

# Astrophysique : étapes de la vie d'une étoile

**1ere étape** Effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz cylindrique (critère de Jeans)

**1er cas** Perturbation se propageant perpendiculairement à l'axe du cylindre

Pas d'effondrement

**2eme cas** Perturbation se propageant le long de l'axe du cylindre et telle que  $k_z^2 c_s^2 > 4\pi G \rho_0$

Pas d'effondrement

**3eme cas** Perturbation se propageant le long de l'axe du cylindre et telle que  $k_z^2 c_s^2 < 4\pi G \rho_0$

Effondrement et fragmentation du nuage en régions de plus en plus petites.

⇒ augmentation de la densité ⇒ opacification progressive du nuage depuis le centre ⇒ augmentation de la température car les photons ne peuvent plus s'échapper ⇒ dissociation du  $H_2$  en  $2H$ .

**2eme étape** Echauffement du coeur d'hydrogène.

Modèle :

- Le gaz d'électron, de proton et de neutron est considéré comme un gaz parfait non dégénéré, non relativiste. La pression dominante est celle des électrons. On a alors  $P = \frac{2}{3}U$ , où  $U$  est l'énergie interne.
- Comme il existe un gradient de température, l'étoile rayonne et perd de l'énergie :  $-\frac{dE}{dt} = L$ . Or  $3PV = -E_p$  et  $PV = nRT$  donc  $2U = -E_g$ .
  - $\frac{dE}{dt} \propto -\frac{dU}{dt}$  donc l'étoile chauffe car  $T \propto M.R^{-1}$
  - $\frac{dE}{dt} \propto \frac{dE_p}{dt}$  donc l'étoile se contracte, ce qui augmente la température de Fermi car  $T_F = \frac{1}{k_b} \frac{p_f^2}{2m_e} \propto n_e^{2/3} \propto M.R^{-2}$

⇒ Le gaz devient dégénéré lorsque  $T = T_F \Leftrightarrow R = \frac{3}{2} \left( \frac{9\pi}{4m_p} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2}{m_e m_p G} M^{-1/3}$

**1er cas** Le gaz d'électron devient dégénéré avant que  $T$  n'atteigne la valeur nécessaire à la fusion du deuterium  
Formation d'une planète

**2eme cas** Le gaz d'électron devient dégénéré avant que  $T$  n'atteigne la valeur nécessaire à la fusion de l'hydrogène

Combustion du deuterium, reprise de la contraction puis dégénérescence des électrons. Formation d'une naine brune.

Modèle

- Le gaz de protons et de neutrons est considéré comme un gaz parfait non dégénéré, non relativiste. Le gaz d'électron est considéré comme un gaz complètement dégénéré, non relativiste. La pression dominante est celle des électrons, donnée par  $P \propto n^{5/3}$ . On a alors  $P = \frac{2}{3}U$ , où  $U$  est l'énergie interne.
- On a toujours  $PV \propto GM^2/R \Leftrightarrow P \propto R^{-4}$  et  $P$  indépendant de  $T$  donc  $R$  indépendant de  $T$  ⇒ la naine brune se refroidit à rayon constant car la masse ne varie pas ⇒ l'énergie rayonnée vient du ralentissement du gaz de protons et de neutrons

**3eme cas** La température atteint la valeur nécessaire à la fusion de l'hydrogène

Début des réactions nucléaires

**3eme étape** Vie nucléaire de l'étoile

Modèle

- Tant que les réactions nucléaires se produisent, on considère  $\frac{dE}{dt} = 0$ ,  $L = P_{nucleaire}$ ,  $T = cste$ . Elles durent un temps  $\tau \propto M^{-2}$ , puis la contraction reprend (avec augmentation de la température et augmentation encore plus importante de la température de Fermi).

### 1er cas Etoile de masse très faible

Formation d'une naine blanche avec un coeur d'hélium.

Modèle

- A cause de la contraction gravitationnelle, les couches externes d'hydrogène se réchauffent jusqu'à permettre la fusion. La pression produite (due aux photons) déplace la couche vers l'extérieur.
- Le gaz d'électron devient complètement dégénéré avant que la température n'atteigne la valeur nécessaire à la fusion de l'hélium. Comme dans le cas des naines brunes, son rayon reste constant. La pression dominante est celle des électrons, donnée par  $P \propto n^{5/3}$ .
- L'hélium crée dans les couches externes s'ajoute au coeur au fur et à mesure qu'il se contracte, augmentant sa masse et sa température. Le coeur chauffe donc à rayon constant, mais de manière insuffisante pour lever la dégénérescence ou permettre la fusion de l'hélium.

### 2eme cas Etoile de masse faible

Modèle

- Comme précédemment, mais le réchauffement du coeur dégénéré par l'ajout d'hélium permet d'atteindre la température de fusion de l'hélium.
- Production d'une gigantesque quantité d'énergie en un temps très court (*flash*) et levée de dégénérescence.

### 3eme cas Etoile de masse intermédiaire

**Formation** d'une naine blanche avec un coeur C O et d'une nébuleuse planétaire.

Modèle

- L'effondrement gravitationnel permet la fusion de l'hydrogène des couches externes et de l'hélium du coeur. Après épuisement de l'hélium, on recommence le même processus avec un coeur formé d'oxygène et de carbone. Les couches sont étendues de plus en plus loin du coeur.
- Le gaz d'électron devient dégénéré avant de permettre la fusion du coeur.

### 4eme cas Etoile de masse plus importante

Modèle

- Comme précédemment, mais la dégénérescence n'est pas atteinte avant d'avoir formé un coeur de fer et une structure d'oignon. Le coeur est alors constitué d'une gaz d'électron relativiste dégénéré, ce qui arrête la contraction. L'ajout de masse due à la fusion des couches externes permet au coeur de dépasser la masse de Chandrasekhar, ce qui entraîne la neutronisation du coeur ainsi que l'effondrement puis le rebond des couches externes.

### 4eme étape A Evolution des naines blanches

- Laisser à elle-même, la naine blanche se refroidit par rayonnement.
- Si la densité devient trop importante, les électrons deviennent relativistes et la pression devient telle que  $PV \propto M^{4/3}R^{-1}$ , ce qui fixe une seule masse possible, la masse de Chandrasekhar.
- Si la densité augmente encore, la naine blanche devient une étoile à neutron.

### 4eme étape B Etoile à neutron

Modèle

- Gaz dégénéré non relativiste de neutrons.
- Si la masse augmente, la densité aussi donc l'impulsion de Fermi aussi donc les neutrons peuvent devenir relativistes.
- Dans ce cas, leur pression diminue et l'étoile s'effondre sur elle-même en formant un trou noir.