

INTRODUCTION à L'ASTROPHYSIQUE

Cours d'option de Licence Magistère Interuniversitaire de Physique.

2006–2007

Steven Balbus

5ème Cours 29 nov 2006: EVOLUTION DES
ÉTOILES

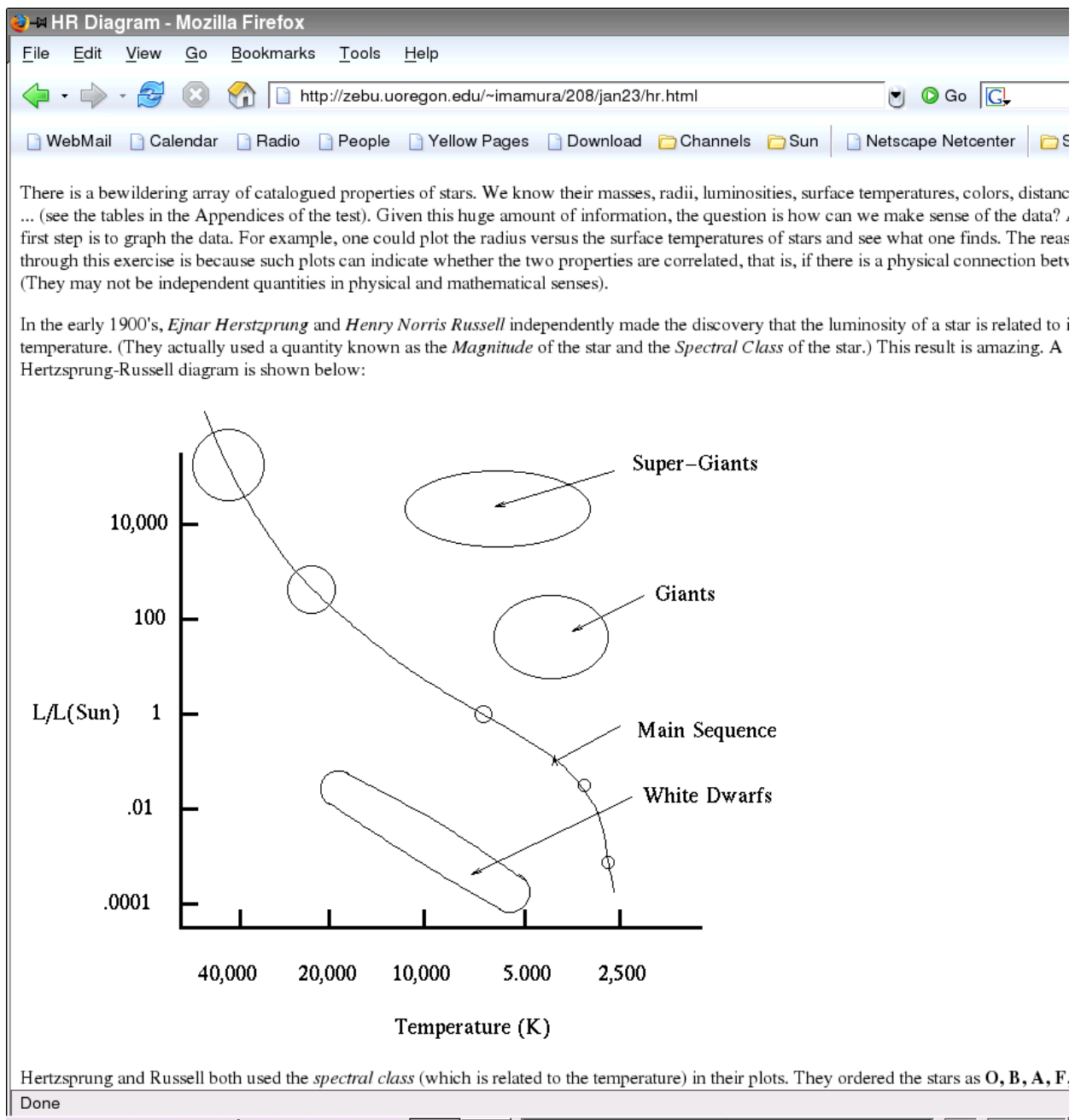
LE DIAGRAMME HR

Pour mieux comprendre l'évolution et l'âges des étoiles, les astronomes ont créé un diagramme qui s'appelle le diagramme HR (Hertzsprung-Russell). C'est une représentation dans le plan LT (luminosité – température de surface). On trouve que la plupart des étoiles font une courbe bien déterminée, dite la séquence principale . La position le long de la séquence principale correspond à la phase de la vie d'une étoile pendant laquelle elle brûle H, dite la durée de vie de la séquence principale . Lorsque l'étoile a terminé cette phase et tout l'Hydrogen est épuisé, la position de l'étoile dans le diagramme se déplace.

Pour des raisons historiques l'axe des x est divisé en plusieurs classes, dites les "classes spectrales." Des étoiles les plus chaudes vers les étoiles les plus froides la séquence est

O B A F G K M

Voila un diagramme HR, avec l'axe des x en kelvins:



La classification est très précise, et dépend du spectre exact. Il y a aussi des sous-classes (O3, B6, G2, etc.), et même les sous-sous-classes!

La séquence va aussi des étoiles massives vers les étoiles de faible masse. Une étoile de type O a une masse de $\sim 20 M_{\odot}$, une étoile de type M $\sim 0.1 M_{\odot}$. Le soleil est une étoile de type G2. Les étoiles les plus massives ont des masses de 50–100 M_{\odot} , les masses les plus faibles $\sim 0.08 M_{\odot}$. Les étoiles de type O et B sont si chaudes, qu'elles sont entourées de gaz ionisé. Les étoiles de type M sont de loin les plus nombreuses, et ont la majorité de la masse visible dans une galaxie.

Alors qu'est-ce qui se passe lorsque une étoile n'a plus d'Hydrogène?

- Sans le support de la pression, le coeur commence à se contracter. La luminosité qui est ainsi générée (grâce à Kelvin-Helmholtz) pousse l'extérieur, et la surface se refroidit!
- Le coeur et la région immédiatement au-dessus deviennent plus chauds.
- À l'intérieur du coeur, il n'y a plus d'Hydrogène. À l'extérieur, il y a de l'Hydrogène, mais le gaz est trop froid pour la fusion. Cependant, dans une coquille mince autour du coeur, il y a assez d'Hydrogène, et il est assez chaud pour qu'il y ait des réactions thermonucléaires.
- Les réactions nucléaires s'amorcent dans une coquille très mince autour du coeur.

- Dans le diagramme HR, l'étoile se déplace d'abord vers la droite lorsque le coeur se contracte (refroidissement). Puis, elle se déplace verticalement quand la luminosité additionnelle générée dans la coquille s'échappe.
- L'étoile, qui est très gros et rouge, s'appelle une géante rouge. (Quelques géantes rouges sont facilement visibles: Arcturus, Bételgeuse, Antarès.)
- Le coeur et la coquille sont maintenus à l'équilibre pas par la pression du gaz normal, mais par la pression dégénérée. Qu'est-ce que ça veut dire, exactement?

LE GAZ DÉGÉNÉRÉ

Lorsque la température d'un système est 0, l'énergie n'est pas 0. La raison est que tous les électrons ne partagent pas le même état d'énergie: 2 par état, spin "up", spin "down". Lorsqu'on ajoute une particule au système, il faut l'ajouter dans un état d'énergie plus élevé.

Considérons des particules dans une boîte. La fonction d'onde d'une particule de quantité de mouvement \mathbf{p} est proportionnelle à

$$\sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$$

où

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} = \hbar(k_x, k_y, k_z)$$

Si les côtés de la boîte ont une longueur L , alors

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L}, \quad \text{etc.}$$

On trouve,

$$n^2 \equiv (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) = \frac{4p^2 L^2}{h^2}$$

et le nombre d'états d'énergie inférieure à $p^2/2m$ est donné par

$$N = \frac{1}{8} \times 2 \times \frac{4\pi}{3} n^3 = \frac{8\pi p^3 L^3}{3 h^3}, \quad \frac{dN}{L^3} = 8\pi p^2 \frac{dp}{h^3}$$

On appelle la quantité de mouvement maximum p_f , la *quantité de mouvement de Fermi*. (L'énergie de Fermi qui correspond est dénotée ϵ_f .) Puisque N/L^3 est la densité d'électrons,

$$n_e = \frac{8\pi p_f^3}{3 h^3} \rightarrow \epsilon_f = \frac{p_f^2}{2m_e} = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3}$$

ou $5.84 \times 10^{-38} n_e^{2/3}$ J. Quand $kT \ll \epsilon_f$, le gaz est dégénéré, même si la température est assez élevée pour avoir les réactions thermonucléaire: 10^8 K pourrait être, de fait, le zéro absolu!

La pression dégénérée est donnée par

$$P = n_e m_e \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3} n_e m_e \langle v^2 \rangle = \frac{n_e}{3m_e} \langle p^2 \rangle$$

En utilisant $dN/Vol. = 8\pi p^2 dp/h^3$, on trouve

$$P = \frac{8\pi}{3m_e h^3} \int_0^{p_f} p^4 dp,$$

(Qu'est-ce qu'on a fait de n_e ??) où

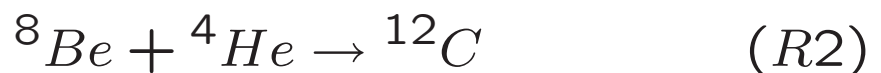
$$P = \frac{8\pi p_f^5}{15m_e h^3} = 2.34 \times 10^{-38} n_e^{5/3} \text{ J cm}^{-3}$$

Notons que la pression dégénérée est proportionnelle à la densité puissance 5/3, et elle est indépendante de T . $P_{deg} \gg nkT$ dans le coeur des étoiles évoluées.

Retournons à notre histoire. La géante rouge brûle l'Hydrogène dans une coquille autour du coeur. Mais le coeur lui-même devient de plus en plus chaud, comme il se contracte. Qu'est-ce qui arrive aux noyaux d'Hélium?



est une réaction endothermique, mais



est (légèrement) exothermique. La difficulté est la désintégration de ${}^8\text{Be}$ (l'inverse de R1) se produit trop rapidement: 2.6×10^{-16} s! Un noyau de ${}^8\text{Be}$ n'est pas stable, et dans les années 1950's c'était un problème sérieux pour les astrophysiciens. En fin, la solution a été trouvé par Fred Hoyle: la réaction (R2) est résonante, et se produit très rapidement!

LE MIRACLE DE ^{12}C

Rapelons qu'il n'y a qu'une petite gamme de vitesses (donc d'énergies) qui participent aux réactions nucléaires. Par hasard, il se trouve que cette énergie est presque exactement la même énergie que l'énergie d'excitation du noyau de ^{12}C .

Le résultat est que les réactions (R1) et (R2) se combinent et deviennent la réaction *triple* α :



Cette réaction se produit très soudainement, à cause des conditions dégénérées. La pression n'augmente pas lorsque la température augmente, mais le taux de la réaction augmente rapidement. La réaction, dit le flash d'He, est donc explosive!

- Le coeur commence à brûler l'He en C. Après le flash d'He, le gaz dans le coeur revient à un état normal.
- La coquille dans laquelle l'Hydrogène brûle est toujours présente, mais elle n'est plus dégénérée. En fait, bien qu'il y ait deux sources de luminosité à ce moment, la luminosité totale décroît!
- Dans le diagramme HR, l'étoile se repose sur la branche horizontale. La position exacte n'est pas du tout certaine: c'est pourquoi on parle de branche. Un groupe d'étoiles (e.g., dans un amas), qui initialement ont presque la même masse, diffusent partout sur la branche quand elles s'évolvent.

- Bientôt, l'He dans le coeur est épuisé. Puis l'histoire se répète: le coeur se contracte, et devient plus chaud.
- L'He commence à brûler dans une coquille autour du coeur dans les conditions dégénérées. Il y a aussi toujours une coquille de H.
- La luminosité L augmente à nouveau. À cause de la fusion dans les deux coquilles, L est très élevée. L'étoile entre dans la phase d'une super-géante rouge.
- La combustion dégénérée dans les coquilles n'est pas stable. (Quand T augmente, le gaz ne se dilate pas.) Le plus souvent les couches extérieures sont éjectées. Ainsi forme une nébuleuse planétaire.

NAINES BLANCHES

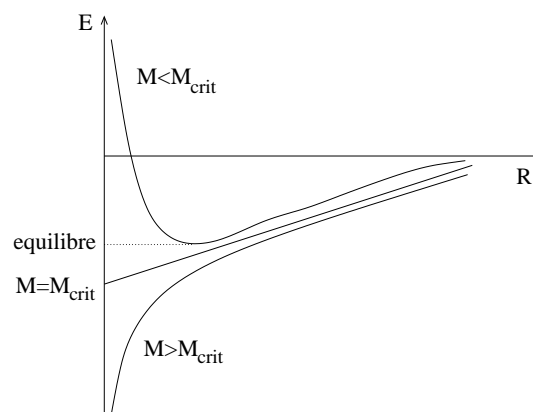
Ce qui reste est essentiellement constitué de carbone, avec une masse typiquement inférieure à $1 M_{\odot}$. C'est une étoile *naine blanche*.

- $M \lesssim 1 M_{\odot}$
- $R \simeq 10^7$ m (\sim rayon terrestre)
- $\rho \simeq 10^6$ g cm⁻³ = 10^9 kg m⁻³
- Composition: He et C pour les naines blanches de faible masse
- Maintenues à l'équilibre par la pression de dégénérescence des électrons.

La masse des naines blanches ne peut excéder $1.4 M_{\odot}$! C'est un effet de relativité spéciale. L'énergie par particule est approximativement

$$E \simeq \sqrt{p_f^2 c^2 + m_e^2 c^4} - \frac{GMm_p}{R} - m_e c^2$$

$$p_f \sim n_e^{1/3} \sim \frac{M^{1/3}}{R}$$



EVOLUTION DES ÉTOILES MASSIVES

L'évolution des étoiles massives est semblable à celle des étoiles de faible masse, avec quelques différences importantes:

- La séquence de combustion dans le coeur et les coquilles ne s'arrête pas au carbone. Selon la masse, la fusion peut aller jusqu'à la production de fer.
- Il n'y a pas de flash de l'hélium: l'intérieur de l'étoile n'est pas dégénéré.
- Le fer est au maximum de la courbe d'énergie de liaison: la fusion nucléaire ne peut pas libérer plus d'énergie – il n'y a pas plus de source d'énergie.

- En l'absence de combustion à l'intérieur de l'étoile, le coeur de fer se contracte et se réchauffe. Finalement les noyaux se cassent à cause de collisions avec des photons énergétiques.
- L'énergie doit être évacuée du coeur, et le coeur s'effondre, puis "rebondit". L'explosion ainsi produite éjecte les parties externes de l'étoile avec une énergie cinétique énorme, $\sim 10^{44}$ J.
- Le coeur s'effondre, formant une étoile à neutrons ou un trou noir. La réaction $p + e^- \rightarrow n + \nu$ produit des neutrinos avec une énergie 10^{46} J (observés pour SN1987A !)