

Θερμές κηλίδες στους πίδακες των ενεργών γαλαξιών: πώς εξηγούνται οι παρατηρήσεις του *Chandra*;

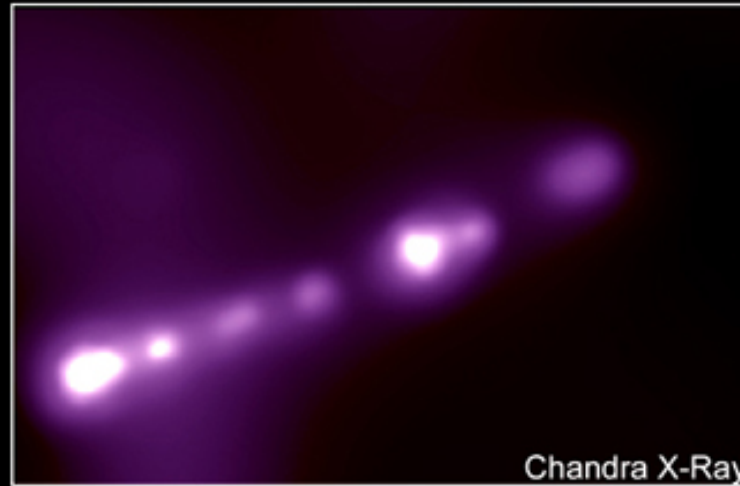
Μάρκος Γεωργανόπουλος*
& Δημοσθένης Καζάνας
NASA/Goddard Space Flight Center

*markos@milkyway.gsfc.nasa.gov

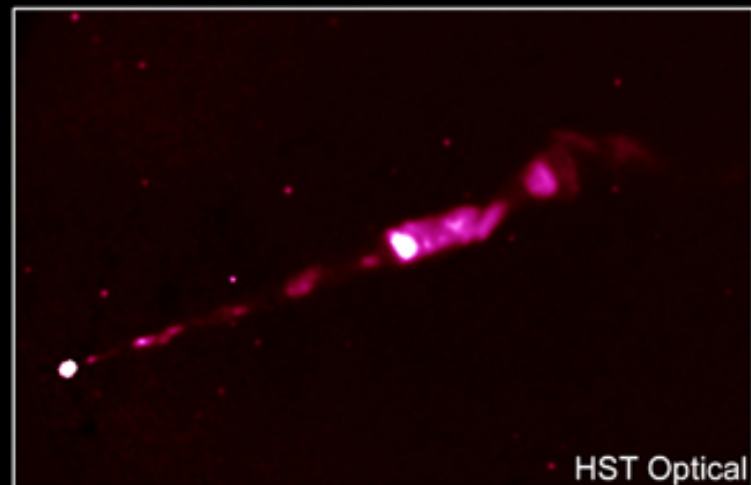
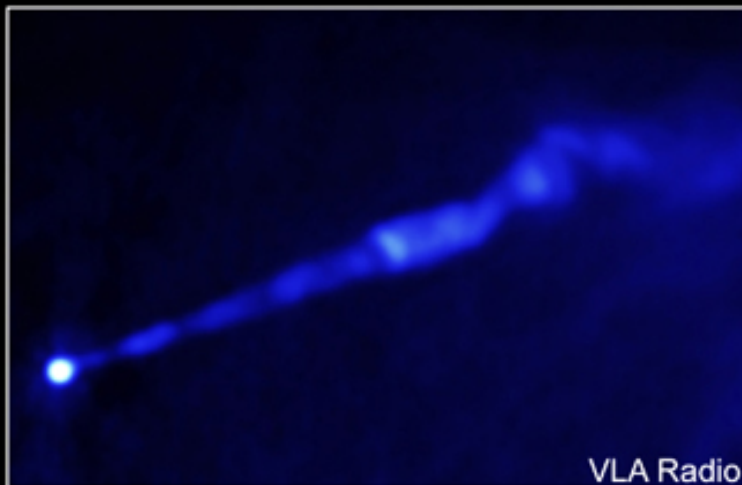
ApJ , 589, L5

ΑΠΘ, 23 ΜΑΙΟΥ 2003

Chandra: Βελτίωση της διακριτικής
ικανότητας στις ακτίνες X κατά ~10.



M87
www.lhea.nasa.gov



Σύνοψη

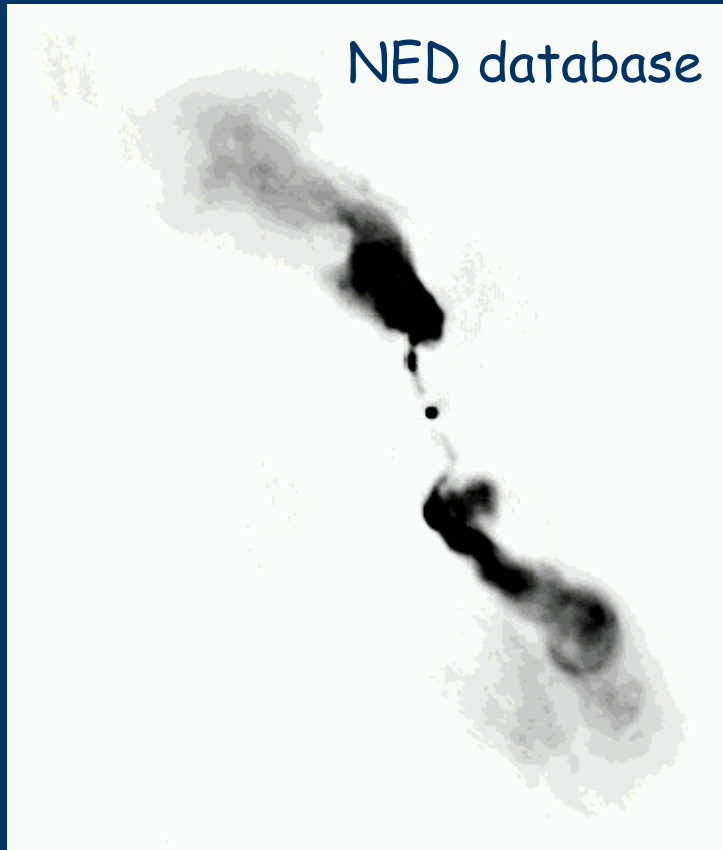
- Τι είναι οι ενεργοί γαλαξίες και ποιοί πιστεύουμε ότι είναι οι μηχανισμοί εκπομπής τους;
- Κύκνος A - Πίκτωρ A: Γιατί οι νέες παρατηρήσεις του *Chandra* προβλημάτισαν τους αστρονόμους;
- Επιπλέον παρατηρήσεις: το πρόβλημα επιτείνεται...
- Μία απλή παρατήρηση, μία εύλογη λύση, και ένας νέος μηχανισμός εκπομπής.

Ραδιογαλαξίες

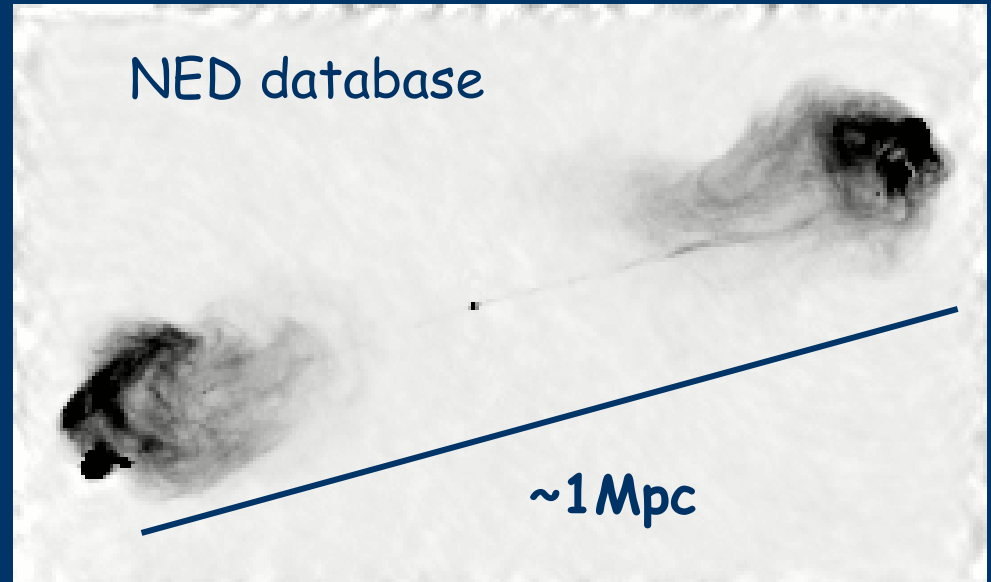
Ασθενείς FR I

$10^{24.5}$ W/Hz

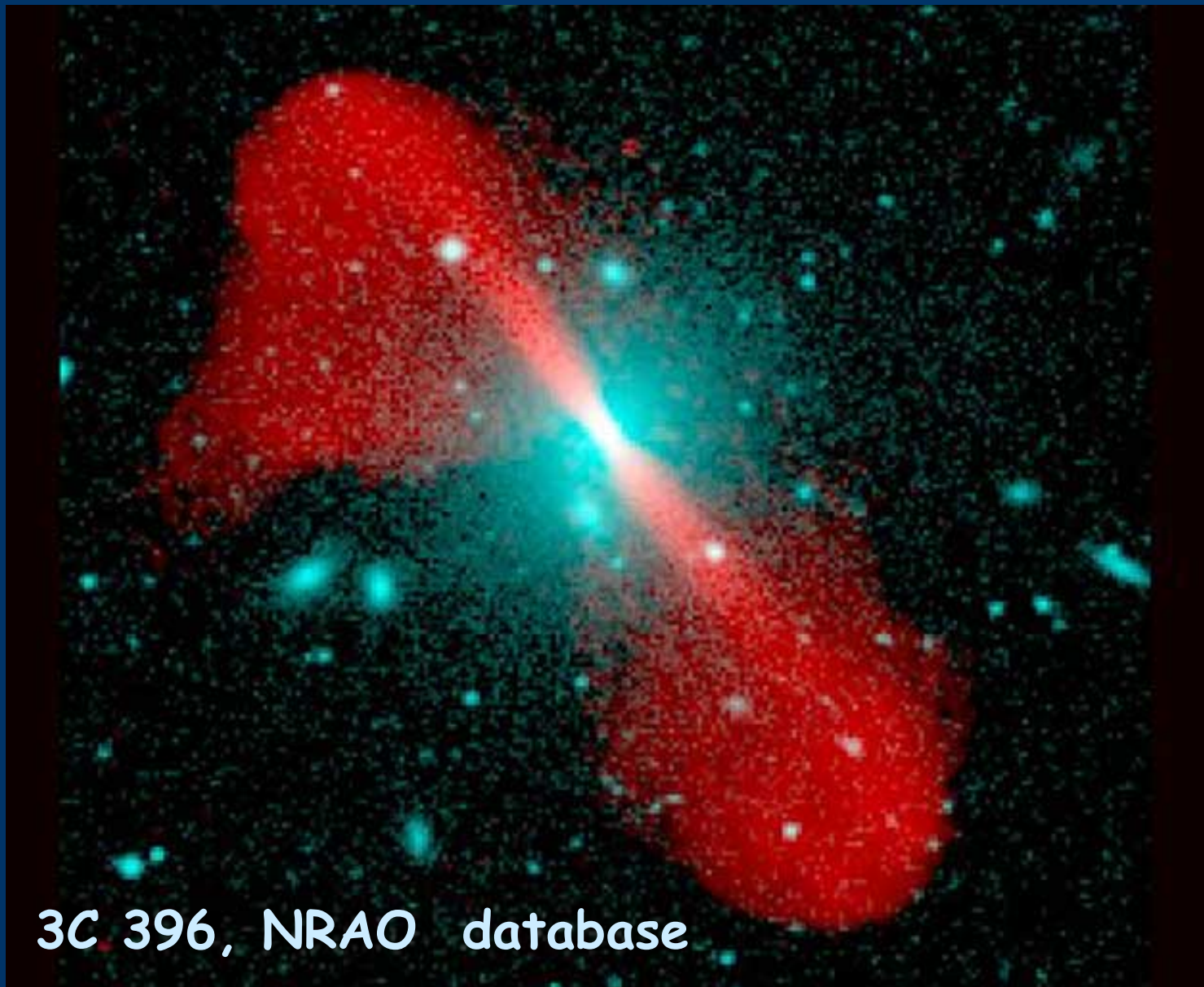
Ισχυροί FR II



Ύδρα (Hydra) A



Κύκνος (Cygnus) A

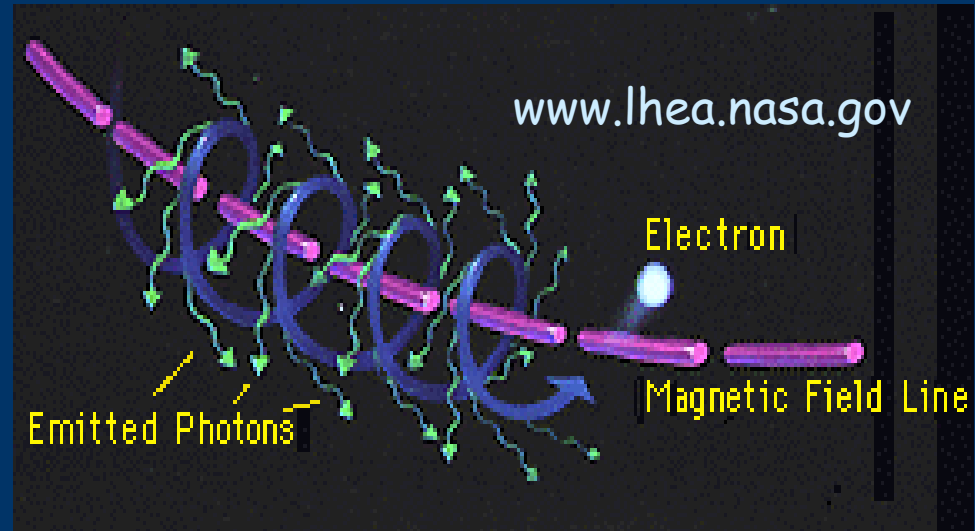


3C 396, NRAO database

Μηχανισμοί ακτινοβολίας Ι: Σύγχροτον

Κλασσική ερμηνεία:

Ενεργό ηλεκτρόνιο +
μαγνητικό πεδίο $\Rightarrow$
επιτάχυνση $\Rightarrow$
ακτινοβολία



Κβαντική ερμηνεία:

Το ηλεκτρόνιο στο
σύστημα ηρεμίας του
βλέπει το μαγνητικό
πεδίο ως εν δυνάμει
(virtual) φωτόνια, απο
τα οποία σκεδάζεται.

$$> v_s \approx \frac{e}{mc} \gamma^2 B \approx 10^6 B \gamma^2$$

$$> P_s = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_B, \quad U_B = \frac{B^2}{8\pi}$$

Μηχανισμοί ακτινοβολίας II: Αντίστροφη σκέδαση Κόμπτον

Ενεργά ηλεκτρόνια +
ασθενή φωτόνια $\Rightarrow$
ενεργά φωτόνια

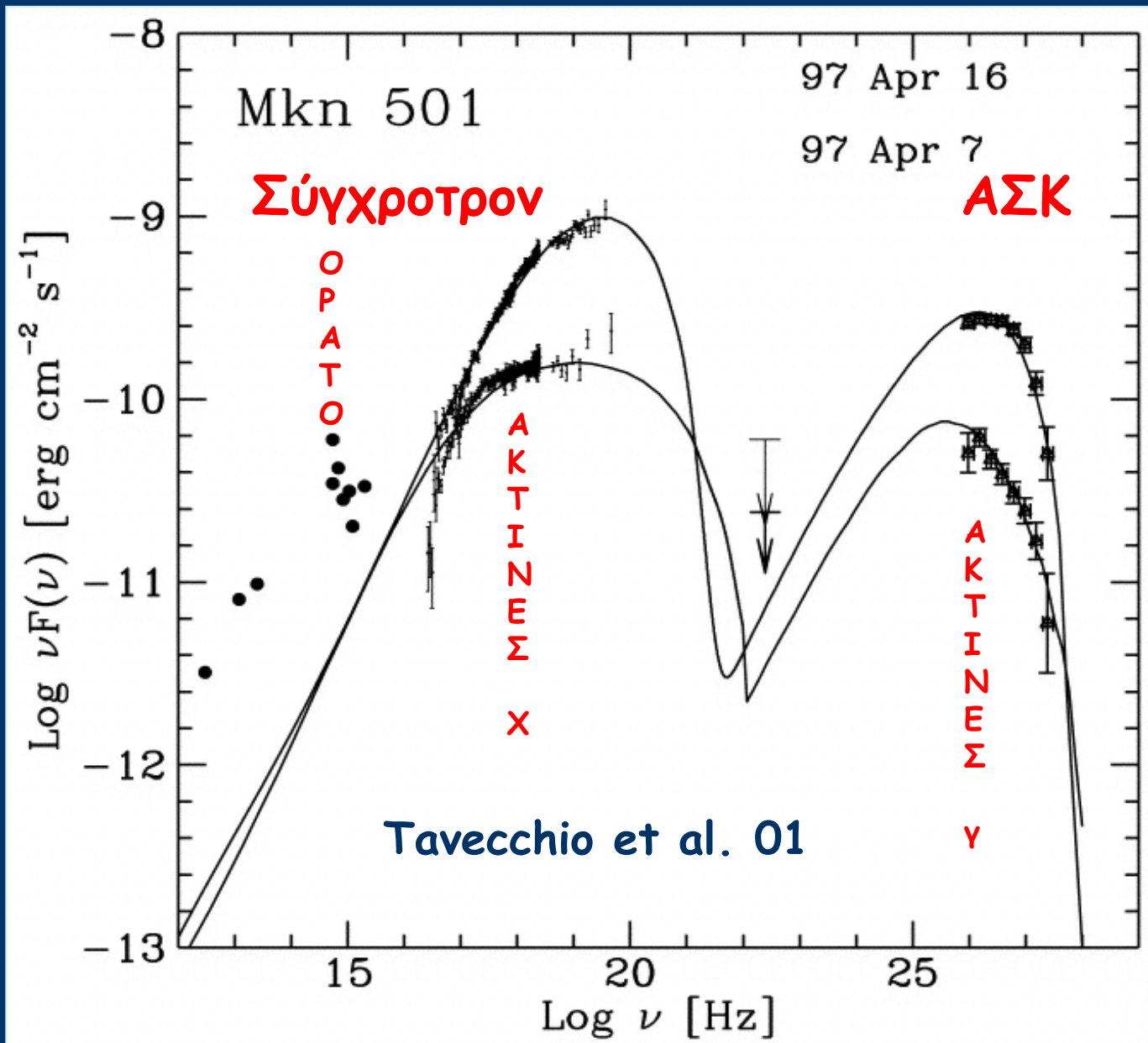
Αυτοσκέδαση
Σύγχροτρον-Κόμπτον
(ΑΣΚ)

Εξωτερικό Κόμπτον
(κοσμικό υπόβαθρο
μικροκυμάτων,
διάχυτη ακτινοβολία)

$$> V_c \approx V_0 \gamma^2$$

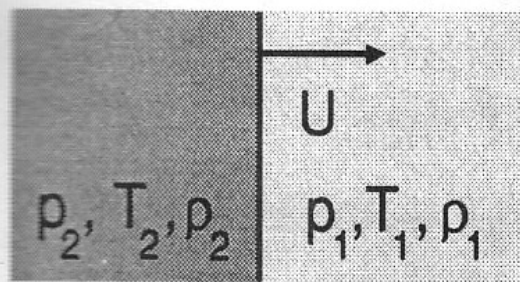
$$> P_c = \frac{4}{3} \sigma_T \gamma^2 V_0$$

$$> \frac{P_s}{P_c} = \frac{V_B}{V_0}$$

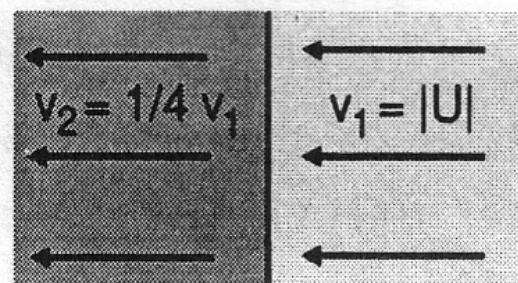


Πώς επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια;

Πιθανός μηχανισμός: επιτάχυνση Φέρμι σε κρουστικά κύματα: μετατροπή οργανωμένης ενέργειας σε τυχαία κίνηση.

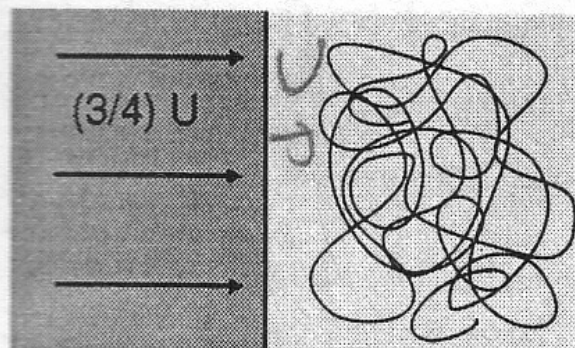


(a)

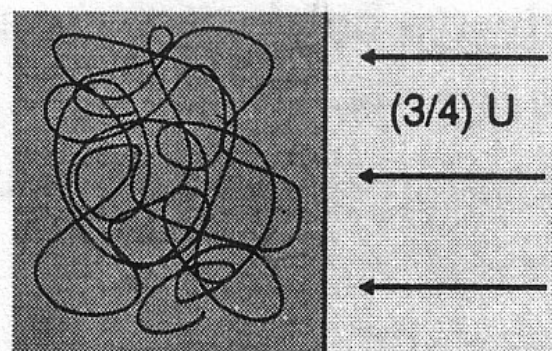


(b)

Longair Κεφ. 10,21



(c)



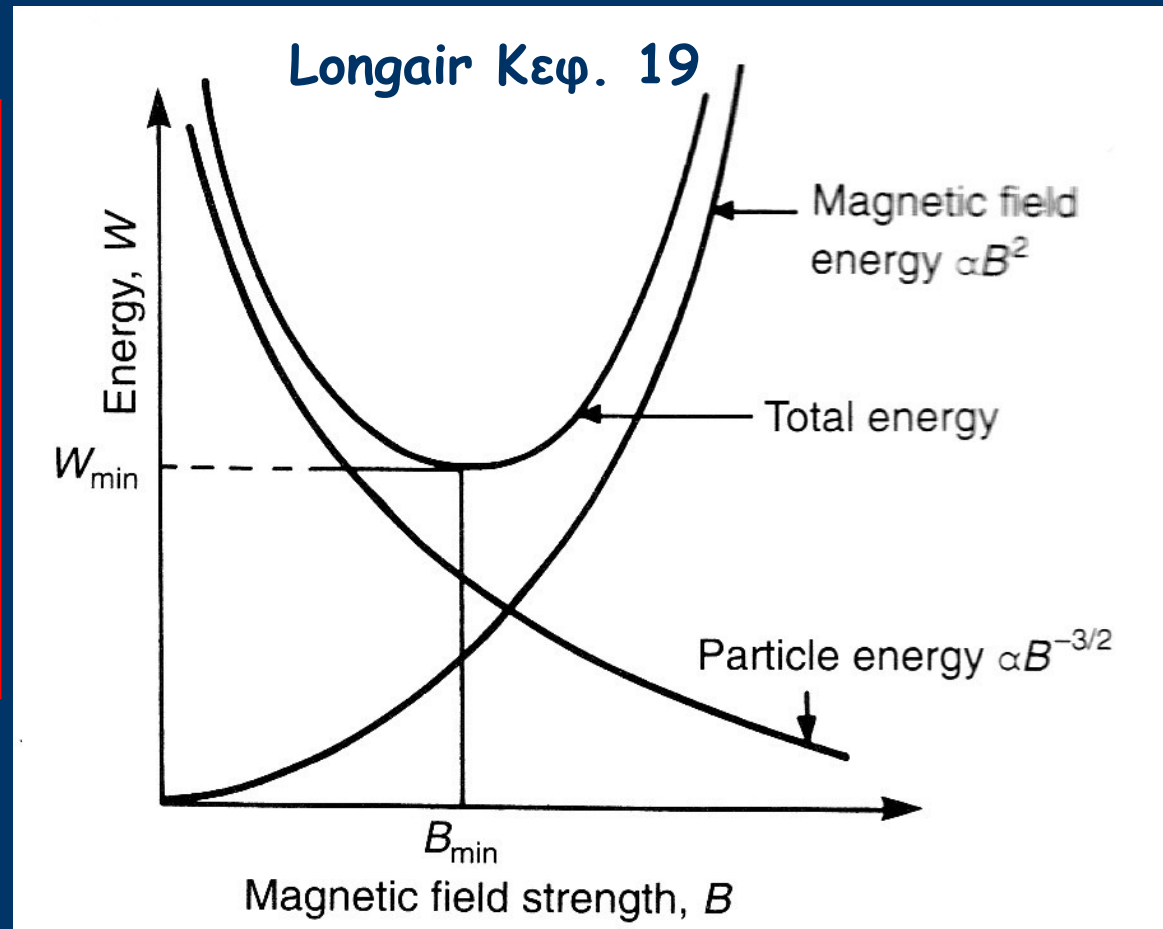
(d)

Ενεργειακή κατανομής νόμου δύναμης: $n(\gamma) \propto \gamma^{-s}$, $s=2$

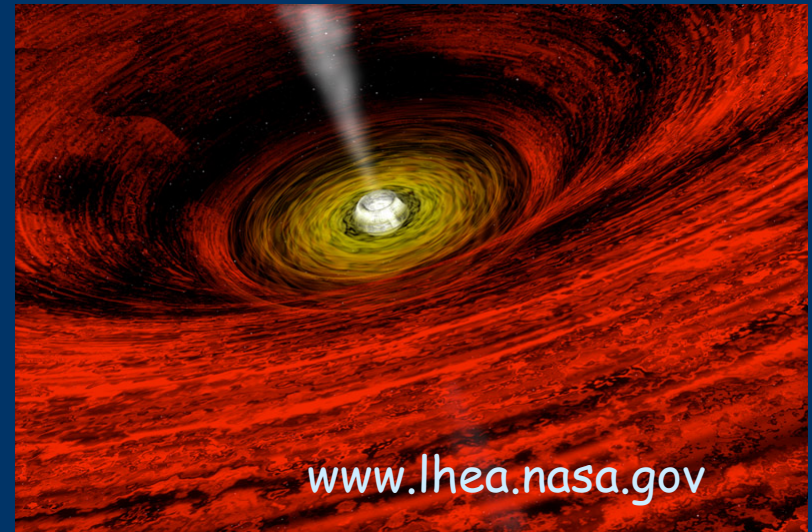
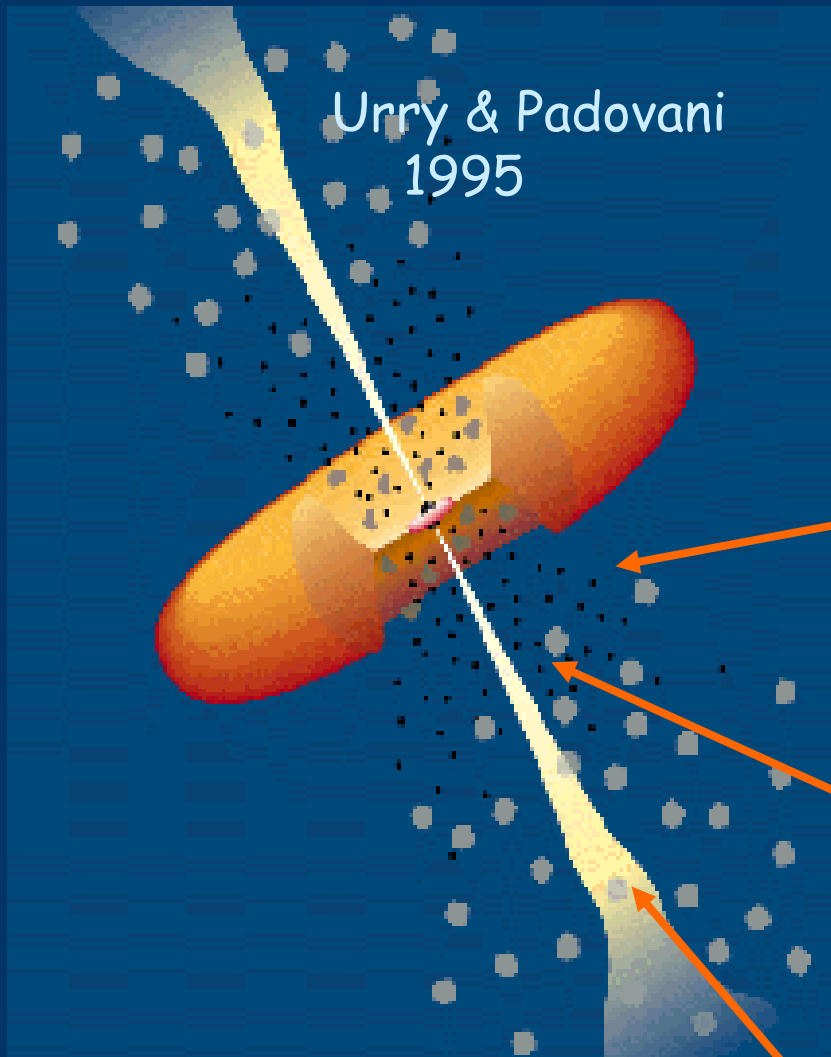
Ισοκατανομή, η οικονομικότερη επιλογή.

Υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί μαγνητικού πεδίου και ενεργών ηλεκτρονίων, που μπορούν να παράγουν ένα δεδομένο φάσμα σύγχροτρον. Αυτός που ελαχιστοποιεί τη συνολική ενέργεια της πηγής είναι:

ενεργειακή
πυκνότητα του
μαγνητικού πεδίου =
ενεργειακή
πυκνότητα των
ηλεκτρονίων



Ενοποίηση των ενεργών γαλαξιών

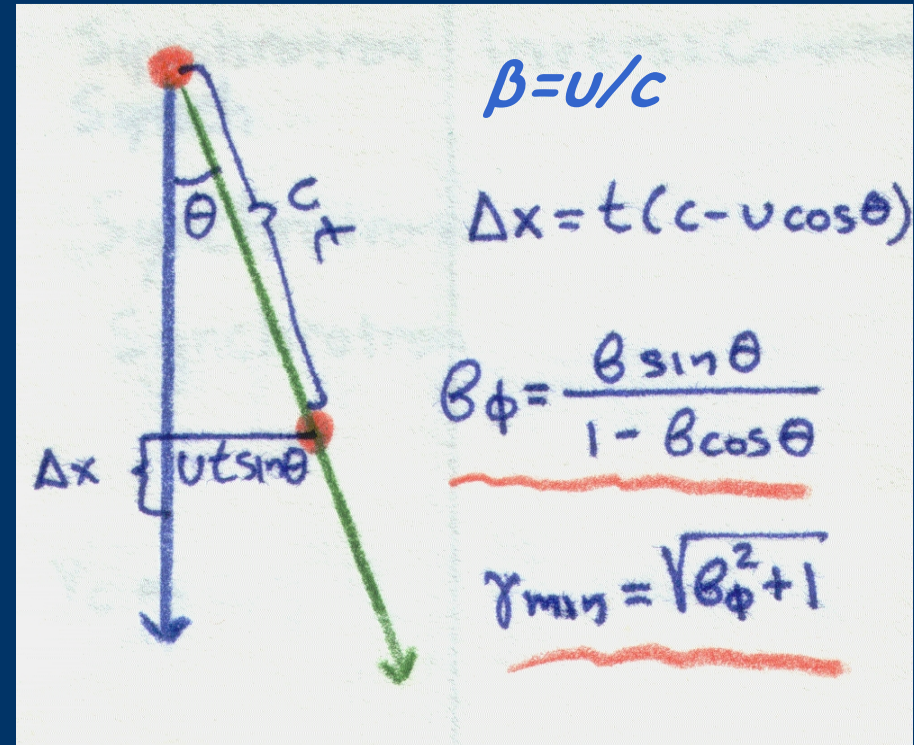
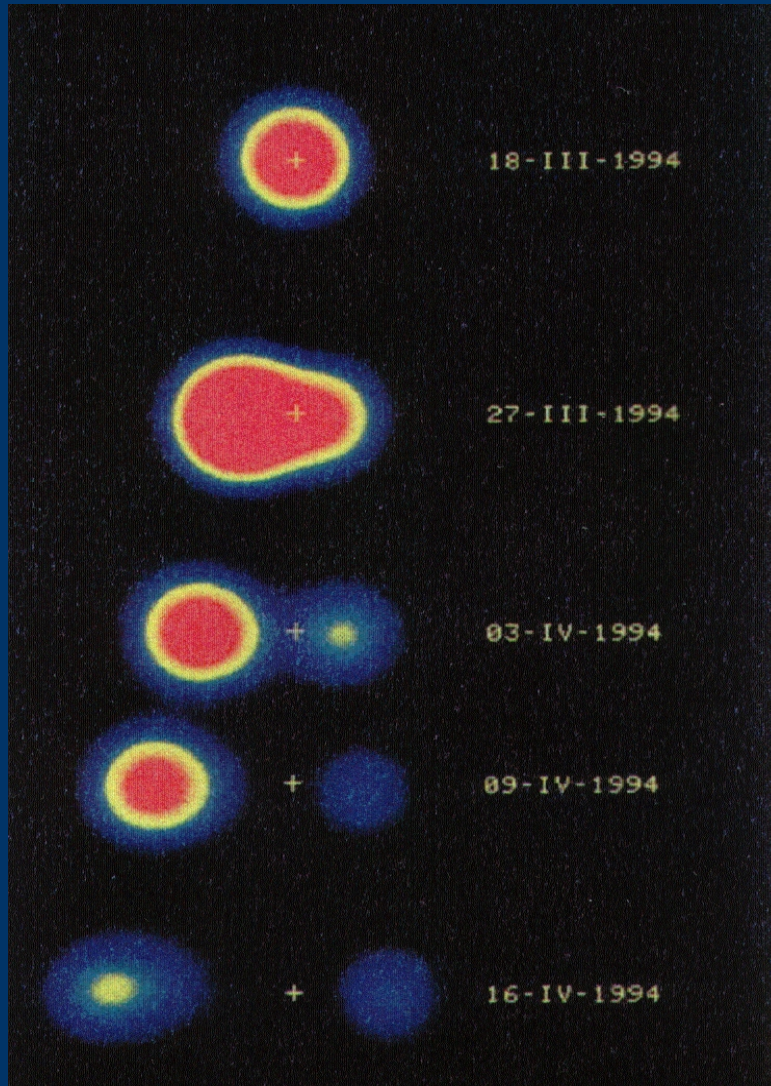


FR I / FR II ραδιογαλαξίες

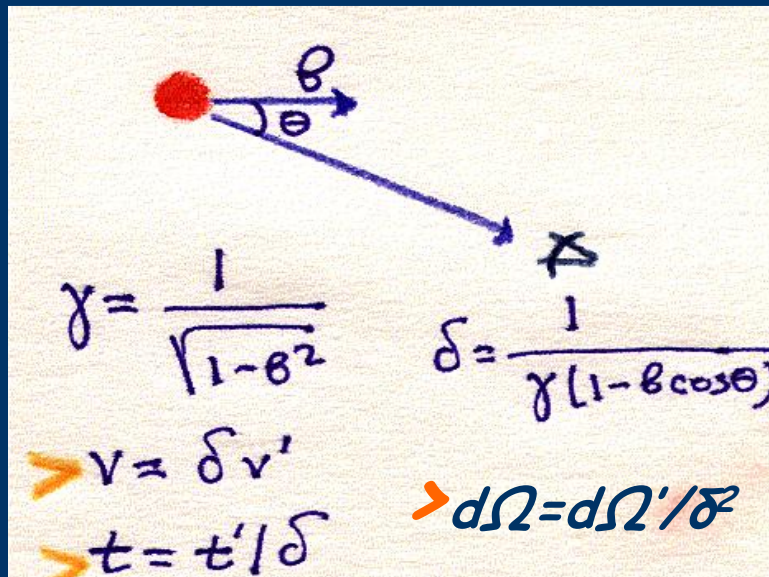
; / Ραδιοημιαστέρες
(radio quasars)

BL Lacertae/Blazars

Φαινομενικά υπερφωτεινές ($u > c$) ταχύτητες



Σχετικιστική εστίαση της ακτινοβολίας



- Για Σύγχροτρον και ΑΣΚ:

$$L_{\text{παρ}} = \delta^4 L_{\text{εκπ}}$$

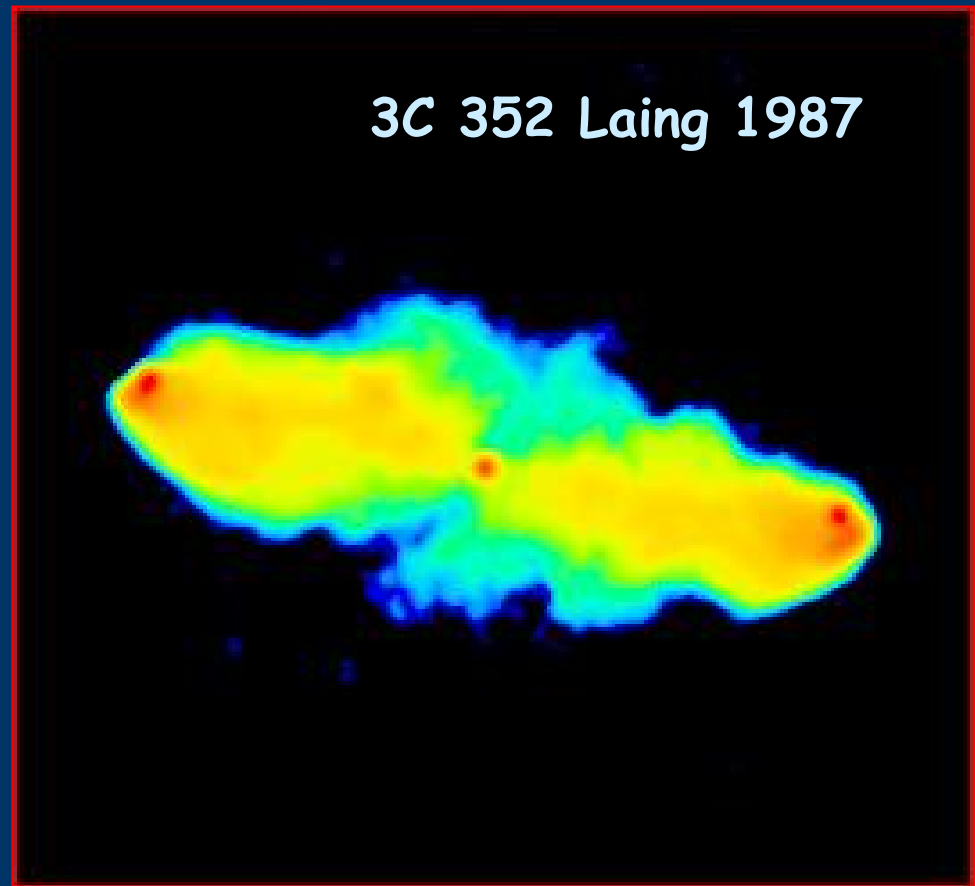
- Για εξωτερικό Κόμπτον:

$$L_{\text{παρ}} = \delta^6 L_{\text{εκπ}}$$

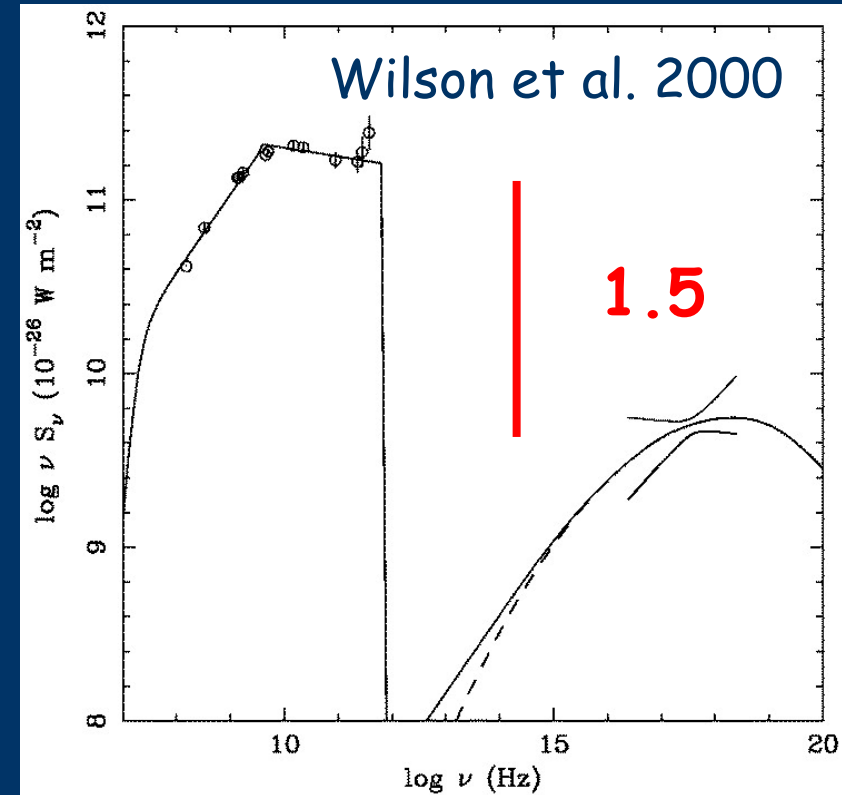
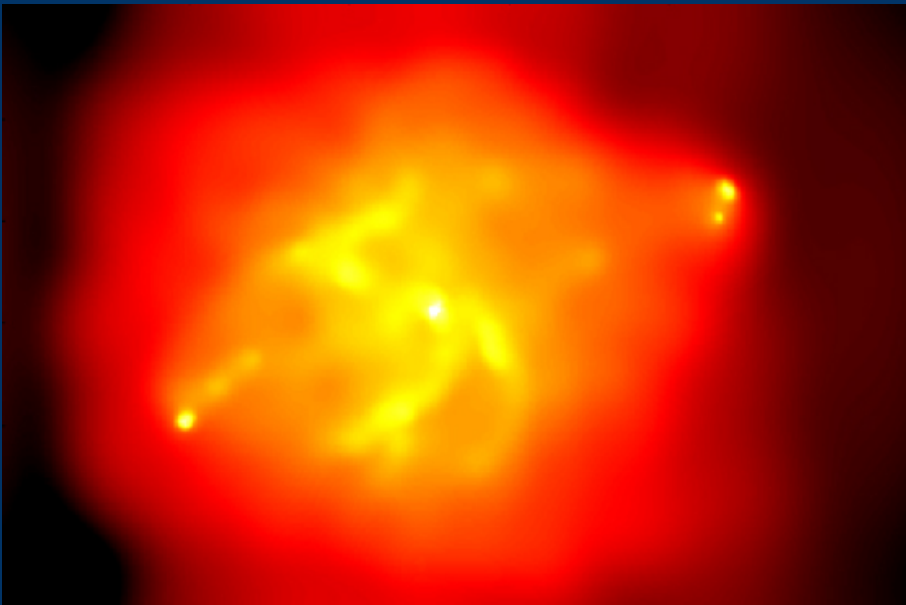
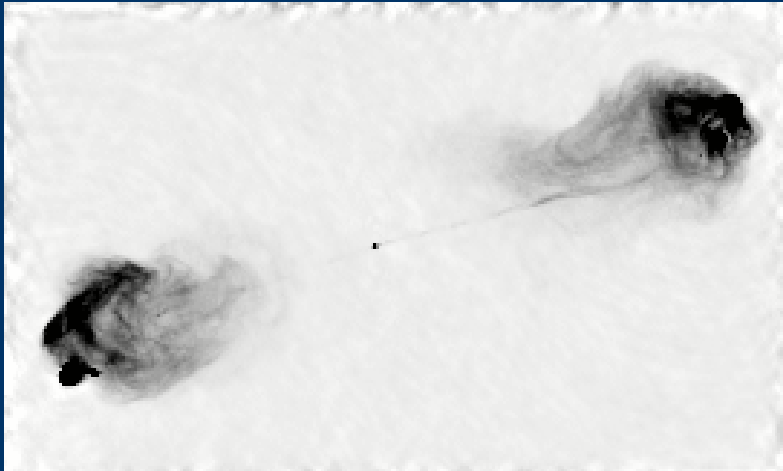
Θερμές κηλίδες: εκεί όπου οι πίδακες συγκρούονται με τη μεσογαλαξιακή ύλη.

Προηγούμενη παραδοχή,
λόγω της χαμηλής
ταχύτητας ($\sim 0.1c$)
"προώθησης" μέσα στη
μεσογαλαξιακή ύλη:

Η ροή μέσα στις θερμές
κηλίδες είναι μή
σχετικιστική και, ως εκ
τούτου, η σχετικιστική
εστίαση είναι αμελητέα.



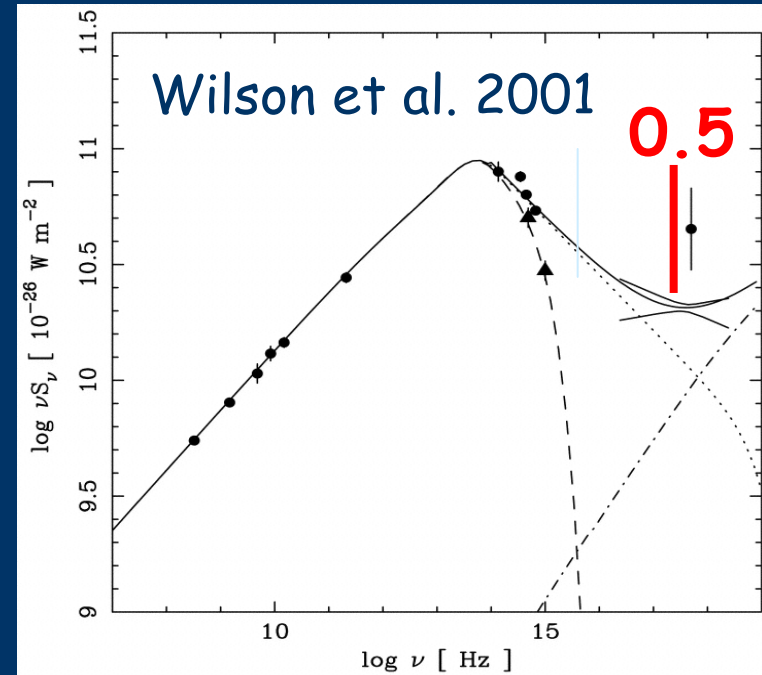
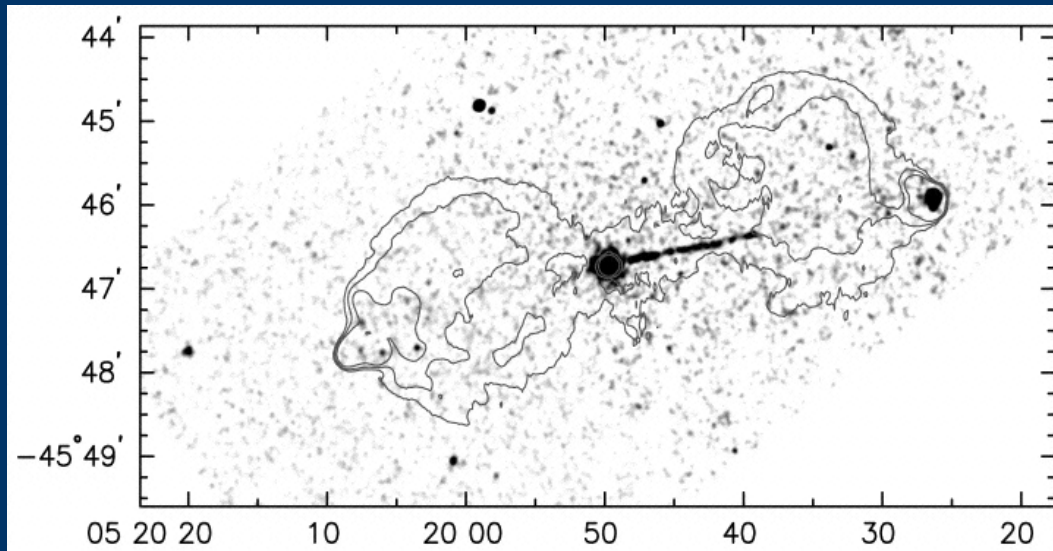
Θερμές κηλίδες/παρατηρήσεις Chandra. Περίπτωση Α: Κύκνος Α



Δύο θερμές κηλίδες σε
ακτίνες Χ, καμία στο ορατό.
Ακτίνες Χ σε συμφωνία με
ΑΣΚ σε ισοκατανομή.

Θερμές κηλίδες/παρατηρήσεις Chandra

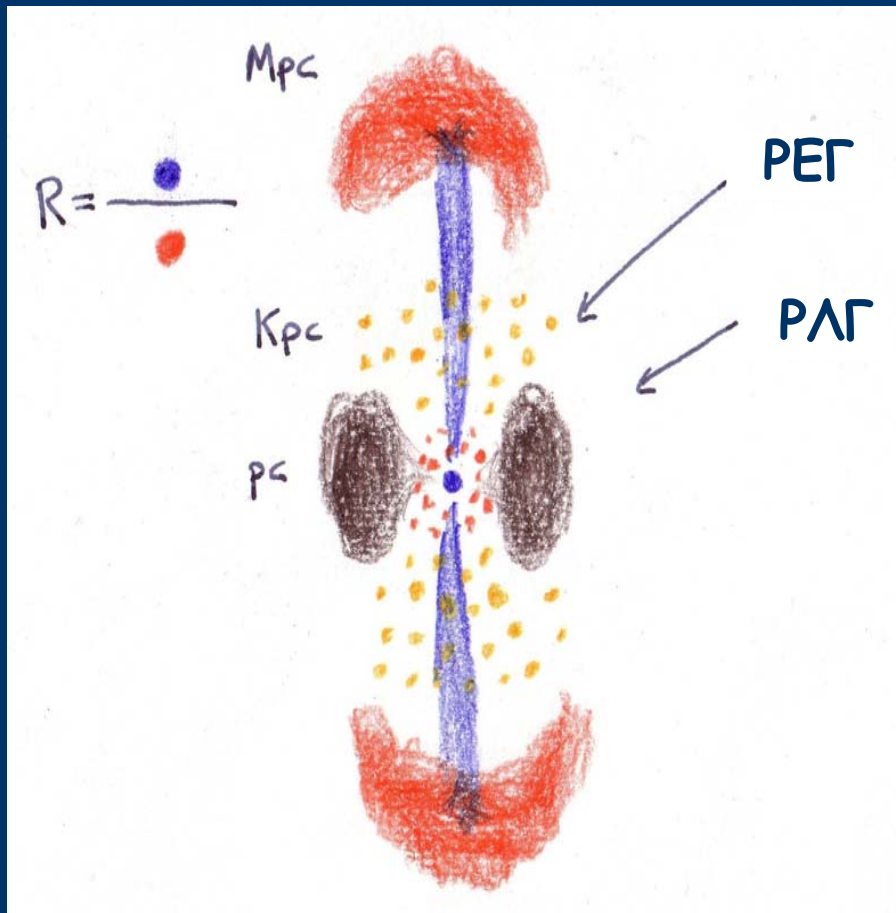
Περίπτωση 2: Πίκτηρ Α



- > Πολύ ισχυρή εκπομπή ακτίνων Χ. > ΑΣΚ σε ισοκατανομή μας δίνει μία πολύ χαμηλή εκπομπή ακτίνων Χ.
- > Μία μόνο θερμή κηλίδα στις ακτίνες Χ, στην ίδια μεριά με τον ραδιοπίδακα που ανίχνευσε το ραδιοσυμβολόμετρο VLBI.
- > Εκπομπή στο ορατό μόνο από την θερμή κηλίδα ακτίνων Χ.

Κύκνος Α- Πίκτωρ Α: Διαφορετικοί προσανατολισμοί.

Κύκνος Α: Ραδιογαλαξίας λεπτών γραμμών (ΡΛΓ)
Πίκτωρ Α: Ραδιογαλαξίας Ευρείων γραμμών (ΡΕΓ)



$R = \text{Πυρήνας/λοβοί στους } 5 \text{ GHz}$

Κύκνος Α: $\log R \approx -3.3$

Πίκτωρ Α: $\log R \approx -1.2$

Κύκνος Α: πίδακες κοντά στο επίπεδο του ουρανού.

Πίκτωρ Α: πίδακες προσανατολισμένοι κοντύτερα στον παρατηρητή.

Πηγές με θερμές κηλίδες πού έχουν ανιχνευθεί από τον *Chandra*

Πήγη	Τύπος	Λογ R	Ορατό	Ακτίνες Χ	ΑΣΚ σε ισοκατανομή
3C 330	ΡΛΓ	-3.5	ΟΧΙ	ΝΑΙ, 2 πλευρές	ΝΑΙ
Cygnus A	ΡΛΓ	-3.3	ΟΧΙ	ΝΑΙ, 2 πλευρές	ΝΑΙ
3C 295	ΡΛΓ	-2.7	ΝΑΙ	ΝΑΙ, 2 πλευρές	ΝΑΙ
3C 123	ΡΛΓ	-1.9	ΟΧΙ	ΝΑΙ, 2 πλευρές	ΝΑΙ
3C 263	Q	-1.0	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΝΑΙ/ΟΧΙ
3C 351	Q	-1.9	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΟΧΙ
Pictor A	ΡΕΓ	-1.2	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΟΧΙ
3C 303	Q	-0.7	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΟΧΙ
3C 390.3	ΡΕΓ	-1.1	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΝΑΙ, πλευρά VLBI	ΟΧΙ

Ιδιότητες ως συνάρτηση του προσανατολισμού

- Καθώς η πηγή στρέφεται προς τον παρατηρητή, το R αυξάνει και η πηγή αλλάζει από ΡΛΓ σε ΡΕΓ /Q:
- Οι ΡΛΓ έχουν θερμές κηλίδες σε ακτίνες X και στους δύο λοβούς, ενώ οι ΡΕΓ/Q έχουν θερμές κηλίδες σε ακτίνες X μόνο στην πλευρά του εγγύτερου ραδιοπίδακα.
- Στους ΡΕΓ/Qs, η ισχύς της θερμής κηλίδας στις ακτίνες X -ray είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζει κανείς από ΑΣΚ σε ισοκατανομή.
- Η εκπομπή στο ορατό, ασθενής ή απύσχα στους ΡΛΓ ανιχνεύεται στους ΡΕΓ/Qs, πάντοτε στη μεριά του εγγύτερου ραδιοπίδακα.

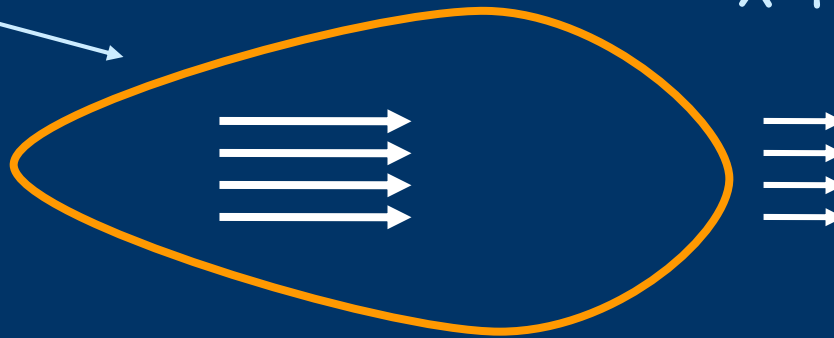
Ερμηνεία: σχετικιστική εστίαση, η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας

- Η εστίαση της ακτινοβολίας Σύγχροτρον είναι ισχυρότερη στο ορατό, το οποίο είναι ανιχνεύσιμο μόνο στις κηλίδες του εγγύτερου πίδακα στις πιο "ευθυγραμμισμένες" πηγές (ΡΕΓ/Q).
- Αντίστροφο Κόμπτον: Η ανίχνευση και των δύο κηλίδων σε ακτίνες Χ στους ΡΛΓ σημαίνει ότι αυτή η εκπομπή δεν είναι έντονα εστιασμένη.
- Όμως, η αύξηση της ισχύος στις ακτίνες Χ σε σχέση με αυτήν στα ραδιοκύματα, καθώς η πηγή προσανατολίζεται προς τον παρατηρητή, αποκαλύπτει τη συνεισφορά μίας συνιστώσας με εστίαση ισχυρότερη από το σύγχροτρον και την ΑΣΚ.

Γωνιακή κατανομή της εστιασμένης ακτινοβολίας από μία σχετικιστική και επιβραδυνόμενη ροή.

Γρήγορη, σχετικιστική ροή,
ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας

Αργή ροή, ηλεκτρόνια
χαμηλής ενέργειας

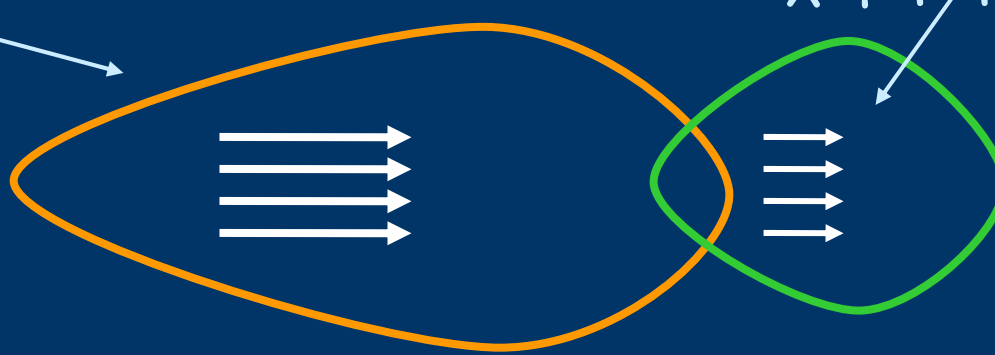


Σύγχροτρον από το άνω (γρήγορο) τμήμα της ροής.
Κυριαρχεί στο ορατό στις εγγύτερες κηλίδες των ΡΕΓ/Qs.

Γωνιακή κατανομή της εστιασμένης ακτινοβολίας απο μία σχετικιστική και επιβραδυνόμενη ροή.

Γρήγορη, σχετικιστική ροή,
ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας

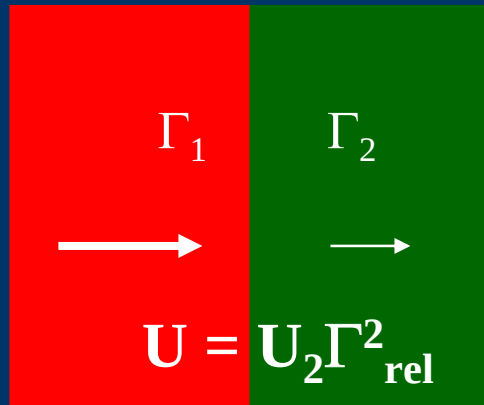
Αργή ροή, ηλεκτρόνια
χαμηλής ενέργειας



Ασθενώς εστιασμένα ραδιοκύματα σύγχροτρον και ακτίνες X από ΑΣΚ από το κάτω (αργό) τμήμα της ροής. Οι ακτίνες X στίς κηλίδες των ΡΛΓ κυριαρχούνται απο αυτή τη ακτινοβολία.

Σκέδαση Άνω Ροής Κόμπτον (APK) [Upstream Compton (UC)]

Αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα των φωτονίων
Περισσότερο εστιασμένη γωνιακή κατανομή των φωτονίων

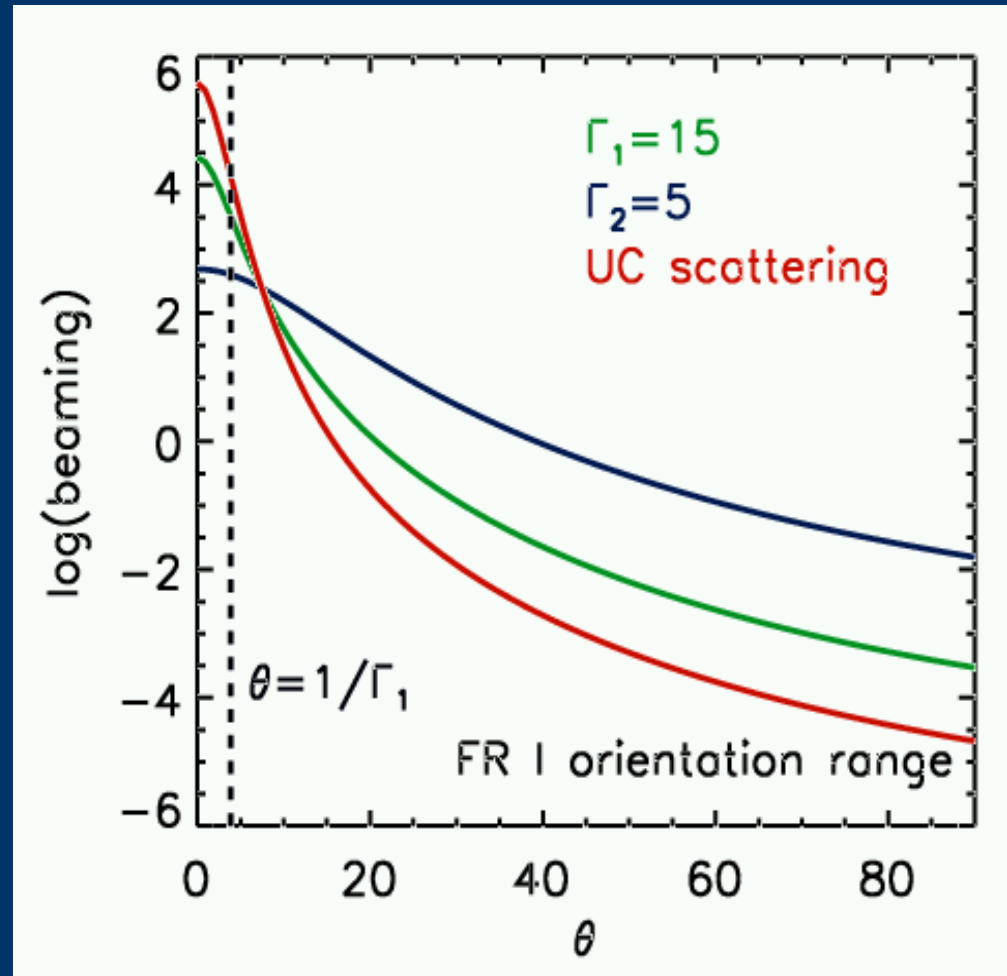


Σύγχροτον και ΑΣΚ από
την κάθε ζώνη:

$$L_1 \propto \delta_1^4, L_2 \propto \delta_2^4$$

UC:

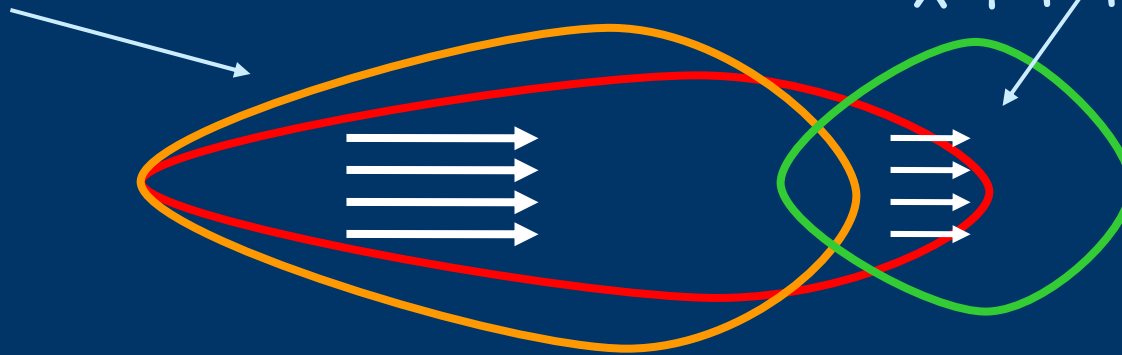
$$L_{UC} \propto \delta_1^6 / \delta_2^2$$



Γωνιακή κατανομή της εστιασμένης ακτινοβολίας από μία σχετικιστική και επιβραδυνόμενη ροή.

Γρήγορη, σχετικιστική ροή,
ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας

Αργή ροή, ηλεκτρόνια
χαμηλής ενέργειας

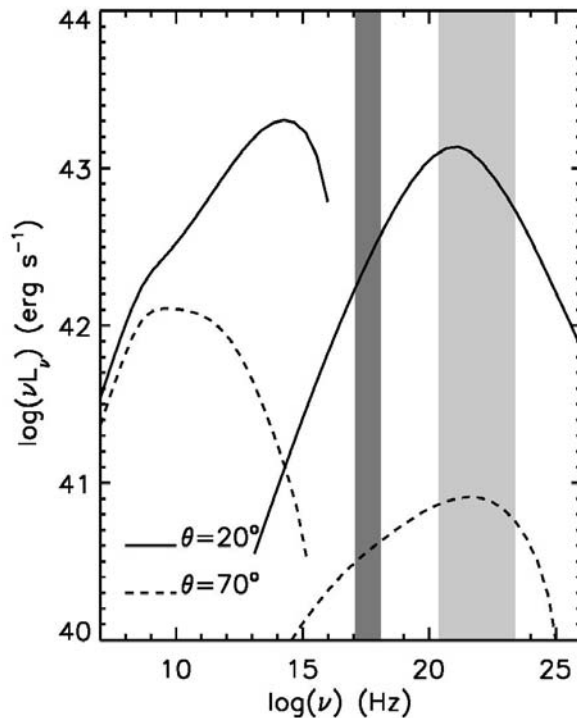


> Σκέδαση ΑΡΚ: Φωτόνια Σύγχροτρον από το αργό τμήμα της ροής σκεδάζονται από τα ενεργά ηλεκτρόνια του άνω (γρήγορου) τμήματος της ροής.

> Η εκπομπή ΑΡΚ, όντας η πλέον εστιασμένη, κυριαρχεί στην εκπομπή ακτίνων Χ στους ΡΕΓ/Q. Αυτό εξηγεί τον υψηλό λόγο ακτίνων Χ/ραδιοκύματα σε αυτές τις πηγές σε σχέση με τους ΡΛΓ.

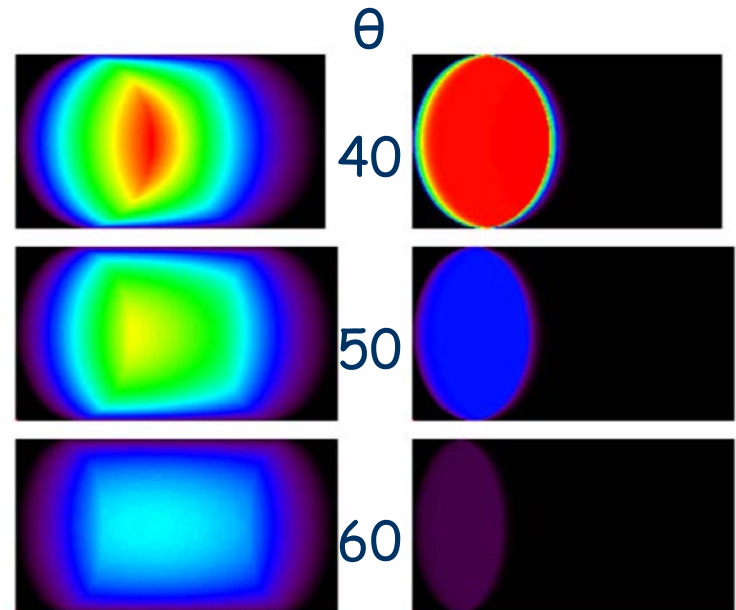
Σχετικιστική και επιβραδυνόμενη ροή: αποτελέσματα προσομοιώσεων

$$\Gamma = 3 \rightarrow 1.1$$



Ράδιο

Ορατό



Συμπεράσματα

- Οι συλλογικές ιδιότητες των Θερμών κηλίδων, δεν εξηγούνται από την μέχρι σήμερα επικρατούσα παραδοχή ότι η ροή στις θερμές κηλίδες είναι αργή.
- Η παραδοχή ότι η ροή είναι σχετικιστική και επιβραδυνόμενη εξηγεί τις συλλογικές παρατηρήσεις και ιδιαίτερα την υψηλή ισχύ σε ακτίνες Χ των ευθυγραμμισμένων πηγών.
- Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, οι πίδακες παραμένουν σχετικιστικοί έως το τέλος.
- Ένας νέος μηχανισμός εκπομπής, η σκέδαση άνω ροής Κόμπτον (Upstream Compton) παράγει την υψηλή ισχύ στις ακτίνες Χ. Πιστεύουμε ότι ο μηχανισμός αυτός έχει εφαρμογές σε μία πλειάδα αστροφυσικών συστημάτων.