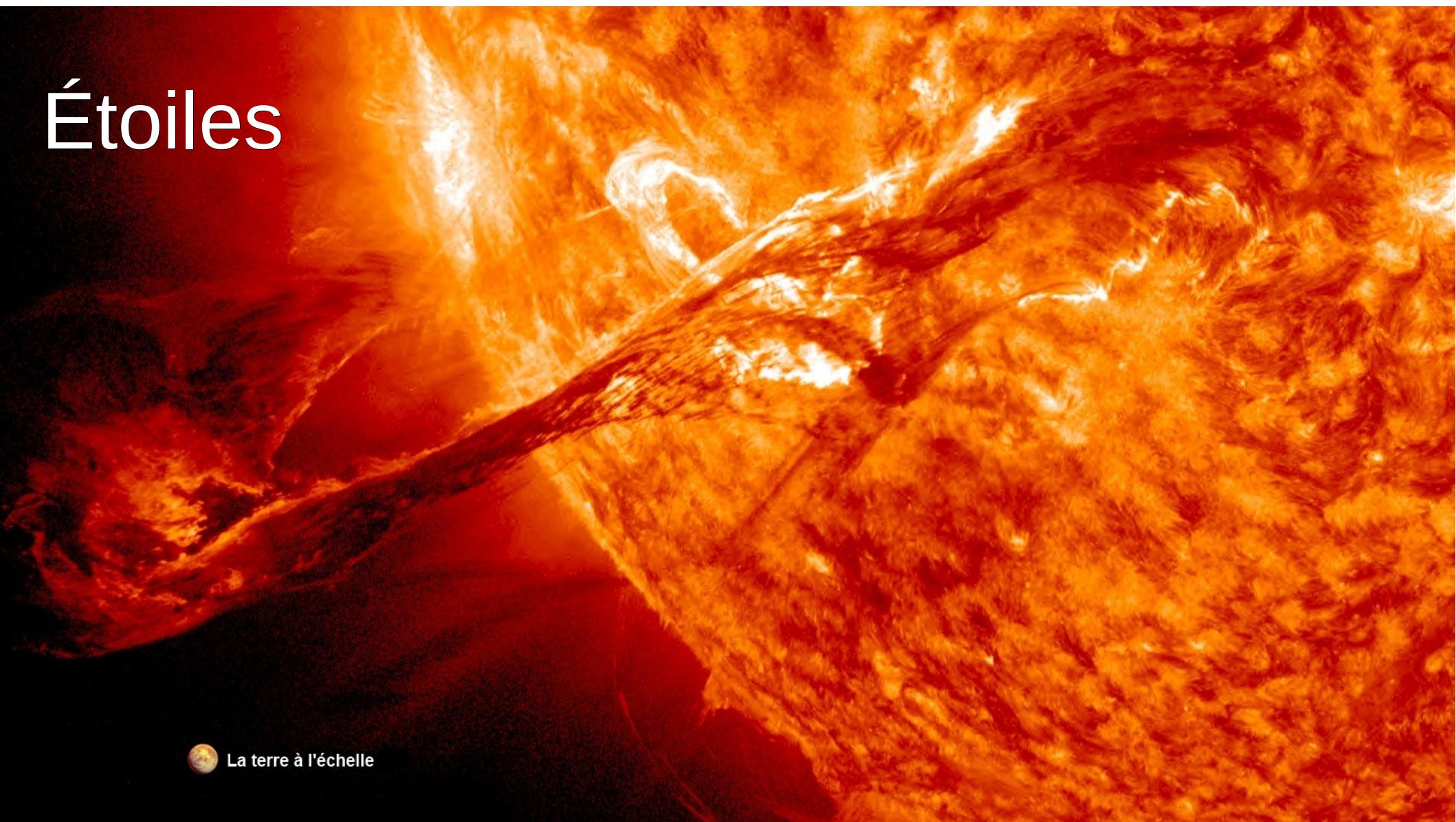


Introduction à l'astrophysique

Étoiles



La terre à l'échelle

Plan global (prévisionnel...) (6 séances)

Chapitre 1 : Introduction

- I. Vue d'ensemble
- II. Les moyens d'observation
- III. Cycle de vie des étoiles
- 1 séance (17 Mars)

Chapitre 2 : Caractérisation observationnelle des étoiles

- I. Distances
- II. Luminosité
- III. Température
- IV. Dimensions
- V. Rotation
- VI. Masses
- VII. Composition chimique
- VIII. Âges
- 2 séances (24 Mars + 31 Mars)

Chapitre 3 : Structure et stabilité des étoiles

- I. Équations fondamentales
- II. Comment résister à l'effondrement gravitationnel
- III. Nucléosynthèse
- 2 séances (7 Avril + 14 Avril)

Contrôle

- 1 séance (5 Mai)

1 séance = 1h20

Introduction

I. Vue d'ensemble

- I.1 Contexte général
- I.2 Ordres de grandeurs

II. Observables et moyens d'observation

- II.1 Télescopes
- II.2 CCD
- II.3 Spectrographes
- II.4 Photométrie
- II.5 Interféromètres

III. Cycle de vie des étoiles

- III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie
- III.2 Naissance des étoiles
- III.3 Évolution
- III.4 Mort

I. Vue d'ensemble

I.1 Contexte général

I.2 Ordres de grandeurs

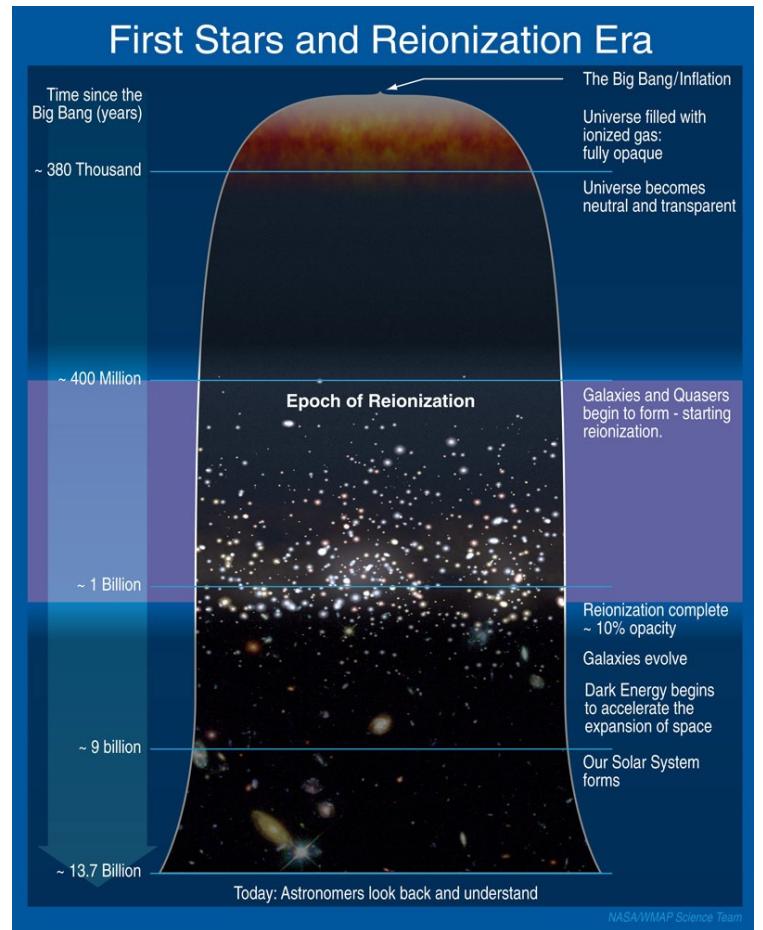
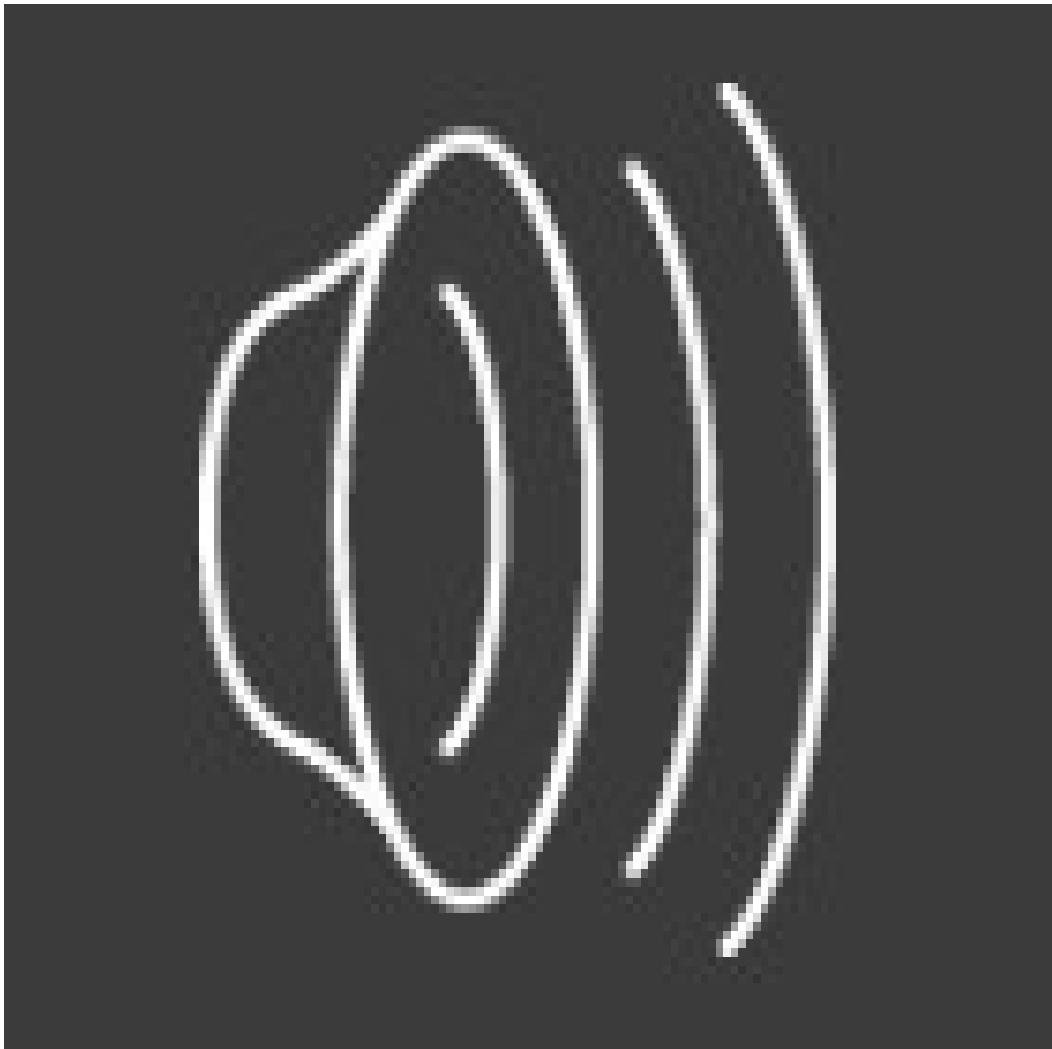
II. Observables et moyens d'observation

III. Cycle de vie des étoiles

I. Vue d'ensemble

I.1 Contexte général

Étoiles = une brique élémentaire dans les structures de l'Univers

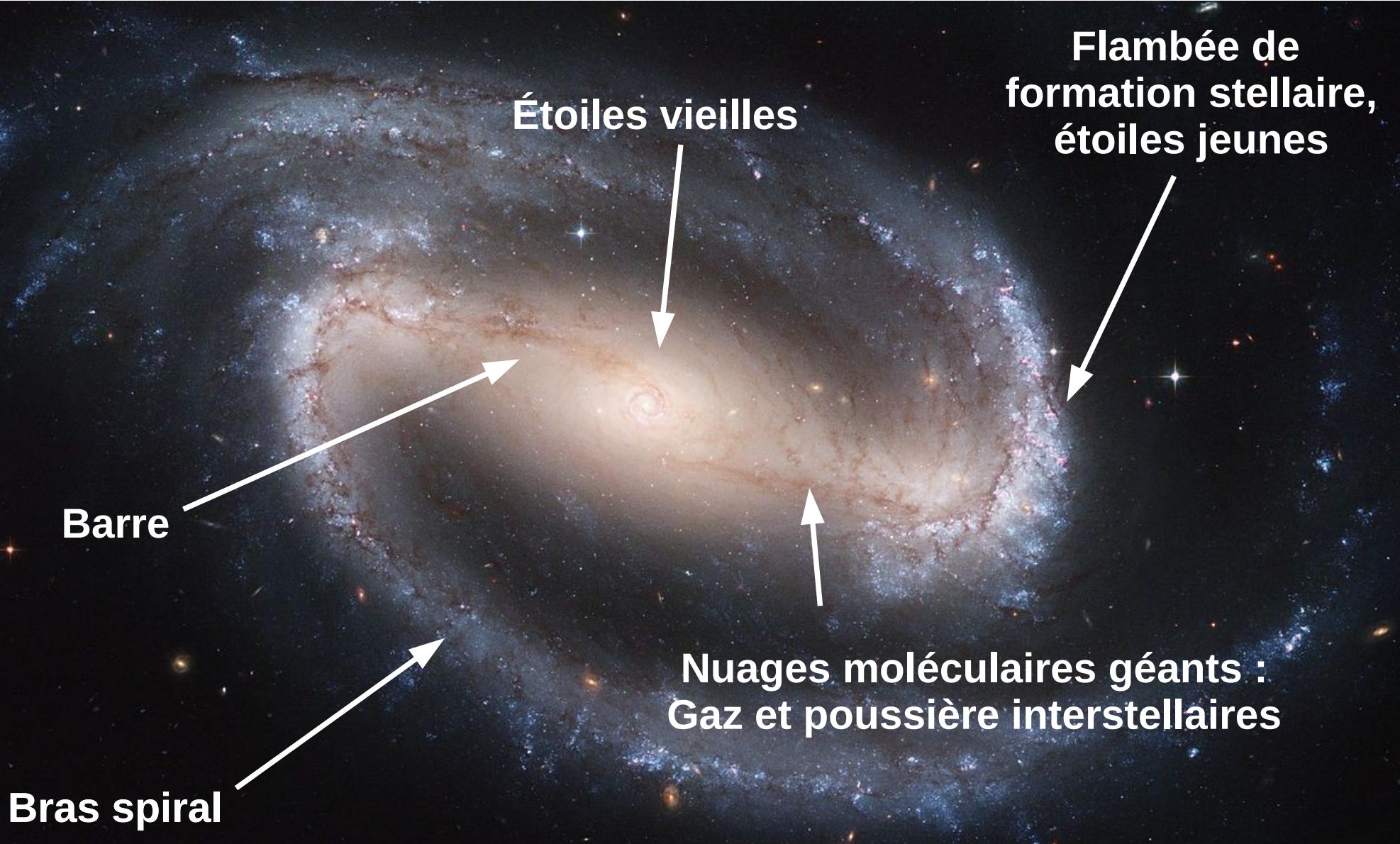


N.B. $t[\text{Myr}] = 10748 * [\text{arcsinh}(1.6443) - \text{arcsinh}(1.6443 (1+z)^{-3/2})]$

<http://www.math.kth.se/~lang/distance.htm>

I. Vue d'ensemble

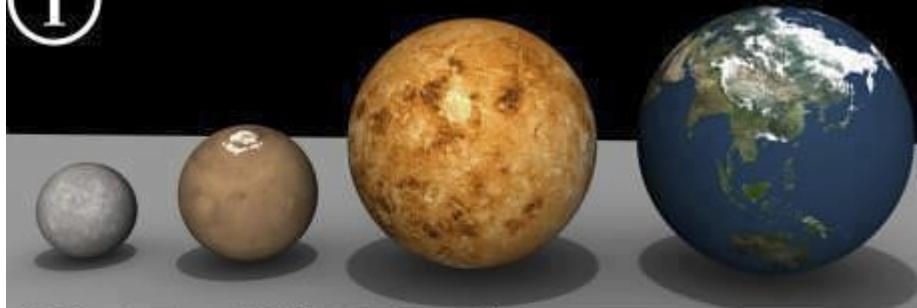
I.1 Contexte général



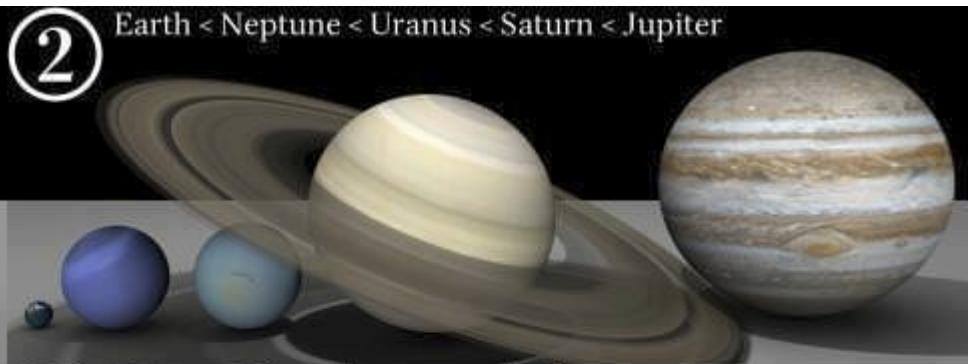
I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

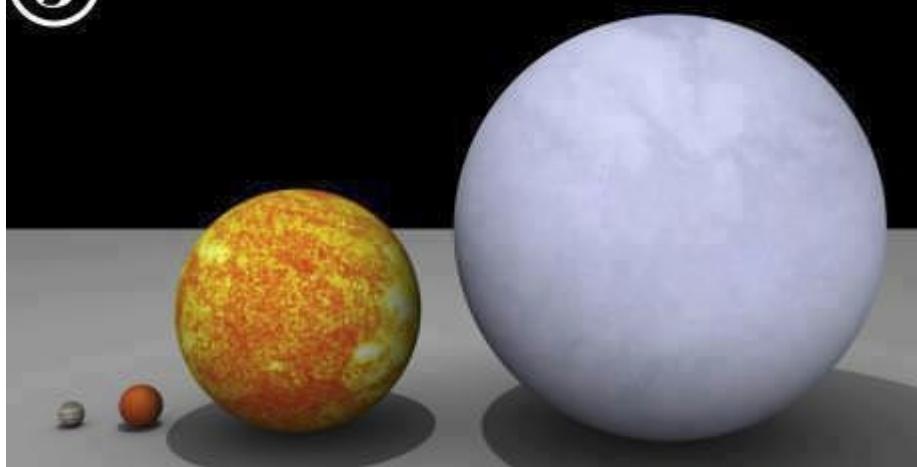
① Mercury < Mars < Venus < Earth



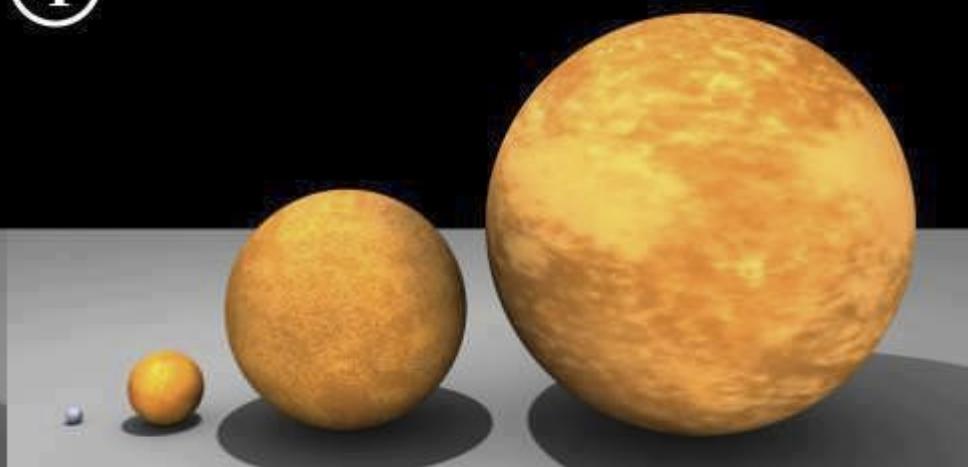
② Earth < Neptune < Uranus < Saturn < Jupiter



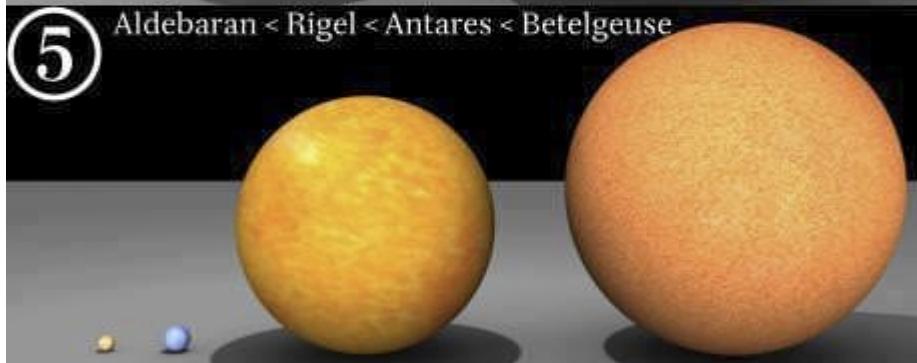
③ Jupiter < Wolf 359 < Sun < Sirius



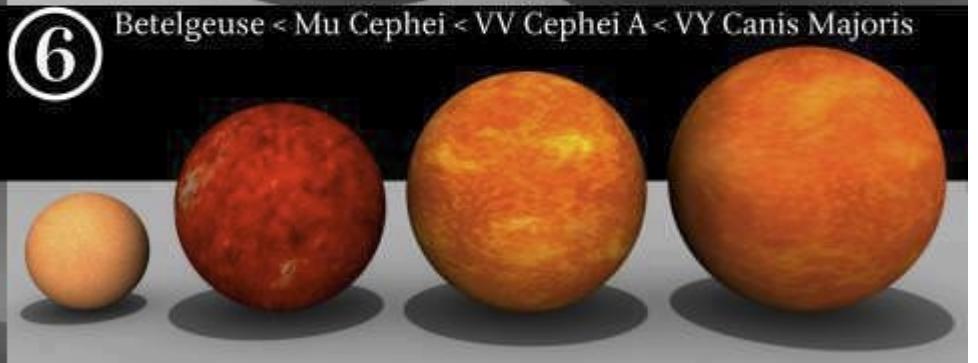
④ Sirius < Pollux < Arcturus < Aldebaran



⑤ Aldebaran < Rigel < Antares < Betelgeuse



⑥ Betelgeuse < Mu Cephei < VV Cephei A < VY Canis Majoris



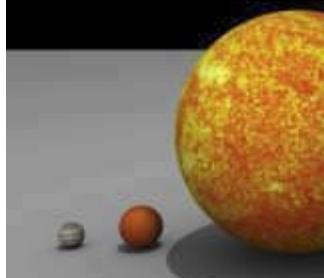
I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

1 Mercury < Mars < Venus < Earth



3 Jupiter < Wolf 359



5 Aldebaran < Rigel



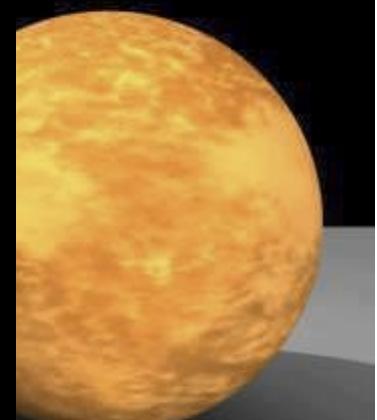
2 Earth < Neptune < Uranus < Saturn < Jupiter



Earth < Neptune < Uranus < Saturn < Jupiter



in



in A < VY Canis Majoris



Soleil

I.2 Ordres de grandeurs

Naines brunes : $M = 0.01 M_{\text{sun}} (\sim 10 M_J) \rightarrow 0.07 M_{\text{sun}}$ (pas de réaction nucléaire)

Naines rouges : $M = 0.07 M_{\text{sun}} \rightarrow 0.4 M_{\text{sun}}$ – $T_{\text{eff}} < 4000 \text{ K}$

...

Supergéantes : $M > \sim 10$ – toutes T_{eff} , tous rayons (ou presque)

I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

Main-Sequence Stars (Luminosity Class V)

| Spectral Type | T_e (K) | L/L_sun | R/R_sun | M/M_sun | M_bol | BC | M_V | U-B | B-V |
|---------------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|
| O5 | 42000 | 499000 | 13.4 | 60 | -9.51 | -4.40 | -5.1 | -1.19 | -0.33 |
| O8 | 35800 | 147000 | 10.0 | 23 | -8.18 | -3.54 | -4.6 | -1.14 | -0.32 |
| B0 | 30000 | 32500 | 6.7 | 17.5 | -6.54 | -3.16 | -3.4 | -1.08 | -0.30 |
| B2 | 20900 | 2920 | 4.1 | | -3.92 | -2.35 | -1.6 | -0.84 | -0.24 |
| B5 | 15200 | 480 | 3.2 | 5.9 | -1.96 | -1.46 | -0.5 | -0.58 | -0.17 |
| B9 | 10500 | 60.7 | 2.3 | | +0.28 | -0.51 | +0.8 | -0.20 | -0.07 |
| A0 | 9800 | 39.4 | 2.2 | 2.9 | +0.75 | -0.30 | +1.1 | -0.02 | -0.02 |
| A2 | 9020 | 23.6 | 2.0 | | +1.31 | -0.20 | +1.5 | +0.05 | +0.05 |
| A8 | 7600 | 7.13 | 1.5 | | +2.61 | -0.10 | +2.7 | +0.09 | +0.25 |
| F0 | 7300 | 5.21 | 1.4 | 1.6 | +2.95 | -0.09 | +3.0 | +0.03 | +0.30 |
| F8 | 6250 | 1.68 | 1.1 | | +4.18 | -0.16 | +4.3 | +0.02 | +0.52 |
| G0 | 5940 | 1.25 | 1.06 | 1.05 | +4.50 | -0.18 | +4.7 | +0.06 | +0.58 |
| G2 | 5790 | 1.07 | 1.03 | | +4.66 | -0.20 | +4.9 | +0.12 | +0.63 |
| Sun | 5777 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | +4.74 | -0.08 | +4.82 | +0.195 | +0.650 |
| G8 | 5310 | 0.656 | 0.96 | | +5.20 | -0.40 | +5.6 | +0.30 | +0.74 |
| K0 | 5150 | 0.552 | 0.93 | 0.79 | +5.39 | -0.31 | +5.7 | +0.45 | +0.81 |
| K7 | 4150 | 0.145 | 0.74 | | +6.84 | -1.01 | +7.8 | +1.21 | +1.33 |
| M0 | 3840 | 0.077 | 0.63 | 0.51 | +7.52 | -1.38 | +8.9 | +1.22 | +1.40 |
| M7 | 2860 | 0.0025 | 0.20 | | +11.3 | -3.46 | +14.7 | +1.40 | +1.80 |

Giant Stars (Luminosity Class III)

| Spectral Type | T_e (K) | L/L_sun | R/R_sun | M/M_sun | M_bol | BC | M_V | U-B | B-V |
|---------------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|------|-------|-------|
| O5 | 39400 | 741000 | 18.5 | | -9.94 | -4.05 | -5.9 | -1.18 | -0.32 |
| O8 | 35000 | 277000 | 14.3 | | -8.87 | -3.39 | -5.5 | -1.13 | -0.31 |
| B0 | 29200 | 84700 | 11.4 | 20 | -7.58 | -2.88 | -4.7 | -1.08 | -0.29 |
| B5 | 15100 | 2080 | 6.7 | 7 | -3.56 | -1.30 | -2.3 | -0.58 | -0.17 |
| B9 | 10900 | 263 | 4.5 | | -1.31 | -0.71 | -0.6 | -0.20 | -0.07 |
| A0 | 10200 | 169 | 4.1 | 4 | -0.83 | -0.42 | -0.4 | -0.07 | -0.03 |
| A2 | 9460 | 100 | 3.7 | | -0.26 | -0.20 | -0.1 | +0.06 | +0.05 |
| A8 | 7830 | 33 | 3.1 | | +0.95 | -0.10 | +1.0 | +0.10 | +0.25 |
| F0 | 7400 | 27 | 3.2 | | +1.17 | -0.11 | +1.3 | +0.08 | +0.30 |
| F5 | 6410 | 22 | 3.8 | | +1.37 | -0.14 | +1.5 | +0.09 | +0.43 |
| G0 | 5470 | 29 | 6.0 | 1.0 | +1.10 | -0.20 | +1.3 | +0.21 | +0.65 |
| G2 | 5300 | 31 | 6.7 | | +1.00 | -0.27 | +1.3 | +0.39 | +0.77 |
| G8 | 4800 | 44 | 9.6 | | +0.63 | -0.42 | +1.0 | +0.70 | +0.94 |
| K0 | 4660 | 50 | 10.9 | 1.1 | +0.48 | -0.50 | +1.0 | +0.84 | +1.00 |
| K7 | 3870 | 154 | 27.6 | | -0.73 | -1.17 | +0.4 | +1.83 | +1.53 |
| M0 | 3690 | 256 | 39.3 | 1.2 | -1.28 | -1.25 | +0.0 | +1.87 | +1.56 |
| M6 | 3330 | 1470 | 116 | | -3.18 | -2.73 | -0.4 | +1.16 | +1.52 |

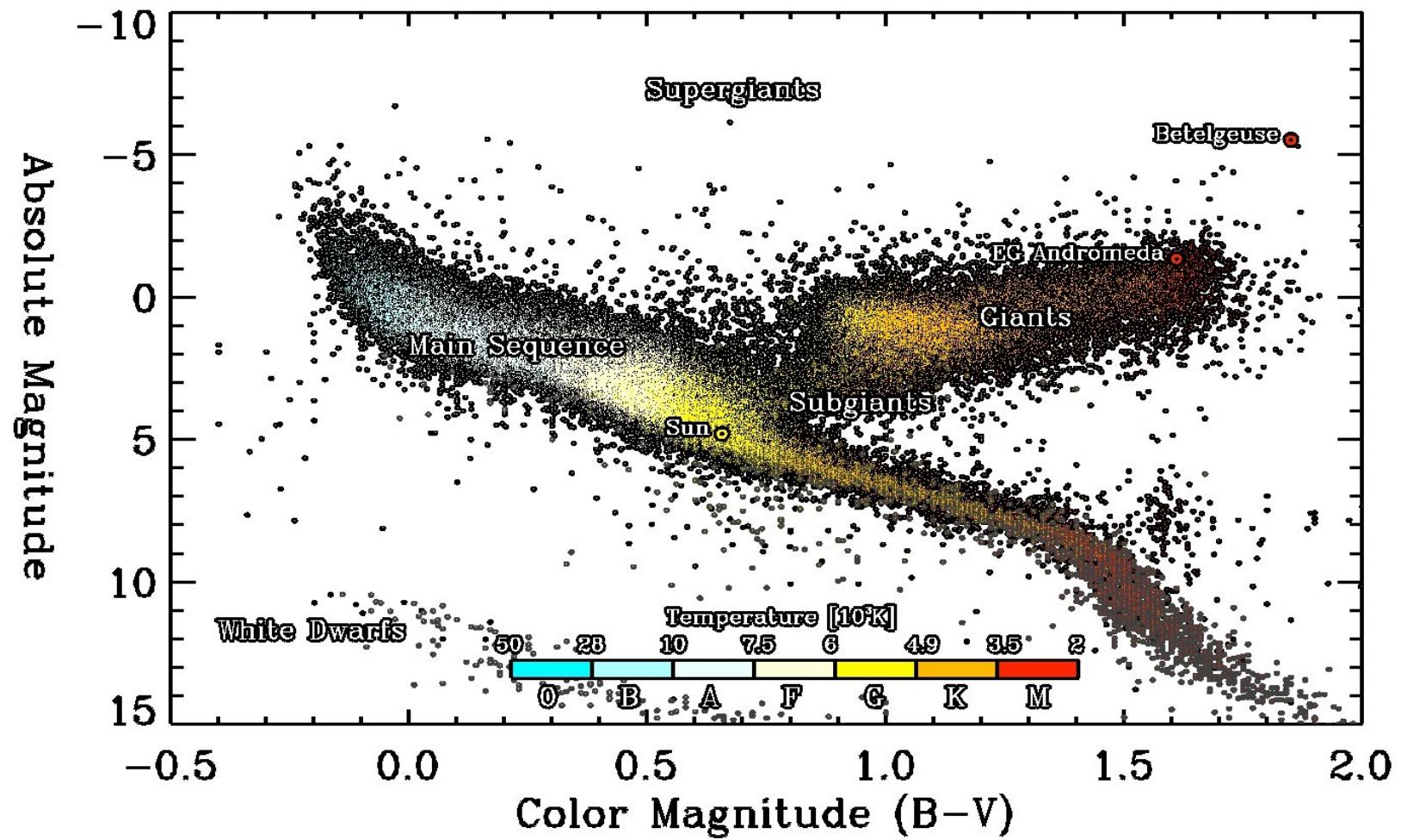
I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

Supergiant Stars (Luminosity Class Approximately Iab)

| Spectral Type | T_e (K) | L/L_sun | R/R_sun | M/M_sun | M_bol | BC | M_V | U-B | B-V |
|---------------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|------|-------|-------|
| O5 | 40900 | 1140000 | 21.2 | 70 | -10.40 | -3.87 | -6.5 | -1.17 | -0.31 |
| O8 | 34000 | 769000 | 25.3 | 28 | -9.98 | -3.35 | -6.6 | -1.13 | -0.29 |
| B0 | 26200 | 429000 | 31.7 | 25 | -9.34 | -2.49 | -6.9 | -1.06 | -0.23 |
| B5 | 13600 | 79100 | 51.1 | 20 | -7.51 | -0.95 | -6.6 | -0.72 | -0.10 |
| B9 | 10500 | 41600 | 61.8 | | -6.81 | -0.52 | -6.3 | -0.50 | -0.02 |
| A0 | 9980 | 37500 | 64.9 | 16 | -6.70 | -0.41 | -6.3 | -0.38 | -0.01 |
| A2 | 9380 | 33700 | 69.7 | | -6.58 | -0.28 | -6.3 | -0.25 | +0.03 |
| A8 | 7910 | 29100 | 91.1 | | -6.42 | -0.03 | -6.4 | +0.11 | +0.14 |
| F0 | 7460 | 28800 | 102 | 12 | -6.41 | -0.01 | -6.4 | +0.15 | +0.17 |
| F5 | 6370 | 29100 | 140 | 10 | -6.42 | -0.03 | -6.4 | +0.27 | +0.32 |
| G0 | 5370 | 30300 | 202 | 10 | -6.47 | -0.15 | -6.3 | +0.52 | +0.76 |
| G2 | 5190 | 30800 | 218 | | -6.48 | -0.21 | -6.3 | +0.63 | +0.87 |
| G8 | 4700 | 32400 | 272 | | -6.54 | -0.42 | -6.1 | +1.07 | +1.15 |
| K0 | 4550 | 33100 | 293 | 13 | -6.56 | -0.50 | -6.1 | +1.17 | +1.24 |
| K5 | 3990 | 39200 | 415 | 13 | -6.74 | -1.01 | -5.7 | +1.80 | +1.60 |
| M0 | 3620 | 51900 | 579 | 13 | -7.05 | -1.29 | -5.8 | +1.90 | +1.67 |
| M2 | 3370 | 72100 | 791 | 19 | -7.41 | -1.62 | -5.8 | +1.95 | +1.71 |
| M5 | 2880 | 165000 | 1640 | 24 | -8.31 | -3.47 | -4.8 | +1.60 | +1.80 |

1913 – Hertzsprung et Russel



Paul A. Higgins (Astrophysics Research Group / Trinity College Dublin)



II. Observables et moyens d'observation

I. Vue d'ensemble

II. Observables et moyens d'observation

II.1 Télescopes

II.2 CCD

II.3 Spectroscopie

II.4 Photométrie

II.5 Interférométrie

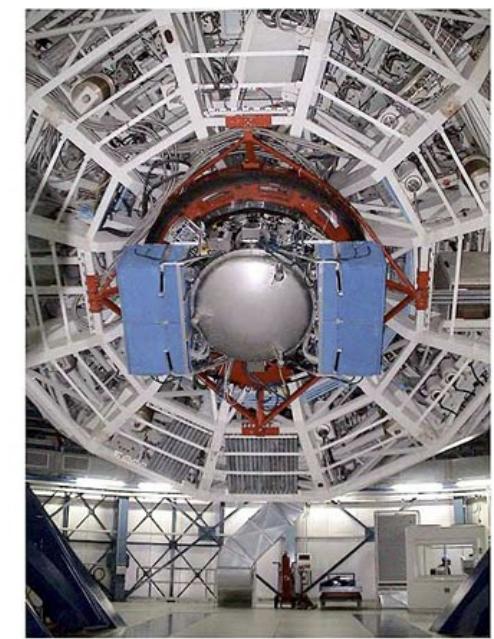
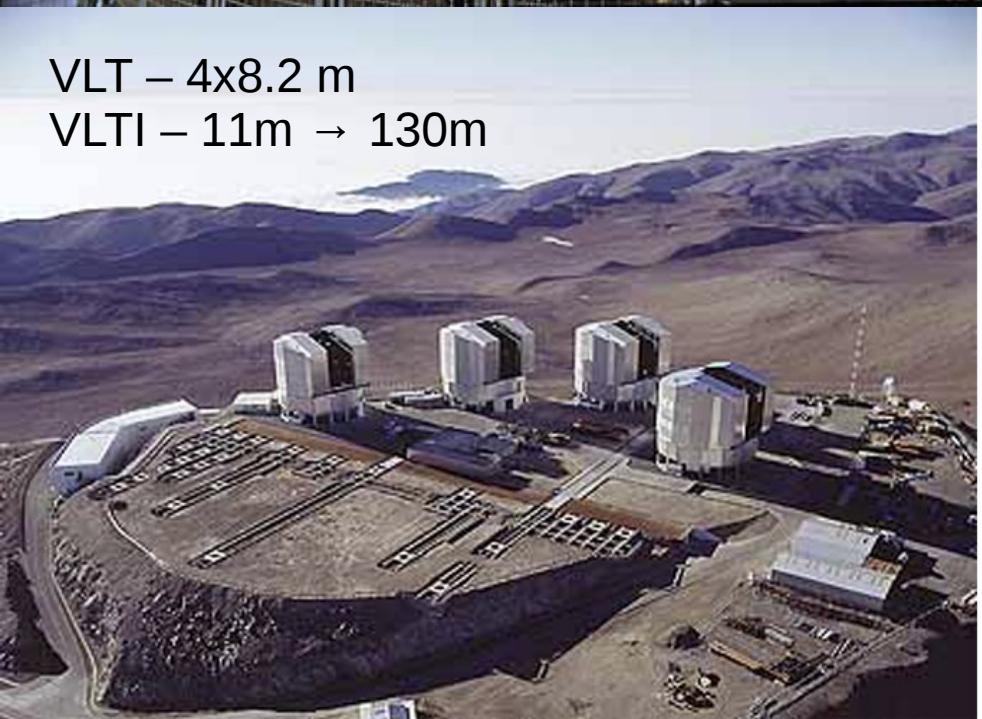
III. Les noyaux actifs de galaxies

IV. Dynamique des galaxies

V. Conclusions

II. Observables et moyens d'observation

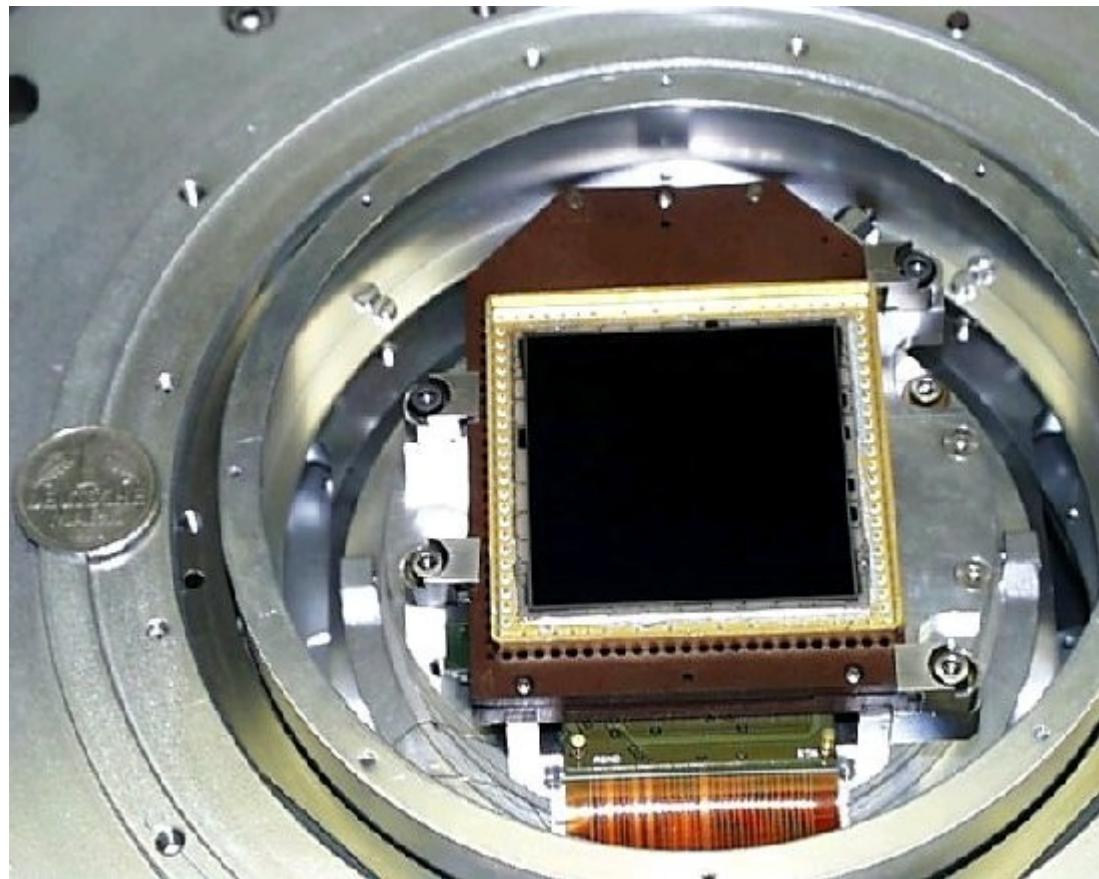
II.1 Télescopes



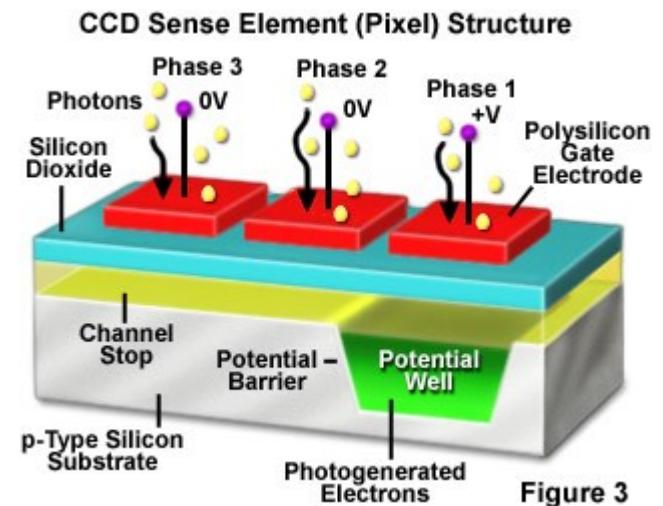
VISIR Mounted behind the 8.2-m Mirror of Melipal

II. Observables et moyens d'observation

II.2 CCD

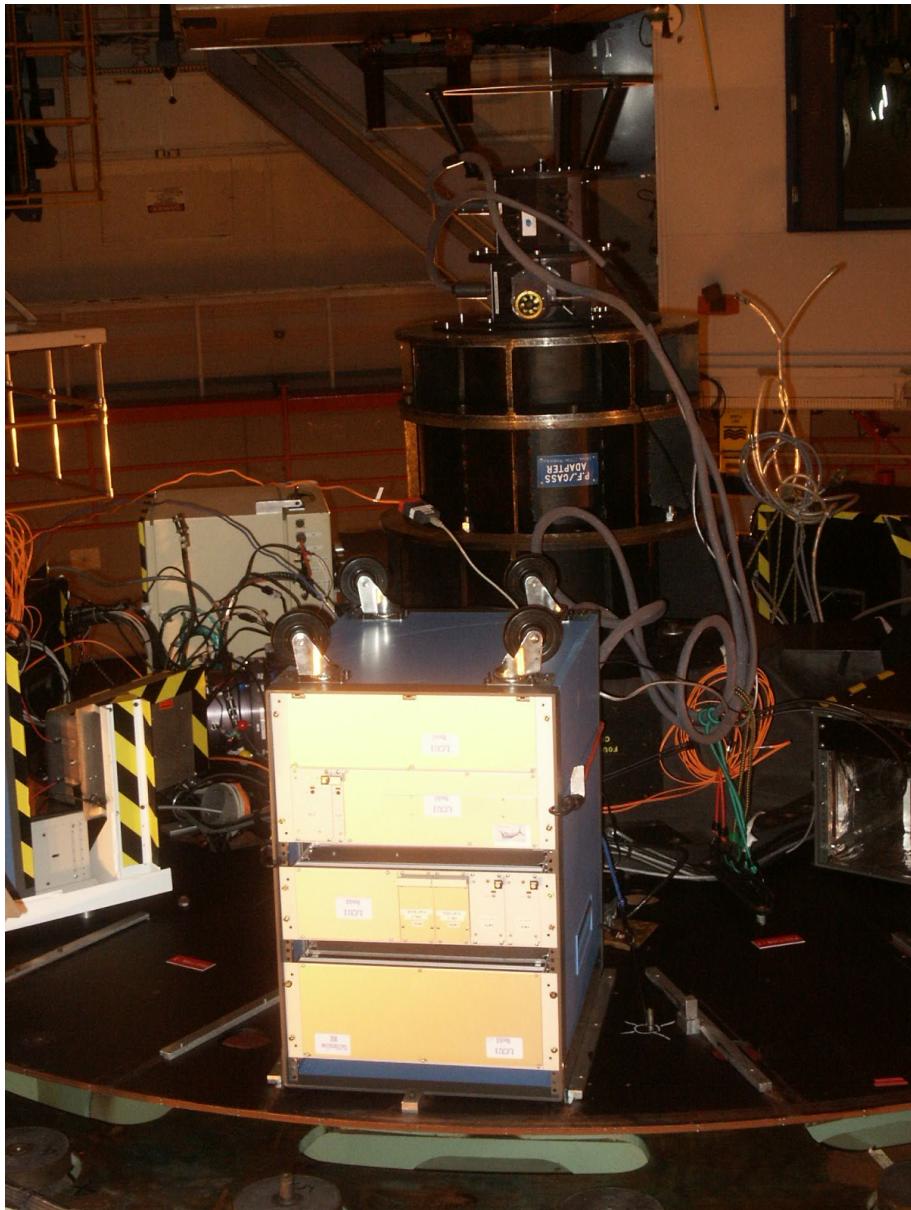


FORS1 / VLT

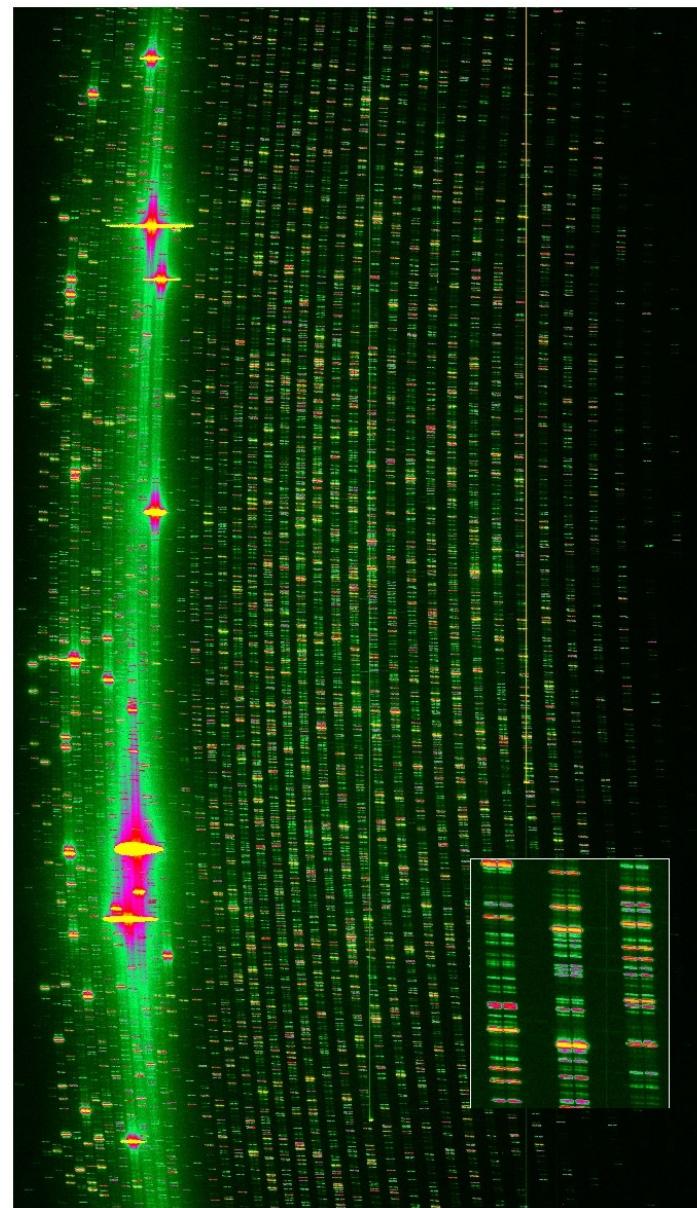


II. Observables et moyens d'observation

II.3 Spectroscopie

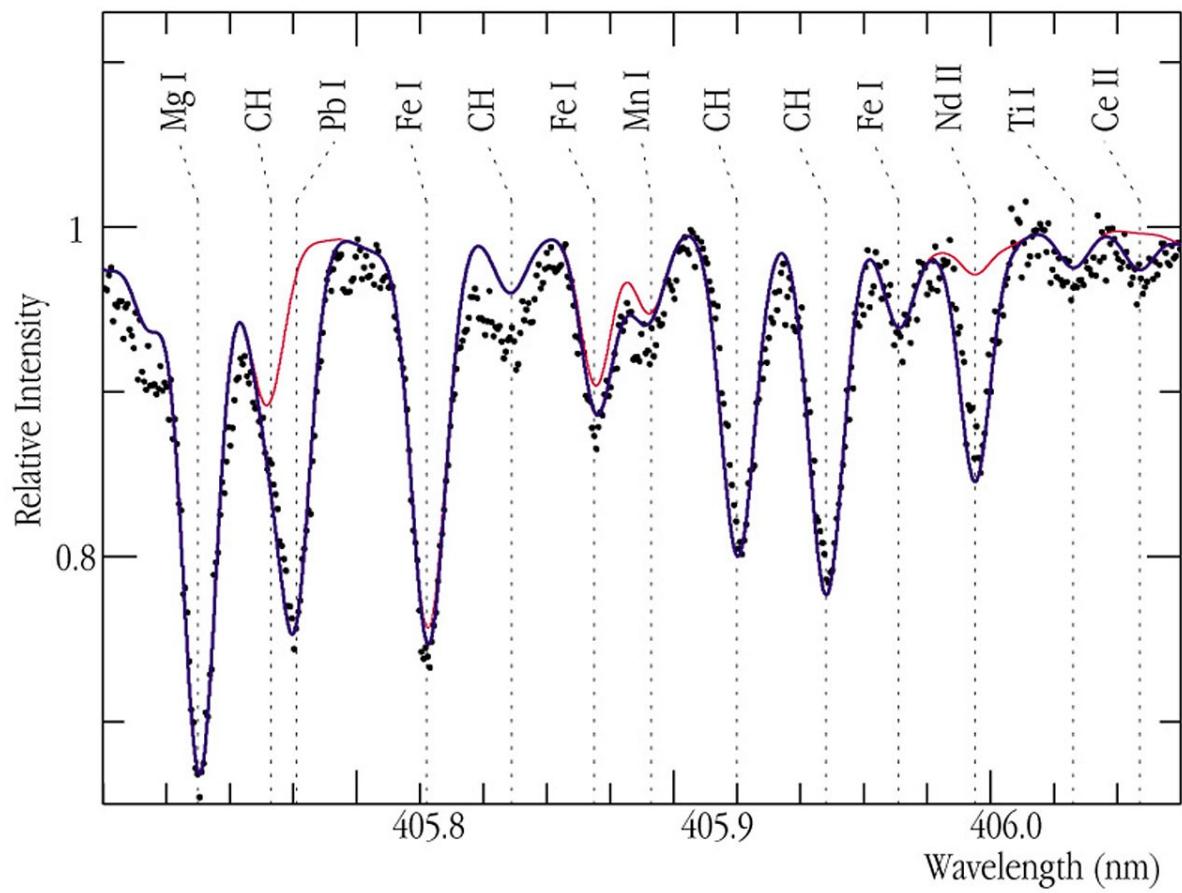
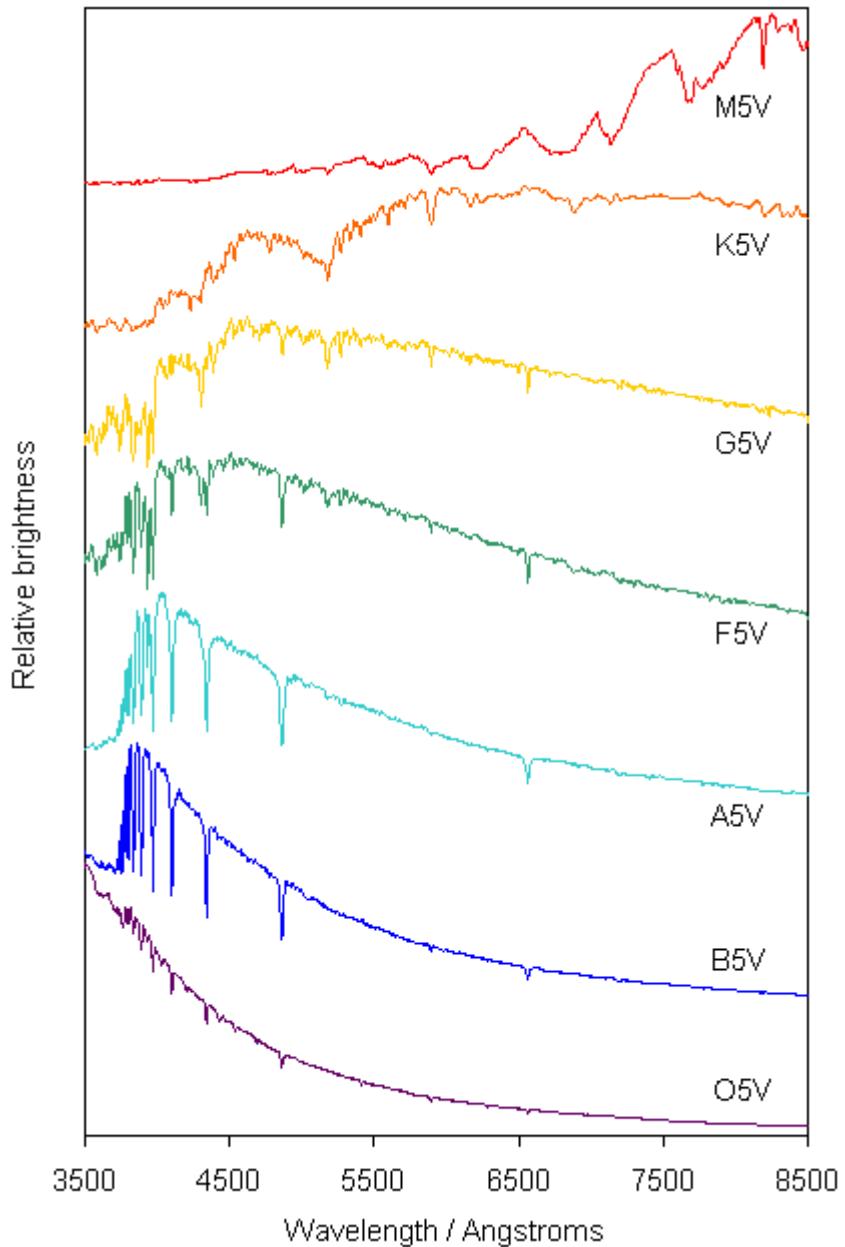


ESPaDOnS: an Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars at CFHT



II. Observables et moyens d'observation

II.3 Spectroscopie

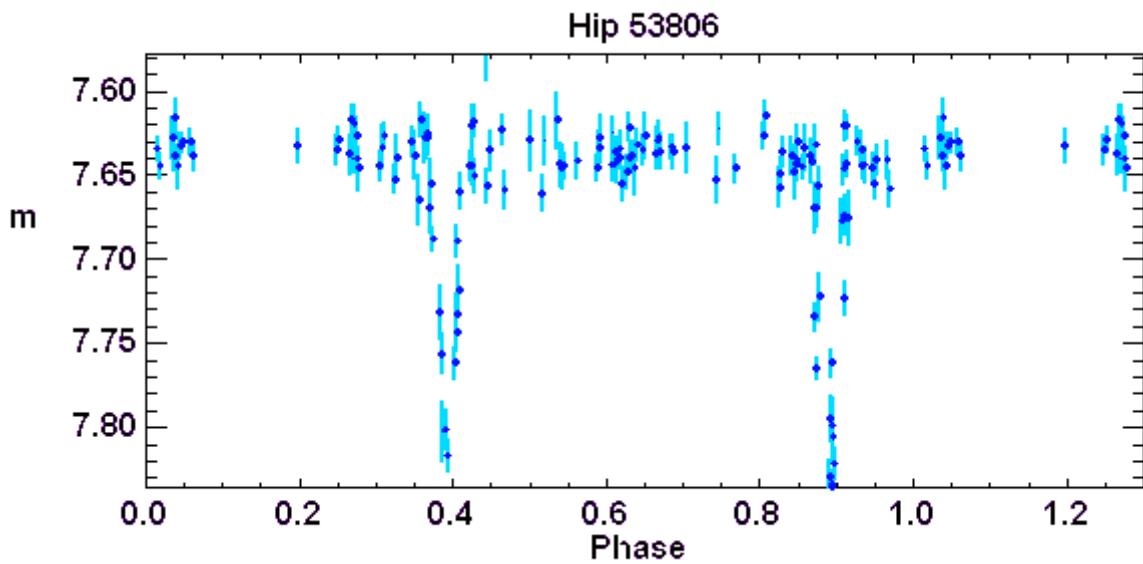


- type spectral, composition chimique, vitesse radiale, ...
- contraintes modèles d'atmosphère stellaire
=> structure, gravité, rotation, ...

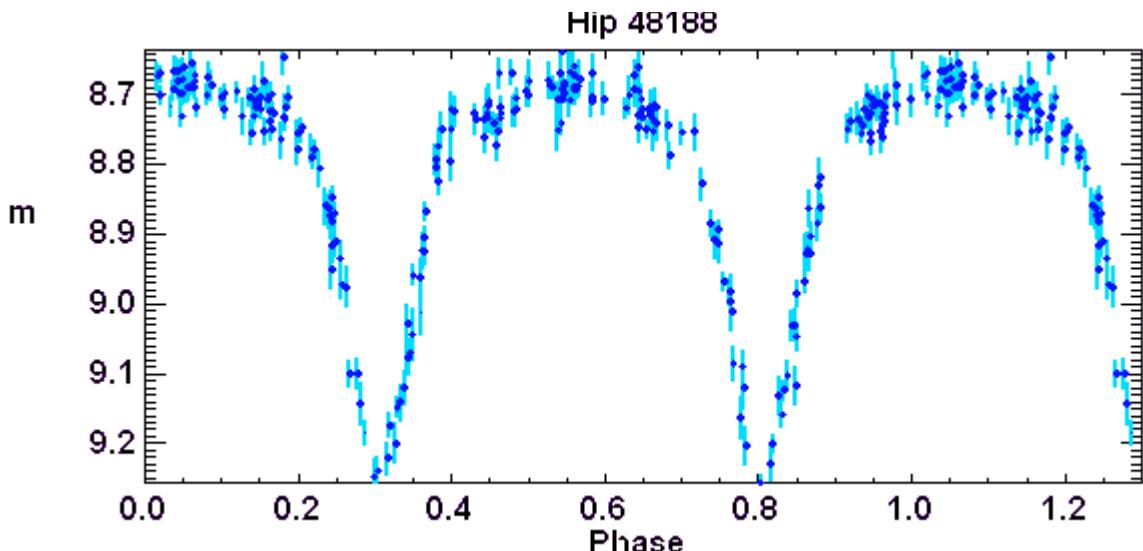
II. Observables et moyens d'observation

II.4 Photométrie

Courbe de lumière (=évolution temporelle de la luminosité)



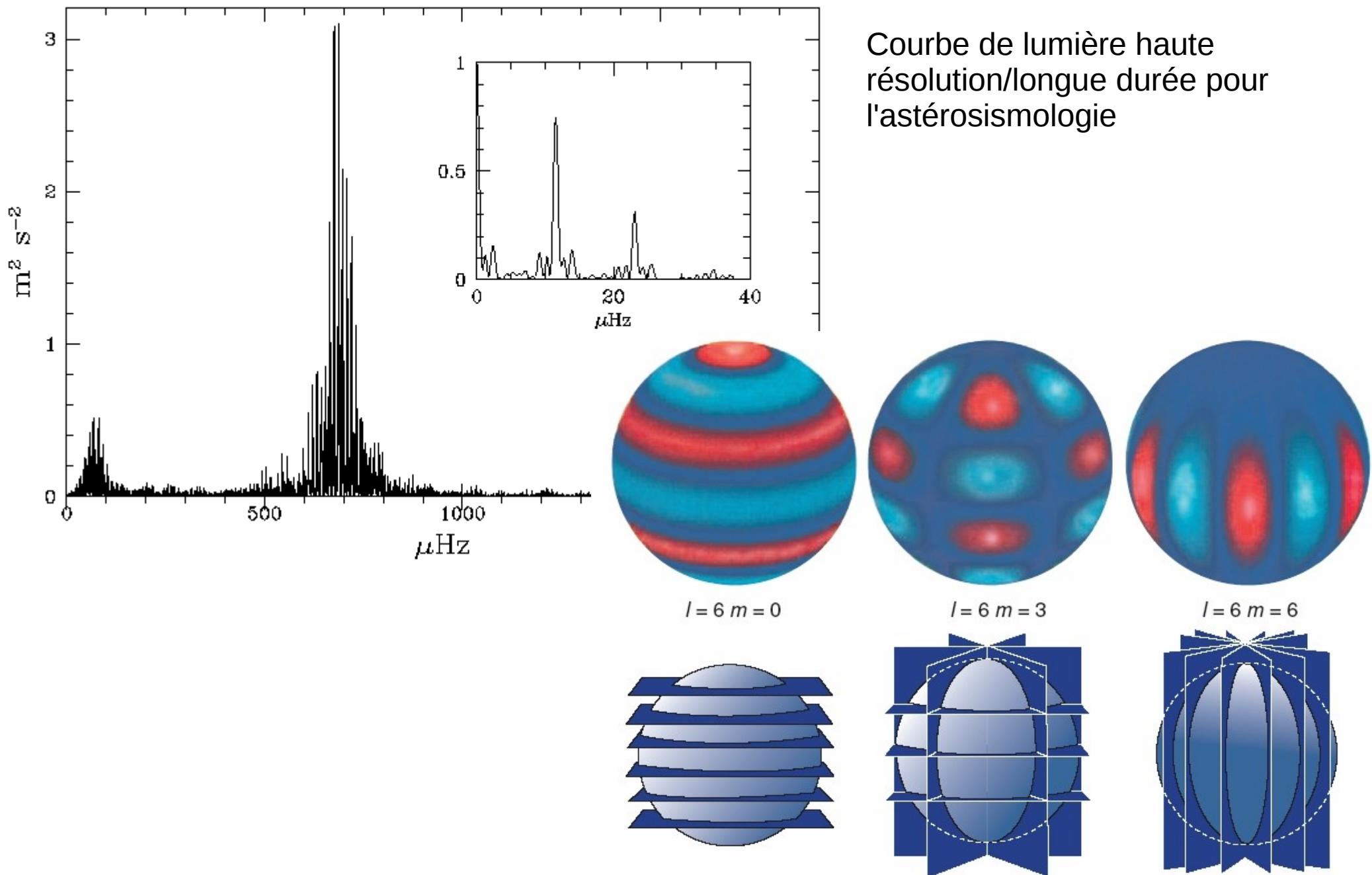
Courbe de lumière d'une binaire à éclipse de type Algol. Observations du satellite européen Hipparcos



Courbe de lumière d'une étoile de type Beta Lyrae. Observations du satellite européen Hipparcos

II. Observables et moyens d'observation

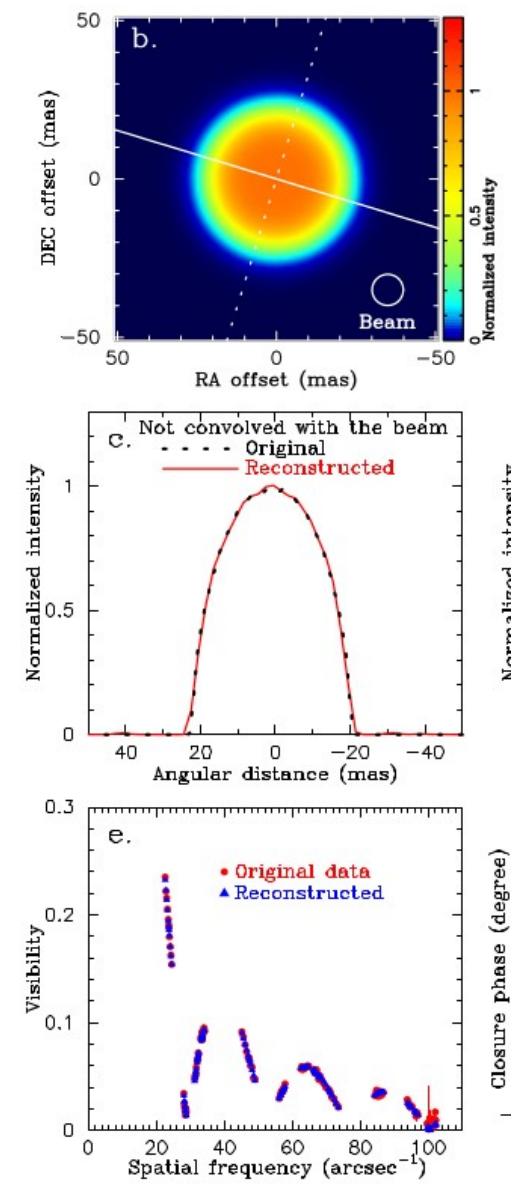
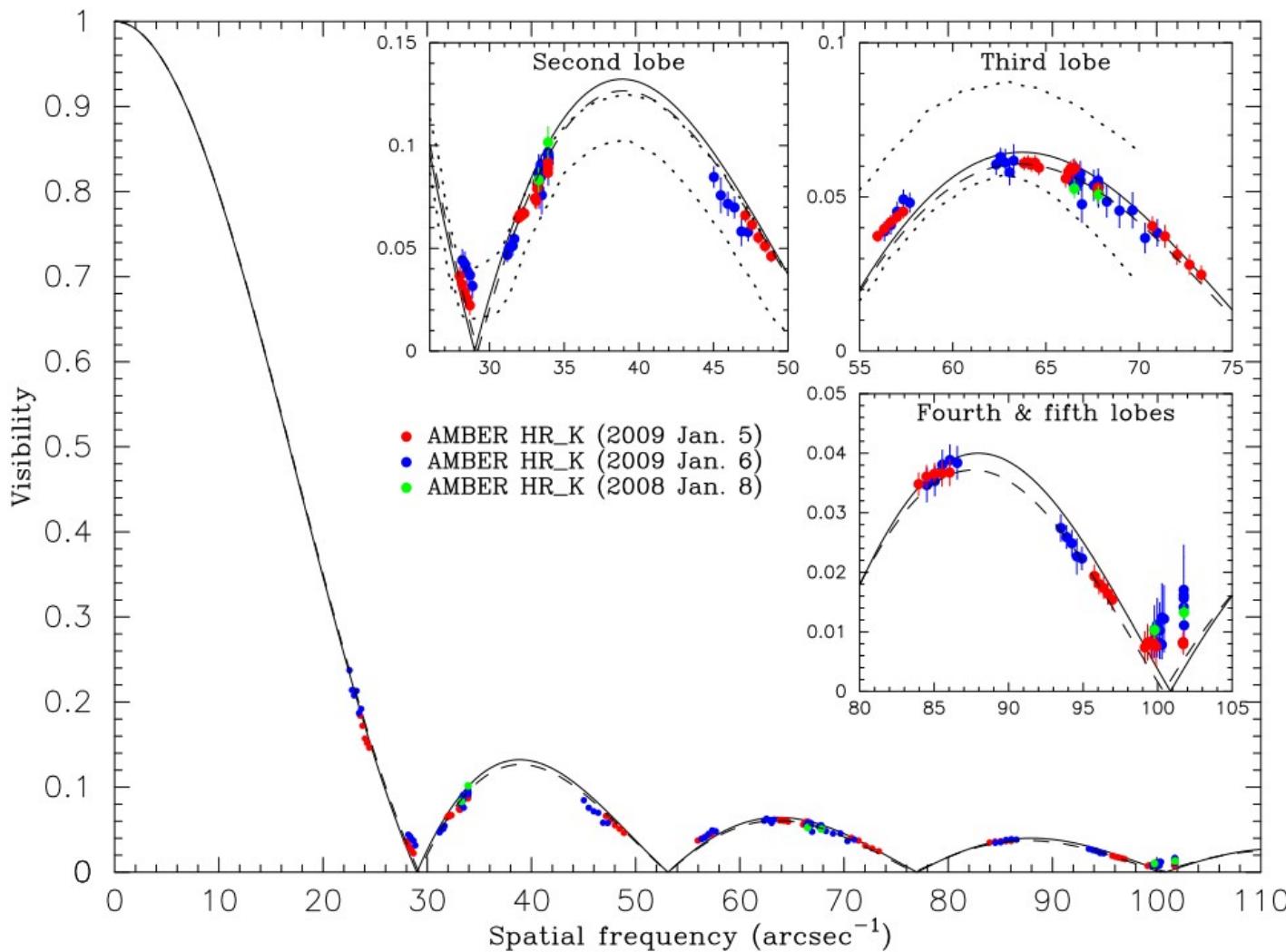
II.4 Photométrie

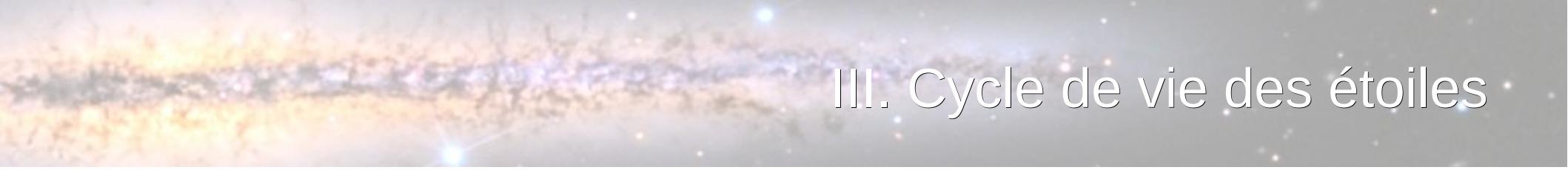


II. Observables et moyens d'observation

II.5 Interférométrie

Interférométrie : Visibilité des franges d'interférence





III. Cycle de vie des étoiles

I. Vue d'ensemble

II. Observables et moyens d'observation

III. Cycle de vie des étoiles

III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie

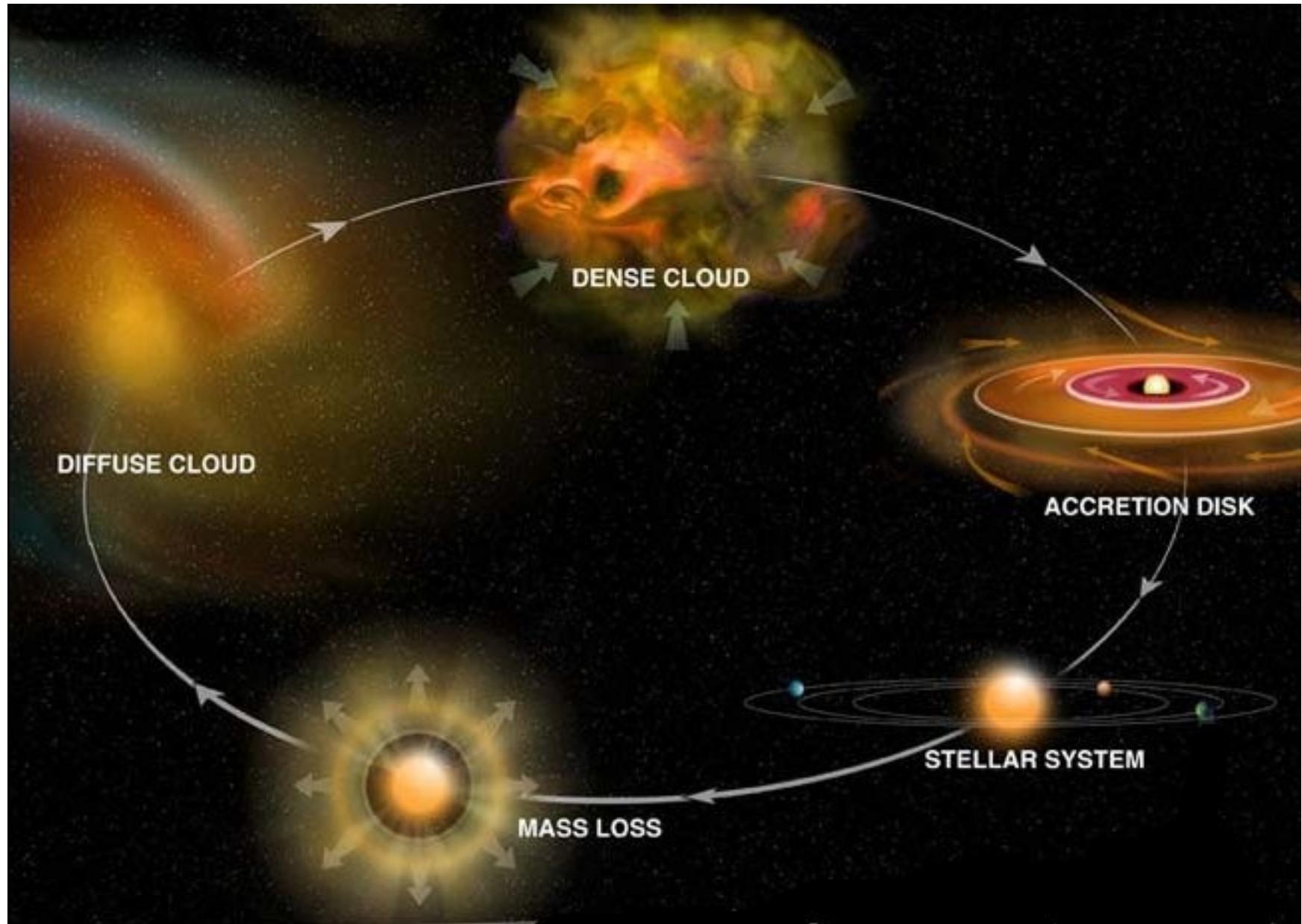
III.2 Naissance

III.3 Évolution

III.4 Mort

III. Cycle de vie des étoiles

III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie



III. Cycle de vie des étoiles

III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie

Formation d'Hélium au cœur des étoiles sur la séquence principale : <http://www.cosmovisions.com/nusy.htm>

Cycle proton-proton

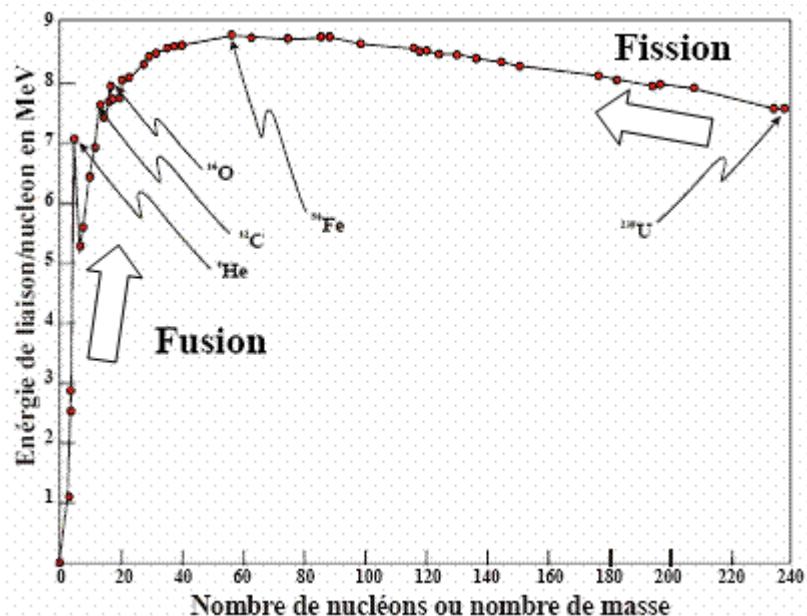
Cycle CNO (cycle catalytique)

Formation des éléments au cœur des étoiles évoluées :

| X consommé | T [K] | Étoile 0.3 Msun | Étoile 1 Msun | Étoile 25 Msun |
|------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| H | 4 – 15 – 40 e6 | ~800 Gyr | 10-12 Gyr | 7 Myr |
| He | 1e8 | - | ~200 Myr | 500000 ans |
| C | 1e9 | - | - | 200 ans |
| Ne | 1.2e9 | - | - | 1 an |
| O | 2e9 | - | - | 5 mois |
| Si | 3e9 | - | - | ~ 1jour |

III. Cycle de vie des étoiles

III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie



Fe = max de stabilité \Rightarrow pas de fusion au-delà
 \Rightarrow explosion en SN II
 \Rightarrow bombardement intense de neutron
 \Rightarrow nucléosynthèse explosive
 \Rightarrow libération de tous les éléments dans le MIS

SNII : forte proportion en éléments alpha

Temps caractéristiques \sim qq Myr



Artist's rendition of a white dwarf accumulating mass from a nearby companion star. This type of progenitor system would be considered singly-degenerate.

Image courtesy of David A. Hardy, © David A. Hardy/www.astroart.org.

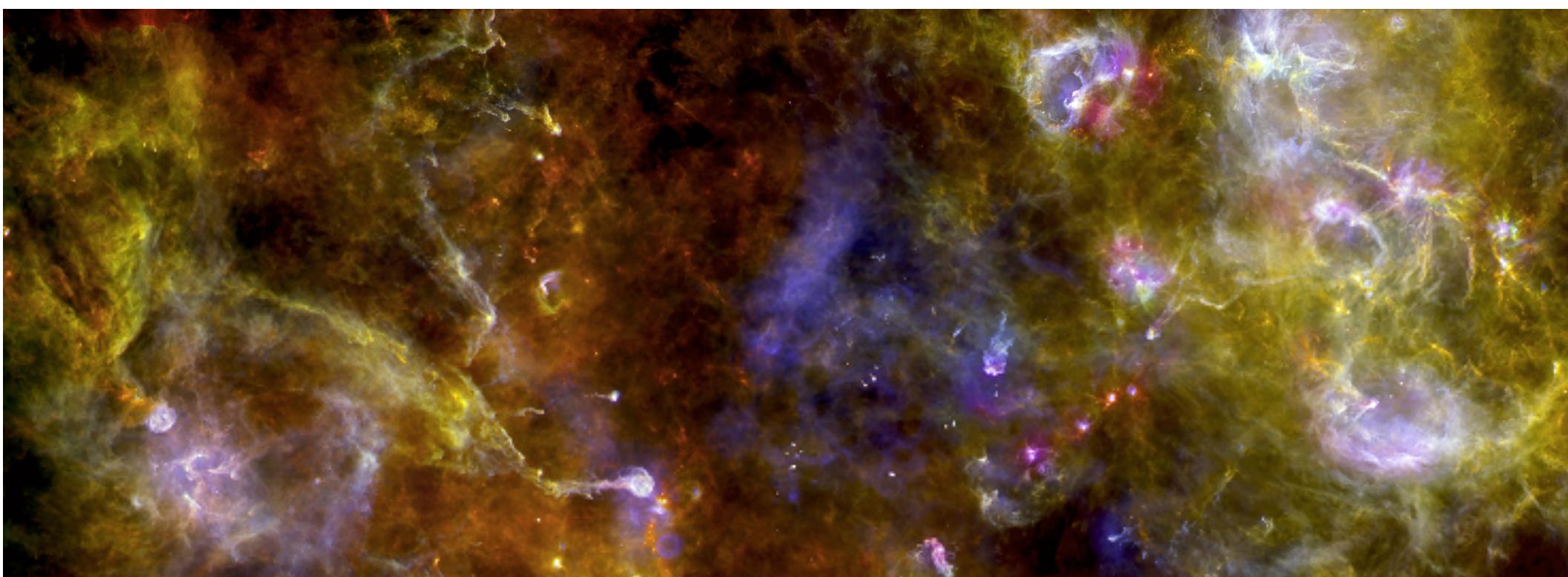
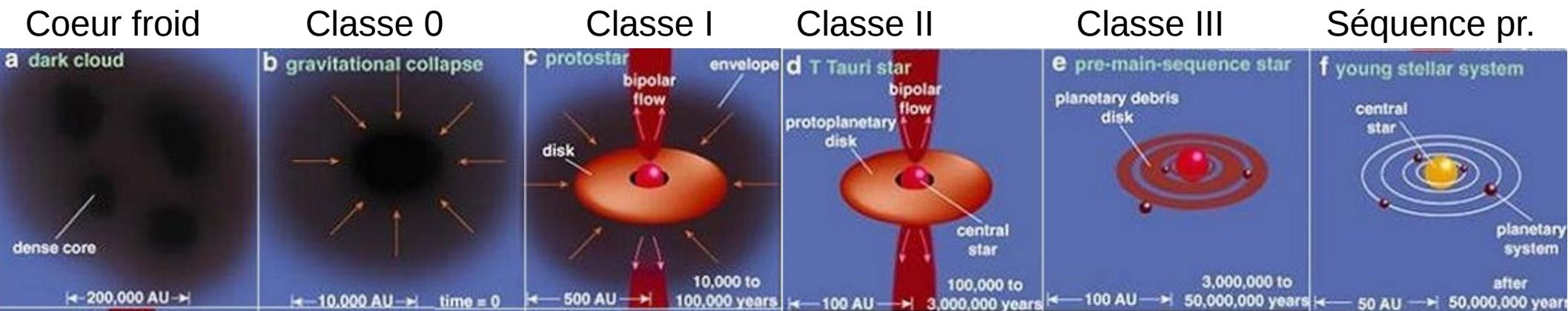
Accrétion de gaz par une étoile dégénérée jusqu'à $M > 1.44 \text{ Msun}$
 \Rightarrow supernova thermonucléaire (= SN Ia)

SN Ia : plus forte proportion de Fe

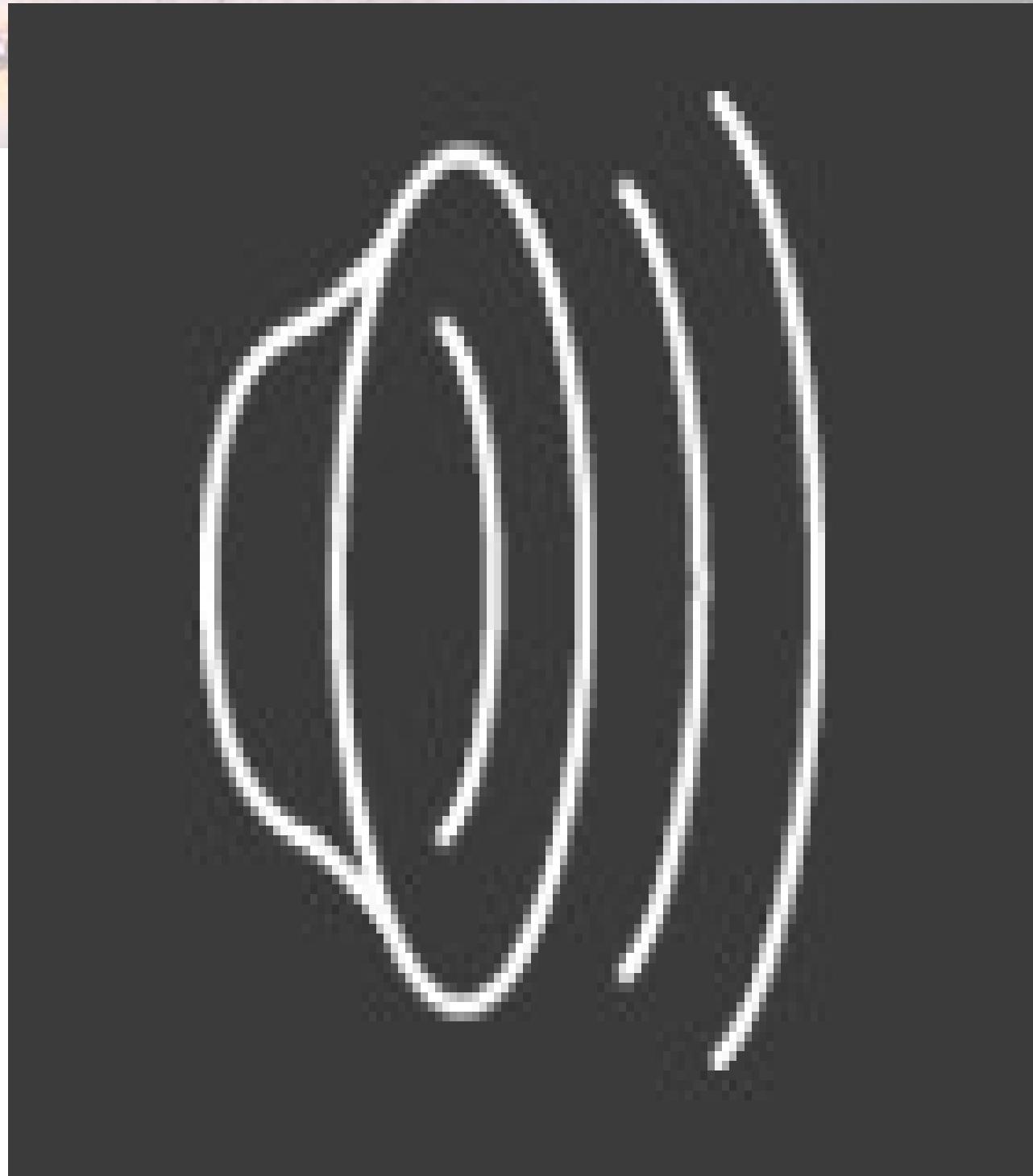
Temps caractéristique \sim qq Gyr

III. Cycle de vie des étoiles

III.2 Naissance des étoiles



es étoiles
es étoiles



III. Cycle de vie des étoiles

III.3 Évolution des étoiles

Formation d'Hélium au cœur des étoiles sur la séquence principale : <http://www.cosmovisions.com/nusy.htm>

Cycle proton-proton

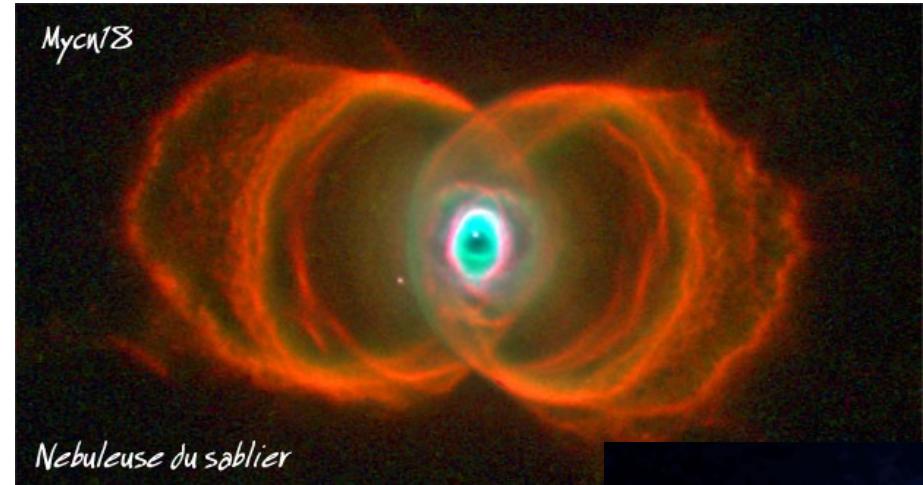
Cycle CNO (cycle catalytique)

Formation des éléments au cœur des étoiles évoluées :

| X consommé | T [K] | Étoile 0.3 Msun | Étoile 1 Msun | Étoile 25 Msun |
|------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| H | 4 – 15 – 40 e6 | ~800 Gyr | 10-12 Gyr | 7 Myr |
| He | 1e8 | - | ~200 Myr | 500000 ans |
| C | 1e9 | - | - | 200 ans |
| Ne | 1.2e9 | - | - | 1 an |
| O | 2e9 | - | - | 5 mois |
| Si | 3e9 | - | - | ~ 1jour |

III. Cycle de vie des étoiles

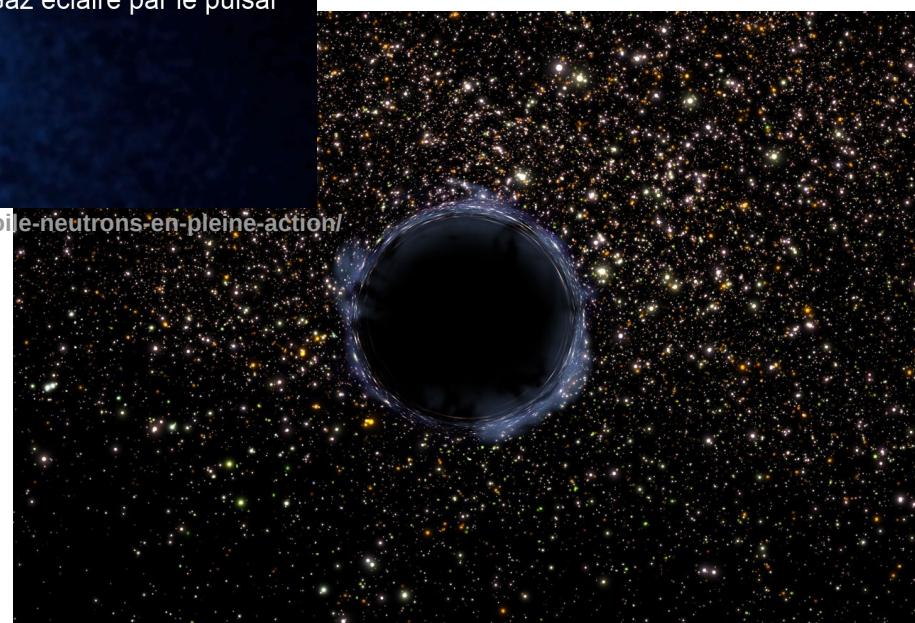
III.4 Mort des étoiles



$M_{\text{coeur}} < 1.4 M_{\text{sun}}$ \Rightarrow naine blanche ($\varnothing \sim 10000$ km)
 $1.4 < M_{\text{coeur}} < 3 M_{\text{sun}}$ \Rightarrow étoile à neutrons ($\varnothing \sim 10$ km)
 $M_{\text{coeur}} > 3 M_{\text{sun}}$ \Rightarrow trou noir



<http://www.gurumed.org/2013/01/09/la-video-d'une-toile-a-neutrons-en-pleine-action/>



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Absorption interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

I. Distances

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Absorption interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

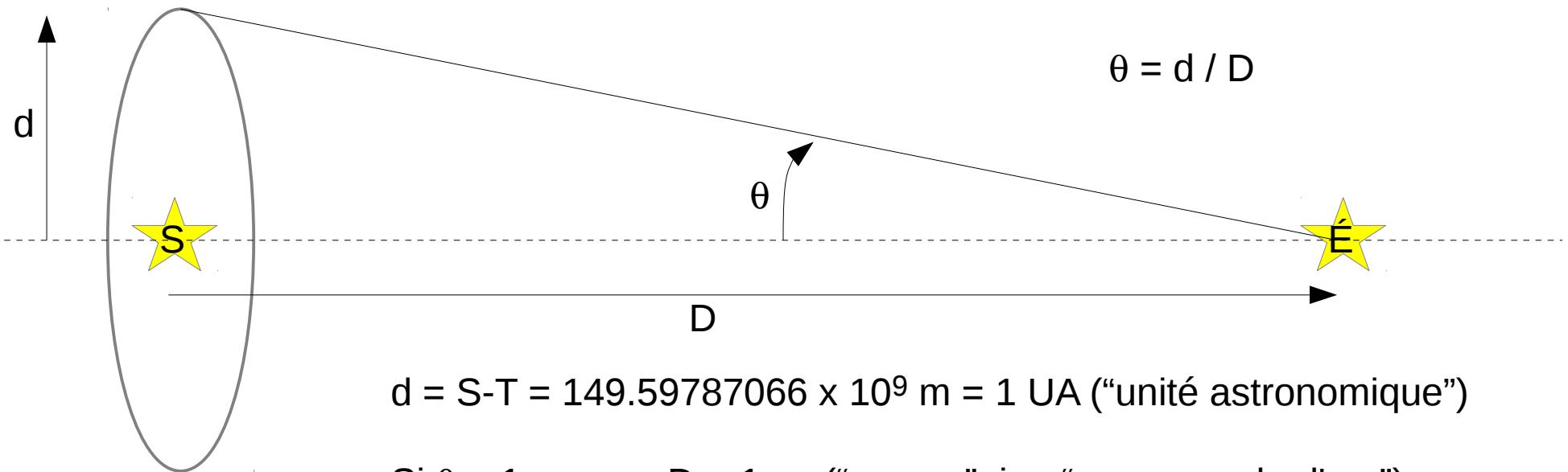
VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Unités

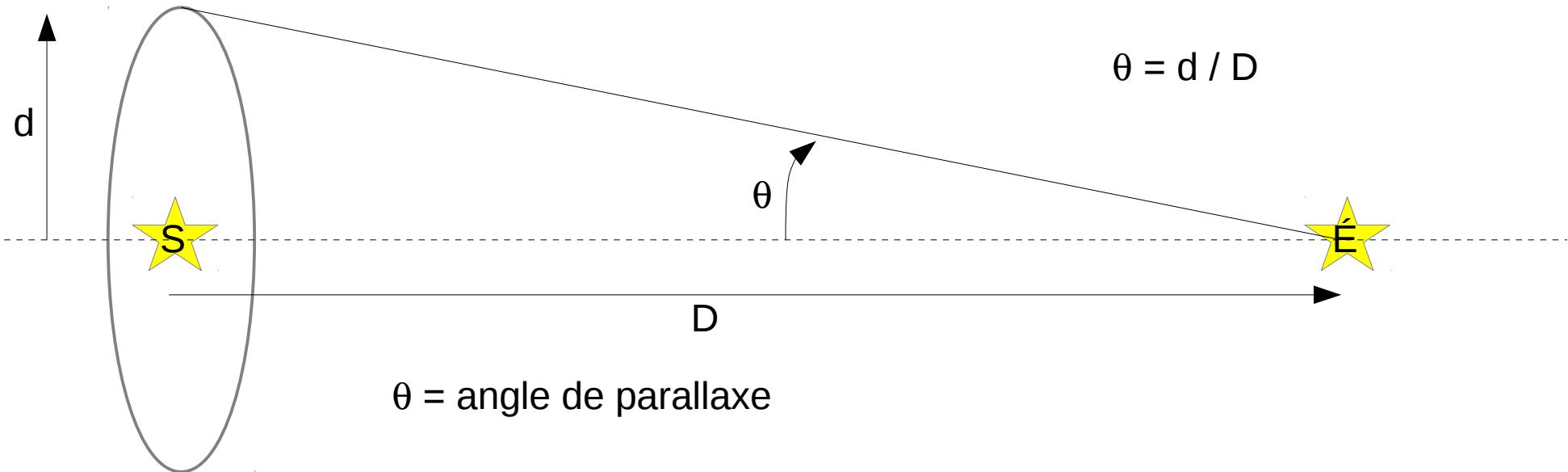


Exercice :

Diamètre angulaire de Bételgeuse = 40 mas (“milli-arcsec”),
 Diamètre linéaire = $650 R_{\text{sun}}$
 Distance en pc ? En UA ? En km ?



Méthode des paralaxes (Bessel, 1838)



Exercice :

GAIA est en train de mesurer la distance d'étoiles jusqu'à ~20 kpc.

Quelle est sa résolution angulaire effective ?

Le miroir du télescope fait moins d'un mètre de diamètre. Comparer la résolution limite théorique due à la diffraction, avec le résultat précédent.

Autres méthodes cinématiques

- parallaxes dynamiques : 3e loi de Kepler + relation masse-luminosité
- méthode du point convergent : $D[\text{pc}] = V_R \tan(\theta) / (4.74 \mu[''])$
 - θ : taille angulaire de l'amas d'étoiles
 - μ : mouvement propre moyen
 - V_R : vitesse radiale moyenne
- parallaxe statistique : $D[\text{pc}] = \sqrt{2} V_R / (4.74 \mu[''])$
 - valeurs moyennes sur un groupe homogène d'étoiles

I. Distances

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Absorption interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Méthode photométrique

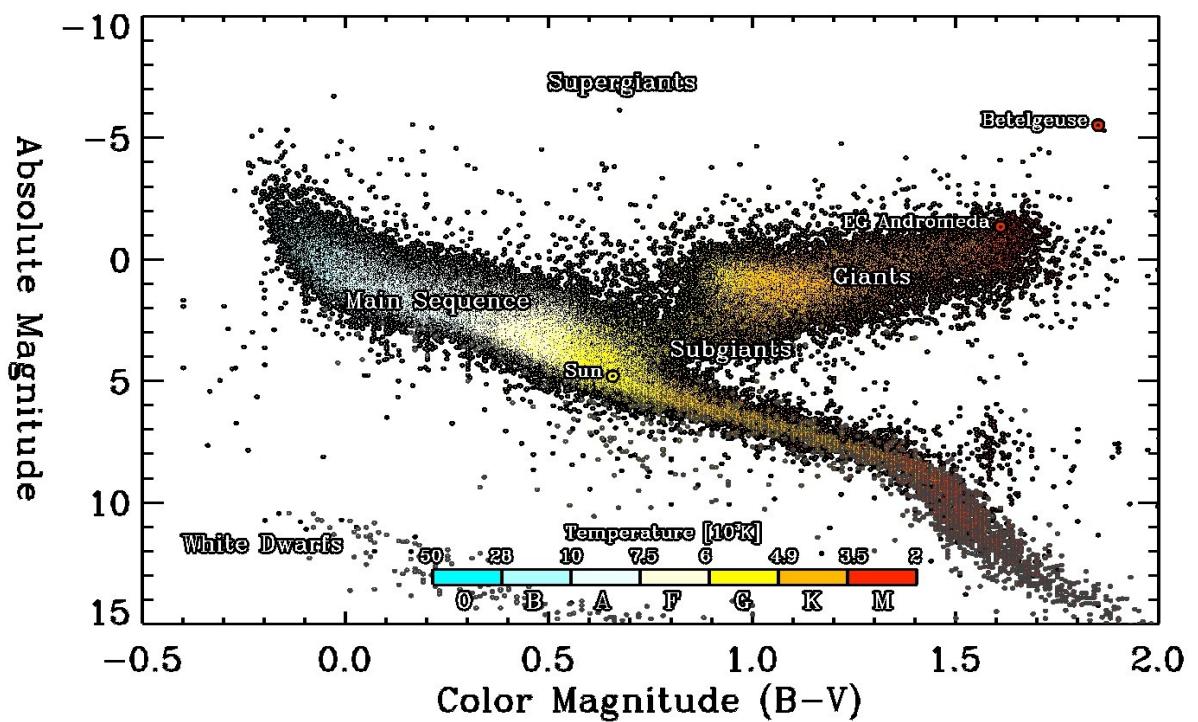


$$L_{app} = L \cdot (D_0/D)^2 \quad \text{si } L \text{ est connue, on en déduit } D \quad (D_0 = \text{standard})$$

| | |
|--|--------|
| Chandelles standards (ou chandelles cosmiques) | Portée |
| RR Lyrae ($M_V = 0.71 \pm 0.07$) | 2 Mpc |
| Céphéïdes (relation période-luminosité) | 30 Mpc |
| Novea ($M_V = -6.5$ au max) | 40 Mpc |
| Amas globulaires ($M_V = -7.5$ au max) | 50 Mpc |
| Supernovae SNII ($M_{V,MAX} = -16$) | 3 Gpc |
| Supernovae SNIa ($M_{V,MAX} = -19.7$) | >3 Gpc |

Méthode spectroscopique

- 1- On mesure la luminosité apparente (photométrie)
- 2- On évalue la luminosité absolue à partir du spectre (type spectral) de l'étoile (cf. Sect. II et III)
- 3- On en déduit la distance par $L_{app} = L (D_0/D)^2$
(et correction pour l'extinction interstellaire)



II. Luminosité

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Absorption interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

Magnitude : définition



$$m = m_0 - 2.5 \log_{10}(F / F_0)$$

F_0 = flux pour une étoile blanche à 10 pc (Véga = une référence habituelle)

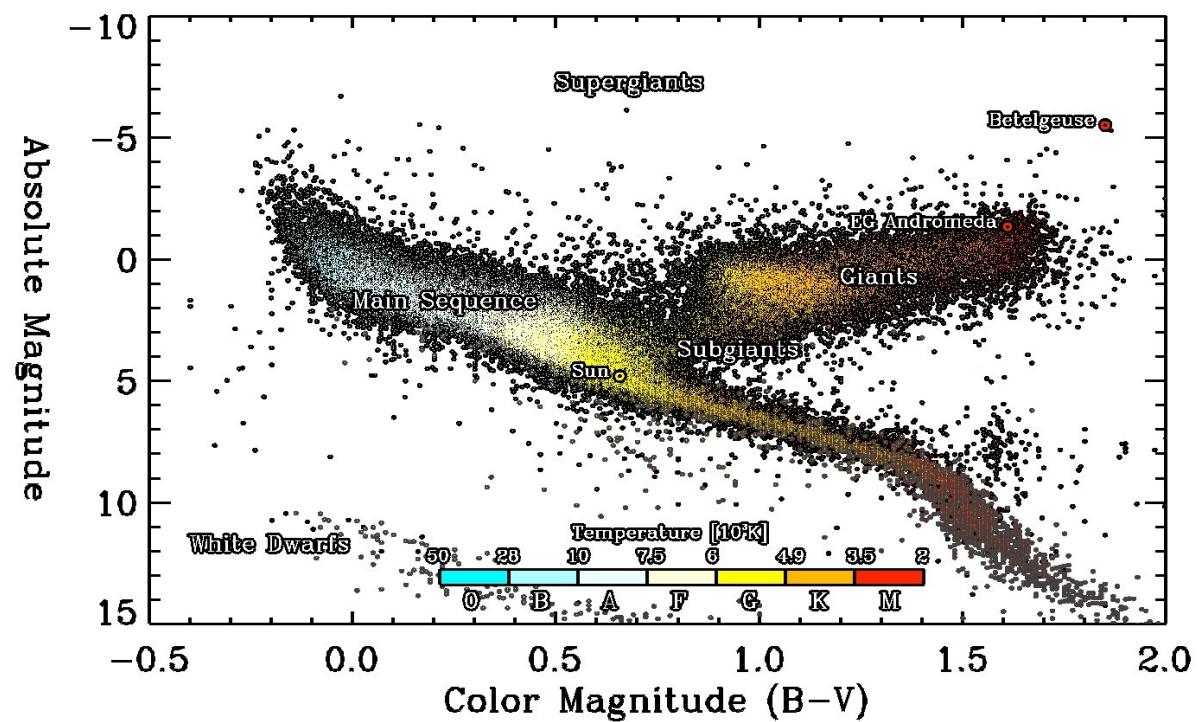
O.G. Dans la bande V

œil <6

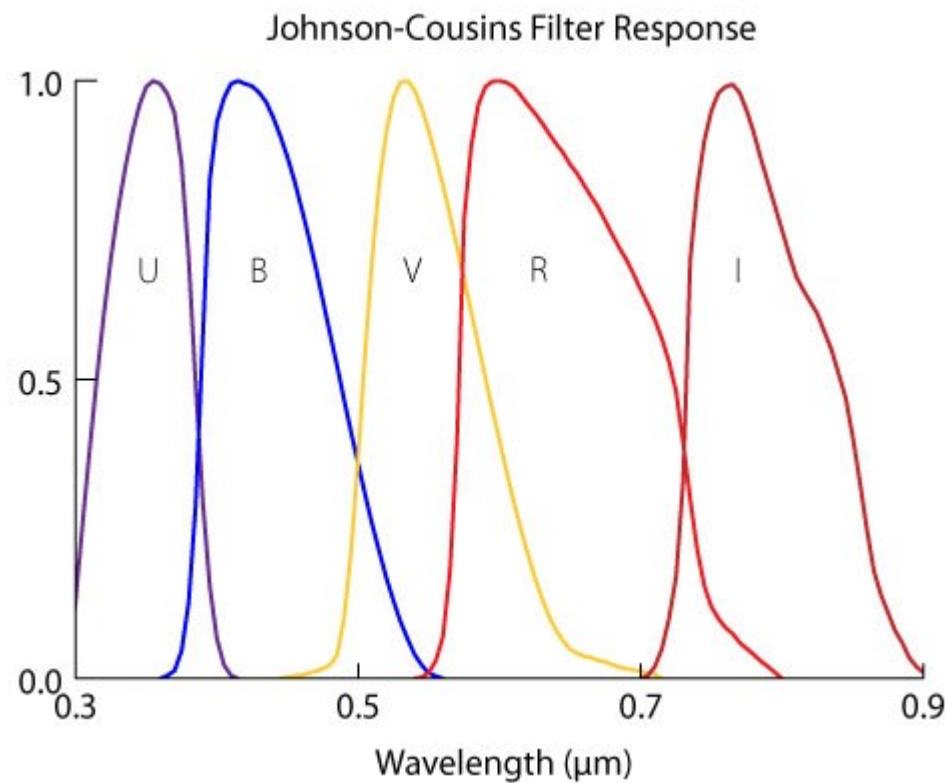
HST < 31

Soleil apparent = -26.7

Étoiles apparentes > -1



Bandes photométriques



Indices de couleur :

$$\text{Exemple : } (B - V) = -0.67 - 2.5 \log(I_B/I_V)$$

II. Luminosité

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

II. Luminosité

II.2 Extinction interstellaire

Extinction = absorption + diffusion

$$m_{\text{obs}} = m_{\text{int}} + A > m_{\text{int}}$$

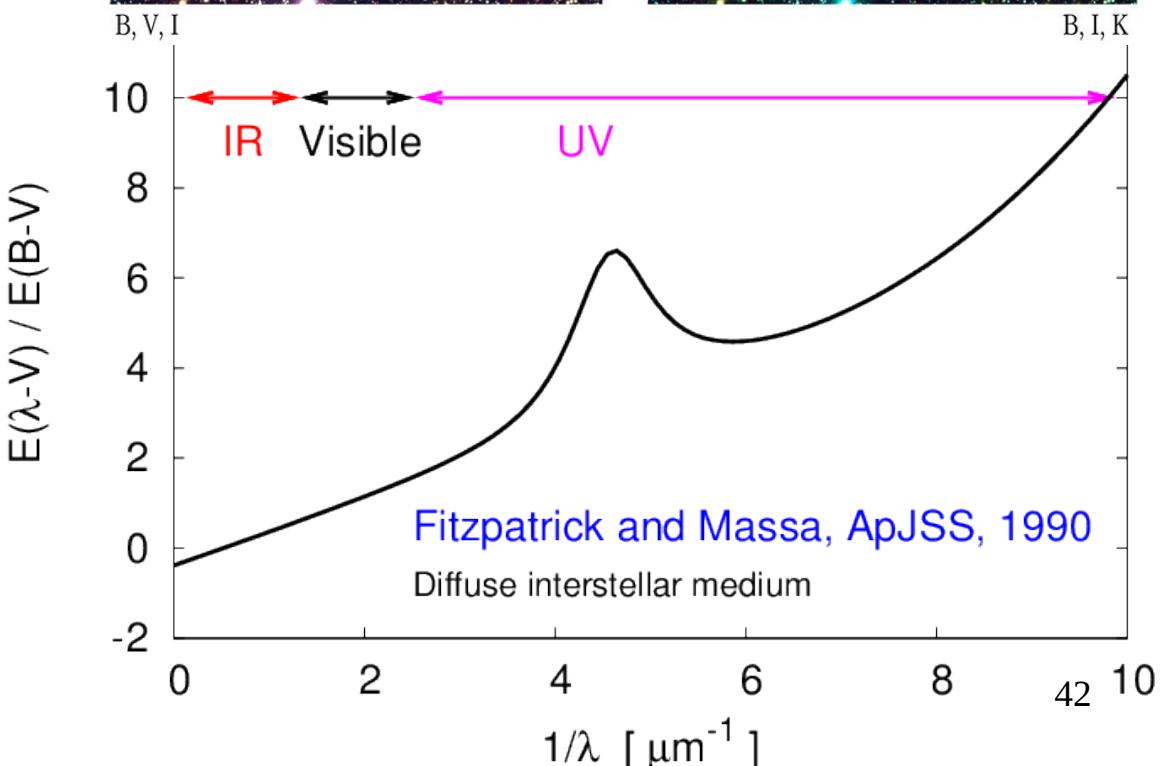
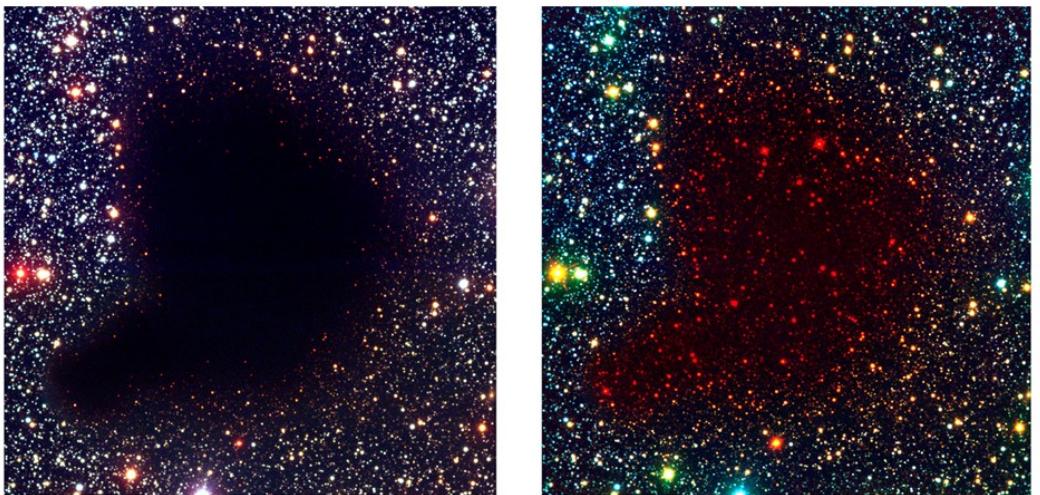
⇒ luminosité intrinsèque > observée

avec $A = A(\lambda)$

⇒ rougissement

On définit l'excès de couleur :

$$E(B-V) = (B-V)_{\text{obs}} - (B-V)_{\text{int}}$$



III. Température

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

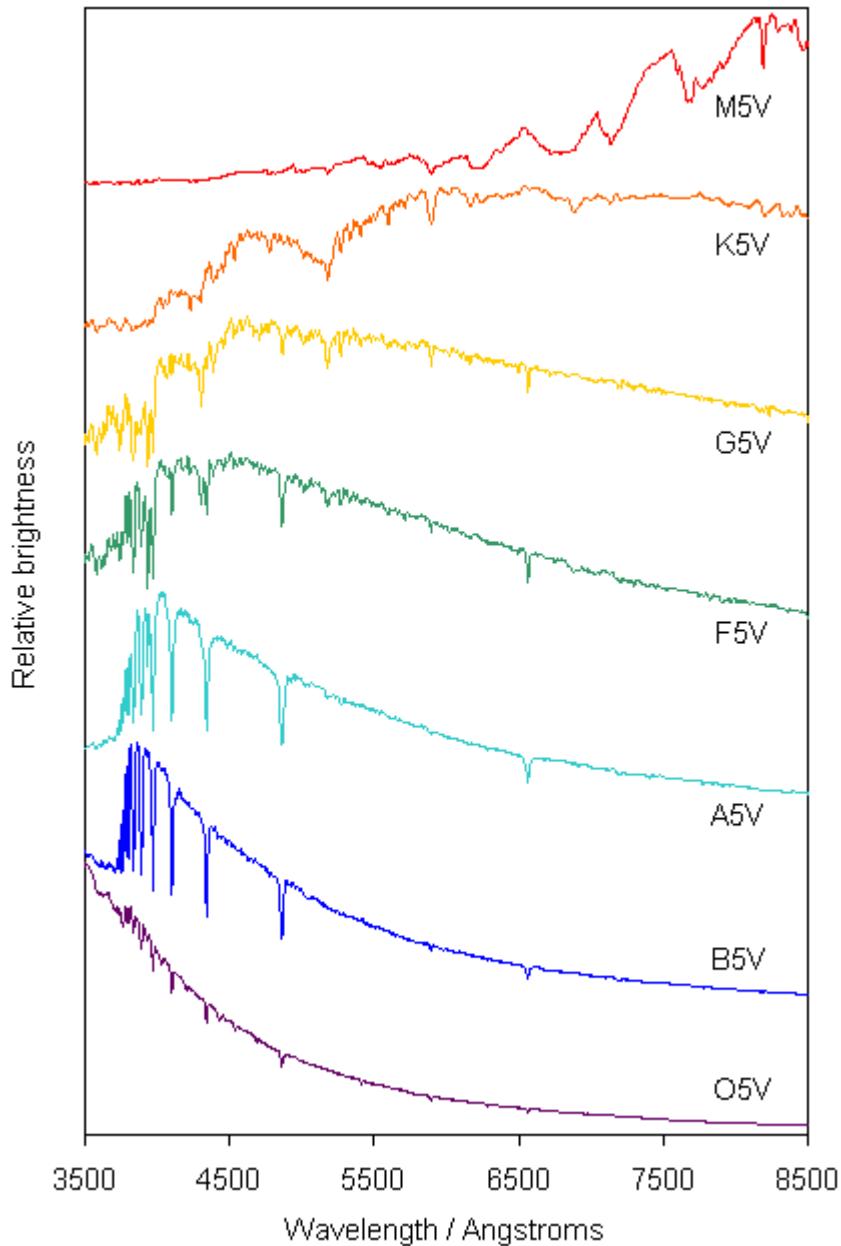
VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.1 Rappel : Types spectraux

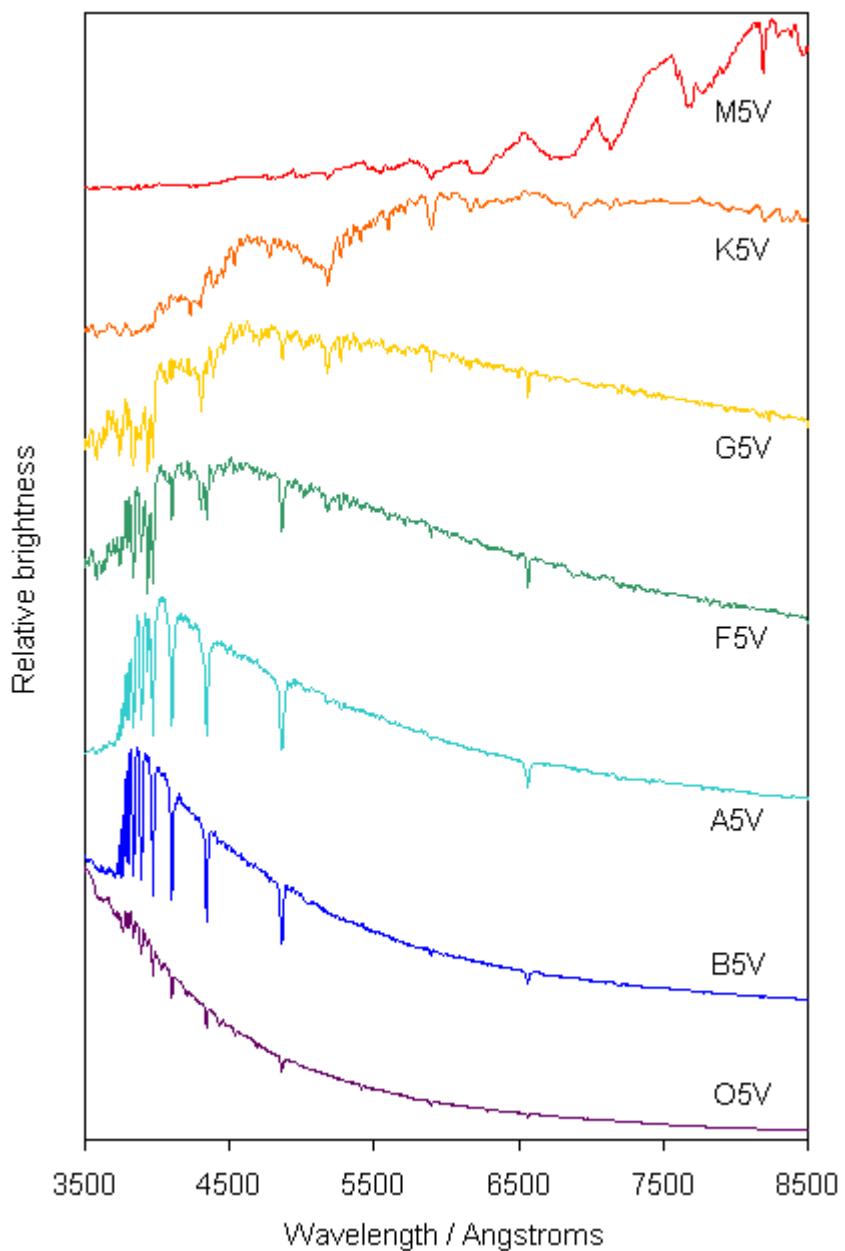


Exercice : classer ces spectres par température croissante



III. Température

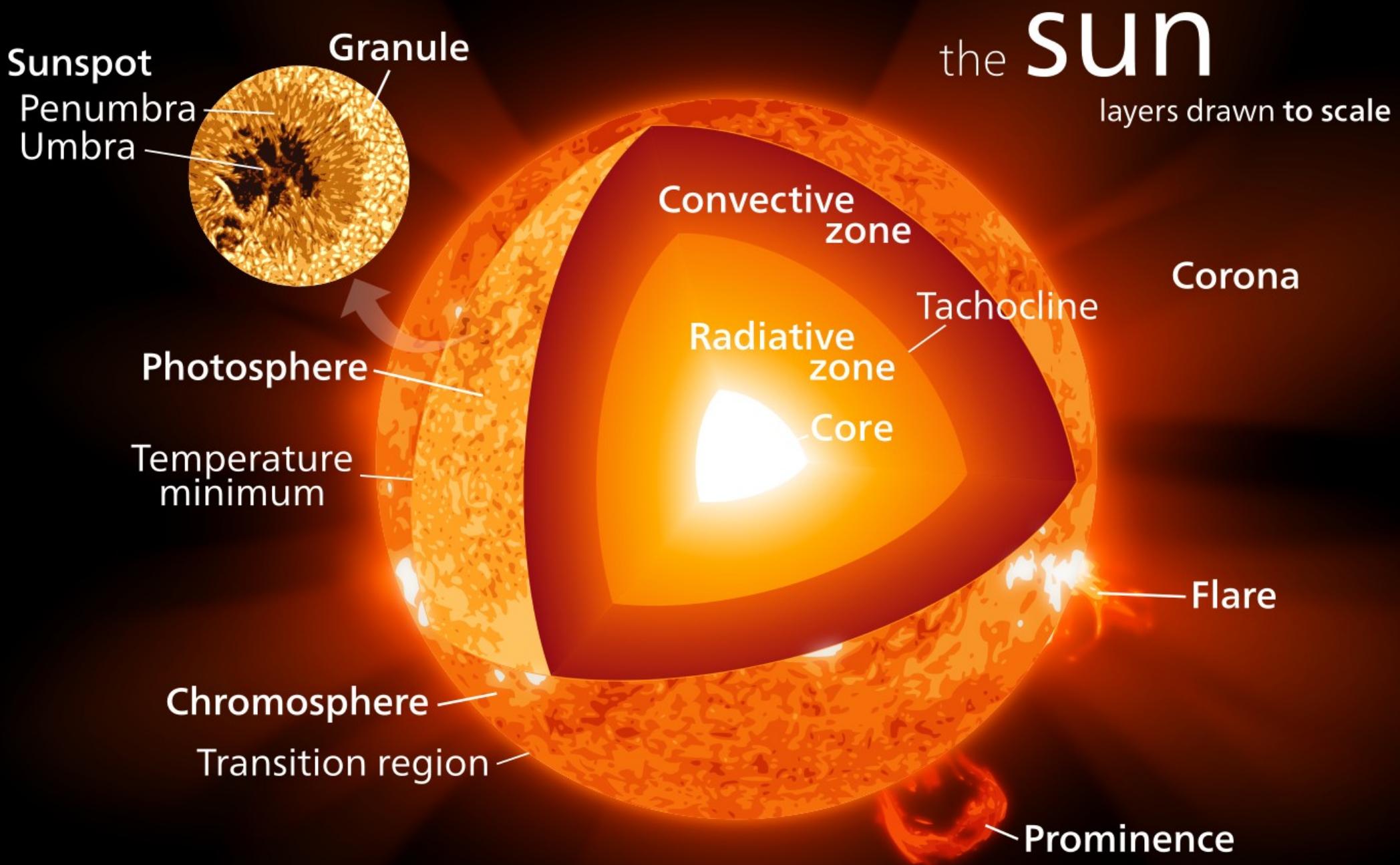
III.1 Rappel : Types spectraux



| Main-Sequence Stars (L) | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Spectral Type | T_e (K) | L/L_sun | R/R_sun | M/M_sun |
| O5 | 42000 | 499000 | 13.4 | 60 |
| O8 | 35800 | 147000 | 10.0 | 23 |
| B0 | 30000 | 32500 | 6.7 | 17.5 |
| B2 | 20900 | 2920 | 4.1 | |
| B5 | 15200 | 480 | 3.2 | 5.9 |
| B9 | 10500 | 60.7 | 2.3 | |
| A0 | 9800 | 39.4 | 2.2 | 2.9 |
| A2 | 9020 | 23.6 | 2.0 | |
| A8 | 7600 | 7.13 | 1.5 | |
| F0 | 7300 | 5.21 | 1.4 | 1.6 |
| F8 | 6250 | 1.68 | 1.1 | |
| G0 | 5940 | 1.25 | 1.06 | 1.05 |
| G2 | 5790 | 1.07 | 1.03 | |
| Sun | 5777 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| G8 | 5310 | 0.656 | 0.96 | |
| K0 | 5150 | 0.552 | 0.93 | 0.79 |
| K7 | 4150 | 0.145 | 0.74 | |
| M0 | 3840 | 0.077 | 0.63 | 0.51 |
| M7 | 2860 | 0.0025 | 0.20 | |

III. Température

III.1 Rappel : Types spectraux



III. Température

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

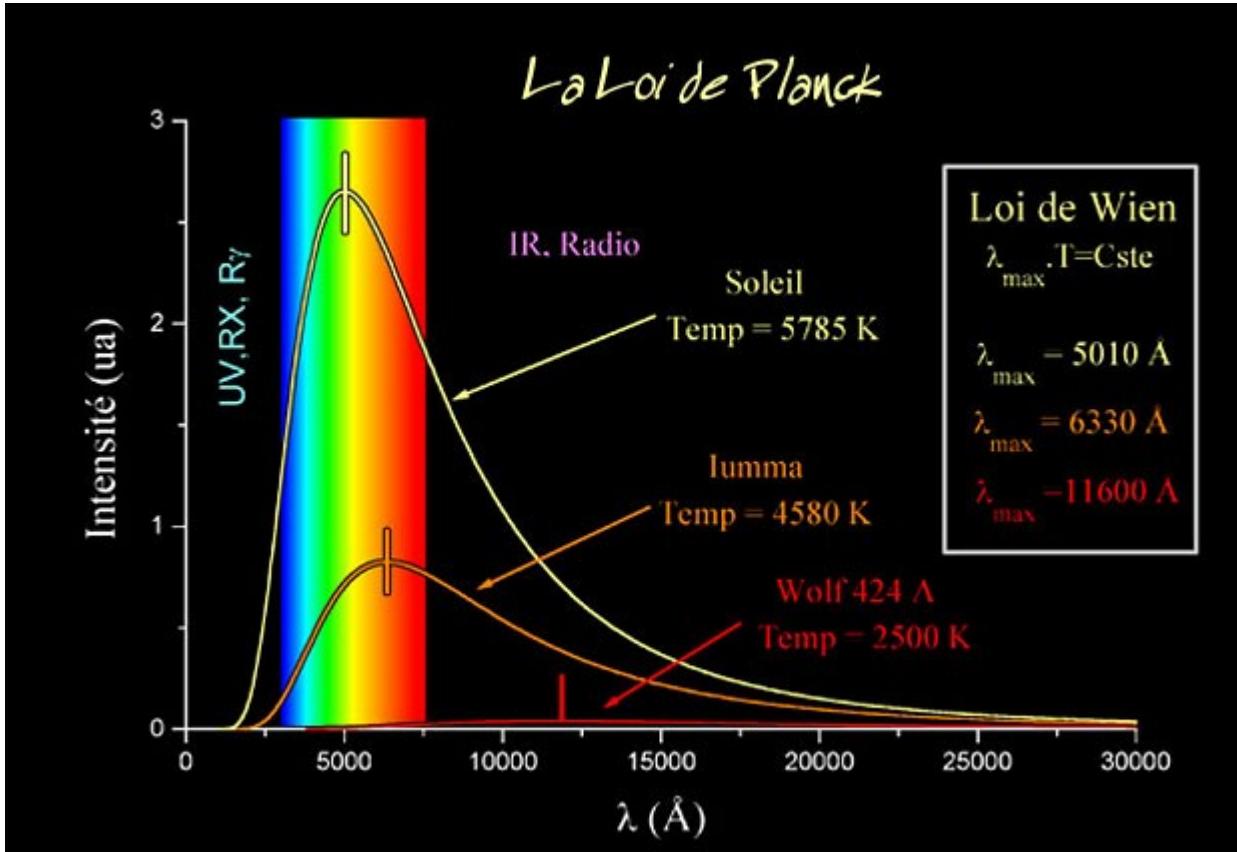
VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

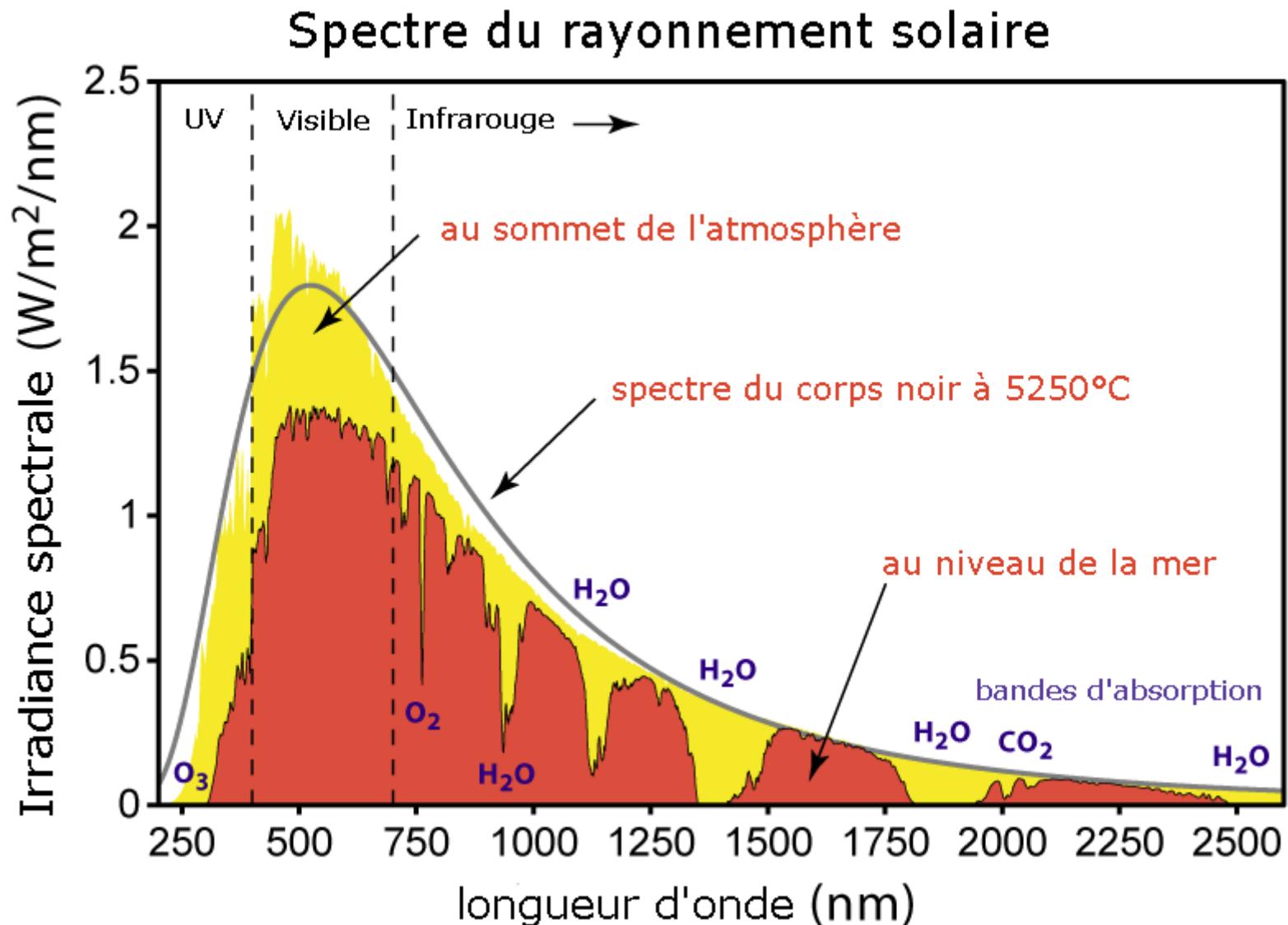
III.2 Détermination par le continuum



(propriétés qualitatives + Stephan + Wien)

$$L_0(\lambda) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_b \cdot T}} - 1}$$

Loi de Stephan – Boltzmann :
 $M = \sigma T^4$
 $\sigma = \pi^2 k_B^4 / (60 c^2 h^3) = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ S.I.}$
 M = “excitance” = puissance totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre



Température effective : → loi de Stephan – Boltzmann

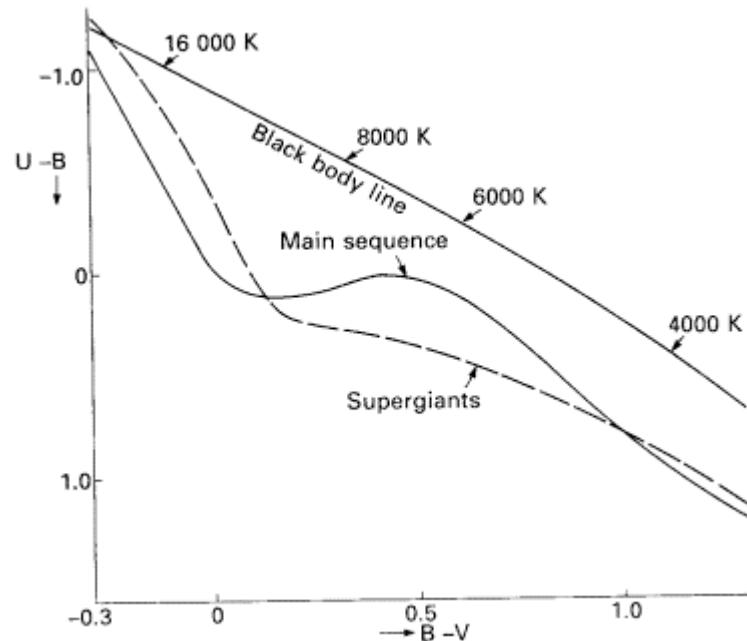
Celle d'un corps noir de même surface et de même luminosité totale que l'étoile

Température de couleur :

Celle d'un corps noir ayant la même distribution spectrale

En pratique, on mesure des indices de couleur, comme $B - V$:

$$B - V = (7200 / T) - 0.64 \text{ (pour un corps noir)}$$



III. Température

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

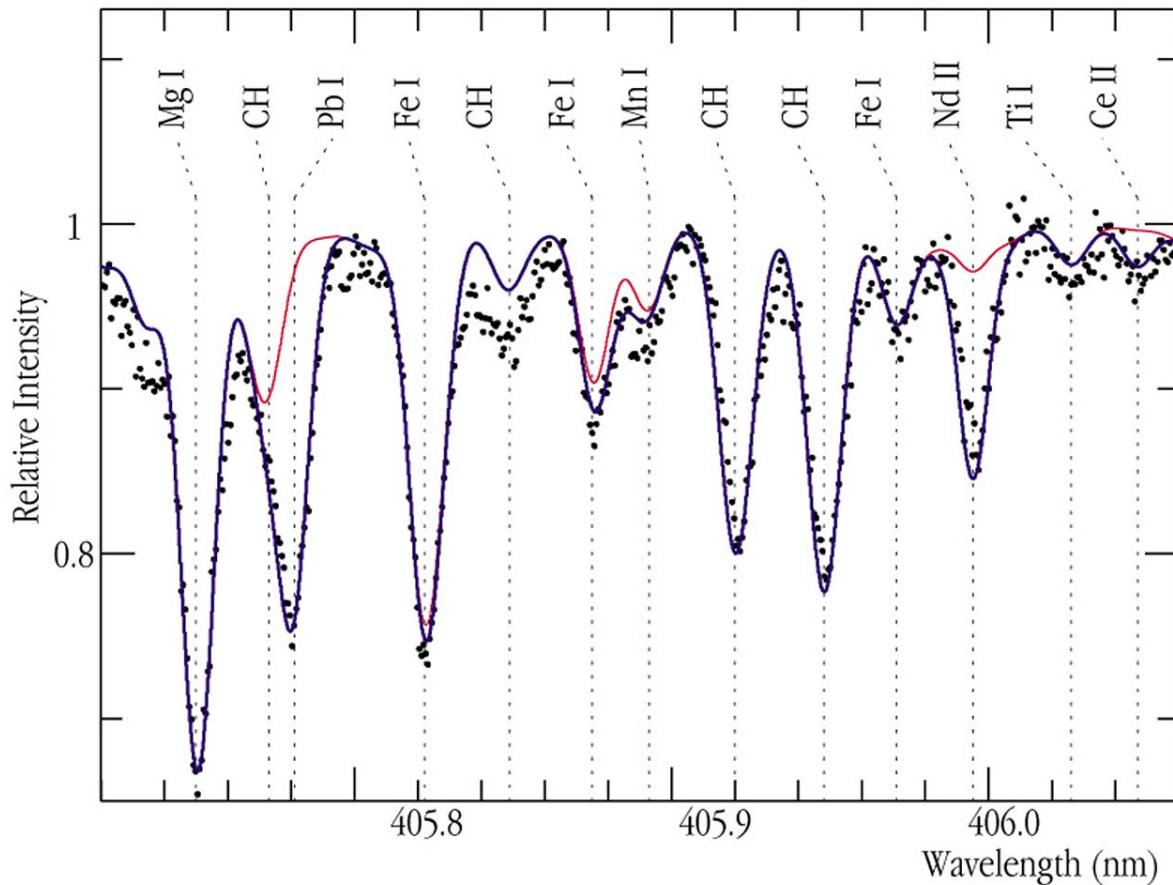
VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.3 Détermination spectroscopique



Loi de Boltzmann

$$\frac{N_i}{N} = \frac{g_i e^{-E_i/k_B T}}{Z(T)}$$

III. Température

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

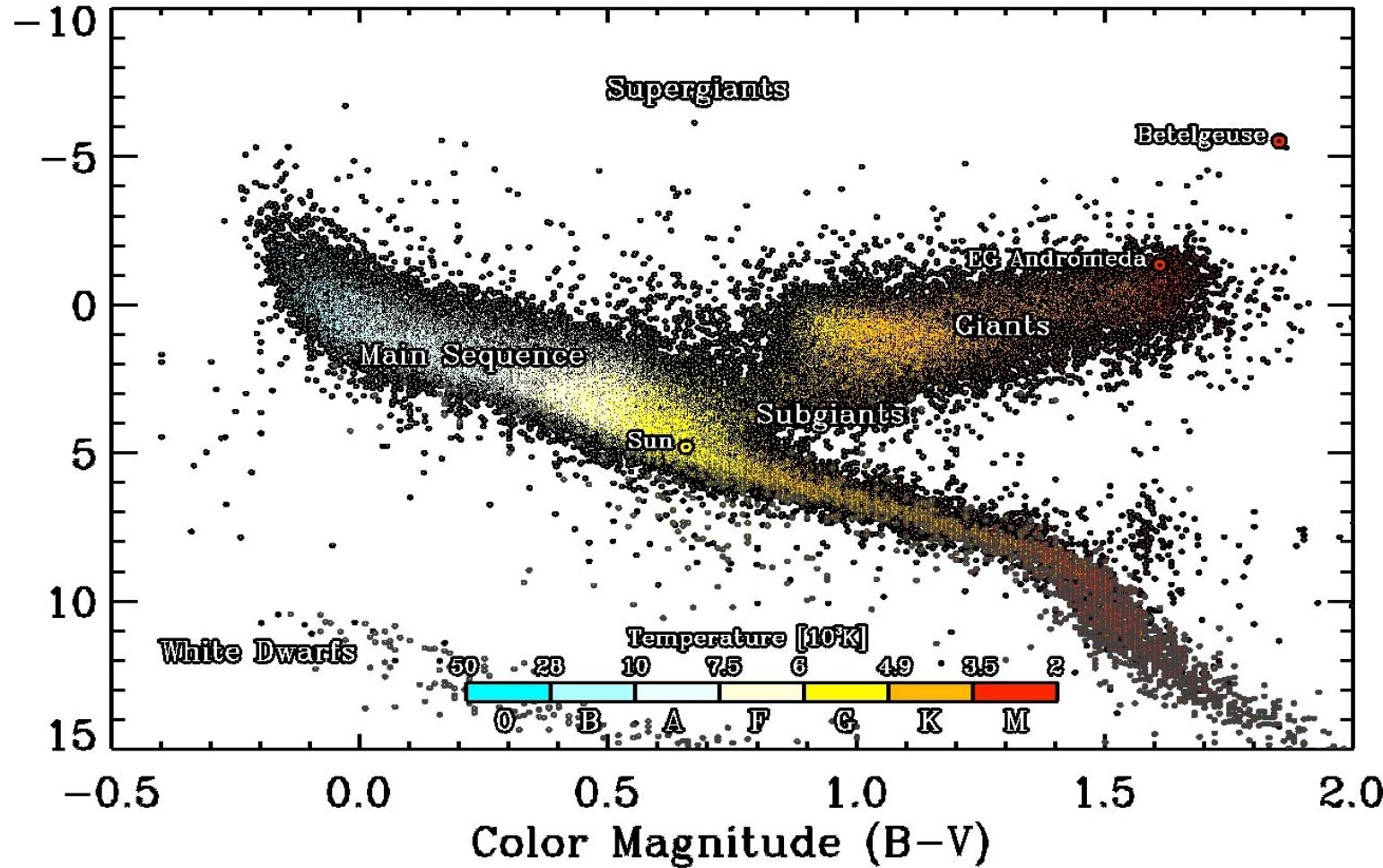
VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.4 Diagramme Hertzsprung – Russel



Absolute Magnitude



Paul A. Higgins (Astrophysics Research Group / Trinity College Dublin)

$$\text{Stephan : } L = \sigma T^4 4\pi R^2$$

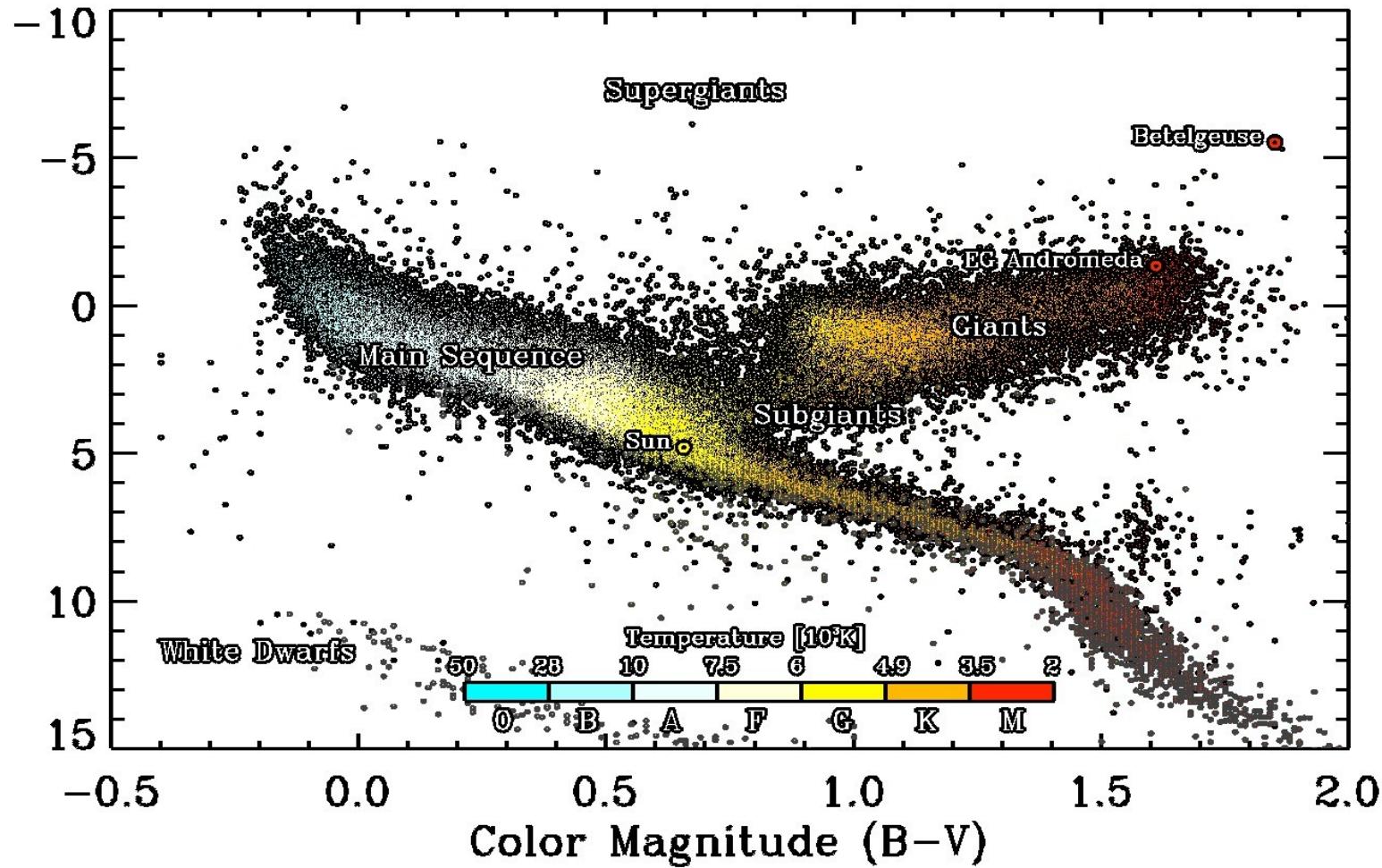
Pour un corps noir : $B - V = (7200 / T) - 0.64$ (cf. III.2)
Exercice 2 : trouver la pente de la séquence principale dans le diagramme H-R

III. Température

III.4 Diagramme Hertzsprung – Russel



Absolute Magnitude



Paul A. Higgins (Astrophysics Research Group / Trinity College Dublin)

Exercice 3 : expliquer pourquoi

Stephan : $L = \sigma T^4 4\pi R^2$

- la branche horizontale est appelée “branche des géantes”,
- le groupe vers $B-V \sim 0$ et $M \sim 10$ est appelé “naines blanches”⁵⁵

IV. Dimension

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

Méthodes :

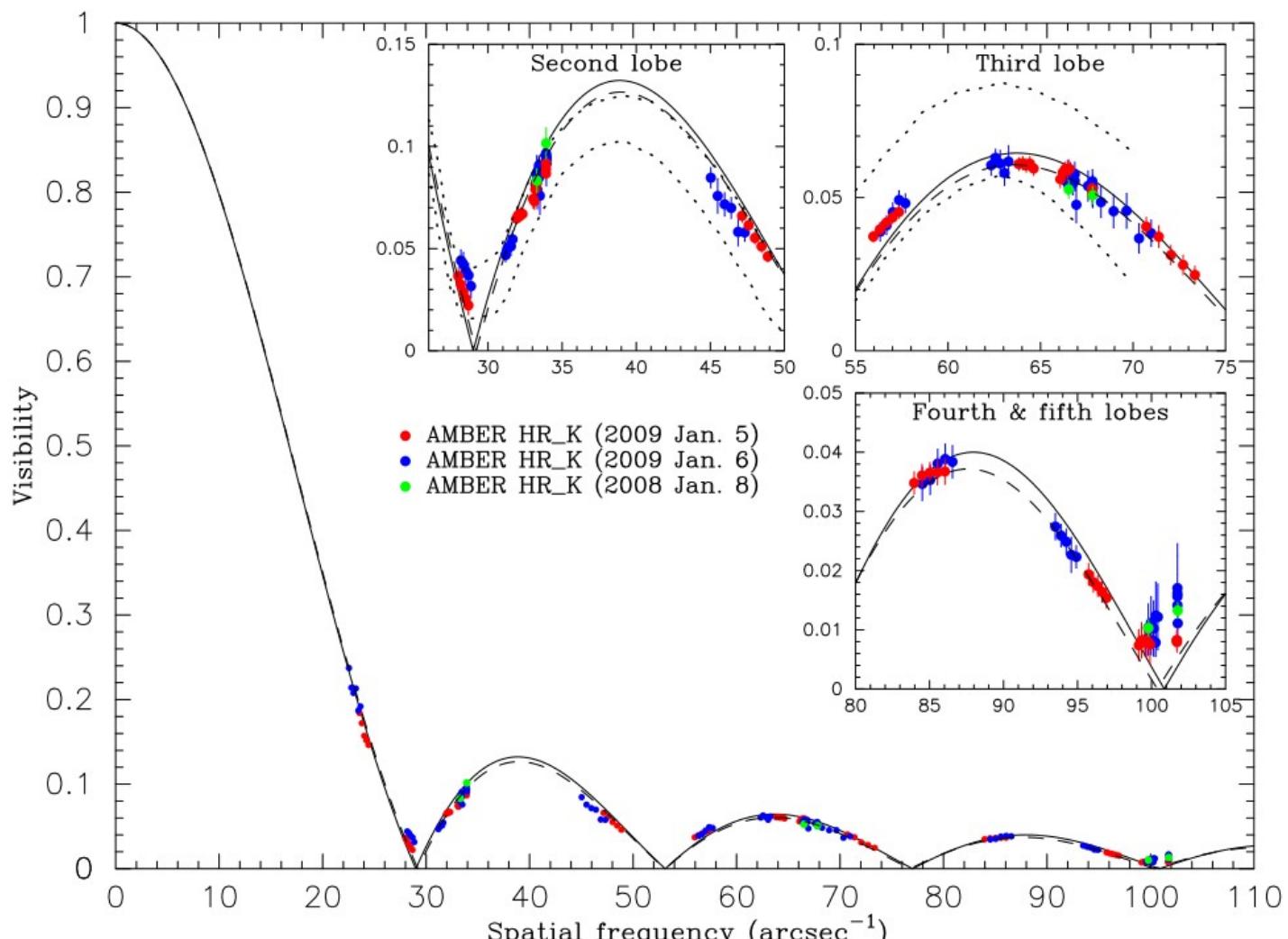
- interférométrie
- speckel
- occultation

>~1625 sources mesurées
(A. Richichi and I. Percheron, 2002)

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

Méthodes :
→ **interférométrie**
→ speckle
→ occultation

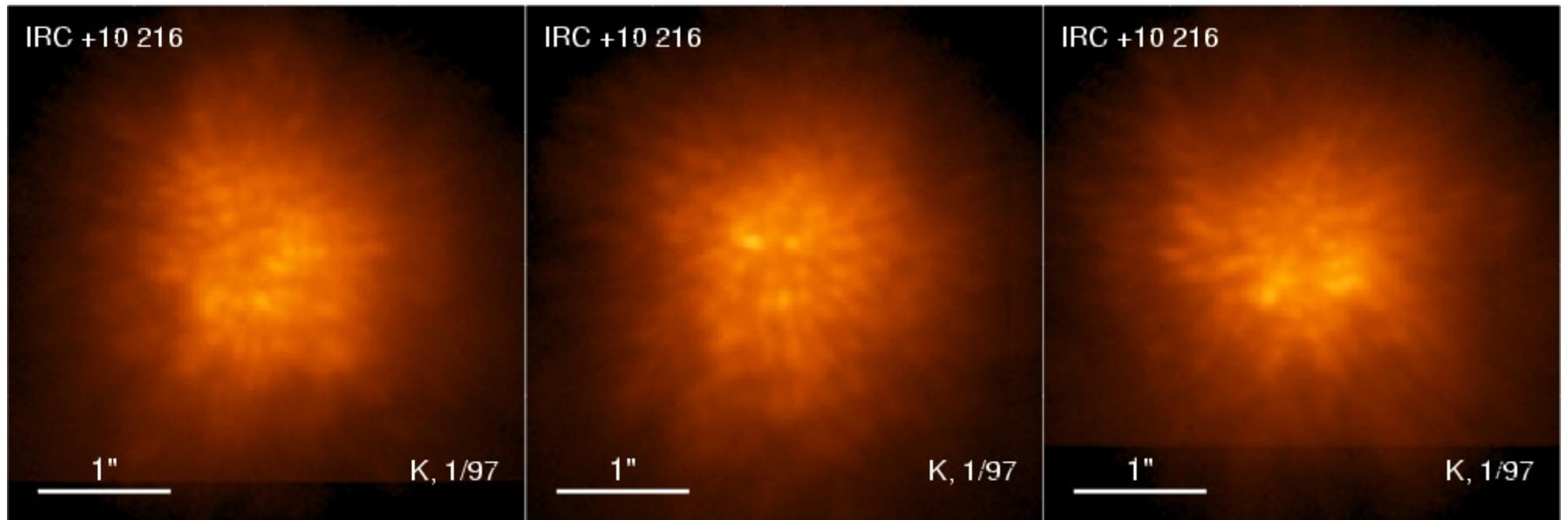


IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

Méthodes classiques :

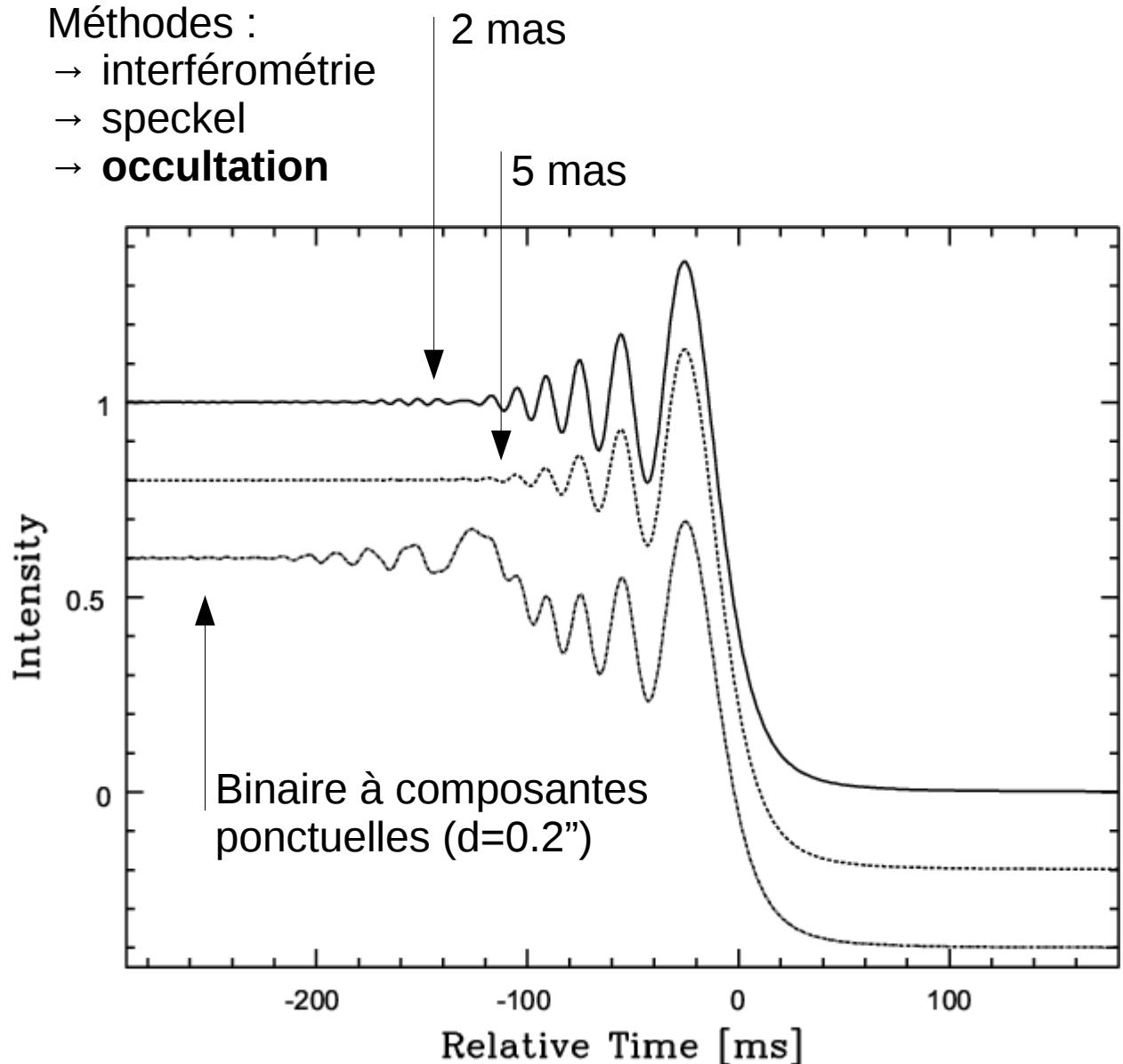
- interférométrie
- **speckle**
- occultation



IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

Méthodes :
→ interférométrie
→ speckel
→ **occultation**



IV. Dimension

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Si la distance est connue :

Stephan : $L = \sigma T^4 4\pi R^2$

$$\log(R) = 5900 / T - 0.20 M - 0.02 = 0.82 (B-V) - 0.20 M + 0.51$$

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeur et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Le cas des pulsars

V.3 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Métaux

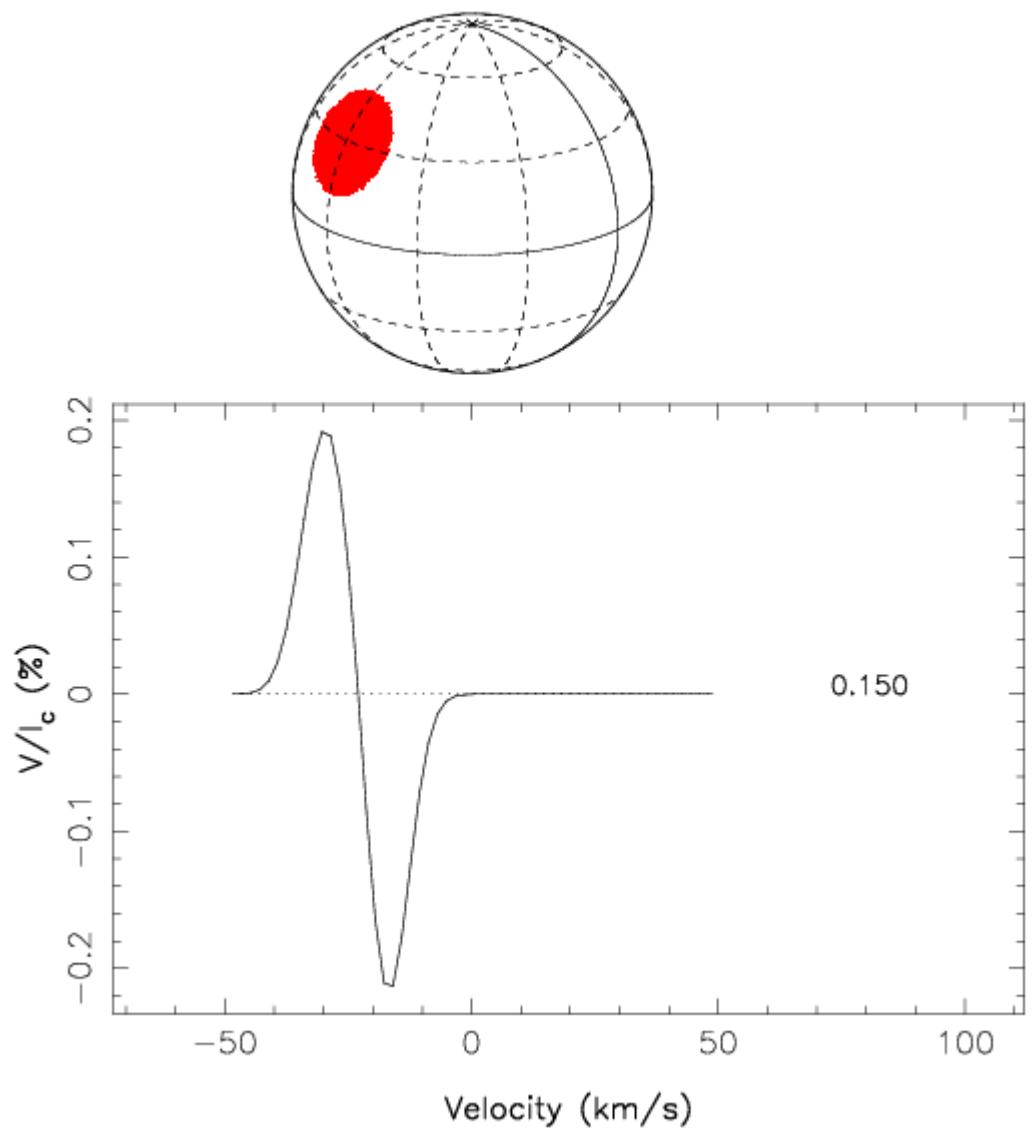
VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

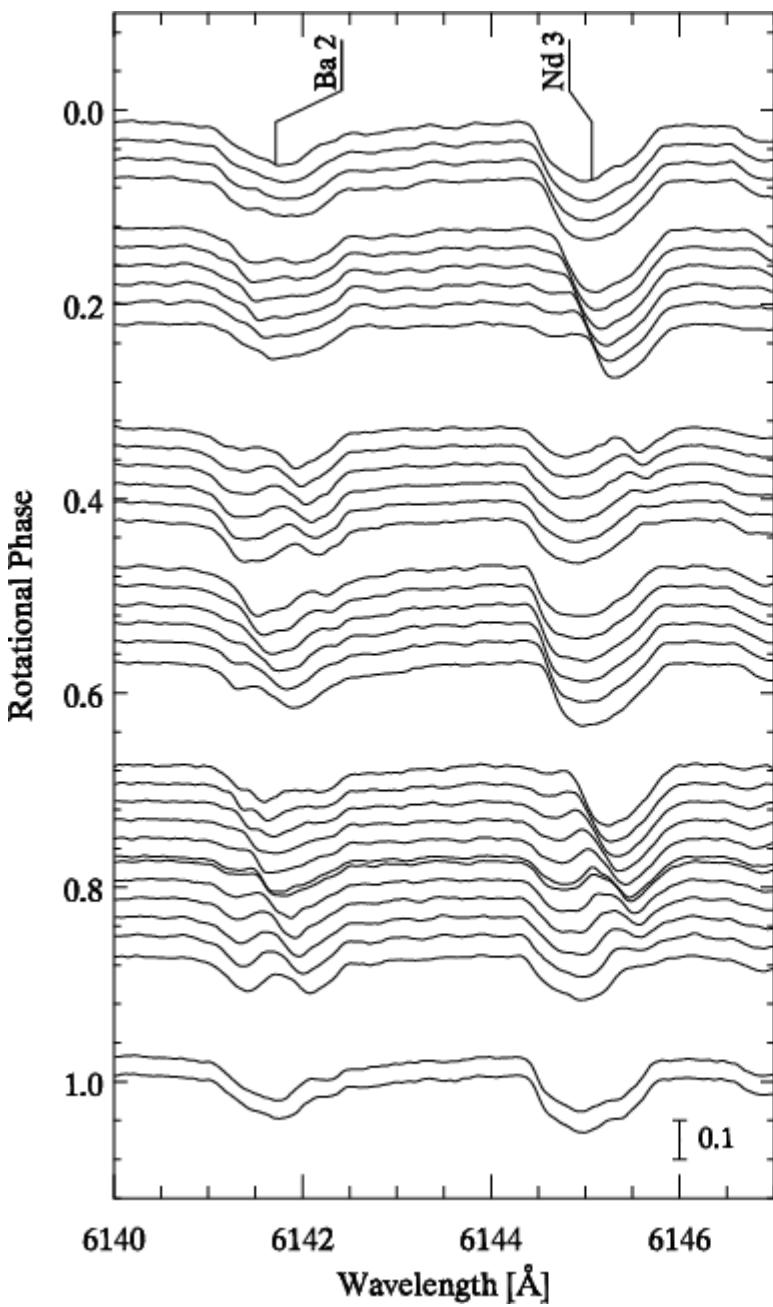
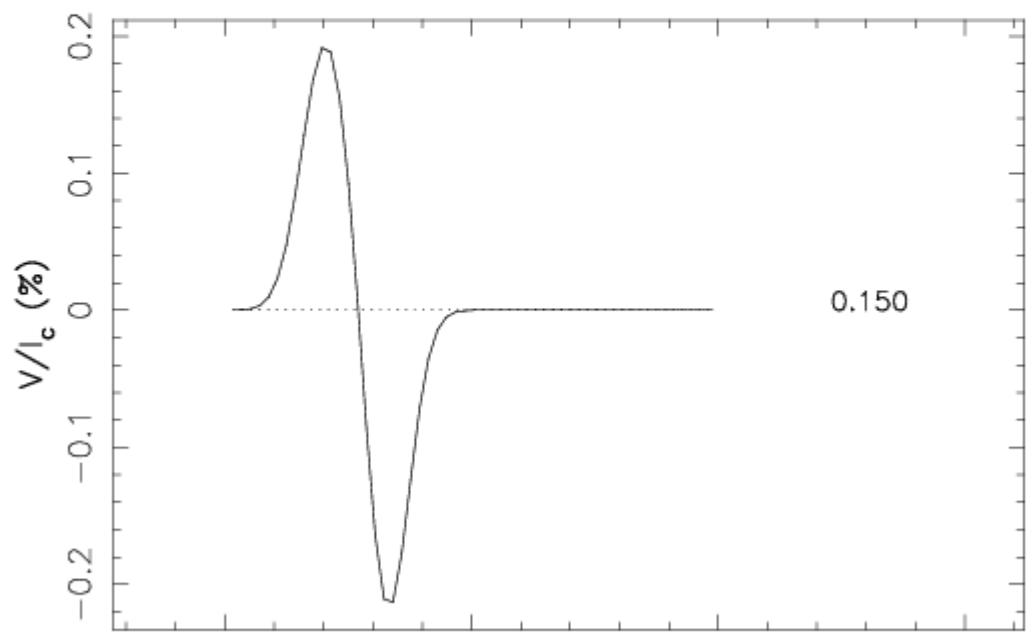
V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique



0.150

Velocity (km/s)



6140

6142

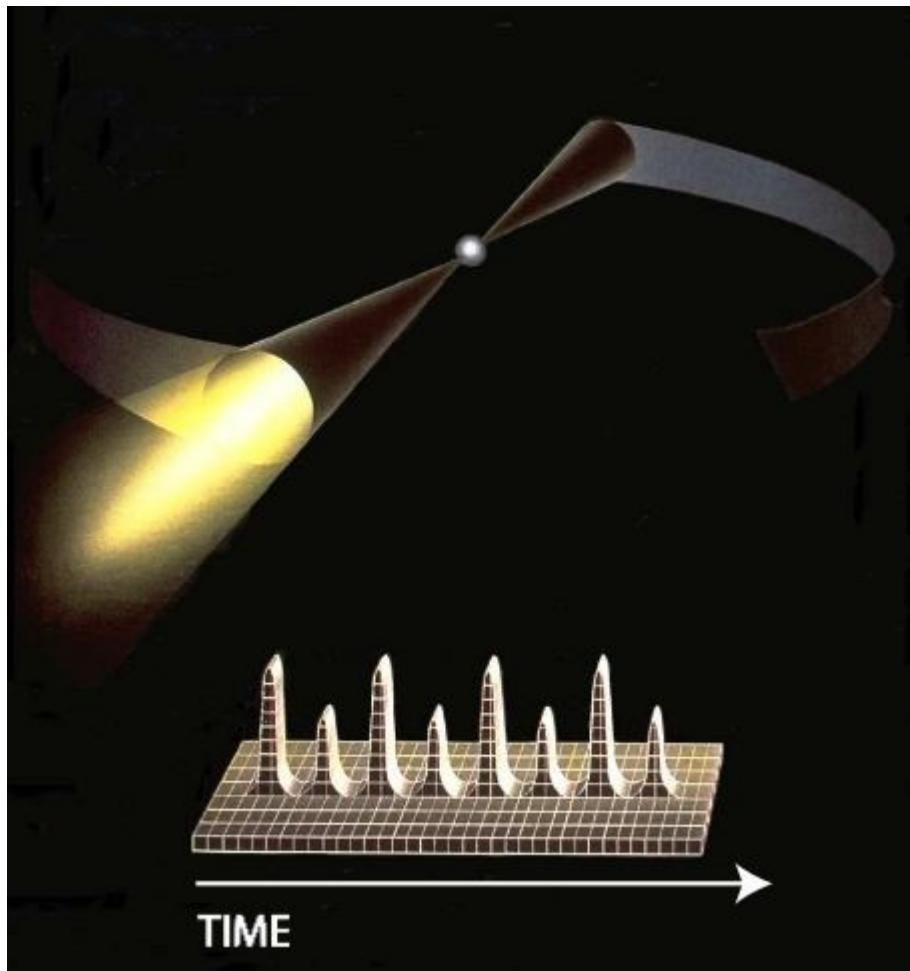
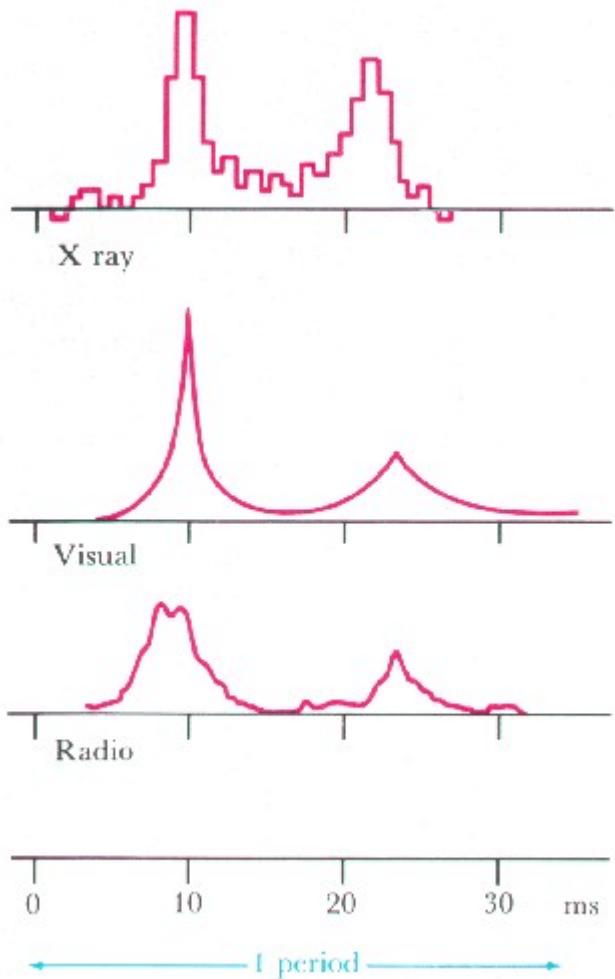
6144

6146

Wavelength [Å]

V. Rotation

V.2 Le cas des pulsars



Exercice :

En écrivant l'équilibre entre la force centrifuge et la force de gravité à la surface d'une étoile, déterminer la vitesse limite au-delà de laquelle l'étoile "éclaterait".

A.N. pour le Soleil ; en déduire la période de rotation correspondante, et la comparer à la rotation réelle du Soleil.

Exercice :

En écrivant l'équilibre entre la force centrifuge et la force de gravité à la surface d'une étoile, déterminer la vitesse limite au-delà de laquelle l'étoile "éclaterait".

A.N. pour le Soleil ; en déduire la période de rotation correspondante, et la comparer à la rotation réelle du Soleil.

$$\rightarrow F_{\text{centrifuge}} = m V_{\max}^2 / R$$

$$\rightarrow F_{\text{grav}} = GmM / R^2$$

$$\Rightarrow V_{\max} = (GM/R)^{1/2}$$

V. Rotation

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Le cas des pulsars

V.3 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Méetallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

À partir de la 3e loi de Kepler :



$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2 \lambda^2}{G(M + m)}$$

- T est la période de l'objet,
- a est le demi grand axe de la trajectoire elliptique,
- G est la constante de la gravitation universelle,
- m est la masse de la planète,
- M est la masse de l'étoile.
- $\lambda = 1 + (m/M)$

VI. Masses

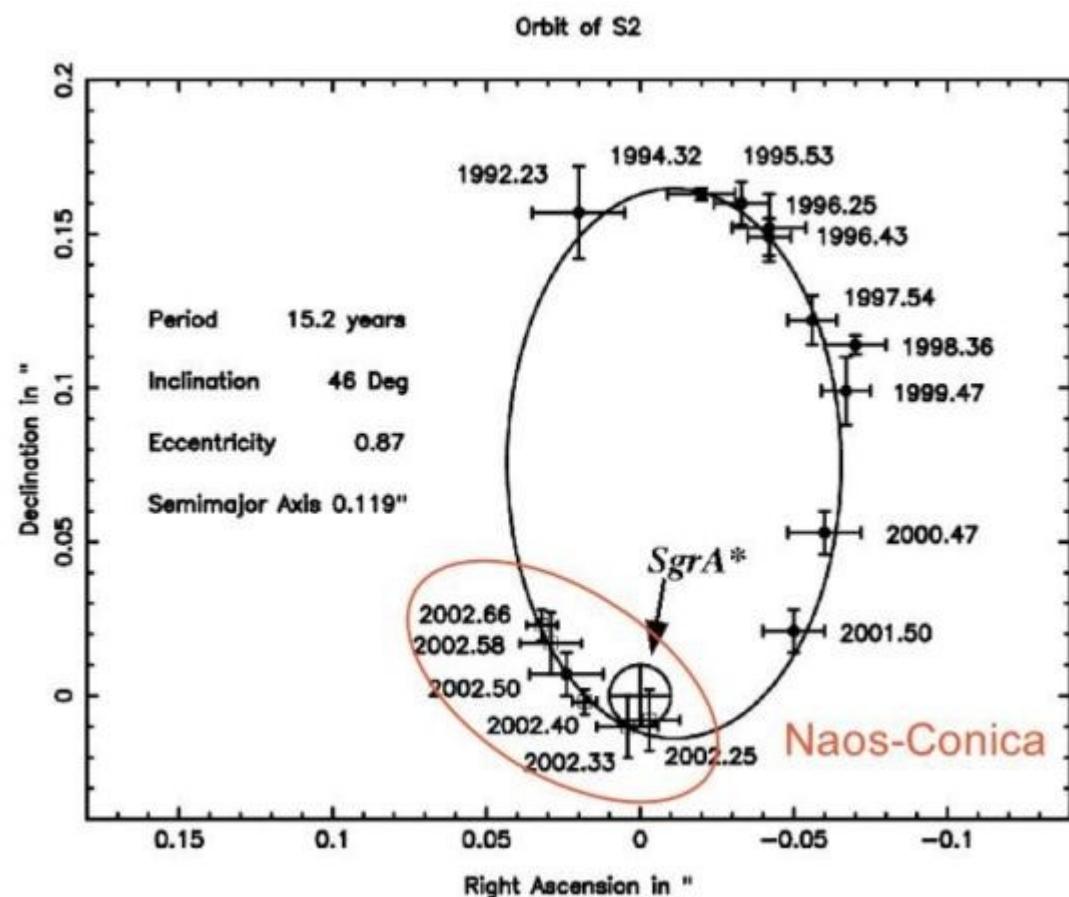
VI.1 Masse des étoiles doubles

À partir de la 3e loi de Kepler :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2 \lambda^2}{G(M + m)}$$

- T est la période de l'objet,
- a est le demi grand axe de la trajectoire
- G est la constante de la gravitation universelle
- m est la masse de la planète,
- M est la masse de l'étoile.
- $\lambda = 1 + (m/M)$

Exercice : quelle est la masse de l'objet “SgrA*” ?



VI. Masses

VI.1 Masse des étoiles doubles

À partir de la 3e loi de Kepler :

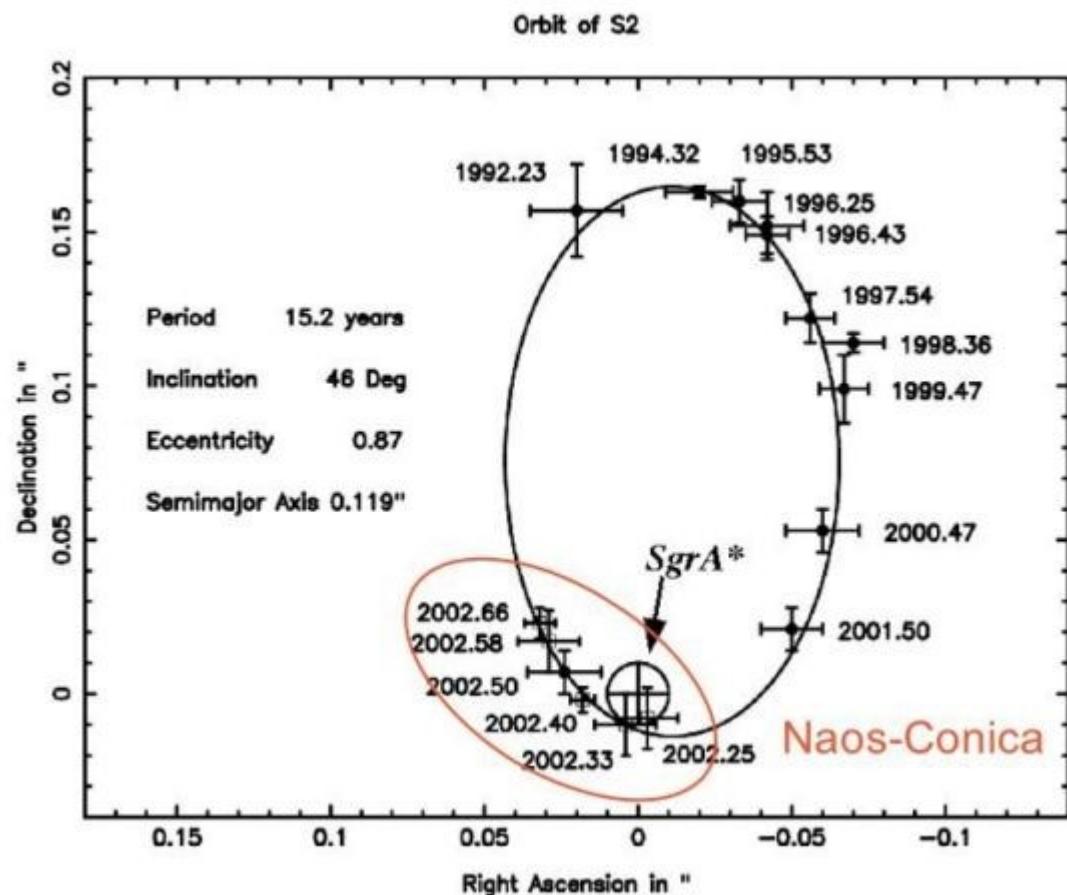
$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2 \lambda^2}{G(M + m)}$$

- T est la période de l'objet,
- a est le demi grand axe de la trajectoire
- G est la constante de la gravitation universelle
- m est la masse de la planète,
- M est la masse de l'étoile.
- $\lambda = 1 + (m/M)$

Exercice : quelle est la masse de l'objet "SgrA*" ?

→ $\sim 10^6 M_{\text{sun}}$!

→ ce n'est pas une étoile, c'est le trou noir central de la Voie Lactée



$$L/L_{\text{sun}} \sim (M/M_{\text{sun}})^{\alpha}$$

$\alpha = 3.45$ en moyenne, mais dépend de la masse des étoiles :

$\alpha = 4$ pour M in $1, 30 M_{\text{sun}}$

$\alpha = 2.4$ pour $M < 0.8 M_{\text{sun}}$

$\alpha = 2$ pour $M > 30 M_{\text{sun}}$

V. Rotation

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrique / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

II.2 Extinction interstellaire

III. Température

III.1 Rappel : les types spectraux

III.2 Détermination par le continuum

III.3 Détermination spectroscopique

III.4 Diagramme H-R

IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

IV.2 Par photométrie

V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique

V.2 Le cas des pulsars

V.3 Vitesse de rotation limite

VI. Masses

VI.1 Masses des étoiles doubles

VI.2 Relation masse-luminosité

VII. Composition chimique

VII.1 Détermination d'abondances

VII.2 Métaux

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie