

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ · ΕΚΠΑ 2026

Αστρονομία ακτίνων Χ

Μαγνητικό πεδίο αστέρα νετρονίων σε
υπερφωτεινό πάλσαρ ακτίνων Χ: **NGC 300**
ULX-1

Γ. Βασιλόπουλος · Δ. Χατζηδημητρίου

1.0 keV
2.0 keV
4.5 keV

Superbubble 30 Dor C

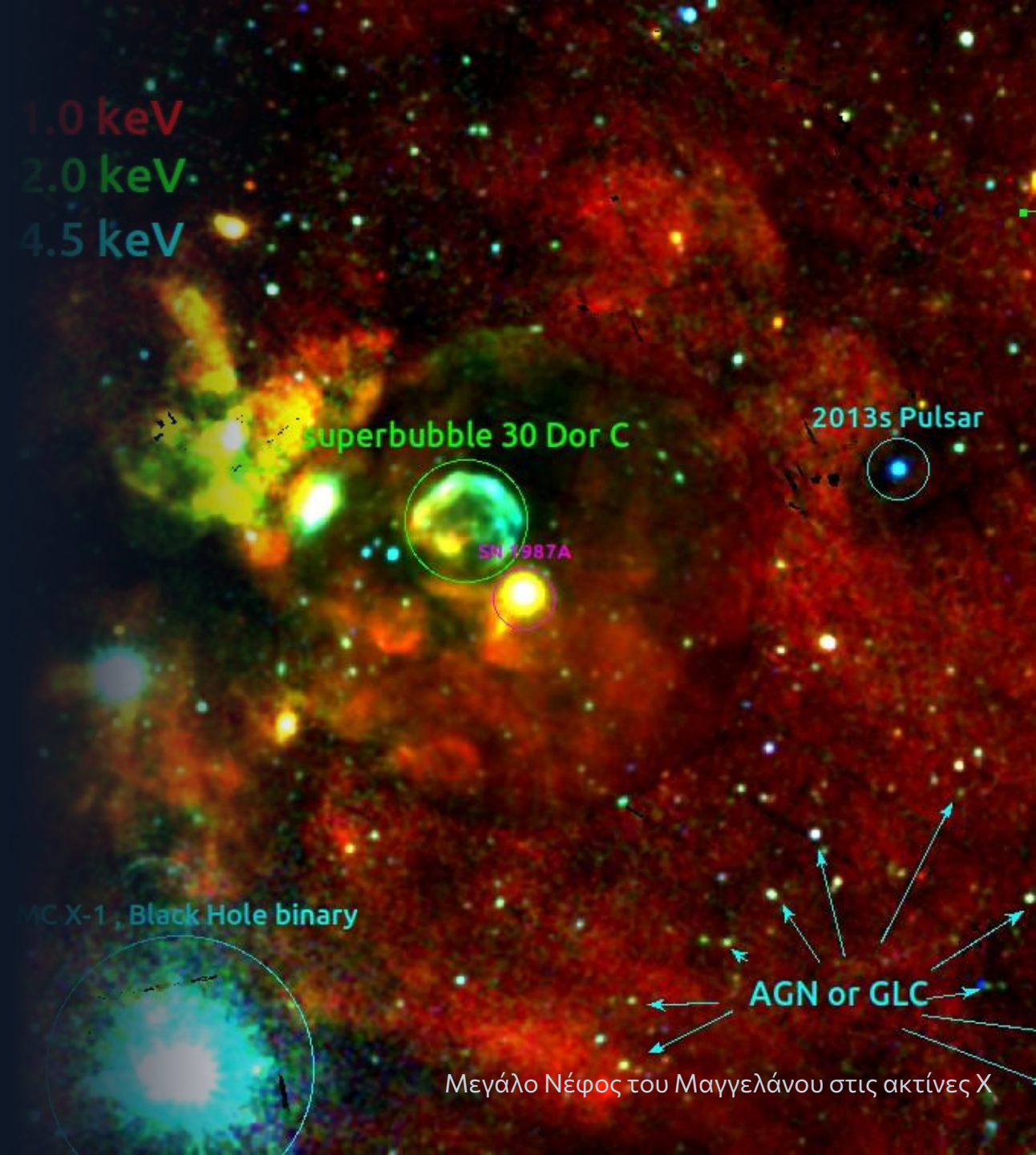
SN 1987A

2013s Pulsar

MC X-1, Black Hole binary

AGN or GLC

Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου στις ακτίνες Χ



Πρόγραμμα της ημέρας

45'

Θεωρία

Ακτίνες Χ, αστέρες νετρονίων,
προσαύξηση και ροπές

3 × 45'

Notebook

Χρονική ανάλυση NuSTAR: από τα
φωτόνια στο ν

1 εβδ.

Εργασία

Έως 2 σελίδες: 2 διαγράμματα, ν και
 B με σφάλματα

Υλικό: σημειώσεις (Κεφ. 1 θεωρία, Κεφ. 2 βήματα) · notebook σε ελληνικά και αγγλικά · κοινό Google Sheet με τα αποτελέσματα της τάξης

CODE:

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

Spreadsheets LINK:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/13tqf6eDudyniVHtJrBHDj4RJmfsUJlr5PpkcH0TDYDo/edit?usp=sharing>

Ο ΣΤΟΧΟΣ

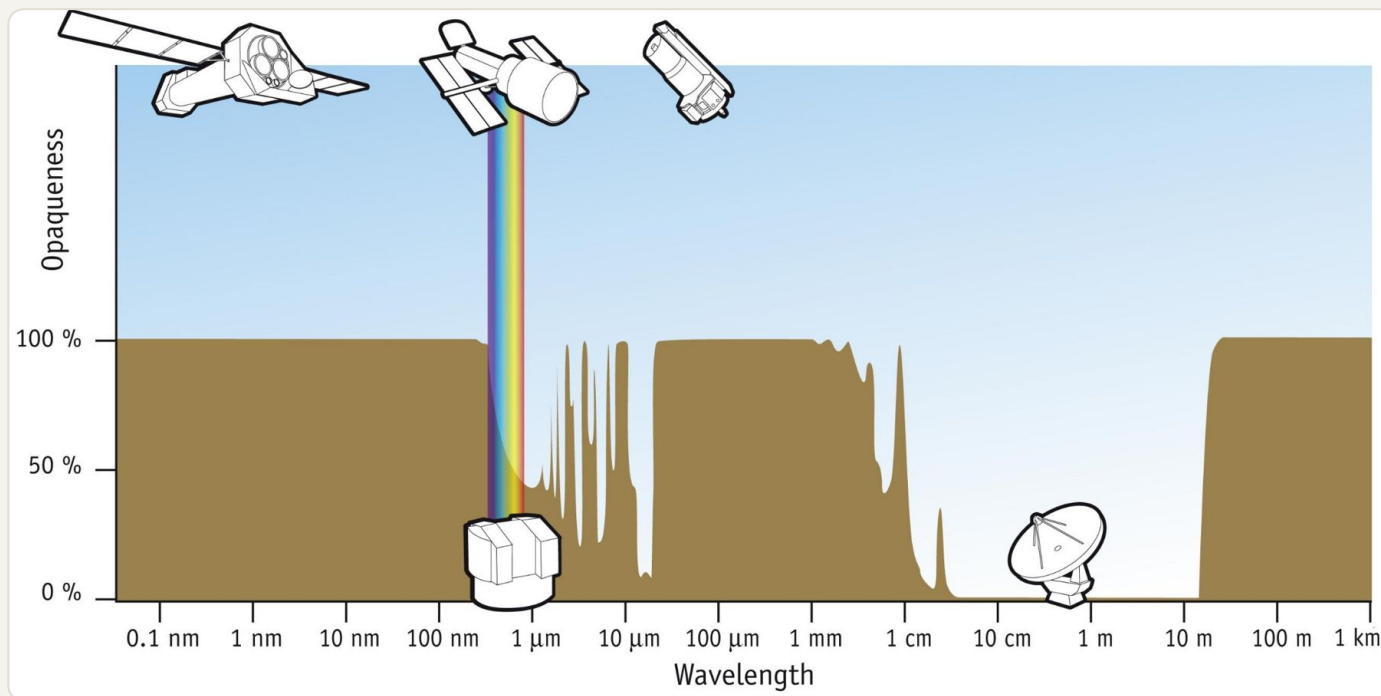
Από τα φωτόνια στο μαγνητικό πεδίο



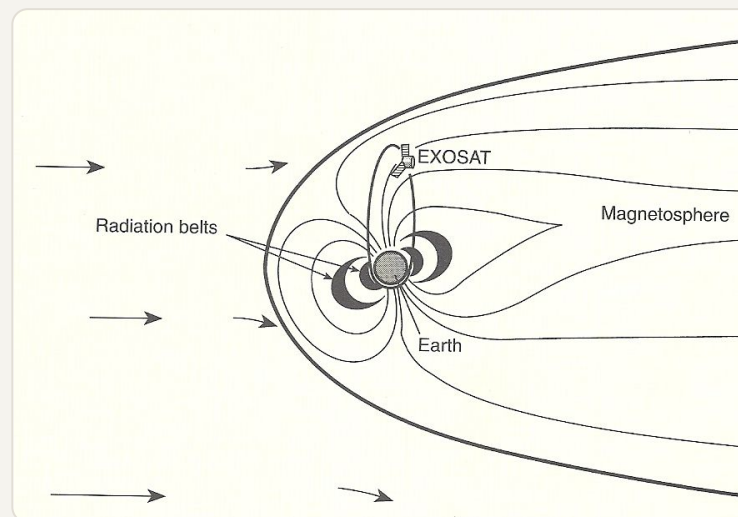
Το ερώτημα της εργασίας: **ποια αβεβαιότητα κυριαρχεί** όταν συνδυάζουμε δικές μας μετρήσεις με τιμές από καταλόγους και παραδοχές;

ΑΚΤΙΝΕΣ Χ

Παρατηρούμε μόνο από το διάστημα



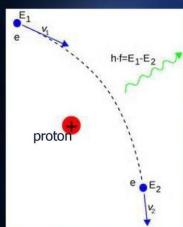
Η ατμόσφαιρα απορροφά πλήρως τις ακτίνες Χ



Δορυφόροι σε τροχιές μακριά από τις ζώνες Van Allen: τα παγιδευμένα φορτισμένα σωματίδια δίνουν υπόβαθρο στους ανιχνευτές

Πώς παράγονται οι ακτίνες X

X-ray Emission Mechanisms – Bremsstrahlung



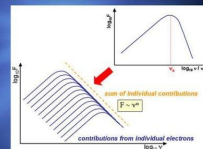
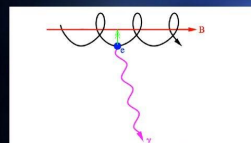
Optically thin gas is so hot that electrons are all or mostly all ionized

Hot X-ray gas cools and emits X-rays through a process called **thermal bremsstrahlung**, or “braking radiation” in an **optically thin** gas

Also called “**free-free emission**” because the electron remains free before and after the interaction

Energy emitted is proportional to $T^{1/2} \cdot n_e \cdot n_i$
where T = temperature, n_e = electron density, n_i = ion density

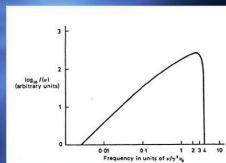
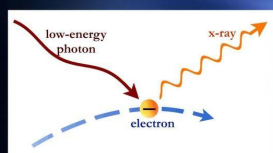
Radiation Processes – Synchrotron + Self Comptonization



Relativistic electrons spiraling down strong magnetic field lines will emit radiation as they do so, generically a **power law spectrum**.

This can lead directly to X-ray emission (**pulsars**), or radio photons that are then inverse Compton scattered up to X-ray energies (**AGN**).

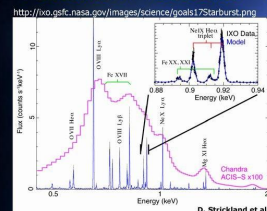
Radiation Processes – Inverse Compton Scattering



Hot electrons can upscatter lower energy photons to higher energies via inverse Compton scattering.

For example, **optical/UV photons** from the disks of AGN can be upscattered to X-ray energies by energetic electrons in a corona around the black hole.

Radiation Processes – Metal Line Emission



O VII – oxygen missing **6 electrons**

Ne X – neon missing **9 electrons**

Mg XI – magnesium missing **10 electrons**

Note how highly ionized the metals are – nearly all electrons have been removed, because of the very high temperature of the gas (**0.3 keV – 15 keV**, depending on the object).

In the hottest clusters, even iron (Fe) is almost completely

Μέλαν σώμα · οπτικά πυκνό αέριο 10^6 – 10^7 K, π.χ. δίσκοι προσαύξεσης

Πέδηση (bremsstrahlung) · θερμό, οπτικά αραιό πλάσμα, π.χ. σμήνη γαλαξιών

Σύγχροτρον · σχετικιστικά ηλεκτρόνια σε μαγνητικό πεδίο

Αντίστροφο Compton · θερμά ηλεκτρόνια «ανεβάζουν» φωτόνια χαμηλής ενέργειας

Γραμμές · μεταβάσεις στις στιβάδες K, L ιόντων (Fe, O, Ne, Mg...)

ΑΚΤΙΝΕΣ Χ

Απορρόφηση στη μεσοαστρική ύλη

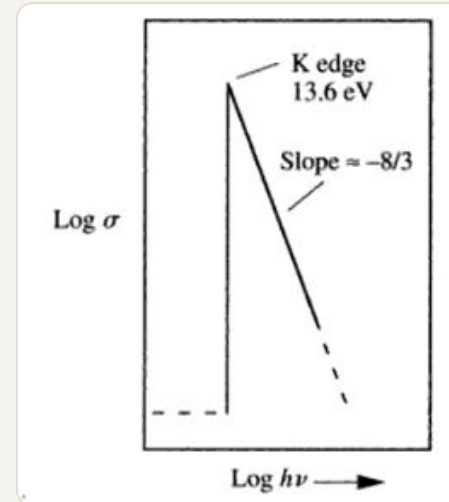
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: ένα φωτόνιο ιονίζει ένα άτομο. Το υδρογόνο απορροφά πάνω από 13.6 eV.

Βαρύτερα στοιχεία δίνουν **ακμές** K, L, M. Η ενεργός διατομή πέφτει γρήγορα με την ενέργεια.

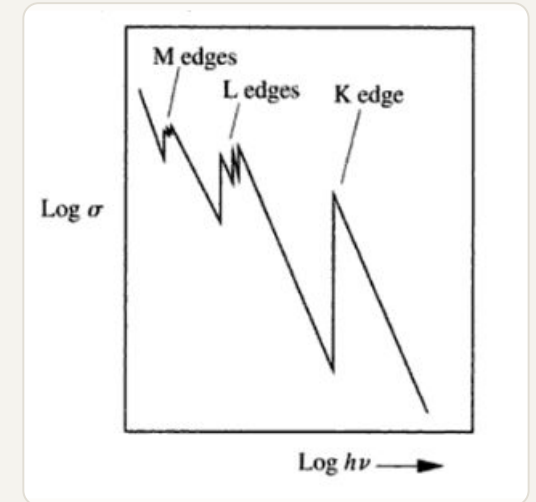
Οι **μαλακές** ακτίνες Χ (<1–2 keV) απορροφώνται περισσότερο.

Μέτρο: η στήλη υδρογόνου $N(H)$ σε cm^{-2} .

Θα το ξαναδούμε στο Μέρος 2: η ροή του καταλόγου υποθέτει μικρή απορρόφηση.

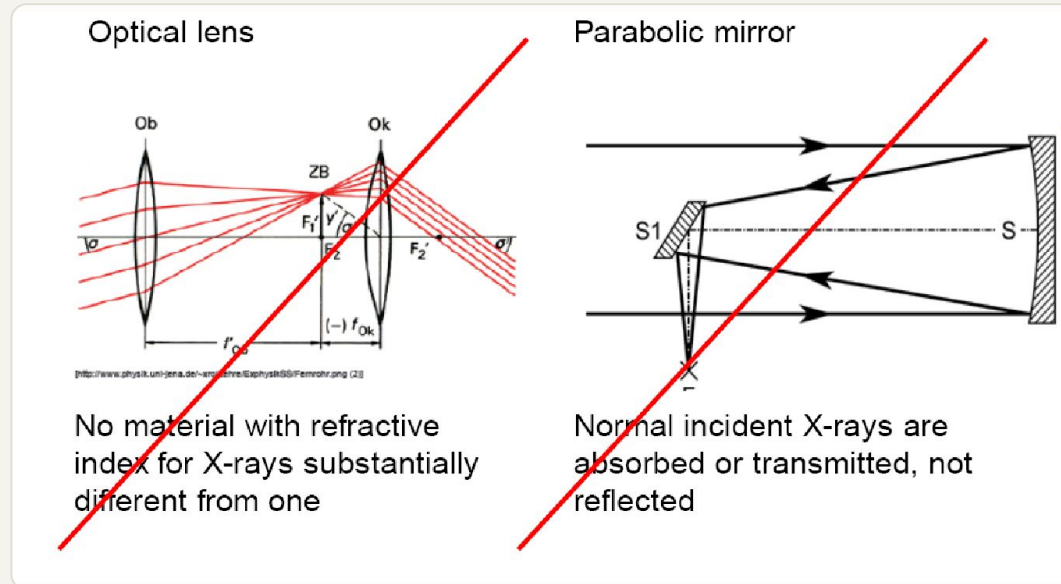


Υδρογόνο

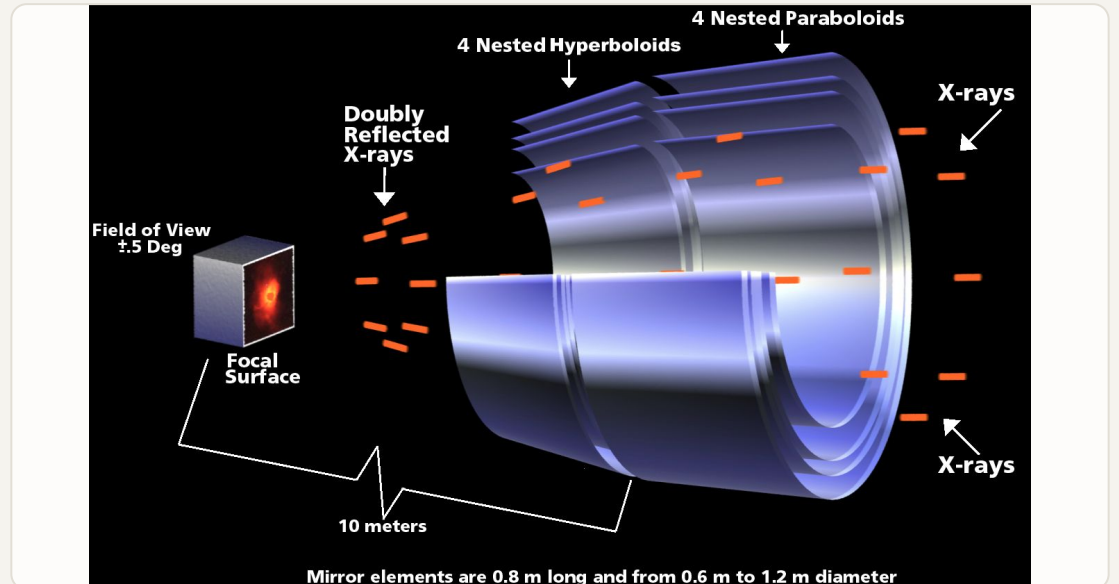


Βαρύτερα στοιχεία

Εστίαση με «ξυστή» πρόσπτωση



Δείκτης διάθλασης $n \approx 1 - \delta$: ούτε φακοί ούτε κάθετη ανάκλαση

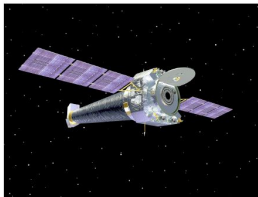


Wolter-I: παραβολή + υπερβολή, πολλά κάτοπτρα το ένα μέσα στο άλλο

Ολική ανάκλαση μόνο για γωνίες πρόσπτωσης $< \sim 1^\circ$. Η ποιότητα των κατόπτρων ορίζει την PSF: $\sim 0.5''$ (Chandra), $\sim 15''$ (XMM-Newton), $\sim 1'$ (NuSTAR).

Σύγχρονα παρατηρητήρια ακτίνων Χ

Chandra and XMM Newton

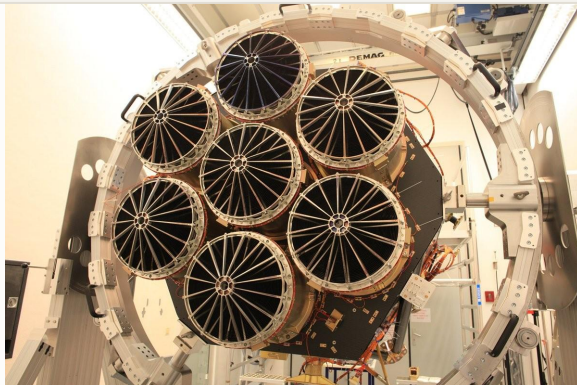


- **Chandra (NASA)**
Launch: July 1999
Orbit: 64 hours
- Two Transmission Grating Spectrometers
- Angular resolution ~ 0.5"

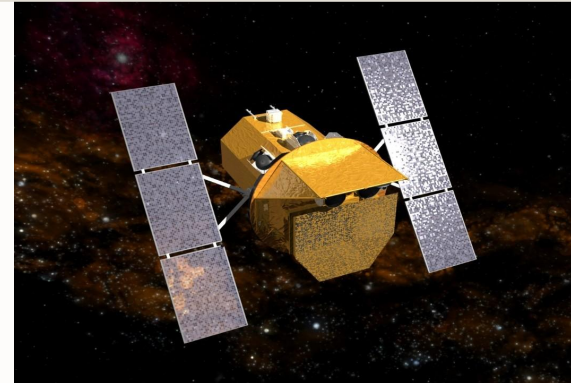


- **XMM-Newton (ESA)**
Launch: December 1999
Orbit: 48 hours
- Reflection Grating Spectrometer
- angular resolution ~ 15"

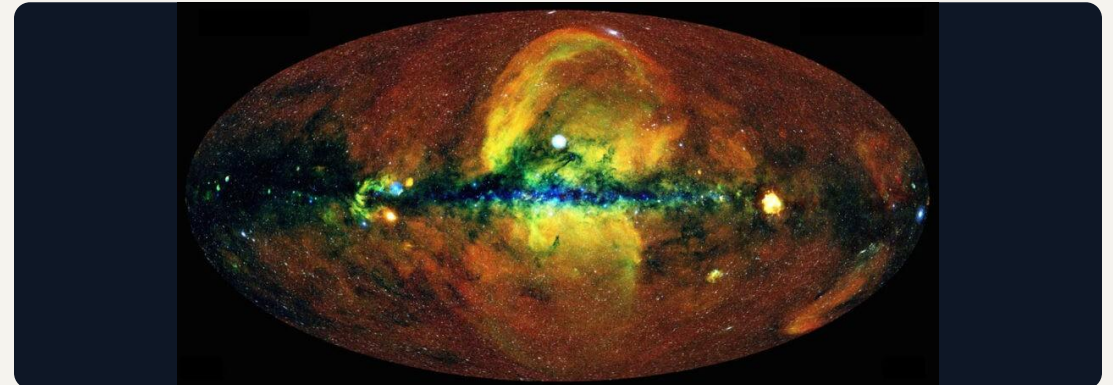
Chandra (NASA) και **XMM-Newton (ESA)**, από το 1999



eROSITA: 7 τηλεσκόπια για επισκόπηση όλου του ουρανού



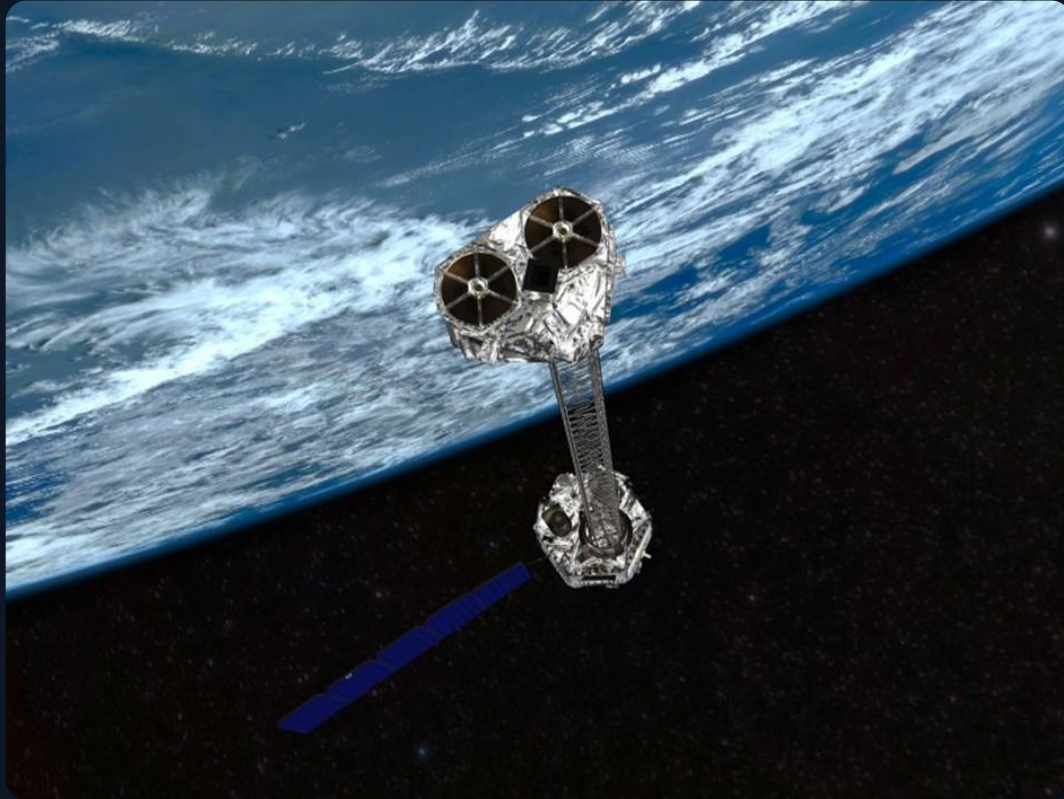
Swift: γρήγορη απόκριση και παρακολούθηση μεταβλητών πηγών



Ο ουρανός στις ακτίνες Χ από το eROSITA

ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΑΣ

NuSTAR: σκληρές ακτίνες X



3–79 keV

πρώτο εστιάζον τηλεσκόπιο σε αυτές τις ενέργειες (2012)

FPMA • FPMB

δύο όμοια τηλεσκόπια, δύο ανιχνευτές

10 m

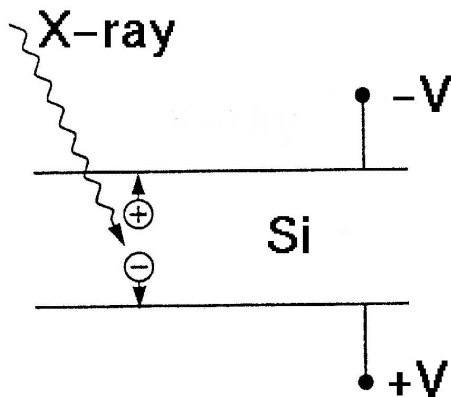
μήκος εστίασης, σε αναπτυσσόμενο ιστό

~96 min

χαμηλή τροχιά → κενά στα δεδομένα

ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Μετράμε κάθε φωτόνιο χωριστά

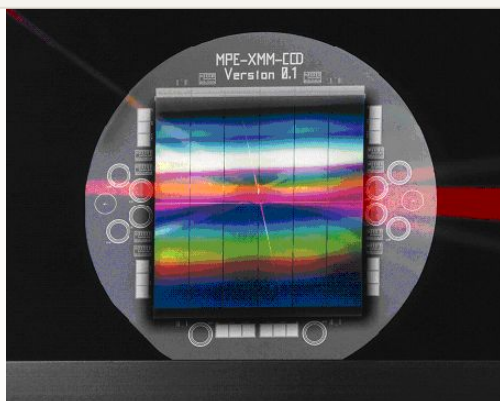


Οπτικό

1 φωτόνιο $\rightarrow$ 1 ζεύγος e^- -οπής. Ο ανιχνευτής **αθροίζει** φως.

Ακτίνες Χ

1 φωτόνιο ενέργειας $E \rightarrow \sim E / 3.6 \text{ eV}$ ζεύγη στο Si. Για 1 keV: ~ 270 ηλεκτρόνια.



Το φορτίο είναι ανάλογο της ενέργειας: **για κάθε φωτόνιο ξέρουμε θέση, χρόνο και ενέργεια.**

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το αρχείο γεγονότων: μία γραμμή ανά φωτόνιο

TIME (s)	X	Y	PI	E (keV)
219600012.43	498.2	503.7	171	8.44
219600014.91	501.6	499.1	92	5.28
219600019.08	312.4	655.0	1450	59.60
219600021.77	497.3	505.2	64	4.16
219600030.12	503.9	501.8	233	10.92
...	...	...	...	...

NuSTAR: $E = 0.04 \times PI + 1.6 \text{ keV} \cdot \text{TIME}$ σε s από 1/1/2010 · ενδεικτικές τιμές



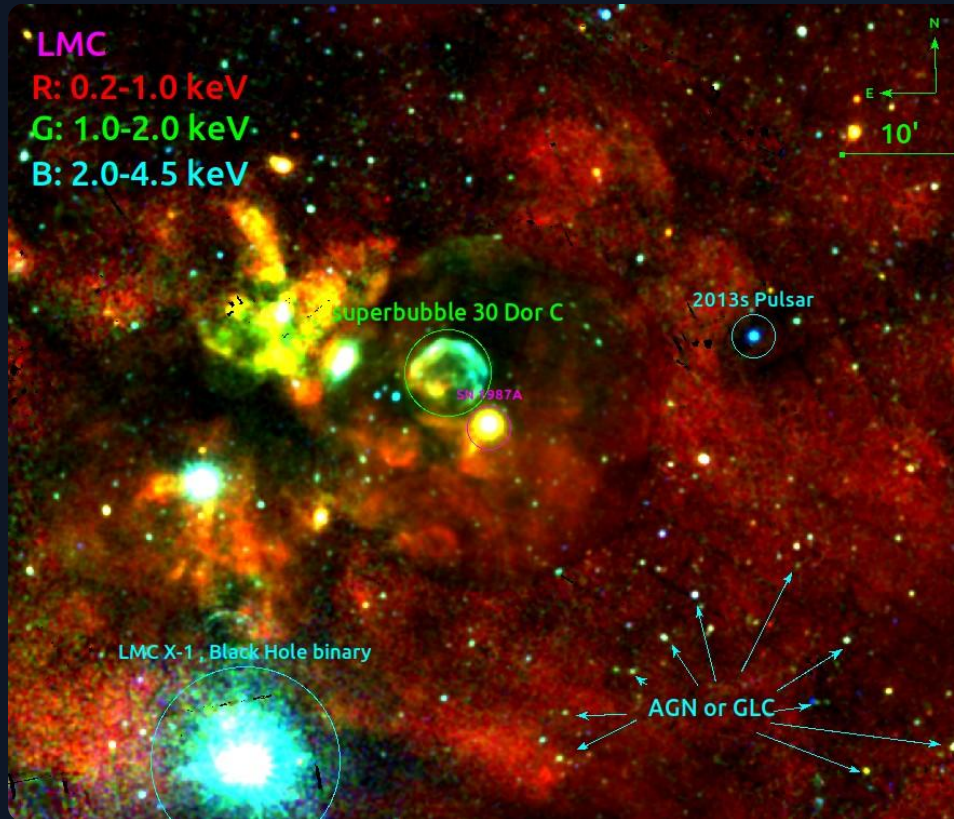
Εικόνα
ιστόγραμμα των X, Y

Φάσμα
ιστόγραμμα των PI (ενέργειας)

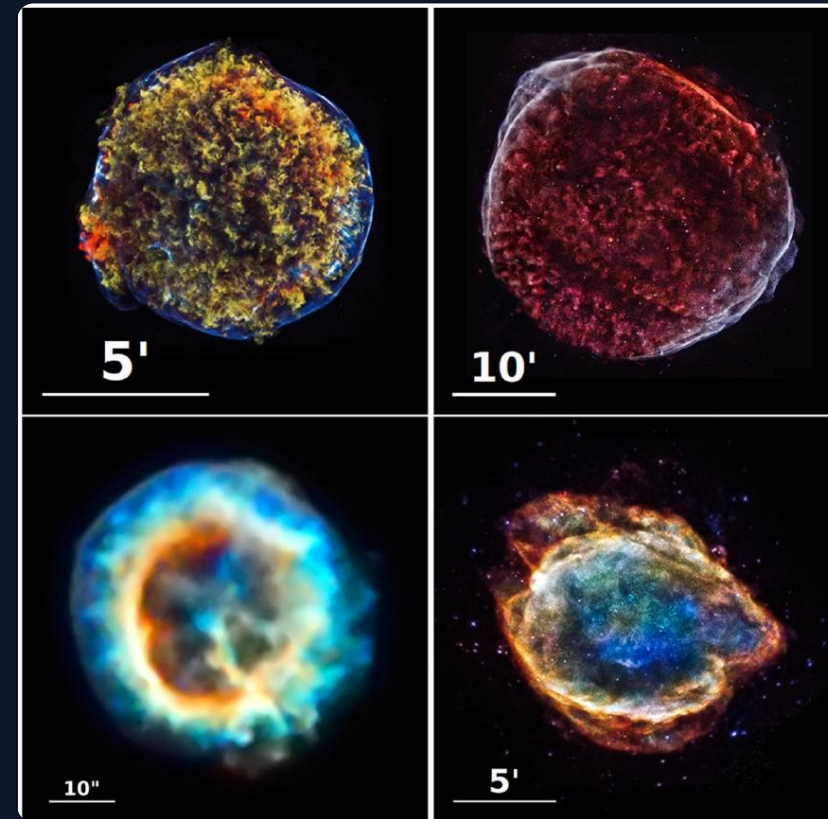
Καμπύλη φωτός
ιστόγραμμα των TIME

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Εικόνες



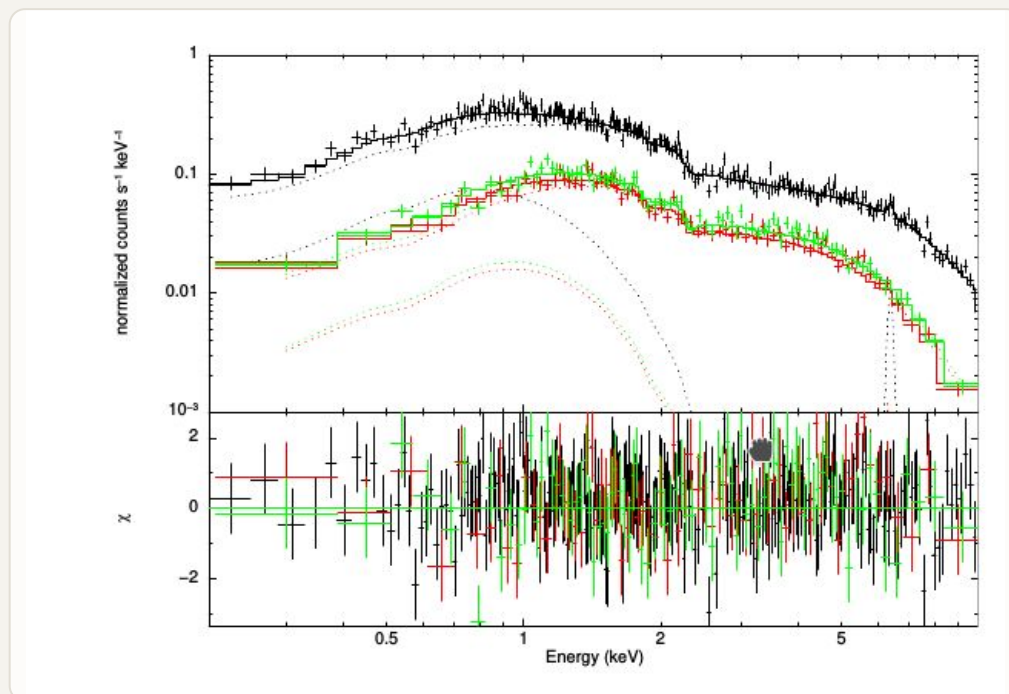
Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου: κόκκινο 0.2–1, πράσινο 1–2, μπλε 2–4.5 keV



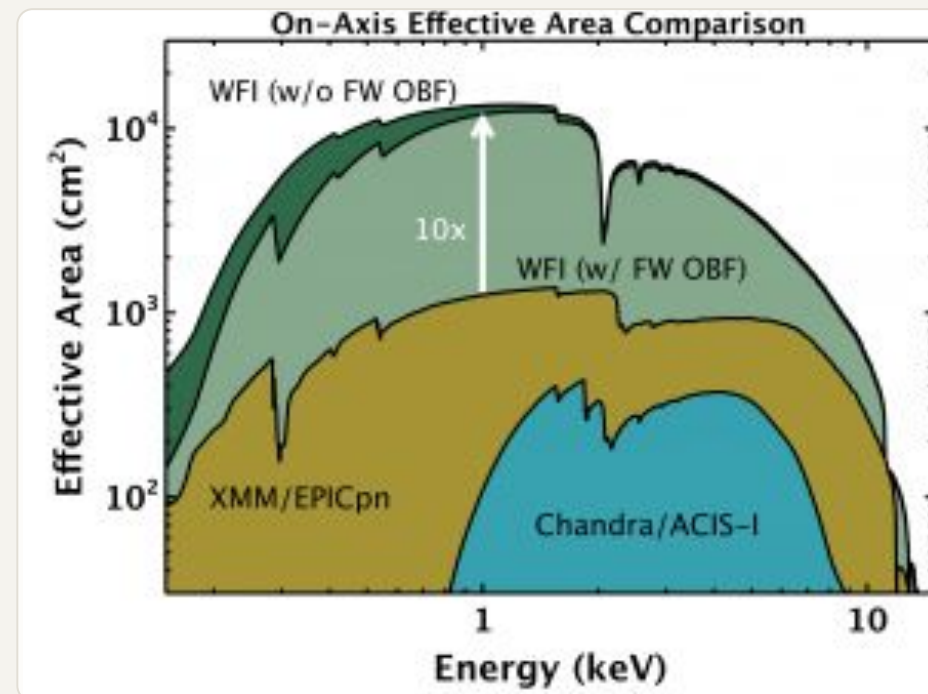
Υπολείμματα υπερκαινοφανών (Chandra)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Φάσματα: ιστόγραμμα ενεργειών



Μέλαν σώμα + νόμος δύναμης, όπως τα «βλέπει» το όργανο

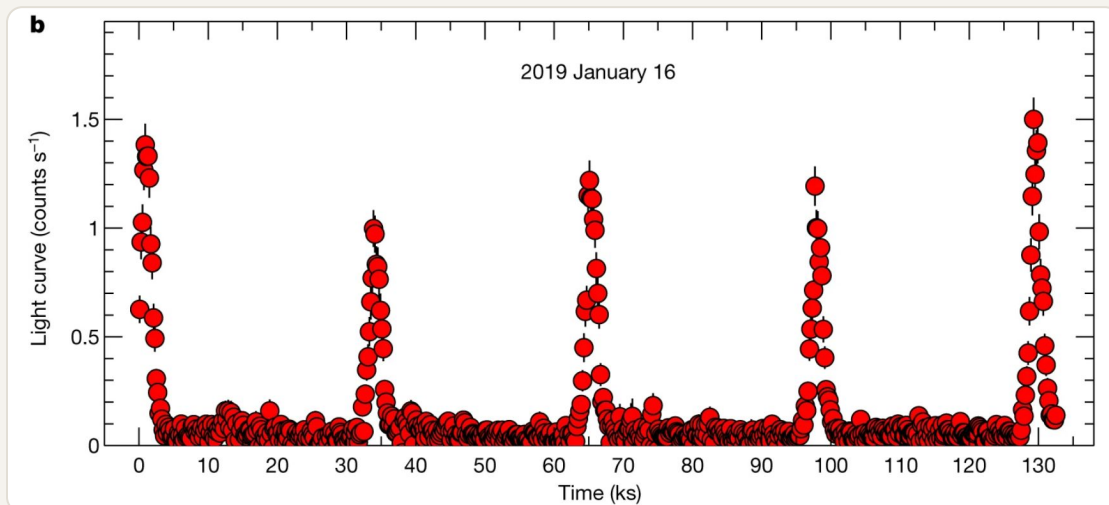


Ενεργός επιφάνεια: XMM-Newton, Chandra, NewAthena

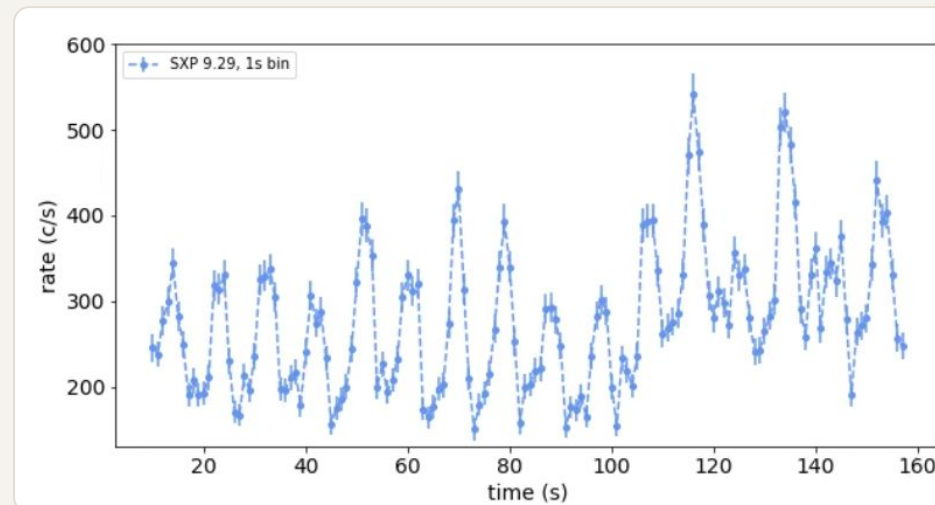
Μετρούμενο φάσμα = φάσμα πηγής × **απορρόφηση** × **ενεργός επιφάνεια** του οργάνου

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Καμπύλες φωτός: ιστόγραμμα χρόνων άφιξης



Ημiperιοδικές εκρήξεις (QPEs) στον πυρήνα του GSN 069



Παλμοί αστέρα νετρονίων στο Μικρό Νέφος του Μαγγελάνου

Περιοδική · περιστροφή ή τροχιά

Ημiperιοδική · π.χ. QPEs,
ταλαντώσεις δίσκου

Στοχαστική · «θόρυβος»
προσαύξησης

ΑΣΤΕΡΕΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

Ακραία αντικείμενα σε αριθμούς

$1.4-2.8 M_{\odot}$

μάζα (θεωρητικά έως $\sim 3 M_{\odot}$)

ms – ώρες

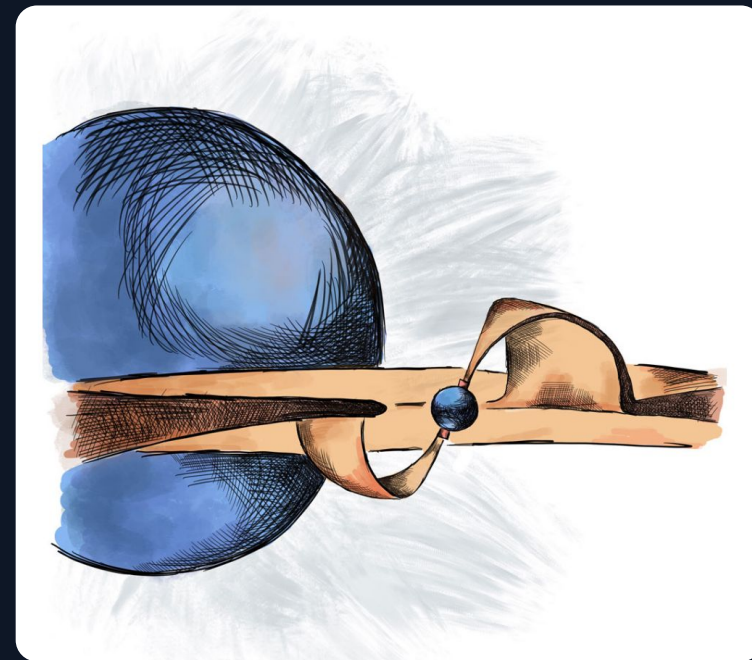
περίοδοι πάλσαρ ακτίνων X

$10-13 \text{ km}$

ακτίνα

$10^{12}-10^{13} \text{ G}$

τυπικό μαγνητικό πεδίο



Κατάλοιπα υπερκαινοφανών· η γρήγορη περιστροφή και το ισχυρό πεδίο προκύπτουν από διατήρηση στροφορμής και μαγνητικής ροής κατά την κατάρρευση.

Μεμονωμένοι Αστéρες Νετρονίων

Radio Pulsars

- Magnetic Dipole Radiation
- Σχέση Larmor

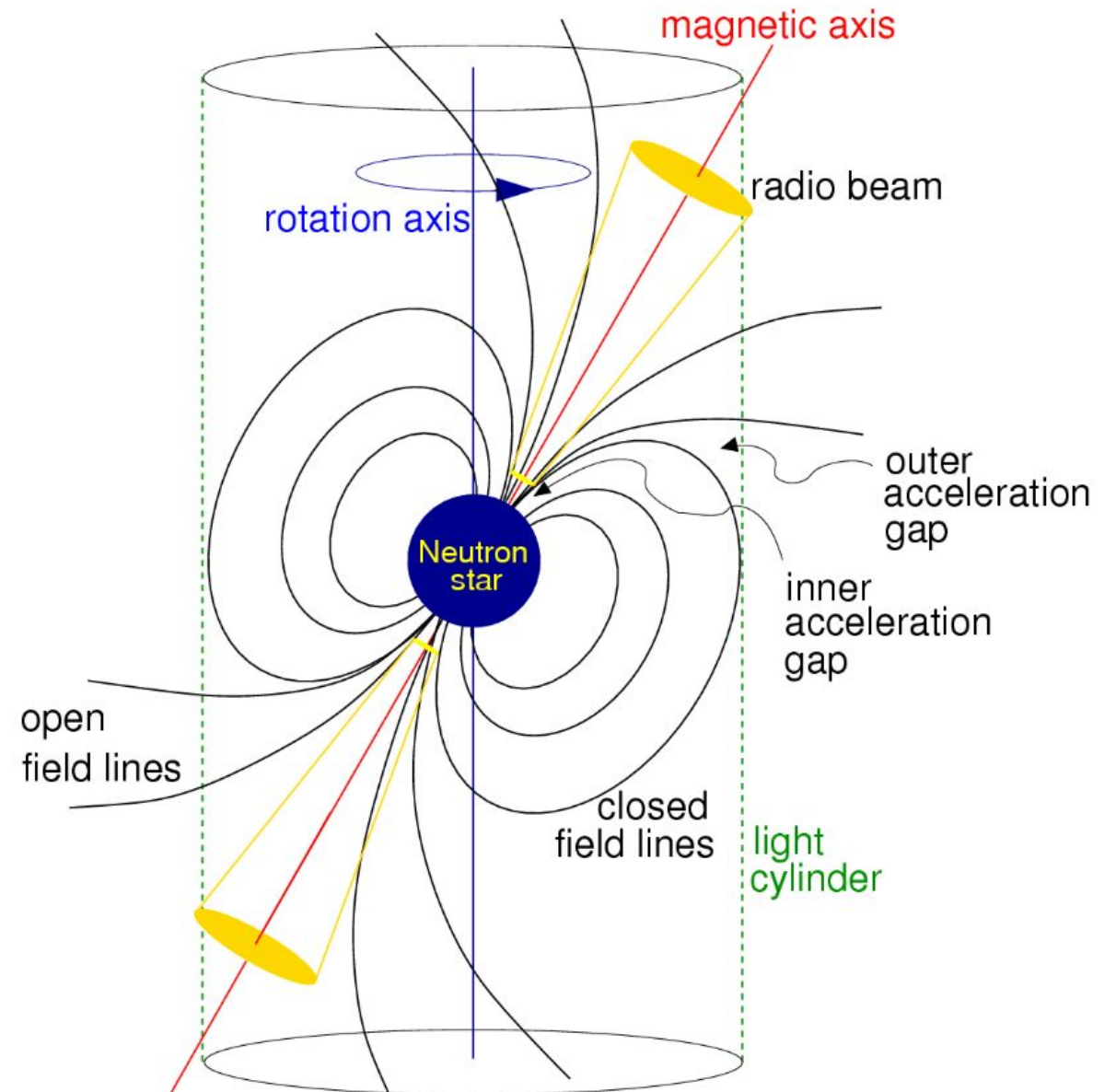
$$P = \frac{2}{3} \frac{q^2 \dot{v}^2}{c^3} = \frac{2}{3} \frac{(q \ddot{r} \sin \alpha)^2}{c^3} = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{p}_\perp)^2}{c^3}$$

$$-\dot{E} = \frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3}.$$

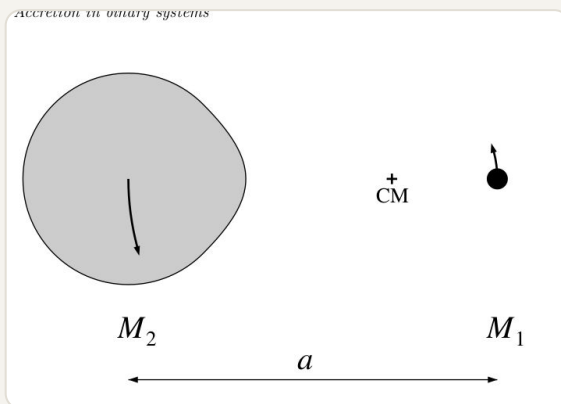
<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch6.html>

Essential Radio Astronomy

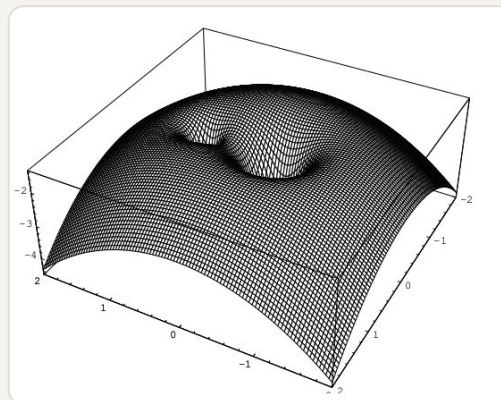
James J. Condon and Scott M. Ransom



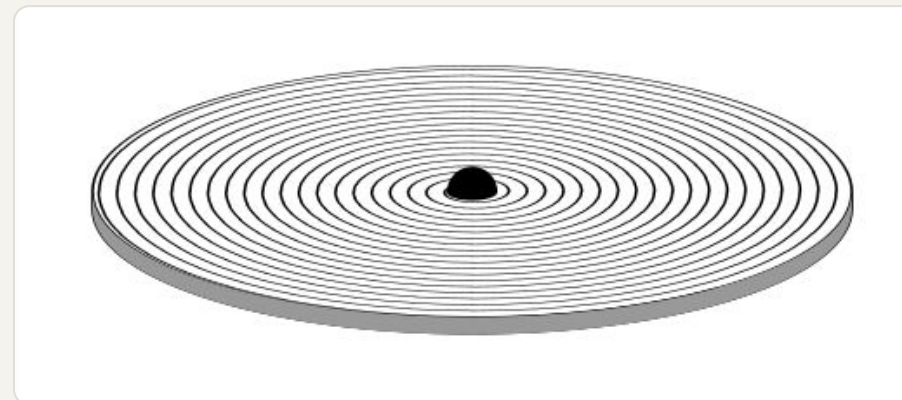
Μεταφορά μάζας και δίσκος προσαύξησης



Διπλό σύστημα



Δυναμικό Roche

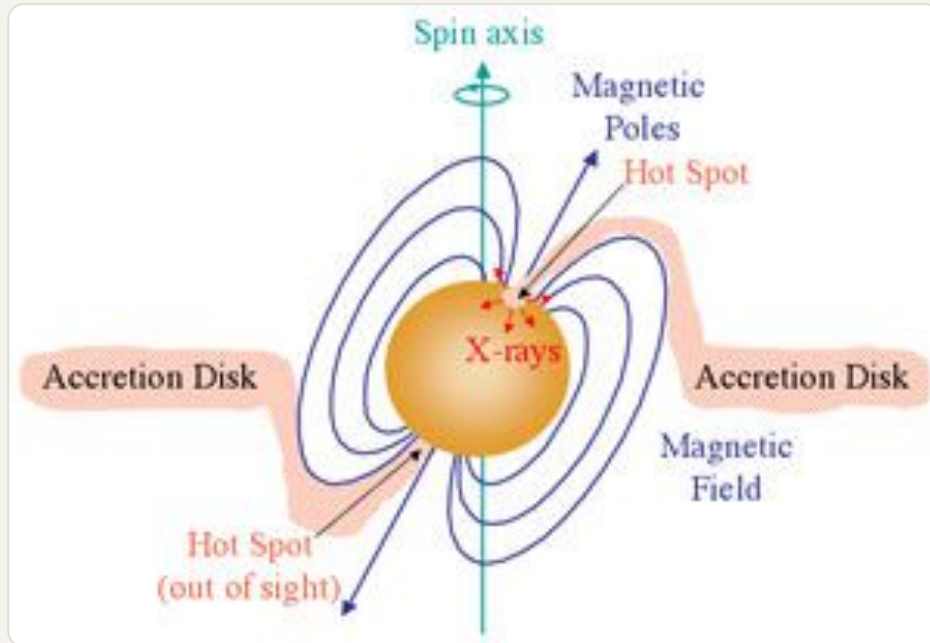


Δίσκος προσαύξησης

Η ύλη του συνοδού έχει στροφορμή: δεν πέφτει ακτινικά, σχηματίζει δίσκο με Κεπλεριανές τροχιές.

$$v_K = \sqrt{GM/r}, \quad \Omega_K = \sqrt{GM/r^3}$$

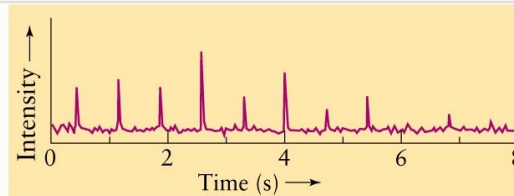
Ο «φάρος» των μαγνητικών πόλων



Κοντά στον αστέρα η ύλη ακολουθεί τις **γραμμές του πεδίου** και πέφτει στους μαγνητικούς πόλους.

Οι πόλοι γίνονται θερμές περιοχές ή **στήλες προσαύξησης** που εκπέμπουν ακτίνες Χ.

Μαγνητικός άξονας $\neq$ άξονας περιστροφής $\rightarrow$ οι θερμές περιοχές μπαينوβγαίνουν στο οπτικό πεδίο: **παλμοί**.



ΠΑΛΣΑΡ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Επιτάχυνση ή επιβράδυνση;

ΡΑΔΙΟΠΑΛΣΑΡ

$$\dot{P} > 0$$

Απομονωμένοι αστέρες: χάνουν ενέργεια με ακτινοβολία διπόλου και άνεμο. Μόνο επιβράδυνση (spin-down).

ΠΑΛΣΑΡ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

$$\dot{P} < 0 \text{ ή } > 0$$

Η ύλη που προσπίπτει φέρνει στροφορμή: συχνά επιτάχυνση (spin-up), μερικές φορές εναλλαγές.

Ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου **μετράει τη ροπή** → μας λέει για το $\dot{m}$ και το B .

ΥΠΕΡΦΩΤΕΙΝΕΣ ΠΗΓΕΣ

ULX πάλσαρ και η NGC 300 ULX-1

$$L \gtrsim 10^{39} \text{ erg/s}$$

Πάνω από το όριο Eddington ενός αστέρα νετρονίων ($\sim 1.8 \times 10^{38} \text{ erg/s}$). Παλιά: υποψήφιος μαύρες τρύπες ενδιάμεσης μάζας.

2014: παλμοί από την **M82 X-2** → αστέρες νετρονίων με προσαύξηση πολύ πάνω από το όριο Eddington.

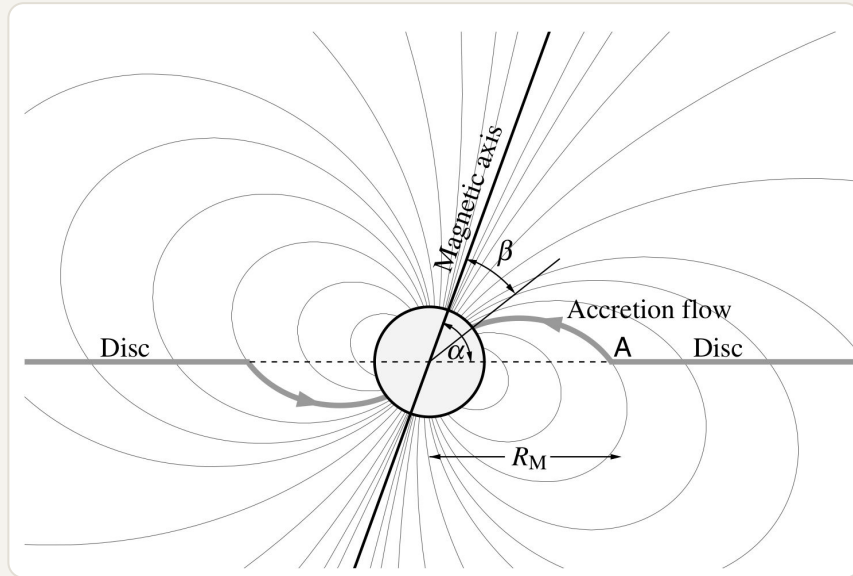
NGC 300 ULX-1

Συνδέεται με το «ψευδο-υπερκαινοφανές» SN 2010da, σε απόσταση $\sim 1.9 \text{ Mpc}$.

Δεκ. 2016, XMM-Newton + NuSTAR: παλμοί **$P \approx 31.6 \text{ s}$**

Η περίοδος έπεσε από **$\sim 126 \text{ s}$ σε $\sim 18 \text{ s}$** σε περίπου 4 χρόνια

Μαγνητόσφαιρα και ακτίνα Alfven



Μαγνητική πίεση = πίεση της ύλης σε ελεύθερη πτώση (cgs):

$$\frac{B^2}{8\pi} = \frac{1}{2} \rho v_{ff}^2, \quad \dot{m} = 4\pi r^2 \rho v_{ff}$$

με διπολικό πεδίο $B(r) = B_s (R/r)^3$:

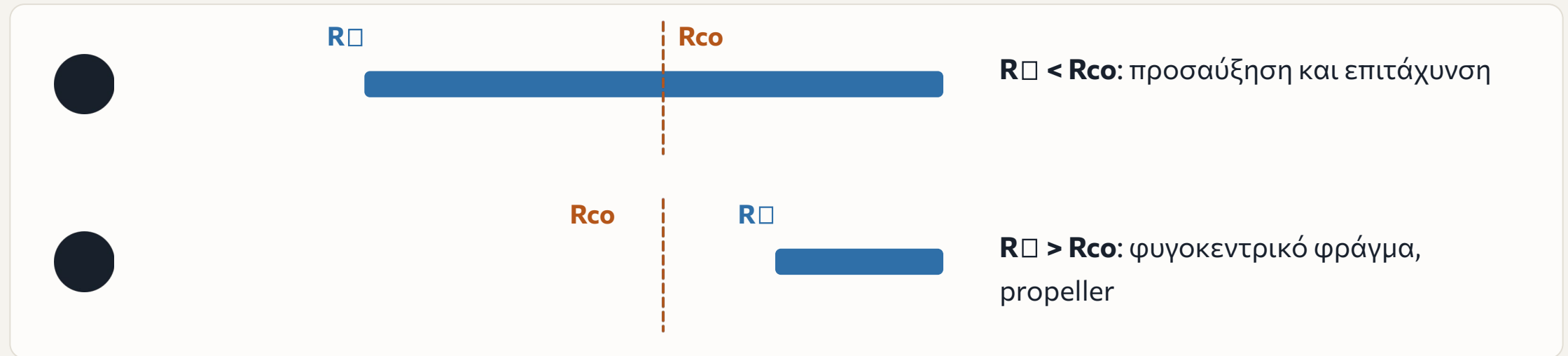
$$R_A = \left(\frac{\mu^4}{2GM\dot{m}^2} \right)^{1/7}, \quad \mu = B_s R^3$$

$$R_m = \xi R_A, \quad \xi \approx 0.3 - 1 \quad \text{βασική τιμή } \xi = 0.5$$

$$R_A \simeq 1.8 \times 10^3 \left(\frac{B_s}{10^{12} \text{ G}} \right)^{4/7} \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^{12/7} \left(\frac{M}{1.4 M_\odot} \right)^{-1/7} \left(\frac{\dot{m}}{10^{-8} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{-2/7} \text{ km}$$

ΘΕΩΡΙΑ

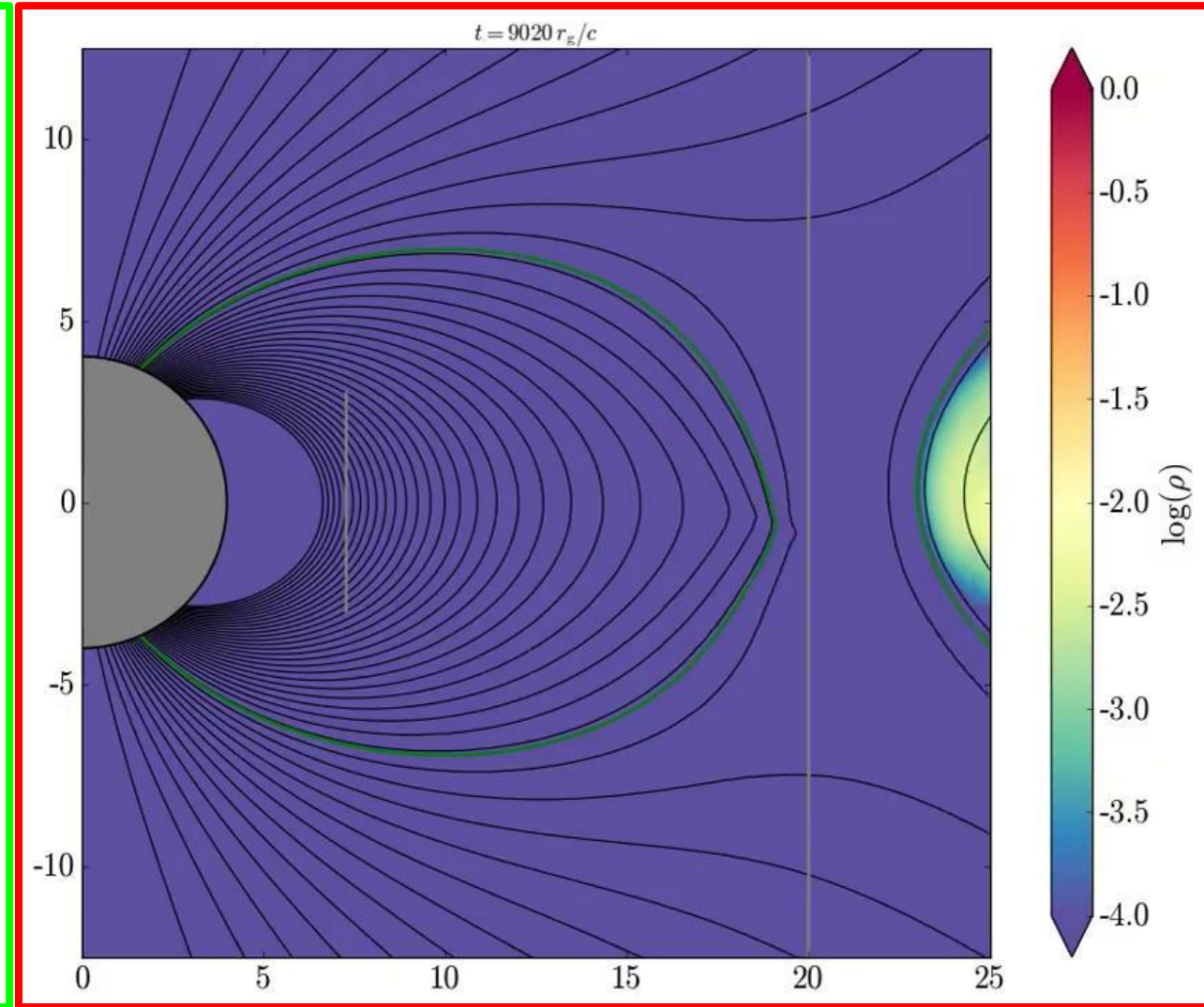
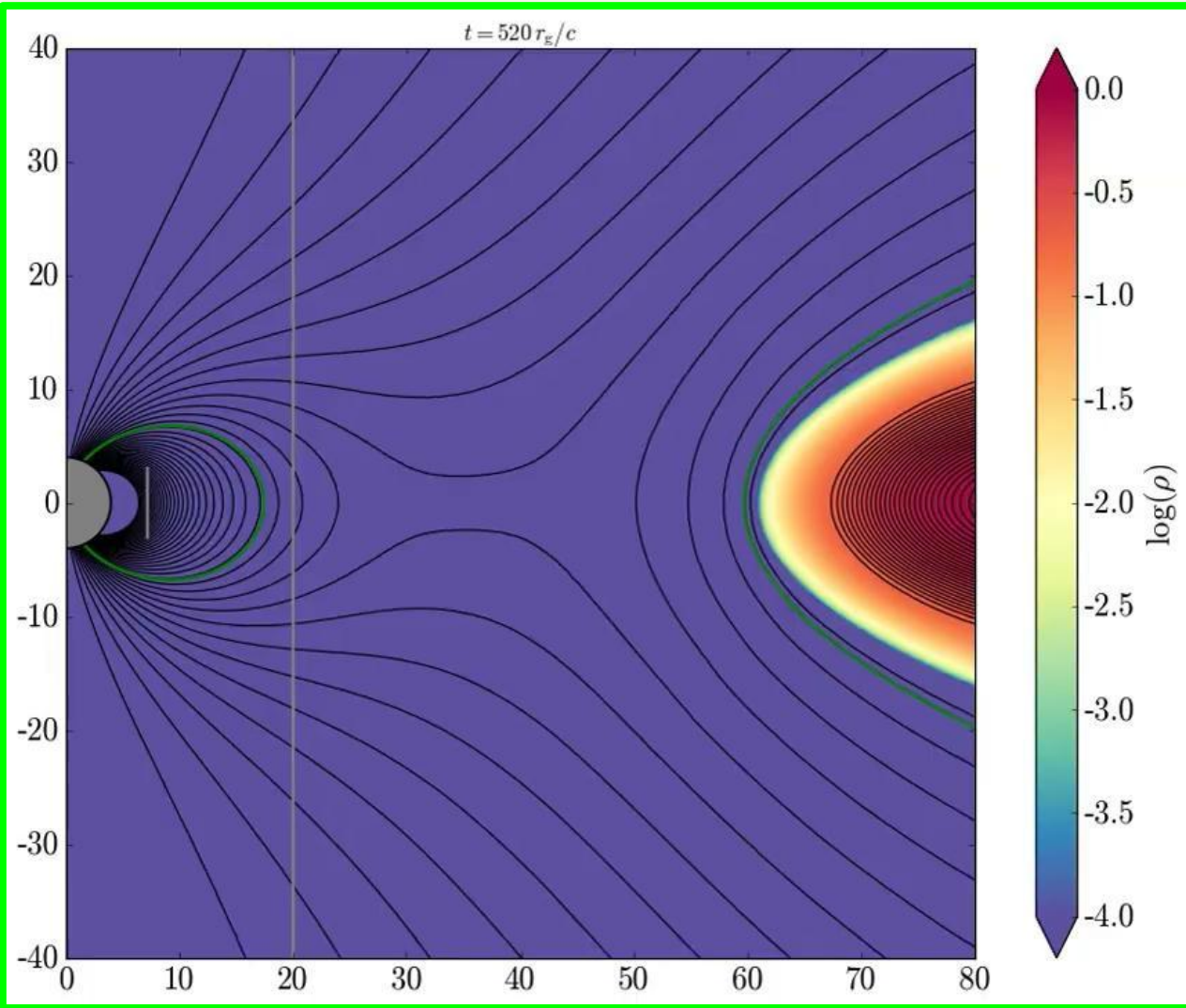
Ακτίνα συμπεριστροφής: πότε γίνεται προσαύξηση;



$$R_{co} = \left(\frac{GMP^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \simeq 1.7 \times 10^3 \left(\frac{P}{1s} \right)^{2/3} \left(\frac{M}{1.4 M_\odot} \right)^{1/3} \text{km}$$

Εκεί όπου $\Omega_* = \Omega = 2\pi/P$: η Κεπλεριανή ύλη συμπεριστρέφεται με το πεδίο

ΜΗD προσομοιώσεις



Credit: Kyle Parfrey

$$\boxed{\Omega_{AN} <} \Omega_K = \sqrt{GM/r^3} \boxed{< \Omega_{AN}}$$

Ροπή προσαύξησης και spin-up

Η ύλη φέρνει στροφορμή

$$N_{acc} = \dot{m} \sqrt{GMR_m}$$

Στροφορμή ανά μονάδα μάζας της Κεπλεριανής ύλης στο R_∞ , επί τον ρυθμό προσαύξησης.

Ο αστέρας επιταχύνεται

$$\dot{\nu} = \frac{N}{2\pi I}, \quad I = \frac{2}{5}MR^2, \quad \dot{P} = -\frac{\dot{\nu}}{\nu^2}$$

$I \approx 1.1 \times 10^{45} \text{ g cm}^2$ για $1.4 M_\odot$ και 10 km (ρεαλιστικά μοντέλα: $1\text{--}2 \times 10^{45}$).

Υπόθεση της άσκησης: **όλη η ροπή οφείλεται στην προσαύξηση** (λογικό όταν $R_\infty \ll R_{co}$).

Από τη ροπή στο μαγνητικό πεδίο

Βήμα 1 • ροπή + spin-up

$$R_m = \frac{1}{GM} \left(\frac{2\pi I \dot{\nu}}{\dot{m}} \right)^2$$



Βήμα 2 • ακτίνα Alfvén με $R_a = R \square / \xi$

Λύνουμε ως προς $B \square$ (μονάδες cgs, $\mu = B \square R^3$)

$$B_s = 2^{1/4} (2\pi)^{7/2} G^{-3/2} M^{-3/2} R^{-3} I^{7/2} \xi^{-7/4} \dot{\nu}^{7/2} \dot{m}^{-3}$$

Σχέση [7] των σημειώσεων: τη χρησιμοποιείτε απευθείας και εξηγείτε κάθε όρο στην εργασία

Λαμπρότητα και ρυθμός προσαύξησης

Ενέργεια προσαύξησης

$$L_{acc} = \frac{GM\dot{m}}{R} \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \frac{LR}{GM}$$

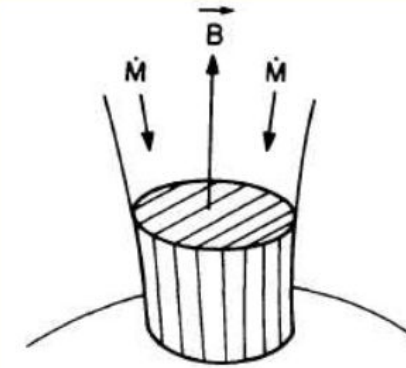
Από το $R \square$ και μέσα η ύλη πέφτει σχεδόν ελεύθερα: ενέργεια GM/R ανά μονάδα μάζας, $\sim 20\%$ του mc^2 .

Όριο Eddington

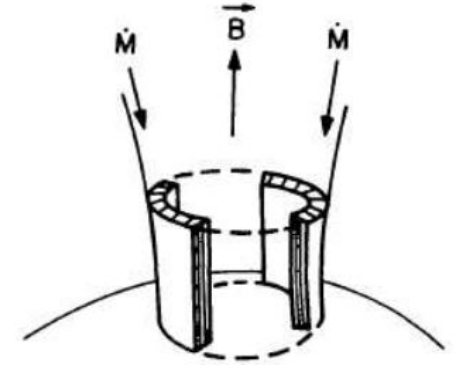
$$L_{Edd} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \simeq 1.26 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

$\approx 1.8 \times 10^{38} \text{ erg/s}$ για $1.4 M_\odot$. Πίεση ακτινοβολίας = βαρύτητα, για σφαιρική πρόσπτωση.

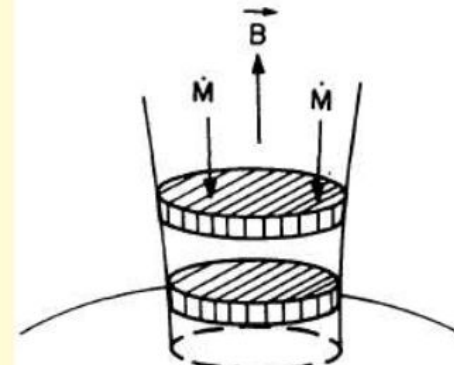
Σε ισχυρό B η ύλη πέφτει σε στήλες και η ακτινοβολία βγαίνει από τα πλάγια: το όριο ξεπερνιέται.



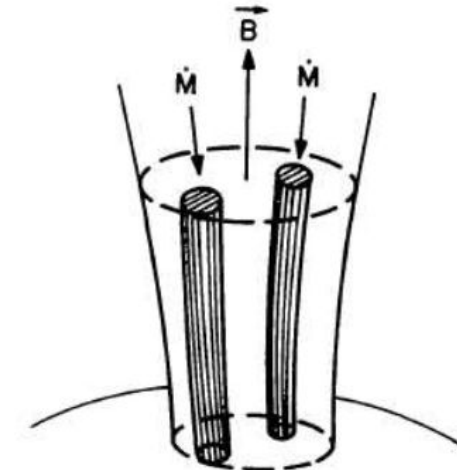
(a)



(b)



(c)



(d)

Mészáros, P., 1984

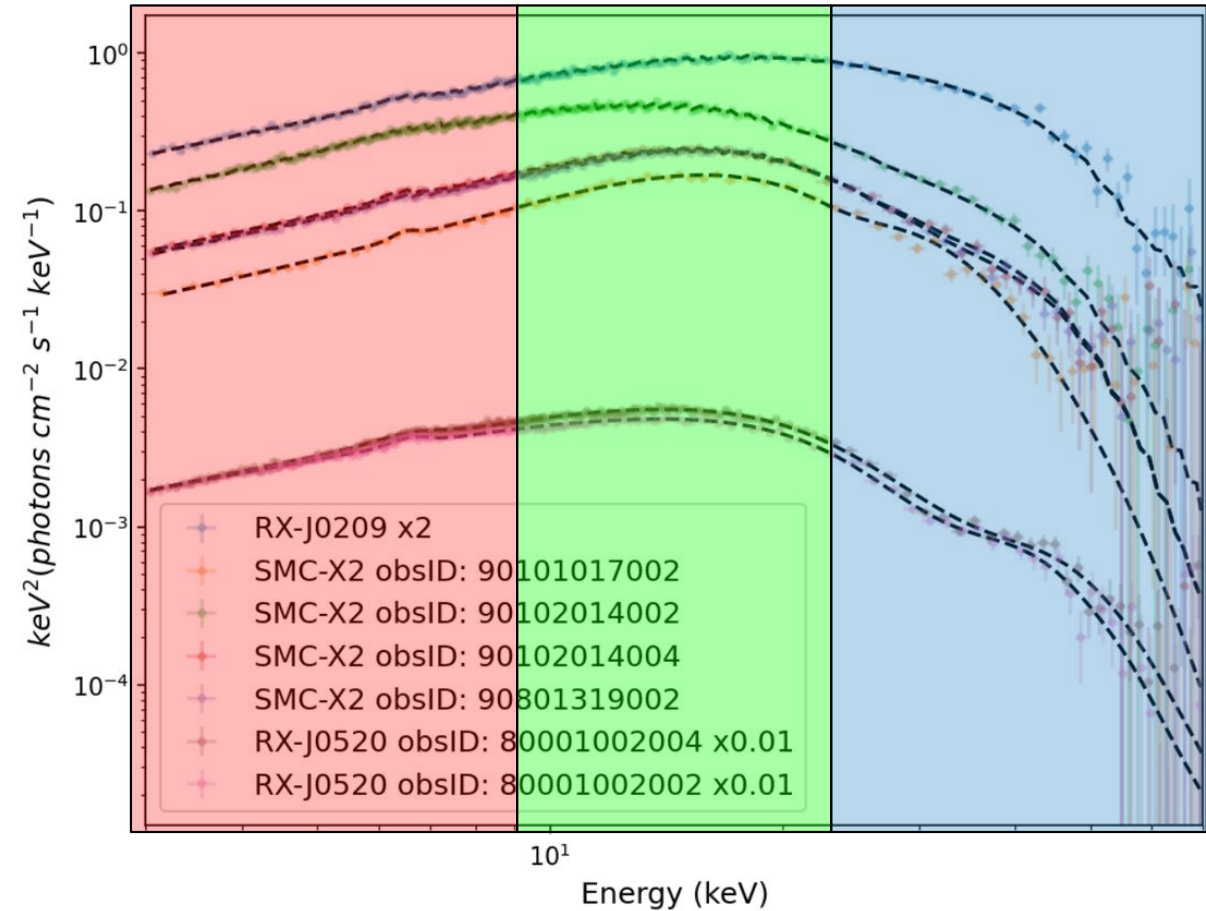
Λαμπρότητα και ρυθμός προσαύξησης (Bolometric correction)

Ενέργεια προσαύξησης

$$L_{acc} = \frac{GM\dot{m}}{R} \Rightarrow \dot{m} = \frac{LR}{GM}$$

Από το R και μέσα η ύλη πέφτει σχεδόν ελεύθερα: ενέργεια GM/R ανά μονάδα μάζας, $\sim 20\%$ του mc^2 .

$$\frac{\text{Green} + \text{Red} + \text{Blue}}{\text{Red}} = \text{BC}$$



ΓΙΑΤΙ ΜΕΤΡΑΝΕ ΟΙ ΕΚΘΕΤΕΣ

Μικρές αλλαγές, μεγάλο αποτέλεσμα στο B

$$B \propto \nu^{3.5} \dot{m}^{-3} \xi^{-1.75} \text{ με } \dot{m} \propto d^2 F$$

$\dot{m} \times 2$

$$B \div 8$$

απόσταση + 5%

$$B - 25\%$$

$\xi: 0.5 \rightarrow 1$

$$B \times 0.3$$

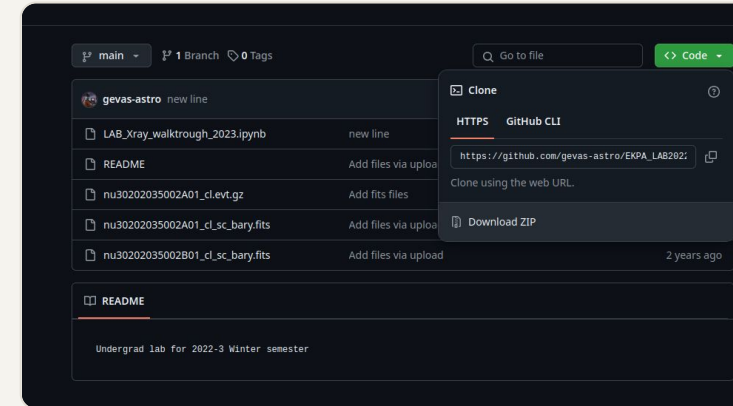
$\nu + 10\%$

$$B + 40\%$$

Το στατιστικό σφάλμα του ν είναι λίγο %. **Οι παραδοχές και οι τιμές της βιβλιογραφίας κυριαρχούν.**

Ένα αρχείο ο καθένας, μία κοινή σύγκριση

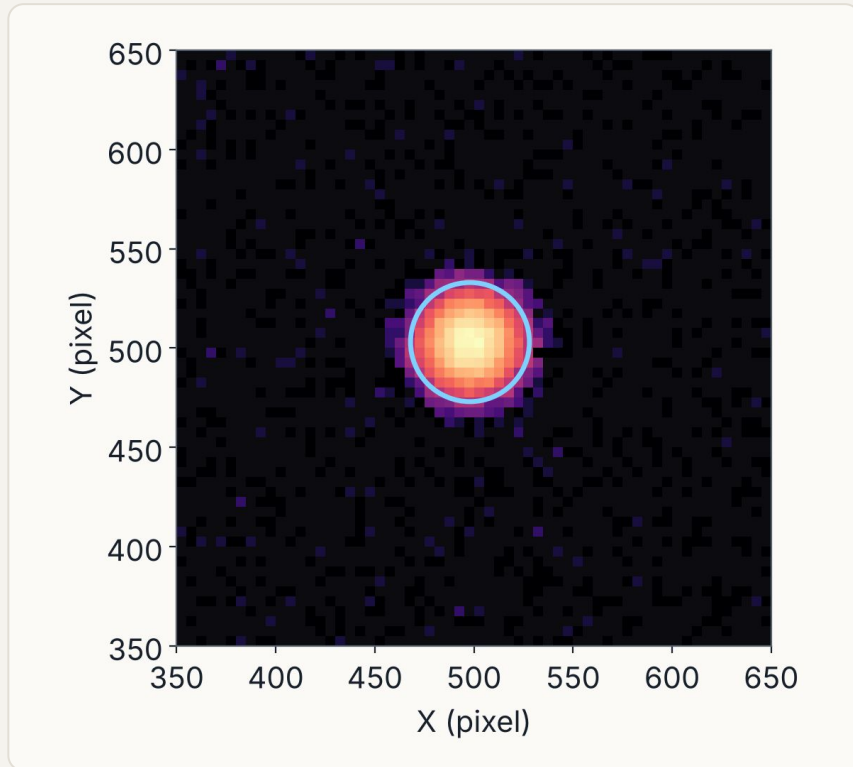
κλειδί	ανιχν.	bary	αρχείο
A_bary	FPMA	ναι	...A01_cl_bary.evt.gz
B_bary	FPMB	ναι	...B01_cl_bary.evt.gz
A_nobary	FPMA	όχι	...A01_cl.evt.gz
B_nobary	FPMB	όχι	...B01_cl.evt.gz



github.com/gevas-astro/EKPA_LAB2
022W_XRay

Στο τέλος: μία γραμμή στο **Google Sheet** (αρχείο, τμήματα, bins, $v \pm \sigma$). Έχει σημασία ο ανιχνευτής; Η βαρυκεντρική διόρθωση;

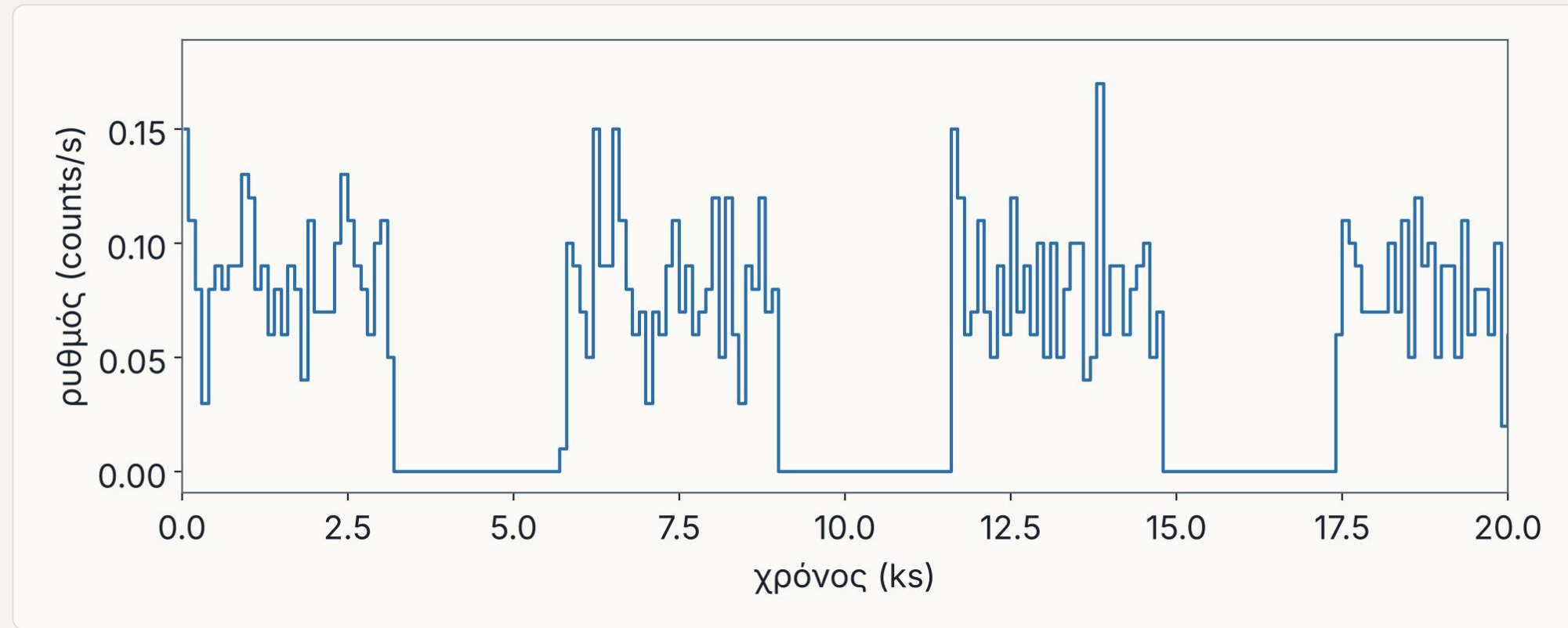
Επιλογή φωτονίων της πηγής



Προσομοιωμένα δεδομένα, για επίδειξη

1. Εικόνα = 2D ιστόγραμμα των X, Y
2. Κέντρο με το μάτι ή το πιο φωτεινό bin
3. Κύκλος ~ 30 pixel γύρω από την πηγή
4. Ενέργειες 3–30 keV: $E = 0.04 \times PI + 1.6$
5. Χρόνοι από το πρώτο φωτόνιο: $t - t_0$

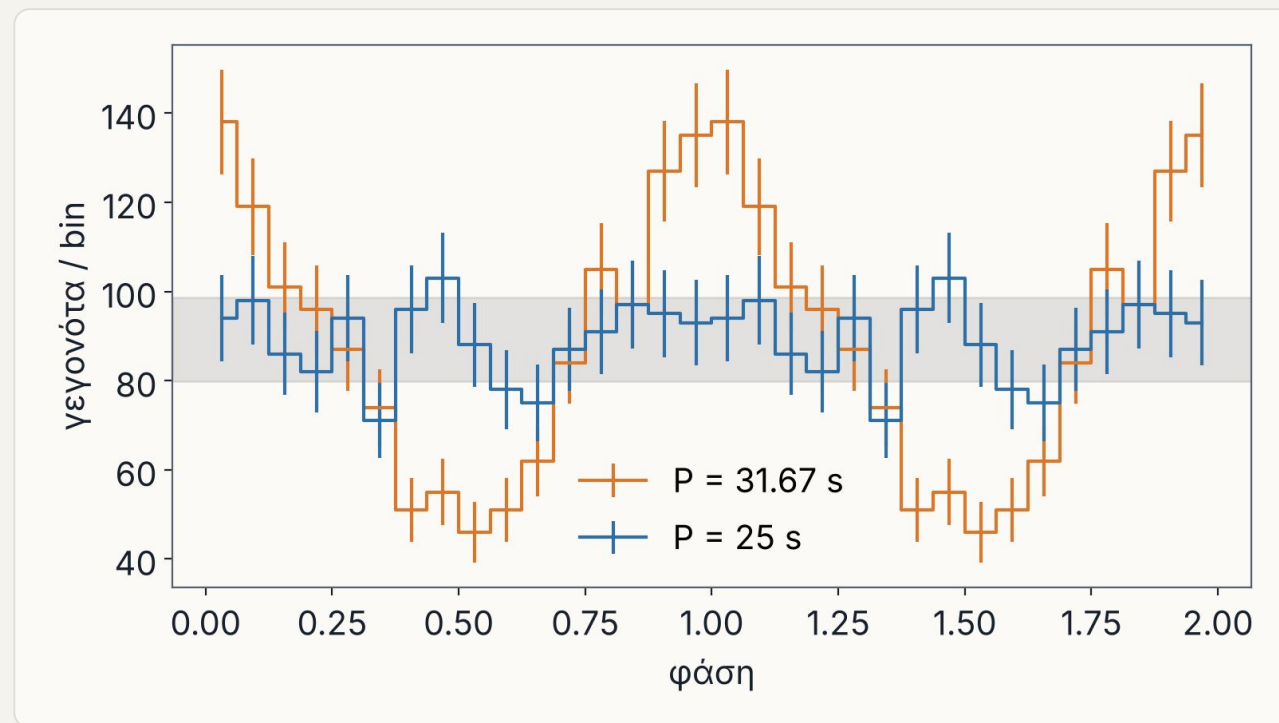
Καμπύλη φωτός: τα κενά της τροχιάς



Κάθε ~96 min η Γη κρύβει την πηγή: τα δεδομένα «ανάβουν και σβήνουν» περιοδικά.

Πρώτα 20 ks · προσομοίωση

Αναδίπλωση: το προφίλ του παλμού



Πορτοκαλί: σωστή περίοδος · μπλε: λάθος · γκρι: θόρυβος $\pm\sqrt{N}$ · προσομοίωση

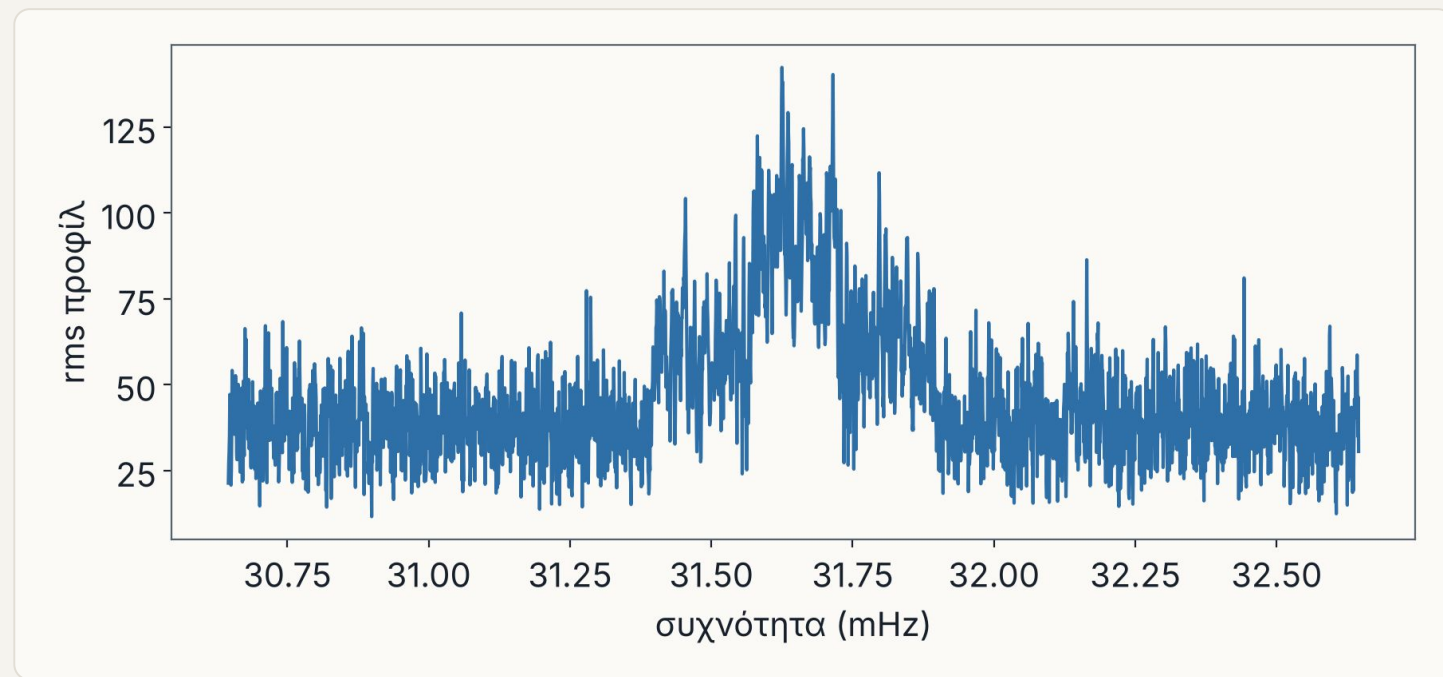
$$\phi = (t/P) \bmod 1$$

Φάση κάθε φωτονίου $\rightarrow$ ιστόγραμμα με n bins = μέσο προφίλ.

$$\Delta\phi \approx \frac{T_{obs} \Delta P}{P^2}$$

Λάθος κατά ΔP : η φάση «γλιστράει». Όταν $\Delta\phi \sim 1$, ο παλμός σβήνει.

Αναζήτηση περιόδου



Όλη η παρατήρηση (~300 ks) · προσομοίωση

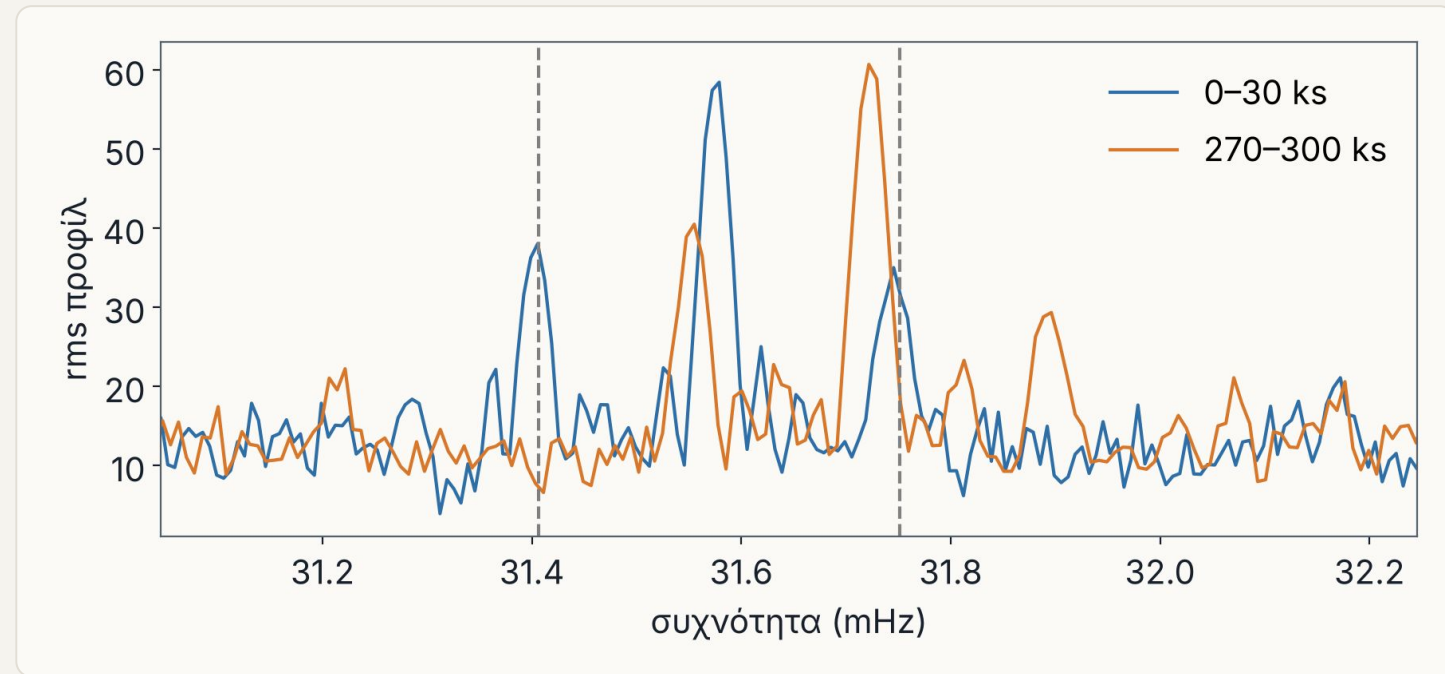
Για κάθε δοκιμαστική συχνότητα: **rms** του αναδιπλωμένου προφίλ. Μέγιστο = καλύτερη συχνότητα.

$$\delta f \approx \frac{1}{T_{obs}}$$

Φυσική διακριτική ικανότητα· βήμα δf / oversample.

Γιατί πολλές κορυφές; **Η συχνότητα αλλάζει** μέσα στην παρατήρηση, και τα δεδομένα έχουν **κενά**.

Τμήματα, μάσκες και aliasing

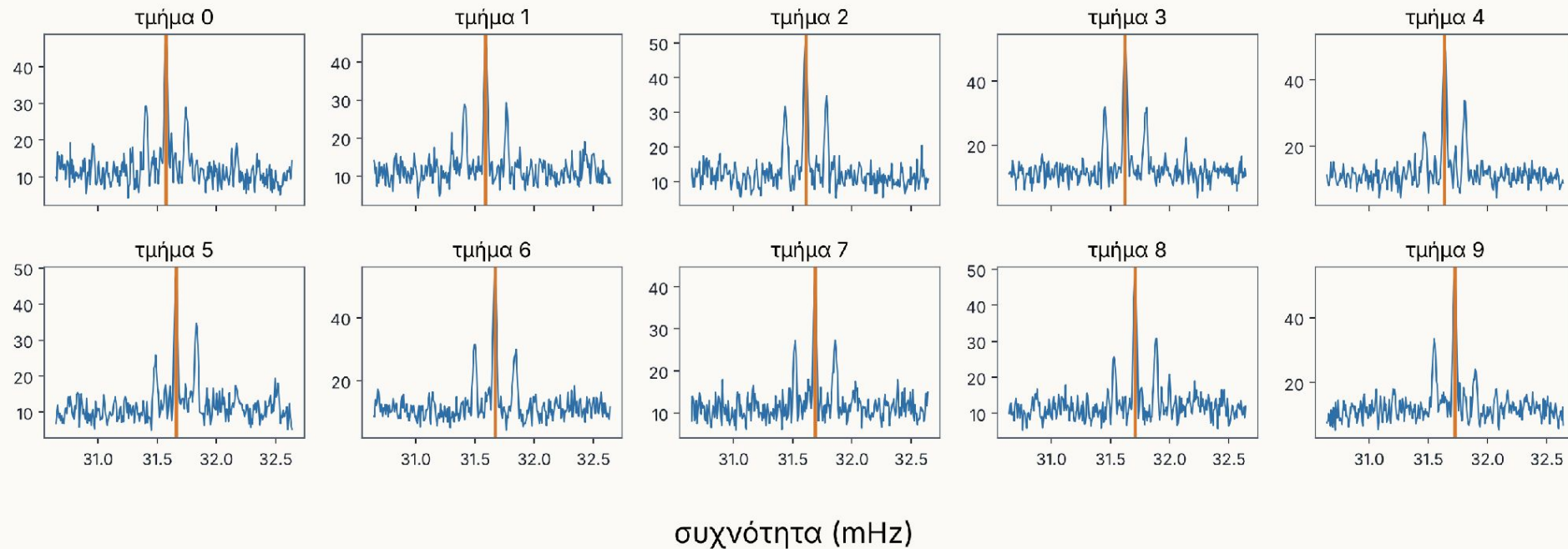


Η κύρια κορυφή **μετακινείται** προς μεγαλύτερη συχνότητα: spin-up.
Πλευρικές κορυφές από το «παράθυρο» των κενών της τροχιάς.

Μπλε: 0–30 ks · πορτοκαλί: 270–300 ks · διακεκομμένες: $f \pm 1/P_{orb}$

$$f_{alias} = f \pm \frac{k}{P_{orb}}, \quad \frac{1}{P_{orb}} \approx 1.7 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

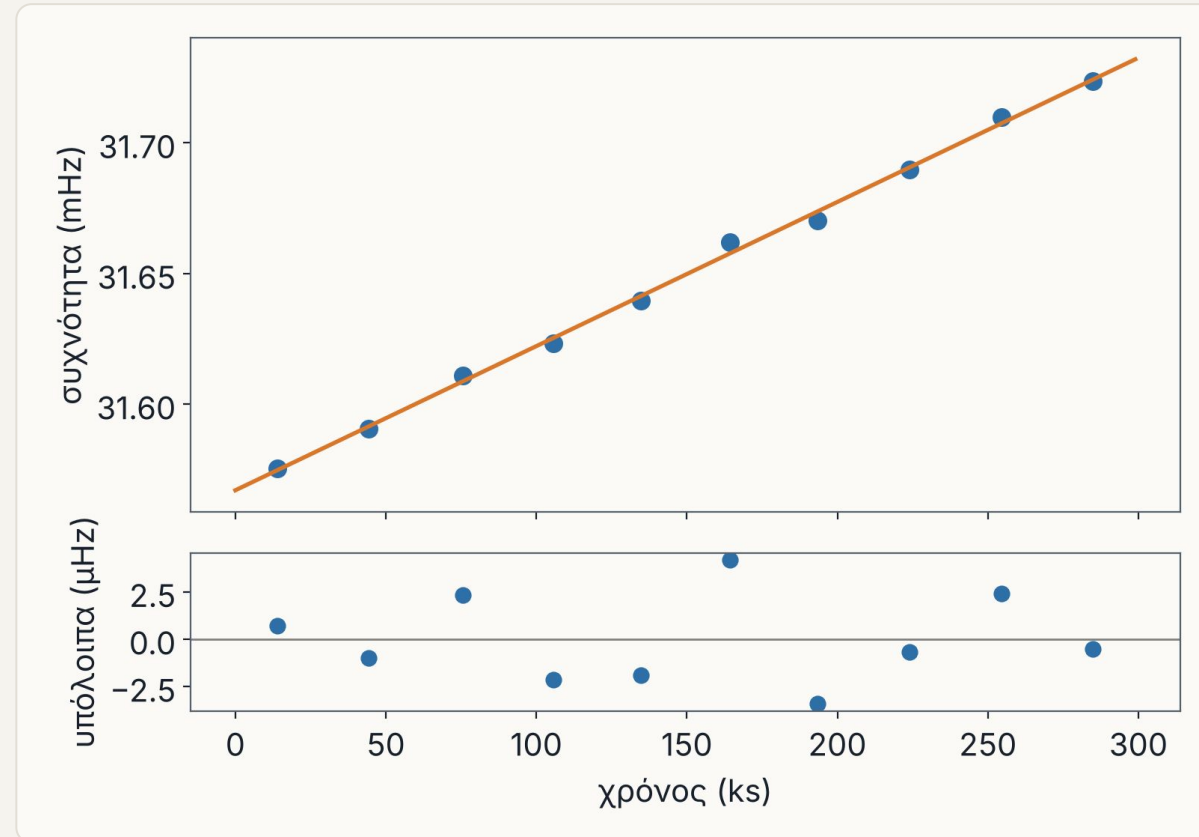
Συχνότητα σε κάθε τμήμα



Έλεγχος με το μάτι: η **κόκκινη γραμμή** κάθετα στην κύρια κορυφή, όχι σε alias;

Περισσότερα τμήματα = περισσότερα σημεία, αλλά χειρότερη ακρίβεια: $\delta f \approx 1/T_{\text{seg}}$.

Γραμμική προσαρμογή: $\dot{\nu}$



Η τελική εικόνα για την αναφορά · προσομοίωση

$$\nu(t) = \dot{\nu}(t - t_{ref}) + \nu_0$$

$$S = \sum_i [\nu_i - \dot{\nu}(t_i - t_{ref}) - \nu_0]^2, \quad \sigma = \sqrt{\text{diag}(\text{pcov})}$$

Κλίση = $\dot{\nu}$, με σφάλμα από τον πίνακα συνδιακύμανσης.

$$\dot{P} = -\dot{\nu} / \nu^2$$

Αναμένουμε $\dot{\nu} \sim 5 \times 10^{-10} \text{ Hz/s}$

EXTRA · ΒΑΡΥΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ

Μας πειράζει που κινείται η Γη;

$$\nu_{obs} \simeq \nu \left(1 + \frac{v_{\parallel}}{c}\right), \quad \dot{\nu}_{app} \simeq \frac{\nu}{c} \frac{dv_{\parallel}}{dt}$$

Φαινόμενο ν' από την τροχιά της Γης

$\sim 10^{-14}$ Hz/s

χειρότερη περίπτωση $\sim 6 \times 10^{-13}$

Μετρούμενο ν' του pulsar

5.5×10^{-10} Hz/s

~1000 φορές μεγαλύτερο

Σε 300 ks η καθυστέρηση Rømer αλλάζει ~ 23 s, όμως η κλίση σχεδόν δεν αλλάζει. Δοκιμάστε και τα δύο αρχεία και συγκρίνετε στο Sheet.

Πόσο μακριά είναι ο NGC 300;

Collections of Measurements

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

display selected measurements

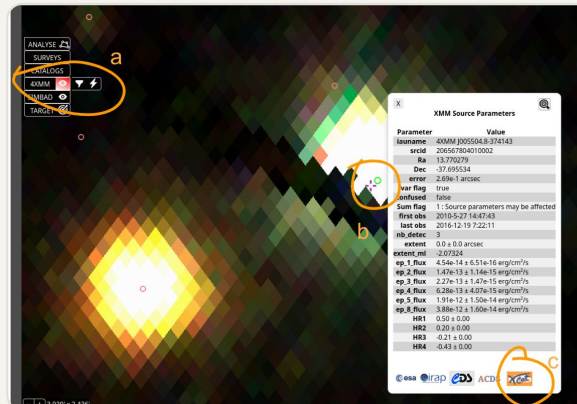
display all measurements

clear

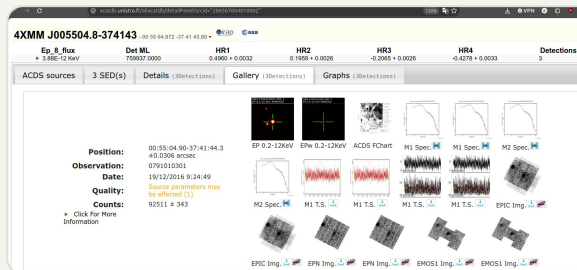
Simbad: NGC 300 → Distances

Πολλές μέθοδοι: **Κηφείδες**, TRGB, ...

Το εύρος των τιμών = **συστηματικό σφάλμα** της d .



Carpano+18: $L \approx 4.7 \times 10^{39} \text{ erg/s}$ για 1.88 Mpc $\rightarrow F \approx 1.1 \times 10^{-11} \text{ erg/s/cm}^2 (\pm 10\%)$

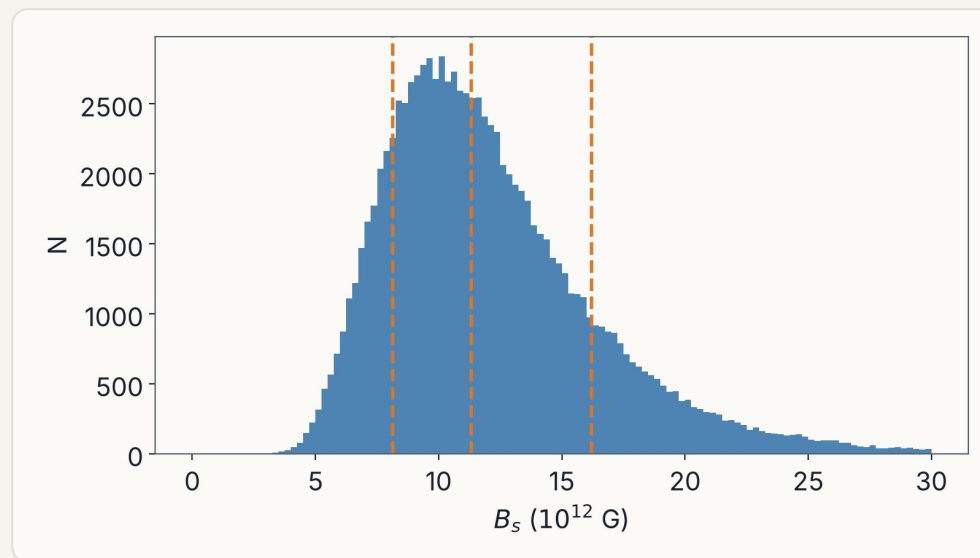
$$L = 4\pi d^2 F$$


XCatDB · παρατηρήσεις XMM 0791010101 / 0791010301 (ελέγξτε ημερομηνίες)

Συνδυασμός αβεβαιοτήτων

$$\left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 = \left(\frac{7}{2} \frac{\sigma_{\dot{\nu}}}{\dot{\nu}}\right)^2 + \left(3 \frac{\sigma_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2, \quad \left(\frac{\sigma_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 = \left(2 \frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_F}{F}\right)^2$$

Ποσότητα	Εύρος	Πηγή
$\dot{\nu}$	$\pm 1\sigma$	προσαρμογή
d	εύρος τιμών	Simbad / NED
F	$\pm 10\%$	Carpano+18
ξ	0.3–1	θεωρία
M	1.4–2.8 $M_{\odot}$	θεωρία



Extra: Monte Carlo · προσομοίωση

Ποιο σφάλμα κυριαρχεί; Συνήθως **όχι** το στατιστικό του $\dot{\nu}$.

Reports

Εργαστηριακή Αναφορά Άσκησης Ακτίνων Χ

Το Όνομά σας / AM

October 14, 2024

Πρότυπη εργασία σε overleaf <https://www.overleaf.com/read/bbssqbgghnssn#50a430>

5. πως μετρήσαμε το $\dot{\gamma}$ με βάση L_X από XMM-Newton, και ποια βολομετρική διόρθωση κάναμε.

6. Απόσταση πηγής από που και πόσο?

1 Στόχοι

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψετε τους στόχους του πειράματός σας.

Για να προσθέσετε αναφορά πάμε στην σελίδα NASA ADS (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018MNRAS.476L..45C/abstract>), διαλέγουμε export citation, βλέπε Σχ. 1. Και κάνουμε copy-paste το κατάλληλο κείμενο στο references.bib file, η αναφορά προστίθεται σαν [1] (βλέπε κώδικα).



Figure 1: Παράδειγμα για εικόνα. Αναφορά από NASA ADS

Να δοθούν μόνο οι βασικές εξισώσεις και όχι αναλυτικά η θεωρία. π.χ. Η ακτίνα Alfvén r_A δίνεται από:

$$r_A = \left(\frac{\mu^4}{M^2 \sqrt{2} \pi^2 G M} \right)^{\frac{2}{5}}$$

όπου μ είναι ... $\dot{M}$... G ... M ...

2 Μέθοδος

Σε αυτήν την ενότητα θα εξηγήσετε τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήσατε για να εκτελέσετε το πείραμα.

- τι δεδομένα, π.χ NuSTAR, από τότε, πόση διάρκεια.
- ποία events κρατήσαμε, περιοχή κ ενέργεια
- πως κάναμε ανάλυση με epoch folding και διαστήματα.
- τι μετρήσαμε, μεταβολή συχνότητας?



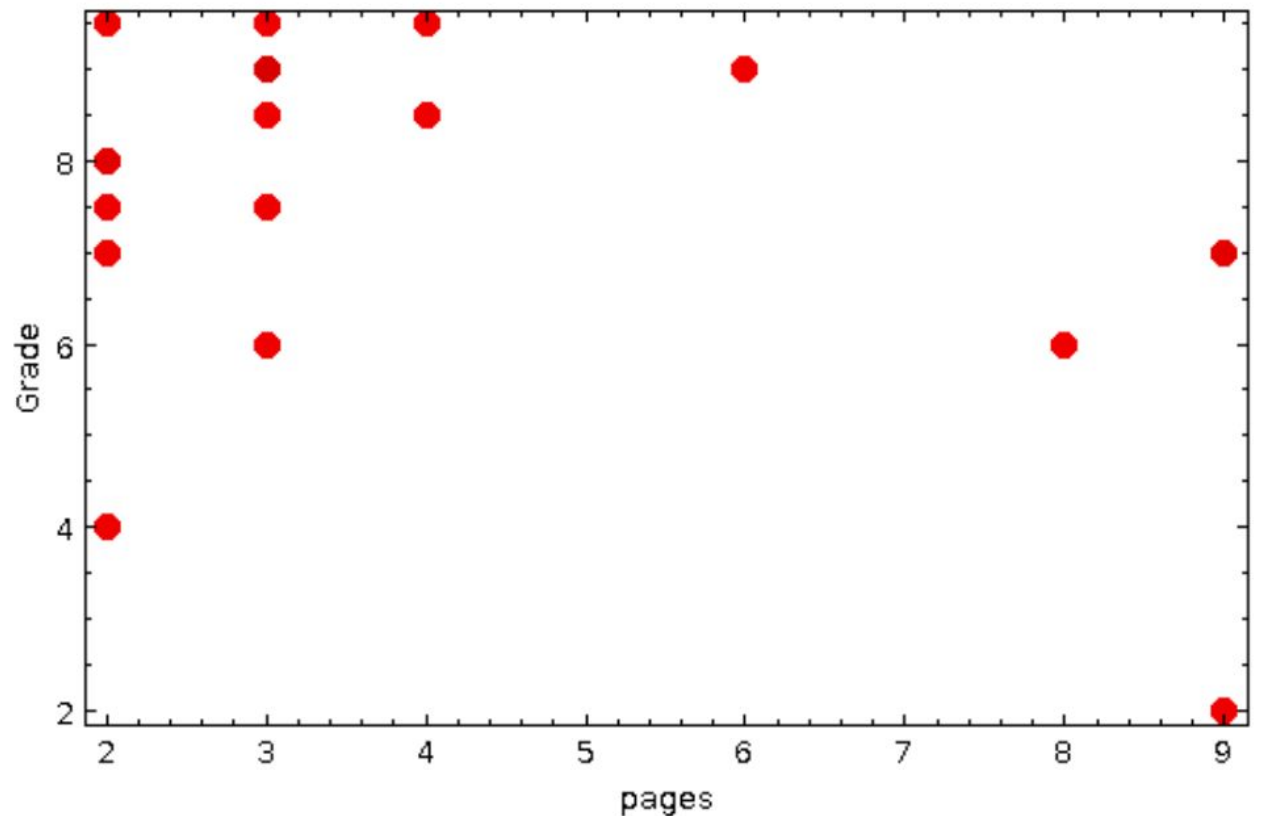
Figure 2: παράδειγμα από περιοδόγραμμα

3 Αποτελέσματα

Παρουσιάστε εδώ τα αποτελέσματα των πειραμάτων σας. Πως συνδέεται το $\dot{\gamma}$ και το $\dot{\gamma}$ με το μαγνητικό πεδίο? Να δώσετε τελική αναλυτική σχέση και αν θέλετε κάποιες βασικές. Τι μαγνητοσφαιρική ακτίνα βρήκατε? Σχολιάστε αποτελέσματα και ποια θεωρείτε σημαντική πηγή σφάλματος πέρα από στατιστικά σφάλματα.

Βιβλιογραφία

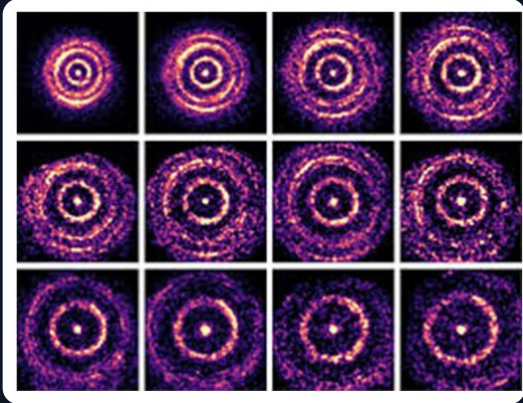
- [1] S. Carpano et al., 2018, *MNRAS*, 476, pp. L45–L49.



ριο

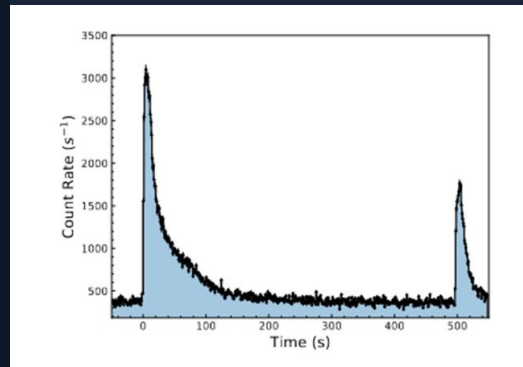
ΜΕΤΑ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Εργασίες 4 εβδομάδων



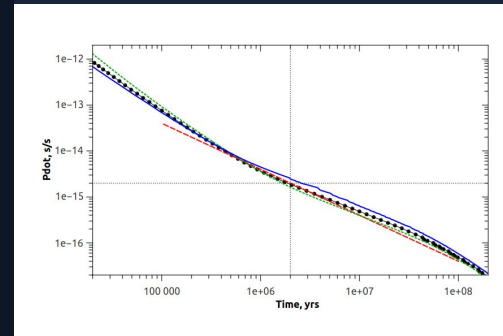
Δακτύλιοι σκόνης

Γεωμετρία → απόσταση



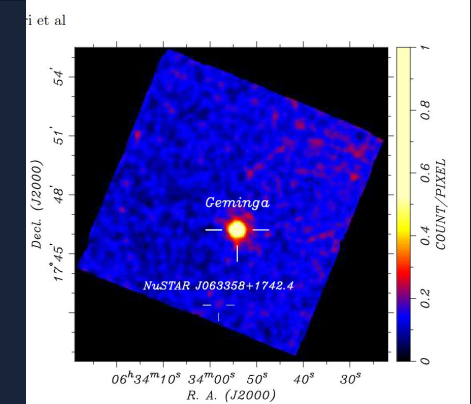
Θερμοπυρηνικές εκρήξεις

Ακτίνα αστέρα νετρονίων



Περιστροφή λευκού νάνου

Ίδιες τεχνικές χρονομέτρησης



Pulsars και τροχιές

Doppler από τη διπλή κίνηση

Και: **αντιστροφή ροπής** — τι γίνεται όταν $R_{\square} \rightarrow R_{\text{co}}$;

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Για περισσότερα

Άρθρα

- Carpano et al. 2018, MNRAS 476, L45
- Vasilopoulos et al. 2018, MNRAS 475, 220
- Vasilopoulos et al. 2019, MNRAS 488, 5225
- Bachetti et al. 2014, Nature 514, 202
- Ghosh & Lamb 1979, ApJ 234, 296

Βιβλία και εργαλεία

- Carroll & Ostlie, An Introduction to Modern Astrophysics
- Frank, King & Raine, Accretion Power in Astrophysics
- Seward & Charles, Exploring the X-ray Universe
- Stingray: stingray.science

Συγγραφέας: Γ. Βασιλόπουλος · Επιμέλεια και σχόλια: Δέσποινα Χατζηδημητρίου · Τα κείμενα επιμελήθηκαν με τη βοήθεια του Claude (Anthropic).