

Quasarmodelle

Zur Energiebilanz in AGN

Betrachte zwei charakteristische Fälle:

3C 273: Hellster bekannter Quasar.

$$z = 0.158 \Rightarrow d_L = 1.06 \text{ Gpc}, m - M = 40.1, K(z) \simeq -0.3;$$

$$V = 12.8 \Rightarrow M_V = -27.0; L(V) = 5 \times 10^{12} L_\odot.$$

$\Rightarrow \sim 50$ fach leuchtkräftiger als hellste Galaxien ($M_V \simeq -23$).

NGC 5548: Nahe Seyfert 1-Galaxie.

$$z = 0.017 \Rightarrow d_L = 102 \text{ Mpc}, m - M = 35.0, K(z) \simeq 0;$$

$$V = 13.5 \Rightarrow M_V = -21.5; L(V) = 3 \times 10^{10} L_\odot.$$

\Rightarrow vergleichbar mit ganzer Milchstraße ($M_V \simeq -22$).

Bolometrische Leuchtkräfte jeweils um Faktor ~ 5 – 10 höher

Energiequelle: vermutlich Akkretion auf ein kompaktes Zentralobjekt

Argument: Nutze Reservoir aus *potentieller* Energie in Muttergalaxie; Umwandlung in thermische Energie durch Reibung.

Betrachte Probeteilchen mit Masse m in Entfernung r von Zentralmasse M .
Für schwarze Löcher: $r > r_s = 2GM/c^2$ (Schwarzschildradius).

Nichtrelativistische Abschätzung: Massenzuwachs durch Akkretion mit Rate \dot{M} von $r = \infty$ auf Endradius $r > r_s$ liefert:

$$L \approx \frac{GM\dot{M}}{r}$$

In Analogie zur Energieerzeugung durch Kernfusion:

$$L = \eta \dot{M} c^2 \quad \text{mit} \quad \eta \simeq GM/rc^2.$$

Großteil der Leuchtkraft kommt i.d.R. aus Bereich $r \simeq 5 \dots 10 r_s$
 $\Rightarrow \eta \simeq 0.05 \dots 0.1$ (bestätigt in genaueren Rechnungen)

Akkretionsrate bei 3C 273: $\sim 20 M_\odot \text{ yr}^{-1}$; bei NGC 5548: $\sim 0.5 M_\odot \text{ yr}^{-1}$.

Quasarmodelle: Zutaten

Ansatz: Vereinheitlichung des AGN-Zoos durch Konzentration auf wesentliche Parameter. Ziel: *Ein* Basismodell für (fast) alle Typen.

Zentrales schwarzes Loch Masse $\sim 10^6 \dots 10^{10} M_{\odot}$. Vermutlich mehr oder weniger schnell rotierend.

Akkretionsscheibe: Einfließende Materie hat geordneten Eigendrehimpuls, deshalb ist sphärische Akkretion unplausibel: Ausbildung einer Vorzugsebene (in Hauptebene der Muttergalaxie???).

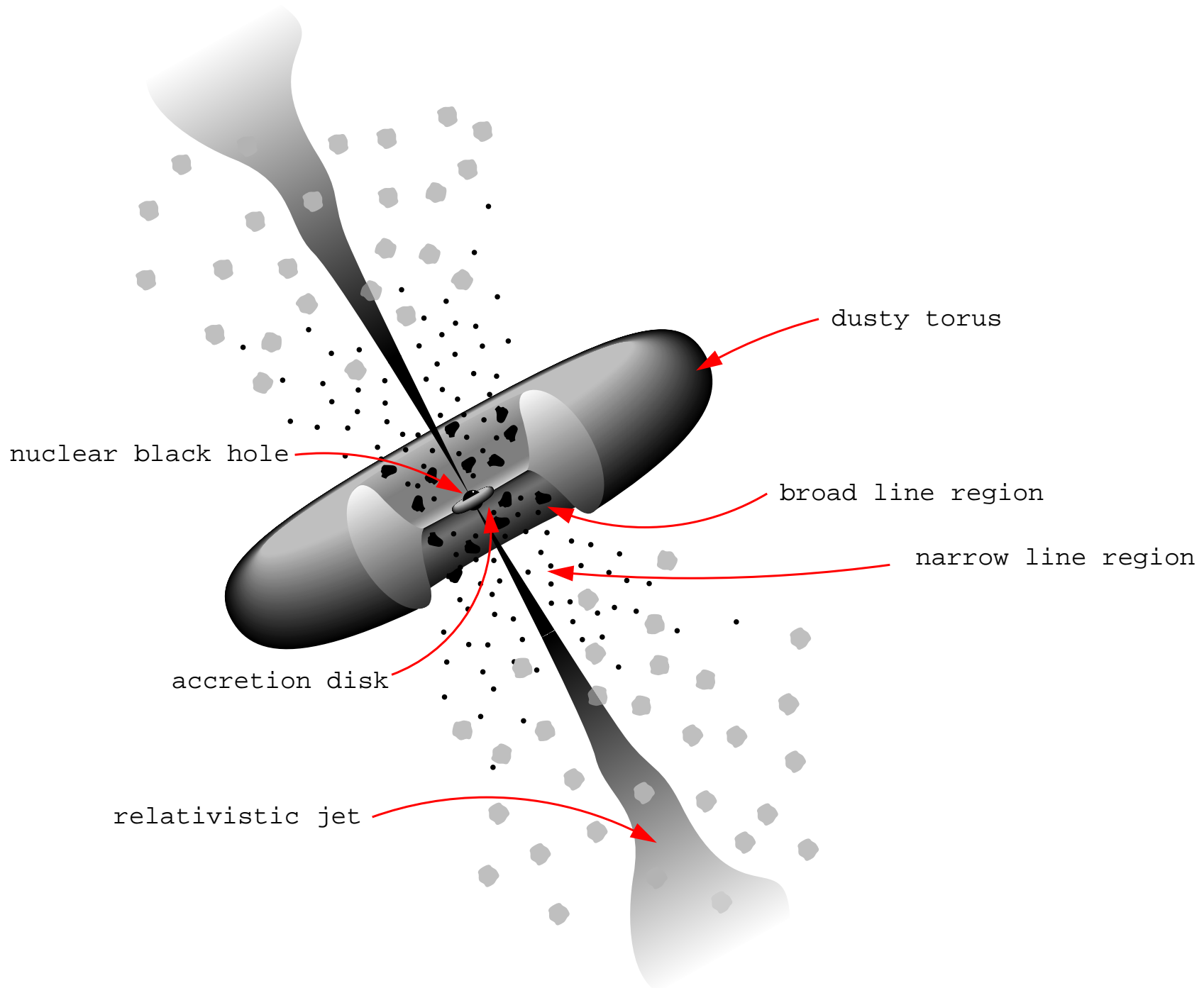
Viskose Heizung der Scheibe \Rightarrow Thermische Kontinuumsemission im optischen/UV/weichen Röntgenbereich (d.h. Temperatur $\sim 10^5$ K).

Jets: Ein (kleiner) Teil der akkretieren Materie wird wieder ausgeworfen – beschleunigt, gebündelt & \sim senkrecht zur Scheibenebene:
 \Rightarrow Synchrotron-Radioemission; hochenergetische Strahlung.

Warme Gaswolken: Um Akkretionsscheibe herum bewegen sich Wolken mit bis zu $\sim 10\,000$ km/s \Rightarrow Broad-Line Region.

Staubtorus (o.ä.): Außenzone der Akkretionsscheibe nicht transparent für opt/UV-Strahlung;
 \Rightarrow Abschattung der BLR in Sy 2-Galaxien; Re-Emission der absorbierten Strahlung im Infraroten.

Ionisiertes Gas in Muttergalaxie Quasarstrahlung enthält große Mengen von UV-Photonen, kann große Bereiche des interstellaren Mediums in Muttergalaxie ionisieren \rightarrow Narrow-Line Region, Extended Narrow-Line Region, schmale Emissionslinien in Muttergalaxie



Verbotene vs. erlaubte Übergänge

Erlaubter Übergang: Dipolübergang vorhanden \rightarrow hohe Übergangswahrscheinlichkeiten \rightarrow Strahlungsabregung passiert schnell (Linien: z.B. Ly α , H α , H β , C IV,...)

Verbotener Übergang: verstößt gegen $\Delta S = 0$ (und eine weitere) Auswahlregel \rightarrow nur Übergänge höherer Momente (Quadrupol,...) \rightarrow Übergangswahrscheinlichkeiten klein (10^{-9} – 10^{-10}) \rightarrow wenn stoßangeregt dann relativ lang stabil (Voraussetzung: kleine Dichten)

Halbverbotener Übergang: “Interkombinationslinien”, $\Delta S \neq 0 \rightarrow$ Übergangswahrscheinlichkeiten $\sim 10^{-6}$

Bereiche nahe des Kerns: Hohe Geschwindigkeiten, hohe Dichten \rightarrow breite Linien \rightarrow “Broad Line Region”

Erlaubte, halbverbotene Übergänge möglich, erzeugen Linien, verbotene Übergänge werden durch hohe Dichten wieder Stoßabgeregt \rightarrow keine verbotenen Linien

Bereiche weiter außen: Niedrigere Geschwindigkeiten, niedrigere Dichten \rightarrow schmale Linien \rightarrow “Narrow Line Region”

Erlaubte, halbverbotene Übergänge möglich, durch geringe Dichten werden verbotene Übergänge nicht mehr stoßabgeregt \rightarrow auch verbote Linien

\rightarrow verbotene Übergänge erscheinen immer als schmale Linien, erlaubte/halbverbotene Übergänge als breite oder schmale, je nach Entfernung vom Kern

Klassifikationsrelevante Parameter

- *Zentralmasse und Akkretionsrate:*

1. LINERs \longleftrightarrow Seyfert 1 \longleftrightarrow Quasare
2. Radiolaute \longleftrightarrow Radioleise Quasare?

- *Eigendrehimpuls des schwarzen Lochs:*

1. Radiolaute \longleftrightarrow Radioleise AGN?
(unsicher)
2. Bündelung der Jets?

- *Orientierungswinkel zum Beobachter:*

1. Seyfert 1 \longleftrightarrow Seyfert 2 – auch QSO 1 \longleftrightarrow QSO 2?
(Abschattung der BLR durch Torus)
2. Radiolaute Quasare \longleftrightarrow Radiogalaxien
(Abschattung des Kerns durch Torus)
3. BAL-Quasare \longleftrightarrow nicht-BAL-Quasare
(Abdeckung des Kerns durch BAL-Wolken/-Winde)
4. Blazare \longleftrightarrow nicht-Blazare
(Winkel relativ zur Jetachse)

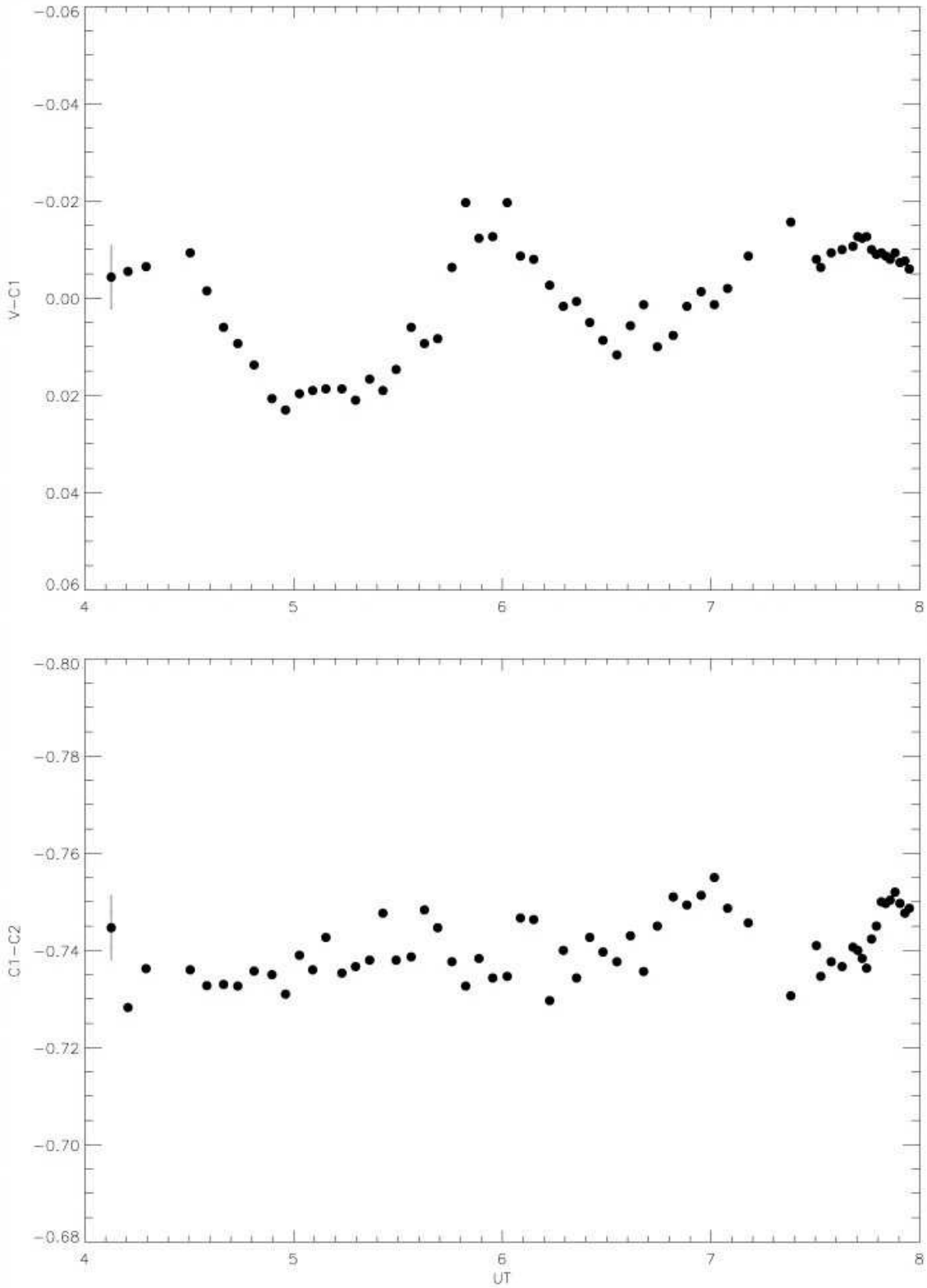
Alternative Klassifikationskonzepte existieren – vor allem solche, die verschiedene AGN-Typen entlang einer *Entwicklungssequenz* aufreihen.

Schwarze Löcher in AGN

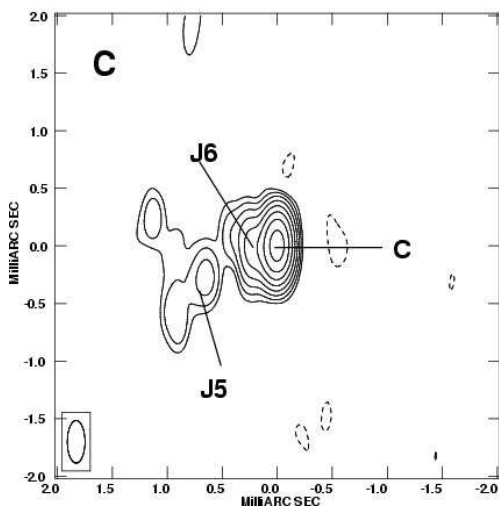
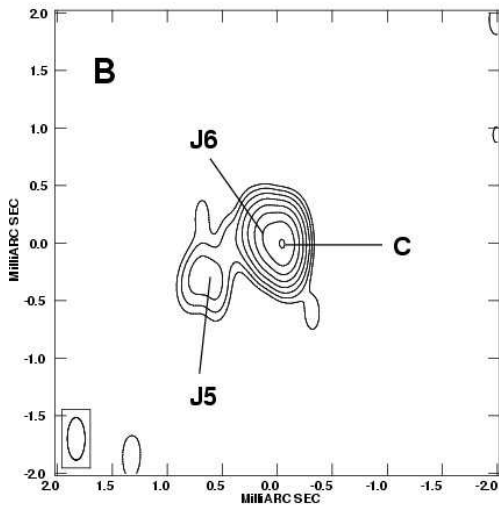
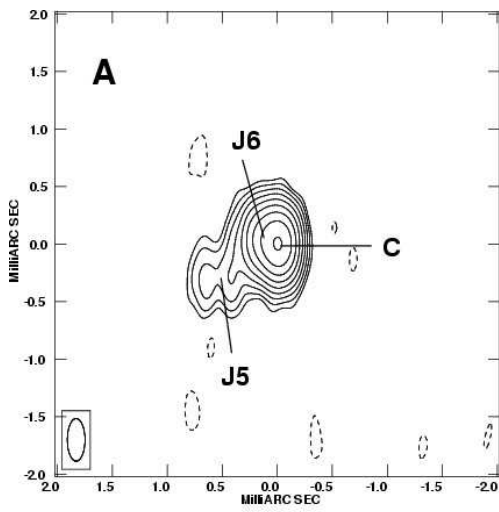
Hypothese superschwerer schwarzer Löcher (BH) in AGN: 10 Hinweise

1. **Variabilität der AGN** (Rees 1977): bis unter 1 min für einige Seyfertgalaxien
 → Lichtlaufzeit für \simeq Schwarzschildradius bei $10^7 M_{\odot}$
 Variabilität-Zeitskala skaliert mit AGN-Leuchtkraft
2. **Effizienz der Energieerzeugung:** hohe Leuchtkräfte der Quasare
 → $L \simeq \eta \dot{M} c^2 \rightarrow \eta \lesssim 0.1$ bei Akkretion auf BH
 (zum Vergleich: 10^{-10} bei chem. Reakt.; 10^{-3} bei H–He Fusion)
3. **Massen:** $L \approx G M \dot{M} / r \rightarrow$ um Quasar-Leuchtkräfte zu erreichen, werden „kompakte Zentralobjekte“ in Galaxienkernen bis zu $\sim 10^{10} M_{\odot}$ benötigt.
4. **Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit der Jets:**
 → $v \simeq c$, relativistisch tiefer Potentialtopf
5. **Radioquellen/-Jets:** → konstante Ausrichtung $> 10^6$ Jahre, andere Ursachen (Supernovae etc.) scheiden aus
6. **Geschwindigkeitsdispersion der Sterne nahe des Kerns:** $\simeq 10^{-3} c$
7. **Breite Emissionslinien:** optisch und Röntgen (MCG 6-30-15 und andere)
 → bis zu $\sim 10\% c \rightarrow$ relativistische Bewegung der Quelle
8. **Statistische Evidenz:** Schwarze Löcher in allen Galaxien mit signifikanter Sphäroid-Komponente (→ Vorlesung „Extragalaktische Astrophysik“), $\sim 0.12\%$ der Gesamtmasse des Sphäroids
9. **Theoretisch-physikalisches Argument (Rees 1984):** Zeitentwicklung eines extrem kompakten Sternhaufens führt zur Entstehung eines massereichen schwarzen Lochs
10. **Rotationsquelle:** Schwarze Löcher in einigen wenigen Galaxien (Milchstraße, NGC 4258) fast zweifelsfrei nachgewiesen (Massen $10^6 \dots 10^7 M_{\odot}$)

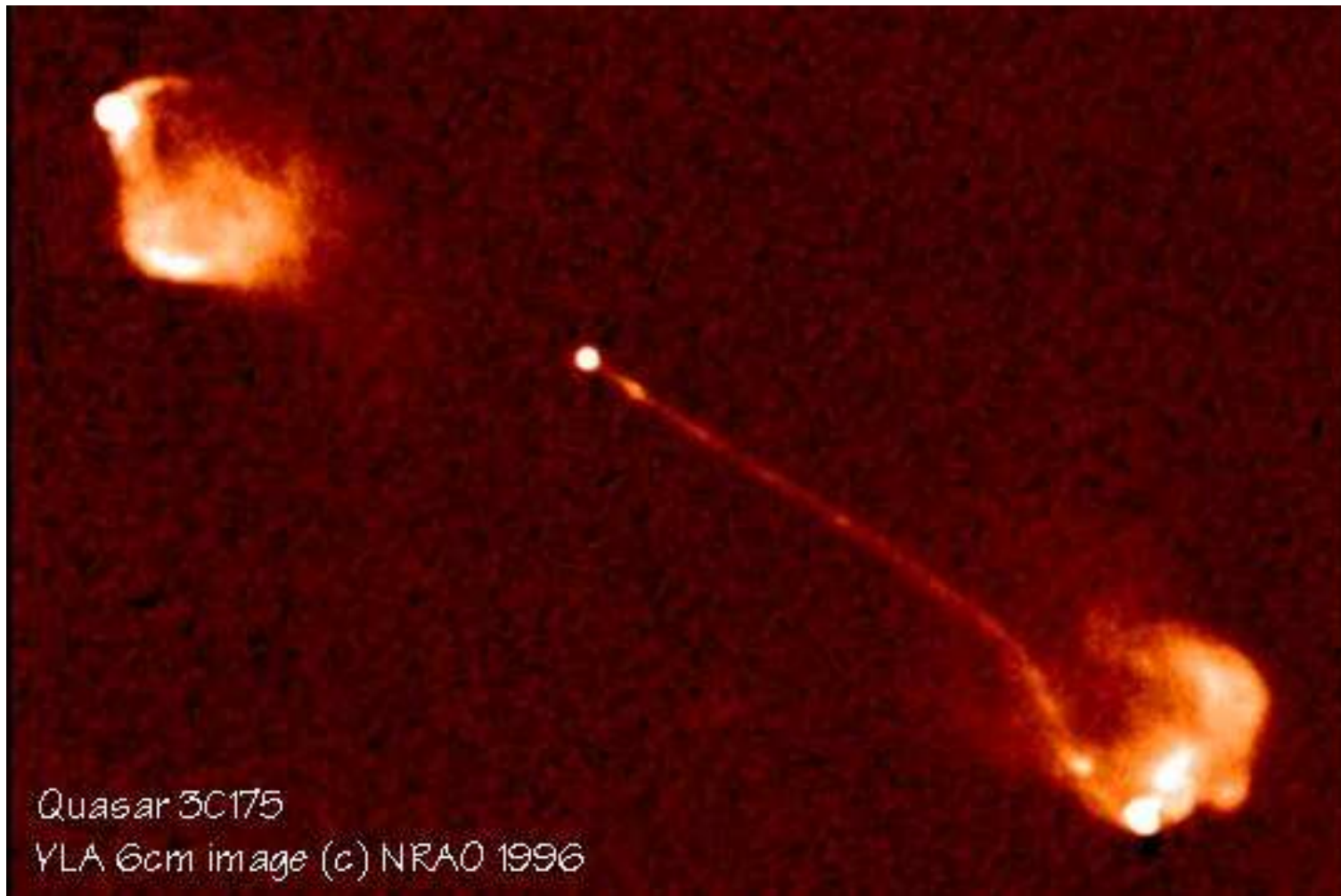
Die Frage nach der Entstehung der massereichen schwarzen Löcher in Galaxienkernen ist noch weitgehend ungeklärt. Im wesentlichen zwei Optionen: Ausbildung der schwarzen Löcher bereits in der Anfangsphase der Galaxienentstehung, oder langsames Wachstum aus stellaren schwarzen Löchern?



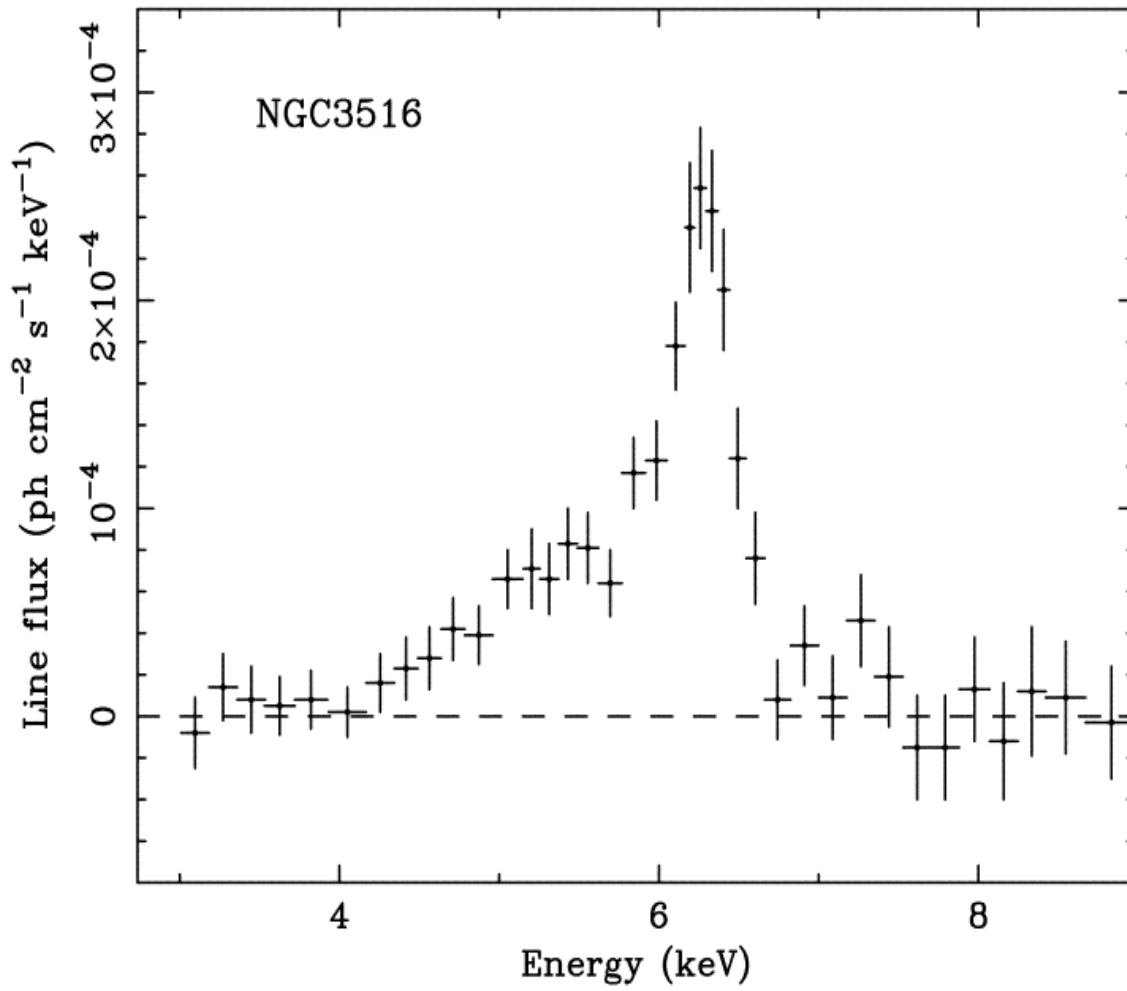
Vergleich Ark 120-Stern (oben) zu Stern 1-Stern 2 (unten)
(Carini et al. 2003, AJ, 124, 1811)



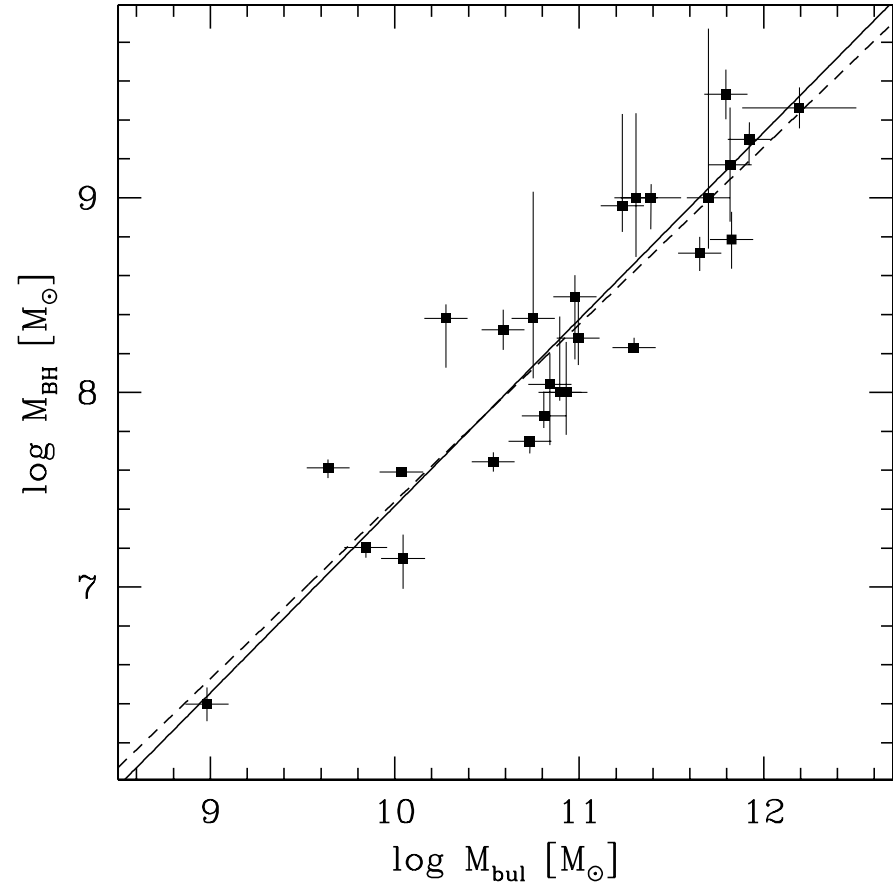
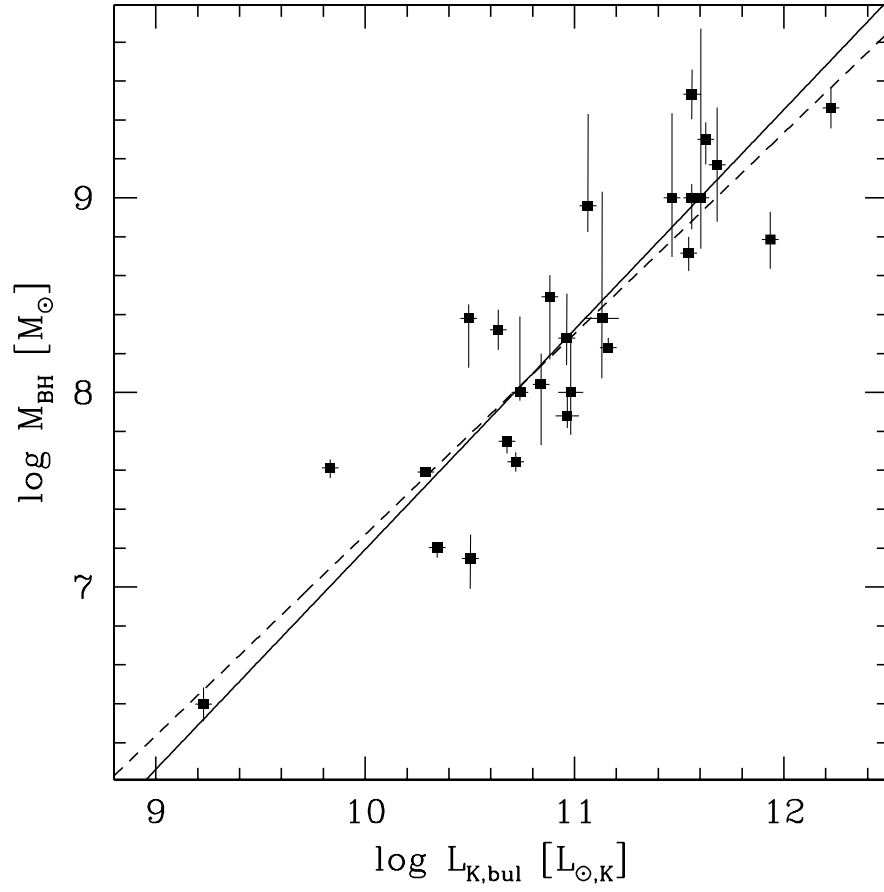
“Überlichtgeschwindigkeit” bei Radioquellen: PKS 1502+106
 (An et al. 2005, 2004, A&A, 421, 839)



Radioquasar 3C 175, Länge der Radiostruktur > 300 *Lichtjahre* (einseitig)
(NRAO/AUI)



Fe K α Linie im Röntgenbereich (Nandra et al. 1999)



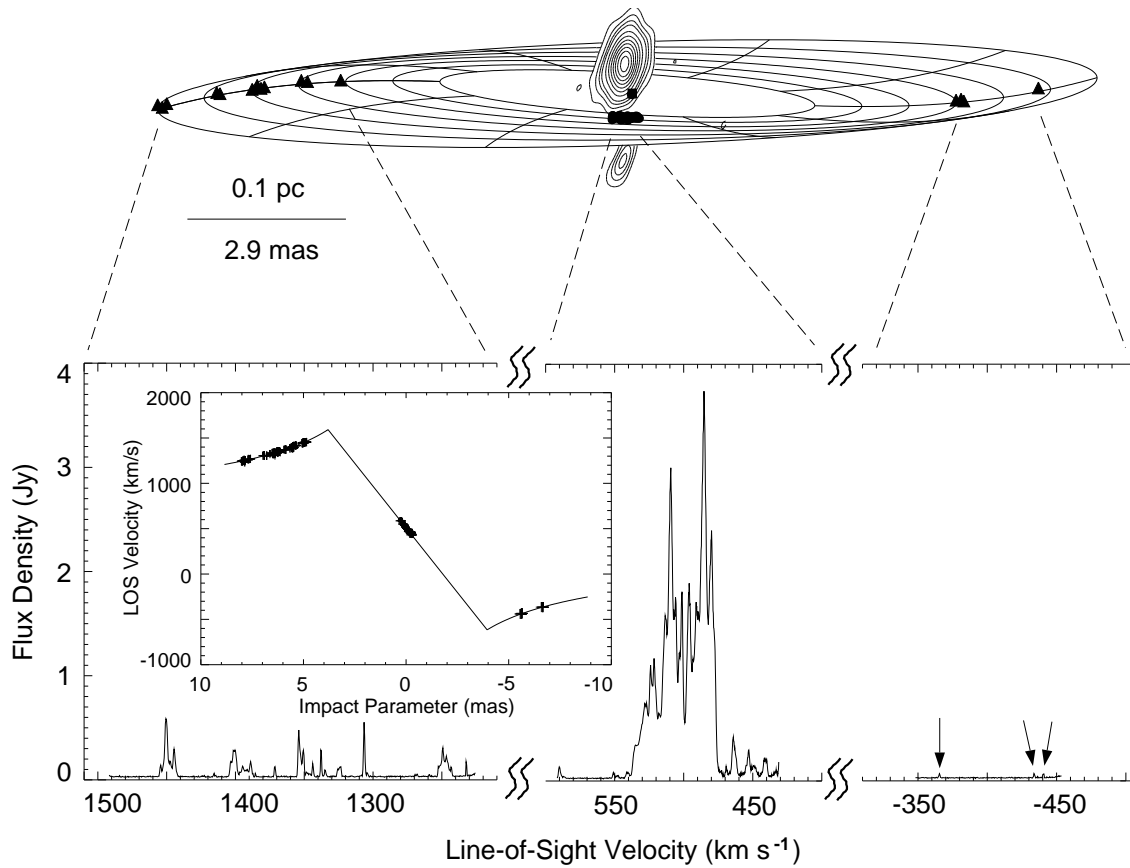
Bulge–BH Massenbeziehung (Marconi & Hunt 2003)

NGC 4258: H₂O-Maser (22 GHz), Auflösung 0''0006 (~ 0.017 pc)

Rotationskurve der nuklearen Scheibe (Herrnstein et al. 1999):

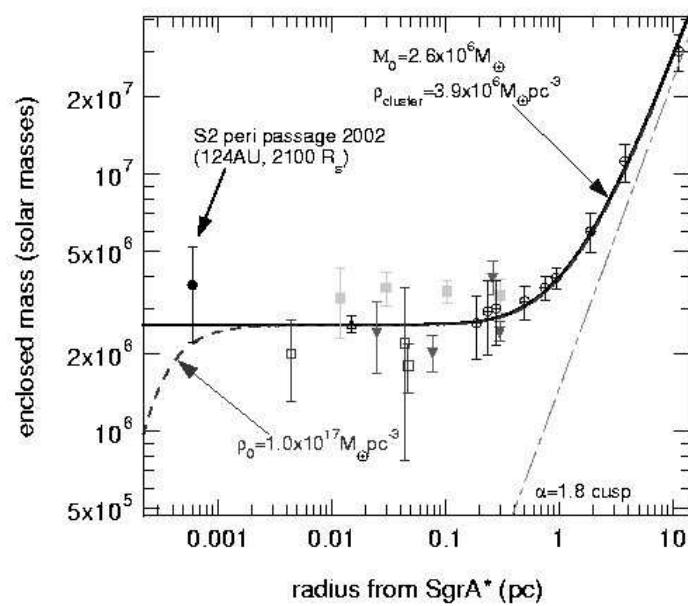
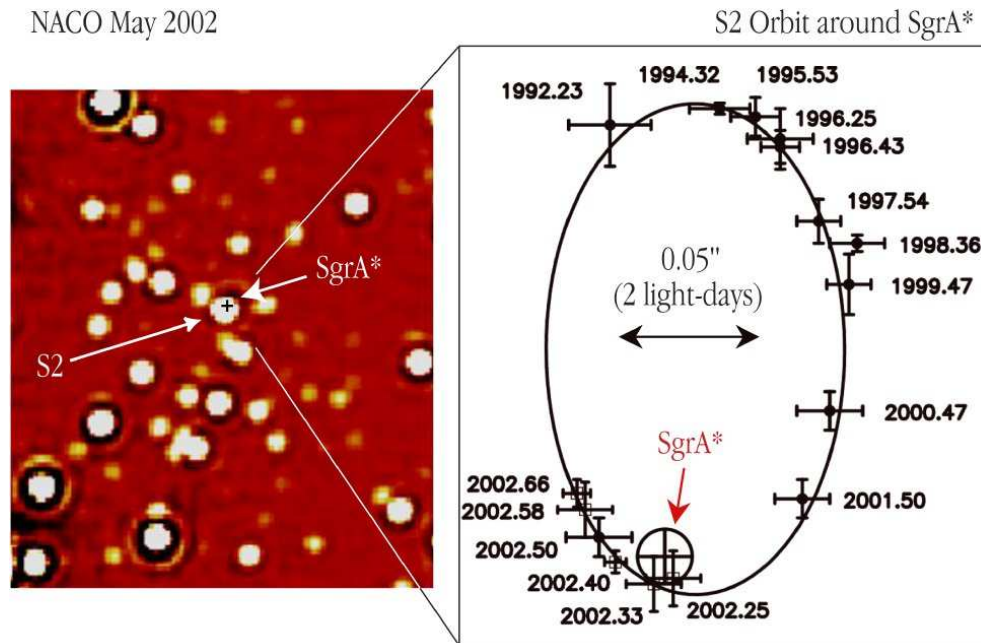
→ $M(r < 0.13)$ pc = $3.3 \times 10^7 M_{\odot}$

→ perfekt Kepler'sch! → Masse konzentriert < 0.012 pc



(Herrnstein et al. 1999, Nature)

Milchstraße: stellare Eigenbewegung (Schödel et al. 2002):
 $\rightarrow M_{GC}(r < 17 \text{ lh}) = (3.7 \pm 1.5) \times 10^6 M_{\odot}$



(Schödel et al. 2002, Nature + ESO PR23c/02)

Schwarze Löcher – Grundlagen

Schwarzes Loch, Definition:

- Lösung zu allgemein relativistischer Feldgleichung mit asymptotisch flacher Raumzeit und Ereignishorizont
- Horizont: trennt sichtbare Ereignisse von unsichtbaren, umschließt Singularität der klassischen Physik
- “cosmic censorship”: Singularität immer unbeobachtbar

Schwarzes Loch, Parameter:

“no hair”-Theorem → einzige Parameter:

- Masse M , Drehimpuls $a = J/Mc$, Ladung q

Radius des Ereignishorizonts (Konvention: $G = 1, c = 1$):

$$r_h = M + \sqrt{M^2 - a^2}$$

$a = 0$: Schwarzschildradius, $r_s = 2M$

$a = 1$: “Gravitationsradius”, $r_g = M$

→ Metrik beschrieben durch Boyer-Lindquist-Koordinaten:

$$ds^2 = \alpha^2 c^2 dt^2 - \tilde{\omega}^2 (d\phi - \omega dt)^2 - (\rho^2/\Delta) dr^2 - \rho^2 d\theta^2$$

$$\rho^2 \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad \Delta \equiv r^2 - 2GM r/c^2 + a^2$$

$$\Sigma^2 \equiv (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta, \quad \tilde{\omega} \equiv (\Sigma/\rho) \sin \theta$$

$$\omega(r, \theta) \equiv 2aGM r/c\Sigma^2, \quad \alpha(r, \theta) \equiv \rho\sqrt{\Delta}/\Sigma$$

“frame-dragging” ω : Raum-Winkelgeschwindigkeit

\equiv ZAMO-Winkelgeschwindigkeit, $\omega = (d\phi/dt)_{\text{ZAMO}}$

(Zero Angular Momentum Observer)

“red-shift, time lapse” α : Gravitative Zeitverzögerung, Gravitationsrotverschiebung

(ZAMO-Eigenzeit $\tau \leftrightarrow$ globale Zeit t , $\alpha = (d\tau/dt)_{\text{ZAMO}}$)

Für nicht-rotierendes Schwarzschild BH: $a = 0$, $d\phi = 0$, $d\theta = 0 \rightarrow$

$$\begin{aligned}\rho^2 &= r^2, & \Delta &= r^2 - 2GMr/c^2 \\ \Sigma &= r^2, & \tilde{\omega} &= r \sin \theta\end{aligned}$$

$$\omega(r, \theta) = 0, \quad \alpha(r, \theta) = \sqrt{1 - 2GM/rc^2}$$

$$\begin{aligned}ds^2 &= \alpha^2 c^2 dt^2 - \tilde{\omega}^2 (d\phi - \omega dt)^2 - (\rho^2/\Delta) dr^2 - \rho^2 d\theta^2 \\ \Rightarrow ds^2 &= (c^2 - 2GM/r) dt^2 - (1/(1 - 2GM/rc^2)) dr^2 \\ &(\text{Schwarzschild-Koordinaten})\end{aligned}$$

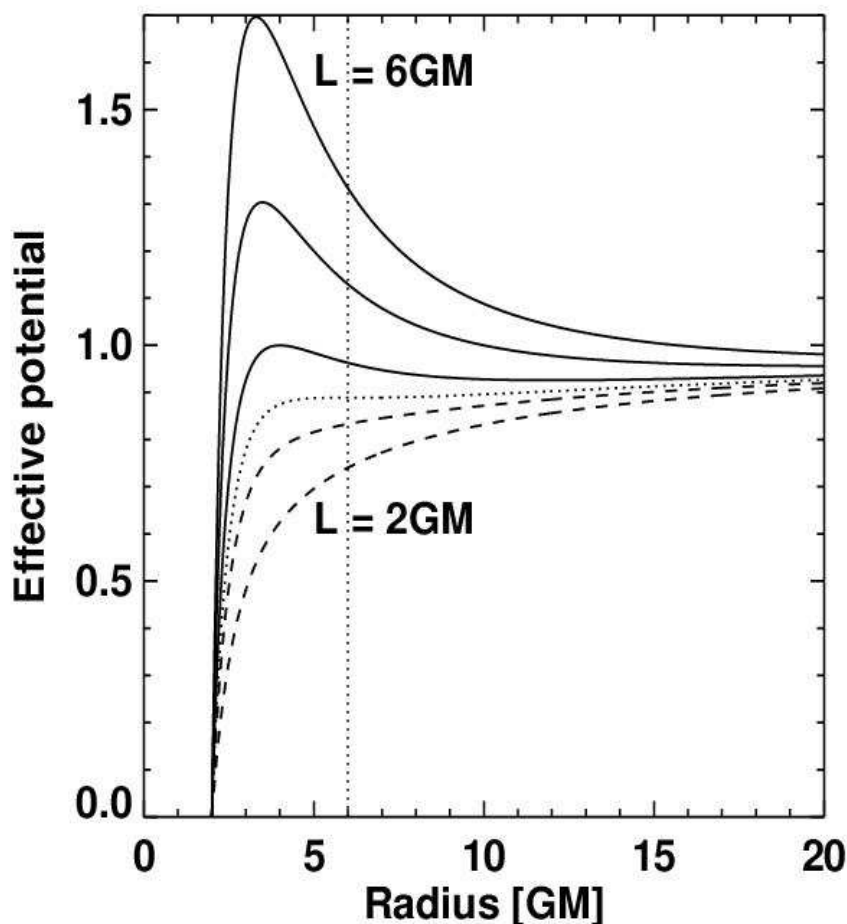
Orbits um schwarze Löcher:

Schwarzschild-Metrik: \rightarrow unabhängig von t, ϕ

- Energie- (E) und Drehimpuls (L)-Erhaltung
- Bewegungsgleichung (vgl. mit Newton'schem Fall)

$$\dot{r} \equiv dr/d\tau = -\sqrt{\tilde{E}^2 - V(r)}$$

$$V(r) = (1 - 2M/r)(1 + \tilde{L}^2/r^2)$$
 effektives Potential
- Stabile Kreisorbiten bei Radien, die $V(r)$ minimieren
Aber: Orbits nicht geschlossen für $\tilde{E} > \sqrt{2V(r_{\min})}$
- Instabile Kreisorbiten bei Radien, die $V(r)$ maximieren
Kleinster stabiler Orbit bei $r_{\text{ms}} = 3r_s$, $(1 - \tilde{E}_{\text{ms}}) = 0.057$



Kerr-Metrik:

Für $a = 1$: $r_{\text{ms}} = r_g$ (direkt), $r_{\text{ms}} = 9r_g$ (retrograd)

Ergosphäre rotierender schwarzer Löcher:

→ Kerr-Metrik

Stationäre Beobachter, (r, θ) fest, Rotation $\Omega = d\phi/dt$

– Aus $u^\alpha u_\alpha = -1$ (Vierergeschwindigkeit) folgt:

$$\Omega_{\min} < \Omega < \Omega_{\max}$$

– Für rotierendes BH: $\Omega_{\min} > 0$ oder

$$r < r_E = M + \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2 \theta}$$

$$\text{für } r \rightarrow r_h: \Omega_{\min} = \Omega_{\max} = \Omega_h = a/(r_h^2 + a^2)$$

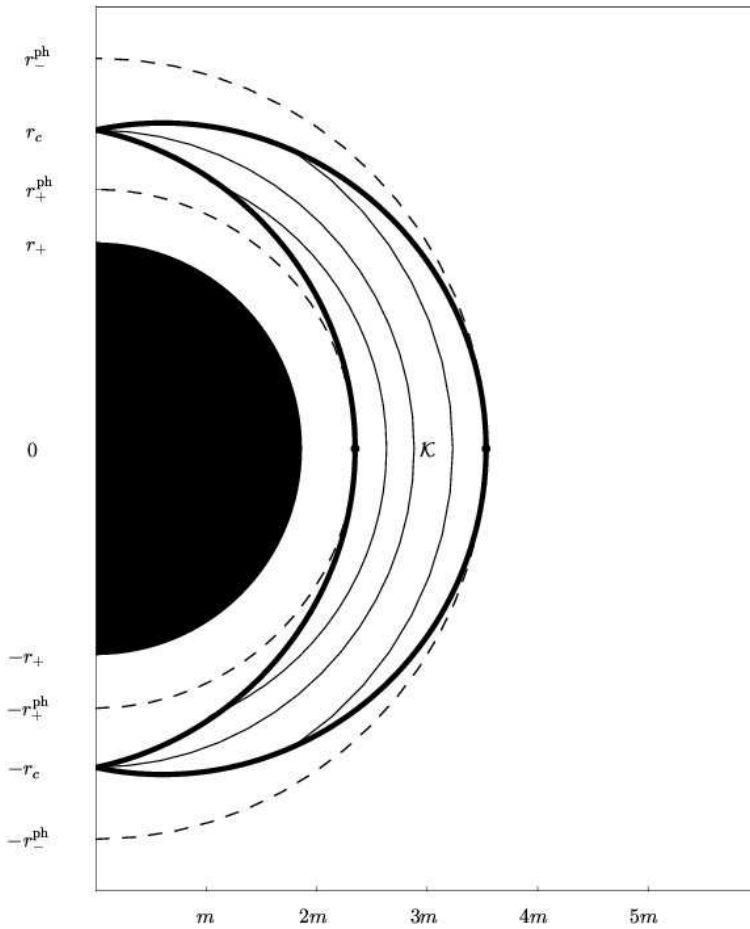
Ergosphäre: Region zwischen r_h und r_E :

– “static limit” r_E : Beobachter **muß** mitrotieren

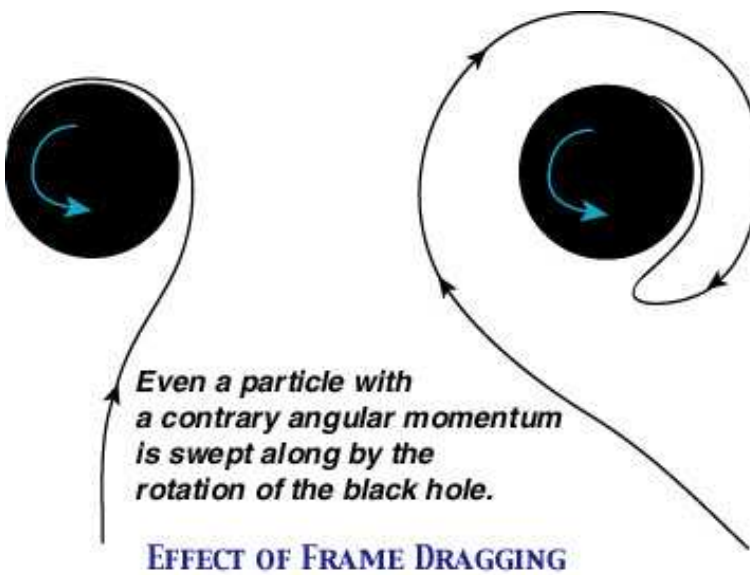
– Orbits $r < r_h$ möglich mit negativer Gesamtenergie,
Teilchen mit $\tilde{E} < 0$ kann Loch-Masse reduzieren!

– Irreduzible Masse (Hawking): $M_{\text{irr}} = \sqrt{Mr_h/2}$, $\Omega_h < 1/\sqrt{8}M_{\text{irr}}$

– $M - M_{\text{irr}} < 0.29M$ Energiegewinn aus rotierendem BH



Ergosphäre (Perlik, 2004)



Frame Dragging (Sochichi Uchii)

Schwarze Löcher – wichtigste Punkte

“No Hair” Theorem: BHs haben nur Masse, Drehimpuls und Ladung (aber keine Haare)

Metrik: Unterschiede nicht-rotierend und rotierend (Schwarzschild, Kerr)

Ereignishorizont:

$a = 0$: Schwarzschildradius $r_s = 2M$

$a = 1$: Gravitationsradius $r_g = M$

letzte stabile Bahn:

Schwarzschild: $r_{ms} = 3r_s$

Kerr: $r_{ms} = r_g$ (prograd), $r_{ms} = 9r_g$ (retrograd)

aber: in Kerr Metrik innerhalb von Ergosphäre r_E muß der Beobachter mitrotieren um auf stabiler Bahn zu sein \rightarrow Frame Dragging, kein Inertialsystem mehr

in Ergosphäre:

Orbits mit negativer Gesamtenergie möglich

Energiegewinn bis Größe $0.29M_{BH}$ aus Rotation möglich

Energiegewinnung aus rotierenden schwarzen Löchern:

Blandford-Znajek-Prozess: elektromagnetische Kopplung an BH

Vier Gedankenexperimente:

1. BH in konstantem elektrischen Feld
 - löse Maxwell-Gleichungen in Schwarzschildmetrik
 - BH ist elektrischer Leiter (Horizont Equipotentialfläche)
2. BH in magnetisierter (\mathbf{B}, \mathbf{E}) Wolke → Akkretion
 - \mathbf{B}, \mathbf{E} -Fluktuationen, Zerfallszeit $\tau \sim r_g/c$

$$\rightarrow \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \simeq -\frac{E}{r_g} \simeq -\frac{j R_h}{r_g} \simeq -\frac{B R_h}{4\pi r_g}$$

→ “Widerstand” des BH R_h , mit

$$\frac{\partial B}{\partial t} \simeq -\frac{B}{\tau} \quad \rightarrow \quad R_h = 4\pi = 377 \Omega$$

3. Schwarzschild-BH, konstantes \mathbf{B} , mit Batterie verbunden
 - Elektrischer Strom $I \simeq V/R_h$ quer zu \mathbf{B}
 - Lorentz-Kraft $\mathbf{F}_L \sim \mathbf{j} \times \mathbf{B}$, Drehmoment $\simeq IB$
4. Rotierendes BH, konstantes \mathbf{B}
 - Da Leiter → Induktion einer Potential-Differenz
 - $V \simeq \Omega_h r_g^2 B \simeq r_g B$
 - bei externem elektrischen Strom zwischen Pol und Äquator
Arbeitsleistung im externen Medium / Energie aus BH

Blandford-Znajek-Prozess: Arbeitsleistung

Abschätzung: Ohm'sche Heizung

$$L_{BZ} \simeq I^2 R_h + I^2 R_{\text{ext}}$$

Für $R_h \simeq R_{\text{ext}}$ maximale externe Leistung:

$$\rightarrow L_{BZ} \simeq I^2 R_{\text{ext}} \simeq r_g^2 B^2 / R_h$$

Blandford-Znajek-Prozess: Anwendung auf AGN:

- Magnetfeld, aus Akkretionsscheibe:
Dynamoprozess oder Advektion (?)
→ Equipartition ($P_{\text{gas}} \simeq P_{\text{mag}}$) → $B \simeq 10^4$ G
- BH-Masse: $10^8 M_\odot$

daraus

- Spannung eines rotierenden BH:

$$V \sim r_g B = 10^{19} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^2 \left(\frac{B}{10^4 \text{G}} \right)^2 \text{ V}$$

- Arbeitsleistung eines rotierenden BH:

$$L_{BZ} \simeq 10^{45} \left(\frac{a}{M} \right)^2 \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^2 \left(\frac{B}{10^4 \text{G}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1}$$

- Zum Vergleich: “Freie Energie”:

$$M - M_{\text{err}} \simeq 4M^3 \Omega_h^2 \simeq 10^{61} \left(\frac{a}{M} \right)^2 \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^2 \text{ erg}$$

Schwarze Löcher außerhalb von AGN

- stellare Schwarze Löcher nach Supernova-Kollaps oder Verschmelzung von Neutronendoppelsternen $\rightarrow 1-3 M_{\odot}$
- in Sternhaufen Verschmelzung und Akkretion $\rightarrow 10^3-10^4 M_{\odot}$?
möglicherweise in Frühzeit “Saat” für galaktische BHs
- galaktische BHs $\rightarrow 10^5-10^{10} M_{\odot}$

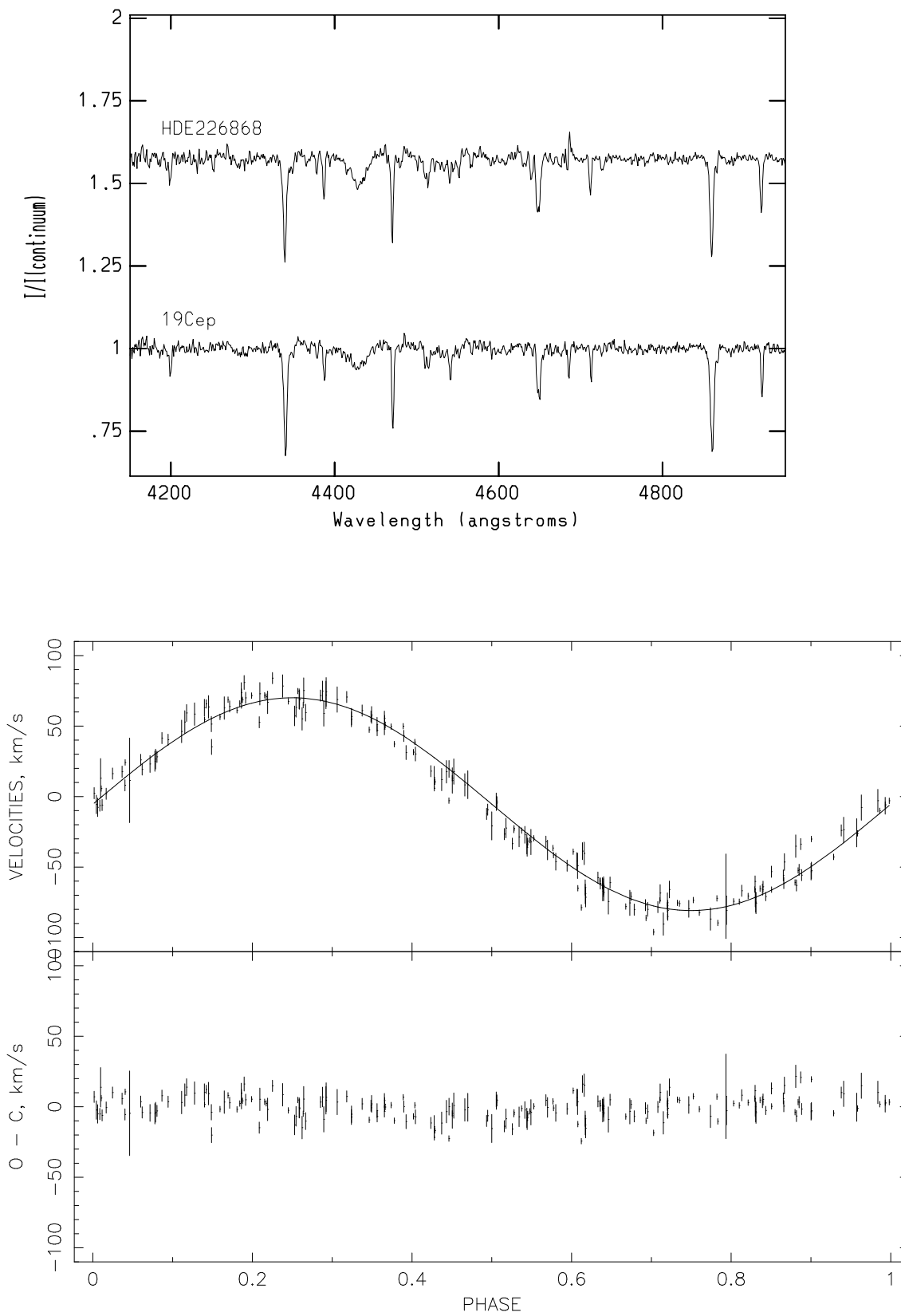
Stellare BHs:

Röntgendoppelsterne (X-ray binaries, XRB)

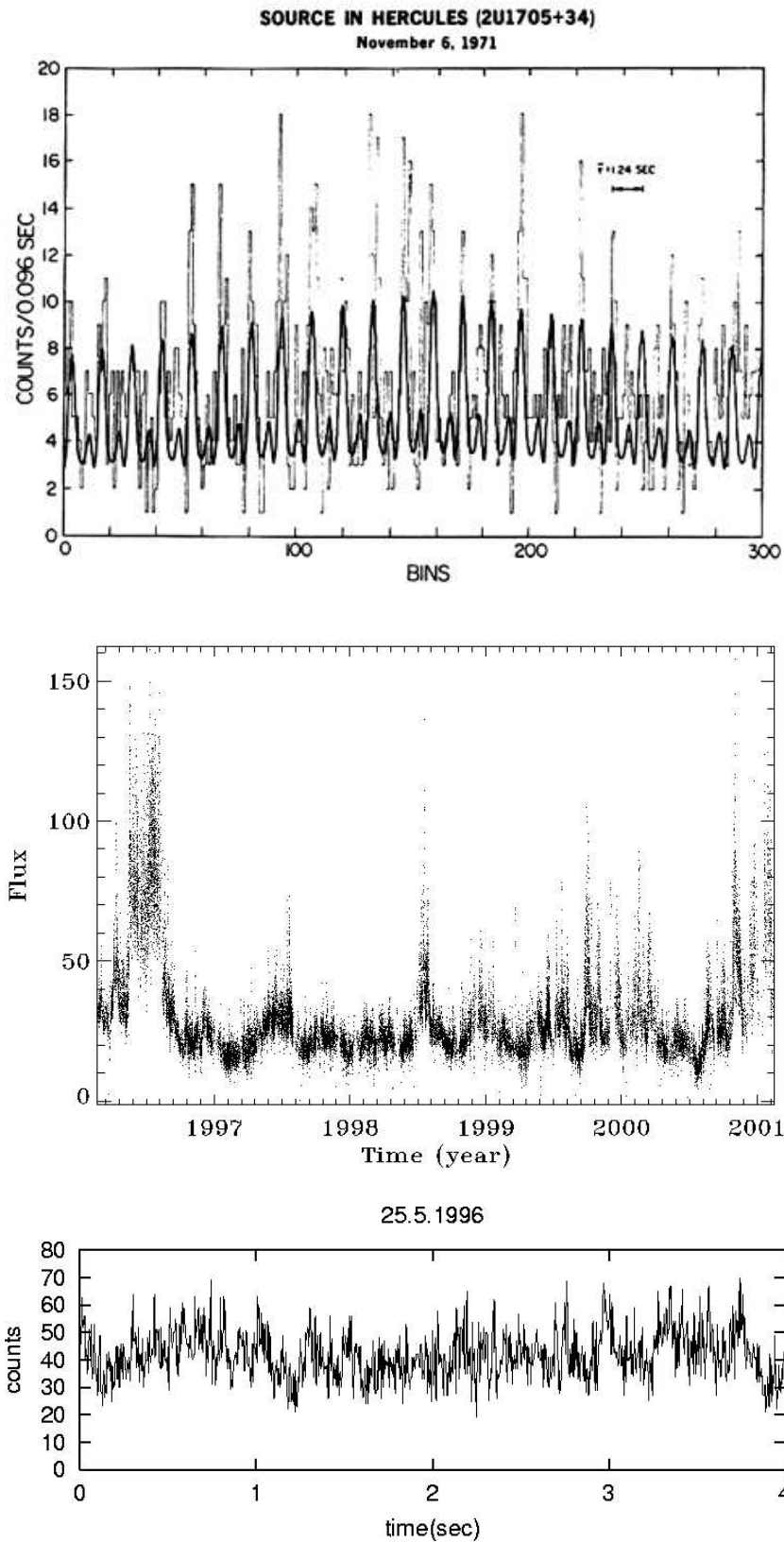
- früher 1970er: Entdeckung sehr heller Röntgenquelle im Sternbild Schwan (Cygnus): Cygnus X-1
- damals Position sehr ungenau: optisches Gegenstück?
- Frühjahr 1972: plötzliches Auftauchen einer Radioquelle, gleichzeitig Ausbruch von Cyg X-1 im Röntgenbereich
- Eindeutige Identifikation der Radioquelle mit OB Überriese HDE 226868 (O9.7 Iab) \rightarrow sehr wahrscheinlich Doppelstern
- Messungen: 5.6 Tage Periodizität in Radialgeschwindigkeit und Röntgenlichtkurve
- Röntgenvariation nicht *periodisch* variabel \rightarrow Röntgenquelle hat keine feste Oberfläche! \rightarrow kein Neutronenstern sondern Schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe
- aus Orbits: $10 M_{\odot}$

Mikroquasare

- Röntgenquellen und Jets wie bei “echten” Quasaren
- Jet-Ausdehnung statt 100 Kiloparsec nur im Parsecbereich
- Röntgendoppelsterne mit einem stellaren BH im Zentrum, Akkretionsscheibe überträgt Masse, relativistische Elektronen in Jets produzieren Radiostrahlung
- alle Vorgänge laufen im Vergleich zu QSOs sehr schnell ab \rightarrow Testlaboratorien für Teile der AGN-Physik



Optisches Spektrum (oben) und Radialgeschwindigkeitsperiodizität (unten) von HDE 226868, 5.6 Tage (LaSala et al. 1998)

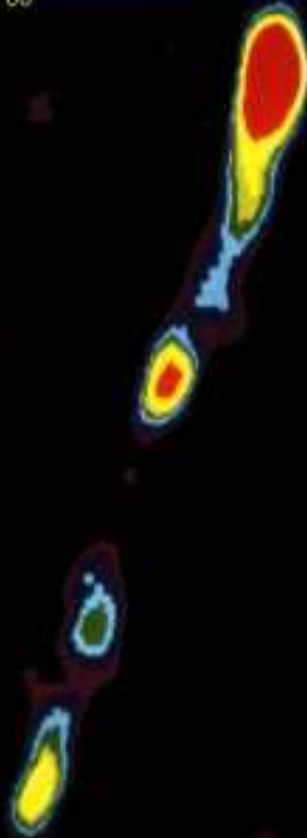


Röntgenemission: Periodischer Neutronenstern Hercules X-1 (oben), aperiodisches BH Cygnus X-1 (Mitte, unten)

nature

INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

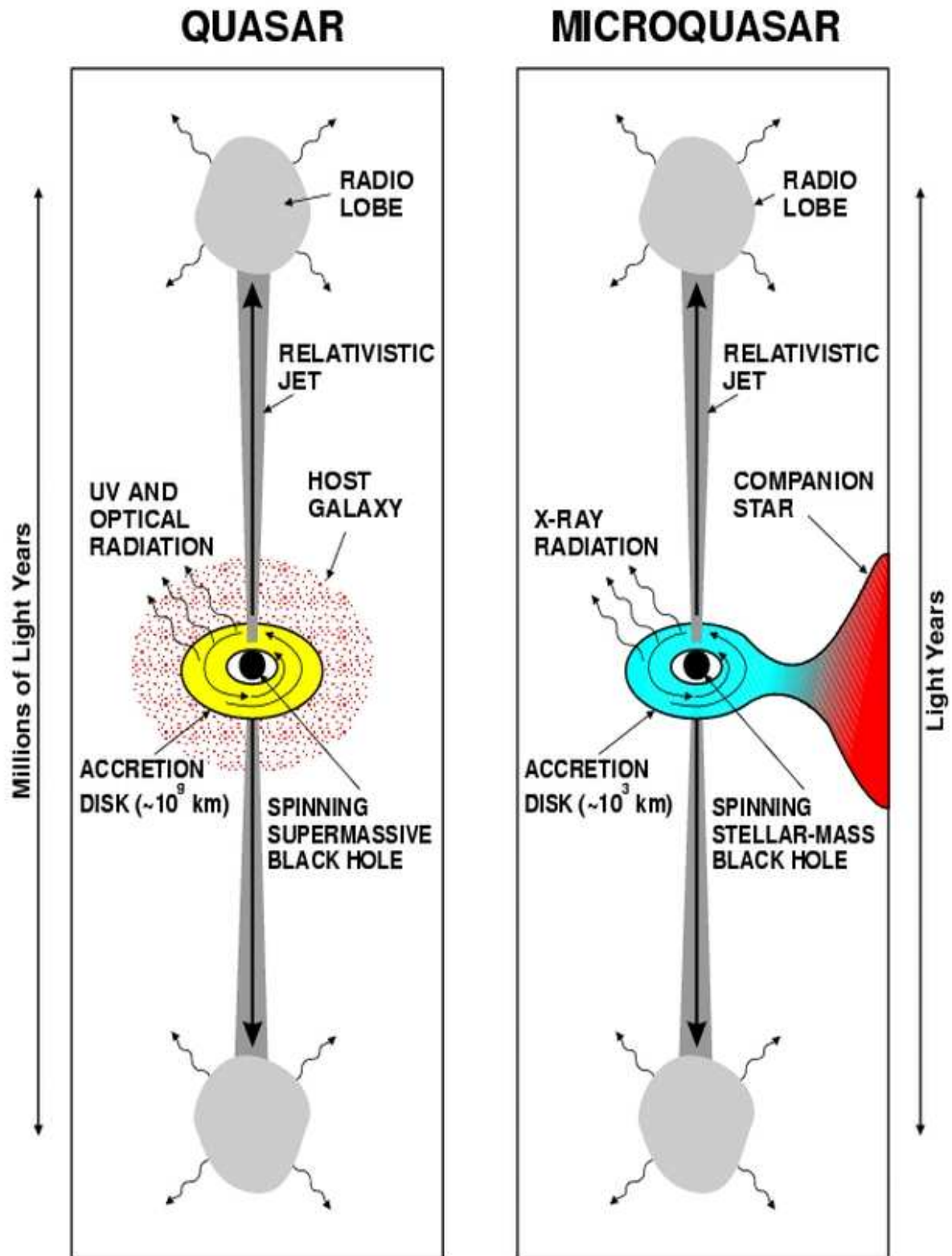
Volume 358 No. 6383 16 July 1992 £3.00



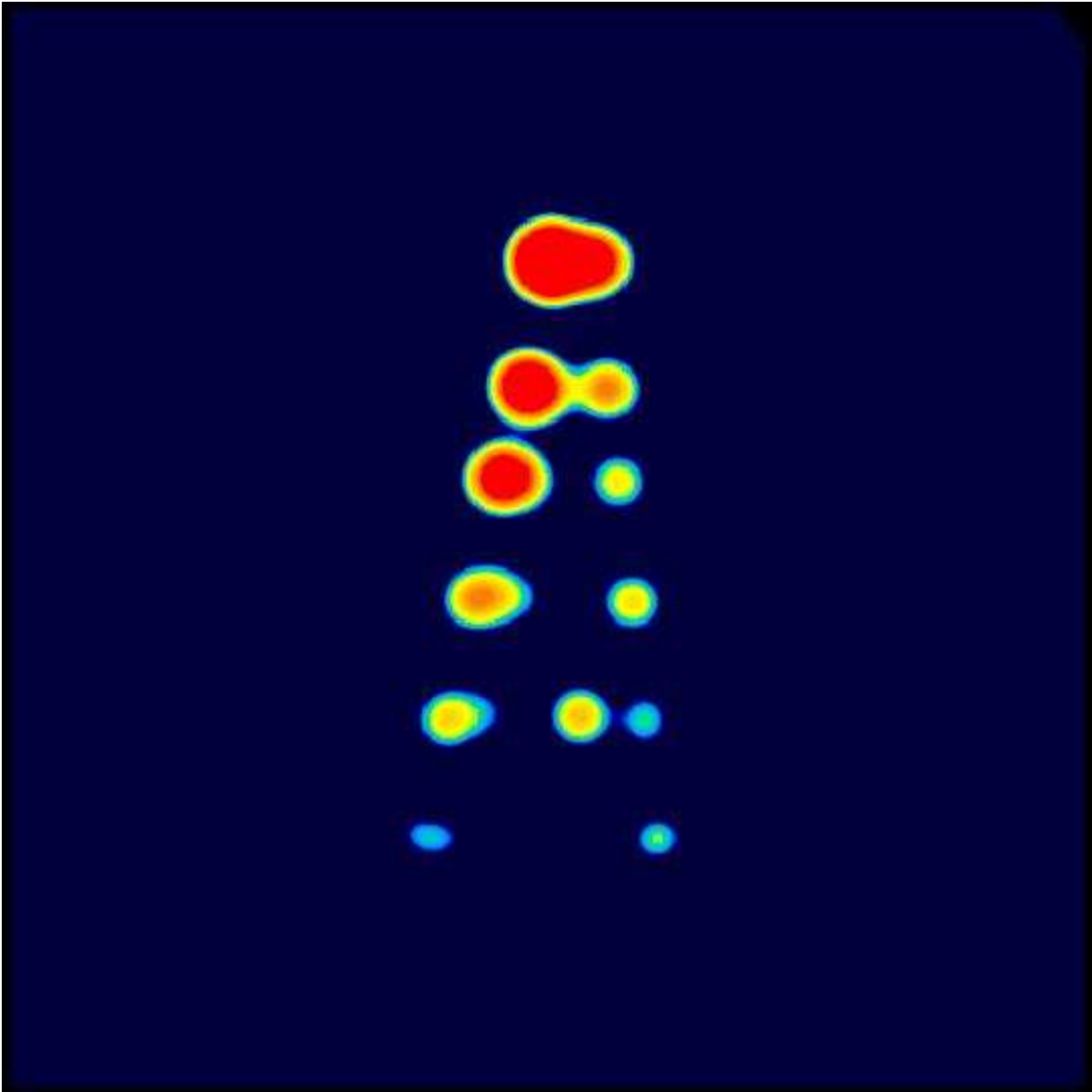
A 'MICROQUASAR' AT THE GALACTIC CENTRE

Probing the heart of human serum albumin
Hox genes in limb development
Carbon nanotubes in bulk
Chemical replicators





Mikro- vs. Makroquasar, skalierbare Physik, ähnliche Phänomene (Mirabel et al. 1998)



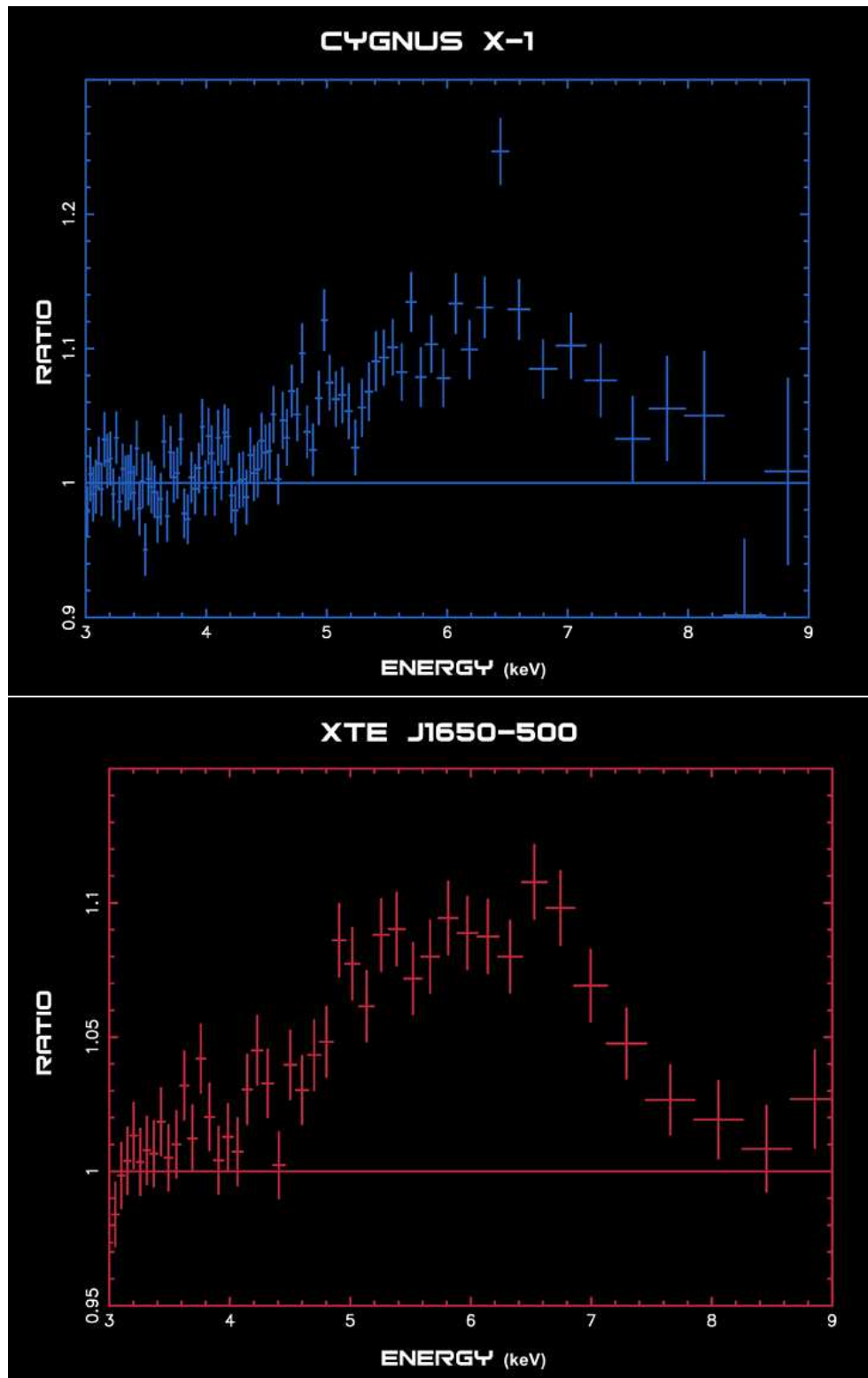
Superluminale Geschwindigkeiten im Mikroquasar GRS 1915+105
(Mirabel et al. 1994)

Fe $K\alpha$ Emissionslinie im Röntgenbereich

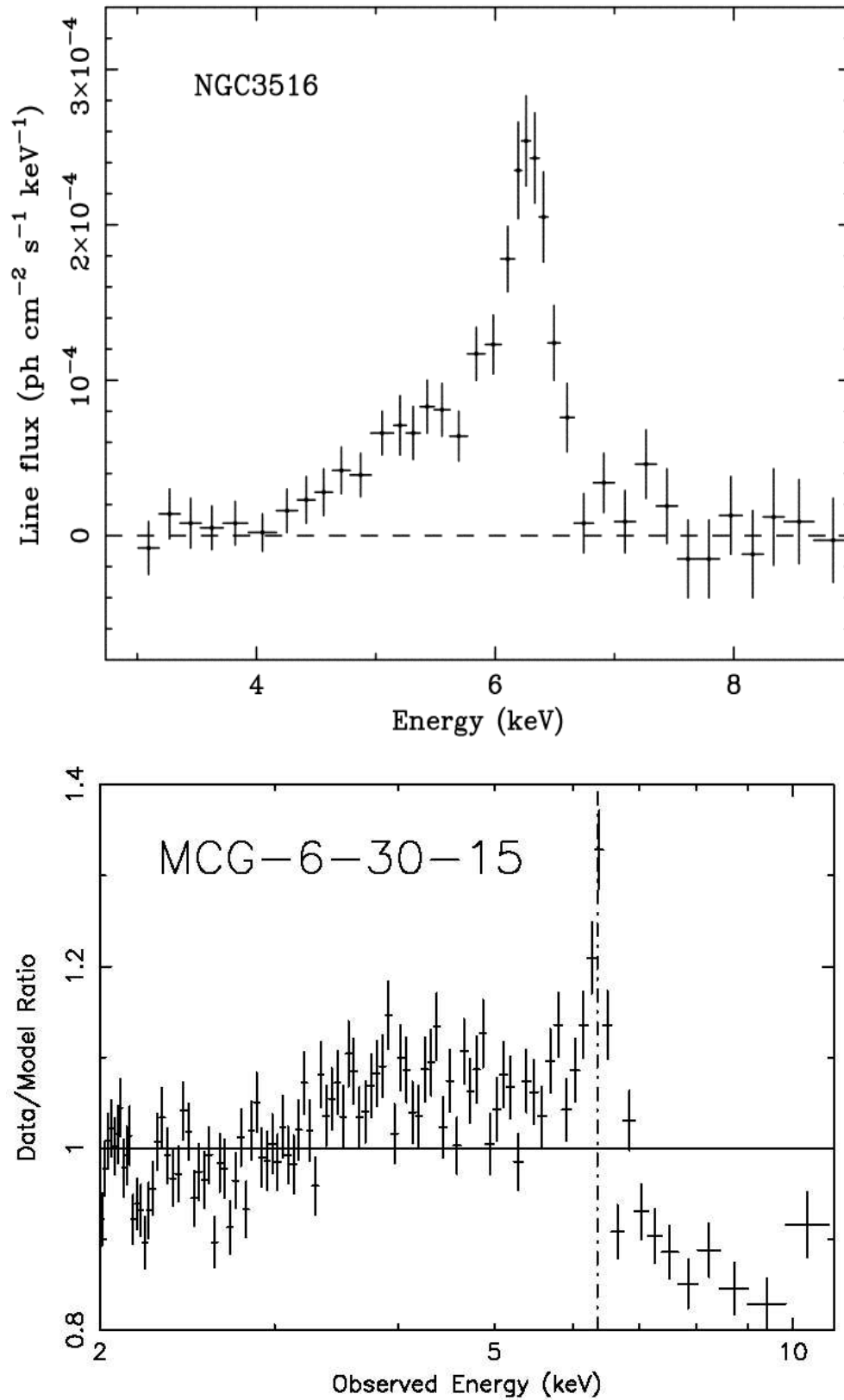
- Fluoreszenzlinie Fe K bei 6.4 keV
- natürliche Breite $\lesssim 200$ eV
- beobachtet sowohl bei AGN, XRB: sehr breite Linie (>2 keV)
- Linienbreite wie im optischen/UV durch tiefen Potentialtopf und großen Rotationsgeschwindigkeiten
- Energien <4 keV nur mit rotierendem Kerr BH möglich

BHs mittlerer Masse:*Ultraleuchtkräftige Röntgenquellen (ULX)*

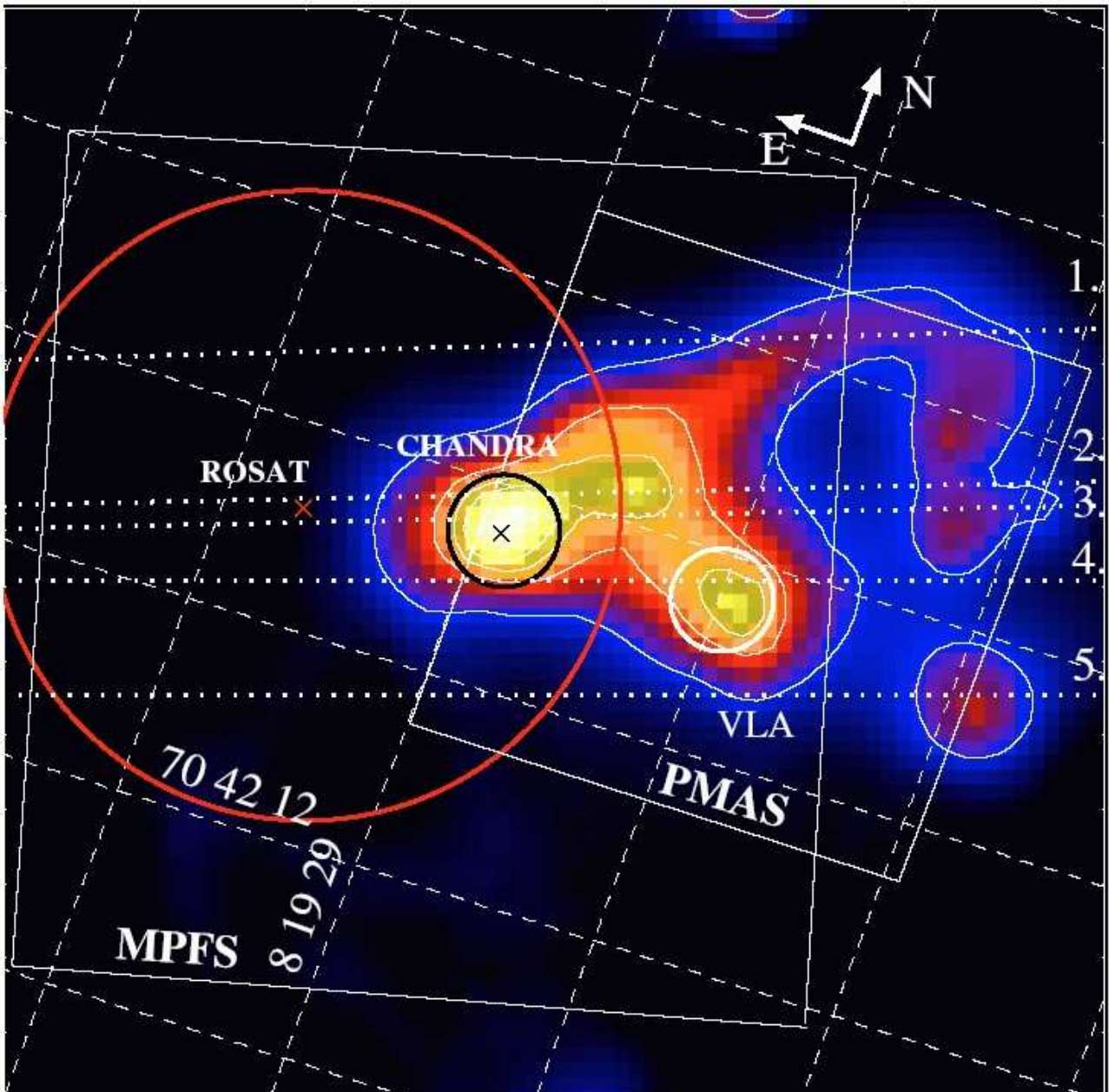
- optische Gegenstücke und integrierte Röntgenleuchtkraft deuten auf sehr energetische Röntgenquelle hin
- Masse größer als stellares BH
- evtl. Überreste von Cluster?



Fe K α Linie, Ruhewellenlänge 6.4keV. Stellare Röntgenquellen Cyg X-1 und XTE J1650-500; nichtrotierendes BH oben, rotierendes BH unten.



Fe K α Linie, Ruhewellenlänge 6.4keV. Seyfertgalaxien NGC3516 und MCG 6-30-15; nichtrotierendes BH oben, rotierendes BH unten.



Ultraleuchtkräftige Röntgenquelle in Galaxie Holmberg II: Röntgen, Radio und optische Integral-Field Spektroskopie (Lehmann et al. 2005)

Direkter Nachweis von Schwarzen Löchern: Gravitationswellen

Interferometrischer Nachweis

- Michelson Interferometer mit großer Armlänge
- sehr konstanter Laserstrahl
- sich verschiebende Interferenzmuster bei unterschiedlicher Längenänderung in den beiden Armen → Licht in Photodiode
- Nachweisempfindlichkeit \propto Schenkellänge und Lichtleistung
- Signalverstärkung durch mehrfaches Durchlaufen der Arme
- Empfindlichkeit von 10–5000Hz (entsprechend Umlauffrequenz von engen Binärsystemen)
- angestrebte Genauigkeit: 10^{-21} → ein Atomdurchmesser auf 1km Armlänge!

Resonanzdetektoren

- Längenänderung eines Metallzylinders durch durchlaufende GW → Änderung der Eigenfrequenz
- ständige Messung der Eigenfrequenz
- empfindlich nur auf Signale nahe Eigenfrequenz → von Masse abhängig
- war erste GW-Meßmethode in den 1960ern

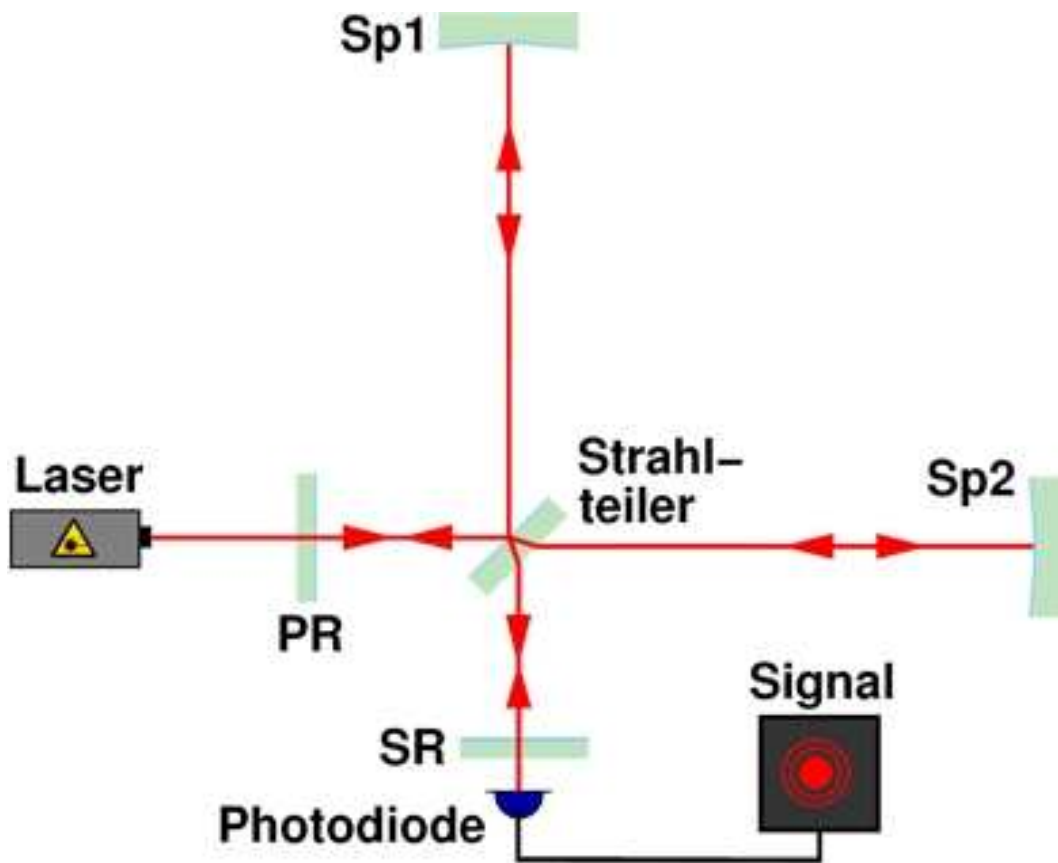
Bestehende Detektoren

- Geo600 (bei Hannover, 600 Meter Armlänge)
- LIGO (Hanford+Livingston/USA, 4km, 4km, 2km)
- VIRGO (bei Pisa, 3km)
- TAMA300 (Tokyo, 300 Meter Länge)
- einige Resonanzdetektoren

Geplante Detektoren

- LISA (Weltraum, 5 Millionen km), ESA/NASA, 2013–15

Bis jetzt kein Nachweis von GW! Die Meßgenauigkeiten sind aber so groß, daß bald (5 Jahre) erste Signale erwartet werden: verschmelzende stellare BHs



GW-Interferometer Grundprinzip (oben), Nautilus Resonanzdetektor (unten)