

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???).

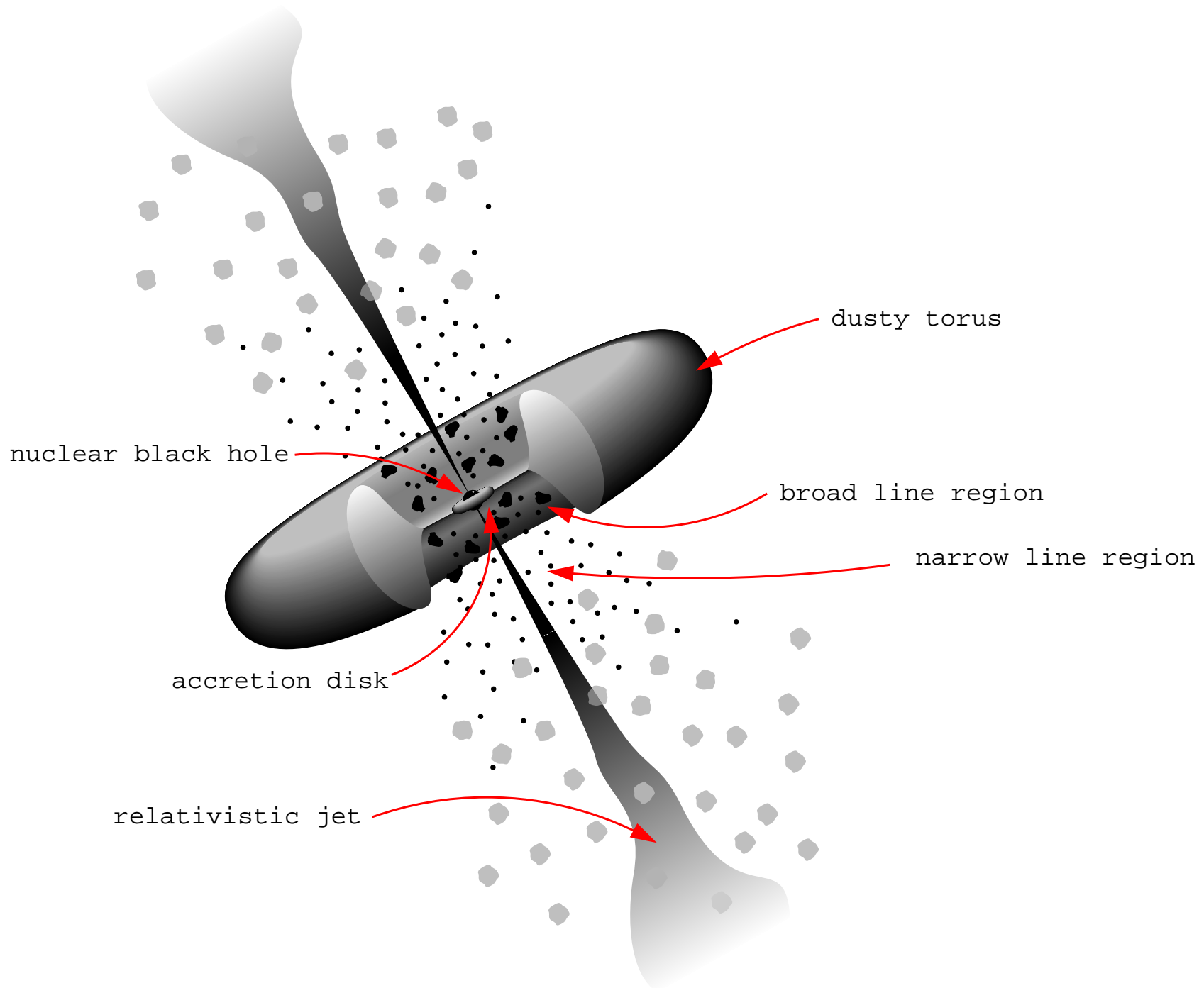
Viskose Heizung der Scheibe \Rightarrow Thermische Kontinuumsemission im optischen/UV/weichen Röntgenbereich (d.h. Temperatur $\sim 10^5$ K).

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)

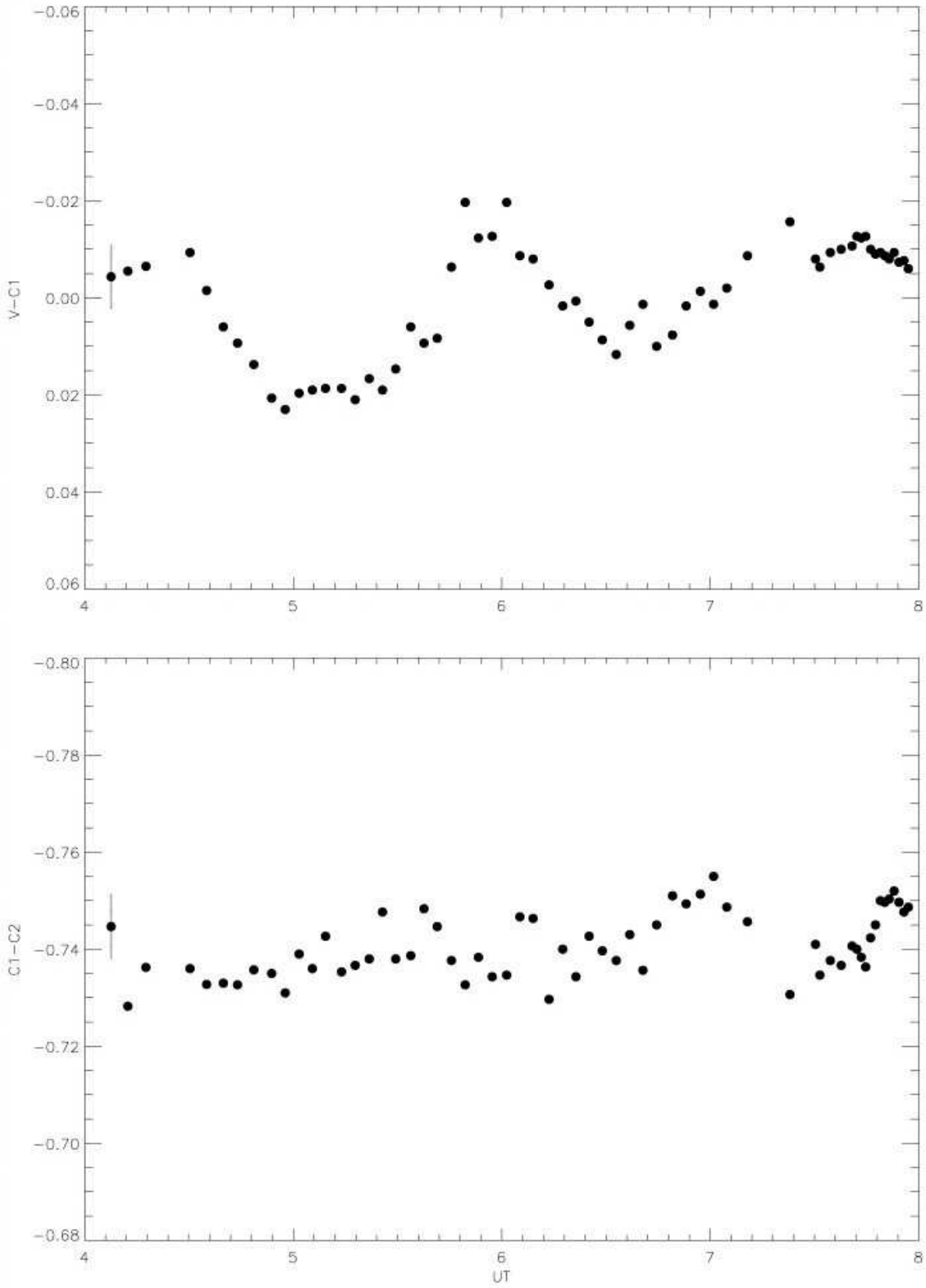
Alternative Klassifikationskonzepte existieren – vor allem solche, die verschiedene AGN-Typen entlang einer *Entwicklungssequenz* aufreihen.

Schwarze Löcher in AGN

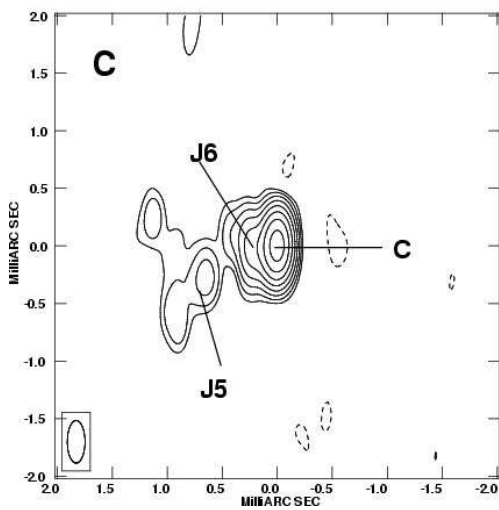
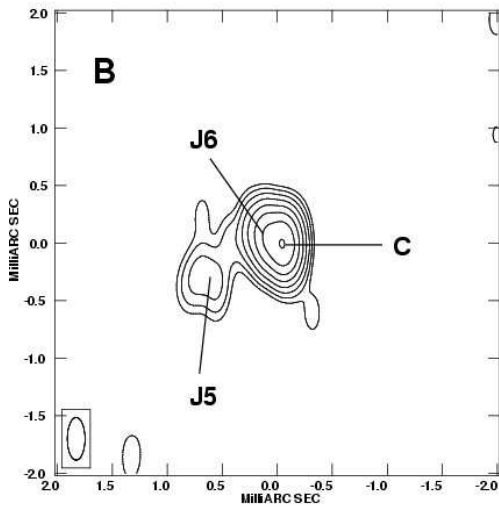
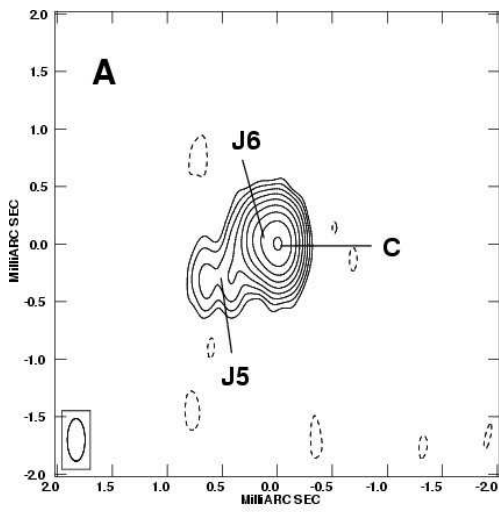
Hypothese superschwerer schwarzer Löcher (BH) in AGN: 10 Hinweise

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 $10^6 \dots 10^7 M_{\odot}$)

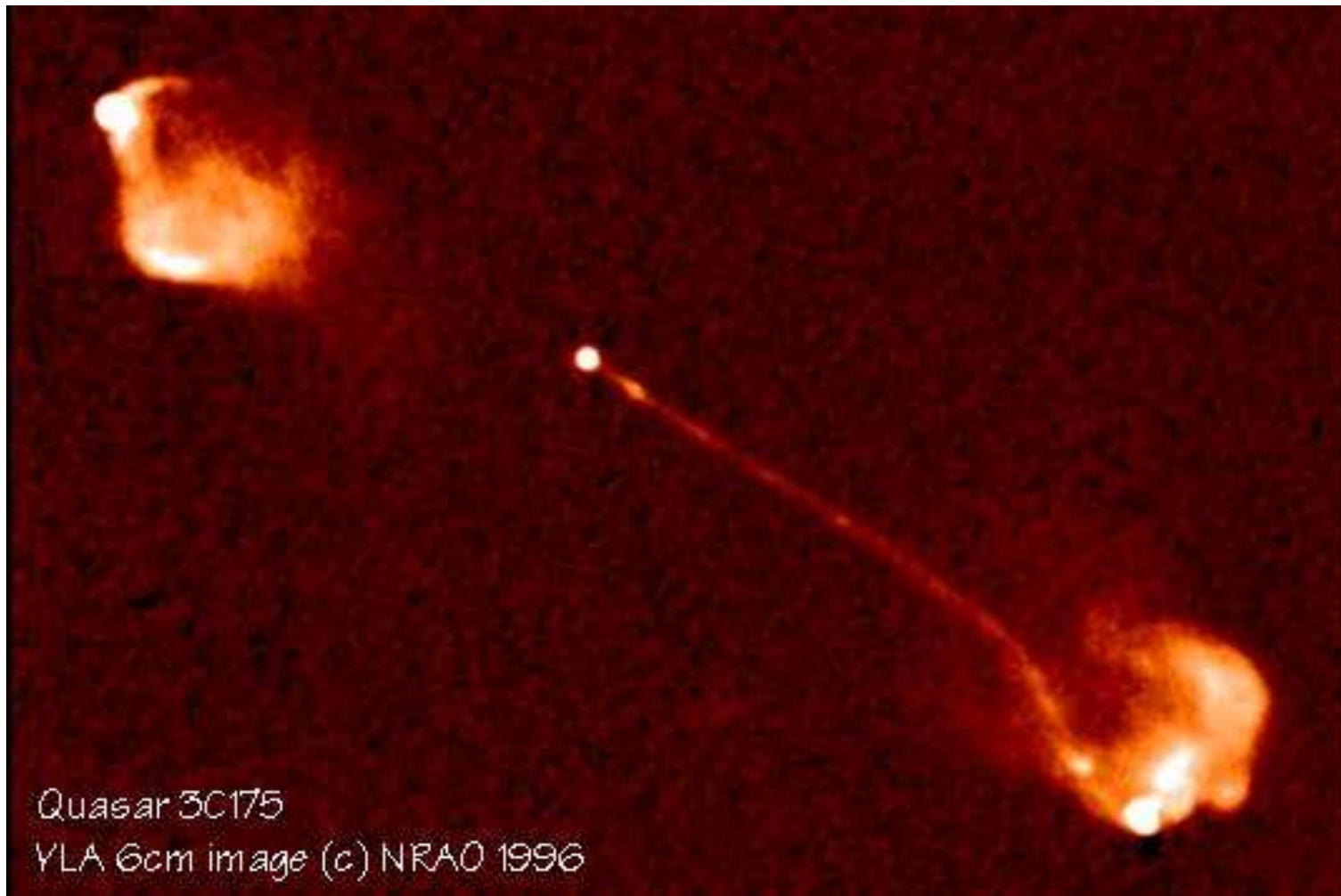
Die Frage nach der Entstehung der massereichen schwarzen Löcher in Galaxienkernen ist noch weitgehend ungeklärt. Im wesentlichen zwei Optionen: Ausbildung der schwarzen Löcher bereits in der Anfangsphase der Galaxienentstehung, oder langsames Wachstum aus stellaren schwarzen Löchern?



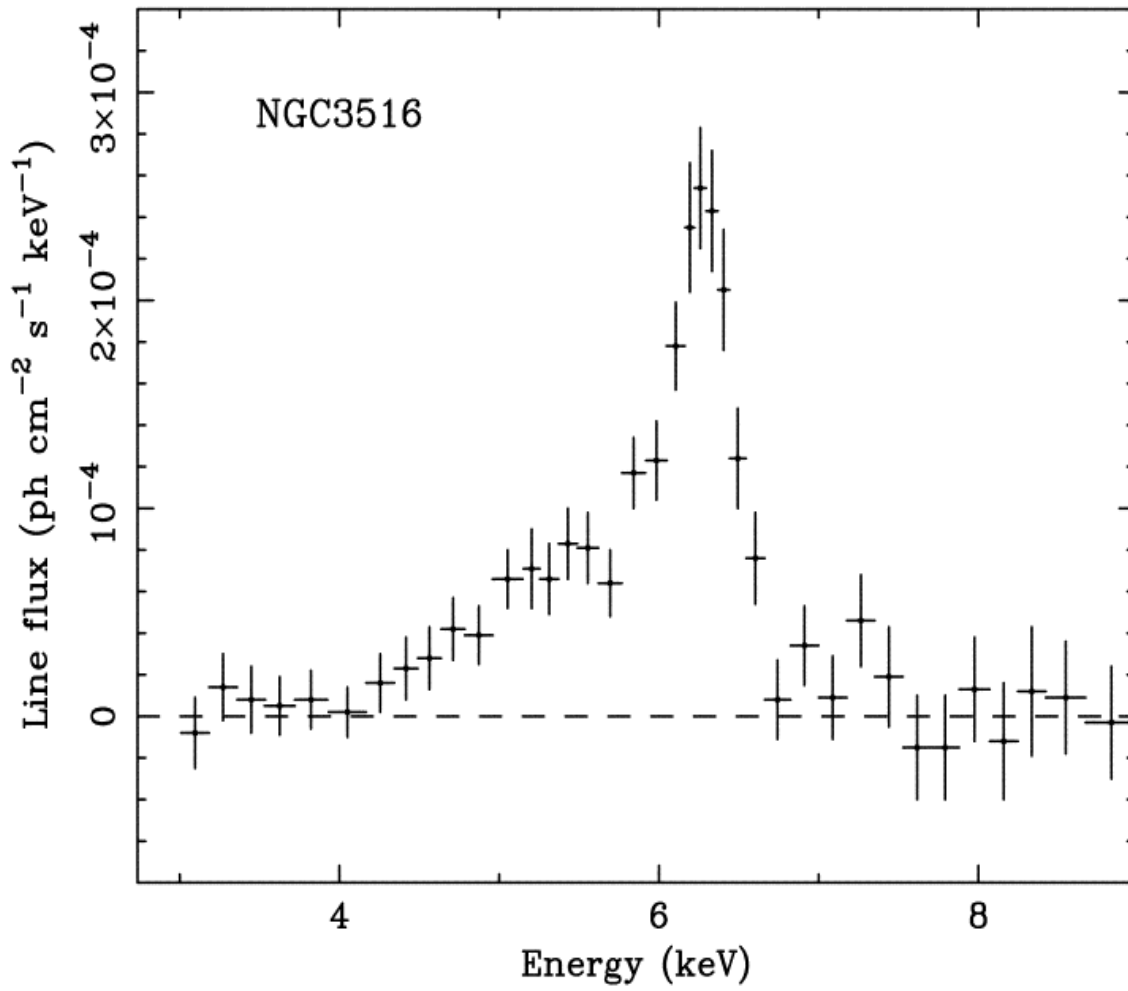
Vergleich Ark 120-Stern (oben) zu Stern 1-Stern 2 (unten)
(Carini et al. 2003, AJ, 124, 1811)



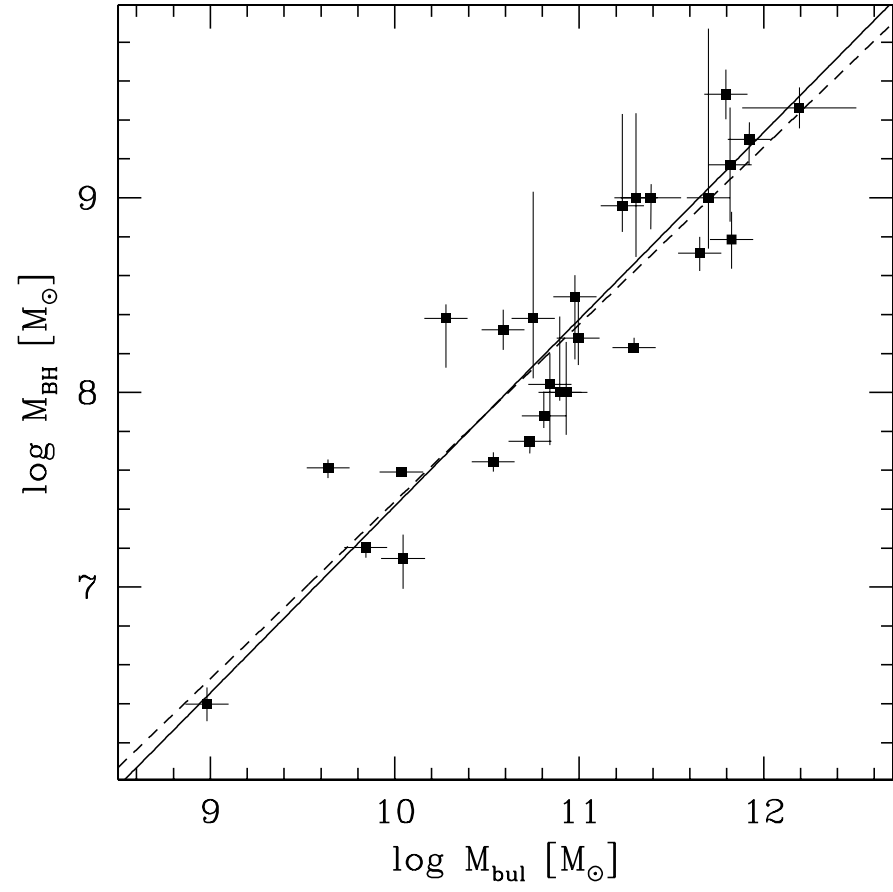
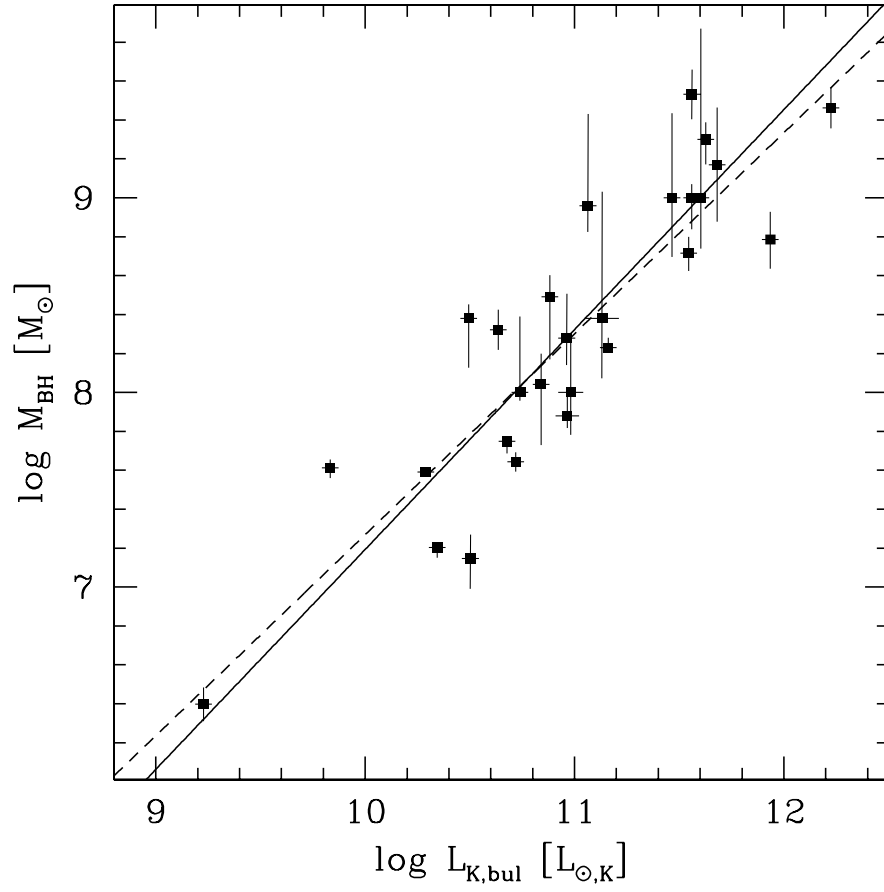
“Überlichtgeschwindigkeit” bei Radioquellen: PKS 1502+106
 (An et al. 2005, 2004, A&A, 421, 839)



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



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



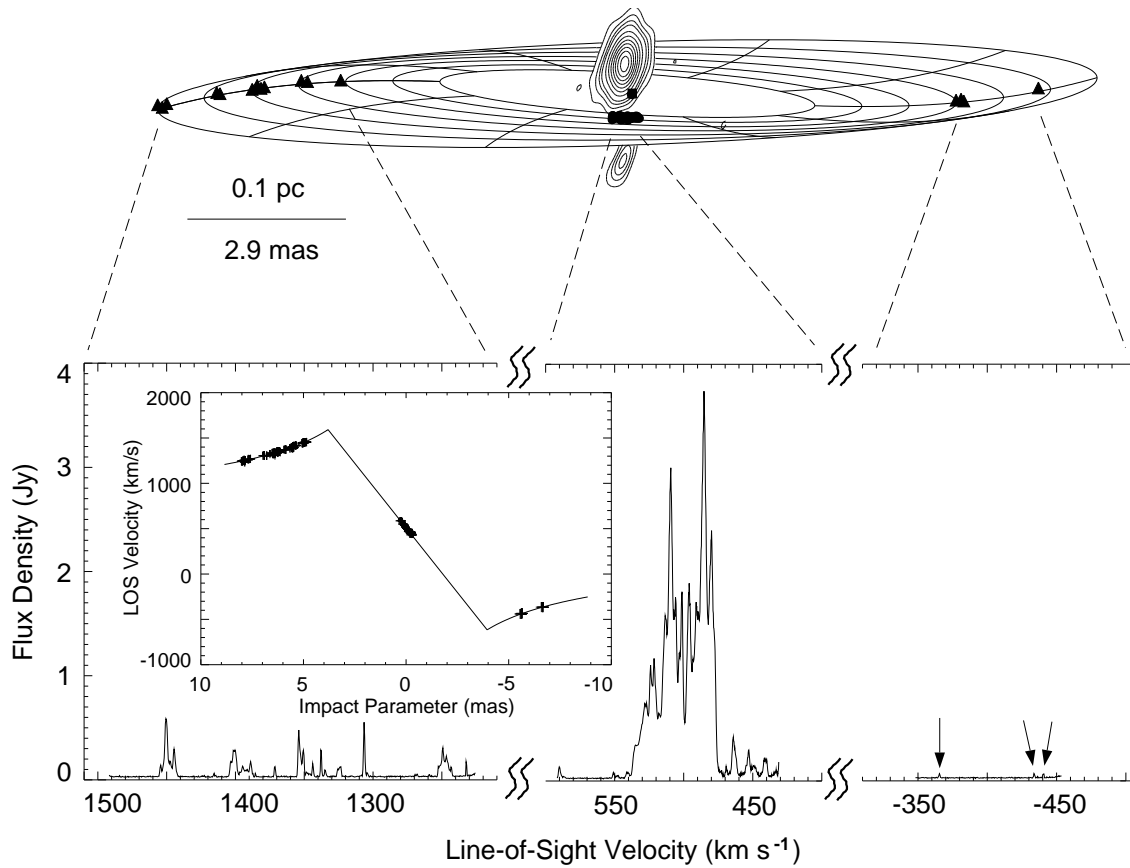
Bulge–BH Massenbeziehung (Marconi & Hunt 2003)

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

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

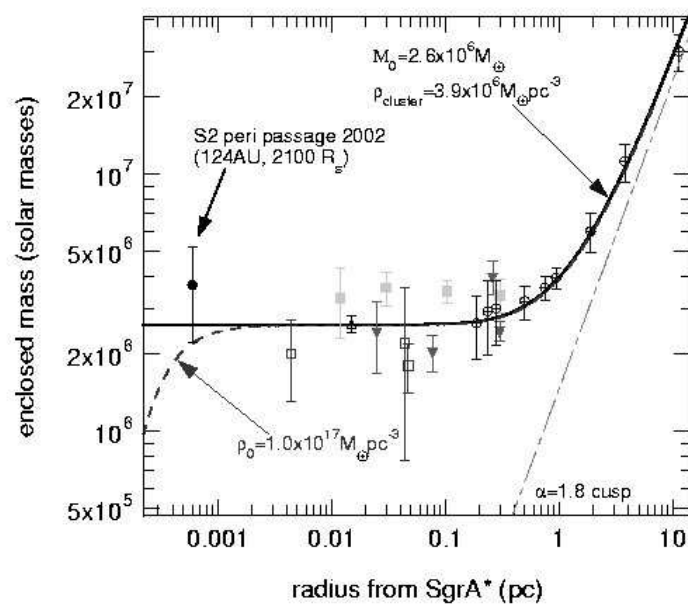
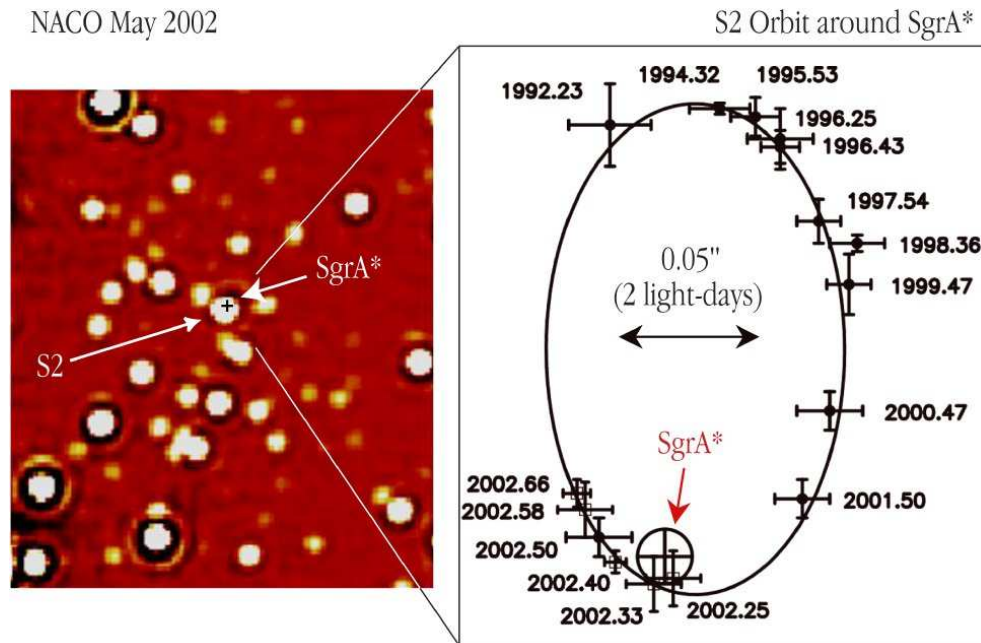
→ $M(r < 0.13)$ pc = $3.3 \times 10^7 M_{\odot}$

→ 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 \rightarrow 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”, $r_g = M$

\rightarrow Metrik beschrieben durch Boyer-Lindquist-Koordinaten:

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

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

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

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

“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: $a = 0$, $d\phi = 0$, $d\theta = 0 \rightarrow$

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

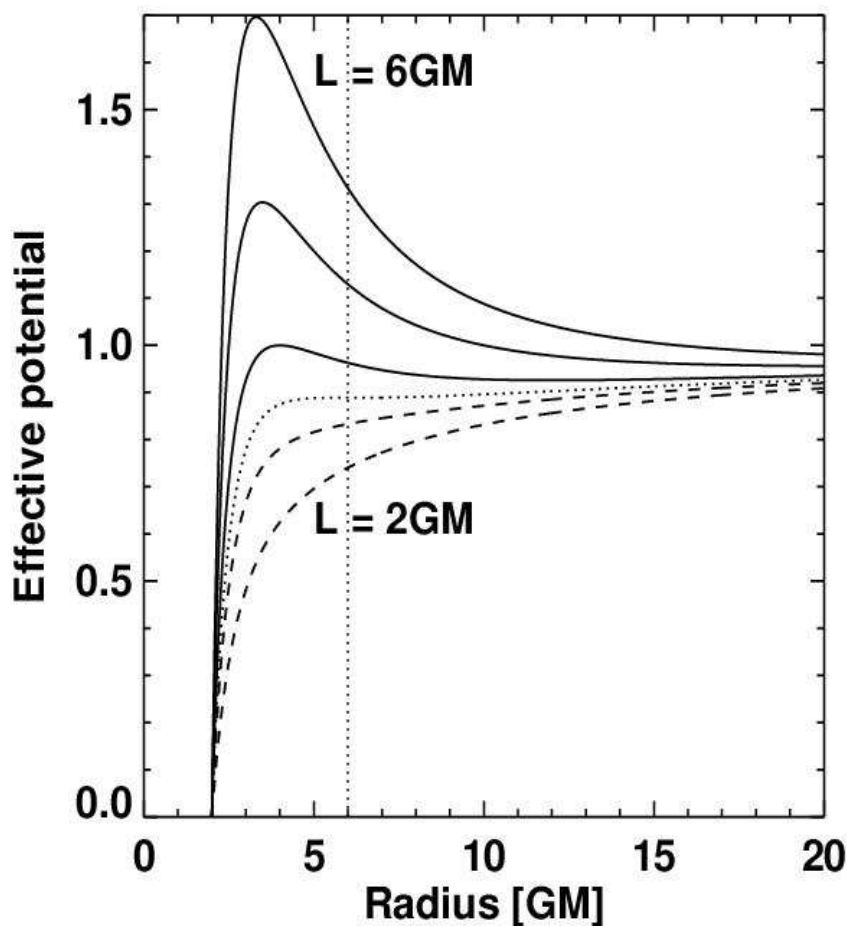
$$\omega(r, \theta) = 0, \quad \alpha(r, \theta) = \sqrt{1 - 2GM/rc^2}$$

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

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 Kreis orbits bei Radien, die $V(r)$ minimieren
 Aber: Orbits nicht geschlossen für $\tilde{E} > \sqrt{2V(r_{\min})}$
- Instabile Kreis orbits 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

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

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

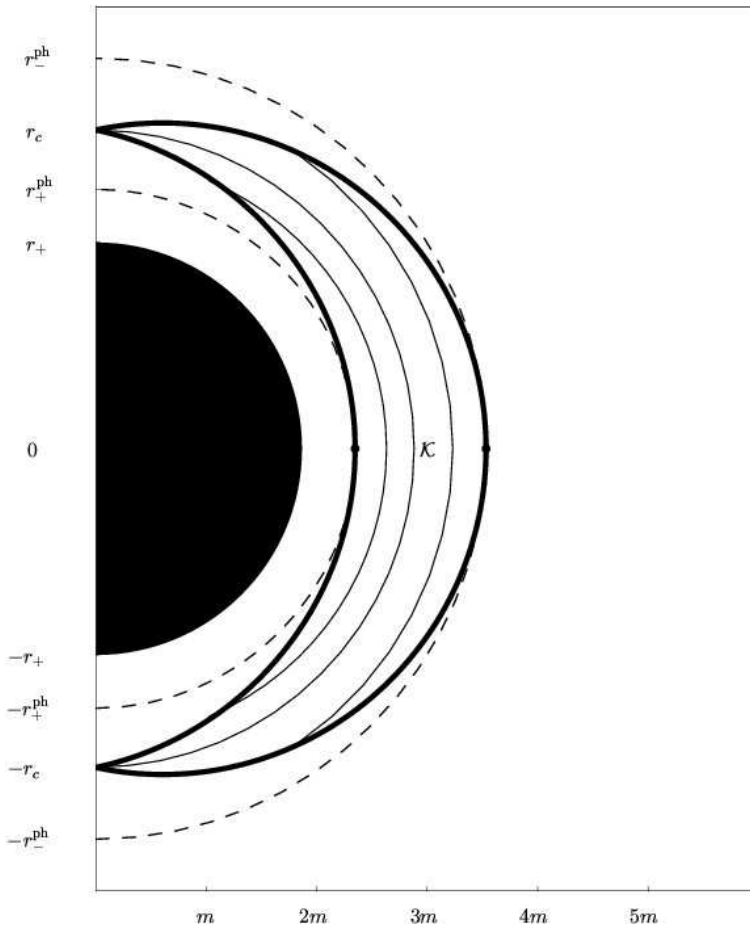
Ergosphäre: Region zwischen r_h und r_E :

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

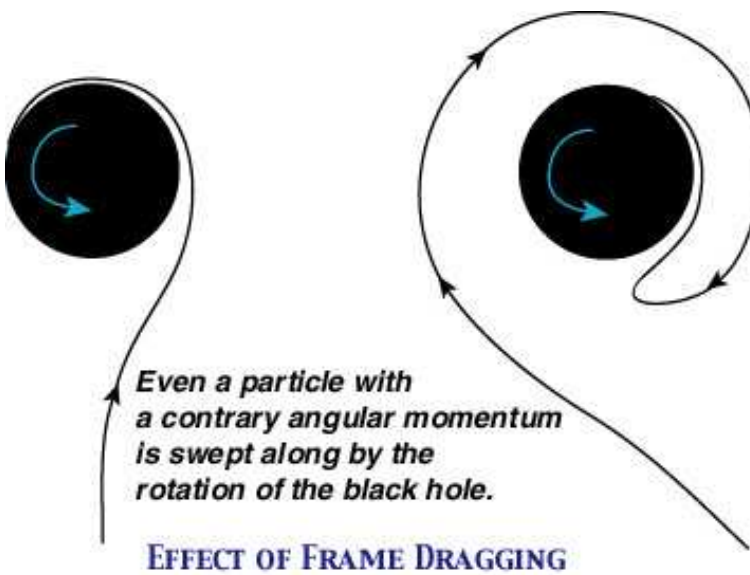
– Orbits $r < r_h$ möglich mit negativer Gesamtenergie,
Teilchen mit $\tilde{E} < 0$ kann Loch-Masse reduzieren!

– 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)