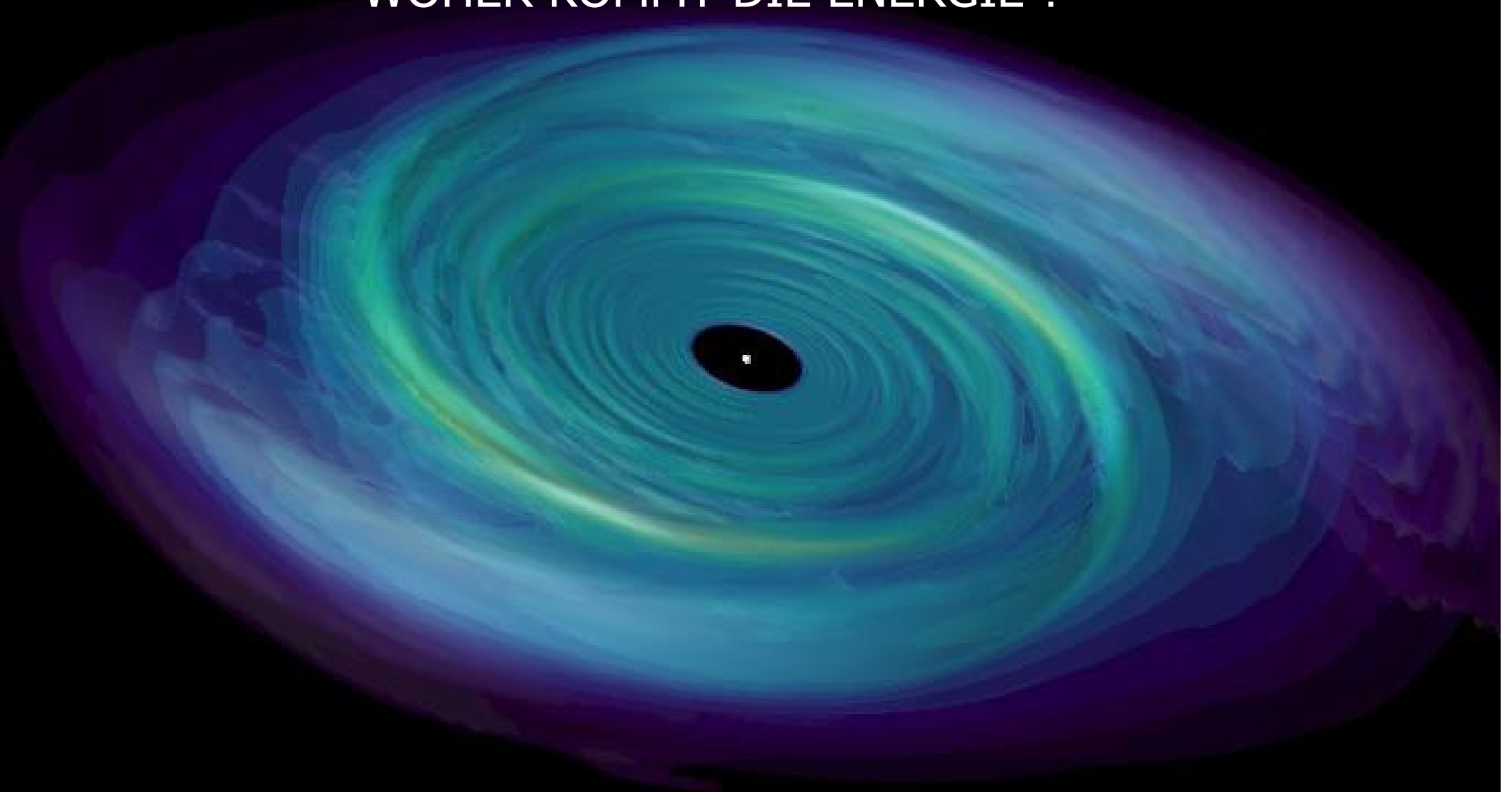


AKKRETION

oder

WOHER KOMMT DIE ENERGIE ?



- I. Was ist Akkretion
- II. Abschätzung zur Leuchtkraft
- III. Eddington-Leuchtkraft
- IV. Akkretion im Binärsystem: Akkretionsscheiben

- Allgemein:
Akkretion → „Wachstum durch Anlagerung“ (lt. „accretio“)
- *Hier:*
Kosmisches Objekt „sammelt“ Materie
oder schöner:
Massebehaftetes Objekt (**Akkretor**) wechselwirkt mit Umgebung
- Mögliche Objekte:
gewöhnliche Sterne, kompakte Objekte (weiße Zwerge, Neutronensterne, schwarze Löcher)

Im Hinterkopf:

- Weltraum: dünnes Gas (interstellare Medium, ISM)
- Ursache des Materiestroms (**Akkretionsflusses**)
→ Gravitation (Newton/ART)

Ziel des Vortrags:

→ Akkretion ist „Motor“ hochenergetischer Phänomene

Wie sehen Akkretionsprozess aus und wovon sind sie abhängig?

Windakkretion

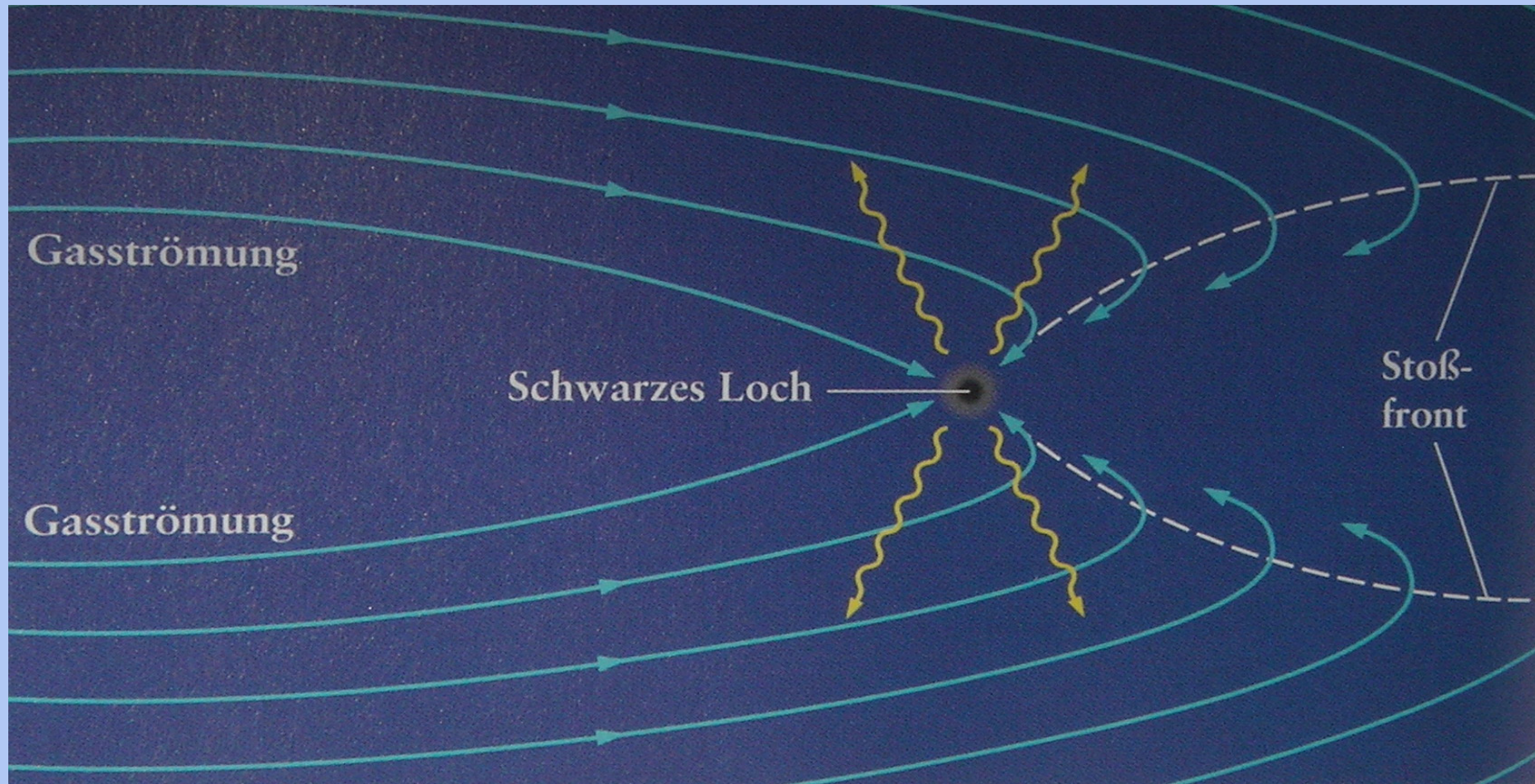
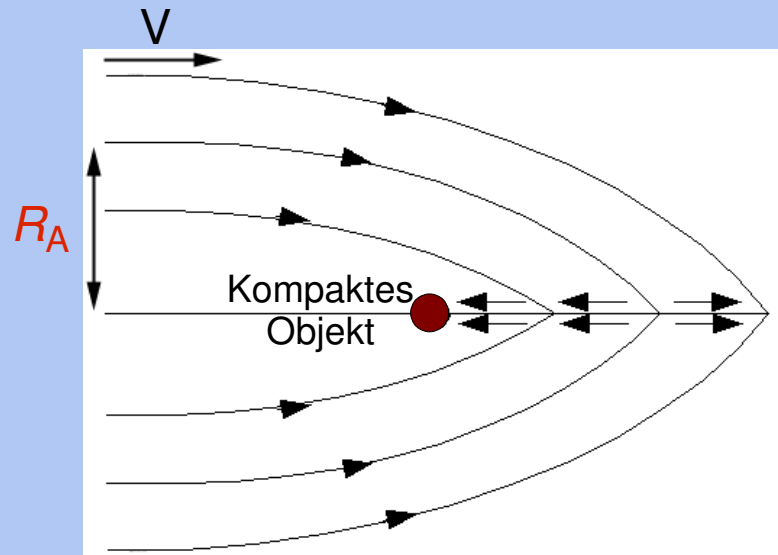


Bild: Begelmann/Rees, S.64

- Effekt der „Gravitationsfokussierung“
- Zusätzliche Materie durch „Stoßwelle“

Vereinfacht (Hoyle-Lyttleton):

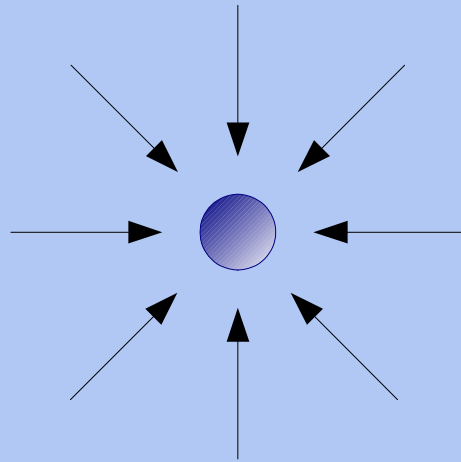


- Führt zu maximalem Akkretionsradius:

$$R_A = \frac{2GM}{V^2} \quad (V = \text{Geschwindigkeit in großer Entfernung})$$

- Daraus folgt (Bondi-Hoyle-)Akkretionsrate:

$$\dot{M} = \pi R_A^2 \rho_\infty V = \frac{4\pi G^2 M^2 \rho_\infty}{V^3} \quad (\rho_\infty = \text{Dichte in großer Entfernung})$$



- Gas wird beschleunigt und verdichtet
- Gas verhält sich adiabatisch → heizt sich auf
heißes Gas strahlt!
(Röntgenbereich)

Strahlungsprozesse der Akkretion:

- Erhitzung durch Reibungseffekte
 - **thermische Strahlung**
- Starke Magnetfelder
 - Synchrotronstrahlung
- Elektromagnetische Felder
 - Bremsstrahlung

Prozesse weit entfernt, trotzdem messbar!

Wie viel Power bringt die Akkretion?

(Masse → Strahlungsenergie)

Körper der Masse m fällt auf Objekt der Masse M

→ Verlust an potentieller Energie

$$\Delta E_{akk} = \int_{R_0}^{\infty} \frac{G M m}{r^2} dr \quad \rightarrow \quad \Delta E_{akk} = \frac{G M m}{R_0}$$

$G = \text{Gravitationskonstante}$
 $R_0 = \text{Radius des Objektes}$

$$\text{Effizienz} \quad \eta_{akk} = \frac{\Delta E_{akk}}{m c^2} = \frac{G M}{c^2 R_0}$$

$$\eta_{akk} = \frac{G}{c^2} \cdot \frac{M}{R_o}$$

- abhängig von der Kompaktheit des Objekts

Schwarze Löcher haben keine harte Oberfläche!

Aber :

Großteil der Leuchtkraft aus Bereich $R = 5$ bis $10 R_s$
(Schwarzschildradius)

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Man erhält für schwarze Löcher:

$$\Delta E_{akk} \approx 10^{20} \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 10^{13} \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

$$\rightarrow \Delta E_{akk} \approx 0.1 m_0 c^2 \rightarrow \eta_{acc} = 0.1$$

(typischer Wert)

Zum Vergleich: **Kernfusion**

typischer Prozess: $4 p \rightarrow He + \Delta E_{nuk}$

grob genähert:

$$\frac{\Delta E_{4 H \rightarrow He}}{m c^2} = \frac{4 m_p - m_{He}}{4 m_p} \approx 0,007 = \eta_{nuk}$$

Woher stammt die Energie

Objekt	η_{akk}	η_{akk} / η_{nuk}
Stellares schw. Loch	0.1	14
Neutronenstern	0.15	21
Weißer Zwerg	10^{-4}	$1.4 \cdot 10^{-2}$
Sonne	10^{-6}	$1.4 \cdot 10^{-4}$
AGN	0.1	14

→ **Akkretion Energiequelle kompakter Objekte**

Leuchtkraft (durch Akkretion) eines stellaren Objektes

$$E_{\text{akk}} = \frac{G M m}{R} \quad (\text{Energiegewinn auf Kosten der Gravitation})$$

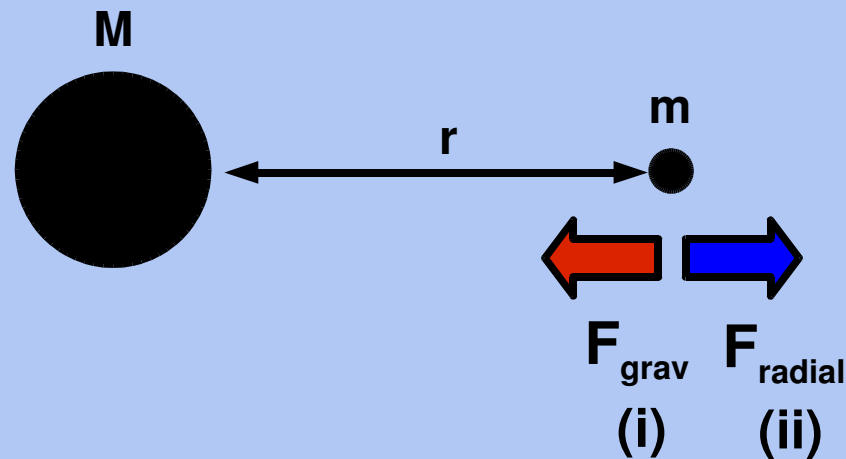
$$\rightarrow \dot{E}_{\text{akk}} = \frac{G M}{R} \cdot \dot{m} = L_{\text{akk}} \quad (\text{Leuchtkraft})$$

$$L_{\text{akk}} = \eta \dot{m} c^2 \quad \text{mit} \quad \eta \simeq \frac{G M}{R c^2}$$

Für festes M/R hängt L also von \dot{m} ab

Eddington-Leuchtkraft

→ theoretische Obergrenze der Leuchtkraft



Ansatz:

Nach außen gerichtete Strahlungsdruck (i)

=

nach innen gerichtete Gravitationsdruck (ii)

Ad (i)

- Strahlungsdruck = Impulsübertrag (durch **Streuung**, Absorption)

Anzahl der Photonen bei R pro Sekunde:

$$\frac{L}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{hf} \quad (E = hf)$$

Wirkungsquerschnitt der Streuung:

→ Thomson-Wirkungsquerschnitt $\sigma_T \approx 6.7 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$

Anzahl der Streuungen pro Sekunde:

$$\rightarrow \frac{L\sigma_T}{4\pi R^2 hf}$$

Übertragene Impuls pro Streuung: $p = \frac{h f}{c}$

$$\rightarrow \frac{L \sigma_T}{4\pi R^2 h f} \cdot \frac{h f}{c} = \left[\frac{\text{Gesamtimpuls}}{\text{Sekunde}} \right]$$

$$\rightarrow F_{\text{radial}} = \frac{\sigma_T L}{4\pi R^2 c}$$

Annahmen:

- Auf Oberfläche hauptsächlich ionisierter Wasserstoff H^+
- Sphärische Symmetrie!

Ad (ii)

aus
$$\Delta E_{\text{akk}} = \frac{GMm}{R_0}$$

folgt:
$$F_{\text{grav}} = \frac{GM(m_p + m_e)}{R_0^2} \approx \frac{GMm_p}{R_0^2}$$

Gravitationsdruck = Strahlungsdruck

$$F_{grav} = F_{radial}$$

$$\stackrel{(i), (ii)}{\Rightarrow} \frac{G M m_p}{R^2} = \frac{\sigma_T L}{4\pi c R^2}$$

$$\Rightarrow L = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T} =: L_{Edd} \quad (\text{Eddington - Leuchtkraft})$$

$$\begin{aligned} &\approx 1.26 \cdot 10^{38} (M / M_S) \cdot \text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 1.26 \cdot 10^{31} (M / M_S) \cdot \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

$$L_{akk} = \eta \dot{M} c^2 \quad (\text{sphärische Symmetrie}) \leq L_{Edd} = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T}$$

- Geschieht Akkretion nur auf Bruchteil ϵ der Oberfläche:

$$\tilde{L}_{Edd} = \epsilon \cdot L_{Edd}$$

Bestätigung der intuitiven Vermutung:

Mehr Masse \longrightarrow größere Leuchtkraft

Maximale (konstante) Akkretionsrate

$$\dot{m} = \frac{L_{Edd}}{\eta c^2}$$

praktische Näherung:

$$\dot{m} \stackrel{(\eta \approx 0.1)}{\approx} 2 \cdot \left(\frac{M}{10^8 M_S} \right) \left[\frac{M_S}{yr} \right]$$

→ mehr Masse = höhere Akkretionsrate

Geeignet für nicht sphärisch symmetrische Akkretion?

Nicht sphärische Akkretion:

- Leuchtkraft kann größer als L_{Edd} sein: **super-Eddington** Quelle
($L < L_{\text{Edd}}$ **sub-Eddington** Quelle)

→ Strahlungsdruck bremst Akkretionsfluss



geringere Akkretionsrate = geringere Leuchtkraft



Leuchtkraft kleiner L_{edd}

Das System ist selbstregulierend (autoregulativ)

Massenzunahme mit L_{edd}

$$L_{\text{akk}} \simeq L_{\text{Edd}} \quad \Leftrightarrow \quad \eta \dot{M} c^2 = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T}$$

$$\Rightarrow M(t) = M_0 \cdot e^{\left(\frac{t}{t_{\text{Edd}}}\right)}$$

$$\text{mit } t_{\text{Edd}} = \frac{\eta c \sigma_T}{4\pi G m_p} \approx \eta \cdot 450 \text{ Myr} \quad (\text{„e-folding time“})$$

Nach einer Zeit von $t \approx 32 \text{ Myr} \rightarrow$ Ausgangsmasse verdoppelt

Spektralbereich?

→ Charakterisierung durch Temperatur T_{rad}

$$T_{\text{rad}} = \frac{h \bar{f}}{k} \quad (k = \text{Boltzmann-Konstante})$$

Zur Eingrenzung:

i) T_{rad} mindestens Schwarzer-Körper-Temperatur

$$P = \sigma A T^4 \quad \sigma = (\text{Stefan-Boltzmann Konstante})$$

$$\rightarrow T_s = \left(\frac{L_{\text{akk}}}{4\pi R^2 \sigma} \right)^{1/4}$$

ii)

$$\begin{array}{ccc}
 & E_{pot} & \xrightarrow{100\%} T_{th} \\
 & \swarrow & \searrow \\
 E_{pot} \approx \frac{GMm_p}{R} & & E_{th} = 2 \times \frac{3}{2} kT \\
 & \rightarrow T_{th} = \frac{GMm_p}{3kR} &
 \end{array}$$

zu erwarten (i + ii):

$$T_s \leq T_{rad} \leq T_{th}$$

Neutronenstern:
 $(L_{akk} \approx L_{Edd})$

$$T_{Th} \approx 5.4 \times 10^{11} K$$

$$T_s \approx 2 \times 10^7 K$$

$$1 keV \leq hf \leq 50 MeV$$

→ (Röntgenstrahlung bis Gammastrahlung)

ISM bietet i.d.R. zu wenig Masse für
hochenergetische Effekte

→ Akkretion in **Doppelsternsystemen**
(„**Binaries**“)

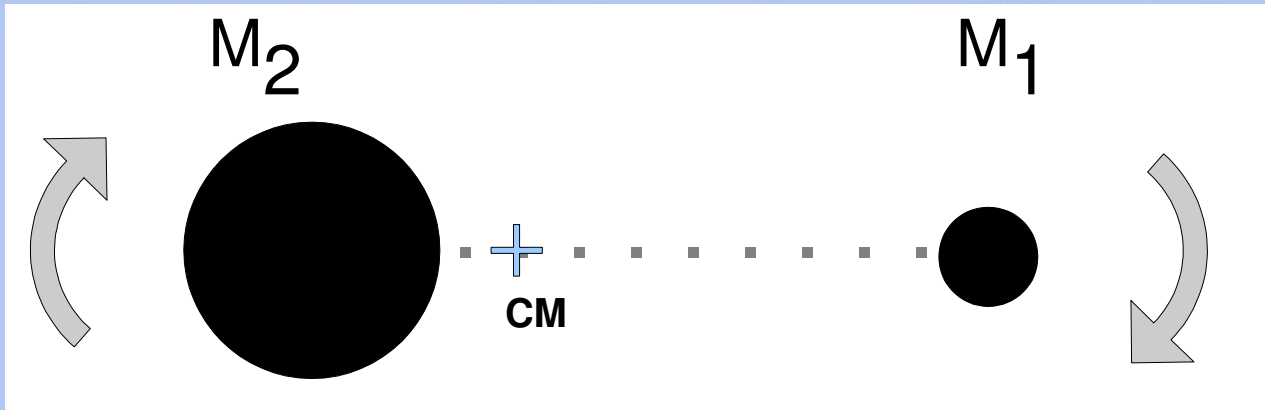
i) Stern schleudert Masse heraus

→ **Windakkretion**

ii) Stern überschreitet kritisches „Volumen“

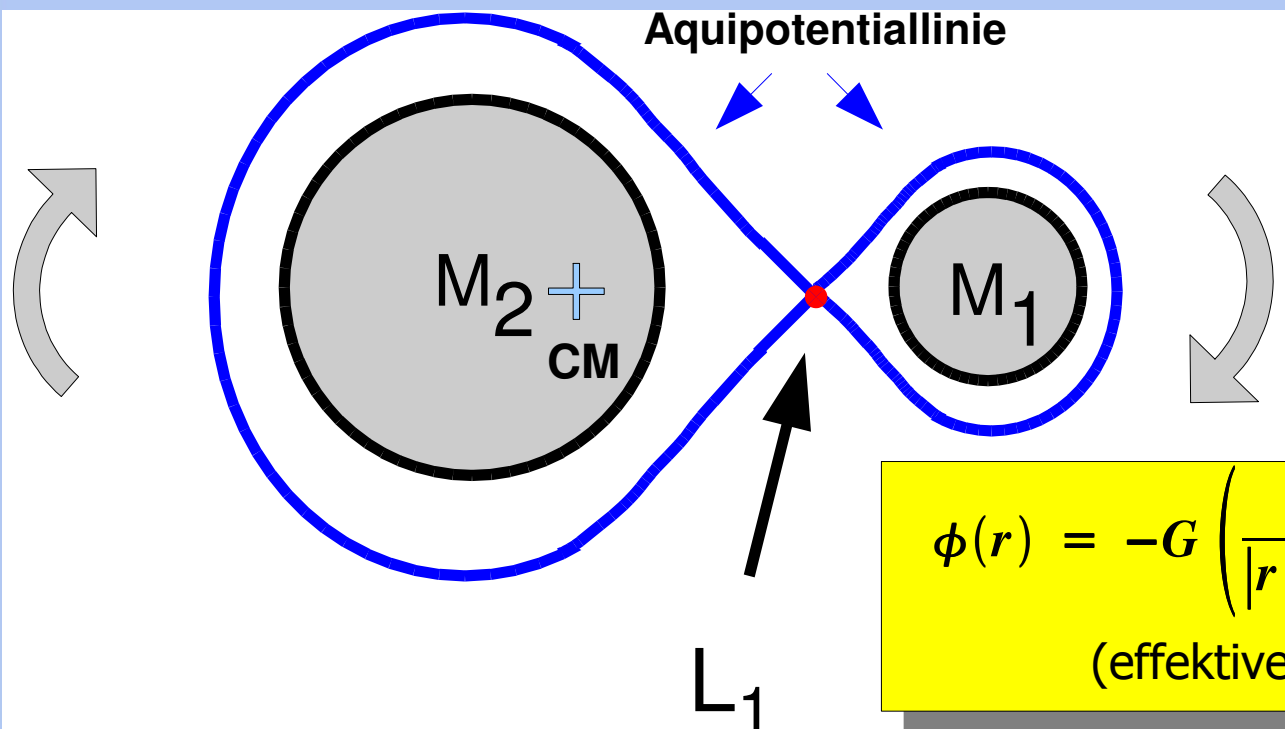
→ „**Roche lobe Overflow**“

IV. Akkretion im Binärsystem: Akkretionsscheiben



M_1 kompaktes Objekt
 M_2 normaler Stern
 $M_2 > M_1$

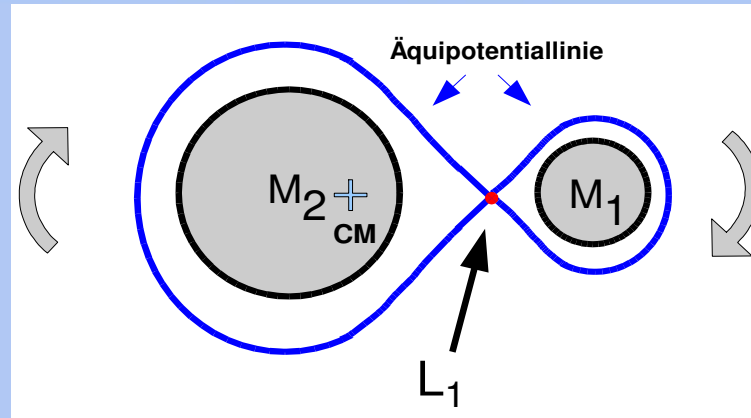
„stabil“, so lange M_2 innerhalb **Roche-Volumen**



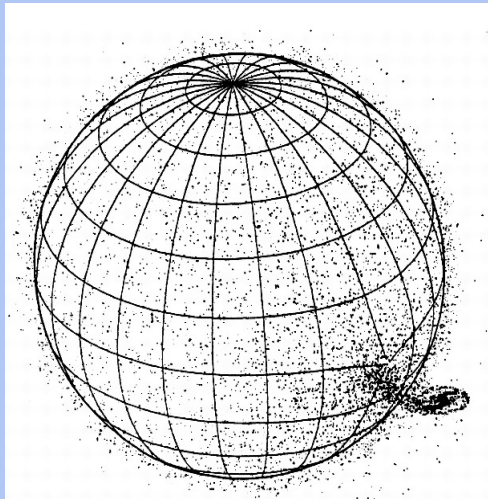
L_1 = Lagrange-Punkt

$$\phi(r) = -G \left(\frac{M_1}{|r - r_1|} + \frac{M_2}{|r - r_2|} \right) - \frac{1}{2} (\omega \times r)^2$$

(effektives Gravitationspotential)



- Stern bricht aus „Einhüllenden“ (engl. Lobe) aus:
→ Materie fließt ab über Lagrange-Punkt



(Dennerl, Dissertation MPE)

→ kompaktes Objekt erhält
Masse für Akkretion

- „Problem“: Masse besitzt Drehimpuls
 - kreist um kompaktes Objekt (Drehimpulserhaltung)
 - **Akkretionsscheibe** (energetisch günstig)

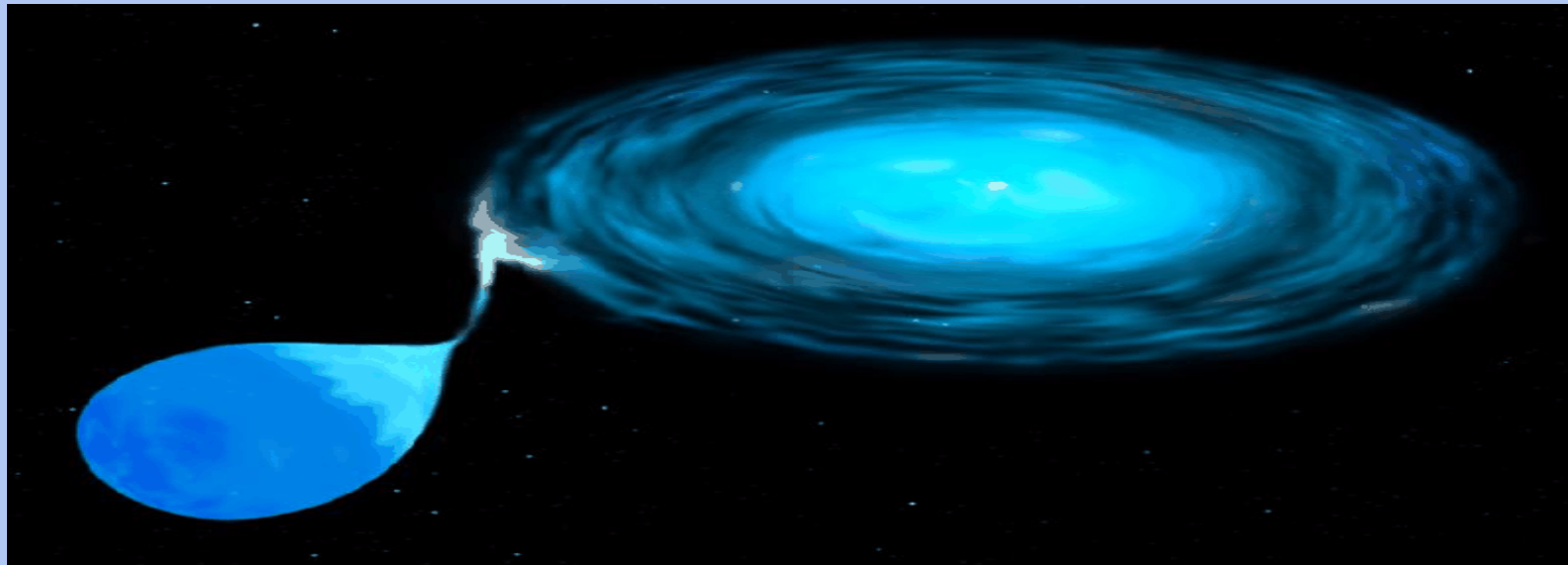
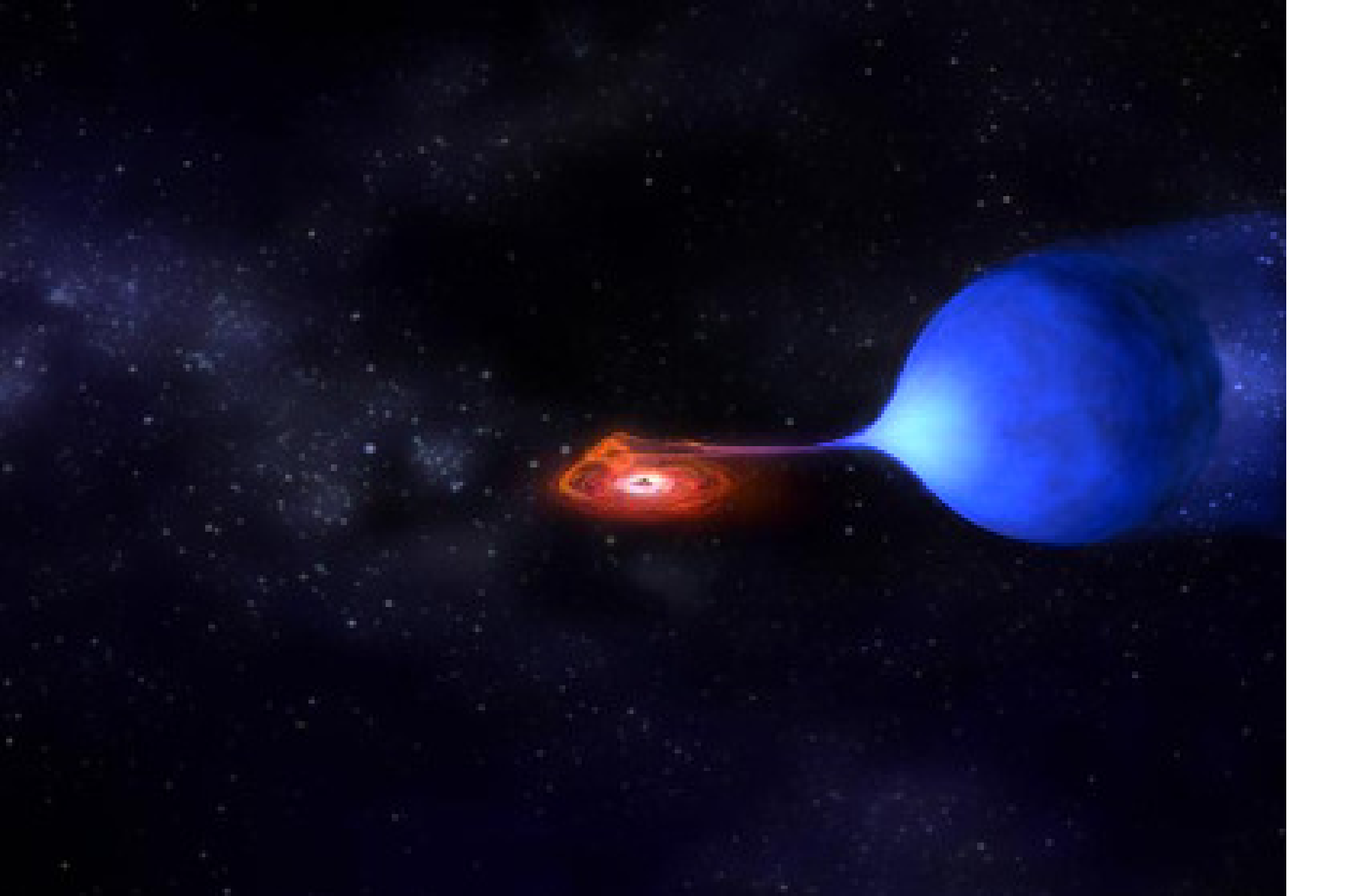


Bild: NASA Illustration

- charakterisiert z.B. durch:
geometrische Form, Geschwindigkeitsfeld, Temperatur- und Dichteverlauf, Viskosität, ...

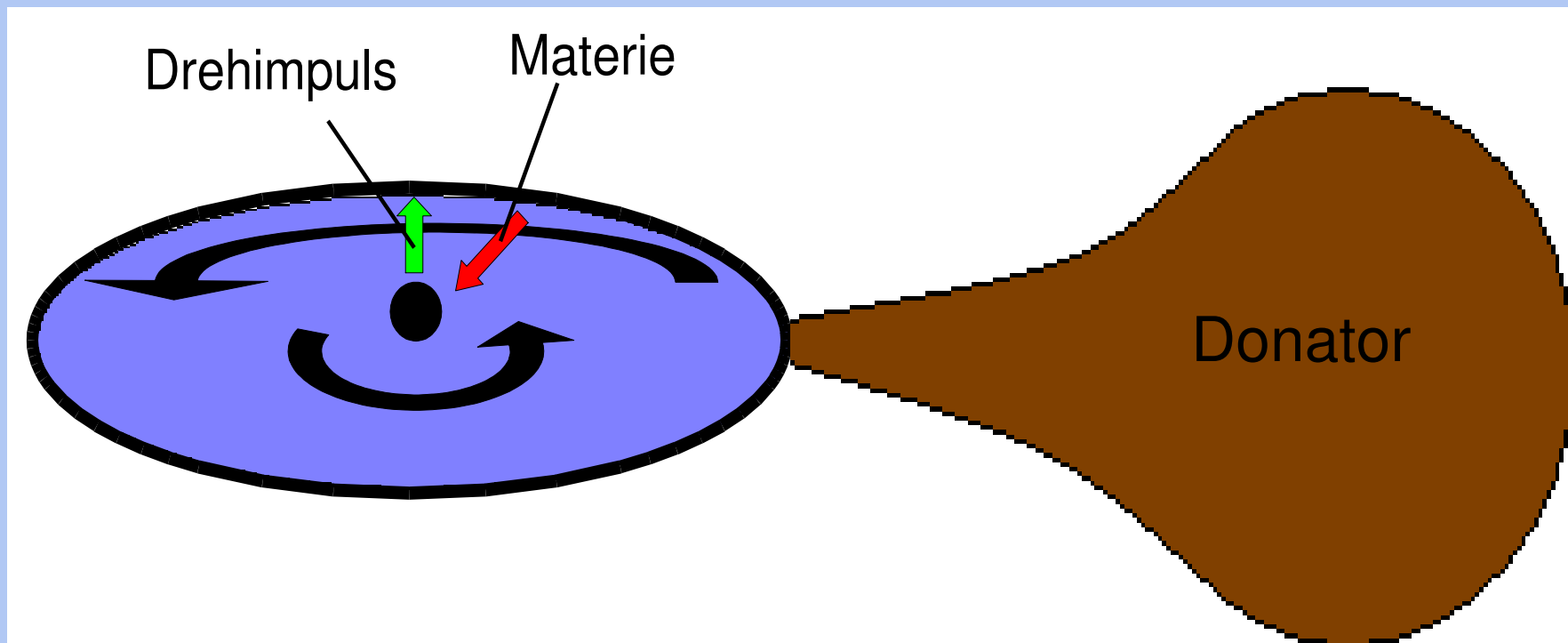




Wie gelangt Materie zum Objekt?

Gesamtsumme der Drehimpulse konstant

ABER Teilchen wechselwirken mit andere Teilchen
(Drehimpulstransport)



Materie rotiert differentiell, innen schneller als außen

$$\omega_{Kepler} = \left(\frac{GM}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Vergleich: Abfluss (Badewanne)



Bild: www.oregonbd.org

Verringerung des Drehimpulses
durch Reibung

Aber: Viskosität der Akkretionsscheibe gering

Magnetische Rotationsinstabilität (MRI)

- Zum Zentrum: Materie immer schneller

→ Ionisierung

→ **Magnetfelder**

- Äußere Masse beschleunigt, innere Masse abgebremst

→ **Drehimpulsübertragung**

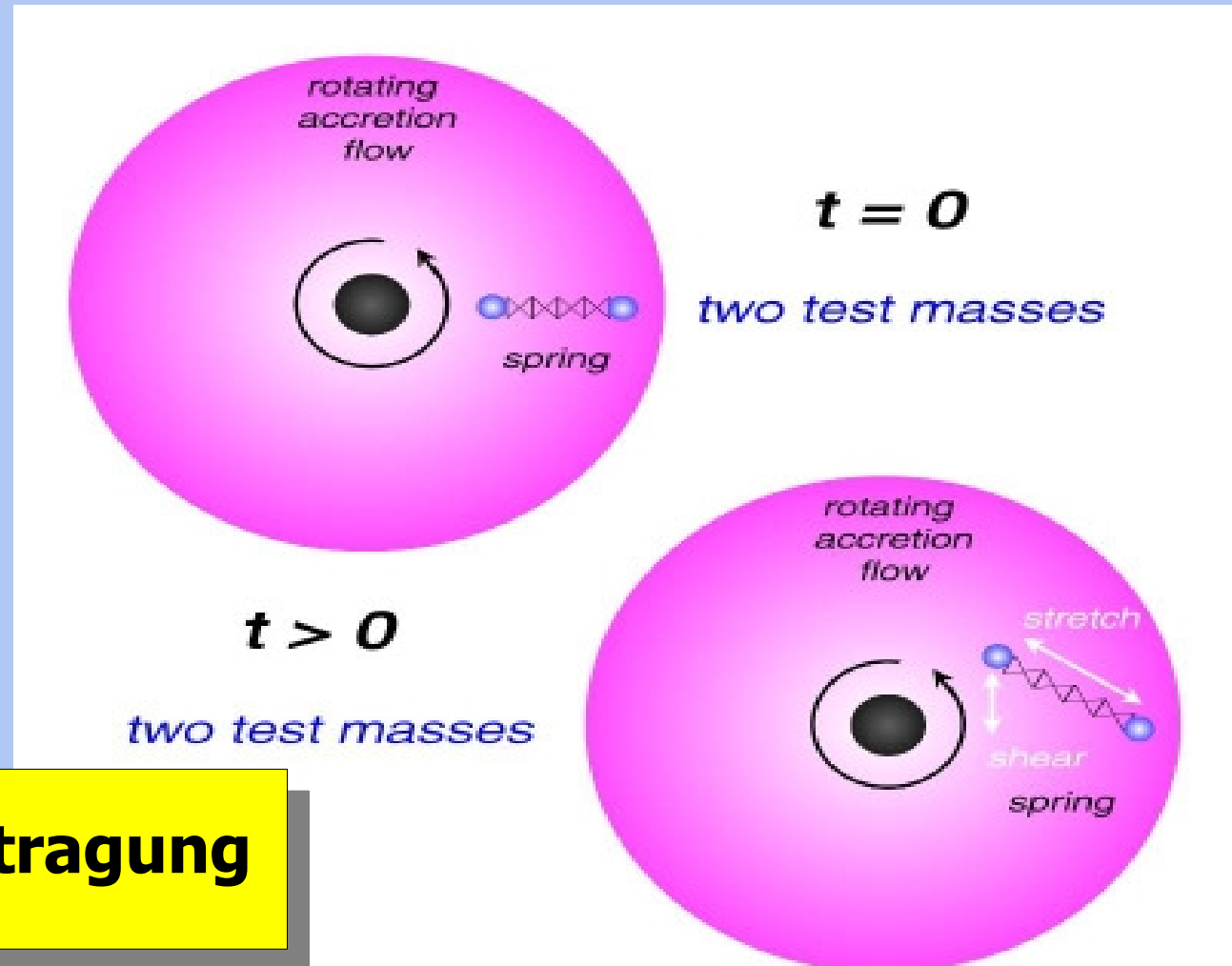


Bild: Astro-Lexikon (Andreas Müller)

IV. Akkretion im Binärsystem: Akkretionsscheiben

- Durch **MRI** (Reibung, Stöße)
→ spiralförmig zum Zentrum
- Spätestens innerste stabile Kreisbahn
→ Schicksalsentscheidung:

„Fall ins Loch“ oder
Reflektion am „Potentialwall“

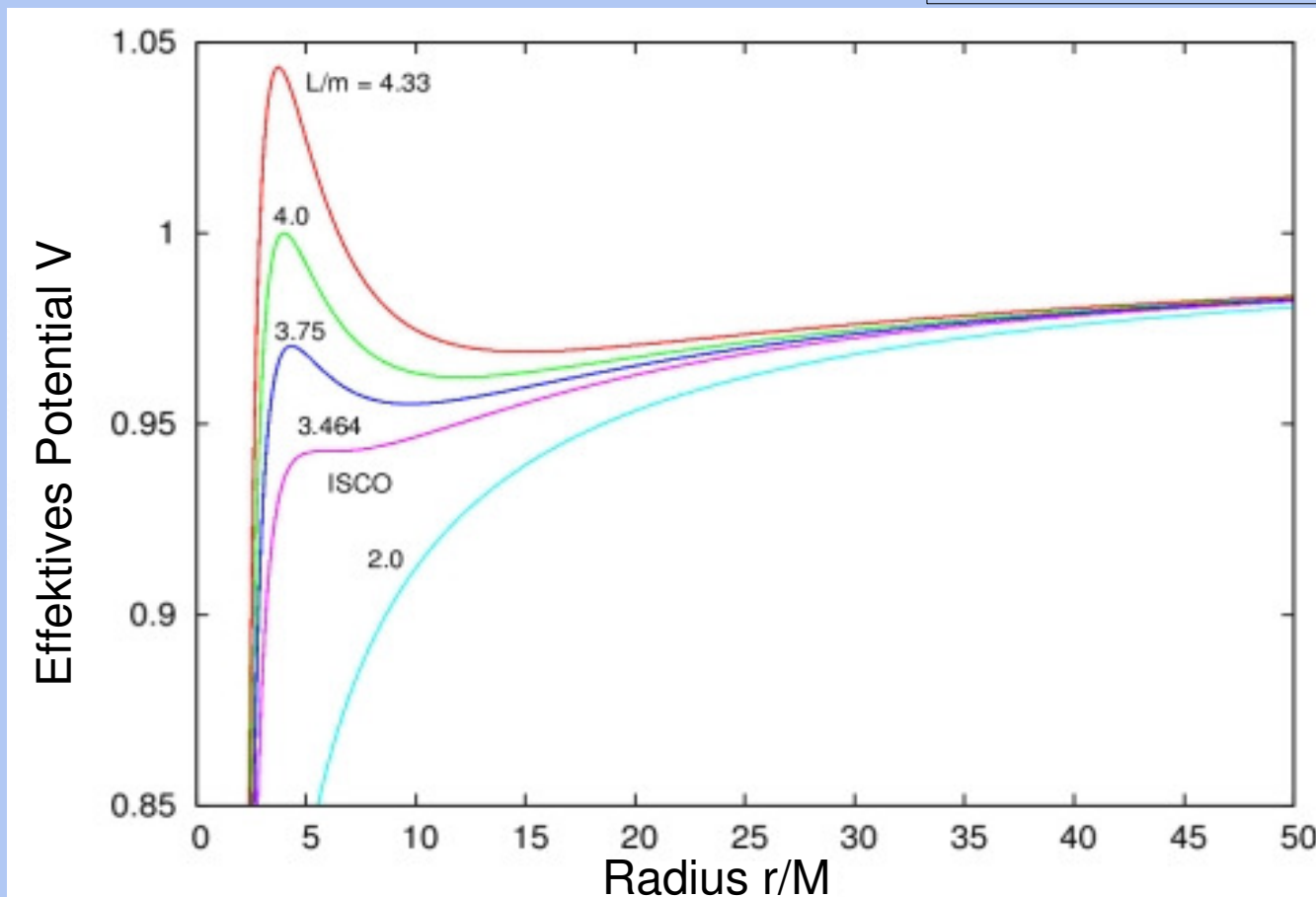


Bild: Astro-Lexikon
(Andreas Müller)

- Kritischer Radius:

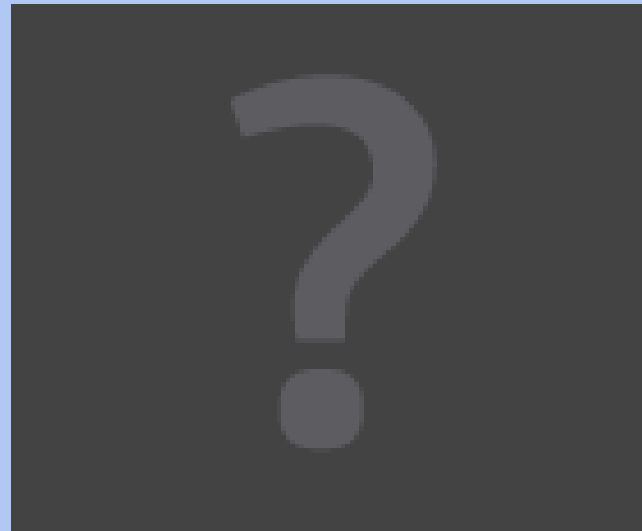
6 (statisches BH) bis 1 (maximal rotierendes BH) $\left(R_G = \frac{GM}{c^2} \right)$
Gravitationsradien

- „Übergang“ zu anderer Akkretionslösung (Akkretionsfluss instabil)

ADAF (advektionsdominierter Akkretionsfluss)

- Keine effiziente Wärmeabgabe
→ dünnes Gas, geringe Dichte (thermische Energie als innere Energie, Entropie gespeichert)

Innere Bereich → **Korona** (Röntgenemission)



Video: www.science.psu.edu

IV. Akkretion im Binärsystem: Akkretionsscheiben

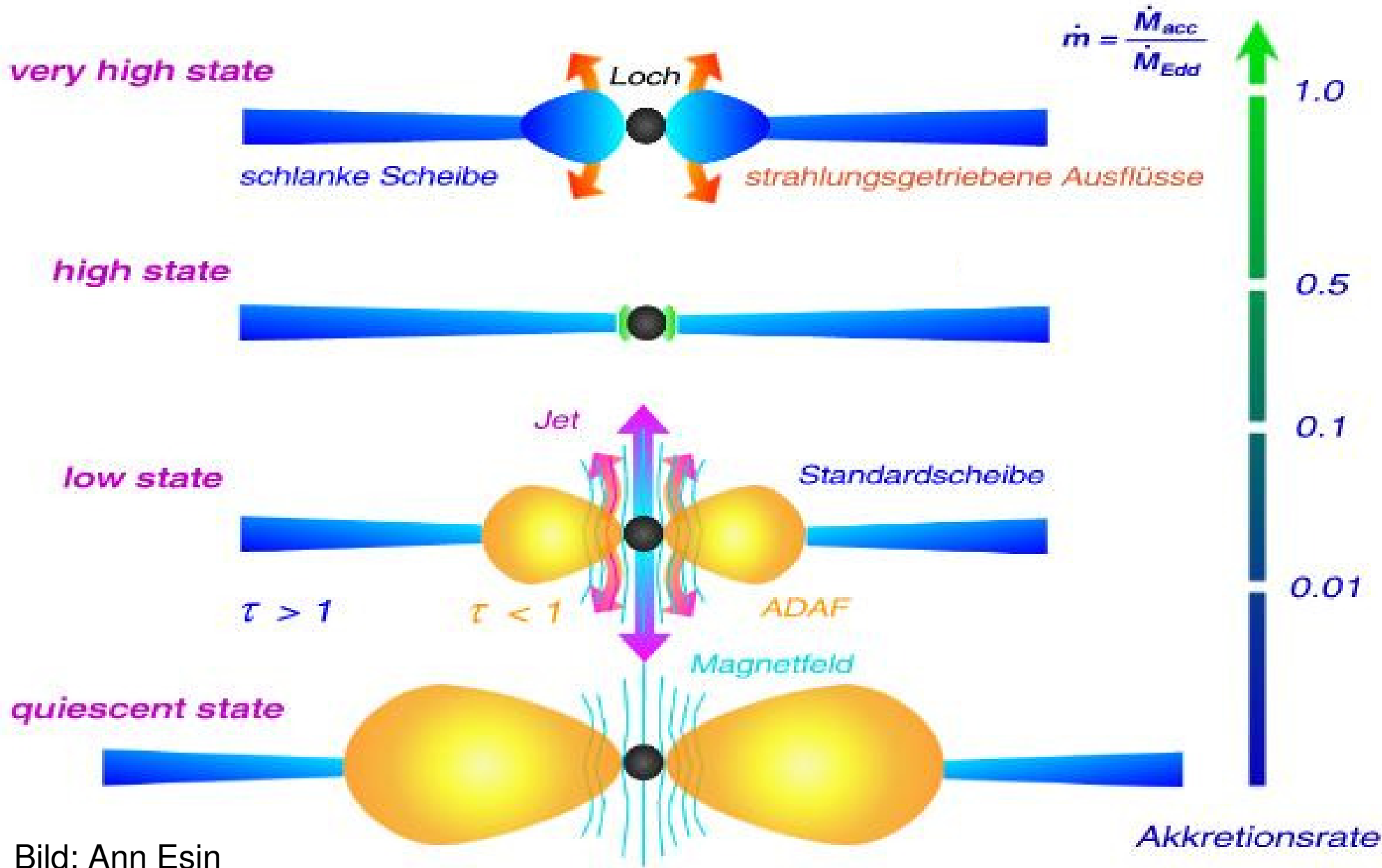


Bild: Ann Esin

Leuchtkraft der Scheibe

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \frac{G M}{R} = \frac{1}{2} E_{akk}$$

Materie kommt aus großer Distanz

$$\rightarrow L_{disk} = \frac{G M \dot{m}}{2 R} = \frac{1}{2} L_{akk}$$

andere Hälfte in der Nähe des kompakten Objektes

Temperatur $\sim r^{-3/4}$ (\rightarrow Frank/King/Raine)

Emissivität verhält sich wie

$$L dr = \sigma T^4 2\pi r dr \quad \sim r^{-1}$$

\rightarrow heiße, innere Rand der Scheibe
(Röntgenbereich)

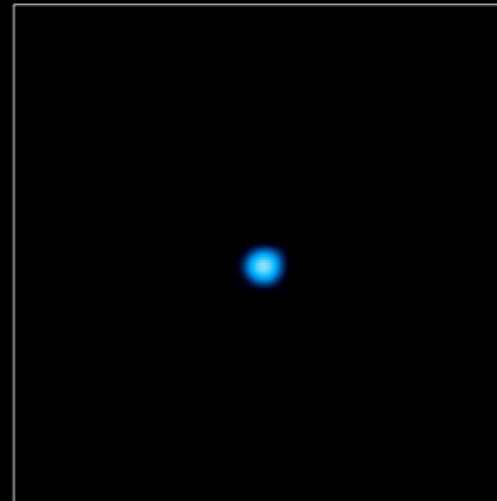
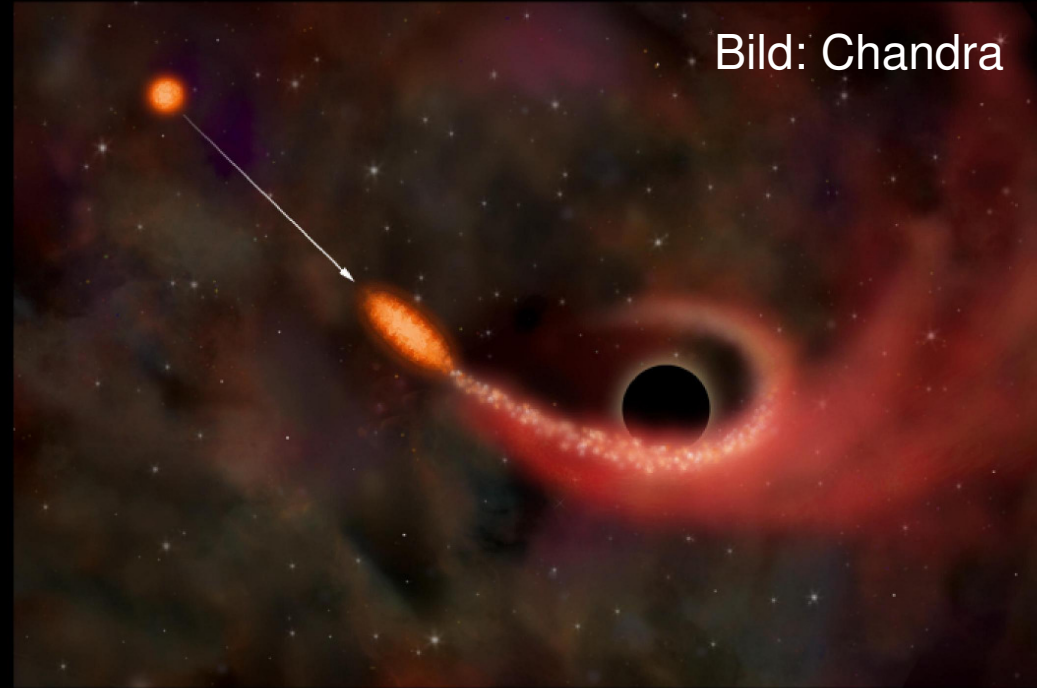
Extremer Fall von Akkretion

Extremer Ausbruch von Helligkeit
(9.3.2001, Röntgenquelle)

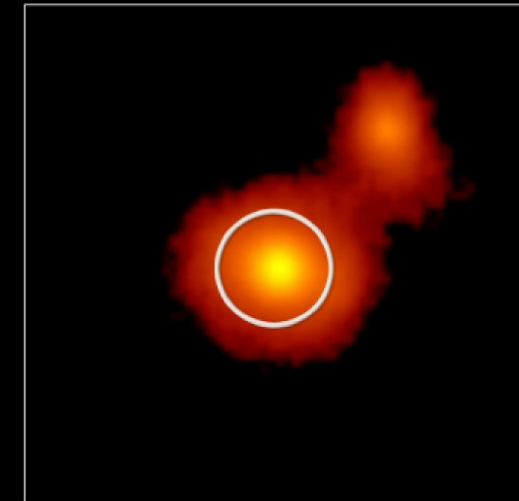
Interpretation:

Stern zerrissen durch
Gezeitenkräfte

Bild: Chandra



CHANDRA X-RAY



ESO OPTICAL

Ende

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit