

Αστέρες νετρονίων

Η κατάρρευση ενός αστέρα που έχει εξαντλήσει την πυρηνική σύντηξη έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός λευκού νάνου για τα μικρής μάζας αστέρια, έναν αστέρα νετρονίων για τα μεγαλύτερα ή μια μαύρη τρύπα για τα πολύ μεγάλα. Ενώ το 95% των αστέρων εξελίσσονται σε λευκό νάνο, αστέρια με μάζα 8- 20 ηλιακές (2×10 στη 33 γραμμάρια) γίνονται αστέρες νετρονίων.

Η δημιουργία ενός λ. νάνου είναι ομαλή. Η σύντηξη δεν μπορεί να συνεχιστεί, λόγω μη επαρκούς πίεσης και θερμοκρασίας, και ο αστρικός πυρήνας ισορροπεί την βαρύτητα μέσω πίεσης των ηλεκτρονίων του (εκφυλισμένη ύλη, σημείωση 1). Αν η μάζα του πυρήνα είναι πάνω από 1,4 ηλιακές μάζες, η δύναμη αυτή δεν μπορεί να συγκρατήσει την βαρυτική κατάρρευση και ο πυρήνας εκφυλίζεται σε αστέρι νετρονίων. Η κατάρρευση αυτή δίνει μια ισχυρότατη έκρηξη σ. νόβα II, με την περισσότερη ύλη του αστέρα να αναπηδάει στον πυρήνα και να μένει εκτός αυτού. Ο απομείναντας πυρήνας έχει παρόλα αυτά μάζα της τάξης της 1 ηλιακής. (Σημείωση 1, εκφυλισμός).

Οι διαφορές πυκνότητας μεταξύ αστέρα και λ. νάνου, και λ. νάνου και αστ. νετρονίων είναι τις κλίμακας του 1 εκατομμυρίου. Η διάμετρος του ορίζοντα γεγονότων μιας μαύρης τρύπας είναι μόλις 3 φορές μεγαλύτερη από την διάμετρο ενός αστ. νετρονίων ίδιας μάζας. Έτσι η πυκνότητα της μ. τρύπας είναι μόνο 10 φορές μεγαλύτερη. Οι τεράστιες μαύρες τρύπες στα κέντρα των γαλαξιών με 100 εκ. ηλιακές μάζες έχουν μόλις την πυκνότητα του νερού (υπολογισμένες με την διάμετρο του ορίζοντα γεγονότων).

Σε διπλό σύστημα αστέρα- λ. νάνο ο τελευταίος μπορεί να έλξει μάζα από το αστέρι. Αν ξεπεράσει το όριο Chandrasekhar (1,4 ηλιακές μάζες) θα γίνει μια έκρηξη σ. νόβα Ia, λόγω κατάρρευσης του λ. νάνου σε αστέρα νετρονίων.

Οι αστέρες νετρονίων είναι σαν τεράστιοι πυρήνες. Η πυκνότητα είναι όμοια με την πυρηνική, $6,7 \times 10$ στη 14 gcm⁻³, με την πυρηνική να είναι $2,7 \times 10$ στη 14 gcm⁻³. Η τυπική ακτίνα τους είναι 10,5 με 11,2 χιλιόμετρα και η μάζα 0,5 με 2 ηλιακές. Την μετράμε από την βαρυτική ερυθρολίσθηση του φάσματος στις ακτίνες X και περιορίζεται από την μεγάλη ταχύτητα περιστροφής του. Η πυκνότητα των νετρονίων είναι 0,4 fm⁻³, ενώ στους πυρήνες είναι κανονικά 0,16 fm⁻³. Το κύριο συστατικό τους είναι ένα υπερρευστό νετρονίων με μόλις 5% πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Εξωτερικά υπάρχει μια στερεή κρυσταλλική κρούστα από σίδηρο και άλλα βαρέα στοιχεία. Για αστ. νετρονίων 1,7 ηλ. μάζες αυτή αποτελεί το 1% της μάζας τους, για 1,4 ηλ. μάζες το 2% και για 1 ηλ. μάζα το 4%.

Κατά την κατάρρευση ενός αστέρα σε αστέρα νετρονίων διατηρείται η στροφορμή του, σε ένα πολύ πιο μικρής ακτίνας σώμα. Έτσι έχουμε πολύ μικρούς χρόνους περιστροφής.

Η κρούστα και το υπερρευστό νετρονίων

Η πάχους 1 χιλιόμετρο κρούστα και το ρευστό εσωτερικό είναι τα κύρια συστατικά του αστ. νετρονίων. Ανάμεσα στην κρούστα και το κέντρο, η πυκνότητα αυξάνεται κατά 9 τάξεις μεγέθους, από 10 στην 6 σε 10 στην 15 gcm⁻³. Το εξωτερικό στρώμα της κρούστας είναι ένα πολύ δυνατό δύκτιο, κυρίως από πυρήνες σιδήρου. Στις μικρότερες πυκνότητες μπορούν να διεισδύσουν ηλεκτρόνια στους πυρήνες και να μετατρέψουν πρωτόνια σε νετρόνια, σχηματίζοντας στοιχεία άγνωστα στα εργαστήρια μας, όπως το ¹¹⁸Kr, ένας εντυπωσιακός πυρήνας με 82 νετρόνια και 36 πρωτόνια.

Μέχρι την πυκνότητα των 4×10 στη 11gcm^{-3} δεν έχουμε νετρόνια εκτός πυρήνων. Πάνω από αυτήν την πυκνότητα, που ονομάζουμε σημείο σταγονοποίησης νετρονίων (neutron drip point), οι πιο μεγάλοι πυρήνες γίνονται ασταθείς και τα νετρόνια εμβαπτίζονται σε ένα ρευστό νετρονίων (συν 5% πρωτόνια και ηλεκτρόνια).

Το ρευστό νετρονίων και το συνυπάρχον ρευστό πρωτονίων είναι υπέρρευστα με μηδενικό ιξώδες. Τα ηλεκτρόνια, που αλληλεπιδρούν ασθενώς, δεν σχηματίζουν υπέρρευστο. Ένα μέρος από το υπέρρευστο μπορεί να διεισδύσει στην στερεή κρούστα και να κινείται ανεξάρτητα από αυτήν. Η γωνιακή ταχύτητα του κρυσταλλικού αυτού υπέρρευστου μπορεί να αποσυνδεθεί από αυτήν που έχει το υπόλοιπο αστέρι και αυτό να περιστρέφεται σε άλλο ρυθμό, κάτι που είναι σημαντικό για τις ανωμαλίες των χρόνων των παλμών του αστ. νετρονίων. Η περιστροφή του υπέρρευστου έχει την μορφή διακριτών δυνών, με κάθε μια να έχει ένα κβάντο της γωνιακής ταχύτητας. Η πυκνότητα των δυνών είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας. Η γωνιακή ταχύτητα του υπέρρευστου μπορεί να αλλάξει μόνο αν αυτές οι δύνες μετακινηθούν. Η μετακίνησή τους είναι δεσμευμένη με αλληλεπιδράσεις με την κρυσταλλική δομή της κρούστας και του μαγνητικού πεδίου μέσα στο ρευστό. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις θέτουν μεγάλα προβλήματα στην παρουσίαση της δυναμικής της περιφοράς των πάλσαρ.

Στο κέντρο μπορεί να υπάρχει πιο εξωτική υλη, τα νετρόνια μπορεί να συνθλιβούν σε καόνια και μεσόνια. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα έναν στερεό πυρήνα, που να είναι σημαντικός για την συμπεριφορά της περιστροφής του αστέρα. Μπορεί τα νετρόνια να διαλύονται σε κουαρκ και γλουόνια. Δεν υπάρχει άλλο μέρος στην φύση όπου μπορούμε να μελετήσουμε την φυσική τέτοιων πυκνοτήτων.

Το μαγνητικό πεδίο του αστέρα νετρονίων.

Οι παλσαρ είναι αστέρες νετρονίων με πολύ δυνατό μαγνητικό πεδίο. Οι δυνάμεις του διπολικού πεδίου προέρχονται από την κατάρρευση ενός κανονικού αστέρα με πολικό πεδίο 100 gauss (10στη -2tesla). Η μαγνητική ροή διατηρήθηκε στην καταρρέουσα αστρική υλη. Λόγω ύπαρξης υπέρρευστου πρωτονίων, ο χρόνος φθοράς του μαγνητικού πεδίου συγκρίνεται με αυτόν της ζωής του παλσαρ. Στα πιο πολλά παλσαρ βρίσκουμε ισχύ 10 στη10 με 10 στη12 gauss, ενώ στις πολύ μεγάλης ενέργειας πηγές ακτίνων X, που ονομάζουμε magnetars, φτάνει τα 10 στη14 gauss, το ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο του σύμπαντος. Αντίθετα στους γηραιότερους, εξελιγμένους milliseconds παλσαρ είναι <μόλις> 10 στη8 gauss (ακόμα και αυτή η τιμή είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από ότι πετυχαίνουμε στα εργαστήριά μας).

Το μαγνητικό πεδίο έχει μηδαμινή επιρροή στο σχήμα του αστέρα. Επηρεάζει όμως έντονα το εσωτερικό του. Το υπέρρευστο νετρονίων περιέχει και μικρή αναλογία ηλεκτρονίων και πρωτονίων, που είναι φορτισμένα σωματίδια. Αυτά δεσμεύουν το υπέρρευστο με το μαγνητικό πεδίο. Το υπέρρευστο όμως που διείσδυσε στην στερεή κρούστα δεν είναι απόλυτα δεσμευμένο, ώστε η περιστροφή του παλσαρ να αποτελείται από την περιστροφή ενός στερεού σώματος και ενός υγρού. Ο συνδυασμός αυτών των δύο περιστροφών είναι μεταβλητός. Η δέσμευσή τους μπορεί να αποσυντονιστεί. Τότε η περιστροφή κάνει ένα πήδημα, γνωστό ως glitch. Αυτά είναι σημαντικά για την κατανόηση του εσωτερικού ενός αστέρα νετρονίων.

Το μαγνητικό πεδίο σε αυτό το υπεραγώγιμο εσωτερικό είναι σε μορφή κβαντισμένων σωλήνων ροής. Η πυκνότητα αυτών των σωλήνων είναι ανάλογη με την ισχύ του

μαγνητικού πεδίου. Μέσω των γραμμών απορρόφησης του φάσματος στις ακτίνες Χ μπορούμε να μετρήσουμε την ισχύ του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια ενός παλσαρ.

Η πιο εμφανής επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε ένα παλσαρ είναι η επιβράδυνση της περιστροφής του. Αυτό συμβαίνει λόγω απώλειας γωνιακής ταχύτητας της ηλεκτρομαγνητικής περιστροφής στην περιστροφή του μαγνητικού δίπολου. Ο ρυθμός επιβράδυνσης είναι εργαλείο μέτρησης του διπολικού πεδίου. Σε νεαρά παλσαρ μπορεί να μετρήσουμε τον βαθμό μεταβολής της επιβράδυνσης, επειδή το διπολικό πεδίο δεν είναι σταθερό, αλλά σε αλληλεπίδραση.

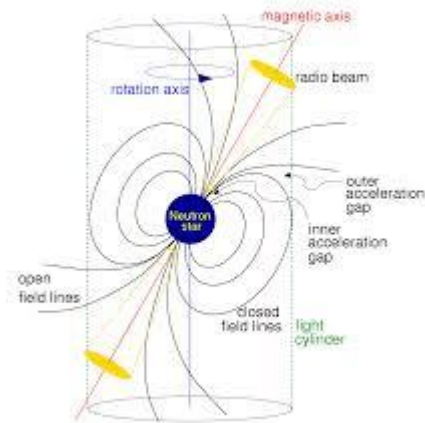
Οι διπλοί ακτίνων Χ μας εμπλουτίζουν τις γνώσεις για το μαγνητικό πεδίο ενός παλσαρ. Η ύλη του συνοδού αστέρα που έλκεται από το παλσαρ αναγκάζεται από το μαγνητικό πεδίο να εισέλθει σε αυτόν σε συγκεκριμένες περιοχές στους πόλους του. Αυτές οι θερμαινόμενες (λόγω τριβής της εισρέουσας ύλης) περιοχές μας δίνουν τις εκπομπές ακτίνων Χ.

Η μαγνητόσφαιρα.

Έξω από την επιφάνεια του παλσαρ το μαγνητικό πεδίο κυριαρχεί όλων των άλλων δυνάμεων, ακόμα και της βαρύτητας, κατά τάξεις μεγέθους. Η διαφορά της ηλεκτροστατικής με την βαρυτική δύναμη σε ένα ηλεκτρόνιο στην επιφάνεια του παλσαρ του νεφελώματος του Καρκίνου είναι 10 στη 12.

Τα εκτεταμένα μαγνητικά πεδία παίζουν κρίσιμο ρόλο στα διάφορα παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά των παλσαρ. Τα δίπολα δεν είναι συνήθως ευθυγραμμισμένα με τον άξονα περιστροφής, που όμως δημιουργεί μια εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην συχνότητα της περιστροφής. Αυτό το γεγονός αποτελεί την αιτία για την κύρια απώλεια της ενέργειας περιστροφής, και την παρατηρήσιμη επιβράδυνση.

Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγεται ένα τοπικό ηλεκτρικό πεδίο, έξω από το παλσαρ. Επηρεάζει μια περιοχή με τέτοιο μέγεθος, ώστε αν σε αυτή έφτανε η επιφάνεια του παλσαρ, θα περιστρεφόταν με την ταχύτητα του φωτός. Αυτή η γωνιακή απόσταση καθορίζει τον κύλινδρο προ της ταχύτητας του φωτός (velocity- of- light cylinder). Μέσα σε αυτόν τον κύλινδρο υπάρχει μια ιονισμένη μαγνητόσφαιρα από πλάσμα υψηλής ενέργειας (δεν μπορεί να επεκταθεί έξω από τον κύλινδρο, γιατί θα ξεπερνούσε την ταχύτητα του φωτός!). Το περισσότερο από αυτό συν- περιστρέφεται με ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός. Εκεί δημιουργείται η δέσμη σχετικιστικής ακτινοβολίας. Η μαγνητόσφαιρα είναι κατά πολύ, αλλά όχι τελείως εξαρτώμενη από τη διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών. Οι συνθήκες στην μαγνητόσφαιρα είναι παρόμοιες με αυτές της ισχυρής αγωγιμότητας στο εσωτερικό των άστρων, όπου δεν μπορεί να υπάρξει ηλεκτρικό πεδίο. Δείχνει να είναι μια προέκταση του εσωτερικού του αστέρα. Και στις δύο αυτές περιοχές το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο ακυρώνεται από ένα στατικό πεδίο.



Η μαγνητόσφαιρα μπορεί να διαιρεθεί σε ισημερινή και πολική περιοχή. Τα όριά της ορίζονται από τις (κλειστές και ανοιχτές) μαγνητικές γραμμές που φτάνουν μέχρι εκεί, αλλά δεν διασχίζουν τον κύλινδρο φωτός. Τα φορτισμένα σωματίδια είναι παγιδευμένα στην ισημερινή περιοχή, αλλά μπορούν να εξέλθουν από τις ανοιχτές γραμμές στους πόλους. Εμφανίζονται δυο κενά στις πολικές περιοχές, όπου πολύ ισχυρά ηλεκτρικά πεδία επιταχύνουν τα σωματίδια σε υψηλές σχετικιστικές ταχύτητες. Το ένα καλύπτει τους πόλους, και σωματίδια που επιταχύνονται εκεί εκκρίνουν του κώνου φωτός με αποτέλεσμα να μπορούν να δημιουργούν τις δέσμες των εκπομπών ραδιοκυμάτων που παρατηρούμε στα παλσαρ. Το άλλο κενό είναι μια προέκταση του κενού στους πόλους που εξελίσσεται κατά μήκος των ορίων ανάμεσα στις δυο περιοχές (τον πόλο και το όριο του κυλίνδρου). Ένα ρεύμα επιστρεφόμενων φορτισμένων σωματιδίων στα όρια αυτού του κενού ρυθμίζει το φορτίο στην πολική εκροή. Το εξωτερικό κενό είναι η θέση εκπομπής των δεσμών ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας φωτονίων που παρατηρούμε στα νεαρά ενεργά παλσαρ και στα μιλισεκοντ παλσαρ, από το οπτικό ως τις ακτίνες γ. Ο μηχανισμός δημιουργίας της ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας στο εξωτερικό κενό έχει κατανοηθεί καλά, αλλά ο μηχανισμός εκπομπής ραδιοκυμάτων δεν έχει κατανοηθεί σε καμία από τις δυο αυτές περιοχές.

Στα νεαρά παλσαρ η ενέργεια που εκκρίνει δημιουργεί σωματίδια υψηλής ενέργειας στο γύρω νεφέλωμα, δημιουργώντας ένα νεφέλωμα με άνεμο παλσαρ (αντίστοιχος του αστρικού ανέμου). Το καλύτερο τέτοιο παράδειγμα είναι το νεφέλωμα του Καρκίνου. Μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από το παλσαρ είναι σε έναν πίδακα σωματιδίων κατά μήκος του άξονα περιστροφής. Δημιουργείται έτσι ένα κυλινδροειδές πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται αρκετή ενέργεια και γωνιακή ταχύτητα στα νεαρά παλσαρ, ώστε να επηρεάζεται η επιβράδυνσή τους.

Οι αποστάσεις των παλσαρ.

Τα κοντινά αστέρια μας δίνουν την απόστασή τους από την παράλλαξη. Σε αποστάσεις πέρα του 1 kpc χρησιμοποιούμε την φαινόμενη λαμπρότητα και συμπεραίνουμε την απόλυτη λαμπρότητα από τον φασματικό τύπο του αστέρα. Οι αποστάσεις των κοντινότερων παλσαρ μετρώνται με την παράλλαξη. Έχουμε μια νέα μέθοδος μέτρησης

ακρίβειας με τις κινητικές ή δυναμικές αποστάσεις από την ακρίβεια των παλμών των μιλισεκοντ παλσαρ και από τις περιόδους περιφοράς διπλών παλσαρ.

Η παρατηρήσιμη ένταση ενός παλσαρ δεν χρησιμοποιείται, γιατί η λαμπρότητά του μεταβάλλεται στον χρόνο και από παλσαρ σε παλσαρ. Έχουμε εκπληκτικές άμεσες μετρήσεις απόστασης από τη διασπορά συχνότητας της ελάττωσης της ταχύτητας της ραδιοακτινοβολίας στην ιονισμένη μεσοαστρική ύλη, που οδηγεί σε μια εύκολα υπολογίσιμη επιβράδυνση στην άφιξη των παλμών, που εξαρτάται από την συχνότητά τους. Το μέγεθος αυτής της χρονικής καθυστέρησης είναι άμεσα ανάλογο με την πυκνότητα στήλης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, κατά μήκος της γραμμής θέασης. Υπάρχουν μοντέλα για αυτή την πυκνότητα. Σε μεγάλες αποστάσεις αυτή η πυκνότητα αλλάζει, ανάλογα την θέση του παλσαρ στον Γαλαξία, κ.λ.π.

Κινητικές αποστάσεις. Μια μεγάλη εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας αυξάνει αξιόλογα (φαινομενικά) την περίοδο, και ας μην επιβραδύνει ο παλσαρ (Shklovsky). Αυτό το ομώνυμο φαινόμενο ονομάζεται δευτερεύοντα επιτάχυνση. Μοιάζει με την μετατόπιση Ντοπλερ. Έχει άμεση σχέση με την επίδραση της περιστροφικής κίνησης της Γης στον χρόνο άφιξης των παλμών, στην μέθοδο μέτρησης απόστασης μέσω παράλλαξης.

Η απορρόφηση από το ουδέτερο υδρογόνο (γραμμές 21εκ.) χρησιμοποιείται για παλσαρ σε μικρά γαλαξιακά πλάτη. Ανάλογα την απορρόφηση εκτιμάμε την απόσταση. Για αυτή την μέτρηση χρησιμοποιούμε τα μοντέλα του μοριακού υδρογόνου του περιστρεφόμενου γαλαξιακού επιπέδου.

Υπολείμματα σ. Νόβα. Το νεφέλωμα του Καρκίνου είναι στα 2 kpc, με αβεβαιότητα 20%. Από τον ιονισμό του από το παλσαρ βρίσκουμε την πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην γραμμή θέασης. Τέτοιες σχέσεις των παλσαρ με τα νέφη τους αποτελούν καλά μέτρα για τις αποστάσεις τους.

Σε πιο μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιούμε τα σφαιρωτά σμήνη, έχουμε ανακαλύψει πάνω από 100 παλσαρ σε αυτά.

Ο σκεδασμός των ραδιοκυμάτων από την μεσοαστρική ύλη. Σε αντίθεση με την διασπορά χρονικής καθυστέρησης, υπάρχουν διαδικασίες σκεδασμού και σπινθηρισμού. Αυτά τα φαινόμενα εξαρτώνται από την διακύμανση της πυκνότητας των ηλεκτρονίων και των μαγνητικών ανωμαλιών κατά μήκος της γραμμής θέασης.

Οι περιοχές μοριακού υδρογόνου. Το μοντέλο διασποράς της πυκνότητας των ηλεκτρονίων στον Γαλαξία έχει 2 μέρη. Έναν χονδρό δίσκο, που εκτείνεται σε μεγάλες γαλαξιακές αποστάσεις, και έναν λεπτό δίσκο, πιο κοντά στο επίπεδο του γαλαξία, κυρίως στις δομές των σπειρών. Υπάρχουν τα διακριτά μοριακά νέφη, όπου γεννιούνται μεγάλα αστέρια O,B, που ιονίζουν τα νέφη με τις υπεριώδεις ακτινοβολίες τους. Μια τέτοια περιοχή κοντά στον ήλιο συνεισφέρει στην μέτρηση της διασποράς κάθε παλσαρ μέσα από αυτήν.

Η ακρίβεια του μοντέλου πυκνότητας ηλεκτρονίων.

Πρέπει να υπάρχει επιφύλαξη ως χρήση της διασποράς σαν μοναδικό μέτρο μέτρησης απόστασης. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μόνο τις σημαντικότερες παραμέτρους διασποράς συμμετρίας ηλεκτρονίων. Πρέπει να συμπληρωθεί η μέτρηση και από άλλες μεθόδους. Σε συγκρίσεις με μετρήσεις απόστασης όπου χρησιμοποιήσαμε την παράλλαξη, φαίνεται ότι υπερεκτιμάμε την τοπική (σε 1 kpc) πυκνότητα ηλεκτρονίων.

Η χρονομέτρηση των παλσαρ.

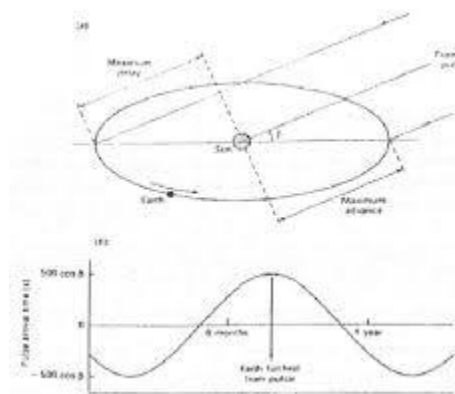
Οι χρόνοι άφιξης των παλμών των ράδιο- παλσαρ μετρούνται εύκολα. Δεν μας δίνουν μόνο πληροφορίες για τη φύση των παλσαρ, αλλά και την ακριβή θέση τους και τη διάδοση των παλμών μέσα από το μεσοαστρικό μέσο. Η μικρή διάρκεια των παλμών και η μικρή και ακριβής περιοδικότητα μας δείχνει ότι η πηγή είναι πολύ μικρή, ένας περιστρεφόμενος παλσαρ. Βλέπουμε ακόμα ότι η περίοδος των παλμών κυμαίνεται (λόγω του φαινομένου Ντόπλερ) από την περιφορά της Γης γύρω από τον ήλιο (άρα η πηγή είναι εκτός ηλιακού συστήματος). Τέλος, ο χρόνος άφιξης ενός παλμού εξαρτάται από τη ράδιο- συχνότητά του, που επηρεάζεται από την διέλευσή του μέσα από ιονισμένο μεσοαστρικό αέριο.

Οι σημερινές μετρήσεις άφιξης παλμών μας δίνουν ακριβείς πληροφορίες για την επιβράδυνση της περιστροφής των παλσαρ και την περιφορά των διπλών παλσαρ. Αποτελούν επίσης βασικές επιβεβαιώσεις της γενικής σχετικότητας και των βαρυτικών κυμάτων, και χρονομέτρες με ακρίβεια παρόμοια των ατομικών ρολογιών.

Υπάρχουν κάποια άλματα μεταξύ του χρόνου άφιξης (TOA, time off arrival) ενός παλμού και του χρόνου εκπομπής του, που έχουν να κάνουν με την περιστροφή της Γης, την δυναμική του ηλιακού συστήματος, την διάδοση στην μεσοαστρική ύλη και την δυναμική των παλσαρ, καθώς και τα χαρακτηριστικά των διπλών παλσαρ.

Η θέση των παλσαρ και η περιφορά της Γης.

Ο Roemer παρατήρησε διαφορές στις θέσεις των δορυφόρων του Δία, ανάλογα με την διαφορετική θέση της Γης στην περιφορά της γύρω από τον ήλιο, υπολογίζοντας έτσι την πεπερασμένη ταχύτητα του φωτός. Έτσι, οι παλμοί από ένα παλσαρ που βρίσκεται στο επίπεδο της εκλειπτικής (όχι κάθετα σε αυτήν), φτάνουν νωρίτερα όταν η Γη είναι κοντύτερα στο παλσαρ.



Πρέπει να γίνουν τουλάχιστον 4 μετρήσεις σε ένα έτος, ώστε να είμαστε σίγουροι για την θέση του παλσαρ. Υπολογίζουμε την γωνία εκλειπτικής- θέσης παλσαρ και την θέση της Γης στην περιφορά της γύρω από τον ήλιο (η ακτίνα της τροχιάς της είναι γνωστή). Πρέπει να συνυπολογιστούν οι παρακάτω λεπτομέρειες.

- 1) Η περιστροφή της Γης προσθέτει μια μεταβλητή καθυστέρησης της άφιξης του παλμού, όση η ακτίνα της Γης (21 ms).
- 2) Η τροχιά της Γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική, όχι κυκλική.

- 3) Ο ήλιος κινείται σε σχέση με το κέντρο αδράνειας του ηλιακού συστήματος, το βαρύκεντρο, το οποίο κινείται ουσιαστικά ομοιόμορφα στο διάστημα και αποτελεί ένα βολικό αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Η κίνηση του ηλίου γύρω από το βαρύμετρο εξαρτάται από τις περιφορές των πλανητών, κυρίως του Δία, που μπορεί να μεταθέσει το βαρύκεντρο μόλις έξω από την επιφάνεια του Ηλίου.
- 4) Το βαρυτικό δυναμικό στη Γη διαφέρει από το δυναμικό σε μεγάλη απόσταση από τον ήλιο, και κυμαίνεται ανάλογα την ελλειπτικότητα της τροχιάς της Γης γύρω από αυτόν. Με την χρήση της γενικής σχετικότητας υπολογίζουμε μια μικρή ετήσια απόκλιση των επίγειων ρολογιών σε σχέση με ένα ρολόι έξω από το ηλιακό σύστημα.
- 5) Το δευτερεύον φαινόμενο Ντόπλερ, από την ειδική σχετικότητα, κυμαίνεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας της Γης. Η διακύμανση αυτού του φαινομένου σχετικά με την ελλειπτικότητα της τροχιάς της Γης είναι πρακτικά δυσδιάκριτη, από την επίδραση της γενικής σχετικότητας στο Νο 4 παραπάνω.
- 6) Υπάρχει μια διακύμανση καθυστέρησης, από την γενική σχετικότητα, λόγω διάβασης του παλμού από το βαρυτικό πεδίο του ηλίου. Ονομάζεται καθυστέρηση Shapiro και εκφράζει την καμπύλωση του χωροχρόνου από αντικείμενα μεγάλης μάζας.
- 7) Η πραγματική ανιχνεύσιμη συχνότητα που παρατηρούμε σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς κυμαίνεται μέσα στο έτος από το φαινόμενο Ντόπλερ λόγω της κίνησης της Γης. Αφού η άφιξη εξαρτάται από την συχνότητα, λόγω διασποράς στην μεσοαστρική ύλη, χρειάζεται μια διόρθωση των παρατηρήσιμων χρόνων των παλμών από παλσαρ με μεγάλη μέτρηση διασποράς.

Οι διορθώσεις των ΤΟΑ πρέπει να δίνουν αποτέλεσμα όμοιο με την θεωρητική παρατήρηση των παλμών από το βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος. Για το φαινόμενο Roemer υπολογίζουμε τις διορθώσεις βάσει εφημερίδων των πλανητικών θέσεων και με χρήση των δεδομένων από διαστημοσυσκευές .

Βασικά πλαίσια αναφοράς θέσεων.

Τα δύο βασικά αστρομετρικά πλαίσια αναφοράς, η εκλειπτική και η ισημερινή, βασίζονται στην τροχιά της Γης και στην περιστροφή της. Η ετήσια διακύμανση της άφιξης των παλμών αποδίδει τις θέσεις των παλσαρ σε εκλειπτικές συντεταγμένες. Συμβατικές τεχνικές ράδιο- συμβολομετρίας και η οπτική αστρομετρία μας δίνουν τις θέσεις σε ισημερινές συντεταγμένες. Οι πόλοι των δύο συστημάτων συντεταγμένων έχουν κλίση (γωνία λοξότητας) 23,5 μοιρών και η διασταύρωση των ισημερινών επιπέδων καθορίζει την διεύθυνση της εαρινής ισημερίας. Η σχέση μεταξύ των αναφορών της τροχιάς της Γης και της περιστροφής της είναι γνωστή με ακρίβεια 0,1 δευτ. μοίρας. Η ακρίβεια στην μέτρηση των μιλισεκοντ παλσαρ μας δίνει ακρίβεια 0,1 εκατομμυριοστό της μοίρας στην παραπάνω σχέση .

Περίοδοι και αλλαγές περιόδων.

Όλα τα γνωστά παλσαρ, εκτός τα παλσαρ ακτίνων Χ που απορροφούν ύλη από συνοδό, έχουν μια μονότονη αργή επιβράδυνση της περιόδου, λόγω απώλειας στροφορμής. Η μεταβολή αυτή της περιόδου του παλσαρ του νεφελώματος του Καρκίνου ανιχνεύεται σε παρατηρήσεις ωρών, και αυτή του Vela σε παρατηρήσεις ημερών. Γενικά όμως χρειάζονται παρατηρήσεις έτους. Οι ακριβείς θέσεις των παλσαρ προσφέρονται μόνο από τις παρατηρήσεις των χρόνων των παλμών, έτσι μια σύντομη αλλαγή της περιόδου

μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπέρασμα της θέσης του παλσαρ. Μπορεί, σε λίγες περιπτώσεις, να σημαίνει ότι βρίσκεται σε διπλό σύστημα. Χρειάζεται προσεκτική ανάλυση, ώστε να μην μπερδεύονται αυτά τα δυο φαινόμενα.

Το αποτέλεσμα των μετρήσεων των χρόνων σε πολλά παλσαρ είναι ότι οι χρόνοι άφιξης των παλμών έχουν εκπληκτική κανονικότητα. Σε νεαρά παλσαρ βρίσκουμε διαφοροποιήσεις στην συχνότητα, όπως στο Vela και στο νέφος του Καρκίνου, αλλά τα περισσότερα παλσαρ δείχνουν μικρές ανωμαλίες των χρόνων σε σχέση με τον θόρυβο της μέτρησης. Ιδίως στα μιλλισεκοντ οι ανωμαλίες είναι τόσο μικρές, ώστε να θεωρούνται τα καλύτερα ρολόγια του κόσμου.

Ιδία κίνηση.

Η ίδια κίνηση των παλσαρ είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να είναι μετρήσιμη στους χρόνους άφιξης των παλμών, μετά από μερικά ετη παρατήρησης.

Βαρυτική επιτάχυνση.

Η παρατηρήσιμη περίοδος περιστροφής ενός παλσαρ μπορεί να διαφέρει αν αυτό επιταχύνεται σε ένα βαρυτικό πεδίο, όπως αυτό ενός γαλαξία ή ενός σφαιρωτού σμήνους, ή ακόμα και αυτό από ένα άστρο- συνοδό. Στα σφαιρωτά παρατηρούμε αυτό το φαινόμενο να είναι πιο έντονο. Στο σφαιρωτό M15, δυο μιλλισεκοντ- παλσαρ κοντά στο κέντρο του σμήνους δείχνουν επιτάχυνση από τον παρατηρητή. Η τιμή της επιτάχυνσης σχετικά με το κέντρο είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της συνολικής μάζας του σμήνους. Στο Τουκάνα 47, τα 9 από τα 15 παλσαρ έχουν αρνητική τιμή επιτάχυνσης, άρα πρέπει να βρίσκονται στην μακρινή από εμάς πλευρά του σμήνους. Έχουν και μεγαλύτερη διασπορά τιμών μέτρησης από αυτά που είναι στην κοντινή πλευρά, κάτι που μας δίνει λεπτομέριες για το περιεχόμενο σε ηλεκτρόνια του αερίου στο σμήνος.

Προπόρευση.

Όταν έχουν γίνει όλες οι διορθώσεις και οι χρόνοι των παλμών μπορούν να αποδοθούν ως χρόνοι εκπομπής του παλσαρ, οι διαφορές μεταξύ παρατηρήσεων ετών και η ομαλή λειτουργία ενός ρολογιού σχηματίζουν ένα πλαίσιο με τα χαρακτηριστικά του παλσαρ. Το βασικό συστατικό είναι η ομαλή επιβράδυνση της περιστροφής, και αν αφαιρεθεί αυτή, βλέπουμε μόνο τις ανωμαλίες της περιστροφής. Αυτές συνήθως είναι μικρές όσο και ο θόρυβος της μέτρησης. Μπορούν όμως να μας φανερώσουν διεργασίες στην εσωτερική δυναμική περιστροφής του παλσαρ. Ένα συστατικό ημι- περιόδου στον θόρυβο, με περίοδο ενός έτους ή περισσότερη, συνδέεται με ελεύθερη προπόρευση. Η ελεύθερη προπόρευση είναι συμπεριφορά των περιστρεφόμενων σωμάτων που είναι απομονωμένα από εξωτερικές επιρροές, και ο άξονας περιστροφής τους δεν είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένος με το διάνυσμα της απόλυτης γωνιακής ταχύτητας.

Το ισημερινό σχήμα ενός περιστρεφόμενου αστέρα νετρονίων είναι σφαιροειδές, με μικρή εκκεντρικότητα. Η ακαμψία του άστρου μπορεί να είναι αρκετή ώστε να διατηρήσει το σχήμα του, ακόμα και αν ο άξονας περιστροφής δεν συμπίπτει με τον κανονικό άξονα της ροπής αδράνειας. Σε ελεύθερη προπόρευση, ο άξονας περιστροφής σχηματίζει έναν μικρό κύκλο, με κέντρο τον πόλο του σφαιροειδούς σχήματος. Η κύρια επίδραση στον παλμό συμβαίνει λόγω της περιοδικής διακύμανσης της γωνίας μεταξύ του μαγνητικού πόλου και του άξονα περιστροφής, που παρατηρούμε ως διακύμανση της επιβράδυνσης. Η προπόρευση παρατηρείται και ως διακύμανση του προφίλ των

παλμών, επειδή μια παλινδρόμηση στην περιστροφή θα αλλάξει την γωνία θέασης με την δέσμη που εκπέμπει το παλσαρ.

Μια επιπλοκή στην θεωρία της προπόρευσης αποτελεί η συμπεριφορά του εσωτερικού υπέρρευστου στην κρούστα και στον πυρήνα. Ένα κανονικό υγρό θα είχε μετριάσει την προπόρευση. Στο υπέρρευστο όμως, η περιστροφή ορίζεται σε κβαντομένες δύνες, που είναι αγκυλωμένες στο κρυσταλλικό πλέγμα της κρούστας. Η αργή προπόρευση μπορεί να γίνει μόνο αν οι δύνες δεν είναι αγκυλωμένες. Από την άλλη, οι δύνες στον πυρήνα δεν μπορούν να επανέλθουν ευθυγραμμιστούν μέσω προπόρευσης, επειδή θα έπρεπε να κόψουν το πλέγμα των σωλήνων μαγνητικής ροής. Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα glitch, μια θεωρία που λύνει αυτό το πρόβλημα.

Ο ρυθμός επιβράδυνσης μειώνεται με την ηλικία του παλσαρ. Παράλληλα μειώνεται και η ισχύς του μαγνητικού πεδίου.

Χρονομέτρηση και αστρομετρία διπλών παλσαρ.

Οι τροχιές των διπλών παλσαρ ποικίλουν από πολύ έκκεντρες (οι PSRJ1638- 4725 με τροχιά 2000 ημερών και εκκεντρικότητα 0,955), μέχρι σχεδόν κυκλικές (οι PSRJ1012+ 5307 έχουν εκκεντρικότητα μικρότερη του 1 εκατομμυριοστού). Αυτές οι ακραίες τιμές έχουν σχέση με την προέλευση και την εξέλιξη ενός διπλού συστήματος.

Παράμετροι μιας τροχιάς διπλών παλσαρ.

Τα μεγάλα βαρυτικά πεδία και οι μεγάλες ταχύτητες σε πολλά διπλά παλσαρ κάνουν αναγκαία την χρήση της γενικής σχετικότητας. Και τα δύο αστέρια κινούνται γύρω από το βαρύκεντρο και έχουν περίαστρο και απόαστρο. Χρησιμοποιούμε τον τρίτο νόμο του Κεπλερ (η σχέση των μεγάλων ημι- αξόνων με την μέγιστη γωνιακή ταχύτητα και την απόλυτη μάζα των παλσαρ).

Ετήσια ορατή παράλλαξη.

Η τροχιά της Γης γύρω από τον ήλιο, που μας δίνει αλλαγές στην παράλλαξη της φαινομενικής θέσης των ουράνιων αντικειμένων, μας δίνει επίσης περιοδική αλλαγή της γωνίας, από την οποία παρατηρούμε ένα διπλό σύστημα. Το φαινόμενο αυτό έχει μικρή επίπτωση και είναι μετρήσιμο μόνο για κοντινά συστήματα.

Σχετικιστικές επιδράσεις στις τροχιές των διπλών παλσαρ.

Η διαμόρφωση των χρόνων άφιξης των παλμών ενός παλσαρ σε διπλό σύστημα είναι ανάλογη της κυκλικής διακύμανσης των χρόνων άφιξης με την θέση του παρατηρητή, σε σχέση με το βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος. Πολλές από τις τροχιές των διπλών είναι μικρές σε σχέση με την τροχιά της Γης. Έτσι οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι μικρότερες και οι ταχύτητες μεγαλύτερες, και οι σχετικιστικοί όροι γίνονται πιο σημαντικοί.

Η σχετικιστική εξέλιξη της τροχιάς διπλών παλσαρ.

Στα πιο πολλά διπλά μιλλισεκοντ παλσαρ ο συνοδός είναι επίσης υπέρπυκνο αστέρι, λευκός νάνος ή αστέρας νετρονίων. Αν θεωρήσουμε ότι το σύστημα δεν δέχεται εξωτερικές επιρροές, όπως βαρυτικές έλξεις σε ένα σφαιρωτό σμήνος, τα δυο αστέρια

μπορούν να θεωρηθούν ως σημειακές μάζες και να αποτελέσουν ιδανικά πεδία δοκιμών της σχετικιστικής βαρύτητας. Ενώ σε τροχιές Κεπλερ (βάσει των νόμων του Νεύτωνα) δεν θα είχαμε αλλαγές στις παραμέτρους των τροχιών, σε πολλά συστήματα έχουμε αλλαγές σε βάθος μερικών ετών. Η βαρυτική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σύστημα, βάσει της γενικής σχετικότητας, επιβραδύνει τις τροχιές των 2 άστρων. Επίσης, έχουμε επιρροή από την ίδια κίνηση και επιτάχυνση στο γαλαξιακό βαρυτικό πεδίο που προστίθεται στην επίδραση της βαρυτικής ακτινοβολίας.

Μια δεύτερη επίδραση της γενικής σχετικότητας είναι μια μετάπτωση του άξονα περιστροφής του παλσαρ. Αυτό έχει να κάνει με το δέσιμο της στροφορμής του περιστρεφόμενου παλσαρ με την στροφορμή της τροχιάς. Το ενδιαφέρον συμπέρασμα από τις παρατηρήσεις είναι ότι η γραμμή θέασης του παρατηρητή μπορεί να έχει μια προοδευτικά διαφορετική κόψη στην δέσμη που εκπέμπει ένα πάλσαρ. Έτσι, οι αλλαγές στις μορφές των διαστημάτων των παλμών έχουν να κάνουν με τη γεωδαιτική μετάπτωση (PSRB1913 +16). Τέτοιες αλλαγές στη θέαση αυξάνουν την πιθανότητα να έχουμε όχι μόνο πλήρες από- ευθυγράμμιση της μορφής της δέσμης σε δύο διαστάσεις, αλλά και ότι η μετάπτωση μπορεί να απομακρύνει την δέσμη τόσο από την γραμμή θέασης, ώστε να μην είναι πια ορατοί οι παλμοί μόλις μερικές δεκαετίες μετά την ανακάλυψη του παλσαρ. Για το παλσαρ στην περίπτωσή μας αυτό θα γίνει το 2025. Μερικά από τα συστήματα με συνοδό λ. νάνο έχουν τροχιές που αναμένουμε να μας δείξουν μεγάλες σχετικιστικές επιδράσεις.

Το διπλό σύστημα παλσαρ J0737- 3039A/B.

Είναι το σύστημα με την μικρότερη περίοδο τροχιάς (2,45 ώρες). Η τροχιά του θα χωρούσε στο εσωτερικό του ηλίου μας. Έχει μικρή εκκεντρικότητα. Αυτό το σύστημα χάνει ταχύτητα ενέργεια λόγω βαρυτικής ακτινοβολίας, και τα δυο σώματα θα ενωθούν σε 85 εκ. έτη, το συντομότερο χρονικό διάστημα για γνωστό τέτοιο σύστημα. Η ύπαρξη τέτοιων συστημάτων μας ενθαρρύνει για την άμεση ανακάλυψη των βαρυτικών κυμάτων, κάτι που πετύχαμε πρόσφατα και με την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων από σύγκρουση 2 αστερών νετρονίων.

Η κλίση του άξονα της τροχιάς του συστήματος είναι σχεδόν στην κόψη, έτσι η γραμμή θέασης πλησιάζει τον συνοδό του παλσαρ. Αυτός βρέθηκε να είναι επίσης παλσαρ, και η τροχιά του μπορεί να βρεθεί ανεξάρτητα. Το μέγεθος των σε προβολή μεγάλων ημιαξόνων μας δίνει το μέγεθος των δυο μαζών. Το άθροισμά τους βρίσκεται από την μετάπτωση της τροχιάς. Έτσι υπολογίζουμε τις μάζες με εκπληκτική ακρίβεια.

Οι δύο παλσαρ (A,B) έχουν περιόδους τροχιάς 22,7 και 2,77 μιλισεκοντ. Ο B έχει μεγάλη μαγνητόσφαιρα, που καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της μεταξύ τους απόστασης. Έχουμε παρατηρήσει εκλείψεις του A από την μαγνητόσφαιρα του B και έναν μεγάλης ενέργειας άνεμο του A να διαταράσσει την μαγνητόσφαιρα του B, υποβιβάζοντας τους παλμούς του B σε μεγάλο μέρος της τροχιάς.

Η θεωρία της γενικής σχετικότητας μας έδωσε παρατηρήσιμες επιδράσεις της δέσμευσης της στροφορμής της περιστροφής των 2 παλσαρ και της τροχιάς τους. Η έκλειψη του A από την μεγάλη μαγνητόσφαιρα του B αλλάζει ανάλογα την μετάπτωση του άξονα περιστροφής του B. Η όψη του B ξεθωριάζει, αλλά δεν είναι σαφές αν έχει να κάνει με αλλαγές στην μαγνητόσφαιρα ή με την μετάπτωση του άξονα περιστροφής.

Τεστ της βαρυτικής θεωρίας.

Οι διπλοί παλσαρ μας δίνουν την μοναδική δυνατότητα να δοκιμάσουμε την θεωρία της γενικής σχετικότητας σε μεγάλα βαρυτικά πεδία και μεγάλες επιταχύνσεις. Το αξίωμα ισχυρής ισοδυναμίας (SEP, strong equivalence principle) βασίζεται στην ισοδυναμία της αδρανειακής και βαρυτικής μάζας, κάτι που επιβεβαιώνεται από τις παρατηρήσεις αυτών των συστημάτων.

Βαρυτικά κύματα.

Τα βαρυτικά κύματα αναμένεται να δώσουν μια ξεχωριστή υπογραφή στους χρόνους των παλσαρ, αποτελώντας ένα στοχαστικό σήμα ενός κοσμικού υποβάθρου διπλών συστημάτων στο νεαρό σύμπαν. Με την διαστολή του σύμπαντος, τα βαρυτικά κύματα αυτού του υποβάθρου θα έχουν διασταλεί με το μέγεθος του ορίζοντα, και η πυκνότητα ενέργειας του κύματος θα είναι ένα σταθερό κλάσμα της συνολικής ενέργειας.

Η ανακάλυψη πλανητικών συστημάτων σε παλσαρ.

Το 5% των παλσαρ είναι σε διπλά συστήματα. Κάποια έχουν συνοδούς μικρότερης μάζας από 0,1 ηλιακές. Ένας μεγάλος πλανήτης σε μεγάλη απόσταση από το παλσαρ θα ήταν ανιχνεύσιμος λόγω περιοδικής μετάθεσης του παλσαρ από το βαρύκεντρο του συστήματος. Ο Δίας για παράδειγμα αναγκάζει τον ήλιο να μετατίθεται κατά 2,5 δευτερόλεπτα φωτός. Έχουμε ανακαλύψει μερικά τέτοια συστήματα.

Χρονικές ανωμαλίες.

Σε χρονική διάρκεια μερικών ημερών όλοι οι παλσαρ δείχνουν εντυπωσιακή σταθερότητα της περιόδου περιστροφής τους. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, αφού η σταθερή περιστροφή είναι αναμενόμενη για ένα περιστρεφόμενο σώμα με μεγάλη σταθερή αδράνεια, που είναι απομονωμένο στο διάστημα. Η στροφορμή του άστρου μπορεί να αλλάξει μόνο από την επίδραση της επιβράδυνσης λόγω ακτινοβολίας από το μαγνητικό δίπολο, ή μιας σχετικής με αυτό εκροής ύλης, ή στην περίπτωση της αύξησης της στροφορμής των παλσαρ ακτίνων Χ από την επίδραση της μεταφοράς στροφορμής από το διπλό σύστημα του αστέρα μέσω της επιταχυνόμενης ύλης που έλκεται από αυτόν. Οι επιδράσεις στους ράδιο- παλσαρ είναι συνήθως απαλές και προβλέψιμες. Υπάρχουν όμως μερικές ανωμαλίες που έχουμε παρατηρήσει στις περιστροφές των παλσαρ, που έχουν να κάνουν με αλλαγές στο εσωτερικό και στο εξωτερικό τους.

Οι εσωτερικές αλλαγές εμφανίζονται σε απότομες ρυθμίσεις κατά την αργά μεταβαλλόμενη κατάσταση ισορροπίας. Για παράδειγμα, το ταχύτατα περιστρεφόμενο αστέρι θα πεπλατυνθεί αισθητά, και η ελλειπτικότητα ισορροπίας θα μειωθεί κατά την επιβράδυνση. Η κρούστα είναι όμως ακραία άκαμπτη, και μπορεί να προσαρμοστεί στην μεταβαλλόμενη ελλειπτική μόνο με μια σειρά από βήματα (όχι ομαλά) στην περίοδο περιστροφής. Οι ανταποκρινόμενες αλλαγές στην αδράνεια μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να είναι παρατηρήσιμες, αφού η διατήρηση της στροφορμής θα εμφανίζεται ως βήματα στην περίοδο περιστροφής. Αυτή η διαδικασία δεν είναι στην πράξη αρκετά μεγάλη ώστε να είναι μετρήσιμη στα πιο πολλά επαναλαμβανόμενα

βήματα της περιόδου περιστροφής, καθώς αυτά εξαρτώνται από τις ανταλλαγές της στροφορμής μεταξύ της κρούστας και του υπέρρευστου εσωτερικού του παλσαρ. Τέτοιες παρατηρήσεις μας δίνουν μια μοναδική θέα στη φυσική του εσωτερικού του παλσαρ.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες χρονικών ανωμαλιών. Η μια είναι θορυβώδεις και συνεχής ακανόνιστη συμπεριφορά γνωστή ως χρονικός θόρυβος, και η άλλη ένα εντυπωσιακό βήμα στην ταχύτητα περιστροφής, που ονομάζεται glitch. Αυτά εμφανίζονται μάλλον σε όλα τα παλσαρ, αλλά επειδή εμφανίζονται σε διαστήματα μερικών ετών, τα γνωρίζουμε μόνο σε παλσαρ που παρατηρούμε πολύ χρόνο.

Τα glitch εμφανίζονται συχνότερα σε νεαρά παλσαρ, όπως το Crab και το Vela. Σε μιλισεκόντ παλσαρ έχουμε εντοπίσει μόνο ένα (PSRB1821-24), μάλλον επειδή τα μιλισεκόντ εξελίσσονται πιο αργά από τα άλλα παλσαρ. Ο χρονικός θόρυβος είναι πιο συνηθής, αλλά και αυτός φαίνεται περισσότερο στα νεαρά παλσαρ και σπάνια στα μιλισεκόντ.

Glitches.

Το glitch είναι ένα ασυνεχές βήμα αύξησης του ρυθμού περιστροφής (επιτάχυνση). Τα πιο εντυπωσιακά τέτοια φαινόμενα τα παρατηρούμε να συμβαίνουν στο Vela παλσαρ. Αυτό το παλσαρ έχει περίοδο 89 ms και ο κανονικός ρυθμός αύξησης της περιόδου (επιβράδυνση περιστροφής) είναι 10,7 ns την ημέρα. Σε ένα τυπικό glitch, που εμφανίζεται κάθε 3 χρόνια περίπου, η περίοδος μειώνεται κατά 200 ns. Μετέπειτα επανέρχεται μετά από μερικές εβδομάδες σε μια περίοδο κοντά, αλλά όχι ακριβώς σε αυτή που περιμένουμε από προηγούμενες παρατηρήσεις. Η ξαφνική αυτή αλλαγή περιόδου συνήθως παρατηρείται ως ασυνεχής μείωση της κλίσης των χρονικών διαστημάτων. Η μεταβολή στην συχνότητα περιστροφής είναι τυπικά ένα με δύο μέρη στο εκατομμύριο (η μεγαλύτερη ήταν 3,1 στο Vela, 01/2000).

Τα glitch είναι σπάνια φαινόμενα, αλλά έχουν παρατηρηθεί σε πολλά κανονικά παλσαρ. Τα διαστήματά τους μεγαλώνουν με την ηλικία του παλσαρ. Μπορεί να έχουν μεγάλο εύρος αλλαγής συχνότητας ακόμα και στο ίδιο παλσαρ. Στα νεαρά παλσαρ τα βήματα στην συχνότητα είναι μικρά, αλλά τα βήματα στον ρυθμό επιβράδυνσης είναι μόνιμα. Το φαινόμενο των glitch είναι πολύ πλούσιο, κάτι που μας λέει ότι οι αλλαγές στην εσωτερική δομή των παλσαρ είναι πολύπλοκες. Αποτελούν ένδειξη της ακρίβειας των μετρήσεών μας στα πάλσαρ.

Το περιστατικό των glitch.

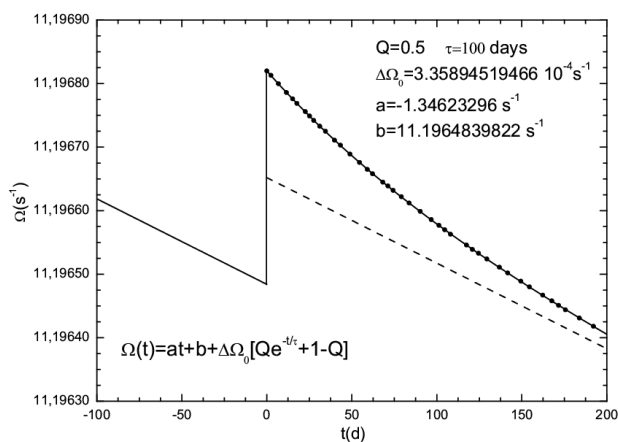
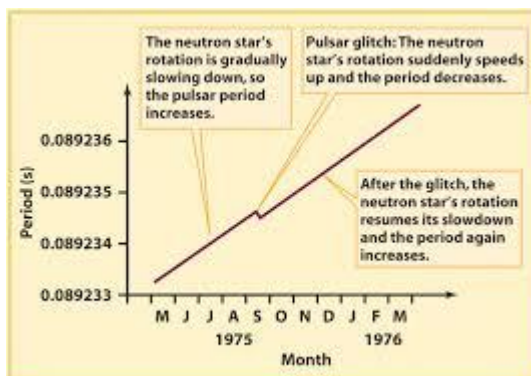
Η σειρά των ρυθμίσεων σε μια αργά μεταβαλλόμενη κατάσταση ισορροπίας εμφανίζεται σε μερικά νεαρά παλσαρ ως ταλάντωση ηρεμίας, δίνοντας μας μια ημι-κανονική σειρά από glitch. Η πιο κανονική σειρά συχνότητας των glitch εμφανίζεται στον PSRJ0537- 6910, ένα παλσαρ ακτίνων X με 23 glitch σε διάστημα 7 ετών. Το διάστημα μεταξύ τους είναι από 50 ως 200 ημέρες. Κάτι μοναδικό για αυτό το παλσαρ είναι ότι υπάρχει αναλογία ανάμεσα στο διάστημα και στο μέγεθος των glitch. Τα μεγαλύτερα διαστήματα ανάμεσά τους έρχονται μετά από τα μεγαλύτερα glitch. Και σε άλλα παλσαρ έχουμε δει κάτι ανάλογο. Στα πιο πολλά παλσαρ έχουμε τυχαία διαστήματα και τυχαία μεγέθη από glitch. Και τα διαστήματα, αλλά και τα μεγέθη μπορούν να έχουν εύρος τουλάχιστον 40 έτη σε ένα μόνο παλσαρ (φαινόμενο σταθερότητας κλίμακας, scale invariant). Αυτή η συμπεριφορά περιγράφεται συχνά ως

φαινόμενο του αμμόλοφου (sand pile effect) όπου μια συνεχής λεπτή ροή άμμου δίνει μια σειρά από κατακρημνίσεις, με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τέτοια συστήματα ονομάζονται αυτό-οργάνωσης. Δεν έχουν προτεινόμενη κλίμακα.

Ο ρυθμός επιβράδυνσης μετά από ένα glitch.

Ενώ ο μακροχρόνιος ρυθμός επιβράδυνσης ενός παλσαρ εκφράζεται με έναν σταθερό εκθέτη επιβράδυνσης, η βραχυχρόνια συμπεριφορά μετά από ένα glitch είναι πολύ διαφορετική. Η ανάκαμψη από ένα glitch μπορεί να είναι αργή, και μπορεί να μην ολοκληρωθεί μέχρι να εμφανιστεί το επόμενο. Έτσι ο εκθέτης επιβράδυνσης που μετράμε κατά την περίοδο ανάκαμψης μπορεί να διαφέρει πολύ από τον μακροχρόνιο μέσο όρο. Για πολλά <αργά> παλσαρ τα διαστήματα μεταξύ των glitch είναι μεγαλύτερα από το διάστημα που τα παρατηρούμε μέχρι σήμερα, άρα δεν μπορούμε να έχουμε συμπεράσματα. Η ανάκαμψη από ένα glitch μπορεί να εμφανίζεται σε πολλές χρονικές κλίμακες. Σε νεαρά παλσαρ μια πραγματική αναλογία του βήματος που προκαλείται από τα glitch στην περίοδο περιστροφής μπορεί να είναι ένα διάστημα δευτερολέπτων ή λεπτών.

Σε μερικά νεαρά παλσαρ υπάρχει αλλαγή στον ρυθμό επιβράδυνσης που δεν αλλοιώνεται. Στο Crab παλσαρ σε 25 έτη έχουμε δει 6 glitch. Είναι μικρά, με τα μεγαλύτερα να είναι της τάξης του δεκάκις εκατομμυριοστού του δευτερολέπτου. Υπάρχει όμως μεγάλη αλλαγή στον ρυθμό επιβράδυνσης (0,4 % σε 40 ετη).

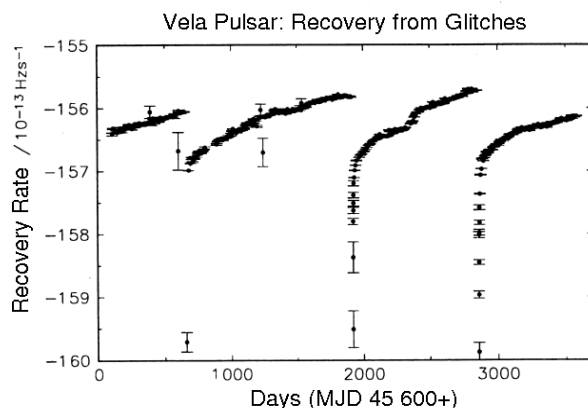


Οι εκθετικές ανακάμψεις.

Οι παρατηρήσεις αυτών των βημάτων με ακρίβεια και των διαδοχικών μεταβάσεων είναι σπάνιες. Είναι απίθανο να έχουμε συνεχή παρακολούθηση κάθε παλσαρ που μπορεί να υποστεί glitch σε διαστήματα μερικών ετών. Μόνο τα παλσαρ των Vela και Crab παρατηρούνται καθημερινά, και μερικές εκατοντάδες άλλα παλσαρ παρακολουθούνται κατά διαστήματα εβδομάδων ή μηνών για χρονικές ανωμαλίες.

Η αύξηση του ρυθμού περιστροφής σε ένα glitch στο παλσαρ Vela αντιστοιχεί σε μια επιπλέον περιστροφή του την ημέρα. Η ακρίβεια των παρατηρήσεων είναι της τάξης του 10 στη -4 της περιόδου, έτσι η ανάκαμψη από ένα βήμα μπορεί να καταγραφεί λεπτομερώς. Μετά την αφαίρεση για την περίοδο περιστροφής πριν το βήμα και τον κανονικό βαθμό επιβράδυνσης, οι παροδικές επιδράσεις στους χρόνους άφιξης των παλμών εμφανίζονται περίπου ως εκθετικές ανακάμψεις. Οι ανακάμψεις σε άλλα παλσαρ εμφανίζονται συνήθως ως απλοί εκθέτες, μιας και δεν έχουν παρατηρηθεί αρκετά καλά. Σε αυτά τα μεγαλύτερης περιόδου παλσαρ η ανάκαμψη συνήθως συμβαίνει σε μικρότερη αναλογία του αρχικού βήματος στην περίοδο περιστροφής. Μια μεγάλη ανάκαμψη παρατηρήθηκε μετά από ένα glitch στο PSRB0355 (με περίοδο 197ms) το 1987. Ακολούθησε μια μετάβαση με εξασθένηση της σταθεράς του χρόνου για 40 μέρες, ανακάμπτοντας κατά 10% από το βήμα. Υπήρξε και μια μικρή μόνιμη αλλαγή στον ρυθμό επιβράδυνσης. Στο παλσαρ Crab είδαμε διαφορετική μετάβαση σε μερικά glitch. Στο glitch του 1989 έχουμε 3 μέρη, μια εξασθένηση με σταθερά χρόνου περίπου 20 ημέρες και δυο θετικούς ασυμπτωτικούς εκθέτες, με σταθερά χρόνου 1 και 200 ημέρες αντίστοιχα.

Στα περισσότερα παλσαρ η μετάβαση εξασθενεί σε σύντομους χρόνους, σχετικά με τα διαστήματα ανάμεσα στα glitch. Πρέπει να αντιμετωπίζονται ως αντιδράσεις στις αλλαγές των βημάτων, παρά ως μέρος του glitch. Υπάρχει όμως ένα ακόμη συστατικό της ανάκαμψης που εξαπλώνεται σε όλο το διάστημα μεταξύ των glitch στο παλσαρ του Vela, και εμφανίζεται και σε άλλα παλσαρ. Μακριά από τα glitch (ανάμεσα σε 2 περιστατικά) ο ρυθμός επιβράδυνσης αναμένεται να είναι αρκετά σταθερός, με μόνες εξαιρέσεις τις βραχυχρόνιες επιδράσεις ενός βήματος και τις μεταβάσεις ανάκαμψης. Η κύρια επίδραση είναι όμως μια περίπου ευθύγραμμη πριονωτή αλλαγή στο σχήμα του ρυθμού επιβράδυνσης.



Αλλαγές στην ροπή αδράνειας.

Αφού τα glitch οφείλονται σε εσωτερικά αίτια στα παλσαρ, η διατήρηση της στροφορμής μας δείχνει ότι οι μικρές αλλαγές στην περίοδο περιστροφής κατά ένα glitch σημαίνουν μικρές αλλαγές στην ροπή αδράνειας. Σε ένα παλσαρ ακτίνας 10 km η αλλαγή αυτή θα είναι μόλις 5μm, ένα πολύ μικρό μέγεθος για να παρατηρηθεί από απόσταση μερικών kpc.

Το μοντέλο των δυο συστατικών, κρούστα και υπέρρευστό.

Και το βήμα και η εκθετική ανάκαμψη μετά από ένα τυπικό glitch σημαίνουν ότι το παλσαρ δεν περιστρέφεται ως ένα συμπαγές άκαμπτο σώμα, αλλά έχει 2 συστατικά μέρη που είναι μόνο ασθενώς ή περιοδικά δεμένα μεταξύ τους. Το συστατικό μέρος με την περισσότερη ροπή αδράνειας είναι η στερεή κρούστα και το μεγαλύτερο μέρος από το εσωτερικό υπέρρευστό νετρονίων. Ένα μικρότερο συστατικό μέρος είναι το τμήμα του υπέρρευστου που μπορεί να περιστρέφεται ανεξάρτητα, αλλά είναι ασθενώς ή περιοδικά δεμένο με την στερεή κρούστα. Η συνεχής μείωση της περιστροφής λόγω άσκησης ροπής του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην κρούστα μπορεί να αφήσει το μικρότερο αυτό συστατικό μέρος να περιστρέφεται γρηγορότερα κατά έναν βαθμό, που εξαρτάται από τις δυνάμεις που δένουν τα δυο συστατικά. Εναλλακτικά, το ρευστό συστατικό μπορεί να αποσυνδεθεί τελείως από την επιβράδυνση, συνεχίζοντας να περιστρέφεται σταθερά στα διαστήματα ανάμεσα στα glitch. Σε αυτή την περίπτωση, η ροπή αδράνειας του αποσυνδεδεμένου ρευστού έχει απομακρυνθεί σημαντικά, και έχει αυξηθεί ο βαθμός επιβράδυνσης που παρατηρούμε. Το βήμα επιτάχυνσης του βαθμού περιστροφής σε ένα glitch είναι αποτέλεσμα της ξαφνικής αύξησης στο δέσιμο των δυο συστατικών, που επιταχύνει την κρούστα και επιβραδύνει το ρευστό. Με άλλα λόγια, κατά την επιβράδυνση, η στροφορμή του μικρού (ρευστού) συστατικού μέρους δεν μεταφέρεται σταθερά στην κρούστα, αλλά απελευθερώνεται βίαια.

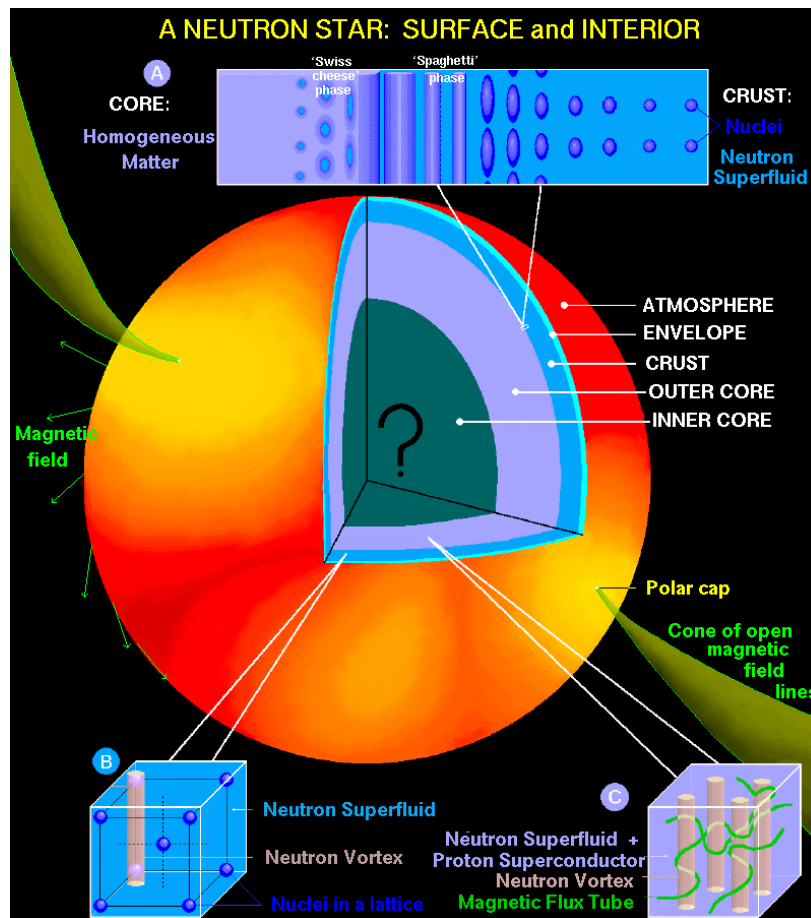
Το στερεό συστατικό, στο οποίο είναι προσαρτημένα το διπολικό μαγνητικό πεδίο και η ράδιο- εκπομπή, ταυτίζεται με την κρούστα και όλα τα μέρη του ρευστού που είναι σφιχτά δεμένα με αυτήν. Αυτό περιλαμβάνει και τα ηλεκτρόνια και πρωτόνια του εσωτερικού του ρευστού νετρονίων, που είναι δεμένα στην κρούστα, μέσω του μαγνητικού πεδίου. Το συστατικό με την διαφορική περιστροφή είναι το μέρος του υπέρρευστου νετρονίων που συνυπάρχει στο κρυσταλλικό πλέγμα, στο εσωτερικό μέρος της κρούστας. Η διαδικασία δεσίματος και αποσύνδεσης μεταξύ κρούστας και υπέρρευστου είναι πράγματι μια εξωτική διαδικασία.

Στροβιλισμός σε ένα ρευστό νετρονίων.

Όπως αναφέραμε, η κρούστα σε έναν τυπικό αστέρα νετρονίων έχει πάχος 1 χιλιόμετρο, και η συνολική του ακτίνα είναι 10 χιλιόμετρα. Το εσωτερικό μέρος της κρούστας είναι ένα κρυσταλλικό πλέγμα με άτομα πλούσια σε νετρόνια, που διαπνέεται από ένα ελεύθερο ρευστό νετρονίων. Πιο μέσα στο αστέρι, το ρευστό εσωτερικό αποτελείται κυρίως από νετρόνια και ελάχιστα πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Αυτές οι δύο περιοχές ρευστού είναι σε διαφορετική κατάσταση υπέρρευστότητας. Η ελκτική δύναμη ανάμεσα σε νετρόνια με ενέργεια κοντά στην ενέργεια Fermi οδηγεί σε αντιστοίχιση, και το ενεργειακό φάσμα τους παρουσιάζει ένα κενό με πλάτος 1 MeV.

Η περιστροφή σε ένα υπέρρευστο δεν είναι μια καθολική συν- περιστροφή όλου του όγκου. Αντίθετα γίνεται σε μορφή δυνών (vortex). Κάθε δύνη φέρει ένα κβάντο της

στροφορμής, ώστε η γωνιακή ταχύτητα του υπέρρευστου πυρήνα να μετριέται σε πυκνότητα δυνών.



Για το παλσαρ του Crab έχουμε 3000 δύνες στο τετραγωνικό χιλιοστόμετρο. Κάθε δύνη είναι πολύ μικρή, με μέγεθος (10 στη -11)mm. Κατά την επιβράδυνση του παλσαρ η περιστροφή του υπέρρευστου μπορεί να συνδυαστεί μόνο με την μείωση της πυκνότητας των δυνών. Αυτό επιτυγχάνεται με μετανάστευση των δυνών μακριά από τον άξονα περιστροφής.

Η περιστροφή του κεντρικού βραχίονα του υπέρρευστου είναι σφιχτά δεμένη με την περιστροφή της κρούστας. Αυτό συμβαίνει μέσω του μικρού πληθυσμού ηλεκτρονίων και πρωτονίων στο ρευστό νετρονίων. Τα ηλεκτρόνια είναι δεμένα στο μαγνητικό πεδίο έξω από την κρούστα και ταυτόχρονα δεμένα στις δύνες, μέσω μαγνητικών δυνάμεων. Σε αυτό το εσωτερικό υπέρρευστο συμβαίνει μια μόνιμη μετανάστευση δυνών προς τα έξω, ώστε να συμβαδίσει με την μείωση του βαθμού περιστροφής του παλσαρ.

Υπάρχει ένας διαφορετικός μηχανισμός στο μέρος του υπέρρευστου που διεισδύει στο εσωτερικό της κρυσταλλικής κρούστας. Εδώ οι πυρήνες περιέχουν υπέρρευστα νετρόνια, και έχουμε αλληλεπίδραση μεταξύ πυρήνων και δυνών. Οι δύνες δεσμεύονται με τους πυρήνες και δεν μπορούν να μεταναστεύσουν προς τα έξω. Η στροφορμή αυτού του υπέρρευστου συστατικού είναι τότε σταθερή, και αυτό το συστατικό είναι αποτελεσματικά αποδεσμευμένο από την κρούστα και δεν συνεισφέρει στην ροπή αδράνειας του παλσαρ. Το glitch είναι το καταστροφικό σπάσιμο της παραπάνω δέσμευσης των δυνών με τον πυρήνα, όταν οι δύνες απελευθερώνονται ώστε να μεταναστεύσουν προς τα έξω (να αραιώσουν), και η στροφορμή που ήταν

αποθηκευμένη στις δεσμευμένες δυνες ξαφνικά ενσωματώνεται με την υπόλοιπη στροφορμή του παλσαρ, δίνοντας την παρατηρήσιμη επιτάχυνση. Η δέσμευση και η αποδέσμευση μπορεί να εμφανιστούν σε πολλές διακριτές απομονωμένες περιοχές που δρουν ανεξάρτητα, δίνοντας πληθώρα glitch, που είναι χαρακτηριστικά για παλσαρ διαφορετικών ηλικιών.

Η κατάσταση ισορροπίας δεν σημαίνει και απόλυτο δέσιμο σε όλες τις περιοχές, αλλά μια συνεχής χαμηλή ροή δυνών μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Η ροή εξαρτάται από την ενέργεια των δεσιμάτων, την θερμοκρασία, και την διαφορική περιστροφή μεταξύ της περιοχής χαμηλής ροής και της κρούστας. Αμέσως μετά από ένα glitch η πυκνότητα των δυνών είναι κοντά σε αυτή που είναι απαραίτητη στον ρυθμό περιστροφής της κρούστας και οι δυνες δεσμεύονται πλήρως. Όσο η κρούστα επιβραδύνεται, η διαφορική περιστροφή αυξάνεται, και η δύναμη Magnus αναπτύσσεται και σπάει τα δεσίματα. Ένας συνδυασμός θερμικής διέγερσης και δύναμης Magnus μπορεί να δημιουργήσει μια σταθερή αργή ροή δυνών με μια κατά μέσο όρο καθυστέρηση της γωνιακής ταχύτητας, ή ένα καταστροφικό σπάσιμο της δέσμευσης, ένα νέο glitch.

Σε μεγάλες περιόδους, τα περιοδικά και τα τυχαία glitch συσχετίζονται με το 1% -2% της συνολικής ροπής αδράνειας του παλσαρ. Σε ένα περιοδικό glitch, όλο ή το μεγαλύτερο μέρος αυτού του συστατικού αποσυνδέεται, ενώ στα μικρότερα τυχαία glitch αποσυνδέεται μόνο ένα μέρος του. Κάθε glitch συσχετίζεται μόνο με έναν μικρό αριθμό, ίσως με μόνο μια, από τις διακριτές περιοχές δέσμευσης. Αυτές ονομάζονται δεξαμενές (reservoirs). Σε ένα σύστημα αυτό- οργανωτής κρισιμότητας, μια καθολική δύναμη (εδώ η επιβράδυνση της περιστροφής) ισορροπείται μακροχρόνια με τοπικές χαλαρώσεις, ενώ βραχυχρόνια οι τυχαίες επιδράσεις εξαρτώνται από τις λεπτομέρειες των δεξαμενών και την συμπεριφορά αποδέσμευσής τους. Οι μεταβατικές ανακάμψεις μετά από ένα glitch ερμηνεύονται σε όρους επανεγκατάστασης της αργής ροής δυνών σε μια δεξαμενή που είχε αποφορτιστεί κατά την διάρκεια ενός glitch. Η ανάκαμψη επαναφέρει την διαφορική ταχύτητα εκθετικά, με την σταθερά χρόνου να εξαρτάται από την ενέργεια δέσμευσης και την θερμοκρασία.

Δέσμευση και αποδέσμευση.

Μια μεμονωμένη δύνη αποδεσμεύεται όταν οι δυνάμεις δέσμευσης ξεπερνιούνται από την δύναμη Magnus συν τον θερμικό ερεθισμό. Τότε η αποδεσμευμένη δύνη διαταράσσει το τοπικό πεδίο ταχύτητας υπέρρευστου και μαζί την τοπική δύναμη Magnus. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεν να αποδεσμεύονται γειτονικές δυνες, αλλά και να αποφορτίζεται η δεξαμενή. Σε ένα glitch αποφορτίζεται μεγάλος αριθμός δυνών. Ένα βήμα του 1 μHz στον ρυθμό περιστροφής αντιστοιχεί σε 10 δις αποδεσμεύσεις ταυτόχρονα. Η αποφόρτιση μιας και μόνο δεξαμενής αφήνει ένα σημάδι στην μορφή της δύναμης Magnus, επηρεάζοντας την μορφή των διαδοχικών glitch.

Οι τοποθεσίες δέσμευσης στο κρυσταλλικό πλέγμα στην κρούστα μπορεί να αποτελούν μηχανικές επιδράσεις ή κβαντικά πηγάδια σε ομαλή δομή. Οι επιδράσεις μπορεί να συσχετίζονται με σπάσιμο της κρούστας, στην περίπτωση που οι δεσμευμένες δυνες στη δεξαμενή είναι κοντά μεταξύ τους. Αν υπάρχουν κβαντικά πηγάδια τότε θα υπάρχουν περισσότερες τοποθεσίες από δυνες, ώστε οι δεσμευμένες δυνες να χωρίζονται από 10 ή περισσότερες πιθανές τοποθεσίες. Τότε δεν είναι ξεκάθαρο το πως οι γειτονικές δυνες αλληλοεπηρεάζονται ώστε να δρουν συλλογικά. Μια εναλλακτική θεωρία της αλληλεπίδρασης των γειτονικών δυνών στην παραπάνω περίπτωση είναι

ότι ο θερμικός θόρυβος που συνδέεται με μια στατιστική διακύμανση στην δύναμη δέσμευσης μπορεί να παράγει το ίδιο συνολικό αποτέλεσμα.

Ανακεφαλαίωση της θεωρίας των glitch.

Μπορούμε να επισημάνουμε τις αλλαγές στα βήματα των διαφορετικών τύπων glitch, σε ορούς δεσίσματος των δυνών.

- 1) Τα glitch τύπου Crab, όπου η κύρια επίδραση είναι μια σωρευτική αύξηση στον ρυθμό επιβράδυνσης σε κάθε glitch. Εδώ η θεωρία προβλέπει μια προοδευτική αύξηση της ποσότητας δεσμευμένου υπέρρευστου, που ελαττώνει την δραστική ροπή αδράνειας σε βαθμό $4 \times (10 \text{ στη } -4)$ το χρόνο. Αυτή είναι μια βραχυχρόνια φάση, που συνδέεται με το νεαρό της ηλικίας ενός παλσαρ. Αν διατηρηθεί για 5000 έτη, το 2% της ροπής αδράνειας θα κλειδωθεί σε δεσμευμένο υπέρρευστο, και θα υπάρξει μεγάλη αποθήκευση στροφορμής, που θα περιμένει να απελευθερωθεί αργότερα. Παρόμοια συμπεριφορά έχουμε παρατηρήσει στα PSRB0540-69, B119-6127, B1509-58.
- 2) Τα παλαιά παλσαρ, όπου υπάρχει μόνο ένα βήμα στον ρυθμό περιστροφής, χωρίς ανάκαμψη και μακροχρόνιες αλλαγές στον ρυθμό επιβράδυνσης. Εδώ τα glitch περιλαμβάνουν υπέρρευστο που είναι δεσμευμένο σε τυχαία συλλογή μιας ή πολλών διαφορετικών δεξαμενών. Όταν συμβαίνει το glitch, οι δύνες είναι τελείως αποδεσμευμένες και κινούνται προς τα έξω, ώστε να αραιώσουν την πυκνότητα της περιοχής σε δύνες, μέχρι ο ρυθμός περιστροφής να ελαττωθεί όσο είναι αυτός της κρούστας. Μετά δένονται πάλι πλήρως. Παραμένουν δεσμευμένες ανάμεσα στα glitch. Το 1%- 2% της ροπής αδράνειας σχετίζεται με αυτή την συμπεριφορά βήματος.
- 3) Τα ημι- περιοδικά glitch, όπως στο νεαρό παλσαρ PSRJ0537-6910 και στο παλσαρ του Vela. Εδώ όλες ή μεγάλο μέρος των δεσμευμένων δυνών αποδεσμεύεται και κατευθύνεται ταυτόχρονα προς τα έξω. Οι λεπτομερείς παρατηρήσεις του Vela δείχνουν έναν ρυθμό επιβράδυνσης που αυξάνεται καταστροφικά στα glitch και μειώνεται σταθερά μεταξύ αυτών. Εδώ η σταθερή μείωση της επιβράδυνσης της περιστροφής αντιπροσωπεύει μια εκθετική αύξηση σε δεσμευμένο υπέρρευστο, που αναλογεί σε εκθετική αποδέσμευση όταν αυξηθεί η διαφορικότητα στην γωνιακή ταχύτητα.

Εναλλακτικές θεωρίες των glitch.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η σωρευτική αύξηση του ρυθμού επιβράδυνσης σε ένα glitch στο Crab παλσαρ θα οδηγούσε, στην θεωρία των δεσμευμένων δυνών, σε μια ανάπτυξη δεσμευμένων δυνών που δεν θα απελευθερωθούν σε επόμενα glitch. Αυτές οι περιοχές συσσώρευσης δεσμευμένων glitch θα κυριαρχούνταν από μεγάλη γωνιακή ταχύτητα, που θα πάγωνε χωρίς εκτόνωση στα επόμενα glitch. Εναλλακτικά, η αύξηση του ρυθμού επιβράδυνσης μπορεί να συμβαίνει λόγω αύξησης της εξωτερικής ροπής από αύξηση της ισχύς ή αλλαγή του σχηματισμού του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η υπόθεση υποστηρίζεται από την ανάλυση της μακροχρόνιας επιβράδυνσης των νεαρών παλσαρ και τις υποθέσεις για την προέλευση των μάγνεταρ (magnetar).

Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερά προσαρτημένο στην κρούστα, μια αύξηση στην ισχύ του πεδίου θα ικανοποιούσε την θεωρία σπασίσματος της κρούστας (Ruderman 1991), στην οποία ο σχηματισμός του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αλλάζει από κινήσεις των πλακών

της επιφάνειας. Αυτές οι κινήσεις μπορεί να αποτελούν αντίδραση σε μεταβολές στην ελλειπτικότητα κατά τη μείωση του ρυθμού περιστροφής ή αντίδραση σε εσωτερικές διεργασίες. Τα διαστήματα ανάμεσα στα glitch στο Crab είναι κοντά στα υπολογισμένα διαστήματα μεταξύ σπασμάτων της κρούστας, έτσι η θεωρία αυτή απλοποιεί τα πράγματα. Το σπάσιμο της κρούστας δεν μπορεί όμως να δώσει εξήγηση για τα διαστήματα ανάμεσα στα glitch σε παλαιότερα παλσαρ. Η συμπεριφορά των βημάτων εκεί εξηγείται πιο καλά με καταστροφικό σπάσιμο των δεσμεύσεων, όταν αναπτυχθεί μια ικανοποιητική διαφορική ταχύτητα. Η κατάσταση στο Vela παλσαρ δεν είναι εύκολα κατανοητή. Το φαινόμενο του πριονιού (μορφή της καμπύλης) στον ρυθμό επιβράδυνσης μας λέει ότι τα glitch εμφανίζονται όταν η διαδοχική μερική αποδέσμευση φτάνει σε ένα όριο που φέρνει την ολική καταστροφή της δέσμευσης.

Στα πιο πολλά μοντέλα τα δυο συστατικά που αλληλοεπιδρούν είναι το υπέρρευστο νετρονίων μέσα στην στερεή κρούστα και η ίδια η κρούστα. Μια εναλλακτική πιθανότητα είναι να τα αντικαταστήσουμε με δυο κβαντωμένες δομές μέσα στον ρευστό πυρήνα, τις περιστρεφόμενες δύνες και το πλέγμα από σωλήνες μαγνητικής ροής. Τα νετρόνια στον πυρήνα σχηματίζουν ένα υπέρρευστο σε ζεύγη, όπου τα πρωτόνια σχηματίζουν έναν υπεραγωγό. Τα δυο συστήματα, οι δύνες και οι γραμμές του πεδίου, αλληλοεπιδρούν. Το φαινόμενο είναι όμοιο με τη δέσμευση με την κρούστα. Οι σωλήνες ροής είναι παγωμένες στην στερεή κρούστα, έτσι ώστε το ρεύμα εκροής περιστρεφόμενων δυνών να είναι εμβυπτισμένο στην αλληλεπίδραση των δυο συστημάτων. Η διαφορική περιστροφή μεταξύ των δυνών και των γραμμών του πεδίου μπορεί να αυξηθεί σε ένα κρίσιμο όριο, με συνέπεια ένα καταστροφικό σπάσιμο όταν οι δύνες μεταφέρουν στροφορμή στη κρυσταλλική δομή και εμφανιστεί ένα glitch.

Ο θόρυβος στην χρονομέτρηση.

Τα παλσαρ, και ειδικά τα μιλισεκοντ, είναι για εμάς ρολόγια πολύ μεγάλης ακρίβειας. Ακόμα και τα κανονικά παλσαρ έχουν σταθερότητα παλμών (10στη 11), αν εξαιρέσουμε τις παραπάνω χρονικά αραιές ασυνέχειες. Σε αυτή την ακρίβεια υπάρχουν πολλές φορές καθαρά διακριτές ανωμαλίες στην περίοδο που φαίνονται τυχαίες. Αυτές τις μετράμε ως αποκλίσεις φάσεων στην περιστροφή ενός παλσαρ, με την παραδοχή ότι ο χρόνος των παλμών είναι ακριβώς συγχρονισμένος με την περιστροφή του παλσαρ. Αυτές οι εμφανιζόμενες ως τυχαίες αποκλίσεις ονομάζονται θόρυβος χρονομέτρησης (timing noise).

Οι θόρυβοι χρονομέτρησης χαρακτηρίζονται ως διακυμάνσεις της φάσης περιστροφής ή του ρυθμού επιβράδυνσης ή της επιτάχυνσης που φαίνονται τυχαίες. Αυτός ο χαρακτηρισμός προϋποθέτει πολυτελείς παρατηρήσεις, αφού το φάσμα του θορύβου εκτείνεται σε περιοδικότητες ετών. Τώρα φαίνεται σε μερικά, ίσως σε όλα τα παλσαρ, το φαινόμενο αυτό να μην είναι τυχαίο, αλλά να κυριαρχείται από μια ημι- περιοδική αλλαγή ανάμεσα σε δύο ρυθμούς επιβράδυνσης.

Αυτό παρατηρήθηκε πρώτα στον PSRB1931 + 24, ένα παλσαρ που παρουσιάζει μετάβαση ανάμεσα σε δύο τρόπους εκπομπής ραδιοκυμάτων. Οι κανονικοί παλμοί που παρατηρήσαμε για 5- 10 ημέρες ακολουθούνται από μια περίοδο περίπου 25 ημερών, όπου δεν ανιχνεύονται παλμοί. Ο ρυθμός επιβράδυνσης ανάμεσα στους δύο αυτούς τρόπους διαφέρει κατά 50%, η μεγαλύτερη σύμπτωση ρυθμού με τον κανονικό τρόπο περιστροφής. Σε άλλα παλσαρ ο θόρυβος χρονομέτρησης βρέθηκε να είναι επίσης μη τυχαίος, αλλά να χαρακτηρίζεται από εναλλαγή μεταξύ δύο ή περισσότερων ρυθμών

επιβράδυνσης με διαφοροποίηση περίπου 1%. Ακόμα, στον ίδιο χρόνο, το ολοκληρωμένο προφίλ των παλμών άλλαξε μεταξύ δυο ελαφρά διαφορετικών μορφών.

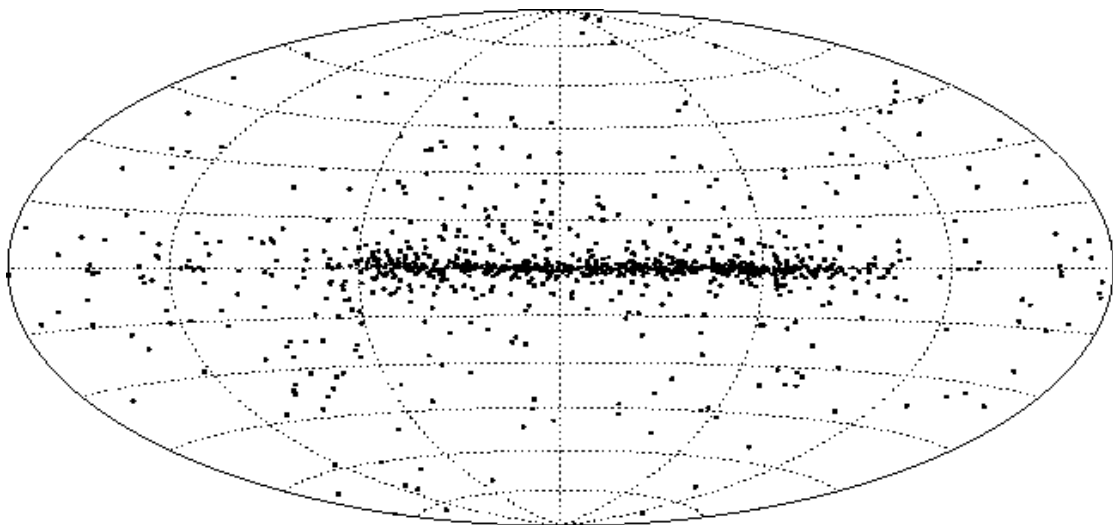
Το φαινόμενο των αλλαγών των ρυθμών επιβράδυνσης μπορεί να συσχετίζεται με άλλες διαδικασίες μεταβολής. Η προέλευσή τους δεν είναι γνωστή, αλλά η σχέση ανάμεσα σε αλλαγές στο προφίλ των παλμών και στον ρυθμό επιβράδυνσης μας οδηγεί σε μια μεταβολή βήματος στην μαγνητόσφαιρα, που πιθανώς προέρχεται από εναλλαγή μεταξύ δύο ημι-σταθερών καταστάσεων του μαγνητικού πεδίου μέσα στον αστέρα νετρονίων.

Μένει να ανακαλύψουμε αν όλοι οι χρονομετρικοί θόρυβοι αναλογούν σε τέτοιες διαδικασίες μεταβολής. Αν σε κάθε πάλσαρ υπάρχουν δυο διακριτοί ρυθμοί επιβράδυνσης, και αν αυτοί αναγνωρίζονται μέσω διάκρισης μεταξύ δυο διαφορετικών προφίλ παλμών, τότε η μακροχρόνια επίδοση των πάλσαρ ως ρολόγια ακριβείας μπορεί να βελτιωθεί κατά πολύ.

Ο γαλαξιακός πληθυσμός των παλσαρ.

Τα περισσότερα παλσαρ που έχουν βρεθεί ανήκουν στον Γαλαξία μας. Τα κανονικά παλσαρ δείχνουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωσή τους στο επίπεδο του Γαλαξία, ενώ τα μιλισεκοντ, που ανακαλύπτουμε σχεδόν μόνο σε κοντινές αποστάσεις, έχουν πιο ισότροπη κατανομή. Τα κανονικά παλσαρ πρέπει να είναι νέα γαλαξιακά αντικείμενα, και η κατανομή τους είναι παρόμοια με αυτή των σ. Νόβα και των μεγάλης μάζας αστεριών.

Σήμερα γνωρίζουμε πάνω από 2000 παλσαρ. Τα κανονικά παλσαρ ραδιοπαλμών αποτελούν μόνο ένα μέρος του συνολικού πληθυσμού. Έχουμε ανακαλύψει πάνω από 200 μιλισεκοντ πάλσαρ, τα μισά από αυτά σε γαλαξιακά νέφη. Τα νεαρά και πιο λαμπρά πάλσαρ βρίσκονται κυρίως κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο, ενώ τα παλαιά, με μειωμένη πλέον λαμπρότητα είχαν τον χρόνο να μεταναστεύσουν μακριά από το επίπεδο.



Ενώ η κατανομή κατά μήκος του γαλαξιακού επιπέδου είναι εμφανής, παρατηρούμε συγκέντρωση σε μικρά γαλαξιακά πλάτη, με μέγιστη συγκέντρωση σε 50 μοίρες πλάτος.

Εκτιμούμε ότι ο αριθμός των ενεργών κανονικών παλσαρ είναι στις 150000 για τον Γαλαξία μας.

Οι ταχύτητες των παλσαρ και οι ηλικίες τους.

Τα παλσαρ διανύουν μεγάλες αποστάσεις μετά την δημιουργία τους. Έχουν τυπικές ταχύτητες 100 με 200 km/s, μέχρι και 500 km/s. Έχουμε μετρήσει με συμβολομετρία και χρονομέτρηση ραδιοπαλμών τις ιδίες κινήσεις για 250 παλσαρ. Τα πιο πολλά απομακρύνονται από το γαλαξιακό επίπεδο. Τα πιο γρήγορα έχουν ταχύτητα διαφυγής από τον Γαλαξία μας. Αυτά θα καταλήξουν στον μεσογαλαξιακό χώρο. Πολλά άλλα θα φτάσουν στη άλω του Γαλαξία μας, σε ακτίνα δεκάδων kpc. Με ταχύτητα 500km/s ένα παλσαρ θα καλύψει απόσταση 1 kpc σε δύο εκ. έτη, την μέση ηλικία της δραστηριότητάς του. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τα παλσαρ μόνο για μερικά εκ. έτη, στην αρχή του ταξιδιού τους στην άλω ή στον μεσογαλαξιακό χώρο, αφού μετά παύουν να εκπέμπουν ραδιοπαλμούς.

Αν, όπως φαίνεται λογικό, όλα τα παλσαρ γεννήθηκαν στο γαλαξιακό επίπεδο, την περιοχή αστρογέννησης του Γαλαξία μας, οι τωρινές ηλικίες τους μπορούν να βρεθούν από την απομάκρυνση τους από αυτό (κινητικές ηλικίες). Αυτές μπορούν να συγκριθούν με τις ηλικίες που συμπεραίνουμε από τους τωρινούς ρυθμούς επιβράδυνσης της περιστροφής τους (χαρακτηριστικές ηλικίες). Ενώ έχουμε καλή συμφωνία για τις νεαρές ηλικίες, για τον μικρό αριθμό παλαιών παλσαρ που παρατηρούμε οι κινητικές ηλικίες είναι μικρότερες από τις χαρακτηριστικές, μια διαφορά που αυξάνεται με την ηλικία. Χαρακτηριστική ηλικία ενός παλσαρ είναι αυτή που προκύπτει από τον παρατηρήσιμο ρυθμό επιβράδυνσης της περιστροφής του. Μια πιθανότητα είναι να πρόκειται για αποτέλεσμα εξασθένησης του μαγνητικού δίπολου με την ηλικία. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού επιβράδυνσης. Τώρα γνωρίζουμε ότι η σχετική έλλειψη παλσαρ μεγάλης ταχύτητας από τον παλαιό πληθυσμό οφείλεται στο ότι απομακρύνονται από το γαλαξιακό επίπεδο τόσο γρήγορα, ώστε να μην είναι πια παρατηρήσιμα από την γωνία θέαςής μας.

Η κεντρική περιοχή του Γαλαξία μας.

Ο θόρυβος στα ραδιοτηλεσκόπια αυξάνεται προς το επίπεδο του Γαλαξία από την ακτινοβολία υποβάθρου. Είναι δύσκολο να καθορίσουμε τον πληθυσμό των παλσαρ κοντά στο κέντρο. Η περιοχή αυτή είναι πολύ μικρή και σε μεγάλη απόσταση, έτσι μόνο λίγα παλσαρ είναι παρατηρήσιμα εκεί. Ακόμα έχουμε πιο έντονο σπινθηρισμό και σκέδαση στην θέα προς το κέντρο του Γαλαξία. Έχουμε βρει εκεί περίπου 50 πάλσαρ, και ένα σμήνος με παλσαρ 15 δευτερόλεπτα του τόξου από το κέντρο. Αυτή η συγκέντρωση των 5 παλσαρ είναι βαρυτικά δεσμευμένη με την κεντρική μ. τρύπα του Γαλαξία μας. Είναι όλα τους παλσαρ μεγάλης περιόδου.

Μοντέλα πληθυσμών.

Η συγκέντρωση των παλσαρ στο γαλαξιακό επίπεδο και οι μεγάλες ταχύτητες με τις οποίες απομακρύνονται από αυτό δείχνουν ότι η διασπορά τους δεν είναι ανεξάρτητη. Αποτελεί μειονέκτημα ότι δεν είναι ακόμα αρκετά γνωστή η σχέση λαμπρότητας- ηλικίας των παλσαρ, ούτε η σχέση λαμπρότητας- μείωσης ρυθμού περιστροφής.

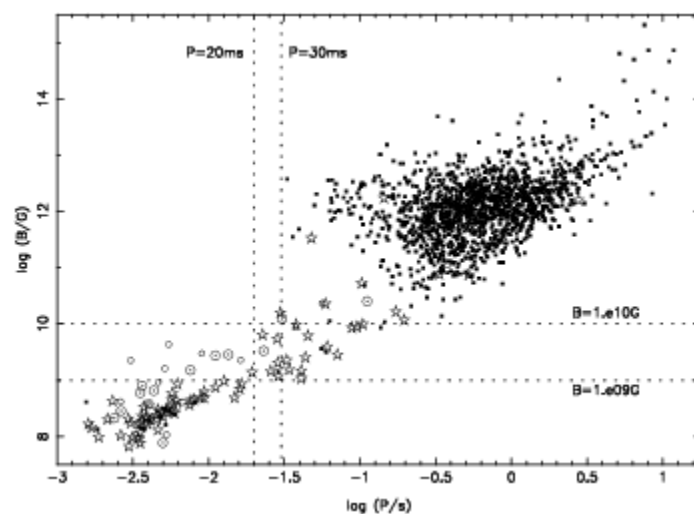
Ο ρυθμός γέννησης των παλσαρ.

Η διάρκεια της ζωής του κυρίως πληθυσμού των παλσαρ (της τάξης των 10 εκ. ετών) είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ηλικία του Γαλαξία, ώστε να μπορούσαμε να θεωρήσουμε έναν

σταθερό ρυθμό γέννησής τους, που θα μας έδινε έναν σταθερό πληθυσμό. Η εξέλιξη όλων των άστρων του Γαλαξία με πάνω από 9 ηλιακές μάζες θεωρητικά θα δώσουν μια σ. Νόβα κάθε 50 έτη. Όμως από τα παρατηρήσιμα απομεινάρια των σ. Νόβα η συχνότητα αυτή μειώνεται σε μια στα 150 έτη.

Ο πληθυσμός των μιλλισεκοντ παλσαρ.

Ενώ θα περιμέναμε τον ρυθμό γέννησης των μιλλισεκοντ να είναι πολύ χαμηλότερος από αυτόν των κανονικών παλσαρ, οι χαρακτηριστικές ηλικίες τους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των κανονικών. Είναι πιθανό να υπάρχει ένας μεγάλος πληθυσμός τους που δεν έχουμε ανακαλύψει ακόμα. Τα περισσότερα που έχουμε δει είναι σε ακτίνα 3 kpc ή σε σφαιρωτά σμήνη. Έχουν μόνο μικρή συγκέντρωση προς το γαλαξιακό κέντρο.



Καθορίζοντας τα μιλλισεκοντ παλσαρ(MPS) ως αυτά που έχουν περίοδο κάτω από 30 ms και εξαιρώντας αυτά στα σφαιρωτά σμήνη, γνωρίζουμε (το 2010) 110 μιλλισεκοντ στον Γαλαξία μας. Οι ταχύτητές τους είναι μικρότερες από αυτές των κανονικών παλσαρ. Εκτιμάμε ότι ο γαλαξιακός πληθυσμός των μιλλισεκοντ είναι στις 30000, πολύ όμοιος με αυτόν των κανονικών παλσαρ. Έχουμε ισχυρές ενδείξεις ότι υπάρχουν άλλα 200000 πάλσαρ μικρής λαμπρότητας, ένας πληθυσμός που ανεβάζει τον αριθμό των ενεργών παλσαρ στον Γαλαξία μας στις 400000. Οι χαρακτηριστικές ηλικίες αυτών των μιλλισεκοντ είναι μερικά δις έτη. Ο ρυθμός γέννησής τους μειώνεται όμως έτσι στο 1 κάθε 10000- 100000 έτη, πολύ μικρότερος από αυτόν των κανονικών παλσαρ.

Τα παλσαρ των Crab και Vela.

Νεαρά παλσαρ.

Ενώ γνωρίζουμε ότι οι αστέρες νετρονίων προέρχονται από εκρήξεις σ. Νόβα, μόνο ένας μικρός αριθμός των γνωστών παλσαρ σχετίζεται με κάποιο υπόλειμμα σ. Νόβα (s. Nova remnant, SNR). Αυτό έχει να κάνει με την διαφορά της διάρκειας ζωής ενός παλσαρ (1- 10 εκ. έτη) και την μικρότερη διάρκεια ζωής του υπολείμματος (10000- 100000 έτη). Έτσι τα παλσαρ με νεφέλωμα είναι τα νεαρά. Τα πιο πολλά που παρατηρούμε είναι σχετικά νέα, με

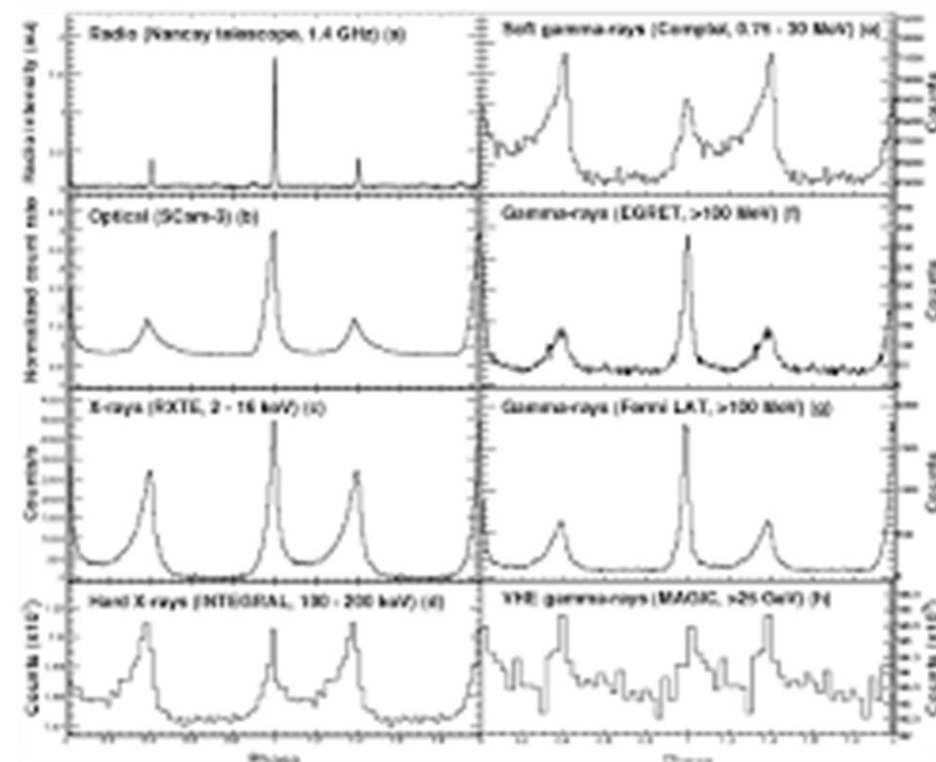
μεγάλη διασπορά περιόδων. Τα πιο πολλά έχουν μικρή περίοδο περιστροφής, < 100 ms. Τα παλαιά έχουν μεγάλες περιόδους και ελάχιστη διασπορά των περιόδων. Τα πάλσαρ του Καρκίνου και του Vela συνδυάζονται με απομεινάρια και έχουν μελετηθεί λεπτομερώς. Το χαρακτηριστικό της νεότητας τους, η ισχυρή εκπομπή, τα κάνει εύκολα παρατηρήσιμα. Και τα δυο τα παρατηρούμε στα ραδιοκύματα, οπτικά και ακτίνες Χ και γ. Η εξέλιξη των ρυθμών περιστροφής τους μελετάται εδώ και 40 χρόνια. Ενώ έχουν βρεθεί και άλλα νεαρά πάλσαρ που συνδέονται με υπολείμματα, αυτά τα δύο εκπέμπουν το πιο ισχυρό σήμα στα ραδιοκύματα.

Εκροή ενέργειας.

Το νέφος γύρω από ένα νεαρό πάλσαρ παίρνει ενέργεια από αυτό, και εκπέμπει ανιχνεύσιμη σχετικιστική ακτινοβολία. Αφού η ροπή αδράνειας είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη δομή του πάλσαρ και όχι πολύ εξαρτωμένη από τη μάζα του, η συνολική εκροή ενέργειας είναι άμεσα υπολογίσιμη για κάθε πάλσαρ από τις μετρήσεις του ρυθμού περιστροφής και του ρυθμού επιβράδυνσης. Οι πιο άμεσες παρατηρήσεις της ενέργειας που ακτινοβολεί ένα πάλσαρ είναι στους παλμούς ακτίνων Χ και γ. Η εκπομπή στα ραδιοκύματα είναι μικρής ενέργειας, στο 1% της συνολικής. Ένα σημαντικό και άγνωστου ποσοστού μεγάλο μέρος εκπέμπεται σε άνεμο σωματιδίων μεγάλης ενέργειας. Παρατηρούμε την αλληλεπίδραση αυτό του ανέμου στα δύο παραπάνω νεφελώματα.

Το πάλσαρ του Καρκίνου, PSRB0531+ 21.

Το προφίλ των παλμών.

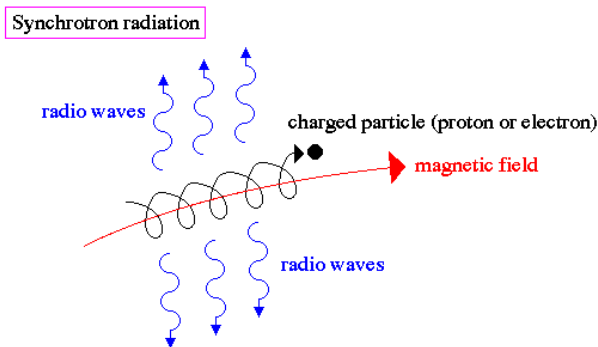


Το πάλσαρ αυτό στέλνει παλμούς σε πάνω από 19 δεκάδες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στο σχήμα βλέπουμε τη σύγκριση μεταξύ των παλμών από τα ραδιοκύματα ως τις ακτίνες γ. Έχουμε σε διάστημα 0,4 περιόδων τον κύριο παλμό (main pulse, MP) και τον

ενδιάμεσο παλμό (interpose, IM). Είναι οι δύο πρώτες μεγάλες κορυφές στα δεξιά του διαγράμματος. Βλέπουμε ότι έχουν μεγάλη ταύτιση στο οπτικό (δεύτερο δεξιά, το πρώτο είναι στα ραδιοκύματα), ακτίνες X (δεύτερο και τρίτο δεξιά) και ακτίνες γ (όλα τα αριστερά διαγράμματα). Η πηγή όλων αυτών των παλμών πρέπει να έχει την ίδια γεωμετρία, να περιστρέφεται σε ασυνάρτητη διενέργεια ευρείας ζώνης, από σωματίδια με συνεχές φάσμα ενέργειας.

Υπάρχουν μικροδιαφορές, που δείχνουν ότι η πηγή υψηλής ενέργειας ακτίνων X και γ συνδέεται με την εξωτερική περιοχή. Η ένταση ανάμεσα στους δυο παλμούς πέφτει κατά 2% από την μεγαλύτερη κορυφή. Η καμπύλη φωτός αναλύει καθαρά την απότομη κλίση της κύριας κορυφής. Το πλάτος της κορυφής είναι 3 μοίρες, όμοιο με άλλα σε πολλά ράδιο-παλσαρ. Το κενό στο φάσμα μεταξύ κοντινού ράδιο (2 εκατοστά) και υπέρυθρου (8 μm) συμπίπτει με το όριο ανάμεσα σε συναφή ακτινοβολία (στο ράδιο- κυρίαρχο φάσμα) και μη συναφή (στο υπέρυθρο και σε πιο μεγάλες ενέργειες). Η μόνη εξήγηση της ομοιότητας των παλμών είναι ότι οι κατά μεγάλο βαθμό σχετιζόμενοι πληθυσμοί σωματιδίων που είναι παγιδευμένοι στην ίδια περιοχή της μαγνητόσφαιρας, ευθύνονται για την ακτινοβολία σε όλο το φάσμα. Οι μόνες εξαιρέσεις είναι κάποιοι παλμοί στα ραδιοκύματα και στα μεγάλης συχνότητας ραδιοκύματα. Η πηγές εκπομπής αυτών των παλμών δεν είναι ακόμα κατανοητές.

Έχουμε μετρήσεις της πολικότητας του φωτός στο οπτικό και στο υπεριώδες. Μέσα από τα προφίλ των γραμμών φαίνεται υψηλή γραμμική πολικότητα με γρήγορη ταλάντευση της γωνίας θέσης στις δυο κορυφές. Αυτή είναι μια ισχυρή ένδειξη ότι το φως είναι σχετικιστική ή καμπυλωμένη εκπομπή από υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια, που έχουν ροή στο μαγνητικό πεδίο. Σε ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο της μαγνητόσφαιρας ενός παλσαρ, ένα ηλεκτρόνιο (ή ποζιτρόνιο) μπορεί να περιοριστεί στο να ακολουθήσει ένα μονοπάτι μιας γραμμής του μαγνητικού πεδίου, έτσι ώστε σχεδόν να ταυτιστεί με αυτήν, με την γωνιά της πορείας του και της μαγνητικής γραμμής να είναι σχεδόν μηδενική. Η γωνία είναι γενικά καμπυλωμένη, έτσι το ηλεκτρόνιο θα επιταχυνθεί κατά την σπειροειδή κίνησή του γύρω από την μαγνητική γραμμή και θα εκπέμπει φωτόνια. Αυτή η εκπομπή, που μοιάζει με την σχετικιστική, λέγεται εκπομπή καμπύλωσης (curvature radiation). Η σχετικιστική εκπομπή (synchrotron radiation) είναι όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται με ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός και εκπέμπει λόγω επιβράδυνσης από το μέσο. Η σχετικιστική ταχύτητα του σωματιδίου συγκεντρώνει το ηλεκτρικό πεδίο που εκπέμπει το σωματίδιο προς τα εμπρός στη γωνία θέασης και παραμορφώνει τον χρόνο του παλμού, και το φάσμα γίνεται συνεχές.



synchrotron radiation occurs when a charged particle encounters a strong magnetic field – the particle is accelerated along a spiral path following the magnetic field and emitting radio waves in the process – the result is a distinct radio signature that reveals the strength of the magnetic field

Διακυμάνσεις της έντασης από γιγάντιους παλμούς.

Υπάρχει ένα πολύ σημαντικό κοντράστ ανάμεσα στην ακραία μεταβλητότητα του Crab παλσαρ στα ραδιοκύματα, όπου οι διακυμάνσεις έχουν παρατηρηθεί σε χρονικές κλίμακες από νανοδευτερόλεπτα ως έτη, και της κανονικότητας που επικρατεί στο καθεστώς των κυμάτων μεγάλης ενέργειας.

Η διακύμανση από παλμό σε παλμό στα ραδιοκύματα είναι η μεγαλύτερη σε παλσαρ. Οι γιγάντιοι παλμοί (giant pulses, GP), με τους οποίους ανακαλύψαμε την διακύμανση, αποτελούν τα άκρα της συνεχούς διασποράς της έντασης των παλμών, όπου ένας τέτοιος γίγαντας με δέκα φορές την συνήθη ενέργεια εμφανίζεται κάθε 1000 παλμούς ή αλλιώς κάθε 30 δευτερόλεπτα. Ένας γίγαντας με 1000 φορές την μέση ενέργεια εμφανίζεται κάθε μία ώρα περίπου. Αυτοί είναι βραχύχρονι, μικρότερης διάρκειας από 10 μ s, και τα παρατηρήσιμα πλάτη τους έχουν επηρεαστεί από την μεσοαστρική σκεύαση, ακόμα και στα υψηλά ραδιοκύματα. Η ενέργεια των παλμών όμως μένει ανεπηρέαστη και καθορίζεται ως η χαμηλότερη συχνότητα.

Οι GP εμφανίζονται κυρίως σε φάσεις παλμών που ανταποκρίνονται σε κυρίως παλμούς και ενδιάμεσους. Δεν έχει παρατηρηθεί GP στον χρόνο του προδρόμου παλμού. Η κοντινή σχέση των GP με την μεταβλητά ολοκληρωμένη σύνθεση παλμών μας δείχνει ότι αυτή αποτελεί στοιχείο του άγνωστου μέχρι τώρα μηχανισμού της ράδιο- εκπομπής των παλσαρ.

Πρόσφατες μετρήσεις έδειξαν ότι ανεξάρτητοι οπτικοί παλμοί του Crab pulsar είναι μεγαλύτεροι κατά 3% όταν συνοδεύονται από γίγαντα, χωρίς λεπτομερή εξήγηση. Η σύμπτωση αυτή μας λέει ότι οι γίγαντες και οι οπτικοί παλμοί προέρχονται από την ίδια περιοχή της μαγνητόσφαιρας. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα παλσαρ με τους μεγαλύτερους γιγάντιους παλμούς είναι αυτά με την μεγαλύτερη ισχύ μαγνητικού πεδίου στον κύλινδρο φωτός. Ο κύλινδρος φωτός είναι η περιοχή όπου μπορούν τα δεσμευμένα στις μαγνητικές γραμμές σωματίδια να περιφέρονται του παλσαρ με υποφωτεινές ταχύτητες. Έτσι οι γραμμές αυτές μπορούν να είναι κλειστές.

Διακυμάνσεις της έντασης από μακροχρόνιους σπινθηρισμούς.

Όπως σε όλα τα παλσαρ, η ράδιο- εκπομπή από το Crab παλσαρ είναι μεταβλητή σε μεγάλες χρονικές κλίμακες. Υπάρχουν όμως επιπλέον διακυμάνσεις στους παλμούς που παρατηρούμε, οι οποίοι οφείλονται στην διάδοση του παλμού. Μέχρι να ανακαλύψουμε ότι η μεσοαστρική ύλη είναι υπεύθυνη για μακροχρόνιες διακυμάνσεις στην ένταση των

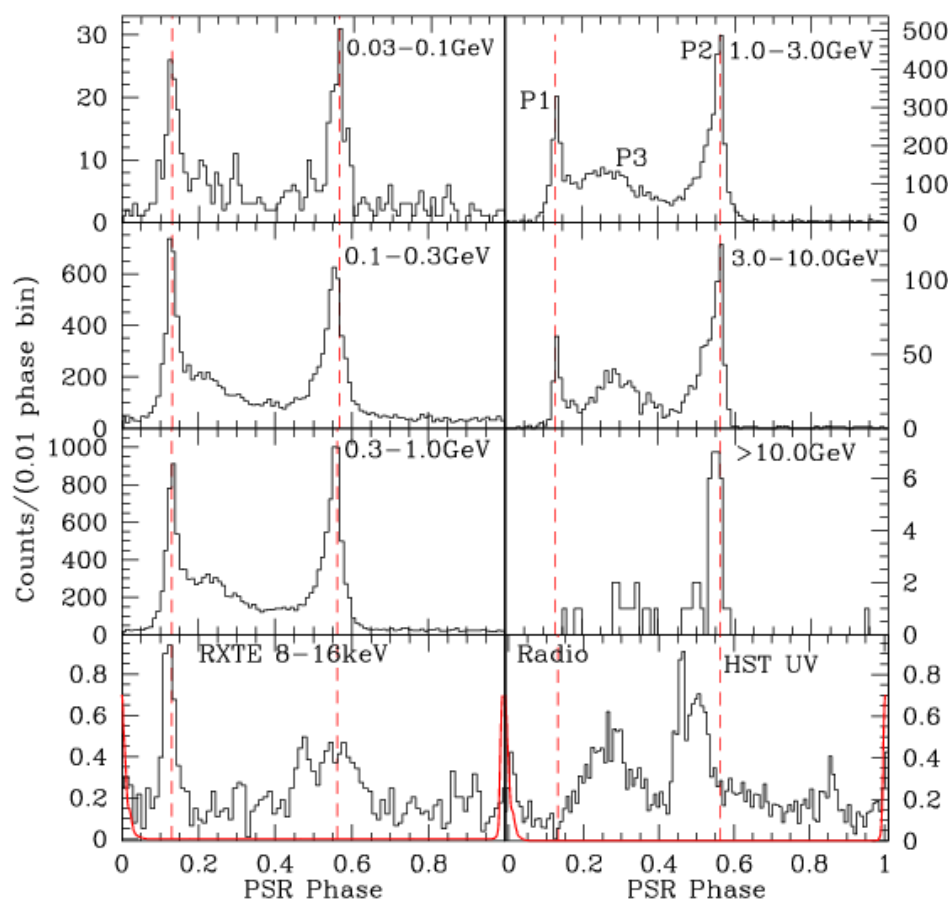
μικρής διαμέτρου ραδιοπηγών, όλες οι διακυμάνσεις με περίοδο πάνω από μερικά λεπτά αντιμετωπίζονται ως άγνωστες αργές εσωτερικές διεργασίες στα παλσαρ. Υπάρχουν μακροχρόνια φαινόμενα διάθλασης της εστίασης στα οποία η χρονική κλίμακα αυξάνεται με το μήκος κύματος, σε αντίθεση με τον βραχυχρόνιο περιθλαστικό σπινθηρισμό όπου η χρονική κλίμακα μειώνεται με την αύξηση του μήκος κύματος.

Η μεταβλητή διερεύνηση και διασπορά των ράδιο- παλμών γίνεται λόγω του φαινομένου πολλαπλής διάδοσης, και μας δείχνει ότι υπάρχουν πιθανώς δύο συστατικά διερεύνησης. Ένα σταθερό συστατικό, που έχει να κάνει με το κύριο μονοπάτι της μετάδοσης, και ένα μεταβλητό, που έχει να κάνει με την διάδοση μέσα στο νεφέλωμα του Καρκίνου. Υπάρχουν μεταβλητότητες που αντιστοιχούν στην δομή του ιονισμένου αερίου μέσα στο νεφέλωμα.

Το Vela παλσαρ.

Το προφίλ των μεγάλης ενέργειας παλμών.

Το σχήμα μας δείχνει ότι ο παλμός είναι ξεχωριστός και εμφανίζεται στην φάση 0. Σε πρώτη ματιά η αντίθεση με το παλσαρ του Καρκίνου είναι απογοητευτική. Η πιο καλή ταύτιση των δυο σχημάτων γίνεται στις ακτίνες γ. Η αδύναμη εκπομπή στις ακτίνες Χ δείχνει μια μετάβαση από υψηλές σε χαμηλές ενέργειες.



Το Vela παλσαρ είναι ένα από τα ισχυρότερα ράδιο- παλσαρ, και η δυνατότερη πηγή ακτίνων γ στον ουρανό, αλλά και ένα από τα πιο ισχνά ανιχνεύσιμα αντικείμενα στο οπτικό φάσμα, και οριακά ανιχνεύσιμο στις ακτίνες Χ. Το μέγιστο της ενέργειας της ακτινοβολίας είναι στις ακτίνες γ. Το φάσμα στα ραδιοκύματα είναι όμοιο με αυτό του Καρκίνου.

Ανιχνεύουμε ένα συνεχές φάσμα από το υπέρυθρο μέχρι τις ακτίνες γ. Μια πηγή μαλακών ακτίνων Χ φαίνεται να κυριαρχείται από θερμική εκπομπή από την επιφάνεια του παλσαρ.

Οι ράδιο- παλμοί του.

Το προφίλ των ράδιο- παλμών του Vela έχει μελετηθεί λεπτομερώς και ως ολοκληρωμένο και ως ανεξάρτητοι παλμοί. Τα ολοκληρωμένα προφίλ προέρχονται από διακριτά συστατικά. Στους ανεξάρτητους παλμούς ένα ή περισσότερα από αυτά τα συστατικά είναι ασυνήθιστα σημαντικά. Ένα παράδειγμα είναι η σύμπτωση ενός προφίλ με 21 επιλεγμένους παλμούς που παρουσιάζουν ένα ασυνήθιστα δυνατό συστατικό, 4 ms μετά τον κύριο παλμό.

Παρατηρούμε στο Vela γιγάντιους παλμούς (όχι τόσο μεγάλους όπως στον Καρκίνο) να εμφανίζονται σε ένα στενό εύρος των φάσεων των παλμών που περιορίζεται στην κύρια άκρη του κανονικού προφίλ, και μπορεί να συσχετίζεται με ένα συστατικό της ακτινοβολίας μεγάλης ενέργειας. Το Vela μας έδωσε το πρώτο κλασσικό παράδειγμα υψηλά πολωμένου ολοκληρωμένου προφίλ στα ραδιοκύματα, στο οποίο το επίπεδο της πολικότητας ταλαντεύεται αργά, σε μεγάλη γωνιά 120 μοιρών.

Άλλα νεαρά παλσαρ.

Η χαρακτηριστική ηλικία, που προκύπτει από τον σημερινό ρυθμό επιβράδυνσης, είναι ένας αναξιόπιστος δείκτης της πραγματικής ηλικίας. Δεν είναι μόνο ανασφαλές να θεωρούμε ότι ο ρυθμός περιστροφής κατά την δημιουργία του παλσαρ ήταν πολύ μεγαλύτερος από σήμερα, αλλά μπορεί να άλλαξε με τον χρόνο και ο κανόνας επιβράδυνσης. Ο χαρακτηρισμός ενός παλσαρ ως νεαρό είναι μόνο ασφαλής για τα λίγα που συσχετίζονται με συγκεκριμένες σ. νόβα. Στην αυξανόμενη λίστα αυτών των παλσαρ το SNR 3C58 είναι μια γνωστή ραδιοπηγή και συνδέεται με την σ. νόβα AD1181.

Μια άλλη ευκαιρία χρονολόγησης είναι η μέτρηση της ίδιας κίνησης του παλσαρ, την απομάκρυνσή του από το κέντρο του νεφελώματος. Μπορούμε όμως μόνο να συμπεράνουμε έτσι το ανώτερο της ηλικίας της σ. νόβα. Χαρακτηρίζουμε όλα τα παλσαρ ηλικίας κάτω από 100000 έτη ως νεαρά.

Πολλά από αυτά αποτελούν πηγές εκπομπής ακτίνων γ μεγάλης ενέργειας, που ανιχνεύθηκαν από διαστημικά τηλεσκόπια. Υπάρχει ισχυρός δεσμός ανάμεσα στην ροή εκπομπής ακτίνων γ και στην ενέργεια επιβράδυνσης. Όταν η ροή ακτίνων γ είναι αρκετή ώστε να σχηματίσουμε ένα προφίλ των παλμών, βρίσκουμε συχνά έναν διπλό παλμό όπως στο πάλσαρ του Καρκίνου. Έχουν βρεθεί πολλοί παλσαρ ακτίνων γ που δεν ανιχνεύονται ως ράδιο- παλσαρ. Τα νεαρά παλσαρ ερεθίζουν τα νεφελώματα τους με άνεμο ή πίδακα από φορτισμένα σωματίδια. Αυτά τα ονομάζουμε νεφελώματα ανέμου παλσαρ (pulsar wind nebula, PWN). Το νεφέλωμα του Καρκίνου ερεθίζεται όλο από το παλσαρ του και η επίδραση του πολικού πίδακα είναι εμφανής κοντά στο νεφέλωμα.

Η ηλικία από την ίδια κίνηση.

Όταν ένα παλσαρ βρίσκεται ασύμμετρα προς το κέντρο του νεφελώματός του μπορεί να έφτασε εκεί από μεγάλη ίδια κίνηση. Αν αυτή είναι μετρήσιμη ότι είναι προς τα έξω από το κέντρο, η σχέση αυτή ενισχύεται και βρίσκουμε την ηλικία ανεξάρτητα από την χαρακτηριστική ηλικία του.

Το PSRB1951 + 32 με περίοδο 32 ms και χαρακτηριστική ηλικία 100000 έτη έχει συνδεθεί με το SNRCTB 80. Έχουν βρεθεί ισχυροί παλμοί ακτίνων γ, και μόνο το νεφέλωμα φάνηκε στις ακτίνες Χ, στο υπέρυθρο και στο ορατό, χωρίς πηγή παλμών. Μετρήθηκε μια ιδία κίνηση, που έδωσε ηλικία 64000 $\pm$ 18000 έτη, που ταιριάζει με την χαρακτηριστική του ηλικία.

Το PSRJ0538 +2817 βρίσκεται μέσα στο SNRS147 (υπόλειμμα σουπερνόβα), αλλά η σύνδεση αυτή ήταν αμφίβολη, λόγω ότι η χαρακτηριστική του ηλικία είναι 620 χιλ. έτη, πολύ μεγαλύτερη από την ηλικία που υπολογίζουμε να είναι ορατό ένα απομεινάρι σ. νόβα. Η ιδία κίνησή του μας δίνει ηλικία 30 $\pm$ 4 χιλιάδες έτη, 20 φορές μικρότερη της χαρακτηριστικής. Αυτό είναι ένα παράδειγμα του κινδύνου της χαρακτηρηστικής ηλικίας.

Αβέβαιες ηλικίες για τα 3C58 και PSRJ0205+ 6449 .

Η ραδιοπηγή 3C58 έχει καθαρή συσχέτιση με το, όμοιο με του Καρκίνου, νεφέλωμα G130.7+ 3.1, που αναγνωρίζεται λιγότερα καθαρά ως PWN και συσχετίζεται με την σ. Νόβα 1181 AD. Η ανακάλυψη του παλσαρ ακτίνων Χ των 65 ms μέσα στο νεφέλωμα επιβεβαιώνει την σχέση, και η χαρακτηριστική ηλικία του είναι στα 5400 έτη. Το παλσαρ αυτό ανακαλύφτηκε και ως ραδιοπαλσαρ, μετά από μερικές προσπάθειες. Η δυσαναλογία της ηλικίας της σ. νόβα και της χαρακτηριστικής ηλικίας του παλσαρ έχει δύο εξηγήσεις. Ή το παλσαρ είναι όντως νεαρό, και ο ρυθμός επιβράδυνσης δίνει περίοδο κατά την γέννησή του στα 60 μs, ή η σύνδεσή του με την ραδιοπηγή είναι λάθος. Αν μετρήσουμε διαστολή στο ορατό νεφέλωμα θα ξέρουμε περισσότερα, όπως συμβαίνει για το νεφέλωμα του Καρκίνου.

Η αβεβαιότητα της ηλικίας του παλσαρ μας δείχνει ότι πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί με την χαρακτηριστική ηλικία. Ένα ακόμα παράδειγμα είναι το παλσαρ PSRJ1811- 1925, με περίοδο 65 ms και χαρακτηριστική ηλικία 24000 έτη, που βρίσκεται σε ένα υπόλειμμα σ. νόβα με μέγιστη ηλικία 2000 έτη. Η κεντρική περιοχή του μας δείχνει ότι συνδέεται με την ιστορική σ. νόβα 386 AD.

Ένας σωσίας του Crab pulsar, το PSRB0540- 69.

Αυτό το παλσαρ είναι ένα από τα νεαρότερα που γνωρίζουμε. Με περίοδο 50,3 ms και χαρακτηριστική ηλικία 1650 έτη, αναφέρεται συχνά ως δίδυμο του παλσαρ του Καρκίνου. Βρίσκεται στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος και είναι ένα από τα πιο μακρινά που έχουμε ανακαλύψει. Όπως σε πολλά νεαρά παλσαρ, τα οπτικά προφίλ και αυτά στις ακτίνες Χ είναι όμοια. Αν και βρίσκεται σε απόσταση 49 kpc, πολύ μακριά σχετικά με τα 2 kpc του Καρκίνου, η ροή των ακτίνων Χ από αυτά είναι παρόμοια. Δείχνει και αυτό γιγάντιους παλμούς. Είναι και αυτό κοντά στο κέντρο του υπολείμματος. Η διάμετρος του υπολείμματος, που βρίσκεται μέσα σε ένα μεγαλύτερο νέφος, είναι 1,3 pc, όμοια με αυτήν του Καρκίνου (3,5 X 2,3 pc).

Ένα παλιό SNR με ένα νέο παλσαρ, το PSRB1509- 58.

Η περιόδός του είναι στα 150 ms. Αν και η ενέργεια επιβράδυνσης είναι η Τρίτη μεγαλύτερη γνωστή, πρόκειται για ένα αδύναμο ραδιοπαλσαρ. Αν δεν είχε βρεθεί πρώτα στις ακτίνες Χ ίσως να μην το ανιχνεύαμε στα ραδιοκύματα, λόγω μεγάλης διασποράς σήματος. Η χαρακτηριστική ηλικία του είναι 1560 έτη, σε ένα υπόλειμμα σ. Νόβα 10000 ετών. Η δυσαναλογία αυτή σημαίνει ότι το νεφέλωμα είναι απομεινάρι παλαιότερης έκρηξης, ίσως από έναν συνοδό του παραπάνω παλσαρ.

Ένα νεαρό αλλά αργό παλσαρ, το PSRJ1846- 0258 στο Kes 75

Το τελευταίο είναι ένα υπόλειμμα σ. Νόβα με κεντρικό πυρήνα με διάμετρο 30 arcsec. Περιβάλλεται από ένα κέλυφος 3,5 arcmin σε απόσταση 6 kpc. Το παλσαρ βρίσκεται στο κέντρο του και ανακαλύφτηκε στις ακτίνες Χ. Εδώ δεν είναι πρόβλημα η ταύτισή του με το νεφέλωμα, αφού η χαρακτηριστική ηλικία του είναι μόλις 700 έτη. Το μόνο ασυνήθιστο είναι η αργή περιόδός του (325 ms).

J0633 +1746 (Geminga).

Η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ακτίνων γ, χωρίς ράδιο ή οπτικά σήματα όταν παρατηρήθηκε αρχικά, είναι αυτό το παλσαρ στους Δίδυμους. Βρέθηκε ως παλμός στις ακτίνες Χ με περίοδο 237 ms. Η χαρακτηριστική ηλικία του είναι 340000 έτη. Τώρα παρατηρούμε στο οπτικό να έχει μεγάλη ίδια κίνηση και η απόστασή του είναι 250 pc. Δεν έχουμε παρατήρηση στα ραδιοκύματα. Αν υπάρχει ραδιοπαλμός είναι εκτός γραμμής θέασης, αρα σε μεγάλη γωνία από την εκπομπή του στις ακτίνες γ.

Τα νεαρότερα παλσαρ.

Η συνολική διαθέσιμη ενέργεια από την επιβράδυνση περιστροφής μειώνεται σε αρκετές τάξεις μεγέθους στη διάρκεια ζωής ενός παλσαρ, αφού η μαγνητική διπολική ακτινοβολία πέφτει κατά την 4^η δύναμη του ρυθμού περιστροφής. Η λαμπρότητα στα ραδιοκύματα συνεχίζεται σχετικά αλώβητη για ένα εκ. έτη, και τα πιο πολλά παλσαρ ξεπερνούν την διάρκεια ζωής του νεφελώματός τους. Τα νεφελώματα αυτά φαίνονται μόνο για 10000 ετη, περιορίζοντας έτσι τα παλσαρ που συνδέονται με υπολείμματα. Μερικά νεαρά παλσαρ έχουν παρατηρηθεί στις ακτίνες Χ. Εκτός από την ευαισθησία, τα τηλεσκόπια ακτίνων Χ και γ έχουν άλλο ένα πλεονέκτημα. Το πλάτος της εκπομπής είναι μεγαλύτερο στις μεγάλες ενέργειες από ότι στα ραδιοκύματα, άρα όπως στο προηγούμενο παράδειγμα μπορεί να μην έχουμε παρατήρηση στα ραδιοκύματα ενός παλσαρ που ανακαλύψαμε στις ακτίνες μεγάλης ενέργειας.

Η εκπέμπουσα ενέργεια.

Όπως είδαμε, η περιγραφή των πληθυσμών των παλσαρ στον Γαλαξία μας χρειάζεται ένα μοντέλο της διασποράς λαμπρότητάς τους, και εξαρτάται από τον ρυθμό περιστροφής. Το απλούστερο είναι να θεωρήσουμε ότι η λαμπρότητα είναι ανάλογη της ενέργειας επιβράδυνσης. Αυτό όμως δεν μπορεί να επεκταθεί και στα νεαρά παλσαρ, που δεν είναι λαμπρότερα από τα μέσης ηλικίας.

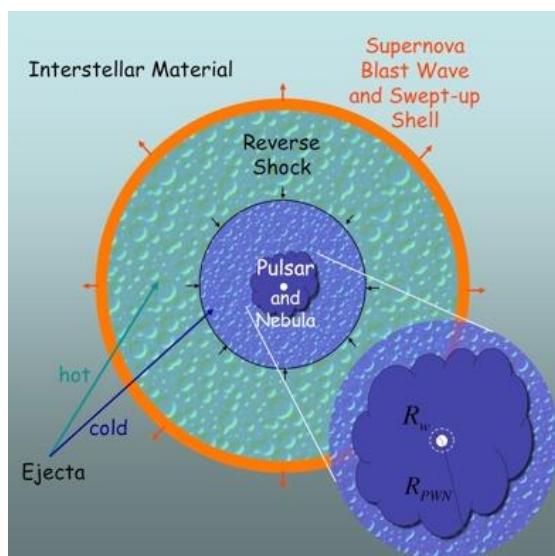
Δείκτες επιβράδυνσης.

Η μέτρηση των δεικτών επιβράδυνσης μας δίνει έναν έλεγχο της δυναμικής της επιβράδυνσης περιστροφής. Δυστυχώς για τα πιο πολλά παλσαρ η μέτρηση αυτή χρειάζεται παρατηρήσεις πολλών δεκαετιών, ώστε να έχουν συμβεί πολλά glitch. Τα νεαρά παλσαρ όμως μας προσφέρουν μια ευκαιρία για τέτοια μέτρηση, αφού έχουν μεγάλους ρυθμούς επιβράδυνσης και συνήθως μικρότερα glitch.

PWN (νεφελώματα ανέμων παλσαρ).

Η ενέργεια επιβράδυνσης της περιστροφής ενός παλσαρ εκπέμπεται κυρίως σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα στην συχνότητα της περιστροφής, με ένα κλάσμα της να εκφράζεται σε ροή ή πίδακα σωματιδίων από τις πολικές περιοχές. Αυτή η ενέργεια απορροφάται ή από το νεφέλωμα που περιβάλλει το παλσαρ ή από την ευρύτερη μεσοαστρική ύλη. Κοντά στο παλσαρ, αλλά εκτός μαγνητόσφαιρας, το κύμα και η ροή

σωματιδίων ωθούν φορτισμένα σωματίδια σε μεγάλες ενέργειες. Αυτά μπορούν να εκπέμψουν σχετικιστική ακτινοβολία που είναι ανιχνεύσιμη σε όλο το φάσμα και από το PWN. Οι ενέργειες των σωματιδίων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να σκεδάσουν σχετικιστικά φωτόνια σε TeV ακτινοβολία γ . Αυτό το έχουμε παρατηρήσει στο νεφέλωμα του Καρκίνου, και τα τηλεσκόπια ακτίνων γ HESS (που μετράνε την δευτερεύων ακτινοβολία Cerenkov) έχουν βρει και άλλες πολλές τέτοιες πηγές. Η ενέργεια της εκπομπής είναι χονδρικά ανάλογη της ενέργειας επιβράδυνσης, άρα τα PWN συνδέονται γενικώς με νεαρά παλσαρ.



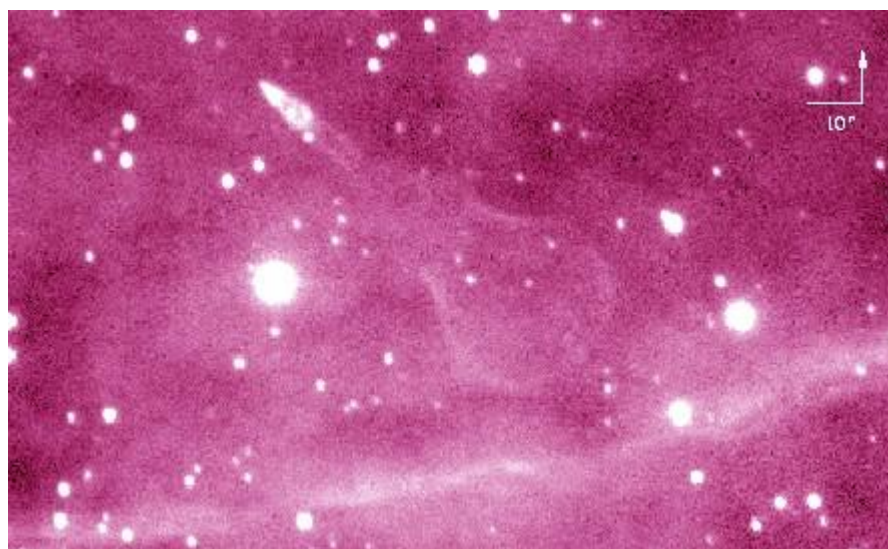
Η δομή των PWN εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό εξέλιξης του υπολείμματος του σ. Νοβα στο οποίο είναι εμβαπτισμένο, αλλά και από την ταχύτητα του παλσαρ, που μπορεί να βγει έξω από το υπόλειμμα. Τα υπολείμματα διαστέλλονται με ταχύτητα χιλιάδων km/s, ενώ τα παλσαρ έχουν ταχύτητες μερικές εκατοντάδες km/s. Στα πρώτα στάδια του το παλσαρ είναι κοντά στο κέντρο του υπολείμματος, και το PWN σχηματίζεται όλο μέσα στο υπόλειμμα, διαμορφώνοντας ένα διακριτό νέφος στο κέντρο του. Ένα νεαρό PWN επεκτείνεται με υπερηχητική ταχύτητα μέσα στο υπόλειμμα. Το νεφέλωμα του Καρκίνου είναι σήμερα ένα PWN και δεν έχουν βρεθεί ίχνη περιβάλλοντος υπολείμματος. Το ίδιο το νεφέλωμα αναφέρεται ως απομεινάρι, αλλά πρέπει να αποκαλείται PWN αφού είναι πλήρως ερεθισμένο από το παλσαρ. Ένα υπόλειμμα που έχει γεμίσει από ένα PWN αναφέρεται ως πληριόνιο (plerion), ο όρος αυτός χρησιμοποιείται και για μερικώς γεμισμένα υπολείμματα.

Σε ιδανικές περιπτώσεις είναι δυνατό να παρατηρήσουμε αυτήν την αρχική φάση βλέποντας το ίδιο το παλσαρ, το διαστελλόμενο κέλυφος της σ. Νοβα και μέσα σε αυτό το PWN. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ένα από τα νεαρότερα παλσαρ, το PSRJ1833- 1034, που είναι μάλλον μόνο 1000 ετών.

Σε αργότερη φάση το διαστελλόμενο υπόλειμμα αλληλοεπιδρά με την μεσοαστρική ύλη. Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική. Η διαστολή επιβραδύνεται και αναπτύσσεται ένα ανάδρομο κρουστικό κύμα (shock, η σύγκρουση με υπερηχητική ταχύτητα με άλλη συγκέντρωση ύλης), που δρα προς το κέντρο του υπολείμματος, και χωρίς να είναι πια ενεργό το παλσαρ όλο το υπόλειμμα γεμίζει από την ύλη που έχει δεχτεί το κρουστικό κύμα. Αν το ανάδρομο κρουστικό κύμα συναντήσει ένα διαστελλόμενο κρουστικό κύμα από PWN, το τελευταίο θα συμπιεστεί και θα θερμανθεί με αποτέλεσμα να γίνει πιο εύκολα ανιχνεύσιμο στις ακτίνες X. Δεν μπορεί να υπάρξει ιδανικό, συμμετρικό δείγμα αυτής της

φάσης. Πρώτον, επειδή το ανάδρομο κρουστικό κύμα είναι ασύμμετρο, λόγω ανωμαλιών της μεσοαστρικής ύλης, και δεύτερον γιατί μετά από μερικές δεκάδες έτη η μεγάλη ταχύτητα του παλσαρ το απομακρύνει από το κέντρο του υπολείμματος και του PWN.

Στο Vela έχουμε ένα PWN να συνδέεται με το παλσαρ, και έχουμε χαρτογραφήσει το μεγάλο υπόλειμμα. Είναι όμως λιγότερο σαφές καθορισμένο από ότι στο Crab, και φαίνεται να έχει διαταραχτεί από ανάδρομο κρουστικό κύμα. Το PWN είναι διαμέτρου 1 μοίρας, ενώ το υπόλειμμα 4 μοιρών. Η ταχύτητα ενός παλσαρ μπορεί να το μεταφέρει εκτός του αρχικού PWN, με αποτέλεσμα να κινείται με μεγάλη ταχύτητα μέσα στο αέριο του υπολείμματος που δέχεται το κρουστικό κύμα. Η ταχύτητά του είναι αρχικά μικρότερη του ήχου, αλλά η ταχύτητα του ήχου μειώνεται στα όρια του υπολείμματος (η πυκνότητα της ύλης είναι μικρότερη εκεί) και τότε το παλσαρ κινείται με υπερηχητική ταχύτητα. Στην μεσοαστρική ύλη η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από την θερμοκρασία αλλά δεν είναι μεγαλύτερη από 100 km/s για θερμή ύλη, ταχύτητα μικρότερη από αυτήν του παλσαρ. Τώρα το PWN παρατηρείται ως ένα κρουστικό μέτωπο σε σχήμα τόξου.



Guitar nebular

Το παραπάνω τοξωτό κρουστικό μέτωπο είναι πολύ κοντά στο παλσαρ PSRB2224 +65, αφήνει όμως ένα ορατό ίχνος.

Ένα παλσαρ μέσα σε υπόλειμμα ανιχνεύεται από τις επιδράσεις της ροής ενεργών σωματιδίων από τους πόλους. Είναι ενδιαφέρον να υποψιαστούμε ότι ένα παλσαρ του οποίου η ραδιοεκπομπή δεν είναι ανιχνεύσιμη, λόγω ακατάλληλης γωνίας με την Γη, μπορεί να δημιουργήσει ένα ορατό PWN που να δηλώνει την παρουσία του. Το νεφέλωμα G 328,4 +0,2 παρατηρείται ως μη θερμική πηγή ακτίνων Χ, και μάλλον του δίνει ενέργεια ένα παλσαρ που δεν το έχουμε ανακαλύψει (ακόμα και το υπόλειμμα είναι ορατό).

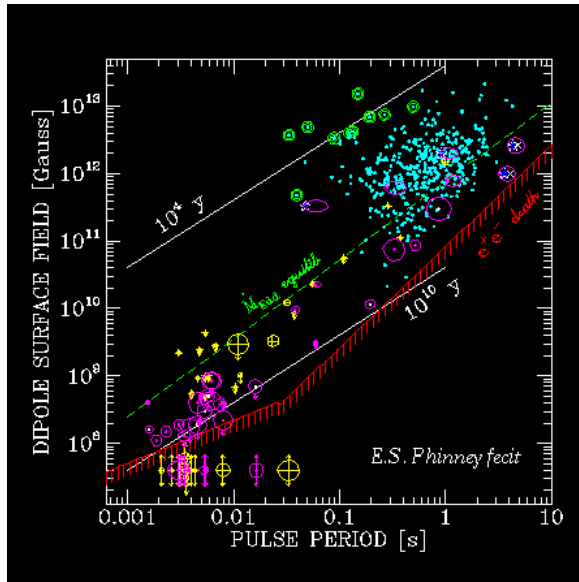
Μιλισέκοντ (millisecond) και διπλά παλσαρ.

Ένας ξεχωριστός πληθυσμός.

Τα μιλισεκοντ είναι μια ξεχωριστή από τα κανονικά παλσαρ κατηγορία πληθυσμού αστέρων νετρονίων. Τα περισσότερα παλσαρ έχουν μια απλή πορεία εξέλιξης από την γέννησή τους σε μια σ. Νόβα μέσα από μια επιβράδυνση περιστροφής, που ξεκινάει από περίοδο περιστροφής μερικών δεκάδων μιλισεκοντ, για να καταλήξει σε <θάνατο> με

περιστροφή περίπου στο ένα δευτερόλεπτο, όταν η ακτινοβολία του σβήνει ή γίνεται μη ανιχνεύσιμη. Τα μιλισεκοντ αποτελούν έναν πληθυσμό με μεγαλύτερη διάρκεια <ζωής>, που προέρχεται από τον γενικό πληθυσμό κανονικών παλσαρ, και αποτελούν αποτέλεσμα βαρυτικής αλληλεπίδρασης με συνοδό. Τα περισσότερα έχουν ακόμα τον συνοδό τους, αλλά μερικά τον έχουν χάσει και αποτελούν τα μοναχικά μιλισεκοντ παλσαρ.

Τα πιο πολλά μιλισεκοντ έχουν περιόδους μικρότερες από 10 ms, αν και στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα παλσαρ με περιόδους μέχρι 30 ms.



Υπάρχει ένα κενό ανάμεσα στα κανονικά παλσαρ και στα μιλισεκοντ, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Αυτά που βρίσκονται στο κενό έχουν βιώσει παλαιότερα αλληλεπιδράσεις με συνοδό.

Διπλά αστέρια.

Το εκπληκτικό είναι ότι σχεδόν όλα τα παλσαρ που σχετίζονται με πηγή ακτινοβολίας Χ είναι μέλη διπλού συστήματος, ενώ μόνο ένα στα δέκα ραδιοπαλσαρ είναι διπλό. Η σχετική σπανιότητα των διπλών με παλσαρ έχει να κάνει με την διάλυση του δεσμού τους κατά την έκρηξη σουπερνόβα (επειδή προέρχονται από αστέρια μεγάλης μάζας είναι πολύ πιθανό να ανήκαν σε διπλό σύστημα), ενώ τα διπλά ακτίνων Χ παρουσιάζουν μεταφορά ύλης ανάμεσα στα δύο μέλη, που επηρεάζει την εξέλιξη και των δύο.

Όλοι οι τύποι αστεριών υπάρχουν σε διπλά συστήματα, και κυρίως οι μεγάλοι που αναμένουμε να γίνουν σουπερνόβα II. Το 70% των αστεριών Ο, Β είναι σε διπλά συστήματα και το 70% αυτών έχουν περίοδο περιφοράς (ο ένας γύρω από τον άλλο) μικρότερη από 10 ημέρες. Η μεταφορά μάζας έχει αφήσει τα σημάδια της σε πολλά συστήματα. Για παράδειγμα, στους δύο αστέρες του Algol ο μεγαλύτερης μάζας έχει την πιο αργή από τους 2 εξέλιξη, άρα πρέπει αρχικά να είχε μικρότερη μάζα από τον συνοδό του. Σε αυτά τα συστήματα ο ρυθμός μεταφοράς της μάζας και η φάση εξέλιξης στην οποία αυτός εμφανίζεται εξαρτώνται από την μάζα των αστεριών και από την απόσταση ανάμεσά τους.

Όταν η μισή μάζα της συνολικής του συστήματος χαθεί από μια συμμετρική έκρηξη, έχουμε διαταραχή του συστήματος. Δεν απομένει αρκετή μάζα ώστε να κρατήσει τα δύο αστέρια στις προ- σουπερνόβα τροχιακές ταχύτητές τους. Η διάλυση του συστήματος αποφεύγεται

μόνο αν αυτή η ελάττωση της συνολικής μάζας είναι μικρότερη του 20%. Όταν η έκρηξη είναι ασύμμετρη ή τα δυο αστέρια είναι πολύ κοντά, η ανάλυση γίνεται πιο πολύπλοκη, γιατί μπορεί να υπάρχει επίδραση του διαστελλομένου κελύφους της έκρηξης στον συνοδό. Πολλές σουπερνόβα Ια αναμένονται να κρατήσουν τον δεσμό τους (αν και η επικρατέστερη θεωρία λέει ότι οι Ια δεν αφήνουν υπόλειμμα άστρου, ο λευκός νάνος διαλύεται εντελώς). Αυτό γιατί έχουν μικρή σχετικά μάζα, ενώ οι σουπερνόβα ΙΙ πρέπει να διαλύουν το σύστημα, αφήνοντας ένα διαστελλόμενο κέλυφος αερίων και δύο άστρα μεγάλης ταχύτητας, με το ένα να είναι μάλλον ένας αστέρας νετρονίων. Μερικά αστέρια μπορεί να απέκτησαν με αυτόν τον τρόπο τις μεγάλες ιδίες ταχύτητές τους.

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα δύο αστέρια, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μιλισεκοντ παλσαρ, είναι η κινούμενη από την βαρύτητα μεταφορά μάζας. Σε αυτή την διαδικασία οφείλονται οι πηγές ακτίνων Χ, όπου η μεταφορά μάζας παρέχει την θερμική ενέργεια για εντατική εκπομπή ακτίνων Χ. Η ουσιώδης επίδραση στο μιλισεκοντ είναι η μεταφορά στροφορμής από την κίνηση στο διπλό σύστημα στην περιστροφή του. Το αποτέλεσμα είναι η επιτάχυνσή του κατά εκατοντάδες περιστροφές το δευτερόλεπτο. Χωρίς αλληλεπίδραση με συνοδό τα μιλισέκοντ θα έχαναν κάποτε τόση λαμπρότητα, ώστε δεν θα ήταν ανιχνεύσιμα. Με την επιτάχυνση της περιστροφής αποκτούν ξανά ραδιοεκπομπή. Έτσι ονομάζονται και ανακυκλωμένα παλσαρ.

Η εξέλιξη που υποψιαζόμαστε ότι βιώνουν τα διπλά και τα μιλισέκοντ παλσαρ είναι πολύ πιο αργή από ότι στα κανονικά παλσαρ. Τα μαγνητικά πεδία τους είναι 3 με 4 φορές λιγότερο ισχυρά από αυτά των κανονικών. Υπάρχει μια ελάττωση του μαγνητικού πεδίου κατά την διαδικασία της μεταφοράς μάζας και της επιτάχυνσης της περιστροφής. Οι χαρακτηριστικές ηλικίες τους είναι της τάξης του 1 δις ετών. Επίσης συνήθως εκπέμπουν και στις ακτίνες γ.

Η ανακάλυψη τους.

Τα περισσότερα μιλισέκοντ βρίσκονται σε συστήματα με λευκούς νάνους, αλλά μερικά είναι σε σύστημα με άλλον αστέρα νετρονίων ή αστέρι κυρίας ακολουθίας. Υπάρχει μια εξελικτική σχέση, που συνδέει κανονικά αστέρια διπλών συστημάτων σε ξεχωριστές ομάδες διπλών και μιλισέκοντ παλσαρ.

.Σε ένα κανονικό διπλό σύστημα (μεγάλων) αστέρων, ο πιο μεγάλης μάζας αστέρας (αστέρι1) εξελίσσεται πιο γρήγορα και καταρρέει σε αστέρα νετρονίων μετά από έκρηξη σουπερνόβα. Το διπλό σύστημα μπορεί να διαταραχτεί ή από δυναμικές των τροχιών, ή επειδή ο αστέρας νετρονίων αποκτάει μεγάλη ταχύτητα, λόγω του ασύμμετρου της έκρηξης. Αν το σύστημα λυθεί, μένει ένα μεμονωμένο παλσαρ και ένα μεγάλης ταχύτητας μεγάλο αστέρι (αυτά είναι τα γνωστά εδώ και πολλά χρόνια μεγάλης ταχύτητας OB αστέρια).

.Αν επιβιώσει το σύστημα, το κανονικό νεαρό παλσαρ παρατηρείται ως διπλό παλσαρ με συνοδό ένα αστέρι κ. ακολουθίας. Για παράδειγμα, το PSRB1259- 63.

.Ο άλλος συνοδός (αστέρι2) εξελίσσεται σε ερυθρό γίγαντα, έχοντας έναν λευκό νάνο ως πυρήνα, και μια εκτεταμένη ατμόσφαιρα, που διαστέλλεται μέχρι να αρχίσει να την έλκει ο αστέρας νετρονίων, λόγω της βαρύτητάς του (δεν αφήνει έτσι να σχηματιστεί πλανητικό νεφέλωμα). Η βαρυτική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη μεταφορά μάζας θερμαίνει τον αστέρα νετρονίων (την ατμόσφαιρά του) και μια άλω γύρω του. Έτσι δημιουργείται μια πηγή ακτίνων Χ. Έχουν βρεθεί πολλές δίπλες πηγές ακτίνων Χ.

.Η στροφορμή της τροχιάς της ύλης που έλκεται μεταφέρεται και αυτή στον παλσαρ, που επιταχύνει σε περιόδους μιλισέκοντ. Αφού η ατμόσφαιρα του ερ. γίγαντα έχει απομακρυνθεί και η μεταφορά της έχει ολοκληρωθεί, μένει ένας πυκνός πυρήνας του αστεριού 2. Έτσι παρατηρούμε ένα ανακυκλωμένο μιλισέκοντ παλσαρ με συνοδό έναν λευκό νάνο.

.Αν το αστέρι 2 είναι μεγάλης μάζας, μπορεί να καταρρεύσει σε έκρηξη σουπερνόβα. Ξανά έχουμε δύο πιθανότητες, να διατηρηθεί ή να διαλυθεί του σύστημα

. Η διάλυση του συστήματος θα δώσει ένα νέο παλσαρ και έναν μεμονωμένο παλιό μιλισεκοντ παλσαρ.

. Αν μένει το σύστημα και μετά την δεύτερη έκρηξη σ. Νοβα, θα έχουμε 2 αστέρες νετρονίων σε ελλειπτική τροχιά, ένα νεαρό και ένα ανακυκλωμένο.

Οι πιο σημαντικοί από αυτές τις πολύπλοκες ακολουθίες είναι οι διπλοί νετρονίων. Μπορούμε να μετρήσουμε τις μάζες και τις παραμέτρους των τροχιών τους με εκπληκτική ακρίβεια. Έτσι αποτελούν την καλύτερη επαλήθευση της γενικής θεωρίας της σχετικότητας.

Αν ο συνοδός είναι λ. νάνος, μπορεί να ανιχνευτεί οπτικά. Πολλές φορές ο αστέρας νετρονίων δεν φαίνεται. Συνήθως αν υπάρχει μεγάλη εκκεντρικότητα των τροχιών, έχουμε απομεινάρια σουπερνόβα, ενώ σε διπλό με λ. νάνο η βαρυτική αλληλεπίδραση σε μορφή παλιρροϊκής επίδρασης και μεταφοράς μάζας μειώνει την εκκεντρικότητα, δίνοντας σε κάποιες περιπτώσεις τις λιγότερο εκκεντρικές (σχεδόν κυκλικές) τροχιές που γνωρίζουμε.

Οι διπλοί και οι τροχιές τους.

Αν και οι παρατηρήσεις των χρόνων των περιόδων μας επιτρέπουν την εύκολη διάκριση ανάμεσα σε μονά και διπλά παλσαρ, μερικά με τις μεγαλύτερες ή τις μικρότερες περιόδους μας δυσκολεύουν σε αυτό. Για το κανονικό παλσαρ PSRB0820 +02, οι μεταβολές στην περίοδο δεν φάνηκαν από τις πρώτες παρατηρήσεις, και η τιμή τους είναι αρνητική (επιτάχυνση της περιστροφής), που σημαίνει ότι υπάρχει συνοδός. Η μεγάλη περίοδος τροχιάς στο διπλό σύστημα (4 έτη) δυσκόλεψε την παρατήρησή της. Και το PSRB 0655 +64 πρέπει να είναι αποτέλεσμα μεγάλης αλληλεπίδρασης. Η περίοδος τροχιάς του είναι μόνο 24,7 ώρες, και η εκκεντρικότητα λιγότερη από 10 στη-5.

Αν μπορεί να μετρηθεί η μετατόπιση Ντόπλερ της περιόδου και για τα δύο μέλη του συστήματος, όπως συμβαίνει στα διπλά με 2 παλσαρ και σπάνια σε αυτά με λ. νάνο, το εύρος της μετατόπισης Ντόπλερ μας δίνει το εύρος των 2 μαζών. Αλλιώς έχουμε μόνο την συνολική μάζα τους. Πρέπει να υπολογίσουμε και τα σχετικιστικά φαινόμενα. Η διακύμανση της ταχύτητας μετάδοσης κατά την τροχιά είναι άμεσα σχετική με την κλίση της τροχιάς. Για το PSRB0655 +64 οι μετρήσεις δείχνουν ότι η κλίση της τροχιάς είναι τουλάχιστον 60 μοίρες.

Η στατιστική των κανονικών διπλών αστεριών δεν δείχνει ενίσχυση των μικρών τιμών εκκεντρικότητας. Έτσι είναι αξιοθαύμαστο ότι η πλειοψηφία των διπλών παλσαρ, οι διπλοί με λ. νάνο, έχουν πολύ ακριβείς κυκλικές τροχιές. Οι πιο κυκλικές τροχιές είναι αυτές με την μικρότερη περίοδο τροχιάς. Η διαδικασία που ελαττώνει την εκκεντρικότητα για έναν ερυθρό γίγαντα που μεταδίδει μάζα σε έναν λ. νάνο είναι καλά κατανοητή. Τείνει να δημιουργηθεί μια τέλεια κυκλική τροχιά. Οι ελάχιστες εκκεντρικότητες που μένουν φαίνονται σαν διακυμάνσεις πυκνότητας στην ατμόσφαιρα του ερ. γίγαντα.

Σε διπλούς με λ. νάνο υπάρχει μια αλληλεπίδραση στην οποία οι τροχιές γίνονται σχεδόν κυκλικές από την απαγωγή στον λευκό νάνο, με αποτέλεσμα τις πιο κυκλικές τροχιές που γνωρίζουμε.

Δύο αστέρες νετρονίων σε διπλό σύστημα συμπεριφέρονται δυναμικά σαν δύο σημειακές μάζες. Η ελλειπτικότητα των τροχιών τους έχει παραμείνει χωρίς αλλαγή από την δεύτερη έκρηξη σουπερνόβα, εκτός από τα σχετικιστικά φαινόμενα. Μια ασυμμετρία στην δεύτερη σουπερνόβα δίνει μια ώθηση στο νεαρότερο παλσαρ, δίνοντάς του ελλειπτική τροχιά. Οι τροχιές των διπλών συστημάτων αστερών νετρονίων (DNSs, double neutron star systems) δείχνουν μια ενδιαφέρουσα σχέση ανάμεσα στην εκκεντρικότητα της τροχιάς και την περίοδο περιστροφής των παλσαρ. Η εκκεντρικότητα που οφείλεται στην διατάραξη από την δεύτερη σουπερνόβα θα είναι αυξημένη για μεγαλύτερης μάζας λ. νάνο, που θα δώσει μεγαλύτερη ώθηση. Αυτά τα μεγαλύτερης μάζας αστέρια θα εξελιχτούν πιο γρήγορα φτάνοντας το όριο Chandrasekhar, δίνοντας λιγότερο χρόνο να επιταχυνθεί το παλσαρ από την μεταφορά στροφορμής. Έτσι υπάρχει μια στενή σχέση ανάμεσα στην περίοδο περιστροφής και την εκκεντρικότητα της τροχιάς.

Υπάρχουν σχεδόν τόσα μιλισεκόντ στα σφαιρωτά, όσα και στον γαλαξιακό δίσκο, και τα περισσότερα είναι διπλά. Η μεγάλη αστρική συγκέντρωση στα σφαιρωτά οδηγεί σε βαρυτικές αλληλεπιδράσεις που επηρεάζουν τις τροχιές των διπλών, κάτι που πρέπει να λαμβάνουμε υπ όψιν. Οι τρεις οικογένειες διπλών μιλισεκόντ που έχουμε βρει στον γαλαξιακό δίσκο είναι

. Μεμονωμένοι, άτομα 20

. Εκκεντρικοί διπλοί (εκκεντρικότητα $>0,05$), άτομα 19, περιλαμβάνονται οι διπλοί νετρονίων και παλσαρ/ λ. νάνος.

. Μικρής εκκεντρικότητας, (εκκεντρικότητα $< 0,05$), άτομα 64.

Οι μάζες των διπλών παλσαρ και οι συνοδοί τους.

Σε συμβατικές οπτικές παρατηρήσεις τα συστήματα διπλών μελετώνται μέσα από τις φασματικές μετατοπίσεις Ντόπλερ σε γραμμές ατόμων (στοιχείων) των αστρικών ατμοσφαιρών, κάτι που είναι ανάλογο της διαμόρφωσης των παλμών περιόδου σε διπλά παλσαρ. Η κλίση του επιπέδου της τροχιάς με την γωνία θέασης δεν μπορεί να βρεθεί μόνο από μια τέτοια μέτρηση. Μια μεγάλη τροχιά που βλέπουμε κατάφασκα δεν μπορεί να ξεχωρίσει από μια μικρή τροχιά που βλέπουμε στη κόψη. Αν η γωνία αυτή είναι άγνωστη, η μάζα του παλσαρ είναι γνωστή μόνο σε συνδυασμό με την μάζα του συνοδού και την συνιστώσα μάζα. Το διπλό PSRB1953 +29 με περίοδο τροχιάς 117 ημέρες έχει συνιστώσα μάζα 0,00272. Οι πιθανοί συνδυασμοί δίνουν μάζα του παλσαρ 0,5, 1,4 και 2,5 ηλιακές μάζες.

Αν μπορούν να μετρηθούν οι σχετικιστικές επιδράσεις, θα έχουμε την ακριβή μάζα του παλσαρ. Έτσι έχουμε εκπληκτική ακρίβεια για διπλά με 2 παλσαρ και μικρότερη για σύστημα παλσαρ/ λ. νάνο.

Διπλοί με δύο παλσαρ.

Στα πιο πολλά τέτοια συστήματα οι μάζες του κάθε παλσαρ έχουν καθοριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Η μεγαλύτερες σχετικιστικές επιδράσεις, που επέκτειναν την ανάλυση των μαζών πέρα από την συνιστώσα μάζα είναι

.Η ελάττωση της περιόδου τροχιάς μέσω βαρυτικής ακτινοβολίας.

.Η μετάπτωση του μεγάλου άξονα της τροχιάς.

.Η καθυστέρηση Shapiro, μέσω διάδοσης κατά την γραμμή θέασης μέσα από το βαρυτικό πεδίο του συνοδού.

Τα πρώτα δύο έχουν να κάνουν με την συνολική μάζα των παλσαρ. Η κρίσιμη καθυστέρηση Shapiro έχει να κάνει με την μάζα του συνοδού και την γωνία της τροχιάς τους προς την γωνία θέασης. Η σχέση των δύο μαζών των παλσαρ είναι άμεσα μετρήσιμη αν οι τροχιές τους είναι μετρήσιμες από χρονομέτρηση. Οι τροχιές των ανακυκλωμένων παλσαρ παρουσιάζουν μεγάλες εκκεντρικότητες.

Διπλοί με νεαρά παλσαρ. Σε περίπτωση που σε μια σουπερνόβα δεν διαταραχτεί το σύστημα θα παρατηρήσουμε ένα κανονικό νεαρό παλσαρ σε ελλειπτική τροχιά με ένα αστέρι B ή έναν μεγάλης μάζας λ. νάνο. Αυτά τα παλσαρ, που είναι πριν το στάδιο της ανακύκλωσης, έχουν παρόμοιες μάζες με τα παλαιότερα, ανακυκλωμένα παλσαρ.

Οι μάζες των διπλών με λ. νάνο. Αν και αυτά τα συστήματα είναι τα περισσότερα, υπάρχουν σε αυτά σχετικά λίγα παλσαρ που έχουμε καθορίσει τη μάζα τους. Η σχεδόν κυκλική τροχιά είναι ένα μεγάλο εμπόδιο σε αυτό, δεν μας αφήνει να μετρήσουμε την τροχιακή μετάπτωση. Η συρρίκνωση της τροχιάς λόγω βαρυτικής ακτινοβολίας τελικά μας δίνει την ολική μάζα, αλλά οι ξεχωριστές μάζες απαιτούν μετρηση της καθυστέρησης Shapiro.

Διάφορες περιπτώσεις τροχιών και επιτάχυνσης περιστροφών.

Τα συστήματα με 2 παλσαρ ξεκινούν ως ζευγάρια αστερών που είναι μεγαλύτερα από 8 ηλιακές μάζες και επιβιώνουν ως σύστημα την δεύτερη σουπερνόβα, αλλά με μεγάλη εκκεντρικότητα. Το ένα θα γίνει ανακυκλωμένο με μικρή περίοδο περιστροφής. Το άλλο θα είναι κανονικό παλσαρ, με μεγάλη περίοδο και μικρότερη προσδόκιμη ηλικία. Αυτά τα ζεύγη μας δίνουν μοναδικές ευκαιρίες να παρατηρήσουμε σχετικιστικά φαινόμενα. Πολλά είναι κοντινοί διπλοί με συρρίκνωση των τροχιών τους σε παρατηρήσιμο ρυθμό. Αυτό συμβαίνει λόγω της απώλειας ενέργειας μέσω της εκπομπής βαρυτικής ακτινοβολίας. Έτσι θα οδηγηθούν σε σύγκρουση σε μικρότερη ηλικία από την σημερινή του σύμπαντος (άρα έχουν ήδη γίνει τέτοιες συγκρούσεις). Έχουμε ήδη ανιχνεύσει ένα τέτοιο γεγονός (έκρηξη βαρυτικών κυμάτων).

Αν μόνο το ένα αστέρι έχει μάζα > 8 ηλιακές, τότε μετά την πρώτη σουπερνόβα το σύστημα θα έχει ένα κανονικό παλσαρ και ένα αστέρι που θα διαστέλλεται σε ερ. γίγαντα. Η εξέλιξη τώρα εξαρτάται από την μάζα του ερ. γίγαντα. Η ροή ύλης προς τον παλσαρ αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής και μπορεί να δημιουργήσει έναν καυτό δίσκο προσαύξησης, που ακτινοβολεί στις ακτίνες X. Αυτό συμβαίνει με αστέρια 1 ηλιακής μάζας, και είναι το σενάριο μικρής μάζας που δίνει έναν παρατηρήσιμο διπλό ακτίνων X. Μέσω της αργής μεταφοράς στροφορμής η περίοδος του παλσαρ μειώνεται στα 10 ms και η τροχιά τους γίνεται σχεδόν κυκλική. Όταν έχει απομακρυνθεί η ατμόσφαιρα του ερ. γίγαντα με αυτή την διαδικασία, μένει ένας λ. νάνος. Αυτά είναι τα πιο συνήθη διπλά με παλσαρ.

Το μεγάλης μάζας σενάριο προβλέπει ο συνοδός να έχει αρκετές ηλιακές μάζες (μέχρι 8). Όταν εξελιχτεί σε γίγαντα διαστέλλεται και δημιουργεί ένα κουκούλι που περικλείει και τον παλσαρ. Το παλσαρ περιστρέφεται μέσα σε αυτό και το ωθεί. Το σενάριο αυτό εξελίσσεται πιο γρήγορα από το σενάριο μικρής μάζας. Το αποτέλεσμα είναι ένα λίγο μεγαλύτερης περιόδου παλσαρ με τροχιά αρκετά, αλλά όχι όσο είδαμε παραπάνω, κυκλική. Αυτά τα

παλσαρ γεμίζουν το κενό στο διάγραμμα ανάμεσα στα κανονικά και στα μιλλισεκοντ. Έχουμε βρει μερικά με περιόδους 28- 60 ms. Φαίνονται να προέρχονται από συστήματα που διαταράχτηκαν από τις σουπερνόβα των δευτερευόντων συνοδών.

Συνοδός πολύ μικρής μάζας (μαύρη χήρα).

Αυτά τα διπλά βρίσκονται σχεδόν όλα σε σφαιρωτά σμήνη. Η τυπική τροχιά τους είναι διάρκειας μικρότερη από μια ημέρα και σχεδόν κυκλική, και ο συνοδός είναι ένας νάνος μικρότερης μάζας από 0,1 ηλιακές. Πολλοί από αυτούς τους μη εκφυλισμένους (κανονικής αστρικής πυκνότητας) συνοδούς παρατηρούνται οπτικά. Ο συνοδός είναι πιο λαμπρός στην πλευρά του που είναι προς το παλσαρ, το οποίο προφανώς καταλύει (εξατμίζει και διαλύει) τον συνοδό του (για αυτό λέγεται μαύρη χήρα). Η προέλευση αυτών των συστημάτων δικαιολογείται από την μεγάλη πυκνότητα αστέρων των σφαιρωτών σμηνών. Οι συγκρούσεις άστρων σε αυτά είναι συχνές, και τα μέλη των διπλών μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με τυχαία κοντινά αστέρια. Έτσι μπορεί ένας λ. νάνος να γίνει σύστημα με ένα μικρής μάζας αστέρι κ. ακολουθίας. Τότε το νέο αυτό σύστημα συρρικνώνεται από εξασθένηση λόγω παλίρροιας και τριβής, με συνέπεια ένα σύστημα μαύρης χήρας. Πολλά από αυτά παρουσιάζουν εκλείψεις όταν το παλσαρ κρύβεται πίσω από τον μικρής μάζας αλλά πολύ μεγαλύτερο σε διάμετρο συνοδό του.

Στα παραπάνω έχουμε και κάποιες εξαιρέσεις. Το PSRJ1744- 3922 έχει έναν μικρής μάζας συνοδό σε σχεδόν κυκλική τροχιά, αλλά η περίοδος του παλσαρ είναι πολύ μεγαλύτερη από συνήθως. Το PSRJ1903 +0327 είναι το μόνο γνωστό σύστημα με έναν μικρής περιόδου μιλλισέκοντ και μεγάλη εκκεντρικότητα τροχιάς. Δεν ταιριάζει σε καμία κατηγορία και πρέπει να έχει πιο πολύπλοκη ιστορία. Ίσως να υπήρξε κάποτε και τρίτος συνοδός τους.

Μεμονωμένα μιλλισέκοντ παλσαρ.

Πρόκειται για παλσαρ που ανακυκλωθήκαν. Από τα 170 γνωστά μιλλισεκοντ τα 64 είναι μεμονωμένα. Η απόδρασή τους από το σύστημα μπορεί να προήλθε από κατάλυση του συνοδού, όπως στις μαύρες χήρες, ή δυναμικά από έκρηξη σουπερνόβα του συνοδού μετά την μεταφορά στροφορμής, αν ο συνοδός ήταν το μέλος με την μεγαλύτερη μάζα. Η ταχύτητα ενός παλσαρ μετά από αυτό θα είναι μικρότερη από 100 km/s. Αν όμως η έκρηξη είναι ασύμμετρη, το παλσαρ αποκτάει μεγάλη ταχύτητα από μια επιπλέον ώθηση.

Παλσαρ με συνοδό μεγάλης μάζας αστέρι κυρίας ακολουθίας.

Το PSRJ0045- 7319, ένα από τα 6 πάλσαρ που έχουμε παρατηρήσει τόσο μακριά, στο μικρό νέφος του Μαγγελάνου, ανήκει στην σπάνια κατηγορία διπλών ραδιοπάλσαρ με συνοδό μεγάλης μάζας. Η περίοδος περιστροφής (936 ms), η χαρακτηριστική ηλικία (3,3 εκ. έτη) και η περίοδος τροχιάς (51 ημέρες) είναι μοναδικά, αλλά η μεγάλη εκκεντρικότητα το φέρνει σε απόσταση 4 αστρικών ακτίνων από τον τύπου B1 συνοδό, που έχει μάζα 9 ηλιακές. Εδώ δεν έχουμε ανιχνεύσιμη έκλειψη, αλλαγή διασποράς ή αλληλεπίδραση. Μπορεί να υπάρχει συγχρονισμός περιστροφής του αστέρα με την τροχιά, αλλά το αδύναμο σήμα που εκπέμπει δεν επιτρέπει αναλυτικές παρατηρήσεις.

Το PSRB1259- 63 μας εμφανίζει μια εξογκωμένη έκλειψη στο περίαστρο. Έχει τροχιά 3,5 ετών και πλησιάζει σε απόσταση 30 αστρικών ακτίνων τον τύπου Be συνοδό του. Η τροχιά του είναι πολύ ελλειπτική. Το πλάσμα που εκρέει από τον συνοδό φαίνεται κατά την έκλειψη από την μέτρηση της διασποράς και την σκέδαση στην αστρική ατμόσφαιρα. Επίσης έχουν σημειωθεί μεγάλες αλλαγές στην μέτρηση της περιστροφής, άρα μπορούν να

μελετηθούν καλά η πυκνότητα ηλεκτρονίων και το μαγνητικό πεδίο της αστρικής ατμόσφαιρας.

Ένα τρίτο παράδειγμα είναι το PSRJ1638- 4725 με περίοδο περιστροφής 764 ms, περίοδο τροχιάς 1940 ημέρες και πολύ μεγάλη εκκεντρικότητα, 0,95. Η μεγάλη εκκεντρικότητα του κυρίας ακολουθίας συνοδού δείχνει ότι το σύστημα σχεδόν λύθηκε κατά την έκρηξη σουπερνόβα. Η σπανιότητα οφείλεται στο ότι το σύστημα επιβίωσε οριακά (παρουσιάζει μεγάλη εκκεντρικότητα), και το ότι ο συνοδός θα βιώσει και αυτός σύντομα σουπερνόβα.

Οι εκλειπτικοί μιλλισέκοντ παλσαρ.

Υπάρχουν μόνο ελάχιστες πιθανότητες το επίπεδο τροχιάς ενός διπλού παλσαρ να είναι στη γραμμή θέασης, ώστε να μπορεί να γίνει έκλειψη από έναν συνοδό λ. νάνο με διάμετρο μόλις 10000 χιλ. σε τροχιά 10 εκ. χιλιόμετρα. Το μιλλισέκοντ PSRB1957+ 20 αποκρύπτεται από τον συνοδό του στο 1/10 της τροχιάς του. Η περίοδος του παλσαρ είναι 1,6 ms και της τροχιάς 9,2 ώρες. Η μάζα του συνοδού είναι μόλις 0,02 ηλιακές, πολύ μικρή για λ. νάνο. Η διάρκεια της απόκρυψης δείχνει ότι ο δίσκος απόκρυψης είναι μεγαλύτερος από τον ήλιο μας. Αποτελεί το πρώτο γνωστό σύστημα μαύρης χήρας.

Αμέσως πριν και μετά την απόκρυψη υπάρχει μια μεγάλη αύξηση της διασποράς μέτρησης του παλσαρ, που δείχνει ότι η γραμμή θέασης περνάει μέσα από ιονισμένο αέριο. Αυτό το νέφος είναι μεγαλύτερο από 1,5 ηλιακές ακτίνες. Πρέπει να πρόκειται για εκρέουν ρεύμα, αφού μια σταθερή ατμόσφαιρα θα ήταν μέσα στον λοβό Roche, που έχει διάμετρο μόνο τη μισή της ηλιακής. Ο μηχανισμός της πραγματικής έκλειψης δεν είναι σαφής, μπορεί να είναι από απορρόφηση ή από σκέδαση στην αναταραχή του πλάσματος.

Αυτή η ιονισμένη ατμόσφαιρα μπορεί να παίρνει ενέργεια από το παλσαρ, και μάλλον βομβαρδίζεται από μεγάλης ενέργειας φορτισμένα σωματίδια. Η επίδραση του ρεύματος εκροής είναι εντυπωσιακή. Η λαμπρότητά του ενισχύεται πολύ στην πλευρά προς το παλσαρ. Ο συνοδός φαίνεται να εξατμίζεται, αλλά οι μετρήσεις της εκροής του δίνουν άλλο 1 δις έτη πριν την κατάλυση του. Έτσι δεν φαίνεται αυτή η εκροή να είναι ικανή να επιταχύνει ένα παλσαρ σε μιλλισεκοντ.

Τα παλσαρ στα σφαιρωτά σμήνη.

Όταν ανακαλύφθηκαν τα μιλλισεκοντ, ήταν ήδη γνωστό πως το 20% όλων των διπλών ακτίνων Χ μικρής μάζας (low mass X ray binaries, LMXB) βρίσκονται σε σφαιρωτά σμήνη, όπως και η θεωρία της προσαύξησης και επιτάχυνσης των αστέρων νετρονίων σε διπλά συστήματα. Έτσι τα σφαιρωτά έγιναν στόχος για εντατικές έρευνες ανακάλυψης μιλλισέκοντ.

Το PSRB1821-24 με 3 ms περίοδο βρέθηκε στο σφαιρωτό M28. Αυτό το σφαιρωτό ήταν γνωστό ότι περιέχει μια ραδιοπηγή με απότομο φάσμα και μεγάλη πολικότητα, χαρακτηριστικά των παλσαρ, αλλά η πηγή είναι πολύ ασθενής, με αποτέλεσμα αυτό το μιλλισέκοντ να παρατηρηθεί μετά από πολύ έρευνα (1987). Λίγους μήνες αργότερα παρατηρήθηκε και άλλο μιλλισέκοντ στο σφαιρωτό σμήνος M4 (PSRB1620-26), με περίοδο 11 μιλλισεκοντ. Αυτό έχει μεγάλη περίοδο τροχιάς στο διπλό του σύστημα. Η τροχιά του είναι σχεδόν κυκλική.

Ενώ αυτά τα μιλλισέκοντ είναι κοντά στο εφικτό όριο της ανίχνευσης, το λιγοστό αέριο που υπάρχει στα σφαιρωτά μας δίνει την ίδια μέτρηση διασποράς για όλα τα μέλη του σμήνους. Τρία σφαιρωτά σμήνη έχουν μεγάλο πληθυσμό παλσαρ. Το 47 Τουκανα έχει μια ομάδα με

23 παλσαρ, όλα μιλισέκοντ με περίοδο από 2 ως 6 ms, το M15 έχει μια ομάδα από 8 παλσαρ με συγκέντρωση στο κέντρο του σμήνους και το Ter 5 έχει τα περισσότερα, 33 παλσαρ. Στις ακτίνες X τα παλσαρ μας δίνουν τις πιο ισχυρές εκπομπές στο σύμπαν. Το NGC 6397 έχει 27 πηγές ακτίνων X και μόνο ένα ραδιοπαλσαρ.

Αυτές οι ανακαλύψεις μας έδειξαν ότι τα LMXB και τα διπλά παλσαρ είναι συνήθη στα σφαιρωτά, δίνοντας στήριξη στην θεωρία ότι τα σφαιρωτά συσχετίζονται με κοινή ακολουθία εξέλιξης. Πολλά από τα παλσαρ στα σφαιρωτά έχουν σχέση με κανονικά γαλαξιακά παλσαρ. Τα πάλσαρ με συνοδό λευκό νάνο χωρίζονται σε δύο ομάδες. Οι μικρής μάζας συνοδοί ($<0,04$ ηλιακές μάζες) είναι λ. νάνοι ηλίου (He). Η δεύτερη ομάδα έχει μεγάλης μάζας συνοδούς ($>0,1$ ηλιακές μάζες), που εξελίχτηκαν σε λ. νάνους (C)- (O), και (O)- (Ne)- (Mg). Άλλοι έχουν συνοδό αστέρι κ. ακολουθίας και πολλοί από αυτούς βιώνουν εκλείψεις. Άλλοι είναι σε πολύ εκκεντρική τροχιά, άρα πρέπει να έχουν αλληλοεπιδράσει βαρυτικά και με άλλα αστέρια του σφαιρωτού σμήνους.

Σε μεγάλη κλίμακα, η συγκέντρωση μάζας στο κέντρο ενός σφαιρωτού μπορεί να επιταχύνει ένα παλσαρ και να επηρεάσει την τροχιά του. Σε μικρή κλίμακα έχουμε αστέρια που περνάνε πολύ κοντά από τα παλσαρ (σχεδόν συγκρούονται με αυτά) και αλλοιώνουν τις σχεδόν κυκλικές τροχιές στα διπλά συστήματα πάλσαρ με λ. νάνους.

Τα μιλισέκοντ σε ένα σφαιρωτό σμήνος αποκαλύπτουν το βαρυτικό πεδίο του μέσω των τροχιών τους που κυριαρχούνται από επιτάχυνση, λόγω της ύπαρξης αυτού του πεδίου. Η πρώτη παρουσίαση ύπαρξης ιονισμένου μεσοαστρικού αερίου μικρής πυκνότητας με μικρές διαφορές στην διασπορά μετρήθηκε ανάμεσα σε παλσαρ στην κοντινή και στην μακρινή πλευρά του 47 Τουκάνα.

Τα μαγνητικά πεδία στα μιλισεκοντ παλσαρ.

Το μαγνητικό δίπολο πεδίο της επιφάνειας στα μιλισεκοντ είναι 100 εκ. ως 1 δις Gauss, σε αντίθεση με τα 1 τρις Gauss που είναι στα κανονικά παλσαρ. Η επιτάχυνση της περιστροφής πρέπει να μειώνει την ισχύ του διπολικού πεδίου κατά 1000 φορές. Σε άλλα διπλά, όπως 2 αστέρες νετρονίων, έχουμε βρει τις ενδιάμεσες στις παραπάνω τιμές. Τα παρακάτω ακόμα μένουν ανεξήγητα.

.Το αρχικό μαγνητικό πεδίο της τάξης των 10 στη 12 Gauss.

. Η διαδικασία που μειώνει το πεδίο μέσω επιτάχυνσης της περιστροφής.

.Γιατί η ελάττωση της ισχύς σταματάει στα 10 στη 8 Gauss, με μικρή ή καθόλου αποσύνθεσή του κατά όλη τη διάρκεια ζωής του μιλισεκοντ.

Υπάρχουν δύο πιθανότητες. Η ωμική αποσύνθεση και η οριζόντια μεταφορά του πεδίου. Η πρώτη δεν εμφανίζεται σε συνήθους πληθυσμούς όπου δεν υπάρχει σαφή σχέση ανάμεσα στην ισχύ του μαγνητικού πεδίου και την ηλικία (αν και τα νεαρά παλσαρ έχουν 3 φορές την ισχύ μαγνητικού πεδίου από τον κυρίως πληθυσμό). Στην δεύτερη πιθανότητα το μαγνητικό πεδίο παγιδεύεται σε ένα πυκνό πλάσμα που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του παλσαρ, που μεταφέρει την μαγνητική ροή προς την επιφάνεια.

Οι ταχύτητες των μιλισέκοντ.

Οι ίδιες ταχύτητες των μιλισέκοντ έχουν μετρηθεί και με χρονομέτρηση και με συμβολομετρικές παρατηρήσεις πολλών ετών. Η μέτρηση της ταχύτητάς τους είναι εύκολη, λόγω της πολύ σταθερής περιόδου και των <απότομων> παλμών τους. Οι ταχύτητες είναι

από 12 km/s ως 1625 km/s. Τα κανονικά νεαρά παλσαρ έχουν ταχύτητες 300 km/s, τα παλιά μη ανακυκλωμένα 200 km/s και τα ανακυκλωμένα 90 km/s.

Αυτές οι ταχύτητες είναι όμοιες με τις ταχύτητες γέννησης των παλσαρ από εκρήξεις σουπερνόβα (400 km/s). Οι ταχύτητές τους μειώνονται για τα παλαιά παλσαρ λόγω βαρυτικής επίδρασης από τον Γαλαξία μας. Οι χαμηλές ταχύτητες των ανακυκλωμένων μιλισέκοντ είναι αποτέλεσμα πολύπλοκης ακολουθίας συμβάντων στο σύστημα. Ένα διπλό σύστημα θα επιβιώσει την έκρηξη σουπερνόβα που θα γεννήσει ένα παλσαρ μόνο αν η ταχύτητα (από την ώθηση της έκρηξης) του τελευταίου είναι μικρή. Αφού οι ηλικίες των μιλισέκοντ είναι μεγαλύτερες από τον χρόνο ταλάντωσής τους κατά μήκος του γαλαξιακού επιπέδου (60 εκ. έτη), ο πληθυσμός έχει τώρα ένα ύψος κλίμακας πάνω από το επίπεδο, που εξαρτάται από τις ταχύτητες κατά την γέννησή τους. Με τις ταχύτητες που αναφέραμε η κλίμακα αυτή για τα μεμονωμένα μιλισέκοντ πρέπει να είναι 1,7 kpc. Αρα πολλά από αυτά βρίσκονται έξω από την ιονισμένη ύλη του γαλαξιακού δίσκου. Η κλίμακα αυτή αποτελεί επίσης ένα συμπέρασμα της κίνησης παράλλαξης που παρατηρούμε και της ίδιας κίνησης, που εξαρτάται από το μοντέλο διανομής της πυκνότητας ηλεκτρονίων.

Παλσαρ που εκπέμπουν ακτίνες Χ μέσω προσαύξησης.

Το φάσμα των με 1 εκ. βαθμούς Κέλβιν επιφανειακής θερμοκρασίας πάλσαρ κορυφώνεται στις ακτίνες Χ, με ενέργεια φωτονίου 1 keV. Το πρώτο παλσαρ για το οποίο μετρήθηκε αυτή η ακτινοβολία ήταν το ScoX1. Τώρα ξέρουμε ότι πρόκειται για μια θερμική πηγή όπου υπάρχει ένας καυτός δίσκος προσαύξησης γύρω από το παλσαρ. Το παλσαρ αυτό αποτελεί πρότυπο των διπλών LMXB (μικρής μάζας). Το παλσαρ αυτό έχει 1,4 ηλ. μάζες και ο συνοδός του 0,42. Πολλές φορές οι συνοδοί είναι πιο μεγάλης μάζας νεαρά αστέρια. Η εξέλιξη αυτών οδηγεί σε γρήγορη διαστολή και ροή ύλης προς τον παλσαρ χωρίς δίσκο προσαύξησης. Αυτοί είναι οι HMXB (μεγάλης μάζας διπλοί ακτίνων Χ). Η ενέργεια προμηθεύεται από την βαρυτική πτώση της ύλης του συνοδού στον παλσαρ. Αυτοί οι παλσαρ εκπέμπουν θερμικά και λέγονται accretion- powered pulsars. Έτσι ξεχωρίζουν από τους rotation powered pulsars (που η ενέργεια της εκπομπής τους οφείλεται στην περιστροφή τους).

Οι μισές από τις πηγές ακτίνων Χ στον ουρανό είναι τέτοια παλσαρ. Οι υπόλοιπες είναι υπολείμματα σουπερνόβα, μεμονωμένοι λ. νάνοι, μη εκφυλισμένα αστέρια και γαλαξιακά σμήνη που αποτελούνται από πολλές πηγές ακτίνων Χ.

Υπάρχει στενή σχέση ανάμεσα στην λαμπρότητα στις ακτίνες Χ και στον ρυθμό απώλειας της περιστροφικής κινητικής ενέργειας. Η μεγαλύτερες τιμές για τα παραπάνω είναι στα νεαρά παλσαρ (όπως του Καρκίνου) και οι χαμηλότερες σε πολλά μιλισέκοντ. Στις χαμηλότερες τιμές έντασης ακτίνων Χ ανιχνεύουμε θερμική ακτινοβολία Χ από τις επιφάνειες μεμονωμένων παλσαρ. Το φάσμα τους είναι μαλακό (1 keV), κάτι που είναι ανιχνεύσιμο από τα τηλεσκόπια μας, αλλά η ολική ένταση της περιοχής που αντιστοιχεί σε ένα παλσαρ (1000 km στη²) είναι πολύ μικρή για να παρατηρηθεί, ακόμα και με επιφανειακή θερμοκρασία 1 εκ. βαθμοί. Το φάσμα ενός μεμονωμένου, χωρίς προσαύξηση παλσαρ είναι μελανού σώματος στα 35 eV, που ήταν αρχικά 50 eV, με επιφανειακή βαρυτική ερυθρολίσθηση $z = 0,3$. Η θερμική ενέργεια ενός απομονωμένου παλσαρ αποτελεί απομεινάρι της αρχικής ενέργειας από την βαρυτική κατάρρευση, μάλλον αυξημένη από

την συνεχή απώλεια ενέργειας μέσω των glitch. Η επιφανειακή θερμοκρασία εξαρτάται από την αγωγιμότητα του εσωτερικού και την ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας.

Καμπύλες φωτός διπλών ακτίνων X.

Είδαμε ότι οι παλμοί στις ακτίνες X και στα ραδιοκύματα του παλσαρ του Καρκίνου έχουν το ίδιο σχήμα. Αυτό εξηγείται μόνο με μεγάλη άμεση ακτινοβολία καμπυλότητας. Οι καμπύλες φωτός σε έναν δίσκο επαύξεσης ακτίνων X είναι τελείως διαφορετικές. Εδώ η περιοχή εκπομπής είναι μια καυτή κηλίδα ή στην επιφάνεια ή στον δίσκο προσαύξεσης. Αυτή η κηλίδα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, και η καμπύλη των ακτίνων X που φαίνεται κατά την περιστροφή του παλσαρ είναι η διακύμανση της φανεράς προβολής της περιοχής της καυτής κηλίδας. Έτσι υπάρχουν πολλές περιπλοκές.

Οι τροχιές και οι μάζες των συνοδών.

Όταν φαίνεται οπτικά ο συνοδός μπορούμε να συνδυάσουμε την οπτική φασματογραφία με την μέτρηση των παλμών του παλσαρ, για να βρούμε τις ταχύτητες τροχιάς και των δύο αντικειμένων. Η μετατόπιση Ντόπλερ της περιόδου του παλμού μας δίνει πληροφορίες για την μάζα του παλσαρ. Όταν μπορεί να παρατηρηθεί η ταχύτητα του συνοδού από την τροχιά του, μέσω οπτικών γραμμών απορρόφησης, είναι εύκολο να έχουμε άμεσα και τις δυο μάζες. Βοηθάει ο συνοδός να έχει εκτεταμένο κέλυφος και να προξενεί έκλειψη στο παλσαρ. Αν το άστρο- συνοδός έχει γεμίσει τον λοβό Roche του, είναι γνωστή η διάμετρος του κελύφους του, και η διάρκεια της έκλειψης μας δίνει την γωνία μεταξύ των δύο σωμάτων. Οι μάζες των παλσαρ είναι παρόμοιες, ενώ αυτές των συνοδών ποικίλουν κατά πολύ. Οι διπλοί μικρής μάζας είναι πιο δύσκολο να αναλυθούν, γιατί δείχνουν μικρό ή καθόλου παλμό, είναι οπτικά πιο αμυδροί και δείχνουν λιγότερες φασματογραφικές λεπτομέρειες. Αποτελούν όμως την πλειοψηφία των μιλλισέκοντ.

Οι μεγάλης μάζας διπλοί X (HMXBs).

Οι μεγάλης μάζας αστέρες κυρίας ακολουθίας σε διπλό σύστημα θα εξελιχθούν έτσι ώστε ο μεγαλύτερης μάζας να <ξεχειλίζει> προς τον μικρότερο (θα γίνει πρώτος ερ. γίγαντας), χάνοντας μεγάλο μέρος της αρχικής του μάζας. Όταν εκραγεί ως σουπερνόβα, θα έχει μικρότερη μάζα από τον συνοδό. Αρα το σύστημα είναι δύσκολο να διαταραχθεί, και θα προκύψει ένας παλσαρ με συνοδό ένα αστέρι μεγάλης μάζας. Τώρα το δεύτερο αστέρι εξελίσσεται και μεταφέρει μάζα στο παλσαρ, που τότε θα ακτινοβολεί στις ακτίνες X (HMXB). Ο συνοδός είναι συνήθως ένα αστέρι 18 -20 ηλιακών μαζών, στην φάση που τελειώνει την καύση υδρογόνου.

Οι περίοδοι των μεγάλης μάζας διπλών X είναι από 0,2 ως 187 ημέρες, και η περίοδος περιστροφής του παλσαρ από 69 ms ως 835 δευτερόλεπτα. Οι περίοδοι αυτοί είναι πολύ πιο ασταθείς από ότι σε ραδιοπάλσαρ, και δείχνουν μάλλον επιτάχυνση παρά επιβράδυνση. Ο βαθμός επιτάχυνσης έχει σχέση με την λαμπρότητα στις ακτίνες X, αφού και τα δυο μεγέθη εξαρτώνται από τον ρυθμό επαύξεσης. Ο χρόνος που συμβαίνει η επιτάχυνση κυμαίνεται από 100- 100000 έτη.

Αφού ένας διπλός X μεγάλης μάζας αποτελεί ένα κανονικό στάδιο της εξέλιξης των διπλών μεγάλης μάζας, η ύπαρξή του είναι ένα σχετικά βραχυχρόνιο φαινόμενο. Λόγω λίγων αστέρων μεγάλης μάζας πρόκειται για ένα σπάνιο φαινόμενο. Οι συνοδοί είναι υπεργίγαντες ή αστέρια Be. Και στις δυο περιπτώσεις ένας άνεμος από τον συνοδό λούζει το παλσαρ. Ειδικά αν πρόκειται για υπεργίγαντα, η εκπομπή ακτίνων X μεταβάλλεται σε

όλες τις χρονικές κλίμακες, ιδίως λόγω ανωμαλιών του αστρικού ανέμου. Οι περίοδοι τέτοιων συστημάτων είναι 1,4 - 10 ημέρες. Ο συνοδός είναι στο τέλος της καύσης υδρογόνου και γεμίζει τον λοβό του. Τα συστήματα με Be αστέρι έχουν πιο ελλειπτικές τροχιές, και οι τροχιές τους είναι από 15 ημέρες ως μερικά έτη. Η περίοδος τροχιάς τους είναι συνήθως τόσο μεγαλύτερη όσο ταχύτερα περιστρέφεται το παλσαρ.

Ο συνοδός δεν γεμίζει ακόμα τον λοβό του. Ο αστρικός άνεμος είναι ασταθής και πολλές τέτοιες πηγές ακτίνων X είναι μεταβλητές με μεγάλες περιόδους.

Οι μικρής μάζας διπλοί X (LMXBs).

Λόγω του ότι είναι πολύ αμυδροί, η κύρια πηγή φωτός τους συνήθως δεν είναι το ίδιο το αστέρι αλλά ο δίσκος προσαύξησης που θερμαίνει το αέριο ώστε αυτό να ακτινοβολεί στις ακτίνες X. Έχουμε τις περιόδους τροχιάς μερικών τέτοιων συνοδών από την μεταβολή της οπτικής λαμπρότητας, αλλά συνήθως παρατηρούμε μόνο τις μεταβολές στις ακτίνες X. Οι τροχιές τους είναι συνήθως μικρότερης διάρκειας από μια ημέρα.

Οι παράμετροι των τροχιών δεν αναλύονται όπως στους μεγάλης μάζας διπλούς, αλλά με την παραδοχή ότι γεμίζει ο λοβός Roche υιοθετούμε ένα μοντέλο που σχετίζει το μέγεθος του λοβού με την διάμετρο της τροχιάς. Δυστυχώς το μοντέλο εξαρτάται από την σχέση μεταξύ της μάζας του συνοδού και ακτίνας του, κάτι που έχει να κάνει με τον τύπο του αστεριού, που συνήθως είναι άγνωστος. Αν υποθέσουμε ότι είναι κυρίας ακολουθίας, και ορίσουμε την μάζα του παλσαρ στις 1,4 ηλιακές (μια μέση τιμή), έχουμε λογικά συμπεράσματα για τις παραμέτρους της τροχιάς.

Οι μικρής μάζας διπλοί ακτίνων X λέγονται και γαλαξιακής ράβδου ή μεταγενέστερου (later) τύπου διπλοί X, επειδή η διασπορά τους δείχνει συγκέντρωση προς το κέντρο του Γαλαξία, ακολουθώντας την διασπορά των παλαιών αστερών πληθυσμού II. Αν και πολλές γαλαξιακές πηγές ακτίνων X δεν δείχνουν την ακρίβεια των παλμών που χαρακτηρίζει ένα παλσαρ ή το φάσμα ενός παλαιού τύπου αστερά ως συνοδό, πιστεύουμε ότι όλες οι πηγές ακτίνων X στη γαλαξιακή ράβδο είναι LMXB.

Η ανακάλυψη περισσότερων τέτοιων διπλών είναι δύσκολη. Τα πιο πολλά βρέθηκαν σε γαλαξιακό πλάτος < 2 μοίρες, όπου η οπτική ανάλυση είναι δύσκολη. Πολλά έχουν υπέρβαση εκπομπής στο υπεριώδες, μια τάξη μεγέθους πάνω από τα αστέρια κυρίας ακολουθίας. Από τις ακτίνες X παράγονται γραμμές εκπομπής (HeII) (468,6 nm) και (NIII) (464 nm). Αυτές και το συνεχές φάσμα μεταβάλλονται από μέρα σε μέρα.

Ιδιόμορφα συστήματα, μαύρες τρύπες και παροδικά συστήματα.

Υπάρχουν συστήματα με παλσαρ στα οποία ο συνοδός είναι πολύ μεγάλης μάζας, μάλλον μια μαύρη τρύπα. Πολλά τέτοια συστήματα είναι παροδικά, ιδίως αυτά με συνοδό Be. Το HerX-1 έχει έναν συνοδό, το HZHer με μάζα 2,35 ηλιακές, τυπική για αστέρα A9. Βρίσκεται 3 kpc πάνω από το γαλαξιακό επίπεδο και πιστεύουμε ότι έχει εκτιναχτεί από αυτό. Δεν ταιριάζει σε καμία κατηγορία διπλών X.

Επιτάχυνση, προσαύξηση και αδράνεια.

Η φυσική γρήγορη επιβράδυνση της περιόδου περιστροφής των παλλόμενων πηγών ακτίνων X μας δείχνει ότι για να σημειωθεί άσκηση επιτάχυνσης της περιστροφής αυτή πρέπει να είναι κατά τρεις τάξεις μεγέθους πιο ισχυρή από την άσκηση μαγνητισμού του παλσαρ, και σε αντίθετη φορά. Ο μηχανισμός για το παραπάνω είναι η επαύξηση μάζας

από τον συνοδό. Στα μεγάλης μάζας διπλά X το γινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν το παλσαρ δέχεται τον δυνατό αστρικό άνεμο, αλλά στα αστέρια K των μικρής μάζας διπλών X η εκροή ύλης είναι πολύ λιγότερη, δηλαδή μόλις η εκροή μιας διαστελλόμενης ατμοσφαίρας που γεμίζει τον λοβό Roche. Εδώ όλη η εκροή συγκεντρώνεται στο παλσαρ και όχι σε δίσκο προσαύξεσης. Η στροφορμή που μεταφέρεται στο παλσαρ προέρχεται από την ορμή της τροχιάς του διπλού συστήματος. Αυτή είναι η διαδικασία που δημιουργεί τον πληθυσμό των ταχύτατα περιστρεφόμενων μιλλισεκοντ παλσαρ.

Το μέγιστο της επαύξεσης και της λαμπρότητας στις ακτίνες X έχει να κάνει με το ότι το πλάσμα που εκρέει αποτελείται από ηλεκτρόνια και πρωτόνια που συγκρατούνται ηλεκτροστατικά. Η ροή ακτινοβολίας από το αστέρι πιέζει τα ηλεκτρόνια, ενώ η βαρύτητα δρα κυρίως στα μεγαλύτερης μάζας, πρωτόνια. Η επαύξεση πετυχαίνεται μόνο αν η πίεση ακτινοβολίας από το αστέρι είναι μικρότερη από την βαρύτητα. Η ενέργεια που αποδεσμεύει η ύλη που συσσωρεύεται είναι σχετική με την ροή και την επιφανειακή βαρύτητα. Ένας μεγαλύτερος ρυθμός προσαύξεσης δεν δίνει περισσότερη λαμπρότητα, γιατί η ακτινοβολία θα συγκρατήσει την επαύξεση. Είναι εντυπωσιακό ότι η βαρυτική ενέργεια που αποδεσμεύει ένα σωματίδιο όταν πέφτει στην επιφάνεια του παλσαρ αντιστοιχεί στο 10% της μάζας του, ποσοστό μετατροπής μάζας σε ενέργεια μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από ότι παράγεται στις θερμοπυρηνικές συντήσεις.

Η ύλη ιονίζεται κατά την προσαύξεση. Όταν πέφτει στο παλσαρ συναντάει ένα σημαντικό όριο, το μαγνητοσφαιρικό όριο Alfven. Εξω από αυτό, το μαγνητικό πεδίο του παλσαρ δεν είναι αισθητό, και μέσα σε αυτό το πλάσμα μπορεί να κινηθεί μόνο κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών. Από την οπτική γωνία του μηχανισμού επιτάχυνσης, η ροή στο πάλσαρ είναι προσαρτημένη στο επίπεδο Alfven. Έξω από αυτό κινείται σε τροχιά Κεπλερ γύρω από το παλσαρ. Έτσι η άσκηση επιτάχυνσης εξαρτάται μόνο από τον ρυθμό ροής της μεταφοράς μάζας και την ακτίνα της επιφάνειας Alfven. Οι παρατηρήσιμες επιταχύνσεις περιστροφής συμφωνούν με αυτή την θεωρία, κάνοντας χρήση της σταθερής τιμής της ροπής και το γεγονός ότι το διπολικό πεδίο της επιφάνειας είναι τουλάχιστον 3×10 στη 12 Gauss.

Η περιστροφική επιτάχυνση του παλσαρ συνεχίζεται μέχρι να φτάσει την Κεπλερια γωνιακή ταχύτητα στην επιφάνεια Alfven, που το ύψος της εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο και τον ρυθμό επαύξεσης. Αυτό θέτει ένα κατώτατο όριο περιόδου περιστροφής. Οι ανωμαλίες που παρατηρούμε στις επιταχύνσεις έχουν να κάνουν με ανωμαλίες στην μεταφορά μάζας. Έτσι έχουμε και μεγάλη διακύμανση της εκροής ακτίνων X.

Η ισχύς του μαγνητικού πεδίου.

Το φάσμα στις ακτίνες X σε πολλές HMXB εμφανίζεται ως απορρόφηση σχετικιστικής αντήχησης (cyclotron resonance absorption) στην περιοχή εκπομπής. Η ενέργεια φωτονίου σε μια σχετικιστική αντήχηση ηλεκτρονίου είναι $E_c = 11,6 B_{12} \text{ keV}$, όπου το B_{12} είναι το μαγνητικό πεδίο σε μονάδες των 10 στη 12 Gauss. Υπάρχει όμως η πιθανότητα οι γραμμές σε μερικές περιπτώσεις να έχουν να κάνουν με σχετικιστική αντήχηση πρωτονίου παρά ηλεκτρονίου. Αυτή έχει ενέργεια $0,0063 B_{12} \text{ keV}$. Τα μαγνητικά πεδία των μάγνεταρ έχουν ισχύ 10 στη 14 Gauss, μια τιμή που ξεπερνάει το κβαντικό επίπεδο της διάσπασης Landau, στο οποίο ένα ηλεκτρόνιο υπερβαίνει την μάζα ηρεμίας του. Τέτοια πεδία μπορούν να δημιουργηθούν από μηχανισμό δυναμό στα πρώτα δευτερόλεπτα της γέννησης του παλσαρ.

Οι εκρήξεις ακτίνων Χ.

Τα αντικείμενα ακτίνων Χ που ονομάζονται πηγές γαλαξιακής ράβδου χαρακτηρίζονται από την έντασή τους (10 στη 34 erg/s), το μαλακό φάσμα τους ($T = 30$ εκ. σε σχέση με το $T = 100$ εκ. Κ για μεγάλης μάζας διπλούς), την απουσία παλμών και την απουσία εκλείψεων. Αυτά τα αντικείμενα παρουσιάζουν εκρήξεις ακτίνων Χ διάρκειας δεκάδων δευτερολέπτων, που φαίνεται να είναι αναλαμπές της ενέργειας από θερμοπυρηνικές εκρήξεις σε ύλη που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του παλσαρ. Αν και είναι κοινά αποδεκτή μια ελεγχόμενη απελευθέρωση πυρηνικής ενέργειας στο εσωτερικό των αστεριών, όπως σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο, η παραπάνω θεωρία για τις εκρήξεις Χ σαν ακολουθία πυρηνικών εκρήξεων στην επιφάνεια των παλσαρ αποτελεί μια καταπληκτική σύλληψη. Οι θεωρητικές και παρατηρησιακές ενδείξεις είναι όμως αρκετά ισχυρές.

Το φάσμα αυτών των εκρήξεων ταιριάζει σε θερμική πηγή. Η θερμοκρασία της πηγής μειώνεται κατά την έκρηξη. Η συνολική ενέργεια και η θερμοκρασία που παρατηρείται από το φάσμα μας δίνει μια μέτρηση για την περιοχή της έκρηξης να είναι της ακτίνας των 7 χιλιομέτρων, που ταιριάζει σε περιοχή παλσαρ. Η θερμοκρασία ανεβαίνει σε μερικά δευτερόλεπτα 30 εκ. βαθμούς και μειώνεται με σταθερά χρόνο τα 10 δευτερόλεπτα. Κάθε ώρες ή ημέρες η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η θεωρία αυτή προέρχεται από την γνωστή δομή ενός παλσαρ. Η επιφάνεια έχει ένα στρώμα πάχους 1 μέτρου με πυκνό υδρογόνο από συσσωρευμένο πλάσμα. Όσο περισσότερο υδρογόνο συσσωρεύεται στην επιφάνεια, τόσο συντήκεται στην βάση του στρώματος σε ήλιο, άνθρακα και σίδηρο, απελευθερώνοντας ενέργεια κατά την διαδικασία αυτή. Έτσι υπάρχει ένα στρώμα καύσης υδρογόνου, μετά ένα στρώμα καύσης ηλίου πάχους 1 μέτρου και μετά πάλι ένα στρώμα καύσης ηλίου. Αυτά τα στρώματα γίνονται ασταθή όταν η ροή του υδρογόνου στην επιφάνεια ξεπεράσει κάποιο όριο. Η αστάθεια αυτή εξαρτάται από τον συντελεστή θερμοκρασίας της θερμοπυρηνικής αντίδρασης.

Το στρώμα καύσης υδρογόνου δεν φαίνεται να είναι πηγή αστάθειας, αφού η καύση του υδρογόνου περιλαμβάνει πολλές ενδιάμεσες καταστάσεις αλλοιώσεων βήτα από άτομα όπως τα (^{13}N) και (^{14}O), που έχουν χρόνο ημιζωής 100 δευτερολέπτων. Στην καύση ηλίου δεν έχουμε τέτοια φαινόμενα, άρα τα στρώματα ηλίου είναι αυτά που ευθύνονται για τις εκρήξεις.

Η συνολική στατιστική της απελευθέρωσης ενέργειας είναι απλή. 10 στη 21 γραμμάρια υδρογόνου συσσωρεύονται για κάθε αναλαμπή, δηλαδή 1 εκ. τόνοι ανά τετραγωνικό μέτρο συσσωρεύονται σε 10000 δευτερόλεπτα. Η αναλαμπή απελευθερώνει 10 στη 39 erg, που ανεβάζει την θερμοκρασία στους 30 εκ βαθμούς στην επιφάνεια του παλσαρ σε 0,1 δευτερόλεπτα. Η ακτινοβολία την ψύχει μετά από 10 δευτερόλεπτα στους 10 εκ. βαθμούς Κ. Η συνολική αυτή ενέργεια είναι 50 φορές αυτή που εκλύει συνολικά ο ήλιος, συγκεντρωμένη σε ένα δευτερόλεπτο σε πολύ μικρό χώρο, μια θερμοπυρηνική έκρηξη τεράστιας δύναμης.

Οι γρήγορες εκρήξεις.

Οι γρήγορες εκρήξεις εκδηλώνονται μέσα σε δευτερόλεπτα ή λεπτά. Η πρώτη τέτοια πηγή Χ που ανακαλύψαμε ονομάστηκε Rapid Burster. Μάλλον πρόκειται για αστάθειες στον ρυθμό συσώρευσης παρά για θερμοπυρηνικές εκρήξεις. Οι γρήγορες εκρήξεις (τύπος 2) αντιπροσωπεύουν επίσης μεγάλες αποδεσμεύσεις ενέργειας, αλλά η πηγή είναι μάλλον βαρυτική, παρά πυρηνική. Το 1/10 της ενέργειας ανά πρωτόνιο που απελευθερώνεται στην

θερμοπυρηνική έκρηξη του πιο αργού τύπου έκρηξης 1 είναι σε μορφή βαρυτικής ενέργειας, που απελευθερώθηκε κατά την πτώση της ύλης στην επιφάνεια του παλσαρ.

Μια παροδική πηγή ακτίνων Χ, η GROJ1744-28, έχει ένα σκληρό (hard) φάσμα όμοιο με αυτά των γρήγορων εκρήξεων, αλλά το ασυνήθιστο είναι ότι διαμορφώνεται ανάλογα την περιστροφή του παλσαρ. Η περίοδος των 467 ms ελαττώνεται, κάτι που σημαίνει ότι βιώνει επιτάχυνση λόγω προσαύξεσης, και μια περιοδική μετατόπιση Ντόπλερ φανερώνει την τροχιά του συνοδού του στις 11,8 ημέρες. Αυτή η πηγή Χ δίνει χρήσιμες πληροφορίες για τη φύση των διπλών παλσαρ σκληρών ακτίνων Χ.

Ημιπερίοδοι και ταλαντώσεις kilohertz.

Η ιδέα ότι η μεταφορά μάζας στα διπλά συστήματα, όπως στα LMXB, επιταχύνει την περιστροφή ενός παλσαρ, βρήκε ισχυρή υποστήριξη από την ανακάλυψη του PSRB1953+29, έναν διπλό ραδιοπάλσαρ με περίοδο 6 ms. Η πιθανότητα να περιλαμβάνονται σε μερικούς LMXB τόσο γρήγορα παλσαρ ανανέωσαν τις προσπάθειες ανακάλυψης διακυμάνσεων μικρής περιόδου στην ροή των γνωστών πηγών ακτίνων Χ. Βρέθηκε μια περιοδικότητα που είναι σχετική με την περιστροφή του παλσαρ, μέσω υψηλής ανάλυσης των χρόνων περιστροφής, αλλά οι πρώτες απόπειρες βρήκαν αντί αυτού μια τελείως διαφορετική ημιπεριοδική διακύμανση σε πολλές LMXB (ScoX-1, CygX-2, Rapid Burster). Η περιοδικότητά τους είναι μεταβλητή και η διακύμανσή της έχει στενή σχέση με την ένταση της ακτινοβολίας Χ. Η εξήγηση των ημιπεριοδικών ταλαντεύσεων είναι ότι οι περίοδοι καθορίζονται από την Κεπλέρια περίοδο τροχιάς στο εσωτερικό άκρο του δίσκου προσαύξεσης. Η διάμετρος του δίσκου εξαρτάται από τον βαθμό της προσαύξεσης, που επηρεάζει και την λαμπρότητα στις ακτίνες Χ. Μεγάλη λαμπρότητα σημαίνει μικρή διάμετρο, άρα και μικρότερη περίοδο τροχιάς. Η λαμπρότητα διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση της ίδιας της περιστροφής του παλσαρ και του δίσκου προσαύξεσης. Έτσι η παρατηρήσιμη συχνότητα αποτελεί συνδυασμό αυτών των δύο παραμέτρων.

Οι μεγάλης συχνότητας ταλαντεύσεις λέγονται ταλαντεύσεις ms ή kHz. Έχουμε 3 κατηγορίες.

- 1) Ημιπερίοδοι που είναι όμοιοι, με μεγάλες περιόδους. Αυτές δημιουργούνται από την τροχιακή κίνηση, αλλά σε έναν εσωτερικό δίσκο προσαύξεσης, όπου η Κεπλέρια περιστροφή είναι σε μεγαλύτερες συχνότητες.
 - 2) Εκρήξεις περιοδικού σήματος με περιόδους λίγο μικρότερες από την περίοδο περιστροφής του παλσαρ. Αυτές διαμορφώνονται από μια ατμόσφαιρα σε κοντινή συν- περιστροφή με το παλσαρ.
 - 3) Διαμόρφωση στην διάρκεια μιας έκρηξης Χ κατά την πραγματική συχνότητα περιστροφής του παλσαρ. Αυτή έχει να κάνει με την θερμική ακτινοβολία από την επιφάνεια και διαφορές θερμοκρασιών γύρω από το παλσαρ.
- Οι τελευταίοι είναι γνωστοί ως μιλισεκοντ διπλοί ακτίνων Χ.

Τα Μαγνεταρ.

Τα μάγνεταρ είναι μια μικρή ομάδα αστέρων νετρονίων με ακραία δραστικό δίπολο μαγνητικό πεδίο, που περιλαμβάνει τα παλσαρ ανώμαλων ακτίνων Χ (Anomalous X-ray Pulsars, AXP) και τους <επαναλήπτες> μαλακών ακτίνων γ (Soft Gamma-ray Repeaters, SGR). Και οι δύο κατηγορίες έχουν μεγάλες (αργές) περιόδους περιστροφής και υψηλό βαθμό επιβράδυνσης, κάτι που παραπέμπει σε πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο και μικρή διάρκεια ζωής. Η ενέργεια που ακτινοβολούν είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τον ρυθμό απώλειας περιστροφικής ενέργειας. Το συμπέρασμα είναι ότι η ενέργεια της εκπομπής ακτίνων Χ και γ προέρχεται από μια αλλοίωση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του παλσαρ. Τα μαγνεταρ φαίνονται να ξεχωρίζουν από τα κανονικά παλσαρ, και δείχνουν να είναι αστέρια νετρονίων ακραίας μορφής.

Οι επαναλήπτες μαλακών ακτίνων γ (SGR).

Οι κοσμικές εκρήξεις γ (GRB) έχουν παρατηρηθεί κατά χιλιάδες, και η διάρκειά τους είναι δεκάδες δευτερόλεπτα, με διάρκεια αύξησης 1 δευτερόλεπτο. Είναι μεταβλητές, και μερικές έχουν δομή ενός ms. Είναι διάσπαρτες ισότροπα σε όλο τον ουρανό, χωρίς συγκέντρωση προς το επίπεδο του Γαλαξία μας. Έχουμε καταγράψει με επιτυχία αρκετές τέτοιες εκρήξεις ώστε να καθορίσουμε με κάποια ακρίβεια την σχέση μεταξύ αριθμού και έντασης. Αυτό απαιτεί μια ίση προς όλες τις κατευθύνσεις ελάττωση της πυκνότητας των πηγών με την απόσταση, όπως θα έπρεπε για κοσμολογικές αποστάσεις, κάτι που τελικά επιβεβαιώθηκε με συσχέτιση με ορατές μεταβάσεις. Τώρα ξέρουμε ότι έχουν να κάνουν με ακραίας μορφής σουπερνόβα.

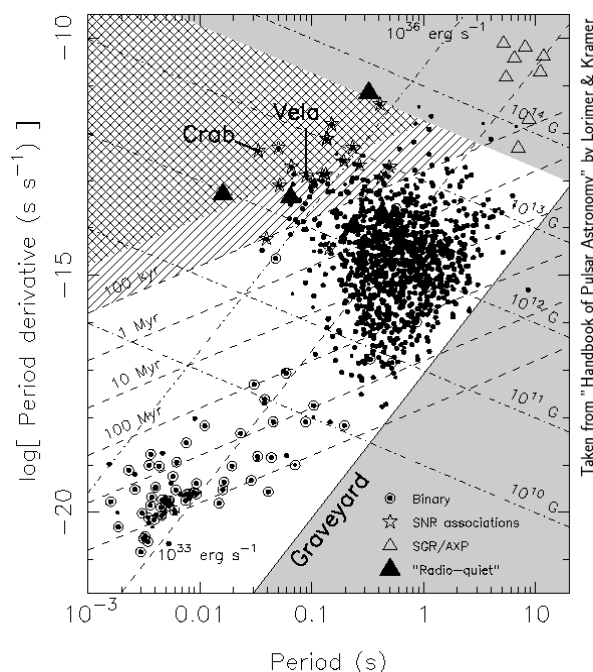
Από τις χιλιάδες GRB μόνο ένας μικρός αριθμός δείχνει επανάληψη εκρήξεων από την ίδια περιοχή. Αυτή η μικρή κατηγορία SGR ξεχωρίζει ως πηγές φάσματος μαλακών ακτίνων γ. Έχουμε καταγράψει την δομή των πιο μεγάλων εκρήξεων, γνωστές ως γιγάντιες εκλάμψεις. Πρόκειται για καμπύλες με κορυφή με γρήγορη ανάπτυξη, που κρατάει μόνο ένα δευτερόλεπτο, ακολουθούμενη από αλλοίωση μερικών λεπτών. Σε όλες τις SGR έχουμε ανιχνεύσει περιοδικότητα από 2 ως 8 δευτερόλεπτα στις ακτίνες γ και Χ. Αυτές αντιπροσωπεύουν την περίοδο περιστροφής του παλσαρ.

Τα παλσαρ ανώμαλων ακτίνων Χ (AXP).

Πρόκειται για μια μικρή ομάδα παλσαρ με μεγάλες περιόδους περιστροφής (6- 12 δευτερόλεπτα), μικρούς συνολικούς χρόνους επιβράδυνσης (100- 100000 έτη) και φάσμα μαλακών ακτίνων Χ. Η περιστροφή τους μπορεί να καταγραφεί συνεχώς επιτρέποντας συναφή λύσεις χρονομέτρησης ανάμεσα σε διαφορετικές εκδοχές παρατήρησης. Εμφανίζονται glitch όμοια με αυτά των ραδιοπαλσαρ. Τα μαγνητικά πεδία, όπως συμπεραίνουμε από τον ρυθμό επιβράδυνσης, είναι τα ισχυρότερα που γνωρίζουμε (10 στη 14 με 10 στη 15 Gauss). Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο αποτελεί την πηγή θέρμανσης του παλσαρ και κρατάει την επιφάνεια σε θερμοκρασία που την κάνει ορατή.

Υπάρχουν 4 AXP που συνδέονται με υπολείμματα σ. Νόβα, που σημαίνει ότι είναι νεαρά, μέχρι 10000 ετών. Δεν υπάρχουν ενδείξεις για AXP σε διπλά συστήματα. Έχουν μαλακό φάσμα ακτίνων Χ θερμικής πηγής, που ενεργοποιείται από την σκέδαση Compton της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια, σε μια ενεργητική μαγνητόσφαιρα. Η ισχύ που εκπέμπεται στην περιοχή των Χ είναι 10 στη 34 ergs-1.

AXP, SGR, RRAT (Rotating radio transient) Μεταβατικοί αστέρες περιστροφής στα ραδιοκύματα, XDINS (X-ray Dim Isolated Neutron Stars), αμυδροί απομονωμένοι αστέρες νετρονίων ακτίνων Χ, όλοι τους μαγνεταρ.



Οι SGR και οι AXP έχουν στενή σχέση, όπως είδαμε από παρατηρήσεις σε όλα τα μήκη κύματος. Βρέθηκαν SGR (SGR 1806-20, 1900+14) να είναι πηγές ακτίνων Χ με μεγάλες περιόδους περιστροφής, όπως αυτές των AXP. Οι θέσεις τους στο διάγραμμα είναι ακραίες. Οι ρυθμοί επιβράδυνσης είναι επίσης παρόμοιοι, που μας δίνουν τα τεράστια μαγνητικά πεδία των 8×10^{14} και 6×10^{14} Gauss αντίστοιχα. Έτσι αυτές οι δυο κατηγορίες είναι οι κλασσικές των μαγνεταρ. Ο σύνδεσμος των δύο κατηγοριών ενισχύεται από μια έκρηξη Χ του APX 1E1048.1-5937 όμοια με εκρήξεις των SGR.

Ο δεσμός με τα ραδιοπάλσαρ φάνηκε στον XTEJ1810-197, ένας παροδικός AXP, που παρατηρήθηκε να αυξάνει σε ένταση ακτίνων Χ κατά παράγοντα 100 το 2003. Ένα χρόνο αργότερα εμφανίστηκε ως ραδιοπάλσαρ, εκπέμποντας λαμπρούς στενούς παλμούς. Το ράδιο- φάσμα του είναι επίπεδο, και στα 20 GHz είχε την λαμπρότερη εκπομπή ραδιοκυμάτων από κάθε άλλο παλσαρ. Μέχρι το 2010 είχαν παρατηρηθεί άλλα 3 AXP να έχουν ραδιοεκπομπή.

Κάποιοι από τους RRAT μπορεί να έχουν σχέση με τα μάγνεταρ. Γνωρίζουμε 29 τέτοια αντικείμενα. Οι περιστροφές τους είναι από 0,125 ως 6,6 δευτερόλεπτα. Έχουν χαρακτηριστικά που μοιάζουν με αυτά των παλαιών παλσαρ, αλλά τα περισσότερα έχουν ισχυρά μαγνητικά πεδία (10^{13} Gauss). Οι XDINS παρατηρήθηκαν ως θερμές πηγές Χ χωρίς ομολόγους στα ραδιοκύματα. Φαίνεται να εκπέμπουν μόνο θερμές ακτίνες Χ, και τα 5 από τα 7 λαμπρότερα έχουν ισχυρό διπολικό μαγνητικό πεδίο (10^{13-14} Gauss), που τα συσχετίζει με μάγνεταρ.

Η προέλευση των μαγνεταρ.

Οι μάγνεταρ είναι μια κατηγορία νεαρών και μικρής διάρκειας ζωής παλσαρ. Το νεαρό της ηλικίας τους φαίνεται από την θέση τους κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο. Οι χαρακτηριστικές ηλικίες τους είναι μικρές. Έχουν μικρή διάρκεια ζωής, λόγω του μεγάλου ρυθμού

επιβράδυνσης της περιστροφής τους. Η εκτίμηση του πληθυσμού τους εξαρτάται από την απόσταση, λόγω απορρόφησης του αστρικού φωτός.

Όπως είναι λογικό για έναν μικρής διάρκειας ζωής πληθυσμό, είναι αριθμητικά μικρός. Οι εκρήξεις των SGR είναι τόσο ισχυρές που φαίνονται σε όλο τον Γαλαξία μας, άρα παρατηρούμε όλες όσες συμβαίνουν. Μάλλον έχουμε μόνο μερικές δωδεκάδες SGR και AXP στον Γαλαξία μας. Ο πληθυσμός των RRAT και INS είναι πολύ μεγαλύτερος, κοντά στο πληθυσμό κανονικών παλσαρ, και μάλλον αυτοί είναι μέρος της κανονικής ακολουθίας εξέλιξης των παλσαρ.

Γενικά πιστεύουμε ότι τα κανονικά παλσαρ δημιουργούνται σε εκρήξεις σουπερνόβα, και είναι περιστρεφόμενα με περιόδους μερικές δεκάδες ms. Όσο επιβραδύνονται μεταναστεύουν στο διάγραμμα από αριστερά προς τα δεξιά (προς μεγαλύτερες περιόδους). Αν το διπολικό είναι σταθερό, τα παλσαρ ακολουθούν την ενδεικνυόμενη πορεία τους. Αν τα μάγνεταρ είχαν εξελιχτεί με σταθερό μαγνητικό πεδίο από μέρος του κανονικού πληθυσμού, θα περιμέναμε να δούμε πολλές παρουσίες στην κενή επάνω αριστερή μεριά του διαγράμματος, ακόμη και αν η εξέλιξή τους είναι πολύ γρήγορη. Υπάρχουν δύο ενδεχόμενα, ή να έχουν άλλη προέλευση, ή να εξελίσσονται με ελάττωση του μαγνητικού πεδίου τους.

Ξεχωριστή προέλευση των μάγνεταρ.

Όπως είπαμε, δεν υπάρχουν υπολείμματα σουπερνόβα που να σχετίζονται με SGR. Υπάρχει όμως μια πιθανή σχέση με αστρικά σμήνη που περιέχουν μεγάλα αστέρια. Έτσι έχει προταθεί οι SGR να δημιουργούνται από σουπερνόβα αστεριών μεγάλης μάζας (50 ηλιακών), αν και μάλλον δημιουργούνται μαύρες τρύπες από τέτοια αστέρια, παρά παλσαρ. Από την άλλη, μερικοί AXP συσχετίζονται με υπολείμματα σουπερνόβα. Αν για την ευκολία μας θέλουμε να τους ξεχωρίσουμε από τους SGR και τους θεωρήσουμε ως μέλη του πληθυσμού των κανονικών παλσαρ, θα πρέπει να έχουν αποκτήσει το ισχυρό τους μαγνητικό πεδίο κατά την δημιουργία τους, για κάτι τέτοιο όμως δεν έχουμε καμία άλλη ένδειξη.

Το μαγνητικό πεδίο που ελαττώνεται.

Εδώ και πολλά χρόνια έχει προταθεί ότι ο χαμηλός ρυθμός επιβράδυνσης των περισσότερων νεαρών παλσαρ έχει να κάνει με μια αύξηση ισχύς του μαγνητικού πεδίου. Θα δούμε αν υπάρχει πιθανή διαδρομή εξέλιξης από νεαρό παλσαρ σε μάγνεταρ. Αν και τα μάγνεταρ θεωρήθηκαν αρχικά ως διακριτός και ξεχωριστός πληθυσμός, γρήγορα είδαμε ότι είναι κανονικά ραδιοπαλσαρ, με τιμές περιστροφής που ξεπερνούσαν αυτές των AXP. Τα μαγνητικά πεδία τους είναι όμοια ισχυρά με αυτά των AXP και τελικά βρέθηκαν μερικά να είναι και ραδιοπαλσαρ και AXP. Άρα τα κανονικά παλσαρ και οι AXP σχηματίζουν μια συνέχεια, και πιθανώς μια εξελικτική ακολουθία με αυξανόμενη ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Ο συσχετισμός του χαμηλού ρυθμού επιβράδυνσης των νεαρών παλσαρ με την αύξηση του διπολικού πεδίου φαίνεται και από την πορεία τους στο παραπάνω διάγραμμα. Η πιθανότητα κάποιοι από αυτούς τους παλσαρ να εξελίσσονται σε μάγνεταρ είναι ακόμα αβέβαιη. Βλέπουμε στο διάγραμμα να υπάρχουν μερικά αντικείμενα ανάμεσα στα νεαρά παλσαρ και στα μάγνεταρ. Εκεί βρίσκεται και το PSRJ 1734-3333, που μας γεμίζει αυτό το κενό. Μας δίνει παρατηρήσεις του αυξανόμενου σε ισχύ διπολικού πεδίου.

Το παλσαρ αυτό παρατηρήθηκε ως ραδιοπαλσαρ και συνδέεται με το υπόλειμμα σουπερνόβα G354.8-0.8. Η περίοδος περιστροφής του είναι 1,17 s και η χαρακτηριστική

ηλικία του 8100 έτη. Δεν έχουμε παρατηρήσει glitch στα 12 έτη μελέτης του, και έχουμε λάβει μέτρηση του δεύτερου παράγωγου του ρυθμού περιστροφής. Αναφέρεται και ως πηγή ακτίνων X. Αν συνεχίσει την διαδρομή του στο διάγραμμα χωρίς αλλαγές, η περίοδος του θα έχει επιβραδυνθεί στα 8 s σε 31000 έτη και θα βρίσκεται στο κέντρο των μαγνεταρ (στο διάγραμμα).

Αυτή η σύνδεση των νεαρών παλσαρ και των μάγνεταρ δίνει εξηγήσεις για πολλά προβλήματα που είδαμε παραπάνω. Αν τα μάγνεταρ πράγματι εξελίσσονται από κανονικά νεαρά παλσαρ, τότε

.Δεν χρειάζεται να θεωρούμε ότι τα μαγνεταρ προέρχονται από άλλου είδους σουπερνόβα II

.Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο τους δημιουργείται στην φάση του νεαρού παλσαρ.

.Οι ηλικίες των μαγνεταρ δεν σχετίζονται με τις χαρακτηριστικές ηλικίες τους και πρέπει να είναι της τάξης των 10000- 100000 ετών.

.Σε τέτοιες ηλικίες, τα απομεινάρια των σουπερνόβα όπου δημιουργήθηκαν έχουν διαλυθεί, έτσι μόνο λίγα μάγνεταρ συσχετίζονται με ορατά υπολείμματα.

Το πρόβλημα που παραμένει είναι πως το μαγνητικό πεδίο ενισχύεται κατά δύο τάξεις μεγέθους μέσα σε 1000- 10000 έτη, με μια διαδικασία που δεν φαίνεται να εμφανίζεται σε όλα τα παλσαρ.

Η αύξηση του μαγνητικού πεδίου.

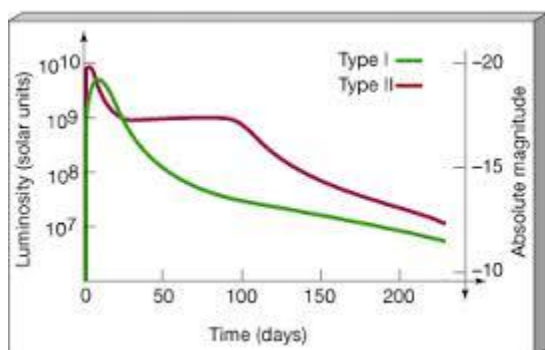
Η δράση του δυναμό ενός παλσαρ που μόλις κατάρρευσε μπορεί να δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο 10 στη 14-15 Gauss. Το δυναμό τροφοδοτείται από την συναγωγή, που εμφανίζεται κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την κατάρρευση, και μόνο σε γρήγορη περιστροφή των 1ms. Το μαγνητικό πεδίο θα αποκτήσει μια μεγάλη δεξαμενή ενέργειας που θα κυριαρχήσει στην συμπεριφορά του παλσαρ. Ένα τέτοιο πεδίο θα δικαιολογούσε πολλά χαρακτηριστικά των SGR, όπως την απαιτούμενη ενέργεια για τις εκροές και τον περιορισμό του πλάσματος μετά την εκροή, όπως φαίνεται στην ουρά της εκροής. Ακόμα, όταν το μαγνητικό πεδίο διαχέεται προς τα έξω μπορεί να σπάει την κρούστα του πάλσαρ σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα, κάτι που έχει σημασία για την εμφάνιση της εκροής.

Ένα άλλο στοιχείο -κλειδί είναι ότι αμέσως μετά τον σχηματισμό του παλσαρ ένα σημαντικό μέρος του υπολείμματος μπορεί να καταρρεύσει πάνω του. Η πίεση εμβολής σε αυτή την γρήγορη συσσώρευση μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και την πίεση του τόσο ισχυρού μαγνητικού πεδίου των μάγνεταρ. Τότε η συσσώρευση μπορεί να περιγραφεί με απλές διαδικασίες υδροδυναμικής, που σχηματίζει ένα στρώμα πάχους 100 μέτρων στην επιφάνεια του παλσαρ. Το μαγνητικό πεδίο διαχέεται προς τα έξω μέσω αυτού του στρώματος, και σχηματίζει το γνωστό μας διπολικό πεδίο. Μια συσσώρευση 0,01 ηλιακής μάζας είναι αρκετή ώστε να συμπίεσει αυτό το πεδίο, που μπορεί να διαχέεται για μερικές χιλιάδες χρόνια. Μια μεγαλύτερη συσσώρευση, 0,1 ηλ. μάζες, μπορεί να περιορίσει το μαγνητικό πεδίο για μεγαλύτερο διάστημα, και ο αστέρας νετρονίων να μην γίνει ποτέ παλσαρ.

Μέσω αυτής της διαδικασίας το αυξανόμενο διπολικό πεδίο είναι σημαντικό για την εξέλιξη των μαγνεταρ από κανονικά παλσαρ. Μπορεί και να είναι σημαντικό για τον χαμηλό ρυθμό επιβράδυνσης των νεαρών παλσαρ.

Οι σουπερνόβα και τα υπολείμματα τους.

Η προφανής σχέση του παλσαρ του Καρκίνου με το υπόλειμμα σουπερνόβα από την έκρηξη του 1054 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όλα τα παλσαρ προέρχονται από σουπερνόβα. Είναι πολύ χρήσιμο να ερευνήσουμε την φύση των σουπερνόβα ώστε να κατανοήσουμε την σχέση τους με τα παλσαρ.



Βασικά οι σουπερνόβα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την Ia και την II (με λιγότερο σημαντικές ομάδες τις Ib, Ic). Η διαφορά είναι στο φάσμα. Οι Ia έχουν πολλές γραμμές εκπομπής από βαρέα στοιχεία και όχι υδρογόνο, ενώ οι II κυρίως υδρογόνο (οι Ia έχουν ήλιο ενώ οι Ib και Ic βαρύτερα στοιχεία). Η συνολική εκροή ενέργειας και η πορεία αποκλιμάκωσής τους είναι παρόμοιες. Και οι δύο προέρχονται από κατάρρευση αστρικού πυρήνα, αλλά οι τύπου II παίρνουν ενέργεια μόνο από βαρυτική κατάρρευση ενός αστέρα μετά την ολοκλήρωση της σύντηξης (πυρήνας σιδήρου), ενώ οι Ia έχουν ως κινητήρια δύναμη την εκρηκτική πυρηνική καύση, λόγω μεγάλης πυκνότητας και θερμοκρασίας κατά την κατάρρευση (κατάρρευση λευκού νάνου, που μετά από συσσώρευση μάζας ξεπερνάει τις 1,4 ηλ. μάζες).

Οι τύπου II έχουν διαφορετικό φάσμα λόγω του κελύφους από αέριο γύρω από το αστέρι (> 8 ηλιακών μαζών), που θα εκραγεί ως σουπερνόβα. Αυτό το κέλυφος επισκιάζει την έκρηξη. Και στις δυο κατηγορίες η λαμπρότητα φτάνει το μέγιστο γρήγορα, συνήθως σε μερικές ημέρες. Στο μέγιστο έχουμε ένα συνεχές φάσμα, που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 15000 βαθμών. Η απόλυτη λαμπρότητα εκφράζεται κυρίως στο ορατό μήκος κύματος, 10 στη 43 erg/s. Ο συνδυασμός αυτών των δεδομένων μας δίνει ακτίνα της έκρηξης 10000 ηλιακές, μια ακτίνα που ταιριάζει με αυτή ενός κελύφους. Η αποκλιμάκωση του φαινομένου γίνεται μονότονα και περίπου εκθετικά με μια σταθερά χρόνου μεταξύ 50 και 100 ημερών, και διαρκεί για δυο και περισσότερα χρόνια. Η συνολική εκροή ενέργειας είναι 10 στη 48 erg.

Το φάσμα των Ia έχει συχνά απορρόφηση στα 615 nm, που δείχνει (SiII). Αυτό κάνει εφικτή την μέτρηση της ταχύτητας διαστολής της έκρηξης (11000 km/s). Αργότερα στο φάσμα βλέπουμε και γραμμές των (Fe+), (Fe++) και άλλων βαρέων στοιχείων. Οι διαφορές των δύο τύπων φαίνονται στο φάσμα μετά το μέγιστο, όταν οι τύπου II αναπτύσσουν γραμμές εκπομπής υδρογόνου Balmer αλλά όχι εκπομπής (Fe+),(Fe++).

Αστρική εξέλιξη και κατάρρευση.

Η πηγή ενέργειας των τύπου II είναι η βαρυτική ενέργεια που απελευθερώνεται όταν καταρρέει το αστέρι. Η κατάρρευση είναι αποτέλεσμα εξουθένωσης και αποτυχίας της

κεντρικής προμήθειας ενέργειας, που στην κανονική διάρκεια ζωής ενός αστέρα αντισταθμίζει την βαρύτητα (καύση υδρογόνου στην κ. ακολουθία και βαρύτερων στοιχείων αργότερα). Τα μεγάλης μάζας αστέρια καίνε πιο γρήγορα το υδρογόνο στον πυρήνα τους (10 εκ. έτη για ένα αστέρι 10 ηλιακών μαζών) και συνεχίζουν τις καύσεις μέχρι τον σίδηρο. Τα άστρα μετά την κύρια ακολουθία σχηματίζουν ένα μεγάλο κουκούλι γύρω τους από τα εξωτερικά στρώματα του αστέρα (ερυθρός γίγαντας). Η καύση των στοιχείων γίνεται σε στρώματα. Όταν ο πυρήνας γεμίσει σίδηρο παρουσιάζεται εκφυλισμός νετρονίων. Έτσι δεν σημειώνεται άλλη σύντηξη, και ακολουθεί κατάρρευση. Αν ο πυρήνας που κατάρρευσε ήταν 1,9 -2,5 ηλιακές μάζες, θα δημιουργηθεί ένας αστέρας νετρονίων, που θα χάσει 1 ηλ. μάζα περίπου κατά την έκρηξη. Η εκφυλιστική πίεση των νετρονίων θα σταματήσει τελικά την κατάρρευση. Για πυρήνα 1,9 ηλ. μαζών πρέπει το αστέρι να είχε αρχική μάζα τουλάχιστον 8 ηλιακές. Ένα αστέρι 15 ηλ. μαζών και άνω θα δημιουργήσει μαύρη τρύπα (δεν επαρκεί η πίεση νετρονίων για να συγκρατήσει την βαρυτική κατάρρευση). Συνοψίζοντας.

.Πυρήνες από αστέρια με μάζα από 8 ως 15 ηλιακές θα καταρρεύσουν σε αστέρες νετρονίων.

.Όταν εξαντληθούν τα πυρηνικά καύσιμα αυτά τα αστέρια καταρρέουν υπό την βαρύτητά τους. Η κατάρρευση αυτή αποτελεί την πηγή ενέργειας της σουπερνόβα

.Η κατάρρευση σε πυρηνικές πυκνότητες γίνεται μέσα σε δευτερόλεπτα. Την ακολουθεί μια αναπήδηση της πιο εξωτερικής του πυρήνα ύλης, που επίσης καταρρέει βαρυτικά, με αποτέλεσμα την εξώθηση μέρος του πυρήνα (που δεν διαλύθηκε σε νετρόνια), και όλων των εξωτερικών στρωμάτων. Η ορατή σουπερνόβα είναι αποτέλεσμα της εκρηκτικής αυτής ώθησης της ύλης που συγκρούεται με την ύλη που απώθησε το αστέρι πριν την κατάρρευσή του και που δημιούργησε ένα περιαστρικό κέλυφος. Δημιουργούνται διασπάσεις ραδιενεργών ισοτόπων (^{56}Ni) με μικρή διάρκεια ημιζωής, που δημιουργήθηκαν κατά την εξώθηση της ύλης (όπως δημιουργήθηκαν και όλα τα βαρύτερα του σιδήρου στοιχεία με την ταχεία απορρόφηση νετρονίων, s- progress).

. Οι πληθυσμοί των αστέρων ελαττώνονται ραγδαία με την αύξηση της μάζας τους, έτσι οι περισσότεροι αστέρες νετρονίων πρέπει να προήλθαν από αστέρια 8 ηλ. μαζών και λίγοι από αστέρια 15 ηλ. μαζών. Από την άλλη, τα μεγάλα αστέρια εξελίσσονται πιο γρήγορα σε αστέρες νετρονίων. Αυτό σημαίνει ότι η μέση μάζα προέλευσης, αλλά και η αναλογία των τριών κατηγοριών (αστέρας νετρονίων, μ. τρύπα ή τύπου Ib, Ic) εξαρτάται από τον γαλαξία ή το τμήμα που εξετάζουμε. Έτσι οι τύπου II, Ib, Ic βρίσκονται μόνο σε σπείρες όπου έχουμε αστρογέννηση, αφού είναι αποτελέσματα γρήγορης αστρικής εξέλιξης, ενώ οι Ia σε όλους τους τύπους γαλαξιών. Αν ο πυρήνας είναι μικρότερος από 1,9 ηλ. μάζες, τότε μάλλον γίνεται έκρηξη κατά την καύση του άνθρακα (carbon flash), και δεν έχουμε περαιτέρω σύντηξη.

Καταρρεύσεις

Οι σουπερνόβα τύπου Ia προέρχονται από λευκό νάνο που συσσωρεύει υλικό από έναν συνοδό του. Λευκοί νάνοι υπάρχουν αρκετοί στο σύμπαν και αυτός ο τύπος των σουπερνόβα είναι αρκετά συνηθισμένος, άρα δεν μπορεί να προέρχεται από την αργή εξέλιξη ενός άστρου μικρής μάζας. Η μάζα του λ. νάνου είναι κάτω από το όριο Chandrasekhar (1,4 ηλ. μάζες), αλλιώς θα είχε καταρρεύσει σε αστέρι νετρονίων. Μέσω της

συσσώρευσης ύλης από συνοδό αστέρα ξεπερνάει αυτό το όριο και δίνει σουπερνόβα Ia. Συνήθως στα διπλά αστέρια (περίπου τα μισά άστρα είναι σε συστήματα) η εξέλιξη του συστήματος είναι το ένα να γίνει λ. νάνος και κάποτε το άλλο να εξελιχτεί σε ερυθρό γίγαντα. Σε κοντινά διπλά θα μεταφερθεί μάζα από τον ερ. γίγαντα στον λ. νάνο και θα ακολουθήσει έκρηξη Νοβα. Μια συνεχή όμως συσσώρευση χωρίς έκρηξη θα κάνει τον λ. νάνο να ξεπεράσει τις 1,4 ηλ. μάζες, και θα έχουμε μια έκρηξη σουπερνόβα και δημιουργία αστέρα νετρονίων.

Ενας λ. νάνος με μάζα κοντά στις 1,4 ηλιακές έχει εξουθενώσει το υδρογόνο και το ήλιο του και λέγεται λ. νάνος άνθρακα- οξυγόνου. Φτάνοντας κοντά στην κρίσιμη μάζα ανεβαίνει η θερμοκρασία και αρχίζει η καύση άνθρακα. Αυτό διαρκεί μερικές εκατοντάδες χρόνια, αλλά οι περαιτέρω πυρηνικές συντήξεις είναι εκρηκτικές και καταστροφικές. Τα αστέρι αποκτάει πυρήνα (O)- (Ne)- (Mg), που συλλαμβάνει ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα το (Mg) να καταρρέψει. Έτσι οι σουπερνόβα Ia ονομάζονται και σουπερνόβα σύλληψης ηλεκτρονίων (electron- capture supernova). Η συνολική ενέργεια που εκρέει είναι 10 στη 51 erg και δημιουργείται περισσότερο από πυρηνική σύντηξη παρά από βαρυτική κατάρρευση. Αυτές οι σουπερνόβα έχουν καλά καθορισμένο φάσμα και λαμπρότητα (όλες περίπου την ίδια, - 19,2 mag) και χρησιμοποιούνται ως κεριά μέτρησης αποστάσεων (λόγω μεγάλης λαμπρότητας είναι πολύ χρήσιμες για την μέτρηση κοσμολογικών αποστάσεων).

Η αποκλιμάκωση της λαμπρότητας.

Το μεγαλύτερο μέρος της βαρυτικής ενέργειας που απελευθερώνεται σε μια σουπερνόβα διαφεύγει ως ακτινοβολία νετρίνων. Αυτά έχουν ελάχιστη αλληλεπίδραση με την μάζα και δεν ασκούν πίεση στο υλικό που καταρρέει. Στην σουπερνόβα του 1987 τα νετρίνα ανιχνεύτηκαν ώρες πριν γίνει ορατό το διαστελλόμενο νέφος της έκρηξης. Το φάσμα των Ia περιέχει ίχνη από βαρέα στοιχεία που συντέθηκαν κατά την διαταραχή του πυρήνα, ενώ στις τύπου II βλέπουμε μόνο υδρογόνο από το προ- έκρηξης εξωτερικό κέλυφος. Σε αυτές σχεδόν όλα τα βαρέα στοιχεία κατέρρευσαν στο αστέρι νετρονίων (πρώην αστρικός πυρήνας). Είδαμε πριν πόσο μοιάζουν οι καμπύλες φωτός των 2 κατηγοριών. Και στις δύο περιπτώσεις τα συμβάντα μέσα στον πυρήνα καθόρισαν την απελευθέρωση της ενέργειας. Μετά την κατάρρευση, η κύρια πηγή ενέργειας της έκρηξης είναι η καταρρέουσα ύλη που αναπηδά. Η αποσύνθεση της ακτινοβολίας που εκπέμπει αυτή η ύλη έχει απλή εξέλιξη, που εξαρτάται από την ραδιενεργό διάσπαση του νικελίου σε σίδηρο. Το ισότοπο (^{56}Ni) σχηματίζεται εύκολα, επειδή έχει ατομικό αριθμό Z ίσο με των νετρονίων N και διαιρείται με το 4. Έτσι μπορεί να συντεθεί κατευθείαν από την απορρόφηση πυρήνων (^4He), και είναι η μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης προς νουκλεόνιο για $Z=N$. Η διάσπασή του γίνεται ως εξής. (^{56}Ni)- 6,1 ημέρες- (^{56}Co)- 77 ημέρες- (^{56}Fe). Η ενέργεια δέσμευσης απελευθερώνεται κυρίως ως ακτίνες γ και με την μορφή νετρίνων, που μεταφέρουν ενέργεια στο κέλυφος. Αυτή είναι και η πηγή λαμπρότητας και των δύο τύπων. Βλέπουμε ότι η αποσύνθεση της λαμπρότητας ακολουθεί την σταθερά διάσπασης των 77 ημερών του (^{56}Co). Το μέγιστο της λαμπρότητας και η εκθετική αποκλιμάκωση όλων των Ia έχει μικρό εύρος επειδή ο πυρήνας που θα εκραγεί είναι μόλις λίγο μικρότερης μάζας από το όριο των 1,4 ηλιακών μαζών. Το μέγιστο της λαμπρότητας για τις τύπου II έχει μεγάλη διακύμανση. Οι τύπου Ib, Ic είναι πολύ λαμπρές.

Συχνότητα εμφάνισης των σουπερνόβα

Οι σουπερνόβα είναι τόσο σπάνιες ώστε η μέτρηση της συχνότητάς τους να απαιτεί την συνεχή παρατήρηση μεγάλου αριθμού γαλαξιών. Γίνονται πολλές τέτοιες

παρατηρήσεις σε γαλαξίες μεγάλης απόστασης, ειδικά για τύπου Ia, για κοσμολογικές μετρήσεις. Έτσι είναι πιο γνωστή η συχνότητά τους σε άλλους γαλαξίες παρά στον δικό μας. Ένα εντυπωσιακό δεδομένο είναι ότι η συχνότητα των 2 τύπων είναι συγκρίσιμη, και ως προέρχονται από διαφορετικά είδη αστεριών. Σε έναν τυπικό γαλαξία συμβαίνει μια σουπερνόβα κάθε 100 έτη. Ενώ η εκροή ενέργειας από τις τύπου II είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι των τύπου I, όπως μας δείχνει η κινητική ενέργεια ενός διαστελλόμενου υπολείμματος μιας τέτοιας έκρηξης, η οπτική εκπομπή δεν έχει τόση διαφορά, άρα οι πιθανότητες παρατήρησης είναι παρόμοιες. Η σχέση κινητικής ενέργειας με την εκπομπή στο ορατό φάσμα είναι 1000 φορές μικρότερη στις τύπου Ia από ότι στις τύπου II.

Στον Γαλαξία μας οι παρατηρήσεις απέχουν από το να είναι ολοκληρωμένες, και μερικές σουπερνόβα δεν ανιχνεύονται, λόγω απορρόφησης από τα νέφη σκόνης στο επίπεδο του γαλαξιακού δίσκου. Έτσι, ενώ παρατηρούμε μια έκρηξη κάθε 450 έτη (η τελευταία τεκμηριωμένη το 1604 από τον Κεπλερ), μάλλον συμβαίνει μια κάθε 50 έτη!

Τα ράδιο- υπολείμματα των σουπερνόβα μπορούν να ξεχωριστούν από άλλες παρόμοιες πηγές από το μέγεθος τους, το σχήμα τους και το φάσμα τους. Τώρα γνωρίζουμε 274 τέτοια υπολείμματα και εκτιμώντας την διάρκεια ζωής τους (50000 έτη), καταλήξαμε ότι πρέπει να γίνεται μια σουπερνόβα κάθε 45- 60 ετη. Τα υπολείμματα αυτά βρίσκονται κυρίως σε έναν δίσκο στον Γαλαξία μας με ακτίνα 8kpc από το κέντρο του, και οι πυκνότητά τους μειώνεται κατά 10 μεγέθη ως τα 12 kpc. Οι ηλικίες και η διασπορά των υπολειμμάτων συμφωνούν με προέλευση από σουπερνόβα τύπου II, που συνδέονται με νεαρά αστέρια πληθυσμού I. Το νεότερο υπόλειμμα είναι το G 1.9+0,3 κοντά στο κέντρο του Γαλαξία, με εκτιμώμενη ηλικία, μετά από 22 έτη παρατήρησης της διαστολής του, στα 140 έτη.

Μια άλλη μέθοδος μέτρησης συχνότητας σουπερνόβα τύπου II γίνεται από τηλεσκόπιο ακτίνων γ CGRO που μετράει την διάσπαση του (26Al) στον Γαλαξία μας. Αυτό το ισότοπο δημιουργείται στις σουπερνόβα τύπου II (με κατάρρευση του πυρήνα), και ο χρόνος ημιζωής του είναι 720000 έτη. Η πλήρης λαμπρότητα αυτής της γραμμής μας δίνει 1.9 ± 1.1 σουπερνόβα τύπου II κάθε αιώνα.

Τα υπολείμματα των σουπερνόβα .

Το αν ένα υπόλειμμα είναι ορατό εξαρτάται από 1) την ηλικία του, 2) τον τύπο της σουπερνόβα και 3) αν περιέχει ένα παλσαρ, που θα του δίνει ενέργεια (το κάνει να λάμπει). Η διαστολή των νεότερων υπολειμμάτων, όπως του CasA και του Καρκίνου, δεν έχει ακόμα επιβραδυνθεί από την μεσοαστρική ύλη. Έτσι οι ταχύτητες διαστολής μας δίνουν το πότε και τι είδους ήταν η έκρηξη. Το CasA είναι ένα κέλυφος με εκατοντάδες κόμπους με νήματα που έχουν ταχύτητες μέχρι 6000 km/s και η ακτίνα του είναι 1,6 pc. Αυτά τα νούμερα μας δείχνουν ότι πρέπει να δημιουργήθηκε το έτος 1658 $\pm$ 3 έτη. Αυτή η σουπερνόβα ίσως να παρατηρήθηκε το 1680, κάτι που σημαίνει ότι έχει επιβραδυνθεί η ταχύτητα διαστολής του υπολείμματος. Σε υπολείμματα σαν το Cygnus loop και το IC443 η διαστολή έχει σχεδόν σταματήσει, και το ορατό υπόλειμμα αποτελείται κυρίως από σαρωμένη μεσοαστρική ύλη. Τα πιο πολλά υπολείμματα μοιάζουν με κέλυφος, αλλά μερικά (Καρκίνου, PSR0540-69) είναι γεμάτα με ύλη που εκπέμπει σε όλα τα μήκη κύματος. Αυτά τα νέφη τα ονομάζουμε πληριόνια (plerions).

Τα νήματα του CasA περιέχουν οξυγόνο και άλλα βαρέα στοιχεία, που πρέπει να δημιουργήθηκαν στο αρχικό αστέρι. Σε αντίθεση τα οπτικά φάσματα από τα κελύφη των υπολειμμάτων Τύχω και Κεπλερ είναι καθαρές εκπομπές Balmer(υδρογόνου). Η εκπομπή

από αυτά τα κελύφη περιλαμβάνει σχετικιστική ακτινοβολία ραδιοκυμάτων και ακτίνες Χ που προέρχονται από την αλληλεπίδραση του διαστελλόμενου νέφους και τη μεσοαστρική ύλη.

Το νεαρό υπόλειμμα CasA ακόμα διαστέλλεται ελεύθερα χωρίς αντίσταση από την γύρω του μεσοαστρική ύλη. Η ταχύτητα διαστολής του είναι στα 10000 km/s. Όταν σαρωθεί 1- 5 φορές ποσότητα μεσοαστρικής ύλης όση η μάζα της εκροής, η διαστολή επιβραδύνεται. Αυτή η φάση λέγεται φάση Sedon και διαρκεί τυπικά 20000 έτη, και διακρίνεται στους ράδιο- χάρτες των υπολειμμάτων σουπερνόβα .

Ένα παλσαρ μπορεί να δώσει επιπλέον ενέργεια σε ένα υπόλειμμα μέσω ενός ανέμου σωματιδίων μεγάλης ενέργειας. Αυτό ισχύει για τα πληριόνια. Η αλληλεπίδραση του ανέμου με πιο ψυχρή ύλη από το νεφέλωμα φαίνεται σαν διακριτό νέφος ανέμου παλσαρ (PWN, pulsar wind nebula). Αυτά τα νέφη διακρίνονται καλύτερα από τις εκπομπές τους στις ακτίνες Χ.

Τα παλαιότερα παρατηρήσιμα υπολείμματα είναι μάλλον οι εκτεταμένες θηλείες (loops) ράδιο εκπομπής, όπως το North Galactic spur. Μπορεί να είναι συνδυασμός σχεδόν στατικών ορίων κρουστικών κυμάτων από μερικές σουπερνόβα σε μια ομάδα αστερών OB, δηλαδή μια περιοχή νεαρών μεγάλης μάζας άστρων. Το διαστελλόμενο κέλυφος αφήνει πίσω του μια τεράστια φούσκα που περιέχει καυτό αέριο χαμηλής πυκνότητας. Η διασπορά της λαμπρότητας στις ακτίνες Χ στον ουρανό μας δείχνει ότι ο ήλιος μας μπορεί να είναι μέσα σε μια τέτοια φούσκα, που ονομάζεται τοπική φούσκα (local bubble). Αν είναι έτσι, το τοπικό σουπερνόβα που δημιούργησε αυτή τη φούσκα μπορεί να άφησε ένα οριακά παρατηρήσιμο παλσαρ, όπως είναι το Geminga.

Το νεφέλωμα του Καρκίνου.

Είναι το καλύτερα μελετημένο υπόλειμμα. Η έκρηξη σουπερνόβα που το δημιούργησε έγινε το 1054 και ήταν ορατή ακόμη και την ημέρα για πολλές μέρες. Η διαφορά της ηλικίας που προκύπτει από αυτήν της μέτρησης της διαστολής (1140 ± 10) μας δείχνει ότι υπάρχει μικρή επιτάχυνση των εξωτερικών ταχυτήτων, ένα έντονο σημάδι ότι υπάρχει πηγή ενέργειας μέσα στο νέφος (πάλσαρ).

Κοντά στο κέντρο της διαστολής υπάρχουν 2 αστέρια $15^{\text{ου}}$ και $16^{\text{ου}}$ μεγέθους. Αφού πρέπει να υπάρχει μια πηγή ενέργειας που το κάνει να εκπέμπει συνεχόμενα φως, υποθέσαμε ότι το ένα από τα δύο αστέρια είναι η πηγή εκπομπής. Το ένα έχει ασυνήθιστο φάσμα, χωρίς γραμμές εκπομπής ή απορρόφησης, που σημαίνει ότι είναι άστρο με πολύ μεγάλη θερμοκρασία. Αρχικά δεν υπήρχε εξήγηση για το πολύ ασθενικό χρώμα που θα έπρεπε να συνδυάζεται με την ισχυρή εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας. Τώρα γνωρίζουμε ότι πρόκειται για το παλσαρ του Καρκίνου, και ότι δίνει ενέργεια στο νέφος όχι μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αλλά μέσω επιτάχυνσης (από το μαγνητικό του πεδίο) σωματιδίων μεγάλης ενέργειας. Ακόμα ξέρουμε ότι το φως του δεν προέρχεται από αέριο στην επιφάνειά του, αλλά από αυτά τα μεγάλης ενέργειας σωματίδια κοντά στο παλσαρ.

Το νεφέλωμα του Καρκίνου είναι μια έλλειψη μεγέθους 180X120 δευτερόλεπτα της μοίρας, και οι εξωτερικές του περιοχές έχουν νήματα που σχηματίζουν ένα πλέγμα που περιέχει την, πιο λαμπρή, εσωτερική περιοχή του. Αυτή είναι μια άμορφη προς το κέντρο συγκέντρωση μάζας που εκτείνεται σχεδόν σε όλη την μεγάλη διάμετρο και στα 2/3 της μικρής. Το φως αυτών των δύο συστατικών (των νημάτων και του εσωτερικού) είναι διαφορετικού χαρακτήρα. Σε έγχρωμες φωτογραφίες τα νήματα φαίνονται κόκκινα, ενώ το

κέντρο μπλε- άσπρο. Το κόκκινο φως των νημάτων οφείλεται στην φασματική εκπομπή, κυρίως (H α), αλλά περιέχει και άλλες γραμμές βαρύτερων ατόμων, όπως ήλιον, άζωτο, οξυγόνο, θείο και νέον. Η σχετική αφθονία των στοιχείων είναι κοντά στην συνήθη αστρική σύνθεση, εκτός της μεγάλης αφθονίας του στοιχείου ήλιον. Ο ιονισμός γίνεται μέσω της υπεριώδης ακτινοβολίας του νεφελώματος.

Η γραμμική εκπομπή από το κέντρο προέρχεται από νήματα που βρίσκονται μπροστά και πίσω, που αποτελούν τα μέρη που πλησιάζουν και απομακρύνονται από τον παρατηρητή με τις μεγαλύτερες ταχύτητες (1000 km/s). Συνδυάζοντας αυτήν την τιμή της διαστολής στην γραμμή θέασης με την μετρημένη γωνιακή διαστολή και αν υποθέσουμε ότι η διαστολή έχει απλό ελλειπτικό σχήμα, μπορούμε να εκτιμήσουμε την απόσταση σε 1,5 με 2,5 kpc.

Το άσπρο φως από την άμορφη κεντρική περιοχή δεν έχει φασματικές γραμμές. Αν και εμφανίζεται συνήθως άμορφο, έχουμε δει το κέντρο να συγκεντρώνεται σε λεπτά νήματα, σαν βαμβάκι. Αυτό έχει οργανωμένη διεύθυνση, που συσχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο μέσα στο νεφέλωμα. Το συνεχές φάσμα και η μεγάλη λαμπρότητά του δεν συνδέονται με θερμική ακτινοβολία.

Το συνεχές φάσμα της ακτινοβολίας του νεφελώματος του Καρκίνου.

Η ένταση της συνεχούς λαμπρής ακτινοβολίας δεν μπορεί να οφείλεται σε θερμική ακτινοβολία ιονισμένου αερίου. Η εξήγηση για αυτήν είναι ότι μεγάλης ενέργειας ηλεκτρόνια κινούνται σε μαγνητικό πεδίο και ακολουθάνε καμπύλες διαδρομές. Αυτή η κίνηση επιταχύνει τα σωματίδια και τα κάνει να ακτινοβολούν. Αναλύσεις της απώλειας ενέργειας της σχετικιστικής δέσμης ενός ηλεκτρονίου έδειξαν ότι το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό, και γενικά ονομάζεται σχετικιστική (synchrotron) ακτινοβολία. Είναι γνωστή και ως ακτινοβολία μαγνητικής επιβράδυνσης (magnetobremsstrahlung, γερμανικά.) Αυτός είναι ο μόνος γνωστός μηχανισμός με τον οποίο μπορεί ένα πολύ καυτό αέριο (πλάσμα) να ακτινοβολεί με ένταση και σε μεγάλο εύρος του φάσματος. Ακόμα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία σε οποιοδήποτε μήκος κύματος μπορεί να είναι τουλάχιστον μερικώς γραμμικά πολωμένη. Το συνολικό φως από όλο το νέφος είναι κατά 9% πολωμένο, ενώ κατά τόπους φτάνει το 60%. Η λευκή ακτινοβολία του νέφους είναι σχετικιστική. Το μαγνητικό πεδίο στο νεφέλωμα έχει ισχύ 10 στη-3 Gauss, και οι ενέργειες των ηλεκτρονίων πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 στη11 eV. Ο μηχανισμός της ακτινοβολίας μας έγινε πλέον γνωστός. Οι παρατηρήσεις του νέφους στα ραδιοκύματα εκτείνονται σήμερα από τα 30 μέτρα μέχρι τα 3 χιλιοστά. Οι οπτικές παρατηρήσεις έχουν επεκταθεί και στο υπέρυθρο, από τα 500 nm μέχρι τα 5000 nm. Στις ακτίνες X και γ καλύπτουμε με τα διαστημικά τηλεσκόπια την περιοχή από τα 0,5 keV ως τα 500 keV (3nm- 3pm) και με συμβολομετρία δευτερευόντων σωματιδίων μετράμε μέχρι τα 100 TeV. Έτσι καλύπτουμε ένα εύρος μήκος κύματος από 10 στη7 Hz ως 10 στη28 Hz.

Η τροφοδοσία ενέργειας.

Η ενέργεια των ταχέων σωματιδίων μέσα σε αυτό είναι 10 στη49 erg, το ένα χιλιοστό από την συνολική ενέργεια που θα απελευθέρωνε η καύση μιας ηλιακής μάζας υδρογόνου σε ήλιον, που είναι και η μέγιστη πυρηνική ενέργεια που αναμένουμε από μια σουπερνόβα. Θα ήταν εντυπωσιακό η ενέργεια της έκρηξης να είναι τόσο καλά συγκεντρωμένη σε σωματίδια υψηλής ενέργειας. Αυτά θα ακτινοβολούσαν τόσο αποτελεσματικά, ώστε το νέφος θα έσβηνε μετά από 100 έτη (ισχυρή και σύντομης διάρκειας ακτινοβολία). Στις

ακτίνες Χ αυτό το διάστημα θα ήταν μόλις ένα έτος! Και η διατήρηση του μαγνητικού πεδίου αποτελεί θεωρητικό πρόβλημα, αφού αυτό έχει την ίδια τάξη μεγέθους ενέργεια με τα σωματίδια. Δεν μπορεί να προέρχεται από την σουπερνόβα, αλλά πρέπει να τροφοδοτείται από κάποιον άλλο μηχανισμό.

PWS (Νέφος ανέμου παλσαρ).

Στις ακτίνες Χ και στο οπτικό έχουμε παρατηρήσει έναν πίδακα σωματιδίων μεγάλης ενέργειας να διαφεύγει από το παλσαρ του Καρκίνου και να τερματίζει σε έναν κύλινδρο καυτού αερίου. Οι ακτίνες Χ είναι βραχύχρονες και δείχνουν ότι το νέφος παίρνει ενέργεια μέσω της συνεχής ροής από το παλσαρ. Ανάλογη παρατήρηση έχουμε και στο Vela, επίσης με ευθυγράμμιση προς την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής. Είμαστε βέβαιοι ότι το παλσαρ τροφοδοτεί το νέφος με ενέργεια για την διατήρηση του μαγνητικού πεδίου, την σωματιδιακή ενέργεια (που το κάνει να ακτινοβολεί) και την επιτάχυνση της διαστολής του. Η ενέργεια που χρειάζεται για τα παραπάνω είναι 10 στη 38 ergs/s που είναι σύμφωνη με τον ρυθμό απώλειας της ενέργειας περιστροφής του παλσαρ.

Και σε άλλα νέφη ανέμου παλσαρ έχουμε παρατηρήσει τέτοιους κυλίνδρους, ιδίως στις ακτίνες Χ, αλλά και στο ορατό και στα ραδιοκύματα. Το PSRJ1856+0245, ένα νέο παλσαρ (81 ms περιστροφή, σαν το Vela) είναι μια πηγή ακτίνων γ Hess (δευτερεύουσα ακτινοβολία). Βρέθηκε άμεση σχέση ανάμεσα στην ακτίνα του κυλίνδρου και την ενέργεια επιβράδυνσης της περιστροφής του παλσαρ. Σε μερικά υπολείμματα με νέφη ανέμου τα παλσαρ είναι πολύ αμυδρά ώστε να τα παρατηρήσουμε. Ένα τέτοιο είναι το SNRG292.0+1,8 που αρχικά φαινόταν σαν ραδιοπηγή και αργότερα στις ακτίνες Χ, αλλά χωρίς να δούμε το παλσαρ, παρά μόνο τελικά ως αμυδρή ραδιοπηγή (PSRJ1124-5916), ένα νεαρό παλσαρ στο κέντρο του νέφους.

Σχέσεις μεταξύ παλσαρ και σουπερνόβα.

- 1) Οι σουπερνόβα από καταρρεύσεις πυρήνων (τύπου II) δημιουργούν αστέρες νετρονίων.
- 2) Οι περισσότερες (ίσως όλες) σουπερνόβα συσσώρευσης, στις οποίες περιλαμβάνονται και οι τύπου Ia, δεν δημιουργούν αστέρες νετρονίων.
- 3) Οι περισσότεροι (ή όλοι) οι αστέρες νετρονίων δημιουργούνται σε σουπερνόβα τύπου II.

Οι εξαιρέσεις στο 2 και στο 3 αναφέρουν την πιθανότητα της κατάρρευσης μετά από συσσώρευση (AIC, accretion induced collapse) σε έναν λ. νάνο με συσσώρευση σε ένα διπλό σύστημα, που πιθανότερα δημιουργεί έναν αστέρα νετρονίων, παρά να διαλυθεί μέσω θερμοπυρηνικής έκρηξης. Οι AIC έχουν λίγες πιθανότητες να συμβούν, μόνο στους λ. νάνους με πυρήνα (O)/(Ne).

Έχοντας στον νου ότι μόνο ένα στα εκατό παλσαρ που γνωρίζουμε συνδέεται με υπόλειμμα σουπερνόβα, το τρίτο συμπέρασμα δεν αποδεικνύεται εύκολα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι προφανής, ο χρόνος ζωής ενός υπολείμματος είναι μόλις το ένα εκατοστό από αυτόν του παλσαρ. Τα δυο πρώτα συμπεράσματα απαιτούν λεπτομερή έρευνα για παλσαρ μέσα ή κοντά στα 300 γνωστά μας υπολείμματα. Αυτός θα είναι και ένας βασικός στόχος των τηλεσκοπίων συμβολομετρίας SKA.

Είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε τα υπολείμματα των δύο τύπων σουπερνόβα. Ένα νέφος ανέμου παλσαρ που γεμίζει το υπόλειμμα και αποδεικνύει την παρουσία παλσαρ θεωρείται σύνθετο υπόλειμμα (composite remnant).

Ένας ακόμα παράγοντας σε αυτήν την υπόθεση είναι η ηλικία του παλσαρ. Η μεγάλη διάρκεια της ζωής τους σε σχέση με τα υπολείμματα μειώνουν την πιθανότητα σύνδεσής τους με αυτά. Αν όμως ένα υπόλειμμα σταματήσει να διαστέλλεται, αφού συγκρουστεί με αρκετή μεσοαστρική ύλη, ώστε να μειώσει την ταχύτητα διαστολής του από 10000 km/s σε 10 km/s, τότε η μεγάλη ίδια ταχύτητα του παλσαρ θα το θέσει εκτός υπολείμματος. Οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν κάτι τέτοιο, αφού το παλσαρ στο 1000 ετών νέφος του Καρκίνου είναι κοντά στο κέντρο του, ενώ στο 10000 ετών Vela η σύνδεση του παλσαρ με το νέφος δεν είναι τόσο σαφής, λόγω θέσης του παλσαρ.

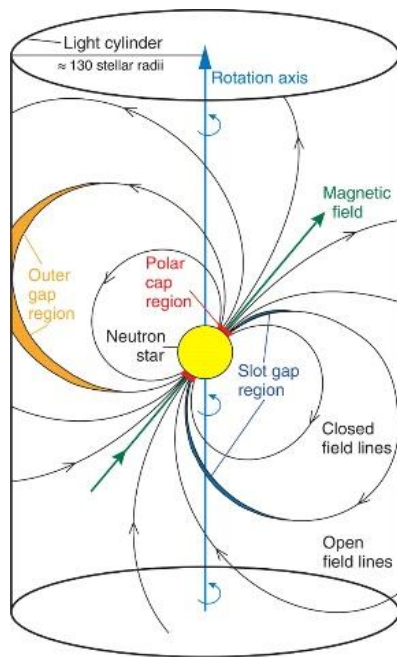
Επιπλέον, το Chandra στις ακτίνες X ανακάλυψε θερμική ακτινοβολία από έναν αστέρα νετρονίων στο κέντρο του CasA, το νεαρότερο γνωστό Γαλαξιακό υπόλειμμα. Οι μεταβολές στο φάσμα στα 9 έτη παρατήρησης δείχνουν ότι η επιφανειακή του θερμοκρασία μειώνεται ραγδαία, από 2,12 εκ βαθμούς σε 2,04 εκ. βαθμούς, κάτι που σημαίνει αλλαγές στην κατάσταση στο εσωτερικό του.

Γενικά, η εκτίμηση ότι ένα υπόλειμμα σουπερνόβα περιέχει ένα παρατηρήσιμο παλσαρ και ένα νέφος του αερίου του δεν είναι υπερβολική. Τα υπόλοιπα παλσαρ μπορεί να έχουν ραδιοπαλμούς όπως το Geminga, που δεν μας σαρώνουν, ή μερικά υπολείμματα να συνδέονται με μαύρες τρύπες και όχι με αστέρες νετρονίων.

Οι περιοχές της εκπομπής στα παλσαρ.

Εκτός της θερμικής εκπομπής της επιφάνειας (στις ακτίνες X), η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προέρχεται και από δύο διακριτές περιοχές της μαγνητόσφαιρας. Το πολικό κάλυμμα (cap) και το εξωτερικό χάσμα (gap). Αυτές οι δύο περιοχές καθορίζονται από την γεωμετρία μεγάλης κλίμακας της μαγνητόσφαιρας. Έξω από αυτές τις δύο περιοχές, το μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από το περιστρεφόμενο μαγνητικό δίπολο προστατεύεται από το φορτισμένο περιβάλλον πλάσμα. Το εξωτερικό χάσμα είναι μια επιφάνεια προσκείμενη στις ανοιχτές γραμμές του μαγνητικού πεδίου και εκτείνεται μπροστά και πίσω από τον κύλινδρο της ταχύτητας του φωτός. Τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια που επιταχύνονται μέσα σε αυτό το χάσμα δημιουργούν ακτινοβολία γ στις μεγαλύτερες παρατηρήσιμες ενέργειες. Ο μηχανισμός της συναφής ραδιοεκπομπής δεν είναι κατανοητός, αλλά η τοποθεσία παραγωγής της μπορεί να βρεθεί από τα πλούσια και μερικές φορές ολοκληρωμένα σύνθετα προφίλ των παλμών. Η εκπομπή ραδιοκυμάτων ενός σύνηθες παλσαρ προέρχεται κυρίως από το πολικό κάλυμμα, ενώ στα νεαρά παλσαρ προέρχεται και από το εξωτερικό χάσμα.

Η σχετικιστική εκτροπή έχει μεγάλη επίδραση στην ακτινοβολία του εξωτερικού χάσματος, που εμφανίζεται σε ακτίνα που πλησιάζει τον κύλινδρο της ταχύτητας του φωτός, και σχεδόν δεν έχει επίδραση στο πολικό κάλυμμα, που βρίσκεται κοντά στο παλσαρ.



Η ακτινοβολία του εξωτερικού χάσματος.

Τα ολοκληρωμένα προφίλ παλμών από την υψηλής ενέργειας ακτινοβολία του εξωτερικού χάσματος αποτελούν έναν σύνθετο συνδυασμό της διασποράς των σωματιδίων που εκπέμπουν μέσα από το χάσμα και της γεωμετρικής σχέσης του άξονα περιστροφής, του δίπολου άξονα και της διεύθυνσης προς τον παρατηρητή. Η ακτινοβολία εκπέμπεται από σωματίδια που ρέουν κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών, με πλάτος δέσμης μόνο μερικές μοίρες ή λιγότερο. Έτσι το πλήρες γεωμετρικό μοντέλο, με μια δεδομένη διασπορά των σωματιδίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο που υπολογίζει τα προφίλ των παλμών προς σύγκριση με τα παρατηρησιακά δεδομένα. Το εξωτερικό χάσμα σχηματίζει πλατιά επίπεδα. Έτσι είναι εύκολο να συγκροτήσουμε μοντέλα που τέμνουν δύο επίπεδα σε κάθε περιστροφή, δίνοντας τον συνήθως διπλό παλμό που παρατηρούμε, όπως για παράδειγμα στο παλсар του Καρκίνου. Τα προφίλ στις ακτίνες γ των Crab, Vela και Geminga παλсар, με χώρισμα διπλής κορυφής στις 0.4, 0.45, 0.5 περιόδους αντίστοιχα, είναι σύμφωνα με αυτή την γεωμετρία για παλсар με μεγάλες γωνίες κλίσης.

Η παρατηρήσιμη πολικότητα του προφίλ οπτικού παλμού του παλсар του Καρκίνου υποστηρίζει αυτό το μοντέλο. Η συσσώρευση των εκτεταμένων ανεξάρτητων πηγών μέσα σε έναν στενό παλμό μειώνει τον βαθμό πολικότητας, δίνοντας ένα ελάχιστο, με γρήγορα μεταβαλλόμενη γωνία πολικότητας κατά την κορυφή του παλμού.

Οι λεπτομέρειες της σύμπτωσης μεταξύ μοντέλου και παρατήρησης εξαρτώνται από την γωνιακή διασπορά της εκπομπής κατά μήκος του χάσματος. Η εκπομπή μπορεί να ξεκινάει χαμηλά στην άκρη του χάσματος, αλλά καλύτερη σύμπτωση έχουμε με εκπομπή στις εξωτερικές περιοχές του χάσματος. Το φάσμα των εκπομπών γ και οι αλλαγές στο σχήμα των παλμών από το οπτικό ως τις ακτίνες γ εξαρτώνται από την ενέργεια του φάσματος των ακτίνων γ που έχουν διασπαρθεί στο εξωτερικό χάσμα.

Η μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των προφίλ των ραδιοακτίνων και των ακτίνων μεγάλης ενέργειας σε κάποια νεαρά παλсар δεν πρέπει να εκλαμβάνεται σαν απόδειξη ότι οι

μηχανισμοί των 2 ακτινοβολιών είναι παρόμοιοι. Επίσης αμφισβητείται η ακριβής σύμπτωση των περιοχών εκπομπής των δύο ακτινοβολιών.

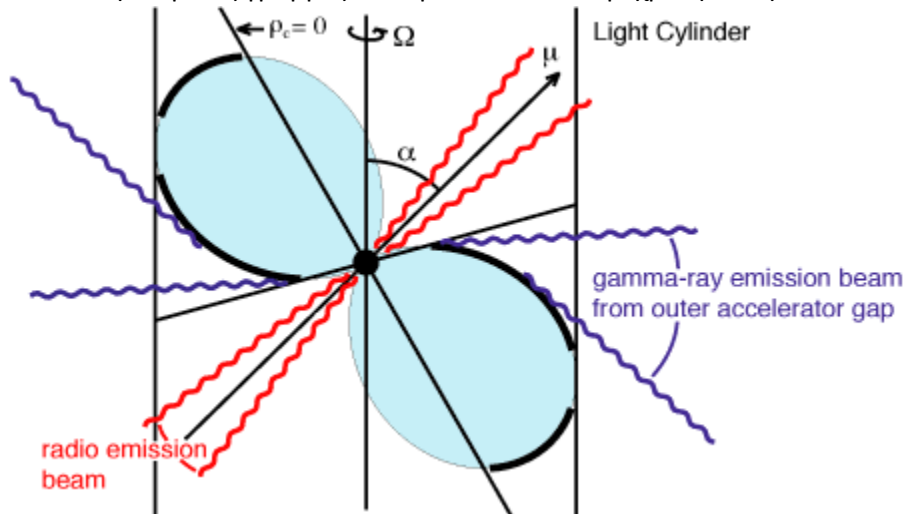
Πηγές ραδιοεκπομπής.

Μέχρι σήμερα δεν έχουμε πλήρη και ικανοποιητική εξήγηση της ραδιοεκπομπής των παλσαρ. Δεν πρέπει να περιμένουμε να ακολουθεί η ακτινοβολία ραδιοκυμάτων τα ίδια βήματα με την ακτινοβολία υψηλής ενέργειας σαν να είναι μόνο παρατηρήσιμη αν είναι συναφής ή αν συνδέεται με κάποιον τρόπο. Η ραδιοεκπομπή πρέπει να εξαρτάται από τοπικές συνθήκες και πρέπει να προέρχεται από μικρές περιοχές, παρά από πολύ διάσπαρτες πηγές. Φαίνεται να έχουμε διαφορετική προέλευση της ραδιοεκπομπής στα παλαιά παλσαρ, που χαρακτηρίζουμε ως κανονικά, και από την άλλη να συνδέεται κάπως με την εκπομπή υψηλής ενέργειας στα νεαρά όπως αυτό του Καρκίνου. Ακόμα, δεν είναι ξεκάθαρο αν οι γιγάντιοι παλμοί πρέπει να κατατάσσονται ως μέρη μιας από τις δύο κατηγορίες, αν και μάλλον έχουν στενή σχέση.

Εκπομπή από το πολικό κάλυμμα (polar cap emission).

Η ραδιοπηγή στο πολικό κάλυμμα δημιουργείται σε ένα ρεύμα σωματιδίων μεγάλης ενέργειας, που είναι το αποτέλεσμα από έναν <καταρράκτη> δημιουργίας ζευγών, σε μια καλά καθορισμένη περιοχή του καλύμματος του πόλου, και πάνω από τον μαγνητικό πόλο. Η άκρη του καλύμματος είναι ο τόπος που ξεκινούν οι μαγνητικές γραμμές (που φτάνουν να είναι εφαπτόμενες στον κύλινδρο ταχύτητας του φωτός). Ο κύλινδρος αυτός που περιλαμβάνει την συν- περιστρεφόμενη μαγνητόσφαιρα έχει ακτίνα 50000 km για ένα αργό παλσαρ με περιστροφή 1s, και 80 km για μιλλισεκοντ παλσαρ με 1,6 ms περιστροφή. Στα όρια του κυλίνδρου επικρατούν ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός. Η γρήγορη περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα τα εγκλωβισμένα στις περιστρεφόμενες μαγνητικές γραμμές σωματίδια να πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός μόλις λίγο έξω από το παλσαρ. Οι εφαπτόμενες στον κύλινδρο μαγνητικές γραμμές καθορίζουν μια περιοχή κλειστών γραμμών. Έξω από αυτές, οι γραμμές του πεδίου εμβολίζουν τον κύλινδρο. Μέσα στις κλειστές γραμμές η μαγνητόσφαιρα είναι στατική. Η περιοχή των ανοιχτών γραμμών είναι δυναμική και επιτρέπει στα φορτία να εκρέουν από την μαγνητόσφαιρα. Το εξωτερικό κάλυμμα, ο τόπος της ακτινοβολίας μεγάλης ενέργειας, βρίσκεται ανάμεσα στις ανοιχτές και στις κλειστές γραμμές. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα απλό δίπολο πεδίο όπως σε έναν ευθυγραμμισμένο περιστροφέα, μπορούμε να βρούμε την γωνιακή ακτίνα του πολικού καλύμματος αν

ακολουθήσουμε τις γραμμές στα όρια του πεδίου μέχρι την επιφάνεια του παλσαρ.



Για τα πιο πολλά παλσαρ υπάρχει και μια καλά καθορισμένη εξάρτηση του συνολικού πλάτους του προφίλ των παλμών με στην ραδιοσυχνότητα. Γενικά το πλάτος αυξάνεται όσο μειώνεται η συχνότητα. Αυτό γενικά εκλαμβάνεται ως σχέση μεταξύ της ακτίνας (ύψος που γίνεται η εκπομπή) και της συχνότητας, και λέγεται RFM (radius to frequency mapping). Μας δείχνει ότι το ύψος της περιοχής εκπομπής σχετίζεται με την τοπική πυκνότητα του πλάσματος, όμως με την παραδοχή ότι το πλάτος της δέσμης που παρατηρούμε καθορίζεται μόνο από την διασπορά των γραμμών του πεδίου στο ύψος της εκπομπής, αγνοώντας κάθε έμφυτο πλάτος της δέσμης από την πηγή εκπομπής. Ακόμα, η ακτίνα μπορεί να μην εφαρμόζει αυστηρά στο σημείο εκπομπής, αλλά σε ένα σημείο απόσπασης του κύματος από τις μαγνητικές γραμμές. Είναι δύσκολο να εφαρμόσουμε τα παραπάνω για μήκη κύματος κάτω από 0,4 GHz, λόγω μεγάλης μεσοαστρικής σκέδασης στις χαμηλές συχνότητες, και σε μεγάλες συχνότητες βλέπουμε ότι το πλάτος της δέσμης γίνεται ανεξάρτητο από την συχνότητα. Για κανονικά, μεγάλης περιόδου παλσαρ, το ελάχιστο ύψος εκπομπής ραδιοκυμάτων είναι 150-200 km.

Συστατικά του πυρήνα και του κώνου.

Η παραπάνω ανάλυση εφαρμόζεται μόνο σε έναν μικρό αριθμό παλσαρ στα οποία ξεχωρίζουν καθαρά οι εξωτερικές αυτές περιοχές και που έχουν μελετηθεί σε πολλές συχνότητες. Οι εσωτερικές περιοχές και ο κώνος δεν συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, και πιστεύουμε ότι τα συστατικά μέρη του πυρήνα και της εξωτερικής περιοχής του κώνου βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη. Το χώρισμα ανάμεσα σε ζεύγη της εσωτερικής περιοχής δεν αλλάζει για μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτές οι παρατηρήσεις μας προτείνουν ότι η RFM ισχύει μόνο στις εξωτερικές περιοχές. Αν υποθέσουμε ότι η εκπομπή υψηλής συχνότητας είναι συγκεντρωμένη σε ένα απλά καθορισμένο ύψος πάνω από το πολικό κάλυμμα, τότε στο κέντρο του καλύμματος όλο το ράδιο- φάσμα εκπέμπεται κοντά ή σε αυτό το ύψος, ενώ στην περιφέρεια του καλύμματος η εκπομπή χαμηλής συχνότητας γίνεται σε ύψη που εκτείνονται στο διπλάσιο από το ελάχιστο ύψος. Μια άλλη πιθανότητα είναι η επέκταση στις χαμηλές συχνότητες να έχει να κάνει με την πλάτυνση του αρχικού διαγράμματος πολικής εκπομπής. Ή να πρόκειται για διάδοση σε αποκλίνουσες γραμμές του πεδίου. Και στις

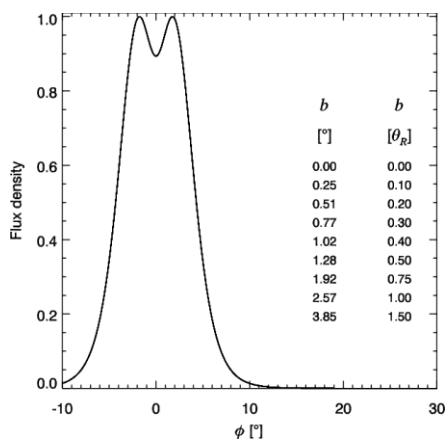
δύο περιπτώσεις είναι πιθανό όλη η ραδιοεκπομπή να προέρχεται από ένα μικρό εύρος του ύψους.

Μιλισέκοντ παλσαρ.

Η απλή σχέση μεταξύ γωνιακού πλάτους δέσμης και περιόδου δεν επεκτείνεται στα μιλισέκοντ. Έτσι φαίνεται η ακτίνα της ενεργής περιοχής του πολικού καλύμματος σε αυτά να είναι κατά 10 φορές μικρότερη από ότι στα κανονικά παλσαρ. Αφού δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε την RFM, παραμένει άγνωστο το ύψος της εκπομπής. Μπορούμε να πούμε μόνο με βεβαιότητα ότι είναι μικρότερο από το ύψος της ακτίνας του κυλίνδρου ταχύτητας του φωτός, που είναι περίπου 200 km.

Υπάρχει μια πολύ μικρή εξέλιξη στο φάσμα του προφίλ του πλάτος των παλμών των μιλισέκοντ. Η ίδια συμπεριφορά έχει επισημανθεί στις εσωτερικές περιοχές σε παλσαρ μεγαλύτερης περιόδου, και υποστηρίζει την άποψη ότι στα μιλισέκοντ μόνο οι κεντρικές περιοχές του πολικού καλύμματος παράγουν παρατηρήσιμη ραδιο-εκπομπή.

Αρχικό πλάτος δέσμης εκπομπής.



Υπάρχουν σπάνιες αλλά πολύ σημαντικές εγκοπές (notches) στα ολοκληρωμένα προφίλ των δεσμών. Αν αυτές εκλαμβάνονται σωστά ως βασικά χαρακτηριστικά του αρχικού διαγράμματος της πολικής εκπομπής, πιθανά από περιορισμένες πηγές ακτινοβολίας καμπύλωσης (σελ.22), τότε το πλάτος της δέσμης εκπομπής είναι συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο από την επέκταση των μαγνητικών γραμμών. Τότε το πλάτος δεν εξαρτάται από την συχνότητα, που σημαίνει ότι καταρρέει όλη η θεωρία RFM. Η εγκοπή εμφανίζεται σε μια από τις δύο τιμές πολικότητας στην ακτινοβολία καμπύλωσης, και το γωνιακό πλάτος της δέσμης εκπομπής μπορεί να εξαλειφθεί από το πλάτος μιας εγκοπής. Τότε όλη η εξάρτηση του προφίλ του πλάτους από την συχνότητα μπορεί να περιγραφεί ως πηγή ευρείας ζώνης σε ένα μοναδικό ύψος. Το ελάχιστο πλάτος σε υψηλές ραδιοσυχνότητες έχει να κάνει με την πλευρική επέκταση της πηγής κατά τις γραμμές στο πολικό κάλυμμα, ενώ η επέκταση στις χαμηλές συχνότητες με την αύξηση του πλάτους των δεσμών που εκπέμπονται.

Εκτροπή, καθυστέρηση και ουρά μαγνητικού πεδίου (magnetic fields weep- back).

Οι μεταβλητές πηγές ακτινοβολίας στην μαγνητόσφαιρα μπορεί να βρίσκονται σε αποστάσεις που αποτελούν λογικά κλάσματα της ακτίνας του κυλίνδρου ταχύτητας του φωτός. Ο χρόνος διάδοσης και η σχετικιστική εκτροπή πρέπει να συνυπολογίζονται, ιδίως για τις εκπομπές ακτίνων γ και γενικά τις εκπομπές υψηλής ενέργειας στα νεαρά παλσαρ. Σε αυτές μπορεί να υπάρχει βαθιά επίδραση της σχέσης ανάμεσα στους παλμούς που παρατηρούμε και της γεωμετρίας της πηγής εκπομπής. Μπορεί να υπάρχει μια μικρότερη αλλά σημαντική επίδραση και στις πηγές ραδιοπομπών στο πολικό κάλυμμα. Η καθυστέρηση κινεί την ακτινοβολία προς την κατεύθυνση της περιστροφής, δίνοντας παλμό πιο νωρίς από ότι μπορεί να αντιστοιχεί άμεσα στο γεωγραφικό πλάτος της πηγής. Ο χρόνος διάδοσης εξαρτάται από την απόσταση των πηγών, που είναι διάσπαρτες στην ακτίνα του καλύμματος. Αυτή η καθυστέρηση σημαίνει ότι μια ακτινοβολία δεδομένου χρόνου λαμβάνεται από πηγές στο εύρος της φάσης περιστροφής. Μια ακόμη επίδραση είναι αυτή της περιστροφής στο μαγνητικό διπολικό πεδίο, που διαταράσσει και δημιουργεί ουρές της τάξης της μιας ακτίνας σε γεωγραφικό μήκος στον κύλινδρο ταχύτητας του φωτός. Αυτές οι 3 επιδράσεις στους χρόνους άφιξης των παλμών των κανονικών ραδιοπαλσαρ είναι γνωστές από το 1992.

Η ραδιοεκπομπή από το εξωτερικό χάσμα.

Ο μηχανισμός ακτινοβολίας που δημιουργεί το σχεδόν πανομοιότυπο πρότυπο δέσμης του παλσαρ του Καρκίνου σε φάσμα μεγάλων ενεργειών (και που παρατηρούμε για περισσότερο από 20 έτη), πρέπει να καθοριστεί με ουσιαστικό απλό γεωμετρικό περιορισμό. Η περιοχή ακτινοβολίας σχετίζεται με το χάσμα της εξωτερικής μαγνητόσφαιρας, η τοποθεσία του οποίου καθορίζεται από τα πρότυπα των μαγνητικών γραμμών αμέσως έξω από την περιοχή των κλειστών γραμμών.

Η ακτινοβολία από σχεδόν όλο το μήκος του εξωτερικού χάσματος φτάνει σε εμάς σχεδόν συγχρόνως. Έτσι η ακτινοβολία από τους δύο πόλους ενός σχεδόν ορθογώνιου περιστροφέα ταιριάζει καλά στον διπλό παλμό των Crab, Vela και άλλων νεαρών παλσαρ. Η εκπομπή από το πολικό κάλυμμα, που ονομάζουμε κανονική ραδιοεκπομπή των παλσαρ, παρατηρείται πριν την κύρια κορυφή εκπομπής του εξωτερικού χάσματος. Τα παραπάνω εφαρμόζονται ικανοποιητικά για πρόδρομα συστατικά στα προφίλ χαμηλής συχνότητας του Crab.

Οι ραδιοπαλμοί που συμπίπτουν με τους στενούς παλμούς μεγάλης ενέργειας προφανώς προέρχονται από κάπου κατά μήκος του εξωτερικού χάσματος. Αν, όπως υποψιαζόμαστε, μια δεδομένη ραδιοσυχνότητα προέρχεται από μια μικρή περιοχή που καθορίζεται από κάποια συντονισμένη τοπική συνθήκη, το φάσμα των ραδιοεκπομπών μπορεί να ανταποκρίνεται σε μια ακτινική διασπορά στο εξωτερικό χάσμα. Αυτή η ακτινική διασπορά, πλατιά ή στενά καθορισμένη, μας είναι άγνωστη.

Σε αντίθεση με τα συστατικά της ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας, η ραδιοεκπομπή του εξωτερικού χάσματος είναι συναφής και προφανώς δημιουργείται σε διαφορετική κατάσταση των σωματιδίων. Για τα πρότυπα ακτινοβολίας που έχουμε φαίνεται ότι οι πηγές ραδιοεκπομπής του Crab παλσαρ περιορίζονται στην άκρη του εξωτερικού χάσματος, μακριά από την ισημερινή περιοχή. Κάτι παρόμοιο παρατηρούμε και στο Vela.

Η περιοχή της ραδιοπηγής στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα, στην άκρη του εξωτερικού χάσματος, είναι σημαντική για την ανάλυση του μηχανισμού ραδιοεκπομπής. Φαίνεται

ότι οι γιγάντιοι παλμοί στο Crab και σε άλλα παλσαρ μπορεί να προέρχονται επίσης από το εξωτερικό χάσμα και όχι από τα πολικά καλύμματα. Βρέθηκε ότι μερικά άλλα συστατικά ραδιοεκπομπής εμφανίζονται σε υψηλές ραδιοσυχνότητες του Crab. Και αυτές μπορεί να έχουν σχέση με πηγές στο εξωτερικό κάλυμμα, αφού η γεωμετρία των δύο χασμάτων (και από τους 2 μαγνητικούς πόλους) μας επιτρέπει να παρατηρήσουμε την ακτινοβολία σε μεγάλο εύρος του πλάτος των παλμών.

Διαδικασίες ακτινοβολίας.

Τα παλσαρ έχουν σύνθετη ακτινοβολία λόγω των 3 διαφορετικών ειδών της.

Η πιο πολύπλοκη είναι η θερμική ακτινοβολία από την επιφάνεια του παλσαρ, που κυρίως παρατηρείται στις ακτίνες Χ. Μετά έχουμε την μη συναφή ακτινοβολία καμπύλωσης από υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια στο εξωτερικό χάσμα και τέλος, την συναφή εκπομπή ραδιοκυμάτων από ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια και στο εξωτερικό χάσμα, αλλά και στο πολικό κάλυμμα. Υπάρχει εμφανής διαφορά στην διαδικασία δημιουργίας υψηλής ενέργειας ακτινοβολίας με αυτή της ακτινοβολίας χαμηλής ενέργειας. Η ράδιο- ακτινοβολία πρέπει να είναι συναφής με την δημιουργία των πολύ υψηλών θερμοκρασιών- λαμπρότητας που παρατηρούμε στα πάλσαρ.

Ακτινοβολία κύκλοτρων (Cyclotron).

Είναι η ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σωματίδιο το οποίο κινείται με μη σχετικιστική ταχύτητα σε μια κυκλική τροχιά, σε ένα μαγνητικό πεδίο. Η πολικότητα της ακτινοβολίας κατανοείται από την περιγραφή της επιτάχυνσης, όπως φαίνεται από τον παρατηρητή. Στην απλούστερη εκδοχή με τον παρατηρητή να είναι στο επίπεδο της περιστροφής, χωρίς μετάδοση κίνησης, η πολικότητα είναι γραμμική. Ένας παρατηρητής πάνω από το επίπεδο θα διακρίνει την κυκλική τροχιά, που εκπέμπει ελλειπτική ακτινοβολία, η οποία ελαττώνεται σε μηδέν στις άκρες της δέσμης, όπου η πολικότητα τείνει να είναι τελείως κυκλική. Μια εγκάρσια τομή διαμέσου του κώνου ακτινοβολίας από ένα ηλεκτρόνιο που κινείται με μεγάλο ποσοστό της ταχύτητας του φωτός κατά μήκος των γραμμών του πεδίου, μας δείχνει παρόμοια χαρακτηριστικά πολικότητας.

Σχετικιστική ακτινοβολία.

Όταν έχουμε σχετικιστικές ταχύτητες σε ένα σωματίδιο, τότε αυτό εκπέμπει την σχετικιστική ακτινοβολία (synchrotron radiation, magnetobremssstrahlung). Αυτή μας δίνει ένα συνεχές φάσμα. Θεωρούμε ένα ηλεκτρικό πεδίο ενός μόνο ηλεκτρονίου, που περιστρέφεται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο, και το παρατηρούμε στο επίπεδο της τροχιάς του. Αυτό το πεδίο θα δώσει παλμούς, κάθε έναν όταν το ηλεκτρόνιο θα έρχεται προς τον παρατηρητή. Η σχετικιστική ταχύτητα του ηλεκτρονίου συρρικνώνει τον χώρο προς τον παρατηρητή με αποτέλεσμα αυτός να μετράει κοντύτερο παλμό από την δέσμη που τέμνει την γραμμή θέασής του.

Στις πιο πολλές αστροφυσικές πηγές η ακτινοβολία αυτή εμφανίζεται ως σειρές ασύγχρονων παλμών, αφού η ενέργεια του σωματιδίου και το μαγνητικό πεδίο μπορεί να μην είναι ίδια σε όλη την τροχιά του ηλεκτρονίου. Το φάσμα είναι το ίδιο με αυτό ενός μοναδικού παλμού. Η ακτινοβολία είναι συγκεντρωμένη στο επίπεδο της περιστροφής.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η κυκλική πολικότητα μεταβάλλεται κατά μήκος της δέσμης.

Ακτινοβολία καμπύλωσης (Curvature radiation).

Στα πολύ έντονα μαγνητικά πεδία των μαγνητόσφαιρων των παλσαρ ένα ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο μπορεί να ακολουθήσει τις μαγνητικές γραμμές σχεδόν ταυτόσημα, με μηδενική σχεδόν γωνία με αυτές. Οι γραμμές αυτές είναι γενικά καμπυλωμένες, και το σωματίδιο θα επιταχυνθεί ως προς την κίνησή του, και θα εκπέμψει ακτινοβολία. Αυτή η ακτινοβολία είναι πολύ σχετική με την σχετικιστική και λέγεται ακτινοβολία καμπύλωσης.

Η πολικότητά της είναι γραμμική στο επίπεδο της τροχιάς. Σε κάθε πλευρά του επιπέδου, η πολικότητα εμφανίζεται κυκλική στην άκρη της δέσμης. Αυτό είναι ακριβώς το ίδιο με ότι συμβαίνει στην σχετικιστική ακτινοβολία.

Τα συστατικά μέρη που έχουν πολικότητα στο επίπεδο και αυτά που είναι κάθετα σε αυτό ονομάζονται κανονικά και μη, αντίστοιχα (ordinary and extraordinary). Αυτά τα δύο συστατικά μέρη δεν παρατηρούνται στον ίδιο βαθμό από έναν παρατηρητή. Η ενίσχυση και η διάδοση μπορεί να είναι διαφορετική για το καθένα.

Η ασυνάρτητη ακτινοβολία καμπύλωσης από τα εξωτερικά χάσματα στα νεαρά παλσαρ, όπως το Crab, εκτείνεται στο φάσμα των ακτίνων γ τουλάχιστον μέχρι τα 10 GeV. Σε αντίθεση, δεν μπορεί να εμφανιστεί σε ραδιοκύματα χαμηλής συχνότητας από το εξωτερικό φάσμα.

Η επίδραση του φάσματος ενέργειας σωματιδίων.

Μέχρι τώρα υποθέσαμε την ακτινοβολία, καμπύλωσης και σχετικιστική, για μεμονομένα σωματίδια. Στην πράξη έχουμε σωρεία ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων με μεγάλο εύρος ενέργειας.

Αυτό- απορρόφηση.

Η ακτινοβολία από ένα σύνολο φορτισμένων σωματιδίων μεγάλης ενέργειας που εκπέμπουν ανεξάρτητα εμφανίζεται πολλές φορές ως θερμική ενέργεια. Σχετικά με την διαδικασία εκπομπής σχετικιστικής ακτινοβολίας υπάρχει, όπως σε κάθε θερμική διαδικασία, μια διαδικασία απορρόφησης. Όσο αυξάνεται ο πληθυσμός των σωματιδίων που εκπέμπουν κατά την γραμμή θέασης τόσο πιο σημαντική είναι. Η θερμοκρασία λαμπρότητας της ακτινοβολίας σε κάθε σωματιδιακή συχνότητα του πληθυσμού δεν μπορεί να ξεπεράσει την θερμοκρασία που αναλογεί στην ενέργεια αυτών των σωματιδίων, που ακτινοβολούν κυρίως κοντά σε αυτήν την συχνότητα. Όταν η ένταση της εκπομπής πλησιάζει αυτό το όριο, όσο η ακτινοβολία περνάει από την γραμμή θέασης, η απορρόφηση αποτελεί σχεδόν από μόνη της μια εκπομπή εξισορρόπησης.

Η αυτό- απορρόφηση παρατηρείται σε πολλά άλλα ουράνια αντικείμενα ως μια χαμηλής ράδιο συχνότητας σχετικιστική πηγή. Πρέπει να εμφανίζεται και στο υπέρυθρο φάσμα του Crab. Σε κανένα παλσαρ δεν εμφανίζεται η αυτό- απορρόφηση στα ραδιοκύματα. Αυτές οι κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμπρότητας στα παλσαρ από κάθε άλλη νοητή ισοδύναμη ενέργεια σωματιδίων που παρατηρούμε, πρέπει να έχουν και συναφή ακτινοβολία.

Αντίστροφη ακτινοβολία Compton.

Στην κλασσική ακτινοβολία Compton, φωτόνια υψηλής ενέργειας συγκρούονται με ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας. Τα φωτόνια χάνουν ενέργεια (κάτι που κάνει τα ηλεκτρόνια να ανέβουν ενεργειακό επίπεδο) και αποκτούν πλέον μεγαλύτερο μήκος κύματος. Το αντίστροφο φαινόμενο περιλαμβάνει την μεταφορά ενέργειας από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στην ακτινοβολία (τα ηλεκτρόνια πέφτουν σε χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας εκπέμποντας φωτόνια). Αν τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια κινούνται στο μαγνητικό πεδίο που γίνεται η εκπομπή, βλέπουμε την εκπομπή αυτή ως σχετικιστική. Η αντίστροφη αυτή ακτινοβολία Compton από ένα νέφος ηλεκτρονίων μεγάλης ενέργειας αυξάνει την συνολική ροή ενέργειας που ακτινοβολείται, και την θέτει σε μικρότερα μήκη κύματος. Έτσι πρόκειται για έναν μηχανισμό ακτινοβολίας σωματιδίων υψηλής ενέργειας που δεν εξαρτάται από συγκρούσεις ή την ύπαρξη σταθερού μαγνητικού πεδίου. Ένα μέρος της ακτινοβολίας γ από το εξωτερικό χάσμα των παλσαρ μπορεί να είναι τέτοιου είδους ακτινοβολία. Τα σωματίδια αυτά μπορεί αρχικά να παρουσίαζαν εκπομπή σε χαμηλότερες ενέργειες, υπεριώδης ή μαλακές Χ, με αφετηρία πιο κοντά στην επιφάνεια του παλσαρ.

Ενίσχυση maser (microwave amplification by stimulated emission off radiation, ενίσχυση μικροκυμάτων από διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας, ανάλογη του laser).

Οι πολύ λαμπρές θερμοκρασίες που παρατηρούμε στις ραδιοεκπομπές των παλσαρ ίσως να σημαίνουν ότι έξω από την πηγή της ακτινοβολίας μπορεί να εμφανίζονται κάποια είδη ενίσχυσης τύπου maser. Το φαινόμενο αυτό είναι καλά κατανοητό από αντίστοιχες παρατηρήσεις, όμως με άλλο μηχανισμό παραγωγής ακτινοβολίας, σε μοριακά νέφη. Εξαρτάται από το μη θερμικό φάσμα στην περιοχή ενίσχυσης. Για γραμμική ακτινοβολία σημαίνει μια ανατροπή πληθυσμών ανάμεσα σε ενεργειακά επίπεδα, ενώ για συνεχής ακτινοβολία μια διαίρεση ανάμεσα σε ένα συστατικό μέρος πολύ υψηλής ενέργειας και ένα χαμηλής ενέργειας.

Το φαινόμενο maser που συνήθως παρατηρούμε είναι μια συναφής ενίσχυση η οποία εμφανίζεται σε μια στενή περιοχή του μήκος κύματος, και είναι δύσκολο να διακρίνουμε πως εφαρμόζεται σε πολύ μεγάλο εύρος γραμμών. Είναι επίσης πολύ δύσκολο να εξηγηθούν τα λεπτομερή χαρακτηριστικά της πολικότητας των ραδιοπαλμών από την θεωρία της ενίσχυσης μέσω maser.

Η συνοχή στην ραδιοεκπομπή.

Αφού δεν μπορεί να εμφανιστεί καμία μέθοδος ενίσχυσης που να βρίσκεται εκτός των ραδιοπηγών με πολύ μεγάλες θερμοκρασίες λαμπρότητας, πρέπει να θεωρήσουμε την ραδιοεκπομπή ως συναφής. Όλοι οι μηχανισμοί ακτινοβολίας είναι πιο αποδοτικοί όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες. Τότε μια ομάδα ηλεκτρονίων κινείται σαν ένα μοναδικό σωματίδιο. Τα ηλεκτρόνια προφανώς δεν βρίσκονται σε τυχαία θερμική κίνηση, και η λαμπρότητα της πηγής δεν περιορίζεται από αυτό-απορρόφηση. Η συνοχή της ακτινοβολίας επιτυγχάνεται μόνο αν όλα τα ηλεκτρόνια της δέσμης εκπέμπουν ακτινοβολία σε φάση. Για ισότροπη ή σχεδόν ισότροπη ακτινοβολία το ζητούμενο είναι οι δέσμες να έχουν κλίμακα μικρότερη του μισού του μήκος κύματος στην κατεύθυνση προς τον παρατηρητή. Αν η πηγή έχει ροή προς τον παρατηρητή, αυτό το συναφές μέγεθος στο πλαίσιο της πηγής αυξάνεται κατά έναν

σχετικιστικό παράγοντα. Αν η ακτινοβολία είναι ακτινωτή, τότε μια δέσμη σαν επίπεδος δίσκος γίνεται ένας αποτελεσματικός μηχανισμός συναφής εκπομπής, με προϋπόθεση ότι ο άξονας του δίσκου να είναι άμεσα παράλληλος προς την ακτινοβολία. Κατά μήκος του άξονα το πάχος πρέπει να είναι μικρότερο από το μισό του μήκος κύματος, όπως προηγουμένως, αλλά το πλάτος θα είναι πολύ μεγαλύτερο.

Ο σχηματισμός τέτοιων δεσμών εξαρτάται από την αστάθεια της ηλεκτρικής ροής. Η ενίσχυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων μπορεί να διαταράξει το εύρος της πυκνότητας, με αποτέλεσμα αυτό να μεγαλώσει. Η σχετικιστική ακτινοβολία από την δέσμη τότε θα ενισχυθεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Αν η κλίμακα της διατάραξης εκφραστεί ως γωνιακό πλάτος γύρω από τον δίσκο, τότε η ακτινοβολία της δέσμης θα είναι σε φάση σε όλο το σχετικιστικό φάσμα, με αποτέλεσμα να έχουμε ενισχυμένη ακτινοβολία.

Όπως είδαμε, η ακτινοβολία καμπύλωσης είναι παρόμοια με την σχετικιστική, έτσι η συνοχή της είναι και αυτή παρόμοια. Αν η ραδιοακτινοβολία ενός παλσαρ είναι η καμπυλωμένη ακτινοβολία από ηλεκτρόνια που περιορίζονται να ακολουθήσουν τις μαγνητικές γραμμές από το πολικό κάλυμμα, οι οποίες έχουν μεγάλο εύρος καμπύλωσης, τότε το ίδιο το φάσμα καμπύλωσης θα έχει μικρή σημασία, και το φάσμα εκπομπής θα εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την δομή των συναφών δεσμών ηλεκτρονίων.

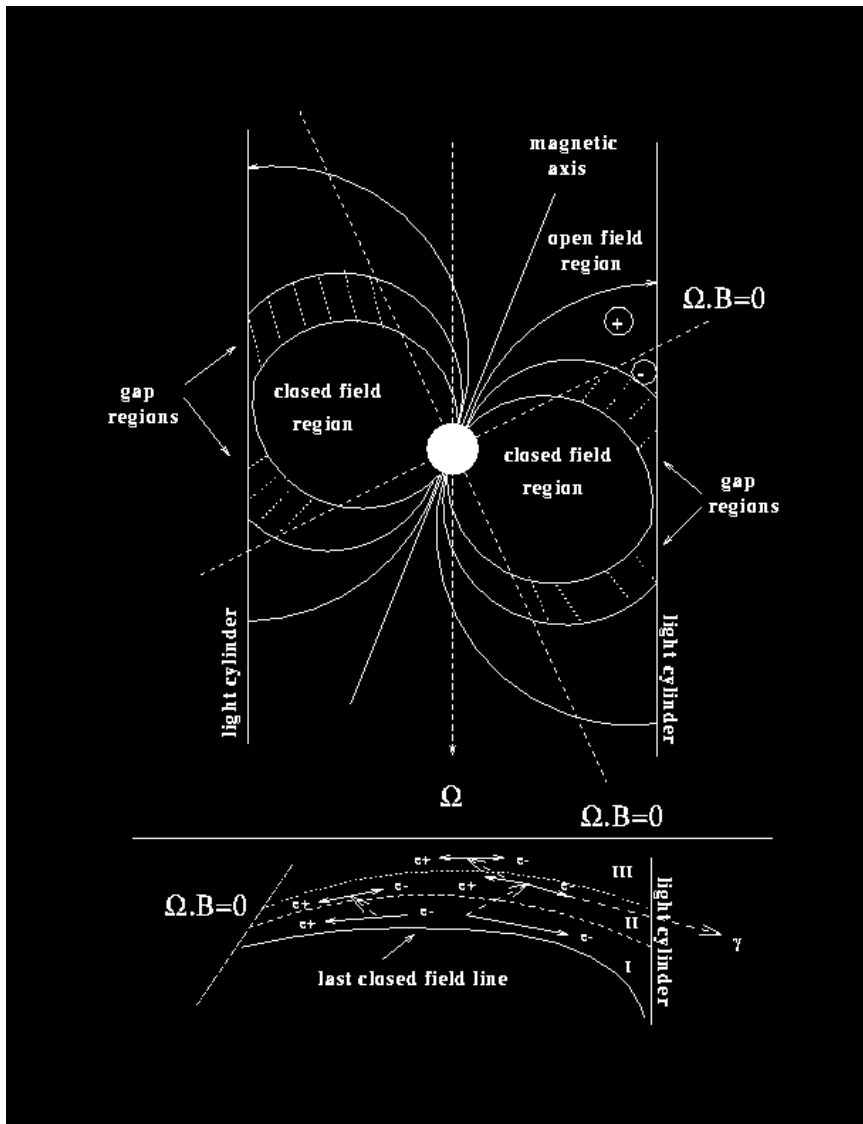
Σχετικιστική ακτινοβολία.

Όποιος και να είναι ο μηχανισμός σχετικιστικής ακτινοβολίας, η μεγάλη ταχύτητα των σωματιδίων έχει πολύ σημαντική επίδραση στην ακτινοβολία, συγκεντρώνοντάς την κατά την στιγμιαία κατεύθυνση κίνησης. Αν η πηγή ακτινοβολούσε ισότροπα, ο παρατηρητής θα έβλεπε την ακτινοβολία να συγκεντρώνεται σε μια δέσμη με πλάτος που θα σήμαινε ότι ο σχετικιστικός παράγοντας θα εξαρτιόταν περισσότερο από την ταχύτητα της πηγής παρά από την ενέργεια των σωματιδίων εκπομπής. Για τα περιστρεφόμενα παλσαρ, υπάρχει και η επίδραση της συμπίεσης, όταν η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή. Άρα έχουμε και φαινόμενο Ντόπλερ. Αυτό έχει να κάνει και με την διάρκεια του παλμού. Κατά την διάρκεια του παλμού, αν η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή, η ένταση αυξάνεται. Ανάμεσα στους παλμούς η ένταση μειώνεται. Ο βαθμός της επίδρασης αυτής μπορεί να είναι μεγάλος και εξαρτάται από το φάσμα της ακτινοβολίας.

Ο μηχανισμός της εκπομπής

40 έτη μετά από την ανακάλυψη των παλσαρ, και μετά από πολλές αναλύσεις των παρατηρήσεων, δεν μπορούμε ακόμα να δώσουμε μια ξεκάθαρη εξήγηση για την διαδικασία εκπομπής ραδιοκυμάτων από τα παλσαρ. Οι τελευταίες ανακαλύψεις εκπομπής ακτίνων γ μεγάλης έντασης από αυτά επιδέχονται περισσότερη ανάλυση, και τα χαρακτηριστικά που παρατηρούμε μπορεί να συσχετίζονται με τις ενέργειες των σωματιδίων και την γεωμετρία της μαγνητόσφαιρας. Και στις εκπομπές γ και σε αυτές των ραδιοκυμάτων, η πηγή ενέργειας είναι το τεράστιο ηλεκτρικό πεδίο που επάγεται από την γρήγορη περιστροφή του έντονα μαγνητισμένου παλσαρ. Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο επιταχύνει ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια σε μεγάλες σχετικιστικές ενέργειες. Εμφανίζεται σε δύο περιοχές εκπομπής, τις ανοιχτές γραμμές πεδίου κοντά στο πολικό κάλυμμα και το εξωτερικό χάσμα. Τα υψηλής ενέργειας φωτόνια που εκπέμπονται από

το εξωτερικό χάσμα αποτελούν την ακτινοβολία καμπύλωσης ή την σχετικιστική ακτινοβολία από αυτά τα σχετικιστικά σωματίδια. Σε αντίθεση, η ραδιοακτινοβολία από τις 2 αυτές περιοχές είναι συναφή εκπομπή από πλάσμα, και δημιουργήθηκε από την αρχική ροή σωματιδίων.



Οι δύο περιοχές εκπομπής.

Το ταχύτατα περιστρεφόμενο και ισχυρό δίπολο πεδίο ενός τυπικού παλσαρ δίνει ένα δυνητικό μέγιστο διαθέσιμο των 10στη14 με 10στη15 βολτ. Σε μια πλήρως εξελιγμένη, συν- περιστρεφόμενη και στατική μαγνητόσφαιρα θα ήταν θωρακισμένο από το ηλεκτροστατικό πεδίο της πυκνότητας των φορτισμένων σωματιδίων. Αυτό συμβαίνει μόνο στις πολικές περιοχές, όπου οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου διασταυρώνονται με τον κώνο της ταχύτητας του φωτός (οι γραμμές είναι πιο ανοιχτές). Εκεί αναπτύσσεται ένα ρεύμα εκροής, και ένα μεγάλης έντασης ηλεκτρικό πεδίο αναπτύσσεται αποτελεσματικά πάνω από τους μαγνητικούς πόλους, ώστε να επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια σε σχετικιστικές ενέργειες. Η επιτάχυνση αυτή πετυχαίνεται σε ένα κενό, το πολικό χάσμα (polar gab). Πάνω από αυτό η ροή των σωματιδίων μεγάλης ενέργειας πολλαπλασιάζεται με μια διαδικασία όμοια με καταρράχη (cascade process). Η μαγνητόσφαιρα πάνω από το πολικό χάσμα

αποτελείται από πλάσμα, που διαπνέεται από την εκροή σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Αυτή είναι η περιοχή εκπομπής ραδιοκυμάτων των περισσοτέρων παλσαρ.

Μια άλλη περιοχή, πιο <απεμπλουτισμένης> πυκνότητας φορτίου και ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, αναπτύσσεται αμέσως έξω από την τελευταία καθορισμένη (κλειστή) μαγνητική γραμμή του πεδίου στην ισημερινή περιοχή. Αυτή η περιοχή ονομάζεται εξωτερικό χάσμα. Αν και είναι βολικό να ξεχωρίζουμε τις δύο παραπάνω περιοχές, αυτές στην πράξη ενώνονται.

Στις περιοχές και του πολικού και του εξωτερικού χάσματος, η ανάπτυξη του ηλεκτρικού πεδίου στο πολικό κάλυμμα εξαρτάται από το έλλειμμα της πυκνότητας φορτίου. Αμέσως πάνω από την επιφάνεια του παλσαρ η πυκνότητα του φορτίου δημιουργείται από πολλούς παράγοντες εκπομπής (θερμικοί παράγοντες, εκπομπή πεδίου, ή αντίδραση από ένα ρεύμα επιστροφής σωματιδίων με αντίθετο πρόσημο). Η εκροή πάνω από αυτές τις περιοχές μειώνει την πυκνότητα φορτίου και αναπτύσσεται ένα κενό τύπου σχισμής με μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο. Μια κύρια δέσμη σωματιδίων με σχετικιστικές ενέργειες εκρέει κατά μήκος των γραμμών του μαγνητικού πεδίου πάνω από αυτή την περιοχή επιτάχυνσης, και μέσω της διαδικασίας cascade δημιουργίας ζευγών σωματιδίων, δημιουργεί πυκνότερο και μικρότερης ενέργειας δευτερεύον πλάσμα. Η πυκνότητα φορτίου αυτού του δευτερεύοντος πλάσματος είναι παρόμοια με αυτήν του κυρίως πλάσματος, αλλά τα ζεύγη σωματιδίων μειώνουν την πυκνότητα των σωματιδίων σε μεγάλο βαθμό (εξαυλώνονται γρήγορα απελευθερώνοντας ενέργεια).

Τα κύρια σωματίδια εκπέμπουν ακτινοβολία καμπύλωσης ως φωτόνια γ . Αυτά αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο και δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων που επιταχύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις από το ηλεκτρικό πεδίο μεγάλης έντασης, και εκπέμπουν περισσότερα φωτόνια μέσω ακτινοβολίας καμπύλωσης. Η τελική πυκνότητα του δευτερεύοντος πλάσματος πάνω από το πολικό χάσμα μπορεί να είναι 1000- 10000 φορές μεγαλύτερη από το κύριο πλάσμα, με ενέργεια αντίστοιχα μικρότερη. Η ραδιοεκπομπή εμφανίζεται μέσα σε αυτό το δευτερεύον πλάσμα.

Μια παρόμοια διαδικασία cascade και επιτάχυνσης εμφανίζεται στο εξωτερικό χάσμα. Εδώ το ηλεκτρικό φορτίο επιτάχυνσης εκτείνεται μέσα από μια μεγάλη περιοχή <απεμπλουτισμένου> φορτίου, και το ηλεκτρικό πεδίο δεν βραχυκυκλώνεται από δευτερεύον πλάσμα. Στο εξωτερικό χάσμα τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια επιταχύνονται σε ακραίες σχετικιστικές ενέργειες. Υπάρχει μια ισορροπία ενέργειας ανάμεσα στην επιτάχυνση και την απώλεια λόγω εκπομπής φωτονίων γ μέσω της ακτινοβολίας καμπύλωσης και της σχετικιστικής ακτινοβολίας. Τα φωτόνια γ , που δεν ακολουθούν τις μαγνητικές γραμμές, μπορούν να διαφύγουν και να παρατηρηθούν ως παλμός, ή μπορούν να δημιουργήσουν πάλι ένα ζεύγος ηλεκτρονίου- ποζιτρονίου σε συμπλοκή με φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας ή με εγκάρσια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Μια άλλη διαδικασία, οι συγκρούσεις Compton με φωτόνια σχετικιστικής ενέργειας, μπορεί να ωθήσει την ενέργεια του μόλις σχηματισμένου ζεύγους σε ενέργεια ζεύγους cascade. Η τάση των φωτονίων να κινηθούν προς τα έξω από το χάσμα, προς τις πολικές περιοχές, εγχείει σωματίδια υψηλής ενέργειας στο πλάσμα. Αυτή μπορεί να είναι η θέση της εκπομπής ακτίνων X και ραδιοκυμάτων των νεαρών παλσαρ όπως αυτό του Καρκίνου.

Το εξωτερικό χάσμα, η ακτινοβολία καμπύλωσης και η σχετικιστική ακτινοβολία.

Στην εκπομπή μεγάλης ενέργειας (από το οπτικό ως τις ακτίνες γ) από το εξωτερικό χάσμα δεν υπάρχει ένδειξη ότι η εκπομπή είναι συναφής. Η ροή των ανεξάρτητων σωματιδίων μπορεί όμως να έχει σχέση με την παρατηρήσιμη πυκνότητα ροής μέσω της θεωρίας της ακτινοβολίας καμπύλωσης. Όλο το φάσμα φωτονίων μεγάλης ενέργειας, από το οπτικό ως τις ακτίνες γ, μπορεί να θεωρηθεί ως ακτινοβολία καμπύλωσης από ανεξάρτητες περιοχές, με ένα φάσμα ενεργειών ακτίνων γ που κυμαίνεται διαμέσου όλου του εξωτερικού χάσματος. Η ενέργεια των ακτίνων γ είναι περιορισμένη λόγω της διαδικασίας δημιουργίας ζευγών σωματιδίων στο μαγνητικό πεδίο. Η μέγιστη ενέργεια είναι αντιστρόφως ανάλογη της έντασης του πεδίου, έτσι οι ακτίνες γ με την μεγαλύτερη ενέργεια εμφανίζονται στις εξωτερικές περιοχές του χάσματος. Για τον ίδιο λόγο, η ακτινοβολία καμπύλωσης μεγάλης ενέργειας δεν μπορεί να εμφανιστεί στις πολικές περιοχές, όπου το πεδίο είναι κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ενέργειας των ακτίνων γ.

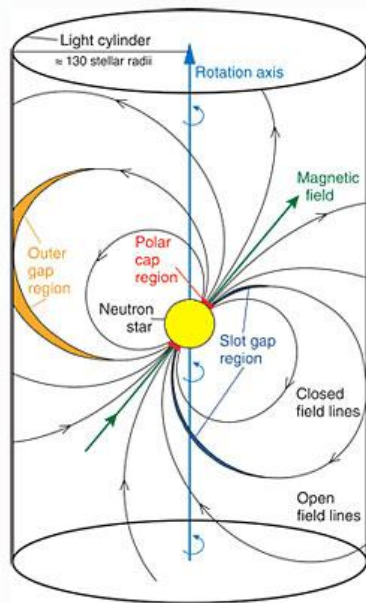
Δύσκολα μπορεί να δώσει η ακτινοβολία καμπύλωσης φάσμα που να δικαιολογεί την ελάττωση στις υψηλές ενέργειες. Στις εξωτερικές περιοχές του χάσματος, στα μισά μέχρι τον κώνο ταχύτητας του φωτός, μπορεί τα σωματίδια της κυρίας δέσμης να αποκτούν σημαντικές γωνίες τροχιάς και να ακτινοβολούν σχετικιστικά. Αυτό εμφανίζεται ως μια σημαντική απορρόφηση των ράδιο- φωτονίων από τις χαμηλότερες περιοχές.

Η εκπομπή ακτίνων X φαίνεται (στο φάσμα) να είναι ξεχωριστή από αυτήν των ακτίνων γ. Υπάρχει ένα κενό στα 10 MeV. Η εκπομπή ακτίνων X κάτω από αυτήν την ενέργεια προέρχεται από το κατώτερο (προς το πάλσαρ) μισό του εξωτερικού χάσματος, και μπορεί να αποδοθεί στην σχετικιστική ακτινοβολία από ένα πλάσμα δευτερευόντων ζευγών, στην πλευρά του πολικού καλύμματος προς το χάσμα σχισμής.

Φαίνεται να είναι αναπόφευκτο το γεγονός να έχουμε διάφορους μηχανισμούς επιτάχυνσης σωματιδίων και ακτινοβολίας, που εμφανίζονται όλοι σε αυτό το χάσμα σχισμής, περιλαμβάνοντας την σχετικιστική ακτινοβολία και την ακτινοβολία καμπύλωσης, την σχετικιστική απορρόφηση, και την ενίσχυση φωτονίων λόγω αντίστροφου Compton.

Τα εξωτερικά χάσματα σχηματίζουν κώνους μεγάλης γωνίας γύρω από τους 2 πόλους, ανοίγουν προς τα έξω, και ακολουθούν το όριο του κώνου της ταχύτητας του φωτός στην ισημερινή περιοχή. Εκεί η εκτροπή και η καθυστέρηση έχουν μεγάλη επίδραση, και στο απώτατο άκρο του χάσματος παρατηρούνται πηγές εκπομπής σε όλες τις γωνιακές αποστάσεις. Οι δύο κορυφές των παλμών των παλσαρ (που είναι όμοια με το Crab παλσαρ) προέρχονται από αυτά τα απώτατα άκρα των δύο μαγνητικών πόλων, σε σχεδόν ορθογώνιο σχηματισμό. Η εκπομπή γ φαίνεται να προβάλλεται σαν κύλινδρος που είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα περιστροφής, υποθέτοντας ότι όλες οι περιοχές του εξωτερικού χάσματος ακτινοβολούν κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών.

Και στα μιλισέκοντ βρέθηκε στενή σχέση των εκπομπών στα ραδιοκύματα και στις ακτίνες γ, και πολλά έχουν παρόμοια προφίλ παλμών, όπως το Crab.



Πέρα από την πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών στο εξωτερικό χάσμα, συμπεραίνουμε ότι η διαδικασία εκπομπής ακτινοβολίας μεγάλης ενέργειας από το εξωτερικό χάσμα έχει κατανοηθεί αρκετά καλά. Η ομοιότητα ανάμεσα στα προφίλ των ράδιο- ακτίνων και ακτίνων γ του Crab μας δείχνει ότι και οι δύο ακτινοβολίες προέρχονται από την ίδια ροή σωματιδίων. Όμως, η ραδιοεκπομπή από την πολική περιοχή σχετίζεται με σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας σε πλάσμα ζευγών. Αν, όπως φαίνεται, η ραδιοεκπομπή στο εξωτερικό χάσμα προέρχεται από παρόμοια διαδικασία, θα πρέπει να υπάρχει πλάσμα ζευγών στην άκρη του εξωτερικού χάσματος με παρόμοια γεωμετρία.

Ισχύ και πυκνότητα της ενέργειας της περιοχής εκπομπής του πολικού καλύμματος.

Μέσω μαθηματικών τύπων υπολογίζουμε τις παραπάνω αξίες, αλλά σαφώς υποτιμημένες, λόγω του ότι οι ξεχωριστοί παλμοί εκπέμπονται από μικρότερες περιοχές από το πολικό κάλυμμα. Αυτό μας λέει ότι η συνολική εκπομπή (συμπεριλαμβάνοντας αυτήν που δεν μας σαρώνουν οι παλμοί της) είναι 10 φορές μεγαλύτερη. Στους γιγάντιους παλμούς του Crab και άλλων παλσαρ έχουμε παρατηρήσει πολύ μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας λαμπρότητας και πυκνότητας ενέργειας. Είναι ξεκάθαρο ότι μια μη σχετικιστική θεωρία μεταφοράς ενέργειας από τα σωματίδια που επιταχύνονται στο πολικό χάσμα και στο πεδίο ακτινοβολίας θα ήταν τελείως ανεπαρκής να εξηγήσει όλες τις παρατηρήσιμες ραδιοεκπομπές.

Ραδιοεκπομπή του πολικού καλύμματος.

Οι μεγάλης έντασης ραδιοεκπομπές και από το πολικό και από το εξωτερικό χάσμα, καθώς και οι μεγάλες θερμοκρασίες λαμπρότητας που αντιστοιχούν σε αυτές τις εκπομπές, χρειάζονται εξήγηση ως συναφή ακτινοβολία από δέσμες σωματιδίων. Ο μηχανισμός της ραδιοεκπομπής από το πολικό κάλυμμα μπορεί να είναι η συναφής ακτινοβολία καμπύλωσης. Σε αυτό όμως έχουμε ένα πρόβλημα γεωμετρικής φύσης, αφού οι ραδιοεκπομπές εμφανίζονται σε όλο το πολικό κάλυμμα, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής πάνω από τον πόλο, όπου οι δίπολες μαγνητικές γραμμές είναι ευθείες. Παρόλα αυτά η παρατήρηση μιας εγκοπής στο προφίλ (ακτινοβολίας) των πόλων σε παλσαρ είναι

ισχυρή απόδειξη ότι εμφανίζεται ακτινοβολία καμπύλωσης τουλάχιστον σε μερικές μεμονωμένες ραδιοπηγές. Δεν έχουμε ακόμα εξήγηση για το πως εμφανίζεται η συναφής ακτινοβολία καμπύλωσης, είτε σαν διαδικασία ακτινοβολίας, είτε σαν επακόλουθη ενίσχυση. Η θεωρία κλείνει προς την αύξηση μεγέθους των κυμάτων πλάσματος και την σύζευξή τους για ακτινοβολία.

Οι φυσικές παράμετροι του πολικού ρεύματος, κυρίως και δευτερεύων, μας απασχολούν ιδιαίτερα. Δύο κρίσιμες παράμετροι του δευτερεύοντος πλάσματος ζευγών που βλέπουμε στην πηγή της ραδιοεκπομπής είναι η πυκνότητα και η διασπορά ενέργειας. Η πυκνότητα καθορίζει την συντονισμένη συχνότητα και η διασπορά ενέργειας των σωματιδίων είναι το μέσο της αύξησης μεγέθους των κυμάτων πλάσματος. Η συντονισμένη συχνότητα του πλάσματος μας δυσκολεύει γιατί τη βρίσκουμε πολύ υψηλή ώστε να διαδίδονται ραδιοκύματα συχνότητας κάτω από 1 GHz. Η λύση σε αυτό είναι η ύπαρξη δομών στο πλάσμα ζευγών. Η αύξηση μεγέθους των κυμάτων του πλάσματος εξηγείται επίσης δύσκολα σε σταθερή κατάσταση και για γενικευμένο μοντέλο, αλλά ως διαδικασία μη σταθερής κατάστασης είναι κατανοητή. Έχοντας κατά νου τις διακυμάνσεις των ραδιοπαλμών που παρατηρούμε σε όλες τις χρονικές κλίμακες, από τα νανοδευτερόλεπτα ως τις ώρες, η εισαγωγή τοπικής και προσωρινής δομής στην σχετική θεωρία είναι αποδεκτή. Για να κατανοήσουμε την σύζευξη ταλάντωσης του πλάσματος ζευγών στα ραδιοκύματα που παρατηρούμε χρειάζεται η θεωρία της διάδοσης ραδιοκυμάτων στη μαγνητόσφαιρα.

Η διάδοση ραδιοκυμάτων στην μαγνητόσφαιρα.

Η διάδοση στο πλάσμα των εξωτερικών περιοχών της μαγνητόσφαιρας είναι πολύ απλή, μέσω του πολύ ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια δεν μπορούν να κινηθούν εγκάρσια στο μαγνητικό πεδίο. Κάθε εγκάρσια ορμή χάνεται ακαριαία από την σχετικιστική ακτινοβολία. Τα ραδιοκύματα εκπέμπονται στην κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών, και σε πρώτη εκτίμηση δεν μπορούν να έχουν πορεία προς τα έξω σε ευθεία γραμμή μέσα από την μαγνητόσφαιρα.

Πολικότητα.

Οι δύο τρόποι (O και X) διάδοσης ορθογώνιας πολικότητας διαφέρουν στην διαδικασία εκπομπής ή στις συνθήκες διάδοσης, όπως στην πυκνότητα του πλάσματος. Υπάρχει αβεβαιότητα για την προέλευση της πολικότητας της ακτινοβολίας καμπύλωσης. Αν αυτή έχει να κάνει με την διάδοση, μπορεί να λύνεται με τον συνδυασμό των δύο παραπάνω τροπών. Αυτός ο συνδυασμός θα εμφανίζεται μόνο κάτω από μια οριακή περιοχή πολικότητας. Πάνω από αυτήν οι ξεχωριστοί τρόποι, περιλαμβάνοντας και την πολικότητα ακτινοβολίας καμπύλωσης, πετυχαίνουν ανεξάρτητοι την διάδοση.

Έχουμε παρατηρήσει ίχνη των δύο τρόπων διάδοσης μέσα σε μαγνητόσφαιρα παλσαρ. Η διάδοση O κάνει τις ακτίνες να ακολουθούν αρχικά τις μαγνητικές γραμμές και να αποσυνδέονται από αυτές σε κάποια απόσταση. Έτσι αφήνουν την μαγνητόσφαιρα σε μεγαλύτερη γωνία από τον πολικό άξονα, και πρέπει να σχηματίζουν το ολοκληρωμένο προφίλ παλμών των εξωτερικών περιοχών. Το ύψος που βρίσκουμε από το άνοιγμα της γωνίας είναι το ύψος της αποσύνδεσης και όχι της αρχικής εκπομπής.

Αν η διεύρυνση των παλμών ,που εξαρτάται από την συχνότητα, έχει να κάνει με την διάδοση κατά μήκος του καμπυλωμένου πεδίου, είναι πιθανό όλες οι ραδιοσυχνότητες να εκπέμπονται σε ένα μικρό εύρος του ύψους των περιοχών. Οι διαφορετικοί οδοί της

ακτινοβολίας στους δύο τρόπους διάδοσης μπορεί να έχουν σημασία για την αλλαγή ανάμεσα στους τρόπους ορθογώνιας πολικότητας.

Φαίνεται ότι μόνο οι αλλαγές στο ύψος των εξωτερικών περιοχών συνδέονται με την συχνότητα, ενώ αντίστοιχες στο εσωτερικό δεν δείχνουν την ίδια συμπεριφορά. Έτσι πρέπει οι εξωτερικές περιοχές να συμπεριφέρονται ως τρόποι διάδοσης O. Οι εσωτερικές μπορεί να είναι O και X (τρόπος που δεν ακολουθάει τόσο τις μαγνητικές γραμμές, αλλά έχει πιο κάθετη κίνηση). Αν υπάρχουν κύματα O, η περιοχή αποσύνδεσής τους από τις μαγνητικές γραμμές πρέπει να είναι κοντά στην περιοχή εκπομπής.

Ο μηχανισμός της ράδιο- εκπομπής.

Οι παράμετροι που κυριαρχούν στις διαδικασίες εκπομπής πρέπει να είναι όμοιοι για όλες τις ραδιοπηγές, και κυρίως να καλύπτουν και τα κανονικά και τα μιλλισέκοντ παλσαρ. Αν, όπως φαίνεται, οι ραδιοεκπομπές από το πολικό κάλυμμα και το εξωτερικό χάσμα έχουν παρομοίους μηχανισμούς, πρέπει να επικρατούν και παρόμοιες συνθήκες στις δύο περιοχές. Τα μαγνητικά πεδία των δύο περιοχών διαφέρει κατά τουλάχιστον 4 τάξεις μεγέθους. Έτσι δεν μπορεί να υπάρχει συντονισμένη σχετικιστική συχνότητα. Είναι προτιμότερο να θεωρήσουμε διαδικασίες και τρόπους διάδοσης όπου τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν να κινηθούν μόνο παράλληλα με το πανίσχυρο μαγνητικό πεδίο. Μπορεί να υπάρχει όμως μια τοπική συχνότητα πλάσματος που να είναι παρόμοια σε αυτές τις δύο πολύ διαφορετικές πηγές. Είδαμε ότι η πυκνότητα φορτίου είναι παρόμοια στα κανονικά παλσαρ και στα μιλλισέκοντ, επειδή είναι ανάλογη της ισχύς του πεδίου και αντιστρόφως ανάλογη της περιόδου περιστροφής. Αυτό προφανώς δεν εμφανίζεται στα εξωτερικά χάσματα. Σε αυτές τις περιοχές αναμένουμε μεγαλύτερες ενέργειες σωματιδίων, και μπορεί ένας συνδυασμός πυκνότητας φορτίου και σχετικότητας να είναι παρόμοιος σε όλες τις περιοχές ραδιοεκπομπής, δίνοντας μια παρόμοια συντονισμένη συχνότητα του πλάσματος.

Οι τρόποι διάδοσης είναι ανάλογοι στα κύματα Langmuir, τα οποία μπορούν να διαφύγουν από μια μαγνητόσφαιρα, και τα κύματα Alfvén (ή μαγνητό- υδροδυναμικά) που δεν μπορούν να διαφύγουν. Τα πρώτα έχουν δύο ορθογώνιους τρόπους πόλωσης. Η σχέση διασποράς των κυμάτων Alfvén εξαρτάται από την πυκνότητα φορτίου και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Υπάρχει μια ακολουθία προόδου. Μια αστάθεια στην εκροή του πλάσματος διεγείρει τα κύματα Alfvén, που διαδίδονται προς τα έξω για κάποια απόσταση, και συνδέονται με τα διαφεύγοντα κύματα Langmuir. Ο τρόπος σύνδεσης, που είναι κρίσιμος, είναι το λιγότερο κατανοητό μέρος της ακολουθίας. Είναι ξεκάθαρο ότι οι δείκτες διάθλασής τους μπορούν να συμπέσουν, αλλά η σύνδεση των διαφορετικών αυτών ειδών κυμάτων είναι μη γραμμική και δύσκολο να αναλυθεί.

Η κλιμάκωση της αστάθειας του πλάσματος είναι σε γενικές γραμμές μη κατανοητή. Κάθε διασπορά ταχύτητας σε πλάσμα με ροή που δεν είναι κανονική θερμική διασπορά, μπορεί να εξελιχτεί σε αστάθεια. Συνήθως έχουμε μια αστάθεια δύο ροών. Αν η επιτάχυνση των σωματιδίων είναι μη ομαλή διαδικασία, ώστε τα σωματίδια που διαφεύγουν του πολικού καλύμματος να εκφορτίζονται σε διακριτές δέσμες, η διασπορά ταχύτητας προκύπτει από τα ταχύτερα σωματίδια της μιας δέσμης που προλαβαίνουν τα πιο αργά άλλης προγενέστερης δέσμης.

Υπάρχει όμως ένα σοβαρό πρόβλημα σε αυτήν την θεωρία. Οι υπολογισμένες τιμές της κρίσιμης συχνότητας είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερες από ότι θα έπρεπε. Η θεωρία μπορεί να διασωθεί μόνο από μια άλλη παράμετρο, μια πλευρική νηματοειδής δομή του πλάσματος. Η ύπαρξη διακριτών σπιθών αποφόρτισης στα πολικά καλύμματα θα δημιουργούσαν στενά περιορισμένες ριπές ακτίνων γ, που θα εμφανίζονταν ως νήματα διάμεσο της περιοχής ακτινοβολίας. Αυτές οι πλευρικές δομές θα επέτρεπαν τον τρόπο σύνδεσης να εμφανίζεται σε πιο αραιές περιοχές.

Μια εναλλακτική θεωρία προτείνει μια μη συντονισμένη αστάθεια του πλάσματος στο δευτερεύων πλάσμα ζευγών που ρέει προς τα έξω. Αυτή είναι μια ευρείας ζώνης αστάθεια σε συχνότητες κάτω από αυτές των συντονισμένων κυμάτων πλάσματος. Τα κύματα, που αυξάνουν σε μέγεθος, ρέουν προς τα έξω μαζί με το πλάσμα ζευγών, προς περιοχές με χαμηλότερη πυκνότητα πλάσματος. Αυτό συμβαίνει μέχρι τα μήκη κύματος να συμπίπτουν με την συχνότητα συντονισμένου πλάσματος, όπου το κύμα πλάσματος συνδέεται με το κύμα Langmuir O και διαδίδεται έξω από την μαγνητόσφαιρα.

Δεν μπορεί να υπάρξει ικανοποιητικός τρόπος εξήγησης της ραδιοεκπομπής των παλσαρ ως απλή, σταθερή διαδικασία που διασπείρεται ομαλά στις καθορισμένες περιοχές του πολικού καλύμματος και του εξωτερικού χάσματος, κάτι λογικό από τις πολυπλοκότητες που είδαμε. Οι πλευρικές δομές σε μεγάλη κλίμακα είναι ένα άμεσο συμπέρασμα της πολυπλοκότητας στο προφίλ των παλσαρ.

Τέλος, οι γιγάντιοι παλμοί περιγράφονται καλύτερα ως τοπικές καταρρεύσεις του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, παρά ως ταλάντωση του πλάσματος. Η διαταραχή του κύματος του πλάσματος σε μια περιοχή μεγάλου ηλεκτρικού πεδίου θα δώσει εκρηκτική κατάρρευση του πεδίου και έκρηξη ακτινοβολίας. Στο Crab αυτοί οι γιγάντιοι παλμοί προέρχονται από τις χαμηλότερες περιοχές του εξωτερικού χάσματος. Οι μικροδομές που παρατηρούμε στους διπλούς παλμούς των μιλισέκοντ παλσαρ μπορεί να προέρχονται από παρόμοια περιοχή. Το αν ο μηχανισμός εκπομπής των γιγάντιων παλμών σχετίζεται με την κανονική ακτινοβολία των παλσαρ ή όχι παραμένει ένα τελείως ανοιχτό ερώτημα.

Μεσοαστρικός σπινθηρισμός και σκέδαση.

Ο οπτικός σπινθηρισμός μας είναι γνωστός από το τρεμόπαιγμα των αστεριών και από την παραμόρφωση της εικόνας μακρινών επίγειων αντικειμένων, όταν τα βλέπουμε μέσα από τον ζεστό αέρα. Στα ραδιοκύματα ο σπινθηρισμός αντιμετωπίζεται σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις επειδή υπάρχουν πολλά είδη μονοπατιών μετάδοσης ραδιοκυμάτων που περιέχουν ανωμαλίες. Το ηλιακό στέμμα για παράδειγμα, περιέχει ένα ανώμαλης εκροής αέριο που διαταράσσει τα ραδιοκύματα που το διαπερνάνε στην πορεία τους από τα μακρινά αντικείμενα προς τη Γη. Η επίδραση μπορεί να είναι διάθλαση ή περίθλαση. Γενικά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα φτάνουν σε εμάς σκεδασμένα, δίνοντας αύξηση της γωνιακής διασποράς τους και μετέπειτα διακυμάνσεις του πλάτους των κυμάτων, που φαίνονται ως διακυμάνσεις της έντασης όπως κινείται η Γη σε σχέση με αυτές τις ανωμαλίες. Παρόμοια φαινόμενα έχουμε από την διέλευση των ραδιοκυμάτων μέσα από την γήινη ιονόσφαιρα.

Την εποχή της ανακάλυψης των παλσαρ τα γνωστά δείγματα ραδιοσπινθηρισμού έδιναν ένα πρότυπο (μοτίβο) γρήγορου ξεθωριάσματος, όχι πολύ διαφορετικό από το ορατό τρέμουλο των άστρων. Το συγκριτικά αργό και βαθύ ξεθώριασμα των ραδιοσημάτων από

τα παλσαρ ήταν ένα τελείως καινούργιο φαινόμενο. Η βασική ανάλυση του σπινθηρισμού σε όρους τυχαίας διάθλασης στη μεσοαστρική ύλη μας έδειξε ότι οι διακυμάνσεις έχουν μια στενή δομή συχνοτήτων, το πλάτος της οποίας εξαρτάται από την απόσταση του παλσαρ. Οι διακυμάνσεις μέσω του σπινθηρισμού μπορούν να διαχωριστούν καθαρά από τις εγγενείς διακυμάνσεις του παλσαρ. Σήμερα η θεωρία και η παρατήρηση είναι καλά εξελιγμένες ώστε να χρησιμοποιούμε τον σπινθηρισμό για να εξετάσουμε την μεσοαστρική ύλη και τις ταχύτητες των παλσαρ. Η μεσοαστρική σκέδαση παρατηρείται επίσης ως αλλοίωση του χρόνου που κάνει ο παλμός να μας έρθει. Πρόκειται για μια διεύρυνση των αιχμηρών χαρακτηριστικών των παλμών. Η σκέδαση μπορεί να είναι αιτία σπινθηρισμού για μακριές περιόδους ημερών ή μηνών, μέσω της διάθλασης σε συστατικά μέρη ιονισμού μεγάλης κλίμακας της μεσοαστρικής ύλης.

Το μοντέλο λεπτής οθόνης (thin-screen).

Μια πλήρης θεωρία πρέπει να περιλαμβάνει την εξέλιξη του μετώπου των κυμάτων που ταξιδεύουν μέσα από την διάχυτη μεσοαστρική ύλη, η οποία εκτείνεται σε όλο τον χώρο από την πηγή ως τον παρατηρητή. Η δυσκολία βρίσκεται στην εξέλιξη με την απόσταση, αφού μπορεί να διαφέρουν οι επιδράσεις των κοντινών από αυτές των μακρινών ανωμαλιών. Το παρακάτω απλό μοντέλο είναι χρήσιμο για τις πιο πολλές αναλύσεις σπινθηρισμού του παλσαρ. Σε μια λεπτή οθόνη συγκεντρώνουμε κάπου στη μέση ανάμεσα στην πηγή και τον παρατηρητή όλες τις τυχαίες ανωμαλίες ή τον πίνακα διαθλάσεων που βρίσκουμε στο μονοπάτι διάδοσης, εφαρμόζοντας τους ανάλογους μαθηματικούς τύπους.

Η ταχύτητα του πρότυπου σπινθηρισμού.

Οι διακυμάνσεις της έντασης μέσω του σπινθηρισμού μπορεί να αντιπροσωπεύουν ή μια τυχαία διάχυση στο μέσο σκέδασης, που αλλάζει την διαμόρφωση του πρότυπου του σπινθηρισμού σε ένα πλάνο που περιλαμβάνει τον παρατηρητή, ή μια σχετική ταχύτητα στο σύστημα του παρατηρητή, του μέσου και της πηγής (οι δύο πιθανότητες μας είναι οικείες στα μοτίβα του ηλιακού φωτός που αντανακλάται στον πυθμένα μιας πισίνας όταν τα κύματα στην επιφάνεια κινούνται και ταυτόχρονα αλλάζουν σχήμα). Πιο πολλούς σπινθηρισμούς παλσαρ ανακαλύψαμε από το μοτίβο κίνησης, παρά από αυτό της αστάθειας. Έτσι ο βαθμός της αλλαγής της έντασης σχετίζεται με το μοτίβο κλίμακας και την ταχύτητα κλίσης. Για παράδειγμα, μια τυπική ταχύτητα κλίσης μπορεί να είναι 100 km/s, με κλίμακα χρόνου ξεθωριάσματος τα 10 λεπτά. Η κλίμακα ενός σταθερού μοτίβου θα ήταν 60000 χιλιόμετρα, μεγαλύτερη από τη διάμετρο της Γης.

Ένα σταθερό τέτοιο μοτίβο παρατηρήθηκε για το PSRB0329+54. Οι παρατηρήσεις έγιναν στην Αγγλία και στον Καναδά, με μεταξύ τους απόσταση 6833 χιλιόμετρα. Ο προσανατολισμός αυτής της έκτασης παρατήρησης αλλάζει με την κίνηση της Γης. Αυτό το παλσαρ είναι αειφανής, έτσι μια πλήρης περιστροφή της έκτασης παρατήρησης εμφανίζεται μετά από 24 ώρες παρατήρηση. Οι διακυμάνσεις του σπινθηρισμού είχαν στενή σχέση στα αποτελέσματα των δύο παρατηρητηρίων, αλλά παρουσίασαν διακύμανση του χρόνου. Η διαφορά αυτή ήταν 18 δευτερόλεπτα, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα των 370 km/s. Αυτή είναι η ταχύτητα του μοτίβου στην κίνησή του κατά την έκταση της παρατήρησης που οφείλεται σε μεγαλύτερη ίδια κίνηση του παλσαρ.

Αν μπορούμε να θεωρήσουμε τις ανωμαλίες σταθερές και αμετάβλητες, μπορούμε έτσι να μετρήσουμε την ταχύτητα διάδοσης της πηγής σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής της Γης, που είναι συνήθως συγκριτικά πολύ μικρή. Οι ταχύτητες μακρινών παλσαρ

υποτιμούνται με αυτήν την μέθοδο, επειδή η συγκέντρωση μεσοαστρικής ύλης στο γαλαξιακό επίπεδο επηρεάζει τις μετρήσεις.

Για τα περισσότερα παλσαρ, η ίδια ταχύτητά τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της τροχιάς της Γης, αλλά για μερικά μπορεί να υπάρξει μια μετρήσιμη διακύμανση της ταχύτητας ξεθωριάσματος στην πάροδο των ετών, καθώς κυμαίνεται η διανυσματική πρόσθεση των ταχυτήτων. Η ταχύτητα ξεθωριάσματος του PSRB1929+10 κυμαίνεται κατά έναν παράγοντα 10 μέσα σε ένα έτος.

Η διεύρυνση των παλμών.

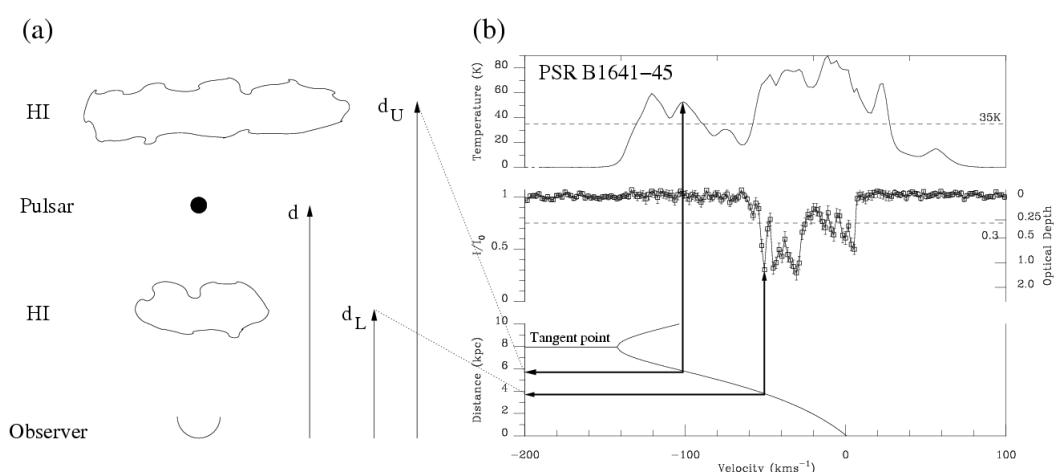
Ο σπινθηρισμός είναι η πιο προφανής, αλλά όχι η μόνη επίδραση της διάδοσης μέσω ανωμαλιών του ιονισμένου μεσοαστρικού αερίου. Παρατηρήσεις μακρινών παλσαρ, μερικώς σε χαμηλές ραδιοσυχνότητες, που αναμένουμε να μας δείξουν ακραίες επιδράσεις του σπινθηρισμού, μας δείχνουν επίσης το σχετικό φαινόμενο της διεύρυνσης των παλμών.

Ας θεωρήσουμε μια λεπτή <λάσπη> (slab) ύλης σκέδασης περίπου στα μισά της διαδρομής από την πηγή στον παρατηρητή. Αν αυτή συμπεριφέρεται ως ένα παχύ μέσο σκέδασης, με την έννοια ότι προβαίνει σε μεγάλες τυχαίες αλλαγές φάσεων, τότε οι ακτίνες που εκπέμφθηκαν σκεδάζονται με μια Gaussian γωνιακή διασπορά.

Πολλαπλή σκέδαση.

Οι θεωρητικές λύσεις της διεύρυνσης των παλμών θέτουν ή τις γεωμετρικές ή τις περιθλαστικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα. Μια θεωρητική οπτική προσέγγιση που περιλαμβάνει την θεωρία των ακτίνων είναι κατάλληλη για την πολλαπλή σκέδαση και τους πολύ διευρυμένους παλμούς, ενώ η προσέγγιση της διάθλασης χρειάζεται για περιπτώσεις όπου η πολλαπλή σκέδαση δεν έχει εκτιμηθεί πλήρως.

Η επίδραση είναι παρόμοια με αυτή της οθόνης στο μέσον μεταξύ πηγής και παρατηρητή, αλλά αν είναι πιο κοντά στην πηγή ή στον παρατηρητή, η κλίμακα χρόνου μικραίνει προς την πιο κοντινή από τις δύο αποστάσεις.



Μεγάλης χρονικής διάρκειας διακυμάνσεις της έντασης.

Αμέσως μετά την ανακάλυψη των παλσαρ έγινε γνωστό ότι οι έντασή τους κυμαίνεται σε πολύ μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες από αυτές που έχουν σχέση με τον σπινθηρισμό.

Αυτές μπορούσαν να μελετηθούν μόνο με μακροχρόνιες παρατηρήσεις πολλών μηνών. Η προέλευση αυτών των διακυμάνσεων συσχετίστηκε με τον ίδιο τον μηχανισμό περιστροφής των παλσαρ ή με τις συνθήκες διάδοσης που επικρατούν πολύ κοντά του.

Βρέθηκε μια στενή σχέση ανάμεσα στην χρονική κλίμακα έντασης και της διασποράς μιας ομάδα παλσαρ. Αυτό μπορούσε να σημαίνει μόνο ότι οι διακυμάνσεις δημιουργούνται στην μεσοαστρική ύλη και πρέπει να αντιμετωπίζονται ως μια άλλη μορφή σπινθηρισμού. Επίσης πρέπει να έχουν σημασία οι μεγάλης χρονικής διάρκειας διακυμάνσεις της πυκνότητας των ηλεκτρονίων. Η χρονική αυτή κλίμακα μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας, κάτι αντίθετο με την μέχρι τότε εμπειρία και θεωρία του σπινθηρισμού.

Η εξήγηση δόθηκε όταν διαπιστώθηκε πειραματικά ότι η διάδοση δέσμης λέιζερ μέσω διάχυτου αερίου δέχεται παρόμοια επίδραση, με δύο συνυπάρχοντα καθεστώτα γωνειακής σκέδασης. Οι αργές αυτές διακυμάνσεις είναι τώρα γνωστές ως σπινθηρισμοί διάθλασης.

Η επιρροή στην συχνότητα στα δυναμικά φάσματα των παλσαρ έχει σχέση με την διάθλαση σε μεγάλης κλίμακας ανωμαλίες, που συνυπάρχει με τις σκεδάσεις μικρής κλίμακας.

Το μεσοαστρικό μαγνητικό πεδίο.

Τα μαγνητικά πεδία των παλσαρ είναι τεράστιας ισχύος (10στη12 Gauss). Τα ραδιοκύματα των παλσαρ όμως μας βοηθάνε στην μέτρηση του ασθενές μεσοαστρικού μαγνητικού πεδίου, στην γραμμή θέασης του παρατηρητή, της τάξης του 1- 10 microgauss. Η σύνδεση της παρατήρησης ανάμεσα σε αυτές τις ακραίες τιμές είναι απλή. Το ισχυρό πεδίο των παλσαρ ευθύνεται για την γραμμική πόλωση της ραδιοεκπομπής, ενώ η περιστροφή Faraday του επιπέδου της πολικότητας στο μεσοαστρικό διάστημα αποτελεί μέτρηση του μεσοαστρικού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της γραμμής θέασης.

Το μεσοαστρικό μαγνητικό πεδίο παρατηρήθηκε από μια μικρή γραμμική πολικότητα που ήταν ίδια για πολλά άστρα στην ίδια κατεύθυνση. Έχει να κάνει με την σκέδαση από τους επιμήκους κόκκους σκόνης που σκεδάζουν ανισότροπα και ευθυγραμμίζουν τους μεγάλους άξονές τους προς το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο. Η ευθυγράμμιση αυτή συμβαίνει μέσω της αλληλεπίδρασής τους με το μαγνητικό πεδίο. Κάθε περιστροφή των κόκκων αυτών, που φέρνει τους μεγάλους άξονές τους περιοδικά σε ευθυγράμμιση και μη με το μαγνητικό πεδίο, θα υποβαθμιστεί. Έτσι το επίπεδο της πολικότητας μας δίνει μια πολύ χρήσιμη μέτρηση του προσανατολισμού του μαγνητικού πεδίου, αλλά όχι την ισχύ του. Το επίπεδο της πολικότητας είναι ανάλογο με την κατεύθυνση του πεδίου, και ο βαθμός πολικότητας με τον βαθμό οργάνωσης του πεδίου.

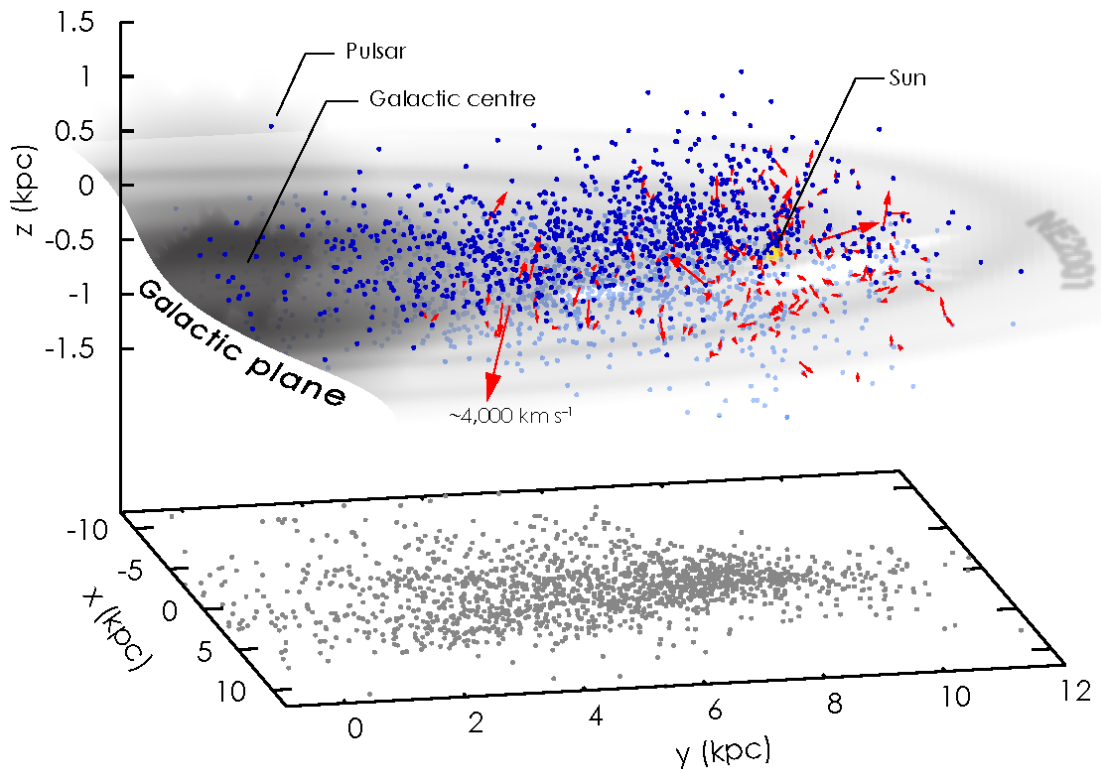
Έχουμε επιτυχείς μετρήσεις της πολικότητας στα ραδιοκύματα υποβάθρου, από τα 21cm ως τα 2m. Στα μεγαλύτερα μήκη κύματος έχουμε πολλές επιδράσεις από την περιστροφή Faraday, μεταξύ της πηγής και του παρατηρητή. Η καλύτερη μελέτη αυτής της περιστροφής γίνεται άμεσα από τις παρατηρήσεις των παλσαρ, στα μικρά μήκη ραδιοκυμάτων. Εκεί η περιστροφή Faraday είναι μικρή, και η πολικότητα ξεπερνάει το 10% σε κάποιες περιοχές του διαστήματος, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει ένα πεδίο με καλή ευθυγράμμιση σε κάποια σημαντική απόσταση. Η μεγαλύτερη πολικότητα παρατηρείται σε γαλαξιακό πλάτος 140 μοιρών, όπου φαίνεται η γραμμή θέασης να είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο για μερικές εκατοντάδες παρσεκ.

Μια πολύ άμεση μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε κάποιες συγκεκριμένες περιοχές γίνεται μέσω του φαινομένου Zeeman. Η φασματική γραμμή των 21 εκατοστών του ουδέτερου υδρογόνου διαχωρίζεται σε ένα μαγνητικό πεδίο, δίνοντας δύο γραμμές αντίθετης κυκλικής πολικότητας, που τις χωρίζουν 2,8 Hz ανά microgauss. Αυτό παρατηρήθηκε στην απορρόφηση, όταν τα πλάτη κάποιων μεμονομένων πεδίων απορρόφησης είναι αρκετά μικρά ώστε να παρατηρούμε αυτό το χώρισμα. Τα πεδία που μετράμε με αυτόν τον τρόπο είναι συχνά μεγαλύτερα από 10 microgauss. Φυσικά αντιπροσωπεύουν μεμονομένα νέφη απορρόφησης με υψηλή τοπική πυκνότητα και με ισχύ πεδίου όχι τόσο τυπική για την μεσοαστρική ύλη.

Σε αντίθεση με το τοπικό φαινόμενο Zeeman, η περιστροφή Faraday παρατηρείται σαν ολοκληρωμένο φαινόμενο στην γραμμή θέασης. Το πιο σοβαρό πρόβλημα στην ερμηνία των παρατηρήσεων της περιστροφής αυτής σε εξωγαλαξιακές πηγές είναι η απομόνωση του γαλαξία της πηγής, λόγω μεγάλης εγγενούς περιστροφής των γαλαξιών. Μετρώντας όμως αυτές τις ιδίες κινήσεις μπορούμε να έχουμε καλά αποτελέσματα. Πρέπει να συνυπολογίσουμε την θέση της πηγής σε σχέση με το επίπεδο του Γαλαξία μας και την επίδραση της μέτρησης από τον τοπικό μας βραχύονα. Σε γαλαξιακές πηγές αυτό το πρόβλημα δεν υπάρχει. Η περιστροφή Faraday στο επίπεδο της πολικότητας μετριέται με την γωνία θέσης της πολικότητας σε πολλές ραδιοσυχνότητες. Αν ένα παλσαρ βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση πάνω από το γαλαξιακό επίπεδο, τότε η πυκνότητα ηλεκτρονίων μπορεί να είναι μικρή. Η μέτρηση της περιστροφής δεν εξαρτάται πολύ από το μαγνητικό πεδίο της άμεσης γειτνίασης, αλλά κυρίως από το μαγνητικό πεδίο κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο.

Η διαμόρφωση του τοπικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο αναμένεται να ακολουθάει χονδρικά τις δομές των βραχυόνων, που μας τις αναλύουν οι παρατηρήσεις του υδρογόνου στα 21 εκατοστά. Ο τοπικός βραχύονας εκτείνεται σχεδόν αζυμουθικά. Έχει κλίση 80 μοιρών στην ακτινική κατεύθυνση προς το κέντρο. Τα κοντινότερα παλσαρ μας δείχνουν το αναμενόμενο επίπεδο σε κάθε πλευρά της κατεύθυνσης εκπομπής, αλλά έχουμε και πολλές ασυμφωνίες, ιδίως σε πιο μακρινά παλσαρ. Τα πιο πολλά παλσαρ είναι κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο, και μερικά απέχουν λίγα Kpc από αυτό.



Ενώ αυτή η συγκέντρωση μπορεί να έχει σχέση με το ότι είναι η περιοχή που έχουμε παρατηρήσει περισσότερο (φαινόμενη συγκέντρωση), μας βοηθάει στην εξερεύνηση της δομής των βραχυόνων που βρίσκονται πίσω από τον τοπικό βραχύονα. Οι αποστάσεις αυτές υπολογίστηκαν από την μέτρηση της διασποράς, με το μοντέλο της κατανομής των ηλεκτρονίων. Έτσι έχουμε μια εκτίμηση για τις τοποθεσίες των 4 βραχυόνων, και ότι η απόσταση του Ηλίου από το γαλαξιακό κέντρο είναι 8,5 kpc. Δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο το πότε γίνεται αντίθετη η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε γειτονικούς βραχύονες. Η ανακρίβεια των αποστάσεων παραμένει πρόβλημα, γιατί μπορεί να δίνει λάθος τοποθέτηση ενός παλσαρ, από την άκρη ενός βραχύονα όπου βρίσκεται πραγματικά, στην γειτονική άκρη ενός άλλου βραχύονα. Έτσι χρησιμοποιούμε παλσαρ που βρίσκονται προς το εσωτερικό των βραχυόνων. Αυτά μας έδειξαν ότι το μαγνητικό πεδίο είναι προσανατολισμένο προς την ίδια κατεύθυνση σε όλους τους βραχύονες, αλλά είναι αντίστροφο ανάμεσα στους βραχύονες. Αυτό λέγεται αντί-συμμετρικό πεδίο (bi-symmetric pattern). Η ισχύ του οργανωμένου αυτού πεδίου είναι περίπου 2 μG στον τοπικό βραχύονα και 4 μG πιο κοντά στο γαλαξιακό κέντρο.

Η γραμμή θέασης προς ένα παλσαρ σε γαλαξιακό πλάτος μικρότερο από 8 μοίρες δεν μπορεί να διατέμνει τους πιο μακρινούς βραχύονες, και η μέτρηση περιστροφής αυτών των παλσαρ παρουσιάζει καθαρό πεδίο μόνο σε σχέση με τον τοπικό βραχύονα. Όπως αναμέναμε, η διασπορά θετικών και αρνητικών τιμών είναι πιο ξεκάθαρη, αλλά παραμένουν κάποιες τυχαίες διακυμάνσεις της ισχύς, ακόμα και της πολικότητας, σε εύρος χωρικής κλίμακας. Οι συνεισφορές των οργανωμένων και των τυχαίων μαγνητικών πεδίων στην πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας είναι περίπου ίδιες στο γαλαξιακό επίπεδο. Η επίδραση των μαγνητικών πεδίων του βραχύονα σε όρους διπολικού πεδίου για όλον τον Γαλαξία μπορεί να είναι μικρή, αφού το πεδίο μέσα στον βραχύονα ακυρώνεται από το αντίθετο πεδίο ανάμεσα στους βραχύονες. Το πεδίο παρουσιάζεται προς τα έξω πολύ λίγο οργανωμένο. Λόγω του ότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχουν ελάχιστα παλσαρ, οι

περισσότερες πληροφορίες που μας έρχονται από αυτές τις κατευθύνσεις είναι από εξωγαλαξιακές πηγές.

Η επίδραση των περιοχών (HII).

Η τυχαία σύνθεση του πεδίου, όπως φαίνεται από την διασπορά των μετρήσεων περιστροφής, είναι αναμενόμενη από τις παρατηρήσεις της πολικότητας του υποβάθρου εκπομπής ραδιοκυμάτων. Οι ανωμαλίες στο μαγνητικό πεδίο παρατηρούνται σε κλίμακα δεκάδων παρσεκ και έχουν στενή σχέση με το κυρίως πεδίο. Υπάρχει μια εκτεταμένη ανωμαλία που σχετίζεται με το νότιο γαλαξιακό πέταλο, που πρέπει να είναι υπόλλειμα κελύφους σουπερνόβα. Μια έρευνα της μέτρησης περιστροφής στην περιοχή του τοπικού βραχύονα (Περσέα) μας δείχνει ότι έχουμε μεγάλες επιρροές από τις περιοχές ιονισμένου υδρογόνου (HII). Αυτές έχουν σημασία στην μεγάλη κατανομή των απλών πεδίων στην διασπορά μέτρησης περιστροφής. Όπως αναμέναμε, ένα παλσαρ πίσω από μια περιοχή (HII) θα δώσει μεγάλη τιμή περιστροφής, λόγω θερμικής εκπομπής αυτής της περιοχής.

Σημείωση 1 Εκφυλισμός

Σε ένα φερμιονικό αέριο, στο οποίο κυριαρχεί η θερμική επίδραση, τα περισσότερα διαθέσιμα ενεργειακά επίπεδα των ηλεκτρονίων δεν είναι συμπληρωμένα και τα ηλεκτρόνια έχουν την ελευθερία να κινηθούν σε αυτά. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των σωματιδίων, τόσο γεμίζουν τα επίπεδα χαμηλότερης ενέργειας, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να είναι αναγκασμένα να καταλαμβάνουν επίπεδα μεγαλύτερης ενέργειας, ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στην εκφυλισμένη ύλη υπάρχει μεγάλη αντίσταση στην περαιτέρω συμπίεση, γιατί τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να κινηθούν σε ήδη γεμάτα επίπεδα χαμηλής ενέργειας, λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli.

Αφού τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να απελευθερώσουν ενέργεια, όπως κάνουν κατά την μετάβασή τους σε χαμηλότερης ενέργειας επίπεδα, δεν μπορεί να αποβληθεί θερμική ενέργεια. Η ορμή των φερμιονίων σε ένα φερμιονικό αέριο τότε δημιουργεί την εκφυλιστική πίεση.

Για να έχουμε εκφυλισμό, πρέπει όλα τα ηλεκτρόνια να έχουν αποδεσμευτεί από τους ατομικούς πυρήνες. Όταν σε ένα αστέρι ολοκληρωθεί η καύση του υδρογόνου στον πυρήνα, αυτός γεμίζει θετικά ιόντα (πυρήνες χωρίς δεσμευμένα ηλεκτρόνια), κυρίως ηλίου αλλά και άνθρακα, που <κλυμπάνε> σε μια θάλασσα ηλεκτρονίων. Το εκφυλισμένο αέριο είναι ένας σχεδόν τέλειος αγωγός της θερμότητας και δεν υπακούει στους νόμους για τα συνήθη αέρια. Οι λευκοί νάνοι λάμπουν όχι λόγω παραγωγής ενέργειας, αλλά επειδή έχουν αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας, την οποία αποβάλλουν. Τα κανονικά αέρια αυξάνουν την πίεσή τους όταν θερμαίνονται, με αποτέλεσμα να διαστέλλονται. Σε ένα εκφυλισμένο αέριο η πίεση δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία. Όταν ένα αέριο γίνει

υπερσυμπιεσμένο, τα σωματίδια πλησιάζουν πολύ το ένα το άλλο και δημιουργούν ένα εκφυλισμένο αέριο, που συμπεριφέρεται περισσότερο σαν στερεό. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων σε αυτό είναι μεγάλη αλλά οι συγκρούσεις τους με άλλα ηλεκτρόνια ή άλλα σωματίδια είναι σπάνιες, επιτρέποντας στα εκφυλισμένα ηλεκτρόνια να διανύουν μεγάλες αποστάσεις με σχετικιστικές ταχύτητες. Σε ένα σχετικιστικό αέριο η πίεση εξαρτάται μόνο από τις ταχύτητες των ηλεκτρονίων και όχι από την θερμοκρασία, που δεν αυξάνει αυτές τις ταχύτητες. Η πίεση αυξάνεται μόνο από την μάζα των σωματιδίων, που αυξάνει την πίεση της βαρύτητας στο να πλησιάσουν μεταξύ τους. Έτσι, έχουμε αντίθετα αποτελέσματα με την αύξηση της μάζας από ότι στην κανονική ύλη. Εδώ με την αύξηση της μάζας το αντικείμενο μικραίνει, αντί να μεγαλώνει. Σε ένα εκφυλισμένο αέριο, με την αύξηση της μάζας ανεβαίνει η προς τα μέσα πίεση και τα σωματίδια έρχονται πιο κοντά, μειώνοντας τον μεταξύ τους χώρο, με αποτέλεσμα το αντικείμενο να συρρικνώνεται.

Υπάρχει ένα όριο σε αυτήν την κατάρρευση, το όριο Chandrasekhar, που μας λέει ότι μπορεί να αυξηθεί η μάζα ως 1,44 ηλιακές, για χημικές συστάσεις κοντά σε αυτές του Ηλίου μας. Το όριο αυτό κυμαίνεται ανάλογα τα στοιχεία (χημική σύσταση), γιατί αυτά έχουν διαφορετική πυκνότητα σωματιδίων. Μετά από αυτό το όριο η βαρύτητα υπερέρχει της πίεσης των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα αυτά να καταρρέουν πάνω στους πυρήνες. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί ένας αστέρας νετρονίων (τα ηλεκτρόνια ενώνονται με τα πρωτόνια και σχηματίζουν νετρόνια). Αν η μάζα είναι τόσο ώστε η βαρύτητα να είναι ισχυρότερη των πυρηνικών δυνάμεων, διαλύονται οι ατομικοί πυρήνες και έχουμε μια μαύρη τρύπα.

Τα παραπάνω συμβαίνουν στις εκρήξεις σουπερνόβα, δηλαδή ξεπερνιέται το όριο Chandrasekhar, κατά τον εκφυλισμό του πυρήνα σιδήρου. Ο τελευταίος δεν συντήκεται, με αποτέλεσμα τον εκφυλισμό της τεράστιας μάζας του.

Σημείωση 2

Νοβα και σουπερνόβα

Μια έκρηξη Νοβα συμβαίνει με παρόμοιο τρόπο με μια σουπερνόβα Ia, δηλαδή σε ένα διπλό σύστημα με λ. νάνο. Αυτός απορροφάει αργά υλικό από τον συνοδό του. Ενώ κατά την σουπερνόβα εκρήγνυται όλος ο λ. νάνος, επειδή ξεπερνάει το όριο Chandrasekhar (1,4 ηλιακές μάζες), η Νοβα είναι ένα προηγούμενο στάδιο. Σε αυτήν καίγεται εκρηκτικά το υδρογόνο που έχει συσσωρευτεί από την απορρόφηση ύλης λίγων αιώνων. Ο λ. νάνος συγκρατεί το ήλιον που παράγεται κατά αυτή την καύση και αυξάνει έτσι την μάζα του.

Η Νοβα έχει απόλυτη λαμπρότητα μέχρι $-8,5 \text{ mag}$, ενώ η σουπερνόβα Ia 10000 φορές περισσότερη, $-19,2 \text{ mag}$. Μετά την Νοβα το διπλό σύστημα αστερών εξακολουθεί να υπάρχει. Παρόλο την 100000 φορές μεγαλύτερη λαμπρότητα από τον Ήλιο μας, κατά την Νοβα καίγεται υδρογόνο μάζας μόνο ένα χιλιοστό της ηλιακής. Το κέλυφος από αυτή την έκρηξη είναι πολύ αραιό, με ένα χιλιοστό της ηλιακής μάζας (περιλαμβάνει το υλικό που συσσωρεύεται γύρω από τον λ. νάνο). Συγκριτικά, ένα κέλυφος από έκρηξη σουπερνόβα περιέχει μερικές ηλιακές μάζες. Έτσι το κέλυφος της Νοβα γίνεται γρήγορα διάφανο, κάτι που φαίνεται από την μετάβαση από φάσμα υδρογόνου προφίλ P Κύκνου (ερυθρή εκπομπή, μπλε απορρόφηση) σε καθαρή εκπομπή. Στις αργές Νοβα τύπου DQ Ηρακλή έχουμε να κάνουμε με έναν μικρής ακόμα μάζας λ. νάνο. Αυτές είναι πιο σπάνιες γιατί αργεί να μαζευτεί αρκετό υδρογόνο από τον λ. νάνο, ώστε να ακολουθήσει η επόμενη έκρηξη. Η απόλυτη λαμπρότητα του DQ Ηρακλή (το 1934) ήταν μόνο $-7,5 \text{ mag}$, αλλά κράτησε μεγάλη λαμπρότητα για μήνες.

Οι γρήγορες Νοβα είναι πιο συνήθεις, όπως πρόσφατα η Νοβα στο Δελφίνι (2013). Σε αυτήν την κατηγορία οι λ. νάνοι έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη μάζα και δίνουν εκρήξεις κάθε λίγες δεκαετίες. Όλο και πλησιάζουν το όριο Chandrasekhar. Η λαμπρότητα των εκρήξεών τους μειώνεται γρήγορα.

Σημείωση 3.

Μια ακραία μεγάλης διάρκειας έκρηξη ακτίνων γ από μάγνεταρ.

Το Swift ανακάλυψε μια έκρηξη ακτίνων γ με διάρκεια 4 ώρες (συνήθως έχουν διάρκεια δευτερόλεπτα ή λεπτά). Μετά από 4 έτη βρέθηκε ότι η έκρηξη αυτή προήρθε από μια σουπερνόβα Ic, με πηγή ενέργειας ένα ταχύτατο (περιστροφή 12 ms) περιστρεφόμενο μάγνεταρ (GRB111209A). Βάσει της λάμψης σε δεύτερο χρόνο στο ορατό (afterglow) εκτιμήσαμε την απόστασή της σε $z = 0,68$. Οι σουπερνόβα φασματικού τύπου Ic δημιουργούνται όταν καταρρέει ένα μεγάλο αστέρι σε μάγνεταρ. Η έκρηξη αυτή (SN 2011kl) ήταν τόσο λαμπρή, ώστε να μην εξηγείται η λαμπρότητά της μόνο με την διάσπαση του Νικελίου 56. Ο αστέρας νετρονίων που προέκυψε πρέπει να έχει πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο, που αλληλοεπίδρασε με το γύρω αέριο, το οποίο και εκτινάχτηκε από την έκρηξη. Αυτό θερμάνθηκε τόσο από αυτή την διαδικασία που απελευθέρωσε τεράστιες ποσότητες ακτινοβολίας γ. Έτσι εξηγείται και η μεγάλη λαμπρότητα της έκρηξης, αλλά και η μεγάλη διάρκεια της έκρηξης ακτίνων γ.

Σημείωση 4

Στον νότιο αστερισμό διαβήτη βρίσκεται η πηγή ακτίνων X Circinus X-1. Πρόκειται για ένα στενό διπλό σύστημα με έναν αστέρα νετρονίων να περιφέρεται γύρω από ένα κανονικό αστέρι. Αυτό το σύστημα παρουσιάζει ισχυρά ξεσπάσματα ακτινοβολίας X, με το τελευταίο να παρατηρήθηκε το 2013. 4 μήνες μετά το τελευταίο ξέσπασμα παρατηρήσαμε ότι δημιουργήθηκαν δακτύλιοι γύρω από το σύστημα (στις ακτίνες X). Αυτοί οι δακτύλιοι είναι μια ηχώ από ένα πλούσιο σε σκόνη νέφος που αντανακλάει τις ακτίνες X. Με την χρήση ραδιοτηλεσκοπίου μετρήθηκε η απόσταση αυτού του νέφους σκόνης. Να σημειώσουμε ότι η ηχώ αυτή είχε 1-3 μήνες καθυστερημένη άφιξη σε εμάς σε σχέση με την άμεση εκπομπή ακτίνων X από το σχετικό ξέσπασμα. Τα παραπάνω δεδομένα μας βοήθησαν να εκτιμήσουμε την απόσταση της πηγής στα 30700 έτη φωτός. Αυτό σημαίνει ότι στις προηγούμενες μετρήσεις, που τοποθετούσαν την πηγή πιο κοντά μας, υποτιμήθηκε η λαμπρότητά της.

