



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Εισαγωγή στην Αστροφυσική

Ενότητα 2: Ζωή και Θάνατος των Αστέρων

Ξενοφών Δ. Μουσάς  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Φυσικής



Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

*Εισαγωγή στην Αστροφυσική  
και Αστρονομία*

*εξέλιξη των άστρων*

Ξενοφών Δ. Μουσάς,  
Καθηγ. Φυσικής Διαστήματος

ΑΘΗΝΑ 2014

# Βιβλιογραφία

- Μάνου Δανέζη και Στράτου Θεοδοσίου, **Το Σύμπαν που αγάπησα**, Εκδ. Δίαυλος, Αθήνα, 2012, ISBN: 978-960-531-288-6
- Χαράλαμπου Βάρβογλη και Γιάννη Χ. Σειραδάκη, **Εισαγωγή στη σύγχρονη αστρονομία**, Εκδότης: Γαρταγάνης, Αριθμός Σελίδων: 352, 1994
- Σταύρου Ι. Αυγολούπη και Ιωάννη Χ. Σειραδάκη, **Παρατηρησιακή Αστρονομία**, Εκδότης Πλανητάριο Θεσσαλονίκης, 2004, Αριθμός Σελίδων 246, ISBN 960-86810-3-0
  
- B. W. Carroll and D. A. Ostlie
- *An Introduction to Modern Astrophysics*,
- εκδ. Addison-Wesley, 1996 και 2013,
- ISBN-13: 978-1292022932



**Επίσης:**

<http://www.astro.virginia.edu/class/majewski/astr551/lectures/LECTURE2/lec2b.html>

<http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/Stars.html>

[http://www.astro.washington.edu/users/anamunn/Astro101/Project1/stellar\\_spectroscopy\\_introduction.html](http://www.astro.washington.edu/users/anamunn/Astro101/Project1/stellar_spectroscopy_introduction.html)

<http://handprint.com/ASTRO/>

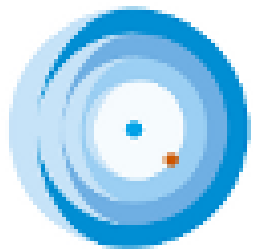
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit1/sptypes.html>

**Γενικώς μπορείτε να βρίσκετε επιστημονικά άρθρα σε οποιοδήποτε αντικείμενο, αστροφυσικής, φυσικής, μαθηματικών, φιλοσοφίας ή οτιδήποτε, στην ιστοσελίδα:**

**[scholar.google.gr/](http://scholar.google.gr/)**

**Τα άρθρα παρουσιάζονται με αξιολόγηση και πρώτα αναφέρονται τα πιο χρησιμοποιημένα, τα κατά τεκμήριο πιο σημαντικά.**





# Εύδοξος

Ηλεκτρονική Υπηρεσία Ολοκληρωμένης Διαχείρισης  
Συγγραμμάτων και Λοιπών Βοηθημάτων

## ΒΙΒΛΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Το σύμπαν που αγάπησα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 22684958

Έκδοση: Πανεπιστημιακή Έκδοση/2012

Συγγραφείς: Δανέζης Μάνος, Θεοδοσίου Στράτος

ISBN: 978-960-531-288-6

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

Το σύμπαν που αγάπησα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 12212

Αριθμός τόμου: Τόμος 1

Έκδοση: 3η έκδ./1999

Συγγραφείς: Δανέζης Μάνος, Θεοδοσίου Στράτος

ISBN: 978-960-531-062-2

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

Το σύμπαν που αγάπησα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 12213

Αριθμός τόμου: Τόμος 2

Έκδοση: 3η έκδ./1999

Συγγραφείς: Δανέζης Μάνος, Θεοδοσίου Στράτος

ISBN: 978-960-531-063-9

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

2. Ζωή και Θάνατος των Αστέρων

Εισαγωγή στην αστροφυσική

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 42022440

Έκδοση: 1η/2014

Συγγραφείς: Αλυσσανδράκης Κ.

ISBN: 978-960-02-3058-1

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΖΗΣΗ ΑΕΒΕ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 22846310

Έκδοση: Α' ΕΚΔΟΣΗ/2012

Συγγραφείς: ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΑΡΑΤΖΟΓΛΟΥ ΦΙΛΑΡΕΤΗ

ISBN: 978-960-530-148-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας  
Πανεπιστημίου Πατρών

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ ΤΟΜΟΣ Ι

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 280

Αριθμός τόμου: Ι

Έκδοση: 1η/2009

Συγγραφείς: SHU FRANK

ISBN: 978-960-7309-16-7

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΡΕΥΝΑΣ-  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ ΤΟΜΟΣ ΙΙ

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 282

Αριθμός τόμου: ΙΙ

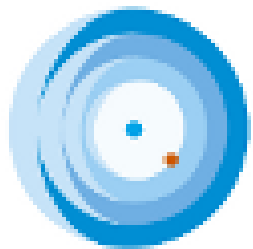
Έκδοση: 1η/2009

Συγγραφείς: SHU FRANK

ISBN: 978-960-7309-17-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΡΕΥΝΑΣ-  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ



# Εύδοξος

Ηλεκτρονική Υπηρεσία Ολοκληρωμένης Διαχείρισης  
Συγγραμμάτων και Λοιπών Βοηθημάτων

## ΒΙΒΛΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Αστροφυσική Πλάσματος

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 50661503

Έκδοση: 2η Έκδοση/2015

Συγγραφείς: Κανάρης Τσίγκανος

ISBN: 978-960-91748-2-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΚΑΝΑΡΗΣ ΤΣΙΓΚΑΝΟΣ

Αστροφυσική Πλάσματος

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 42116553

Έκδοση: 1η Έκδοση/2015

Συγγραφείς: Κανάρης Τσίγκανος

ISBN: 978-960-91748-2-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΚΑΝΑΡΗΣ ΤΣΙΓΚΑΝΟΣ

Κοσμική Ακτινοβολία

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 45309

Έκδοση: 1η έκδ./2009

Συγγραφείς: Μαυρομιχαλάκη - Χριστοπούλου Ελένη

ISBN: 978-960-266-251-9

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): Σ.ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ & ΣΙΑ Ο.Ε.

Γενική Σχετικότητα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 6236

Έκδοση: 3/2007

Συγγραφείς: Bernard F. Schutz

ISBN: 960-7122-21-6

Τύπος: Σύγγραμμα

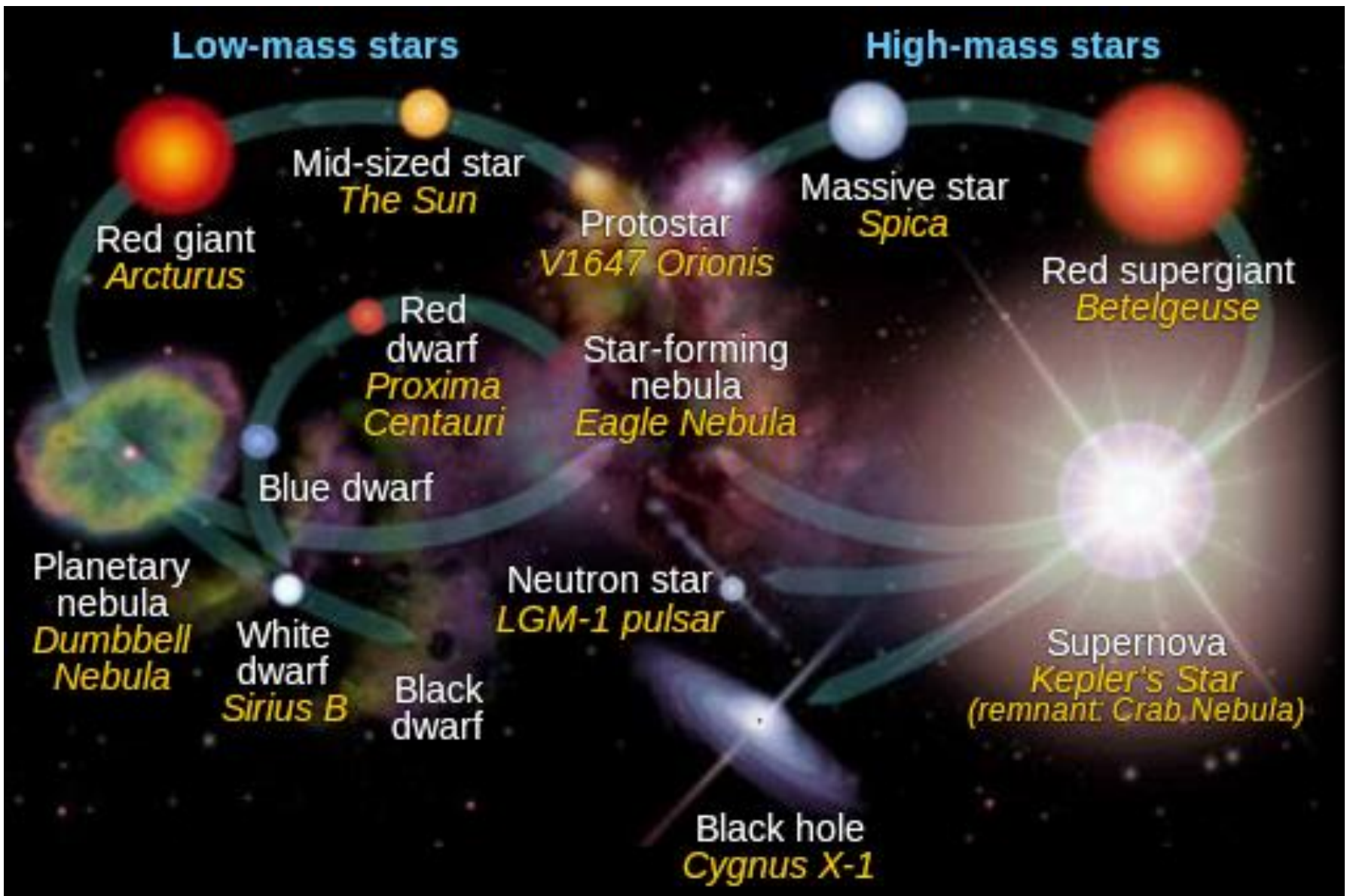
Διαθέτης (Εκδότης): ΤΡΑΥΛΟΣ & ΣΙΑ ΟΕ



# Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες Ευχαριστίες οφείλονται στη NASA, ESA, ESO, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

στους Ερευνητές και λοιπούς συντελεστές των επιγείων τηλεσκοπίων και διαστημικών πειραμάτων, στους κυρίους Στράτο Κουφό, Νίκο Πασχάλη, Πάνο Παπασπύρου για τις εικόνες που χρησιμοποιούνται σε αυτό το μάθημα, σε αυτούς που μας έδωσαν μετρήσεις ή συμβουλές, στην Wikipedia για πολλές πολύτιμες εικόνες που προσφέρονται χωρίς δικαιώματα χρήσης και συνεπώς είναι πολύτιμες σε κάθε δάσκαλο.



[http://imagine.gsfc.nasa.gov/teachers/lessons/xray\\_spectra/images/life\\_cycles.jpg](http://imagine.gsfc.nasa.gov/teachers/lessons/xray_spectra/images/life_cycles.jpg)

Εικόνα της NASA's Goddard Space Flight Center.



# Μεταφορά θερμότητας σε άστρα με διάφορες μάζες

## Heat Transfer of Stars

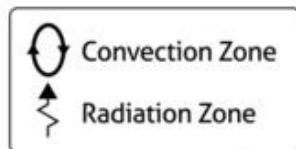
> 1.5 solar masses



0.5 - 1.5 solar masses



< 0.5 solar masses



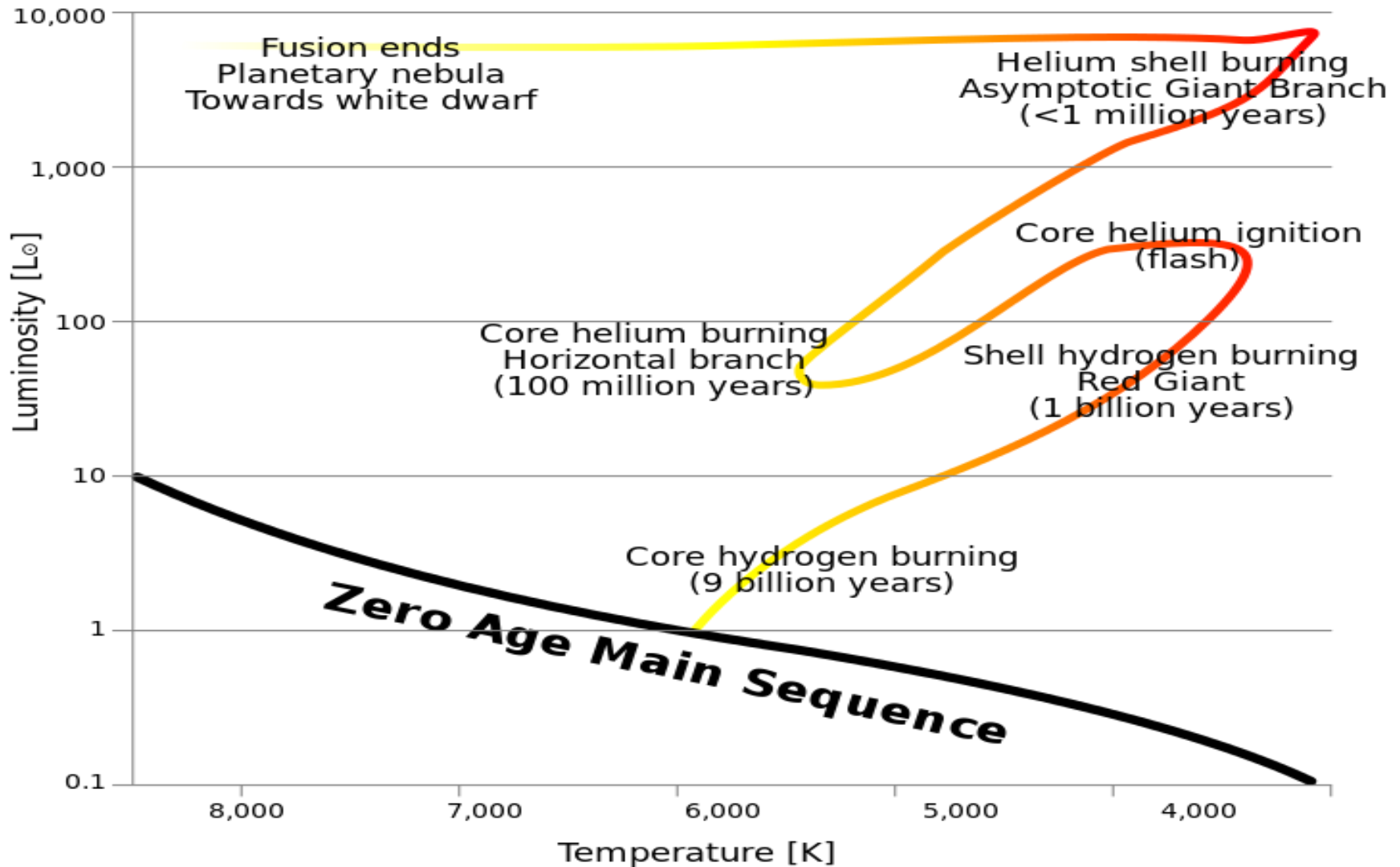
ήλιος

By [www.sun.org](http://www.sun.org) (<http://www.sun.org/encyclopedia/stars>) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], via Wikimedia Commons

The different transport mechanisms of low-mass, intermediate-mass, and high-mass stars.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_structure#/media/File:Heat\\_Transfer\\_in\\_Stars.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_structure#/media/File:Heat_Transfer_in_Stars.png)

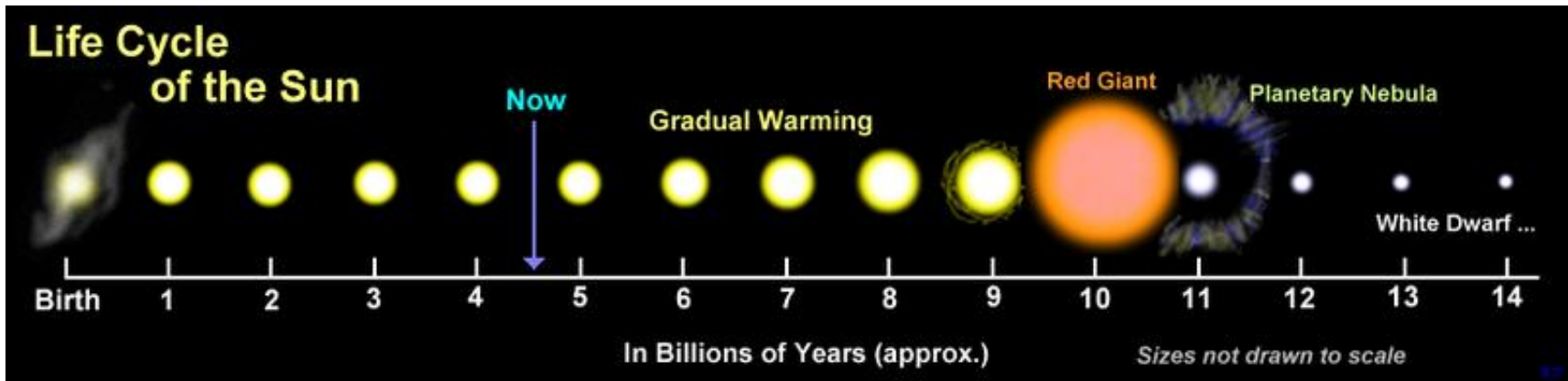


## Evolution of the Sun from main sequence to end of fusion

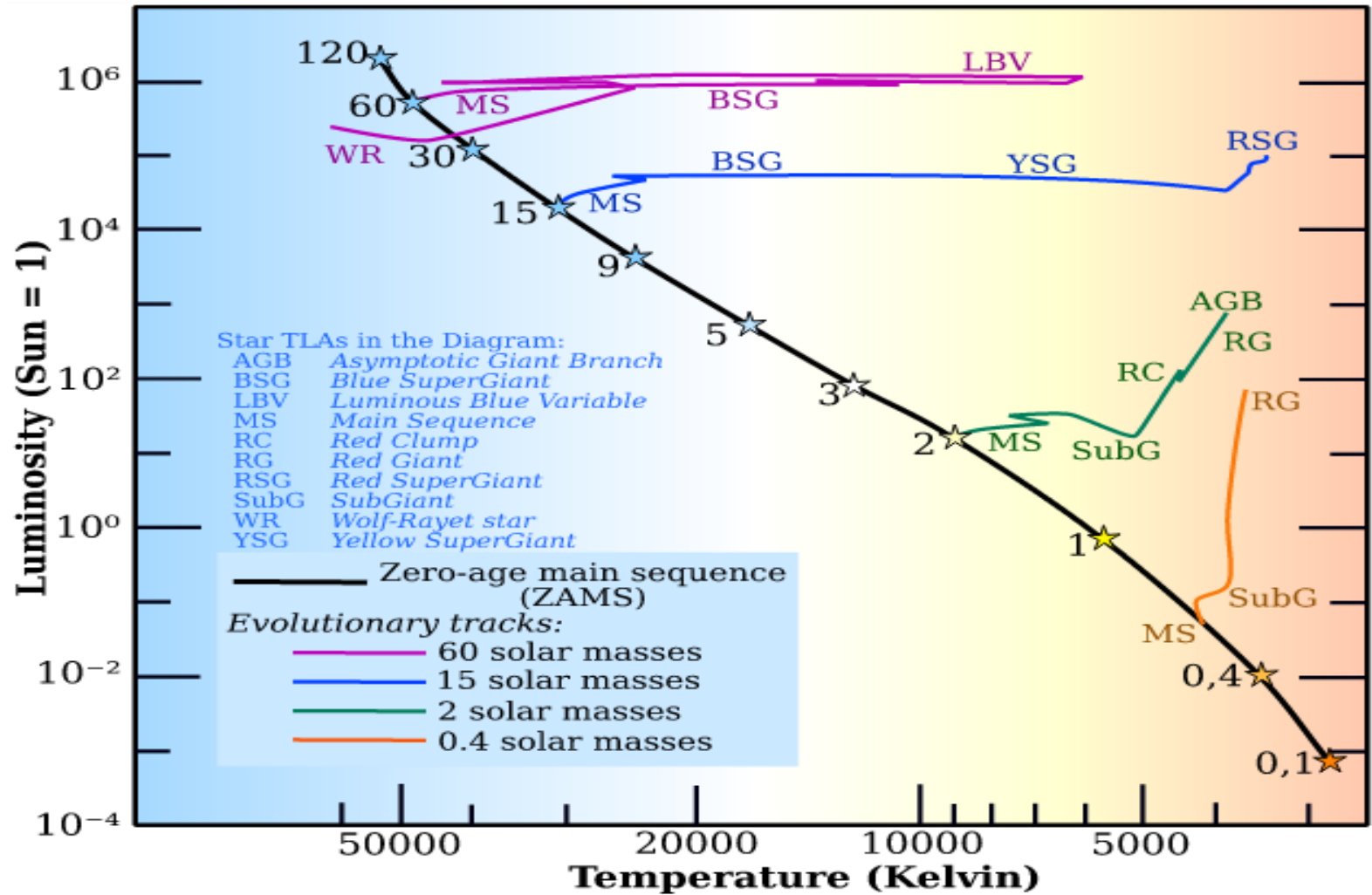


Lithopsian [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f8/Evolution\\_of\\_a\\_Sun-like\\_star.svg/730px-Evolution\\_of\\_a\\_Sun-like\\_star.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f8/Evolution_of_a_Sun-like_star.svg/730px-Evolution_of_a_Sun-like_star.svg.png),

# Εξέλιξη του ηλίου

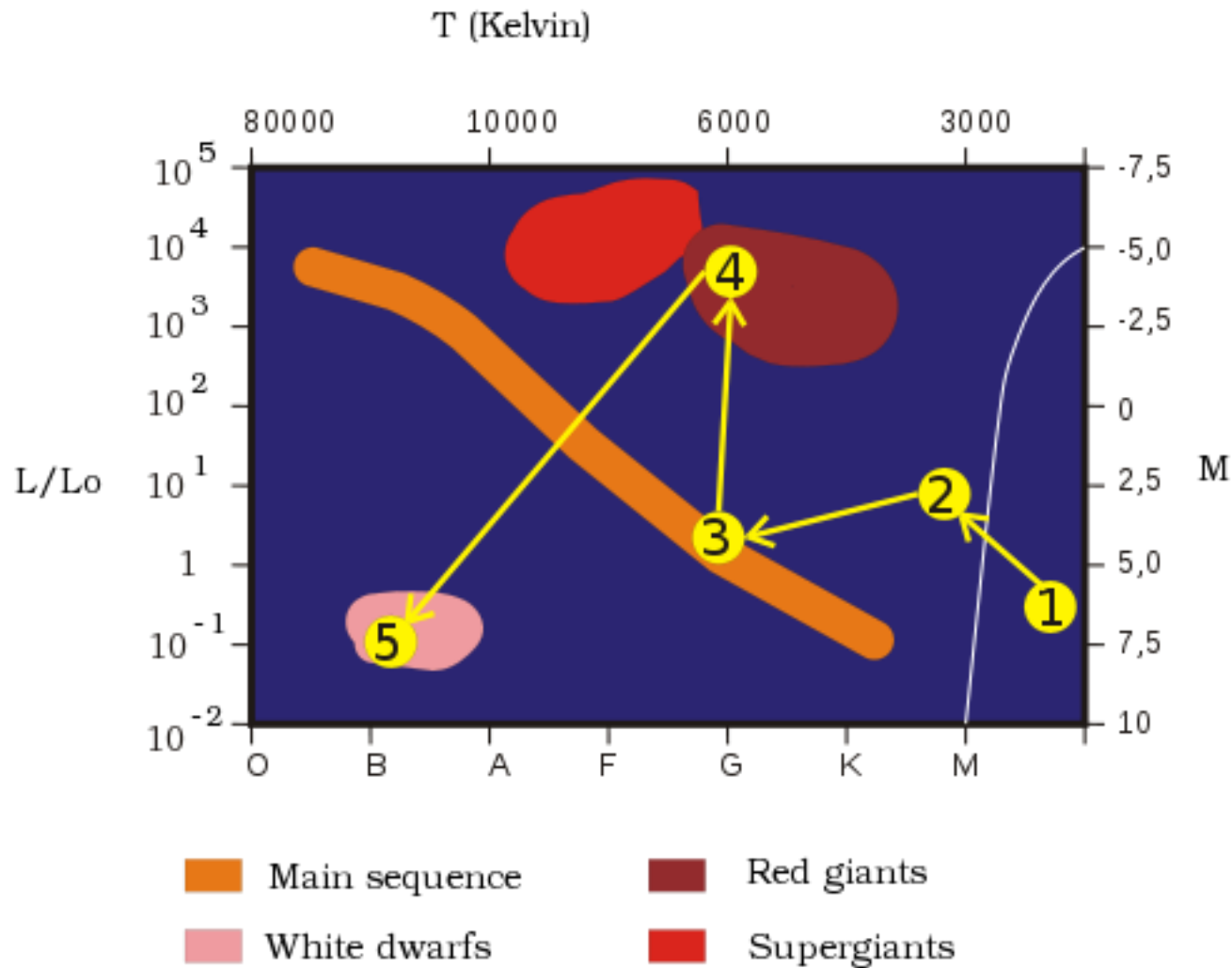


Tablizer,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sun\\_Life.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sun_Life.png)



By derivative work: Rursus (talk) Stellar\_evolutionary\_tracks-en.PNG: \*derivative work: G.A.S Stellar\_evolutionary\_tracks.gif: Jesusmaiz (Stellar\_evolutionary\_tracks-en.PNG) [CC BY 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>)], via Wikimedia Commons [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Stellar\\_evolutionary\\_tracks-en.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Stellar_evolutionary_tracks-en.svg)





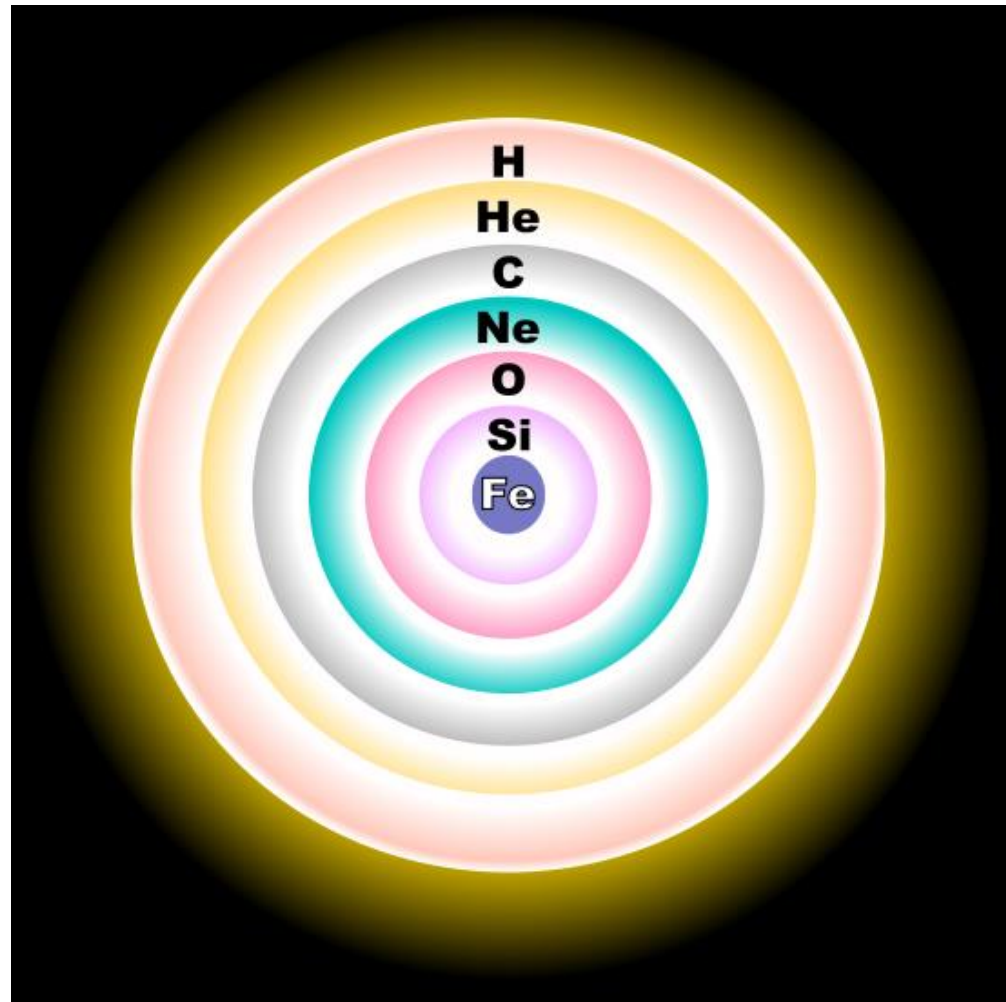
The path of a star with the mass of the Sun over Hertzsprung-Russell diagram during stellar evolution. Εικόνα του κ. Vitecek Arpad Horvath  
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Stellar\\_evolution\\_sun.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Stellar_evolution_sun.svg)



R. J. Hall

This diagram shows a simplified (not to scale) cross-section of a massive, evolved star (with a mass greater than eight times the Sun.)

Where the pressure and temperature permit, concentric shells of Hydrogen (H), Helium (He), Carbon (C), Neon/Magnesium (Ne), Oxygen (O) and Silicon (Si) plasma are burning inside the star. The resulting fusion by-products rain down upon the next lower layer, building up the shell below. As a result of Silicon fusion, an inert core of Iron (Fe) plasma is steadily building up at the center. Once this core reaches the Chandrasekhar mass, the iron can no longer sustain its own mass and it undergoes a collapse. This can result in a supernova explosion.



# Ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας εξαρτάται από την πυκνότητα και την θερμοκρασία

$$\epsilon_{\text{nuc}} = \epsilon_0 \rho T^\nu$$

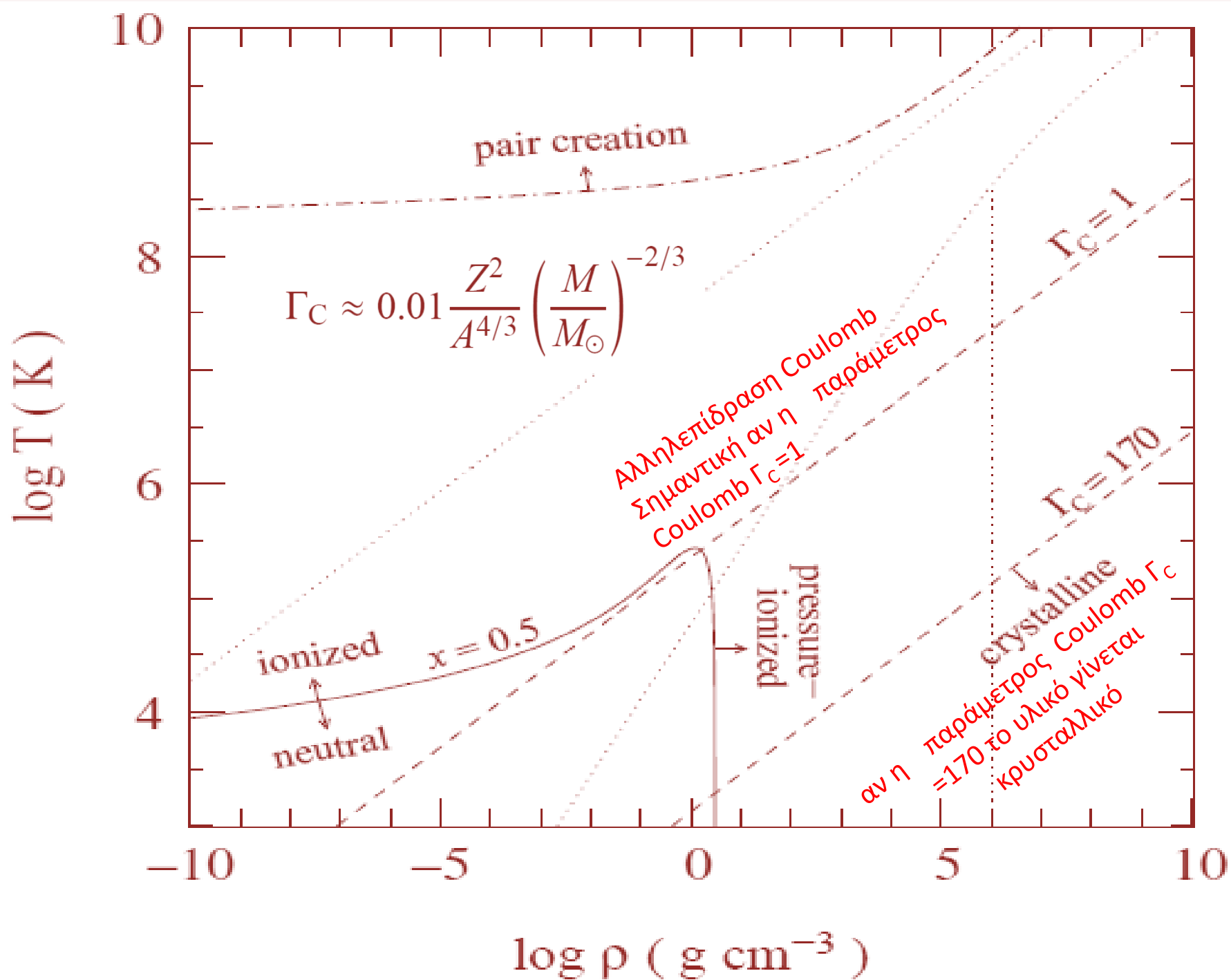
αν έχουμε δυο σωμάτια π.χ. pp

$$\epsilon_{\text{nuc}} = \epsilon_0 \rho^\lambda T^\nu$$

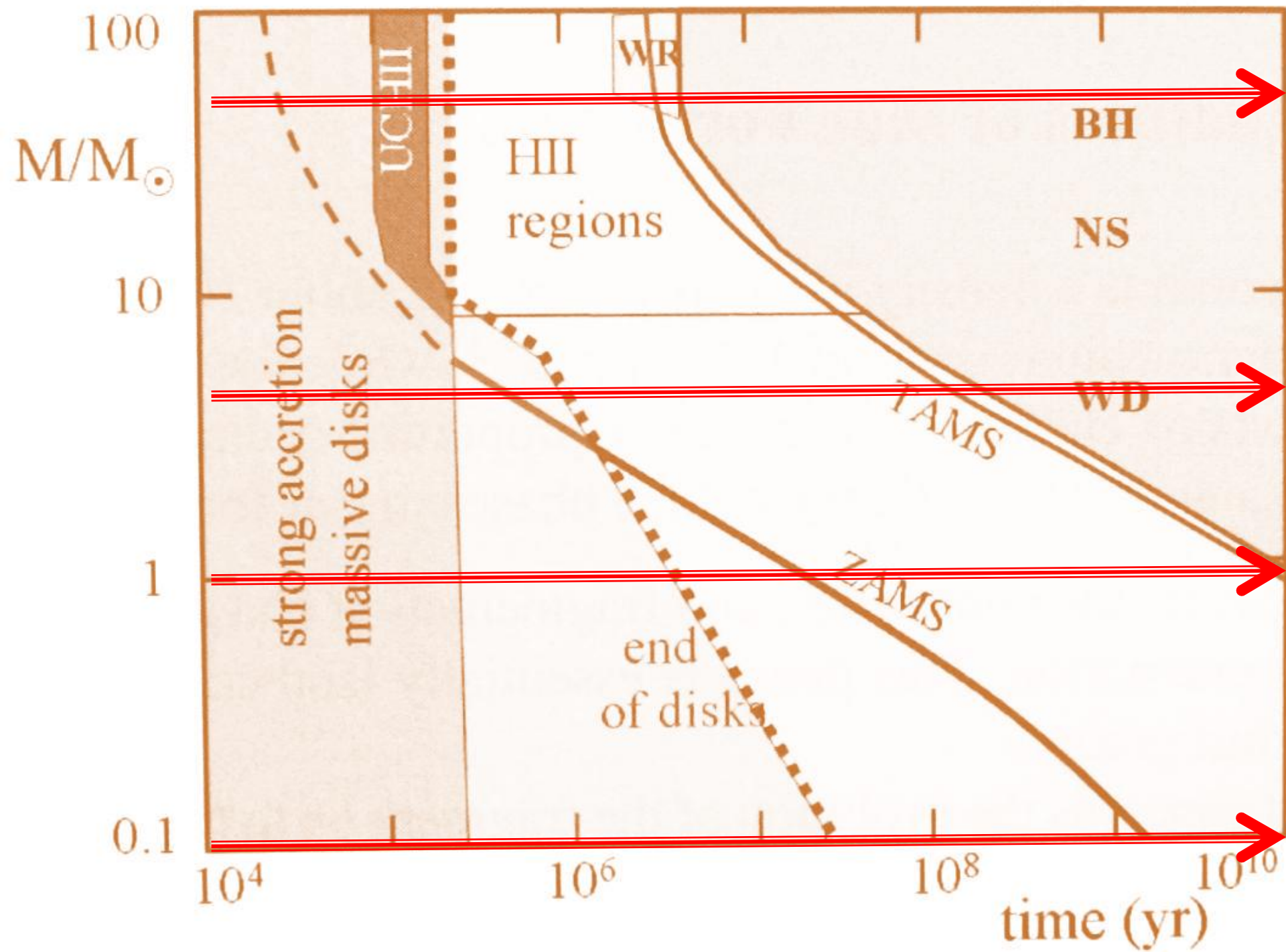
Ο εκθέτης  $\lambda=1$  αν έχουμε δυο σωμάτια π.χ. pp

- $\lambda=2$  αν έχουμε τρία σωμάτια
- Ο εκθέτης  $\nu=4$  για pp,
- $\nu= 18$  για τον κύκλο CNO
- Και  $\nu=40$  για καύση He
- Για καύση C ή O  $\nu \gg 40$









Παραγωγή ενέργειας ανά μάζα  
με καύση πρωτονίων σε ήλιο

$$\epsilon_{pp} \propto X^2 \rho T^4$$

$$\epsilon_{CNO} \propto XX_{14} \rho T^{18}$$



# Παραγωγή ενέργειας ανά μάζα με καύση ήλιου σε άνθρακα



$$\epsilon_{3\alpha} = q_{3\alpha} X_4^3 \rho^2 \lambda_{3\alpha}$$



Η θερμοκρασία στο κέντρο μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση της ομολογίας (των σταθερών λόγων)

$$T_c = T_{c,\odot} (M/M_{\odot})^{4/(\nu+3)}$$



# Η ισχύς, η πυκνότητα, η πίεση, η θερμοκρασία του άστρου:

$$P = \frac{\mathcal{R}}{\mu} \rho T$$

Μ η μάζα,  $\mu$  είναι μια σταθερά, διαφορετική για κάθε άστρο  
κ είναι η αδιαφάνεια

$$L \propto \frac{1}{\kappa} \mu^4 M^3$$

$$L \propto \frac{\mu^{7.5} M^{5.5}}{R^{0.5}}$$

$$\rho_c \propto \mu^{3(4-\nu)/(\nu+3)} M^{2(3-\nu)/(\nu+3)}$$

$$T_c \propto \mu^{7/(\nu+3)} M^{4/(\nu+3)}$$



$\log P \uparrow$

Non-degenerate region

Radiation pressure  
 $P \propto T_j^4 = \text{constant}$

$T_j > T_i$       $T_j$   
 $T_i$

Perfect gas  
 $P \propto \rho T_j$

Εξέλιξη διαφόρων αστέρων  
M1 και M2

M2

T=0

Limit point  
M1

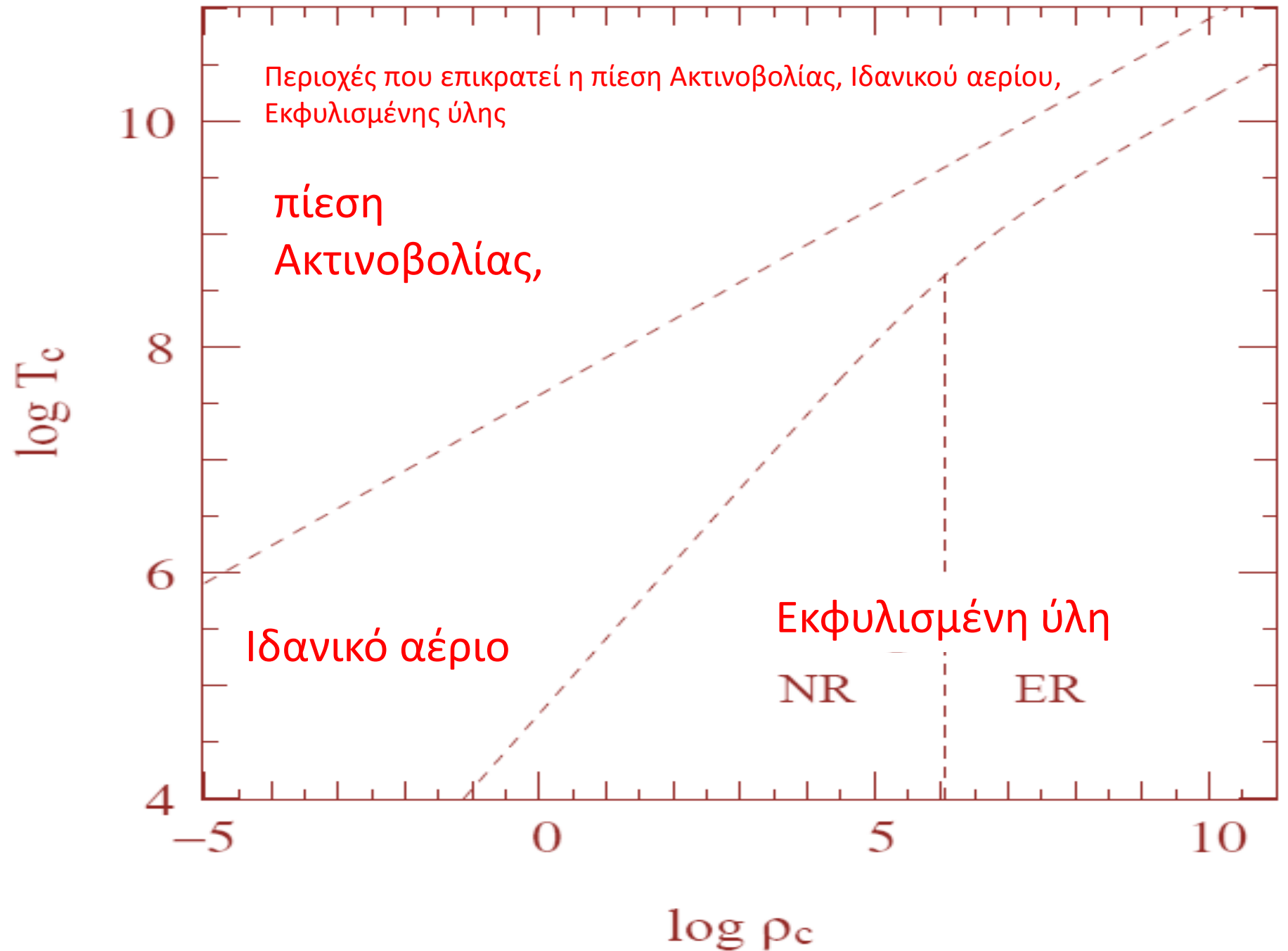
Region forbidden by Pauli

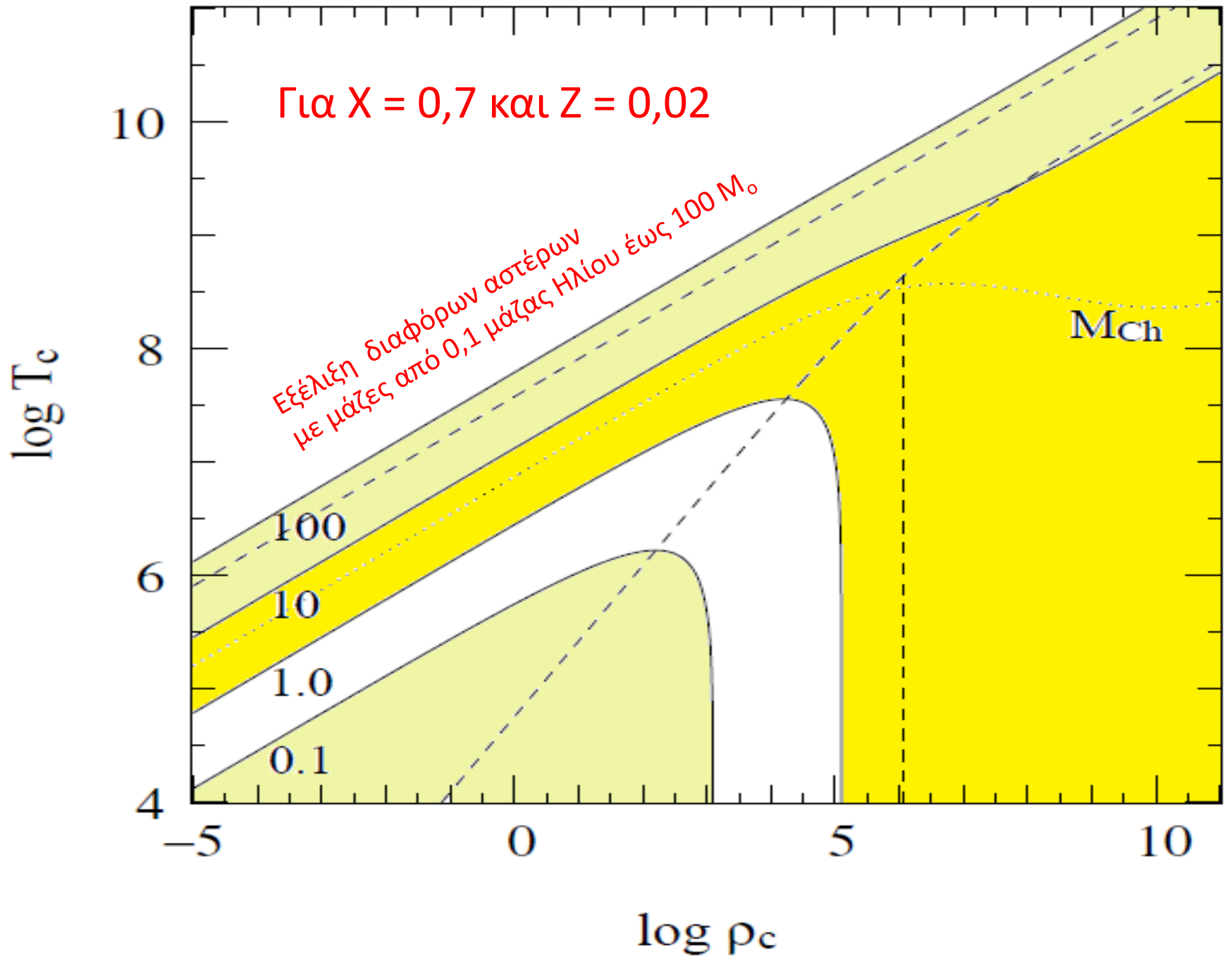
$P \propto \rho^{5/3}$

Non-rel.

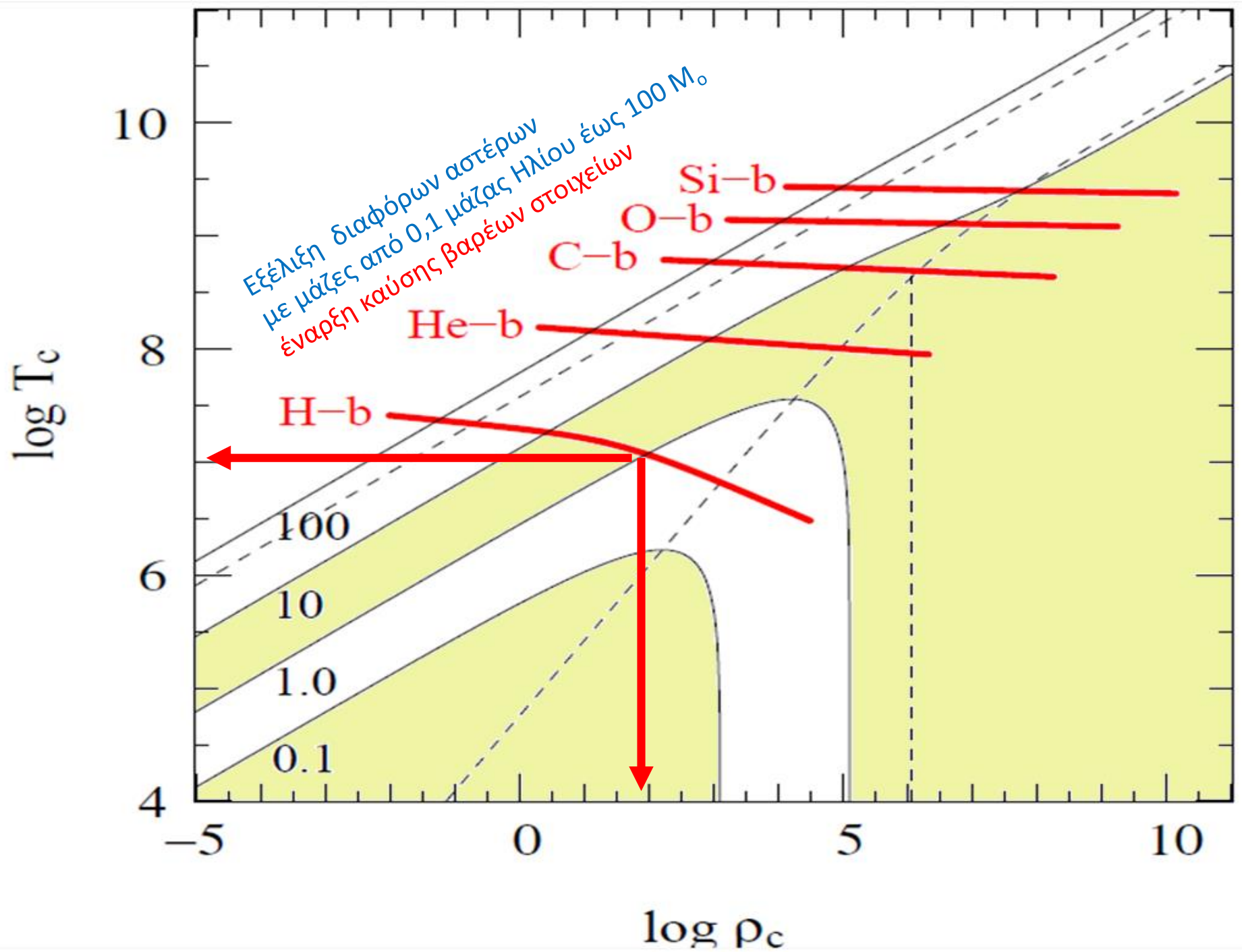
Rel.

$\log \rho \rightarrow$

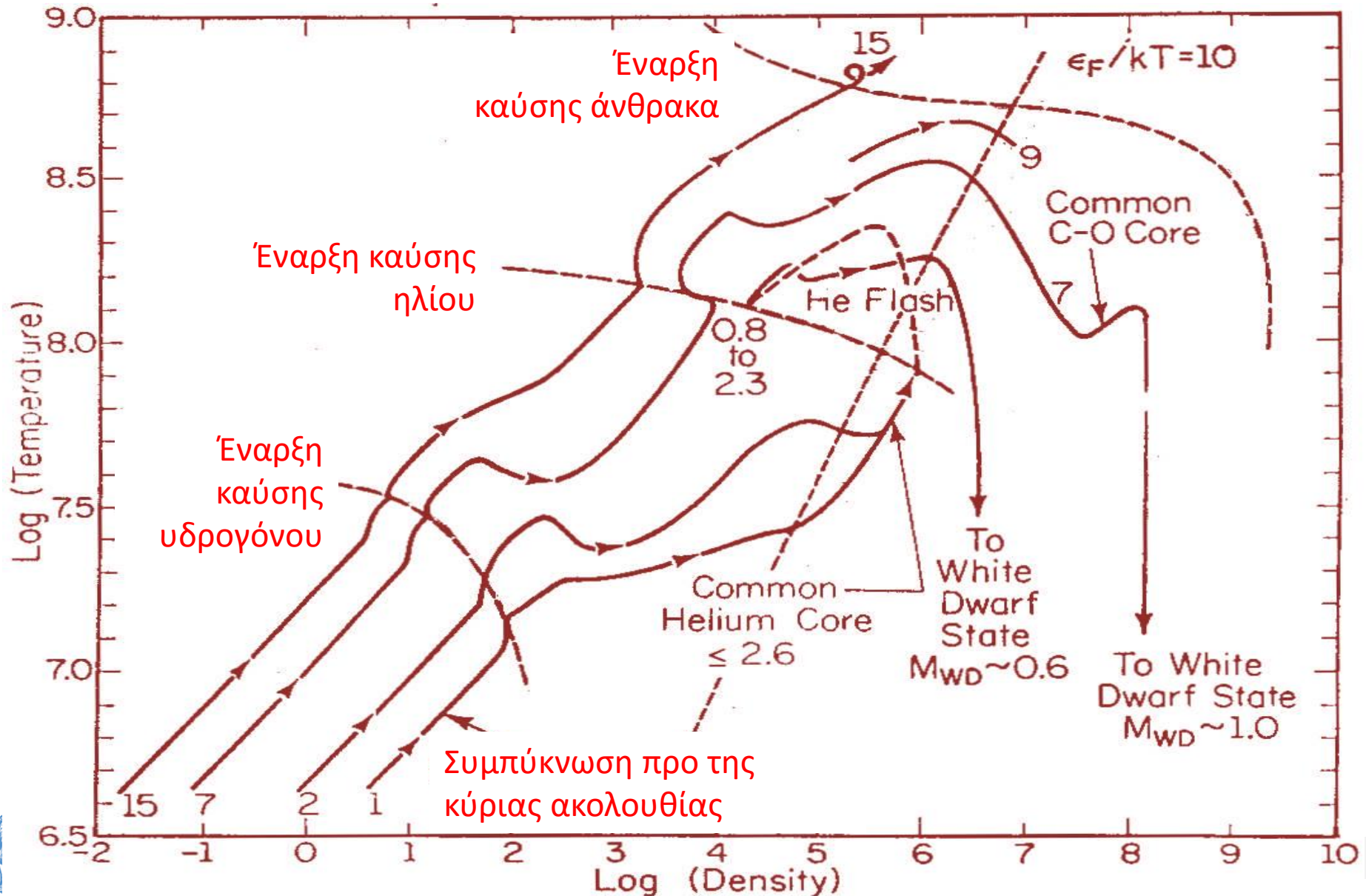








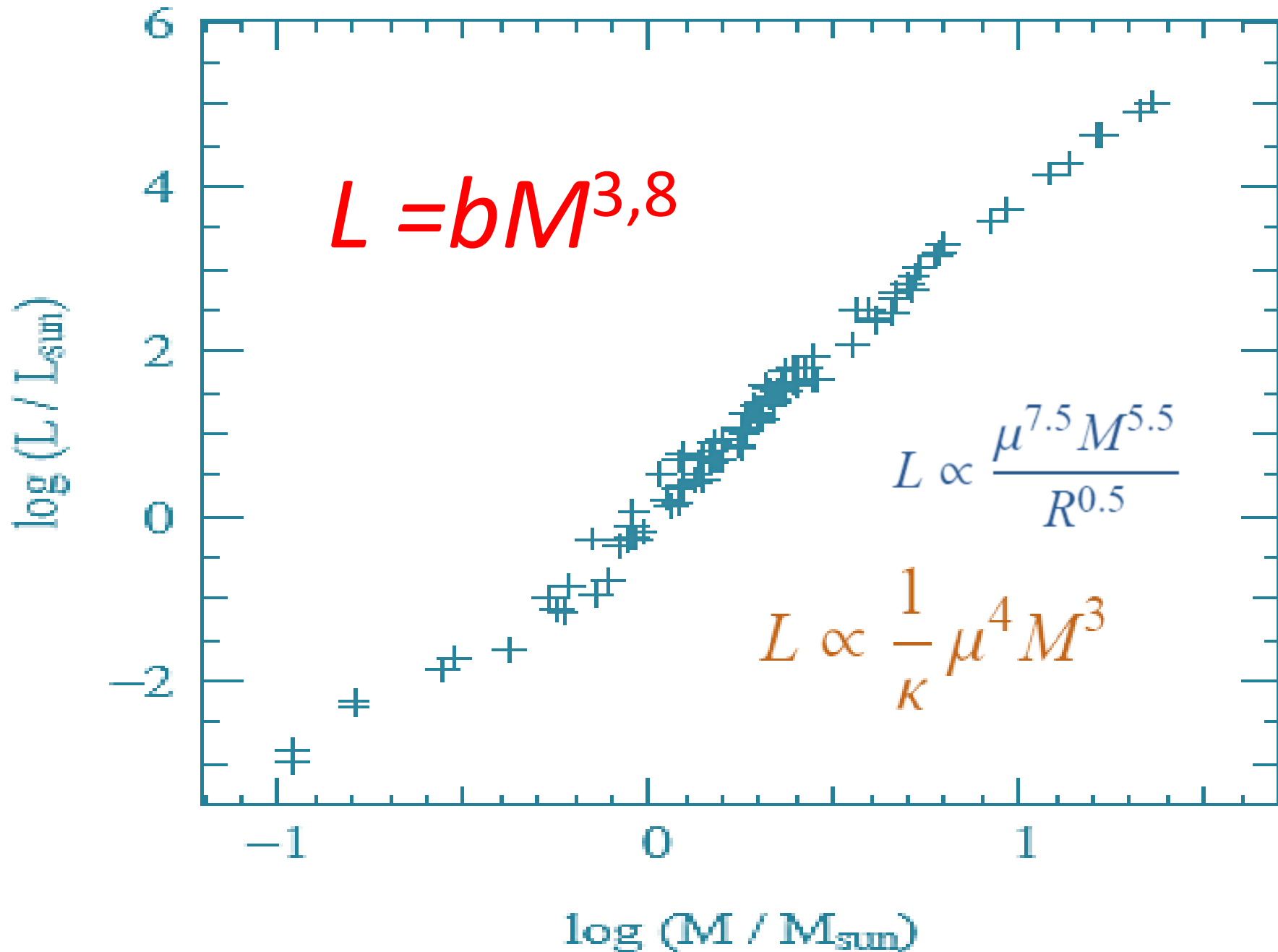
# Εξέλιξη διαφόρων αστέρων



# Πίνακας εξέλιξης άστρων

οι δυο τελευταίες στήλες δίδουν το ποσοστό της ενέργειας που αποκομίζουν τα φωτόνια  $\gamma$  και τα νετρίνα  $\nu$  κατά την διάρκεια της αντίδρασης

phase	$T$ ( $10^6$ K)	total $E_{\text{gr}}/n$	main reactions	total $E_{\text{nuc}}/n$	$M_{\text{min}}$	$\gamma$ (%)	$\nu$ (%)
grav.	$0 \rightarrow 10$	$\sim 1$ keV/n				100	
nucl.	$10 \rightarrow 30$		${}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$	$6.7$ MeV/n	$0.08 M_{\odot}$	$\sim 95$	$\sim 5$
grav.	$30 \rightarrow 100$	$\sim 10$ keV/n				100	
nucl.	$100 \rightarrow 300$		${}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}$	$\approx 7.4$ MeV/n	$0.3 M_{\odot}$	$\sim 100$	$\sim 0$
grav.	$300 \rightarrow 700$	$\sim 100$ keV/n				$\sim 50$	$\sim 50$
nucl.	$700 \rightarrow 1000$		${}^{12}\text{C} \rightarrow \text{Mg}, \text{Ne}$	$\approx 7.7$ MeV/n	$1.1 M_{\odot}$	$\sim 0$	$\sim 100$
grav.	$1000 \rightarrow 1500$	$\sim 150$ keV/n					$\sim 100$
nucl.	$1500 \rightarrow 2000$		${}^{16}\text{O} \rightarrow \text{S}, \text{Si}$	$\approx 8.0$ MeV/n	$1.4 M_{\odot}$		$\sim 100$
grav.	$2000 \rightarrow 5000$	$\sim 400$ keV/n	$\text{Si} \rightarrow \dots \rightarrow \text{Fe}$	$\approx 8.4$ MeV/n			$\sim 100$



Από το βιβλίο του κ. Onno Pols, Astrophysics, Utrecht, 2011

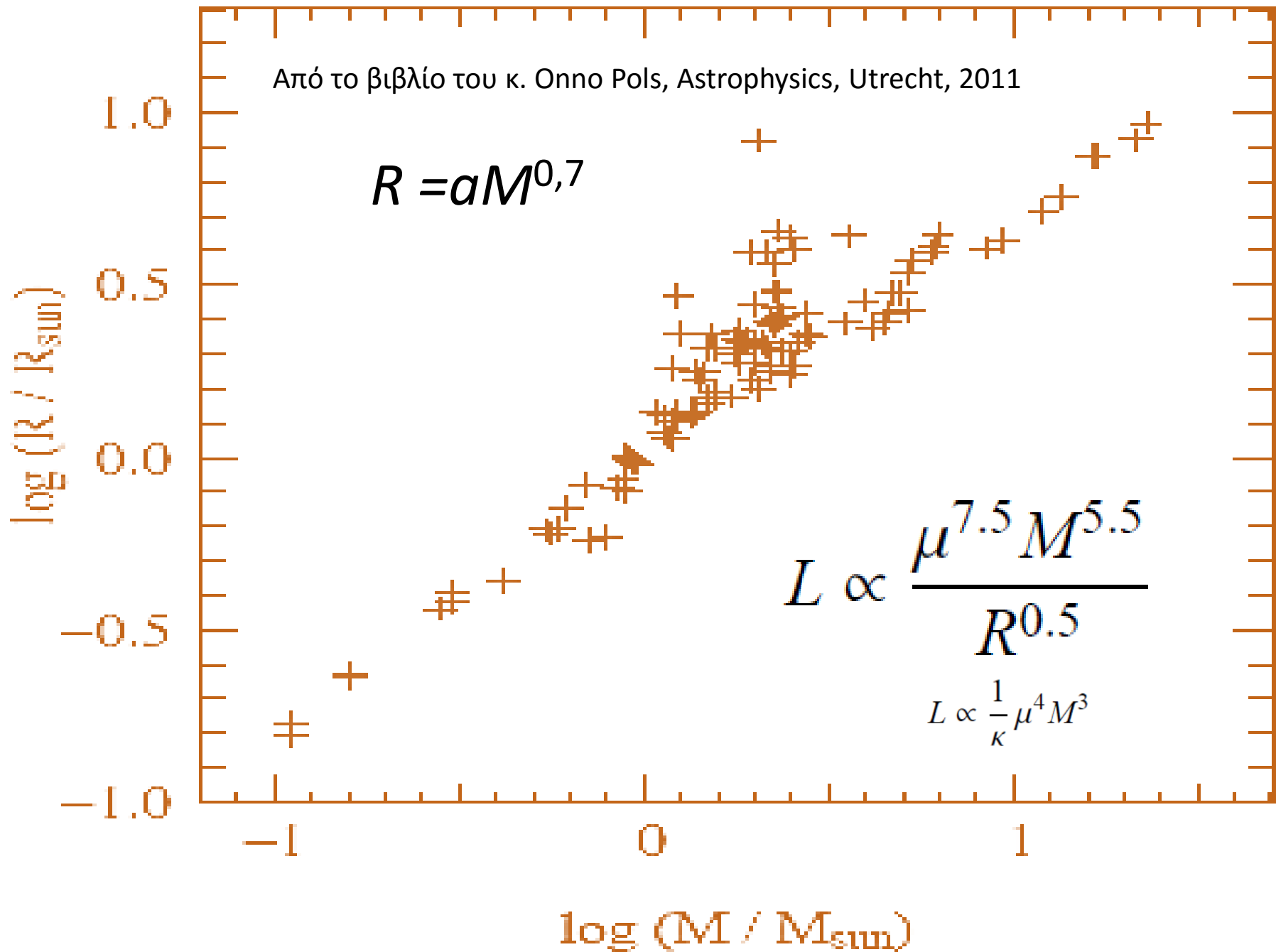
$$R = aM^{0,7}$$

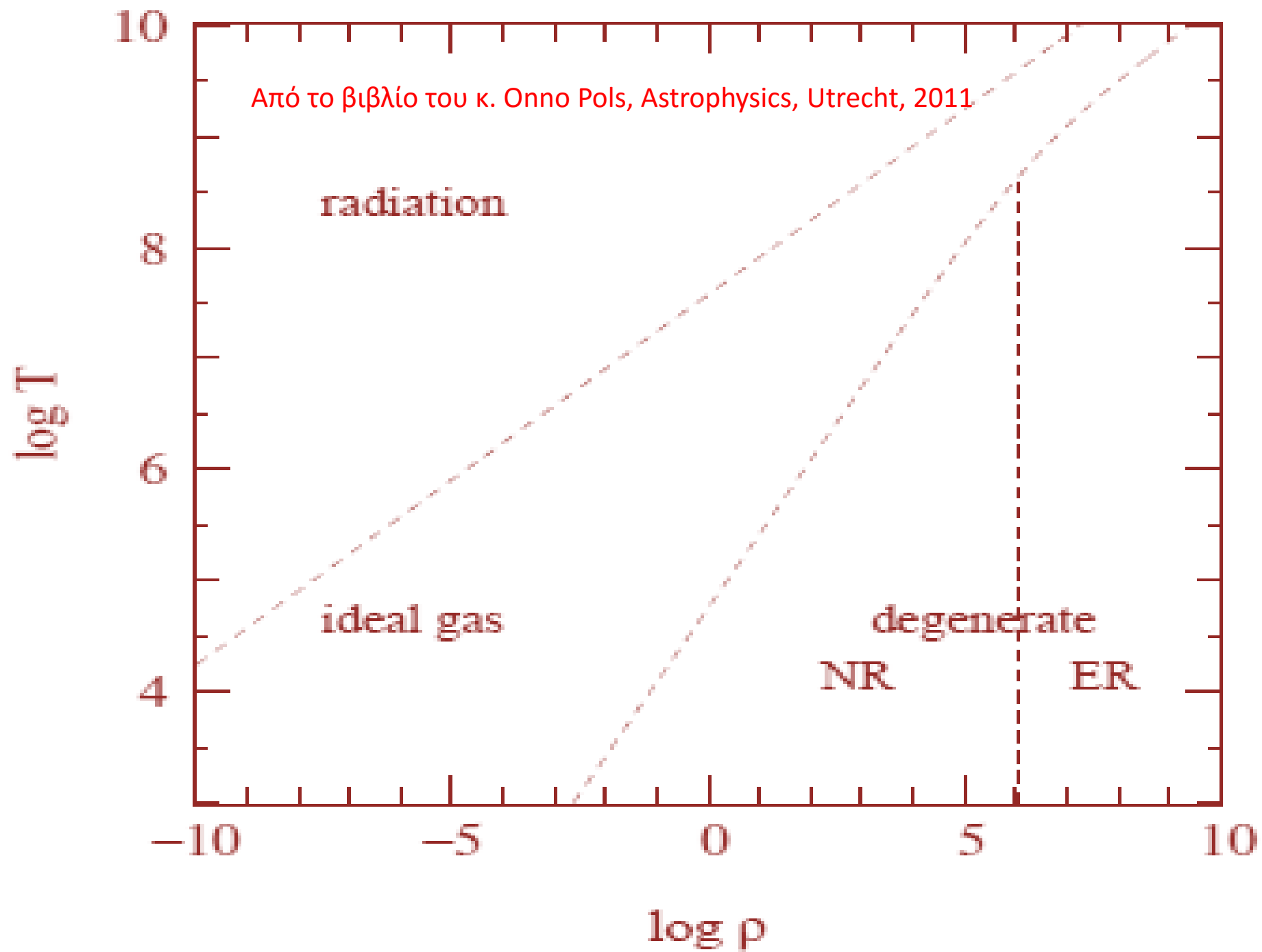
$$L \propto \frac{\mu^{7.5} M^{5.5}}{R^{0.5}}$$

$$L \propto \frac{1}{\kappa} \mu^4 M^3$$

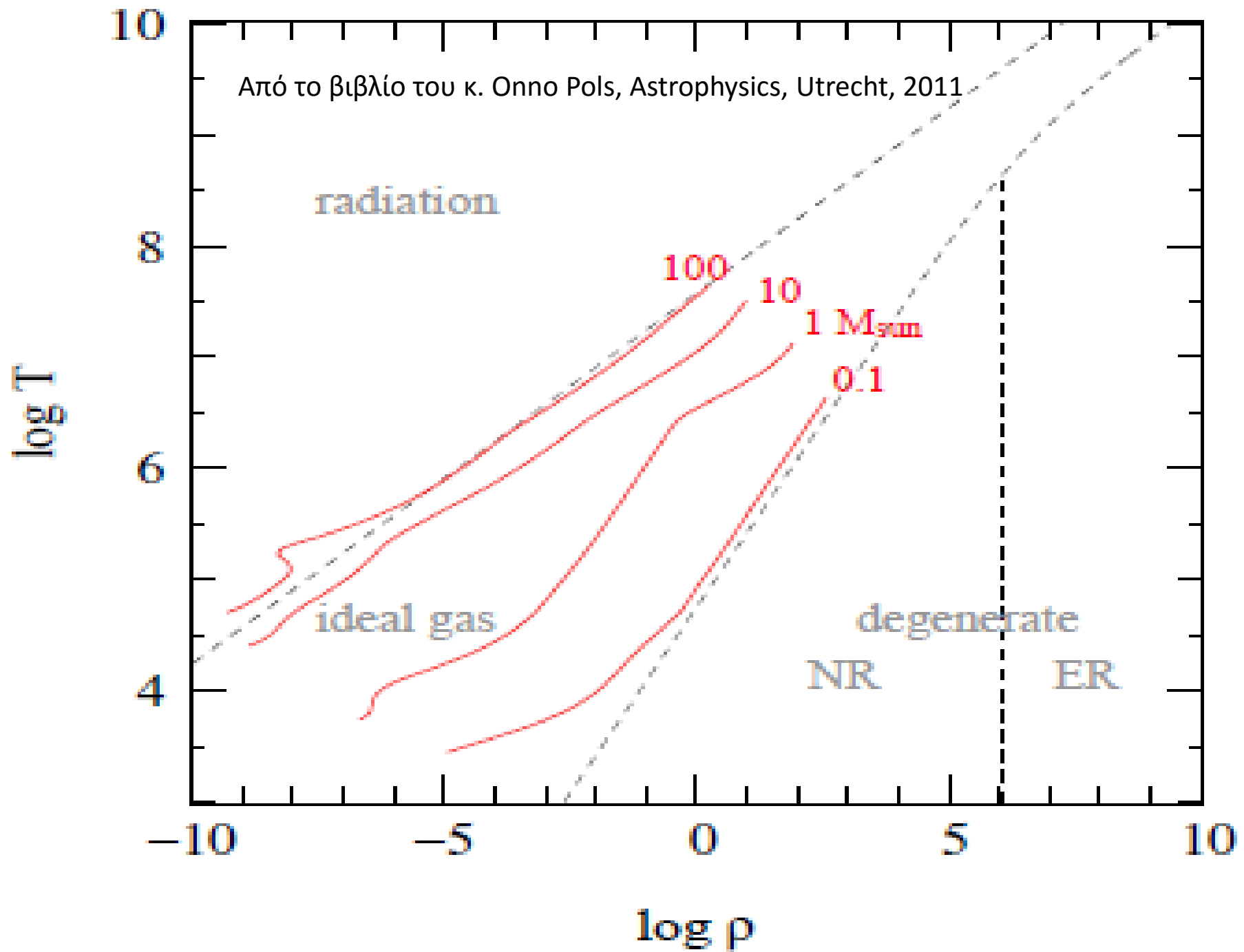
$\log (R / R_{\text{sun}})$

$\log (M / M_{\text{sun}})$





Από το βιβλίο του κ. Onno Pols, Astrophysics, Utrecht, 2011



Τέλος Ενότητας



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών Ξενοφών Δ. Μουσάς 2015. «Εισαγωγή στην Αστροφυσική. Ζωή και Θάνατος των Αστέρων». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/PHYS1/>



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

