

WS 2004/05

Hochauflösende Radiobeobachtungen aktiver Galaxienkerne

Silke Britzen

MPIfR, Bonn



Max-Planck-Institut
für
Radioastronomie

Jede 2. Woche!

Termine:

05.11.2004

- **Geplant: pdf-Version**

19.11.2004

der Vorlesung im Internet

03.12.2004

Baustelle!!

17.12.2004

Meine e-mail:

14.01.2005

sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de

28.01.2005

11.02.2005 **Heute: Schwarze Löcher &**

Das Standardmodell für Aktive Galaxienkerne

Überblick: Wintersemester 2004/05

■ Astrophysik aktiver Galaxienkerne

■ Einführung und Überblick

- Aktive Galaxienkerne
- Was heißt „aktiv“?
- Welche Arten gibt es – der Zoo, wichtigste Merkmale
- AGN Radio-Durchmusterungen

■ Schwarze Löcher:

- Das Standardmodell: Schwarzes Loch + Akkretionsscheibe +Jet

■ Das Jet-Phänomen

- Jets von pc- zu kpc-Skalen
- Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen
- Krümmungen & Präzession
- Polarisation
- MHD & Jetsimulationen

■ Variabilität

- Überblick: Zeitskalen & Wellenlängen
- Theoretische Modelle

Überblick: Wintersemester 2004/05

■ Astrophysik aktiver Galaxienkerne

- Kosmologische Evolution der AGN
- Unsere Milchstraße und die Möglichkeit eines Schwarzen Lochs im Zentrum
- Vereinheitlichungstheorien
- Kosmologie mit Aktiven Galaxienkernen
- Offene Fragen der Erforschung aktiver Galaxienkerne



Schwarze Löcher &

Das Standardmodell für Aktive Galaxienkerne

Literature

■ Books:

- *Active galactic nuclei*, 1990, R.D. Blandford, 20th SAAS-FEE lectures
- *An Introduction to Active Galactic Nuclei*, Bradley M. Peterson
- *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*, Julian H. Krolik
- *Quasars and Active Galactic Nuclei : An Introduction* Ajit Kembhavi & Jayant V. Narlikar
- *Homepage von A. Müller, LSW:*

www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller

■ Articles:

- *Theory of Extragalactic Radio Sources*, Begelman, M.C., R.D. Blandford, & M.J. Rees, 1984, *Revs. Modern Physics* **56**, 255

Schwarze Löcher

- Warum?
- Was ist ein Schwarzes Loch?
- Wie entstehen Schwarze Löcher?
- Zur Geschichte der Schwarzen Löcher
- Wie funktionieren Aktive Galaxienkerne?
 - Schwarzes Loch, Akkretionsscheibe, Jet
- Nachweise und Sichtungen Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher, warum?

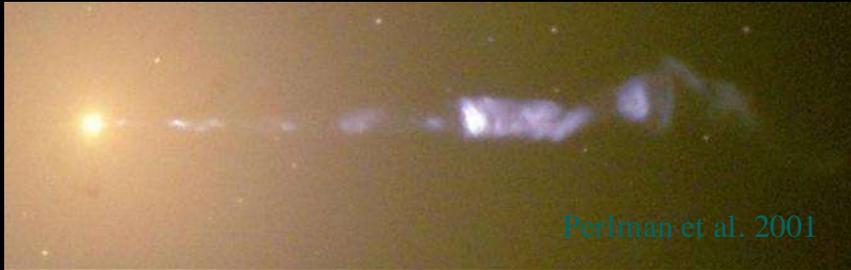
Schwarze Löcher, warum?

- Zur Erklärung großer, dunkler, kompakter Massen in den Kernen der Galaxien
- Zur Erklärung der enormen Leuchtkräfte der aktiven Galaxienkerne
- Erklärung der Entstehung der riesigen, gebündelten Plasmaströme (Jets), die aus dem Innern aktiver Galaxien ausgeworfen werden und schließlich die Galaxie selbst in ihrer Ausdehnung übertreffen



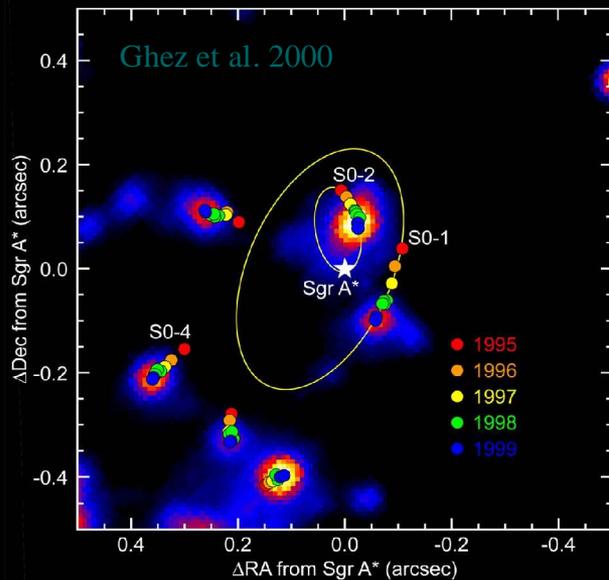
CHANDRA Röntgen Bild,
Jetlänge: 30 000 Lichtjahre

Evidence for SMBH



Exceptional stability of jet direction on timescales of $\sim 10^6$ years

Proper motions of stars around Sgr A* imply a black hole of 10^5 solar masses



Superluminal

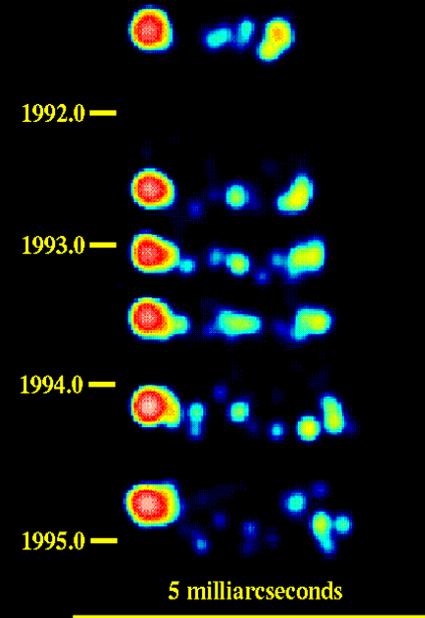
motions: apparent speeds $b_{\text{app}} \sim 20$, which requires an effective mechanism for energy release

Observations of

accretion disks:

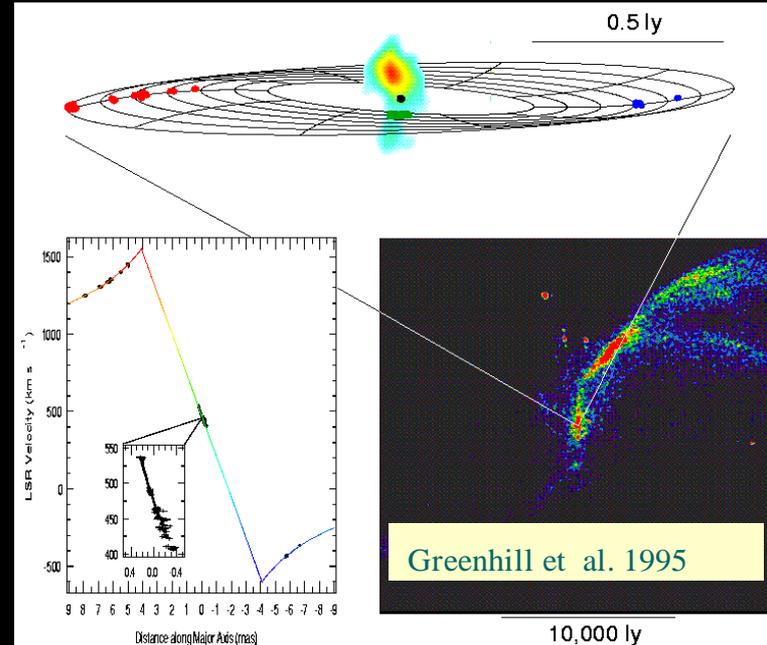
Keplerian motions imply densities of $\sim 10^{12} M_{\text{sol}}/\text{pc}^3$

3C 279
Superluminal Motion
Wehrle et al. 1998



Other evidence:

rapid variability, emission line width, gravitational redshift of Fe K line, etc.



Rangliste der Aktiven Galaxienkerne

Typ	Normale Galaxie	Radiogalaxie	Seyfert	Quasar
Beispiele	Michstraße	M87, Cygnus A	NGC4151	3C273 BL Lac, 3C279
Galaxientyp	Spiral	Elliptisch, irregulär	Spiral	Irregulär Elliptisch?
Leuchtkraft Sonneneinheit	$< 10^4$	$10^6 - 10^8$	$10^8 - 10^{11}$	$10^{11} - 10^{14}$
Zentrale Masse Sonneneinheit	2.6×10^6	3×10^9	$10^6 - 10^9$	$10^6 - 10^9$
Radio	Schwach	zentr. Obj. +jets+lobes	nur 5% radio-hell	nur 5% radio-hell hell, schnell variabel
Optisch/IR	Vollkommen verdeckt	Pop II Sterne Kontinuum	breite Emissions- linien	breite Emissions- linien Spektrallinien schwach/n
Röntgen	schwach	stark	stark	stark
Gamma	schwach	schwach	mittel	stark
Variabilität Zeitskala	nicht bek.	Monate- Jahre	Stunden- Monate	Stunden- Jahre

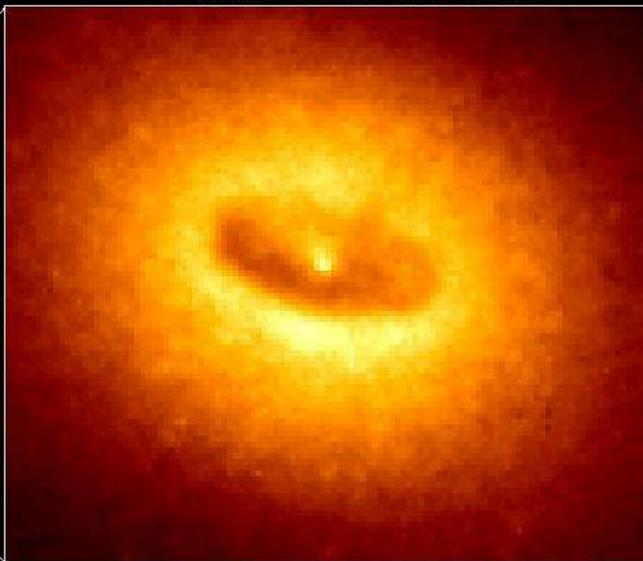
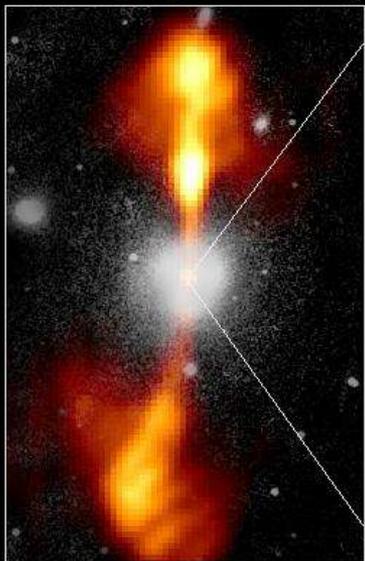
The Current Paradigm of AGN-Act

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image

HST Image of a Gas and Dust Disk



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

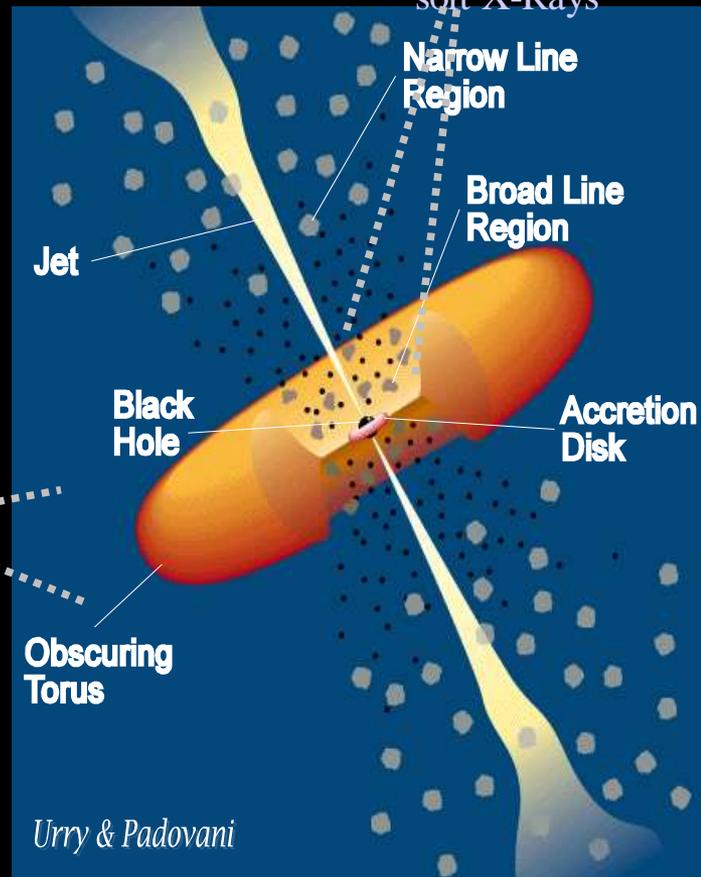
NGC 4261, Jaffe et al. (1996)

Type 1:

One-Sided Jets;
Broad and Narrow
Line Region;
No absorption of
soft X-Rays

Type 2:

Two-Sided Jets;
Free-Free Absorption;
Narrow Line Region;
Strong Absorption of
soft X-Rays



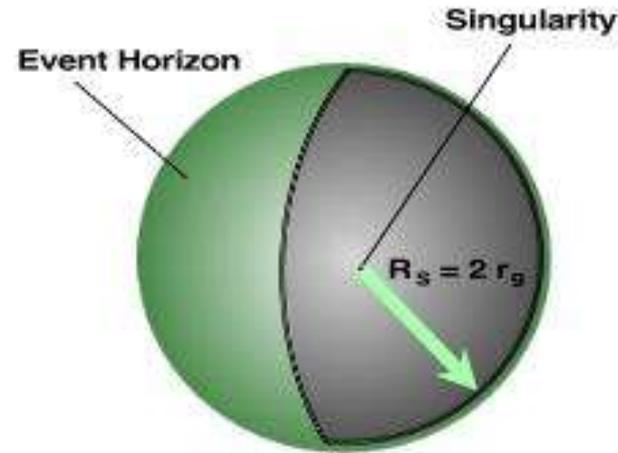
Urry & Padovani

Was ist ein Schwarzes Loch?

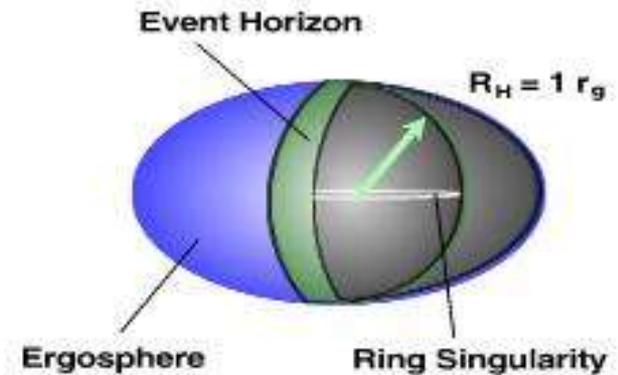
= Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen

Was ist ein Schwarzes Loch?

Black Holes



Schwarzschild
 $a = 0$

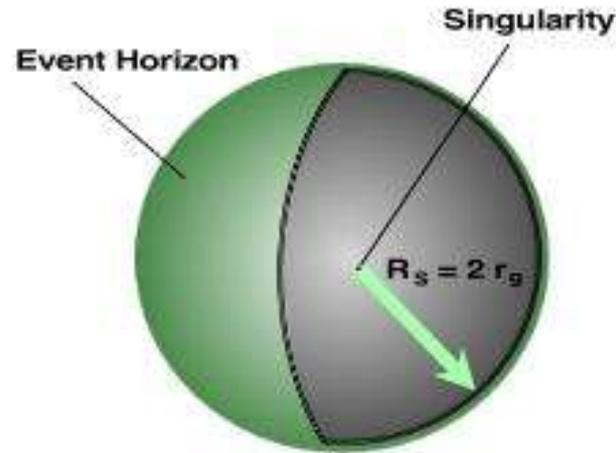


Kerr
 $a = 1$

- Besonders kompakte Objekte, die so dicht sind, daß ab einem bestimmten Abstand, dem Ereignishorizont (event horizon), nicht einmal Licht zu entweichen vermag.
- Schwarzschildradius: $R = 2 G M / c^2$
- Eddington Leuchtkraft: für eine gegebene zentrale Masse kann die Leuchtkraft nicht die Eddington Leuchtkraft übersteigen: $L < 1.26 \times 10^{38} M / M_{\text{Sonne}} \text{ erg sec}^{-1}$

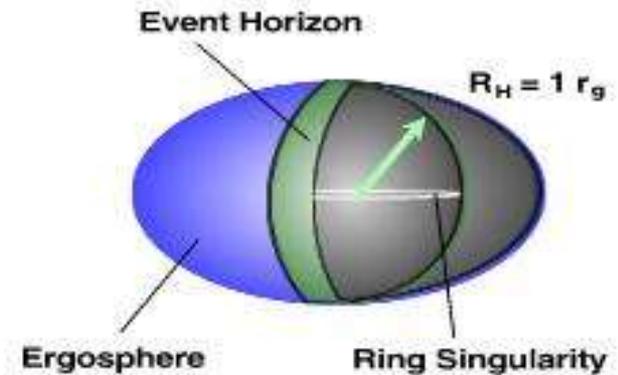
Was ist ein Schwarzes Loch?

Black Holes



Schwarzschild

$$a = 0$$

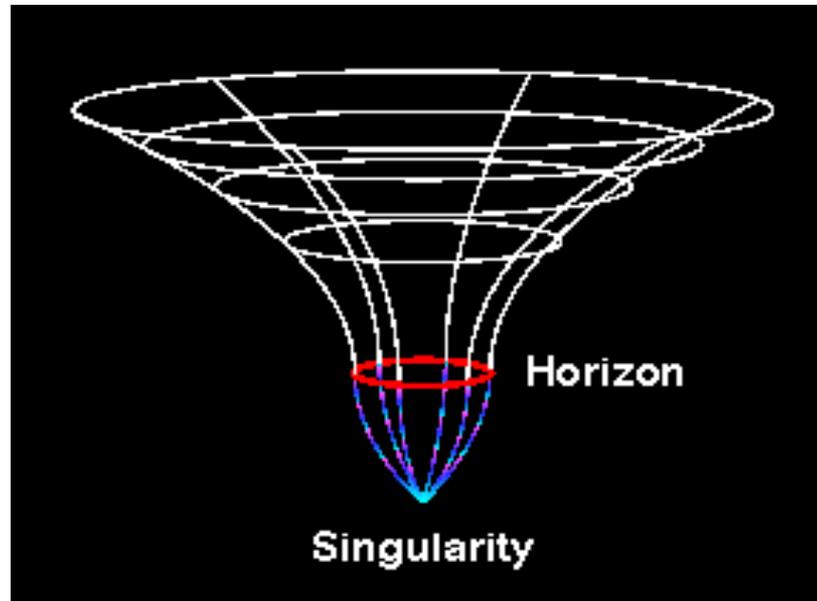


Kerr

$$a = 1$$

- Schwarzschild beschreibt nicht-rotierende, die Kerr-Lösung rotierende Schwarze Löcher
- Oben: gleiche Massen, aber Kerr-Loch ist kleiner, Rotation wird mit Kerr-Parameter dargestellt: $\alpha=0$, keine Rotation; $\alpha=-1$ maximale retrograde Rotation; $\alpha=1$ maximale prograde Rotation: abhängig von Vorgeschichte, Alter und Akkretionsaktivität des Schwarzen Lochs

- Die drei-dimensionale Geometrie des Schwerefeldes um ein Schwarzes Loch als "Delle" in einer zwei-dimensionalen Ebene darstellbar; Das Licht eines Objektes tief in so einer "Delle" kann einen außenstehenden Beobachter nicht mehr erreichen; das Objekt ist jenseits des Beobachtbaren, jenseits des "Horizonts". Das Wort "schwarz" deutet auf diese Unmöglichkeit, das Wort "Loch" deutet auf die skizzierte Geometrie



Beispiele für die Radien Schwarzer Löcher

	<u>Masse</u>	<u>Radius des Schwarzen Lochs</u>
--	--------------	-----------------------------------

■ Erde	5.98 x 10 ²⁷ g	0.9 cm
--------	---------------------------	--------

■ Sonne	1.989 x 10 ³³ g	2.9 km
---------	----------------------------	--------

■ Stern 5-facher Sonnenmasse		
------------------------------	--	--

	9.945 x 10 ³³ g	15 km
--	----------------------------	-------

■ Galaxienkern		
----------------	--	--

	109 Sonnenmassen	3 x 10 ⁹ km
--	------------------	------------------------

Massenskala Schwarzer Löcher

- Schwarzes Loch kann beliebige Massen haben
- Primordiale Schwarze Löcher (Mini-Löcher): sehr klein, Massen von 10^{-15} Sonnenmassen, Radius des Ereignishorizonts 10^{-12} m, Existenz spekulativ, Frühphase des Universums? Keine Hinweise auf Existenz aus Beobachtungen
- Stellare Schwarze Löcher: entstehen im Rahmen der Sternentstehung, wiegen wenige Sonnenmassen bis 100 Sonnenmassen; kompakteste Endkonfiguration neben Weißen Zwergen, Neutronensternen; entstehen aus Sternexplosionen (Supernovae)

■ Microquasars (similar to AGN?)

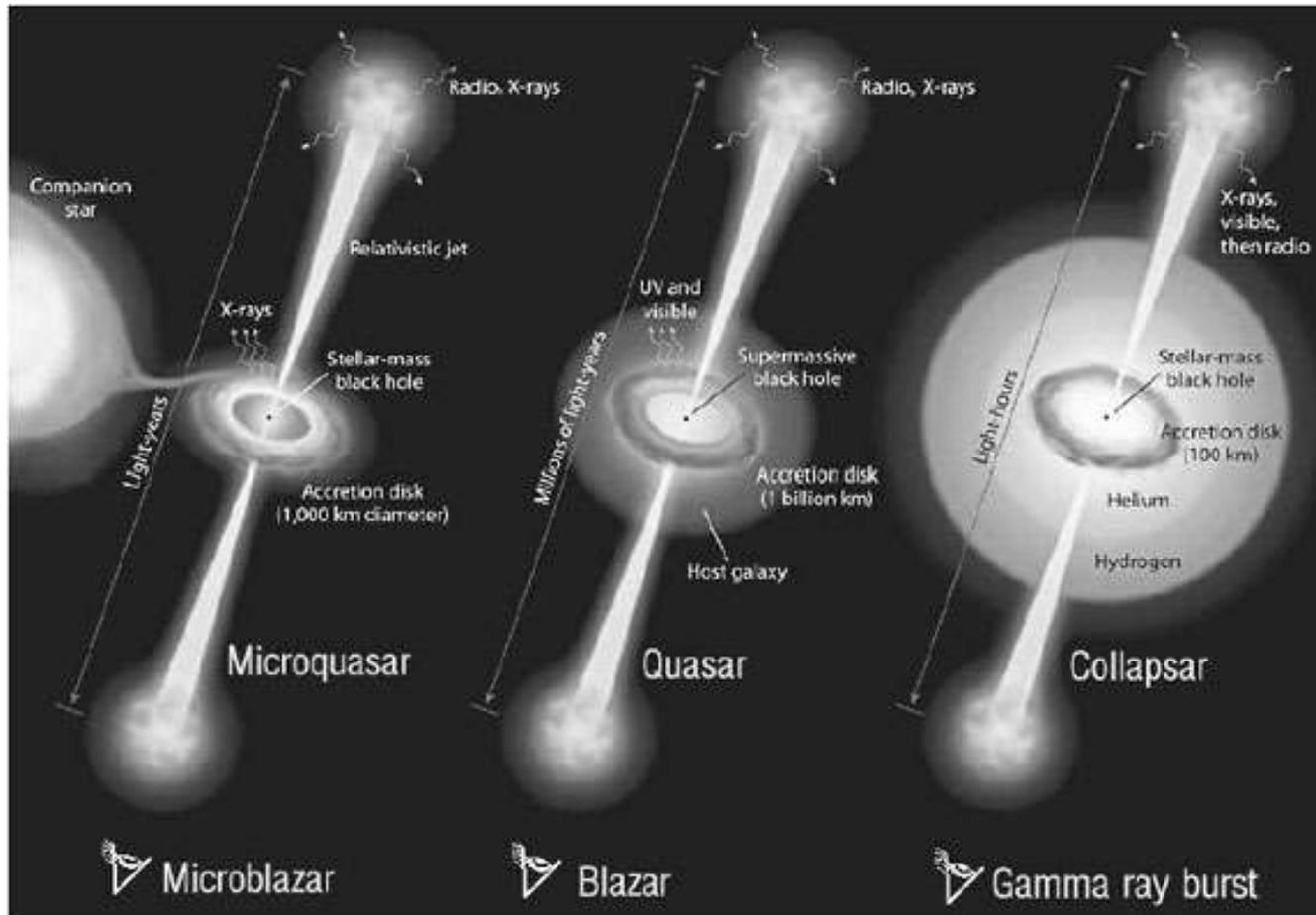
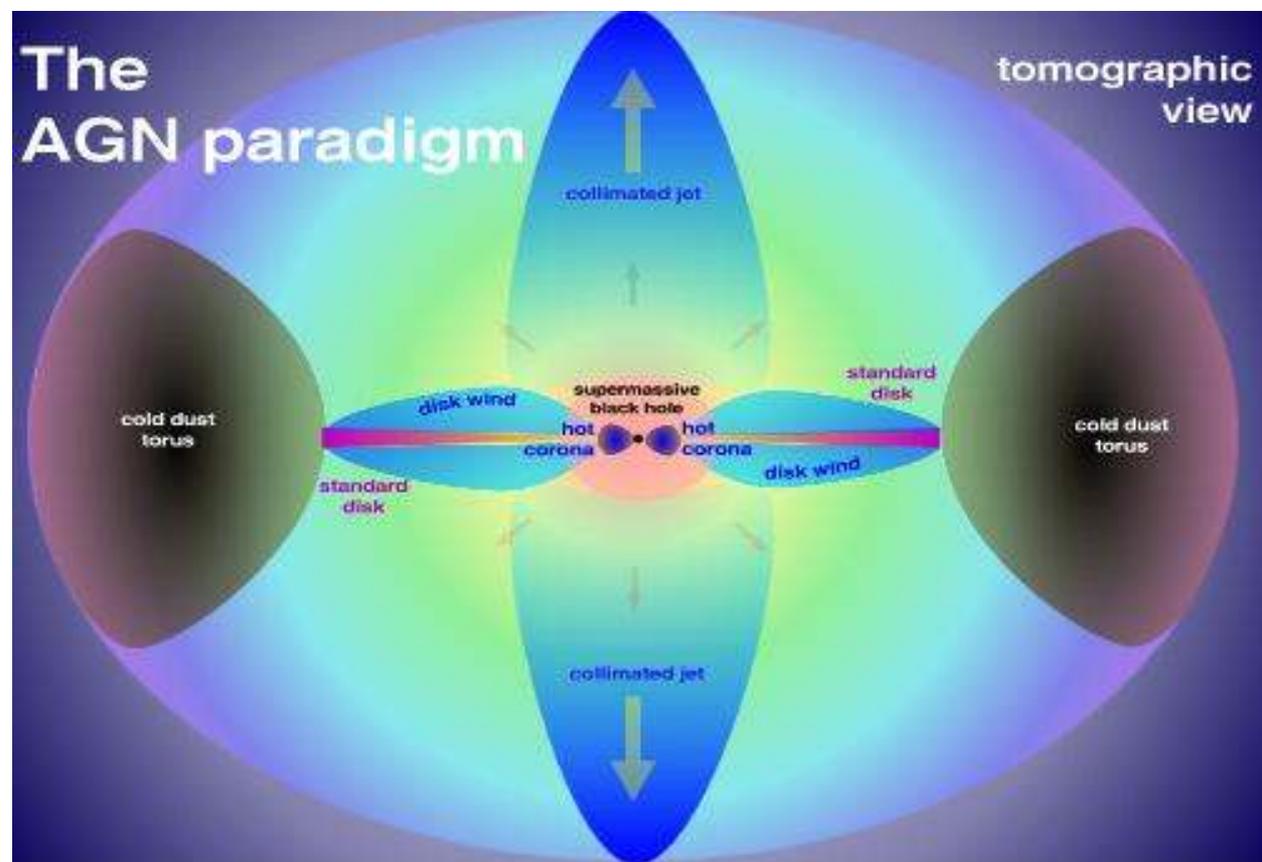


Diagram illustrating current ideas concerning microquasars, quasars and gamma-ray bursts (not to scale). It is proposed that a universal mechanism may be at work in all sources of relativistic jets in the universe. Synergism between these three areas of research in astrophysics should help to gain a more comprehensive understanding of the relativistic jet phenomena observed everywhere in the universe.

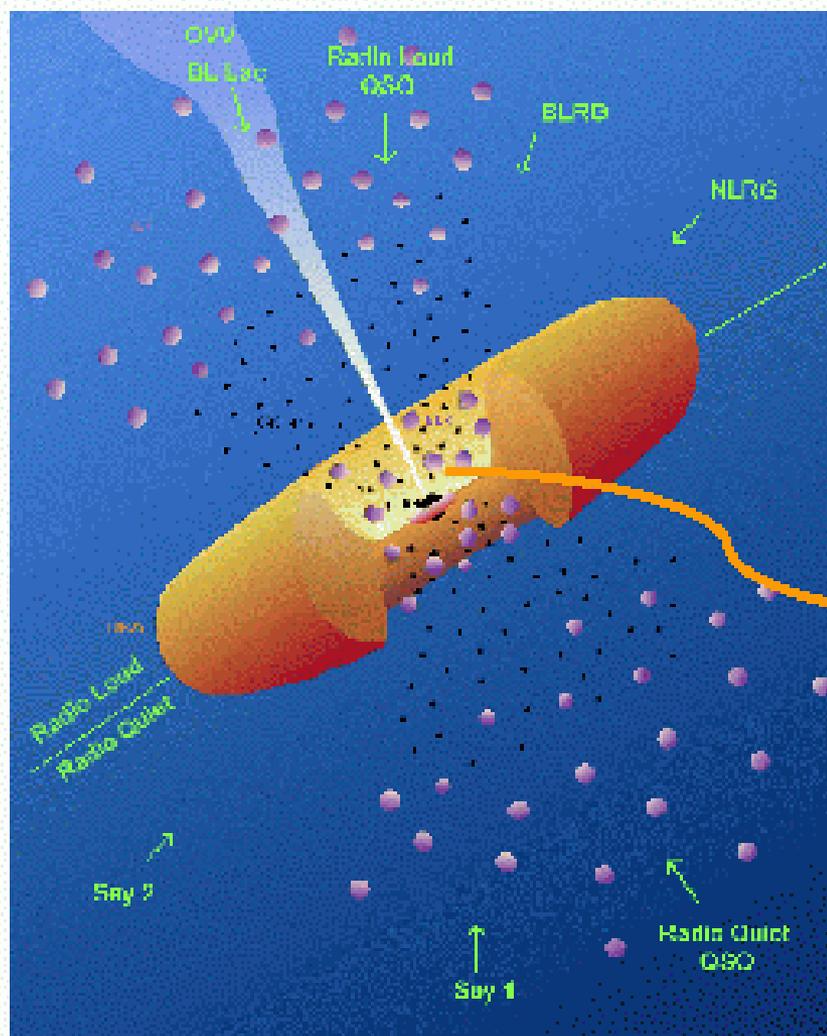
Massenskala Schwarzer Löcher



- Massereiche Schwarze Löcher: 10^2 bis 10^5 Sonnenmassen; muß in Zentren von Kugelsternhaufen existieren (M15, G1); hungrige Schwarze Löcher
- Supermassereiche Schwarze Löcher: Zentren von Galaxien (jeder Galaxie); über Akkretion von Plasma wird die enorme Helligkeit der AGN gespeist;

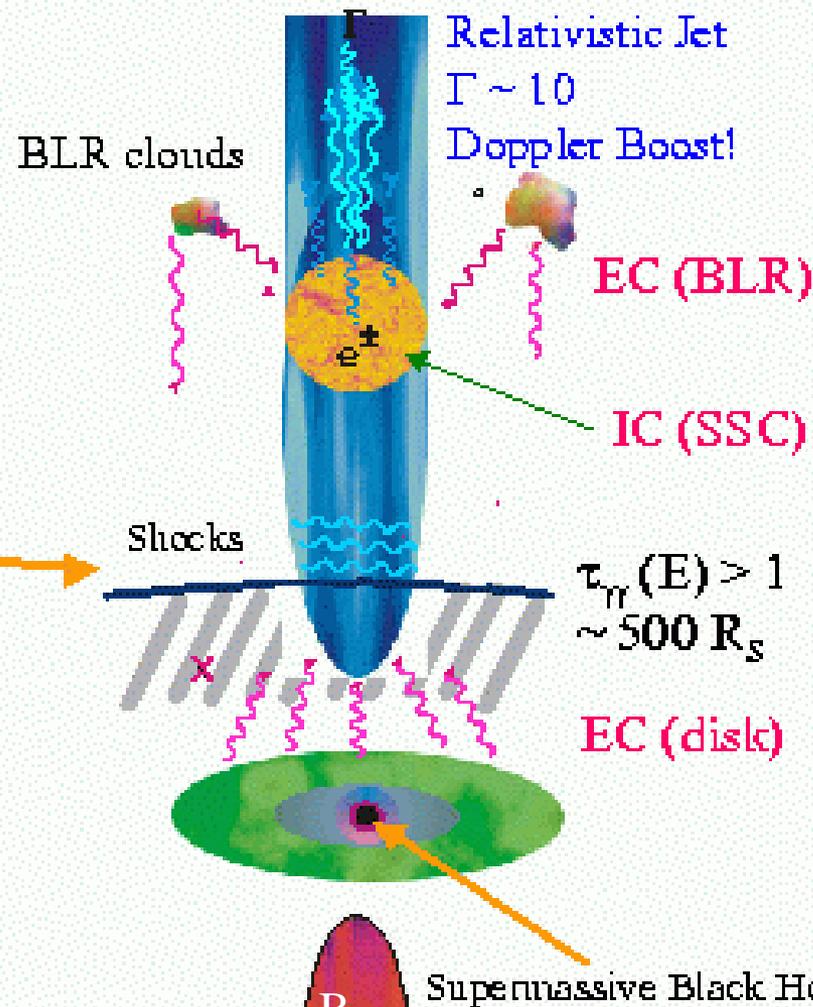
Where does the radiation come from?

AGN Modell:



Synchrotron & Inverse Compton

(Bremsstrahlung & Annihilation)

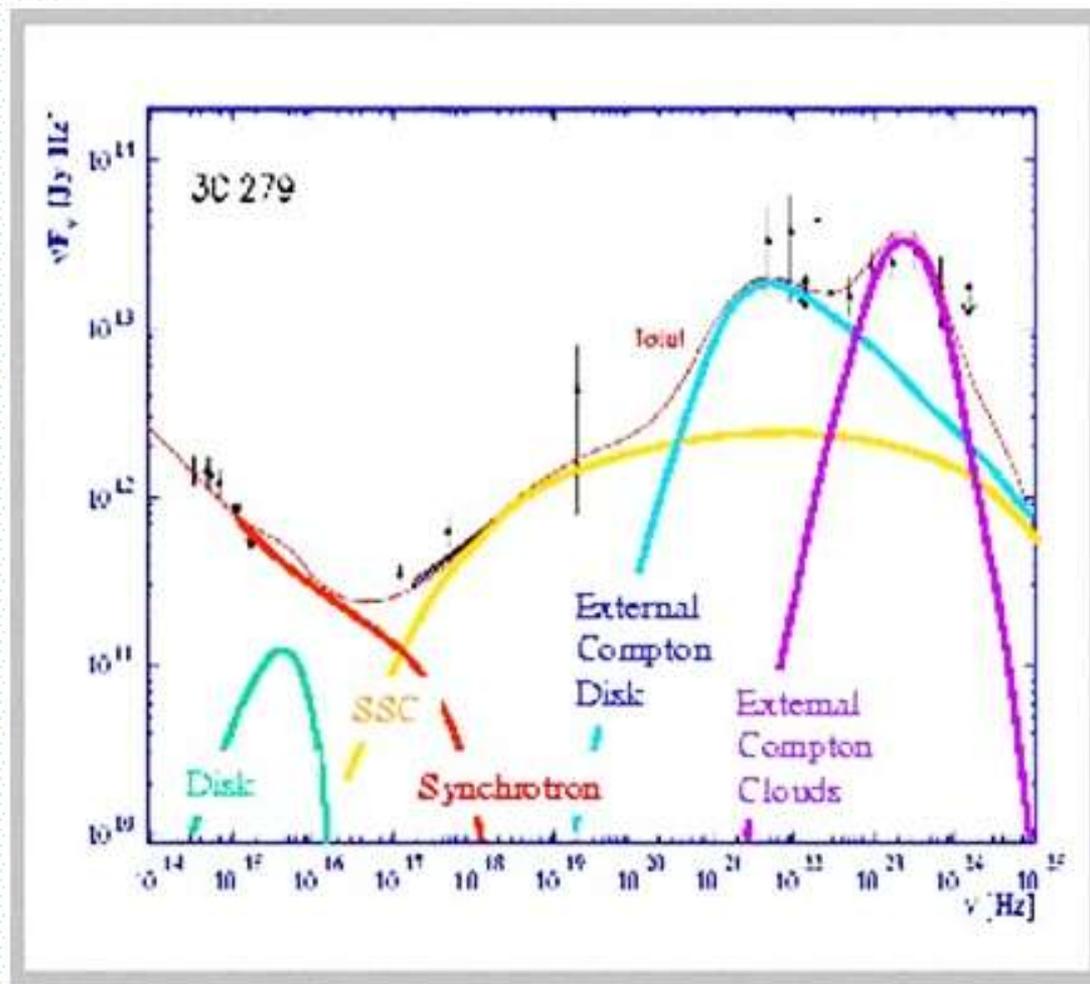
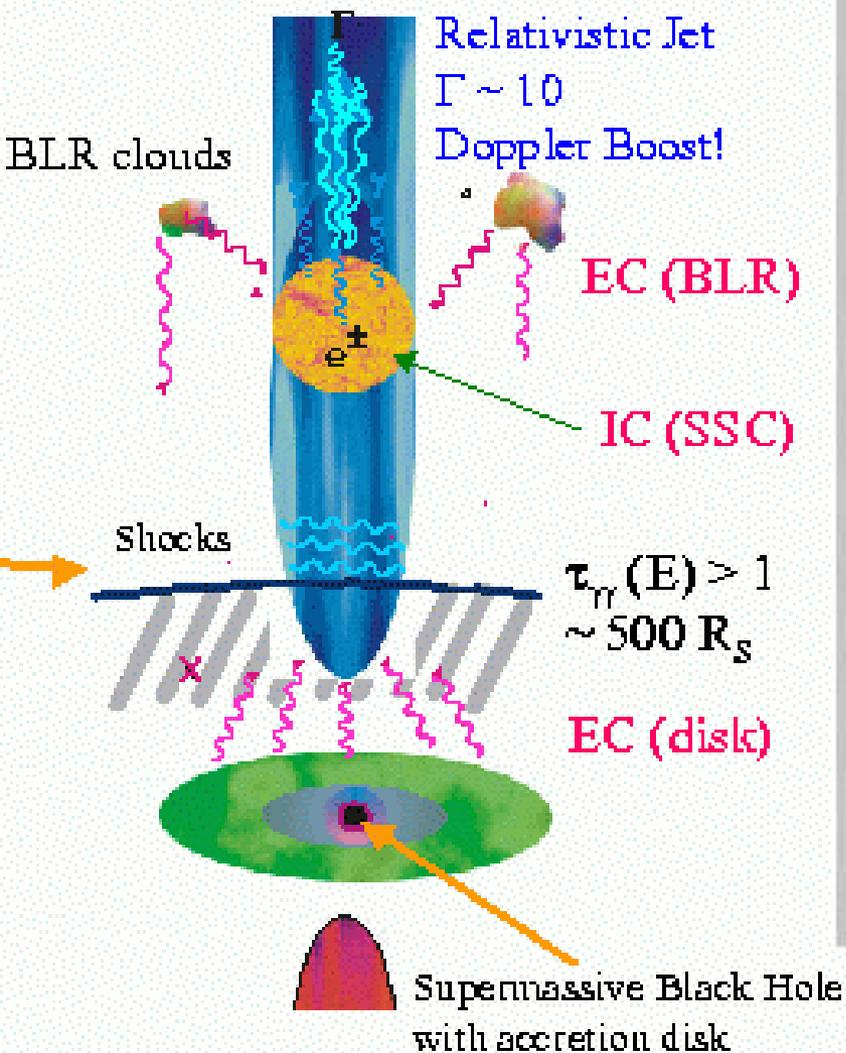


Boettcher et al.

Where does the radiation come from?

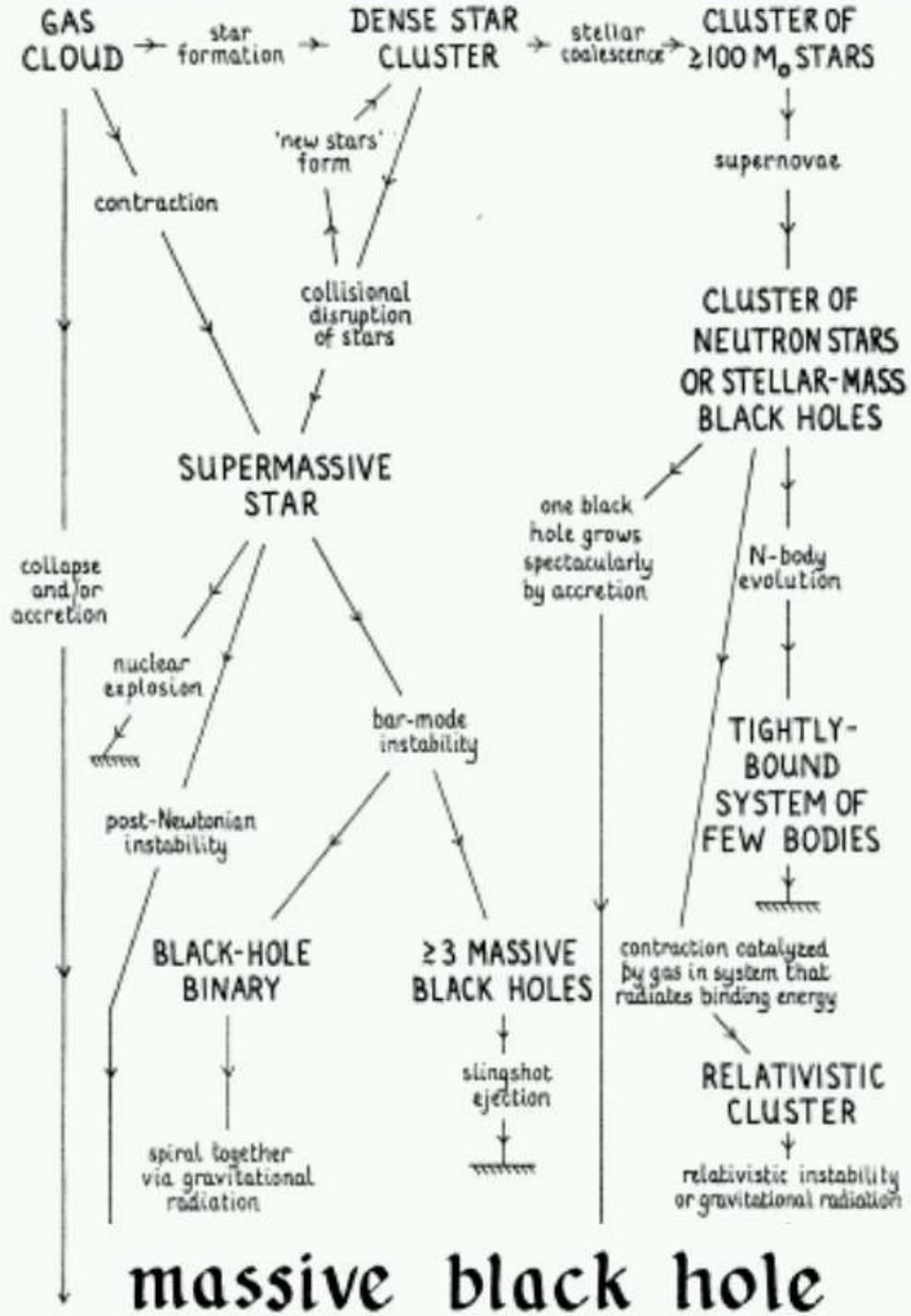
Synchrotron & Inverse Compton

(Bremsstrahlung & Annihilation)



Boettcher et al.

Wie entstehen Schwarze Löcher?



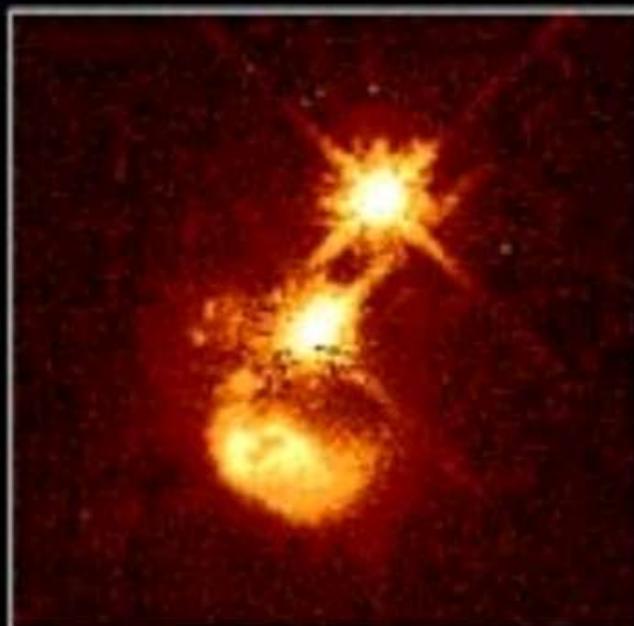
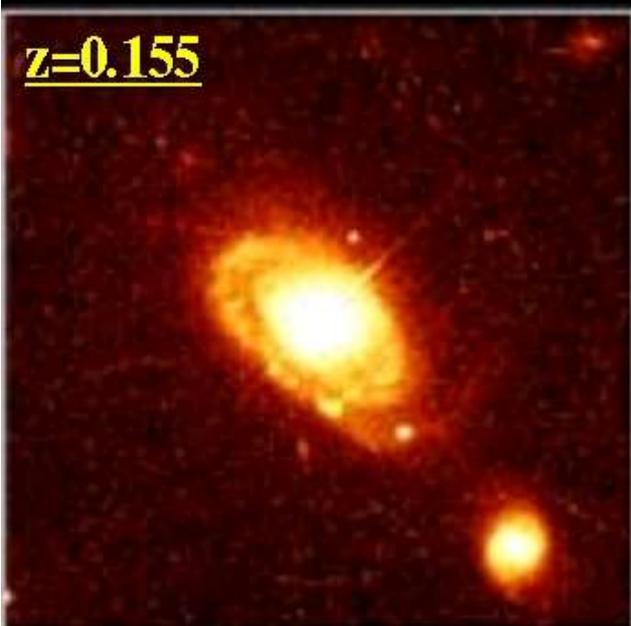
M.J. Rees, 1984

normale Spiralgalaxie

zerrissen, $z=0.286$

?, $z=0.265$

$z=0.155$



$z=0.171$

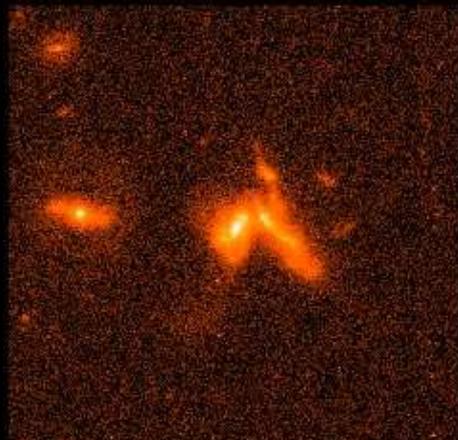
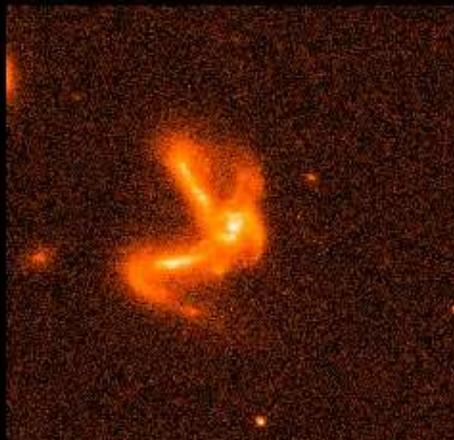
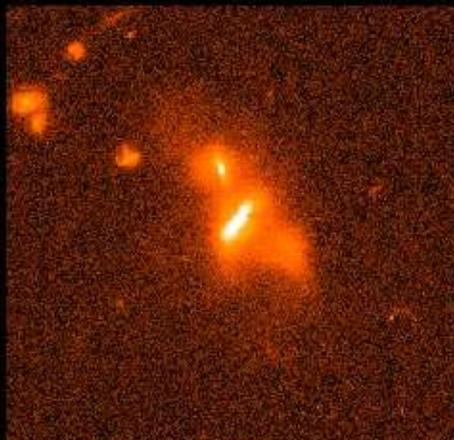
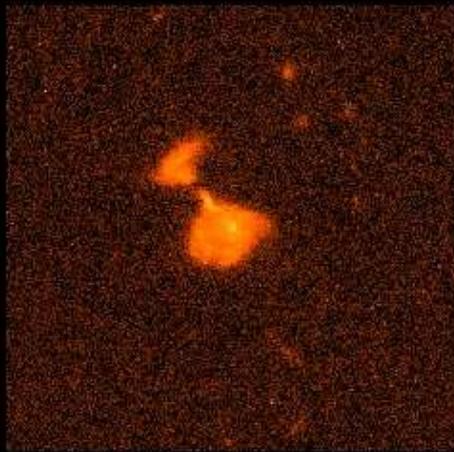
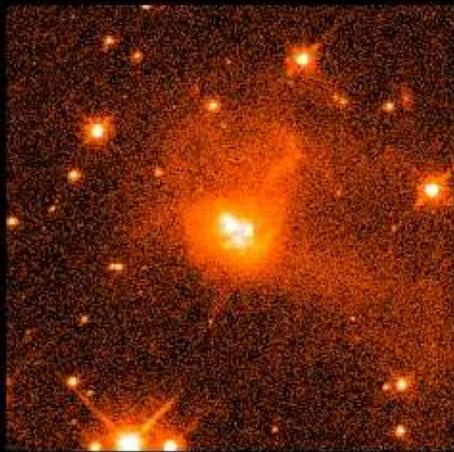
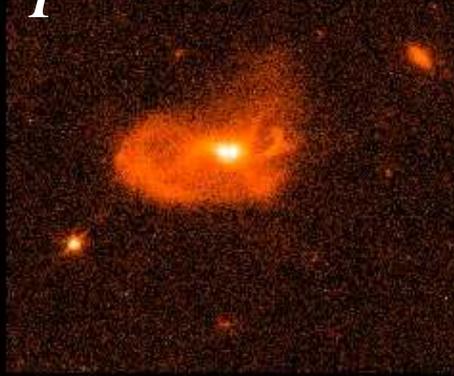
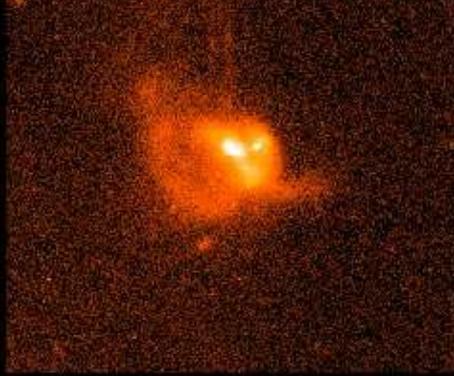


normale elliptische Galaxie

"merger", $z=0.187447$

"merger", $z=0.205102$

Kosmisches Spektakel: Wechselwirkend



Kosmisches Spektakel: Wechselwirkend

Galaxies NGC 2207 and IC 2163



Hubble
Heritage

Zur Geschichte

Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- Erste Erwähnung: Pfarrer, Geologe und Astronom John Michell (1724-1793), Publikation der Royal Society 1783: „.....and by supposing light to be attracted by the same force in proportion to its mass with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.“
- Ähnlich: Pierre Simon de Laplace 1795
- Albert Einstein (1879-1955): Spezielle Relativitätstheorie 1905 (Raum-Zeit-Kontinuum), Allgemeine Relativitätstheorie 1915 (Theorie der Gravitation)
- Karl Schwarzschild (1873-1916): findet die erste Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen 1916: äußere Schwarzschild-Lösung, beschreibt nicht-rotierende, statische Löcher, Ereignishorizont und zentrale Singularität; innere Schwarzschild-Lösung, nicht mehr statisch, keine Vakuumraumzeit mehr, von inkompressibler Flüssigkeit erzeugt, die Kugelform besitzt

Zur Geschichte Schwarzer Löcher

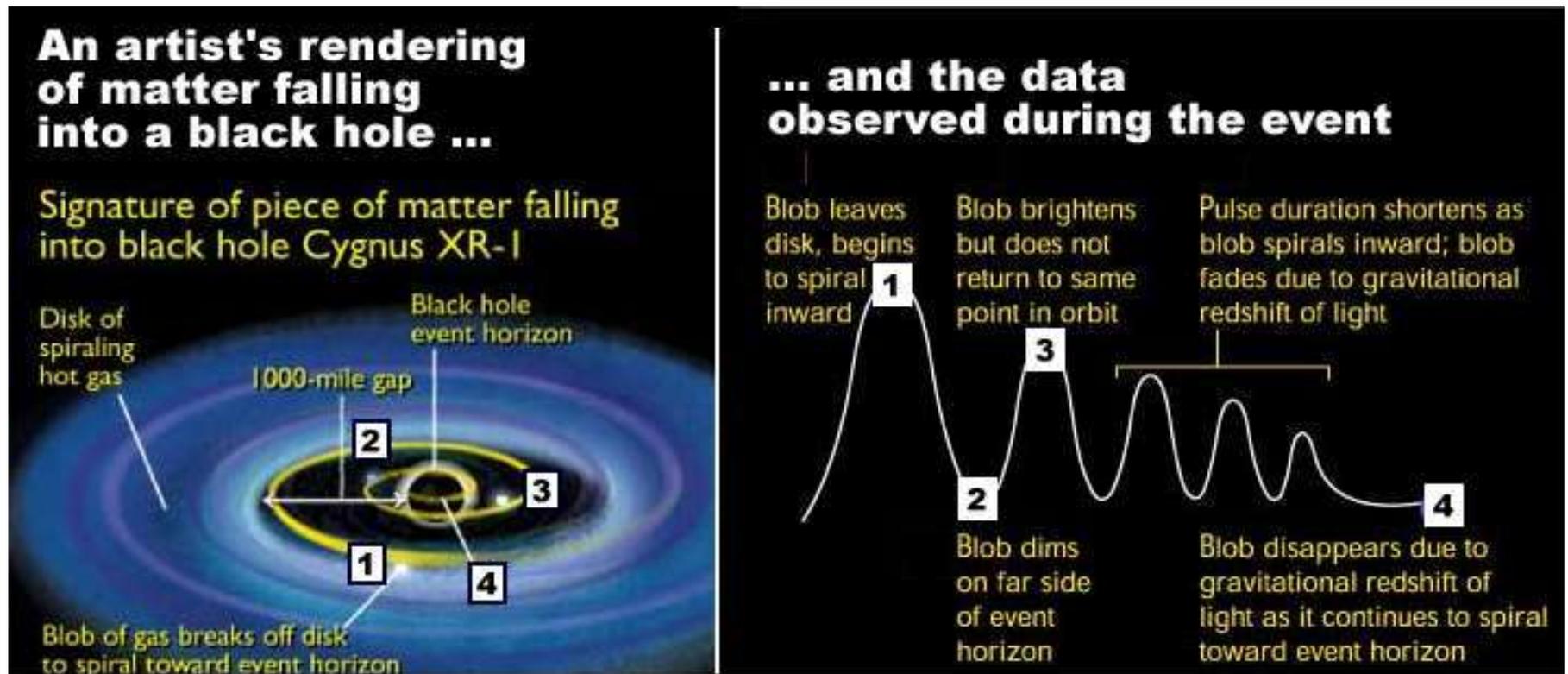
- Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) 1930, für eine Ansammlung entarteter, relativistischer Materie gibt es Grenzmasse, oberhalb Chandrasekhar-Grenze kann Gravitationskollaps nicht aufgehalten werden
- Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) und Hartland Snyder (1913-1962) 1939 erste Berechnung, relativistischer Gravitationskollaps einer homogenen Flüssigkeitskugel, Abschirmung während des Kollapses durch die Ausbildung eines Ereignishorizontes
- Jahrzehnte der Ignoranz des Problems (Ablehnung durch Eddington und Landau)
- Roy Patrick Kerr (1934) 1963, Verallgemeinerung der Schwarzschild-Lösung auf rotierende Schwarze Löcher
- Physiker Roger Penrose vermutet 1964 die Existenz von Singularitäten im Innern Schwarzer Löcher

Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- Verallgemeinerung der Kerr-Metrik: Schwarze Loch besitzt nun neben Masse und Drehimpuls auch Ladung: Kerr-Newman Lösungen, 1965, E.T. Newman, E. Couch, K. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash, R. Torrence
- R.H. Boyer und R.W. Lindquist finden 1967 heutige Standardschreibweise für rotierende, ungeladene Schwarze Löcher: Boyer-Lindquist Form
- John Archibald Wheeler (*1911) findet 1967 den Begriff Schwarzes Loch (statt gefrorener Stern, kollabierter Stern), Keine-Haar-Theorem: Schwarze Löcher haben maximal nur 3 Eigenschaften: Masse, Drehimpuls, Ladung: „Ein schwarzes Loch hat keine Haare.“
- Stephen W. Hawking (*1942) 1970, die Oberfläche eines Schwarzen Lochs, der Horizont, nimmt weiter zu (z.Bsp. durch Akkretion)

Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- Tom Bolton identifiziert 1972 Cygnus X-1 aufgrund Röntgenemission als ersten Kandidaten für ein stellares Schwarzes Loch



SOURCE: Ann Feild (STScI)

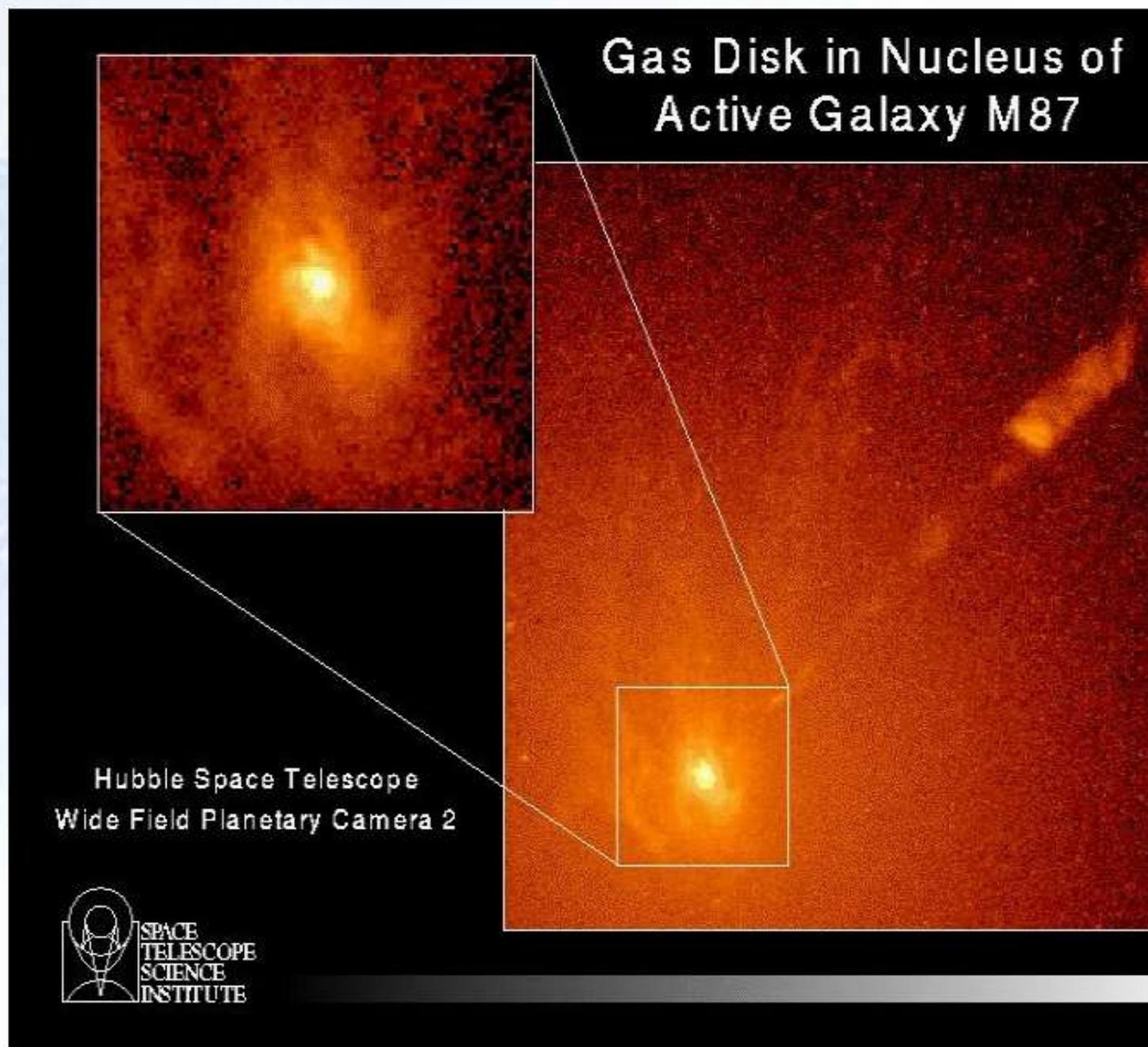
Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- Hawking leitet 1974 die Hawking-Strahlung ab:
Schwarze Löcher können Teilchen emittieren, wenn der quantentheoretische Prozess der Paarbildung nahe am Ereignishorizont stattfindet. Sehr leichte Schwarze Löcher (10^{18} g) können durch diese Teilchenemission am Horizont verdampfen.
- Hubble Space Teleskop findet 1994 Evidenz für supermassereiches Schwarzes Loch in M87:
Paradigma Aktiver Galaktischer Kerne
- 2002: schwache Evidenz für massereiche Schwarze Löcher in den Zentren von Kugelsternhaufen

★ a) dynamische Studien an Gas im Kern von M87 (Ford et al)

kleine Scheibe
aus ionisiertem
Gas,
Spiralstruktur
~ 500 km/s
Geschwindigkeit
-> Schwarzes
Loch

Gas Disk in Nucleus of
Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2



Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- Pawel O. Mazur und Emil Mottola finden 2001 eine Alternative zu den Schwarzen Löchern ohne Horizont: Gravasterne, kommt ohne zentrale Singularität aus

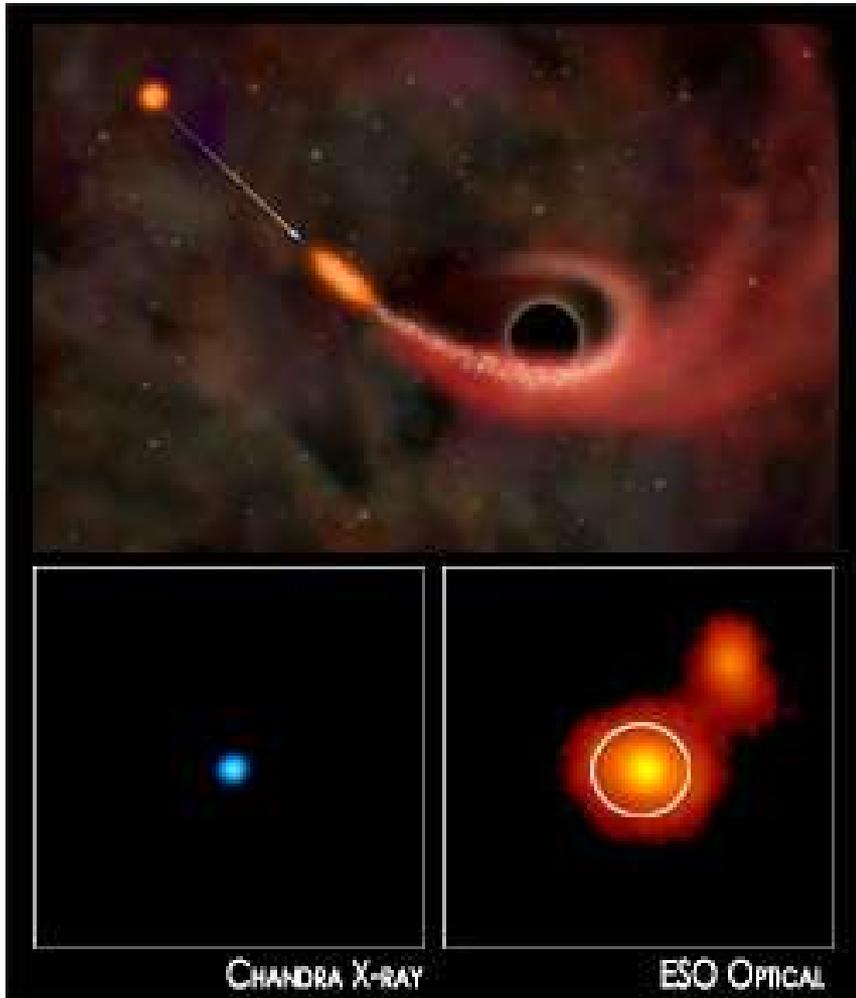
Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- **R. Genzel (MPE), 2003, finden Blitze im Nahinfrarotbereich aus dem Zentrum der Milchstraße: das Galaktische Schwarze Loch rotiert, beste bisher gefundene Evidenz für die Rotation eines Schwarzen Lochs**

Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- S. Komossa, 2004, Beobachtung Zerriss eines Sterns unter verheerender Wirkung von

ermassereichen



- RX J1242-1119 in einer Entfernung von $z = 0.05$, also etwa 210 Mpc

Die Schwarzschild-Lösung

**external
Schwarzschild
solution**

*non-vacuum
solution*

finite radius

no singularity!

**internal
Schwarzschild
solution**

*incompressible
fluid*

*surface
 $p = 0$*

globally spherical symmetry

Die Kerr-Lösung

Die Kerr-Lösung

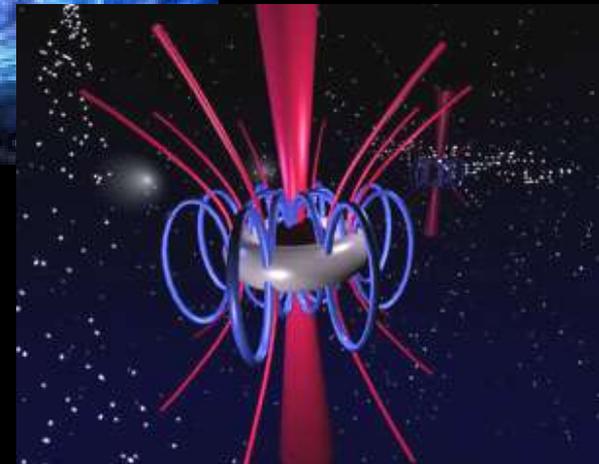
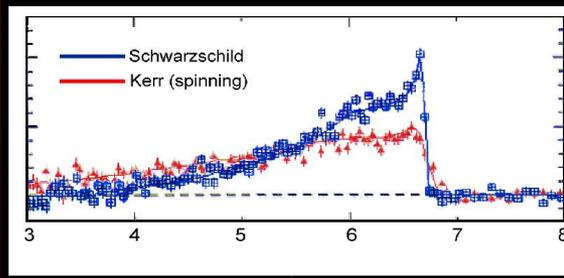
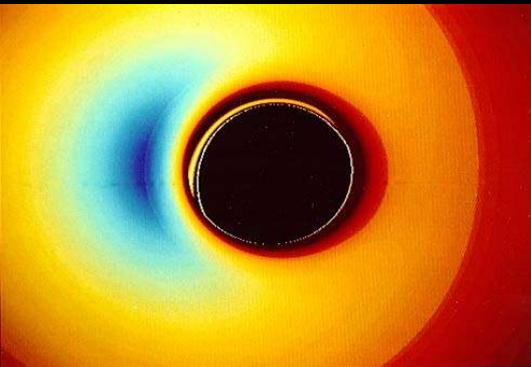
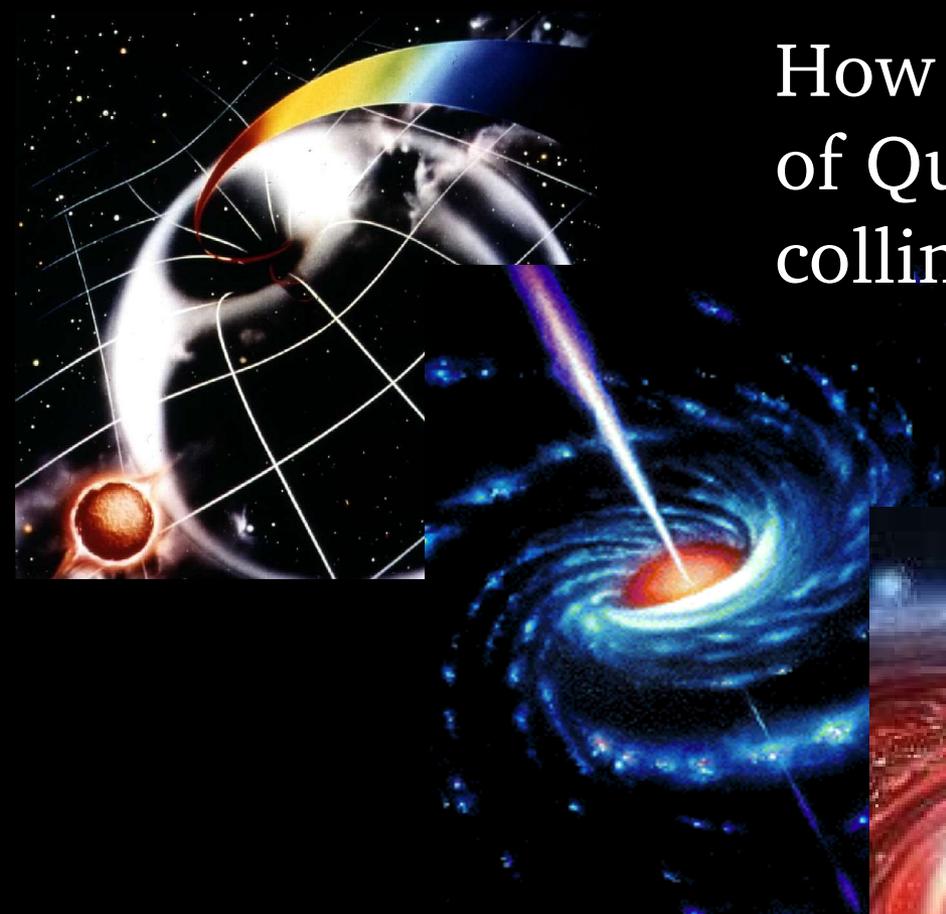
■ Effekte in der Nähe des SL:

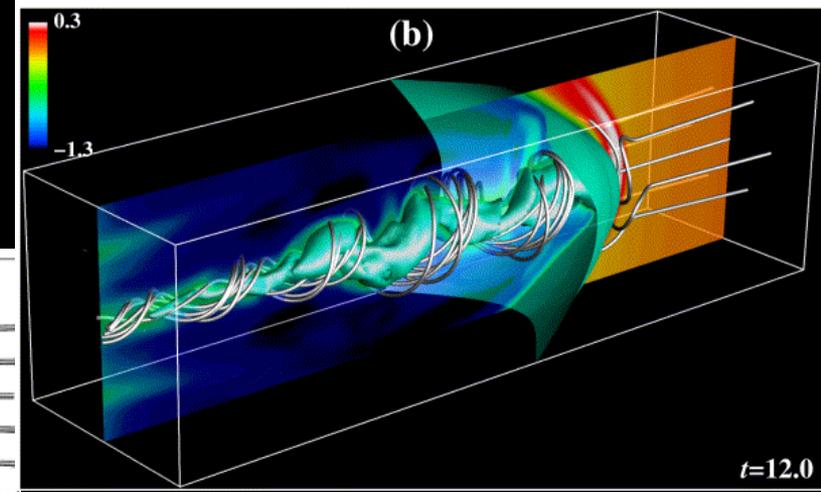
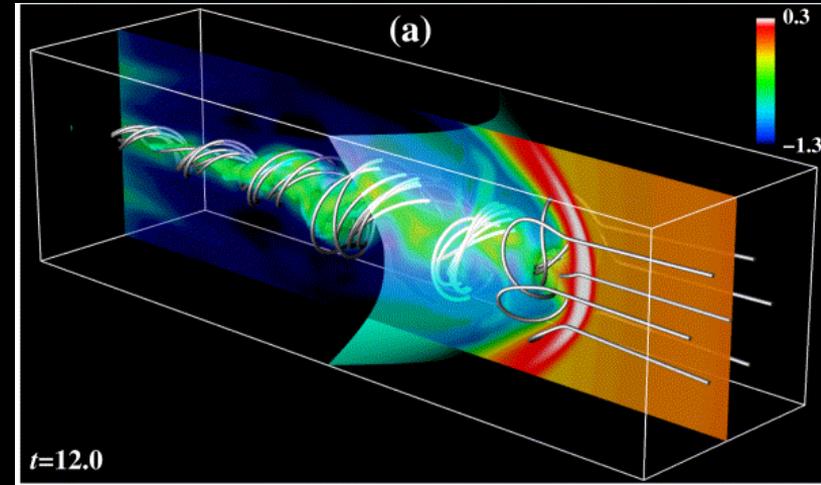
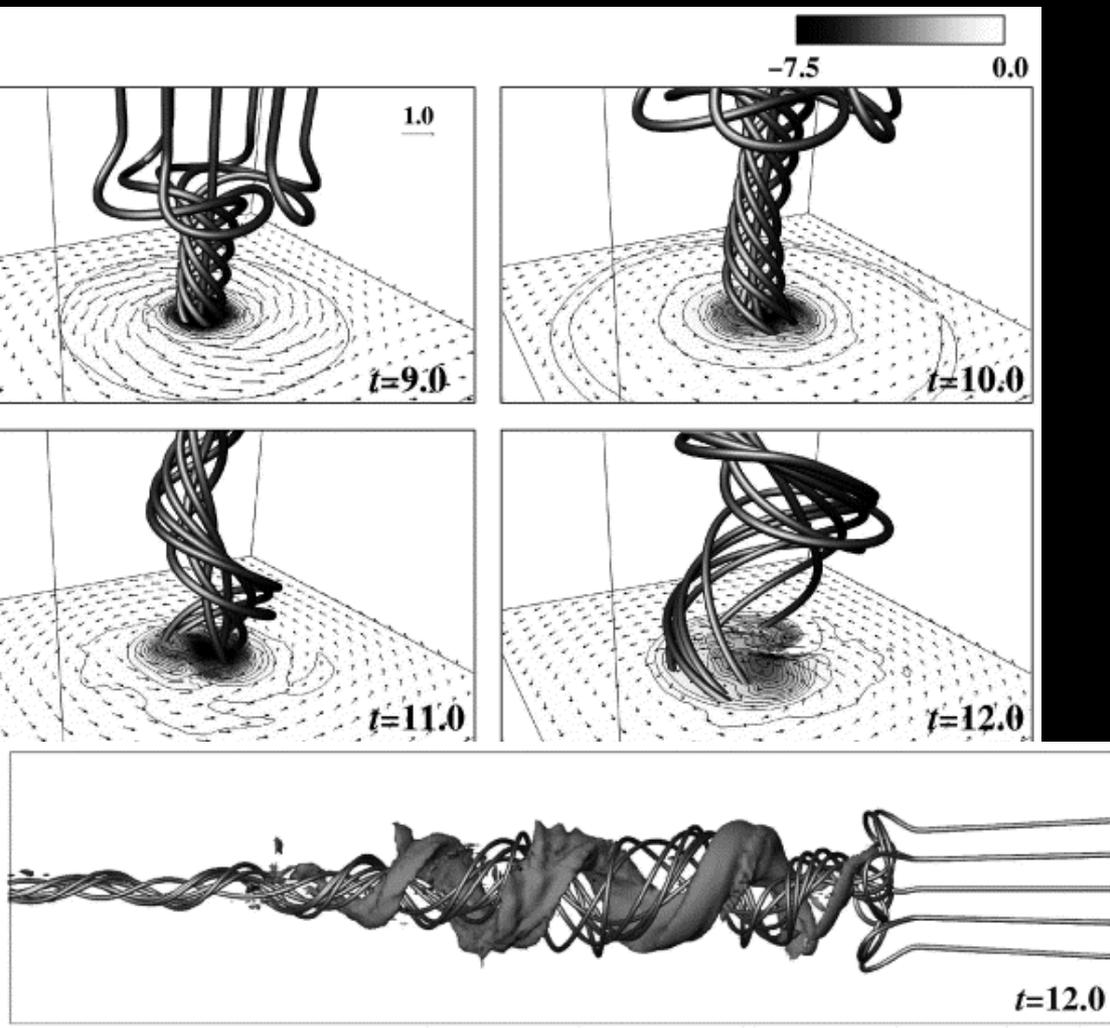
- **Doppler-Effekt**
- **Beaming**: spezielle Relativitätstheorie, Kollimation der Strahlung in Bewegungsrichtung des Emitters, In Umgebung von SL rotiert Plasma außerhalb der marginal stabilen Bhn Keplersch in geometrisch dünner Akkretionsscheibe, Beaming bewirkt, daß der Teil der Scheibe, der auf den Beobachter zurotiert heller wird, während der andere Teil der Scheibe, in der Helligkeit unterdrückt wird
- **Gravitationsverschiebung**: nahe des Ereignishorizontes kommt es zu einer Verschiebung der Wellenlänge der Photonen zum roten, niederenergetischen Ende hin; Ursache: starkes Gravitationsfeld des SL, gegen das die Photonen ankämpfen müssen, Emission am Horizont wird reduziert: es bildet sich ein Schatten

Die Kerr-Lösung

- Beschreibt rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher
- **Frame-Drag (Mitschleppen des Bezugssystems):** rotierendes Schwarze Loch zwingt am Horizont alles, Materie, Licht, selbst den Raum (genauer: die Raumzeit), in seine Umlaufrichtung und mit gleicher Winkelgeschwindigkeit zu rotieren; global poloidale Magnetfelder werden in der Nähe von Kerr-Löchern verdrillt (Torsion), die Feldlinien werden zusammengequetscht und rotieren, Magnetfeldstärke signifikant erhöht, rotierendes Loch treibt Alfvén-Wellen an (räumlich und zeitlich variables Magnetfeld) => Torsionaler Alfvén-Wellen Zug (Torsional Alfvén Wave Train, TAWT): eine MHD-Welle, die entlang der Rotationsachse des Schwarzen Lochs propagiert und dabei Plasma mitreißt => mittels dieses Mechanismus könnte die Jet-Entstehung funktionieren

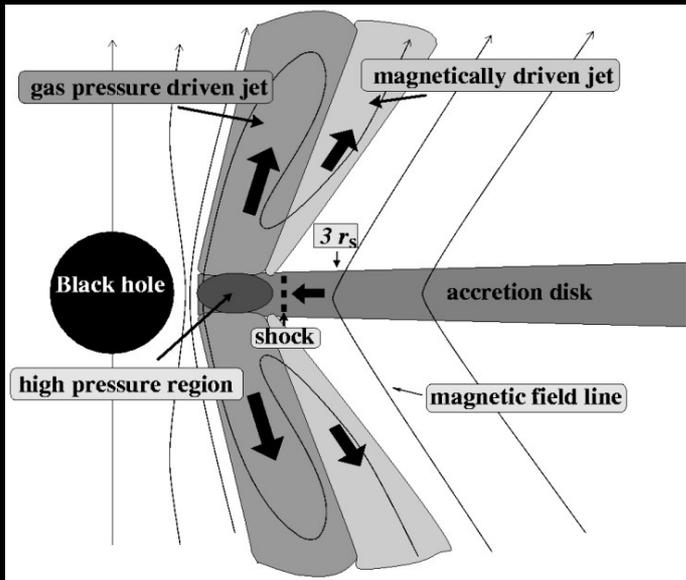
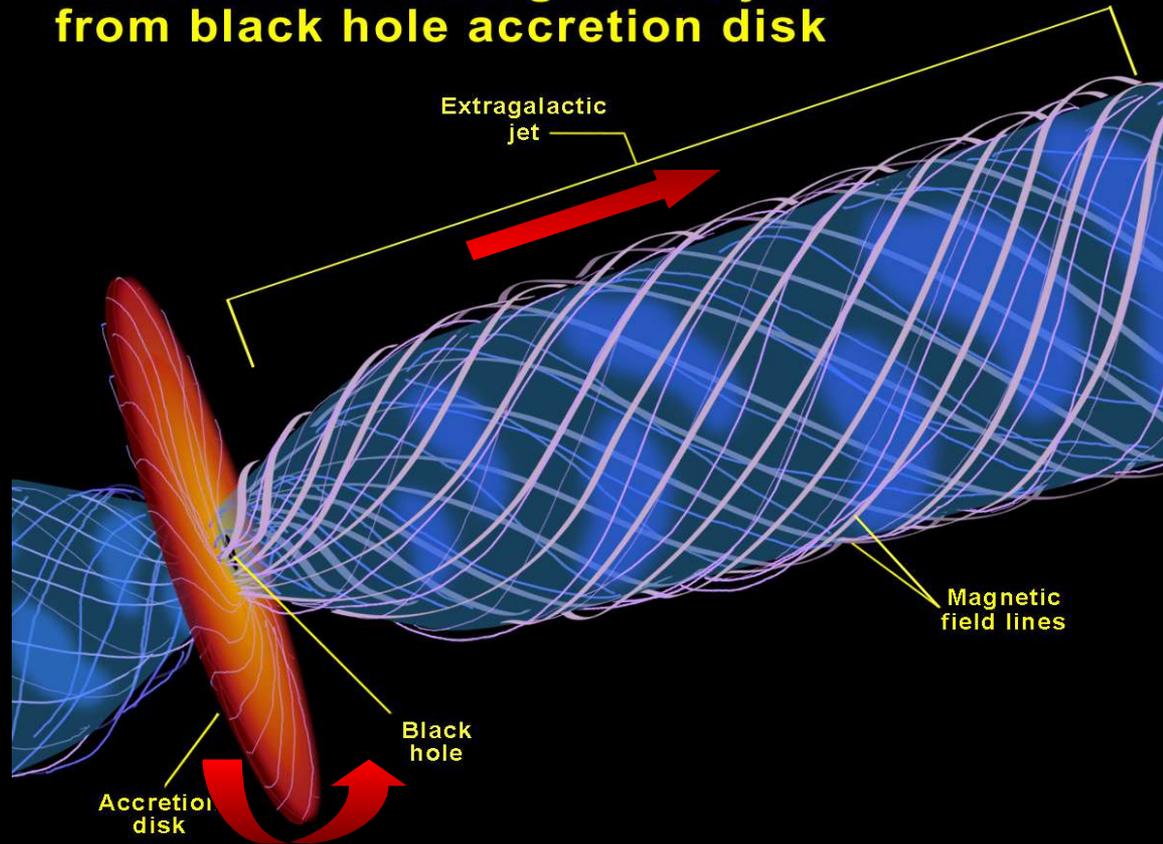
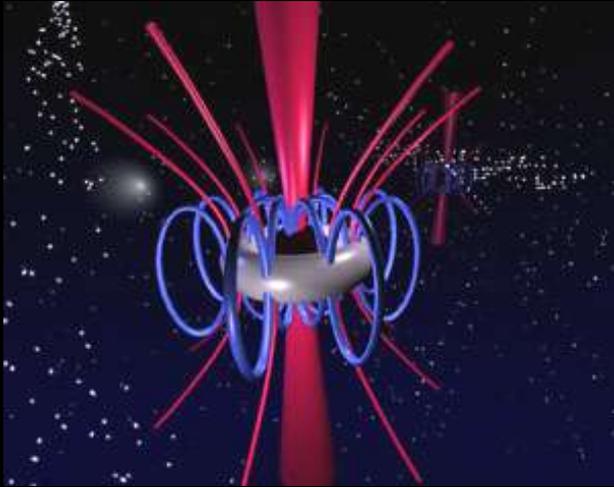
How are the jets at the centres of Quasars launched and collimated ?





3-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) jet simulations

Formation of extragalactic jets from black hole accretion disk



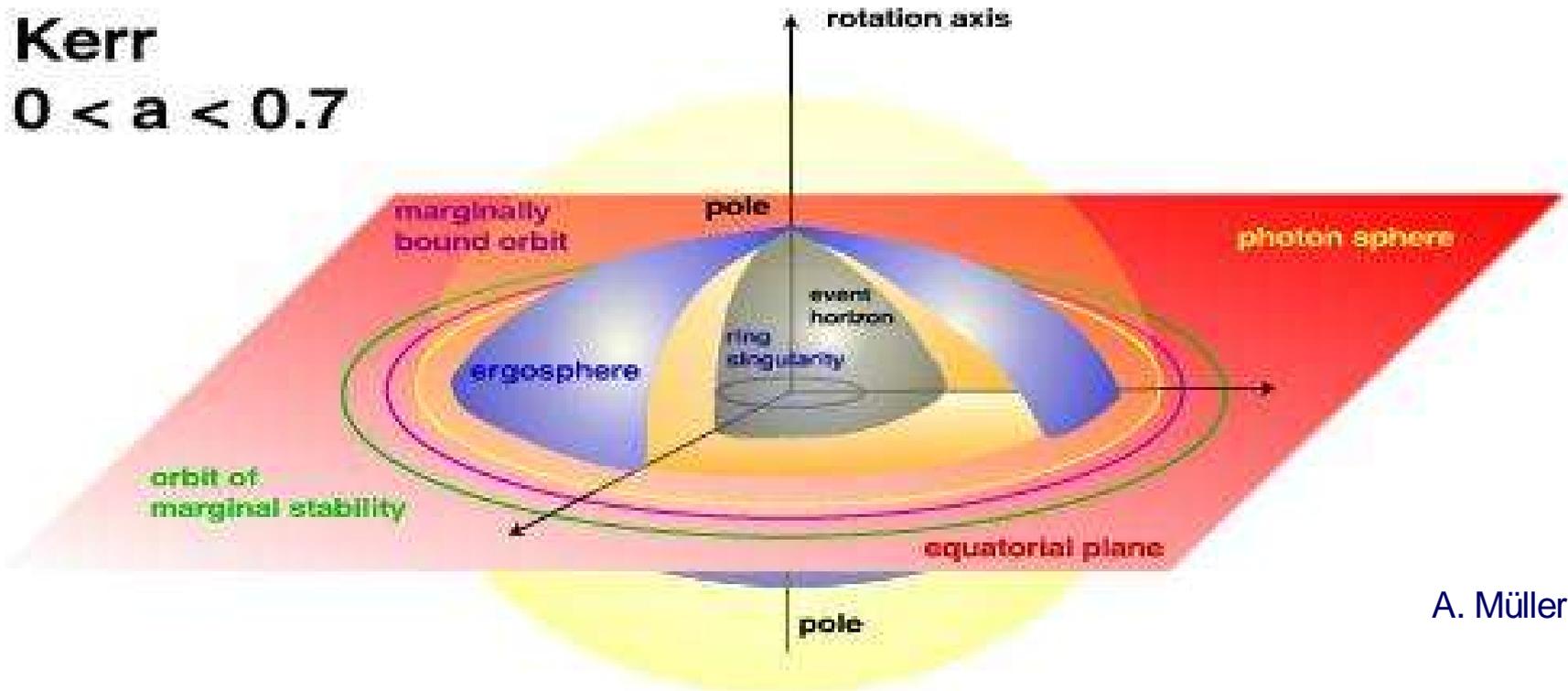
MHD simulation of a confining B-field anchored in a rotating disk

Die Kerr-Lösung

- **Beschreibt rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher**
- **Stabile Keplerbahnen um ein Schwarzes Loch, stabile und instabile Orbits, 5 Möglichkeiten**
 - Fällt direkt aus dem Unendlichen in das SL
 - Wird aus dem Unendlichen eingefangen und fällt nach einigen Umläufen in das SL
 - Beschreibt stabile Kreisbahn (konstanter Radius)
 - Beschreibt elliptische Bahn mit einer Periastron-Drehung um das SL
 - Entkommt dem SL

Die Kerr-Lösung

Kerr
 $0 < a < 0.7$



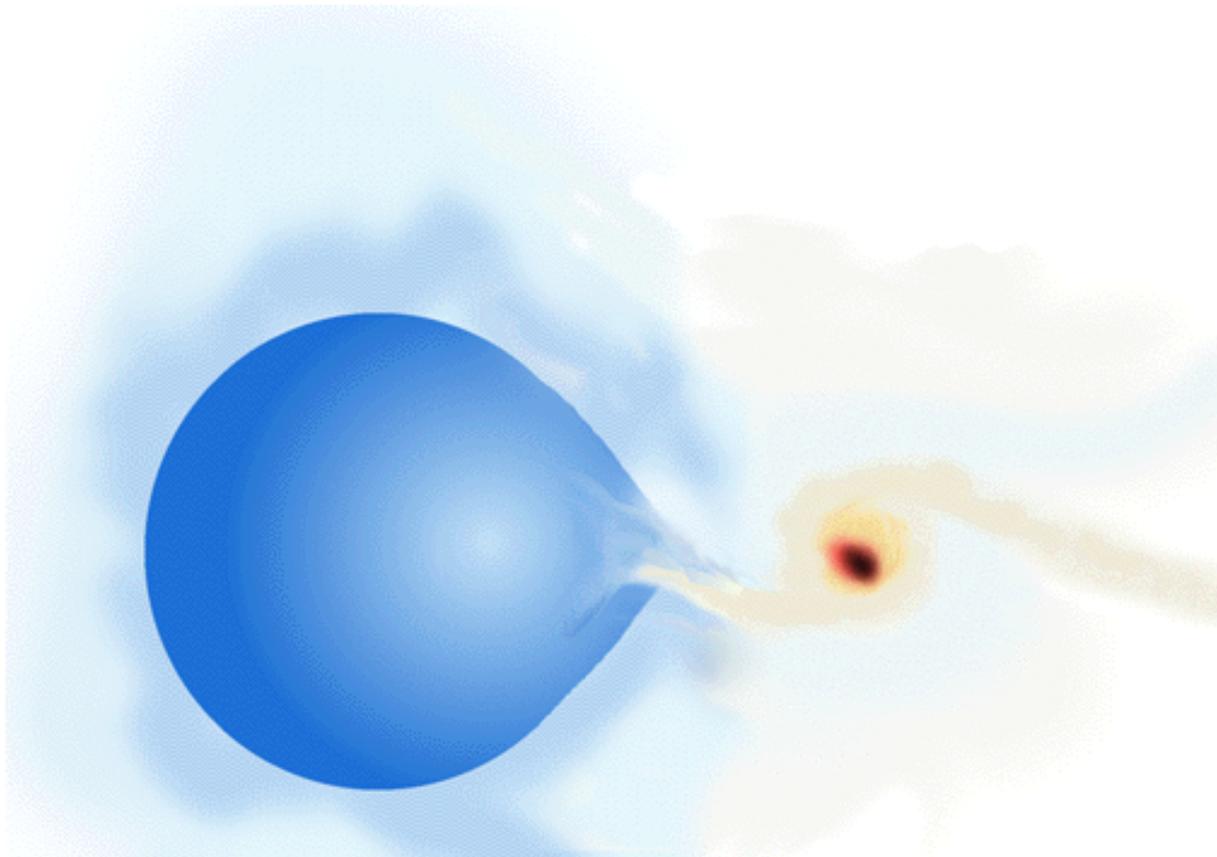
- Ringsingularität: Massenfluß in einem unendlich dünnen Ring.

Quelle des rotierenden Gravitationsfeldes

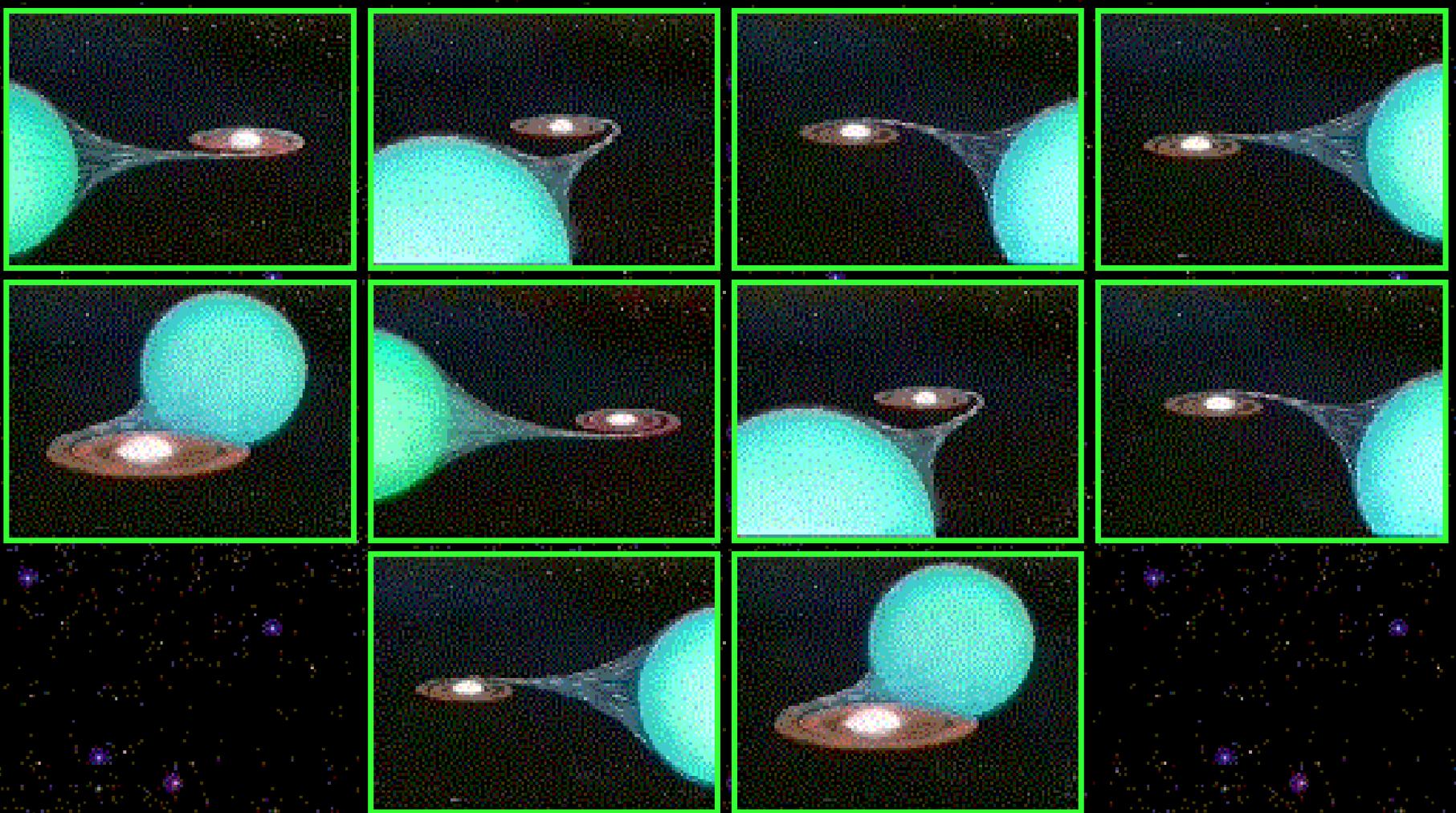
Akkretionsscheiben um rotierende Schwarze Löcher

Akkretionsscheiben

- **Akkretion (lat. Accrescere: hinzuwachsen) bezeichnet den Vorgang, daß ein massebehaftetes Objekt Materie aufammelt**
- **2 Typen von akkretierenden SL:**
 - stellare (Materie eines Begleitsterns) und supermassereiche SL



**Materie, die aus der Oberfläche eines Sterns durch ein
begleitendes Schwarzes Loch gezogen wird, bildet eine
Röntgenstrahlen emittierende Scheibe und fließt langsam
in das Schwarze Loch.**



Schwarzes Loch zieht Material von einem Begleitstern

Material ab und bildet eine Akkretionsscheibe aus

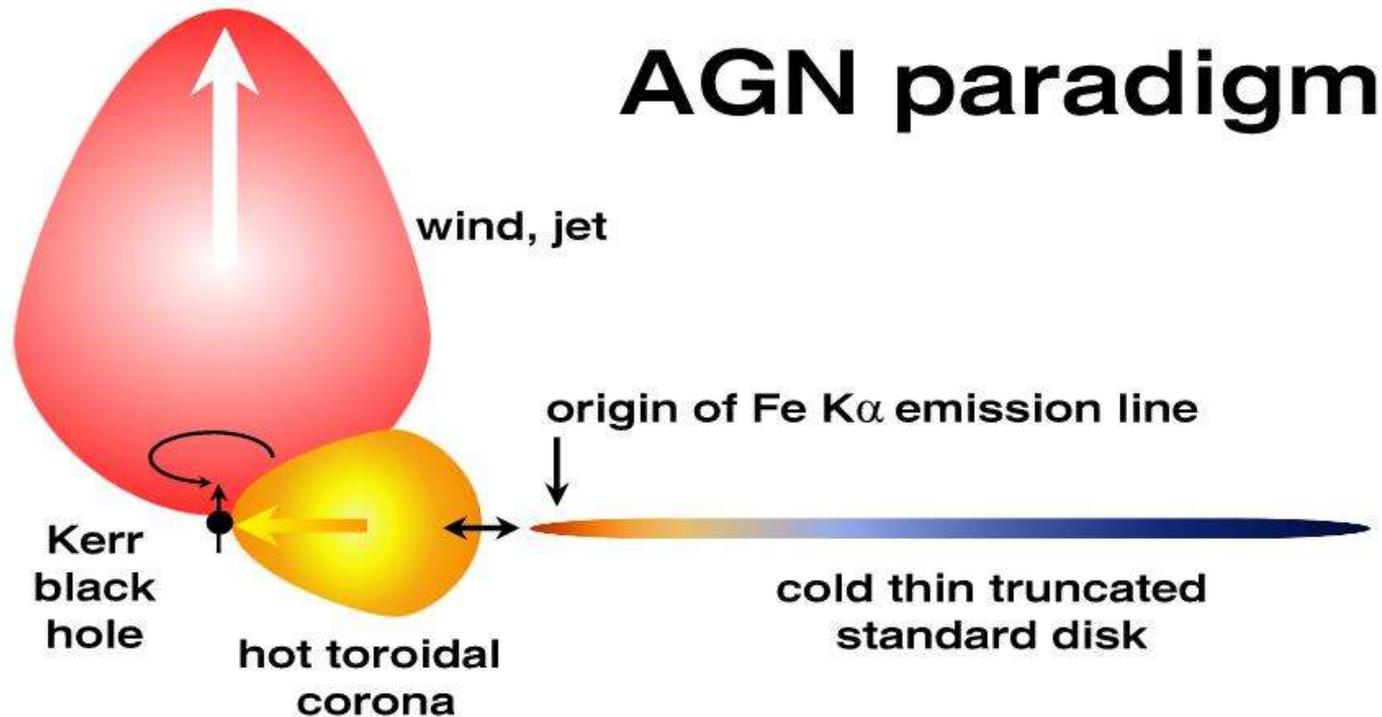
Akkretionsscheiben

- Akkretion (lat. Accrescere: hinzuwachsen) bezeichnet den Vorgang, daß ein massebehaftetes Objekt Materie aufsammelt
- großskaliger Staubtorus, der riesiges, kaltes Materiereservoir von 10^4 bis 10^8 Sonnenmassen darstellt, kpc-Skala; nicht stabil -> Materie fällt ins Zentrum; innerhalb des Staubtorus bildet sich abgeflachter Akkretionsfluß: die Standardscheibe, optisch dick, Materie bewegt sich Keplersch und nimmt aufgrund des Drehimpulses dünne Scheibengestalt an; als verformbares Fluidum beschreibbar; Akkretionsfluß kann hohe Geschwindigkeiten erreichen und unterliegt der Turbulenz, Scherungskräfte wirken, wichtige: magnetische Turbulenz



Akkretionsscheiben

■ Je näher am SL um so schwieriger die Beschreibung: Akkretionsfluß wird heißer, akkretiertes Material ionisiert (Elektronen + Ionenrümpfe): Plasmaphysik, sich bewegende Plasmateilchen erzeugen Magnetfelder: Magnetohydrodynamik, dann gekrümmte Raumzeit, allgemeine Relativitätstheorie, Plasmageschwindigkeiten nehmen zu, Spezielle Relativitätstheorie

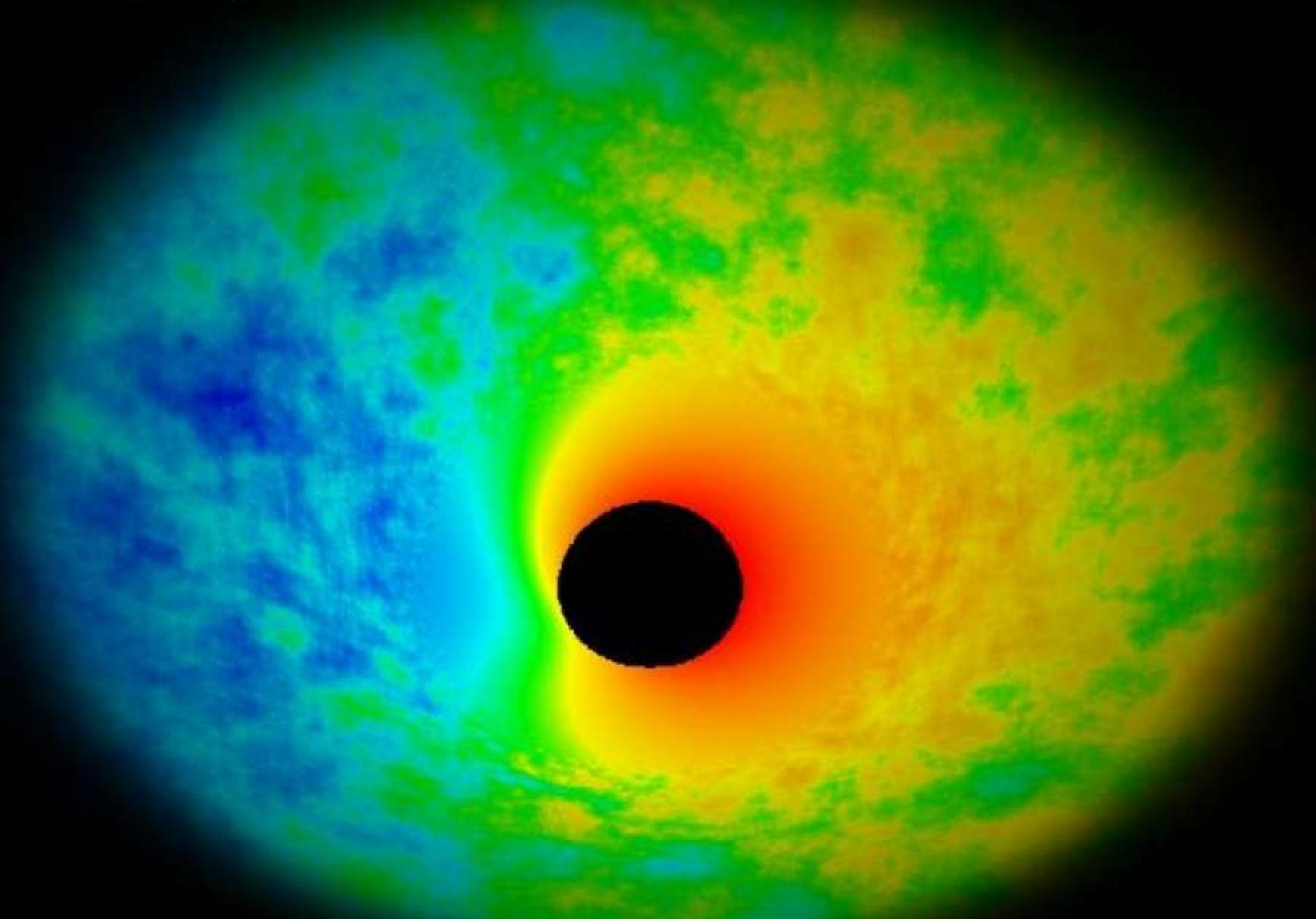


Beobachtung Schwarze Löcher

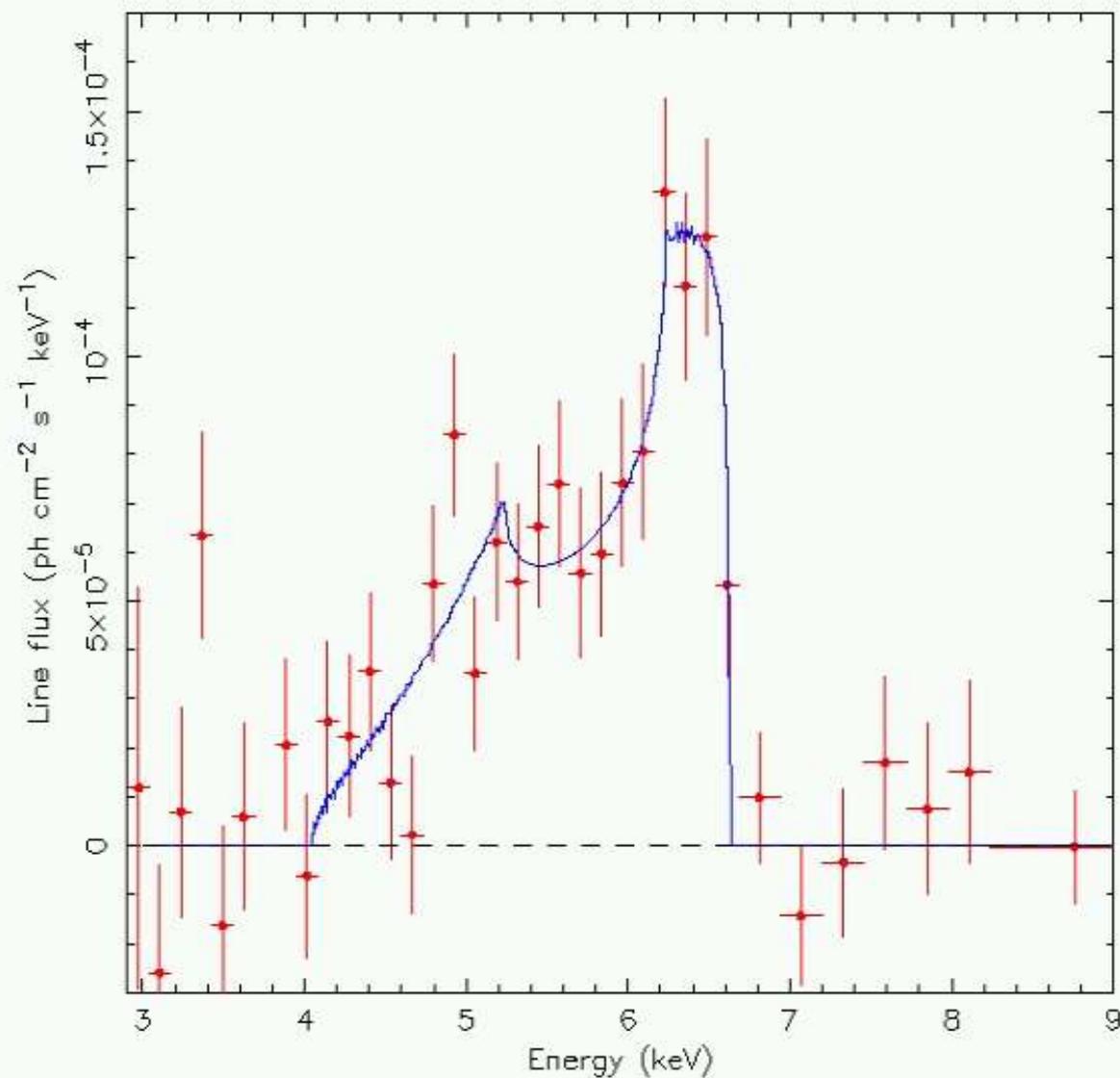
Beobachtung Schwarzer Löcher

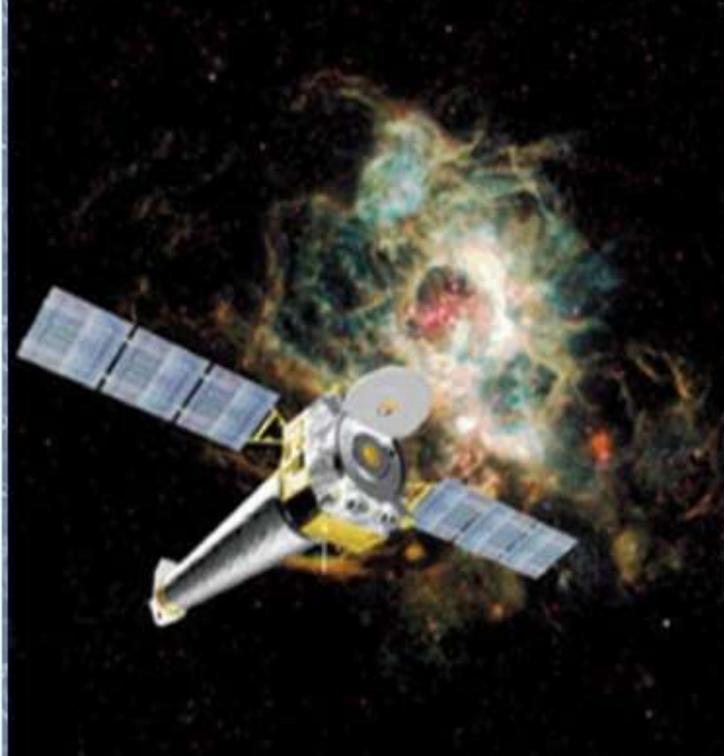
- Nicht direkt beobachtbar aber verheerende Wirkung auf Umgebung!!
- Spektror-relativistische Verifikation: Umgebung heizt sich auf, Röntgenstrahlung, Emissionslinien (Eisen, Nickel, Chrom) die in unmittelbarer Nähe des SL entstehen, Profile der Spektrallinien verraten viel über die physikalischen Eigenschaften des Systems; aus dem Linienprofil die Neigung der kalten Standardscheibe der kalten Standardscheibe ableiten, den Rotationszustand des Schwarzen Loches folgern, die Ränder der Standardscheibe bestimmen oder etwas über das Geschwindigkeitsfeld des Plasmas erfahren

Tomley, Miller & Pariev 1998, Nature 391, 54; turbulente Schwarzschild-
scheibe, Ursprung der Fe-Linie, Simulation

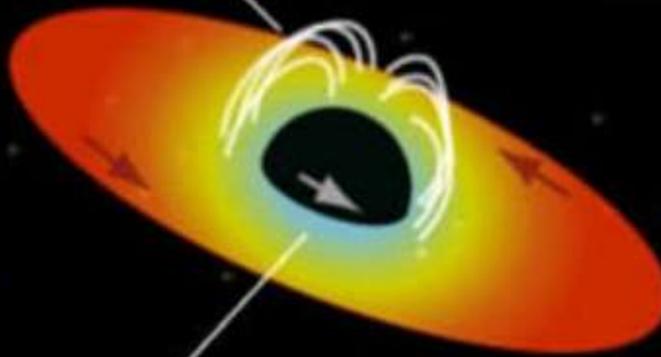


- * c) Entdeckung sehr breiter, durch Gravitation rotverschobener Röntgenemissionslinien in MCG-6-30-15 (Tanaka et al. 1995)



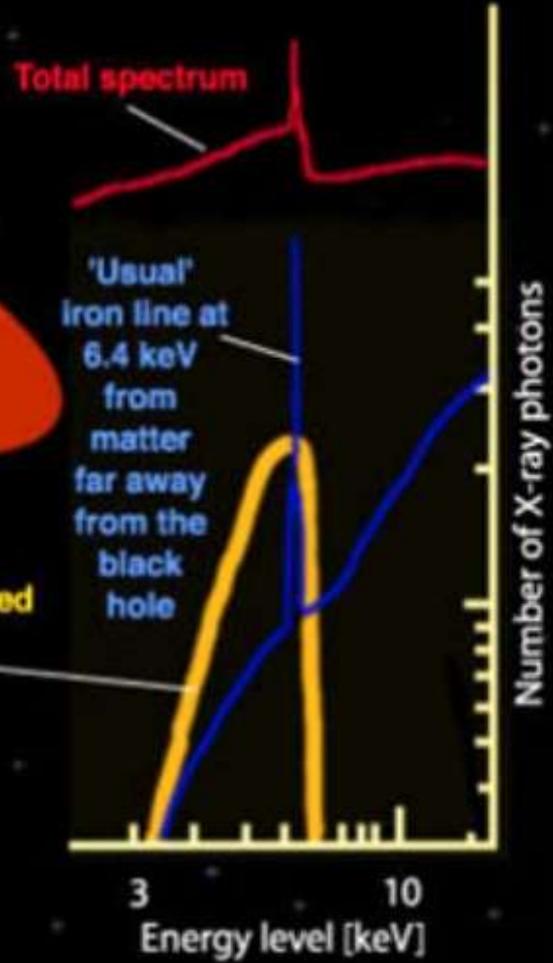


Rotating black hole in magnetic field releasing energy to inner areas of accretion disk ?



Iron nearest to being swallowed by the black hole believed to produce the strong, broad line which is fully revealed by XMM-Newton

The surprising spectrum from MCG-6-30-15



Beobachtung Schwarzer Löcher

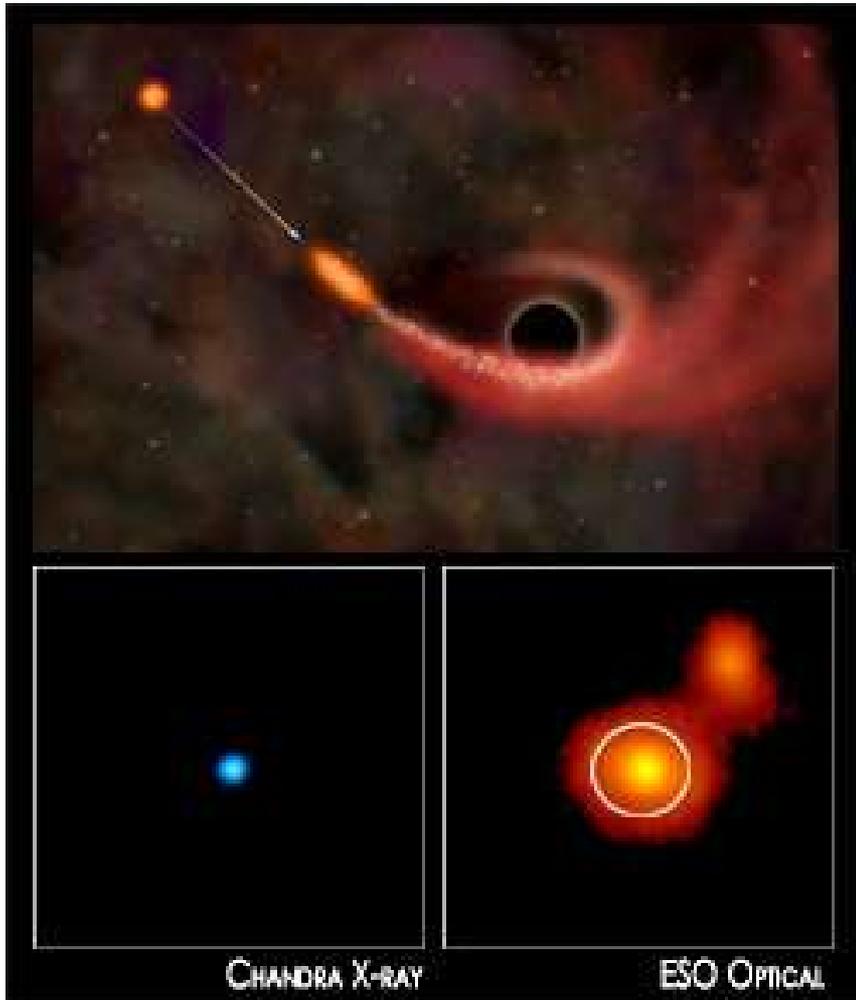
- Nicht direkt beobachtbar aber verheerende Wirkung auf Umgebung!!

- Eruptive Nachweismethode: Röntgenflares, wenn Sterne sich dem Loch bis auf den Gezeitenradius nähern, bis zu 110 Mio Sonnenmassen, GRB

Zur Geschichte Schwarzer Löcher

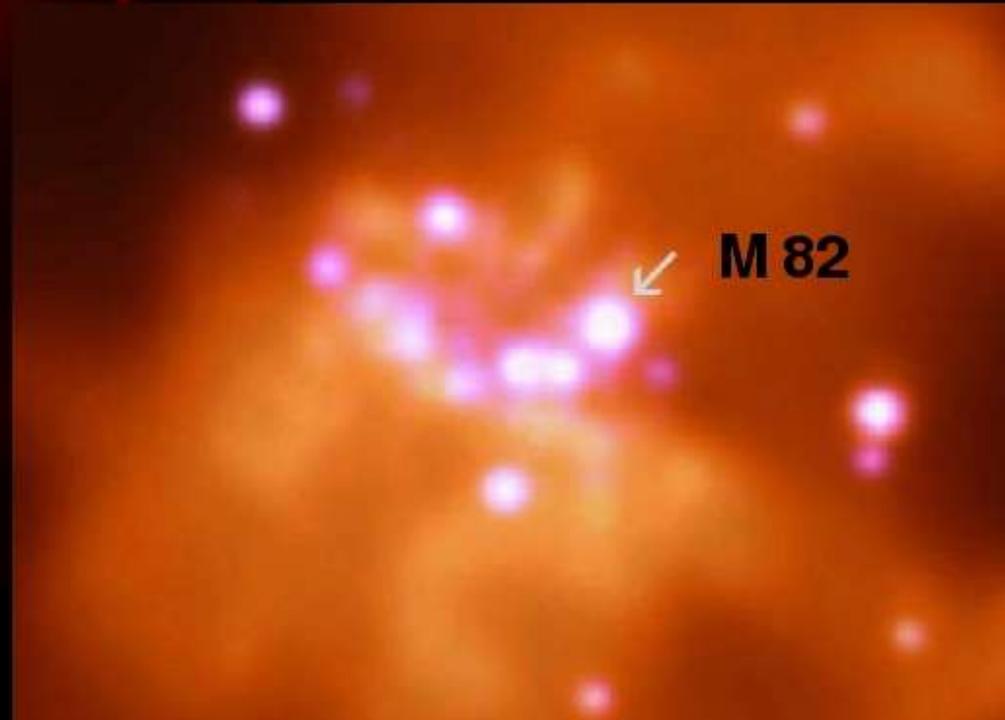
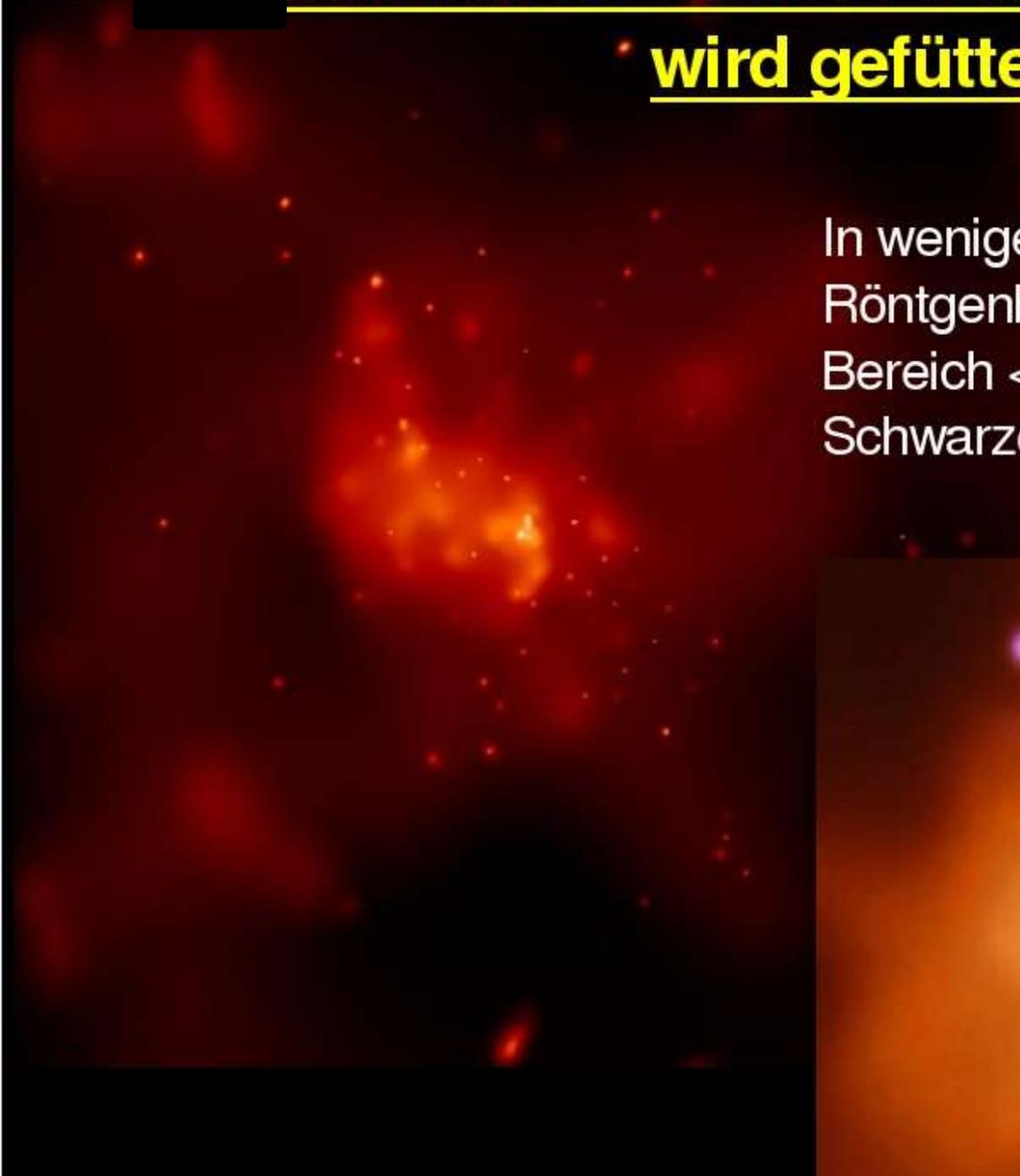
- S. Komossa, 2004, Beobachtung Zerriss eines Sterns unter verheerender Wirkung von

ermassereichen



Schwarzes Loch in unserer Milchstraße wird gefüttert

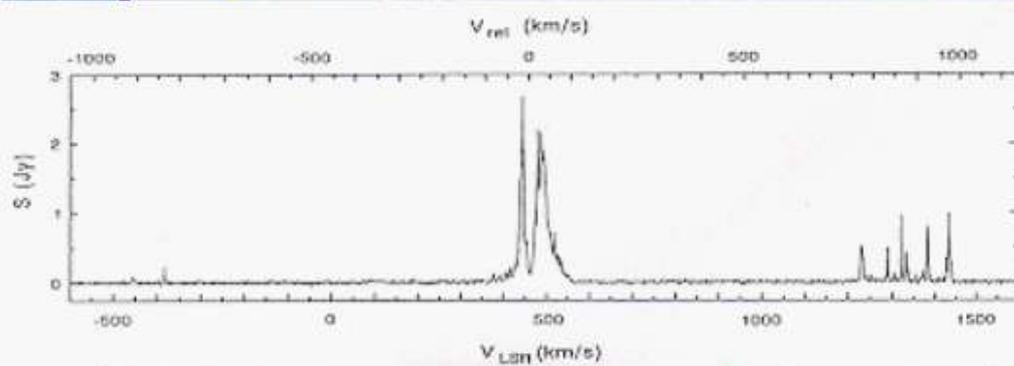
In wenigen Minuten 45 Mal heller im Röntgenbereich ! 10 Minuten Pause, Bereich < 15 Mio km !! -> Größe des Schwarzen Lochs?



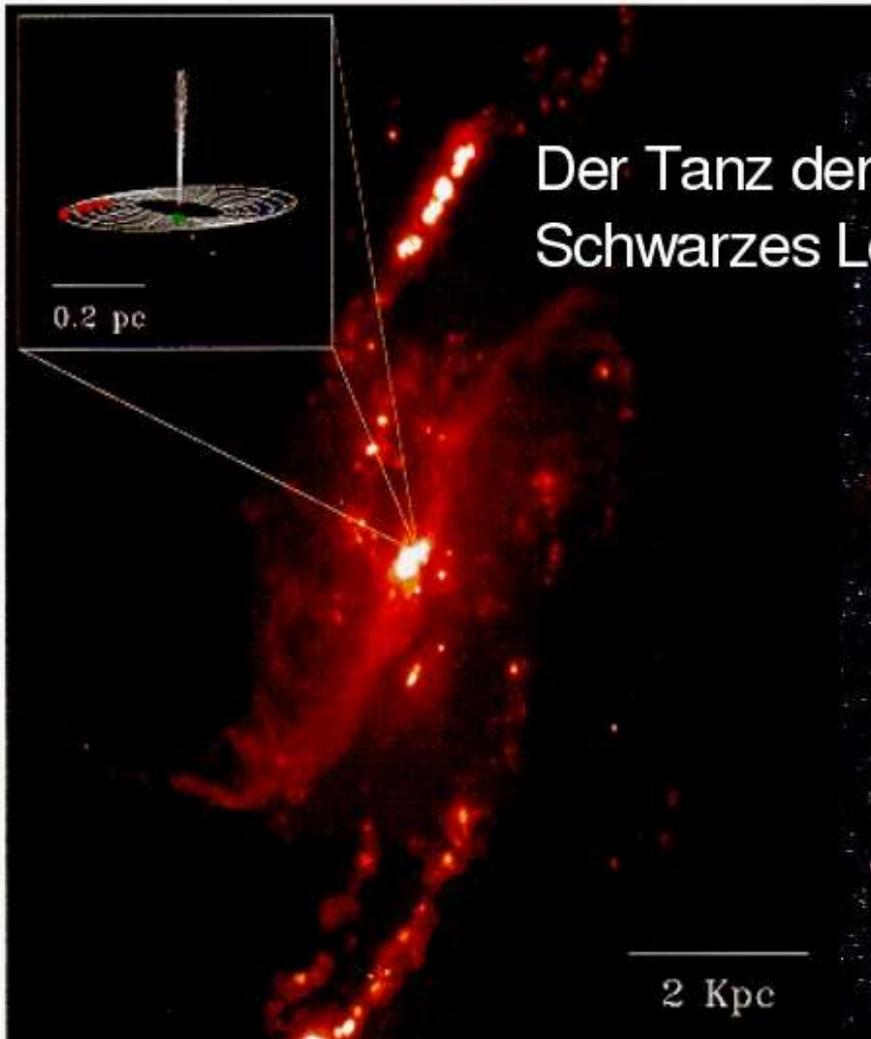
Beobachtung Schwarzer Löcher

- Nicht direkt beobachtbar aber verheerende Wirkung auf Umgebung!!

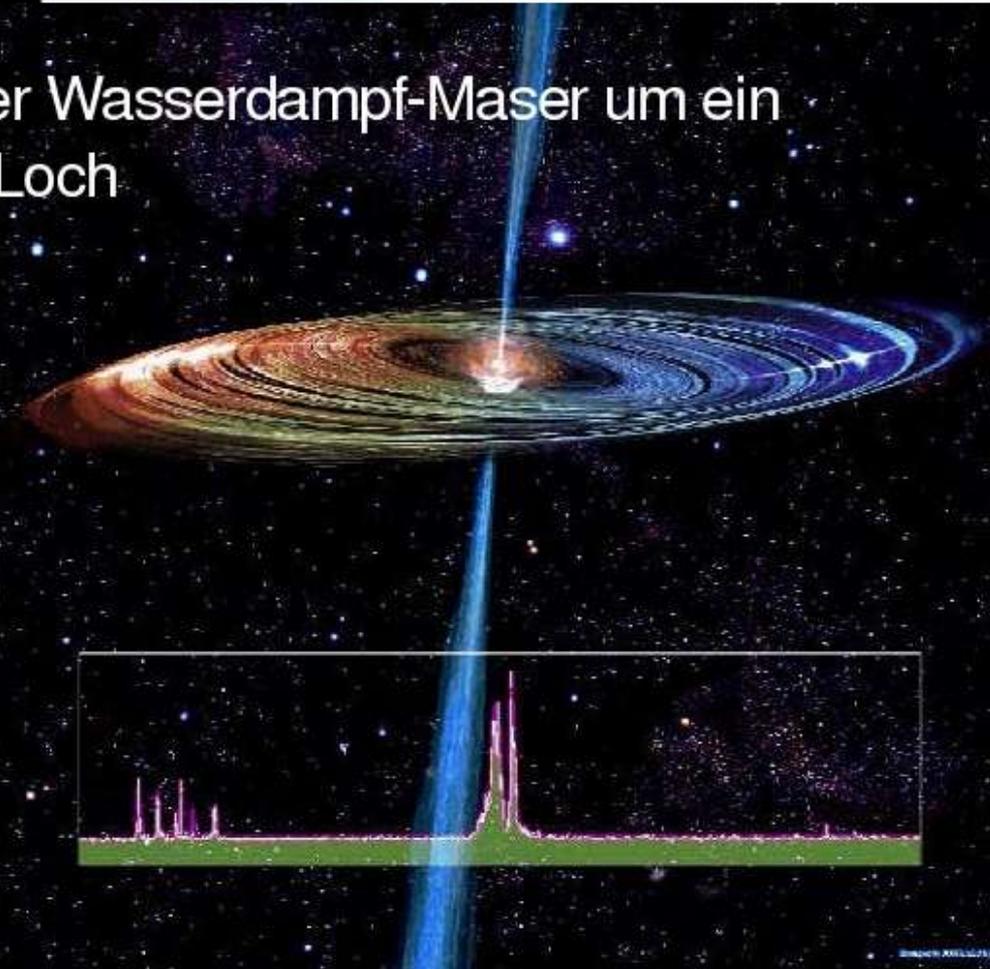
- Kinematische Methode: vermisst die Bahnen von Sternen, Bsp. Sagittarius A*



★ b) Megamaser Kinematik in M106 (Miyoshi et al. 1995); NGC4258; natural microwave amplifier=MASER (1982); 40 Mio Sonnenmassen



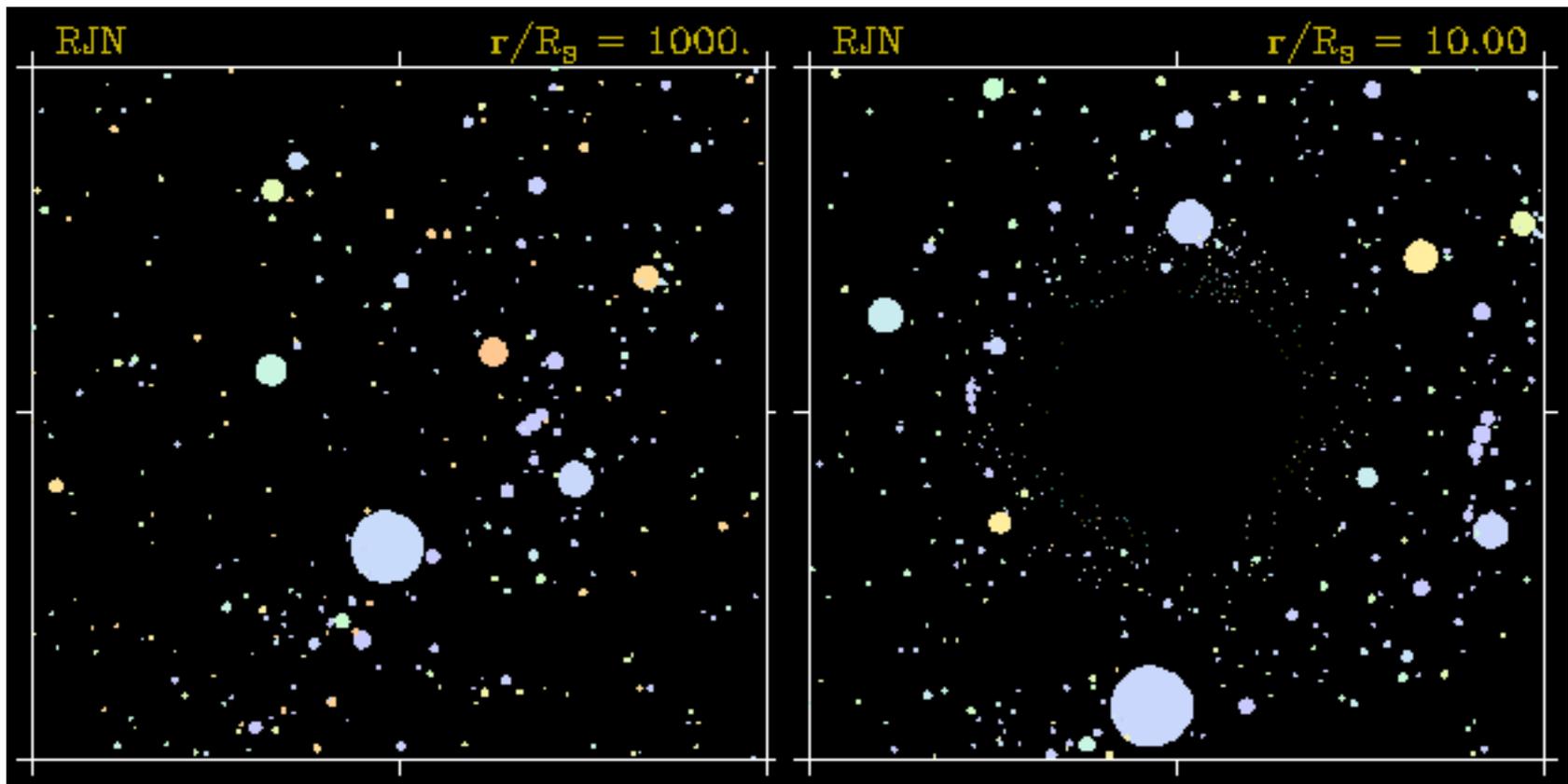
Der Tanz der Wasserdampf-Maser um ein Schwarzes Loch



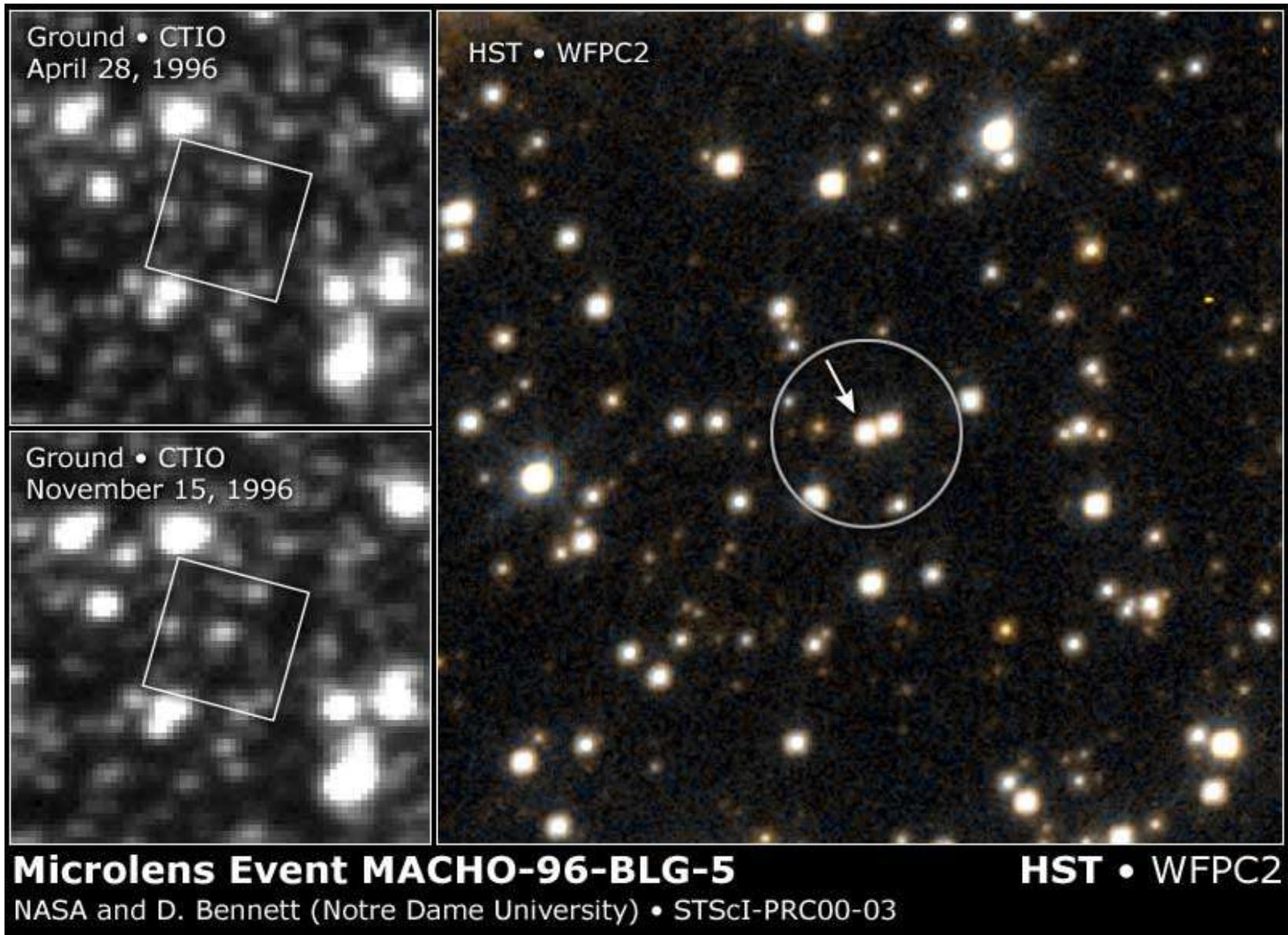
2 Kpc

Beobachtung Schwarzer Löcher

- **Aberrative Methode:** SI können durch ihre tiefen Potentialtöpfe die Richtung von Strahlen ablenken, Lensing, Gravitationslinse



**Computererzeugt, Sternbild Orion, Beugungseffekt der
Gravitationswirkung des Schwarzen Lochs**



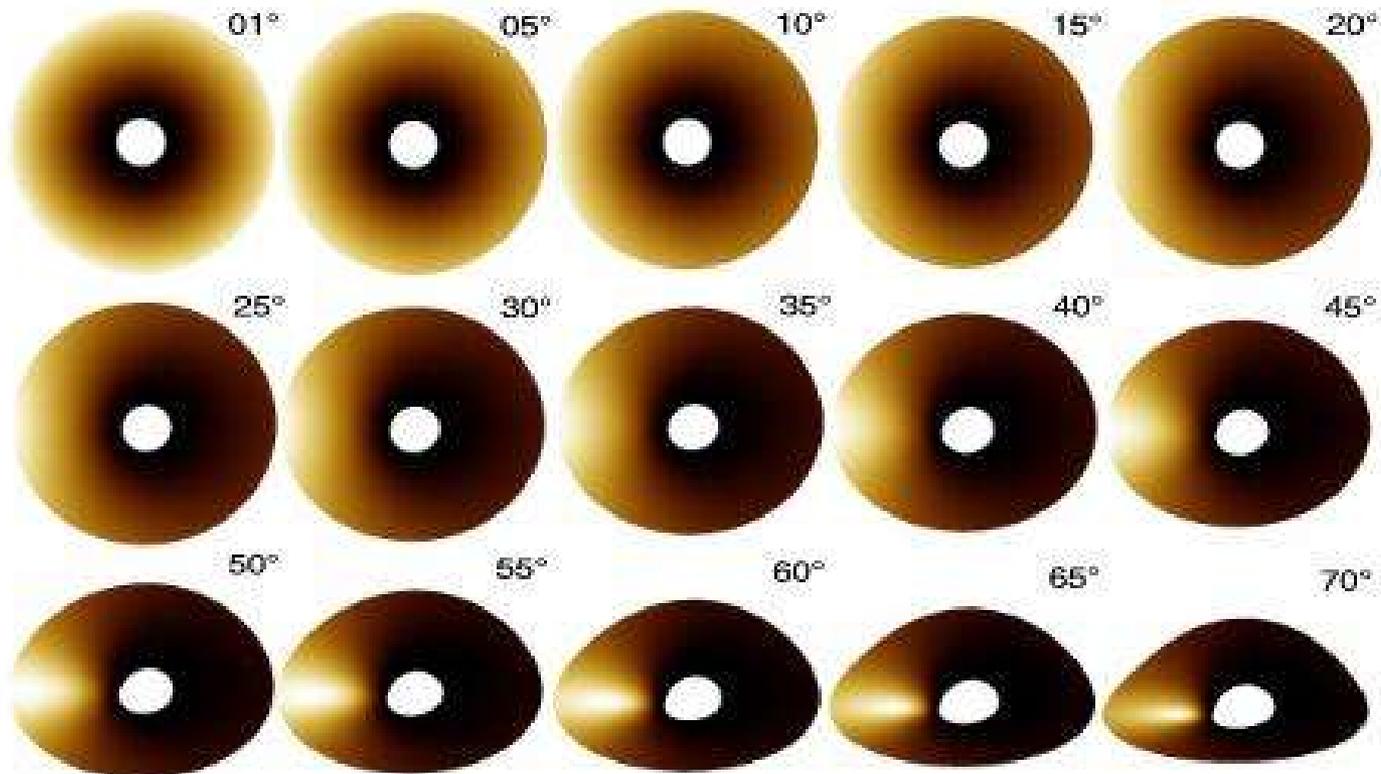
Mysteriöses dunkles Objekt unserer Galaxie, dass vor dem Hintergrund entfernter

Sterne treibt und durch seine Wirkung als Gravitationslinse deren Licht dramatisch verstärkt.

Beobachtung Schwarzer Löcher

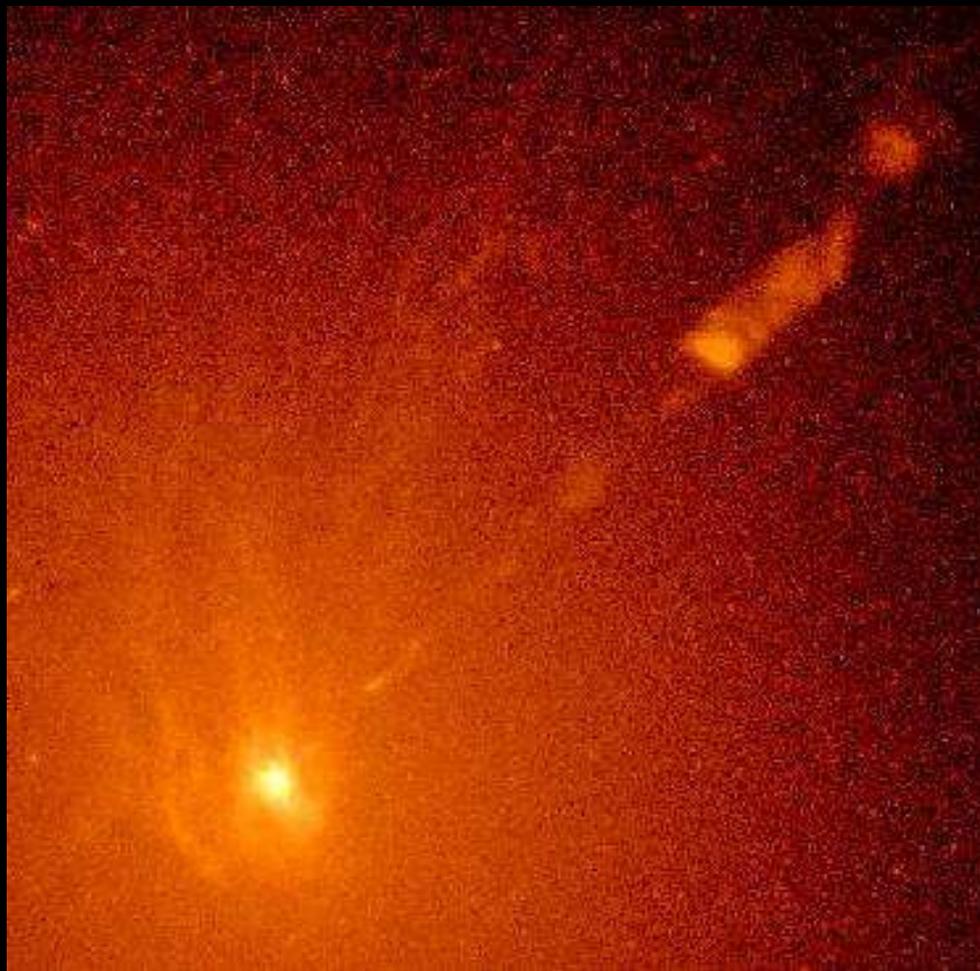
- Obskursive Verifikation: die Absorption der Strahlung am Ereignishorizont mit Hilfe von

The **Shadow** of Kerr Black Holes



Beobachtung Schwarzer Löcher

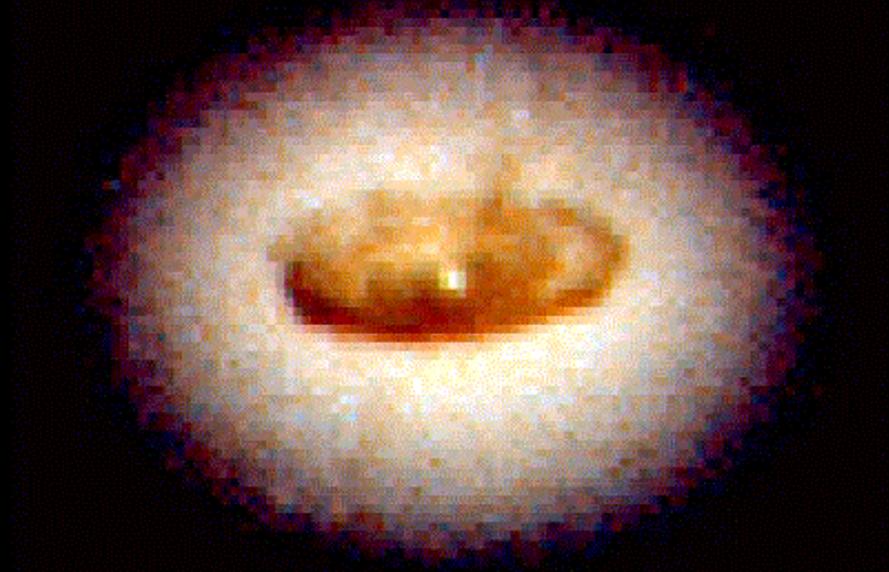
- **Akkretive Verifikation:** Gas heizt sich bei Akkretion auf, Heizung erfolgt über Turbulenz und dissipative Viskosität, die in den Feldern gespeicherte Energie wird auf das Plasma in Form kinetischer Energie übertragen. Ein großer Teil des strömenden Plasmas wird vom SL aufgesammelt, reichert es mit noch mehr Masse an und vergrößert es damit, das Gas leuchtet dabei in allen Spektralbereichen und sorgt für die typischen enormen Leuchtkräfte aktiver Galaxienkerne



Zentrum unserer Nachbargalaxie M87, 1994 HST entdeckt

Scheibe aus heißem Gas, die das Zentrum der Galaxie umkreist

Scheibe erkennbar im linken unteren Bildteil



Core of Galaxy NGC4261

HST · WFPC2

PRC95-47 · ST ScI OPO · December 4, 1995
H. Ford and L. Ferrarese (JHU), NASA

Das Bild zeigt den Kern der Galaxie NGC 4261.

Im Zentrum befindet sich wahrscheinlich ein Schwarzes Loch, das von einer 800 Lichtjahre großen Spiralscheibe aus Staub umrundet wird.