

ΤΕΕ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ

ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ

ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ

ΚΑΙ

ΑΣΤΡΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

3-4 / 11 / 1996

ΒΟΛΟΣ



ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ  
Κόλλου 48 Τ.Κ 932 01  
Τηλ. 0431 - 46410 - 46352 ΜΟΔΟΣ

**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ**  
(ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ)

**Σ Ε Μ Ι Ν Α Ρ Ι Ο**

**ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΡΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ**

Από τον αστροφυσικό **Νικόλαο Α. Πράντζο**.

στο αμφιθέατρο του Τεχνικού Επιμελητηρίου, 3 και 4 Ιανουαρίου 1996, ώρα 8 μ.μ.

**ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ**

Αγαπητοί φίλοι,

Χρόνια Πολλά και Καλή Χρονιά.

Με την αρχή του καινούργιου χρόνου 1996 το ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ και η ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ της πόλης μας ανέλαβαν την πρωτοβουλία να σας παρουσιάσουν το σεμινάριο αυτό του συμπατριώτη μας Νίκου Πράντζου, ελπίζοντας ότι βοηθούν στην επιμόρφωσή σας πάνω στα τόσο ενδιαφέροντα θέματα της Αστροφυσικής.

Ο Νίκος Πράντζος τελείωσε το 1974 το 1ο Γυμνάσιο Αρρένων Βόλου και το 1978 το φυσικό τμήμα του Πανεπιστημίου Αθηνών. Έκανε μεταπτυχιακές σπουδές στην αστροφυσική στο Παρίσι, καθώς και τις δυο διδακτορικές του διατριβές, με υποτροφίες από το Γαλλικό Υπουργείο Έρευνας και από την Επιστημονική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. Μετέχει σε διάφορα συνέδρια, είναι συγγραφέας γαλλικών για την χώρα, βιβλίων αστροφυσικής - ελπίζουμε σύντομα και ελληνικών - και δημοσιεύει επιστημονικά και ερευνητικά άρθρα σε γαλλικά και ελληνικά περιοδικά, άρθρα γραμμένα τεχνικά στο περιοδικό ΟΥΡΑΝΟΣ που εκδίδεται στο Βόλο και κυκλοφορεί σε όλη την Ελλάδα και στο εξωτερικό.

Το Παράρτημα Μαγνησίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος ιδρύθηκε το 1972 και είναι πολύ γνωστό για την επιστημονική και τεχνική δράση του στην περιοχή μας. Ήδη στεγάζεται στο ιδιόκτητο, νεόδμητο, μοντέρνο κτίριο της οδού 2ης Νοεμβρίου με όλες τις σύγχρονες ανέσεις και απαιτήσεις.


Η Εταιρεία Αστρονομίας και Διαστήματος ιδρύθηκε το 1990 και οι πρώτες δραστηριότητές της είναι: Αστρονομικές παρατηρήσεις με τηλεσκόπια κάθε Κυριακή βράδυ στο 1ο Λυκείο, ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ την πρώτη Κυριακή του μηνός ώρα 7 μ.μ. στο Αμφιθέατρο του 1ου Λυκείου Βόλου. Έκδοση για 16 συνεχώς χρονιά του περιοδικού ΟΥΡΑΝΟΣ με επιστημονικά και εκλαϊκευτικά άρθρα, αστρονομικά νέα, αστροεοημερίδα, ειδήσεις, αστρονομική επικαιρότητα κ.ά. Ομιλίες και διαλέξεις από έγκριτους ομιλητές προς το ευρύτερο κοινό. Επισκέψεις σε σχολεία πόλης, κωμοπόλεις, συλλόγους κ.λπ. για ομιλίες, παρατηρήσεις με τηλεσκόπιο, προβολές κ.ά.

Επίς επόμενες σελίδες σας δίνουμε μερικό στοιχείο από τις σημειώσεις του κ. Πράντζου που χρησιμοποίησε για το σεμινάριο και είμαστε βέβαιοι ότι θα σας φανούν πολύ χρήσιμες για κάποια καλύτερη μελέτη και εμπάθυση στη σύγχρονη αστρονομική έρευνα.

Με τιμή  
τα Διοικητικά Συμβούλια

# ΠΥΡΗΝΕΣ ΚΑΙ ΙΣΟΤΟΠΑ

ΑΤΟΜΟ :  ΠΥΡΗΝΑΣ + ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ

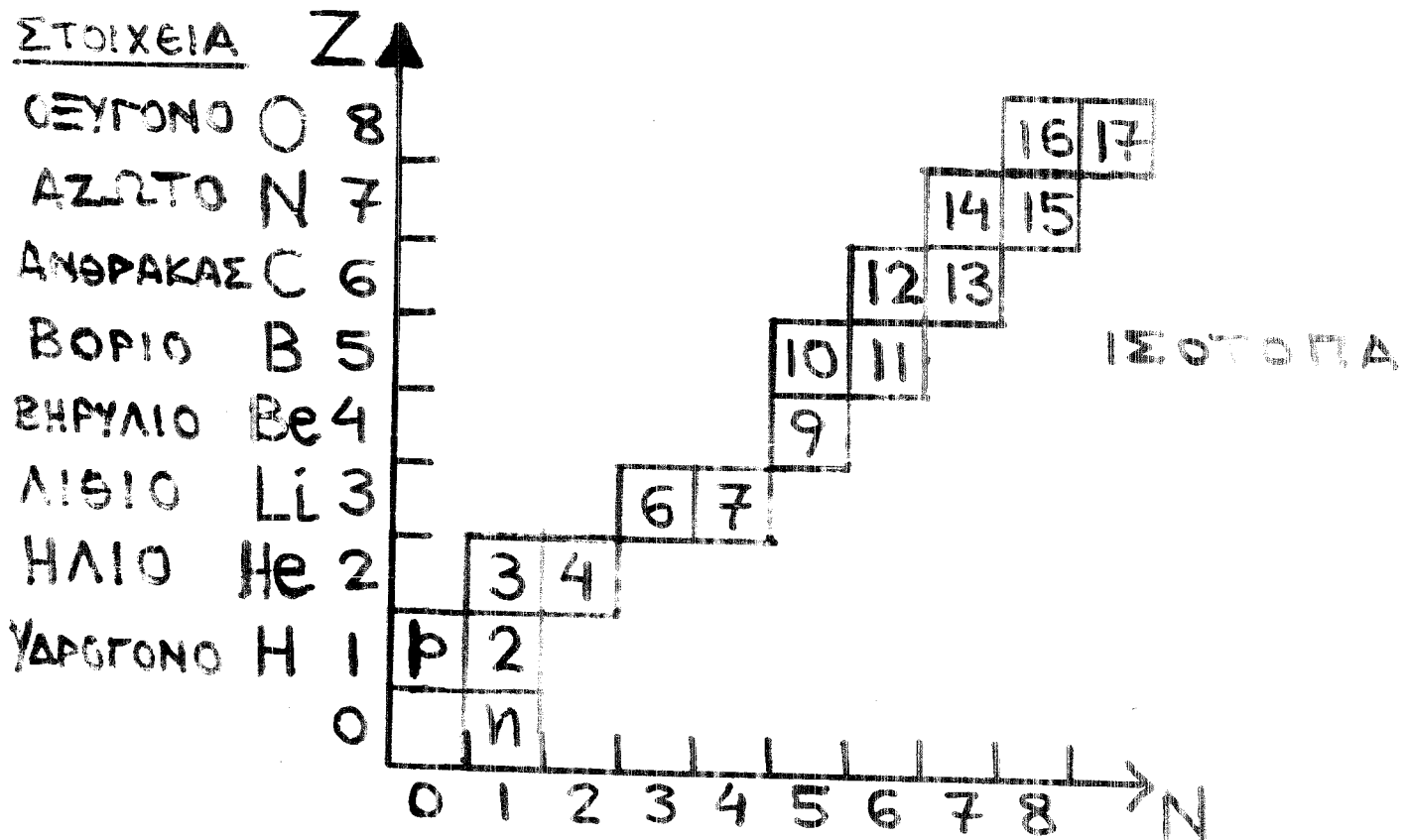
 ΠΥΡΗΝΑΣ : Z ΠΡΩΤΟΝΙΑ (p)  
N ΝΕΥΤΡΟΝΙΑ (n)

$$A = Z + N \quad \text{ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΑ}$$

$$\Delta M = Z m_p + N m_n - m_A^Z$$

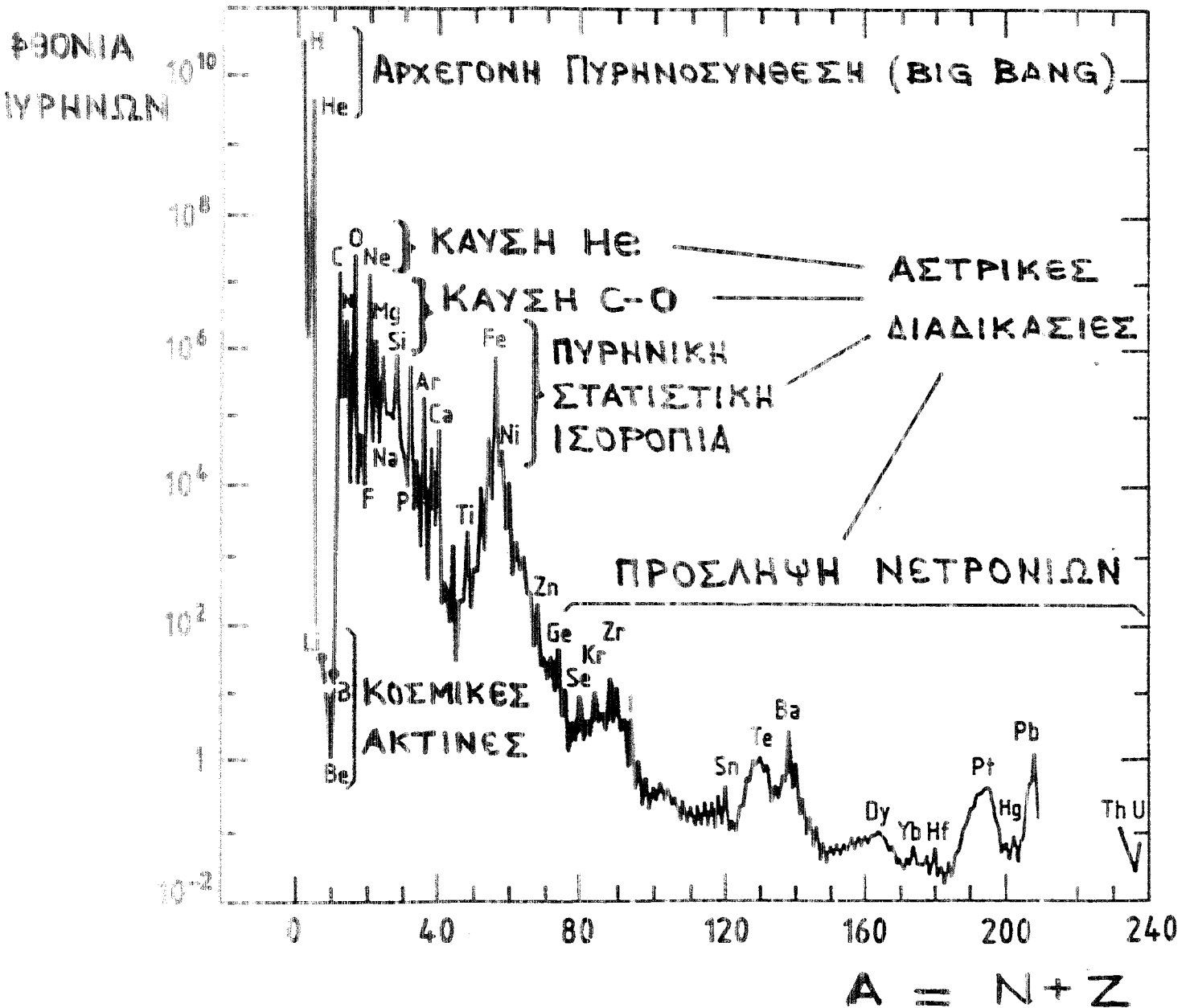
$$B = \frac{\Delta M c^2}{A} \quad \text{ΔΕΣΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΟ}$$

(ΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΠΥΡΗΝΑ)



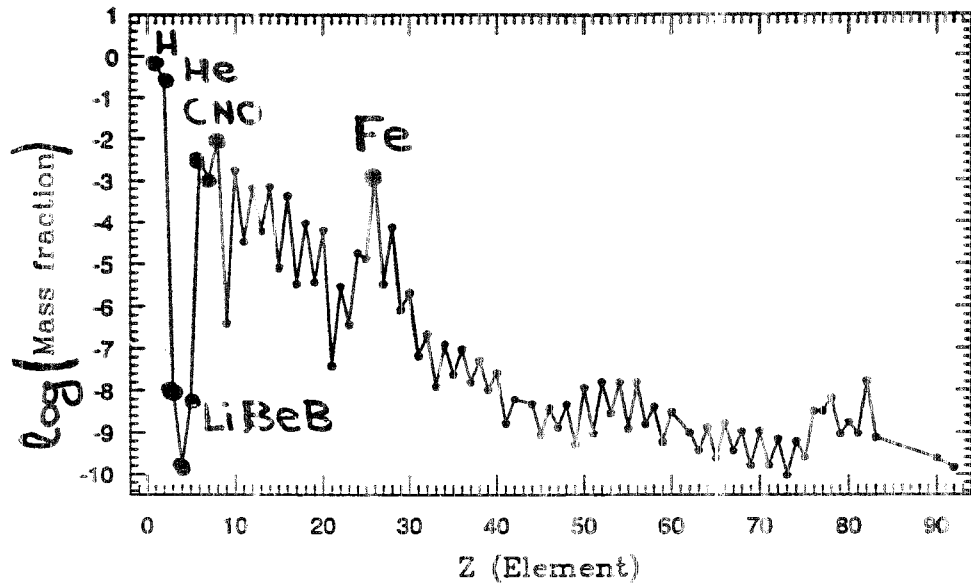
# ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΜΠΑΝ

- ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΤΗΤΑ ΑΦΘΟΝΙΑΣ → ΚΟΙΝΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ  
 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ → ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΕ ΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ( $T > 10^6$  Κ)
- ΑΡΧΕΓΟΝΟ ΣΥΜΠΑΝ ⓐ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΠΡΟΣΛΗΨΕΙΣ η (GAMOW 46)  
 ⓑ ΜΙΓΜΑ (η, ρ) + ⓐ (HAYASHI 48)
- ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΑΣΤΡΩΝ ΑΣΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ (HOYLE 46)  
 + ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ



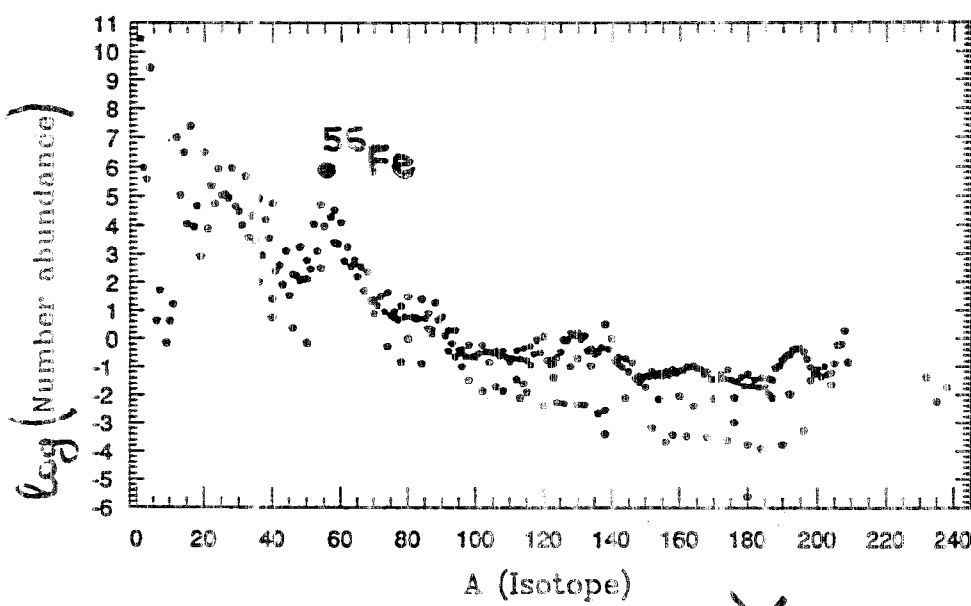
# Η ΑΦΘΟΝΙΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΜΠΛΗΝ

(ABUNDANCE)

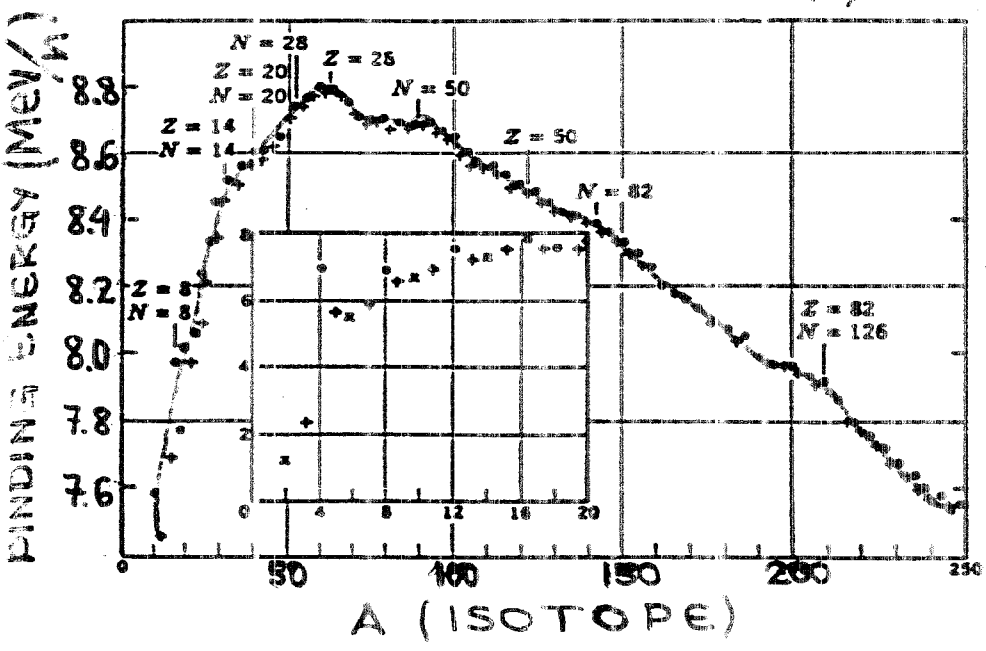


ΣΤΟΙΧΕΙΟ      Z      %

H	1	70
He	2	28
A=5,8		0
Li Be B	3-5	$10^{-6}$
C - Ne	6-10	1.8
Na-Tl	11-22	0.2
"Fe"	23-28	0.02
63 < A < 100	29-42	$10^{-5}$
A > 100	> 43	$10^{-6}$



$\times$  (A, Z = ΜΟΝΟΣ)       $\leq \times$  (A, Z = ΣΥΓΓΡΟΣ)

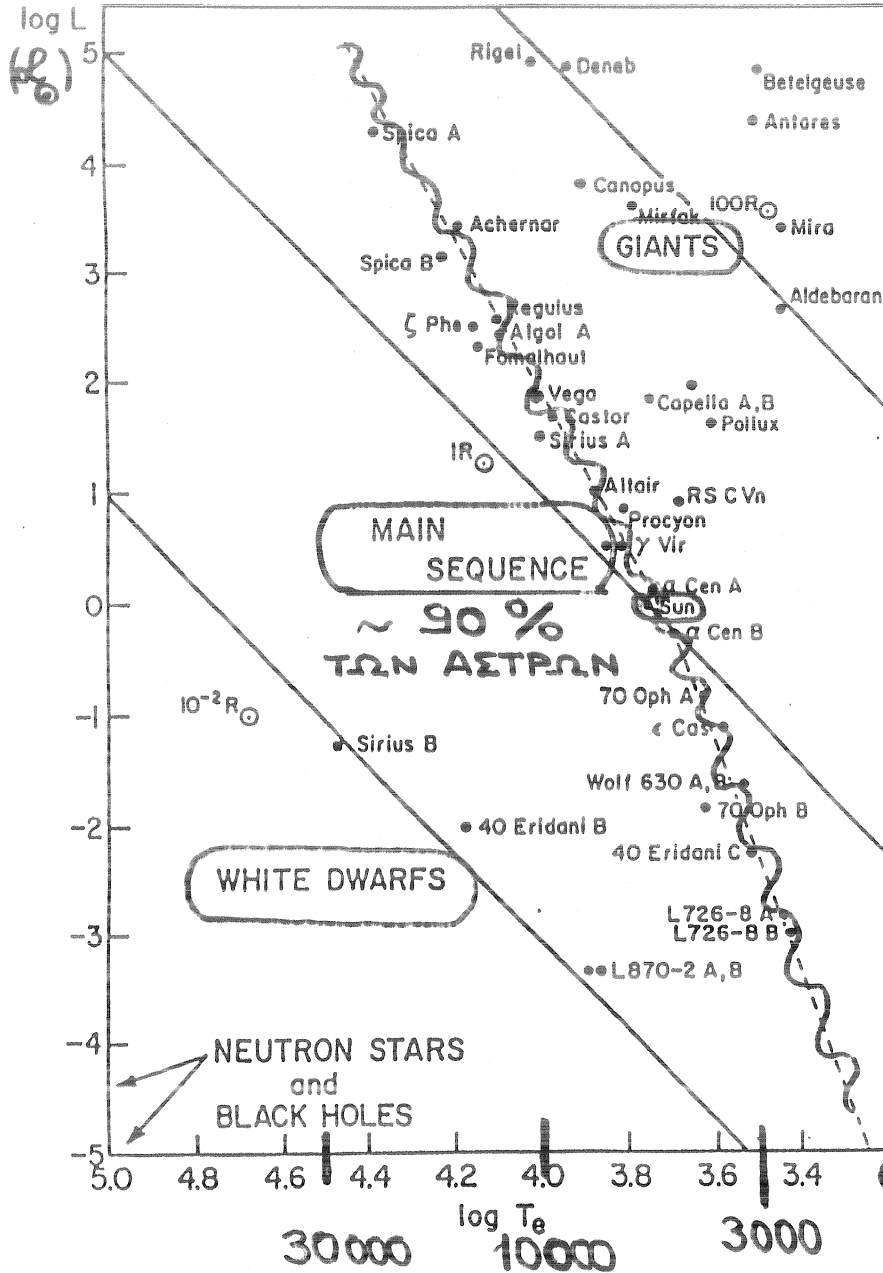


ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ  
ΑΦΘΟΝΙΑΣ ΜΕ  
ΔΕΣΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ  
ΑΝΑ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΟ  
 $B = \Delta M c^2 / A$

$$\Delta M = Z m_p + N m_n - m_A$$

# ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΤΡΩΝ

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



- ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ  $L \sim 10^{-3} - 10^6 L_{\odot}$   $L_{\odot} \sim 4 \cdot 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$
- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ  $T_e \sim 2 \cdot 10^3 - 10^5 \text{ K}$   $T_{e\odot} \sim 5800 \text{ K}$
- ΜΑΖΑ  $M \sim 10^{-1} - 10^2 M_{\odot}$   $M_{\odot} \sim 2 \cdot 10^{33} \text{ g}$
- ΑΚΤΙΝΑ  $R \sim 10^{-2} - 10^3 R_{\odot}$   $R_{\odot} \sim 7 \cdot 10^{10} \text{ cm}$

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

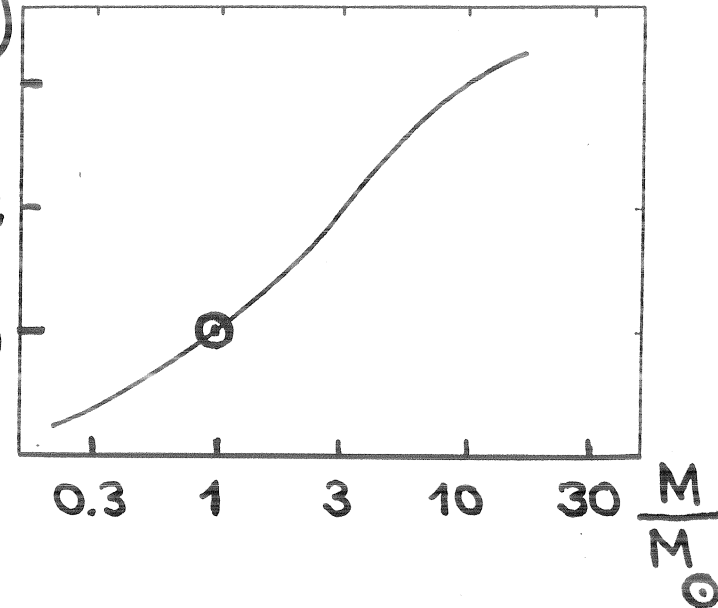
ΜΑΥΡΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ :  $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$

$\log(L/L_{\odot})$

→ Σ Χ Ε Σ Η

ΜΑΖΑΣ - ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑΣ

$L \propto M^{\nu} (\nu \sim 3)$



ΕΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ

# ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

1) ΤΕΛΕΙΟ ΑΕΡΙΟ : ①  $P_g = n k T = \frac{\rho}{\mu m_p} k T$

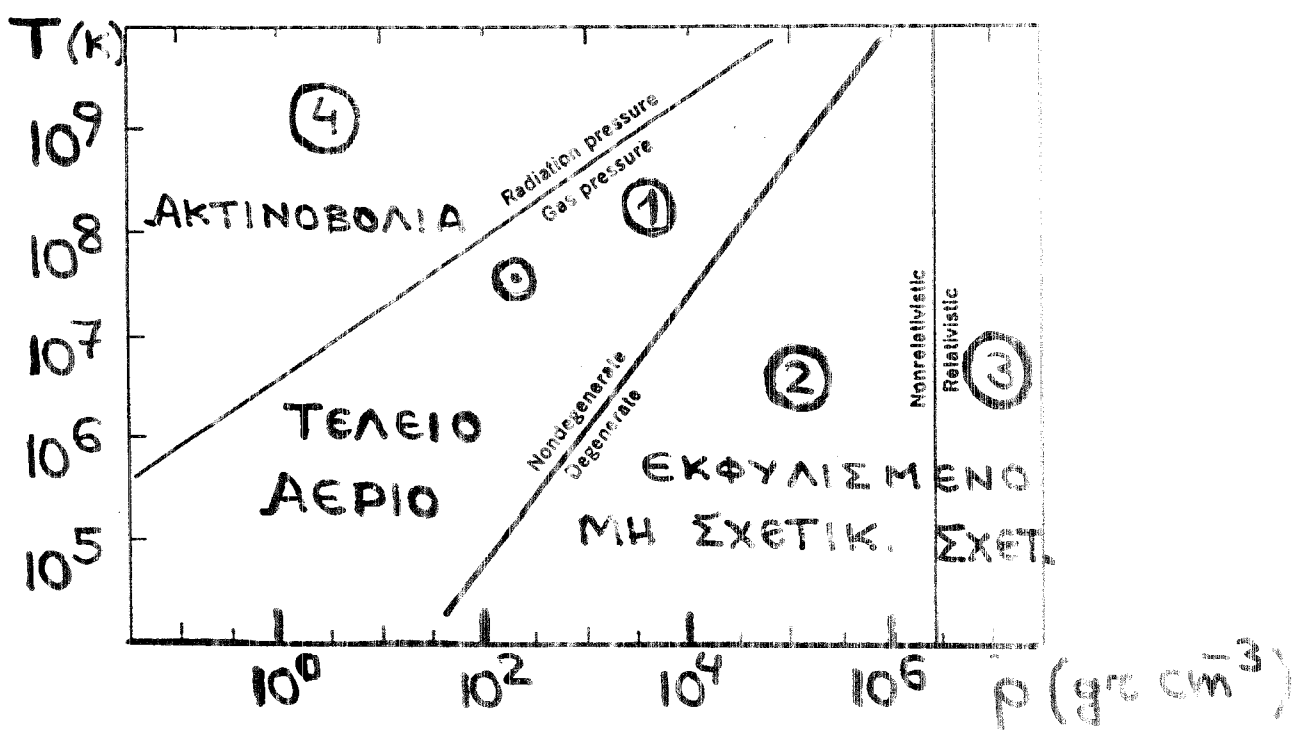
ΠΙΕΣΗ :  $P$  ( $\text{dyn cm}^{-2}$ )  
 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ :  $n$  ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ :  $\rho$  ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$k = 6 \times 10^{-27}$   
 $m_p = 1.6 \times 10^{-24} \text{ g}$

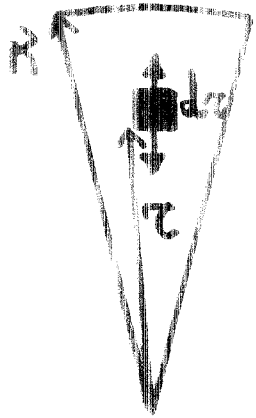
ΜΕΣΟ ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ :  $\mu = \frac{\rho}{n m_p}$   
 ΙΟΝΙΣΜΕΝΟ H :  $(1p + 1e^-) \rightarrow \mu = \frac{1}{2}$   
 ΙΟΝΙΣΜΕΝΟ He :  $(1\text{He} + 2e^-) \rightarrow \mu = \frac{4}{3}$

2) ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΟ ΑΕΡΙΟ (ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΥΚΝ.) : ②  $P_{NR} = \kappa_1 n^{5/3}$  (ΜΗ-ΣΧΕΤΙΚ.  $v \ll c$ )  
 ③  $P_{UR} = \kappa_2 n^{4/3}$  (ΣΧΕΤΙΚ.  $v \sim c$ )

3) ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ : ④  $P_r = \frac{1}{3} a T^4$   
 (ΜΕΓΑΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡ.)



# Το ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ ΑΣΤΡΩΝ



ΑΕΡΙΑ ΣΦΑΙΡΑ ΣΕ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΙΣΟΡΟΠΙΑ :

ΒΑΡΥΤΗΤΑ = ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

$$dP = - \frac{dF}{S} = - \frac{dm g}{S} = - \frac{\rho S dr}{S} \frac{G M r}{r^2}$$

$$\frac{dP}{dr} = - G \frac{M r \rho}{r^2} \Rightarrow P_{\text{ΕΣ}} \sim \frac{3G}{4\pi} \frac{M^2}{R^4} \quad (1)$$

(ΗΛΙΟΣ :  $M = M_{\odot}$ ,  $R = R_{\odot} \rightarrow P_{\text{ΕΣ}} \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ dyn cm}^{-2}$ )

(1) : ΑΠΟ ΤΕΛΕΙΟ ΑΕΡΙΟ ( $P = \frac{\rho k T}{\mu m_p}$ ) ( $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$ )

$$\Rightarrow T_{\text{ΕΣ}} \sim \frac{G M \mu_p}{k} \frac{M}{R} \quad (2) \quad (\text{ΗΛΙΟΣ : } T_{\text{ΕΣ}} \sim 10^7 \text{ K})$$

ΤΑ ΑΣΤΡΑ ΛΑΜΒΟΥΝ ΕΠΕΙΔΗ ΕΧΟΥΝ ΜΕΓΑΛΗ ΜΑΖΑ  $\rightarrow$  ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ

$T_{\text{ΕΣ}} > 10^6 \text{ K}$  ( $M > 0.1 M_{\odot}$ )  $\rightarrow$  ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

"ΚΑΥΣΗ" Η :  $T_{\text{ΕΣ}} \sim 10^7 \text{ K} \sim \text{σταθ.}$

- $\rho \propto M^3 \Rightarrow M \propto \rho^{1/3}$
- $\rho = 4\pi R^2 \sigma T_E^4 \Rightarrow R = (\rho / 4\pi \sigma T_E^4)^{1/2}$

(2) :  $\rho^{-1/6} T_E^2 \sim \text{σταθ.}$   
ΚΥΡΙΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ

$M < 0.1 M_{\odot} \rightarrow T_{\text{ΕΣ}} < 10^6 \text{ K}$  + ΠΙΕΣΗ ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

ΚΑΦΕ ΝΑΝΟΙ

ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΜΑΖΑΣ ΕΝΟΣ ΑΣΤΡΟΥ

$$\frac{P_{\text{ΑΚΤ}}}{P_{\text{ΕΣ}}} \propto \frac{M^4 / R^4}{M^2 / R^4} \propto M^2$$

$P_{\text{ΑΚΤ}}$  ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΓΙΑ  
 $M \sim 100 M_{\odot}$   
ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΜΑΖΑΣ  
ΕΝΟΣ ΑΣΤΡΟΥ

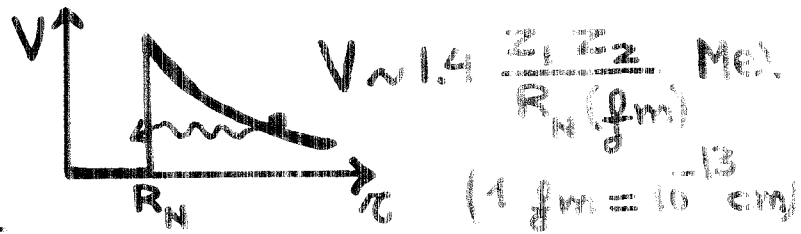


# ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ :  $X + a \rightarrow Y + b + Q$   $[X(a, b)Y]$

ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $Q = (m_x + m_a - m_y - m_b) c^2$   $Q > 0$  ΕΞΟΘΕΡΜΗ  
 $Q < 0$  ΕΝΔΟΘΕΡΜΗ

ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ  
 ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΑ  
 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ : ΑΠΩΣΤΙΚΟ  
 ΔΥΝΑΜΙΚΟ  
 COULOMB

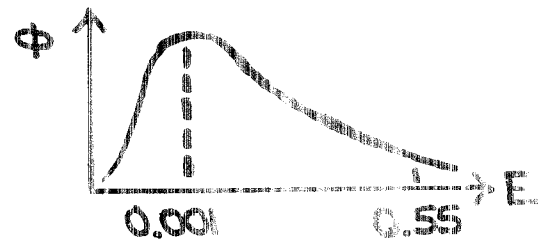


$p + p : V \sim 0.55 \text{ MeV}$

$T_{\odot} \sim 10^7 \text{ K} \sim 0.0009 \text{ MeV}$

$\Phi(0.55) / \Phi(0.0009) \sim 10^{-275} !$

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ "ΣΗΡΑΓΓΩΣ"



ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $Q = [m(4p) - m({}^4\text{He})] c^2 \sim 24 \text{ MeV}$

ΑΠΟΔΟΣΗ :  $A = \Delta m / 4m_p \sim 24 / 3700 \sim 0.007$

ΣΤΟΝ ΗΛΙΟ :  $L_{\odot} = A \cdot \frac{\Delta M}{\Delta t} c^2 \Rightarrow \frac{\Delta M}{\Delta t} \sim 10^9 \text{ ΤΟΝΝΟΙ/ΣΕΚ}$

## ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΤΡΩΝ

ΒΑΡΥΤΗΤΑ :  $E_G \sim G \frac{M^2}{R}$

ΗΛΙΟΣ :  $E_G \sim 10^{48} \text{ ergs}$

ΔΙΑΡΚΕΙΑ :  $t \sim \frac{E_G}{L_{\odot}} \sim 3 \cdot 10^7 \text{ ΧΡΟΝΙΑ}$

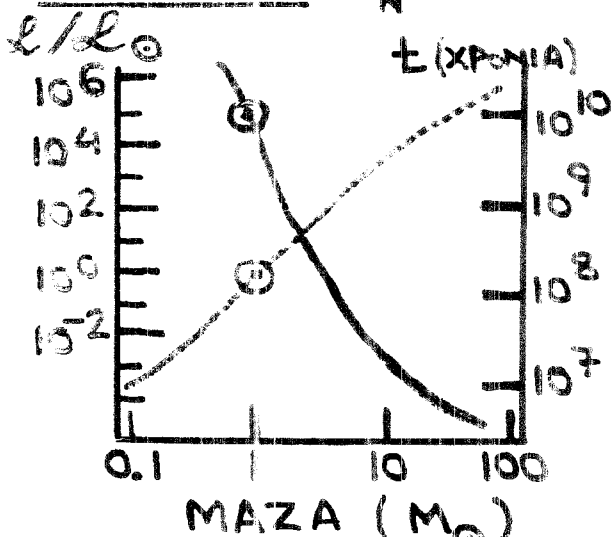
ΠΥΡΗΝΙΚΗ :  $E_N \sim A \cdot M \cdot c^2$

ΗΛΙΟΣ :  $E_N \sim 10^{52} \text{ ergs}$

ΔΙΑΡΚΕΙΑ :  $t \sim \frac{E_N}{L_{\odot}} \sim 10^{11} \text{ ΧΡΟΝΙΑ}$

ΑΛΛΑ ΑΣΤΡΑ :

$t \sim \frac{E_N}{L} \propto \frac{M}{M^3} \propto M^{-2}$

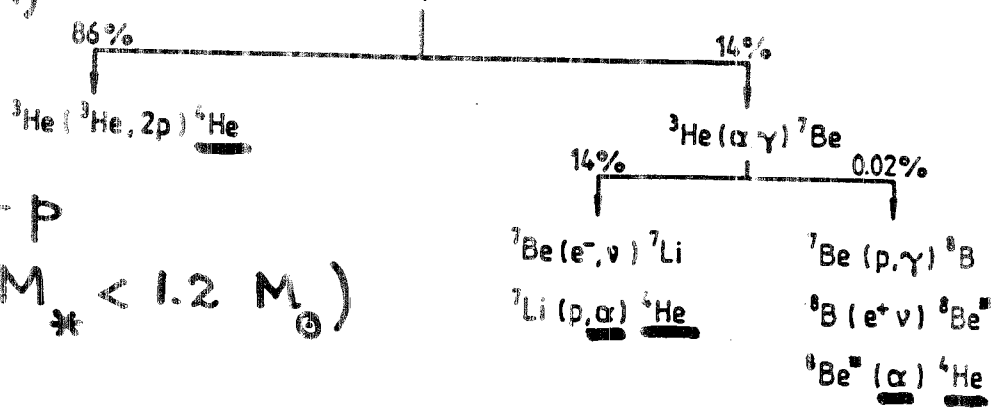


# ΚΑΥΣΗ Η Η

(ΚΥΡΙΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ)



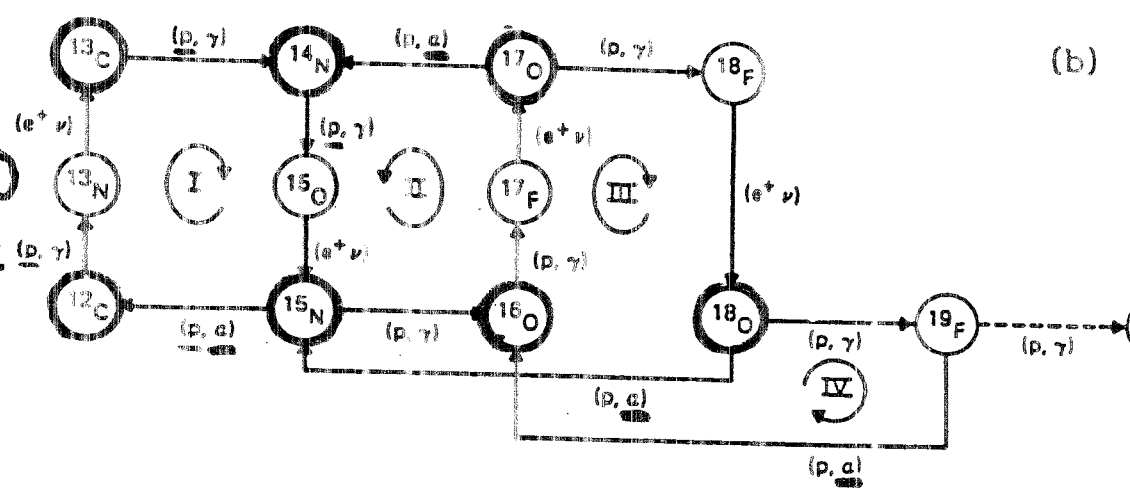
ΑΛΥΣΙΔΕΣ P-P  
 $(T_c < 2 \cdot 10^7 \text{ K} \leftrightarrow M_* < 1.2 M_\odot)$



CHAIN I	CHAIN II	CHAIN III
$Q_{\text{eff}} = 26.20 \text{ MeV}$ (2.0% loss)	$Q_{\text{eff}} = 25.66 \text{ MeV}$ (4.0% loss)	$Q_{\text{eff}} = 19.17 \text{ MeV}$ (28.3% loss)
<b>NET RESULT: <math>4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu + Q_{\text{eff}}</math> (6 MeV)</b>		

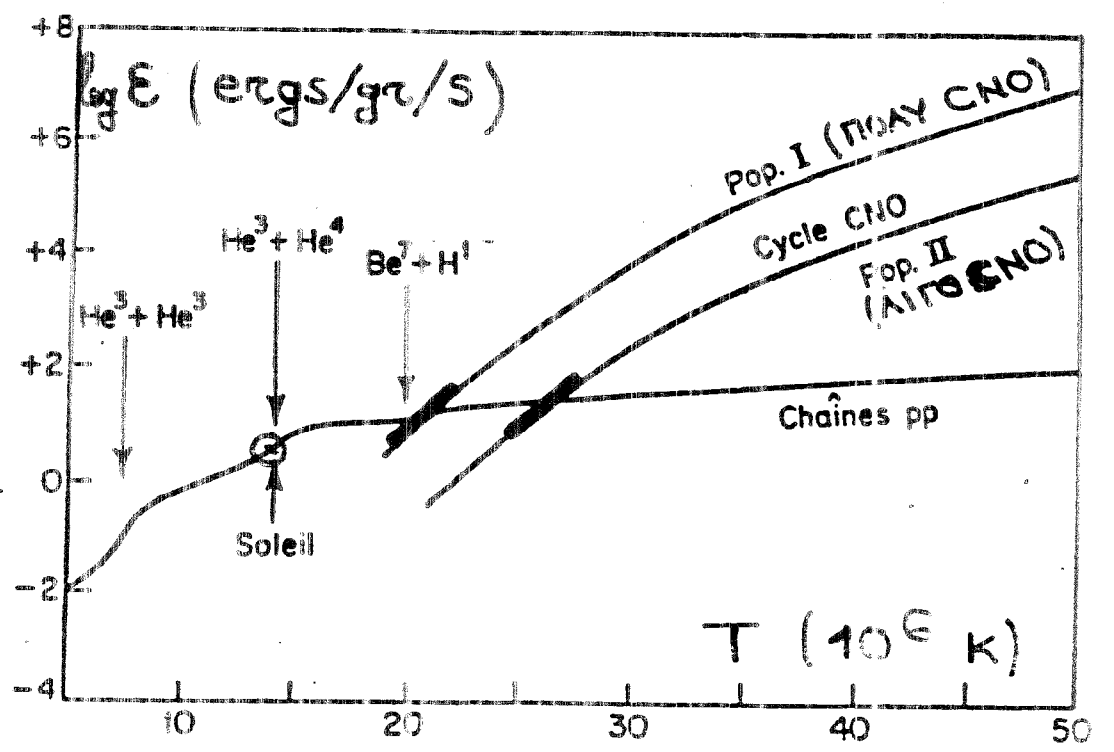
$(T_c > 2 \cdot 10^7 \text{ K} \leftrightarrow M_* > 1.2 M_\odot)$

ΚΥΚΛΟΙ CNO  
 CNO: ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ  
 $({}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N})$



## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$pp \propto X_p^2 \rho T^4$   
 $CNO \propto X_C X_N \rho T^{16}$



# ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΣΤΡΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

1. ΜΑΖΑ (ΕΞ. ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ)

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \longrightarrow \frac{dr}{dM_r} = (4\pi r^2 \rho)^{-1}$$

2. ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΙΣΟΡΟΠΙΑ

$$\frac{dP}{dr} = -\rho G \frac{M_r}{r^2} \longrightarrow \frac{dP}{dM_r} = -G \frac{M_r}{4\pi r^4}$$

3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΙΣΟΡΟΠΙΑ

$$\frac{d\mathcal{L}}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon \longrightarrow \frac{d\mathcal{L}}{dM_r} = \epsilon$$

4. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

α)  $\nabla T_{rad} < \nabla T_{ad} \longrightarrow$  ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (RADIATION)  $\frac{dT}{dM_r} = \frac{-3\kappa\rho}{4\pi r^2 \epsilon} \frac{d\mathcal{L}}{dM_r}$

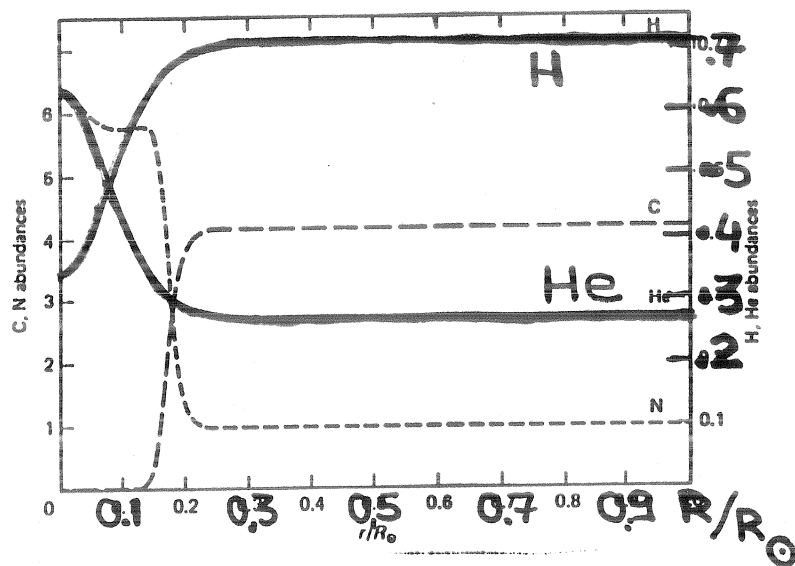
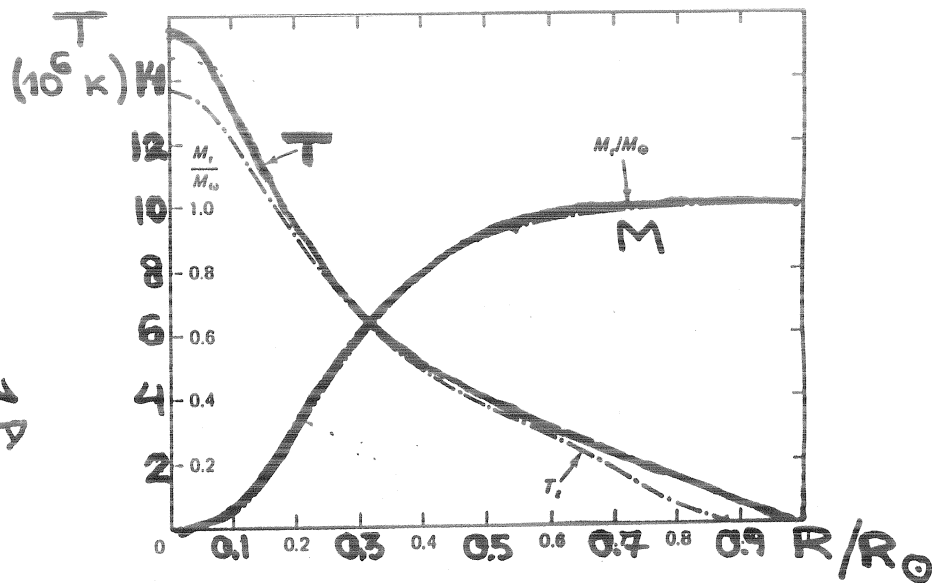
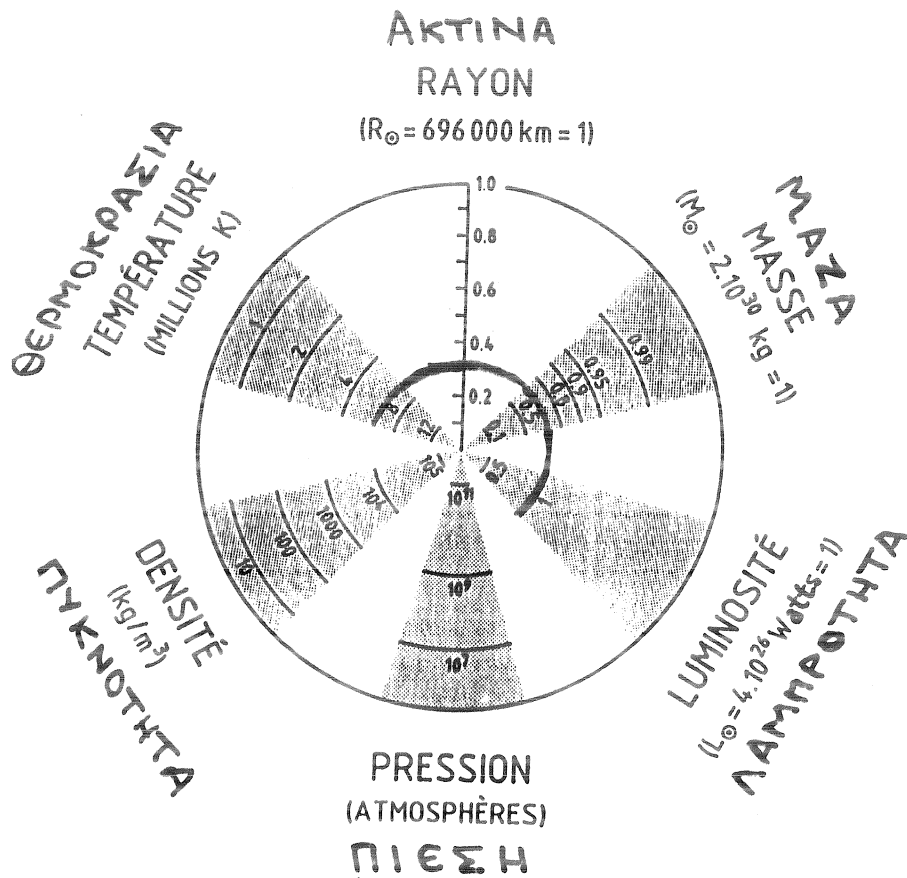
β)  $\nabla T_{rad} > \nabla T_{ad} \longrightarrow$  ΜΕΤΑΦΟΡΑ (CONVECTION)  $\frac{dT}{dM_r} = \left(\frac{1}{\delta} - 1\right) \frac{T}{P} \frac{GM_r}{4\pi r^2}$

+	{	ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	$P = f(T, \rho, \psi)$
		ΑΔΙΑΦΑΝΕΙΑ (OPACITY)	$\kappa = f(T, \rho, \psi)$
		ΠΑΡΑΓΩΓΗ-ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	$\epsilon = f(T, \rho, \psi)$
		ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	$\psi$

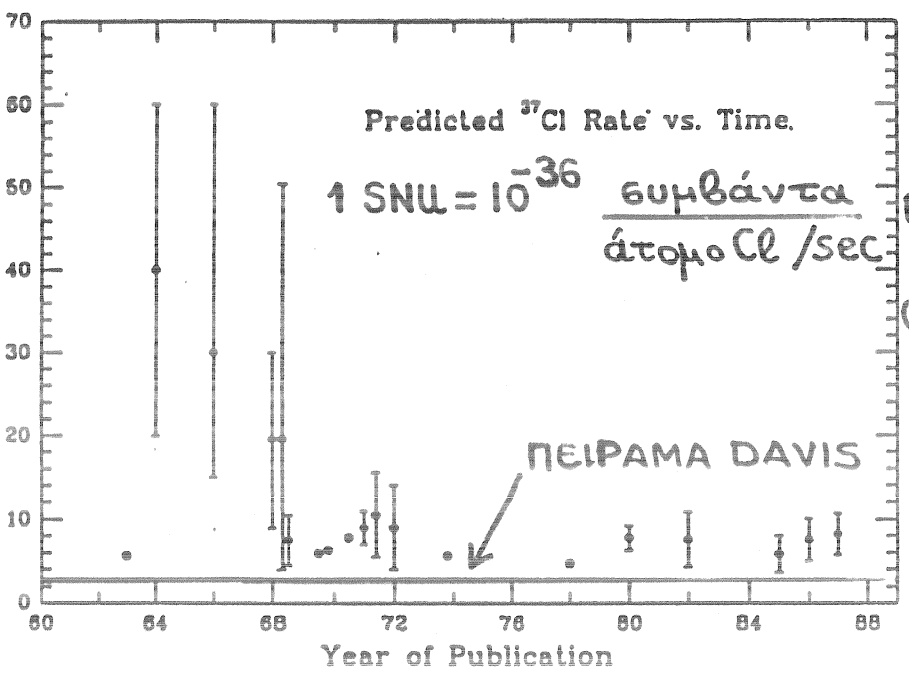
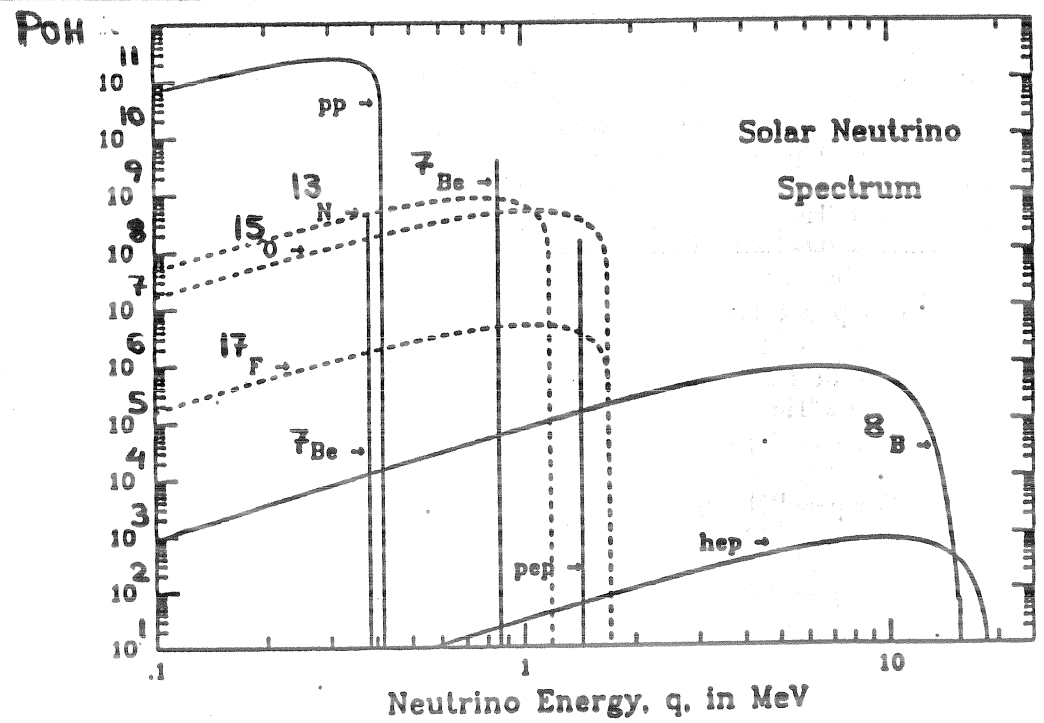
+

ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΕΧΕΙΕΣ		
ΚΕΝΤΡΟ ( $M_r = 0$ )	$r = 0$	$\frac{d\mathcal{L}}{dr} = 0$
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ( $M_r = M_*$ )	$P = 0$	$T \sim 0$

# ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ



Cycle and abundance	Reaction	ΡΟΗ ΣΤΗ ΓΗ ( $10^{10} \nu \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
PPI 88%	$p + p \rightarrow d + e^+ + (\nu_1)$ (99.75%)	6.
	$p + e^- + p \rightarrow d + (\nu_2)$ (0.25%)	$1.4 \cdot 10^{-2}$
	$d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	
	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	
PPII 12%	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	
	$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + (\nu_3)$	$4.7 \cdot 10^{-1}$
	${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	
PPIII 0.01%	${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	
	${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + (\nu_4)$	$5.8 \cdot 10^{-4}$
	${}^8\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	
CNO	${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	
	${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + (\nu_5)$	$6.1 \cdot 10^{-2}$
	${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	
	${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	
	${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + (\nu_6)$	$5.2 \cdot 10^{-2}$
	${}^{15}\text{N} + p \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	



ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ

Target	p-p	pep	hep	${}^7\text{Be}$	${}^8\text{B}$	${}^{13}\text{N}$	${}^{15}\text{O}$	${}^{17}\text{F}$	Total
${}^2\text{H}$	0.0	0.0	0.02	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	6.0
${}^7\text{Li}$	0.0	9.2	0.06	4.5	22.5	2.6	12.8	0.1	51.8
${}^{37}\text{Cl}$	0.0	0.2	0.03	1.1	6.1	0.1	0.3	0.004	7.9
${}^{40}\text{Ar}$	0.0	0.0	0.02	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
${}^{71}\text{Ga}$	70.8	3.0	0.06	34.3	14.0	3.8	6.1	0.06	132
${}^{81}\text{Br}$	0.0	1.1	0.07	8.6	15.3	0.9	1.9	0.02	27.8
${}^{98}\text{Mo}$	0.0	0.0	0.08	0.0	17.3	0.0	0.0	0.0	17.4
${}^{115}\text{In}$	468	8.1	0.05	116	14.4	13.6	18.5	0.2	639

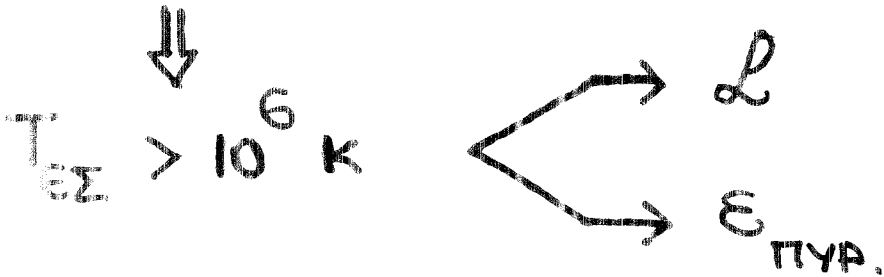
1992 : GALEX :  $83 \pm 21 \text{ SNU}$

???

DAVIS : Cl  
GALEX : Ga

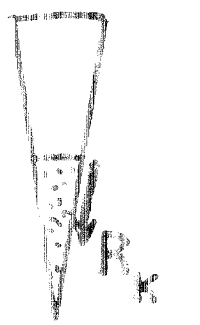
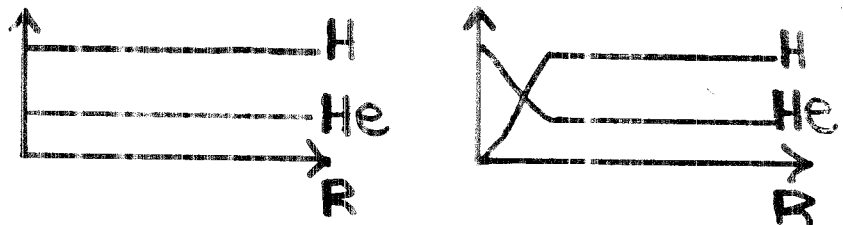
# Η ΖΩΗ ΕΝΟΣ ΑΣΤΡΟΥ

$$P_{\text{ΑΕΡ.}} (\propto \rho T) \sim P_{\text{ΒΑΡ}} (\propto \frac{M^2}{R^4})$$

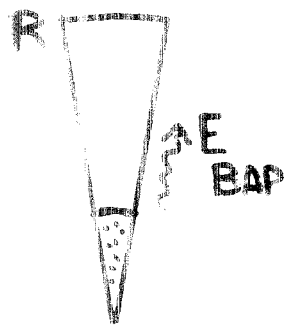


ΚΑΘΩΣ ΤΟ Η ΤΕΛΕΙΩΝΕΙ,  $\epsilon_{\text{ΠΥΡ}} \rightarrow 0$  ΚΑΙ

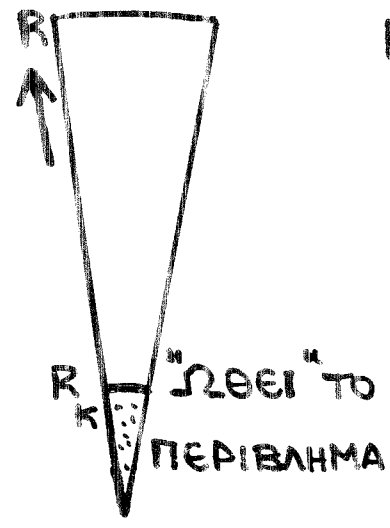
ΤΟ ΑΣΤΡΟ ΓΙΝΕΤΑΙ  
ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ



ΚΑΡΔΙΑ  
ΥΠΕΡΛΑΤΕΙΑΙ



ΕΚΛΑΓΕΤΑΙ  
 $E \propto \frac{M_K^2}{R_K}$



"ΩΘΕΙ" ΤΟ  
ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ

$$T_E \propto \left( \frac{L}{R^2} \right)^{1/4}$$



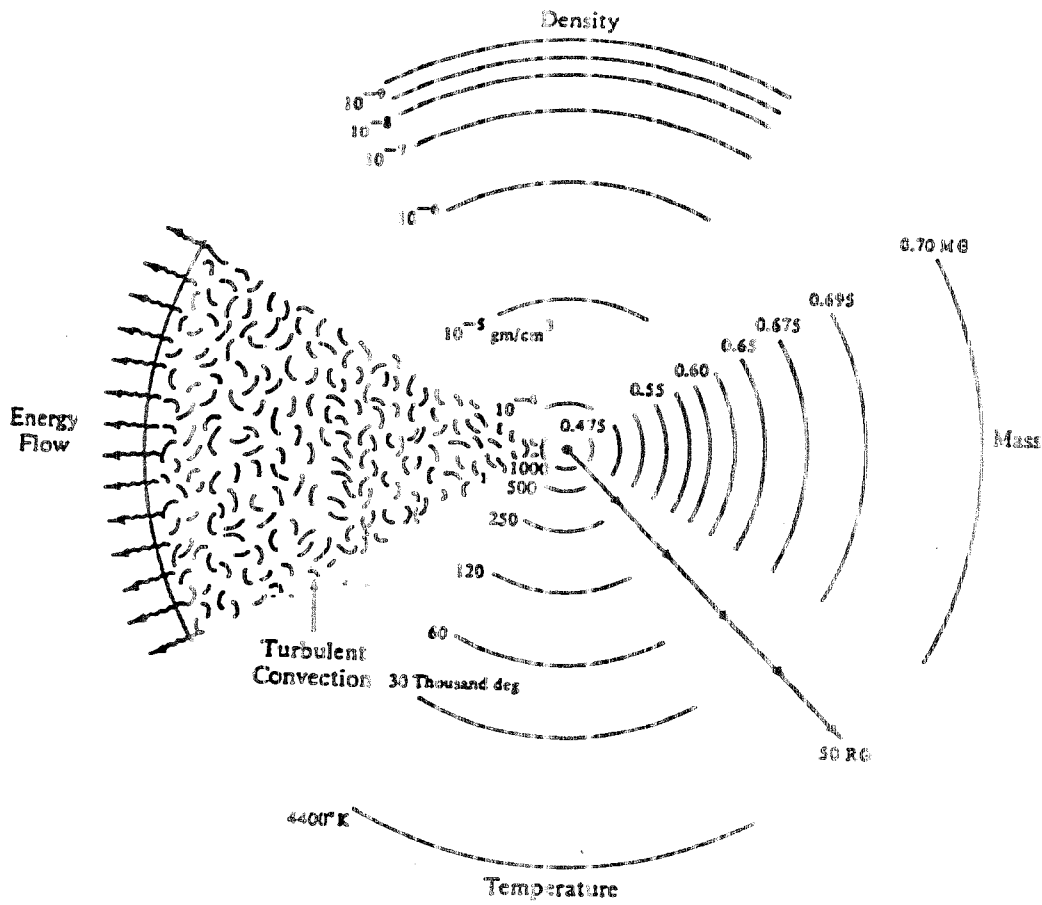
ΑΝΑΦΛΕΞΗ Η  
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ  
 $\rightarrow \epsilon_{\text{ΠΥΡ}}$

$L \uparrow$

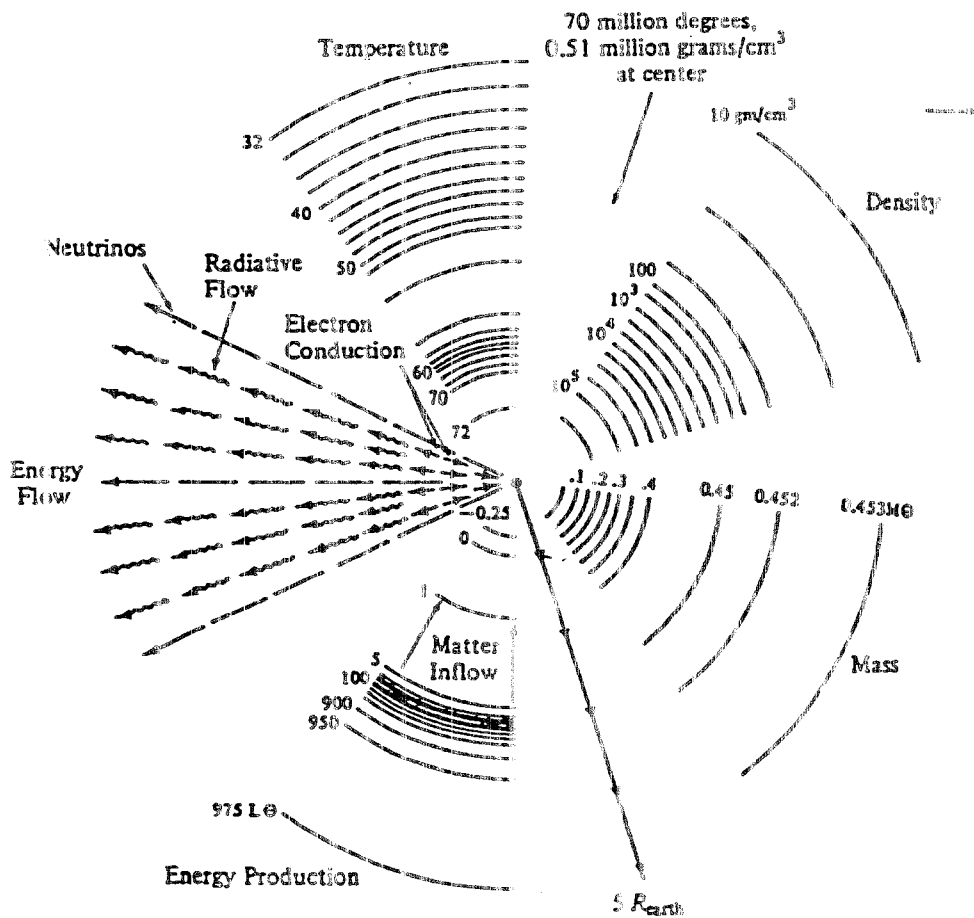
ΤΟ ΑΣΤΡΟ ΓΙΝΕΤΑΙ : ΕΡΥΘΡΟΣ ΓΙΓΑΝΤΑΣ

ΩΤΑΝ  $T_{\text{ΕΣ}} \propto \frac{M}{R_K} \sim 10^8 \text{ K} \Rightarrow$  ΑΝΑΦΛΕΞΗ  $4\text{He}$   
 $\rightarrow \epsilon_{\text{ΠΥΡ}}$



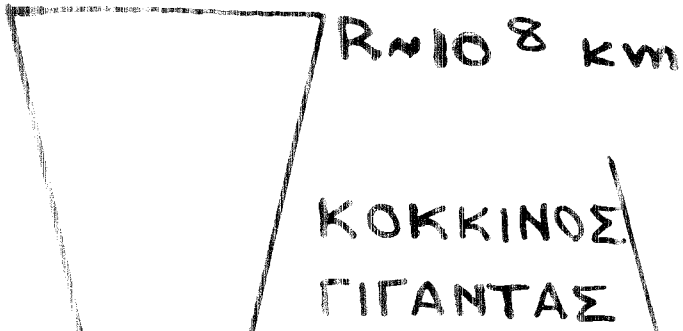


(a) Red Giant Envelope



(b) Core of Red Giant

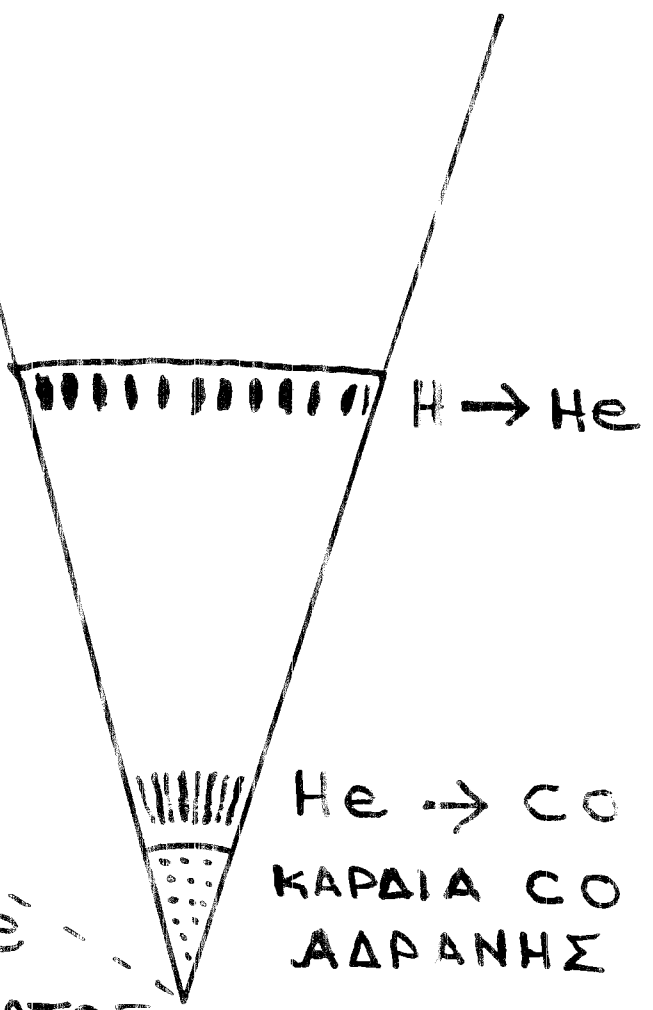
# ΤΕΛΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΕΝΟΣ "ΜΙΚΡΟΥ" ΑΣΤΡΟΥ



$H \rightarrow He$   $R \approx 10^5 \text{ km}$   
 $He \rightarrow C/O$   $R \approx 4 \cdot 10^4 \text{ km}$

ΟΤΑΝ ΤΟ  $He$   
 ΤΕΛΕΙΩΣΕΙ ΣΤΗΝ ΚΑΡΔΙΑ  
 ΣΥΣΤΟΛΗ  $\rightarrow T_{E\epsilon}$

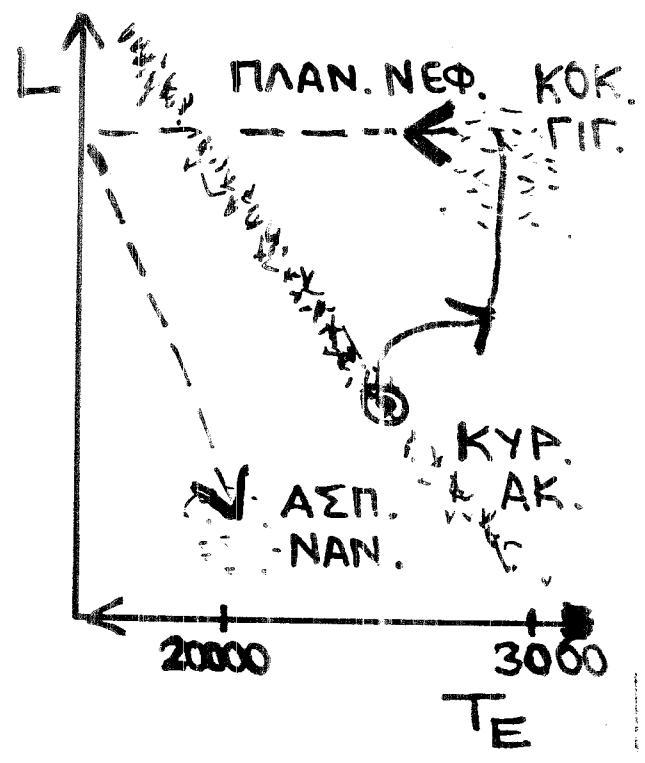
ΠΕΡΙΦΕΡΙΚΗ ΑΝΦΛΕΞΗ  $He$   
 ΕΚΤΙΝΑΞΗ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ  
 ( $M < 10 M_{\odot}$ )



ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ : ΠΛΑΗΤΙΚΟ ΝΕΦΕΛΩΜΑ

ΚΑΡΔΙΑ  $C/O$  : ΑΣΠΡΟΣ ΝΑΝΟΣ  
 ( $R \approx 10^4 \text{ km}$ ,  $M \approx 0.5 - 1 M_{\odot}$ )  
 $\rho \approx 10^6 \text{ g cm}^{-3}$

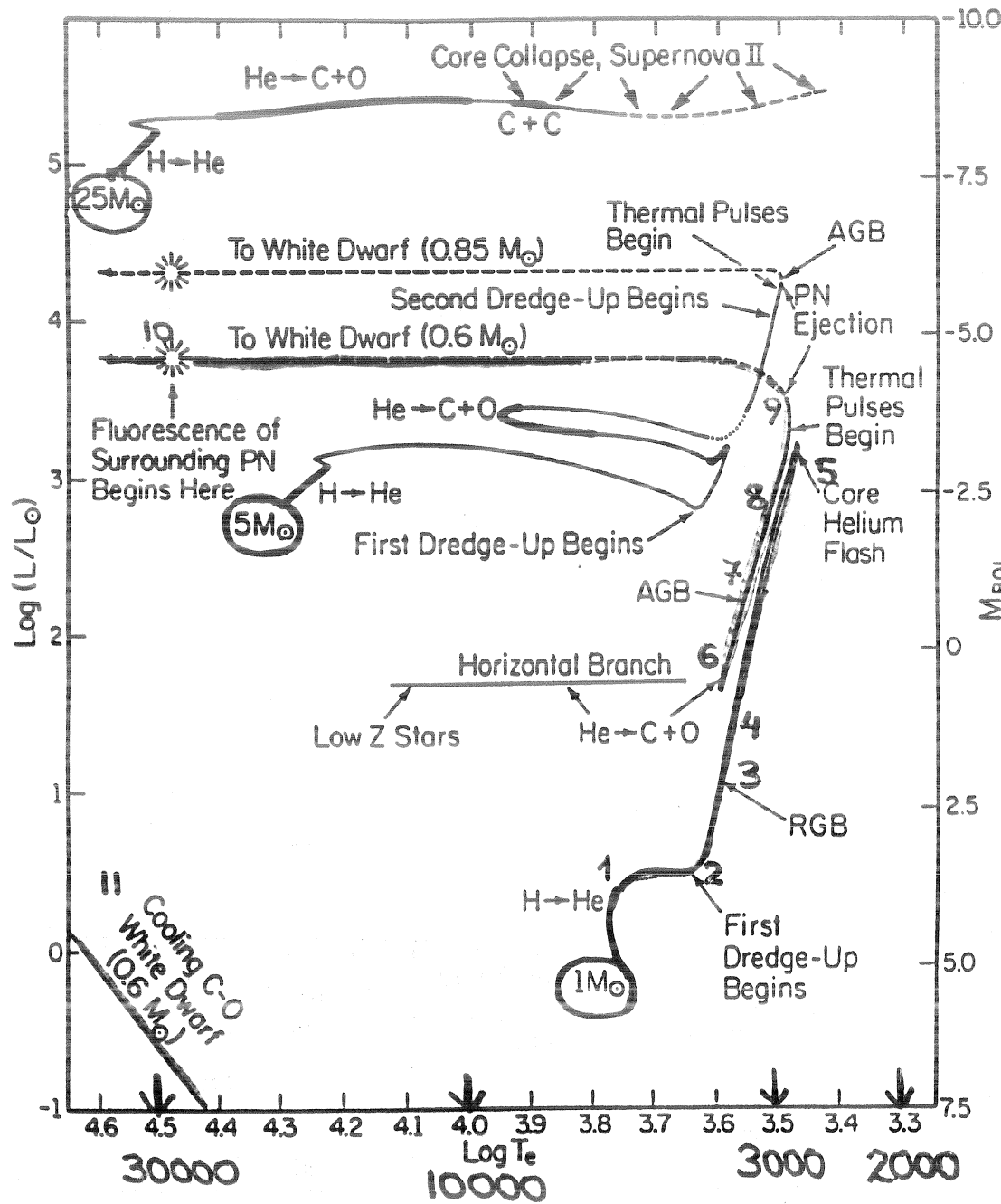
ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΙΕΣΗ  
 ΤΟΥ ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ





# ΑΣΤΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

## ΜΙΚΡΟ-ΜΕΣΑΙΑ ΑΣΤΡΑ ( $M < 8-10 M_{\odot}$ )



- 1 ΤΕΛΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ Η
  - 2 1<sup>ο</sup> DREDGE-UP (ΑΝΑΜΙΞΗ CNO ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ)
  - 3 ΚΟΚΚΙΝΟΣ ΓΙΓΑΝΤΑΣ
  - 4 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΚΑΥΣΗ Η - ΑΝΑΦΛΕΞΗ Ηε ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ
  - 5 ( $M < 2 M_{\odot}$  : He-FLASH)
  - 6 ΤΕΛΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ Ηε 2<sup>ο</sup> DREDGE-UP
  - 7 ΔΙΠΛΗ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΚΑΥΣΗ Η-He
  - 8 3<sup>ο</sup> DREDGE-UP (ΑΝΑΜΙΞΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ 3α ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ)
  - 9 ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΠΛΑΛΜΟΙ - ΕΚΤΙΝΑΞΗ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ
  - 10 ΠΛΑΝΗΤΙΚΟ ΝΕΦΕΛΩΜΑ
- ΥΠΟΛΕΙΜΑ ΑΠΟ ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΟ C-O ( $M < 1.4 M_{\odot}$ )
- || ΑΣ. ΠΡΟΣ ΝΑΝΟΣ ( $M_{Ch} \sim 1.4 M_{\odot}$ )

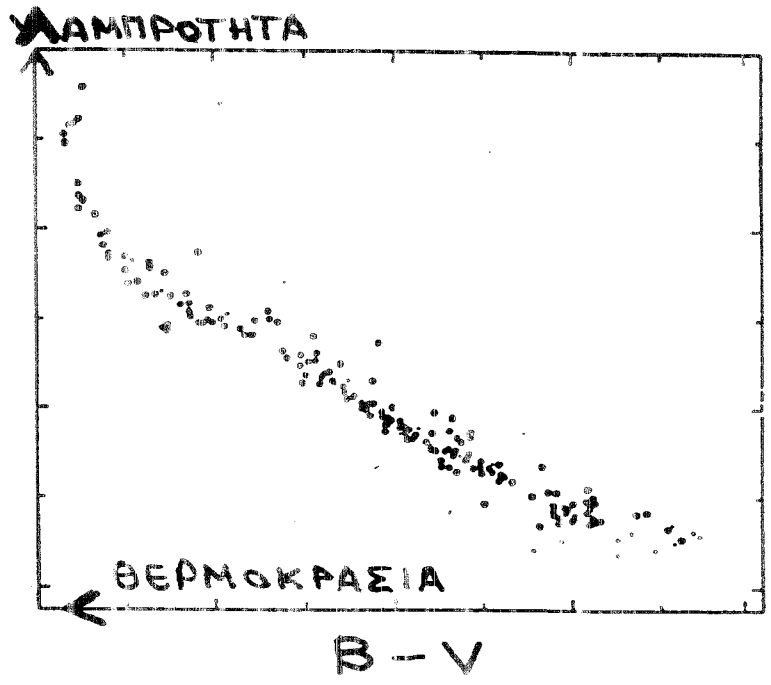
# ΑΣΤΡΙΚΑ ΣΜΗΝΗ :

ΕΛΕΓΧΟΣ  
ΘΕΩΡΙΑΣ : ΑΡΙΘΜΟΣ \*  $\begin{cases} \text{ΚΥΡ. ΑΚ. } \propto T (H_{\text{ΚΕΝΤΡ}}) \\ \text{ΕΡΥΘ. ΠΓ. } \propto T (H_{\text{ΕΚΕΝΤΡ}}) \\ \text{ΑΣΥΜΠΤ. ΠΓ. } \propto T (H_{\text{ΠΕΡ.}}) \end{cases}$

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ  
ΗΛΙΚΙΑΣ ΣΜΗΝΟΥΣ

"ΝΕΑΡΟ" ΣΜΗΝΟΣ  
ΠΛΕΙΑΔΕΣ

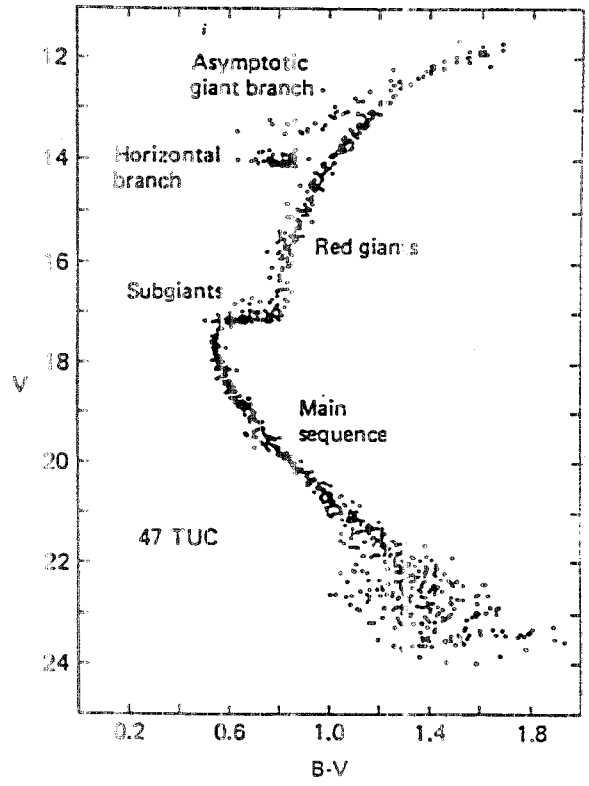
$T \sim 7 \cdot 10^7$  ΧΡΟΝΙΑ



"ΗΛΙΚΙΩΜΕΝΟ" ΣΜΗΝΟΣ

47 TUC

$T \sim 13-18 \cdot 10^9$  ΧΡΟΝΙΑ



ΓΑΛΑΞΙΑΚΗ ΔΩΣ

$T > 12 \cdot 10^9$  ΧΡΟΝΙΑ



ΓΑΛΑΞΙΑΚΟΣ  
ΔΙΣΚΟΣ

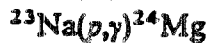
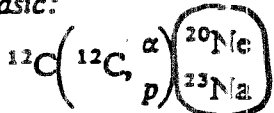
$T < 10 \cdot 10^9$  ΧΡΟΝΙΑ

# ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΣΤΡΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

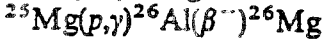
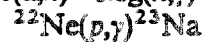
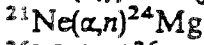
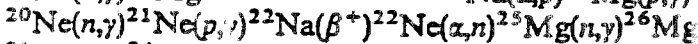
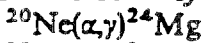


## IMPORTANT REACTIONS IN CARBON BURNING

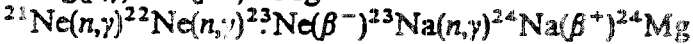
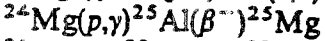
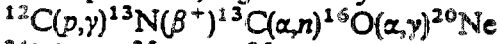
Basic:



Down to  $10^{-2}$  of above:

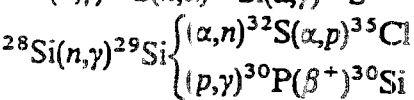
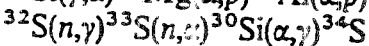
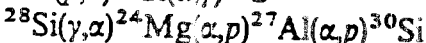
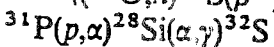
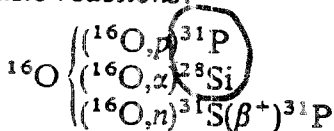


Low-temperature, high-density:

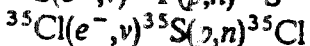
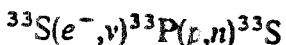


## OXYGEN BURNING

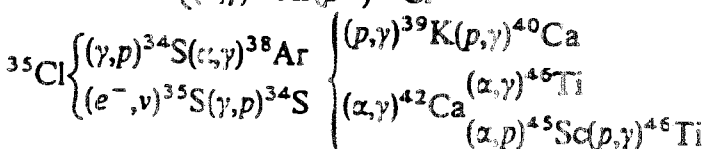
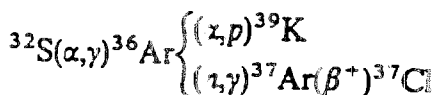
Basic reactions:



Electron captures:

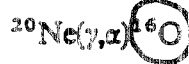


Massive stars ( $M_* = 16 M_\odot$ ):

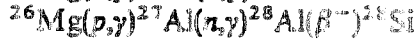
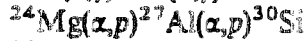
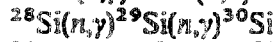
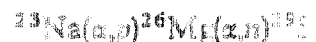


## NEON BURNING

Basic reactions:



Flows  $> 10^{-2}$  times the above:



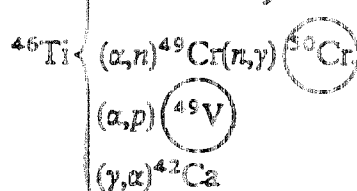
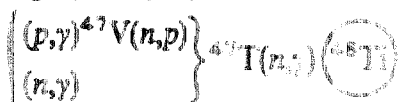
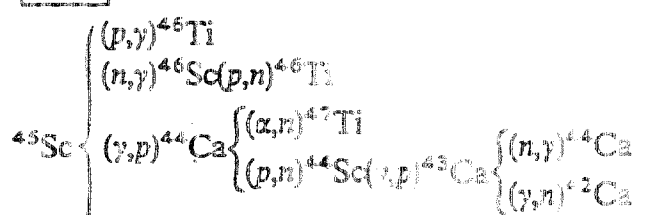
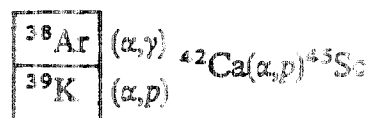
At low temperature and high density

( ${}^{22}\text{Ne}$  left from prior n-rich C burning):

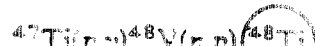
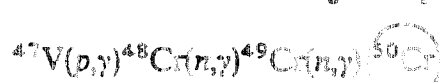


## SILICON BURNING

Basic reactions:



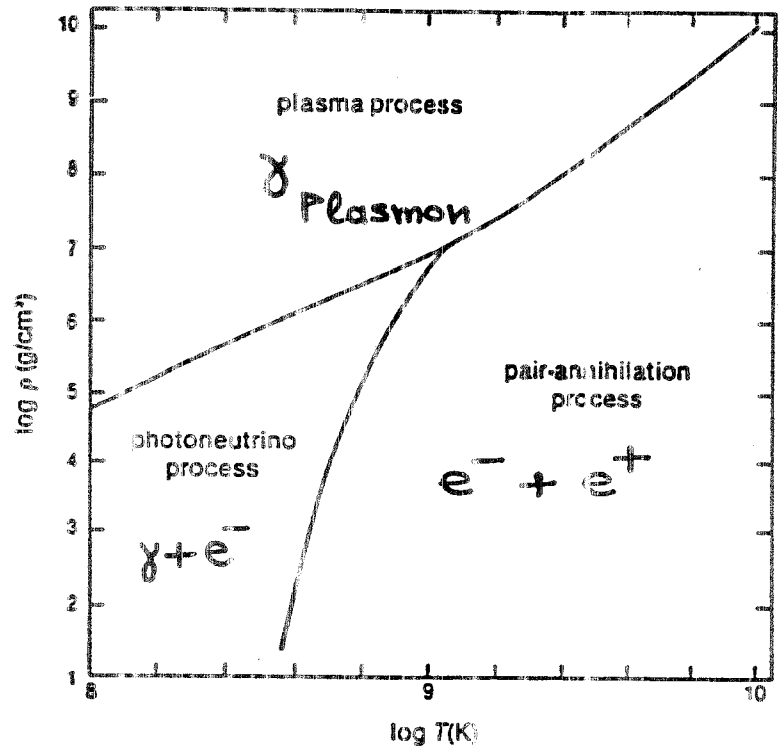
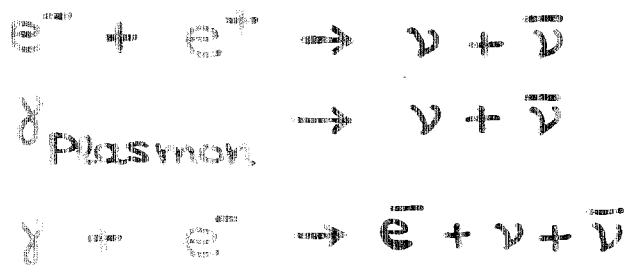
Additional reactions in high-temperature burning:



# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΑΠΟ ΕΚΠΟΜΠΗ $\gamma$

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ  $T > 5 \cdot 10^8$  K  
(ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ He)

ΕΚΠΟΜΠΗ  $\gamma$  ΑΠΟ :



ΣΤΡΩΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ  
 $\gamma$  - ΥΛΗΣ

$$\epsilon_{\gamma} \sim 10^{-44} \left( \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} \right)^2 \text{ cm}^2$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ :

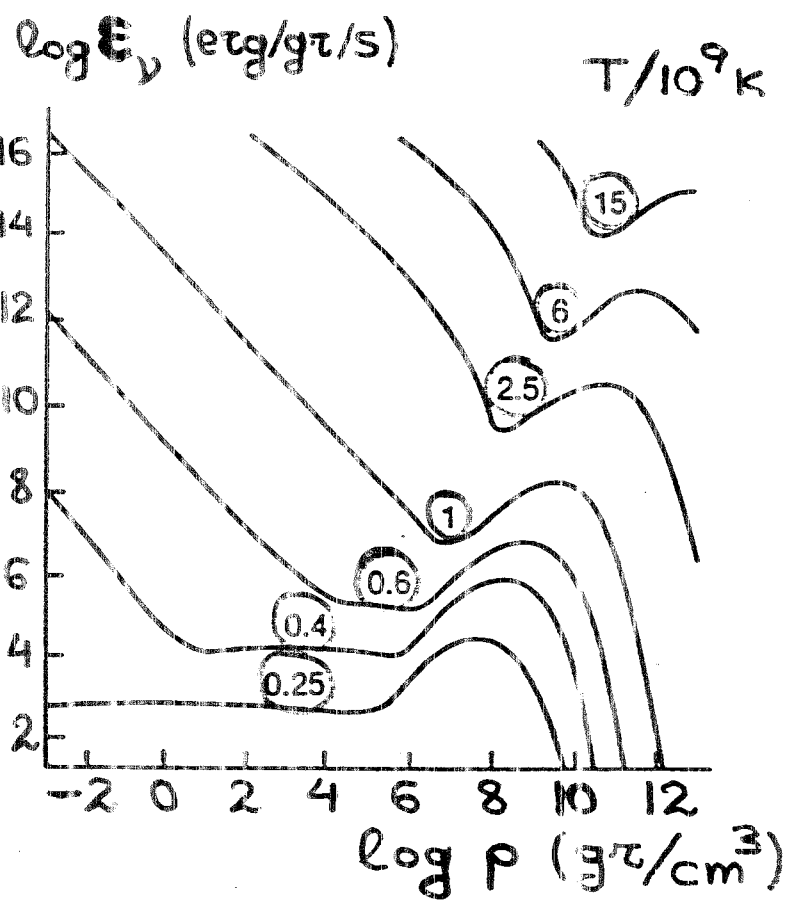
$$\rho \sim 10^4 \text{ g/cm}^3 \rightarrow n \sim 10^{28} \text{ cm}^{-3}$$

ΤΙΘΕΙΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ :

$$\lambda = \frac{1}{n \epsilon_{\gamma}} \sim 10^{16} \text{ cm} \sim 10^5 R_{\odot}$$



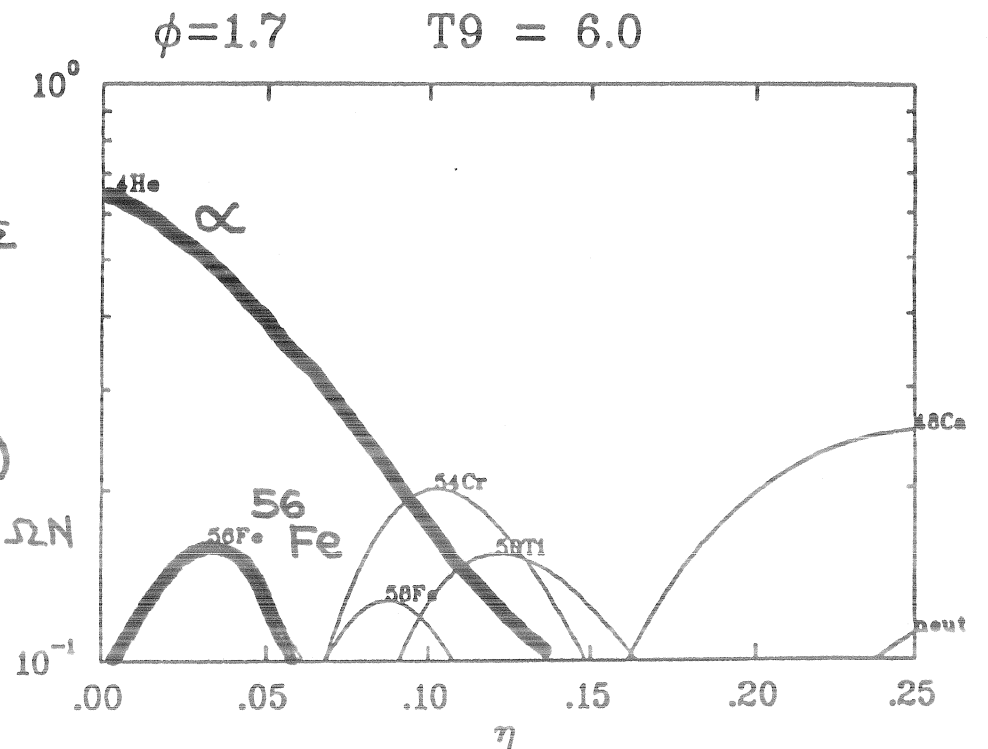
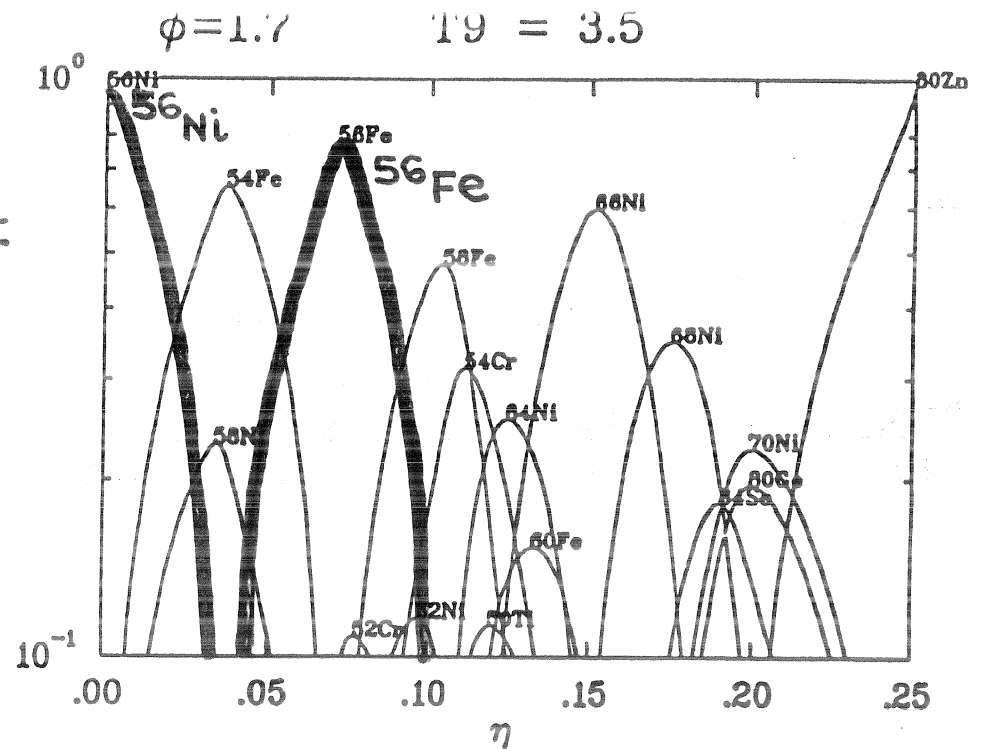
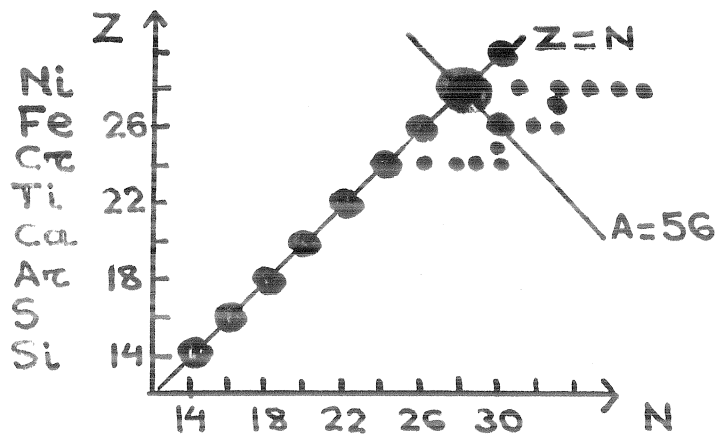
ΤΑ  $\gamma$  "ΔΡΑΠΙΣΤΕΥΟΥΝ" ΑΠΟ  
ΤΟ ΑΣΤΡΟ "ΑΠΑΓΟΝΤΑΣ"  $\epsilon_{\gamma}$



Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΑΣΤΡΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΕΤΑΙ

# ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΙΣΟΡΟΠΙΑ (NUCLEAR STATISTICAL EQUILIBRIUM)

$T > 3 \cdot 10^9 \text{ K}$  . ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΦΩΤΟΔΙΑΣΠΑΣΗΣ  
 $E > 0.3 \text{ MeV}$  .  $\lambda_\gamma \propto \exp(-Q/kT)$   
 ΕΥΝΟΟΥΝΤΑΙ ΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ  $\propto$  ( $Z, N = \text{ΖΥΓΟΙ}$ )



$T > 5 \cdot 10^9 \text{ K}$  : ΟΛΕΣ ΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΗΛΜ  
 ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΙΣΟΡΟΠΟΥΝ ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΣ

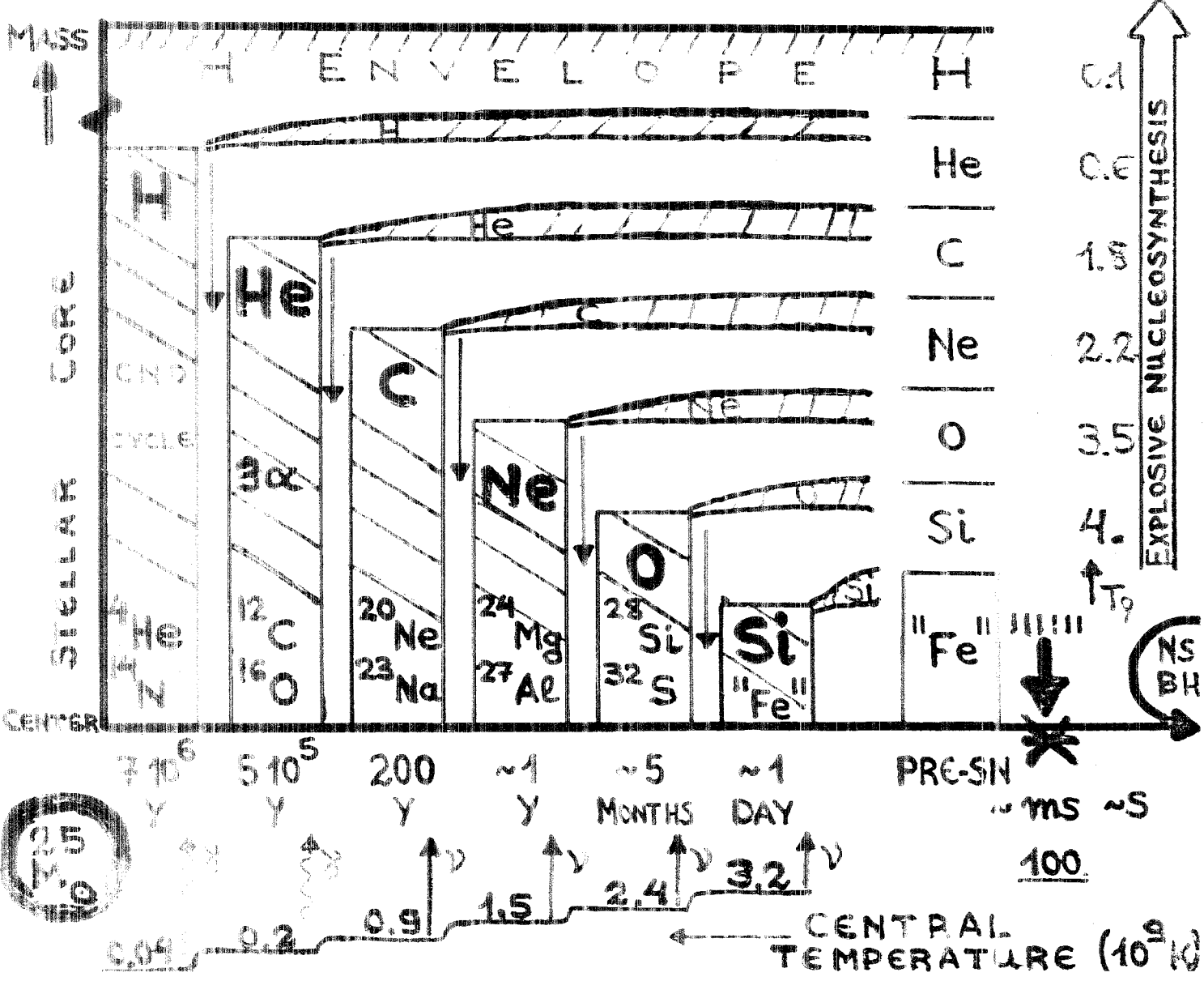
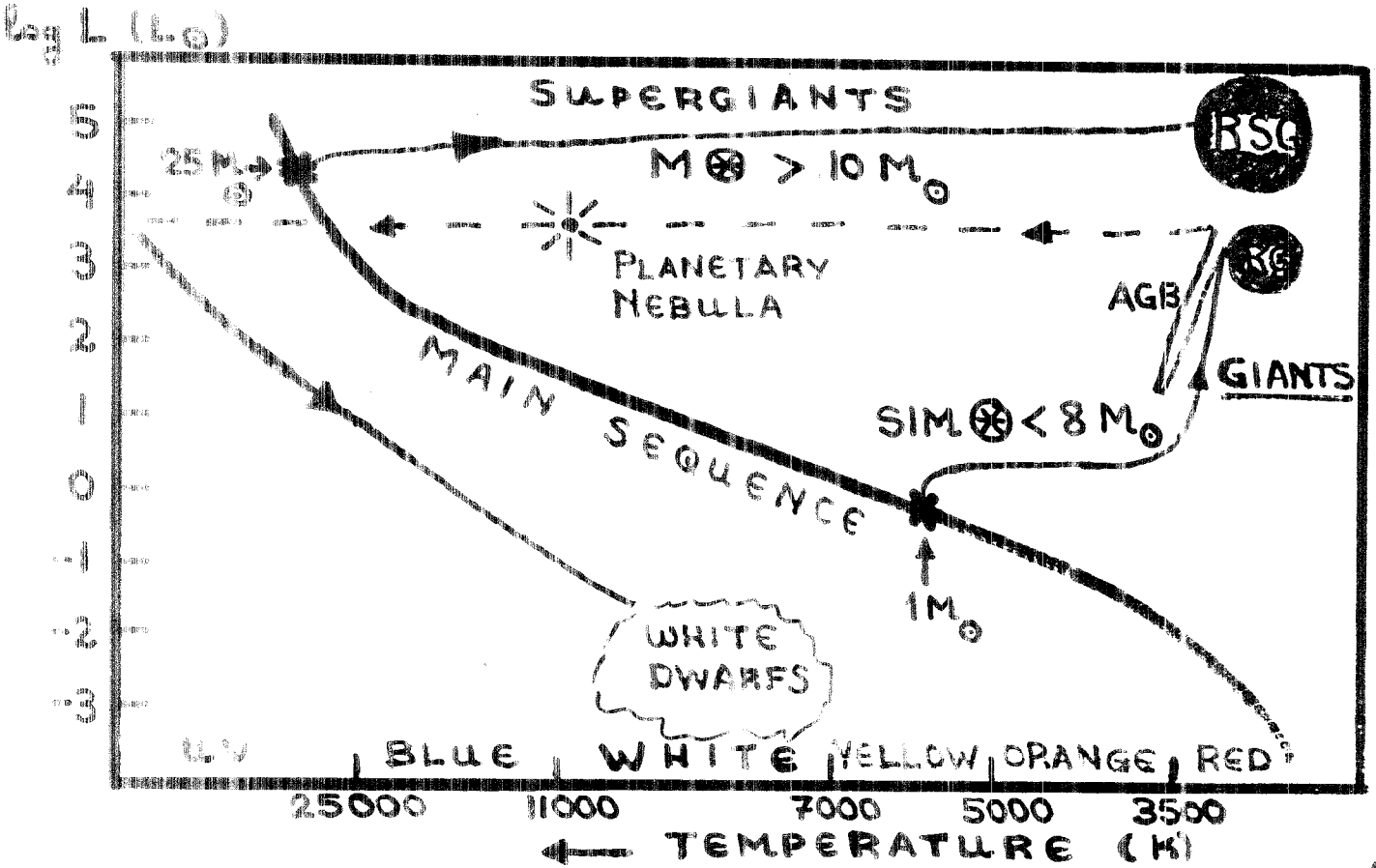
Π. Σ. Ι. :  $\rho_{OH} (\alpha + \beta) = \rho_{OH} (\gamma + \delta)$   
 $\alpha + \beta \rightleftharpoons \gamma + \delta$

ΟΧΙ ΟΜΩΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΣΘΕΝΕΙΣ (ΠΡΟΣΛΗΨΗ  $e^-$ )  
 ΠΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΥΝ ΤΟ ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

$$\eta = \frac{N - Z}{N + Z}$$

Π. Σ. Ι. :  $X = f(T, \rho, \eta)$

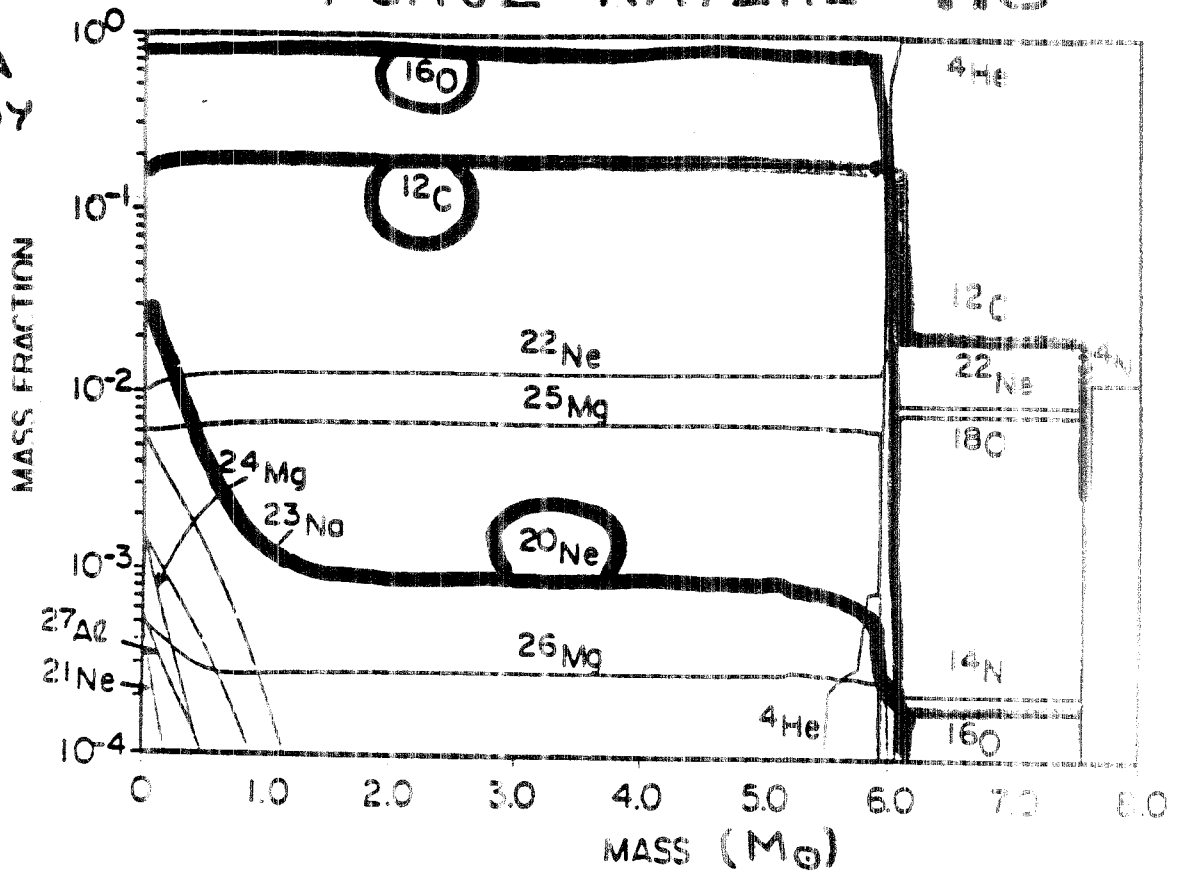
# STELLAR EVOLUTION AND NUCLEOSYNTHESIS



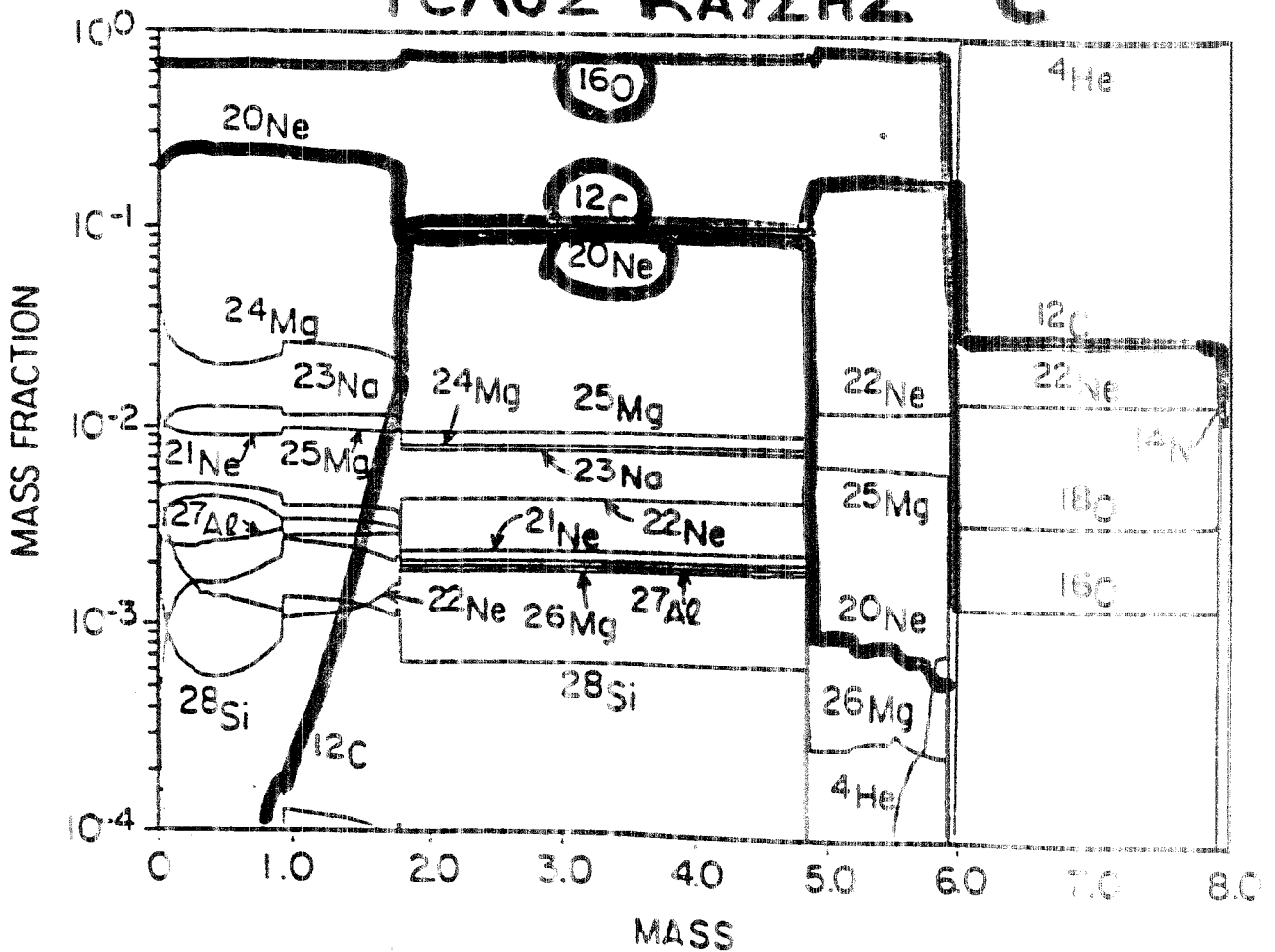
# ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΣΤΡΟΥ

## ΤΕΛΟΣ ΚΑΥΣΗΣ He

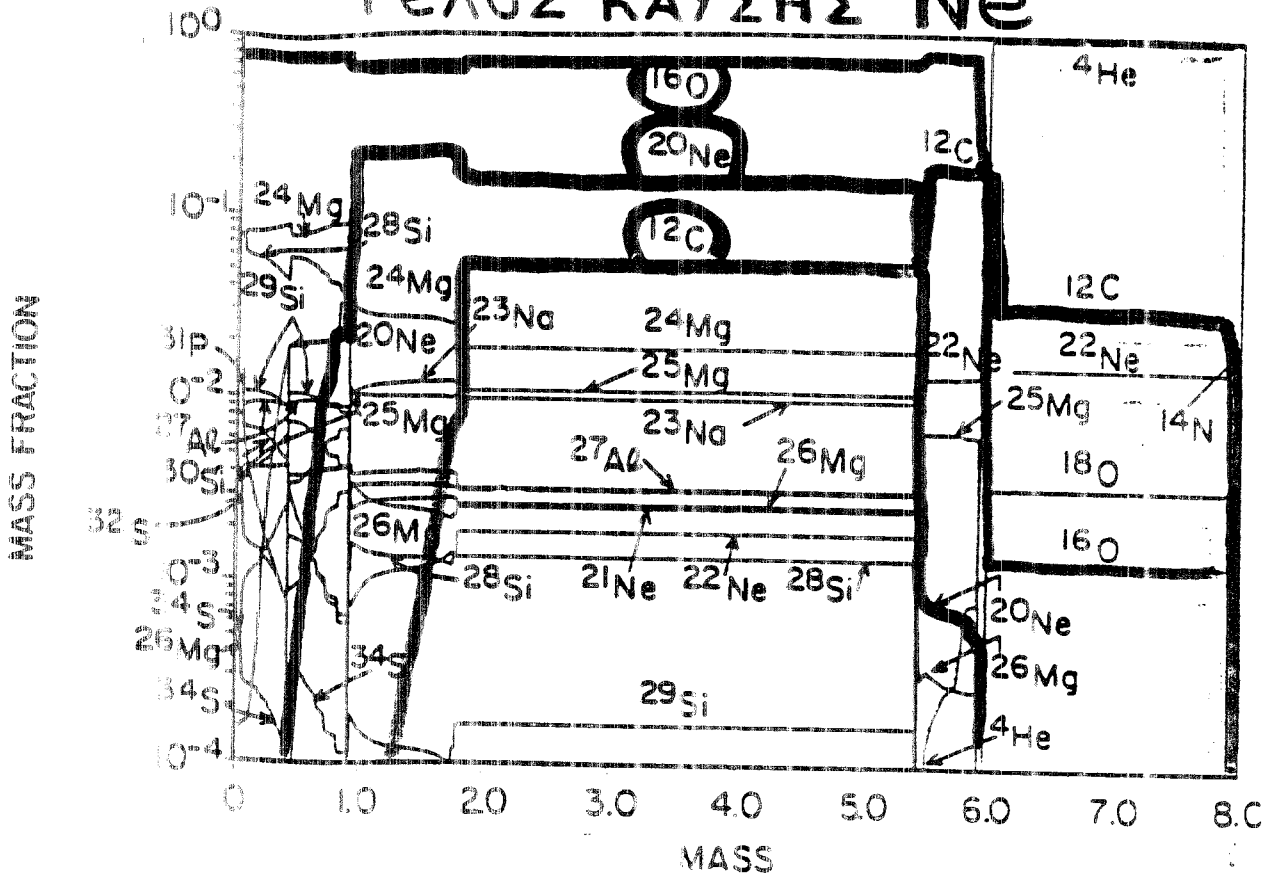
ΙΟΣΟΤΗΤΑ  
ΕΤΟΙΧΕΙΟΥ



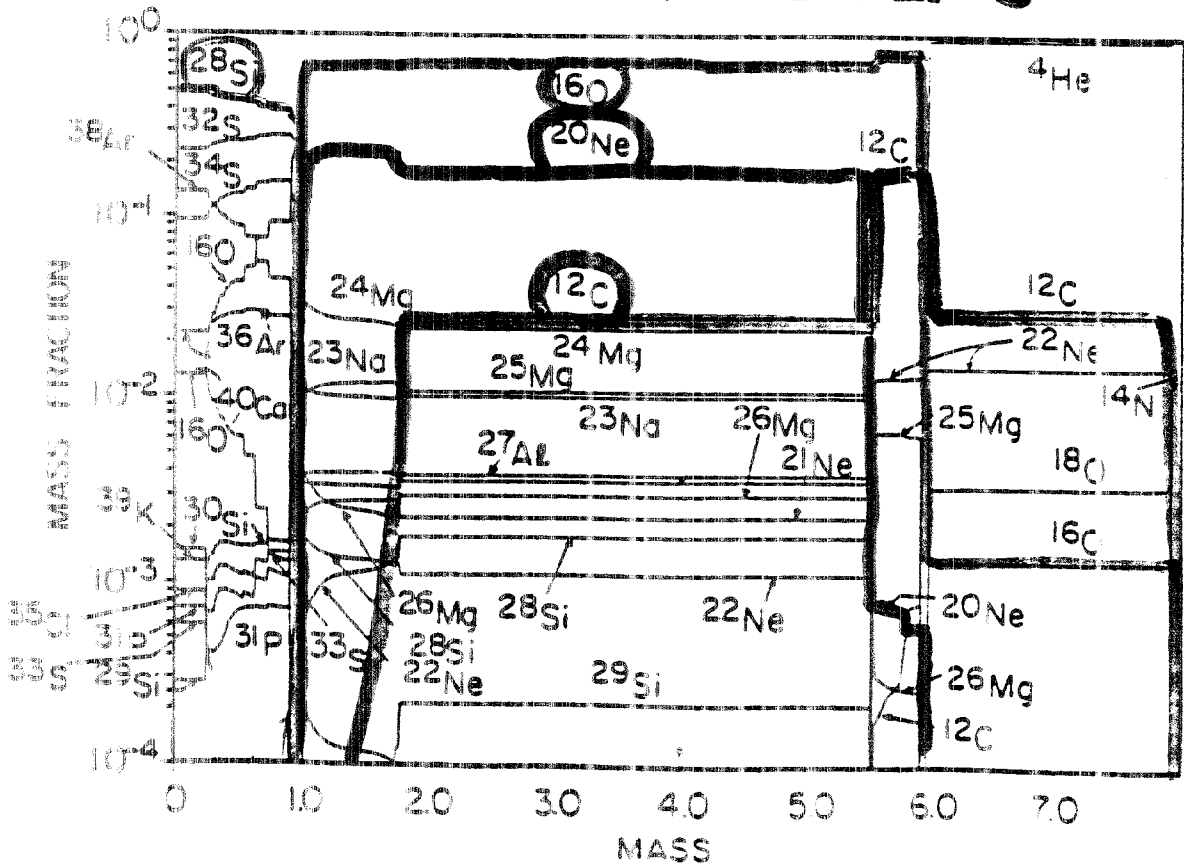
## ΤΕΛΟΣ ΚΑΥΣΗΣ C



# ΤΕΛΟΣ ΚΑΥΣΗΣ Ne



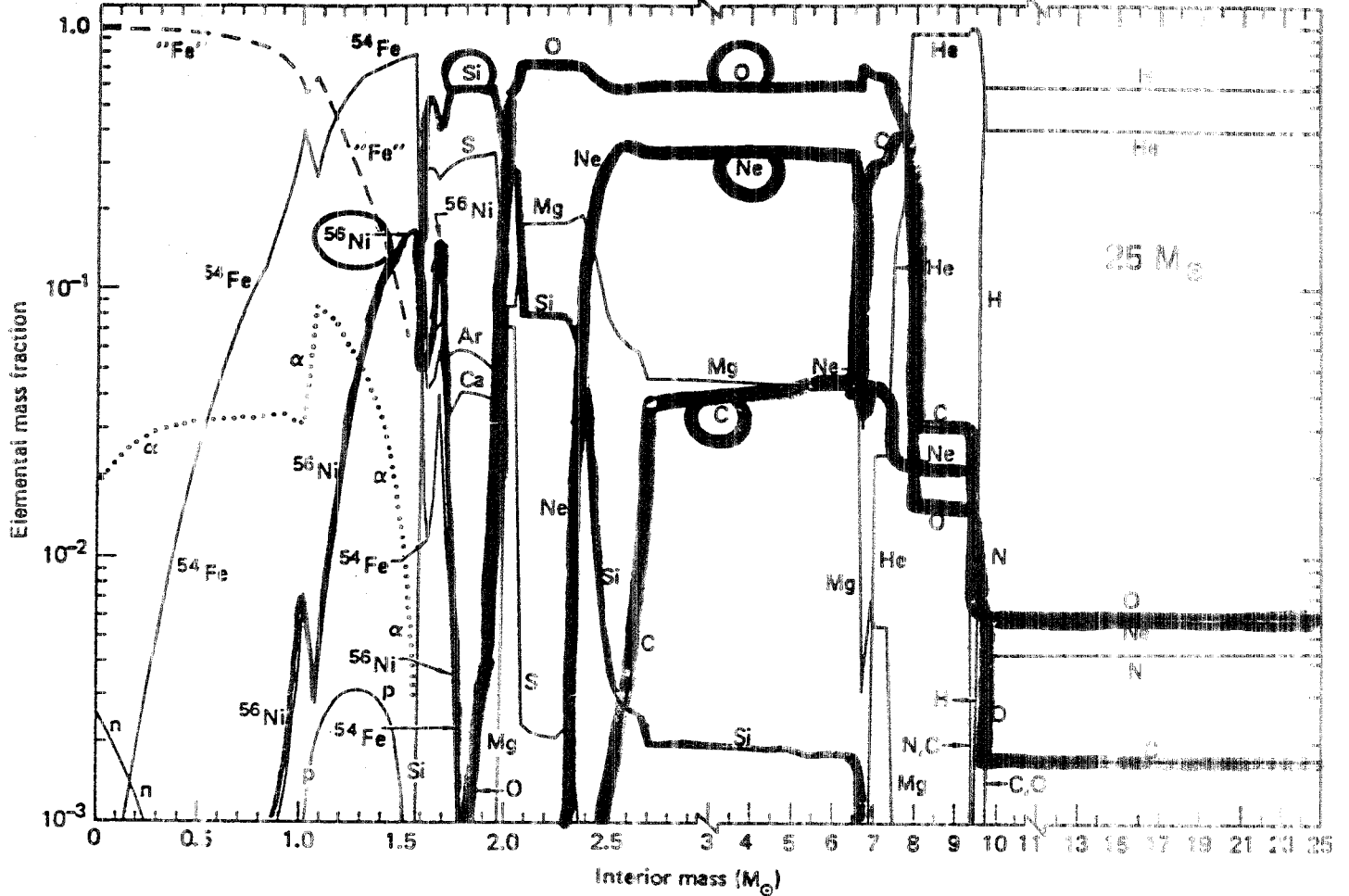
# ΤΕΛΟΣ ΚΑΥΣΗΣ O



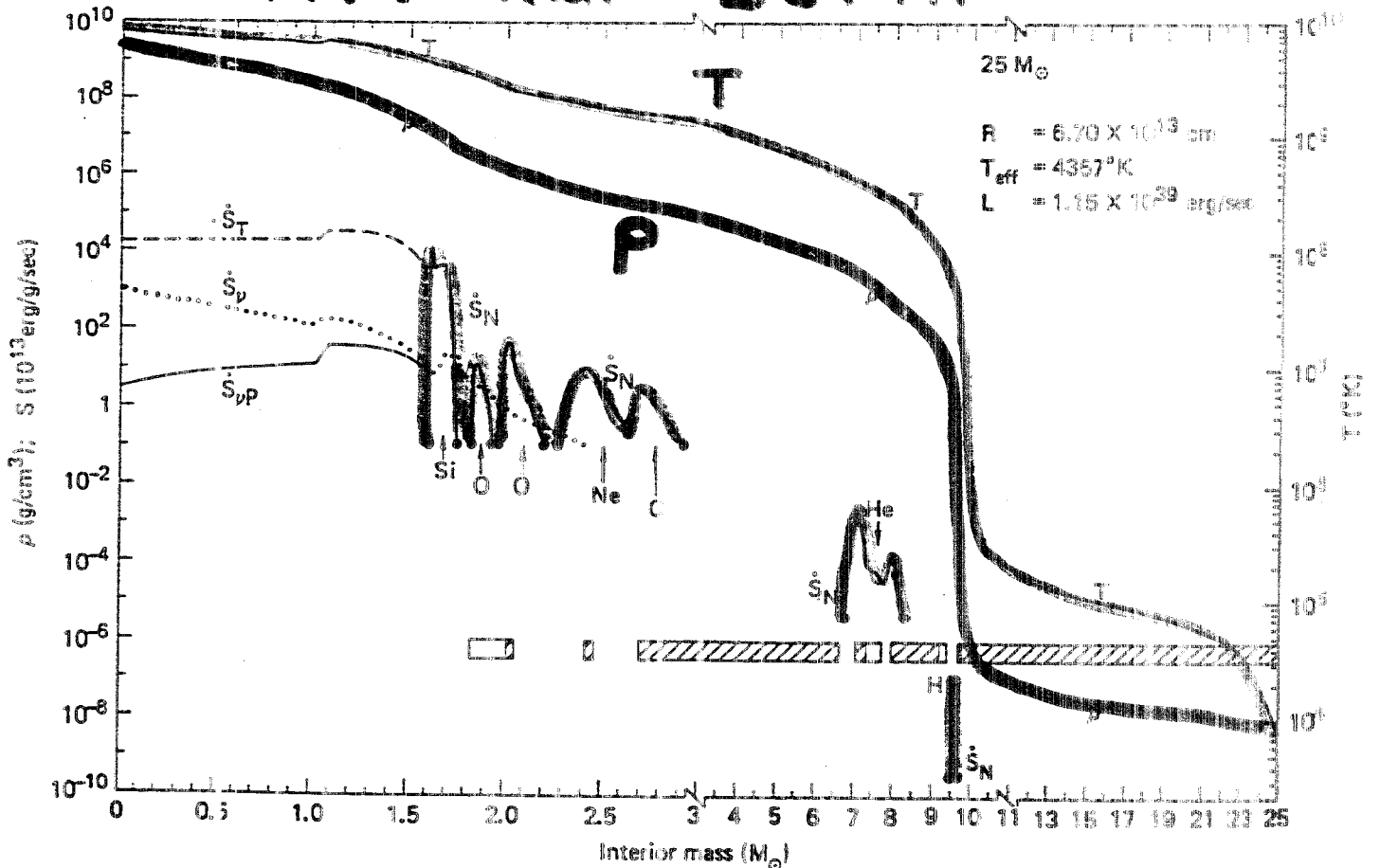


# ΑΣΤΡΟ ΠΡΟ - ΣΟΥΠΕΡΝΟΒΑ

## ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ...

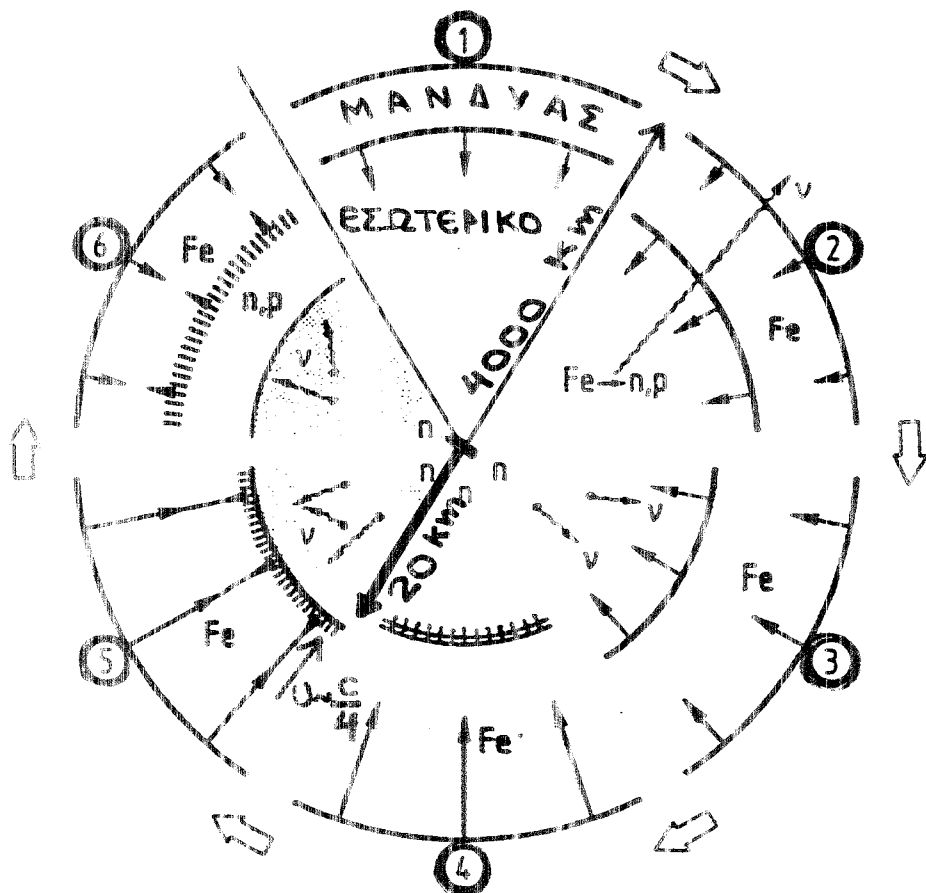


## ... ΚΑΙ ΔΟΜΗ



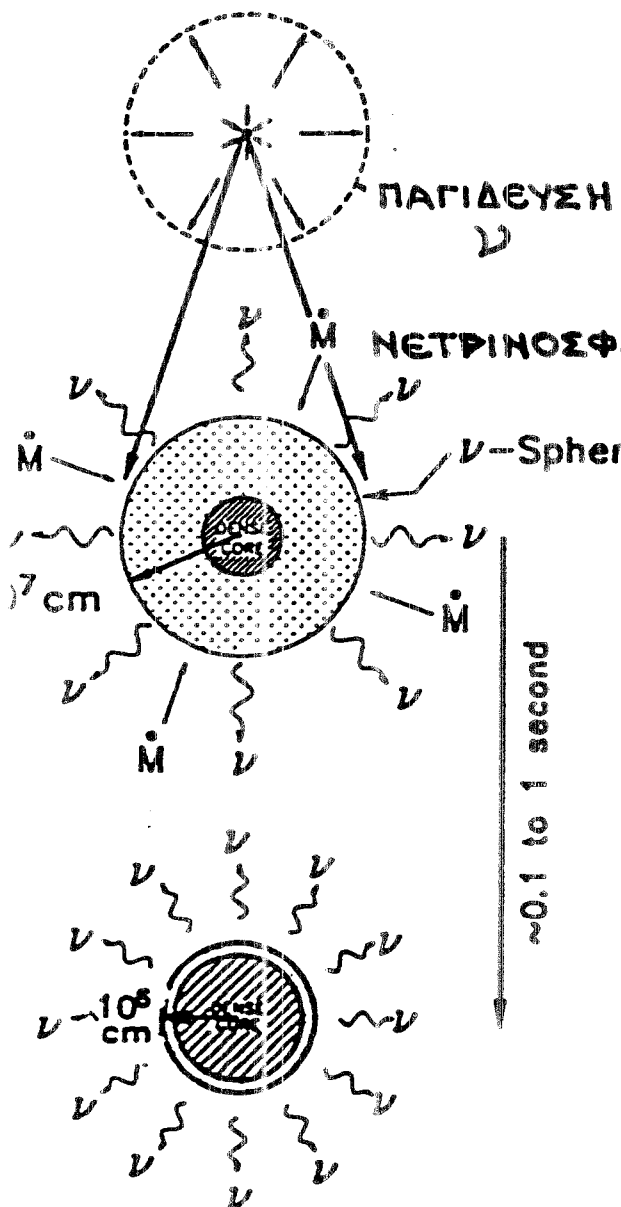
# ΕΚΦΡΑΣΗ ΣΟΥΠΕΡΝΟΒΑ SNII

ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ ΤΗΣ ΣΙΔΕΡΕΝΙΑΣ ΚΑΡΔΙΑΣ ΕΝΟΣ ΑΣΤΡΟΥ

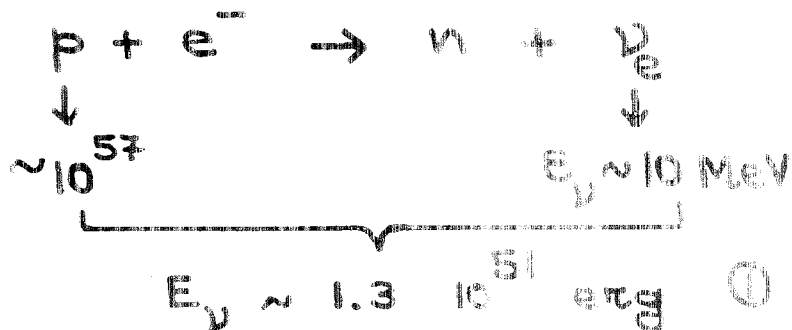


- ① ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ( $\sim 0.8 M_{\odot}$ )
  - ②  $T > 5 \cdot 10^9 \text{ K} : {}^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13 \alpha$   
 $\rho > 10^9 \text{ g/cm}^3 : p + e^- \rightarrow n + \nu \quad (Z, A) + e^- \rightarrow (Z-1, A)$
  - ③  $\rho > 10^{11} \text{ g/cm}^3 : \text{ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ } \nu \quad \left( \frac{t(\nu)}{\text{ΣΚΕΔΑΣΗΣ}} > t_{\text{ΚΑΤΑΡΕΥΣΗΣ}} \right)$   
 $p + e^- \rightleftharpoons n + \nu$
  - ④  $\rho > 2 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$  ΔΙΑΚΟΠΗ ΚΑΤΑΡΕΥΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ  
 (ΑΕΡΙΟ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΩΝ N.R. ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΟ)  
 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΡΟΥΣΗΣ  
 (ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $\sim 10^{51} \text{ erg}$ )
  - ⑤ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΡΕΟΝΤΟΣ ΜΑΝΔΥΛΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΣΚΛΗΡΟ  
 ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ (ΠΡΟ-ΑΣΤΡΟ ΝΕΥΤΡΟΝΙΩΝ)
  - ⑥ ΑΝΑΔΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΑΤΑΡΕΟΝΤΑ  
 ΜΑΝΔΥΛΑ. ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ( $\gamma + \text{Fe}$ ):  $\sim 10^{51} \text{ erg} / 0.1 M_{\odot}$
- ΑΝ ΤΟ ΚΥΜΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΔΙΑΣΧΙΣΕΙ ΤΟΝ ΜΑΝΔΥΛΑ : ΕΚΦΡΑΣΗ  
 ΑΝ ΟΧΙ : ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ ΣΕ ΜΑΥΡΗ ΤΡΥΠΑ

# ΕΚΠΟΜΠΗ $\nu$ ΑΠΟ $SNI$



① ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ: ΝΕΤΡΟΝΟΠΟΙΗΣΗ



② ΟΤΑΝ ΤΟ ΚΥΜΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΤΥΠΑ ΤΗ ΝΕΤΡΙΝΟΣΦΑΙΡΑ: ΠΑΛΜΟΣ  $\nu$



$$\tau_{\text{ΠΑΛΜΟΥ}} \sim 1 \text{ ms}, \quad \dot{E}_\nu \sim 10^{53} \text{ erg/s}$$

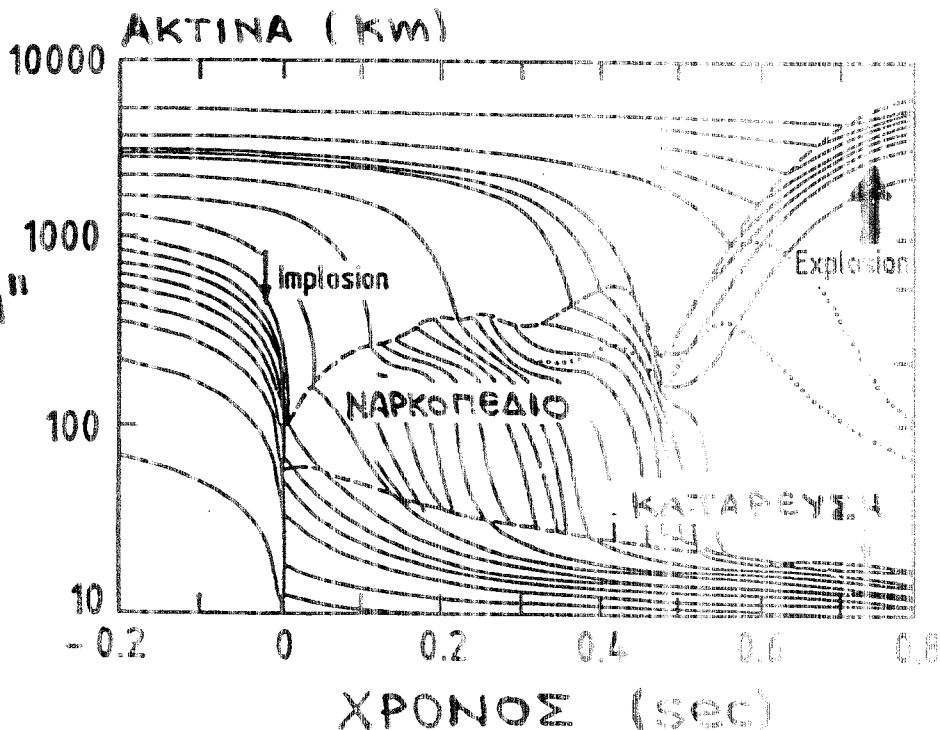
$$E_\nu = \dot{E}_\nu \times \tau \sim 10^{50} \text{ erg}$$
 ②

③ ΤΟ ΠΡΟ-ΑΣΤΡΟ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΨΥΧΕΤΑΙ ΕΚΠΕΜΠΟΝΤΑΣ  $\nu - \bar{\nu}$  ΤΗΝ ΔΕΣΜΙΚΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

$$E_B \sim \frac{GM^2}{R} \quad (M \sim 1 M_\odot, R \sim 10 \text{ km})$$

$$E_\nu \sim 0.99 E_B \sim 2 \cdot 10^{52} \text{ erg}$$
 ③

ΤΑ  $\nu$  ③ ΘΑ  
 ΥΠΟΡΟΥΣΑΝ ΝΑ  
 ΒΟΗΘΗΣΟΥΝ ΜΙΑ  
 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΜΕΝΗ ΕΚΡΗΞΗ"  
 ΤΟΥ ΣΟΥΠΕΡΝΟΒΑ  
 ΕΠΡΩΧΝΟΝΤΑΣ" ΜΕ  
 $E \sim 0.01 E_\nu$   
 ΤΟΝ ΜΑΝΔΥΑ Fe



# ΣΚΗΝΟΤΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ ΣΕ ΣΙΝΔ

ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΚΥΜΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΤΥΠΑ ΔΙΑΔΟΧΙΚΑ ΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΣΤΡΟΥ, ΤΑ ΘΕΡΜΑΙΝΕΙ

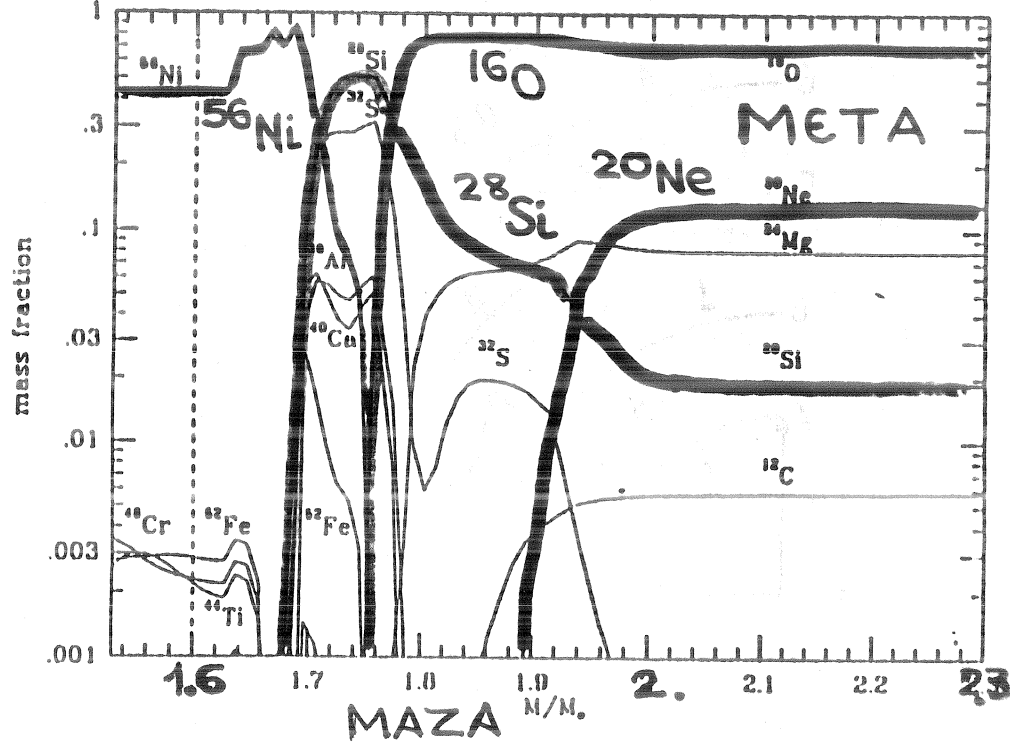
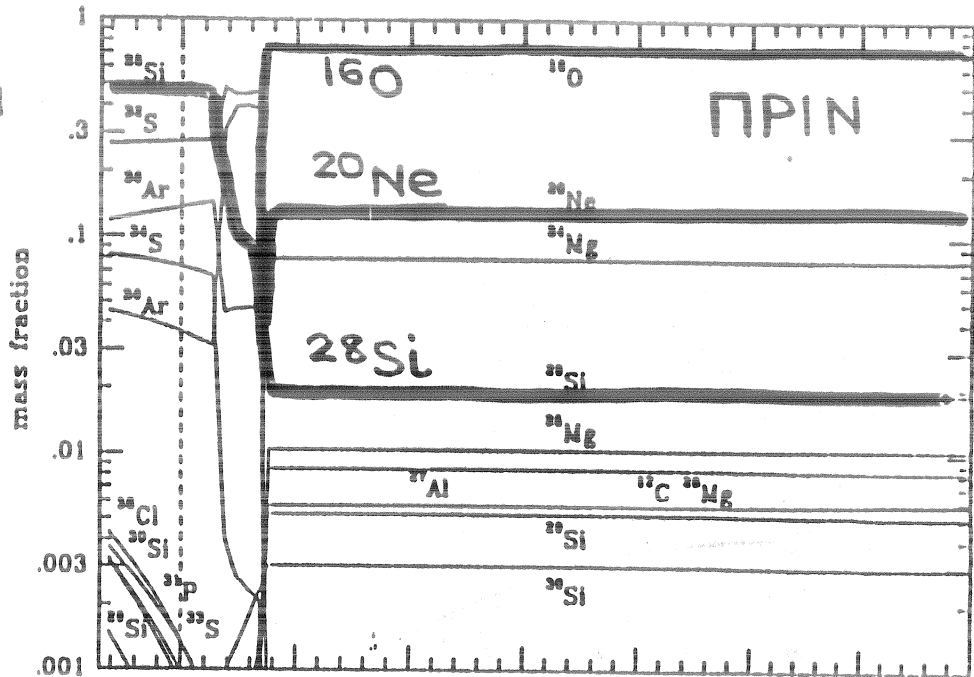
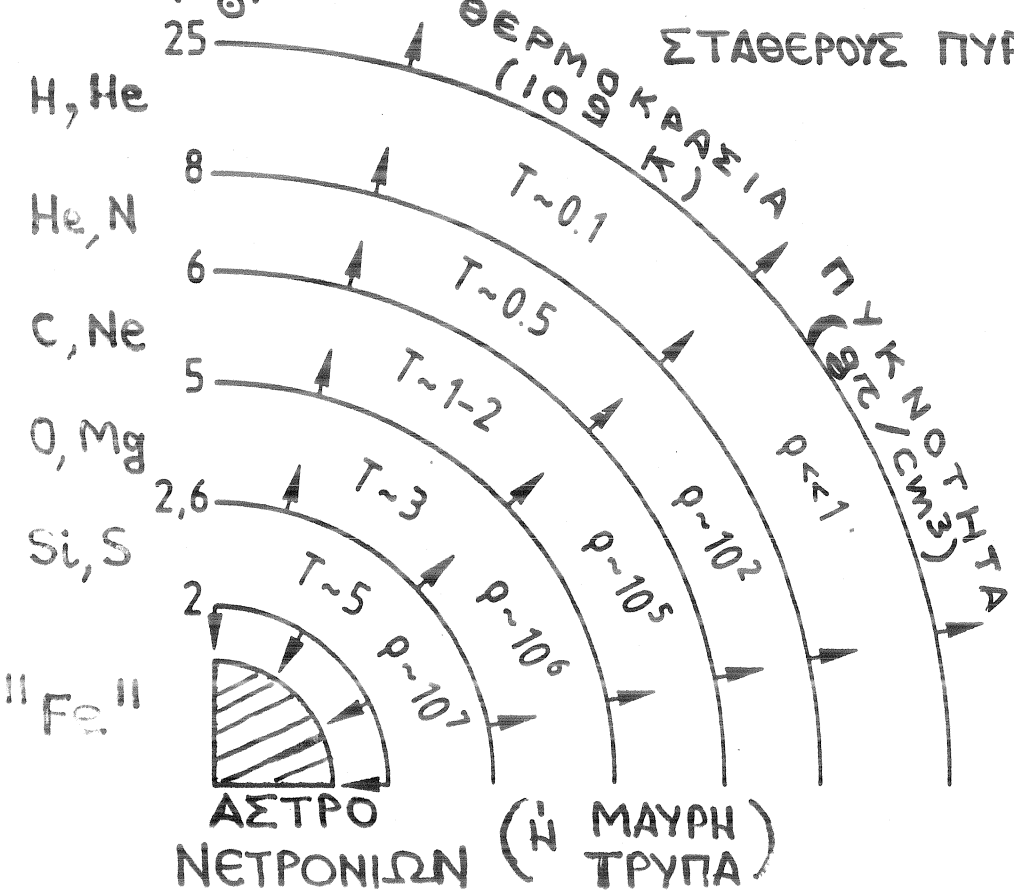
$$\Sigma \epsilon: T_{\max} \sim \left( \frac{3 E_0}{4 \pi a R^3} \right)^{1/4}$$

ΣΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ (Si, O, Ne, C) :  
ΣΥΝΤΟΜΗ (~ SEC) ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ

ΜΑΖΑ ( $M_{\odot}$ )

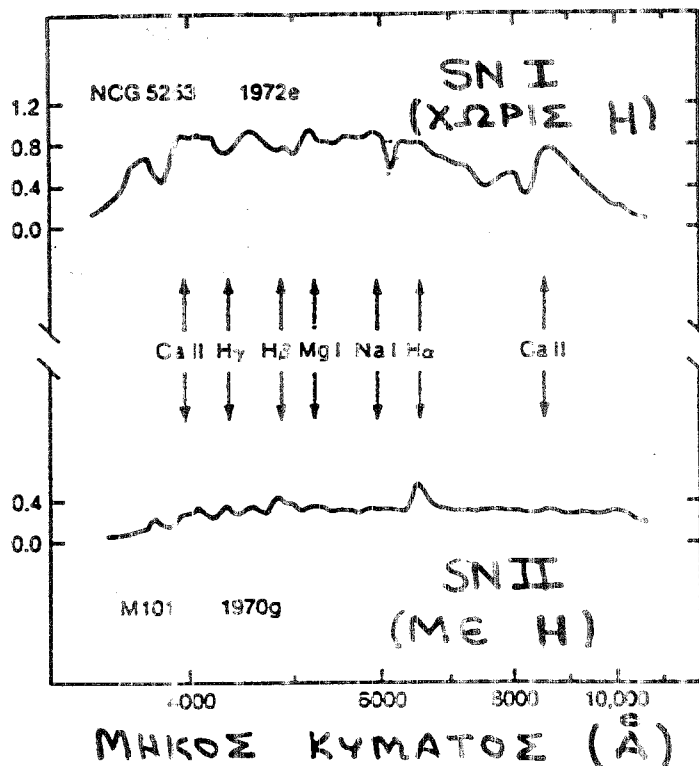
ΠΑΡΑΓΕΙ ΛΙΓΟΤΕΡΟ

ΣΤΑΘΕΡΟΥΣ ΠΥΡΗΝΕΣ

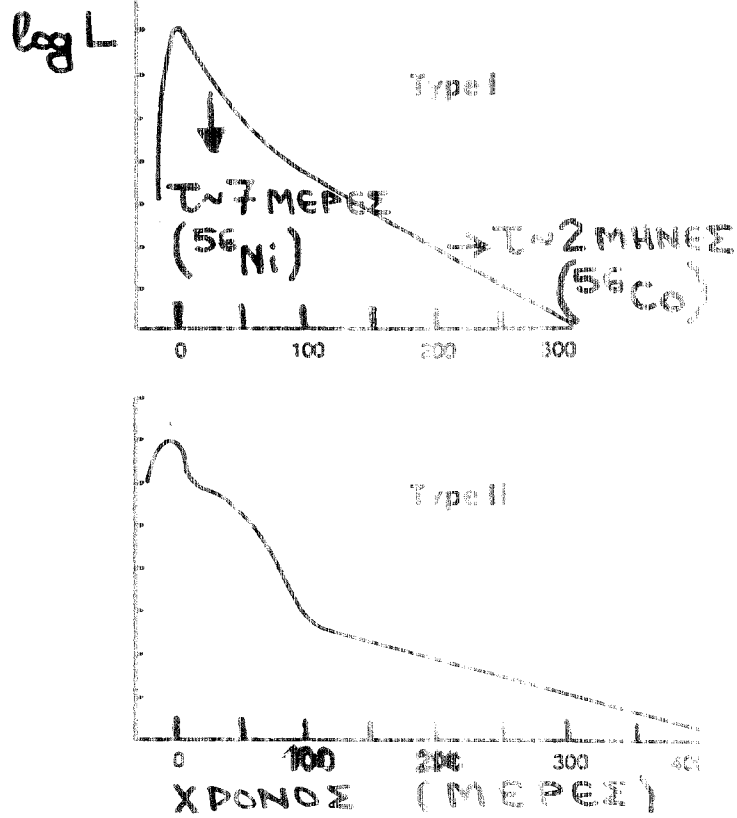


# ΣΟΥΠΕΡΝΟΒΑ (SN)

## ΦΑΣΜΑ



## ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑΣ



- $E_{\text{ΦΩΤ}} \sim 10^{49} \text{ erg}$      •  $E_{\text{ΚΙΝ}} \sim 10^{51} \text{ erg}$

- SN II : ΜΟΝΟ ΣΕ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΙΣ ΓΑΛΑΞΙΕΣ (~ 20% ΑΕΡΙΟ)  
→ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΣΤΡΩΝ (ΜΕΓΑΛΑ = ΒΡΑΧΥΒΙΑ)
- SN I : ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΙΣ + ΕΛΕΙΠΤΙΚΟΙ (~ 0% ΑΕΡΙΟ)  
→ ΜΟΝΟ ΓΕΡΙΚΑ (= ΜΙΚΡΑ) ΑΣΤΡΑ

## ΜΟΝΤΕΛΑ

- SN II : ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ ΕΝΟΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΣΤΡΟΥ  
ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $E_B \sim \frac{GM^2}{R} \sim 10^{53} \text{ erg}$  OK  
( $M \sim 1 M_{\odot}$ ,  $R \sim 10 \text{ km}$ )
- SN Ia : ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΠΥΡΗΝΙΚΗ ΚΑΥΣΗ ΕΝΟΣ ΑΣΤΡΟΥ ΝΑΝΟΥ  
ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $E \sim \begin{matrix} 3 \cdot 10^{51} \text{ ergs} & (\text{Ne} \rightarrow \text{Fe}) \\ 1 \cdot 10^{51} \text{ ergs} & (\text{C} \rightarrow \text{Fe}) \end{matrix}$   
( $M \sim 1 M_{\odot}$ )

# SNI



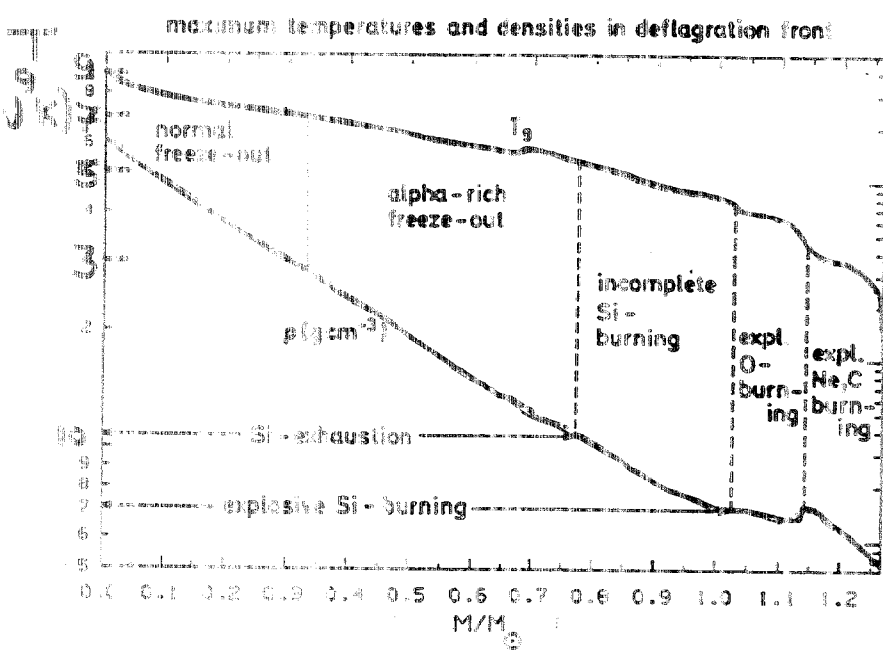
ΔΙΠΛΟ ΑΣΤΡΟ : ΑΠΟΡΟΦΗ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΞΥΝΟΔΟΥ  
 ΠΑΝΩ ΣΤΟΝ ΑΣΤΡΟ ΝΑΝΟ  $M_1 > M_2 \rightarrow$  ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ  
 ΑΝ  $C_H$

$T_c \sim 4 \cdot 10^8 \text{ K}$   
 $\rho_c \sim 10^9 \text{ g/cm}^3$

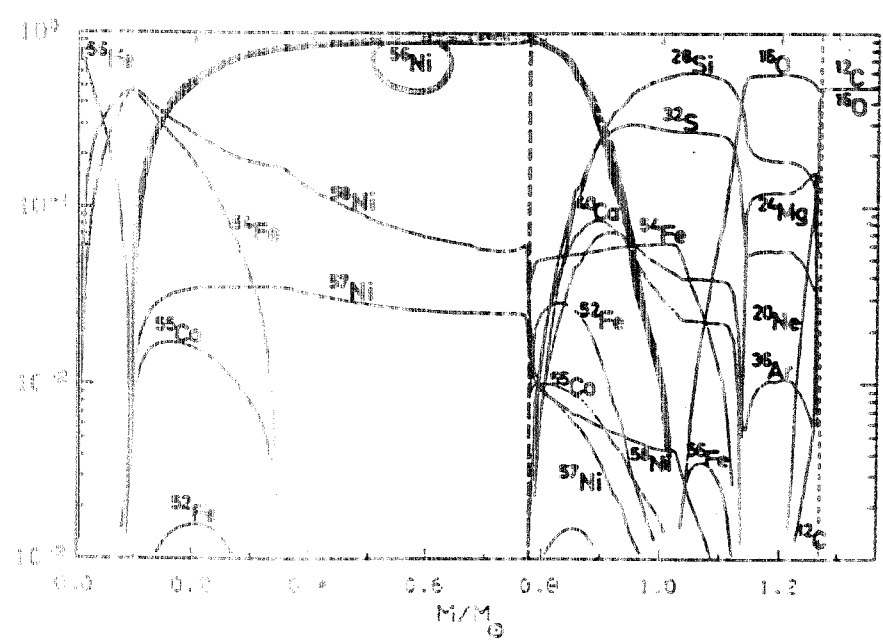
ΑΝΑΦΛΕΞΗ C (ΧΑΜΗΛΗ T, ΛΟΓΩ SCREENING EFFECT)  
 ΕΚΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ :  $\dot{E} \propto T^V \Rightarrow T \uparrow$

ΑΙΟΝΙΚΟ ΑΕΡΙΟ :  $P \propto \rho T$   $T \uparrow \Rightarrow P \uparrow \Rightarrow$  ΔΙΑΣΤΟΛΗ  $\Rightarrow T \downarrow, \dot{E} \downarrow$   
 (ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΗΣ)  
 ΚΡΥΑΛΙΜΕΝΟ ΑΕΡΙΟ :  $P \propto \rho^K$   $T \uparrow \Rightarrow P \sim \text{const.} \Rightarrow \dot{E} \uparrow \Rightarrow T \uparrow \dots$

$\rightarrow$  ΘΕΡΜΟΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΚΡΗΞΗ

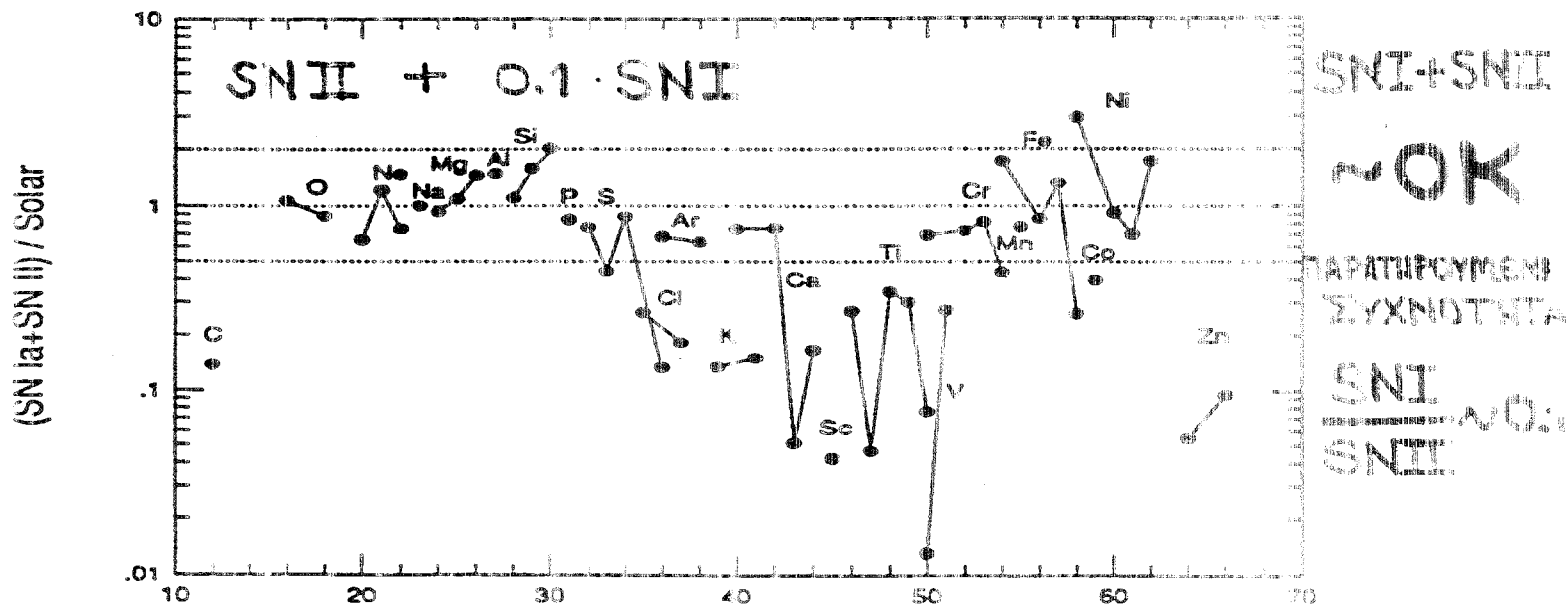
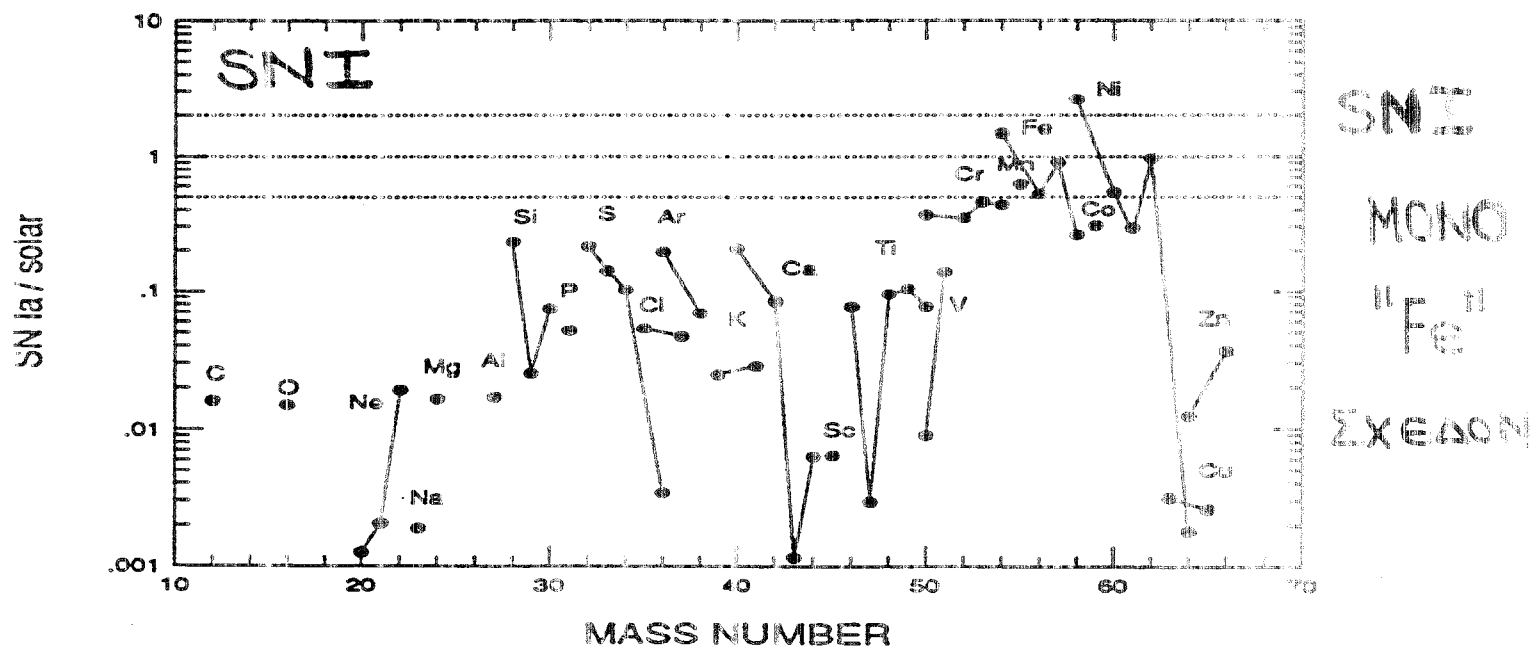
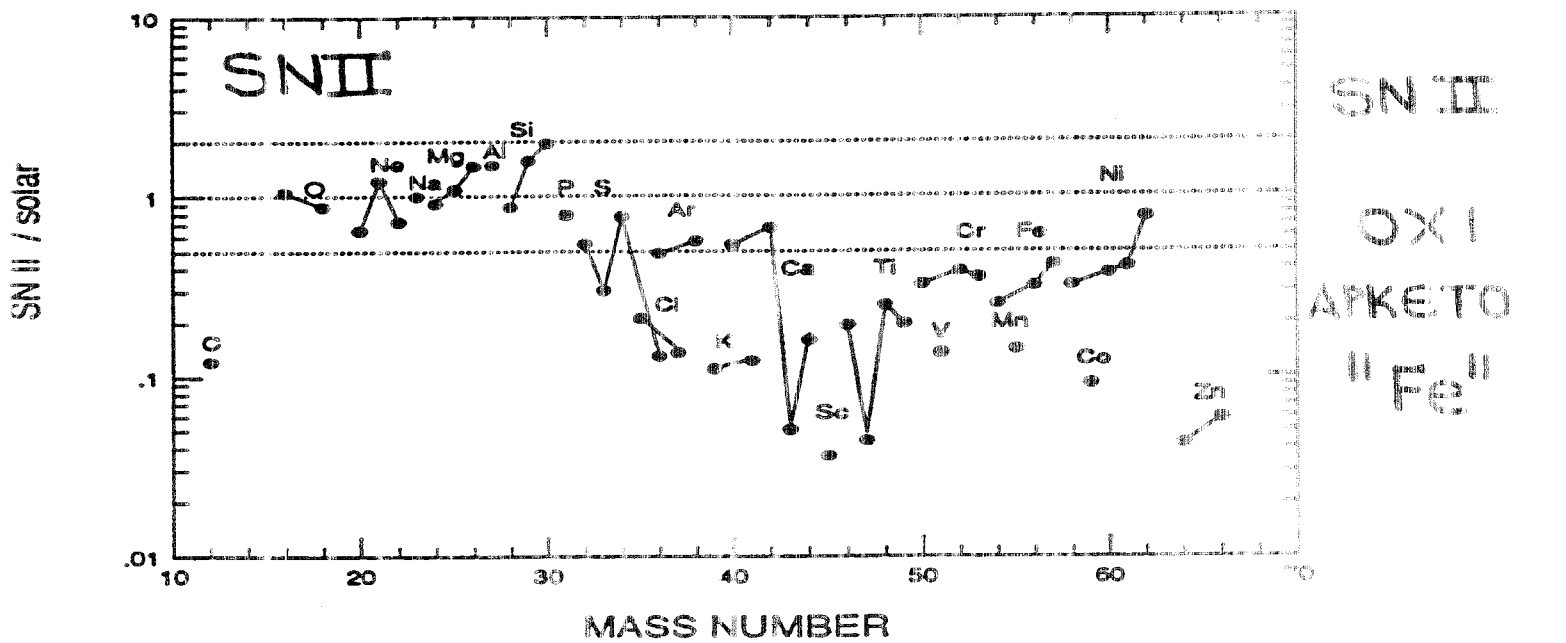


$\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ )  
 ΤΟ ΜΕΤΩΓΙΟ ΚΑΥΣΗΣ  
 ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΡΟΣ ΤΗΝ  
 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕ  
 $U \sim 10^3 \text{ km/s}$   
 ΑΝ  $U < U_{\text{ΗΧΟΥ}}$   $\Rightarrow$   
 ΝΤΟ ΜΙΣΟ ΑΣΤΡΟ  
 "ΚΑΙΓΕΤΑΙ" ΣΕ Π.Σ.Ι.



$\sim 0.7 M_{\odot}$   $^{56}\text{Ni}$   
 Η ΑΛΥΣΙΔΑ  
 $^{56}\text{Ni} \xrightarrow{\sim 7 \text{ ΗΜ}} ^{56}\text{Co} \xrightarrow{\sim 2 \text{ ΜΗΝ}} ^{56}\text{Fe}$   
 ΤΡΟΦΟΔΟΤΕΙ ΤΗΝ ΨΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑ  
 ΤΩΝ SNI

# ΠΑΡΑΪΩΓΗ ΕΝΔΙΑΜΕΣΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ SN



# ΝΕΤΡΙΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ SN1987A

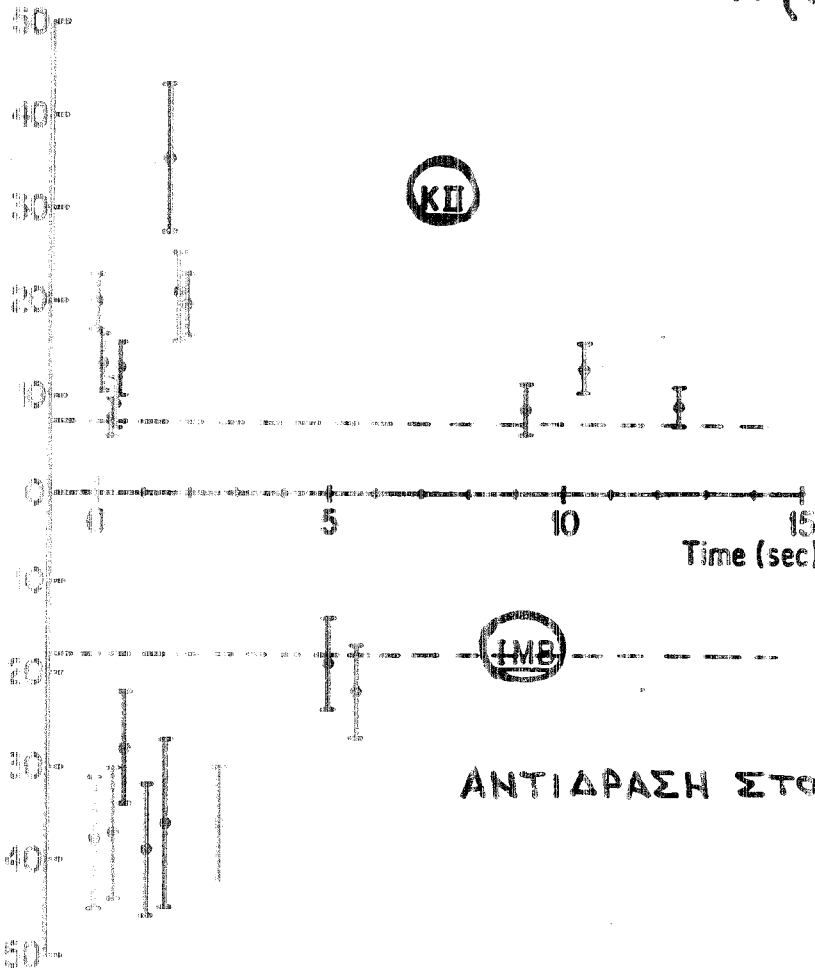
▶ ΠΡΩΤΗ ΦΟΡΑ  $\nu$  ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ (ΠΛΗΝ  $\theta$ )

▶ ΘΕΡΙΑΜΒΩΣΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ SNII

(= ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΕΥΣΗ + ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΣΤΡΟΥ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ)

▶ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΚΑΝ 2h 20' ΠΡΙΝ ΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΣΗΜΑ

= ΧΡΟΝΟΣ ΠΟΥ ΧΡΕΙΑΣΤΗΚΕ ΤΟ ΚΥΜΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΓΙΑ ΝΑ ΔΙΑΣΚΙΣΕΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΗΜΑ (H) ΤΟΥ ΑΣΤΡΟΥ



ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ	KII	IMB
ΧΩΡΑ	ΙΑΠΩΝΙΑ	ΗΠΑ
ΤΟΝΟΙ H <sub>2</sub> O	3000	6800
ΒΑΘΟΣ (m)	2700	1570
ΚΑΤΩΦΛΙ (MeV)	7	19
ΑΡΙΘΜΟΣ $\bar{\nu}$	11	8



ΡΟΗ ΝΕΤΡΙΝΩΝ:  $F = 5 \pm 2.5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \rightarrow$

ΣΤΗΝ ΠΗΓΗ (D=150000 Ε.Φ.):  $N_\nu \sim 4\pi D^2 F \sim 10^{58} \nu - \bar{\nu}$

ΦΑΣΜΑ ΜΑΥΡΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ:  $T_{\bar{\nu}_e} (\nu\text{-ΣΦΑΙΡΑ}) \sim 4 \text{ MeV}$ ,  $T_{\text{ΚΕΝΤΡΟ}} \sim 30 \text{ MeV}$   
 $\sim 3 \cdot 10^{11} \text{ K}$

$\langle E_{\nu_e} \rangle \sim 12 \text{ MeV} \rightarrow$  ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ  $E_\nu = N_\nu \langle E_{\nu_e} \rangle \sim 2 \cdot 10^{53} \text{ erg}$

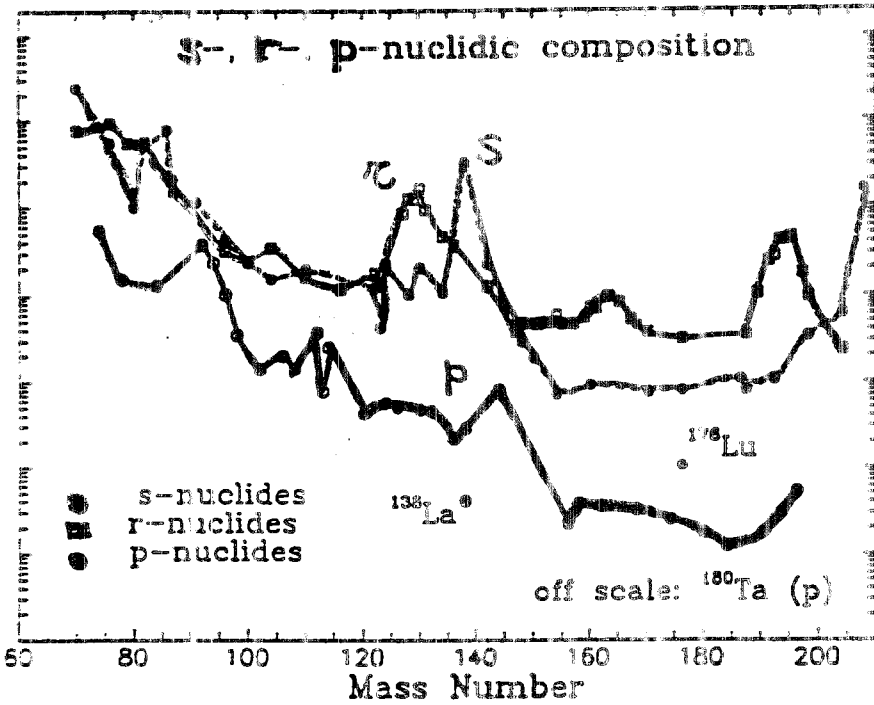
ΑΚΤΙΝΑ ΝΕΤΡΙΝΟΣΦΑΙΡΑΣ:  $R \sim \left( \frac{E_\nu}{4\pi T_\nu^4} \right)^{1/2} = (30 \pm 20) \text{ km}$

ΜΑΖΑ:  $M \sim \left( \frac{E_\nu R}{G} \right)^{1/2} = (1.45 \pm 0.20) M_\odot$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΑΤΟΣ



# ΤΑ ΒΑΡΕΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (A > 65)

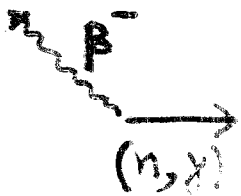


ΟΧΙ ΜΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ  
ΘΕΡΜΟΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ  
(ΥΠΛΟ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΦΡΑΓΜΑ)

ΠΡΟΣΛΗΨΗ  
ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

ΑΠΟ ΠΥΡΗΝΕΣ ΗΔΗ  
ΥΠΑΡΧΟΝΤΕΣ ΣΕ ΑΦΘΟΝΙΑ  
(56 Fe)

## ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ :



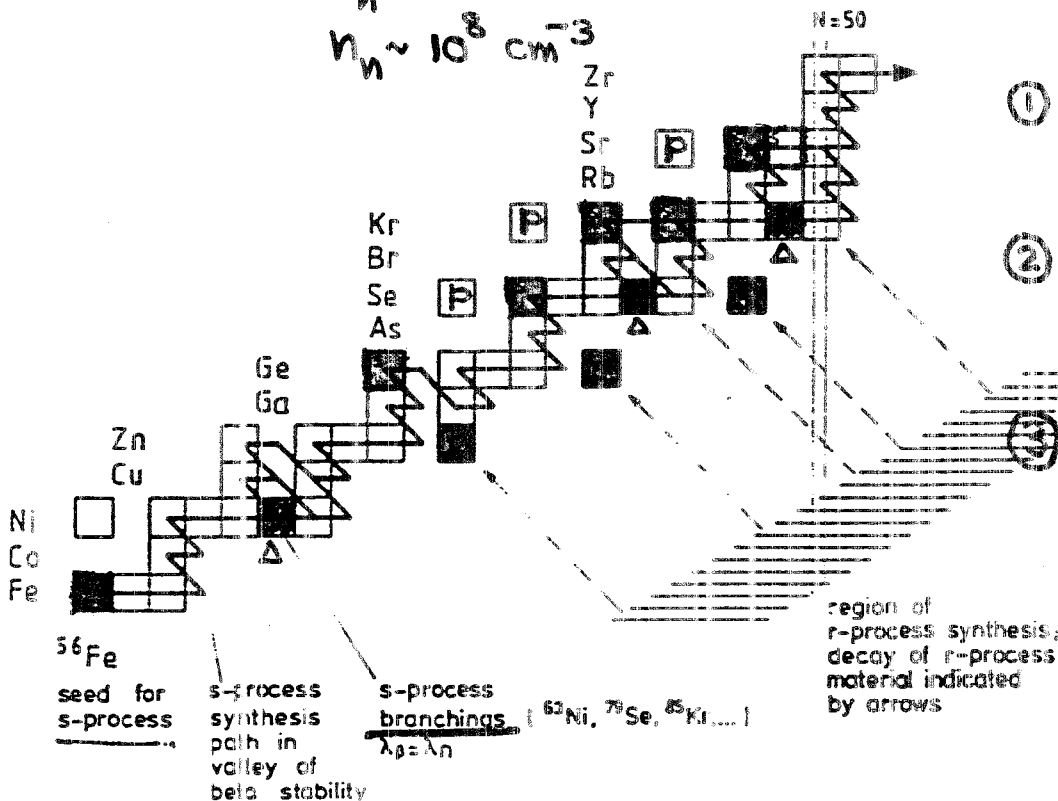
ΔΙΑΣΠΑΣΗ  $\beta^-$  :  $\lambda_\beta$  (s<sup>-1</sup>)

ΠΡΟΣΛΗΨΗ n :  $\lambda_n = \sigma_n v_n n_n$  (s<sup>-1</sup>)

$\sigma_n \sim 10 - 1000 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$

$v_n \sim 3 \cdot 10^8 \text{ cm s}^{-1}$

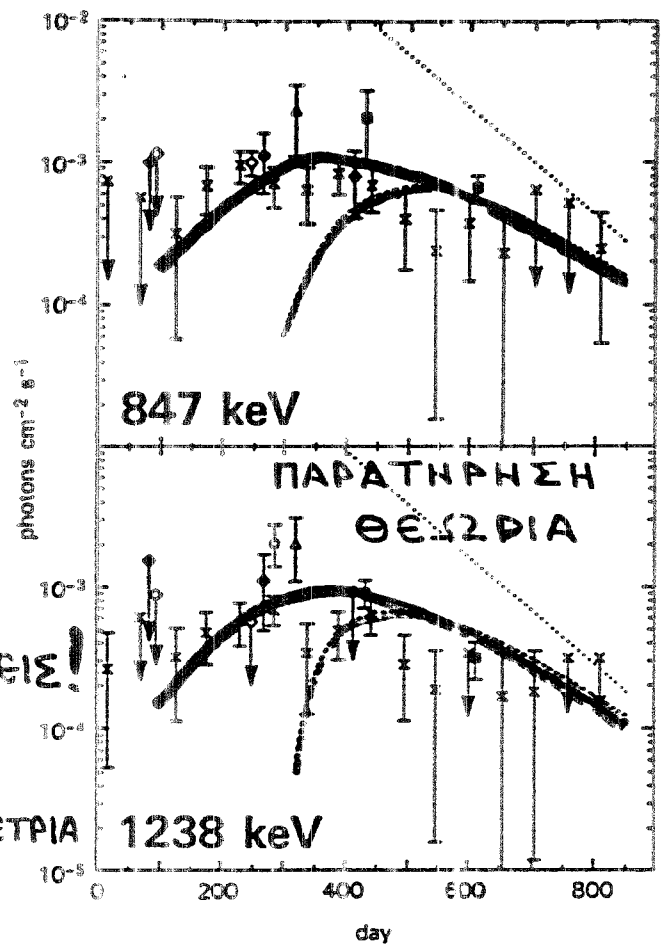
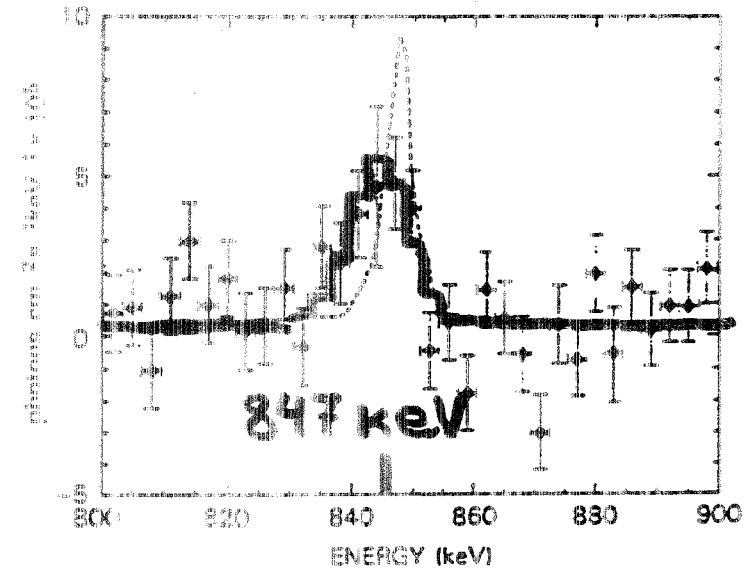
$n_n \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$



ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ  
S (SLOW)  
r (RAPID)

# ΑΚΤΙΝΕΣ $\gamma$ ΑΠΟ ΤΟΝ SNI987A

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΟΙ Β7 : ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ 847, 1238 keV ( $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ )  
 ΘΡΙΑΜΒΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗΣ



16 ΜΗΝΕΣ ΝΩΡΙΤΕΡΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ!

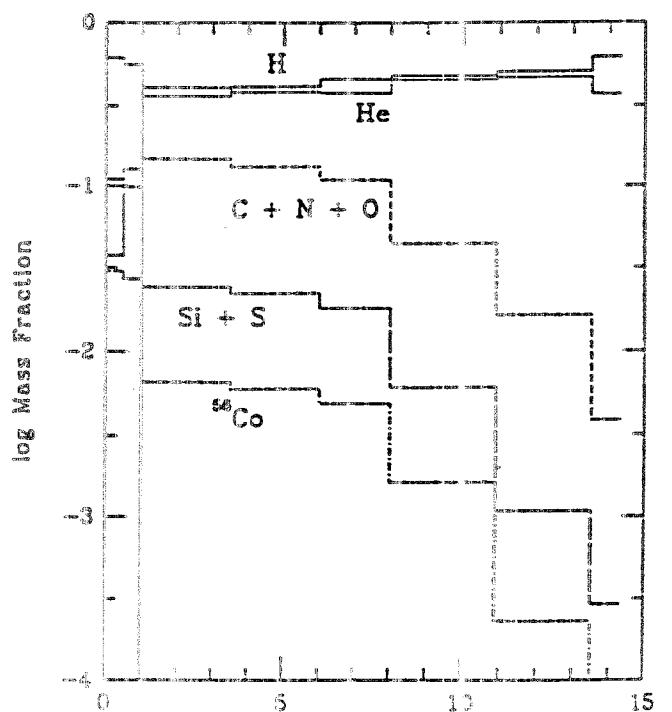
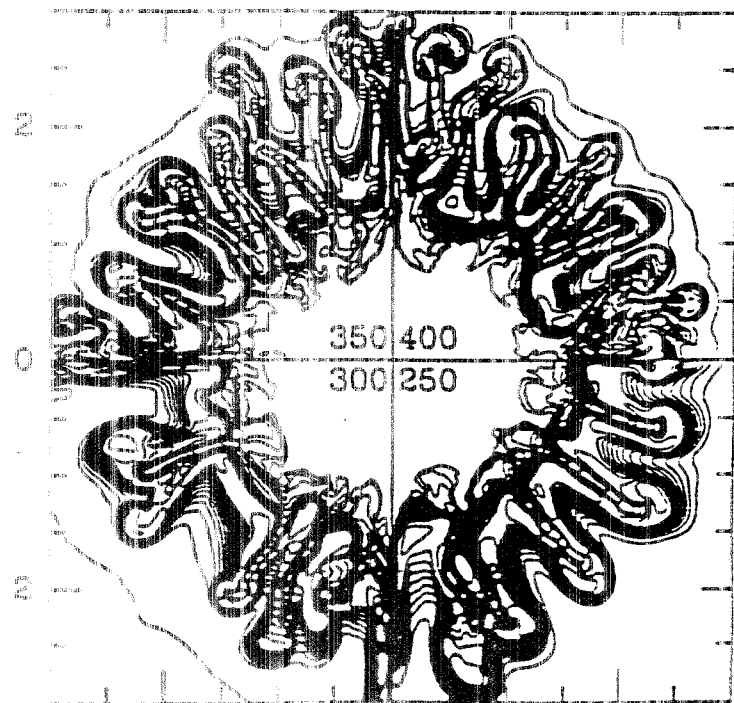


Η ΕΚΡΗΞΗ ΠΑΡΑΒΙΑΣΕ ΤΗΝ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ

ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΣΤΑΘΕΙΕΣ

ΠΡΟΚΑΤΕΨΑΝ ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ SN

ΜΕΤΑΦΕΡΟΝΤΑΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ  $^{56}\text{Co}$  ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ



# Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ S

ΑΝΤΙ-ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ

$$\sigma_A \uparrow \leftrightarrow \chi_A \downarrow$$

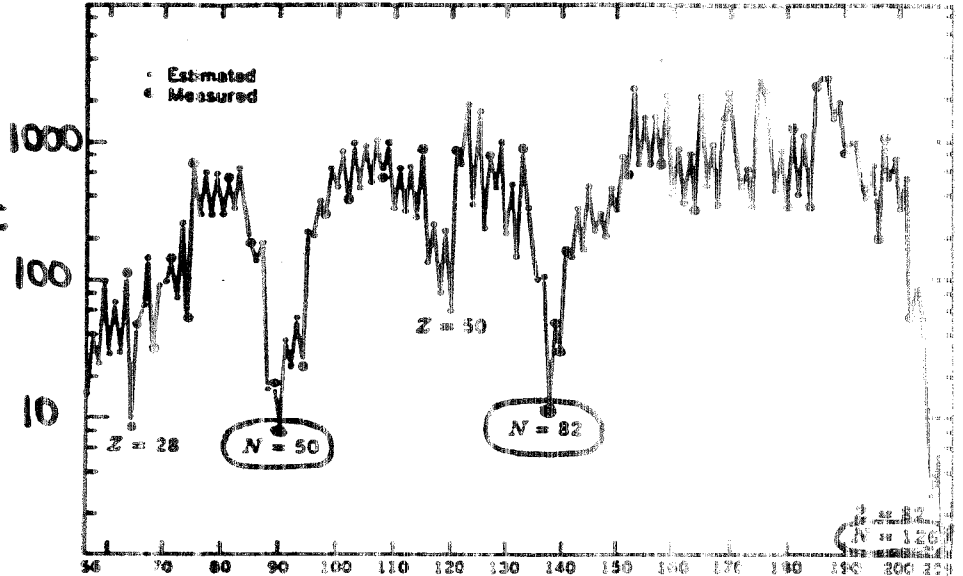
ΔΙΑΙΤΕΡΑ ΣΤΟΥΣ ΠΥΡΗΝΕΣ

ΜΕ "ΜΑΓΙΚΟ" ΑΡΙΘΜΟ

ΝΕΥΤΡΟΝΙΩΝ

$$(N = 50, 82, 126)$$

$$\sigma \text{ (mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2)$$



ΚΛΑΣΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ S :

$$\frac{dN_A}{dt} = \sigma_{A-1} N_{A-1} \nu n - \sigma_A N_A n$$

(ΓΙΑ ΚΑΘΕ A > 56)

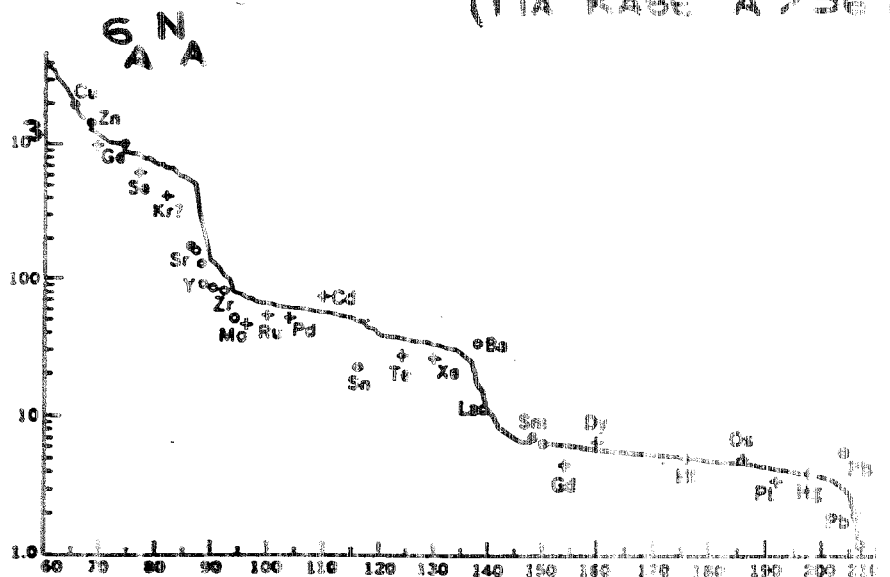
ΙΣΟΡΟΠΙΑ ( $\frac{dN_A}{dt} = 0$ )

$$\sigma_{A-1} N_{A-1} = \sigma_A N_A$$

$$\sigma_A N_A = \text{σταθ.}$$

ΚΑΛΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ,

ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ N<sub>ΜΑΓΙΚΟ</sub>

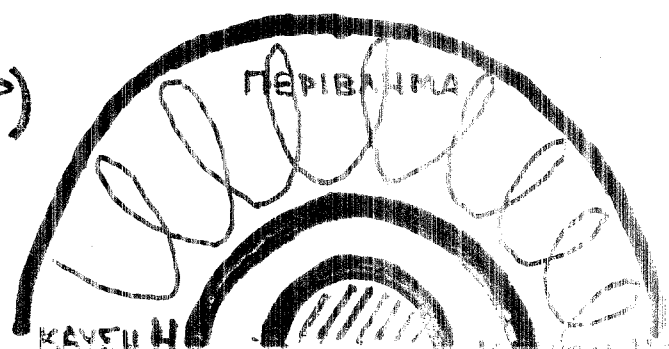


ΠΗΓΕΣ ΝΕΥΤΡΟΝΙΩΝ:  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  Η  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  ΚΑΥΣΗ He

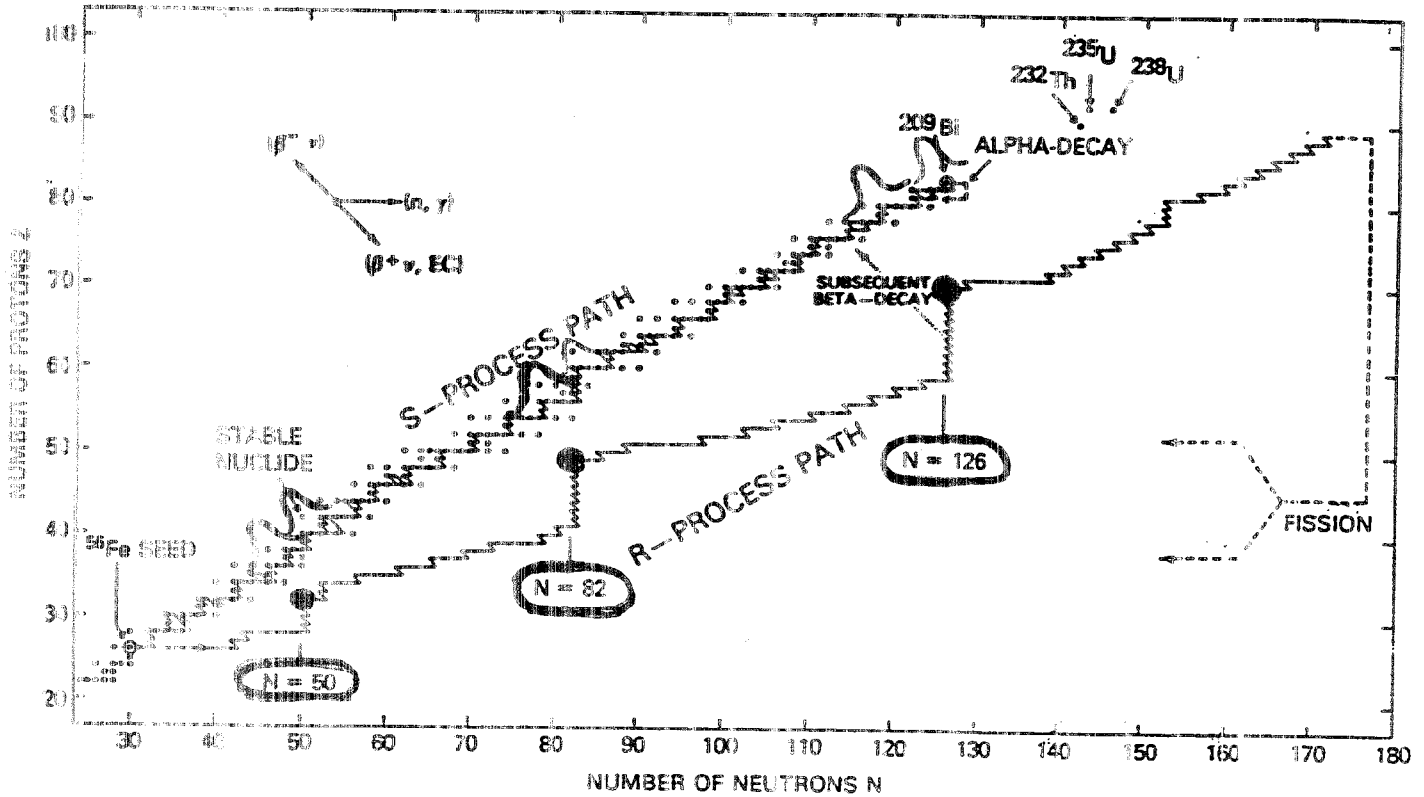
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΚΑΥΣΗ He ΣΕ ΚΟΚΙΝΟΥΣ ΠΓΑΝΤΕΣ (+ 3<sup>ο</sup> DREDGE-UP)

ΚΑΙ ΕΚΤΙΝΑΞΗ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΜΕ ΑΣΤΡΙΚΟΥΣ ΑΝΕΜΟΥΣ

$$(M_{\nu} \sim 1-3 M_{\odot})$$



# Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ $\tau$



ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΠΡΟΣΛΗΨΕΙΣ  $n$  ΜΕΧΡΙ: ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ  $\rho_{OH} = \rho_{OH} \rightarrow \beta^-$   
 (n,  $\gamma$ ) (n, n) K.O.K.  
 ΟΤΑΝ Η  $\rho_{OH}$  ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΤΕΛΕΙΩΣΕΙ:  $\beta^- \rightarrow$  ΠΥΡΗΝΕΣ  $\tau$

ΛΑΓΙΚΑ ΠΥΡΗΝΕΣ: ΕΙΔΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ  $\rightarrow$  ΣΥΣΩΛΡΕΥΣΗ ΜΑΖΑΣ  
 $\tau \sim S$

## ΜΟΝΤΕΛΑ

ΧΡΕΙΑΖΟΝΤΑΙ:  $n_n > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  } ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ He, C  
 (10  $\sim$  SEC)  $T > 10^9 \text{ K}$  } ΣΕ SNI (n ΔΠΟ  $^{13}\text{C}(\alpha, n)$  Η  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)$ )

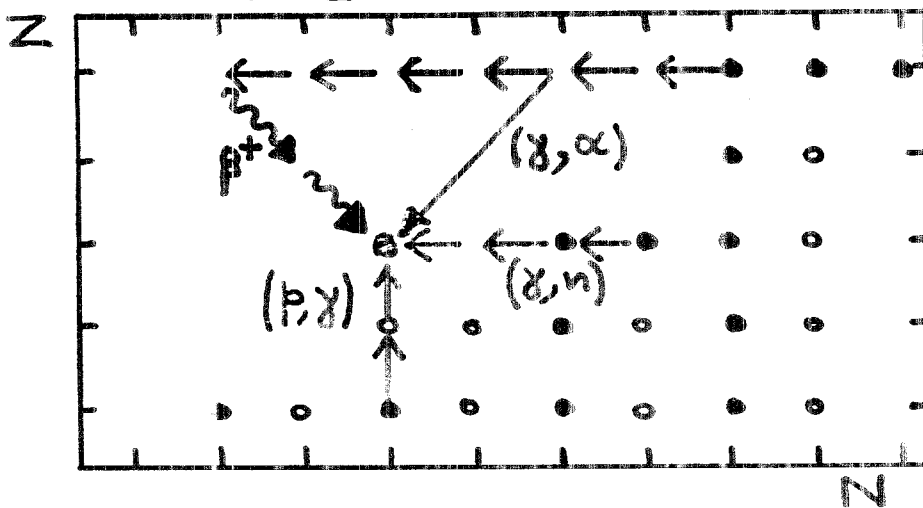
ΑΚΟΜΗ:  $\rho > 10^{10} \text{ g cm}^{-3}$  } Π. Σ. Ι. ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΜΕΘΑΝΑΣΜΑ  $n$   
 $T > 10^{10} \text{ K}$  }  $p + e^- \rightarrow n$  (Z, A) +  $e^- \rightarrow (Z-1, A)$   
 ΝΕΤΡΟΝΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ SNI

ΔΥΣΚΟΛΙΑ: ΧΡΕΙΑΖΟΝΤΑΙ  $\sigma_n, \lambda_p, M, Q_n \dots$   
 ΓΙΑ  $\sim$  ΕΘΟΣ ΠΥΡΗΝΕΣ  
 ΠΟΛΥ ΜΑΚΡΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ

# ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ρ

ΠΥΡΗΝΕΣ ρ : ΕΧΟΥΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΕΙ ΜΟΝΟ ΣΕ : ΓΗ - ΜΕΤΕΩΡΙΤΕΣ  
 ΑΦΘΟΝΙΑ : ΜΟΝΟ 1-10% ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ S - T

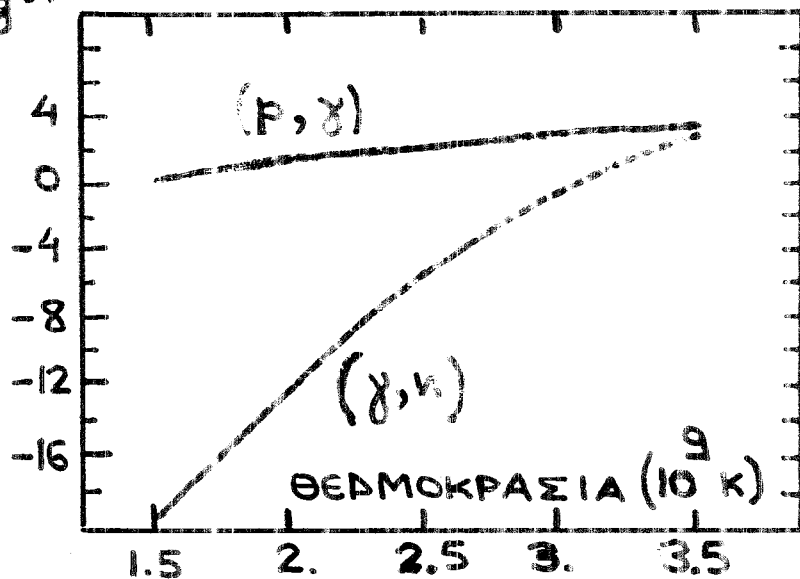
- ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ
- ΑΣΤΑΘΕΙΣ



## ΠΑΡΑΓΩΓΗ

- ⊙ ΦΩΤΟΔΙΑΣΠΑΣΗ  
 $(\gamma, \alpha) (\gamma, n) + \beta^+$
- ⊙ ΒΑΡΥΤΕΡΩΝ ΠΥΡΗΝΩΝ  
 (S και T)
- ⊙ ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ  
 ΑΠΟ ΕΛΑΦΡΟΤΕΡΟΥΣ

## ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ



## ΔΥΣΚΟΛΙΑ

Η ΤΡΟΜΑΚΤΙΚΗ "ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ"  
 ΤΩΝ ΦΩΤΟΔΙΑΣΠΑΣΕΩΝ  
 ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

$$\lambda_{\gamma n} \propto \exp\left(-\frac{Q_n}{kT}\right)$$

→ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΙΣ  
 ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ρ, T) ΤΗΣ

## ΕΚΦΡΑΣΗ

ΠΙΘΑΝΟΤΕΡΟΣ ΤΟΠΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ : ΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ Ne, O ΤΩΝ SNI  
 ( $T \sim 2-3 \cdot 10^9 \text{ K}$ )