

Résultats scientifiques obtenus avec CESAM

Présentés par :

Bernard PICHON

Laboratoire G.-D. Cassini , UMR 6529 du CNRS
Observatoire de la Côte d'Azur à Nice

Pour le Forum « Modélisation en physique stellaire » (conférence invitée)
Organisé par le Programme National de Physique Stellaire (PNPS)
à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP), les 27 et 28 Novembre 2001

On trouvera dans ce document :

- Le texte de mon exposé du 27 novembre 2001 (11 pages)
- Les figures qui y ont été présentées (12 pages) .

Je remercie Janine, Gabrielle, Yveline, Sylvaine, Pierre, Frédéric, Sacha, Eric, Roger, ..., de l'aide apportée à la préparation de cette compilation.

Résultats scientifiques obtenus avec CESAM

Code d'
Evolution
Stellaire
Aadaptatif et
Modulaire

V 4.4 ¹

¹ P.Morel, Astronomy and Astrophysics (Supplement Series) 124 (1997) 597 -- 614

PLAN

I : Historique

GDR n°131 (1987--1995) dont réunions du groupe code

Initiateurs : A. Baglin, E. Schatzman, P. Morel (début en 1987).

II : Vie du code

Mise à disposition « *gratuite* » de CESAM (©) au public sur la toile (Web) depuis 1997 !

Contributions : Voir la section sur le contenu du code

Aspects numériques :

Pierre MOREL : Analyse numérique,
programmation (F77, F90, F95)
Bernard Pichon (depuis 2001) : programmation (F95, F2k, POO)
→ voir perspectives

Extension : CEPAM par Tristan Guillot (1991-1994)

III : Exploitation

Voir la suite de l'exposé !!!

IV : Perspectives

Voir les conclusions !!!

Equipes des collaborations directes (dès le départ) :

OCA (Cassini)	:	G. Berthomieu, P. Morel, B. Pichon, J. Provost
Paris-Meudon (Dasgal, Daec)	:	M. Auvergne, A. Baglin, R. Cayrel, M.-J. Goupil, Y. Lebreton, E. Schatzman, C. Van't-Veer,
GONG (validation du code)	:	J. Christensen-Dalsgaard

Laboratoires concernés (actuellement) :

- En France :

Observatoire de la Côte d'Azur : G.D. Cassini
Observatoire de Paris-Meudon : DASGAL à Meudon + Rennes
Service d'Astrophysique du CEA à Saclay

- À l'étranger :

Coimbra (Portugal)
Bombay (Inde)
Vienne (Autriche)
? ? ?

Thèses (par ordre chronologique avec indication du directeur de thèse) :

Tristan Guillot	1994	P. Morel
Nathalie Audard	1994	J. Provost
João Manuel Fernandes	1996	A. Baglin + Port.
Fatma Soufi	1996	A. Baglin
Allan Sacha Brun	1998	J.-P. Zahn
Thierry Corbard	1998	G. Berthomieu
M. Hernández	1998	E. Michel (?) + Esp.
Caroline Barban	1999	M. Auvergne
Daniel Cordier	2000	Y. Lebreton
Laurent Piau	2001	S. Turck-Chièze
Lionel Bigot	2002	J. Provost

Contenu du code

Physique implantée :

Implémentation : Pierre Morel

Aides, conseils et *debug* de/par :

Physique locale

Equations d'état (EFF, CEFF,) : M. Auvergne, A. Baglin, M. Gabriel,
(OPAL, GONG) Y. Lebreton, J. Provost
Opacités : N. Audard, S. Brun, G. Houdek,
Y. Lebreton
Réactions thermonucléaires : M. Gabriel, Y. Lebreton, B. Pichon,
S. Turck-Chièze

Physique globale

Turbulence : E. Schatzman
Pression turbulente : S. Brun
Convection : M.-J. Goupil, J. Provost
Rotation : N. Audard, M.-J. Goupil
Diffusion : P. Morel
Accélération radiative : G. Alécian

Autres aspects astrophysiques

Atmosphère : R. Cayrel, C. Van't-Veer
Neutrinos : G. Berthomieu,

Autres aspects techniques

: P. Morel (mode d'emploi)
M. Auvergne (procédures Unix)

Résultats

Soleil :

- Modèles standards e.g. le Soleil comme 'laboratoire de physique'
 - a) « Updated solar models » by P. Morel *et al.* , A&A 327 (1997) 349
Introduction de la diffusion microscopique (amélioration des fréquences)
et le la perte de masse (amélioration de l'épuisement du lithium)
Mise en évidence du besoin de meilleure opacités et d'équation d'état.
 - b) « Standard solar models in the light of new helioseismic constraints.
I : The solar core » by A.S. Brun *et al.* , ApJ 506 (1998) 913
Introduction de quelques (autres) ingrédients physiques e.g. taux de réaction
d'Adelberger *et al.*, de nouvelles tables d'opacités et d'équation d'état
→ Figure 1
 - c) « Solar models and NACRE thermonuclear reaction rates »
by P. Morel *et al.* , A&A 350 (1999) 275
Utilisation de la nouvelle compilation épéenne de taux de réactions et
comparaison avec celle plus spécifique d'Adelberger *et al.*
→ Figure 2
→ Figure 3
 - d) « About the time evolution of a solar model » by P. Morel *et al.* , A&A 353 (2000) 771
- Neutrinos
 - a) « Standard solar models with CESAM code : neutrinos and
helioseismology » by G. Berthomieu *et al.* , A&A 268 (1993) 775
Un des premiers de la série ... et un des premiers articles fait avec CESAM !
 - b) « Solar neutrino emission deduced from a seismic model »
by S. Turck-Chièze *et al.* , ApJ 555 (2001) L69
Un des derniers de la série ...

Remarque : aucune différence (Cl : de 7.43 à 7.44 , Ga : de 127.7 à 127.8) !
 - c) « Diffusion near the solar core » by P. Morel and E. Schatzman , A&A 310 (1996) 982

- Héliosismologie :

- a) « Incorporating the atmosphere in stellar structure models : the solar case »
by P. Morel *et al.* , A&A 286 (1994) 91
Nécessité d'avoir un raccord *correct* de l'atmosphère pour le calcul des
fréquences d'oscillations.

Vitesse du son :

- b) « Solar neutrino emission deduced from a seismic model »
by S. Turck-Chièze *et al.* , ApJ 555 (2001) L69
→ Figure 4
- c) « Structure of the solar core : Effect of asymmetry of peak profiles » by S. Basu *et al.* ,
ApJ 535 (2000) 1078

Tachocline et rotation :

- d) « Standard solar models in the light of new helioseismic constraints.
II : Mixing below the convective zone » by A.S. Brun *et al.* ,
ApJ 525 (1999) 1032
Introduction de la problématique de la tachocline solaire ; problème du
lithium dans la séquence principale.
- e) « Shear turbulence beneath the solar tachocline » by E. Schatzman *et al.* ,
A&A 364 (2000) 876
- f1) « Solar internal rotation from LOWL data : A 2D regularized least-square inversion
using B-Splines » by Th. Corbard *et al.* , A&A 324 (1997) 298
- f2) « Inferring the equatorial solar tachocline from frequency splittings »
by Th. Corbard *et al.* , A&A 330 (1998) 1149
Utilisation de CESAM (avec un code d'inversion et un autre d'oscillations)
pour obtenir la carte de rotation (interne) du Soleil.
- f3) « Non linear regularization for helioseismic inversions : Application for the study of
the solar tachocline » by Th. Corbard *et al.* , A&A 344 (1999) 696

Modes g et p :

- g) « Low-frequency p- and g- mode solar oscillations » by J. Provost *et al.* ,
A&A 353 (2000) 775
- h) « Excitation of stellar p-modes by turbulent convection. II : The Sun »
by R. Samadi *et al.* , A&A 370 (2001) 147

(Autres) Etoiles :

- Abondances

- a) « Microscopic diffusion and subdwarfs » by P. Morel and A. Baglin ,
A&A 345 (1999) 156

Importance d'inclure à la fois la diffusion et une procédure de calibration pour mieux expliquer la positionnement de certaines étoiles dans le diagramme HR (*cf.* aussi l'article suivant)

→ Figure 5

- b) « The Hipparcos HR diagram of nearby stars in the metallicity range $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.3$: A new constraint on the theory of stellar interiors and model atmospheres » by Y. Lebreton *et al.* , A&A 350 (1999) 587

Introduction de la correction non-ETL de F. Thévenin et T. Idiart pour l'amélioration des analyses de ces mêmes observations.

→ Figure 6

- c) « Lithium depletion in the pre-main sequence solar-like stars »
by L. Piau et S. Turck-Chièze , Prépublication

Étude du problème du lithium pour des étoiles de 0.8 à 1.4 M_{sun}

Pour en savoir plus : Thèse de Laurent PIAU le Vendredi 7 Décembre

- Procyon :

- c) « Solar-like oscillations of Procyon A : Stellar models and time series simulations versus observations » by C. Barban *et al.* ,
A&A 350 (1999) 617

- Astérosismologie :

« Généralités » :

- a) « Oscillations of a rotating stars : A non-pertubative theory »
by B. Dintrans and M. Rieutord , A&A 354 (2000) 86
Utilisation de CESAM. par nos collègues toulousains (!)
pour avoir un modèle initial plus réaliste.
- b) « Seismic study of stellar convective cores »
by A. Mazumdar and H. M. Antia , A&A 377 (2001) 192
Utilisation de CESAM. par nos collègues indiens !
- c) « Comparative seismology of pre- and main- sequence stars in the instability trip »
by M. Suran *et al.* , A&A 372 (2001) 233
- d1) « Seismological properties of intermediate-mass stars » by N. Audard and J. Provost ,
A&A 282 (1994) 73
- d2) « Seismological effects of convective-core overshooting in stars of intermediate mass »
by N. Audard *et al.* , A&A 297 (1995) 427

Étoiles (ro)Ap :

- a) « The acoustic cut-off frequency of roAp stars » by N. Audard *et al.* ,
A&A 335 (1998) 954
- b) « Non-axisymmetric oscillations of Ap stars » by L. Bigot *et al.* ,
A&A 356 (2000) 218
Pour en savoir plus : Thèse de Lionel BIGOT, début 2002 @ Nice

Étoiles δ Scuti :

- a1) « Seismology of δ Scuti stars in the Praesepe cluster. **I** : Ranges of unstable modes as predicted by linear analysis versus observations »
by E. Michel *et al.* , A&A 342 (1999) 153
- a2) « Seismology of δ Scuti stars in the Praesepe cluster. **II** : Identification of radial modes and their associated stellar parameters »
by M. N. Hernández *et al.* , A&A 338 (1998) 511

(Calibration des) Etoiles doubles :

- α Cen A :

- a) « Calibrations α Cen A & B » by P. Morel *et al.* , A&A 363 (2000) 675
Prédiction des fréquences (Observations de François Bouchy *et al.*)

- ζ Her

- a) « Contribution to the study of the visual binary ζ Herculis :
A detailed analysis of ζ Herculis A »
by Y. Chmielewski *et al.* , A&A 299 (1995) 809

→ Figure 7

- b) « The ζ Herculis binary system revisited : Calibration and seismology »
by P. Morel *et al.* , A&A 379 (2001) 245
De meilleures observations (Hipparcos) pour une meilleure calibration.

→ Figure 8

- η Cas , ξ Boo , 70 Oph et 85 Peg :

- a) « Fundamental stellar parameters for nearby visual binary stars : η Cas ,
 ξ Boo , 70 Oph and 85 Peg ; Helium abundance, age and mixing length
parameter for low mass stars » by J. Fernandes *et al.* ,
A&A 338 (1998) 455

Aussi : Détermination d'une valeur pour le rapport $\Delta Y/\Delta Z$ (voir plus loin)

Remarque : Plus il y aurait de points (*i.e.* de systèmes doubles étudiés),
meilleur ce serait !

→ Figure 9

- ι Peg

- a) « Calibration of ι Pegasi system » by P. Morel *et al.* ,
A&A 354 (2000) 636

→ Figure 10

Amas :

- Age et abondances : e.g. les Hyades

- a) « The Hyades : distance, structure, dynamics, and age »
by M. A. C. Perryman *et al.* , A&A 331 (1998) 81
Calcul d'un diagramme d'amas (par Yveline) pour la détermination de
certains paramètres.

→ Figure 11

- b) « The helium content and age of the Hyades : Constraints from five
binary systems and Hipparcos parallaxes » by Y. Lebreton *et al.* ,
A&A 374 (2001) 540
Même travail avec des données plus récentes....

- c) « A Hipparcos study of the Hyades open cluster : Improved colour-absolute
magnitude and Hertzsprung-Russell diagrams » by J. H. J. de Bruijne *et al.* ,
A&A 367 (2001) 111
Utilisation de modèles obtenus avec CESAM dans l'article cité en a)

Abondances :

- Evolution chimique de la Galaxie

- a) « On the width of the theoretical lower main sequence : Consequences
for the determination of the $\Delta Y/\Delta Z$ ratio in the solar neighbourhood »
by J. Fernandes *et al.* , A&A 311 (1996) 127

- Deutérium primordial solaire

- a) « A reestimate of the protosolar ($^2\text{H}/^1\text{H}$)_p ratio from ($^3\text{He}/^4\text{He}$)_{sw} solar
wind measurements » by D. Gautier and P. Morel , A&A 323 (1997) L9

Perpectives & Développements

- Stades avancés ? (Besoin d'opacités !)
- Amélioration des ingrédients physiques :
e.g. EOS, convection, réactions et réseau nucléaire,
opacités (selon la composition chimique)
- Restructuration du code (POO, Fortran 95, F2k)
- Code 2D (physique globale vs. physique locale)
→ cf. Michel Rieutord ...

Conclusions

- Mise à disposition publique de CESAM à la communauté scientifique qui exploite ainsi depuis plusieurs années un code de structure et d'évolution stellaire adaptatif et modulaire ²
- Les développements effectués par les utilisateurs de CESAM sont mis systématiquement à la disposition de la communauté lorsqu'ils sont communiqués !

² Parmi les '*tiroirs*' ainsi disponibles, citons par exemple, la possibilité de faire des modèles avec/sans diffusion, avec/sans PMS, ... , avec différentes précisions numériques, avec plusieurs phénoménologies pour la convection,

Table des figures (référéncées dans le texte) :

Figure 1 : extraite de l'article ApJ 506 (1998) 913 , page 919

Figure 2 : extraite de l'article A&A 350 (1999) 275 , page 283

Figure 3 : extraite de l'article A&A 350 (1999) 275 , page 283

Figure 4 : extraite de l'article ApJ 555 (2001) L69 , page L71

Figure 5 : extraite de l'article A&A 345 (1999) 156 , page 159

Figure 6 : extraite de l'article A&A 350 (1999) 587 , page 594

Figure 7 : extraite de l'article A&A 299 (1995) 809 , page 819

Figure 8 : extraite de l'article A&A 379 (2001) 245 , page 251

Figure 9 : extraite de l'article A&A 338 (1998) 455 , page 463

Figure 10 : extraite de l'article A&A 354 (2000) 636 , page 639

Figure 11 : extraite de l'article A&A 331 (1998) 81 , page 127

Rmq : Les droits sur la reproduction des figures appartiennent aux auteurs et/ou aux revues .

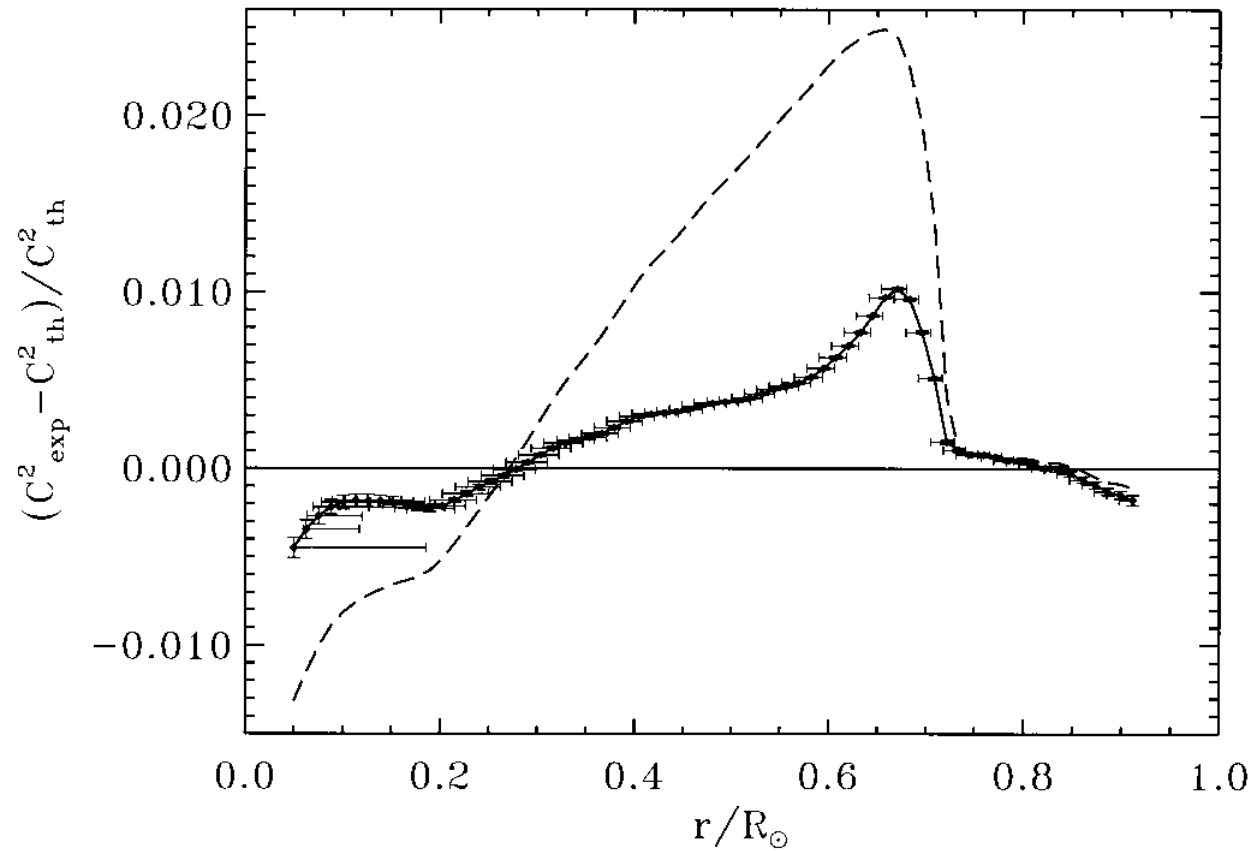


FIG. 4.—Sound-speed square difference between the Sun as measured by GOLF + LOWL experiments (Lazrek et al. 1997; Tomczyk et al. 1995) and our models without (*dashed line*) and with diffusion (*solid line with experimental error bars*).

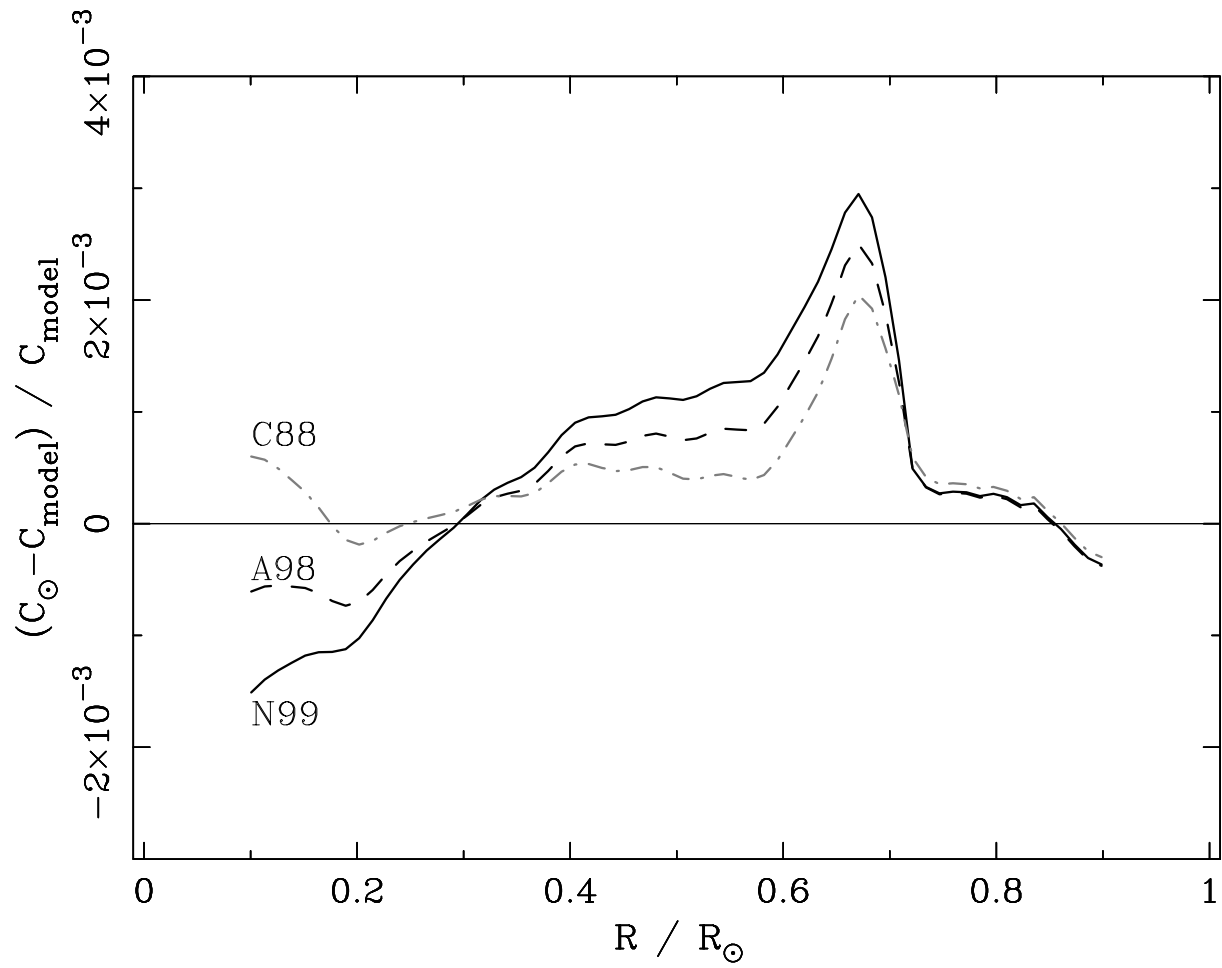


Fig. 9. Relative difference in sound velocity between the Sun and the calibrated models N99 (full), A98 (dashed) and C88 (dot-dash-dot-dash).

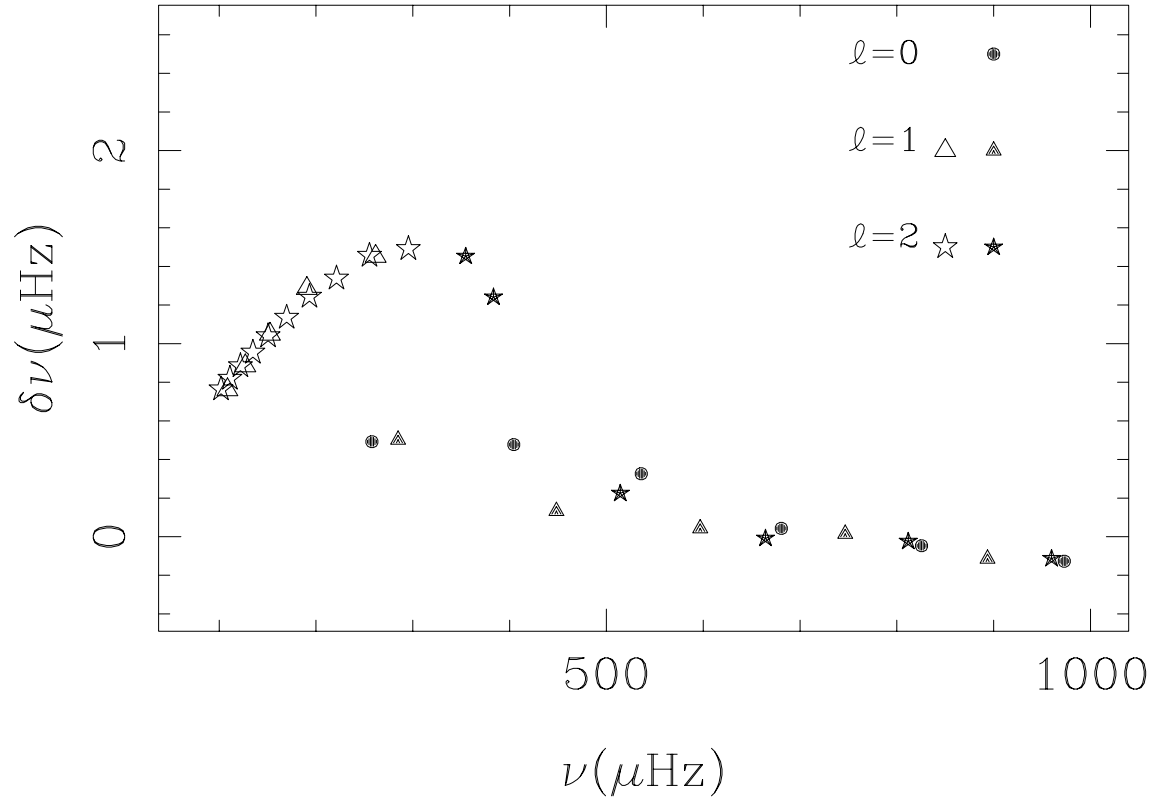


Fig. 8. Frequency differences (in μHz) in the low frequency range between N99 and C88 for modes of degree $\ell = 0, 1, 2$. Open symbols denote g-modes and, full symbols, f-modes and p-modes.

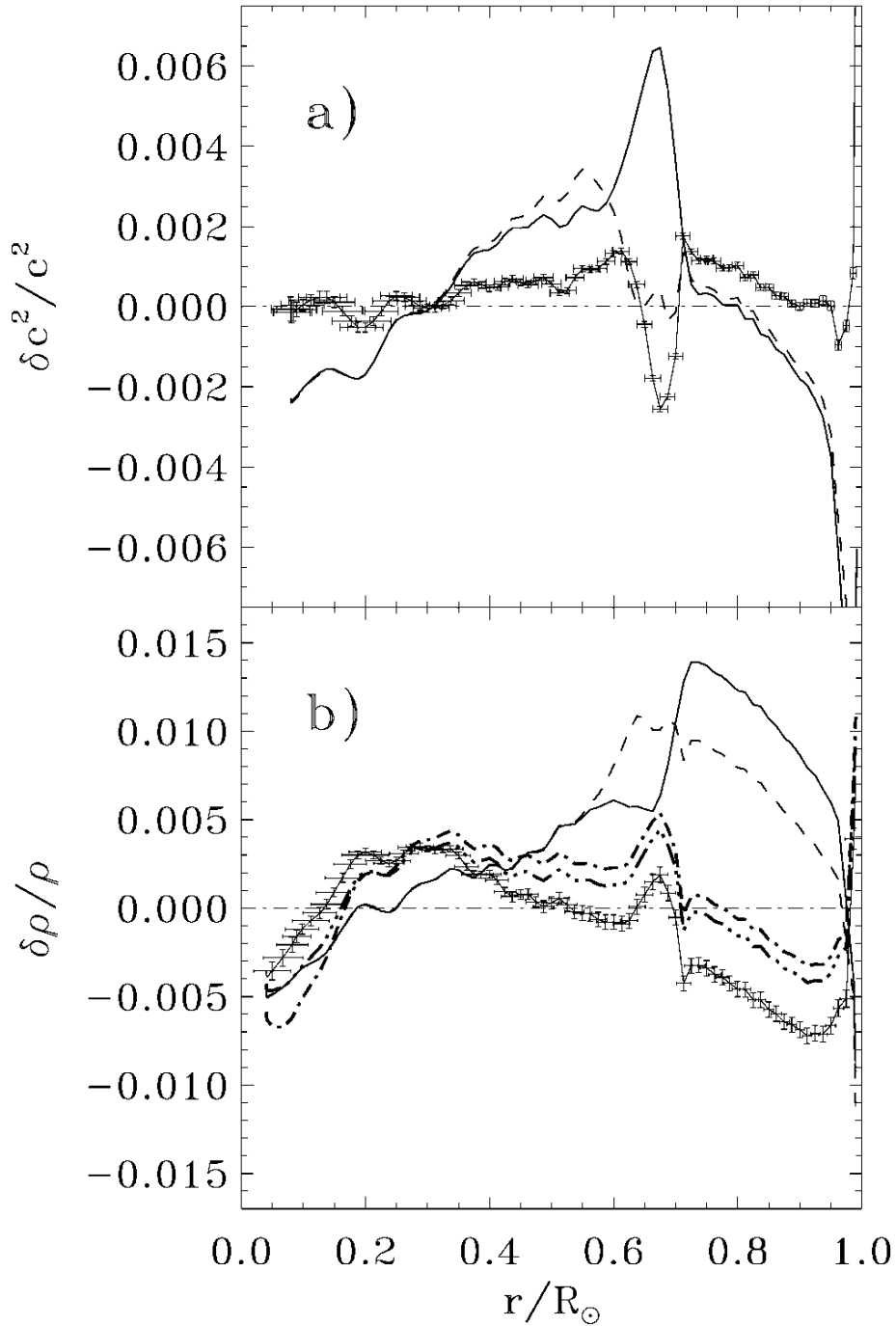


FIG. 2.—Relative differences between (a) the square of the sound speed and (b) the density deduced for the Sun using the GOLF/MDI frequencies described in § 3 and those of different Saclay solar models. The models are reference model (*continuous curve*), model B_{tz} of BTCZ99 (*dashed curve*), and the seismic model (points with error bars joined by straight lines). Superposed on the density profile are two other models: model with reaction rate of (^3He , ^4He) reduced by 10% (*dot-dot-dashed curve*) and model with the reaction rates of the CNO cycle reduced by 70% (*dot-dashed curve*) relative to the seismic model.

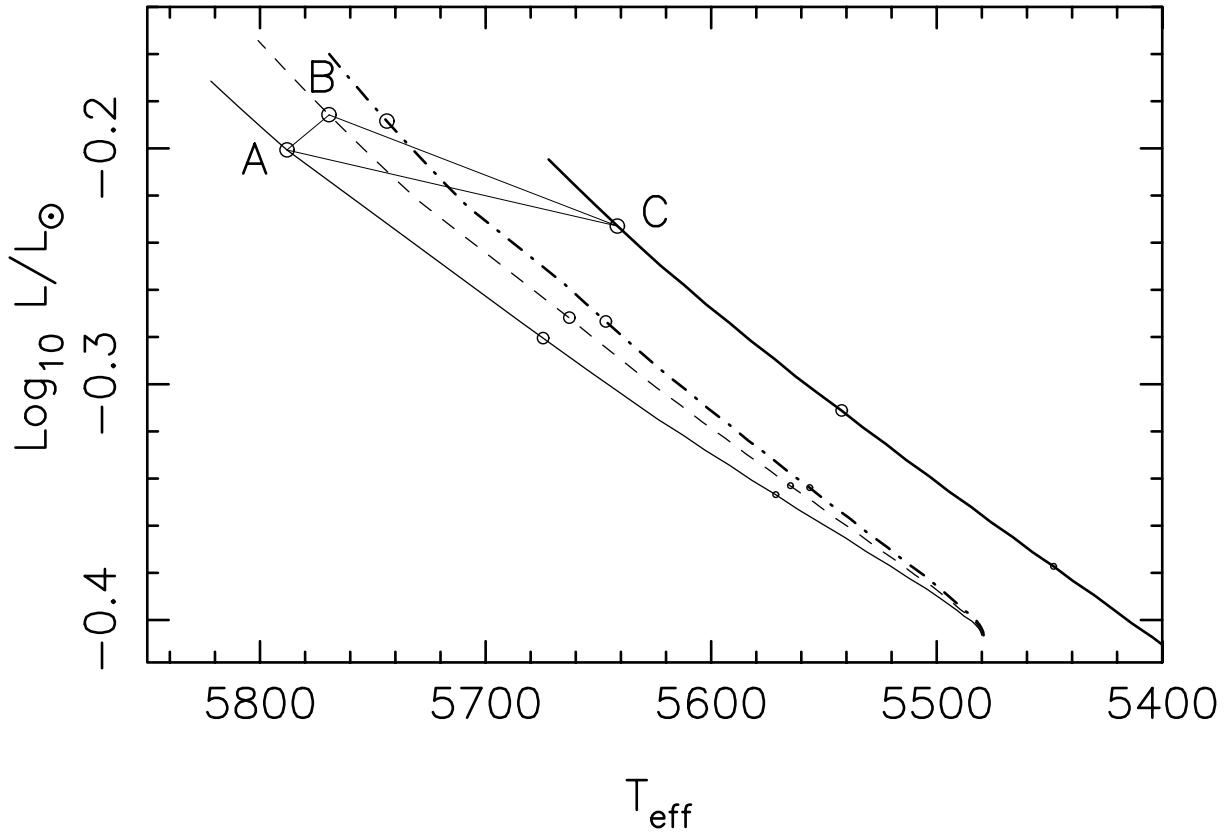


Fig. 3. The main-sequence HR evolutionary tracks for $0.8M_{\odot}$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.94$, without diffusion (thin full), with diffusion of helium only (dash-dot-dash), with diffusion of all elements (dashed), and finally with the calibration of surface $[\text{Fe}/\text{H}]$ (heavy full) (the initial metallicity has been computed in order to achieve, at 10 Gyr, the initial surface metallicity of the other three models). On each evolutionary track the open circles correspond to ages of 3 Gy, 6 Gy and 9 Gy respectively. For 9 Gy, AB is the diffusion shift **DS**, BC the calibration shift **CS** and AC the global shift **GS** (see text).

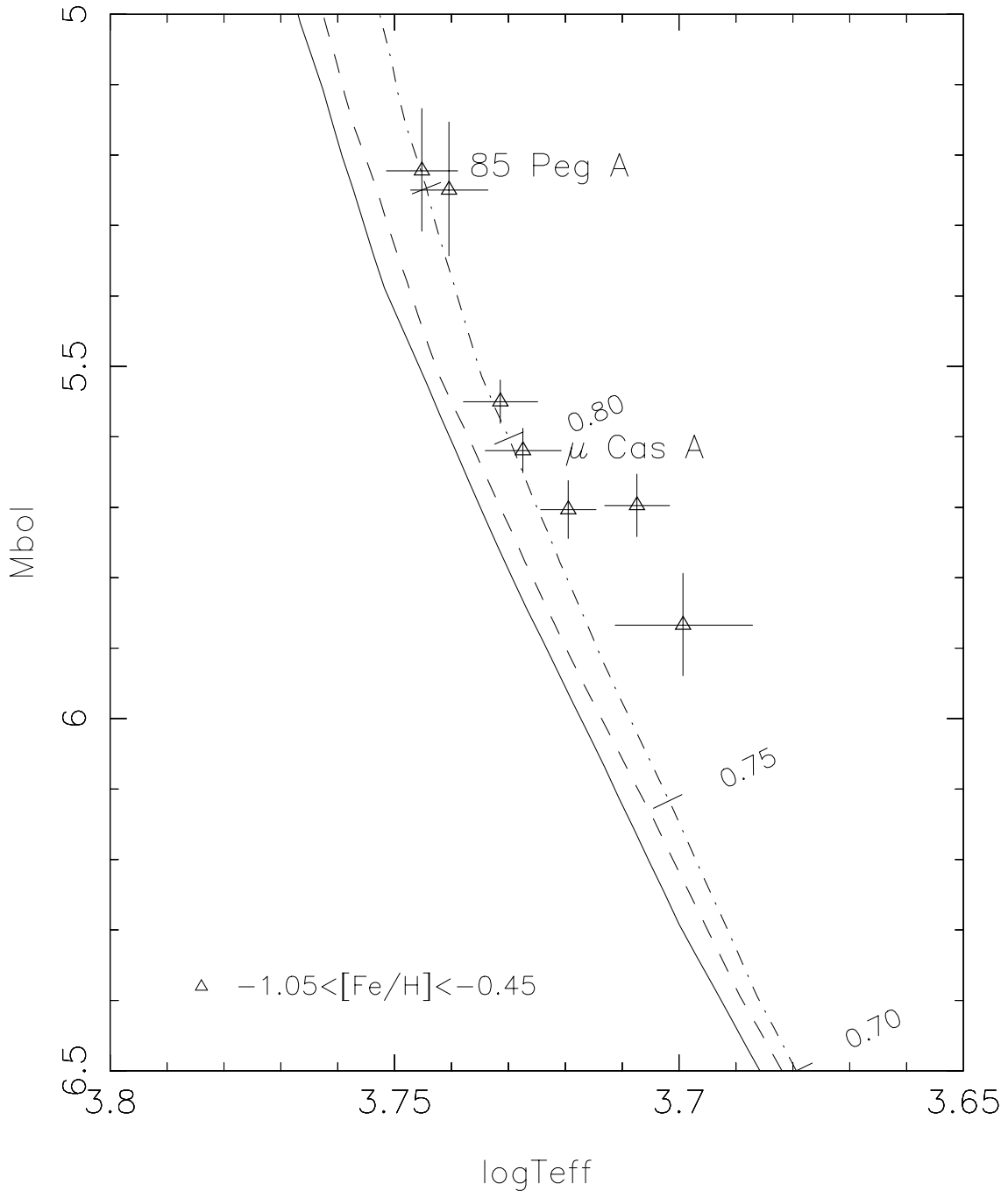


Fig. 5. This figure is a large scale HR diagram for the subsample of unevolved stars in the LTE metallicity range $-1.05 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.45$. The full line is a standard isochrone for the mean LTE metallicity of the sample $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.72$. The dashed line is the standard isochrone corresponding to the NLTE mean metallicity of the sample $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.57$. The dot-dashed line corresponds to an isochrone including microscopic diffusion of the elements for an age of 10 Gyr. The surface metallicity is the NLTE value $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.57$, but the initial metallicity, which is very close to the mean interior metallicity was $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.5$. The fit is now satisfactory. The tick marks show the value of the mass along the upper isochrone. The tick mark near 85 Peg A corresponds to $0.85 M_{\odot}$ (not labeled for clarity)

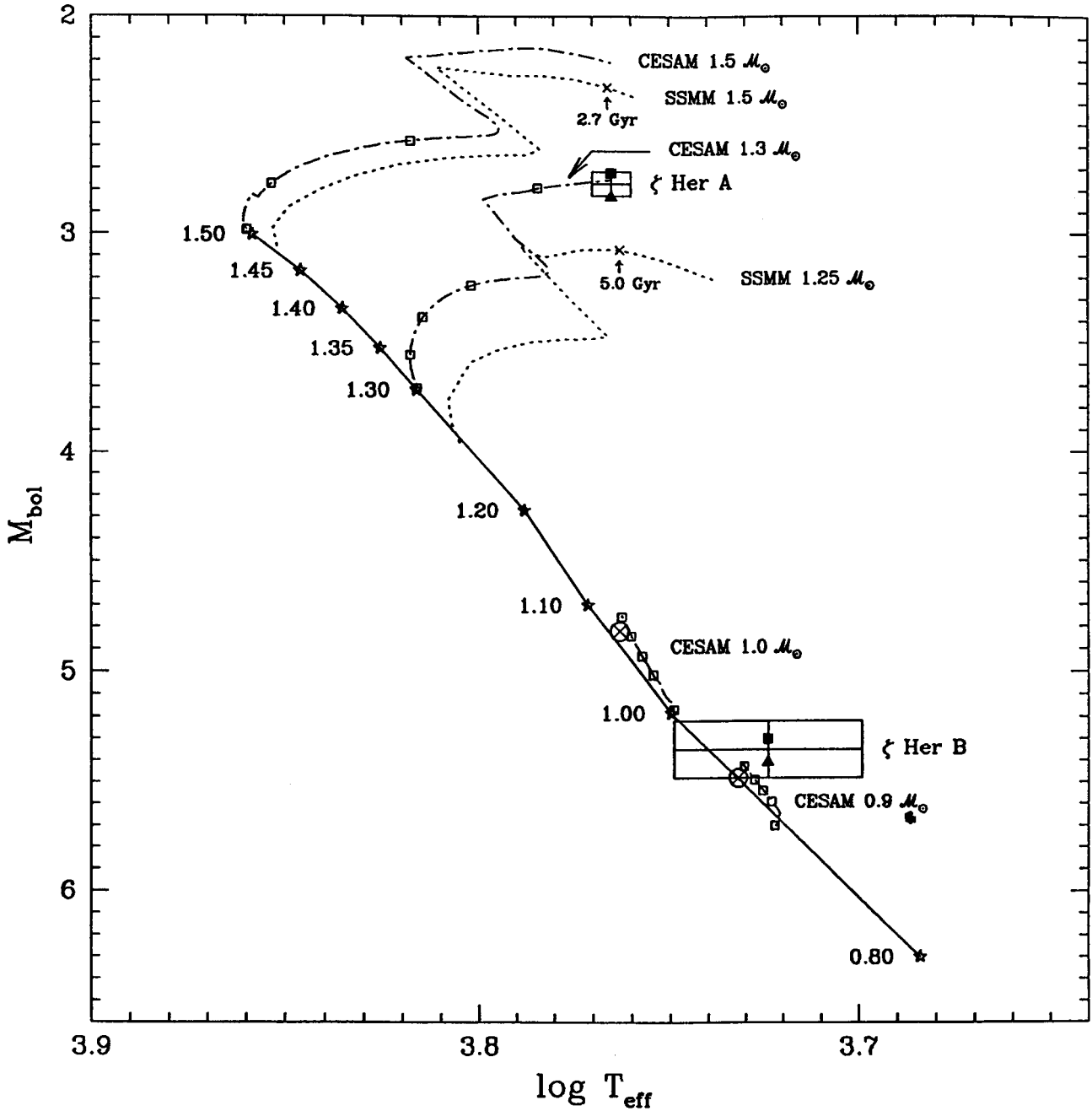


Fig. 4. The ζ Her system in the HR diagram. The filled squares give the location of ζ Her A and B corresponding to the parallax $\pi = 0''.095$, and the filled triangles give their location corresponding to the parallax $\pi = 0''.100$. The solid line represents the CESAM ZAMS. The dot-dashed lines show the CESAM evolutionary tracks for 0.9, 1.0, 1.3 and 1.5 M_{\odot} ; the open squares are at integer ages in Gy. The dotted lines are SSMM evolutionary tracks for 1.25 and 1.5 M_{\odot} . The circled crosses represent SSMM models of 0.9 and 1.0 M_{\odot} evolved to an age of 4.0 Gyr

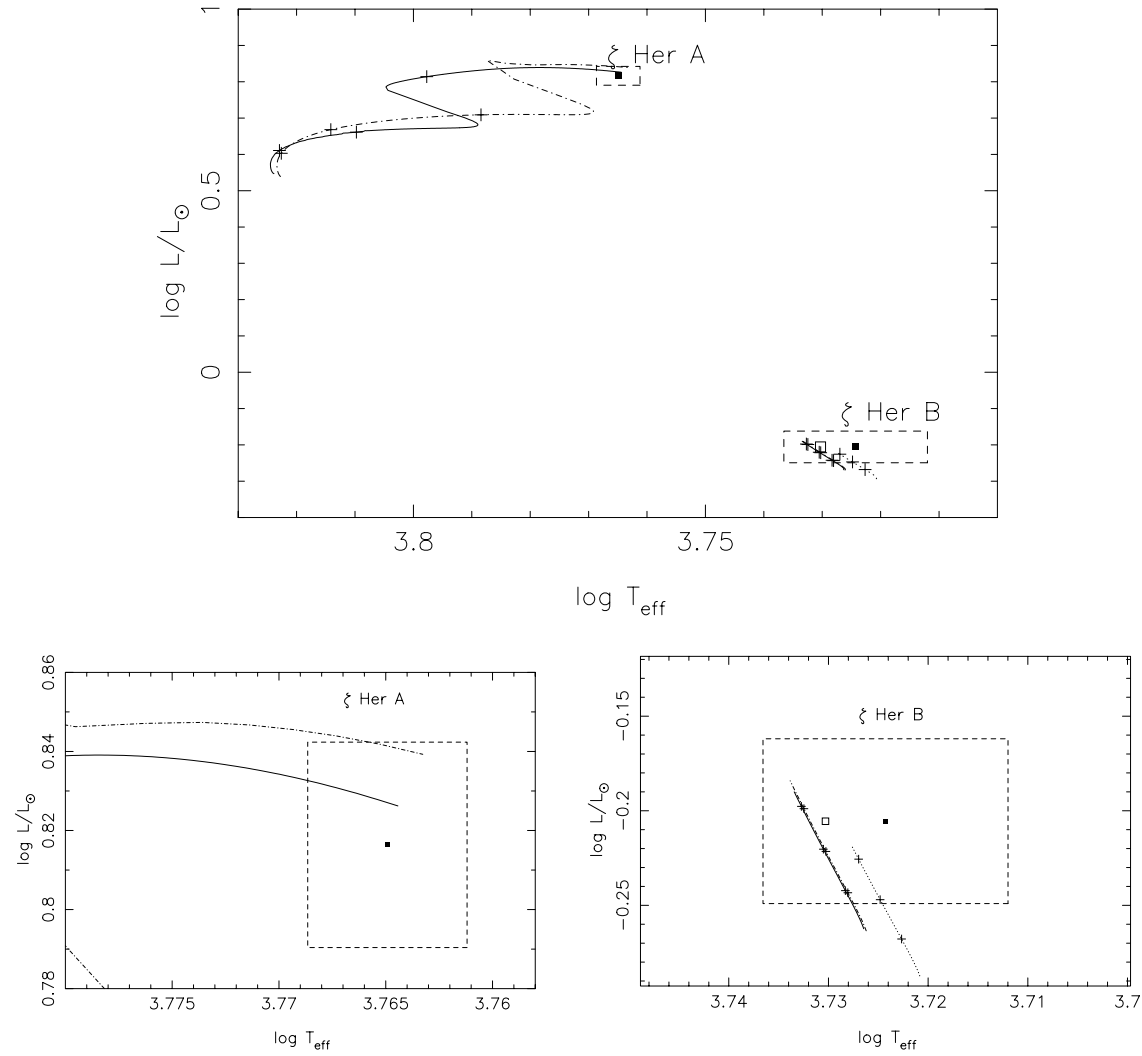


Fig. 1. Evolutionary tracks in the H-R diagram for models of ζ Her A, & B without overshooting (full), with overshooting of $0.2H_p$ for the convective core of ζ Her A (dot-dash-dot) and with a larger metallicity of 0.05 dex for ζ Her B (dotted). The open squares correspond to the locus of ζ Her B assuming this larger metallicity. Dashed rectangles delimit the uncertainty domains. Top panel: full tracks from ZAMS. The “+” signs denote 1 Gyr time intervals along the evolutionary tracks. Bottom left and right panels: enlargements around the observed ζ Her A & B loci.

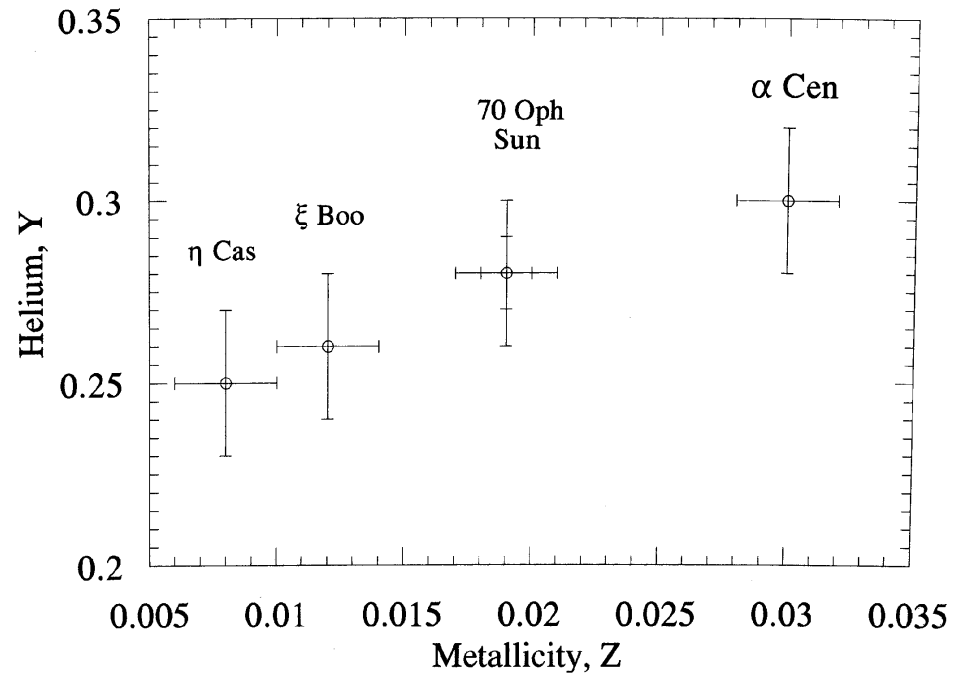


Fig. 5. Helium versus metal abundance: α Centauri (Fernandes & Neuforge 1995) and other stars (this work)

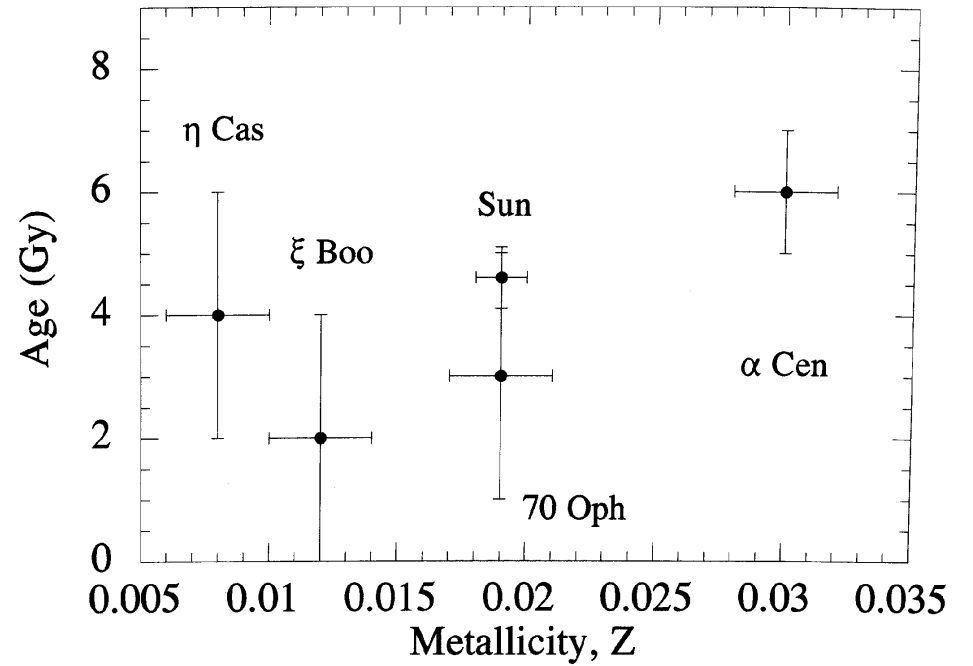


Fig. 6. Age versus metal abundance (same systems as in Fig. 5)

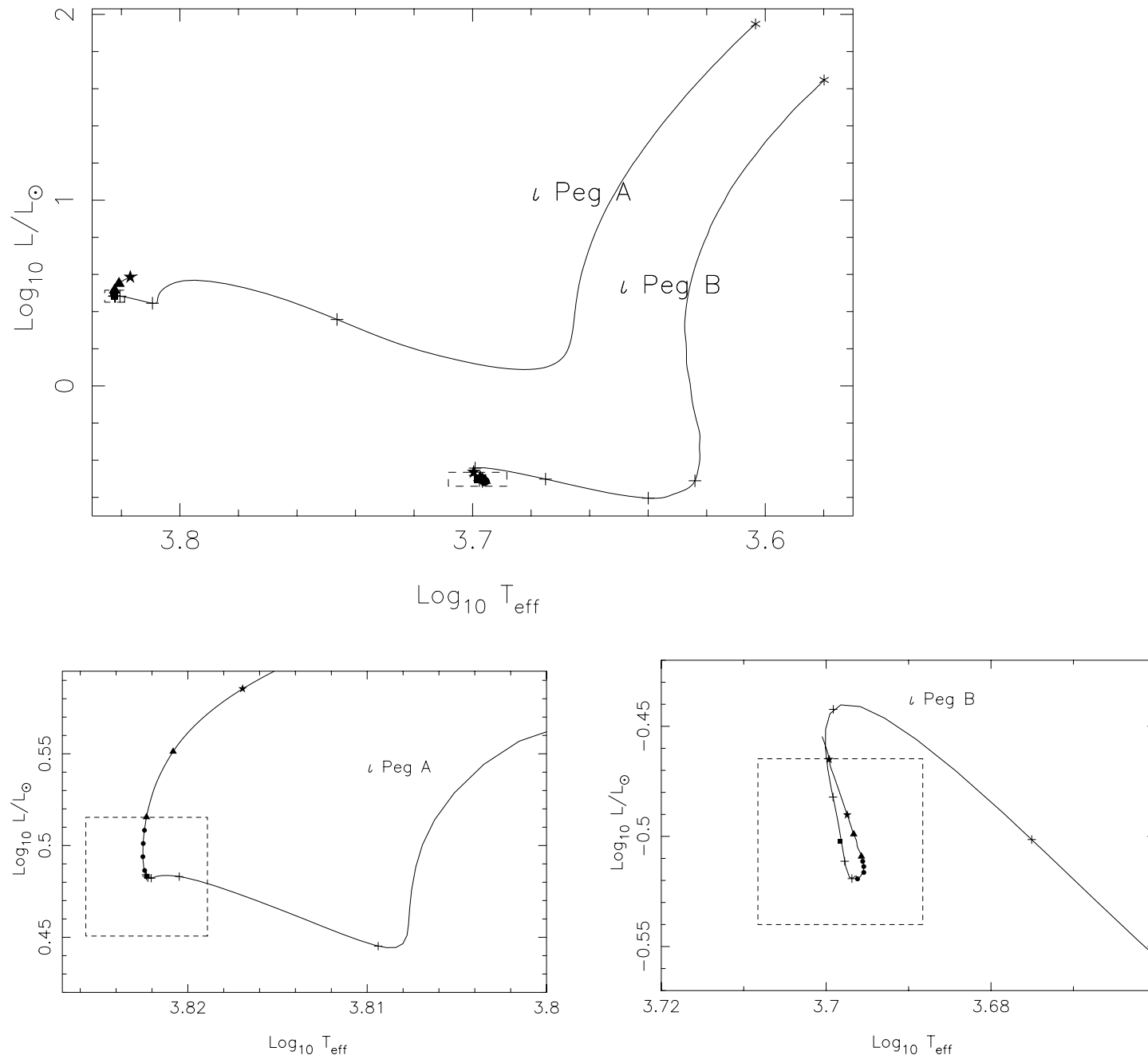


Fig. 1. Top: Evolutionary tracks in the HR diagram for ι Peg. A and B. Bottom: enlargements around the observational points (full square) with the uncertainty domains. The stellar evolution sequences are initialized (stick mark \ast) on the pre-main sequence soon after the deuterium ignition. Along the stellar tracks the time intervals between the marks are respectively 10 MY (+), 100 MY (●), 500 MY (full triangle), 1500 MY (★).

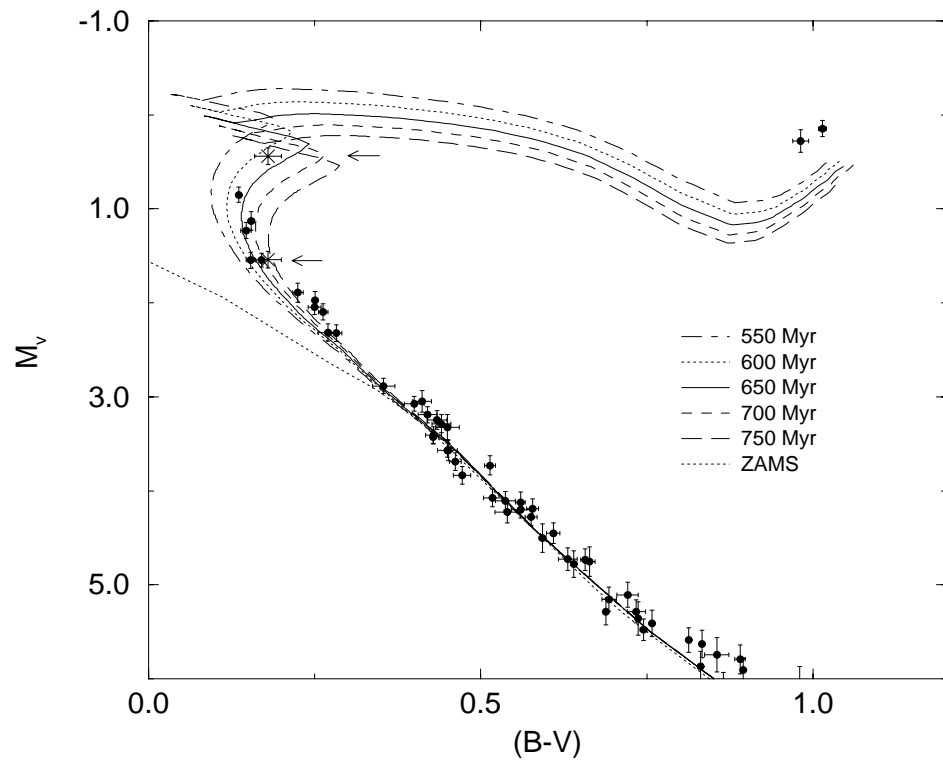


Fig. 22. The 69 single stars with the location of the ZAMS, and with isochrones corresponding to the range 550–750 Myr calculated with overshooting. The two objects indicated by different symbols (arrowed) are discussed in the text.

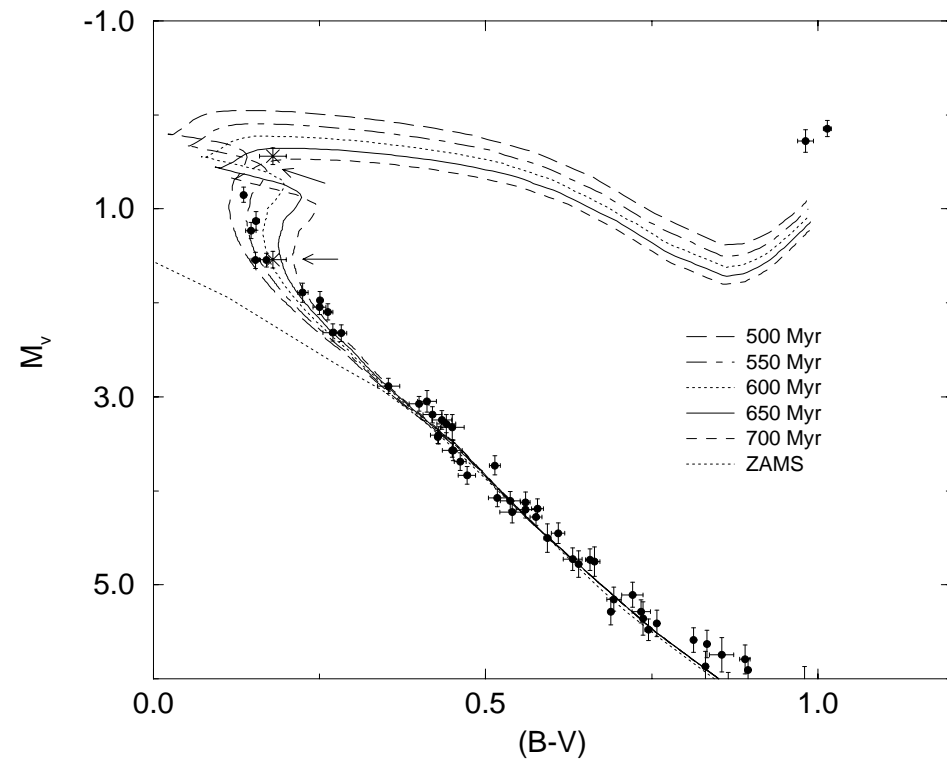


Fig. 23. The 69 single stars with the location of the ZAMS, and with isochrones corresponding to the range 500–700 Myr calculated without overshooting. The two objects indicated by different symbols (arrowed) are discussed in the text.