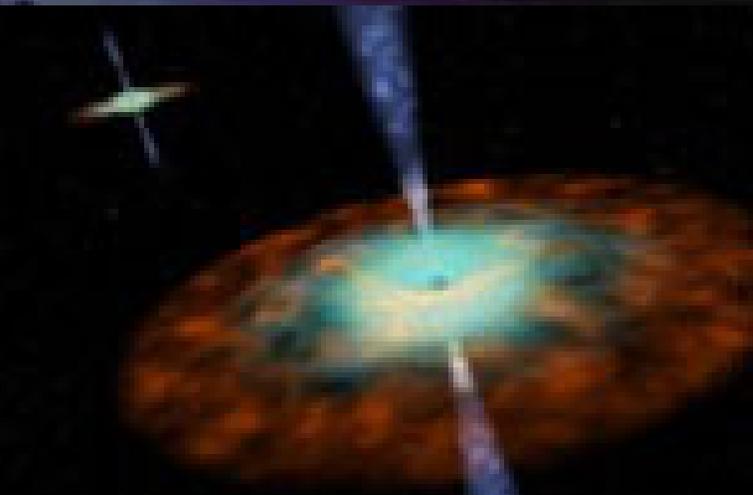


# Schwarze Löcher

## Neue Ergebnisse und Spekulationen



# „Brennpunkte extragalaktischer Forschung“ Themen

- **04.11.2005 Fragen an die moderne Radioastronomie**
  - Eine neue Generation von Radioteleskopen, Aktive Galaxienkerne
- **18.11. Das hochenergetische Universum**
  - (TeV-Blazare & Kosmische Strahlung)

- **16.12. Schwarze Löcher:**

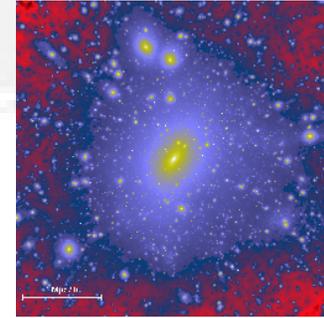
## Neue Ergebnisse und Spekulationen



- **13.01.2006 Mikrowellenhintergrund**
- **27.01.2006 Dunkle Rätsel im Universum**
- **10.02.2006 Die Zeit vor dem Urknall**

# Aktive Galaxienkerne & ihre Auswirkungen

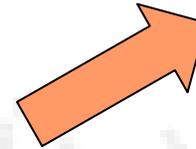
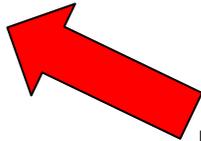
**Koevolution Schwarze Löcher - Galaxien**  
**Strukturbildung im Universum**  
Galaxienbildung



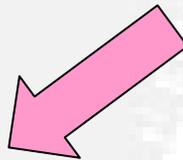
**Dunkle Materie**  
Quasar Halos  
WIMPS ?

**Aktive Galaxienkerne**

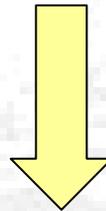
**Frühphase des Universums:**  
**Reionisation**  
LOFAR / SKA



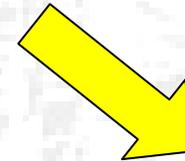
**Kosmische Strahlung**  
Jets als Beschleuniger  
Exotische Teilchen



**TeV-Strahlung**  
Blazare  
Hintergrundstrahlung



**Schwarze Löcher**  
Relativitätstheorie  
„Quantengravitation“



# Übersicht

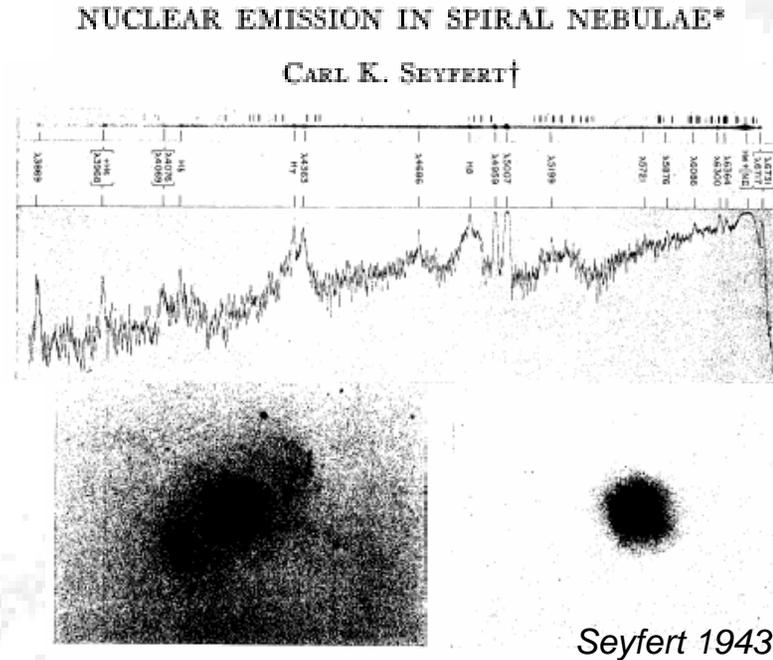
- Aktive Galaxienkerne / Schwarze Löcher
  - Kurze Historische Einführung / Das Paradigma
  - Aktive Galaxienkerne: statistisch/Multifrequenzuntersuchungen
    - Ausgewählte Durchmusterungen
    - Kinematik aktiver Galaxienkerne
    - Korrelationsuntersuchungen Radio/optisch/Röntgen/ $\gamma$ /TeV
- Schwarze Löcher
  - Schwarze Löcher historisch
  - Wie sie funktionieren
  - Bistlang: Indirekte Evidenz für ihre Existenz
  - In Zukunft: Direkt detektieren -> Schatten des schwarzen Lochs
- Koevolution: Galaxien – Schwarze Löcher
  - Hinweise auf Koevolution
  - Die Suche nach mittelschweren Schwarzen Löchern
  - Das hierarchische Szenario: Binäre Schwarze Löcher
  - Aktive Galaxienkerne als *Phase* der Galaxienentwicklung



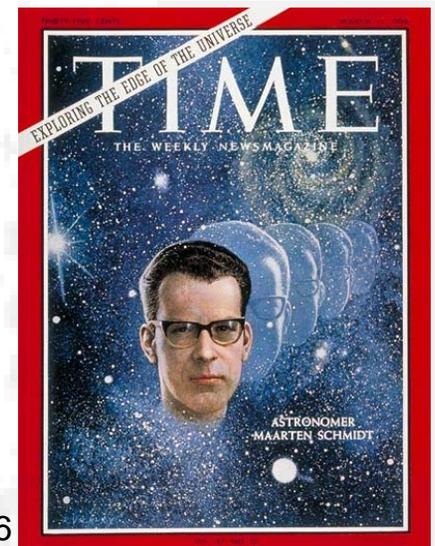
# **Aktive Galaxienkerne**

# Aktive Galaxienkerne (AGK) / Historisch

- **H. D. Curtis (1918):** "curious straight ray apparently connected with the nucleus by a thin line of matter"
- **Carl K. Seyfert (1943):** Spiralgalaxien, deren helle („stellare oder semistellare“) Kerne Strahlung mit einem Emissionslinienspektrum und charakteristisch breiten Emissionslinien aufweisen
- **C. Hazard (1963):** Mondbedeckung erlaubt genaue Positionsbestimmung der Radioquelle 3C273.
- **M. Schmidt (1963):** leitet die Rotverschiebung anhand des Spektrums der Quelle 3C273 ab: Kern einer Galaxie, welche sich mit 170 Millionen km von uns wegbewegt. Quasistellares Objekt.
- **AGK: höchstenergetische Objekte im bekannten Universum und prominente Objekte in vielen Wellenlängenbereichen**

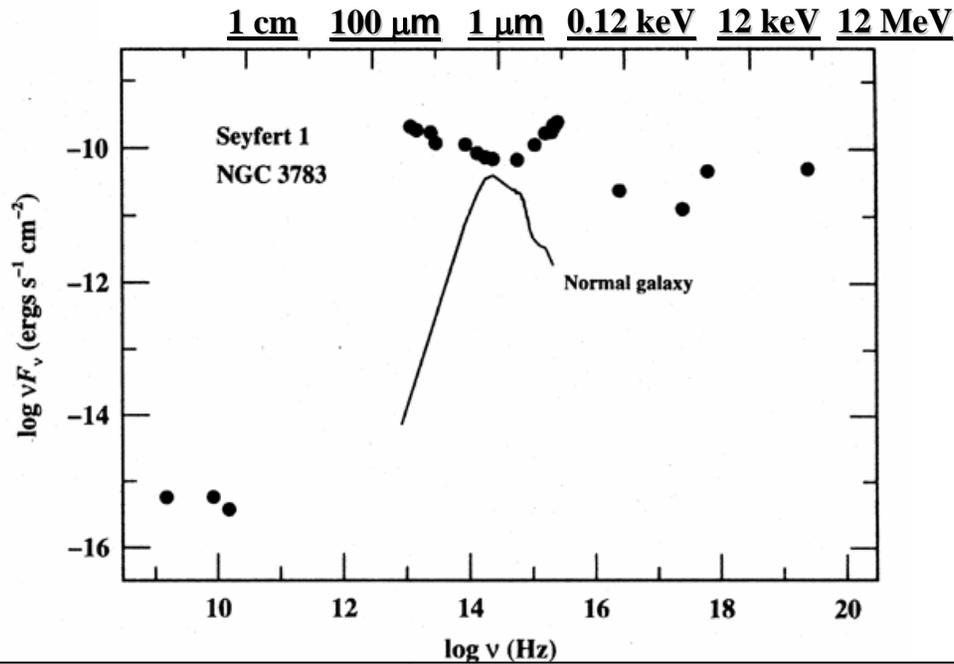


NGC 4151

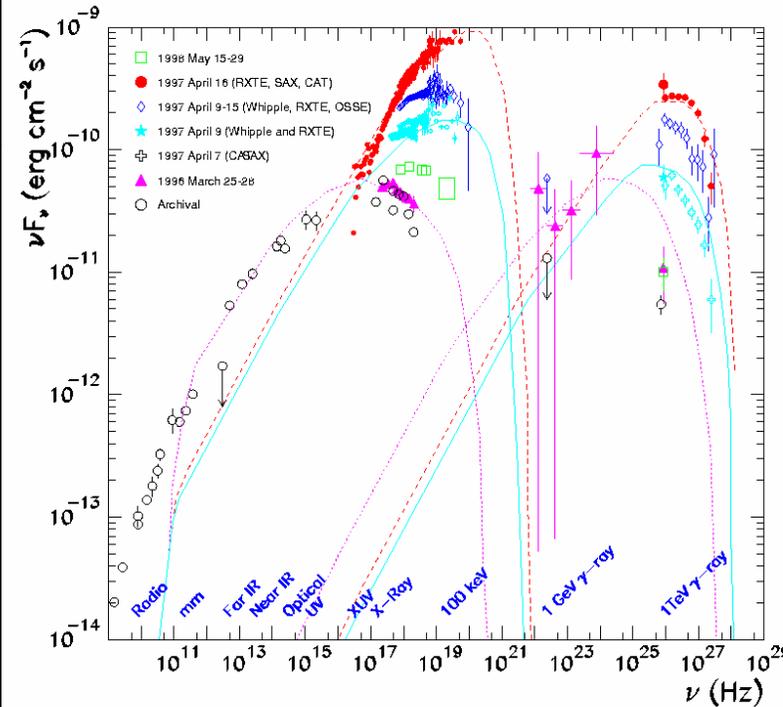


11.03.1966

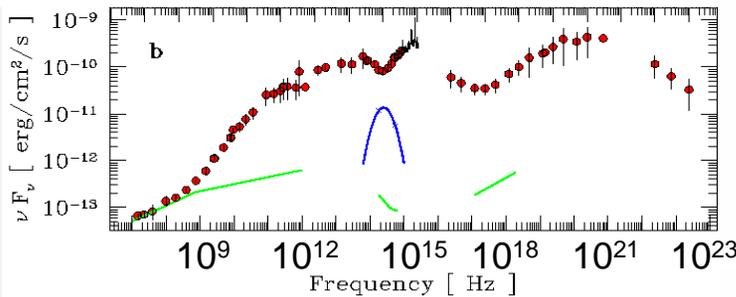
# Aktive Galaxienkerne / Spektrale Energieverteilung



## Mkn 501

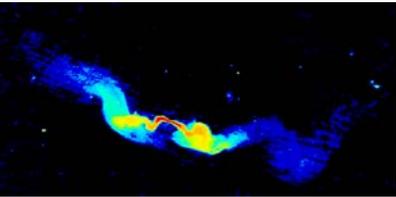


## Quasar 3C273



# Aktive Galaxienkerne / Vereinheitlichung / Mögliche Eigenschaften

„Ungebeamte“ Population

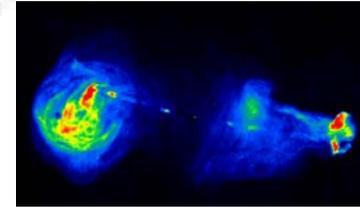


## Radiogalaxien

### Fanarof-Riley I, Fanarof-Riley II

geringe Leuchtkraft

hohe Leuchtkraft



„Gebeamte“ Population

BL Lac Objekte

Quasare (radio-laut)

## Radio-leise AGK

Seyfert I

Seyfert II

geringe Leuchtkraft

Quasare (radio-leise)

hohe Leuchtkraft

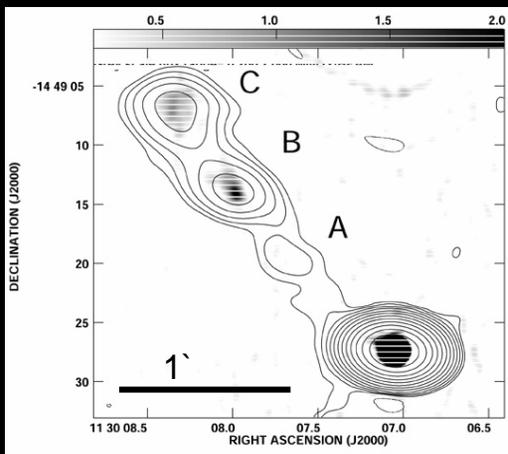
**Außerdem: Starbursts, LINER (Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions), ULIG (UltraLuminous Infrared Galaxies), Nuclear H II Regions**

Breit-Band Kontinuum, Starke Emissionslinien, Variabilität, Schwache Polarisation, Radiostrahlung, Jets (Radio, Optisch, Röntgen), Supermassive Schwarze Löcher, etc.

# Zwei aktive Galaxienkerne:

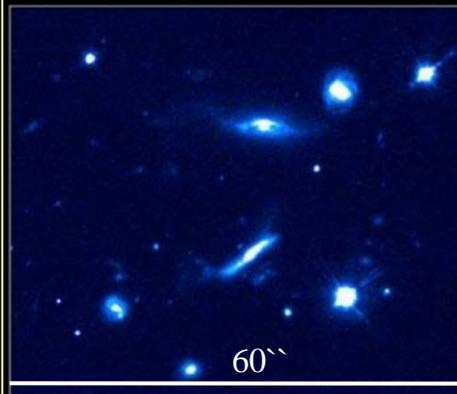
## Quasar PKS 1127-145 ( $z=1.187$ ), Quasar 3C273 ( $z=0.158$ )

VLA, MERLIN



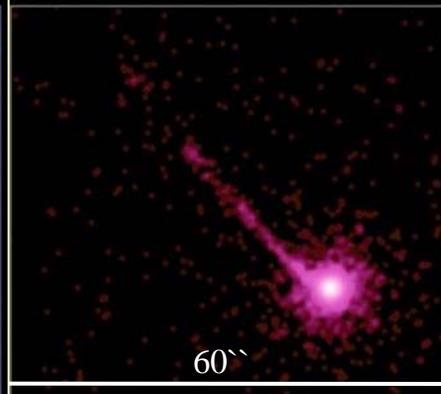
Siemiginowska et al. (VLA)

HST



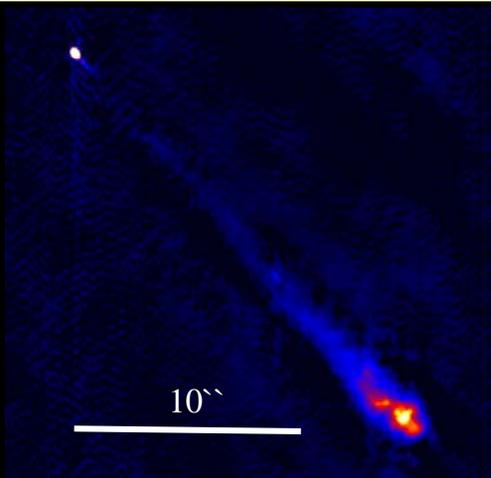
A. Siemiginowska (CfA) & J. Bechtold (U. Arizona), et al., NASA

CHANDRA

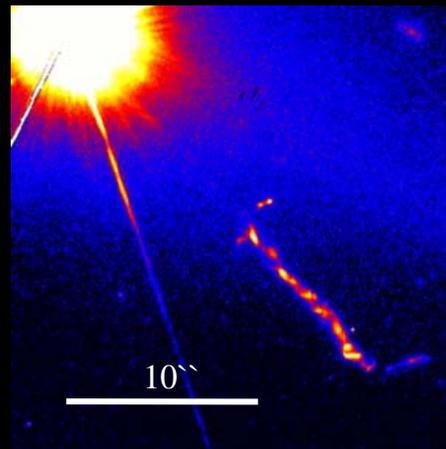


EGRET

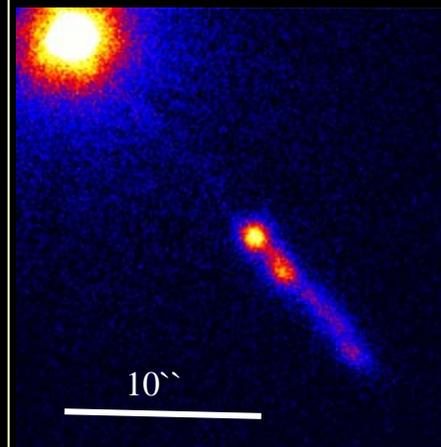
Detektiert,  
leider kein Bild



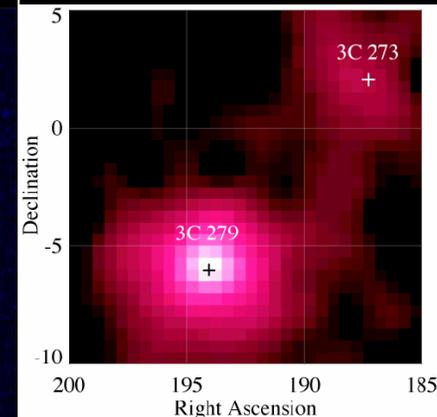
MERLIN



NASA/STScI



NASA/CXC/SAO  
/H. Marshall et al.



NASA/CGRO

# Still hazy after all these years

Was Lucy a member of an extinct branch of hominids, a dead end of primate development? Or is she the Eve from which homo sapiens springs.

5. What happened to Lord Lucan? Did he cast himself into the waters of the Channel from a car ferry or did he escape from England, change his appearance and live on in secret in South America?

6. Precisely how does the human brain work? We know much about the map of the cerebral nervous system and the hormones secreted by the brain, but the operation of our intelligence, memory, moods and emotions is still largely mysterious. There is no explanation for our dreamlife or for the mechanisms involved in the basement of cerebral activity, the subconscious.

7. When and how did Adlai Stevenson die and where were his remains deposited? Were they simply buried in the inferno of the Soviet Union or were they taken to Moscow by the Soviets?

8. Why did the dinosaurs die out? Do we expect meanings?

6,000 degrees cooler than the sun's surface. But we don't know why they occur in an approximate cycle of 11.5 years and we don't understand why they affect our climate.

12. What is going on in Cygnus A, the distant double galaxy which is distinguished by extraordinary levels of radio wave emission, luminosity and a speed of recession estimated to be 16,000 kilometres per second? At first we believed that this activity was the result of a collision between the two elements of the double galaxy. Now we think that the energy source lies between the two galaxies and is the parent of two enormous plasma clouds. What can this energy source be?



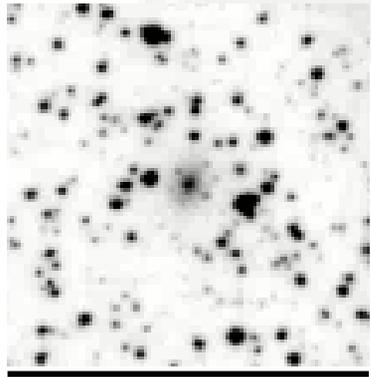
Will o' the wisp . . . S



THE GUARDIAN  
Thursday January 7 1993



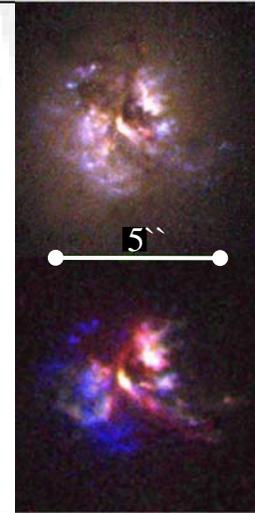
# Aktive Galaxienkerne / Cygnus A



3"  
Palomar 48-inch Schmidt

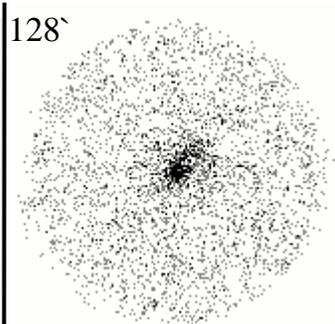


Erste Aufnahme von Walter Baade  
mit dem 200" Hale-Reflektor

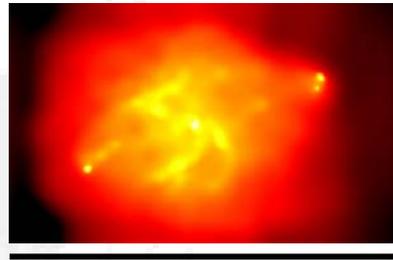


HST

optisch

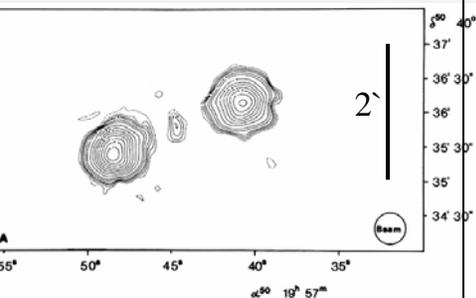


ROSAT, 0.1-2.4keV 1995

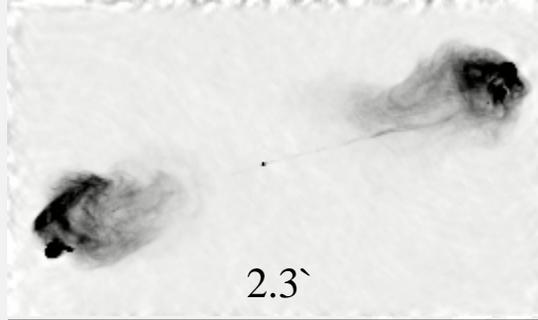


3.3"  
CHANDRA, 0.1-10keV 2003

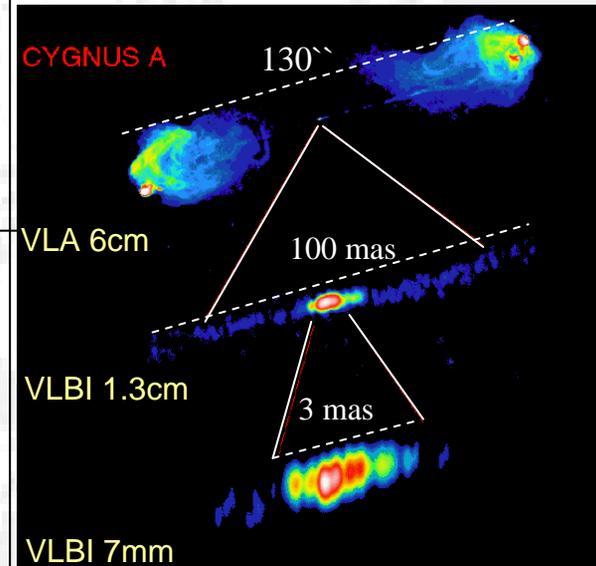
Röntgen



Effelsberg, 8.5 mm, 1976



VLA, 6cm



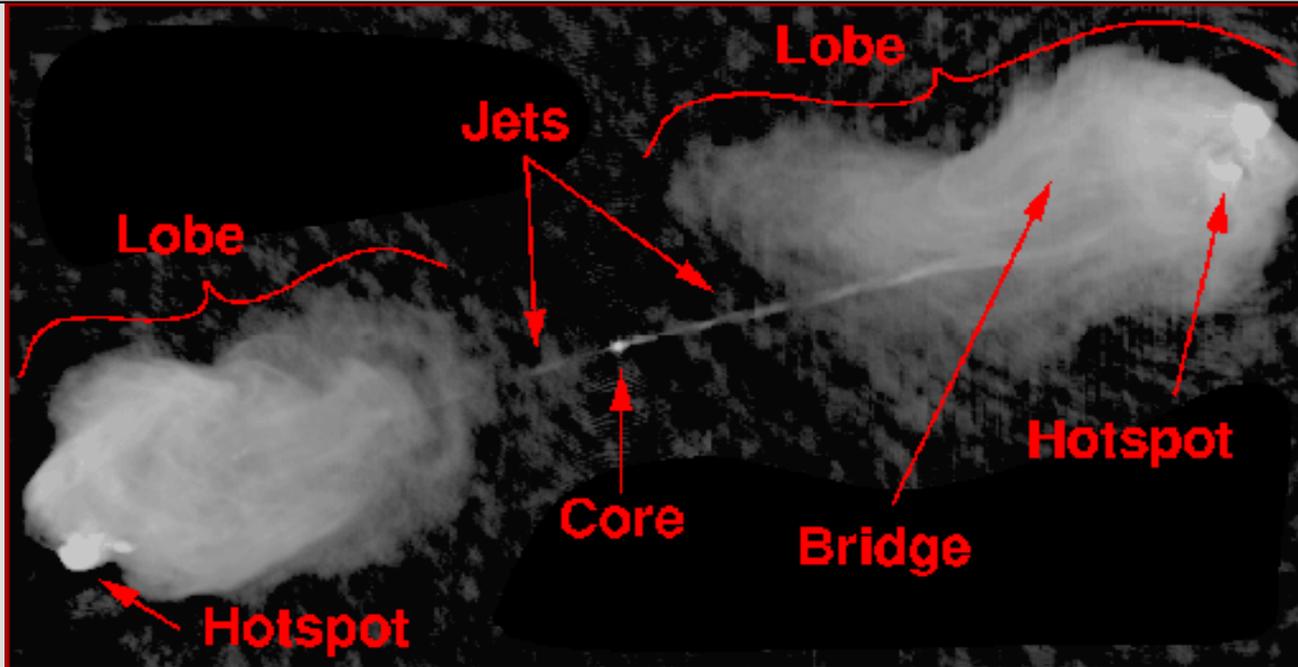
VLA 6cm

VLBI 1.3cm

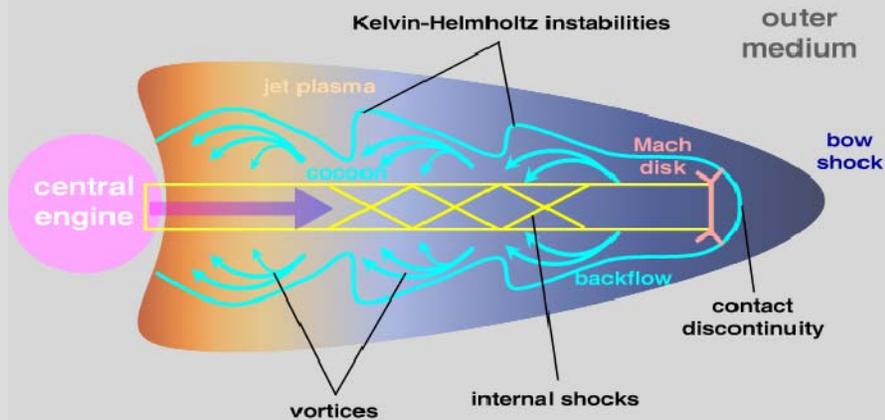
VLBI 7mm

Radio

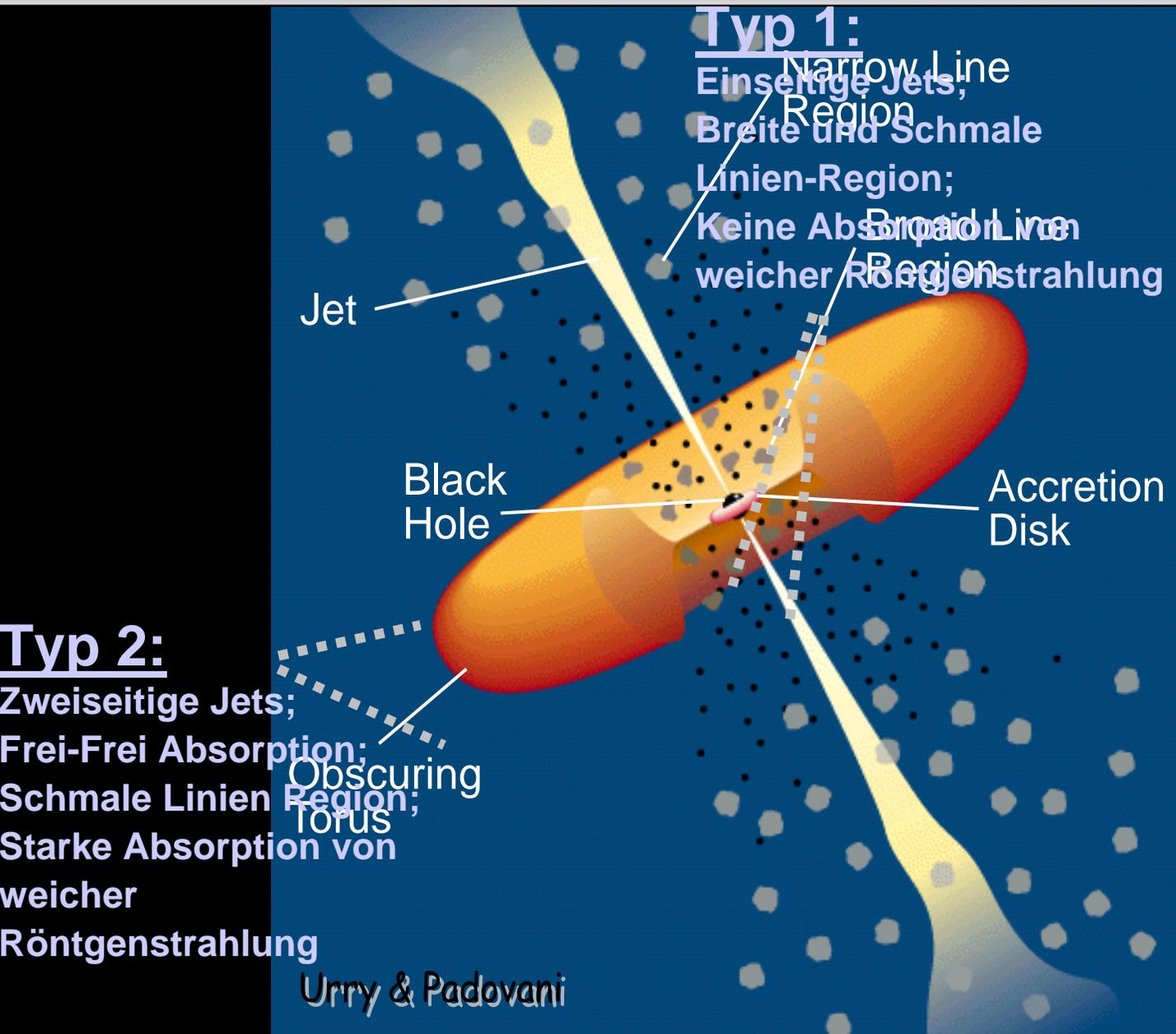
# Aktive Galaxienkerne / Cygnus A



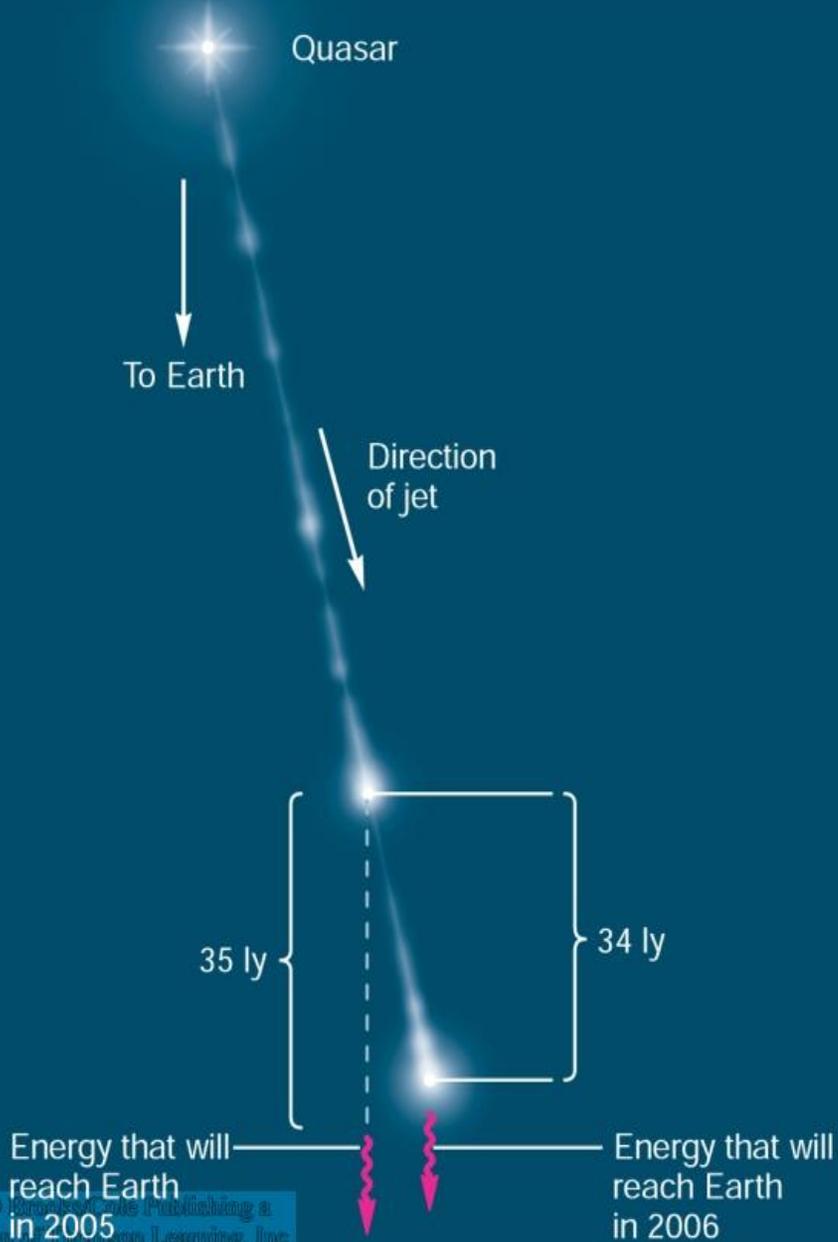
## Jet propagation



# Paradigma der Aktiven Galaxienkerne



# Beaming / Boosting



- Beaming verändert
  - die Geschwindigkeit
  - Flußdichte
  - Variabilität
  - etc.

$$L_{\text{app}} = \delta^4 L$$

$$\delta = \gamma^{-1} / (1 - \beta \cos \theta)$$

$$\beta_{\text{app}} = \beta \sin \theta / (1 - \beta \cos \theta)$$

# Strahlung Aktiver Galaxienkerne

**Jets:** Radio,  
optisch, Röntgen,  
Gamma

**Galaxie:** alle  
Bänder

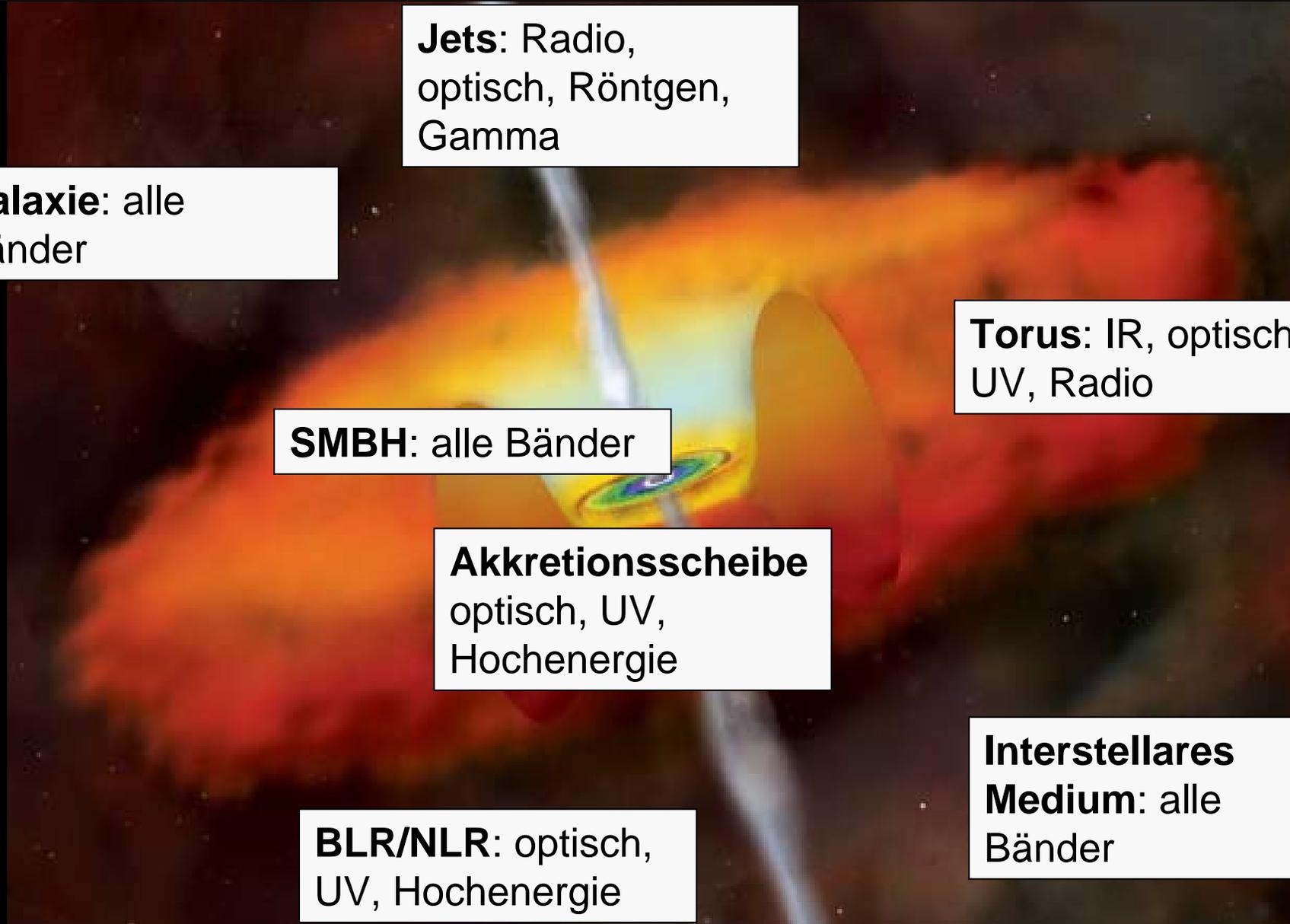
**Torus:** IR, optisch,  
UV, Radio

**SMBH:** alle Bänder

**Akkretionsscheibe**  
optisch, UV,  
Hochenergie

**BLR/NLR:** optisch,  
UV, Hochenergie

**Interstellares  
Medium:** alle  
Bänder



# Aktive Galaxienkerne / Typische Parameter

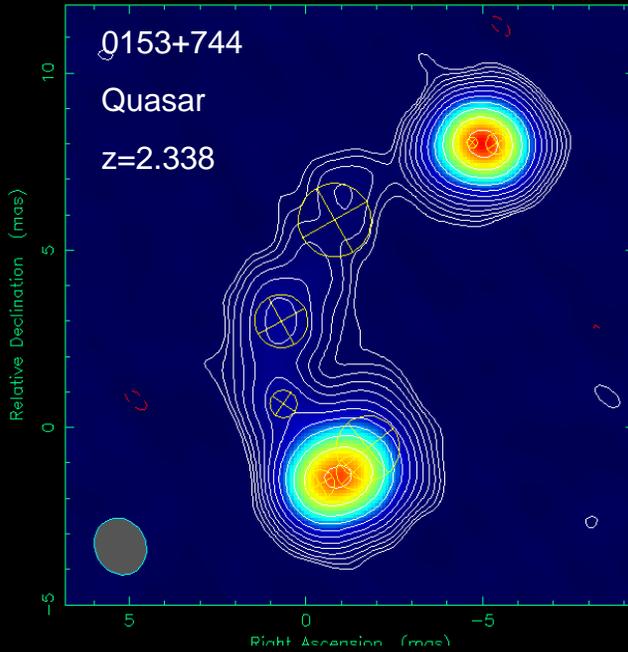
Leuchtkraft	$10^{43} - 10^{46}$ erg/sec
Masse der Schwarzen Löcher	$10^6 - 10^9$ $M_{\text{Sonne}}$
Schwarzschildradius	3 km/ $M_{\text{Sonne}}$
Jet Länge	- $10^6$ Lichtjahre
Jet Öffnungswinkel	einige Grad
Jet Geschwindigkeit	nahe $c$
Variabilität (Radio – TeV-Bereich)	Minuten - Monate

# Ausgewählte Durchmusterungen

		Frequenz	Anzahl	
Radio	NVSS	1.4 GHz	2 000 000	VLA-Karten
	FIRST	1365 & 1435 MHz	811 000	1mJy
	WENSS	326 & 612 MHz	300 000	nördlich Deklination 30
	MPI-NRAO	5 GHz	518	>1Jy, Radio-Sp., Pos., opt.
	3CR	178 MHz	471	
Optisch	SDSS II / SEGUE			Universum, Milchstraße, DE
	SDSS	3551, 4686, 6165, 7481, 8931Å	~200 000 000	25% des Himmels, Rotversch.
	2dF		245 591	>23 000 QSOs, z~0.1
Röntgen	CHANDRA			
	CDF-N	0.5-8 keV	600	
	CDF-S	0.5-8 keV	800	
	ROSAT/ RASS	0.1-2.4 keV	~150 000	
Gamma	EGRET	> 30 MeV	271	67 Blazare, 27 Kandidaten

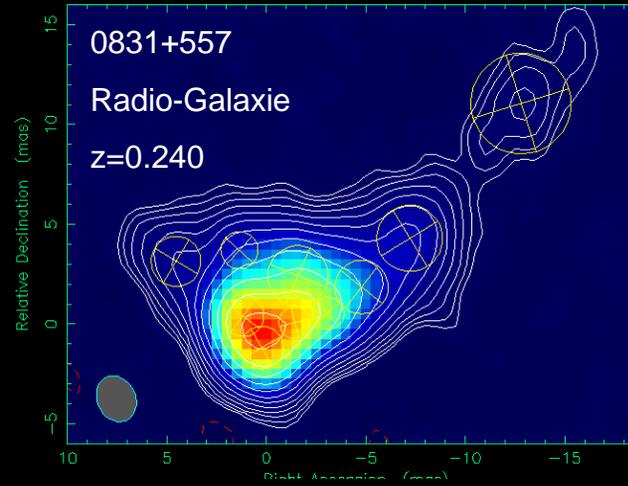
# Aktive Galaxienkerne / pc-Morphologien

Clean LL map. Array: BFHKLMNOPS  
0153+744 at 4.991 GHz 1996 Aug 24

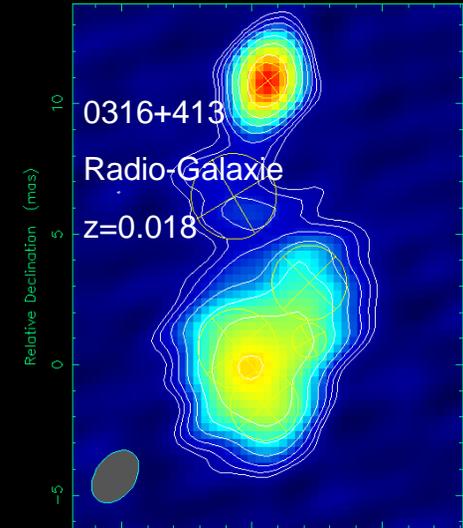


*Britzen et al., A&A; accepted*

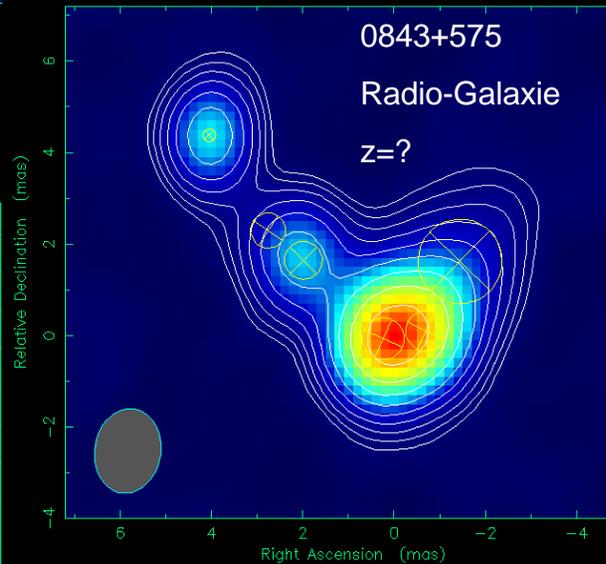
Clean LL map. Array: BFHKLMNOPS  
0831+557 at 4.991 GHz 1996 Aug 25



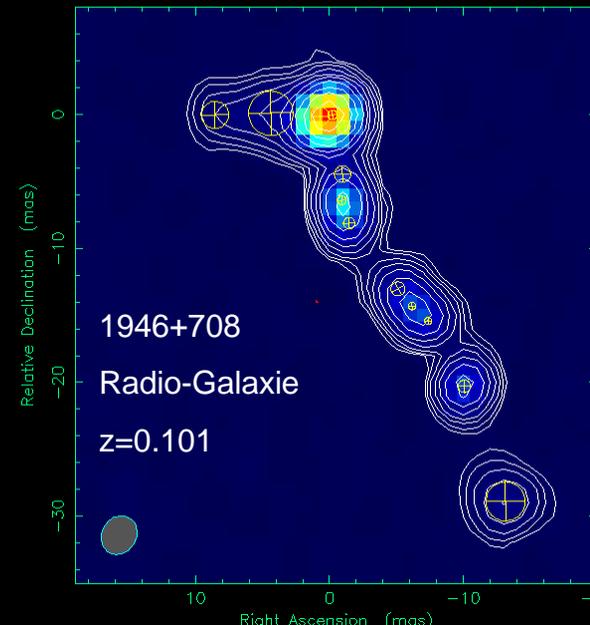
Clean I map. Array: BFHKLMOP  
0316+413 at 4.995 GHz 1999 Nov 22



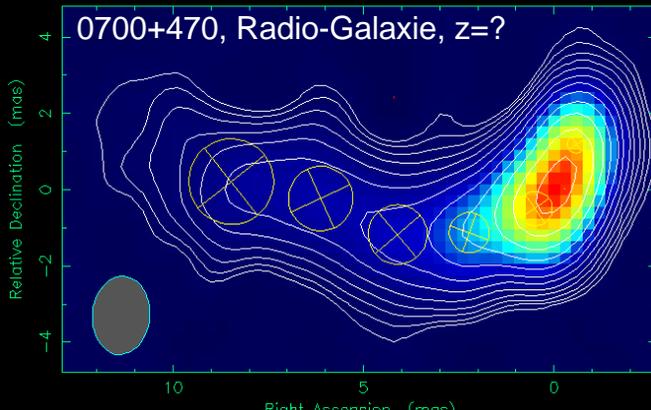
Clean LL map. Array: BFHKLMNOPS  
0843+575 at 4.991 GHz 1995 Aug 25



Clean I map. Array: BFHKLMNOPS  
1946+708 at 4.995 GHz 1998 Feb 08

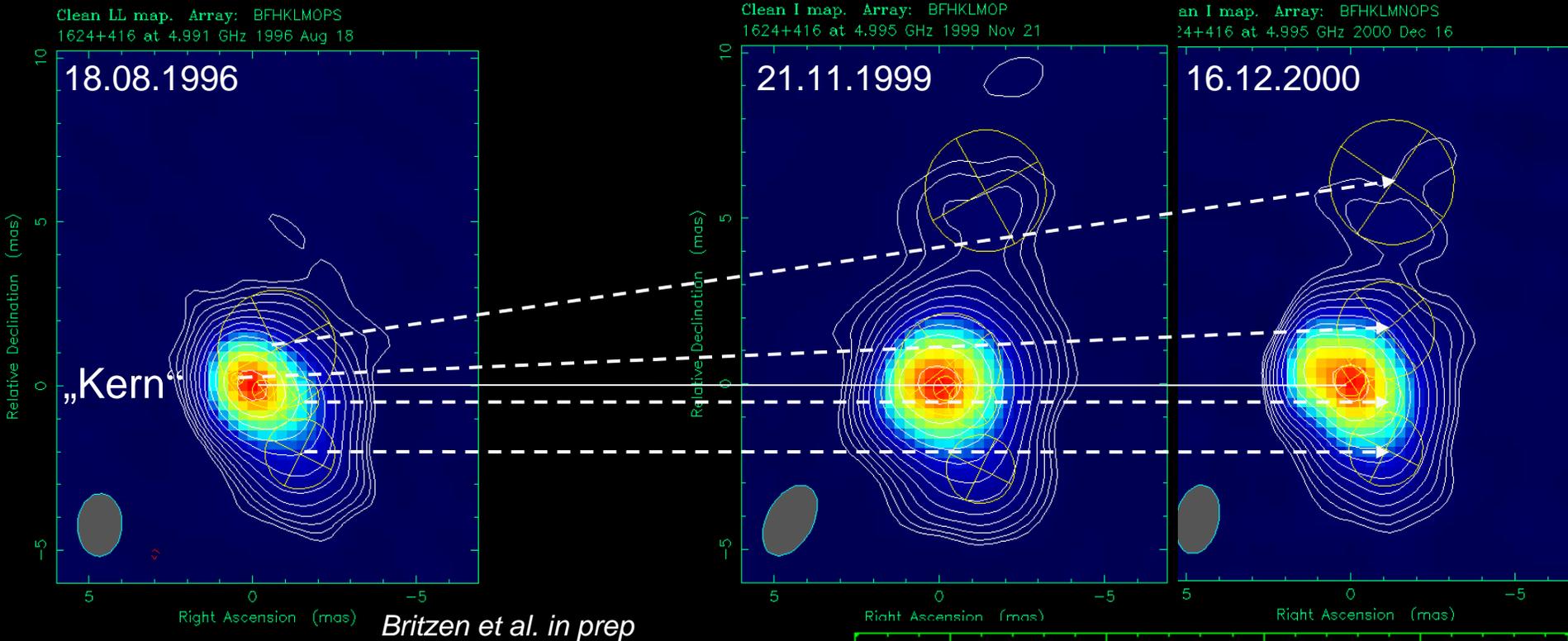


Clean LL map. Array: BFHKLMNOPS  
0700+470 at 4.991 GHz 1995 Sep 04



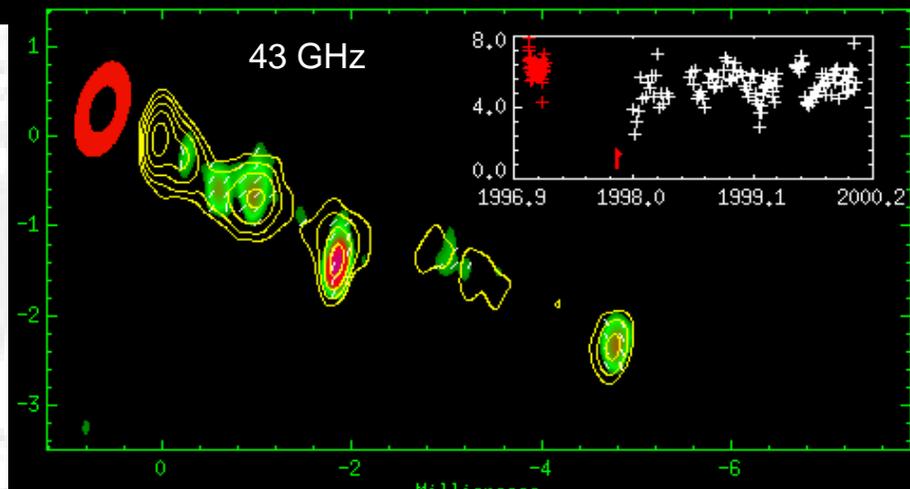
Map center: RA: 08 47 28.062, Dec: +57 23 38.336 (2000.0)  
Map peak: 0.12 Jy/beam

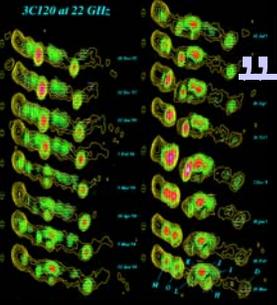
# Aktive Galaxienkerne / Jets / Scheinbare Überlichtgeschwindigkeiten



- VLBA, 5 GHz, 1624+416, Quasar,  $z=2.55$ , Mittlere scheinbare Geschwindigkeit:  $10 c$
- Typische Geschwindigkeiten (CJF, *Britzen et al., in prep*)
  - Radio Galaxien:  $1.1 c$
  - Quasare:  $4.4 c$
  - BL Lac Objekte:  $1.7 c$

*Gomez et al.*





# „Ein massives Schwarzes Loch füttert seinen Jet“

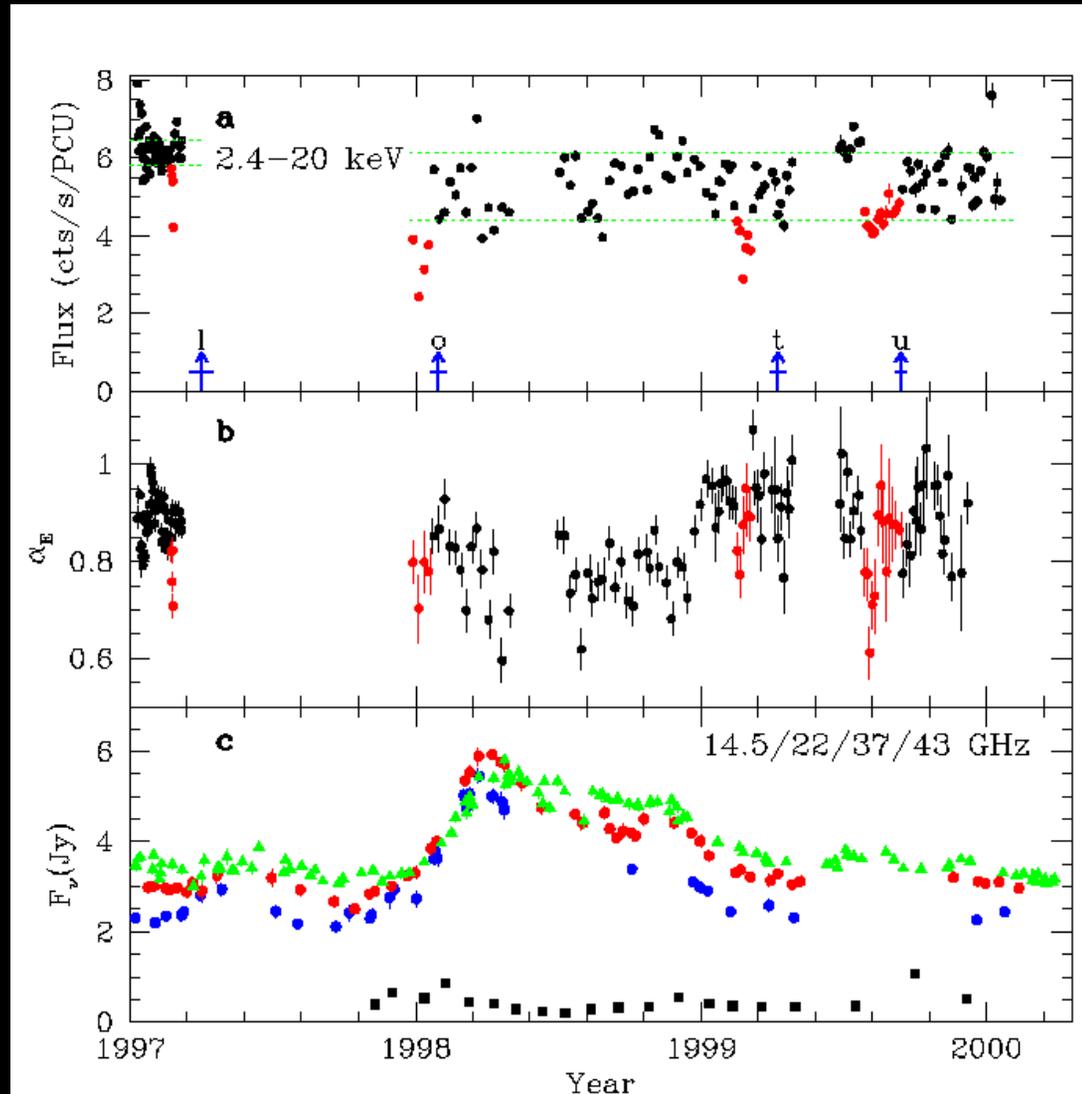
3C120 - Röntgenfluß sinkt ab 0.1 Jahre bevor neue Jetknoten ausgestoßen werden

**X-ray flux (RXTE), dips in red**

**jet component ejection in blue**

**X-ray spectral index (RXTE)**

**variability in the radio bands (UMRAO)**



# Aktive Galaxienkerne / Jets / Scheinbare Überlichtgeschwindigkeiten

## Beschleunigung

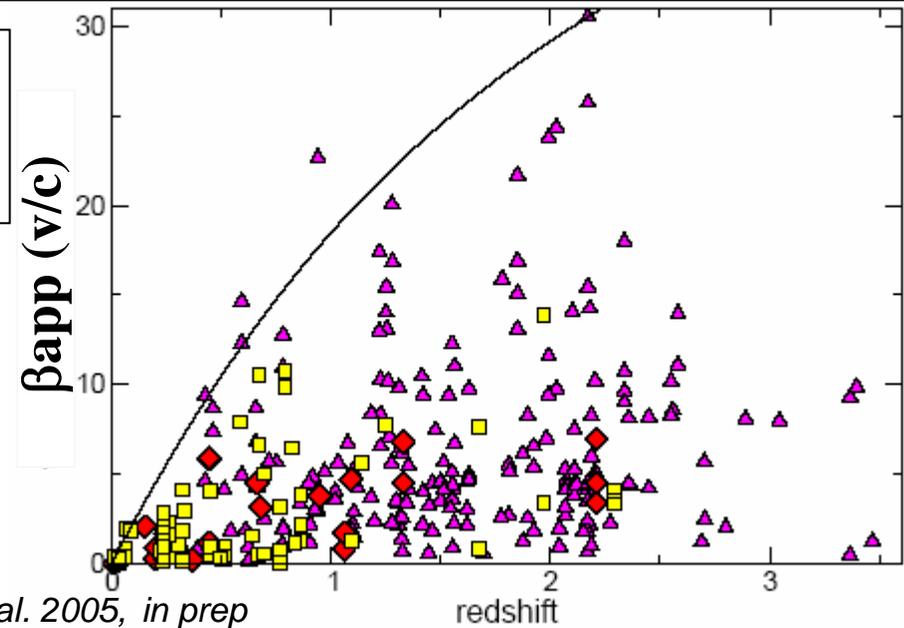
Quasare: 32% (16%)  
 BL Lac Objekte: 26% (16%)  
 Seyfert I, II: const.  
 LINER: const.

## Krümmungen

Quasare:  $\sim 10^\circ$   
 BL Lac Objekte:  $\sim 16^\circ$

- CJF-survey weist geringere scheinbare Geschwindigkeiten auf als 2cm-survey (Kellermann et al. 2004).
- Vergleich mit Jorstad et al. (mm) bestätigt den Trend
- **Anstieg der scheinbaren Geschwindigkeiten mit Frequenz der Beobachtungen**

**CJF**

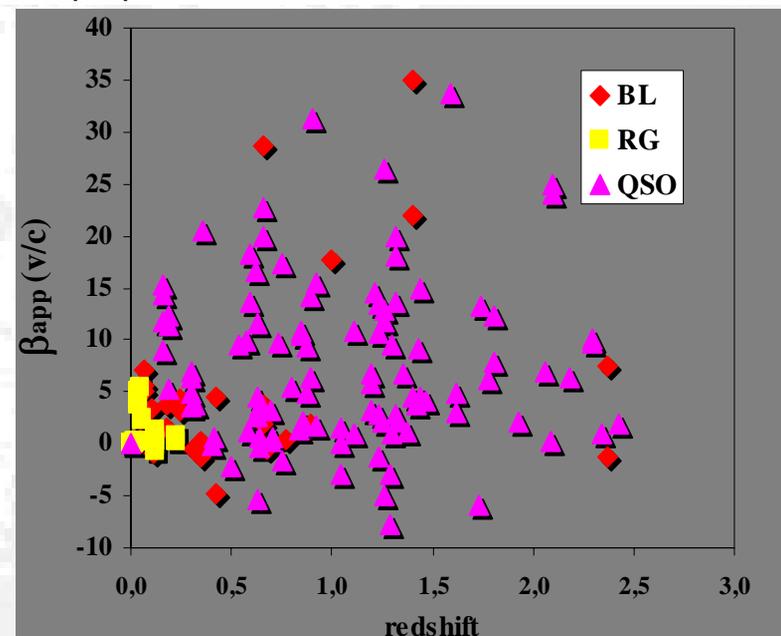


Britzen et al. 2005, in prep

**2cm survey**

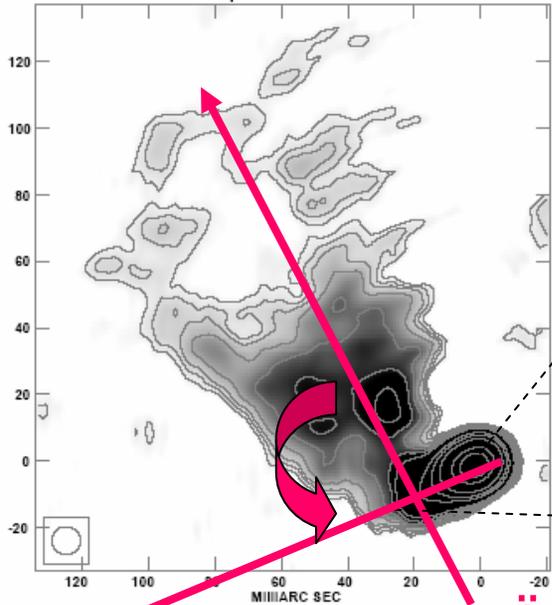
$H_0=65, \Omega_m=0.3$

Kellermann et al. 2004

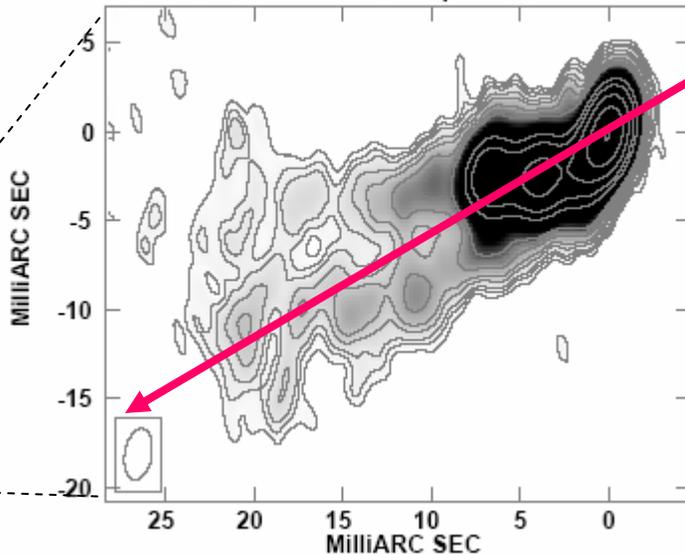


# „Misalignment“ (pc- und kpc-Skalen Jet)

Markarian 501 1.6 GHz April 1998



Markarian 501 1.6 GHz April 1998

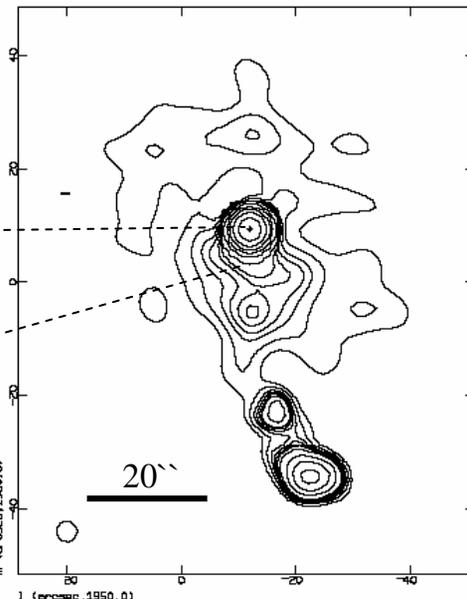
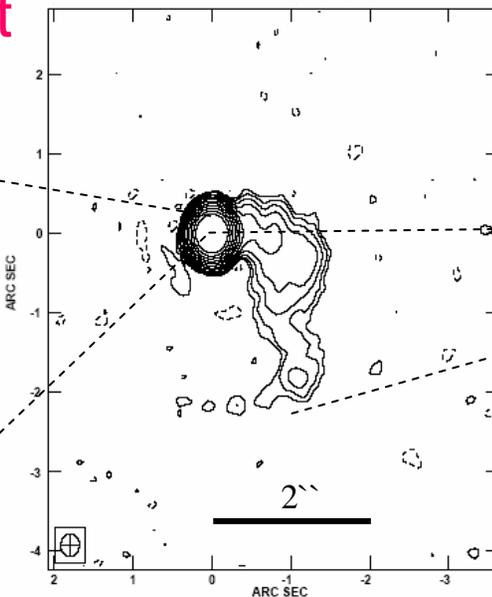
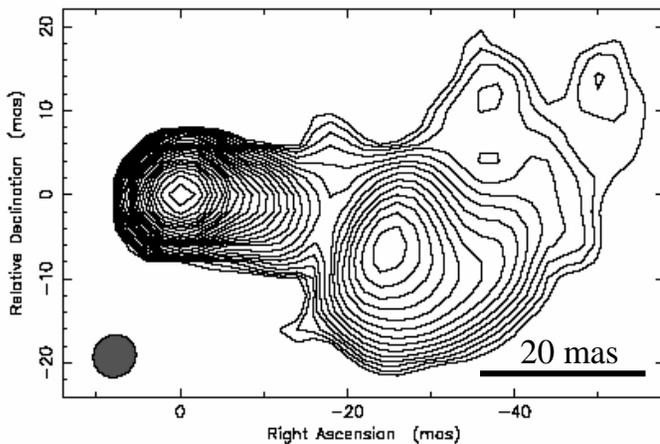


*Giovannini et al. 1998*

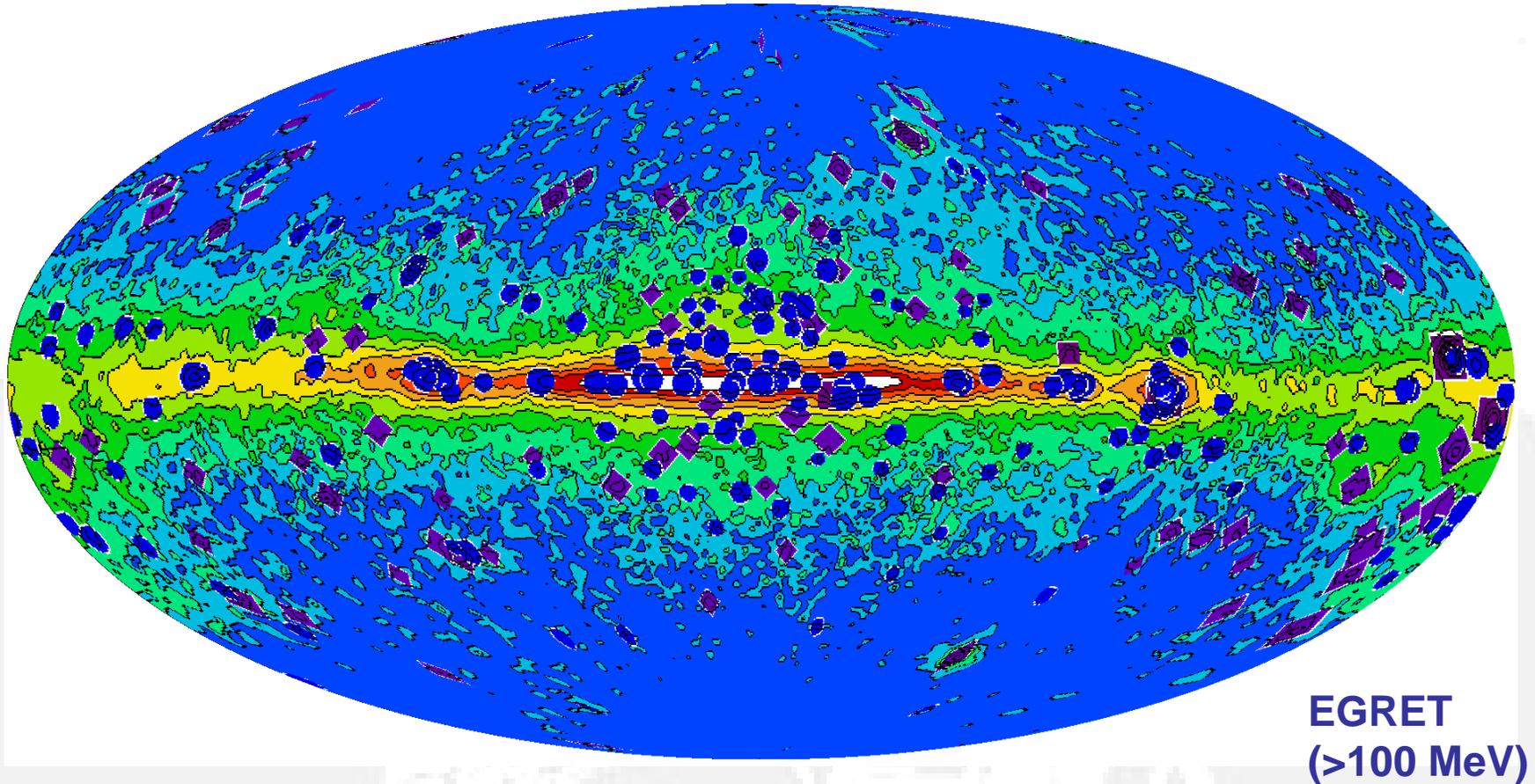
Innerer Jet (pc)  
Positionswinkel

Äußerer Jet  
Positionswinkel

1803+784 *Britzen et al. 2005d*

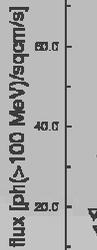


# $\gamma$ -Strahlung / EGRET all-sky map



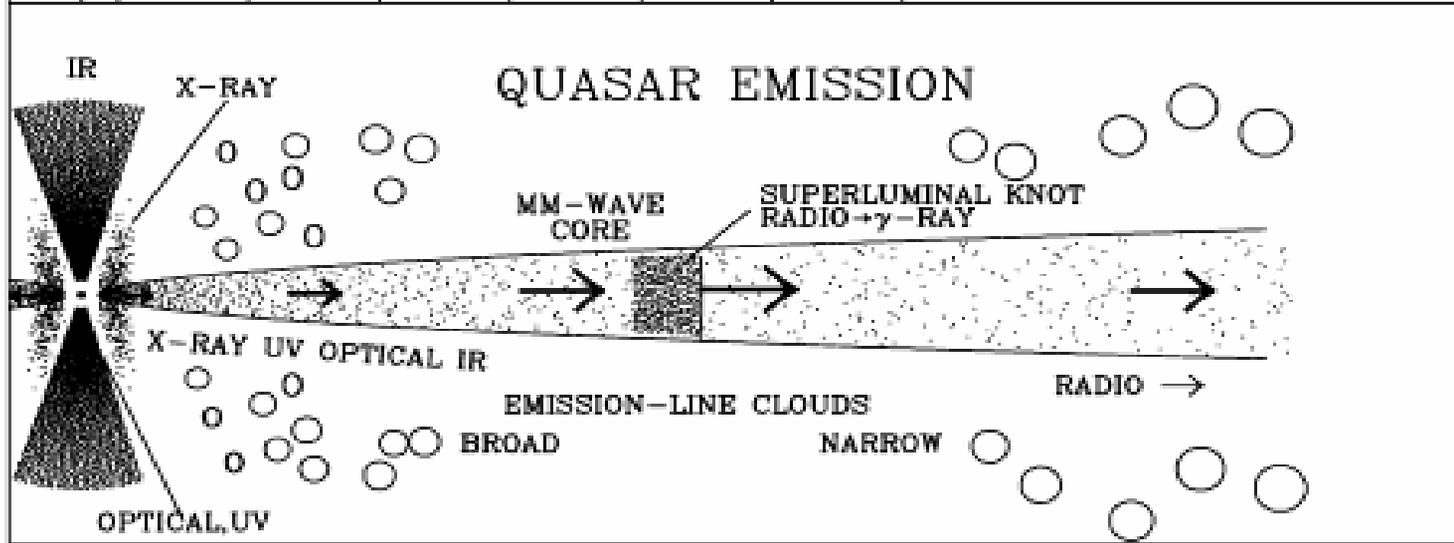
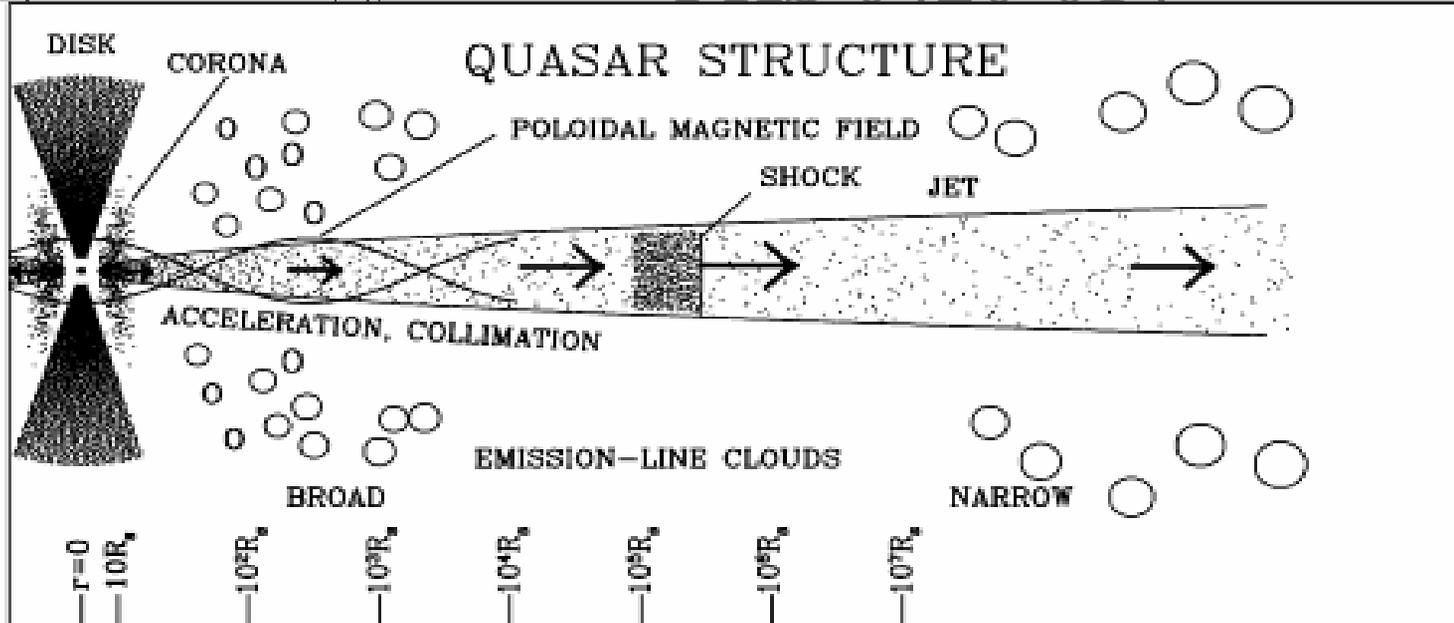
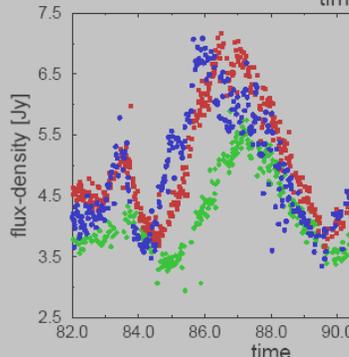
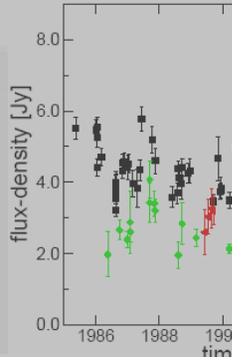
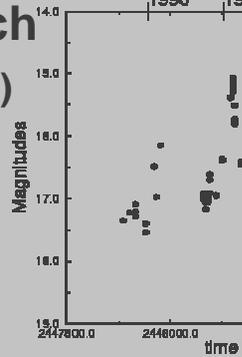
- ~60% interstellare Emission der Milchstraße
  - ~10% sind katalogisierte (3EG) Punktquellen
- 3EG catalog (Hartman et al. 1999)

$\gamma$ -Strahlung  
EGRET

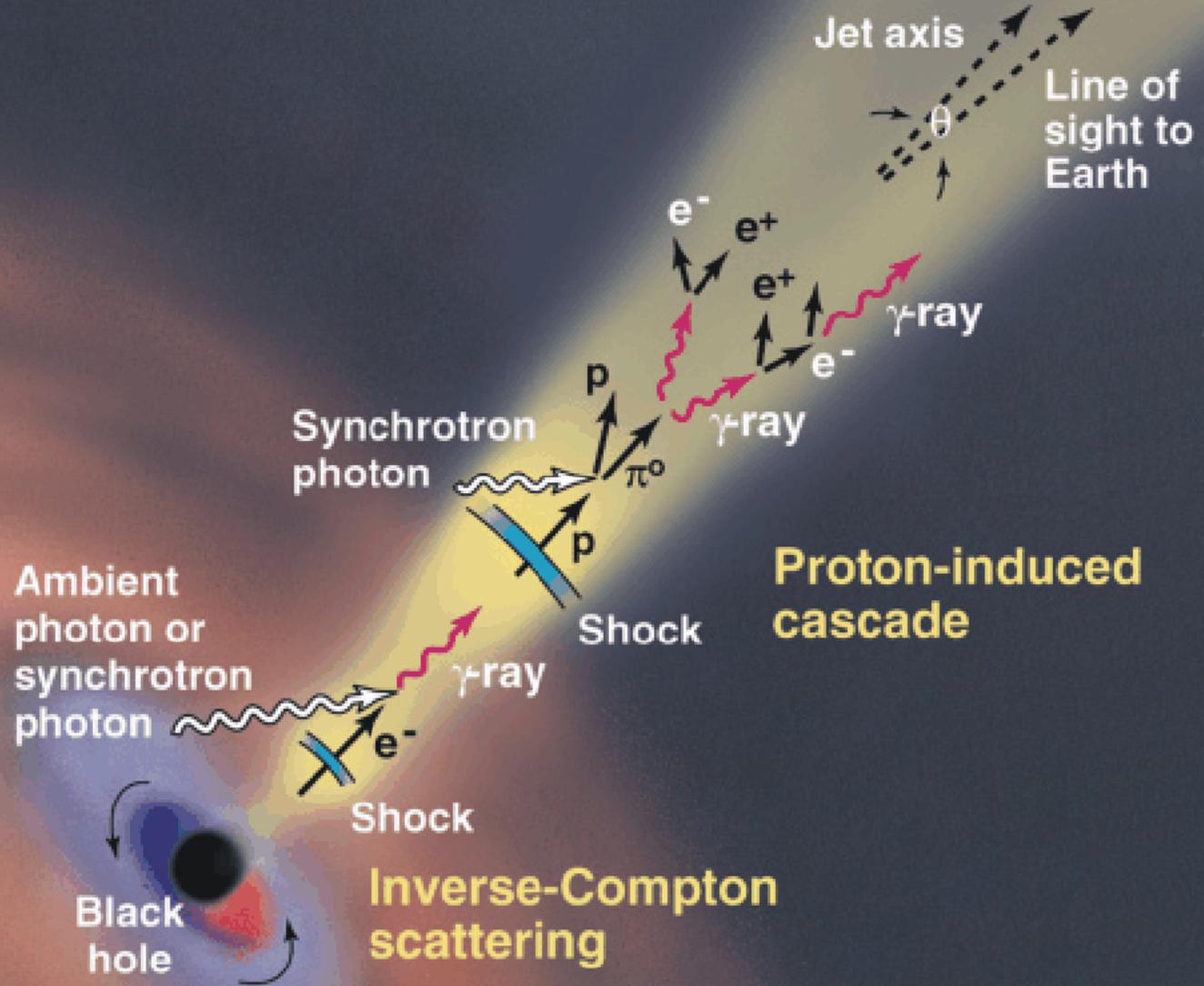


# Multifrequenz-Variabilität in PKS 0420-014

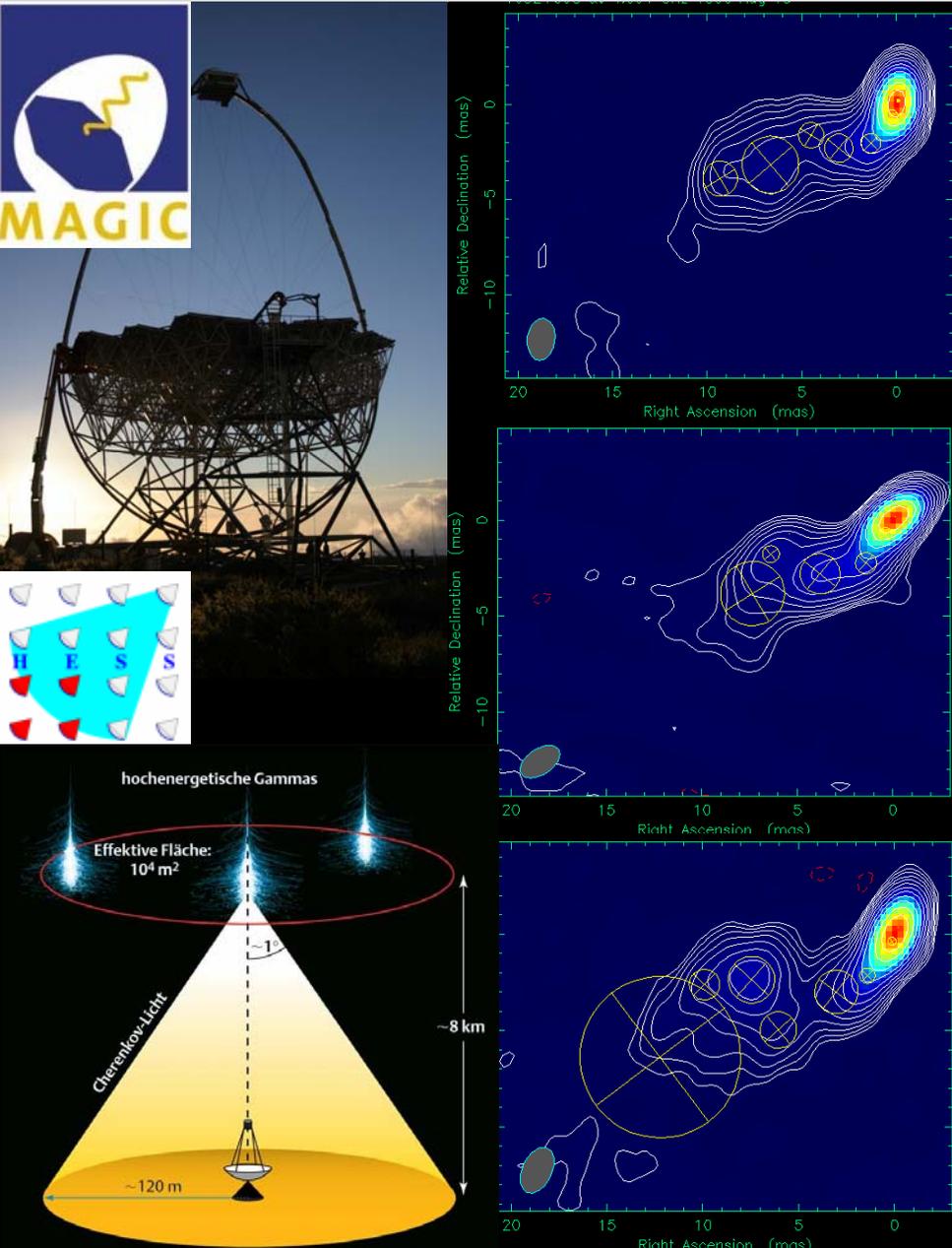
Optisch  
(650 nm)



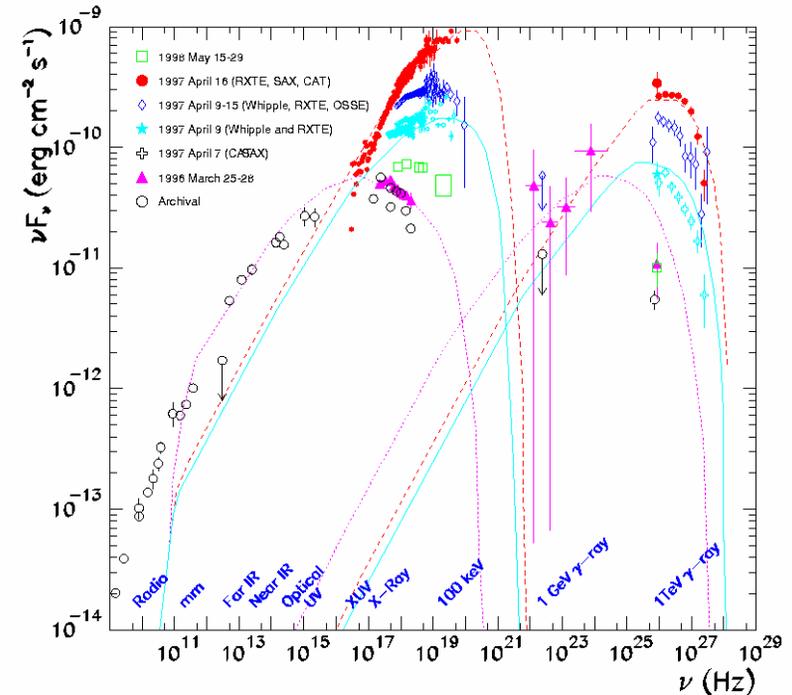
# $\gamma$ -Strahlung aus dem Jet



# Cherenkov-Teleskope / TeV-Blazare / Mkn 501



- Mkn 501: TeV-Blazar
  - Unerwartet langsame Geschwindigkeiten:  $0.1 - 0.9c$
  - Typisch für TeV-Quellen



# Aktive Galaxienkerne

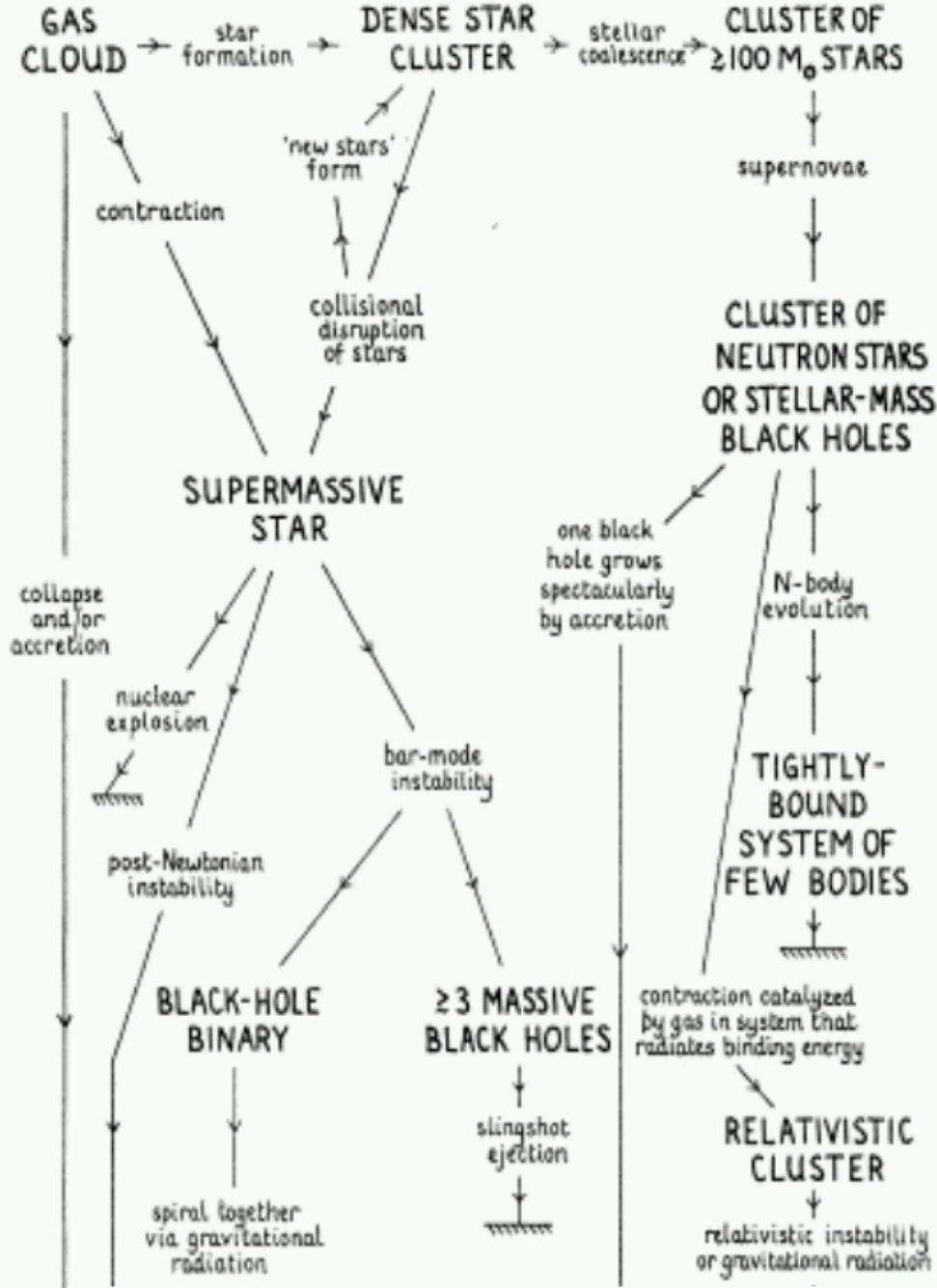
## Gelöste Probleme

# offene Fragen

- Bislang kein direkter Nachweis der Existenz Schwarzer Löcher ...
- Wie „wachsen“ die Schwarzen Löcher ? Und die Galaxien?
- Wann, Warum und Wo entstehen Jets ?
- Was unterscheidet „radio-laute“ und „-leise“ AGK ?
- Wodurch und Wie wird die Aktivität der AGK getriggert ?
- Ist die Massenskala der Schwarzen Löcher kontinuierlich ?
- etc.



# Schwarze Löcher



Es führt kein Weg an ihnen vorbei ...

# 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
- **Roger Penrose** vermutet 1964 die Existenz von Singularitäten im Innern Schwarzer Löcher

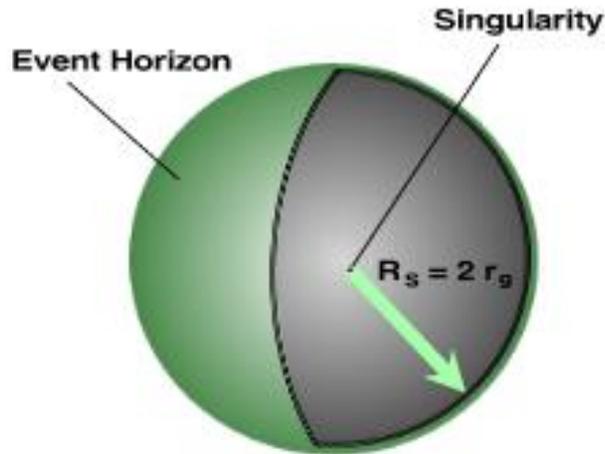
# Zur Geschichte Schwarzer Löcher

- 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), Kein-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)
- AGN Paradigma **Sir Martin Rees, D. Lynden-Bell**, 1969, 1971, akkretierendes supermassereiches Schwarzes Loch erklärt die Aktivität und enorme Leuchtkraft der AGK und Quasare

# Zur Geschichte Schwarzer Löcher

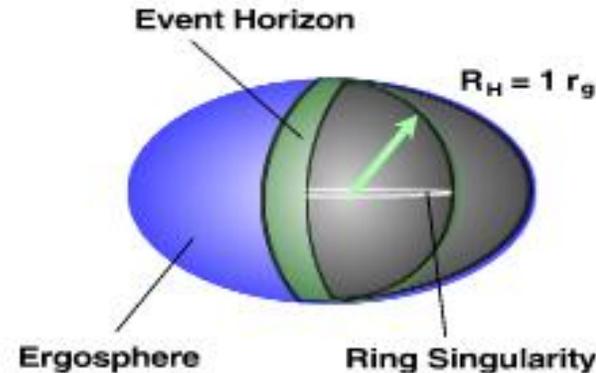
- **N.I. Shakura & R.A. Sunyaev** entdecken 1973 eine neue Akkretionslösung, flache, durch Strahlung effizient gekühlte Materiescheibe: Standardakkretionsscheibe
- **S. Hawking** leitet 1974 die Hawking-Strahlung ab: Schwarze Löcher können Teilchen emittieren, wenn der quantentheoretische Prozess der Paarbildung nahe am Ereignishorizont stattfindet. Sehr leichte Schwarze Löcher ( $10^{18}$  g) können durch diese Teilchenemission am Horizont verdampfen.
- **R.D. Blandford & R.L. Znajek** schlagen 1977 einen prozess vor, der es erlaubt, auf elektromagnetischem Wege einem rotierenden Schwarzen Loch Rotationsenergie zu entnehmen. Blandford-Znajek-Mechanismus
- 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

# Schwarze Löcher



**Schwarzschild**

$$a = 0$$



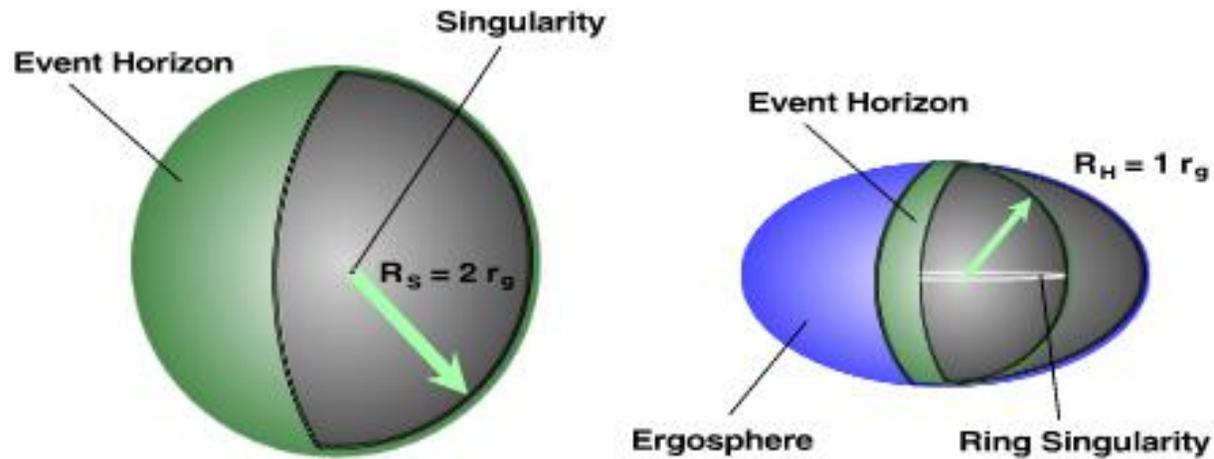
**Kerr**

$$a = 1$$

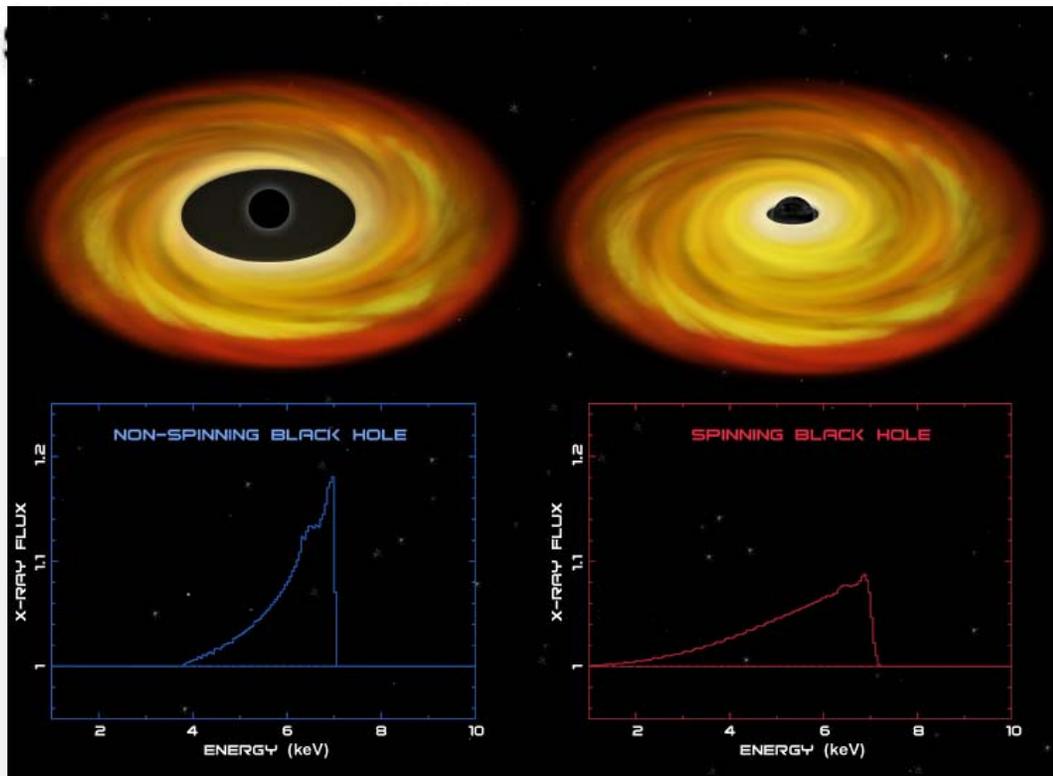
A. Müller

- 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:  
 $L < 1.26 \times 10^{38} M / M_{\text{Sonne}} \text{ erg sec}^{-1}$

# Schwarze Löcher / Akkretionsscheiben

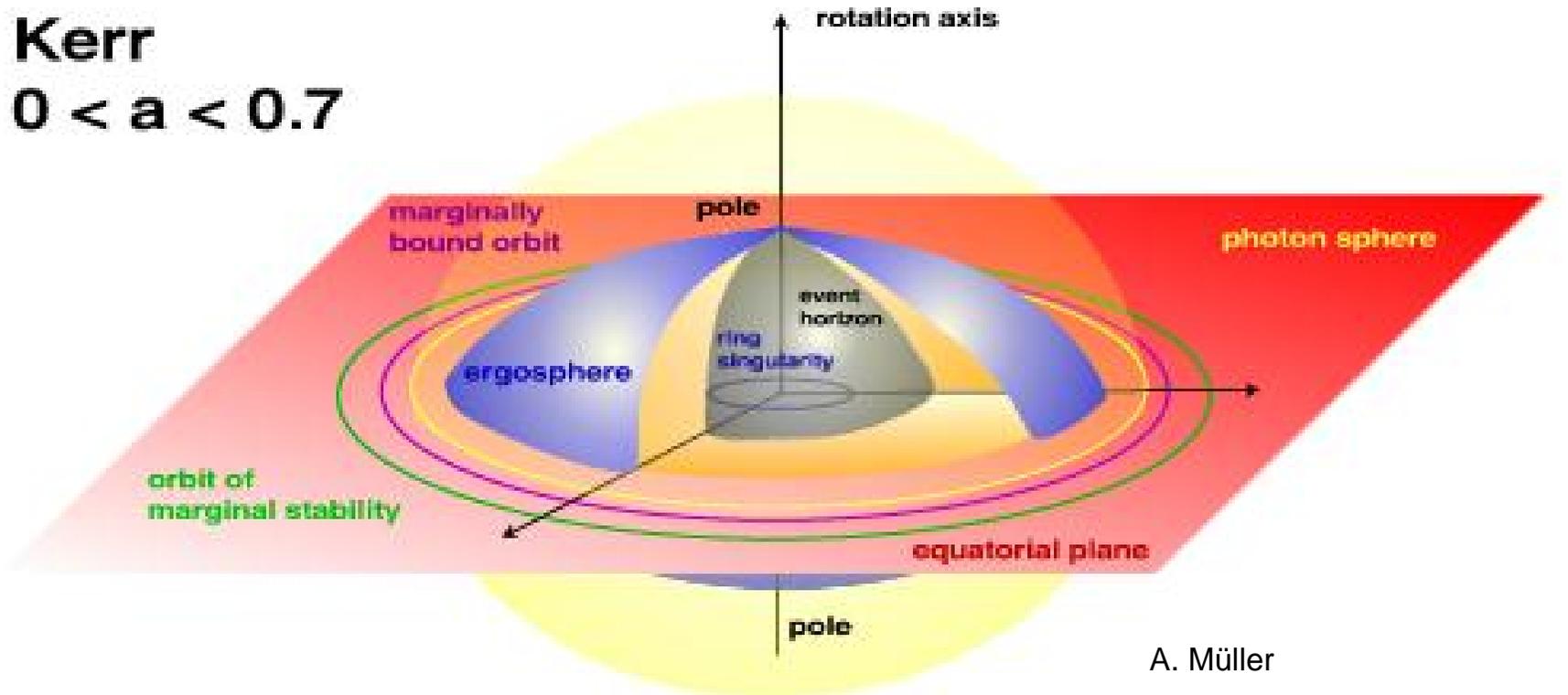


A. Müller



# Die Kerr-Lösung

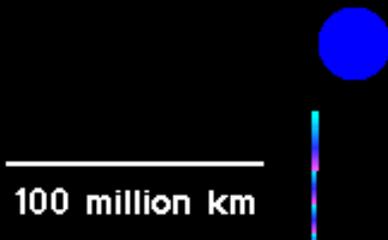
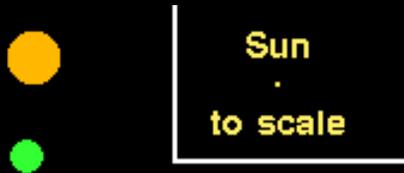
**Kerr**  
 $0 < a < 0.7$



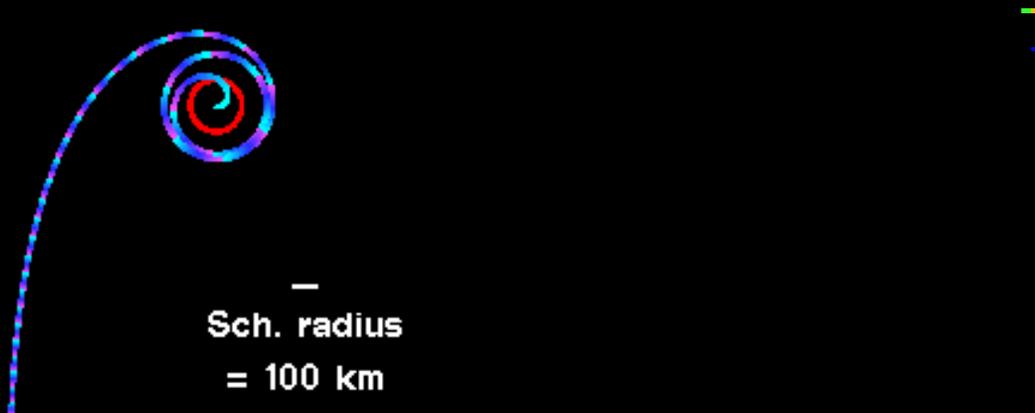
Ringsingularität: Massenfluß in einem unendlich dünnen Ring,  
Quelle des rotierenden Gravitationsfeldes

# What would it be like to go visit a black hole?

## Plan of 4-`star' system:

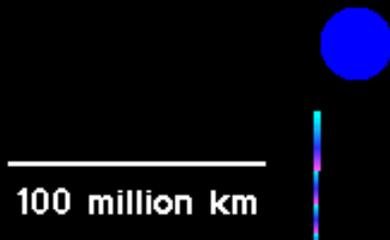
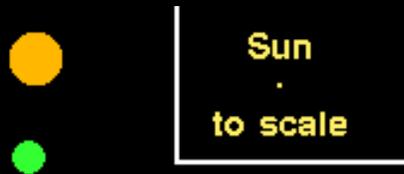


## Our trajectory:

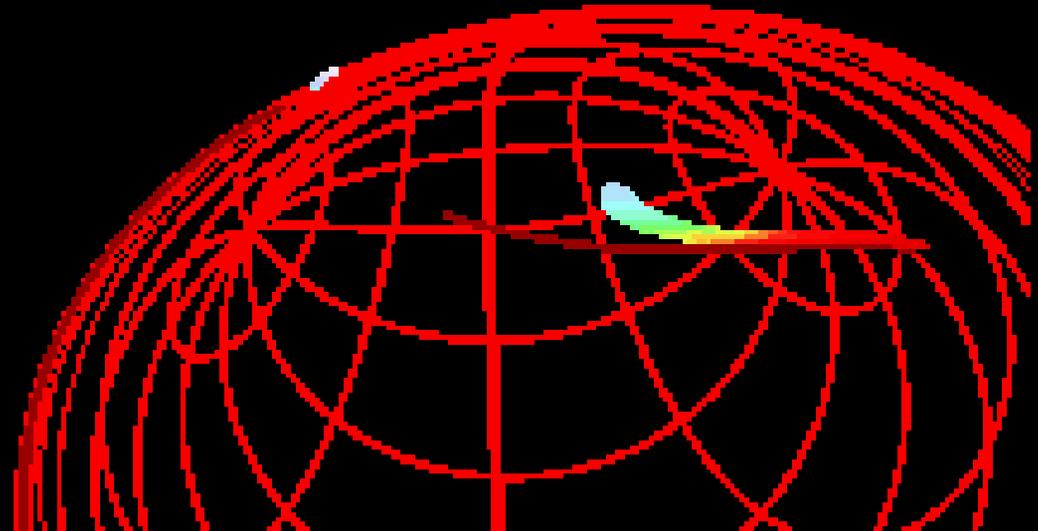
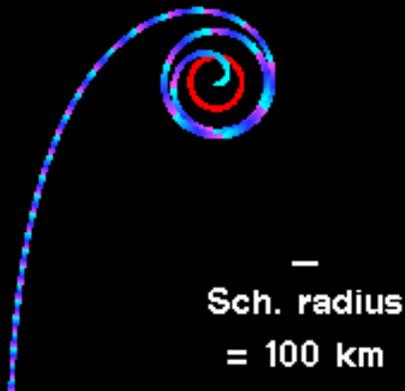


# What would it be like to go visit a black hole?

## Plan of 4-`star' system:

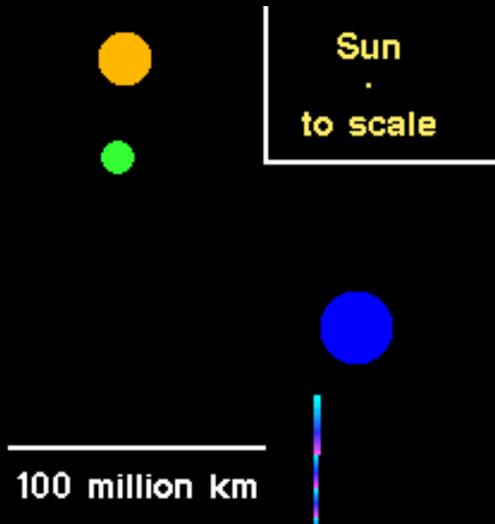


## Our trajectory:

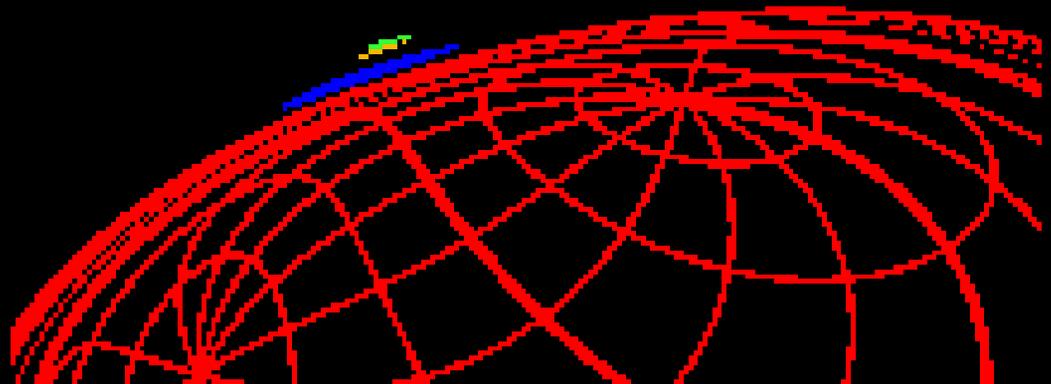
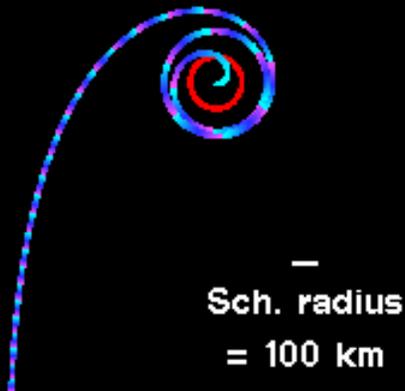


# What would it be like to go visit a black hole?

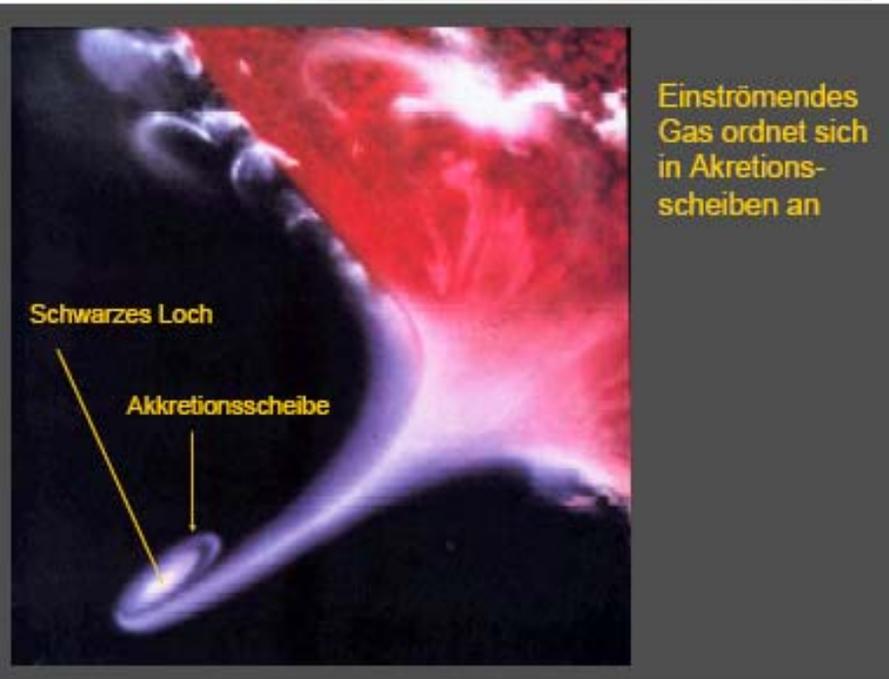
## Plan of 4-`star' system:



## Our trajectory:



# Akkretionsscheiben

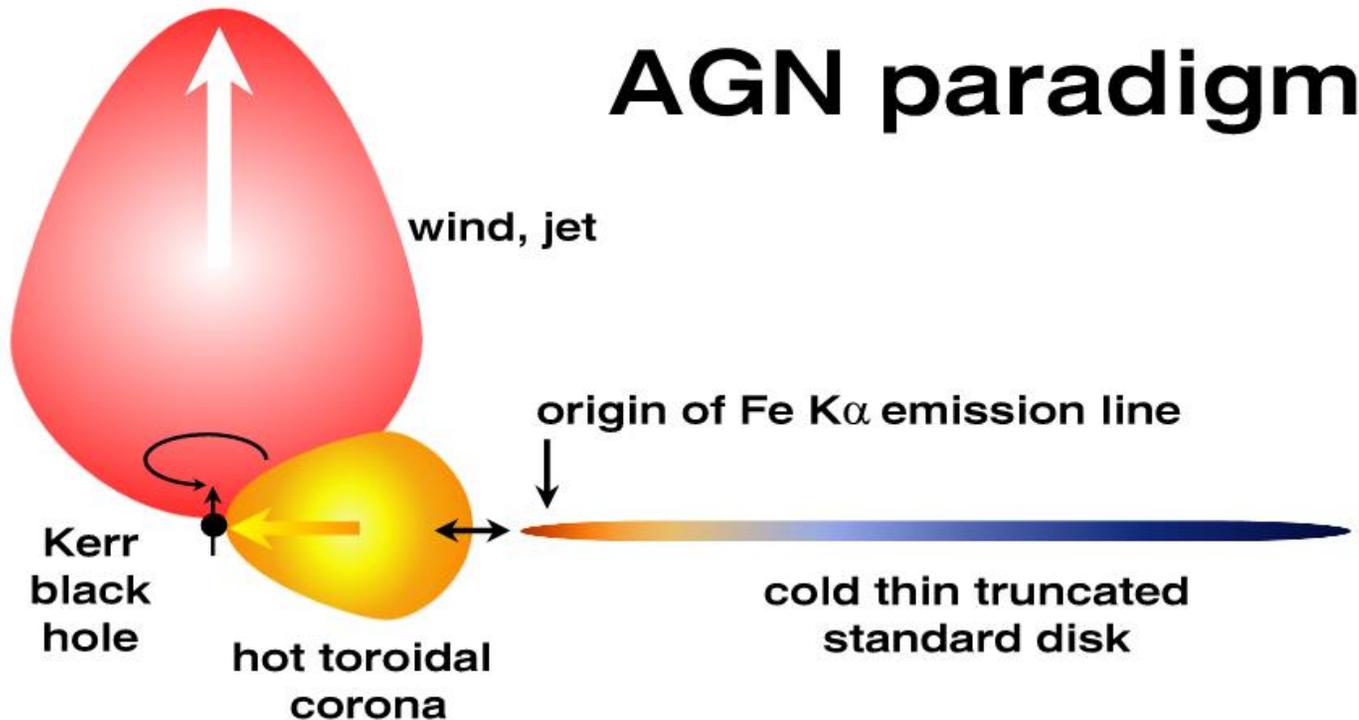


- großskaliger Staubtorus, der riesiges, kaltes Materiereservoir von  $10^4$  bis  $10^8$  Sonnenmassen darstellt, kpc-Skala; nicht stabil -> Materie fällt ins Zentrum; innerhalb des Staubtorus bildet sich abgeflachter Akkretionsfluß: die Standardscheibe, optisch dick, Materie bewegt sich Keplersch und nimmt aufgrund des Drehimpulses dünne Scheibengestalt an; als verformbares Fluidum beschreibbar; Akkretionsfluß kann hohe Geschwindigkeiten erreichen und unterliegt der Turbulenz, Scherungskräfte wirken, wichtig: magnetische Turbulenz

- Akkretion (lat. Accrescere: hinzuwachsen) bezeichnet den Vorgang, daß ein massebehaftetes Objekt Materie aufsammelt

# Akkretions scheiben

- 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



# 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

# Evidence for SMBH

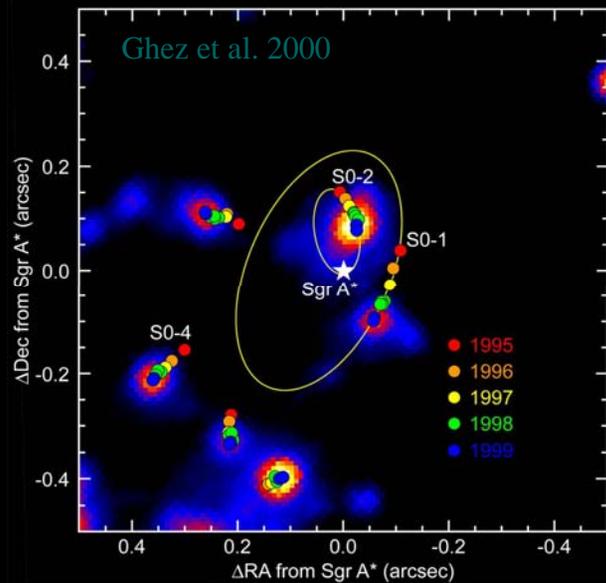
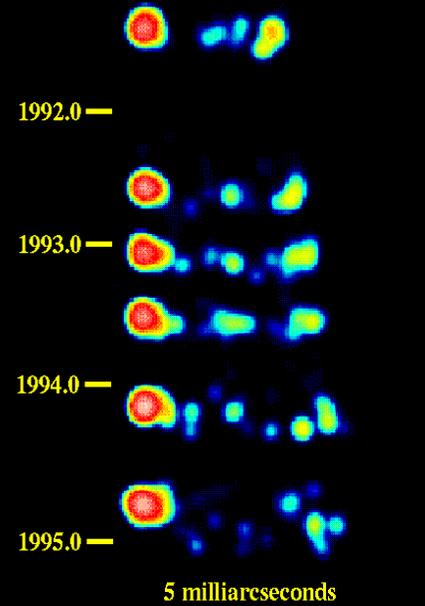


**Exceptional stability** of jet direction on timescales of  $\sim 10^6$  years  
**Proper motions** of stars around Sgr A\* imply a black hole of  $10^5$  solar masses (Eckart et al.)

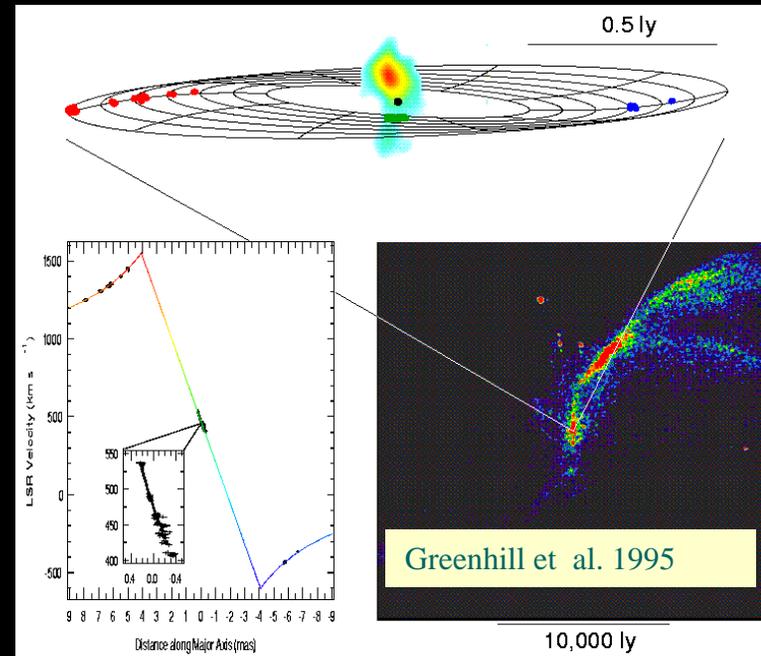
**Superluminal motions:** apparent speeds  $b_{app} \sim 20$ , which requires an effective mechanism for energy release

**Observations of accretion disks:** Keplerian motions imply densities of  $\sim 10^{12} M_{sol}/pc^3$

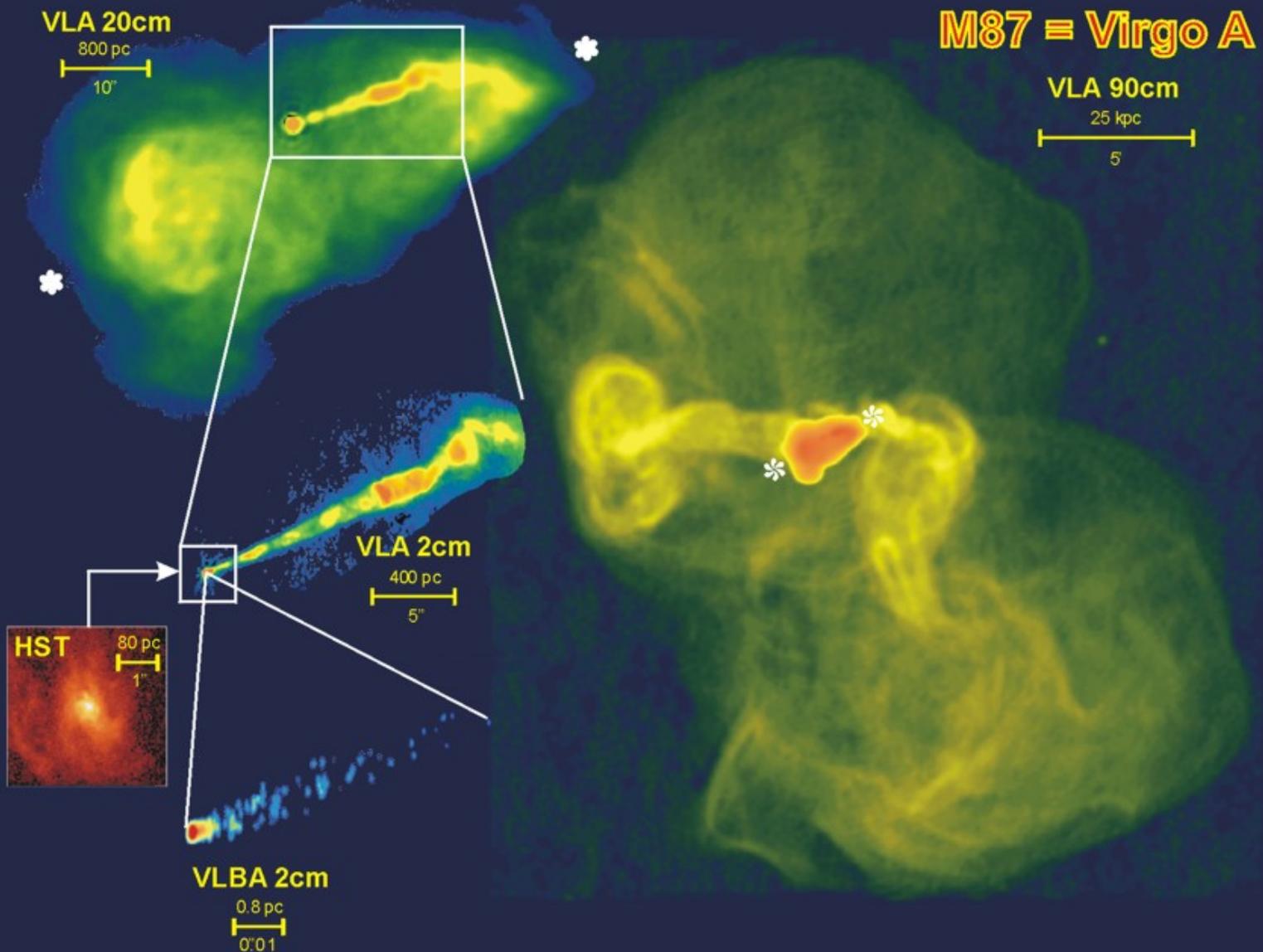
3C 279  
 Superluminal Motion  
 Wehrle et al. 1998



**Other evidence:** rapid variability, emission line width, gravitational redshift of Fe K line, etc.



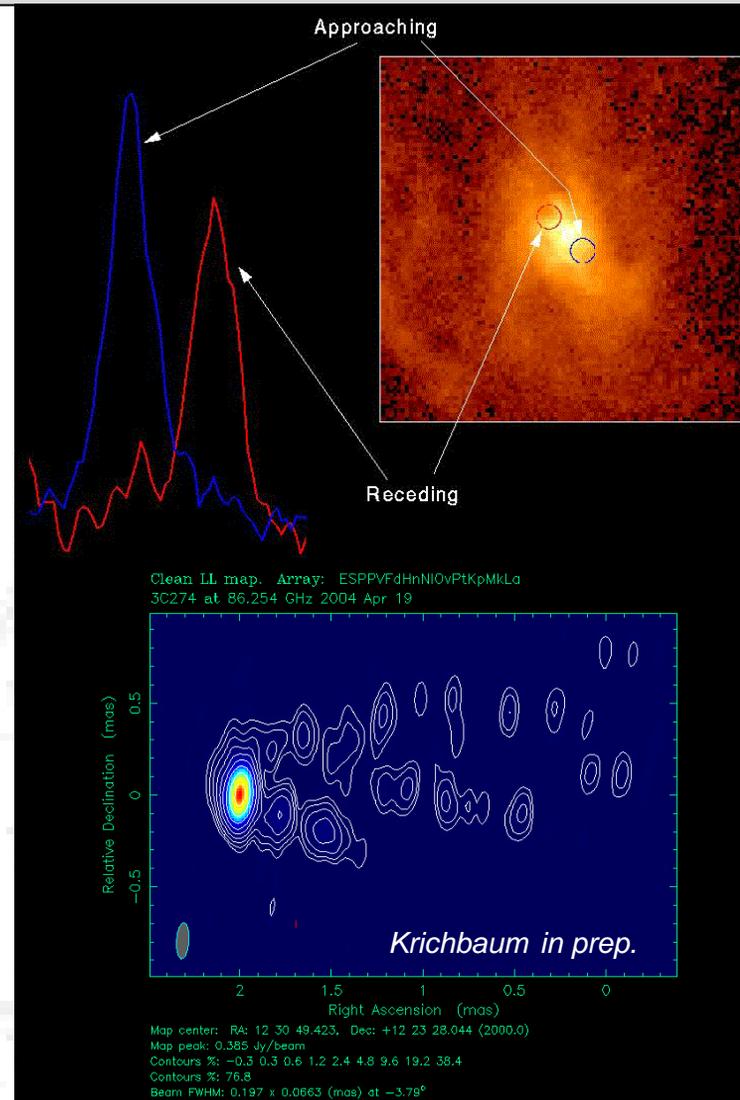
# M87 / Testfeld für Theorien



# M87 / Schwarzes Loch / Dunkle Materie

- M87 – gigantische elliptische Galaxie (cD) – befindet sich in einem reichen Galaxienhaufen.
- Hubble Space Teleskop – Spektrum zeigt schnell rotierendes Gas: Hinweis auf Schwarzes Loch der Masse  $3 \times 10^9$  (größtes Schwarzes Loch in nahen Galaxien), Größe unseres Sonnensystems.
- Mit mm-VLBI: Jetbasis messen, Suche nach Fußpunkt des Jets, Aussagen über Spin?

Tsai 1993



Die Größe der Jetbasis ( $\lambda=3\text{mm}$ , 512 Mbit/s):

197 x 54 mas = 21 x 6 Lichttage = **69 x 19  $R_s$**

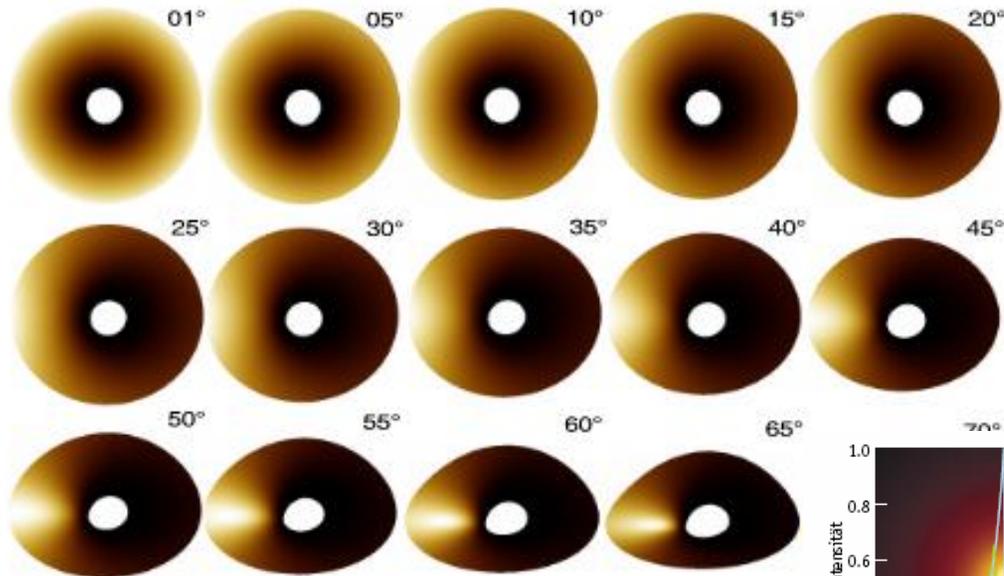
Transversale Jetbreite bei 0.5 mas **~174  $R_s$**

# Die Kerr-Lösung / Der Schatten des Schwarzen Lochs

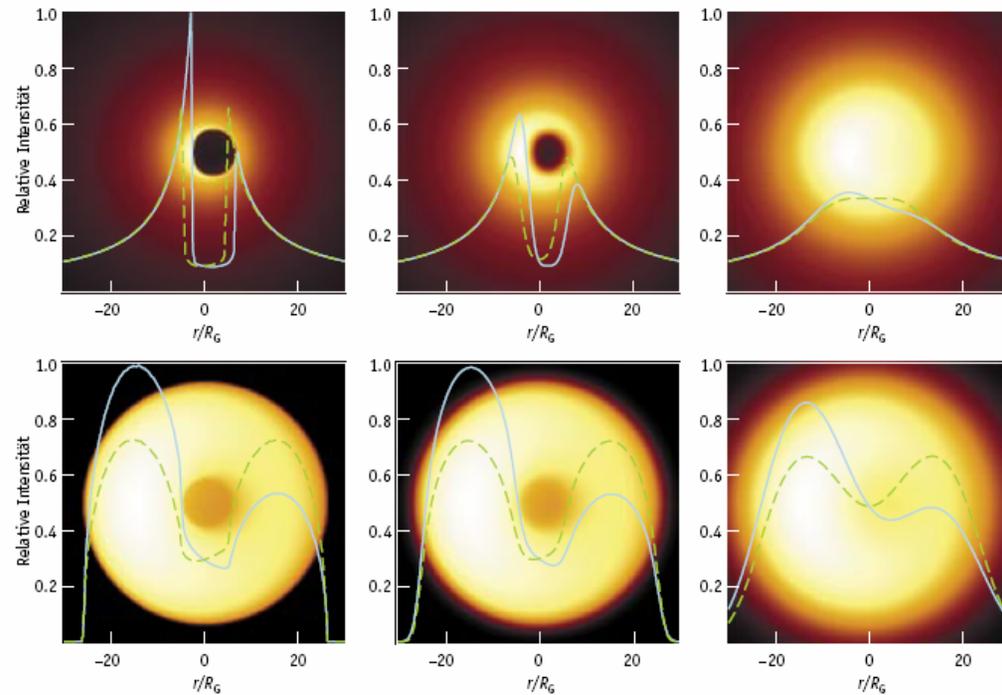
- Effekte in der Nähe des SL:
  - **Doppler-Effekt**
  - **Beaming**: spezielle Relativitätstheorie, Kollimation der Strahlung in Bewegungsrichtung des Emitters, In Umgebung von SL rotiert Plasma außerhalb der marginal stabilen Bhn Keplersch in geometrisch dünner Akkretionsscheibe, Beaming bewirkt, daß 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 ....**

# Schwarze Löcher und ihre Schatten

## The **Shadow** of Kerr Black Holes



*Falcke et al. 2000*



A. Müller

# Neue Generation von **Niederfrequenz**-Radioteleskopen



Im Bau befindlich ....

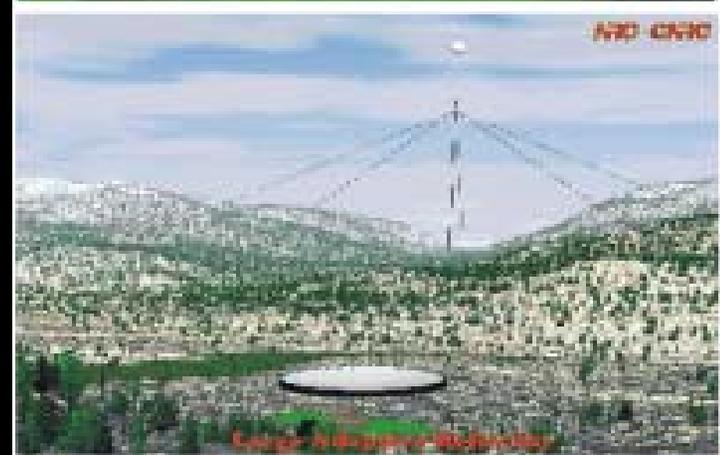
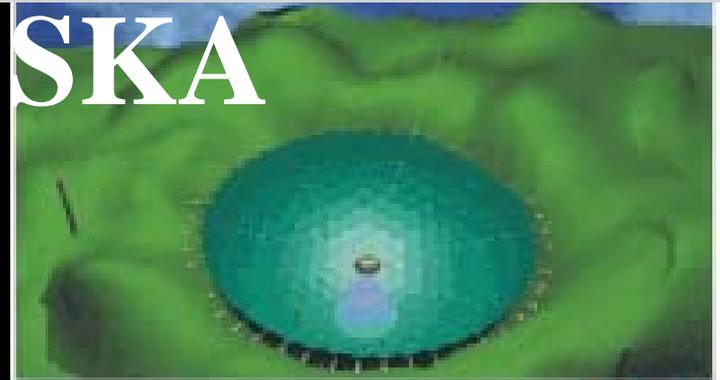
Durchmesser: 350 km

Frequenzen: 10 – 250 MHz

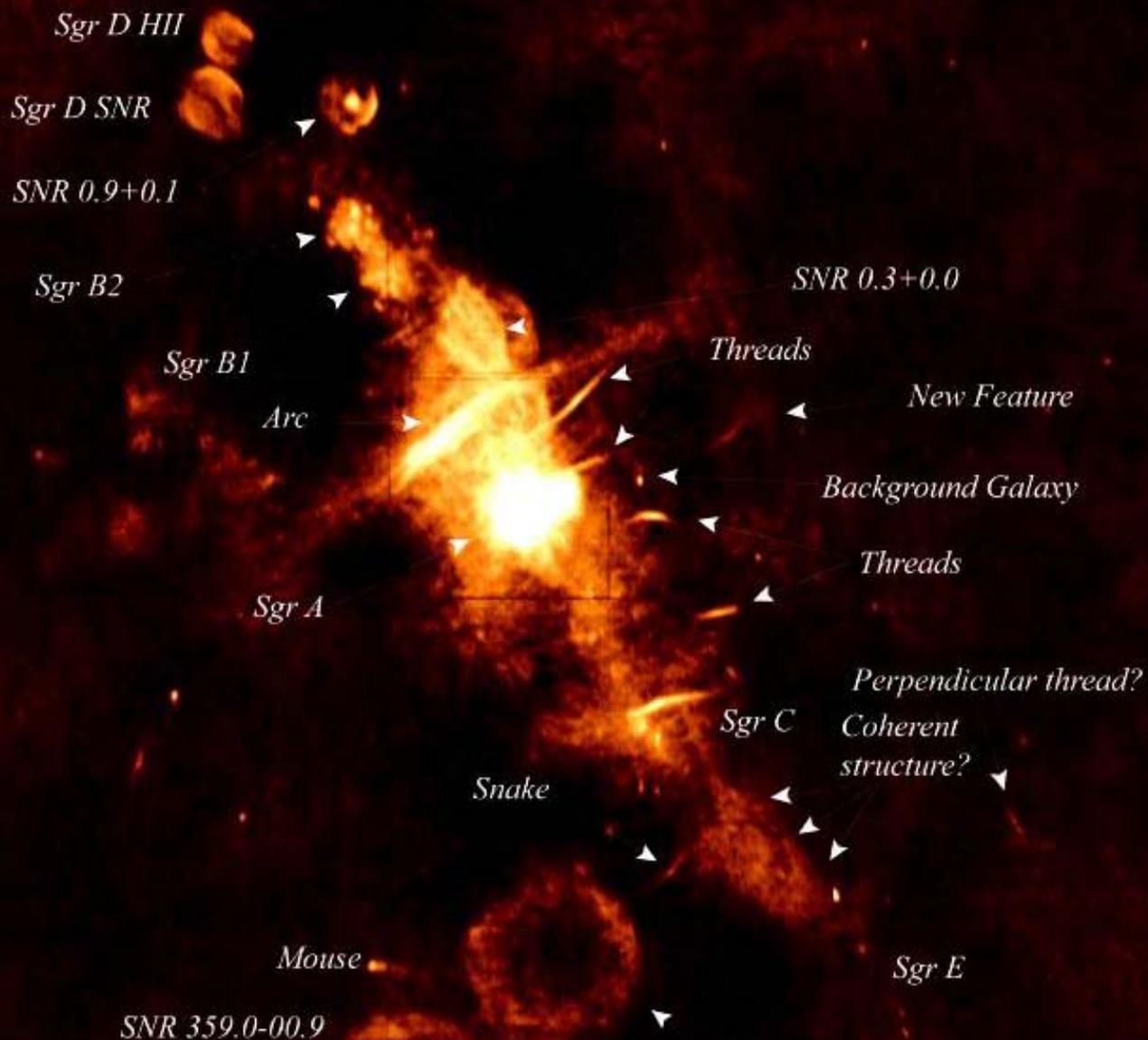
Antennen: 25 000

Suche nach der ersten Generation von  
Sternen u. Schwarzen Löchern

# SKA



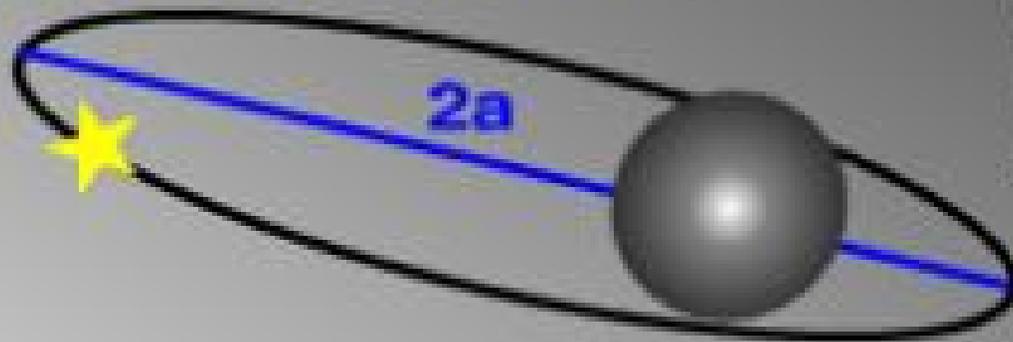
# Wide-Field Radio Image of the Galactic Center



# 3<sup>rd</sup> Keplerian law

orbital period  $\tau$

star on  
elliptical  
orbit



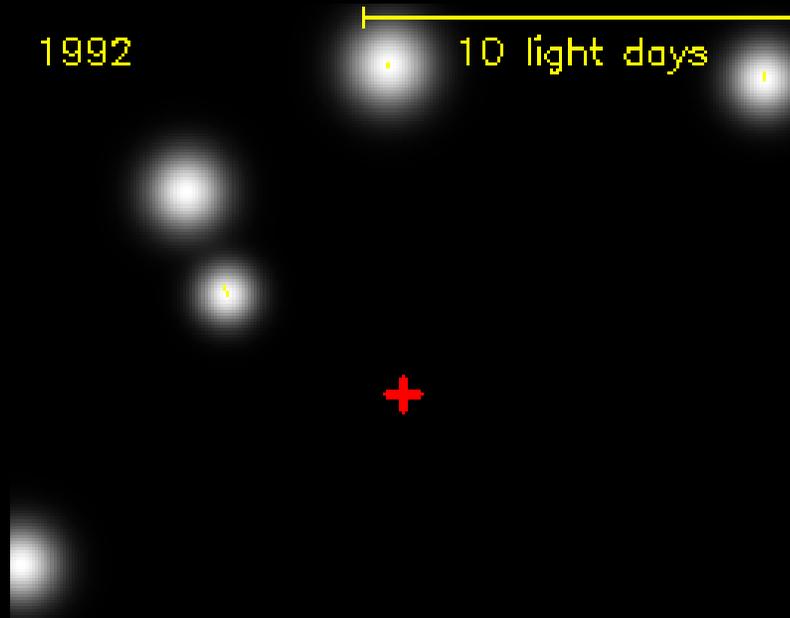
Galactic  
Black Hole  
at Sgr A\*

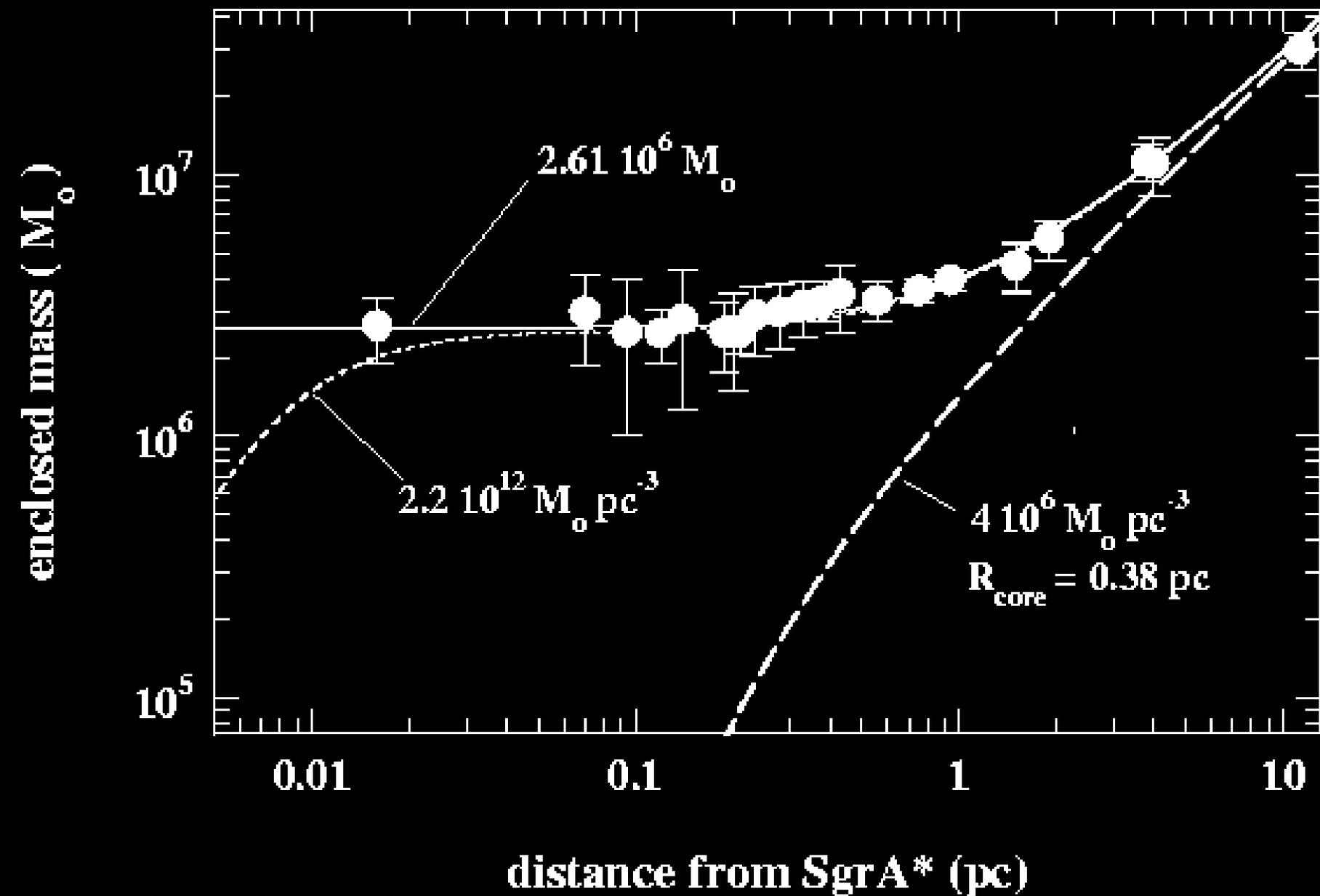
mass M

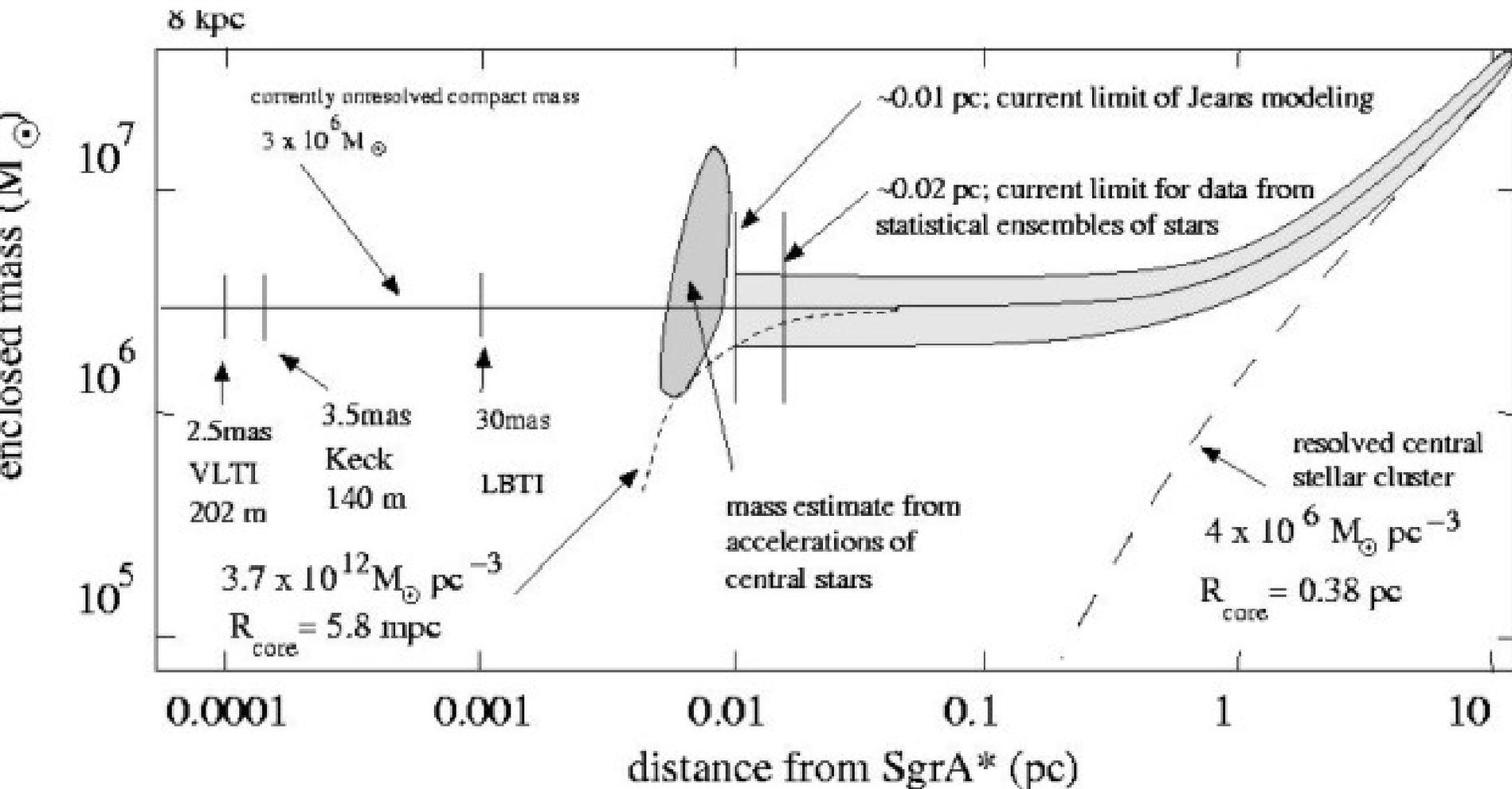
$$\frac{\tau^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{const}$$

1992

10 light days



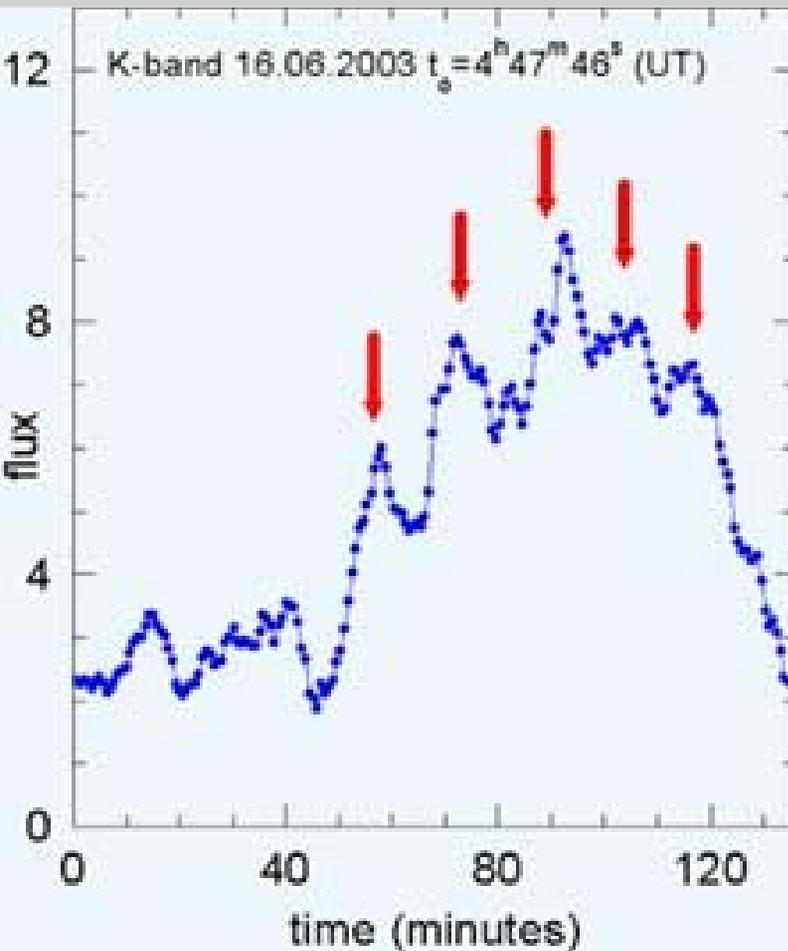




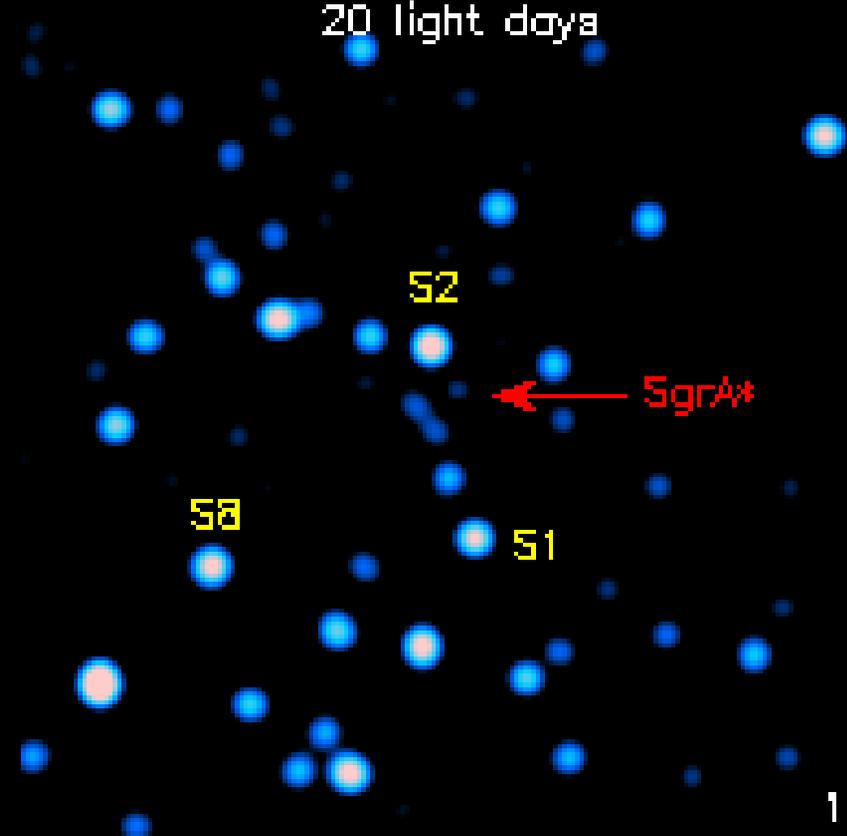
Gezeigt ist die eingeschlossene Masse als Funktion des Abstands von Sgr A\*.

Außerdem ist die Winkelauflösung angegeben, die mit modernen Infrarot Interferometern in der Zukunft erreicht werden wird.

# Das Schwarze Loch in der Milchstraße scheint zu rotieren



Nah-Infrarot: Faktor 5-6 Anstieg, schwächer nach 30 Minuten  
20 light days



Das Flackern des Flares: Die roten Pfeile in dieser Lichtkurve vom 16. Juni 2003 markieren eine Periodizität von 17 Minuten. Stammt der Flare von wirbelnden Gaswolken, dann muss auch das Schwarze Loch selbst rotieren – mit etwa der halben von der Allgemeinen Relativitätstheorie zugelassenen Höchstgeschwindigkeit.

Bild: Europäische Südsternwarte/Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

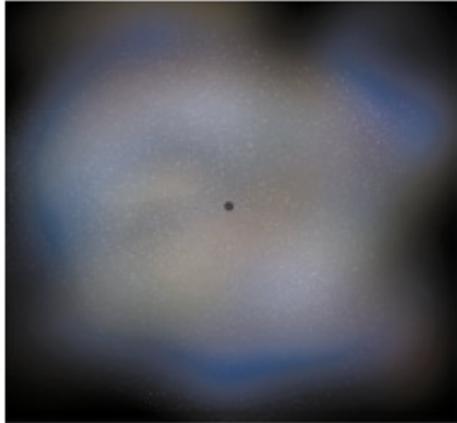


# **Koevolution – Schwarze Löcher / Galaxien**

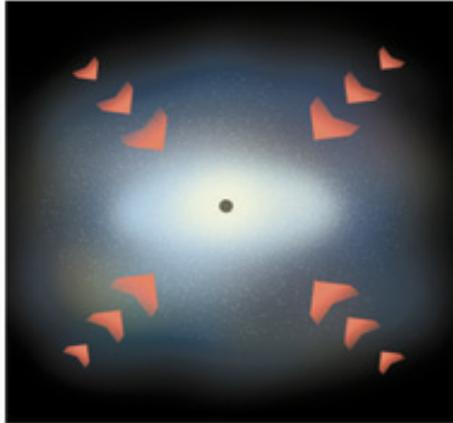
# Koevolution: Schwarze Löcher - Galaxien

## PRIMORDIAL COLLAPSE OF GAS CLOUD

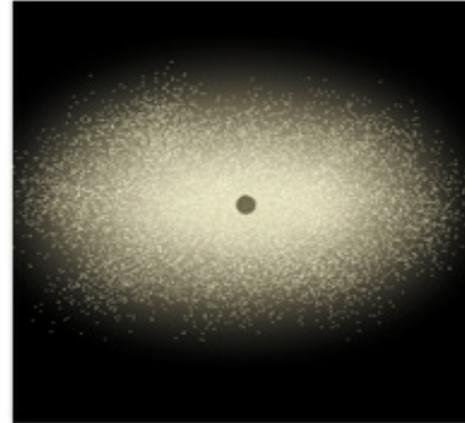
In a galaxy's birth, a hydrogen cloud collapses around a small compact object, a "seed" black hole.



Falling in toward the galactic center, the gas forms stars and adds more mass to the black hole.

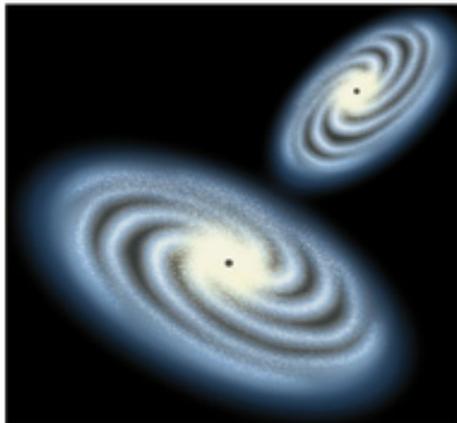


The result is a giant elliptical galaxy. The bigger the galaxy, the bigger its central black hole.

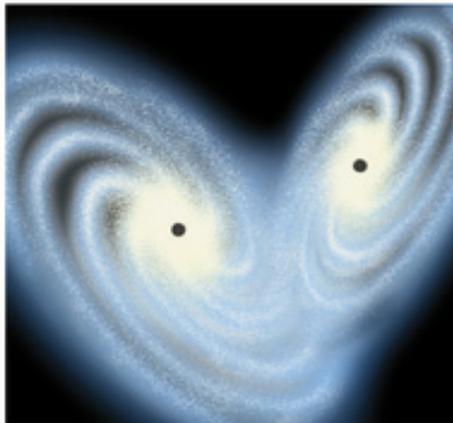


## GALAXY COLLISIONS

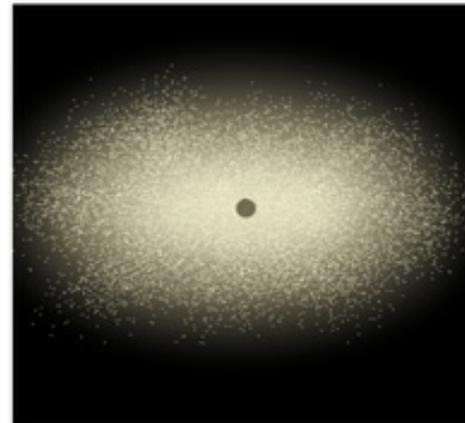
Two disk galaxies with modest black holes are on collision course.



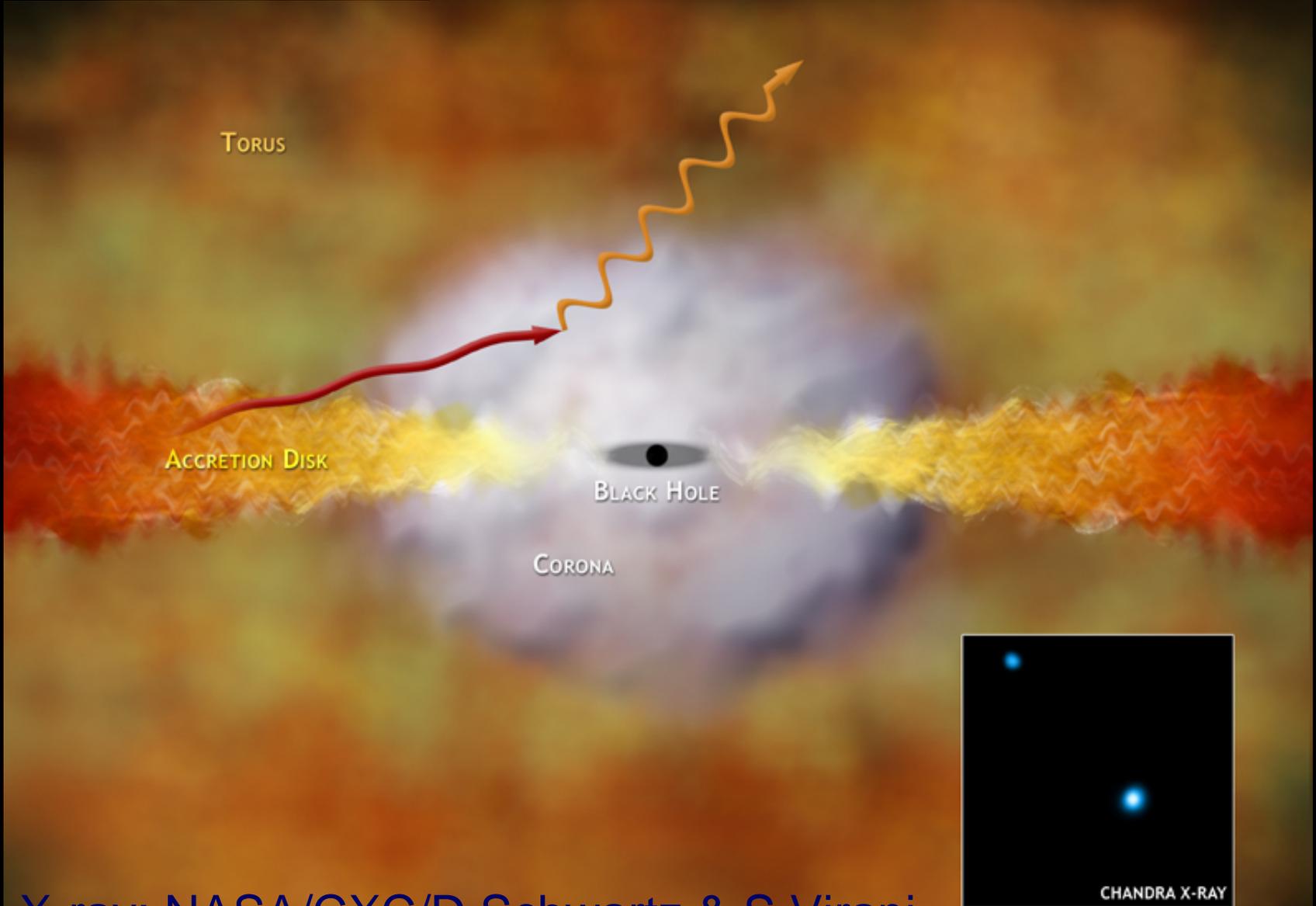
When they collide, their cores and their two black holes begin to merge.



Out of the merger comes a giant elliptical galaxy and a single black hole much more massive than the sum of the two separate ones.

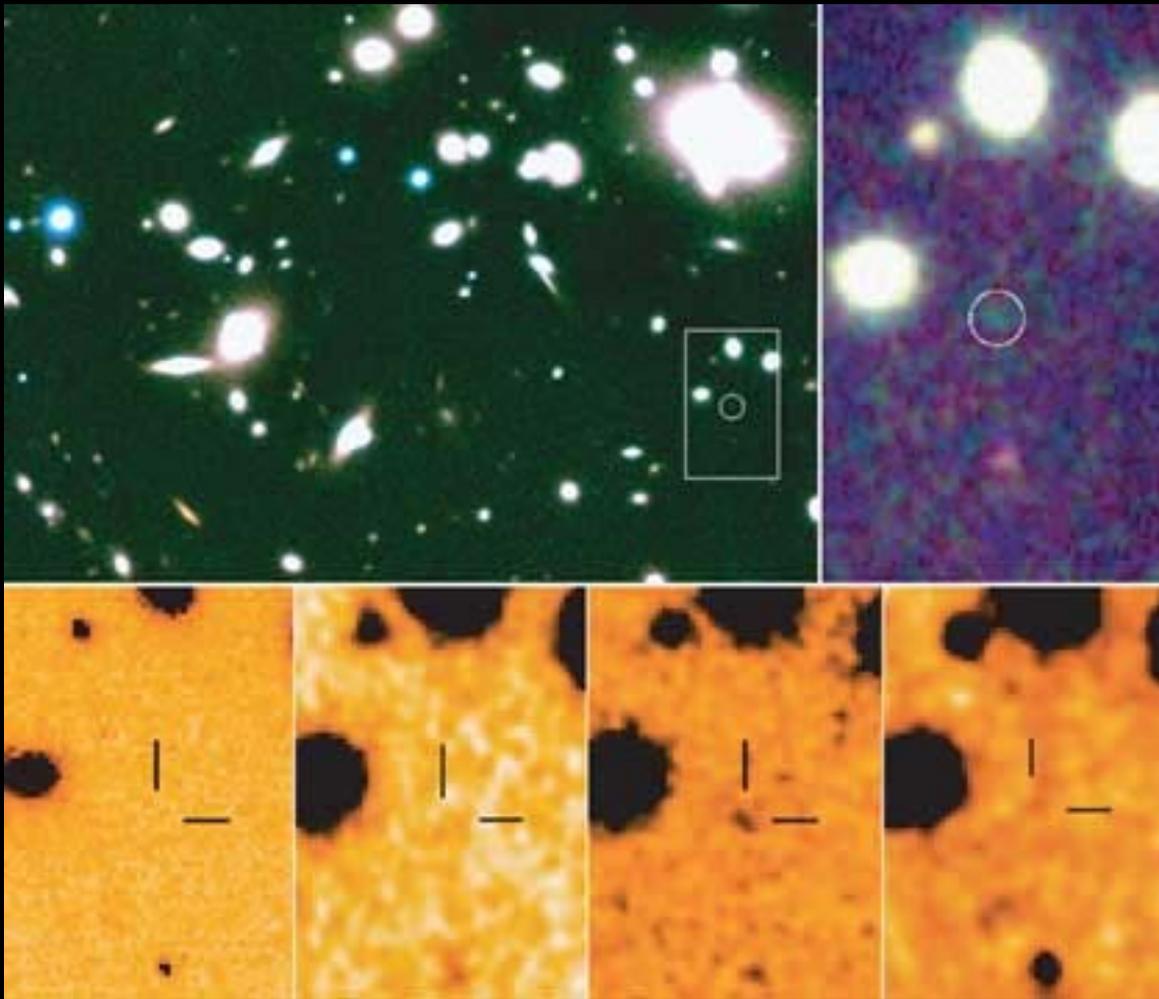


# SDSSp J1306: Precocious Supermassive Black Holes Challenge Theories, $z=5.99$



X-ray: NASA/CXC/D.Schwartz & S.Virani

# Eine der ersten Galaxien?



Galaxie Abell 1835  
IR1916 im nahen Infrarot  
(weißer Kreis).

Untere Bilder in den  
sichtbaren R-, J-, H- und  
K-Bändern.

Die Tatsache, dass die  
Galaxie nur im H-Band  
gesehen werden kann, ist  
ein Indiz für eine

Rotverschiebung um 10.

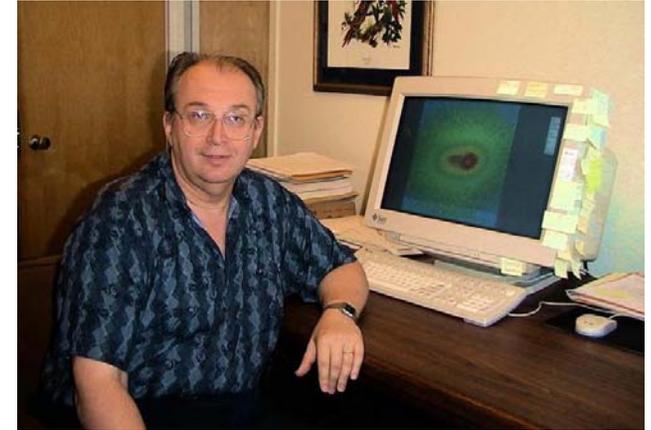
# Schwarze Löcher in nahen Galaxien

Die Suche nach Schwarzen Löchern in nahen Galaxien dauert jetzt bereits 20 Jahre: Messung der Rotations und zufälligen Bewegungen von Sternen und Gas nahe den galaktischen Zentren.

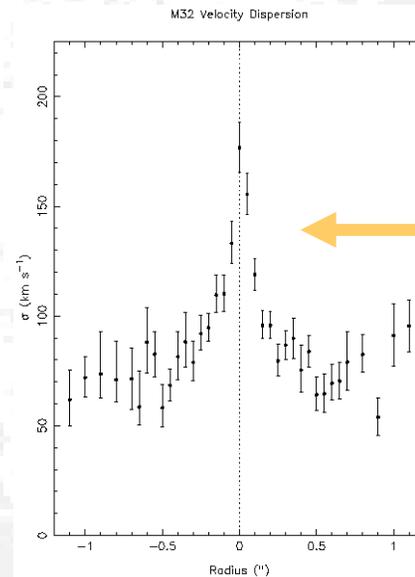
Das erste Schwarze Loch wurde in der Andromeda Galaxy M31 gefunden: 30,000,000 Sonnenmassen.



M32, der kleinere elliptische Begleiter von M31, hat ebenfalls ein Schwarzes Loch allerdings nur 3 Mio Sonnenmassen.

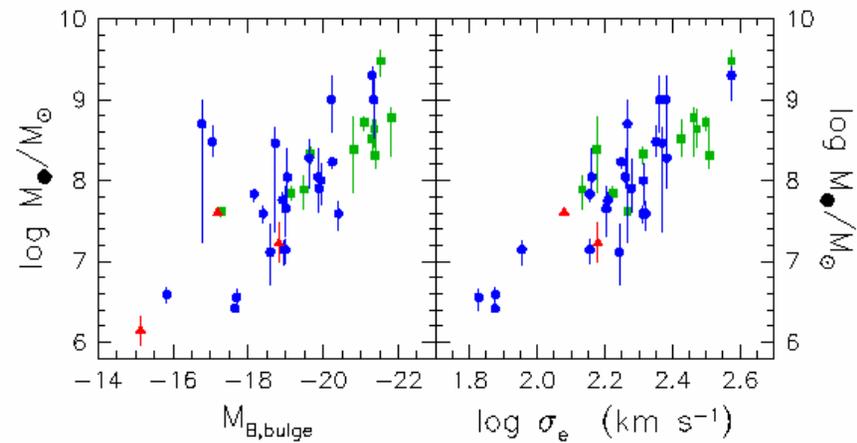
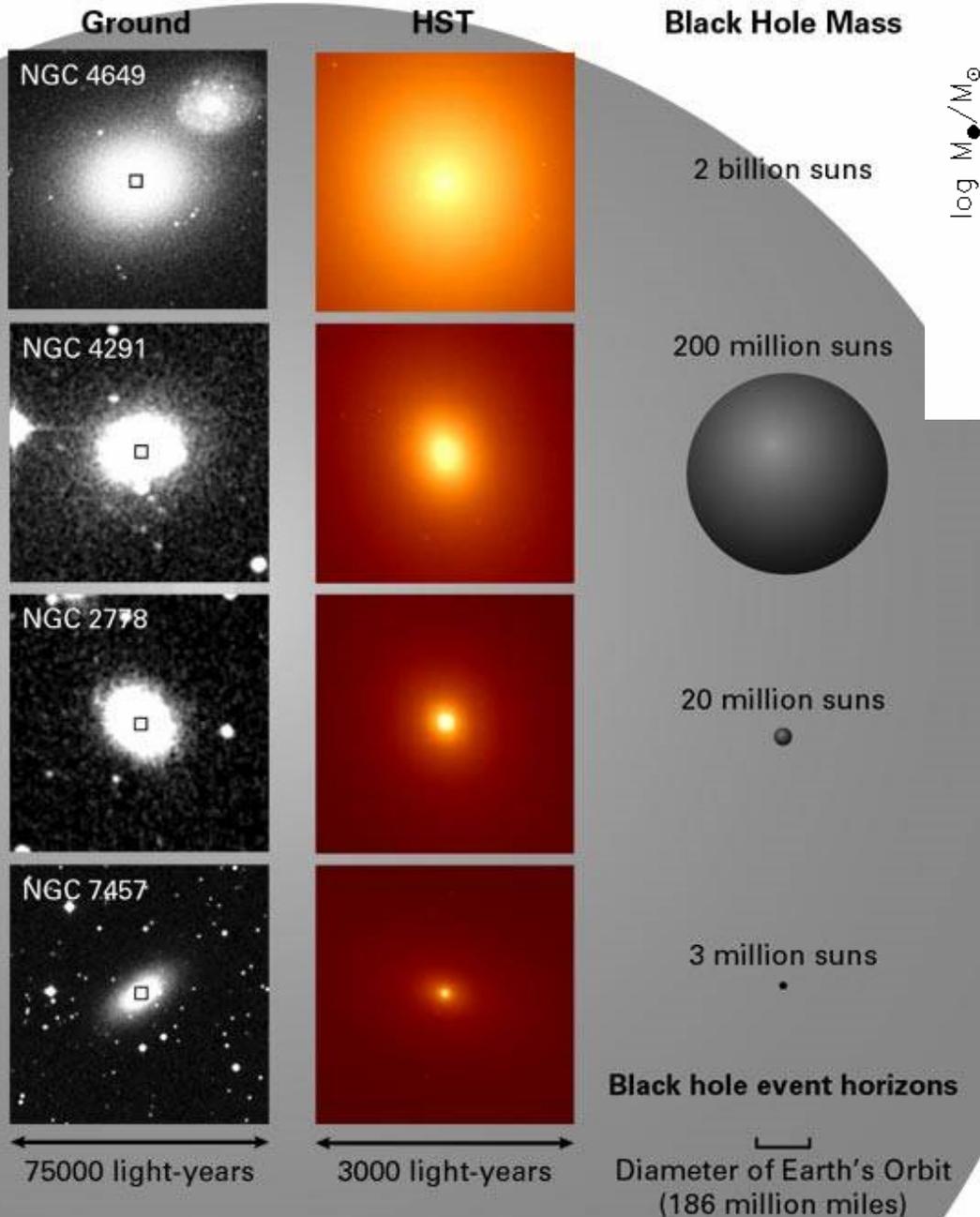


John Kormendy: Staff Member  
DAO, Victoria (1979 - 1989)



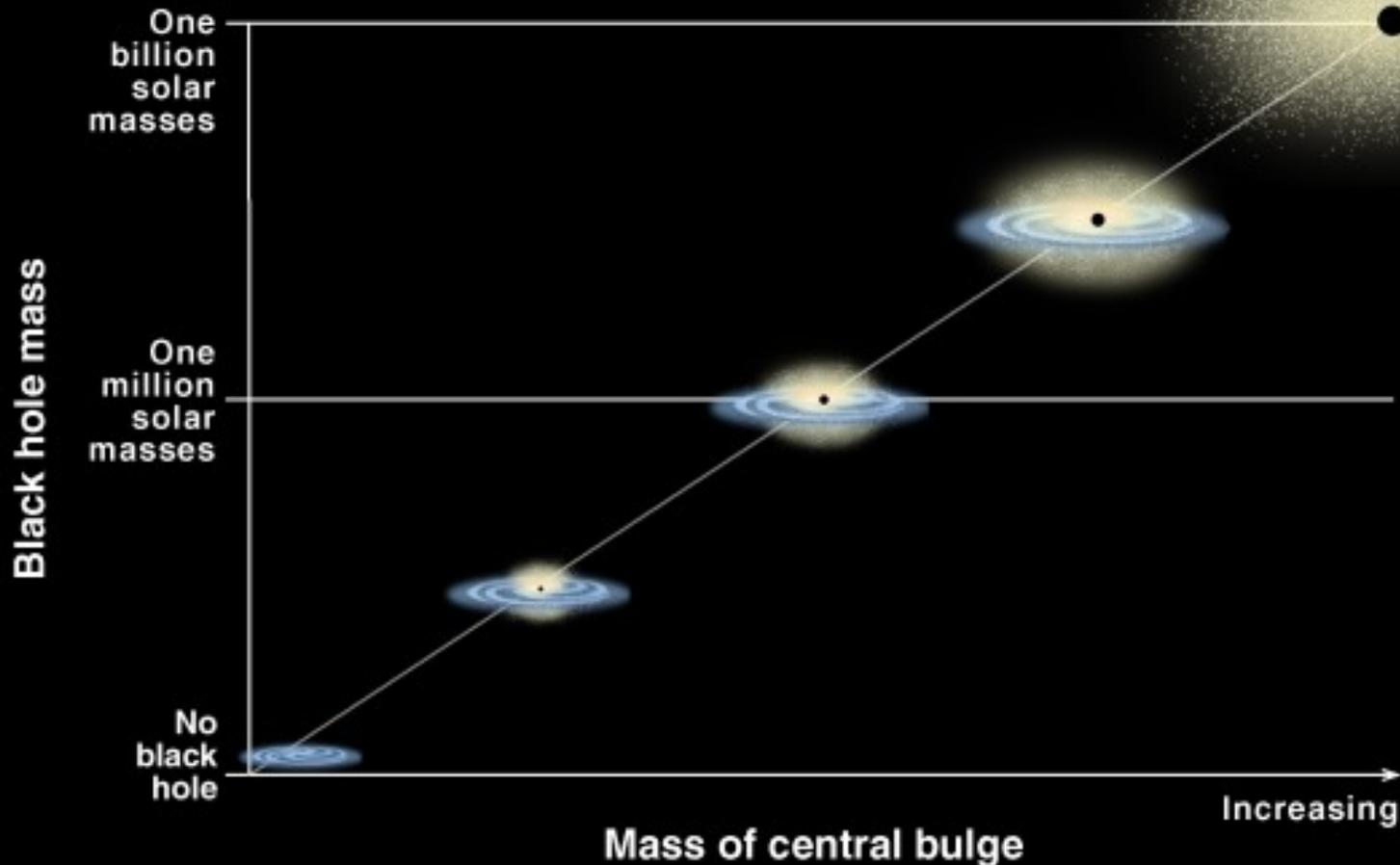
**M32  
velocity  
dispersion**

# Black Hole Mass Scales with Galaxy Size



- Links: die SL Masse korreliert mit der Leuchtkraft des bulges der Galaxie (blau: Sterne, grün: Gas, rot: kaltes Gas, Maser)
- Rechts: SL Masse korreliert mit der „velocity dispersion“, Kollaps der Galaxie im „dark matter halo“, Galaxienbildung und SL Fütterung

# Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



22 000 Systeme ... Emissionslinien, Sternentstehung

Ferrarese & Merritt 2000; Kauffmann et al.

# Mittelschwere Schwarze Löcher / Kugelsternhaufen

## Theoretical interpretation

Astronomers can deduce the presence of a central black hole and measure its mass.



Globular cluster  
without black hole

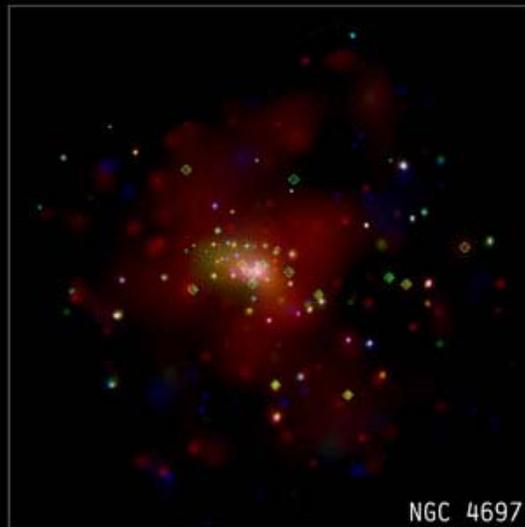
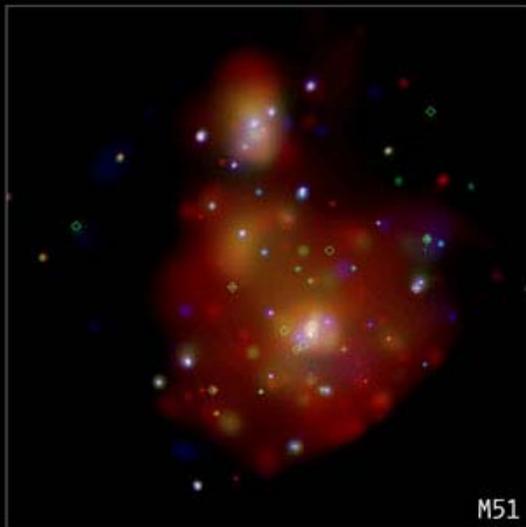
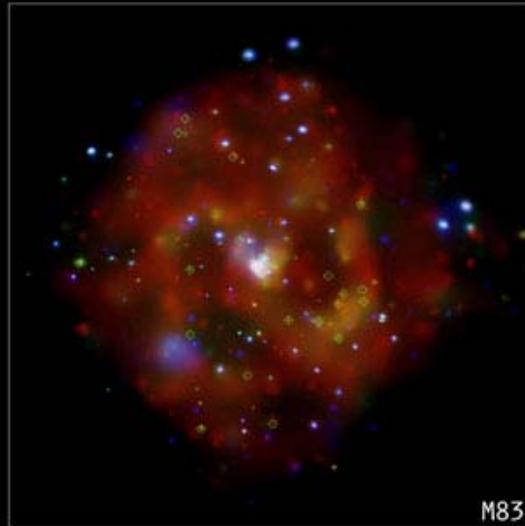
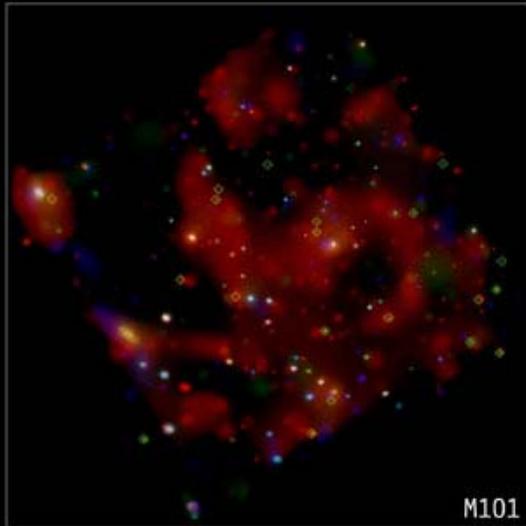


Globular cluster  
with black hole

NASA and A. Feild and R. Van Der Marel (STScI)

Älteste Sterne im Universum,  
Schwarze Löcher mit 20 000 facher Sonnenmasse, Kugelsternhaufen G1  
G1: in 2.2 Mio Lichtjahre Entfernung zur Erde, Andromeda Galaxie

# Mittelschwere Schwarze Löcher

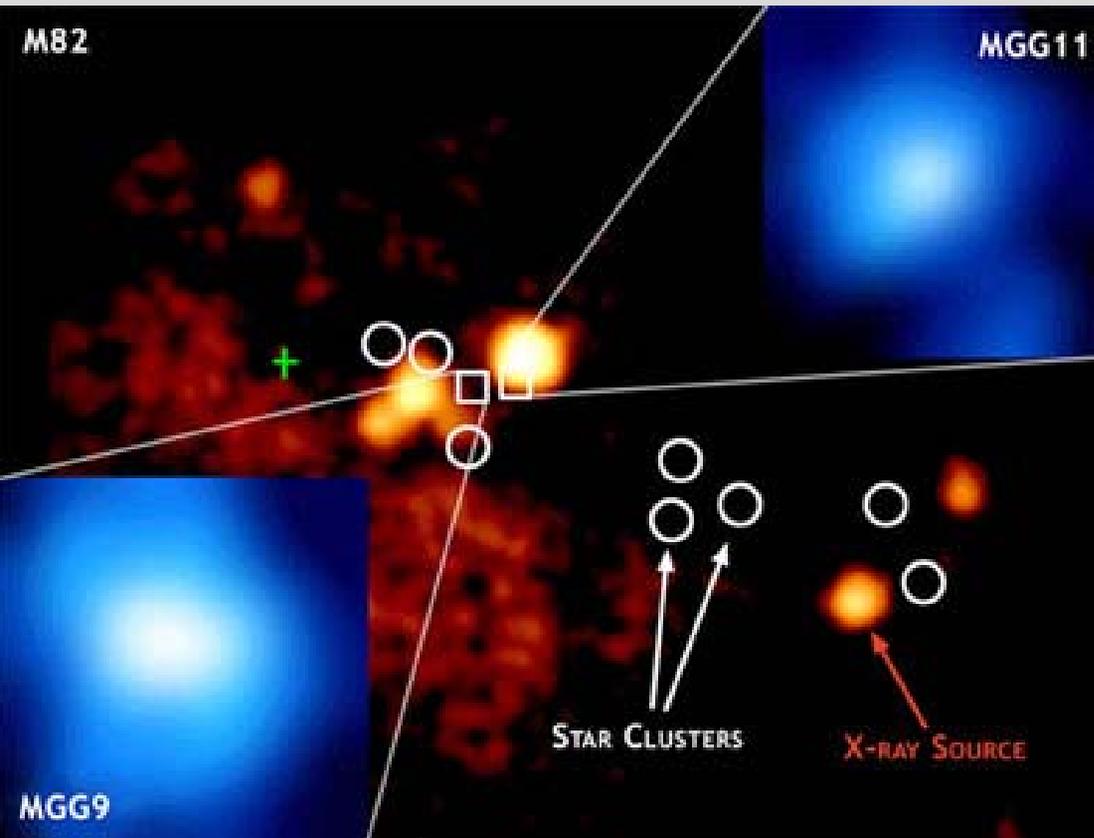


Suche nach 100-1000  
facher Sonnenmasse  
SL

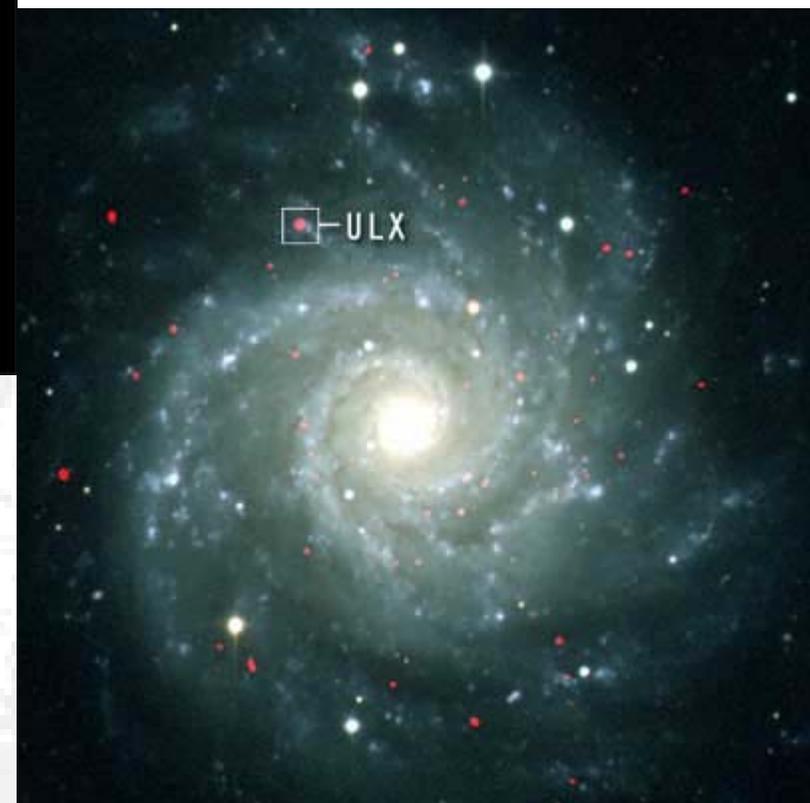
CHANDRA-  
Beobachtungen:  
Objekte zu kalt (1-4  
Mio Grad Celsius) für  
Neutronensterne/stellar  
e Schwarze Löcher  
und emittieren deutlich  
mehr

Röntgenstrahlung  
Quasisoft-sources

# Mittelschwere Schwarze Löcher



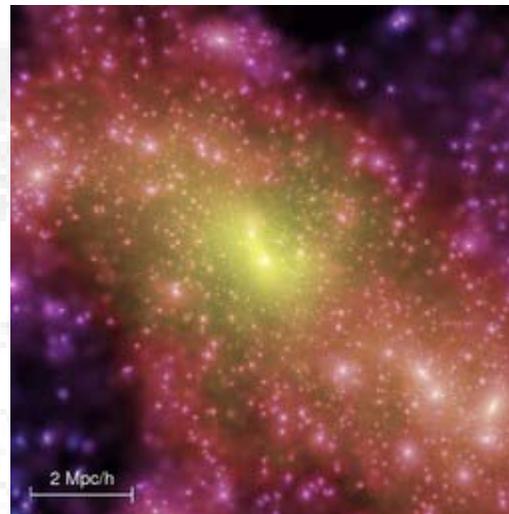
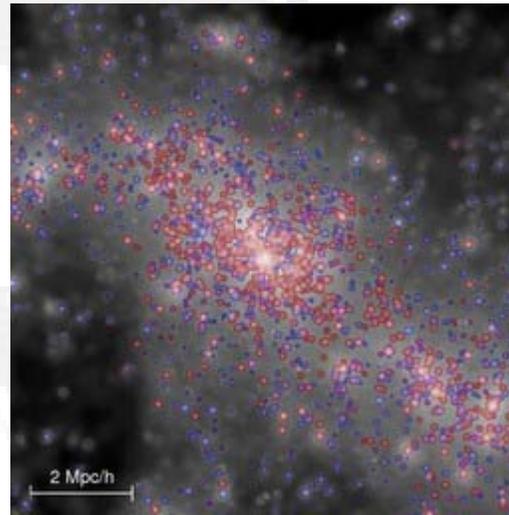
- M74, 10 000 fache Sonnenmasse, 32 Mio Lichtjahre von Erde entfernt
- Starke, nahezu periodische Variationen in der Röntgen-Leuchtkraft
- ULX: 10-1000 fache Röntgen Strahlung verglichen mit Neutronensternen und stellaren SL (ULS: Röntgenleuchtkraft  $>10^{39}$  erg/s)
- Entstehung: Verschmelzen kleinerer SL oder Überreste kleiner Galaxien nach WW



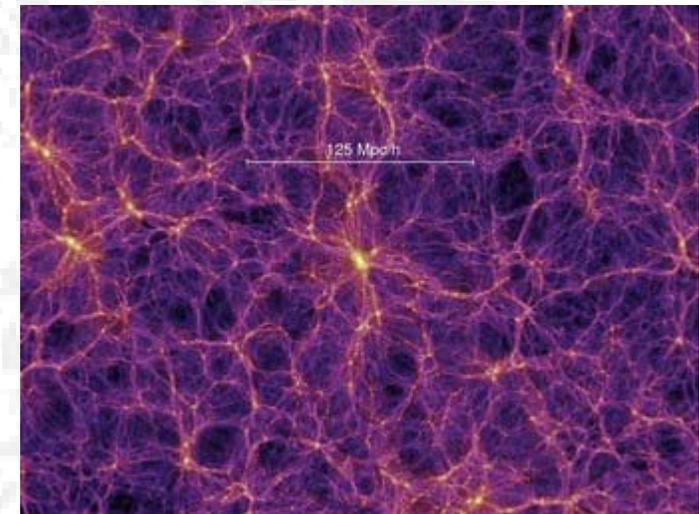
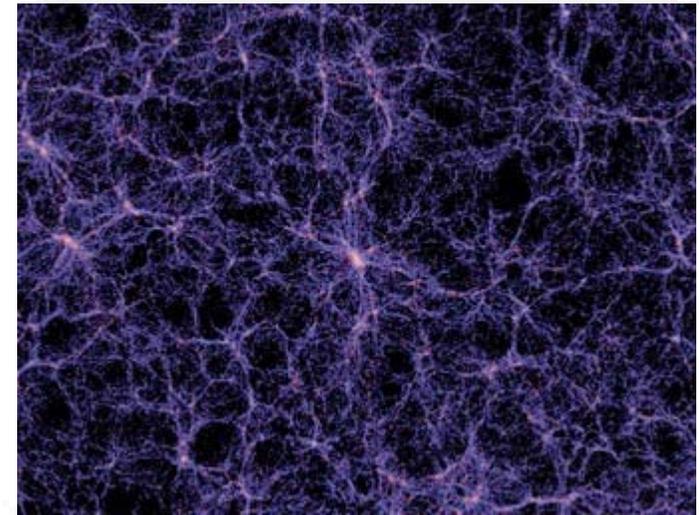
- CHANDRA: starburst M82, 1000 fache Sonnenmasse SL,
- Der Welt schnellster Computer GRAPE-6 (Japan), Sternhaufen-Simulationen, Entwicklung eines jungen, dichten Sternhaufens mit 600 000 Sternen -> kann Charakteristika des Sternhaufens MGG11 reproduzieren+erzeugt SL mit 800-3000 facher Sonnenmasse, innerhalb von 4 Mio Jahren, wenn stellare Dichten  $>$ Mio-fache Dichte in Nachbarschaft der Sonne, Kollisionen dominieren die weitere Entwicklung des Sternhaufens

# Millenium Simulation

- Mehr als  $10^{10}$  Teilchen
- Großer Bereich: mehrere Gpc
- Kleinsten Bereich:  $\sim 10$  kpc
- Rechts: oben, Galaxienverteilung (Licht); unten, korrespondierende Verteilung der dunklen Materie



2 Mpc/h

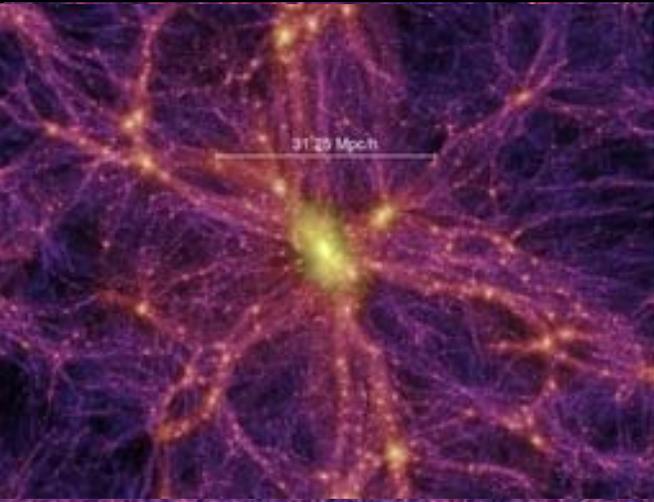


125 Mpc/h

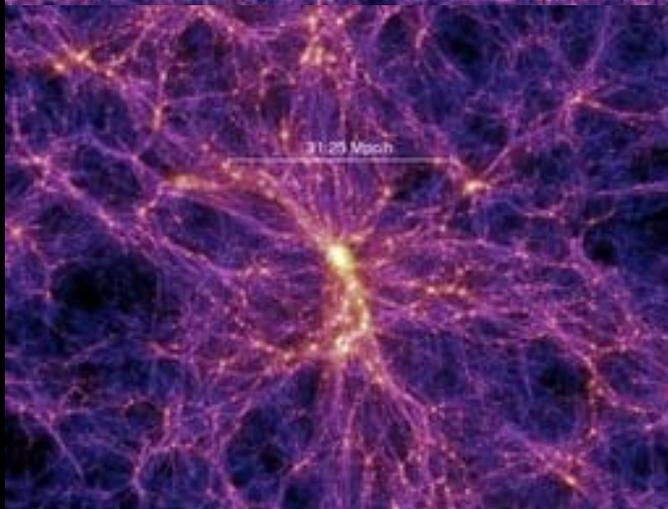
*Springel et al. 2005*

# Millennium Simulation

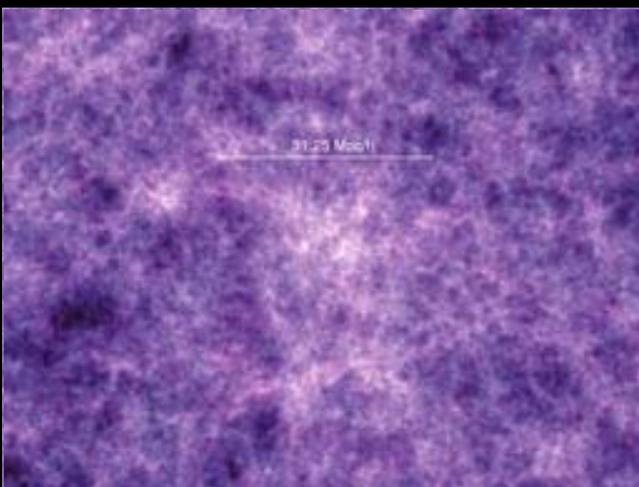
Redshift  $z=0$  ( $t = 13.6$  Gyr)



Redshift  $z=1.4$  ( $t = 4.7$  Gyr)



Redshift  $z=18.3$  ( $t = 0.21$  Gyr)



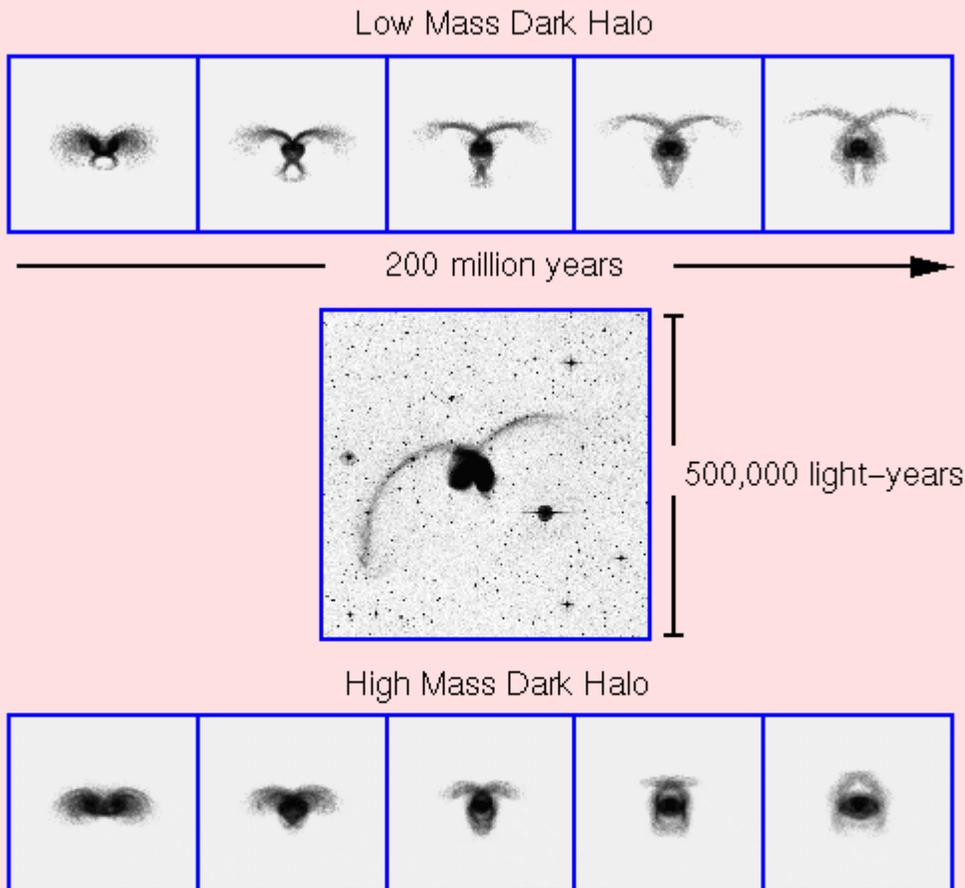
Schnitte durch das Dichtefeld, jeweils 15 Mpc/h dick,  
Sequenz von Vergrößerungen, jeweils um Faktor 4

# Simulation / Normale Spiralgalaxie



- Die ersten 1.7 Milliarden Jahre einer virtuellen Milchstraße
- Ausgangsbasis: Universum mit Ausdehnung von 15 Mio Lichtjahren, 390 000 Partikel + Staub + Gas + dunkle Materie
- Dunkle Materie verklumpt sehr schnell zu Halo
- Nach 900 Mio Jahren: Spiralarme
- Nach 1.7 Milliarden Jahren: Materiebalken
- Spiralgalaxie mit 30000 Lichtjahren Radius entsteht, ca. 2/3 der Ausdehnung unserer Milchstraße

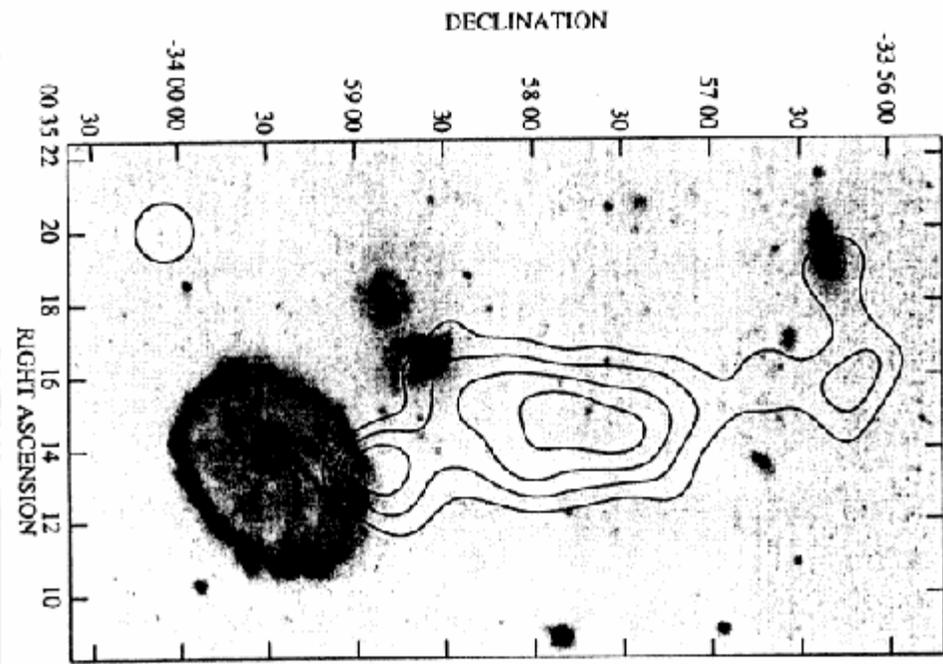
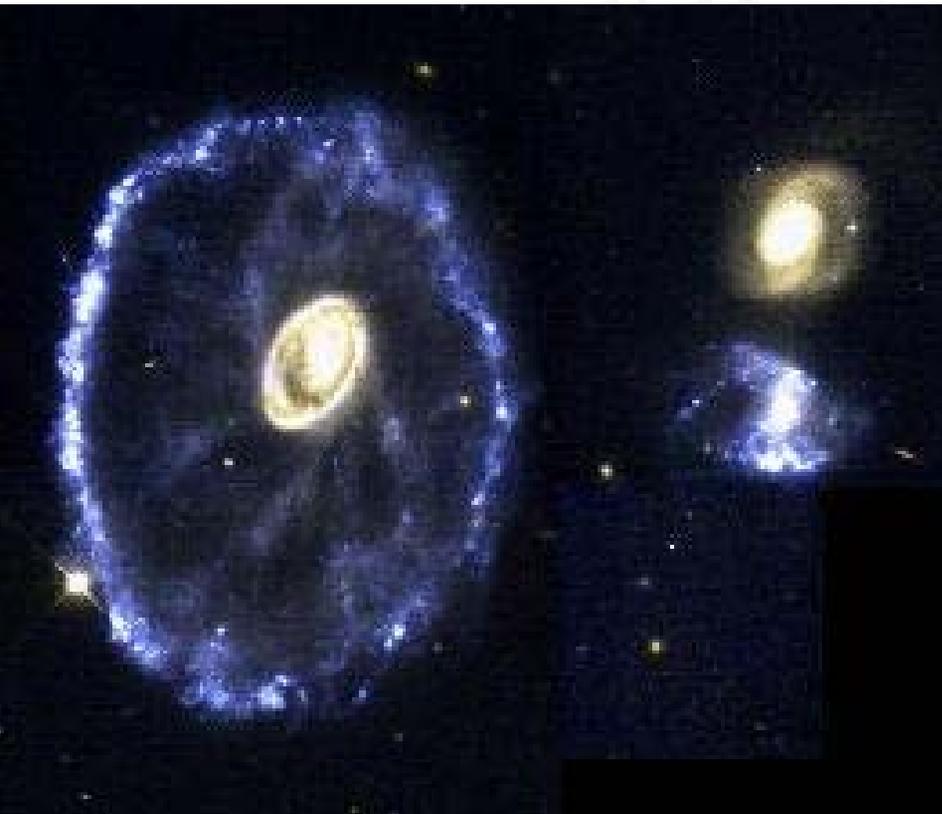
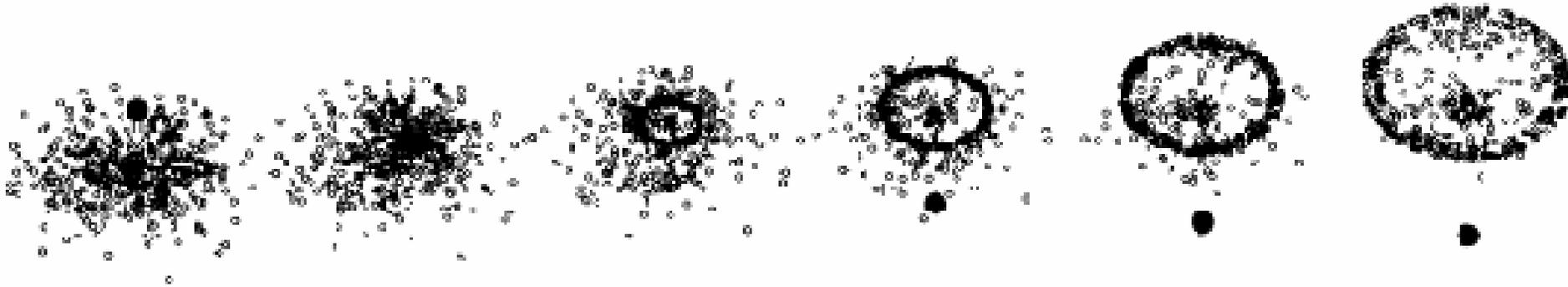
# Simulationen / WWW



- 6% pekuliare Galaxien
- Toomre & Toomre 1973 erste Simulationen
- Aus Gezeitenwirkung auf beteiligte Galaxiengrößen schließen

image courtesy John Dubinski, CITA

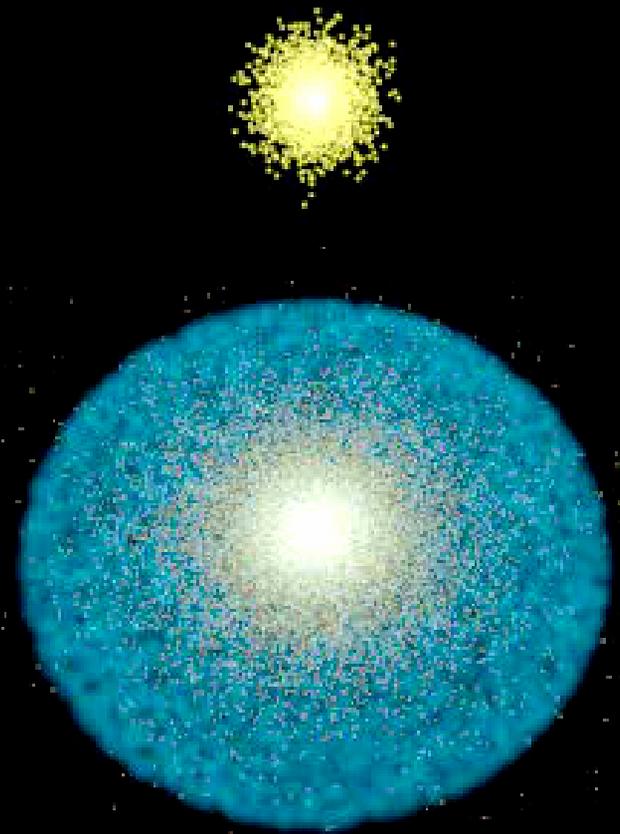
# Wagenrad-Galaxie



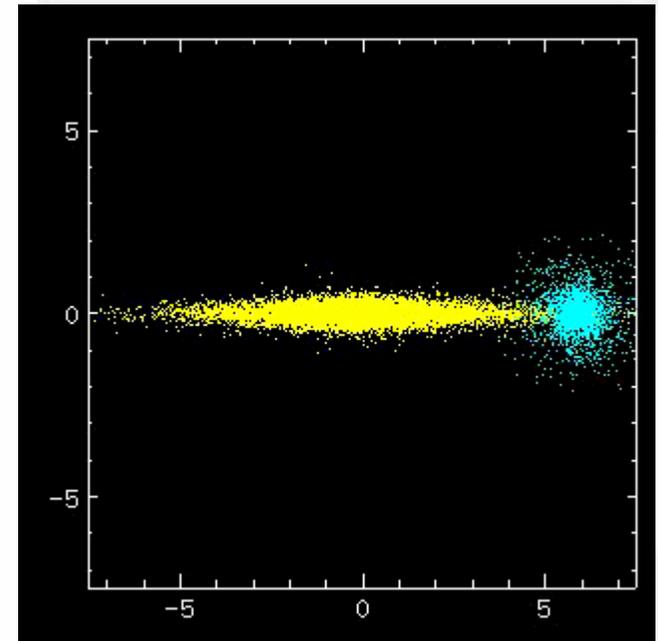
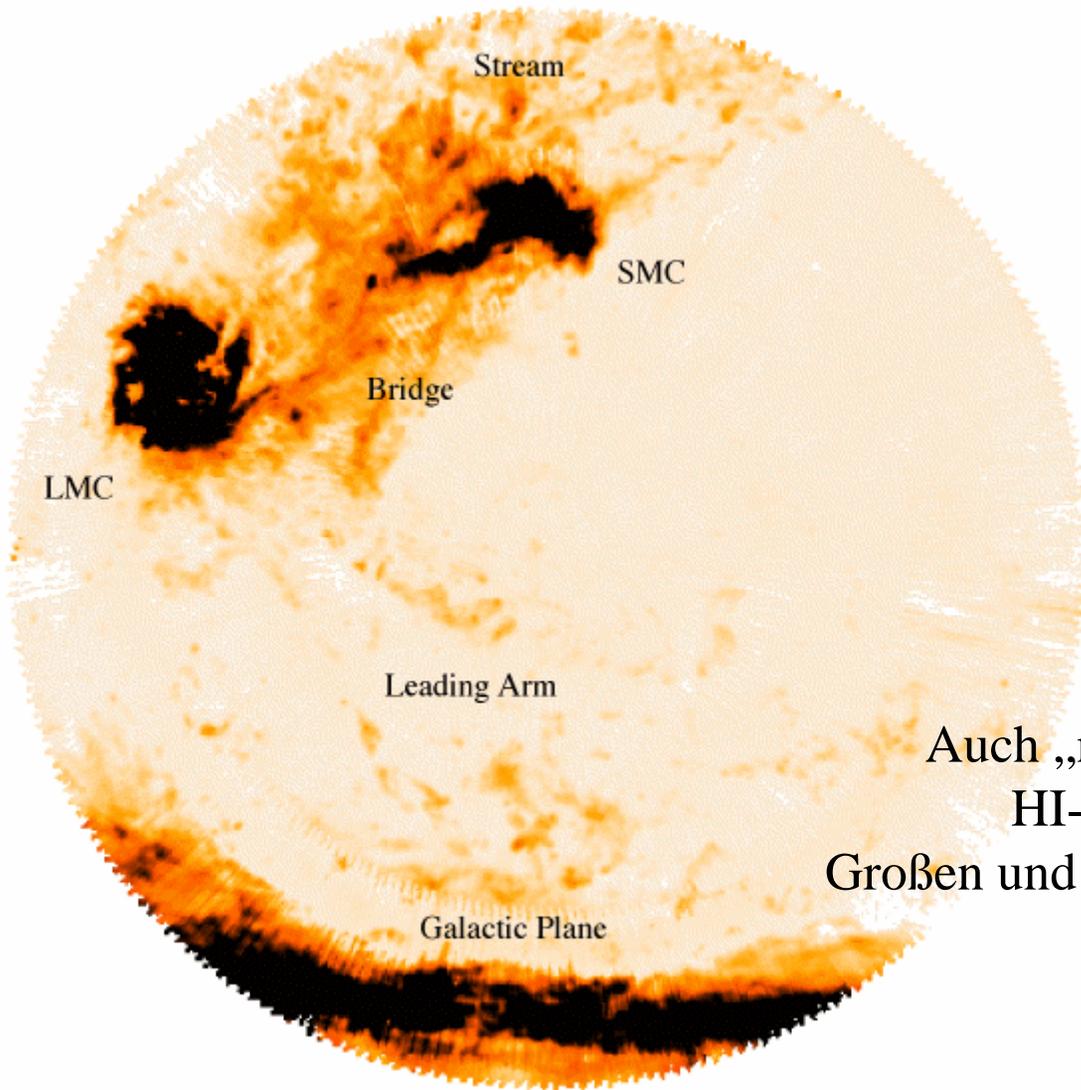
# Wagenrad-Galaxie



- Expansionsrate des Rings: 60 km/s
- Alter: 300 Mio Jahre
- Erster Ring schwach und beobachteter Ring ist zweiter Ring
- Speichen sind natürliche Konsequenz der Instabilitäten in Gas hinter der expandierenden ringförmigen Dichtewelle



# Milchstraße / Wechselwirkungen

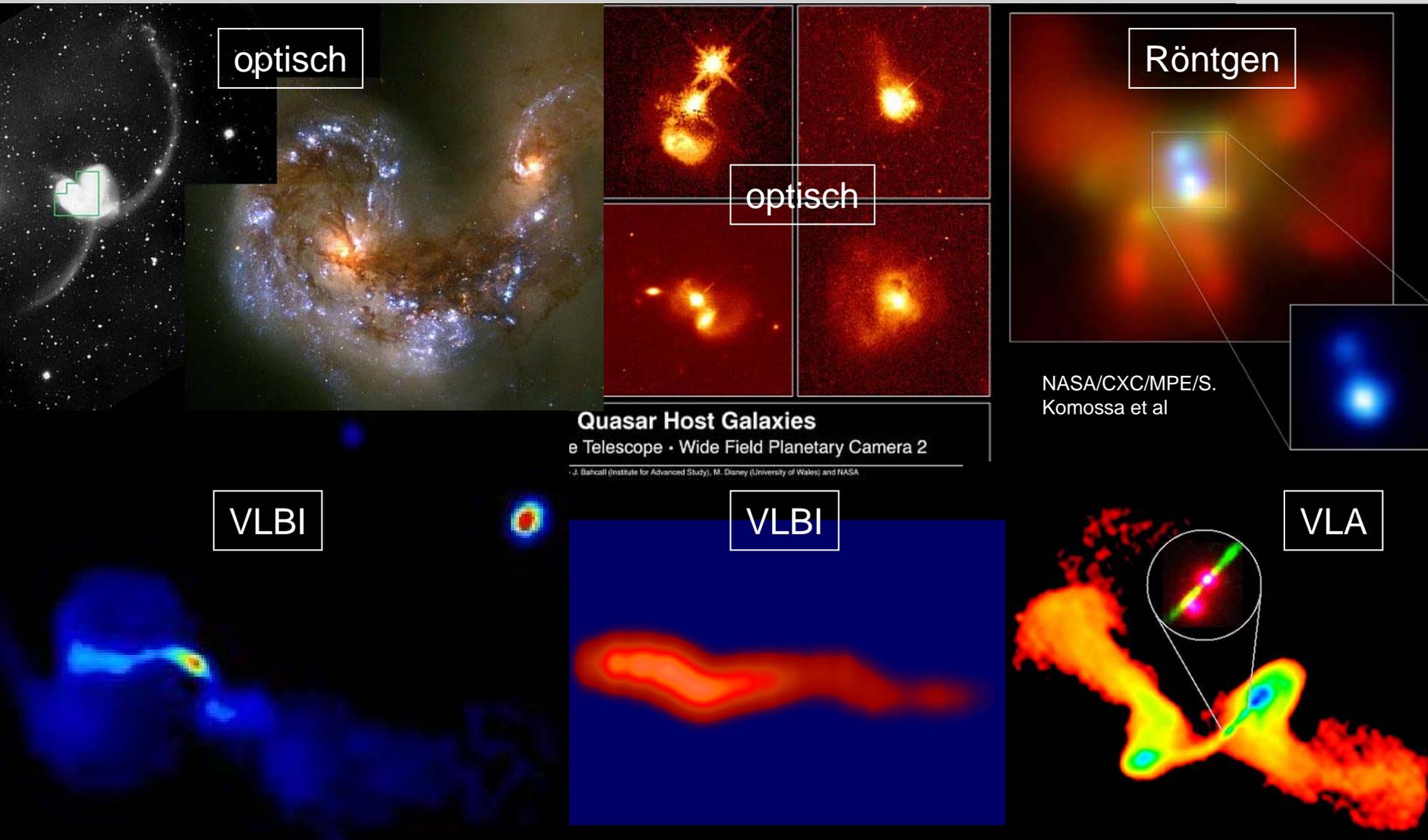


Auch „normale“ Galaxien wechselwirken!  
HI-Karte, die Milchstraße ww mit der  
Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke

# Milchstraße & Andromeda



# Supermassive Binäre Schwarze Löcher auf verschiedenen Skalen, Entwicklungszuständen?



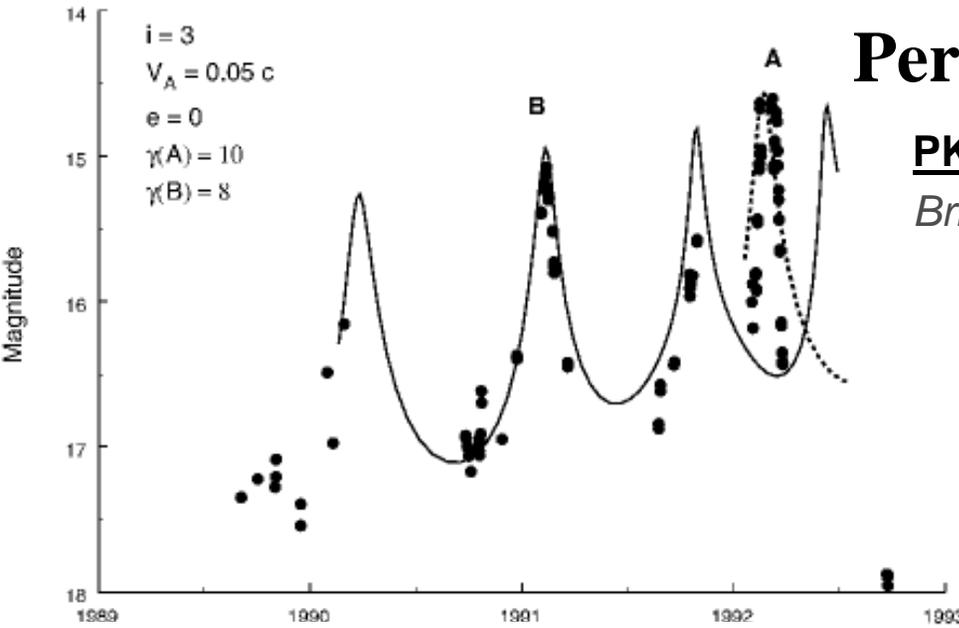
# Supermassive Binäre Schwarze Löcher

sind von fundamentaler astrophysikalischer Relevanz im Kontext....:

- der Steigerung der Aktivität Aktiver Galaxienkerne
- der Erklärung unterschiedlicher Klassen radiolauter AGN
- der Erklärung beobachteter unterschiedl. Ausrichtungen zwischen Jets und Akkretionsscheiben
- der **Erzeugung gekrümmter Jetpfade**
- der **Erzeugung (semi) periodischer Ausbrüche in Lichtkurven (optisch – Gamma)**
- etc....

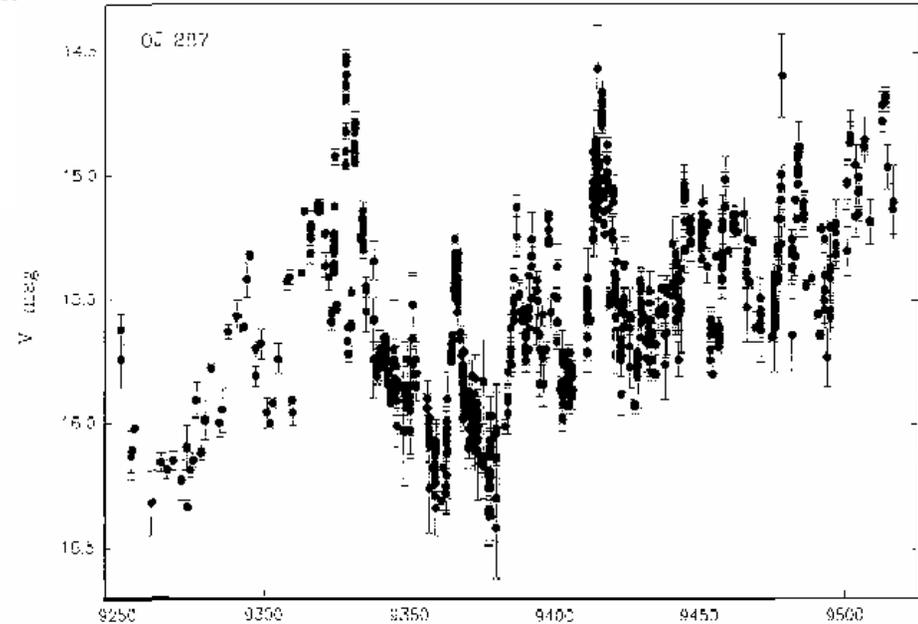
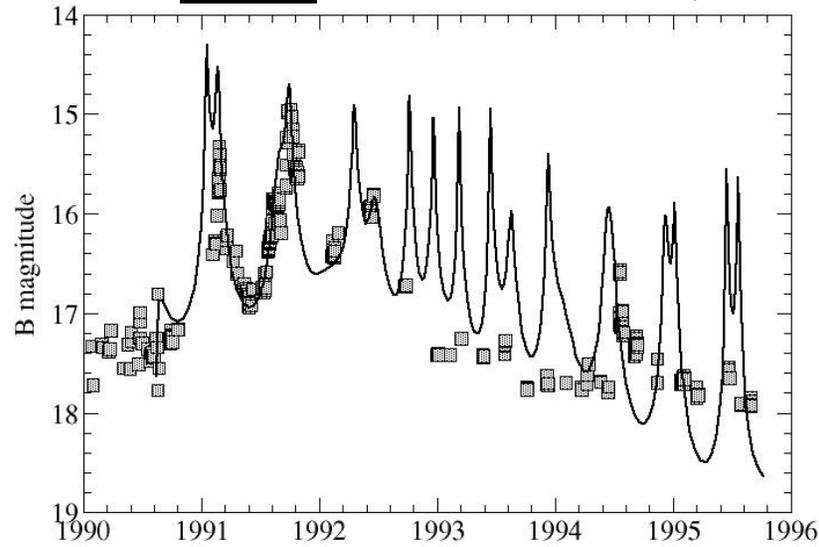
# Periodische Optische Variabilität / Supermassive Binäre Schwarze Löcher

## Periodische Optische Lichtkurven

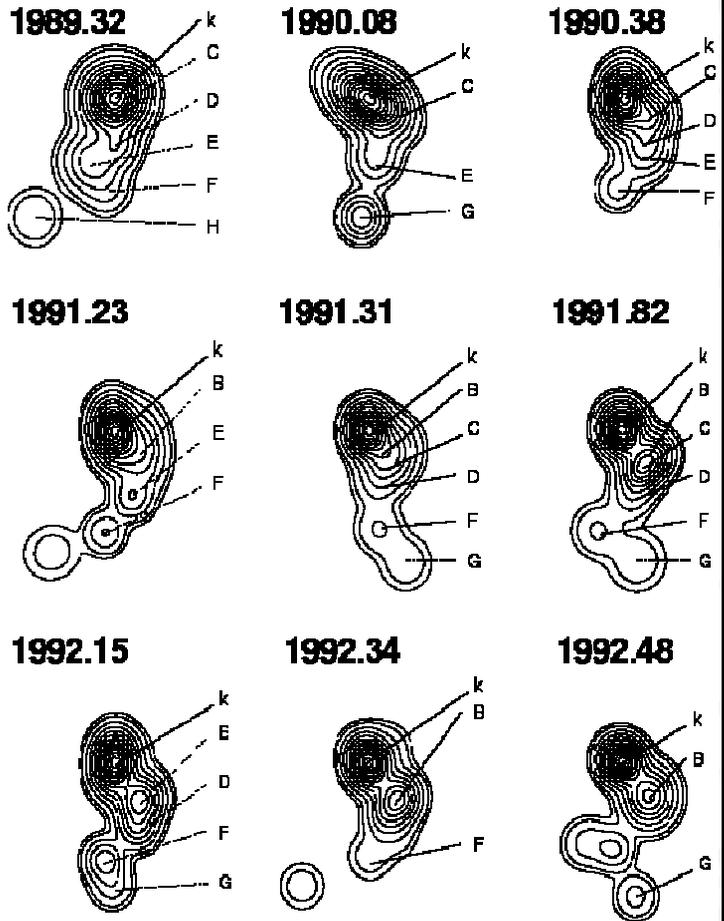


**OJ287: “The Rosetta Stone of Blazars”**  
*e.g., Takalo 1994, Abraham 2000*

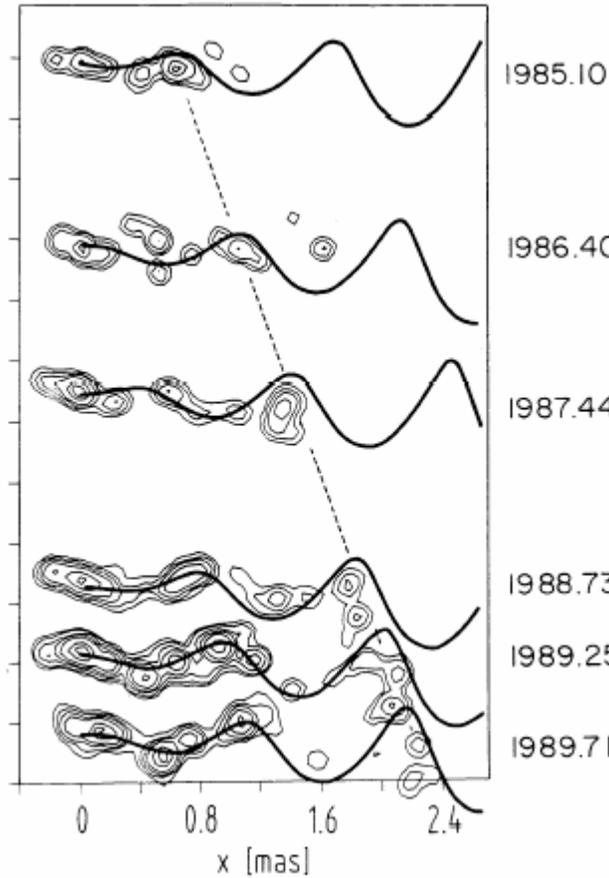
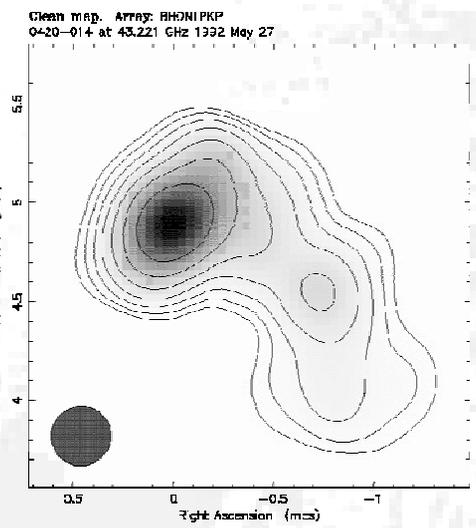
**3C 345:** *Lobanov & Roland, 2005*



# Helikale Jets / Supermassive Binäre Schwarze Löcher

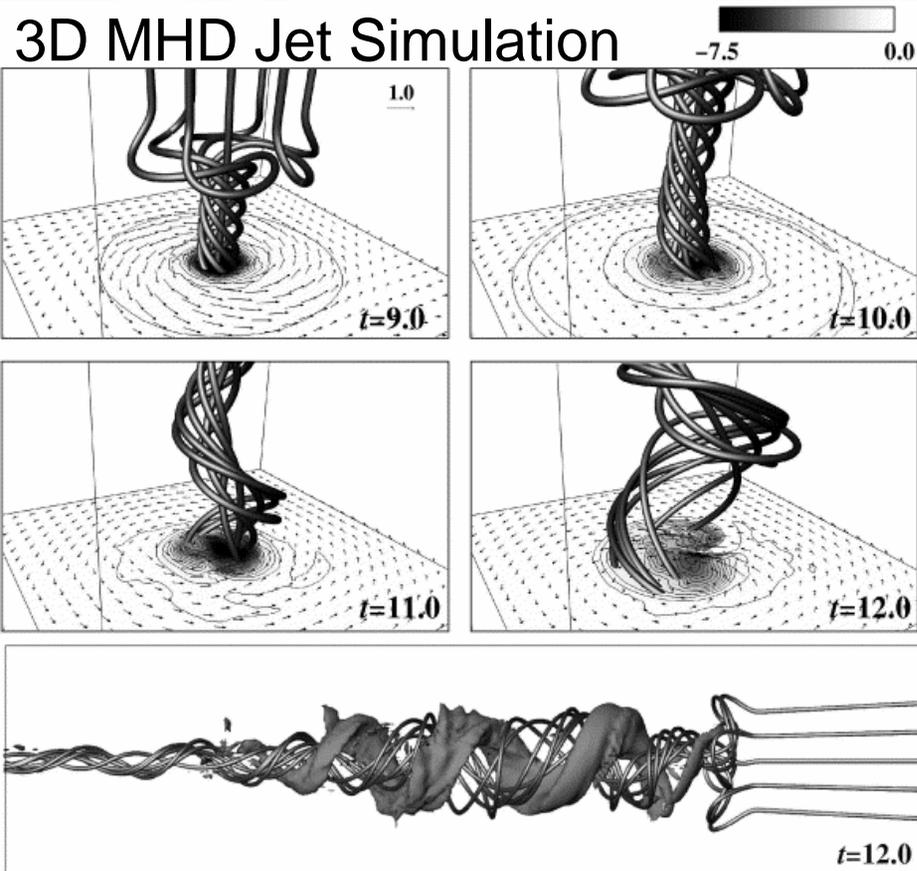


**PKS 0420-014**  
**z= 0.95**



**1928+738**  
**z= 0.3**

# Helikale Jets / Modelle



*Nakamura et al. 2001*



- Sweeping magnetic twist mechanism

*Nakamura et al. 2001*

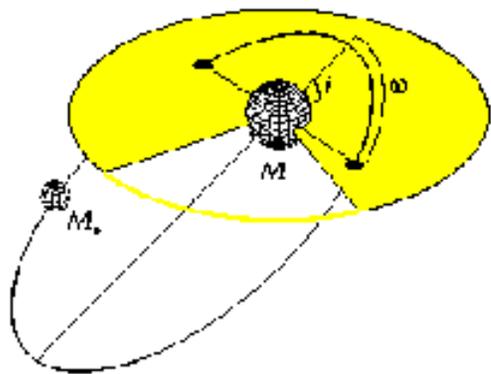
- Spin-induzierte Präzession

*Caproni et al. 2004*

- Supermassive Binäre Schwarze Löcher (SBBH):

- Bahn-Bewegung des Jet-emittierenden Schwarzen Lochs (*Kaastra & Roos 1992*)
- **Präzessions Effekte**, Präzession der Akkretionsscheibe um das Jet-emittierende Schwarze Loch unter Gravitation (*Katz 1997*), oder aufgrund von geodätischer Präzession (*Begelman et al. 1980*)

# Supermassive Binäre Schwarze Löcher / Modellrechnungen

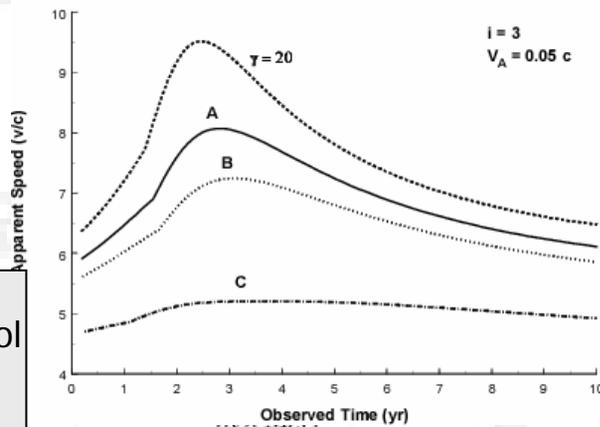


$$M_1 = 7 \cdot 10^7 M_{\text{sol}} \quad M_2 = 2 \cdot 10^8 M_{\text{sol}}$$

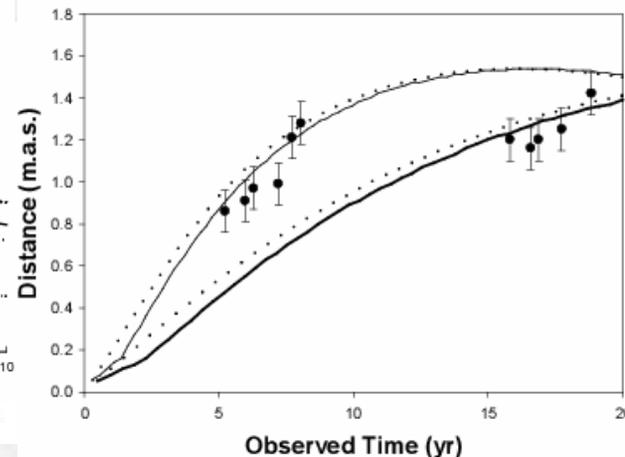
$$P_{\text{orb}} \approx 150 \text{ years}$$

$$P_{\text{prec}} \approx 10000 \text{ years}$$

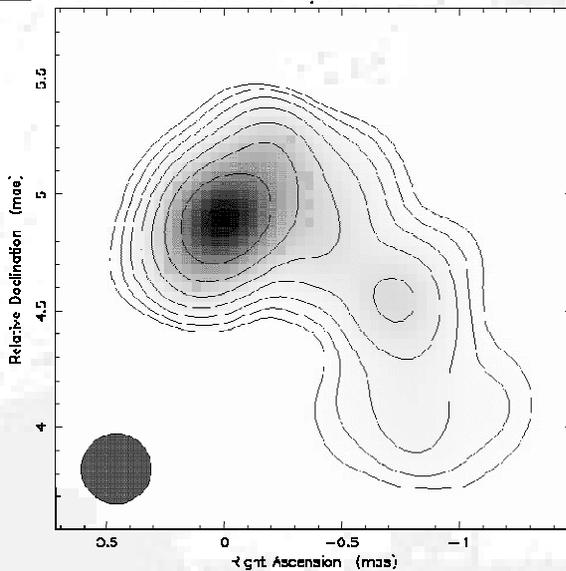
VLBI Components: Apparent speeds



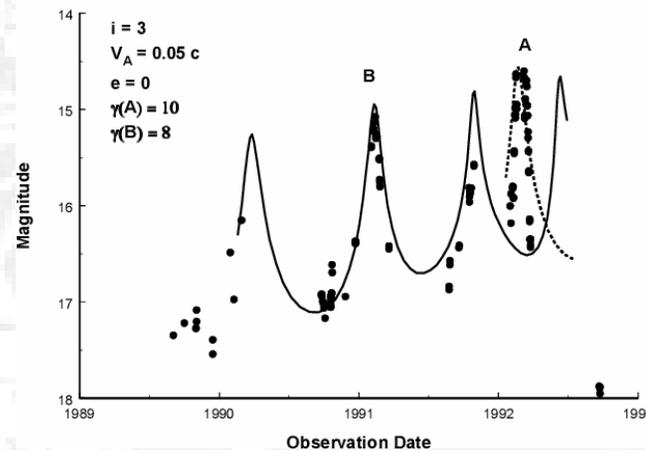
Core Separation: Components D & E



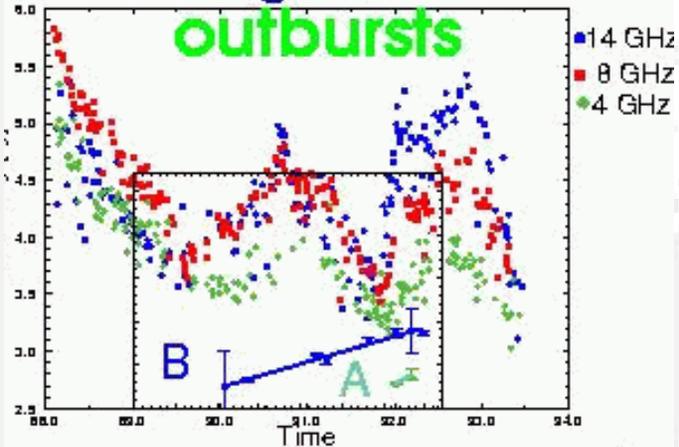
Clean map. Array: RHONIPKP  
0-20-C14 at 43.221 GHz - 992 May 27



Optical Light Curve



## Radio lightcurves

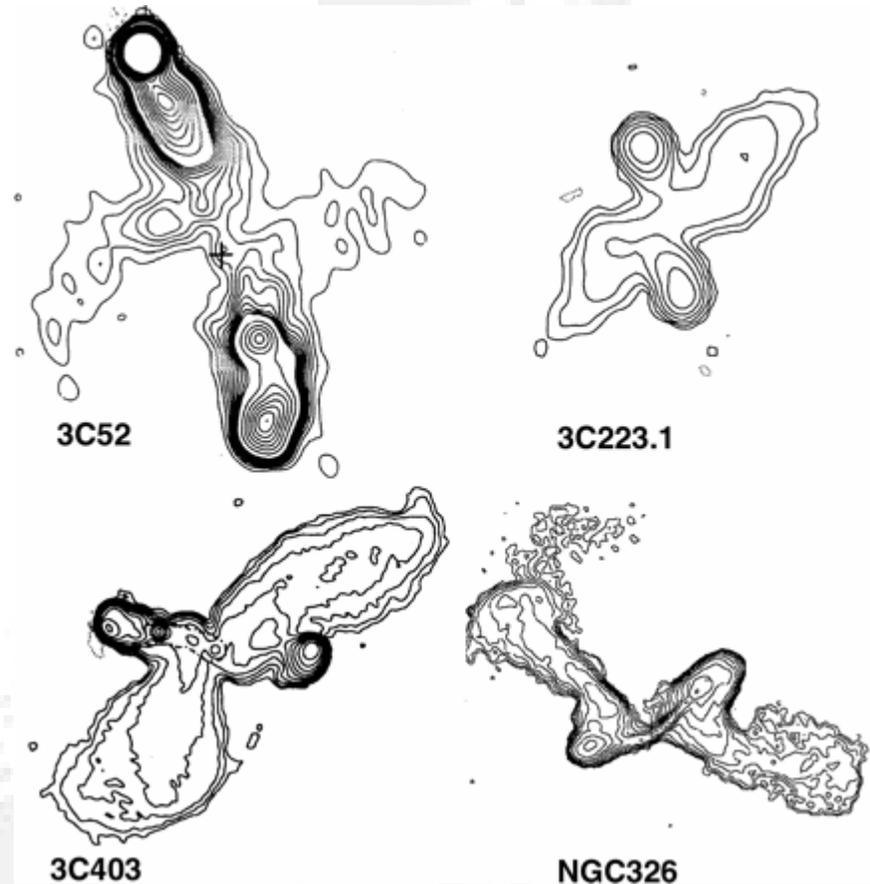


Britzen et al., 2000, *A&A* **360**, 65;  
Britzen et al., 2001, *A&A* **374**, 784

# Binäre Supermassive Schwarze Löcher

ändert sich die Jetrichtung aufgrund eines Spin-flip?

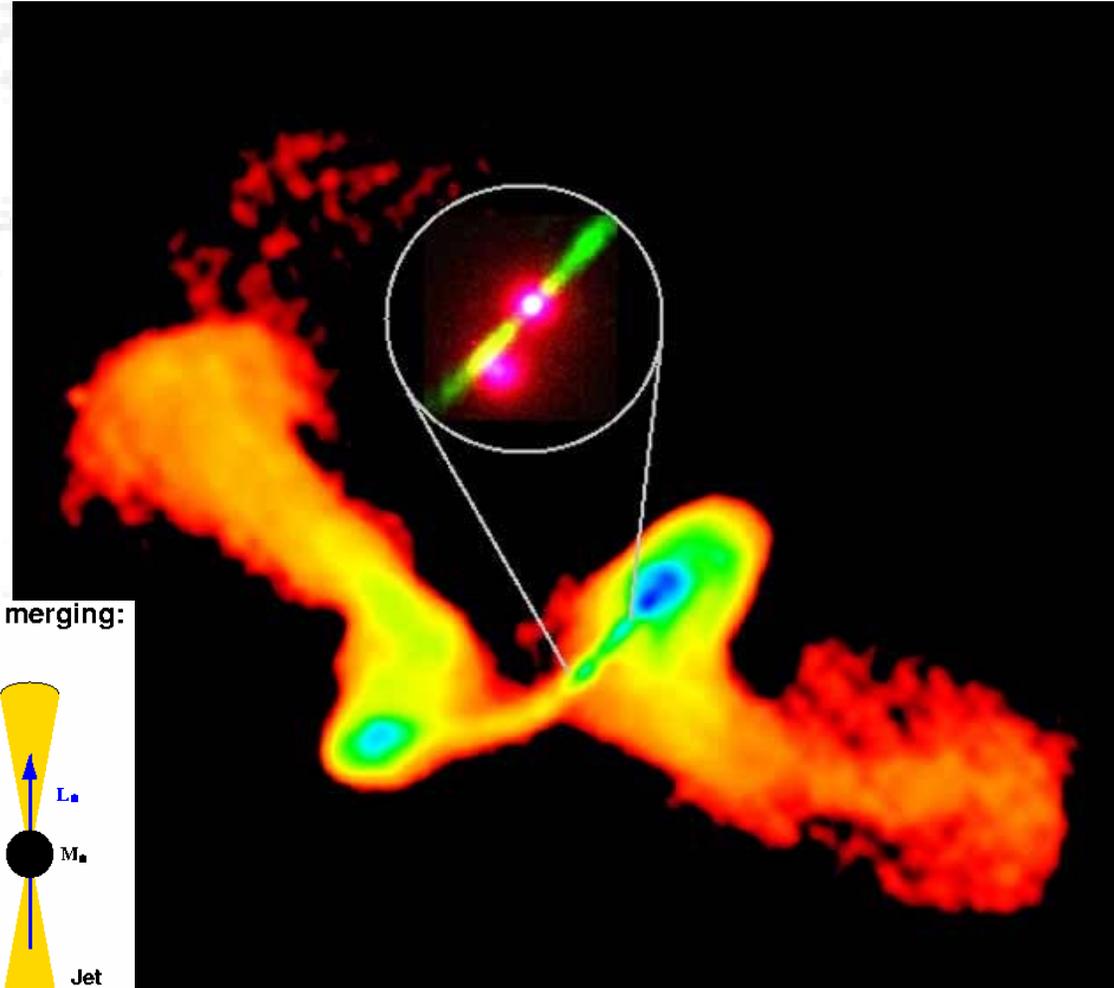
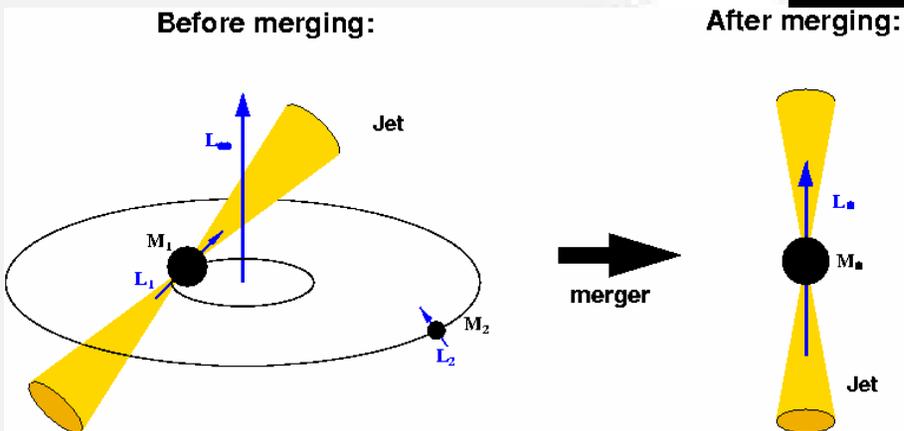
- Zusammenstellung von 4 deutlichen Beispielen einer X-förmigen Morphologie
- VLA radio observations of 3C52 (Leahy & Williams, 1984, MNRAS 210, 929), 3C223.1, 3C403 (Dennett-Thorpe et al., 1999, MNRAS 304, 27), and NGC 326 (Murgia et al., 2001, A&A 380, 102)



# Nach der Verschmelzung von SBBH

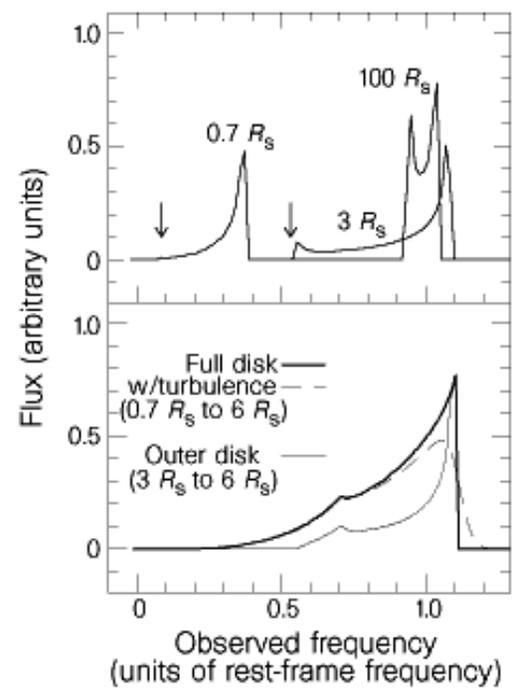
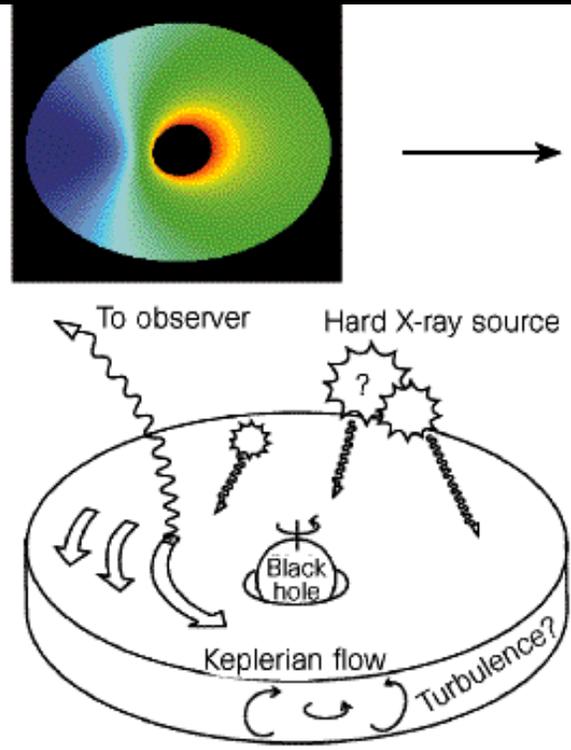
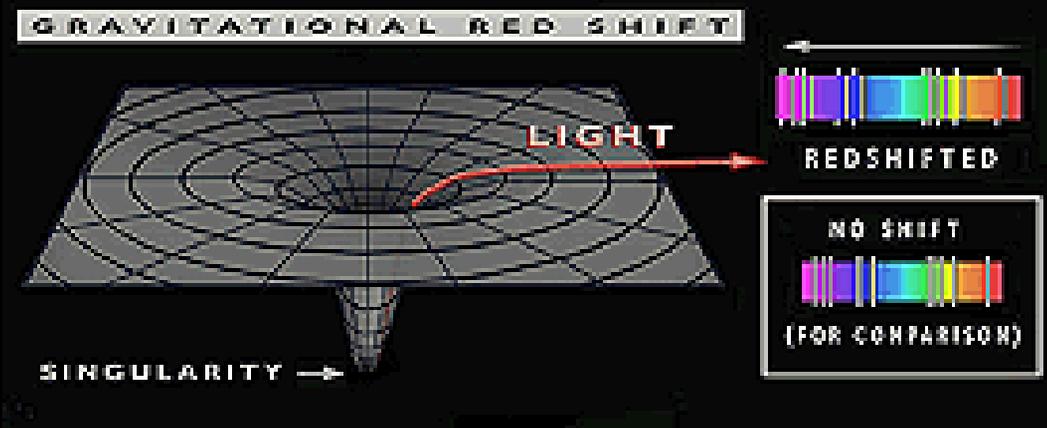
## Änderung der Jet-Ausrichtung durch einen Spin-Flip?

- NGC 326
- Verschmelzung der Schwarzen Löcher: Jets ändern ihre Richtung
- Jet-flip aufgrund eines Spin-flips des primären Schwarzen Lochs (dem orbital angular momentum folgend)

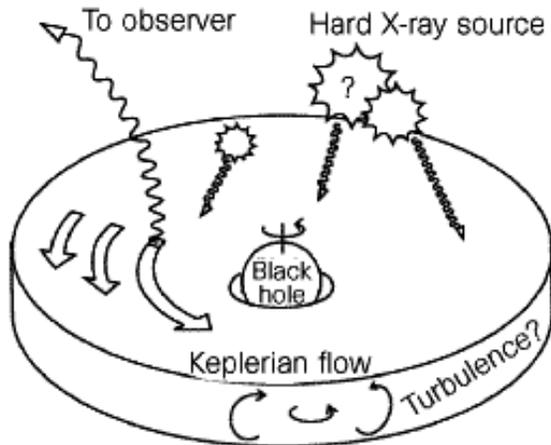
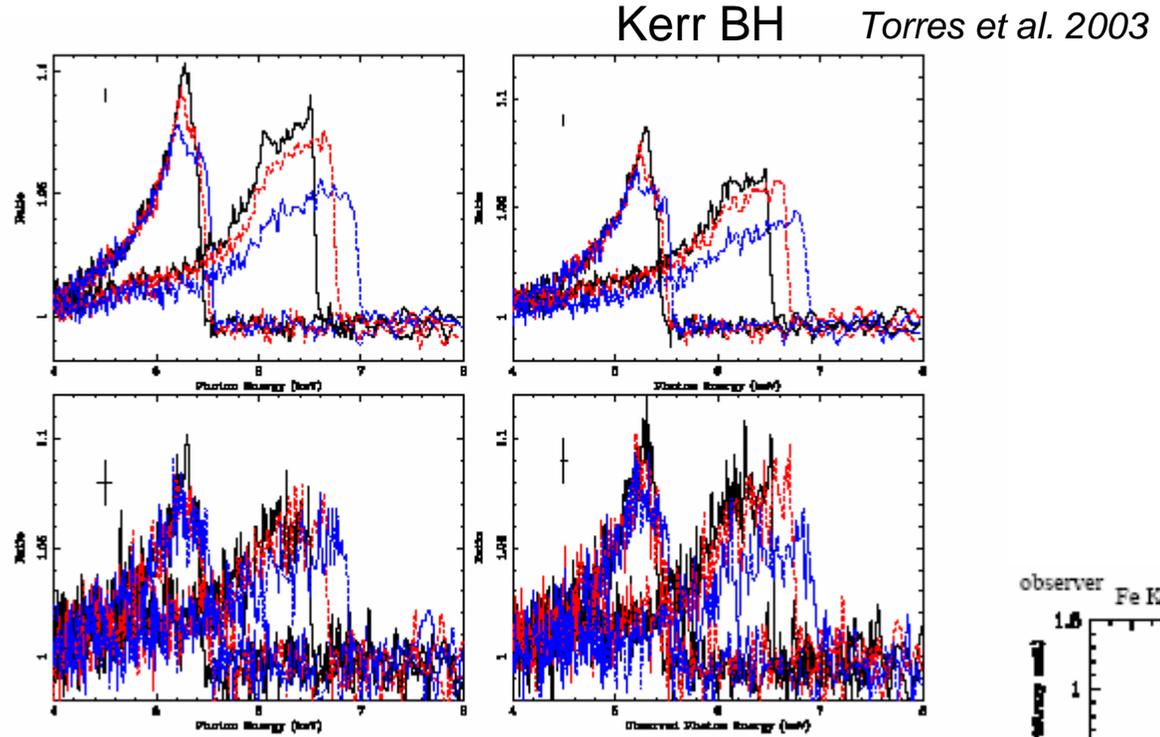
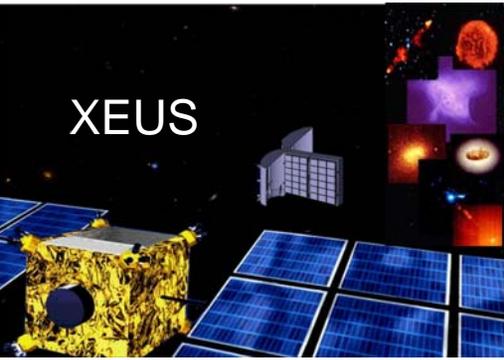


National Radio Astronomy Observatory / AUI, Murgia et al.; STScI (for the inset).

Die Eisenlinie  
 (Fluoreszenzlicht) aus den innersten Teilen der Akkretionsscheibe zeigt die Signaturen von gravitationsbedingter Rotverschiebung und deutet auf ein extremes Gravitationsfeld hin.

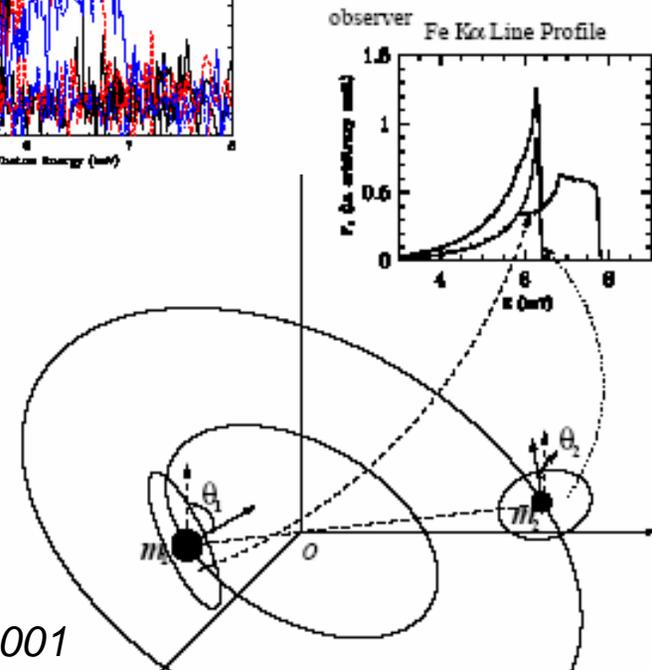


# SMBH / Zukunft: direkter Nachweis mit Röntgenstrahlung



XEUS

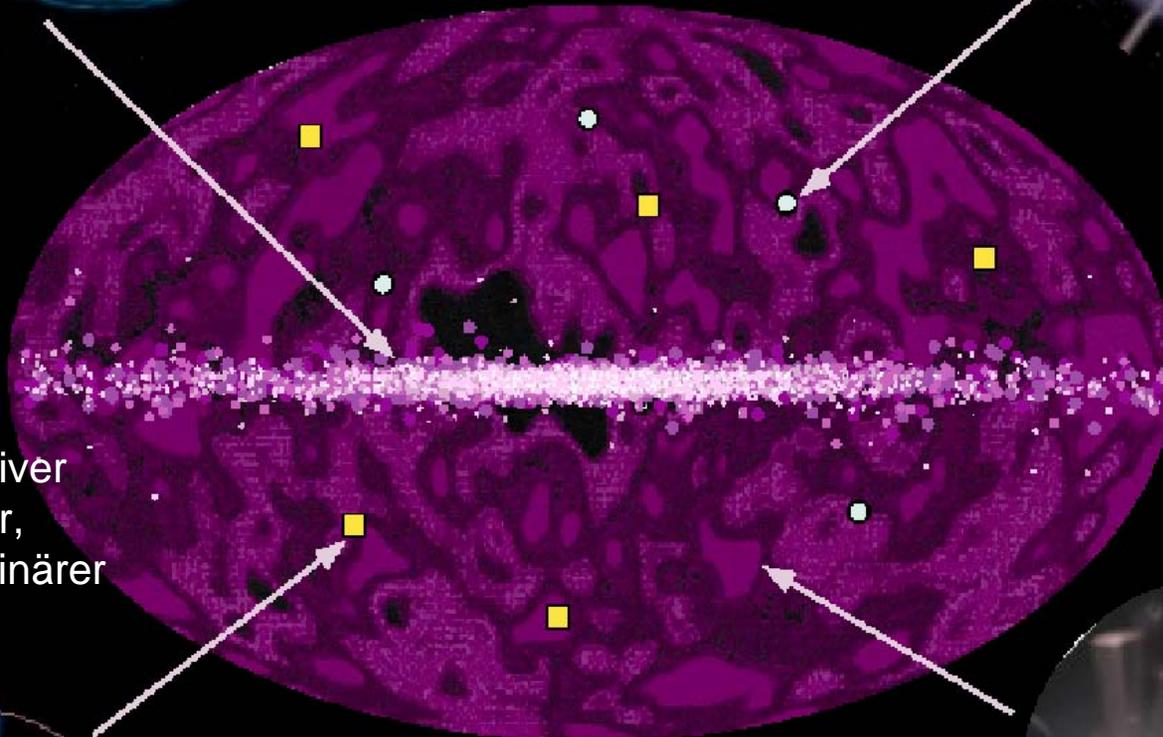
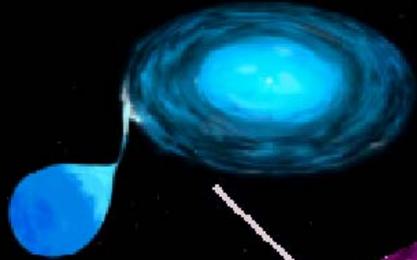
*Yu & Lu, 2001*



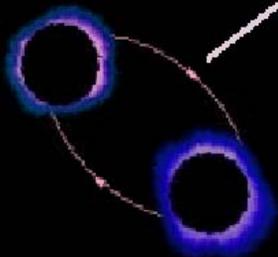
# Gravitationswellen / LISA

Binäre Galaktische  
Objekte, z.Bsp.  
Typ Ia Supernovae

Kompakte Objekte in der Nähe  
Schwarzer Löcher,  
hochpräzise Tests eines  
starken Schwerfeldes



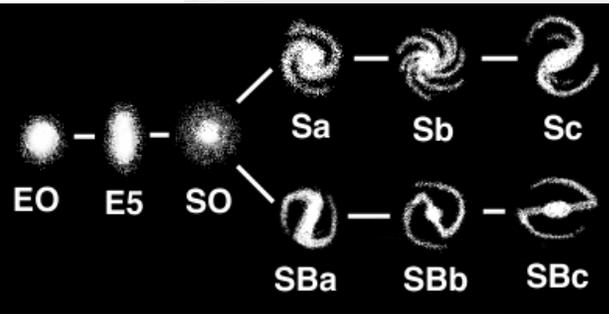
Entstehung massiver  
Schwarzer Löcher,  
Verschmelzung binärer  
Systeme



Fluktuationen im frühen  
Universum, vor Entstehung des  
Mikrowellenhintergrundes



# Hierarchisches Modell /Galaxien/Aktive Galaxienkerne



**Galaxien**



**Merger**



Toomre & Toomre 1972



**Aktive  
Galaxienkerne**



**Starburst**

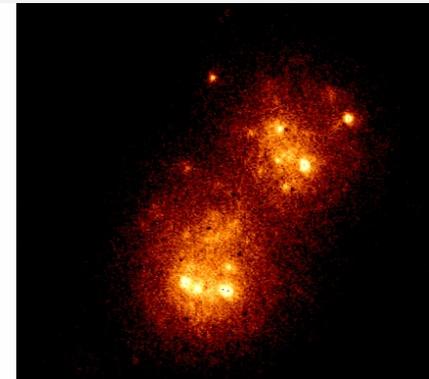


Cen A



NASA/Chandra/CXOM, Karovska et al.

NGC 1741

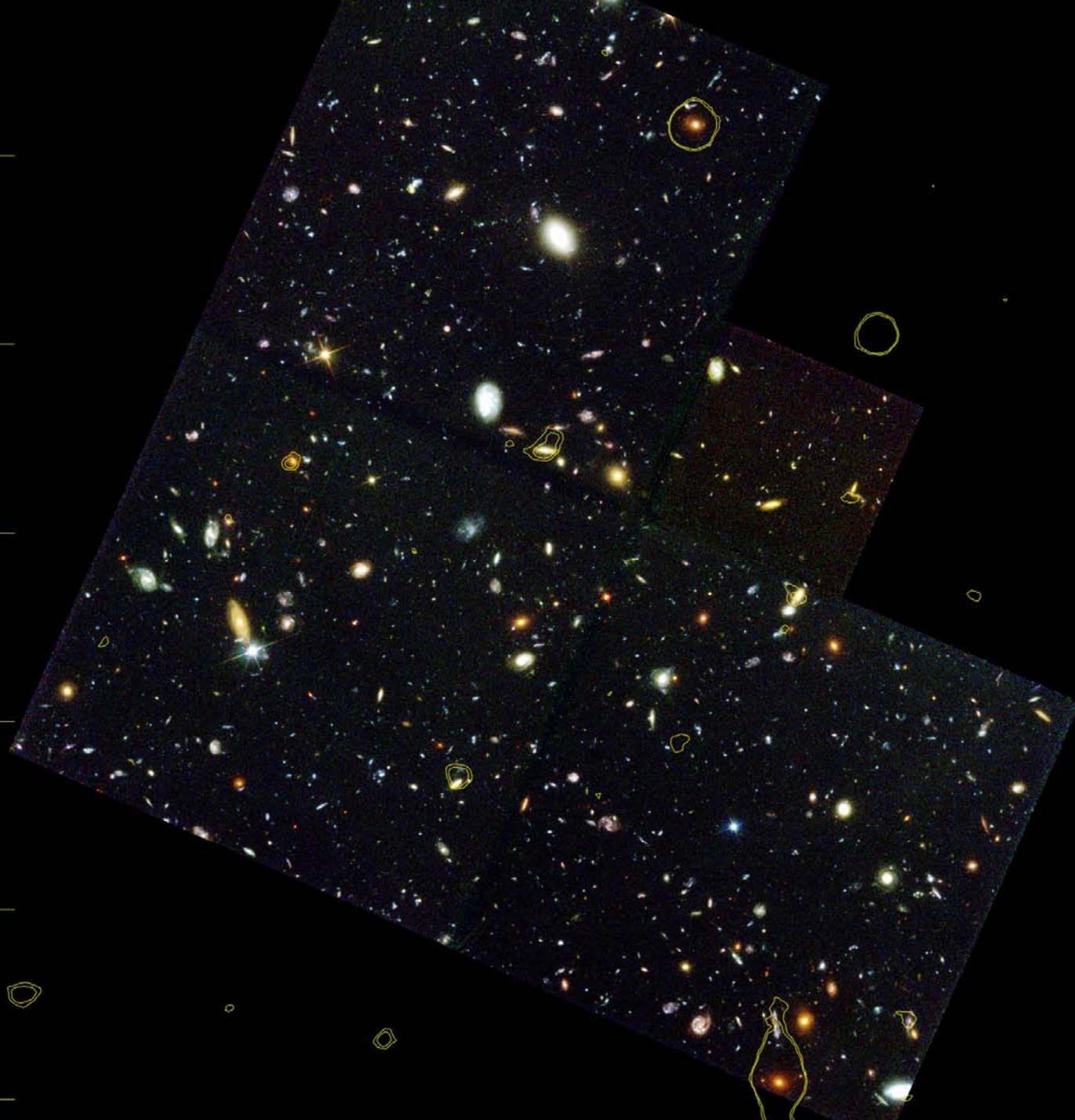


DECLINATION (J2000)

62°14'

13'

12'



# „Brennpunkte extragalaktischer Forschung“ Themen

- **04.11.2005 Fragen an die moderne Radioastronomie**
  - Eine neue Generation von Radioteleskopen, Aktive Galaxienkerne
- **18.11. Das hochenergetische Universum**
  - (TeV-Blazare & Kosmische Strahlung)
- **16.12. Schwarze Löcher:  
Neue Ergebnisse und Spekulationen**



- **13.01.2006 Mikrowellenhintergrund**



*Frohe Weihnachten  
und einen  
guten Rutsch ins Neue Jahr!*

