

Gefangen im Wirbel aus Raum und Zeit - Rotierende Schwarze Löcher

08.12.2004

**AK Astronomie
Universität Stuttgart**

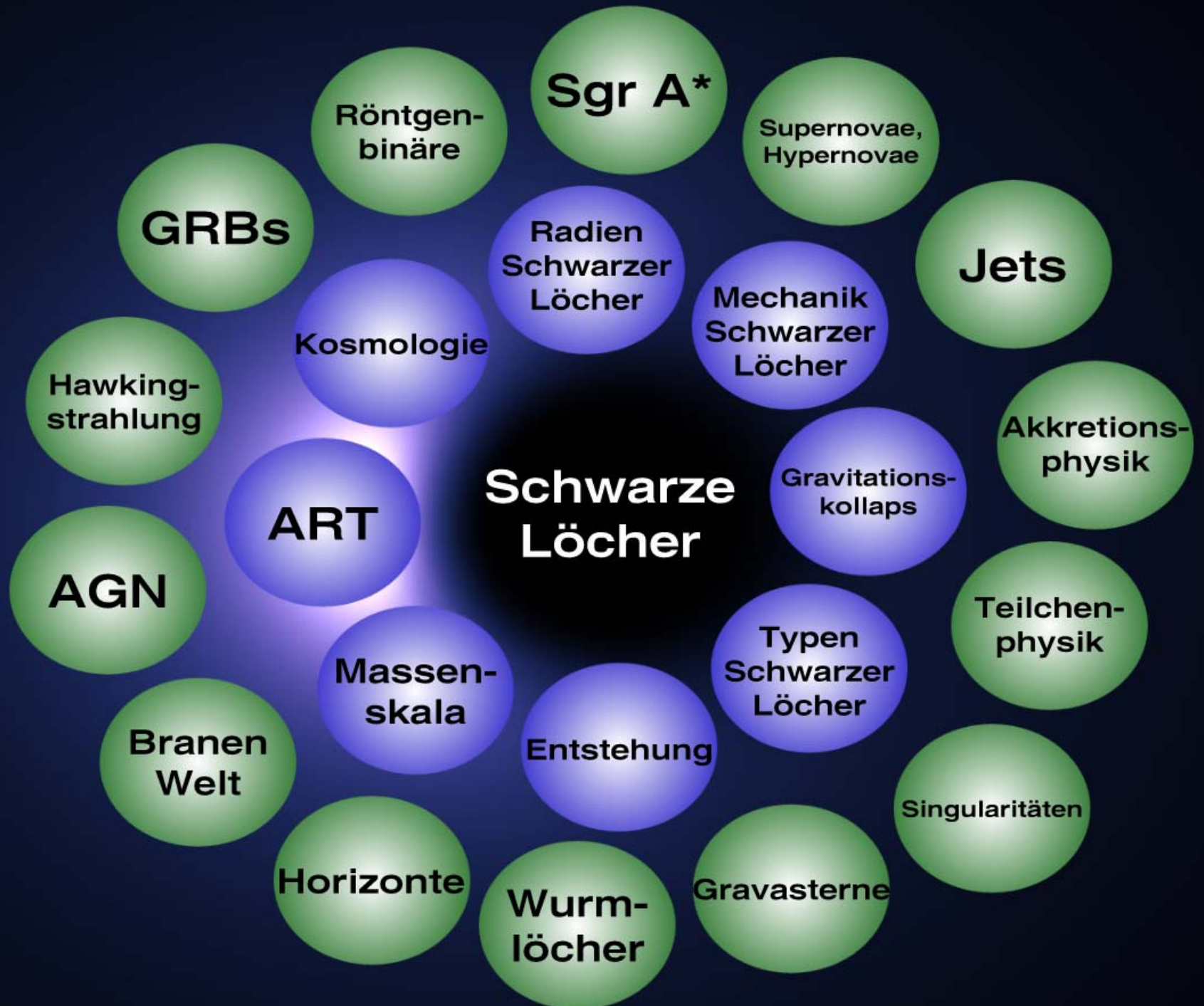
Andreas Müller

Theoriegruppe

Landessternwarte Heidelberg



Eine Übersicht



Grundsätzliches über Schwarze Löcher

Warum Schwarzes Loch?

schwarz → Fluchtgeschwindigkeit c

Loch → Krümmungssingularität
in der Raumzeit

Begriff „*Schwarzes Loch*“ stammt vom Relativisten *John Archibald Wheeler* (1968), aber erste Spekulation bereits vom Geologen und Astronomen *John Michell* (1783)

Allgemeine Relativitätstheorie

- Schwarze Löcher sind Lösungen der Feldgleichungen der ART von Albert Einstein (1915)

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

- Geschichte:
 - Schwarzschild 1916 (statisch, neutral, Vakuum)
 - Reissner-Nordstrøm 1918 (statisch, elektrisch geladen)
 - Kerr 1963 (rotierend, neutral, Vakuum)
 - Kerr-Newman 1965 (rotierend, geladen)
- Raumzeit im metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ löst Feldgleichung
- Masse steckt in Punkt- oder Ringsingularität

Schwarze Löcher haben keine Haare!



maximal set:
 $\{M, a, Q\}$

- Schwarzschild
 $\{M\}$
- Reissner-Nordstrom
 $\{M, Q\}$
- Kerr
 $\{M, a\}$
- Kerr-Newman
 $\{M, a, Q\}$

*Wheeler:
Keine-Haare Theorem*

Standardmodell der Teilchenphysik

- elementare Bausteine: **Quarks** und **Leptonen**
- Alle Hadronen bestehen aus Quarkmaterie:
 - 2 Quarks konstituieren Mesonen wie π , K , ...
 - 3 Quarks konstituieren Baryonen wie p , n , Σ^0 , Ξ^- , ...
 - auch Tetraquarks und Pentaquarks 2003 entdeckt!
- leptonische Materie besteht aus e^- , e^+ , μ , ν_e , ν_τ , ...
- exotische ultradichte Aggregatzustände:
 - Quark-Gluonen Plasma, Diquarks

Jenseits des Standardmodells

- supersymmetrische Materie:

Superpartner wie Neutralino, Selektion, Higgsino, ...

bisher nicht nachgewiesen!

- String- und Branen-Materie (Extradimensionen!)

Superstringtheorien

Standardmodell der Kosmologie

- Datengrundlage:

kosmische Hintergrundstrahlung (WMAP)

Supernovae Typ Ia

- **baryonische Materie** $\Omega_b = 0.04$

- **Dunkle Materie** $\Omega_{DM} = 0.23$, $\Omega_m = \Omega_{DM} + \Omega_b = 0.27$

baryonisch: Braune Zwerge, M-Zwerge, extrasolare Planeten, ...

nicht-baryonisch: Axion, WIMPs, Dark SUSY

- **Dunkle Energie** $\Omega_\Lambda = 0.73$

kosmologische Konstante Λ , Quintessenzen, Phantom-Energie

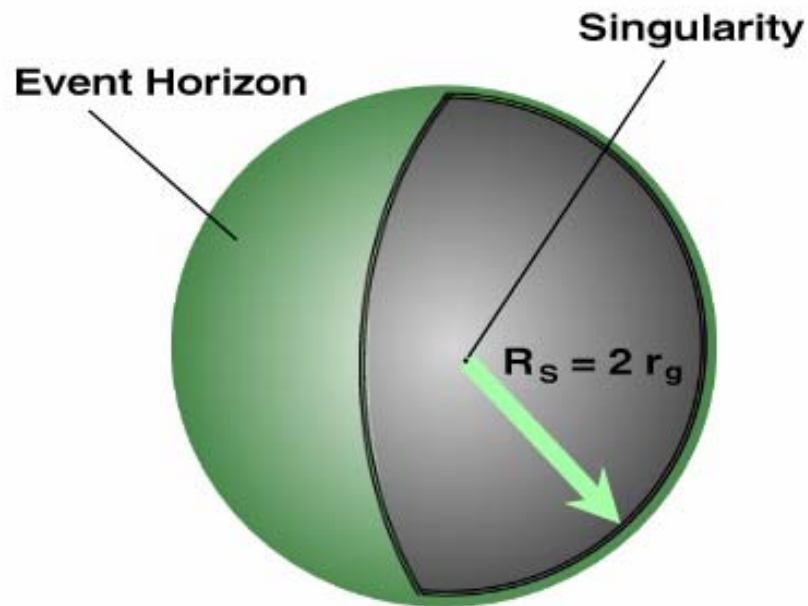
antigravitativ: **Expansion des Universums**, Quantenvakuum?

... und Schwarze Löcher?

- Masse steckt in Krümmungssingularitäten
- Diskussion des Riemannschen Krümmungstensors $R_{\kappa\lambda\mu\nu}$
- „singuläre Materie“: Raumzeit-Singularitäten
- „Masse ohne Materie“

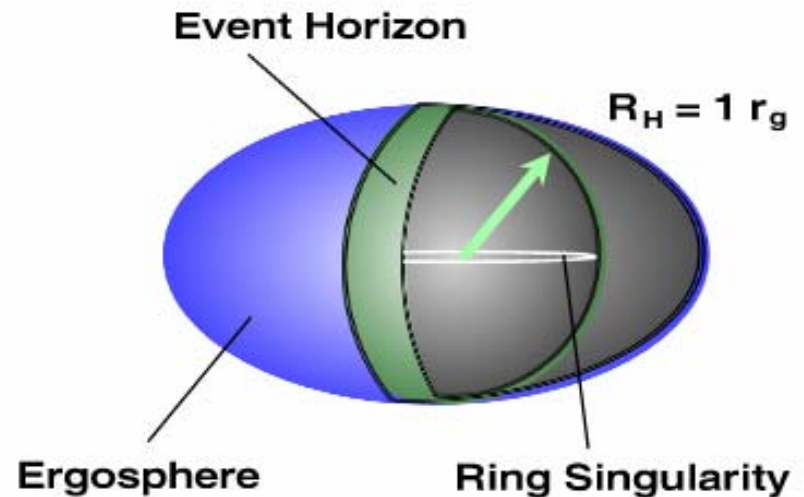
Statik vs. Rotation

Black Holes



Schwarzschild

$$a = 0$$



Kerr

$$a = 1$$

Massenskala

- | | |
|-------------------|--|
| ▪ TeV | $M_{\text{BH}} \sim 1 \text{ TeV}$ |
| ▪ primordial | $M_{\text{BH}} \sim 10^{18} \text{ g}$ |
| ▪ stellar | $1 M_{\odot} < M_{\text{BH}} < 100 M_{\odot}$ |
| ▪ massereich | $100 M_{\odot} < M_{\text{BH}} < 10^6 M_{\odot}$ |
| ▪ supermassereich | $10^6 M_{\odot} < M_{\text{BH}} < 10^{10} M_{\odot}$ |
|
 | |
| ▪ TeV | Mini-Löcher in Teilchenbeschleunigern |
| ▪ primordial | Frühes Universum, galaktische Saatkörner? |
| ▪ stellar | Schicksal massereicher Sterne, Mikroquasare |
| ▪ massereich | Kugelsternhaufen |
| ▪ supermassereich | Galaktische Zentren und AGN |

Indikatoren stellarer Schwarzer Löcher:

Hypernovae, GRBs, Supernovae

Indikatoren supermassereicher Schwarzer Löcher:

$M_{\text{BH}}\text{-}\sigma\text{-}$ und $M_{\text{BH}}\text{-}M_{\text{bulge}}\text{-}$ Relationen

Bildungsmechanismen

- TeV
Stöße relativistischer Schwerionen?
- primordial
Huhn-Ei Problem...
Brill-Wellen?
topologische Defekte nach SSB?
- stellar
Gravitationskollaps massereicher Sterne
SN Ia: explodierende WD
Verschmelzungsereignisse NS-SL, SL-SL
- massereich
akkretierende Schwarze Löcher
Verschmelzung in Haufenzentren?
Relikte supermassereicher Sterne?
- supermassereich
akkretierende Schwarze Löcher
Verschmelzungen in Sternhaufen
Verschmelzung von Galaxien

Prinzipiell alle Typen (?): super-kritische Brill-Wellen



Supermassereiche Schwarze Löcher

The AGN paradigm

tomographic view

cold dust torus

standard disk

disk wind

hot corona

supermassive black hole

hot corona

disk wind

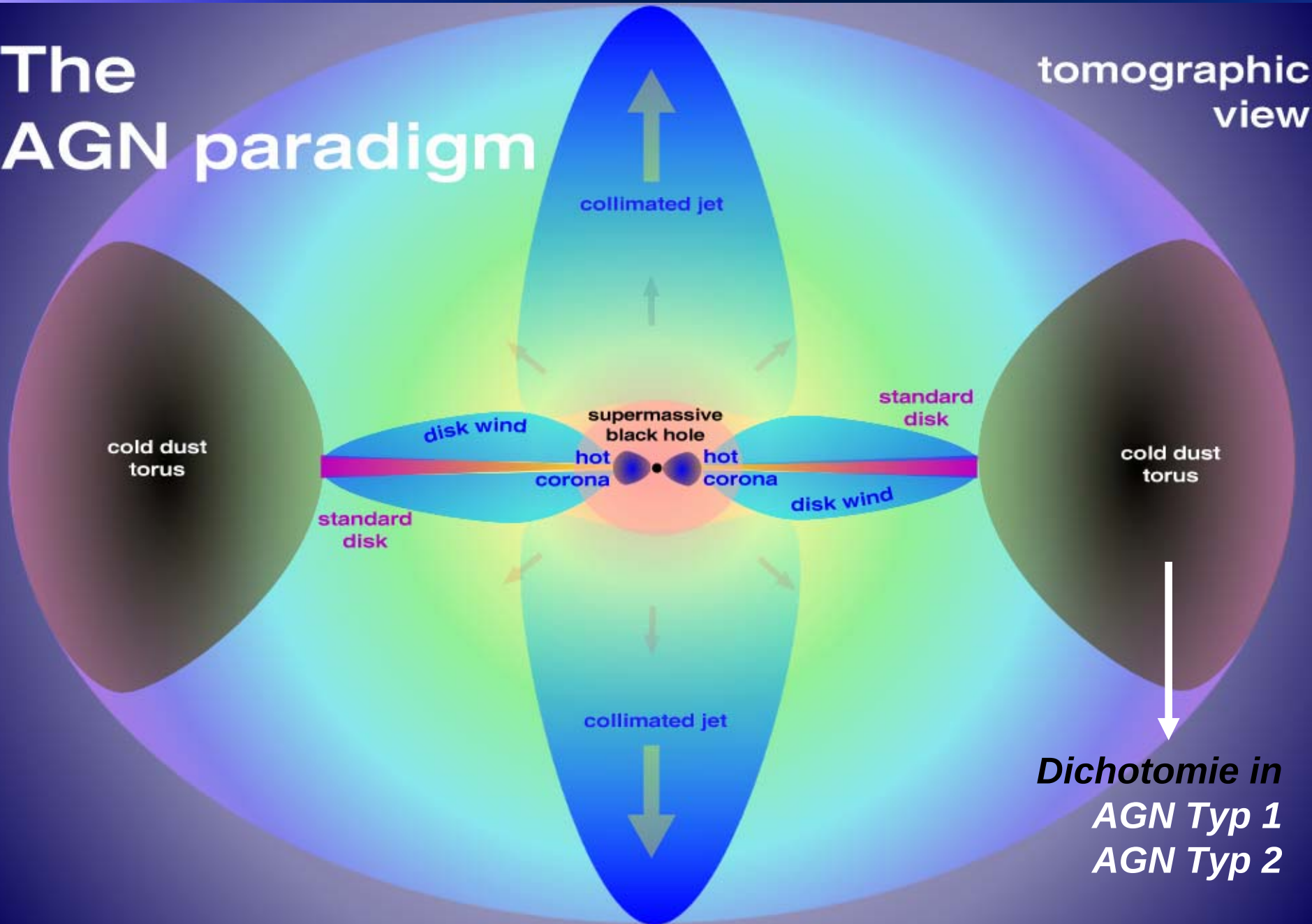
standard disk

cold dust torus

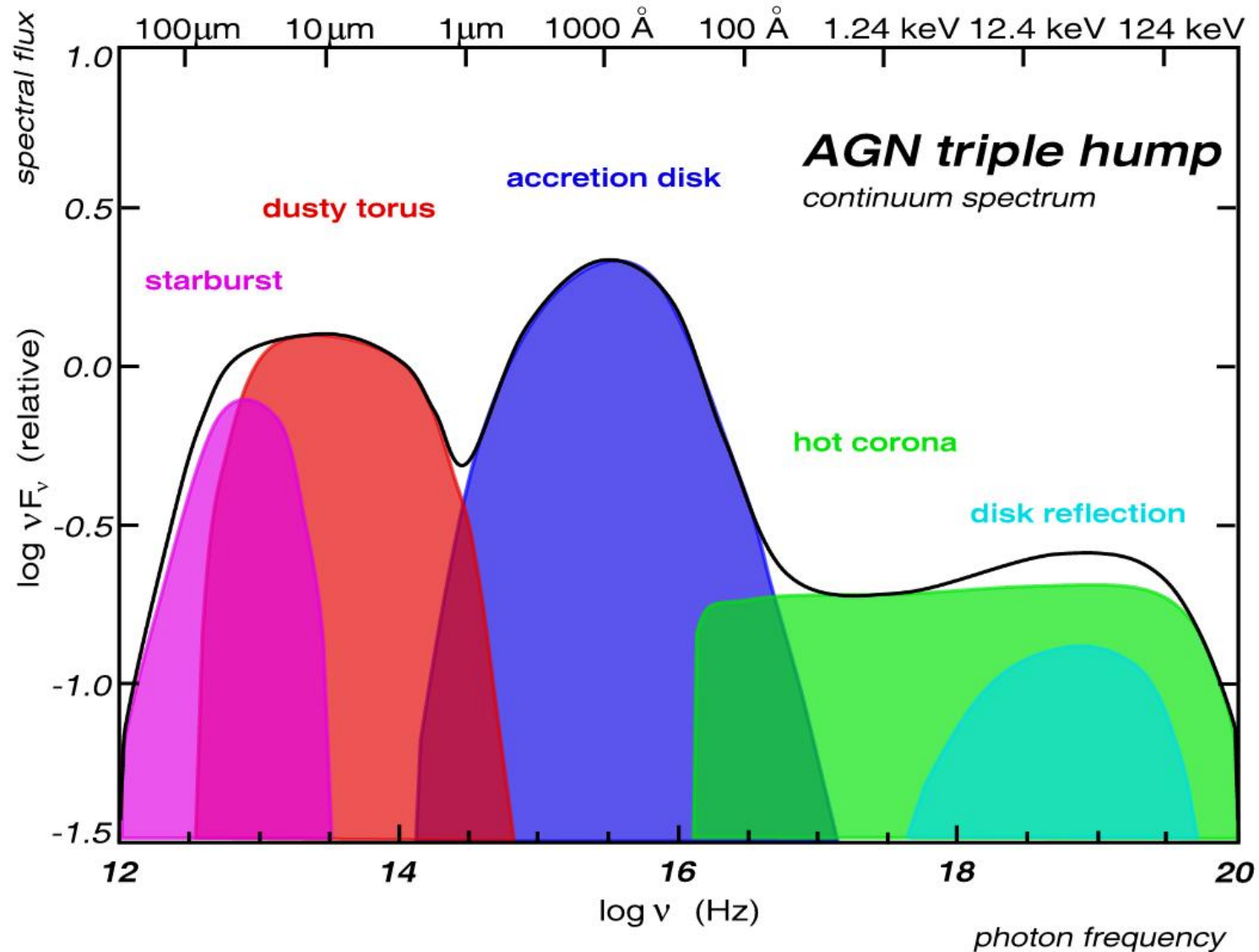
collimated jet

collimated jet

*Dichotomie in
AGN Typ 1
AGN Typ 2*

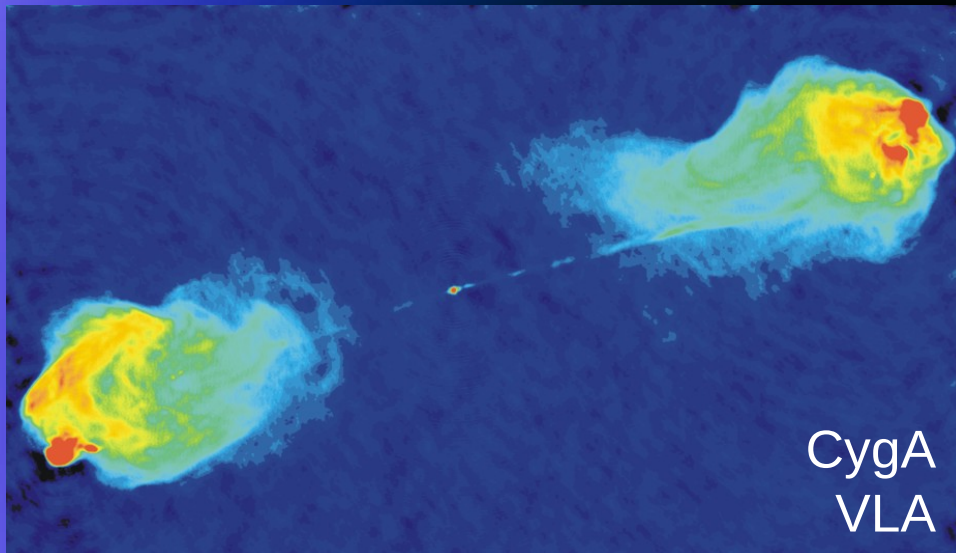


AGN Typ-1 Spektrum

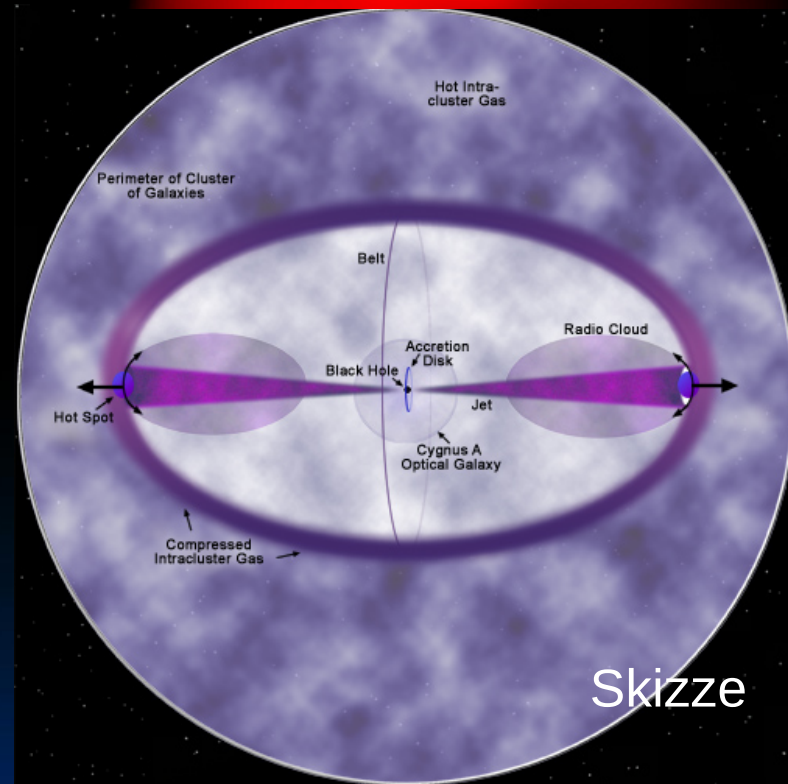
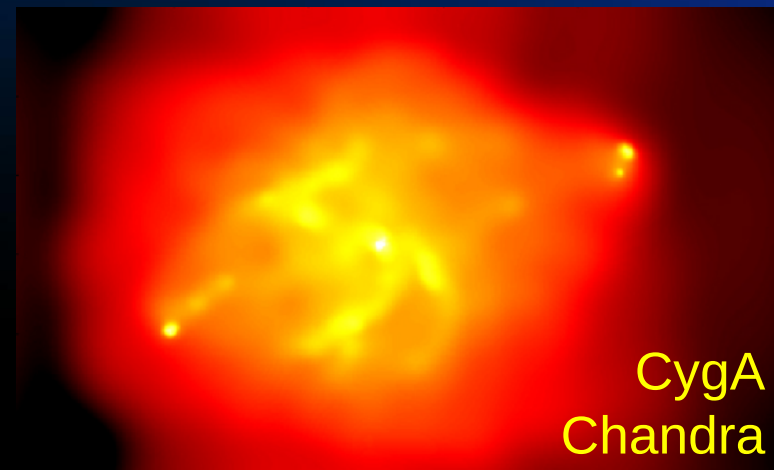


Radiogalaxie

Cyg A, $z = 0.056$



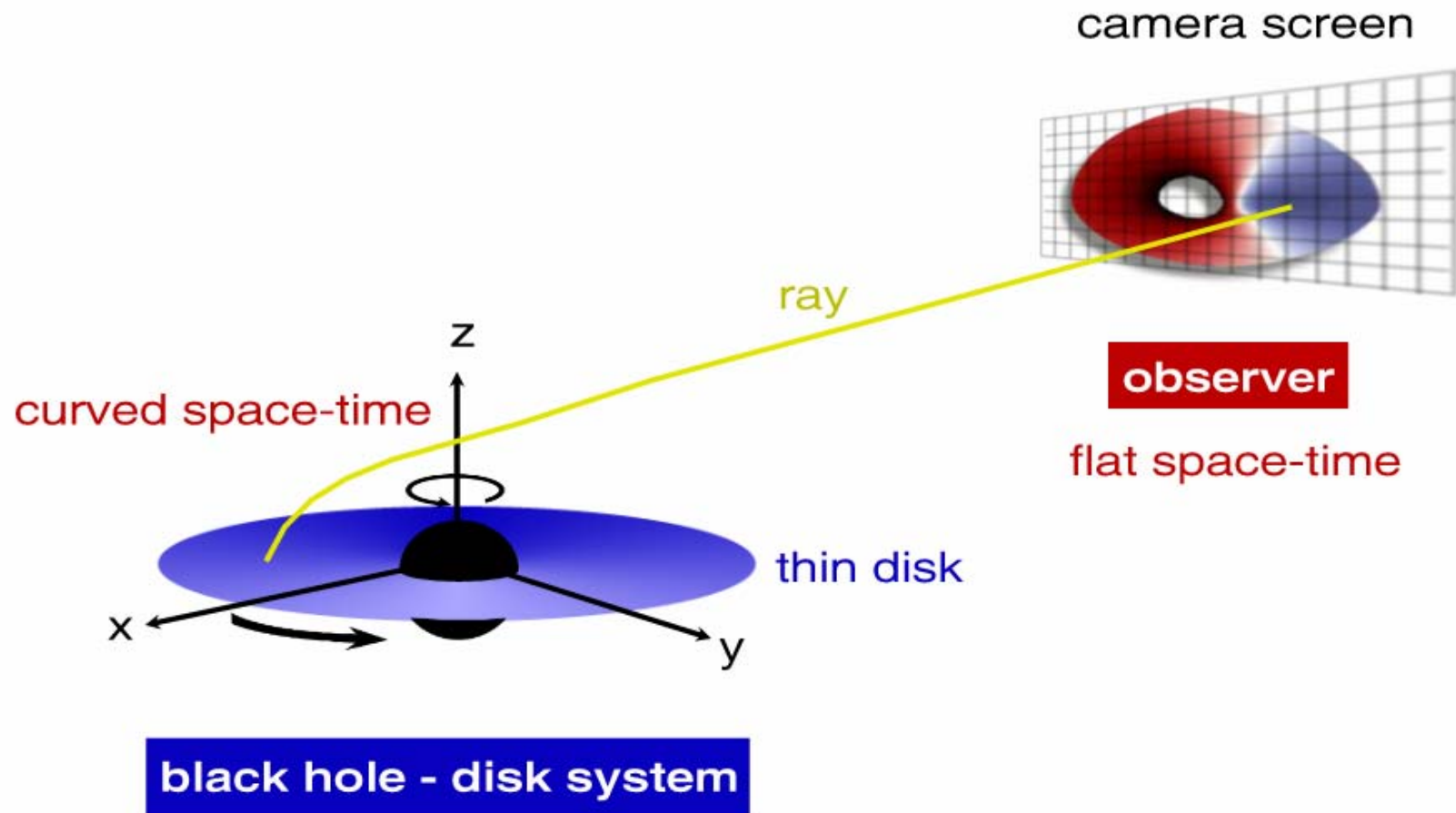
- starke Radioquelle
- Entfernung 233 Mpc
- Quasar-ähnliche Morphologie
- relativistische Jets, $\beta \sim 0.5c$
- $M_{\text{SMBH}} \sim 2.5 \times 10^9 M_{\odot}$





Relativistisches Ray Tracing

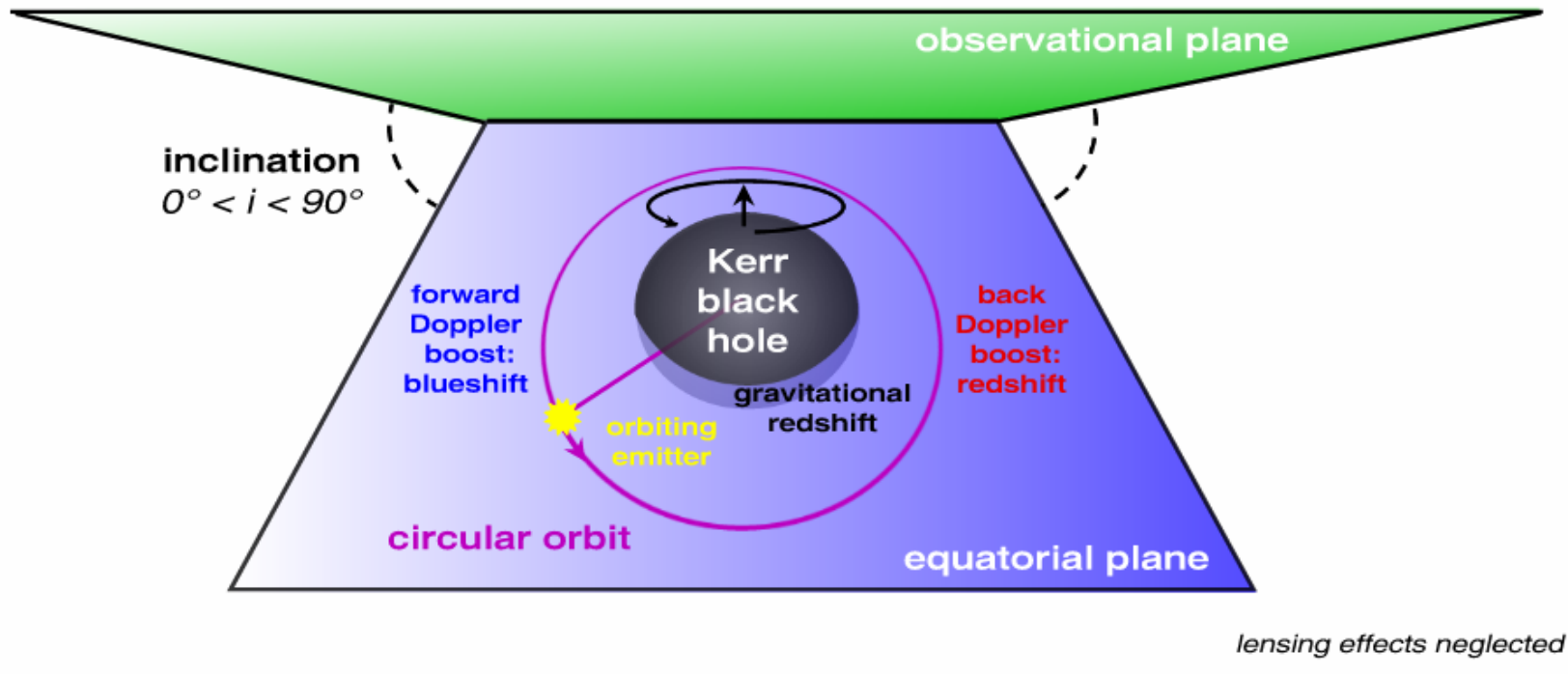
Ray Tracing Methode



Einsteins Doppler-Effekt

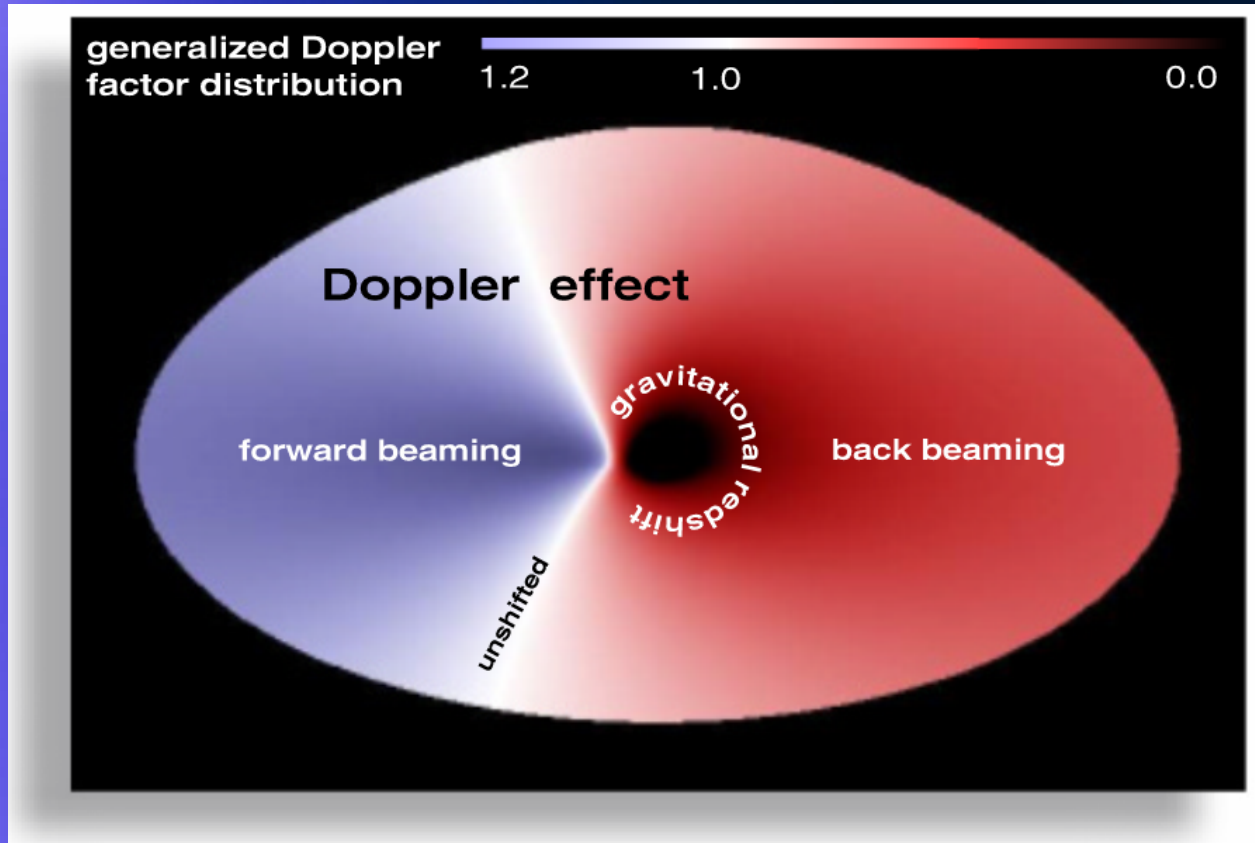
Orbiting a rotating black hole

generalized relativistic Doppler factor



- Keplerbahnen bis zum Radius marginaler Stabilität
- Neigung ist Parameter mit stärkstem Einfluss

Relativistischer Dopplerfaktor

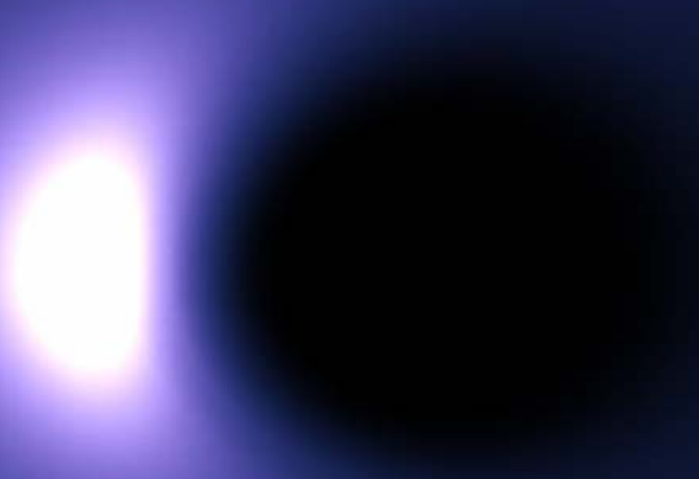


$$\begin{aligned} i &= 60^\circ \\ a &= 0.99 \\ r_{\text{in}} &= r_H \\ r_{\text{out}} &= 30.0 \end{aligned}$$

Kepler-
Kinematik

- klassischer Doppler-Effekt signifikant modifiziert!
- relativistisch: Beaming und Gravitationsrotverschiebung
- beeinflußt jede Emission in der Nähe Schwarzer Löcher!

Relativistische Strahlungsverteilung



$$a = 0.1$$

$$i = 40^\circ$$

$$r_{in} = r_H = 1.995 r_g$$

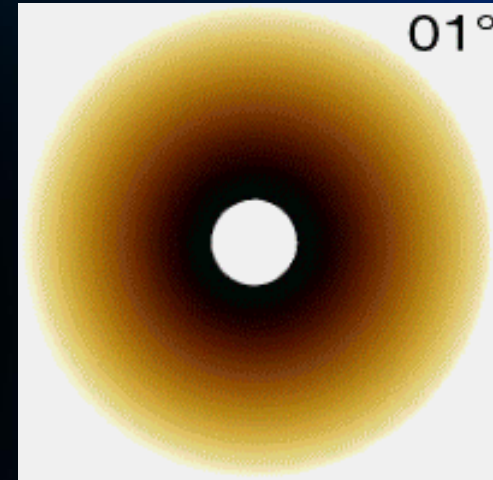
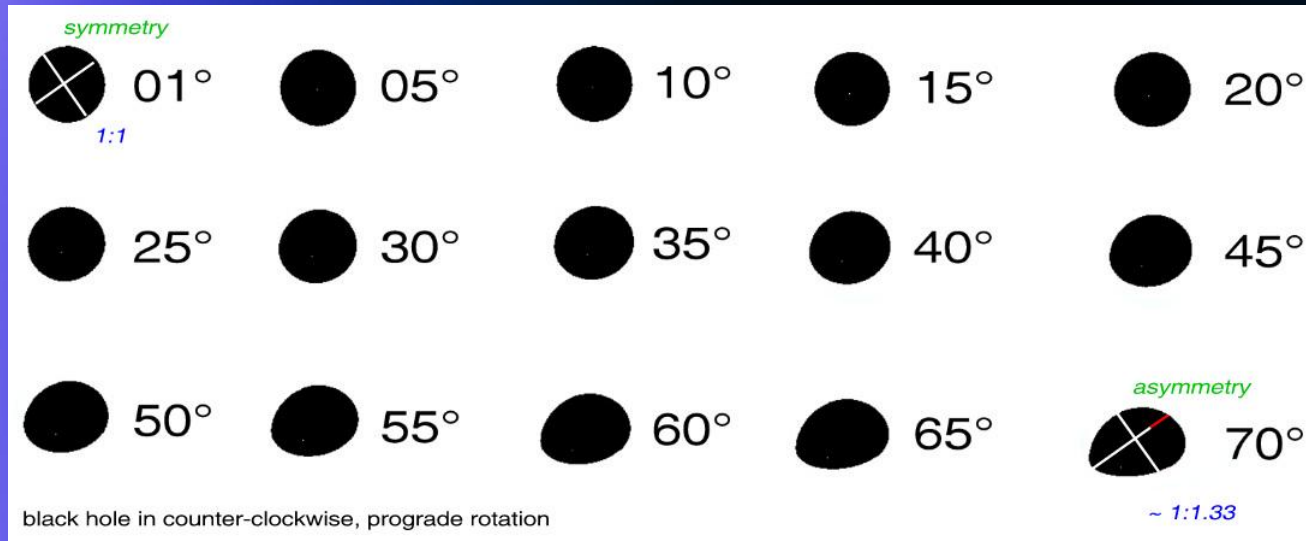
$$r_{out} = 30.0 r_g$$

$$R_t = 6.0 r_g$$

Kepler + Drift

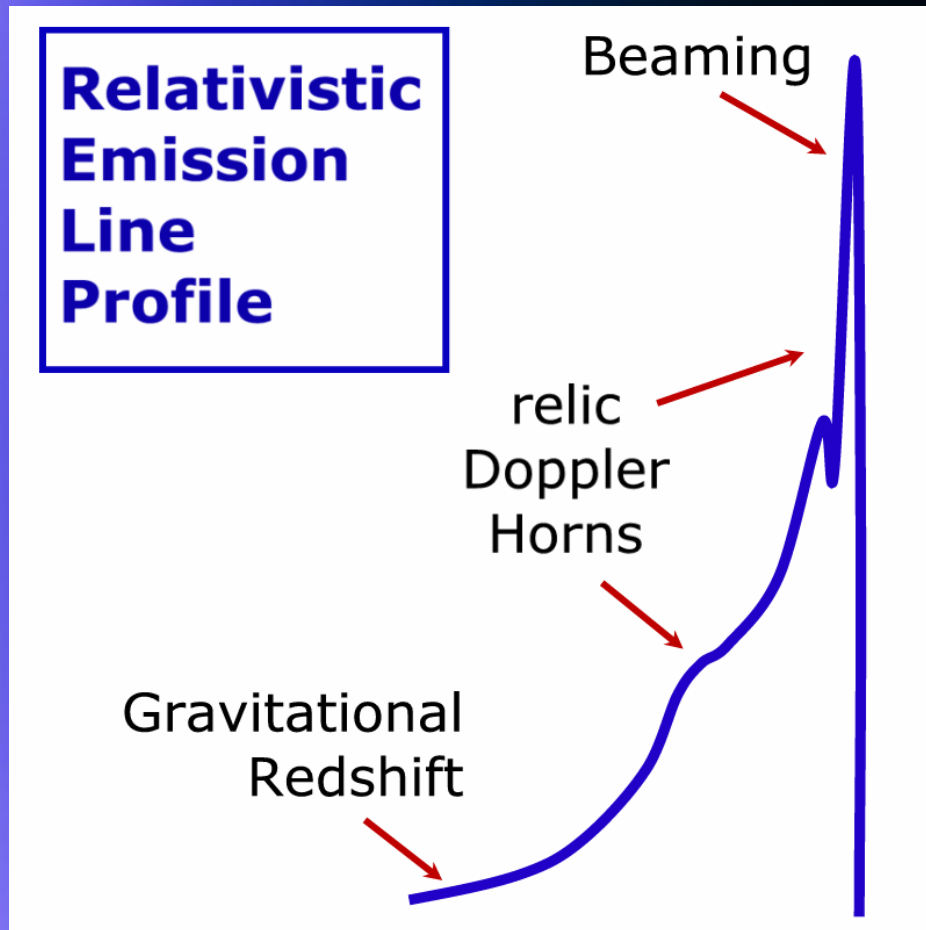
trunk. Emissivität

Schwarzmalerei



- unterdrückte Emission durch Gravitationsrotverschiebung
- VLBI an der Schwelle für direkte Auflösung
- Vermessung des „Großen Schwarzen Flecks“
- **obskurative Methode**

Diagnostik mit Emissionslinien

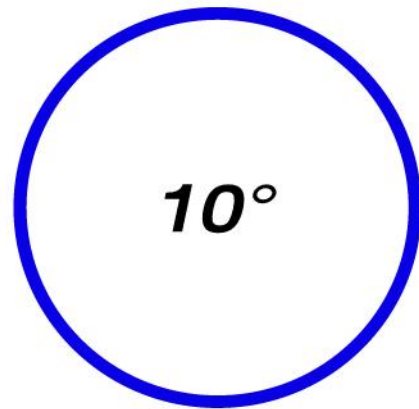


- Fluoreszenz heißer Ionen
- Fe K α bei ~ 6.4 keV dominant
- Röntgendaten: ASCA, Chandra, XMM
- Linienzoo!
- Quellen: Seyfert 1, Quasare Typ 1, Mikroquasare
- **spektro-relativistische Methode**

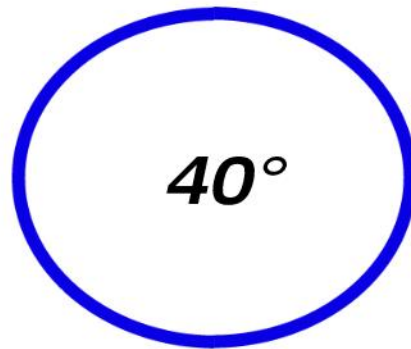
Löcher als Gravitationslinsen

Lensing at extreme Kerr

Appearance of circular orbits

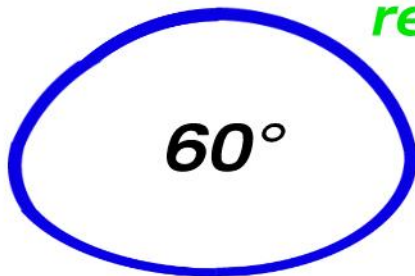


$10.0 r_g$

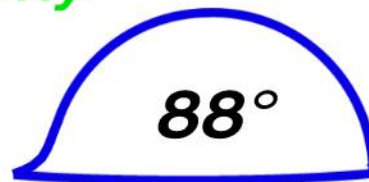


$10.0 r_g$

relativity



$10.0 r_g$

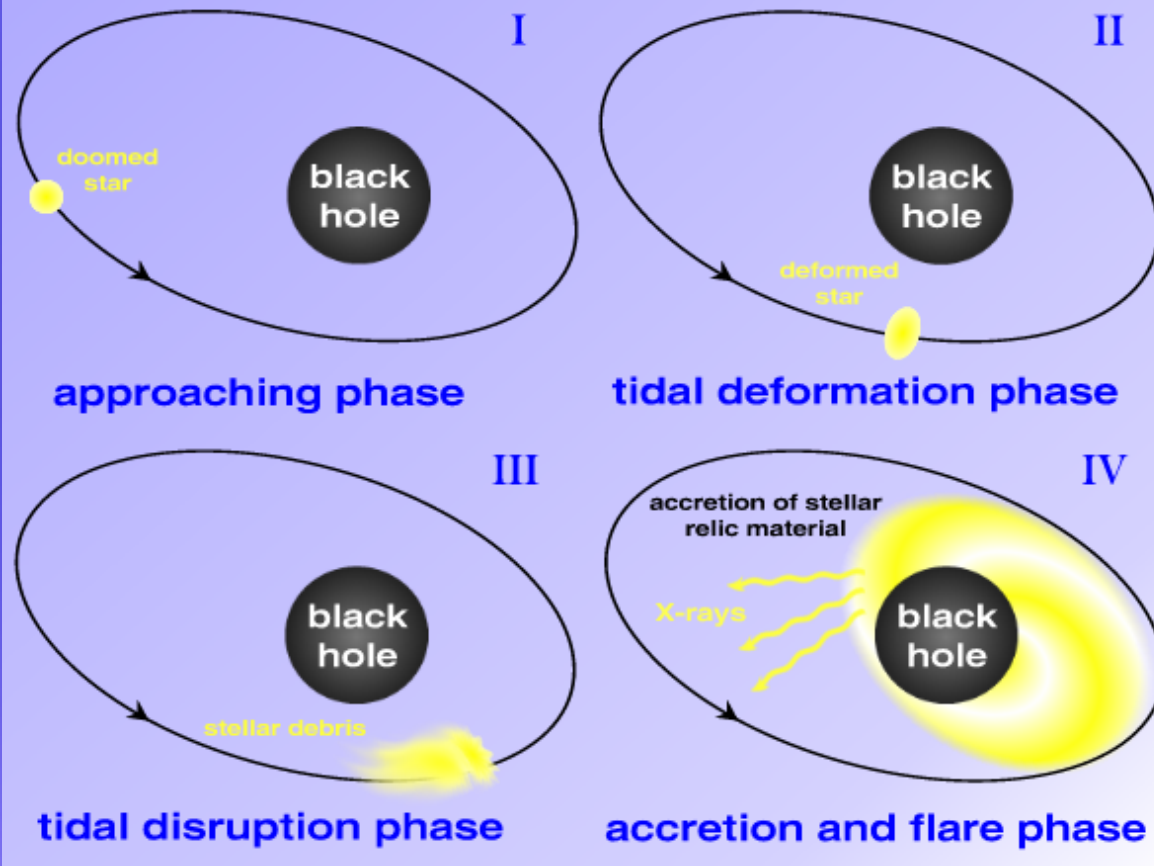


$5.5 r_g$

- Deformation klassischer Ellipsen
- relativistische Bildverzerrung
- starke Abhängigkeit von Inklination!
- **aberrative Methode**

Sternzerriss durch Gezeiten

Stellar tidal disruption by a supermassive black hole



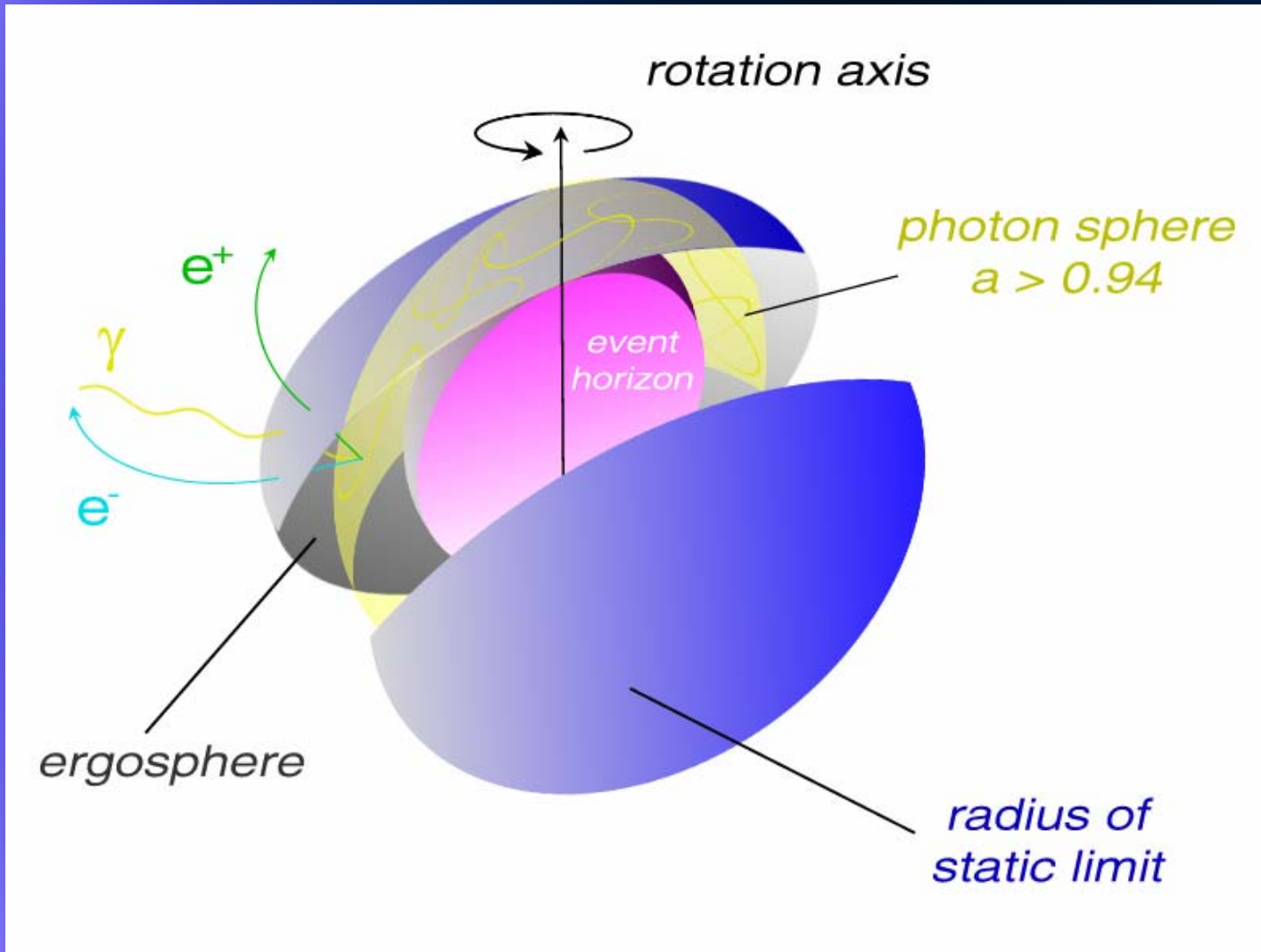
- Gezeitenradius:

$$\begin{aligned} R_T &= R_{\odot} (M_{\text{BH}}/M_{\odot})^{1/3} \\ &= 1.1 R_{\text{S}} \times \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-2/3} \end{aligned}$$

- alle 10 000 Jahre
- RX J1242-1119,
 $z = 0.05$
(Komossa et al. 2004)
- Akkretion stellarer
Bruchstücke
- Freisetzung von
 10^{51} erg
- Röntgenflare!
- **eruptive Methode**

Relevanz von Rotation

Penrose Paarbildung

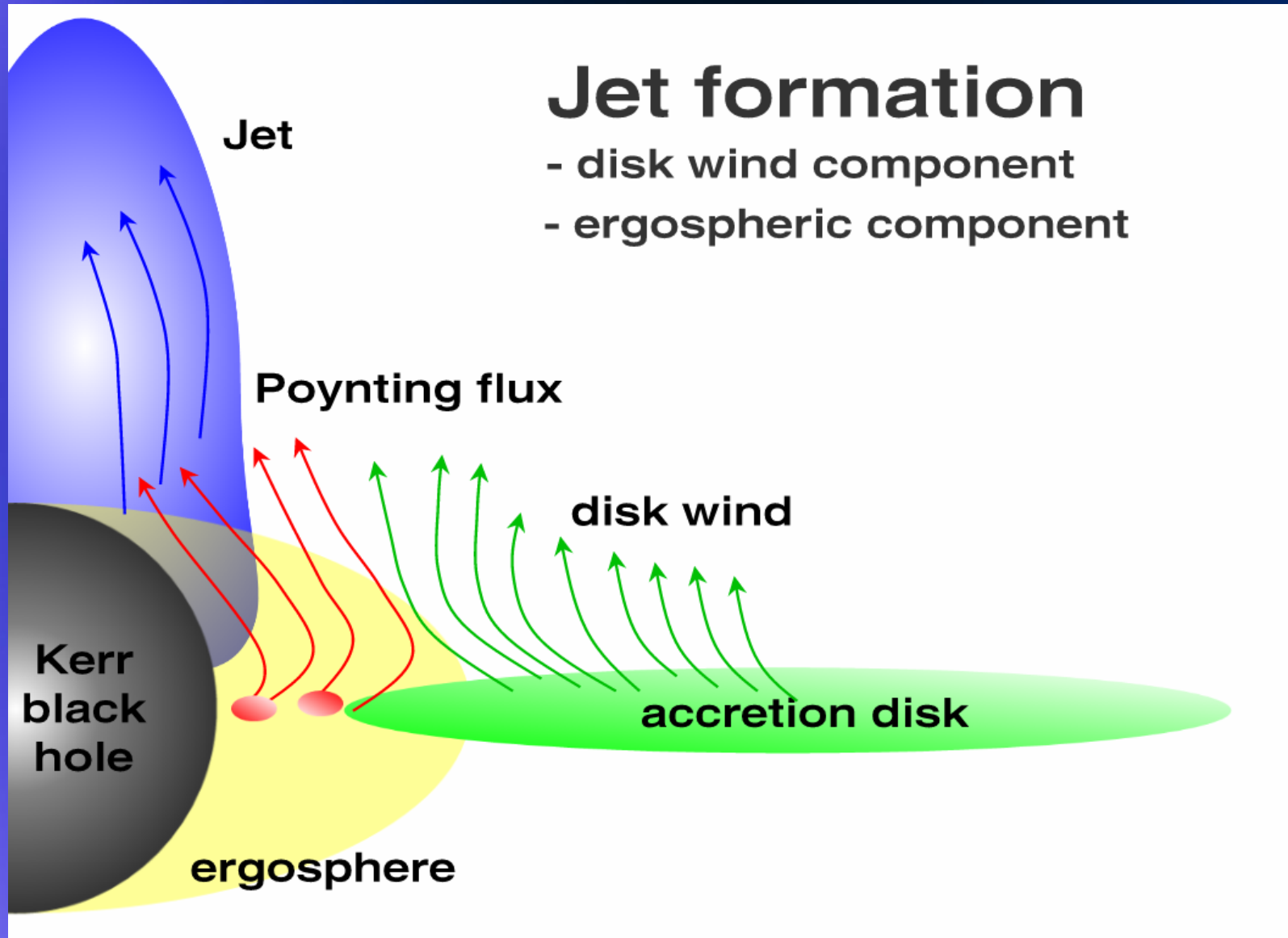


$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$$

$$\gamma_{\text{sphere}} > \text{MeV}$$

$$\gamma_{\text{in}} \sim 10 \text{ keV}$$

Jet-Scheiben Symbiose

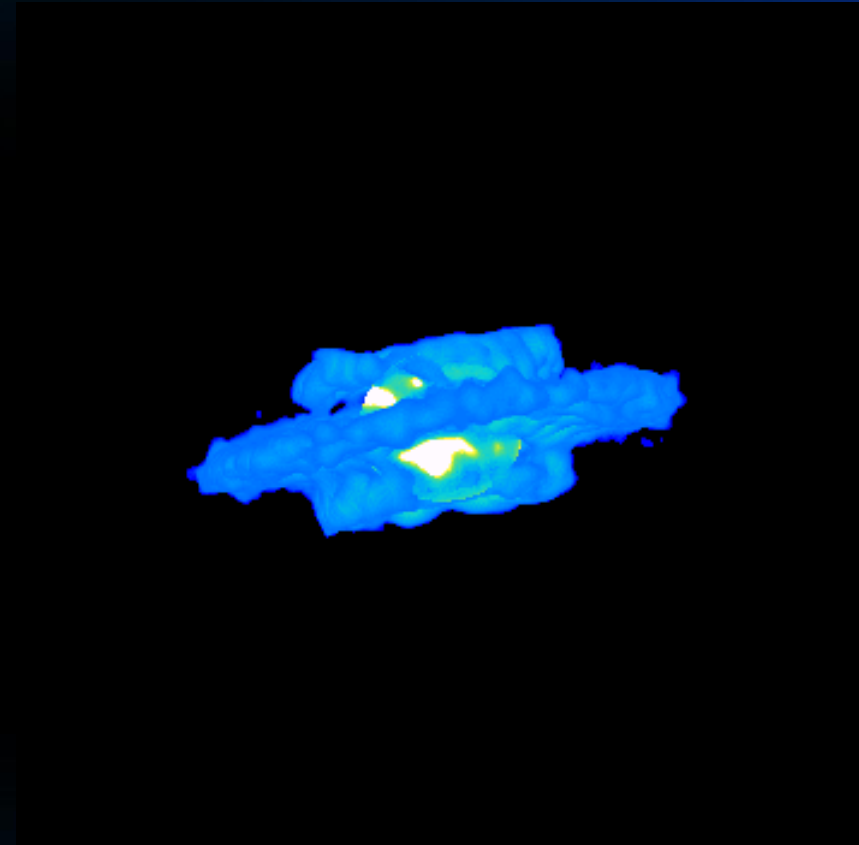


Jet Motor

- Blandford-Znajek Mechanismus (1977):
Extraktion von Loch-Rotationsenergie über Magnetfelder
Energiequelle: Loch
- Blandford-Payne Szenario (1982):
magneto-zentrifugal getriebener Ausfluss aus Akkretionsscheibe („Scheibenwind“)
Energiequelle: Scheibe

Magnetosphärenphysik

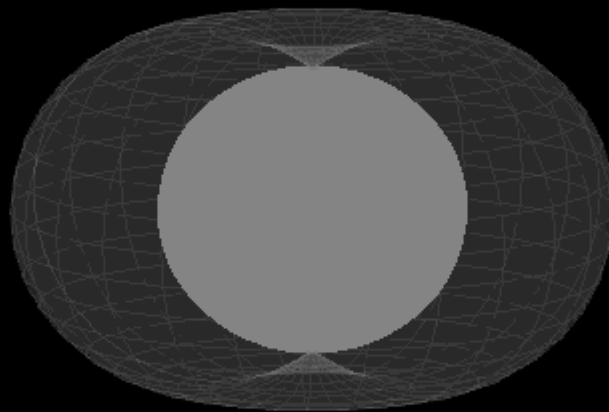
- Freisetzung von Feldenergie durch **Rekonnexion**
- gravitomagnetischer Dynamo: Torsion des Magnetfelds durch gravitomagnetische Kraft
- dominant toroidales Magnetfeld!



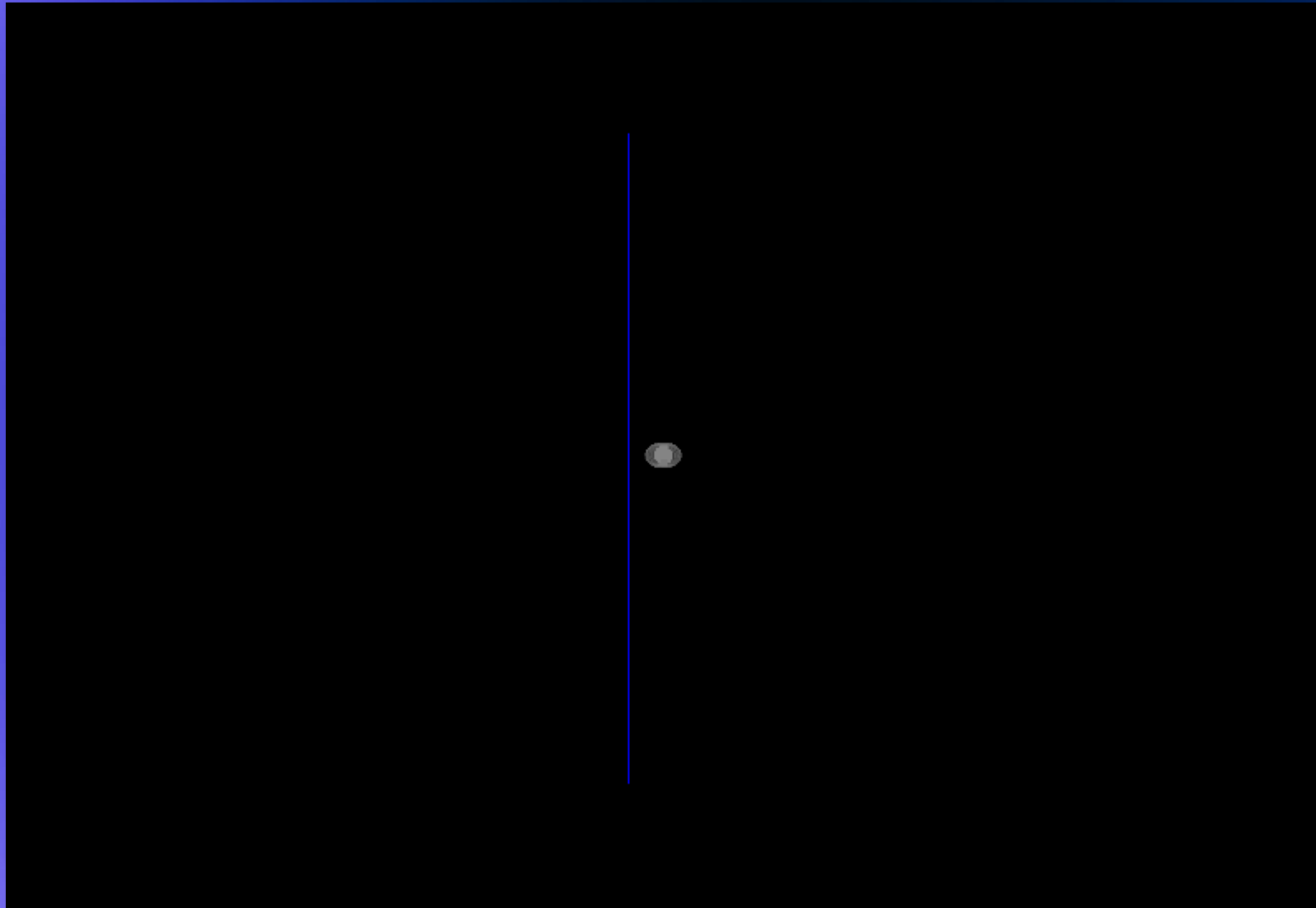
Analogie:

Jupiter Magnetosphäre, VLA 20cm
Van Allen Strahlungsgürtel
Synchrotronstrahlung von e^-

Zug der rotierenden Raumzeit

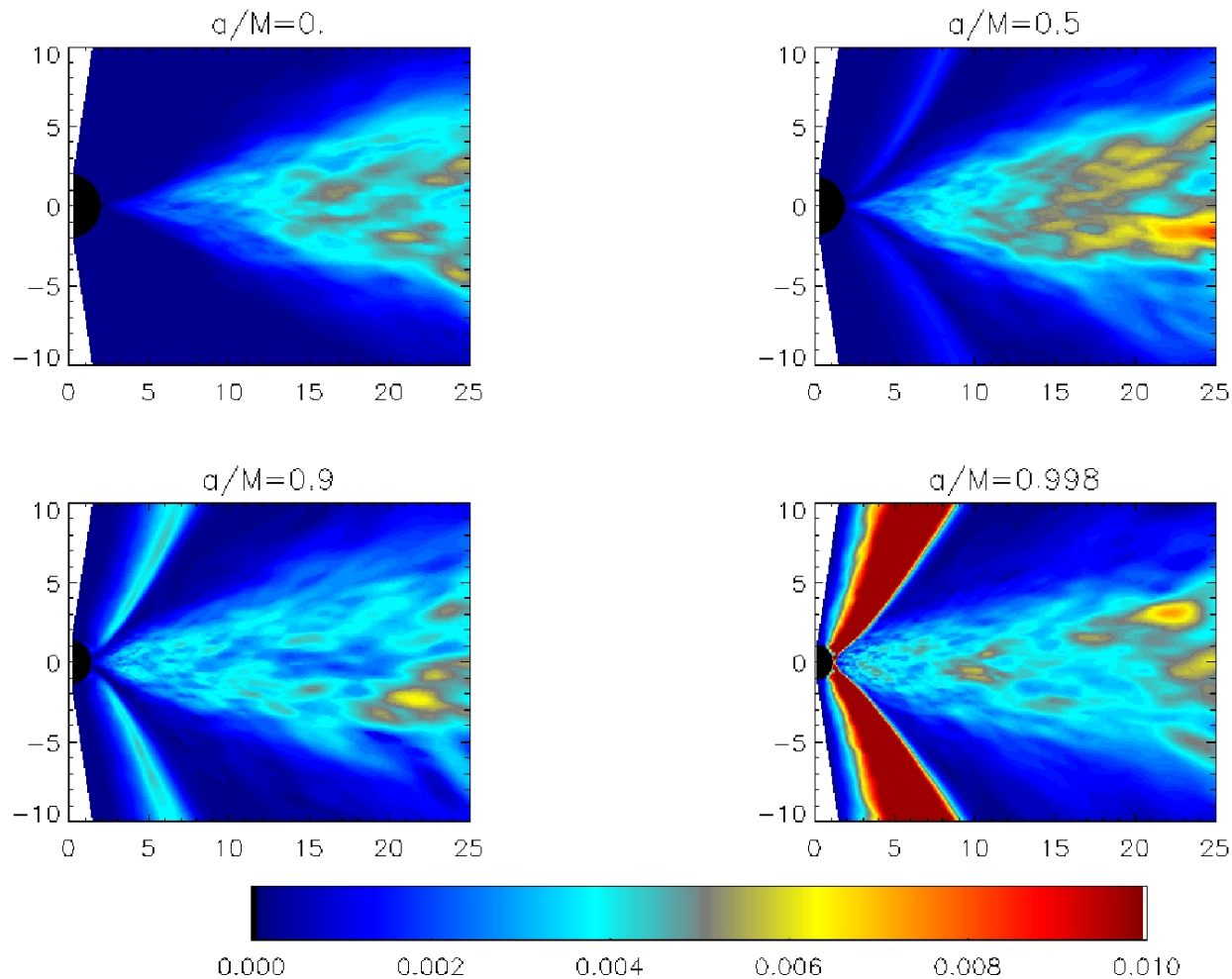


Magnetisch getriebene, bipolare Jets



Semenov et al., Science, 2004

Poynting Flüsse

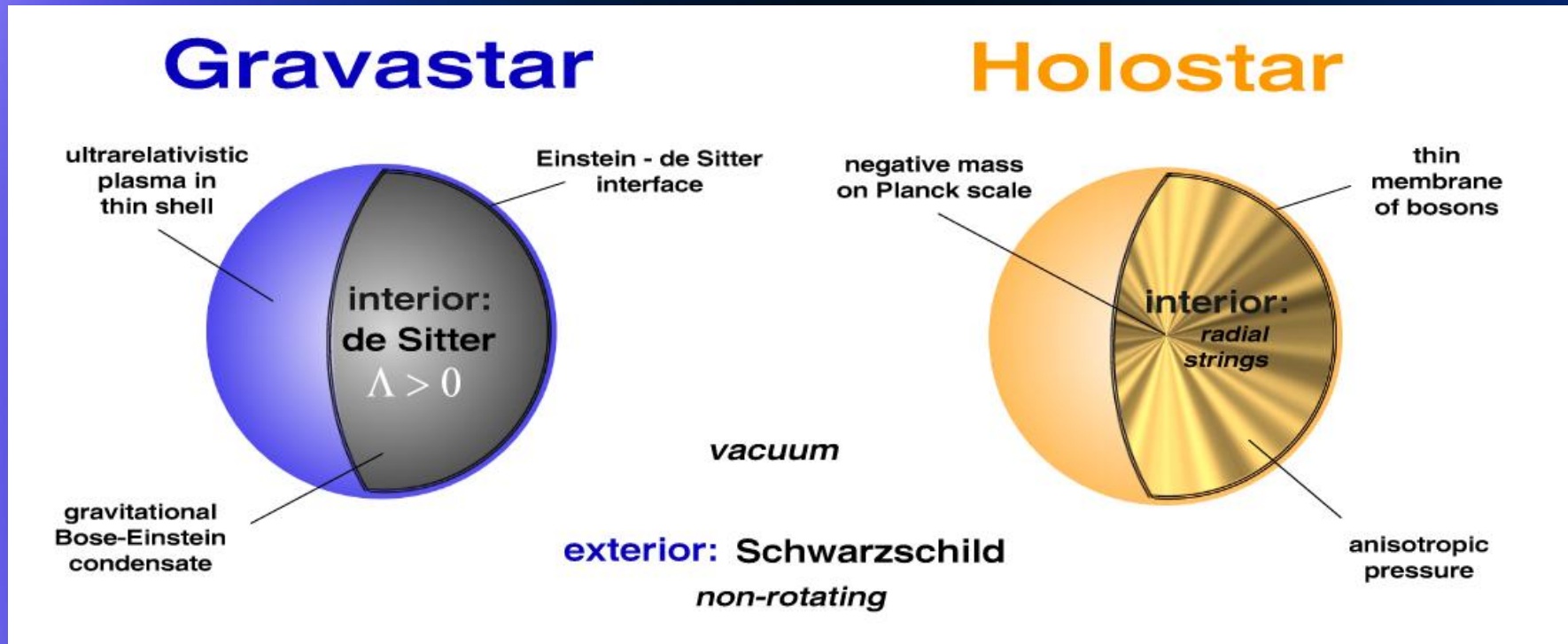


Poynting-Fluss dominierte Ausflüsse für extreme Kerr-Lösung **Krolik et al. 2004**



Krise Schwarzer Löcher

Gravasterne und Holosterne



- Alternativen zum Schwarzen Loch
- antigravitative Vakua: **Dunkle Energie** (Λ) vs. **Strings**
- keine Singularität, kein Horizont!
Aber: **nicht-rotierend**

Nachweismethoden

- **kinematisch**: umlaufende Sterne/Flares, QPOs, M- σ Relation
- **obskurativ**: Strahlungsunterdrückung durch Gravitationsrotverschiebung („Großer Schwarzer Fleck“)
- **aberrativ**: Gravitationslinsen-Effekte, direkte Abbildung, indirekt bei Mikrolinsen
- **spektro-relativistisch**: Diagnostik mit Emissionslinien
- **akkretiv**: aktive Schwarze Löcher, typische AGN-Aktivität und Variabilität
- **eruptiv**: Sternzerriss durch Gezeitenkäfte, Flares, Supernovae, Hypernovae, GRBs
- **Gravitationswellen-induziert**: z.B. SL-SL Einspiralphase
- bald im **irdischen Labor** Teilchenbeschleuniger:
Mini-Löcher und Hawking-Strahlung?

Schwarze Löcher im Internet

http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/astro_sl.html

Mehr Details, mehr Formeln, mehr Bilder...

<http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/lexdt.html>

Online-Lexikon zu vielen Begriffen der Astrophysik.

Schwarze Löcher auf Papier I

Oktober Ausgabe
S.24 f



Schwarze Löcher auf Papier II

Dissertation Andreas Müller, Oktober 2004:

Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr Geometry

182 Seiten, 53 Abbildungen, englisch, pdf mit 10 MB

Download unter:

[http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/
downloads/PhD/PhD_AMueller.pdf](http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/downloads/PhD/PhD_AMueller.pdf)