



LA CAPSULE DU DÉBUTANT



Les étoiles (2)

- ✓ La naissance des étoiles : Partie 1
- ✓ La naissance des étoiles : Partie 2
- ✓ Le disque protoplanétaire
- ✓ La classification des étoiles
 - ✓ Les outils : introduction à la spectroscopie
 - ✓ Préliminaires et hommage aux “Calculatrices”

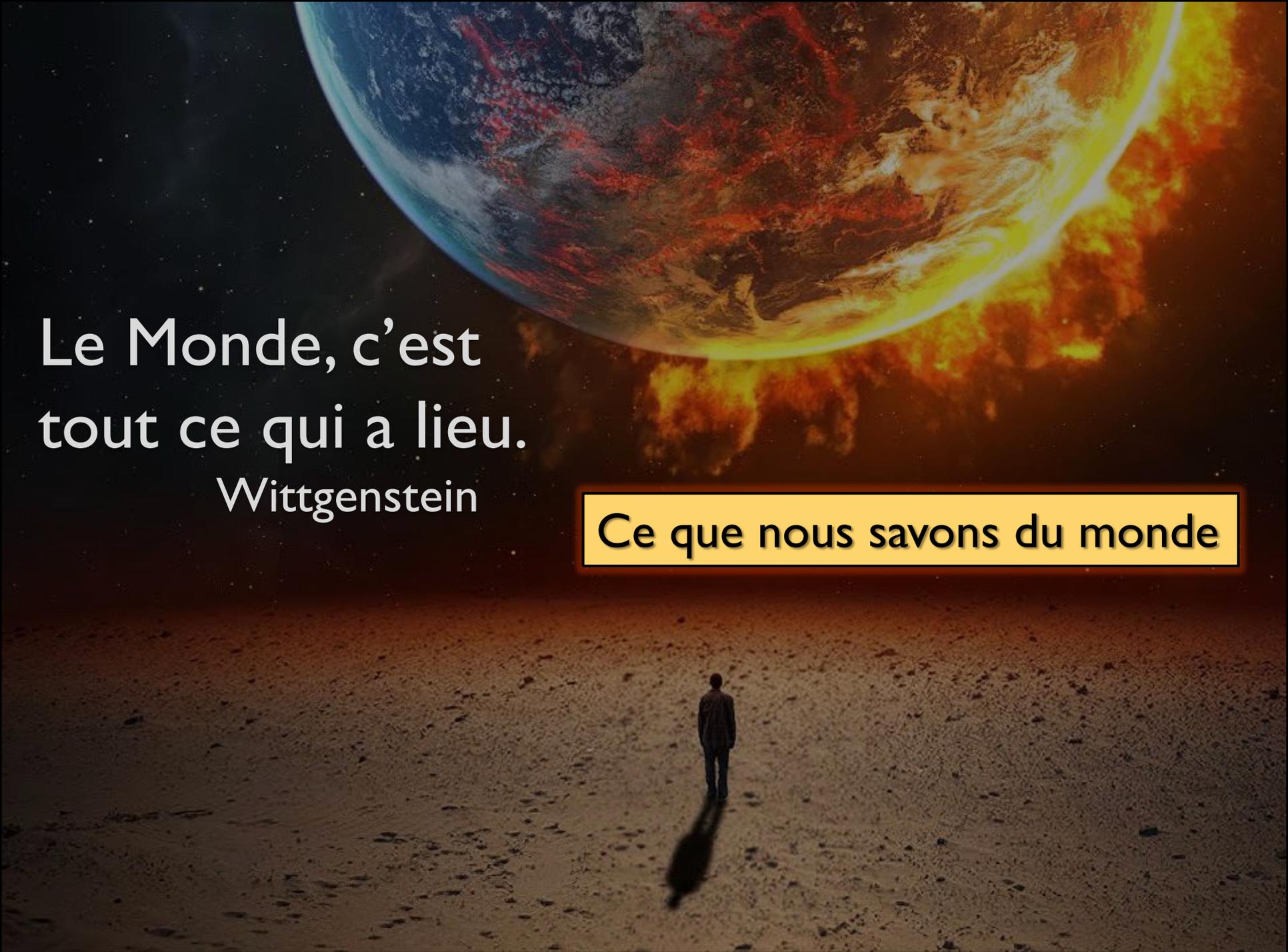


LES OBJECTIFS

★ Au terme de cette présentation, le participant pourra :

- Expliquer la nature quantique de la lumière et les succès de la science à extraire de la lumière une panoplie de données sur l'évolution des étoiles.
- Raconter les jalons historiques de l'élaboration de la classification des étoiles à partir du spectre électromagnétique dans le domaine du visible.
- Rendre hommage et accorder tout le crédit nécessaire à la participation effacée de femmes appliquées dans la naissance de l'astrophysique moderne.



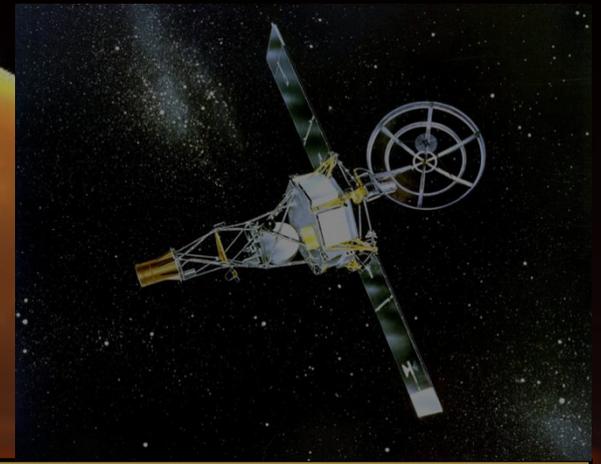


Le Monde, c'est
tout ce qui a lieu.

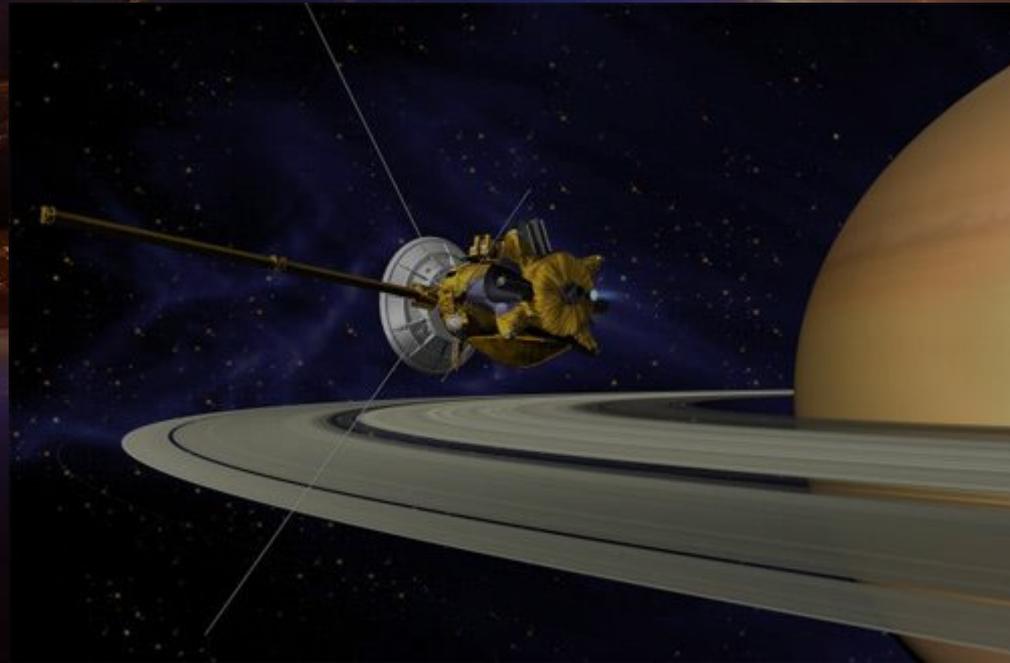
Wittgenstein

Ce que nous savons du monde

L'exploration mécanique du monde.



Ce que nous savons du monde

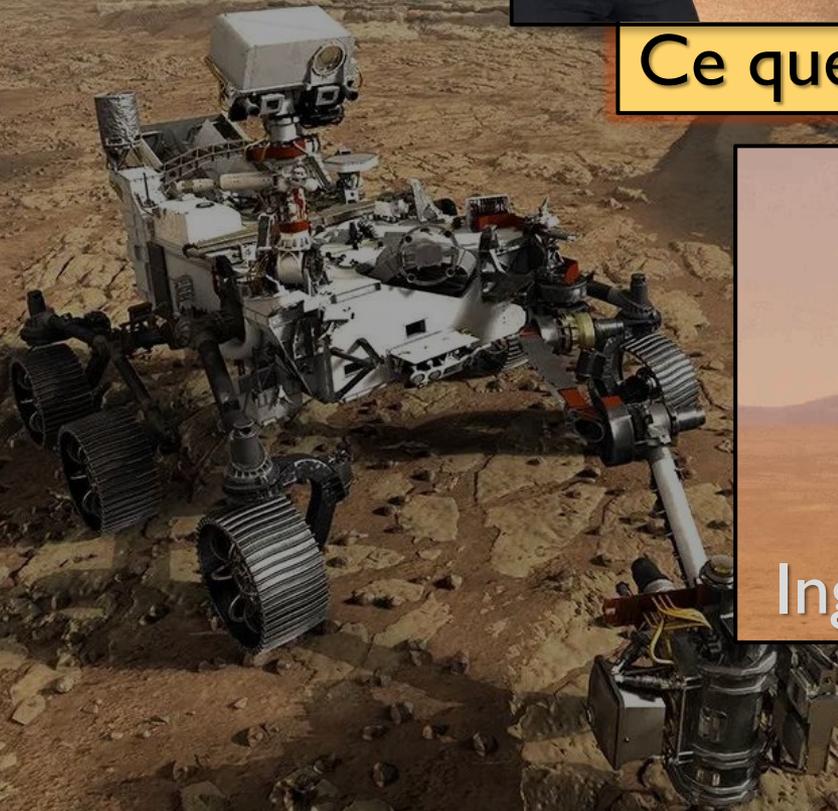


L'exploration mécanique du monde.



Farah Alibay

Ce que nous savons du monde

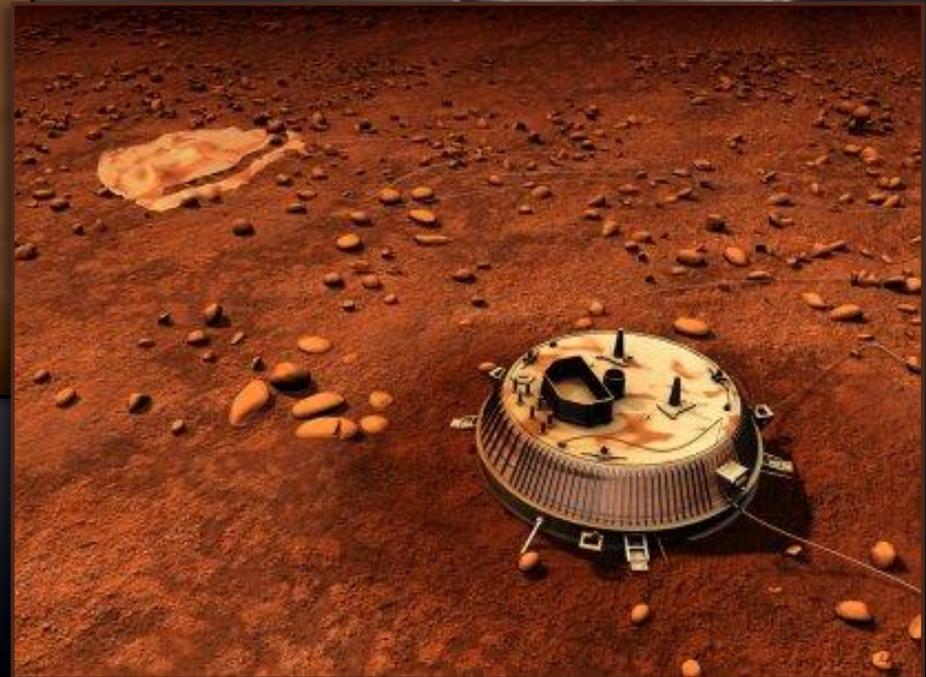


Ingenuity

Perseverance, 2021

L'exploration mécanique du monde.

Ce que nous savons du monde



L'exploration mécanique du monde.

Ce que nous savons du monde



L'exploration mécanique du monde.

Ce que nous savons du monde



L'exploration
mécanique du
monde.

Ce que nous savons du monde

Mais ce monde ainsi révélé
se réduit à bien peu

L'exploration mécanique du monde.

Si, dans notre modèle, l'exploration mécanique de l'espace ne dépasse pas le boulevard du Sommet, il faut savoir que ...

Voyager I



- 24×10^9 km
- ou 161 U.A.



L'exploration mécanique du monde.

Proxima centauri
à 4,244 a.l.

3 483 km

**Tout ce que nous savons du monde
au-delà des sondes Voyager ne
provient que d'une seule source...**





La lumière

Alors, parlons-en...

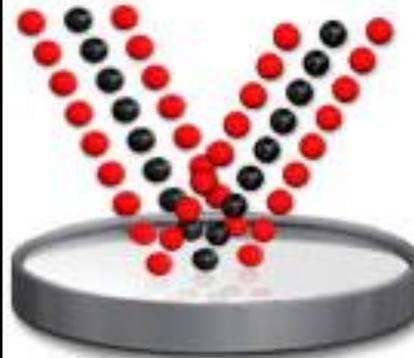
Que savons-nous de la lumière ?

I. La lumière est à la fois *onde* et *particule*.

Particules d'abord

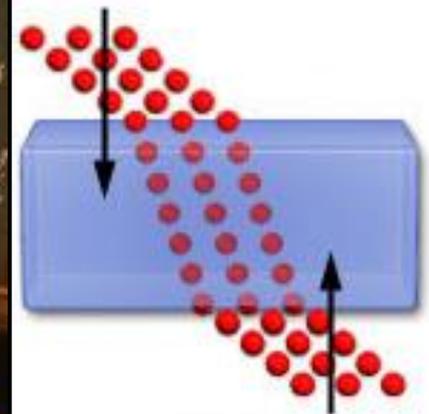
La lumière est composée de "corpuscules"

Réflexion



Particules

Réfraction

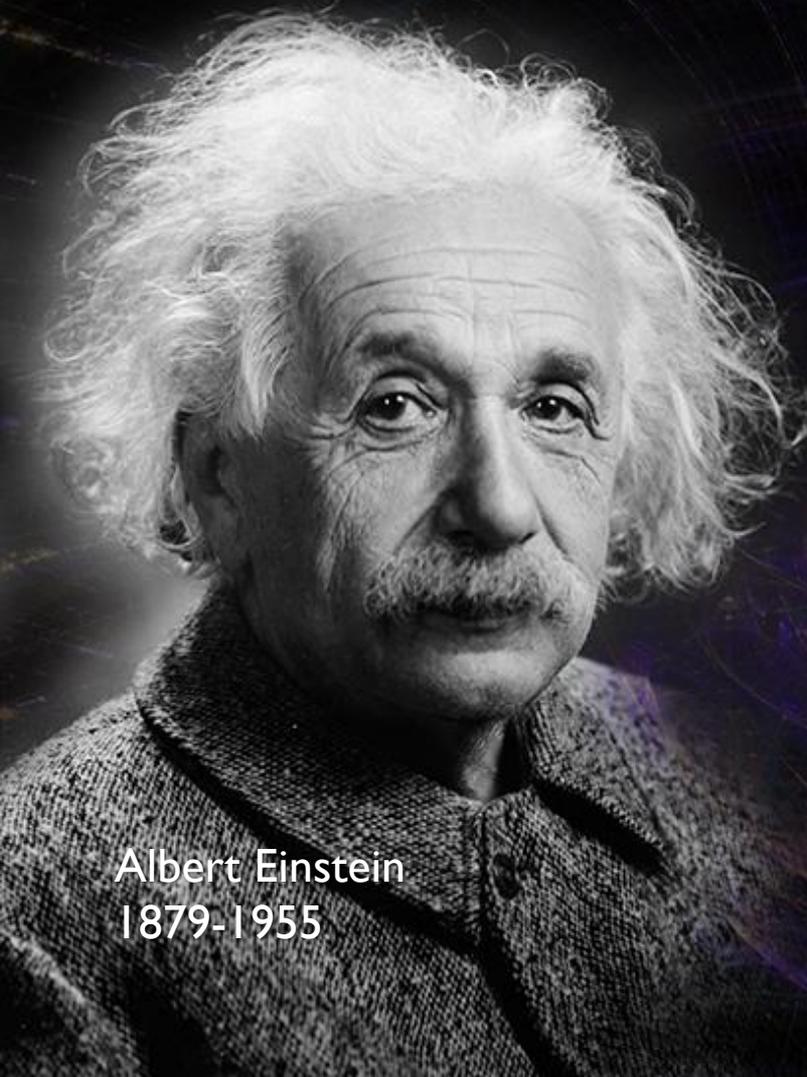


Particules

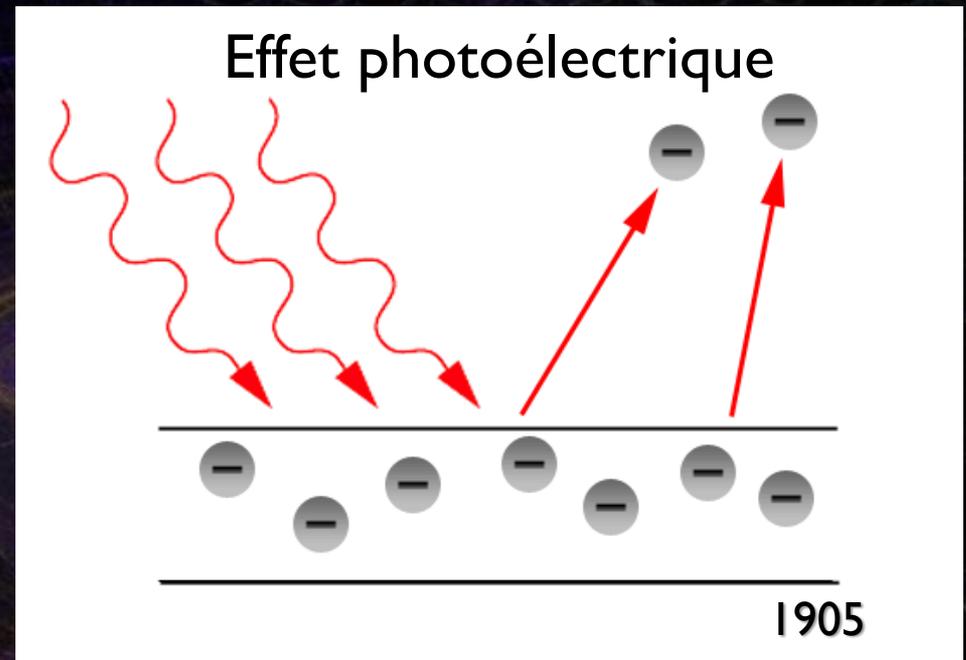
La réflexion
La réfraction

Isaac Newton
1643-1727

Particules d'abord



Albert Einstein
1879-1955



Particules d'abord

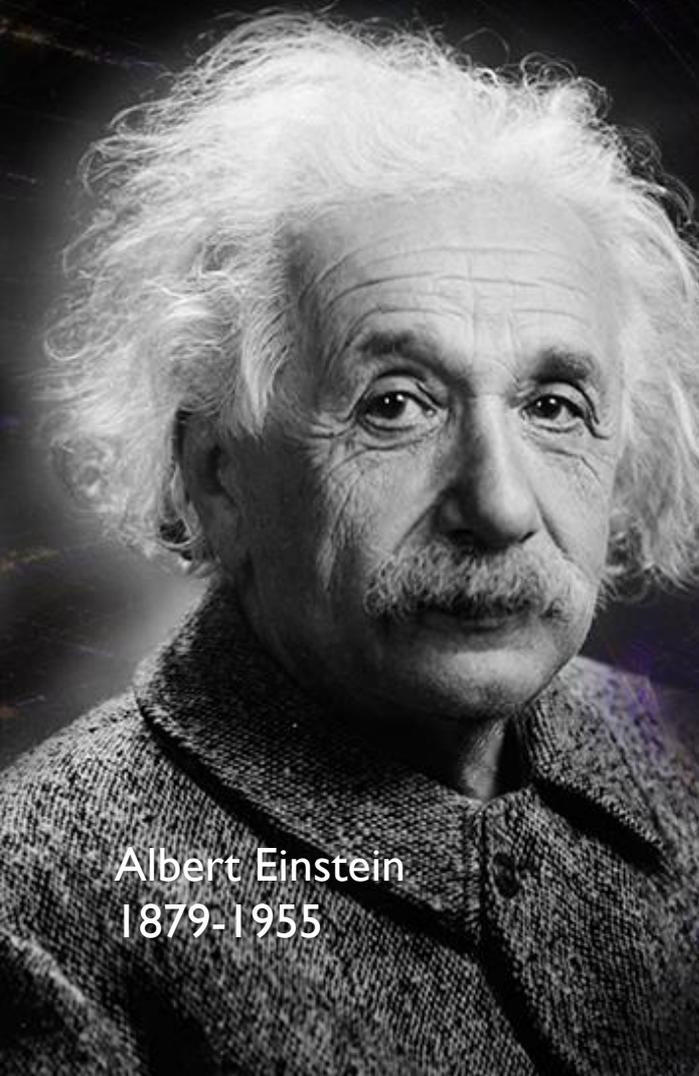


Albert Einstein
1879-1955

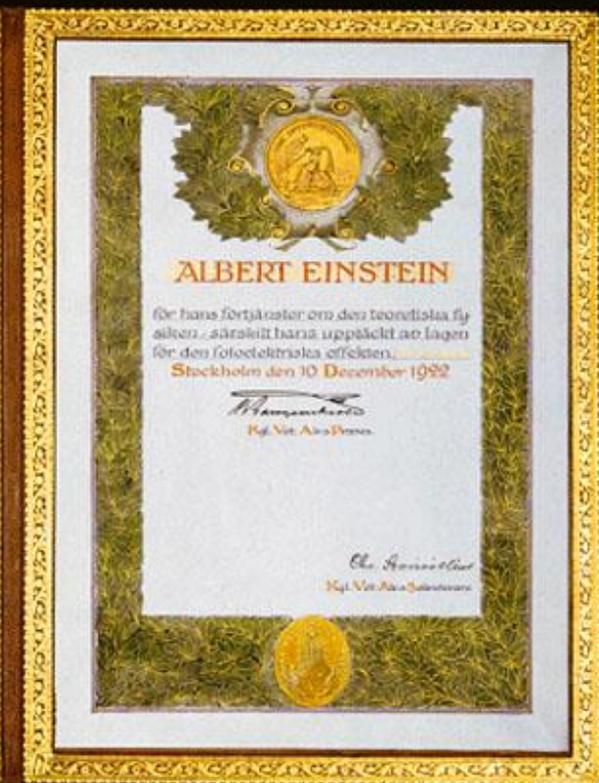
**La lumière est
composée de
« *quanta lumineux* »**



Particules d'abord



Albert Einstein
1879-1955



Le Prix Nobel d'Albert Einstein...

Particules d'abord

- En mécanique classique, les données du monde sont continues.

Max Planck
1858-1947

Particules d'abord

- Postulat révolutionnaire : certaines grandeurs physiques se manifestent de façon discontinue.
 - Exemple = Énergie
- Planck va appeler **quanta** ces « paquets » d'énergie.

$$E = hf$$

Max Planck
1858-1947

Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est composée de particules

$$E = hf$$

La mécanique
quantique était née.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

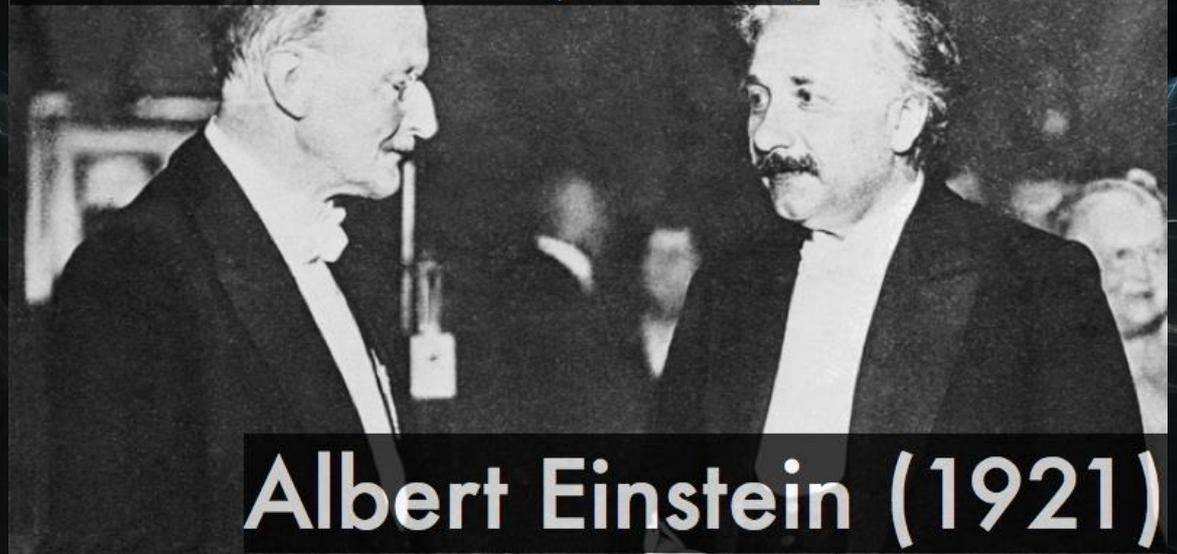
Max Planck
1858-1947

Particules d'abord



Max Planck
1858-1947

Max Planck (1918)



Albert Einstein (1921)

Prix Nobel

Particules d'abord

- Einstein appelait « quanta lumineux » les particules qui causaient l'effet photoélectrique.
- Frithiof Wolfers (1926) va suggérer le nom de **photon** pour appeler ces « paquets » d'énergie.
- Les photons sont des *multiples entiers* de la constante de Planck.

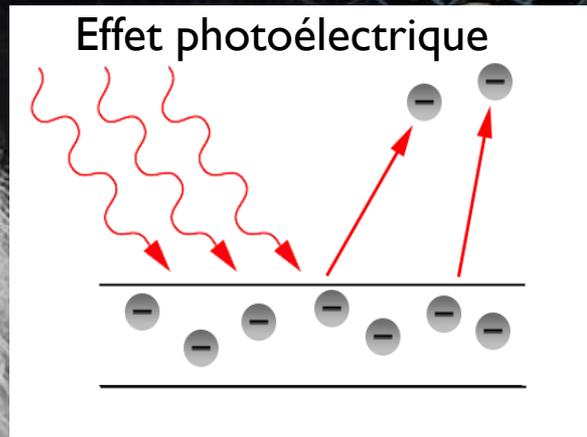
Max Planck
1858-1947

$$E = hf$$

Qu'est-ce que la lumière ?



La lumière est composée de particules



$$m_{p_{\text{hoton}}} = \frac{\hbar f}{c^2}$$

$$E = \hbar f$$

$$\hbar = \frac{E}{f}$$

$$m = \frac{E \cancel{f}}{\cancel{f} c^2}$$

$$m = \frac{E}{c^2}$$

$$E = mc^2$$

Albert Einstein
1879-1955

Ondes aussi

Christian Huygens
1629-1695

TRAITE DE LA LUMIERE.

Où font expliquées

Les causes de ce qui luy arrive

Dans la REFLEXION, & dans la
REFRACTION.

Et particulièrement

Dans l'etrange REFRACTION

DV CRISTAL DISLANDE.

Par C. H. D. Z.

Avec un Discours de la Cause

DE LA PESANTEUR.



1690

A LEIDE,
Chez PIERRE VANDER AA, Marchand Libraire.
MDCXC,

Ondes aussi

- Qu'est-ce qu'une onde ?

Une onde est la propagation d'une *perturbation* produisant sur son passage une *variation réversible* des propriétés physiques locales du milieu.

Christian Huygens
1629-1695

Ondes aussi

- Qu'est-ce qu'une onde ?

Une onde est la propagation d'une *perturbation* produisant sur son passage

Christian Huygens
1629-1695



Ondes aussi

- Qu'est-ce qu'une onde ?

Une onde est la propagation d'une

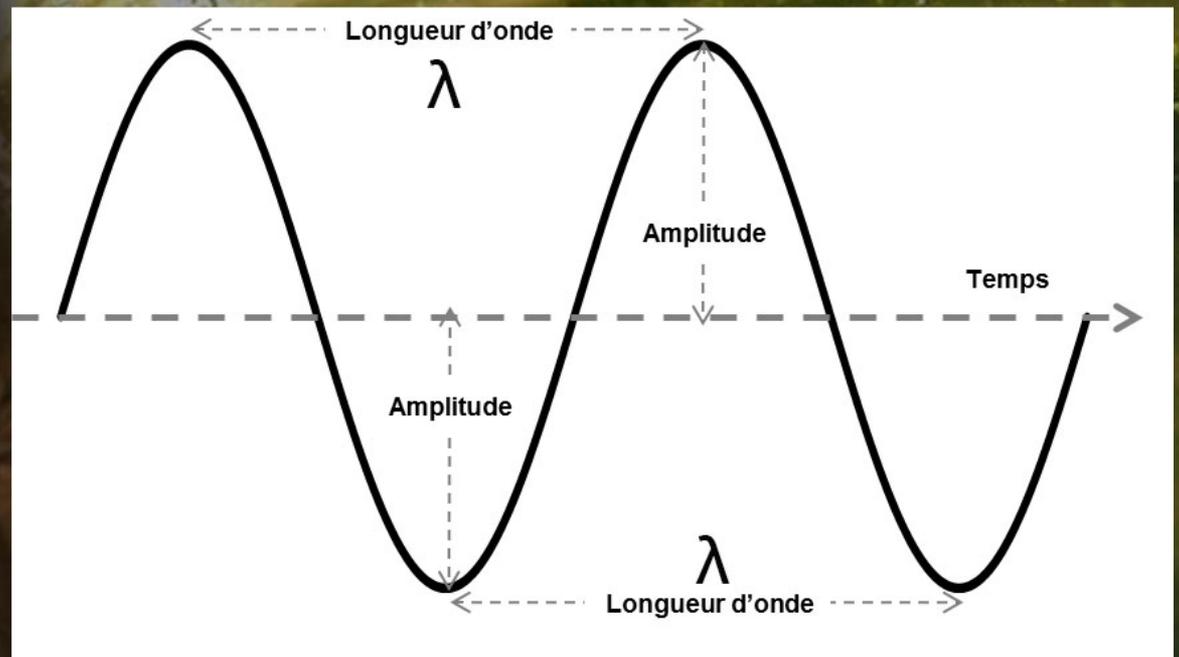
Energy

Waves only transfer energy

Christian Huygens
1629-1695

Ondes aussi

➤ À quoi ressemble une onde ?



Christian Huygens
1629-1695

Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est composée d'ondes

➤ Une propriété des ondes

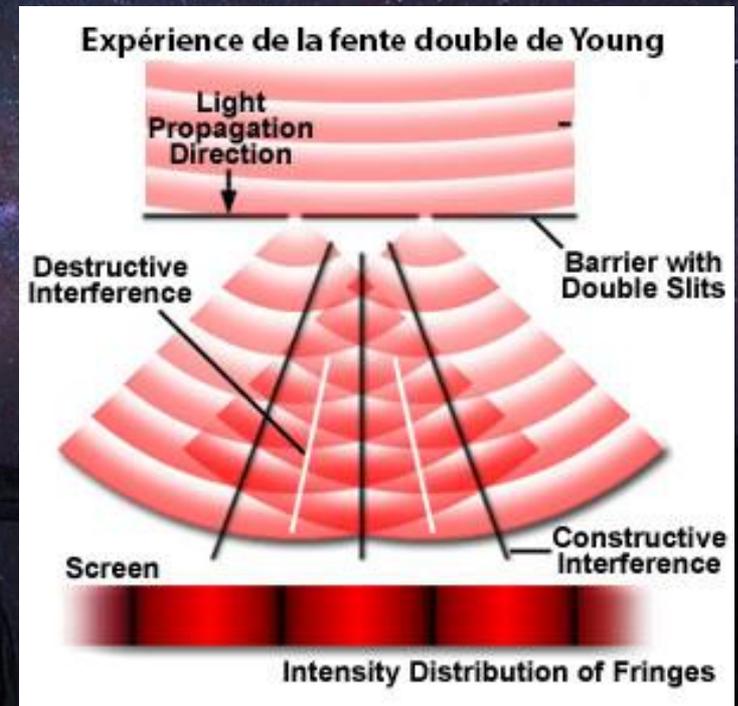
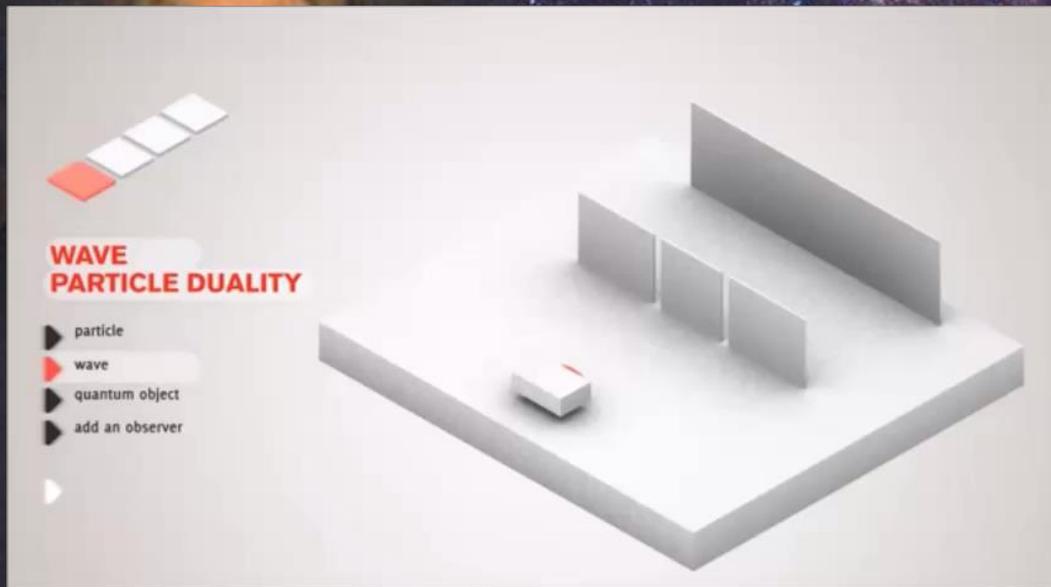
Principe de Huygens :

Chaque point d'un front d'onde peut devenir la source d'un front d'onde secondaire.

Christian Huygens
1629-1695

Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est composée d'ondes



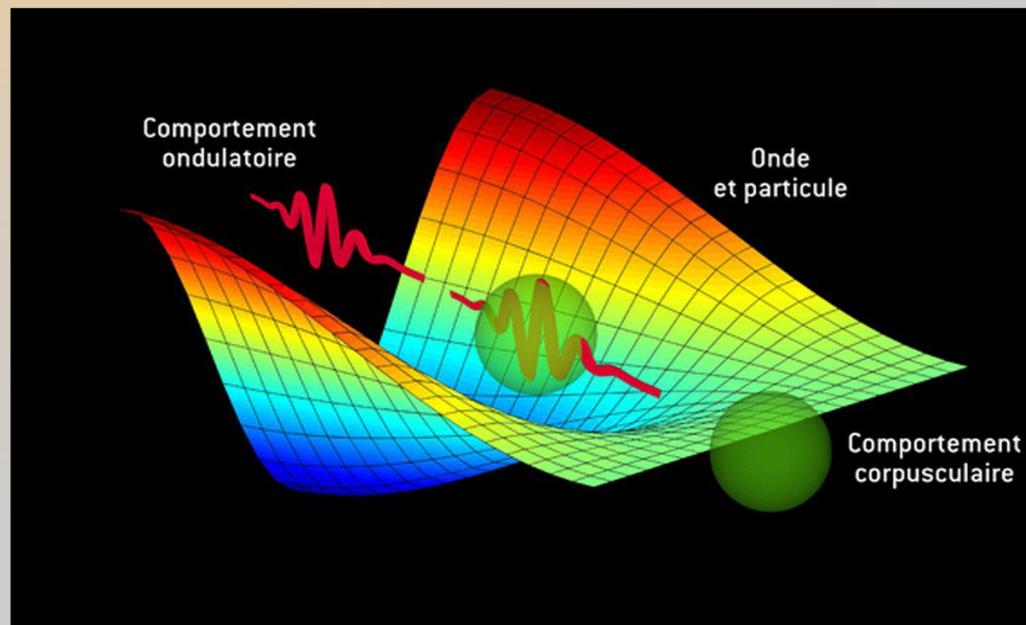
Thomas Young
1773-1829



LA LUMIÈRE EST QUANTIQUE

- ★ La lumière est à la fois :
 - Composée de particules
 - Et de comportement ondulatoire

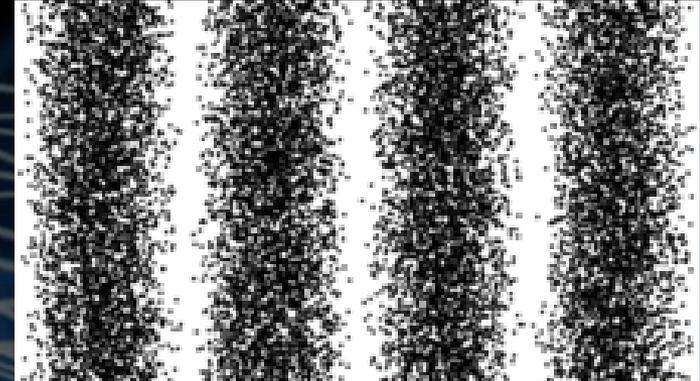
On parle de dualité
onde-particule



Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière : onde ou particule ?

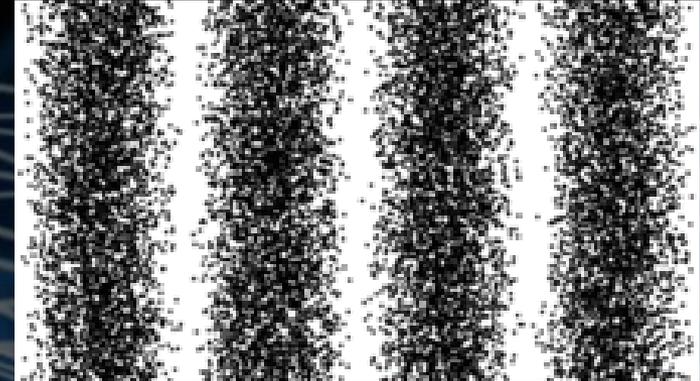
- Les deux.
 - Une particule dans ses interactions avec la matière.
 - Une onde dans ses mouvements.
- En fait, une particule qui se déplace dans une onde de probabilité.
 - L'onde n'est pas tangible. C'est une onde porteuse d'information sur la probabilité de trouver le photon à un endroit donné.
 - Le photon est un *paquet d'énergie* quantifié.



Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière : onde ou particule ?

- Les deux.
 - Une particule dans ses interactions avec la matière.
 - Une onde dans ses mouvements.
- En fait, une particule qui se déplace dans une onde de probabilité.



Voilà la conception de la mécanique quantique sur la lumière.

ntifié.

Que savons-nous de la lumière ?

1. La lumière est à la fois *ondes* et *particules*.
2. La lumière a une vitesse finie.

Comment est la lumière ?

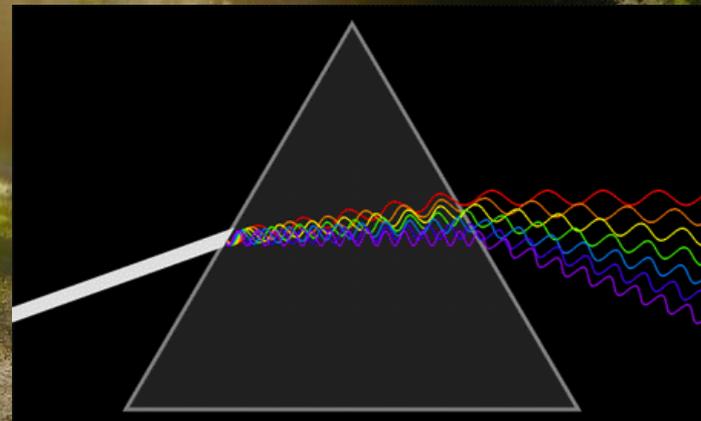
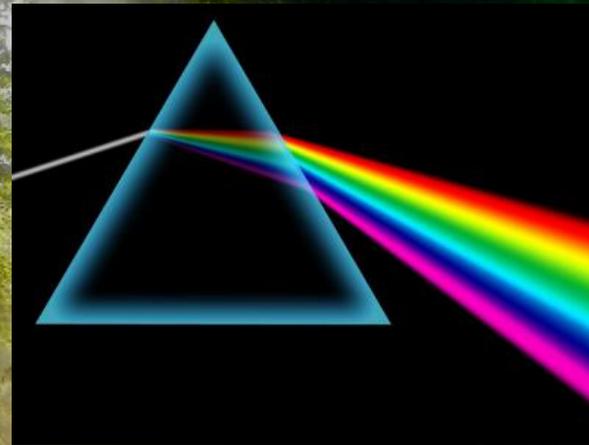
Célérité

- Mesures par laser
 - En 1983, on a fixé la vitesse de la lumière dans le vide à **299 792 458 m/s !**

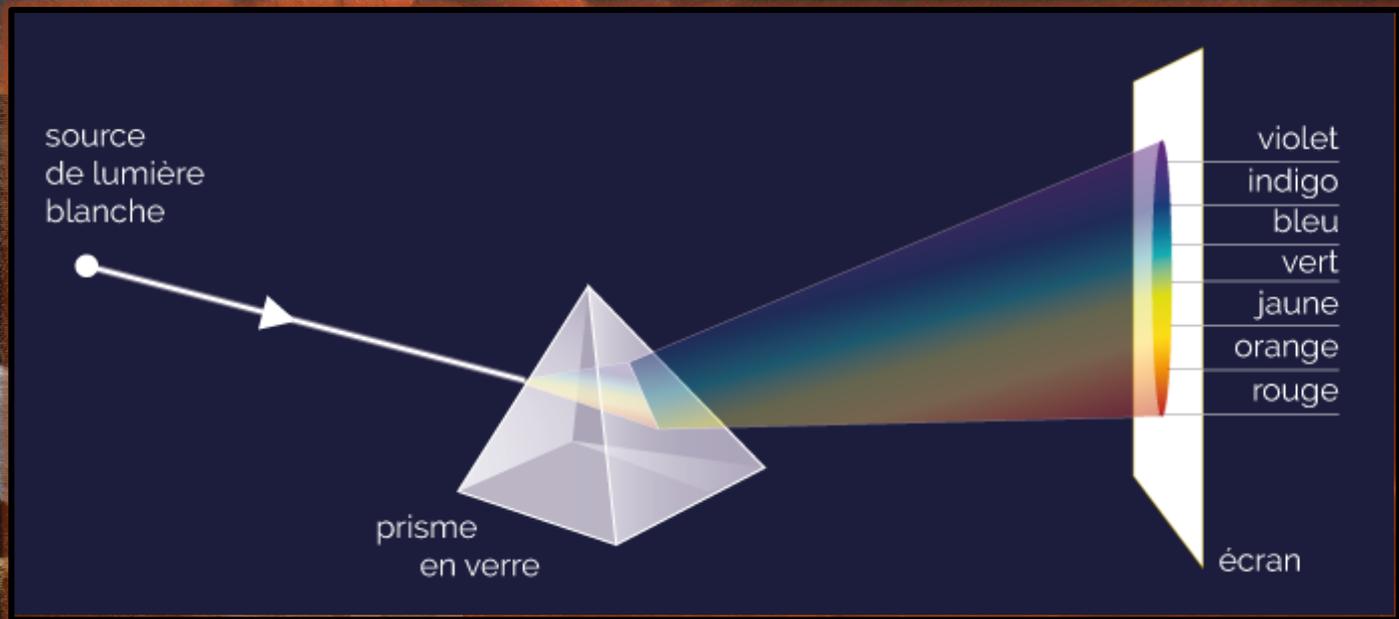
Comment est la lumière ?

Célérité

- La vitesse de la lumière varie selon le milieu:
 - Vide = 299 792 458 m/s
 - Eau = 225 563 000 m/s
 - Verre = 200 000 000 m/s
- La vitesse dans les milieux autres que le vide varie selon λ .



Qu'est-ce que la lumière ?

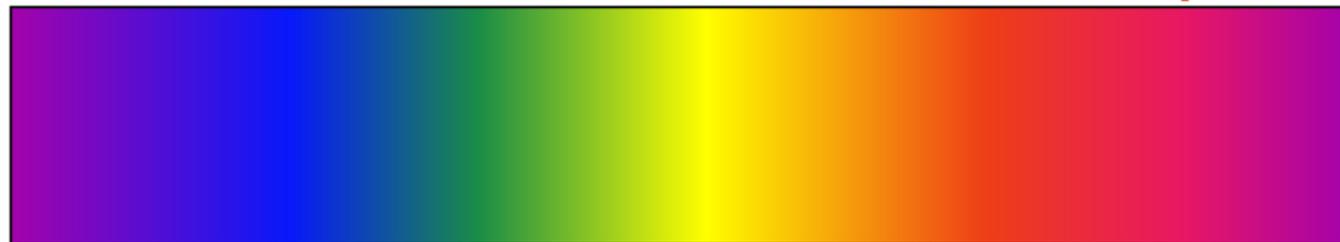


Isaac Newton
1643-1727

Que savons-nous de la lumière ?

1. La lumière est à la fois *ondes* et *particules*.
2. La lumière a une vitesse finie.
3. La lumière blanche comprend l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible.

Couleur



Longueur d'onde

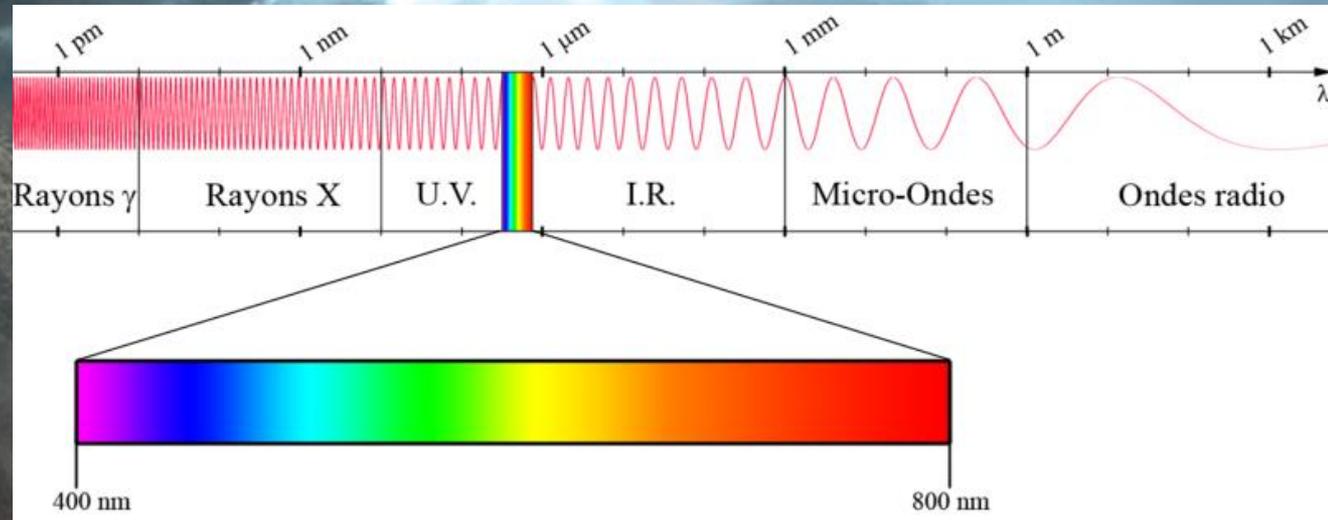
Lambda λ (nm) 400 450 500 550 600 650 700

Que savons-nous de la lumière ?

1. La lumière est à la fois *ondes* et *particules*.
2. La lumière a une vitesse finie.
3. La lumière blanche comprend l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible.
4. Le spectre visible n'est qu'une mini fraction du spectre électromagnétique.

Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est composée d'ondes



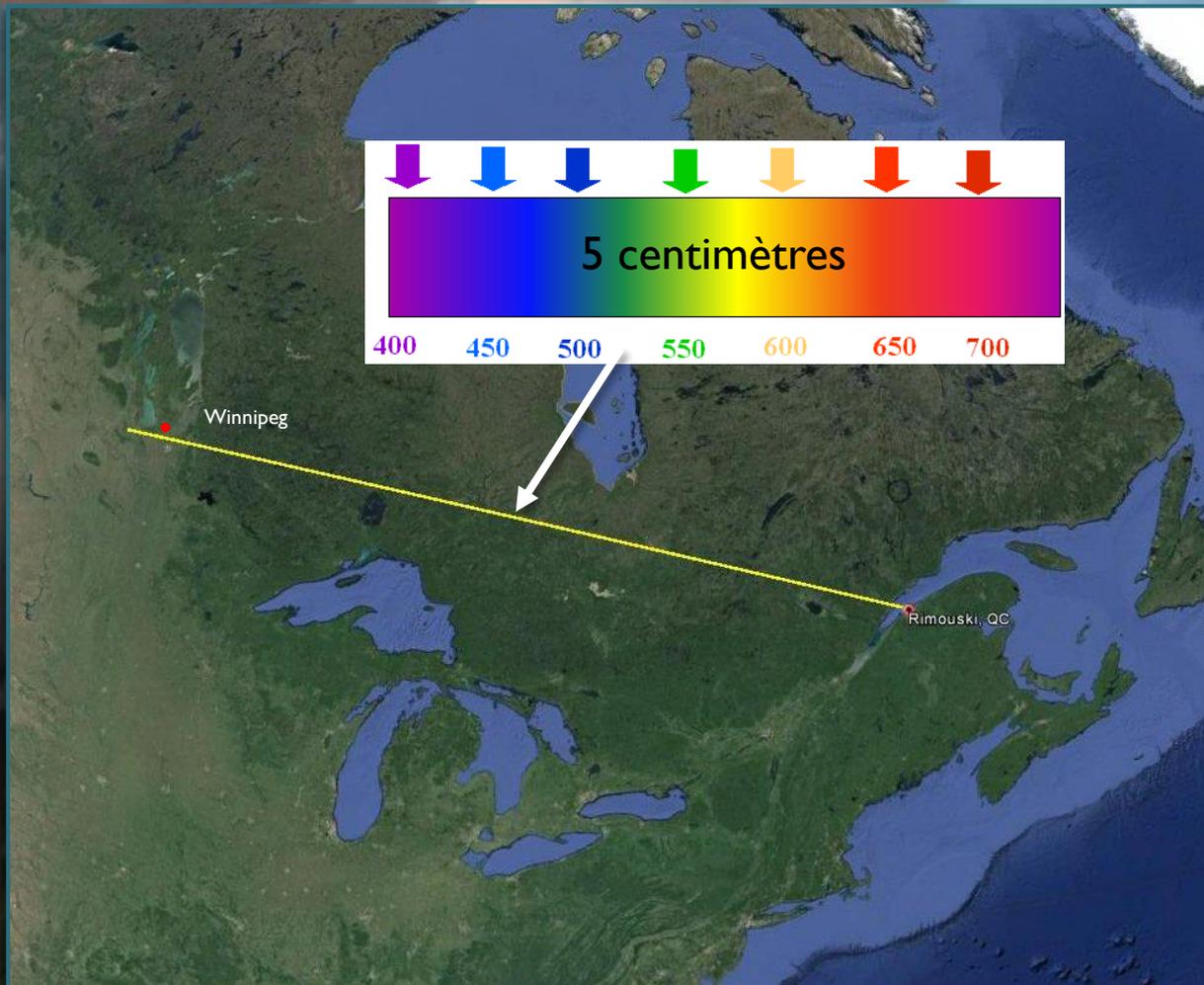
James Clerk Maxwell
1831-1879

- Cette figure est fautive dans son expression.
- En réalité, il est impossible de représenter l'étendue du spectre électromagnétique sur une feuille de papier.

Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est composée d'ondes

James Clerk Maxwell
1831-1879



Après ces longs préliminaires...

Après ces longs préliminaires...

Enfin le vif du sujet

- Pour aborder la *Classification des étoiles*, nous adopterons une approche historique pour expliquer :
 - La nomenclature
 - Les catégories
 - La représentation graphique ➡ le diagramme de Hertzsprung-Russel ou **Diagramme HR**

Notre histoire commence...

➤ Edward Charles Pickering débute sa carrière en astronomie et développe une expertise en :

- Observation et analyse des étoiles variables.
- Développe une méthode pour photographier sur plaques de verre des spectres simultanés de nombreuses étoiles à l'aide d'un prisme élargi.



Harvard College Observatory, 1877

Notre histoire commence...

- Edward Charles Pickering débute sa carrière en astronomie et développe une expertise en :
 - Observation et analyse des étoiles variables.
 - Développe une méthode pour

Pickering fonde l'AAVSO en 1911 en compagnie de William Tyler Olcott et de Anne Sewell Young

1846-1919

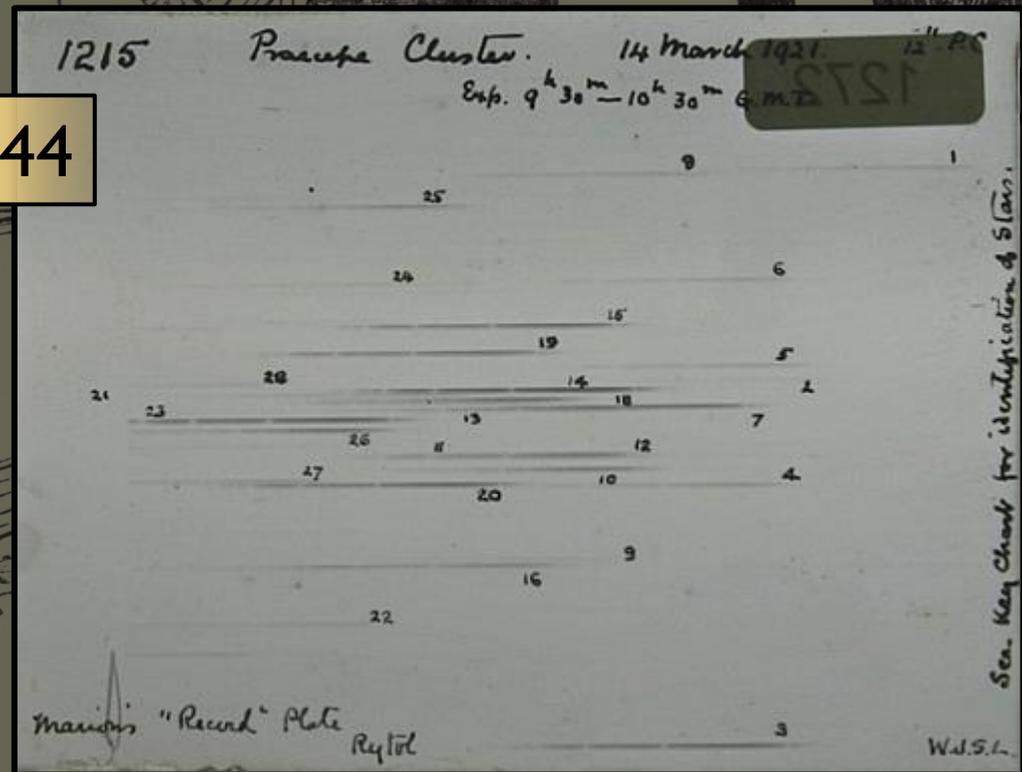


Harvard College Observatory, 1877

Il était une fois...

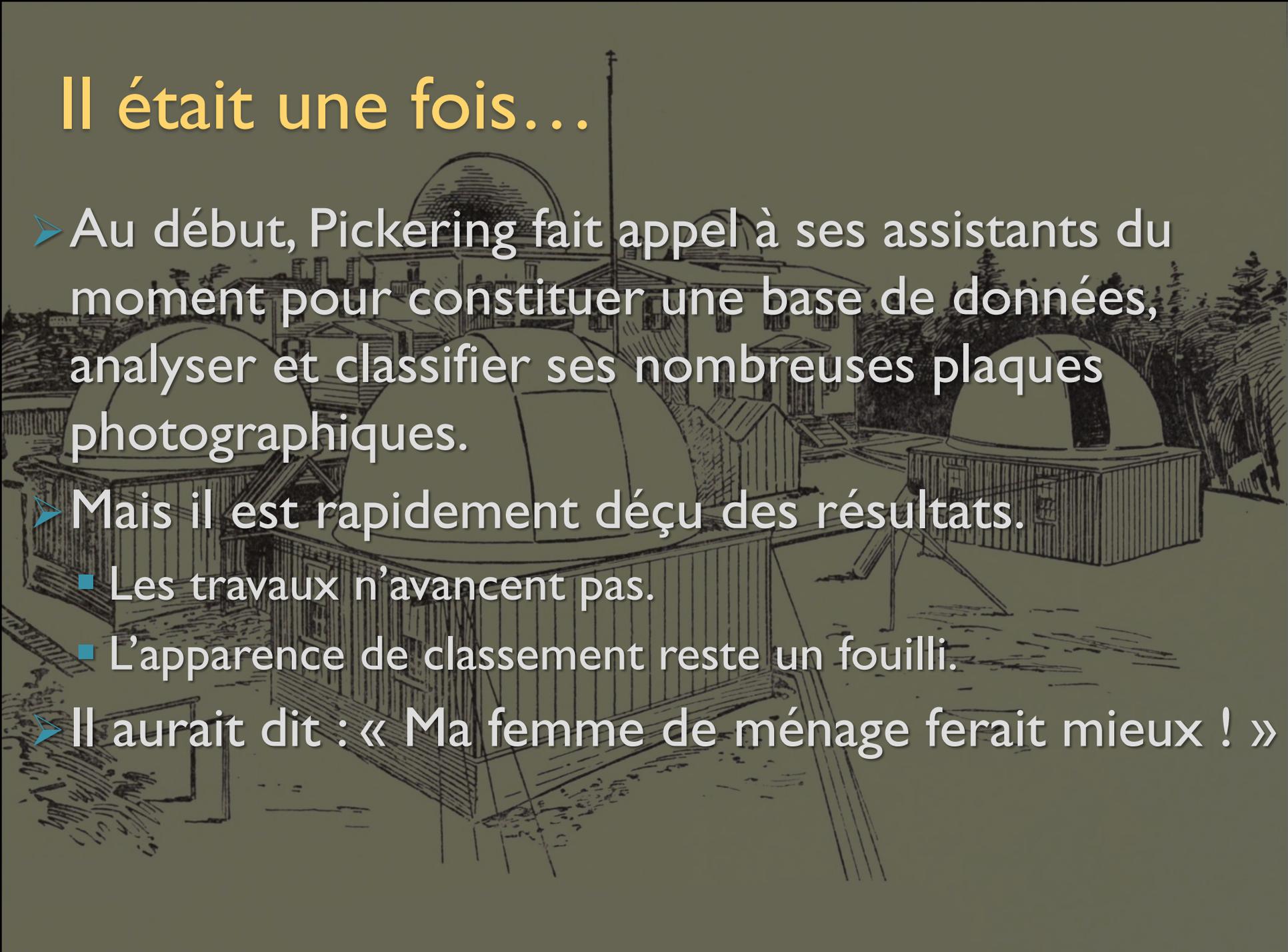
- Pickering collecte des milliers de plaques photographiques de spectre d'étoiles :
 - Une analyse et une classification de ces spectres devient nécessaire...

M44



Il était une fois...

- Au début, Pickering fait appel à ses assistants du moment pour constituer une base de données, analyser et classer ses nombreuses plaques photographiques.
- Mais il est rapidement déçu des résultats.
 - Les travaux n'avancent pas.
 - L'apparence de classement reste un fouilli.
- Il aurait dit : « Ma femme de ménage ferait mieux ! »



Il était une fois...

➤ Voici la femme de ménage de Pickering :

Williamina Fleming.

- Immigrante d'origine écossaise.
- Qu'il trouve particulièrement intelligente et vive d'esprit, avec un sens aiguisé de l'organisation.
- Pickering va lui donner une formation de base dans l'étude des spectres des étoiles.

1857-1911



Il était une fois...

➤ Voici la femme de ménage se Pickering :
Williamina Fleming.

- Elle catalogue plus de 10 000 étoiles et développe une méthode de classification des spectres basée sur les lettres de l'alphabet allant de A ➔ O.
- Elle travaille sur les spectres des étoiles RR Lyrae.
- Elle découvre la *nébuleuse de la tête de cheval* dans la constellation d'Orion

1857-1911



Il était une fois...

- Pickering recrute des “Calculatrices” sous la direction de Williamina Fleming :

1857-1911

NATIONAL
GEOGRAPHIC
CHANNEL HD



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering ➔ $\cong 80$ au total



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering ➔ $\cong 80$ au total

Williamina Fleming

Henrietta Leavitt

Annie Jump Cannon

Antonia Maury



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- Annie Jump Cannon
- Devient *experte* dans la classification spectrale des étoiles.
- Elle remodèle la classification de Fleming et lui donne son caractère définitif.
- Elle répertorie $\approx 250\ 000$ étoiles qu'elle classe à vue.

1863-1941



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :



A B C D E F G H I J K L M N O

O B A F G K M



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :



➤ Oh Be A Fine Girl Kiss Me

➤ Oh Be A Fine Guy Kiss Me



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- Cannon va subdiviser chaque catégorie en 10 sous unités allant de 0 ➔ 9.

O B A F G K M

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- Cannon va subdiviser chaque catégorie en 10 sous unités allant de 0 ➔ 9.

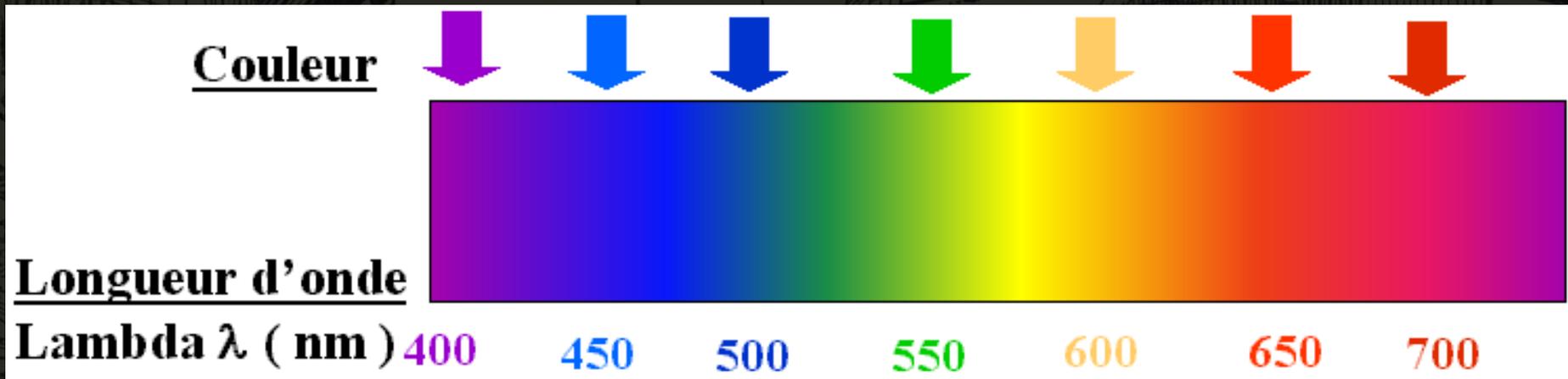
O B A F G K M

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9



Il était une fois...

- Les *Calculatrices* de Pickering :
- La classification d'Annie Jump Cannon (Harvard) est fondée sur l'analyse du spectre visible.



La lumière des étoiles

Les zones manquantes

1814

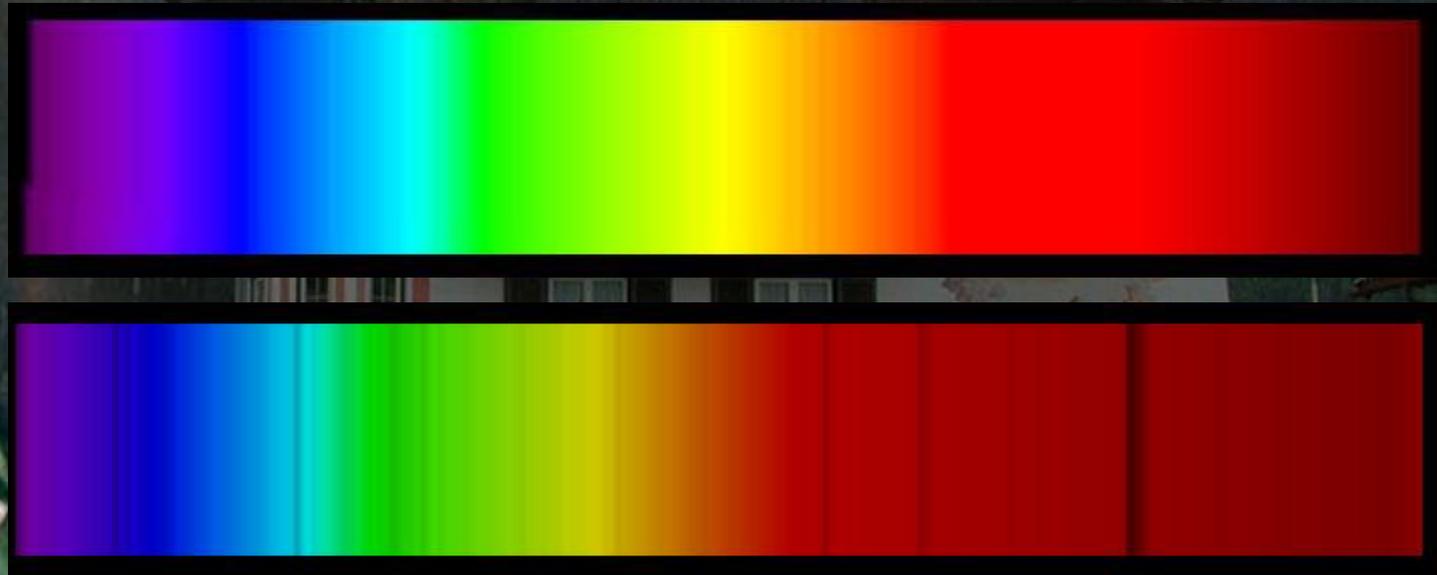


Joseph Von Fraunhofer
1787-1826



La lumière des étoiles

Les zones manquantes

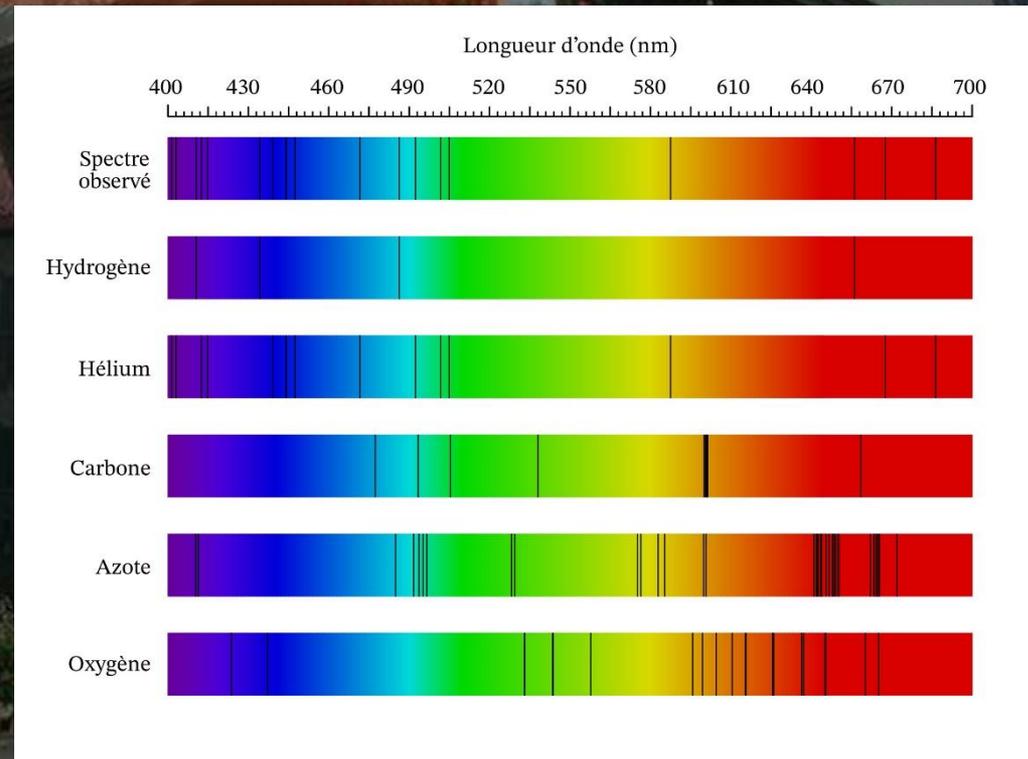


➤ Il venait d'inventer la spectroscopie

Joseph Von Franhofer
1787-1826

La lumière des étoiles

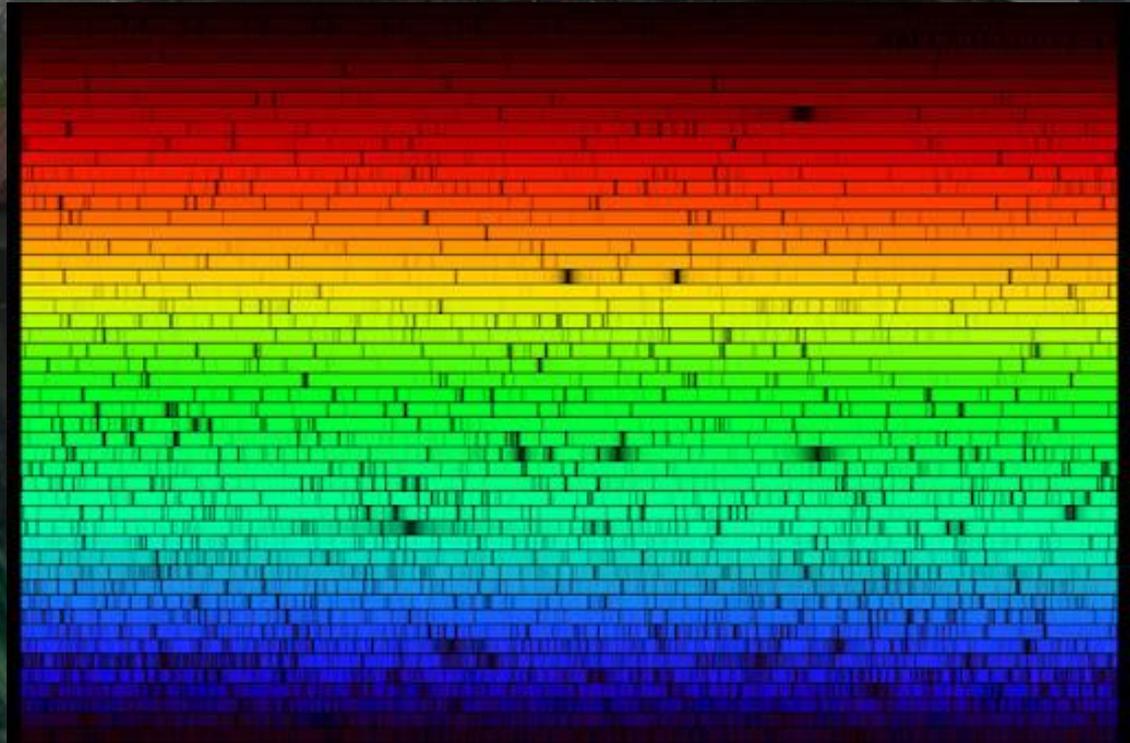
Les zones manquantes



➤ Permet de connaître la composition chimique de l'atmosphère des étoiles.

La lumière des étoiles

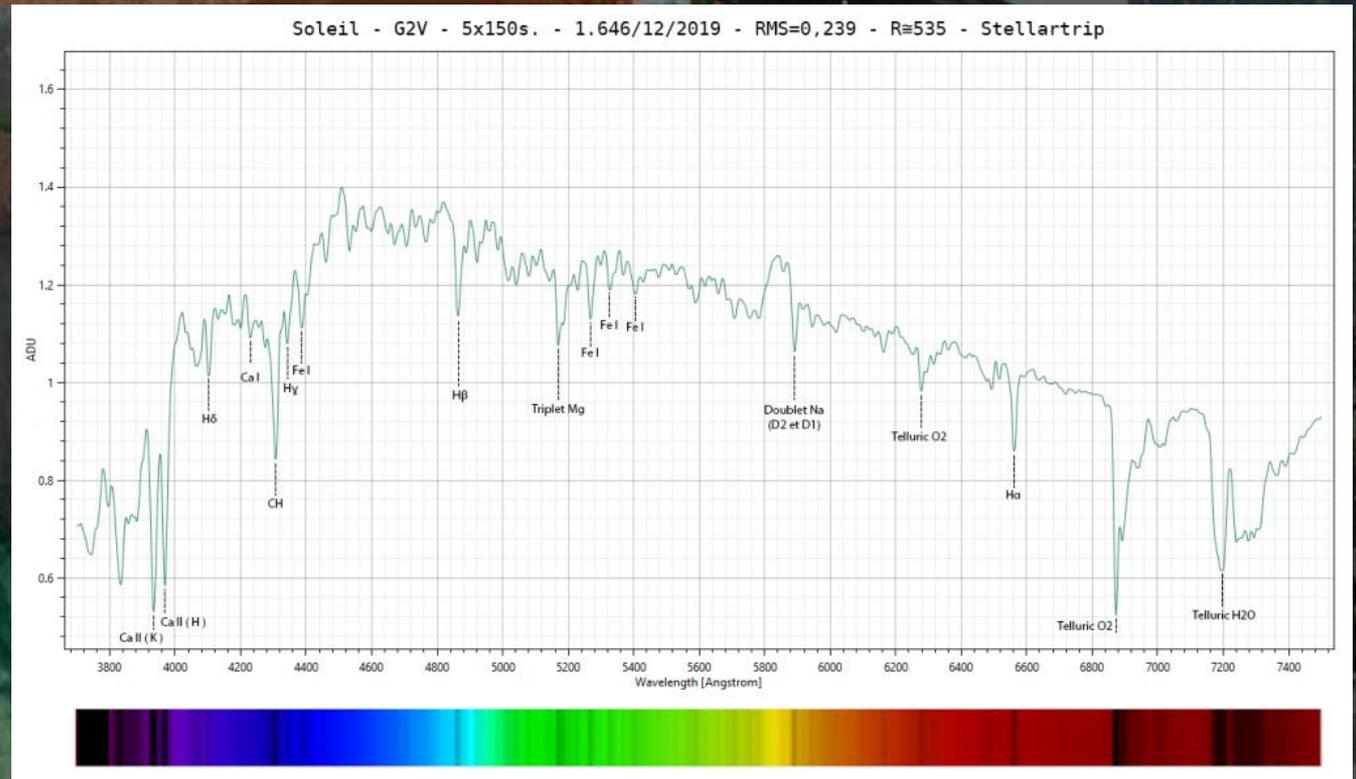
Les zones manquantes



- Il y a 67 éléments chimiques dans l'atmosphère du Soleil.

La lumière des étoiles

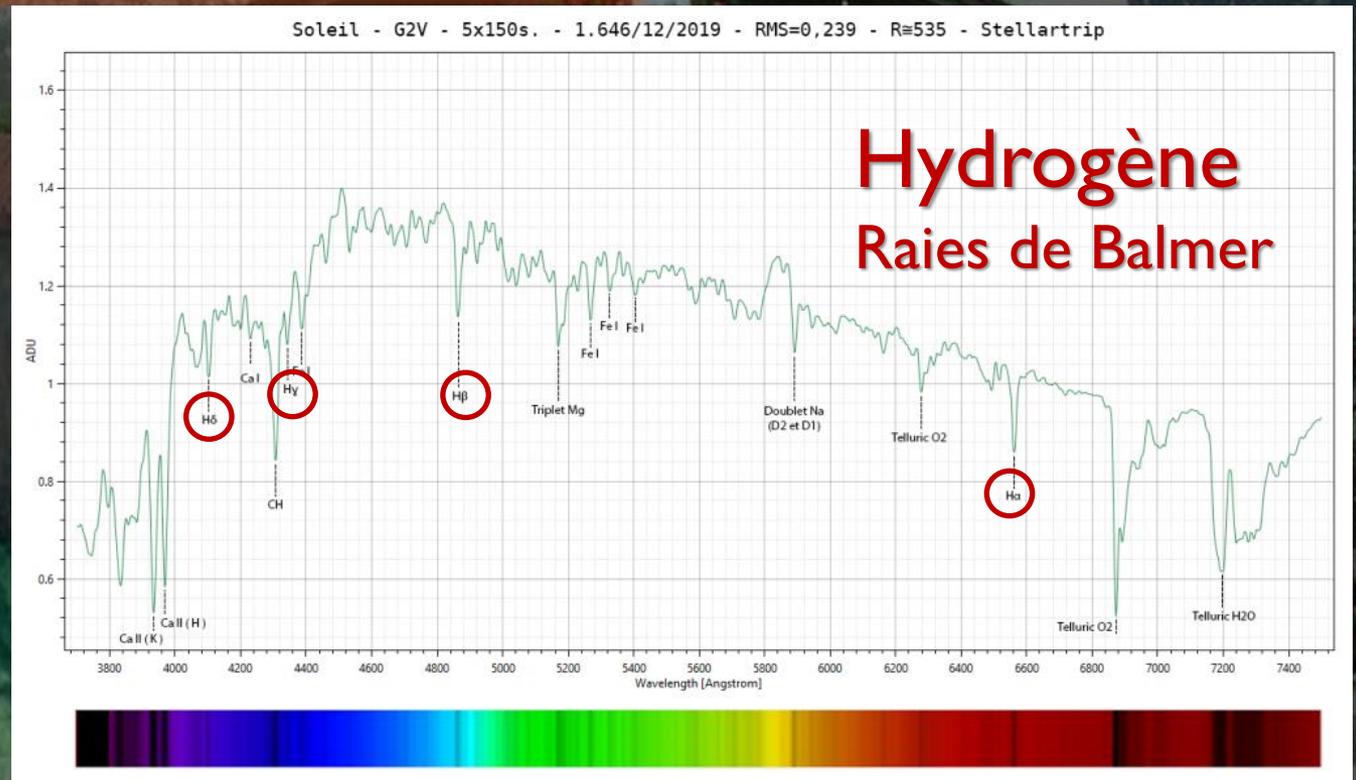
Les zones manquantes



➤ Il y a 67 éléments chimiques dans l'atmosphère du Soleil.

La lumière des étoiles

Les zones manquantes

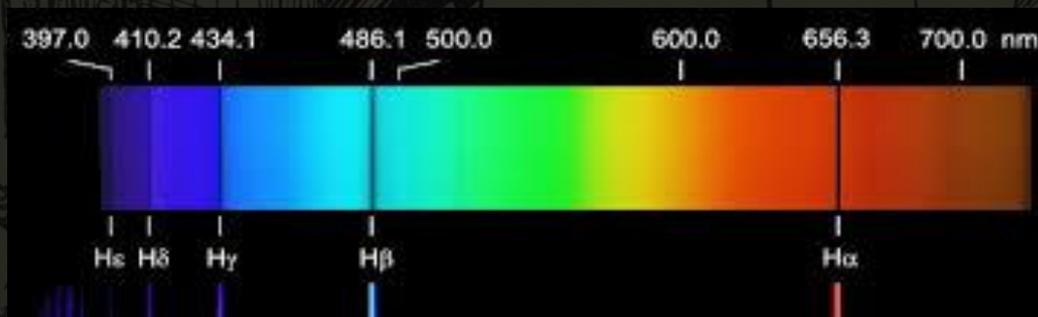


➤ Il y a 67 éléments chimiques dans l'atmosphère du Soleil.

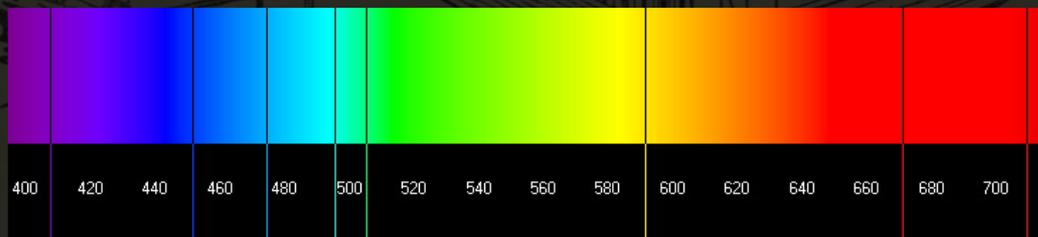
Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- La classification de Cannon est surtout fondée sur les raies de l'hydrogène et de l'hélium..



$1H$

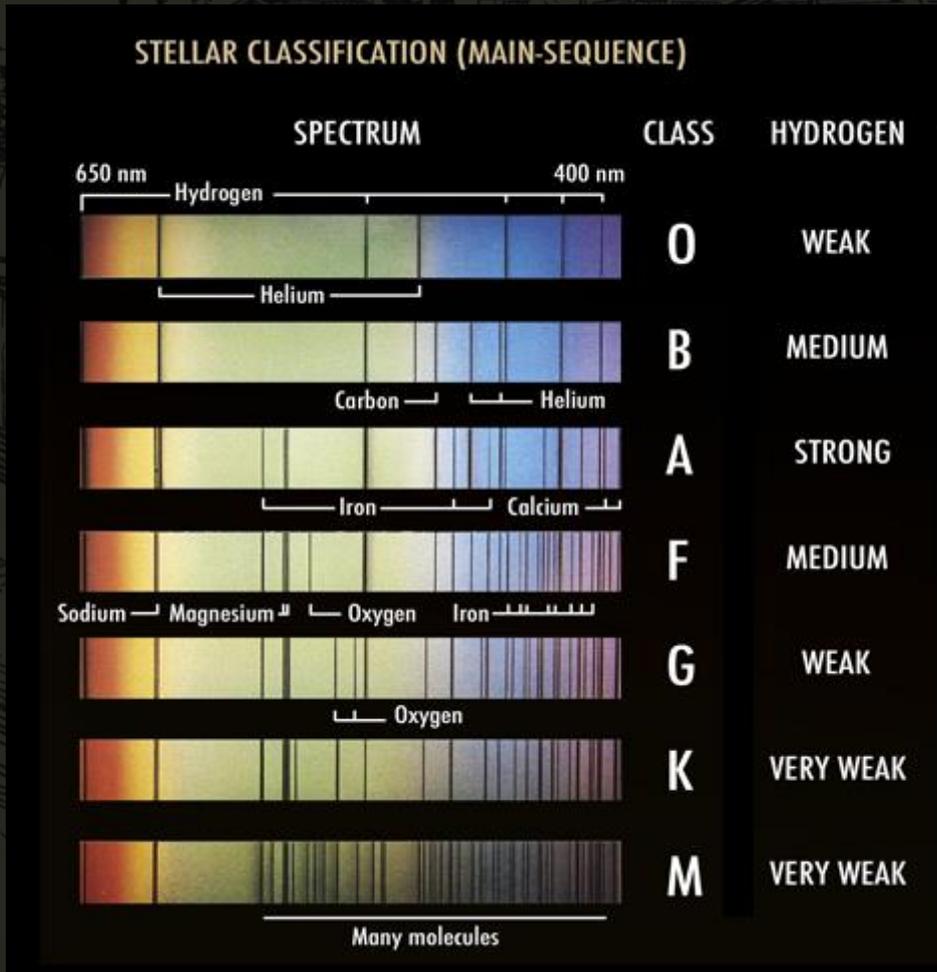


$2He$



Il était une fois...

➤ La classification de Cannon

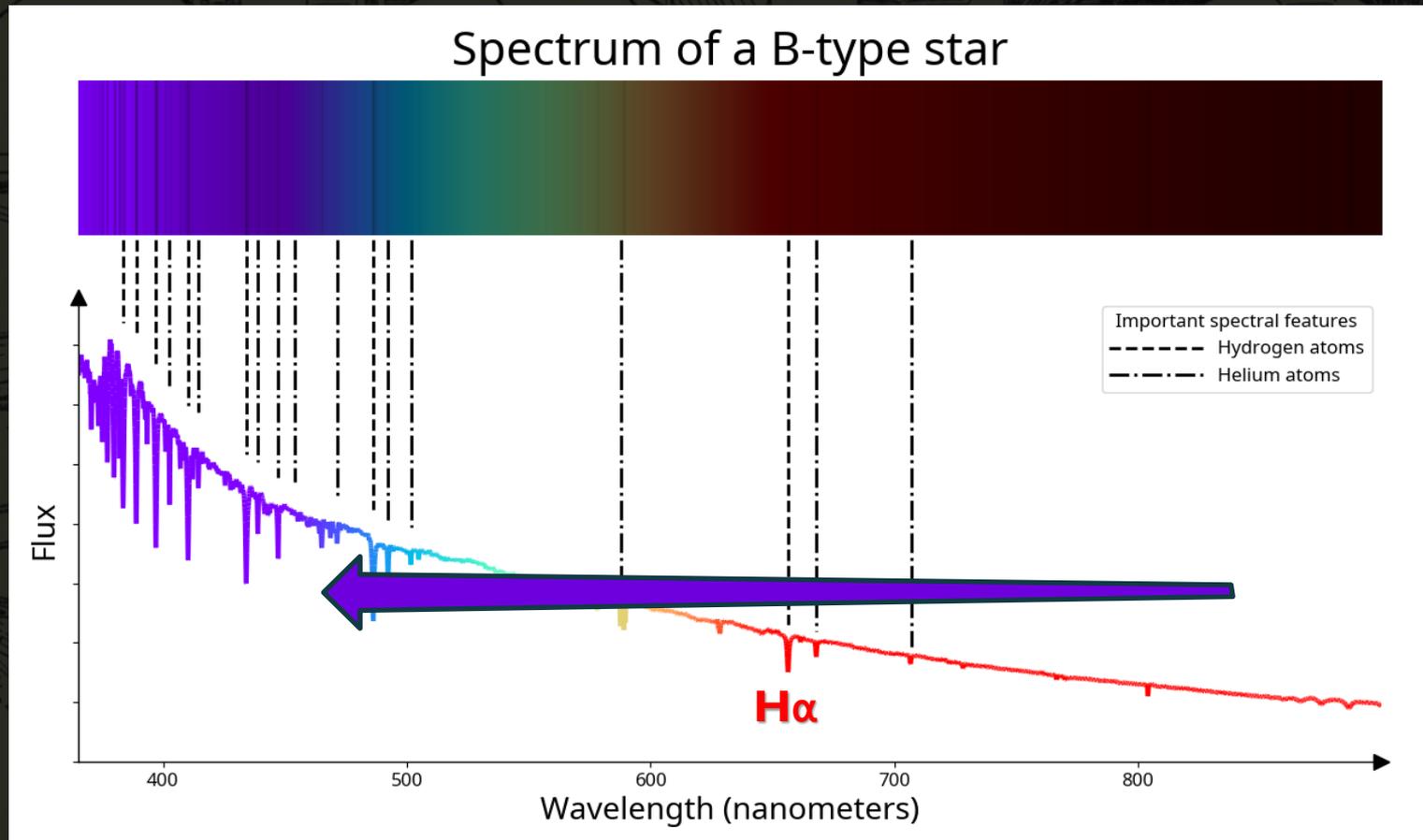


- Elle ne prend en compte que le spectre dans le domaine du *visible*.

Il était une fois...

➤ La classification de Cannon

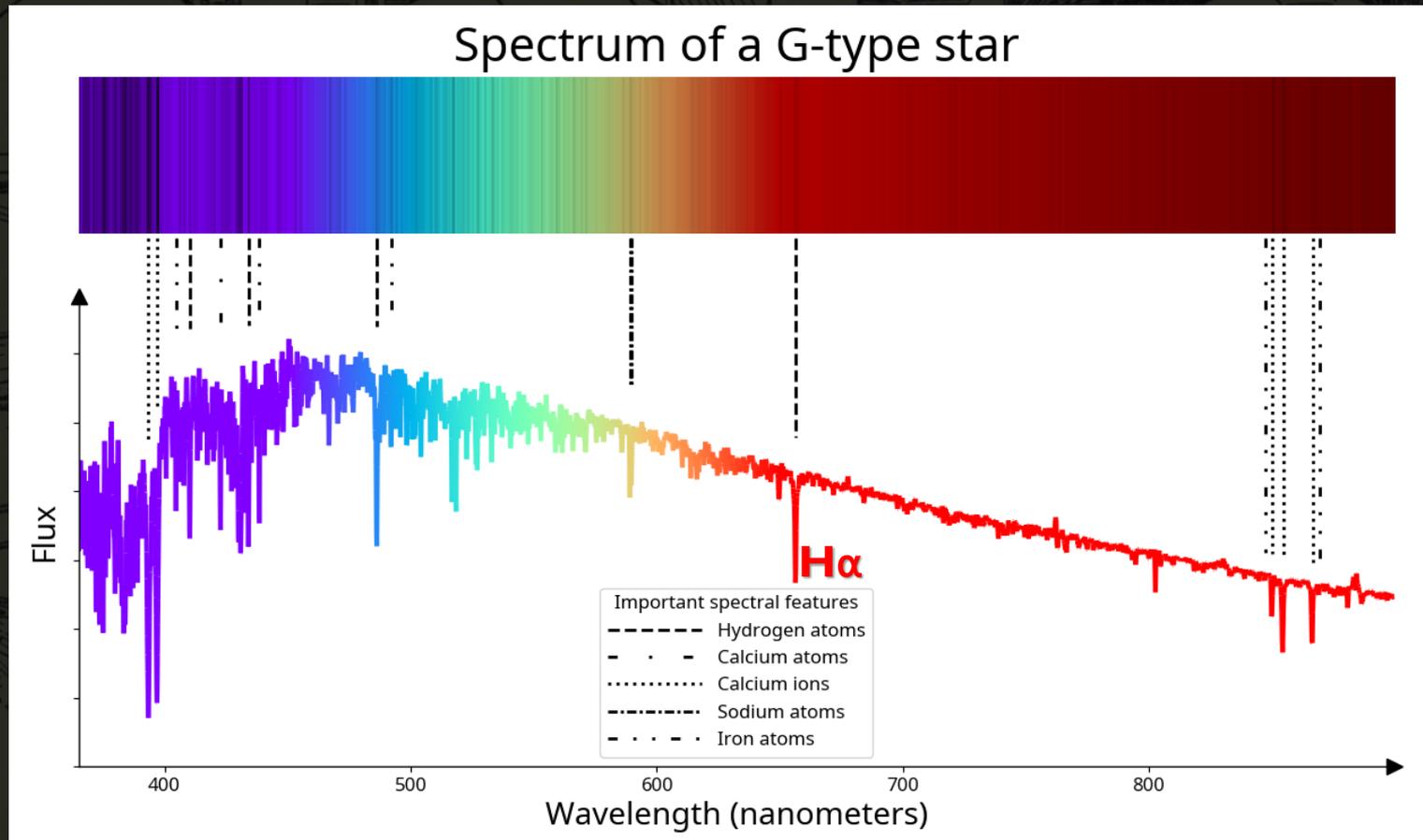
O B A F G K M



Il était une fois...

➤ La classification de Cannon

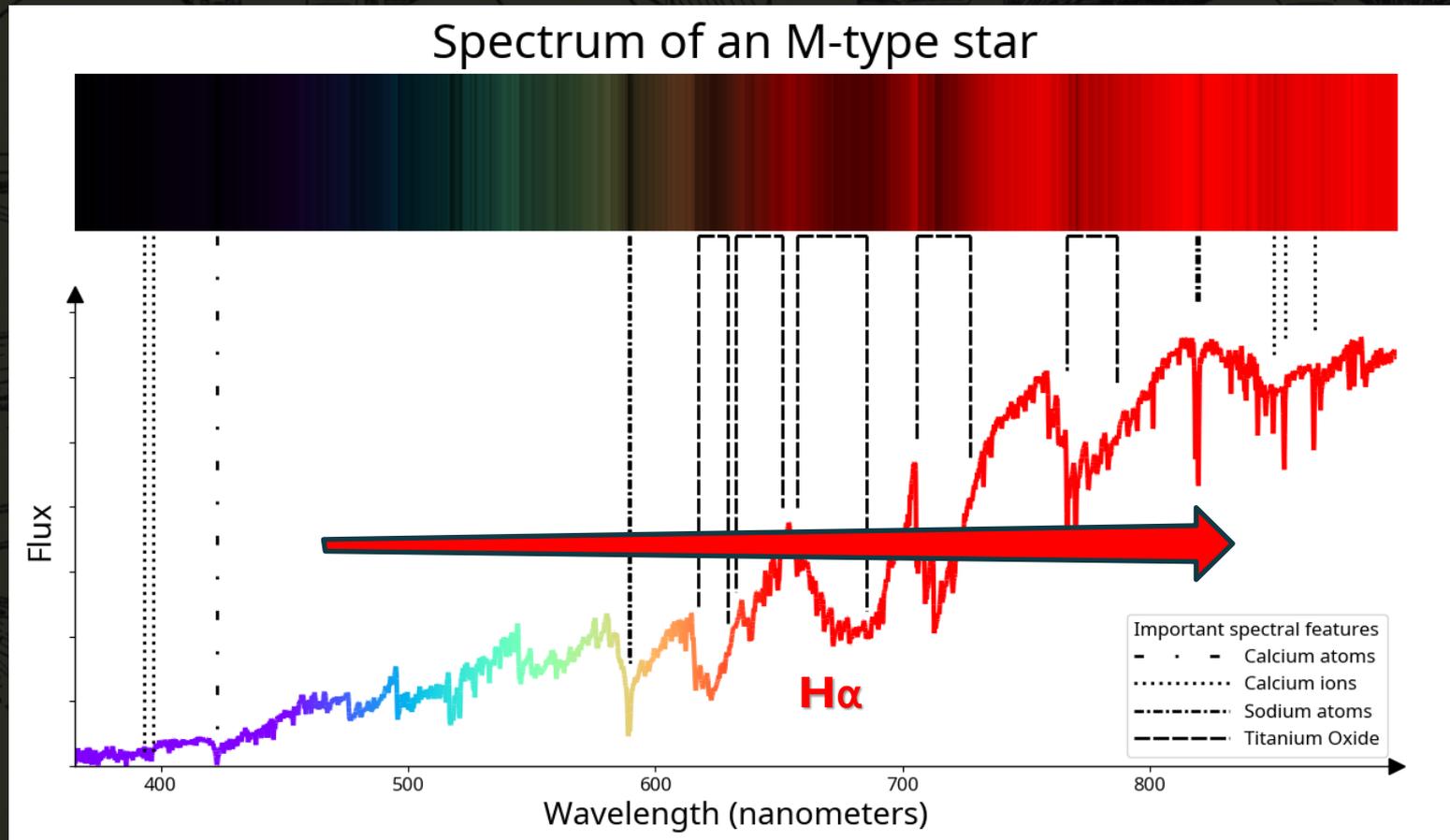
O B A F **G** K M



Il était une fois...

➤ La classification de Cannon

O B A F G K **M**

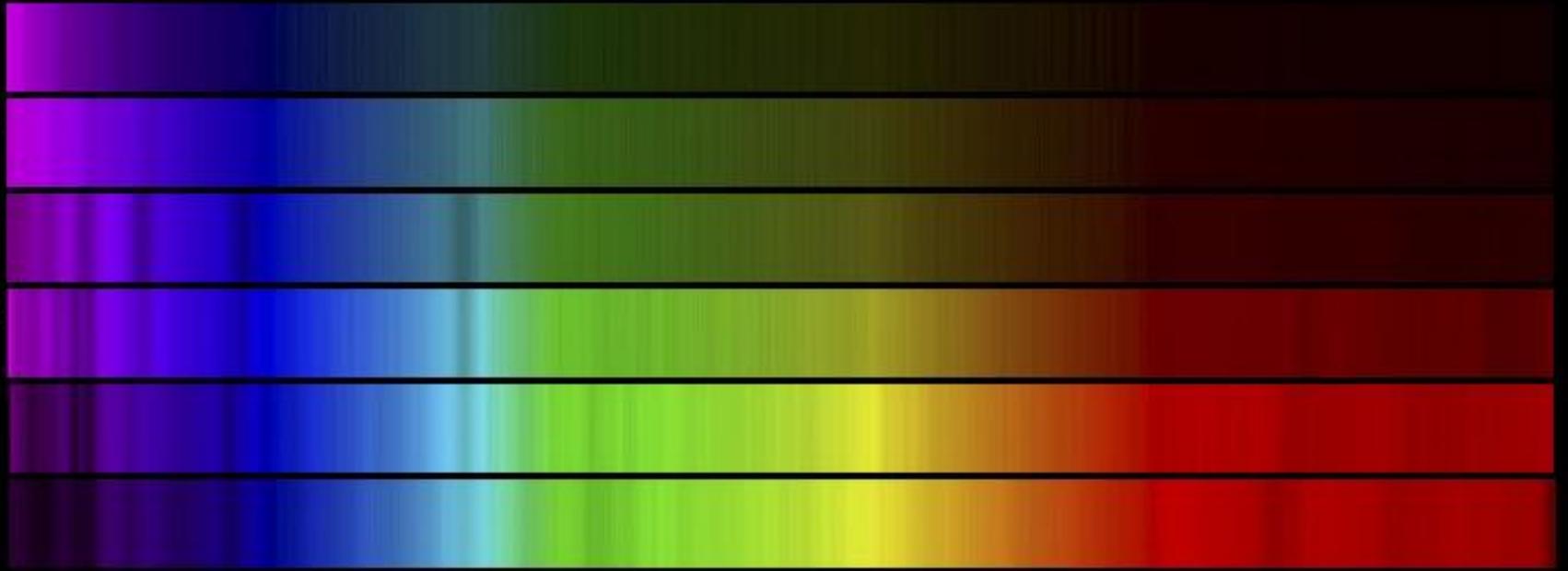


Il était une fois...

➤ La classification de Cannon

O B A F G K M

Alnitak
O9
Mintaka
B0
Sirius
A0
Procyon
F5
Capella
G3
Pollux
K0



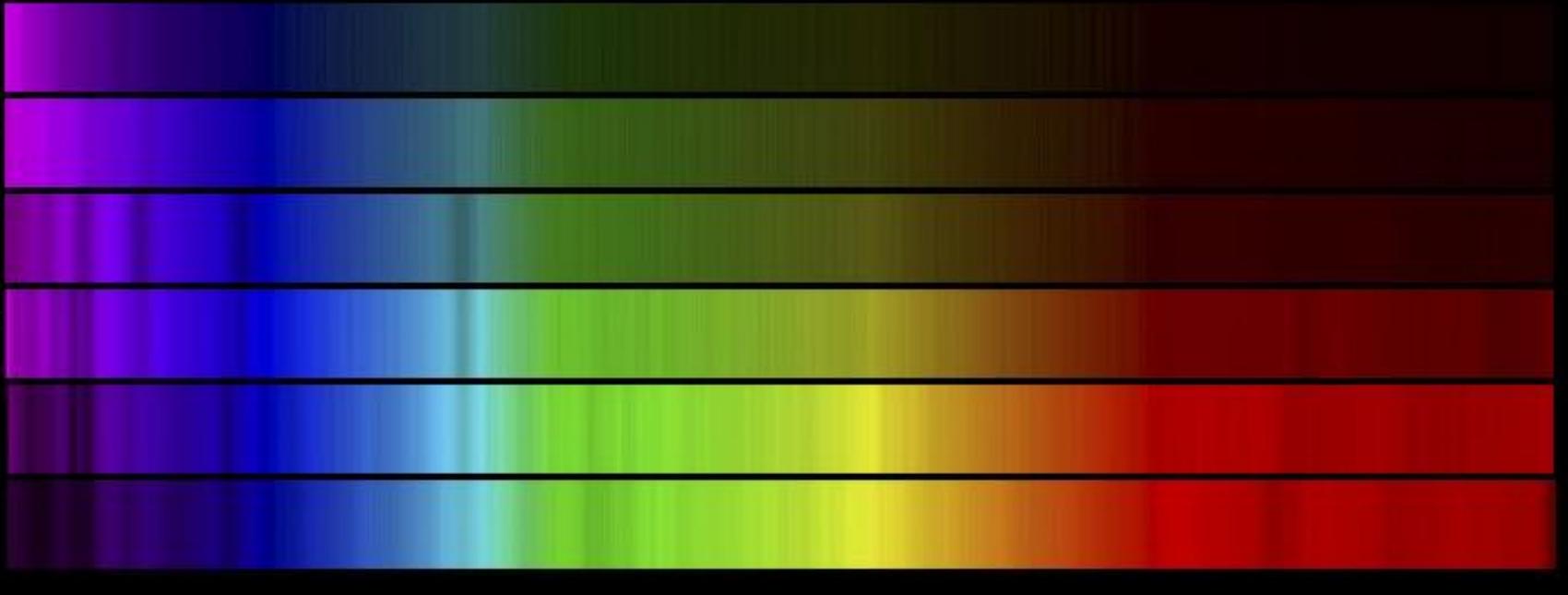
➤ Il est à noter que les “calculatrices” n’avaient pas accès à la couleur sur les plaques de verre.

Il était une fois...

➤ La classification de Cannon

O B A F G K M

Alnitak
O9
Mintaka
B0
Sirius
A0
Procyon
F5
Capella
G3
Pollux
K0



➤ Il y a cependant un net déplacement de la couleur moyenne lorsqu'on passe des types O ➔ M.

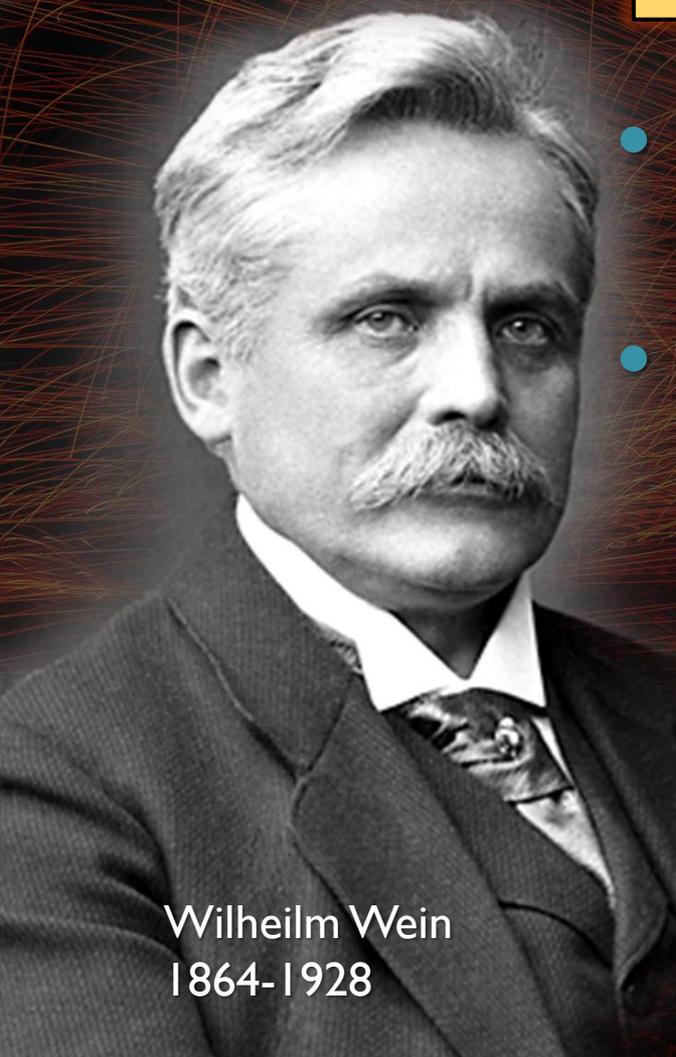
Que pouvons-nous faire de plus avec la lumière ?

I. Appréhender la température (T°) de la photosphère des étoiles.

Lumière, merveilleuse lumière ?

Les enseignements du corps noir

- En examinant la lumière émise par un objet, on peut déterminer sa $^{\circ}\text{T}$.
- Tout objet dont la $^{\circ}\text{T} > 0^{\circ}\text{K}$ émet de la lumière (rayonnement électromagnétique).

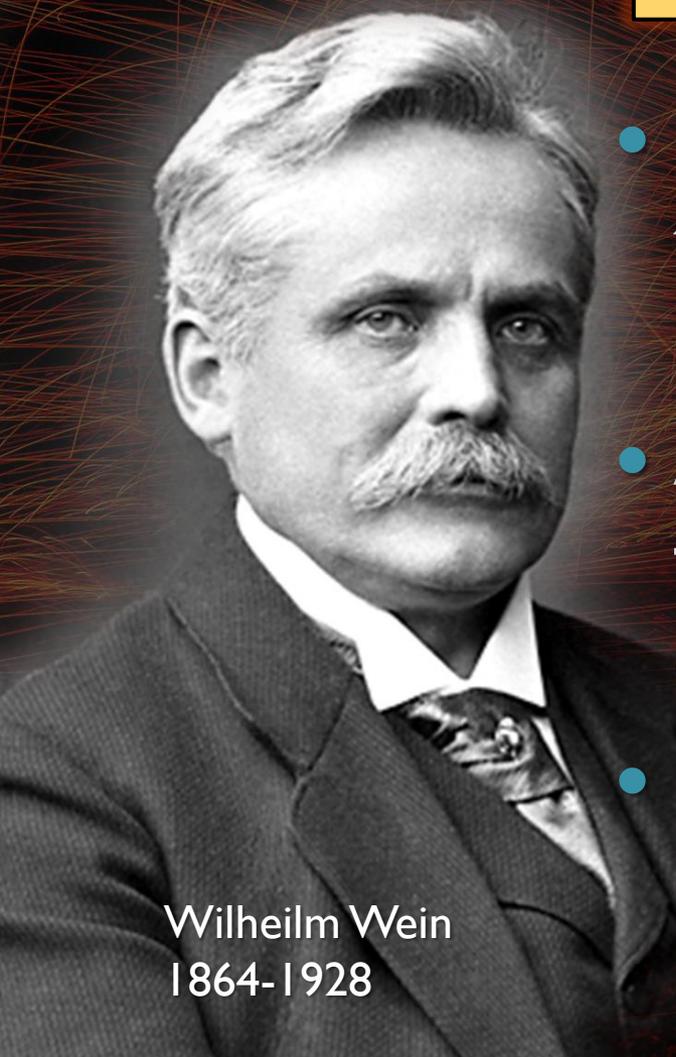
A black and white portrait of Wilhelm Wien, a man with a mustache, wearing a suit and tie.

Wilhelm Wien
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

Les enseignements du corps noir

- **Corps noir** = Un objet qui absorbe toute lumière incidente et donc, qu'il n'en réfléchit aucune.
- Ainsi, il n'émet de la lumière qu'en fonction de sa $^{\circ}T$ et seulement de cela.
- Un corps noir est nécessairement opaque et thermiquement stable.

A black and white portrait of Wilhelm Wien, a man with a mustache, wearing a suit and tie.

Wilhelm Wien
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

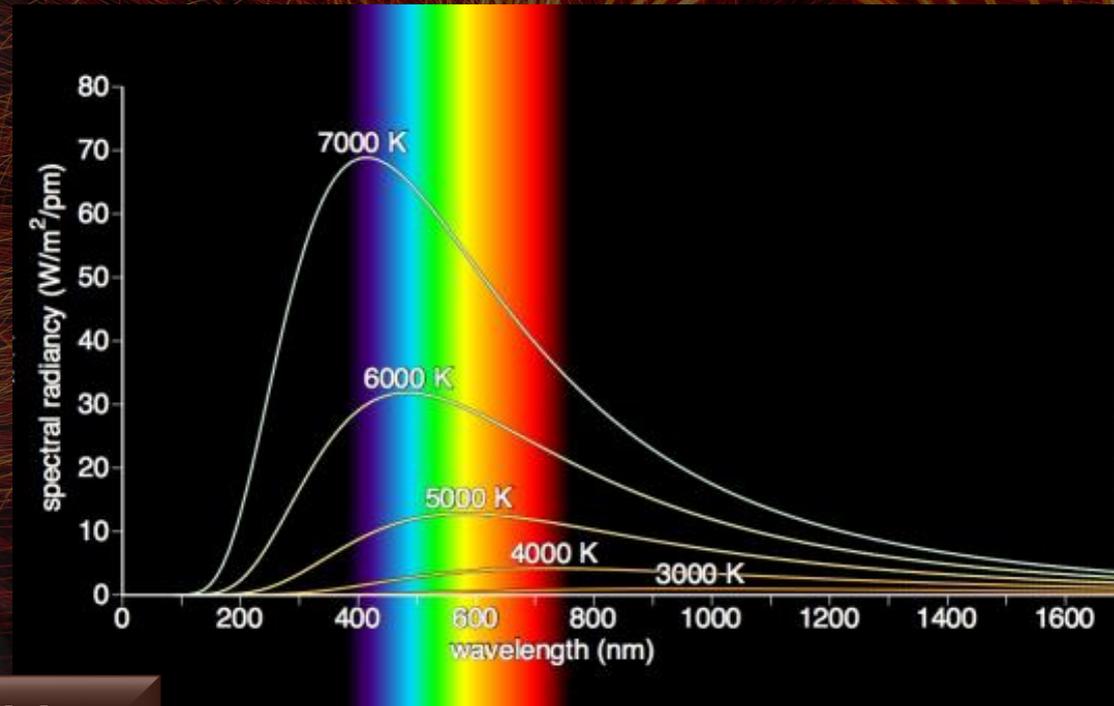
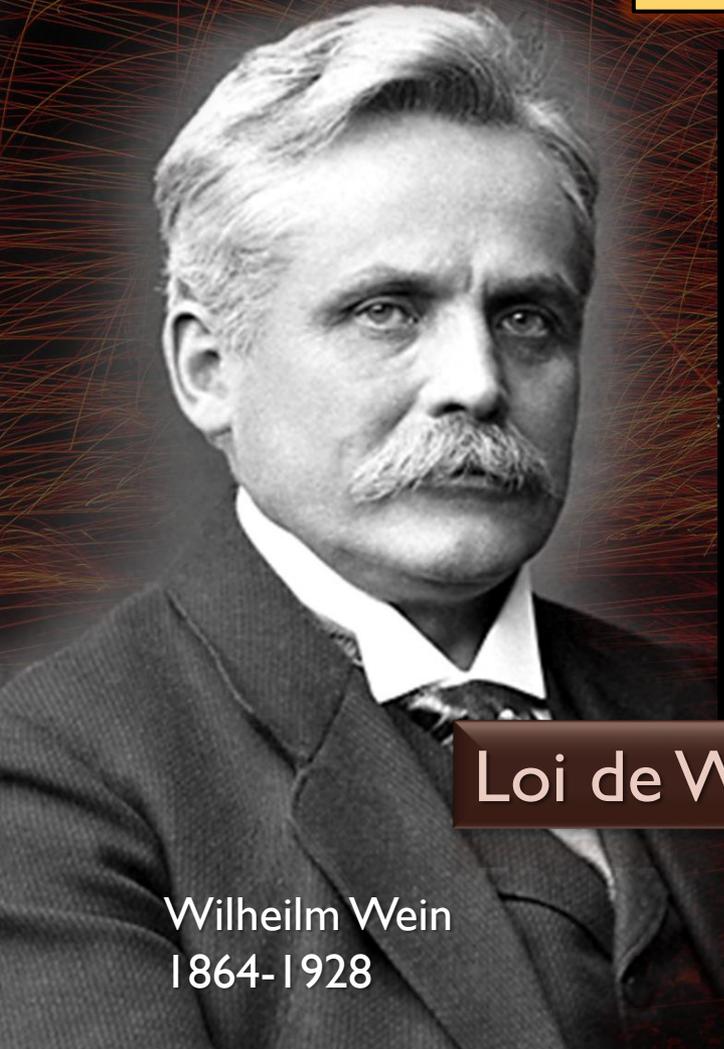
Les enseignements du corps noir

- Un corps noir *n'est pas nécessairement noir*.
- Il peut être aussi brillant qu'une étoile – une étoile est un quasi parfait corps noir.
 - Elle est isolée dans l'espace.
 - Elle est opaque.
 - Elle est thermiquement stable.

Wilhelm Wein
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

Les enseignements du corps noir



Loi de Wien

Wilhelm Wien
1864-1928

$$\lambda_{pic} \text{ (m)} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T \text{ (K)}}$$

Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la T de surface du Soleil si,
 - Son pic d'émissivité mesuré = 500 nm

$$\lambda_{pic} \text{ (m)} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T \text{ (K)}}$$

$$\bullet T = \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{500 \cdot 10^{-9}}$$

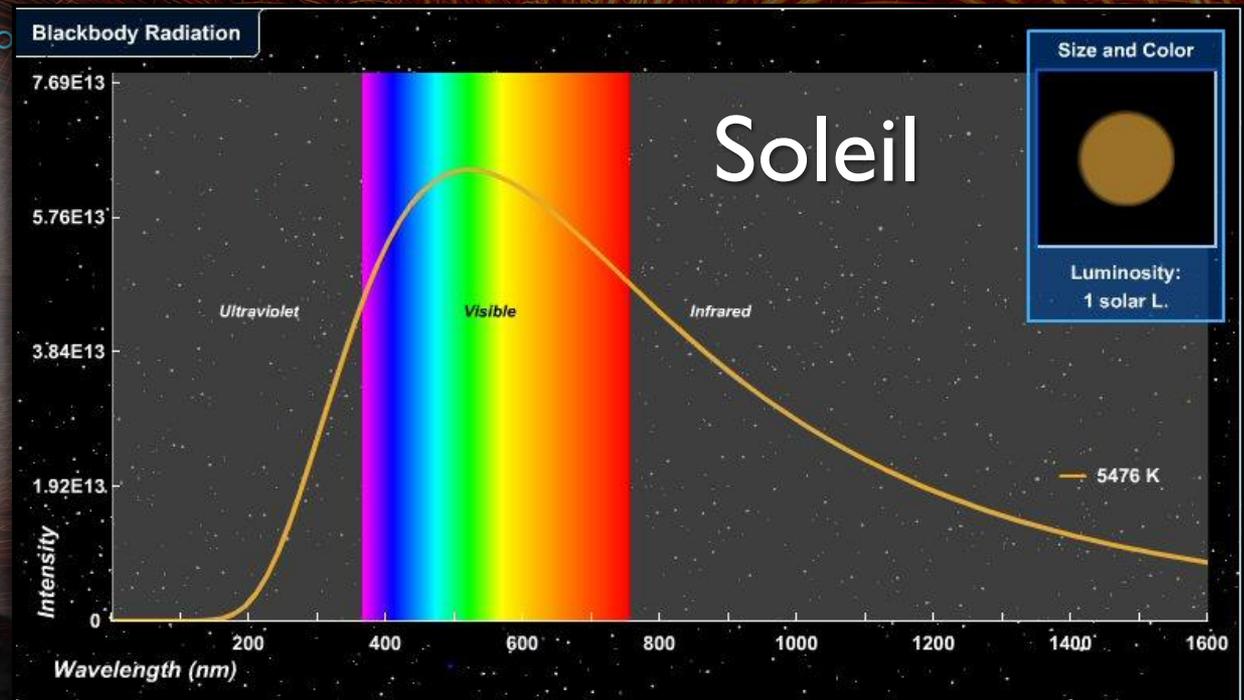
$$\bullet T = 5,88 \cdot 10^3 = 5\ 800 \text{ K}$$

- $\approx 5\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Wilhelm Wein
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la T de surface du Soleil si,



• $T = 5,000^{\circ}\text{K} = 5,000\text{ K}$

• $\approx 5,500^{\circ}\text{C}$

Wilhelm Wein
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la λ_{pic} du corps humain si,
 - Sa T mesurée = **37** °C

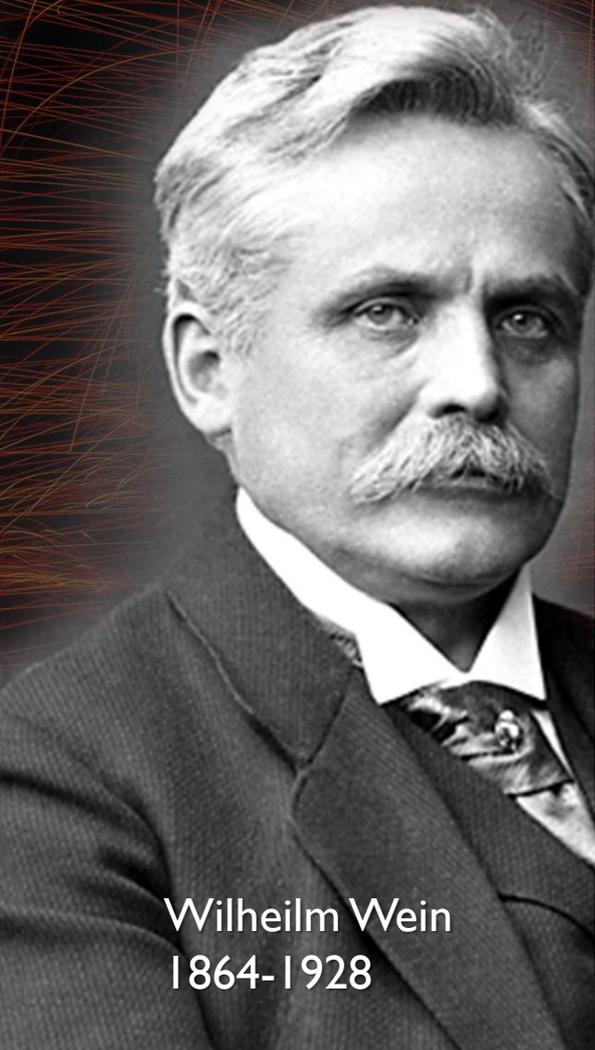
$$\lambda_{pic} \text{ (m)} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T(K)}$$

- $\lambda_{pic} = \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{37 + 273}$

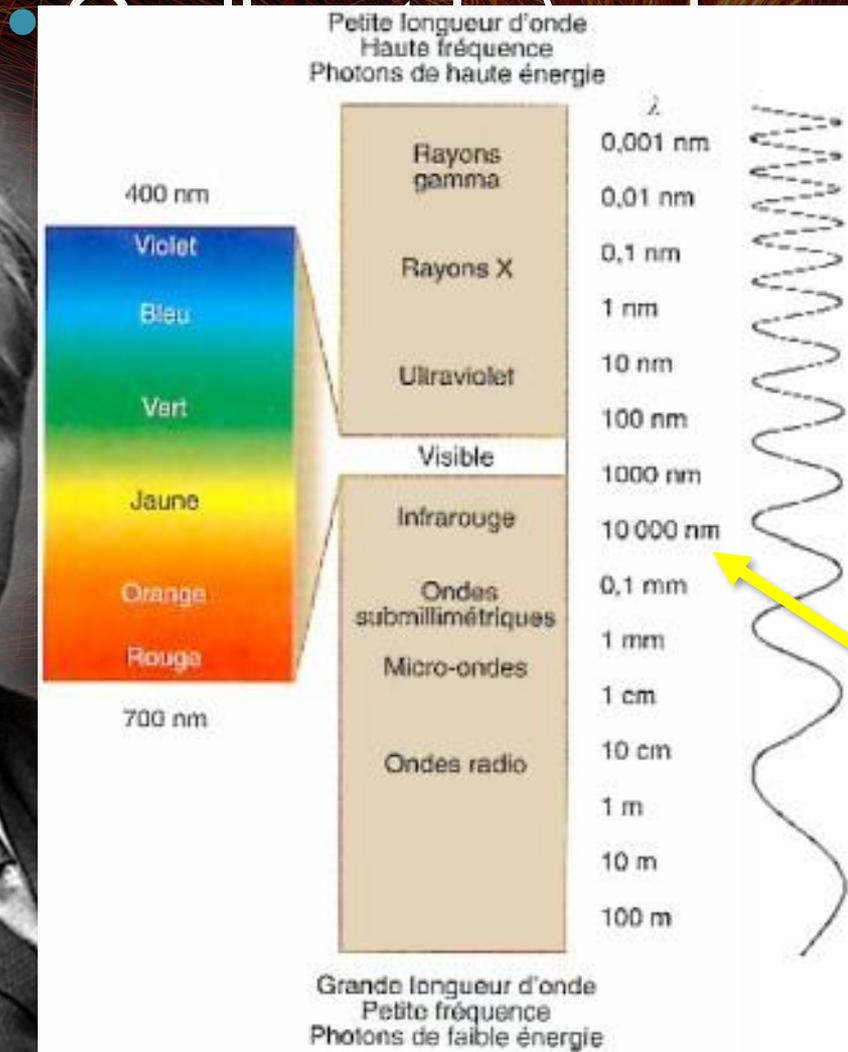
- $\lambda_{pic} = 9,354 \cdot 10^{-6} = \mathbf{9\ 354\ nm}$

Wilhelm Wein
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?



Wilhelm Wien
1864-1928

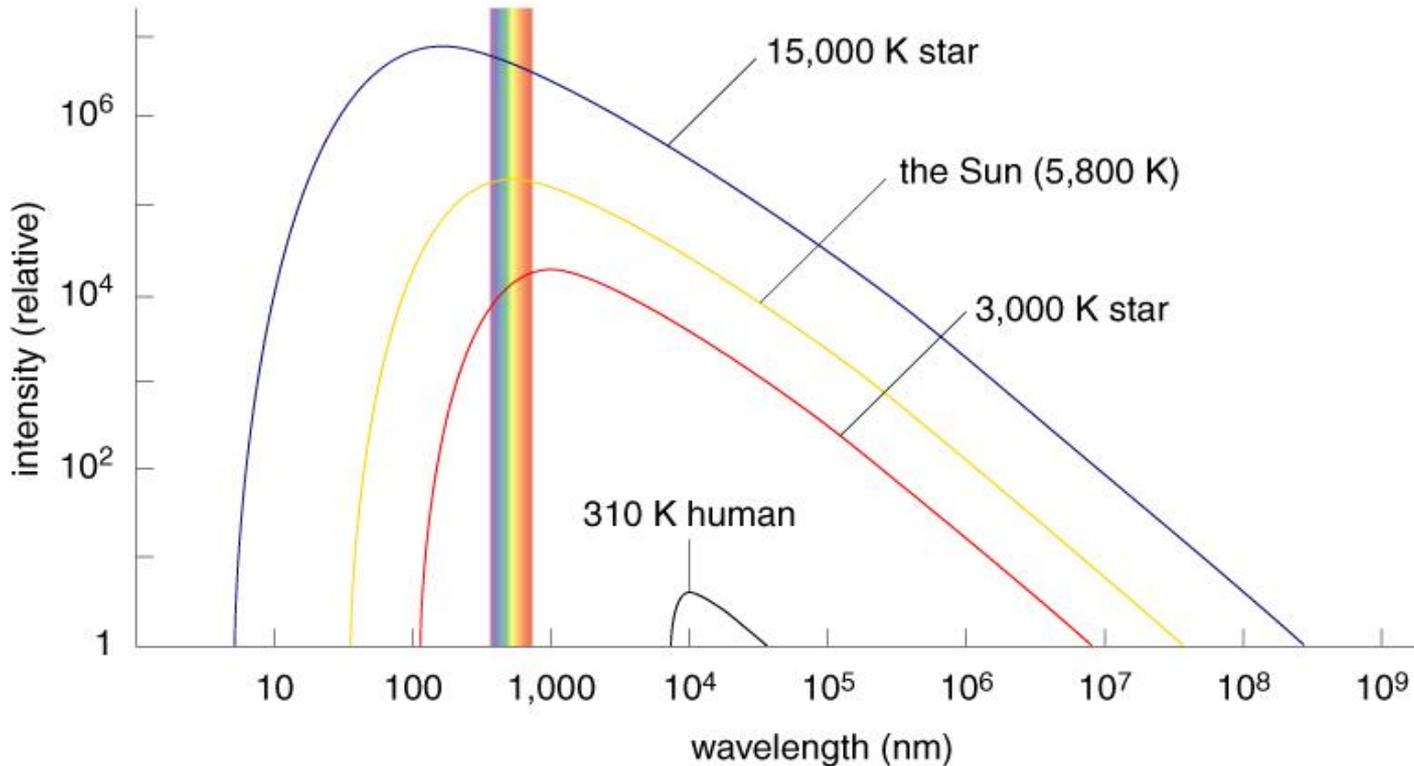


= 9 354 nm

...ps humain si,

Lumière, merveilleuse lumière ?

humain si,



© Addison-Wesley Longman



Grande longueur d'onde
Petite fréquence
Photons de faible énergie

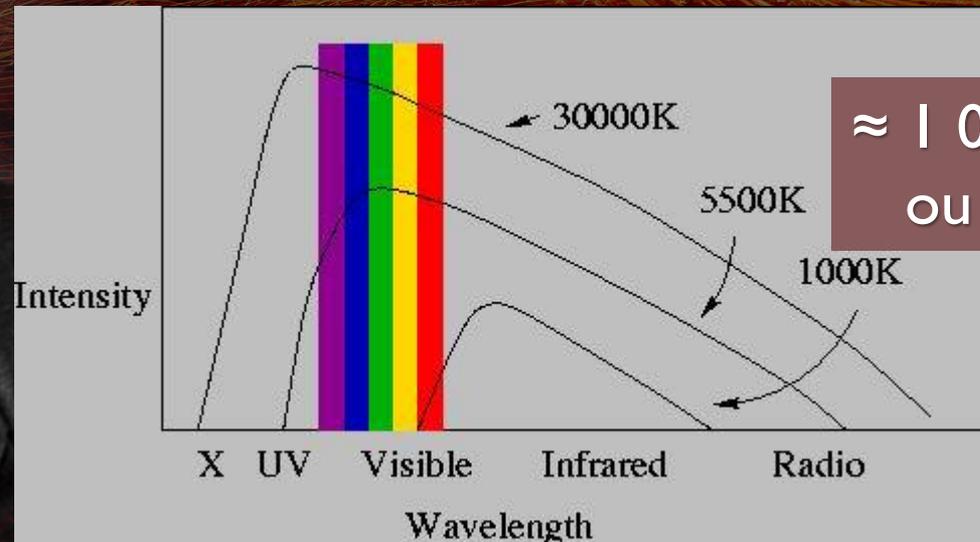
= 9 354 nm

Wilhelm Wein
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

- À quelle T un rond de poêle devient-il rouge ?

$$\lambda_{pic} \text{ (m)} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T \text{ (K)}}$$



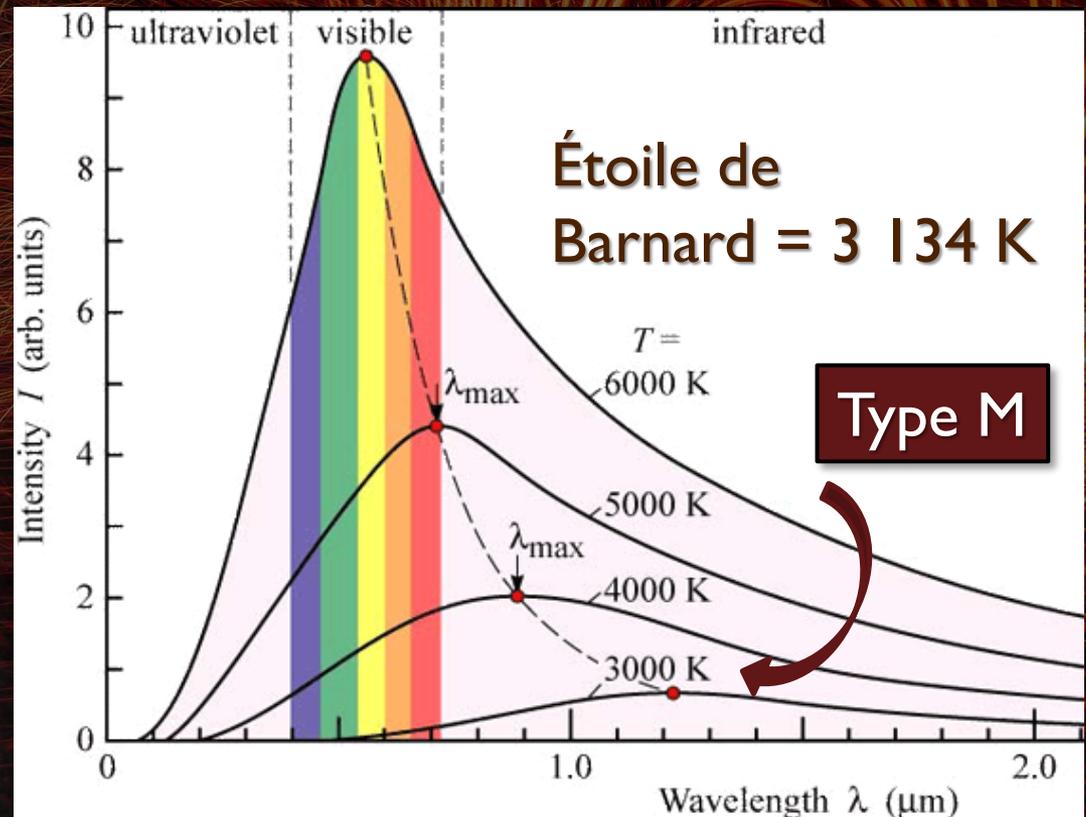
Wilhelm Wein
1864-1928

Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la couleur des étoiles ?



Wilhelm Wien
1864-1928

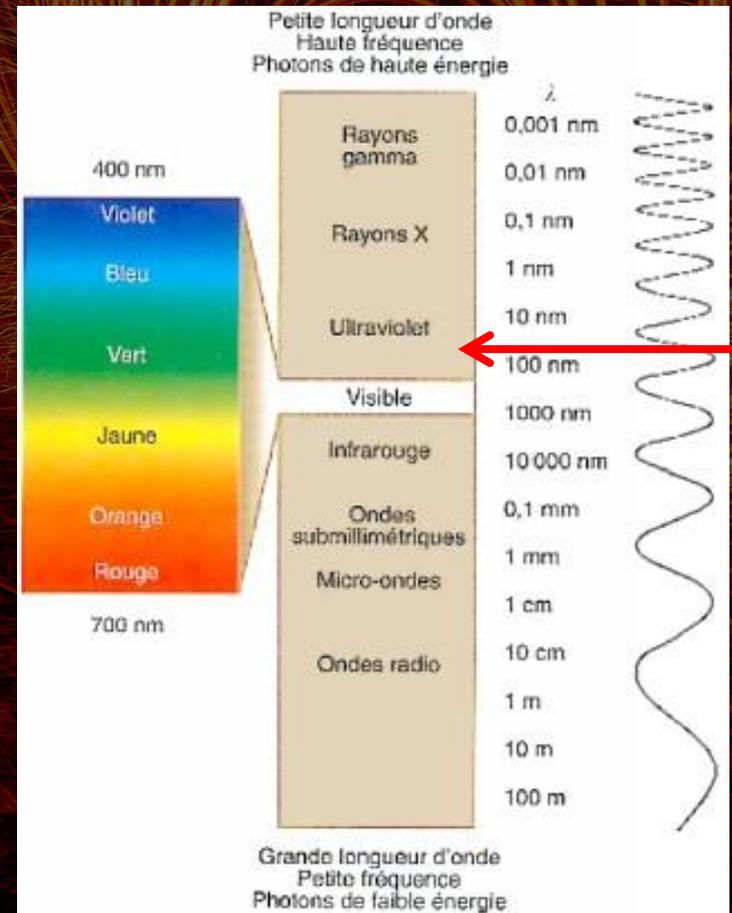


Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la couleur des étoiles ?
 - Une étoile de type O a une $T = 35\,000\text{ K}$
 - $\lambda_{\text{pic}} = 82\text{ nm}$

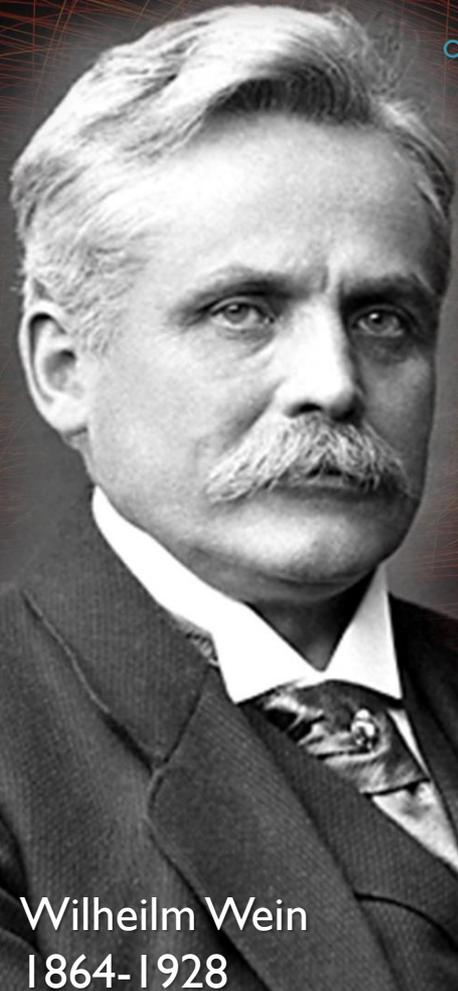


Wilhelm Wien
1864-1928

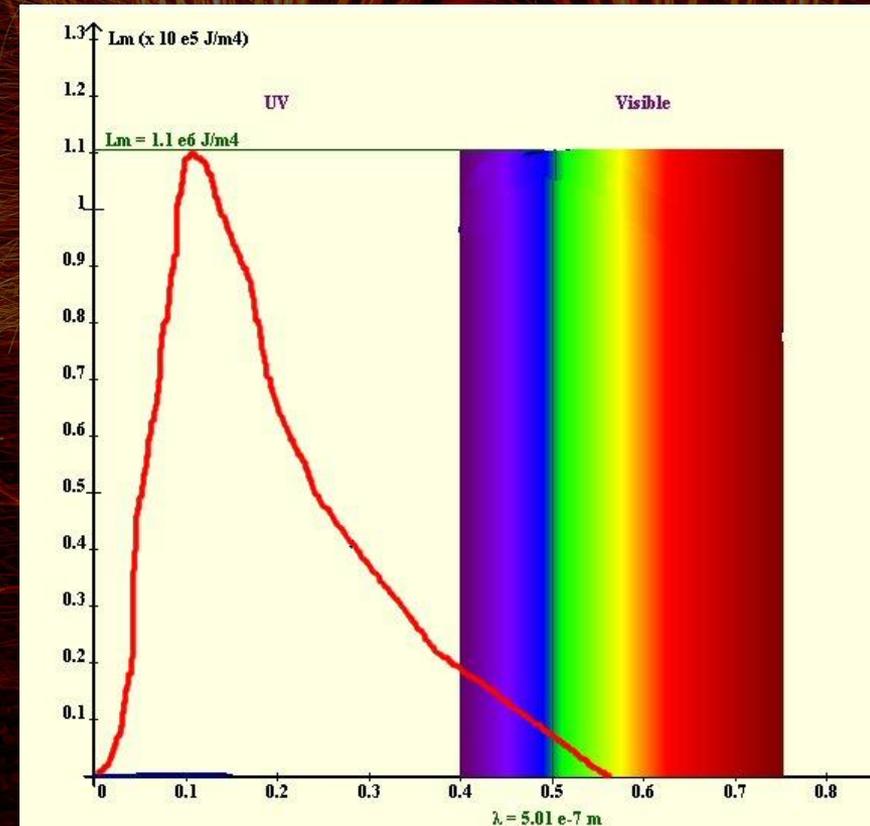


Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la couleur des étoiles ?
 - Une étoile de type O a une $T = 35\,000\text{ K}$
 - $\lambda_{\text{pic}} = 82\text{ nm}$

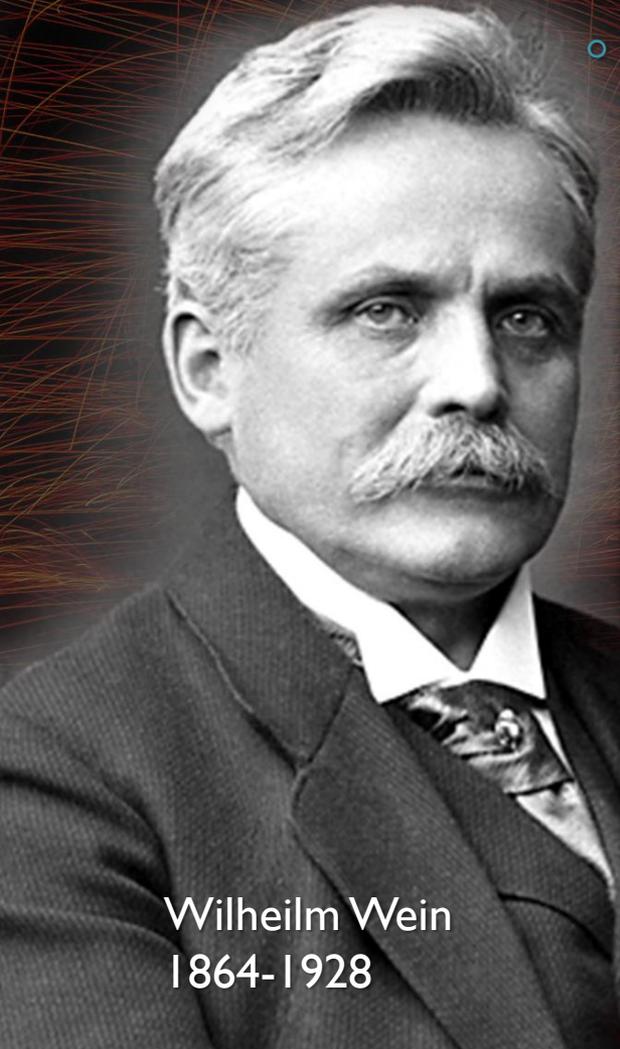


Wilhelm Wien
1864-1928

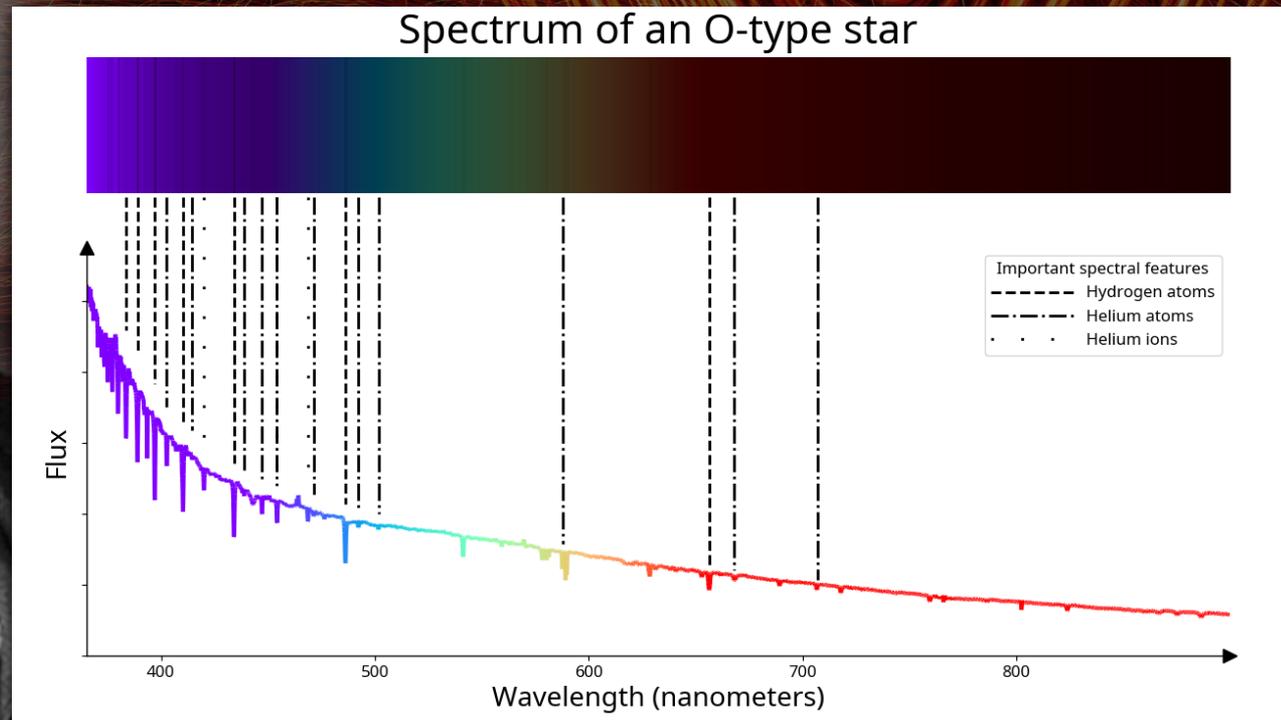


Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la couleur des étoiles ?
 - Une étoile de type O a une $T = 35\,000\text{ K}$
 - $\lambda_{\text{pic}} = 82\text{ nm}$

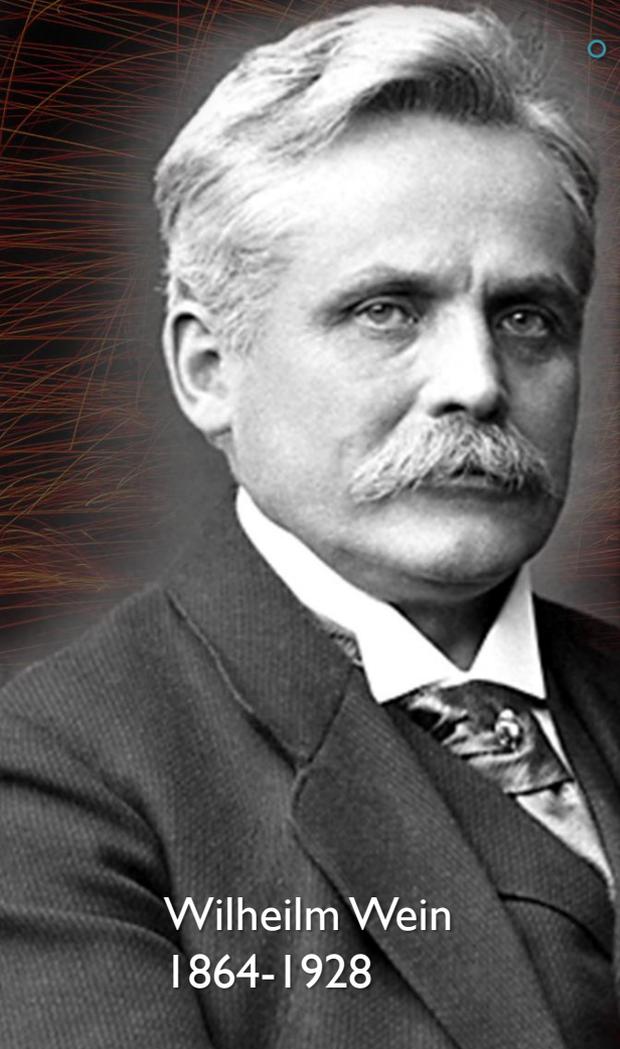


Wilhelm Wien
1864-1928

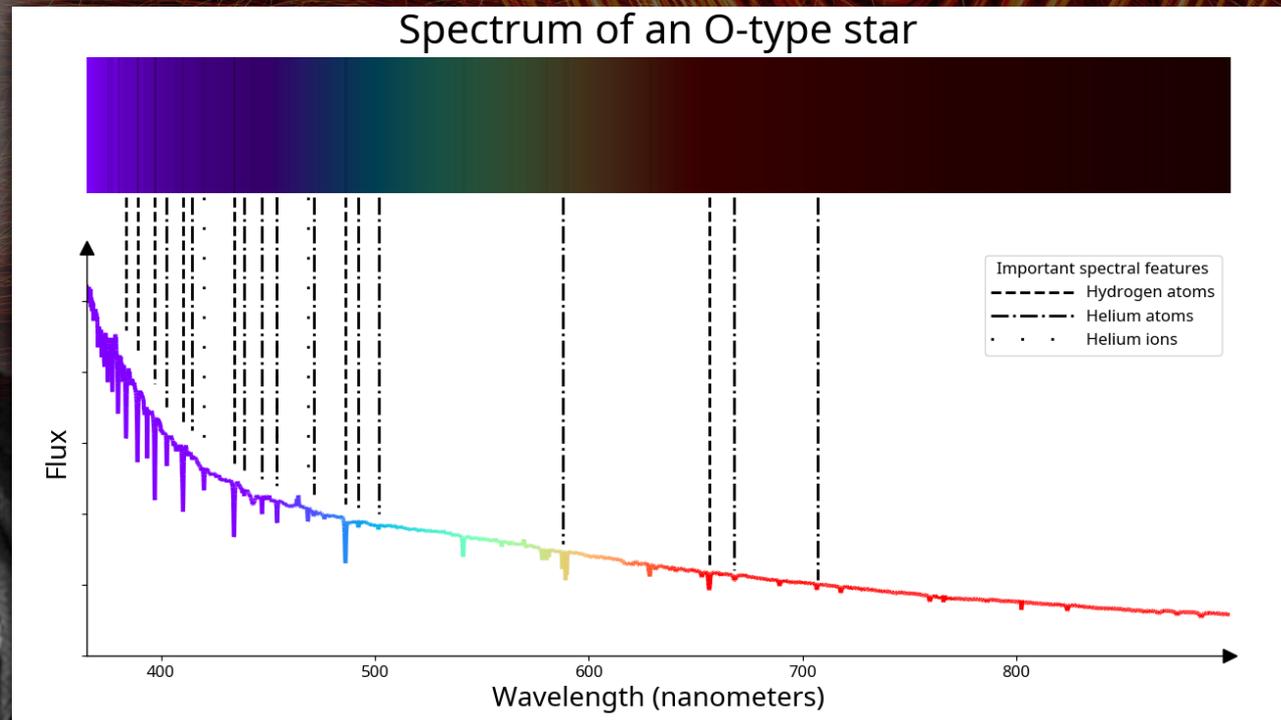


Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la couleur des étoiles ?
 - Une étoile de type O a une $T = 35\,000\text{ K}$
 - $\lambda_{\text{pic}} = 82\text{ nm}$

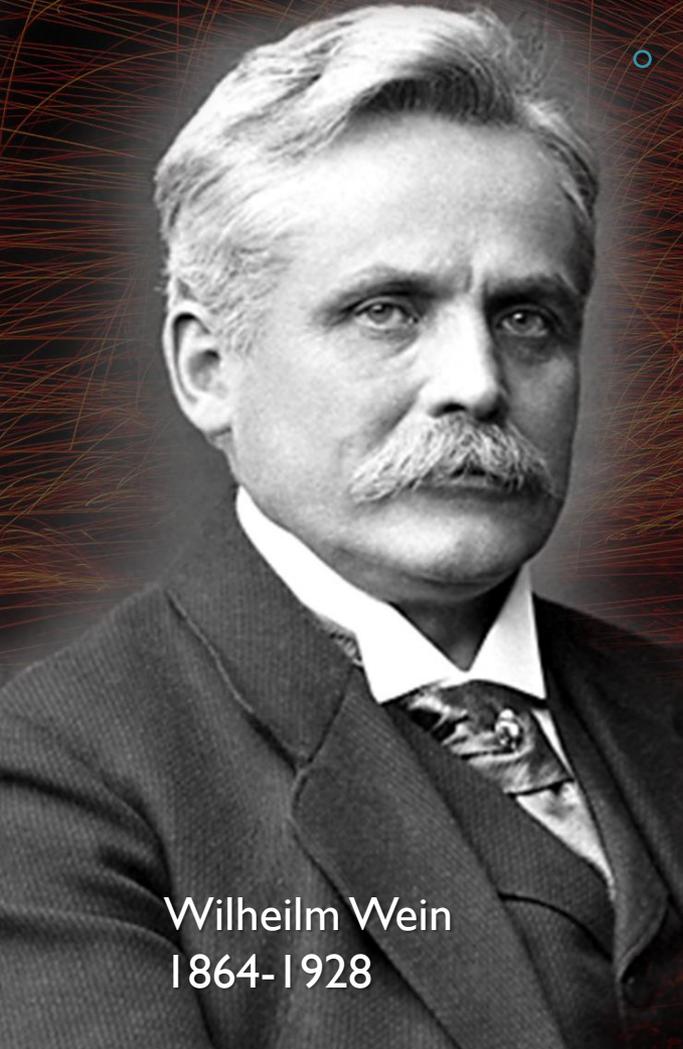


Wilhelm Wien
1864-1928

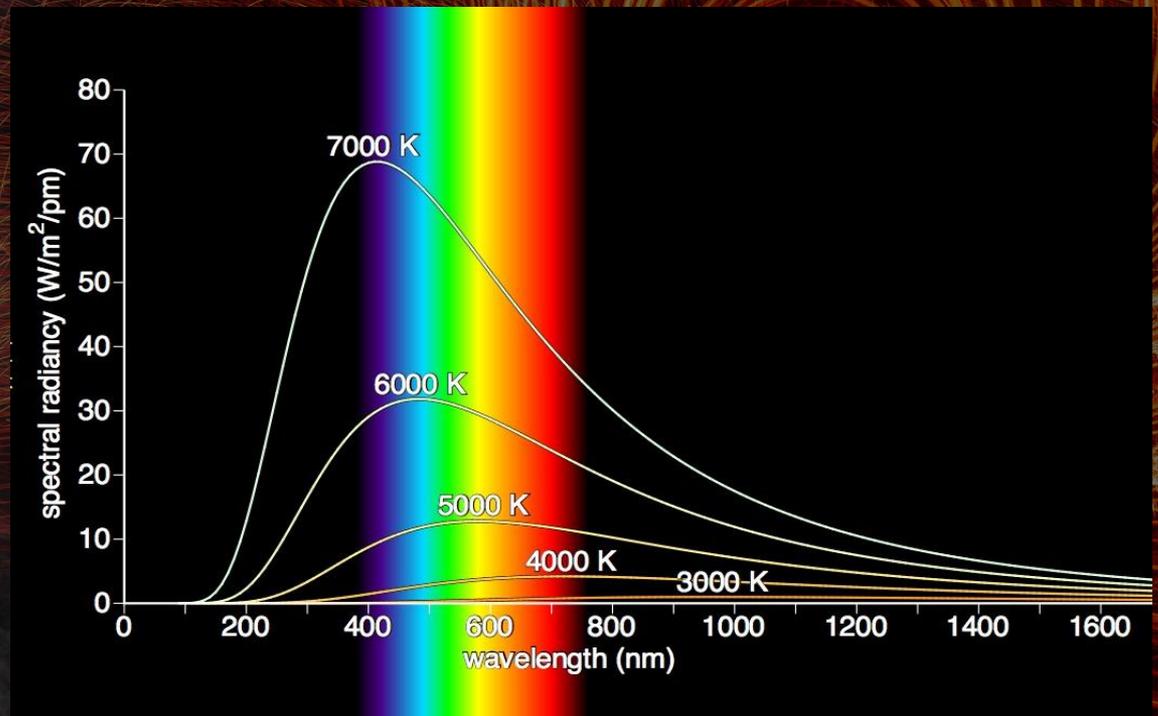


Lumière, merveilleuse lumière ?

- Quelle est la couleur des étoiles ?
 - La majorité des étoiles sont **blanches**



Wilhelm Wien
1864-1928



Spectral Class Types for Stars



Il était une fois...

➤ La classification de Cannon



➤ Il y a cependant un net déplacement de la couleur moyenne lorsqu'on se déplace des types O ➔ M.

Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- Cecilia Payne-Gaposchkin : une révolution à venir.



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- Cecilia Payne-Gaposchkin : une révolution à venir.
 - À l'école primaire, elle développe un protocole pour vérifier l'efficacité de la prière !

N'en trouvant pas, elle professe son athéisme !



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

■ Cecilia Payne-Gaposchkin : une révolution à venir.

- À l'école primaire, elle développe un protocole pour vérifier l'efficacité de la prière !
- Diplômée en science de l'université de Cambridge (1923).
- Bourse de l'université Harvard, elle s'intègre aux "*calculatrices*".
- Le Harvard College Observatory est dirigé par Harlow Shapley.



1900-1979

Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

- Cecilia Payne-Gaposchkin : une révolution à venir.

NATIONAL
GEOGRAPHIC
CHANNEL



1900-1979



Il était une fois...

➤ Les *Calculatrices* de Pickering :

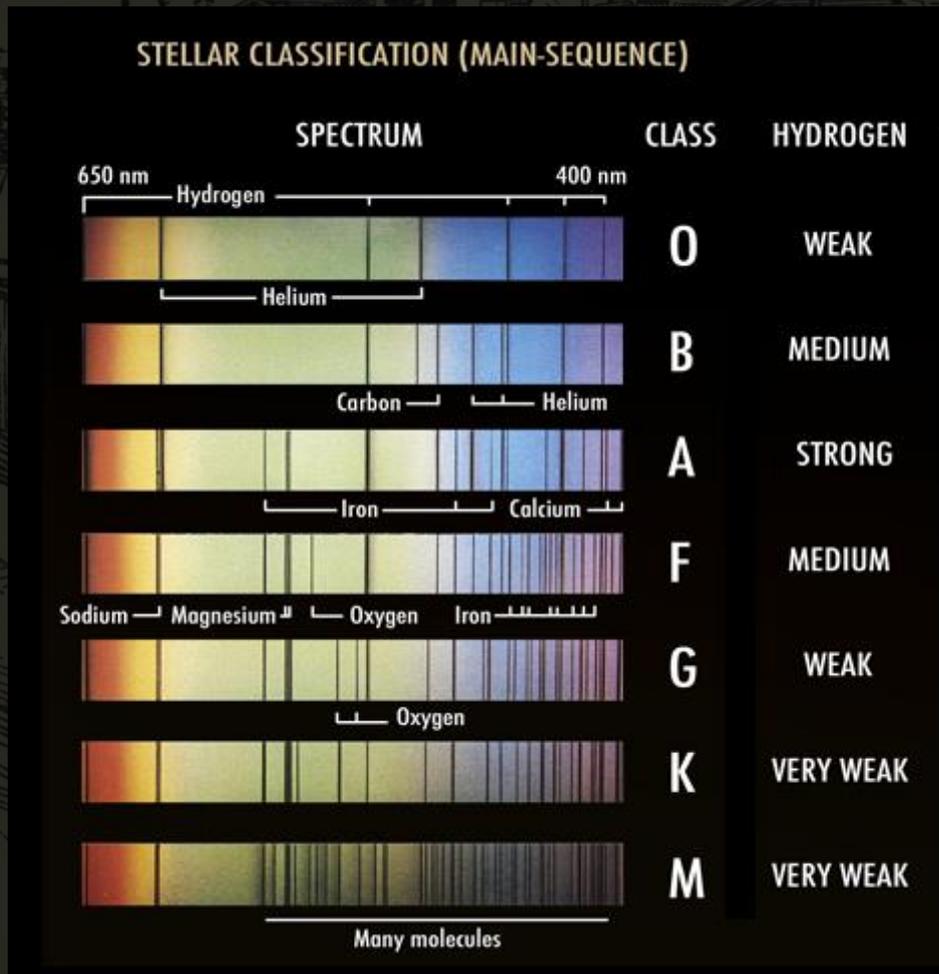
■ Cecilia Payne-Gaposchkin : une révolution à venir.

- Elle détermine que l'Univers (et aussi les étoiles) est composé à $\cong 90\%$ d'atomes d'Hydrogène et à $\cong 8\%$ d'atomes d'Hélium.
- Puis, elle s'intéresse, entre autres, à la **Luminosité** des étoiles.



Il était une fois...

➤ La classification de Cannon interprétée par Payne

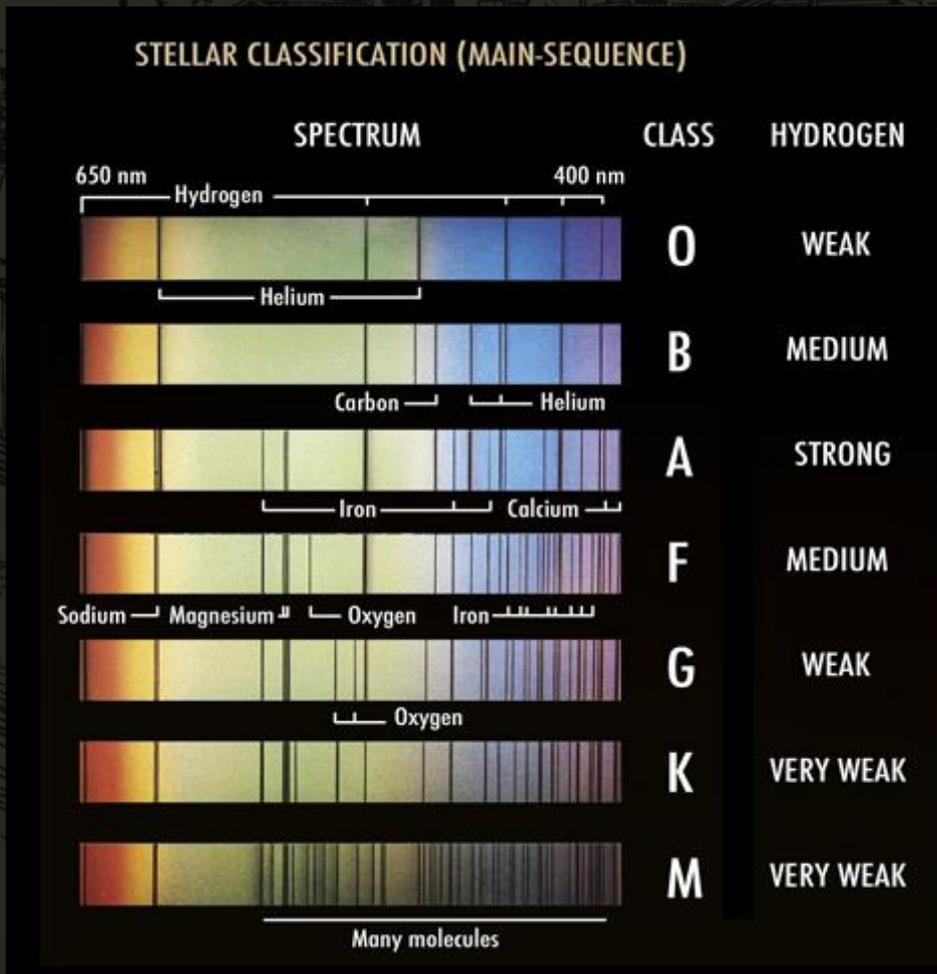


- Elle découvre que l'intensité et de la largeur des raies d'absorption permettent de connaître la température des étoiles.

Il était une fois...

➤ La classification de Cannon interprétée

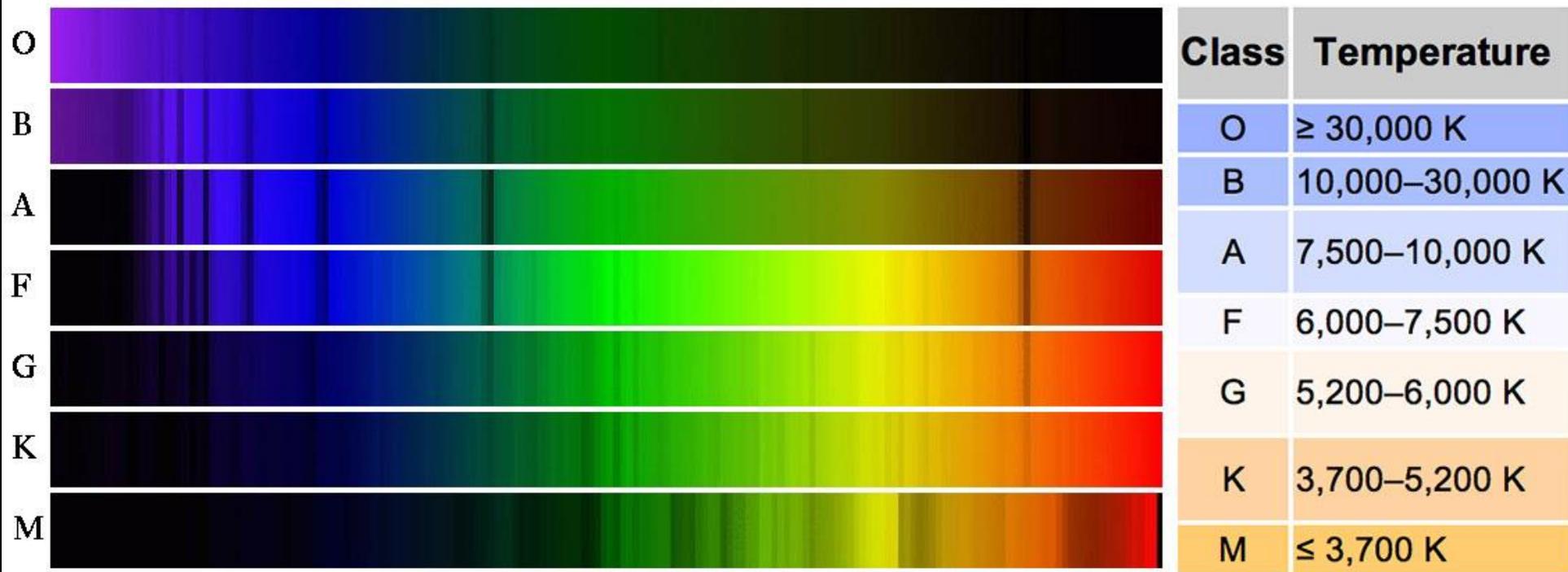
par Payne



- Ainsi, la simple **analyse visuelle** du spectre d'une étoile permet de connaître sa température sans invoquer la loi de Wein et la nécessité de mesurer le pic d'émissivité.

Il était une fois...

- La classification de Cannon interprétée par Cecilia Payne-Gaposchkin.



Que pouvons-nous faire de plus avec la lumière ?

1. Appréhender la température (T°) de la photosphère des étoiles.
2. Mesurer la puissance (L) des étoiles.

La puissance d'une étoile s'exprime par sa **luminosité** (W).

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

Lumière, merveilleuse lumière

- La lumière émise par chaque m^2 d'un objet chauffé est $\approx T^4$ (K).

$$\bullet \ell \text{ (W/m}^2\text{)} = \sigma T^4 \text{ (K)}$$

- ℓ est la Luminosité surfacique
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Loi de Stefan-Boltzmann

- La luminosité est la puissance d'une étoile. Elle est exprimée en Watts (W).

Ludwig Boltzmann
1844-1906

Lumière, merveilleuse lumière

➤ Quelle est la luminosité surfacique du Soleil ?

■ $T = 5\,800\text{ K}$

● $\ell \text{ (W/m}^2\text{)} = \sigma T^4 \text{ (K)}$

● $\ell = 5,67 \cdot 10^{-8} \times 5\,800^4 = 64\,000\,000 \text{ W/m}^2$

➤ Ainsi, un m^2 de la surface du Soleil peut maintenir en incandescence 640 000 ampoules de 100 W !

Ludwig Boltzmann
1844-1906

Lumière, merveilleuse lumière

➤ Quelle est la puissance (L) du Soleil ?

- $\ell = 64\,000\,000\text{ W/m}^2$
- La surface du Soleil ($S=4\pi r^2$) est de $6,09 \cdot 10^{18}\text{ m}^2$

$$\bullet L_{(w)} = \ell S$$

$$\bullet L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}\text{ W}$$

Ludwig Boltzmann
1844-1906

Lumière, merveilleuse lumière

➤ Quelle est la puissance (L) du Soleil ?

- $\ell = 64\,000\,000\text{ W/m}^2$

- La surface de la Terre est de $6,09 \times 10^{16}\text{ m}^2$

Soit 10^{16} fois la puissance d'Hydro-Québec !
La Terre reçoit $2/10^6$ de L_{\odot} soit $1\,361\text{ W/m}^2$ de surface.

- $L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}\text{ W}$

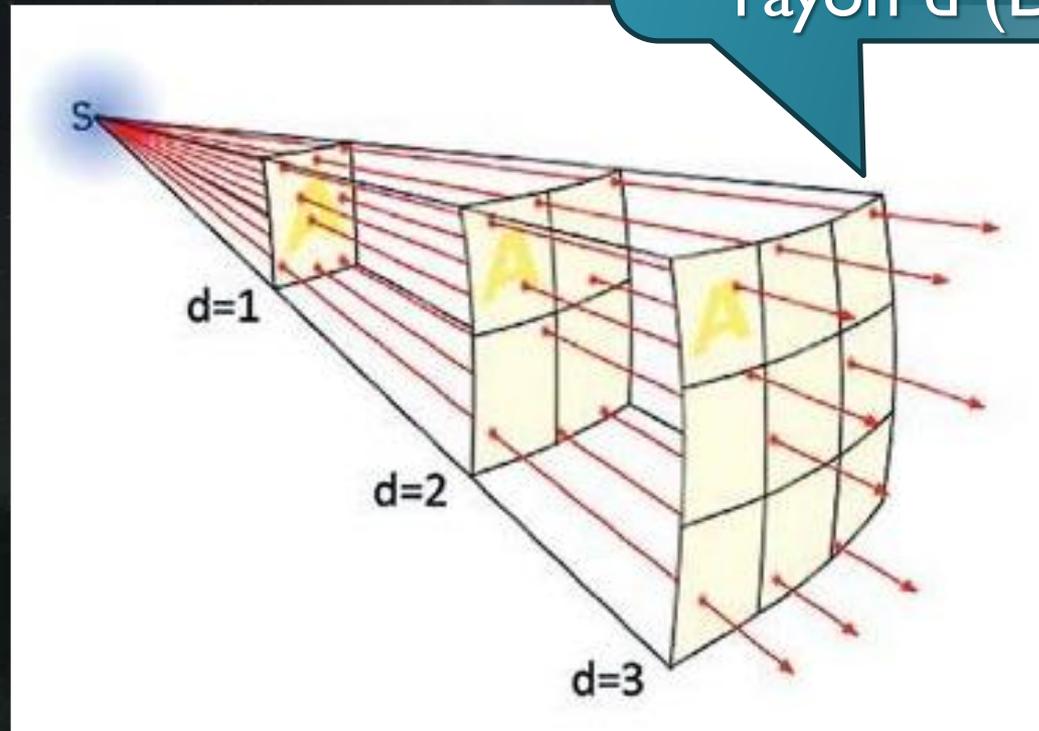
Ludwig Boltzmann
1844-1906

Mesurer la luminosité des étoiles

➤ Relation Intensité-Luminosité-Distance.

$$I \propto \frac{1}{D^2}$$

Sphère centrée sur l'étoile de rayon d (D)



Friedrich Wilhelm Bessel
1784-1846

Mesurer la luminosité des étoiles

- Relation Intensité-Luminosité-Distance.

$$I \propto L \quad \text{et} \quad I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

D'où $L = I \times 4\pi D^2$

- On mesure l'intensité lumineuse à l'aide d'un photomètre.

Friedrich Wilhelm Bessel
1784-1846

Mesurer la luminosité des étoiles

➤ Quelle est la luminosité de l'étoile Véga si :

- $I = 3,353 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Parallaxe = 0,13 arc•sec

$$D(a.l.) = \frac{3,26}{\theta(")} = \frac{3,26}{0,13} = \mathbf{25} a.l.$$

Friedrich Wilhelm Bessel
1784-1846

Mesurer la luminosité des étoiles

➤ Quelle est la luminosité de l'étoile Véga si :

- $I = 3,353 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Parallaxe = 0,13 arc•sec

$$L = I \times 4\pi D^2$$

$$L_V(W) = 3,353 \times 10^{-8} \times 4\pi(25 \times 9,461 \times 10^{15})^2$$

$$L_V(W) = 2,3572 \times 10^{28} W$$

$$L_{Vega}(L_{\odot}) = \frac{2,3572 \times 10^{28}}{3,83 \times 10^{26}} = \mathbf{61}$$

Friedrich Wilhelm Bessel
1784-1846

Que pouvons-nous faire de plus avec la lumière ?

1. Appréhender la température (T°) de la photosphère des étoiles.
2. Mesurer la puissance (L) des étoiles.
3. Connaître la taille des étoiles.

Mesurer la luminosité des étoiles

➤ Quel est le rayon de l'étoile Véga ?

si: • $L_{\text{Véga}} = 61 L_{\odot}$

• $\lambda_{\text{pic}} = 674 \text{ nm} \rightarrow T^{\circ} = 9\,600 \text{ K}$

On sait que : $L = \ell S$

Et que : $\ell = \sigma T^4$

Or : $S = 4\pi r^2$

Donc : $L = 4\pi r^2 \sigma T^4$

Ludwig Boltzmann
1844-1906

Mesurer la luminosité des étoiles

➤ Quel est le rayon de l'étoile Véga ?

si: • $L_{\text{Véga}} = 61 L_{\odot}$

• $\lambda_{\text{pic}} = 674 \text{ nm} \Rightarrow T^{\circ} = 9\,600 \text{ K}$

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

Donc :

$$r = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$$

On trouve $r_{\text{Véga}} = 2,7 r_{\odot}$

Ludwig Boltzmann
1844-1906

Que pouvons-nous faire de plus avec la lumière ?

1. Appréhender la température (T°) de la photosphère des étoiles.
2. Mesurer la puissance (L) des étoiles.
3. Connaître la taille des étoiles.
4. Déterminer la masse des étoiles.

Question de masse

- Comment déterminer la masse des étoiles ?
 - La 3^e loi de Kepler généralisée ($a^3 \propto T^2$)

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a^3}{M_c}$$

$$\text{Et, } T^2 = K \frac{a^3}{M_c}$$

$$\text{Où } K = 5,92 \times 10^{11} \text{ s}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Johannes Kepler
1571-1630

Constante de Kepler

Question de masse

➤ Quelle est la masse du Soleil si la Terre :

- $a = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$
- $T = 365,25 \text{ jours}$

$$T^2 = K \frac{a^3}{M_c}$$

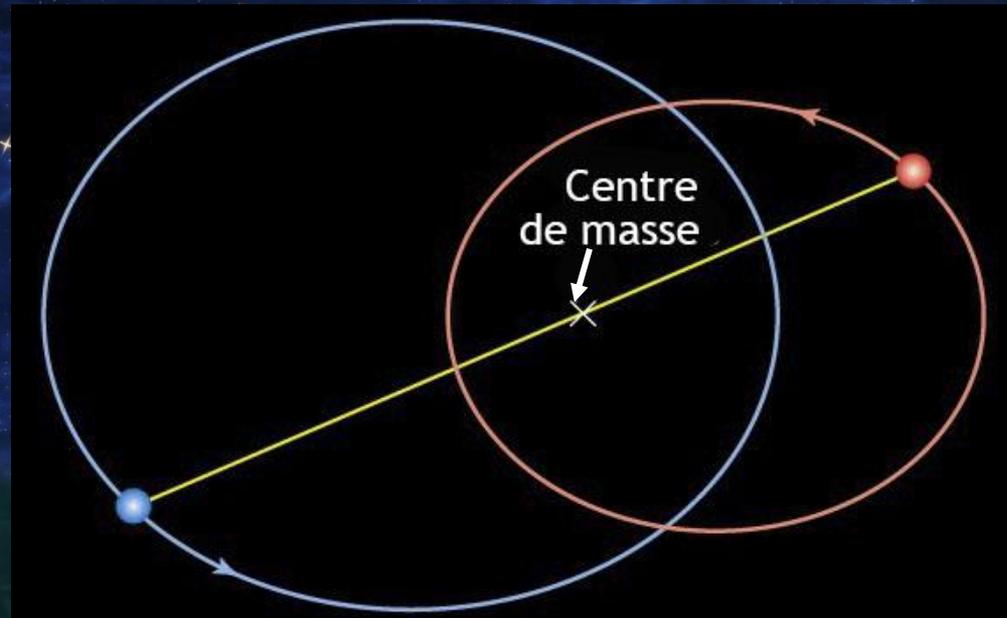
$$M_{\odot} = K \frac{a^3}{T^2} = 5,92 \times 10^{11} \cdot \frac{(1,49 \times 10^{11})^3}{(3,156 \times 10^7)^2}$$

$$M_{\odot} = 1,97 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Johannes Kepler
1571-1630

Question de masse

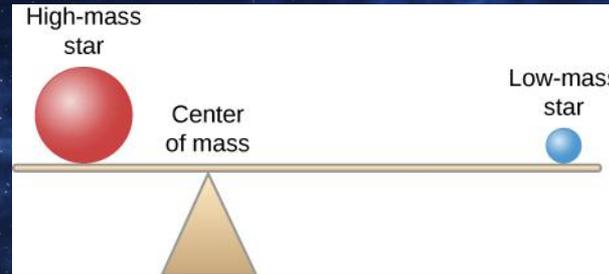
- On peut mesurer la masse des étoiles dans les systèmes binaires :



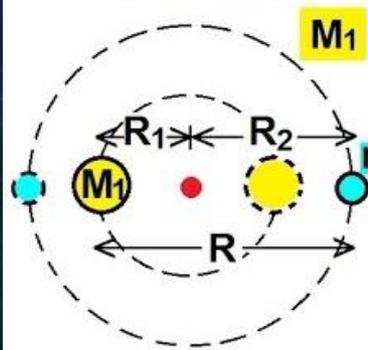
Johannes Kepler
1571-1630

Question de masse

➤ On peut mesurer la masse des étoiles dans les systèmes binaires :



The Barycenter A General Approach



$R = R_1 + R_2$ Let $M_1 = 3 m_2$

$$R_1 = \text{CM} = \frac{\sum m d}{\sum m} = \frac{M_1(0) + m_2(R_1 + R_2)}{M_1 + m_2}$$

$$M_1 = m_2 \frac{R_1}{R_2}$$

$$\frac{M_1}{m_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{3}{1} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$T_1 = T_2$$

$$(2\pi) \frac{R_1}{V_1} = \frac{R_2}{V_2} (2\pi)$$

Johannes Kepler
1571-1630

Question de masse

- On peut mesurer la masse des étoiles dans les systèmes binaires :
 - Et comme on peut connaître le type spectral des étoiles du couple stellaire.
 - On peut faire une corrélation entre le type spectral et la masse de l'étoile.
 - On constate que pour un type spectral donné, **les masses sont semblables.**

Johannes Kepler
1571-1630

Question de masse

Masse à la naissance

Masse initiale (Soleil = 1)	70 à 10	10 à 3	3 à 1	1 à 0,08		
Couleur	bleu	blanc	jaune	orange		
Température de surface	+ de 25000	10000	7500	6000	5000	3500
Classe spectrale						
Catégorie	Supergéante bleue	Géante blanche	Naine jaune	Naine rouge		

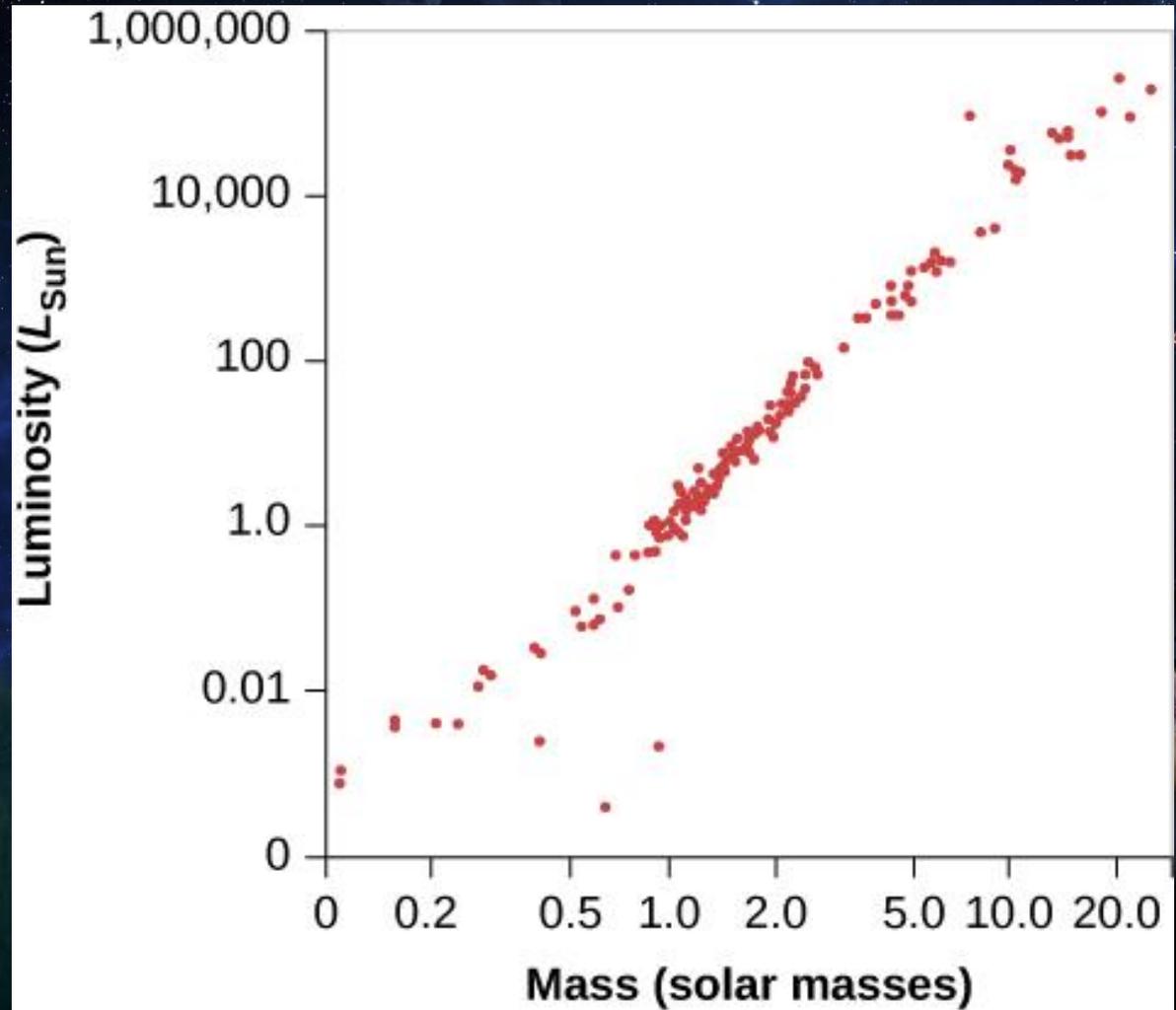
Johannes Kepler
1571-1630

M

Question de masse



Johannes Kepler
1571-1630



Question de masse

Classe spectrale	Température de surface (en °K)	Masse M_{\odot}	Rayon R_{\odot}	Luminosité L_{\odot}
O5 Alnitak	40 000	32	18	600 000
B0 Alnilam	28 000	16	7.4	16 000
A0 Véga	9 900	3.2	2.5	60
F0 Procyon A	7 400	1.75	1.4	6
G0 Chara	6 000	1.06	1.1	1.3
K0 α Centauri B	4 900	0.80	0.8	0.4
M0	3 500	0.48	0.6	0.02

Johannes Kepler
1571-1630



MESSAGES CLÉS

- ★ La lumière est notre seule fenêtre sur le monde situé au-delà du Système solaire, si on exclut le nouveau domaine des ondes gravitationnelles encore dans ses balbutiements.
- ★ L'analyse du seul rayon de lumière qui nous arrive d'une étoile nous permet de connaître :
 - Sa température de surface (photosphère)
 - La composition chimique de son atmosphère
 - Sa classe ou catégorie
 - Sa puissance radiative ou luminosité
 - Sa taille (rayon, surface, volume)
 - Sa masse
 - Souvent sa distance (étoiles jumelles)





MESSAGES CLÉS

- ★ La classification des étoiles est fondée sur leur analyse spectrale.
- ★ Cette catégorisation est le fruit du labeur acharné et minutieux d'un groupe de femmes dévouées appelées collectivement les « calculatrices de Pickering », attachées à l'Observatoire astronomique de l'université Harvard à Cambridge, Massachusetts.
- ★ La classification originale fondée sur les lettres de l'alphabet allant de A à O a été développée par Williamina Fleming.
- ★ Puis, Annie Jump Cannon l'a peaufinée et lui a donné sa forme définitive et actuelle : OBAFGKM.





MESSAGES CLÉS

- ★ Cecilia Payne-Gaposchkin élucide le mystère de la composition des étoiles.
- ★ Elle détermine que l'analyse à première vue du spectre des étoiles permet de connaître leur température.





QUELQUES RÉFÉRENCES



★ Astronomie et Astrophysique, 2^e édition
Séguin M, Villeneuve B
Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 2002



★ Série Cosmos 2014
Neil deGrasse Tyson

- Sur : Joseph von Fraunhofer
<https://www.youtube.com/watch?v=qugjVsGdUMs&list=PLEUbJSilJ0U28U9-qEm7rFoYFZ-XFvncN&index=10>



<https://www.youtube.com/watch?v=78sk7XsvxeM&list=PLEUbJSilJ0U28U9-qEm7rFoYFZ-XFvncN&index=15>



QUELQUES RÉFÉRENCES



- ★ Série Cosmos 2014
Neil deGrasse Tyson

- Sur : les “calculatrices”

<https://www.youtube.com/watch?v=p20pOBsPp6o&list=PLEUbJSilJ0U0omtAvMT8NeX2f3oRZg2bD&index=3>

<https://www.youtube.com/watch?v=8TsUftYk5Vw&list=PLEUbJSilJ0U0omtAvMT8NeX2f3oRZg2bD&index=4>



QUELQUES RÉFÉRENCES

★ Wikipédia :

- Type spectral

https://fr.wikipedia.org/wiki/Type_spectral

- Classification spectrale

<http://wsdiscovery.free.fr/astonomie/spectro/atlas/seriebr/>

- Luminosité

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Luminosit%C3%A9>

- Les étoiles

<http://physique.unice.fr/sem6/2014-2015/PagesWeb/PT/Etoile/etoiles.php>

