

WS 2004/05

# Hochauflösende Radiobeobachtungen aktiver Galaxienkerne

Silke Britzen

MPIfR, Bonn



Max-Planck-Institut  
für  
Radioastronomie

**Jede 2. Woche!**

**Termine:**

**05.11.2004**

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/>

**19.11.2004**

**03.12.2004**

**17.12.2004**

**Vorlesungsfreie Zeit**

**14.01.2005**

Titel:

**28.01.2005**

Ein schwarzes Loch in der Milchstraße?

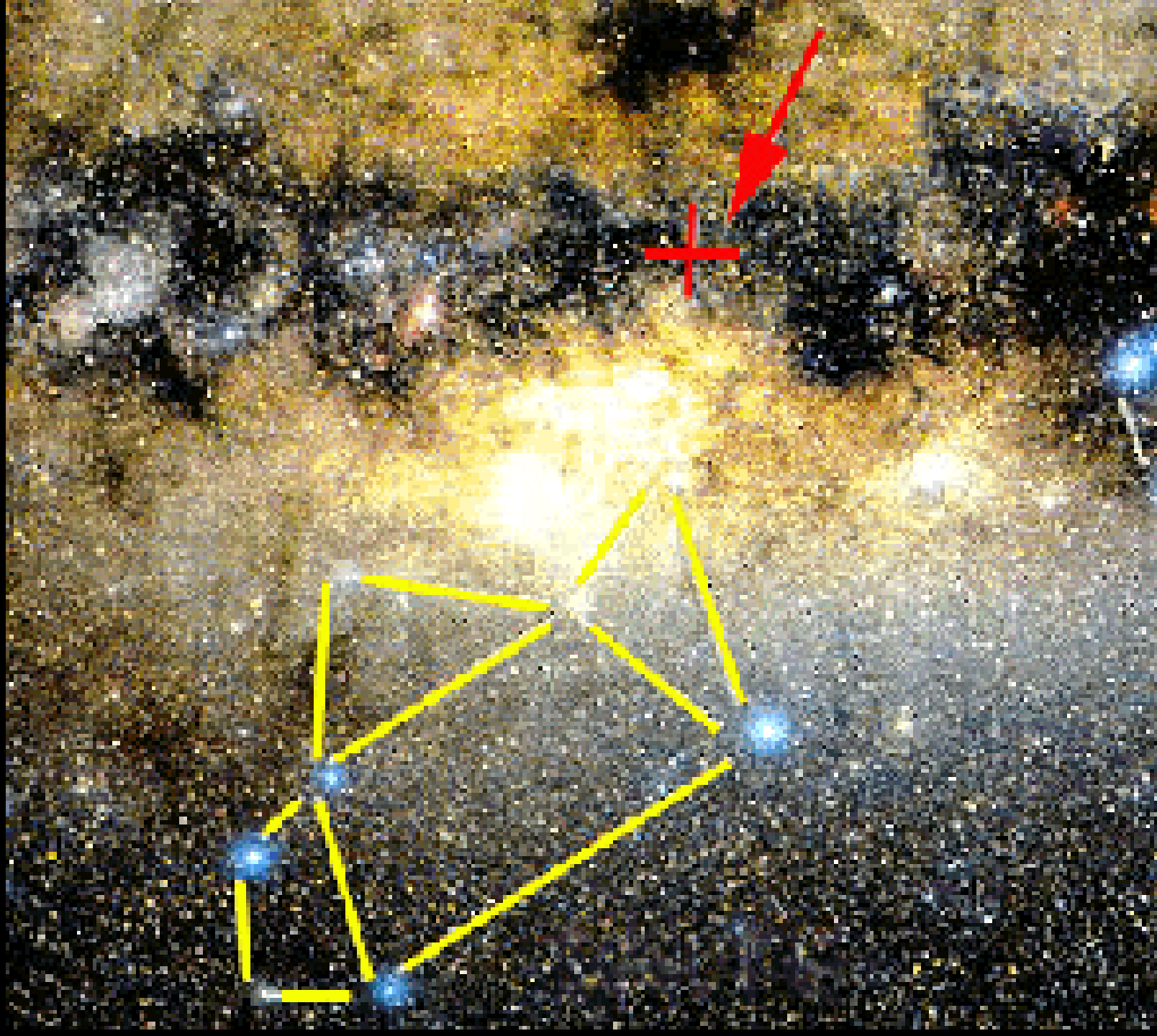
**11.02.2005**

## ■ Articles: *Literatur*

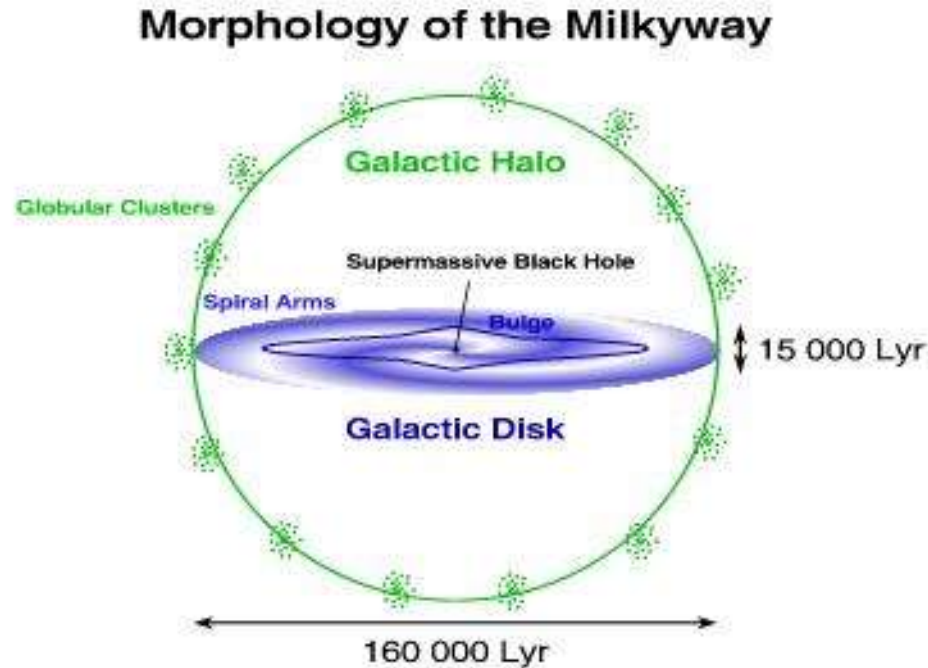
- *The Galactic Center Environment*, M. Morris & E. Serabyn, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1996. 34: 645-701
- *Galactic Structure Surveys and the Evolution of the Milky Way*, S.R. Majewski, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1993. 31: 575 - 638
- *The Supermassive Black Hole at the Galactic Center*, F. Melia & H. Falcke, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2001. 39:
- *Homepage MPE Garching, Genzel-Gruppe*
- *Sterne und Weltraum Special 1/03: Das junge Universum*

- Seit 50 Jahren ist Richtung zum Zentrum bekannt
- Seit 25 Jahren kennen wir die Entfernung

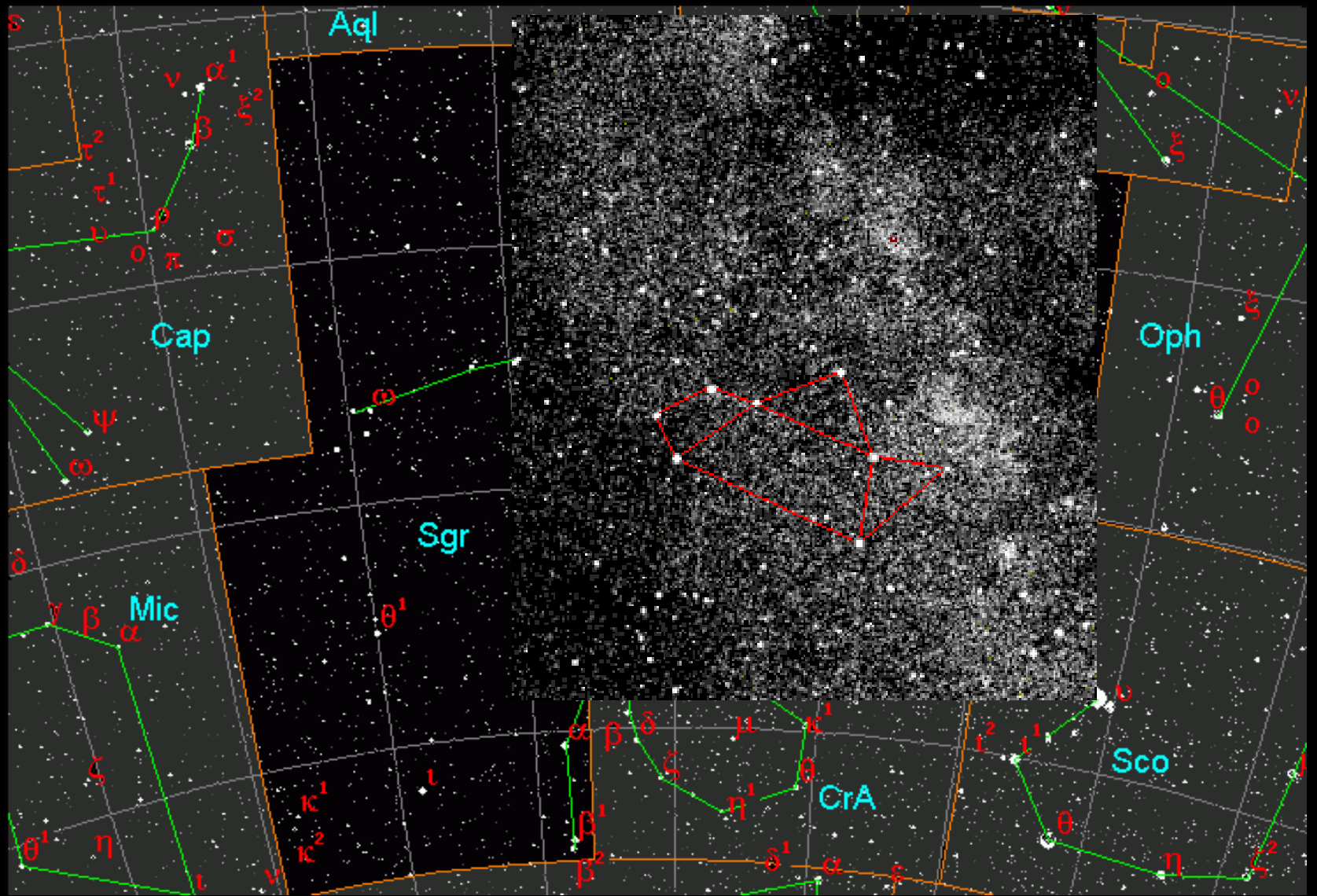




# Unsere Galaxis: die Milchstraße



- **Das Band der Milchstrasse** war schon in der Antike bekannt und war letztendlich Namenspate für alle Sternensysteme: der Begriff Galaxie oder Galaxis leitet sich vom Griechischen ab, *galaktos* heisst übersetzt "Milch".



# Geschichte des Sternbildes

- Die Konstellation ist seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. bekannt wie man aus Felszeichnungen im Kaukasus weiß. Als Schütze mit Pfeil und Bogen wird das Sternbild seit der Zeit der Babylonier gedeutet. Die übliche Darstellung als Zentaur mit Pfeil und Bogen könnte, ähnlich wie das Mischwesen des "Skorpionmenschen" auf eine babylonische Gottheit hinweisen. Man kennt aus dem 12. Jahrhundert v. Chr. einen babylonischen Grenzstein, auf dem ein geflügelter Zentaur mit Pfeil und Bogen dargestellt ist, zweifellos eine Wiedergabe des Sternbildes, denn unter den Vorderhufen des Zentauren ist auch gleich das Nachbarsternbild Skorpion figürlich abgebildet.



- Abkürzung:
  - **Sgr**
- Deutscher Name:
  - **Schütze**
- **Besonderheiten:**
- Doppelsterne *zeta Sgr, 21 Sgr*
- Veränderliche Sterne *W Sgr, U Sgr, X Sgr*
- Mehrfach Stern *beta Sgr*
- Sagittarius Sternwolke *M 24*
- Diffuse Nebel *M 8, M 17, M 20*
- Planetarischer Nebel *NGC 6818*

- Offene Sternhaufen *M 18, M 21, M 23, M 25, NGC 6530, NGC 6603, NGC 6716*
- Kugelsternhaufen *M 22, M 28, M 54, M 55, M 69, M 70, M 75, NGC 6723*
- Elliptische Galaxie **NGC 6822**
- Radio Quellen *Sgr-A (galaktisches Zentrum !), Sgr-B2, Sgr-C, Sgr-D*
- Meteor Schauer: *Sagittariiden, Phi Sagittariiden, Capricorniden-Sagittariiden*

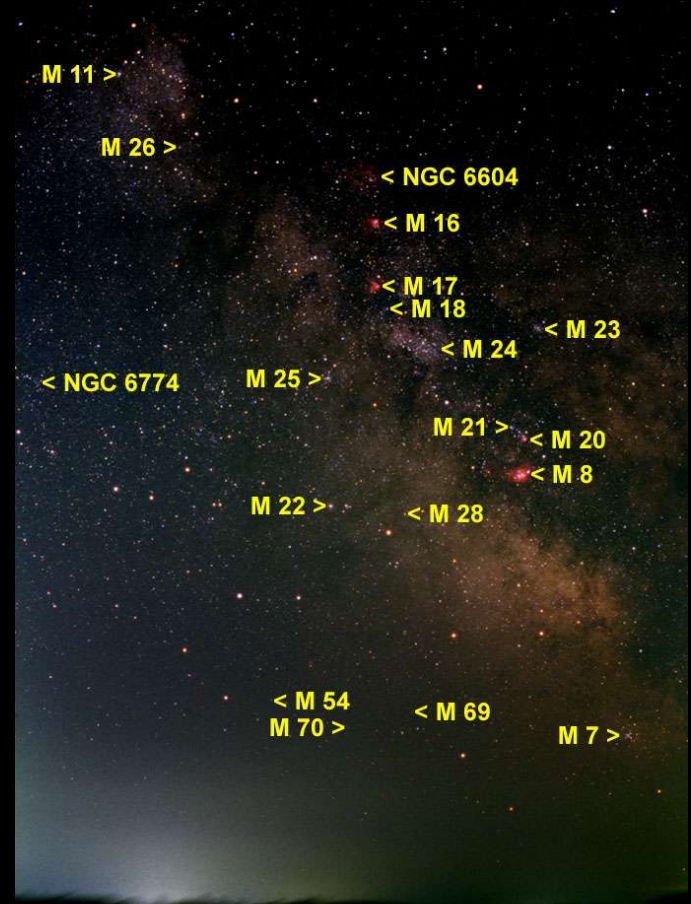
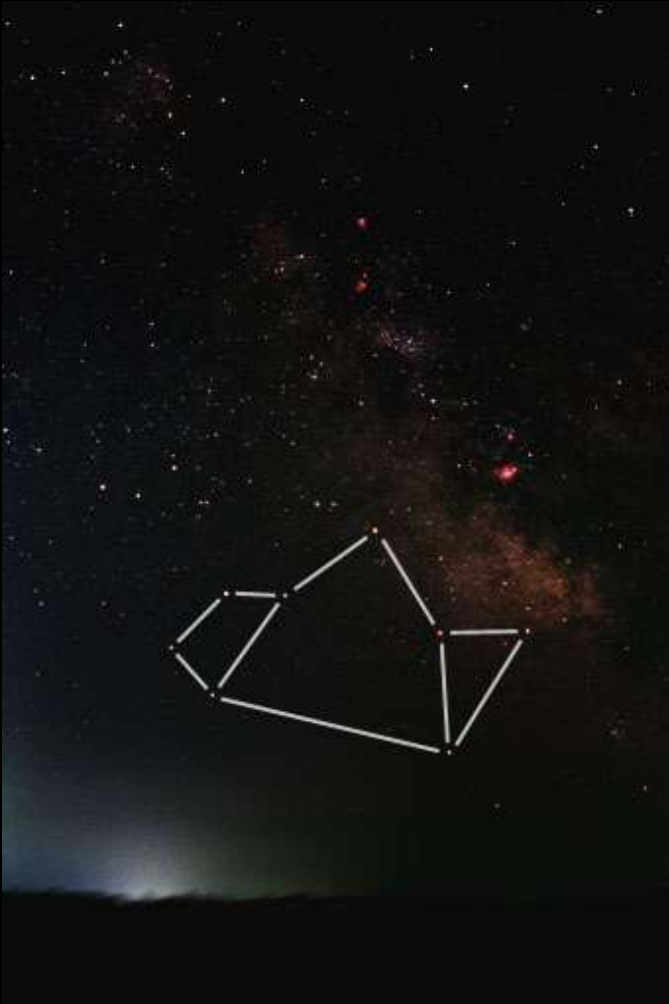


- 1.7 Mio Lichtjahre entfernt

Hubble  
Heritage

- 1884 von Barnard entdeckt

# Sagittarius



## M20: Trifid Nebel



- Rot: ionisierter Wasserstoff (junge Sterne)
  - Dunkel: Atmosphären kühler Riesensterne, SN-Überreste
  - Blau: Reflexionsnebel
- Ca 5000 Lichtjahre entfernt, Durchmesser 50 Lichtjahre



Wolken glühenden Gases, dunkle, dichte Staubwolken eingebettet

Gebiet intensiver Sternbildung

Gemini Observatory

# M8: Lagunen-Nebel

M8 Lagunennebel am 30.7.2003.  
Mosaik aus 2 Mintranaufnahmen  
gemittelt aus 70 und 140 Einzelbildern  
a 2,56 sec, 250mm f/5 Newton

Von Flamsteed 1680 entdeckt

Ausdehnung 90 x 40 Bogenminuten, 160 x 60 Lichtjahre

Entfernung 5200 Lichtjahre

Globulen: kollabierende protostellare Wolken

L-RGB-Farbauszug  
aus einer Aufnahme mit E200



# Lagunen-Nebel



- O Herschel 36: primäre Quelle, erleuchtet hellste Region (Stundenglas)
- Heftige stellare Winde werden in die kalten Wolken getrieben



# Lagunen-Nebel

H II-Region, Im Licht von Wasserstoff,

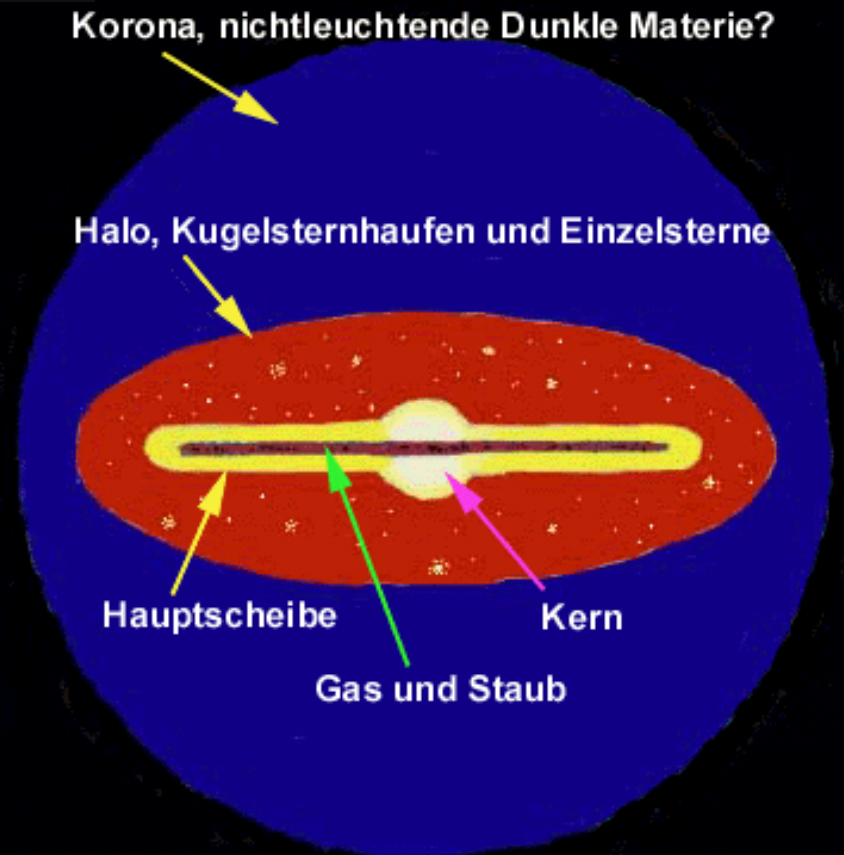
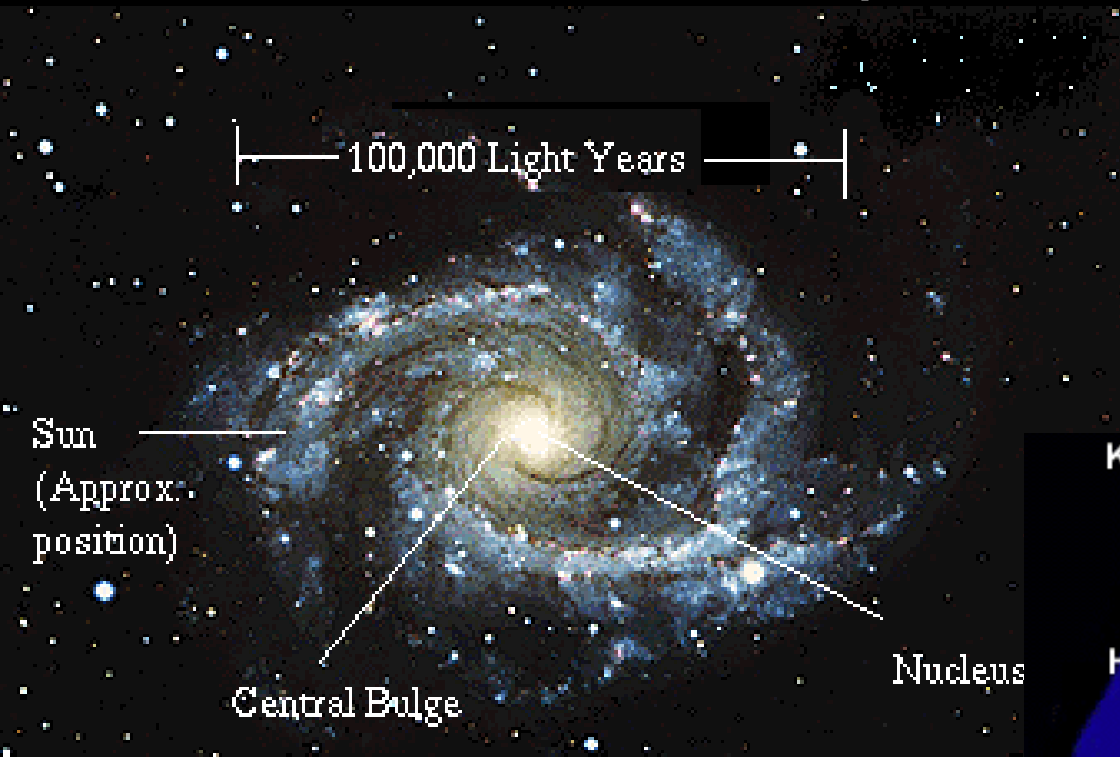
Sauerstoff und Schwefel belichtet

Name aufgrund von Filamenten im Kanal



M8 - Diffuser Nebel im Schützen - 5200 Lichtjahre entfernt, NASA, Hubble Space Teleskop und ESO

# Die Milchstraße und ihre Komponenten



# Komponenten der Milchstraße

- Galaktische Scheibe, Halo, Spiralarme, Kugelsternhaufen, Sterne, Magnetfelder
- Milchstraße + Andromedagalaxie + Magellansche Wolken + einige irreguläre Galaxien des Südhimmels + einige Zwerggalaxien= Lokale Gruppe
- Zentralregion der Milchstrasse innerhalb von etwa einer Parsec enthält eine dichte Ansammlung heller Sterne (stellare Komponente) mit sehr hohen Eigenbewegungen sowie neutrales und ionisiertes, vor allem sehr heisses Material (Gaskomponente), blaue Überriesen (engl. *blue supergiants*) beobachtet, die Emissionslinien neutralen Heliums (HeI) zeigen. Vermutlich sind sie mit 30 bis 100 Sonnenmassen sehr massereich und mit 20 000 bis 30 000 K Oberflächentemperatur sehr heiss. Diese He-Sterne verlieren durch Winde sehr viel Material und versorgen damit das Galaktische Zentrum mit Masse. Sie befinden sich in einer Nachhauptreihenphase. Dabei wird bis heute die Frage untersucht, wie die heissen, massereichen Sterne in die Zentralregion gelangt sind. (A. Müller)

# Milchstraße: Daten

Hubble- Typ	Sb
Radius	17 kpc
Kern	5 kpc
Scheibe	1 kpc
Halo	50 kpc
Korona	200 kpc ?
Abstand Sonne-Zentrum	7,7 kpc
Abstand Sonne-Ebene	12 pc nördlich
Geschwindigkeit der Sonne	225 km/s

# Milchstraße: Daten

1 Umlauf um das Zentrum

210 Millionen Jahre

Gesamtmasse

$2 \times 10^{11} - 10^{12}$  Sonnenmassen

Scheibenmasse

$1,8 \times 10^{11}$  Sonnenmassen

Massenanteile:

Sterne heller als  $M=+3$ :

11%

Sterne schwächer als  $M=+3$ :

85%

interstellares Gas:

4%

interstellarer Staub:

0,24%

Anzahl Kugelhaufen

200- 300

Anzahl offener Haufen

30 000

# Die Entstehung der Milchstraße

# Die Entstehung der Milchstraße

- Milchstraßensystem bildet sich innerhalb weniger 100 Mio Jahren aus rotierender Gaswolke, die sich unter dem Einfluß ihrer Gravitation zusammenzieht
- Je weiter der Kollaps voranschreitet, desto schneller rotiert die Protogalaxie, Spiralarme bilden sich aus
- Zunächst besteht die Wolke aus Wasserstoff- und Heliumatomen, massereiche, kurzlebige Sterne entstehen und verändern durch die Nukleosynthese die Zusammensetzung der galaktischen Materie, nachfolgende Sternenerationen enthalten größere Mengen an schwereren Elementen
- Weitgehend akzeptiert aber:

# Die Entstehung der Milchstraße

- **Viele der ältesten Sterne und Sternhaufen im galaktischen Halo weisen retrograde Bewegung auf**
  - Grund: Protogalaxie mit klumpige Struktur und in turbulenter Bewegung sammelt größere Gaswolkenfragmente ein, die sich in unterschiedlichen Richtungen bewegt haben
- **Protogalaxie kann nicht auf so homogene Weise kollabiert sein; die dichtesten Bereiche sollten weit schneller nach innen gestürzt sein als die weniger dichten**
  - Vereinigung mehrerer großer Materischwaden
  - Oder vieler kleiner Wolkenteile?

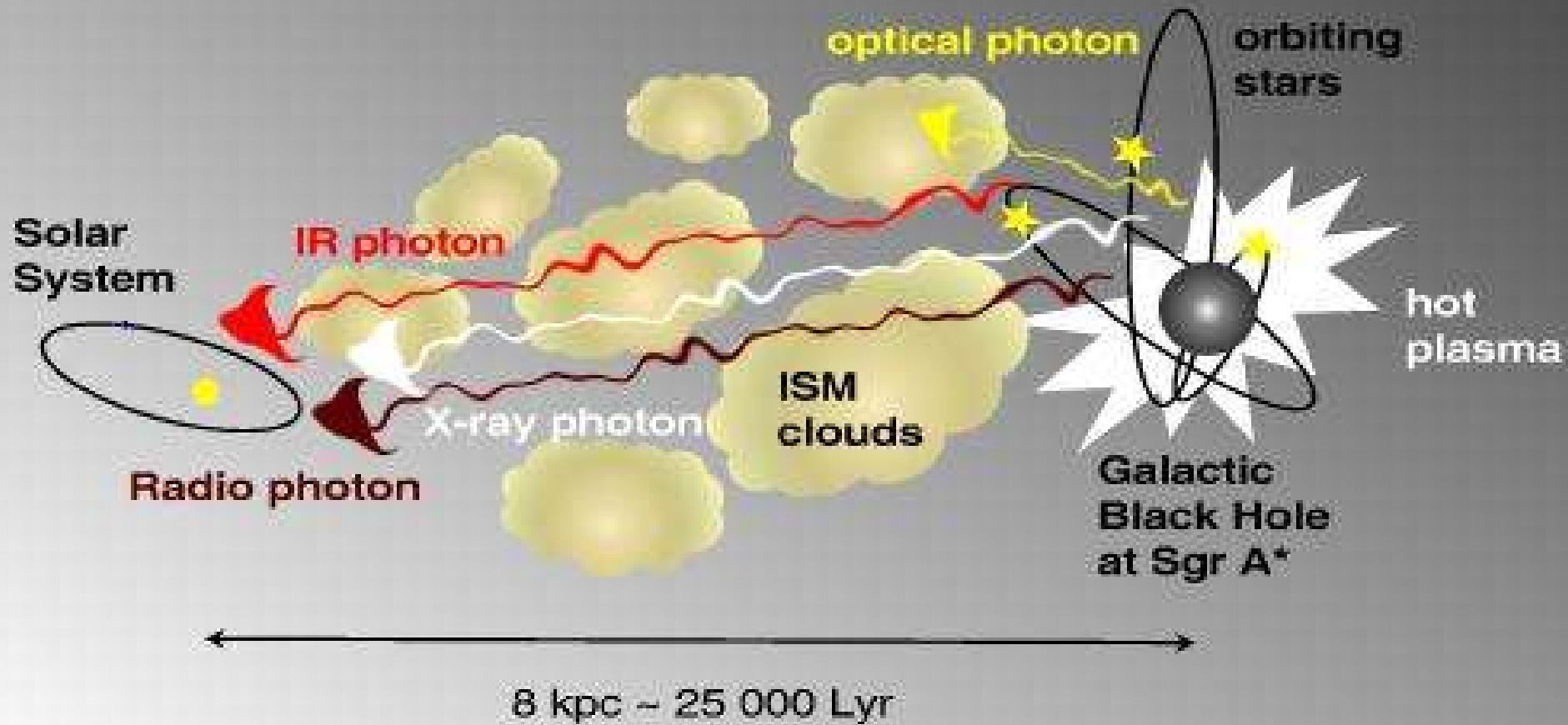


# Die Entstehung der Milchstraße

- Heute: lichtschwache Halosterne beobachtbar
- Die Sternhaufen, die sich ihrer chemischen Zusammensetzung nach als erste nach dem Urknall gebildet haben, sind alle innerhalb eines Zeitraums von 500 Mio Jahren entstanden (Alter anderer Sternhaufen variiert stärker)
- Kollaps des äußeren Halos dauerte 10x länger als im einfachen Modell
- Sternhaufen im inneren Halo haben sich eher gebildet als die in den dünneren Außenbereichen
- Galaktische Scheibe hat sich nach dem Halo gebildet

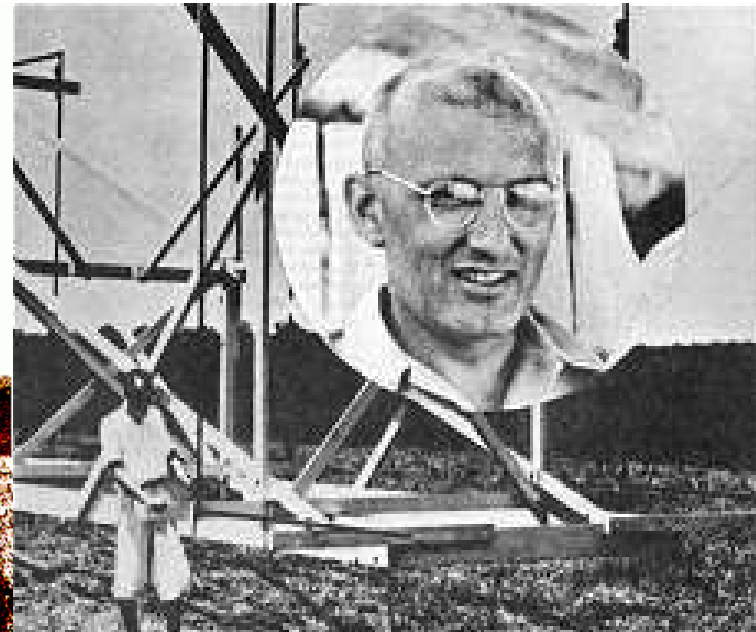
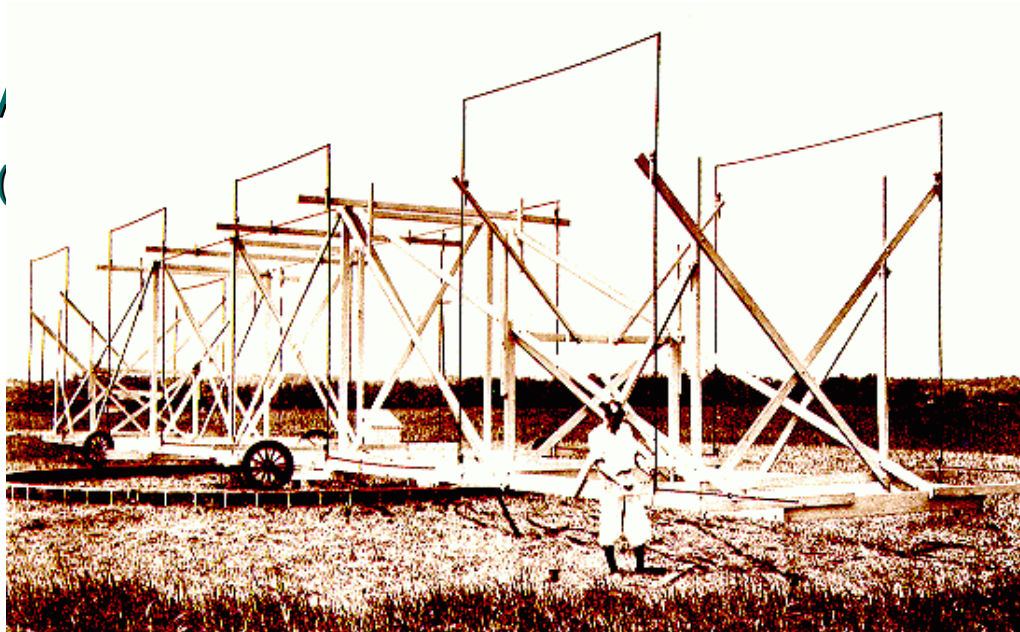
# Kurze Geschichte der Beobachtungen des galaktischen Zentrums

# Interstellar Extinction



# Erste Beobachtungen des galaktischen Zentrums

- 1932: **K.G.Jansky** untersucht für die Bell Laboratories (New Jersey) warum transatlantische Radiotelephon-Verbindungen so viele Störgeräusche aufweisen (Interferenz) Wellenlänge von  $\sim 14.6$  m); identifiziert 3 mögliche Quellen:
  - Nahe Gewitter
  - Entfernte, tropische Gewitter
  - Störung unbekannter Herkunft, scheint aus der Richtung der Milchstraße zu kommen



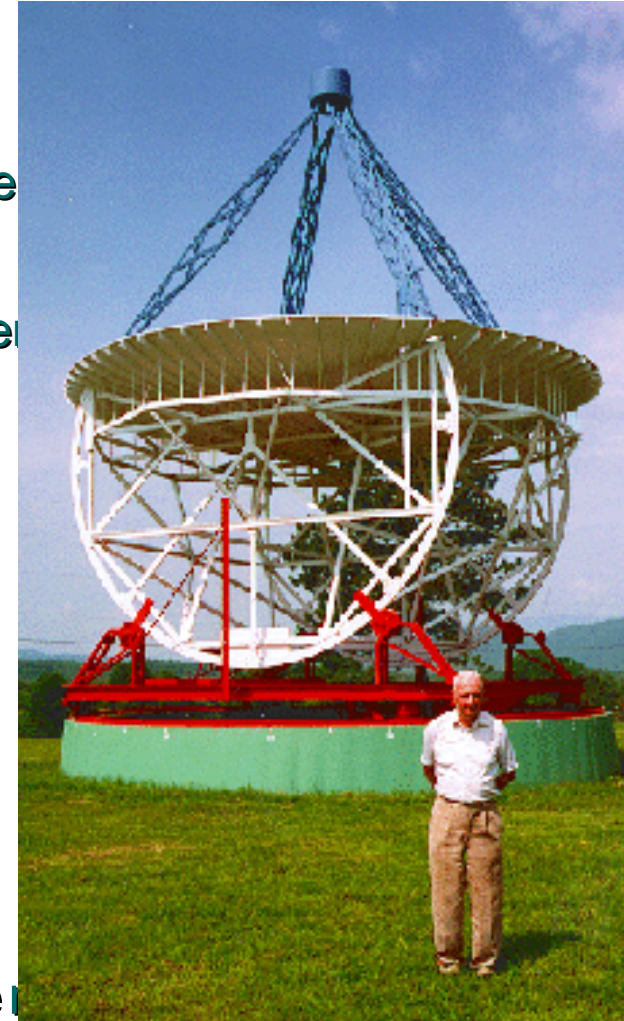
# Erste Beobachtungen des galaktischen Zentrums

- **Grote Reber** (Illinois) liest über Jansky's Arbeit und erkennt die Bedeutung-> baut das erste schüsselförmige Radioteleskop (1937) of 9.6m ( $\sim 14^\circ$ ) Durchmesser im eigenen Garten!! Geht von thermischem Ursprung der Strahlung aus -> Empfänge für eine Wellenlänge von 9.1 cm, später für 33cm und schließlich für 1.87 m, detektiert Radiostrahlung aus der galaktischen Ebene

- 1939: Reber bestätigt Jansky and widerlegt eigene Ideen über den Ursprung der Strahlung

- Publikation in ApJ: nicht zur Kenntnis genommen von den astronomischen Kollegen!!

- 4 Jahre später: die ersten Radiokarten der Milchstraße und Radiomessungen der Sonne: **Beginn der radioastronomischen Forschung!!**

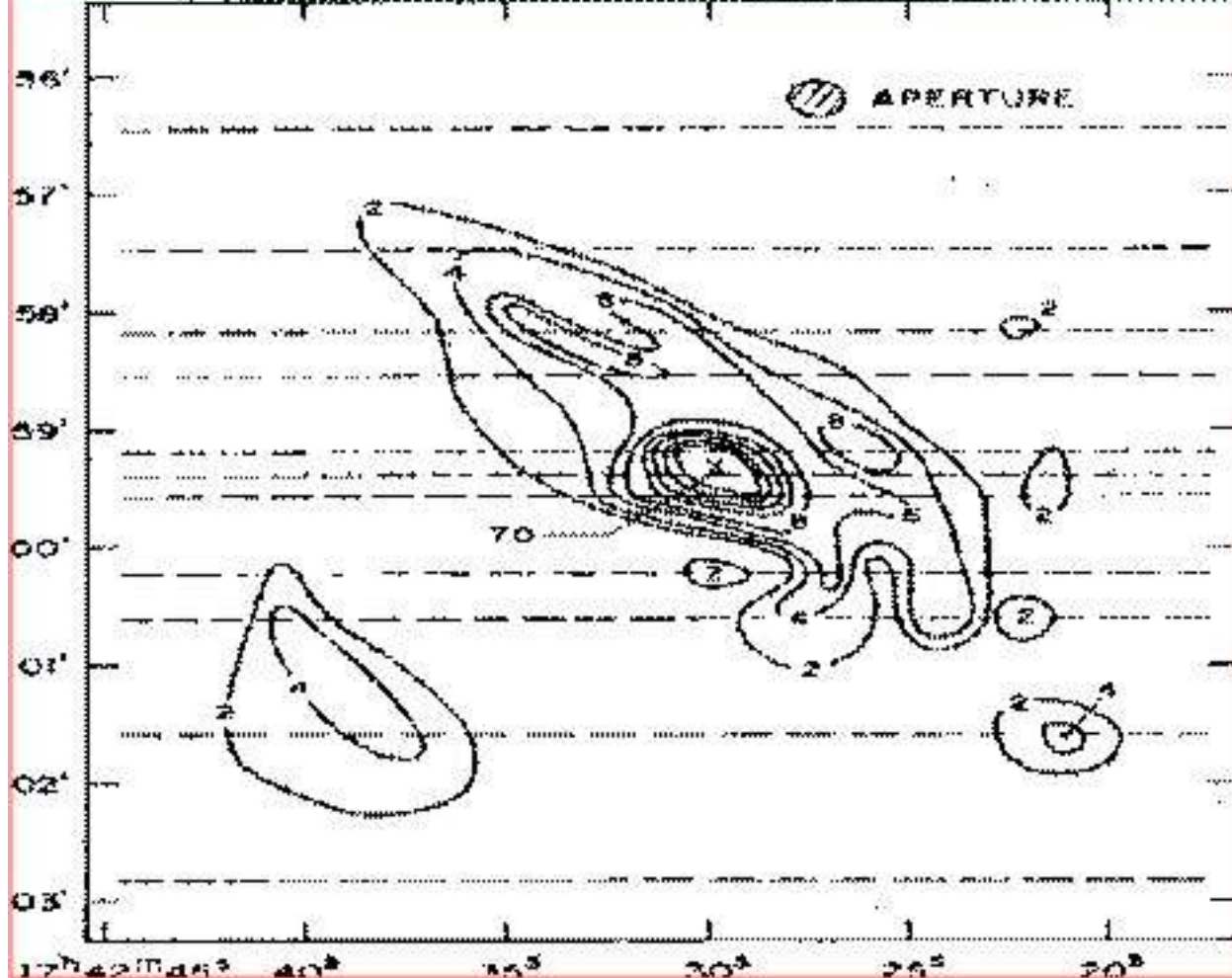


# DAMALS

Erste (erfolgreiche)

Versuche im

Infrarot 1945!



Erste Kontouren-Karte, aufgenommen bei  $2.2 \mu\text{m}$

(Becklin & Neugebauer 1968), erster Nachweis des kompakten

nuklearen Sternhaufens. Die Winkelauflösung beträgt  $0.25'$ . Kontourlinien

als Vielfache von  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$ .

Gestrichelte Linien repräsentieren die einzelnen Scans der Beobachtung.

Elektronen im interstellaren Magnetfeld

radio continuum (408 MHz)

21 cm, kaltes und warmes interstellares Medium

atomic hydrogen

Heißes, ionisiertes Gas, Bonn, Parkes

radio continuum (2.5 GHz)

Kalte, dichte Teile des interstellaren Mediums

molecular hydrogen

IRAS, 12, 60, 100 micron, thermisch, interstellarer Staub

infrared

Komplexe Moleküle, junge, verdeckte Objekte

mid-infrared

Kalte, gigantische K-Sterne in Scheibe und bulge

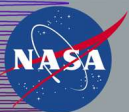
near infrared

ROSAT, heißes Gas durch Stöße angeregt

x-ray

EGRET, >300 MeV, cosmic rays with hydrogen nuclei,

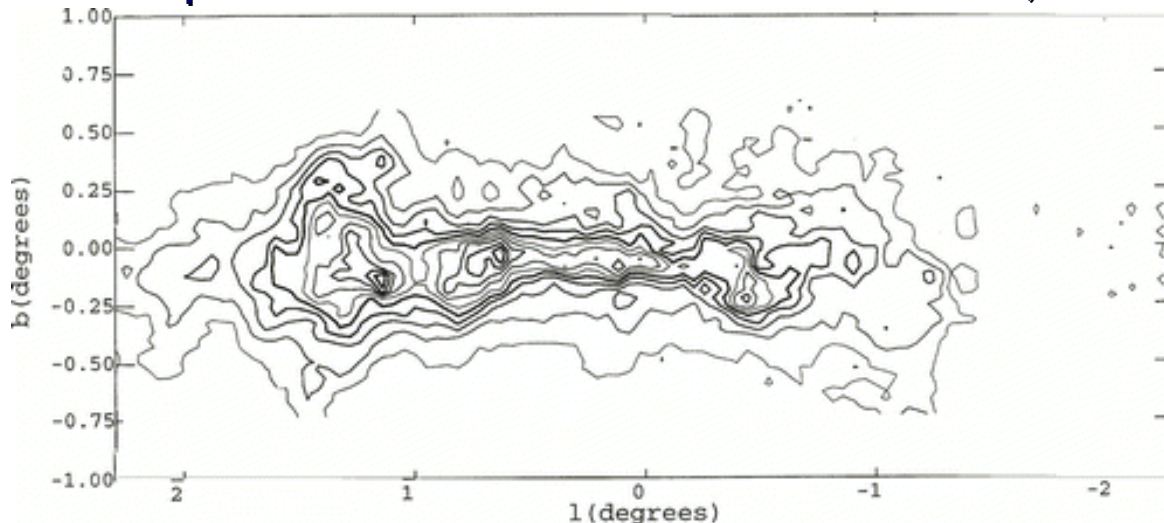
gamma ray



# Multiwavelength Milky Way

# Galaktisches Zentrum

- Galaktisches Zentrum umfaßt sehr verschiedene Arten von Phänomenen von stellaren zu galaktischen Skalen
- Molekulares CO und atomares C stark in den zentralen Regionen (einige 100pc), kleinere Region zeigt Radio und Infrarot-Kontinuum Emission: zentrale molekulare Zone (CMZ), enthält 10% des molekularen Gases unserer Galaxis
- Undurchsichtig für optische und UV-Strahlung, ab 1 keV für Röntgenlicht wieder durchsichtig
- Temperaturen der Gaswolken zw. 30-200 K, hohe Geschwind. 15-50 km/s



Uchida et al. 1996

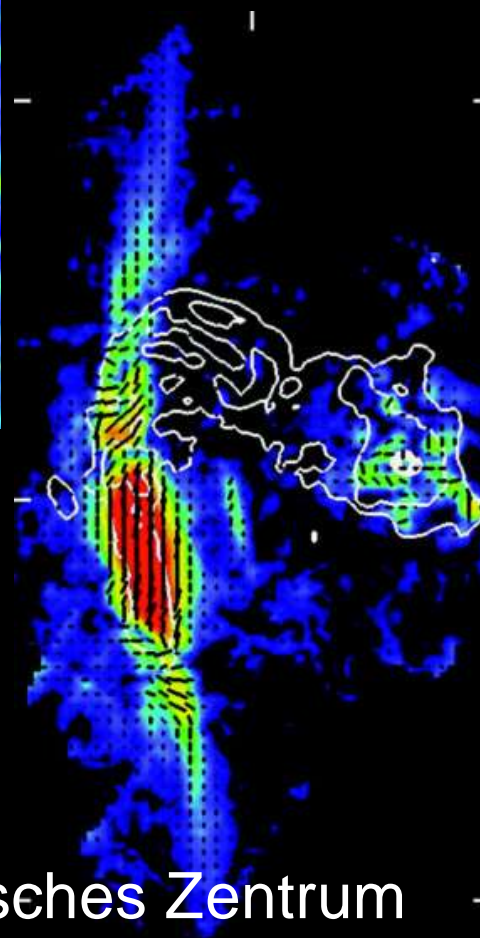
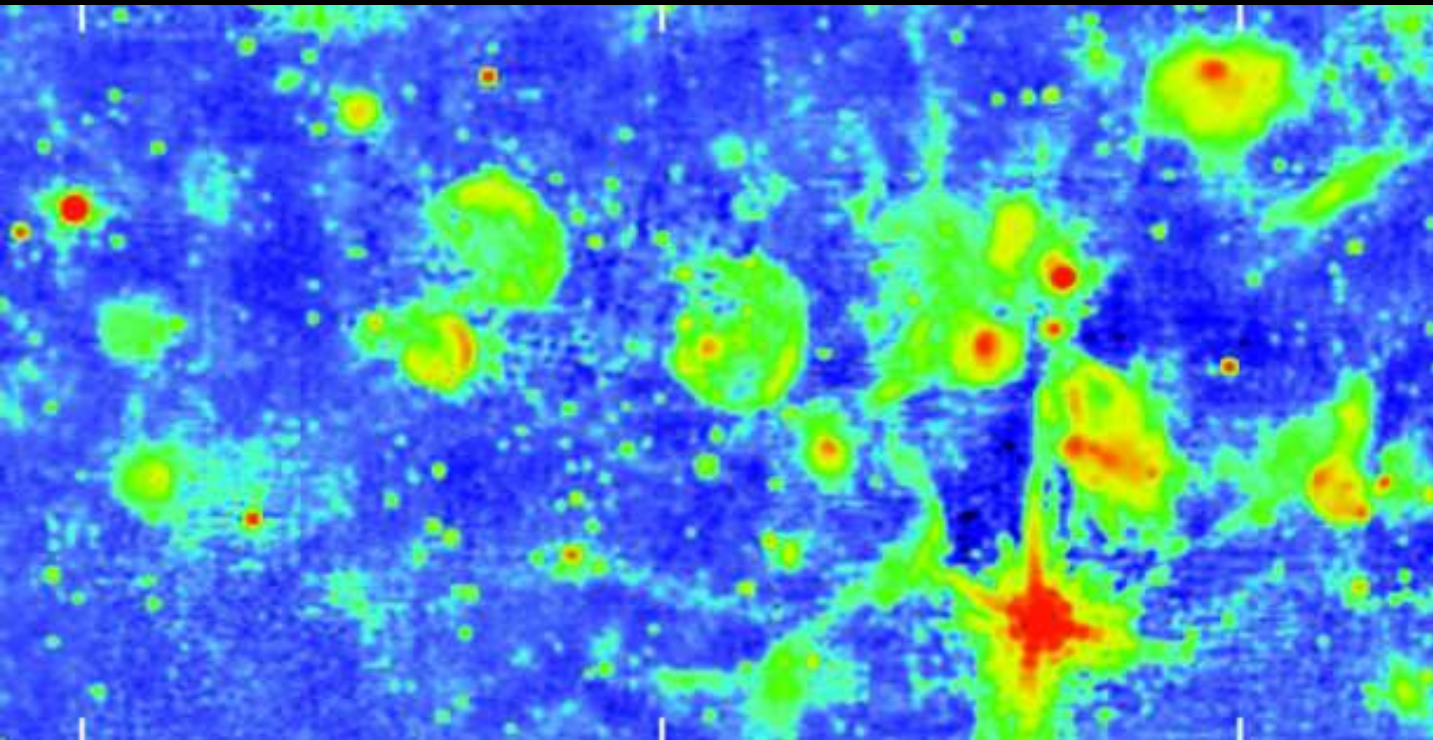


# Multiwellenlängenbeobachtungen des Zentrums

## ■ RADIO

Im **Radiobereich** wurden die ersten Beobachtungen mit dem *Very Large Array* (VLA) gemacht. Typische Wellenlängen liegen bei 6 cm und 20 cm. Diese Beobachtungen legten die gesamte Sagittarius-Region auf **Längenskalen von wenigen zehn Lichtjahren** dar. Dabei wurden **bogenartige Strukturen, Radiofilamente**, entdeckt. Man beobachtete auch die thermische Emission von heißem, ionisiertem Gas sowie kompakte, nicht-thermische Radioquellen. Die beobachteten Radiostrukturen legten eine **Bewegung nahe, die auf eine helle, kompakte Radioquelle** gerichtet ist: **Sagittarius A\***. Diese Punktquelle (Radioausdehnung etwa 30 Lichtminuten) in der räumlich ausgedehnteren Region Sagittarius A wird mit dem eigentlichen Zentrum der Milchstrasse assoziiert. Hier zeichneten sich die ersten vagen **Hypothesen für ein supermassereiches Schwarzes Loch** ab.

# Radiokarte der Milchstraße



Ausschnitt aus der 11-cm-Durchmusterung  
der Milchstraße im Sternbild Cassiopeia,  
Sternentstehungsgebiete und SN-Überreste

Galaktisches Zentrum

# Komponenten des Galaktischen Zentrums

- **Die inneren pcs beinhalten (von innen nach außen):**
  - Supermassives Schwarzes Loch (Sgr A\*)
  - Haufen aus jungen Sternen (Sgr A West)
  - Molekularer Staubring
  - Ionisierte Gasströme
  - Diffuses, heißes Gas
  - Supernova-Überrest (Sgr A Ost)

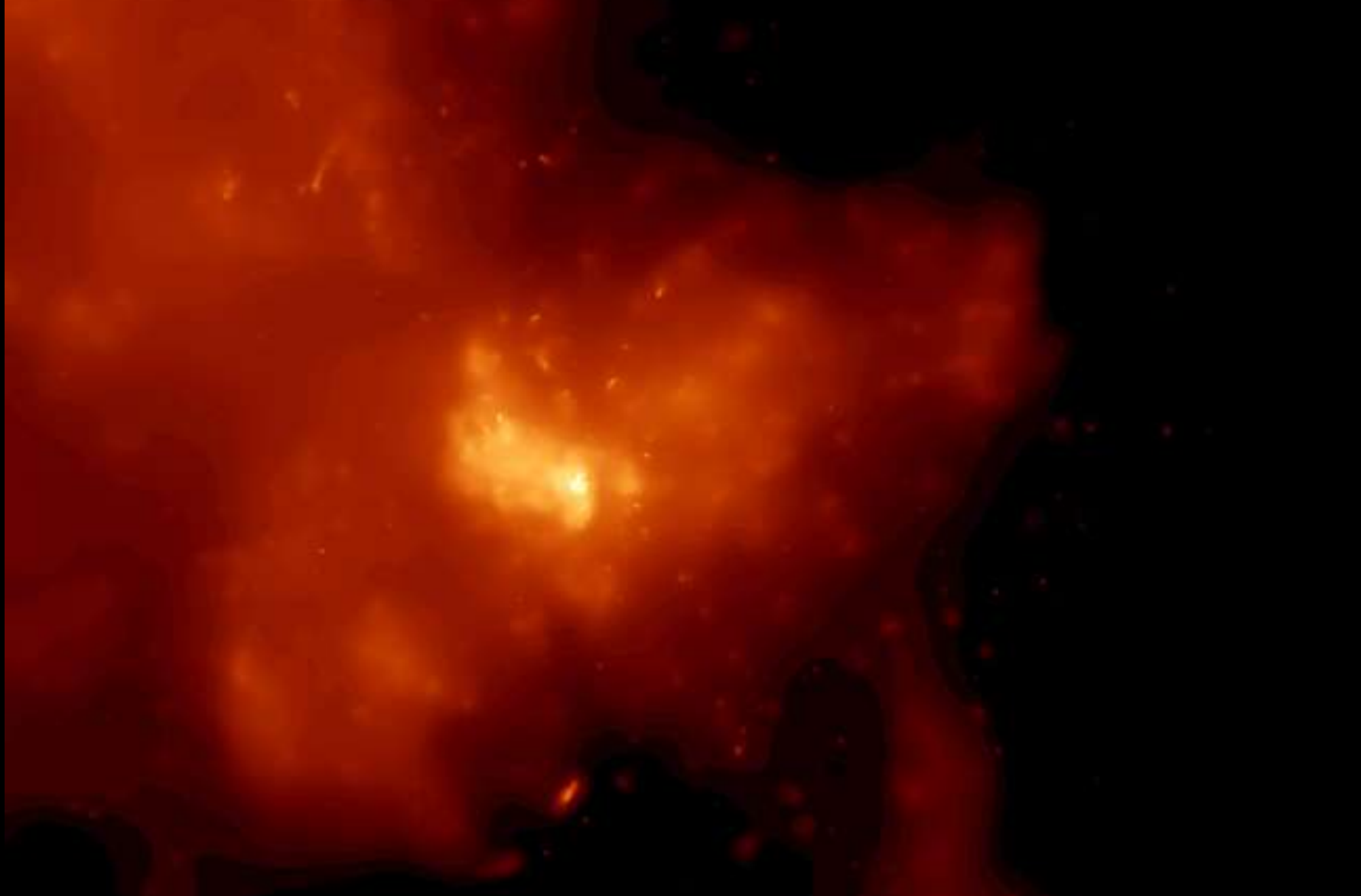
# Komponenten des Galaktischen Zentrums

- **Gaswolken bestehend aus:**
  - Molekularem Wasserstoff
  - Kohlenmonoxid (CO)
  - Blausäure (HCN)
  - Hydroxyl (OH)
  - Kohlenmonosulfid (CS)
  - Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

# Röntgenbeobachtungen

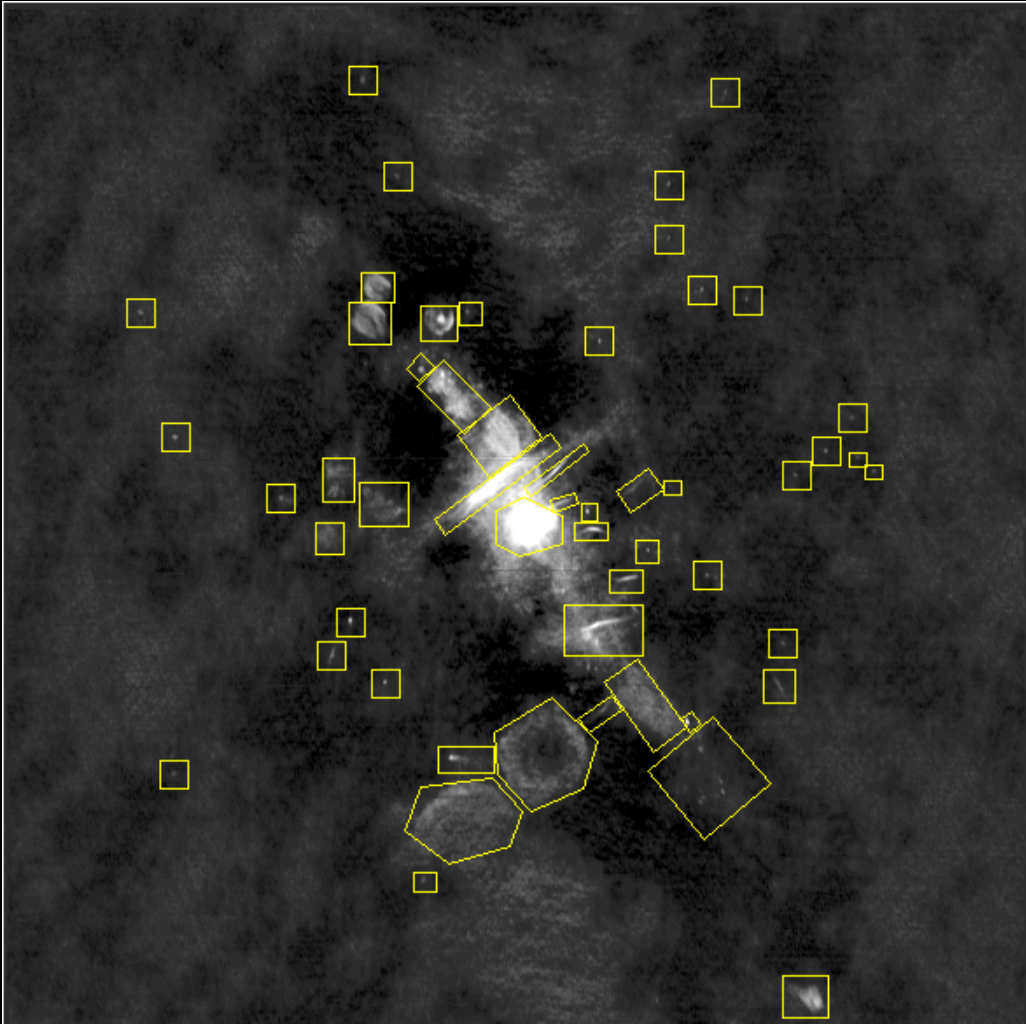
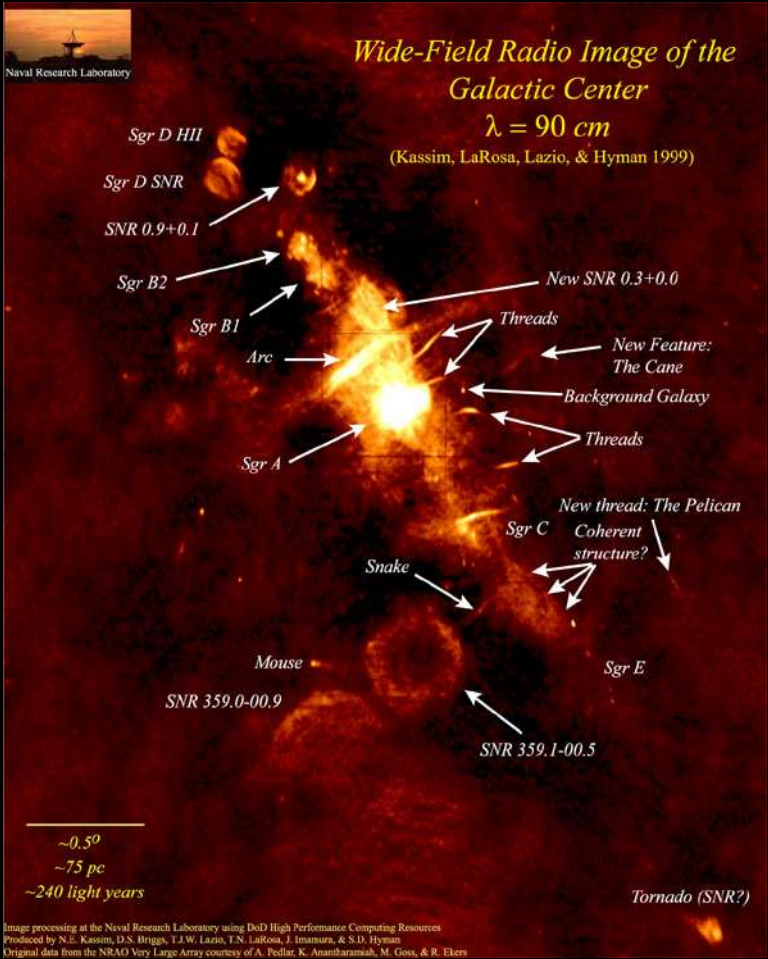
- Die **Röntgenbeobachtungen** finden hingegen im hochenergetischen Strahlungsbereich statt. Das weltraumgestützte Röntgenobservatorium **Chandra** schaute vor allem auf das Galaktische Zentrum (seit Jahr 2000). Dabei wurden ausgedehnte Bereiche sehr heissen Plasmas entdeckt, dass thermisch im Röntgenbereich strahlt ("eine Röntgenblase") und ausserdem besonders helle Punktquellen. Diese grossräumigen Strukturen heißen, ionisierten Plasmas erwartet man auch in der Umgebung eines Schwarzen Loches, weil durch Akkretion die Materie stark aufgeheizt wird: von einer räumlich grösseren Skala muss der (magnetisierte) Akkretionsfluss durch ein Nadelöhr im räumlich viel kleineren Schwarzen Loch verschwinden und es mit Masse anreichern. Die hellste Röntgenquelle ist wiederum Sgr A\*!

# Röntgen: CHANDRA, Sagittarius (Gesamt)



- 3.3-4.7 keV, 17.5 x 14.5 arcmin, Gas 20 Mio Grad heiß

# Galaktisches Zentrum, VLA, Überblick



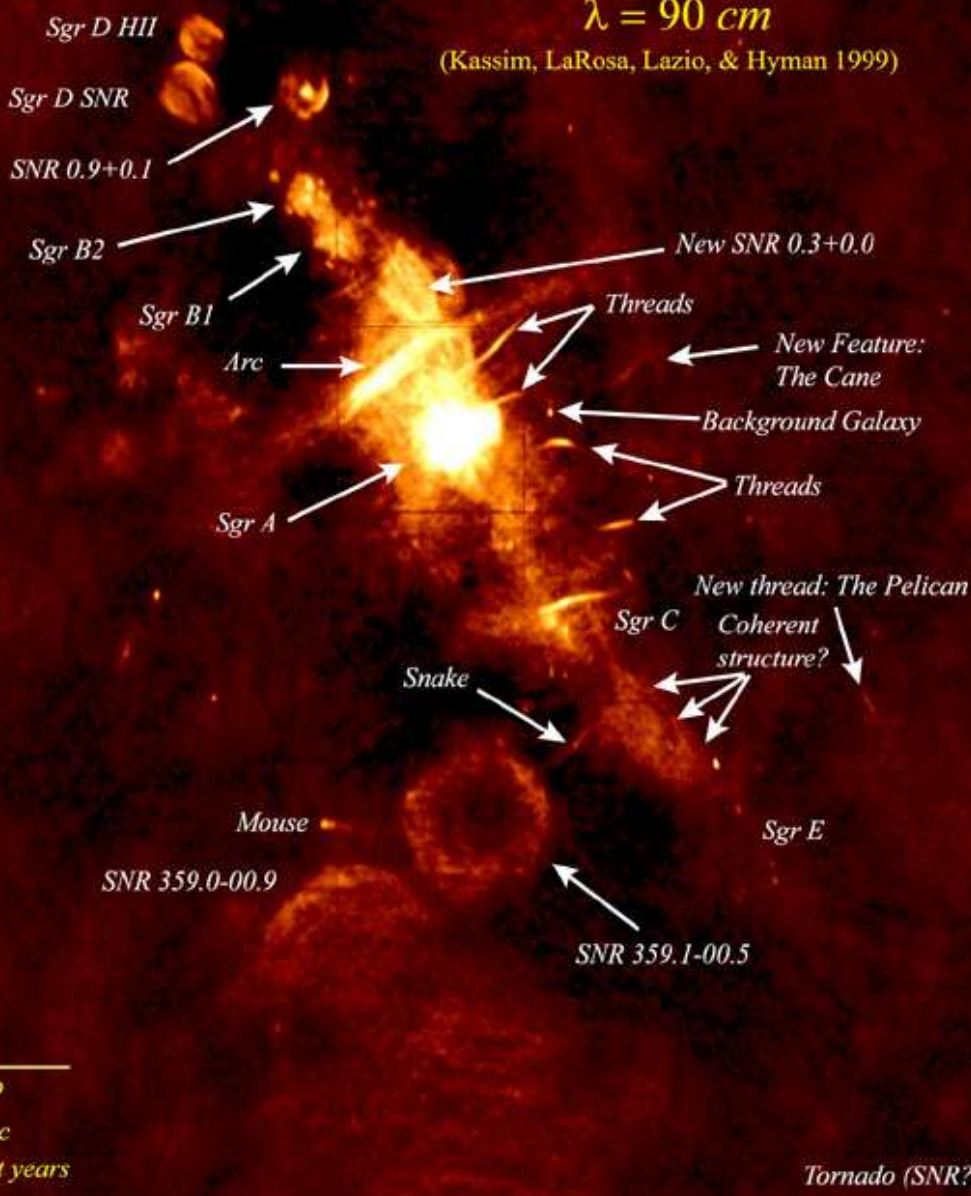
Radio-Bild des Galaktischen Zentrums,  
Schema rechts, wichtigste Quellen



# Wide-Field Radio Image of the Galactic Center

$\lambda = 90 \text{ cm}$

(Kassim, LaRosa, Lazio, & Hyman 1999)



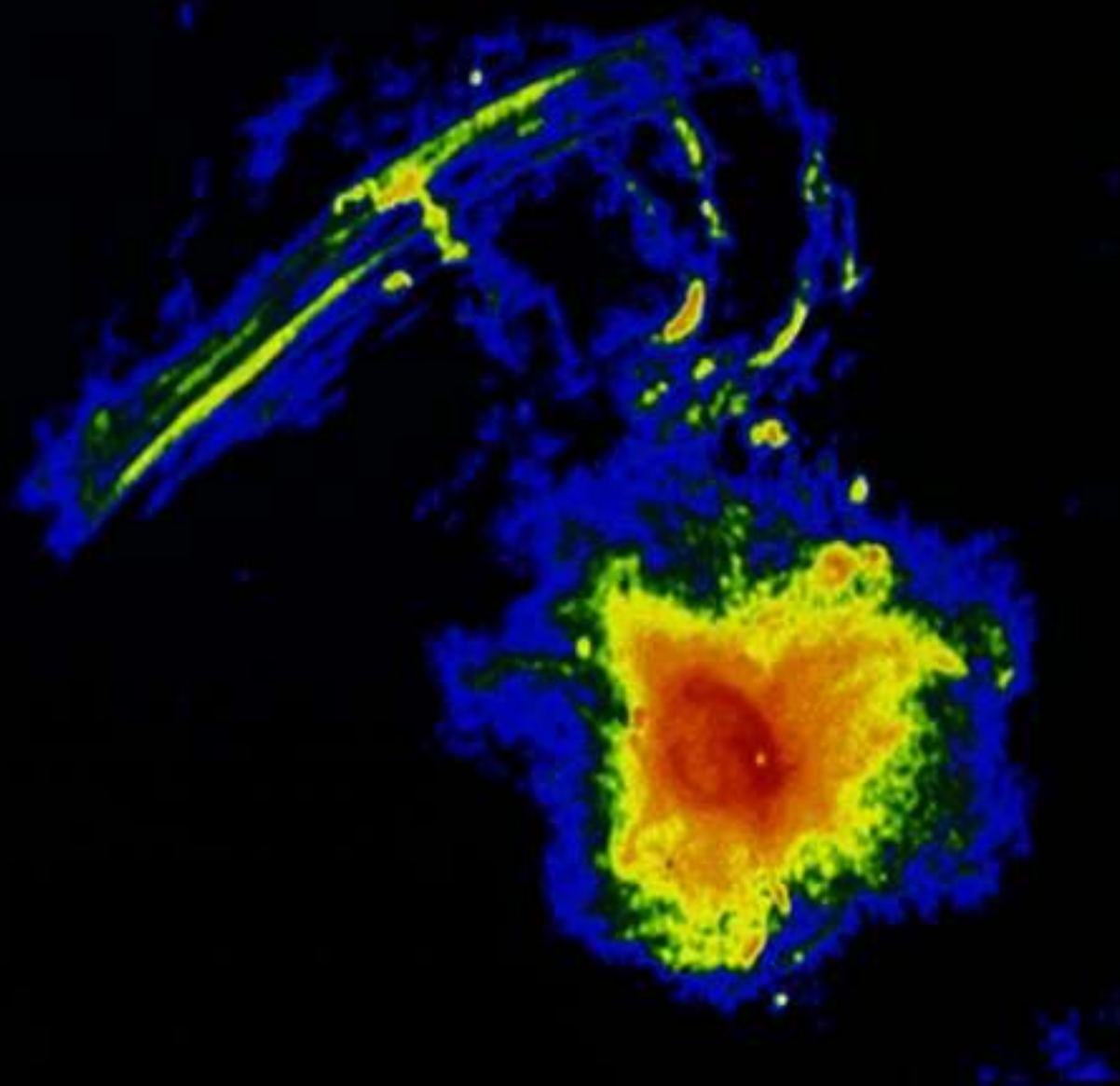
~0.5°  
 ~75 pc  
 ~240 light years

Radio-Bild (330 MHz)  
 des Galaktischen Zentrums,  
 2 x 2 Grad ,  
 über 100 Quellen

Image processing at the Naval Research Laboratory using DoD High Performance Computing Resources  
 Produced by N.E. Kassim, D.S. Briggs, T.J.W. Lazio, T.N. LaRosa, J. Imamura, & S.D. Hyman  
 Original data from the NRAO Very Large Array courtesy of A. Pedlar, K. Anantharamiah, M. Goss, & R. Ekers

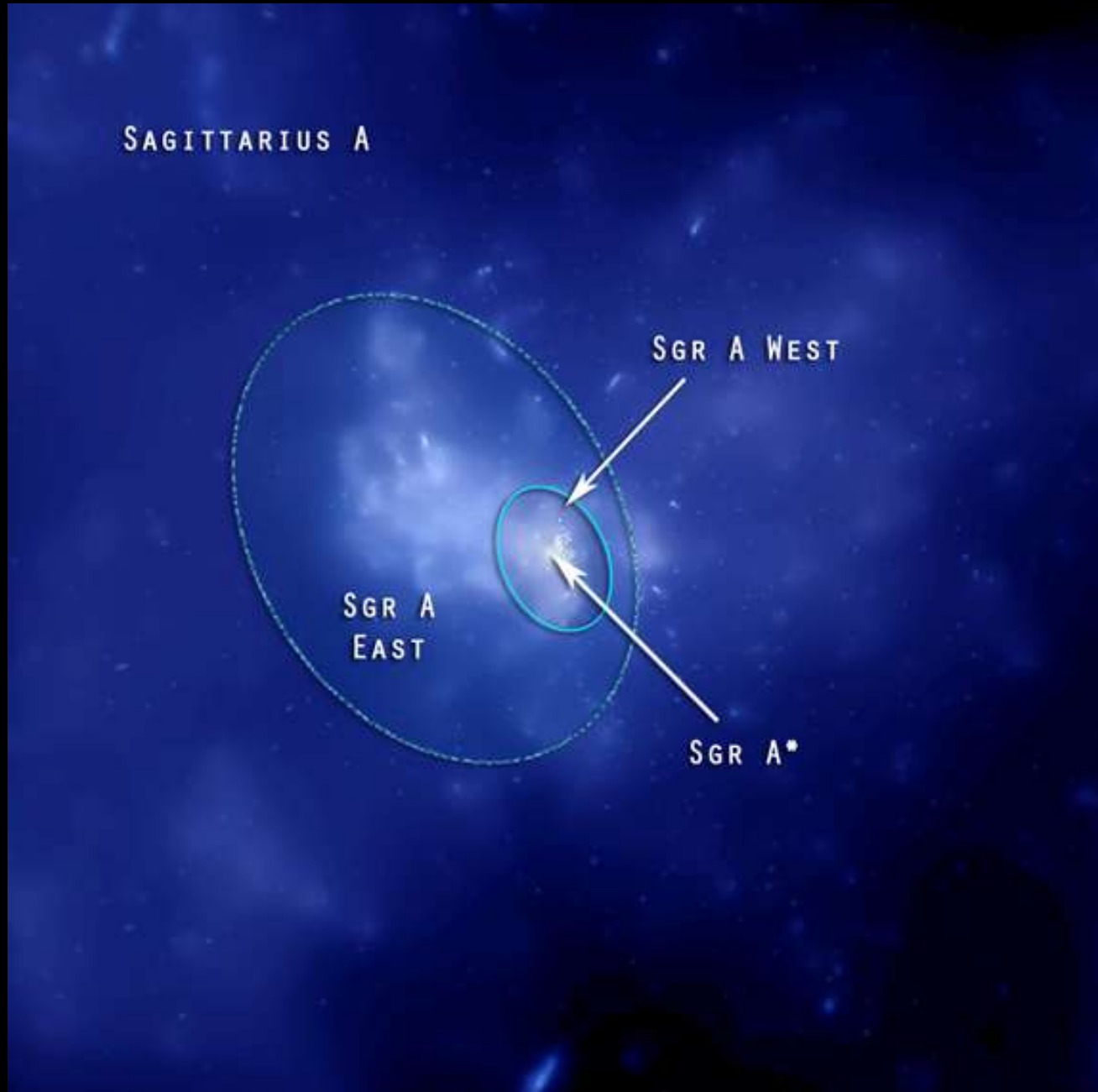


Sgr A: 20 cm Karte; VLA



F. Yusef-Zadeh, M.R. Morris, D.R. Chance

# CHANDRA: Sagittarius A

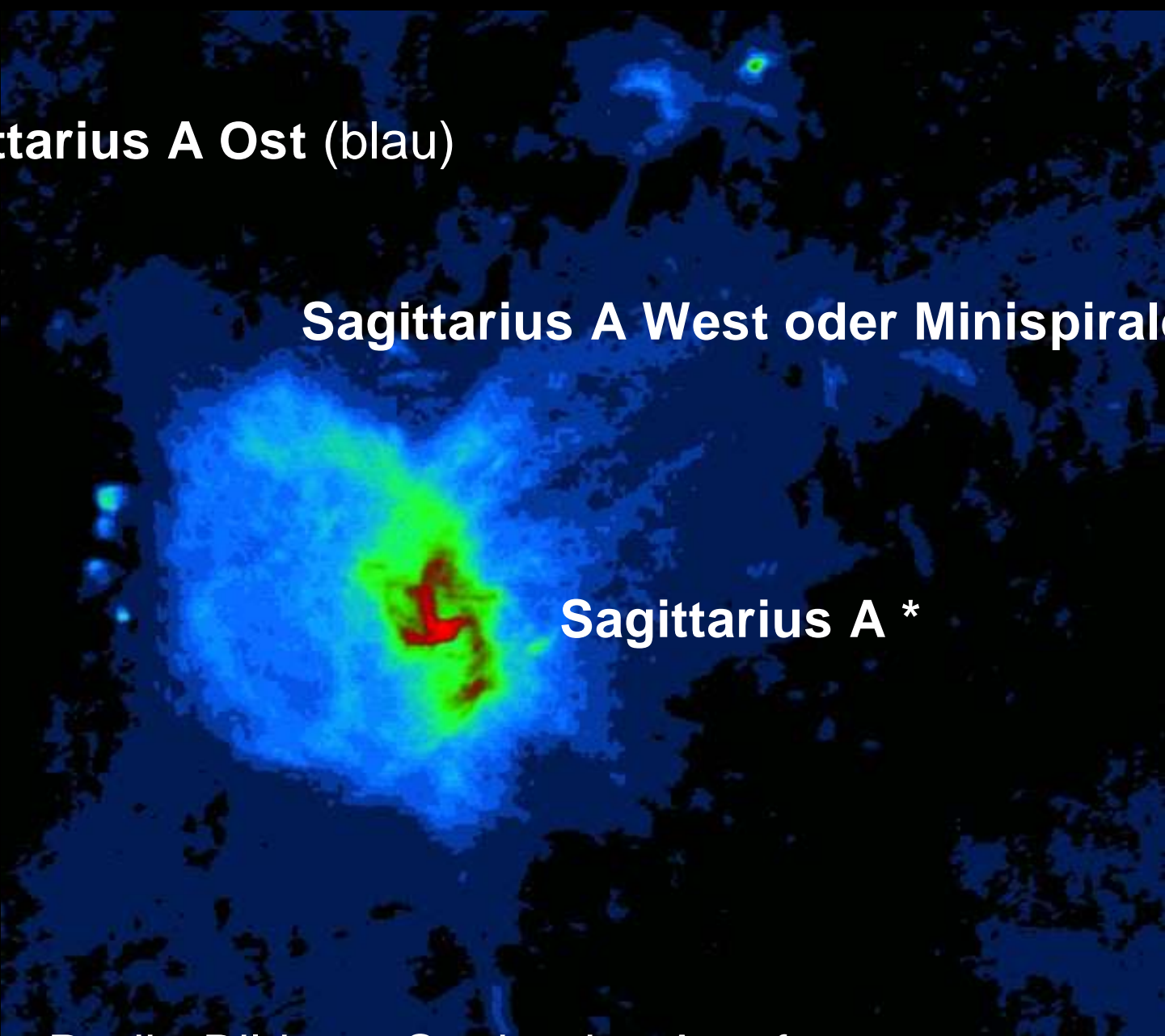


**Sagittarius A Ost (blau)**

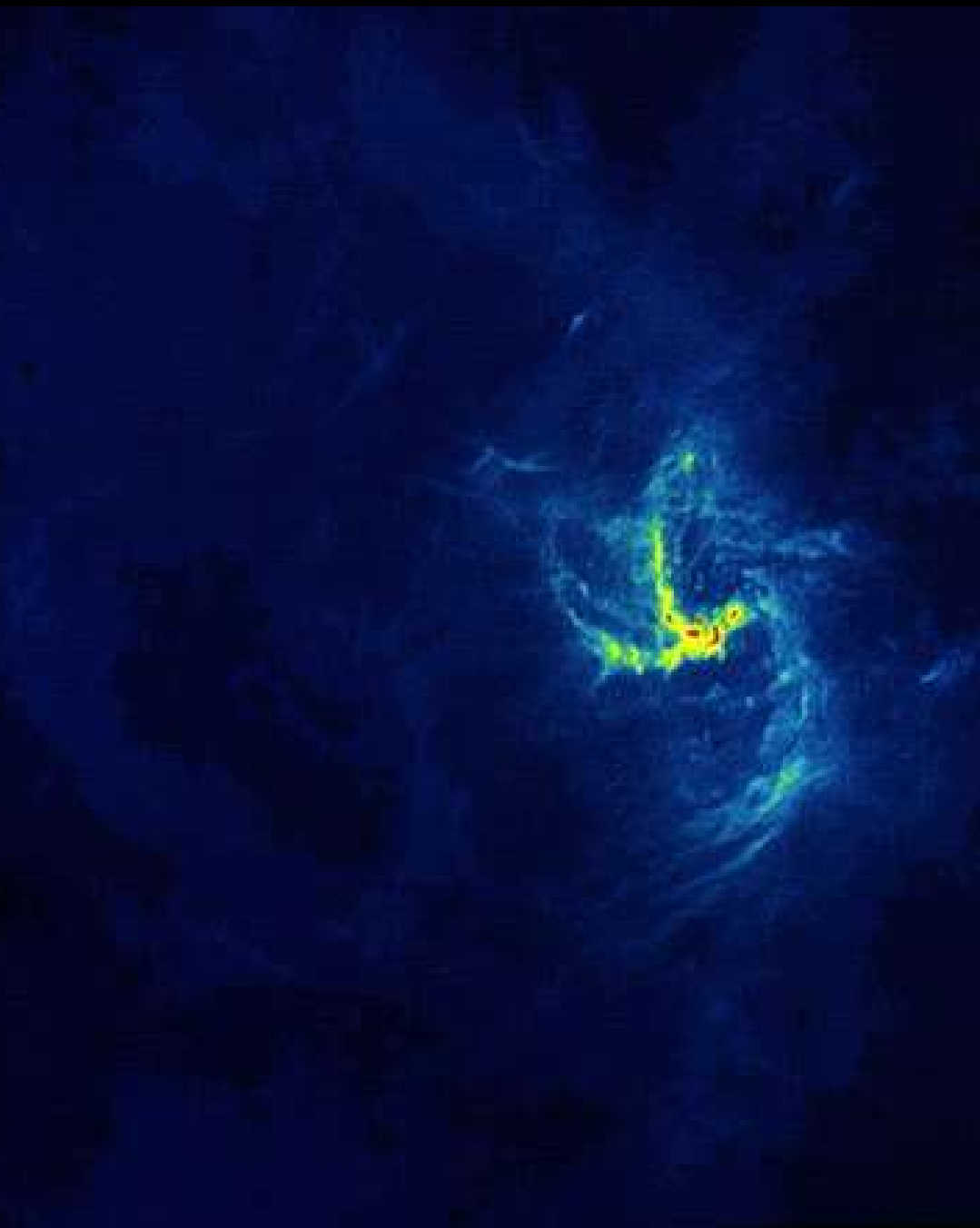
**Sagittarius A West oder Minispirale (rot)**

**Sagittarius A \***

Radio-Bild von Sagittarius A aufgenommen  
mit dem VLA (by Y. Farhad-Zadeh & M. Morris)



## Sgr A West: 6 cm Bild; VLA

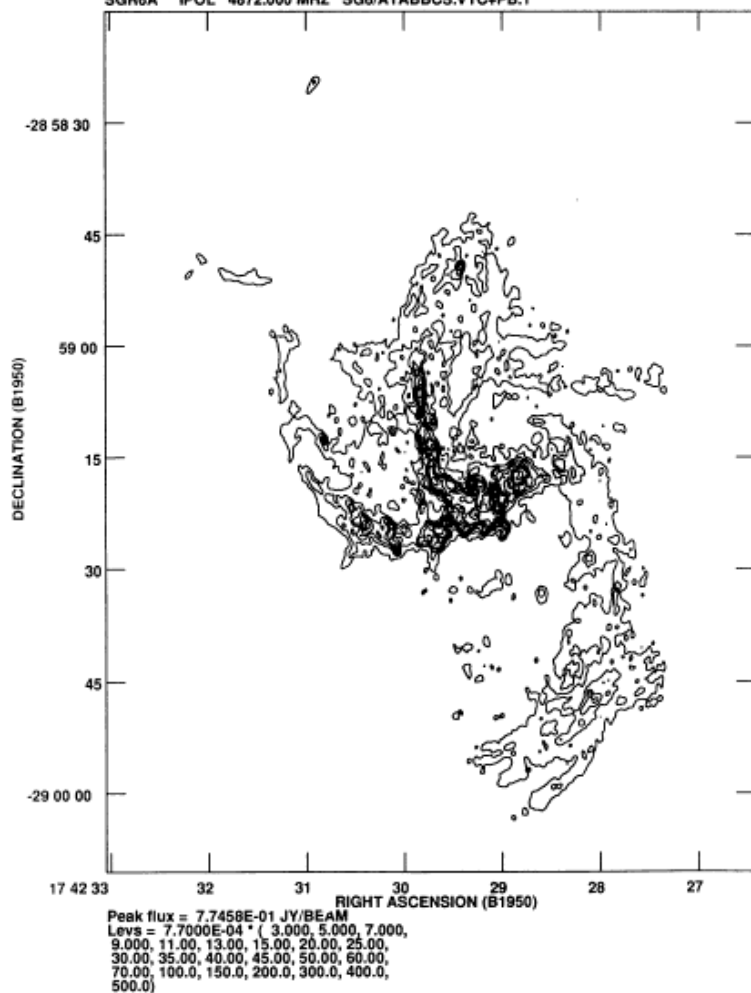


Sgr A West, ein spiralförmiges Muster aus thermisch ionisiertem Gas, das in das Zentrum der Galaxie zu fallen scheint.

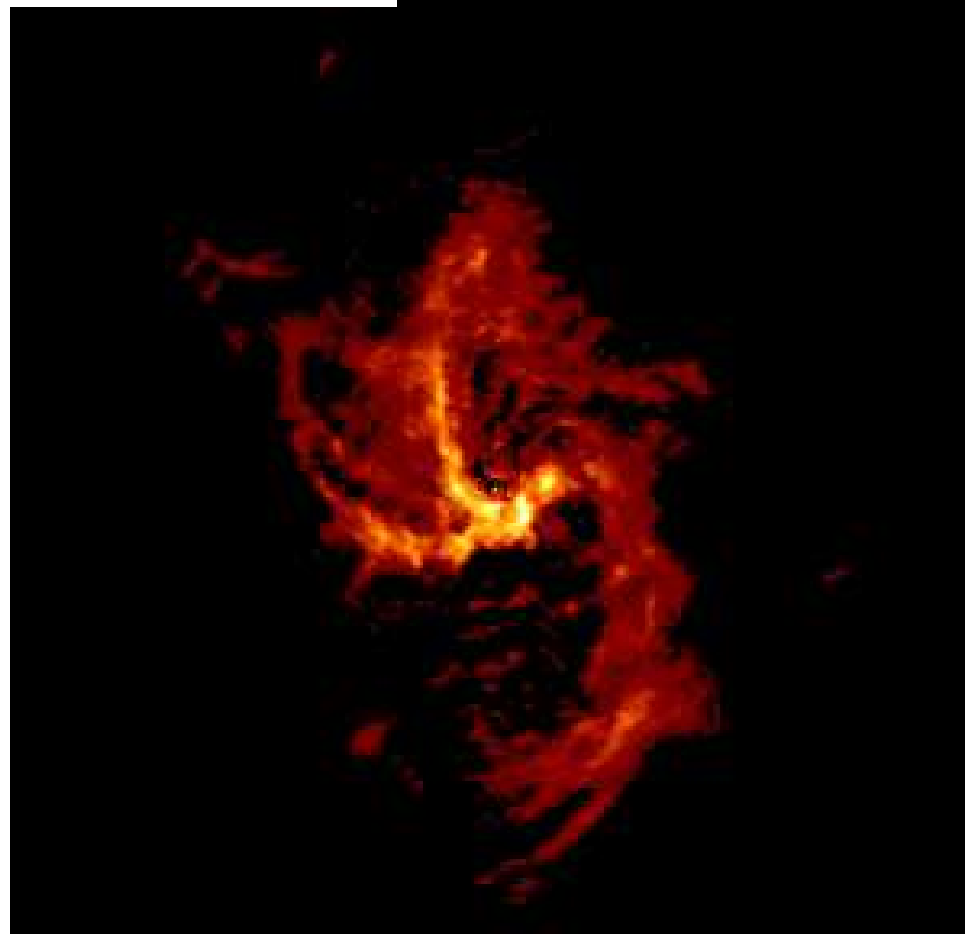
Nah dem Zentrum befindet sich Sgr A\*, eine punktförmige Radioquelle.

K.Y. Lo, University of Illinois, Urbana-Champaign, Dept. of Astronomy

PLot file version 1 created 03-APR-1992 18:33:42  
 SGR6A IPOL 4672.000 MHZ SG6/ATABBCS.VTC+PB.1



Close-up view of the northern half of the Northern Arm exhibiting the dark band that runs adjacent to the Northern Arm. This figure is based on a map at  $\lambda 6$  cm with FWHM =  $0''.3 \times 0''.6$  and is constructed only from the A-array configuration data. Contours of total intensity are set at (-3, 5, 7, 9, 11, 15, 20, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 500)  $\times 770 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ . The rms noise is  $7.7 \mu\text{Jy}$ .

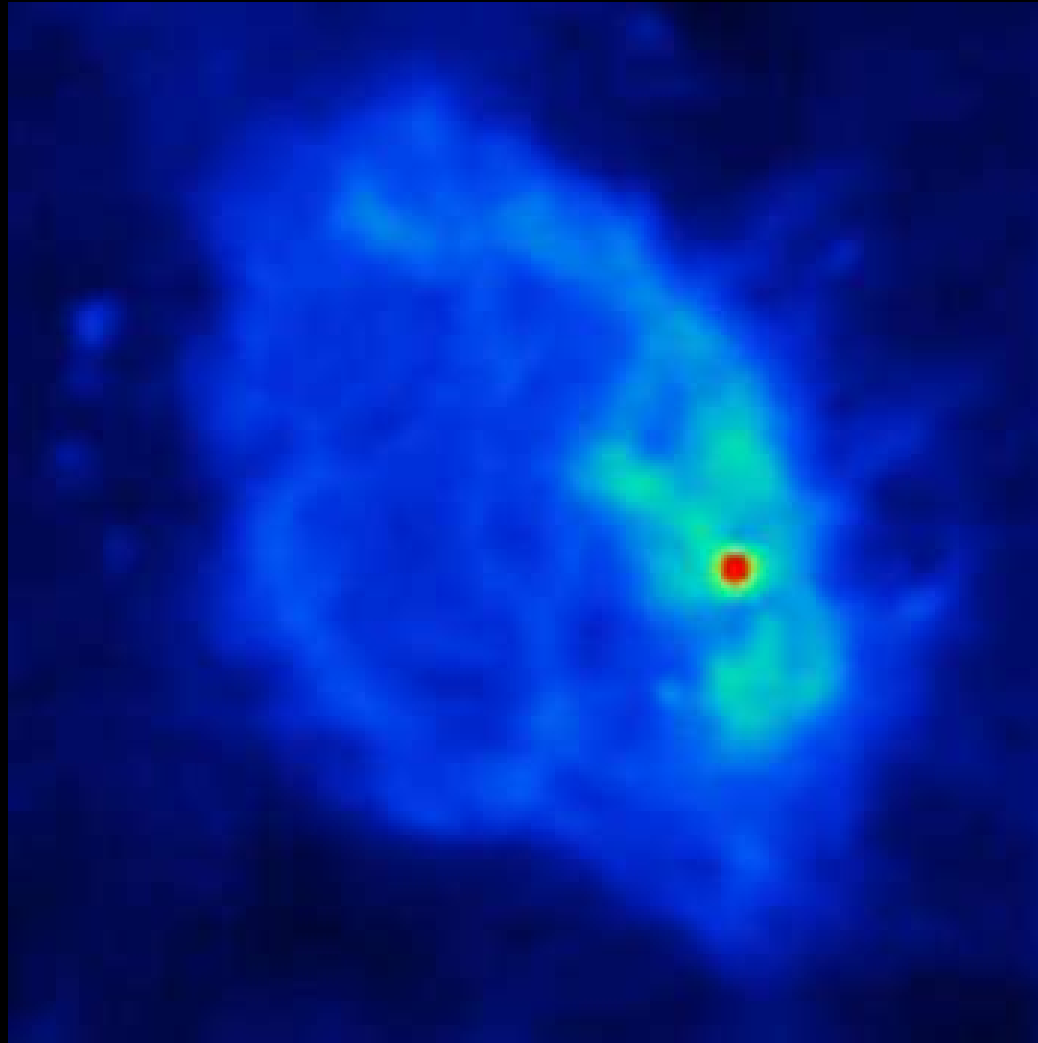


Wardle 1992). These streamers show a clear spatial relationship from a circular ring as they run in the direction parallel to the major axis of the circumnuclear ring. Plate 11) displays the weak continuum emission streamers with flux densities of  $\approx 0.3 \text{ mJy beam}^{-1}$ . The most prominent of these ionized and diffuse streamers are the Northern and Southern Arms and the east-west arm of which are saturated in Figure 6. We note a few bright and discrete ionized features which are super-

### 3. DISCUSSION

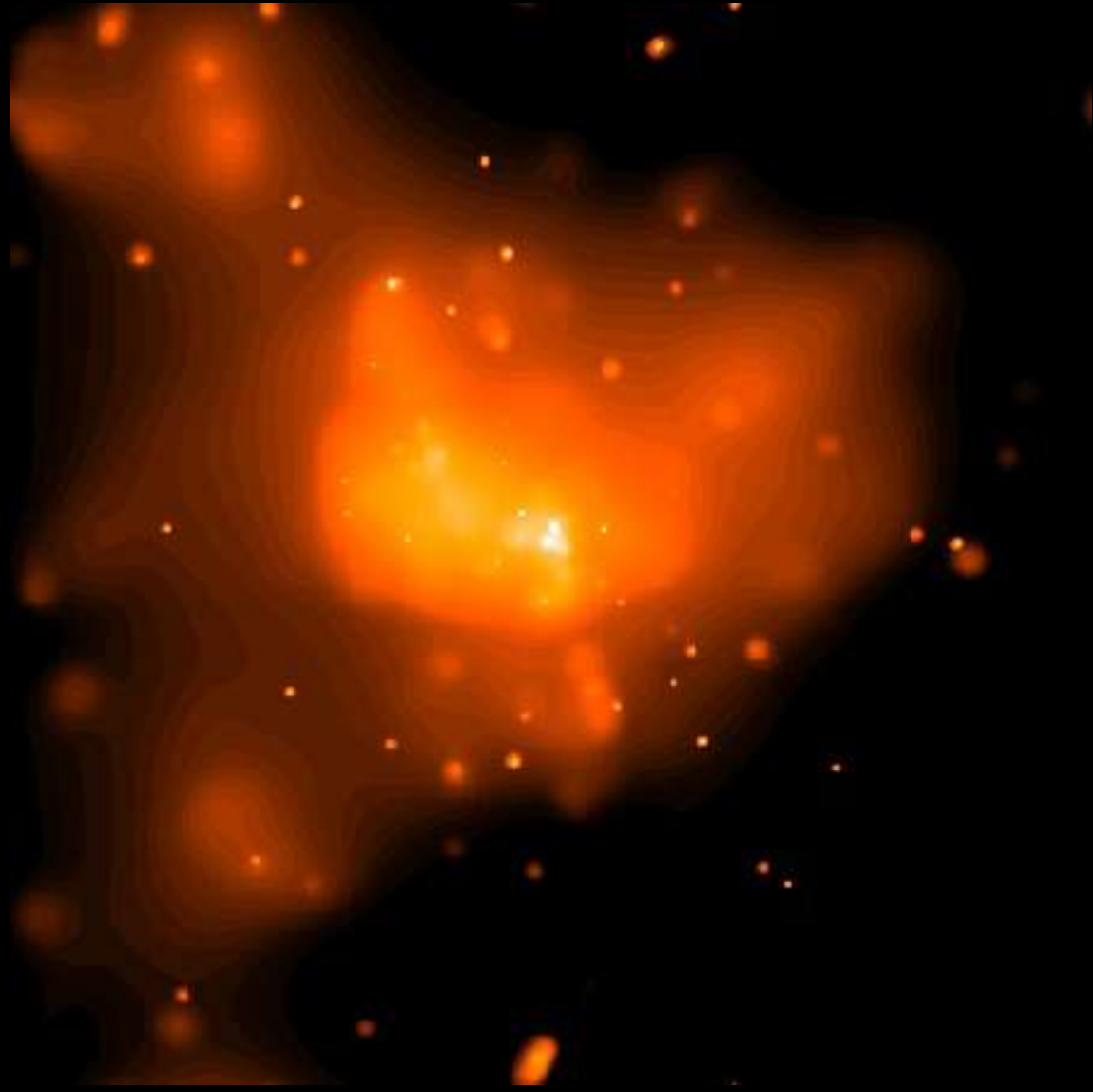
In the previous section, we noted the waviness of the Northern Arm, the dark band, the ionized streamers and the disturbed nature of the western edge of the circumnuclear disk. We now argue that these features are consistent with a scenario in which the IRS 16 wind is affecting the dynamics and morphology of the gas at the Galactic center. The outflow originates from several sources in IRS 16, merges and is somewhat

## Sgr A Ost: 20 cm Kontinuum Bild

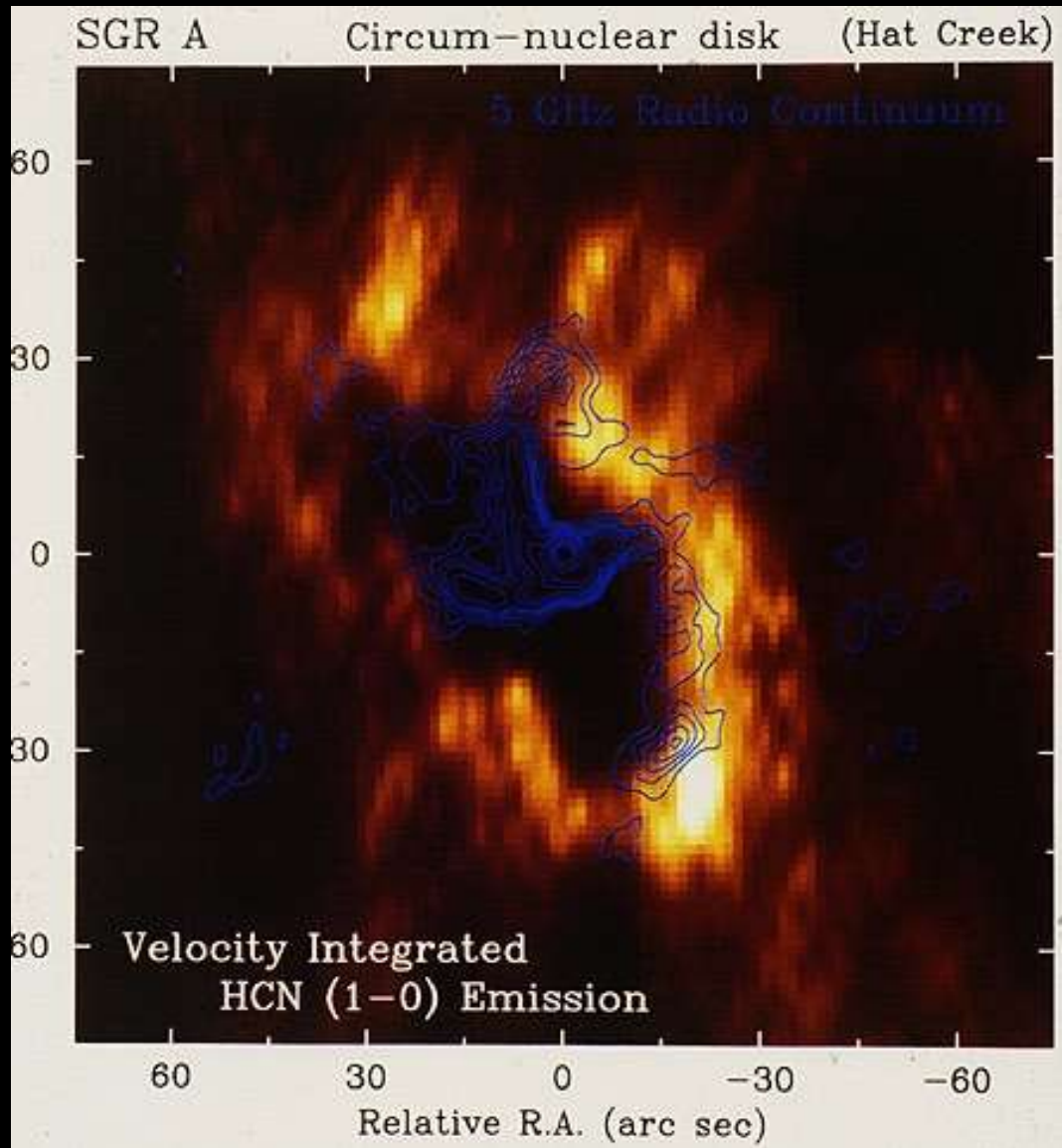


Raymond Plante, K. Y. Lo, Richard M. Crutcher, University of Illinois at Urbana-Champaign, Astronomy Department

Röntgen: CHANDRA, Sgr A\* und Sgr A Ost



# Der zirkumnukleare Ring



Eine 2 pc (1') Radius rotierende ringförmige Verteilung molekularen Gases (+Kohlenstoff und Sauerstoff), kartiert HCN-Linien Emission.

Überlagert ist das Spiralmuster von Sgr A West.

Leo Blitz, University of Maryland



# Der zirkumnukleare Ring

- Strukturierte Scheibe aus warmen Molekülwolken, die scheinbar leeren Bereich von 10 Lichtjahren Durchmesser umgeben. Mit dem molekularen Gas der Scheibe sind Kohlenstoff- und Sauerstoffatome vermischt, zum Teil durch UV-Strahlung ionisiert, Gasscheibe dreht sich mit Geschwindigkeit von 110 km/s um das gal. Zentrum.
- Auch im zentralen Loch gibt es ionisierte Gasströme und -wolken
- Geschwindigkeitsverteilung der sehr dünnen Materie innerhalb des 10 Lichtjahre breiten Hohlraums: 110-400 km/s
- Direkt im Zentrum rast Materie mit Geschwindigkeiten bis zu 1000 km/s, weggeschleudertes Gas von sich schnell bewegenden Sternen, intensive Sternwinde

# Innerhalb des zirkumnuklearen Rings

- Kosmische Katastrophe im Zentrum der Galaxie?
- Rotierender Gasring sollte aufgrund von Stößen zwischen Materiewolken unterschiedl. Geschw. Allmählich eine sehr gleichmäßige Struktur annehmen
- Sterne im zentralen Gebiet können im Infrarot zw. 2 und 3 Mikrometern Wellenlänge beobachtet werden
- Sternendichte im inneren Bereich sehr hoch und nimmt zum Zentrum hin weiter zu, typischer Abstand zw. Sternen 300 fach geringer als zw. Sonne und nächstem Nachbarn
- Geschwindigkeitsmessung: Großteil der Sternstrahlung wird im Infraroten emittiert, reichlich Kohlenmonoxid in der Atmosphäre, aus CO-Spektrum Geschwindigkeit bestimmen

## Innerhalb des zirkumnuklearen Rings

- Innerhalb der letzten 5 Milliarden Jahre haben sich dort ca. 5 Mio Sonnenmassen angehäuft (Diffusion, Kollision zw. Wolken, eine Sonnenmasse Gas und Staub pro 1000 Jahre)
- Schwarzes Loch früher vermutlich aktiver als heute
- Bei gegenwärtiger Sterndicht kommt alle paar tausend Jahre ein Stern so nahe, daß er auseinandergerissen wird -> Aufblitzen für wenige Jahre
- Überreste von früheren Ausbrüchen -> zentraler Hohlraum und die ringförmigen Molekülwolken könnten Zeugnisse eines Ausbruchs vor 10000-100000 Jahren sein

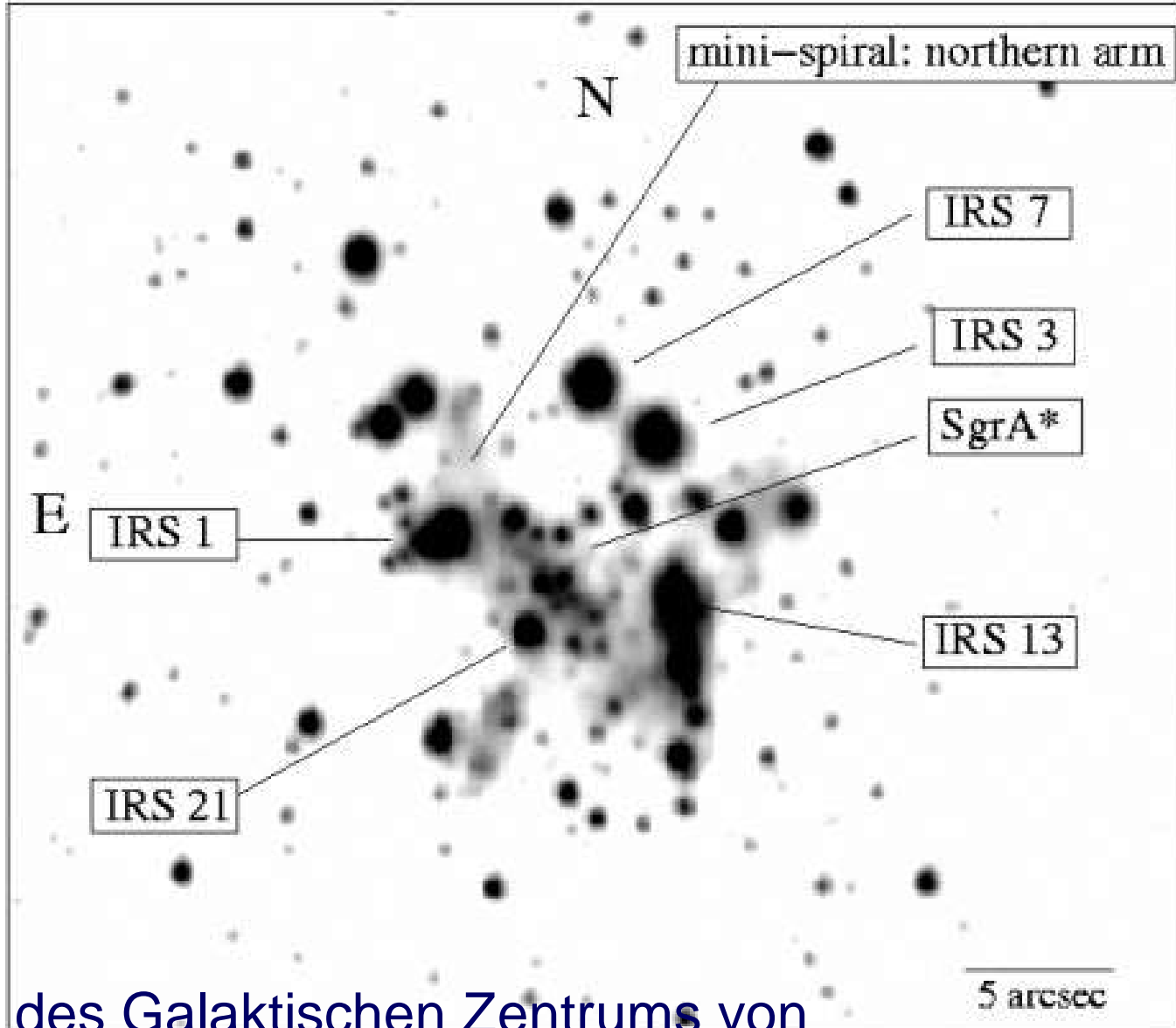


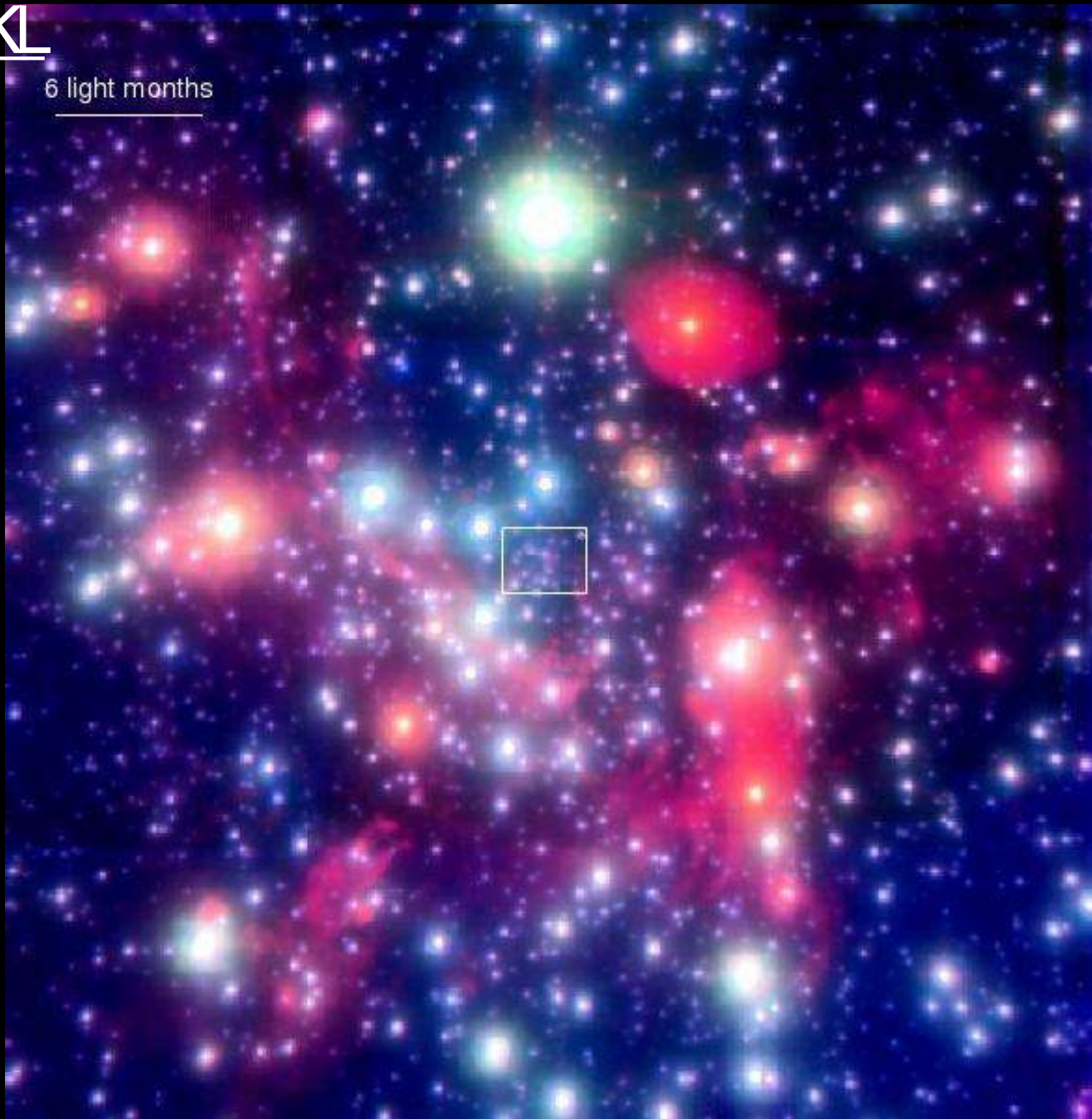
Bild des Galaktischen Zentrums von

ISAAC Mai 2002, VLT im L-Band ( $3.7 \mu\text{m}$ ).

Der zirkumnukleare Ring ist nicht sichtbar in diesem Bild.

Sgr A\*, HKL

6 light months



Genzel et al.

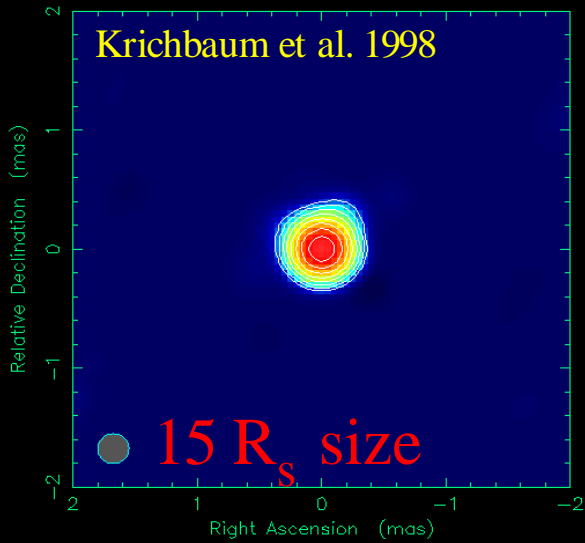
# Das Galaktische Zentrum in hochauflösenden mm- Beobachtungen

VLA 2cm

VLBI 86 GHz

SGR\_A at 86.189 GHz 1995 Mar 08

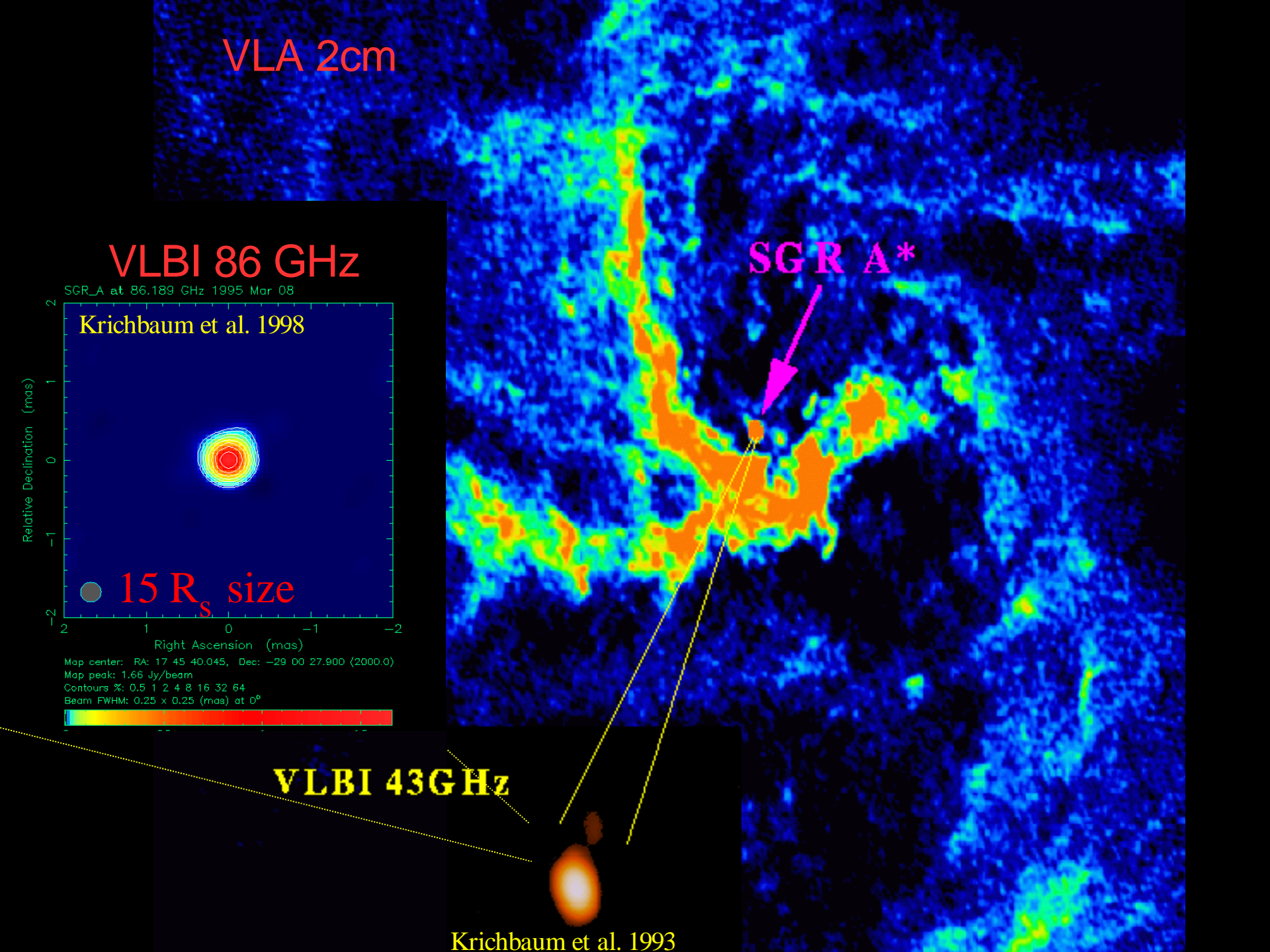
Krichbaum et al. 1998



SGR A\*

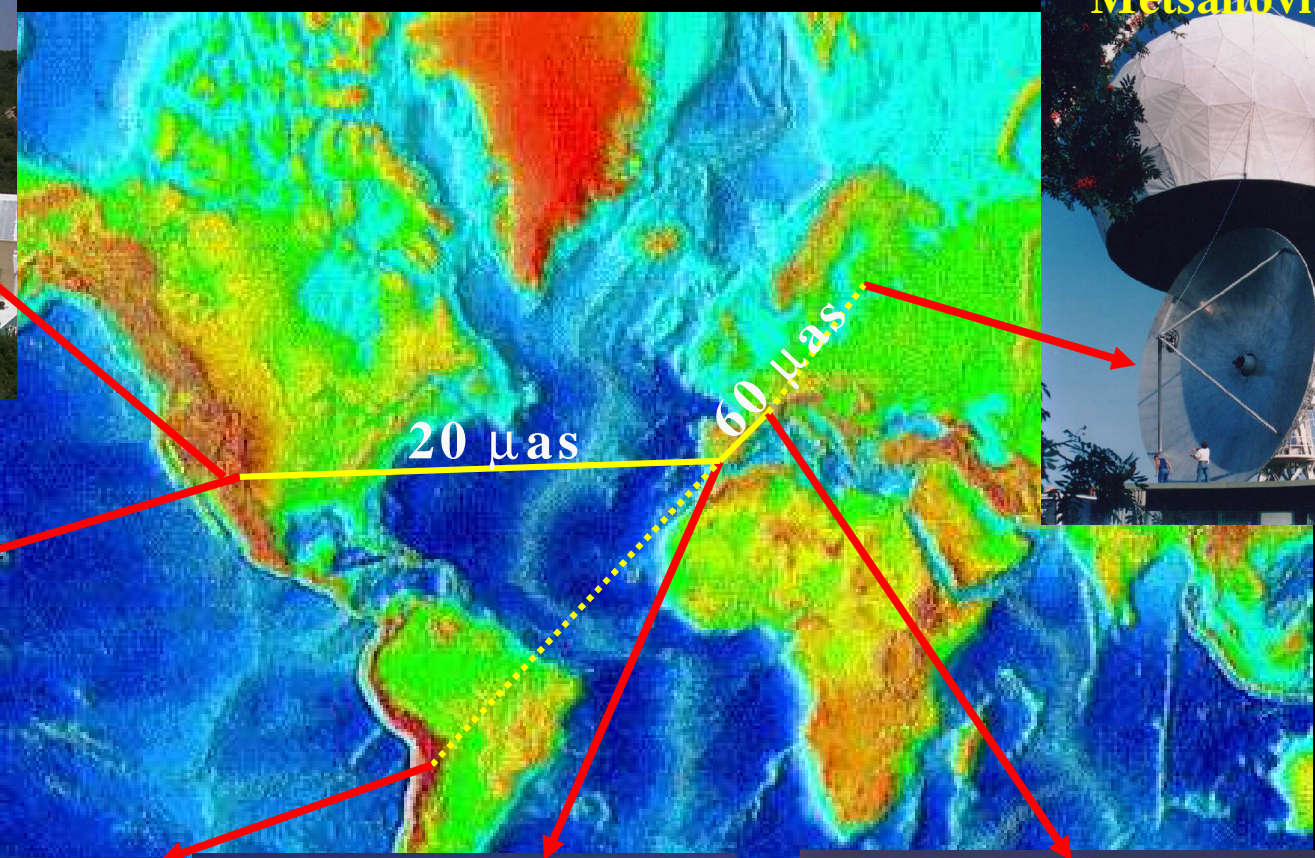
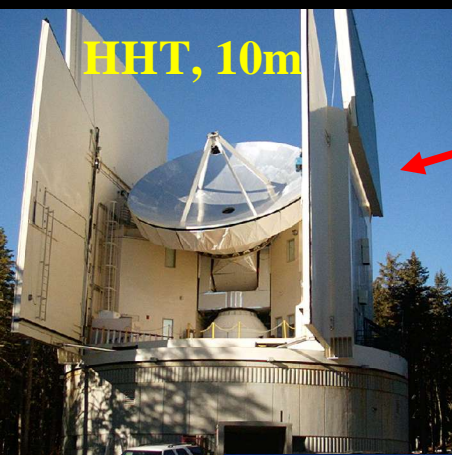
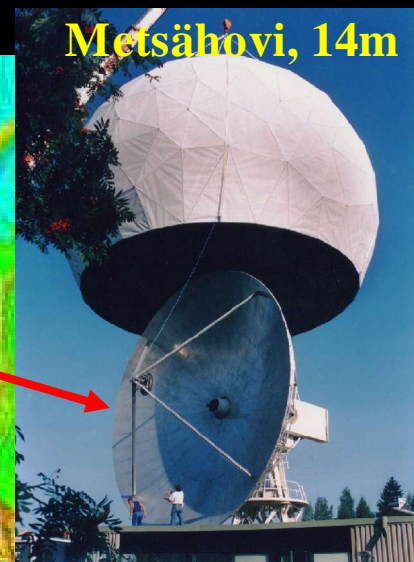
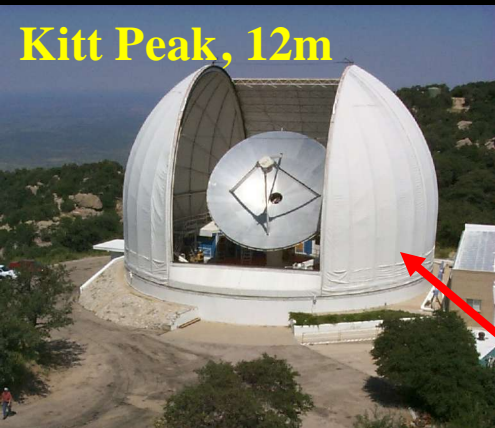
VLBI 43GHz

Krichbaum et al. 1993



# Global mm-VLBI at 150 - 230 GHz

angular resolutions: for 230 GHz



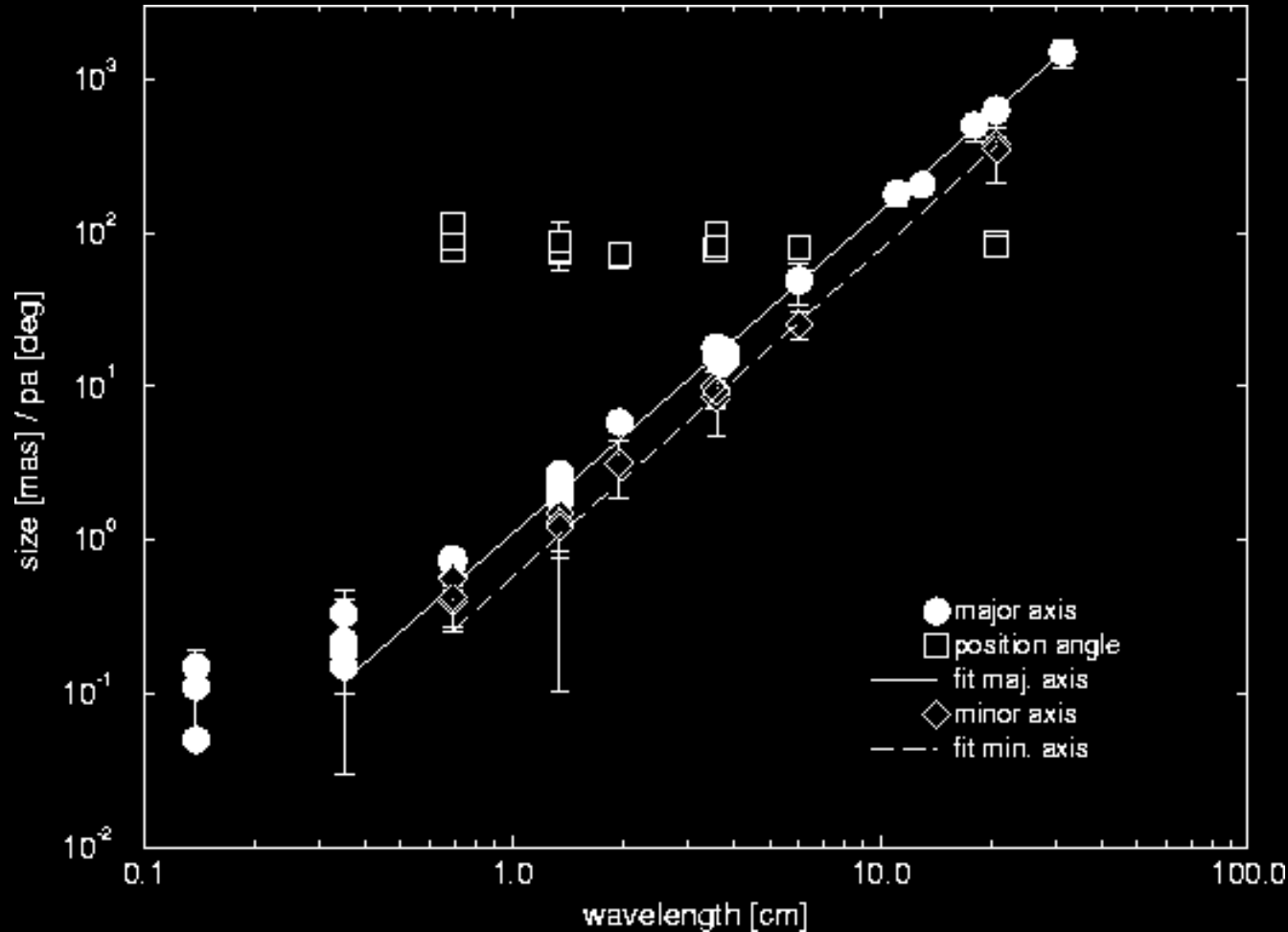


Wie groß ist Sgr A\*?

# Wie groß ist Sgr A\*?

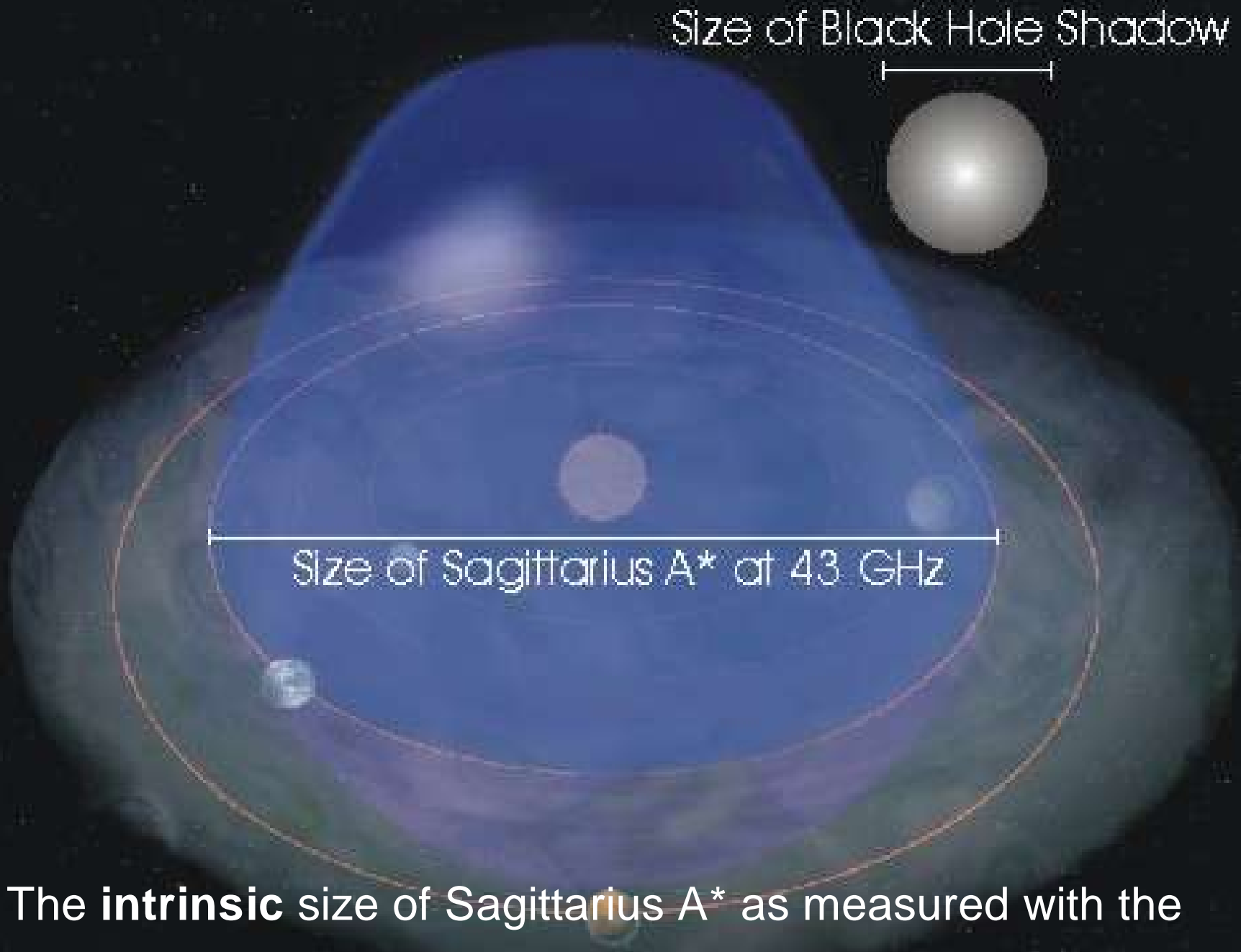
- **Schwierig die wahre Größe zu bestimmen, denn:**
  - Streuung durch das interstellare Medium,  $\lambda^2$ -Abhängigkeit, Durchmesser ist Funktion der Wellenlänge
  - Streuung ist anisotrop, vermutlich aufgrund der Magnetfelder
  - Mm- bis sub-mm: intrinsische Größe von Sgr A\* kann bis auf Faktor 10 genau bestimmt werden:
    - 9 x 10<sup>13</sup> cm bei 43 GHz (1.2 Milliarden km, Durchmesser der Jupiterbahn); entspricht 17 Schwarzschildradien für ein Schwarzes Loch der Masse 2.6 x 10<sup>6</sup> Sonnenmassen

# Die Größe von Sagittarius A\*



Die Größe von Sagittarius A\* gemessen mit VLBI bei verschiedenen Wellenlängen der beobachteten Strahlung,

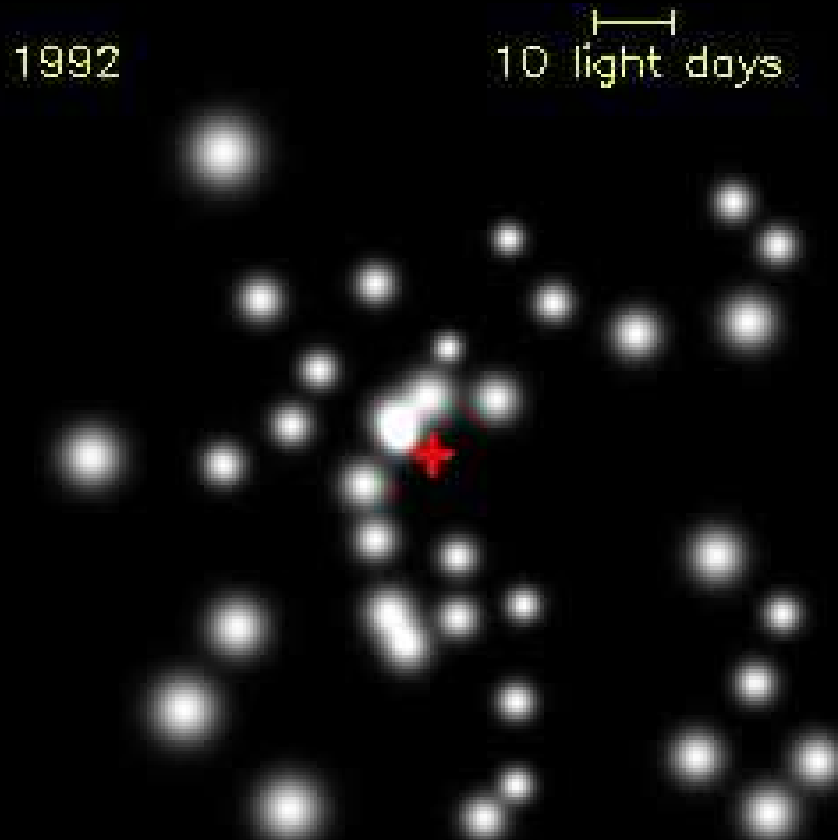
T. Krichbaum



- The **intrinsic** size of Sagittarius A\* as measured with the
- VLBA at 43 GHz by Bower Falcke Herrnstein et al (2004)

# Sterne auf Kepler-Bahnen um ein hypothetisches Schwarzes Loch

# *Galaktisches Zentrum*



From high resolution near-infrared imaging over the last 10 years the proper motions of more than 100 stars between about 0.01 and 0.3 pc from the compact radio source Sgr A\* have been determined, velocities  $> 1000$  km/s

### 3. Keplersches Gesetz

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

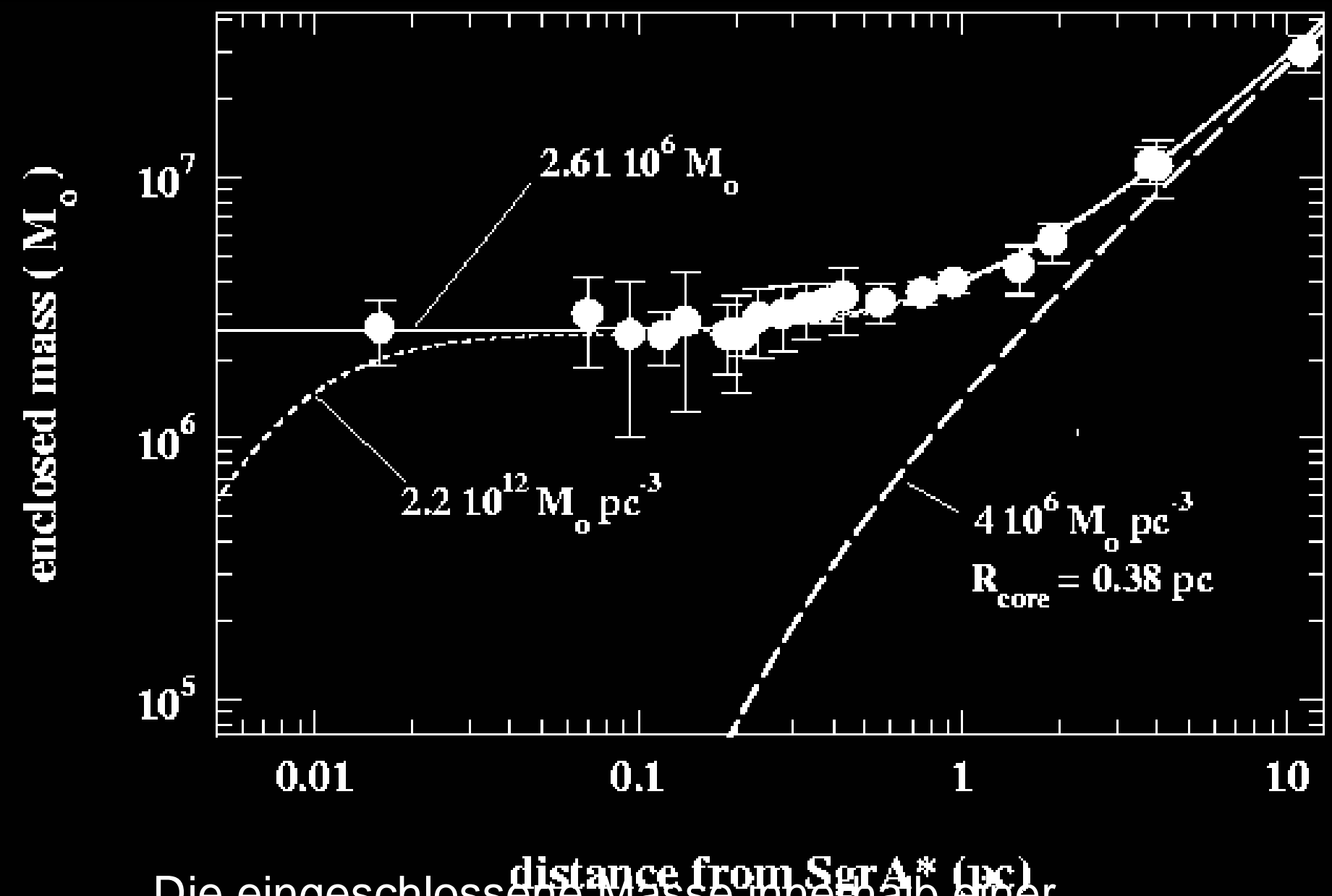
star on  
elliptical  
orbit



Galactic  
Black Hole  
at Sgr A\*

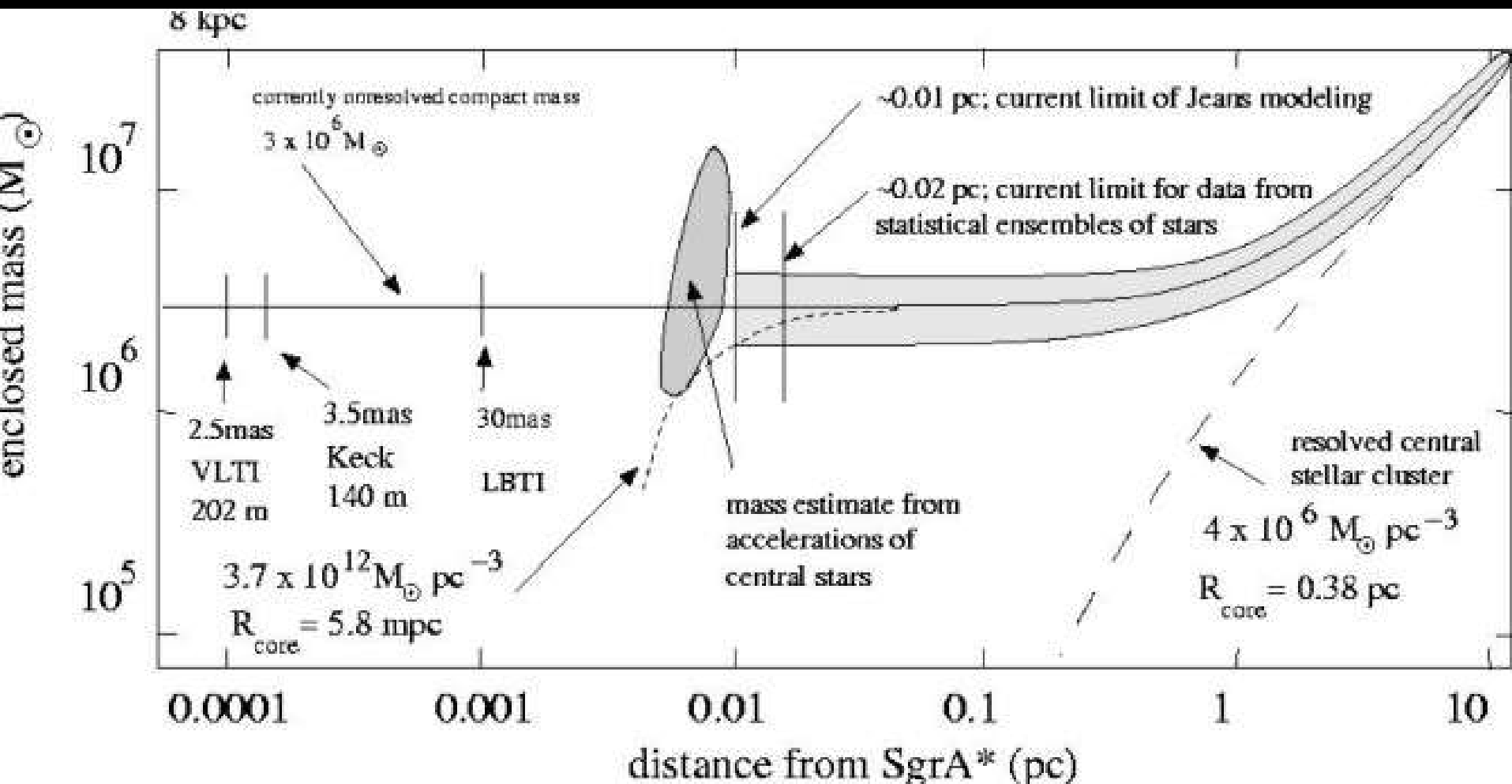
mass  $M$

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



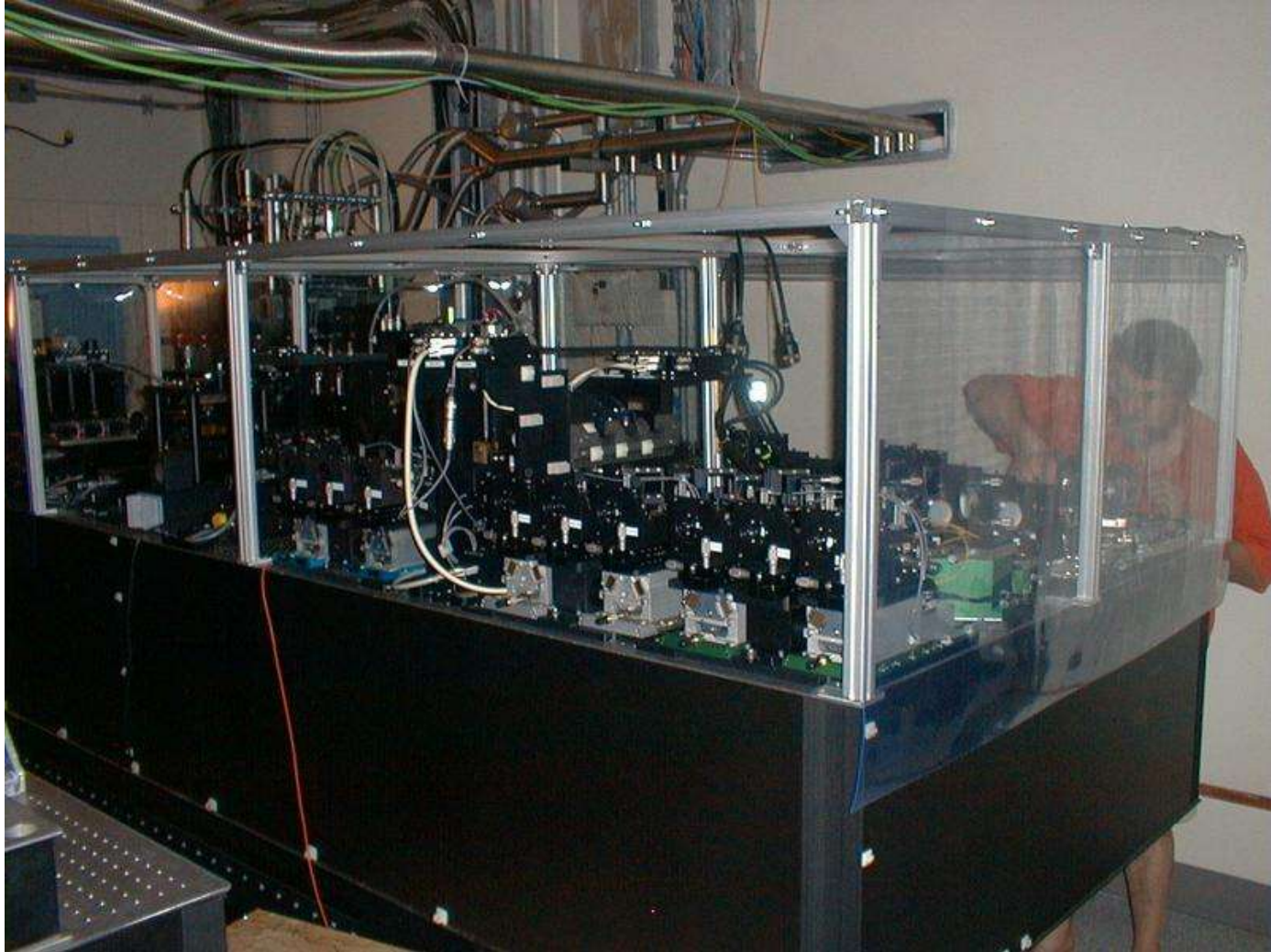
Die eingeschlossene Masse innerhalb einer Bestimmten Entfernung von Sagittarius A\* (A. Eckart & R. Genzel)





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.



Astronomical Multi BEam Recombiner, Bildschärfe eines Teleskops

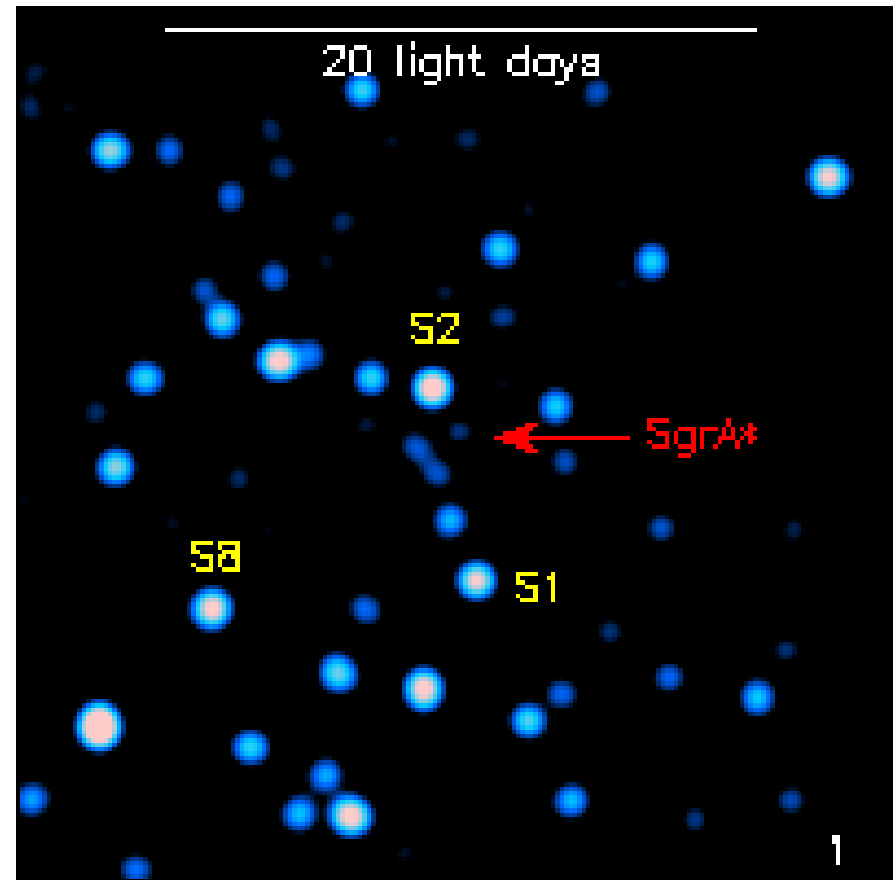
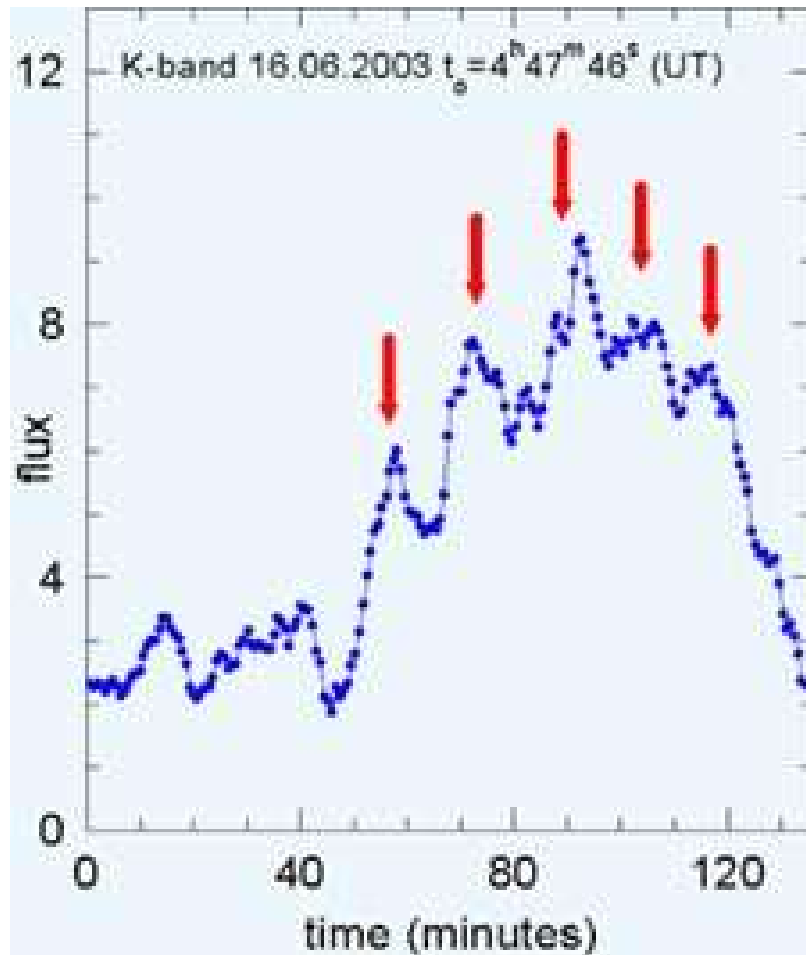
mit 200 m Durchmesser (25 fach schärfer als mit Einzelteleskop)  
Das AMBER-Instrument. Der komplexe Aufbau enthält eine große Anzahl  
von optischen und mechanischen Komponenten für Interferometrie und  
gleichzeitig Spektroskopie. Bild: AMBER-Konsortium.

# Die Masse des Schwarzen Lochs:

- Ghez et al. 1998 (Infrarot, Sternbewegung): 2.6 Mio Sonnenmassen
- Genzel et al. 2000: 2.6-3.3 Mio Sonnenmassen
- Ghez et al. 2000: 3 Mio Sonnenmassen
- Eckart et al. 2002: 2-8 Mio Sonnenmassen
- 2002: 3.3 Mio Sonnenmassen
- => insgesamt: zwischen 2.4-2.8 Mio Sonnenmassen, Schwarzschildradius von 8 Mio km, im Falle maximaler Rotation: halber Wert

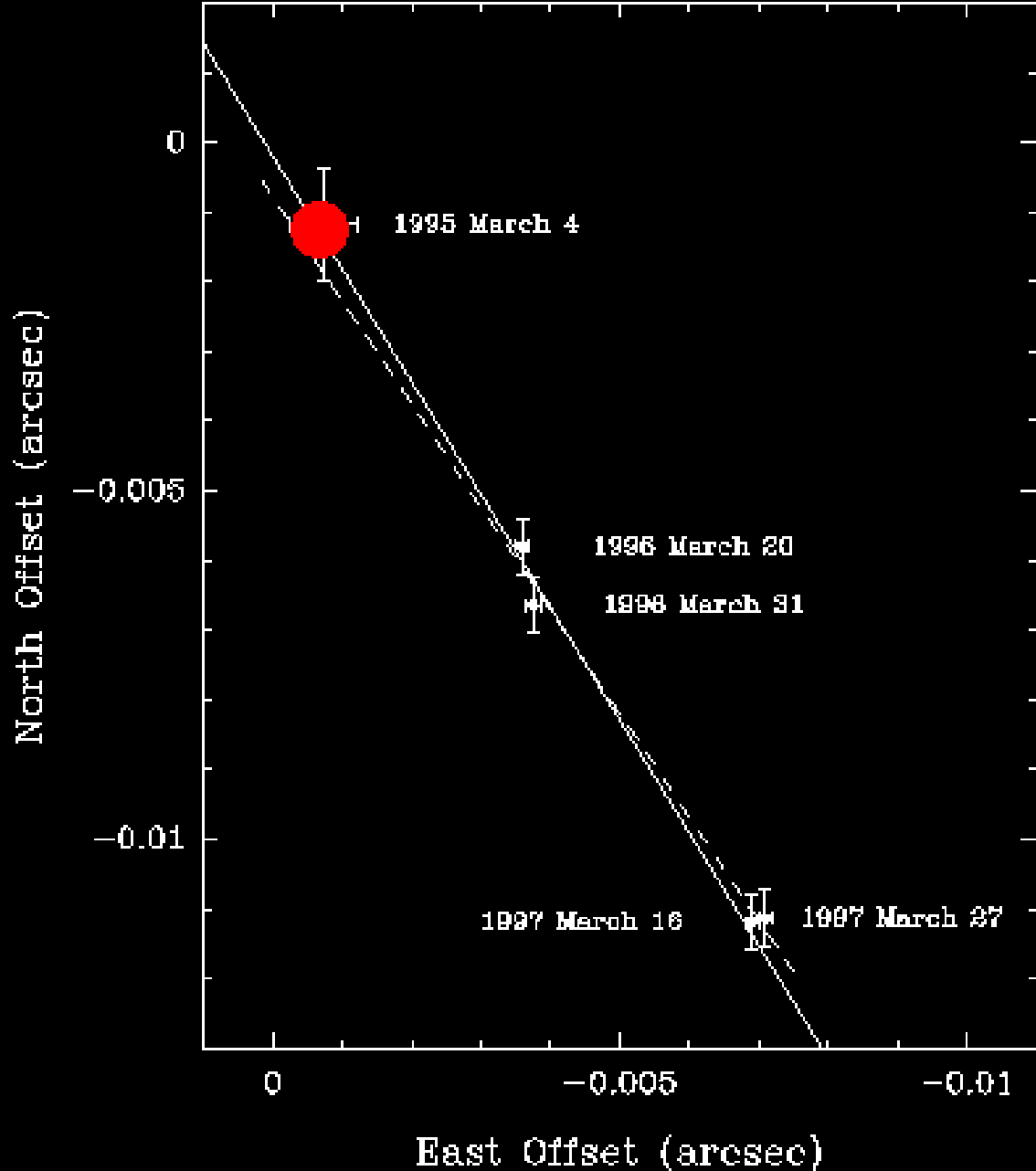
# Weitere Hinweise auf ein Schwarzes Loch

# Das Massemonster im Herzen der Milchstraße flackert und scheint zu rotieren



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



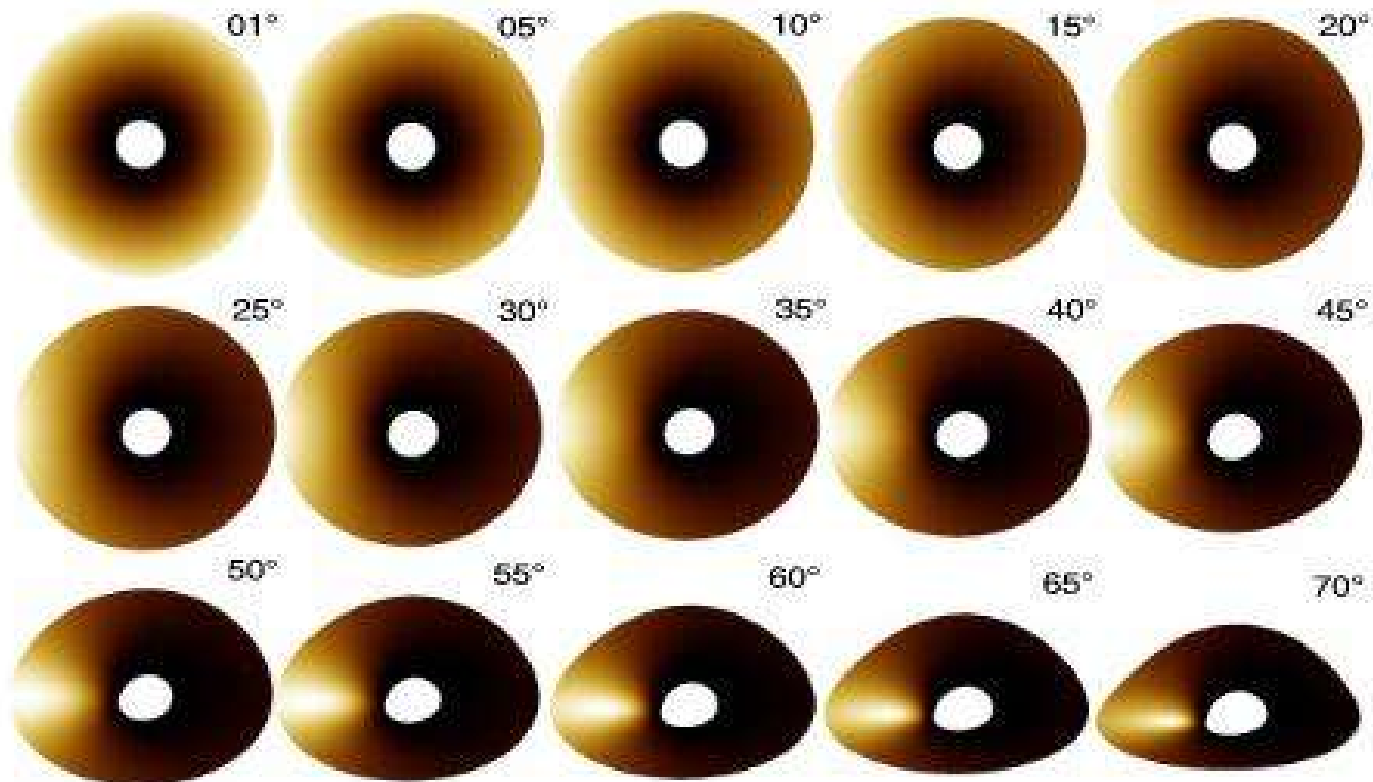
Die Position von  
Sagittarius A\* am  
Himmel  
gemessen relativ zu  
sehr weit entfernten  
(stationären)  
Hintergrund-Quasaren  
( M. Reid und andere)

# Zukunftsmusik ....

# Beobachtung Schwarzer Löcher

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

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





# Ein hungerndes Schwarzes Loch?

# Hungerndes Schwarzes Loch?

- Viel zu leuchtschwach bei allen Wellenlängen, strahlt nur mit  $3 \times 10^{-10}$  seiner Eddington Leuchtkraft
- Warum ist trotz einfallenden Gases die Strahlungseffizienz gering?
- ADAF: Advection dominated Accretion Flow:

Darin ist der heiße Akkretionsfluss evaporiert, und es bildet sich eine quasi-sphärische Region um das Schwarze Loch aus. Die Materie wird hier ins Schwarze Loch advectiert, d.h. Dichteprofile etc. werden unverändert im Profil vom Akkretor verschlungen.

Die advektionsdominierten Modelle wurden in der Folgezeit modifiziert. So kennt man Modelle wie **ADIOS** (*advection-dominated inflow/outflow solutions*), wo auch signifikante Ausflüsse (Winde) berücksichtigt werden, sowie **CDAF** (*convection-dominated accretion flow*), wo Konvektion des akkretierten Plasmas eine wichtige Rolle spielt.

# Vergleich des galaktischen Zentrums mit anderen AGN

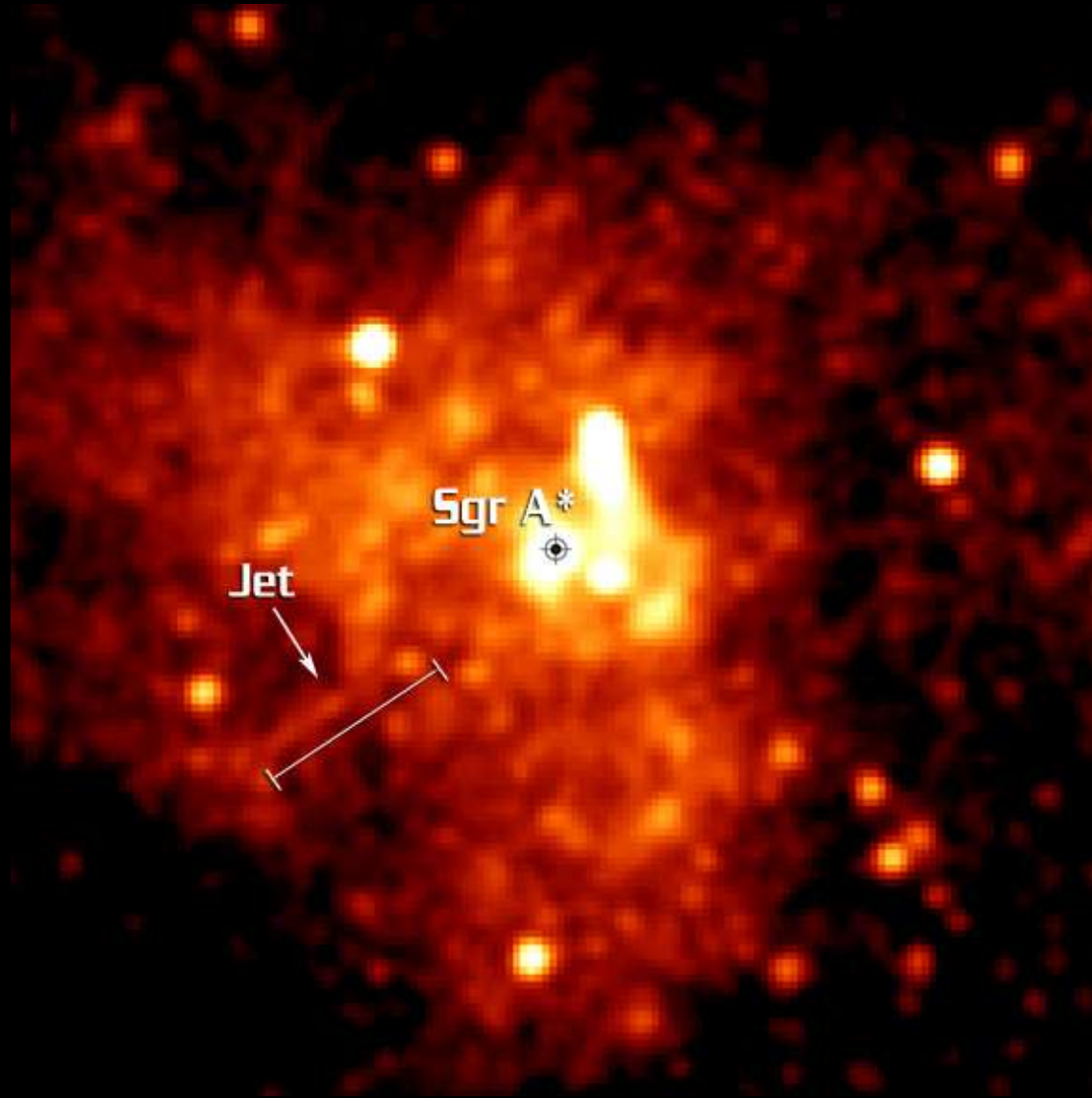
## Vergleich mit anderen AGN

- Molekulare Wolken (besonders die zirkumnukleare Scheibe) könnte der verdeckende Torus des galaktischen Zentrums sein, zirkumnukleare Scheibe ist vermutlich Rest der durch Gezeitenkräfte auseinandergerissenen Wolken
- Weiter innen: Gas-Ströme und kollidierende stellare Winde könnten der Narrow-Line-Region entsprechen
- Da viel Gas in der Nähe des Schwarzen Lochs zu finden ist: Akkretion auf Sgr A\* kann irgendwann wesentlich größer werden, vor einigen Mio. Jahren gab es dort einen Sternentstehungs-Ausbruch, der die heißen Sterne in den zentralen pcs erzeugt hat

## Vergleich mit anderen AGN

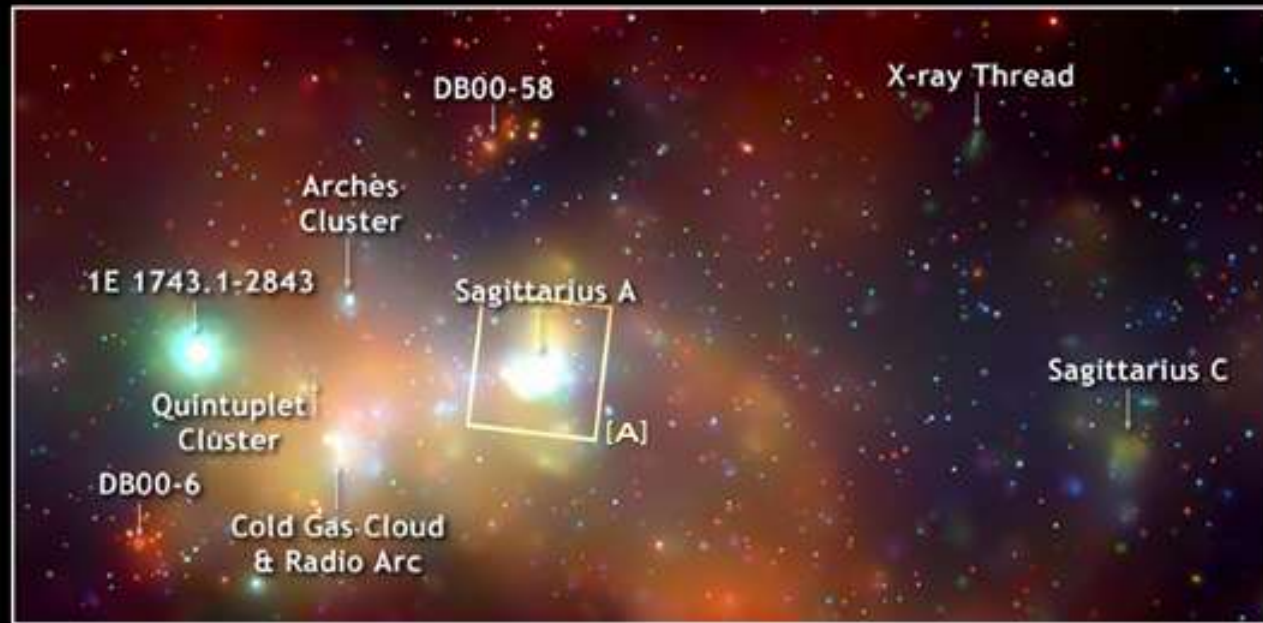
- Wird es basierend auf dem Evolutionszyklus der massiven Sterne einen Zyklus wiederkehrender Nuklearer Aktivität geben? Starburst-AGN-Verbindung
- Bislang keine Evidenz für eine Broad-line-region
- Jet ???????!

# Jet wurde doch gefunden!



- 1.5 Lichtjahre Länge

900 x 400 LJ



2000 Röntgen-Quellen

