

CESAM : étoiles massives et phases avancées

Laurent Piau

Présentation atelier CESAM Nice, 19-20 mai 2003

Equation d'Etat :
les intégrales de Fermi-Dirac

Opacités :
métallicités non solaires et très hautes températures

Atmosphère :
grille $T_{\text{eff}} / \log(g)$ de modèles initiaux

Réactions nucléaires et énergétique :
extension du réseau et neutrinos

Equation d'état

1) L'extension

Entrées : P, T & comp

Sorties : ρ , u_{int} , δ , ∇_{ad} ... dérivées

* $T < 10^8$ K EOS OPAL2001 → dégénérescence, effets Coulombien, opacités

routine etat_opal_2001

* $T > 10^8$ K EOS basée sur des tables de Fermi-Dirac

→ dégénérescence & effets relativistes (e-), effets Coulombien (approximation de Debye).

routine etat_bxl

	β_1	β_2	β_3	β_4	...
η_1					
η_2			$F_{1/2}, F_{3/2}, F_{5/2}, \partial_{\eta}, \partial_{\beta}$		
.					
.					

Domaine des tables :

* $\beta (=kT/m_e c^2)$ correspond à T entre $5 \cdot 10^6$ et 10^{11} K : $\Delta \ln \beta = \text{cte}$

* η entre -20 et 30 : $\Delta \eta = 0.5$

Le domaine T, ρ des massives est couvert :

Pour une 25 M

Combustion 3α : $T \approx 10^8$ K , $\rho \approx 10^2 \text{ gcm}^{-3}$ correspond à $\eta \approx -3$

QES ^{28}Si : $T \approx 10^9$ K , $\rho \approx 10^7 \text{ gcm}^{-3}$ correspond à $\eta \approx 2$

Inclusion des effets non-idéaux en cours (Y. Busegnies)

2) La routine *etat_bxl* : principe

hypothèse : ionisation totale

→

→

1) P & $\beta(T)$ connus, on cherche η par la méthode de Newton :
 η est donné par le zéro de la fonction $\Psi_{\beta}(\eta) = P - [P_e(\eta, \beta) + P_i(\eta, \beta) + P_{\text{coul}}(\eta, \beta)]$
Routine `rtsafe` (Numrec)

2) Interpolation des intégrales FD & dérivées : polynôme d'ordre ajustable.
Routine `polint` (Numrec)

3) Calcul des grandeurs physiques basé sur les formulations analytiques :
Miralles & Van Riper (1996) ApJ SS 105, 407
routine `physquitt`

ex:

3) Les calibrations

Pour $T = 9.7 \cdot 10^7$ K & composition solaire : ρ 10^{-1} à 10^4 gcm^{-3}

$P(\rho)$, $u_{\text{int}}(\rho)$, $(\partial\rho/\partial P)_T$, $(\partial\rho/\partial T)_P$, $\delta\dots$

EOS OPAL (*`Z_interp_leos`*)

Tables FD (*`etat_bxl`*)

Ecart maximal en P : 0.87%; en u_{int} : 0.66%; grandeurs dérivées : 8.2%

Opacité

Entrées : ρ , T & comp

Sorties : κ , dérivées de κ en T, ρ , X

1)Trois domaines

Si $T < 5. 10^8$ K : opacités OPAL : nombreux processus d'interaction rayonnement / matière : bb, bf, ff, diffusion ..

2 Cas :

a) Combustion PP&CNOF:

Fractions : X, Y, Z variables ($Z < 0.1$ & rapports solaires)

Routine *opa_houdek2*

b) Combustion 3α & $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$: (^{12}C , ^{20}Ne ... ?)

Fractions : X=0, Y variable, $Z = Z_{\bullet} + Z_1 + Z_2$ variable où

$(Z_1; Z_2) = (C; O)$

(O;Ne)

(O;Mg)

(O;Na)

(O;Si)

Routine *opaliv21* (adaptation de la routine de Livermore)

Interpolations classiques en $\log T$, r ($\log(\rho/t6^3)$), Z_1 , Z_2 sur les tables de Livermore de 'type 2'

Bon raccord avec la table usuelle....

Si $T > 5. 10^8$ K : on considère la diffusion Compton et la conduction

électroniques :

c) Combustions 'avancées' : ^{12}C , ^{20}Ne , ^{16}O , quasi-équilibres statistiques..

fractions indifférentes : Interactions rayonnement / e-uniquement

Radiation : diffusion Compton (relativiste): $\sigma \approx \sigma_0 \sim (e/mc)^2$

*Si e- non dégénérés : formule Iben (1975) ApJ 196, 525

$$\kappa_e = [0.2 - D - (D^2 + 0.004)^{1/2}] (1 + X) \text{ en cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\text{où } D = 0.05 [\log T - 1.7]$$

*Si e- dégénérés : formule Buchler & Yueh (1976) ApJ 210, 440

valide pour T entre $2.9 \cdot 10^8$ à $2.9 \cdot 10^9$ K (soit β de 0.05 à 0.5)

$$\eta + 1/\beta \text{ entre } -10 \text{ et } 4 \quad \eta_{\text{max}} \text{ toujours supérieur à } 6$$

Conduction : formules Iben (1975) ApJ 196, 525

Effets relativistes et de dégénérescence

Valide pour ρ entre $10^{-5.75}$ et 10^{12} g.cm⁻³

$$T \text{ entre } 10^5 \text{ et } 10^9 \text{ K}$$

→ Extrapolation au-delà de 10^9 K

2) Calibration

Comparaison de l'opacité radiative de *opa_tht* à la table de Livermore

$$X_c = 0.2; X_o = 0.78; Z = 0.02 \text{ à } T = 5 \cdot 10^8 \text{ K}$$

Pour ρ entre 10^5 et 10^{-3} gcm⁻³ écart maximal 2.8 % sur κ

Ecart plus importants hors du domaine 'stellaire' (T/ ρ) des massives (correlation Coulombienne, autres effets... ?)

Limite atmosphérique

Evolution massives hors SP : T_{eff} et $\log(g)$ varient fortement

Adaptation à CESAM des lois $P(\tau)$ et $T(\tau)$ extraites des calculs 'Nextgen'
Hauschildt, Allard, Baron (1999) ApJ 512, 377

Modèles atmosphériques à l'ETL, convection $\alpha=1$, typiquement 10^7 raies...

→ Choix de la structure 'initiale' sur une grille de points ($T_{\text{eff}}, \log(g)$) :

T_{eff}	de 3000 à 10.000 K	$\Delta t_{\text{eff}}=200$ K
$\log(g)$	de 2 à 4.5	$\Delta \log(g)=0.5$

Sauf $T_{\text{eff}} > 7000$ K & $\log(g) < 3$

↓

168 relations pour $P(\tau)$, $T(\tau)$ pour couvrir les conditions de surface rencontrées

Principe : Le guess initial pour la stratification dépend de T_{eff}
et $\log(g)$

→ Basculement automatique des lois $P(\tau)$ et $T(\tau)$ au cours de l'évolution

Routines `interpatm` `m1eq_atm` & `m1lim_atm`

Réactions nucléaires & énergétique

Entrées : ρ , T & comp

Sorties : dcomp, ε , ε ...
v

1) Extensions nécessaires

*Phases nucléaires avancées : vecteur de composition et réseau de réactions étendus aux brûlage ^{12}C , Cycles NeNa et MgAl, brûlage ^{20}Ne , ^{16}O

*Pertes neutriniques 'plasma': pour $T > 10^8$ K

2) Développement

Adaptation des réseaux de réactions NetGen (Bruxelles) à CESAM
Goriely & Jorissen (2001) NP A 688, 508

Collaboration S. Goriely & A. Jorissen : domaine couvert de 10^6 à 10^{10} K
480 points de maillage en T

Routine nuc_bxl : 29 isotopes & 52 réactions

Adaptation de la routine du groupe Flash pour les pertes neutriniques plasma

Routine sneut : neutrinos de paires, Bremstrahlung...

Développement en cours pour le réseau

→ Actuellement : réseau partiel → combustion ^{12}C soit $T_{\text{max}} 10^9$ K