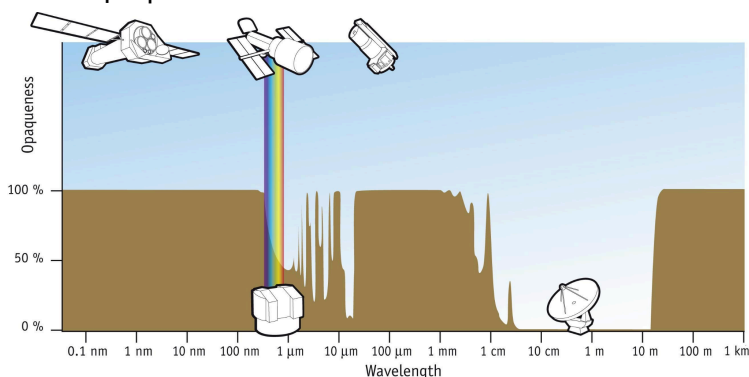


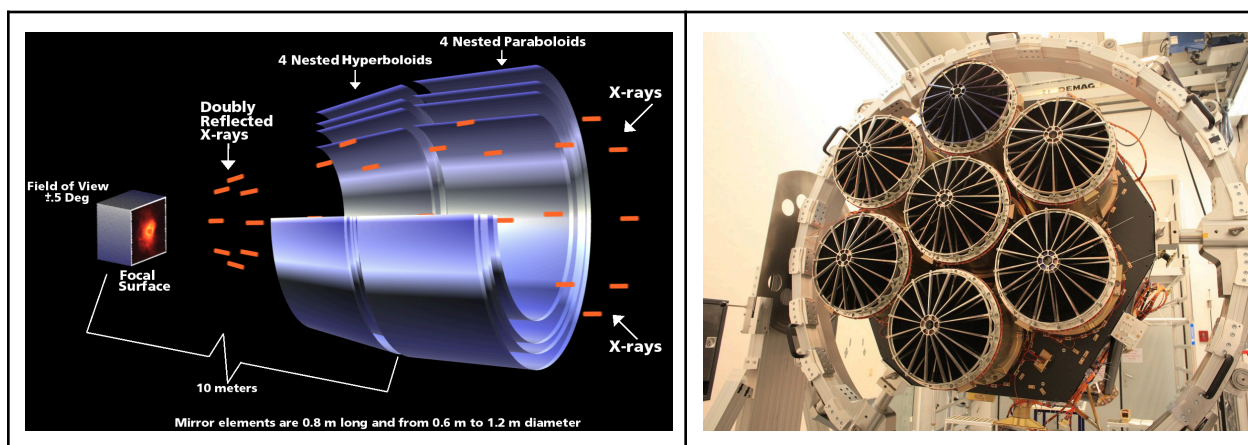
Εύρεση μαγνητικού πεδίου αστέρα νετρονίων σε Υπερφωτεινό (Ultraluminous) X-ray Pulsar

1. Εισαγωγή στις Ακτίνες X

Οι αποστολές παρατηρητηρίων ακτίνων X παράγουν πολλών ειδών δεδομένα. Εδώ, θα συζητήσουμε τους κύριους τύπους δεδομένων ακτίνων X. Το είδος της πληροφορίας που καταγράφεται από τους ανιχνευτές στα τηλεσκόπια ακτίνων X σχετίζεται με τον τύπο του ανιχνευτή και με το γεγονός ότι οι ακτίνες X είναι πολύ υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ανίχνευση των ακτίνων X βασίζεται στη σωματιδιακή τους φύση και έτσι είναι εύκολο να μετρηθεί η ενέργεια κάθε μεμονωμένου φωτονίου. Μπορεί, επίσης, να καταγραφεί η χρονική στιγμή που ένα φωτόνιο “χτυπάει” τον ανιχνευτή, όπως και η θέση του αντικειμένου από οποίο προήλθε.



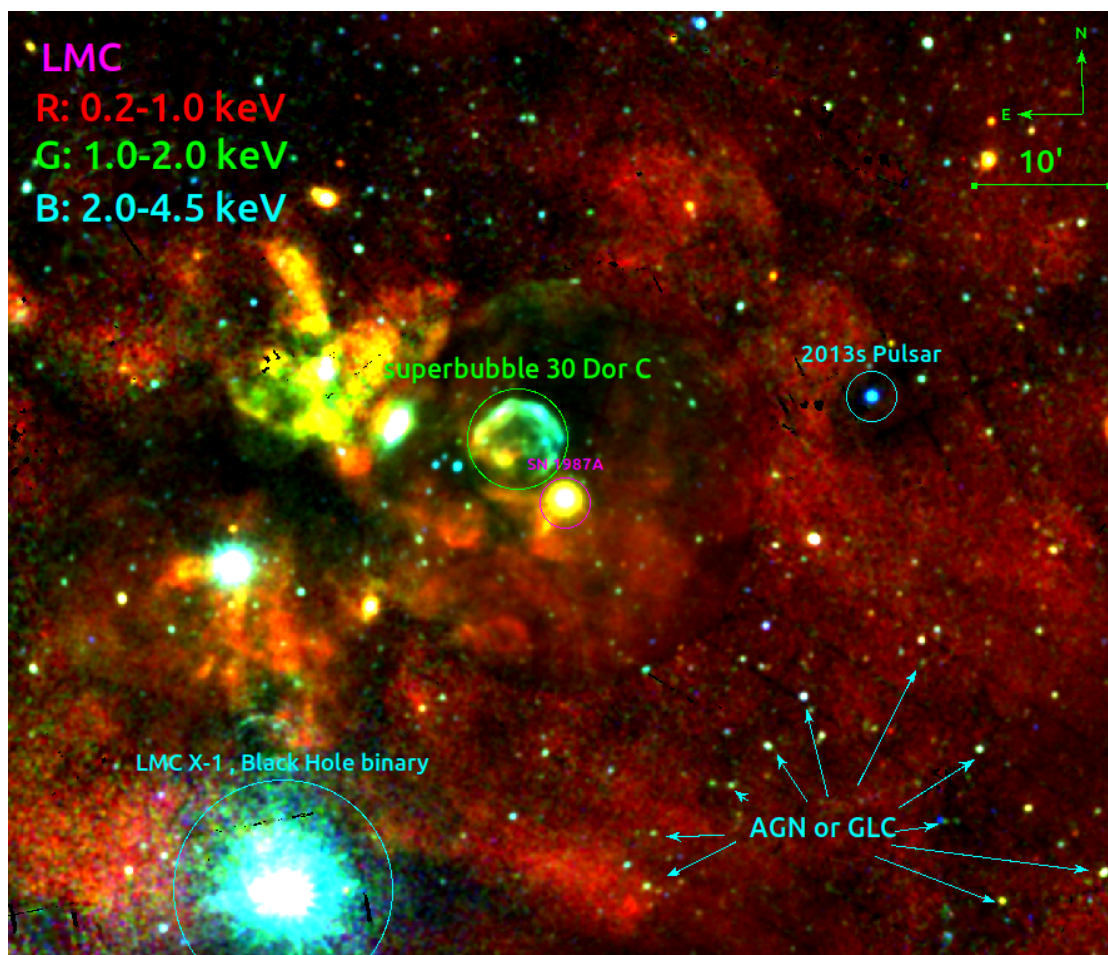
Σχήμα 1: Οι ακτίνες X απορροφώνται από την ατμόσφαιρα και για αυτό τις παρατηρούμε μόνο από το διάστημα.



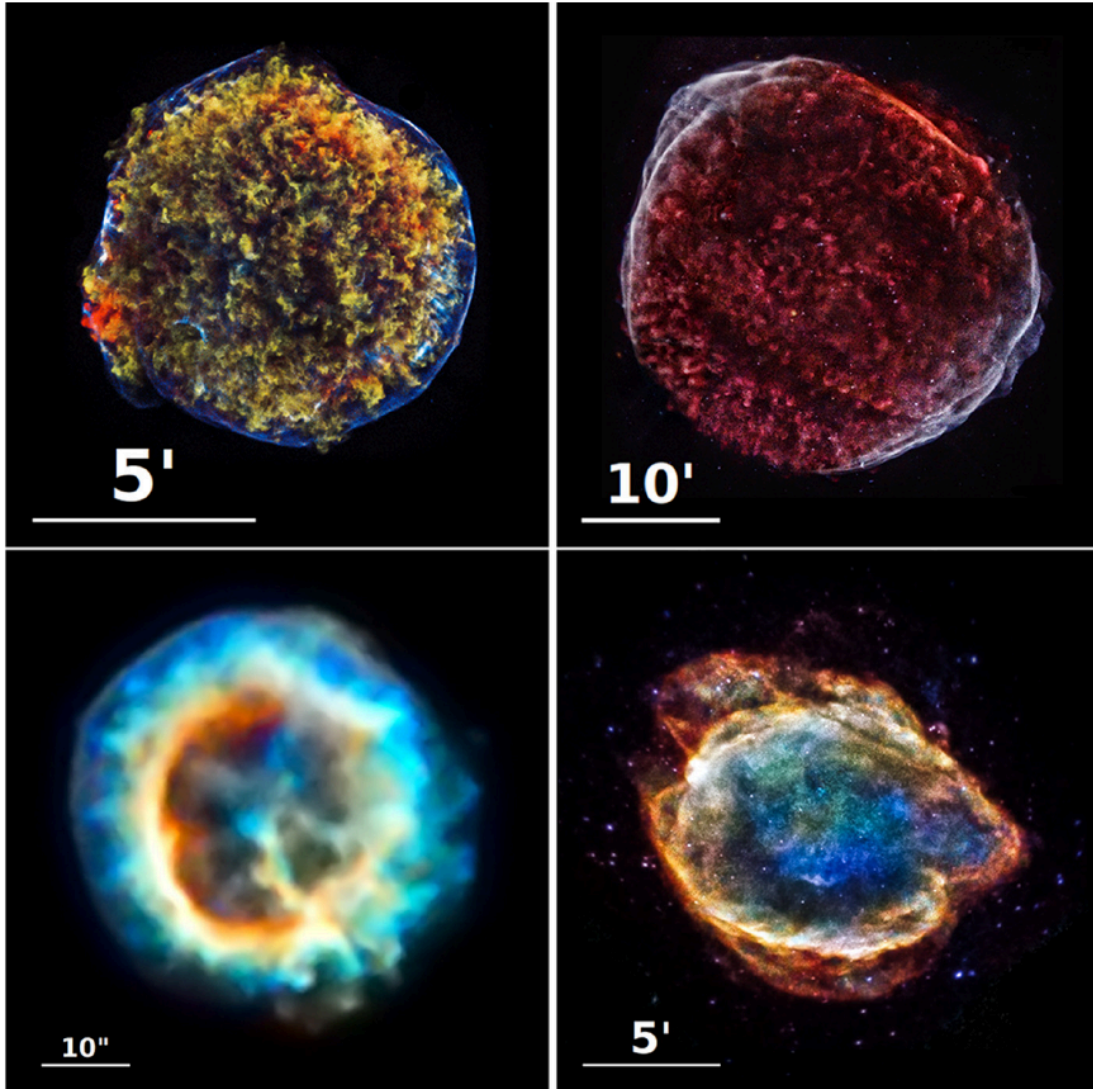
Σχήμα 2: Για να επιτευχθεί η εστίαση των ακτίνων X απαιτούνται τηλεσκόπια αρκετά διαφορετικά από εκείνα που χρησιμοποιούνται στα μεγαλύτερα μήκη κύματος: αποτελούνται από συνδυασμό παραβολικών-υπερβολικών ανακλαστικών επιφανειών στις οποίες οι ακτίνες X προσπίπτουν σχεδόν “ξυστά”. Για να συγκεντρωθούν αρκετά φωτόνια, χρησιμοποιούνται πολλές ομοαξονικές σκεδαστικές επιφάνειες, η μία μέσα στην άλλη (εικόνα στα αριστερά). Δεξιά βλέπουμε τα 7 τηλεσκόπια του eROSITA. Μία μονοενεργειακή δέσμη λειζερ σκεδάζεται και “απλώνεται” δημιουργώντας μια Γκαουσιανή κατανομή πάνω στη CCD κάμερα. Το εύρος της κατανομής εξαρτάται από την ποιότητα της ανακλαστικής επιφάνειας, και μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα με το τηλεσκόπιο (π.χ. 0.2”-60”). [Πίστωση εικόνας: MPE, SAO.]

Εικόνες

Οι εικόνες είναι το πιο εύκολα προσβάσιμο αποτέλεσμα από αποστολές ακτίνων Χ. Το πρωτογενές προϊόν (output) ενός ανιχνευτή ακτίνων Χ είναι το αρχείο "γεγονότων", το οποίο δείχνει πόσα φωτόνια έχουν "χτυπήσει" κάθε ρίχει του ανιχνευτή. Ωστόσο, οι επιπλέον πληροφορίες, για παράδειγμα οι ενέργειες των φωτονίων, δίνουν πληρέστερη εικόνα για το τι συμβαίνει στο υπό μελέτη αντικείμενο. Πολλές από τις μελέτες ακτίνων Χ που παρουσιάζονται εδώ βασίζονται σε εικόνες, αν και οι φασματικές πληροφορίες (δείτε παρακάτω) προσθέτουν αυτή την επιπλέον διάσταση στη μελέτη.



Σχήμα 3: X-ray Mosaic (υπέρθυση πολλαπλών εικόνων) περιοχής του Μεγάλου νέφους του Μαγγελάνου. Μπορείτε να διακρίνετε διάχυτο θερμό αέριο (κόκκινο), σημειακές πηγές (πάλσαρ, διπλά συστήματα, ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες), και εκτεταμένες πηγές, όπως υπολείμματα υπερκαινοφανών. Παρατηρείστε ότι πιο λαμπρές πηγές μοιάζουν μεγαλύτερες (γιατί συμβαίνει αυτό;). Προσοχή τα χρώματα είναι "ψευτοχρώματα" και αντιστοιχούν σε ροή ακτινοβολίας σε συγκεκριμένη ενεργειακή μπάντα [Πίστωση εικόνας: G. Vasilopoulos]



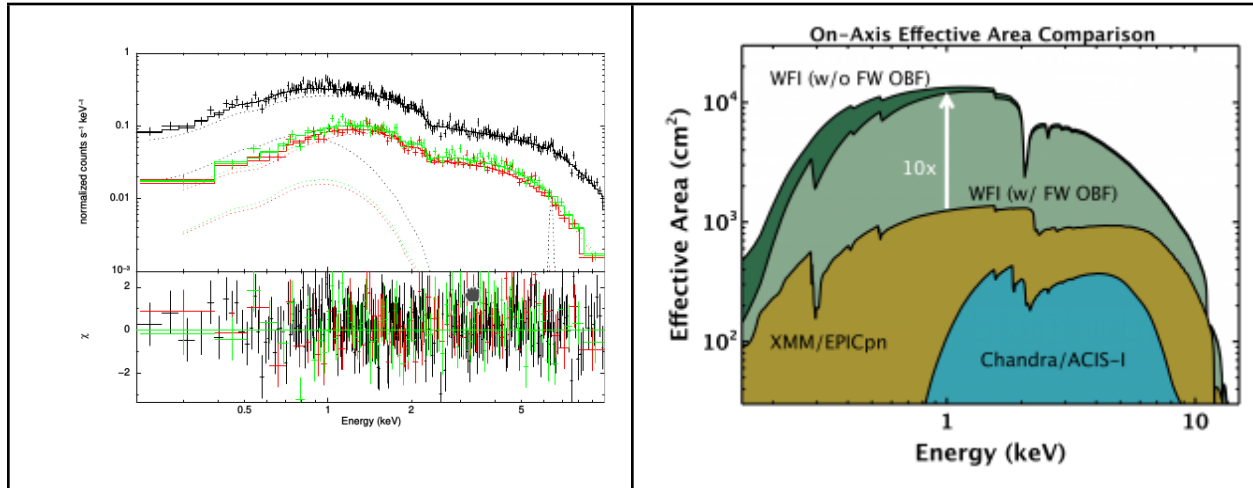
Σχήμα 4: Εικόνες ακτίνων X υπολειμμάτων υπερκαινοφανών (supernova remnants - SNR) που ελήφθησαν με το παρατηρητήριο ακτίνων X Chandra. Δεξιόστροφα και αρχίζοντας από την επάνω αριστερή γωνία παρουσιάζονται τα SNR του Tycho, SN 1006, SNR G299.2-2.9 και 1E 0102-72.3. Χαμηλές-, μεσαίες-, και υψηλότερης ενέργειας ακτίνες X παρουσιάζονται με κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα αντίστοιχα. Η εκπομπή σύγχροτρον είναι εμφανής ως λεπτές μπλε ζώνες στα Tycho's SNR και SN 1006. Η φυσική κλίμακα ποικίλλει μεταξύ των εικόνων, όπως υποδεικνύεται από τα λευκά ευθύγραμμα τμήματα. [Πίστωση εικόνας: Παρατηρητήριο ακτίνων X Chandra <https://www.chandra.si.edu/>.]

Φάσματα

Τα φάσματα δημιουργούνται όταν το φως διαχωρίζεται σε διαφορετικά μήκη κύματος, ή συχνότητες, ή ενέργειες - το ουράνιο τόξο είναι ένα καθημερινό παράδειγμα φάσματος. Το φάσμα μεταφέρει σημαντικές πληροφορίες για τις συνθήκες που επικρατούν στη πηγή. Για παράδειγμα, με φάσματα ακτίνων X μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία, τη πυκνότητα, τη περιεκτικότητα στοιχείων και τις συνθήκες ισορροπίας σε πλάσματα υψηλής θερμοκρασίας (σε αστρικές κορώνες, υπολείμματα υπερκαινοφανών, και σμήνη γαλαξιών). Σε πηγές ακτίνων X που τροφοδοτούνται από προσαύξηση ύλης γύρω από συμπαγή αντικείμενα (λευκούς νάνους, αστέρες νετρονίων, μαύρες τρύπες) το ισχυρό συνεχές φωτίζει το περιβάλλον

υλικό και παράγει γραμμές εκπομπής και απορρόφησης που μας πληροφορούν για τις συνθήκες που επικρατούν εκεί. Σε “λεπτά” θερμά αστροφυσικά πλάσματα, τα φάσματα ακτίνων X περιλαμβάνουν γραμμές εκπομπής στις μαλακές και μεσαίες ακτίνες X που προέρχονται από μεταβάσεις από τη στιβάδα K σχεδόν των άφθονων στοιχείων (C μέχρι Zn) και από τη στιβάδα L όλων των στοιχείων.

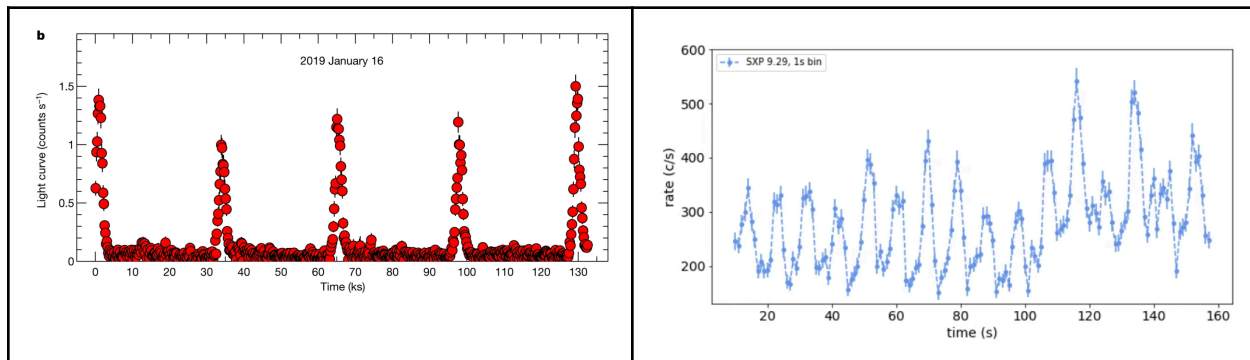
Από το συνδυασμό εικόνων και φασμάτων μπορούμε να δημιουργήσουμε λεπτομερή μοντέλα για το ποιες είναι οι συνθήκες που επικρατούν π.χ. μέσα σε ένα σμήνος γαλαξιών ή κοντά σε μια μαύρη τρύπα, ταιριάζοντας αυτό που βλέπουμε με το μοντέλο.



Σχήμα 5: Αριστερά βλέπουμε 3 φάσματα στις ακτίνες X, μοντελοποιημένα με το ίδιο μοντέλο που αποτελείται από δύο συναρτήσεις, ένα μέλαν σώμα (<2 keV) και ένα νόμο δύναμης. Το φάσμα είναι στην ουσία ένα ιστόγραμμα της ενέργειας των φωτονίων. Ο νόμος δύναμης μοιάζει “παράξενος” και δεν είναι ευθεία γραμμή. Αυτό συμβαίνει γιατί βλέπουμε αυτό που παρατηρεί η κάμερα και όχι το φάσμα καθεαυτό. Η κάμερα έχει κβαντική απόδοση που εξαρτάται από την ενέργεια, ενώ οι καθρέφτες του τηλεσκοπίου απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας. Δεξιά βλέπουμε τι θα παρατηρούσαν 3 διαφορετικά τηλεσκόπια για επίπεδο φάσμα: XMM-Newton, Chandra, και Athena (το τελευταίο αναμένεται να πετάξει το 2035). Είναι προφανής η μειωμένη κβαντική απόδοση στις μεγάλες ενέργειες αλλά και γραμμές απορρόφησης λόγω του ίδιου του ανιχνευτή στα 2 keV και ~0.3 keV.

Χρονοσειρές

Καθώς οι ανιχνευτές μπορούν να καταγράψουν τη χρονική στιγμή που ανιχνεύεται το κάθε φωτόνιο, είναι δυνατό να εξετάσουμε αν η εκπομπή μιας πηγής μεταβάλλεται με το χρόνο. Για να το κάνουμε αυτό, κατασκευάζουμε μία χρονοσειρά, που είναι στην ουσία ένα ιστόγραμμα των φωτονίων που ανιχνεύονται συναρτήσει του χρόνου. Χρονική μεταβλητότητα παρατηρείται, για παράδειγμα, στην περίπτωση διπλών αστρικών συστημάτων ακτίνων X, αλλά και Ενεργών Γαλαξιακών Πυρήνων (Active Galactic Nuclei, AGN). Η χρονική μεταβλητότητα μπορεί να είναι είναι περιοδική και να συνδέεται π.χ. με την τροχιακή περίοδο της πηγής ή με την ιδιοπεριστροφή ενός αστέρα νετρονίων (AN). Ωστόσο, σε ορισμένες πηγές ακτίνων X δεν υπάρχει σαφές (ή μπορεί να μην υπάρχει καθόλου) περιοδικό μοτίβο, δηλ. η ροή ακτινοβολίας μοιάζει να μεταβάλλεται με σχεδόν τυχαίο τρόπο.



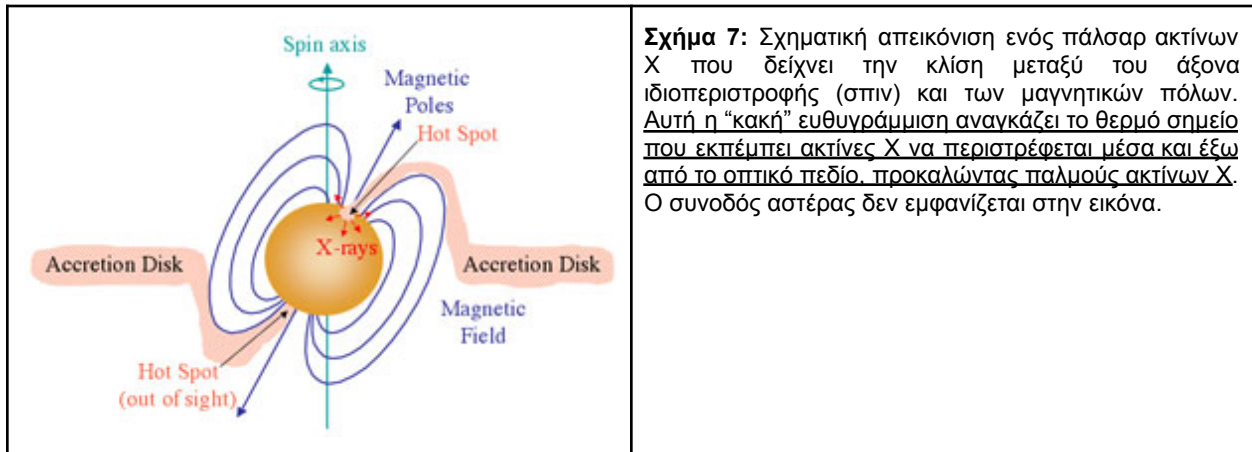
Σχήμα 6: Αριστερά βλέπουμε μια χρονοσειρά από ένα Ενεργό Γαλαξιακό Πυρήνα που εμφανίζει ημι-περιοδικές (quasi-periodic) εκλάμψεις (δεν ξέρουμε γιατί!). Δεξιά βλέπουμε ένα περιοδικό σήμα από έναν αστέρα νετρονίων σε ένα διπλό σύστημα. Η περίοδος των παλμών είναι η περίοδος περιστροφής του αστέρα.

2. X-ray Pulsars

Τα διπλά συστήματα στα οποία το ένα μέλος είναι συμπαγές αντικείμενο στο οποίο συμβαίνει προσαύξηση ύλης που προέρχεται από τον συνοδό αστέρι, αποτελούν πηγές ακτίνων Χ (X-ray binaries).

Εάν το συμπαγές αντικείμενο σε ένα διπλό σύστημα ακτίνων Χ είναι ένα αστέρι νετρονίων (AN) με ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το αέριο που συσσωρεύεται από το συνοδό αστέρι θα διοχετευτεί στους μαγνητικούς πόλους του αστέρα νετρονίων. Αυτό σχηματίζει θερμά σημεία στην επιφάνεια του αστέρα νετρονίων, που εκπέμπουν στις ακτίνες Χ. Αυτά κινούνται εντός και εκτός του κώνου παρατήρησης καθώς το αστέρι περιστρέφεται, προκαλώντας κανονικούς παλμούς ακτίνων Χ. Το αντικείμενο αυτό είναι γνωστό ως πάλσαρ ακτίνων Χ (X-ray pulsar).

Η περίοδος παλμών ενός πάλσαρ ακτίνων Χ μπορεί να είναι τόσο σύντομη όσο 1,6 χιλιοστά του δευτερολέπτου ή μπορεί να είναι μεγαλύτερη από μερικές ώρες. Τα πάλσαρ ακτίνων Χ πολύ μεγάλης περιόδου έχουν συνήθως ισχυρά μαγνητικά πεδία που είναι σε θέση να παγιδεύσουν τον άνεμο από το συνοδό αστέρι. Αυτό αναγκάζει το πάλσαρ να μειώνει τον ρυθμό περιστροφής του (spin-down) μέσω ροπών που ασκούνται στη μαγνητόσφαιρά του.



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση ενός πάλσαρ ακτίνων Χ που δείχνει την κλίση μεταξύ του άξονα ιδιοπεριστροφής (σπιν) και των μαγνητικών πόλων. Αυτή η “κακή” ευθυγράμμιση αναγκάζει το θερμό σημείο που εκπέμπει ακτίνες Χ να περιστρέφεται μέσα και έξω από το οπτικό πεδίο, προκαλώντας παλμούς ακτίνων Χ. Ο συνοδός αστέρας δεν εμφανίζεται στην εικόνα.

Επιπλέον, και σε αντίθεση με τα ραδιοπάλσαρ που περιστρέφονται όλο και πιο αργά λόγω απωλειών ενέργειας με τη μορφή σχετικιστικών σωματιδίων (pulsar wind) και ακτινοβολίας μαγνητικού διπόλου, ορισμένα πάλσαρ ακτίνων Χ έχει βρεθεί ότι αυξάνουν τον ρυθμό περιστροφής τους (περιστρέφονται πιο γρήγορα, spin-up). Κάποιοι πάλσαρ έχουν σχετικά σταθερούς ρυθμούς spin-up, ενώ άλλοι μπορεί να παρουσιάζουν ασταθή συμπεριφορά με εναλλασσόμενες περιόδους spin-up και spin-down. Η διαφορά στη συμπεριφορά περιστροφής μεταξύ των ραδιοπάλσαρ και των πάλσαρ ακτίνων Χ οφείλεται στην αλληλεπίδραση πάλσαρ ακτίνων Χ με το συνοδό αστέρι. Τα ραδιοπάλσαρ είναι γενικά απομονωμένα αντικείμενα ή, εάν βρίσκονται σε διπλό σύστημα, ο συνοδός τους είναι σχετικά αδρανής (π.χ. ένας λευκός νάνος) και δεν επηρεάζει το spin-down.

Διακυμάνσεις στον ρυθμό περιστροφής των πάλσαρ ακτίνων X προκύπτουν επειδή το πάλσαρ μπορεί να κερδίσει, να χάσει ή να διατηρήσει τη στροφορμή του ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο το συσσωρευμένο υλικό μεταφέρεται στο αστέρι νετρονίων. Μπορούν να έχουν συνεχή μεταφορά μάζας από υπερχειλίση του λοβού Roche, επεισόδια συσσώρευσης μάζας (πιθανώς λόγω μιας έκκεντρης τροχιάς που οδηγεί το αστέρι νετρονίων κοντά στο συνοδό του, κοντά στο περίαστρο) ή μπορούν να τροφοδοτούνται από αστρική συσσώρευση ανέμου. Για ένα απομονωμένο ραδιοπάλσαρ, ωστόσο, δεν υπάρχει τέτοιος μηχανισμός για την αύξηση ή τη σταθεροποίηση της στροφορμής, διότι μπορεί μόνο να χάσει στροφορμή μέσω ακτινοβολίας διπόλου.

Κεπλεριανός δίσκος

Τα σωματίδια μάζας που παρέχονται από το συνοδό αστέρι διαθέτουν στροφορμή και δεν ταξιθεύουν ακτινικά στο συμπαγές αντικείμενο. Αντίθετα, θα ανταλλάξουν ενέργεια μεταξύ τους και θα εγκατασταθούν σε έναν δίσκο προσαύξησης, όπου ακολουθούν ομοεπίπεδες κυκλικές τροχιές με την τοπική Κεπλεριανή ταχύτητα $V_K = (GM/r)^{1/2}$.

Μαγνητόσφαιρα και ακτίνα Alfvén

Σαν ένα πρώτο υπολογισμό, ας δούμε αν μπορούμε να εκτιμήσουμε τη χαρακτηριστική ακτίνα εντός της οποίας οι μαγνητικές τάσεις είναι κυρίαρχες, στη ροή στο δίσκο προσαύξησης. Η περιοχή εντός αυτής της ακτίνας ονομάζεται **μαγνητόσφαιρα**. Σαν πρώτο βήμα, θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε την ενεργειακή πυκνότητα. Η πυκνότητα της μαγνητικής ενέργειας είναι $u_B = B^2/2\mu_0$, όπου B η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητα της κινητικής ενέργειας της ύλης είναι $u_{kin} = \rho V^2/2$, όπου ρ είναι η πυκνότητα και V είναι το μέτρο της τυπικής ταχύτητας. Ας υποθέσουμε ότι το μαγνητικό πεδίο είναι διπολικό, έτσι ώστε $B(r) = B_s \left(\frac{R}{r}\right)^3$, όπου B_s η επιφανειακή ένταση του μαγνητικού πεδίου και R η ακτίνα του AN, και ότι η ύλη κινείται ακτινικά σε ελεύθερη πτώση (free fall - ff) προς τον AN, έτσι ώστε $V_{ff} = \sqrt{(2GM/r)}$. Από την εξίσωση συνέχειας μάζας μπορούμε να βρούμε τη σχέση μεταξύ πυκνότητας ρ και ρυθμού προσαύξησης μάζας \dot{m} (για σφαιρική πρόσπτωση μάζας):

$$\dot{m} = 4\pi r^2 \rho V_{ff}$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις σχέσεις στην εξίσωση $u_B = u_{kin} \Rightarrow B^2/2\mu_0 = \rho V^2/2$, και λύνοντας ως προς r , που είναι η ακτίνα Alfvén, R_A , βρίσκουμε ότι:

$$R_A = \left(\frac{8\pi^2 B_s^4 R^{12}}{\mu_0^2 GM \dot{m}^2} \right)^{1/7}$$

Κανονικοποιώντας τα φυσικά μεγέθη σε τυπικές τιμές, η ακτίνα Alfvén μπορεί να εκφραστεί ως:

$$R_A \sim 1800 \left(\frac{B_s}{10^{12} G} \right)^{4/7} \left(\frac{R_{NS}}{10 km} \right)^{12/7} \left(\frac{M_{NS}}{1.4 M_\odot} \right)^{-1/7} \left(\frac{\dot{m}}{10^{-8} M_\odot yr^{-1}} \right)^{-2/7} km \quad [1]$$

(βλ. Carroll & Ostlie, An Introduction to Modern Astrophysics, ch. 18)

Παρατηρούμε ότι η ακτίνα Alfvén είναι συνάρτηση του ρυθμού προσαύξησης μάζας. Ανάλογα με τη θεωρία για την περιγραφή του ορίου δίσκου-μαγνητόσφαιρας, το μέγεθος της μαγνητόσφαιρας R_m λαμβάνεται μέσω μιας ελαφριάς τροποποίησης της παραπάνω εξίσωσης, δίνοντας $R_m = \xi R_A$, με (αδιάστατο) συντελεστή $\xi \sim 0.1 - 1$. Για απλότητα θεωρούμε $\xi=1$, αν και γενικά αυτό το όριο ισχύει για σφαιρική πρόσπτωση μάζας, ενώ για λεπτό δίσκο συνήθως θεωρούμε $\xi=0.5$. Στο RM, η ύλη φεύγει από το δίσκο και δύναται να ακολουθήσει τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου στον AN.

Ωστόσο, για να συμβεί αυτό, το υλικό της μαγνητόσφαιρας πρέπει να έχει μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα από την ταχύτητα των μαγνητικών γραμμών. Διαφορετικά, αν η μαγνητόσφαιρα περιστρέφεται πιο γρήγορα, καθώς το υλικό προσπαθεί να μεταπηδήσει από το δίσκο στις μαγνητικές γραμμές δεν μπορεί να υπερνικήσει το το φράγμα δυναμικού και απωθείτε. Επομένως η αναγκαία συνθήκη για να έχουμε μαγνητική πρόσπτωση υλικού είναι η μαγνητοσφαιρική ακτίνα (και επομένως η εσωτερική άκρη του δίσκου) πρέπει να βρίσκεται εντός της ακτίνας συμπεριστροφής R_{co} , όπου η ταχύτητα Κέπλερ του δίσκου ισούται με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου $V_{mag} = 2\pi r/P$, όπου P η περίοδος περιστροφής (spin) του AN. Πρέπει δηλαδή $R_m < R_{co}$, όπου

$$R_{co} = P^{2/3} \left(\frac{GM_{NS}}{4\pi^2} \right)^{1/3} \sim 1700 \left(\frac{P}{1s} \right)^{2/3} \left(\frac{M_{NS}}{1.4 M_\odot} \right)^{1/3} km. \quad [2]$$

Προσαύξηση Μάζας

Η προσαύξηση μάζας σε ένα συμπαγές αντικείμενο μπορεί να είναι μια από τις αποτελεσματικότερες διαδικασίες παραγωγής ενέργειας. Μια δοκιμαστική μάζα m (με μηδενική στροφορμή) που πέφτει ακτινικά προς ένα αντικείμενο μάζας M από μια μεγάλη απόσταση r από αυτό, θα μετατρέψει το μισό της βαρυτικής δυναμικής του ενέργειας, $E = -GMm/r$, σε κινητική ενέργεια, ενώ το άλλο μισό είναι διαθέσιμο ως θερμική ενέργεια και ως τελικά ακτινοβολία. Για απλότητα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλη η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε ακτινοβολία στην επιφάνεια ενός αστέρα νετρονίων.

Ροπή αδράνειας spin-up

Μια σημαντική συνέπεια της προσαύξησης και γενικά της αλληλεπίδρασης του δίσκου με το AN μέσω των γραμμών (μαγνητικού) πεδίου του είναι ότι το σπιν του AN μπορεί να αλλάξει ως αποτέλεσμα των επαγόμενων ροπών. Η κύρια ροπή που εφαρμόζεται στο αστέρι από την προσαύξηση, N_{acc} , ορίζεται ως:

$$N_{acc} = \dot{m} \sqrt{GMR_m}. \quad [3]$$

Στην πράξη η ροπή λόγω πρόσπτωσης μάζας δεν είναι η μοναδική, αλλά για την άσκηση θα την θεωρήσουμε ίση με την ολική ροπή, $N_{tot} = N_{acc}$. Η μεταβολή της ιδιοπεριστροφής του αστέρα σχετίζεται με τη μεταβολή της στροφορμής, και η εξίσωση που περιγράφει το spin up (αύξηση της συχνότητας) του AN γράφεται ως:

$$\dot{\nu} \equiv \frac{\dot{\Omega}}{2\pi} = \frac{N_{tot}}{2\pi I} \quad [4]$$

Στη παραπάνω σχέση το I είναι η ροπή αδράνειας και μπορεί να προσεγγιστεί με εκείνη μίας σφαίρας με σταθερή πυκνότητα, $I = (2/5) MR^2$, όπου M η μάζα και R η ακτίνα της σφαίρας.

3. Ερωτήσεις κατανόησης πριν την εκτέλεση του εργαστηρίου

*****Να απαντηθεί το ερώτημα 0 πριν το εργαστήριο*****

Ερώτημα 0:

Από τις σχέσεις 1,3,4 να εκφράσεται το μαγνητικό πεδίο στη επιφάνεια του AN σαν συνάρτηση του $\dot{\nu}$ και \dot{m} .

*****Για τα παρακάτω να έχει γίνει προσπάθεια να πραγματοποιηθούν/ολοκληρωθούν πριν την έναρξη του εργαστηρίου, και θα συζητηθούν στην τάξη.*****

Οι AN έχουν μάζες από ~1.4 έως ~3 ηλιακές μάζες και ακτίνες της τάξης των 10 km. Υποθέστε μια τυπική μάζα και ακτίνα για τον AN του Σχήματος 6 (δεξιά) και χρησιμοποιήστε την περίοδο του για να απαντήσετε στις ακόλουθες ερωτήσεις:

1. Ποια είναι η γραμμική ταχύτητα ενός σημείου στον ισημερινό του άστρου;
2. Εκφράστε αυτή τη ταχύτητα ως ποσοστό της ταχύτητας του φωτός.
3. Ποια είναι η κεντρομόλος δύναμη που απαιτείται για να κρατήσει το υλικό της επιφάνειας κοντά στον ισημερινό στη θέση του (σε τροχιά γύρω από το κέντρο);
4. Ποια είναι η βαρυτική δύναμη στην επιφάνεια αυτού του αντικειμένου;
5. Πώς συγκρίνεται αυτή η απάντηση με την απάντησή σας στο ερώτημα 3 παραπάνω;
6. Πόση διαφορά βρίσκουμε στην ενέργεια που θα απελευθερωθεί σε ακτινοβολία αν το υλικό που πέφτει στον AN ξεκινάει από το από το άπειρο ή από τυπική απόσταση 1000-2000 km?
7. Για το παραπάνω AN και για $B = 10^{12} G$, πόσο μεγάλο πρέπει να είναι το \dot{m} για να έχουμε πρόσπτωση μάζας, δηλαδή $R_M < R_{co}$;

4. Άσκηση: Μελέτη πρόσπτωσης μάζας και μεταβολής στροφορμής σε ένα υπερφωτεινό (superluminous) X-ray Pulsar.

Θα ασχοληθούμε με την πηγή NGC 300 ULX1, γνωστή και σαν sn2010da ή NGC 300 2010da.

Μέρος 1: Χρονοσειρές - spin-up Αστέρα Νετρονίων (AN)

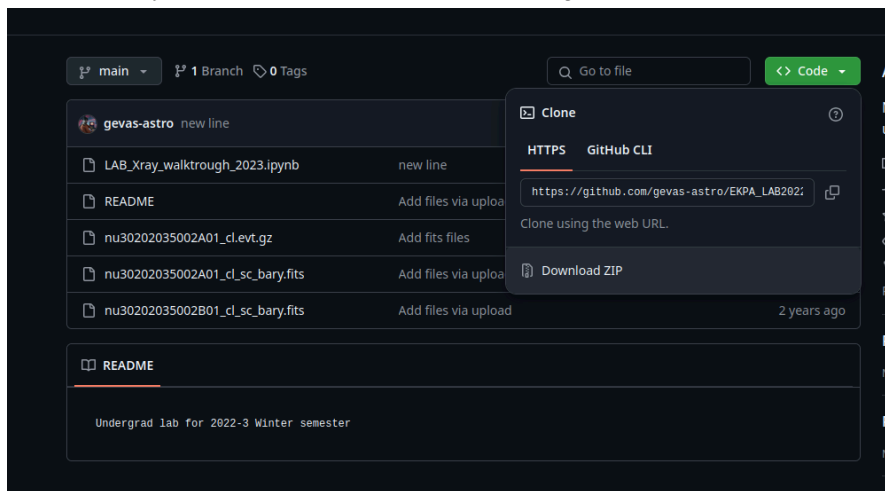
*****Θα πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο (jupyter notebook)*****

*****Τα παρακάτω βήματα θα πραγματοποιηθούν στο εργαστήριο, αλλά να τα έχετε διαβάσει καθώς και το github notebook.*****

https://github.com/gevas-astro/EKPA_LAB2022W_XRay

Βήματα:

- 1) Δημιουργούμε ένα φάκελο εργασίας με τα αρχικά του ονόματος μας και το AM μας (π.χ. AB0020150404). Από το github, κατεβάζουμε το repository σε μορφή zip και το αποσυμπιέζουμε μέσα στο φάκελο εργασίας.



- 2) Τα δεδομένα είναι σε μορφή λίστας φωτονίων (*_cl.evt.gz αρχεία). Από τους χρόνους άφιξης κάθε φωτονίου μπορούμε να κατασκευάσουμε μία χρονοσειρά, δηλαδή ένα ιστόγραμμα των φωτονίων συναρτήσει του χρόνου.
- 3) Θα κατασκευάσετε τη χρονοσειρά στη python και θα δείτε τις καμπύλες φωτός.
- 4) Θα ψάξετε για μεταβλητότητα με τεχνικές epoch folding στην python. Αν και υπάρχουν έτοιμες συναρτήσεις για εύρεση περιόδου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια απλή μέθοδο βασισμένη σε χ^2 ελαχιστοποίηση για να ψάξουμε για περίοδο.

- 5) Η χρονοσειρά μας έχει μήκος περίπου 300 ks ή 4 μέρες. Μέσα σε αυτό το διάστημα υπάρχει μεταβολή της περιόδου, άρα απλές τεχνικές εύρεσης περιόδου δεν έχουν αρκετή ακρίβεια. Θα χωρίσετε την χρονοσειρά σε μικρότερα κομμάτια (όσα νομίζετε) και θα ψάξετε για περιοδικό σήμα σε κάθε κομμάτι ξεχωριστά.
- 6) Θα φτιάξετε ένα διάγραμμα μεταβολής περιόδου/συχνότητας με το χρόνο. Θα το μοντελοποιήσετε με μία γραμμική συνάρτηση και θα υπολογίσετε το spin-up του AN.
- 7) Από τη θεωρία μπορείτε να υπολογίσετε το μαγνητικό πεδίο του AN. Θα χρειαστείτε την περίοδο, το spin-up, και το ρυθμό πρόσπτωσης μάζας (δες μέρος 2 άσκησης). Πόσο είναι το μέτρο του μαγνητικού πεδίου B του AN;

*****Από το εργαστήριο θα δημιουργήσουμε διάγραμμα μεταβολής συχνότητας/περιόδου στο χρόνο και θα υπολογιστεί ο ρυθμός μεταβολής. Το τελικό διάγραμμα και ο ρυθμός μεταβολής θα συμπεριληφθούν στη εργασία.*****

*****Στο τέλος του εργαστηρίου θα πρέπει να σταλούν με email στους διδάσκοντες*****

Μέρος 2: Φάσματα - πρόσπτωση μάζας

*****Τα παρακάτω βήματα θα πραγματοποιηθούν πριν ή μετά εργαστήριο, αλλά τουλάχιστον να τα έχετε κάνει μία ανάγνωση πριν το εργαστήριο*****

Σε αυτό το μέρος θα χρησιμοποιήσουμε εργαλεία από το διαδίκτυο για να βρούμε το ρυθμό πρόσπτωσης μάζας \dot{m} στον AN. Θα υπολογίσουμε το ρυθμό αυτό έμμεσα μέσω της ροής ακτινοβολίας του συστήματος. Από τη ροή ακτινοβολίας και γνωρίζοντας την απόσταση του συστήματος θα βρούμε τη λαμπρότητα (ακτινοβολιακή ισχύς/luminosity [erg/s]). Προσοχή, επειδή τα όργανα που χρησιμοποιούμε παρατηρούν σε μια περιορισμένη ενεργειακή μπάντα, θα χρειαστούμε ένα διορθωτικό παράγοντα για να βρούμε τη βολομετρική λαμπρότητα (σε όλα τα μήκη κύματος).

Βήματα:

- 1) Μεταβαίνουμε στο simbad <http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/> και βρίσκουμε πληροφορίες για την πηγή από το basic search.
- 2) Η πηγή ανήκει στον γαλαξία NGC 300, οπότε μέσω simbad, βρίσκουμε την απόσταση γαλαξία. Ψάχνουμε τον γαλαξία και θα δούμε κάπου στη σελίδα το measurements/distance info. **Ποιά είναι η απόσταση του NGC 300 ULX1;**

Collections of Measurements

velocities : 7 distance : 12 PLX : 1 PM : 1

display selected measurements

display all measurements

clear

Σχήμα 8: screenshot απο simbad, βλέπουμε οτι υπάρχουν 12 τιμές της απόστασης του NGC 300. Κάθε μέτρηση βασίζεται σε διαφορετικό πείραμα, και έχει διαφορετική ακρίβεια. Διαλέξτε αυτή με την μικρότερη αβεβαιότητα.

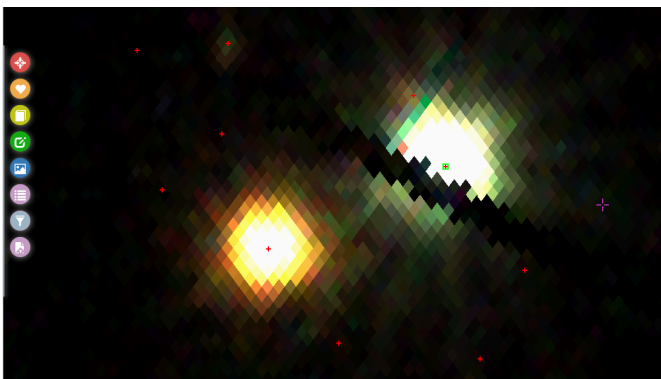
3) Μεταβαίνουμε στο <https://xcatdb.unistra.fr/4xmmdr13/>, το οποίο είναι ένα portal με πολλαπλά δεδομένα ακτίνων X από το τηλεσκόπιο XMM-Newton.

4) Βρίσκουμε την πηγή sn2010da, γράφοντας το όνομα της πάνω δεξιά (βλέπε σχήμα 9).



Σχήμα 9: πεδίο εισαγωγής συντεταγμένων στο xcatdb

5) Βρίσκουμε την πηγή (βλέπε σχήμα 10) και την επιλέγουμε. Τότε θα εμφανιστεί το τελευταίο (κάτω) εικονίδιο αριστερά.

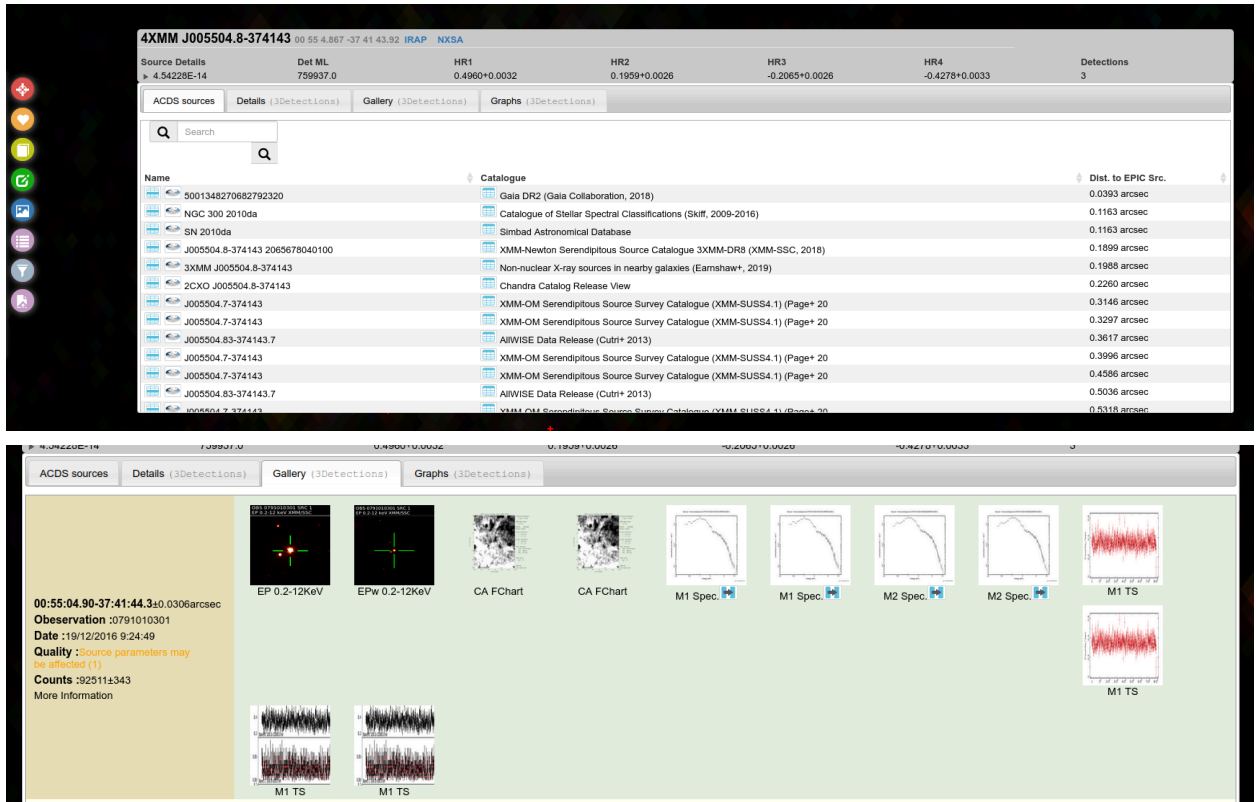


Σχήμα 10: περιοχή του ουρανού όπου βλέπουμε το NGC 300 ULX-1 (sn2010da).

6) Στο εικονίδιο αυτό θα βρούμε διάφορες πληροφορίες σε μορφή πίνακα.

Στο details θα δούμε ότι υπάρχουν 3 παρατηρήσεις με το XMM-Newton, ενώ στο Gallery

μπορούμε να δούμε πληροφορίες για φάσματα και χρονοσειρές (βλέπε σχήμα 11). Είναι σημαντικό ότι στο Details μπορείτε να βρείτε τη ροή ακτινοβολίας σε μονάδες erg/s/cm^2 . **Μπορείτε να το μετατρέψετε σε φωτεινότητα-luminosity αν ξέρετε την απόσταση.**



Σχήμα 11: μενού αναζήτησης αποτελεσμάτων στο xcatdb

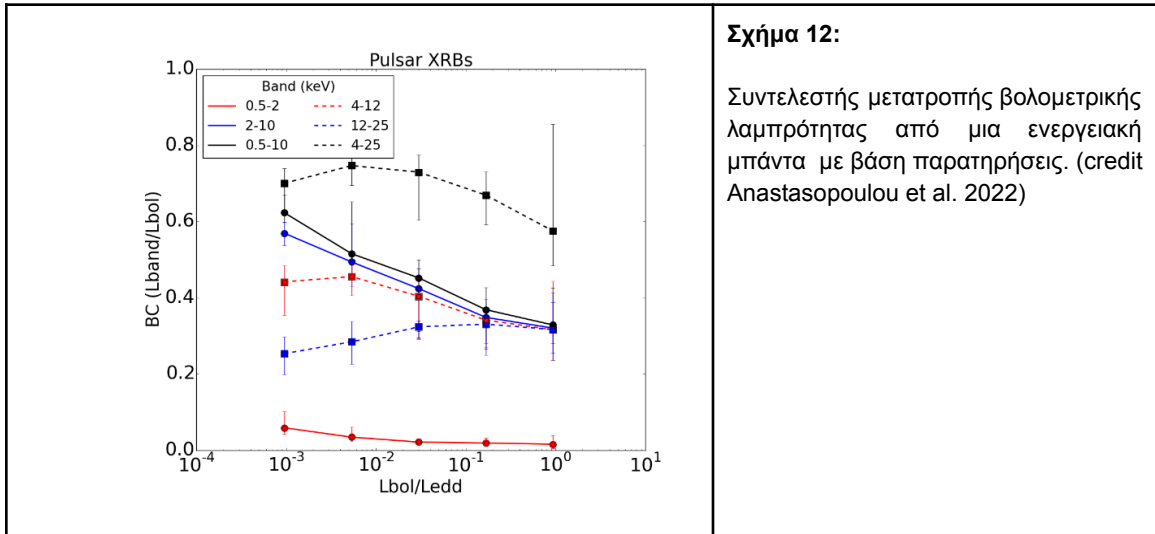
- 7) Αν και στη βάση δεδομένων υπάρχουν πολλές παρατηρήσεις, μας ενδιαφέρουν αυτές που έχουν παρθεί την ίδια ημερομηνία με τα δεδομένα του NuSTAR που αναλύσαμε στο 1ο μέρος. Πρέπει δηλαδή η μέτρηση των χρονικών παραμέτρων να είναι ταυτόχρονη με τη μέτρηση της ροής ακτινοβολίας.

Στο Gallery θα δείτε την παρατήρηση “**Observation :0791010101**” και μπορείτε να επιλέξετε το μπλε εικονίδιο στο φάσμα **PN Spec.**

Ποιά είναι η ροή ακτινοβολίας (details tab) για την παρατήρηση 0791010101 και 0791010301 σε erg/s/cm^2 ; Ποιά η λαμπρότητα (luminosity) σε erg/s ?

- 8) Ο υπολογισμός της luminosity (μονάδες erg/s) γίνεται στην ενεργειακή μπάντα 0.5-10 keV, όπου λειτουργεί το τηλεσκόπιο XMM-Newton. Αλλά το φάσμα εκτείνεται σε μεγαλύτερη περιοχή. Στο σχήμα 12 βλέπετε τη διόρθωση μεταξύ luminosity σε στενές ενεργειακές μπάντες και της συνολικής (βολομετρικής) luminosity. Δεδομένου ότι το XMM-Newton μετράει τη ροή ακτινοβολίας μεταξύ περίπου 0.5-10 keV, βρείτε τη βολομετρική luminosity της πηγής που μελετάμε. Υποθέστε ότι η πηγή συμπεριφέρεται

σαν τυπικό διπλό σύστημα ακτίνων Χ (XRB) στο όριο Eddington* ($L_{Edd} \approx 2 \times 10^{38} \text{ erg/s}$ για AN).



(*) Μία από τις αντιπροσωπευτικές αστροφυσικές εφαρμογές της σκέδασης Thomson είναι το όριο Eddington, η μέγιστη luminosity που μπορεί να έχει ένα σώμα (όπως ένας αστέρας) όταν υπάρχει ισορροπία μεταξύ της πίεσης της ακτινοβολίας που ενεργεί προς τα έξω και της πίεσης λόγω βαρύτητας που ενεργεί προς τα μέσα. Το όριο αυτό ισχύει για σφαιρική πρόσπτωση μάζας (και δεν λαμβάνει υπόψη το μαγνητικό πεδίο) και στην περίπτωση μας, όπου η μάζα ακολουθεί τις μαγνητικές γραμμές, μπορεί να παραβιαστεί.

*** Κανόνες***

1. Το εργαστήριο ξεκινά 14:00, με το ακαδημαϊκό τέταρτο το μάθημα ξεκινά αυστηρά στις 14:15, ενώ αργοπορημένη προσέλευση θα έχει συνέπειες (δηλ. ενδεχομένως απουσία κ επανάληψη).
2. Οι εργασίες θα πρέπει να παραδοθούν εντός της προβλεπόμενης διορίας (θα οριστεί στο τέλος του 4ώρου του εργαστηρίου). Αργοπορημένη παράδοση θα συνεπάγεται βαθμολογική ποινή.
3. Μέρος της εργασίας μπορεί να γίνει συνεργατικά, δηλαδή μπορούμε να συζητάμε με συναδέλφους μας τα βήματα και να ανταλλάσσουμε ιδέες για πιθανές ερμηνείες αποτελεσμάτων ή προβλήματα κατά την ανάλυση. Παρόλα αυτά, για να επωφεληθείτε από το εργαστήριο, το εργαστηριακό/προγραμματιστικό κομμάτι (rython notebooks) θα πρέπει να το δουλέψετε όσο πιο ανεξάρτητα μπορείτε. Επίσης, την εργασία που θα παραδώσετε πρέπει να την γράψετε μόνοι σας, χωρίς βοήθεια και αντιγραφή περιεχομένου (αριθμούς, εικόνες, κείμενο) από άλλες εργασίες κτλ.

Περί λογοκλοπής:

<https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/PHS387/plagiarism%20AUTH.pdf>

*** Εργασία για το σπίτι: ***

Από τα παραπάνω βήματα μπορείτε να βρείτε τον ρυθμό πρόσπτωσης μάζας υποθέτοντας έναν τυπικό αστέρα νετρονίων (τυπικές τιμές για μάζα και ακτίνα); Δείτε “**Ερώτημα 0**” στις Ερωτήσεις κατανόησης.

Μορφή και περιεχόμενο εργασίας:

- **Έκταση:** ~2 σελίδες (11-12 pt). Όχι θεωρία, αλλά αν χρησιμοποιείτε μία αναλυτική σχέση πρέπει να την αναφέρετε και να εξηγήσετε τους όρους. Επίσης, δε χρειάζεται να παραδώσετε κομμάτια του κώδικα που γράψατε.
- Απαραίτητα σχήματα: (I) κάποιο σχήμα με αποτελέσματα εύρεσης περιόδου (περιοδόγραμμα). (II) σχήμα εξέλιξης περιόδου (ή συχνότητας) στο χρόνο για τη NuSTAR παρατήρηση. Επιπλέον σχήματα μπορούν να προστεθούν αν νομίζετε ότι χρειάζονται. **Όλα τα σχήματα πρέπει να έχουν λεξάντα και αναφορά στο κείμενο.**
- Σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου B στην επιφάνεια του AN. Επίσης μπορείτε να υπολογίσετε και το μέγεθος της μαγνητόσφαιρας και να σχολιάσετε. Σαν τελικό αποτέλεσμα πρέπει να υπάρχει το B με το σφάλμα του. Είναι η τιμή λογική?
- **Γνωρίζουμε θεωρία σφαλμάτων.** Για κάποιες μετρήσεις κάνουμε διάδοση σφαλμάτων, τα οποία έχουν στατιστικό νόημα. Αλλά κατά τη διάρκεια της ανάλυσης κάνουμε κάποιες παραδοχές, ή χρησιμοποιούμε δεδομένα από βιβλιογραφία. Σε τέτοιες περιπτώσεις η θεωρία σφαλμάτων (διάδοση) μπορεί να μην εφαρμοστεί, αλλά πρέπει να αναφέρεται τί επίπτωση μπορεί να έχει αυτή η παραδοχή στον υπολογισμό σας. Αν μια παράμετρος παίρνει τιμές σε κάποιο εύρος $[A_{\min}, A_{\max}]$, μπορείτε να υπολογίσετε πως θα επηρεαστεί

το τελικό αποτέλεσμα από το εύρος αυτό. **Σκεφτείτε, από όσες παραδοχές κάνατε, ποια είναι η μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων?**

- Πρέπει να βάλετε βιβλιογραφία. Αν χρησιμοποιήσετε κάποιο δεδομένο (τιμή απόστασης) αναφέρεται από που το βρήκατε. Η βιβλιογραφία δεν μπαίνει απαραίτητα στο τέλος της εργασίας. Μπορεί να γίνει η αναφορά σε ένα paper μέσα σε παρένθεση (δίπλα από το αντίστοιχο σημείο του κειμένου). Μπορεί να είναι ένα footnote με URL.

Βιβλιογραφία

- 1) Exploring the X-ray Universe, Book by Frederick D. Seward and Philip A. Charles
- 2) Accretion power in astrophysics, Book by Juhan Frank
- 3) The Restless Universe: Understanding X-ray Astronomy in the Age of Chandra and Newton, Book by Eric Matthew Schlegel
- 4) Carroll & Ostlie Εισαγωγή στη μοντέρνα αστροφυσική (ελληνική έκδοση) κεφ. 7.6 (για όριο φωτεινότητας (luminosity) Eddington), κεφ. 11 (για AN και πάλσαρ), chapter 18 στην αγγλική έκδοση.
- 5) Carpano et al. 2018 MNRAS, 476L, 45 <https://arxiv.org/abs/1802.10341>
- 6) Anastasopoulou et al. 2022, MNRAS.513.1400: <https://arxiv.org/abs/2204.01749>
- 7) Review Book chapter Mushtukov & Tsygankov 2023: <https://arxiv.org/abs/2204.14185>