

Ludwig-Maximilians-Universität München

WS 2004/05

Entwicklung von kompakten Doppelsternen

Vorlesung von

Priv. Doz. Dr. H. Ritter

Max-Planck-Institut für Astrophysik

85740 Garching

Verzeichnis häufig verwendeter Abkürzungen

| | |
|-------------|---|
| AGB | asymptotischer Riesenast (Asymptotic Giant Branch) |
| AM | AM Her System: CV mit synchron rotierendem, magnetisch akkretierendem WZ |
| ART | allgemeine Relativitätstheorie |
| BH | Schwarzes Loch (Black Hole) |
| BGB | Base of red giant branch = "Fuss" des Riesenasts |
| CAML | Consequential Angular Momentum Loss = Drehimpulsverluste, die durch Massentransfer bewirkt werden |
| CH | Chandrasekhar, im Zusammenhang der Chandrasekhar-Masse |
| CV | Kataklysmische Variable (Cataclysmic Variable) |
| DN | Zwergnova (Dwarf Nova) = Unterklasse der CVs |
| Edd | Eddington, im Zusammenhang mit der Eddington-Leuchtkraft oder der Eddington-Akkretionsrate |
| EOS | Zustandsgleichung (Equation Of State) |
| GC | Globular Cluster = Kugelsternhaufen |
| GR | Gravitational Radiation, Energie- /Drehimpulsverlust durch |
| HL | Hayashi-Linie |
| HMXB | massereicher Röntgendoppelstern (High-Mass X-ray Binary) |
| HR | Hauptreihe |
| HRD | Hertzprung-Russel-Diagramm |
| IMXB | Röntgendoppelstern mit einem Begleiter mittlerer Masse (Intermediate-Mass X-ray Binary) |
| IP | Intermediate Polar: CV mit asynchron rotierendem, magnetisch akkretierendem WZ |
| KH | Kelvin-Helmholtz, im Zusammenhang mit der Kelvin-Helmholtz-Zeit |
| KH | Kugelsternhaufen |
| LMXB | massearmer Röntgendoppelstern (Low-Mass X-ray Binary) |
| MB | Magnetische Bremsung, Drehimpulsverlust durch |
| MS | Mestel & Spruit, im Zusammenhang mit magnetischer Bremsung |
| MWT | Mischungsweg-Theorie = phänomenologische Beschreibung der Konvektion im Sternaufbau |
| N | Nova = Unterklasse der CVs |
| NL | novaähnliche Systeme = Unterklasse ^e der CVs |
| NS | Neutronenstern |

| | |
|------|--|
| PSR | Pulsar |
| SSS | Supersoft X-ray Source |
| TAMS | Terminal Age Main Sequence |
| TGB | Tip of red giant branch = "Spitze" des Riesenasts |
| VZ | Verbunt & Zwaan, im Zusammenhang mit magnetischer Bremsung |
| WZ | Weisser Zwerg |
| ZACV | Zero Age Cataclysmic Variable |
| ZAMS | Alter Null Hauptreihe (Zero Age Main Sequence) |

ENTWICKLUNG VON KOMPAKTEN DOPPELSTERNEN

Literaturliste

Lehrbücher und Monographien

- Frank, J., King, A.R., Raine, D.J.: **Accretion Power in Astrophysics**, 3rd edition, Cambridge University Press, Cambridge (2002), ISBN: 0-5216-2957-8
- Kippenhahn, R., Weigert, A.: **Stellar Structure and Evolution**, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1994), ISBN: 3-540-58013-1
- Kolb, U.: **Interacting Binary Stars**, S381 Block 3 *The Energetic Universe*, The Open University (2002), ISBN:0-7492-9765-4
- Lewin, W.H.G., van Paradijs, J., van den Heuvel, E.P.J. (eds.): **X-Ray Binaries**, Cambridge Astrophysics Series Vol. 26, Cambridge University Press, Cambridge (1997), ISBN: 0 521 59934 2
- Warner, B.: **Cataclysmic Variable Stars**, Cambridge University Press, Cambridge (1995), (zur Zeit vergriffen), ISBN: 0521412315
- Wijers, R.A.M.J., Davis, M.B., Tout, C.A. (eds.): **Evolutionary Processes in Binary Stars**, NATO ASI Ser. Vol. 477, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1996), ISBN: 0-7923-4004-3

Weiterführende Literatur (Konferenzberichte)

- Greiner, J. (ed.): **Supersoft X-Ray Sources**, Lecture Notes in Physics Vol. 472, Springer Verlag, Berlin (1996), ISBN: 3-540-61390-0
- Podsiadlowski, Ph., Rappaport, S., King, A.R., D'Antona, F., Burderi, L. (eds.): **Evolution of Binary and Multiple Star Systems**, ASP Conf. Ser., Vol. 229, Astron. Soc. Pacific, San Francisco (2001), ISBN: 0-7923-4004-3
- Shore, S.N., Livio, M., van den Heuvel, E.P.J.: **Interacting Binaries**, Saas-Fee Advanced Course 22, Springer Verlag, Berlin (1992), ISBN: 3-540-57014-4, ISBN: 0-387-57014-4

Kataloge

- Downes, R.A., Webbink, R.F., Shara, M.M., Ritter, H., Kolb, U., Duerbeck, H.W.: 2001, **A Catalog and Atlas of Cataclysmic Variables: The living Edition**, PASP 113, 764; Zugriff auf die Daten via <http://icarus.stsci.edu/downes/cvcat>
- Liu, Q.Z., van Paradijs, J., van den Heuvel, E.P.J.: 2000, **A catalogue of high-mass X-ray binaries**, A&AS 147, 25
- Liu, Q.Z., van Paradijs, J., van den Heuvel, E.P.J.: 2001, **A catalogue of low-mass X-ray binaries**, A&A 368, 1021
- Ritter, H., Kolb, U.: 2001, **Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition)**, A&A 404, 301; Zugriff auf die Daten via <http://www.mpa-garching.mpg.de/RKcat/> oder <http://physics.open.ac.uk/RKcat/>

1. Einleitung und Übersicht

- Kompakte Sterne: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher
- Vorkommen von kompakten Sternen
- Was sind kompakte Doppelsterne?
- Übersicht über die verschiedenen Typen von kompakten Doppelsternen
- Die Bedeutung der Akkretion als Energiequelle
- Kurze Übersicht über die wichtigsten Akkretionsmoden
- Ziele der Vorlesung
- Ergänzung: Kurze Charakterisierung der wichtigsten Typen von kompakten Doppelsternen
 - Kataklysmische Variable
 - Supersoft X-Ray Sources
 - Massearme Röntgendoppelsterne
 - Soft X-Ray Transients
 - Pulsar-Doppelsterne

Weisse Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher und "normale" Sterne im Vergleich

| Sternotyp | Druckquelle | chem. Zus. | Masse | Radius | $\frac{R_s}{R}$ | urspr. Masse |
|------------------------|---|-------------------------------------|--|---|--|---|
| Weisser Zwerg | Fermi-Dirac-Entartung der Elektronen | He, oder C, O, oder O, Ne, Mg | $< M_{\text{Ch}}$ $\approx 1.4 M_{\odot}$ | $\sim 10^4$ km | $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ | $\sim 0.8 M_{\odot} - \sim 8 M_{\odot}$ |
| Neutronenstern | starke W.W. + Entartung der Neutronen | $\sim 90\%$ n $\sim 10\%$ p | $M_{\text{Ch}} - \sim 3 M_{\odot}$ | ~ 10 km | ~ 0.3 | $\sim 8 M_{\odot} - \sim 25 M_{\odot}$ |
| Schwarzes Loch | — | — | $\geq 3 M_{\odot}$ | $R_s = \frac{2GM}{c^2}$ $= 3 \text{ km} \frac{M}{M_{\odot}}$ | 1 | $\geq 25 M_{\odot}$ |
| Hauptreihen - stern | Gasdruck + Strahlung | $\sim 75\%$ H $\sim 25\%$ He | $0.08 M_{\odot} -$ $\sim 100 M_{\odot}$ | $0.1 R_{\odot} -$ $\sim 20 R_{\odot}$ | $4 \cdot 10^{-6} -$ $4 \cdot 10^{-5}$ | |

Vorkommen von **Weissen Zwergen**, **Neutronensternen** und **Schwarzen Löchern**

| | als Einzelsterne | ohne Akkretion* | in Doppelsternsystemen mit Akkretion* |
|-----------------|--|--|--|
| Weisse Zwerge | unauffällige, schwache, "blaue" Sterne. $N \approx 5600$ Vorläufer: <u>Zentralsterne</u> <u>Planetarischer Nebel</u> , sehr heiss ($T \approx 10^5 K$) und blau. $N \approx 1500$ | unauffällige, schwache, "blaue" Sterne, vom Begleiter überstrahlt \rightarrow schwer zu finden. Bsp. Sirius B, Procyon B, 40 Eri B $N \approx 80$ mit Radiopulsaren, $N \approx 75$ | <u>Novae</u> , <u>Zwergnovae</u> und <u>verwandte Objekte</u> (sind sehr auffällige veränderliche Sterne mit z.T. starken Ausbrüchen (Novae)) $N \approx 1600$ |
| Neutronensterne | <u>Radiopulsare</u> , $N \approx 1800$ (z.B. Pulsar im Krebsnebel), einzelne NS als Röntgenquellen, anormale Röntgenpulsare, Soft γ -ray repeaters (SGR) | <u>Pulsardoppelsterne</u> , $N \approx 150$ (z. B. der berühmte Binärpulsar PSR 1913+16) <u>Doppelpulsare</u> : $N = 1$ <u>Doppelneutronensterne</u> : $N = 5$ | <u>Röntgendoppelsterne</u> (Röntgenpulsare), "massereiche", $N \approx 150$ "massearme", $N \approx 150$ (in der Milchstrasse) |
| Schwarze Löcher | praktisch nicht beobachtbar, kein Bsp. bekannt | praktisch nicht beobachtbar, kein Bsp. bekannt | <u>Röntgendoppelsterne</u> HMXBs: $N \approx 3$ IMXBs: $N \approx 3$ LMXBs: $N \approx 14$ |

*) Akkretion = Anlagerung von vom Begleitstern abströmender Materie \rightarrow Akkretionsleuchtkraft !

ENGE DOPPELSTERNE MIT KOMPAKTEN KOMPONENTEN

► Kompakte Sterne : Endstadien der Sternentwicklung

1) **Weisse Zwerge** : $M < M_{\text{CH}} \approx 1.4 M_{\odot}$, $R \approx 10^{-2} R_{\odot}$

2) **Neutronensterne** : $M_{\text{CH}} \lesssim M \lesssim 3 M_{\odot}$, $R \approx 10 \text{ km}$

3) **Schwarze Löcher** : $M \gtrsim 3 M_{\odot}$, $R = R_{\text{s}} = \frac{2GM}{c^2}$

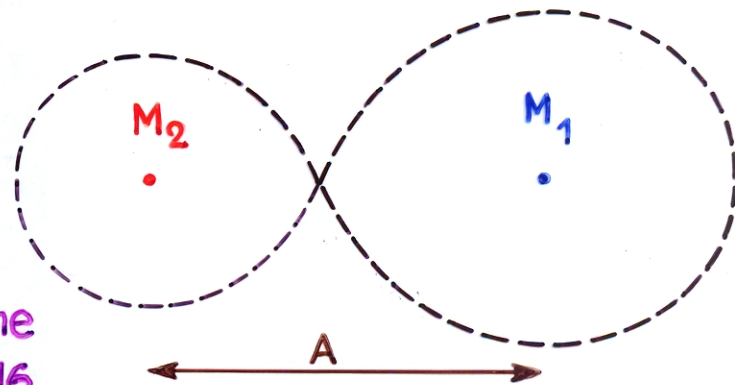
► Enge Doppelsterne (mit einem kompakten Primärstern)

a) weit getrennte Systeme

Sekundärstern : $R_2 \ll A$

Beispiele :

Millisekundenpulsar-Doppelsterne
"Der" Binärpulsar PSR 1913+16

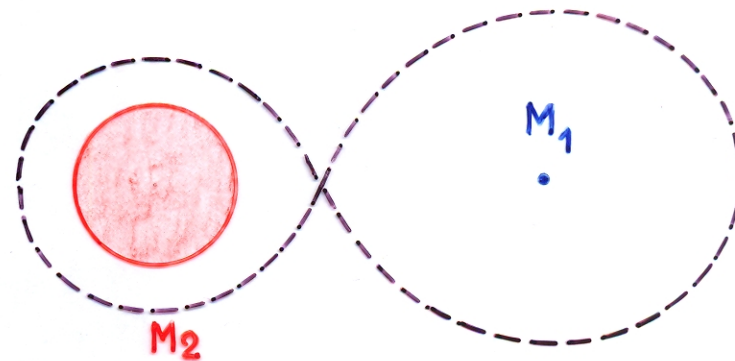


b) enge, getrennte Systeme (D)

Sekundärstern : $R_2 < R_{2,\text{krit}}$

Beispiele :

Präkataklysmische Doppelsterne
(Massereiche Röntgendoppelsterne)

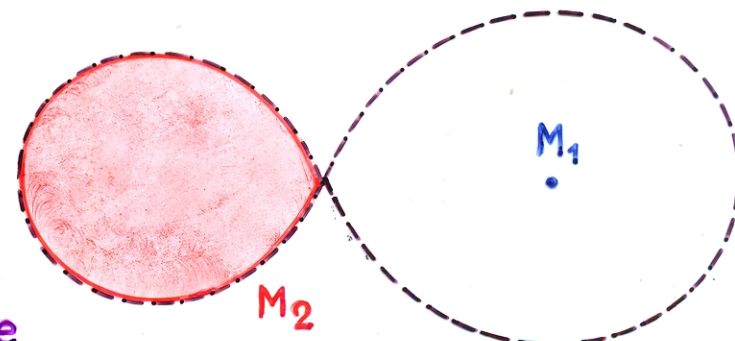


c) halbgetrennte Systeme (SD)

Sekundärstern : $R_2 = R_{2,\text{krit}}$

Beispiele :

massearme Röntgendoppelsterne
Kataklysmische Doppelsterne



Doppelsterne mit kompakten Komponenten (Übersicht)

Getrennte Systeme : (ohne Massentransfer)

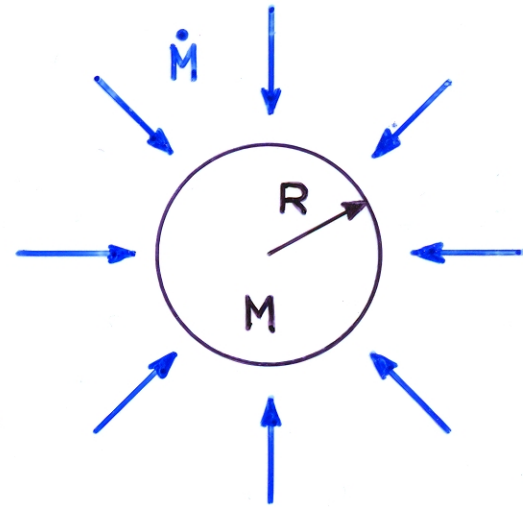
| $M_2 \backslash M_1$ | Weisser Zwerg | Neutronenstern | Schwarzes Loch |
|------------------------------------|---|--|----------------|
| Weisser Zwerg | ≥ 45 | Pulsare (≥ 75) | |
| Neutronenstern | | Pulsare (≥ 6) | |
| Schwarzes Loch | | | |
| HR-Stern, $M_2 \lesssim M_{\odot}$ | Präkataklysmische Systeme (≥ 65) | Pulsare (≥ 5) | |
| HR-Stern, $M_2 \gtrsim M_{\odot}$ | zahlreich | HMXBs (≥ 150) Pulsare (~ 3) | |
| Riese | symbiotische St. | | |
| Überriese | symbiotische St. | | |

Halbgetrennte Systeme : (mit Massentransfer $M_2 \rightarrow M_1$)

| $M_2 \backslash M_1$ | Weisser Zwerg | Neutronenstern | Schwarzes Loch |
|------------------------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Weisser Zwerg | Kataklysmische Systeme (16) | LMXBs (11) | |
| Neutronenstern | | | |
| Schwarzes Loch | | | |
| HR-Stern, $M_2 \lesssim M_1$ | Kataklysmische Systeme (≥ 610) | LMXBs (≥ 55) | LMXBs (≥ 11) IMXBs (3) |
| HR-Stern, $M_2 \gtrsim M_1$ | Supersoft X-ray sources (≥ 13) | | Röntgendoppelsterne (0) |
| Riese, kleines M_c | ~ 6 CVs, symbiot. St. | LMXBs (~ 4) | LMXBs (≥ 6) |
| Überriese | symbiotische St. | | |

AKKRETION ALS ENERGIEQUELLE

$$\dot{E} \approx \frac{GM}{R} \dot{M}$$



- $\frac{M}{R}$ gross \rightarrow effiziente Energieerzeugung

\Rightarrow Akkretion auf kompakte Objekte

Weisse Zwerge: $\frac{GM}{R} \approx 10^{-4} c^2 \approx 100 \text{ keV/Nukleon}$

Neutronenstern: $\frac{GM}{R} \approx 0.2 c^2 \approx 200 \text{ MeV/Nukleon}$

Schwarzes Loch: $\frac{GM}{R} \approx 0.057 c^2 - 0.42 c^2$

- zum Vergleich: nukleare Energieerzeugung:

Massendefekt $< 0.007 c^2 \approx 8 \text{ MeV/Nukleon}$

Akkretion auf kompakte Sterne: → Akkretionsleuchtkraft L_{accr}

▶ dabei $L_{accr} \gg$ alle anderen Leuchtkräfte möglich!

Grund: Gravitationspotential $\phi(R_c) = -\frac{GM_c}{R_c}$

Weisser Zwerg: $-\phi(R_{WZ}) \approx 200 \text{ keV/Nukleon}$

Neutronenstern: $-\phi(R_{NS}) \approx 200 \text{ MeV/Nukleon}$

Schwarzes Loch: $-\phi(R_S) = \eta c^2, 0.057 \leq \eta \leq 0.42$

Abschätzung für Doppelsterne

Massenquelle: HR-Stern, $L_{HR} \approx L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{\alpha}, \alpha \approx 3, M-L\text{-Beziehung}$

kompakter Stern:

$$M = M_c = \begin{cases} 1 M_{\odot} \text{ für WZ} \\ 1.4 M_{\odot} \text{ für NS} \end{cases}$$

$$R = R_c = \begin{cases} 10^{-2} R_{\odot} \text{ für WZ} \\ 10^6 \text{ cm für NS} \end{cases}$$

▶ Akkretionsleuchtkraft $L_{accr} \approx \frac{GM_c(-\dot{M})}{R_c}$

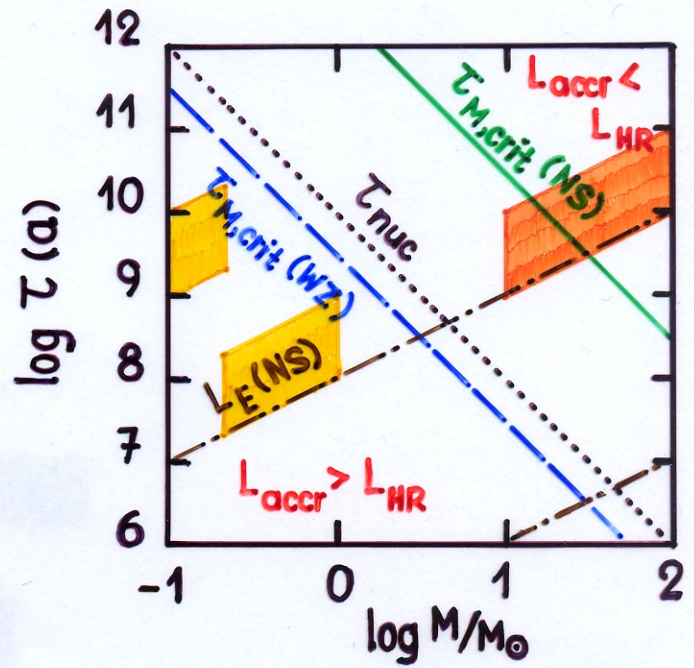
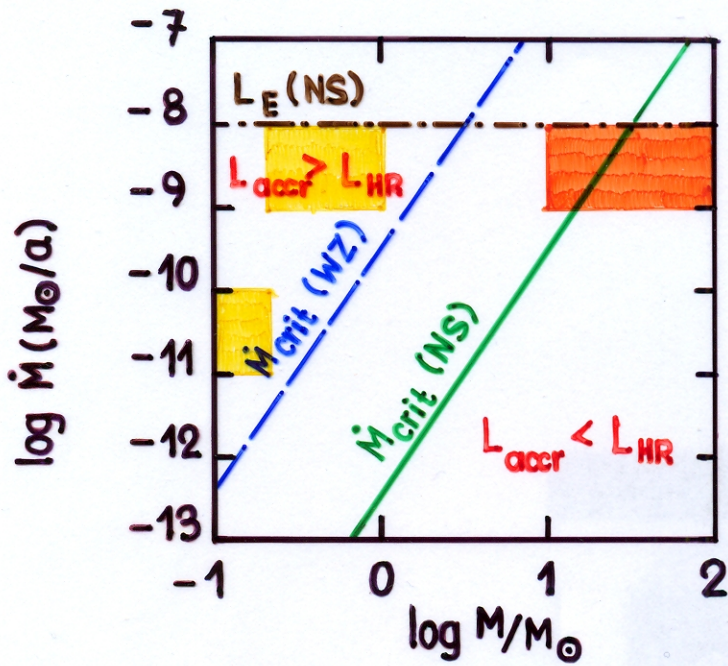
Def. \dot{M}_{crit} , so dass $L_{accr}(\dot{M}_{crit}) = L_{HR}(M) \rightarrow -\dot{M}_{crit} = \frac{R_c L_{\odot}}{G M_c} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^3$

$$\rightarrow \log \frac{-\dot{M}_{crit}}{M_{\odot}/a} = 3 \log \frac{M}{M_{\odot}} - \begin{cases} 9.5 \text{ für WZ} \\ 12.5 \text{ für NS} \end{cases}$$

Def. $\tau_{M,crit} = \frac{M}{-\dot{M}_{crit}} = \frac{G M_c M_{\odot}}{R_c L_{\odot}} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-2}$

$$\rightarrow \log \tau_{M,crit}(a) = -2 \log \frac{M}{M_{\odot}} + \begin{cases} 9.5 \text{ für WZ} \\ 12.5 \text{ für NS} \end{cases}$$

Def. $\tau_{nuc}(M) \approx 10^{10} a \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{-1} = 10^{10} a \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-2}$



Def. $L_E = \frac{4\pi GcM}{\alpha_{es}} \approx 6.5 \cdot 10^4 L_{\odot} \frac{M}{M_{\odot}} (1+X)^{-1}$: Eddington-Leuchtkraft

$L \gtrsim L_E$: Strahlungsdruck dominiert, Akkretion wird behindert

► Fazit :

$L_{accr} \gg L_{HR}$ bei LMXBs, für die $M \lesssim 1M_{\odot}$

$L_{accr} > L_{HR}$ bei CVs (WZ), für die $M \lesssim 1M_{\odot}$, sofern \dot{M} nicht zu klein ($\dot{M} \gtrsim 10^{-10} M_{\odot}/a$)

$L_{accr} \sim L_{HR}$ in massereichen Röntgendoppelsternen ($M \gtrsim 10M_{\odot}$)

für WZ: wenn $L_{accr} > L_{HR} \rightarrow \tau_M < \tau_{HR}$

Beobachtungen:



CVs und LMXBs

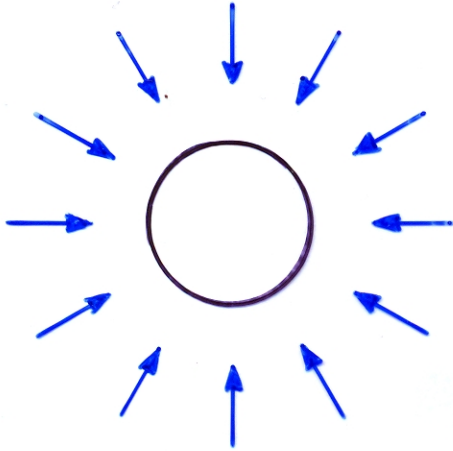


massereiche Röntgendoppelsterne

Akkretionsmoden

Vorkommen

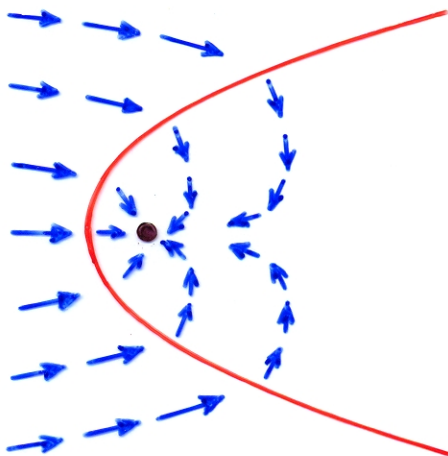
1) radialsymmetrisch:



- "nur in der Theorie"

(hochgradige Symmetrie ist in der Natur praktisch nie gegeben)

2) Akkretion aus einem Wind:



- massereiche Röntgendoppelsterne (NS akkretiert aus dem Wind des Begleiters)

→ Röntgenpulsare (NS)

→ Be-Stern Röntgenquellen (NS)

3) Scheibenakkretion:



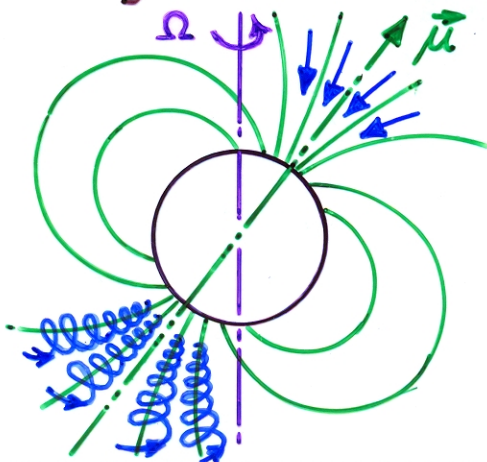
- Massentransfer in Doppelsternen

→ Röntgendoppelsterne (NS, BH),
CVs (WZ), symbiot. Sterne (WZ),
Algol-Systeme (HR)

- protostellare Scheiben

- Zentren von AGNs

4) magnetische Akkretion:



- Massentransfer in Doppelsternen auf einen magnetisierten Stern

→ Röntgenpulsare (NS), $\Omega_{rot} \gg \omega_B$

→ magn. CVs, IP (WZ), $\Omega_{rot} > \omega_B$

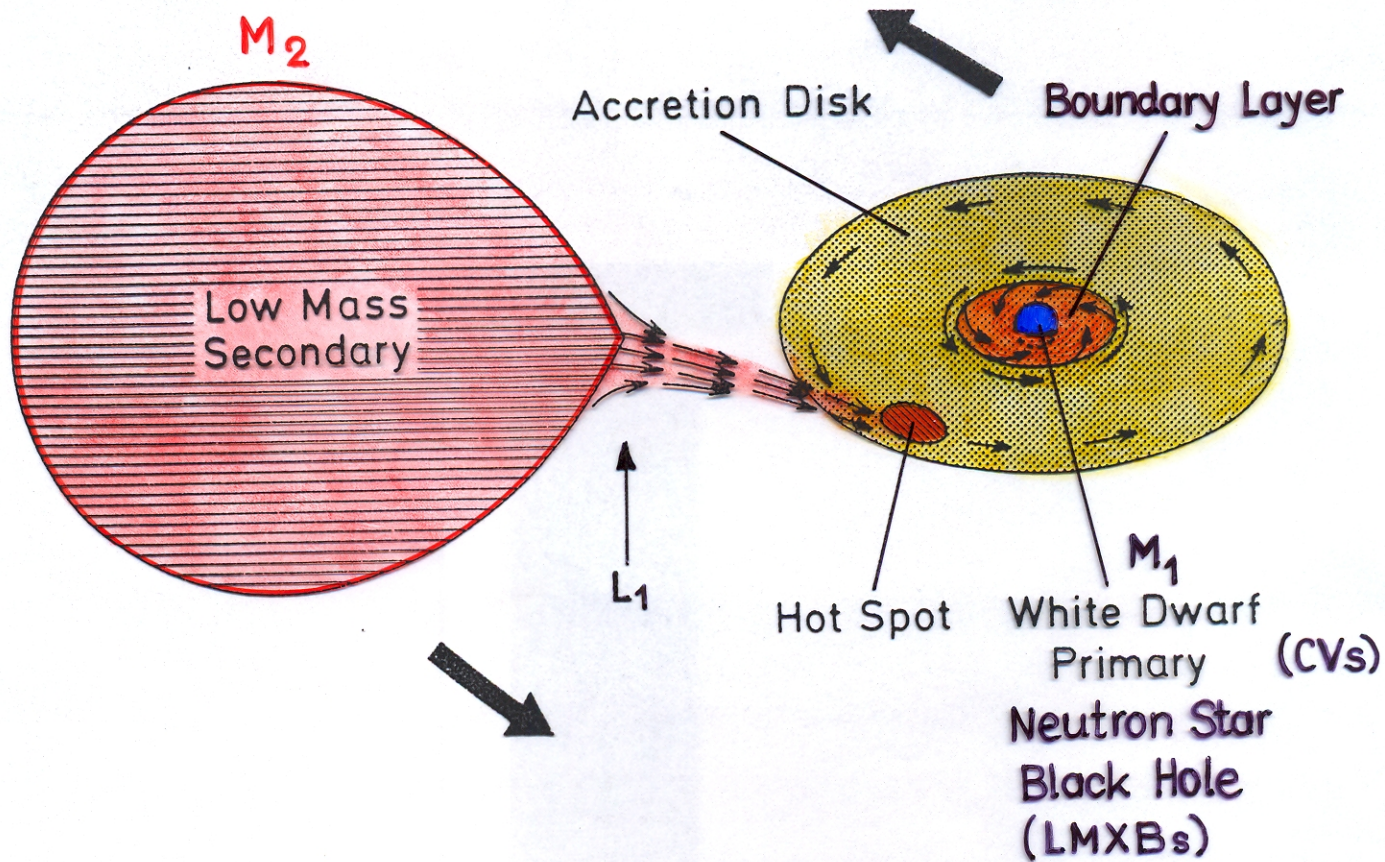
→ magn. CVs, AM (WZ), $\Omega_{rot} = \omega_B$

Ziel der Vorlesung

Wollen versuchen, etwa folgende Fragen zu beantworten:

- Wie kann man die Langzeitentwicklung der verschiedenen Typen von kompakten Doppelsternen verstehen ?
- Warum kommt es zu Massentransfer ?
- Was steuert den Massentransfer ?
- Unter welchen Bedingungen ist Massentransfer stabil / instabil, bzw. stationär / instationär ?
- Wie bestimmt man die Massentransferrate ?
- Wie reagiert der masseverlierende Stern auf den Massenverlust ?
- Welche Rolle spielt der akkretierende, kompakte Stern ?
- Hat die Freisetzung von Akkretionsenergie Rückwirkungen auf den Massentransfer ?
- Wie entwickeln sich Systeme ohne Massentransfer ?
- ⋮

Das Doppelsternmodell für massearme Röntgendoppelsterne und für Kataklysmische Doppelsterne



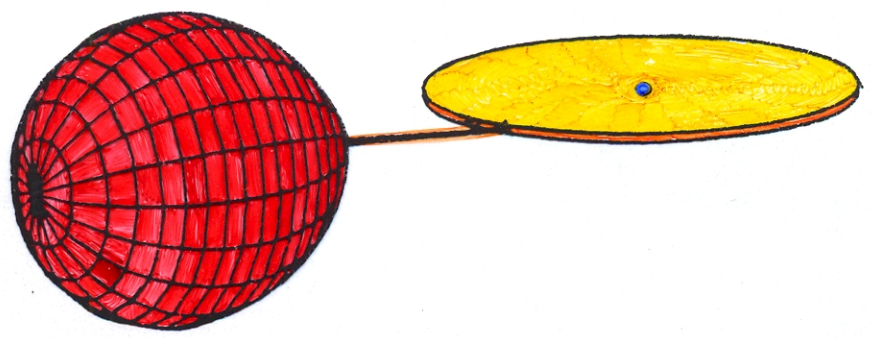
Charakteristische Parameter

- ▶ **Primärstern:** Weisser Zwerg, $M_1 < M_{CH} \approx 1.4 M_{\odot}$
 → Kataklysmischer Doppelstern
- Neutronenstern, $M_{CH} \lesssim M_1 \lesssim 3 M_{\odot}$
- Schwarzes Loch, $M_1 \gtrsim 3 M_{\odot}$
 → massearmer Röntgendoppelstern
- ▶ **Sekundärstern:** Hauptreihenstern
 Riese
 entarteter Zwergstern } $M_2 \lesssim M_1$
- ▶ **Umlaufszeit:** $80 \text{ min} \lesssim P \lesssim 16^h$, wenn M_2 auf der HR
 $\gtrsim 2^d$, wenn M_2 ein Riese
 $\lesssim 1^h$, wenn M_2 entartet

Systeme mit einem magnetisierten kompakten Stern

a) $r_M \lesssim R_1 \ll A$

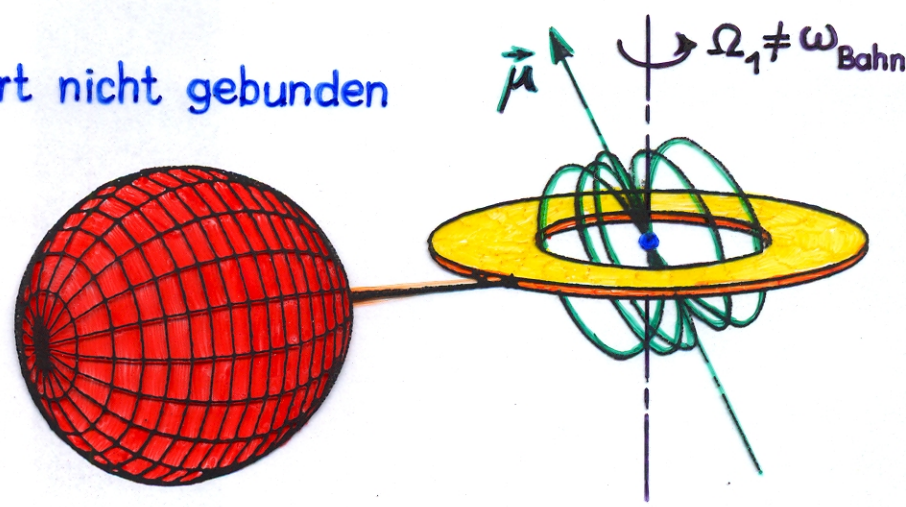
- "nicht-magnetische Systeme
- Standardmodell mit Akkretionsscheibe



- ▶ Beispiele : ~ 80% der Kataklysmischen Doppelsterne
Röntgenburster & massearme Röntgendoppelsterne

b) $R_1 < r_M \lesssim \frac{1}{2} A$

- ▶ kompakter Stern rotiert nicht gebunden
Magnetosphäre verdrängt den inneren Teil der Scheibe



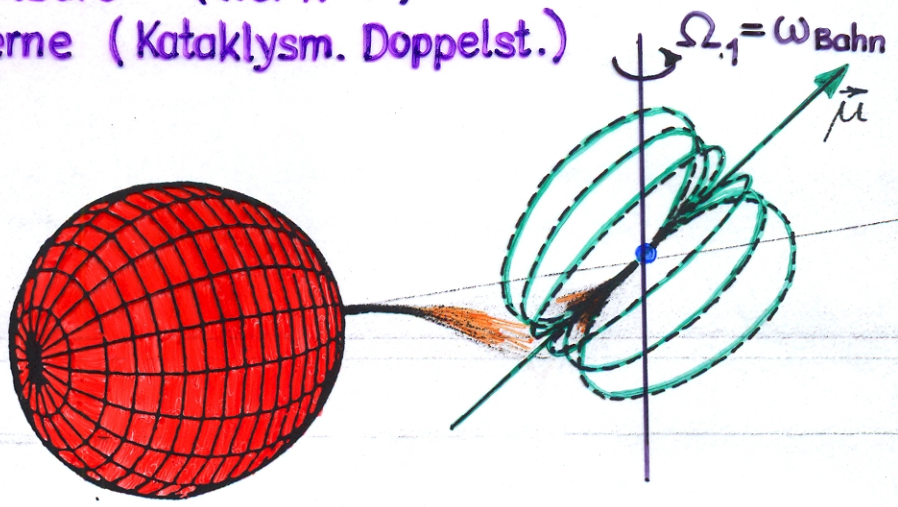
- ▶ Akkretion an den magnetischen Polen

→ Leuchtturmeffekt → opt. & Röntgenpulse

- ▶ Beispiele: Röntgenpulsare (Her X-1)
DQ Her-Sterne (Kataklysm. Doppelst.)

c) $r_M \gtrsim A$

- ▶ keine Scheibe, kompakter Stern rotiert gebunden



- ▶ Akkretion an den magn. Polen

- ▶ Beispiele : AM Her-Sterne (Kataklysm. Doppelsterne)
mit $B \approx 20-60 \text{ MG} \hat{=} \mu \approx 10^{34} \text{ Gcm}^3$

Beobachtete Eigenschaften von Kataklysmischen Variablen (CVs)

- ▶ ≥ 1600 Objekte bekannt, davon ca. 650 mit bekannter Bahnperiode
 - (→ Ritter & Kolb 2003, A&A 404, 301; Downes et al. 2001, PASP 113, 764)
- ▶ die meisten CVs sind alte Pop. I Objekte, \exists einige wenige in Kugelhaufen
- ▶ CVs werden in zahlreiche Unterklassen eingeteilt, hauptsächlich nach dem photometrischen Verhalten und der Magnetisierung des Weissen Zwergs, u.a. unterscheidet man:
 - klassische Novae (N)
 - Zwergnovae (DN) + Unterklassen
 - novaähnliche Systeme (NL) + Unterklassen
 - magnetische Systeme (AM, IP, DQ, ...)
 - und andere mehr

N.B.: diese Klassen sind nicht disjunkt!

- ▶ Die Bahnperioden sind im wesentlichen bimodal verteilt!

$\lesssim 50\%$ mit $78 \text{ min} \leq P \leq 2^h$ } \rightarrow nur relativ wenige mit $2^h \lesssim P \lesssim 3^h$
 $\lesssim 50\%$ mit $3^h \lesssim P \lesssim 16^h$ } \rightarrow sog. Periodenlücke

\exists einige Systeme mit $10 \text{ min} \lesssim P \lesssim 40 \text{ min}$ und wenige mit $P \gtrsim 2^d$;
 alle Unterklassen "respektieren" die Lücke (mehr oder weniger).

- ▶ Die Sekundärsterne sind vorwiegend massearme "Hauptreihensterne"

- ▶ Die Massentransferraten sind nicht genau bekannt; typische Werte:
 oberhalb der Lücke ($P \gtrsim 3^h$): $10^{-9} M_{\odot} / \text{a} \lesssim \langle -\dot{M}_2 \rangle \lesssim 10^{-8} M_{\odot} / \text{a}$,
 unterhalb der Lücke ($78 \text{ min} \leq P \lesssim 2^h$): $10^{-11} M_{\odot} / \text{a} \lesssim \langle -\dot{M}_2 \rangle \lesssim 10^{-10} M_{\odot} / \text{a}$.

Bei jedem $P \exists$ Streuung von $-\dot{M}_2$ von mindestens einem Faktor 10!
 Die Ursache dafür ist nicht genau bekannt.

\rightarrow Entwicklungszeitskala ($-\dot{M}_2 / \dot{M}_2$): oberhalb der Lücke $\sim 10^8 \text{ a}$
 unterhalb der Lücke $\sim 10^9 \text{ a}$

- ▶ Die Massen sind im allgemeinen nicht oder nur ungenau bekannt. \exists "glaubhafte" Massen für nur ganz wenige Systeme (~ 20).

\rightarrow mittlere beobachtete Masse der WZ in CVs $\langle M_{wz} \rangle_{cv} \approx 0.8 M_{\odot}$ ist deutlich grösser als die mittlere Masse isolierter WZ $\langle M_{wz} \rangle \approx 0.6 M_{\odot}$.

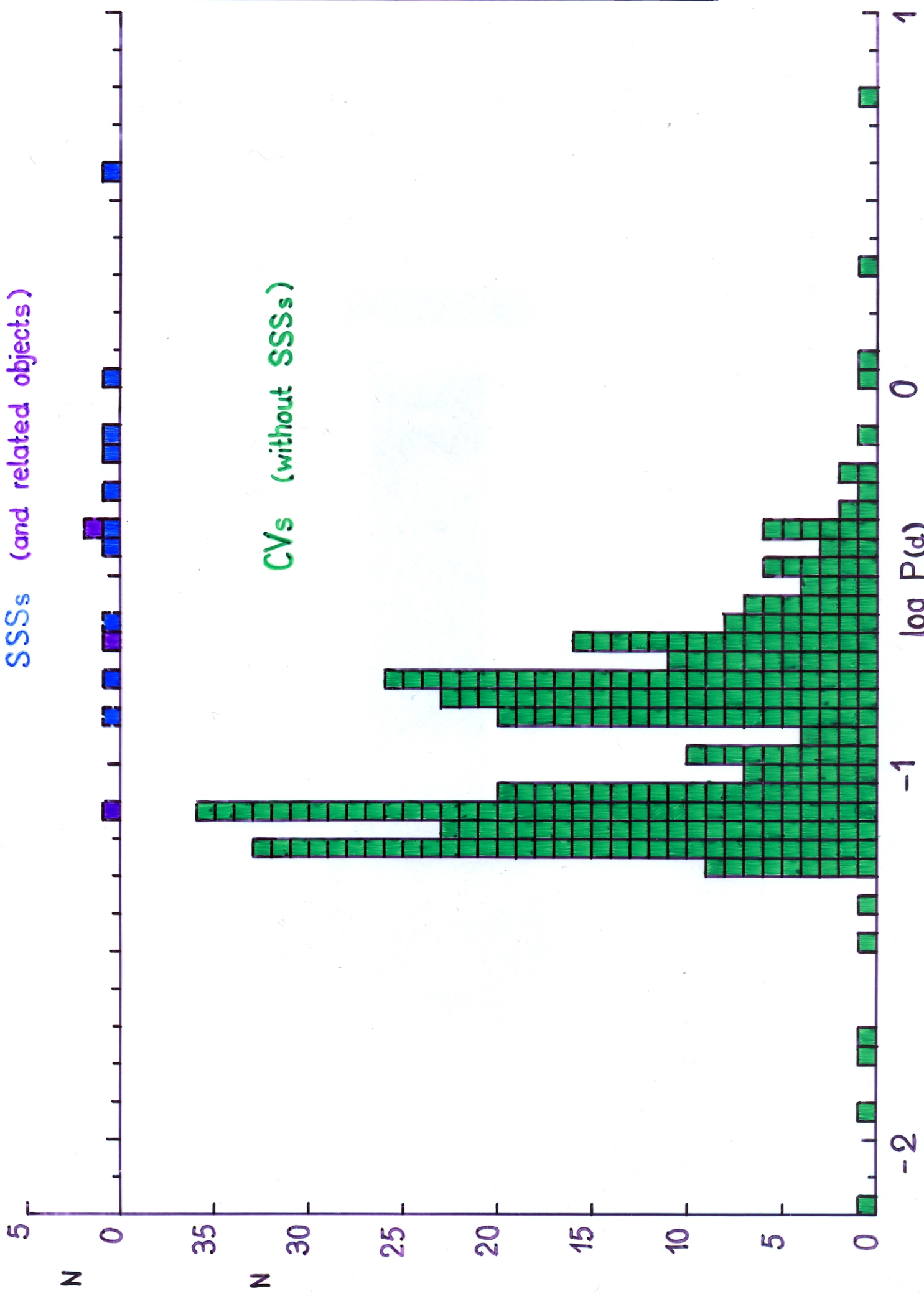
Distribution of the orbital periods of CVs and SSSs

4/99

V/C**1/5

SSSs (and related objects)

CVs (without SSSs)



Supersoft X-Ray Sources (SSS)

a) Was sind SSS ?

- ▶ leuchtkräftige Röntgenquellen mit $L_{bol} \sim L_{Edd}(1M_{\odot}) \approx 5 \cdot 10^4 L_{\odot} (1+X)^{-1}$
mit Schwarzkörper-Temperaturen $kT_{bb} \approx 10 - 100 \text{ eV} (\hat{=} 10^5 - 10^6 \text{ K})$
→ $R \approx 0.5 R_{\odot} \dots 0.005 R_{\odot}$

Beobachtungskriterien (zur Ausgrenzung der SSS gegen andere Quellen)

- $\approx 90\%$ der Photonen mit $h\nu \lesssim 0.5 \text{ keV}$, sehr weiches Röntgenspektrum.
- kein Vordergrundobjekt geringer Leuchtkraft (wie etwa WZ, kühler Stern mit Korona, CV (insbesondere AM Her Sterne!), ect.), kein Fluss im EUV-Bereich ($h\nu \approx$ einige 10 eV) beobachtet.
- Anhaltspunkte für grosse Entfernung (→ grosse Leuchtkraft)

b) Was beobachtet(e) man, und wo ? (haupts. mit ROSAT)

Da nahe (leuchtschwache) Quellen ausgeschlossen sind (→ Beobachtungskriterien), sieht man die SSS bevorzugt in Richtung geringer H-Säulendichte. (N.B. Strahlung im Bereich $13.5 \text{ eV} < h\nu \lesssim 0.1 - 1 \text{ keV}$ wird durch neutralen Wasserstoff im interstellaren Gas stark absorbiert → Figur).

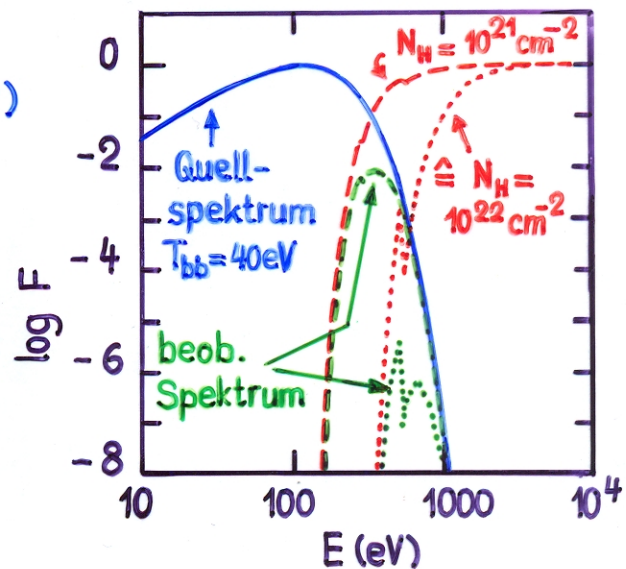
- in hohen galaktischen Breiten
- LMC, SMC, M31, und einige wenige in der Milchstrasse (MW)

Zusammenstellung der SSS

→ Tabelle

Welche Objekte ?

- junge, sehr heisse WZ ($T > 10^5 \text{ K}$)
- Zentralsterne von Planetarischen Nebeln
- alte Novae (Jahre nach dem Ausbruch)
- symbiotische Sterne, symbiotische Novae
- andere, kurzperiodische Doppelsterne, $P \approx 0.5 \dots$ einige Tage



} enge Doppelsterne

Table 1. Summary of all known supersoft X-ray sources with luminosities above 10^{36} erg/s excluding PG 1159-type stars and supersoft AGN.

| Name | Count rate ⁽¹⁾ (cts/s) | T ⁽²⁾ (eV) | L _{bol} (erg/s) | Type | Period |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------|---------|
| Large Magellanic Cloud | | | | | |
| RX J0439.8-6809 | 1.35 | 20-25 (wd) | $10-14 \times 10^{37}$ | SSS | 3.37 h |
| RX J0513.9-6951 | <0.06-2.0 | 30-40 (bb) | $0.1-2 \times 10^{38}$ | SSS | 18.24 h |
| RX J0527.8-6954 | 0.004-0.25 | 18-45 (bb) | $1-10 \times 10^{37}$ | SSS? | 9.42 h |
| RX J0537.7-7034 | 0.02 | 18-30 (bb) | $0.6-2 \times 10^{37}$ | | |
| CAL 83 | 0.98 | 20-50 (bb) | $1-10 \times 10^{38}$ | SSS | 1.04 d |
| CAL 87 | 0.09 | 65-75 (wd) | $6-20 \times 10^{37}$ | SSS | 10.6 h |
| RX J0550.0-7151 | <0.02-0.9 | 25-40 (bb) | | | |
| Small Magellanic Cloud | | | | | |
| 1E 0035.4-7230 | 0.33 | 40-50 (wd) | $0.8-2 \times 10^{37}$ | SSS | 4.1 h |
| RX J0048.4-7332 | 0.19 | 25-45 (wd) | $1-8 \times 10^{38}$ | Sy | |
| RX J0058.6-7146 | <0.001-0.7 | 15-70 (bb) | 2×10^{36} | | |
| 1E 0056.8-7154 | 0.29 | 30-40 (wd) | 2×10^{37} | PN | |
| Andromeda Galaxy (M31) | | | | | |
| RX J0037.4+4015 | 0.3×10^{-3} | 43 | | | |
| RX J0038.5+4014 | 0.8×10^{-3} | 45 | | | |
| RX J0038.6+4020 | 1.7×10^{-3} | 43 | | | |
| RX J0039.6+4054 | 0.4×10^{-3} | 45 | | | |
| RX J0040.4+4009 | 0.8×10^{-3} | 42 | | | |
| RX J0040.7+4015 | 1.3×10^{-3} | 42 | | | |
| RX J0041.5+4040 | 0.3×10^{-3} | 40 | | | |
| RX J0041.8+4059 | 0.5×10^{-3} | 43 | | | |
| RX J0042.4+4044 | 1.7×10^{-3} | 43 | | | |
| RX J0043.5+4207 | 2.2×10^{-3} | 45 | | | |
| RX J0044.0+4118 | 2.5×10^{-3} | 42 | | | |
| RX J0045.4+4154 | < 10^{-5} -0.03 | 70-90 (wd) | $5-10 \times 10^{37}$ | | |
| RX J0045.5+4206 | 3.1×10^{-3} | 20-48 (bb) | 7×10^{37} | | |
| RX J0046.2+4144 | 2.1×10^{-3} | 38 | | | |
| RX J0046.2+4138 | 1.1×10^{-3} | 40 | | | |
| RX J0047.6+4205 | 1.0×10^{-3} | 39 | | | |
| Galactic Sources | | | | | |
| RX J0019.8+2156 | 2.0 | 25-37 (wd) | $3-9 \times 10^{36}$ | SSS | 15.85 h |
| RX J0925.7-4758 | 1.0 | 70-75 (wd) | $3-7 \times 10^{35(3)}$ | SSS | 3.5-4 d |
| GQ Mus | 0.1 | 25-35 (bb) | $1-2 \times 10^{38}$ | N | 1.41 h |
| 1E 1339.8+2837 | 0.01-1.1 | 20-45 (bb) | $0.12-10 \times 10^{35}$ | | |
| AG Dra | 1.0 | 10-15 (bb) | $1.4 \times 10^{36(3)}$ | Sy | 554 d |
| RR Tel | 0.18 | 12 (wd) | 1.3×10^{37} | Sy | 387 d |
| Nova Cyg 1992 | 0.03-76 | | 2×10^{38} | N | 1.95 h |

(1) Count rates in the ROSAT PSPC corrected for vignetting, i.e. absorbed on-axis count rates. Count rates in the HRI have been converted to PSPC rates using a conversion factor of PSPC/HRI = 7.8 (Greiner et al. 1996a).

(2) Temperatures for the M31 sources are the maximum blackbody temperatures derived from the hardness ratios at the appropriate absorbing column (Greiner et al. 1996b).

(3) Luminosity for assumed distance of 1 kpc.

c) theoretische Deutung der SSS

E1.7

2/94

► nuklear brennende Weisse Zwerge

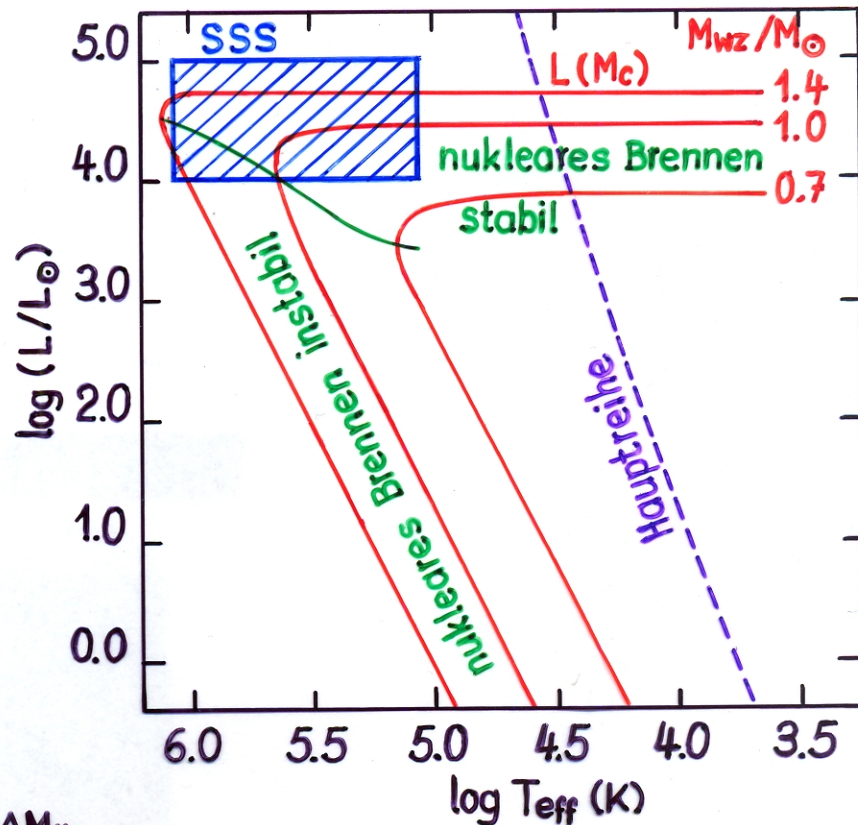
- Einzelsterne, oder
- in engen Doppelsternen

SSS als Einzelsterne

- Objekte im Übergang vom AGB zu den WZ, ev. mit spätem thermischen Puls: PG 1159-Objekte, ZPN

nukleares Brennen mit $L = L(M_c)$ ist thermisch stabil, Zeitskala $\tau_{nuc} = \frac{\Delta M_H}{X_0 Q L(M_c)}$

nukleares Brennen mit $R \approx R_{WZ}(M_c)$ ist säkular instabil.



SSS in engen Doppelsternen

► akkretierende Weisse Zwerge

- mit thermisch stabilem nuklearem H-Brennen, wenn $\dot{M}_{accr} \gtrsim 10^{-7} M_\odot/a$
z.B. in "CVs" mit therm. instabilem Massentransfer, d.h. wenn $M_2 > M_1/q_{crit} \gtrsim 1.6 M_\odot \rightarrow$ Umlaufzeit $P \gtrsim 0.5$ d, oder
in CVs mit einem nuklear weit entwickelten Sekundärstern (Riese) \rightarrow symbiotische Sterne mit $P \gtrsim 10^2$ d.
- mit thermisch instabilem nuklearem H-Brennen
z.B. in Form von H-Schalen-Flashes, wenn $10^{-9} M_\odot/a \lesssim \dot{M}_{accr} \lesssim 10^{-7} M_\odot/a$
 \rightarrow sog. symbiotische Novae, oder
in Form von Novae (Jahre nach dem Ausbruch), wenn $\dot{M}_{accr} \lesssim 10^{-9} M_\odot/a$

Massearme Röntgendoppelsterne

Inventar (Liu et al. 2001, A&A 368, 1021)

150 Objekte (in der Milchstrasse, Kugelsternhaufen, grosse Magellansche Wolke)

63 mit Röntgenausbrüchen (sog. X-ray bursts)

5 Röntgenpulsare

75 transiente (nicht immer sichtbare) Quellen

11 mit einem Schwarzen Loch ($M_c > 3M_\odot$)
+ 8 weitere Kandidaten

5 Jet-Quellen (sog. Mikroquasare)

N. B.
diese
Kategorien
sind nicht
notwendiger-
weise
disjunkt !

Vorkommen

Milchstrasse : ~ 135

Kugelsternhaufen : 13

LMC 2

SMC —

Röntgenleuchtkraft

typisch: $250 L_\odot - 25'000 L_\odot$

helle Quellen im galaktischen Zentrum: $20'000 L_\odot - 60'000 L_\odot$

Quellen mit Röntgenausbrüchen : $4'000 L_\odot - 20'000 L_\odot$

→ sehr helle Objekte, und da Röntgenstrahlung sehr durchdringend ist:

Inventar der dauernd hellen Objekte ist nahezu vollständig

(Zahl der transienten Quellen wächst nach wie vor)

1) Statistik

Milchstrasse : \exists 135 LMXBs, davon ~ 120 NS-LMXBs, ~ 15 BH-LMXBs
von den ~ 120 NS-LMXBs sind 63 X-ray burster

Kugelhaufen : \exists 13 LMXBs, davon 13 NS-LMXBs,
von den 13 NS-LMXBs sind 11 X-ray burster

LMC : \exists 2 LMXBs

- Milchstrasse: $\sim 50\%$ der NS-LMXBs sind X-ray burster
Kugelhaufen: $\sim 90\%$ " " " " " " " "

2) Leuchtkraft, Akkretionsrate

typisch $L_{\text{LMXB}} \approx 10^{36} - 10^{38} \text{ erg s}^{-1} \triangleq \dot{M} \approx (10^{-10} - 10^{-8}) \frac{M_{\odot}}{a} R_6 \left(\frac{M_{\text{NS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-1}$

bright galactic bulge sources (BGBS): $L \approx (0.7 - 2.4) 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$
 $\triangleq \dot{M} \approx (0.6 - 2.0) 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{a} R_6 \left(\frac{M_{\text{NS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-1}$

Röntgen burster : $L \approx (0.15 - 0.8) 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$
 $\triangleq \dot{M} \approx (1.3 - 6.8) 10^{-9} \frac{M_{\odot}}{a} R_6 \left(\frac{M_{\text{NS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-1}$

3) Kinematik, Raumverteilung, Populationen

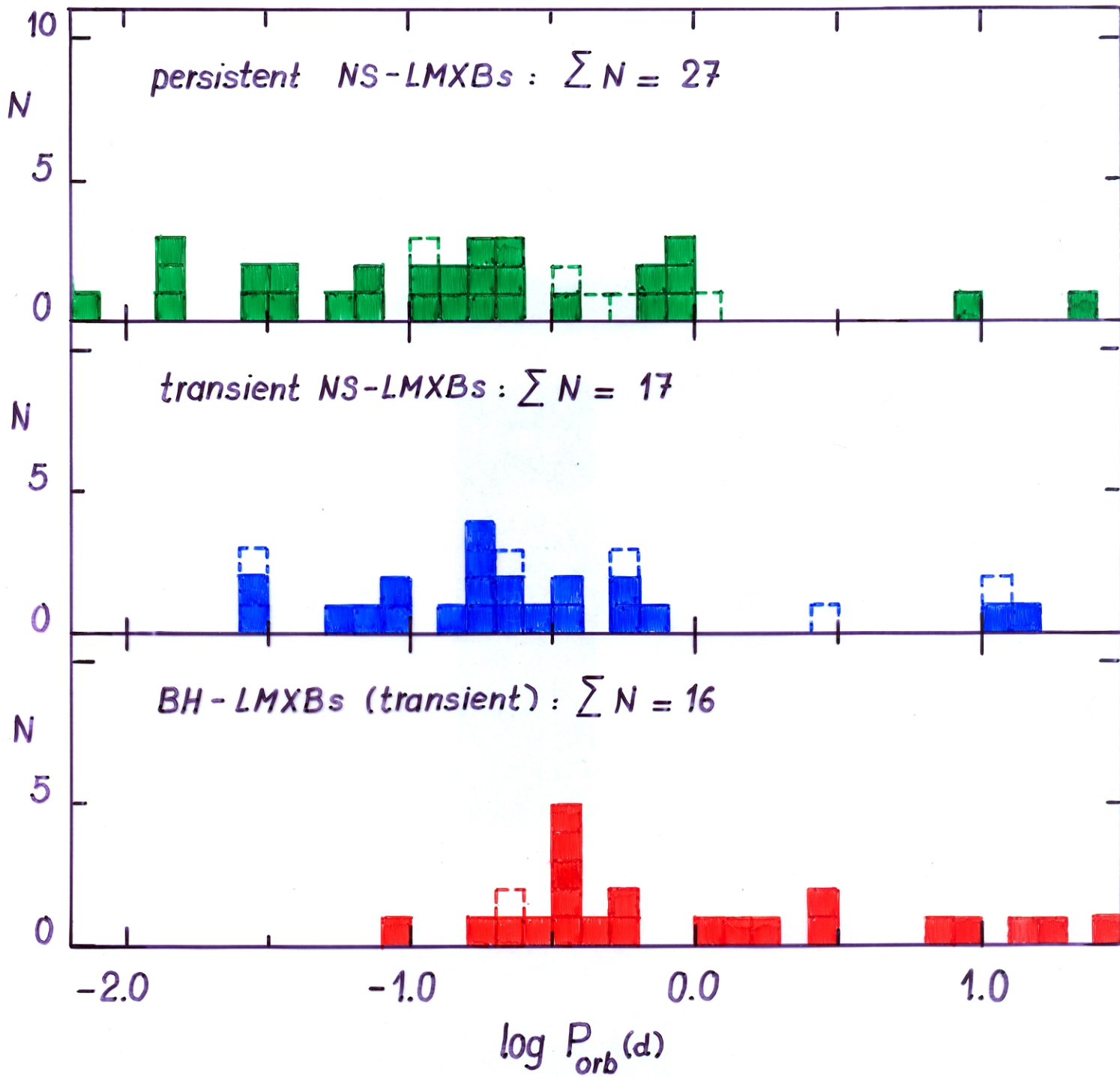
- Dispersion der Raumgeschwindigkeiten $\sigma_v \approx 120 \text{ km s}^{-1}$
- mittlere gal. Breite $\langle b \rangle \approx 9.2$
- mittlerer Abstand von der gal. Ebene $\langle z \rangle \approx 500 \text{ pc}$
- mittlere Geschw. \perp zur gal. Ebene $\langle \dot{z} \rangle \approx 30 \text{ km s}^{-1}$

→ LMXBs sind alte Objekte, Alter $\gtrsim 10^{10} a$, aber

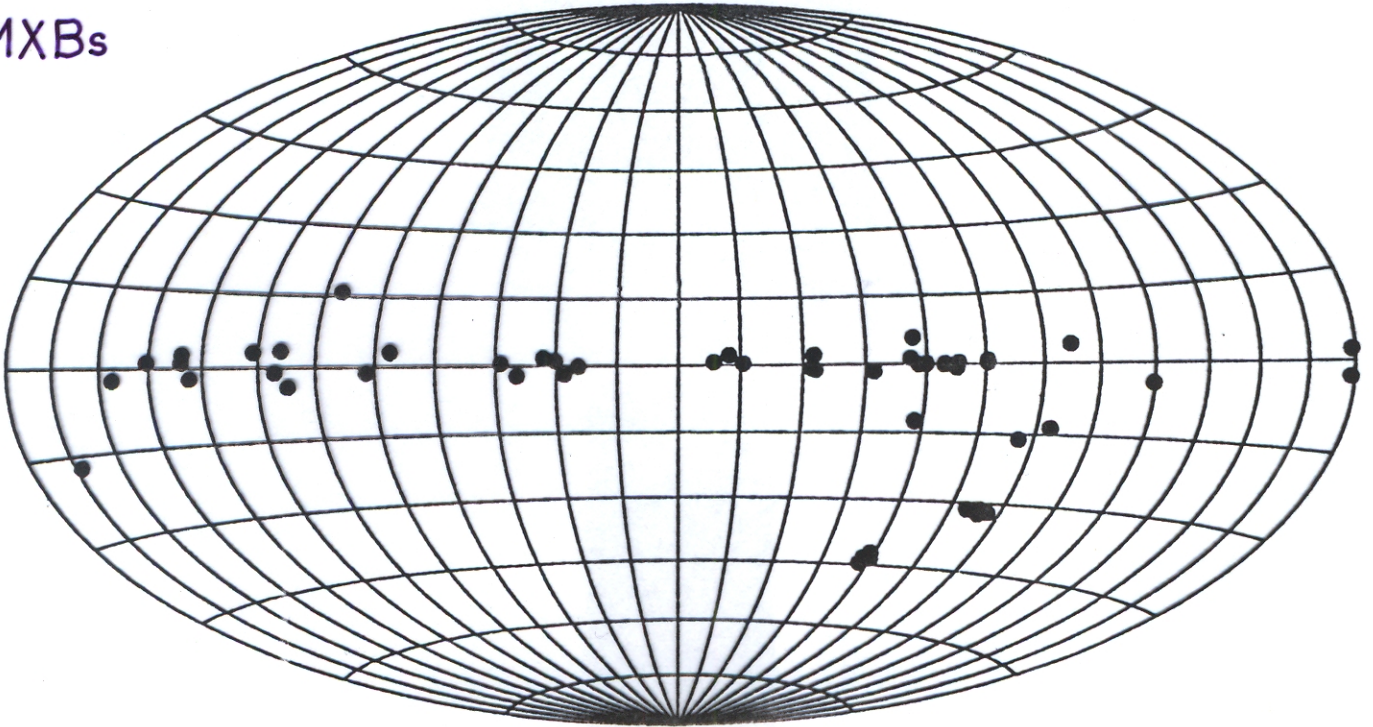
\exists möglicherweise 3 Populationen (Naylor & Podsiadlowski 1993)

- Scheiben LMXBs (burster) : Alter $\approx 10^7 - 10^8 a$
- Kern LMXBs (BGBS) : Alter $> 10^9 a$
- Kugelhaufen LMXBs (burster)

The orbital periods of low-mass X-ray binaries



HMXBs



LMXBs

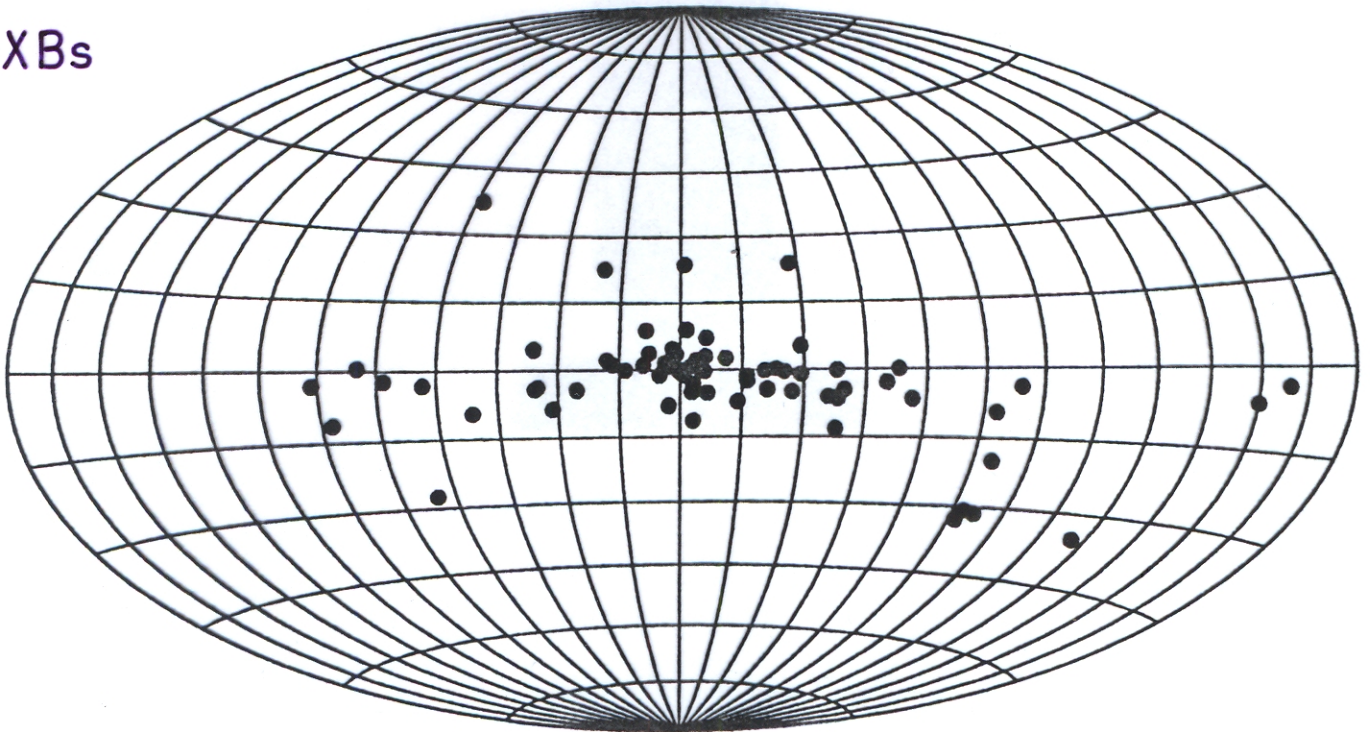


Fig. 7: Sky maps (in galactic coordinates) of the high-mass X-ray binaries (top panel) and low-mass X-ray binaries (bottom panel); the latter also include the globular-cluster sources.

Observed properties of Black Hole candidates

(updated October 2006)

| 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) |
|------------|------|------------|------------------|-----------------|-----------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| V1487 Aql | LMXB | 30.8 | K-M III | 140 ± 15 | 9.5 ± 3.0 | 70 ± 2? | 10 - 18? | 1.0 - 1.4 |
| V404 Cyg | LMXB | 6.4714 | K0 III-V | 208.5 ± 0.7 | 6.08 ± 0.06 | 56 ± 4 | 10.06 - 13.38 | 0.5 - 0.8 |
| Cyg X-1 | HMXB | 5.59983 | O9.7 Iab | 74.9 ± 0.5 | 0.244 ± 0.005 | 35 ± 5 | 6.85 - 13.25 | 12 - 27 |
| LMC X-1 | HMXB | 4.2288 | O9-7 III | 68 ± 8 | 0.14 ± 0.05 | ≈ 63? | 4.0 - 10.0? | |
| LS 5039 | HMXB | 3.9060 | ON6.5 V | 25.2 ± 1.4 | 0.0053 ± 0.0009 | 25 ± 3 | 2.7 - 5.0 | 20.0 - 26.3 |
| V4641 Sgr | IMXB | 2.81730 | B9 III | 220.5 ± 3.0 | 3.13 ± 0.13 | 75 ± 2 | 6.82 - 7.42 | 2.92 - 3.26 |
| V1033 Sco | IMXB | 2.6219 | F6 IV | 215.5 ± 2.4 | 2.73 ± 0.09 | 70.2 ± 1.2 | 6.03 - 6.57 | 2.25 - 2.75 |
| BW Cir | LMXB | 2.54448 | G0-5 III | 279 ± 5 | 7.34 ± 0.46 | < 77 | > 7.83(50) | > 1.02(6) |
| V821 Ara | LMXB | 1.7557 | F8-G2 II | 317 ± 10 | 5.8 ± 0.5 | | | |
| LMC X-3 | HMXB | 1.70479 | B3 V | 235 ± 11 | 2.29 ± 0.32 | 67 ± 3 | 5.94 - 9.17 | 3.0 - 8.3 |
| V381 Nor | LMXB | 1.5435 | G8 IV-K3 II | 349 ± 12 | 6.86 ± 0.71 | 72 ± 5 | 8.36 - 10.76 | < 0.9 |
| IL Lup | IMXB | 1.116407 | A2 V | 129 ± 2 | 0.25 ± 0.01 | 20.7 ± 1.5 | 8.45 - 10.39 | 2.3 - 3.2 |
| V2107 Oph | LMXB | 0.521 | K5 V | 448 ± 4 | 4.86 ± 0.13 | > 60 | 6.64 - 8.30 | > 0.3 |
| GU Mus | LMXB | 0.432606 | K3-4 V | 408 ± 8 | 3.01 ± 0.15 | 54 ± 2 | 6.47 - 8.18 | 0.7 - 1.7 |
| V406 Vul | LMXB | 0.382 | G5 | 570 ± 27 | 7.4 ± 1.1 | | 7.6 - 12.0? | |
| QZ Vul | LMXB | 0.344092 | K3-6 V | 519.9 ± 5.1 | 5.01 ± 0.12 | 64 ± 1.3 | 7.15 - 7.78 | 0.25 - 0.41 |
| V616 Mon | LMXB | 0.323016 | K4 V | 433 ± 3 | 2.72 ± 0.06 | 40.8 ± 3.0 | 8.70 - 12.86 | 0.48 - 0.97 |
| J1650-4957 | LMXB | 0.3205 | K4 V | 435 ± 30 | 2.73 ± 0.56 | > 50 ± 3 | | |
| MM Vel | LMXB | 0.285206 | K7-M0 V | 475.4 ± 5.9 | 3.17 ± 0.12 | 67? | 3.64 - 4.74? | 0.45 - 0.75? |
| V518 Per | LMXB | 0.212160 | M4-5 V | 378 ± 2 | 1.19 ± 0.02 | 44 ± 2 | 3.66 - 4.97 | 0.28 - 1.55 |
| KV UMa | LMXB | 0.169930 | K7 V-M0 V | 701 ± 10 | 6.1 ± 0.3 | 81 ± 2 | 6.48 - 7.19 | 0.22 - 0.32 |

ms-pulsars and pulsars in binaries: overview

(updated 18 September 2006)

| PSR | Pspin(ms) | dP/dt | Porb(d) | e | M1/Msun | M2/Msun | in GC | in the | msPSR? |
|-------------|--------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|--------|
| B0021-72C | 5.7567800 | -4.99(-20) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72D | 5.3575733 | -3.33(-21) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72E | 3.5363292 | 9.85(-20) | 2.25684 | 0.000318 | | >0.15 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72F | 2.6235794 | 6.45(-20) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72G | 4.0403791 | -4.22(-20) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72H | 3.2103407 | -1.62(-21) | 2.35770 | 0.070557 | 1.61(4) | >0.16 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72I | 3.4849921 | -4.59(-20) | 0.22979 | <0.0004 | | >0.013 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72J | 2.1006335 | -9.79(-21) | 0.12066 | <0.00004 | | >0.021 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72L | 4.3461680 | -1.22(-19) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72M | 3.6766432 | -3.84(-20) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72N | 3.0539543 | -2.19(-20) | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72O | 2.6433433 | 3.04(-20) | 0.13597 | <0.00016 | | >0.022 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72P | 3.643021 | | 0.1472 | 0.0 | | >0.017 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72Q | 4.0331812 | 3.40(-20) | 1.18908 | 0.000085 | | >0.18 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72R | 3.480463 | | 0.0662 | 0.0 | | >0.026 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72S | 2.8304060 | -1.21(-19) | 1.20172 | 0.000394 | | >0.088 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72T | 7.5884798 | 2.94(-19) | 1.12618 | 0.00040 | | >0.17 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72U | 4.3428267 | 9.52(-20) | 0.42911 | 0.000149 | | >0.17 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72V | 4.810 | | 0.227 | 0.0 | | >0.34 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72W | 2.352344 | | 0.13294 | 0.0 | | >0.13 | 47 Tuc | | + |
| B0021-72X | 4.771 | | | | | | 47 Tuc | | + |
| B0021-72Y | 2.19666 | | 0.52194 | 0.0 | | >0.13 | 47 Tuc | | + |
| J0030+0451 | 4.8654532 | 1.0(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J0034-0534 | 1.8778185 | 0.7(-20) | 1.58928 | 0.000015 | | >0.15 | | Galaxy | + |
| J0045-7319 | 926.2759050 | 4.46(-15) | 51.16945 | 0.807949 | | -8.8 | | SMC | + |
| J0218+4232 | 2.3230905 | 7.74(-20) | 2.02885 | 0.000051 | | >0.16 | | Galaxy | + |
| J0407+1607 | 25.7017392 | 7.9(-20) | 696.0704 | 0.000937 | | >0.2 | | Galaxy | + |
| J0437-4715 | 5.7574518 | 5.73(-20) | 5.74104 | 0.000019 | 1.58(18) | 0.236(17) | | Galaxy | + |
| J0514-4002A | 4.990576 | | 18.7850 | 0.889 | | >0.9 | NGC 1851 | | + |
| J0609+2130 | 55.6980139 | 2.35(-19) | | | | | | Galaxy | + |
| J0610-2100 | 3.8613247 | 1.24(-20) | 0.28602 | | | | | Galaxy | + |
| J0613-0200 | 3.0618440 | 9.57(-21) | 1.19851 | 0.000004 | | >0.13 | | Galaxy | + |
| J0621+1002 | 28.8538607 | 4.73(-20) | 8.31868 | 0.002457 | 1.41-2.02 | 0.82-1.24 | | Galaxy | + |
| B0655+64 | 195.6709450 | 6.86(-19) | 1.02867 | 7.5(-6) | | 0.7: | | Galaxy | + |
| J0711-6830 | 5.4909684 | 1.49(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J0737-3039A | 22.6993786 | 1.76(-18) | 0.10225 | 0.087778 | 1.338(1) | 1.249(1) | | Galaxy | + |
| J0737-3039B | 2773.4607474 | 0.88(-15) | 0.10225 | 0.087778 | 1.249(1) | 1.338(1) | | Galaxy | + |
| J0751+1807 | 3.4787708 | 7.27(-21) | 0.26314 | <5(-7) | 2.1(2) | 0.191(15) | | Galaxy | + |
| B0820+02 | 864.8727519 | 1.04(-16) | 1232.404 | 0.011869 | | 0.60(8) | | Galaxy | + |
| J0900-3144 | 11.1096492 | 4.91(-20) | 18.73764 | 1.03(-5) | | | | Galaxy | + |
| J1012+5307 | 5.2560552 | 7.27(-21) | 0.60467 | <1.3(-6) | 1.64(22) | 0.156(2) | | Galaxy | + |
| J1022+1001 | 16.4529297 | 4.33(-20) | 7.80513 | 0.000097 | | >0.9 | | Galaxy | + |
| J1024-0719 | 5.1622005 | 1.87(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J1038+0032 | 28.8515580 | 6.7(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J1045-4509 | 7.4742241 | 1.77(-20) | 4.08353 | 0.000020 | | >0.16 | | Galaxy | + |
| J1125-6014 | 2.6303807 | 4.01(-21) | 8.75260 | 8(-7) | | >0.28 | | Galaxy | + |
| J1141-6545 | 393.8978340 | 4.29(-15) | 0.19765 | 0.171876 | 1.30(2) | 0.986(20) | | Galaxy | + |
| J1157-5112 | 43.5892271 | 1.43(-19) | 3.50739 | 0.000402 | | >1.18 | | Galaxy | + |
| J1216-6410 | 3.5393757 | 1.6(-21) | 4.03673 | 7(-6) | | >0.16 | | Galaxy | + |
| J1232-6501 | 88.2819082 | 8.1(-19) | 1.86327 | 0.00011 | | >0.14 | | Galaxy | + |
| B1259-63 | 47.7620535 | 2.28(-15) | 1236.72432 | 0.869007 | | >3.2 | | Galaxy | + |
| B1310+18 | 33.163166 | | 255.84 | <0.01 | | >0.29 | M 53 | | + |
| J1342+2822A | 2.545 | | | | | | M 3 | | + |
| J1342+2822B | 2.389 | | 1.42 | 0.0 | | >0.20 | M 3 | | + |
| J1342+2822C | 2.166 | | | | | | M 3 | | + |
| J1342+2822D | 5.443 | | | | | | M 3 | | + |
| J1420-5625 | 34.1171308 | 6.8(-20) | 40.29452 | 0.003500 | | >0.37 | | Galaxy | + |
| J1435-6100 | 9.3479722 | 2.45(-20) | 1.35489 | 0.000010 | | >0.90 | | Galaxy | + |
| J1439-5501 | 28.6348882 | 1.42(-19) | 2.11794 | 0.00005 | | >1.11 | | Galaxy | + |
| J1453+19 | 5.79 | | | | | | | Galaxy | + |
| J1454-5846 | 45.2487730 | 8.16(-19) | 12.42307 | 0.001898 | | >0.87 | | Galaxy | + |
| J1455-3330 | 7.9872048 | 2.42(-20) | 76.17457 | 0.000170 | | >0.27 | | Galaxy | + |
| B1516+02A | 5.5535925 | 4.12(-20) | | | | | M 5 | | + |
| B1516+02B | 7.9469407 | -0.33(-20) | 6.85845 | 0.13784 | | >0.11 | M 5 | | + |
| B1516+02C | 2.484 | | 0.0867 | 0.0 | | >0.038 | M 5 | | + |
| B1516+02D | 2.988 | | 1.22 | 0.0 | | >0.19 | M 5 | | + |
| B1516+02E | 3.182 | | 1.096 | 0.0 | | >0.14 | M 5 | | + |
| J1518+4904 | 40.9349883 | <4(-20) | 8.63400 | 0.249484 | | | | Galaxy | + |
| J1528-3144 | 60.8222304 | 2.49(-19) | 3.18035 | 0.000213 | | >0.94 | | Galaxy | + |
| B1534+12 | 37.9044408 | 2.42(-18) | 0.42074 | 0.273677 | 1.333(1) | 1.35(8) | | Galaxy | + |
| J1551-49 | 6.284 | | | | | | | Galaxy | + |
| J1600-3053 | 3.5979285 | 9.48(-21) | 14.34846 | 0.000174 | | >0.20 | | Galaxy | + |
| J1603-7202 | 14.8419520 | 1.56(-20) | 6.30863 | 0.000009 | | >0.29 | | Galaxy | + |
| J1614-2230 | 3.151 | | 8.68 | | | >0.40 | | Galaxy | + |
| J1614-2318 | 33.50 | | 3.15 | | | >0.08 | | Galaxy | + |
| J1618-3919 | 11.987313 | | 22.8 | | | >0.18 | | Galaxy | + |
| B1620-26 | 11.0757509 | 9.77(-19) | 191.44281 | 0.025315 | | 0.34(4) | M 4 | | + |
| J1629-6902 | 6.0006003 | 1.00(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J1638-4715 | 763.9335 | 4.8(-15) | 1940. | 0.95 | | >4.5 | | Galaxy | + |
| B1639+36A | 10.3775095 | <4.5(-20) | | | | | M 13 | | + |
| B1639+36B | 3.528072 | | 1.25911 | <0.001 | | >0.15 | M 13 | | + |
| B1639+36C | 3.722 | | | | | | M 13 | | + |
| B1639+36D | 3.118 | | 0.592 | -0.0006 | | >0.18 | M 13 | | + |
| B1639+36E | 2.487 | | 0.213 | 0.0 | | >0.061 | M 13 | | + |
| J1640+2224 | 3.1633158 | 2.83(-21) | 175.46066 | 0.000797 | | 0.10-0.23 | | Galaxy | + |
| J1643-1224 | 4.6216414 | 1.85(-20) | 147.01739 | 0.000506 | | >0.13 | | Galaxy | + |
| J1701-3006A | 5.2415662 | -1.32(-19) | 3.80595 | <0.000004 | | >0.20 | NGC 6266 | | + |
| J1701-3006B | 3.5938522 | -3.50(-19) | 0.14455 | <0.00007 | | >0.12 | NGC 6266 | | + |
| J1701-3006C | 3.8064244 | -3.19(-20) | 0.21500 | <0.00006 | | >0.07 | NGC 6266 | | + |
| J1701-3006D | 3.418 | | 1.118 | 0.0 | | >0.12 | NGC 6266 | | + |
| J1701-3006E | 3.234 | | 0.16 | 0.0 | | >0.03 | NGC 6266 | | + |
| J1701-3006F | 2.295 | | 0.20 | 0.0 | | >0.018 | NGC 6266 | | + |
| J1709+2313 | 4.6311963 | 3.63(-21) | 22.71189 | 0.000019 | | >0.27 | | Galaxy | + |
| J1711-4322 | 102.6182288 | 2.67(-17) | 920.4707 | 0.002375 | | >0.20 | | Galaxy | + |
| J1713+0747 | 4.5701365 | 8.53(-21) | 67.82513 | 0.000075 | 1.3(2) | 0.28(3) | | Galaxy | + |
| B1718-19 | 1004.037129 | 1.59(-15) | 0.25827 | 0.007 | | 0.11-0.35 | NGC 6342 | | + |
| J1721-2457 | 3.4966337 | 0.59(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J1723-28 | 1.856 | | tbd | | | | | Galaxy | + |
| J1726-29 | 27.081 | | | | | | | Galaxy | + |
| J1730-2304 | 8.1227979 | 1.87(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J1732-5049 | 5.3125502 | 1.38(-20) | 5.26300 | 0.000001 | | 0.18 | | Galaxy | + |
| J1737+13 | 3.747 | | | | | | | Galaxy | + |
| J1738+0333 | 5.85 | | 0.35 | | | >0.09 | | Galaxy | + |
| J1740-5340 | 3.6503289 | 1.68(-19) | 1.35406 | <0.0001 | | 0.296 | NGC 6397 | | + |
| J1740-3052 | 570.3095805 | 2.55(-14) | 231.02965 | 0.578872 | | >11. | | Galaxy | + |
| J1741+1351 | 3.7471544 | | 16.335 | | | >0.24 | | Galaxy | + |
| J1744-3922 | 172.4443610 | 1.55(-18) | 0.19141 | 0.0013 | | >0.083 | | Galaxy | + |
| J1744-1134 | 4.0745459 | 8.94(-21) | | | | | | Galaxy | + |
| J1745-0952 | 19.3763031 | 9.5(-20) | 4.94345 | 0.000018 | | >0.11 | | Galaxy | + |
| J1748-2446A | 11.5631484 | -3.4(-20) | 0.07565 | 0.0 | | 0.09-0.11 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446C | 8.4360953 | 6.06(-19) | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446D | 4.71398 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446E | 2.19780 | | 60.06 | -0.02 | | >0.22 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446F | 5.54014 | | | | | | Ter 5 | | + |

| PSR | Pspin(ms) | dP/dt | Porb(d) | e | M1/Msun | M2/Msun | in GC | in the | msPSR? |
|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|--------|
| J1748-2446G | 21.67187 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446H | 4.92589 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446I | 9.57019 | | 1.328 | 0.428 | | >0.24 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446J | 80.33793 | | 1.102 | 0.350 | | >0.38 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446K | 2.96965 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446L | 2.24470 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446M | 3.56957 | | 0.4431 | 0 | | >0.14 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446N | 8.66690 | | 0.3855 | 0.000045 | | >0.48 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446O | 1.67663 | | 0.2595 | 0 | | >0.036 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446P | 1.72862 | | 0.3626 | 0 | | >0.38 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446Q | 2.812 | | > 1? | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446R | 5.02854 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446S | 6.11664 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446T | 7.08491 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446U | 3.289 | | 1.78 | 0.27 | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446V | 2.07251 | | 0.5036 | 0 | | >0.12 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446W | 4.20518 | | 4.877 | 0.015 | | >0.30 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446X | 2.99926 | | 4.9985 | 0.3024 | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446Y | 2.04816 | | 1.17 | 0 | | >0.14 | Ter 5 | | + |
| J1748-2446Z | 2.46259 | | 3.48807 | 0.7608 | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446aa | 5.78804 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446ab | 5.11971 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446ac | 5.08691 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446ad | 1.39595 | | 1.09443 | 0 | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446ae | 3.65859 | | 0.17073 | 0 | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446af | 3.30434 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446ag | 4.44803 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2446ah | 4.96515 | | | | | | Ter 5 | | + |
| J1748-2021B | 16.760 | | 20.550 | 0.570 | | | NGC 6640 | | + |
| J1748-2021C | 6.227 | | | | | | NGC 6640 | | + |
| J1748-2021D | 13.496 | | 0.286 | 0.00 | | | NGC 6640 | | + |
| J1748-2021E | 16.264 | | | | | | NGC 6640 | | + |
| J1750-3703A | 111.609 | | 17.3 | 0.71 | | >0.57 | NGC 6441 | | + |
| J1750-3703B | 6.074 | | 3.61 | 0.0 | | | NGC 6441 | | + |
| J1750-3703C | 26.569 | | | | | | NGC 6441 | | + |
| J1750-3703D | 5.140 | | | | | | NGC 6441 | | + |
| J1751-2857 | 3.9148732 | 1.13(-20) | 110.74646 | 0.000128 | | >0.19 | | Galaxy | + |
| J1756-2251 | 28.4615885 | 1.02(-18) | 0.31963 | 0.180567 | 1.40(3) | 1.18(3) | | Galaxy | + |
| J1757-5322 | 8.8699612 | 2.63(-20) | 0.45331 | 0.000004 | | >0.56 | | Galaxy | + |
| J1801-1417 | 3.6250967 | 5.31(-21) | | | | | | Galaxy | + |
| J1802-2124 | 12.6475936 | 7.2(-20) | 0.69889 | <0.00001 | | >0.81 | | Galaxy | + |
| B1802-07 | 23.1008552 | 4.75(-19) | 2.61676 | 0.212042 | 1.1-1.8 | 0.23-0.46 | NGC 6539 | | + |
| J1803-3002 | 7.101 | | | | | | NGC 6522 | | + |
| J1803-3002B | 4.397 | | | | | | NGC 6522 | | + |
| J1803-3002C | 5.840 | | | | | | NGC 6522 | | + |
| J1803-2712 | 334.4154239 | 1.73(-17) | 406.781 | 0.000507 | | | | Galaxy | + |
| J1804-2717 | 9.3430307 | 4.2(-20) | 11.131 | 0.000031 | | >0.21 | | Galaxy | + |
| J1807-2459A | 3.0594488 | | 0.07109 | 0.0 | | >0.009 | NGC 6544 | | + |
| J1807-2459B | 4.186 | | | | | | NGC 6544 | | + |
| J1810-2005 | 32.8222443 | 1.51(-19) | 15.01202 | 0.000025 | | >0.28 | | Galaxy | + |
| J1811-1736 | 104.1819547 | 1.8(-18) | 18.77917 | 0.82802 | | >0.87 | | Galaxy | + |
| J1813-26 | 4.430 | | | | | | | Galaxy | + |
| B1820-11 | 279.8284508 | 1.38(-15) | 357.76199 | 0.794608 | | | | Galaxy | + |
| B1820-30A | 5.4400023 | 3.39(-18) | | | | | NGC 6624 | | + |
| B1821-24 | 3.0543147 | 1.62(-18) | | | | | M 28 | | + |
| J1822-0848 | 834.8392726 | 1.35(-16) | 286.8303 | 0.058962 | | >0.32 | | Galaxy | + |
| J1823-3021D | 3.020 | | | | | | NGC 6624 | | + |
| J1823-3021E | 4.394 | | | | | | NGC 6624 | | + |
| J1823-3021F | 4.850 | | | | | | NGC 6624 | | + |
| J1824-2452B | 6.547 | | | | | | M 28 | | + |
| J1824-2452C | 4.159 | | | | | | M 28 | | + |
| J1824-2452D | 79.832 | | | | | | M 28 | | + |
| J1824-2452E | 5.420 | | | | | | M 28 | | + |
| J1824-2452F | 2.451 | | | | | | M 28 | | + |
| J1824-2452G | 5.909 | | | | | | M 28 | | + |
| J1824-2452H | 4.629 | | | | | | M 28 | | + |
| J1829-2456 | 41.0098236 | 5.25(-10) | 0.105 | 0.0 | <1.34 | >1.26 | | Galaxy | + |
| B1831-00 | 520.9543082 | 1.43(-17) | 1.17603 | 0.13914 | | | | Galaxy | + |
| J1841+0130 | 29.772775 | 8.17(-18) | 1.81110 | 0.004 | | | | Galaxy | + |
| J1843-14 | 5.471 | | 10.41626 | <0.0001 | | >0.096 | | Galaxy | + |
| J1843-1113 | 1.8456663 | 9.59(-21) | | | | | | Galaxy | + |
| J1853+1303 | 4.0917974 | 8.85(-21) | 115.65379 | 0.000024 | | >0.24 | | Galaxy | + |
| B1855+09 | 5.3621005 | 1.78(-20) | 12.32717 | 0.000022 | 1.46-1.69 | 0.24-0.29 | | Galaxy | + |
| J1904+0412 | 71.0948974 | 1.1(-19) | 14.93426 | 0.00022 | | >0.22 | | Galaxy | + |
| J1905+0154A | 3.193 | | | | | | NGC 6749 | | + |
| J1905+0154B | 4.968 | | | | | | NGC 6749 | | + |
| J1905+0400 | 3.7844048 | 4.86(-21) | | | | | | Galaxy | + |
| J1906+0746 | 144.0719300 | 2.03(-14) | 0.16599 | 0.085303 | | >0.11162 | | Galaxy | + |
| J1909-3744 | 2.9471080 | 1.40(-20) | 1.53345 | <0.000001 | 1.438(24) | 0.204(2) | | Galaxy | + |
| J1911-5958A | 3.2661866 | 2.95(-21) | 0.83711 | -0.000003 | | >0.19 | | Galaxy | + |
| J1910-5959B | 8.3577985 | -7.90(-19) | | | | | NGC 6752 | | + |
| J1911-6000C | 5.2773269 | 2.16(-21) | | | | | NGC 6752 | | + |
| J1910-5959D | 9.0352852 | 9.64(-19) | | | | | NGC 6752 | | + |
| J1910-5959E | 4.5717659 | -4.34(-19) | | | | | NGC 6752 | | + |
| J1910+1256 | 4.9835839 | 9.77(-21) | 58.46674 | 0.000230 | | >0.22 | | Galaxy | + |
| J1911-1114 | 3.6257456 | 1.42(-20) | 2.71656 | 0.000019 | | >0.12 | | Galaxy | + |
| J1911+0102A | 3.6185243 | -6.58(-21) | 0.14100 | <0.00013 | | -0.02 | | Galaxy | + |
| J1911+0101B | 5.3843257 | -2.0(-21) | | | | | NGC 6760 | | + |
| J1911+1347 | 4.6259625 | 1.71(-20) | | | | | NGC 6760 | | + |
| B1913+16 | 59.0299979 | 8.63(-18) | 0.32300 | 0.617133 | 1.4414(2) | 1.3867(2) | | Galaxy | + |
| J1918-0642 | 7.6458728 | 2.4(-20) | 10.91318 | 0.000022 | | >0.24 | | Galaxy | + |
| J1933-6211 | 3.3543431 | 3.7(-21) | 12.81941 | 0.000001 | | >0.32 | | Galaxy | + |
| B1937+214 | 1.5578065 | 1.05(-19) | | | | | | Galaxy | + |
| J1944-0907 | 5.1852019 | 1.71(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| J1953+1846A | 4.888 | | 0.1766 | 0.0 | | >0.032 | M 71 | | + |
| B1953+29 | 6.1331665 | 2.97(-20) | 117.34910 | 0.000330 | | | | Galaxy | + |
| B1957+20 | 1.6074017 | 1.69(-20) | 0.38197 | <0.00004 | | 0.02: | | Galaxy | + |
| J2010-1323 | 5.2232710 | 4.82(-21) | | | | | | Galaxy | + |
| J2016+1948 | 64.9403887 | | 635.039 | 0.00128 | | >0.29 | | Galaxy | (+) |
| J2019+2425 | 3.9345241 | 7.02(-21) | 76.51163 | 0.000111 | | 0.35 | | Galaxy | + |
| J2033+17 | 5.9489575 | | 56.2 | <0.05 | | >0.2 | | Galaxy | + |
| J2051-0827 | 4.5086417 | 1.27(-20) | 0.09911 | <0.000096 | | 0.04 | | Galaxy | + |
| J2124-3358 | 4.9311149 | 2.05(-20) | | | | | | Galaxy | + |
| B2127+11B | 56.1330355 | 9.54(-18) | | | | | M 15 | | + |
| B2127+11C | 30.5292961 | 4.99(-18) | 0.33528 | 0.681395 | 1.358(10) | 1.354(10) | M 15 | | + |
| B2127+12D | 4.8028043 | -1.08(-18) | | | | | M 15 | | + |
| B2127+12E | 4.6514352 | 1.78(-19) | | | | | M 15 | | + |
| B2127+11F | 4.0270427 | 3.2(-20) | | | | | M 15 | | + |
| B2127+11G | 37.6601670 | 1.95(-18) | | | | | M 15 | | + |
| B2127+11H | 6.7433942 | 2.4(-20) | | | | | M 15 | | + |
| J2129-5721 | 3.7263484 | 2.07(-20) | 6.62549 | 0.000007 | | >0.14 | | Galaxy | + |
| J2140-2310A | 11.0193291 | -5.18(-20) | 0.17399 | <0.00012 | | >0.10 | M 30 | | + |
| J2140-2310B | 13.0 | | >0.8 | >0.52 | | >0.02 | M 30 | | + |
| J2145-0750 | 16.0524237 | 2.98(-20) | 6.83890 | 0.000019 | | 0.7-1.0 | | Galaxy | + |
| J2229+2643 | 2.9778193 | 1.46(-21) | 93.01589 | 0.000256 | | | | Galaxy | + |
| J2235+1506 | 59.7673560 | 1.58(-19) | | | | | | Galaxy | + |
| B2303+46 | 1066.3710716 | 5.69(-16) | 12.33955 | 0.658369 | <1.44 | >1.20 | | Galaxy | + |
| J2317+1439 | 3.4452511 | 4.42(-21) | 2.45933 | 5(-7) | | | | Galaxy | + |
| J2322+2057 | 4.8084428 | 9.70(-21) | | | | | | Galaxy | + |

Massereiche Röntgendoppelsterne

Inventar (Liu et al. 2000)

- 130 Objekte (in der Milchstrasse, der grossen und kleinen Magellanschen Wolke)
- 71 Röntgenpulsare
 - 60 *transiente Quellen*
 - 54 *mit einem Be-Stern als Begleiter*
 - 22 *mit einem O/B-Stern als Begleiter*
 - 126 *mit einem Neutronenstern*
 - 4 *mit einem Schwarzen Loch (wahrscheinlich)*
 - 1 *Jet-Quelle (SS 433)*

Vorkommen:

| | | | |
|---------------------------|----|---|---|
| Milchstrasse | 85 | | |
| Grosse Magellansche Wolke | 20 | ⇐ | } relativ sehr grosse Häufigkeit von HMXBs in der LMC und SMC ! |
| Kleine Magellansche Wolke | 25 | ⇐ | |

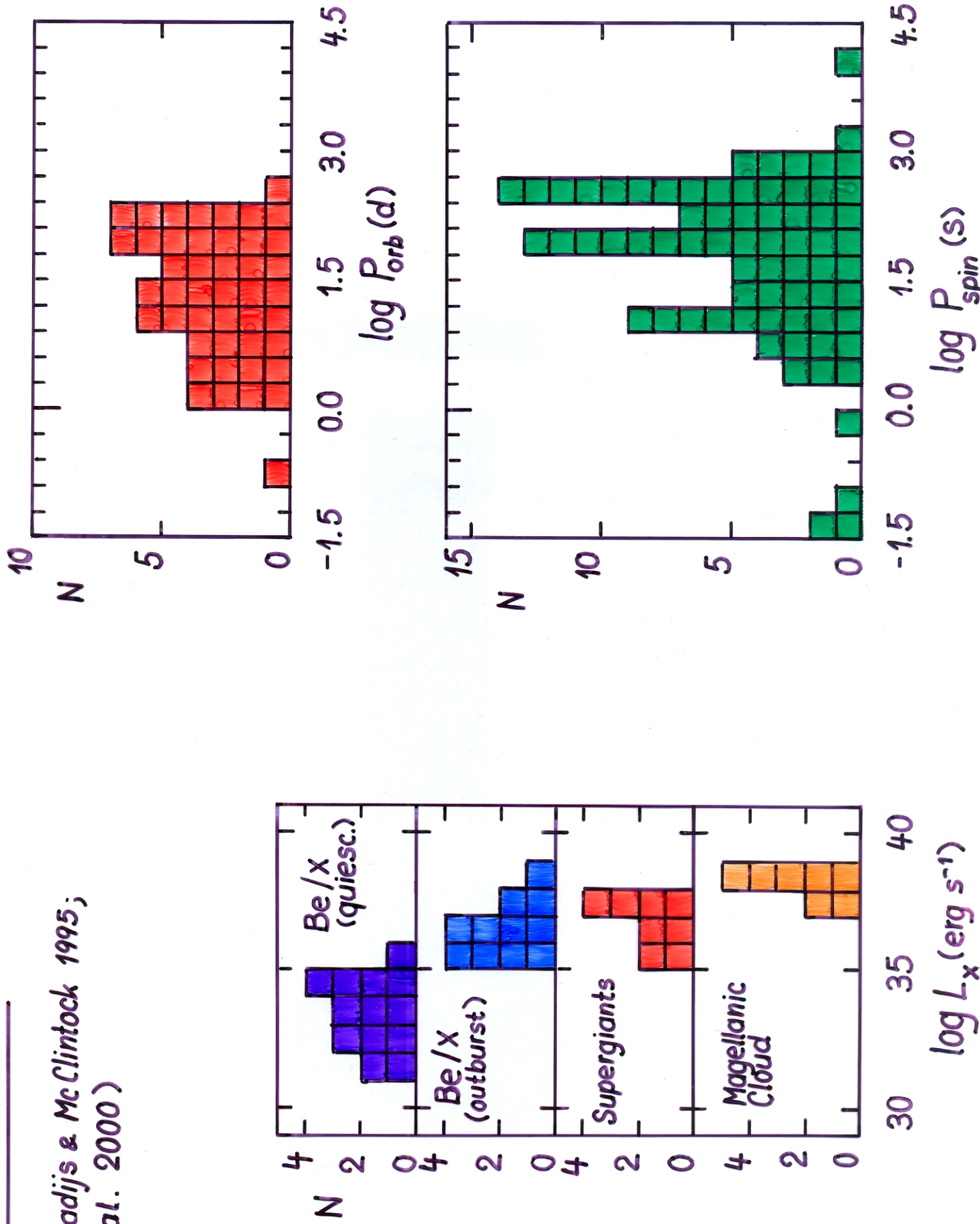
Leuchtkraft:

- im optischen: sehr gross, da die Begleitsterne massereiche, helle O/B-Sterne sind (viele Objekte optisch identifiziert)
- im Röntgen: typisch $100 - 10^4 L_{\odot}$ (ausser bei transienten Quellen im Minimum)

Inventar der dauernd hellen Objekte und der transienten Quellen mit kurzem Ausbruchszyklus ist nahezu vollständig

Properties of HMXBs

(van Paradijs & McClintock 1995;
Liu et al. 2000)

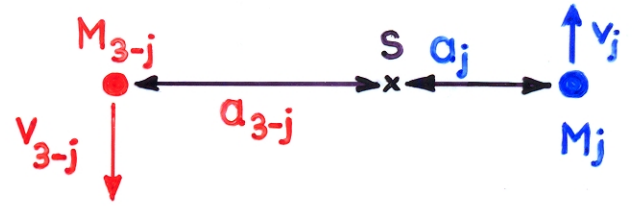


Beobachtete Eigenschaften der beiden Haupttypen von Röntgendoppelsternen

| Massereiche Röntgendoppelsterne (HMXBs) | Massearme Röntgendoppelsterne (LMXBs) |
|---|---|
| <p><u>Optische Komponente</u> massereicher, leuchtkräftiger Stern, Spektraltyp O, früher B(e) $L_{opt} / L_x > 1$</p> <p><u>Räumliche Verteilung</u> stark zur galaktischen Ebene hin konzentriert; junge Sterne, Alter $< 10^7$ Jahre</p> <p><u>Zeitliche Variabilität</u> regelmässige Röntgenpulse; keine Röntgenausbrüche viele transiente Quellen</p> <p><u>Röntgenspektrum</u> relativ hart, $kT \gtrsim 15 \text{ keV}$</p> | <p>leuchtschwacher, blauer "Stern" $L_{opt} / L_x < 0.1$</p> <p>zum galaktischen Zentrum hin konzentriert sowie in einer relativ dicken Scheibe und in Kugelsternhaufen; alte Sterne, Alter: 5-15 10^9 Jahre</p> <p>vielfach Röntgenausbrüche (bei ca. 50% der Objekte); regelmässige Röntgenpulse selten (nur 5 Objekte)</p> <p>relativ weich, $kT \lesssim 10 \text{ keV}$</p> |

Die Massenfunktion bei spektroskopischen Doppelsternen

- ▶ Doppelstern charakterisiert durch M_1, M_2 und a (Kreisbahn)



- ▶ Beobachtet :

P : Umlaufszeit

$K_j = v_j \sin i = \frac{2\pi}{P} a_j \sin i$, $j = 1$ oder 2 ; $i =$ Bahnneigung
 = projizierte Bahngeschwindigkeit einer Komponente

Mit $a_j = \frac{M_{3-j}}{M_1+M_2} a$ und $\frac{P^2}{4\pi^2} = \frac{G(M_1+M_2)}{a^3}$ folgt die

$$\text{Massenfunktion } \underline{\underline{f(M_{3-j}) = \frac{PK_j^3}{2\pi G} = \frac{(M_{3-j} \sin i)^3}{(M_1+M_2)^2}}}, \quad j = 1 \text{ oder } 2$$

- ▶ Da $M_{3-j} < M_1+M_2$ und $\sin i \leq 1$, folgt:

$f(M_{3-j}) < M_{3-j} \rightarrow f(M_{3-j}) = \frac{PK_j^3}{2\pi G}$ ergibt untere Grenze für die Masse des "unsichtbaren" Sterns!

- ▶ Wenn $M_{3-j} \gg M_j$ (z.B. bei Röntgenpulsaren in massereichen Röntgendoppelsternen)

$$\rightarrow M_{3-j} \approx f(M_{3-j}) \sin^{-3} i$$

- ▶ Wenn M_{3-j} aus anderen Beobachtungen bekannt, dann

$$M_j = \frac{(M_{3-j} \sin i)^{3/2}}{f(M_{3-j})^{1/2}} - M_{3-j} \rightarrow \text{Eingrenzung für } M_j \text{ wenn } \exists \text{ eine Eingrenzung für } \sin i$$

- ▶ N.B. Bei Pulsaren beobachtet man die durch den Doppler-Effekt modulierte Spinperiode $P_{\text{spin}}(t)$ bzw. die durch die Lichtlaufzeit veränderten Pulsankunftszeiten. Das ist äquivalent zur Messung von K_j .