

ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

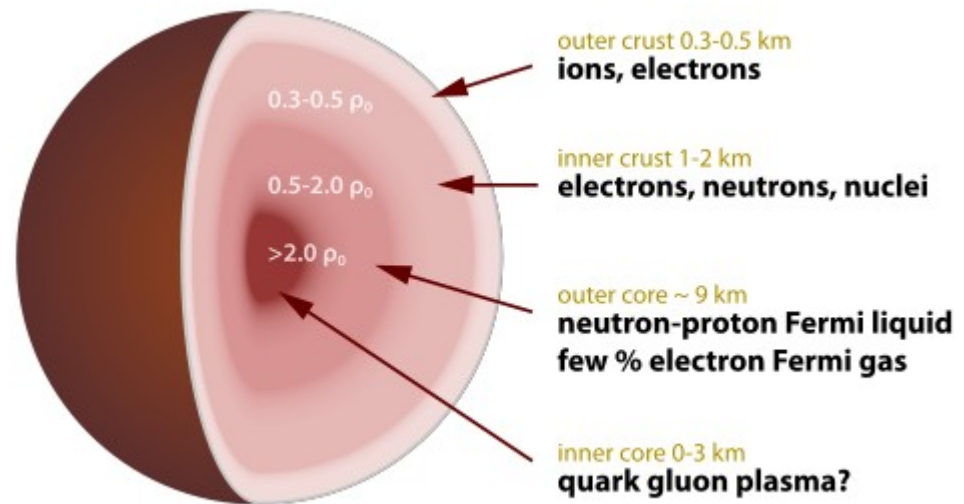
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



5/10/2011

ΑΣΤΕΡΕΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

- Οι αστέρες νετρονίων προκύπτουν ως τελική κατάσταση της κατάρρευση αστέρων μεγάλης μάζας, που συνοδεύεται από μια έκρηξη υπερκαινοφανούς τύπου II. Ο πυρήνας του αρχικού αστέρα, όπου συσσωρεύεται κυρίως σίδηρος ως αποτέλεσμα διαδοχικών θερμοπυρηνικών αντιδράσεων, καταρρέει όταν φτάσει στην κρίσιμη τιμή μάζας $\sim 1.4 M_{\odot}$.



Στη διάρκεια της κατάρρευσης του πυρήνα (που έχει συνολική διάρκεια μικρότερη από 1s, η πυκνότητα της ύλης αυξάνει ραγδαία κατά πολλές τάξεις μεγέθους. Όταν η πυκνότητα ξεπεράσει την τιμή $\rho \sim 10^9 - 10^{10} \text{ g/cm}^3$, ξεκινά η νετρονιοποίηση του πυρήνα, μέσω της αντίστροφης β -διάσπασης:

$$p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu_e$$

ΠΛΗΡΩΣ ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΟ ΑΕΡΙΟ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

- Όταν η πυκνότητα ξεπεράσει την τιμή $\rho \sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$ τα νετρόνια σχηματίζουν ένα εκφυλισμένο αέριο νετρονίων, του οποίου η κβαντομηχανικής φύσεως πίεση γίνεται αρκετά ισχυρή ώστε να ανακόψει την κατάρρευση.
- Ο πυρήνας (μετά από μερικές ταλαντώσεις) ισορροπεί σε μια πυκνότητα μεγαλύτερη της πυρηνικής πυκνότητας, $\rho > \rho_N \sim 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$.
- Τα εξωτερικά στρώματα του αστέρα που συνεχίζουν να καταρρέουν αναπηδούν πάνω στον πυρήνα και εκτοξεύονται σε μεγάλη απόσταση, δημιουργώντας την έκρηξη του υπερκαινοφανούς. Στην επιτυχία αυτής της έκρηξης κρίσιμο ρόλο παίζουν ένας συνδυασμός της στροφορμής, μαγνητικών πεδίων, εκπομπή νετρίνων καθώς και μη-αξονικά συμμετρικές υδροδυναμικές αστάθειες.

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

- Ένας πρόχειρος υπολογισμός της πυρηνικής πυκνότητας, δηλ. της πυκνότητας που επικρατεί στους πυρήνες των ατόμων, όπου ουσιαστικά τα νετρόνια και πρωτόνια “ακουμπούν” μεταξύ τους, έχει ως εξής:

Λόγω της αρχής της απροσδιοριστίας, θα ισχύει η σχέση

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar$$

Η μέγιστη ορμή που μπορεί να έχει ένα (μη-σχετικιστικό) νετρόνιο είναι

$$\Delta p \sim m_B c$$

οπότε

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{\Delta p} \sim \frac{\hbar}{m_B c} \sim 10^{-13} \text{ cm}$$

Ένας πιο ακριβής υπολογισμός δίνει $\Delta x \sim 1.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$, που αντιστοιχεί σε αριθμητική πυκνότητα $n \sim 1/\Delta x^3 \sim 1.7 \times 10^{38} \text{ cm}^{-3}$. Η αντίστοιχη πυκνότητα μάζας είναι

$$\rho_N = m_B n \sim 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

- Ένας πρόχειρος υπολογισμός της πυρηνικής πυκνότητας, δηλ. της πυκνότητας που επικρατεί στους πυρήνες των ατόμων, όπου ουσιαστικά τα νετρόνια και πρωτόνια “ακουμπούν” μεταξύ τους, έχει ως εξής:

Λόγω της αρχής της απροσδιοριστίας, θα ισχύει η σχέση

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar$$

Η μέγιστη ορμή που μπορεί να έχει ένα (μη-σχετικιστικό) νετρόνιο είναι

$$\Delta p \sim m_B c$$

οπότε

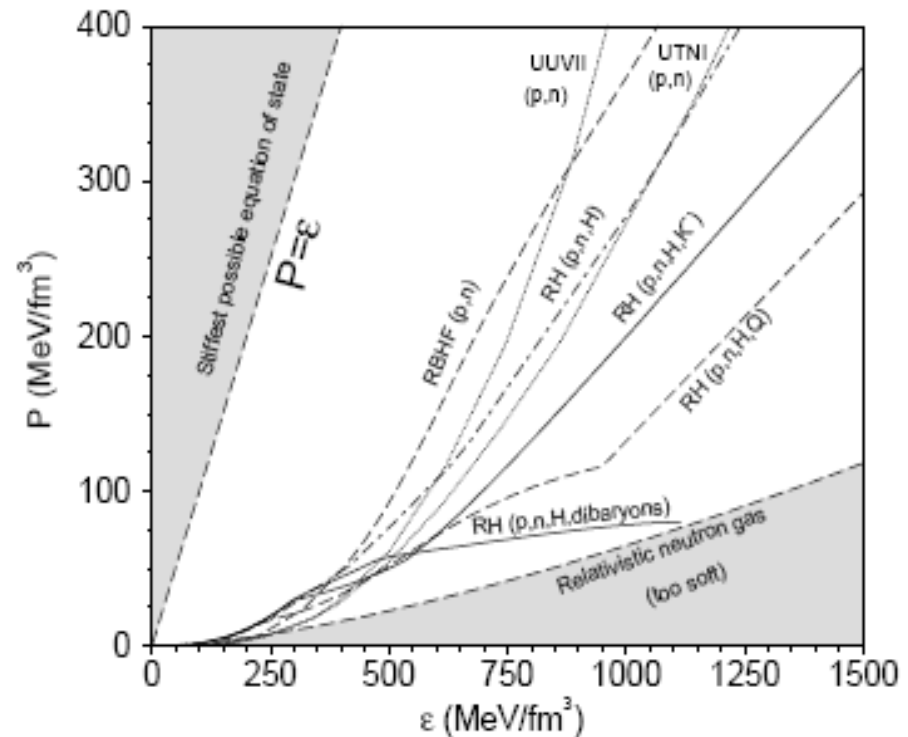
$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{\Delta p} \sim \frac{\hbar}{m_B c} \sim 10^{-13} \text{ cm}$$

Ένας πιο ακριβής υπολογισμός δίνει $\Delta x \sim 1.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$, που αντιστοιχεί σε αριθμητική πυκνότητα $n \sim 1/\Delta x^3 \sim 1.7 \times 10^{38} \text{ cm}^{-3}$. Η αντίστοιχη πυκνότητα μάζας είναι

$$\rho_N = m_B n \sim 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

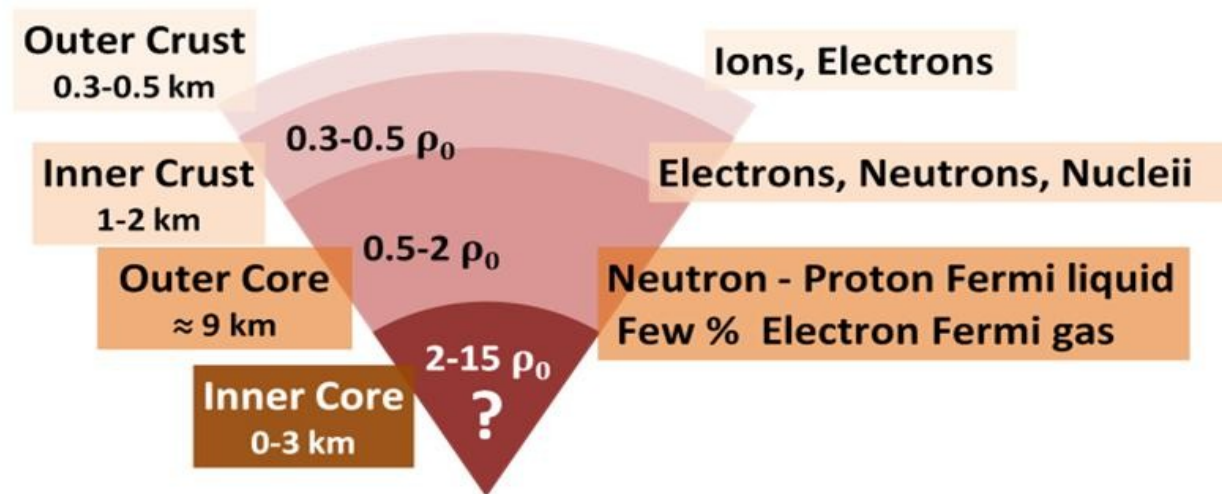
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ

- Η καταστατική εξίσωση που περιγράφει την ύλη στο εσωτερικό των αστέρων νετρονίων, δηλ. η σχέση πίεσης-πυκνότητας $P=P(\rho)$, είναι γνωστή με κάποια βεβαιότητα μόνο για τις χαμηλές πυκνότητες που υπάρχουν στον στερεό φλοιό του αστήρα. Αντιθέτως, για τις πυκνότητες που επικρατούν στον πυρήνα του αστήρα, υπάρχει ακόμη μεγάλη αβεβαιότητα.



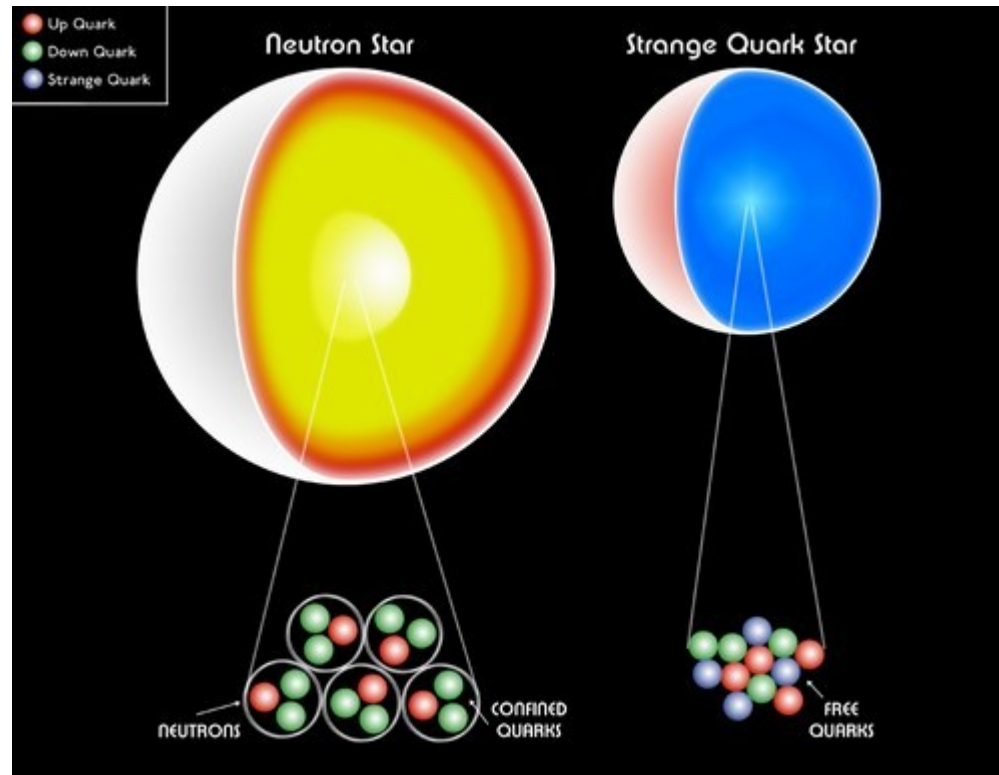
Σήμερα υπάρχουν δεκάδες διαφορετικές καταστατικές εξισώσεις που προκύπτουν από διαφορετικές εκδοχές της θεωρητικής φυσικής υψηλών ενεργειών κι επειδή δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε ύλη τόσο υψηλής πυκνότητας στο εργαστήριο, ο μόνος τρόπος να απορρίψουμε τις λανθασμένες εκδοχές ώστε να προκύψει ποια είναι η μοναδική σωστή, είναι μέσω της παρατήρησης των αστέρων νετρονίων.

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΑΣΤΕΡΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ



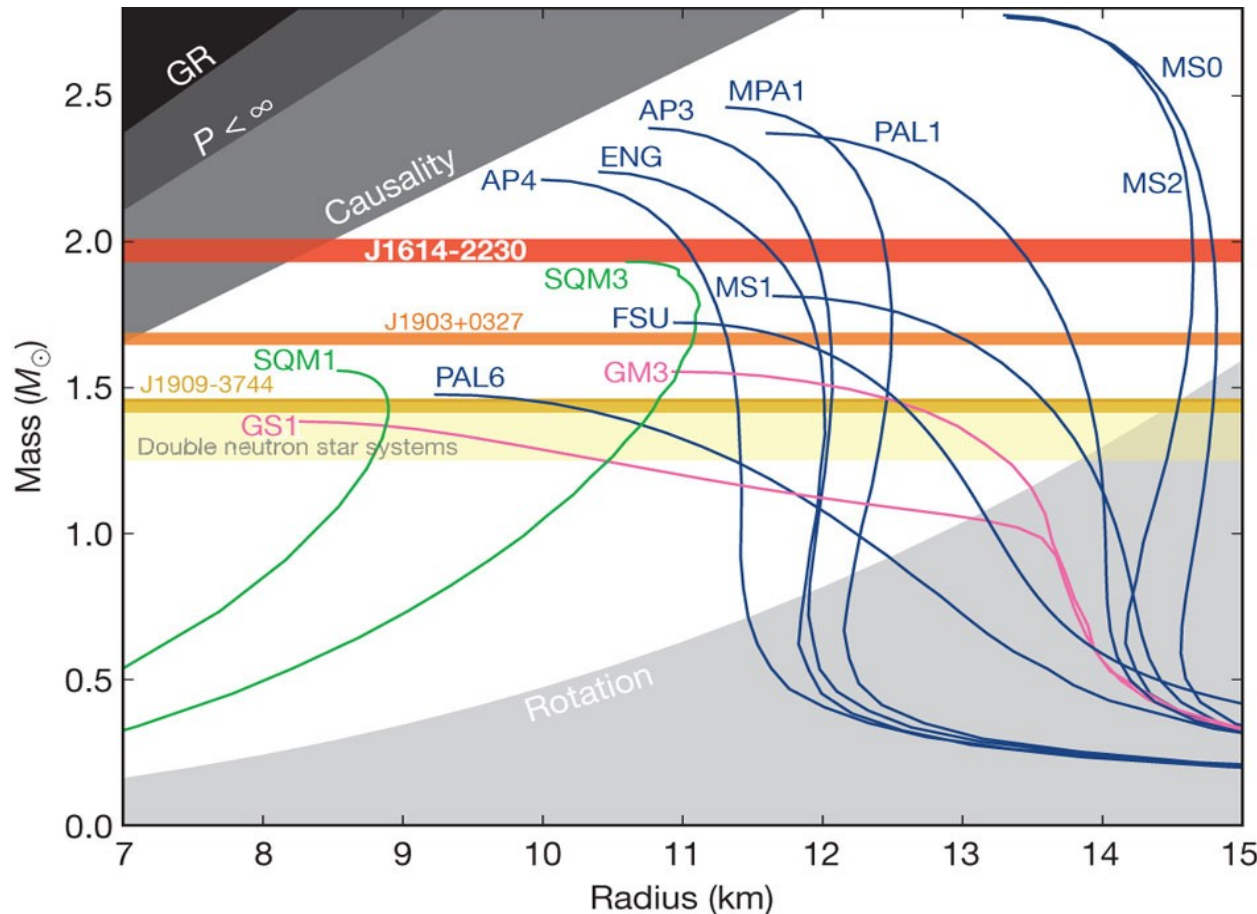
- Στην επιφάνεια η πίεση είναι ουσιαστικά μηδενική, όπως και η πυκνότητα (για την ακρίβεια η πυκνότητα είναι αυτή του σιδήρου).
- Ο εξωτερικός φλοιός είναι σε στερεή μορφή (κρυσταλλικό πλέγμα ιόντων συν ελεύθερα ηλεκτρόνια).
- Στον εσωτερικό φλοιό ξεκινά η νετρονιοποίηση και φτάνοντας στον εξωτερικό πυρήνα έχουμε κυρίως νετρόνια σε μορφή υπερ-ρευστού και υπερ-αγώγιμα πρωτόνια.
- Για τη σύσταση του εσωτερικού πυρήνα (πυκνότητες πολλές φορές μεγαλύτερες της πυρηνικής πυκνότητας) υπάρχουν διάφορες θεωρητικές εκδοχές και μέχρι σήμερα από τις διαθέσιμες παρατηρήσεις δεν έχει ξεκαθαρίσει ακόμη ποια είναι η πραγματική σύσταση.

ΑΣΤΕΡΕΣ ΠΑΡΑΞΕΝΩΝ QUARK



- Υπάρχει μια θεωρητική εκδοχή, σύμφωνα με την οποία το εσωτερικό των αστέρων νετρονίων δεν αποτελείται από αδρόνια, αλλά από ένα μείγμα ελεύθερων quark με κυρίαρχο το παράξενο quark. Σ' αυτή την περίπτωση η κατάσταση των ελεύθερων quark ευνοείται ενεργειακά σε σύγκριση με την κανονική ύλη και ολόκληρος ο αστέρας μετατρέπεται σε έναν πολύ συμπαγή αστέρα παράξενων quark.

ΣΧΕΣΗ ΜΑΖΑΣ-ΑΚΤΙΝΑΣ



Διάφορες
καταστατικές
εξισώσεις:

— Αδρόνια
— παράξενα
quark

- Η κάθε υποψήφια καταστατική εξίσωση δίνει μια διαφορετική σχέση μάζας-ακτίνας για τους αστέρες νετρονίων ή τους αστέρες quark. Επειδή έχει ήδη μετρηθεί με ακρίβεια η μάζα του πάλσαρ J1614-2230 ως $1.97 M_{\odot}$, όσες καταστατικές εξισώσεις δίνουν μέγιστη μάζα μικρότερη από αυτή την τιμή, έχουν ήδη αποκλειστεί.

ΤΥΠΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Η τυπική μάζα των αστέρων νετρονίων είναι $1.4 M_{\odot}$.
- Η μεγαλύτερη μάζα που έχει παρατηρηθεί με ακρίβεια είναι $1.97 M_{\odot}$ (με βάση το σχετικιστικό φαινόμενο Shapiro, σε διπλό σύστημα), ενώ οι διάφορες καταστατικές εξισώσεις που έχουν προταθεί επιτρέπουν θεωρητικά μέγιστη μάζα $< 3 M_{\odot}$.
- Στη μέτρηση της ακτίνας υπάρχει ακόμη μεγάλο παρατηρησιακό σφάλμα $>30\%$, ενώ οι διάφορες καταστατικές εξισώσεις δίνουν πιθανές ακτίνες μεταξύ $10 - 15 \text{ km}$. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει αστέρας νετρονίων για τον οποίο να έχουμε ταυτόχρονη μέτρηση μάζας και ακτίνας με καλή ακρίβεια, ώστε να ξεχωρίσει η σωστή καταστατική εξίσωση στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.
- Στη φάση της ζωής τους που γίνονται ορατοί ως πάλσαρ, η πλειοψηφία των αστέρων νετρονίων έχει μαγνητικό πεδίο έντασης $10^{11} - 10^{12} \text{ G}$. Η συχνότητα περιστροφής είναι μικρότερη από $\sim 100 \text{ Hz}$, ενώ η σχετικότητα επιτρέπει έως $\sim 2500 \text{ Hz}$.

ΕΙΔΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

- Millisecond pulsars

- Είναι αστέρες νετρονίων με πολύ γρήγορη περιστροφή (με συχνότητα περιστροφής έως $\sim 700\text{Hz}$ και πολύ ασθενές μαγνητικό πεδίο έντασης $10^8 - 10^9 \text{ G}$. Προέκυψαν από την προσαύξηση μάζας και στροφορμής από έναν κοντινό αστέρα σε διπλό σύστημα (συνήθως από έναν λευκό νάνο).

- Magnetars

- Είναι αστέρες νετρονίων με πολύ αργή περιστροφή (μερικά Hz) και πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο έντασης $10^{14} - 10^{15} \text{ G}$. Πιθανολογείται ότι προέκυψαν από την εξέλιξη αστέρων πολύ μεγάλης αρχικής μάζας που έχασαν το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας λόγω έντονου αστρικού ανέμου πριν την κατάρρευση, ενώ εξελίχθηκαν πολύ γρήγορα, έτσι ώστε ο πυρήνας να διατηρήσει μεγάλη στροφορμή. Η μεγάλη αρχική στροφορμή δημιούργησε το ισχυρό μαγνητικό πεδίο, μέσω μαγνητοϋδροδυναμικών ασταθειών.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

- Οι εξισώσεις που διέπουν την υδροστατική ισορροπία

$$\frac{dP}{dr} = \frac{-Gm(r)\rho(r)}{r^2}$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi \rho r^2$$

μπορούν να συνδυαστούν στην εξίσωση δεύτερης τάξης:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{\rho} \frac{dP}{dr} \right) = -4\pi G \rho r^2$$

Εάν θεωρήσουμε πως η ύλη περιγράφεται από την πολυτροπική καταστατική εξίσωση $P=k\rho^\gamma$, και ορίσουμε νέες, αδιάστατες μεταβλητές ξ και θ μέσω των εξισώσεων

$$r = a \xi$$

$$\rho = \rho_c \theta^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

όπου η σταθερά a είναι μια κλίμακα μήκους και ρ_c είναι η κεντρική πυκνότητα, τότε η εξίσωση υδροστατική ισορροπίας γράφεται στην αδιάστατη μορφή Lane-Emden:

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right) + \theta^{\frac{1}{\gamma-1}} = 0$$

όπου

$$a = \sqrt{\frac{k\gamma\rho_c^{\gamma-2}}{4\pi G(\gamma-1)}}$$

Η εξίσωση αυτή έχει αλγεβρική λύση για τις εξής τιμές της πολυτροπικής σταθεράς γ :

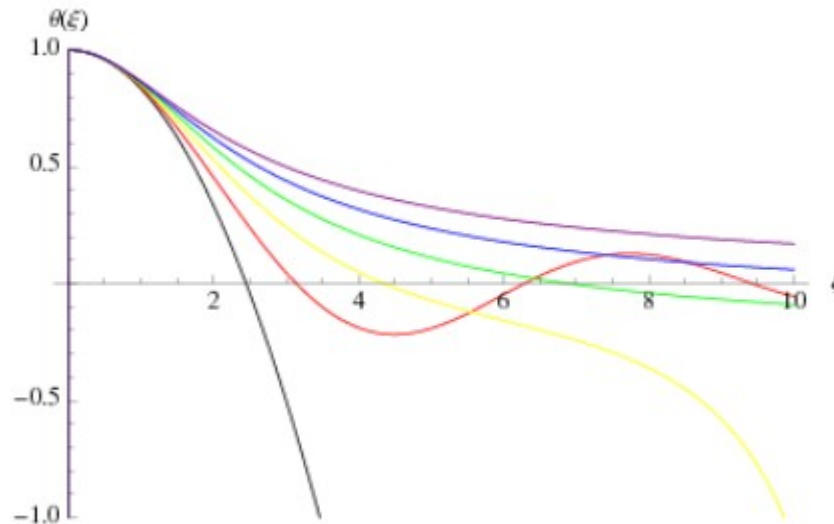
$$\gamma = \infty : \quad \theta(\xi) = 1 - \frac{1}{6} \xi^2$$

$$\gamma = 2 : \quad \theta(\xi) = \frac{\sin \xi}{\xi}$$

$$\gamma = 6/5 : \quad \theta(\xi) = \left(1 + \frac{1}{3} \xi^2 \right)^{-1/2}$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

- Για ενδιάμεσες τιμές της σταθεράς γ η εξίσωση Lane-Emden έχει μόνο αριθμητική λύση. Στο $\xi=0$ η λύση είναι πάντοτε $\theta=1$. Για διάφορες τιμές της σταθεράς γ η γραφική παράσταση της λύσης παρουσιάζει διάφορους μηδενισμούς, εκ των οποίων ο πρώτος μηδενισμός ονομάζεται ξ_1 και αντιστοιχεί στην επιφάνεια του αστέρα.



Άρα, η ακτίνα του αστέρα είναι

$$R = a \xi_1$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

- Η μάζα του αστέρα μπορεί να βρεθεί εύκολα ως εξής:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^R 4\pi r^2 \rho dr \\ &= 4\pi a^3 \rho_c \int_0^{\xi_1} \xi^2 \theta^{\frac{1}{\gamma-1}} d\xi \\ &= -4\pi a^3 \rho_c \int_0^{\xi_1} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right) d\xi \\ &= -4\pi a^3 \rho_c \left[\xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right]_0^{\xi_1} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow M = 4\pi a^3 \rho_c \xi_1^2 \left| \frac{d\theta}{d\xi} \right|_{\xi_1}$$