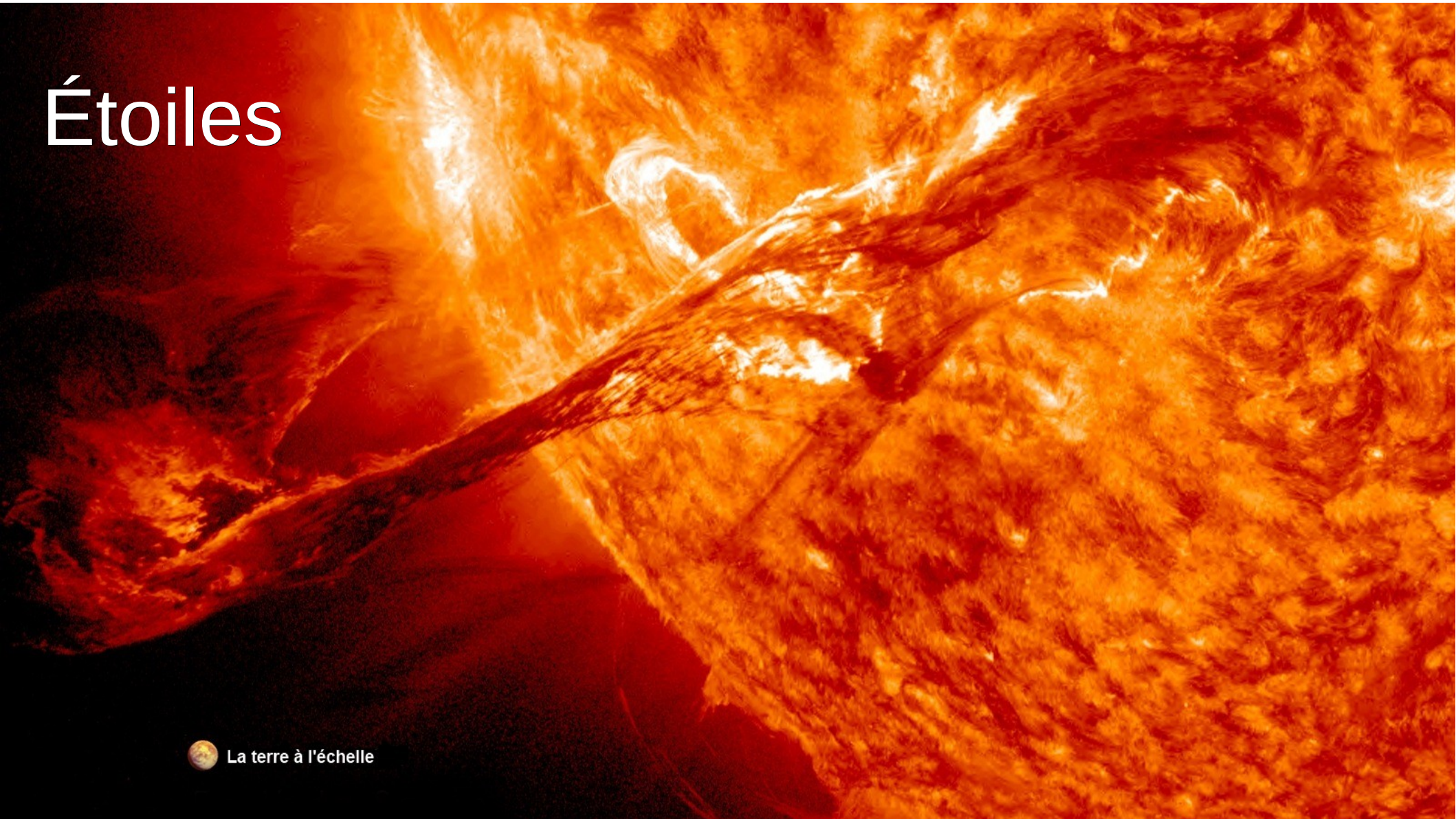



Introduction à l'astrophysique

Étoiles



 La terre à l'échelle

Plan global (10 séances)

ÉTOILES (7 séances)

Chapitre 1 : Introduction (1 séance – 11 Sept.)

- I. Vue d'ensemble
- II. Les moyens d'observation
- III. Cycle de vie des étoiles

Chapitre 2 : Caractérisation observationnelle des étoiles (3 séances – 18 et 25 Sept.)

- I. Distances II. Luminosité III. Température IV. Dimensions
- V. Rotation VI. Masses VII. Composition chimique VIII. Âges
- + TDO Diagramme Hertzsprung-Russell (1 séance – 6 Nov.)

Chapitre 3 : Structure et stabilité des étoiles (2 séances – 2 et 9 Oct.)

- I. Équations fondamentales
- II. Comment résister à l'effondrement gravitationnel
- III. Nucléosynthèse

COSMOLOGIE (1 séance – 23 Oct.)

- I. Un peu d'histoire
- II. Dynamique universelle : l'Univers est en expansion
- III. Le fond diffus cosmologique

CONTROLE (1 séance – 6 Nov.)

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

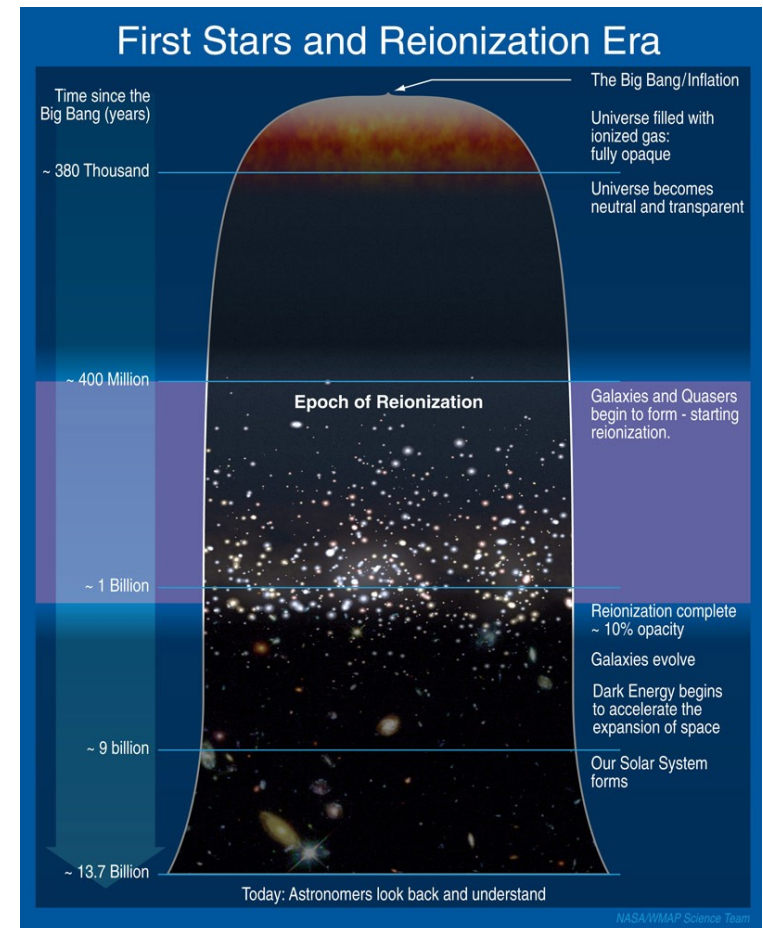
III. Cycle de vie des étoiles

I. Vue d'ensemble

I.1 Contexte général

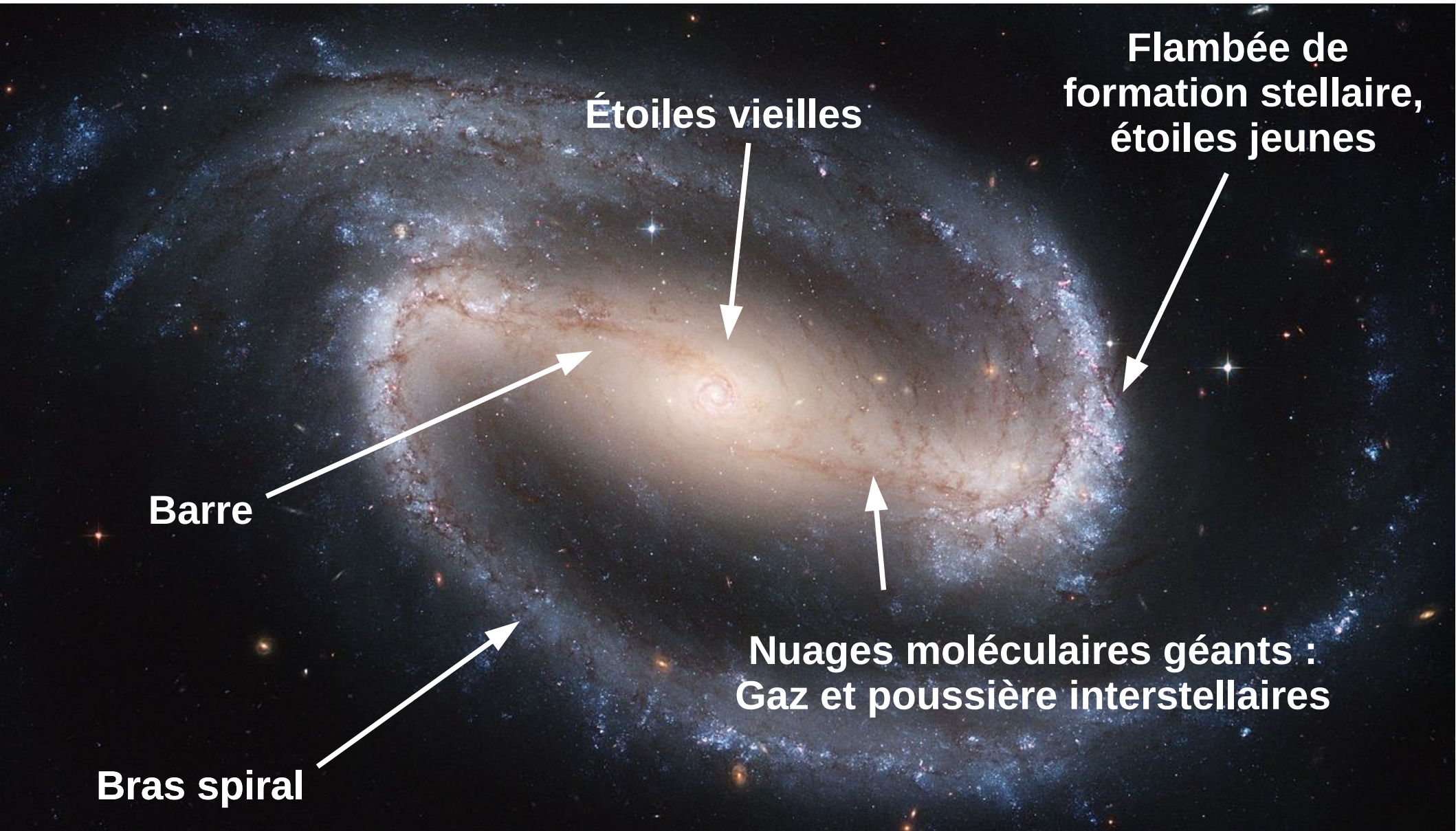
Étoiles = une brique élémentaire dans les structures de l'Univers

Video from: <http://www.tapir.caltech.edu/~phopkins/Site/Welcome.html>



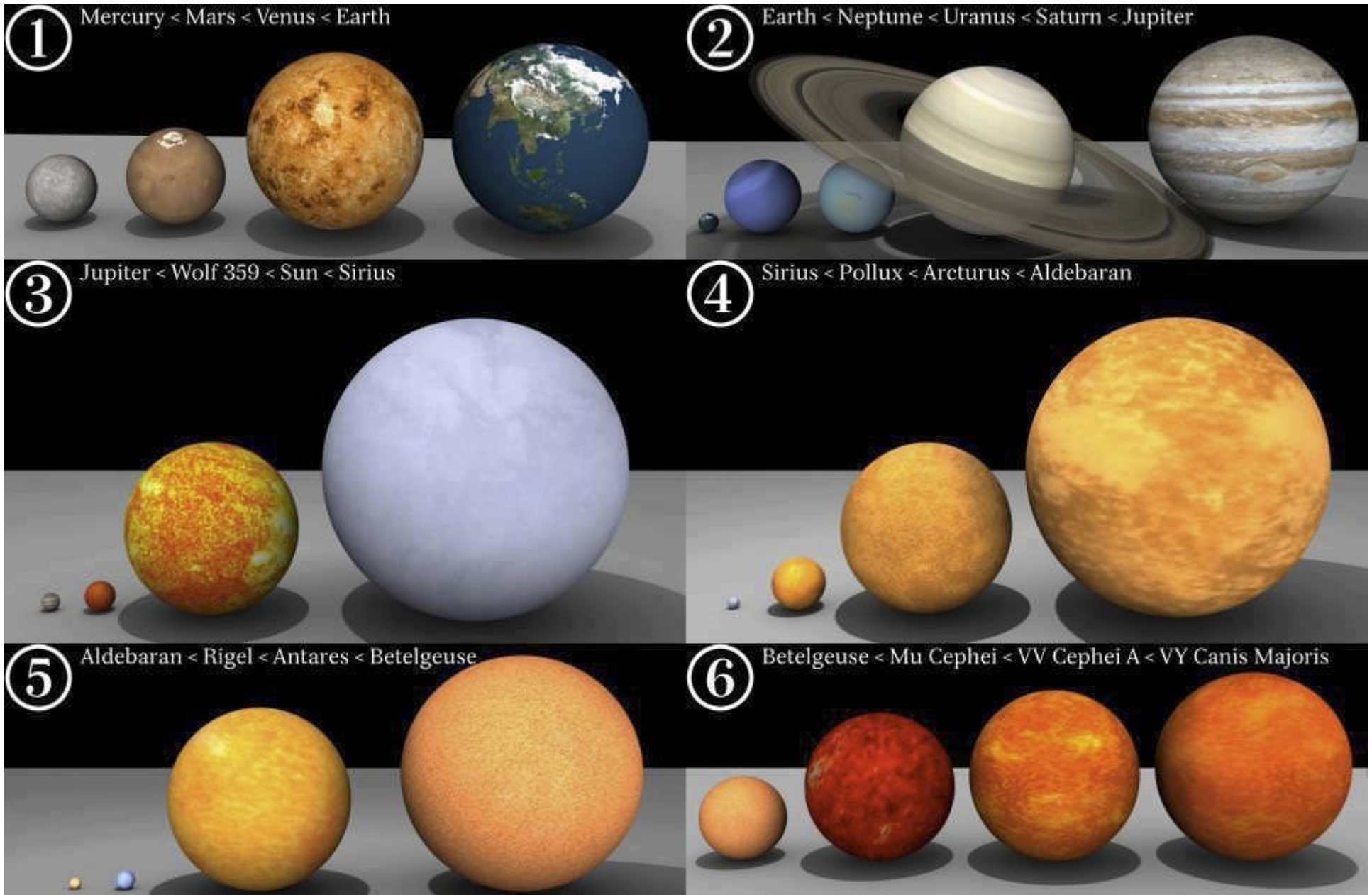
N.B. $t[\text{Myr}] = 10748 * [\text{arcsinh}(1.6443) - \text{arcsinh}(1.6443 (1+z)^{-3/2})]$
<http://www.math.kth.se/~lang/distance.htm>

I. Vue d'ensemble
I.1 Contexte général



I. Vue d'ensemble


I.2 Ordres de grandeurs



I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs





I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

Naines brunes : $M = 0.01 M_{\text{sun}} (\sim 10 M_{\text{J}}) \rightarrow 0.07 M_{\text{sun}}$ (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

I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

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

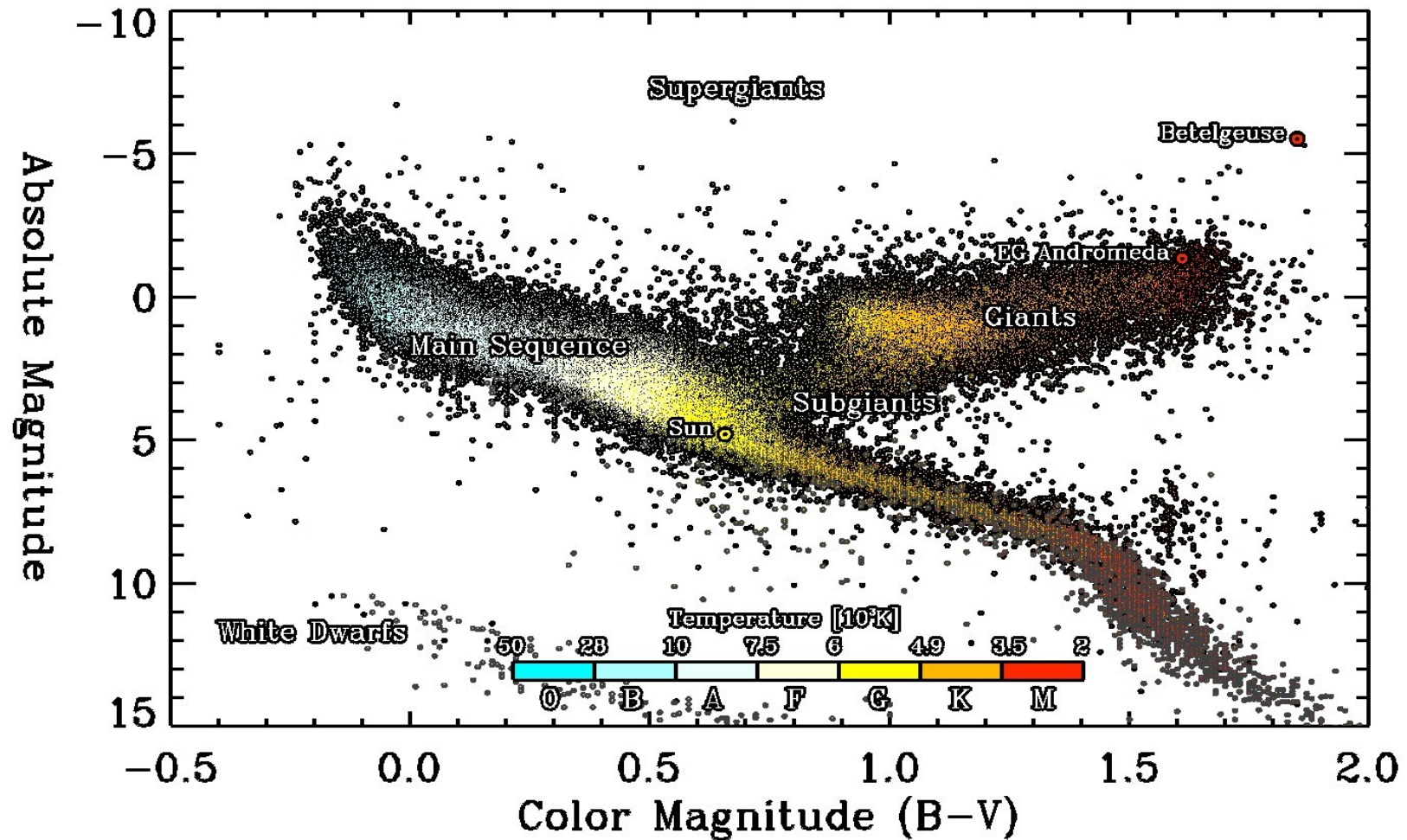
Supergiant Stars (Luminosity Class Approximately Iab)

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

I. Vue d'ensemble

I.2 Ordres de grandeurs

1913 – Hertzsprung et Russell



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

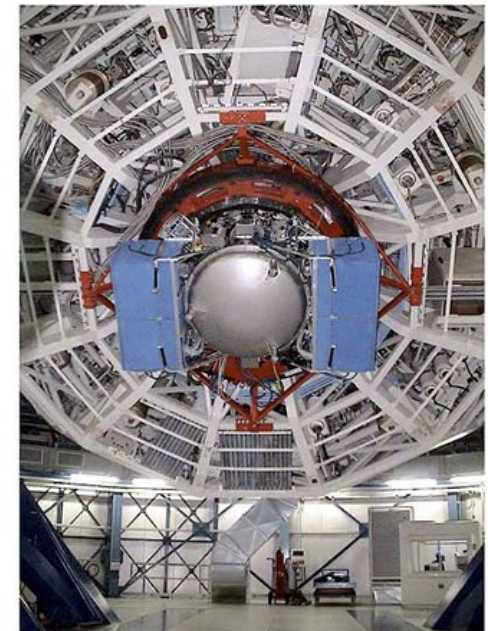
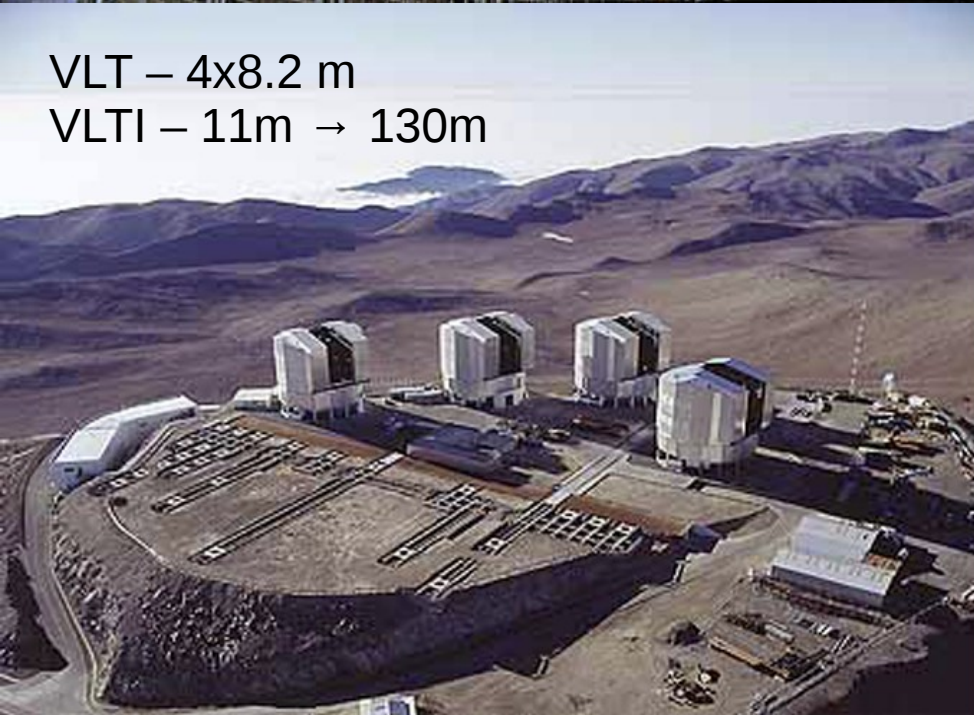
II.5 Interférométrie

III. Cycle de vie des étoiles

IV. Conclusions

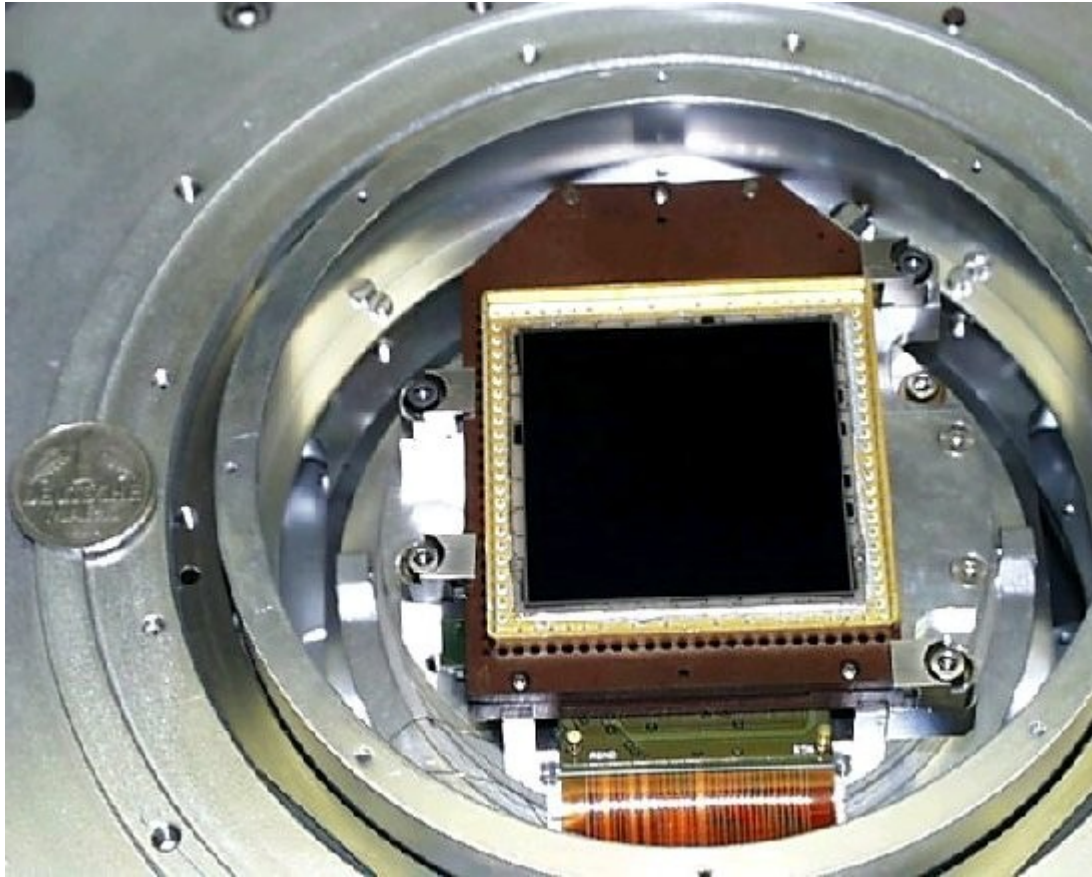
II. Observables et moyens d'observation

II.1 Télescopes

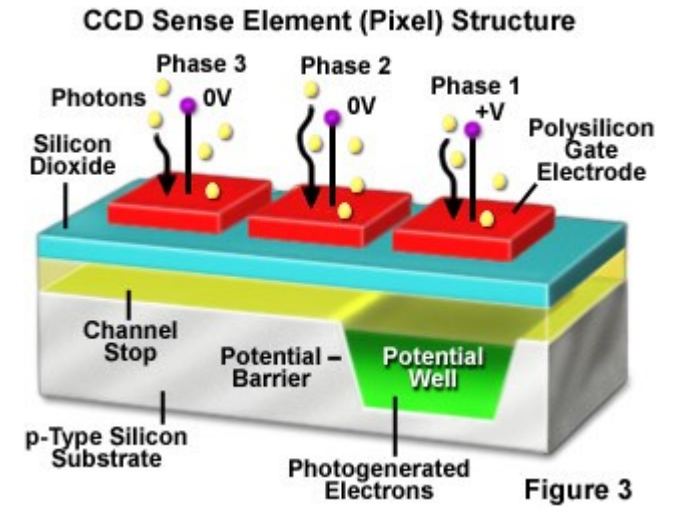


II. Observables et moyens d'observation

II.2 CCD

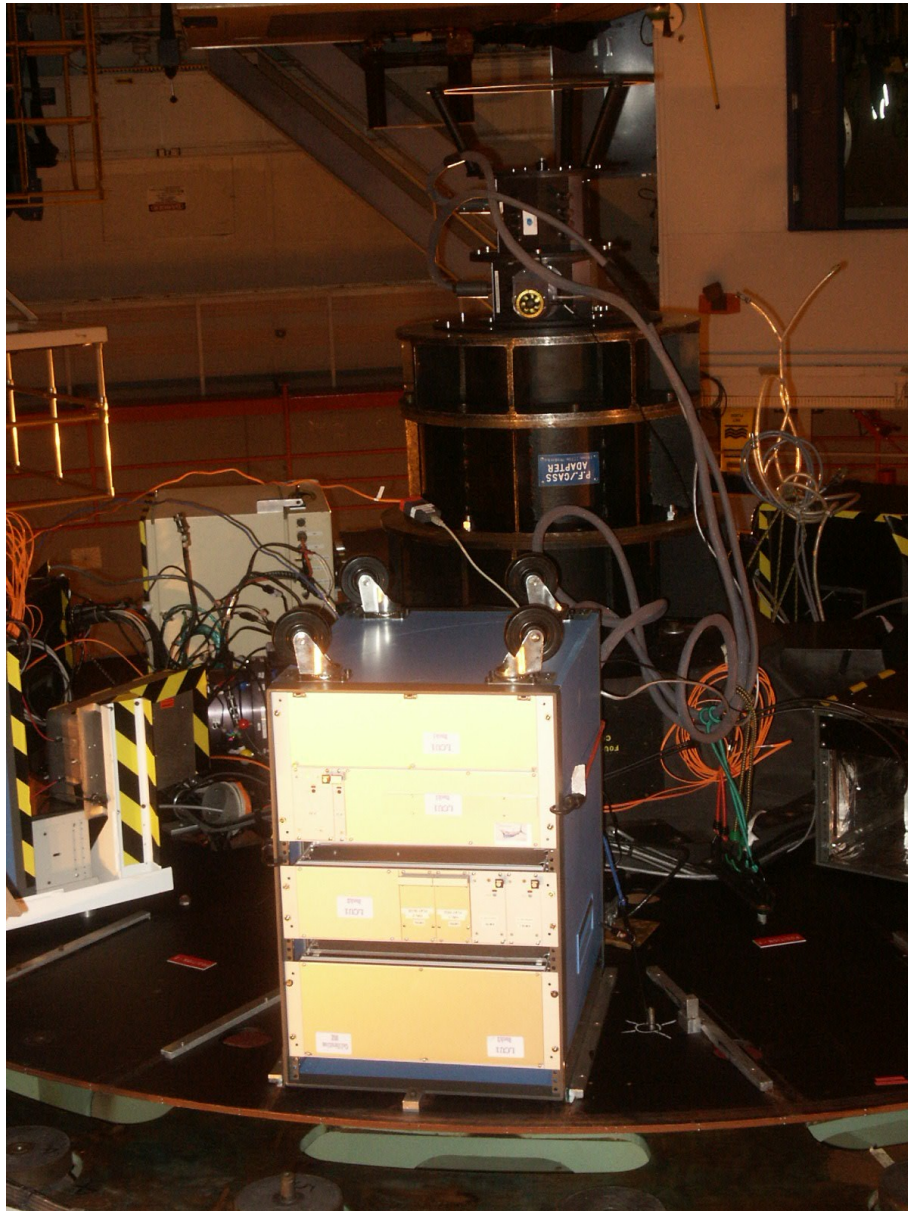


FORS1 / VLT

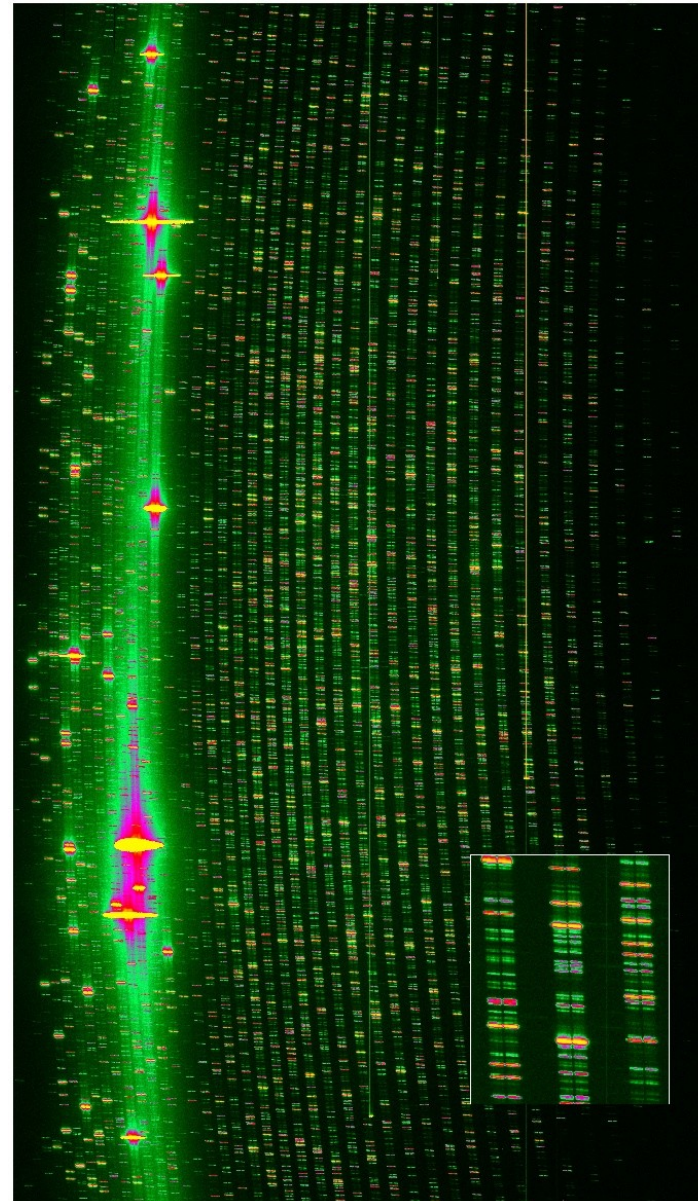


II. Observables et moyens d'observation

II.3 Spectroscopie

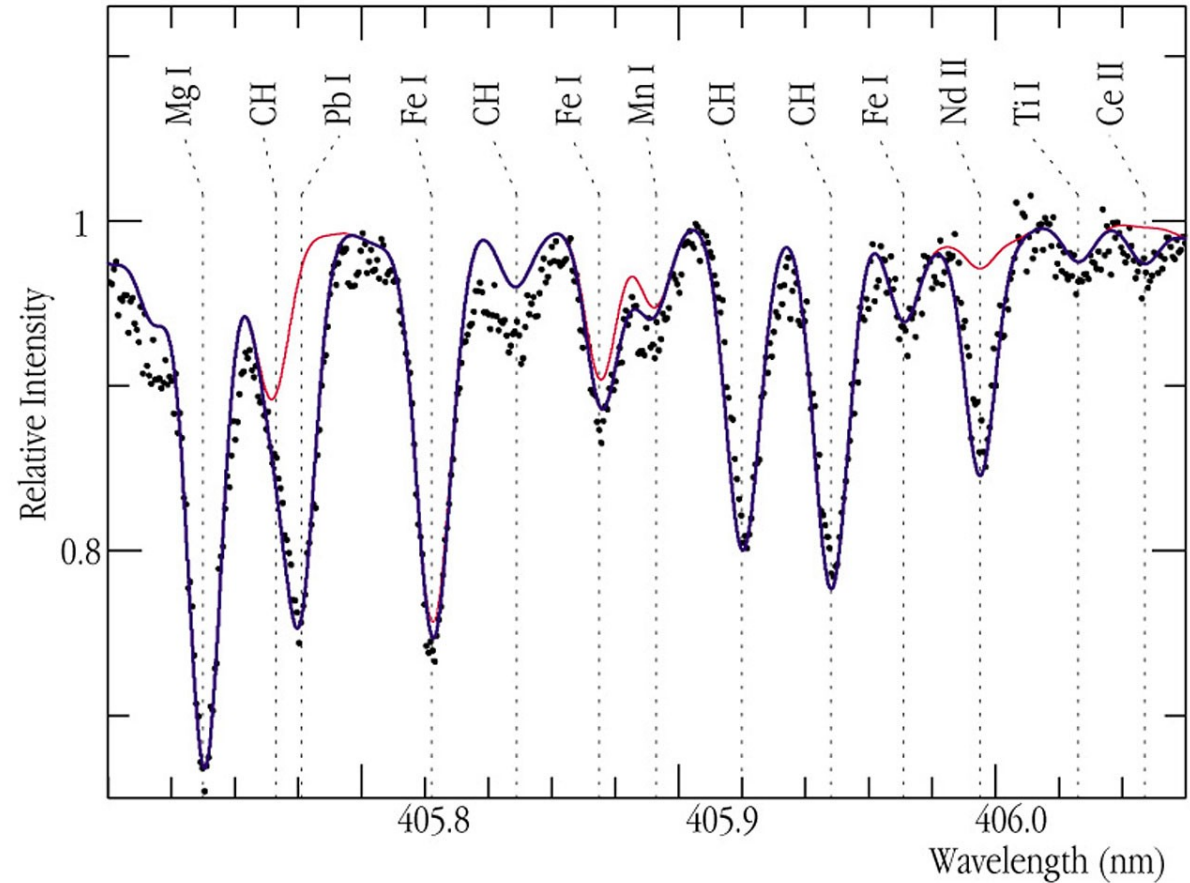
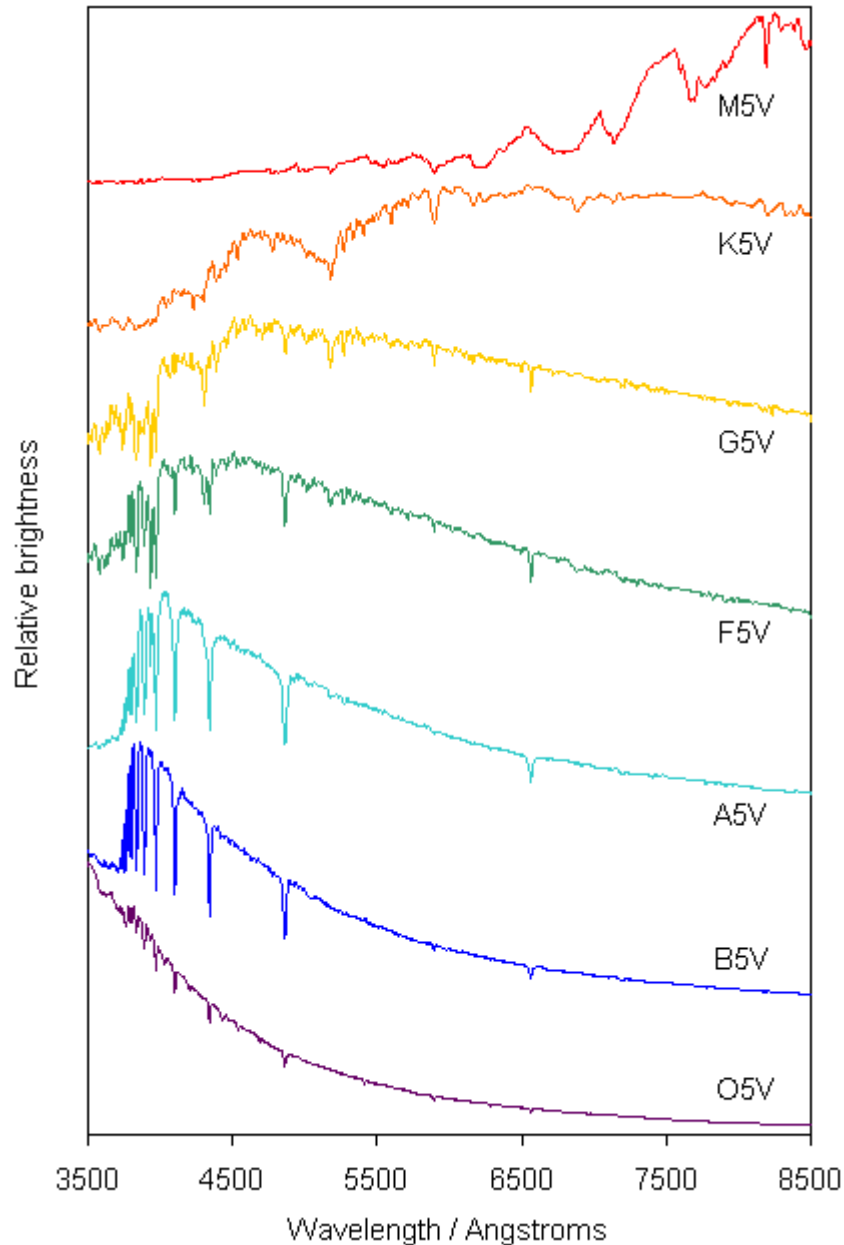


ESPaDOnS: an Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars at CFHT



II. Observables et moyens d'observation

II.3 Spectroscopie



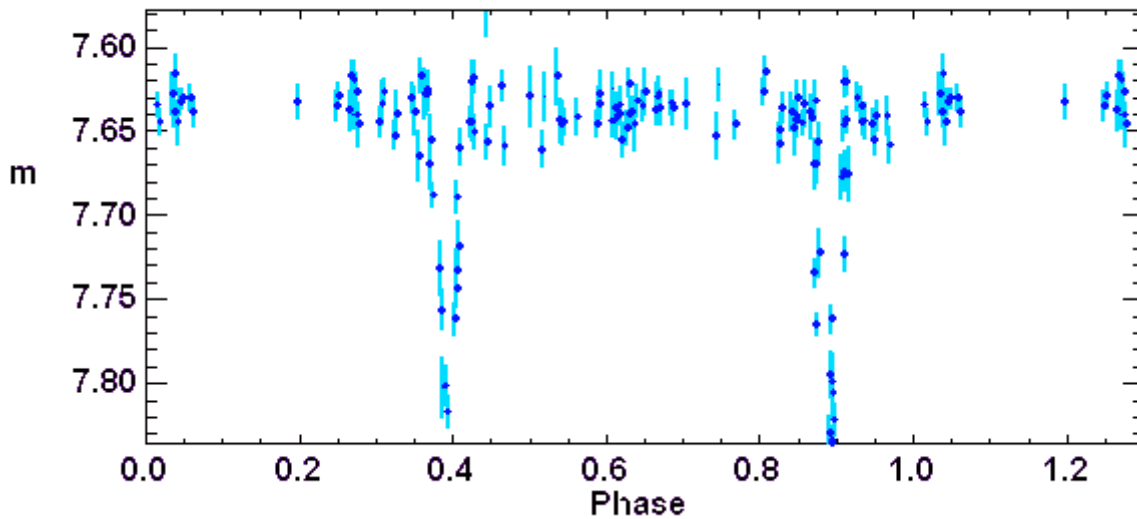
- type spectral, composition chimique, vitesse radiale, ...
- contraintes modèles d'atmosphère stellaire
- => structure, gravité, rotation, ...

II. Observables et moyens d'observation

II.4 Photométrie

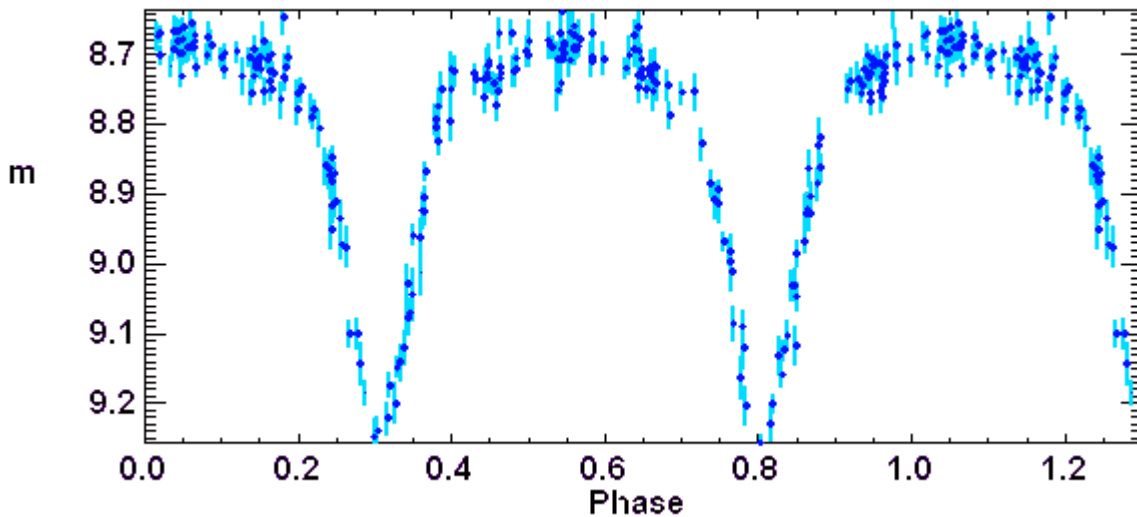
Courbe de lumière (=évolution temporelle de la luminosité)

Hip 53806



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

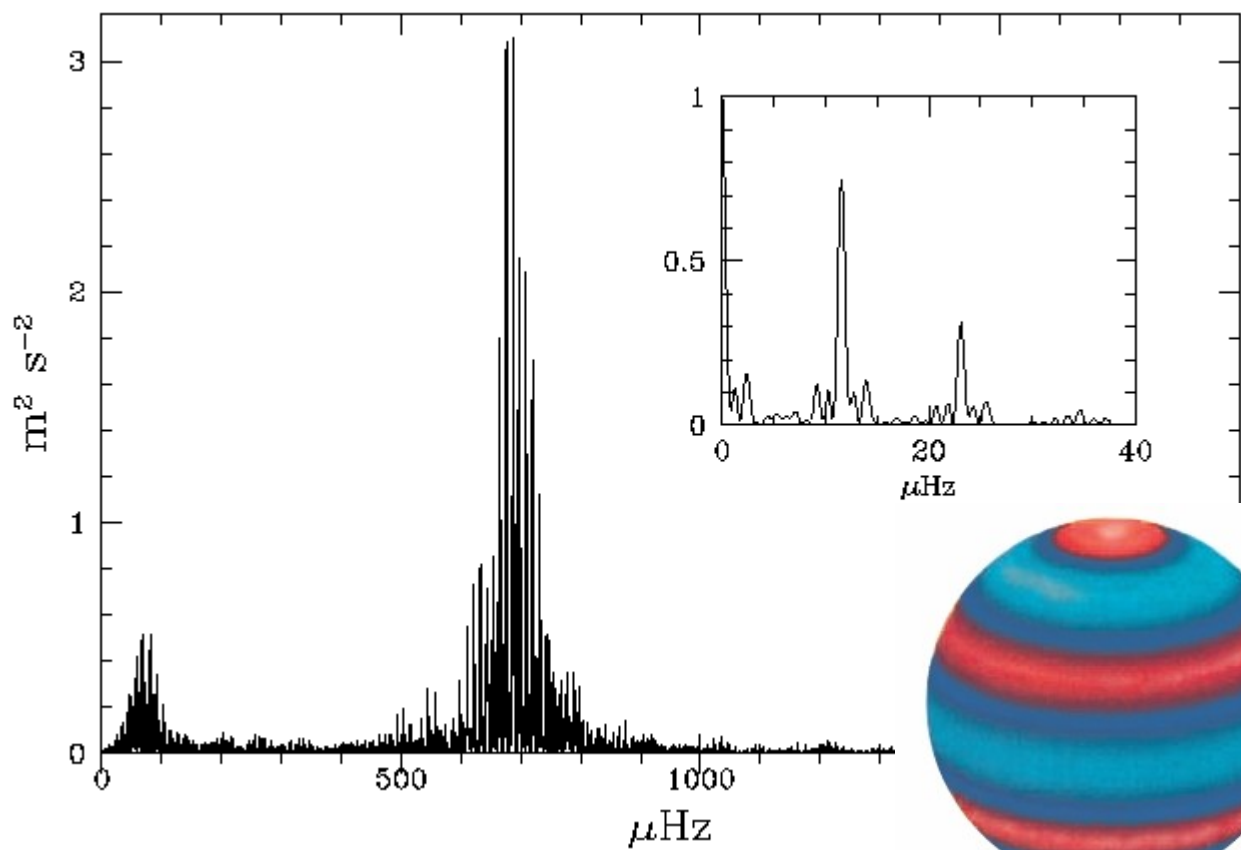
Hip 48188



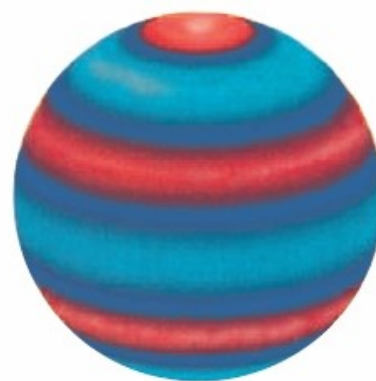
Courbe de lumière d'une étoile de type Beta Lyrae. Observations du satellite européen Hipparcos

II. Observables et moyens d'observation

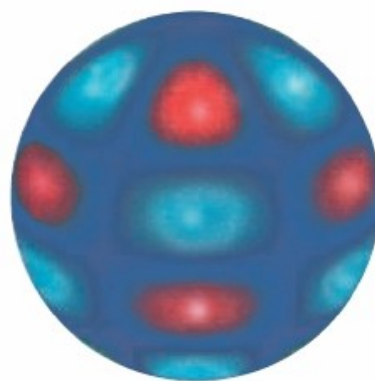
II.4 Photométrie



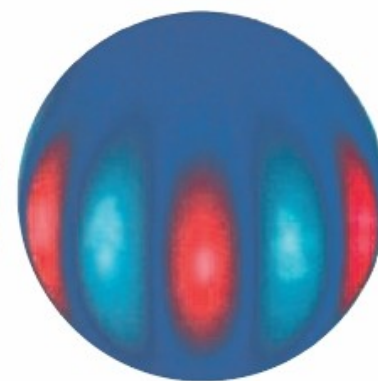
Courbe de lumière haute
résolution/longue durée pour
l'astérosismologie



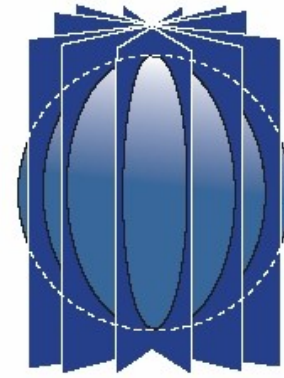
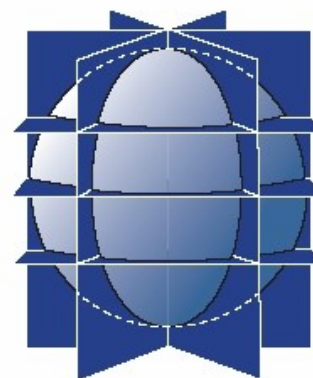
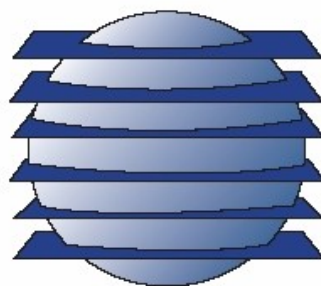
$l=6 m=0$



$l=6 m=3$



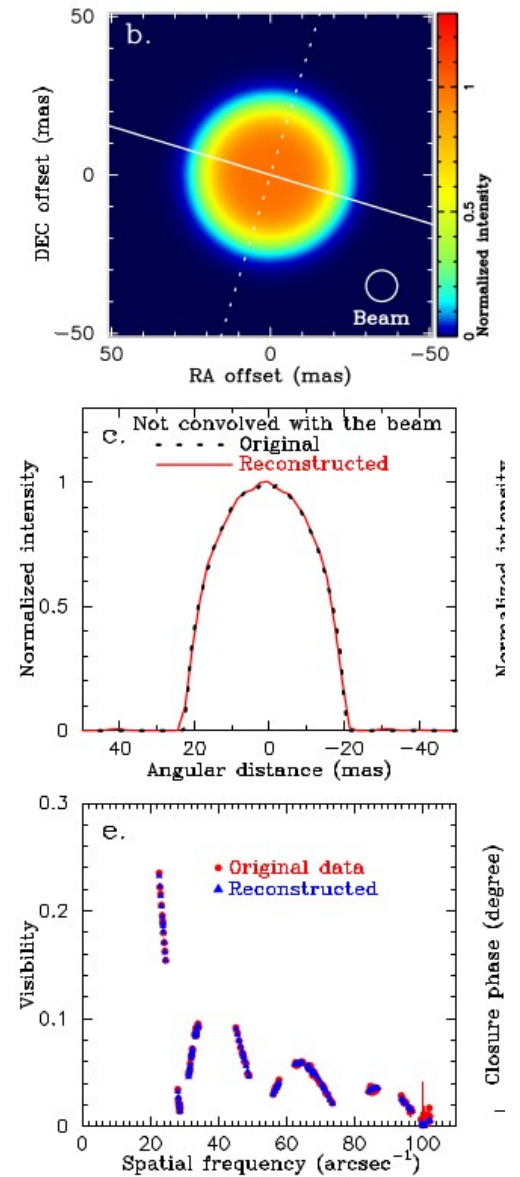
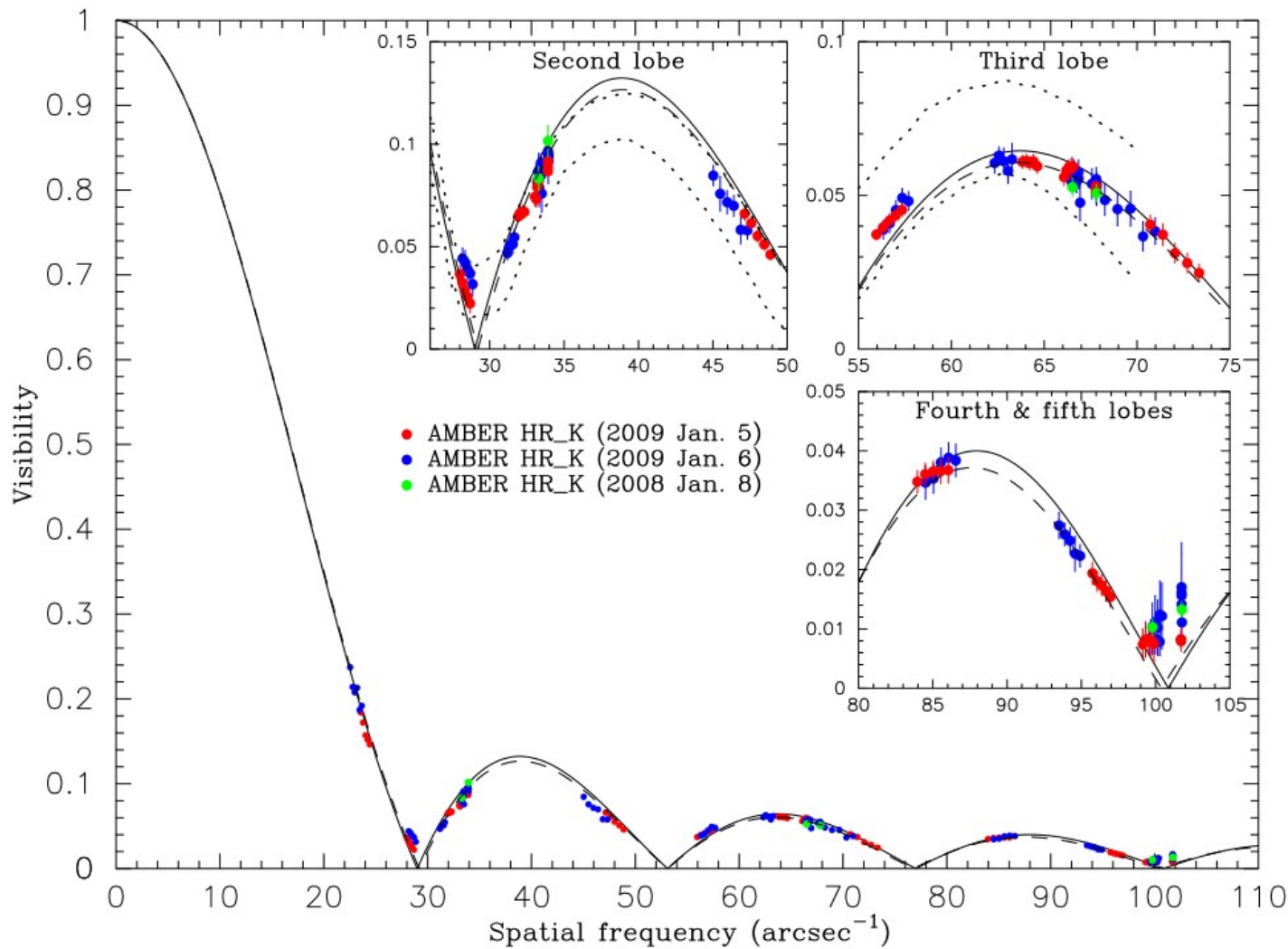
$l=6 m=6$



II. Observables et moyens d'observation

II.5 Interférométrie

Interférométrie : Visibilité des franges d'interférence



I. Vue d'ensemble

II. Observables et moyens d'observation

III. Cycle de vie des étoiles

III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie

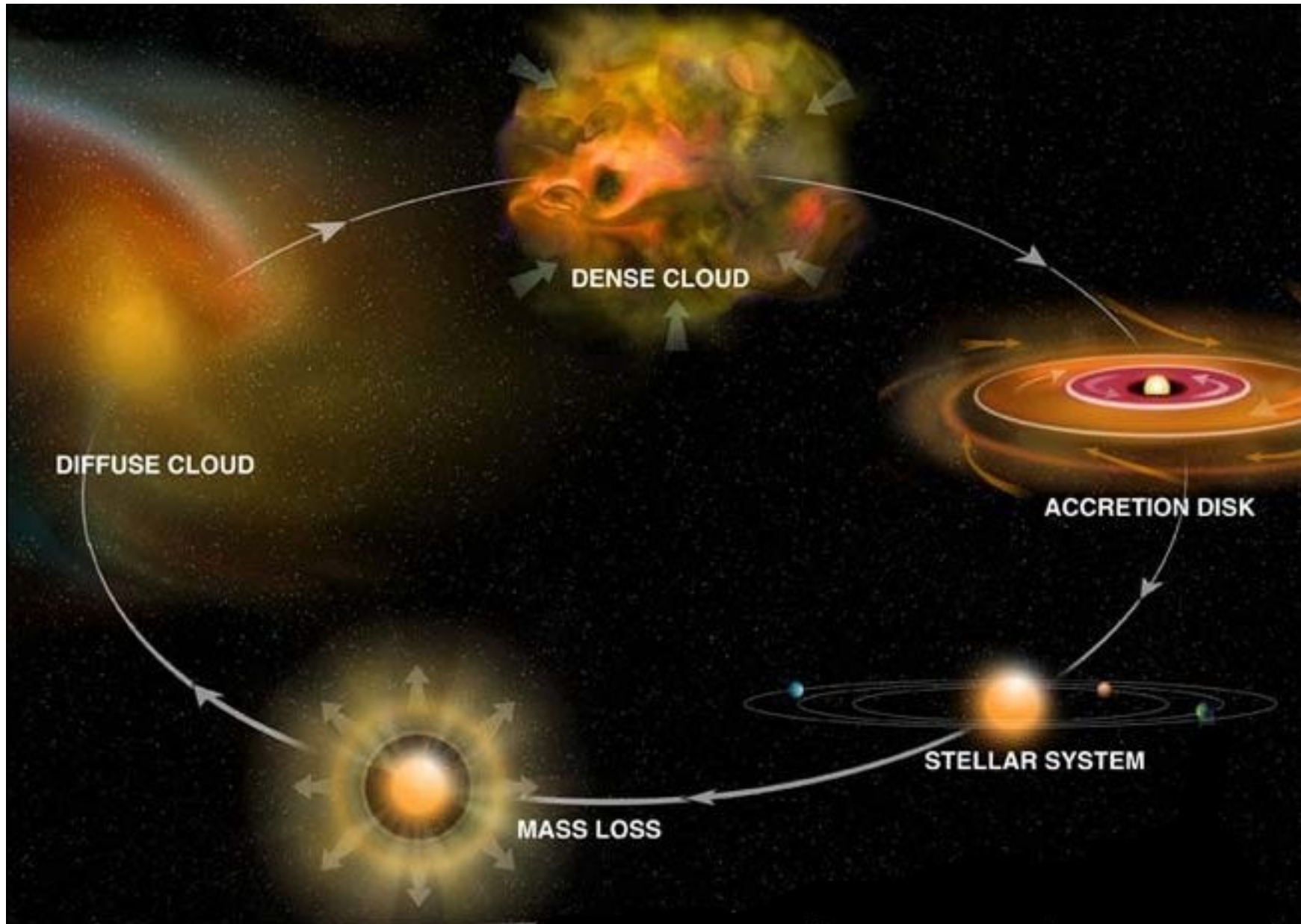
III.2 Naissance

III.3 Évolution

III.4 Mort

III. Cycle de vie des étoiles

III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie

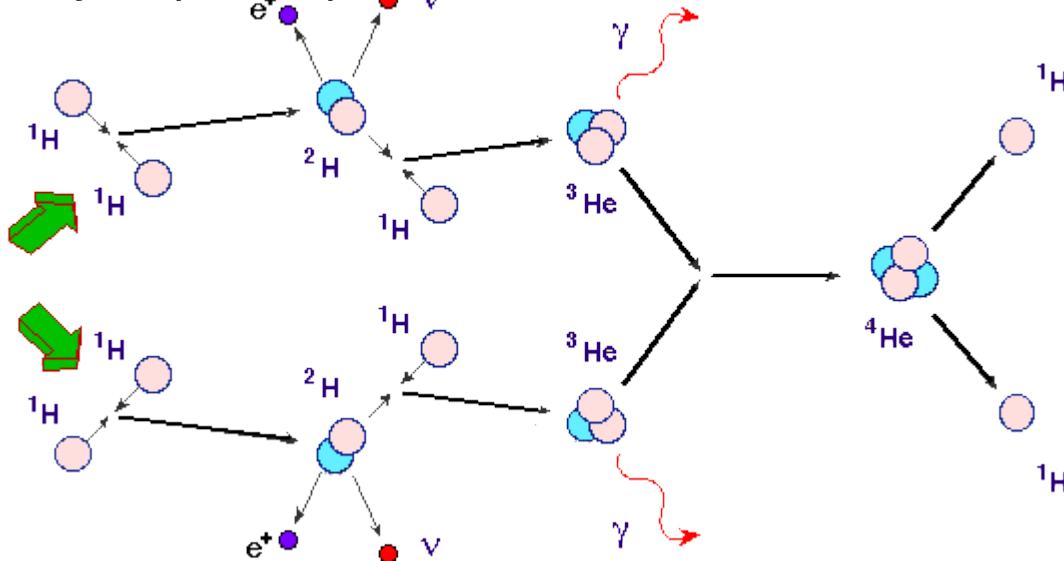


III. Cycle de vie des étoiles

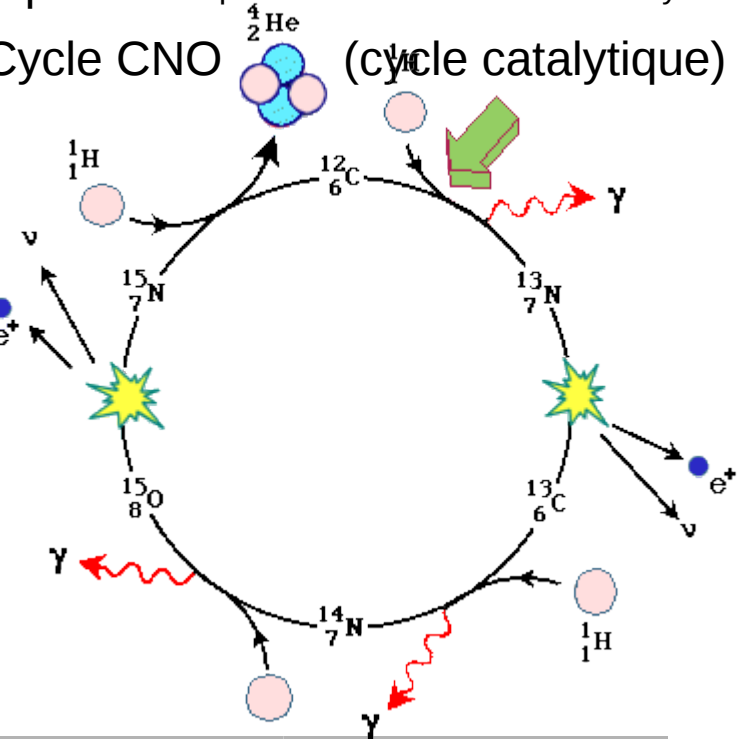
III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie

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

Cycle proton-proton



Cycle CNO (cycle catalytique)

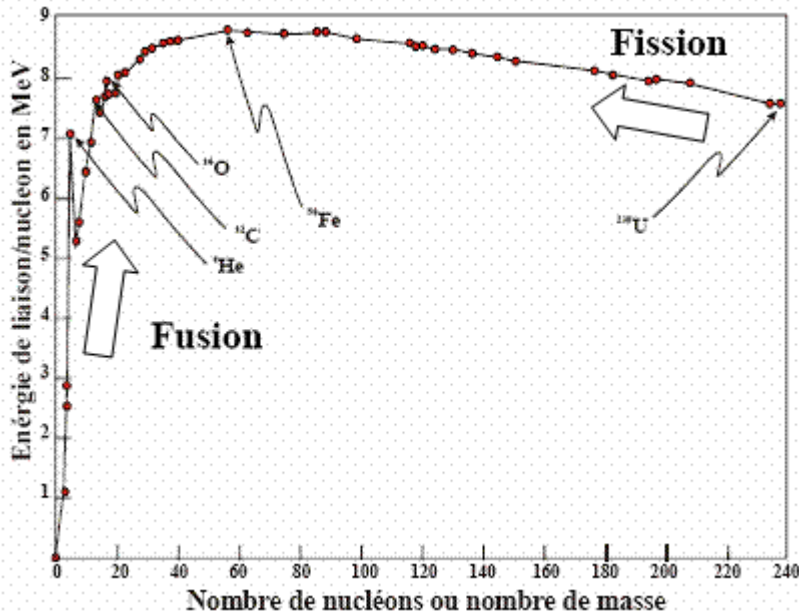


Formation des éléments au coeur des étoiles évoluées :

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

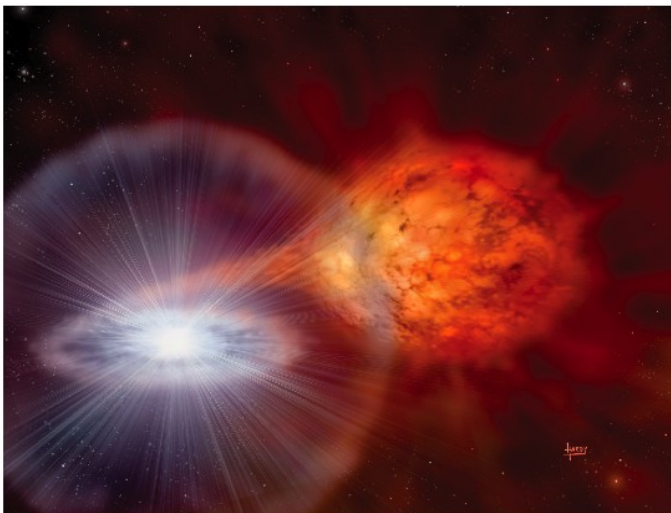
III.1 Rôle des étoiles dans la Galaxie



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 $M > 1.44 M_{\text{sun}}$

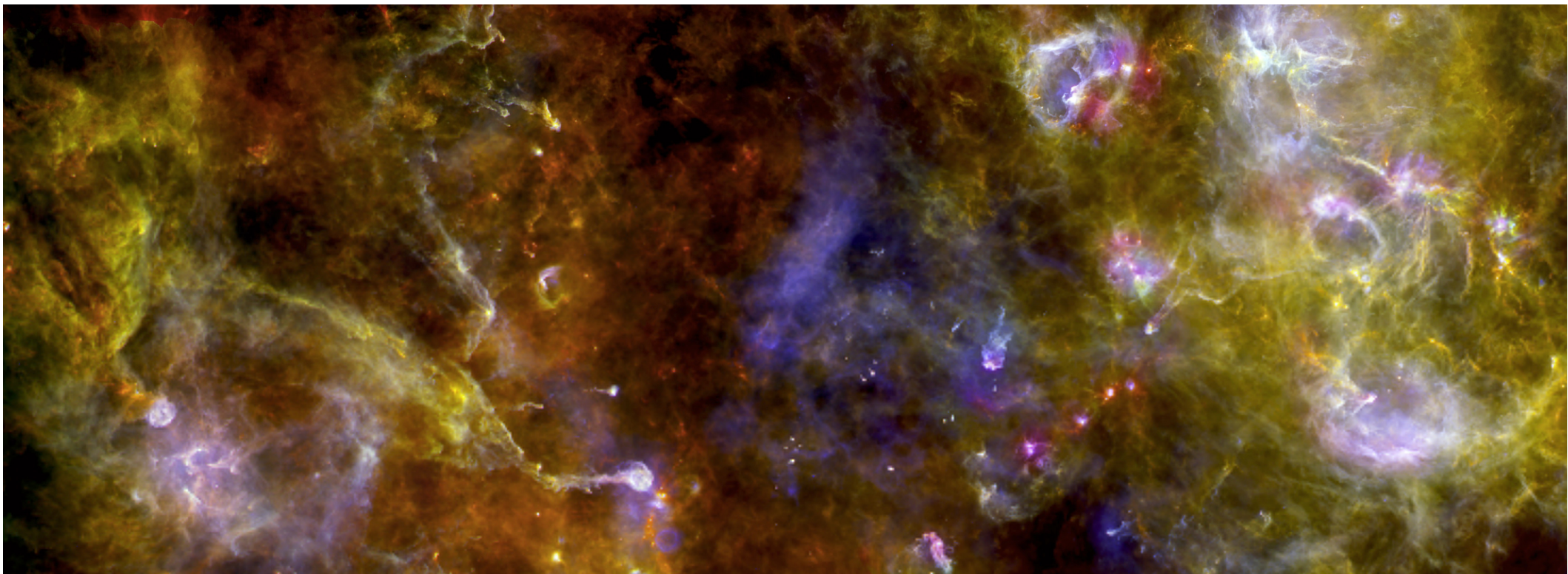
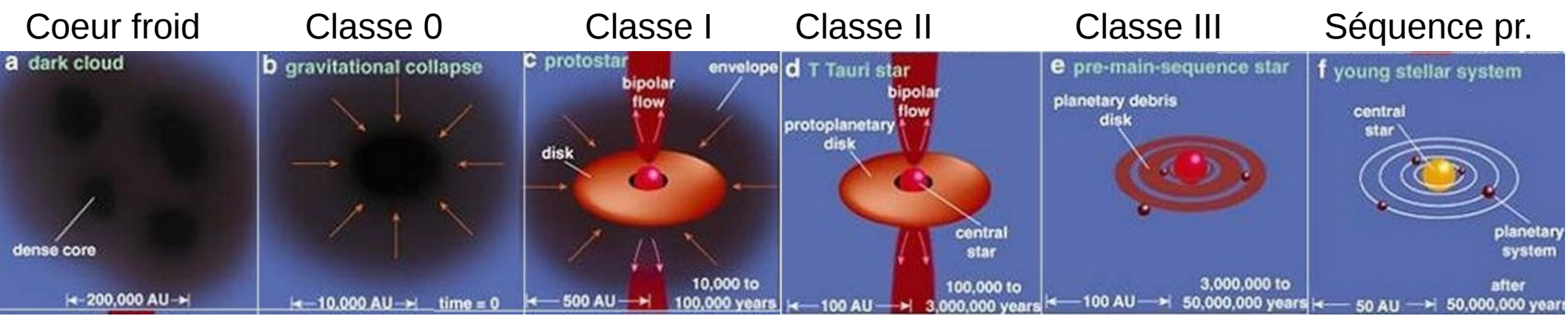
\Rightarrow supernova thermonucléaire (= SN Ia)

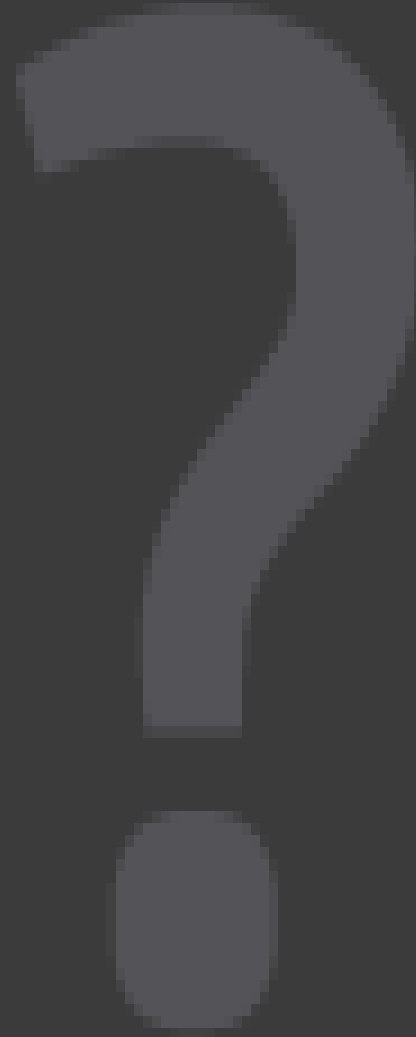
SN Ia : plus forte proportion de Fe

Temps caractéristique \sim qq Gyr

III. Cycle de vie des étoiles

III.2 Naissance des étoiles



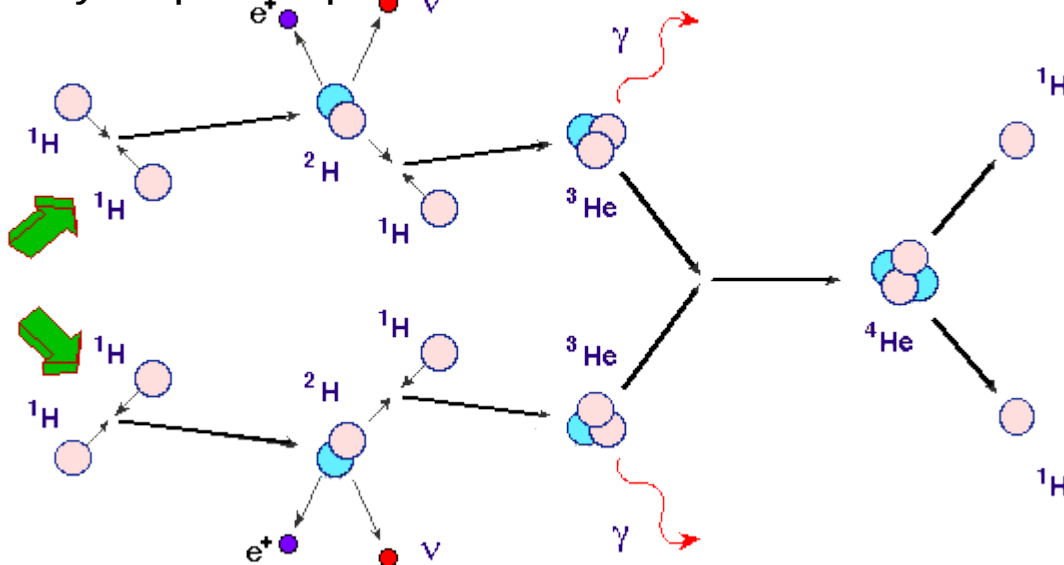


III. Cycle de vie des étoiles

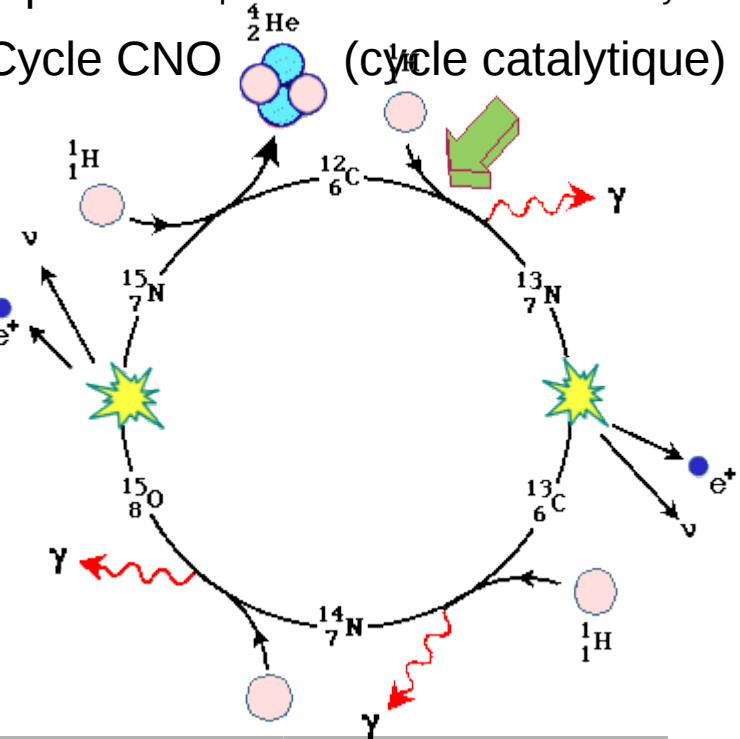
III.3 Évolution des étoiles

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

Cycle proton-proton



Cycle CNO (cycle catalytique)



Formation des éléments au coeur 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

Mycn18



Nebuleuse du sablier

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



<http://www.gurumed.org/2013/01/09/la-vido-dune-toile-neutrons-en-pleine-action/>



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / spectroscopique

II. Luminosité

- II.1 Grandeurs 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 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrie / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs 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

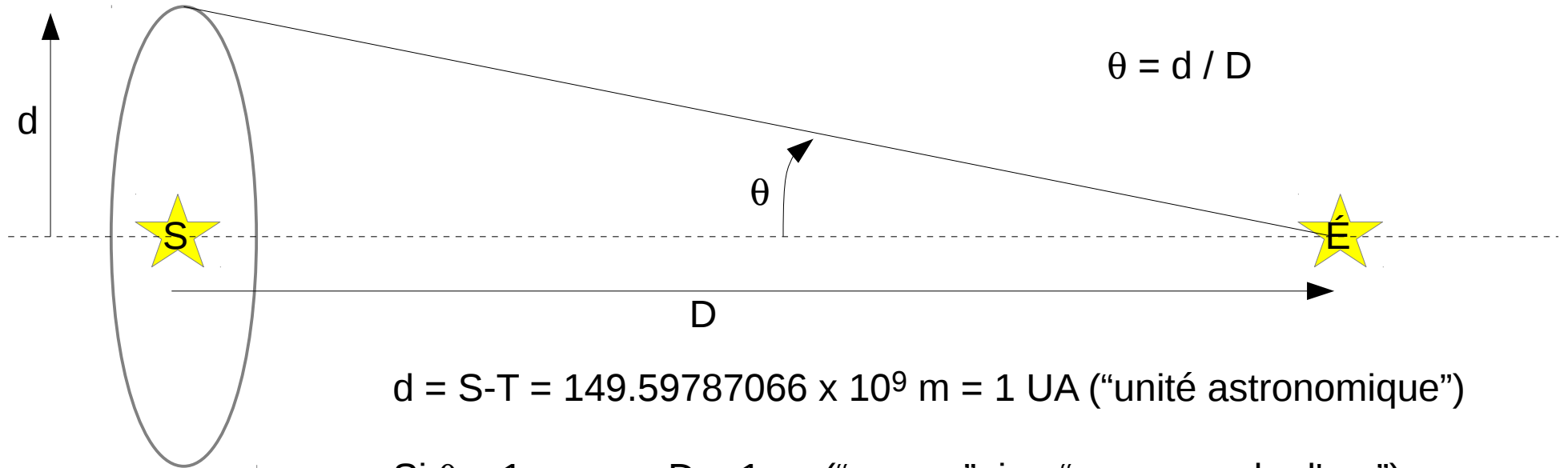
VII.2 Métallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Unités



$$d = S-T = 149.59787066 \times 10^9 \text{ m} = 1 \text{ UA ("unité astronomique")}$$

$$\text{Si } \theta = 1 \text{ arcsec, } D = 1 \text{ pc ("parsec", i.e. "par seconde d'arc")}$$

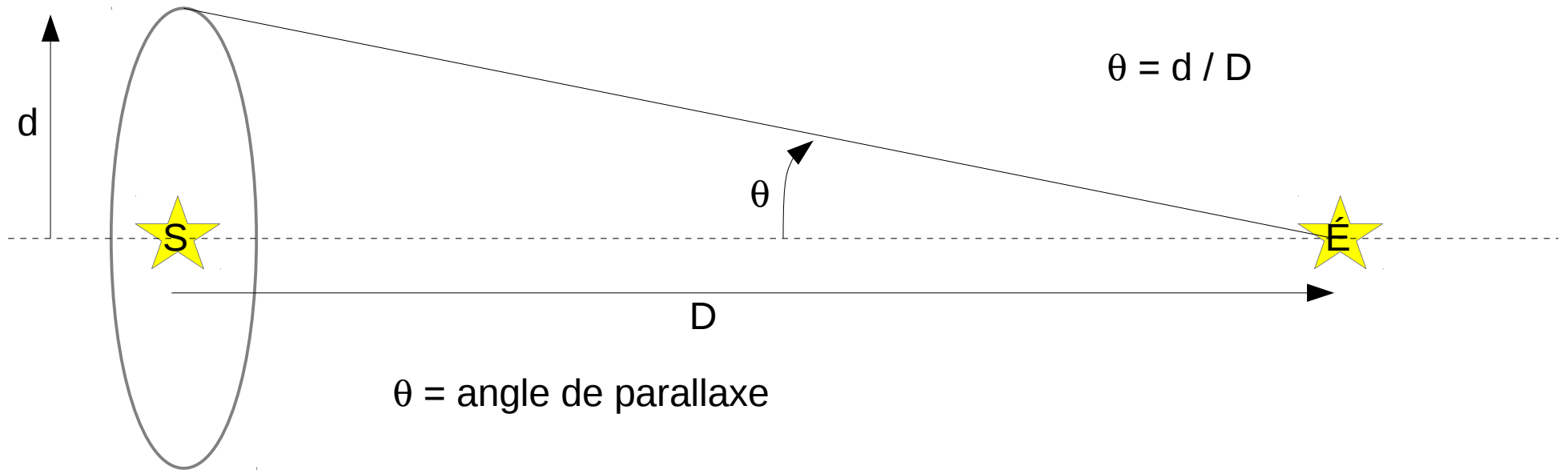
Exercice :

Diamètre angulaire de Bételgeuse = 40 mas ("milli-arcsec"),

Diamètre linéaire = $650 R_{\text{sun}}$

Distance en pc ? En UA ? En km ?

Méthode des parallaxes (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 : $D[\text{pc}] = \text{sqrt}(2) V_R / (4.74 \mu["])$
 - valeurs moyennes sur un groupe homogène d'étoiles

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrie / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs 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 Métallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Méthode photométrique



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

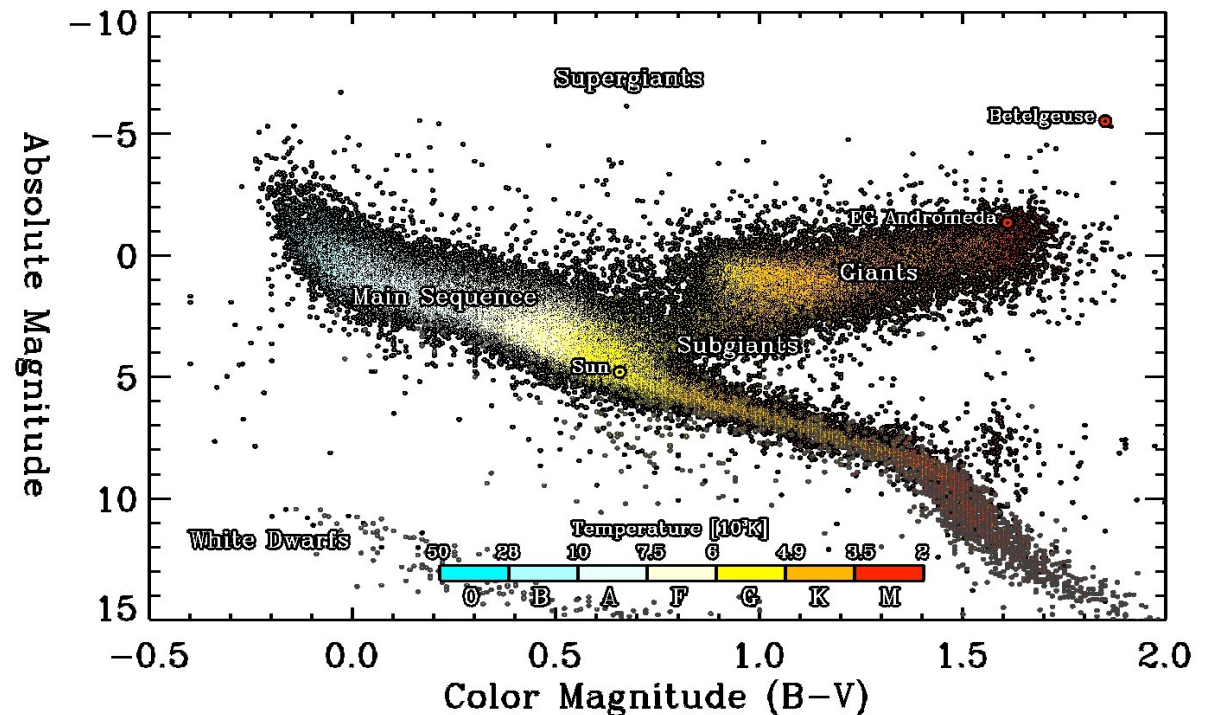
Chandelles standards (ou chandelles cosmiques)	Portée
RR Lyrae ($M_V = 0.71 \pm 0.07$)	2 Mpc
Céphéïdes (relation période-luminosité)	30 Mpc
Novea ($M_V = -6.5$ au max)	40 Mpc
Amas globulaires ($M_V = -7.5$ au max)	50 Mpc
Supernovae SNI ($M_{V,\text{MAX}} = -16$)	3 Gpc
Supernovae SNIa ($M_{V,\text{MAX}}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

I. Distances

I.2 Photométriques / spectroscopiques

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 $L_{\text{app}} = L (D_0/D)^2$ (et correction pour l'extinction interstellaire)



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrie / spectroscopique

II. Luminosité

II.1 Grandeurs 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 Métallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

II. Luminosité

II.1 Grandeurs et magnitudes

Magnitude : définition

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

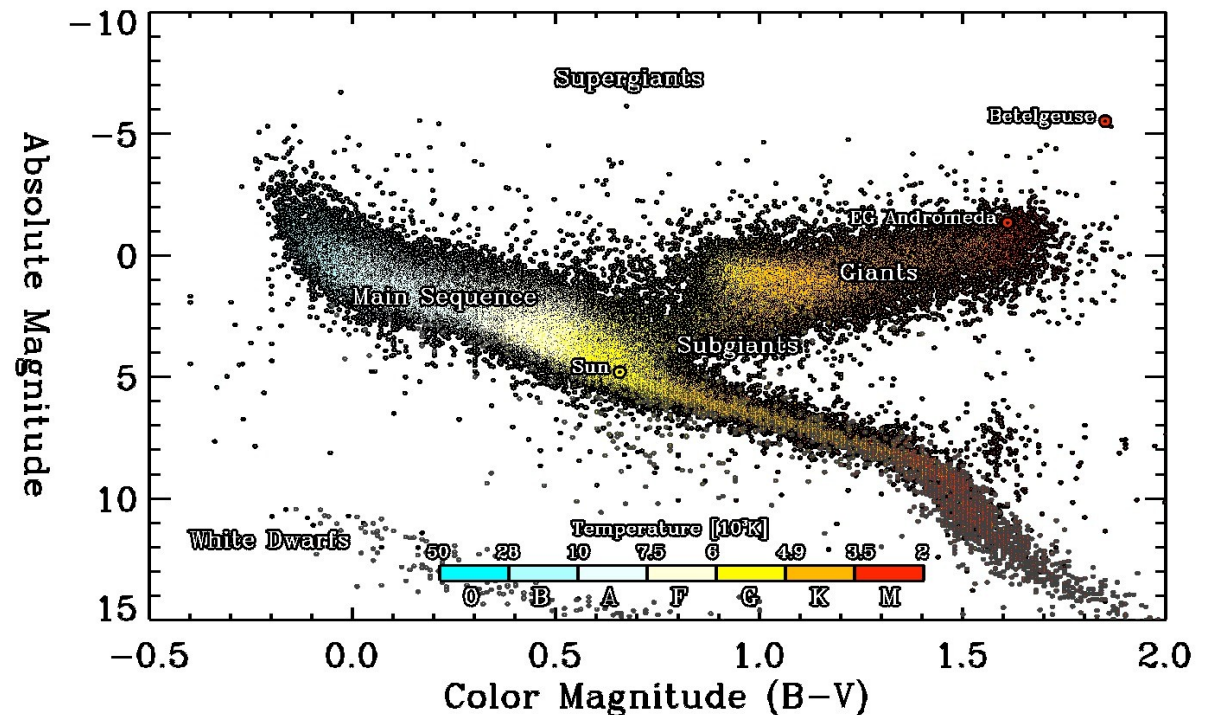
F_0 = flux pour une étoile blanche à 10 pc (Véga = une référence habituelle)

O.G. Dans la bande V
œil < 6

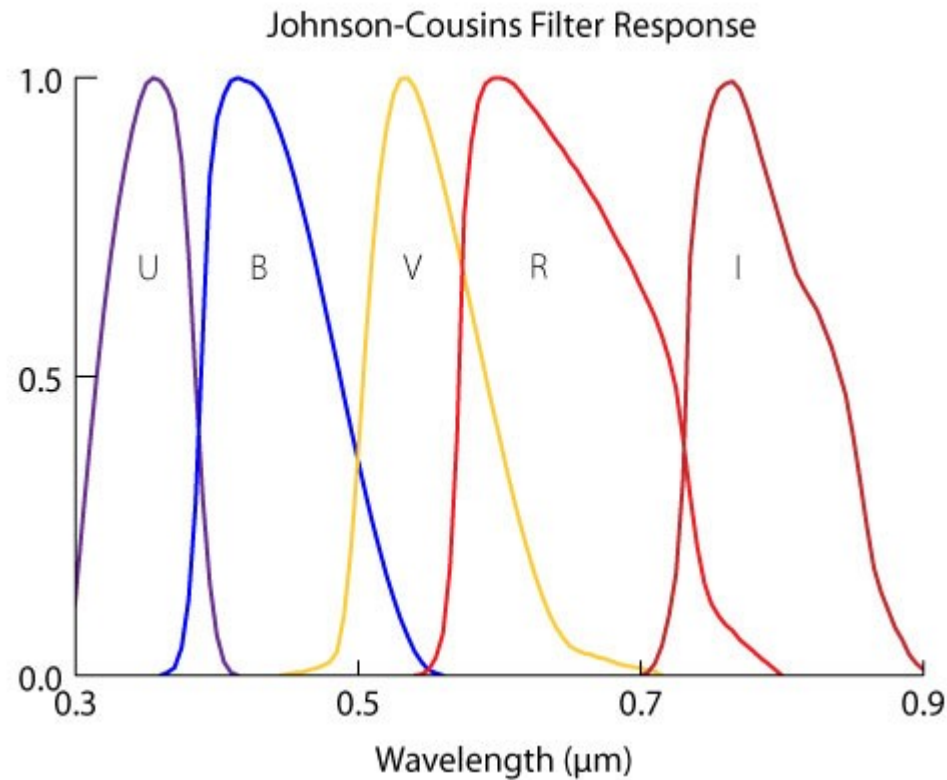
HST < 31

Soleil apparent = -26.7

Étoiles apparentes > -1



Bandes photométriques



Indices de couleur :

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

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

I.1 Cinématique

I.2 Photométrie / 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 Métallicité

VIII. Âges

VIII.1 Rappel : Évolution stellaire

VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

II. Luminosité

II.2 Extinction interstellaire

Extinction = absorption + diffusion

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

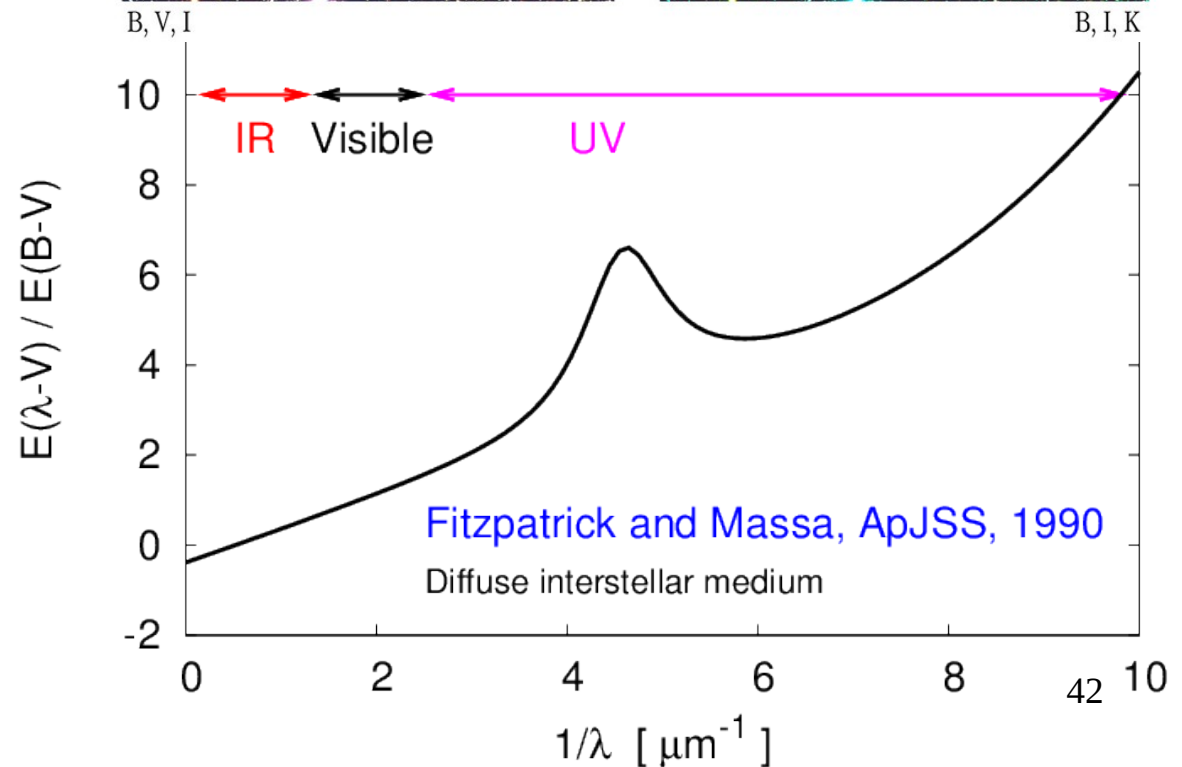
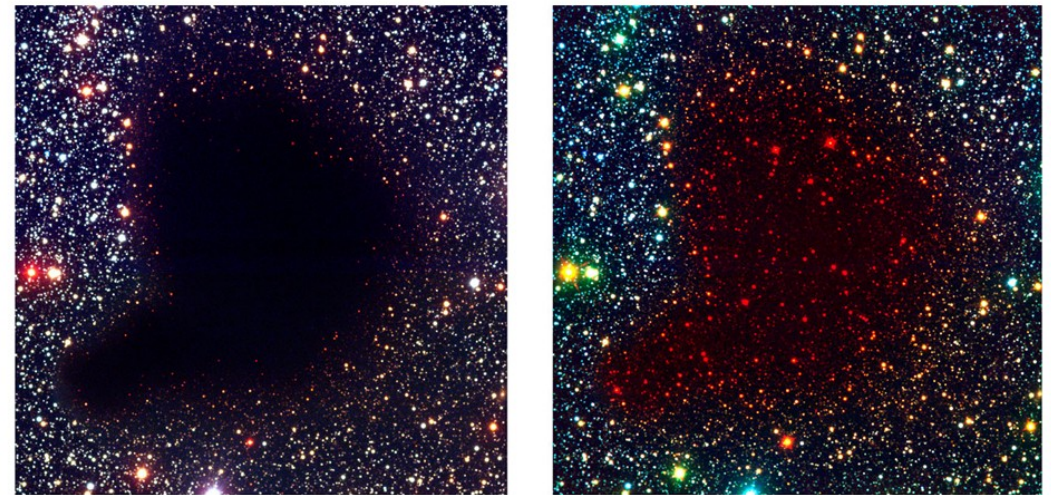
⇒ luminosité intrinsèque > observée

avec $A = A(\lambda)$

⇒ rougissement

On définit l'excès de couleur :

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



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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

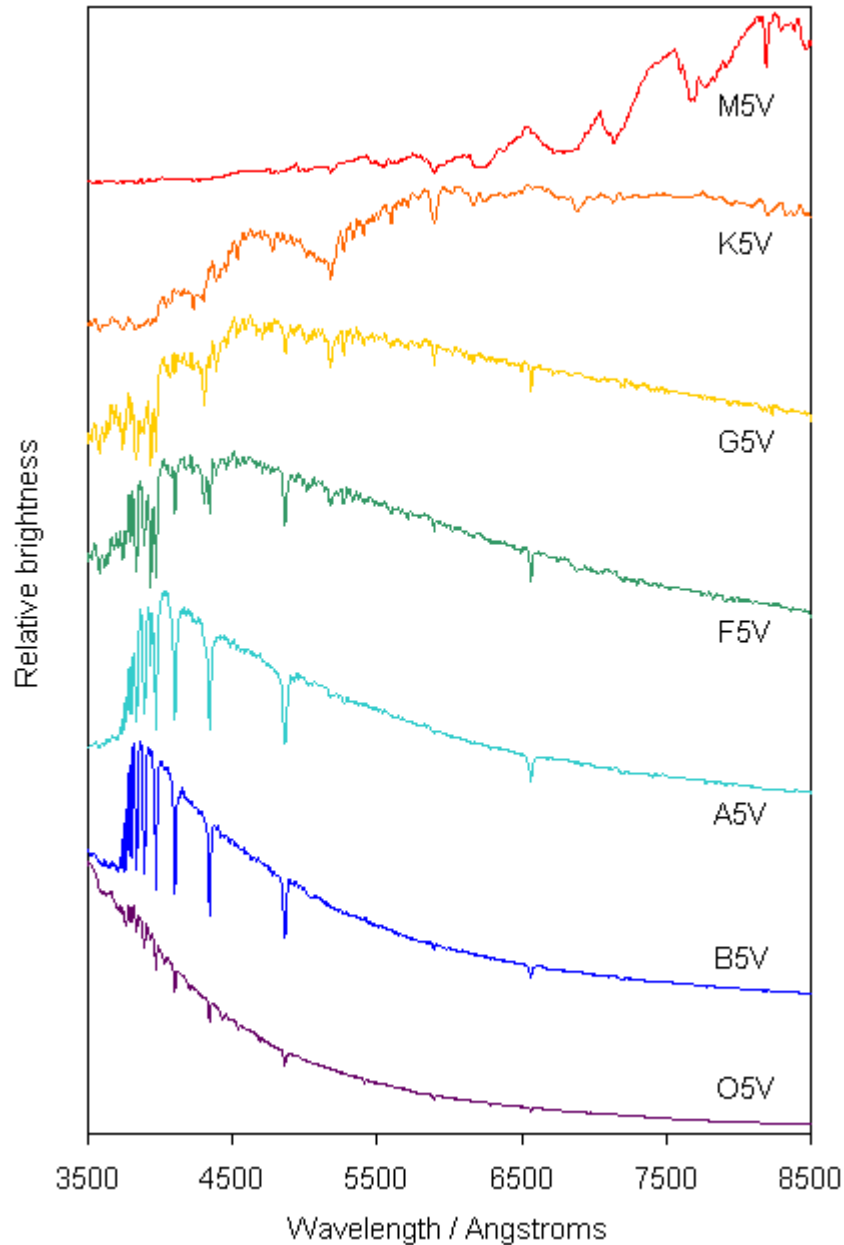
- VII.1 Détermination d'abondances
- VII.2 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.1 Rappel : Types spectraux

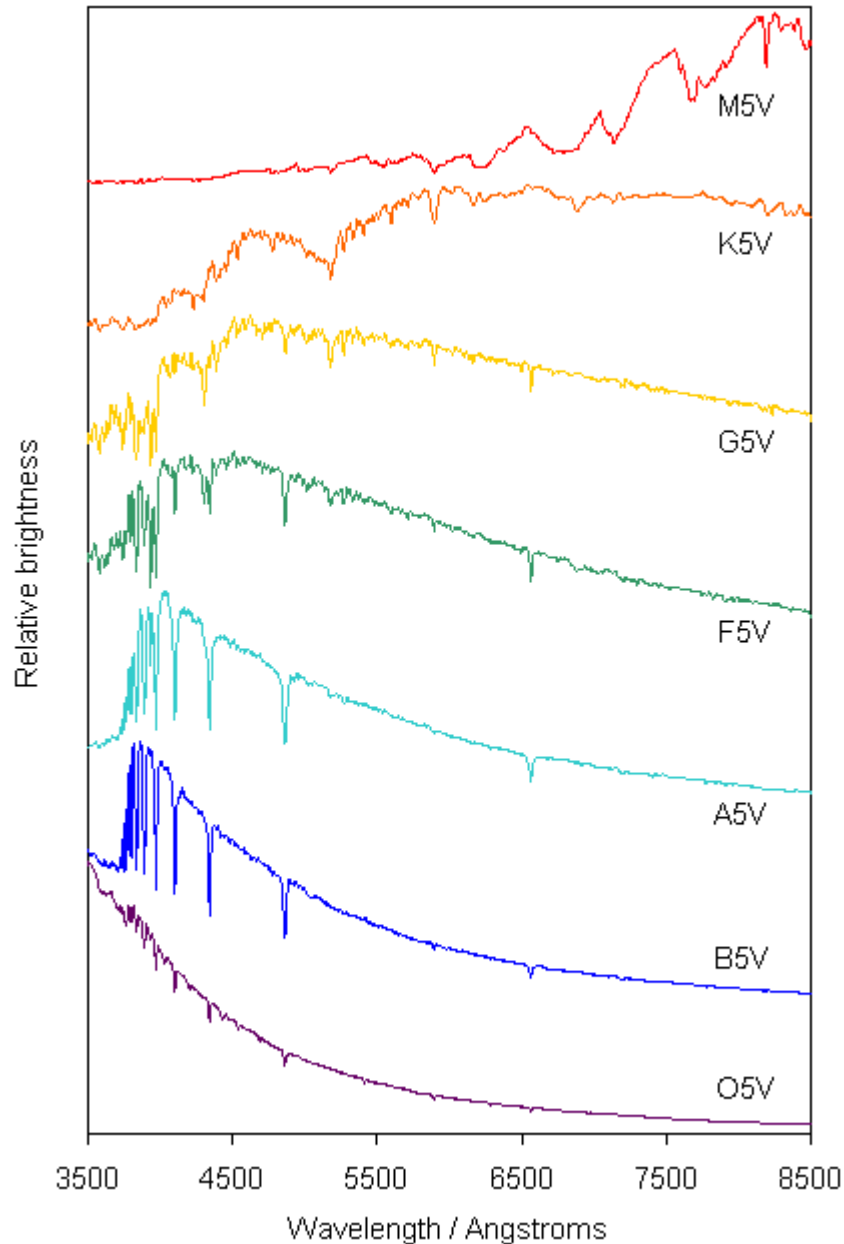


Exercice : classer ces spectres par température croissante



III. Température

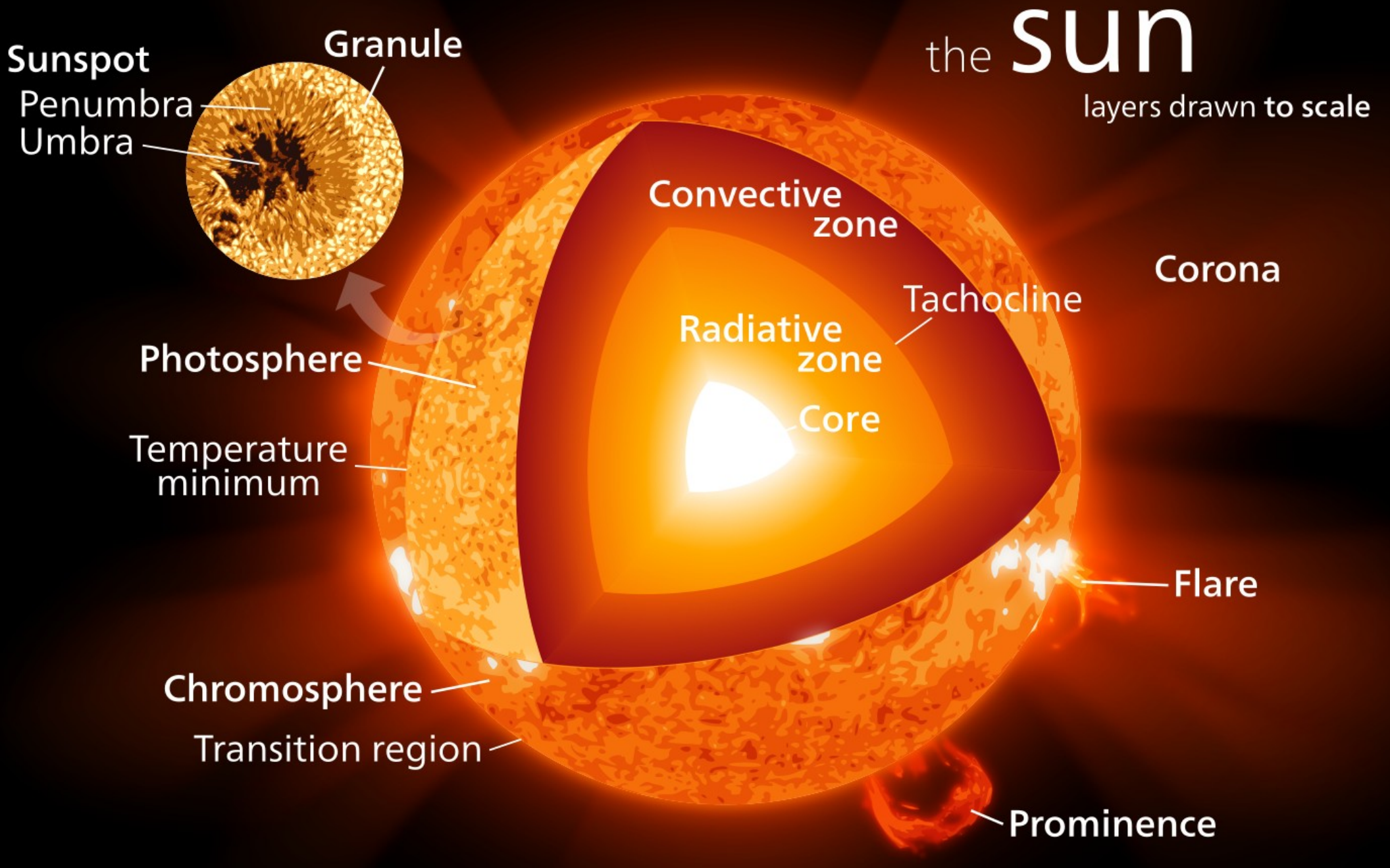
III.1 Rappel : Types spectraux



Main-Sequence Stars (I)

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



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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 Métallicité

VIII. Âges

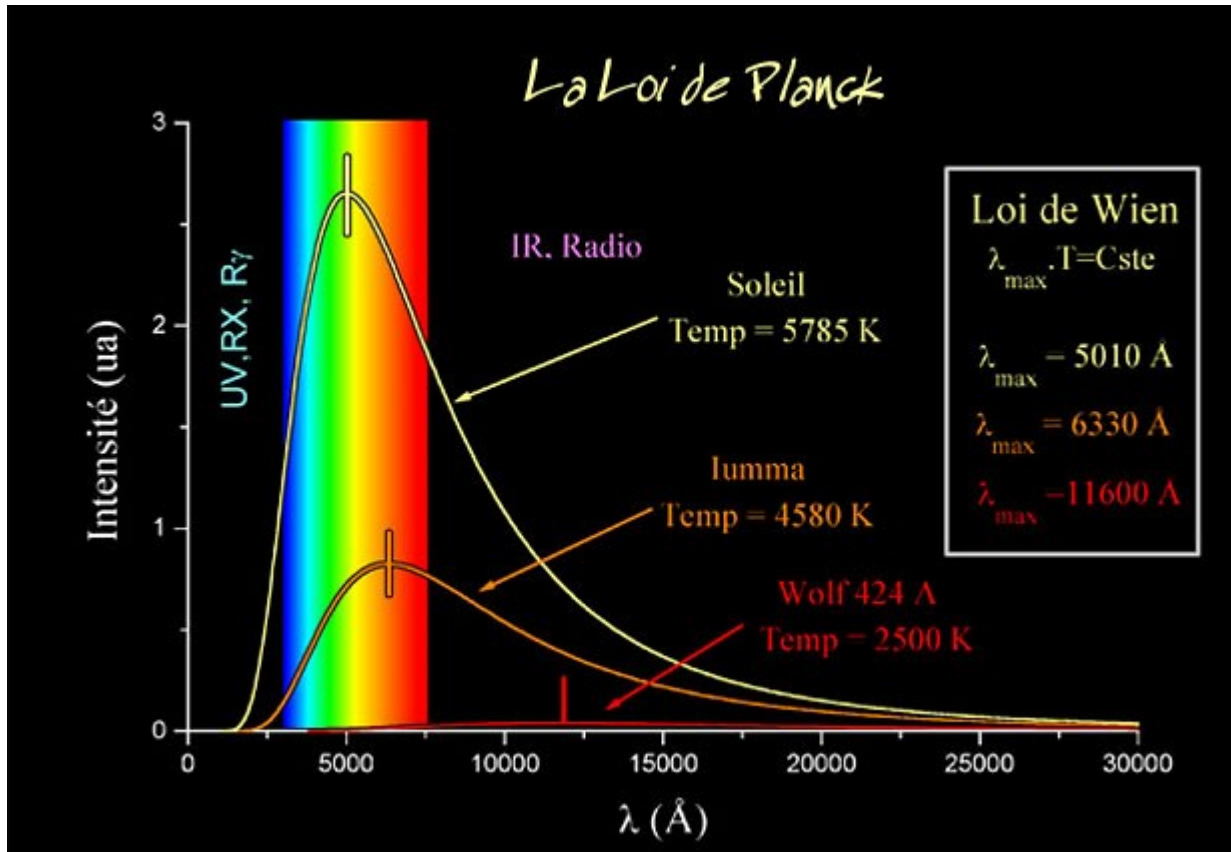
- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.2 Détermination par le continuum



(propriétés
qualitatives
+ Stephan
+ Wien)



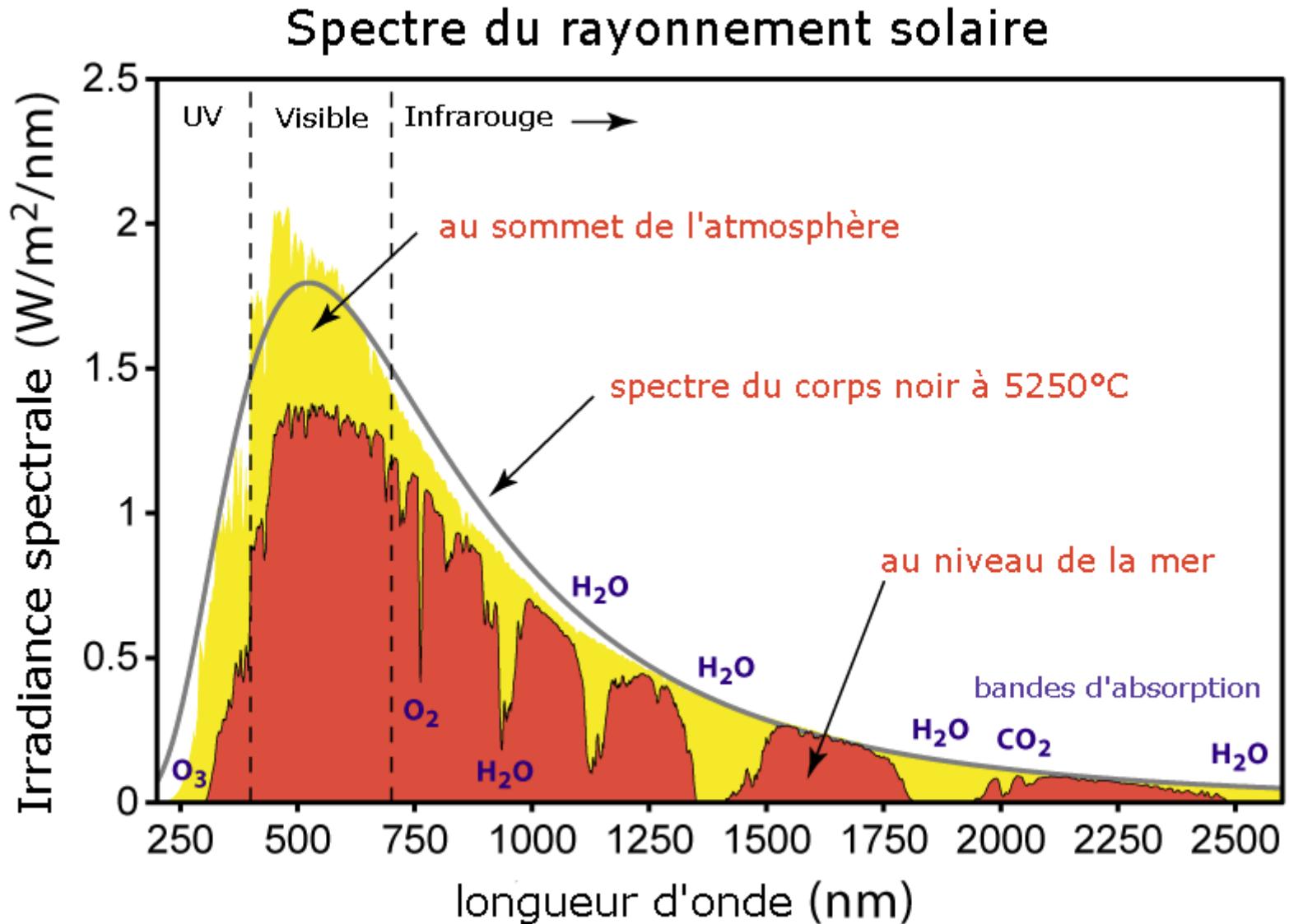
$$L_0(\lambda) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_b \cdot T}} - 1}$$

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 (ce n'est **PAS** la magnitude)



III. Température

III.2 Détermination par le continuum

Température effective : → loi de Stephan – Boltzmann

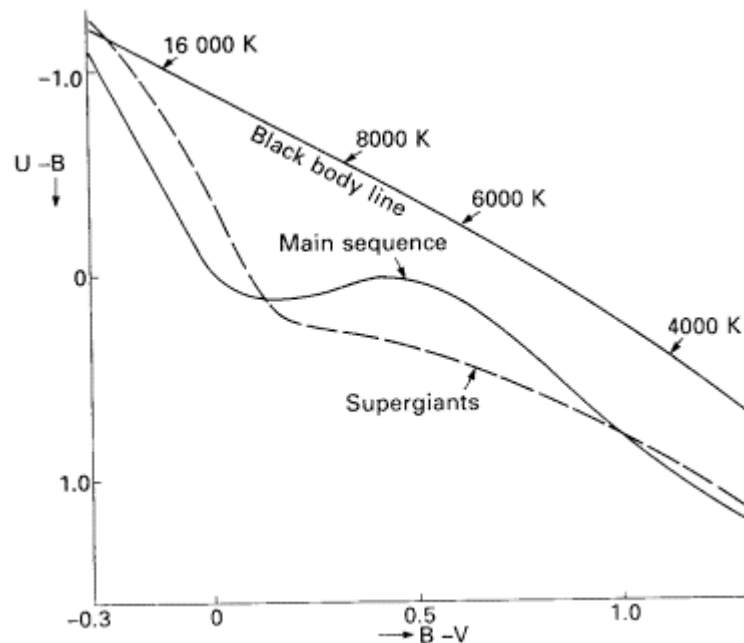
Celle d'un corps noir de même surface et de même luminosité totale que l'étoile

Température de couleur :

Celle d'un corps noir ayant la même distribution spectrale

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

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



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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

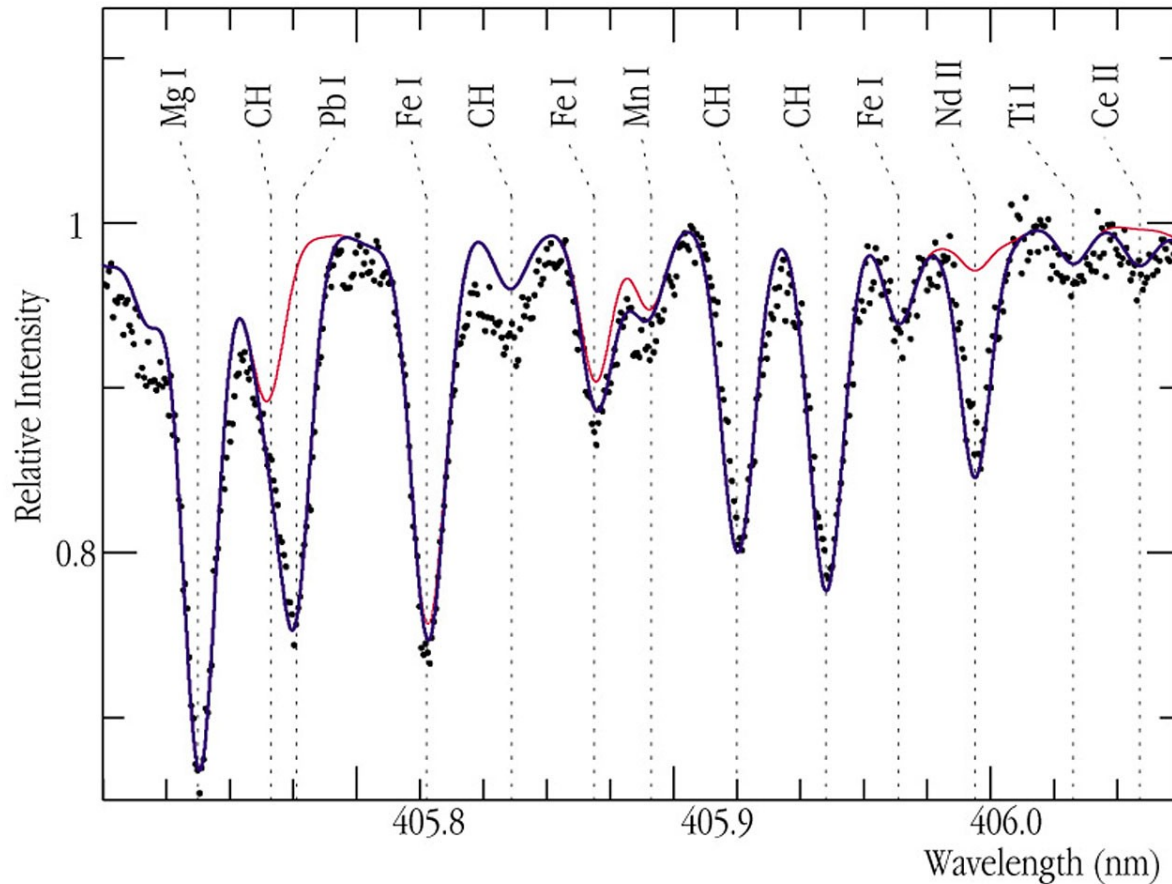
- VII.1 Détermination d'abondances
- VII.2 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.3 Détermination spectroscopique



Loi de Boltzmann

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

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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

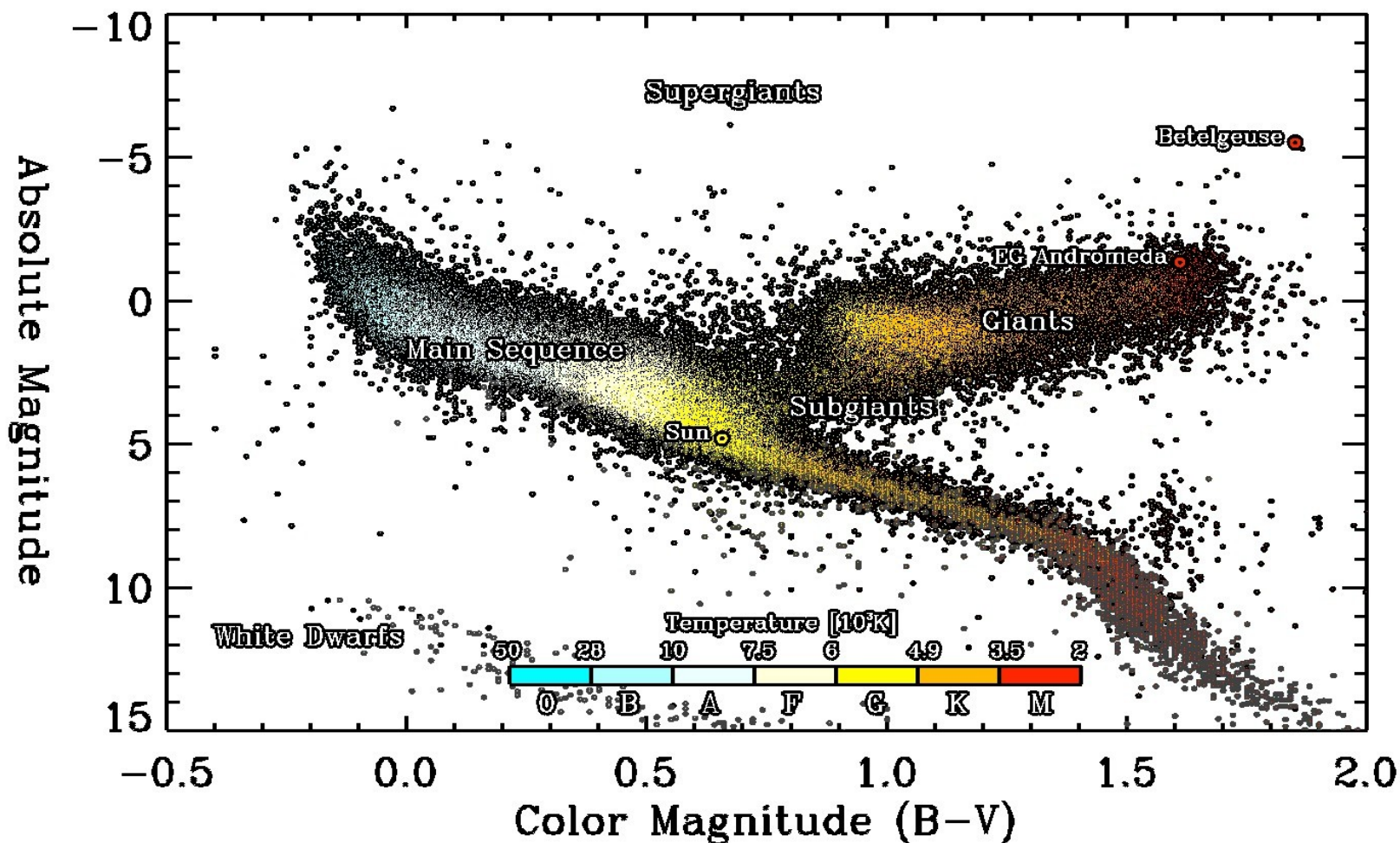
- VII.1 Détermination d'abondances
- VII.2 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

III. Température

III.4 Diagramme Hertzsprung – Russel



Exercice 1 :

Montrer que :

$$L = L_{\text{sun}} 10^{1.9-M/2.5}$$

On donne :

$$M_{\text{sun}} = 4.76 \text{ mag}$$

$$T_{\text{sun}} = 5770 \text{ K}$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ S.I.}$$

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

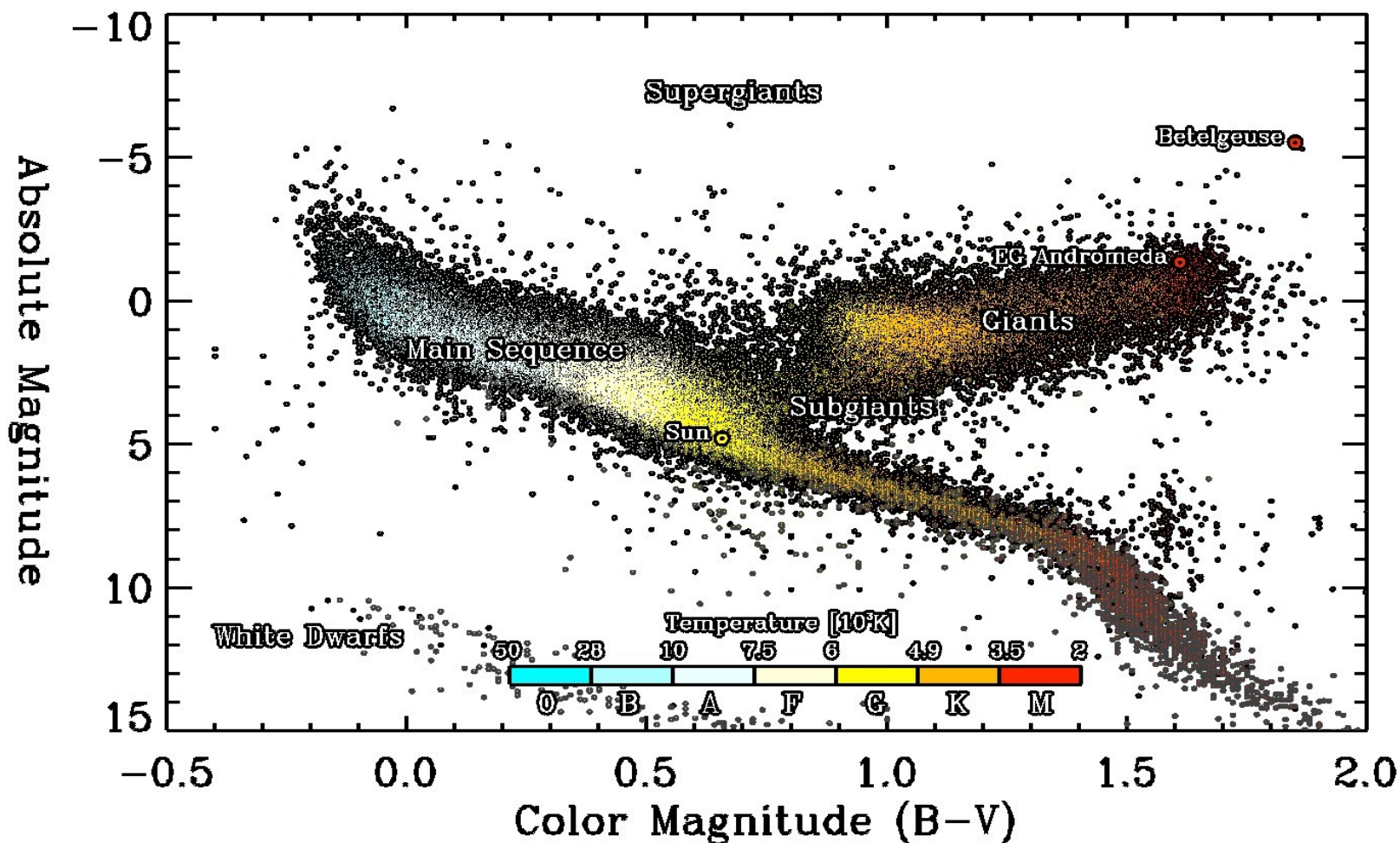
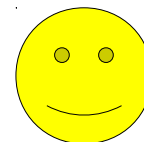
Stephan : $L = \sigma T^4 4\pi R^2$

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



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”,⁵⁵
- le groupe vers $B-V \sim 0$ et $M \sim 10$ est appelé “naines blanches”⁵⁵

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

Méthodes :

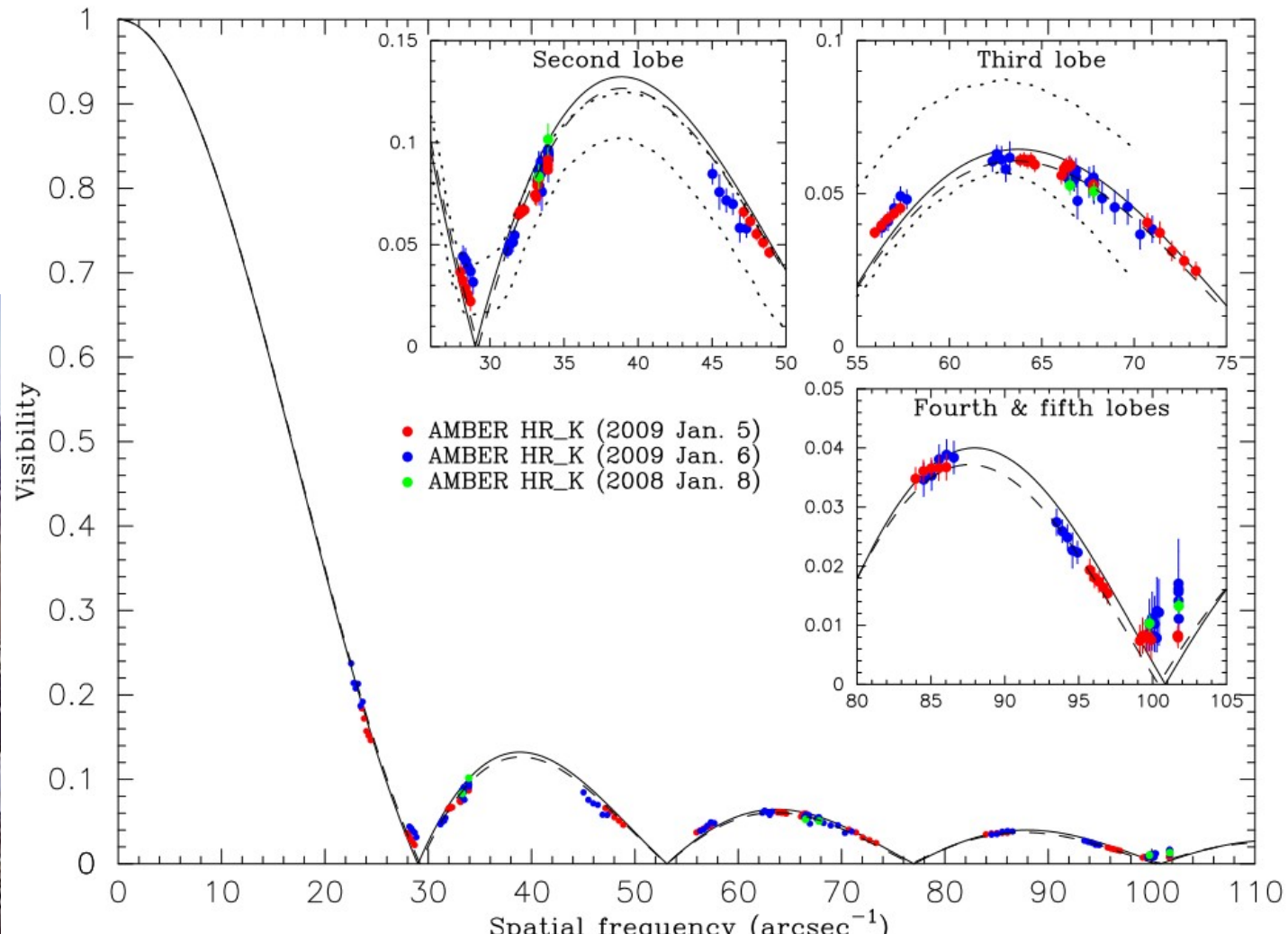
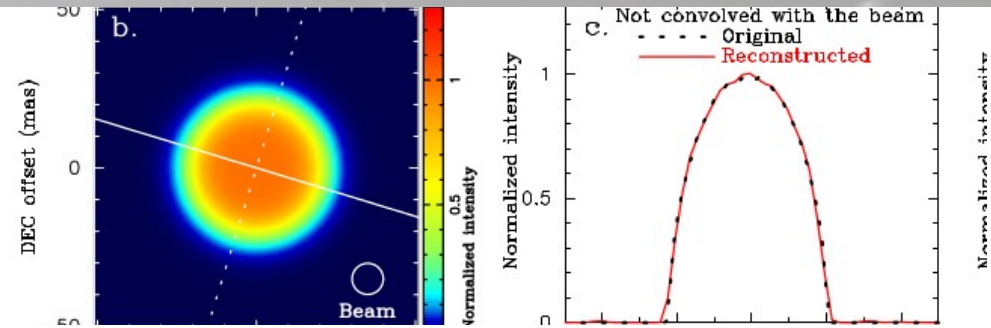
- interférométrie
- speckel
- occultation

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

IV. Dimension

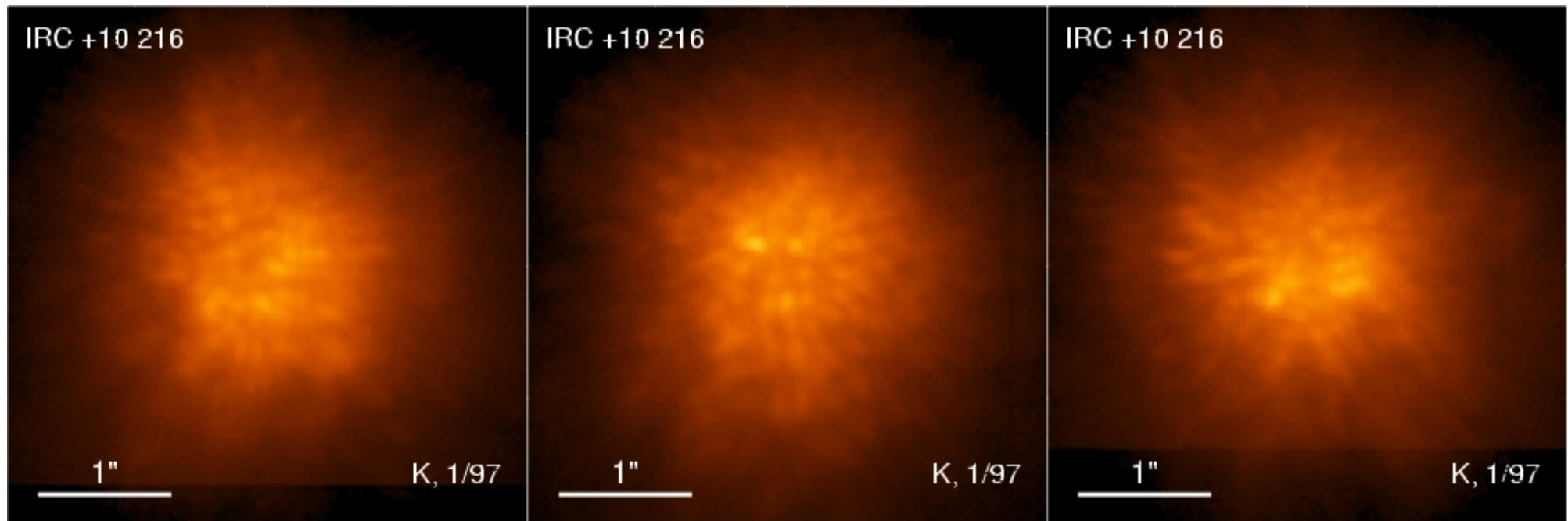
IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

- Méthodes :
- interférométrie
 - speckel
 - occultation



Méthodes classiques :

- interférométrie
- **speckel**
- occultation

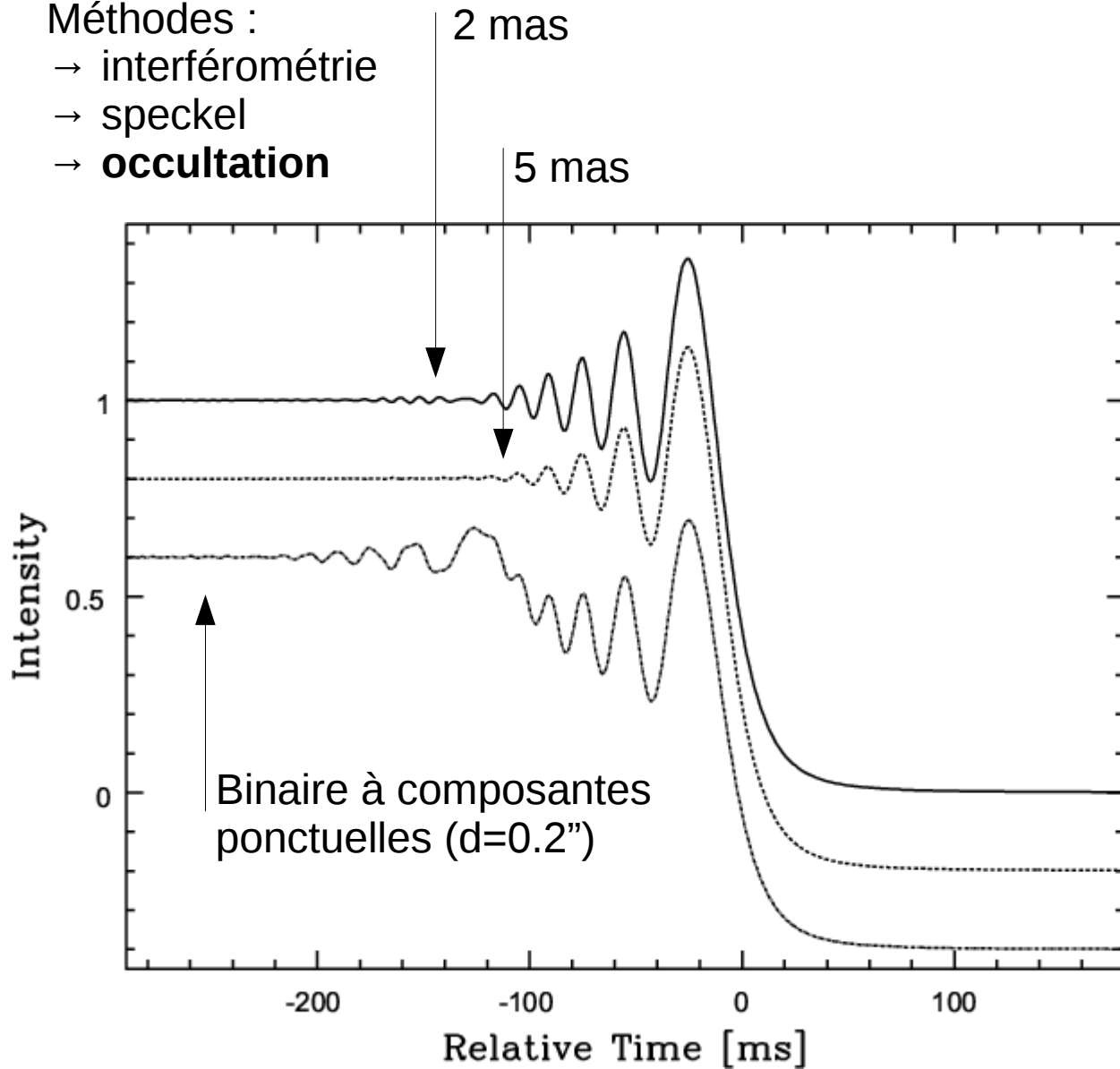


IV. Dimension

IV.1 Mesure directe du diamètre angulaire

Méthodes :

- interférométrie
- speckel
- **occultation**



Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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 Métallicité

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 Photométrie / 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

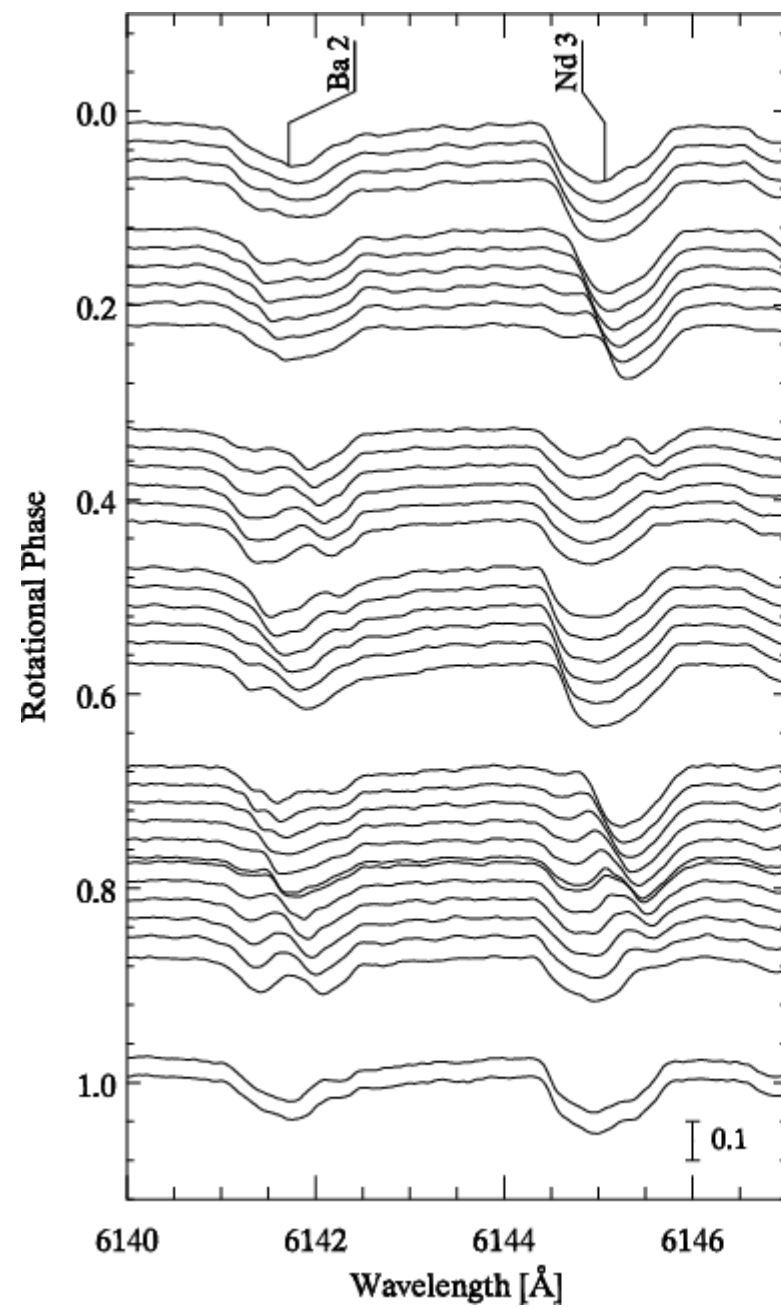
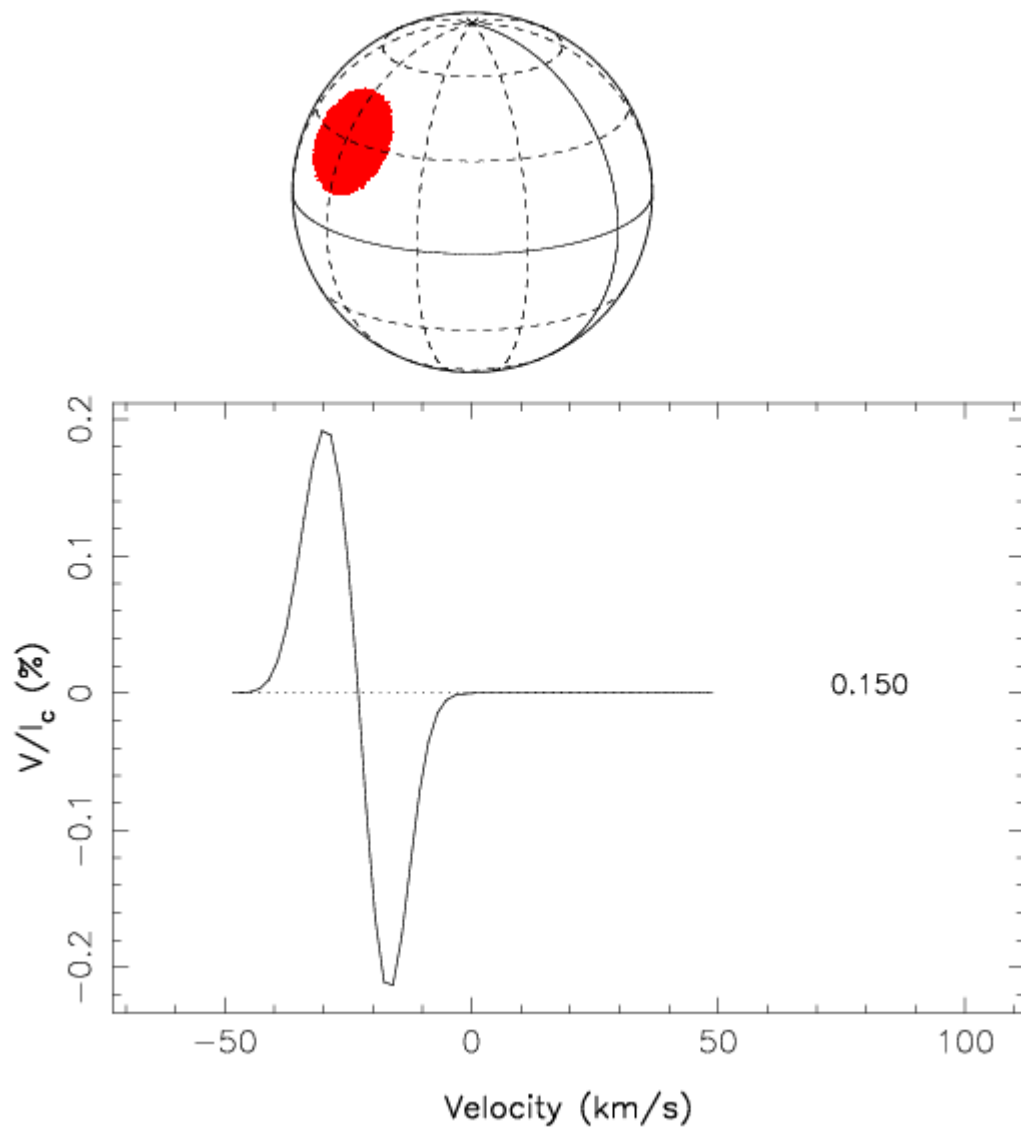
- VII.1 Détermination d'abondances
- VII.2 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

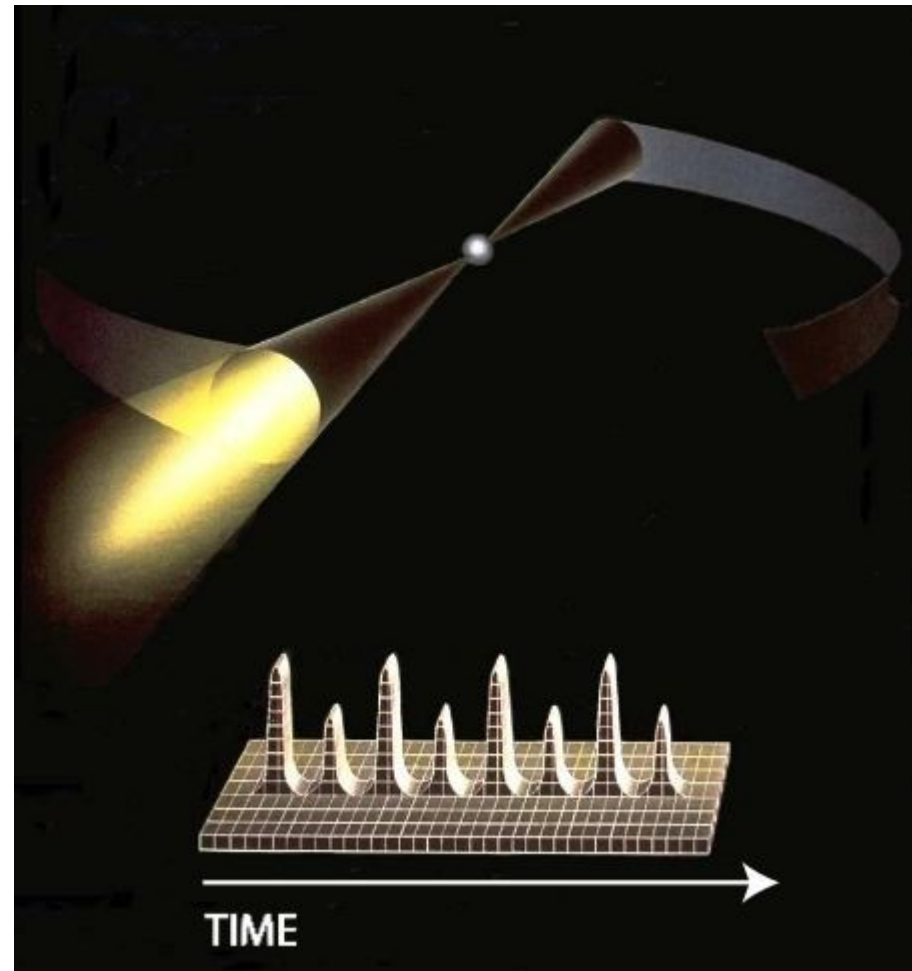
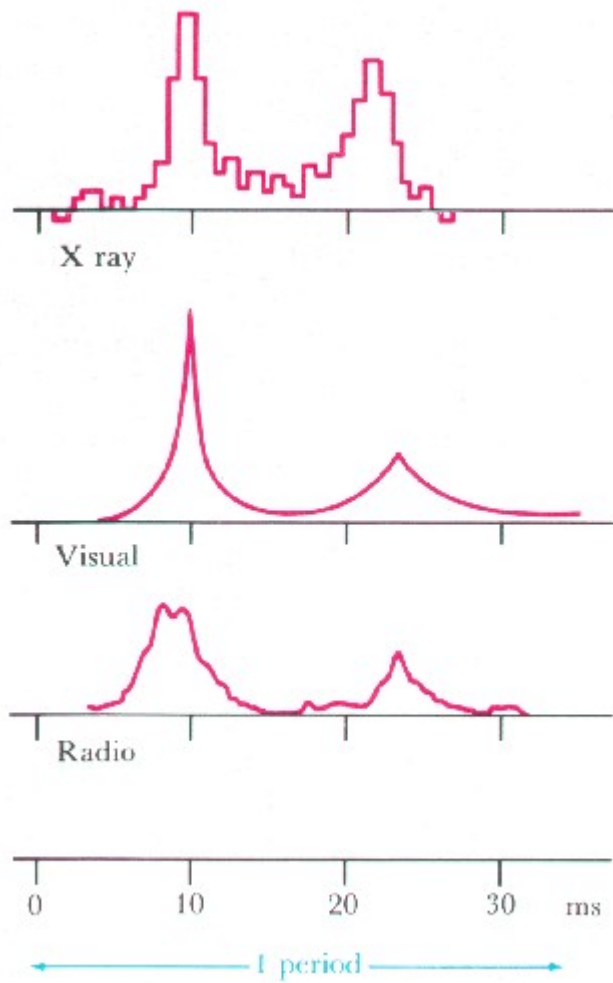
V. Rotation

V.1 Signature spectroscopique



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.

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

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

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

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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 Métallicité

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

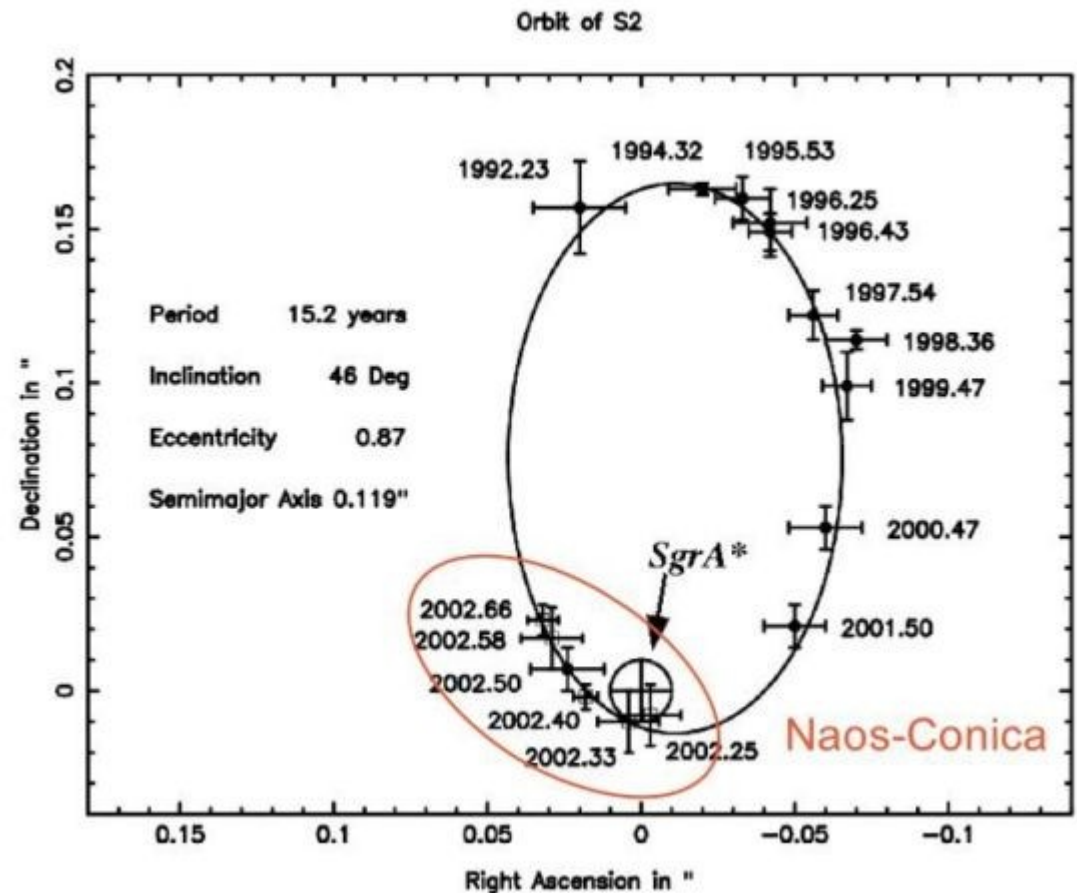
VI.1 Masse des étoiles doubles

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 :

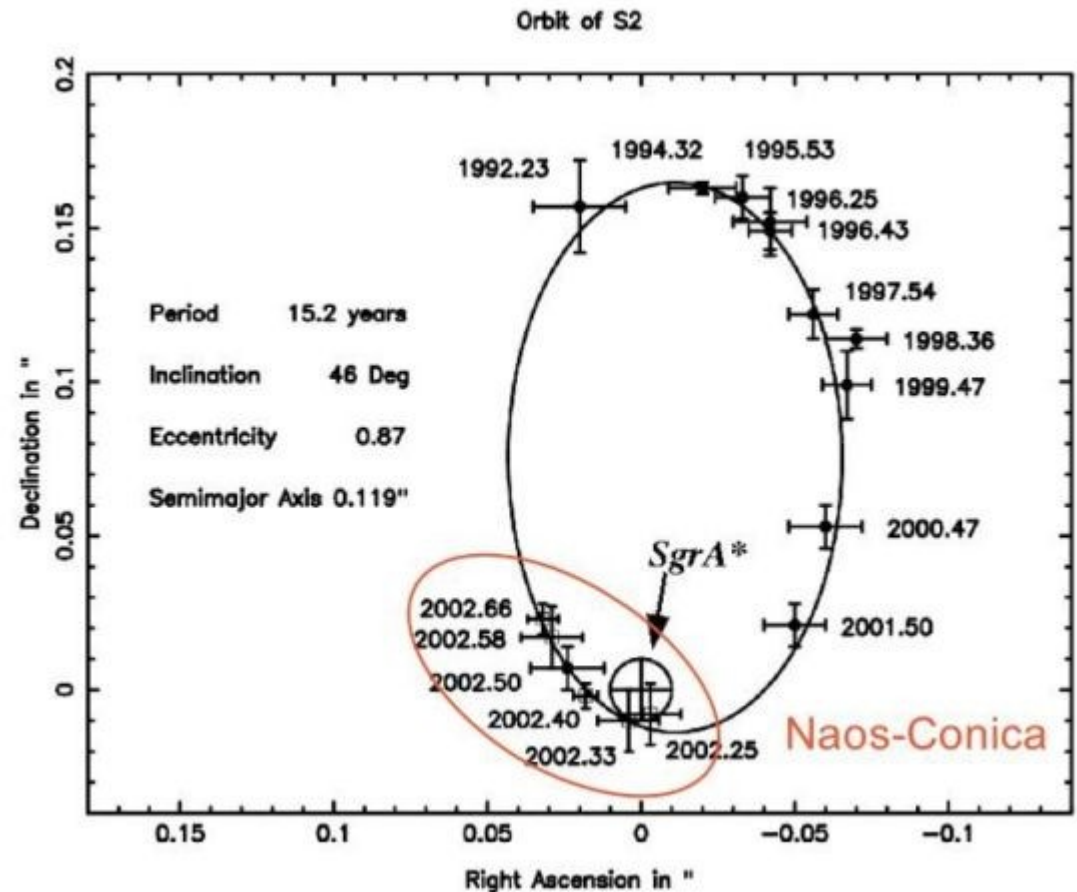
$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2 \lambda^2}{G(M + m)}$$

- 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 $M > 30 M_{\text{sun}}$

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

$\alpha = 3.45$ 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 $M > 30 M_{\text{sun}}$

Caractérisation observationnelle des étoiles

I. Distance

- I.1 Cinématique
- I.2 Photométrie / 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 Métallicité

VIII. Âges

- VIII.1 Rappel : Évolution stellaire
- VIII.2 Nucléo-cosmochronologie

Structure et stabilité des étoiles

I. Équations fondamentales

I.1 Hypothèses

I.2 Équations

II. Résister à l'effondrement gravitationnel


II.1 Pressions entretenues par l'énergie thermonucléaire

II.2 Pression de dégénérescence

III. Nucléosynthèse

III.1 Les cycles (rappel)

III.2 Relation de Bethe et Weizsäcker



I. Les équations fondamentales

I.1 Hypothèses

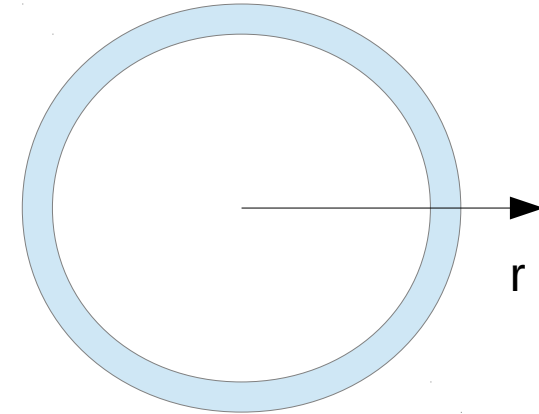
- pas de rotation
- pas de champ magnétique
- parfaitement sphérique

I. Les équations fondamentales

I.2 Équations

- **Distribution de la masse** à l'intérieur de l'étoile :
La coquille sphérique (r, dr) contient la masse

$$dM(r) = 4 \pi r^2 \rho dr$$



I. Les équations fondamentales

I.2 Équations

- **Distribution de la masse** à l'intérieur de l'étoile :
La coquille sphérique (r, dr) contient la masse

$$dM(r) = 4 \pi r^2 \rho dr$$

- **Équilibre hydrostatique** (PFD à l'équilibre, projeté radialement)
 $F_G(r) + 4 \pi r^2 P(r) - 4 \pi r^2 P(r+dr) = dM(r) a_r(r) = 0$

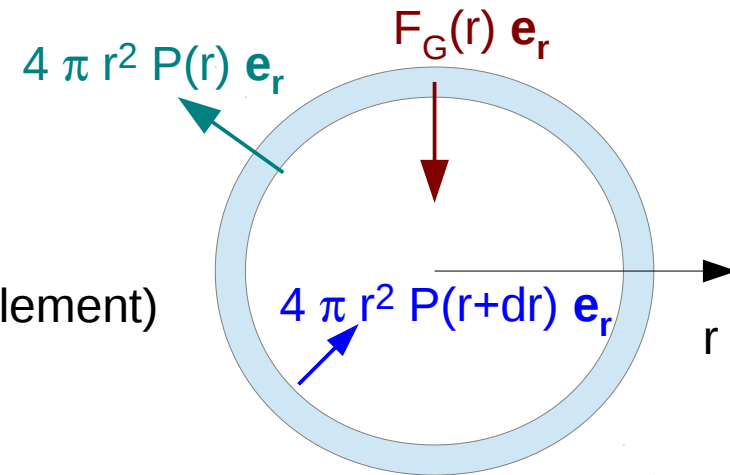
Avec

Force de gravité : $F_G(r) = - G M(r) dM(r) / r^2$

Pression : $P(r)$

$$\Rightarrow dP = - \rho G M(r) dr / r^2$$

Rq: $P = P_{\text{gaz}} + P_{\text{rad}}$



I. Les équations fondamentales

I.2 Équations

- **Distribution de la masse** à l'intérieur de l'étoile :
La coquille sphérique (r , dr) contient la masse

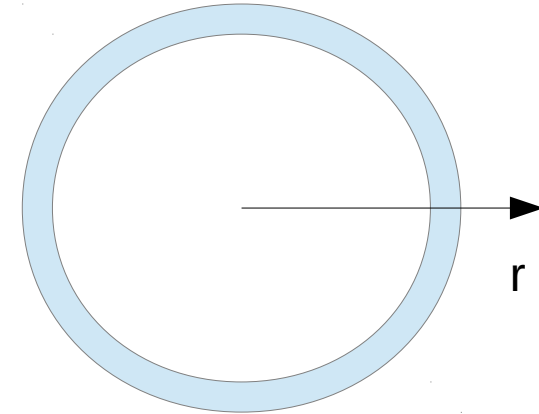
$$dM(r) = 4 \pi r^2 \rho dr$$

- **Équilibre hydrostatique** (PFD à l'équilibre, projeté radialement)
 $F_G(r) + 4 \pi r^2 P(r) - 4 \pi r^2 P(r+dr) = dM(r) a_r(r) = 0$

Avec

Force de gravité : $F_G(r) = - G M(r) dM(r) / r^2$

Pression : $P(r)$



$$\Rightarrow dP = - \rho G M(r) dr / r^2$$

$$Rq: P = P_{\text{gaz}} + P_{\text{rad}}$$

$4\sigma T^4 / (3c)$ → pression de radiation, uniquement pour les étoiles les plus massives
 σ = Constante de Stephan
 c = vitesse de la lumière
 T = température locale

$R\rho T/\mu$ → pression cinétique, pour toutes les étoiles
 R = constante des gaz parfaits
 μ = masse moyenne des particules

I. Les équations fondamentales

I.2 Équations

- **Équilibre énergétique :**

$$dL(r) = 4 \pi r^2 \rho \varepsilon dr$$

Avec :

ε = emissivité spécifique (J/kg/s)

$$\varepsilon = \varepsilon_G + \varepsilon_T + \varepsilon_N$$

$= - P \cdot dV / (dM dt) = P dp / (\rho^2 dt)$: gravité

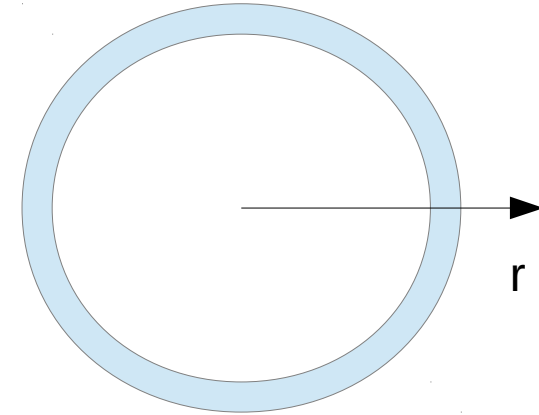
→ Domine la phase pré-séquence principale

$= - d(1.5 kT) / dt$: thermique

→ terme dominant pour les naines blanches

$\sim \rho^m T^m$: nucléaire

low-mass : $m=4$ (PP)
high-mass : $m=16$ (CNO)



II. Résister à l'effondrement

Structure et stabilité des étoiles

I. Les équations fondamentales

I.1 Hypothèses

I.2 Équations

II. Résister à l'effondrement gravitationnel

II.1 Pressions entretenues par l'énergie thermonucléaire

II.2 Pression de dégénérescence

III. Nucléosynthèse

III.1 Les cycles (rappel)

III.2 Relation de Bethe et Weizsäcker

II. Résister à l'effondrement gravitationnel

II.1 Pressions entretenues par l'énergie thermonucléaire

RAPPELS :

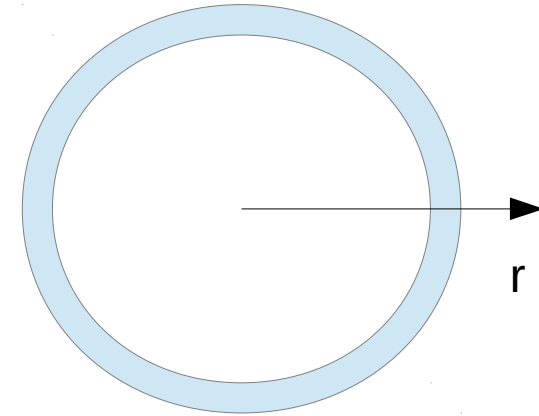
- **Équilibre hydrostatique** (PFD à l'équilibre, projeté radialement)

$$dP = - \rho G M(r) dr / r^2$$

$$\text{Rq: } P = P_{\text{gaz}} + P_{\text{rad}}$$

$4\sigma T^4 / (3c)$ → pression de radiation, uniquement

$R\rho T/\mu$ → pression cinétique, pour toutes les étoiles



- **Équilibre énergétique :**

$$dL(r) = 4 \pi r^2 \rho \varepsilon dr$$

Avec :

ε = emissivité spécifique (J/kg/s)

$$\varepsilon = \varepsilon_G + \varepsilon_T + \varepsilon_N$$

$\sim \rho^m T^m$: nucléaire

low-mass : $m=4$ (PP)

high-mass : $m=16$ (CNO)

II. Résister à l'effondrement gravitationnel

II.2 Pression de dégénérescence

En l'absence de réactions thermonucléaires :

Maxwell : nombre d'électrons entre v et $v+dv$

$$N_e(p)dp = 4\pi N p^2 dp \exp(-p^2/2MkT) / (2\pi MkT)^{3/2}$$

Pauli : 2 fermions ne peuvent avoir le même état quantique
→ “pression de Schrödinger”

Heisenberg : principe d'incertitude

$$dx dp_x > h$$

⇒ si compression, dx diminue, donc dp_x (et p_x) augmente

Le gaz est dégénéré si $dx dp_x \sim h$

$$\text{alors : } N_e(p)dp = 2/\Delta V = (2/h^3) 4\pi p^2 dp \neq \text{Maxwell}$$

On obtient la pression des électrons par $dP_e = (1/3) v p N_e(p) dp$ (et $N_e = \rho/M$)

→ $P_e = K (\rho/\mu_e)^{5/3}$ avec $K \sim 9.9 \times 10^6$ S.I. et $\mu_e \sim 2$ (gaz non relativiste)

→ nouvelle équation d'état \neq gaz parfaits

II. Résister à l'effondrement gravitationnel

II.2 Pression de dégénérescence

Cas des naines blanches

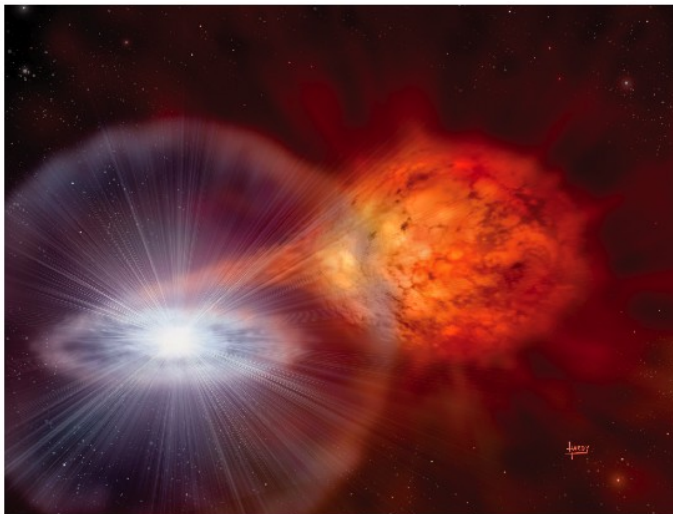
Équilibre hydrostatique $\Rightarrow dP_e \sim -GM\rho dr/r^2$

&

Équation d'état GD $\Rightarrow P_e \sim \rho^{5/3} \sim M^{5/3} / R^5$

\rightarrow relation masse – rayon : $MR^3 = \text{constante}$ tel que $R(\text{km}) = 10^4 (M_{\text{sun}}/M)^{5/3}$

$R \downarrow$ si $M \uparrow$!



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.

Quand $M \uparrow$, $v \rightarrow c \Rightarrow$ cas relativiste : $P_e \sim \rho^{4/3}$

\rightarrow relation masse – rayon : $M^{4/3}/R^5 \sim M^2/R^5$

\rightarrow indépendant du rayon !

Pression GDR

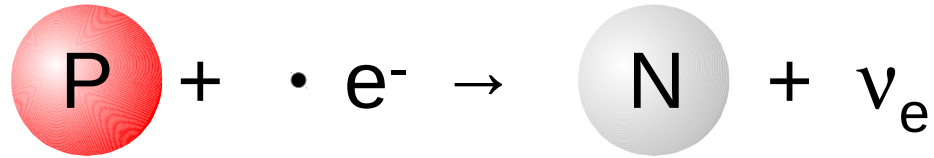
gravité

Masse maximum = $1.44 M_{\text{sun}}$ (Chandrasehkar 1930)

II. Résister à l'effondrement gravitationnel

II.2 Pression de dégénérescence

Cas des étoiles à neutrons



Équilibre hydrostatique $\Rightarrow dP_e \sim -GM\rho dr/r^2$

&

Équation d'état GD $\Rightarrow P_e \sim \rho^{5/3} \sim M^{5/3} / R^5$

\rightarrow relation masse – rayon : $MR^3 = \text{constante}$ tel que $R(\text{km}) = 12 (M_{\text{sun}}/M)^{5/3}$

$R \downarrow$ si $M \uparrow$!



Quand $M \uparrow$, $v \rightarrow c \Rightarrow$ cas relativiste : $P_e \sim \rho^{4/3}$

\rightarrow relation masse – rayon : $M^{4/3}/R^5 \sim M^2/R^5$

\rightarrow indépendant du rayon !

Pression GDR

gravité

Masse maximum = $qq M_{\text{sun}}$

Valeur exacte toujours débattue

Structure et stabilité des étoiles

I. Les équations fondamentales

I.1 Hypothèses

I.2 Équations

II. Résister à l'effondrement gravitationnel

II.1 Pressions entretenues par l'énergie thermonucléaire

II.2 Pression de dégénérescence

III. Nucléosynthèse stellaire

III.1 Les cycles (rappel)

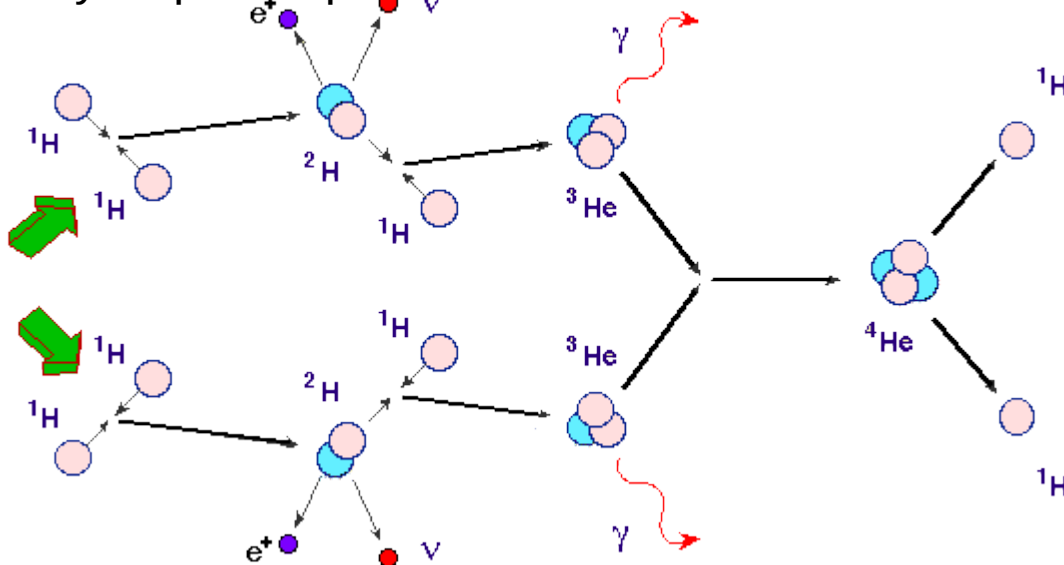
III.2 Relation de Bethe et Weizsäcker

III. Nucléosynthèse stellaire

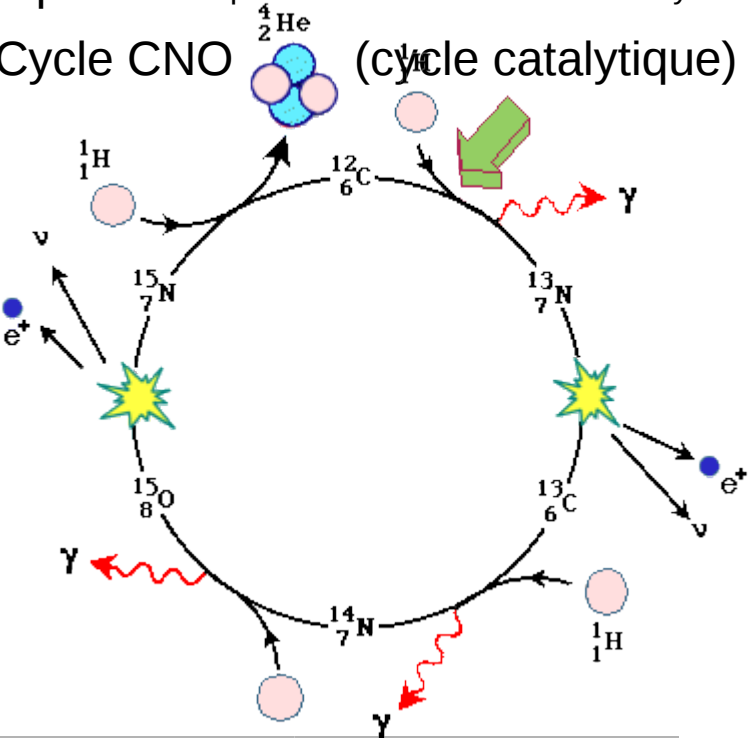
III.1 Les cycles (rappel)

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

Cycle proton-proton



Cycle CNO (cycle catalytique)



Formation des éléments au coeur 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. Nucléosynthèse stellaire

III.2 Relation de Bethe et Weizsäcker

Énergie de liaison des noyaux atomiques (semi-empirique)

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/2}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm a_p A^{-1/2}$$

= 15.56 MeV : E de volume, force nucléaire

= 17.23 MeV : E de surface = tension superficielle

= 0.7 MeV : répulsion électrostatique

= 23.6 MeV : E d'asymétrie ($A-2Z = N-Z$), lié à Pauli

= 11.2 MeV : E d'appariement (+ si pair-pair, 0 si pair-impair, - si impair-impair)