

# Αστροφυσική Ακτίνων Χ

Ερευνητικές εργασίες

Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ

2026

Κάθε εργασία χρησιμοποιεί δημόσια δεδομένα από τηλεσκόπια ακτίνων Χ και βασίζεται στα εργαλεία της εργαστηριακής άσκησης. Ο στόχος είναι μια σύντομη αναφορά με ένα κύριο αποτέλεσμα (μια μέτρηση με το σφάλμα της) και σύγκριση με τη βιβλιογραφία. Οι αναφορές κάθε εργασίας είναι το σημείο εκκίνησης· η πλήρης λίστα βρίσκεται στο τέλος.

## 1 Τομογραφία σκόνης με δακτυλίους ακτίνων Χ

Όταν μια πηγή ακτίνων Χ εκπέμπει μια ισχυρή και σύντομη έκλαμψη, μέρος των φωτονίων της σκεδάζεται από κόκκους σκόνης στη γραμμή παρατήρησης. Τα φωτόνια αυτά διανύουν μεγαλύτερη διαδρομή και φτάνουν σε εμάς αργότερα, από ένα δακτύλιο γύρω από την πηγή: μια ηχώ φωτός στις ακτίνες Χ. Τα φωτόνια που σκεδάστηκαν σε ένα λεπτό νέφος σκόνης φτάνουν με την ίδια γωνία  $\theta$ , άρα κάθε νέφος δίνει έναν δακτύλιο, που μεγαλώνει με το χρόνο. Για μικρές γωνίες, η γεωμετρία του Σχ. 1 δίνει

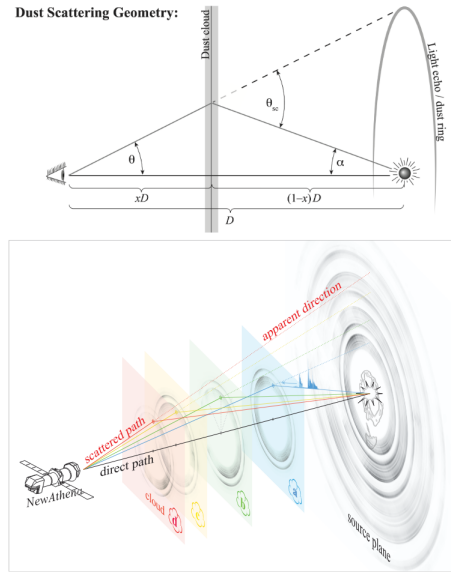
$$\theta(t) = \sqrt{\frac{2c \Delta t (1-x)}{x D}}, \quad (1)$$

όπου  $\Delta t$  ο χρόνος από την έκλαμψη. Αν η  $D$  είναι γνωστή, το μέγεθος κάθε δακτυλίου δίνει την απόσταση ενός νέφους σκόνης.

Τον Ιούνιο του 2015 το διπλό σύστημα μαύρης τρύπας V404 Cyg ( $D \simeq 2.4 \text{ kpc}$ , [3]) είχε μία από τις φωτεινότερες εκρήξεις που έχουν παρατηρηθεί στις ακτίνες Χ. Παρατηρήσεις *Swift*/XRT και *Chandra* τις επόμενες εβδομάδες δείχνουν τουλάχιστον πέντε ομόκεντρους δακτυλίους [1].

**Τι θα κάνετε.** Θα κατεβάσετε παρατηρήσεις *Swift*/XRT ή/και *Chandra* του V404 Cyg από το HEASARC, θα φτιάξετε εικόνες και ακτινικά προφίλ γύρω από την πηγή, θα εντοπίσετε τους δακτυλίους και θα μετρήσετε τη γωνιακή τους ακτίνα. Στη συνέχεια, μία από δύο κατευθύνσεις:

- **Εξέλιξη στο χρόνο:** μέτρηση των δακτυλίων σε πολλές παρατηρήσεις, έλεγχος ότι  $\theta \propto \sqrt{\Delta t}$ , και υπολογισμός της απόστασης κάθε νέφους σκόνης με την Εξ. (1).
- **Δομή των δακτυλίων:** μελέτη των δακτυλίων σε μία βαθιά παρατήρηση και σύγκριση των



**Σχήμα 1:** Πάνω: γεωμετρία της σκέδασης από σκόνη. Η παρατηρούμενη γωνία της ηχούς,  $\theta$ , εξαρτάται από την απόσταση της πηγής  $D$ , τη σχετική απόσταση της σκόνης  $x \equiv D_{\text{dust}}/D$  και τη χρονική καθυστέρηση  $\Delta t$ : τα φωτόνια σκεδάζονται κατά γωνία  $\theta_{\text{sc}} \geq \theta$ . Κάτω: πολλά νέφη σκόνης στη γραμμή παρατήρησης δίνουν πολλούς δακτυλίους. Προσαρμογή από [2].

στρωμάτων σκόνης με μετρήσεις του μεσοαστρικού μέσου στην ίδια διεύθυνση (π.χ. τρισδιάστατοι χάρτες σκόνης/απόσβεσης).

Ελάχιστο αποτέλεσμα: η απόσταση ενός νέφους σκόνης με το σφάλμα της, σε σύγκριση με το [1].

**Δεδομένα:** *Swift*/XRT, *Chandra*/ACIS (HEASARC) **Ξεκινήστε από:** [1, 2]

## 2 Εξέλιξη της περιστροφής και του μαγνητικού πεδίου ενός νεαρού αστέρα νετρονίων

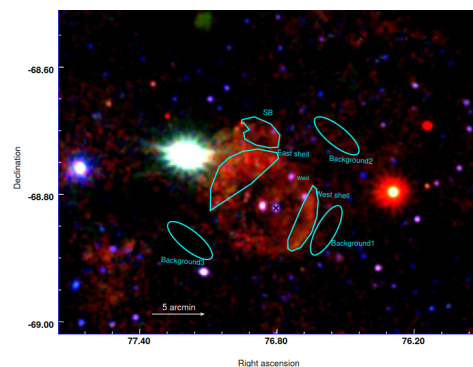
Η περιστροφή ενός αστέρα νετρονίων που προσαν-  
ξάνει μάζα εξαρτάται από το μαγνητικό του πεδίο,  
το ρυθμό πρόσπτωσης μάζας και το χρόνο. Συ-  
νήθως γνωρίζουμε μόνο τη σημερινή περίοδο και τη  
φωτεινότητα, όχι την ηλικία του συστήματος. Έ-  
νας αστέρας νετρονίων μέσα στο δικό του υπόλειμμα  
σουπερνόβα είναι ξεχωριστή περίπτωση: το μέγεθος  
του υπολείμματος δίνει την ηλικία. Για υπόλειμμα  
στη φάση Sedov, η ακτίνα αυξάνεται ως  $R_{\text{SNR}} \propto (E t^2 / \rho)^{1/5}$ , όπου  $E$  η ενέργεια της έκρηξης και  $\rho$  η  
πυκνότητα του αερίου γύρω της.

Ο XMMU J050722.1–684758 στο Μεγάλο Νέφος  
του Μαγγελάνου είναι διπλό σύστημα Be/X-ray με  
pulsar, κοντά στο κέντρο του υπολείμματος MC-  
SNR J0507–6847 (Σχ. 2). Η περίοδος περιστροφής  
του είναι μεγάλη, ενώ το υπόλειμμα είναι νεαρό [4].  
Πώς μπορεί ένας αστέρας νετρονίων να επιβραδυν-  
θεί τόσο πολύ σε τόσο λίγο χρόνο; Με τα εργαλεία  
του εργαστηρίου (ακτίνα Alfvén  $R_m$ , ακτίνα συμπε-  
ριστροφής  $R_{\text{co}}$ , ροπή πρόσπτωσης) ο αστέρας περνά από τρία στάδια:

- **ejector:** ο άνεμος του pulsar κρατά το αέριο μακριά και ο αστέρας επιβραδύνεται ως ραδιο-pulsar
- **propeller:**  $R_m > R_{\text{co}}$ , το πεδίο εκτινάσσει το αέριο και ο αστέρας επιβραδύνεται γρήγορα
- **accretor:**  $R_m < R_{\text{co}}$ , το αέριο φτάνει στην επιφάνεια και ο αστέρας πλησιάζει την περίοδο ισορροπίας, όπου  $R_m \simeq R_{\text{co}}$ .

**Τι θα κάνετε.** Θα μετρήσετε την περίοδο του pulsar από τα δεδομένα *XMM-Newton* και θα  
εκτιμήσετε την ηλικία του υπολείμματος από το μέγεθός του. Στη συνέχεια θα γράψετε έναν σύντομο  
κώδικα Python που ακολουθεί την  $P(t)$  στα τρία στάδια για σταθερό ρυθμό πρόσπτωσης (από την  
παρατηρούμενη  $L_X$ ), για ένα πλέγμα τιμών του μαγνητικού πεδίου  $B$  και της αρχικής περιόδου. Θα  
βρείτε ποιες τιμές του  $B$  φέρνουν τον αστέρα στην παρατηρούμενη περίοδο μέσα στην ηλικία του  
υπολείμματος, και θα δοκιμάσετε απλές υποθέσεις, όπως ένα μαγνητικό πεδίο που εξασθενεί με το  
χρόνο. Ελάχιστο αποτέλεσμα: γράφημα της  $P(t)$  για μερικές τιμές του  $B$ , με την παρατηρούμενη  $P$   
και το εύρος ηλικίας, και το εύρος του  $B$  που συμφωνεί με τα δεδομένα.

**Δεδομένα:** *XMM-Newton* (αρχείο), μοντελοποίηση σε Python **Ξεκινήστε από:** [4, 5]



**Σχήμα 2:** Εικόνα *XMM-Newton* (κόκκινο 0.3–0.7, πράσινο 0.7–1.1, μπλε 1.1–4.2 keV) του υπολείμματος σουπερνόβα MCSNR J0507–6847 στο Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου. Κυανό: περιοχές για την εξαγωγή φασμάτων. Ο σταυρός δείχνει τον Be/X-ray διπλό pulsar XMMU J050722.1–684758: μια κοντινή σημειακή πηγή είναι ένας AGN στο υπόβαθρο. Από [4].

## 3 Ένας λευκός νάνος που συστέλλεται

Η εξέλιξη της ιδιοπεριστροφής ενός συμπαγούς υπολειμματος μπορεί να έχει διάφορα αίτια. Στους αστέρες νετρονίων που προσανυξάνουν μάζα, όπως αυτός του εργαστηρίου, κύριο αίτιο είναι η ροπή της ύλης που προσπίπτει. Ένας λευκός νάνος (ΛΝ) είναι πολύ μεγαλύτερος, άρα έχει πολύ μεγαλύτερη ροπή αδράνειας, και η αύξηση του ρυθμού ιδιοπεριστροφής (spin-up) λόγω προσαύξεσης μάζας αναμένεται πολύ μικρή. Μια εναλλακτική εξήγηση είναι ότι το παρατηρούμενο spin-up οφείλεται σε συστολή του ίδιου του ΛΝ: αν η στροφορμή  $J = I\Omega$  διατηρείται ενώ η ακτίνα  $R$  μειώνεται, τότε για  $I \propto MR^2$

$$\frac{\dot{P}}{P} = 2 \frac{\dot{R}}{R}. \quad (2)$$

Τέτοια συστολή αναμένεται σε νεαρούς ΛΝ, ή όταν τα εξωτερικά στρώματα έχουν θερμανθεί από πυρηνικές καύσεις, π.χ. μετά από μια ποβα [7].

Η 1RXS J050526.3–684628 στο Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου είναι μια υπέρμαλαχη πηγή ακτίνων X: ένας ΛΝ που ακόμη καίει υδρογόνο στην επιφάνειά του, δεκαετίες μετά από μια έκρηξη ποβα [6]. Η ροή της στις ακτίνες X παρουσιάζει παλμούς (Σχ. 3).

**Τι θα κάνετε.** Θα χρησιμοποιήσετε τα εργαλεία χρονομέτρησης του εργαστηρίου σε δύο παρατηρήσεις *XMM-Newton* με διαφορά λίγων ετών: αναδίπλωση της καμπύλης φωτός, μέτρηση της περιόδου σε κάθε παρατήρηση και εκτίμηση του  $\dot{P}$ . Στη συνέχεια (α) θα υπολογίσετε το μέγιστο spin-up που μπορεί να δώσει η προσαύξεση μάζας, με την παρατηρούμενη φωτεινότητα και τις σχέσεις του οδηγού του εργαστηρίου, και (β) θα χρησιμοποιήσετε την Εξ. (2) για να βρείτε το ρυθμό συστολής  $\dot{R}$  που εξηγεί τη μέτρηση. Ελάχιστο αποτέλεσμα: το  $\dot{P}$  με το σφάλμα του και σύγκριση των δύο εξηγήσεων.

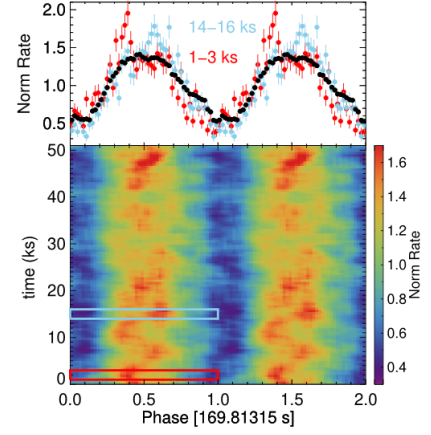
**Δεδομένα:** *XMM-Newton*/EPIC (δύο εποχές) **Ξεκινήστε από:** [6, 7]

## 4 Θερμοπυρηνικές εκλάμψεις στην επιφάνεια αστέρων νετρονίων

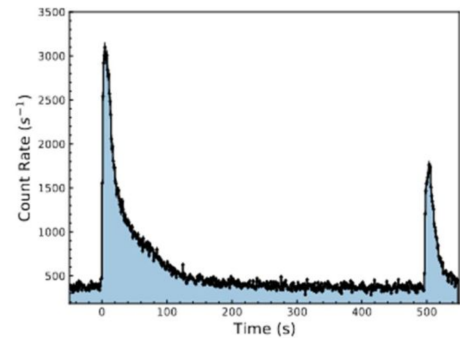
Σε διπλά συστήματα ακτίνων X μικρής μάζας, ένας αστέρας νετρονίων δέχεται μάζα από έναν αστέρα της κύριας ακολουθίας. Το υδρογόνο και το ήλιο εναποτίθενται στην επιφάνειά του μέχρι το στρώμα να φτάσει μια κρίσιμη πυκνότητα και θερμοκρασία, και τότε καίγονται αστραπιαία, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα: μια θερμοπυρηνική έκλαμψη ή έκλαμψη τύπου I (Σχ. 4). Η πυρηνική καύση απελευθερώνει λίγα MeV ανά νουκλεόνιο, ενώ η προσαύξεση  $GM/R \sim 200$  MeV ανά νουκλεόνιο. Ο λόγος

$$\alpha = \frac{E_{\text{pers}}}{E_{\text{burst}}} = \frac{\langle L_{\text{pers}} \rangle t_{\text{rec}}}{4\pi d^2 f_b} \quad (3)$$

της ενέργειας προσαύξεσης ανάμεσα σε δύο εκλάμψεις προς την ενέργεια της έκλαμψης μάς πληροφορεί λοιπόν για το καύσιμο που καίγεται ( $t_{\text{rec}}$  ο χρόνος επανάληψης και  $f_b$  η ολική ροή, fluence, της έκλαμψης) [8]. Οι φωτεινότερες εκλάμψεις φτάνουν το όριο Eddington και μπορούν να δώσουν εκτίμηση της απόστασης.



**Σχήμα 3:** Προφίλ παλμού της υπέρμαλαξης πηγής 1RXS J050526.3–684628 από μία παρατήρηση *XMM-Newton*. Πάνω: μέσο προφίλ (μαύρο) και δύο διαστήματα των 2 ks. Κάτω: δυναμικό προφίλ, δηλαδή φάση του παλμού συναρτήσει του χρόνου. Από [6].



**Σχήμα 4:** Καμπύλη φωτός ακτίνων X με δύο θερμοπυρηνικές εκλάμψεις (τύπου I): γρήγορη άνοδος σε λίγα δευτερόλεπτα και πιο αργή πτώση, πάνω από τη σταθερή εκπομπή λόγω προσαύξεσης.

**Τι θα κάνετε.** Ξεκινώντας από αρχαιακά αρχεία γεγονότων (FITS), θα φτιάξετε χρονοσειρές σε Python, θα εντοπίσετε τις εκλάμψεις και θα μετρήσετε τους χρόνους ανόδου και πτώσης, το μέγιστο ρυθμό και τη fluence. Θα μετατρέψετε σε ενέργεια για δεδομένη απόσταση, θα μετρήσετε τη σταθερή εκπομπή ανάμεσα στις εκλάμψεις και θα υπολογίσετε το  $\alpha$ . Θα συγκρίνετε με τις τιμές που αναμένονται για καύση υδρογόνου ή/και ηλίου. Ελάχιστο αποτέλεσμα: πίνακας των εκλάμψεων με τις ιδιότητές τους και το  $\alpha$  με το σφάλμα του.

**Δεδομένα:** αρχαιακά αρχεία γεγονότων ακτίνων X (FITS) **Ξεκινήστε από:** [8]

## 5 Spin-up και τροχιά ενός Be/X-ray pulsar σε έξαρση

Στα διπλά συστήματα Be/X-ray ο αστέρας νετρονίων κινείται σε έκκεντρη τροχιά γύρω από έναν αστέρα Be και δέχεται μάζα από τον δίσκο του, συχνά σε εξάρσεις που διαρκούν εβδομάδες ή μήνες. Κατά την έξαρση ο pulsar επιταχύνει την περιστροφή του, όπως ο NGC 300 ULX-1 στο εργαστήριο, αλλά εδώ μπορούμε να παρακολουθήσουμε την περίοδο και τη φωτεινότητα μέρα με τη μέρα. Το *Fermi* Gamma-ray Burst Monitor (GBM) μετρά τη συχνότητα και την παλμική ροή πολλών τέτοιων pulsar [10], και το *Swift*/BAT παρακολουθεί τη ροή τους.

Η παρατηρούμενη συχνότητα αλλάζει για δύο λόγους: τη ροπή της πρόσπτωσης και τη μετατόπιση Doppler από την τροχιακή κίνηση,

$$2\pi I \dot{\nu}_{\text{int}} = n \dot{m} \sqrt{GMR_m},$$

$$\nu_{\text{obs}}(t) = \nu_{\text{int}}(t) \left[ 1 - \frac{v_r(t)}{c} \right], \quad (4)$$

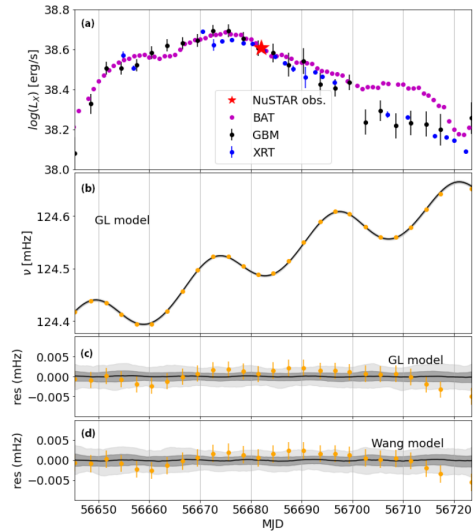
όπου ο ρυθμός  $\dot{m}$  ακολουθεί την παρατηρούμενη φωτεινότητα, η  $R_m$  εξαρτάται από το  $B$ ,  $n$  ένας αδιάστατος παράγοντας ροπής και  $v_r$  η ακτινική ταχύτητα του αστέρα νετρονίων στην τροχιά του. Η ταυτόχρονη προσαρμογή των δύο φαινομένων δίνει το μαγνητικό πεδίο και τις τροχιακές παραμέτρους (περίοδο, προβολή του μεγάλου ημιάξονα, εκκεντρότητα) [9] (Σχ. 5).

**Τι θα κάνετε.** Θα επιλέξετε μια έξαρση διπλού Be/X-ray από τις σελίδες pulsar του GBM, θα κατεβάσετε το ιστορικό της συχνότητας και τη ροή από GBM/BAT, και θα τη μετατρέψετε σε φωτεινότητα για γνωστή απόσταση. Θα γράψετε ένα μοντέλο της Εξ. (4) σε Python, ξεκινώντας από κυκλική τροχιά, και θα το προσαρμόσετε στα δεδομένα. Ελάχιστο αποτέλεσμα: η τροχιακή περίοδος και το μαγνητικό πεδίο με τα σφάλματά τους, σε σύγκριση με τη βιβλιογραφία.

**Δεδομένα:** δεδομένα pulsar του *Fermi*/GBM, *Swift*/BAT **Ξεκινήστε από:** [9, 10]

## Εργασία

Όλες οι εργασίες χρησιμοποιούν Python (numpy, matplotlib, astropy), ένα πρόγραμμα προβολής εικόνων όπως το DS9 και, όπου χρειάζεται, το TOPCAT και το λογισμικό των αποστολών (HEASoft). Η μελέτη επιστημονικών άρθρων στα αγγλικά είναι μέρος κάθε εργασίας.



**Σχήμα 5:** Η έξαρση του 2014 του RX J0520.5–6932. (α) Φωτεινότητα από *Fermi*/GBM, *Swift*/BAT και XRT. (β) Συχνότητα περιστροφής από το GBM με μοντέλο ροπής πρόσπτωσης και τροχιακής κίνησης (Ghosh & Lamb). (γ,δ) Υπόλοιπα για δύο μοντέλα ροπής. Από [9].

## Βιβλιογραφία

- [1] Vasilopoulos G., Petropoulou M., 2016, *The X-ray dust-scattered rings of the black hole low-mass binary V404 Cyg*, MNRAS, 455, 4426. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.455.4426V>
- [2] Heinz S., et al., 2015, *Lord of the Rings: A Kinematic Distance to Circinus X-1 from a Giant X-Ray Light Echo*, ApJ, 806, 265. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...806..265H>
- [3] Miller-Jones J. C. A., et al., 2009, *The first accurate parallax distance to a black hole*, ApJ, 706, L230. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJ...706L.230M>
- [4] Maitra C., Haberl F., Maggi P., et al., 2021, *XMMU J050722.1–684758: discovery of a new Be X-ray binary pulsar likely associated with the supernova remnant MCSNR J0507–6847*, MNRAS, 504, 326. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021MNRAS.504..326M>
- [5] Haberl F., et al., 2012, *SXP 1062, a young Be X-ray binary pulsar with long spin period. Implications for the neutron star birth spin*, A&A, 537, L1. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012A&A...537L...1H>
- [6] Vasilopoulos G., Koliopanos F., Woods T. E., Haberl F., Soraisam M. D., Udalski A., 2020, *Discovery of a  $\sim 30$ -yr-duration post-nova pulsating supersoft source in the Large Magellanic Cloud*, MNRAS, 499, 2007. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020MNRAS.499.2007V>
- [7] Popov S. B., et al., 2018, *A young contracting white dwarf in the peculiar binary HD 49798/RX J0648.0–4418?*, MNRAS, 474, 2750. <https://arxiv.org/abs/1711.02449>
- [8] Strohmayer T., Bildsten L., 2006, *New views of thermonuclear bursts*, in Lewin W., van der Klis M., eds, Compact Stellar X-ray Sources, Cambridge University Press, p. 113. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0301544>
- [9] Karaferias A. S., Vasilopoulos G., Petropoulou M., Jenke P. A., Wilson-Hodge C. A., Malacaria C., 2023, *A Bayesian approach for torque modelling of BeXRB pulsars with application to super-Eddington accretors*, MNRAS, 520, 281. <https://arxiv.org/abs/2211.16079>
- [10] Malacaria C., et al., 2020, *The ups and downs of accreting X-ray pulsars: decade-long observations with the Fermi Gamma-ray Burst Monitor*, ApJ, 896, 90. Data: <https://gamma-ray.msfc.nasa.gov/gbm/science/pulsars.html>