

Η ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ

Η περιστροφή των αστεριών αποτελεί μια πολύ σημαντική αστρονομική ιδιότητα που επηρεάζει την εξέλιξη του ορατού σύμπαντος. Τα αστέρια δεν είναι στατικά αλλά δυναμικές σφαίρες καυτού πλάσματος. Η περιστροφή τους αποτελεί τον μηχανισμό για μια σειρά σημαντικά φαινόμενα. Η περιστροφή επηρεάζει την εξέλιξη, τον χημικό εμπλουτισμό και την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου σε ένα αστέρι.

Η δομή των αστεριών

Για να απλοποιήσουμε τα αστρικά μοντέλα προβαίνουμε σε μερικές βασικές παραδοχές

- 1) Τα αστέρια είναι σφαιρικά και συμμετρικά, κάτι που συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό.
- 2) Αν και περιστρέφονται, στα μοντέλα θεωρούμε ότι η (αργή) περιστροφή δεν αλλοιώνει το σφαιρικό σχήμα.
- 3) Θεωρούμε ότι δεν επηρεάζονται από συνοδούς αστέρια ή μεγάλους πλανήτες τους. Οι πλανήτες συνήθως επηρεάζουν ελάχιστα το αστέρι τους.
- 4) Θεωρούμε ότι έχουν ομοιογενής σύσταση που δεν διαφοροποιείται με την ακτίνα του αστεριού. Εδώ αποτελεί σημαντική εξαίρεση ο αστρικός πυρήνας.
- 5) Δεν λαμβάνουμε υπόψη σχετικιστικά φαινόμενα. Συνήθως είναι αμελητέα.
- 6) Δεν λαμβάνουμε υπόψη διακυμάνσεις στον χρόνο. Συμβαίνουν σε μεγάλο χρονοδιάγραμμα.

Οι παραπάνω παραδοχές μας παρουσιάζουν ένα στατικό, απομονωμένο και συμμετρικό αστέρι. Έτσι έχουμε διατήρηση της μάζας, της ενέργειας, υδροστατική ισορροπία και ομαλή εσωτερική μεταφορά ενέργειας. Όμως θα πρέπει να προσθέσουμε την εξίσωση κατάστασης (equation of state), δηλαδή τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (T), πίεσης (P) και όγκου (V) ενός θερμοδυναμικού συστήματος, την αδιαφάνεια (opacity), δηλαδή πόσο διαπερατό στην ακτινοβολία είναι ένα αέριο και την αποδοτικότητα της θερμοπυρηνικής σύντηξης.

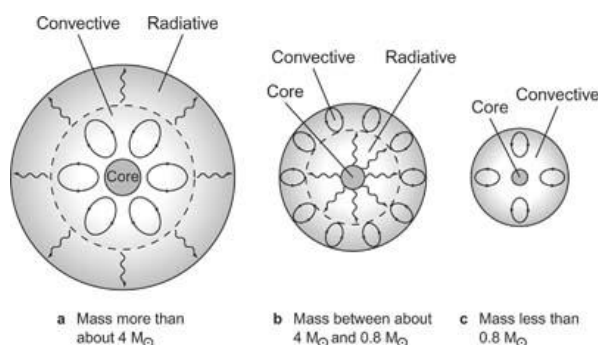
Ανάλογα την μάζα τους, τα αστέρια βρίσκονται για πολύ χρόνο σε υδροστατική ισορροπία. Δεν μεταβάλλουν την δομή τους ούτε την παραγωγή ενέργειας, με την λαμπρότητά τους να παραμένει σταθερή. Υδροστατική ισορροπία σημαίνει ότι οι εξωτερικές δυνάμεις εξισορροπούνται από τις εσωτερικές δυνάμεις στο αστέρι. Η πίεση της βαρύτητας προς τα μέσα ισορροπεί με την πίεση της ακτινοβολίας και του αερίου προς τα έξω.

Η θερμοπυρηνική σύντηξη Υδρογόνου σε Ήλιο στον πυρήνα ενός αστεριού έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας με την μορφή ακτινοβολίας γ . Στον ήλιο μας αυτή η διαδικασία έχει χρονοδιάγραμμα τα 10 δις έτη.

Η μετάδοση της ενέργειας στο εσωτερικό ενός αστεριού συμβαίνει με 2 διαδικασίες. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας γ σκεδάζονται στην πορεία τους προς το εξωτερικό του αστεριού. Η άλλη διαδικασία είναι η συναγωγή, η μεταφορά θερμής ύλης σε φούσκες προς την επιφάνεια και η βύθιση ψυχρής ύλης. Μία φούσκα θερμού αερίου κινείται ανοδικά μέσα στο αστέρι. Η θερμοκρασία της φούσκας μεταβάλλεται αδιαβατικά, δηλαδή η ταχεία ανοδική κίνηση της φούσκας χωρίς ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον.

Το πλάσμα μέσα στο οποίο κινείται η φούσκα μεταβάλλει την θερμοκρασία του μέσω της ακτινοβολίας. Η μεταβολή θερμοκρασίας της φούσκας είναι μικρότερη από την μεταβολή θερμοκρασίας του πλάσματος γύρω της με αποτέλεσμα να συνεχίζει την ανοδική της πορεία.

Η συναγωγή εμφανίζεται κοντά στον πυρήνα αστεριών μεγάλης μάζας ή κοντά στην επιφάνεια αστεριών μικρής μάζας. Στα αστέρια μεγάλης μάζας η συναγωγή εμφανίζεται μέσα στον πυρήνα, αν η ακτινοβολία έχει μεγάλη ένταση. Στα μικρής μάζας αστέρια η θερμοκρασία της ανερχόμενης ύλης με συναγωγή ελαττώνεται αρκετά ώστε τα άτομα H, He να είναι λίγο ή καθόλου ιονισμένα. Όσο πιο ψυχρό (μικρότερης μάζας) είναι ένα αστέρι, σε τόσο πιο μεγάλο βάθος εκτείνεται η ζώνη συναγωγής. Στον ήλιο μας φτάνει σε βάθος 200.000 χιλιόμετρα, το 1/3 της ακτίνας του.



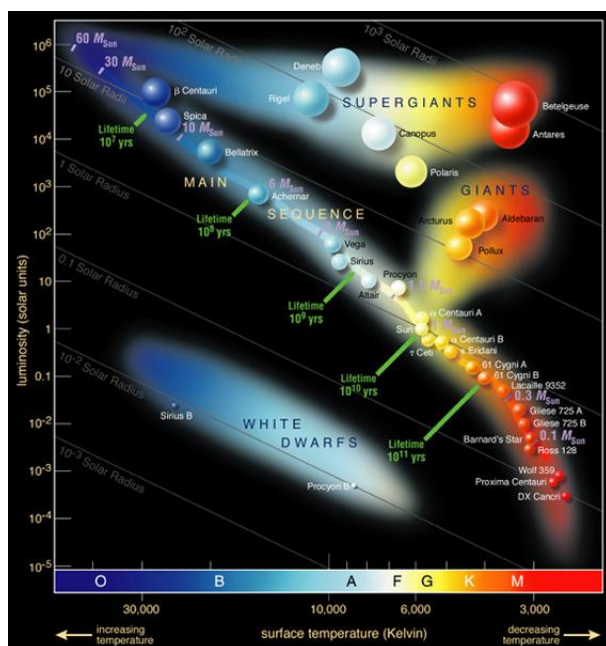
Στα αστέρια έχουμε 3 χρονοδιαγράμματα. Το δυναμικό εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται η εξομάλυνση μιας διαταραχής στο εσωτερικό ενός αστεριού και να επανέλθει η ισορροπία. Για τον ήλιο μας είναι γύρω στα 18 λεπτά. Το θερμικό χρονοδιάγραμμα μας δείχνει για πόσο χρόνο ένα αστέρι θα μπορούσε να ακτινοβολεί χωρίς θερμοπυρηνική σύντηξη, κυρίως λόγω συρρίκνωσης, ανάλογα την μάζα του και την ακτίνα του. Για τον ήλιο είναι 30 εκατομμύρια έτη, πολύ μικρό χρονικό διάστημα σχετικά με την διαπιστωμένη από ισότοπα ηλικία της Γης (4,5 δις έτη).

Το πυρηνικό χρονοδιάγραμμα αποτελεί τον δείκτη αποτελεσματικότητας της θερμοπυρηνικής σύντηξης. Για την σύντηξη του Υδρογόνου η απόδοση είναι 0,7% (μετατροπή μάζας σε ενέργεια). Η θερμοπυρηνική σύντηξη απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει μόνο στους αστρικούς πυρήνες. Για τον ήλιο το χρονοδιάγραμμα σύντηξης Υδρογόνου στον πυρήνα του είναι 10 δις έτη.

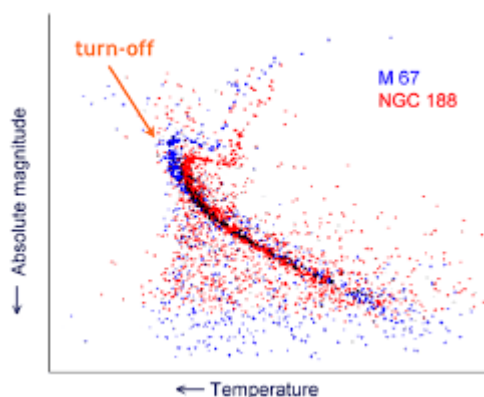
Το δυναμικό χρονοδιάγραμμα μας δείχνει τον χρόνο κατάρρευσης ενός αστεριού μεγάλης μάζας, όπως κατά την έκρηξη σουπερνόβα. Το θερμικό είναι σημαντικό για την αρχική εξέλιξη ενός πρωτοαστέρα, πριν την έναρξη θερμοπυρηνικής σύντηξης στον πυρήνα του. Το πυρηνικό χαρακτηρίζει τα αστέρια στο 80% της ζωής τους.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από την ενεργειακή κατάσταση n_1 στην μεγαλύτερη n_2 δαπανάται ενέργεια. Τότε εμφανίζεται μια γραμμή απορρόφησης στο φάσμα. Αντίθετα όταν μεταπηδήσει από το n_2 στο n_1 απελευθερώνεται ενέργεια και εμφανίζεται ως γραμμή εκπομπής.

Στο διάγραμμα Hertzsprung- Russell κατατάσσουμε τα αστέρια ανάλογα την λαμπρότητα και τον φασματικό τύπο (θερμοκρασία). Η απόλυτη (πραγματική) λαμπρότητα ενός αστεριού ορίζεται από τη φαινόμενη λαμπρότητά του σε απόσταση 10 parsec (32,6 έτη φωτός). Το 80% των αστεριών στο διάγραμμα βρίσκονται σε μια ζώνη που κατευθύνεται από δεξιά κάτω (μικρότερης λαμπρότητας και θερμοκρασίας αστέρια) ως επάνω αριστερά (μεγαλύτερη θερμοκρασία και λαμπρότητα), την κύρια ακολουθία. Η λαμπρότητα ενός αστεριού εξαρτάται από το μέγεθος (επιφάνεια) και την θερμοκρασία του. Έτσι τα αστέρια δεξιά επάνω είναι γίγαντες με πολύ μεγάλη επιφάνεια.

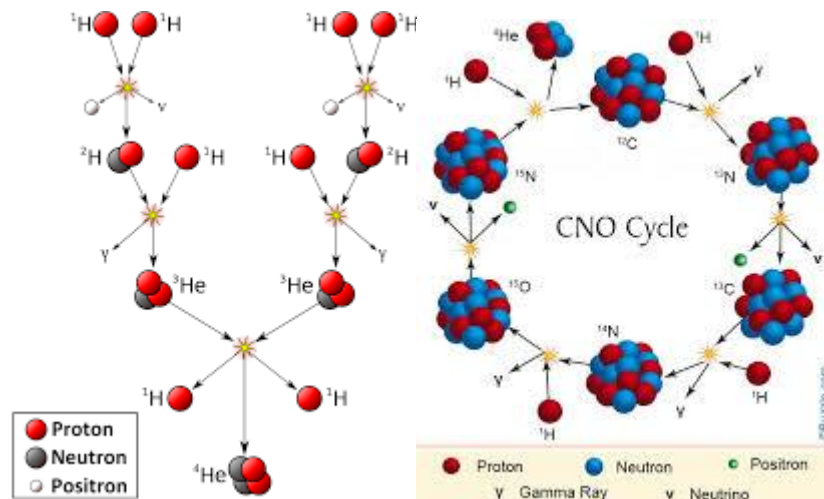


Αν τοποθετήσουμε τα αστέρια ενός ανοιχτού αστρικού σμήνους ηλικίας 100 εκατομμυρίων ετών στο διάγραμμα, τα αστέρια με μάζα μέχρι 3 ηλιακές θα βρίσκονται στην κύρια ακολουθία. Τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας θα βρίσκονται στα δεξιά της. Εγκατέλειψαν την κύρια ακολουθία από το σημείο αποκοπής. Το ύψος αυτού του σημείου στο διάγραμμα μας δείχνει την ηλικία αυτών των αστεριών, όσο πιο χαμηλά είναι τόσο πιο παλιό είναι το σμήνος.



Το παλαιότερο σμήνος έχει χαμηλότερο σημείο αποκοπής

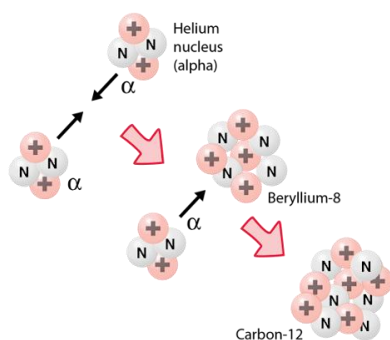
Τα περισσότερα αστέρια στο σύμπαν έχουν μικρότερη μάζα από τον ήλιο μας. Ένα αστέρι με μία ηλιακή μάζα συντήκει το Υδρογόνο σε Ήλιο με την αλυσίδα πρωτονίου- πρωτονίου (pp process). Στα αστέρια με θερμοκρασία πυρήνα πάνω από 20 εκατομμύρια βαθμούς (2,3 ηλιακές μάζες) κυριαρχεί ως μηχανισμός θερμοπυρηνικής σύντηξης ο κύκλος CNO. Σε αυτόν ο Άνθρακας λειτουργεί ως καταλύτης στην παραγωγή Ηλίου.



Οι 2 τρόποι σύντηξης του Υδρογόνου σε Ήλιο

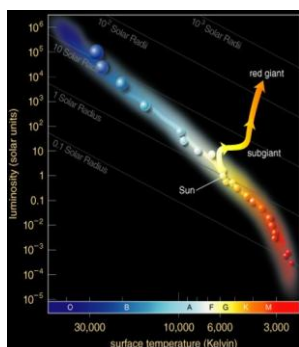
Όταν το Υδρογόνο εξαντληθεί στον αστρικό πυρήνα, το αστέρι διαστέλλεται και γίνεται κόκκινος γίγαντας. Ο πυρήνας συρρικνώνεται επειδή διακόπτεται η σύντηξη με αποτέλεσμα να μην αντισταθμίζεται η βαρυτική πίεση. Απελευθερώνει βαρυτική ενέργεια. Η μισή από αυτήν διαφεύγει με την μορφή ακτινοβολίας ενώ η υπόλοιπη μισή θερμαίνει τον πυρήνα (Virial theorem).

Μόλις αυξηθεί αρκετά η θερμοκρασία στον πυρήνα συντήκεται το Ήλιο σε Άνθρακα. Αυτή η σύντηξη έχει μόλις το 1/10 της απόδοσης ενέργειας από την σύντηξη του Υδρογόνου σε Ήλιο. Έτσι το χρονοδιάγραμμα αυτής της σύντηξης είναι πιο σύντομο. Τα αστέρια με μάζα κάτω από 0,23 ηλιακές δεν αναπτύσσουν την κατάλληλη θερμοκρασία στον πυρήνα για σύντηξη του Ηλίου και καταλήγουν σε λευκούς νάνους Υδρογόνου. Ο πυρήνας σε αυτά τα αστέρια συρρικνώνεται με αποτέλεσμα να εκφυλλίσεται η ύλη λόγω μεγάλης πίεσης. Βέβαια η εξέλιξη σε τόσο μικρής μάζας αστέρια είναι πολύ αργή, κανένα δεν έχει εξελιχτεί σε λευκό νάνο από την αρχή του σύμπαντος. Απαιτούνται 1 τρισεκατομμύρια έτη για να συμβεί αυτό.



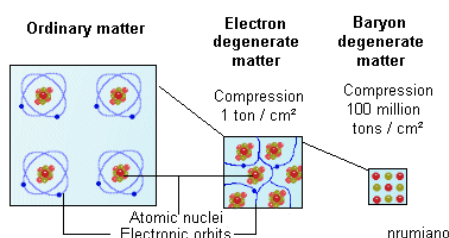
Η σύντηξη του Ηλίου σε Άνθρακα

Αστέρια με μεγαλύτερη μάζα που έχουν εξελιχτεί διαστέλλονται σε αυτή την φάση με αποτέλεσμα να ψύχεται η επιφάνειά τους (η θερμότητα μοιράζεται σε μεγαλύτερο χώρο). Τότε μετακινούνται στο διάγραμμα στον κλάδο των υπογίγαντων, συντήκοντας Υδρογόνο σε Ήλιο σε έναν φλοιό γύρω από τον πυρήνα Ηλίου. Ο μικρός χρόνος παραμονής ενός αστεριού σε αυτή την φάση έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρούμε ελάχιστα αστέρια ως υπογίγαντες, κάτι που απεικονίζεται στο διάγραμμα ως κενό.



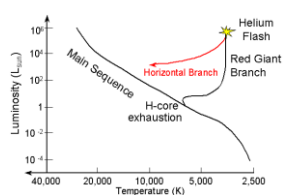
Η εξέλιξη του ηλίου μας στο διάγραμμα

Τα αστέρια παραμένουν περισσότερο στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων από ότι στον υπογίγαντων. Τα εξωτερικά στρώματα των διασταλμένων αστεριών ψύχονται αρκετά ώστε να γίνονται αδιαφανή. Ο δακτύλιος Υδρογόνου γύρω από τον πυρήνα αυξάνει θερμοκρασία και το αστέρι γίνεται πιο λαμπρό. Ο πυρήνας Ηλίου εκφυλλίσεται λόγω πίεσης επειδή δεν φτάνει η θερμοκρασία ώστε να αρχίσει η θερμοπυρηνική σύντηξη σε αυτόν. Τα αστέρια με μικρή μάζα γίνονται με αυτόν τον τρόπο λευκοί νάνοι Ηλίου.

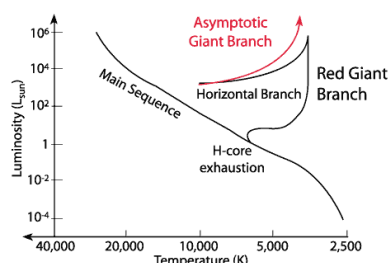


Εκφυλλισμένη ύλη

Τα αστέρια με λίγο μεγαλύτερη μάζα αποκτούν θερμοκρασία 100 εκατομμύρια βαθμούς στον πυρήνα, με αποτέλεσμα να σημειωθεί ταχεία σύντηξη του Ηλίου σε Άνθρακα (Helium flash). Η εκφυλλισμένη ύλη αποτελεί καλό αγωγό της θερμότητας, με αποτέλεσμα η περιοχή όπου άρχισε η σύντηξη να μεγαλώσει ραγδαία. Η πίεση του εκφυλισμού (πίεση ηλεκτρονίων) είναι πολύ πιο ισχυρή από την πίεση του αερίου, άρα η συνολική πίεση της ύλης εκεί δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία. Έτσι η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μόνο μικρή αύξηση της πίεσης. Άρα ο πυρήνας δεν διαστέλλεται. Το Helium flash δεν γίνεται αντιληπτό στην επιφάνεια του αστεριού.



Το αστέρι βρίσκεται πλέον στον οριζόντιο κλάδο, που σημαίνει ότι αυξάνει θερμοκρασία χωρίς αύξηση της λαμπρότητας. Μόλις εξαντληθεί το Ήλιο στον αστρικό πυρήνα, σχηματίζεται και ένας φλοιός από Ήλιο γύρω από τον πυρήνα. Το αστέρι βρίσκεται πλέον στον ασυμπτωτικό κλάδο.

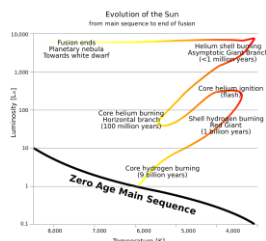


Στα αστέρια μεγάλης μάζας η θερμοπυρηνική σύντηξη Υδρογόνου στον πυρήνα γίνεται βασικά με τον κύκλο CNO. Πρόκειται για μια διαδικασία που δεν μπορούσε να γίνει στα πρώτα αστέρια του σύμπαντος, επειδή δεν υπήρχε ακόμα Άνθρακας. Στον αρχικό ασυμπτωτικό κλάδο το Ήλιο σε φλοιό συντήκεται σε Άνθρακα και Οξυγόνο παράγοντας το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του αστεριού. Το αστέρι διαστέλλεται δραματικά και φτάνει τις 200 ηλιακές ακτίνες.

Στην φάση των θερμικών παλμών (TP, thermal pulsating) το ήλιο στον φλοιό έχει εξαντληθεί. Η ενέργεια του αστεριού παράγεται από την σύντηξη σε έναν λεπτό φλοιό Υδρογόνου. Σε μια χρονική περίοδο 10.000 -100.000 έτη το παραγόμενο Ήλιο συντήκεται εκρηκτικά (δεύτερο Helium flash, κυρίως σε αστέρια ως 2 ηλιακές μάζες).

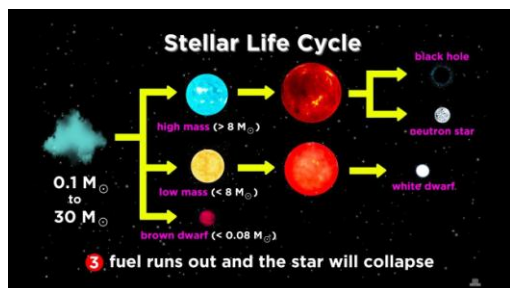
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάμειξη υλικού από τον πυρήνα με υλικό από τα εξωτερικά αστρικά στρώματα. Τα αστέρια στον ασυμπτωτικό κλάδο είναι μεταβλητοί μακράς περιόδου και βιώνουν σημαντική απώλεια μάζας λόγω ισχυρών αστρικών ανέμων, ως και 1 ηλιακή μάζα σε 10.000 έτη. Ουσιαστικά χάνουν όλα τα εξωτερικά του πυρήνα στρώματα.

Το όριο μάζας Chandrasekhar είναι πολύ σημαντικό στην αστρική εξέλιξη. Όταν ένα εκφυλισμένο αέριο όπως ένας εξελιγμένος αστρικός πυρήνας ξεπεράσει αυτή την μάζα (1,38 ηλιακές μάζες) καταρρέει, δεν μπορεί πλέον η πίεση των ηλεκτρονίων να αντισταθμίσει την βαρυτική πίεση. Η ύλη κοντά στον πυρήνα του αστεριού ακολουθεί την κατάρρευση και τα πιο εξωτερικά διαφεύγουν αυξάνοντας την λαμπρότητα (έκρηξη σουπερνόβα).



Τα αστέρια με εκφυλισμένο πυρήνα με μάζα κάτω από αυτό το όριο εξελίσσονται σε λευκούς νάνους. Όταν ο ήλιος γίνει λευκός νάνος θα είναι 100 φορές μικρότερος από σήμερα και θα έχει το μέγεθος της Γης. Όσο πιο μεγάλη μάζα έχει ένας λευκός νάνος τόσο πιο μικρός σε μέγεθος είναι. Η μετάδοση ενέργειας στους λευκούς νάνους γίνεται λόγω

αγωγιμότητας θερμότητας των ηλεκτρονίων. Οι λευκοί νάνοι δεν παράγουν ενέργεια, με αποτέλεσμα να ψύχονται αργά, λόγω μικρής επιφάνειας.



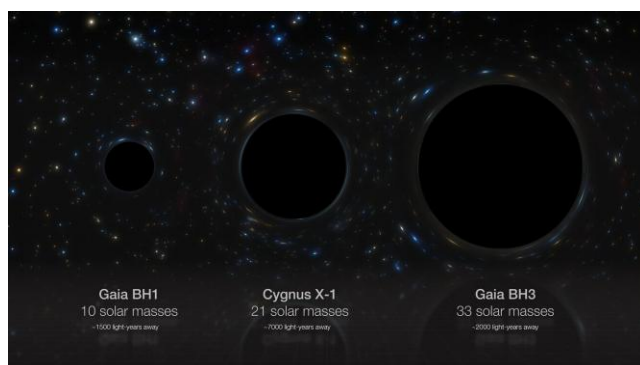
Τα αστέρια με μάζα πάνω από 8 ηλιακές συντήκουν τα χημικά στοιχεία στον πυρήνα μέχρι το Σίδηρο. Η σύντηξη του Σιδήρου είναι ενδόθερμη, δεν παράγεται αλλά καταναλώνεται ενέργεια, με αποτέλεσμα να μην αντισταθμίζεται η τεράστια βαρυτική πίεση. Ο πυρήνας καταρρέει επειδή ξεπερνάει το όριο Chandrasekhar.

Αν το αστέρι έχει αρχική μάζα από 8 ως 20 ηλιακές, θα σχηματίσει έναν αστέρα νετρονίων. Πλέον στηρίζεται από την πίεση των νετρονίων, τα ηλεκτρόνια έχουν συμπιεστεί στους ατομικούς πυρήνες με αποτέλεσμα την δημιουργία νετρονίων.

Η κατάρρευση αυτή γίνεται με μια έκρηξη σουπερνόβα. Τα αστέρια νετρονίων έχουν διάμετρο 10- 20 χιλιόμετρα και λόγω διατήρησης της στροφορμής κατά την κατάρρευση του αστρικού πυρήνα περιστρέφονται τυπικά πολλές φορές το δευτερόλεπτο. Οι αστέρες νετρονίων εκπέμπουν ανιχνεύσιμους παλμούς στα ραδιοκύματα και στις ακτίνες Χ. Το ισχυρότατα μαγνητικά πεδία τους έχουν κλίση προς τον άξονα με αποτέλεσμα οι αστέρες νετρονίων να εκπέμπουν σαν φάροι. Ονομάζονται πάλσαρ.

Το 1054 οι Κινέζοι αστρονόμοι κατέγραψαν μια λαμπρή σουπερνόβα στον Γαλαξία μας που ήταν ορατή την ημέρα με γυμνό μάτι. Σήμερα στο νεφέλωμα Καρκίνος στον αστερισμό του Ταύρου παρατηρούμε το διαστελλόμενο νεφέλωμα αυτής της σουπερνόβα και το πάλσαρ με περίοδο περιστροφής 33ms.

Αν το αστέρι έχει αρχική μάζα πάνω από 20 ηλιακές τότε κάμπτεται και η πίεση των νετρονίων και δημιουργείται μια αστρική μαύρη τρύπα. Αυτή δεν εκπέμπει σε κανένα μήκος κύματος και ανιχνεύεται μόνο έμμεσα, από υλικό (αστέρια και αέριο) που κινείται γύρω της, λόγω του έντονου βαρυτικού πεδίου της.



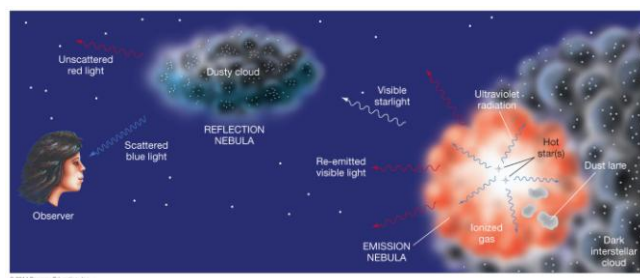
Η δημιουργία των αστεριών

Ο χώρος ανάμεσα στα αστέρια ονομάζεται μεσοαστρικός. Αποτελείται από αέριο και λίγη σκόνη με πολύ μικρή μέση πυκνότητα, 1 σωματίδιο ανά 1 εκατομμύριο κυβικά μέτρα. Η σκόνη αποτελεί το 1% αυτής της μάζας. Η συσσώρευση σκόνης δημιουργεί αδιαφάνεια, όπως παρατηρούμε στα σκοτεινά νεφελώματα. Πολλές φορές τα σκοτεινά νεφελώματα βρίσκονται μαζί με λαμπρά νεφελώματα. Οι πολύ μικρές σκοτεινές περιοχές ονομάζονται σφαιρίδια (globules).

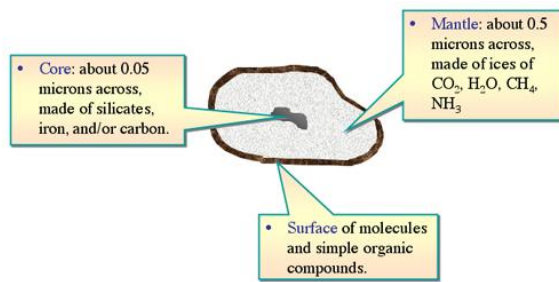
Η μεσοαστρική απορρόφηση του φωτός λόγω της σκόνης έχει ως αποτέλεσμα τα αστέρια να εμφανίζονται πιο αμυδρά. Η σκέδαση είναι πιο έντονη στο μπλε με αποτέλεσμα τα αστέρια να φαίνονται πιο κόκκινα (μεσοαστρική ερυθροποίηση, interstellar reddening). Σημαντική είναι και η πολικότητα του αστρικού φωτός λόγω της σκόνης, 8-10% στο ορατό φως.



Όταν η σκόνη έχει συσσωρευτεί στην μία πλευρά ενός αστεριού παρά ανάμεσα στο αστέρι και τον παρατηρητή η σκέδαση του φωτός προς τον παρατηρητή τον κάνει να παρατηρεί ένα νεφέλωμα ανάκλασης. Αυτό εμφανίζεται πιο μπλε, αφού η ανάκλαση του μπλε είναι πιο αποτελεσματική από αυτή του κόκκινου.



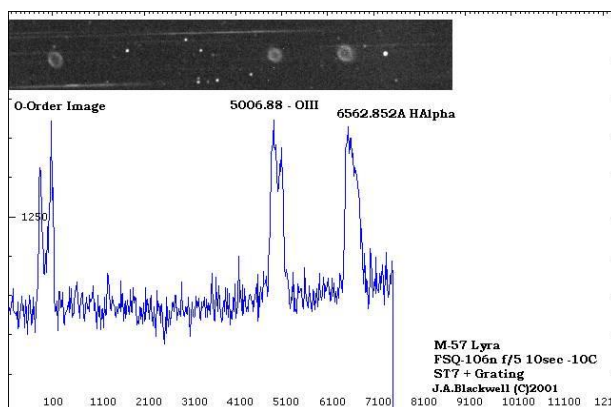
Οι κόκκοι σκόνης είναι επιμήκεις (για αυτό παρουσιάζουν πολικότητα), με πάγο στην επιφάνεια, κυρίως από γραφίτη (Άνθρακα) αλλά και πολύπλοκα μόρια όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, και πυρίτιο. Η σκόνη είναι πολύ σημαντική για την κατάτμηση των νεφελωμάτων στα επεισόδια αστρογένεσης και για την προστασία των μορίων στην επιφάνειά τους από την αστρική υπεριώδης ακτινοβολία.



Το μεσοαστρικό αέριο εντοπίζεται στις παρατηρήσεις όταν στο φως ενός αστεριού εμφανίζονται φασματικές γραμμές που δεν αναλογούν στον τύπο του αστεριού. Αυτές ανήκουν στο αέριο ανάμεσα στον παρατηρητή και το αστέρι. Αν διάφορα νέφη σε αυτή την πορεία παρουσιάζουν διαφορετική κίνηση, αυτό απεικονίζεται στο φάσμα με μετατοπίσεις των φασματικών γραμμών (φαινόμενο Doppler).

Τα νεφελώματα εκπομπής ιονίζονται από αστέρια τύπου O, B που εκπέμπουν βασικά στο υπεριώδες. Τότε ονομάζονται περιοχές H II. Επίσης παρατηρούμε απαγορευμένες γραμμές, φασματικές γραμμές πολύ ιονισμένων χημικών στοιχείων που δεν παρατηρούμε στις συνθήκες που επικρατούν στη Γη αλλά μόνο σε ακραίες συνθήκες.

Αυτές τις παρατηρούμε και στα πλανητικά νεφελώματα, λόγω έντονου ιονισμού από τον λευκό νάνο. Ο λευκός νάνος στο ηλικίας 20.000 ετών και σε απόσταση 2300 έτη φωτός νεφέλωμα του δακτυλιδιού (ring nebula, M57) έχει θερμοκρασία 70.000K. Πρόκειται για τα εξωτερικά στρώματα αστεριού μετά την φάση του ασυμπτωτικού κλάδου. Συνήθως τα πλανητικά νεφελώματα δεν έχουν σφαιρικό σχήμα, λόγω επίδρασης από συνοδό αστέρα του λευκού νάνου.

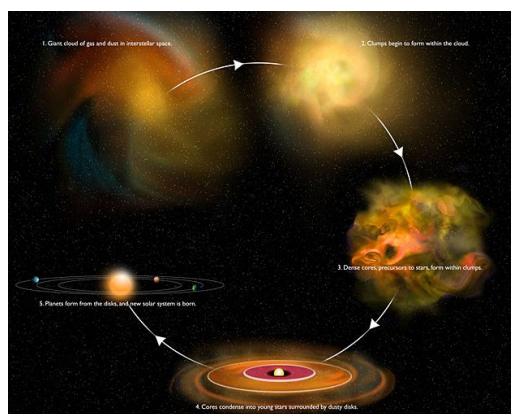


Αντίθετα στις ιονισμένες περιοχές H II οι απαγορευμένες φασματικές γραμμές δεν είναι ξεκάθαρες, λόγω μεγάλης πυκνότητας. Στα 21 εκατοστά παρατηρούμε την γραμμή του ουδέτερου Υδρογόνου. Επίσης παρατηρούμε μόρια όπως τα CO, CN, OH.

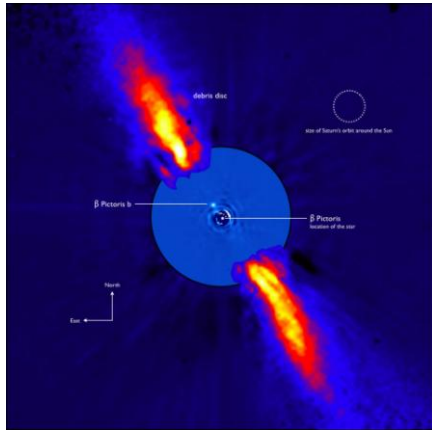
Το κριτήριο Jeans μας δείχνει αν ένα μεσοαστρικό αέριο θα καταρρεύσει. Αυτό συμβαίνει όταν η βαρυτική ενέργεια (έλξη) είναι μεγαλύτερη από την κινητική ενέργεια των σωματιδίων. Μόνο τα νεφελώματα με μάζα πάνω από 1000 ηλιακές μπορούν να καταρρεύσουν. Κατά την κατάρρευση συμβαίνει κατάρτηση (fragmentation), σπάει σε πολλά μικρότερα κομμάτια το νεφέλωμα που καταρρέει. Έτσι τα αστέρια (αποτέλεσμα της κατάρρευσης) δημιουργούνται σε ομάδες.

Σχηματίζουν ανοιχτά σμήνη που διαλύονται σε βάθος εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών λόγω των παλιρροιακών δυνάμεων του Γαλαξία. Τα βασικά στάδια σχηματισμού αστεριών είναι

- 1) Κατάρρευση σε ελεύθερη πτώση. Δεν παρατηρείται σύγκρουση ανάμεσα στα σωματίδια και η εσωτερική πίεση (αντίθετη στην βαρυτική κατάρρευση) είναι μηδενική.
- 2) Η κεντρική περιοχή ενός τμήματος καταρρέει με μεγαλύτερη ταχύτητα από τα εξωτερικά στρώματα.
- 3) Μετά τον σχηματισμό συμπυκνώματος στο κέντρο (πυρήνα), η συσσώρευση ύλης σε αυτό γίνεται από ένα κέλυφος γύρω του. Ο πυρήνας συρρικνώνεται και θερμαίνεται λόγω απελευθέρωσης βαρυτικής ενέργειας. Η μισή από αυτή την ενέργεια θερμαίνει τον πυρήνα και η άλλη μισή διαφεύγει ως ακτινοβολία (virial theorem).
- 4) Όταν ο πυρήνας θερμανθεί αρκετά, αρχίζει η θερμοπυρηνική σύντηξη του Υδρογόνου σε Ήλιο. Το αστέρι πλέον μπαίνει στην κύρια ακολουθία του διαγράμματος H/R. Δεν συρρικνώνεται άλλο και βρίσκεται σε υδροδυναμική ισορροπία.



Η πίεση της ακτινοβολίας του νεαρού αστεριού απομακρύνει όλο το υλικό γύρω του (σκόνη και αέριο). Έτσι υπάρχει μόνο ένα πολύ μικρό χρονικό περιθώριο για τον σχηματισμό των πλανητών. Στο ηλικίας 20 εκατομμυρίων ετών αστέρι β Pictoris, φασματικού τύπου A5, εκτός από έναν πλανήτη (b) παρατηρούμε γύρω του έναν δίσκο από θραύσματα (debris disk). Οι συγκρούσεις πλανητοειδών (σωμάτων που θα δημιουργήσουν πλανήτες) εμπλουτίζουν τον δίσκο σε σκόνη. Η σκόνη δεν μπορεί να είναι αρχέγονη, επειδή απομακρύνεται ή καταστρέφεται σε βάθος εκατομμυρίων ετών από το αστέρι.



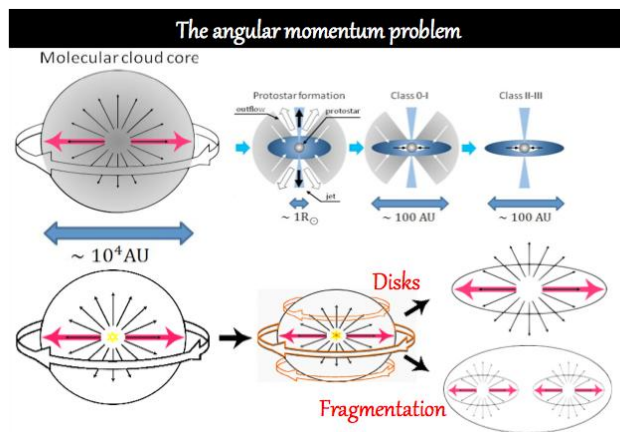
b Pictoris

Υπάρχει ένα πρόβλημα σχετικά με την διατήρηση της στροφορμής κατά την κατάρρευση ενός νεφελώματος. Τα αστέρια θα έπρεπε να περιστρέφονται πολύ πιο γρήγορα αν διατηρούσαν την στροφορμή του νεφελώματος. Ενώ οι πλανήτες στο ηλιακό μας σύστημα αποτελούν μόλις το 1% της συνολικής μάζας (το 99% ο ήλιος), κατέχουν το 99% της στροφορμής του συστήματος!

Τα αστέρια έχουν κατά 3 τάξεις μεγέθους μικρότερη στροφορμή από τα νεφελώματα που τα δημιούργησαν. Αυτό το πρόβλημα είναι πιο έντονο στα αστέρια μεγάλης μάζας, που δημιουργούνται μόνο σε νεφελώματα μεγάλης μάζας. Βέβαια τα αστέρια δημιουργούνται σε ομάδες και πολλά έχουν συνοδό, με αποτέλεσμα να μοιράζεται η αρχική στροφορμή. Επίσης μαγνητικές και βαρυτικές δυνάμεις έχουν ρόλο στην απόσβεση της στροφορμής.

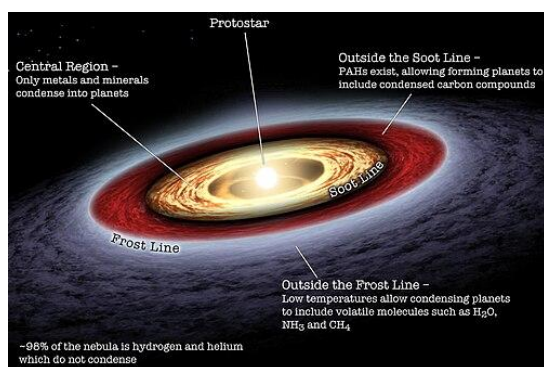
Η μαγνητική πέδηση (magnetic braking) μπορεί να απομακρύνει στροφορμή από το συμπύκνωμα που καταρρέει προς την διάχυτη ύλη γύρω του. Στην εξέλιξη η βαρύτητα γίνεται πιο σημαντική από τις μαγνητικές δυνάμεις και το μαγνητικό πεδίο του σώματος παραμένει σταθερό. Αυτό επιβεβαιώνεται σε ευρήματα στους μετεωρίτες.

Η αλληλεπίδραση του πρωτοαστέρα με το υλικό γύρω του αλλάζει την κατανομή της στροφορμής. Ο πρωτοπλανητικός δίσκος, μεγέθους 100 αστρονομικών μονάδων όπου δημιουργούνται οι πλανήτες, απομακρύνει αποτελεσματικά στροφορμή από το πρωτοαστέρι λόγω του ιξώδους του.

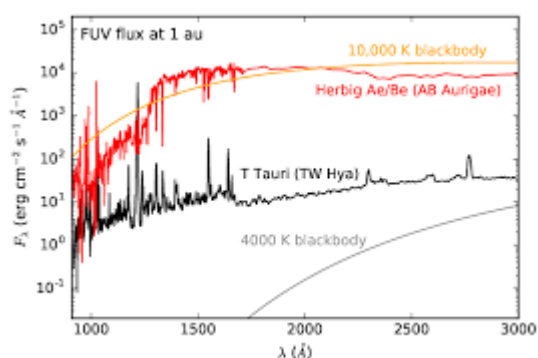


Στον δίσκο η δημιουργία πλανητών αρχίζει όταν το πρωταστέρι ακόμα συσσωρεύει με έντονο ρυθμό ύλη. Η σκόνη στο μέσο του δίσκου ενώνεται και σχηματίζει μεγαλύτερα σώματα, δημιουργούνται οι πρωτοπλανήτες. Όταν ένα τέτοιο σώμα ξεπεράσει τις 10 φορές την μάζα της Γης συσσωρεύει πολύ αέριο και γίνεται αέριος γίγαντας. Αυτοί δημιουργούνται στις εξωτερικές περιοχές του δίσκου, επειδή κοντά στο αστέρι ο αστρικός άνεμος απομακρύνει το αέριο που απαιτείται για την δημιουργία τους.

Για αστέρια με μάζα πάνω από 4 ηλιακές το χρονοδιάγραμμα δημιουργίας πλανητών είναι πολύ μικρό, εξαερώνουν σύντομα τον δίσκο τους λόγω έντονης ακτινοβολίας. Τα αστέρια μεγάλης μάζας δεν έχουν προ κύριας ακολουθίας φάση, μεταστοιχειώνουν το Υδρογόνο σε Ήλιο στους πυρήνες τους πριν έρθουν σε κατάσταση ισορροπίας, όταν ακόμα συρρικνώνονται και συσσωρεύουν ύλη. Μόνο συμπυκνώσεις ύλης στο δίσκο μακριά από αυτά τα αστέρια μπορούν να δημιουργήσουν πλανήτες, κάτι αδύνατο να παρατηρηθεί με τα σημερινά μέσα.



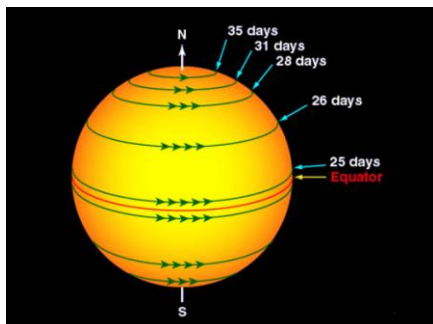
Τα πρωταστέρια μάζας ως 2 ηλιακές ονομάζονται και T Tauri. Εκπέμπουν βασικά στο ορατό φως. Η ενέργειά τους προέρχεται από την συρρίκνωση και η συσσώρευση ύλης εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία (λόγω θέρμανσης της ύλης που πέφτει στο αστέρι). Τα πρωταστέρια μεγαλύτερης μάζας ονομάζονται Herbig AE. Οι δίσκοι προσαύξεσης όπως οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι ανιχνεύονται χάρη σε μια υπέρβαση στην υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared excess) του αστεριού. Αυτό συμβαίνει λόγω της σκόνης στον δίσκο.



Γενικά η υπέρβαση στο υπέρυθρο αυξάνεται με την ηλικία του πρωταστέρα. Η υπέρβαση αυτή συνδέεται με την εκπομπή Ηα. Στα αστέρια Herbig με μάζα πάνω από 7 ηλιακές δεν υπάρχει υπέρβαση εκπομπής στο υπέρυθρο. Η φάση του πρωταστέρα είναι πολύ πιο σύντομη στα αστέρια μεγάλης μάζας.

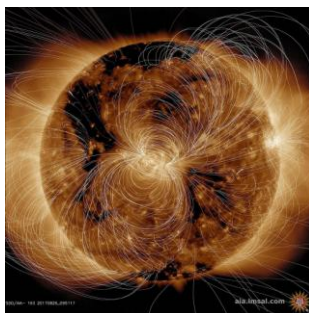
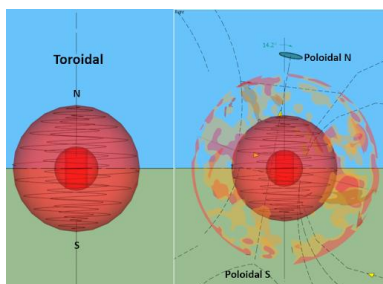
Η παρατήρηση της αστρικής περιστροφής

Η δραστηριότητα σε ένα αστέρι επηρεάζει την εκπομπή του. Ένας τρόπος παρατήρησης της αστρικής δραστηριότητας είναι οι κηλίδες στην φωτόσφαιρα. Η κίνηση μιας κηλίδας λόγω περιστροφής του αστεριού επηρεάζει την φασματική εκπομπή του. Αν η κηλίδα είναι μεγάλη η μεταβολή στην λαμπρότητα (καμπύλη λαμπρότητας) είναι μετρήσιμη. Με αυτόν τον τρόπο οι κηλίδες μας βοηθάνε να μελετήσουμε την αστρική περιστροφή.



Η διαφορετική περιστροφή του ήλιου

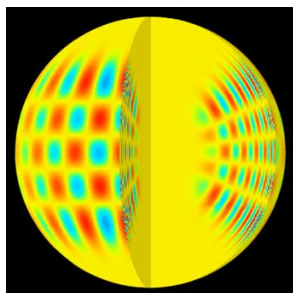
Κηλίδες σε διαφορετικά πλάτη του αστεριού κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Αυτή η διαφορετική περιστροφή του αστεριού συμβαίνει επειδή ένα αστέρι δεν είναι στερεό σώμα. Έτσι οι ισημερινές περιοχές περιστρέφονται πιο γρήγορα από τις πολικές. Η διαφορετική περιστροφή της αστρικής επιφάνειας έχει ως συνέπεια την εξέλιξη των μαγνητικών πεδίων. Το μαγνητικό πεδίο του αστεριού εξελίσσεται από πολικό σε τοροειδές. Η αστρική περιστροφή απεικονίζεται και στην πλάτυνση των φασματικών γραμμών.



Τα αστέρια ταλαντεύονται (oscillation) σαν κοιλότητες συντονισμού. Στον ήλιο παρατηρούμε με το φαινόμενο Doppler μία ταλάντωση διάρκειας 5 λεπτών. Οι διάφορες περιοχές του ηλιακού δίσκου ταλαντεύονται με διαφορετικούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα την επικάλυψη των ταλαντώσεων.

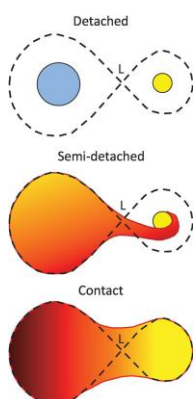
Τα κύματα πίεσης που παράγονται από την συναγωγή στον ήλιο διεισδύουν στο αστρικό εσωτερικό και αντανακλώνται προς την επιφάνεια. Το βάθος της διείσδυσης εξαρτάται από την έκταση του μετώπου των κυμάτων. Η μελέτη του μοτίβο αυτών των ταλαντώσεων

ονομάζεται ηλιοσεισμολογία και για τα άλλα αστέρια αστροσεισμολογία. Αυτή η μελέτη μας δείχνει και την αστρική περιστροφή.



Τα περισσότερα αστέρια έχουν συνοδό. Η περιφορά 2 ή περισσότερων αστεριών γύρω από το κοινό κέντρο βάρους τους επηρεάζει τις περιστροφές τους. Τα διπλά αστέρια χωρίζονται σε οπτικούς διπλούς, όπου φαίνονται (αναλύονται στο τηλεσκόπιο) και τα 2 αστέρια, τους φασματικούς, όπου έχουμε μεταβολές του φάσματος ανάλογα την περιφορά των 2 αστεριών, τους εκλειπτικούς, όπου το ένα αστέρι περνάει μπροστά από το άλλο στην γραμμή θέαςής μας και τους αστρομετρικούς, που παρουσιάζουν ένα λίκνισμα στην κίνησή τους από την βαρυτική επίδραση του συνοδού.

Τα στενά διπλά συστήματα χαρακτηρίζονται πολλές φορές από την ανταλλαγή μάζας ανάμεσα στα 2 αστέρια. Αυτή εξαρτάται από την πλήρωση ή όχι του λοβού Roche. Έτσι υπάρχουν τα διαχωρισμένα, τα ημι διαχωρισμένα και τα συστήματα επαφής.



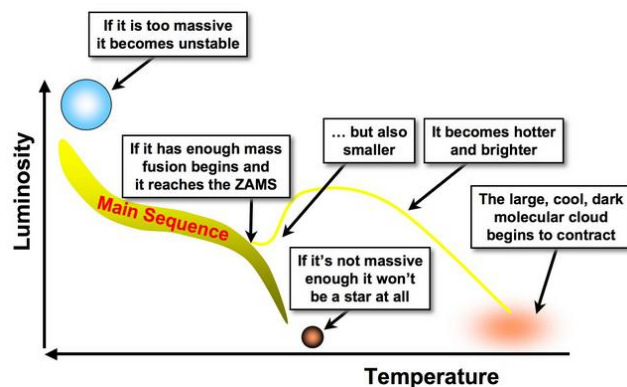
Η εξέλιξη της περιστροφής σε ένα αστέρι με συνοδό έχει να κάνει με την περιστροφή του συνοδού, την περιφορά τους γύρω από το κοινό κέντρο βάρους, την αναλογία μάζας των 2 αστεριών, την παλιρροιακή επίδραση του συνοδού, την μεταφορά μάζας και στροφορμής ανάμεσα στα 2 αστέρια και την μεταβολή της ροπής αδράνειας των 2 αστεριών. Κατά την μεταφορά μάζας αναπτύσσεται ένας δίσκος προσαύξησης στο αστέρι που συσσωρεύει μάζα, που επηρεάζει την στροφορμή των 2 αστεριών.

Η περιστροφή των αστεριών στο διάγραμμα H/R

Σε αυτό το διάγραμμα τοποθετούνται τα αστέρια με βάση την θερμοκρασία και την λαμπρότητα. Μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την αστρική εξέλιξη και την ηλικία των αστεριών. Ένα αστέρι περιστρέφεται επειδή σχηματίστηκε από συρρίκνωση τμήματος

ενός νεφελώματος. Τα σωματίδια σε αυτά τα τμήματα έχουν τυχαία κατανομή στροφορμής, αλλά πάντα υπάρχει μια υπέρβαση στροφορμής σε συγκεκριμένη διεύθυνση. Η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται όταν συρρικνώνεται ένα τέτοιο τμήμα του νεφελώματος, λόγω διατήρησης της στροφορμής.

Τα προ κύριας ακολουθίας αστέρια (πρωτοαστέρια) συσσωρεύουν ακόμα μάζα και γίνονται ορατά όταν απομακρύνουν με τον αστρικό τους άνεμο το αέριο και την σκόνη γύρω τους. Ακόμα δεν παρουσιάζουν θερμοπυρηνική σύντηξη και δεν βρίσκονται σε υδροστατική ισορροπία. Εκλύουν βαρυτική ενέργεια λόγω συρρίκνωσης. Όταν αυτό συμβεί μπαίνουν στην κύρια ακολουθία ως αστέρια μηδενικής ηλικίας (ZAMS, zero age main sequence).



Σε ένα μοριακό νεφέλωμα παρατηρούμε πλάτυνση των φασματικών γραμμών λόγω στροβιλισμού. Η πλάτυνση των γραμμών λόγω της (αργής) περιστροφής είναι αμελητέα.

Η επιφανειακή βαρύτητα ενός αστεριού είναι ανάλογη με την ακτίνα του (για συγκεκριμένη πυκνότητα). Τα αστέρια προ κύριας ακολουθίας έχουν μεγαλύτερη ακτίνα από τα αστέρια κύριας ακολουθίας και μικρότερη πυκνότητα, άρα μικρότερη επιφανειακή βαρύτητα.

Διαχωρίζουμε τα πρωτοαστέρια σε T Tauri όταν έχουν μάζα μικρότερη από 2 ηλιακές και Herbig Ae/Be όταν έχουν μάζα 2-8 ηλιακές.



Τα τελευταία εξελίσσονται πολύ γρήγορα. Παρουσιάζονται γραμμές εκπομπής από το περιαστρικό υλικό που απομακρύνουν λόγω ταχύτατης περιστροφής. Η σκέδαση του ορατού φωτός στον δίσκο προσαύξησης δημιουργεί υπέρβαση στο υπέρυθρο και πολικότητα. Μερικά δείχνουν σημαντική μεταβλητότητα, λόγω συμπυκνωμάτων στον δίσκο προσαύξησης. Σε αστέρια με μάζα πάνω από 5 ηλιακές η θερμοπυρηνική σύντηξη αρχίζει πριν ολοκληρωθεί η φάση συρρίκνωσης.

Η περιστροφή πριν την κύρια ακολουθία είναι σημαντική για την εξέλιξη της περιστροφής του αστεριού. Σε αυτά τα αστέρια οι τεράστιες κηλίδες φτάνουν σε μέγεθος το 30% της επιφάνειας και οφείλονται στην ταχύτατη περιστροφή. Η περιαιστική ύλη συσσωρεύεται στο αστέρι ή απομακρύνεται από τον αστρικό άνεμο.

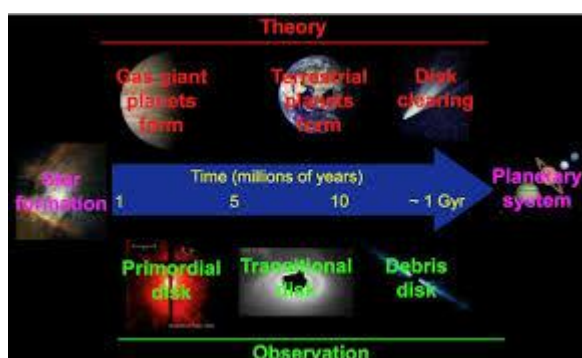
Κατά την προ κύριας ακολουθίας φάση το αστέρι ακόμα συρρικνώνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής αδράνειας και της ταχύτητας περιστροφής. Υπάρχουν 3 παράγοντες που επιβραδύνουν την ταχύτητα περιστροφής, η αλληλεπίδραση με τον δίσκο, οι αστρικοί άνεμοι και η εσωτερική αναδιάταξη της στροφορμής. Ένα αστέρι φτάνει στο μέγιστο της ταχύτητας περιστροφής όταν μπαίνει στην κύρια ακολουθία.

Όταν τα αστέρια μπαίνουν στην κύρια ακολουθία θεωρητικά θα έπρεπε να έχουν χρόνο περιστροφής μικρότερο από 1 ημέρα. Αυτό είναι αντίθετο με τις παρατηρήσεις μας, που σημαίνει ότι υπάρχουν αποτελεσματικοί μηχανισμοί επιβράδυνσης της αστρικής περιστροφής

Η αλληλεπίδραση του αστεριού με τον δίσκο προσαύξησης έχει ως αποτέλεσμα το <κλείδωμα> του δίσκου. Δηλαδή το μαγνητικό πεδίο του αστεριού <κλειδώνει> με αυτό του δίσκου με αποτέλεσμα την μεταφορά στροφορμής από το αστέρι στον δίσκο. Με την συσσώρευση ύλης ο δίσκος κινείται προς την αστρική επιφάνεια.

Η εσωτερική περιοχή ενός δίσκου προσαύξησης περιστρέφεται πιο αργά από το αστέρι, κάτι που μπορούμε να παρατηρήσουμε. Τα αστέρια με ανεπτυγμένο δίσκο περιστρέφονται πιο αργά από αυτά που δεν φαίνεται να έχουν περιαιστικό υλικό. Ο δίσκος επιδρά στην περιστροφή του αστεριού το πολύ για 5 εκατομμύρια έτη.

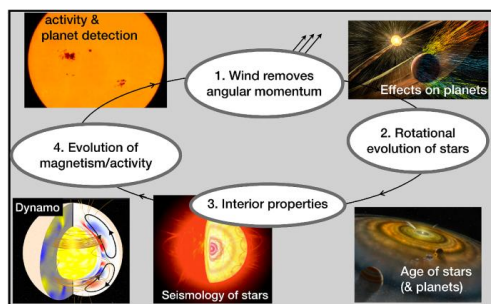
Το χρονοδιάγραμμα του δίσκου αυξάνεται αν αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα και η μάζα του συστήματος δίσκος- αστέρι και ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος. Το 30% των δίσκων έχουν χρονοδιάγραμμα μικρότερο από 1 εκατομμύριο έτη και ελάχιστα έχουν μεγαλύτερο από 10 εκατομμύρια έτη.



Ο αστρικός άνεμος του πρωταστέρα μεταφέρει στροφορμή, ιδίως αν είναι πιο ισχυρός από τα μαγνητικά πεδία του αστεριού. Αποτελεί έναν αποτελεσματικό παράγοντα απομάκρυνσης στροφορμής και επιβράδυνσης της αστρικής περιστροφής.

Η ταχύτητα περιστροφής των αστέρων ελαττώνεται δραματικά για αστέρια με επιφανειακή θερμοκρασία κάτω από 6200K. Αυτά τα αστέρια έχουν βαθιά ζώνη συναγωγής. Ενεργοποιείται ο μηχανισμός του δυναμό για το μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα την

επιβράδυνση της περιστροφής λόγω μαγνητικής πέδησης. Τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας δεν έχουν τέτοιο μηχανισμό απώλειας στροφορμής.

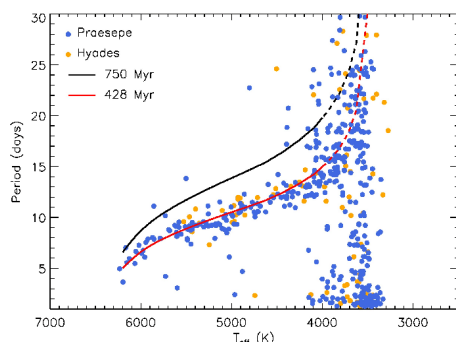


Η μελέτη της αστρικής περιστροφής είναι εφικτή στα σμήνη. Υποθέτουμε ότι τα αστέρια ενός σμήνους έχουν την ίδια ηλικία. Η εξέλιξή τους διαφέρει ανάλογα την μάζα τους. Στα πολύ νεαρά σμήνη τα αστέρια δεν έχουν μπει ακόμα στην κύρια ακολουθία (δεν παρουσιάζουν θερμοπυρηνική σύντηξη). Ακόμα συρρικνώνονται, αυξάνεται η ροπή αδράνειας και η ταχύτητα περιστροφής τους.

Ένα αστέρι με μια ηλιακή μάζα έχει μια εσωτερική ζώνη ακτινοβολίας και μια εκτεταμένη εξωτερική ζώνη συναγωγής. Το αστέρι μπαίνοντας στην κύρια ακολουθία δεν συρρικνώνεται άλλο και βρίσκεται σε υδροστατική ισορροπία. Η εσωτερική του δομή μένει σταθερή κατά την παραμονή του στην κύρια ακολουθία. Το αστέρι συνεχίζει να έχει απώλεια στροφορμής λόγω μαγνητικής πέδησης, αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό.

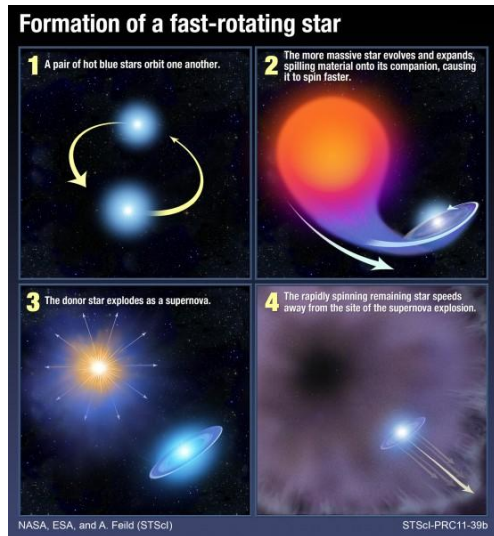
Ενώ τα αστέρια όταν μπαίνουν στην κύρια ακολουθία έχουν μεγάλη διασπορά χρόνου περιστροφής με τιμές περιόδου μικρότερες από 15 ημέρες (η μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής στην εξέλιξή τους), μετά από μερικά εκατομμύρια έτη οι περίοδοι περιστροφής είναι σημαντικά μεγαλύτερες και δεν έχουν μεγάλη διασπορά. Η γυροχρονολόγηση είναι ο καθορισμός της αστρικής ηλικίας από την ταχύτητα περιστροφής.

Στο ανοιχτό αστρικό σμήνος Υάδες με ηλικία 1 δις έτη παρατηρούμε ομοιογένεια των αστρικών στροφορμών για ίδιες αστρικές μάζες (αστέρια τύπου G,K). Στις Πλειάδες, σμήνος με ηλικία 120 εκατομμύρια έτη, τα αστέρια αυτών των τύπων μόλις μπήκαν στην κύρια ακολουθία.



Υπάρχουν αστέρια που έχουν ταχύτατη περιστροφή, όπως 2 αστέρια μεγάλης μάζας τύπου O9, O7.5 (μεγάλης μάζας) στο σύμπλεγμα 30Dor στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Το πρώτο (VFTS 102) περιστρέφεται σε ταχύτητα κρίσιμη για την διατήρηση της συνοχής του. Μάλλον

επιτάχυνε την περιστροφή του λόγω συγχώνευσης με άλλο αστέρι. Το δεύτερο (VFTS 285) περιστρέφεται στο 95% της κρίσιμης ταχύτητας και απομακρύνεται από το σύμπλεγμα, μάλλον ωθούμενο από την έκρηξη σουπερνόβα του συνοδού αστέρα του.



Τα αστέρια μεγάλης μάζας με ταχεία περιστροφή αυξάνουν λαμπρότητα όταν βρίσκονται ακόμα στην κύρια ακολουθία, πριν εξελιχτούν σε κόκκινους γίγαντες. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχεία περιστροφή μεταφέρει Υδρογόνο στον πυρήνα τροφοδοτώντας τον με καύσιμο. Αντίθετα, Ήλιο από τον πυρήνα αναδύεται στην αστρική επιφάνεια. Πρόκειται για ένα σημαντικό παράδειγμα της επίδρασης της περιστροφής στην εξέλιξη των αστεριών.

Τα αστέρια μεγάλης μάζας που έχουν μεγάλη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να την απέκτησαν λόγω μεγάλης αρχικής στροφορμής, λόγω αλληλεπίδρασης με στενό συνοδό (το 90% των αστεριών μεγάλης μάζας έχουν συνοδό) ή λόγω μεταφοράς μάζας από συνοδό αστέρι.

Όταν αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η ακτίνα στους πόλους είναι αισθητά μικρότερη από ότι στον ισημερινό. Έτσι οι πόλοι εμφανίζονται θερμότεροι από τον ισημερινό (επειδή είναι πιο κοντά στον αστρικό πυρήνα), ένα φαινόμενο που ονομάζεται βαρυτική αμαύρωση (gravity darkening).

Το αστέρι Achernar στον Ηριδανό, σε απόσταση 130 έτη φωτός, παρουσιάζει το παραπάνω φαινόμενο και εμφανίζεται πεπλατυσμένο. Τα αστέρια μεγάλης μάζας δεν έχουν εξωτερική ζώνη συναγωγής με αποτέλεσμα να μην υφίστανται απώλεια στροφορμής λόγω μαγνητικής πέδησης. Τα αστέρια που έχουν επιφάνεια πλούσια σε Ήλιο φτάνουν να έχουν στον ισημερινό μιάμιση φορές την ακτίνα που έχουν στους πόλους.



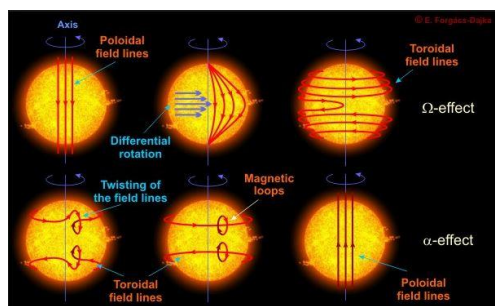
Η αστρική περιστροφή σχετίζεται με την δραστηριότητα της χρωμόσφαιρας, ελαττώνονται και τα δύο αρκετά μέχρι την αστρική ηλικία του 1 δις ετών (για αστέρια ηλιακής μάζας) και μετά με πολύ μικρότερο ρυθμό. Υπάρχουν και αστέρια με πολύ αργή περίοδο περιστροφής (100 έτη). Η επίδραση από συνοδό αστέρα μπορεί να επιταχύνει ή να επιβραδύνει την αστρική περιστροφή.

Οι κόκκινοι γίγαντες έχουν μεγάλη διαφορά ταχύτητας περιστροφής του πυρήνα με το υπόλοιπο αστέρι. Η διαστολή των εξωτερικών αστρικών στρωμάτων ελαττώνει την ταχύτητα περιστροφής, το αντίθετο φαινόμενο με την συρρίκνωση ενός αστρικού πυρήνα σε αστέρα νετρονίων (διατήρηση της στροφορμής).

Όμως αργή περιστροφή παρατηρούμε και σε λευκούς νάνους μικρής μάζας. Ένας μηχανισμός επιβράδυνσης της περιστροφής του αστρικού πυρήνα είναι τα εγκάρσια βαρυτικά κύματα που σχηματίζονται στην εκτεταμένη ζώνη συναγωγής. Έτσι στον ήλιο μας δεν παρατηρούμε μεγάλη διαφορά ταχύτητας περιστροφής του πυρήνα με την φωτόσφαιρα. Η επιβράδυνση της περιστροφής του πυρήνα είναι εφικτή λόγω της μικρής στροφορμής του (λόγω σχετικά μικρής ακτίνας του).

Τα δυναμό των αστεριών

Ο μηχανισμός του δυναμό στα αστέρια είναι η αιτία που έχουμε αστρική δραστηριότητα και κύκλους δραστηριότητας, όπως τον 11ετή κύκλο του ήλιου. Στον μηχανισμό του δυναμό (διαφορική περιστροφή) το πολοειδές μαγνητικό πεδίο μετασχηματίζεται σε τοροειδές. Η συναγωγή και οι δυνάμεις Coriolis το επαναφέρουν σε πολοειδές. Για να συμβεί αυτό και μάλιστα επαναλαμβανόμενα, πρέπει το πλάσμα να εγκλωβίζει τις μαγνητικές γραμμές.

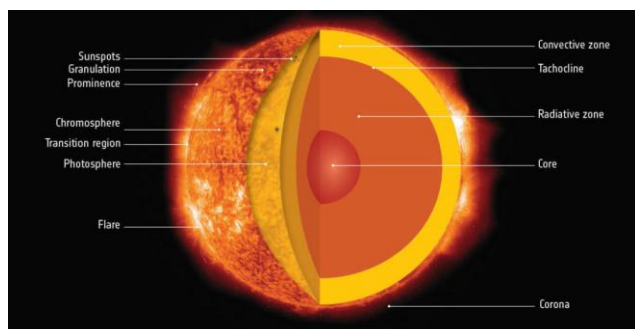


Ο ήλιος μας παρουσιάζει διαφορική περιστροφή. Από μελέτες των κηλίδων συμπεραίνουμε ότι ολοκληρώνει μια περιστροφή σε 15 ημέρες στον ισημερινό, σε 27 ημέρες σε ύψος 45 μοιρών και όπως ανακαλύψαμε με φασματοσκοπική παρατήρηση σε 31 ημέρες στους πόλους. Η μέθοδος που βασίζεται στις κηλίδες δίνει ελαφρώς αυξημένες τιμές περιστροφής από τις πραγματικές, επειδή παρατηρώντας τις κηλίδες <βλέπουμε> λίγο στο εσωτερικό του ήλιου κάτω από την φωτόσφαιρα.

Η δομή του ήλιου περιλαμβάνει τον πυρήνα με την θερμοπυρηνική σύντηξη Υδρογόνου σε Ήλιο και την παραγωγή ενέργειας. Η ζώνη ακτινοβολίας είναι η εσωτερική αστρική περιοχή όπου μεταφέρεται η ενεργεία από τον πυρήνα προς τα έξω μέσω σκέδασης, απορρόφησης και εκπομπής φωτονίων.

Η ζώνη συναγωγής (μεταφοράς) φτάνει σε βάθος 200.000 χιλιόμετρα κάτω από την φωτόσφαιρα. Ανεβαίνει θερμή ύλη στην επιφάνεια και βυθίζεται ψυχρή ύλη από αυτήν. Ο χρόνος αναστροφής συναγωγής (convection turn over time) είναι ο χρόνος που μία φούσκα αερίου χρειάζεται να αναδυθεί στην επιφάνεια. Η αναλογία του με την ταχύτητα περιστροφής είναι σημαντική για την συναγωγή (αριθμός Rossby).

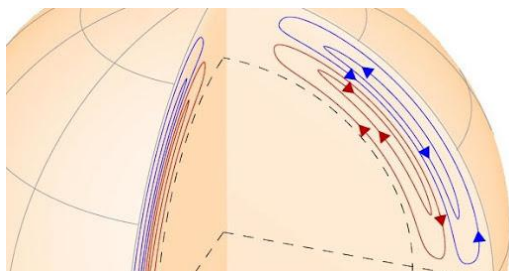
Ανάμεσα στην ζώνη ακτινοβολίας και την ζώνη μεταφοράς υπάρχει ένα λεπτό στρώμα, το ταχοκλινές στρώμα (tachocline). Σε αυτή την περιοχή αλλάζει ο τρόπος περιστροφής από στερεοειδή σε διαφορική. Η περιοχή αυτή είναι κρίσιμη για τον μηχανισμό του δυναμό του ηλίου. Γνωρίζουμε την ύπαρξή της χάρη στην ηλιοσεισμολογία.



Από την φωτόσφαιρα προς το εσωτερικό του ηλίου έχουμε διαφορική περιστροφή στην επιφάνεια, αύξηση ρυθμού περιστροφής για 1000 χιλιόμετρα βάθος, σχεδόν σταθερή διαφορική περιστροφή μέχρι τις 0,6 ηλιακές ακτίνες. Το εσωτερικό του ηλίου μετά από βάθος 0,6 ακτίνες (μετά το ταχοκλινές) περιστρέφεται πιο γρήγορα και χωρίς διαφορική περιστροφή. Η διαφορική περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη οριζόντιων στροβιλισμών.

Η διαφορική περιστροφή του ηλίου θα έπρεπε να δείχνει μεταφορά ύλης προς τους πόλους. Υπάρχει ένας μηχανισμός εξισορρόπησης με την μεταφορά ύλης προς τον ισημερινό στον πυθμένα της ζώνης συναγωγής που έχει να κάνει με τους στροβιλισμούς. Η μεσημβρινή κυκλοφορία στον ήλιο οφείλεται στην ανισορροπία ανάμεσα στην στροφορμή και σε δυνάμεις πλευστότητας.

Η θερμική ανισορροπία είναι αυξημένη στα όρια της ζώνης συναγωγής. Η μεσημβρινή κυκλοφορία κορυφώνεται εκεί και ελαττώνεται μέσα στην ζώνη συναγωγής. Έχει ισχυρή επίδραση στην μεταφορά στροφορμής και την ανάμειξη των χημικών στοιχείων (basικά Ήλιο από τον πυρήνα και Υδρογόνο προς τον πυρήνα) που επιδρούν στην αστρική εξέλιξη.



Μεσημβρινή κυκλοφορία στον ήλιο

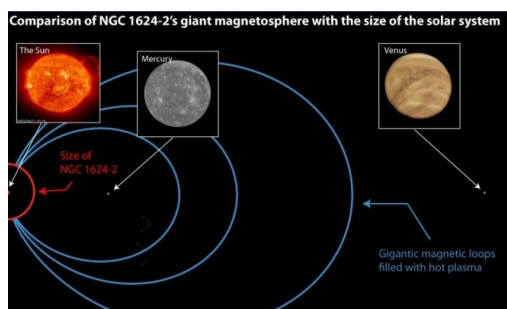
Στα αστέρια με ταχεία περιστροφή η μεσημβρινή κυκλοφορία γίνεται με μεγάλη ταχύτητα. Η ταχύτητα περιστροφής του ηλίου ελαττώνεται με τα χρόνια λόγω μαγνητικής πέδησης, μηχανισμός που ενεργοποιείται πιο έντονα στις ισημερινές περιοχές. Μπορεί να φτάσει στο σημείο να περιστρέφονται ταχύτερα οι πολικές περιοχές από τις ισημερινές (antisolar rotation), κάτι που θα επηρεάσει σημαντικά στον μηχανισμό του δυναμό. Έχουμε ανακαλύψει 22 αστέρια σε αυτή την φάση.

Ένας παράγοντας της ανάπτυξης του φαινομένου του δυναμό στα αστέρια είναι η θερμική συναγωγή. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει ο συνδυασμός προπόρευσης (precession) με την συναγωγή. Απαιτείται ο συνδυασμός αυτών των 2 παραγόντων για την δημιουργία αστάθειας που οδηγεί στην διαφορική περιστροφή. Το ίδιο συμβαίνει στη Γη, όπου ο ρευστός πυρήνας δεν έχει πλέον την απαραίτητη θερμική ροή ώστε η συναγωγή να υποστηρίξει το δυναμό.

Τα αστέρια χωρίς εξωτερική ζώνη συναγωγής, δηλαδή τα αστέρια μεγάλης μάζας με ζώνη συναγωγής βαθιά στο εσωτερικό του αστεριού και εξωτερική ζώνη ακτινοβολίας, δεν έχουν τον μηχανισμό του δυναμό που έχει ο ήλιος μας. Αποκτούν μαγνητικό πεδίο από παλιρροϊκές δυνάμεις (Tidal dynamo action). Έχουν και αυτά αστρική επιφανειακή δραστηριότητα.

Ο Βέγκα είναι ένα αστέρι ηλικίας 500 εκατομμυρίων ετών. Έχει 2,2 φορές την μάζα του ηλίου και 37 φορές την λαμπρότητά του. Περιστρέφεται σε 12,5 ώρες με ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 93% της ταχύτητας περιστροφής όπου θα έχανε την συνοχή του. Έχει ελλειπτικό σχήμα και η διάμετρός του στους πόλους είναι 23% μικρότερη από ότι στον ισημερινό.

Παρουσιάζει έντονο φαινόμενο βαρυτικής αμαύρωσης, με την θερμοκρασία στον ισημερινό να είναι 23% χαμηλότερη από ότι στους πόλους. Έχει ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο.



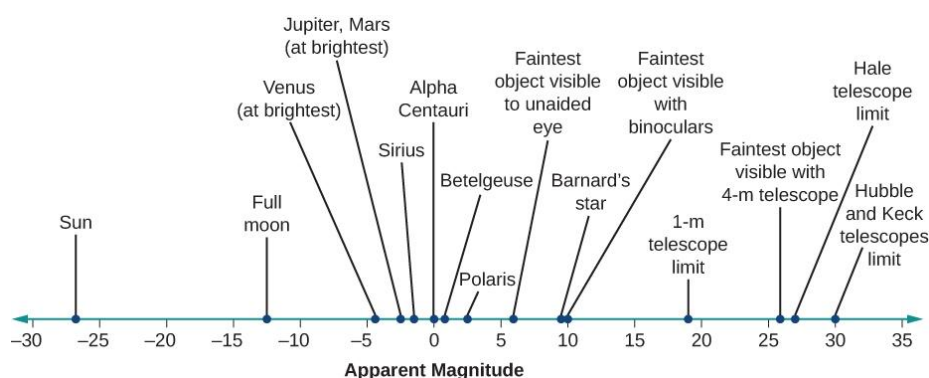
Σε ένα αστέρι που έχει συντήξει το Υδρογόνο στον πυρήνα και εγκαταλείπει την κύρια ακολουθία ο πυρήνας συρρικνώνεται. Έτσι περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, λόγω διατήρησης της στροφορμής. Τα εξωτερικά στρώματα, λόγω διαστολής του αστεριού, ελαττώνουν την ταχύτητα περιστροφής τους.

Υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στην ταχύτητα περιστροφής και την δραστηριότητα στην αστρική επιφάνεια. Όμως υπάρχει ένα όριο κορεσμού, όπου η αστρική δραστηριότητα δεν αυξάνεται με την ταχύτερη περιστροφή (dynamo saturation). Μάλλον επειδή αυξάνεται πολύ η διαφορική περιστροφή λόγω μεγάλης γωνιακής ταχύτητας.

Στο μέγιστο της αστρικής δραστηριότητας το τοροειδές μαγνητικό πεδίο είναι επίσης στο μέγιστο και το πολοειδές στο ελάχιστο. Το αντίθετο συμβαίνει το ελάχιστο δραστηριότητας (φωτόσφαιρα χωρίς κηλίδες).

Αστρική δραστηριότητα και περιστροφή

Η λαμπρότητα στα αστέρια εκφράζεται σε μεγέθη (magnitudes). Με γυμνό μάτι μπορούμε να διακρίνουμε αστέρια με λαμπρότητα ως 6 mag. Αυτή είναι η φαινόμενη λαμπρότητα. Η απόλυτη λαμπρότητα ισούται με την φαινόμενη λαμπρότητα ενός αστέρα από απόσταση 10 πάρσεκ (32,6 έτη φωτός). Ενώ η φαινόμενη απόσταση του ήλιου είναι -26,8 (λόγω εγγύτητας) η απόλυτη είναι +4,8!



Η αστρική δραστηριότητα, δηλαδή κηλίδες, προεξοχές, εκλάμψεις και στεμματικές εκρήξεις, μπορεί να ανιχνευτεί σε άλλα αστέρια εκτός του ήλιου μας, λόγω μεταβολών της λαμπρότητας. Οι κηλίδες αποτελούν απόδειξη μαγνητικής δραστηριότητας. Έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από τις εκλάμψεις, από ημέρες ως και έτη. Μας δίνουν πληροφορίες για την αστρική περιστροφή σε διάφορα πλάτη. Σε εξελιγμένα αστέρια μία κηλίδα μπορεί να καλύψει το 30% της αστρικής επιφάνειας.

Οι μεταβολές της λαμπρότητας ενός αστεριού μπορεί να οφείλονται και σε εξωπλανήτες (διάβαση), αλλά αυτές έχουν περιοδικότητα που απεικονίζεται στην καμπύλη λαμπρότητας. Επίσης περιοδικότητα παρουσιάζουν εξελιγμένα αστέρια όπως οι μεταβλητοί παλμών, και διπλά αστέρια απόκρυψης.

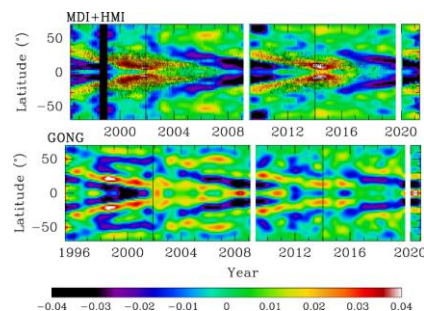
Οι μεταβολές λαμπρότητας στα αστέρια είναι συνήθως πολύ μικρές. Έτσι έχουμε καλύτερα αποτελέσματα από τα διαστημικά τηλεσκόπια, χωρίς την παρεμβολή της γήινης ατμόσφαιρας.

Στα αστέρια η φυγόκεντρος δύναμη ελαττώνει την επιφανειακή βαρύτητα. Επίσης δεν είναι τελείως σφαιρικά, αλλά παρουσιάζουν πλάτυνση. Η ανισότητα στους στροβιλισμούς προκαλείται λόγω ισχυρότερης μεταφοράς ύλης οριζόντια παρά κάθετα στο αστέρι.

Η στροφορμή στο εσωτερικό των αστεριών μεταφέρεται λόγω συναγωγής, στροβιλισμών και μεσημβρινής κυκλοφορίας. Η μεταφορά στροφορμής προς τα μέσα λόγω μεσημβρινής κυκλοφορίας είναι ίση με την διάχυτη ροή στροφορμής προς τα έξω. Με το όρο διάχυση εννοούμε μεταφορά μάζας από πυκνό σε πιο αραιό περιβάλλον.

Η μεσημβρινή κυκλοφορία οφείλεται στην τοπική κατάρρευση της ακτινικής ισορροπίας σε ένα περιστρεφόμενο αστέρι. Στην μεσημβρινή κυκλοφορία η ύλη βυθίζεται στους πόλους και αναδύεται στον ισημερινό.

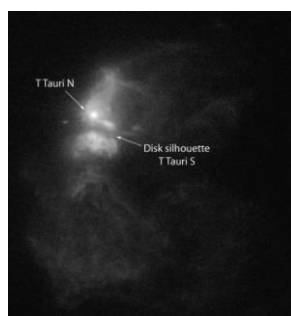
Οι αστάθειες διάτμησης (Shear instabilities) οφείλονται στην διαφορική αστρική περιστροφή και προκαλούν ανάμειξη της ύλης. Είναι ανάλογη της ταχύτητας αστρικής περιστροφής. Όταν ο θερμικός διαχωρισμός είναι σημαντικός, η ρευστότητα ως δύναμη αποκατάστασης περιορίζεται και παρουσιάζονται αστάθειες. Το χρονοδιάγραμμα εδώ είναι το θερμικό. Τα βαρυτικά κύματα προκαλούν στροβιλισμούς και αστάθειες σε αστέρια μεγάλης μάζας με πυρήνα συναγωγής.



Εξέλιξη της αστάθειας διάτμησης στον ήλιο

Τα αστέρια τύπου T Tauri είναι έχουν μάζα ως 2 ηλιακές (φασματικοί τύποι F, G, K, M) και ηλικία κάτω από 10 εκατομμύρια έτη, και δεν συντήκουν ακόμη το Υδρογόνο σε Ήλιο. Είναι μεταβλητοί, βρίσκονται κατά κανόνα μέσα στο νεφέλωμά τους και δεν βρίσκονται σε υδροστατική ισορροπία (ακόμα συρρικνώνονται). Έχουν μεγάλες κηλίδες και εκπομπή ακτίνων X και ραδιοκυμάτων 1000 φορές μεγαλύτερη από ότι ο ήλιος μας. Επίσης παρουσιάζουν ισχυρούς αστρικούς ανέμους και 2 πολικούς πίδακες.

Στο φάσμα τους ανιχνεύουμε Λίθιο, ένα χημικό στοιχείο που καταστρέφεται στους 2,5 εκατομμύρια βαθμούς. Μέρος της ενέργειας των T Tauri προέρχεται από την καύση Λιθίου. Αυτή μπορεί να συμβεί μόνο σε αστέρια με 60 φορές την μάζα του Δία.



P-P chain $p + 6 \text{ }^3\text{Li} \rightarrow 7 \text{ }^4\text{Be (unstable)}$ $7 \text{ }^4\text{Be} + e^- \rightarrow 7 \text{ }^3\text{Li} + \nu$ $p + 7 \text{ }^3\text{Li} \rightarrow 8 \text{ }^4\text{Be (unstable)}$ $8 \text{ }^4\text{Be} \rightarrow 2 \text{ }^4\text{He} + \text{energy}$

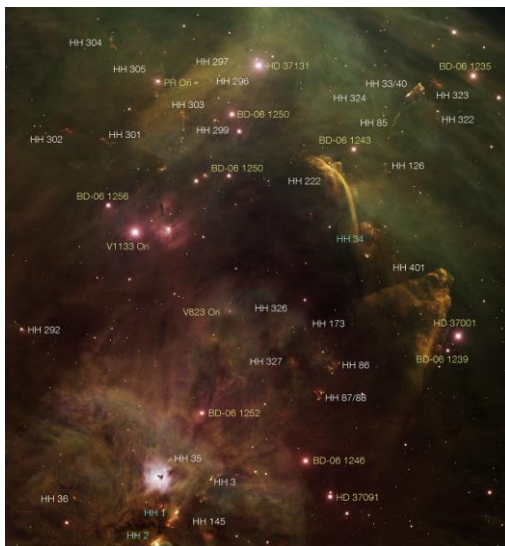
Η ταχεία περιστροφή- επιταχύνεται λόγω συρρίκνωσης- ενισχύει την μεταφορά Λιθίου στο βάθος του αστεριού, όπου υπάρχει η κατάλληλη θερμοκρασία για την καύση του. Έτσι παρατηρούμε ότι οι T Tauri που περιστρέφονται πιο γρήγορα από άλλους έχουν εξαντλήσει

από νωρίς το Λίθιο. Φυσικά το Λίθιο εξαντλείται πιο γρήγορα στους T Tauri με την μεγαλύτερη θερμοκρασία, εκτός από τα αστέρια με τύπους G0-K0.

Η μεταβλητότητά τους οφείλεται και στην αλληλεπίδραση με τον δίσκο προσαύξησης. Το εκτεταμένο στέμμα και οι ισχυρές εκλάμψεις αποσταθεροποιούν τον δίσκο. Οι εκλάμψεις μπορεί να δημιουργήσουν σήραγγες μεταφοράς ύλης προς το αστέρι από τον δίσκο.

Τα πρωτοαστέρια με μάζα 2-8 ηλιακές ονομάζονται Herbig Ae/Be. Τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας δεν έχουν προ κυρίας ακολουθίας φάση, επειδή συντήκουν Υδρογόνο σε Ήλιο όταν βρίσκονται ακόμα στην φάση συρρίκνωσης λόγω μεγάλης θερμοκρασίας. Δεν παρουσιάζουν δίσκο προσαύξησης.

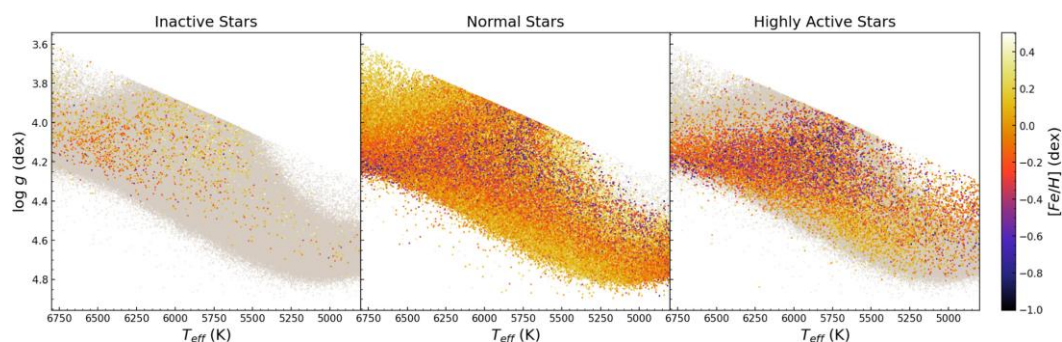
Τα αντικείμενα Herbig- Haro (HH) είναι λαμπρά διάχυτα τεμάχια νεφελώματος σε περιοχές αστρογένεσης που βρίσκονται κοντά σε πρωτοαστέρια. Είναι ευθυγραμμισμένα με τον άξονα περιστροφής ενός πρωτοαστέρα (δέχονται την ενέργεια του πίδακα) και έχουν μέγεθος από 1 ως μερικά πάρσεκ. Είναι περαστικά σε αυτή την θέση με αποτέλεσμα να λάμπουν μόνο για μερικές χιλιάδες έτη. Παρουσιάζουν μεταβλητότητα στην λαμπρότητά τους.



Η θερμοκρασία σε ένα μοριακό νεφέλωμα είναι 10- 20 Κέλβιν. Σε αυτή την θερμοκρασία τα μόρια του CO θα έπρεπε να κινούνται μόλις με 1km/s. Έτσι η κινητικότητα που παρατηρούμε σε αυτά είναι υπερηχητικοί στροβιλισμοί. Ένας μηχανισμός παραγωγής τους είναι η αλληλεπίδραση των πιδάκων των πρωτοαστέρων με την ύλη του νεφελώματος. Οι πίδακες που κινούνται παράλληλα με το γύρω μαγνητικό πεδίο φτάνουν πολύ πιο μακριά από αυτούς που κινούνται κάθετα.

Στα αστέρια με ζώνη συναγωγής που φτάνει στην επιφάνεια υπάρχει αναλογία ανάμεσα στην ταχύτητα περιστροφής και την αστρική δραστηριότητα. Η ταχύτητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη στα αστέρια με εκπομπή Ca II (δραστήρια χρωμόσφαιρα), που είναι πιο νεαρά αστέρια. Η εκπομπή του Ca II εξαρτάται από την μαγνητική δραστηριότητα ενός αστεριού. Μετά από την ηλικία 1 δις ετών η ελάττωση της μαγνητικής δραστηριότητας απεικονίζεται στην μειωμένη εκπομπή του Ca II.

Τα αστέρια επιβραδύνονται με τη ηλικία (γυροχρονολόγηση). Παρατηρούμε γενικά να υπάρχει αναλογία ανάμεσα στην εκπομπή ακτίνων Χ, την περιστροφή και την βολομετρική (σε όλα τα μήκη κύματος) λαμπρότητα των αστεριών.



Όταν η περιστροφή ξεπερνάει το μισό της κρίσιμης ταχύτητας για την διατήρηση της αστρικής συνοχής, το αστέρι δεν είναι πια σφαιρικό αλλά οβάλ. Τότε εμφανίζεται και το φαινόμενο της βαρυτικής αμαύρωσης. Στα αστέρια μεγάλης μάζας οι άνεμοι από τις πολικές περιοχές απομακρύνουν ελάχιστη στροφορμή ενώ αντίθετα η απώλεια μάζας από τον ισημερινό απομακρύνει αποτελεσματικά στροφορμή από την αστρική επιφάνεια.

Οι ιδιότητες περιστροφής των συμπαγών αντικειμένων

Τα αστέρια με μάζα ως 8 ηλιακές, (μάζα πυρήνα 1,4 ηλιακές), που είναι και τα περισσότερα στο σύμπαν, εξελίσσονται σε λευκούς νάνους. Τα αστέρια με μάζα από 8 ως 20 ηλιακές (από 1,4 ως 3 ηλιακές μάζες στον πυρήνα) εξελίσσονται σε αστέρες νετρονίων. Τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας εξελίσσονται σε μαύρες τρύπες.

Οι λευκοί νάνοι έχουν μάζα από 0,17 ως 1,4 ηλιακές, με κορύφωση διασποράς μάζας στις 0,6 ηλιακές. Η ακτίνα τους είναι από 0,8 ως 2% της ακτίνας του ηλίου. Έτσι έχουν παρόμοιο μέγεθος με την Γη. Η πυκνότητά τους (1 τόνος ανά τετραγωνικό εκατοστό) είναι ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου.

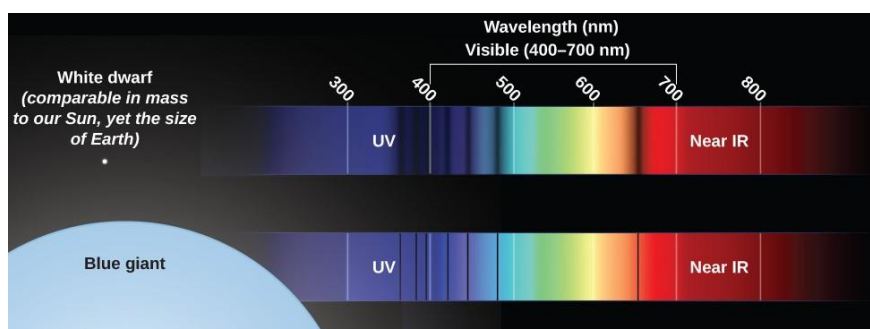
Η δομή τους κυριαρχείται από τα εκφυλισμένα ηλεκτρόνια. Σε αυτά τα σώματα είναι σημαντική μόνο η πίεση των ηλεκτρονίων, που είναι ανεξάρτητη από την θερμοκρασία, και δεν υπάρχει θερμοπυρηνική σύντηξη. Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός λευκού νάνου, τόσο μικρότερη η ακτίνα του!



Η τυπική περίοδος περιστροφής των λευκών νάνων είναι μια ημέρα. Η εξέλιξη ενός αστεριού σε γίγαντα στον ασυμπτωτικό κλάδο με αργή περιστροφή και μετά σε λευκό νάνο καθορίζει τον ρυθμό περιστροφής του.

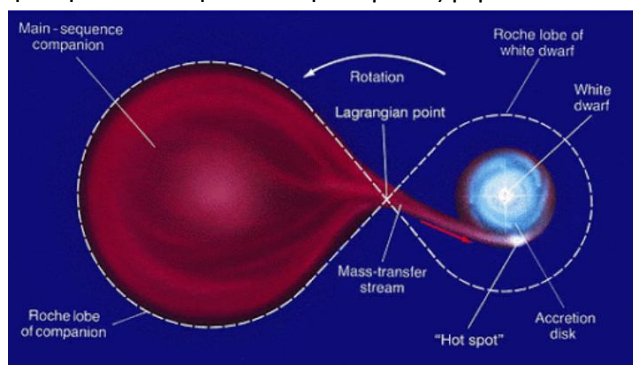
Ένας τυπικός λευκός νάνος με 0,6 ηλιακές μάζες εξελίχτηκε από αστέρι με 3 ηλιακές μάζες. Η αρχική περίοδος περιστροφής του είναι 10 ώρες. Αν δεν είχε επιβραδύνει λόγω εξέλιξης σε ερυθρό γίγαντα αυξάνοντας 90 φορές την αρχική ακτίνα του, θα είχε ως λευκός νάνος περίοδο περιστροφής 90 δευτερόλεπτα.

Η μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής από την παρατήρηση των αστρικών κηλίδων δεν μπορεί να εφαρμοστεί στους λευκούς νάνους, δεν έχουν κηλίδες. Έτσι χρησιμοποιούμε την μελέτη της πλάτυνσης των φασματικών γραμμών.



Οι λευκοί νάνοι σε διπλά αστρικά συστήματα μπορεί να αποκτήσουν στροφορμή όταν συσσωρεύουν ύλη από τον συνοδό τους. Οι κατακλυστικοί μεταβλητοί είναι συστήματα που αποτελούνται από έναν λευκό νάνο και ένα αστέρι, κυρίως ακολουθίας ή κόκκινο γίγαντα (δότη), από τον οποίο συσσωρεύουν ύλη. Πρόκειται για στενά διπλά αστρικά συστήματα.

Η ύλη μεταφέρεται από το σημείο Lagrange 1 σε έναν δίσκο προσαύξησης γύρω από τον λευκό νάνο όταν ο δότης γεμίσει τον λοβό Roche του. Αυτό συμβαίνει στην εξέλιξη μετά την φάση του πλανητικού νεφελώματος γύρω από τον λευκό νάνο.



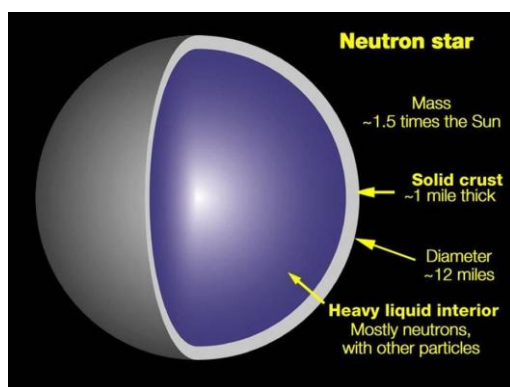
Μερικοί λευκοί νάνοι έχουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα αν πρόκειται για συγχώνευση 2 λευκών νάνων. Η περίοδος περιστροφής αυτών των λευκών νάνων είναι λίγα λεπτά.

Τα αστέρια νετρονίων έχουν ακτίνα 10 χιλιόμετρα περίπου και πυκνότητα ατομικού πυρήνα. Η πίεση εκφυλισμού των νετρονίων συγκρατεί το αντικείμενο από την βαρυτική

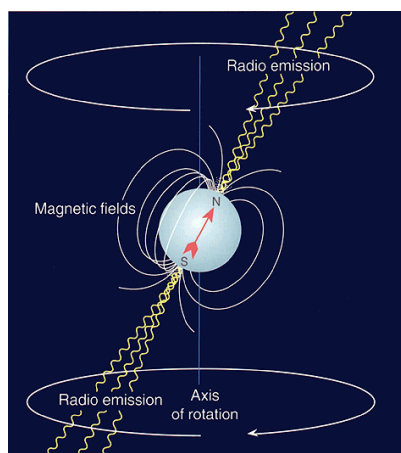
κατάρρευση. Λόγω διατήρησης της στροφορμής η τιμή περιόδου περιστροφής τους φτάνει τις εκατοντάδες φορές το δευτερόλεπτο με περίοδο περιφοράς 1,4 ms ως 30s, στα όρια της βαρυτικής συνοχής.

Το αστέρι νετρονίων με την πιο γρήγορη περιστροφή του γνωρίζουμε είναι το PSR J1748-2446ad. Περιστρέφεται 716 φορές το δευτερόλεπτο με ταχύτητα 0,24 της ταχύτητας του φωτός. Στον Γαλαξία μας υπολογίζουμε να υπάρχουν 100 εκατομμύρια αστέρες νετρονίων.

Κατά την έκρηξη σουπερνόβα ενός αστέρα με αρχική μάζα 8-20 ηλιακές ο πυρήνας καταρρέει μέχρι να συγκρατηθεί από την πίεση των νετρονίων. Λόγω διατήρησης της στροφορμής η ταχύτητα περιστροφής του αυξάνεται σημαντικά. Η ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια ενός αστέρα νετρονίων είναι 100 δις φορές μεγαλύτερη από ότι στην Γη, 0,5 φορές η ταχύτητα του φωτός. Μία κουταλιά του γλυκού μάζας αστέρα νετρονίων ζυγίζει 6 δις τόνους, όσο ένα μεγάλο βουνό στη Γη.



Τα πάλσαρ είναι αστέρες νετρονίων που μας στέλνουν περιοδικά ραδιοκύματα και ακτίνες Χ. Αυτό συμβαίνει επειδή η εκπομπές αυτές δεν είναι ευθυγραμμισμένες με τον άξονα περιστροφής. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε την περιστροφή τους με ακρίβεια. Οι αστέρες νετρονίων επιβραδύνουν με τον χρόνο, με μικρά επεισόδια επιτάχυνσης της περιστροφής (glitches). Η εκπομπή αυτή οφείλεται στα πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία τους.



Οι μαύρες τρύπες έχουν πολύ ισχυρό βαρυτικό πεδίο, ούτε το φως δεν μπορεί να διαφύγει από αυτές (ταχύτητα διαφυγής μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός). Μία περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα έχει $2 <\text{επιφάνειες}>$, τον ορίζοντα γεγονότων όπου η ταχύτητα διαφυγής ισούται με την ταχύτητα του φωτός, και την εργόσφαιρα. Εκεί η

ταχύτητα περιστροφής των σωμάτων (λόγω περιστροφής της μαύρης τρύπας) ισούται με την ταχύτητα του φωτός.

Οι αστρικές μαύρες τρύπες προέρχονται από τη βαρυτική κατάρρευση πυρήνα αστεριού πολύ μεγάλης μάζας, πέρα από το όριο της εκφυλιστικής πίεσης των νετρονίων. Ανιχνεύονται έμμεσα, από το υλικό που συσσωρεύουν (στις ακτίνες Χ).

Οι υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες στα κέντρα των γαλαξιών ανιχνεύονται από τις κινήσεις κοντινών τους αστέρων και νεφελωμάτων, αλλά και με άμεσες απεικονίσεις της σκιάς τους.

