

Jak se pozorují černé díry? - část 4. Současné otevřené problémy



Jiří Svoboda

Astronomický ústav Akademie věd ČR

Vybrané kapitoly z astrofyziky, Astronomický ústav UK, prosinec 2013

Osnova přednáškového cyklu

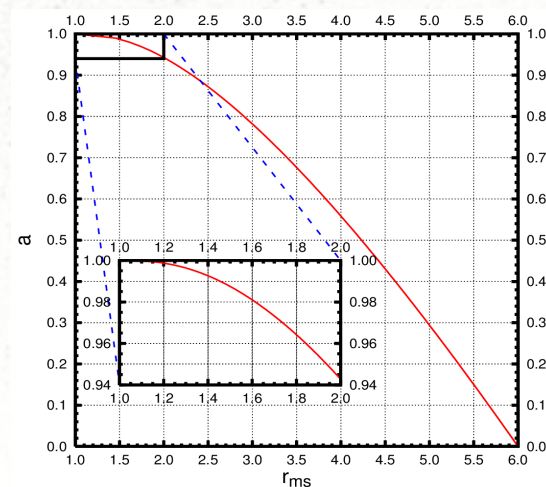
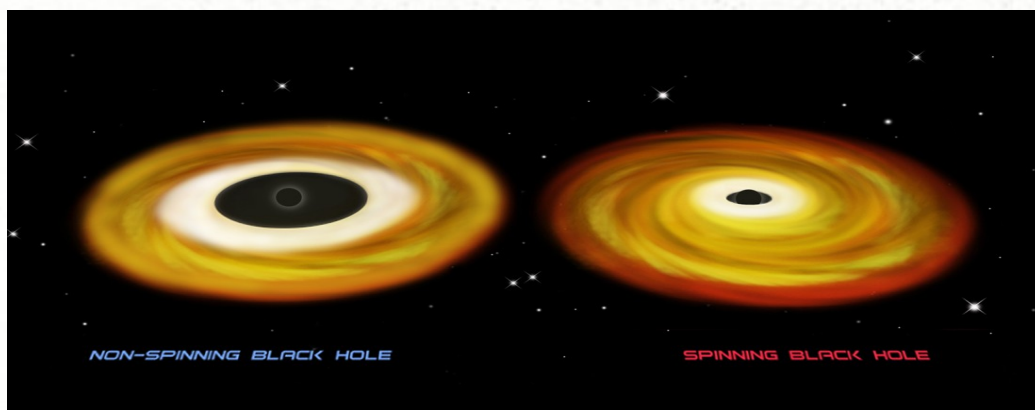
- Úvodní přednáška
 - popularizační přednáška z Týdne vědy a techniky
 - jak a kde pozorujeme černé díry ve vesmíru?
 - metody detekce černých děr – současné i budoucí
- Rentgenová astronomie
 - proces redukce dat a spektrální analýza
 - astrofyzikální modely pro rentgenová spektra
- Otevřené problémy současné astrofyziky akrečních disků okolo černých děr
- Závěr, diskuze, sepisování návrhu na pozorování,...

Co si pamatujeme z minulé přednášky?

- teplota akrečního disku $T(r) \sim r^{-3/4}$ (Shakura-Sunyaev)
 - termální spektrum je složeno z mnoha jednotlivých příspěvků z různých poloměrů
 - nejvyšší teplota je poblíž vnitřního okraje disku
 - teplota na $r = r_{\text{in}} = 1 - 6 r_g$ (pro spin $a = 1 - 0$) závisí na skutečné vzdálenosti od centra a tedy na hmotnosti černé díry ($R \sim M$): $T \sim M^{-1/4}$
- termální spektrum se rozptyluje v horké koróně
 - inverzním Comptonovým rozptylem se původně ultrafialové (aktivní galaxie) nebo měkké rtg záření (rentgenové dvojhvězdy) posouvá do tvrdého rentgenu
 - výsledkem je netermální **mocinné spektrum** (power law)
- odražené záření – vzniká interakcí rtg záření s okolní hmotou

Co si pamatujeme z minulé přednášky?

- měření spinu černé díry z rentgenových spekter
 - termální záření
 - spin se měří z vysoko-energetického konce termálního spektra (nejvyšší efektivní teplota)
 - odražené záření (fluorescenční čára železa)
 - spin se měří z maximálního gravitačního rudého posuvu
- základní idea obou metod je určení polohy poslední stabilní dráhy



Program dnešní přednášky

- současné otevřené problémy týkající se akreujících černých děr
 - vznik a udržení relativistických výtrysků hmoty (jetů)
 - souvislost se spinem černé díry?
 - Blandford-Znajekův efekt
 - dichotomie rádiově silných a slabých galaxií
 - souvislost se spektrálním stavem akreujícího objektu
 - spojitosti a odlišnosti aktivních galaxií a rentgenových dvojhvězd
 - fundamentální schéma
 - vztah rádiové a rentgenové luminosity a hmotnosti
 - evoluční diagramy spektrálních stavů
- závěr, shrnutí přednáškového cyklu

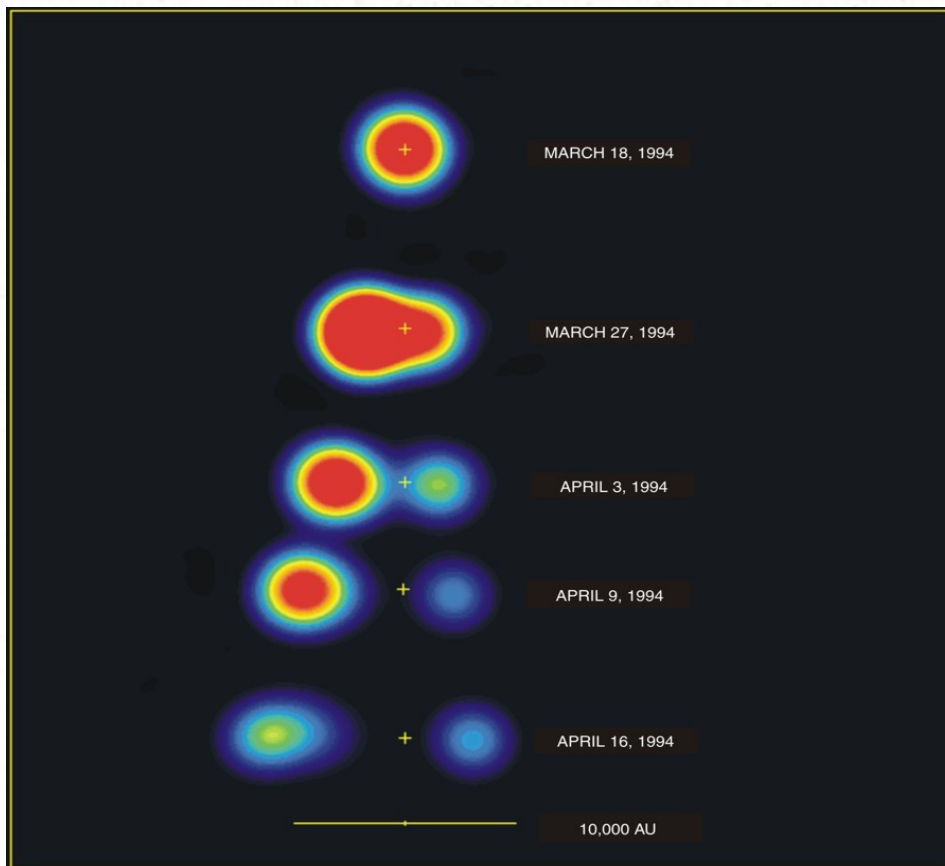
1.téma – jety

- jety jsou kolimované polární výtrysky hmoty, které se pozorují u celé řady astronomických objektů
 - vznikající hvězdy (akrece protoplanetárního disku)
 - kataklyzmické proměnné hvězdy (bílý trpaslík)
 - planetární mlhoviny
 - neutronové hvězdy
 - černé díry ve dvojhvězdách i v galaxiích
 - záblesky gamma
- společné prvky objektů s jety
 - disková akrece
 - přítomnost magnetického pole

Relativistické výtrysky hmoty (jety)

- jety z černých děr dosahují relativistických rychlostí

jet v GRS 1915+105 (rentgenová dvojhv.)



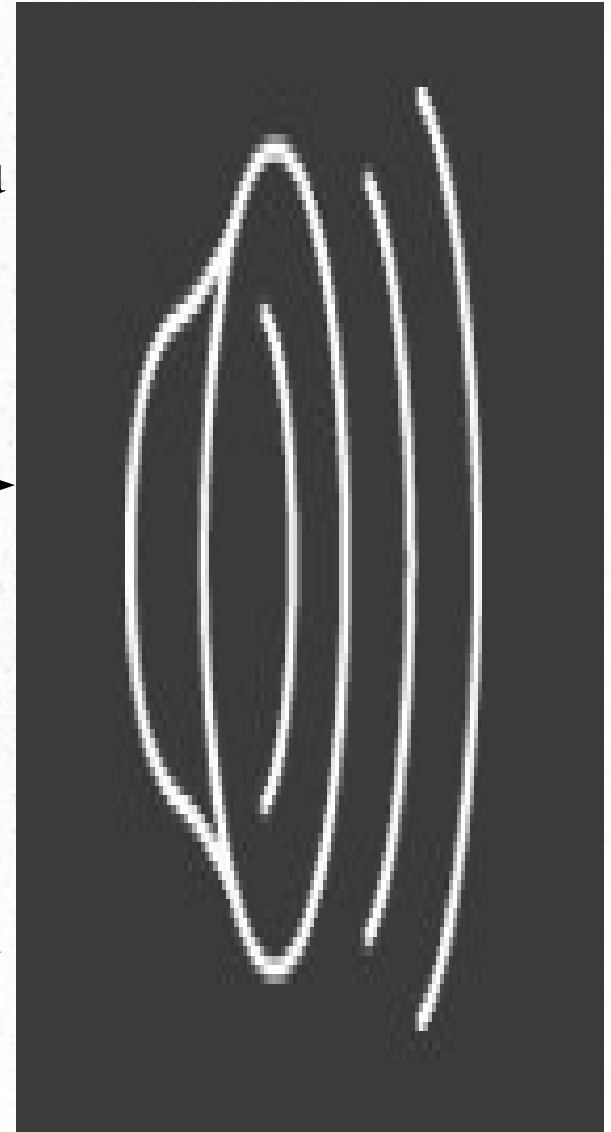
jet v M87 (blízká aktivní galaxie)



Dopplerův beaming způsobuje, že je výtrysk mířící k pozorovateli jasnější

Vznik a udržení jetu

- roli hraje magnetické pole
 - fokusace a urychlení částic v jetu
- magnetohydrodynamické simulace
 - relativistické 3D simulace
 - např. McKinney, 06 →
 - jety vytvářejí pouze tlusté disky
 - $L \geq L_{\text{Edd}}$
 - $L < \text{několik procent } L_{\text{Edd}}$
 - v horizontální oblasti turbulentní, ve vertikální organizované prostředí
 - zářivý výkon jetu silně závisí na intenzitě magnetického pole a spinu černé díry

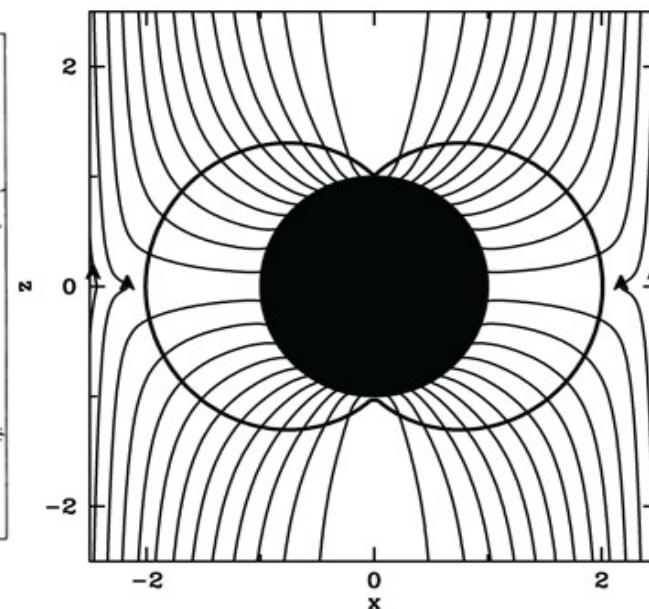
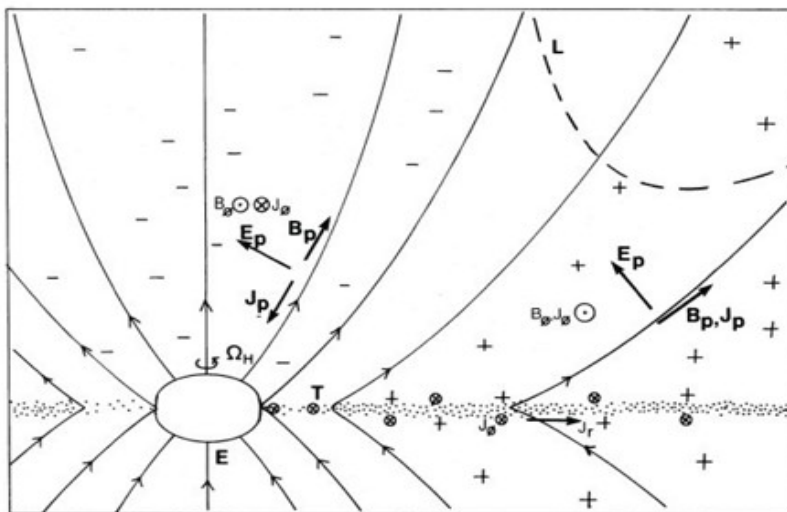


Efekt spinu černé díry

- Blandford-Znajekův mechanismus
 - energie se do jetu dostává na úkor rotační energie černé díry (jet se utváří v oblasti ergosféry)
 - síla jetu: $P_{jet} \approx \Phi_{mag}^2 \Omega_H^2 / c$

úhlová rotační rychlost horizontu černé díry

Blandford-Znajek, 1977

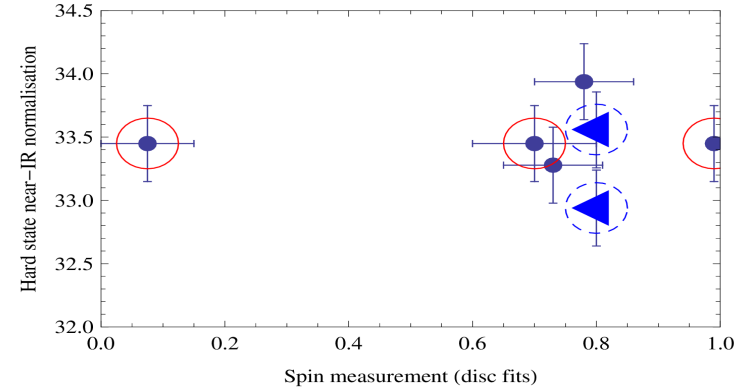
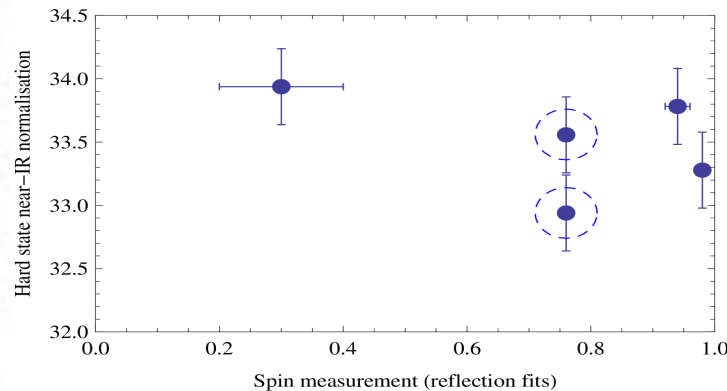
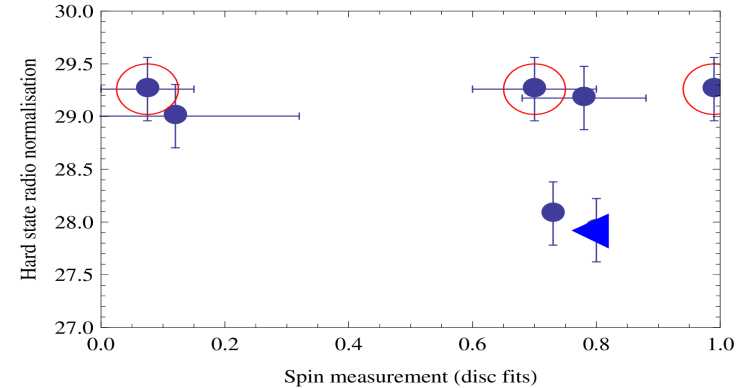
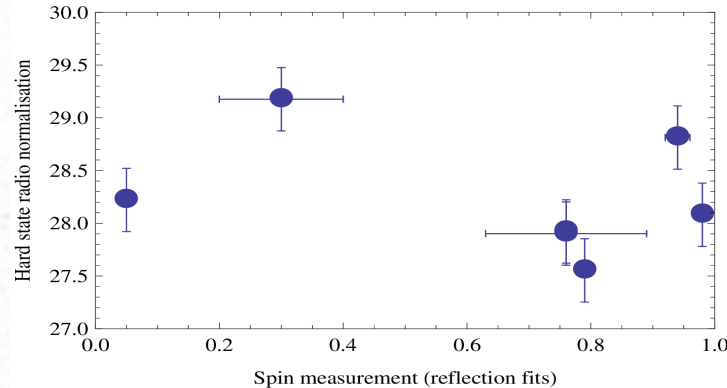


Komissarov-McKinney, numerical sim., 2007

Pozorování – rentgenové dvojhvězdy

- není zcela jasný vztah mezi zářivým výkonem jetu a spinem černé díry

odhadovaný zářivý výkon jetu

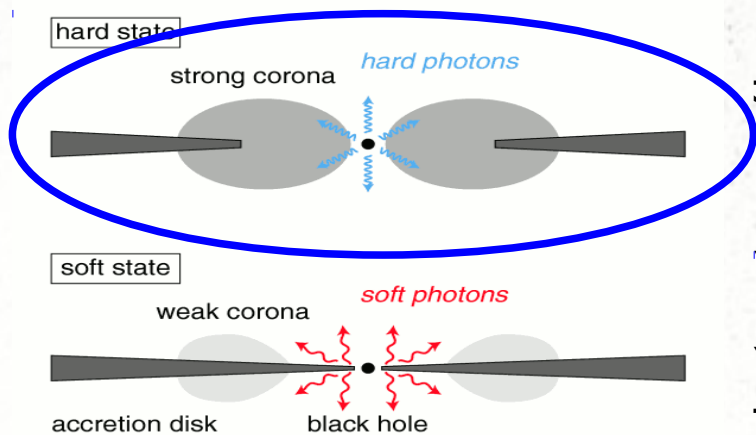


spin černé díry

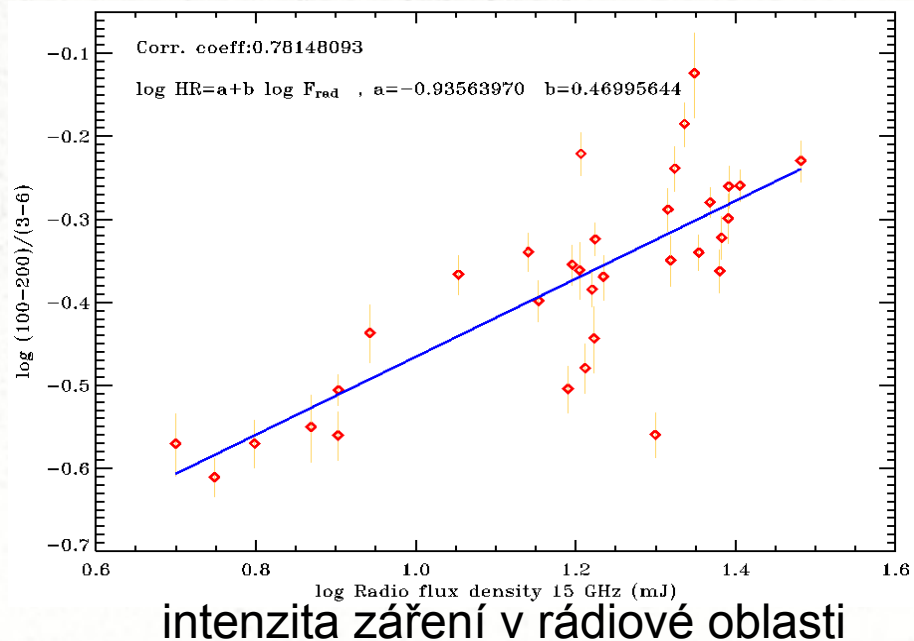
Fender+, 2010

Výskyt jetu v závislosti na spektrálním stavu

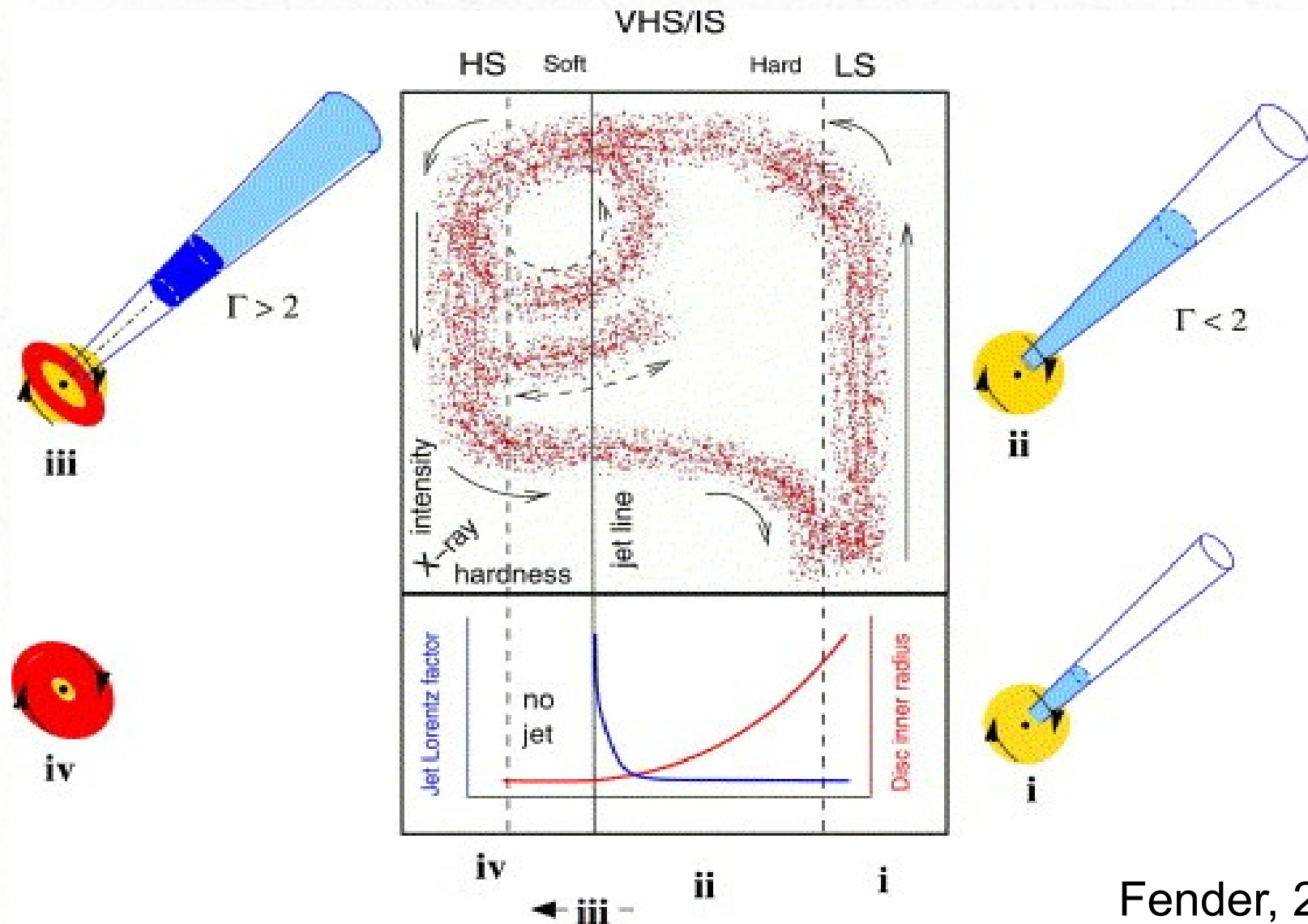
- jety se pozorují téměř výhradně v rentgenově tvrdých stavech
 - velmi malé nebo žádné záření z akrečního disku
 - rentgenové záření je tvrdé (nízký index mocninného záření)



tvrdost rentgenového záření

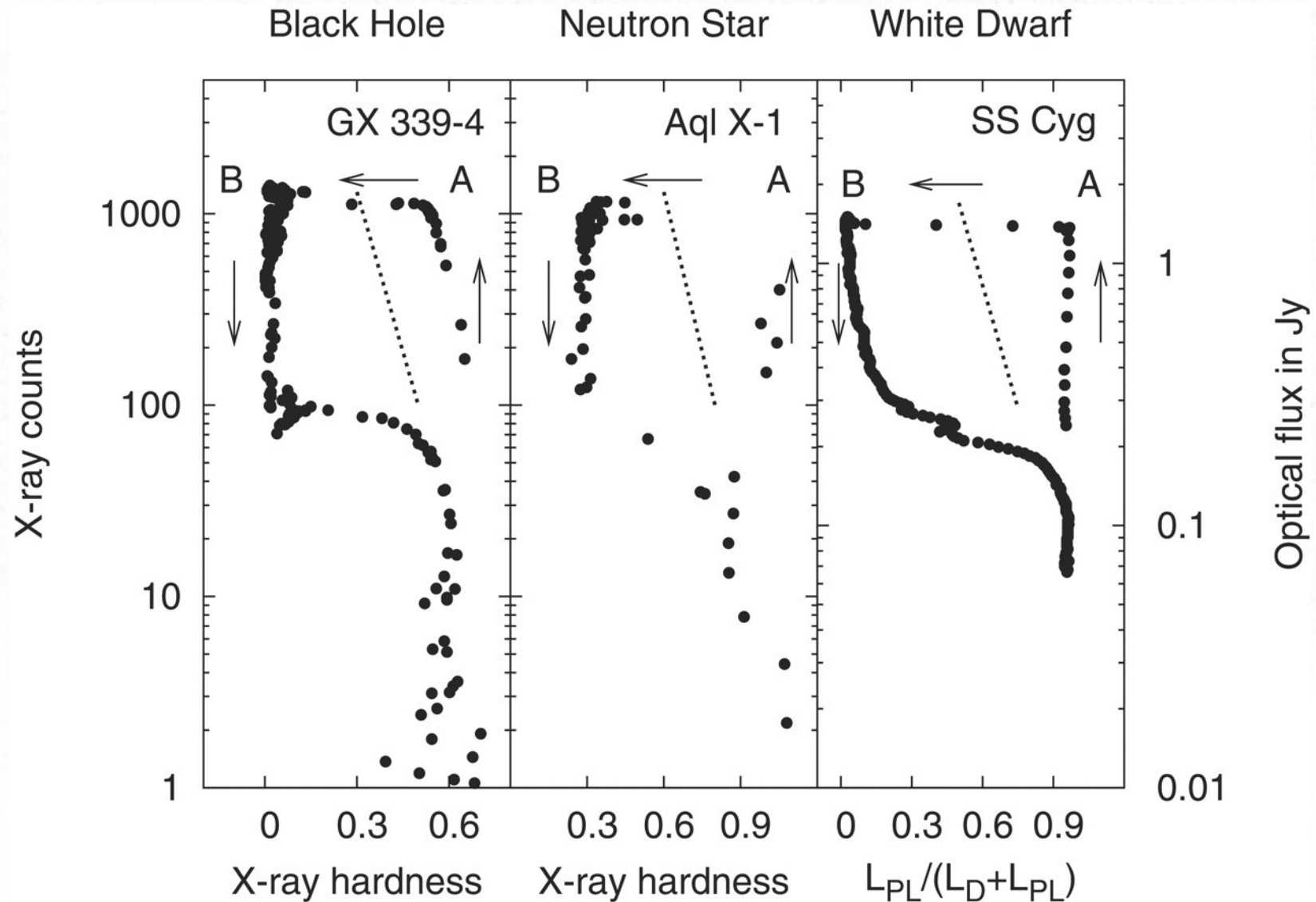


Evoluční diagram



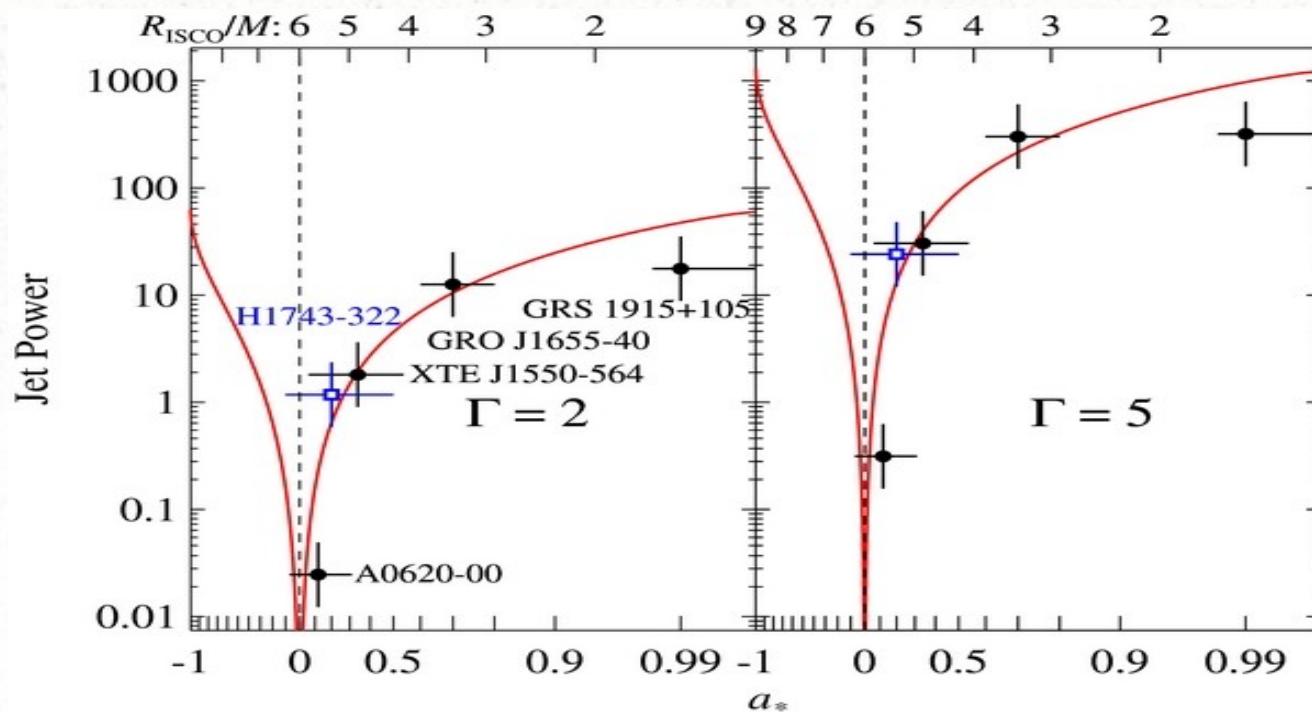
Fender, 2004

Evoluční diagram nejen pro černé díry



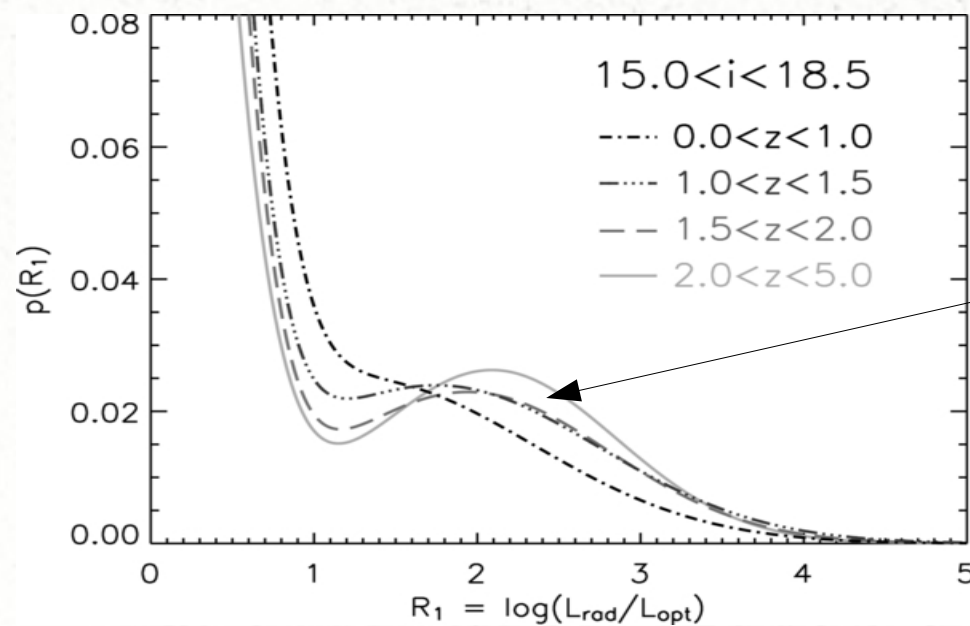
Pozorování – rentgenové dvojhvězdy

- není zcela jasný vztah mezi zářivým výkonem jetu a spinem černé díry
- korelace v případě balistického jetu (Narayan+ 2012, Steiner+ 2013)



Pozorování – aktivní galaxie

- dichotomie rádiově silných a slabých galaxií
 - asi 10% galaxií jsou silné rádiové zdroje
 - jedna z prvních objevených zvláštností aktivních galaxií (quasar = quasi-stellar radio source)

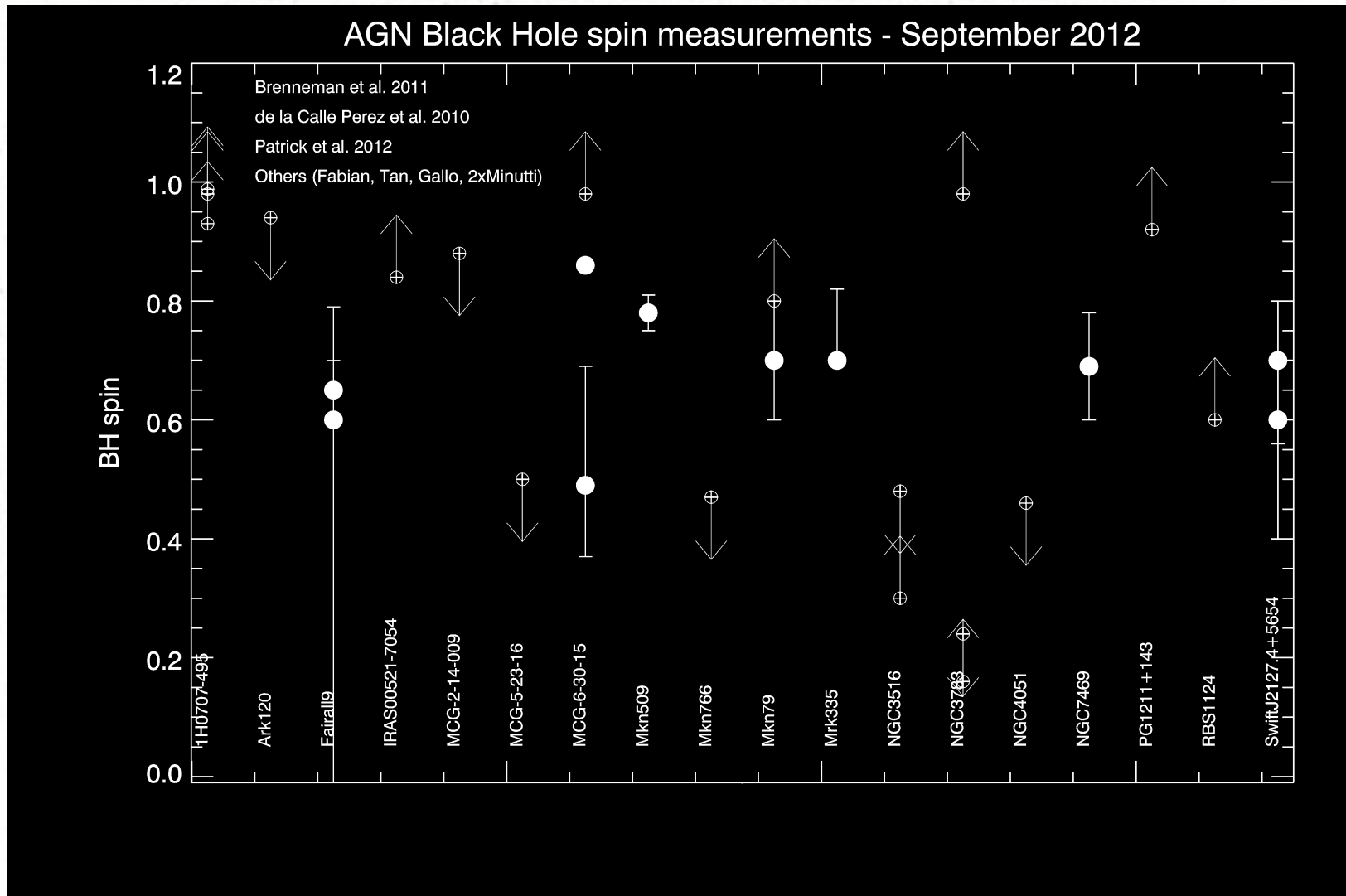


rádiově silné galaxie

Balokovic+, 2012, z dat SDSS
(Sloan Digital Sky Survey)

- současná měření spinu však jen výhradně u rádiově slabých zdrojů

Měření spinu v AGN



Otevřené otázky okolo jetů

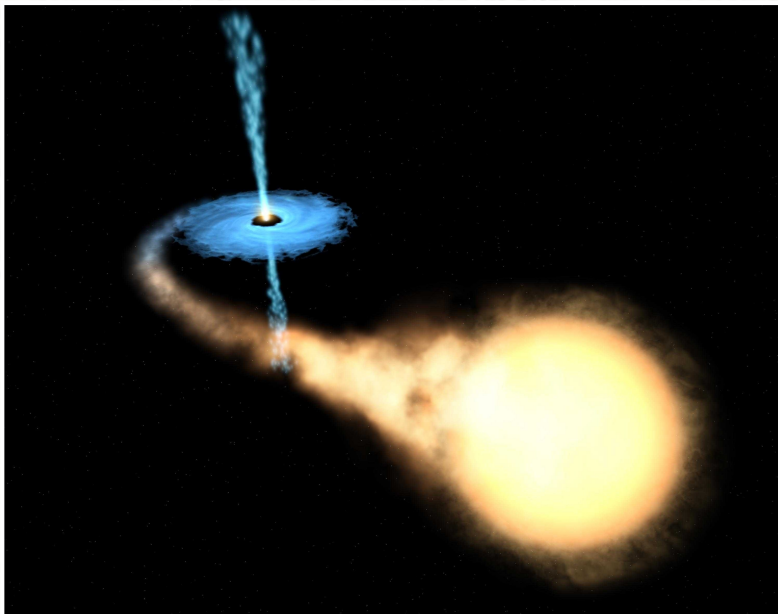
- jak jety vznikají?
 - jaký je jejich vzájemný vztah s akrečním diskem?
 - jaké jsou podmínky pro magnetické pole, akreční tok,...
- kde jety vznikají?
- jakým procesem je plazma v jetu urychlováno?
- závisí zářivý výkon jetu na rotaci černé díry?
 - funguje Blandford-Znajekův mechanismus?
- souvisí dichotomie rádiově silných a slabých galaxií s velikostí spinu centrální černé díry?
- jak ustálený/variabilní je vtok hmoty do jetu?

2. Spojitosti a odlišnosti rentgenových dvojhvězd a aktivních galaktických jader

rentgenové dvojhvězdy

(stelární černé díry)

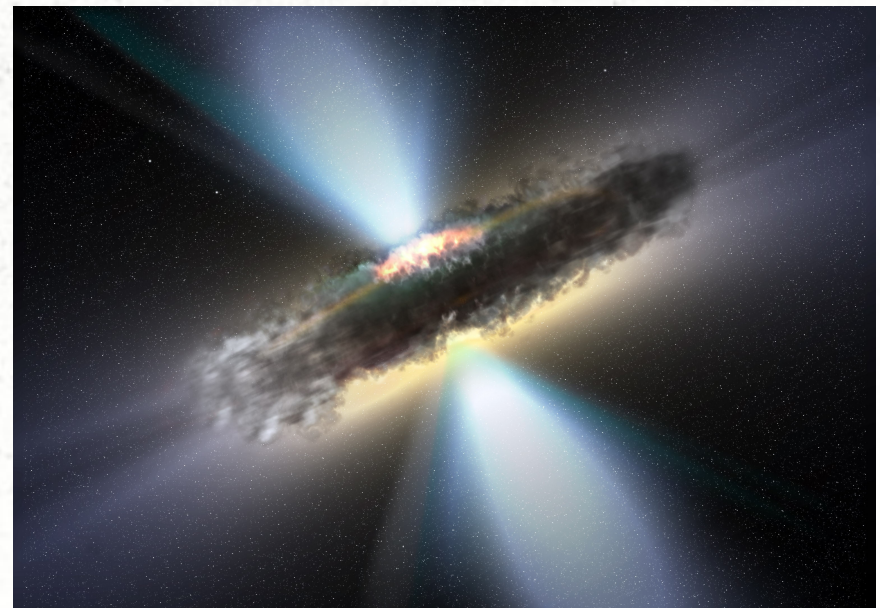
$$M \sim 10 M_{\text{Slunce}}$$



aktivní galaktická jádra

(super-hmotné černé díry)

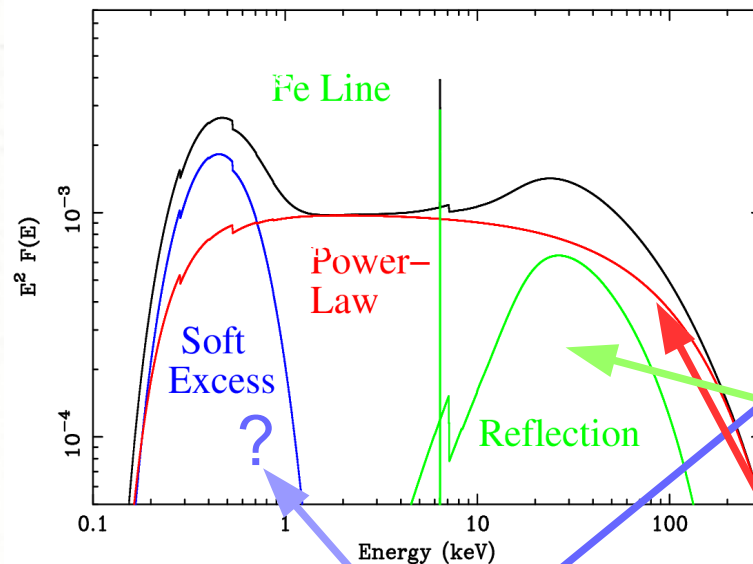
$$M \sim 10^6 - 10^{10} M_{\text{Slunce}}$$



Rentgenová spektra

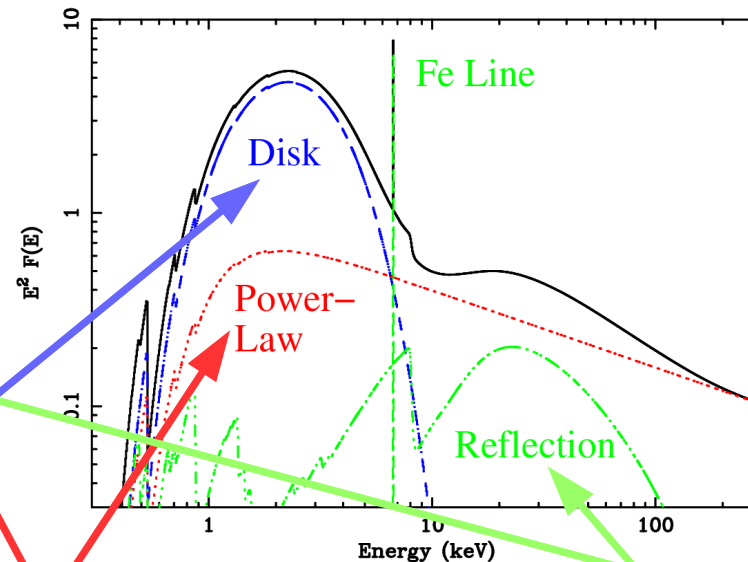
- existuje nápadná podobnost
- hlavní rozdíl je v teplotě akrečního disku

aktivní galaxie



tepelné záření disku

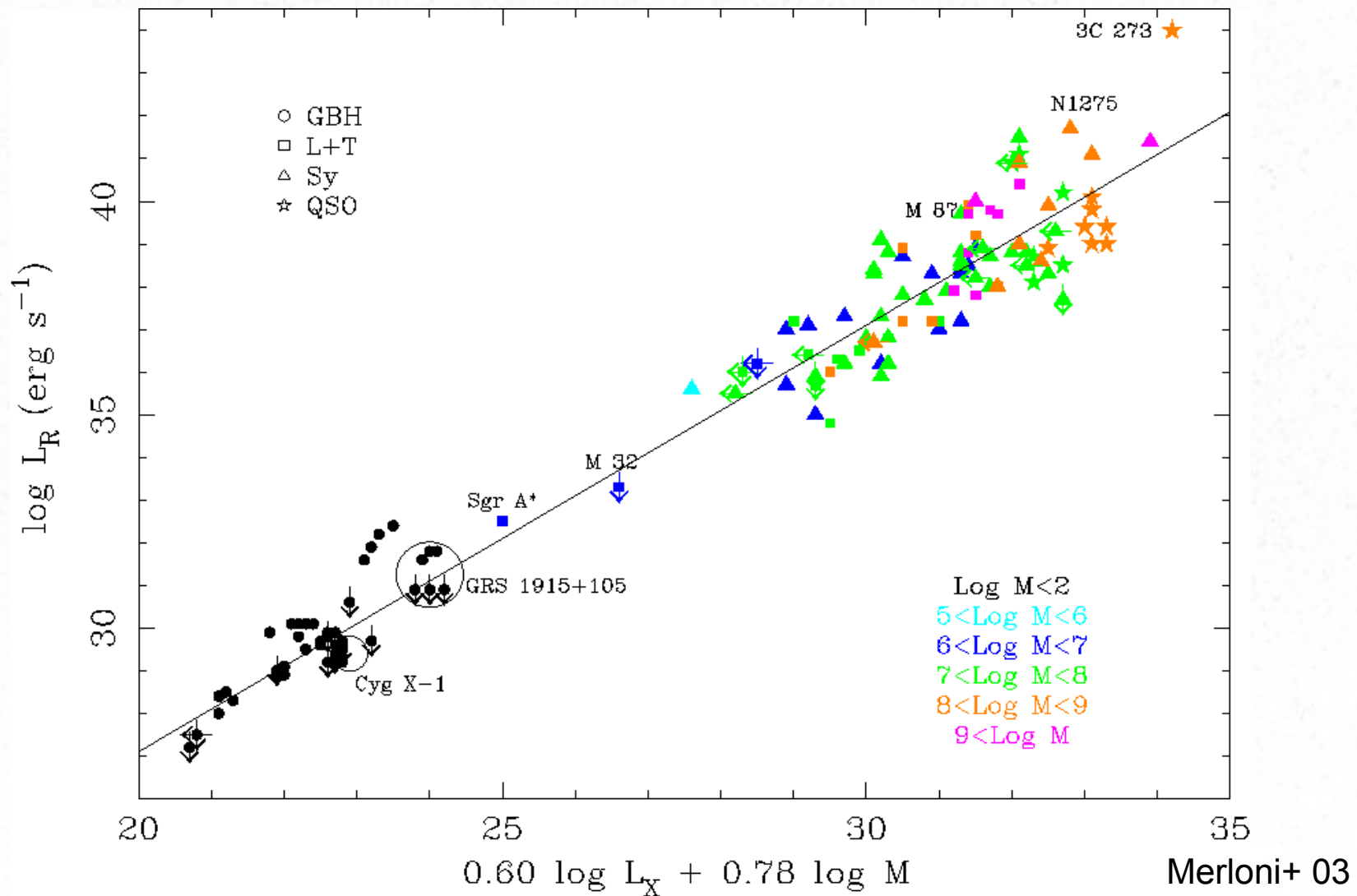
rentgenová dvojhvězda



záření rozptýlené na
horkých elektronech
v atmosféře disku

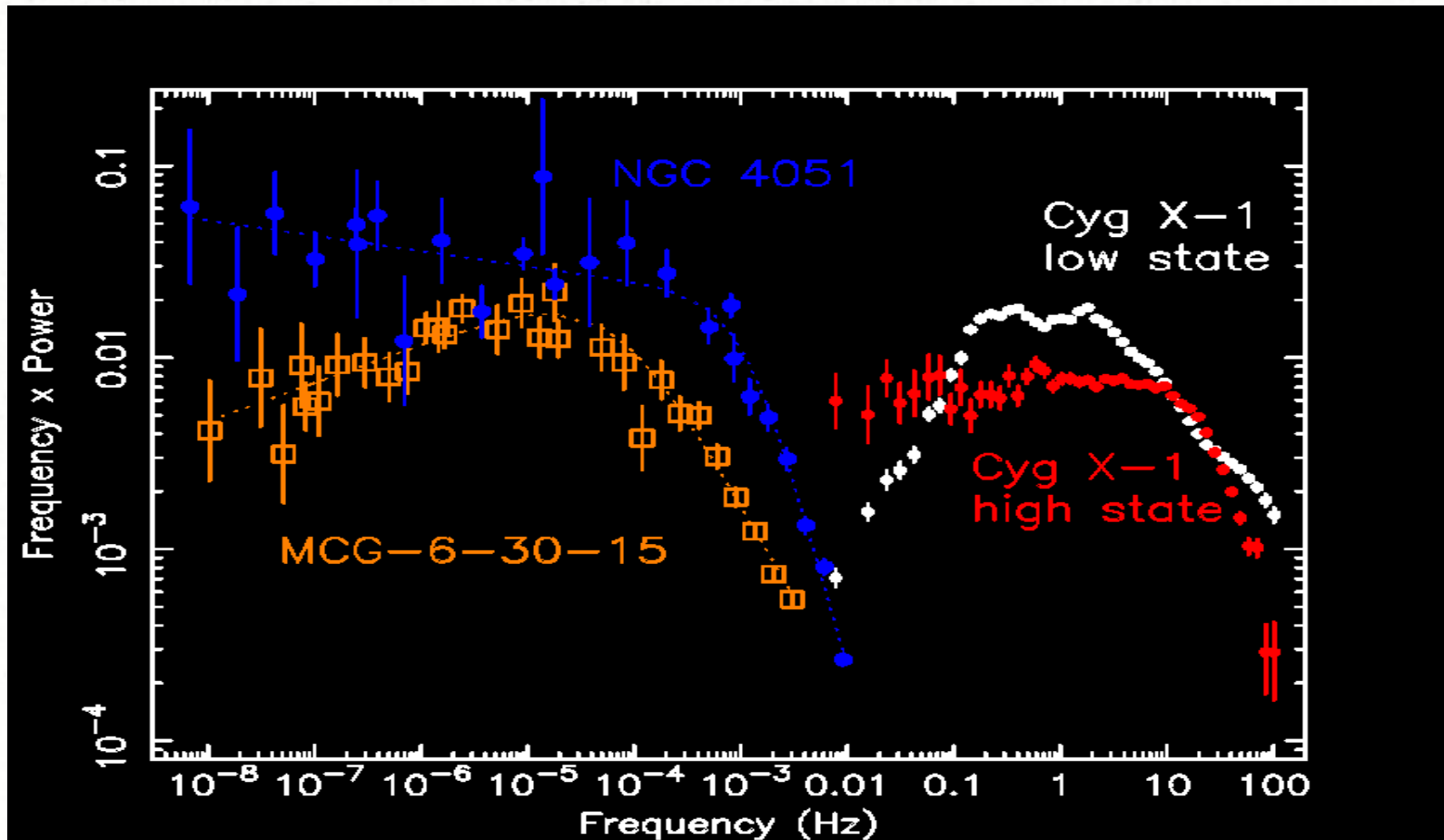
odraz rozptýleného
záření na povrchu
akrečního disku

Fundamentální vztah rádiové a rentgenové luminosity a hmotnosti



Časová proměnnost

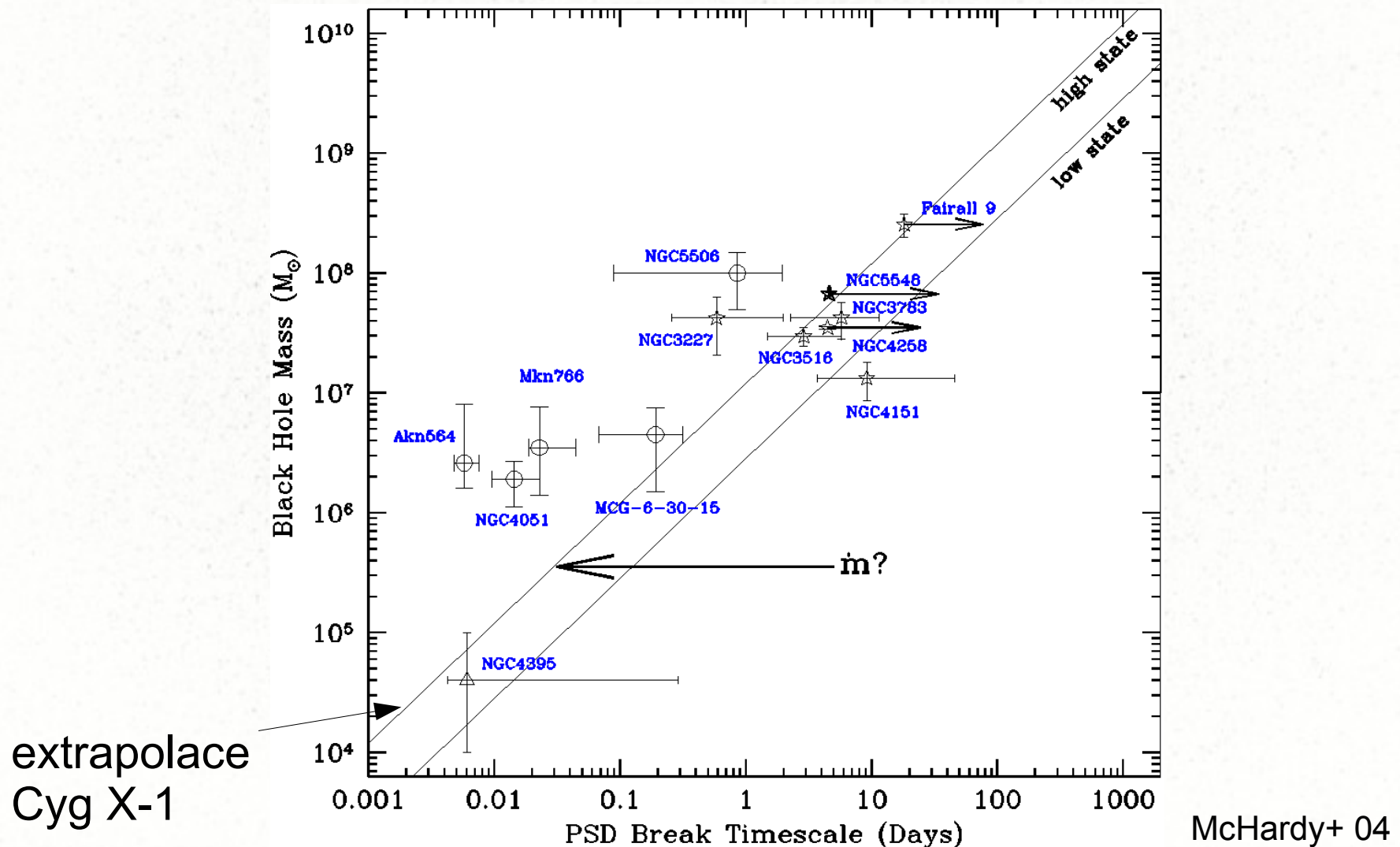
- variabilita se popisuje pomocí tzv. PSD (power spectral density) diagramů



Porovnání AGN a XRB

- power spektra AGN jsou podobná rentgenovým dvojhvězdám v termálním stavu
 - na nízkých frekvencích "bílý šum", který se zlomí na specifické frekvenci, od které power spektrum klesá jako $1/f^2$
 - zlom je u AGN posunutý k nižším frekvencím v důsledku delší časové škály okolo hmotnější černé díry ($R \approx M$)
- frekvence zlomu závisí nejen na hmotnosti ale také na akrečním toku (na hmotnosti však výrazněji)

Diagram hmotnosti a časové škály zlomu ve výkonových spektrech AGN



Otevřené otázky týkající se analogie stelárních a supermasivních ČD

- probíhá akrece na černé díry různých hmotností stejným způsobem?
 - rentgenová spektra
 - podobné komponenty spektra; odlišnost spočívá zejména v různé teplotě a hustotě akrečního disku – důvod pro výskyt tzv. "soft excessu" u aktivních galaxií?
 - časová proměnnost
 - podobná výkonová spektra, ale proč se nepozorují u AGN kvazi-periodické oscilace? (jediná výjimka RE J1034+396)
 - jety
 - jsou rádiově silné galaxie analogií tvrdých spektrálních stavů rentgenových dvojhvězd?
- probíhá vývoj AGN podobně jako u rentgenových dvojhvězd?

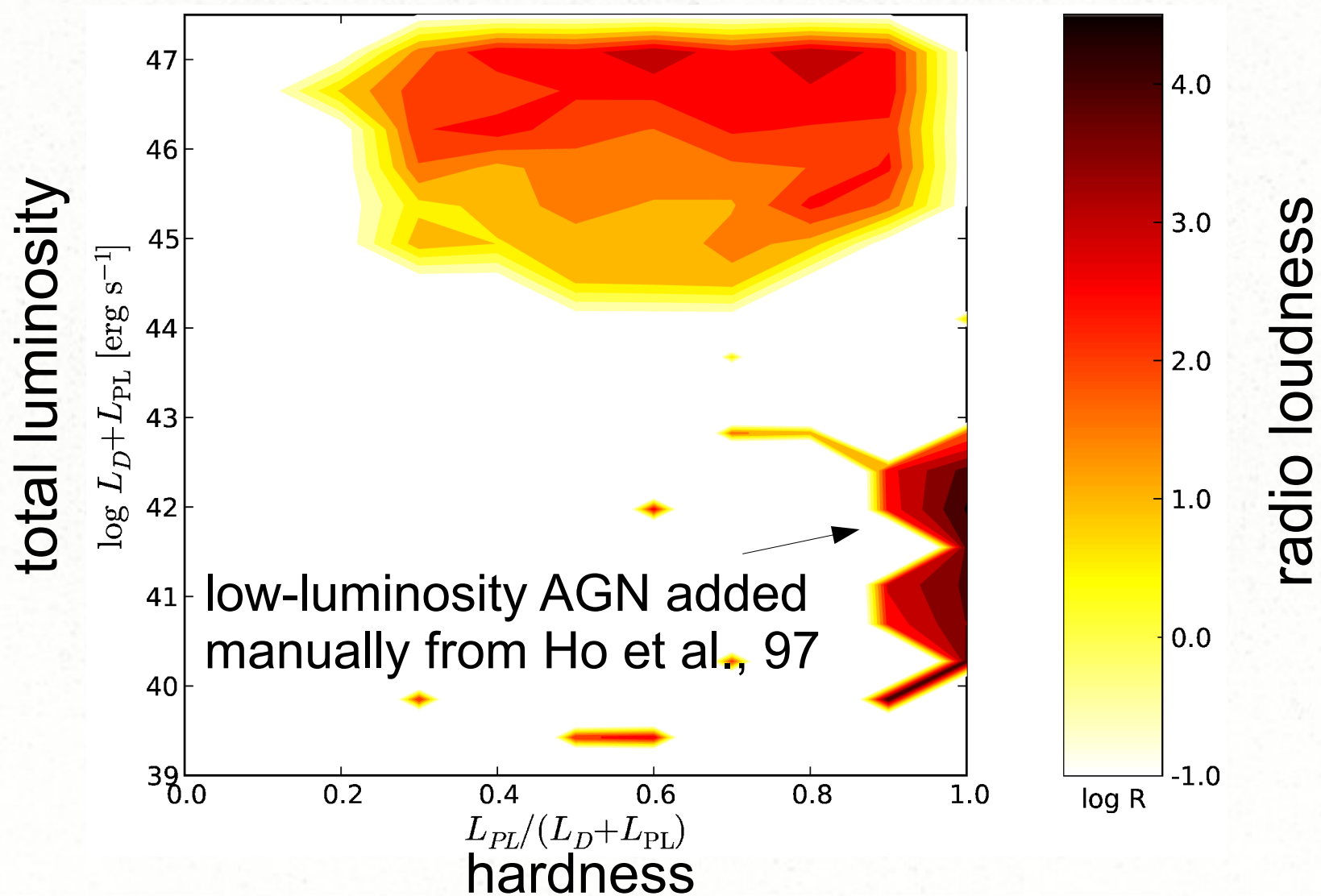
Spektrální stavy aktivních galaxií

- časová škála spektrálních změn rentgenových dvojhvězd je v řádech měsíců až roků
 - u aktivních galaxií by to bylo miliony až miliardy let
 - řešením je studium velkého souboru různých galaxií
- pro zařazení do spektrálního stavu je třeba znát poměr termálního záření k netermální složce
 - u rentgenových dvojhvězd je vše v rentgenovém oboru
 - u aktivních galaxií je v rentgenovém oboru pouze netermální část (s výjimkou málo hmotných ČD $\leq 10^6 M$)
 - tepelné záření akrečního disku je v ultrafialovém oboru
 - v něm září i okolní hvězdy galaxie & absorpce mezihvězdnou látkou

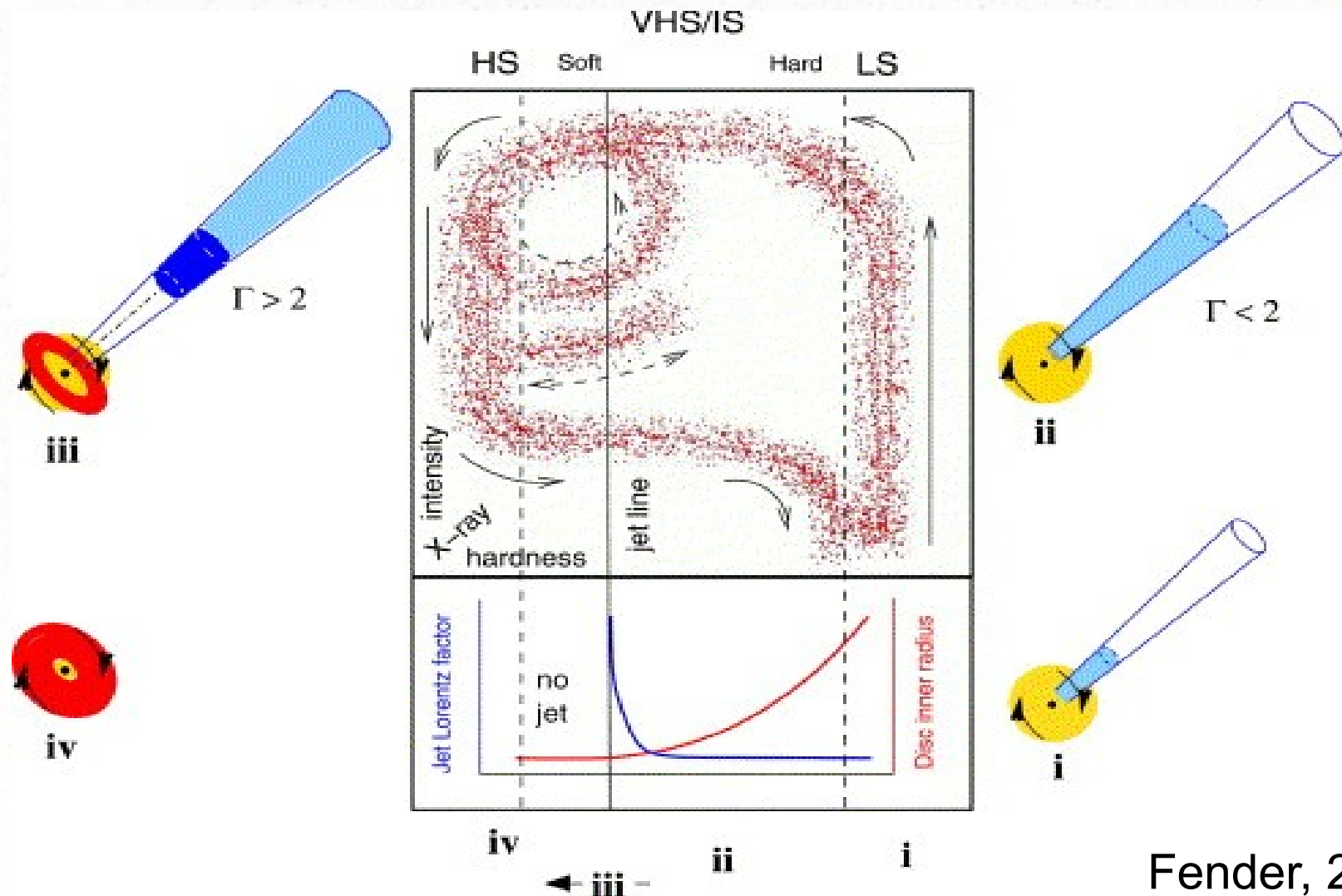
AGN analogy to XRB states

- disc-fraction luminosity diagrams (Körding+ 2006)
 - diagrams of $\log (L_D + L_{PL})$ vs. $L_{PL} / (L_D + L_{PL})$ where:
 - disc luminosity: $\log L_D = -0.4 M_B + 35.9$
(empirical relation by Falcke+ 1995)
 - power-law luminosity: $L_{PL} = 3 L_{0.5-10\text{keV}}(\text{extrapolated})$
 - based on SDSS (optical), ROSAT (X-ray) and FIRST (radio) surveys
- simulating AGN states by mass up-scaling the GRO J1655-40 cycle (Sobolewska+ 2011)

E. Körding's diagram



Hardness-Intensity diagram for stellar-mass black hole binaries



Fender, 2004

Projekt s využitím XMM

- using simultaneous XMM-Newton UV (Optical Monitor) and X-ray (EPIC) measurements
 - only **strictly simultaneous** UV and X-ray data
 - => eliminate effect of the (X-ray) variability
 - directly measured **2-10 keV** X-ray flux instead of an extrapolated flux from 0.1-2.4 keV (by ROSAT)
 - => eliminate influence of the X-ray absorber
 - **UV** flux instead of the optical magnitude to constrain the accretion-disc **thermal emission**

Instruments onboard XMM-Newton

- three European Photon Imaging Cameras (EPIC – PN, MOS1, MOS2) operating in 0.2-12 keV
 - large collecting area (4300 cm²)
- two reflection grating spectrometers (RGS) sensitive below 2 keV
 - useful for high resolution X-ray spectroscopy
- 30cm Ritchey-Chretien optical/UV telescope
 - 3 ultraviolet filters
 - 3 optical filters (U, B, V)

3XMM catalogue

- contains 7427 observations made between 2000 (Feb 3) and 2012 (Dec 8)
- more than half million of X-ray detections (with the total band 0.2-12 keV likelihood values > 6)
- 372 728 unique sources
- total sky area covered: 794 deg^2
- positional accuracy is less than $3''$ (90% confidence level)

OM SUSS catalogue

- = Optical Monitor Serendipitous Ultraviolet Source Survey
- contains 2417 observations performed between 2000 (Feb 24) and 2007 (Mar 29)
- above 3/4 of million of UV detections (above 3σ signal-to-noise ratio threshold), 624 049 unique sources
- net sky area: 29-54 deg² (depending on filter)
- UV filters:
 - UVW1 @ 2910Å, $m_{ab} = 21.9$
 - UVM2 @ 2310Å, $m_{ab} = 20.9$
 - UVW2 @ 2120Å, $m_{ab} = 20.2$

UV-X simultaneous observations

- cross-correlation of 3XMM and OMSUSS with the critical radius: 3"
- simultaneosity (= the same ObsId) was required

catalogue	3XMM	OM SUSS	3XMM+OM simult.
number of entries	531 261	753 578	12 307

- cross-correlation with Véron AGN catalogue (13th Ed., Véron-Cetty & Véron, 2010, without blazars)
=> **1817 entries (dcr = 3")**

Final sample

- additional filtering:
 - remove sources with an extended UV emission
 - remove too obscured sources in X-rays ($\sim \Gamma < 1.2$)
- selecting the best observation for each source (based on the UV significance and EPIC exposure time)
- final sample consists of **~ 1000 sources**

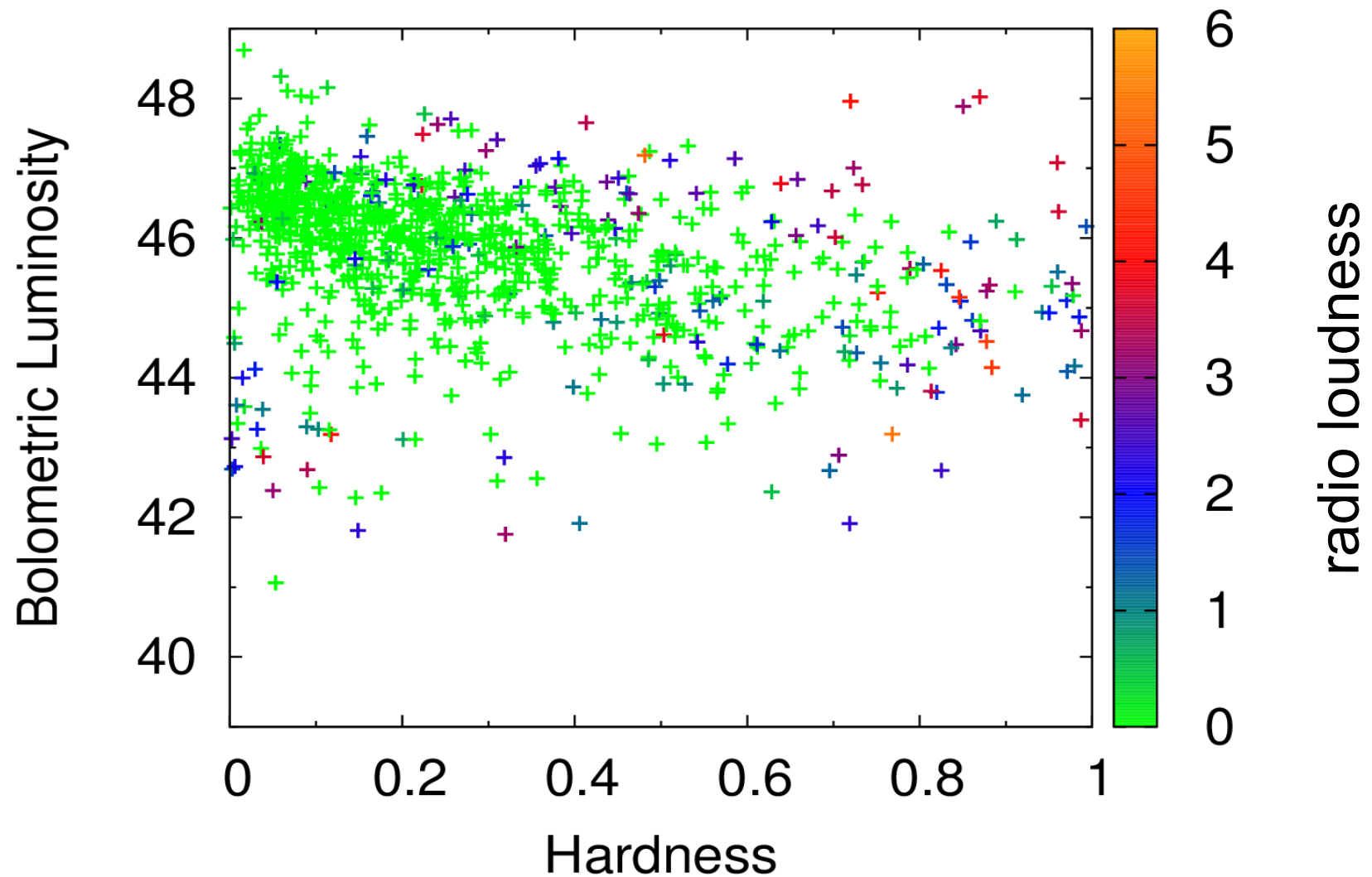
catalogue information	UV and X	UV, X and radio	UV, X, R +R slope*
number of sources	1017	219	73

* radio slope from SpecFind Catalogue (Vollmer et al., 2010)

Disc and Power-law Luminosity

- disc luminosity: $L_D = \text{factor}_{UV} \times L_{2910\text{\AA}}$
- power-law luminosity: $L_{Pow} = \text{factor}_{Pow} \times L_{2-10\text{keV}}$
- the multiplicative factors were obtained by fitting the equation: $L_{BOL} = L_D + L_{Pow}$
 - L_{BOL} is the bolometric luminosity constrained for 15 sources by Vasudevan & Fabian (2009)
=> $\text{factor}_{UV} \sim 2$, $\text{factor}_{Pow} \sim 10$
- hardness: $L_{Pow} / (L_D + L_{Pow})$; radio loudness: L_R / L_{Total}

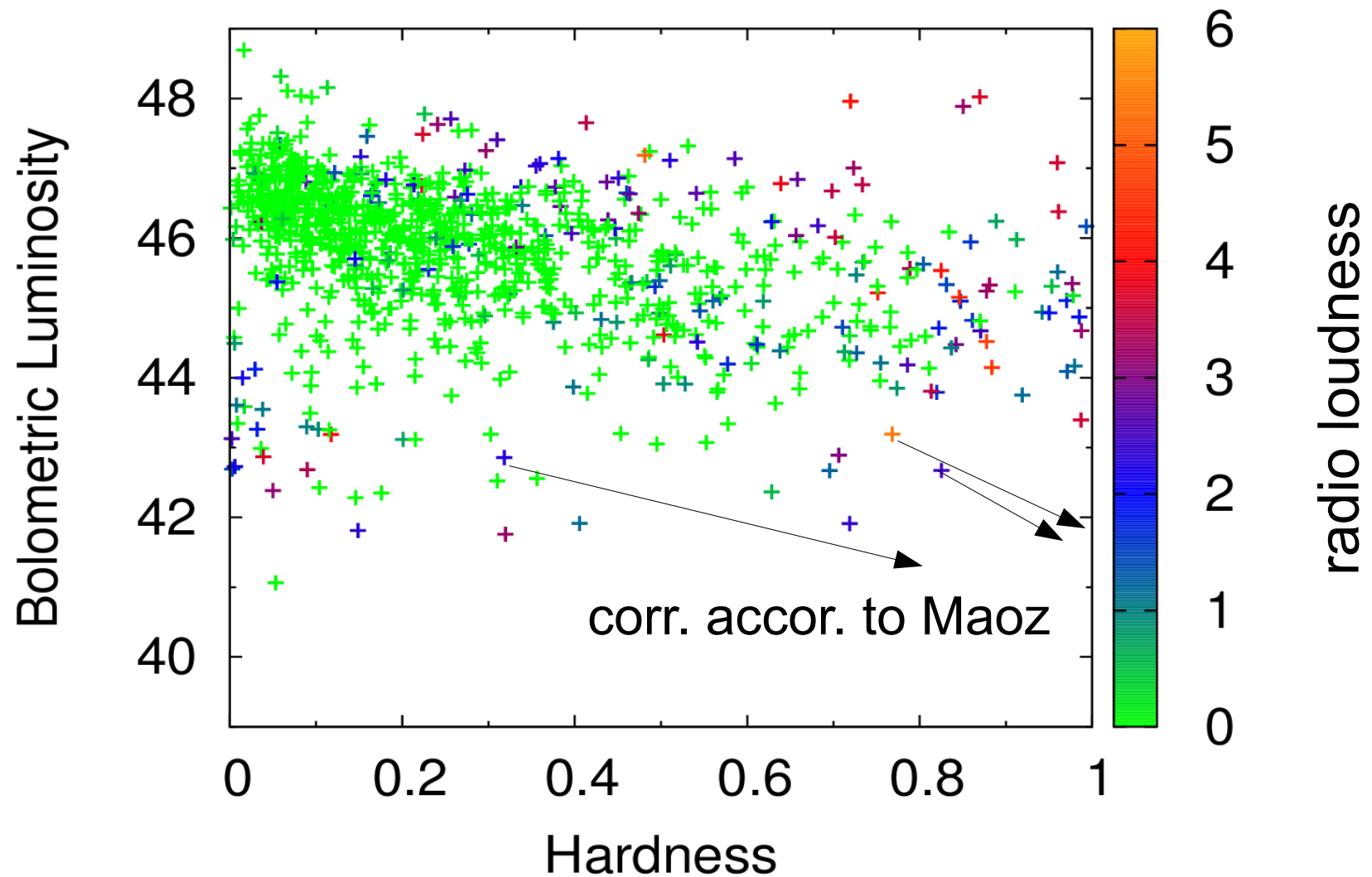
'Raw' HID diagram



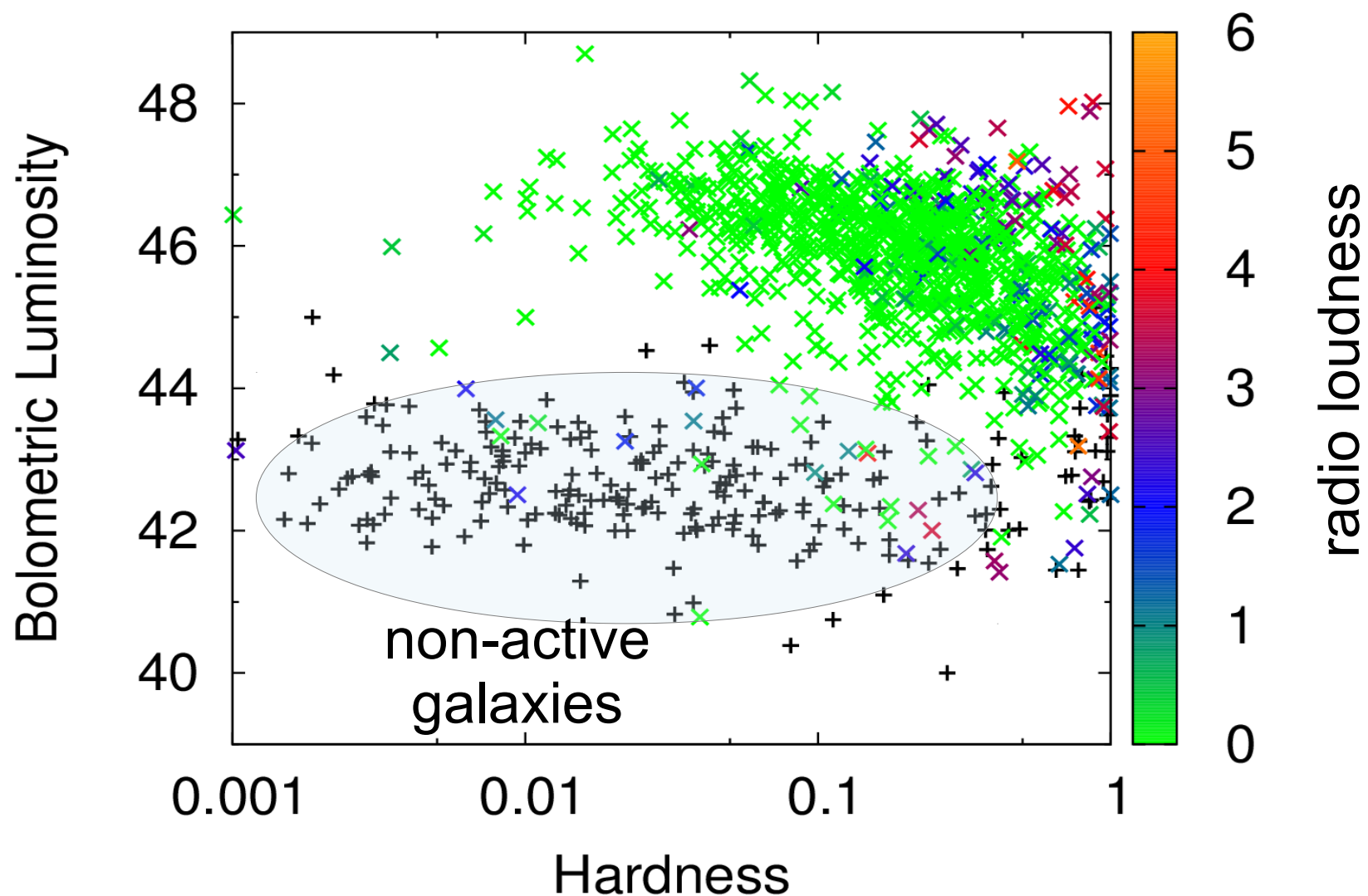
Low-Luminosity AGN

- UV flux dominated by the host galaxy
- only few sources have decomposed spectral energy distribution (Ho et al. 99, Maoz 07, Ho 08)
 - Ho: LINERs and LLAGN lack a UV bump
 - Maoz: some UV emission comes from the accretion disc → AGN luminosity at 2500 Å
 - 3 objects of the Maoz sample are present in our sample (M 87, NGC 3398, NGC 4579)

'Raw' HID diagram

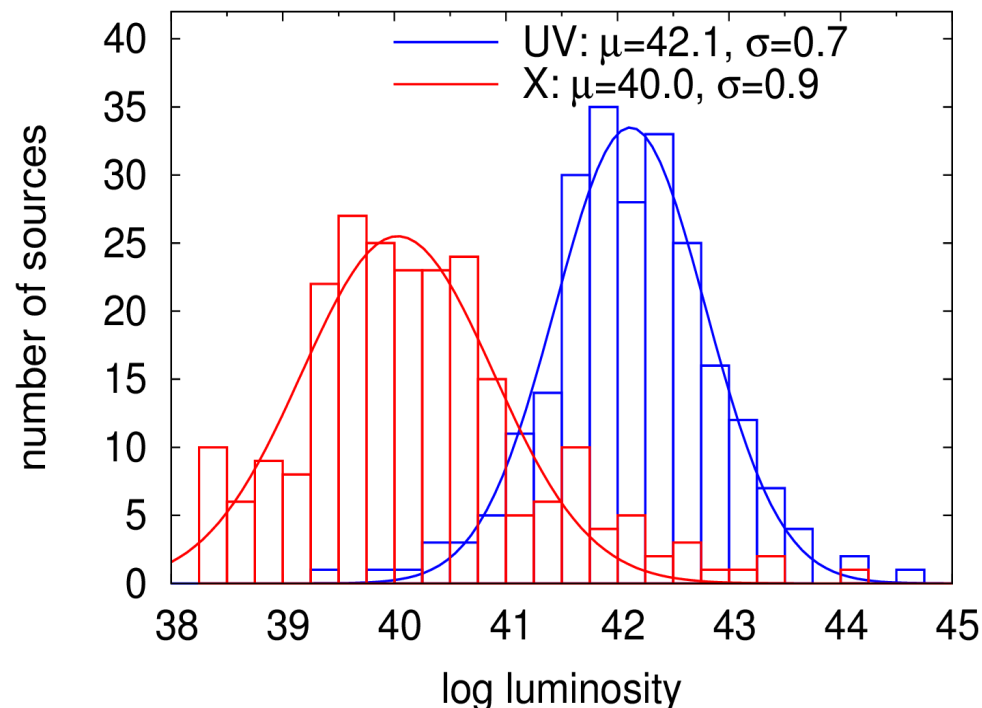


HID diagram of all galaxies



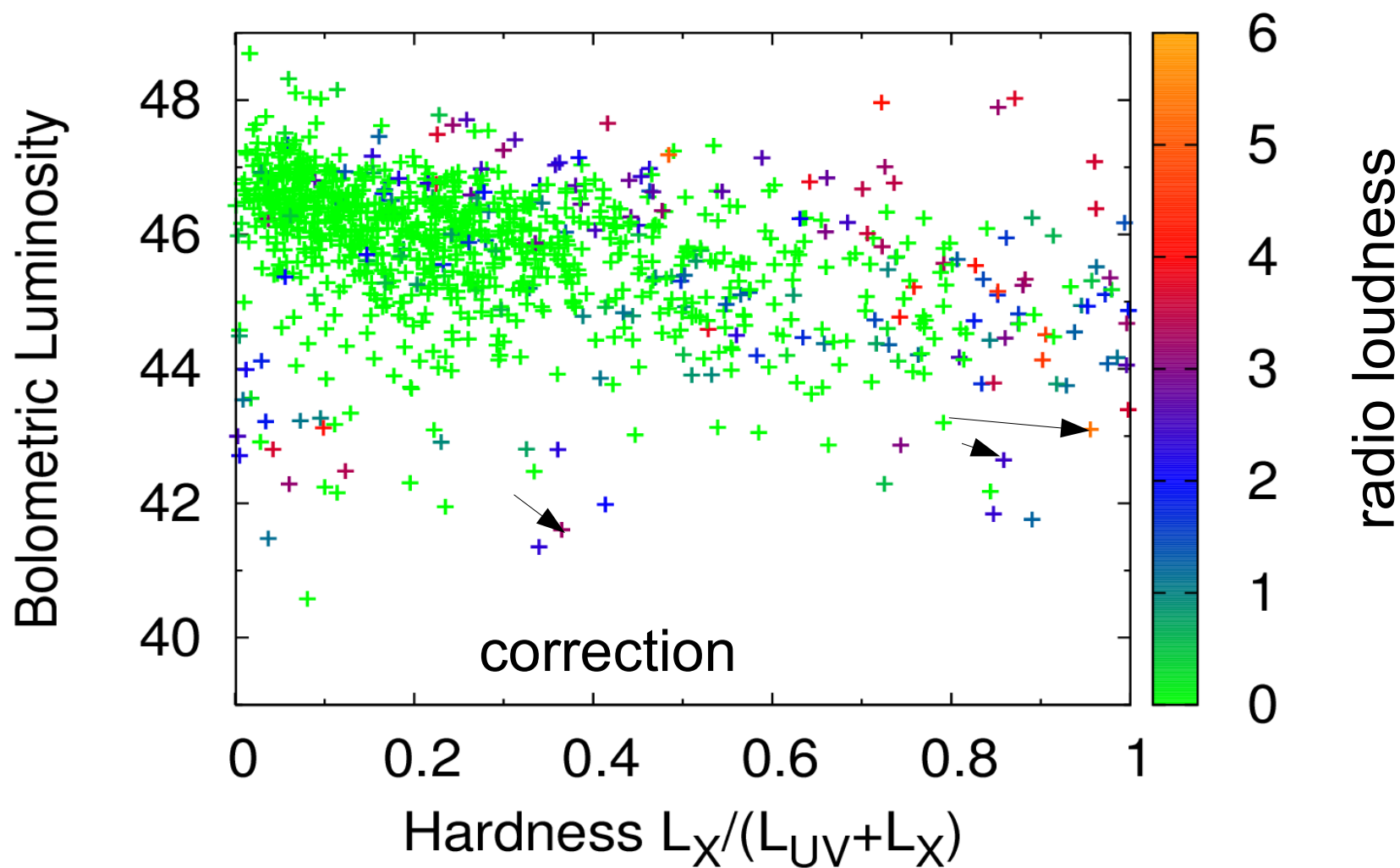
Correction for host galaxy

- optimally: using carefully extracted SEDs for low-luminosity AGN
- based on luminosities of non-active galaxies:

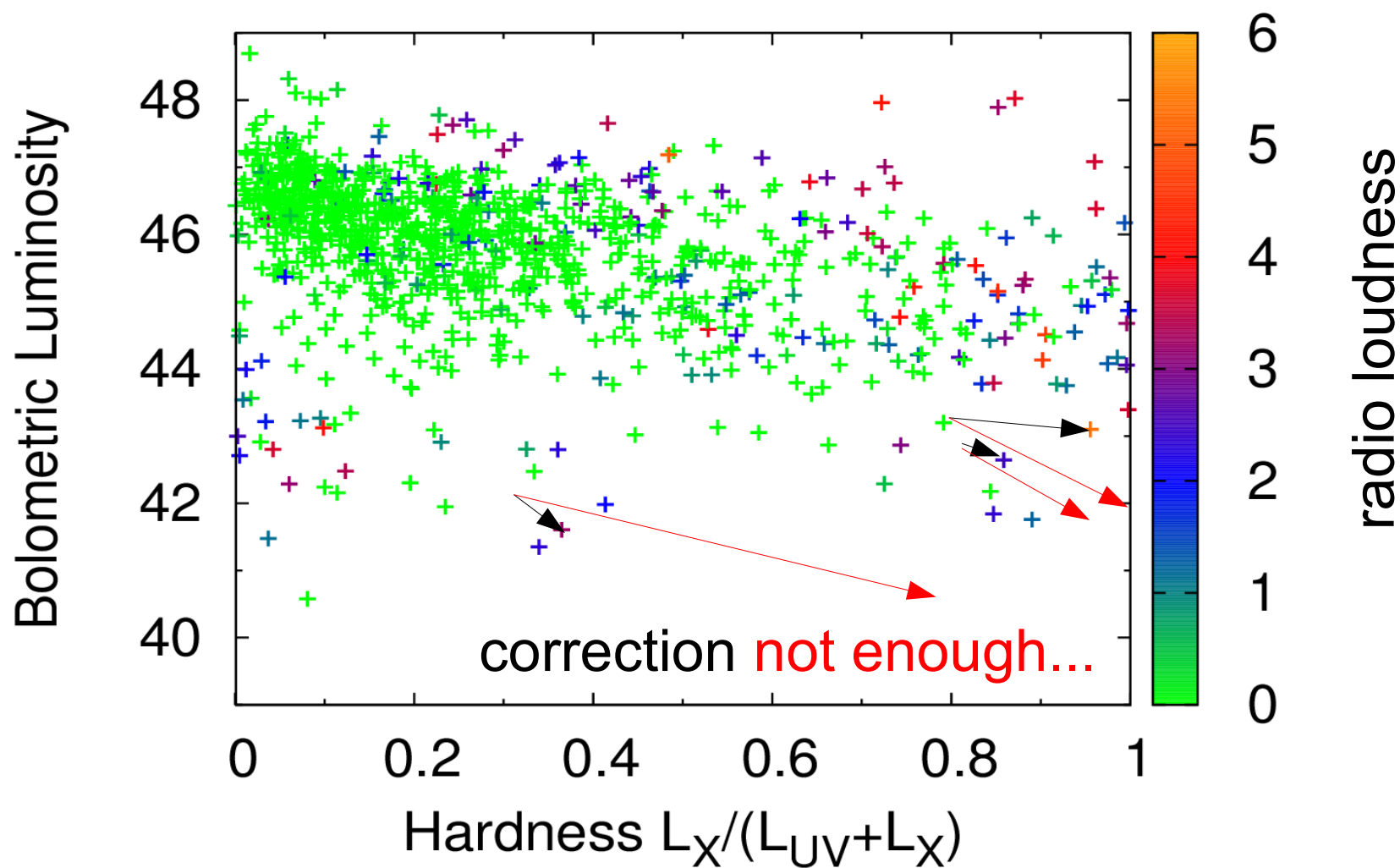


- crosscorrelate 3XMMOMC with non-active galaxies from 2MASS Redshift Survey (Huchra et al., 12) ~ 232 sources (after filtering)
- normal distributions of UV and X-ray luminosities
=> Monte-Carlo simulation of the AGN host-galaxy luminosity

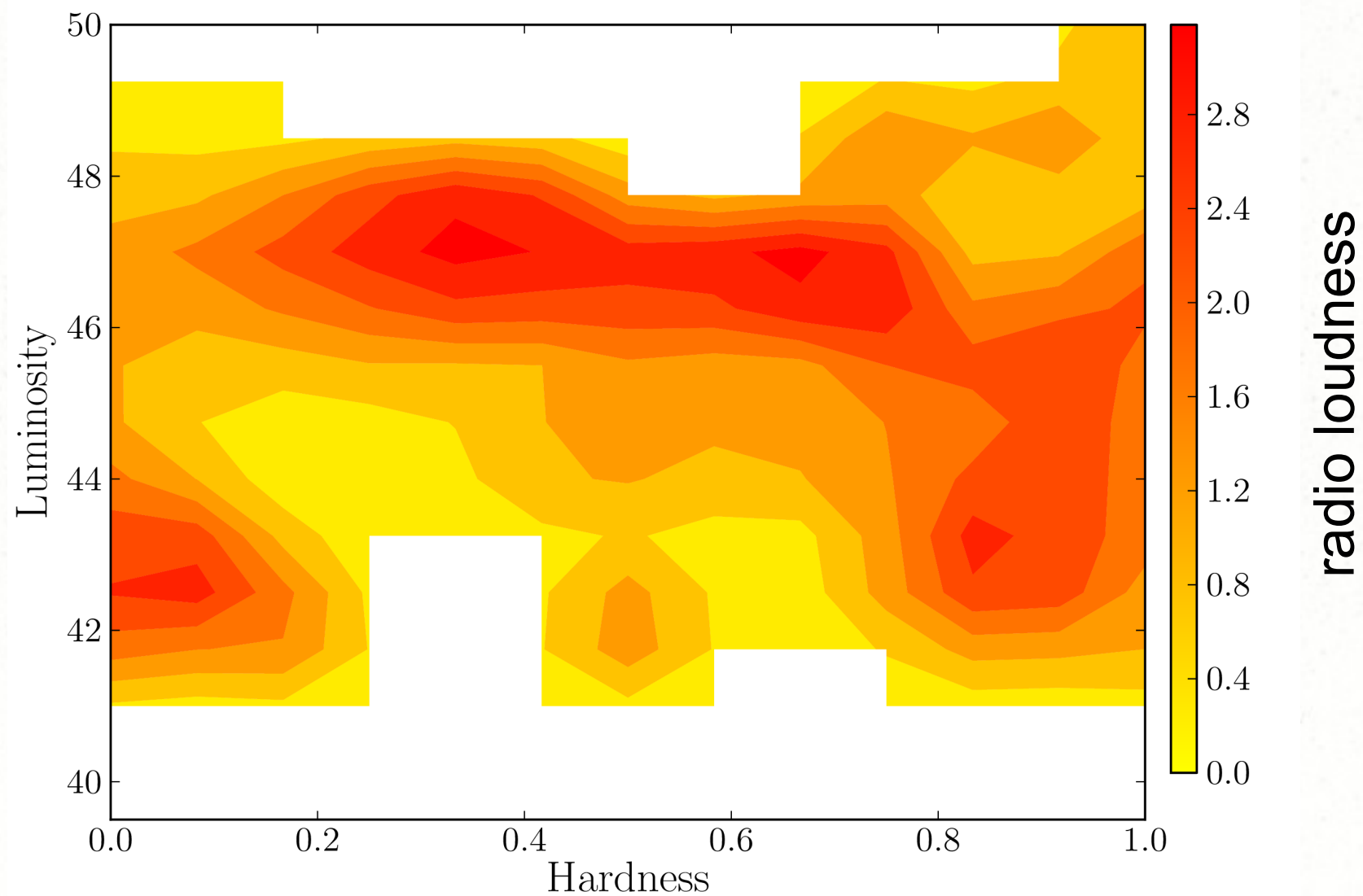
'Corrected' HID diagram



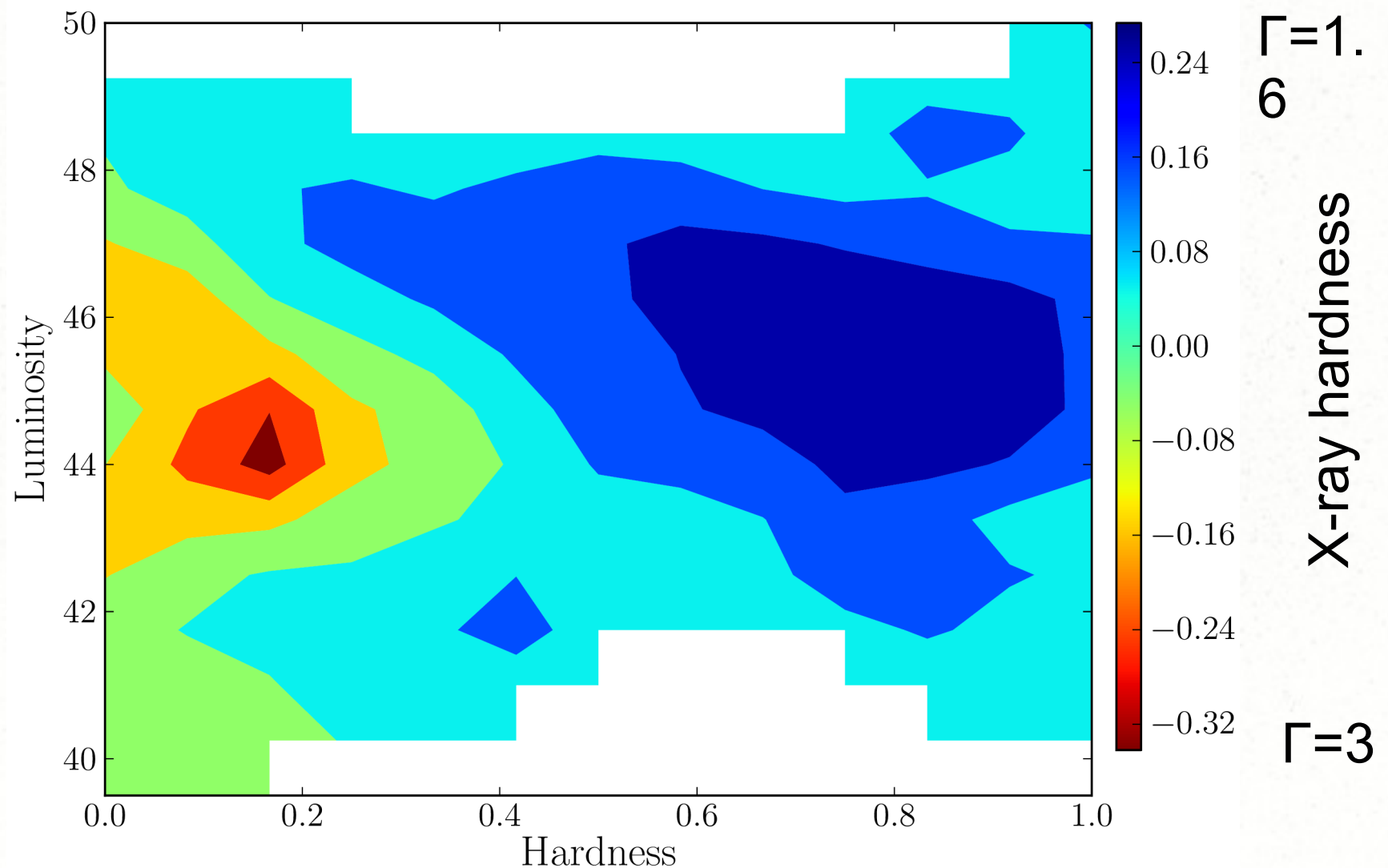
'Corrected' HID diagram



HID histogram



HID diagram with X-ray hardness



Conclusions

- AGNs qualitatively evolve in a similar way as the stellar-mass black hole binaries (confirming the previous results by Körding and Sobolewska)
- **Radio Loudness** seems to be a good indicator for an AGN evolutionary track, **hard** sources are RL
- the **X-ray** spectral slope **steeper for soft states**

Issues & Future work

- low-luminosity AGNs
 - **the host galaxy subtraction...**
- sample biases & effects
 - study sub-samples according to **redshift** and **mass**
- radio properties of AGNs
 - only a few sources with a confirmed radio morphology...
- X-ray variability

Shrnutí přednáškového cyklu o čem jsme si povídali?

- černé díry
 - kde se vyskytují, jak vznikají, co nás na nich zajímá?
 - **jak se pozorují?**
- rentgenová astronomie
 - interakce silného záření s elektrony v atomových obalech
 - různé způsoby detekce rentgenového záření ve vesmíru
 - současné a plánované rentgenové laboratoře
 - redukce rentgenových spekter
- spektrální stavy
 - tvrdé (převládá koróna) vs. měkké (převládá disk)

Shrnutí - pokračování

- astrofyzikální modely akreujících černých děr
 - termální záření akrečních disků
 - odraz záření na akrečním disku, vznik fluorescenčních čar
- relativistické efekty na vyzářené spektrum
 - měření spinu černé díry
- současné otevřené problémy týkající se akreujících černých děr
 - vznik a zánik jetů, vztah k akrečnímu toku
 - dichotomie rádiového záření aktivních galaxií
 - vývoj akrece na černou díru – univerzální pro aktivní galaxie a rentgenové dvojhvězdy?

Závěr

- studium černých děr nám umožňuje pochopit
 - fyzikální procesy v oblasti velmi silné gravitace a vysokých rychlostí
 - aplikace speciální a obecné teorie relativity (ověření platnosti?)
 - způsob akrece hmoty
 - - akreční disky (tenké, tlusté)
 - relativistické výtrysky hmoty (jety), větry z akrečních disků
 - vznik, vztah k akrečnímu toku
 - dopad na okolní galaxii (tvorba hvězd)
 - slapové trhání hmoty v blízkosti černé díry
 - vývoj a formaci galaktických jader a jejich superhmotných černých děr
 - vývoj velmi hmotných hvězd