

Υπέρπυκνα ουράνια σώματα

Τα σώματα, των οποίων η χωρική έκταση είναι συγκρίσιμη με την ακτίνα Schwarzschild ή μέχρι 10000 φορές την ακτίνα αυτή ονομάζονται συμπαγή. Γενικά χωρίζονται σε 3 είδη, τους λευκούς νάνους, τους αστέρες νετρονίων και τις μαύρες τρύπες. Οι λευκοί νάνοι είναι 1 εκατομμύριο φορές πυκνότεροι από ένα κανονικό αστέρι, οι αστέρες νετρονίων είναι πάλι 1 εκατομμύριο φορές πιο πυκνοί από έναν λευκό νάνο και οι μαύρες τρύπες είναι μόλις 3 φορές πυκνότερες από έναν αστέρα νετρονίων. Στο εσωτερικό τους δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν θερμοπυρηνικές συντήξεις. Έτσι, αντίθετα από ότι στα αστέρια, η βαρύτητα δεν εξισορροπείται από την θερμική πίεση των αερίων τους. Στους λευκούς νάνους η πίεση που αντισταθμίζει την βαρύτητα προέρχεται από την πίεση των ηλεκτρονίων της εκφυλισμένης ύλης, ενώ στους αστέρες νετρονίων από την πίεση του υπέρρευστου νετρονίων και τις πυρηνικές δυνάμεις. Αντίθετα οι μαύρες τρύπες αποτελούνται από κενό, έχουν μόνο βαρύτητα. Οι αστέρες νετρονίων και οι λευκοί νάνοι ονομάζονται και εκφυλισμένοι αστέρες.

Λευκοί νάνοι

Είναι αστρικά σώματα, που εξισορροπούν την βαρύτητα μέσω πίεσης των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων. Αποτελούν το τελικό στάδιο των αστέρων μέχρι 8 ηλιακών μαζών. Έχουν πολύ μικρή απόλυτη λαμπρότητα σε σύγκριση με αστέρια ίδιας μάζας της κύριας ακολουθίας.

.Φασματική κατάταξη

Οι γραμμές τους είναι πολύ πεπλατυσμένες, λόγω μεγάλης βαρυτικής επιφανειακής επιτάχυνσης.

DA ονομάζουμε αυτούς με φάσματα (H), με επιφανειακές θερμοκρασίες μεταξύ 90000 και 6000 Κελβιν. Σε χαμηλές θερμοκρασίες οι γραμμές Balmer δεν φαίνονται πια. Οι DA αποτελούν το 80% όλων των λ. νάνων.

DO ονομάζουμε αυτούς που το φάσμα κυριαρχείται από (HeII), με επιφανειακή θερμοκρασία μεταξύ 100000 και 45000 Κελβιν. Τα στοιχεία (C), (N), (O), (Si) είναι ορατά στη φωτόσφαιρα.

DB ονομάζονται αυτοί με ατμόσφαιρα που κυριαρχείται από (He), με επιφανειακή θερμοκρασία μεταξύ 30000 και 12000 Κελβιν (υπάρχει κενό ανάμεσα σε DB και DO).

DQ είναι αυτοί με ατμόσφαιρα στην οποία κυριαρχεί το (He), επιφανειακής θερμοκρασίας 12000-6000 Κελβιν και με το (C) να είναι σχετικά λιγότερο.

DZ είναι αυτοί που έχουν μόνο γραμμές μετάλλων ((CaIIH)+(K)).

Οι DC είναι οι τόσο ψυχροί, που δεν δίνουν φάσμα.

Η κατάσταση των λευκών νάνων είναι όμοια με το ιδανικό αέριο ηλεκτρονίων κατά Fermi. Έχουν μάζα 0,2-1,4 ηλιακές (όριο Chandrasekhar), με τυπική τις 0,58 ηλιακές. Η ακτίνα τους κυμαίνεται από 0,02- 0,008 ηλιακές, με την τυπική να είναι στα 0,013. Έχουν μεγάλη πυκνότητα στον πυρήνα, 10στη7-10στη13 Kg/m³, και βαρύτητα $g = 10$ στη5 ηλιακές. Έχουν 3 στρώματα, τον (C)/(O) πυρήνα, ένα (He) κέλυφος, και την (H) ατμόσφαιρα. Η επιφανειακή θερμοκρασία τους είναι 120000-3000 Κελβιν.

Δεν συντήκουν πια στοιχεία και δεν μπορούν να συρρικνωθούν άλλο. Έτσι χάνουν θερμοκρασία. Όταν αυτή πέσει κάτω από τους 8000 K, ο άνθρακας και το οξυγόνο σχηματίζουν ένα στερεό σώμα (σαν διαμάντι). Θεωρούνται κοσμοχρονόμετρα για την εξακρίβωση της ηλικίας του Γαλαξία μας και αυτή των σφαιρωτών σμηνών.

Με την ερυθρολίσηση έχουμε εντοπίσει 13000 λευκούς νάνους σε διπλά συστήματα μέχρι 1 κpc μακριά.

Σουπερνόβα Ια.

Δημιουργούνται μόνο σε διπλά συστήματα με λευκό νάνο και ερυθρό γίγαντα. Ο λευκός νάνος έλκει πλάσμα από το διαστελλόμενο κέλυφος του συνοδού του, μέχρι να φτάσει ο (εκφυλισμένος) πυρήνας του που αποτελείται από (C)/(O) το όριο Chandrasekhar. Ο πυρήνας καταρρέει και ο άνθρακας καίγεται (συντηκείται) εκρηκτικά, με συνέπεια να διαλυθεί ο λευκός νάνος εντελώς (υπάρχει και η εκτίμηση ότι σπάνια δημιουργείται αστέρας νετρονίων). Λόγω ότι η κρίσιμη μάζα και η σύσταση είναι πολύ όμοιες σε όλους τους λευκούς νάνους, η έκρηξη αυτή έχει πάντα την ίδια ισχύ (φαινόμενη λαμπρότητα περίπου $-19,2$ mag). Έτσι οι εκρήξεις σουπερνόβα Ια είναι πολύ χρήσιμες ως κοσμικά κεριά πολύ μεγάλης σταθερής λαμπρότητας, βοηθώντας μας στην μέτρηση μεγάλων (κοσμολογικών) αποστάσεων. Το χαρακτηριστικό τους είναι η απουσία (H) από το φάσμα τους, έτσι ξεχωρίζουν από τις σουπερνόβα ΙΙ (βαρυτική κατάρρευση αστέρα μεγάλης μάζας). Επίσης η έκρηξη αυτή έχει μικρότερη διάρκεια, και διαφορετική καμπύλη εξέλιξης λαμπρότητας.

Αστέρες νετρονίων

Αστέρες νετρονίων ονομάζουμε τα ουράνια σώματα με πυκνότητα στο μέγεθος αυτής των υποατομικών σωματιδίων. Έχουν τυπική ακτίνα 10-12 χιλιόμετρα και μάζα 1,2-2 ηλιακές. Αποτελούν τα τελικά προϊόντα αστέρων 8-25 ηλιακών μαζών και δημιουργούνται από εκρήξεις σουπερνόβα ΙΙ, Ib, Ic (όλες από καταρρεύσεις μεγάλων αστέρων, με φασματικές διαφορές). Οι αστέρες νετρονίων εκπέμπουν παλμικά ραδιοκύματα, λόγω της περιστροφής τους (ραδιοφάροι). Έχουν συμπαγή δομή με κελύφη. Η κρυσταλλική ατμόσφαιρα σιδήρου τους είναι μόλις πάχους μερικών εκατοστών, μετά ακολουθεί ένα πλέγμα από πυρήνες, κυρίως σιδήρου⁵⁶, και αέριο Fermi σχετικιστικών εκφυλισμένων ηλεκτρονίων.

Το εσωτερικό κέλυφος αποτελείται από υπέρρευστα νετρόνια σε <δύνες> (vortex) και ένα πλέγμα ατόμων, πλούσια σε νετρόνια. Σε πυκνότητα 4×10^{14} kg/m³, την λεγόμενη πυκνότητα σταγόνων νετρονίων (neutron drip density), η ενέργεια που συγκρατεί τα νετρόνια στον πυρήνα είναι τόσο χαμηλή, ώστε αυτά τον εγκαταλείπουν σε <σταγόνες>. Έτσι ονομάζουμε αυτή τη φάση ρευστό νετρονίων. Το εσωτερικό αυτό κέλυφος φτάνει μέχρι όπου η πίεση είναι $1,7 \times 10^{17}$ kg/m³, όπου πια όλοι οι ατομικοί πυρήνες αποσυντίθενται. Σχηματίζονται κβαντικές δύνες υπέρρευστων νετρονίων. Στον εξωτερικό ρευστό πυρήνα από πρωτόνια και νετρόνια υπάρχουν και ηλεκτρόνια σαν εκφυλισμένο αέριο φέρμι. Μπορεί να υπάρχουν και βαρέα βαρυόνια, τα λεγόμενα υπερόνια. Η πυκνότητά τους είναι 2-3 φορές αυτή των υποατομικών σωματιδίων.

Στον εσωτερικό πυρήνα τα νουκλεόνια έχουν διασπαστεί στα σωματίδια που τα απαρτίζουν. Εδώ περιμένουμε στα κουαρκ αυτά να έχει αρθεί η συμπερίληψη και να είναι, σε ελεύθερη μορφή, σε ισορροπία με τα γλουόνια (το πλάσμα κουαρκ-γλουονίων). Αυτή η εξωτική μορφή της ύλης έχει τεράστια πυκνότητα (3-6 φορές των σωματιδίων), και η θερμοκρασία εκεί είναι 170 MeV.

Η κατάσταση τους χαρακτηρίζεται από την εξισορρόπηση της βαρύτητας μέσω της πίεσης των εκφυλισμένων νετρονίων. Τα φωτόνια που διαφεύγουν από έναν αστέρα νετρονίων έχουν μετατοπιστεί βαρυτικά στο ερυθρό κατά 25-35%. Οι αστέρες νετρονίων κατατάσσονται ανάλογα με την σύσταση του πυρήνα τους.

Οι αδρονικοί έχουν σχεδόν σταθερή ακτίνα, 11-12 χιλιόμετρα, και μάζα 1,2-1,8 ηλιακές. Οι κουαρκ-αδρονίων είναι λίγο πιο συμπαγείς. Τα καθαρά αστέρια κουαρκ είναι σαν τεράστιοι ατομικοί πυρήνες.

Οι αστέρες νετρονίων έχουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Αυτό δημιουργείται λόγω ανακατέματος του υπέρρευστου με την κρυσταλλική επιφάνεια. Τα δύο αυτά μέρη έχουν διαφορετική ταχύτητα περιστροφής γύρω από τον άξονα του αστέρα, με συνέπεια την δημιουργία ισχυρότατου μαγνητικού πεδίου (το υπέρρευστο περιέχει και ελάχιστα φορτισμένα πρωτόνια και ηλεκτρόνια).

Κατατάσσονται σε

.Απομονωμένοι θερμικοί. Οι αστέρες νετρονίων δημιουργούνται σε εκρήξεις σουπερνόβα II σε θερμοκρασία 20MeV. Η ακτινοβολία νετρονίων ψύχει την επιφάνειά τους μετά από 100000 έτη σε 10 εκατομμύρια βαθμούς και η εκπομπή της φωτόσφαιρας την ψύχει περαιτέρω σε μερικές 100000 K. Μετά από μερικά εκ. έτη ψύχεται τόσο, ώστε να μην είναι οπτικά ορατός.

.Ράδιο-παλσαρ. Έτσι ονομάζεται ένας περιστρεφόμενος αστέρας νετρονίων, στον οποίο ο άξονας περιστροφής δεν συμπίπτει με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου. Το αποτέλεσμα είναι ένας διπλός λοβός να εκπέμπει σχετικιστική, μη θερμική ακτινοβολία σύμφωνα με την ταχύτητα περιστροφής του αστέρα. Σε μερικές περιπτώσεις αυτή η δέσμη σαρώνει τη Γη μας. Σταδιακά επιβραδύνεται η ταχύτητα περιστροφής του. Οι παλσαρ με περιόδους κάτω από 100 ms ονομάζονται millisecond παλσαρ. Οι περισσότεροι βρίσκονται ως μέλη σε διπλά συστήματα (αποκτήσαν μεγάλη ταχύτητα περιστροφής με τον ίδιο μηχανισμό που η Γη επιταχύνει την περιστροφή της λόγω βαρυτικής αλληλεπίδρασης με τη Σελήνη).

Συνήθως εκπέμπουν σε όλα τα μήκη κύματος. Στα διπλά που τους έχουμε ανακαλύψει, συνήθως συνοδός είναι ένας λ. νάνος, αλλά μπορεί να είναι και άλλοι αστέρες νετρονίων ή κοινά άστρα. Οι πρώτοι εξωπλανήτες που ανακαλύψαμε ανήκουν σε αστέρες νετρονίων. Όταν ενώνονται δύο αστέρες νετρονίων που βρίσκονται σε σύστημα, δημιουργούν μια μαύρη τρύπα, με ξέσπασμα ακτίνων γ.

Μια σπάνια περίπτωση είναι ο διπλός παλσαρ PSR J0737-3039A+B. Πρόκειται για 2 παλσαρ, που οι δέσμες τους σαρώνουν τη Γη. Έχουν μεταξύ τους απόσταση μόλις 1 εκατομμύριο χιλιόμετρα και μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια τις τροχιές τους.

.Πάλσαρ ακτίνων X

Εδώ έχουμε πάντα έναν πάλσαρ και ένα αστέρι- συνοδό. Το πάλσαρ έλκει ύλη από τον συνοδό, η οποία ή διαφεύγει με ηλιακό άνεμο από το αστέρι, ή γεμίζει το όριο Roche σε στενά διπλά συστήματα. Το φαινόμενο Ντόπλερ μας προδίδει την ύπαρξη του συνοδού. Η λαμπρότητα και το μαγνητικό πεδίο μας παραπέμπουν σε αστέρα νετρονίων και όχι σε λ. νάνο. Γύρω από τον αστέρα νετρονίων σχηματίζεται ένας δίσκος συσσώρευσης, όπου το αέριο πλησιάζει σε σπείρες και τελικά πέφτει σε αυτόν. Στη διαδικασία αυτή το αέριο αποκτάει τεράστιες ταχύτητες, μέχρι 200000 km/s, ακολουθώντας τις μαγνητικές γραμμές του πάλσαρ. Υπολογίζουμε ότι με αυτή την ταχύτητα 100 δις τόνοι αερίου πέφτουν σε λίγα τετραγωνικά χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο, σχεδόν σε ελεύθερη πτώση. Η αναπήδηση της ύλης αυτής στην επιφάνεια του αστέρα νετρονίων ή από την ακτινοβολία του λίγο πριν φτάσει σε αυτήν την κάνει να θερμανθεί τόσο, ώστε να μας δώσει μια λάμψη στην ακτινοβολία X (μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ακτινοβολία). Συνήθως είναι ανιχνεύσιμη και στο ορατό φως. Τα νεαρά πάλσαρ έχουν ακόμη τα νεφελώματά τους. (βλέπε σημείωση 1)

Μαύρες τρύπες

Οι μαύρες τρύπες ορίζονται μόνο από τη βαρύτητα, αλλά η ύλη είναι απαραίτητη για την γέννησή τους. Σχηματίζονται (οι αστρικές) από την κατάρρευση μεγάλων αστεριών μετά την ολοκλήρωση της θερμοπυρηνικής τους σύντηξης ή από την συγχώνευση 2 αστεριών νετρονίων μεγάλης μάζας.

Ορίζονται από την μάζα τους και την στροφορμή τους.

Οι γρήγορα περιστρεφόμενες είναι μικρότερες από τις μη περιστρεφόμενες. Οι περιστρεφόμενες έχουν μια εργόσφαιρα, το πεδίο έξω από τον ορίζοντα γεγονότων, όπου πρέπει όλη η ύλη να περιφέρεται γύρω από τη μαύρη τρύπα. Η εργόσφαιρα έχει οβάλ σχήμα και περικυκλώνει τον ορίζοντα, κλείνοντας στους πόλους. Μέσα στην εργόσφαιρα δεν μπορεί να υπάρξει στατικός παρατηρητής, όλα ακολουθούν την περιστροφή της μαύρης τρύπας. Ακόμα και το φως, και ο ίδιος ο χώρος (καμπύλωση χωροχρόνου). Γύρω από μια μ. τρύπα

μπορεί να υπάρξουν τροχιές Κεπλερ, όπως στους πλανήτες γύρω από τον Ήλιο. Οι μ. τρύπες συμπεριφέρονται φασματικά σαν μελανά σώματα. Έχουν τους εξής νόμους (δυναμική μ. τρύπας).

1) Η επιφάνεια του ορίζοντα γεγονότων (το όριο, όπου ότι περάσει δεν διαφεύγει της μ. τρύπας, ούτε το φως) παίρνει τον ρόλο της εντροπίας. Η βαρύτητα του ορίζοντα παίρνει τον ρόλο της θερμοκρασίας. Σε αστρονομικές (οχι μικροσκοπικές) μαύρες τρύπες η θερμοκρασία είναι ελάχιστη και δεν παίζει κανέναν ρόλο.

2) Το σύνολο της επιφάνειας του ορίζοντα γεγονότων δεν μπορεί να μειωθεί, ανεξάρτητα τι θα συμβεί (συγχώνευση 2 μ. τρυπών, ή ροή υλικού σε αυτήν).

3) Δεν επιτυγχάνεται ποτέ θερμοκρασία 0.

Μετράμε την μάζα μιας μ. τρύπας έμμεσα, από την κίνηση αστεριών ή νεφών που περιφέρονται αυτής. Ακόμα, έχουμε τις γραμμές εκπομπής από τη σκόνη, το αέριο ή το πλάσμα που βρίσκεται κοντά σε αυτήν.

Ο μηχανισμός Blandford -Znajek μας λέει ότι είναι δυνατή η εκροή περιστροφικής ενέργειας από μια μ. τρύπα μέσω ηλεκτρομαγνητισμού. Ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να φρενάρει την περιστροφή της, όπως στα πάλσαρ. Αυτή η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε κινητική ενέργεια του πλάσματος που διαφεύγει μέσα από κάθετους στον δίσκο προσάυξης πίδακες. Το πλάσμα που περιφέρεται στον ορίζοντα αναγκάζει τις μαγνητικές γραμμές να τυλιχτούν έντονα, επιβραδύνοντας την περιστροφή της.

Γνωρίζουμε περίπου 40 αστρικές μ. τρύπες. Στις 20 από αυτές η μάζα είναι καλά καθορισμένη, μεγαλύτερη των 3 ηλιακών. Ονομάζονται και μικρό-Κβάζαρ, επειδή έχουν συχνά πίδακες. Μετά έχουμε τις ενδιάμεσες μ. τρύπες, με 100-100000 ηλ. μάζες, που θα έπρεπε να εντοπίσουμε σε σφαιρωτά σμήνη και νάνους γαλαξίες. Μέχρι τώρα έχουμε μόνο ενδείξεις για την ύπαρξη μερικών (πολύ λαμπρές πηγές ακτίνων X). Τέλος, έχουμε τις τεράστιες μ. τρύπες στα κέντρα των γαλαξιών. Σε 50 κοντινούς γαλαξίες έχουμε μετρήσει με ακρίβεια τις μάζες τους, όχι όμως και τις περιστροφές τους. Έχουν εκατομμύρια ως δισεκατομμύρια ηλιακές μάζες.

Σημείωση 1

Υπάρχει μια κατηγορία αστέρων νετρονίων με πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο, τα magnetars. Μέχρι πρόσφατα ήταν μυστήριο η δημιουργία τους. Στο 16000 ετών φωτός μακριά και μόλις μερικών εκ. ετών ηλικίας τεράστιο αστρικό σμήνος Westerlund 1 ανακαλύφθηκε ένα τέτοιο αστέρι το 2005. Ήταν από τότε μυστήριο, γιατί από παρατηρήσεις αυτού και των κοντινών του αστέρων το συμπέρασμα ήταν ότι το αρχικό, πριν την κατάρρευσή του αστέρι, πρέπει να ήταν 40 ηλιακών μαζών. Έτσι θα έπρεπε να υπήρχε μια μαύρη τρύπα και όχι ένα αστέρι νετρονίων.

Τώρα όμως βρέθηκε ένα αστέρι στο σμήνος, μακριά από τον αστέρα νετρονίων, που κινείται με μεγάλη ταχύτητα σχετικά με τα άλλα άστρα του σμήνος. Η μεγάλη ταχύτητα αυτή οφείλεται στον βίαιο εξοστρακισμό του από ένα διπλό σύστημα, λόγω έκρηξης σουπερνόβα του συνοδού του. Το αστέρι αυτό με το όνομα Westerlund 1-5 έχει ένα μοναδικό δακτυλικό αποτύπωμα, την ιδιαίτερη χημική σύστασή του. Έχει ασυνήθιστα πολύ άνθρακα, ήλιο και άζωτο και πολύ λίγο οξυγόνο, κάτι που δικαιολογείται μόνο με αλληλεπίδραση με τα εξωτερικά στρώματα άλλου αστέρα. Κανονικά ο άνθρακας εμφανίζεται όταν μειωθεί σημαντικά το υδρογόνο και το άζωτο.

Τα 2 αστέρια είχαν αρχικά μάζες 41 και 35 ηλιακές αντίστοιχα, με το μικρότερο να εξελιχτεί τελικά σε magnetar. Ο μεγάλος συνοδός έγινε γρήγορα υπεργίγαντας. Σε διπλά συστήματα μεταφέρεται σε αυτήν τη φάση πολύ ύλη στον συνοδό. Ενώ η εξέλιξή του ήταν αρχικά πιο αργή από αυτή του συνοδού του, λόγω του υλικού που απορροφούσε από τον συνοδό του εξελίχτηκε γρήγορα και μέσω συντήξεων παρήγαγε μεταξύ άλλων και άνθρακα. Ο συνοδός Westerlund 1-5 έλαβε ένα μέρος του άνθρακα μέσω του εντόνου αστρικού ανέμου που τον απογύμνωσε από τα εξωτερικά του στρώματα. Έτσι ξεπερνάει ο αρχικά μικρότερος συνοδός ως σουπερνόβα II πριν τον Westerlund

1-5, αλλά είχε χάσει τόση μάζα από τον αστρικό του άνεμο, ώστε τελικά να μην δημιουργήσει μ. τρύπα, αλλά αστέρι νετρονίων. Το ρεύμα ύλης που δεχόταν το αστέρι πριν γίνει magnetar επιτάχυνε την περιστροφή του αστέρα με αποτέλεσμα να δυναμώσει πολύ το μαγνητικό του πεδίο.