

# **Galaktische Schwarze Löcher**

—

## **Low Mass X-ray Binaries**

**La Villa 2006**

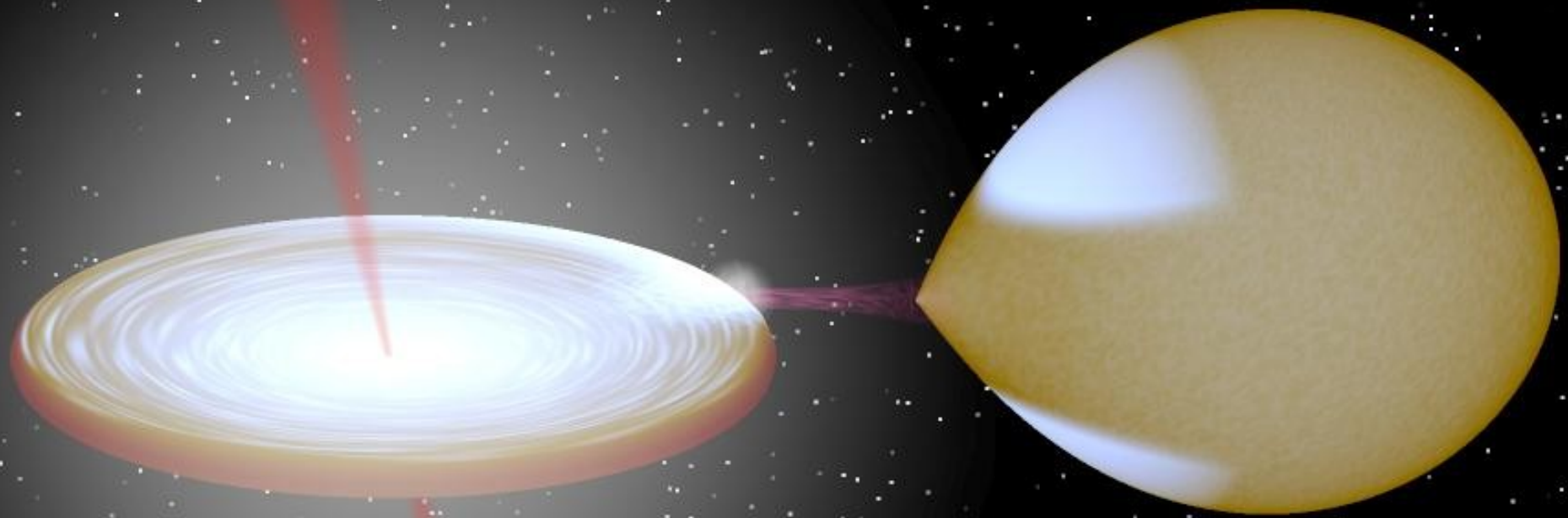
**Arbeitsgruppe: Schwarze Löcher im Kosmos**

**Vortragender: Andre Gipperich**

# Inhaltsübersicht

- **Was sind Low Mass X-ray Binaries?**
- **Wie zeigen sich LMXB mit schwarzen Löchern**
- **Ausbrüche**
- **Bemerkungen zur Akkretion**
- **Modelle zur Beschreibung des Gesamtverhaltens**
- **Der Ereignishorizont**
- **Zusammenfassung**

# GRO J1655-40



# Was bedeutet Low Mass X-ray Binary?

- Binary: Doppelsternsystem
- X-ray: machen sich vornehmlich durch Röntgenstrahlung bemerkbar
- Low Mass:  
Masse des Begleiters  $M_C < M_{\odot}$   
Spektrum des Begleiters zwischen (A, F, G), K, M
- abgekürzt mit LMXB
- bestehen aus einem kompaktem Objekt und dem Begleiter  
pesistentes (kontinuierliches) Verhalten – Neutronenstern (NS)  
transientes (wechselndes) Verhalten – Schwarzes Loch  
(BH – black hole)
- es findet Massenakkretion zum kompakten Objekt statt

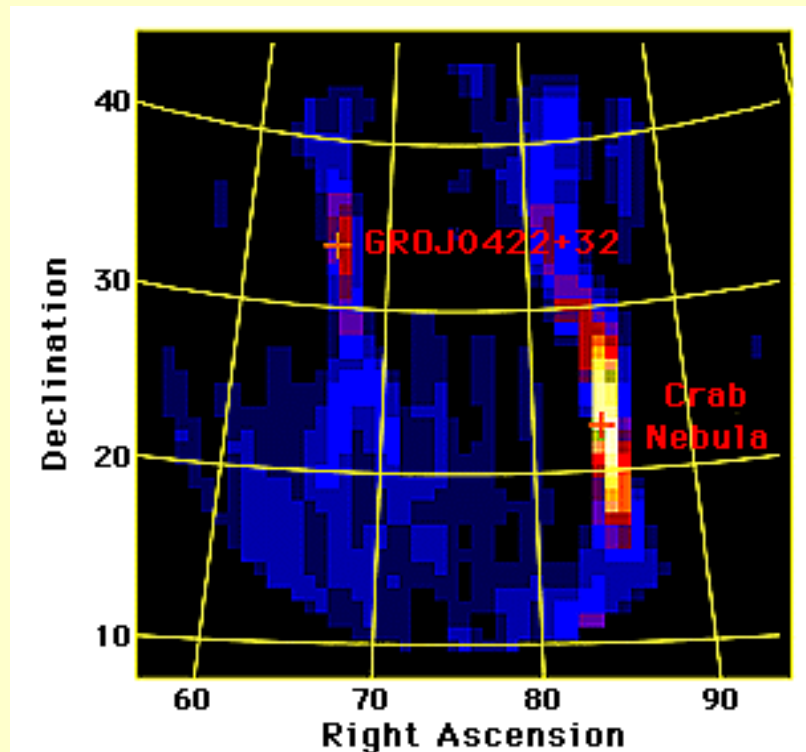
# Wichtige Eigenschaften

- **Entdeckung während der Ausbrüche**
- **Ausbrüche zeigen ein breites Strahlungsspektrum**
- **meistens sind die Systeme in einem unscheinbaren Zustand**
- **im „Ruhezustand“ kann der Begleiter ungestört beobachtet werden**
- **die Systeme zeigen über Jahre keine Veränderung in ihrem Spektrum, weshalb man sie aus verschiedenen Blickwinkeln erforschen kann**
- **aber auch schnelle Änderungen (im Sekundenbereich) im Spektrum während der Ausbrüche**
- **andere Namen: X-ray Novae (XRN) und Soft X-ray Transient (SXT)**

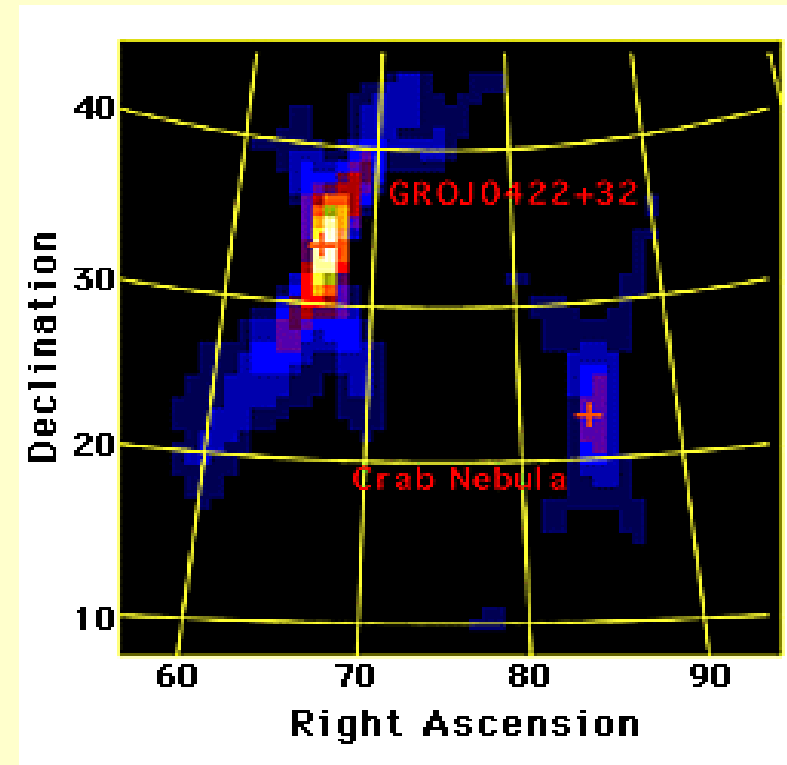
# GRS J0422+32

- Die Abbildungen zeigen den Crab Nebel mit konstantem Energiefluss und den Röntgendoppelstern GRS J0422+32 in Ruhe und im Ausbruch.
- Wellenlängenbereich: optische Strahlung, Röntgen- und Gammastrahlung

in Ruhe:



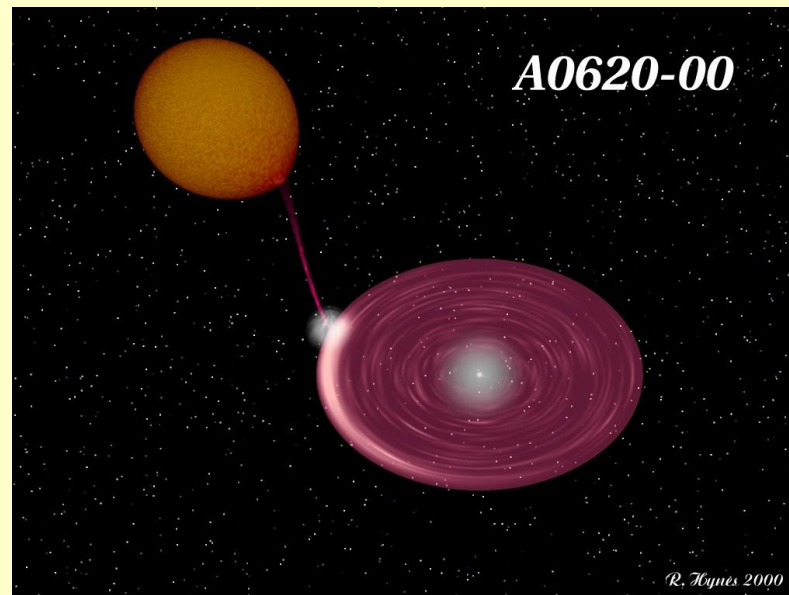
im Ausbruch:



Quelle: NASA

# Häufigkeit von Röntgenquellen

- mehr als 300 Röntgenquellen
- davon mehr als die Hälfte LMXBs, der Rest HMXBs
- ungefähr 20 LMXB mit Schwarzem Loch
- viele andere Systeme sind noch/nur „Kandidaten“ für Schwarze Löcher
- A0620-00 ist die erste entdeckte X-ray nova (1975)



# Übersicht X-Ray Binaries mit BH I

| Source                | Alternative name <sup>a</sup> | Year <sup>b</sup>  | Type <sup>c</sup> | $F_{x,max}$<br>( $\mu\text{Jy}^d$ ) | D<br>(kpc)    | $P_{orb}$<br>(hr) | Spec.   | References  |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------|---------|-------------|
| 0422+32               | V518 Per                      | 1992/1             | L,T               | 3000                                | $2.6 \pm 0.7$ | 5.1               | M2V     | 1,2         |
| 0538-641              | LMC X-3                       | –                  | H,P               | 60                                  | $50 \pm 2.3$  | 40.9              | B3V     | 3,4         |
| 0540-697              | LMC X-1                       | –                  | H,P               | 30                                  | $50 \pm 2.3$  | 101.5             | O7III   | 3,5,6       |
| 0620-003              | V616 Mon                      | 1975/2             | L,T               | 50000                               | $1.2 \pm 0.1$ | 7.8               | K4V     | 7,8,9,10    |
| 1009-45               | MM Vel                        | 1993/1             | L,T               | 800                                 | $5.0 \pm 1.3$ | 6.8               | K7/M0V  | 11,12       |
| 1118+480              | KV UMa                        | 2000/1             | L,T               | 40                                  | $1.8 \pm 0.5$ | 4.1               | K5/M0V  | 13,14       |
| 1124-684 <sup>e</sup> | GU Mus                        | 1991/1             | L,T               | 3000                                | $5 \pm 1.3$   | 10.4              | K3/K5V  | 15,15a,16   |
| 1543-475              | IL Lupi                       | 1971/4             | L,T               | 15000                               | $7.5 \pm 0.5$ | 26.8              | A2V     | 17,18       |
| 1550-564              | V381 Nor                      | 1998/5             | L,T               | 7000                                | $5.3 \pm 2.3$ | 37.0              | G8/K8IV | 19          |
| 1655-40               | V1033 Sco                     | 1994/2             | L,T               | 3900                                | $3.2 \pm 0.2$ | 62.9              | F3/F5IV | 20,21,22    |
| 1659-487 <sup>f</sup> | V821 Ara                      | 1972/ <sup>f</sup> | L,T               | 1100                                | 4             | 42.1:             | –       | 23,24       |
| 1705-250              | V2107 Oph                     | 1977/1             | L,T               | 3600                                | $8 \pm 2$     | 12.5              | K3/7V   | 7,25,26     |
| 1819.3-2525           | V4641 Sgr                     | 1999/1             | L,T               | 13000                               | 7.4–12.3      | 67.6              | B9III   | 27          |
| 1859+226              | V406 Vul                      | 1999/1             | L,T               | 1500                                | 11            | 9.2:              | –       | 28,29       |
| 1915+105              | V1487 Aql                     | 1992/1             | L,T               | 3700                                | 11–12         | 804.0             | K/MIII  | 30,31,32,33 |
| 1956+350              | Cyg X-1                       | –                  | H,P               | 2300                                | $2.0 \pm 0.1$ | 134.4             | O9.7Iab | 34,35       |
| 2000+251              | QZ Vul                        | 1988/1             | L,T               | 11000                               | $2.7 \pm 0.7$ | 8.3               | K3/K7V  | 35a,7,36,37 |
| 2023+338              | V404 Cyg                      | 1989/3             | L,T               | 20000                               | 2.2–3.7       | 155.3             | K0III   | 38,39,40    |

<sup>a</sup> Name recognized by the SIMBAD Database and the Astrophysics Data System (ADS).

<sup>b</sup> Year of discovery/number of outbursts observed (Chen et al. 1997; this work).

<sup>c</sup> ‘H’ – HMXB, ‘L’ – LMXB, ‘T’ – transient, ‘P’ – persistent; Liu et al. 2000, 2001; this work.

<sup>d</sup>  $1 \mu\text{Jy} = 10^{-29} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} = 2.42 \times 10^{-12} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ .

<sup>e</sup> Commonly known as Nova Muscae 1991.

<sup>f</sup> Commonly known as GX339-4; number of outbursts  $\sim 10$  (Kong et al. 2002).

Quelle: McClintock & Remillard 2003



# Übersicht X-Ray Binaries mit BH II

| Source      | $f(M)^a$<br>( $M_\odot$ ) | $M_1^a$<br>( $M_\odot$ ) | $f(\text{HFQPO})$<br>(Hz) | $f(\text{LFQPO})$<br>(Hz) | Radio <sup>b</sup> | $E_{\text{max}}^c$<br>(MeV) | References     |
|-------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|
| 0422+32     | $1.19 \pm 0.02$           | 3.2–13.2                 | –                         | 0.035–32                  | P                  | 0.8, 1–2:                   | 1,2,3,4,5      |
| 0538–641    | $2.3 \pm 0.3$             | 5.9–9.2                  | –                         | 0.46                      | –                  | 0.05                        | 6,7            |
| 0540–697    | $0.14 \pm 0.05$           | 4.0–10.0:                | –                         | 0.075                     | –                  | 0.02                        | 8,7            |
| 0620–003    | $2.72 \pm 0.06$           | 3.3–12.9                 | –                         | –                         | P, J?              | 0.03:                       | 9,10,11,11a    |
| 1009–45     | $3.17 \pm 0.12$           | 6.3–8.0                  | –                         | 0.04–0.3                  | – <sup>d</sup>     | 0.40, 1:                    | 12,4,13        |
| 1118+480    | $6.1 \pm 0.3$             | 6.5–7.2                  | –                         | 0.07–0.15                 | P                  | 0.15                        | 14,15,16,17    |
| 1124–684    | $3.01 \pm 0.15$           | 6.5–8.2                  | –                         | 3.0–8.4                   | P                  | 0.50                        | 18,19,20,21    |
| 1543–475    | $0.25 \pm 0.01$           | 7.4–11.4 <sup>e</sup>    | –                         | 7                         | – <sup>f</sup>     | 0.20                        | 22,4           |
| 1550–564    | $6.86 \pm 0.71$           | 8.4–10.8                 | 92,184,276                | 0.1–10                    | P, J               | 0.20                        | 23,24,25,26,27 |
| 1655–40     | $2.73 \pm 0.09$           | 6.0–6.6                  | 300,450                   | 0.1–28                    | P, J               | 0.80                        | 28,29,30,31,54 |
| 1659–487    | $> 2.0^g$                 | –                        | –                         | 0.09–7.4                  | P                  | 0.45, 1:                    | 32,33,4,13     |
| 1705–250    | $4.86 \pm 0.13$           | 5.6–8.3                  | –                         | –                         | – <sup>d</sup>     | 0.1                         | 34,35          |
| 1819.3–2525 | $3.13 \pm 0.13$           | 6.8–7.4                  | –                         | –                         | P, J               | 0.02                        | 36,37          |
| 1859+226    | $7.4 \pm 1.1$             | 7.6–12:                  | 190                       | 0.5–10                    | P, J?              | 0.2                         | 38,39,40,41    |
| 1915+105    | $9.5 \pm 3.0$             | 10.0–18.0:               | 41,67,113,168             | 0.001–10                  | P, J               | 0.5, 1:                     | 42,43,44,4,13  |
| 1956+350    | $0.244 \pm 0.005$         | 6.9–13.2                 | –                         | 0.035–12                  | P, J               | 2–5                         | 45,46,47,48,49 |
| 2000+251    | $5.01 \pm 0.12$           | 7.1–7.8                  | –                         | 2.4–2.6                   | P                  | 0.3                         | 18,50,51       |
| 2023+338    | $6.08 \pm 0.06$           | 10.1–13.4                | –                         | –                         | P                  | 0.4                         | 52,53          |

<sup>a</sup> Orosz et al. 2002b, except for 1659–487; colon denotes uncertain value.

<sup>b</sup> Radio properties: ‘P’ - persistent over 10 or more days and/or inverted spectrum; ‘J’ - relativistic jet detected.

<sup>c</sup> Maximum energy reported; colon denotes uncertain value.

<sup>d</sup> No observations made.

<sup>e</sup> Orosz, private communication.

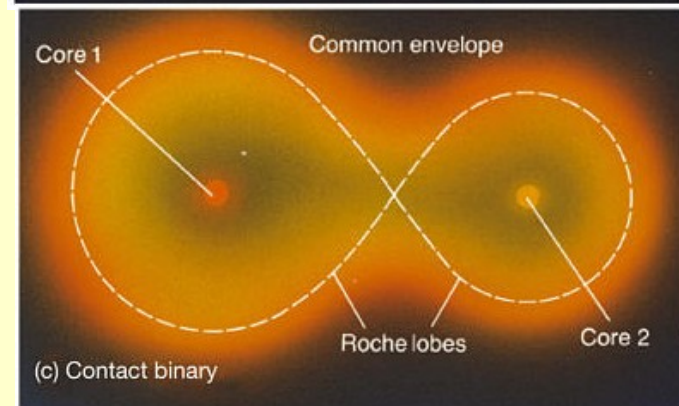
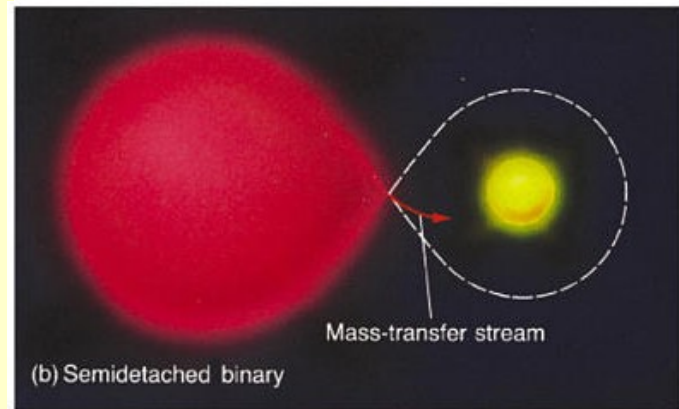
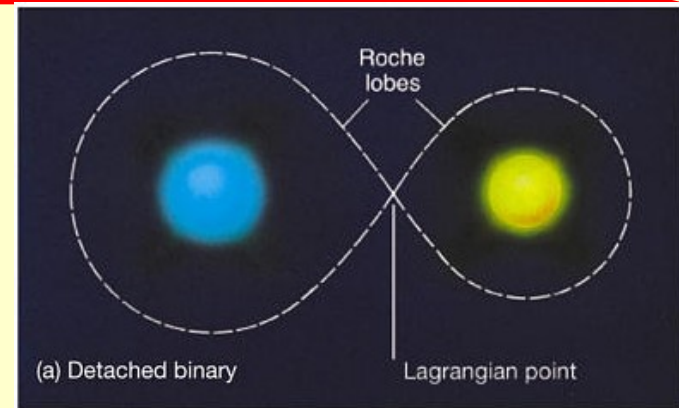
<sup>f</sup> Very faint (e.g., see IAUC 7925).

<sup>g</sup> For preferred period,  $P = 1.76$  days,  $f(M_1) = 5.8 \pm 0.5 M_\odot$ ; Hynes et al. 2003.

Quelle: McClintock & Remillard 2003

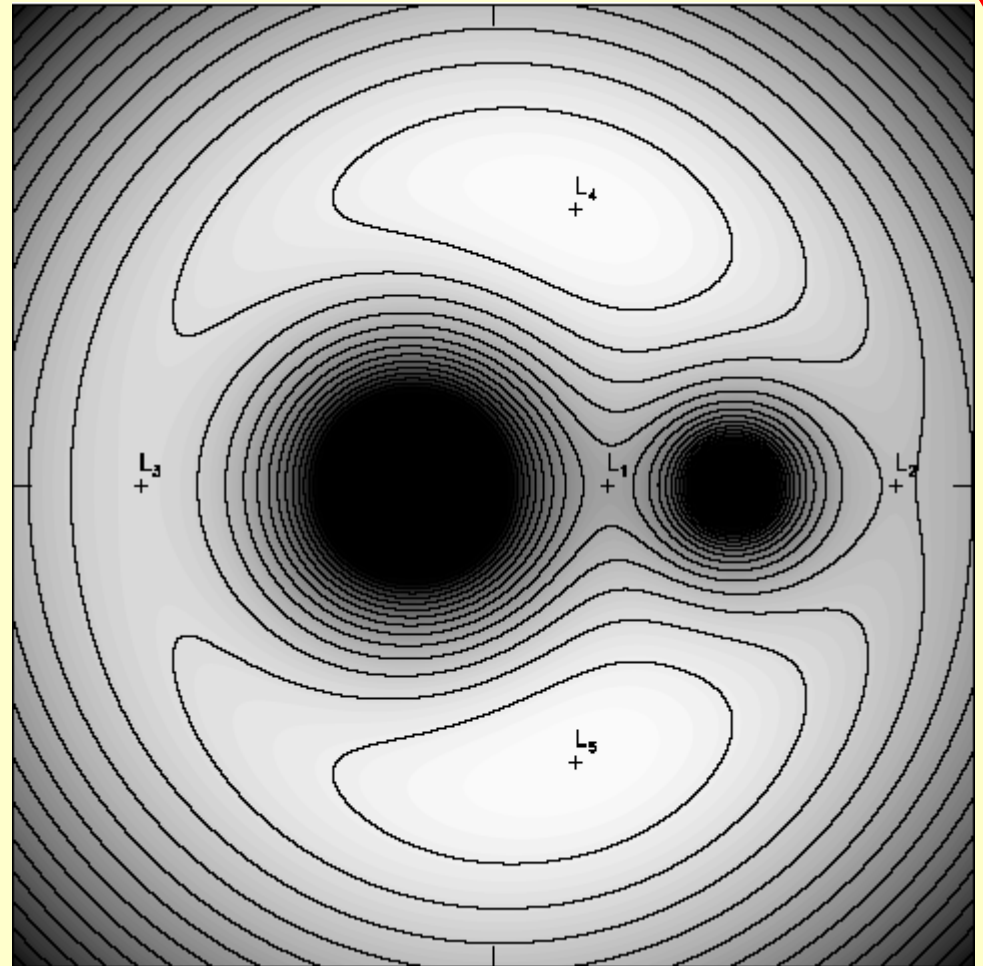
# Welches Doppelsternsystem?

- **drei Systemformen:**  
detached, semidetached, contact
- **die Art des Systems kann sich über lange Zeitperioden ändern**
- **hier semidetached: der Begleiter überschreitet sein Roche-Volumen und es kommt zum Massenaustausch**
- **die Objekte müssen ein extremes Massenverhältnis haben**
- **nur bei bestimmten Abständen der Objekte kann sich ein solches System bilden**



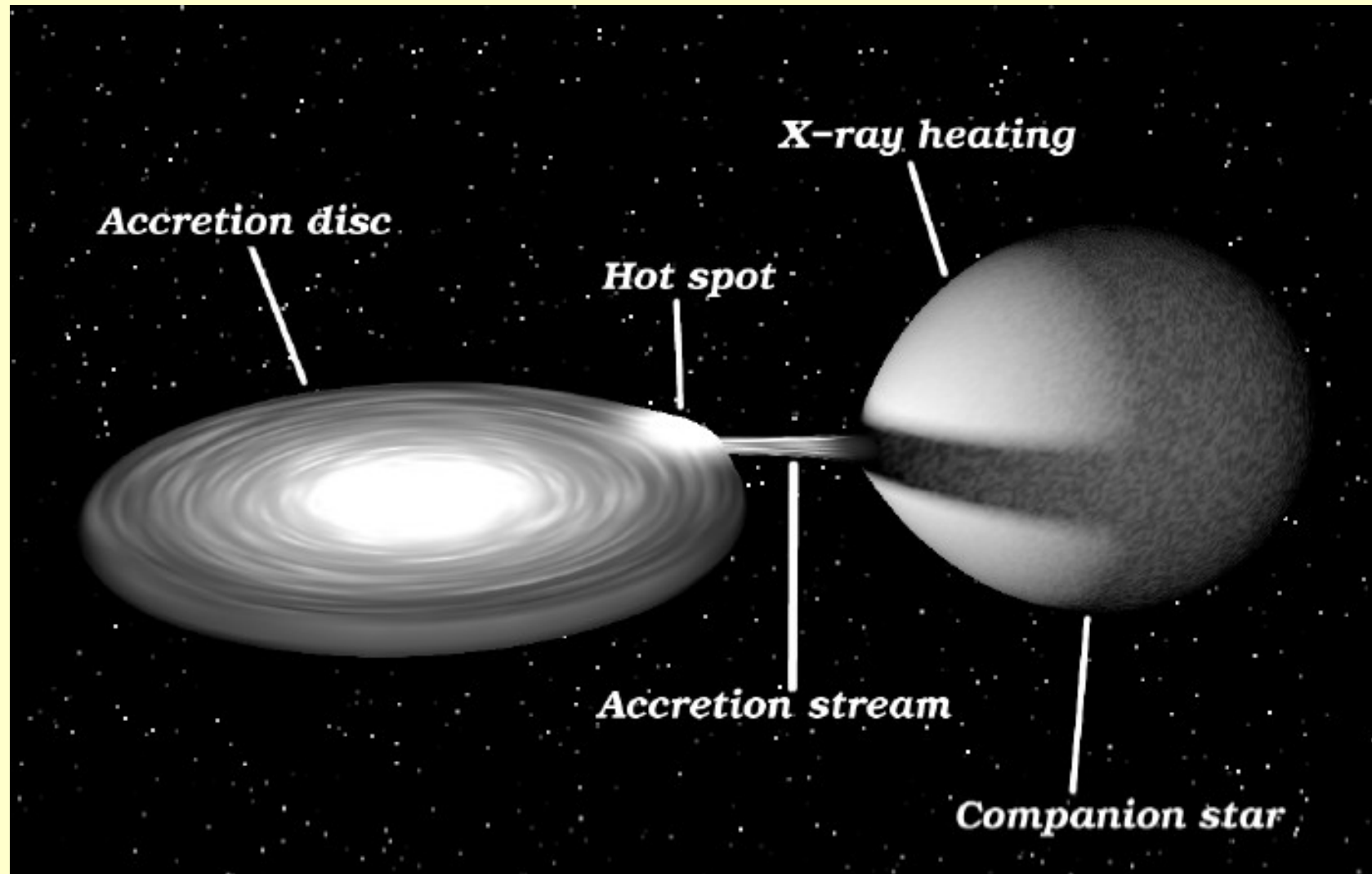
# Roche Lobe Overflow

- das Roche Potential setzt sich aus Gravitation, Zentrifugalkraft und Corioliskraft zusammen
- bei einem interaktiven Doppelsystem wird Masse über den inneren Lagrangeunkt  $L_1$  übertragen
- durch die Corioliskraft fällt das Gas nicht direkt in das kompakte Objekt, sondern es bekommt einen Drehimpuls
- durch die Viskosität formt das Gas eine Scheibe



Quelle: Hynes 1999

# LMXB im Ausbruch



Quelle: Hynes 1999

# Hilfreiche Definitionen

- Einheit „erg“:  $1 \text{ erg} = 1.6 \times 10^{-9} \text{ keV}$
- Einheit „Jansky“:  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ Hz}}$
- Definition „Leuchtkraft“ (Luminosity): Leistung die eine Quelle abgibt,  
z. B.:  $L_{\odot} = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$
- Definition „Crab“: Wenn das Spektrum einer Quelle dieselbe Form besitzt wie das des Crab Nebels, können die Spektren in Crab Einheiten verglichen werden:  
 $1 \text{ Crab} = 1.06 \text{ mJy} @ 5.2 \text{ keV} = 2.6 \times 10^{-9} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \text{ s keV}}$  (durchschnittlich über 2–11 keV)
- Definition „Potenzgesetz“ (Power-law): hier für Röntgenflussdichte  $I$  [ph/(cm<sup>2</sup> s keV)] in Abhängigkeit von der Energie  $E$ :

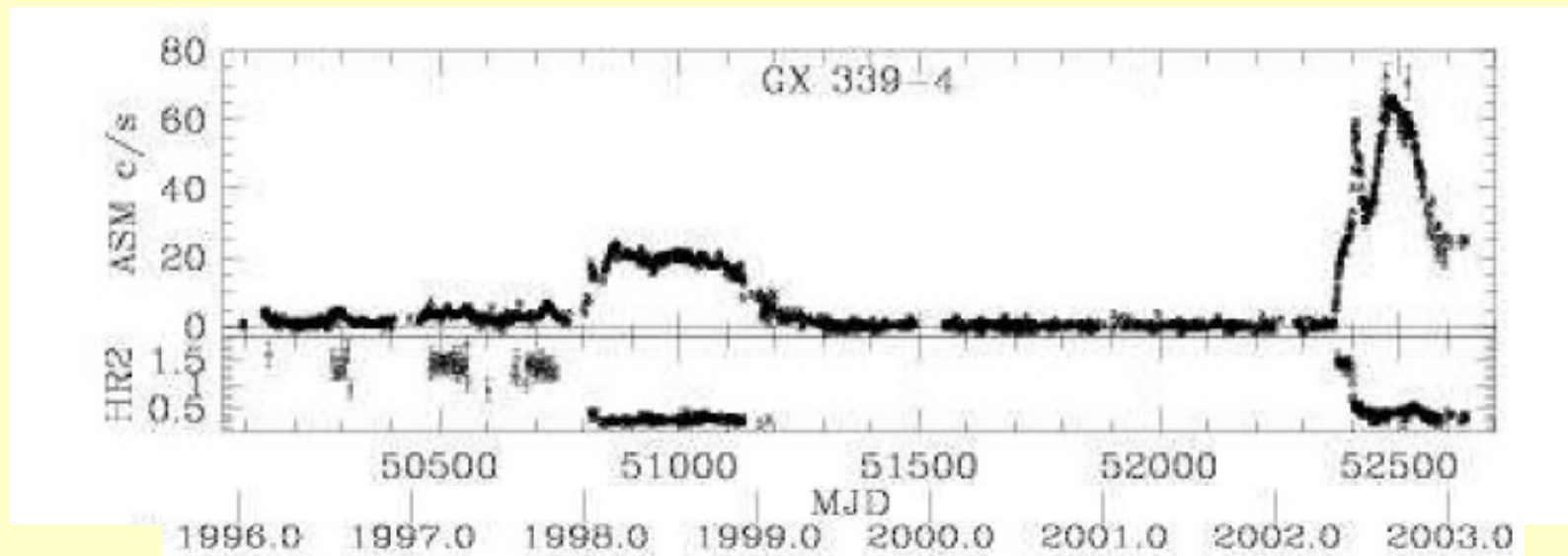
$$I(E) = A \cdot E^{-\Gamma}$$

$\Gamma$ : Photon Index;  $A$ : Normierungskonstante

# Wie zeigen sich LMXBs?

- optische Beobachtung des Begleiters und der Akkretionsscheibe
- Beobachtungen auch im Gamma- und Radiobereich
- im Röntgenbereich Unterteilung in fünf Zustände (states):
  - quiescence
  - low
  - intermediate
  - high
  - very high
- Für die Folien 15, 17 und 18:
  - 1.5 – 12 keV Aufzeichnungen vom RXTE ASM
  - 75.5 counts/s entsprechen 1 Crab
  - Härteverhältnis:  $HR2 = (5 - 12 \text{ keV}) / (3 - 5 \text{ keV})$

# Langzeitbeobachtungen



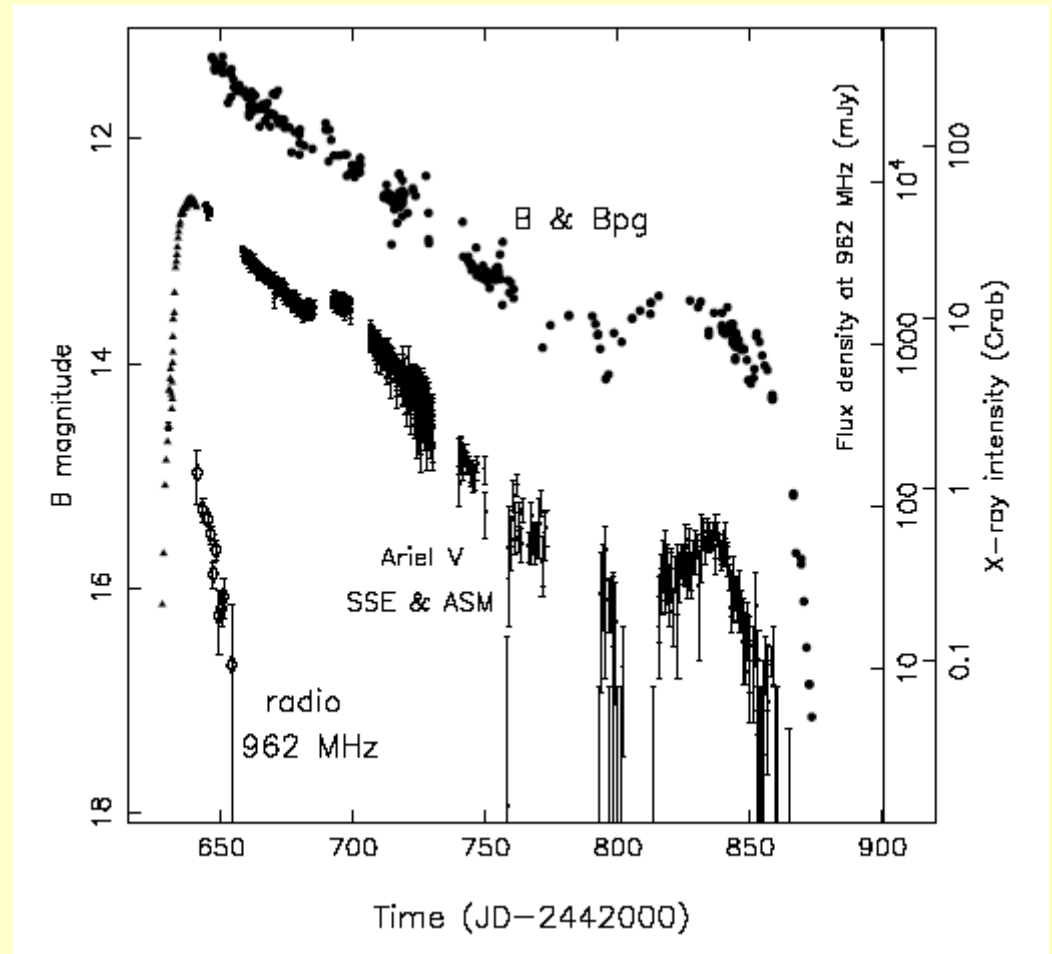
Quelle: McClintock & Remillard 2003

- im Ausbruch weiche Röntgenstrahlen, deshalb high soft state (HS);  $HR2 = 0.5$
- zwischen den Ausbrüchen Tendenz zu harten Röntgenstrahlen, deshalb low hard state (LH);  $HR2 = 1.5$
- GX 339-4 sehr aktive Quelle mit bisher 10 Ausbrüchen
- Vermutung: Ausbrüche im Durchschnitt alle 10 – 50 Jahre



# Ausbruch in mehreren Energiebereichen

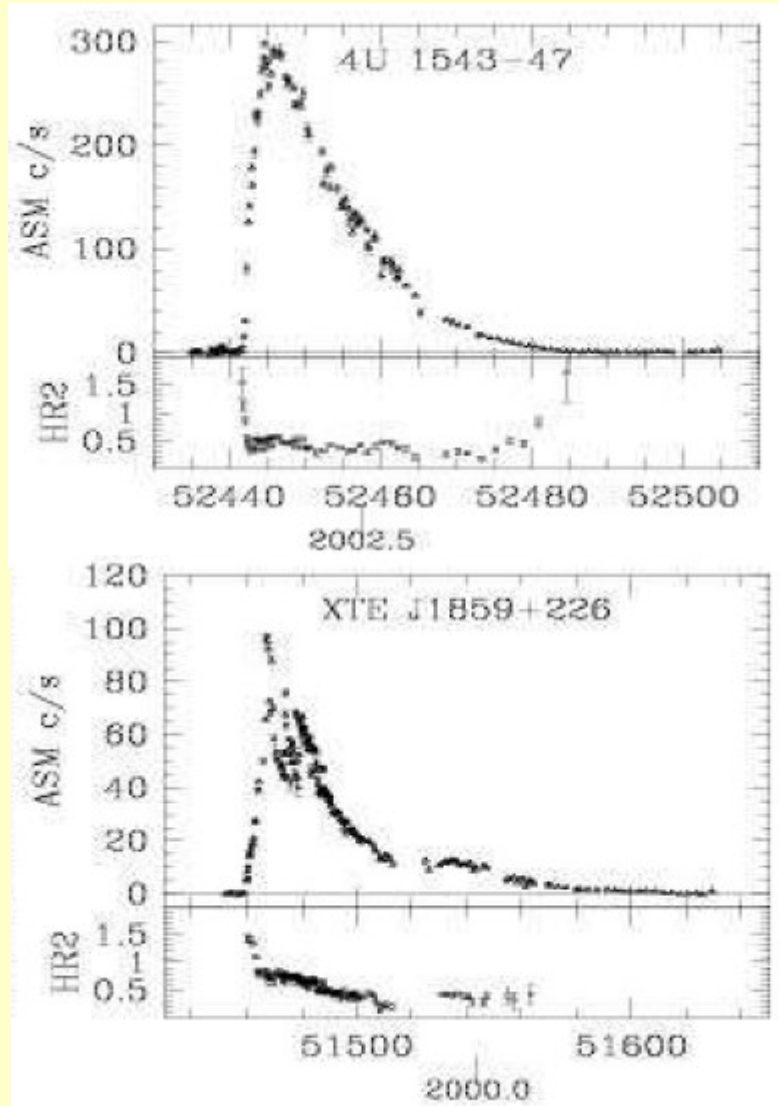
- Ausbruch von A0620-00
- X-ray Kurve steigt innerhalb weniger Tage steil an, fällt dann exponentiell ab
- im optischen Bereich wird kein Anstieg beobachtet, sondern nur ein Abfall
- Abfall im Radiobereich zu Beginn des Ausbruchs
- Unregelmäßigkeiten in der X-ray Kurve sind typisch:
  - glitch (um Tag 680)
  - bump (um Tag 830)
  - mini outbursts



Quelle: Hynes 1999



# Typische Ausbrüche I



## 4U 1543-47:

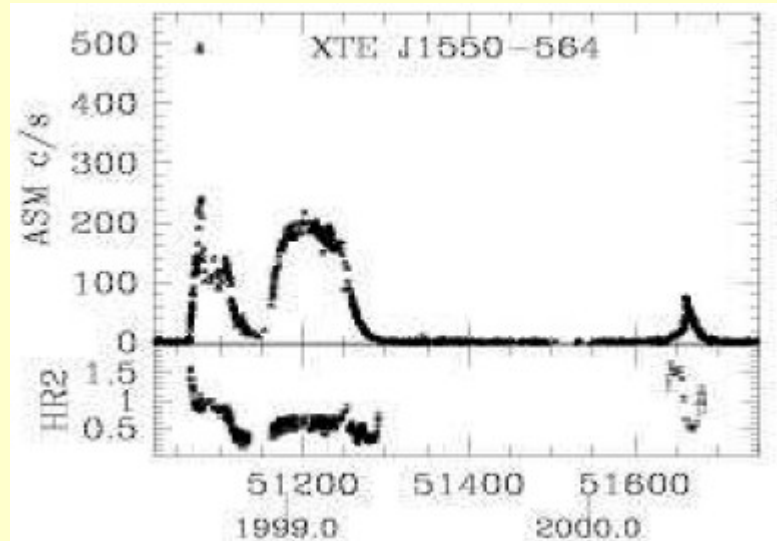
- kurzer typischer Ausbruch
- exponentielles Abfallen der Kurve innerhalb von 20 Tagen
- Wechsel von Low/Hard zu High/Soft

## XTE J1859+226:

- Abklingen dauert deutlich länger
- Schwankungen um das erste Maximum
- Zweites Maximum um Tag 51530

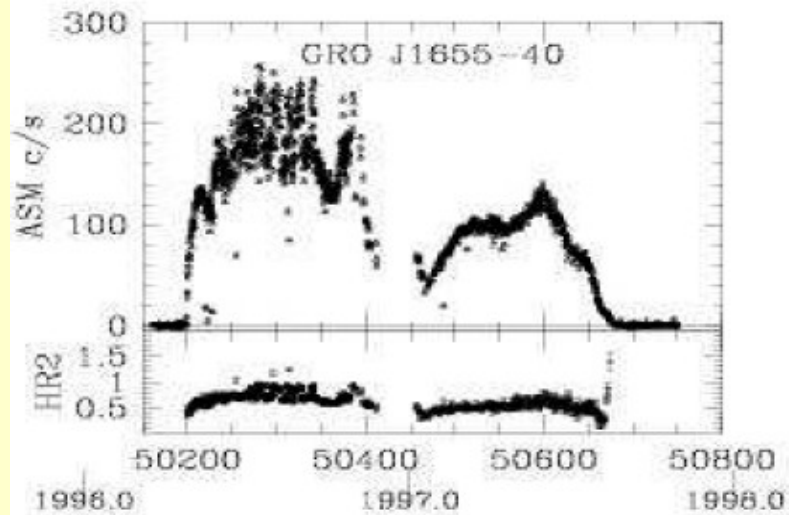
Quelle: McClintock & Remillard 2003

# Typische Ausbrüche II



## XTE J1550-564:

- 1998/1999 über mehrere hundert Tage aktiv mit zwei dominanten Ausschlägen
- Ausbruch 2000 nicht so stark, dafür aber schnelle Wechsel zwischen den X-ray states



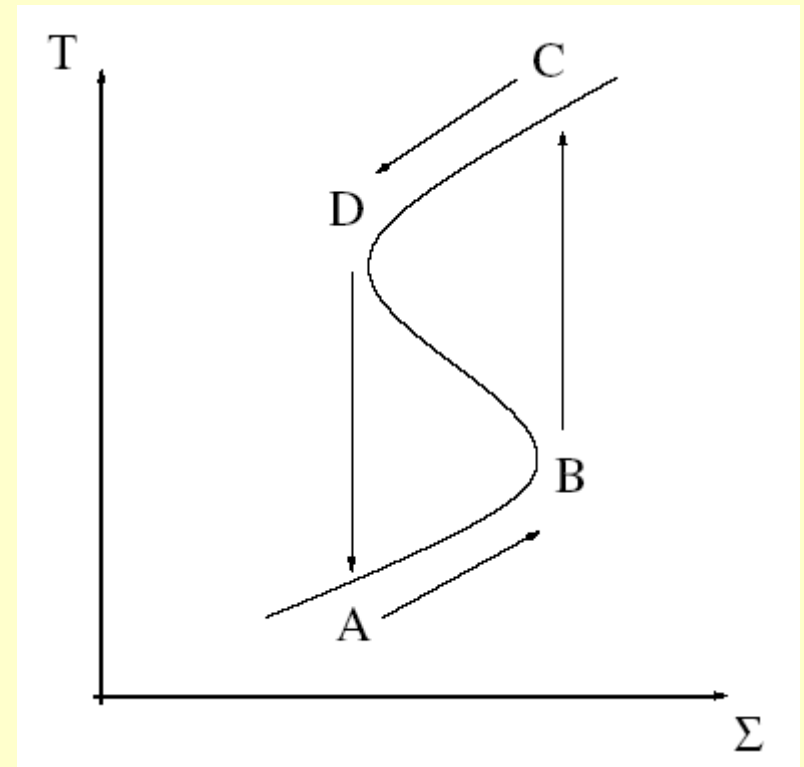
## GRO J1655-40:

- Ausbruch dauert 16 Monate
- untypische Kurve
- das Flackern zeigt den very high state

Quelle: McClintock & Remillard 2003

# Mechanismus eines Ausbruchs I

- disc instability model (DIM)
- lokale Oberflächendichte der Scheibe  $\Sigma$  über der lokalen effektiven Temperatur  $T$
- $T^4 \propto \dot{m}$  und  $\dot{\Sigma}$  entspricht  $\dot{m}$
- stabile Bereiche:  
AB: kühl; geringer Viskosität  
CD: heiß; hohe Viskosität
- BD: weder thermische noch viskose Stabilität



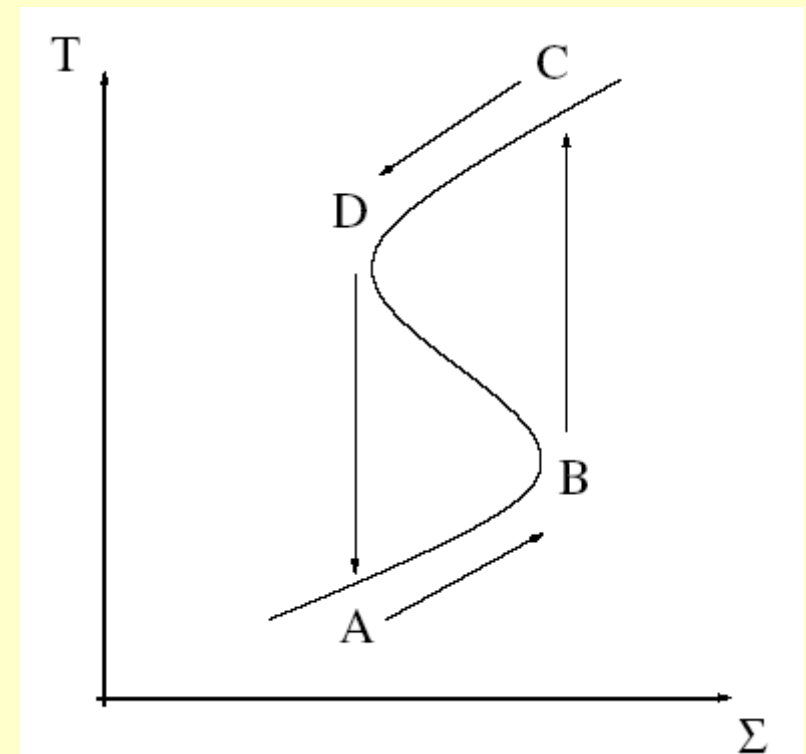
thermal-viscous limit cycle instability

Quelle: Hynes 1999

# Mechanismus eines Ausbruchs II

**Zyklus einer transienten Quelle im Detail:**

- **A  $\rightarrow$  B:** nur ein Teil des Massenstroms wird akkretiert  $\rightarrow$  Dichte und Temperatur steigen
- **bei zu hohem  $\Sigma$  erfolgt der Sprung zu C  $\rightarrow$  Ausbruch**
- **C  $\rightarrow$  D:** es wird mehr Masse akkretiert als vom Begleiter nachströmt  $\rightarrow$  Dichte und Temperatur sinken
- **bei zu niedrigem  $\Sigma$  erfolgt der Sprung zu A**
- **Anmerkung:** Es gehen nur viskose Effekte in die Betrachtung mit ein. Das Aufheizen durch Strahlung (z. B.: X-rays) bleibt unberücksichtigt.



**thermal-viscous limit cycle instability**  
Quelle: Hynes 1999

# Strahlungsmechanismen

- **inverser Compton-Effekt:**  
ein Elektron mit hoher kinetischer Energie gibt einen Teil dieser Energie an ein Photon mit niedrigerer Energie ab:

$$E_{\text{ph}} = h\nu \ll (E_e - E_{e,0}) = m_e c^2$$

- **Modell „Schwarzer Körper“ (black body):**  
Ein Körper, der elektromagnetische Strahlung komplett absorbiert (und nicht reflektiert oder durchlässt), wird „Schwarzer Körper“ genannt. In Abhängigkeit seiner Temperatur zeigt er ein bestimmtes Emissionsspektrum. Für die insgesamt abgestrahlte Energie gilt:

$$E_{\text{ges}} \propto T^4$$

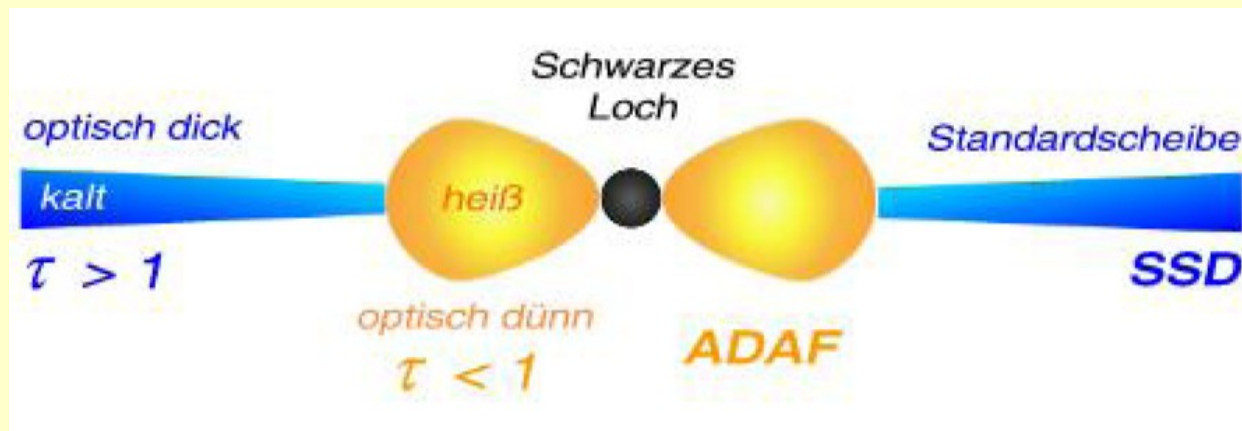
- **Bremsstrahlung:**  
elektromagnetische Strahlung, die beim Abbremsen eines schnellen Elektrons durch ein positives Teilchen ausgesendet wird

- **Definition Coulomb Kraft:**  
(kein Strahlungsmechanismus)

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

# Wie kann man das Verhalten erklären?

- Modell der „dünnen Akkretionsscheibe“ oder Multi Color Disk (MCD) zur Beschreibung des high state
- Modell „advective dominated accretion flow“ (ADAF) zur Beschreibung des quiescent state
- die Vereinigung der beiden Modelle stellt einen Grundansatz dar, um alle states erklären zu können
- Verhalten und Integration von Jets



Quelle: Müller 2005

# Modell der dünnen Scheibe I

- ein Schwarzes Loch wird definiert durch: Masse  $M$ ; Spin  $a_*$ ; Ladung  $Q$
- Gas bewegt sich auf Keplerschen Bahnen:  $\omega = \left(\frac{MG}{R^3}\right)^{\frac{1}{2}}$
- Innermost stable circular orbit (ISCO) ist die innerste stabile Kreisbahn bevor die Gravitation zu stark wird (Radius  $R_{\text{ISCO}}$ )
- Event Horizon: nichtmaterielle Hülle, die das Innere von der äußeren Raumzeit vollständig abgrenzt

|                                    | Schwarzschild                                                                     | Kerr                   |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $a_*$                              | 0                                                                                 | 1                      |
| $R_{\text{ISCO}}$                  | $6\left(\frac{MG}{c^2}\right)$                                                    | $\frac{MG}{c^2} = R_g$ |
| $R_{\text{EH}}$                    | $2\left(\frac{MG}{c^2}\right) = 30 \text{ km} \left(\frac{M}{10M_{\odot}}\right)$ | $\frac{MG}{c^2}$       |
| abgestrahlte<br>Energie<br>am ISCO | $0.057mc^2$                                                                       | $0.42mc^2$             |

# Modell der dünnen Scheibe II

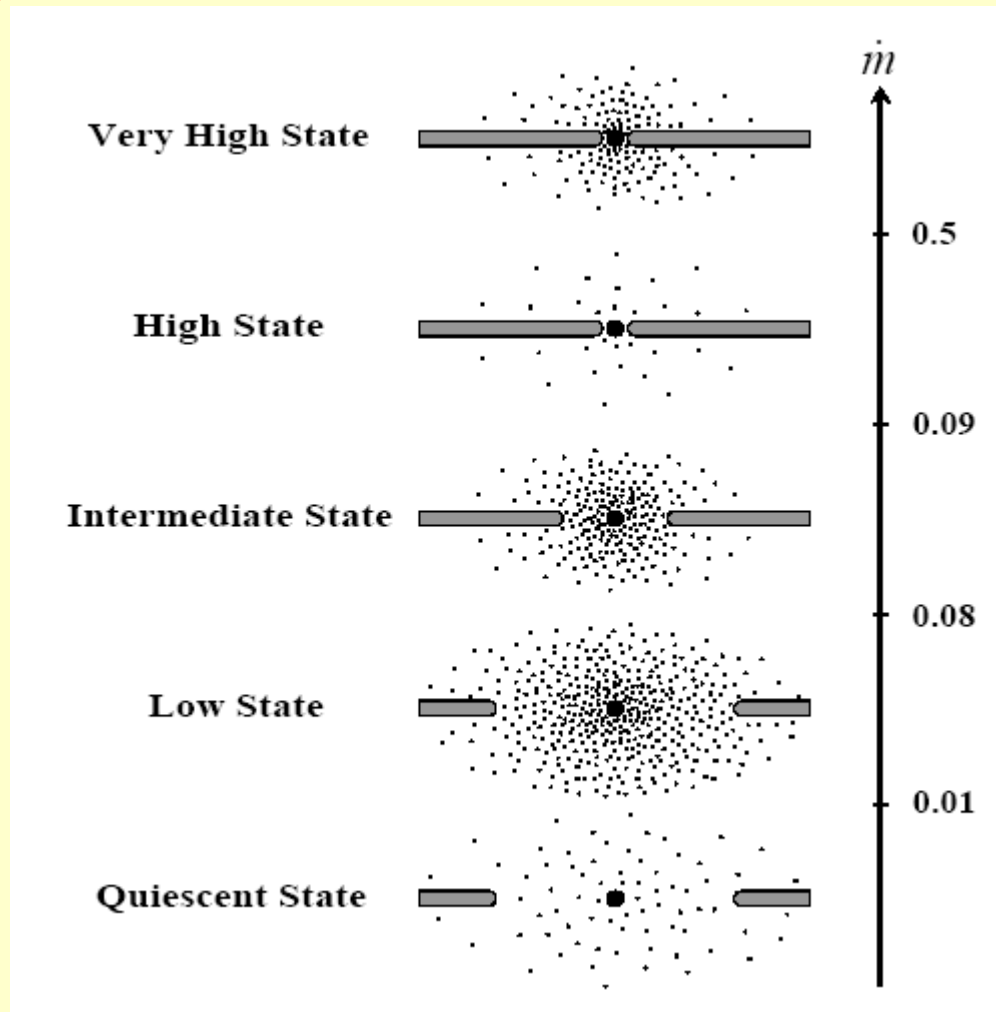
- die meiste Energie wird innerhalb  $20R_g$  abgestrahlt
- in diesem Bereich Temperaturen von  $10^7$  K
- Leuchtkraft der Scheibe:  $L_{disk} \propto \frac{\dot{M}}{2R_{inner}}$
- das Modell eignet sich um thermische Komponenten (Wärmestrahlung aus Viskoitätseffekten) zu beschreiben (HS state)
- Modell ist unter dem Namen Multicolor Disk (MCD) bekannt (kann mit Hilfe des Prinzip des Schwarzen Körpers modelliert werden)
- Ausdehnung der Scheibe für XTE J1118-480:  $\sim 10^5 R_g$
- Die Scheibe kann sich bis auf mehrere  $R_g$  dem Schwarzen Loch nähern



# ADAF

- für den quiescent und low state gibt es ein anderes Modell: advection-dominated accretion flow (ADAF)
- Medium nimmt Kugelform ein und hat eine geringe Dichte
- Temperaturen im Bereich von  $10^{10}$  K (Elektronen) bis  $10^{12}$  K (Ionen)
- es findet kaum Interaktion zwischen Ionen und Elektronen statt (dünnes Medium  $\rightarrow$  geringe Coulombkräfte)
- die meiste Energie wird nicht abgestrahlt, sondern vom Schwarzen Loch aufgenommen
- die abgegebene Strahlung besteht aus Synchrotronstrahlung oder entsteht durch den inversen Comptoneffekt
- kann über ein Potenzgesetz angenähert werden

# Vereinigung der Modelle



Quelle: McClintock & Remillard 2003

- im high state ist der  $R_{\text{ISCO}}$  erreicht und die Wärmestrahlung dominiert
- intermediate state: Scheibe schiebt sich in Richtung  $R_{\text{ISCO}}$
- steigt die Dichte weiter kondensiert das ADAF zu einer dünnen Scheibe; thermische Strahlung
- quiescent  $\rightarrow$  low: Dichte steigt; Comptonstrahlung
- Eddingtonleuchtkraft:

$$L_{\text{max}} = L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{39} \left( \frac{M}{10M_{\odot}} \right) \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

# BHB im quiescent state

- BHB verbringen die meiste Zeit im quiescent state

- die Leuchtkraft ist sehr gering:

Beispiel: A0620-00

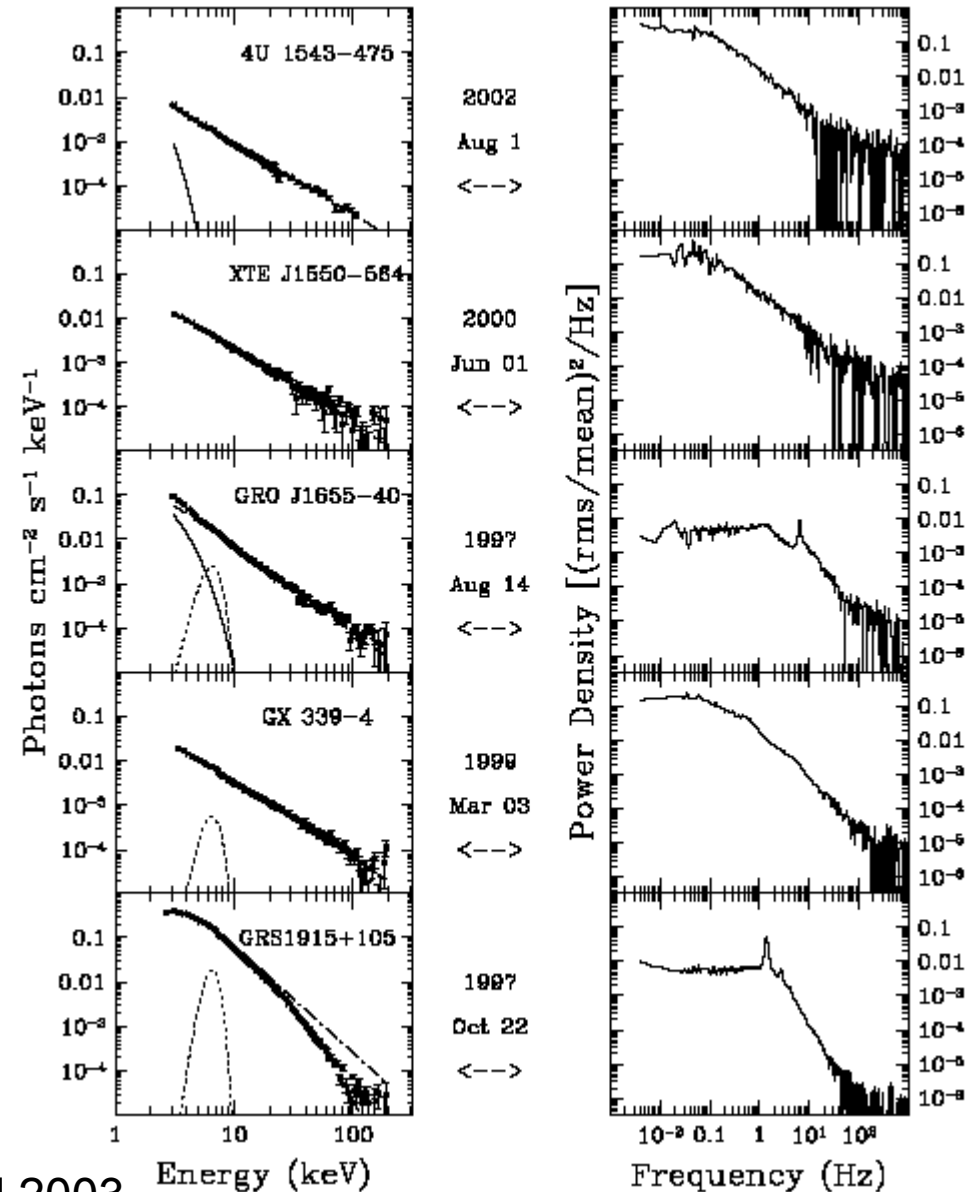
$L_x = 10^{-30} \text{ erg/s}$  das ist nur der  $\sim 10^{-8}$ -Teil der Ausbruchstärke

zum Vergleich die Eddingtonleuchtkraft:  $L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{39} \left( \frac{M}{10M_{\odot}} \right) \frac{\text{erg}}{\text{s}}$

- der innerste Radius der Scheibe ist groß
- die Leuchtkraft von LMXB mit Schwarzen Loch ist wesentlich geringer als die eines Systems mit Neutronenstern

# low/hard state

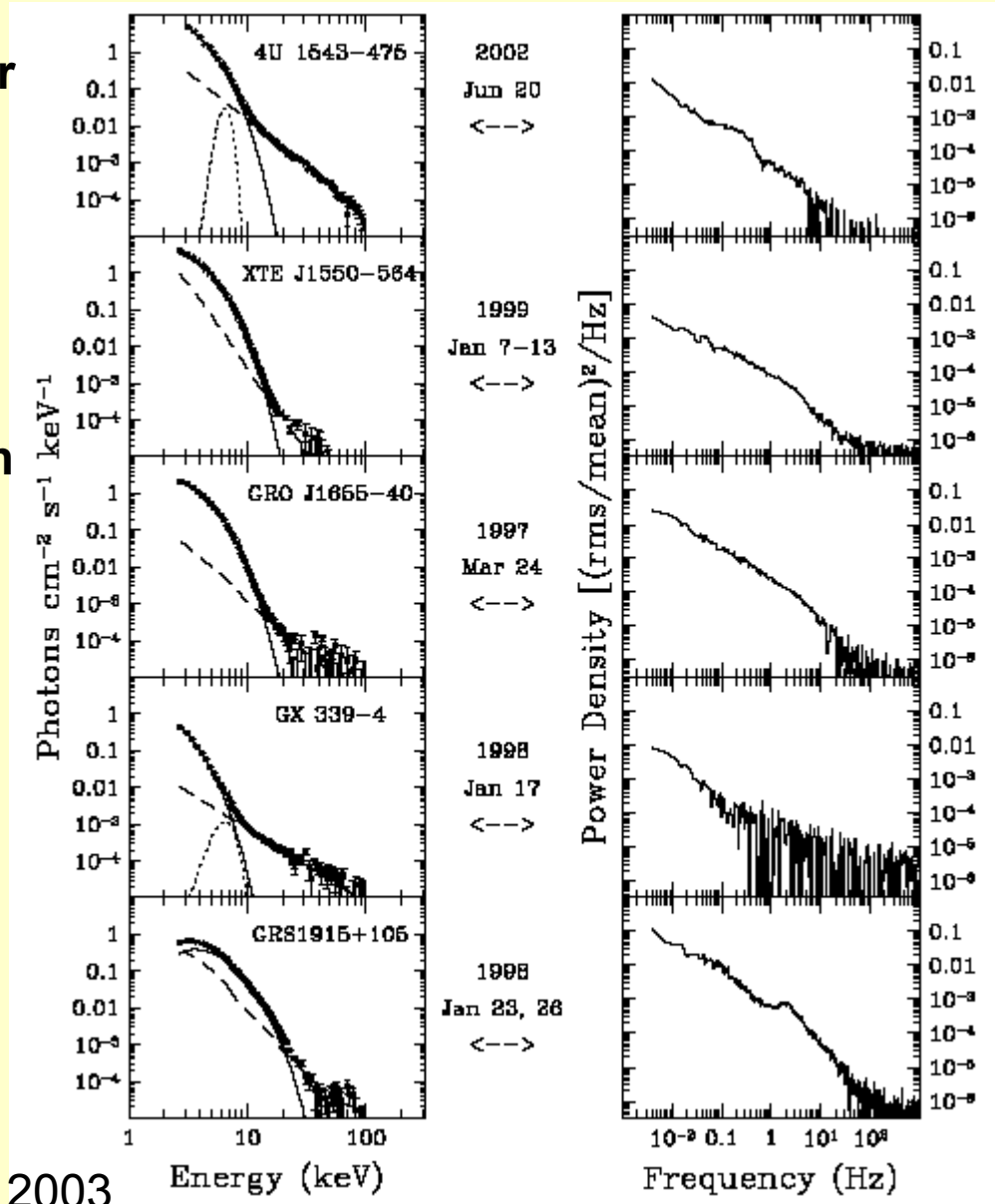
- Wärmestrahlung:  
durchgezogene Linie
- Potenzgesetz:  
gestrichelte Linie
- die Quellen sind relativ  
dunkel
- Beschreibung durch  
flaches Potenzgesetz  
( $1.5 < \Gamma < 2.1$ )



Quelle: McClintock & Remillard 2003

# high/soft state

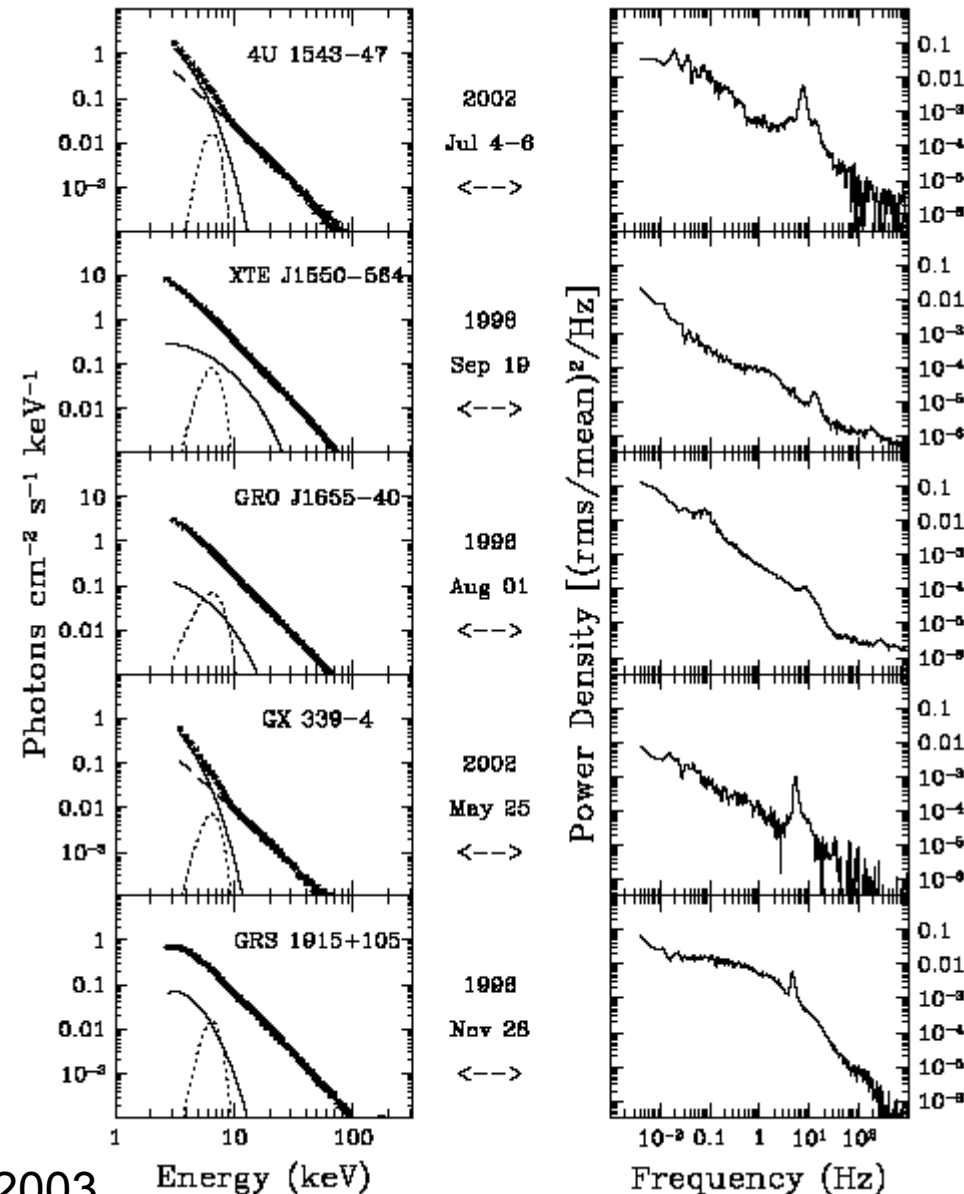
- Quellen sind wesentlich heller als im low/hard state
- im Bereich bis 10 keV ist die thermische Strahlung dominant
- das Potenzgesetz ist schwach und steil ( $\Gamma = 2.1 - 4.8$ )
- Übergang ist durch einen Knick geprägt



Quelle: McClintock & Remillard 2003

# very high state

- Leuchtkraft kann größer als  $0.2 L_{\text{edd}}$  werden, muss die des HS state jedoch nicht übersteigen
- Strahlung besteht zu 40 – 90 % nicht aus Strahlung der Scheibe
- Potenzgesetz mit  $\Gamma > 2.4$
- Quasi periodische Schwankungen (quasi periodic oscillations - QPOs) als Peaks im Power Density Spektrum



Quelle: McClintock & Remillard 2003

# QPOs

- QPOs sind charakteristische Variabilitäten in der Lichtkurve, die in etwa dieselbe Frequenz haben
- zeigen sich in den Power Density Spektren als Peaks
- im Bereich von 0.1 – 30 Hz als low frequency QPOs (LFQPOs)
  - treten im very high state auf
  - könnten den Anteil der Wärmestrahlung erklären
  - halten über mehrere Wochen (manchmal sogar über Monate) an
  - werden aus einer definierten Region ausgesendet
- im Bereich von 40 – 450 Hz als high frequency QPOs (HFQPOs)
  - häufig stehen die Frequenzen im Verhältnis von 3:2
  - Zusammenhänge mit dem Spin  $a_*$  und der Keplerfrequenz werden im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie vermutet
  - Zusammenhang von Frequenz und Masse des BH:  $\nu \propto \frac{1}{M}$
- genaueres im Vortrag über Mikroquasare

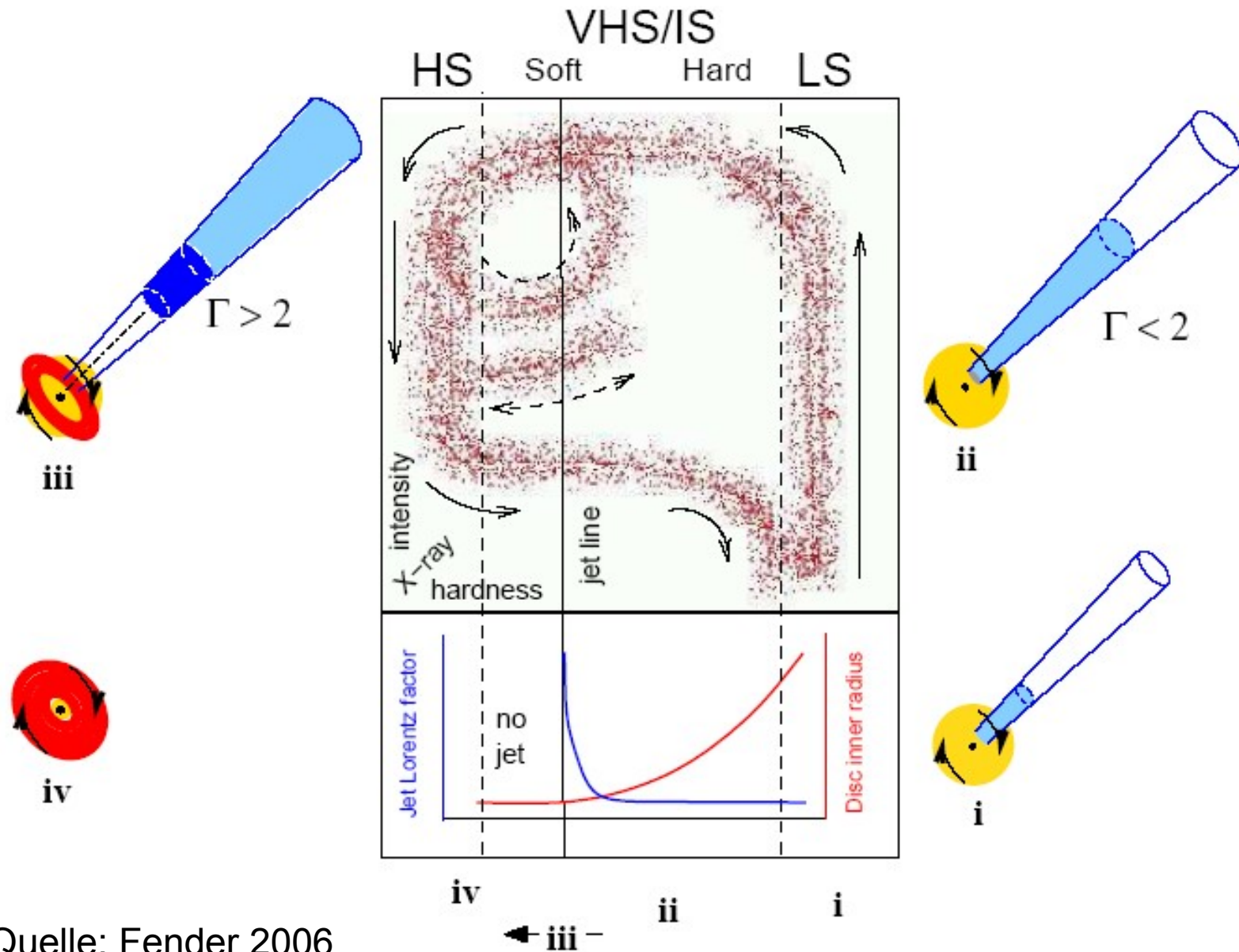
# Was sind Jets?

- Jets sind Materieströme, die in der Nähe des Schwarzen Loches austreten und sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fortbewegen können
- ihr Strahlungsspektrum liegt im Radiobereich
- Jets und Akkretion bilden eine Einheit (kein Jet ohne Akkretion)
- sie fließen als neuer Aspekt mit in die Modelle ein

- Definition „Lorentzfaktor“: 
$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$



# Verhalten von Jets I



Quelle: Fender 2006

# Verhalten von Jets II

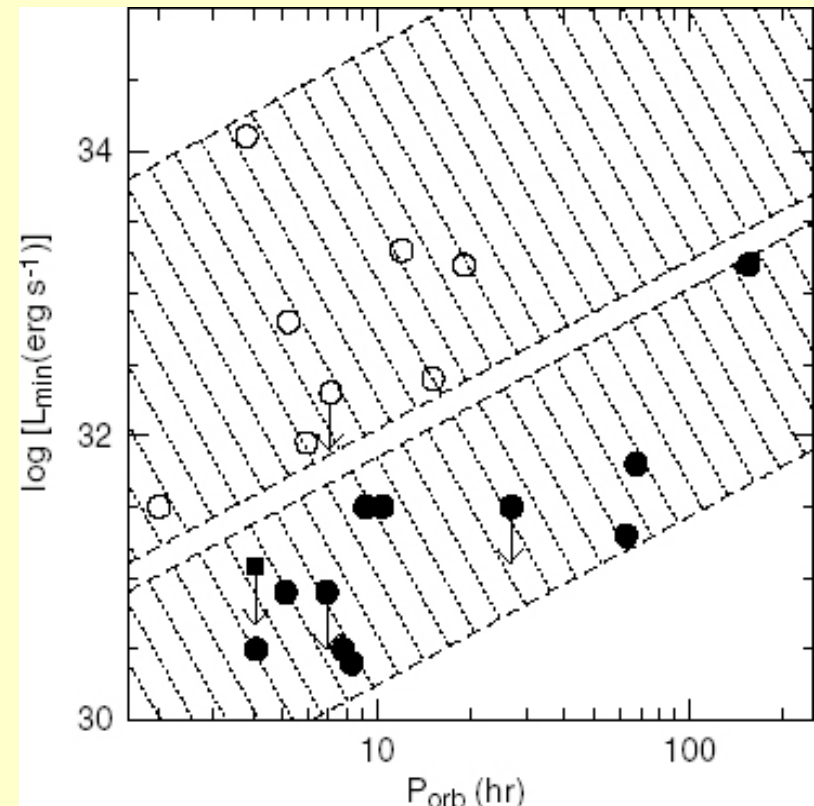
- im low/hard state (hier LS) gibt es einen permanenten Jet:  $L_{\text{Jet}} \propto L_X^{0.5}$
- wechselt das X-ray Spektrum vom low/hard state in den high/soft state (HS) erhöht der Jet zunächst Dichte und Geschwindigkeit (interner Schock)
- mit einer hohen Dichte und einer hohen Geschwindigkeit ( $\Gamma > 2$ ) trennt sich der Jet während des X-ray Ausbruchs von der Quelle ab und entfernt sich
- die Quelle bleibt ohne Jet bis sie sich wieder in einem harten Zustand angesiedelt hat

# Ereignishorizont und die Folgen

- bisher wurde davon ausgegangen, dass ein Schwarzes Loch vorliegt, wenn die Masse die Massengrenze eines Neutronensterns übersteigt
- ein weiteres Merkmal ist das Vorhandensein eines Event Horizon und dessen Folgen
- Ereignishorizont (Event Horizon): nichtmaterielle Hülle, die das Innere von der äußeren Raumzeit vollständig abgrenzt
- ein typisches Merkmal von Neutronensternen sind X-ray I bursts, diese sind aber bei Schwarzen Löchern nie beobachtet worden
- Definition „X-ray I burst“: Akkretierendes Gas sammelt sich auf der Oberfläche (eines Neutronensterns) und wird dichter und heißer bis es durch thermonukleare Reaktionen „gezündet“ wird.
- Magnetfelder von Schwarzen Löchern sind nicht verankert. Deshalb lassen sich bei Schwarzen Löchern keine periodischen Röntgenimpulse wie bei Neutronensternen beobachten.

# Event Horizon und Leuchtkraft

- falls ein System einen Event Horizon besitzt, so ist es dunkler als ein System ohne Event Horizon und sonst gleichen Eigenschaften
- Abbildung zeigt Beobachtungen der minimalen Leuchtkraft (quiescent state)
- Systeme mit NS sind bis zu 1000 mal heller als Systeme mit BH, da Wärmestrahlung von der Oberfläche des NS abgegeben werden kann, während der Event Horizon diese schluckt (vgl. ADAF)



Quelle: Narayan 2005

# Zusammenfassung

- Grundlage zur Beschreibung des Verhaltens von LMXB ist die Akkretion
- durch das Verstehen der Akkretionsprozesse können Modelle zur Beschreibung der Röntgenspektren erstellt werden
- Eigenschaften wie QPOs, Radiojets und Ereignishorizont erweitern als aktueller Gegenstand der Forschung das Verständnis
- Fazit: Für ein vollständiges Verständnis von LMXB gibt es noch einiges zu tun...

# Quellenangaben

Begelman, M.; Rees, M., Schwarze Löcher im Kosmos, ISBN 3-8274-1044-4

Fender et al., 2006, Kluver Academic Publishers, astro-ph/0506469

Hynes, R. I., 1999, Observations of Low Mass X-ray Transients in Outburst

Hynes, R. I., 2001, <http://www.phys.lsu.edu/~rih/> [Stand 22.8.2006]

McClintock, J. E.; Remillard, R. A., 2003, astro-ph/0306213

Müller 2005, <http://www.mpe.mpg.de/~amueller/> [Stand 22.8.2006]

Narayan, R., 2005, New Journal Physics **7** 199

NASA: <http://imagine.gsfc.nasa.gov/Images/basic/gamma/> [Stand 22.8.2006]