

Η πρώτη «επαφή»

*«μια παράξενη ακτίνα
στο νεφέλωμα M87»*

1918 Heber Curtis

M87 από www.starimager.com

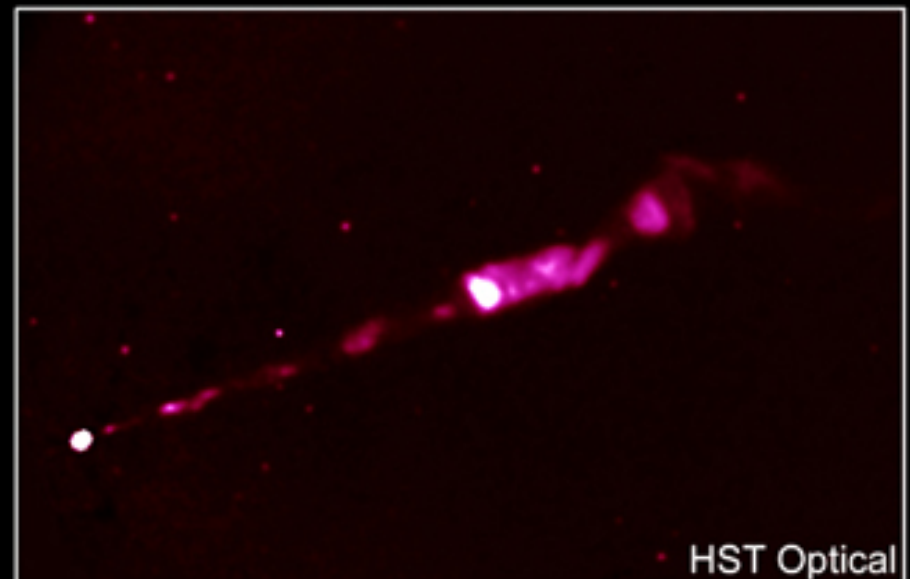
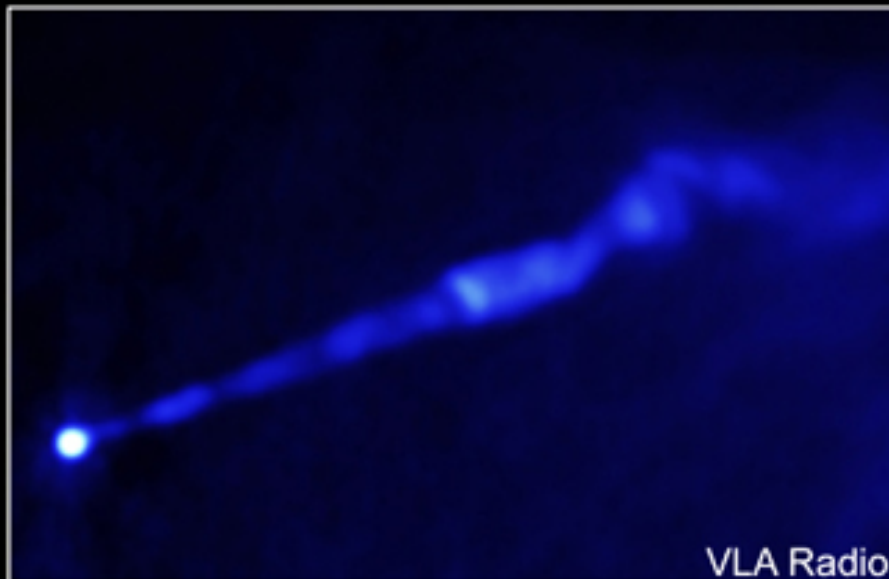
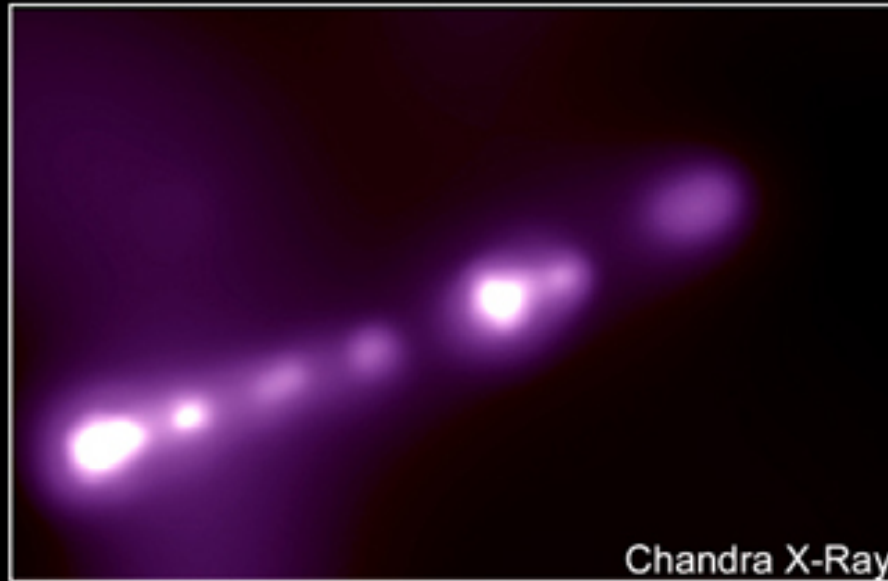
Η διαμάχη της δεκαετίας του '20:

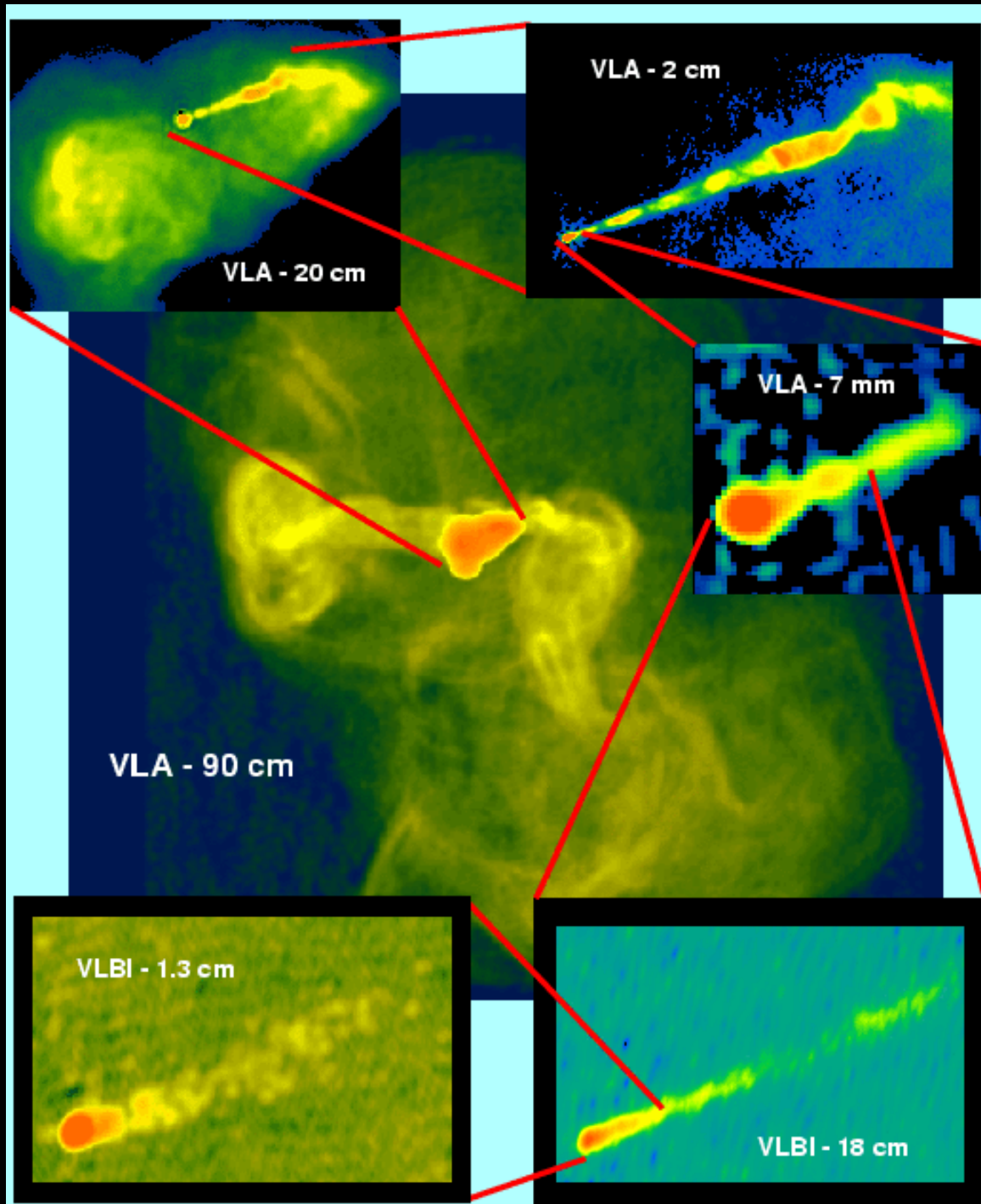
- *Τι είναι τα νεφελώματα;*



- Shapley εναντίον Curtis στην αμερικανική ακαδημία επιστημών
- Shapley: είναι μέρη του Γαλαξία μας
- Curtis: είναι εξωτερικοί γαλαξίες
- *Νίκησε ο Curtis*

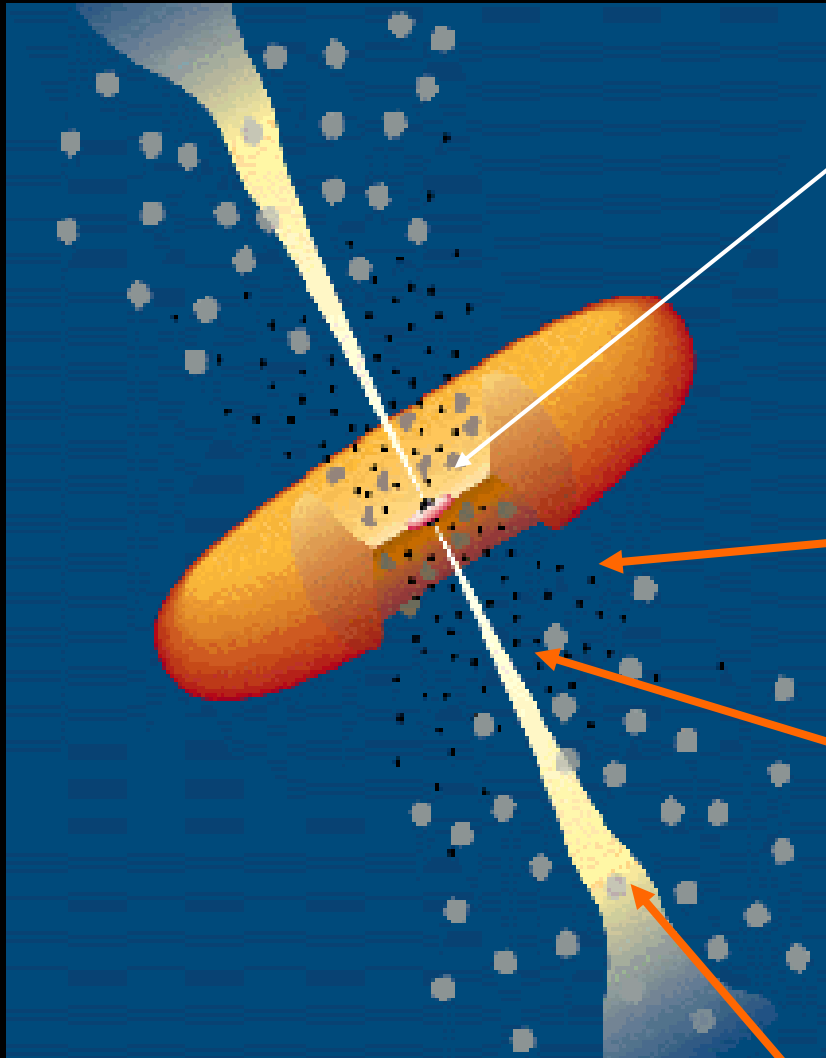
85 έτη μετά...





Ενοποίηση των ενεργών γαλαξιών

Urry & Padovani, PASP, 1995



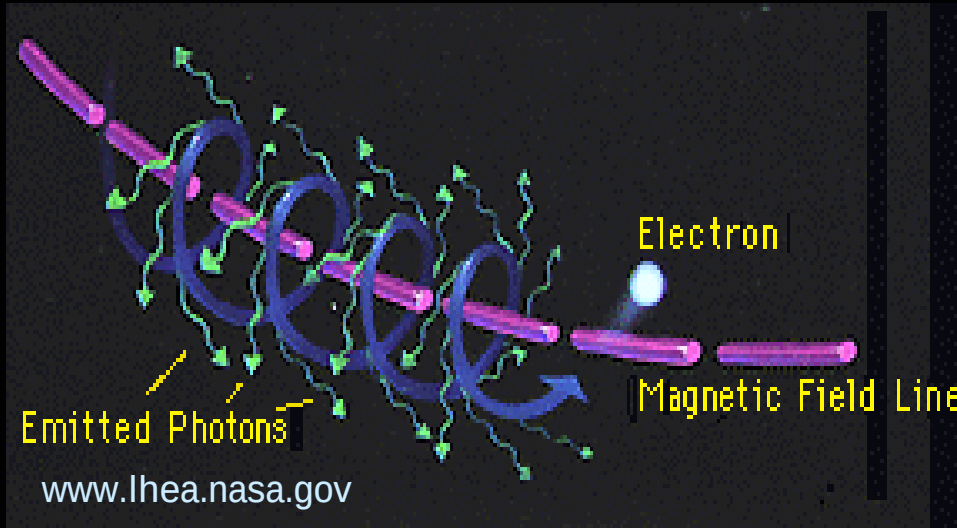
Δίσκος προσαύξεσης
(δεν φαίνεται) γύρω
απο μελανή οπή
μάζας $\sim 10^{7-9} M_{\text{Ηλίου}}$

Ραδιογαλαξίες

Ράδιο-quasars

Blazars

Τί παρατηρούμε; Ακτινοβολία Σύνχροτρον και αντιστρόφου Κόμπτον από σχετικιστικά ηλεκτρόνια + (;) ποζιτρόνια



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

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

σχετικιστικά $e +$
φωτόνια χαμηλής ενέργειας
 $\Rightarrow$

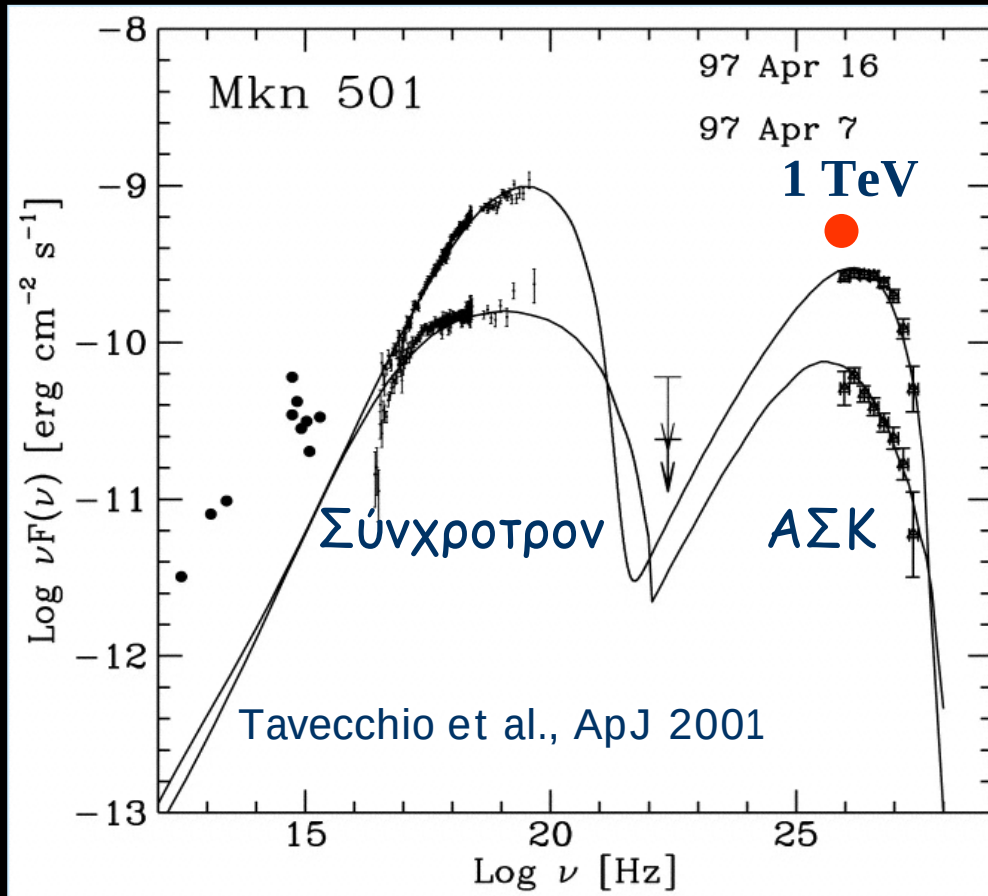
φωτόνια υψηλής ενέργειας
Αυτοσκέδαση Σύνχροτρον-
Κόμπτον (ΑΣΚ)

Εξωτερικό Κόμπτον (ΕΚ)
(πχ Κοσμικό υπόβαθρο
μικροκυμάτων - CMB)

$$> v_c \approx v_0 \gamma^2$$

$$> P_c = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_0$$

Τί παρατηρούμε; Ακτινοβολία Σύνχροτρον και αντιστρόφου Κόμπτον από σχετικιστικά ηλεκτρόνια + (?) ποζιτρόνια



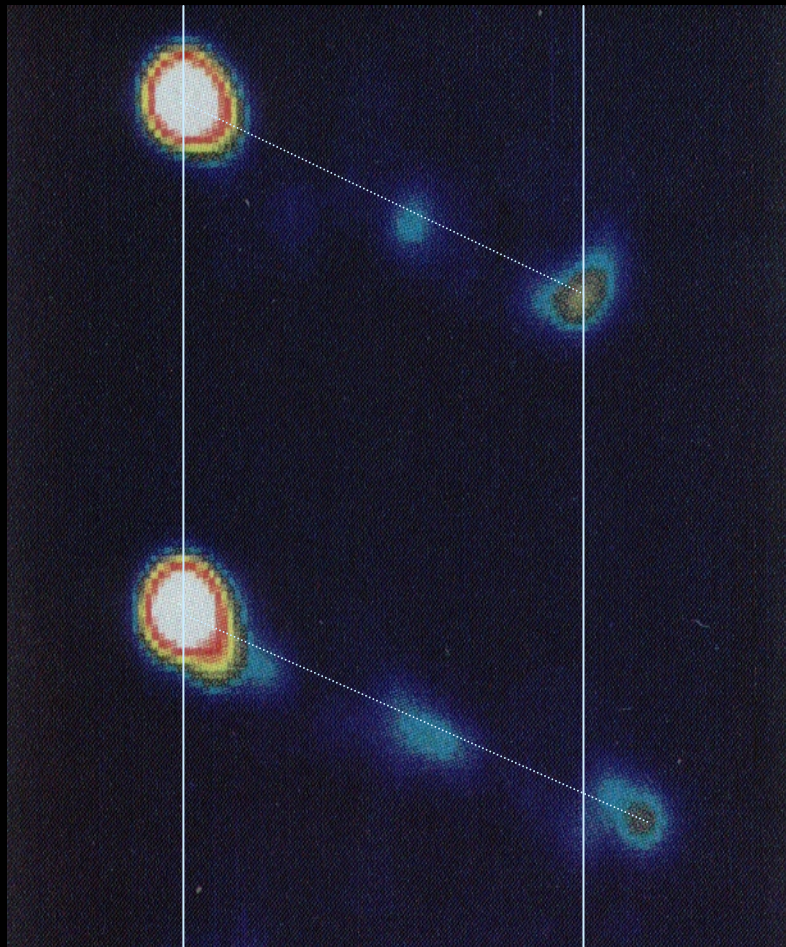
σχετικιστικά $e^- +$
φωτόνια χαμηλής ενέργειας
 $\Rightarrow$

φωτόνια υψηλής ενέργειας
Αυτοσκέδαση Σύνχροτρον-
Κόμπτον (ΑΣΚ)

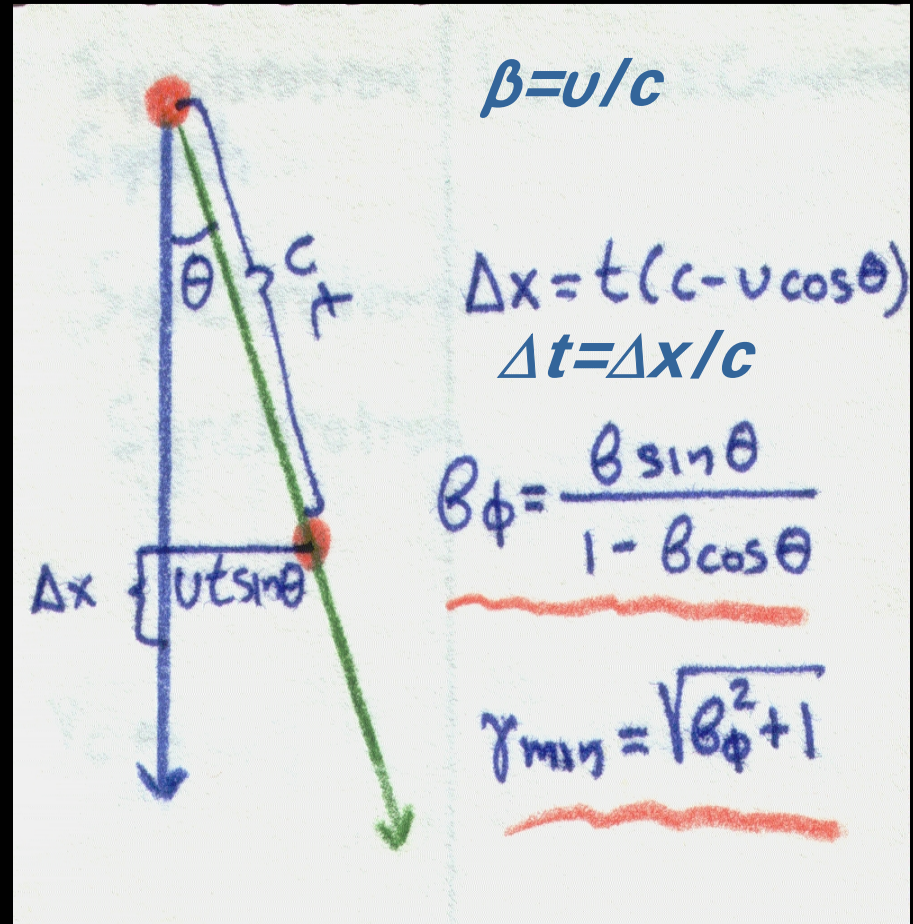
Εξωτερικό Κόμπτον (ΕΚ)
(πχ Κοσμική υπόβαθρο
μικροκυμάτων - CMB)

Φαινομενικά υπερφωτεινές ($u > c$) ταχύτητες

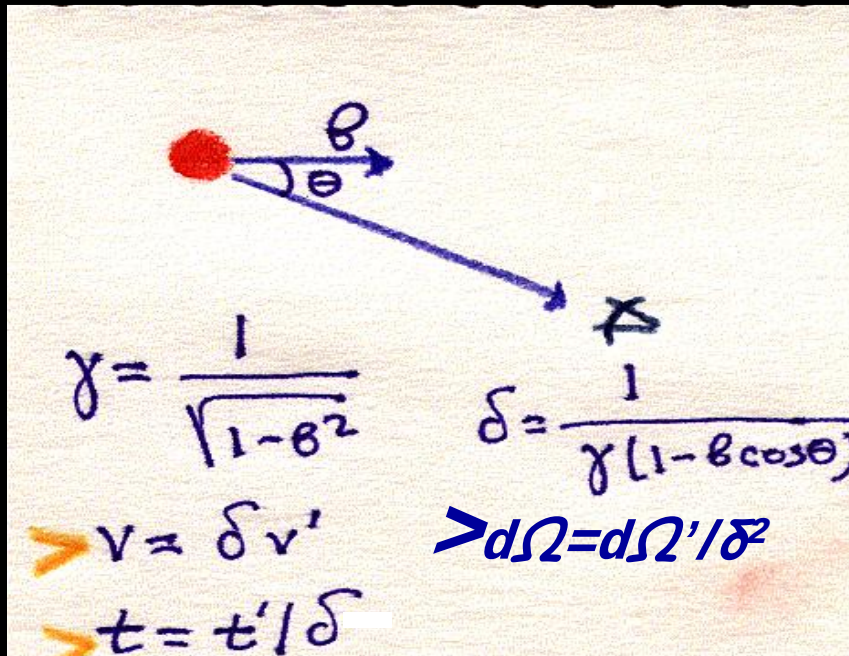
3C 279



$$\beta_{\phi} \sim 10$$



ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΗ ΕΣΤΙΑΣΗ

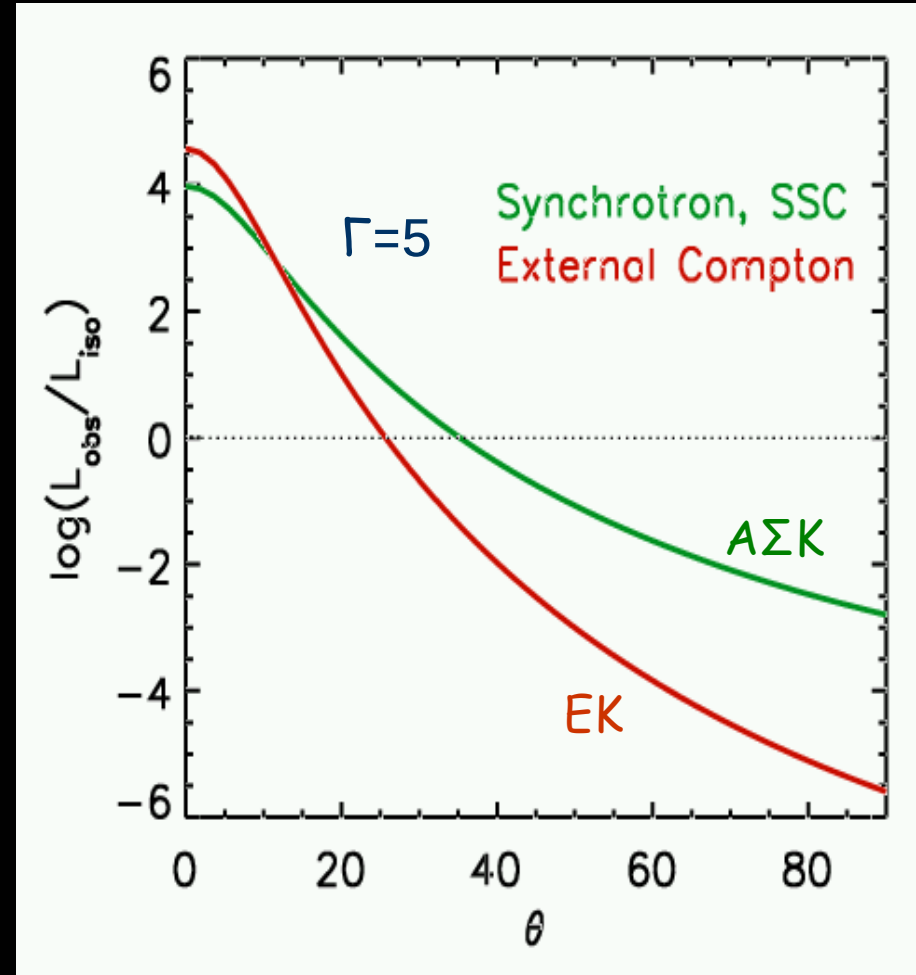


- Για Σύνχροτρον και ΑΣΚ:

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

- Για ΕΚ:

$$L_{\text{παρ}} = \delta^6 L_{\text{εκπ}} / \gamma^2$$



Οι πίδακες των ενεργών γαλαξιών: απο τι αποτελούνται και γιατί μας ενδιαφέρει;

Μαρκος Γεωργανόπουλος^{1,2},
Δημοσθένης Καζάνας²,
Eric Perlman¹,
Floyd Stecker²

¹JCA/UMBC

²NASA/GSFC

*το τελευταίο τμήμα δημοσιεύθηκε
στο Astrophysical Journal της 1ης Ιουνίου,
625, 656*

Πιθανά συστατικά των πιδάκων

Φαινομενική ισχύς μέχρι 10^{49} erg/s,
~ 10^5 φορές ή λαμπρότητα του γαλαξία μας

- Σχετικιστικά ηλεκτρόνια ν
- Σχετικιστικά ποζιτρόνια ;
- Μαγνητικά πεδία ν
- Θερμικά ηλεκτρόνια and ποζιτρόνια ;
- Θερμικά πρωτόνια ;
- Σχετικιστικά πρωτόνια ;

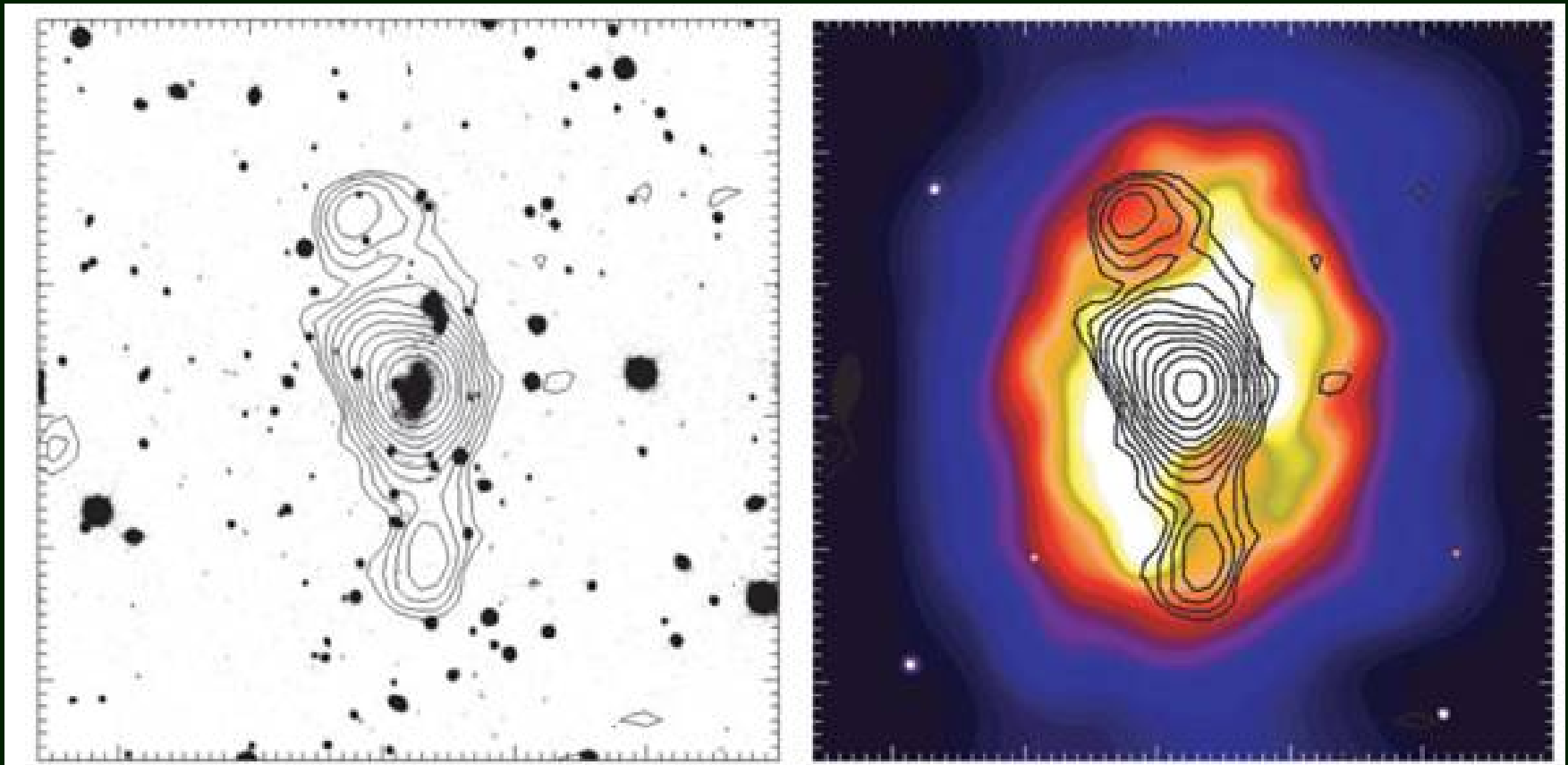
Γιατί μας ενδιαφέρει;

Ι. Περιορίζει τις θεωρίες γεννέσεως των σχετικιστικών πιδάκων

- Πίδακες που αντλούν ισχύ από την περιστροφή του δίσκου προσαύξησης αποτελούνται από κανονικό πλάσμα ($e-p$).
- Πίδακες που αντλούν ισχύ από την περιστροφή της μελανής οπής αποτελούνται κυρίως από πλάσμα $e-e^+$

Meier et al., Science, 2003

II: Πόση ισχύ μεταφέρουν οι πίδακες; Πόσο θερμαίνουν την “ψυχόμενη ροή” (“cooling flow”) στο φιλοξενών γαλαξιακό σμήνος;



- McNamara et al., Nature, 2005

III: Επανατροφοδότηση μεταξύ του πίδακα, του γαλαξιακού σμήνους και της επαύξεσης της μάζας της μελανής οπής

- > Ισχυροί πίδακες σε πρωτοσμήνη μπορούν να απωθήσουν και να αναθερμάνουν το ιονισμένο αέριο του σμήνους.
- > Το αέριο του σμήνους δεν μπορεί να καταρρεύσει πάνω στους πρωτογαλαξίες
- > Διακόπτεται η γέννηση αστέρων και η επαύξεση της μάζας των μελανών οπών στον φιλοξενούντα γαλαξία και στους πρωτογαλαξίες του σμήνους.

Rawlings & Jarvis, MNRAS, 2005,
review by Begelman, astro-ph/0303040

Προηγούμενες προσπάθειες
προσδιορισμού της σύστασης
των πιδάκων

Ισοκατανομή, ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος παραγωγής ενός δεδομένου φάσματος ακτινοβολίας σύνχροτρον

Ελαχιστοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου όταν:

Η ενεργειακή πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου και των ακτινοβολούντων ηλεκτρονίων είναι ίσες

Αποκλίσεις από την ενεργειακή κατανομή είναι ενεργειακά πολύ ακριβές.

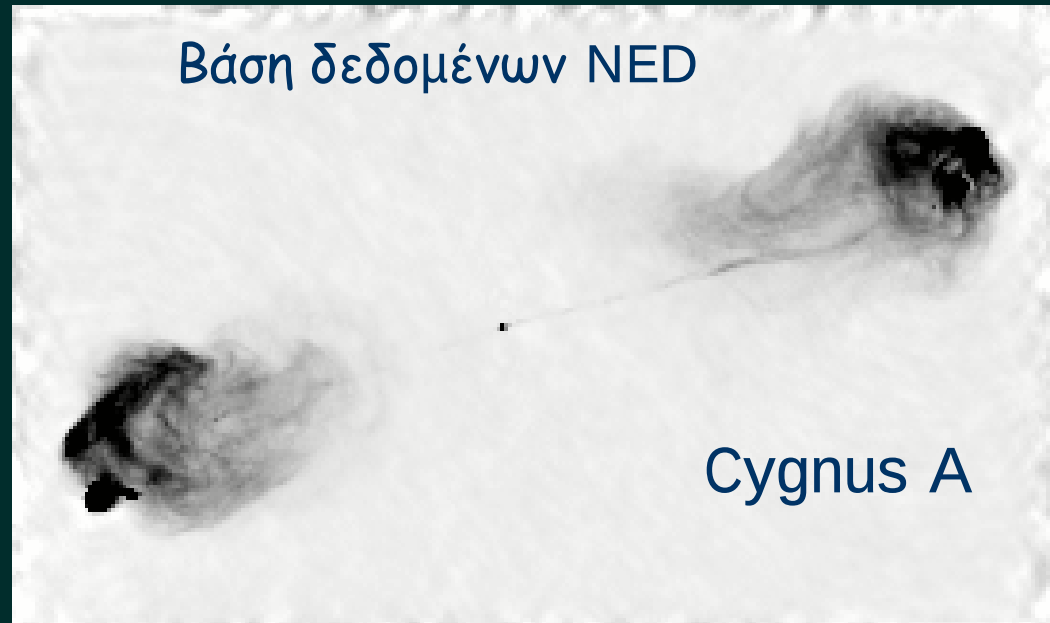
$$> L_s \propto n \gamma^2 B^2 \propto \gamma U_p U_B$$

$$> U = U_p + U_B = U_p + \frac{c}{U_p}$$

$$> \frac{\partial U}{\partial U_p} = 0 \Rightarrow U_p^2 = c \Rightarrow U_p = U_B$$

Υπολογισμός της ελάχιστης* ισχύος του πίδακα μέσω της ενέργειας που αποτίθεται στους ραδιολοβούς

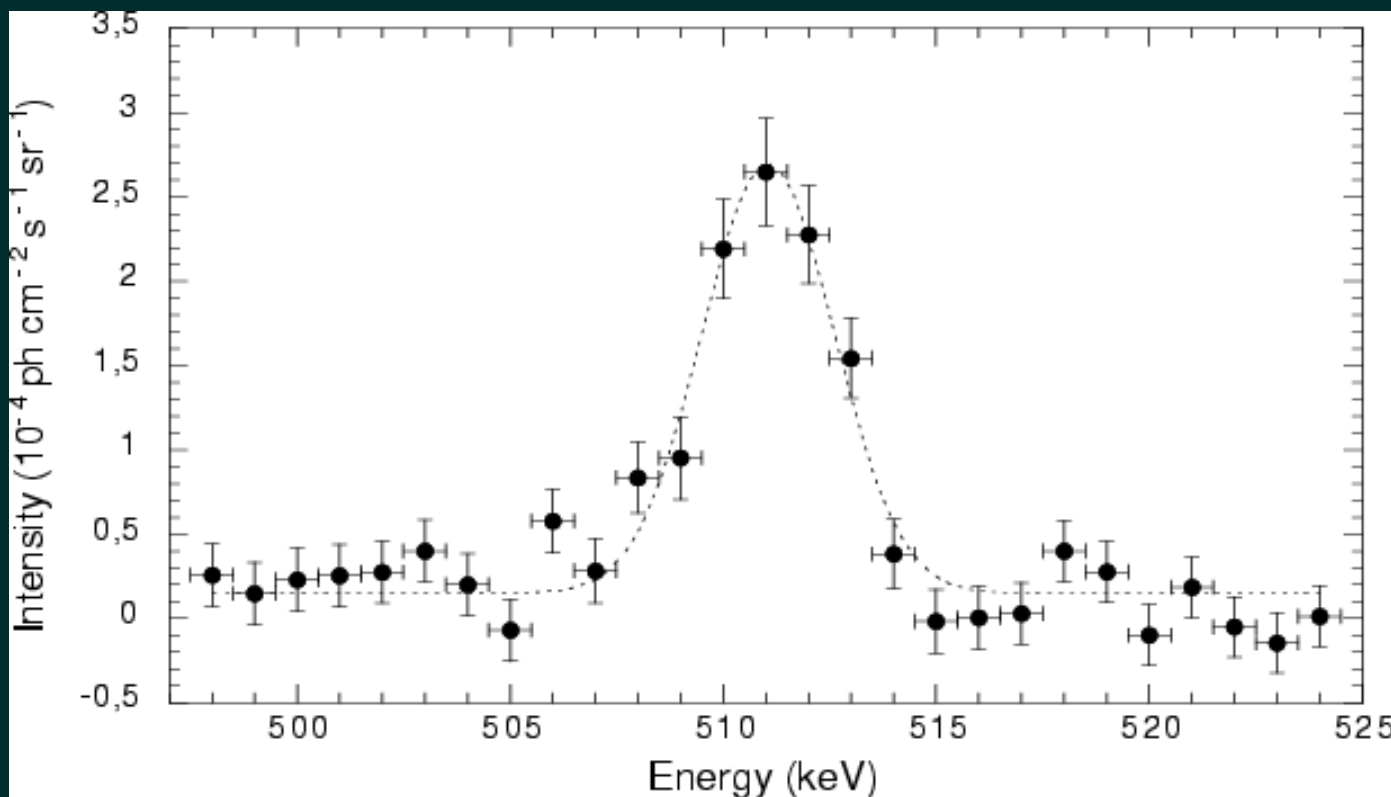
- Ελάχιστο ενεργειακό περιεχόμενο των ραδιολοβών διά της εκιμούμενης ηλικία του συστήματος:
- Οι ισχυρότεροι πίδακες έχουν ισχύ $L_{\text{jet}}=10^{47}$ erg/s, της τάξης της ισχύος Eddington μιας μελανής όπης μάζας $10^9 M_{\text{ηλίου}}$.



Rawlings and Saunders Nature, 1991

*Ελάχιστη ισχύς, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν πρωτόνια, παρα μόνο σχετικιστικά λεπτόνια και μαγνητικά πεδία.

Εξαύλωση ηλεκτρονίων - ποζιτρονίων στο γαλαξιακό κέντρο.



Παρατηρήσεις του γαλαξιακού κέντρου απο τον δορυφόρο INTEGRAL
(Jean et al. A&A, 2003)

Δεν παρατηρούμε γραμμές εξαΰλωσης στα quasars. Επιπτώσεις στο περιεχόμενο των πιδάκων;

- Ενεργός διατομή εξαΰλωσης $\propto 1/\gamma$
- Άνω όριο της πυκνότητας ζευγών στη βάση του πίδακα από την έλλειψη γραμμών εξαΰλωσης.
- Κάτω όριο από τον ελάχιστο αριθμό απαιτούμενων λεπτονίων για την παραγωγή της παρατηρούμενης ακτινοβολίας
- Με αυτούς τους περιορισμούς, πλάσμα ζευγών με ενεργειακή κατανομή νόμου δύναμης, $n(\gamma) \propto \gamma^{-p}$, $\gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}$, απαιτεί $\gamma_{\min} = 100$.

Δεν αποκλείει πλάσμα e-p

Ghisellini et al., ApJ 1992

Στροφή Faraday

- Υψηλή γραμμική πόλωση (~10%) στους ραδιοπίδακες

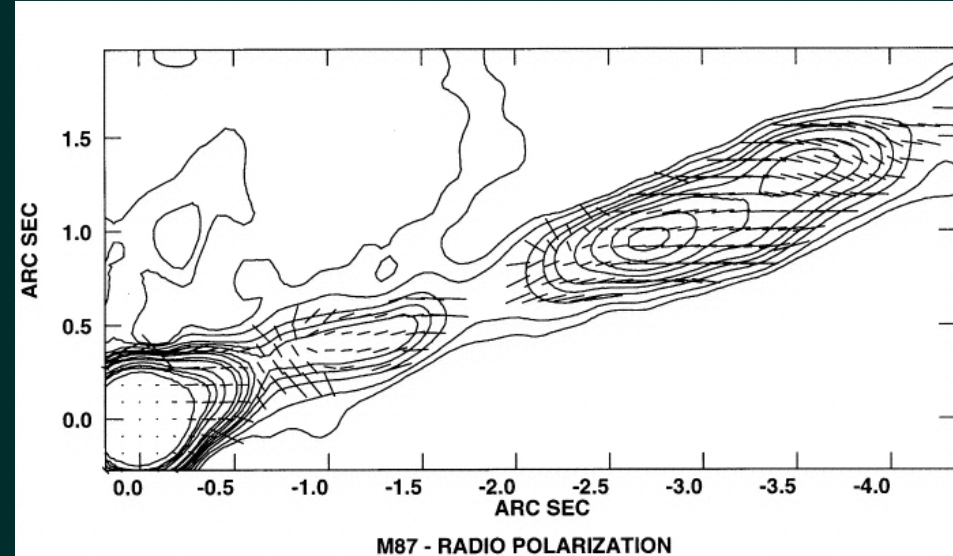
⇒

Πολύ χαμηλή στροφή Faraday

M87 Perlman et al., AJ 1999

- στροφή $\propto$ πυκνότητα λεπτονικών φορτίων, ισόποσο μείγμα e^-e^+ δεν επάγει στροφή Faraday.
- Συμβατό είτε με πλάσμα e^-e^+ είτε με πλάσμα e^-p με $\gamma_{\min}=100$

Wardle et al., Nature 1977,
Jones & O' Dell, ApJ 1977



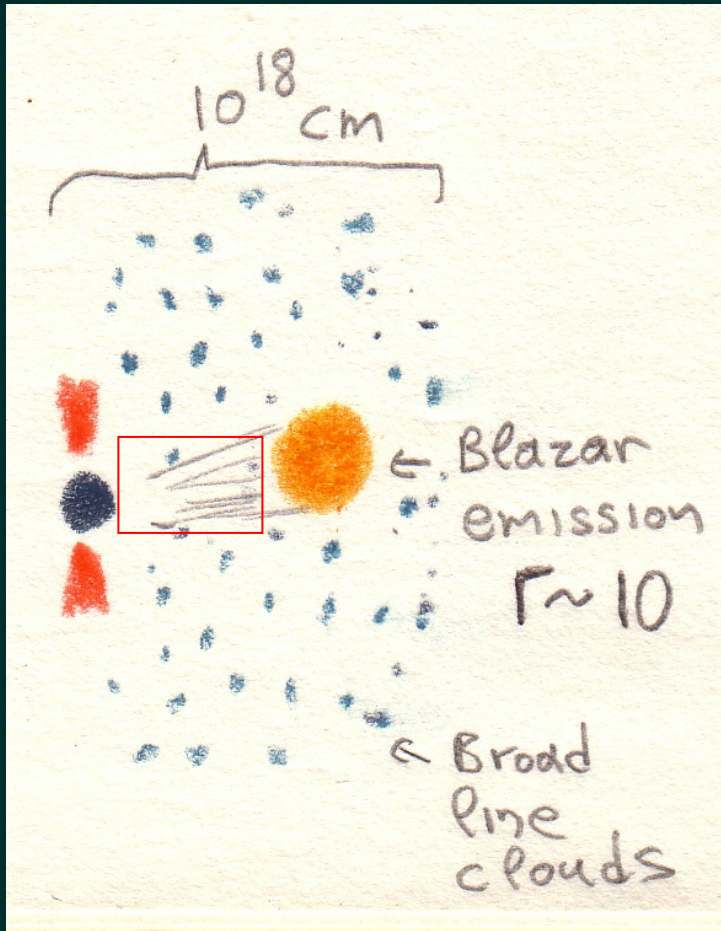
Μετατροπή Faraday της ράδιο - εκπομπής από γραμμική σε κυκλικά πολωμένα

- Μετατροπή $\propto (\text{φορτίο λεπτονίων})^2 \Rightarrow$
- Πλάσμα ζευγών παράγει κυκλική πόλωση, αλλά όχι στροφή
- Ανίχνευση κυκλικής πολώσεως στο quasar 3C 279
 $\Rightarrow$ Απαιτεί πλάσμα ζευγών
- Αυτό δεν αποκλείει ένα μικρό πληθυσμό πρωτονίων,
ο οποίος ίσως κυριαρχεί ενεργητικά.

Συγκράτηση των ραδιολοβών από το εξωτερικό αέριο.

- Χρησιμοποίησε παρατηρήσεις ακτίνων X-ray για να εκτιμήσεις την πίεση του εξωτερικού αερίου.
- Εάν η πίεση ισοκατανομής του ραδιολοβού είναι μικρότερη, είτε δεν είμαστε σε ισοκατανομή είτε υπάρχει επιπλέον ύλη πέραν των μη θερμικών λεπτονίων (θερμικά πρωτόνια και/ή λεπτόνια)
- Μέχρι στιγμής, αντικρουόμενα αποτελέσματα (π.χ. Gizani & Leahy, MNRAS, 2004; Croston et al., MNRAS, 2004)

Sikora & Madejski 2000:

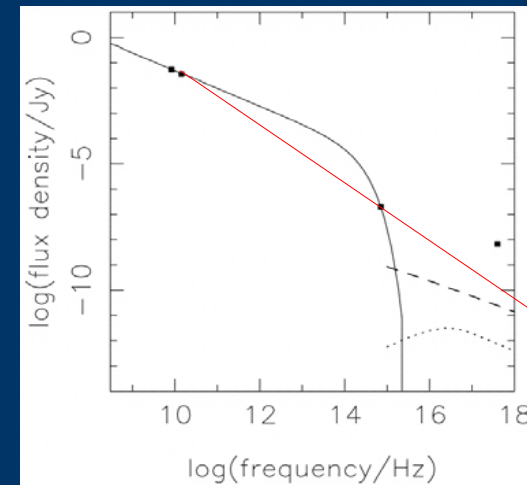
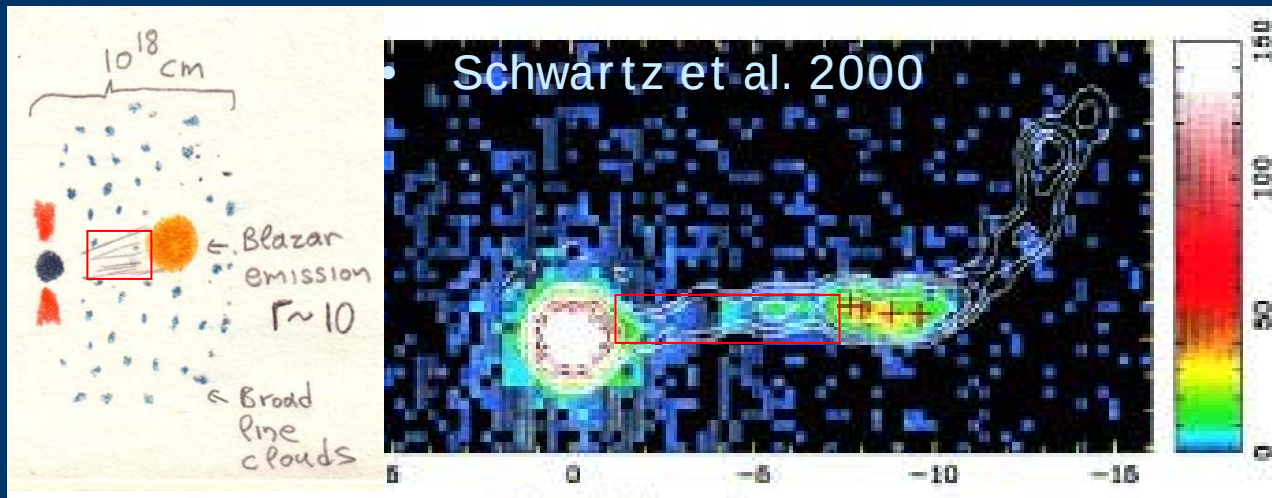


Υπάρχει καλύτερο περιβάλλον για να εφαρμόσουμε αυτή την ιδέα? ΝΑΙ!

- Ψυχρά λεπτόνια στην βάση του πίδακα των blazars διαδίδονται διαμέσου του φωτο-πεδίου της περιοχής ευρείων γραμμών και σκεδάζουν αυτά τα φωτόνια σε υψηλότερες ενέργειες (ακτίνες Χ).
- Η ακτινοβολία αυτή δεν ανιχνεύθηκε, γιατί στην ίδια περιοχή συχνοτήτων η ακτινοβολία του blazar κυριαρχεί.
- Πολύ καλή ιδέα, δύσκολη περιοχή: άγνωστη η γωνία εστίασης του πίδακα jet και ακαθόριστη η γεωμετρική κατανομή των νεφών.

To Chandra ανιχνεύει το υπερφωτεινό quasar PKS 0637-752.

μήκος στο επίπεδο του ουρανού ~ 100 Kpc

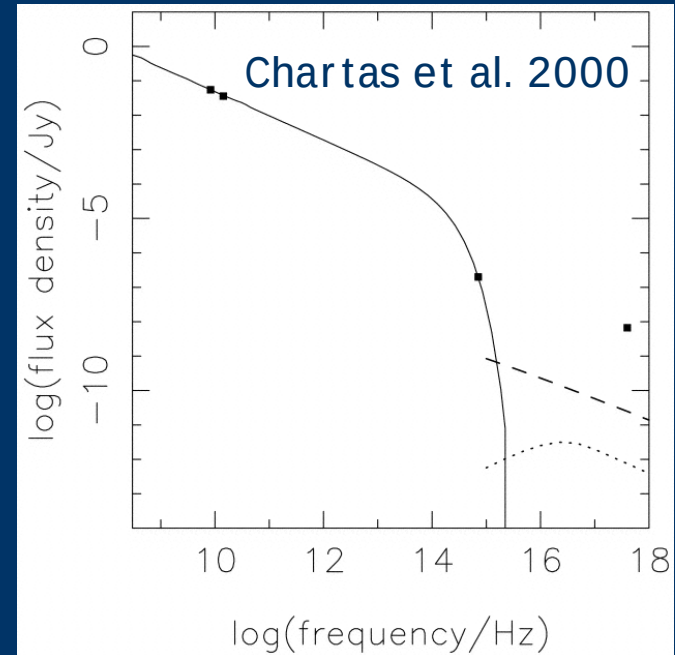


Οι ακτίνες Χ των κόμβων δεν είναι προέκταση του
ράδιο-οπτικού φάσματος,
αλλά μία ξεχωριστή φασματική συνιστώσα

Ποιός είναι ο μηχανισμός εκπομπής των ακτίνων Χ;

Δεν είναι ούτε ΑΣΚ (διακεκομμένη γραμμή), ούτε ΕΚ πάνω στο CMB (διάστικτη γραμμή). Σε ισοκατανομή και τα δυο προβλέπουν 2-4 τάξεις μεγέθους λιγότερες ακτίνες Χ.

Τότε τι είναι;



Ιδέα:

Φαινομενικά υπερφωτεινές ταχύτητες ($u > c$) (Lovell et al. 2000): Η ροή του πίδακα είναι σχετικιστική σε αποστάσεις $\sim \text{pc}$ από τον πυρήνα και ο πίδακας σημαδεύει κοντά στον παρατηρητή.

Μήπως η ροή του πίδακα παραμένει σχετικιστική μέχρι τους κόμβους, σε απόσταση εκατοντάδων Kpc ?

ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΑ ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ ΑΣΚ σε ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗ

- $L_{s,obs} \propto L_s \delta^4$
- $L_s \propto U_p U_B = U_p^2 = U_B^2$

$\left. \begin{array}{l} \bullet L_{s,obs} \propto L_s \delta^4 \\ \bullet L_s \propto U_p U_B = U_p^2 = U_B^2 \end{array} \right\} \rightarrow U_B = U_p \propto \delta^{-2}$

- $L_{ssc} \propto U_p U_s$
- $U_s \propto \frac{L_s}{R^2} = \frac{U_p U_B}{R^2}$

$\left. \begin{array}{l} \bullet L_{ssc} \propto U_p U_s \\ \bullet U_s \propto \frac{L_s}{R^2} = \frac{U_p U_B}{R^2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \rightarrow L_{ssc} \propto U_p^2 U_B \\ \rightarrow L_{ssc,obs} = L_{ssc} \delta^4 \end{array}$

$L_{ssc,obs} \propto \delta^{-2}$

Για μία δεδομένη ισχύ σύνχροτρον, η σχετικιστική εστίαση μειώνει την αναμενόμενη ισχύ της ΑΣΚ σε ισοκατανομή.

Σχετικιστικά εστιασμένο ΕΚ σε ισοκατανομή

$$\left. \begin{aligned} &> L_{EC} \propto U_p \underbrace{\Gamma^2}_{\text{ext}} U_{\text{ext}} \\ &> L_{EC,obs} = L_{EC} \frac{\delta^6}{\Gamma^2} \\ &> U_p \propto \delta^{-2} \end{aligned} \right\} L_{EC,obs} \propto \delta^4$$

Για μία δεδομένη ισχύ σύνχροτρον, η σχετικιστική εστίαση αυξάνει την αναμενόμενη ισχύ της ΑΣΚ σε ισοκατανομή.

ΕΚ πάνω στο CMB από ενεργητικά ηλεκτρόνια σε ένα σχετικιστικό πίδακα

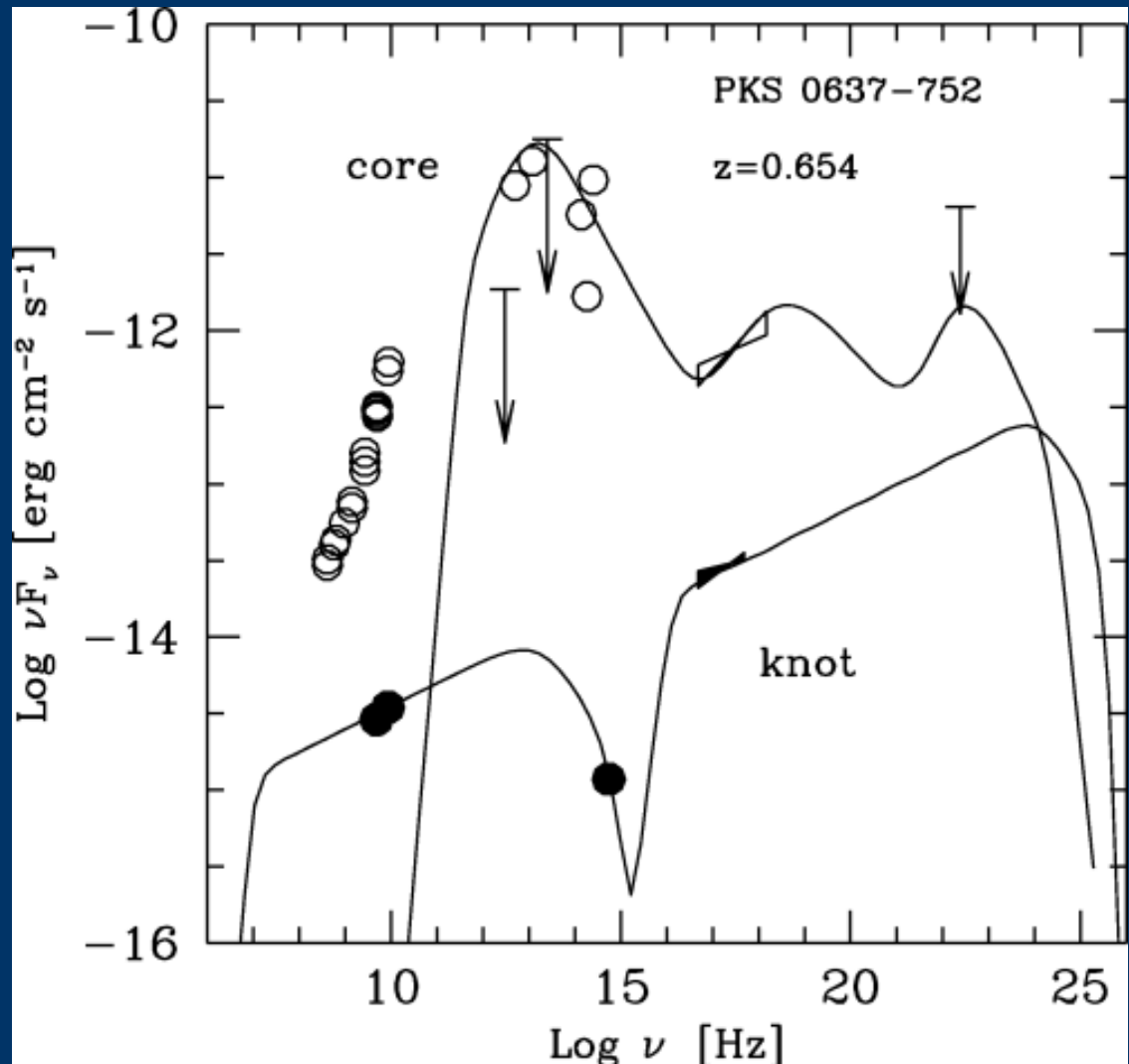
Celotti et al. 2001

Tavecchio et al. 2000:

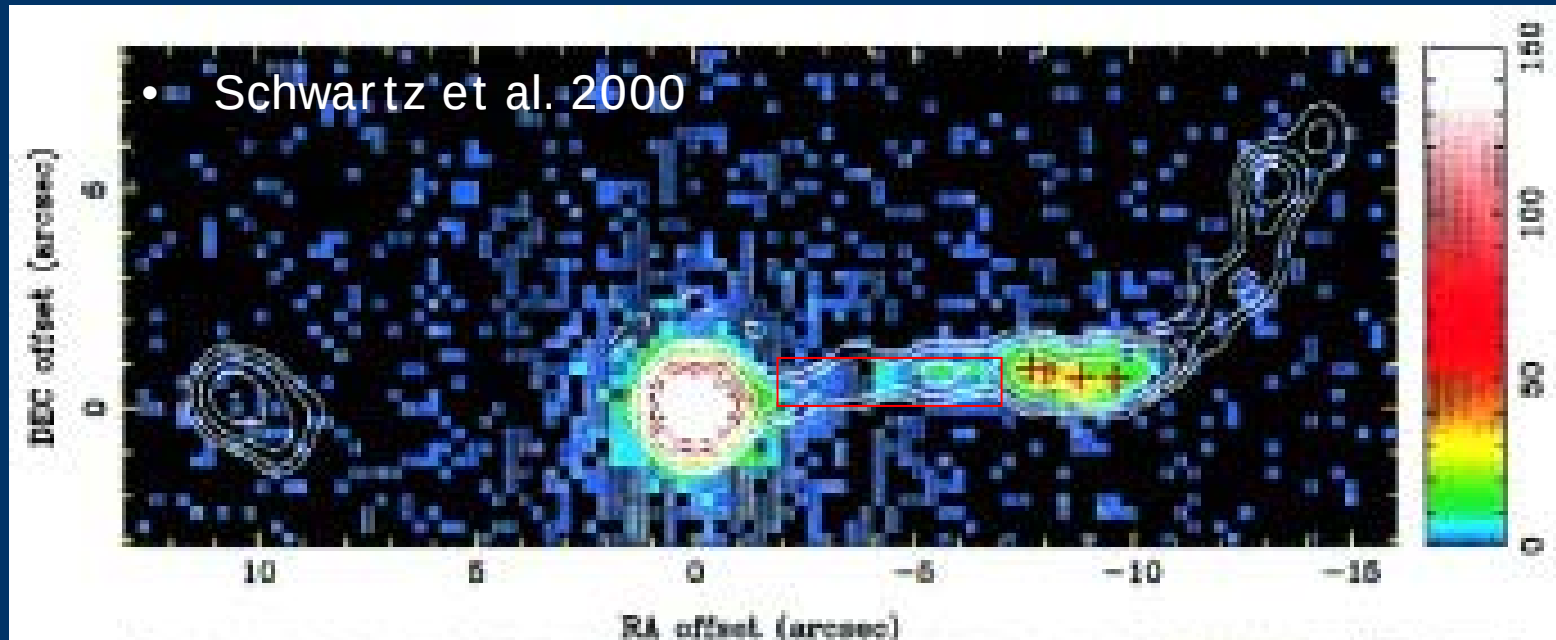
$\Gamma \approx 15$, $\theta \approx 6^\circ$,

ίδια με τον υπερφωτεινό πίδακα σε κλίμακες pc.

Πρώτο επιχείρημα ότι οι
πίδακες παραμένουν
σημαντικά σχετικιστικοί
σε κλίμακες εκατοντάδων
Kpc.



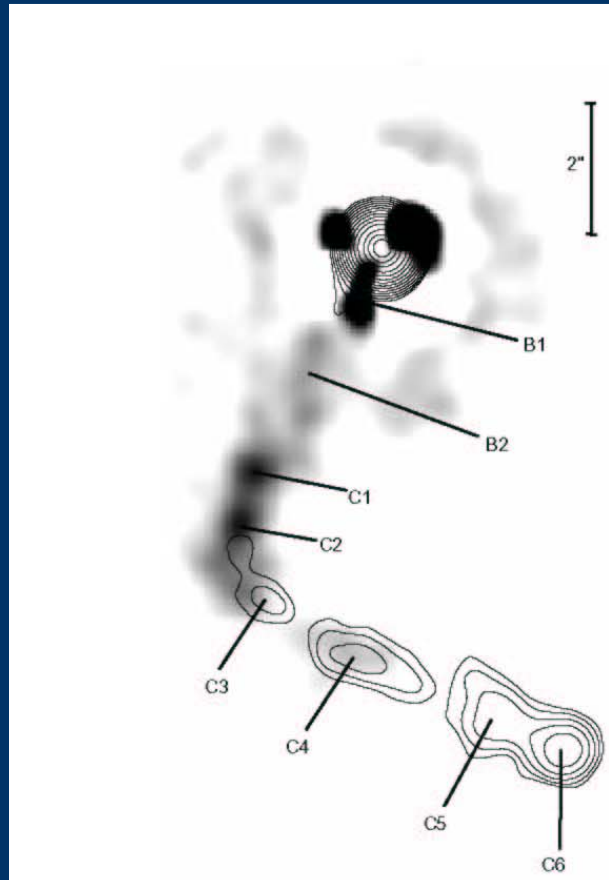
Ασθενής εκπομπή από την «γέφυρα»:
Τα περισσότερα λεπτόνια ταξιδεύουν ψυχρά
διαμέσου της «γέφυρας» που συνδέει τον
πυρήνα με τον πρώτο κόμβο.



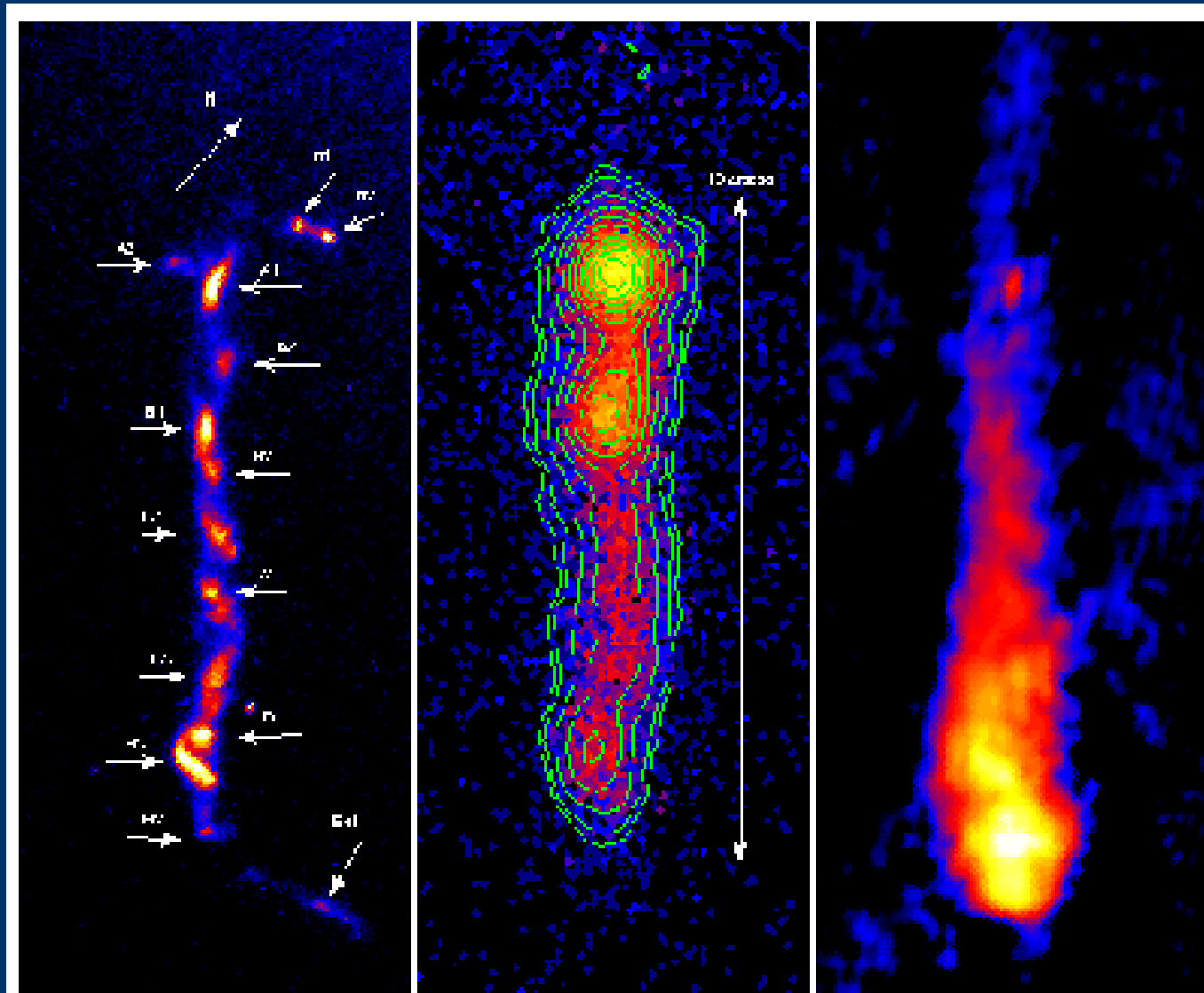
Έχει δει άλλες πηγές με τα ίδια χαρακτηριστικά το Chandra?

Άλλο ένα υπερφωτεινό quasar, 0827+243

(Jorstad & Marscher, *Apj* 2004)



Ακόμη ένα: 3C 273 (Marshall *et al.* 01)



Ορατό

Ακτίνες Χ

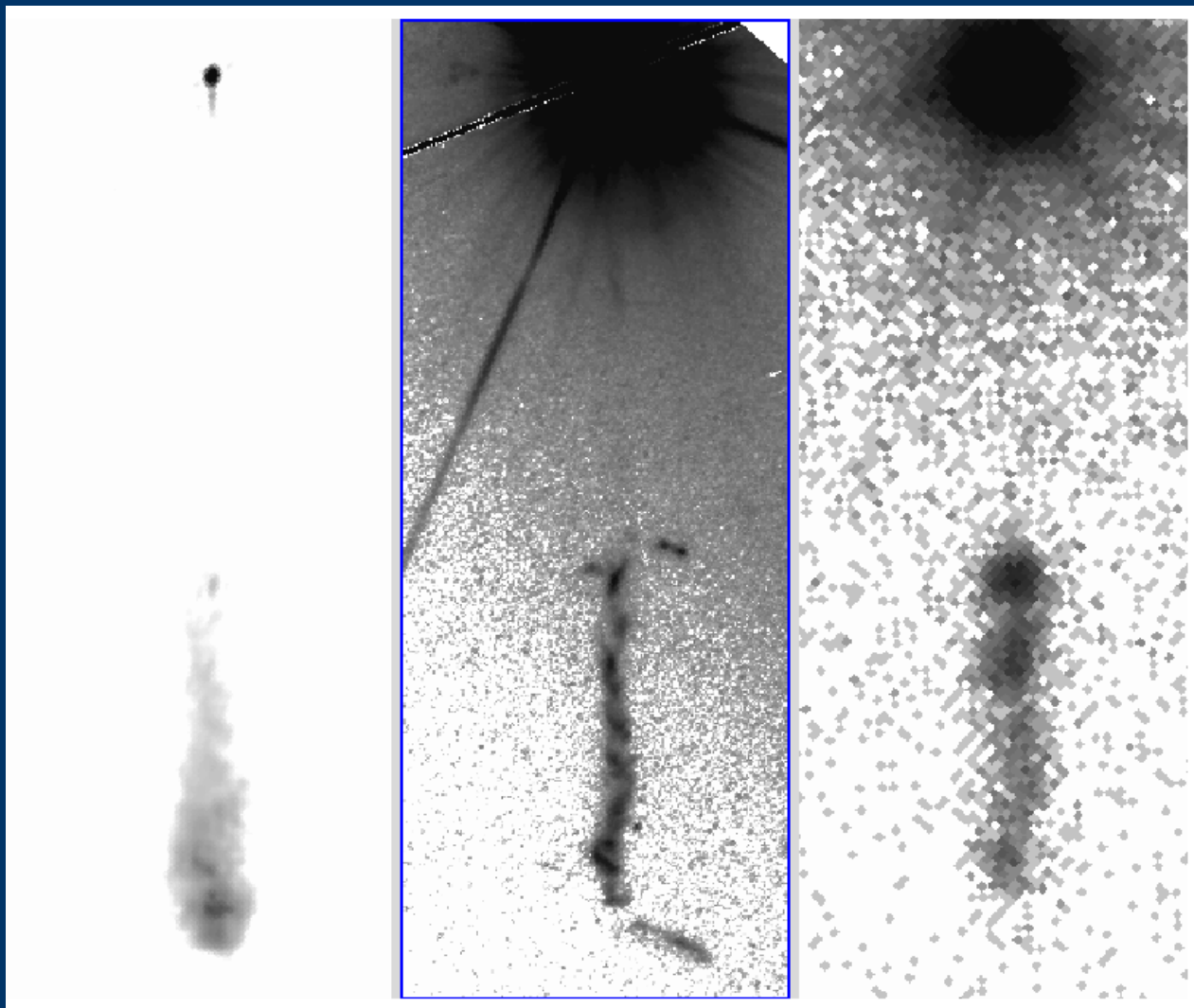
Ράδιο

Ακόμη ένα: 3C 273 (Marshall *et al.* 01)

Και στις τρεις
πηγές η ταχύτη-
τα ροής του
πλάσματος στον
πυρήνα και στον
πρώτο κόμβο
είναι πρακτικά
ίδιες.

⇒

Το ψυχρό πλά-
σμα στην γέφυρα
έχει σταθερή
παράγοντα
Lorentz
 $\Gamma \approx 10-20$



Ορατό

Ακτίνες X

Ράδιο

Τι περιμένουμε να δούμε στην γέφυρα?

«Βαλλιστική» εκπομπή Κόμπτον:

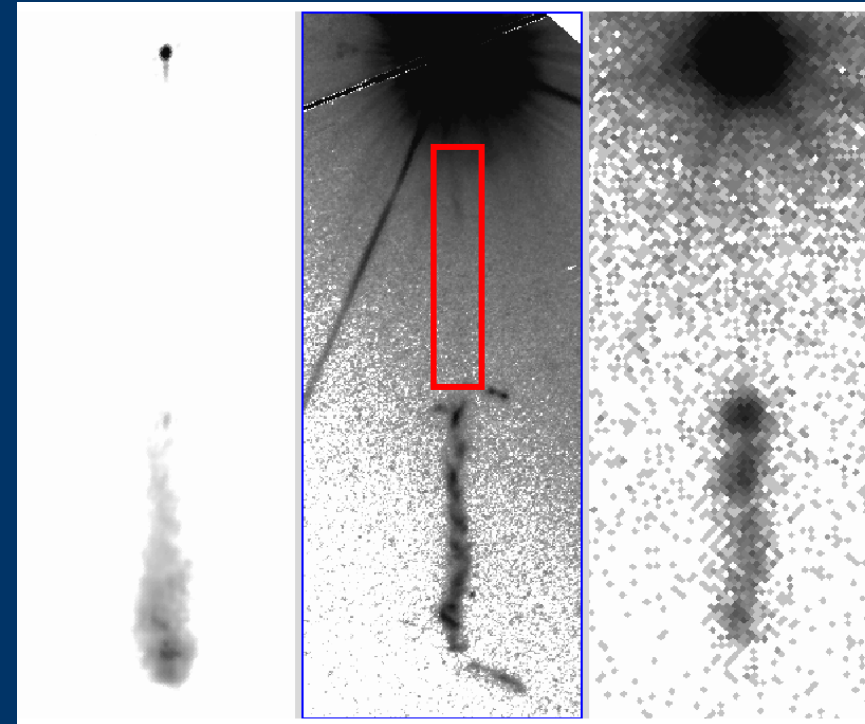
Τα ψυχρά λεπτόνια κινούνται βαλλιστικά με τη σχετικιστική ταχύτητα του πίδακα και σκεδάζουν τα φωτόνια του CMB, κατά προτίμηση προς την κατεύθυνση της κίνησης.

$$L_{BC} = 4\sigma_T / 3mc^2 \quad L_e U_{CMB} \quad I_{\text{γέφυρας}} \quad \delta^3$$

Η εκπομπή κορυφώνεται στο υπέρυθρο ($\lambda \sim$ μερικά μm):

$$\nu_{BC} = 2 \Gamma \delta \nu_{CMB}$$

>Ανιχνεύσιμο με το SPITZER και το HST



Ορατό

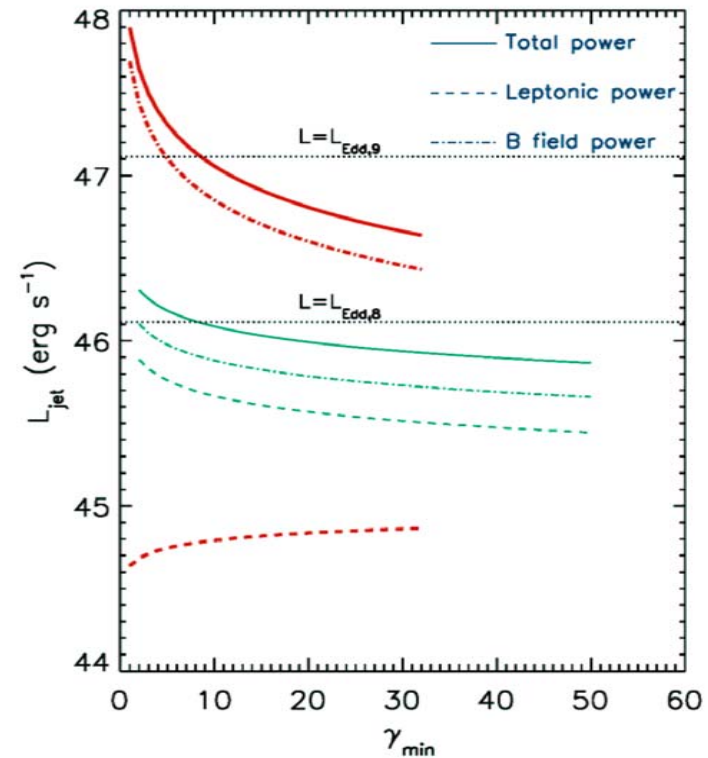
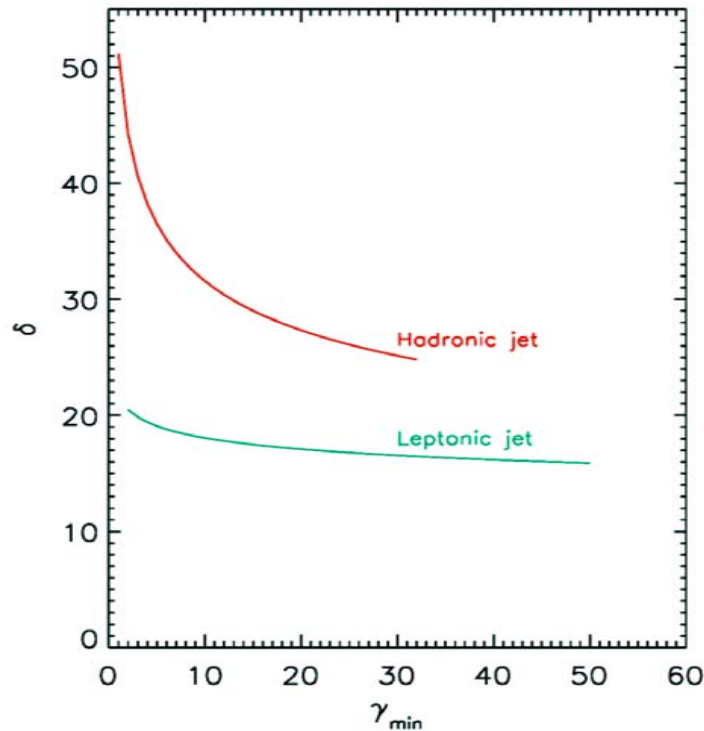
Ακτίνες Χ

Ράδιο

Ο πίδακας σε συνθήκες ελάχιστης ισχύος

Ποιός είναι ο παράγοντας Doppler και η ελάχιστη ισχύς με την οποία πρέπει να τροφοδοτήσουμε τους κόμβους για να παράξουμε το παρατηρούμενο φάσμα?

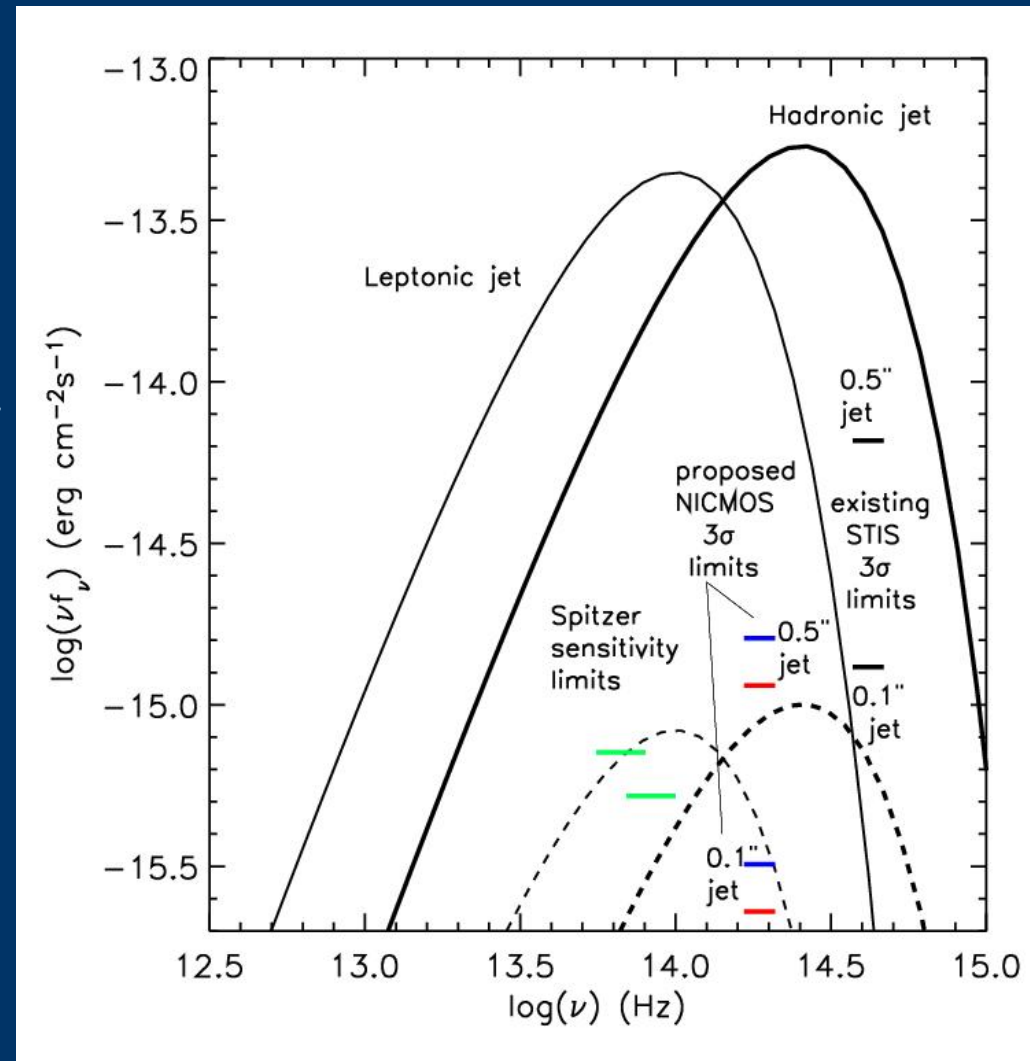
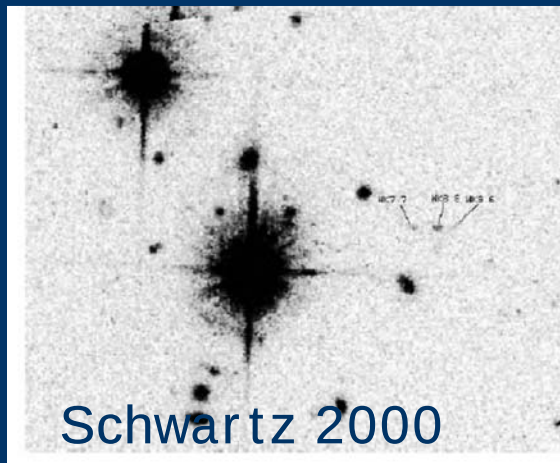
(κατά Dermer & Atoyan, ApJ 2004)



Η βαλλιστική εκπομπή Κόμπτον του PKS 0637-752

A: Η ισχύς που απαιτούν
τα λεπτόνια στον κόμβο
παρέχεται μόνο από
λεπτόνια του πίδακα
(συνεχείς γραμμές).

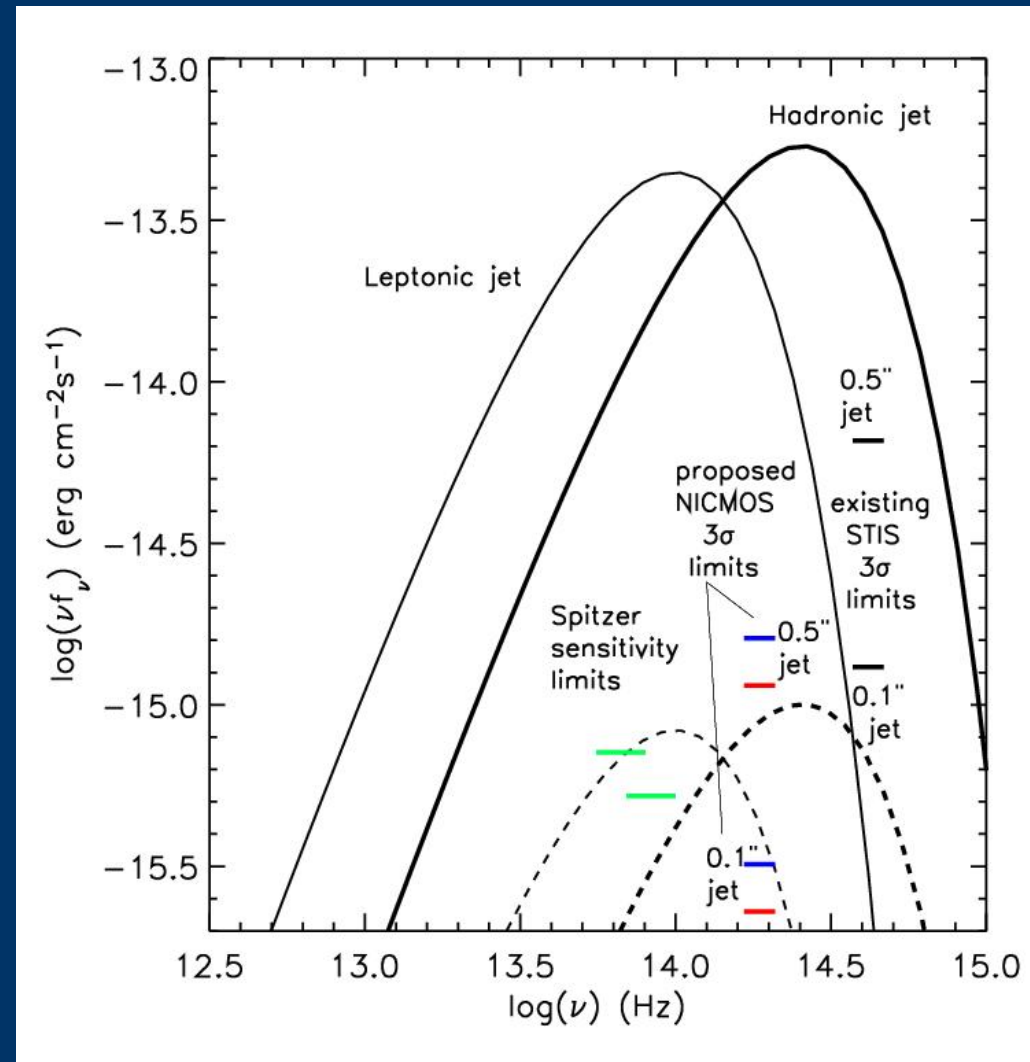
Το οπτικό όριο δεν συνάδουν
με σύσταση e-p



Η βαλλιστική εκπομπή Κόμπτον του PKS 0637-752

Β: Ο πίδακας παρέχει τον αριθμό των λεπτονίων που χρειάζεται ο κόμβος.
(διακεκομμένες γραμμές).

Η βαλλιστική εκπομπή Κόμπτον είναι ακόμη ανιχνεύσιμη και μπορούμε να θέσουμε περιορισμούς στη σύσταση των πιδάκων.



Πρόταση για παρατηρήσεις με το Spitzer

Πρόταση για παραπομπή με το Spitzer

ΑΠΟΡΡΙΦΘΗΚΕ

Πρόταση για παρατήρησης με το Spitzer

ΑΠΟΡΡΙΦΘΗΚΕ

Πρόταση στο HST:

Πρόταση για παρατηρήσεις με το Spitzer

ΑΠΟΡΡΙΦΘΗΚΕ

Πρόταση στο HST:

Εγκρίθηκε.

7 τροχιές του δορυφόρου, $7 \times 7 = 50$ Κ \$
περιμένουμε τον προγραμματισμό των
παρατηρήσεων και την έγκριση του
προυπολογισμού μέσα στο καλοκαίρι.

Αποτελέσματα πριν το τέλος του 2006