

7. Transiente, massearme Röntgendoppelsterne

- Terminologie
- Systemparameter
- Stabilität der Scheibenakkretion in LMXBs
- Beobachtungen von soft X-ray transients
 - Eigenschaften der Ausbrüche
 - Vergleich mit Zwernovaausbrüchen
- Theoretische Überlegungen
 - Ausbrüche der SXTs im Lichte des Standard DIM
 - Der Innenrand der Scheibe während des Minimums
 - Soft X-ray transients im Ausbruch
- Ergebnisse numerischer Rechnungen

Vorlesung SS 2007: Akkretionsphänomene in kompakten Doppelsternen

Weiterführende Literatur zu den transienten, massearmen Röntgendoppelsternen

- Campana, S., Colpi, M., Mereghetti, S., Stella, L., Tavani, M.: *The neutron stars of Soft X-ray Transients*, 1998, A&AR 8, 279
- Chen, W., Shrader, C.R., Livio, M.: *The properties of X-ray and optical light curves of X-ray novae*, 1997, ApJ 491, 312
- Dubus, G., Hameury, J.-M., Lasota, J.-P.: *The disc instability model for X-ray transients: evidence for truncation and irradiation*, 2001, A&A 373, 251
- King, A.R., Ritter, H.: *The light curves of soft X-ray transients*, 1998, MNRAS 293, L42
- King, A.R.: *Outbursts of irradiated accretion discs*, 1998, MNRAS 296, L45
- Lasota, J.-P.: *The disc instability model of dwarf-novae and low-mass X-ray binary transients*, 2001, New Astron. Rev. 45, 449
- Menou, K., Narayan, R., Lasota, J.-P.: *A population of faint nontransient low-mass black hole binaries*, 1999, ApJ 513, 811
- Menou, K., Esin, A.A., Narayan, R., Garcia, M.R., Lasota, J.-P., McClintock, J.E.: *Black hole and neutron star transients in quiescence*, 1999, ApJ 520, 276
- Meyer-Hofmeister, E., Meyer, F.: *Black hole soft X-ray transients: evolution of the cool disk and mass supply for the ADAF*, 1999, A&A 348, 154
- Meyer-Hofmeister, E., Meyer, F.: *A limit for the mass transfer rate in soft X-ray transients*, 2000, A&A 355, 1073
- Meyer, F., Liu, B.F., Meyer-Hofmeister, E.: *Evaporation: The change from accretion via a thin disk to a coronal flow*, 2000, A&A 361, 175
- Meyer-Hofmeister, E., Meyer, F.: *Black hole X-ray transients: Mass accumulation in the disk - constraints for the viscosity*, 2001, A&A 372, 508
- van Paradijs, J.: *On the accretion instability in soft X-ray transients*, 1996, ApJ 464, L139

Transiente, massearme Röntgendoppelsterne

- Hier: Beschränkung auf massearme Röntgendoppelsterne, deren transiente Natur vermutlich auf Scheibeninstabilitäten zurückzuführen ist. (Also keine Be-Stern X-ray transients).

Terminologie

transient = mit Ausbrüchen, jeweils gefolgt von langen Ruhezeiten, etwa wie Novae (aber nicht mit diesen zu verwechseln)

LMXBs $\left\{ \begin{array}{l} \text{mit einem Schwarzen Loch} = \text{BHLMXBs} \\ \text{mit einem Neutronenstern} = \text{NSLMXBs} \end{array} \right.$

in der Literatur finden sich auch folgende, nicht völlig äquivalente Bezeichnungen:

- X-ray novae, wegen gewisser Ähnlichkeiten mit den Novae
- soft X-ray transients (SXTs), wegen des "weichen" Röntgenspektrums im Ausbruch.

1. Beobachtungen

- Unter den LMXBs \exists transiente und persistente (= andauernd etwa gleich helle) Systeme. Wenn die transienten Systeme wegen Scheibeninstabilitäten transient sind, dann muss es eine kritische Massentransferrate \dot{M}_{crit} geben, so dass wenn

$\dot{M}_{\text{tr}} > \dot{M}_{\text{crit}} \longrightarrow$ persistentes System

$\dot{M}_{\text{tr}} < \dot{M}_{\text{crit}} \longrightarrow$ transientes System

(völlig analog zu den Zwergnovae und den UX UMa-Systemen bei den Kataklysmischen Variablen).

- Stimmt das mit den Beobachtungen überein ?

Müssen hierzu \dot{M}_{crit} bestimmen und dabei auch den Einfluss der Bestrahlung berücksichtigen!

Observed binary parameters of low-mass X-ray transients

(updated July 2001)

| Object | Type | P (d) | spectral type | K_2 (km/s) | $f(M_1)$ M_\odot | i (deg.) | M_1 (M_\odot) | M_2 (M_\odot) |
|------------|---------|------------|------------------|-----------------|-----------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| J1744-2844 | NSLMBXB | 11.8367 | | | | | | |
| V404 Cyg | BHLMXB | 6.4714 | K0III-V | 208.5 ± 0.7 | 6.08 ± 0.06 | 56 ± 4 | 10-15 | 0.5-1.0 |
| QX Nor | NSLMBXB | 4.1 : | | | | | | |
| V4641 Sgr | BHIMXB | 2.81730 | B9III | 211.0 ± 3.1 | 2.74 ± 0.12 | 65 ± 5 | 8.7-11.7 | 5.5-8.1 |
| V1033 Sco | BHLMXB | 2.6219 | F6III | 215.5 ± 2.4 | 2.73 ± 0.09 | 70.2 ± 1.9 | 6.3 ± 0.5 | 2.4 ± 0.4 |
| IL Lup | BHLMXB | 1.123 | A2V | 124 ± 4 | 0.22 ± 0.02 | ≲ 40 | 5.2 ± 2.3 | 2.45 ± 0.15 |
| V1333 Aql | NSLMBXB | 0.78950 | K7V | | | | | |
| V822 Cen | NSLMBXB | 0.629063 | K5V | 146 ± 12 | 0.20 ± 0.05 | | | |
| V2107 Oph | BHLMXB | 0.523 | K5V | 441 ± 6 | 4.65 ± 0.21 | ~ 70 | 6.4 - 6.9 | 0.3 - 0.6 |
| J1750-3116 | NSLMBXB | 0.5150 | | | | | | |
| GU Mus | BHLMXB | 0.4333 | K3-4V | 399.3 ± 8.0 | 2.86 ± 0.07 | 54.0 ± 1.5 | 6.95 ± 0.60 | 0.75 ± 0.05 |
| J1859+2239 | BHLMXB | 0.382 | G5 | 570 ± 27 | 7.4 ± 1.1 | | | |
| QZ Vul | BHLMXB | 0.344092 | K3-6V | 519.9 ± 5.1 | 5.01 ± 0.12 | 65 ± 9 | 8.5 ± 1.5 | 0.26 - 0.59 |
| V616 Mon | BHLMXB | 0.323014 | K3V | 443 ± 4 | 2.91 ± 0.08 | 62 - 76 | 3.3 - 4.2 | 0.15 - 0.38 |
| MM Vel | BHLMXB | 0.285206 | K7-M0V | 475.4 ± 5.9 | 3.17 ± 0.12 | ~ 78 | 3.64 - 4.74 | 0.50 - 0.65 |
| LZ Aqr | NSLMBXB | 0.248236 | K7-8V | 287 ± 12 | 0.61 ± 0.03 | 73 ± 4 | 1.55 ± 0.31 | 0.76 ± 0.22 |
| V1727 Cyg | NSLMBXB | 0.218259 | F7V | | | | | |
| V518 Per | BHLMXB | 0.212160 | M4-5V | 378 ± 16 | 1.19 ± 0.02 | ≲ 45 | ≳ 4.2 | ≳ 0.46 |
| J1118+4802 | BHLMXB | 0.169930 | K7V-M0V | 701 ± 10 | 6.1 ± 0.3 | 81 ± 2 | 6.0 - 7.7 | 0.09 - 0.5 |
| UY Vol | NSLMBXB | 0.159338 | | | | | | |
| V4580 Sgr | NSLMBXB | 0.083902 | | | | | | |

a) Bestrahlte Akkretionsscheiben

► Effekt der Bestrahlung: $T_{\text{eff}} \uparrow$, $T_{\text{eff}}^4 = T_{\text{visc}}^4 + T_{\text{irr}}^4$, wobei

$$T_{\text{visc}}^4 = \frac{3GM_1 \dot{M}(r)}{8\pi\sigma r^3} \quad \rightarrow T_{\text{visc}} \sim r^{-3/4}$$

$$T_{\text{irr}}^4 = \frac{\eta \dot{M}(R_i) c^2 (1-\beta)}{4\pi\sigma r^2} \left(\frac{H}{r}\right)^n \left(\frac{d\ln H}{d\ln r} - 1\right) \quad \rightarrow T_{\text{irr}} \sim r^{-1/2}$$

$$\eta = \frac{L_{\text{accr}}}{\dot{M}(R_i) c^2} = \text{Effizienz der Energieerzeugung durch Akkretion}$$

$\dot{M}(R_i) = \dot{M}_c =$ Akkretionsrate am Innenrand ($r=R_i$) der Scheibe

$\beta =$ Albedo (Rückstrahlvermögen) für Röntgenstrahlung

$$n = \begin{cases} 1, & \text{für NS und WZ, } \frac{d\ln H}{d\ln R} = \frac{45}{38} \quad (\text{Punktquelle im Zentrum}) \\ 2, & \text{für BH, } \frac{d\ln H}{d\ln r} = \frac{43}{36} \quad (\text{innere Scheibe als Quelle}) \end{cases}$$

- 1) \exists Verschiebung der Abstrahlung zu grösseren Wellenlängen (Röntgen \rightarrow visuelles Licht). \rightarrow höhere Helligkeit der Scheibe im Visuellen für geg. \dot{M} und M_1/R_1 .
- 2) Veränderung der vertikalen Struktur der Scheibe durch geringeren Temperaturgradienten und höheres $T_{\text{eff}} \rightarrow$ verändertes H/r und $f(\Sigma)$.
- 3) Da $T_{\text{visc}} \sim r^{-3/4}$, aber $T_{\text{irr}} \sim r^{-1/2} \rightarrow$ Bestrahlung wird nach aussen immer wichtiger und kann dadurch Teile der Scheibe heiss, d.h. den Wasserstoff ionisiert halten ($T_{\text{eff}} > T_H \approx 6500\text{K}$), die ohne Bestrahlung kalt wären.
- Systeme können mit Bestrahlung persistent sein, die ohne Bestrahlung transient wären (van Paradijs 1996)
- Im Ausbruch kann Bestrahlung das Loslaufen der Kühlungsfront verhindern/verzögern. Dadurch entscheidender Einfluss auf den Verlauf der Ausbrüche! (King & Ritter 1998).

b) Kritische Massentransferraten

- bei viskoser Heizung der Scheibe:

$$T_{\text{visc}}(\dot{M}_{\text{crit}}, R_d) = T_H \approx 6500 \text{ K}$$

$$\rightarrow \dot{M}_{\text{crit}} = \frac{8\pi \delta T_H^4 R_d^3}{3GM_1} \quad (1)$$

- bei reiner Bestrahlung:

$$T_{\text{irr}}(\dot{M}_{\text{crit}}, R_d) = T_H \approx 6500 \text{ K}$$

$$\rightarrow \dot{M}_{\text{crit}} = \frac{4\pi \delta T_H^4}{\eta c^2 (1-\beta)} \left(\frac{H}{r}\right)^{-n} \left(\frac{d \ln H}{d \ln r} - 1\right)^{-1} R_d^2 \quad (2)$$

► Ersetzen R_d in (1) und (2) mit Hilfe des 3. Kepl. Gesetzes und Roche-Geometrie durch P_{orb} und M_2 :

$$\rightarrow \dot{M}_{\text{crit}} = \frac{16\delta T_H^4}{243\pi} \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{0.35} \left(\frac{R_d}{R_{1,R}}\right)^3 P_{\text{orb}}^2 \quad (1')$$

$$\approx 1.5 \cdot 10^{-10} \frac{M_\odot}{a} \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{0.35} \left(\frac{R_d/R_{1,R}}{0.7}\right)^3 P_{\text{orb}}^2 (h) \quad (1'')$$

$$\rightarrow \dot{M}_{\text{crit}} = \frac{4\pi \delta T_H^4}{\eta c^2 (1-\beta)} \left(\frac{2G}{81\pi^2}\right)^{2/3} \left(\frac{H}{r}\right)^{-n} \left(\frac{d \ln H}{d \ln r} - 1\right)^{-1} M_1^{9/10} M_2^{-7/30} \left(\frac{R_d}{R_{1,R}}\right)^2 P_{\text{orb}}^{4/3} \quad (2')$$

Mit $\eta = 0.15$ (NS), bzw. $\eta = 0.1$ (BH), $\beta = 0.9$, $\frac{H}{r} \approx 0.2$ folgt:

$$\dot{M}_{\text{crit}} \approx 5 \cdot 10^{-12} \frac{M_\odot}{a} \left(\frac{R_d/R_{1,R}}{0.7}\right)^2 \left(\frac{M_1}{M_\odot}\right)^{9/10} \left(\frac{M_2}{M_\odot}\right)^{-7/30} P_{\text{orb}}^{4/3} (h) \quad \text{für } n=1 \text{ (NS),} \quad (2'')$$

$$\approx 4 \cdot 10^{-11} \frac{M_\odot}{a} \left(\frac{R_d/R_{1,R}}{0.7}\right)^2 \left(\frac{M_1}{M_\odot}\right)^{9/10} \left(\frac{M_2}{M_\odot}\right)^{-7/30} P_{\text{orb}}^{4/3} (h) \quad \text{für } n=2 \text{ (BH).}$$

c) Vergleich mit Beobachtungen (van Paradijs, J.: 1996, ApJ 464, L139)

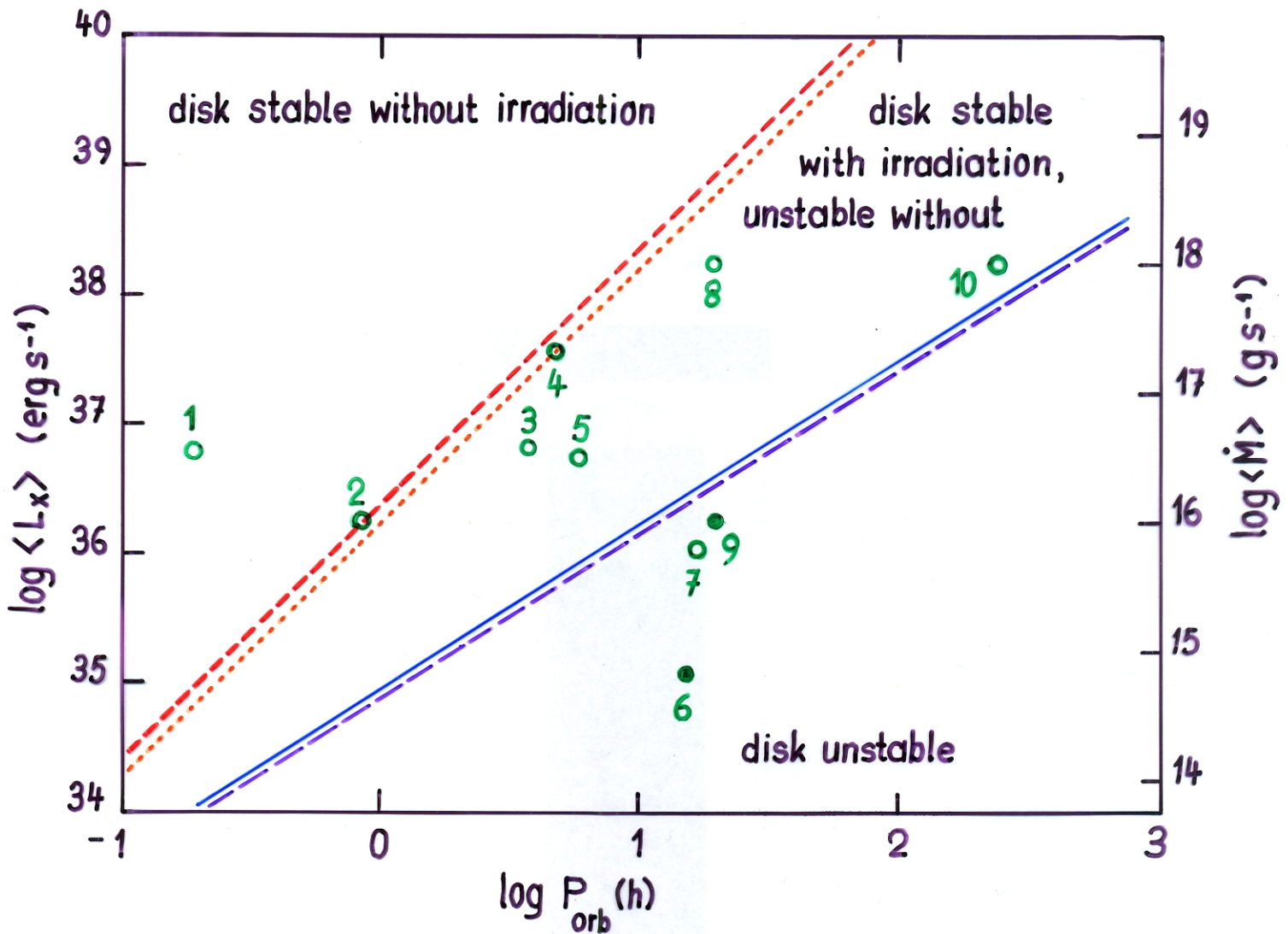
► Ergebnis: → Figuren

BHLMXBs müssten alle transient sein, auch mit Bestrahlung ✓

NSLMXBs: einige Systeme nur dank der Bestrahlung persistent ✓

→ Bestrahlung ist wichtig für die Stabilität der LMXBs!

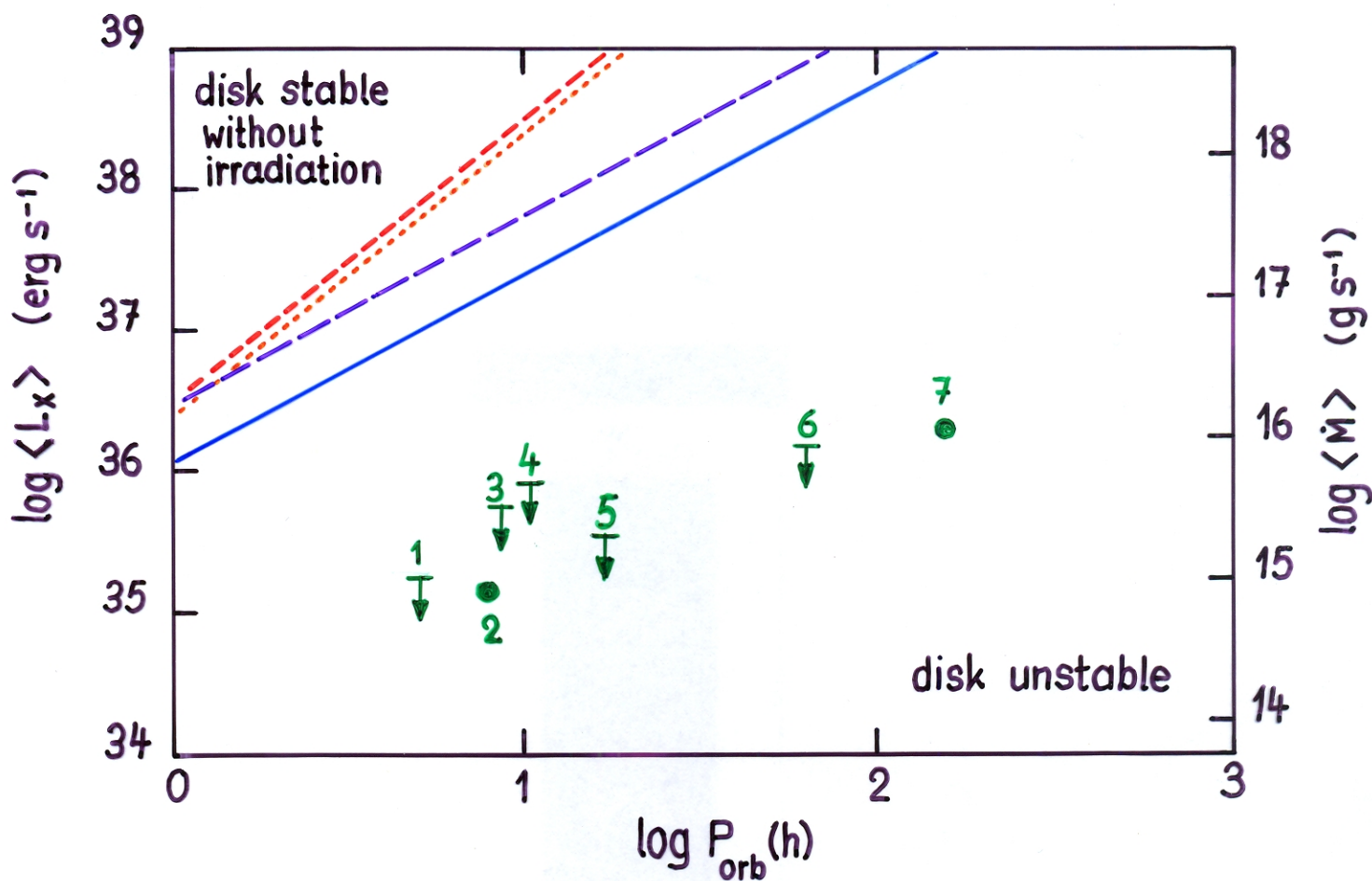
Stability of accretion disks in NS LMXBs: Theory vs. observations



Identifications

| | | | | | |
|---|-----------|---|-----------|----|-----------|
| 1 | 1820-3023 | 5 | 1746-3702 | 9 | V1333 Aql |
| 2 | V1405 Aql | 6 | V822 Cen | 10 | V1341 Cyg |
| 3 | V801 Ara | 7 | AC 211 | | |
| 4 | V926 Sco | 8 | V818 Sco | | |

Stability of accretion disks in BH LMXBs: Theory vs. observations



$$\begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \left. \begin{array}{l} M_1 = 3M_{\odot}, M_2 = 1M_{\odot} \\ M_1 = 10M_{\odot}, M_2 = 2M_{\odot} \end{array} \right\} \begin{array}{l} n = 2, \eta = 0.2, \beta = 0.9, \\ \frac{H}{R} = 0.2, \frac{d \ln H}{d \ln R} = \frac{43}{36} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \left. \begin{array}{l} M_1/M_2 = 5 \\ M_1/M_2 = 3 \end{array} \right\} \text{neglecting irradiation}$$

● transient system
 ↓ transient system, upper limit

data from: van Paradijs, J.: 1996, ApJ 464, L139

Identifications

| | | | |
|---|----------|---|-----------|
| 1 | V518 Per | 5 | V2107 Oph |
| 2 | V616 Mon | 6 | V1033 Sco |
| 3 | QZ Vul | 7 | V404 Cyg |
| 4 | GU Mus | | |

d) Beobachtungen von SXTs

► Der Ausbruchszyklus

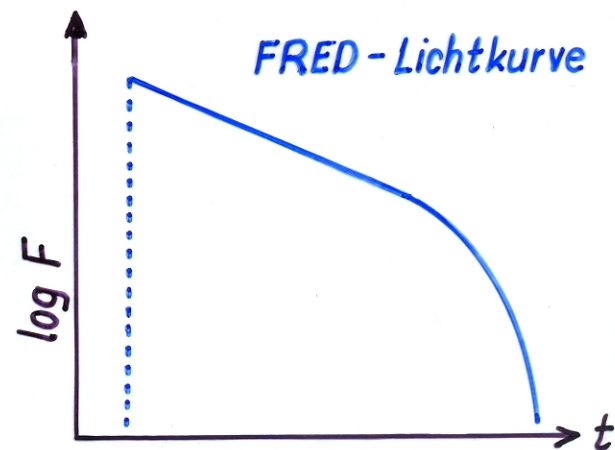
- sehr lange Zykluszeiten (Ruhezeiten), bei vielen BH SXTs nur ein Ausbruch beobachtet $\rightarrow t_q \approx$ Jahrzehnte (\rightarrow Tabellen).
- lange Ausbrüche, typisch $t_{out} \approx 10^2 d$ (\rightarrow Lichtkurven)
- kleiner duty cycle $d = t_{out} / (t_q + t_{out}) \approx 10^{-2}$
- \exists gewisse Ähnlichkeiten zwischen dem Verhalten der SXTs und dem der WZ Sge-Sterne (vgl. z.B. die Ausbruchlichtkurven von V518 Per mit der des WZ Sge-Sterns EG Cnc)

► SXTs im Ausbruch

- sind Röntgenbereich, aber auch im Visuellen absolut sehr hell; können kurzfristig auch zu den scheinbar hellsten Röntgenquellen am Himmel werden. \rightarrow leicht zu entdecken und optisch zu identifizieren.

- Erscheinungsbild wird vollständig durch die helle Scheibe dominiert

- sehr unterschiedliche Ausbruchlichtkurven (\rightarrow Beispiele); viele vom Typ FRED (= fast rise, exponential decay) \rightarrow Schema
Beispiele: QZ Vul, IL Lup, GU Mus, V518 Per, V616 Mon, ...



- Anstieg in den Ausbruch erfolgt (mindestens bei einigen Systemen) im Optischen früher, als im Röntgenbereich (analog zum UV-delay bei Zwergnovae).

Beispiel: V1033 Sco (\rightarrow Hameury, J.-M., Lasota, J.-P., McClintock, J.E., Narayan, R.: 1997, Ap J. 489, 234)

- Maximalhelligkeit $L_{max} \lesssim L_{Edd}$

The X-ray delay at the onset of an outburst of the BHSXT V1033 Sco

(Hameury, J.-M., Lasota, J.-P., McClintock, J.E., Narayan, R.: 1997, ApJ, 489, 234)

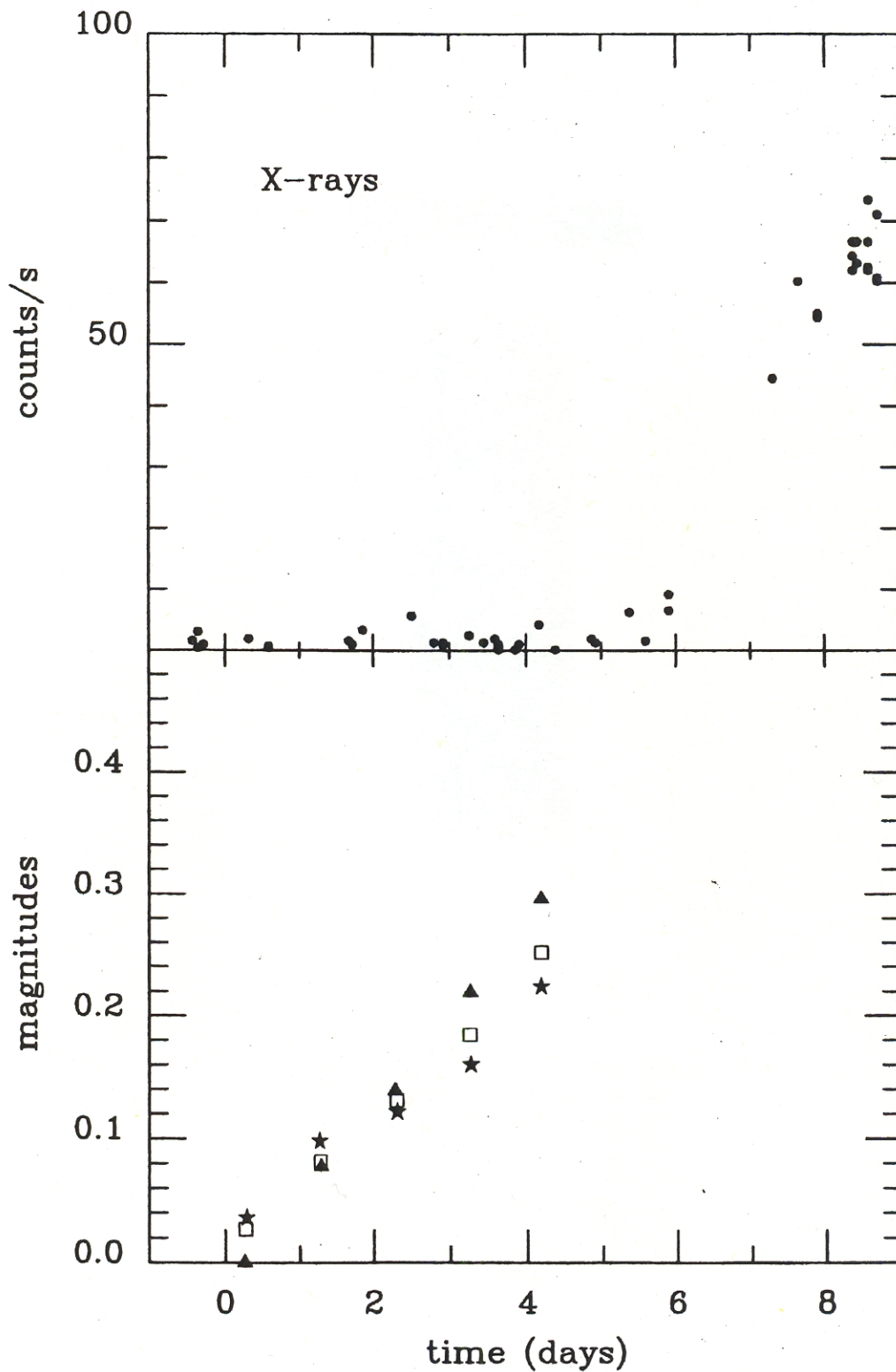


FIG. 1.—Observed optical and 2–12 keV X-ray light curves during the initial phase of the 1996 April outburst of GRO J1655–40 (from ORBM). For the sake of clarity, only one average data point per night is plotted. *B*, *V*, and *I* magnitudes are represented by triangles, squares, and stars respectively. Time has been set to zero at an arbitrary point close to the onset of the outburst.

- Ausbrüche dauern lange, typisch mehrere Wochen-Monate
- einige Systeme erzeugen während der Ausbrüche *luminale jets*, z.B. V1033 Sco ($v_{\text{jet}} \approx 0.9c$), GRS 1915+105 ($v_{\text{jet}} \approx 0.9c$), 1E1740.7-2942 und GRS 1758-258, ähnlich wie Qusare, nur auf wesentlich geringeren Längen- und kürzeren Zeitskalen, daher die Bezeichnung **Mikroquasare** für diese Objekte.

► SXTs im Minimum

- optisches Erscheinungsbild ist praktisch vollständig durch den Sekundärstern dominiert, die Scheibe ist fast unsichtbar.
 - erlaubt Bestimmung der Radialgeschwindigkeit des Sekundärsterns → Bahnperiode, Massenfunktion des kompakten Sterns, ev. weitere Systemparameter (→ Tabelle).
 - "Nachweis" Schwarzer Löcher.
- sind im Optischen sehr schwache Objekte (grosse Entfernung, geringe Leuchtkraft des Sekundärsterns), mit typisch $V_{\text{min}} \approx 18-23$. → Identifizierung nur im Ausbruch möglich!
- ∃ messbare Röntgen- und UV-Emission mit Leuchtkräften von
 - $L_{\text{min}} \approx 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ bei BH SXTs, und
 - $L_{\text{min}} \approx 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ bei NS SXTs (→ Tabellen)

► Vergleich mit Zwergnova-Ausbrüchen (→ Tabelle)

- ∃ gewisse Ähnlichkeiten zwischen den Ausbrüchen einiger SXTs (z.B. von V616 Mon, V518 Per, V616 Mon, MM Vel, ...) und denen von WZ Sge-Sternen (AL Com, EG Cnc, WZ Sge, ...) (→ Kuulkers, E., Howell, S.B., van Paradijs, J.: 1996, ApJ 462, L87):
 - lange Ruhezeiten
 - nur ein wesentlicher (Super-) Ausbruch pro Zyklus,
 - ev. gefolgt von einer kleinen Zahl von "Miniausbrüchen", sog. Echo-Ausbrüchen, unmittelbar nach dem Hauptausbruch.

Die Ausbrüche von transienten Röntgendoppelsternen und von Zwergnovae im Vergleich

| Eigenschaft | NS SXTs | BH SXTs | norm. Zwergnovae | WZ Sge - Sterne |
|---------------------------|---|---|---------------------------------|---------------------------------|
| Dauer der Ausbrüche | Wochen - Monate | Wochen - Monate | Tage - Wochen | einige Wochen |
| Dauer des Ausbruchszyklus | Monate - Jahre | Jahre - Jahrzehnte | Wochen - Monate | Jahre - Jahrzehnte |
| Ausbruchsamplitude | $\sim 1 \dots \sim 10^7$ | $\sim 10^4 \dots 10^6$ | $\sim 10^2$ | $\sim 10^4$ |
| Maximalhelligkeit | $\sim (10^{-2} \dots 1) L_{\text{Edd}}$ | $\sim (10^{-2} \dots 1) L_{\text{Edd}}$ | $\sim L_{\odot}$ | $\sim (1 \dots 10) L_{\odot}$ |
| Ausbruchsennergie | $10^{43} - 10^{46} \text{ erg}$ | $10^{43} - 10^{46} \text{ erg}$ | $10^{38} - 10^{39} \text{ erg}$ | $10^{40} - 10^{41} \text{ erg}$ |

X-ray light curves of X-ray novae

(Chen, W., Shrader, C.R., Livio, M.: 1997, ApJ 491, 312)

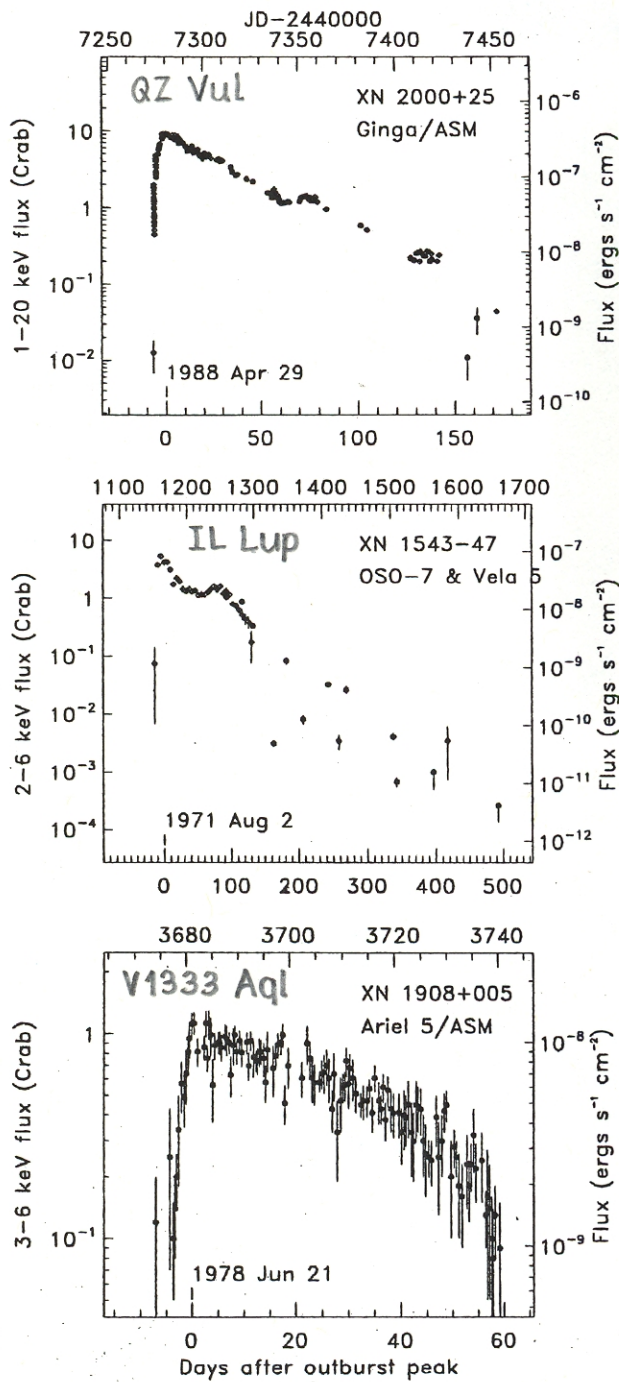


FIG. 1.—Examples of the FRED-type X-ray light curves. *Top*: the 1988 outburst of GS 2000+25 (Tsunemi et al. 1989), a BH XN. *Middle*: the 1974 outburst of 4U 1543-47 (Li, Sprott, & Clark 1976), also a BHC. *Bottom*: the 1978 outburst of 4U 1908+005 (Charles et al. 1980), a NS XN. Note that both the top and middle panels exhibit a “glitch”-type secondary maximum (see § 5.2.3).

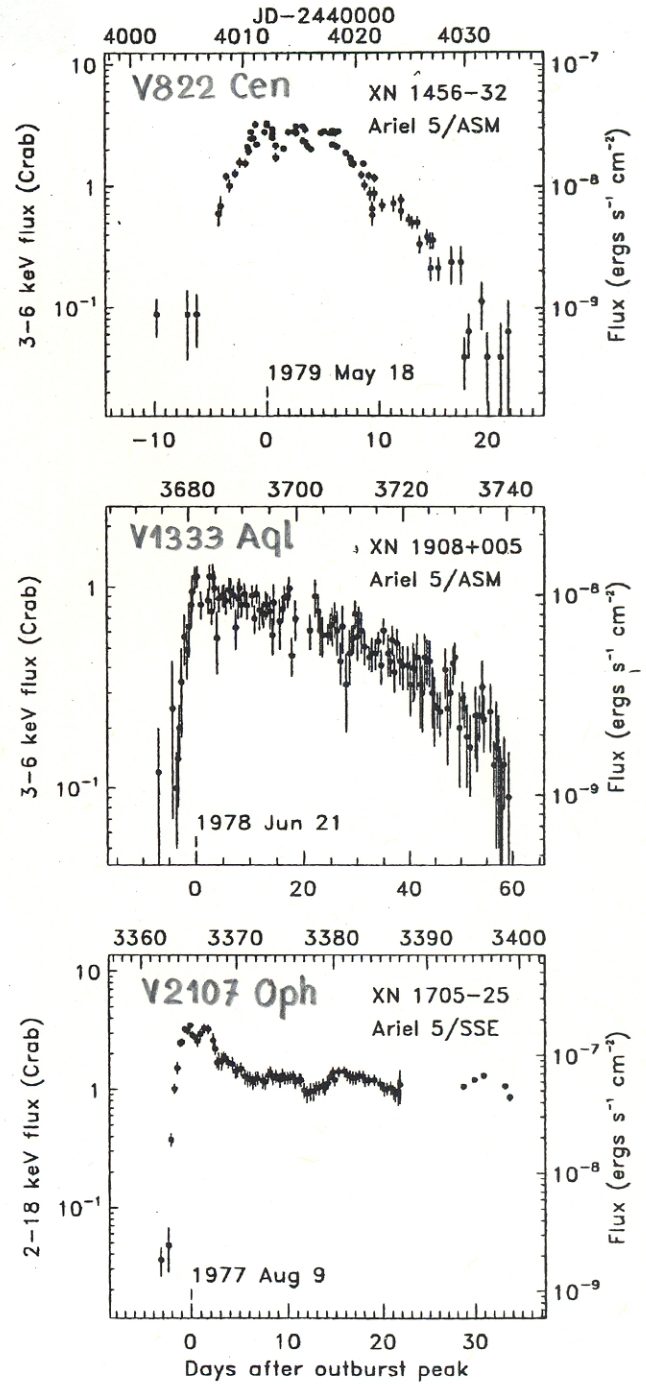


FIG. 4.—Examples of short plateaus that are usually followed by normal decay. *Top*: the 1979 outburst of 4U 1456-32 (Kaluziński, Holt, & Swank 1980). *Middle*: the 1978 outburst of 4U 1908+005 (Charles et al. 1980). *Bottom*: the 1977 outburst of 1H 1705-25 (Griffiths et al. 1978; Share et al. 1978). The late phase of this outburst is uncertain.

X-ray light curves of X-ray novae

(Chen, W., Shrader, C.R., Livio, M.: 1997, ApJ 491, 312)

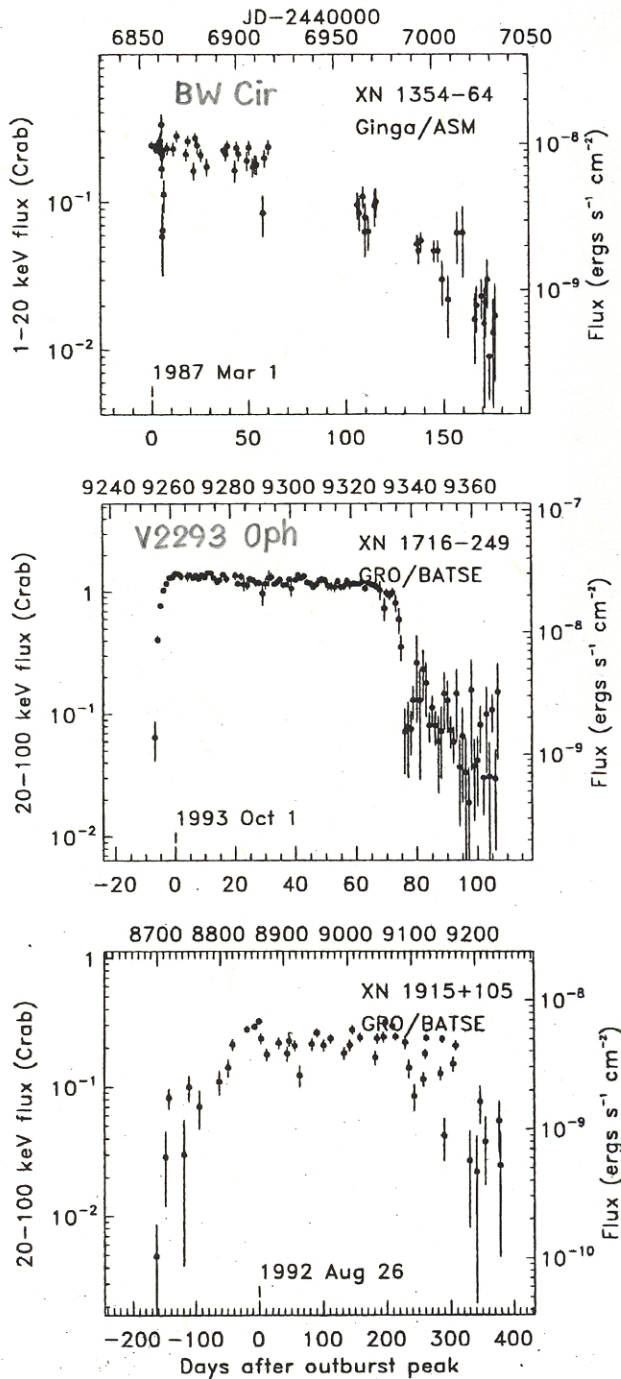


FIG. 5.—Examples of long plateau X-ray light curves. *Top*: the 1987 outburst of GS 1354–64 (Kitamoto et al. 1990), a plateau of 50 days followed by normal decay. *Middle*: the 1993 outburst of GRS 1716–249 (Harmon et al. 1994), which has a fast rise and a sudden cutoff. *Bottom*: the 1992 outburst of GRS 1915+105 (Harmon et al. 1994), the longest plateau to date, which has a very slow rise.

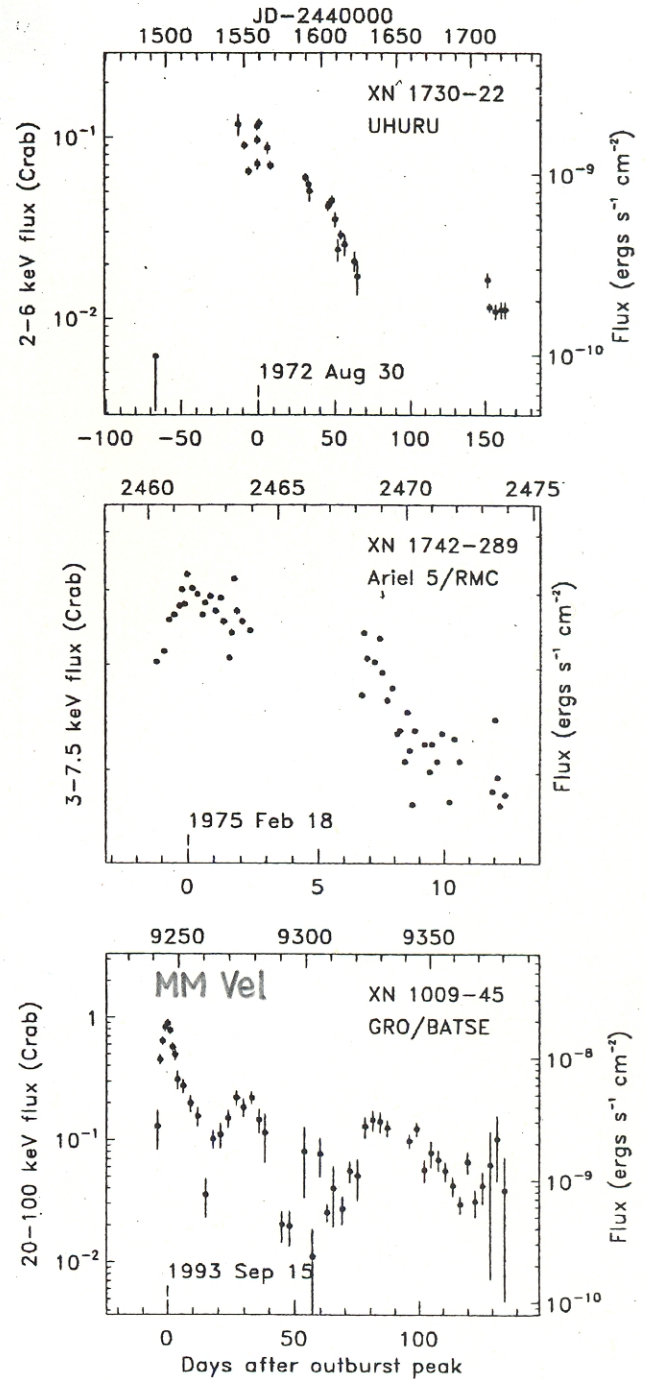


FIG. 6.—Examples of light curves with variable decay constants. *Top*: the 1972 outburst of 4U 1730–22 (Cominsky et al. 1978). *Middle*: the 1975 outburst of A1742–289 (Eyles et al. 1975; Branduardi et al. 1976). *Bottom*: the 1993 outburst of GRS 1009–45 (Harmon et al. 1994) in hard X-rays.