

Εκροή ύλης από μαύρες τρύπες

Νίκος Κυλάφης
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Η μελέτη του θέματος ξεκίνησε ως διδακτορική διατριβή του Δημήτρη Γιαννίου (Princeton) και συνεχίζεται.

Ιωάννινα, 8-9-11

Κατ' αρχάς, πώς ξέρουμε ότι υπάρχουν μαύρες τρύπες;

- Το συμπεραίνομε αφενός θεωρητικά (είναι η κατάληξη των αστεριών μεγάλης μάζας) αφετέρου διότι παρατηρούμε κανονικά αστέρια να γυρίζουν γύρω από έναν **αόρατο συνοδό**. Ο αόρατος συνοδός είναι η μαύρη τρύπα που έχει μάζα της τάξεως των 10 ηλιακών μαζών.
- Επίσης στα κέντρα γαλαξιών είναι συγκεντρωμένη πολύ μεγάλη **αόρατη μάζα** γύρω από την οποία περιφέρονται ορατά αστέρια. Από την περίοδο περιφοράς και την «ακτίνα» της τροχιάς προσδιορίζομε (νόμος Kepler) τη μάζα της μαύρης τρύπας η οποία είναι της τάξεως εκατομμυρίων έως δισεκατομμυρίων ηλιακών μαζών.

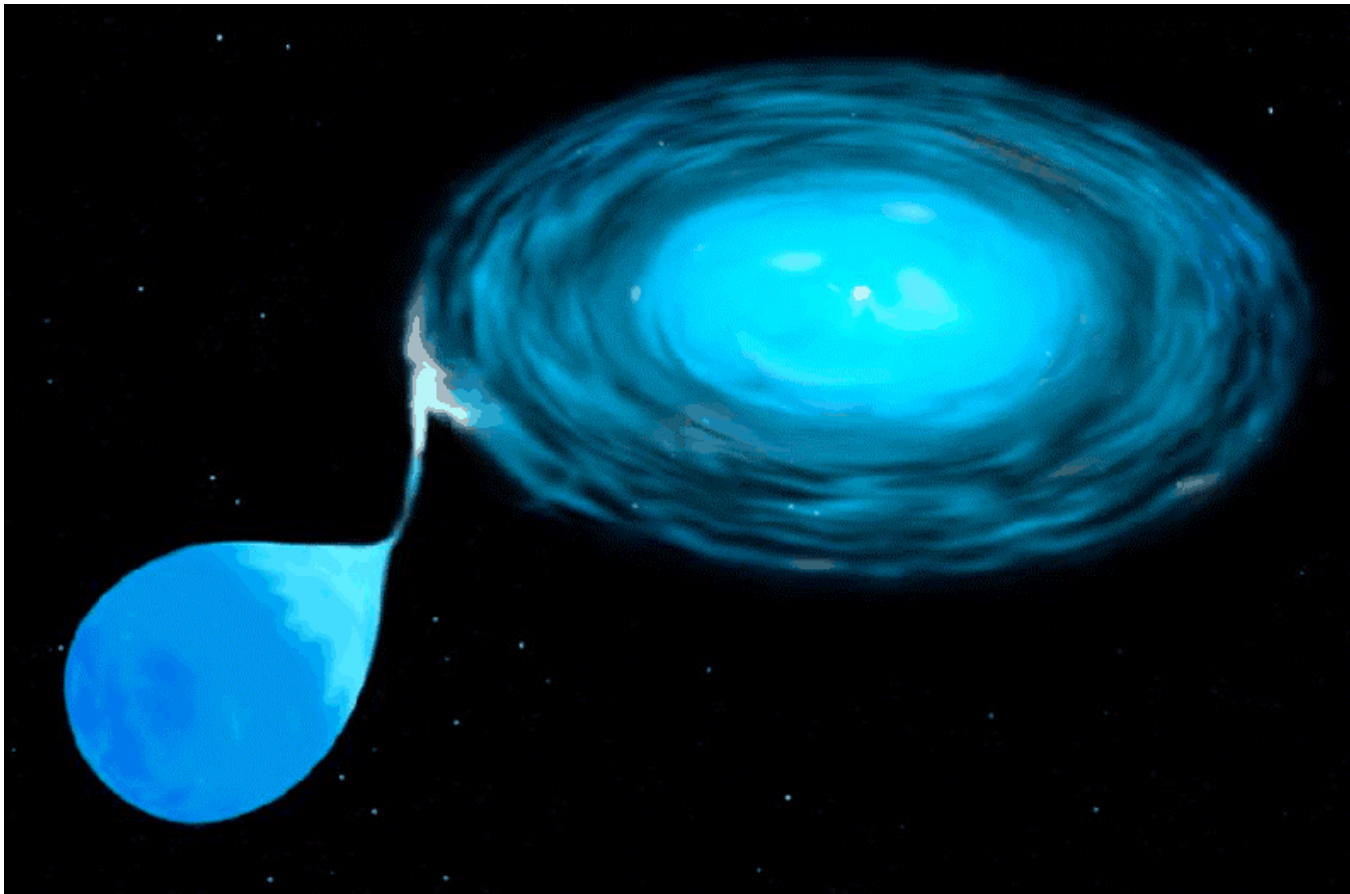
Αφού οι μαύρες τρύπες απορροφούν τα πάντα, πώς γίνεται εκροή ύλης;

- Όντως οι μαύρες τρύπες δεν αφήνουν τίποτε να διαφύγει, ούτε φως. Ό,τι απορροφάται από τη μαύρη τρύπα δεν μπορεί πλέον να ξεφύγει.
- Η εκροή ύλης λοιπόν πρέπει να γίνεται στο περιβάλλον της μαύρης τρύπας, δηλαδή έξω από τον ορίζοντα γεγονότων.
- Με άλλα λόγια, ύλη που προορίζονταν να πέσει μέσα στη μαύρη τρύπα, για κάποιο λόγο (που θα τον εξηγήσουμε παρακάτω) εκτοξεύεται υπό μορφή πίδακα.

Ζεύγος κανονικού αστεριού με μαύρη τρύπα.

- ❑ Τα περισσότερα αστέρια είναι σε ζεύγη. Ο Ήλιος μας είναι η εξαίρεση.
- ❑ Καθώς αυτά εξελίσσονται, το μεγαλύτερο από τα δυο τελειώνει τα πυρηνικά καύσιμά του πρώτο και, αναλόγως της μάζας του, καταλήγει να γίνει λευκός νάνος, αστέρι νετρονίων ή μαύρη τρύπα.
- ❑ Καθώς το αστέρι συνοδός εξελίσσεται, χάνει μάζα, η οποία πέφτει στη μαύρη τρύπα.
- ❑ Λόγω στροφορμής, η ύλη δεν πέφτει ακτινικά, αλλά σχηματίζει ένα δίσκο.

Σχηματική αναπαράσταση



- Εικόνα ζεύγους: Το κανονικό αστέρι τροφοδοτεί το συμπαγές. Λόγω στροφορμής δημιουργείται δίσκος συσσώρευσης.

Δίσκος συσσώρευσης

- ❑ Ο δίσκος συσσώρευσης είναι κάτι σαν τα δαχτυλίδια του Κρόνου, μόνο που εδώ λόγω τριβής η ύλη σιγά-σιγά πέφτει προς τη μαύρη τρύπα. Είναι δηλαδή όπως οι τεχνητοί δορυφόροι, που πέφτουν στη Γη λόγω τριβής στην ατμόσφαιρα.
- ❑ Κανονικά δηλαδή, η ύλη του δίσκου έπρεπε να πέσει όλη μέσα στη μαύρη τρύπα.
- ❑ Αυτό όμως που συμβαίνει μερικές φορές είναι ότι μέρος της ύλης εκσφενδονίζεται υπό μορφή πίδακα λίγο πριν πέσει στη μαύρη τρύπα.

Σχηματική αναπαράσταση εκροής
ύλης από τον δίσκο συσσώρευσης.



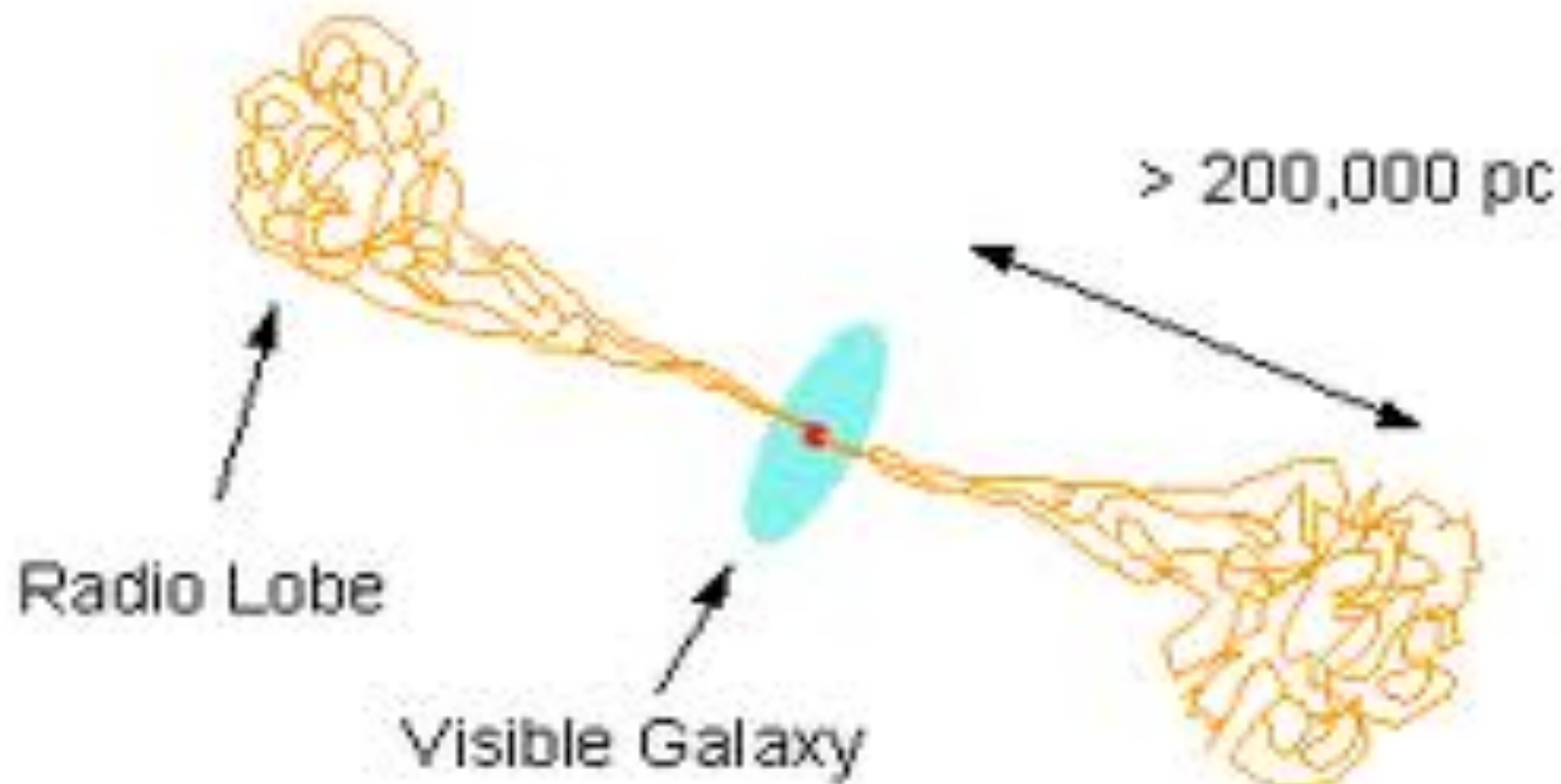
Πίδακας της πηγής Cyg X-1, όπως φαίνεται στα ραδιοκύματα



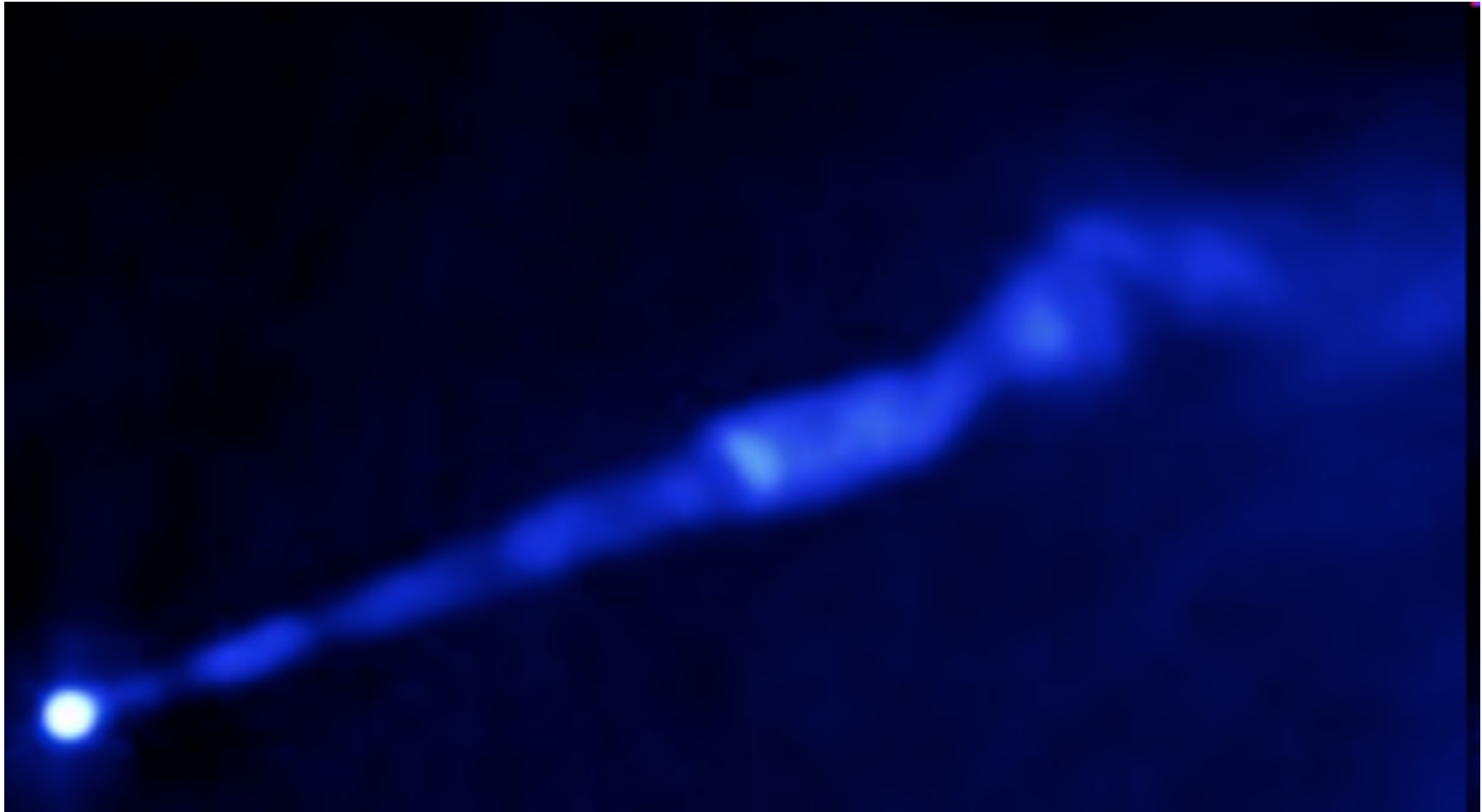
Εκροή ύλης από τον δίσκο συσσώρευσης στο κέντρο γαλαξία

- ▣ Το ίδιο συμβαίνει με τους δίσκους συσσώρευσης στα κέντρα γαλαξιών.
- ▣ Οι διαστάσεις είναι ανάλογες της μάζας της μαύρης τρύπας.
- ▣ Όπως είπαμε ήδη, οι μαύρες τρύπες στα κέντρα γαλαξιών έχουν μάζα εκατομμύρια έως δισεκατομμύρια φορές τη μάζα του Ήλιου.

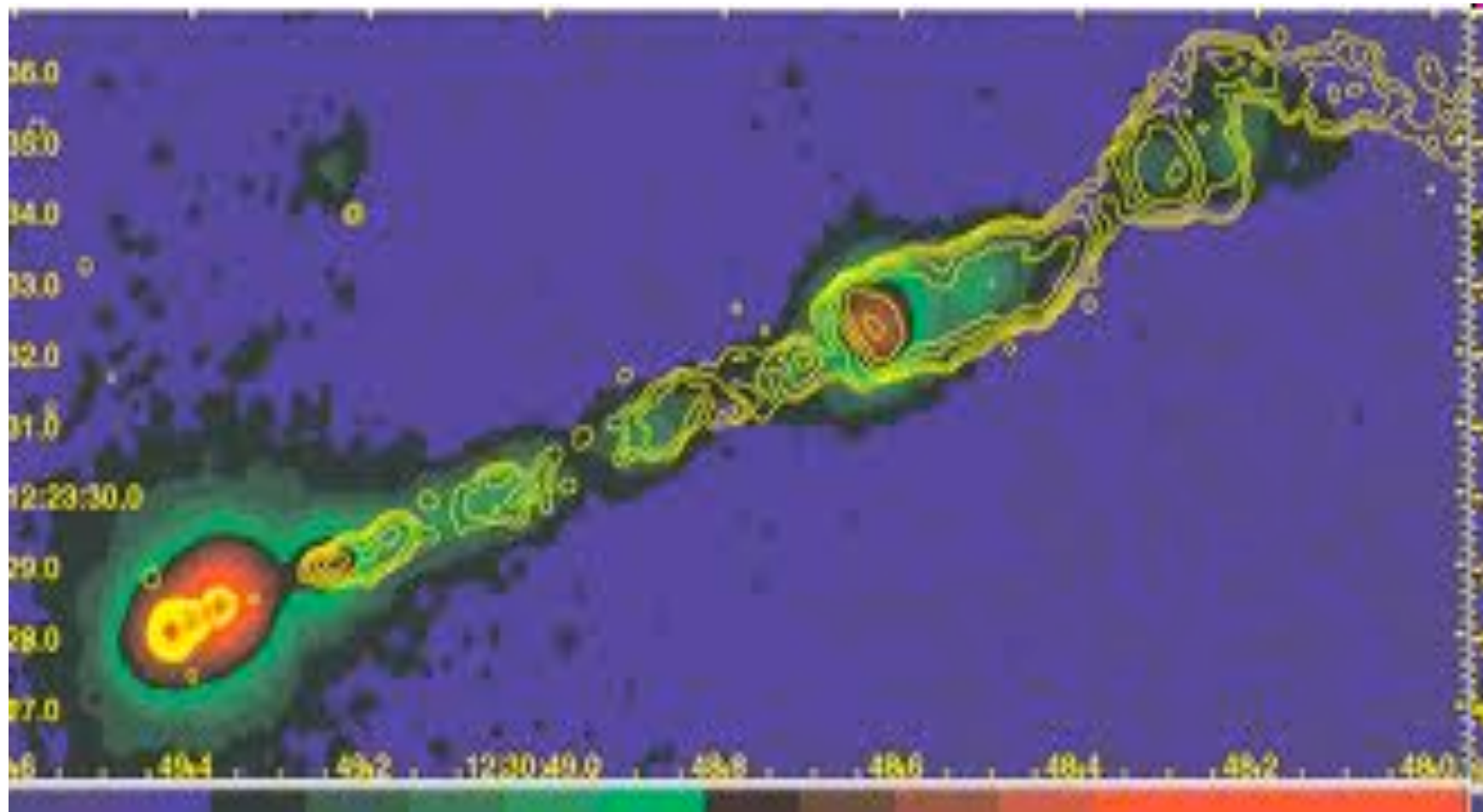
Αναπαράσταση γαλαξία και εκροή
ύλης από την κεντρική περιοχή του.



Πίδακας του γαλαξία M87, όπως φαίνεται στα ραδιοκύματα.



Πίδακας του ίδιου γαλαξία, όπως φαίνεται στις ακτίνες X.



Εκτόξευση του πίδακα

- ▣ Τι είναι αυτό που κάνει την ύλη να εκτοξευθεί υπό μορφή πίδακα αντί να πέσει στη μαύρη τρύπα;
- ▣ Ας δούμε πρώτα ένα μηχανικό ανάλογο.

Εκτόξευση του πίδακα

- Τον ρόλο των συρμάτων στο δίσκο συσσώρευσης τον παίζουν οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές.
- Επειδή η ύλη του δίσκου συσσώρευσης είναι ιονισμένη, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα μπορούν να κινηθούν ελεύθερα κατά μήκος του μαγνητικού πεδίου.
- Έτσι, φυγόκεντρος δύναμη και μαγνητικό πεδίο δημιουργούν τον πίδακα (Blandford & Payne 1982).

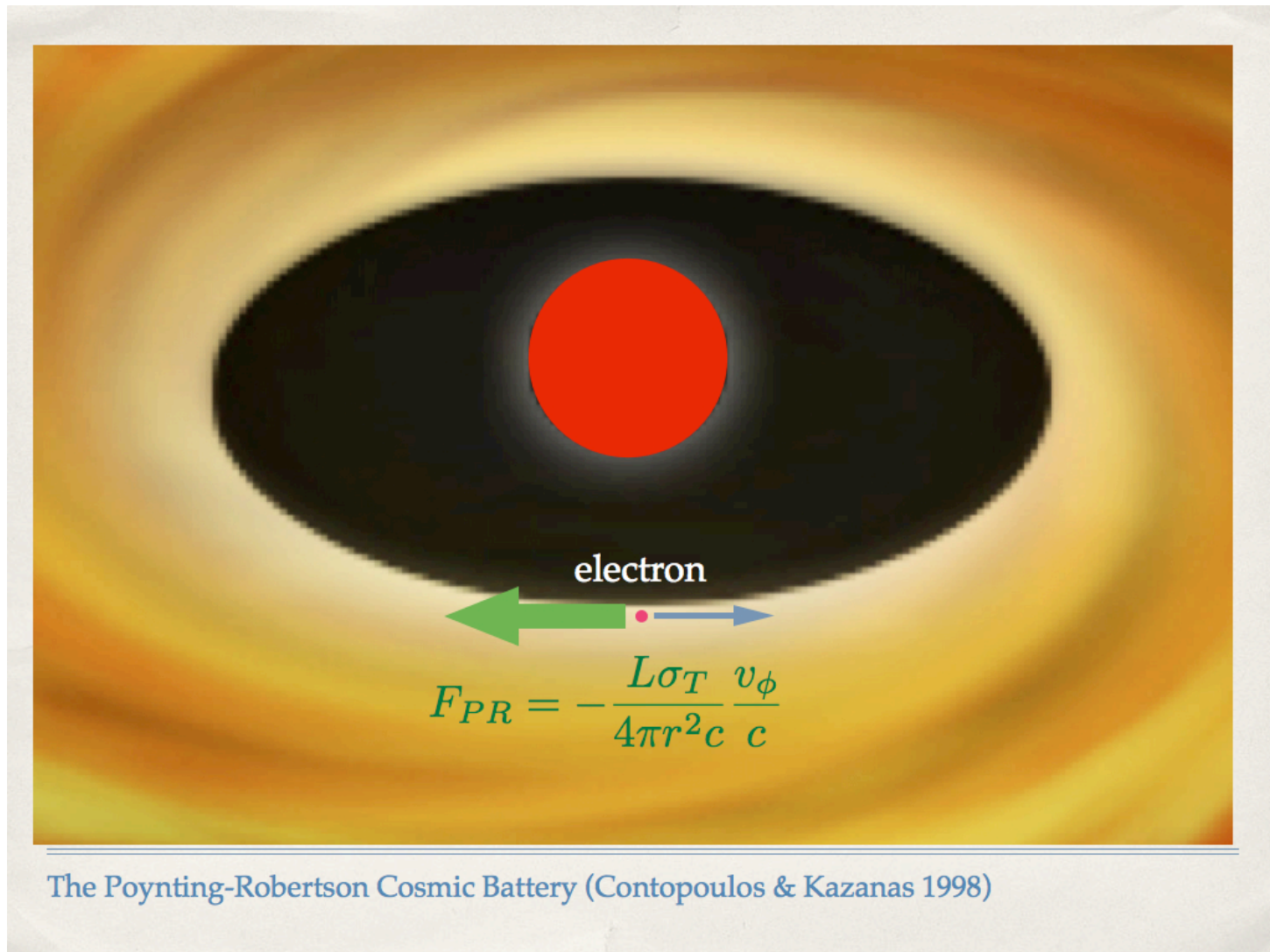
Και το μαγνητικό πεδίο πώς σχηματίζεται;

- Για να έχουμε μαγνητικό πεδίο που να βγαίνει από τον δίσκο συσσώρευσης, πρέπει να έχουμε ρεύμα κατά τη φορά περιστροφής του δίσκου.
- Για να έχουμε ρεύμα, πρέπει να έχουμε έναν μηχανισμό που να το φτιάχνει, δηλαδή μια μπαταρία.

Κοσμική Μπαταρία (Contopoulos & Kazanas 1998)

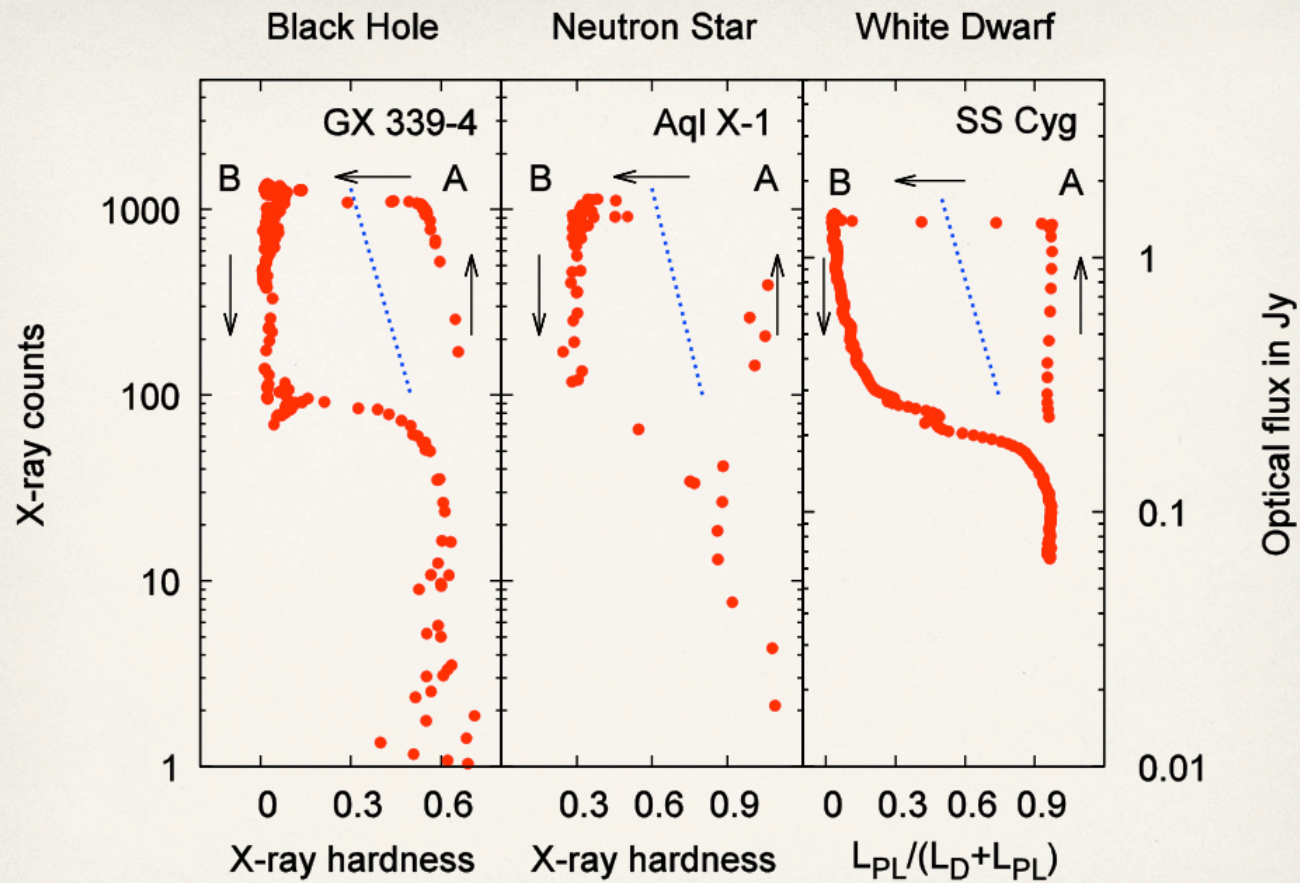
- Μια καταπληκτική ιδέα προτάθηκε από τους Ιωάννη Κοντόπουλο και Δημοσθένη Καζάνα το 1998.
- Η ακτινοβολία από το εσωτερικό του δίσκου συσσώρευσης εξασκεί δύναμη (τύπου Poynting – Robertson) στα ηλεκτρόνια και έτσι δημιουργείται ρεύμα στο δίσκο, με φορά τη φορά περιστροφής.

Αρχή λειτουργίας Κοσμικής Μπαταρίας.

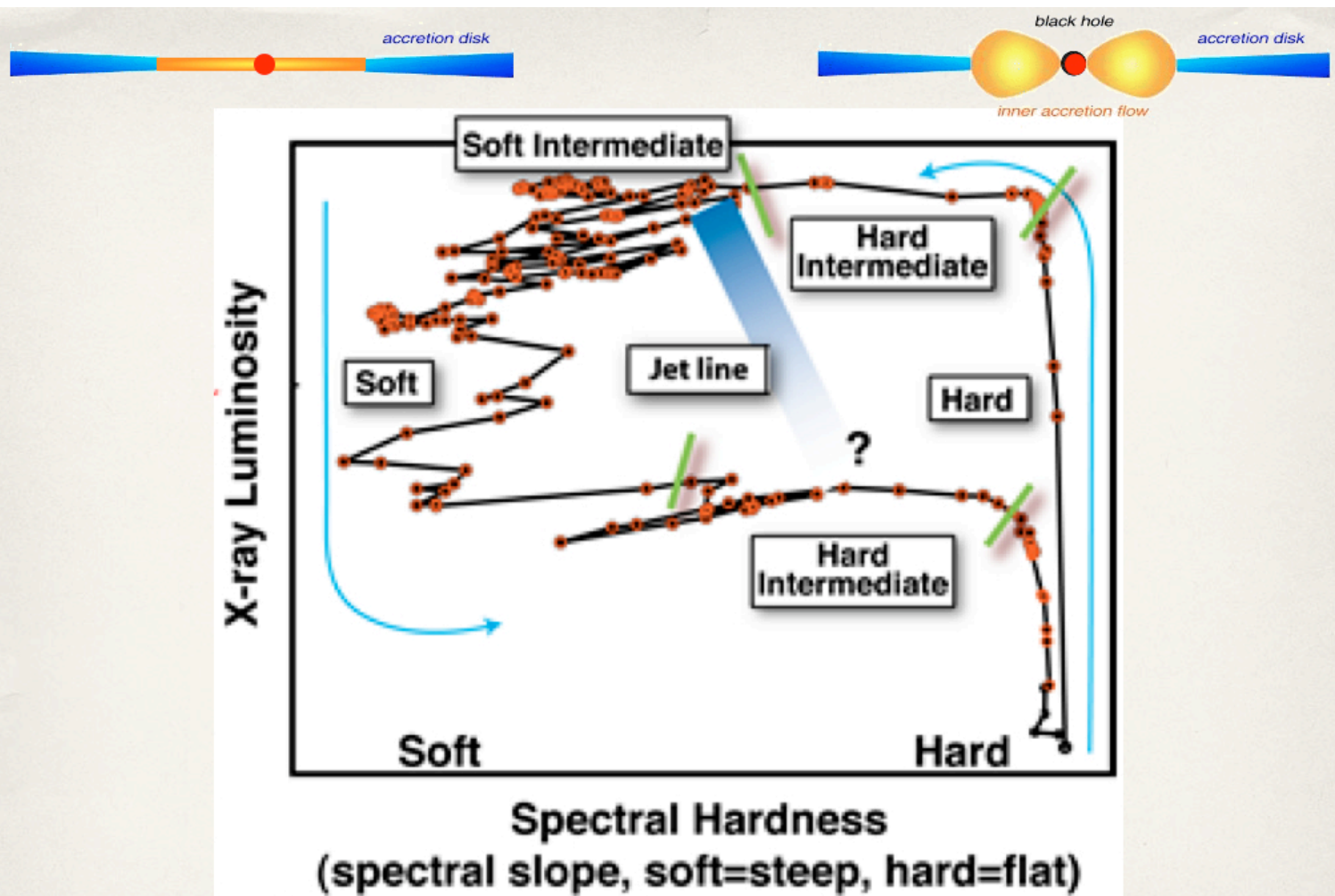


Φαινομενολογία πηγών ακτίνων X

- Από παρατηρήσεις στις ακτίνες X έχουμε μεγάλη φαινομενολογία για το πότε εμφανίζεται πίδακας και πότε όχι.
- Ας δούμε λοιπόν αυτή τη φαινομενολογία.



The jet line in the Hardness-Intensity Diagram (Kording *et al.* 2008)



The jet line in the HID (Kylafis, Contopoulos, Kazanas & Christodoulou 2011, submitted)

Κοσμική μπαταρία και Φαινομενολογία πηγών ακτίνων Χ

- Στην πιο πρόσφατη δουλειά μας αποδείξαμε ότι υπάρχει πλήρης συνέπεια μεταξύ της υπάρχουσας φαινομενολογίας και της Κοσμικής Μπαταρίας.

Ο πίδακας μπορεί να εξηγήσει τις παρατηρήσεις από μαύρες τρύπες;

- Η απάντηση είναι ΝΑΙ.
- Θα σας παρουσιάσω λίγα (λόγω έλλειψης χρόνου) αποτελέσματα από τέσσερις εργασίες που κάναμε τα τελευταία χρόνια με συναδέλφους στην Κρήτη και αλλού.

Φάσμα ακτίνων X από πηγές που περιέχουν μαύρη τρύπα.

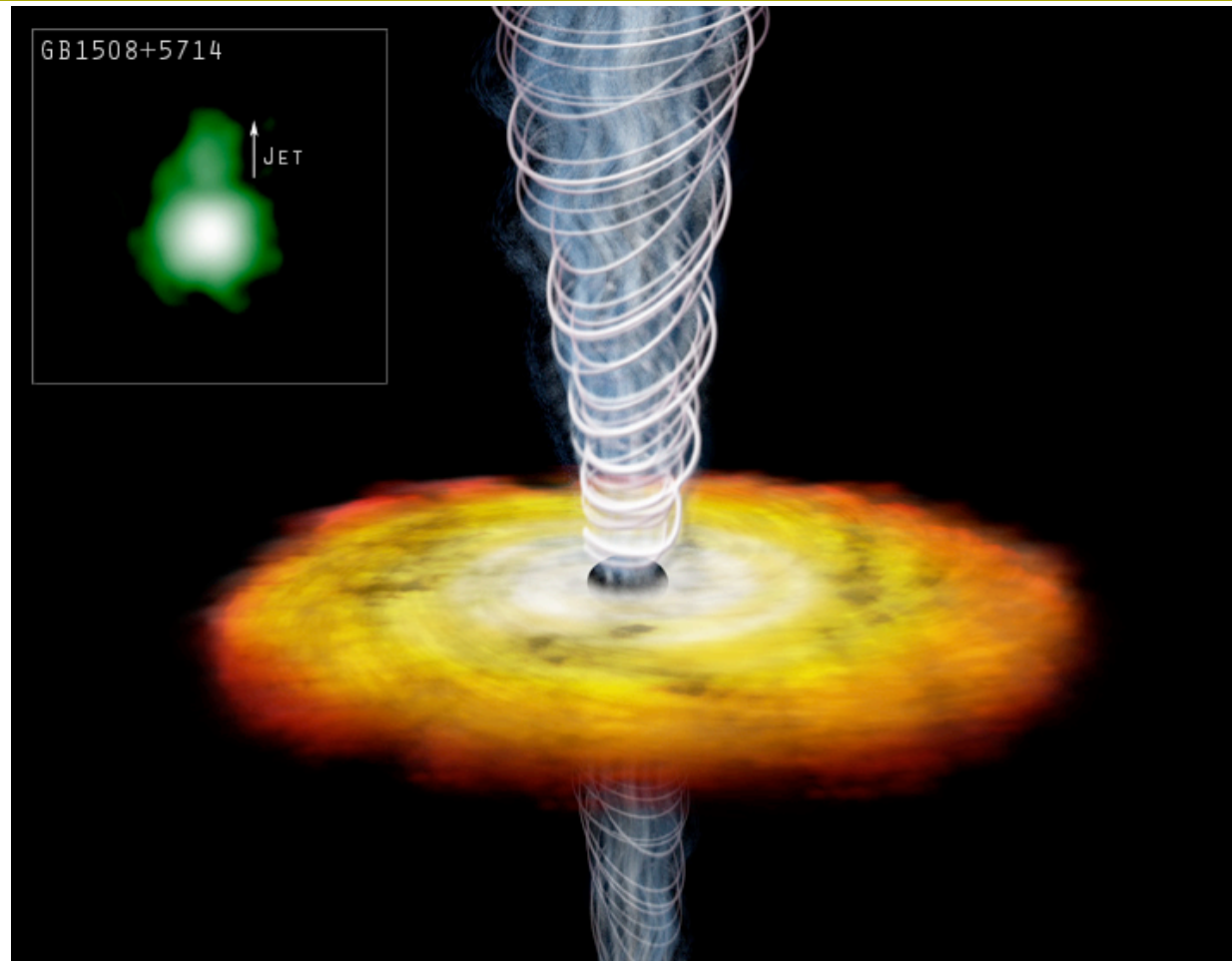
- ❑ Οι μαύρες τρύπες ως πηγές ακτίνων X εμφανίζονται με δυο “μορφές” όσον αφορά στο φάσμα τους.
- ❑ Στη μια, το φάσμα ακτίνων X κυριαρχείται από την εκπομπή ‘μαλακών’ ακτίνων X ($\sim 1-10$ keV) και το φάσμα είναι περίπου φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας $kT \sim 2$ keV. Αυτές προέρχονται από τον δίσκο συσσώρευσης γύρω από τη μαύρη τρύπα.

-
- Στην άλλη, το φάσμα ακτίνων X κυριαρχείται από την εκπομπή 'σκληρών' ακτίνων X ($\sim 1-300$ keV) και το φάσμα είναι της μορφής

$$I(E) = E^{-\alpha}$$

Σ' αυτή τη μορφή, παρατηρούμε πάντοτε πίδακα (jet) και εκπομπή ραδιοκυμάτων.

Σχηματική αναπαράσταση



- Εικόνα δίσκου συσσώρευσης με πίδακα (jet).

Πώς μπορούμε να πάρουμε φάσμα ακτίνων X της μορφής $I(E) = E^{-\alpha}$;

- ▣ Ας θεωρήσουμε φωτόνια χαμηλής ενέργειας E_0 , π.χ. από τον δίσκο συσσώρευσης.

Πώς μπορούμε να πάρουμε φάσμα ακτίνων X της μορφής $I(E) = E^{-\alpha}$;

- ▣ Ας θεωρήσουμε φωτόνια χαμηλής ενέργειας E_0 , π.χ. από τον δίσκο συσσώρευσης.
- ▣ Έστω $\lambda = \Delta E / E$ η μέση κλασματική αύξηση της ενέργειας του φωτονίου ανά σκέδαση Compton. Τότε

$$E_1 = E_0 + \Delta E_0 = E_0(1 + \Delta E_0 / E_0) = E_0(1 + \lambda)$$

$$E_2 = E_1 + \Delta E_1 = E_1(1 + \Delta E_1 / E_1) = E_1(1 + \lambda) = E_0(1 + \lambda)^2$$

...

$$E_n = E_0(1 + \lambda)^n \quad (1)$$

Πώς μπορούμε να πάρουμε φάσμα ακτίνων X της μορφής $I(E) = E^{-\alpha}$;

- Αν p είναι η πιθανότητα για να σκεδαστεί ένα φωτόνιο μια φορά, τότε η ένταση των φωτονίων που σκεδάστηκαν n φορές είναι

$$I_n \sim p^n \quad (2)$$

Πώς μπορούμε να πάρουμε φάσμα ακτίνων X της μορφής $I(E) = E^{-\alpha}$;

- Αν p είναι η πιθανότητα για να σκεδαστεί ένα φωτόνιο μια φορά, τότε η ένταση των φωτονίων που σκεδάστηκαν n φορές είναι

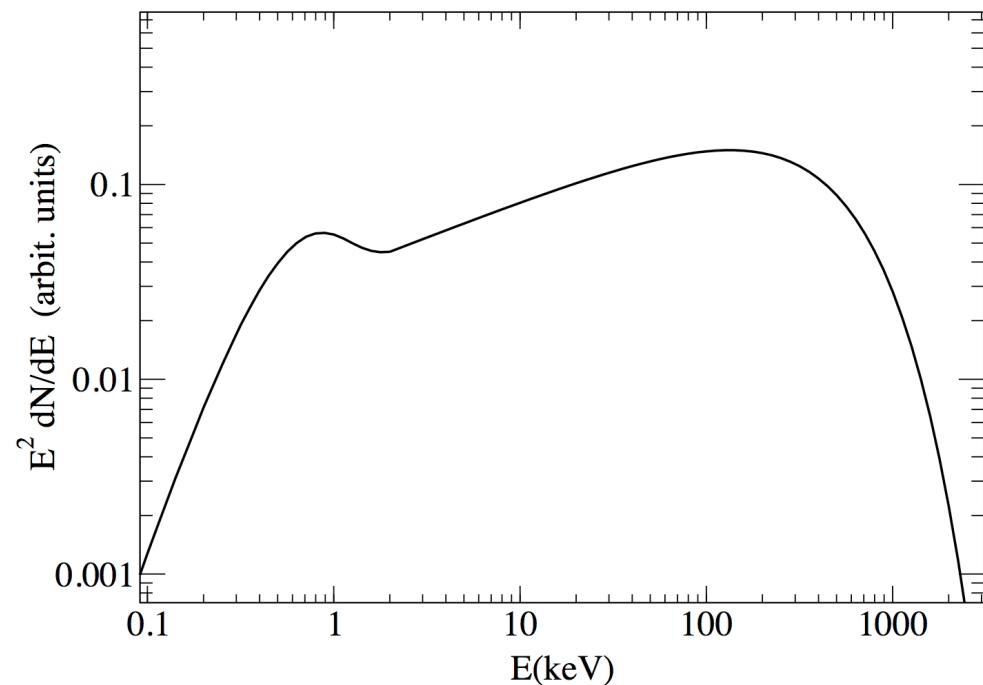
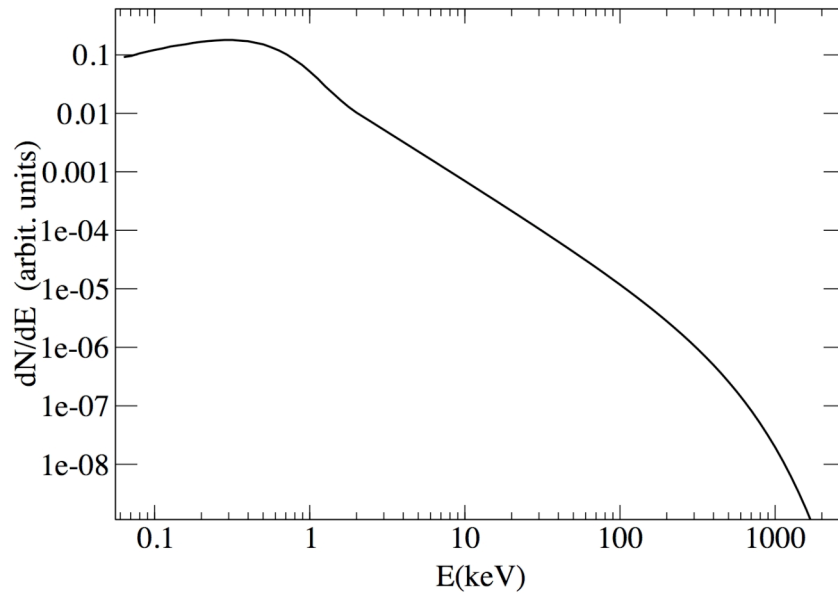
$$I_n \sim p^n \quad (2)$$

- Λύνοντας την εξίσωση (1) ως προς n και αντικαθιστώντας στη (2) παίρνουμε

$$I(E) \sim (E / E_0)^{-\alpha}$$

όπου $\alpha = \ln(1 / p) / \ln(1 + \lambda)$

Φάσμα ακτίνων Χ από μαύρη τρύπα όταν υπάρχει πίδακας.



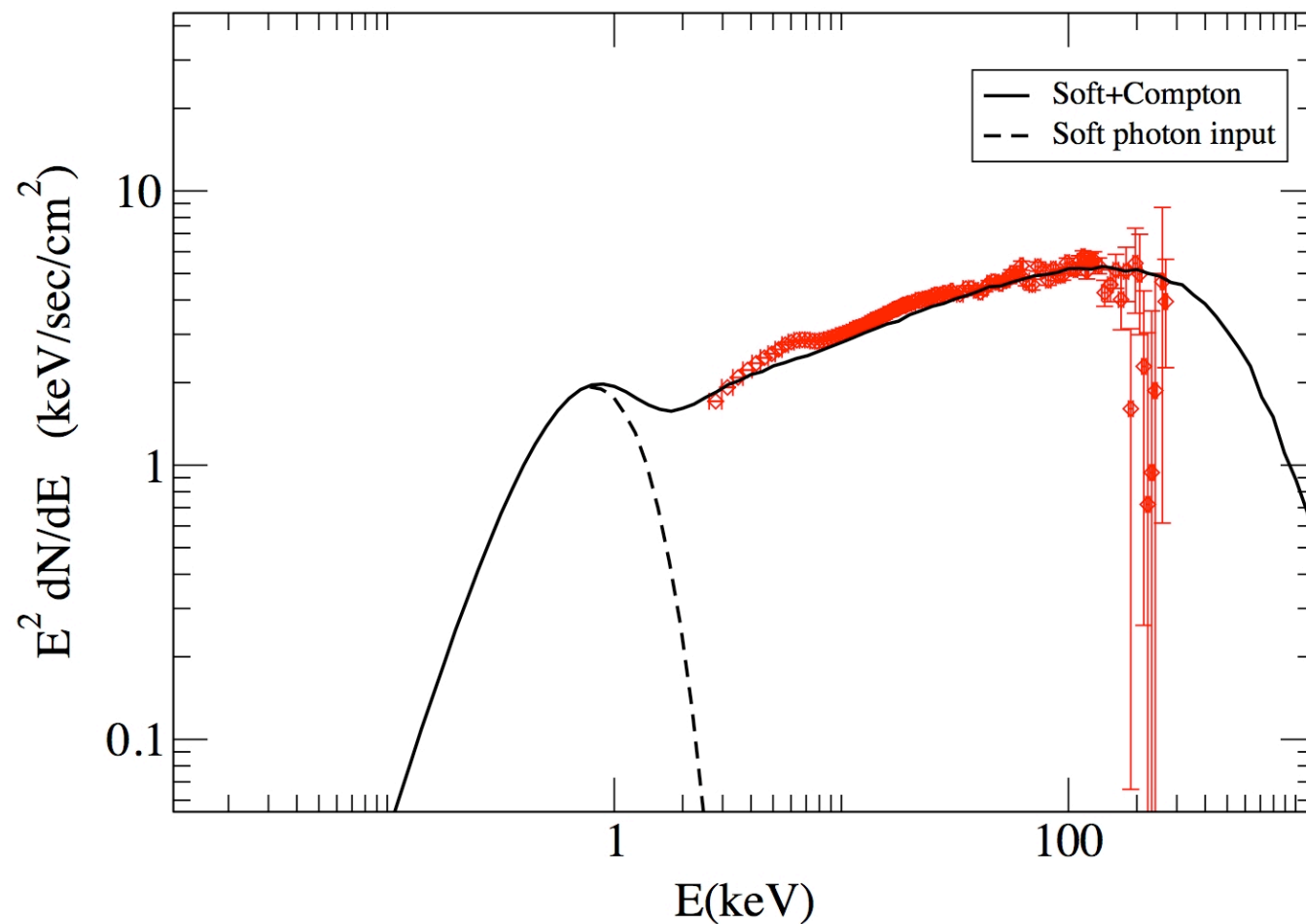
Σκέδαση Compton στον πίδακα.

- Το μοντέλο που προτείναμε είναι ότι φωτόνια χαμηλής ενέργειας ($\sim 0.1 - 1 \text{ keV}$) από τον δίσκο συσσώρευσης είτε διαφεύγουν χωρίς να σκεδαστούν είτε σκεδάζονται από τα ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια στον πίδακα.

Σκέδαση Compton στον πίδακα.

- Το μοντέλο που προτείνουμε είναι ότι φωτόνια χαμηλής ενέργειας ($\sim 0.1 - 1 \text{ keV}$) από τον δίσκο συσσώρευσης είτε διαφεύγουν χωρίς να σκεδαστούν είτε σκεδάζονται από τα ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια στον πίδακα.
- Τα ηλεκτρόνια δεν είναι απαραίτητο να είναι θερμικά και δεν είναι.

Σύγκριση με παρατηρήσεις

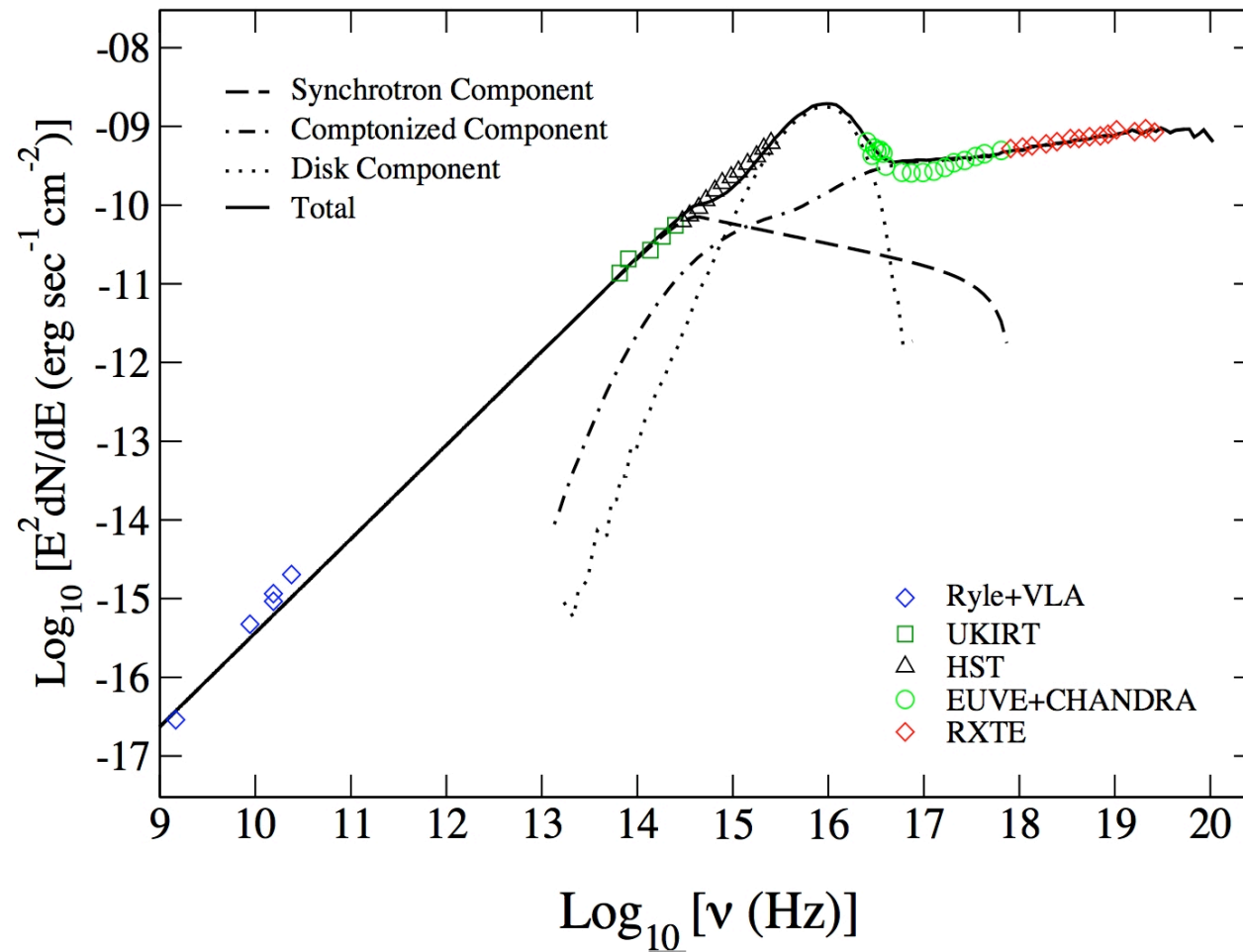


Παρατηρούμενο φάσμα ακτίνων X από την πηγή Cygnus X-1.

Περαιτέρω σύγκριση με παρατηρήσεις

- Μπορεί το μοντέλο να αναπαράξει το φάσμα σε όλες τις ενέργειες;
- Μέχρι σήμερα, μόνο για μια πηγή (XTE J 1118+480) έχουμε ταυτόχρονες παρατηρήσεις από τα ραδιοκύματα μέχρι τις ακτίνες Χ.
- Όντως, το μοντέλο εξηγεί πάρα πολύ καλά το παρατηρούμενο φάσμα.

Giannios (2005)



- Μοντέλο και παρατηρήσεις για XTE J 1118+480



Σας ευχαριστώ για την
προσοχή σας.