

Astrophysik galaktischer Schwarzer Löcher

Jörn Wilms

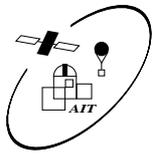
Institut für Astronomie und Astrophysik
Abteilung Astronomie

in Zusammenarbeit mit

M.C. Begelman (JILA), **S. Benlloch (IAAT)**,
C. Brocksopp (JMU), S. Corbel (Paris),
J.B. Dove (MSC Denver), R.P. Fender (Amsterdam),
T. Gleißner (IAAT), **W.A. Heindl (UCSD)**,
D.E. Lehr (Wellesley), T. di Matteo (MPA),
M.A. Nowak (JILA/Yale), G.G. Pooley (Cambridge),
K. Pottschmidt (IAAT), C.S. Reynolds (JILA),
R.E. Rothschild (UCSD), **R. Staubert (IAAT)**,
R. Wagoner (Stanford).

<http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms/teach/vorst/>

IAAT



Inhalt, I

1. Was sind kompakte Objekte?

Weißer Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher

2. Energieerzeugung durch Akkretion

Energiebilanz, Akkretionsscheiben,
Eddington-Leuchtkraft, Roche Lobe Overflow

3. Beobachtungen Schwarzer Löcher

Spektrale Zustände, Comptonisierung,
Langzeitvariabilität, Zustandsänderungen,
Kurzzeitvariabilität

4. Zusammenfassung

5. Ausblick



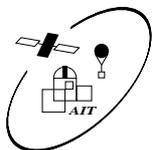
Endstadien, I

Sterne beenden ihr Leben als eines von drei verschiedenen **kompakten Objekten**:

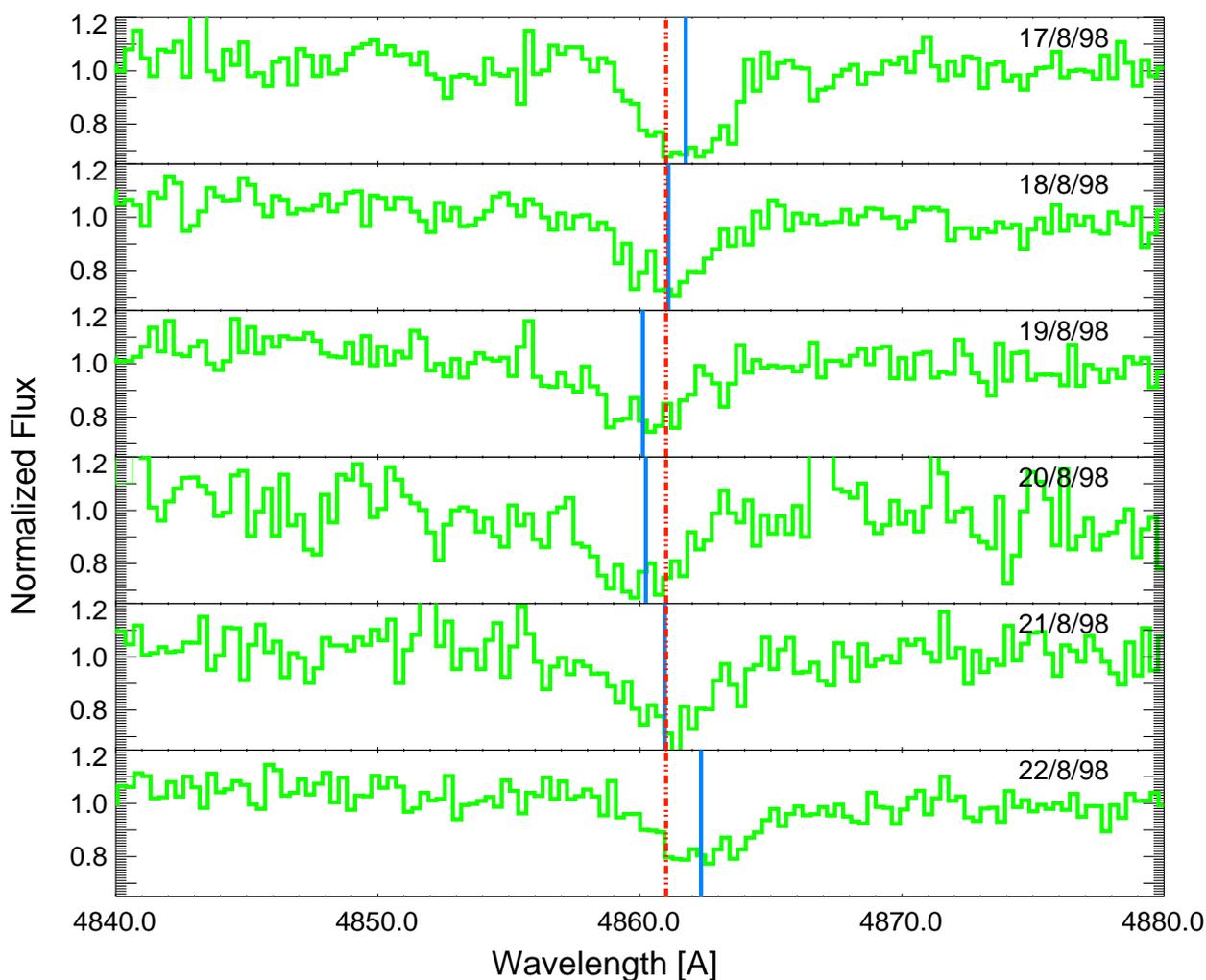
Weißer Zwerg: $\rho \sim 10^{5\cdots 6} \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim R_{\text{Erde}}$,
Gleichgewicht zwischen Gravitation und Gas
durch Druck ([relativistisch] entarteter)
Elektronen, $M < 1.44 M_{\odot}$
(**Chandrasekhar-Grenze**).

Neutronenstern: $\rho \sim 10^{13} \dots 10^{16} \text{ g cm}^{-3}$,
 $R \sim 10 \text{ km}$, bei dieser Dichte inv. β -Zerfall
($p + e^{-} \rightarrow n$), d.h. Stern hat hohen
Neutronenanteil. $1.44 M_{\odot} < M \lesssim 3 \dots 4 M_{\odot}$
(**Oppenheimer-Volkoff Grenze**).

Schwarzes Loch: Oberhalb OV-Grenze kein
stabiler Zustand bekannt \implies Stern fällt
vollständig in sich zusammen \implies **Schwarzes
Loch**. Ereignishorizont bei
 $R_S = 2GM/c^2 = 3(M/M_{\odot}) \text{ km}$
(**Schwarzschild-Radius**), $M \gtrsim 4 M_{\odot}$.



Massenbestimmung, I

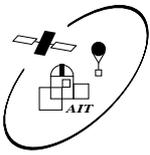


Dopplerbewegung der $H\beta$ Linie in HDE 226868 (Cyg X-1)
(Pottschmidt, Wilms, et al., in prep.)

In **Doppelsternsystem**: Masse des kompakten Objekts aus
3. Keplerschen Gesetz

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2} \quad (1)$$

bestimmbar (a : große Halbachse, T : Umlaufzeit, $M_{1,2}$:
Massen).



Massenbestimmung, II

Da Inklination i meist unbekannt, nur Bestimmung der **Massenfunktion**

$$\text{MF} = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{a_1^3 \sin^3 i}{U^2} \quad (2)$$

möglich. MF ist **untere Grenze** für M_2 .

Die meisten Schwarzen Löcher haben $\text{MF} \gtrsim 2 M_\odot$, es gibt aber einige wenige mit $\text{MF} > 5 M_\odot$.

Da häufig MF unbestimmbar: Klassifikation als Schwarzloch*kandidat* (Black Hole Candidate, BHC).

Erster BHC in 1965 entdeckt, identifiziert in 1972 (**Cygnus X-1**). Ende der 1970er: **LMC X-3** und **LMC X-1**.

Heute >20 BHC bekannt, davon sind 3 sichere BH.



Energiequellen, I

Energiequellen der Astrophysik:

1. Kernfusion

Typische Reaktionen der Art



wo $\Delta E_{\text{nuc}} = 0.007 m_p c^2$.

Kernfusion liefert $\sim 6 \times 10^{18}$ erg/g.

2. Gravitation

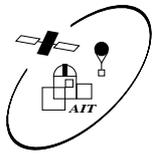
Energiegewinn aus Masse m akkretiert aus ∞ bis R :

$$\Delta E_{\text{acc}} = \frac{GMm}{R} \quad (4)$$

Für NS oder BH: $M = 1 M_{\odot}$ und $R = 10$ km:

Akkretion liefert 10^{20} erg/g.

\implies Akkretion ist die **effizienteste** astrophysikalische Energiequelle.



Energiequellen, II

Maximale Leuchtkraft bestimmt durch
**Gleichgewicht Strahlungsdruck vs.
Gravitationskraft.**

Im **sphärisch symmetrischen Fall**:

$$\text{Gravitation} = \text{Strahlungsdruck} \quad (5)$$

$$\frac{GMm_p}{r^2} = \frac{\sigma_T S}{c} = \frac{\sigma_T}{c} \quad (6)$$

(Kopplung e^- und p durch Coulomb)

Gleichgewicht bei

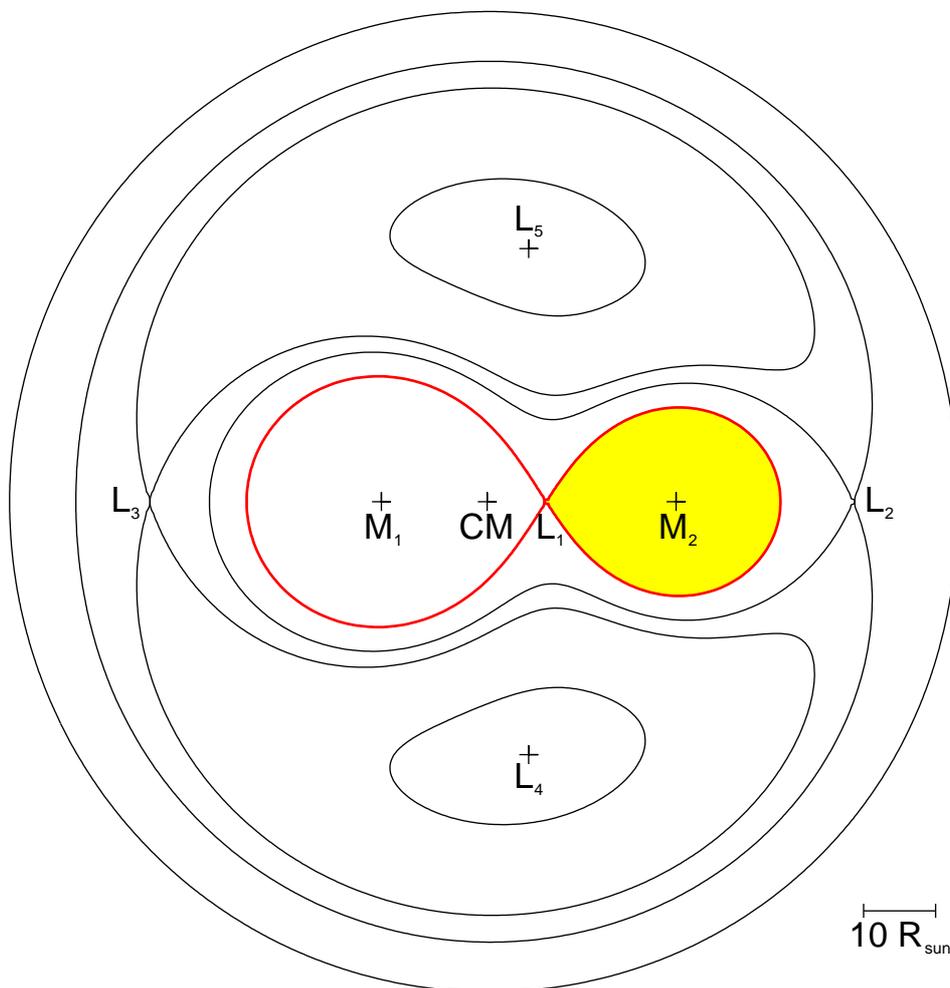
$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} = 1.3 \times 10^{38} \text{ erg/s} \cdot \left(\frac{M}{M_\odot} \right)$$

(**Eddington-Leuchtkraft**).

Sonne: $L_\odot = 4 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 4 \times 10^{26} \text{ W} \sim 10^{-4} L_{\text{Edd},\odot}$.



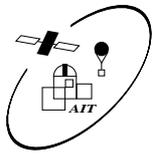
Akkretionsscheiben, I



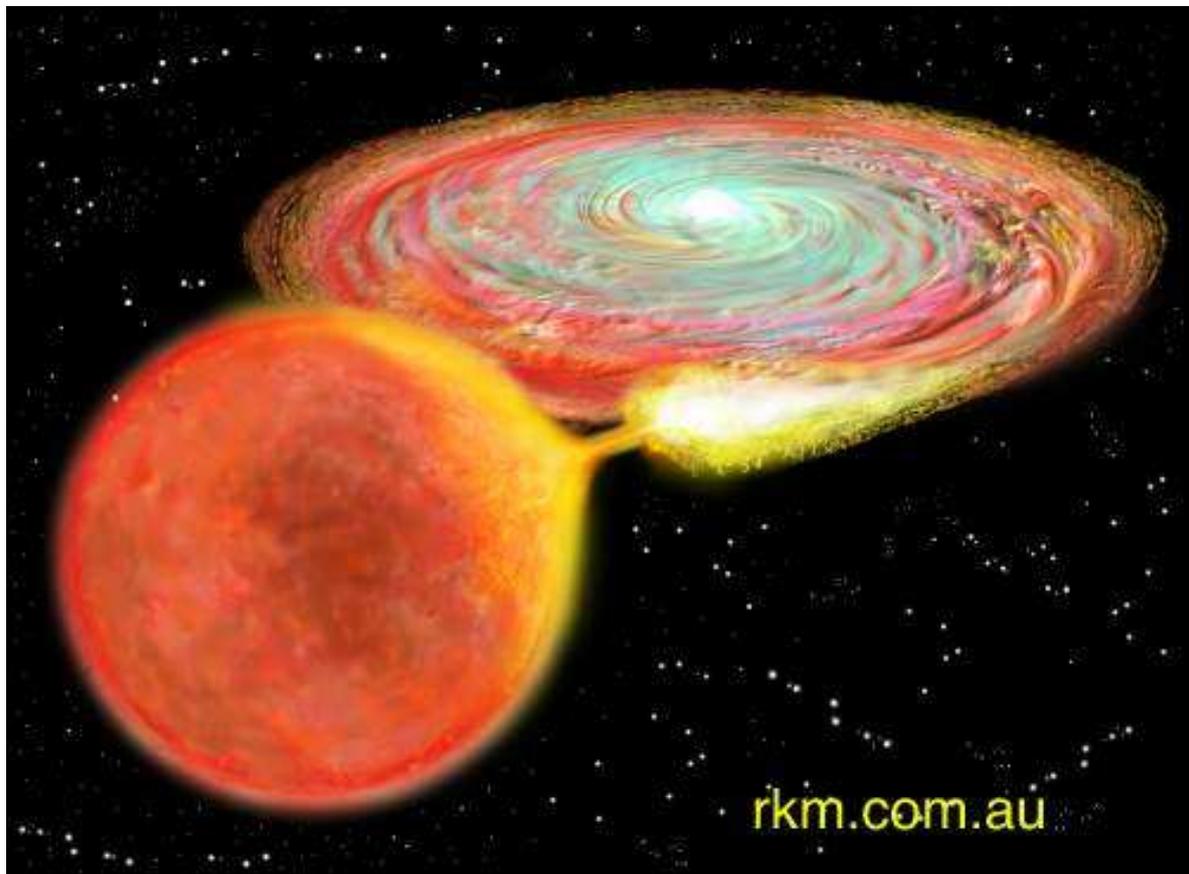
Normalfall: **Akkretion im Doppelsternsystem**

In rotierendem Koordinatensystem: Bewegung dominiert durch **Gravitation** und **Zentrifugalkraft** \implies **Roche Potential**.

Material fließt von normalem Stern über **inneren Lagrangepunkt**, L_1 , auf kompaktes Objekt



Akkretionsscheiben, II



Akkretiertes Material hat **Drehimpuls** \implies Ausbildung einer **Akkretionsscheibe** (Shakura & Sunyaev 1973).

Drehimpulstransport in Scheibe durch Viskosität, genaue Physik ist eines der großen ungelösten Probleme der modernen Astrophysik.

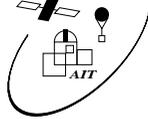
Typische Temperaturen aus

$$L_{\text{acc}} \approx 4\pi R^2 \sigma_{\text{SB}} T^4 \quad (7)$$

mit $L_{\text{acc}} = 10^{38}$ erg/s: $T = 10^7$ K, d.h. $kT = 1$ keV \implies **weiche Röntgenstrahlung**.

Genauere Rechnung: $T(r) \propto r^{-3/4}$.

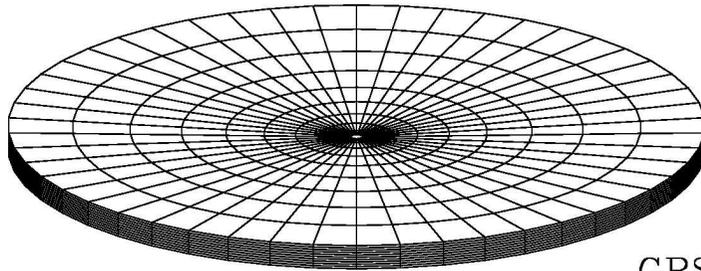
IAAT



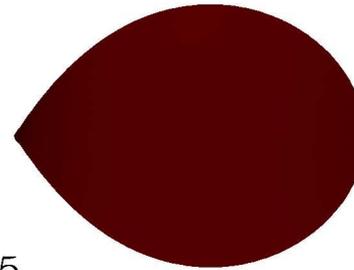
Akkretionsscheiben, III

Orosz, 2001,
priv. comm.

← Sun → Mercury →



GRS 1915+105



XTE J1118+480

XTE J1859+226



GRS 1009-45

GRS 1124-683

SAX J1819.3-2525

GS 2000+25

H1705-250

GRO J1655-40

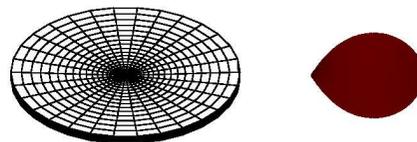
A0620-00

GRO J0422+32

4U 1543-47

companion star 

accretion disk and black hole 

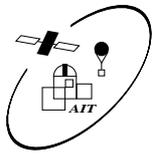


GS 2023+338



XTE J1550-564





Zusammenfassung, I

Astrophysik galaktischer Schwarzer Löcher ist hauptsächlich die Untersuchung von Akkretionsprozessen.

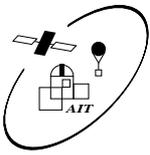
Einfacher als bei NS/WD: **keine Oberfläche**,
keine Magnetfelder.

Schwieriger als bei NS/WD: **hohe Akkretionsraten**, **Windakkretion**, Modifikation des Spektrums durch **heißes Gas**, . . .

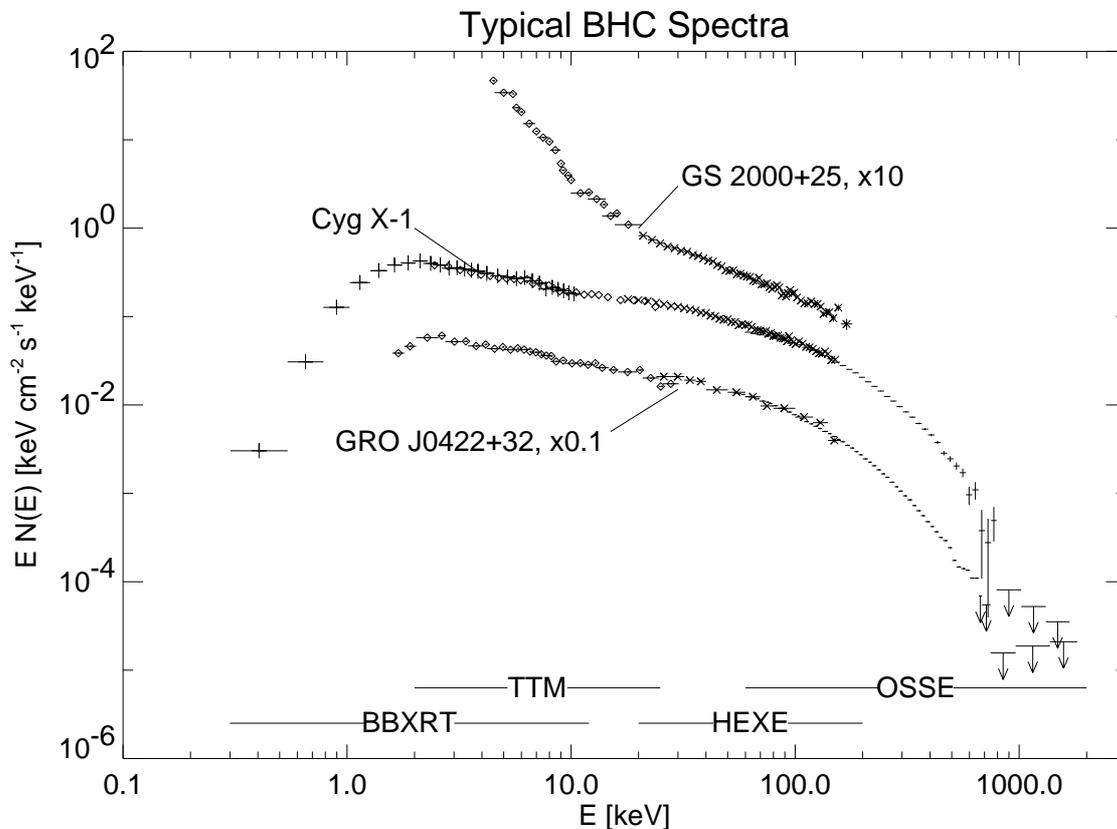
⇒ Heute gute Beobachtungsdaten, grobes physikalisches Verständnis, noch viele Fragen offen.

Da T im keV-Bereich ⇒ **Beobachtung im Röntgenbereich**.

Relativistische Effekte spielen nur bei Aktiven Galaxien eine Rolle (z.B. Eisenlinie in MCG–6-30-15, Tanaka et al., 1995, Wilms et al., in prep.)



Beobachtungen, I



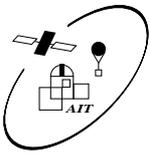
1970–1995: Einzelne pointierte Beobachtungen:

- Einige Quellen haben **thermisches Röntgenspektrum**
⇒ **Akkretionsscheibe!**
- Viele Quellen zeigen **Potenzgesetzspektrum**
- Anwesenheit von **Fe K α Linienemission** bei 6.4 keV ⇒
“kaltes Material” (Scheibe?)

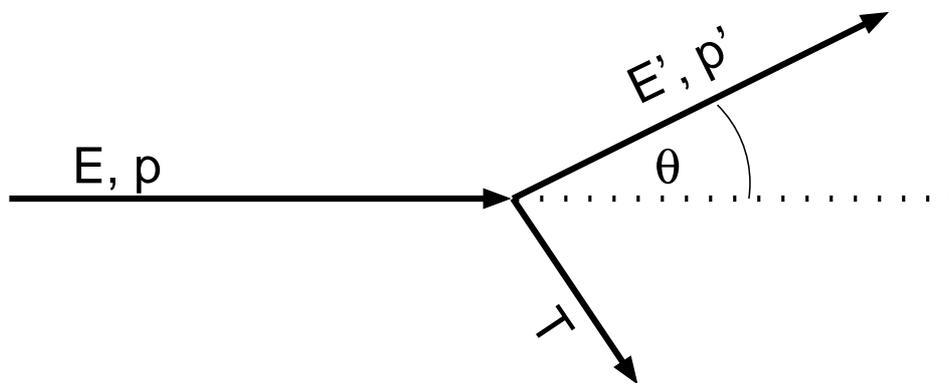
Allgemein daher: **“Zustände Schwarzer Löcher”**:

high/soft state: Akkretionsscheibe dominiert.

low/hard state: Potenzgesetz dominiert.



Comptonisierung, I



Sunyaev & Trümper (1979):

Potenzgesetzspektrum verursacht durch
Comptonisierung.

Ruhesystem des Elektrons: Energieänderung
des Photons bei Compton-Streuung:

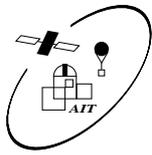
$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (8)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (9)$$

wo $h/m_e c = 2.426 \times 10^{-10}$ cm
(Compton-Wellenlänge).

Für $E \ll m_e c^2$:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx -\frac{E}{m_e c^2} \quad (10)$$



Comptonisierung, II

Im allgemeinen: **Elektronen nicht ruhend** \implies
Energieübertrag an Photon möglich:

$$E' \sim \gamma^2 E \quad (11)$$

für Elektron mit Energie $\gamma m_e c^2$: **inverse Comptonisierung**.

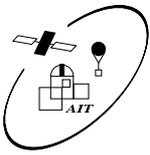
Für thermische Elektronenverteilung:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4kT_e - E}{m_e c^2} \quad (12)$$

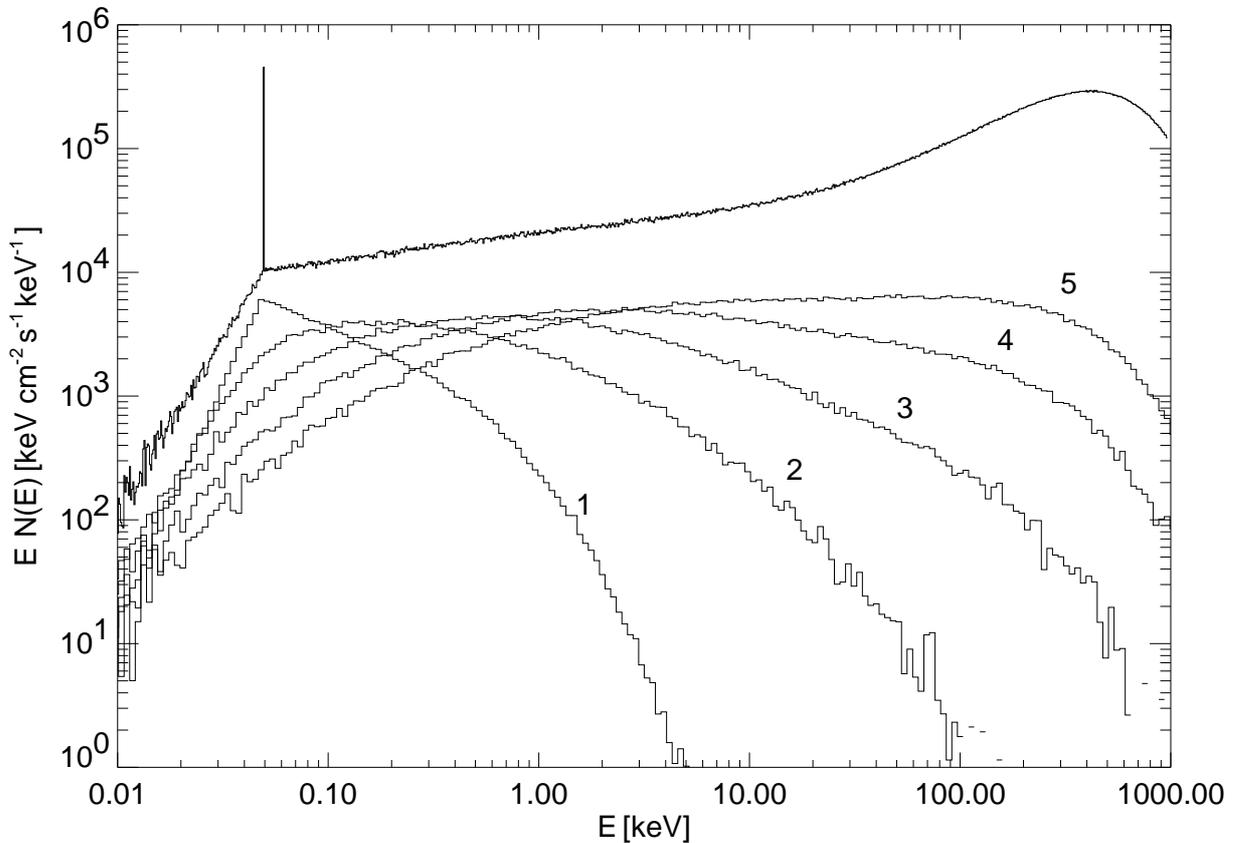
(nichtrelativistisch)

\implies Niederenergetische Photonen können in
heißem Elektronengas **sehr viel Energie**
gewinnen.

Typische Parameter für BHC: $\tau_e \sim 1$, $kT_e \sim 150$ keV.

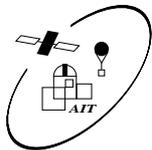


Comptonisierung, III

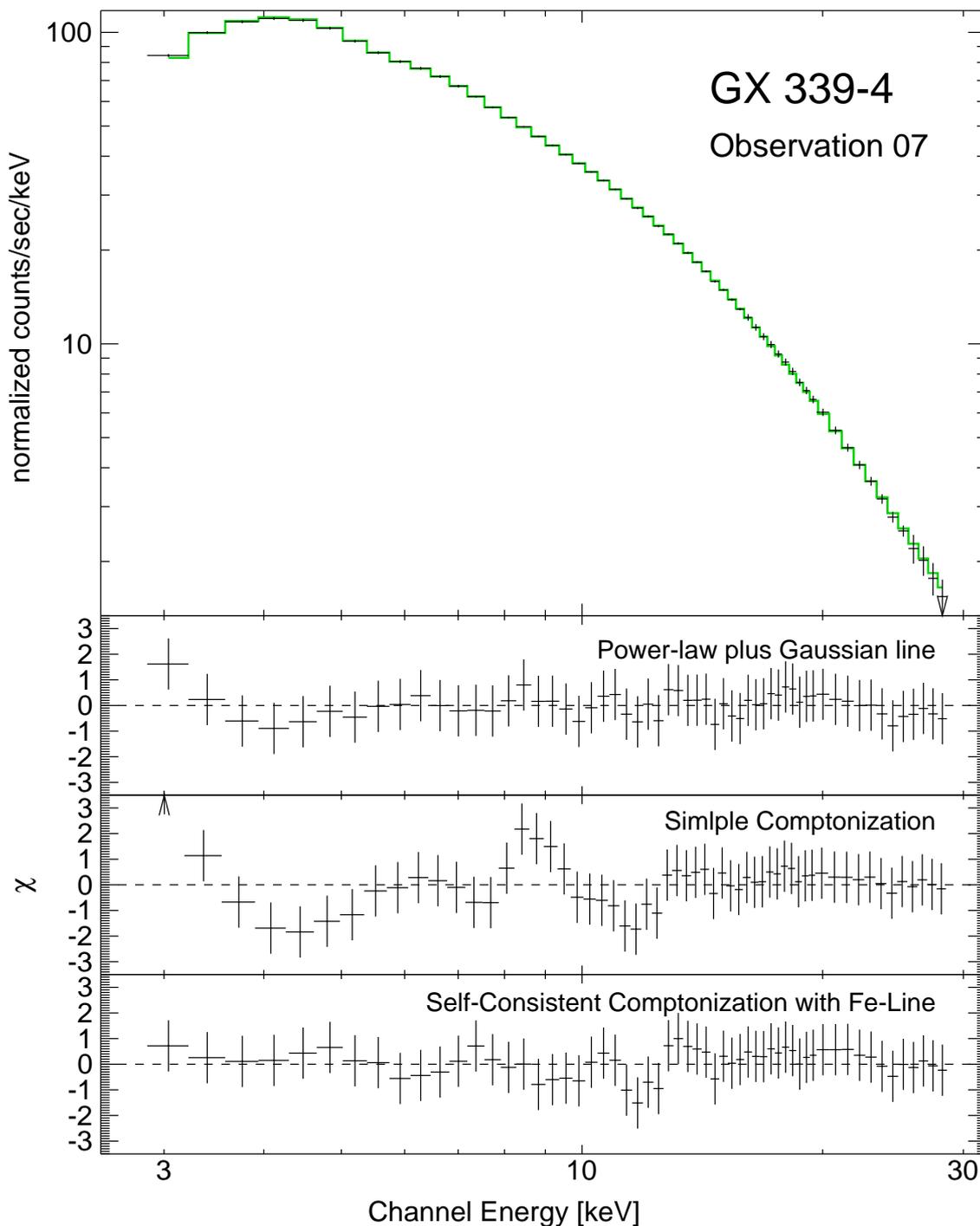


Gesamtspektrum und Spektren verschiedener Streuordnungen für Kugelgeometrie mit optischer Tiefe $\tau = 5$ und $kT_e = 0.4 m_e c^2$ (~ 200 keV).

Berechnung des Spektrums: Lösung der **Kompaneets-Gleichung** (quantenmechanisch modifizierte Form der Fokker-Planck Gleichung) oder direkt durch **Monte Carlo Simulation** liefert **Potenzgesetzspektren**.



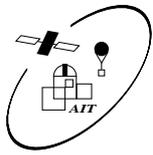
Comptonisierung, IV



Anwendung von Comptonisierungsmodellen auf GX 339–4
(Wilms et al., 2000)

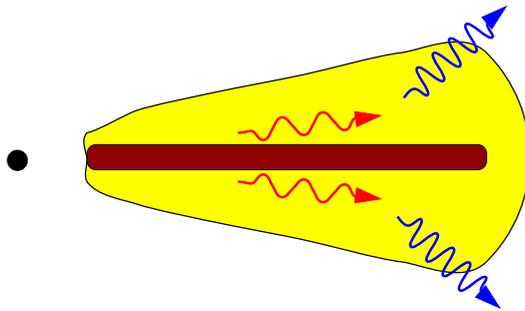
⇒ Gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung

IAAT

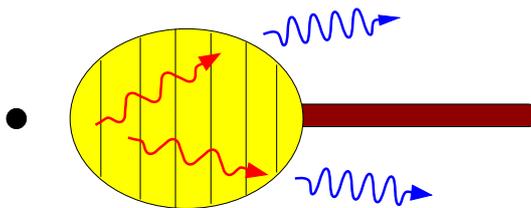


Akkretionsgeometrie, I

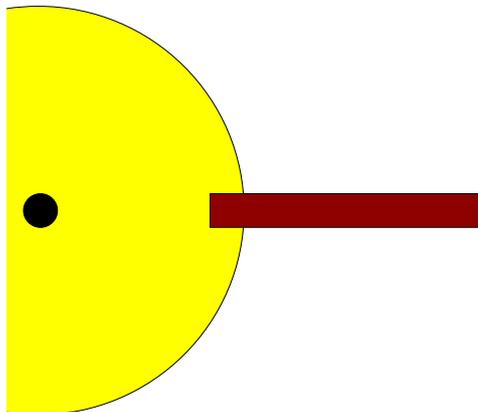
Wo die **Akkretionsscheibenkorona** sitzt ist unklar:



Sandwich geometry
(Haardt & Maraschi,
1993)

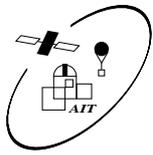


**Advection dominated
accretion flow (ADAF)**
Narayan (1996),
Esin et al. (1997, 2000)

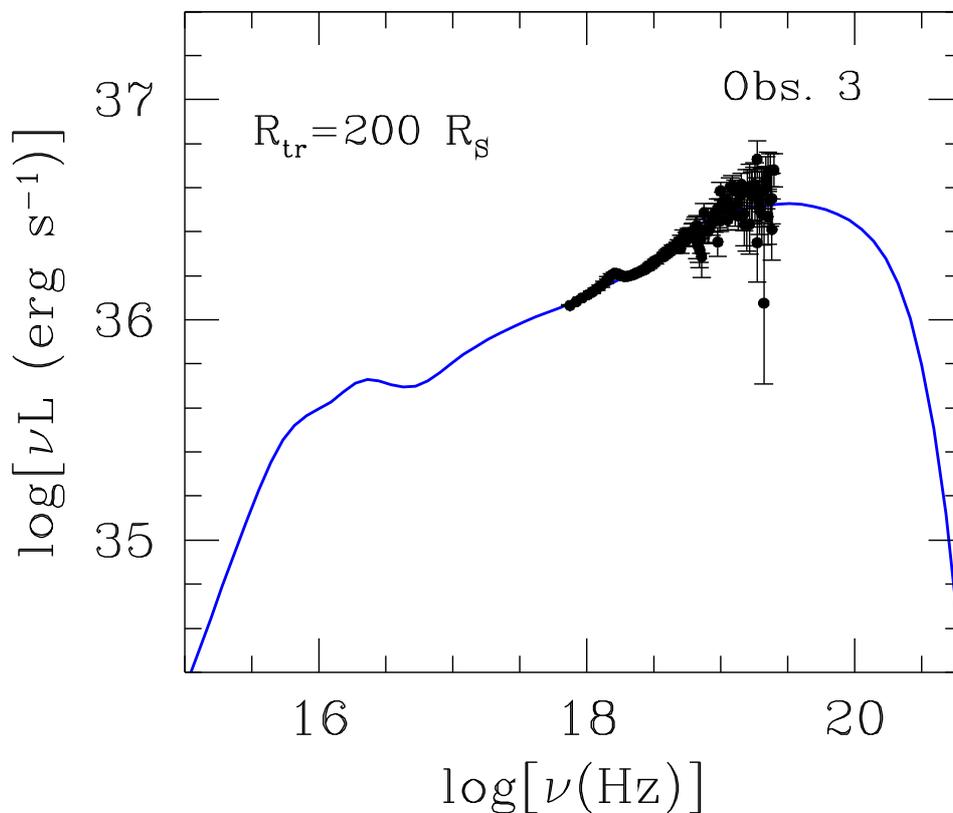


“Sphere+Disk geometry”
Dove, Wilms, et al. (1997),
Zdziarski et al. (1998)

IAAT

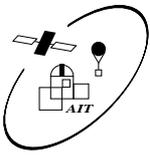


Akkretionsgeometrie, II

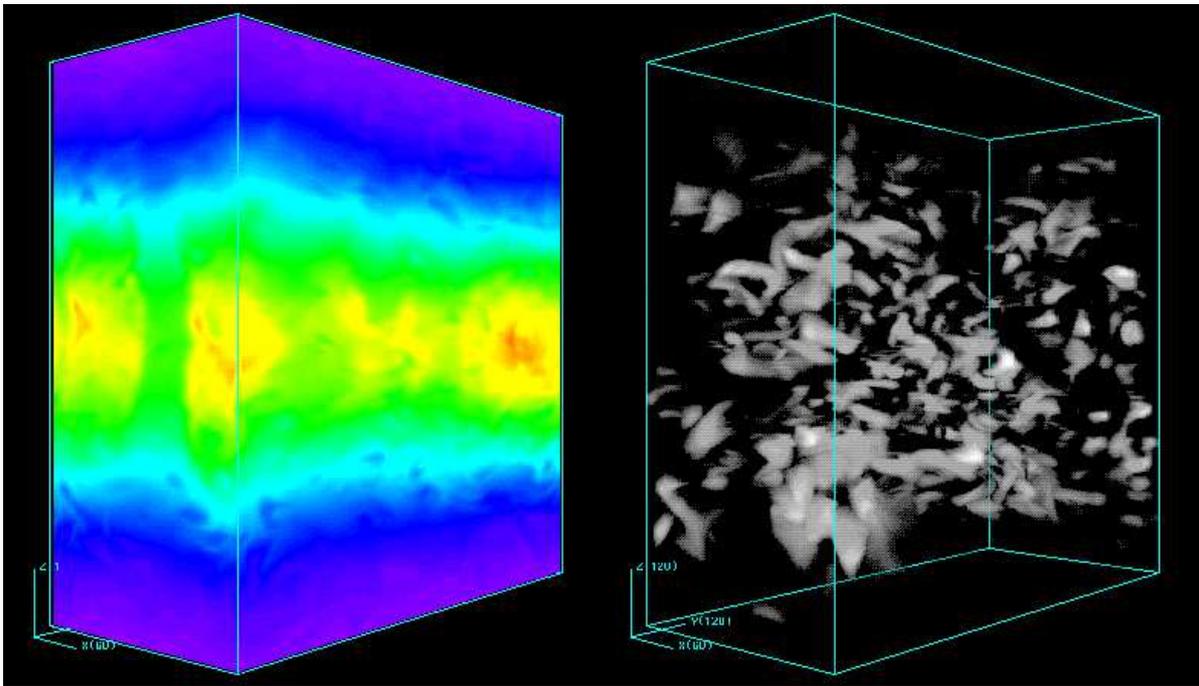


ADAF fit an GX 339–4, beobachteter Radiofluß ist 7 mJy bei 843 MHz (Wilms et al., 2000)

- **Sandwich-Geometrie nicht selbstkonsistent**, da Korona zu effektiv gekühlt (Dove, Wilms et al., 1997).
 - **ADAF** in vielen Objekten nicht möglich, da zu **starker Synchrotronpeak** (z.B. Wilms et al., 2000, siehe Abb.).
 - **Sphere+Disk** erklärt Spektrum, aber **nicht Kurzzeitverhalten** (z.B. Nowak, Wilms, et al., 1999) ...
- ⇒ **Akkretionsgeometrie noch nicht vollständig gelöstes Problem!**



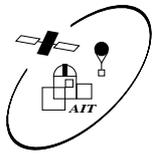
Balbus-Hawley, I



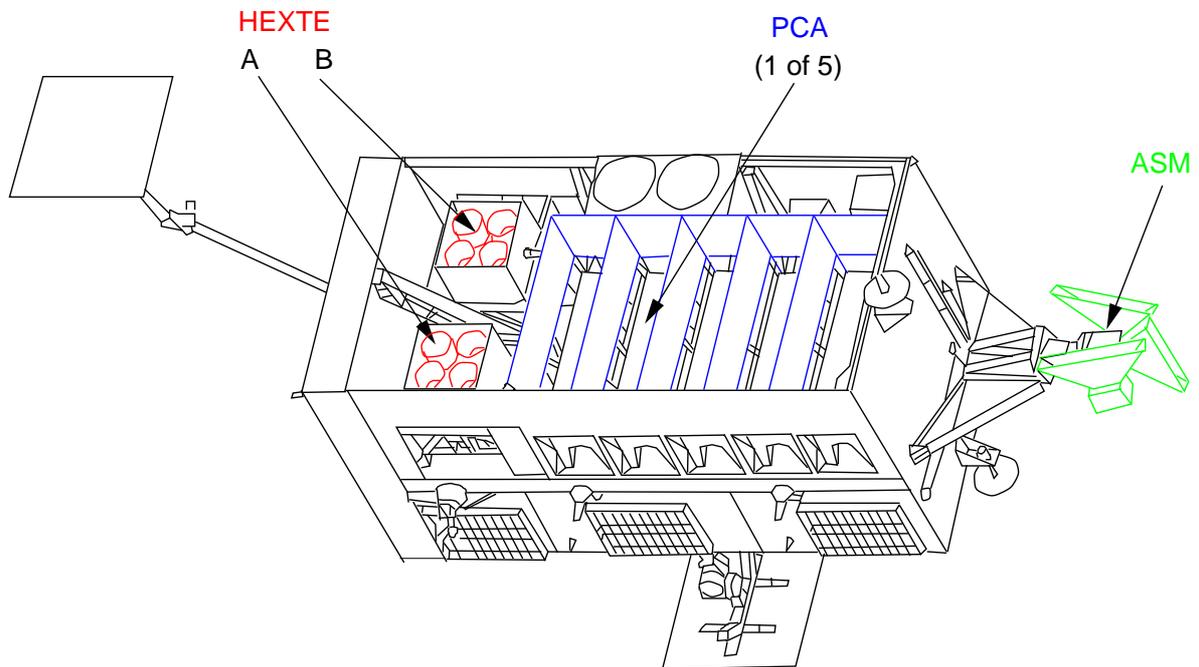
Querschnitt durch "Sandwich Korona". *Links: Dichte, Rechts: B-Feld* (Stone, priv. comm.)

Entstehung von Akkretionsscheibenkoronen ist unbekannt. Wahrscheinlich magnetohydrodynamischer Ursprung.

Bislang einziger erfolgversprechender Mechanismus: **Magnetorotational Instability** (MRI, aka **Balbus-Hawley Instabilität**). Kann evtl. auch Scheibenviskosität erklären.



Langzeitvariabilität, I



Mehr Einsicht durch **systematische**, auf **mehrere Jahre** angelegte **Beobachtungskampagnen** anstelle von "Snapshots", möglich mit **Rossi X-ray Timing Explorer** (RXTE, NASA, seit 1996).

Durchgeführte Kampagnen:

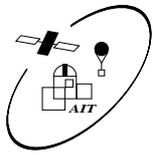
Cyg X-1: 1997–heute (RXTE, Radio, optisch; Pottschmidt, Wilms, et al., 2000, Pottschmidt, Wilms, et al., in Vorb.)

LMC X-1: 1997/1998 (RXTE; Wilms et al., 2001)

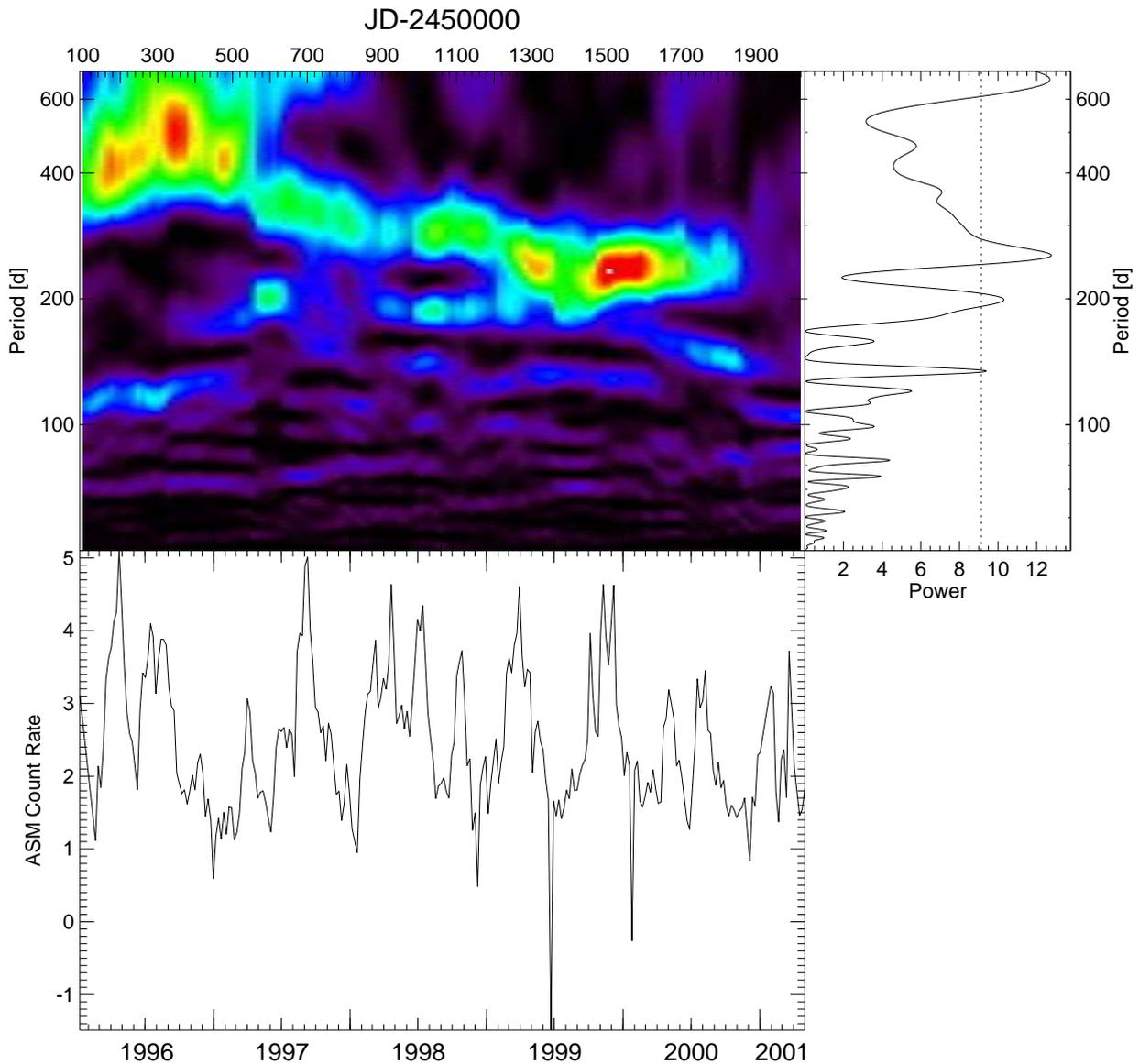
LMC X-3: 1997–1999, 2001–heute (RXTE; Wilms et al. 2001), 1990–1995 (optisch [Amsterdam]; Brocksopp, Groot, Wilms, im Druck).

GX 339–4: 1998 (RXTE; Wilms et al. 2001), 2000 (XMM-Newton, BeppoSAX)

IAAT

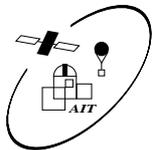


V1408 Aql, I

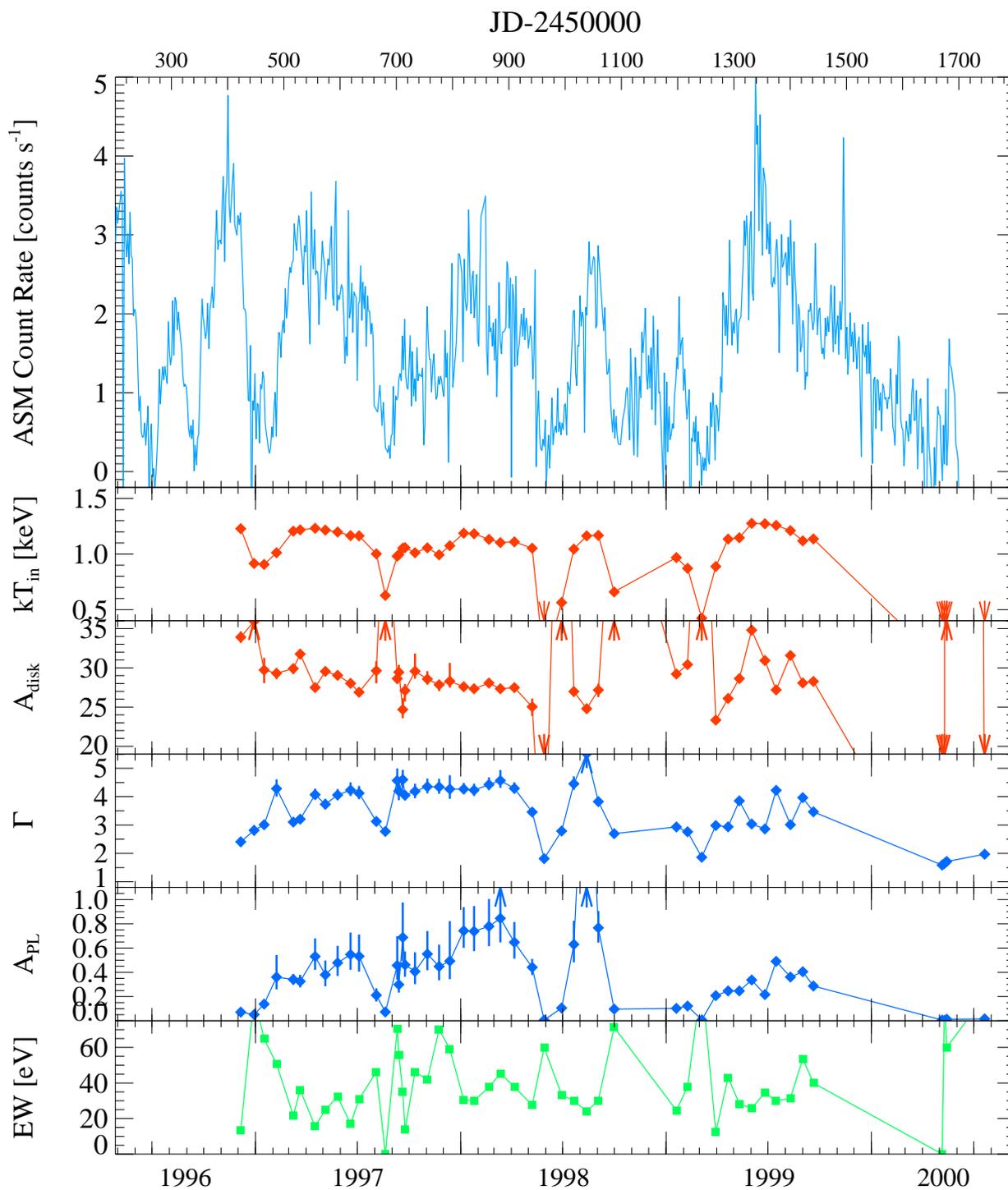


Langzeitlichtkurve von V1408 Aql (4U 1957+115; Nowak & Wilms, 1999, Benloch, Wilms, et al., 2001):
quasi-periodische Intensitätsschwankungen. Quelle hat
härteres Spektrum bei niedrigerer Intensität.

IAAT

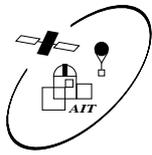


LMC X-3, I

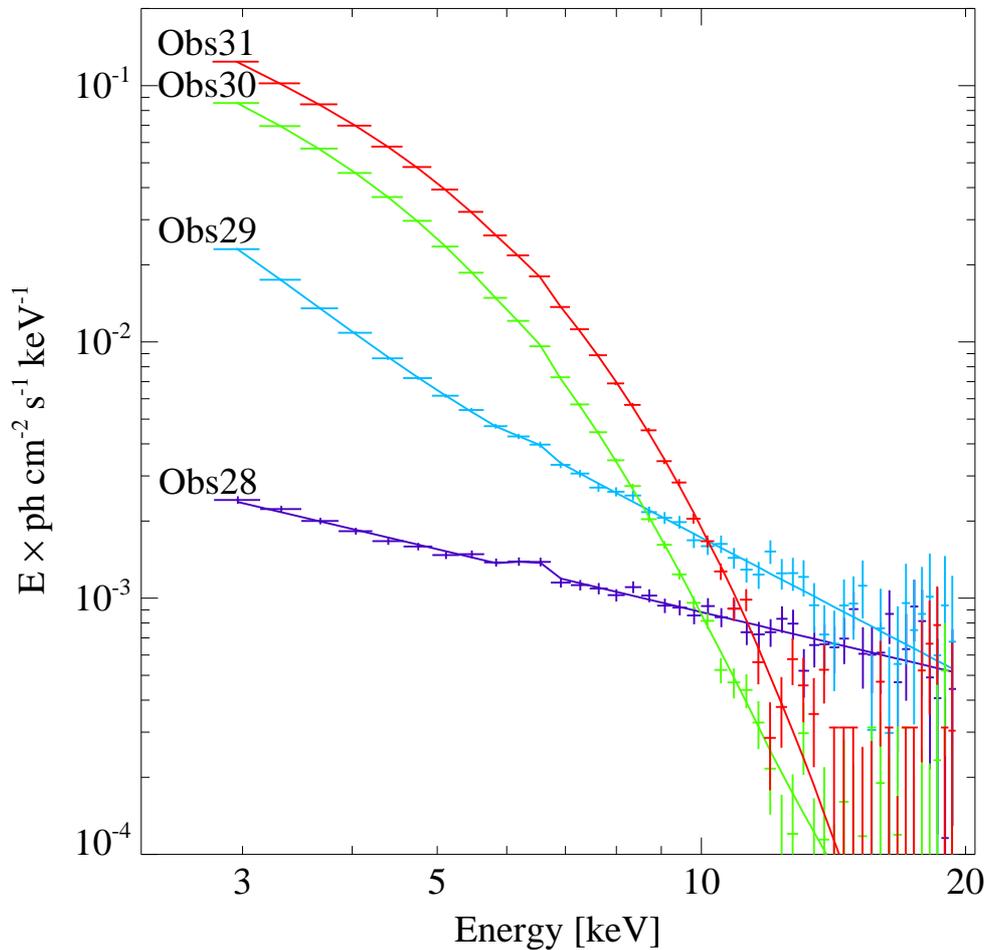


LMC X-3: Variation der Spektralparameter (Wilms et al., 2001)

IAAT



LMC X-3, II



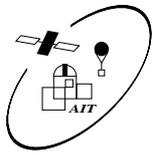
Wilms et al., 2000, 2001

LMC X-3 zeigt quasi-periodische Übergänge
zwischen dem **soft state** und dem **hard state** für
 $L \lesssim 5\% L_{\text{Edd}}$

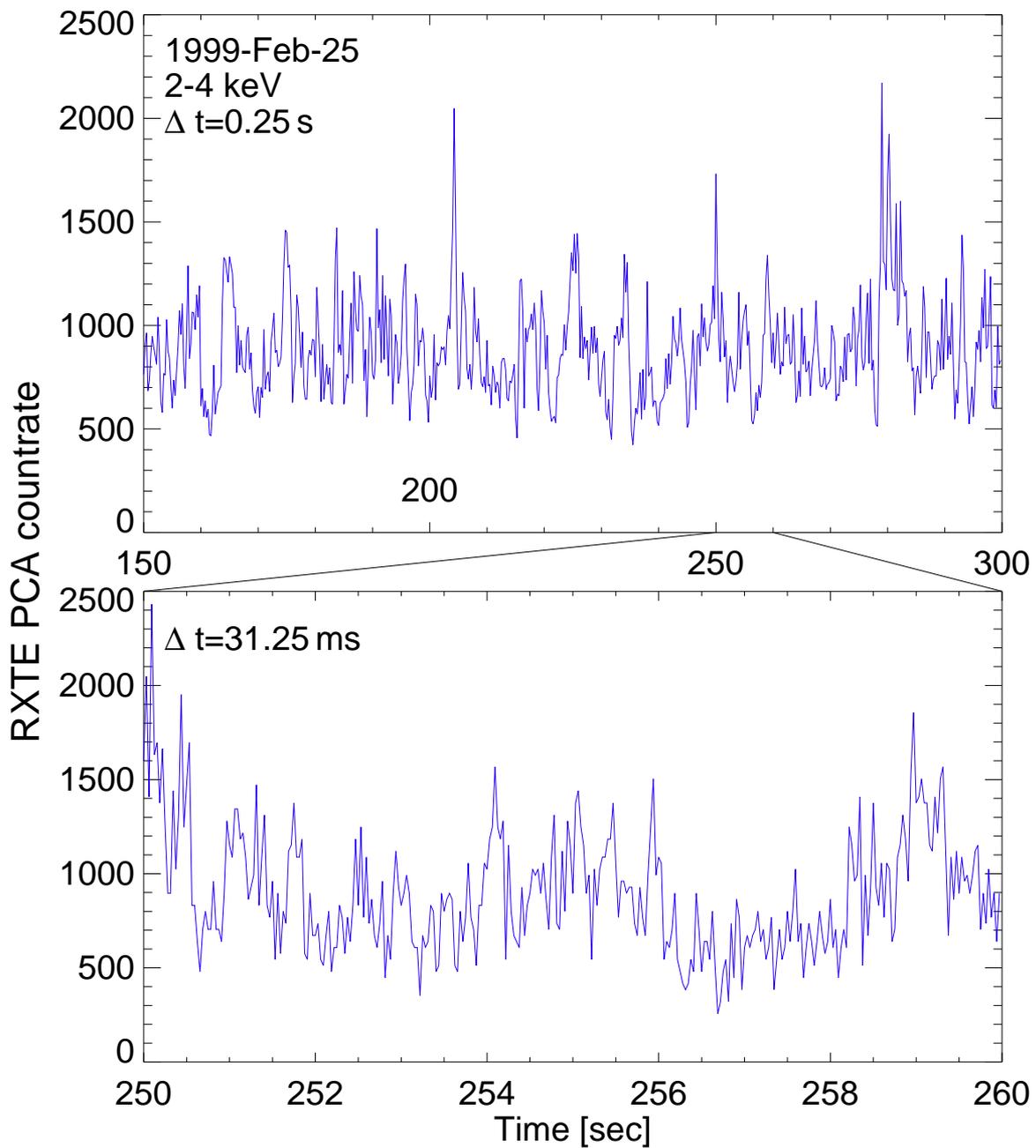
⇒ Akkretionsscheibenkorona baut sich quasi-periodisch
auf und ab.

Ähnliches auch von anderen BHC bekannt (z.B. Cyg X-1, XTE
J1550, ...) ⇒ **MRI funktioniert nicht für große L , ($\propto \dot{M}$).**

IAAT

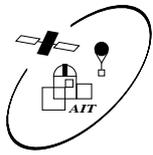


Cyg X-1, I

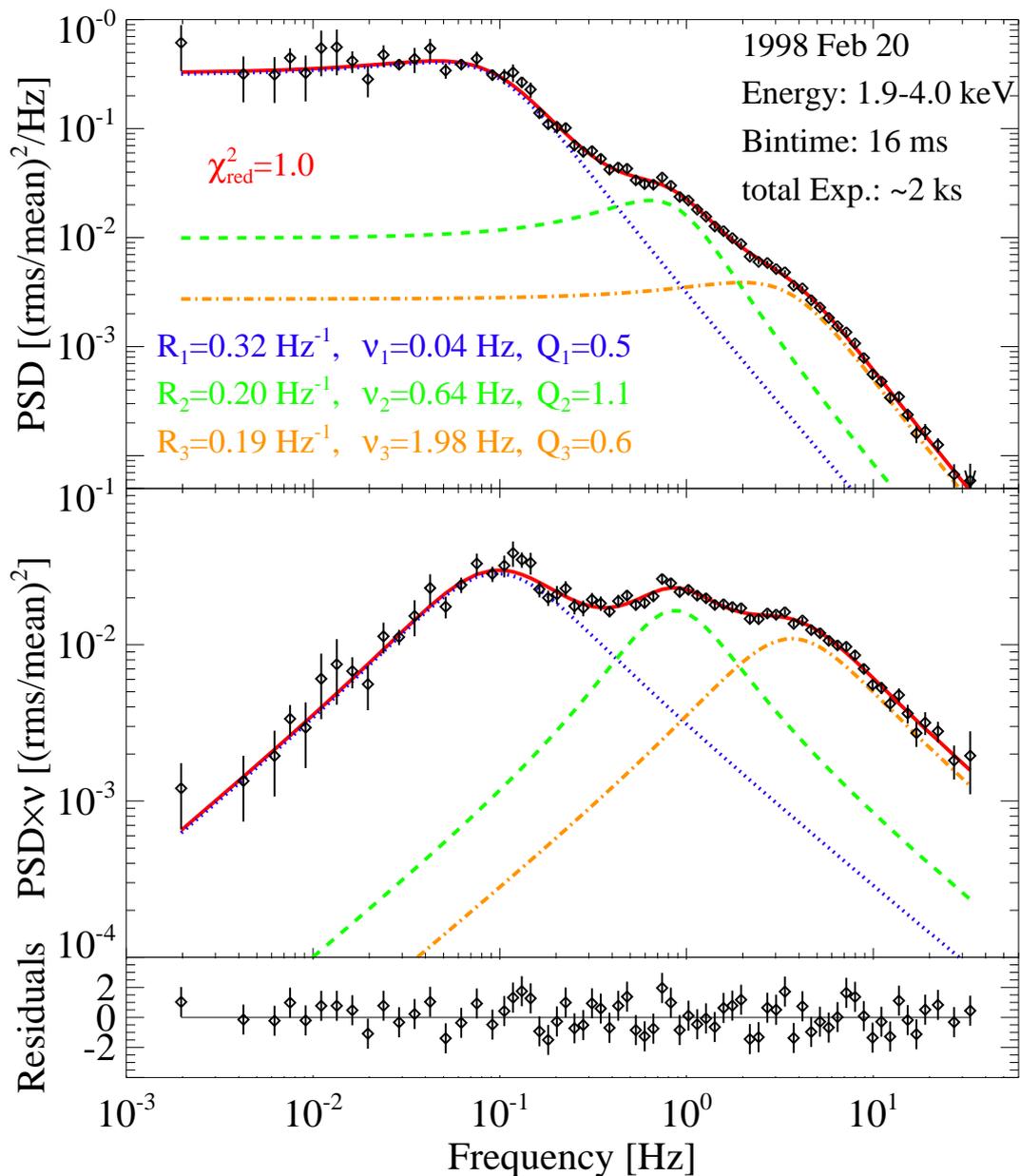


Weitere Hinweise auf Physik aus **Zeitverhalten**.

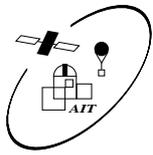
IAAT



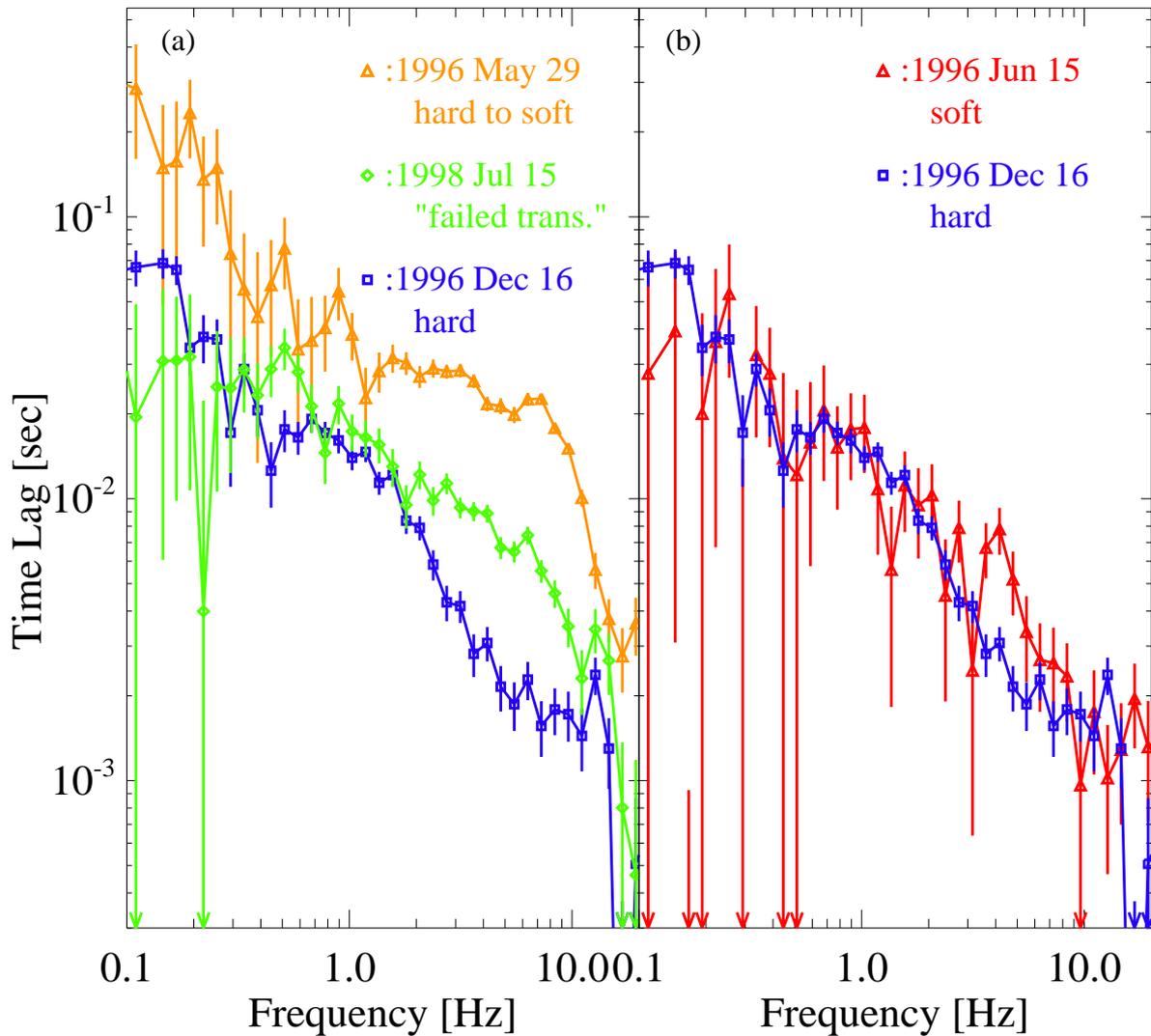
Cyg X-1, II



Zeitvariation der BHC kann als **“Rotes Rauschen”** beschrieben werden, mit charakteristischen Frequenzen, von denen vermutet wird, daß sie mit angeregten Schwingungen in der Akkretionsscheibe in Zusammenhang stehen (**Diskoseismology**).



Cyg X-1, III



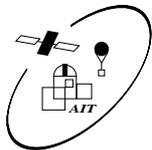
Pottschmidt, Wilms, et al., 2000

Der fourierfrequenzabhängige "Lag" ändert sich nur während der Zustandsänderungen.

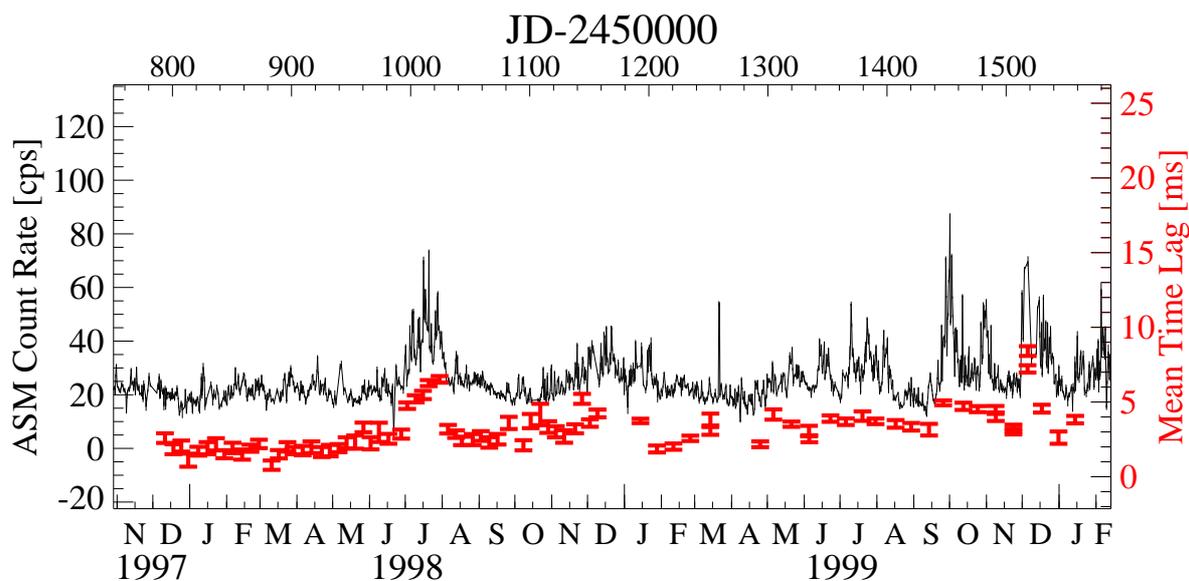
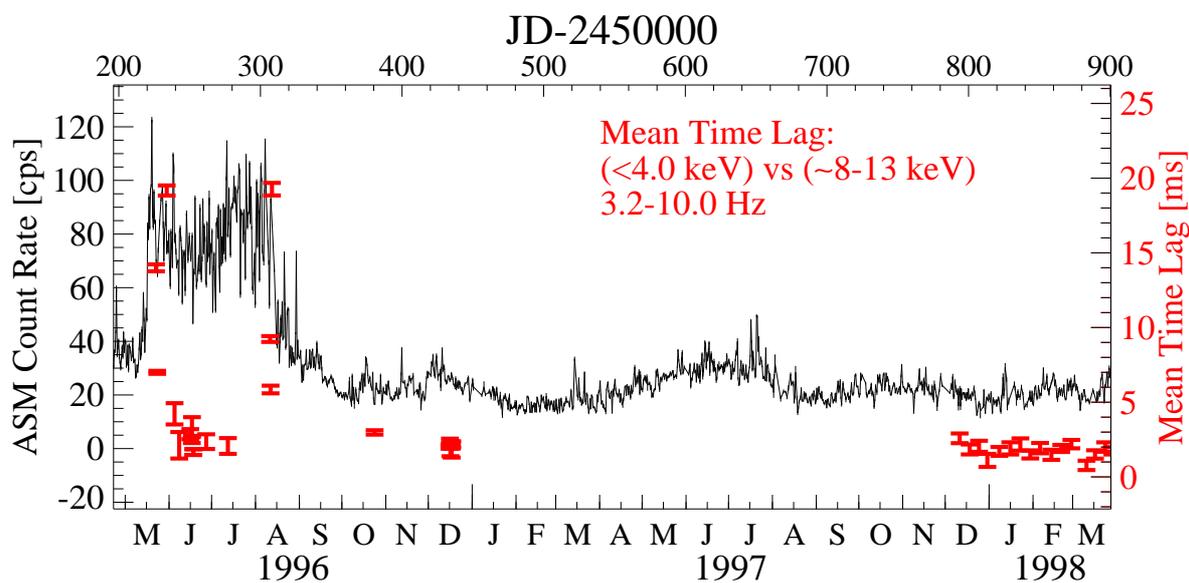
Im **hard oder soft state sind die Lags identisch** \implies

Entstehung des Lags ist von Akkretionsscheibenkorona unabhängig.

IAAT



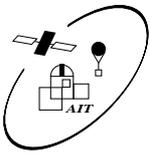
Cyg X-1, IV



Pottschmidt, Wilms, et al., 2000

Zeitliche Entwicklung der Zeitverschiebung ("lag") zwischen zwei Energiebändern. Der Lag ist signifikant höher während Zustandsänderungen \Rightarrow Hinweis auf Geometrieänderung?

IAAT

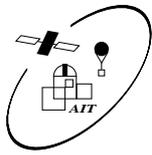


Zusammenfassung, I

Bisherige Ergebnisse:

1. Prinzipielle Physik der BHC gut verstanden:
Comptonisierung und **Akkretionsscheibe**.
2. **Akkretionsgeometrie offen**
3. **Langzeitvariation** ist vorhanden, evtl. bedingt durch Änderungen der Massenakkretionsrate.
4. **Zustandsänderungen** im Spektrum wegen Auf-/Abbau der Akkretionsscheibenkorona?
5. **Stochastische Kurzzeitvariabilität**
6. **Lags sind nicht** durch Korona bedingt.

IAAT



Ausblick, I

Was bringt die Zukunft?

Kurzfristig muß Modellierung verbessert werden:

1. Bessere MHD Rechnungen?
2. Bessere Modelle für Zeitvariabilität \implies
Vereinheitlichung Spektren und Zeitverhalten.

Langfristig ist neue Hardware erforderlich:

1. **Breitbandspektren:**
 - INTEGRAL (ESA, 2002)
 - CZT-Detektoren \implies Brasilianischer Kleinsatellit (INPE, UCSD, IAAT, MIT)?
 - Niederenergie-Monitor auf ISS [ROSITA] (MPE, IAAT)?
 - CZT Monitor auf Space Station (EXIST)?
2. Neuer dedizierter **Satellit für Timing?**
 - EXTRA (CESR, IAAT, UVA, Birmingham)
3. Bessere **Spektralaufösung**
 - XMM-Newton (2000–, ESA)
 - Chandra (1999–, NASA)
 - XEUS (2010–, ESA)
 - Constellation-X (2008–, NASA)

“Goldene Zukunft” der Röntgen- und γ -Astronomie.

IAAT