

Πτυχιακή Εργασία

Microquasars : Οι παράδοξες ιδιότητες του
αντικειμένου SS433

του
Αλέξη Καυγά

Φοιτητή του τμήματος Φυσικής
του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Επιβλέπων καθηγητής: Σειραδάκης Ι.Χ.

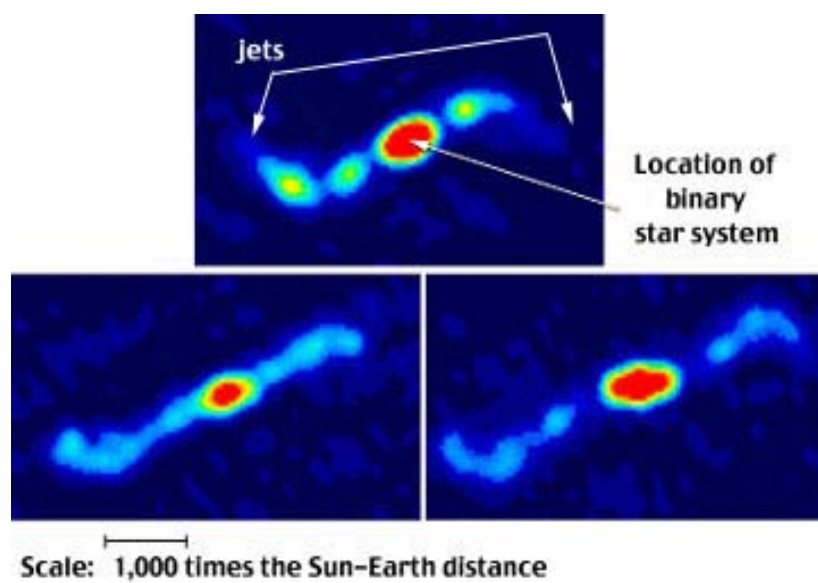
Θεσσαλονίκη
Απρίλιος 2004

Περίληψη

Η παρούσα εργασία διαπραγματεύεται κατά κύριο λόγο τη μελέτη των φαινομένων που διέπουν μια ξεχωριστή κατηγορία αντικειμένων των οποίων η ύπαρξη ταυτοποιήθηκε σχετικά πρόσφατα. Πρόκειται για τα microquasars που αποτελούν νέες αστρικές πηγές σχετικιστικών πιδάκων. Οι σχετικιστικοί πίδακες ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά στους πυρήνες των ενεργών γαλαξιών και τα μακρινά quasars. Αντιλαμβάνεται κανείς αμέσως τη σημασία που έχει – για την πληρέστερη κατανόηση φαινομένων όπως αυτά που διέπουν τη φυσική των μακρινών αντικειμένων – η μελέτη γαλαξιακών αντικειμένων που εμφανίζουν παρόμοια φαινόμενα.

Γι' αυτό γίνεται πρώτα μια εκτενής αναφορά στις βασική φυσική των microquasars σε συνδυασμό με τις γνώσεις που έχουμε και χαρακτηρίζουν άλλες πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία. Ακολούθως επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στο αντικείμενο SS433 και μελετούμε τις παράδοξες, για γαλαξιακό αντικείμενο, ιδιότητές του. Εισάγουμε τη θεωρία της κινηματικής των πιδάκων, όπως την παρέχει το ευρέως αποδεκτό πρότυπο.

Τέλος, αφού επιδιωχθεί η λήψη μιας γενικής εικόνας για την εσωτερική ραδιοφωνική περιοχή των πιδάκων και το σύνθετο περιβάλλον του αντικειμένου SS433, παρατίθενται παρατηρήσεις του microquasar αυτού σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος καθώς και ραδιοφωνικοί χάρτες της αλληλεπίδρασης των πιδάκων με το μεσοαστρικό χώρο. Η παρούσα εργασία κλείνει με μια σύντομη αναφορά στην προαναφερθείσα αναλογία με εξωγαλαξιακά αντικείμενα και θέματα.



To microquasar SS433

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	7
1 Microquasars και άλλες πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία	
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Πίδακες στην Αστροφυσική.....	8
1.3 Microquasars.....	12
1.4 Κατάλογος των microquasars και δυνατότητα ανίχνευσης ακτινοβολίας γ που να προέρχεται από αυτά	15
1.5 Πηγές με υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα.....	17
1.5.1 Υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα στο αντικείμενο GRS 1915+105...	19
1.5.2 Υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα στο αντικείμενο GRO J1655-40 ..	21
1.5.3 Υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα στο αντικείμενο XTE J1748-288 ..	25
1.6 Επίδραση της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας	25
1.6.1 Παράμετροι της εκπομπής	25
1.6.2 Καθορισμός της απόστασης με σχετικιστικές μεθόδους.....	26
1.6.3 Μετάθεση Doppler.....	27
1.7 Αστάθειες του δίσκου προσάυξης και δημιουργία πίδακα.....	28
1.8 Σχετικά με τη δημιουργία των πιδάκων.....	31
1.9 Εκπομπή ακτινοβολίας σύγχροτρον	32
1.10 Άλλες πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία μας.....	34
1.11 Αλληλεπίδραση σχετικιστικών πιδάκων με το μεσοαστρικό περιβάλλον.....	36
1.12 Συμπεράσματα και προοπτικές	38
2 Το αντικείμενο SS433 και οι παράδοξες ιδιότητές του	
2.1 Εισαγωγή – Τι είναι το αντικείμενο SS433.....	41
2.2 Το κινηματικό πρότυπο των πέντε παραμέτρων (kinematic model)...	42
2.3 Η απόσταση του SS433.....	49
2.4 Το διπλό σύστημα (binary system).....	50
2.5 Ο μηχανισμός των πιδάκων (the jet engine).....	50
2.6 Ραδιοφωνική εκπομπή από το SS433.....	51
2.7 Οι ραδιοφωνικές δέσμες σε μικρές κλίμακες.....	51
2.8 Καμπάνιες παρατήρησης σε διάφορα μήκη κύματος.....	52
2.9 Η συμπαγής ραδιοφωνική δομή του SS433.....	54
2.9.1 Τα γεγονότα εκλάμψεων.....	55
2.10 Φυσικοί περιορισμοί των εκροών	57

3 Η Ραδιοφωνική εκπομπή κεντρικής περιοχής των πιδάκων και το σύνθετο περιβάλλον του αντικειμένου SS433

3.1 Εισαγωγή.....	60
3.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία δεδομένων.....	61
3.3 Η περιοχή του πυρήνα και οι εσωτερικοί πίδακες	63
3.4 Οι ανώμαλες περιοχές εκπομπής NE και SW.....	66
3.5 Συμπεράσματα.....	67

4 Παρατήρηση του SS433 σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος και αλληλεπίδραση των πιδάκων με το μεσοαστρικό χώρο

4.1 Εισαγωγή.....	68
4.2 Παρατηρήσεις σε διάφορα μήκη κύματος (Multi wavelength observations).....	68
4.2.1 ISOCAM.....	68
4.2.2 Ραδιοφωνικές παρατηρήσεις	71
4.2.3 Παρατηρήσεις στις ακτίνες X.....	71
4.2.4 Υπέρυθρες και χιλιοστομετρικές παρατηρήσεις.....	73
4.3 Αναλογία με εξωγαλαξιακά αντικείμενα και θέματα.....	75
4.4 Συμπεράσματα.....	76

Βιβλιογραφία	78
---------------------------	-----------

Εισαγωγή

Ο όρος microquasars, χρησιμοποιήθηκε ούτως ώστε να περιγραφούν κατάλληλα γαλαξιακές πηγές οι οποίες χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη σχετικιστικών ραδιοφωνικών πιδάκων. Όλες αυτές οι πηγές θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ως διπλά συστήματα ακτίνων X (X-ray binaries) που εκπέμπουν ισχυρή ραδιοφωνική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα πρόκειται για HMXBs ή LMXBs (high-/low-mass X-ray binaries).

Η ονομασία microquasar έχει επιλεγεί για να τονίζει το γεγονός ότι η αναλογία των αντικειμένων αυτών με τα quasars δεν εντοπίζεται και δεν αφορά μονάχα τη μορφολογική τους δομή αλλά μπορεί να αναδειχθεί η συσχέτιση που αποδεικνύει την ενότητα στη φυσική των μαύρων τρυπών που προσανξάνουν μάζα είτε πρόκειται για μαύρες τρύπες με μάζα όσο μερικές αστρικές στα διπλά συστήματα, είτε για υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες στα κέντρα των απομακρυσμένων γαλαξιών.

Το SS433 είναι ένα διπλό δι'εκλείψεων σύστημα (eclipsing binary star). Η περίοδος περιστροφής του συστήματος είναι περίπου 13 μέρες, ενώ ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο μελών του συστήματος είναι της τάξης του 1AU (10^{12} cm). Το μέγεθός του έξω από τις εκλείψεις είναι $V \sim 14.0$, παρότι η εν λόγω τιμή μπορεί να αλλάξει με λαμβάνοντας υπ' όψη την περίοδο μετάπτωσης. Οι περισσότεροι συντάσσονται με την άποψη που θέλει το σύστημα να αποτελείται από έναν νεαρού τύπου αστέρα και έναν δίσκο προσαύξεσης γύρω από ένα εξαιρετικά συμπαγές αντικείμενο. Ο δίσκος προσαύξεσης δημιουργεί τη συμμετρική επίπεδη επιφάνεια που παρατηρείται και θεωρείται ως το πλέον ιδανικό περιβάλλον για τη δημιουργία σχετικιστικών συμπυκνώσεων σωματιδίων ενός αστρικού αντικειμένου.

Το γεγονός που καθιστά το SS433 ξεχωριστό έγκειται στο ότι αντιπαράλληλες δέσμες πηγάζουν από το χώρο της πηγής με σχετικιστικές ταχύτητες. Ο λόγος για τον οποίο ήταν εξαιρετικά δημοφιλές στις αρχές του 1980 βασιζόταν στο ότι μέσω της μελέτης των αστροφυσικών πιδάκων ενός γαλαξιακού αντικειμένου θα ήταν δυνατή η πληρέστερη κατανόηση και εφαρμογή της ληφθείσας γνώσης στους εξωγαλαξιακούς αστροφυσικούς πίδακες.

Κεφάλαιο 1

1. Microquasars και άλλες πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία

1.1 Εισαγωγή

Μαύρες τρύπες και αστέρες νετρονίων σε διπλά συστήματα παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά ως ισχυρές πηγές ακτίνων X, μέσω των διαστημικών τηλεσκοπίων υψηλών ενεργειών. Σχετικιστικοί πίδακες σε μερικές απ' αυτές τις συμπαγείς πηγές ανακαλύφθηκαν με παρατηρήσεις σε πολλές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με τηλεσκόπια εγκατεστημένα στη γη, όπως αυτές που θα μας απασχολήσουν για το SS433, αποκαλύπτοντας πολλές σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τη δομή του.

Η εκπομπή στις ακτίνες X, μας αποκαλύπτει το εσωτερικό του δίσκου προσαύξησης και το άμεσο περιβάλλον του συμπαγούς αντικειμένου, ενώ η εκπομπή ακτινοβολίας σύγχροτρον (synchrotron emission) από τους πίδακες παρατηρείται στη ραδιοφωνική και στην υπέρυθρη μπάντα, ενώ στο μέλλον θα μπορέσει να παρατηρηθεί και σε άλλα μήκη κύματος. Διπλά συστήματα ακτίνων X με μαύρη τρύπα και σχετικιστικούς πίδακες εμφανίζουν και χαρακτηρίζονται από φαινόμενα που ομοιάζουν, σε πολύ μικρότερη κλίμακα, με αυτά που παρατηρούνται στα quasars, γι' αυτό και είναι γνωστά με την ονομασία microquasars. Εξαιτίας της εγγυτήτάς τους, η μελέτη και η πληρέστερη κατανόηση των φαινομένων που τα διέπουν ανοίγει το δρόμο για καλύτερη κατανόηση της φυσικής των σχετικιστικών πιδάκων που συναντιούνται σε οποιοδήποτε άλλο μέρος του Σύμπαντος.

Εξάλλου από την παρατήρηση των προσανατολιζόμενων σε δύο αντίθετες διευθύνσεις κινούμενων πιδάκων, διαπιστώνεται πως η εκτίναξη ύλης στα microquasars σχετίζεται με σχετικιστικές ταχύτητες παρόμοιες μ' αυτές που χαρακτηρίζουν τα κανονικά quasars. Προσεγγίζοντας τα αντικείμενα αυτά με παρατηρήσεις σε πολλά μήκη κύματος, αποκαλύπτεται η στενή σχέση ανάμεσα στις αστάθειες στο δίσκο προσαύξησης που παρατηρούνται στις ακτίνες X, και την εκπομπή σχετικιστικών νεφών πλάσματος που παρατηρούνται ως εκπομπή σύγχροτρον στα μεγαλύτερα μήκη κύματος.

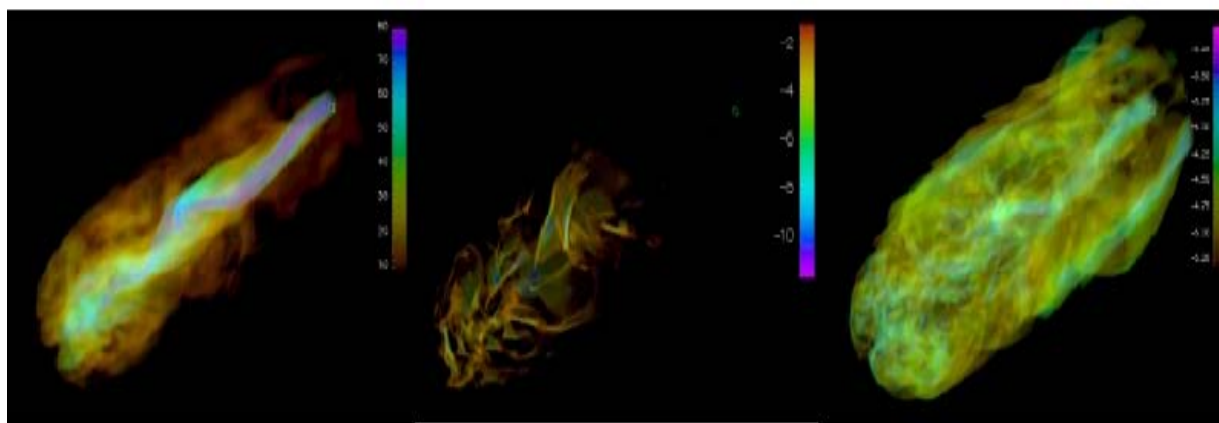
Πάντως συνεισφέροντας στην βαθύτερη και πληρέστερη κατανόηση των δίσκων προσαύξησης και των πιδάκων, τα microquasars μπορεί να αποτελέσουν στο μέλλον αντικείμενα ικανά να μας οδηγήσουν στον καθορισμό των αποστάσεων των πηγών που γέννησαν τους πίδακες, χρησιμοποιώντας βέβαια τις αρχές και τη βασική γνώση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας. Ακόμη μέσω της γενικής θεωρίας της σχετικότητας θα μπορέσει να μελετηθεί η περιστροφική κίνηση των μαύρων τρυπών.

1.2 Πίδακες στην αστροφυσική

Η ύπαρξη των σχετικιστικών πιδάκων συνιστά ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα φαινόμενα στην αστροφυσική. Οι πίδακες αυτοί είναι ευρύτερα γνωστοί ως jets και συνδέονται με ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες. Στο πλέον διαδεδομένο πρότυπο της ερμηνείας τους, απαιτείται η αποδοχή της ύπαρξης ροής ταχυτήτων στο εσωτερικό τους. Οι εν λόγω ταχύτητες μπορεί να προσεγγίζουν το 99 % αυτής του φωτός, ενώ σε μερικές περιπτώσεις μπορεί φαινομενικά να ξεπερνούν και αυτό το ποσοστό. Τα προτεινόμενα μοντέλα για την εξήγηση του σχηματισμού των σχετικιστικών πιδάκων, αφορούν το φαινόμενο προσαύξησης μάζας ενός συμπαγούς κεντρικού αντικειμένου (αστέρας νετρονίων, μαύρη τρύπα).

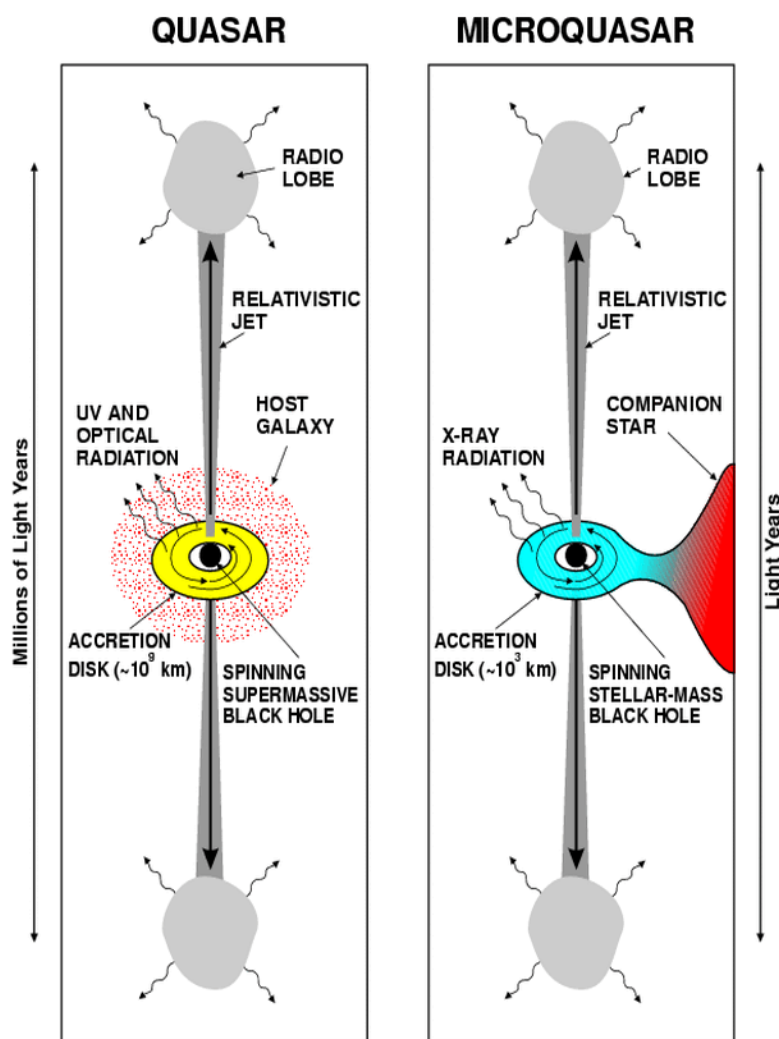
Οι πολύ υψηλές ταχύτητες που παρατηρούνται στο εσωτερικό των πιδάκων μας οδηγούν στο να υποθέσουμε ότι σχηματίζονται σε μικρή απόσταση από τον ορίζοντα γεγονότων μιας μαύρης τρύπας. Οι παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα αποκαλύπτουν ότι πρόκειται για σχηματισμούς ήδη μορφοποιημένους ακόμα και σε κλίμακες μικρότερες του $1pc$. Στις κλίμακες των pc οι πίδακες που παρατηρούνται μέσω της ακτινοβολίας σύγχροτρον και της ακτινοβολίας λόγω του αντιστρόφου φαινομένου *Compton* στις ραδιοφωνικές συχνότητες εμφανίζουν μία σταθερή δομή με ένα φωτεινό σημείο (τον πυρήνα) στο ένα άκρο του πίδακα καθώς και μία σειρά από διαφορετικά τμήματα τα οποία απομακρύνονται με πολύ μεγάλες ταχύτητες από τον πυρήνα. Τα κινούμενα τμήματα στους σχετικιστικούς πίδακες είναι δυνατό να ερμηνευθούν με τη βοήθεια της θεωρίας των κρουστικών κυμάτων.

Η μορφολογία και η δυναμική των πιδάκων σε κλίμακες των χιλιάδων *parsec* κυριαρχούνται από την αλληλεπίδραση των σχηματισμών αυτών με την περιβάλλουσα ύλη.



Σχήμα 1.1 : Αστροφυσικοί πίδακες

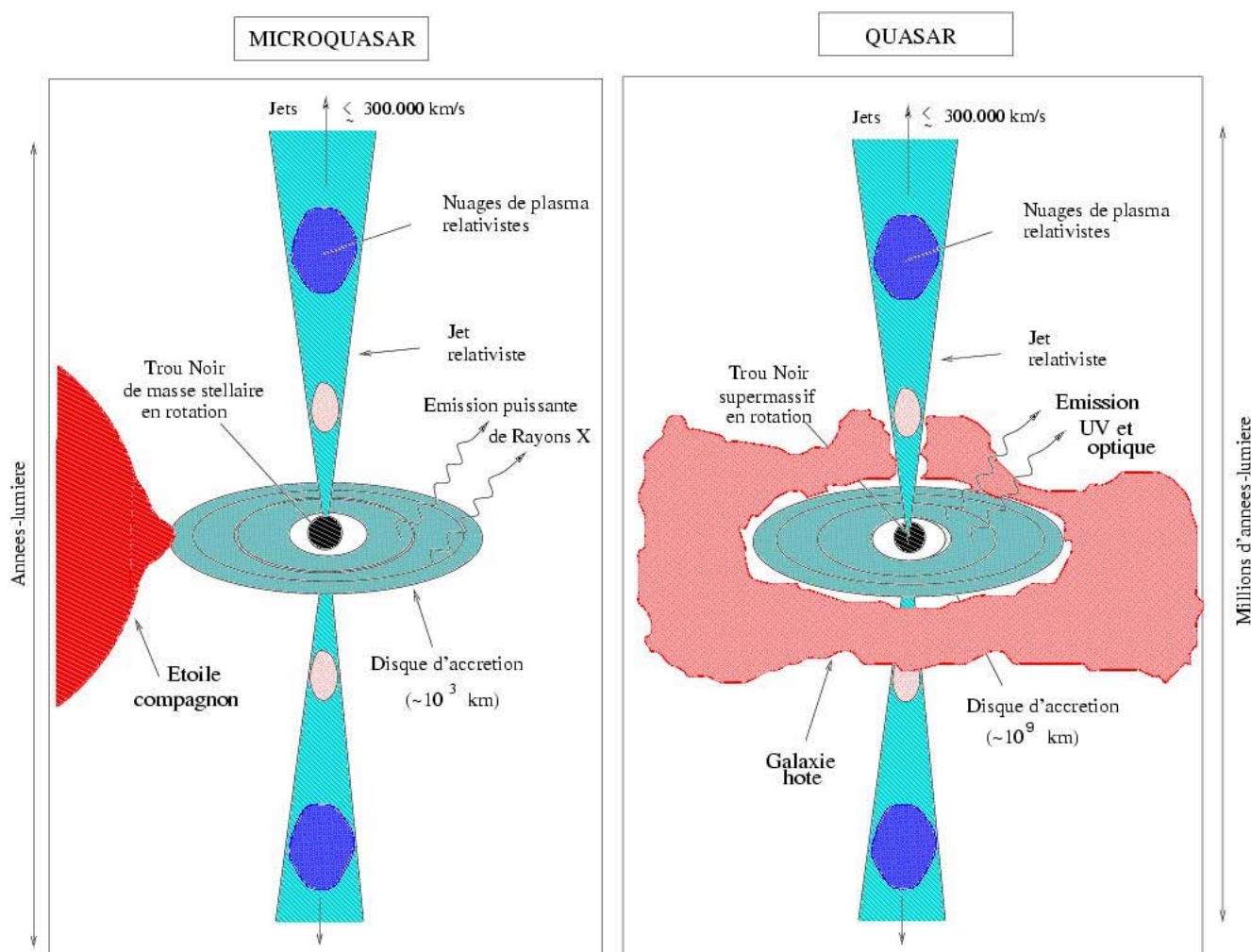
Καθώς οι πρώτες παρατηρήσεις και αποδείξεις για την ύπαρξη δομών που μοιάζουν με πίδακες και εκπηγάζουν από τους πυρήνες των γαλαξιών, χρονολογούνται από το 1918 και αργότερα από την ανακάλυψη του Curtis για τον οπτικό πίδακα από τον ελλειπτικό γαλαξία M87 στο σμήνος γαλαξιών της Παρθένου, η ανακάλυψη ότι πίδακες μπορούν να παραχθούν και να παρατηρηθούν και σε διπλά αστρικά συστήματα είναι πολύ πιο πρόσφατη. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και θα αναλύσουμε, η ανακάλυψη από τον Margon et al. (1979) μεγάλων, περιοδικών μετατοπίσεων των οπτικών φασματικών γραμμών λόγω φαινομένου Doppler στο φάσμα του SS433, κατέληξε στην εξαγωγή ενός κινηματικού πρότυπου (Fabian & Rees 1979; Milgrom 1979) που συμπεριλαμβάνει δύο πίδακες καλά κατευθυνόμενης ύλης με ταχύτητα **0.26c**. Υψηλής γωνιακής διακριτικής ικανότητας ραδιοφωνικές παρατηρήσεις αποκάλυψαν την ύπαρξη ραδιοφωνικών πιδάκων που σχετίζονται με εκτίναξη υλικού περιεχομένου, επιβεβαιώνοντας πλήρως το προτεινόμενο πρότυπο κίνησης (Spencer 1979 ; Gilmore & Seaquist 1980; Gilmore et al. 1981; Hjellming & Johnston 1981). Μια ανασκόπηση της πρόσφατης ιστορίας του SS433 έχει γίνει από τον Margon (1984).



Σχήμα 1.2 : Quasar και microquasar

Μετά την πρώτη ανίχνευση της πηγής Sco X-1 στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος (Ables 1969), και μερικά διπλά συστήματα ακτίνων X εντοπίστηκαν ως ισχυρές, μη θερμικές πηγές εκπομπής μεταβλητές με το χρόνο. Εκτίναξη νεφών που εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον είχε υποπτευθεί και αναμενόταν από εκείνα ακόμη τα χρόνια, αλλά η πραγματική επιβεβαίωση των ραδιοφωνικών πιδάκων κατέστη δυνατή μόνο μέσω των παρατηρήσεων του SS433.

Σήμερα, υπάρχουν περίπου 200 γνωστά γαλαξιακά διπλά συστήματα ακτίνων X (Van Paradijs 1995), εκ των οποίων το 10% περίπου εκπέμπουν πολύ ισχυρά στη ραδιοφωνική μπάντα μηκών κύματος (Hjellming & Han 1995). Απ' αυτά τα διπλά συστήματα ακτίνων X, 9 έχουν παρουσιάσει πληροφορίες που σχετίζονται με σχετικιστικούς πίδακες που εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον, κι αυτή μας η αναφορά θα επικεντρωθεί σ' αυτή ακριβώς την κατηγορία των αντικειμένων. Μετά τον ορισμό και την αποσαφήνιση του θέματος των πιδάκων από τους Bridle & Perley (1984), χρησιμοποιούμε τον όρο πίδακες ("jets") για να περιγράψουμε μεγάλης κατευθυντικότητας εκπομπή που χαρακτηρίζεται από γωνιακό άνοιγμα $\leq 15^\circ$.



Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση ενός microquasar, και το αντίγραφο ενός quasar σε κλίμακα αστρική.

Τα τελευταία χρόνια, εξάλλου, έχει γίνει πλέον σαφές το γεγονός πως καλά κατευθυνόμενη εκπομπή δύναται να παραχθεί σε διάφορα αστρικά περιβάλλοντα, όταν βέβαια ένας δίσκος προσαύξησης είναι παρών. Πίδακες με τελικές ταχύτητες της τάξης μερικών εκατοντάδων έως μερικών χιλιάδων $Kmsec^{-1}$, έχουν πλέον παρατηρηθεί να εκπηγάζουν από αντικείμενα ποικίλα όπως είναι για παράδειγμα πολύ νεαρά αστέρια (Reipurth & Bertout 1997), πυρήνες πλανητικών νεφελωμάτων (Lopez 1997), και λευκοί νάνοι που εμφανίζουν προσαύξηση μάζας που παρατηρούνται ως εξαιρετικά μαλακές πηγές ακτίνων X (Motch 1998, Cowley et al. 1998). Αυτά τα είδη των αστρικών πιδάκων έχουν, όμως, μη σχετικιστικές ταχύτητες ($\sim 100-10000 \text{ Kmsec}^{-1}$) και η άμεσα συσχετίσιμη μ' αυτά εκπομπή είναι κατά κύριο λόγο μη θερμικής φύσεως (π.χ. συνεχής εκπομπή στα ραδιοφωνικά καθώς και χαρακτηριστικές γραμμές τόσο στο οπτικό, όσο στο UV και το κοντινό υπέρυθρο).

Είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσα η αντίληψη που θέλει ένα δίσκο προσαύξησης σε όλους τους γνωστούς τύπους των πηγών που παράγουν πίδακες. Αυτή η εργασία ασχολείται κυρίως σε πίδακες που εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον, με ταχύτητες που μπορούν να θεωρηθούν σχετικιστικές ($v \geq 0.1c$), και παρατηρούνται σε διπλά συστήματα ακτίνων X που περιέχουν ένα συμπαγές αντικείμενο, δηλαδή έναν αστέρα νετρονίων ή μια μαύρη τρύπα. Έμφαση θα δοθεί στα ραδιοφωνικά χαρακτηριστικά των εν λόγω πηγών. Για λεπτομερείς αναφορές των συστημάτων ακτίνων X, των

συστατικών και της φυσικής των πιδάκων, ο αναγνώστης της εργασίας παραπέμπεται στην εργασία των Tanaka & Shibasaki (1996) και Zhang et al. (1997).

1.3 Microquasars

Είναι αρκετά παράδοξο το γεγονός πως οι σχετικιστικοί πίδακες ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά στους πυρήνες γαλαξιών και σε μακρινά quasars και για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της μιας δεκαετίας το SS433 ήταν το μόνο γνωστό αντικείμενο αυτής της κατηγορίας, στον γαλαξία μας (Margon 1984). Αυτό οφείλεται στο γεγονός που θέλει τους δίσκους γύρω από υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες μεγάλης μάζας, να εκπέμπουν ισχυρά στα οπτικά και στα UV μήκη κύματος. Πράγματι, όσο πιο μεγάλη σε μάζα η μαύρη τρύπα, τόσο ψυχρότερο είναι το περιβάλλον αυτής, δηλαδή ο δίσκος προσαύξεσης που την περιβάλλει. Για μια μαύρη τρύπα στο όριο Eddington, η χαρακτηριστική ακτινοβολία μέλανος σώματος στην τελευταία στάθμη περιστροφής κατά τη διαδικασία της προσαύξεσης θα δίνεται κατά προσέγγιση ως $T \sim 2 \times 10^7 M^{-1/4}$ (Rees 1984), με την T να μετράται σε K , ενώ η μάζα M της μαύρης τρύπας, σε μάζες ηλίου.

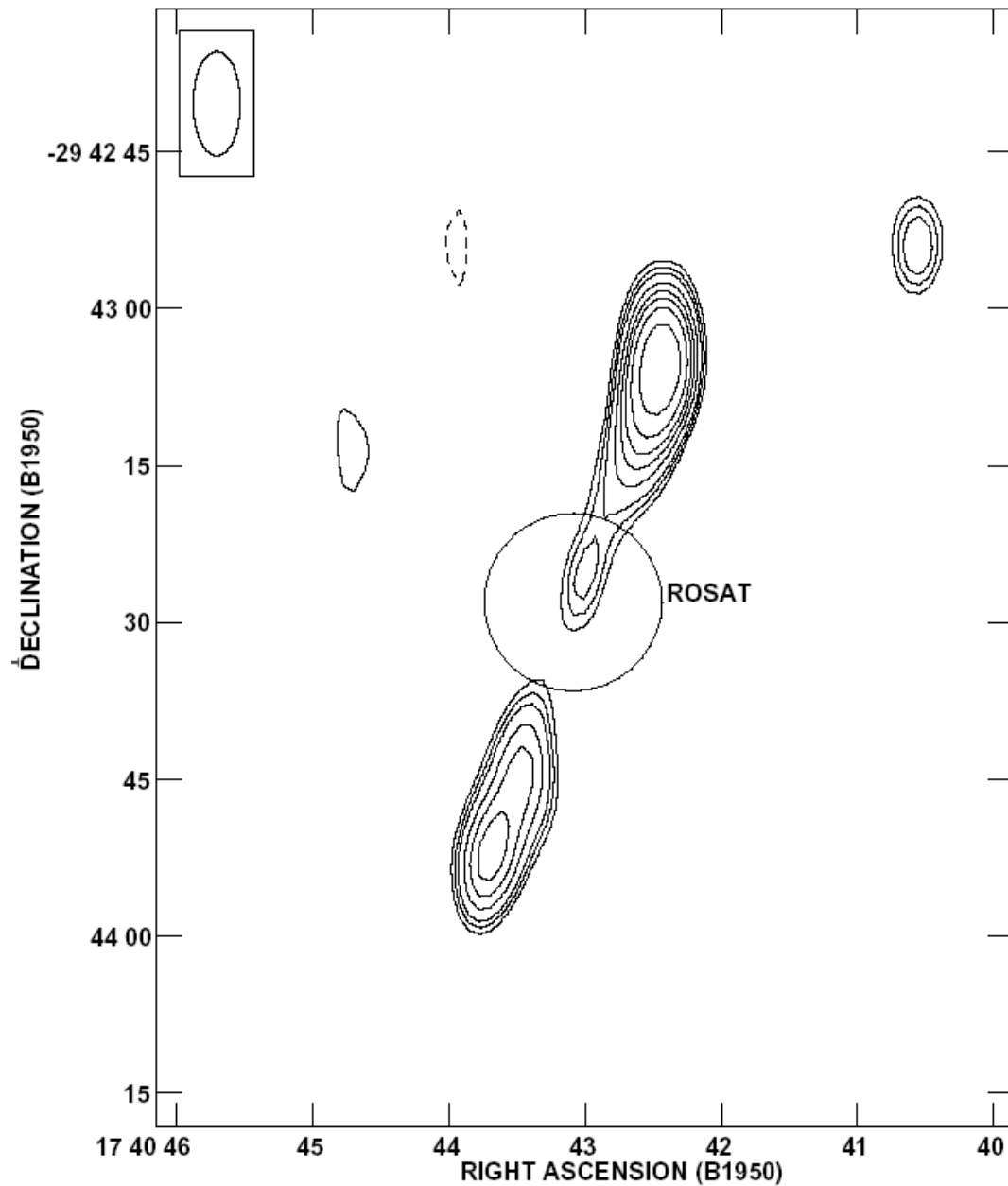
Επομένως, καθώς οι δίσκοι προσαύξεσης των AGNs εμφανίζουν ισχυρή εκπομπή στο οπτικό και στο υπεριώδες με ευδιάκριτες, χαρακτηριστικές, πλατειές γραμμές εκπομπής, τα διπλά συστήματα μαύρης τρύπας και αστέρια νετρονίων συνήθως αναγνωρίζονται και παρατηρούνται κατ' εξοχήν από την εκπομπή τους στις ακτίνες X. Ανάμεσα στις παρατηρούμενες πηγές που εμφανίζουν συμπεριφορά ανάλογη αυτής που μας απασχολεί, το SS433 εμφανίζει το ασύνηθες φαινόμενο να εκπέμπει ισχυρή οπτική εκπομπή και το μέγιστο της φωτεινότητάς του να παρουσιάζεται στο ορατό. Επομένως γίνεται κατανοητό το γεγονός πως η πρόσφατη εξέλιξη της τεχνολογίας για την καλύτερη παρατήρηση στις ακτίνες X, έδωσε ώθηση στην ανακάλυψη νέων πηγών σχετικιστικών πιδάκων.

Παρατηρήσεις στα δύο άκρα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, δηλαδή στις σκληρές ακτίνες X απ' τη μια μεριά (Sunyaev et al. 1991; Paul et al. 1991), και στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος από την άλλη, αποκάλυψαν την ύπαρξη νέων αστρικών πηγών σχετικιστικών πιδάκων γνωστών ως "microquasars" (Mirabel et al. 1992; Mirabel & Rodriguez 1998). Αυτά είναι μαύρες τρύπες με μάζα κάποιες αστρικές μάζες στο γαλαξία μας που χαρακτηρίζονται, σε μικρότερη κλίμακα βέβαια, από πολλά από τα φαινόμενα που παρατηρούνται στα quasars.

Τα microquasars συνδυάζουν δύο σχετικές απόψεις της σχετικιστικής αστροφυσικής: 1) Μαύρες τρύπες που τις περιβάλλουν δίσκοι προσαύξεσης, το οποίο βέβαια αποτελεί πρόβλεψη της Γενικής Θεωρίας Σχετικότητας, και αναγνωρίζονται και παρατηρούνται από την παραγωγή σκληρών ακτίνων X καθώς και ακτίνων γ από τους περιβάλλοντες δίσκους προσαύξεσης. 2) Σχετικιστικούς πίδακες σωματιδίων που κατανοούνται βάσει της μελέτης των αρχών της Ειδικής Σχετικότητας και παρατηρούνται εξαιτίας της εκπομπής ακτινοβολίας σύγχροτρον.

Εξάλλου, παρατηρήσεις σε πολλά μήκη κύματος των πηγών ακτίνων X και γ στην περιοχή του γαλαξιακού κέντρου, οδήγησαν το 1992 στην ανακάλυψη δύο microquasars: **1E1740.7-2942** και **GRS 1758-258** (Mirabel et al. 1992; Rodriguez, Mirabel, & Marti 1992). Η φωτεινότητα στις ακτίνες X, το φάσμα καθώς και η χρονική διακύμανση αυτών των δύο πηγών είναι συγκρίσιμα με αυτές που χαρακτηρίζουν το διπλό σύστημα Cygnus X-1 (Churazov et al. 1994; Kuznetsov et al. 1997), το οποίο συμπεριλαμβάνει μαύρη τρύπα. Εξάλλου είναι εξαιρετικά απίθανο να πρόκειται για εξωγαλαξιακές πηγές, καθώς δεν έχουν παρατηρηθεί AGNs, με τόση ισχυρή φωτεινότητα στις σκληρές ακτίνες X (Mirabel et al. 1993). Στην εικόνα του Σχήματος 1.4 που ακολουθεί απεικονίζεται ο ραδιοφωνικός συνοδός του microquasar

1E1740.7-2942 . Όπως ακριβώς παρατηρείται και στο σύστημα Cygnus X-1, ο ραδιοφωνικός συνοδός του **1E1740.7-2942** αποτελεί μια ασθενή συμπαγή πηγή που παρουσιάζει μεταβολές στη ροή της τάξης του ~50% περίπου, οι οποίες σε διάφορες εποχές εμφανίζονται μη συσχετισμένες με τη ροή των ακτίνων X (Mirabel et al. 1992).



Σχήμα 1.4: Χάρτης της εκπομπής σε μήκος κύματος $\lambda = 6$ cm, από τον ραδιοφωνικό συνοδό του microquasar 1E1740.7-2942, όπως παρατηρήθηκε με το VLA (Mirabel et al. 1992 ; Rodriguez & Mirabel 1999). Ο κύκλος λάθους της θέσης του ROSAT (Heindl, Prince & Grunsfeld 1995), που συμπεριλαμβάνει την πηγή του πυρήνα είναι επίσης εμφανής. Σε μια απόσταση των 8 Kpc, το μήκος της δομής του πίδακα θα είναι ~5 pc. Οι κύκλοι είναι -4, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 και 20 φορές τα $28 \mu\text{Jy}/\text{beam}$.

Στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος αυτές οι δύο σταθερές πηγές ισχυρών ακτίνων X, που παρατηρούνται κοντά στο γαλαξιακό κέντρο εμφανίζουν εξαιρετική ομοιότητα με τους μακρινούς ραδιογαλαξίες : αποτελούνται από συμπαγείς δομές και συστατικά στο κέντρο των κατευθυνόμενων σε δύο αντίθετες διευθύνσεις πιδάκων που καταλήγουν σε ασθενείς, εκτεταμένους λοβούς με καμιά χαρακτηριστική μεταβολή της ραδιοφωνικής τους ροής να έχει παρατηρηθεί σε χρονικό διάστημα εύρους 6 χρόνων (Rodriguez & Mirabel 1999). Τα αντικείμενα **1E1740.7-2942** και **GRS 1758-258**, φαίνεται πως είναι σταθερές πηγές τόσο ακτίνων X, όσο σχετικιστικών πιδάκων. Οι Mirabel et al. διαφώνησαν στο γεγονός που θα ήθελε τις ραδιοφωνικές αυτές πηγές να είναι ραδιο-γαλαξίες των οποίων η ροή συμπίπτει μ' αυτή των πηγών ακτίνων X. Εξάλλου για το αντικείμενο **1E1740.7-2942** κανένας συνοδός αστέρας δεν αποκαλύφθηκε με παρατηρήσεις στο οπτικό ή στα μήκη κύματος του κοντινού υπερύθρου μέχρι τώρα, παρ' όλα αυτά όμως υπάρχει μια αναφορά μιας επισφαλούς ανίχνευσης σε μήκος κύματος $\lambda = 3.8 \mu m$ από τον Djorgovski et al. (1992). Πάντως το **GRS 1758-258** έχει δύο πιθανούς ασθενείς συνοδούς (Marti et al. 1998).

Σ' αυτά τα διπλά συστήματα αστρικής μάζας βρίσκει κανείς τα τρία βασικά συστατικά των quasars: μια μαύρη τρύπα, έναν δίσκο προσαύξεσης που θερμαίνεται από την διαρκή συσσώρευση υλικού καθώς και καλά κατευθυνόμενους πίδακες σωματιδίων με πολύ υψηλές ενέργειες. Ωστόσο στα microquasars η μαύρη τρύπα είναι μόλις μερικών ηλιακών μαζών σε αντίθεση με τις μερικές χιλιάδες των ηλιακών μαζών των quasars, ο δίσκος προσαύξεσης έχει μέση θερμοκρασία μερικών εκατομμυρίων βαθμών σε αντίθεση με τους μερικούς χιλιάδες βαθμούς και τα σωματίδια που εκτινάσσονται με σχετικιστικές ταχύτητες μπορούν να ταξιδέψουν έως αποστάσεις της τάξης των μερικών ετών φωτός, ενώ αντίθετα για τους γιγαντιαίους ραδιοφωνικούς γαλαξίες αυτή η τιμή φτάνει τα μερικά εκατομμύρια έτη φωτός. (Mirabel & Rodriguez (1998)).

Η ονομασία microquasar έχει επιλεχθεί για να τονίζει το γεγονός ότι η αναλογία των αντικειμένων αυτών με τα quasars δεν εντοπίζεται και δεν αφορά μονάχα τη μορφολογική τους δομή αλλά μπορεί να αναδειχθεί η συσχέτιση που αποδεικνύει την ενότητα στη φυσική των μαύρων τρυπών που προσανξάνουν μάζα είτε πρόκειται για μαύρες τρύπες με μάζα όσο μερικές αστρικές στα διπλά συστήματα, είτε για υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες στα κέντρα των απομακρυσμένων γαλαξιών.

1.4 Κατάλογος των microquasars και δυνατότητα ανίχνευσης ακτινοβολίας γ που να προέρχεται από αυτά.

Όπως έχει προαναφερθεί ο όρος microquasars, χρησιμοποιήθηκε ούτως ώστε να περιγραφούν κατάλληλα γαλαξιακές πηγές οι οποίες χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη σχετικιστικών ραδιοφωνικών πιδάκων. Όλες αυτές οι πηγές θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ως διπλά συστήματα ακτίνων X (X-ray binaries) που εκπέμπουν ισχυρή ραδιοφωνική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα πρόκειται για HMXBs ή LMXBs (high-/low-mass X-ray binaries).

Η εικόνα που λάβαμε για τα αντικείμενα αυτά αφορά ένα συμπαγές αντικείμενο (ένας αστέρας νετρονίων ή μια μαύρη τρύπα) που μέσω δίσκου προσάυξης αφαιρεί μάζα από το συνοδό του διπλού συστήματος. Η μεγάλη φωτεινότητα των αντικειμένων αυτών στις ακτίνες X εξηγείται αν λάβουμε υπ' όψη την απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσάυξης μάζας. Στα microquasars ένα συγκεκριμένο ενεργειακό ποσοστό (με το κατώτατο όριο να είναι $L_{inj} \approx (10^{-3} - 10^{-2})L_E$) πρέπει να εισρέει στους πίδακες οι οποίοι μπορούν να ανιχνευθούν από την εκπομπή ακτινοβολίας σύγχροτρον (synchrotron radiation), στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Αντίστροφη σκέδαση Compton (inverse Compton scattering) των φωτονίων, από τον συνοδό αστέρα, το δίσκο προσάυξης ή το θερμό στέμμα που δημιουργείται, μπορεί να δημιουργήσει ακόμη μια πολύ σημαντική ροή ακτίνων γ (gamma-ray flux).

Εξάλλου πρόσφατα ιδιαίτερα ισχυρά στοιχεία έχουν παρουσιαστεί, τα οποία υποστηρίζουν πως το κοντινό microquasar LS 5039 ($\sim 3\text{Kpc}$), είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται άμεσα με την πηγή ακτίνων γ EG J1824-1514, που παρατηρήθηκε με το EGRET. Εάν αυτή η αναγνώριση αποδειχθεί σωστή και ταυτοποιηθεί, μπορεί να υπολογιστεί η φωτεινότητα, L_γ , των ακτίνων γ για ενέργειες μεγαλύτερες των 100 MeV από την μετρούμενη μέσω του EGRET ροή. Η φωτεινότητα αυτή βρίσκεται ότι είναι:

$$F_\gamma(E > 100\text{MeV}) = (35.2 \pm 6.5) \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ και } L_\gamma(>100\text{MeV}) \sim 2.4 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}.$$

Τέλος χρησιμοποιώντας την παραπάνω ροή του EGRET για το EG J1824-1514 στα 100 MeV και το μετρούμενο φασματικό δείκτη $\alpha = 2.19 \pm 0.18$ λαμβάνουμε μια ροή για ενέργειες μεγαλύτερες από 30 GeV (για $F_\gamma(E > 30\text{GeV}) \sim 4 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα μέχρι τώρα γνωστά microquasars.

Microblazars και IXOs

Έρευνες στα μήκη κύματος των ακτίνων X σε κοντινούς γαλαξίες έχουν αποκαλύψει πηγές ακτίνων X γνωστές ως IXOs, μέσης φωτεινότητας (Intermediate-luminosity X-ray Objects), με τυπικές φωτεινότητες στις ακτίνες X της τάξης των $10^{32} \text{ ergs}^{-1} \leq L_x \leq 10^{41} \text{ ergs}^{-1}$. Αυτές οι πηγές εμφανίζουν μέση φωτεινότητα, ανάμεσα στα αστρικά διπλά συστήματα ακτίνων X και τους πυρήνες των ενεργών γαλαξιών Seyfert. Παρατηρήσεις με το ROSAT και συγκεκριμένα με τη συσκευή HRI (High Resolution Imager), έδειξαν ότι αυτές οι πηγές (IXOs), αποτελούν συμπαγή αντικείμενα έξω από τον πυρήνα των κοντινών γαλαξιών που τα περιέχουν.

Εξάλλου τα αντικείμενα UXLs (UltraLuminous X-ray sources), τα χαρακτηρίζουν φωτεινότητες που υπερβαίνουν το όριο Eddington για προσάυξη ύλης σε μια μαύρη τρύπα μάζας όσης η ηλιακή. Εφόσον η εκπομπή ακτίνων X γίνεται μέσω ακτίνων, τότε οι φωτεινότητες προκύπτουν συγκρίσιμες αυτών μ' αυτές που περιμένουμε από τους πίδακες των microquasars. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε το κίνητρο για να θεωρηθούν τα IXOs, πιθανοί υποψήφιοι για να είναι microblazars και

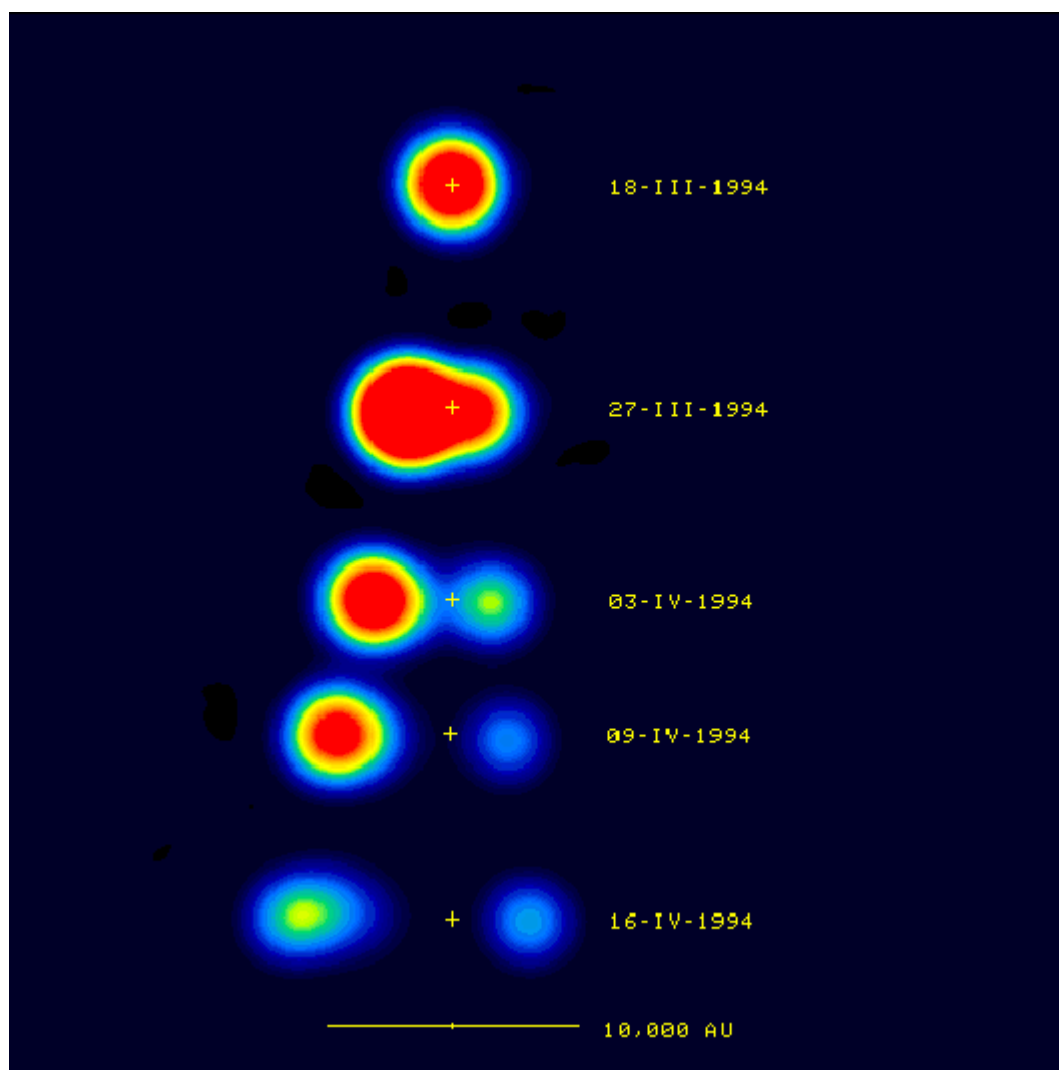
μεγάλωσε το ενδιαφέρον γι' αυτά. Στον Πίνακα 2 έχουν επιλεγεί όλοι οι κοντινοί γαλαξίες που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 10 Mpc, οι οποίοι βρίσκονται στους καταλόγους της μελλοντικής διαστημικής αποστολής IXO που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις του δορυφόρου ROSAT.

Πίνακας 1. Λίστα των μέχρι σήμερα γνωστών microquasars. Οι πηγές που εμφανίζονται με έντονο μαύρο χρώμα είναι παρατηρήσιμες σε ζενίθειες γωνίες $\leq 35^\circ$ από το βόρειο ημισφαίριο. Τα αντικείμενα που εμφανίζονται γραμμένα με πλάγια γράμματα μπορούν να παρατηρηθούν σε υψηλές ζενιθιακές γωνίες με το ενεργειακό κατόφλι σ' αυτές να είναι μεγαλύτερο.

Object Name	RA (J2000.0)	Dec. (J2000.0)	Type
LS I 61°303 (V615 Cas)	02 ^h 40 ^m 31.7 ^s	+61° 13' 46"	HMXB
XTE J0421+560 (CI Cam)	04 ^h 19 ^m 42.2 ^s	+55° 59' 58"	HMXB
XTE J1118+480 (KV UMa)	11 ^h 18 ^m 10.9 ^s	+48° 02' 13"	LMXB
Circinus X-1 (BR Cir)	15 ^h 20 ^m 40.9 ^s	-57° 10' 01"	LMXB
XTE J1550-564 (V381 Nor)	15 ^h 50 ^m 58.7 ^s	-56° 28' 36"	LMXB
<i>Scorpius X-1 (V818 Sco)</i>	16 ^h 19 ^m 55.1 ^s	-15° 31' 15"	LMXB
GRS J1655-40 (V1033 Sco)	16 ^h 54 ^m 00.1 ^s	-39° 50' 45"	LMXB
GX 339-4 (V821 Ara)	17 ^h 02 ^m 49.5 ^s	-48° 47' 23"	LMXB
XTE J1748-288	17 ^h 48 ^m 05.1 ^s	-28° 28' 26"	LMXB
1E1740.7-2942 (Great Annihilator)	17 ^h 44 ^m 02.7 ^s	-29° 43' 25"	LMXB
GRS 1758-258	18 ^h 01 ^m 12.3 ^s	-25° 44' 36"	LMXB
V* V4641 Sgr (XTE J1819-254)	18 ^h 19 ^m 21.6 ^s	-25° 24' 25"	LMXB
<i>LS 5039</i>	18 ^h 26 ^m 15.0 ^s	-14° 50' 54"	HMXB
SS 433 (V1343 Aql)	19 ^h 11 ^m 49.6 ^s	+04° 58' 58"	HMXB
GRS 1915+105 (V1487 Aql)	19 ^h 15 ^m 11.5 ^s	+10° 56' 44"	LMXB
Cygnus X-1 (V1357 Cyg)	19 ^h 58 ^m 21.7 ^s	+35° 12' 06"	HMXB
Cygnus X-3 (V1521 Cyg)	20 ^h 32 ^m 26.6 ^s	+40° 57' 09"	HMXB

Πίνακας 2. Κατάλογος των κοντινών γαλαξιών που περιλαμβάνουν IXOs από τον κατάλογο των Colbert και Ptak (2002). Οι γαλαξίες που εμφανίζονται με έντονα γράμματα είναι παρατηρήσιμοι από ένα βόρειο παρατηρητήριο.

Host Galaxy Name	RA (J2000.0)	Dec. (J2000.0)	D[Mpc]	Comments
NGC 891	02 ^h 22 ^m 32.9 ^s	+42° 20' 45"	9.6	
NGC 1291	03 ^h 17 ^m 18.3 ^s	-41° 06' 25"	8.6	
NGC 1313	03 ^h 18 ^m 15.4 ^s	-66° 29' 50"	3.7	2 IXOs
IC 342	03 ^h 46 ^m 49.1 ^s	+68° 05' 47"	3.9	
Holmberg II	08 ^h 19 ^m 03.9 ^s	+70° 43' 09"	2.7	
NGC 3031 (M81)	09 ^h 55 ^m 33.2 ^s	+69° 03' 55"	3.6	
NGC 3628	11 ^h 20 ^m 16.9 ^s	+13° 35' 14"	7.7	
NGC 4395	12 ^h 25 ^m 48.9 ^s	+33° 32' 48"	2.9	
NGC 4485	12 ^h 30 ^m 31.6 ^s	+41° 41' 58"	9.3	
NGC 4559	12 ^h 35 ^m 57.8 ^s	+27° 57' 35"	9.7	2 IXOs
NGC 4631	12 ^h 42 ^m 07.8 ^s	+32° 32' 27"	6.9	
NGC 5055	13 ^h 15 ^m 49.3 ^s	+42° 01' 47"	7.2	
NGC 5128 (Cen A)	13 ^h 25 ^m 27.6 ^s	-43° 01' 09"	4.9	2 IXOs
NGC 5204	13 ^h 29 ^m 36.5 ^s	+58° 25' 13"	4.8	
NGC 5194 (M51)	13 ^h 29 ^m 52.4 ^s	+47° 11' 41"	8.4	4 IXOs
NGC 5236 (M83)	13 ^h 37 ^m 00.8 ^s	-29° 51' 59"	4.7	
NGC 5457 (M101)	14 ^h 03 ^m 12.5 ^s	+54° 20' 53"	5.4	
NGC 6946	20 ^h 34 ^m 52.7 ^s	+60° 09' 14"	5.5	



Σχήμα 1.5: Το αντικείμενο GRS 1915+105

1.5 Πηγές με υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα

Επεκτάσεις σε ταχύτητες πάνω από δέκα φορές την ταχύτητα του φωτός έχουν παρατηρηθεί στα quasars για χρονικό διάστημα περισσότερο των δέκα χρόνων (Pearson & Zensus 1987; Zensus 1997). Αρχικά αυτές οι υπέρ-σχετικιστικές κινήσεις προκάλεσαν περισσή σκέψη και μελέτη καθώς εμφανίζονταν να παραβιάζουν με τρόπο 'βίαιο' τις παγιωμένες αρχές της σχετικότητας. Ωστόσο σύντομα αναφέρθηκαν και αποδόθηκαν σε παραισθήσεις εξαιτίας της σχετικιστικής εκτροπής (relativistic aberration Rees, 1996). Όμως, η απόλυτη φυσική εξήγηση παρέμενε αβέβαιη. Στις εξωγαλαξιακές περιπτώσεις, οι κινούμενοι πίδακες παρατηρούνται σαν μιας πλευράς (επειδή η ισχυρή μετατόπιση Doppler απαιτείται να ληφθεί υπ' όψη για να είναι ανιχνεύσιμη η εκπομπή που μας πλησιάζει). Γι' αυτό και δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε εάν οι υπέρ-σχετικιστικές ταχύτητες, που παρατηρούνται, αντιπροσωπεύουν τη διάδοση κυμάτων διαμέσου ενός βραδέως κινούμενου πίδακα, ή εάν αντανακλούν την πραγματική ογκώδη κίνηση των πηγών που εκπέμπουν ισχυρή ακτινοβολία.

Στη θεματική παράγραφο που αφορά την αναλογία των microquasars, κάποιος θα μπορούσε να αναρωτηθεί για το εάν οι υπέρ-σχετικιστικές ταχύτητες θα μπορούσαν να παρατηρηθούν προερχόμενες από πηγές που είναι γνωστό ότι βρίσκονται στο δικό μας Γαλαξία. Ανάμεσα στις μαύρες τρύπες αστρικής μάζας που είναι γνωστές μέχρι σήμερα, τρεις πηγές ακτίνων X έχουν πραγματικά αναγνωριστεί στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος σαν σποραδικές πηγές πιδάκων, που παρουσιάζουν υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα. Η πρώτη πηγή που ανακαλύφθηκε (Mirabel & Rodriguez 1994), που παρουσίαζε υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα, ήταν η **GRS 1915 + 105**, μια περιοδική πηγή σκληρών ακτίνων X, που πρωτοανακαλύφθηκαν και μελετήθηκαν από τον δορυφόρο GRANAT (Castro – Tirado et al. 1994; Finogenov et al. 1994). Η ανακάλυψη υπέρ-σχετικιστικής ταχύτητας στο αντικείμενο **GRS 1915 + 105** οριοθέτησε την απαρχή της έρευνας για παρόμοια σχετικιστική εκπομπή και σε άλλες παρόμοιες περιοδικές πηγές σκληρών ακτίνων X. Σύντομα μετά την παρατήρηση του ίδιου φαινομένου από δύο διαφορετικές ερευνητικές ομάδες (Tingay et al. 1995; Hjellming & Rupen 1995) στο αντικείμενο **GRO J1655-40**, ένας καινοφανής ισχυρός εκπομπός σκληρών ακτίνων X ανακαλύφθηκε με το παρατηρητήριο ακτίνων γ Compton (Zhang et al. 1994). Εξάλλου μία τρίτη πηγή, που παρουσιάζει υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα, ενδέχεται να είναι το αντικείμενο **XTE J1748-288** (Hjellming et al. 1998). Πρόκειται για μια περιοδική πηγή με φάσμα που υποδηλώνει εκπομπή ισχυρών ακτίνων X, που ανακαλύφθηκαν πρόσφατα με το XTE (Smith et al. 1998).

Το αντικείμενο **GRS 1915 + 105** βρίσκεται σε απόσταση ~ 12 kpc από τον ήλιο (Rodriguez et al. 1995; Chaty et al. 1996), στην αντίθετη πλευρά του γαλαξιακού επιπέδου και δεν μπορεί να παρατηρηθεί και να μελετηθεί με παρατηρήσεις στα οπτικά μήκη κύματος. Δοθείσης της μεγάλης απορρόφησης λόγω της σκόνης κατά μήκος της ευθείας παρατήρησης (Mirabel et al. 1994; Chaty et al. 1996), η πραγματική φύση του διπλού συστήματος είναι εξαιρετικά δύσκολο να καθοριστεί. Οι Castro – Tirado et al. (1996) πρότειναν ότι το **GRS 1915 + 105** είναι ένα διπλό σύστημα χαμηλής μάζας, ενώ οι Mirabel et al. (1997) πρότειναν ότι είναι ένα μακράς περιόδου διπλό σύστημα με έναν συνοδό αστέρα συγκεκριμένου φασματικού τύπου.

Με παρατηρήσεις στο υπέρυθρο (Eikenberry et al. 1998) πρότειναν ότι οι γραμμές εκπομπής στο **GRS 1915 + 105** προκύπτουν λόγω της ύπαρξης δίσκου προσάυξης παρά ενός κοινού δίσκου που δημιουργείται από έναν Oe/Be συνοδό (Mirabel et al. 1997). Εξάλλου το **GRS 1915 + 105** εμφανίζει σαφείς ομοιότητες με το **GRO J1655-40** τόσο στις ακτίνες X, όσο στις ακτίνες γ , καθώς και με άλλα διπλά συστήματα με μαύρες τρύπες, ενώ είναι ακόμη πιθανό να ‘φιλοξενεί’ μια μαύρη τρύπα το ίδιο (Greiner, Morgan & Remillard 1996). Η φωτεινότητα του αντικειμένου **GRS 1915 + 105** στις ακτίνες X (αγγίζει τις $2 \times 10^6 L_{\odot}$, φωτεινότητες ηλίου), νούμερο που υπερβαίνει κατά πολύ το όριο Eddington – πάνω από το οποίο η πίεση λόγω ακτινοβολίας θα δρούσε καταστροφικά εκτοξεύοντας στο μεσοαστρικό χώρο τα εξωτερικά της πηγής στρώματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως για αντικείμενο με μάζα όσο τρεις φορές η ηλιακή, το εν λόγω όριο είναι $\sim 10^6 L_{\odot}$ (ηλιακές φωτεινότητες).

Επιπλέον, εμφανίζει την τυπική ‘ουρά’ στο φάσμα των σκληρών ακτίνων X, πέρα από τα 100 keV, που παρατηρείται στα διπλά συστήματα με μαύρες τρύπες (Cordier 1993; Finogenov et al. 1994; Grove et al. 1998). Τέλος έχει αποδειχθεί ότι οι απόλυτες φωτεινότητες στις σκληρές ακτίνες X στα συστήματα που περιλαμβάνουν μαύρη τρύπα είναι συστηματικά υψηλότερες απ’ ό,τι στα συστήματα με αστέρες νετρονίων (Ballet et al. 1993, Barret, McClintock, & Grindlay 1996), κι αυτή η επισημάνση αποτελεί ακόμη ένα αποτέλεσμα που δείχνει ότι στο αντικείμενο **GRS 1915 + 105** υπάρχει πιθανότατα μια μαύρη τρύπα.

Αναφορικά, τώρα, με το αντικείμενο **GRO J1655-40** αυτό βρίσκεται σε απόσταση 3.2 kpc με τις φαινόμενες εγκάρσιες κινήσεις της εκτινασσόμενης απ' αυτά ύλης να είναι οι μεγαλύτερες που έχουν ως τώρα παρατηρηθεί (Tingay et al. 1995; Hjellming & Rupen 1995) μέχρι σήμερα από κάποιο αντικείμενο πέρα από το ηλιακό σύστημα. Έχει έναν λαμπρό οπτικό συνοδό και αποτελείται από έναν αστέρα με μάζα 1.7-3.3 ηλιακές μάζες περιστρεφόμενο γύρω από ένα καταρρέον αντικείμενο με μάζα 4-7 μάζες ηλίου (Orosz & Bailyn 1997; Phillips et al. 1999). Το συμπαγές αντικείμενο είναι κυρίως μια μαύρη τρύπα, καθώς η μάζα του υπολογίζεται ότι είναι πάνω από το θεωρητικό μέγιστο όριο των ~ 3 ηλιακών μαζών για αστέρες νετρονίων (Kalogera & Bayrn 1996).

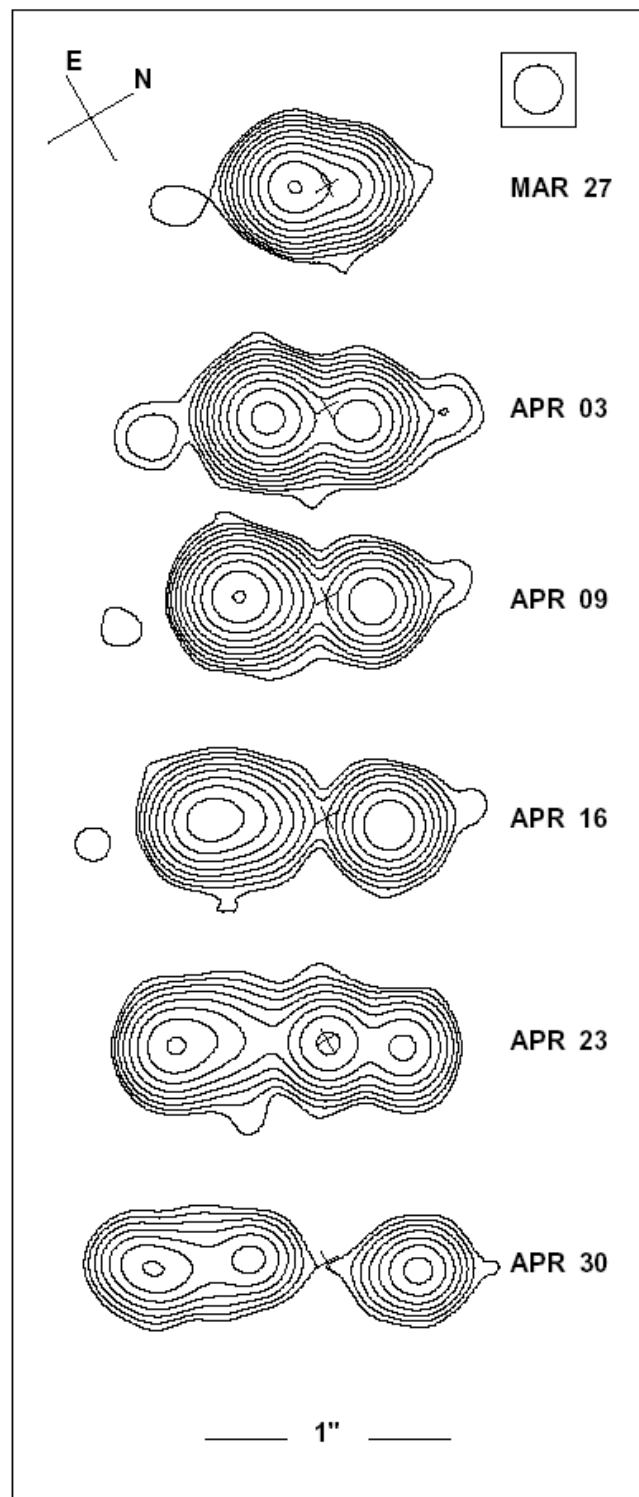
Εξάλλου ο King (1998) πρότεινε ότι οι πηγές που παρουσιάζουν υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα συνιστούν διπλά συστήματα με μαύρη τρυπα. Στο εσωτερικό του γαλαξία μας ενδέχεται να υπάρχουν περισσότερα από 10^3 συστήματα αυτής της κατηγορίας αυτής με χρόνο ζωής για τη φάση των πιδάκων $\leq 10^7$ χρόνων.

1.5.1 Υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα στο αντικείμενο GRS 1915+105

Το Σχήμα 1.6 που ακολουθεί εμφανίζει ένα ζευγάρι λαμπρών ραδιοφωνικών εκροών που αναδύονται σε αντίθετες διευθύνσεις σε σχέση με τον συμπαγή, μεταβλητό πυρήνα του **GRS 1915 + 105**. Πριν και μετά το αξιοσημείωτο γεγονός της εκτίναξης υλικού που απεικονίζεται στην εικόνα του Σχήματος 1.6, από την πηγή εκτινάχθηκαν άλλα ζεύγη εκροών με πυκνότητες ροής μία ή δύο τάξεις μεγέθους ασθενέστερες. Εξάλλου ένα από αυτά τα ασθενέστερα ζευγάρια μπορεί να παρατηρηθεί στους πρώτους τέσσερις χάρτες του Σχήματος 1.6 σαν ένα εξασθενημένο ζεύγος εκροών που προηγούνται αναφορικά με την κίνησή τους των λαμπρότερων ζευγαριών, παρατηρούμενα στην ίδια διεύθυνση.

Στο Σχήμα 1.7 εμφανίζονται οι κανονικές κινήσεις των εκροών που ανιχνεύονται από τέσσερα γεγονότα εκτίναξης υλικού το 1994. Οι γωνιακές μεταθέσεις από το σταθερό πυρήνα είναι σύμφωνες με βαλλιστικές κινήσεις (μη επιταχυνόμενες κινήσεις). Η χρονική διαφοροποίηση ανάμεσα στην εκπομπή υποδεικνύει περιοδικότητα με διαλείμματα που κυμαίνονται από 20 έως 30 μέρες. Παρόλο που τα νέφη σε κάθε γεγονός εμφανίζονται να κινούνται βαλλιστικά, πάντα στην ίδια γενική περιοχή του ουρανού, οι γωνιακές τους θέσεις υποδηλώνουν διαφοροποιήσεις κατά $\sim 10^\circ$ ως προς τη διεύθυνση της εκπομπής σε διάστημα ενός μήνα.

Οι σχηματικές παραστάσεις 1.7 και 1.8 εμφανίζουν δύο βασικότερες ασυμμετρίες : στις φαινόμενες περιοδικές κινήσεις καθώς και στη φωτεινότητα. Το νέφος που εμφανίζεται να κινείται ταχύτερα, εμφανίζεται λαμπρότερο. Έχει αποδειχθεί ότι και οι δύο ασυμμετρίες – στις κανονικές κινήσεις και στη λαμπρότητα – σχετίζονται άμεσα με την υπόθεση της αντιπαράλληλης εκπομπής δίδυμων νεφών κινούμενων με σχετικιστικές ταχύτητες (Mirabel and Rodriguez 1994), όπως άλλωστε συζητήθηκε προηγουμένως. Στην απόσταση των 12 kpc οι κανονικές κινήσεις που μελετήθηκαν μέσω παρατηρήσεων του VLA το 1994 για τη συμπύκνωση που πλησιάζει ($17.6 \pm 0.4 \text{ mas/day}$) και γι'αυτή που απομακρύνεται ($9.0 \pm 0.1 \text{ mas/day}$) εμφανίζονται στην εικόνα 1.7 και υπονοούν φαινόμενες ταχύτητες στο επίπεδο του ουρανού της τάξης του $1.25c$ και $0.65c$ αντίστοιχα. Όμως εκτενέστερη ανάλυση χρήση των σχετικιστικών εξισώσεων που ακολουθούν σε επόμενη παράγραφο και τα δεδομένα του VLA, αποφεύγεται η παραποίησης και παραμόρφωσης των εξαγομένων τιμών. Συγκεκριμένα η εκτινασσόμενη ύλη κινείται με ταχύτητα $0.92c$ σε μια γωνία $\theta = 70^\circ$ ως προς τη διεύθυνση παρατήρησης.



Σχήμα 1.6: Ζεύγος ραδιοφωνικών εκροών που απομακρύνονται από την πηγή σκληρών ακτίνων **X GRS 1915 + 105** (Mirabel and Rodriguez, 1994). Αυτοί οι χάρτες του VLA κατασκευάστηκαν σε μήκος κύματος $\lambda = 3.5\text{cm}$. Η θέση του σταθερού πυρήνα σημειώνεται με έναν μικρό σταυρό. Το νέφος που εμφανίζεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας φαίνεται να απομακρύνεται από τον σταθερό πυρήνα με ταχύτητα ίση με το 125% της ταχύτητας του φωτός. Οι καμπύλες είναι 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 και 512 φορές τα 0.2mJy/beam για όλες τις εποχές εκτός από την 27^η Μαρτίου οπότε και η μέτρηση γίνεται σε μονάδες των 0.6mJy/beam .

Με συνυπολογισμό των σφαλμάτων μέτρησης και μια μετάπτωση $\leq 10^\circ$, σχετικιστικές εκπομπές με σταθερό άξονα πίδακα σε κλίμακες από 500-5000 AU και μεγαλύτερες παρατηρήθηκαν αργότερα από το αντικείμενο **GRS 1915 + 105** για ένα διάστημα τεσσάρων ετών (Mirabel et al. 1996; Fender et al. 1999; Dhawan, Mirabel and Rodriguez 1999), κυρίως, σε απόσταση ~ 10 AU από την πηγή (Σχήμα 1.8).

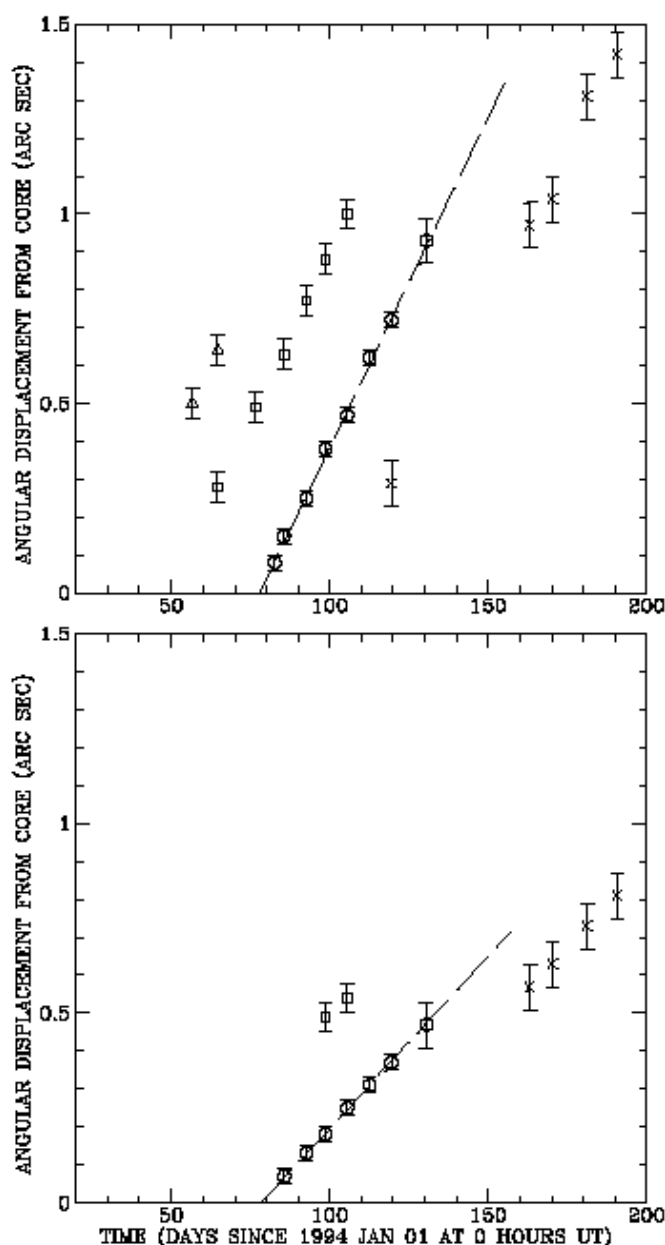
Όσο για τον πυρήνα, αυτός εμφανίζεται ως πίδακας που εκπέμπει ακτινοβολία σύγχροτρον μήκους ~ 100 AU στον οποίο παρατηρούνται εκλάμψεις στο οπτικό κομμάτι του φάσματος, ενώ στις ίδιες κλίμακες παρουσιάζει επίσης φασματική μετάθεση λόγω φαινομένου Doppler. Επιπλέον, αμυδρά παρατηρείται εκπομπή υλικού στα 500 AU περίπου. Ακόμη παρατηρήσεις με το MERLIN (Fender et al. 1999) καθώς και με το VLBA (Dhawan, Mirabel and Rodriguez 1999) κατά τη διάρκεια των ετών 1997 και 1998 αποκάλυψαν υπέρ-σχετικιστικές ταχύτητες, $1.3c - 1.7c$, σε κλίμακες εκατοντάδων AU, και σαφείς επεκτάσεις των νεφών που απομακρύνονται από την περιοχή του πυρήνα σε συγκεκριμένες διευθύνσεις.

1.5.2 Υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα στο αντικείμενο **GRO J1655-40**

Οι σχετικιστικές εκπομπές που παρατηρούνται στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος στο **GRO J1655-40** έχουν σαφείς ομοιότητες και συγκεκριμένες διαφορές μ' αυτές του **GRS 1915 + 105**. Λαμπρά συστατικά του αντικειμένου, απομακρυνόμενα απ' αυτό υπακούοντας στις κανονικές κινήσεις, παρατηρήθηκαν ανεξάρτητα με το πείραμα Southern Hemisphere VLBI Experiment (Tingay et al. 1995), καθώς και με το VLA, VLBA (Hjellming & Rupen 1995). Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται μια ακολουθία 7 ραδιοφωνικών εικόνων που μας χάρισε το VLBA για το **GRO J1655-40** από τους Hjellming & Rupen (1995). Σε μια απόσταση των 3.2 kpc οι κινήσεις του εκτινασσόμενου υλικού που εκπέμπεται μοντελοποιήθηκαν χρήσει ενός πρότυπου κίνησης (kinematic model), ανάλογο μ' αυτό που παρουσιάστηκε για το SS433, με μια ταχύτητα $0.92c$ και κλίση του άξονα των πιδάκων 85° ως προς τη διεύθυνση παρατήρησης και γωνία θέσης στις 47° , σε σχέση με την οποία οι πίδακες περιστρέφονται κάθε τρεις μέρες σε μια γωνία 2° .

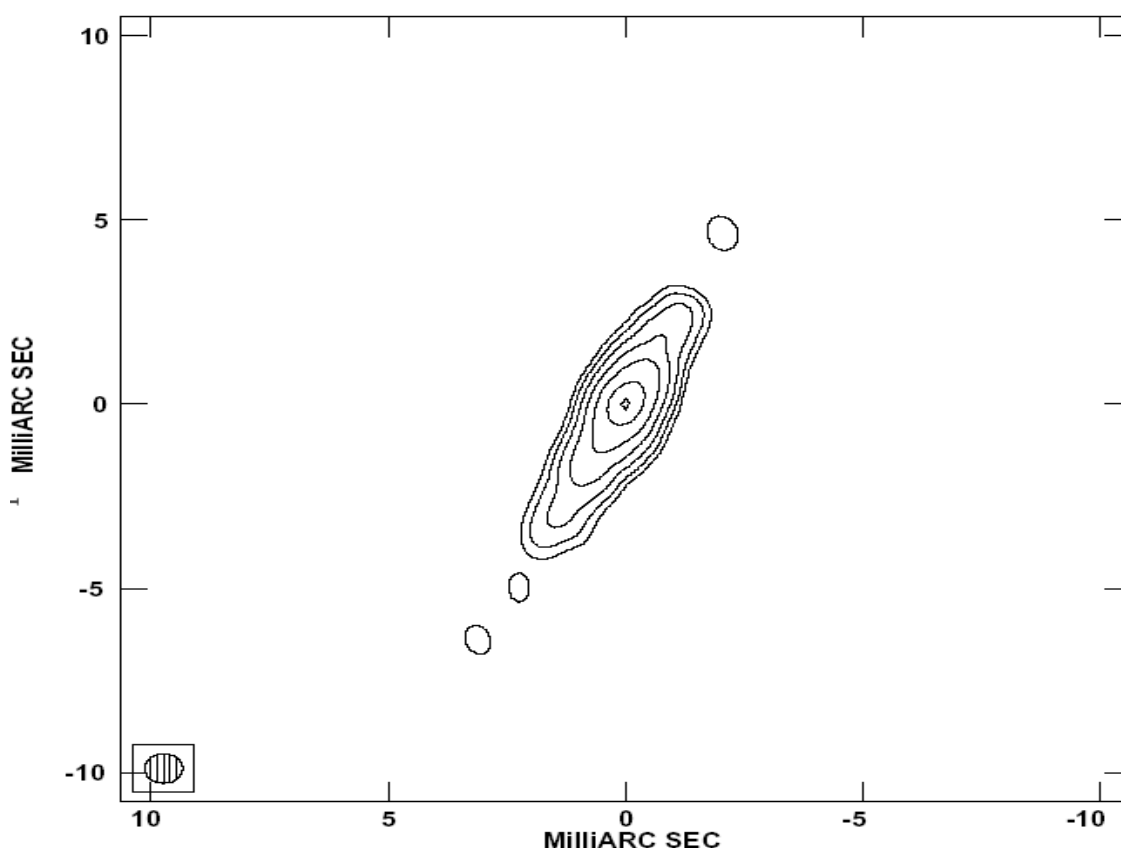
Εξάλλου, σε αντίθεση με το τι έχει παρατηρηθεί στις επαναλαμβανόμενες εκπομπές του **GRS 1915 + 105**, στο αντικείμενο **GRO J1655-40** η ασυμμετρία στη λαμπρότητα εμφανίζεται να μεταβάλλεται από πλευρά σε πλευρά (Hjellming & Rupen 1995). Επιπλέον δεν είναι μόνο το γεγονός που θέλει τους πίδακες να εμφανίζουν εντελώς ασύμμετρη δομή, αλλά ακόμη υπάρχει η αίσθηση πως η ασυμμετρία αυτή μεταβάλλεται από γεγονός σε γεγονός. Επομένως παρόλο που παρόμοιες ταχύτητες $\geq 0.9c$ έχουν παρατηρηθεί και στις δύο πηγές, εξαιτίας των έντονων ασυμμετριών στο **GRO J1655-40**, η απόλυτη φυσική ερμηνεία των υπέρ-σχετικιστικών κινήσεων σ' αυτή την πηγή παραμένει αβέβαιη.

Σημειώνεται πως στο αντικείμενο SS433 οι ασυμμετρίες στη ροή που λαμβάνεται ανάμεσα σε εκπομπές που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα σε δύο αντίθετες διευθύνσεις έχει επίσης παρατηρηθεί (Fejes, 1996). Η ασυμμετρία ενδεχομένως να προέρχεται από εσωτερικές μεταβολές της πηγής, μεταβολές οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνουν χώρα και στο **GRO J1655-40**. Όμως παρατηρήσεις με το VLBA σε πολλά μήκη κύματος όπως αυτές που παρουσιάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους (Panagi et al. 1999) δείχνουν πως είναι πάντα το απομακρυνόμενο τμήμα της σύνθετης δομής του πυρήνα που εμφανίζεται ασθενέστερο σε σύγκριση με εκείνο που πλησιάζει και το γεγονός αυτό δεν μπορεί να εξηγηθεί με τη θεωρία του φαινομένου Doppler.

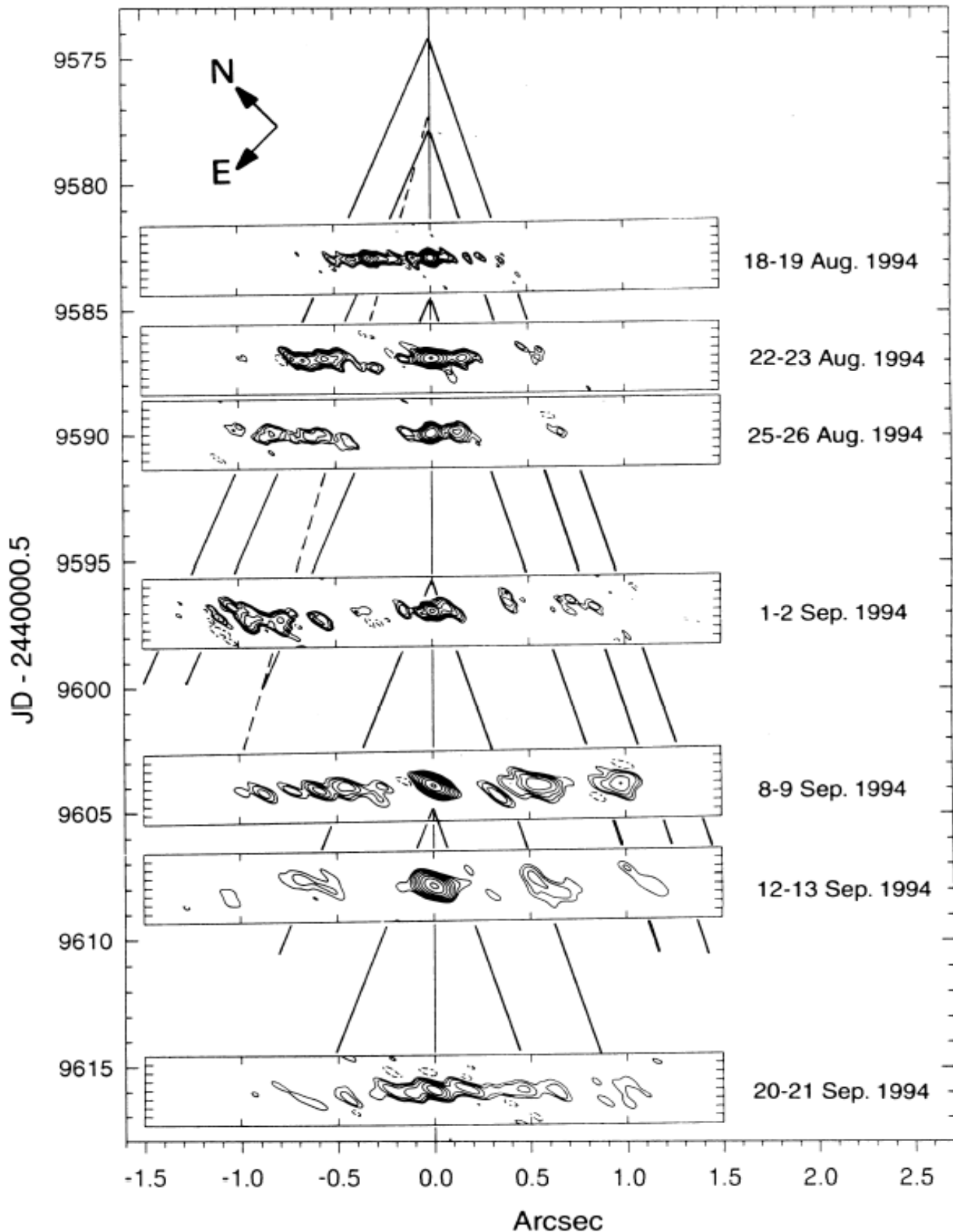


Σχήμα 1.7: Γωνιακές μεταθέσεις ως συνάρτηση του χρόνου για τέσσερα γεγονότα εκτίναξης υλικού παρατηρούμενα το 1994 στο αντικείμενο **GRS 1915+105** (Rodriguez & Mirabel 1999). Πάνω: Γωνιακές μεταθέσεις σαν συνάρτηση του χρόνου για τέσσερις εκροές που πλησιάζουν και αντιστοιχούν σε εκπομπές που έλαβαν χώρα (από αριστερά στα δεξιά) στις 29 Ιανουαρίου του 1994 (τρίγωνα), στις 19 Φεβρουαρίου (τετράγωνα), στις 19 Μαρτίου (κύκλοι) και στις 21 Απριλίου (σταυροί). Κάτω: Γωνιακές μεταθέσεις συναρτήσει του χρόνου για τρεις εκροές που πλησιάζουν και αντιστοιχούν σε εκπομπές που έχουν λάβει χώρα (από αριστερά στα δεξιά) στις 29 Ιανουαρίου του 1994 (τρίγωνα), στις 19 Φεβρουαρίου (τετράγωνα), στις 19 Μαρτίου (κύκλοι) και στις 21 Απριλίου (σταυροί). Τα νέφη στην εκπομπή που αντιστοιχεί στις 29 Ιανουαρίου του 1994 ήταν σχετικά ασθενή και το συστατικό που εκπέμφθηκε και μας πλησιάζει δεν μπορεί να ανιχνευθεί με την προσδοκώμενη ακρίβεια. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι τα ελάχιστα τετράγωνα που περιγράφουν καλύτερα τα δεδομένα που ελήφθησαν από το γεγονός της 19^{ης} Μαρτίου του 1994 που είναι τα λαμπρότερα και καλύτερα μελετημένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κινήσεις εμφανίζονται βαλλιστικές που σημαίνει μη επιταχυνόμενες.

Ωστόσο είναι πιθανό φαινόμενα απορρόφησης (free-free absorption) καθώς και οι διαφορετικές ελεύθερες διαδρομές των σωματιδίων διαμέσου ενός απορροφητικού μέσου, να μπορούν να μας βοηθήσουν στην εξήγηση της ύπαρξης των παρατηρούμενων ανωμαλιών τόσο στο SS433 αλλά και σε άλλες δομές πιδάκων. Επιπλέον, στο SS433 μεγαλύτερο ποσοστό από το 90% της ραδιοφωνικής εκπομπής εμφανίζεται σε knots παρά σε συνεχείς πίδακες, ενώ ο σύνθετος σε δομή πυρήνας εξαφανίζεται μετά από μεγάλη εκπομπή, όπως και στο **GRS 1915 + 105** (Mirabel and Rodriguez 1994).



Σχήμα 1.8: Χάρτης σε μήκος κύματος $\lambda=2\text{cm}$ που περιγράφει την εκπομπή από τον πυρήνα του **GRS 1915+105** που παρατηρήθηκε την 11^η Απριλίου του 1997 με τη διάταξη Very Long Baseline Array με γωνιακή ανάλυση milliarcsec (Dhawan, Mirabel and Rodriguez 1999). Η γωνιακή ανάλυση αντιστοιχεί σε $\sim 10\text{AU}$ στ ο **GRS 1915+105**. Η καμπύλη της μέσης ισχύος της δέσμης εμφανίζεται στην κάτω αριστερή γωνία. Οι καμπύλες είναι $-1, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64$ και 96 φορές την τιμή $0.26\text{mJy} / \text{beam}^{-1}$. Η γωνία θέσης αυτής της εκπομπής στην κλίμακα των milliarcsec, είναι η ίδια με αυτή που παρατηρήθηκε στις κλίμακες των arcsec τρία χρόνια πίσω στο παρελθόν.



Σχήμα 1.9: Μια ακολουθία 7 εικόνων του VLBA για το αντικείμενο **GRO J1655-40** στα 1.6GHz. Καθεμία έχει γωνιακή ανάλυση 3.0×0.4 arcsec (Hjellming & Rupen 1995). Κάθε εικόνα εμφανίζεται μαζί με την ημερομηνία των παρατηρήσεων. Οι γραμμές ανάμεσα στις εικόνες αναγνωρίζουν κινήσεις της τάξης των 54 mas/day (αριστερά) και 45.5 mas/day (δεξιά). Η κάθετη γραμμή σημειώνει τη θέση της κεντρικής πηγής που θεωρείται ότι είναι το λαμπρότερο σημείο σε κάθε εικόνα.

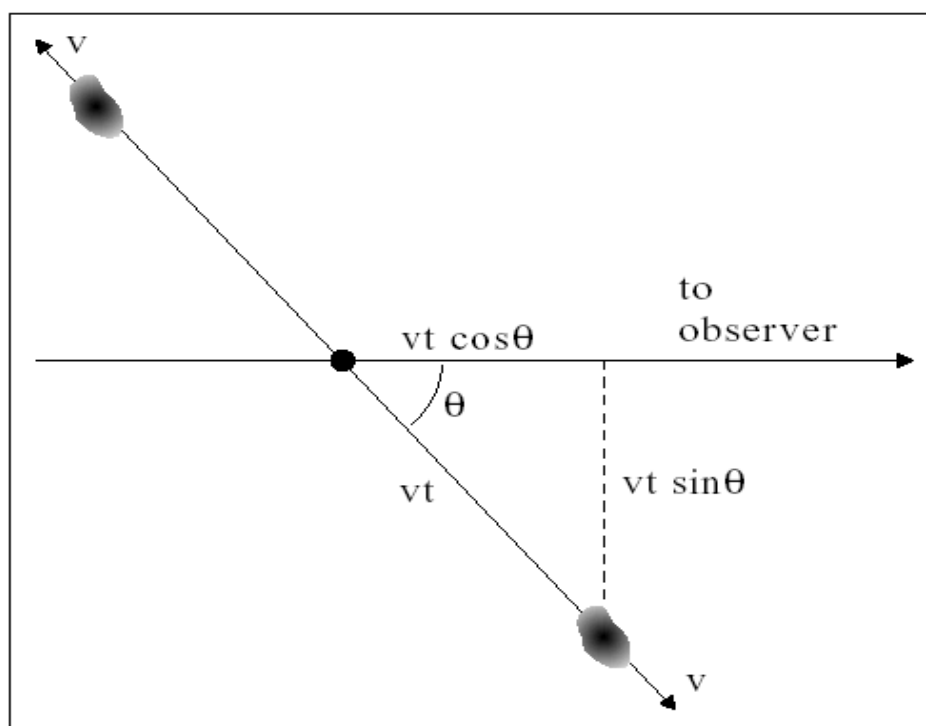
1.5.3 Υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα στο αντικείμενο XTE J1748-288

Δύο κύριες σχετικιστικής εκπομπής ακολουθίες κινούμενες τουλάχιστον με 20 mas/day παρατηρήθηκαν τον Ιούνιο του 1998 (Hjellming et al. 1998) από την περιοδική πηγή σκληρών ακτίνων X **XTE J1748-288** (Smith et al. 1998). Κάθε ακολουθία εμφανιζόταν να ξεκινάει με μία μονόπλευρη σχετικιστική εκπομπή. Η εκτόξευση υλικού εμφανίζεται σε υψηλό βαθμό γραμμικά πολωμένη, και σε απόσταση των 8 kpc – όπως εξάγεται από τη γραμμή απορρόφησης του HI σε μήκος κύματος $\lambda = 21\text{cm}$ – οι κινήσεις τους υποδηλώνουν φαινόμενες ταχύτητες της τάξης των $0.9c$ και $1.5c$ καθώς και εσωτερικές ταχύτητες μεγαλύτερες των $0.9c$ (Hjellming et al. 1998). Αυτή είναι η πρώτη γαλαξιακή πηγή σχετικιστικών πιδάκων όπου έχει παρατηρηθεί το γεγονός πως οι πίδακες συγκρούονται με το υλικό του περιβάλλοντος χώρου, επιβαδυνόμενοι καθώς αυξάνει σε λαμπρότητα η οδηγούσα άκρη του κάθε πίδακα.

1.6 Επίδραση της ειδικής θεωρίας της Σχετικότητας.

1.6.1 Παράμετροι της εκπομπής

Τα κύρια χαρακτηριστικά των υπέρ-σχετικιστικών εκπομπών μπορούν να κατανοηθούν μέσω της μελέτης της στιγμιαίας εκπομπής ενός ζεύγους διδύμων συμπυκνώσεων που κινούνται με ταχύτητα $\beta (\beta = v/c)$, όπου v η ταχύτητα των συμπυκνώσεων και c η ταχύτητα του φωτός.



Σχήμα 1.10: Γεωμετρία της δίπλευρης παρατηρούμενης εκτόξευσης ύλης. Η εκπομπή είναι συμμετρική, αλλά όταν τα εκπεμπόμενα νέφη κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες, το συστατικό μέρος του ζευγαριού που πλησιάζει, εμφανίζεται να κινείται ταχύτερα και να είναι λαμπρότερο του μέλους του ζεύγους που απομακρύνεται.

Εξάλλου ο άξονας της ροής αυτής σχηματίζει γωνία θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) σε σχέση βέβαια με τη διεύθυνση παρατήρησης (Rees 1966; Βλέπε Σχήμα 1.10). Οι φαινόμενες

κανονικές κινήσεις στον ουρανό για τις συμπυκνώσεις που πλησιάζουν ή απομακρύνονται, μ_a και μ_r αντίστοιχα, δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$\mu_a = \frac{\beta \sin \vartheta}{(1 - \beta \cos \vartheta)} \frac{c}{D}, \{1\}$$

$$\mu_r = \frac{\beta \sin \vartheta}{(1 + \beta \cos \vartheta)} \frac{c}{D}, \{2\}$$

όπου D είναι η απόσταση από τον παρατηρητή έως την πηγή. Αυτές οι δύο εξισώσεις μπορούν να μετασχηματιστούν στο ισοδύναμο ζευγάρι των ακόλουθων εξισώσεων :

$$\beta \cos \vartheta = \frac{\mu_a - \mu_r}{\mu_a + \mu_r}, \{3\}$$

$$D = \frac{c \tan \vartheta (\mu_a - \mu_r)}{2 \mu_a \mu_r}, \{4\}$$

Εάν μόνο οι κανονικές κινήσεις είναι γνωστές, ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον ανώτερο όριο για την απόσταση D μπορεί να ληφθεί συνδυάζοντας τις εξισώσεις {3} και {4}:

$$D \leq \frac{c}{\sqrt{\mu_a \mu_r}}, \{5\}$$

Σε όλες τις εξισώσεις χρησιμοποιούνται μονάδες του συστήματος CGS, και οι κανονικές κινήσεις βρίσκονται σε *radians/sec*. Στην περίπτωση του γεγονότος της λαμπρής εκπομπής στις 19 Μαρτίου 1994 για το **GRS 1915+105**, οι μετρούμενες κανονικές κινήσεις ήταν $\mu_a = 17.6 \pm 0.4 \text{ mas/day}$ και $\mu_r = 9.0 \pm 0.1 \text{ mas/day}$. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση {5}, λαμβάνουμε ένα ανώτερο όριο για την απόσταση $D \leq 13.7 \text{ kpc}$, τιμή η οποία επιβεβαιώνει τη γαλαξιακή φύση της πηγής.

Η απόσταση έως το αντικείμενο **GRS 1915+105** έχει βρεθεί να είναι – από μελέτες των γραμμών απορρόφησης του HI – ίση με $12.5 \pm 1.5 \text{ kpc}$ (Rodriguez et al. 1995 ; Chaty et al. 1996). Τότε οι κανονικές κινήσεις της συμπύκνωσης που πλησιάζει και αυτής που απομακρύνεται μετρημένες με το VLA τα έτη 1994 και 1995, υποδηλώνουν φαινόμενες ταχύτητες στο επίπεδο του ουρανού ίσες με $v_a = 1.25c$ και $v_r = 0.65c$ γι' αυτή που πλησιάζει και γι' αυτή που απομακρύνεται αντίστοιχα. Το υλικό που εκτινάσσεται κινείται με αληθινή ταχύτητα $v = 0.92c$ σε μία γωνία $\vartheta = 70^\circ$ σε σχέση με τη διεύθυνση της ευθείας παρατήρησης (Mirabel & Rodriguez 1994). Επιπλέον οι ταχύτερες κανονικές κινήσεις των 24 mas/day μετρημένες μέσω του MERLIN (Fender et al. 1999) καθώς και το VLBA (Dhawan et al. 1999) την περίοδο του 1997, ουσιαστικά υποδεικνύουν πραγματική ταχύτητα $0.98c$ σε μια γωνία 66° ως προς τη διεύθυνση της ευθείας παρατήρησης.

1.6.2 Καθορισμός της απόστασης με σχετικιστικές μεθόδους

Σημειώνεται πως η ανίχνευση μιας γνωστής γραμμής προερχόμενη από κάποια συγκέντρωση ύλης θα επέτρεπε τον ακριβή καθορισμό της απόστασης. Οι παράγοντες Doppler, κυρίως, οι λόγοι των παρατηρούμενων προς τις εκπεμπόμενες συχνότητες (ν_o), τόσο για τη συγκέντρωση που πλησιάζει όσο γι' αυτήν που απομακρύνεται δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\delta_a = \frac{\nu_a}{\nu_o} = \gamma^{-1} (1 - \beta \cos \theta)^{-1}, \{6\}$$

$$\delta_r = \frac{v_r}{v_o} = \gamma^{-1}(1 - \beta \cos \theta)^{-1}, \{7\}$$

Σ' αυτές τις δύο τελευταίες εξισώσεις {6} και {7}, το γ είναι ο παράγοντας Lorentz που δίνεται από την πολύ γνωστή σχέση: $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$. Εφόσον γνωρίζουμε το $\beta \cos \theta$, καθορίζοντας είτε το $\frac{v_a}{v_o}$ ή το $\frac{v_r}{v_o}$ τότε θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε τον παράγοντα β και στη συνέχεια τη γωνία θ και επομένως την απόσταση από την τέταρτη εξίσωση. Στην περίπτωση, εξάλλου, αντικειμένων που βρίσκονται σε πολύ μακρινές κοσμολογικές αποστάσεις, οι εξισώσεις {1}, {2}, {4} και {5} είναι σωστές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εφόσον η απόσταση D αντικατασταθεί από τη γωνιώδη απόσταση D_a (Peebles 1993), και η συχνότητα ηρεμίας v_o από τη σχέση $v_o/(1+z)$, όπου z η παρατηρούμενη μετάθεση προς το ερυθρό της κεντρικής πηγής. Η γωνιώδης διάμετρος δίνεται μέσω της σχέσης : $D_a = (cz/H_o)[1 - (1+q_o)z/2 + \dots]$, όπου H_o είναι η σταθερή του Hubble και q_o είναι ο παράγοντας της αδιάστατης επιτάχυνσης (ή επιβράδυνσης). Τότε, οι παρατηρήσεις των κανονικών κινήσεων καθώς και των μεταθέσεων της συχνότητας σε εξωγαλαξιακές περιπτώσεις σχετικιστικής εκπομπής σε ζεύγη, μελλοντικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ούτως ώστε να επαληθευτούν τα διάφορα κοσμολογικά μοντέλα και να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα κάποιου έναντι κάποιων άλλων.

1.6.3 Μετάθεση Doppler

Οι λόγοι της παρατηρούμενης προς την εκπεμπόμενη πυκνότητα ροής S_o , από ένα δίδυμο ζεύγος οπτικά λεπτών πιδάκων που εκπέμπουν ισότροπα σε όλες τις διευθύνσεις είναι :

$$\frac{S_a}{S_o} = \delta_a^{k-a},$$

$$\frac{S_r}{S_o} = \delta_r^{k-a},$$

όπου a είναι ο φασματικός δείκτης της εκπομπής ($S_v \sim v^a$) και k είναι μία παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με την γεωμετρία της εκτινασσόμενης ύλης, με το $k=2$ για έναν συνεχόμενο πίδακα και $k=3$ για διακριτές συγκεντρώσεις. Τότε, ο λόγος των παρατηρούμενων πυκνοτήτων ροής θα δίνονται μέσω της ακόλουθης σχέσης :

$$\frac{S_a}{S_r} = \left(\frac{1 + \beta \cos \vartheta}{1 - \beta \cos \vartheta} \right)^{k-a},$$

Καθώς για το γεγονός της παρατήρησης της 19^{ης} Μαρτίου έχουμε $\beta \cos \vartheta = 0.323$ και $a = -0.8$, γι' αυτό ο λόγος της ροής θα είναι 12, ενώ για έναν πίδακα συνεχούς δομής θα είναι 6. Εξάλλου για έναν δεδομένο γωνιακό διαχωρισμό βρέθηκε ότι ο παρατηρούμενος λόγος ροής ανάμεσα στη συγκέντρωση που πλησιάζει και σ' αυτή που απομακρύνεται είναι 8 ± 1 . Παρόμοια αποτελέσματα εξήχθησαν χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις μέσω του MERLIN από τους Fender et al. (1999).

Επομένως δίχως να λαμβάνεται υπ' όψη η απόσταση της πηγής, οι λόγοι ροής για ίσους γωνιακούς διαχωρισμούς από τον πυρήνα είναι σύμφωνοι με την υπόθεση που θέλει δίδυμη εκτόξευση ύλης σε σχετικιστικές ταχύτητες. Οι Atoyan & Aharonian (1997) έλαβαν υπ' όψη στην έρευνά τους τα παρατηρούμενα αποτελέσματα πάνω στην πυκνότητα ροής των ασυμμετρικών ανάμεσα στον έναν πίδακα και στον συνοδό πίδακα. Τέλος οι Bodo & Ghisellini (1995) πρότειναν πως θα μπορούσε να υπάρξει μια συνεισφορά από τη διάδοση κυμάτων στις κινήσεις των σχηματισμών.

1.7 Αστάθειες του δίσκου προσαύξησης και δημιουργία πίδακα

Οι καλά κατευθυνόμενοι πίδακες φαίνεται να είναι συστηματικά συσχετισμένοι με την παρουσία ενός δίσκου προσαύξησης γύρω από ένα αστερί ή ένα καταρρέων αντικείμενο. Στην περίπτωση των μαύρων τρυπών, οι χαρακτηριστικοί δυναμικοί χρόνοι στη ροή της ύλης είναι ανάλογοι της μάζας της μαύρης τρύπας, και οι αυξομειώσεις της εκπομπής με χαρακτηριστική διάρκεια μερικών λεπτών σε ένα microquasar θα μπορούσαν να αντιστοιχούν σε ανάλογα φαινόμενα με διάρκεια χιλιάδων χρόνων σε ένα quasar μάζας $10^9 M_{\odot}$ μάζες ηλίου (Sams et al. 1996; Rees, 1998). Επομένως, οι μεταβολές με διάρκεια λεπτών που παρατηρούνται στα microquasars τόσο στα ραδιοφωνικά, όσο στο υπέρυθρο (IR), στο οπτικό και στις ακτίνες X θα μπορούσαν να ομοιάζουν με φαινόμενα που δεν θα ήμασταν ικανοί να παρατηρήσουμε στα quasars.

Οι παρατηρήσεις στις ακτίνες X επιτρέπουν τη μελέτη της εσωτερικής περιοχής του δίσκου προσαύξησης ενώ τα ραδιοφωνικά κύματα την εκπομπή σύγχροτρον (synchrotron) από τους σχετικιστικούς πίδακες. Μακράς διάρκειας παρατηρήσεις σε ποικίλα μήκη κύματος και οι αντίστοιχες καμπύλες φωτός που κατασκευάζονται για τις πηγές με υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα, δείχνουν πως η εκπομπή των σκληρών ακτίνων-X είναι μια αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για τη δημιουργία των καλά κατευθυνόμενων πιδάκων που εκπέμπουν ραδιοφωνική ακτινοβολία σύγχροτρον. Συγκεκριμένα στο αντικείμενο **GRS 1915+105**, η σχετικιστική εκτόξευση ύλης σε ζευγάρια σύννεφων πλάσματος ακολουθείται πάντα από ασυνήθιστη δραστηριότητα στις σκληρές ακτίνες X (Harmon et al. 1997), και πιο συγκεκριμένα, το σύνολο των κύριων γεγονότων εκτόξευσης φαίνεται να είναι ταυτόχρονο με την ξαφνική πτώση από μία πολύ λαμπρή κατάσταση στις σκληρές ακτίνες X (Foster et al. 1996; Mirabel et al. 1996). Όμως, δεν μπορούμε να προβούμε σε λάθος γενικεύσεις όπως αυτή που θέλει οι ξαφνικές πτώσεις στη ροή των σκληρών ακτίνων X να εμφανίζονται συσχετισμένες με τη ραδιοφωνική εκπομπή από τους σχετικιστικούς πίδακες. Στην πραγματικότητα στο αντικείμενο **GRO J1655-40** έχουν υπάρξει μερικές περιπτώσεις εξάρσεων της εκπομπής στις ακτίνες X, δίχως οι τελευταίες να προηγούνται ραδιοφωνικών εκλάμψεων / γεγονότων εκτόξευσης υλικού. Οι Zhang et al. (1997) συνοψίζουν με περισσότερη λεπτομέρεια τις μακράς διάρκειας παρατηρήσεις σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων των διπλών συστημάτων με μαύρη τρύπα.

Τα επεισόδια των μεγάλων μεταβολών στη ροή των ακτίνων X σε χρονικές κλίμακες της τάξης των δευτερολέπτων και των λεπτών, και κυρίως, τα απότομα “βυθίσματα” που παρατηρούνται (Greiner et al. 1996; Belloni et al. 1997; Chen et al. 1997) στο αντικείμενο **GRS 1915+105** πιστεύεται να είναι απόδειξη της παρουσίας μιας μαύρης τρύπας, όπως συζητήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Οι εν λόγω μεταβολές μπορούν να εξηγηθούν εφόσον το εσωτερικό ($\leq 200 \text{ km}$) τμήμα του δίσκου προσαύξησης οδηγείται σταδιακά προς την κατάσταση συνεχούς μετατόπισης προς το συμπαγές αντικείμενο (Abramowicz et al. 1995; Narayan et al. 1997). Εξάλλου σ' αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, ο χρόνος που απαιτείται για τη

μεταφορά ενέργειας από ιόντα (που λαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας λόγω ιξώδους) σε ηλεκτρόνια (που είναι υπεύθυνα για την ακτινοβολία), είναι μεγαλύτερος από το χρόνο της μετάπτωσης στο συμπαγές αντικείμενο.

Επομένως η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται μέσω του ιξώδη σκεδασμού στο δίσκο δεν ακτινοβολείται (όπως συμβαίνει σε δεδομένα δισκοειδή μοντέλα), αλλά αντίθετα αποθηκεύεται στο αέριο σαν θερμική ενέργεια. Αυτό το αέριο, που περιέχει μεγάλες ποσότητες αποθηκευμένης ενέργειας είναι μετατοπισμένο (transported) ως προς το συμπαγές αντικείμενο. Εάν το συμπαγές αντικείμενο είναι μια μαύρη τρύπα, η ενέργεια σταδιακά εξαφανίζεται μέσω του ορίζοντα γεγονότων. Αντιθέτως εάν το συμπαγές αντικείμενο είναι ένας αστέρας νετρονίων, η θερμική ενέργεια στο υπέρθερμο αέριο απελευθερώνεται με τη μορφή ακτινοβολίας όταν συγκρούεται με την επιφάνεια του αστέρα νετρονίων την οποία και θερμαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες.

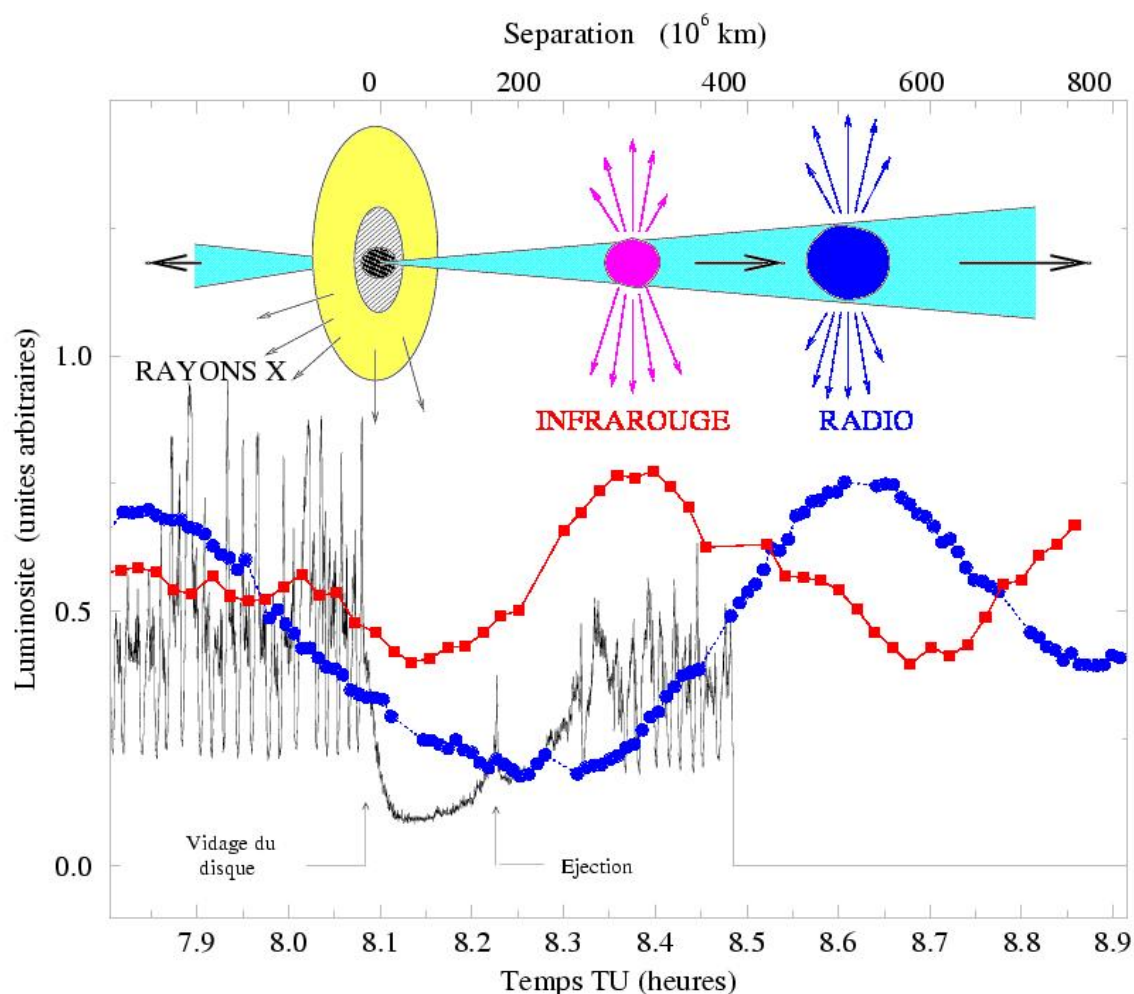
Ο χρόνος ψύξης της φωτόσφαιρας του αστέρα νετρονίων είναι σχετικά μεγάλος σε διάρκεια και σ' αυτή την περίπτωση εμφανίζεται μια αργή πτώση στη ροή των παρατηρούμενων ακτίνων X. Επομένως κάποιος θα ανέμενε τη φωτεινότητα των διπλών συστημάτων με μαύρη τρύπα να ποικίλλει σε εύρος πολύ μεγαλύτερο αυτού που παρατηρείται για τα διπλά συστήματα με αστέρα νετρονίων (Barret et al. 1996). Εξάλλου η ιδέα μιας ροής που κυριαρχείται από τη μετατόπιση προς το συμπαγές αντικείμενο (advection-dominated) έχει επίσης προταθεί (Hameury et al. 1997) με σκοπό να εξηγήσει την καθυστέρηση στην παρατήρηση των ακτίνων X σε μια οπτική έξαρση (Orosz et al. 1997) για το αντικείμενο **GRO J1655-40**.

Αξιοσημείωτες μεταβολές της ροής σε χρονικές κλίμακες λεπτών έχουν αναφερθεί και επισημανθεί και για τα ραδιοφωνικά μήκη κύματος (Pooley & Fender 1997; Rodriguez & Mirabel 1997; Mirabel et al. 1998). Οι ταχύτατες εκλάμψεις στα ραδιοφωνικά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος θεωρείται ότι προέρχονται από διαστελλόμενα μαγνητικά νέφη σχετικιστικών σωματιδίων. Εξάλλου αυτή η ιδέα υποστηρίζεται από τον παρατηρούμενο χρόνο μετατόπισης της εκπομπής στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος σαν συνάρτηση του μήκους κύματος και το γεγονός της ανακάλυψης στο υπέρυθρο ακτινοβολίας σύγχροτρον που αποτελεί προπομπό των επακόλουθων ραδιοφωνικών εκλάμψεων (Mirabel et al. 1998).

Στο Σχήμα 1.11 που ακολουθεί εμφανίζονται ταυτόχρονες καμπύλες φωτός στις ακτίνες X, στο υπέρυθρο καθώς και στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Αυτές οι καμπύλες φωτός υποδεικνύουν πως τα σχετικιστικά νέφη πλάσματος εκπηγάζουν τη χρονική στιγμή που παρατηρούνται “βυθίσματα” και ακολουθούν την επανάκαμψη της κανονικής ροής των ακτίνων X. Σε αδιαβατικά διαστελλόμενα νέφη η μέγιστη πυκνότητα ροής σε στενό εύρος μηκών κύματος (π.χ. κοντινό υπέρυθρο) θα πρέπει να παρατηρείται σύντομα μετά την εκτίναξη (10^{-3} sec), και είναι μόνο στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος που σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις λαμβάνουν χώρα (Mirabel et al. 1998). Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται πως η αρχή της υπέρυθρης έκλαμψης έλαβε χώρα σε χρόνο ≥ 200 sec μετά την πτώση της ροής των ακτίνων X, πιθανότατα στο χρόνο τη στιγμή της εμφάνισης μιας απότομης αύξησης ακτίνων X (X-ray spike, $t = 13$ min).

Παρόμοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί στην πηγή αυτή από τον Eikenberry et al. (1998). Εξάλλου σύμφωνα με το περιεχόμενο του πρότυπου του Belloni et al. (1997) που πραγματεύεται την ύπαρξη του ασταθούς πρότυπου δίσκου προσαύξεσης, αυτές οι παρατηρήσεις θέλουν την εκτόξευση των σύννεφων πλάσματος να λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του επόμενου “γεμίσματος” του εσωτερικού δίσκου προσαύξεσης. Η εκτόξευση των σύννεφων φαίνεται να συμπίπτει με την κορυφή των μαλακών ακτίνων X. Επιπλέον, η αργή άνοδος της υπέρυθρης ροής ως τη μέγιστη της τιμή που φαίνεται στο Σχήμα 1.11 φανερώνει πως η έγχυση των

σχετικιστικών σωματιδίων δεν είναι στιγμιαία αλλά αντίθετα μπορεί να διαρκεί μέχρι και δεκάδες λεπτά.



Σχήμα 1.11 : Ταυτόχρονες καμπύλες φωτός στις ακτίνες X στο υπέρυθρο και τα ραδιοφωνικά.

Οι Mirabel et al. (1998) είχαν υπολογίσει πως η ελάχιστη μάζα των νεφών που εκτοξεύονται κάθε μερικές δεκάδες λεπτά είναι : $\sim 10^{19} g$. Απ' την άλλη πλευρά, η υπολογισμένη συνολική μάζα που μετακινείται από την εσωτερική περιοχή του δίσκου προσαύξεσης σε έναν κύκλο των μερικών δεκάδων λεπτών είναι της τάξης των $\sim 10^{21} g$ (Belloni et al. 1997). Δοθέντων των αβεβαιοτήτων στον υπολογισμό των μαζών αυτών, είναι ακόμα μη καθορισμένο το ποσοστό της μάζας του εσωτερικού δίσκου προσαύξεσης που εξαφανίζεται διαμέσου του ορίζοντα της μαύρης τρύπας. Παρ' όλα αυτά φαίνεται εύλογο το γεγονός πως κατά τη διάρκεια ασταθειών στο δίσκο προσαύξεσης συμπεριλαμβανομένης της ξαφνικής εξαφάνισης του εσωτερικού τμήματος, το μεγαλύτερο μέρος αυτού μετατοπίζεται και καταλήγει να πέσει μέσα στη μαύρη τρύπα, και μόνο κάποιο κλάσμα αυτού ωθείται σε σύννεφα πλάσματος που εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον.

Ενεργειακά ξεσπάσματα στο επίπεδο φάσμα της ακτινοβολίας σύγχροτρον έχουν επίσης παρατηρηθεί στο αντικείμενο Cygnus X-3 (Fender et al. 1996). Η παρατηρούμενη οπτική πόλωση στο αντικείμενο **GRO J1655-40** (Scaltriti et al. 1997) θα μπορούσε να συσχετιστεί με την παρουσία εκπομπής σύγχροτρον στα οπτικά μήκη

κύματος. Η σπουδή και η μελέτη των φαινομένων που διέπουν το αντικείμενο **GRS 1915+105** οδηγεί στη συνειδητοποίηση πως παρόλη την καταναλισκόμενη ενέργεια για την επιτάχυνση των νεφών πλάσματος ως τις μαζικές τους κινήσεις, οι ταλαντώσεις που χαρακτηρίζουν το Σχήμα 1.11 απαιτούν ακτινοβολία σύγχροτρον της τάξης τουλάχιστον $10^{38} \text{ ergs}^{-1}$. Η φωτεινότητα λόγω ακτινοβολίας σύγχροτρον δεν είναι αμελητέα σε σχέση με τη θερμική φωτεινότητα που ακτινοβολείται στις ακτίνες X. Αυτά τα αποτελέσματα ενισχύουν και επιβεβαιώνουν τις παρατηρήσεις σύγχροτρον υπέρυθρων πιδάκων που φθάνουν τις αποστάσεις μερικών χιλιάδων AU από το αντικείμενο **GRS 1915+105** (Sams et al. 1996).

1.8 Σχετικά με τη δημιουργία των πιδάκων

Οι διαδικασίες βάσει των οποίων οι πίδακες επιταχύνονται και εμφανίζονται καλά κατευθυνόμενοι δεν έχουν ακόμη ξεκαθαριστεί και πλήρως κατανοηθεί, ωστόσο πιστεύεται πως μερικές από τις αντιλήψεις που έχουν προταθεί ότι ισχύουν για τους εξωγαλαξιακούς πίδακες θα μπορούσαν να επεκταθούν και στους γαλαξιακούς πίδακες. Οι Blandford & Znajek (1997) αξιοποιώντας το γεγονός πως, σε γενικές γραμμές, είναι δυνατό να δημιουργηθούν πεδία ηλεκτρικό και μαγνητικό, και πιθανότατα ταχύτεροι πίδακες από την εξαγόμενη ενέργεια και στροφορμή από μια περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα (Penrose 1969). Εξάλλου ένας μαγνητισμένος δίσκος προσάυξης γύρω από μια μαύρη τρύπα τύπου Kerr “τη φρενάρει” ηλεκτρομαγνητικά. Ωστόσο οι Ghosh, Abramowicz (1997) και Livio et al. (1998) αμφισβήτησαν τη δυνατότητα της διαδικασίας των Blandford & Znajek να παράσχει την πρωταρχική ισχύ στους πίδακες.

Μια βασική ιδέα που ακολουθήθηκε από πολλούς ερευνητές στο εν λόγω πεδίο είναι αυτή του μαγνητο – υδροδυναμικού πρότυπου των Blandford & Payne (1982). Αυτοί πρότειναν πως η στροφορμή ενός μαγνητισμένου δίσκου προσάυξης που βρίσκεται γύρω από ένα καταρρέων αντικείμενο είναι υπεύθυνη για την επιτάχυνση του πλάσματος.

Επιπλέον οι Koide et al. (1998) επέτυχαν για πρώτη φορά πλήρη προσομοίωση – λύνοντας αριθμητικά τις εξισώσεις της μαγνητο-υδροδυναμικής – της δημιουργίας πιδάκων κοντά σε μια μαύρη τρύπα. Τα αποτελέσματά τους υποδηλώνουν πως ο εκτινασόμενος πίδακας εμφανίζει δομή με δύο στρώματα, με ένα εσωτερικό γρήγορα οδηγούμενο από την πίεση του αερίου τμήμα κι ένα εξωτερικό τμήμα που καθορίζει τη συμπεριφορά του το μαγνητικό πεδίο. Η παρουσία του εσωτερικού τμήματος είναι αποτέλεσμα της αύξησης της ισχυρής πίεσας που παράγεται από κρουστικά κύματα στο δίσκο κατά τη διαδικασία της γρήγορης μετατόπισης και ροής ύλης μέσα στην τελευταία σταθερή τροχιά γύρω από μια μαύρη τρύπα. Αυτή η δομή δεν παρατηρείται σε μη σχετικιστικούς υπολογισμούς.

Λαμβάνοντας υπ’ όψη τις αβεβαιότητες η ταχύτητα των πιδάκων φαίνεται να χαρακτηρίζεται ως δίμορφη κατανομή, με μερικές πηγές να έχουν $v_{jet} \cong 0.3c$ ενώ άλλες $v_{jet} \geq 0.9c$. Δύο εξηγήσεις για τις τιμές αυτές κυριαρχούν στη βιβλιογραφία. Απ’ τη μια πλευρά αυτή που υποστηρίζεται από τους Kudoh & Shibata (1995) θέλει τους ταχύτερους πίδακες πιθανότατα να προέρχονται από τα βαθύτερα βαρυτικά πηγάδια (Livio 1998). Απ’ την άλλη οι Meier et al. (1997) πρότειναν πως η ταχύτητα των πιδάκων καθορίζεται από έναν μαγνητικό “διακόπτη”, με τις υψηλά σχετικιστικές ταχύτητες να επιτυγχάνονται μόνο πάνω από μια κρίσιμη τιμή του λόγου της ταχύτητας των κυμάτων Alfven και της ταχύτητας διαφυγής. Εξάλλου ο καθορισμός της μάζας του καταρρέοκειμένου στις πηγές των πιδάκων θα εμφανίζει σαφή διάκριση ανάμεσα στα δύο αυτά μοντέλα.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως ένα βασικό χαρακτηριστικό που τα προτεινόμενα μοντέλα των πιδάκων θα πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψη είναι η παραγωγή σχετικιστικών σωματιδίων που θα παρήγαγαν την εκπομπή σύγχροτρον που παρατηρείται σε μερικές πηγές. Όπως και σε άλλα αστροφυσικά θέματα, πιστεύεται πως η επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ταχύτητες λαμβάνει χώρα σε κρουστικά κύματα (Blandford & Ostriker 1978). Απ' την άλλη πλευρά, ωστόσο, τα περισσότερα των διπλών συστημάτων ακτίνων – X είναι ραδιοφωνικά ήσυχα (“radio-quiet”), φανερώνοντας πως τα σχετικιστικά ηλεκτρόνια / μαγνητικά πεδία δεν είναι πάντα παρόντα σε επαρκείς ποσότητες.

1.9 Εκπομπή ακτινοβολίας σύγχροτρον

Η υψηλή θερμοκρασία λαμπρότητας, η γρήγορη μεταβλητότητα, και η γραμμική πόλωση που παρατηρείται στη ραδιοφωνική εκπομπή από τα διπλά συστήματα ακτίνων X, δείχνει ότι η ακτινοβολία οφείλεται σε εκπομπή σύγχροτρον. Η χρονική εξέλιξη της ραδιοφωνικής εκπομπής έχει μοντελοποιηθεί με τους όρους που θέτουν κωνικοί πίδακες ή διαστελλόμενα νέφη μαγνητισμένου πλάσματος (Hjellming & Johnston 1988; Marti et al. 1992; Seaquist 1993).

Στην απλούστερη περίπτωση ενός αδιαβατικά διαστελλόμενου σφαιρικού νέφους το πρότυπο του Van der Laan (1996) χρησιμοποιείται, με την πυκνότητα ροής να δίνεται ως εξής : $S_\nu \propto \nu^{(1-p)/2} r^{-2p}$, ενώ τα σχετικιστικά ηλεκτρόνια εμφανίζουν την ακόλουθη ενεργειακή κατανομή: $N(E) = KE^{-p}$, με το K να είναι μια σταθερά άμεσα συσχετισμένη με την πυκνότητα των σχετικιστικών ηλεκτρονίων. Σ' αυτή την εξίσωση r είναι η ακτίνα του νέφους.

Υποθέτοντας πως το εν λόγω νέφος διαστέλλεται γραμμικά με το χρόνο, η πυκνότητα ροής δίνεται μέσω της ακόλουθης σχέσης : $S_\nu \propto \nu^{(1-p)/2} r^{-2p}$, και για μια τυπική τιμή $p = 2.4$ λαμβάνεται ως εξαγόμενο πως $S_\nu \propto \nu^{-0.7} t^{-4.8}$. Αυτό το απλό πρότυπο ακολουθεί την μείωση που παρατηρείται στη ροή, χαρακτηριστικό των διπλών συστημάτων ακτίνων-X που εκπέμπουν στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος (Ball 1996). Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις πηγών πιδάκων που έχουν παρατηρηθεί και μελετηθεί πολύ καλά, όπως είναι τα αντικείμενα **SS433** (Hjellming & Johnston 1988, Vermeulen et al. 1993), και **GRS 1915+105** (Rodriguez & Mirabel 1999), παρατηρούνται πολύ μικρότερες μειώσεις. Αυτή η τοποθέτηση πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στην περίπτωση που αποσκοπούμε στο να κάνουμε τροποποιήσεις στο απλό πρότυπο διαστολής.

Πάντως μία πιθανότητα είναι να αποδώσουμε αυτήν τη βαθύτερη πτώση στην πυκνότητα ροής με το χρόνο σε περιορισμένη διαστολή (constrained expansion) – η πηγή δεν μπορεί να διασταλεί και στις τρεις διαστάσεις αλλά μόνο σε μία ή σε δύο διαστάσεις. Στην πραγματικότητα οι χάρτες για το αντικείμενο **GRS 1915+105** με ανάλυση milliarcsec από τους Dhawan et al. (1999) δείχνουν πως η διαστολή των νεφών σε αποστάσεις εκατοντάδων AU από τη συμπαγή πηγή είναι κυρίως προς μία διεύθυνση. Η πυκνότητα ροής μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από την εξίσωση: $S_\nu \propto \nu^{-0.7} t^{-(2/3)pn}$, όπου n είναι ο αριθμός των διαστάσεων για τις οποίες είναι επιτρεπτή η διαστολή.

Εξάλλου τόσο στην πηγή **SS433** (Hjellming & Johnston 1988) όσο στην **GRS 1915+105** (Rodriguez & Mirabel 1999), μία εξαίρεση στο νόμο της δύναμης που περιγράφει τη μείωση της ροής σαν συνάρτηση του χρόνου παρατηρείται. Ακόμη είναι αξιοσημείωτο το γεγονός που θέλει και στις δύο πηγές η μείωση κοντά στην πηγή να ακολουθεί το νόμο $S_\nu \propto t^{-1/3}$, ενώ σε μια απόσταση της τάξης των $\sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}$

παρατηρείται ότι $S_v \propto t^{-2.6}$. Οι Hjellming & Johnston (1988) πρότειναν πως αυτοί οι νόμοι δυνάμεων μπορούν να εξηγηθούν και να ερμηνευθούν σαν αποτέλεσμα μιας αρχικής ασθενούς διαστολής ακολουθούμενης από ελεύθερη διαστολή στις δύο διαστάσεις. Αυτή η, με σταδιακά βήματα, μείωση στην πυκνότητα ροής με τη γωνιακή διακριτική ικανότητα μπορεί να συσχετισθεί με την παρατηρούμενη τάση στους πίδακες μερικών ραδιογαλαξιών, όπου η ένταση I μειώνεται με τη γωνιώδη απόσταση ϕ ακολουθώντας τον ακόλουθο νόμο: $I_v \propto \phi^{-x}$, $x = 1.2 - 1.6$, στις εσωτερικές περιοχές και $x \sim 4$ στις εξωτερικές περιοχές του πίδακα (Bridle & Perley 1984).

Είναι ακόμη πιθανό πως συνεχής έγχυση (injection) τόσο σχετικιστικών σωματιδίων όσο μαγνητικού πεδίου εντός του πλάσματος μπορούν να προκαλέσουν βαθύτερες μειώσεις σαν συνάρτηση του χρόνου στην πυκνότητα ροής (Mirabel et al. 1998). Επιπλέον αναφέρουμε πως οι Rodriguez & Mirabel (1999) υπολογίζουν για το λαμπρό γεγονός της 19^{ης} Μαρτίου 1994 στο αντικείμενο **GRS 1915+105** μαγνητικό πεδίο $\sim 50 mGauss$ και ενέργεια $\sim 4 \times 10^{43} ergs$ στα σχετικιστικά ηλεκτρόνια. Υποθέτοντας πως υπάρχει ένα (μη σχετικιστικό) πρωτόνιο ανά σχετικιστικό ηλεκτρόνιο, η μάζα του νέφους πρωτονίου υπολογίζεται ότι είναι της τάξης $10^{23} g$.

Για να υπολογιστεί η μέγιστη μηχανική ισχύς κατά τη διάρκεια της εκτίναξης απαιτείται η γνώση της διάρκειας της επιτάχυνσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της εκτίναξης. Οι Mirabel & Rodriguez (1994) με συντηρητικούς υπολογισμούς καταλήγουν πως το γεγονός της εκτίναξης πρέπει να έχει διαρκέσει ≤ 3 μέρες, απαιτώντας μια ελάχιστη ισχύ $\sim 5 \times 10^{38} erg/sec$, μία τιμή συγκρίσιμη με τη μέγιστη παρατηρούμενη σταθερή φωτεινότητα του **GRS 1915+105** που είναι $\sim 3 \times 10^{38} erg/sec$ (Harmon et al. 1994).

Η μάζα που εκτινάχτηκε πριν και μετά το ξέσπασμα της 19^{ης} Μαρτίου 1994 έχει εκτιμηθεί ότι είναι της τάξης των $10^{21} - 10^{22} g$. Εξάλλου εάν τα επαναλαμβανόμενα παρατηρούμενα γεγονότα με περιόδους κάποιων δεκάδων λεπτών στο αντικείμενο **GRS 1915+105** (Rodriguez & Mirabel 1997; Pooley & Fender 1997; Mirabel et al. 1998; Eikenberry et al. 1998) ερμηνευθούν ως μικρά επεισόδια εκτίναξης, η μάζα που σχετίζεται άμεσα μ' αυτά είναι της τάξης των $10^{19} g$.

Ο ακριβής υπολογισμός θέλει το **GRS 1915+105** να χαρακτηρίζεται από την έγχυση ενέργειας της τάξης των $10^{23} g$ για κάθε χρόνο με τη μορφή σχετικιστικών ($0.92c - 0.98c$) καλά κατευθυνόμενων εκροών (collimated outflows). Αυτό αντιστοιχεί σε μια μέση μηχανική ενέργεια $L_{mech} \sim 10^3 L_o$, όπου L_o η ηλιακή φωτεινότητα. Σε αντίθεση στο **SS433** σαν αποτέλεσμα της περισσότερο συνεχόμενης ροής του πίδακα είναι $L_{mech} \sim 10^5 L_o$ (Margon 1984), παρόλο που στο αντικείμενο αυτό εμφανίζεται μικρότερη ταχύτητα ροής σε σχέση με το **GRS 1915+105**. Σύμφωνα μ' αυτή τη θεώρηση επομένως οι εκρήξεις του **GRS 1915+105** είναι πολύ ενεργητικές αλλά περισσότερο σποραδικές.

Ακόμη υπάρχουν αρκετά στοιχεία που συνηγορούν στο ότι κατά τη διάρκεια μερικών γεγονότων, η εκπομπή σύγχροτρον στο **GRS 1915+105** εκτείνεται σε ένα εύρος μηκών κύματος από τα ραδιοφωνικά ως τουλάχιστον την περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (Mirabel et al. 1998; Fender & Pooley 1997). Τότε η φωτεινότητα σύγχροτρον γίνεται αξιοσημείωτη, αγγίζοντας τιμές που φθάνουν τα $10^{36} erg/sec$.

Τέλος όπως εμφατικά επισημαίνεται από τους Hjellming & Han (1995) οι πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον στα αστρικά περιβάλλοντα τείνουν να είναι μεταβλητές με το χρόνο. Τότε, μια συμπεριφορά εξαιρετικά δύσκολο να συμπεριληφθεί στους

υπολογισμούς είναι η σχετική σταθερότητα της ραδιοφωνικής ροής σε μερικές πηγές, εκ των οποίων η **Cyg X-1** αποτελεί το πλέον ακραίο των παραδειγμάτων.

1.10 Άλλες πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία μας

Όπως έχει καταστεί σαφές σ' όσα ως τώρα έχουν αναφερθεί, στα διπλά συστήματα ακτίνων X υπάρχει μια γενική συσχέτιση ανάμεσα στις ιδιότητες των ακτίνων X και αυτές των πιδάκων. Συγκεκριμένα σταθερές πηγές ακτίνων X είναι επίσης σταθερές ραδιοφωνικές πηγές, ενώ οι πηγές ακτίνων X παράγουν στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος σποραδικά ξεσπάσματα / γεγονότα εκτινάξεων. Σταθερές πηγές σκληρών ακτίνων X όπως π.χ. τα αντικείμενα **1E1740.7-2942**, **GRS 1758-258** συνήθως εμφανίζονται άμεσα συσχετισμένα με ασθενείς, δίπλευρες ραδιοφωνικές δομές που έχουν μεγέθη μερικών *arc min* (parsec scales). Οι ραδιοφωνικοί πυρήνες αυτών των δύο σταθερών πηγών είναι ασθενείς (≤ 1 mJy) και δεν εμφανίζουν μεγάλη μεταβολή στο πλάτος. Αντιθέτως τα αντικείμενα **GRS 1915+105**, **GRO J1655-40**, **XTE J1748-288** (hard X-ray transients) μπορεί να εμφανίζουν μεταβολές στις ακτίνες X και στις ραδιοφωνικές ροές μερικών τάξεων μεγέθους σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

Η αρχή διατήρησης της στροφορμής στους δίσκους προσαύξησης δείχνει πως πιθανότατα όλες οι πηγές σκληρών ακτίνων X που προσανυζάνουν ύλη σε ποσοστά μεγαλύτερα από αυτά που προβλέπει η θεωρία του Eddington, πρέπει να παράγουν σχετικιστικούς πίδακες. Ωστόσο η παρατηρησιακή μελέτη αυτών των πιδάκων πρακτικά παρουσιάζει μερικές δυσκολίες. Σταθερές πηγές σκληρών ακτίνων X όπως είναι ο **Cygnus X-1** περιβάλλονται από ασθενείς μη θερμικές ραδιοφωνικές δομές που εκτείνονται για μερικά *arc min* (Marti et al. 1996). Ακόμη και στις περιπτώσεις στις οποίες αυτές οι δομές είναι καλά ευθυγραμμισμένες με τον μεταβλητό συμπαγή ραδιοφωνικό συνοδό είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποδειχθεί εάν οι ασθενείς και εκτεταμένες ραδιοφωνικές δομές είναι πραγματικά συσχετισμένες με την πηγή ακτίνων X. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή του **SCO X-1**, όπου πιθανοί μεγάλης κλίμακας ραδιοφωνικοί "λοβοί" βρέθηκε να είναι εξωγαλαξιακές πηγές συμμετρικά τοποθετημένες στο επίπεδο του ουρανού σε σχέση με την πηγή **SCO X-1** (Fomalont & Geldzahler 1991).

Table 1 Sources of Relativistic Jets in the Galaxy⁽¹⁾

Source	Compact object	$V_{app}^{(2)}$	$V_{int}^{(3)}$	$\Theta^{(4)}$	References
GRS 1915+105	black hole	1.2e-1.7c	0.92e-0.98c	66°-70°	MR94; F+99; DMR99
GRO J1655-40	black hole	1.1c	0.92c	72°-85°	T+95; HR95; OB97
XTE J1748-288	black hole	0.9e-1.5c	>0.9c		H+98
SS 433	neutron star ?	0.26c	0.26c	79°	M84; S84
Cygnus X-3	neutron star ?	~0.3c	~0.3c	>70°	S+93; M+99
CI Cam	neutron star ?	~0.15c	~0.15c	>70°	M+98; G+98
Circinus X-1	neutron star	≥0.1c	≥0.1c	>70°	S+93; F+98
1E1740.7-2942	black hole				M+92; RM99e
GRS 1758-258	black hole				R+94
Sgr A*	black hole				L+98

⁽¹⁾Sources reported as of December 1998.

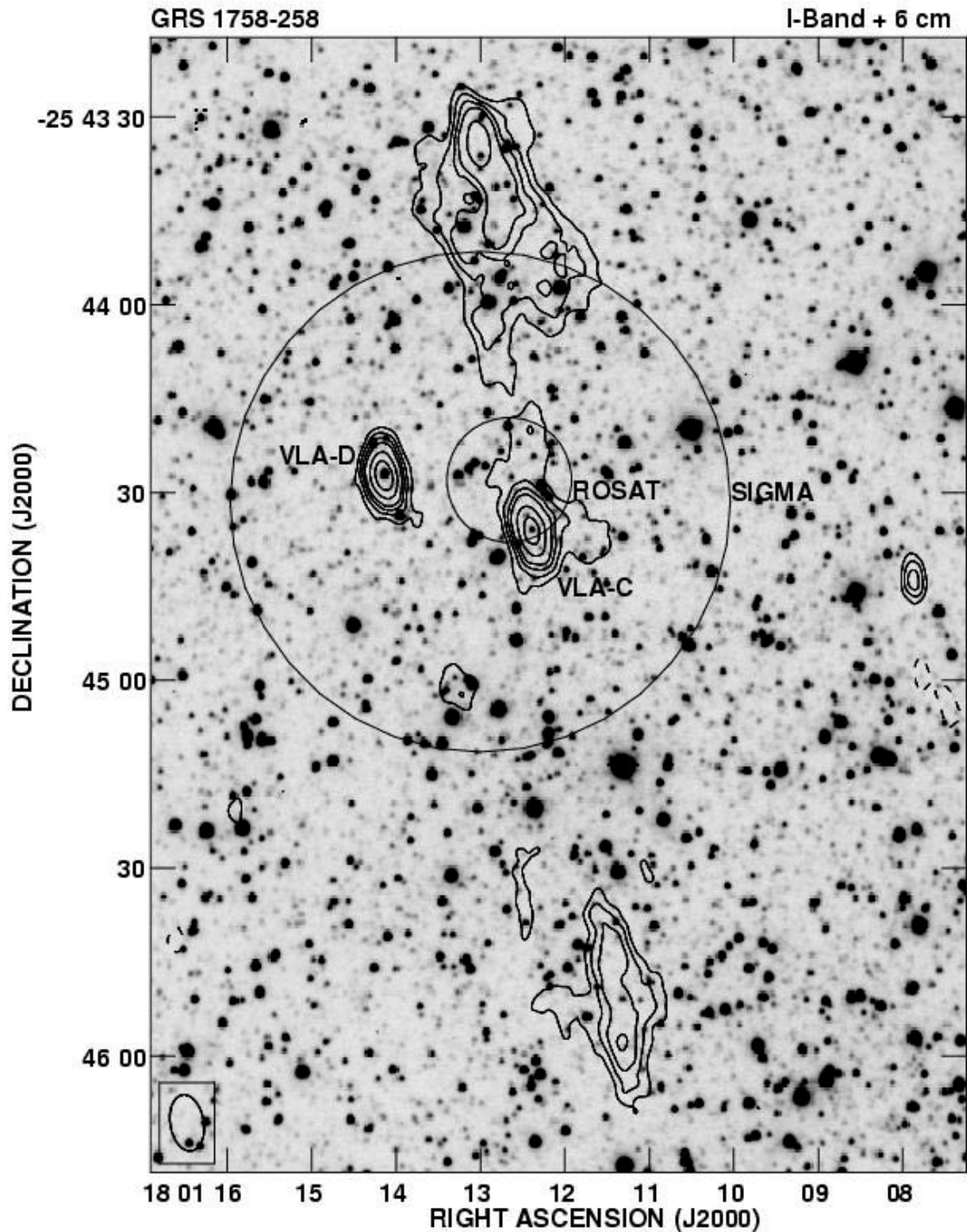
⁽²⁾ V_{app} is the apparent speed of the highest velocity component of the ejecta.

⁽³⁾ V_{int} is the intrinsic velocity of the ejecta.

⁽⁴⁾ Θ is the angle between the direction of motion of the ejecta with the line of sight.

Συμπεριλαμβάνουμε στον παραπάνω Πίνακα τις 10 γνωστές πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία μας. Οι έξι πρώτες είναι παροδικές, ενώ οι επόμενες τρεις είναι

σταθερές πηγές ακτίνων Χ. Οι κανονικές κινήσεις της σχετικιστικής εκτίναξης έχουν καθοριστεί με ακρίβεια στα αντικείμενα **GRS 1915+105**, **GRO J1655-40**, **XTE J1748-288** καθώς και στο **SS433**.



Σχήμα 1.12 : Παρατηρήσεις του microquasar GRS 1758-258 με τις δορυφορικές αποστολές **ROSAT** και **SIGMA** και το ραδιο-συμβολόμετρο **VLA**.

Πέρα όμως από τις τέσσερις αυτές πηγές, οι κανονικές κινήσεις έχουν ακόμη μετρηθεί, –αλλά με μικρότερη ακρίβεια– για τις κινούμενες δομές στα αντικείμενα **Cygnus X-3** (Schalinski et al. 1995, Marti et al. 1999), **Circinus X-1** (Fender et al. 1998) και **CI Cam** (XTE J0421+560; Hjellming & Mioduszewski 1998; Mioduszewski et al. 1998). Είναι πολύ ενδιαφέρον το γεγονός πως οι εκτινάξεις από τα διπλά συστήματα με μαύρη τρύπα **GRS 1915+105**, **GRO J1655–40**, και πιθανότατα και το **XTE J1748-288** έχουν ταχύτητες μεγαλύτερες από $0.9c$, ενώ η εκτίναξη από τις τέσσερις πηγές που πιστεύεται ότι είναι διπλά συστήματα με αστέρα νετρονίων εμφανίζουν ταχύτητες $\leq 0.3c$.

Ακόμη μια πιθανή πηγή σχετικιστικών πιδάκων στο γαλαξία μας είναι, φυσικά, η *SgrA**, στην οποία προβλέπεται και η ύπαρξη μαύρης τρύπας μάζας 2.5 εκατομμυρίων ηλιακών μαζών στο γαλαξιακό κέντρο (Eckart & Genzel 1997). Η ραδιοφωνική πηγή είναι πάντοτε παρούσα περίπου στο επίπεδο 1 Jy και τη χαρακτηρίζει ένα επίπεδο φάσμα με σχετικά μικρές διακυμάνσεις. Η συμπεριφορά αυτή είναι παρόμοια αυτής των ασθενών συμπαγών ραδιοφωνικών πηγών (mJy) που σχετίζονται με το αντικείμενο **Cygnus X-1** (Marti et al. 1996) και το **GRS 1915+105** (Pooley & Fender 1997). Τέλος παρόλη την ισχυρή μεσοαστρική διασπορά (interstellar scattering) στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος, πρόσφατες παρατηρήσεις του VLBA στα 7-mm συμβάλλουν και στηρίζουν την πεποίθηση πως η *SgrA** αποτελεί μια εκτεταμένη ραδιοφωνική πηγή ακτίνας $72 R_{\text{Schwarzschild}}$ και την ύπαρξη ενός πίδακα (Lo et al. 1998).

1.11 Αλληλεπίδραση σχετικιστικών πιδάκων με το μεσοαστρικό περιβάλλον

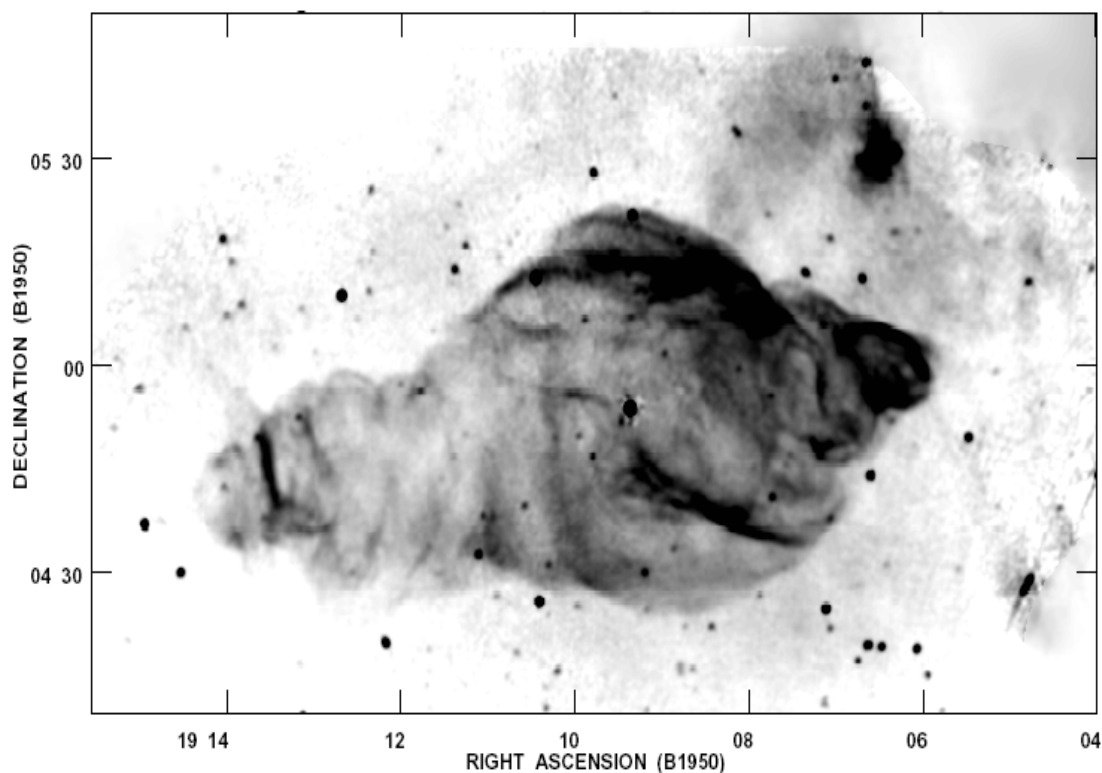
Εάν ένα συμπαγές αντικείμενο (μαύρη τρύπα ή αστέρας νετρονίων) λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εγχέονται καλά κατευθυνόμενοι σχετικιστικοί πίδακες εντός του ψυχρού περιβάλλοντος αυτού, αναμένεται ότι κάποιο ποσοστό της ισχύος αυτής θα διαχυθεί μέσω κρουστικών κυμάτων στο μεσοαστρικό αέριο και τη σκόνη. Η σύγκρουση σχετικιστικής εκτίναξης υλικού, με υλικό του περιβάλλοντος χώρου έχει παρατηρηθεί στο αντικείμενο **XTE J1748-288** (Hjellming et al. 1998), όπου η οδηγούσα άκρη του πίδακα επιβραδύνεται ενώ αυξάνει σε πολύ μεγάλο βαθμό σε λαμπρότητα.

Η αλληλεπίδραση των ‘ελαφρώς’ σχετικιστικών πιδάκων από την πηγή **CI Cam** (Hjellming & Mioduszewski, 1998) με ένα κελυφοειδές νεφέλωμα αποτελούμενο από σκόνη και *HII*, ανιχνεύθηκε και αναφέρθηκε από τους Garcia et al. (1998). Επιπλέον άλλες αποδείξεις για την αλληλεπίδραση των σχετικιστικών πιδάκων με το περιβάλλον τους είναι οι ραδιοφωνικοί λοβοί του αντικειμένου **1E 1740.7-2942** (Mirabel et al. 1992) καθώς και αυτοί του **GRS 1758+258** (Rodriguez et al. 1992). Ακόμη ανάλογα παραδείγματα αποτελούν οι συστρεφόμενοι πίδακες *arcsec* του αντικειμένου **Circinus X-1** (Steward et al. 1993; Fender et al. 1998) και οι δύο πλευρικές επεκτάσεις δεκάδων *pc* στο ραδιοφωνικό κέλυφος του νεφελώματος W50 που φιλοξενεί στο κέντρο του το αντικείμενο **SS433**. Η αλληλεπίδραση του **SS433** με το νεφέλωμα W50 μελετήθηκε τόσο στην περιοχή των ακτίνων X (Brinkmann et al. 1996), όσο στο υπέρυθρο (Mirabel et al. 1996) και στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος (Dubner et al. 1998). Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις παρουσιάζονται εκτενώς σε ακόλουθες παραγράφους, όπου και γίνεται ευρεία αναφορά στα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά που τις διέπουν.

Το **SS433** είναι ένα μεγάλης μάζας διπλό σύστημα που εκπέμπει στην περιοχή των ακτίνων X, ευρισκόμενο σε απόσταση $\sim 3 \text{ kpc}$ κοντά στο κέντρο του ραδιοφωνικού κελύφους του νεφελώματος W50 (Margon, 1984). Το τελευταίο ενδέχεται να είναι είτε το υπόλειμμα υπερκαινοφανούς κατά το οποίο δημιουργήθηκε το συμπαγές αντικείμενο (Velusamy & Kundu 1974), είτε μία φυσαλίδα μέσω της οποίας

διεξάγεται η απομάκρυνση της ενέργειας που εκρέει το **SS433** (Begelman et al. 1980). Εξάλλου σχετικιστικοί πίδακες παρατηρούνται στις κλίμακες των *sub-arcsec* στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος και οι μεγάλης κλίμακας πίδακες καθίστανται ορατοί στις ακτίνες X σε αποστάσεις των $\sim 30 \text{ arc min}$ ($\sim 25 \text{ pc}$) από τη συμπαγή πηγή (Brinkmann et al. 1996). Με παρατηρήσεις στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος, οι λοβοί φθάνουν σε διαστάσεις μεγαλύτερες της 1° ($\sim 50 \text{ pc}$). Αυτοί οι μεγάλης κλίμακας πίδακες ακτίνων X και οι ραδιοφωνικοί λοβοί είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της εκροής μάζας με το μεσοαστρικό μέσο. Από τις γραμμές εκπομπής τόσο στο οπτικό κομμάτι του φάσματος, όσο στις ακτίνες X, βρίσκεται πως οι σχετικιστικοί πίδακες (*sub-arcsec*) έχουν κινητική ενέργεια $\sim 10^{39} \text{ erg/sec}$ (Margon, 1984; Spencer, 1984), η οποία είναι μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη αυτής που ακτινοβολείται στις ακτίνες X καθώς και στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος.

Στο Σχήμα 1.13 απεικονίζεται ο σε $\lambda = 20 \text{ cm}$ χάρτης του με ανάλυση 55 arc sec των Dubner et al. (1998). Δείχνει τη σχέση ανάμεσα στους σχετικιστικούς πίδακες (*sub-arcsec*) και το εκτεταμένο νεφέλωμα πάνω από $\sim 10^5$ τάξεις μεγέθους σε κλίμακες απόστασης. Εξάλλου οι Dubner et al. (1998) υπολογίζουν πως η μεταφερόμενη κινητική ενέργεια από το **SS433** στο μέσο είναι $\sim 2 \times 10^{51} \text{ erg}$, και επομένως επιβεβαιώνεται το γεγονός που θέλει τους σχετικιστικούς πίδακες από το **SS433** να αντιπροσωπεύουν μια σημαντική συνεισφορά στη συνολική ενέργεια του περιβάλλοντος το αντικείμενο νεφελώματος W50.



Σχήμα 1.13: Μωσαϊκό του W50 στα 1.5 GHz (Dubner et al. 1998) μέσω της διάταξης του VLA. Το αντικείμενο **SS433** είναι η λαμπρή σημειακή πηγή στο κέντρο της εικόνας. Η πλευρική E–W επέκταση του νεφελώματος πάνω από 1° ($\sim 50 \text{ pc}$) $\sim 1^\circ$ προκαλείται από την έγχυση των σχετικιστικών πιδάκων από το **SS433**. Η κλίμακα του γκρι ποικίλει αντιπροσωπεύοντας τιμές από 1 έως 25 mJy/beam . Η γωνιακή ανάλυση είναι $56 \times 54 \text{ arcsec}$.

Οι Begelman et al. (1980) χαρακτηρίζουν το νεφέλωμα W50 σαν “beambag” θέλοντας να εξηγήσουν το επιμηκυμένο σχήμα και τη ραδιοφωνική δομή του W50 σαν απόδειξη της συνεχούς επίδρασης σε αυτό μαγνητικού πεδίου και έγχυσης υψηλής ενέργειας σωματιδίων από το **SS433**.

Αποδεικτικά στοιχεία για την αλληλεπίδραση των πιδάκων με το μεσοαστρικό μέσο έχουν επίσης αναζητηθεί στις δύο πηγές **GRS 1915+105** και **GRO J1655-40**, που παρουσιάζουν υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα. Συγκεκριμένα στο αντικείμενο **GRS 1915+105** οι Chaty, Rodriguez & Mirabel (1999) έψαξαν στα χιλιοστομετρικά, υπέρυθρα μήκη κύματος και στις ακτίνες X για αποδείξεις μιας αναμενόμενης φυσικής συσχέτισης ανάμεσα στους σχετικιστικούς πίδακες και δύο πηγές IRAS που προβάλλονται συμμετρικά σε κάθε πλευρά σε γωνιώδη απόσταση ~ 15 arcmin από τη συμπαγή πηγή που με την πρώτη ματιά θα μπορούσε να πρόκειται για λοβούς που προκαλούνται από την πρόσκρουση των πιδάκων σε μεσοαστρικά μοριακά νέφη (Rodriguez & Mirabel, 1999). Παρόλη την καλή ευθυγράμμιση των πηγών του IRAS με τους πίδακες (sub-arcsec) μη αδιαμφισβήτητη και τελειωτική φυσική απόδειξη για συσχέτιση με το **GRS 1915+105** δεν έχει βρεθεί. Πάντως οι πηγές του IRAS είναι πολύ πιθανόν να αποτελούν κανονικές περιοχές *HII*.

Απ’ την άλλη πλευρά, εξάλλου, οι Hunstead et al. (1998) ανακάλυψαν περιοχές εκτεταμένης εκπομπής ευθυγραμμισμένες με τους ραδιοφωνικούς πίδακες του αντικειμένου **GRO J1655-40**, αλλά η πραγματική τους συσχέτιση με την υψηλής ενέργειας πηγή δεν έχει ακόμα επιβεβαιωθεί. Οι πίδακες στα αντικείμενα **GRS 1915+105** και **GRO J1655-40** είναι ταχύτεροι αυτών του αντικειμένου **SS433**, αλλά πολύ πιο σποραδικοί, και σ’ αυτό πιθανότατα οφείλεται η έλλειψη φανερών λοβών που σχετίζονται άμεσα με αυτούς.

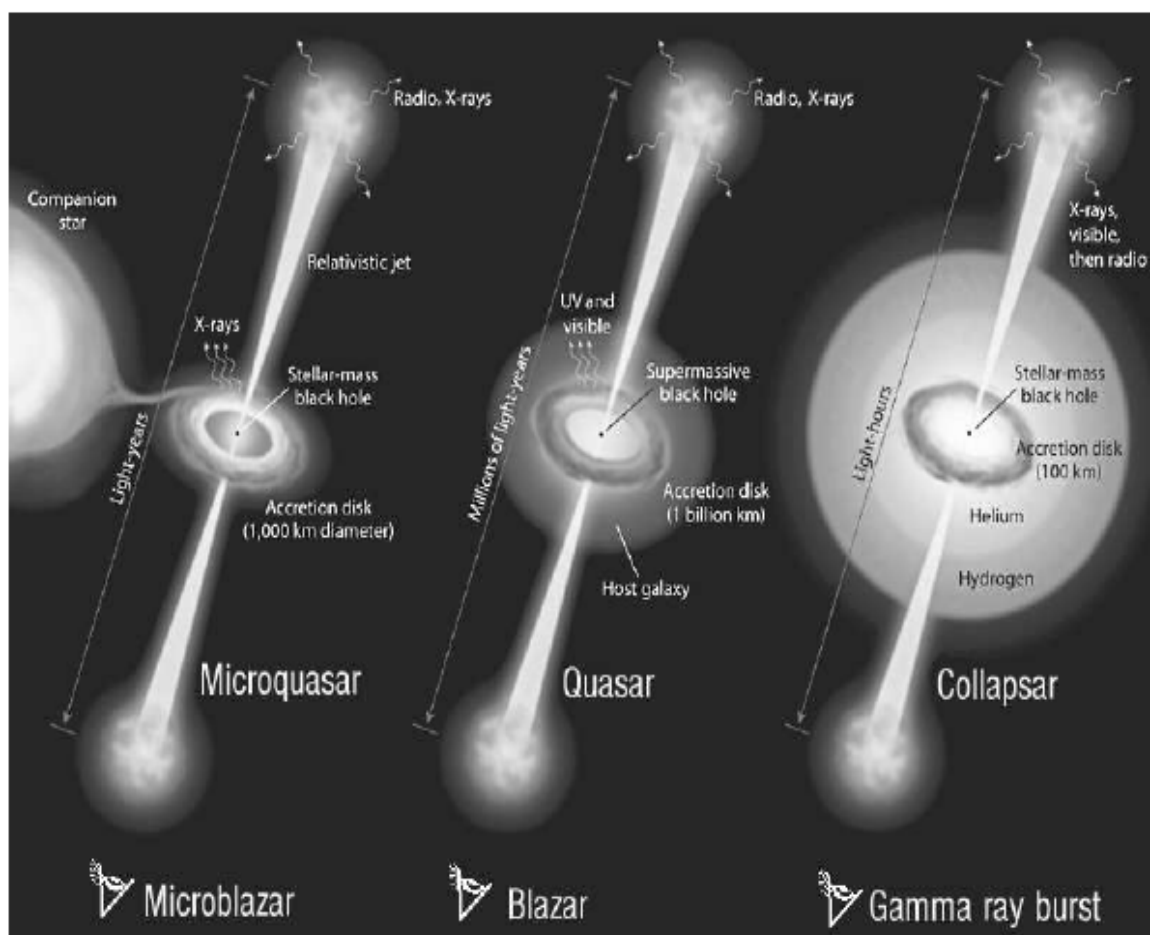
Έχει προταθεί πως η αλληλεπίδραση των σχετικιστικών πιδάκων με το περιβάλλον ενδεχομένως να επιφέρει υψηλής ενέργειας ακτινοβολία. Συγκεκριμένα ποζιτρόνια που απελευθερώνονται αυθόρμητα από τη συμπαγή πηγή θα μπορούσαν να εξαϋλωθούν τοπικά στο θερμό πλάσμα παράγοντας μία πλατειά φασματική δομή στα 511 keV (Sunyanev et al. 1991; Ramaty et al. 1992). Εναλλακτικά ένα ποσοστό ποζιτρονίων θα μπορούσε να εισρεύσει στο αεριώδες μεσοαστρικό περιβάλλον – υφιστάμενο επιβράδυνση και εξαϋλωση σε ένα τέτοιο ψυχρό μέσο, με αποτέλεσμα να εκπέμπει σε μια στενή γραμμή στα 511 keV, συμπεριλαμβάνοντας εκπομπή σύγχροτρον από ραδιοφωνικούς λοβούς και συνεχής εκπομπή *bremsstrahlung* ακτίνων γ (Laurent & Paul 1994).

1.12 Συμπεράσματα και προοπτικές

Η μελέτη των σχετικιστικών πιδάκων από τα διπλά συστήματα ακτίνων X (X-ray binaries) στο Γαλαξία μας θέτει μια σταθερότερη βάση για τη μελέτη των σχετικιστικών εκπομπών οπουδήποτε αλλού στο Σύμπαν. Η αναλογία ανάμεσα στα quasars και στα microquasars οδήγησε στην ανακάλυψη των πηγών στο Γαλαξία μας, που παρουσιάζουν υπέρ-σχετικιστική ταχύτητα. Εξάλλου από τη μελέτη των κινούμενων πιδάκων σε ένα microquasar, ένα ανώτατο όριο για την απόσταση ως την πηγή εξήχθηκε, χρησιμοποιώντας βέβαια τους περιορισμούς που θέτει η ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Εξαιτίας του ότι η σχετικά σύντομη χρονική κλίμακα στην οποία λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα σχετίζεται με τις ροές ύλης γύρω από μαύρες τρύπες αστρικής μάζας, κάποιος μπορεί να λάβει πληροφορίες για παρόμοια φαινόμενα που συμβαίνουν στα quasars αλλά δεν είναι δυνατό να παρατηρηθούν. Βασικής σημασίας είναι η κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στις αστάθειες της ροής προσαύξησης ύλης που παρατηρούνται στις ακτίνες X με την εκτίναξη σχετικιστικών νεφών πλάσματος που

παρατηρούνται στα ραδιοφωνικά, υπέρυθρα, και πιθανότατα στα οπτικά μήκη κύματος. Η ανίχνευση εκλάμψεων σύγχροτρον στο υπέρυθρο υποδηλώνει ότι η εκτίναξη ύλης στα microquasars περιέχει πολύ ενεργητικά σωματίδια.



Σχήμα 1.14: Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τις παρούσες αντιλήψεις σχετικά με τα microquasars, quasars και gamma-ray bursts. Προτείνεται πως ένας παγκόσμιος μηχανισμός ίσως ενεργεί σε όλες τις πηγές σχετικιστικών πιδάκων στο Σύμπαν. Η σύνδεση των γνώσεων ανάμεσα σ' αυτές τις τρεις περιοχές της έρευνας στην αστροφυσική θα πρέπει, όπως αναμένεται, να βοηθήσει για να επιτευχθεί μια πληρέστερη και ουσιαστικότερη κατανόηση των φαινομένων των σχετικιστικών πιδάκων που παρατηρούνται σε οποιαδήποτε περιοχή τόσο του Γαλαξία μας όσο και ολόκληρου του Σύμπαντος.

Η ανίχνευση των microquasars διανοίγει μερικές νέες προοπτικές που αναμένεται να αποδειχθούν ιδιαίτερα σημαντικές για τις μελλοντικές ανακαλύψεις :

1. Παρέχουν μια νέα μέθοδο για τον καθορισμό αποστάσεων χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς που θέτονται από την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας. Εφόσον οι κανονικές κινήσεις της δίπλευρης εκτομής και ο παράγοντας Doppler μετρηθούν, η απόσταση ως την πηγή μπορεί να εξαχθεί. Με την ταχεία εξέλιξη και πρόοδο των τεχνολογικών δυνατοτήτων στην αστρονομία, αυτή η σχετικιστική μέθοδος για τον καθορισμό αποστάσεων μπορεί να εφαρμοσθεί πρώτα στους πίδακες πηγών με μαύρη τρύπα σε γαλαξιακά διπλά συστήματα και ίσως αργότερα και στα quasars.
2. Τα microquasars αποτελούν κοντινά εργαστήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί μια γενικότερη κατανόηση του μηχανισμού εκτόξευσης των σχετικιστικών πιδάκων. Οι παρατηρήσεις σε

πολλά μήκη κύματος για το **GRS 1915+105** υποδηλώνουν πως τα νέφη εκτινάσσονται κατά τη διάρκεια του ‘ανεφοδιασμού’ του εσωτερικού δίσκου προσαύξησης που ακολουθεί την ξαφνική εξαφάνιση πέρα από την τελευταία σταθερή τροχιά γύρω από τη μαύρη τρύπα. Με βάση αυτά τα νέα δεδομένα νέες θεωρητικές ανακαλύψεις πάνω στα μοντέλα της δημιουργίας των σχετικιστικών πιδάκων βρίσκονται προ των πυλών.

3. Υψηλής ευαισθησίας φασματοσκοπία ακτίνων X πηγών πιδάκων με τα μελλοντικά διαστημικά παρατηρητήρια ακτίνων X ενδέχεται να ξεκαθαρίσουν και να φωτίσουν κρυφές πτυχές φαινομένων στους δίσκους προσαύξησης που συσχετίζονται με τη δημιουργία των πιδάκων.
4. Πολύ περισσότερα microquasars αναμένεται να ανακαλυφθούν στο μέλλον. Ανάμεσά τους, τα microblazars πρέπει να εμφανίζονται ως πηγές με γρήγορες και μεγάλες μεταβολές στο πλάτος της παρατηρούμενης ροής.
5. Τέλος τα microquasars και η μελέτη τους θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρόσφορο έδαφος για να ελεγχθούν φαινόμενα της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας στο όριο του ισχυρού πεδίου. Η Γενική Θεωρία στην περίπτωση ασθενών βαρυτικών πεδίων έχει επιτυχώς ελεγχθεί παρατηρώντας στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος φαινόμενα που αφορούν τους pulsars. Πάντως αναμένεται ότι τα παρατηρούμενα στα microquasars φαινόμενα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για να ερευνηθεί η φυσική του ισχυρού βαρυτικού πεδίου κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μαύρης τρύπας

Κεφάλαιο 2

2. Το αντικείμενο SS433 και οι παράδοξες ιδιότητές του

2.1 Εισαγωγή – Τι είναι το αντικείμενο SS433

Το 1997 οι Stephenson και Sanduleak δημοσίευσαν έναν κατάλογο αντικειμένων των οποίων το κύριο χαρακτηριστικό ήταν η εμφάνιση στο φάσμα τους, της πολύ ισχυρής γραμμής εκπομπής H_α στα οπτικά μήκη κύματος. Το αντικείμενο με αριθμό 433 του συγκεκριμένου καταλόγου εμφανίζεται ακόμη ως ισχυρή πηγή ραδιοφωνικής ακτινοβολίας καθώς και εκπομπός ακτίνων X, ενώ είναι επίσης γνωστό ως 4C04.66 (Gower et al., 1967), A 1909+04 (Seward et al., 1980) και 4U 1908+05 (Forman et al., 1978). Το SS433 είναι επίσης μεταβλητός αστέρας, V 1343 Aql (Kholopov et al., 1981). Παρόλο που το αντικείμενο είναι γνωστό με διάφορα ονόματα, αυτό που περισσότερο χρησιμοποιείται είναι το SS433. Η θέση του είναι: $\alpha_{1950} = 19^h 09^m 21.282^s$, $\delta_{1950} = 04^\circ 53' 54.04''$ και $\alpha_{2000} = 19^h 11m 49.6s$, $\delta_{2000} = 04^\circ 58' 58''$.

Το **SS433** είναι ένα διπλό δι'εκλείψεων σύστημα (eclipsing binary star). Η περίοδος περιστροφής του συστήματος είναι περίπου 13 μέρες, ενώ ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο μελών του συστήματος είναι της τάξης του 1 AU ($\sim 10^{12}$ cm). Το μέγεθός του έξω από τις εκλείψεις είναι $V \sim 14.0$, παρότι η εν λόγω τιμή μπορεί να αλλάξει λαμβάνοντας υπ' όψη την περίοδο μετάπτωσης. Οι περισσότεροι συντάσσονται με την άποψη που θέλει το σύστημα να αποτελείται από ένα νεαρού τύπου αστέρα και έναν δίσκο προσαύξησης γύρω από ένα εξαιρετικά συμπαγές αντικείμενο. Ο δίσκος προσαύξησης δημιουργεί τη συμμετρική επίπεδη επιφάνεια που παρατηρείται και θεωρείται ως το πλέον ιδανικό περιβάλλον για τη δημιουργία σχετικιστικών συμπυκνώσεων σωματιδίων ενός αστρικού αντικειμένου.

Το γεγονός που καθιστά το SS433 ξεχωριστό έγκειται στο ότι αντιπαράλληλες δέσμες πηγάζουν από το χώρο της πηγής με σχετικιστικές ταχύτητες. Ο λόγος για τον οποίο ήταν εξαιρετικά δημοφιλές στις αρχές του 1980 βασιζόταν στο ότι μέσω της μελέτης των αστροφυσικών πιδάκων ενός γαλαξιακού αντικειμένου θα ήταν δυνατή η πληρέστερη κατανόηση των παρατηρήσεων και ο έλεγχος των θεωριών στους εξωγαλαξιακούς αστροφυσικούς πίδακες.



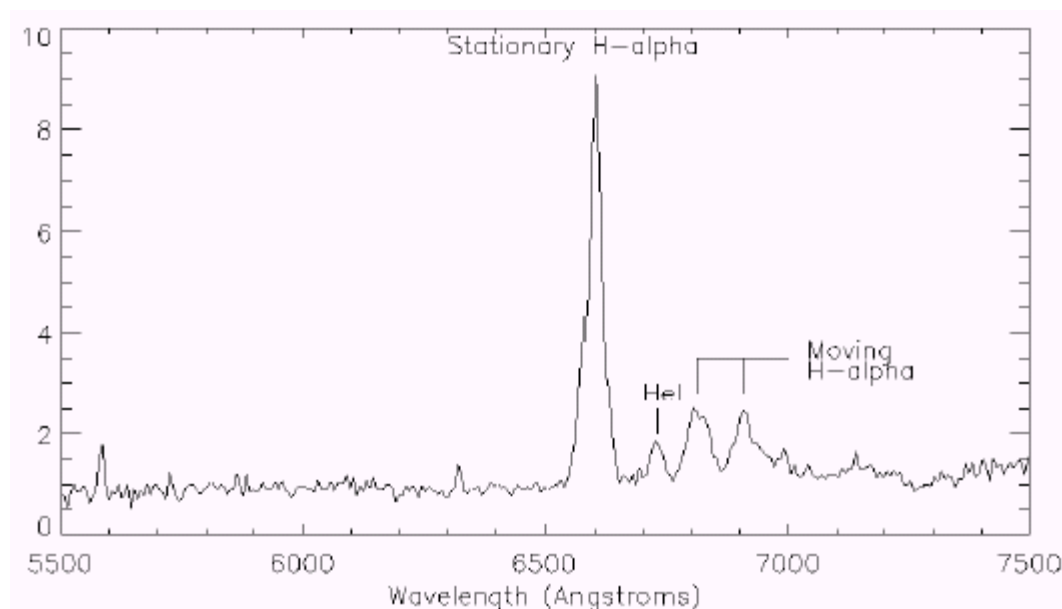
Σχήμα 2.1: Καλλιτεχνική απεικόνιση του SS433. Ο υπεργίγαντας αστέρας χάνει μάζα μέσω του ασταθούς δίσκου προσαύξησης προς το συνοδό αστέρα νετρονίων (ή ίσως μαύρη τρύπα). Σωματίδια επιταχύνονται σε τεράστιες

ταχύτητες (που ξεπερνούν το $1/3$ της ταχύτητας του φωτός), εκπεμπόμενα σε δύο αντιπαράλληλους πίδακες οι οποίοι δύναται να παρατηρηθούν στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος.

2.2 Το πρότυπο των 5-παραμέτρων (The kinematic model).

Πριν επεκταθούμε και διεισδύσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες στη μελέτη της συμπαγούς ραδιοφωνικής δομής του SS433 είναι απαραίτητο να εξηγήσουμε το πιο απλό από τα προτεινόμενα μοντέλα που περιγράφει τις πλήρεις κινητικές ιδιότητες της πηγής. Αυτό το κινηματικό πρότυπο (kinematic model) αποτελεί το πλέον χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση και τη μετέπειτα πρόβλεψη των κινήσεων των εκπεμπόμενων πιδάκων. Συνεπώς, μπορούν να προβλεφθούν με μεγάλη ακρίβεια οι παρατηρούμενες ποσότητες, όπως είναι η περίοδος μετάπτωσης (precession period), το μέγεθος και άλλες.

Τόσο το οπτικό, όσο το υπέρυθρο φάσμα του SS433 εμφανίζουν δύο σετ ισχυρά μετατοπισμένων γραμμών εκπομπής λόγω του φαινομένου Doppler. Αυτά τα συστήματα παρουσιάζουν μη συνεχείς αλλαγές στο μήκος κύματος με ημερήσια διαλείμματα. Οι μέγιστες παρατηρούμενες ακτινικές ταχύτητες αφορούν τιμές της τάξης των $+50.000$ km/sec και -30.000 km/sec.



Σχήμα 2.2:Τυπικό φάσμα του SS433 μέσω του παρατηρητηρίου Hartung-Boothroyd (τηλεσκόπιο 24 ιντσών). Παρατηρείται καθαρά η εμφάνιση των μετατοπισμένων γραμμών Balmer από τους πίδακες (moving Balmer lines from the jets).

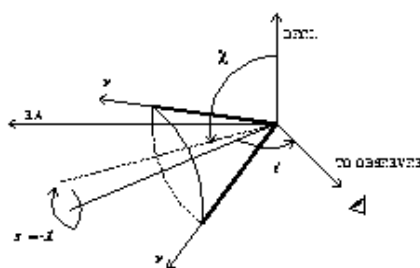
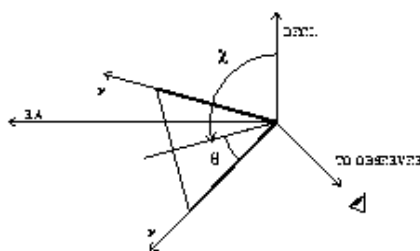
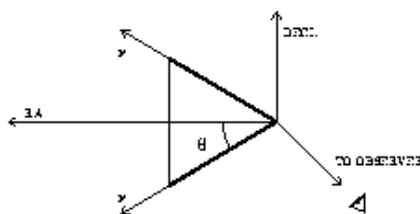
Στο πρότυπο που μας απασχολεί, γίνεται η υπόθεση που θέλει της δύο μετατοπισμένες λόγω φαινομένου Doppler γραμμές (Doppler shifted lines) να οφείλονται στις δύο κατευθυνόμενες αντιπαράλληλες δέσμες σωματιδίων. Η παρατηρούμενη περιοδική αλλαγή στην ακτινική ταχύτητα εξηγείται λαμβάνοντας υπ' όψη την περιστροφή γύρω από τον άξονα εκπομπής (ejection axis). Καθώς οι δέσμες είναι αντιπαράλληλες, η μία κινείται απομακρυνόμενη από τον παρατηρητή (redshifted spectral lines), ενώ η άλλη πλησιάζει τον παρατηρητή (blueshifted spectral lines). Το εν λόγω πρότυπο προτάθηκε από τους Fabian και Rees (1979) και από τον Milgrom (1979). Εξάλλου για να έχουμε συμφωνία με τις παρατηρούμενες ακτινικές ταχύτητες θα πρέπει οι δέσμες να εμφανίζουν μία σχεδόν-σχετικιστική ταχύτητα $0.26c$.

Στην απλούστερή του μορφή το πρότυπο που εξετάζουμε περιγράφεται πλήρως από 7 παραμέτρους οι οποίες έχουν ως ακολούθως :

- i , η γωνία κλίσης ανάμεσα στη διεύθυνση παρατήρησης και τον άξονα του κώνου που σχηματίζεται λόγω της μεταπτωτικής κίνησης. Είναι $i \leq 90^\circ$ εξ' ορισμού.
- θ , το μέσο γωνιακό άνοιγμα του κώνου που οριοθετείται από τις δέσμες των σωματιδίων.
- ψ , η γωνία θέσης του άξονα του κώνου καθώς προβάλλεται στο επίπεδο του ουρανού.
- s , η παράμετρος που καθορίζει τη φορά μετάπτωσης της δέσμης, χρησιμοποιώντας $s = 1$ δεξιόστροφη περιστροφή και $s = -1$ για αριστερόστροφη.
- u , η ταχύτητα της ύλης στις δέσμες . Ακόμη χρησιμοποιείται η έκφραση:

$$\beta = \frac{u}{c}.$$

- P , η περίοδος μετάπτωσης, ή αλλιώς, η συχνότητα $\omega = \frac{2\pi}{P}$
- t_0 , ο χρόνος στον οποίο η φάση της μετάπτωσης $\psi(t)$ είναι μηδέν.



$x-y-z$ λαμβάνεται ύστερα από μία περιστροφή κατά γωνία $90^\circ-i$ γύρω από τον άξονα y' .

Μιας και η γωνία ψ αντιστοιχεί σε μια από τις γωνιακές συνιστώσες ενός σφαιρικού πολικού συστήματος συντεταγμένων και η γωνία $\Omega(t_o - t_{ref})$ περιγράφει την άλλη γωνιακή συνιστώσα του διανύσματος $\mathbf{u}$ για χρόνο t_o , μετά από έναν χρόνο αναφοράς t_{ref} , όταν το διάνυσμα που καθορίζει τη διεύθυνση της εκπομπής κείται στο επίπεδο $x'-z'$, μπορούμε να γράψουμε :

$$v = s_{jet} \bar{v} [\sin \psi \cos \Omega(t_o - t_{ref}), \sin \psi \sin \Omega(t_o - t_{ref}), \cos \psi].$$

Οι προβολές του διανύσματος $\mathbf{u}$ στους άξονες x , y και z του συστήματος συντεταγμένων έχουν ως ακολούθως :

$$v\hat{x} = s_{jet} \bar{v} [\sin \psi \sin i \cos \Omega(t_o - t_{ref}) + \cos \psi \cos i],$$

$$v\hat{y} = s_{jet} \bar{v} [\sin \psi \sin \Omega(t_o - t_{ref})],$$

$$v\hat{z} = s_{jet} \bar{v} [\sin i \cos \psi - \cos i \sin \psi \cos \Omega(t_o - t_{ref})],$$

αντίστοιχα. Για να καταστεί δυνατή η περιγραφή των κανονικών κινήσεων, θα πρέπει ακόμη να περιστραφούν οι άξονες y και z κατά γωνία χ ούτως ώστε ο νέος y -άξονας να δείχνει βόρεια ενώ ο νέος z -άξονας να δείχνει ανατολικά όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα (B), όπου ο νέος z -άξονας ονομάζεται Δα και ο νέος y -άξονας ονομάζεται Δδ. Ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των πιδάκων, η αίσθηση της περιστροφής αυτών, καθώς και οι υπόλοιπες γεωμετρικές παράμετροι είναι ενσωματωμένες στο Σχήμα (B).

Η προβολή του διανύσματος $\mathbf{u}$ της ταχύτητας πάνω στους άξονες Δα και Δδ μας δίνει :

$$v_a = (\sin \chi)v\hat{y} + (\cos \chi)v\hat{z},$$

$$v_\delta = (\cos \chi)v\hat{y} + (\sin \chi)v\hat{z},$$

Έστω t_{eject} , ο χρόνος κατά τον οποίο ένα συγκεκριμένο ζευγάρι τμημάτων των πιδάκων του SS433, εκτινάσσεται από το κεντρικό αντικείμενο. Τότε οι παρατηρούμενες κανονικές κινήσεις αυτών των τμημάτων πιδάκων σε έναν μεταγενέστερο χρόνο t_o περιγράφονται από την ακόλουθη σχέση :

$$\mu_a = \frac{v_a(t_o - t_{eject}) / \cos \delta}{d(1 - v\hat{x}/c)}$$

και

$$\mu_\delta = \frac{v_\delta(t_o - t_{eject})}{d(1 - v\hat{x}/c)}$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, d η απόσταση του αντικειμένου, ενώ ο άλλος παράγοντας που εμφανίζεται σε κάθε έναν παρονομαστή αντισταθμίζει τον πεπερασμένο χρόνο ταξιδιού της παρατηρηθείσας ακτινοβολίας που διασχίζει την πηγή. Εξαιτίας της επίδρασης αυτής, λόγω της ειδικής σχετικότητας, η κοντινή πλευρά ενός δίδυμου πίδακα, παρατηρείται όπως ήταν σε χρόνο αργότερα από τον t_o και η μακρινή πλευρά όπως ήταν σε χρόνο νωρίτερα από τον t_o . Ο χρόνος μιας

συγκεκριμένης παρατήρησης t , σχετίζεται με τον t_0 σύμφωνα με τον χρόνο που διανύει το φως από το αντικείμενο SS433 μέχρι τον παρατηρητή.

Εξετάζοντας τις προαναγραφόμενες εξισώσεις αντιλαμβανόμαστε την ύπαρξη των ακόλουθων παραμέτρων $s_{jet}, s_{rot}, \psi, i, \chi, P, t_{ref}, v/d, v$ που είναι κοινές για όλες τις εποχές του αντικειμένου σε ένα σταθερής ταχύτητας πρότυπο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν τις προφανείς κινήσεις οποιουδήποτε υλικού που εκτινάσσεται από ένα συγκεκριμένο σημείο και δίνουν σωστά αποτελέσματα ακόμη και για σχετικιστικές ταχύτητες. Επομένως βρίσκουν εφαρμογή όχι μόνο στο SS433 αλλά και στους πίδακες των quasars καθώς και των ραδιογαλαξιών. Ακόμη μπορεί να παρατηρηθεί το γεγονός που θέλει η φαινόμενη

κανονική κίνηση που περιγράφει η εξίσωση $\mu_\delta = \frac{v_\delta(t_0 - t_{eject})}{d(1 - v\hat{x}/c)}$ να γίνεται

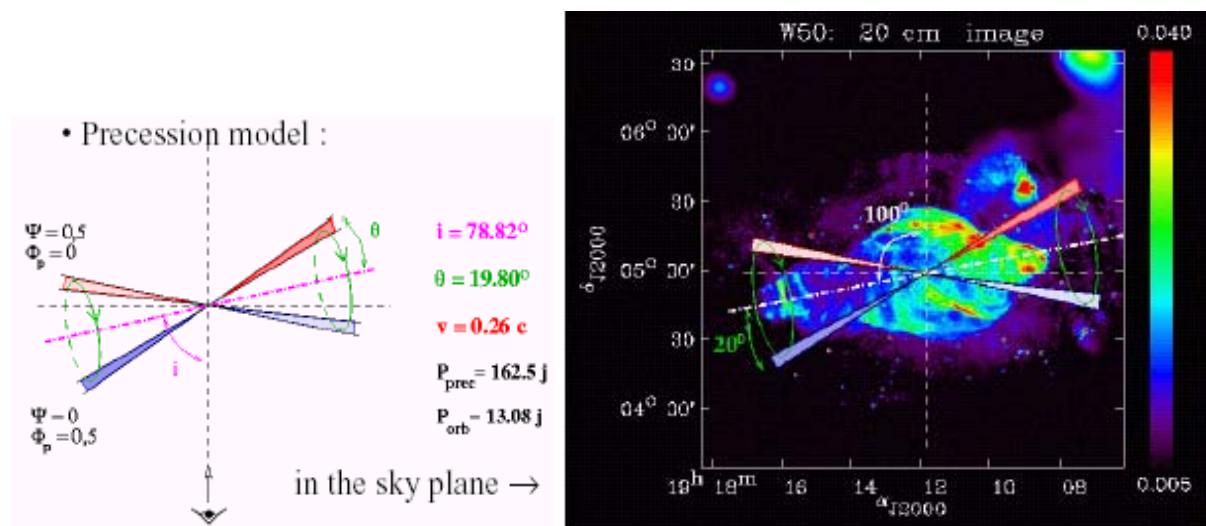
“αυθαίρετα” πολύ μεγάλη όταν η κλίση $i \rightarrow 0^\circ$ και η ταχύτητα v γίνεται ένα σημαντικό ποσοστό του c .

Στην ανάλυση που προσεγγίζουμε οι κανονικές κινήσεις των ραδιοφωνικών πιδάκων του SS433, βασίζεται πάνω στα αποτελέσματα των **Margon et al.**, που θέλουν είτε :

$$i = 80^\circ, \psi = 20^\circ$$

είτε:

$$i = 20^\circ, \psi = 80^\circ$$

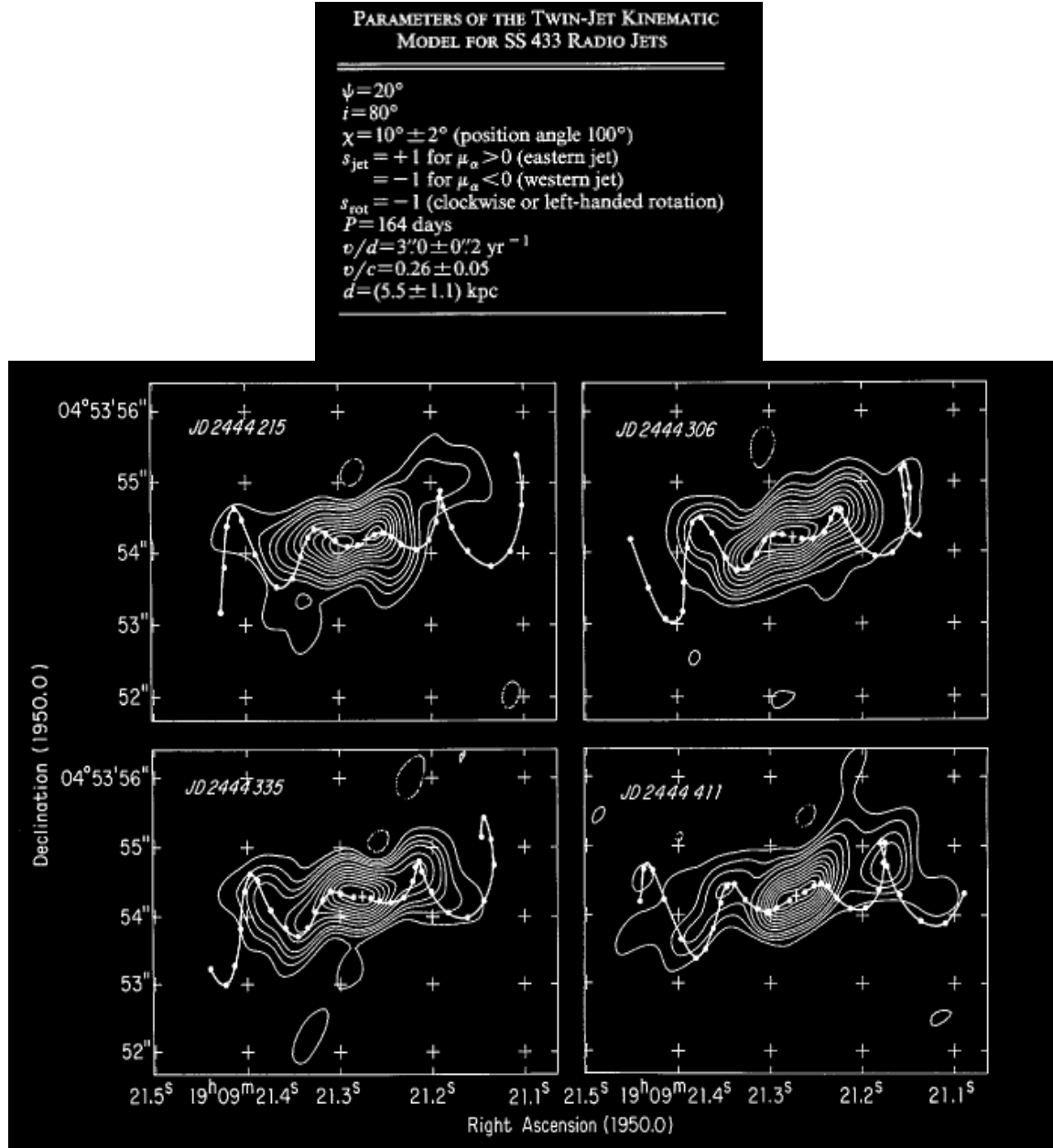


Σχήμα 2.4: Το νεφέλωμα W50 στα 20 cm με τον προβαλλόμενο άξονα μετάπτωσης στο επίπεδο του ουρανού.

Πρακτικά θα μπορούσε να αποδειχθεί από τα ραδιοφωνικά δεδομένα και μόνο ότι οι τιμές για το i που βρίσκονται κοντά στις $i = 80^\circ, \psi = 20^\circ$ απαιτούνται, αλλά $i = 20^\circ, \psi = 80^\circ$

καθώς οι τιμές που προσδιορίζονται μέσω των δεδομένων των οπτικών παρατηρήσεων είναι πολύ πιο ακριβείς, θα πρέπει να υιοθετηθούν. Κάτι ακριβώς ανάλογο ισχύει και για την περίοδο P . Κάποιος μπορεί να δείξει μέσω των ραδιοφωνικών δεδομένων πως μια περίοδος της τάξης των 164 ημερών απαιτείται ούτως ώστε να περιγράφονται με ακρίβεια όλες οι εποχές των χαρτών του VLA, με τις ίδιες παραμέτρους. Επομένως υιοθετούμε την περίοδο που προτάθηκε από τους Margon et al. και είναι 164.0 μέρες. Ακόμη υιοθετείται η τιμή των Margon et al. για

τον χρόνο $t_{ref} = JD2,443,501.48$. Επομένως μεταχειριζόμαστε τις επιλογές των προσήμων των s_{jet}, s_{rot} , τις δύο προαναφερθείσες επιλογές αναφορικά με τα i, ψ , καθώς και τις τιμές των $\chi, v/d, v$ ως τις παραμέτρους εκείνες που πρέπει να καθοριστούν για να 'προσαρμοστούν' και να εφαρμοστούν τα δεδομένα των κανονικών κινήσεων για τους ραδιοφωνικούς πίδακες.



Σχήμα 2.5: Ραδιοφωνικοί χάρτες του VLA για το SS433 στα 4885 MHz για χρόνο $t=JD$ 2,444,215, 2,444,306, 2,444,335 και 2,444,411 οι οποίοι αποτυπώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε ο πυρήνας (συμπαγής ραδιοφωνική δομή), του οποίου οι συνιστώσες δεν είναι εμφανείς (μικρό +), μετακινείται, ενώ οι θέσεις των κανονικών κινήσεων του εκτινασσόμενου υλικού σε διαστήματα 20 ημερών με τις παραμέτρους του προηγούμενου πίνακα σχεδιάζονται με συμπαγείς κύκλους. Οι ισόφωτες αντιστοιχούν στο 90,80,70,60,50,40,30,20,15,10,5 και -5% του μεγίστου των τιμών της πυκνότητας ροής των 0.070, 0.030, 0.029 και 0.032 Jy/per beam area για τους χάρτες με $t=JD$ 2,444,215, 2,444,306, 2,444,335 και 2,444,411 αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις, των οποίων η εξαγωγή και περιγραφή προηγήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία γραφημάτων των παρατηρούμενων αποτελεσμάτων των κανονικών κινήσεων των ραδιοφωνικών πιδάκων του SS433 για κάποιο εύρος των πιθανών τιμών για την κάθε παράμετρο. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση με χάρτες του VLA στα 4885 MHz για τις ακόλουθες εποχές (**t**): JD 2,444,215(1979 December 7), 2,444,306(1980, March 7), 2,444,335(1980 April 5) και 2,444,111(1980 June 20). Οι χάρτες αυτοί, οι οποίοι αποτυπώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε ο πυρήνας (συμπαγής ραδιοφωνική δομή σημειωμένη με μικρό +) να μη μετακινείται, εικονίζονται στο παραπάνω σχηματικό διάγραμμα.

Παρόλο που υπάρχει εμφανής διακύμανση στην ένταση των ιδιαίτερων τμημάτων των ραδιοφωνικών πιδάκων, το σχηματικό διάγραμμα καθιστά εμφανές πως το κυρίαρχο αποτέλεσμα που καθορίζει την εκτεταμένη δομή των ραδιοφωνικών πιδάκων του SS433 είναι κανονική κίνηση υλικού που εκτινάσσεται από τις κεντρικές περιοχές του αντικειμένου.

Όλες οι παράμετροι που εμφανίζονται στον πρώτο πίνακα είναι σύμφωνες και ταιριάζουν με τις οπτικές παραμέτρους των πιδάκων που εξήχθησαν από τους **Margon et al.** Εξάλλου όλες οι παράμετροι θα μπορούσαν, σε γενικές γραμμές, να καθοριστούν αποκλειστικά από την επεξεργασία των ραδιοφωνικών δεδομένων, ωστόσο όπως προαναφέρθηκε αντιλαμβανόμενοι πως οι παράμετροι που είναι γνωστές και καθορισμένες μέσω των οπτικών παρατηρήσεων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν παρέχοντάς μας μεγαλύτερη ακρίβεια, τις υιοθετούμε.

Η επιλογή $i = 80^\circ - \chi = 20^\circ$ αντιστοιχεί στο στενό πρότυπο κώνων που προτάθηκε από τους **Margon et al.** Η $\chi = 10^\circ$ γωνία περιστροφής στο επίπεδο του ουρανού αντιστοιχεί στη μέση γωνία θέσης των 100° γεγονόσ που έχει αποδειχθεί τόσο από παρατηρήσεις στις ακτίνες X (**Seward et al. 1981**) όσο με αυτές του VLBI (**Spencer 1979; Walker et al. 1981**). Περιστροφή κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού με μια περίοδο 164 ημερών είναι απαραίτητη για να επιτρέψει το ίδιο σετ των παραμέτρων να περιγράφουν σωστά τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά που παρατηρούνται σε όλες τις εποχές παρατήρησης του αντικειμένου SS433. Τα αποτελέσματα λόγω της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας που περιγράφουν οι

εξισώσεις : $\mu_a = \frac{v_a(t_o - t_{eject})/\cos\delta}{d(1 - v\hat{x}/c)}$ και $\mu_\delta = \frac{v_\delta(t_o - t_{eject})}{d(1 - v\hat{x}/c)}$ που εξήχθησαν

προηγουμένως, παρατηρούνται κυρίως στις θέσεις των κανονικών κινήσεων στους ραδιοφωνικούς χάρτες. Συγκεκριμένα στο πρότυπο των δύο πιδάκων (twin-jet “pair” model) ο ανατολικός άξονας του ενός πίδακα ($s_{jet} = +1$) βρίσκεται στην κοντινή πλευρά του κεντρικού αντικειμένου, ενώ ο δυτικός άξονας του άλλου βρίσκεται στη μακρινή πλευρά, μιας και οι εξισώσεις προβλέπουν ότι :

$$\frac{\mu_w}{\mu_E} = \frac{1 - (v/c)\cos\theta}{1 + (v/c)\cos\theta}$$

όπου $\cos\theta = v\hat{x}/v$ και μ_w, μ_E είναι οι ανατολικότερες και οι δυτικότερες κανονικές κινήσεις ενός συγκεκριμένου “ζευγαριού” πιδάκων εκτινασσόμενων την ίδια χρονική στιγμή.

Ο λόγος $v/d = 3''.0 \pm 0''.2 \text{ yr}^{-1}$ εξάγεται από την μελέτη των φαινομένων κινήσεων μερικών γραμμικά πολωμένων δομών των πιδάκων. Οι τιμές $v/c = 0.26 \pm 0.05$ και $d = (5.5 \pm 1.1) \text{ kpc}$ είναι λιγότερο καλά καθορισμένες και απαιτούν ειδική συζήτηση και αναφορά. Ωστόσο όπως μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας τους ραδιοφωνικούς χάρτες των τεσσάρων διαφορετικών εποχών του

VLA, οι κανονικές κινήσεις που εμφανίζουν τη μορφή τιρμπουσόν (corkscrew), τις οποίες “προβλέπουν” οι παράμετροι του Πίνακα 1, βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με όλες σχεδόν τις κύριες δομές που εμφανίζονται στους προαναφερόμενους χάρτες. Οι αποκλίσεις αναφορικά με την ένταση που παρατηρούνται κατά μήκος των κανονικών κινήσεων προκαλούνται λόγω των αποκλίσεων στις φυσικές παραμέτρους του εκτινασσόμενου πλάσματος που εκπέμπει στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Αυτή η ανάλυση, όμως, βρίσκεται πολύ πέρα από τα θέματα που αποσκοπεί να καλύψει η παρούσα ανάλυση.

Εξάλλου, σε γενικές γραμμές, δεχόμενοι της προβλέψεις της ειδικής σχετικότητας μπορούμε να έχουμε ακριβή καθορισμό του ν οπότε η απόσταση d προκύπτει από τον γνωστό λόγο $\nu/d = 3''.0 \pm 0''.2 \text{ yr}^{-1}$. Τα δεδομένα που φαίνονται στους χάρτες δείχνουν ότι $\nu = 0.26c$. Επομένως μιας και καθορίζουμε την ταχύτητα των ραδιοφωνικών πιδάκων να είναι πολύ κοντά στην τιμή $\nu = 0.26c$, για όλες τις εποχές, είναι πολύ πιθανό το γεγονός που θέλει τόσο τις ταχύτητες τόσο στα οπτικά όσο στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος να είναι και οι δύο ακριβώς $\nu = 0.26c$, οπότε η απόσταση είναι $d = 5.5 \text{ kpc}$.

Η μέτρηση του λόγου $\nu/d = 3'' \text{ yr}^{-1}$ καθώς και η φύση των μοντέλων τα οποία περιγράφουν με ακρίβεια τις περισσότερες από τις δομικές λεπτομέρειες σε $2''$ – $3''$ από το κεντρικό αντικείμενο, δείχνουν ότι η παρατηρούμενη δομή είναι το αποτέλεσμα της συσσωρευτικής διαδικασίας σχεδόν 300 ημερών εκτίναξης υλικού που εκπέμπει ακτινοβολία στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος από τις εσωτερικές περιοχές του SS433.

Ακόμη μια διαφορετική ανάλυση φανερώνει την ύπαρξη μαγνητικών πεδίων της τάξης των $10^{-3} - 10^{-2} \text{ gauss}$ και $10^{43} - 10^{44} \text{ ergs}$ για τα σχετικιστικά ηλεκτρόνια και τα μαγνητικά πεδία. Μιας και αυτό είναι αποτέλεσμα σχεδόν 300 ημερών εκπομπής, κάποιος μπορεί να υπολογίσει το ενεργειακό απόθεμα των παρατηρούμενων ραδιοφωνικών πιδάκων να είναι τουλάχιστον $10^{35} - 10^{36} \text{ erg/sec}$.

Συμπερασματικά το πρότυπο για την κίνηση των πιδάκων που αποτελούν ζεύγος εξηγεί όχι μόνο την ακραία ακτινική ταχύτητα των οπτικών πιδάκων, αλλά και τις λεπτομέρειες των κανονικών κινήσεων των ραδιοφωνικών πιδάκων με τάξεις μεγέθους από $0''.1$ μέχρι μερικά arcsec . Ο συνδυασμός των οπτικών και των ραδιοφωνικών δεδομένων και της πληροφορίας που παρέχουν, δίνει μια συνολική εικόνα των κινήσεων (kinematic model) του ζεύγους των πιδάκων, στο οποίο τόσο τα ραδιοφωνικά όσο τα οπτικά δεδομένα υπακούν με το ίδιο πρότυπο σταθερής ταχύτητας, χρησιμοποιώντας τις ίδιες γεωμετρικές παραμέτρους.

Τέλος φαινόμενα όπως αυτά που περιγράφηκαν, αναφορικά με την επίδραση των νόμων της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας στις ίδιες κινήσεις (proper motions) του υλικού που κινείται με πολύ μεγάλες ταχύτητες, εκτινασσόμενο σε αντίθετες διευθύνσεις μπορούν να βρουν ευρεία εφαρμογή για τη μελέτη των πιδάκων στα quasars και τους ραδιογαλαξίες, επιτρέποντας τον ακριβή καθορισμό της ταχύτητας και της απόστασης των συστημάτων αυτών. Γενικότερα, η ποικιλία και ο τύπος των δεδομένων, ραδιοφωνικών και οπτικών, για το SS433 μπορούν να καταστήσουν το εν λόγω αντικείμενο οδηγό για την πληρέστερη κατανόηση προβλημάτων που αφορούν εν γένει το πρόβλημα των σχετικιστικών πιδάκων.

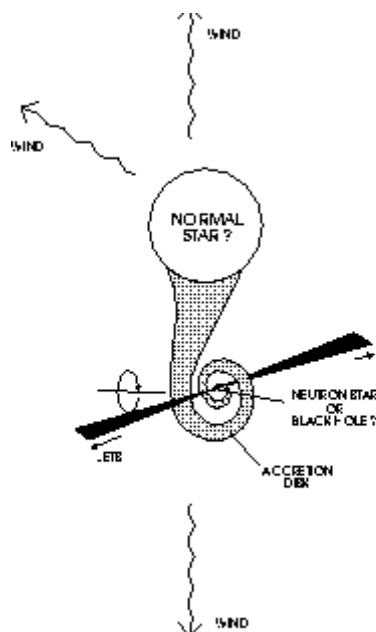
2.3 Η απόσταση του SS433

Η απόσταση μπορεί να βρεθεί απ' ευθείας από τις ραδιοφωνικές παρατηρήσεις. Άλλωστε δεν απαιτείται εργασία που να αφορά τα οπτικά μήκη κύματος ούτως ώστε να βρεθούν οι παράμετροι του πρότυπου τις κίνησης οι οποίες θα δοθούν αναλυτικά

αργότερα. Η ταχύτητα u και η απόσταση D , μπορούν να εξαχθούν με τη βοήθεια ραδιοφωνικών χαρτών μαζί με όλες τις άλλες παραμέτρους του πρότυπου της κίνησης. Βρίσκεται μια τιμή για την απόσταση περίπου 5.0 kpc

2.4 Το διπλό σύστημα (The binary system)

Όπως προαναφέρθηκε το SS433 είναι ένα διπλό σύστημα. Παρατηρήσεις στο χρώμα V αποκαλύπτουν μια καμπύλη φωτός που τη χαρακτηρίζουν μια πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα έκλειψη. Σ' αυτό το σύστημα το μέγεθος είναι ~14 έξω από τις εκλείψεις ενώ η τροχιακή περίοδος P είναι σχεδόν 13 μέρες. Το πιο πιθανό πρότυπο για το SS433 είναι ότι πρόκειται για ένα σύστημα με έναν αστέρα προγενέστερου φασματικού τύπου και ένα συμπαγές αντικείμενο το οποίο περιβάλλεται από έναν δίσκο προσαύξεσης. Ο διαχωρισμός των μελών του συστήματος (binary separation) είναι περίπου 1 AU.



Σχήμα 2.6 : Το διπλό σύστημα

Εξάλλου ο δίσκος προσαύξεσης συνιστά ένα συμμετρικό επίπεδο το οποίο παρέχει το κατάλληλο φυσικό περιβάλλον για τη δημιουργία περιοχών που έχουν τη μορφολογία σχετικιστικών πιδάκων. Εξαιτίας των σχετικιστικών ταχυτήτων των συμπυκνώσεων, εξαιρετικά μετατοπισμένες γραμμές λόγω φαινομένου Doppler, είναι ορατές στο φάσμα του SS433 όπως προείπαμε.

2.5 Ο μηχανισμός των πιδάκων (The jet engine)

Παραμένει ακόμη αρκετά αβέβαιος ο ακριβής μηχανισμός που περιγράφει τις επιταχυνόμενες και καλά κατευθυνόμενες δέσμες. Σε γενικές γραμμές, η υπόθεση πως είτε η περιστροφή ή η προσαύξηση μάζας μέσω του δίσκου προσαύξεσης σε έναν συμπαγή αστέρα θα παρείχε το τεράστιο ποσό ενέργειας, είναι αρκετά πιθανή. Μοντέλα τα οποία αποσκοπούν στο να εξηγήσουν τον τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού περιορίζονται από τις ακόλουθες παρατηρούμενες παραμέτρους (Vermeulen, 1989) :

- Οι δέσμες θα πρέπει να έχουν σταθερή ταχύτητα ίση με $0.26c$. Αυτή η ταχύτητα θα πρέπει να αποκτάται μέσα στο σύντομο διάστημα των 100 δευτερολέπτων.
- Εξαιρετικά καλά κατευθυνόμενες δέσμες με γωνιακό άνοιγμα μικρότερο των 4° .
- Οι δέσμες είναι δίπλευρες και αντιπαράλληλες και παρουσιάζουν κίνηση μετάπτωσης 162 ημερών και επιπλέον μερικές τυχαίες αποκλίσεις και μεταβολές δίκως απώλεια ευθυγράμμισης.

2.6 Ραδιοφωνική εκπομπή από το SS433.

Σχεδόν δέκα χρόνια πριν η ασυνήθιστη συμπεριφορά του αντικειμένου γίνει γνωστή, το **SS433** είχε ήδη παρατηρηθεί στα ραδιοκύματα. Είναι σχεδόν σίγουρο πως η πηγή **4C04.66** είναι το **SS433**. Η σύμπτωση στη θέση του οπτικού αντικειμένου και της ραδιοφωνικής πηγής είναι τουλάχιστον $0.2''$ (Margon 1984). Η κεντρική πηγή έχει παρατηρηθεί από τα 160 MHz έως τα 22 GHz. Στις υψηλές συχνότητες ο τυπικός φασματικός δείκτης είναι περίπου -0.6 , μια συνηθισμένη τιμή για πηγές μη θερμικής εκπομπής. Οι φασματικές γραμμές εμφανίζουν πλάτος στις χαμηλές συχνότητες ενώ το φάσμα αλλάζει κάτω από τα 300 MHz. Ένα μεγάλο ποσοστό της εκτεταμένης ραδιοφωνικής εκπομπής είναι πολωμένη (πάνω από το 20%). Λαμβάνοντας υπ' όψη το φασματικό δείκτη είναι πολύ πιθανό πως η πηγή της ραδιοφωνικής εκπομπής είναι η ακτινοβολία σύγχροτρον (synchrotron radiation).

2.7 Οι ραδιοφωνικές δέσμες σε μικρές κλίμακες

Η ραδιοφωνική εκπομπή από το SS433 έχει παρατηρηθεί σε διάφορες χωρικές κλίμακες, με την κατάλληλη χρησιμοποίηση διαφορετικών ραδιοτηλεσκοπίων. Τα ραδιοσυμβολόμετρα είναι ευαίσθητα σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων εξαιτίας του σχεδιασμού των οργάνων αυτών. Αυτό σημαίνει πως υψηλής ανάλυσης εικόνες μέσω του VLBI, δείχνουν μόνο χαμηλής κλίμακας δομές. Η μεγάλης κλίμακας ραδιοφωνική εκπομπή μπορεί μόνο να παρατηρηθεί με τηλεσκόπια όπως το VLA και το WSRT.

Με τις τεχνικές του VLBI, ελήφθησαν εικόνες υψηλής διακριτικής ποσότητας της τάξης των 10^{14} cm (1 mas). Ωστόσο το μέγιστο της ραδιοφωνικής εκπομπής βρίσκεται σε κλίμακες της τάξης των 10^{15} cm και ακόμη μεγαλύτερες. Οι μικρές δομές εμφανίζονται εξαιρετικά ασθενείς και συνεπώς η παρατήρησή τους καθίσταται δύσκολη (Walker et al., 1981). Ο λαμπρότερος σχηματισμός- δομή σε όλους τους ραδιοφωνικούς χάρτες είναι ο πυρήνας. Ο εν λόγω πυρήνας είναι πολύ μεγαλύτερος από ένα τυπικό διπλό αστρικό σύστημα. Η ραδιοφωνική εκπομπή εκτείνεται κατά μήκος του καμπύλου γεωμετρικού τόπου (όπως προβλέπεται από το πρότυπο της κίνησης), αλλά μέχρι πρόσφατα δεν έχει αποκαλυφθεί ραδιοφωνική δομή παράλληλη σ' αυτή την τροχιά. Καθώς τα ραδιοσυμβολόμετρα είναι ευαίσθητα μόνο σε αρκετά περιορισμένο εύρος χωρικών κλιμάκων, αυτό δε μας παρέχει κάποιες πληροφορίες σχετικά με τη διάμετρο των εκροών.

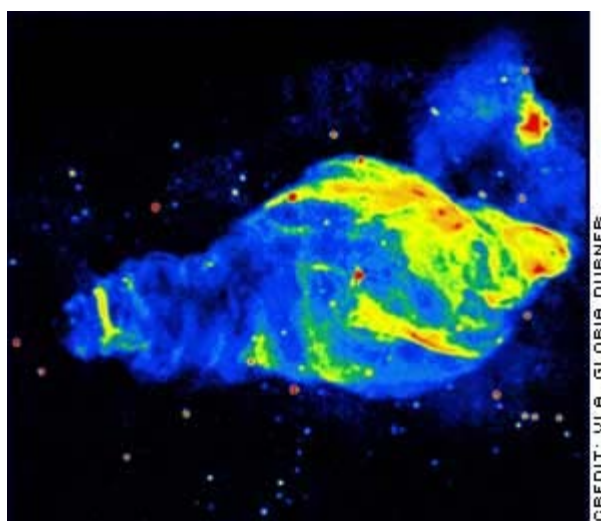
Μερικές σχετικά λαμπρές δυσδιάκριτες δομές μπορούν να παρατηρηθούν στους χάρτες που μας παρέχει το VLBI, με ανάλυση 10^{15} cm (με μια ταχύτητα $0.26c$ σημαίνει ~ 1.5 μέρες φωτός). Στους χάρτες με την προαναφερθείσα ανάλυση, μπορεί να παρατηρηθεί ασθενής, περισσότερο διάχυτη εκπομπή. Μερικοί κόμβοι (knots), αλλά όχι όλοι, σχετίζονται άμεσα με τα συμβάντα ραδιοφωνικών εκλάμψεων (Vermeulen, 1989).

Οι παρατηρήσεις μέσω του οργάνου MERLIN, έχουν μια τυπική ανάλυση 7.5×10^{15} cm (100 mas), που σημαίνει περίπου 11 μέρες φωτός με ταχύτητα $0.26c$. Ακόμη

σ' αυτή την κλίμακα η εκπομπή δεν είναι συνεχής. Παρατηρούνται διαβαθμίσεις στη λαμπρότητα καθώς διακρίνονται τόσο περιοχές μειωμένης λαμπρότητας, όσο πολύ λαμπρές περιοχές. Αναφορικά με την πυκνότητα ροής των κόμβων, δεν είχε εξακριβωθεί εάν η εξασθένησή τους ακολουθεί έναν εκθετικό νόμο, αλλά ο Spencer (1984) πρότεινε το πρότυπο της αδιαβατικής εκτόνωσης για την περιγραφή του φαινομένου. Οι κόμβοι που παρατηρήθηκαν από τον Spencer (1984) με το MERLIN έχουν εκτοξευτεί από το **SS433** κατά τη διάρκεια επεισοδίων ραδιοφωνικών εκλάμψεων.

Με τις παρατηρήσεις του VLA, οι λοβοί παρατηρούνται και μπορούν να μελετηθούν μέχρι $2-3 \text{ arcsec}$ και προς τις δύο πλευρές του πυρήνα. Η αντίστοιχη απόσταση είναι $\sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}$ (περίπου 300 μέρες ταξιδιού με τη σταθερή ταχύτητα $0.26c$). Αυτές οι παρατηρήσεις του **SS433** εμφανίζουν συστρεφόμενους λοβούς. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις δεν εντοπίζεται ραδιοφωνική εκπομπή. Μόνο η διάχυτη εκπομπή του υπολείμματος **W50** μπορεί να διακριθεί σε μεγαλύτερες κλίμακες (10^{20} cm). Εξάλλου το **W50** αποτελεί έναν ελλειπτικό σχηματισμό που έχει τη μορφολογία κελύφους και συνιστά ένα νεφέλωμα που εκπέμπει ακτινοβολία στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Παρόλο που έχει καταγραφεί ως υπόλειμμα υπερκαινοφανούς, κάποιοι επιστήμονες πρότειναν πως το **W50** δεν προέκυψε ως το αποτέλεσμα μιας τέτοιας έκρηξης, αλλά ως το αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης του κρουστικού κύματος με τον προερχόμενο από τον αστρικό άνεμο του **SS433**.

Οι λοβοί έχουν φασματικό δείκτη $\alpha = -0.6$, τιμή χαρακτηριστική της εκπομπής σύγχροτρον. Σε αυτές τις κλίμακες η εκπομπή από το **SS433** εμφανίζεται συνεχής.



Σχήμα 2.7: Το νεφέλωμα **W50** μέσω των παρατηρήσεων του VLA.

2.8 Καμπάνιες παρατήρησης σε διάφορα μήκη κύματος (Multi-wavelength observing campaigns)

Αυτό που δεν μπορεί να εξηγηθεί από το πρότυπο της κίνησης (kinematic model) που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, αφορά τις ενδιαφέρουσες φυσικές διεργασίες και τη φυσική εν γένει που διέπει το **SS433**, όπως για παράδειγμα η φύση των παρατηρούμενων αστερών, ο μηχανισμός που σχετίζεται μ' αυτή καθαυτή την εκπομπή και την αξιοσημείωτη κατευθυντικότητα των εκροών. Για να δοθούν απαντήσεις σε τέτοιου είδους θέματα, έχουν γίνει παρατηρήσεις σε διάφορα μήκη κύματος, τόσο στην οπτική όσο στη ραδιοφωνική περιοχή του φάσματος καθώς και στις ακτίνες X. Σε δύο αστρονομικές καμπάνιες που διεξήχθησαν το 1985 και 1987

συμμετείχαν αστρονόμοι απ' όλο τον κόσμο πραγματοποιώντας σχεδόν καθημερινές ταυτόχρονες παρατηρήσεις σε διαφορετικά μήκη κύματος.

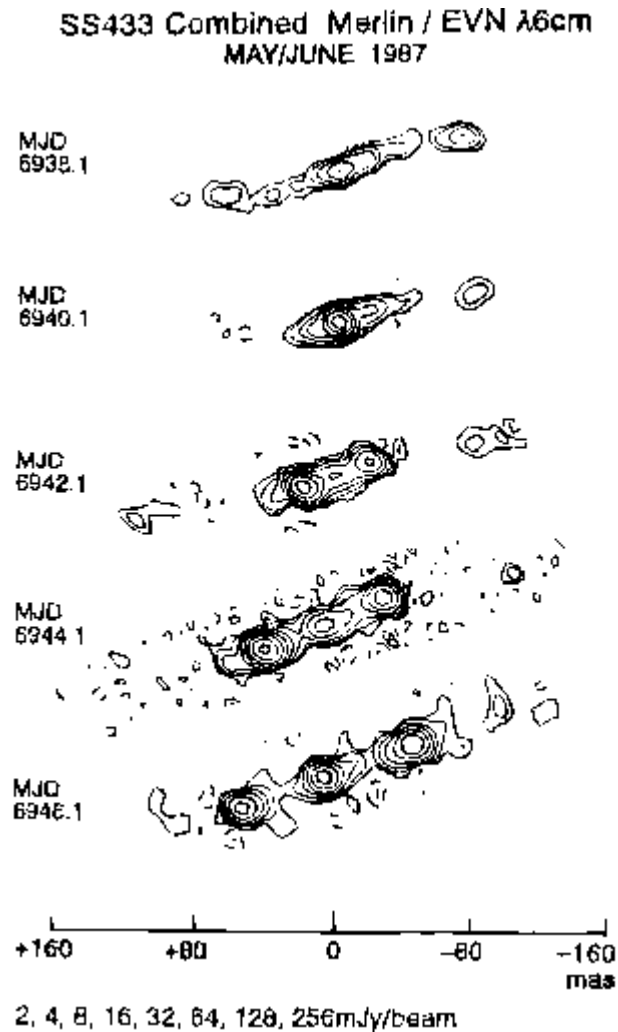
Οι πρώτες των παρατηρήσεων αυτού του είδους έλαβαν χώρα ανάμεσα στις 16 Μαΐου και στις 4 Ιουνίου του 1985. Ο προσανατολισμός του **SS433** ήταν τέτοιος ώστε οι δέσμες αναμενόταν να βρίσκονται σχεδόν στο επίπεδο του ουρανού. Ο δίσκος προσαύξεσης παρατηρείται edge on σ' αυτή τη φάση. Ο προσανατολισμός εκείνης της εποχής επέτρεπε τη μελέτη της δυναμικής των εκροών του **SS433** κοντά στο κέντρο του διπλού συστήματος. Οι δύο, πλέον σημαντικές παρατηρήσεις έχουν γίνει με την τεχνική VLBI (VLBI mapping) και την οπτική φασματοσκοπία των κινούμενων, λόγω φαινομένου Doppler, φασματικών γραμμών.

Η δεύτερη σειρά των παρατηρήσεων έλαβε χώρα την Άνοιξη του 1987, αμέσως μετά τη φάση κατά την οποία οι μετατοπισμένες λόγω φαινομένου Doppler φασματικές γραμμές έφτασαν στο μέγιστο διαχωρισμό. Τότε η γωνία μεταξύ των εκροών και της διεύθυνσης παρατήρησης είναι ελάχιστη και ο δίσκος παρατηρείται edge on. Κατά τη διάρκεια της καμπάνιας του 1987 το **SS433** άλλαξε από την ήρεμη ραδιοφωνική κατάσταση (radio quiescent mode) στην εκρηκτική κατάσταση (flaring state) (βλέπε επόμενο κεφάλαιο).

Οι Fielder et al. (1987) και Bonsignori-Facondi et al. (1986) παρουσίασαν μια πολύ μεγάλη βάση δεδομένων ραδιοφωνικών παρατηρήσεων που ελήφθησαν στα 2695, 8085 και 408 MHz. Οι παρατηρήσεις αυτές ελήφθησαν σε μια περίοδο αρκετών χρόνων. Τα δεδομένα των παρατηρήσεων δείχνουν ότι το SS433 εμφανίζει περιόδους εκλάμψεων (flaring periods) τόσο στις χαμηλές όσο στις υψηλές συχνότητες. Παρατηρήθηκε μη σταθερή περιοδικότητα. Κατά τη διάρκεια των εκλάμψεων ο φασματικός δείκτης (ανάμεσα στα 2695 και 8085 MHz) μπορεί να αλλάξει από $\alpha = -0.6$ σε $\alpha = 0$.

Το 1988 μια σειρά 7 εικόνων ελήφθησαν μέσω του MERLIN από τους Spencer et al. (1992). Οι παρατηρήσεις έγιναν στο μήκος κύματος των 18 cm, με διαλείμματα άλλοτε δύο και άλλοτε τριών εβδομάδων. Η ανάλυση αυτών των εικόνων είναι $\sim 10^{16}$ cm, μια τυπική τιμή που υποδεικνύει ουσιαστικά συμπαγή εκπομπή.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου δύο κόμβοι (knots) σχηματίστηκαν και συνδέθηκαν με επεισόδια εκλάμψεων (flaring episodes). Η λαμπρότητα αυτών των κόμβων εξασθενεί με έναν ρυθμό $1/e$ σε χρόνο ~ 20 των ημερών. Εξάλλου η φωτεινότητα των κόμβων που παρατηρούνται μέσω του VLBI εξασθενεί πολύ πιο γρήγορα. Η θερμοκρασία λαμπρότητας των κόμβων που αποκάλυψε το MERLIN είναι 10^5 K ενώ 10^8 είναι αυτή των παρατηρούμενων με το VLBI. Μια πιθανή ερμηνεία γι αυτές τις παρατηρήσεις είναι η θεώρηση που θέλει τους VLBI κόμβους να συνδέονται άμεσα με ανεξάρτητες εκλάμψεις, ενώ οι κόμβοι που παρατηρήθηκαν με το συμβολόμετρο MERLIN είναι πιθανό να αποτελούνται από κάποιον αριθμό εκλάμψεων, εκτινασσόμενων σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ανάμεσα στις λαμπρές περιοχές κόμβων, μπορεί να παρατηρηθεί στους χάρτες που λαμβάνουμε μέσω του MERLIN συνεχής εκπομπή σε κάποιο βαθμό. Ωστόσο δεν είναι ξεκάθαρο εάν η εν λόγω εκπομπή εμφανίζεται επίσης σε χαμηλότερο βαθμό στις κλίμακες που επιτυγχάνονται με το VLBI (10^{15} cm), ή εάν δημιουργείται και παρουσιάζεται σε μεγαλύτερες του πυρήνα αποστάσεις.



Σχήμα 2.8: Παρατηρήσεις του SS433 με τα MERLIN και EVN σε $\lambda = 6\text{cm}$

2.9 Η συμπαγής ραδιοφωνική δομή του SS433 (The compact radio structure of SS433)

Με τις τεχνικές του VLBI είναι δυνατόν να απεικονιστεί λεπτομερώς η κεντρική περιοχή του **SS433**, με διακριτική ικανότητα τέτοια ώστε τα εξελικτικά φαινόμενα να είναι ορατά. Λοβοί επιταχυνόμενου και καλά κατευθυνόμενου αερίου εκτινάσσονται από τον πυρήνα με σταθερή ταχύτητα **$0,26c$** σε δύο αντιπαράλληλες διευθύνσεις. Λόγω της μεταπτωτικής κίνησης του εσωτερικού συστήματος οι ραδιοφωνικοί λοβοί εμφανίζουν μια τροχιά στο σχήμα του τριμπουσόν (corkscrew shaped trail). Σε κλίμακες μικρότερες από 0.5 arcsec δυσδιάκριτες δομές στις ραδιοφωνικές δέσμες είναι κυρίαρχες.

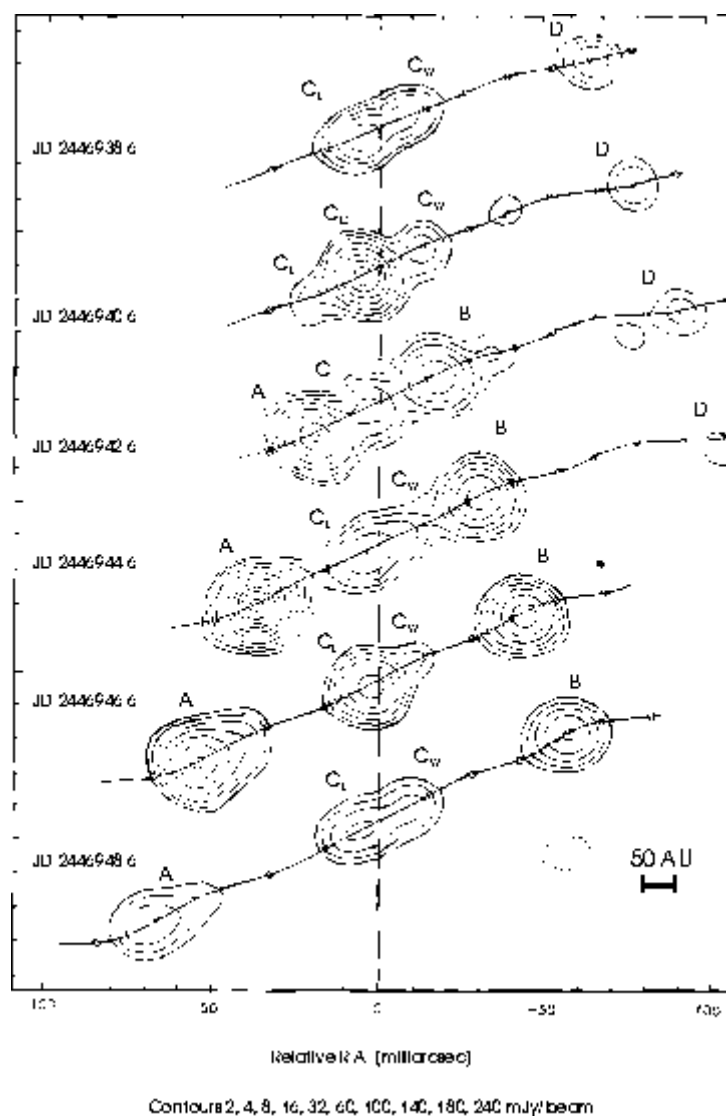
Το μέγιστο της ακτινοβολίας εμφανίζεται σε κλίμακες μεγαλύτερες από 10^{15} cm (15 mas). Συνήθως, αλλά όχι πάντα, οι λοβοί εκτινάσσονται σε δύο αντίθετες διευθύνσεις. Εμφανίζουν την τάση που τους θέλει να αυξάνουν τη λαμπρότητά τους σε μια σημαντική απόσταση από τον πυρήνα ($4 \times 10^{15}\text{ cm}$), και μετά εξασθενίζουν πολύ γρήγορα. Αυτή η ζώνη αύξησης της λαμπρότητας θα μπορούσε να εμφανίζεται όταν ένας νέος λοβός ξεπερνά το μέτωπο κύματος του προηγούμενου. Μ' αυτόν τον μηχανισμό είναι πιθανό να παραχθεί η ζώνη λαμπρότητας σε μια καλά καθορισμένη θέση χωρίς καμιά ιδιαίτερη απαίτηση από το μέσο που περιβάλλει το αντικείμενο **SS433**.

2.9.1 Τα γεγονότα εκλάμψεων (The flaring events)

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης καμπάνιας παρατήρησης των Vermeulen et al. (1989), το **SS433** πέρασε από την κατάσταση ηρεμίας στις περιόδους εκλάμψεων. Ένας συνολικός αριθμός πέντε γεγονότων εκλάμψεων παρατηρήθηκαν. Δεδομένα ελήφθησαν σε εννιά διαφορετικές συχνότητες που κυμαίνονται από τα 408 έως τα 8085 MHz καθώς και επιπρόσθετες μετρήσεις σε εφτά ενδιάμεσες αλλά και υψηλότερες συχνότητες, πάνω από τα 22.5 GHz. Παρόλο που δεν χρησιμοποιούνταν όλες οι συχνότητες κάθε μέρα, το φάσμα λαμβανόταν σε καθημερινή βάση. Σκοπεύοντας στον προσδιορισμό των μεγίστων της πυκνότητας ροής καθώς και το χρόνο κατά τον οποίο αυτά τα μέγιστα λαμβάνουν χώρα, είναι απαραίτητη η διαδικασία παρεμβολής (interpolation) ανάμεσα στα μετρούμενα δεδομένα. Οι Vermeulen et al. (1989) έκαναν την υπόθεση που θέλει το φάσμα του **SS433** να μπορεί να περιγραφεί ως η υπέρθεση ενός σταθερού ήρεμου υποβάθρου και ενός αριθμού ανεξαρτήτων εκλάμψεων, καθεμία με το δικό της εξελικτικό φάσμα.

Συχνά λίγο πριν την εμφάνιση μιας κατάστασης που χαρακτηρίζεται από εκλάμψεις παρατηρείται μια μικρή μείωση (dip) στην πυκνότητα ροής σε πολλές συχνότητες. Η εν λόγω μείωση ενδεχομένως να σχετίζεται με την εκτίναξη, στο αρχικό στάδιο της έκλαμψης, κάποιας ύλης η οποία εμφανίζεται οπτικά πολύ πυκνή (αδιαφανής) στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Όταν στο αντικείμενο προχωρήσει το φαινόμενο της έκλαμψης τότε το υλικό γίνεται οπτικά αραιό (διαφανές). Αυτή η ύλη θα δημιουργούσε μια απορρόφηση (region of obscuration), παρεμποδίζοντας την εκπομπή κατά την διεύθυνση του παρατηρητή (Vermeulen et al. 1989). Είναι ακόμη πιθανό το γεγονός που θέλει τη μείωση να προκαλείται από οπτικά πολύ πυκνή ύλη εκτινασσόμενη με τη μορφή κελύφους κοντά στο διπλό σύστημα, παρεμποδίζοντας την ήρεμη ραδιοφωνική εκπομπή απ' αυτό το σύστημα. (quiescent radio emission). Εξάλλου περαιτέρω παρατηρήσεις αυτών των μειώσεων απαιτούνται για να αποκαλυφθεί η ακριβής φύση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτών φαινομένων που καταγράφονται στο φάσμα και προηγούνται των γεγονότων εκλάμψεων.

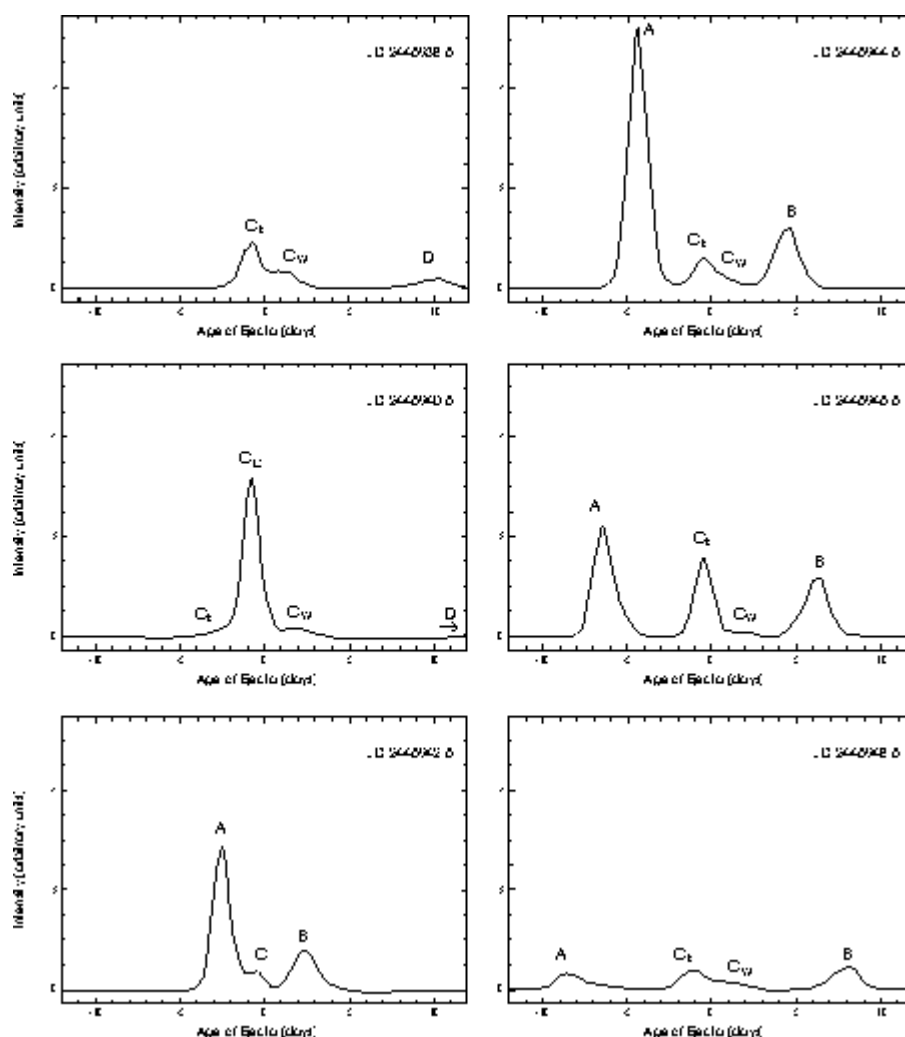
Οι εκλάμψεις εμφανίζουν ως τυπικό χρόνο ζωής το διάστημα των πέντε ημερών. Δεν εμφανίζουν ιδιαίτερη εξάρτηση από τη συχνότητα, παρόλο που έχουν την τάση να διαρκούν περισσότερο στις χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, δύο διαφορετικά είδη εκλάμψεων μπορούν να παρατηρηθούν. Αναπτύσσονται και εξελίσσονται με διαφορετικό τρόπο, γι' αυτό και είναι πολύ πιθανό να πηγάζουν από διαφορετικές θέσεις εντός του συστήματος. Παρατηρήσεις του Vermeulen (1989) με το VLBI δείχνουν ότι ένα γεγονός συνδέεται με την αύξηση της λαμπρότητας της περιοχής του πυρήνα του **SS433**, ενώ οι μετέπειτα εμφανιζόμενες εκλάμψεις γεννιούνται και προέρχονται από τις δέσμες του αντικειμένου, σε κάποια απόσταση μακριά απ' τον πυρήνα. Απεικονίσεις από τον Vermeulen (1989) αποκαλύπτουν το συσχετισμό όλων των προαναφερθέντων γεγονότων. Άλλωστε η πρώτη έκλαμψη αποτέλεσε προάγγελο αυτής που μέλει να επακολουθήσει.



Σχήμα 2.9: Γεγονότα εκλάμψεων

Εξάλλου και οι δύο τύποι εκλάμψεων δεν μπορούν να περιγραφούν μόνο με τη θεώρηση που θέλει μια ακαριαία εκτίναξη σχετικιστικών ηλεκτρονίων ακολουθούμενη από αδιαβατική διαστολή. Εφόσον η αδιαβατική διαστολή αποτελούσε το μόνο μηχανισμό που συμμετείχε στο όλο φαινόμενο, τότε το μέγιστο της πυκνότητας ροής θα έπρεπε να εμφανίζει ραγδαία μείωση στις χαμηλότερες συχνότητες. Στο φάσμα του **SS433** εμφανίζεται μια πολύ μικρή μείωση. Μερικά γεγονότα εκλάμψεων ακόμα εμφανίζουν αυξητικές τάσεις και παρατηρούνται αυξήσεις στην πυκνότητα ροής στις χαμηλότερες των συχνοτήτων.

Αυτή η επιπρόσθετη εκπομπή ενισχύει το συμπέρασμα του Vermeulen (1989) που προτείνει η συντηρούμενη και συνεχή παραγωγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων να λαμβάνει χώρα στο αντικείμενο **SS433**.



2.10 Φυσικοί περιορισμοί των εκροών (Physical constraints of the beams).

Δύο λαμπρές περιοχές ραδιοφωνικής εκπομπής δύναται να παρατηρηθούν στο αντικείμενο **SS433**. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται εντός της περιοχής ακτίνας 10^{15} cm με κέντρο τον πυρήνα. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μία οιονεί συνεχής εκτινασσόμενη ύλη από δομές που έχουν τη μορφή φτερών και παραμένουν σε σταθερή κατάσταση, παρόλο που με παρατηρήσεις του φαινομένου Doppler φαίνεται να κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, $0.26c$. Αυτό ακριβώς αποτελεί απόδειξη ότι νέα ηλεκτρόνια παράγονται με συνεχή τρόπο καθώς τα προηγούμενα ηλεκτρόνια (old electrons) παρασύρονται μακριά από τις δέσμες. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις η ποσότητα της εκπομπής σύγχροτρον (synchrotron emission) εμφανίζει ραγδαία πτώση, γεγονός που με πολύ μεγάλη πιθανότητα αποδίδεται στο φαινόμενο της αδιαβατικής διαστολής.

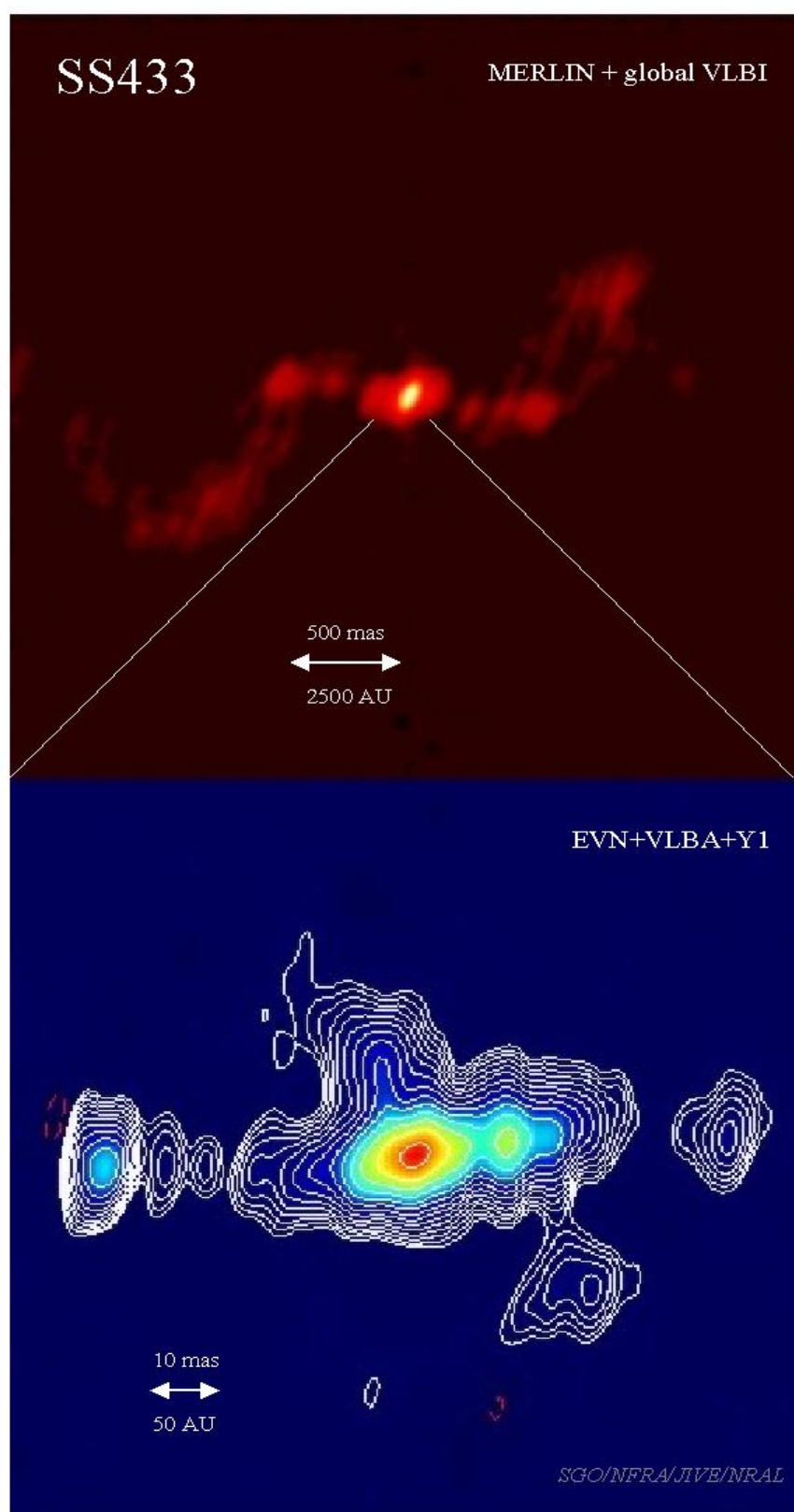
Η δεύτερη περιοχή που εμφανίζει λαμπρή ραδιοφωνική εκπομπή είναι αυτή που φτάνει σε απόσταση της τάξης των 4×10^{15} cm. Μετά την καμπάνια παρατήρησης του 1985 προτάθηκε ότι η παραγωγή των σχετικιστικών ηλεκτρονίων σ' αυτή την περιοχή θα μπορούσε να οφείλεται στη μορφολογική δομή των εκροών που έχουν σχήμα λοβού.

Αυξανόμενη ραδιοφωνική εκπομπή αναμένεται να παρατηρηθεί ως συνέπεια της συμπίεσης του μαγνητικού πεδίου, αυξητικές τάσεις της πυκνότητας ή την παραγωγή

καινούργιων σχετικιστικών ηλεκτρονίων μέσω της διαδικασίας στροβιλισμού. Από την καμπάνια παρατηρήσεων του 1987 και μετά το παραπάνω πρότυπο είναι λιγότερο αξιόπιστο εξαιτίας της απόδειξης που θέλει μια πιο συνεχή εκροή (Vermeulen, 1989).

Οι δύο περιοχές που χαρακτηρίζονται από λαμπρή εκπομπή, είναι περιοχές αυξανόμενης ραδιοφωνικής εκπομπής. Σε κάθε δοθείσα χρονική στιγμή η πυκνότητα της ραδιοφωνικής ροής είναι εξαιρετικά ευμετάβλητη. Εκλάμψεις προερχόμενες από τον πυρήνα μπορούν να συσχετιστούν με την παραγωγή των κόμβων (knots), σχεδόν πάντα συμμετρικά στις δύο δέσμες. Αυτοί οι σχηματισμοί κινούνται με ταχύτητα 0.26c, που είναι αναμενόμενο για κρουστικά κύματα που ταξιδεύουν στο μεσοαστρικό χώρο.

Μετρήσεις που αφορούν το φασματικό δείκτη κατά τη διάρκεια των επεισοδίων εκλάμψεων υποδεικνύει μια σταθερή και διατηρούμενη παραγωγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων που λαμβάνει χώρα για μια περίοδο μερικών ημερών. Αυτό συμβαίνει και στις δύο περιοχές. Καθώς οι εκλάμψεις αναπτύσσονται και εξελίσσονται το ληφθέν φάσμα τείνει να ομαλοποιηθεί. Εξάλλου μια καλή ανάλυση της παραγωγής της εκπομπής σύγχροτρον προβάλλει εξαιρετικά δύσκολη. Μιας και ο χρόνος ζωής των σχετικιστικών ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερος των 10^9 χρόνων, είναι πολύ πιθανό τα εν λόγω σωματίδια να παράγονται στα φτερά του πυρήνα ακτινοβολώντας σε μεγαλύτερες αποστάσεις, όταν για παράδειγμα το μαγνητικό πεδίο συμπιέζεται ή ευθυγραμμίζεται. Αυτή τη χρονική στιγμή δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος ο ρόλος του μαγνητικού πεδίου στη διαμόρφωση των εκροών.



Σχήμα 2.10: Το αντικείμενο SS433

Κεφάλαιο 3

3. Η ραδιοφωνική εκπομπή της κεντρικής περιοχής των πιδάκων και το σύνθετο περιβάλλον του αντικειμένου SS433

3.1 Εισαγωγή

Ακολούθως θα παρουσιάσουμε παρατηρήσεις του **SS433** που ελήφθησαν μέσω των VLBA + VLA στις συχνότητες των 1.6, 5 και 15 GHz. Αυτές οι παρατηρήσεις παρέχουν την υψηλότερη γωνιακή ανάλυση με την οποία έχουν κατασκευαστεί ποτέ ραδιοφωνικοί χάρτες. Κατά τη διάρκεια της παρατήρησης ανιχνεύθηκε κίνηση των συνιστωσών του **SS433**. Επιπλέον της ασυνήθιστης δομής των πιδάκων που αποκάλυψε το VLBI, ανιχνεύθηκαν δύο συνιστώσες του συστήματος με πολύ ισχυρή ραδιοφωνική εκπομπή σε μια εξαιρετικά ανώμαλη γωνία θέσης. Αυτές οι περιοχές που έχουν ανακαλυφθεί πρόσφατα, ενδεχομένως να εμφανίζουν άμεση συσχέτιση με μια εκροή υλικού με τη μορφή ανέμου στο ισημερινό επίπεδο με συνέπεια το σχηματισμό δίσκου προσαύξησης. Ακόμη επιβεβαιώνεται το γεγονός που θέλει το μέρος του ραδιοφωνικού πυρήνα να διακλαδώνεται με ένα εμφανές κενό ανάμεσα στο ανατολικό και στο δυτικό τμήμα των φτερών εκπομπής. Κατάλληλα μοντέλα αναφορικά με τους πίδακες και τις κινούμενες ομάδες (κόμβοι) του **SS433** δείχνουν ότι το κέντρο των κινήσεων – το διπλό σύστημα – βρίσκεται στο κενό ανάμεσα στο ανατολικό και στο δυτικό ραδιοφωνικό τμήμα του πυρήνα. Φασματικές αναλύσεις καθώς και παρατηρούμενες μετατοπίσεις στη θέση του πυρήνα μας οδηγούν στην αποδοχή της θεωρήσης που θέλει να παρατηρούμε το γεγονός που συνδυάζει φαινόμενα αυτό-απορρόφησης (self absorption) μέσω της ακτινοβολίας σύγχροτρον ελεύθερης απορρόφησης στην κεντρική κυρίως περιοχή της πηγής δηλαδή σε μικρές αποστάσεις από το κέντρο στις κλίμακες AU. Εξάλλου η χωρική κατανομή της ιονισμένης ύλης πιθανότατα δεν είναι σφαιρικά συμμετρική γύρω από το διπλό σύστημα, αλλά μπορεί να έχει δισκοειδή μορφή.

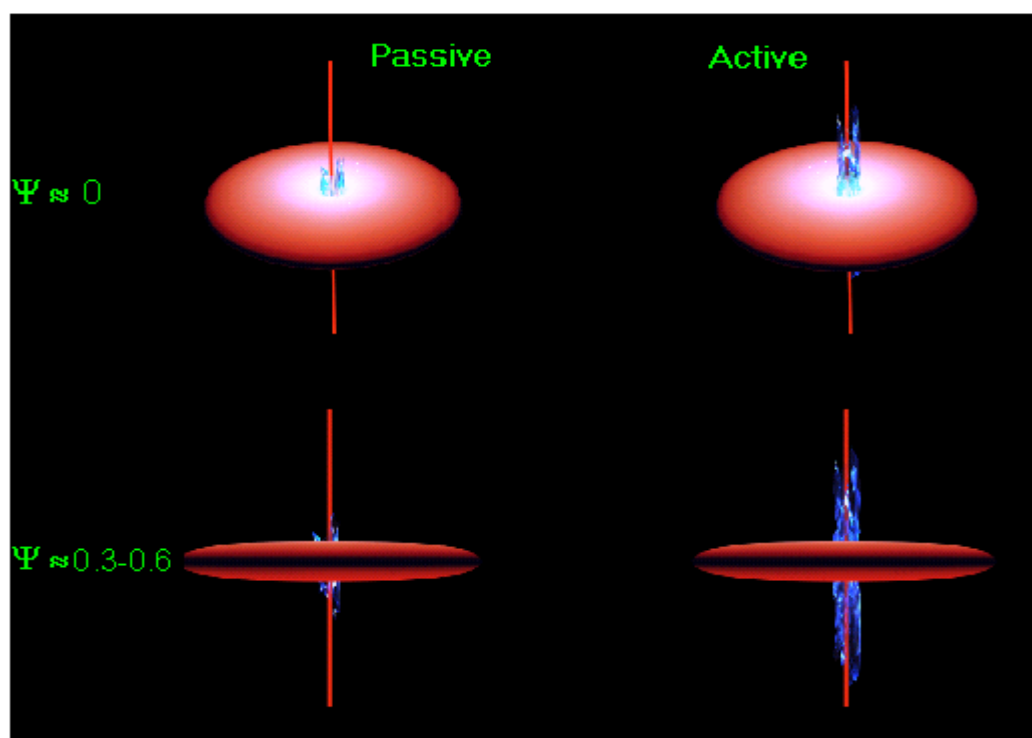
Όπως έχει εκτενώς εξηγηθεί το διπλό αστρικό σύστημα **SS433**, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δύο αντιπαράλληλων εκτινασσόμενων πιδάκων με σχεδόν σχετικιστική ταχύτητα της τάξης των $0.26 c$ (Vermeulen 1995). Η κινηματική τους αποκαλύφθηκε μέσω οπτικά μετατοπιζομένων γραμμών Doppler (Margon & Anderson 1989), καθώς και των ραδιοφωνικών χαρτών. Για παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί το σχήμα τιρμπουσόν (corkscrew shape) των τροχιών που προκαλείται λόγω μεταπτωτικής κίνησης (Hjellming & Johnston 1981). Οι εν λόγω πίδακες εμφανίζουν περίπλοκες μεταπτωτικές κινήσεις, ενώ είναι καλά κατευθυνόμενες σε βαθμό καλύτερο των 4° . Η ταχύτητα της εκτίναξης εμφανίζει αξιοσημείωτη σταθερότητα. Προγράμματα που παρακολουθούν τη ραδιοφωνική ροή υπέδειξαν πως το **SS433** εμφανίζει ενεργές περιόδους καθώς και περιόδους ηρεμίας (Fielder et al. 1987). Οι ομάδες (knots) στους πίδακες κινούμενες με ταχύτητες $0.26c$ μπορούν να φανούν στις κλίμακες παρατήρησης του MERLIN (Spencer 1979, 1984). Ραδιοφωνική δομή σε μια κλίμακα από 10 σε 50 mas ανακαλύφθηκε το 1979 (Scilizzi et al. 1979). Έκτοτε, πολλές παρατηρήσεις χρήσει του VLBI έγιναν με μια ποικιλία διατάξεων και συχνοτήτων παρατήρησης οι οποίες αποκάλυψαν ότι τα κινούμενα συστατικά μέρη του SS433 είναι παρόντα τόσο στις ενεργές όσο στις περιόδους ηρεμίας του αντικειμένου (Rommey et al. 1987, Fejes et al. 1988, Vermeulen et al. 1993). Αυτές οι παρατηρήσεις αποκάλυψαν επίσης πως το κεντρικό κομμάτι της ραδιοφωνικής πηγής έχει τη μορφολογία πυρήνα – φτερού (core – wing), ο οποίος

δεν είναι λαμπρότερος στο κέντρο. Η παρουσία ζώνης λαμπρότητας –όπου τα κινούμενα συστατικά γίνονται λαμπρότερα– σε 50 *milliarcsec* από το κέντρο ανακαλύφθηκε από τους Vermeulen et al. (1993).

Οι παρατηρήσεις μέσω του VLBI του SS433 στα 1.6, 5 και 15 GHz που θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους μας παρέχουν τη δυνατότητα χάραξης χαρτών με εξαιρετική ανάλυση σχετικά με τις περιοχές του αντικειμένου αυτού. Εκτός της αποκάλυψης μέσω αυτών της συνήθους δομής του συστήματος, οι νέοι χάρτες αποκαλύπτουν μερικές νέες δομές σ' αυτό. Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφεται η μέθοδος των παρατηρήσεων και η διαδικασία ανάλυσης δεδομένων. Στο τρίτο κομμάτι αυτής της αναφοράς οι εικόνες μέσω του VLBI καθώς και μερικά σχετικά παρατηρησιακά αποτελέσματα παρουσιάζονται. Κριτική για τα αποτελέσματα λαμβάνει χώρα στο τέταρτο κομμάτι του κεφαλαίου.

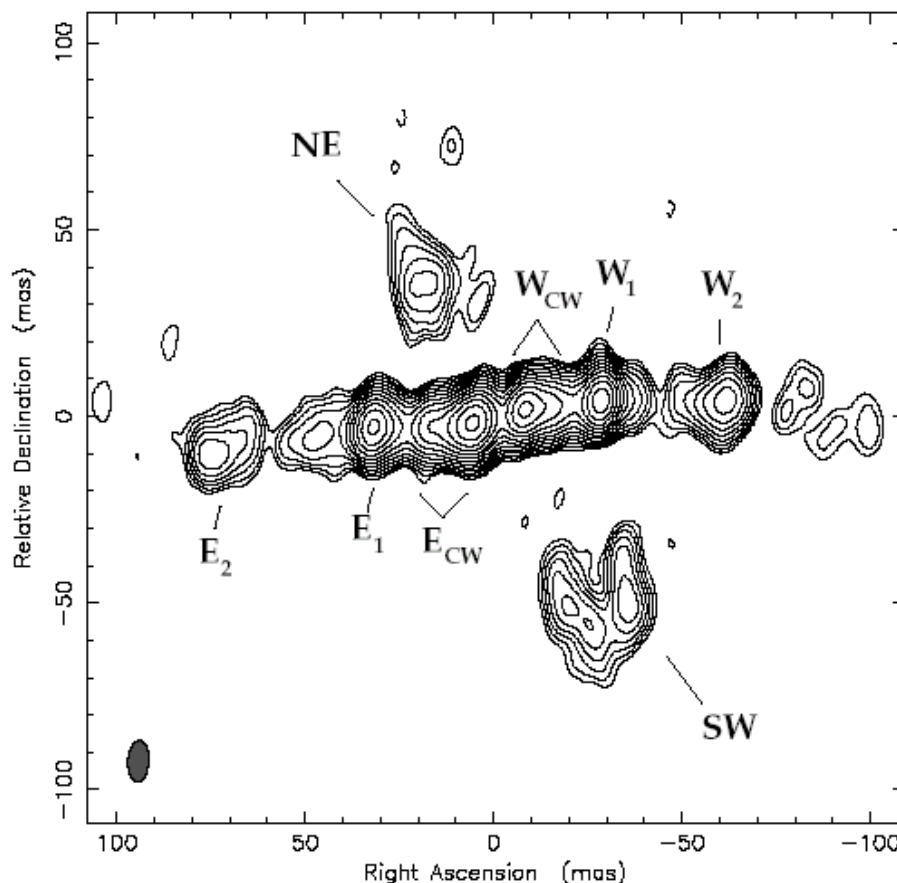
3.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στις 6 Μαΐου 1995 χρήσει του VLA στα 1.6, 5 και 15 GHz. Τότε η περιστροφική σε ανοικτή διάταξη φάση του διπλού συστήματος ήταν 0.28 (με το $\phi = 0$ να αντιστοιχεί στο γεγονός της έκλειψης του δίσκου προσαύξεσης από τον κανονικό αστέρα), ενώ η φάση λόγω μετάπτωσης (σύμφωνα με τον ορισμό του Vermeulen 1989), των ραδιοφωνικών πιδάκων ήταν 0.5, όταν ο πίδακας που φαίνεται να μας προσεγγίζει βρίσκεται πολύ κοντά στη γραμμή παρατήρησης. Το SS433 παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια 10 ωρών χρησιμοποιώντας αριστερόστροφη κυκλική πόλωση και εύρος συχνοτήτων 16 MHz. Το πείραμα συμπεριέλαβε μερικές αναλύσεις σχετικές με τη φάση με ραδιοφωνικές πηγές σύγκρισης τις 1910+052 (σε όλες τις συχνότητες) και 1916+062 (στα 5 GHz μόνο).



Σχήμα 3.1: Μια απεικόνιση του δίσκου προσαύξεσης με τα εμφανή κελύφη να περιβάλλουν τις εσωτερικές βάσεις των πιδάκων στις ενεργές και τις παθητικές καταστάσεις ηρεμίας αντίστοιχα για τις περιπτώσεις δύο ακραίων προσανατολισμών.

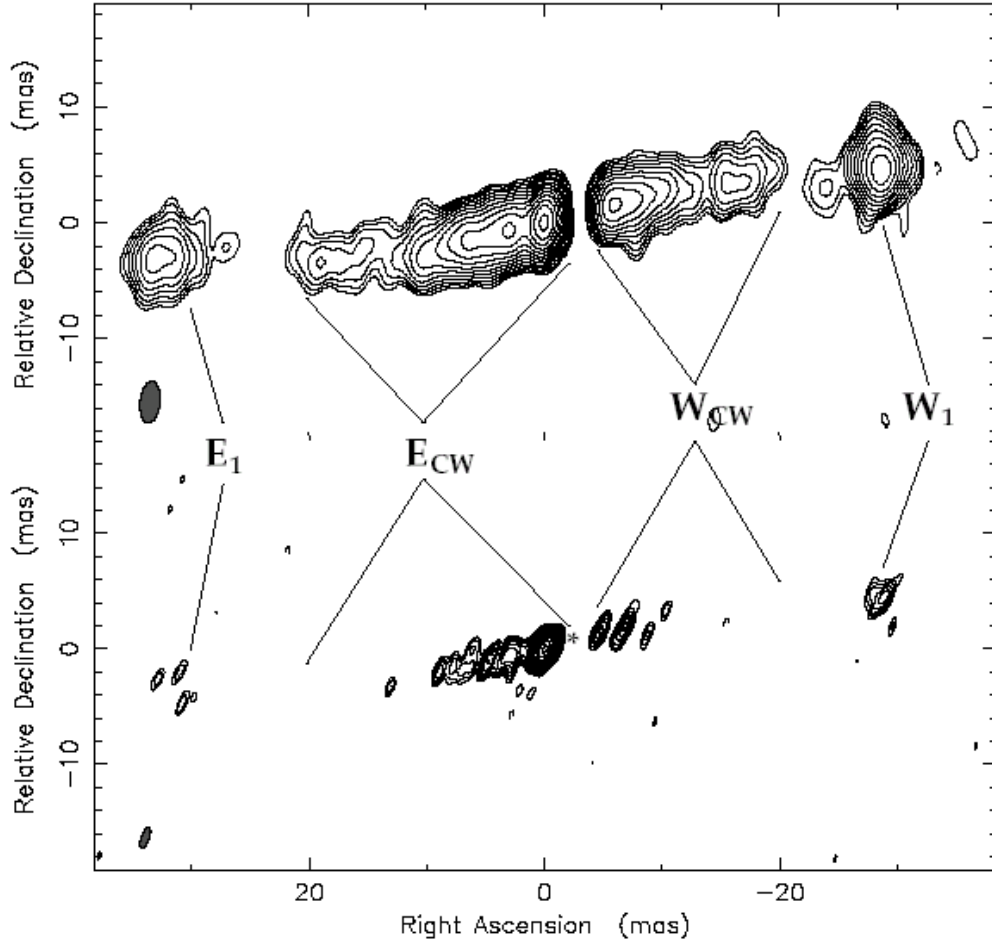
Το ακόλουθο σχήμα αποτελεί εικόνα του αντικειμένου στα 1.6 GHz. Στα 1.6 GHz και 5 GHz υπάρχει η γνωστή δομή πίδακα προσανατολιζόμενη σε μεγάλο βαθμό από τα ανατολικά προς τα δυτικά η οποία εμφανίζεται σχεδόν συμμετρική στο σχήμα κάτι που δεν είναι άμεσα σύμφωνο με την πυκνότητα ροής. Αναφέρονται στα σχήματα μερικές από τις πλέον κυρίαρχες και χαρακτηριστικές δομές του πυρήνα του SS433.



Σχήμα 3.2: Εικόνα του SS433 στα 1.6 GHz. Για περισσότερη σαφήνεια σημειώνονται μερικά χαρακτηριστικά μέρη που αναφέρονται στο κείμενο. Οι ισόφωτες είναι -1.41, 1.41, 2.0, 2.83, 4.0, 5.66, 8.0, 11.31, 16.0, 22.63, 32.0, 45.25, 64.0, 90.51 % του μεγίστου της πυκνότητας ροής που είναι 53.3 mJy / δέσμη.

Οι παρατηρήσεις μας δείχνουν πως οι ίδιες περιοχές εμφανίζονται και στα 5 GHz, αλλά είναι εξαιρετικά ασθενείς και πολύ εκτεταμένες για να απεικονιστούν με ακρίβεια. Η εικόνα στα 15 GHz εμφανίζεται περισσότερο ασύμμετρη, ωστόσο δείχνει την ίδια γενική εσωτερική δομή των πιδάκων: Τα E_1 και W_1 είναι αναγνωρίσιμα και καλά διαχωρίσιμα και στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ υπάρχει και παρατηρείται εκπομπή από την κατεύθυνση των συμπλεγμάτων E_{CW} και W_{CW} . Είναι εμφανές το γεγονός πως όλες οι περιοχές εκπομπής είναι διευρυμένες, με τις πληροφορίες και τις λεπτομέρειες της μορφολογίας τους να είναι δύσκολο να απεικονιστούν αξιόπιστα σ' αυτή την υψηλή ανάλυση.

Η ανάλυση στα 5 και 15 GHz ήταν αρκετή για την ανίχνευση της κίνησης μερικών συνιστωσών των πιδάκων κατά τη διάρκεια των δώδεκα ωρών της παρατήρησης. Οι αλλαγές στη δομή της πηγής δεν επηρεάζουν τις τελικές εικόνες που λαμβάνονται πολύ έντονα, γεγονός που ελέγχθηκε με το διαχωρισμό του συνόλου δεδομένων σε πιο σύντομα χρονικά διαστήματα. Όμως αυτή η αλλαγή στα χρονικά διαστήματα ενδέχεται να έχει επιπτώσεις στις εικόνες μας κυρίως των 15 GHz.



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικές δομές του πυρήνα του SS433.

3.3 Η περιοχή του πυρήνα και οι εσωτερικοί πίδακες.

Οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν το αποτέλεσμα των Vermeulen et al. (1993) που θέλει την λαμπρότητα του πυρήνα να μην αυξάνει προς το κέντρο. Για πρώτη φορά έχουμε τη δυνατότητα μέσω της υψηλής διακριτικής ικανότητας να παρατηρήσουμε ένα κενό ανάμεσα στα φτερά του πυρήνα (core-wings), όπως φαίνεται στα δύο παραπάνω Σχήματα. Κινηματική μοντελοποίηση βασισμένη στη γεωμετρία των πιδάκων και στη συμμετρία των εξωτερικών συστατικών έδειξε πως το κινηματικό κέντρο της πηγής βρίσκεται στο κέντρο του κενού στην εικόνα των 15 GHz. Ο διαχωρισμός των λαμπρότερων συνιστωσών E_{CW} και W_{CW} αυξάνει, καθώς μειώνεται η συχνότητα. Επίσης, οι φασματικές ιδιότητες εμφανίζονται ελαφρώς ανόμοιες ανάμεσα στα E_{CW} και W_{CW} .

Στο βασικό πρότυπο για τους εξωγαλαξιακούς πίδακες η απόσταση του ράδιο – πυρήνα από την κεντρική μηχανή είναι ανάλογη του ν^{-1} (Blandford & Konigl 1979). Αυτό οδηγεί σε μία προβλεπόμενη μετατόπιση θέσης του ράδιο – πυρήνα ανάμεσα στις συχνότητες. Ακολουθώντας τον φορμαλισμό του Lobanov (1998), η μέτρηση της μετάθεσης της θέσης του πυρήνα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$\Omega_{rv} = 4.58 \cdot 10^{-9} \Delta r_{mas} D \frac{\nu_1^{1/k_r} \nu_2^{1/k_r}}{\nu_2^{1/k_r} - \nu_1^{1/k_r}},$$

όπου Δr_{mas} είναι η παρατηρούμενη μετάθεση της θέσης του πυρήνα ανάμεσα στις παρατηρούμενες συχνότητες ν_1 και ν_2 (δοθείσες σε Hz), και D η απόσταση της

πηγής σε pc . Η παράμετρος k_r εξαρτάται από το πρότυπο. Το μαγνητικό πεδίο στον πίδακα στην απόσταση του $1 pc$ από την κεντρική μηχανή μπορεί να γραφεί ως εξής (Lobanov 1996):

$$B_1 = 2.92 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\Omega_{rv}^3}{k_e \delta_j^2 \phi \sin^5 \theta} \right]^{1/4},$$

όπου δ_j είναι παράγοντας Doppler του πίδακα, ϕ το γωνιακό άνοιγμα του πίδακα και θ η γωνία παρατήρησης. Χρησιμοποιώντας το ότι: $B \propto r^{-1}$ με το $k_e = 1$, αντικαθιστώντας $\phi = 4$ για το γωνιακό άνοιγμα του πίδακα και υπολογίζοντας τις παραμέτρους που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό (θ και δ_j) για φάση μετάπτωσης 0.5 βρίσκουμε πως η παρατηρούμενη $\sim 4 mas$ μετατόπιση της θέσης του πυρήνα στην πλευρά του πίδακα που πλησιάζει ανάμεσα στις συχνότητες 1.6 GHz και 5 GHz καταλήγει στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου έντασης $B = 0.4 Gauss$ σε απόσταση 35 AU από την κεντρική μηχανή, όπου το συστατικό του πυρήνα παρατηρείται στα 1.6 GHz.

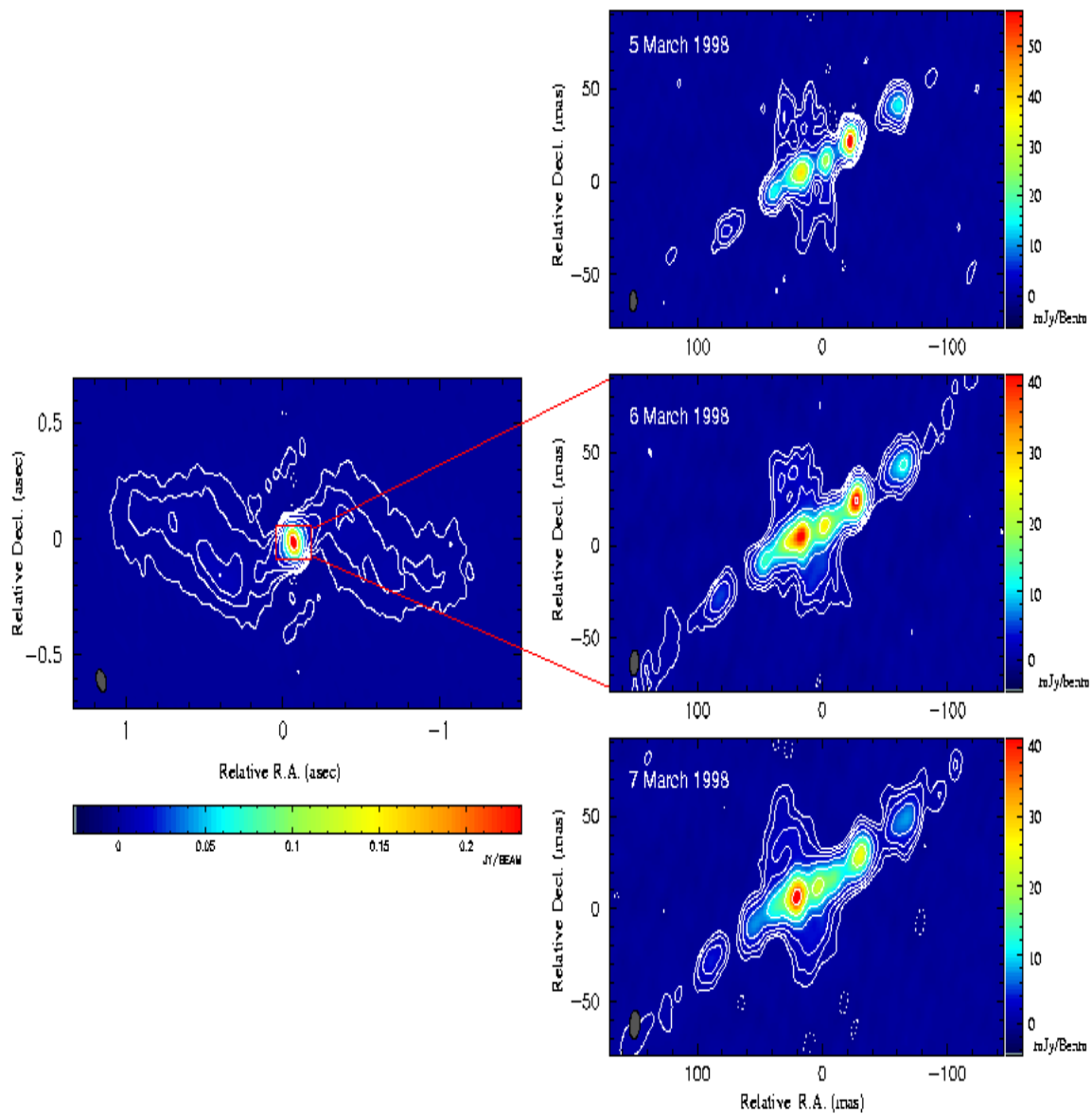
Πυκνότητες ροής των διαφόρων συνιστωσών του **SS433**. Δίνονται επίσης οι συντεταγμένες των περιοχών που αναφέρεται η πυκνότητα ροής κάθε συνιστώσας.

Component	Flux density (mJy)			Box coordinates (mas)			
	1.6 GHz	5 GHz	15 GHz	x_1	y_1	x_2	y_2
E ₂	16.8	7.5	—	86.5	−23.5	58.5	18.0
E ₁	42.4	18.1	3.1	38.5	−18.0	23.0	12.5
E _{cw}	116.2	113.4	121.5	23.0	−16.0	−2.5	16.0
W _{cw}	76.1	44.3	17.4	−2.5	−13.0	−22.0	18.0
W ₁	56.6	33.0	9.5	−22.0	−9.5	−35.5	21.0
W ₂	25.6	9.9	—	−40.0	−11.0	−71.0	20.5
NE	19.7	6.0	—	31.0	18.5	−1.0	58.5
SW	32.6	10.5	—	−10.5	−72.5	−44.5	−24.5

Μιας και ο διαχωρισμός των συνιστωσών E_{CW} και W_{CW} ανάμεσα στα 1.6 GHz και στα 5 GHz είναι ανάλογος του ν^{-1} λάβαμε μια λογική ένταση πεδίου στους υπολογισμούς μας. Παρατηρούμε πως η συνολική πυκνότητα ροής της περιοχής E_{cw} όπως αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα παραμένει σχεδόν σταθερή. Εξάλλου, η μέγιστη τιμή της λαμπρότητας του πίδακα που πλησιάζει, στα 15 GHz δεν φαίνεται να είναι αρκετά υψηλή. Εξάλλου τα φωτεινότερα μέρη του πίδακα που απομακρύνεται (τοποθετούμενος διαδοχικά κοντύτερα στην κεντρική μηχανή αυξανόμενης της συχνότητας) απορροφούνται, γι' αυτό και το συνολικό φάσμα της περιοχής W_{cw} παραμένει απότομο στις συχνότητες από 1.6 GHz έως 15 GHz.

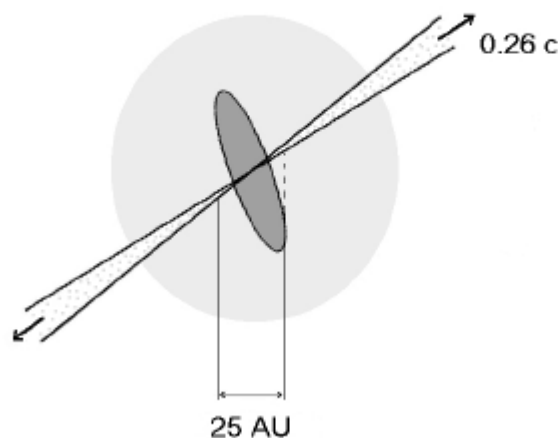
MERLIN+VLA Image of SS433

VLBA Images of SS433



Courtesy of Amy J. Mioduszewski (U. of Sydney)

Σχήμα 3.4: Εικόνες παρατηρήσεων του αντικειμένου **SS433** μέσω των VLA+MERLIN και VLBA. Παρατηρούμε την πολύ καλύτερη ανάλυση που μας παρέχουν οι εικόνες που λαμβάνονται με το VLBA. Συγκεκριμένα στη δεξιά εικόνα διακρίνεται μόνο η ύπαρξη της συμπαγούς κεντρικής περιοχής δίχως να υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω ανάλυση των συστατικών αυτής. Βασικότερες δομές της συμπαγούς κεντρικής περιοχής μας παρέχουν οι εικόνες στο δεξιό τμήμα της σελίδας όπου φαίνεται και η αρχή της διαδικασίας μεταφοράς ύλης.



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του απορροφητικού μέσου (free-free absorbing medium) γύρω από το αντικείμενο **SS433**. Η πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων αυξάνει ραγδαία προς το μέρος της κεντρικής μηχανής. Στα 15 GHz το απορροφητικό νέφος καθίσταται οπτικά πυκνό σε μια προβαλλόμενη απόσταση των ~ 12.5 AU σε σχέση με την κεντρική μηχανή (τονίζεται με την εσωτερική σκιασμένη περιοχή). Η τιμή του οπτικού βάθους ξεπερνά την τιμή 3 ($\tau_{ff} > 3$) για τον πίδακα που απομακρύνεται. Πάντως η μεγάλη ασυμμετρία ανάμεσα στις δύο πλευρές και η ξαφνική αύξηση του οπτικού βάθους, πιθανότατα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη μιας γεωμετρίας δισκοειδούς τύπου.

Σημειώνουμε πως υπάρχουν θεωρίες που υποστηρίζουν πως οι συνιστώσες E_{cw} και W_{cw} αποτελούν περιοχές μετάβασης από οπτικά πυκνά (optically thick) σε οπτικά λεπτά (optically thin) μέσα. Ακόμη αναφέρουμε πως η σκιά της περιοχής της παραπάνω σχηματικής αναπαράστασης είναι πολύ μεγαλύτερη του δίσκου προσαύξησης. Το προβαλλόμενο μέγεθος του κενού μεταξύ των συστατικών E_{cw} και W_{cw} βρίσκεται να είναι στα 25 AU, ενώ το διπλό σύστημα πιστεύεται γενικά ότι είναι 1 AU σε μέγεθος.

3.4 Οι ανώμαλες περιοχές εκπομπής NE και SW.

Συχνά παρατηρούνται αποκλίσεις στις ταχύτητες της τάξης των 5000 km/sec στους πίδακες του **SS433**. Επίσης σε μερικές περιπτώσεις έχουν ανιχνευθεί συνιστώσες που εμφανίζουν ανώμαλη ραδιοφωνική εκπομπή. Συγκεκριμένα οι Romney et al. (1987) ανακάλυψαν αναλύοντας τα δεδομένα των παρατηρήσεών τους μια επιμήκη δομή η οποία “καβαλικεύει” τον πυρήνα σε PA 62° ευρισκόμενη πέρα από τον κώνο που προβλέπει το κινηματικό πρότυπο το οποίο και αναλύσαμε. Οι Spencer & Waggett (1984) ανακάλυψαν ανώμαλη ραδιοφωνική εκπομπή $15^\circ - 20^\circ$ από τον προβλεπόμενο τόπο σε μια σειρά εικόνων που ελήφθησαν μέσω παρατηρήσεων με το EVN στα 5 GHz το 1982.

Οι σύγχρονες παρατηρήσεις του αντικειμένου **SS433** εμφανίζουν δύο εξασθενημένες, εκτεταμένης εκπομπής περιοχές τις **NE** και **SW** προσανατολισμένες η πρώτη βόρειο – ανατολικά και η δεύτερη νότιο – δυτικά της κεντρικής μηχανής. Οι περιοχές αυτές τοποθετούνται ανάμεσα στις συνιστώσες E_{cw} και W_{cw} , εκτεινόμενες σε PA $\sim 30^\circ \pm 20^\circ$, σε μια απόσταση από 30 mas έως 70 mas στην εικόνα των

1.6 GHz. Αποτελούν μάλλον δυσδιάκριτες περιοχές σε σχέση με τους “κανονικούς” πίδακες (normal jets) που είναι ευδιάκριτοι σχεδόν πάντοτε.

Η θερμοκρασία λαμπρότητας που φαίνεται να χαρακτηρίζει τις περιοχές αυτές στα $10^7 K$ υποδεικνύει την ύπαρξη μη θερμικής ακτινοβολίας. Αποκλείοντας πως οι συνιστώσες NE και SW αποτελούν μη ανώμαλες περιοχές που μπορούν να συσχετίζονται με τους πίδακες, εκτινασόμενες με σχεδόν σχετικιστικές ταχύτητες, σήμερα πιστεύεται πως αυτές οι ραδιοφωνικές δομές εμφανίζουν μακρύτερο χρόνο ζωής – ενδεχομένως να αποτελούν σταθερές περιοχές εκπομπής, εκτεινόμενες κατά μήκος ισημερινού επιπέδου του διπλού συστήματος. Δεν είχαν ανιχνευθεί νωρίτερα καθώς η διάταξη του VLBI είναι αυτή που έχει μία δίχως προηγούμενο ευαισθησία στην ανίχνευση περιοχών που χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη εκπομπή.

3.5 Συμπεράσματα

Είναι φανερό το γεγονός πως το αντικείμενο SS433 είναι ενεργό (active) σχεδόν σε όλες τις εποχές παρατήρησης. Το χαρακτηρίζει η ύπαρξη μιας συνεχούς κεντρικής ραδιοφωνικής περιοχής. Το ανατολικό και το δυτικό κομμάτι του σύνθετου πυρήνα διαχωρίζεται από ένα κενό, που ουσιαστικά αποτελεί το κέντρο του κινηματικού πρότυπου. Ακόμη υπάρχουν ασθενέστερες εκτεταμένες περιοχές που ωστόσο δεν συνδέονται άμεσα με τους κινούμενους πίδακες της πηγής. Ασχοληθήκαμε με αρκετά και κυρίως με τα πλέον σημαντικά των μοντέλων που κατασκευάστηκαν αποσκοπώντας στο να εξηγήσουν τις ποικίλες δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο αντικείμενο αυτό και το καθιστούν αξιοσημείωτα ενδιαφέρον. Ωστόσο πολλές ερωτήσεις και προβλήματα απομένουν για να απαντηθούν και να επιλυθούν αντίστοιχα.

Επιπλέον, η ασυμμετρία που παρατηρείται εντός της περιοχής του πυρήνα υποδεικνύει πως τα σενάρια τόσο της ραδιοφωνικής εκπομπής όσο αυτό της απορρόφησης θα πρέπει να ερευνηθούν ακόμα περισσότερο, ώστε να καθιερωθούν. Τέλος η εμφάνιση εκτεταμένου δίσκου (εξωτερική ακτίνα 1–3 arcmin που μεταφράζεται σε απόσταση μερικών pc από την πηγή), όπως αυτή ανακαλύφθηκε από τον Fabrika (1993) πρέπει να παρατηρηθεί εκτενέστερα με νέες παρατηρήσεις του VLBI στις χαμηλές συχνότητες.

Κεφάλαιο 4

4. Παρατήρηση του SS433 σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος και αλληλεπίδραση των πιδάκων με το μεσοαστρικό χώρο.

4.1 Εισαγωγή

Η ως τώρα μελέτη του αντικειμένου **SS433** υποδεικνύει πως πρόκειται για ένα διπλό αστρικό σύστημα που εκπέμπει ισχυρά στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος αλλά και στις ακτίνες X (X-ray binary), αποτελούμενο πιθανότατα από έναν συμπαγή αστέρα και έναν αστέρα νετρονίων, όμως η ακριβής φύση αυτών δεν έχει επιβεβαιωθεί με ακρίβεια. Το διπλό αυτό σύστημα εκπέμπει συμπαγείς σχετικιστικούς πίδακες που παρατηρούνται σε κλίμακες της τάξης μεγέθους των subarcsec στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος.

Οι πίδακες αυτοί έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την εμφάνιση μεταπτωτικής κίνησης (precession movement). Οι μετατοπισμένες λόγω φαινομένου Doppler φασματικές γραμμές παρατηρούμενες στο οπτικό φάσμα μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε τις παραμέτρους του πρότυπου της μεταπτωτικής κίνησης, καταλήγοντας σε σχετικιστικούς πίδακες ($v = 0.26c$) που σχηματίζουν και καλύπτουν έναν κώνο του οποίου το μέσο γωνιακό άνοιγμα είναι $\theta = 19.8^\circ$, και ο άξονας σχηματίζει γωνία κλίσης $i = 78.82^\circ$ σε σχέση με τη διεύθυνση παρατήρησης.

Η περίοδος μετάπτωσης είναι περίπου 162.5 days, ενώ η περίοδος του διπλού συστήματος είναι πολύ κοντά στις 13.08 days (Margon 1984). Η σημασία αυτών των πιδάκων που εμφανίζουν μεταπτωτική κίνηση έγκειται στο ότι κατά τη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος μετάπτωσης, ο ανατολικός πίδακας που μας προσεγγίζει για μεγάλη χρονική διάρκεια, τώρα απομακρύνεται, ενώ ο δυτικός άξονας μας προσεγγίζει αντί να απομακρύνεται.

Το διπλό σύστημα αποτελεί το κέντρο του ραδιοφωνικού νεφελώματος W50 που εμφανίζει τη μορφή κελύφους (sea-shell radio nebula), η μορφή του οποίου εικονίζεται στα 20 cm (Dubner et al. 1998) στις εικόνες των Σχημάτων 4.1 και 4.2. Αυτό το νεφέλωμα εκτάσεως $2^\circ \times 1^\circ$ ($\sim 120 pc \times 60 pc$ σε απόσταση 3.5 kpc) έχει ένα σφαιρικό κεντρικό σχήμα θεωρούμενο ως ένα υπόλειμμα υπερκαινοφανούς, με δύο επεκτάσεις που χαρακτηρίζονται ως λοβοί ή “φτερά” (“wings”) για να καταλήξουμε στο προαναφερθέν κελυφοειδές σχήμα. Ο ανατολικότερος λοβός παρουσιάζει ένα καθαρά ηλιακό σχήμα που καθρεφτίζει στις μεγάλες κλίμακες την μετάπτωση των πιδάκων του SS433. Το δυτικότερο “φτερό”, μικρότερο και λαμπρότερο, φαίνεται να αλληλεπιδρά έντονα με τον πυκνότερο χώρο του μεσοαστρικού μέσου. Τόσο διαφορετικές συνθήκες είναι πολύ πιθανό να καταλήγουν σε διαφορετικούς τρόπους και μηχανισμούς επιτάχυνσης που να λαμβάνουν χώρα εντός του υπολείμματος. Επομένως η εμφανιζόμενη δομή του νεφελώματος W50 αποκαλύπτει τη σχέση ανάμεσα στους παρατηρούμενους σε κλίμακες των sub-arcsec σχετικιστικούς πίδακες από το **SS433** και του εκτεταμένου νεφελώματος του οποίου η φωτεινότητα είναι πάνω από ~ 5 τάξεις αστρικών μεγεθών.

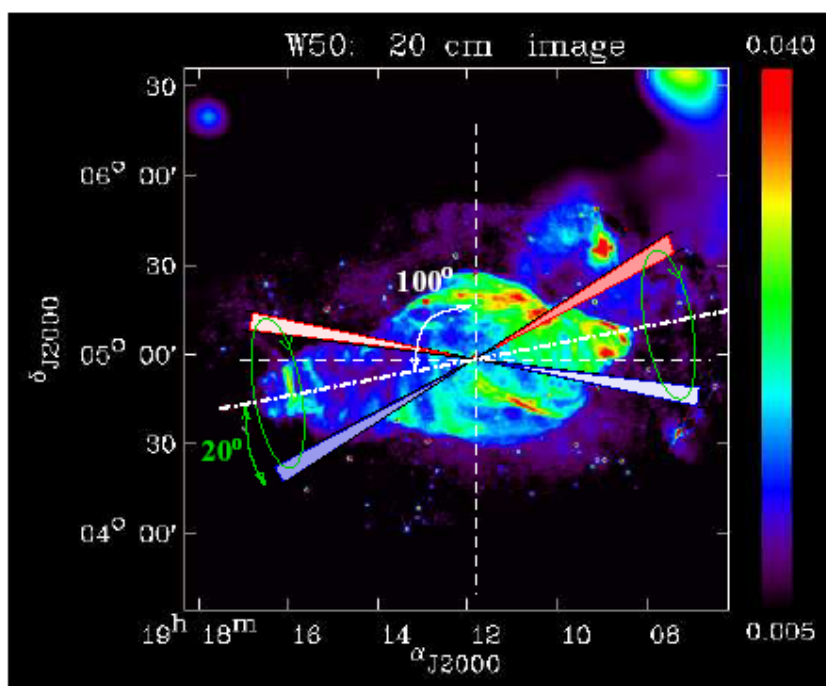
4.2 Παρατηρήσεις σε διάφορα μήκη κύματος (Multiwavelength observations).

4.2.1 ISOCAM

Για να αποδειχθεί ότι η επιμήκυνση στο σχήμα του W50 οφείλεται στην ύπαρξη των πιδάκων, το νεφέλωμα παρατηρήθηκε με την υπέρυθη κάμερα ISOCAM, του

δορυφορικού τηλεσκοπίου *ISO*. (Infrared Space Observatory), στα $15\mu m$ (large band filter $14-16\mu m$) με ανάλυση $6'' \times 6''$ ανά *pixel*. Μιας και δεν είναι δυνατή η παρατήρηση ολόκληρου του νεφελώματος με τόσο μεγάλη διακριτική ικανότητα, γι' αυτό και παρουσιάζεται ένα μικρό μόνο τμήμα του ανατολικότερου λοβού όπου βρίσκεται, μία συμπύκνωση ακτίνων X (X-ray knot) στο βορειοανατολικό τέταρτο του κεντρικού σφαιρικού τμήματος του W50 και θα ασχοληθούμε ελάχιστα με τον δυτικότερο λοβό.

Δεν παρατηρείται ιδιαίτερης μνείας εκπομπή στα $15\mu m$ στα ανατολικότερα τμήματα του W50, ενώ στο κεντρικό πεδίο και ιδιαίτερος στην περιοχή των συμπυκνώσεων ακτίνων X (X-ray knots), δεν βρέθηκε καμιά συσχέτιση ανάμεσα στις χαρτογραφήσεις στο υπέρυθρο και σ' αυτές που σε ακτίνες X (με *ROSAT* και *ASCA*) και στη ραδιοφωνική πάντα (στα 20 cm).

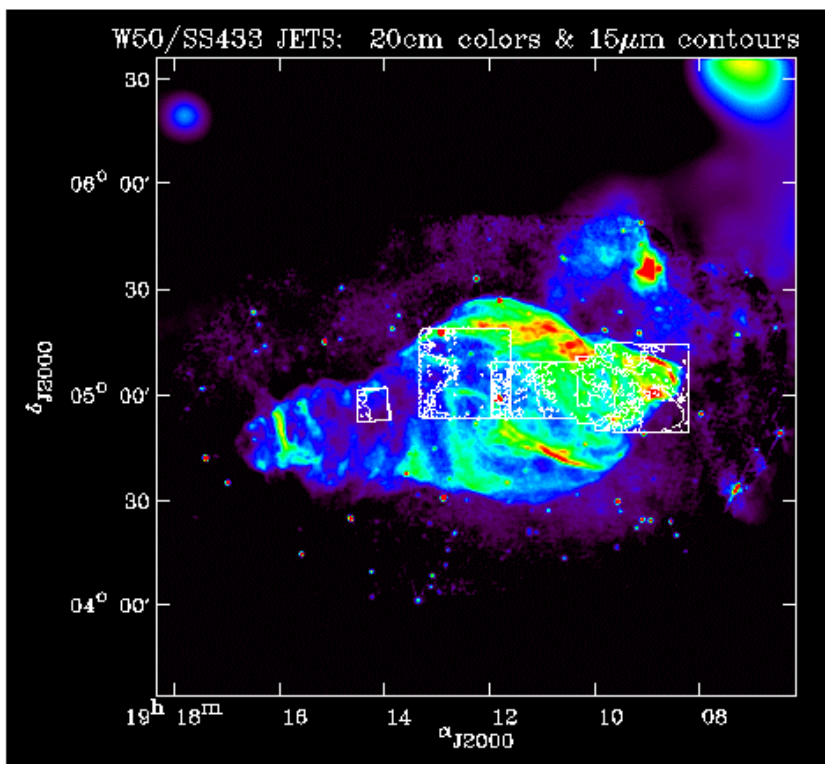


Σχήμα 4.1: Το νεφέλωμα W50 στα 20 cm με τον προβαλλόμενο άξονα μετάπτωσης στο επίπεδο του ουρανού. Ο άξονας του κώνου έχει γωνία θέσης 100° σύμφωνα με τους Hjellming και Johnston (1981). Οι δύο ραδιοφωνικοί λοβοί εντοπίζονται εντός του κώνου.

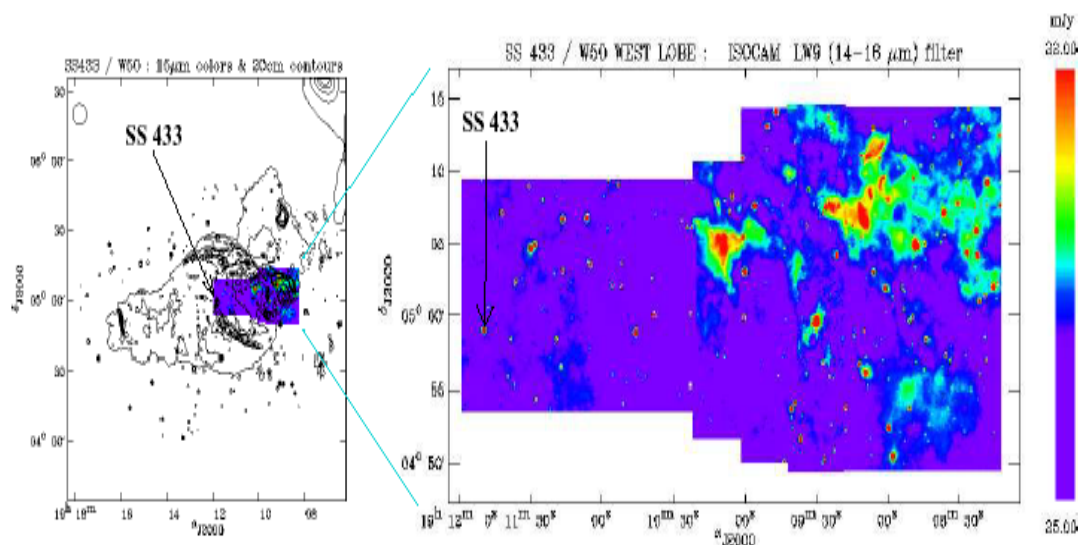
Το γεγονός αυτό δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει καθώς το υλικό του κεντρικού τμήματος του νεφελώματος πρέπει να έχει παρασυρθεί μακριά εξ' αιτίας της έκρηξης του υπερκαινοφανούς (supernova explosion) και ο ανατολικότερος λοβός παρουσιάζεται το ίδιο αμυδρός και στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος όντας λιγότερο πυκνός από τον δυτικότερο (Dubner et al. (1998)). Η πλέον λαμπρή συμπύκνωση ακτίνων X που μπορεί να παρατηρηθεί με τον δορυφόρο *ROSAT* στα $0.1-2.4\text{ keV}$ είναι γνωστή ως “περιοχή e2” από τους Safi-Harb και Ögelman (1997) και συμπίπτει με ένα λεπτό νήμα (filament) παρατηρούμενο στα οπτικά μήκη κύματος. Το τελευταίο πιθανότατα να υπάρχει ως αποτέλεσμα της επίδρασης των κλονισμών με το υπόλειμμα του υπερκαινοφανούς (Safi-Harb και Petre 1999). Ωστόσο δεν υπάρχει δυνατότητα παρατήρησης στα $15\mu m$ λόγω ανεπαρκούς ευαισθησίας της *ISOCAM*.

Ακολουθώντας θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στον δυτικό λοβό. Ο χάρτης που τον απεικονίζει στα $14-16\mu m$ και φαίνεται στο Σχήμα 4.3, αποκαλύπτει δομές

στο υπέρυθρο σε αποστάσεις $> 20'$ μακριά από το SS433, που περιλαμβάνουν λαμπρές κηλίδες (hotspots). Οι δύο κύριες περιοχές εκπομπής του δυτικού λοβού εμφανίζονται ευθυγραμμισμένες με τη διεύθυνση του άξονα του κώνου μετάπτωσης. Οι ζώνες εκπομπής στο IR ενδεχομένως να δείχνουν πυκνότερη περιοχή εντός του δυτικού λοβού που επηρεάζεται περισσότερο από τον σχετικιστικό πίδακα. Για να κατανοηθεί η φύση αυτών των IR εκπομπών, επιδιώκεται μια σύγκριση με άλλες παρατηρήσεις σε διαφορετικά μήκη κύματος.



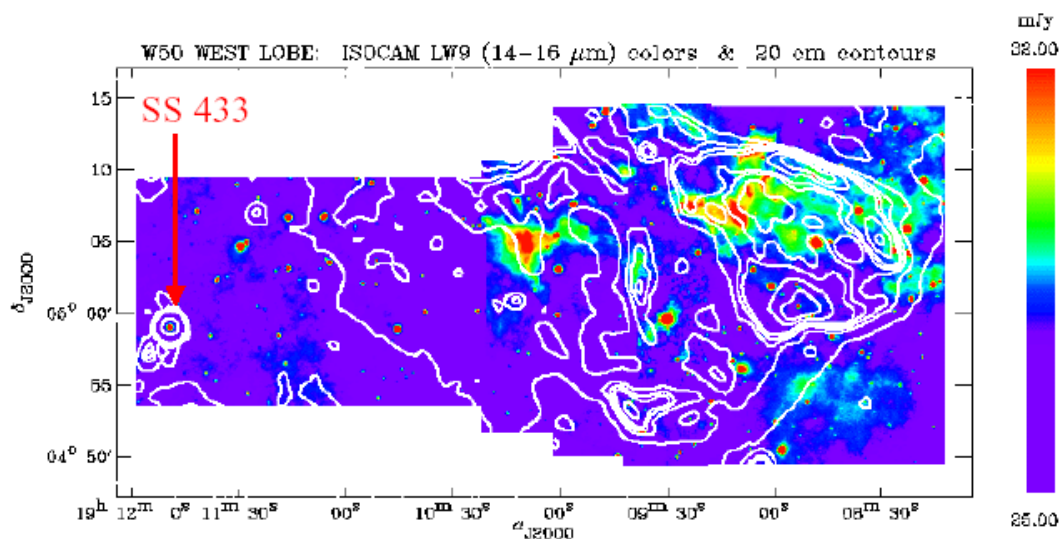
Σχήμα 4.2: Το νεφέλωμα W50.



Σχήμα 4.3: Αριστερά: η θέση της περιοχής που παρατηρήθηκε από την κάμερα ISOCAM σε χαρτογράφηση στα 20 cm, στον δυτικό λοβό του W50. Δεξιά: Ο χάρτης της ISOCAM στα 14-16 μm με κλίμακα από $-σ$ έως $+2σ$ γύρω από τη μέση τιμή της ροής.

4.2.2 Ραδιοφωνικές παρατηρήσεις

Το Σχήμα 4.4 που ακολουθεί δείχνει πως οι ραδιοφωνικές εκπομπές κι αυτές που παρατηρούνται στα $15\ \mu\text{m}$ εμφανίζονται να συμπίπτουν χωρικά, μόνο στην άκρη του δυτικού “αυτιού” του νεφελώματος, όπου η ραδιοφωνική εκπομπή είναι εξαιρετικά ισχυρή. Δεν υπάρχει υπέρυθρη εκπομπή, IR, νοτιότερα εξαιτίας ενός λιγότερο πυκνού μέσου. Η εικόνα αποτελεί το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης έκθεσης των ισοφώτων των ραδιο παρατηρήσεων στα $20\ \text{cm}$ και αυτών της κάμερας *ISOCAM*. Οι ισόφωτες αντιπροσωπεύουν την πυκνότητα ροής.

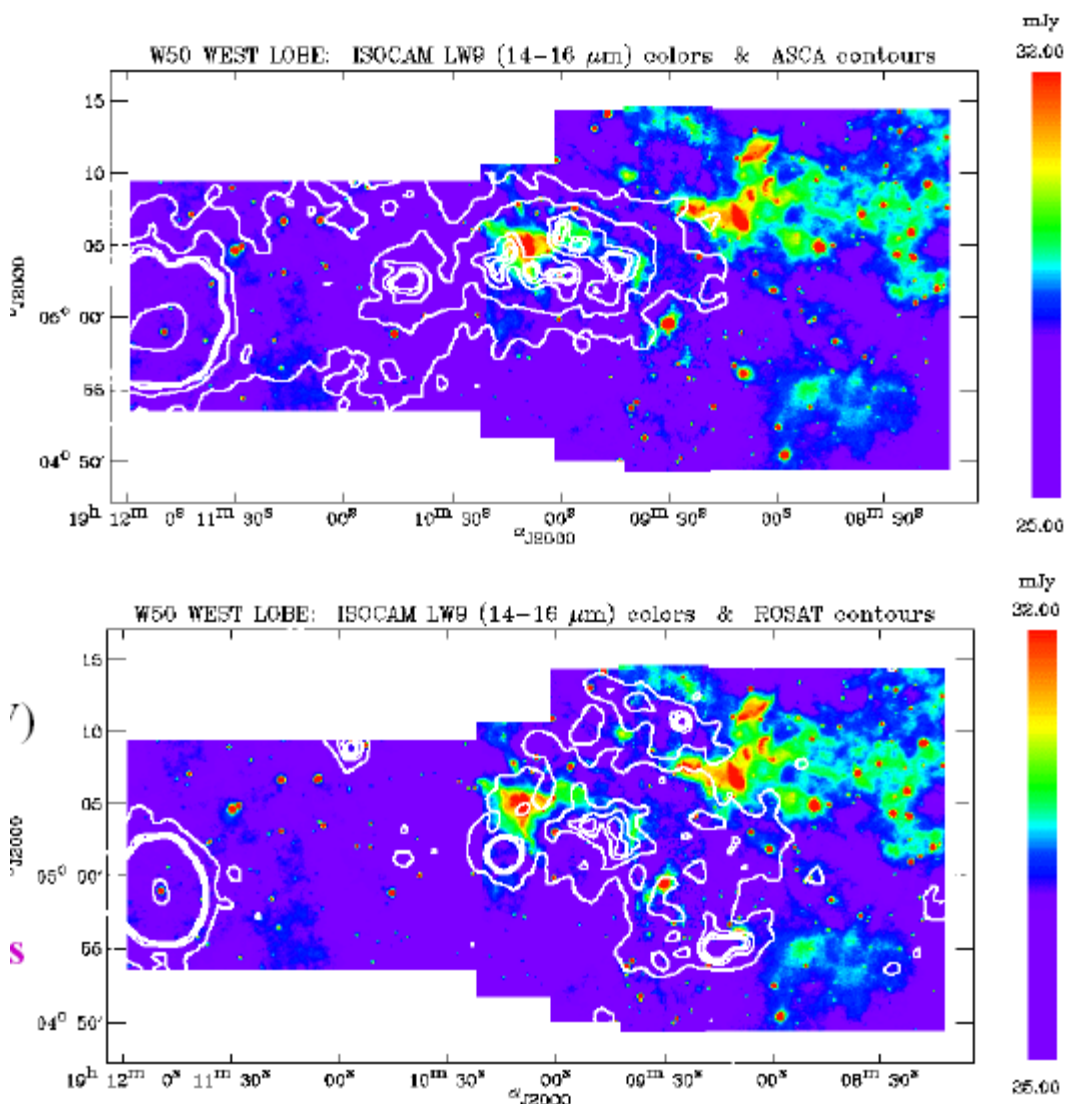


Σχήμα 4.4: Σύγκριση της εικόνας που λαμβάνουμε μέσω της *ISOCAM* στα $15\ \mu\text{m}$, του δυτικού λοβού του W50, με τις ισόφωτες των ραδιοφωνικών παρατηρήσεων στα $20\ \text{cm}$.

4.2.3 Παρατηρήσεις στις ακτίνες X (X-ray observations).

Ο δυτικός λοβός του W50 παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στις ακτίνες X με τον δορυφόρο *ROSAT* ($0.1\text{--}2.4\ \text{keV}$) από τους Brinkmann et al. (1996) και μελετήθηκαν με δεδομένα από τους *ROSAT* και *ASCA* ($0.5\text{--}9\ \text{keV}$), από τους Safi-Harb και Ögelman (1997), οι οποίοι δεν μπόρεσαν να πιστοποιήσουν εάν η παρατηρούμενη εκπομπή είναι θερμική ή όχι. Λοβοί που εκπέμπουν στις ακτίνες X παρατηρούνται να “καλύπτουν” το κενό ανάμεσα στο **SS433** και τα ραδιοφωνικά “αυτιά” (radio ears), με το φάσμα τους, σε γενικές γραμμές να τείνει προς εξομάλυνση καθώς κινούμαστε μακριά από το **SS433** κατά μήκος του άξονα μετάπτωσης των πιδάκων (Safi-Harb and Petre 1999). Η πολύ ισχυρή εκπομπή ακτίνων X που ανιχνεύθηκε με τον *ASCA* ($0.5\text{--}9\ \text{keV}$) είναι “μπερδεμένη”, εμφανιζόμενη σε απόσταση $>15'$ από το **SS433** και εμφανίζεται επικεντρωμένη κατά μήκος του άξονα μετάπτωσης του κώνου όπως συμβαίνει και με την εκπομπή που ανιχνεύει το *ISOCAM*. Λόγω του περιορισμένου πεδίου παρατήρησης του *ASCA*, η άκρη του λοβού δεν παρατηρήθηκε, αλλά φαίνεται να υπάρχει μη χωρική συσχέτιση ανάμεσα στις ισχυρές ακτίνες X και τις mid-IR εκπομπές από το διπλό σύστημα. Η λαμπρότερη περιοχή στις ακτίνες X είναι στις $31'$ δυτικά του **SS433**, όπου υπάρχει εκπομπή στα $15\ \mu\text{m}$, αλλά για να επιβεβαιωθεί απαιτούνται παρατηρήσεις στις ακτίνες X με καλύτερη χωρική ανάλυση. Οι μαλακές ακτίνες X που παρατηρήθηκαν με το *ROSAT* ($0.11\text{--}2.35\ \text{keV}$) φέρουν κι αυτές

συμπυκνώσεις (knotty) και είναι διάχυτες (diffuse), κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί. Είναι επίσης αρκετά αμυδρές και δεν σχετίζονται χωρικά με την εκπομπή στα $15\mu m$. Ας σημειωθεί, βέβαια, ότι είναι πολύ αμυδρές για να μπορούν να εμφανισθούν στο Σχήμα 4.5 (Brinkmann et al. 1996).

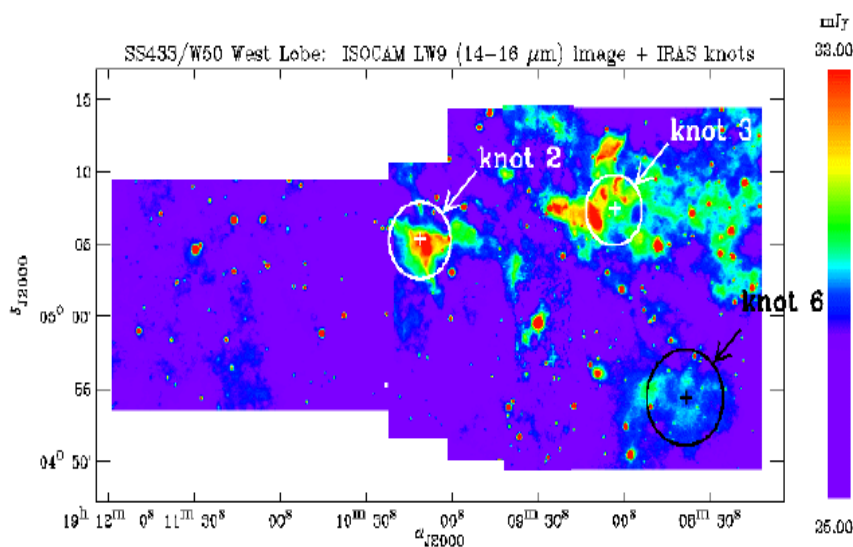


Σχήμα 4.5: Σύγκριση ανάμεσα στην εικόνα του *ISOCAM* στα $15\mu m$ για τον δυτικό λοβό του νεφελώματος W50 και αυτή του *ASCA* 0.5–9 keV (πάνω) και του *ROSAT* 0.11–2.35 keV (κάτω). Η χωρική ανάλυση είναι $6'' \times 6''$ ανά pixel για το *ISOCAM*, $15'' \times 15''$ για το *ASCA* και $12'' \times 12''$ για το *ROSAT*.

Αναφορικά με τη φύση της εκπομπής των ακτίνων X είναι ακόμα αβέβαιο το εάν πρόκειται για θερμική ή μη θερμική εκπομπή. Εξάλλου η απουσία παρατήρησης γραμμής εκπομπής, μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως είτε το πλάσμα είναι πολύ θερμό (μερικά keV), ή ότι το φάσμα είναι μη θερμικής φύσης. Πάντως είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν τόσο οι μηχανισμοί θερμικής όσο και μη θερμικής εκπομπής να είναι παρόντες, όπως θα αναμενόταν άλλωστε από την αλληλεπίδραση ενός πίδακα με το ανομοιογενές μέσο. Επομένως η ερώτηση που τίθεται είναι η εξής: Είναι οι περιοχές εκπομπής των ακτίνων X (knots) ζώνες επιτάχυνσης σωματιδίων ; Εάν η απάντηση είναι θετική θα πρέπει να είναι παρατηρήσιμες με το δορυφορικό τηλεσκόπιο *INTEGRAL*.

4.2.4 Υπέρυθρες και χιλιοστομετρικές παρατηρήσεις (IR and millimetric observations)

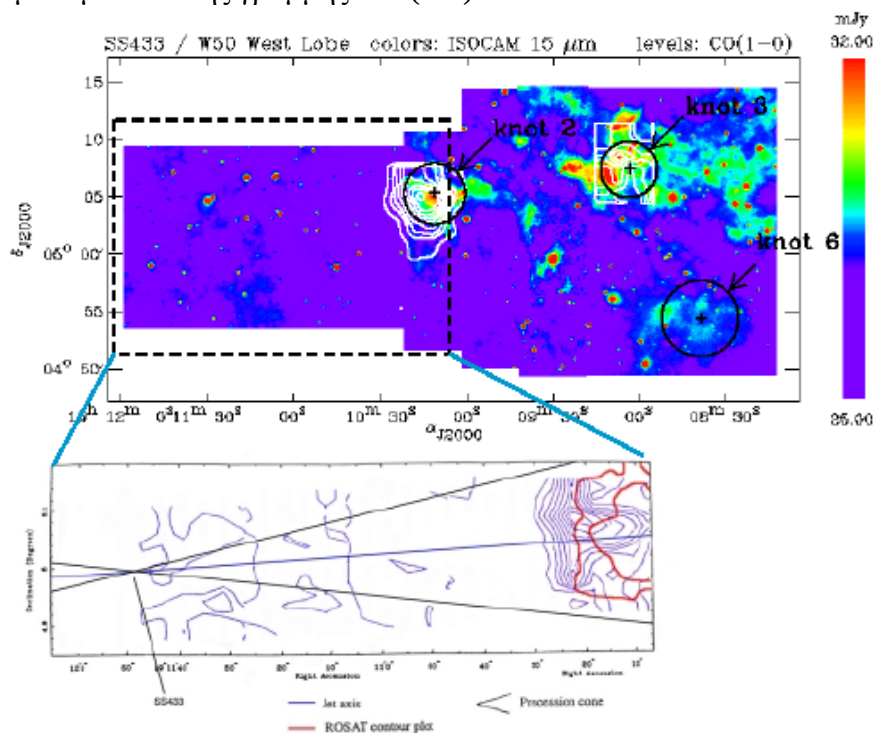
Το νεφέλωμα W50 είχε ήδη παρατηρηθεί στο υπέρυθρο με τον δορυφόρο *IRAS*, πριν το *ISO*. Ο Band (1987) ανακάλυψε μερικές περιοχές που παρουσίαζαν συμπυκνώσεις (IR knots), εμφανιζόμενες στα 12, 25, 60, και 100 μm . Τρεις από αυτές υπάρχουν στο πεδίο παρατήρησης του *ISOCAM* όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο ακόλουθο Σχήμα 4.6, όπου οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν το μέγεθος των εν λόγω περιοχών (knots) όπως παρατηρήθηκαν από τον *IRAS*, με τα ονόματά τους να είναι αυτά που δόθηκαν από τον Band (1987). Η $6'' \times 6''$ ανά pixel χωρική ανάλυση που παρέχει το *ISOCAM*, επιτρέπει να αποκαλυφθεί η δομή τους για πρώτη φορά. Η εκπομπή στα 15 μm είναι διάχυτη, ενώ παρουσιάζονται λαμπρές κηλίδες (hot spots), που άλλοτε είναι καλά καθορισμένες και άλλοτε όχι. Καθώς η προβολή της περιοχής “knot 6” στο επίπεδο του ουρανού βρίσκεται στο εξωτερικό όριο του ραδιοφωνικού νεφελώματος W50, πιθανότατα δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ τους, γι’ αυτό και θα επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στις περιοχές “knot 2” και “knot 3”. Η “knot 2” αποτελεί την κοντινότερη περιοχή από το **SS433**, ενώ το “knot 3” την πιο μακρινή.



Σχήμα 4.6: Το πεδίο παρατήρησης της κάμερας *ISOCAM* του δορυφόρου *ISO*.

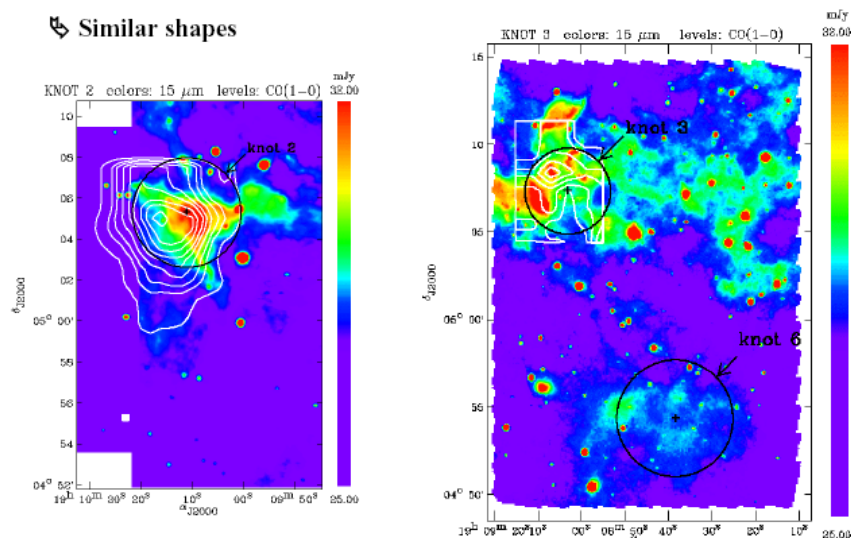
Το νεφέλωμα W50, και πιο συγκεκριμένα η περιοχή του δυτικού λοβού αυτού, έχει παρατηρηθεί με τα ραδιοτηλεσκόπια *SEST* και *MOPRA* στη χιλιοστομετρική μπάντα των μικρών κύματος. Δεν παρατηρείται εκπομπή από τη γραμμή μετάπτωσης του μονοξειδίου του άνθρακα CO(1-0) στα 2.6mm (115 GHz), ανάμεσα στο **SS433** και την περιοχή “knot2”. Πάντως δύο περιοχές εκπομπής του CO(1-0) συμπίπτουν με τις δύο περιοχές που παρατηρούνται με το *IRAS* (IRAS knots), όπως είναι φανερό στο Σχήμα 4.7 που ακολουθεί. Έτσι αυτά τα μοριακά νέφη είναι ευθυγραμμισμένα με τον άξονα μετάπτωσης του κώνου σε προβολή πάνω στο επίπεδο του ουρανού. Λόγω φαινομένου Doppler η ταχύτητά τους είναι 50 km/sec, που αντιστοιχεί στην ίδια απόσταση των ~ 3.5 kpc από τη Γη, όπως ισχύει και για το W50. Τα όρια των νεφών αυτών δεν είναι γνωστά εξαιτίας του περιορισμένου πεδίου παρατήρησης, γι’ αυτό και δεν μπορεί να ειπωθεί ή καλύτερα να αποδειχθεί εάν τα δύο αυτά νέφη συνδέονται με κάποιο τρόπο ή όχι. Για να δοθεί μια απάντηση απαιτούνται νέες καμπάνιες παρατήρησης και λήψη νέων δεδομένων.

Η εικόνα 4.7 δείχνει λεπτομερώς αυτές τις περιοχές εκπομπής CO. Τα σχήματά τους ομοιάζουν μ' αυτά που μας δίνει η παρατήρηση με το *ISOCAM*, ενώ οι εκπομπές στο υπέρυθρο και στα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος συμπίπτουν εντελώς τυχαία, αλλά θα πρέπει να αναζητηθεί μια φυσική συσχέτιση. Έτσι, οι παρατηρούμενες στα $15\ \mu\text{m}$ εκπομπές οφείλονται και προέρχονται από περιοχές που κείτονται εντός του νεφελώματος W50 και συμπεριλαμβάνουν μοριακά νέφη. Η περιοχή “knot 2” έχει επίσης παρατηρηθεί στη φασματική γραμμή CO(2-1), με το σχήμα της να είναι παρόμοιο με αυτό της γραμμής CO(1-0).



Knot 2 & knot 3: ISOCAM / CO

Similar shapes

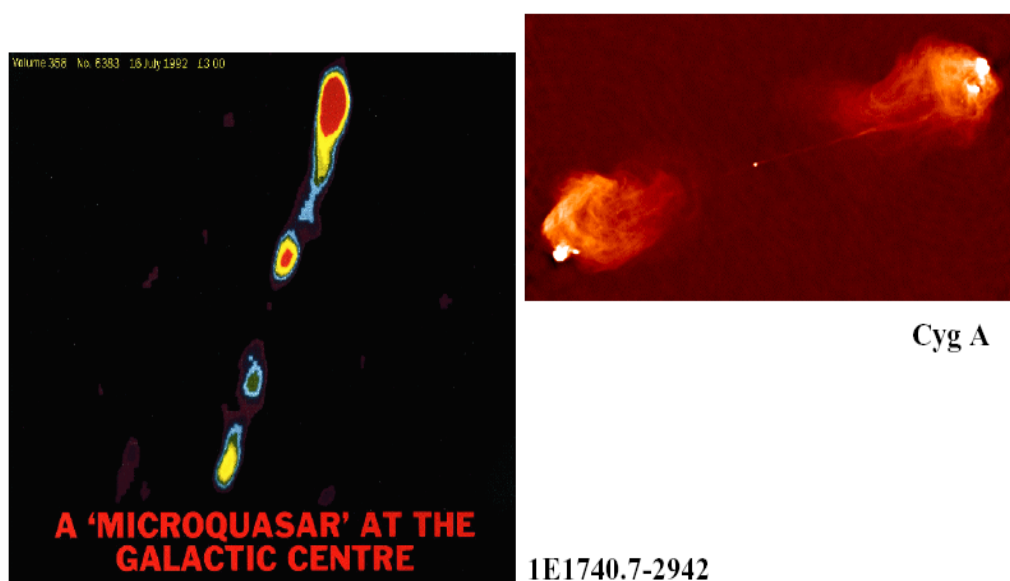


Σχήμα 4.7: Ισόφωτες εκπομπής CO (1-0) λαμβανόμενες με τα ραδιοτηλεσκόπια MOPRA κάτω και “knot 3”) και SEST (“knot 2”) αντίστοιχα, συγκρινόμενες με την εικόνα του *ISOCAM* στα $15\ \mu\text{m}$ για τον δυτικό λοβό του νεφελώματος W50.

Η ακριβής φύση της εκπομπής IR αποτελεί πεδίο έρευνας αιχμής. Θα μπορούσε να είναι απλά θερμική εκπομπή προερχόμενη από περιοχές νεαρών αστεριών τα οποία βρίσκονται ακόμα εντοπισμένα μέσα στα σύννεφα σκόνης που τα γέννησαν. Πολύ πιο ενδιαφέρουσα είναι η θεώρηση που θέλει να πρόκειται για θερμική εκπομπή προερχόμενη από τη θέρμανση της σκόνης από την αλληλεπίδραση των πιδάκων με μοριακά νέφη – τα υψηλής ενέργειας σωματίδια των πιδάκων χτυπούν κόκκους ύλης CO καθώς και σκόνης - . Εναλλακτική σκέψη αποδίδει την υπέρυθη εκπομπή σε ακτινοβολία σύγχροτρον, που προέρχεται από τα πολύ ενεργητικά σωματίδια των πιδάκων, τα οποία ξανα-επιταχύνονται από κρουστικά κύματα (shocks) στο πυκνότερο μέσο του δυτικού λοβού. Τα σωματίδια αυτά θα χάσουν την ενέργεια που απέκτησαν εκπέμποντας αρχικά ακτινοβολία σύγχροτρον στις ακτίνες X (synchrotron radiation in X-ray), και τελικά στο IR καθώς ταξιδεύουν απομακρυνόμενα από το αντικείμενο **SS433**.

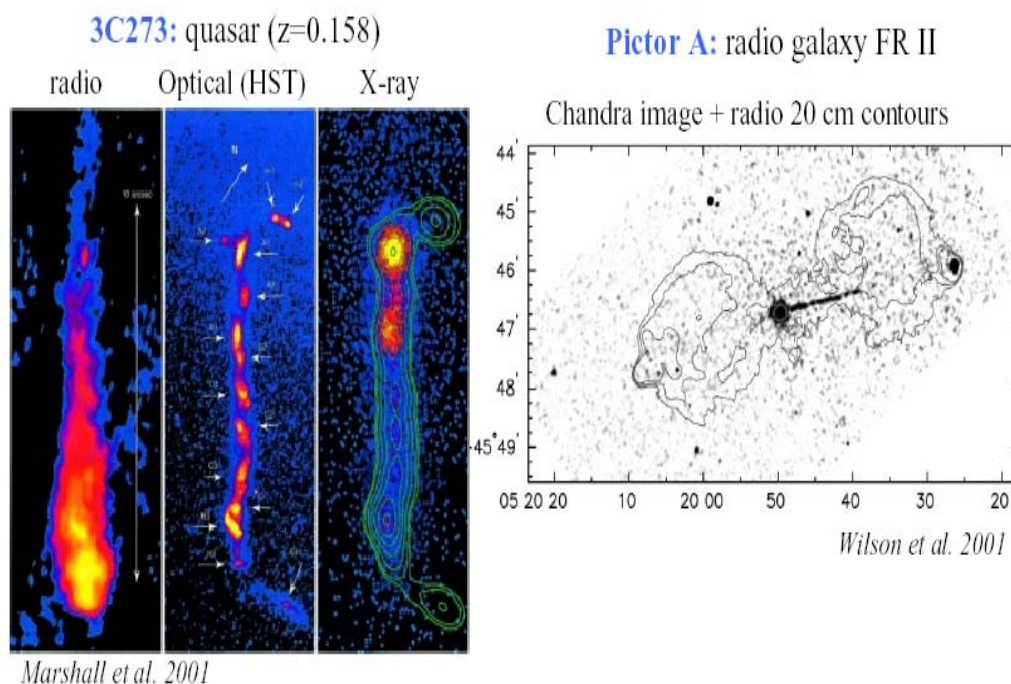
4.3 Αναλογία με εξωγαλαξιακά αντικείμενα και θέματα

Η υπόθεση και η μελέτη του αντικειμένου **SS433** καθώς και του νεφελώματος W50, προκύπτει ενδιαφέρουσα εάν μας απασχολεί η αναλογία ανάμεσα στα quasars και τα microquasars (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Το microquasar 1E1740.7-2942 και ο ραδιογαλαξίας Cyg A.

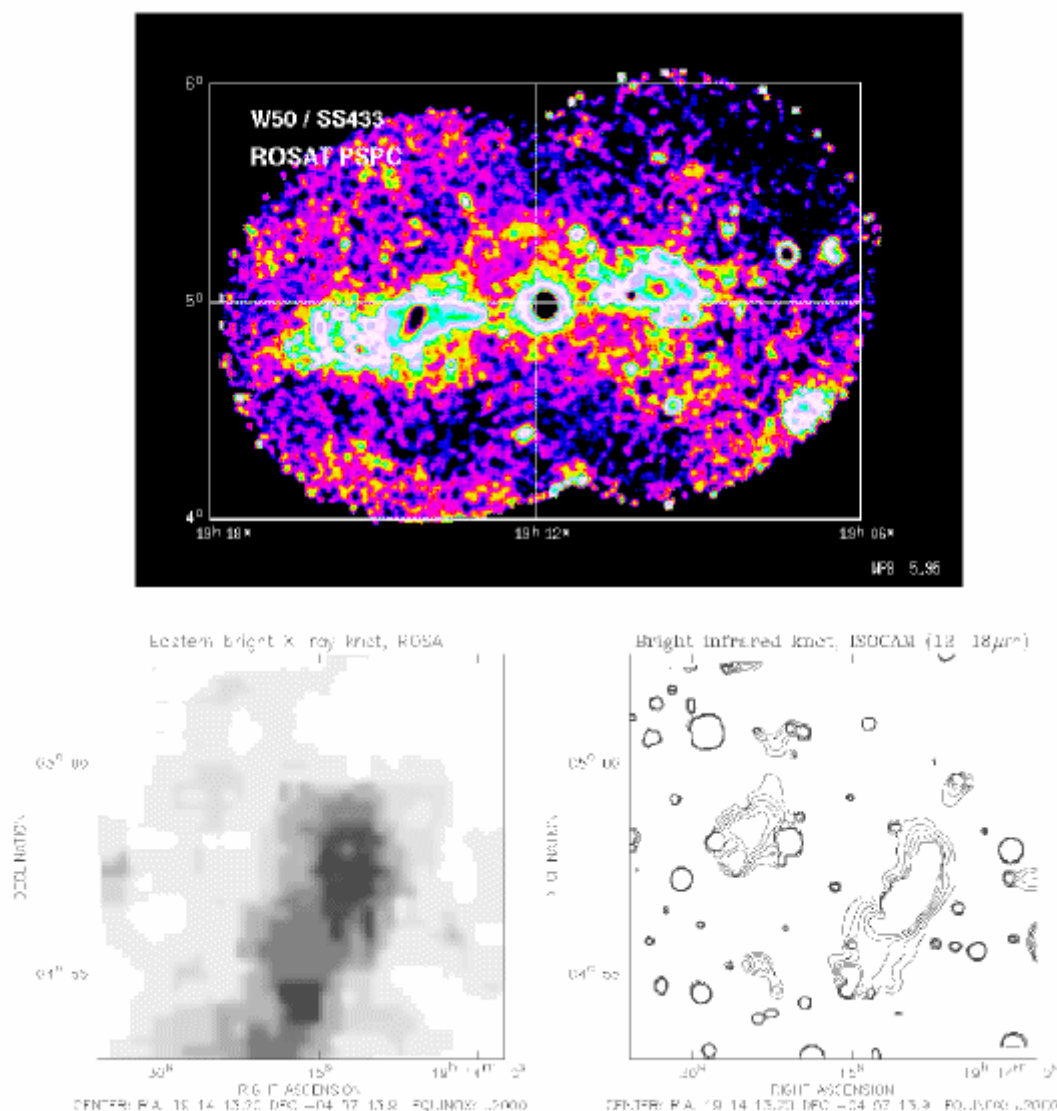
Τέλος στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται δύο εξωγαλαξιακές ραδιοπηγές οι οποίες προφανώς παρουσιάζουν εμφανείς ομοιότητες με microquasars. Πρόκειται για το quasar 3C273 (Marshall et al. 2001) και τον ραδιογαλαξία FR II Pictor A (Wilson et al. 2001). Μπορούν να αναζητηθούν συσχετίσεις ξεκινώντας από την παρατήρηση της ομοιότητας των δομών των πιδάκων και στις δύο περιπτώσεις και το γεγονός που θέλει την εκπομπή των ακτίνων X και τη ραδιοφωνική εκπομπή να μη συμπίπτουν χωρικά.



Σχήμα 4.9: Το quasar 3C273 και ο ραδιογαλαξίας Pictor A.

4.4 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους παρατηρήσεις που ως κύριο στόχο είχαν να αναδείξουν την αλληλεπίδραση των πιδάκων του αντικειμένου **SS433** με το νεφέλωμα του W50, με το κύριο ενδιαφέρον να επικεντρώνεται στον δυτικό λοβό. Διαπιστώθηκε ότι οι ραδιοφωνικοί λοβοί βρίσκονται μέσα στον κώνο μετάπτωσης που σχηματίζουν οι σχετικιστικοί πίδακες, η εκτεταμένη εκπομπή στο IR συμπίπτει με την ύπαρξη μοριακών νεφών, ενώ υπάρχει ενδεχόμενη συσχέτιση με την εκπομπή στις ακτίνες X. Η εκπομπή στο μέσο-υπέρυθρο (mid-IR) μπορεί να είναι τόσο θερμικής όσο μη θερμικής φύσεως, ενδεχόμενα που μας απασχόλησαν και συζητήθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο (βλέπε και Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10 : Η γενικευμένη περιοχή W50 / SS433 από παρατηρήσεις του ROSAT

Η προοπτική για να δοθεί μια σαφής απάντηση στην προηγούμενη ερώτηση καθώς και σ' άλλες σχετικές, προϋποθέτει τη διεξαγωγή νέων παρατηρήσεων : με τα δορυφορικά τηλεσκόπια *XMM-Newton* και *Chandra* για να καθοριστεί η ακριβής φύση της εκπομπής στις ακτίνες X (θερμική ή όχι ή και οι δύο μαζί), στο κοντινό υπέρυθρο για να βρεθούν πιθανές περιοχές νέων αστεριών, στα χιλιοστομετρικά για να ολοκληρωθεί η χαρτογράφηση του νεφελώματος CO και να βρεθούν τα ίχνη κρουστικών κυμάτων, και τέλος με το δορυφορικό τηλεσκόπιο *INTEGRAL* για να αναζητηθεί μια εκπομπή στις μαλακές ακτίνες γ, η οποία θα αποδείκνυε ότι οι περιοχές knots αποτελούν τοποθεσίες κατάλληλες για την επιτάχυνση σωματιδίων.

Τέλος όλα τα αποτελέσματα που συνεχώς θα προκύπτουν μέσω της ανάλυσης ακόμα περισσότερων δεδομένων θα πρέπει να θεωρηθούν και να ειπωθούν μέσα από το πρίσμα της έρευνας για την ανάδειξη της αναλογίας ανάμεσα στα quasar και τα microquasar, και συνεπώς την πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη λειτουργία των πρώτων που βρίσκονται σε εξαιρετικά μακρινές αποστάσεις για να μπορούν να λάβουν χώρα ικανοποιητικής ακρίβειας παρατηρήσεις.

Βιβλιογραφία

- Abell, G. O. and Margon, B., 1979, “A Kinematic Model for SS433”, Abell, Nature, **279**, 701.
- Anderson, S. F. et al., 1983, “Precession Instability in SS433”, Astrophysical Journal, **273**, 697.
- Clark, D. H. and Murdin, P. 1978, “An Unusual Emission-line Star/X-ray source/Radio Star, Possibly Associated with an SNR, Clark”, Nature, **276**, 44.
- Colbert, E. J. M.; Ptak, A. F. (2002), “A Catalog of Candidate Intermediate-Luminosity X-Ray Objects”, ApJS, **143**, 25.
- Eikenberry, S. S. et al., 2001, “Twenty Years of Timing SS433”, Astrophysical Journal, **561**, 1027.
- Fabian, A. C. and Rees, M. J., 1979, “SS433: A Double Jet in Action?”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **187**, 13p.
- Fuchs, Y., 2002, “Multi wavelenght observation of SS433 jet interaction with the interstellar medium”, astro-ph/0207429.
- Hjellming, R. M. and Johnston, K. J., 1981, “An Analysis of the Proper Motions of SS433 Radio Jets”, Astrophysical Journal (Letters), **246**, L141.
- Katz, J. I. et al, 1982, “Nodding Motions of Accretion Rings and Disks: A Short-Term Period in SS433”, Astrophysical Journal, **260**, 780.
- Margon, B. et al., 1979, “The Bizarre Spectrum of SS 433”, Astrophysical Journal (Letters), **230**, L41.
- Margon, B. et al., 1979, “Enormous Periodic Doppler Shifts in SS433”, Astrophysical Journal (Letters), **233**, L63.
- Margon, B., 1980, “The Bizarre Spectrum of SS433”, Scientific American (October), **243**, 54.
- Margon, B. et al., 1980, “The 164 and 13 Day Periods of SS433: Confirmation of the Kinematic Model”, Astrophysical Journal, **241**, 306.
- Milgrom, M., 1979, “On the Interpretation of the Large Variations in the Line Positions in SS433”, Astronomy & Astrophysics, **76**, L3.
- Margon, B. 1982, “Relativistic Jets in SS433”, Science **215**, 247.
- Margon, B., 1984, “Observations of SS433”, Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, **22**, 507.

Margon, B. and Anderson, S. F., 1989, “Ten Years of SS433 Kinematics”, *Astrophysical Journal*, **347**, 448.

Marshall, H. L. et al., 2002, “The High-Resolution X-Ray Spectrum of SS433 Using the Chandra HETGS”, *Astrophysical Journal*, **564**, 941.

Mirabel, I.F., Rodriguez, L.F., 1999, “Sources of relativistic jets in the galaxy”, *Annual Reviews of Astronomy and astrophysics*, **37**, 409.

Paragi, Z., Vermeulen, R.C, Fejes, I., Schilizzi, R.T., Spencer, R.E. and Stirling, A.M., 1999, “The inner radio jet region and the complex environment of SS433”, *New Astronomy Reviews*, **43**, 553.

Stephenson, C. B. and Sanduleak, N., 1977, “New H-alpha Emission Stars in the Milky Way”, *Astrophysical Journal (Supplement)*, **33**, 459.

Vermeulen, R. C. et al., 1993, “Monitoring of Very Rapid Changes in the Optical Spectrum of SS433 in May/June 1987”, *Astronomy & Astrophysics*, **270**, 204.