



**Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg**



X-Ray Astronomy II

Extragalactic X-Ray Astronomy

Jörn Wilms, Matthias Kadler

<http://pulsar.sternwarte.uni-erlangen.de/wilms/teach/xray2/>

Wintersemester 2008/2009

Büro: Dr. Karl Remeis-Sternwarte, Bamberg

Tel.: (0951) 95222-13 / -26

Email: {joern.wilms,matthias.kadler}@sternwarte.uni-erlangen.de

1-2

Schedule

- X-Rays in the Galaxy
- 13.10. JW Introduction, Interstellar Medium
- 20.10. – **NO LECTURE** –
- 27.10. MK The Galactic Center / Antrittsvorlesung JW
- 03.11. MK Supernova Remnants, Nucleosynthesis
- X-Rays from Normal Galaxies
- 10.11. JW X-ray Populations in Galaxies
- Supermassive Black Holes in Active Galaxies
- 17.11. JW AGN Taxonomy, Seyfert Galaxies I
- 24.11. JW Seyfert Galaxies, II
- 01.12. MK Radio Galaxies and Blazars, I
- 08.12. MK Radio Galaxies and Blazars, II
- Large Scale Structure and Cosmology
- 15.12. JW Galaxy Clusters
- 22.12. JW γ -ray bursts
- 12.01. MK X-Ray Background and AGN Evolution, I
- 19.01. MK X-Ray Background and AGN Evolution, II
- 26.01. JW X-Ray Background and AGN Evolution, III
- 02.02. JW Summary

Introduction

1



1-1

Literature

- LONGAIR, M.S., 1992, *High Energy Astrophysics, Vol. 1: Particles, Photons, and their Detection*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, ~50€
- Good introduction to high energy astrophysics, the 1st volume deals extensively with high energy processes, the 2nd with stars and the Galaxy. The announced 3rd volume has never appeared. Unfortunately, everything is in SI units.
- TRÜMPER, J., HASINGER, G. (eds.), 2007, *The Universe in X-rays*, Heidelberg: Springer, 96.25€
- Recent book giving an overview of X-ray astronomy written by a group of experts (mainly from Max Planck Institut für extraterrestrische Physik, the central institute in this area in Germany).
- BRADT, H., 2004, *Astronomy Methods: A Physical Approach to Astronomical Observations*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, \$50
- Good general overview book on astronomical observations at all wavelengths.

Introduction

2

Introduction



Literature

- CHARLES, P., SEWARD, F., 1995, *Exploring the X-ray Universe*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, out of print
Summary of X-ray astronomy, roughly presenting the state of the early 1990s.
- ASCHENBACH, B. et al., 1998, *The invisible sky*, New York: Copernicus
Popular "table top" book summarizing the results of the ROSAT satellite, with many beautiful pictures.
- KROLIK, J., 1999, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*, Princeton: Princeton Univ. Press, 632pp., \$57.50
The most comprehensive textbook on AGN available, covers much more material than what is possible here.
- KEMBHAVI, A.J. & NARLIKAR, J.V., 1999, *Quasars and Active Galactic Nuclei: An Introduction*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 476pp., \$50
Graduate level textbook, similar to Krolik, but often explains things from a somewhat different point of view.

Introduction

3



Inhalt

- Die Milchstraße
 - Historisches
 - Größenskalen
- Der Weg zum galaktischen Zentrum
 - Multiwellenlängenastronomie
 - Der innere kpc
- Das galaktische Zentrum
 - Sgr A, Sgr A*
 - Massenbestimmung: ein $10^6 M_{\odot}$ schwarzes Loch!
 - Modellierung des Breitbandspektrums
 - Annäherung an den Ereignishorizont
- Zusammenfassung

Inhalt

1



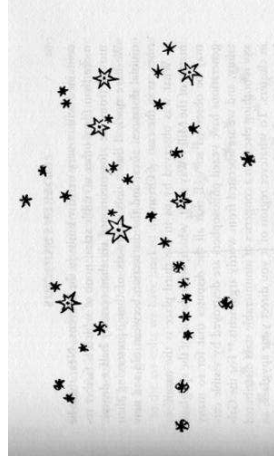
The Galactic Center

Introduction

3



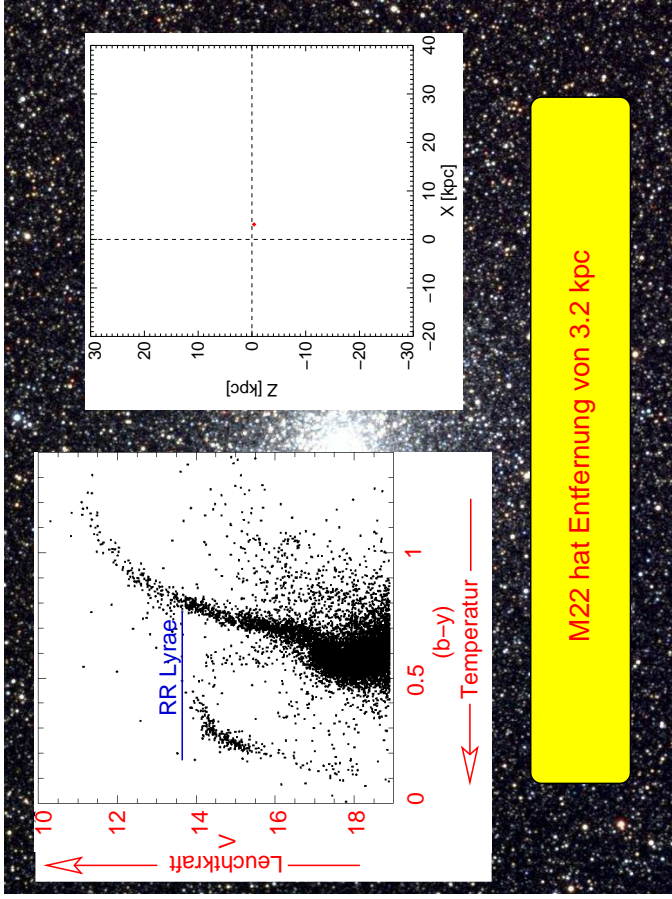
Historisches, I



Galileo Galilei (1564–1642; Sidereus Nuncius): Erste Publikation, die auf Teleskopdaten beruhte. Diffuses Leuchten der Milchstraße wird in Sterne aufgelöst.

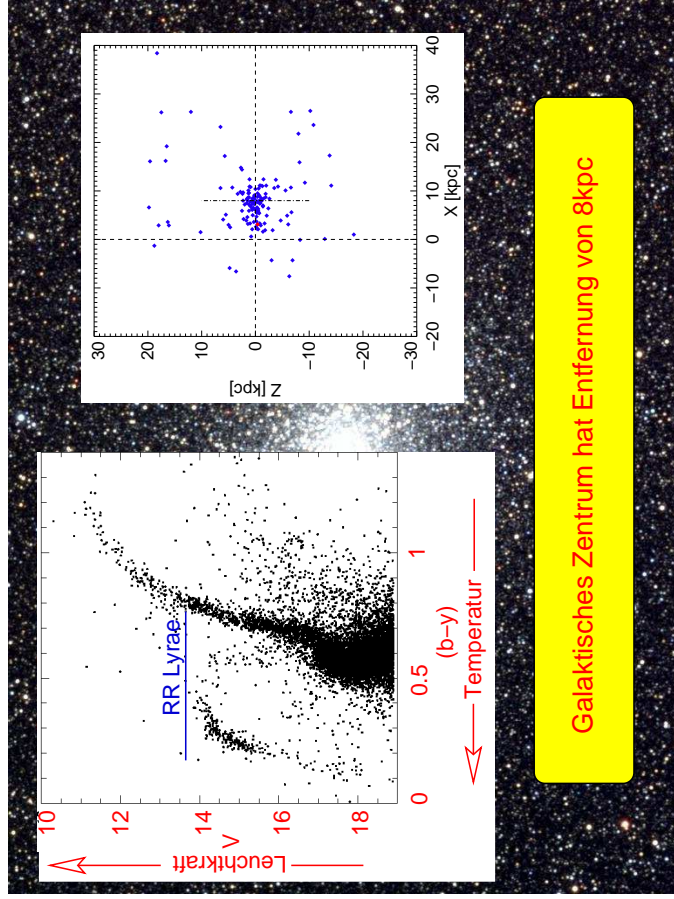
Die Milchstraße

1



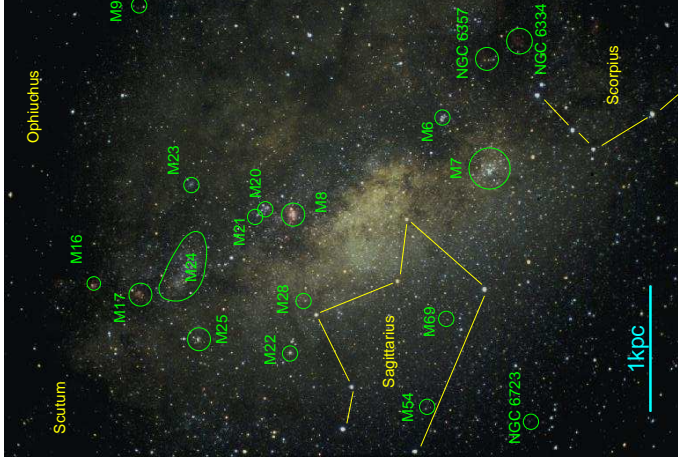
Richter et al., 1999, A&A 350, 476

M22, KPNO (N.A.Sharp, REU program/NOAO/AURA/NSF)



Richter et al., 1999, A&A 350, 476

M22, KPNO (N.A.Sharp, REU program/NOAO/AURA/NSF)



Milchstraße in Sagittarius

$27^\circ \times 40^\circ$

Entfernung: 8 kpc

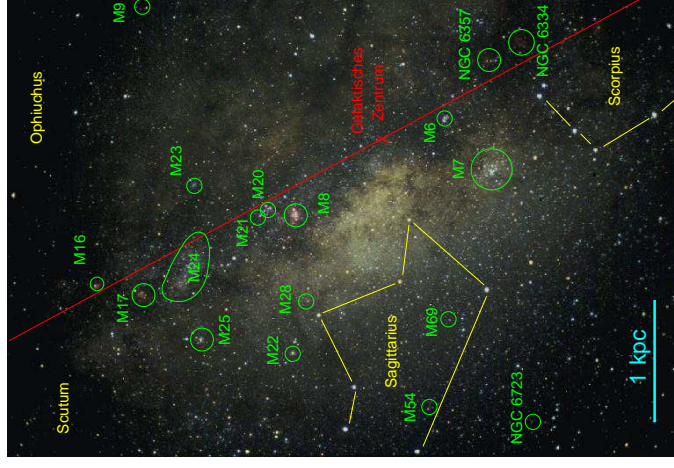
$\Rightarrow 1^\circ \sim 140 \text{ pc}$

$\Rightarrow 1' \sim 2.3 \text{ pc}$

$\Rightarrow 1'' \sim 0.04 \text{ pc}$

$\Rightarrow 1 \text{ mas} \sim 8 \text{ AU}$

W. Keel (U Alabama)



Milchstraße in Sagittarius

$27^\circ \times 40^\circ$

Entfernung: 8 kpc

$\Rightarrow 1^\circ \sim 140 \text{ pc}$

$\Rightarrow 1' \sim 2.3 \text{ pc}$

$\Rightarrow 1'' \sim 0.04 \text{ pc}$

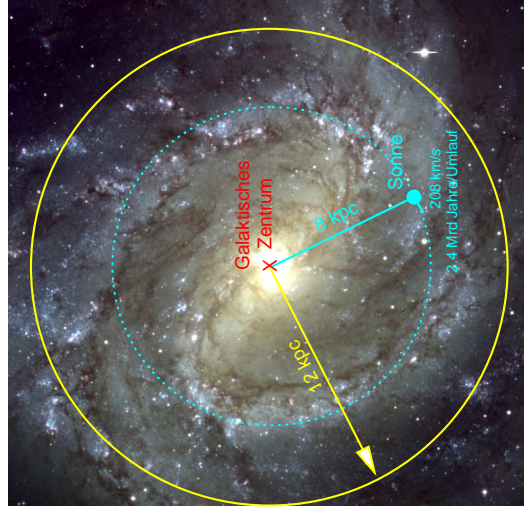
$\Rightarrow 1 \text{ mas} \sim 8 \text{ AU}$

W. Keel (U Alabama)



3-16

Milchstraße als Galaxie



M83: ESO [VLT ANTU+FORST]

- Leuchtkraft: $\sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$
- Masse: $\sim 10^{11} M_{\odot}$ (leuchtend)
 $\sim 10^{12} M_{\odot}$ (insges.)
- Sterndichte: $\sim 0.3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$
- $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
- $1 L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$

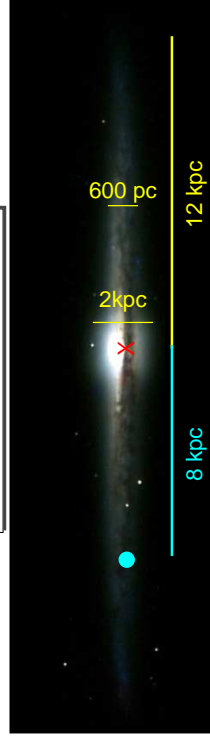
Die Milchstraße

14



3-16

Milchstraße als Galaxie



- Leuchtkraft: $\sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$
- Masse: $\sim 10^{11} M_{\odot}$ (leuchtend)
 $\sim 10^{12} M_{\odot}$ (insges.)
- Sterndichte: $\sim 0.3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$
- $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
- $1 L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$

NGC 4565: W. McLaughlin

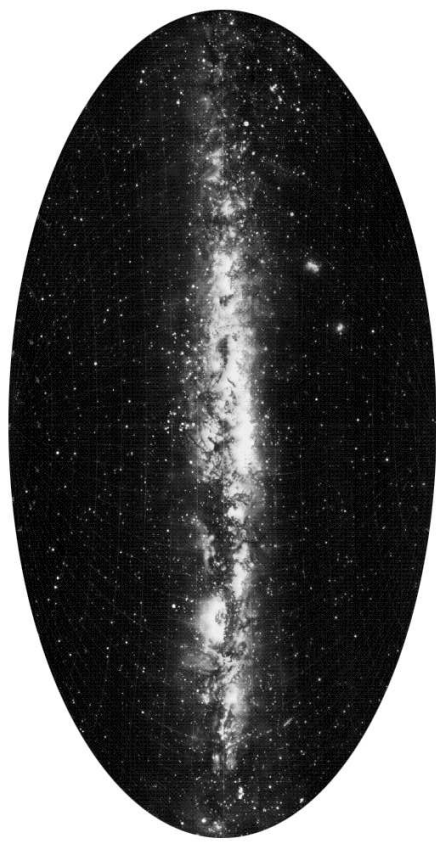
Die Milchstraße

15



3-17

Multiwellenlängenastronomie, I



Optisch (Knut Lundmark, Lund Observatory)

Problem: Starke Extinktion durch Staub
($A_V \sim 30: 10^{12}$ -fache Abschwächung im Optischen!)
 \Rightarrow Multiwellenlängenastronomie!

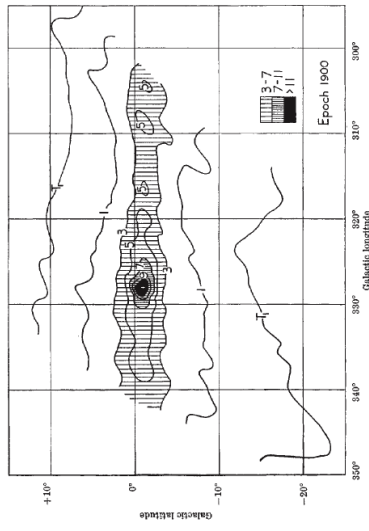
Der Weg zum galaktischen Zentrum

1



3-18

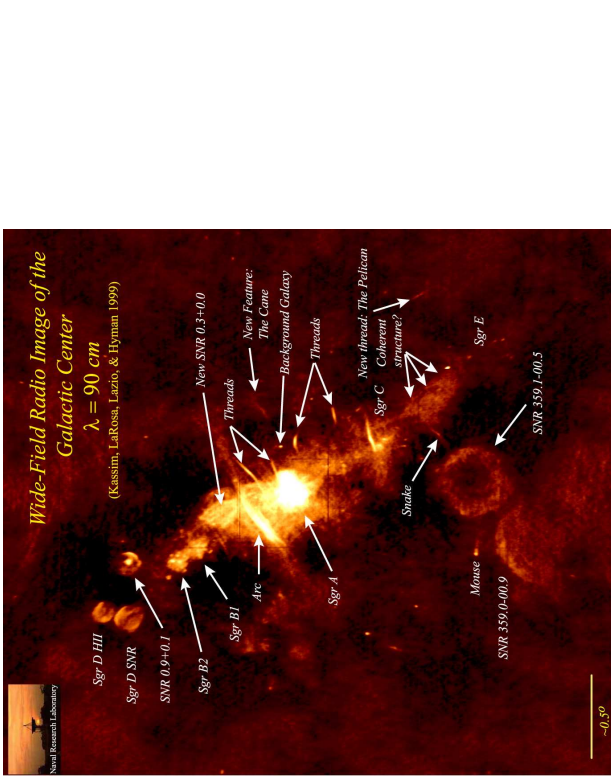
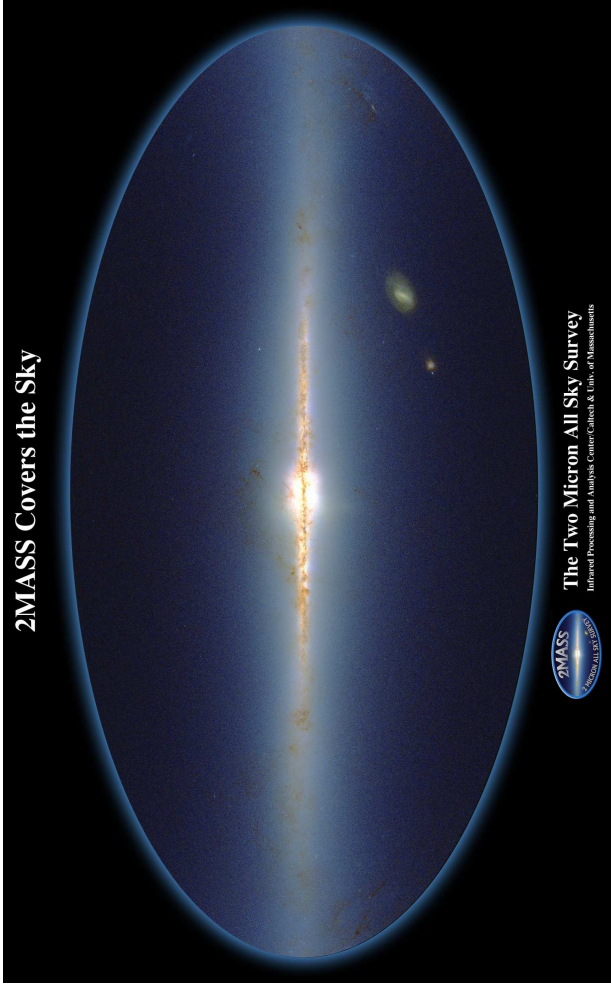
Multiwellenlängenastronomie, II



Jack Piddington and Harry Minnett (1951, Australian J. Sci. Res. Ser A, 4, 495)
Dick McGee and John Bolton (1954, Nature, 173, 985)
Entdeckung einer hellen Radiopunktquelle nahe des (vermuteten) Galaktischen Zentrums: Sgr A

Der Weg zum galaktischen Zentrum

2



Infrarot: Staub wird durchlässig!

2MASS: 3 IR Bänder: J (1.25 μm), H (1.65 μm), K_s (2.17 μm)

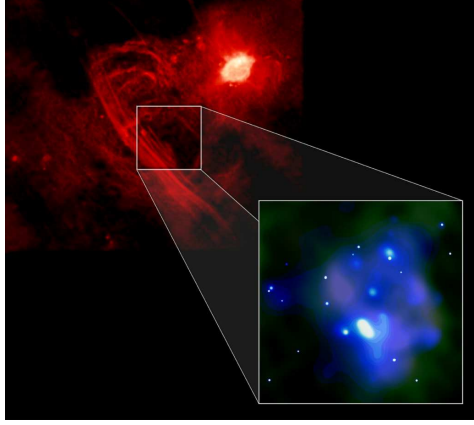
2MASS/MSX (Near-IR/Mid-IR): Innere $4^\circ \times 2^\circ$

2MASS (J [1.25 μm], blau), (K [2.17 μm], grün), MSX (A [6–11 μm], rot)

X



Die inneren 1000 Parsec: Röntgenstruktur

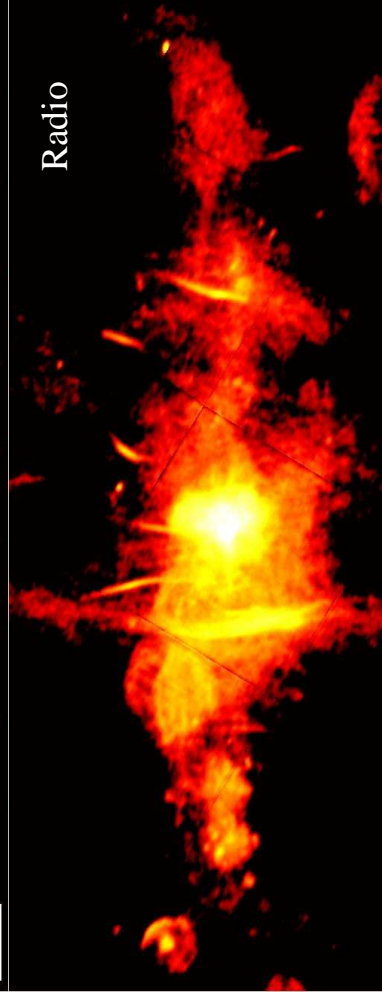
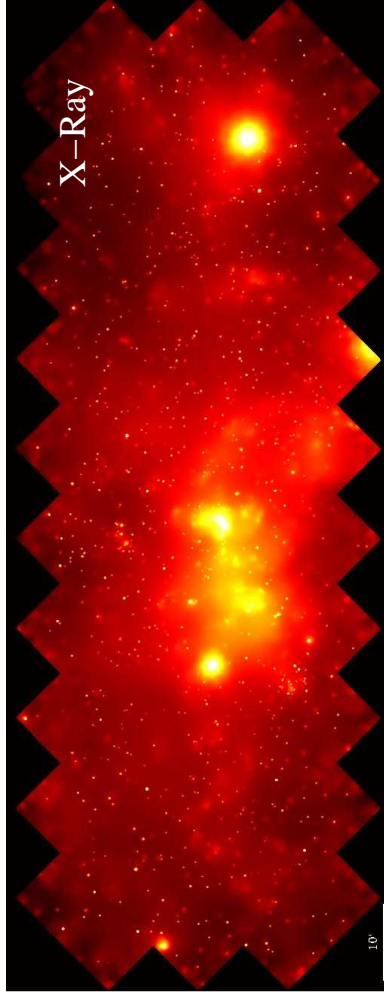
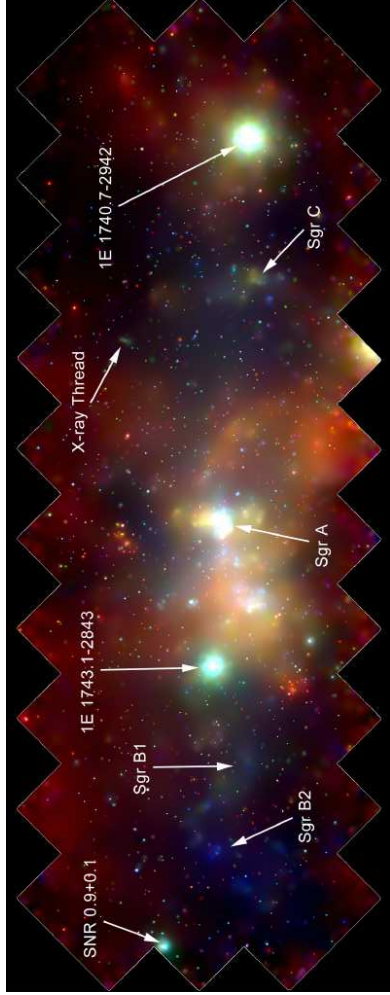


X-ray (blue): NASA/CXC/Northwestern/F.Zadeh et al.;
Millimeter Wavelength (green): Nobeyama/M. Tsuboi;
Radio (red): NRAO/VLA F.Zadeh et al.

Bogen; Arc: 5'' (=0.2 pc) breite Radiofilamente \perp galaktischer Ebene.
Polarisiertes, steiles Radiospektrum \Rightarrow Synchrotronstrahlung (nichtthermische Elektronen; $n_e(E) \propto E^{-p}$)! Durch Supernovae geschockt?

Radio-Röntgen Anti-Korrelation

Der Weg zum galaktischen Zentrum

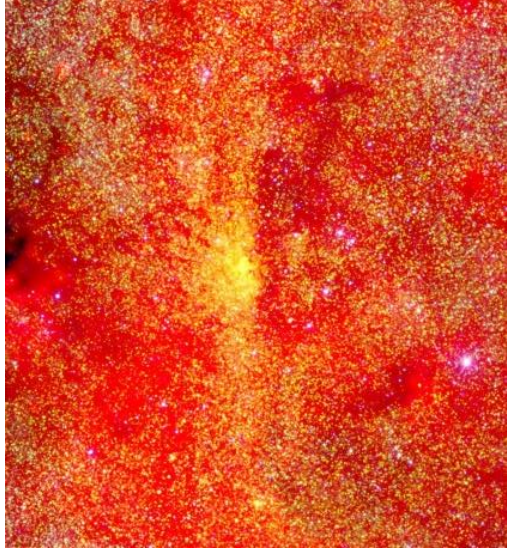


Sgr A East: Hypernova Überrest
Sgr A West ("Die Spirale"):
2 pc Durchmesser,
 $\sim 60 M_{\odot}$ ionisiertes Gas, durch Gezeitenkräfte verformt (evtl. Einfluß von mG B-Feld), nördlicher Arm fällt auf Quelle, östlicher und südlicher Arm rotieren.
Um Sgr A West: Zirkumnukleare Scheibe molekularen Gases, ($r \sim 2$ pc).

Sgr A (3.6 cm, courtesy K.Y. Lo/NRAO/AUI)



Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, I



Zentrum von Sgr A enthält massereichen und dichten Sternhaufen ($> 10^6 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, vgl. Sonnenumgebung: $0.1 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$)
Spektroskopie: Sterne sind reich an Helium, früher Typ (=große Masse), starke Winde ($v_{\text{Wind}} \sim 1000 \text{ km s}^{-1}$).

Das galaktische Zentrum



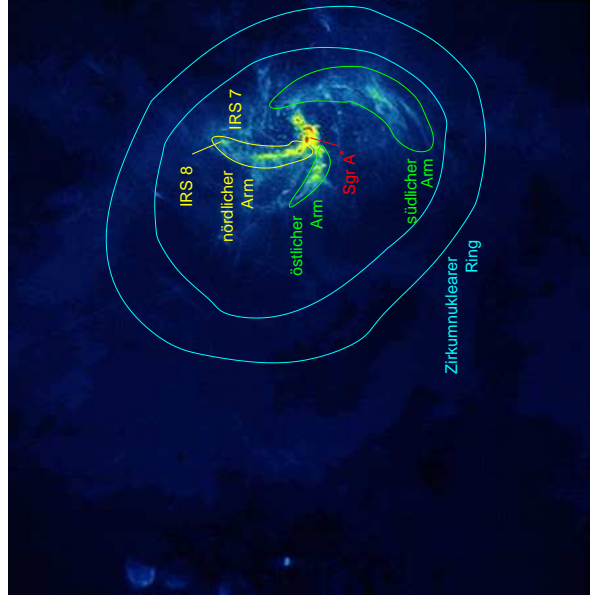
Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, II



Beobachtungen sehr aufwendig: Verschlechterung der Auflösung durch astronomisches Seeing ($\sim 0.7'' = 0.02 \text{ pc}$)

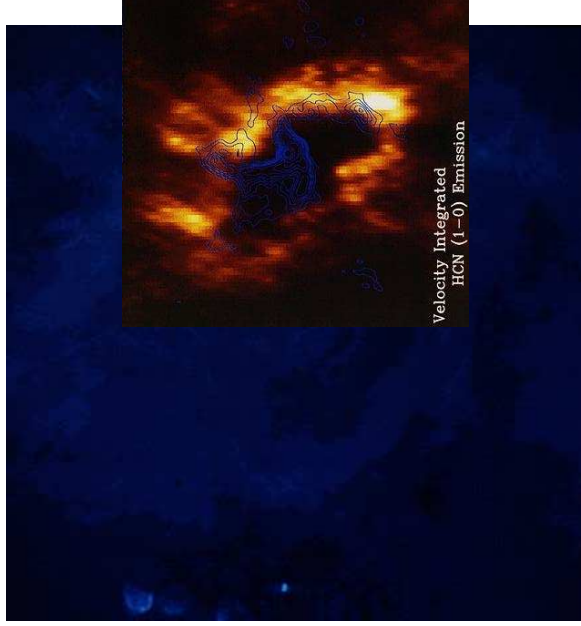
Gemini North/AURA

Das galaktische Zentrum



Sgr A (3.6 cm, courtesy K.Y. Lo/NRAO/AUI)

Sgr A East: Hypernova Überrest
 Sgr A West ("Die Spirale"):
 2 pc Durchmesser,
 $\sim 60 M_{\odot}$ ionisiertes Gas, durch Gezeitenkräfte verformt (evtl. Einfluß von mG B-Feld), nördlicher Arm fällt auf Quelle, östlicher und südlicher Arm rotieren.
 Um Sgr A West: Zirkumnukleare Scheibe molekularen Gases, ($r \sim 2 \text{ pc}$).



Sgr A (3.6 cm, courtesy K.Y. Lo/NRAO/AUI)

Sgr A East: Hypernova Überrest
 Sgr A West ("Die Spirale"):
 2 pc Durchmesser,
 $\sim 60 M_{\odot}$ ionisiertes Gas, durch Gezeitenkräfte verformt (evtl. Einfluß von mG B-Feld), nördlicher Arm fällt auf Quelle, östlicher und südlicher Arm rotieren.
 Um Sgr A West: Zirkumnukleare Scheibe molekularen Gases, ($r \sim 2 \text{ pc}$).



3-30

Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, III



Gemini North/AURA

Beobachtungen sehr aufwendig:
 Verschlechterung der Auflösung
 durch astronomisches Seeing ($\sim 0.7'' = 0.02 \text{ pc}$)
 ... das durch adaptive Optiken korrigiert werden kann
 \Rightarrow Auflösung: Beugungslimit!
 $\theta = 1.22 \text{ rad} \cdot \lambda / d \sim 70 \text{ mas}$
 (für $d = 8 \text{ m}$, $\lambda = 2.2 \mu\text{m}$)

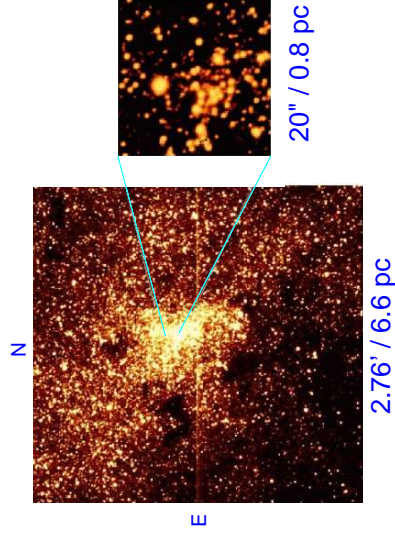
Das galaktische Zentrum

6



3-31

Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, IV

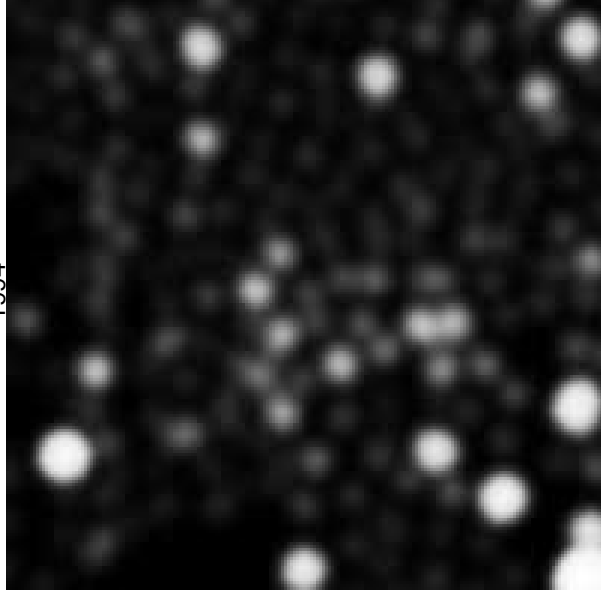


VLT ISAAC K-Band ($2.2 \mu\text{m}$) (Genzel/Eckart)

Das galaktische Zentrum

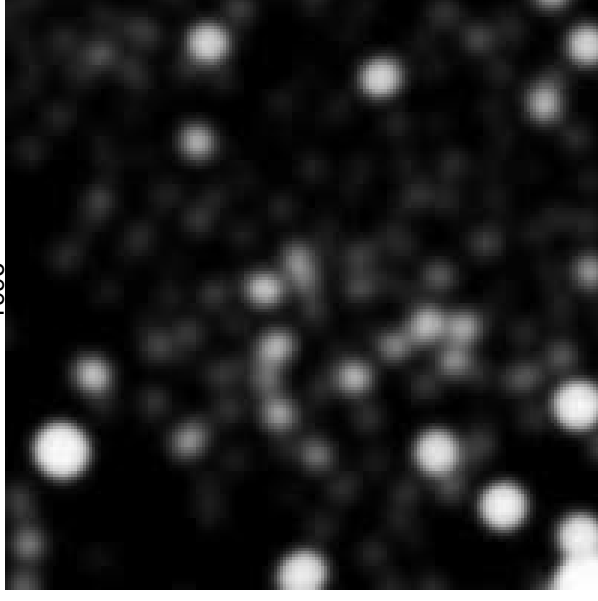
7

1994

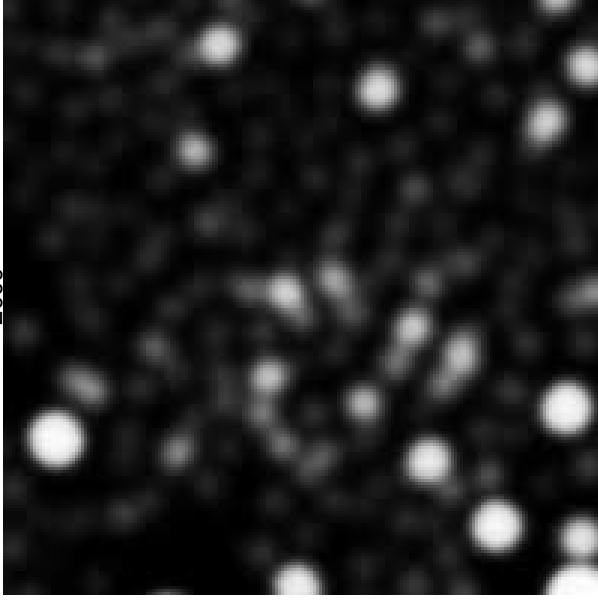


Genzel/Eckart

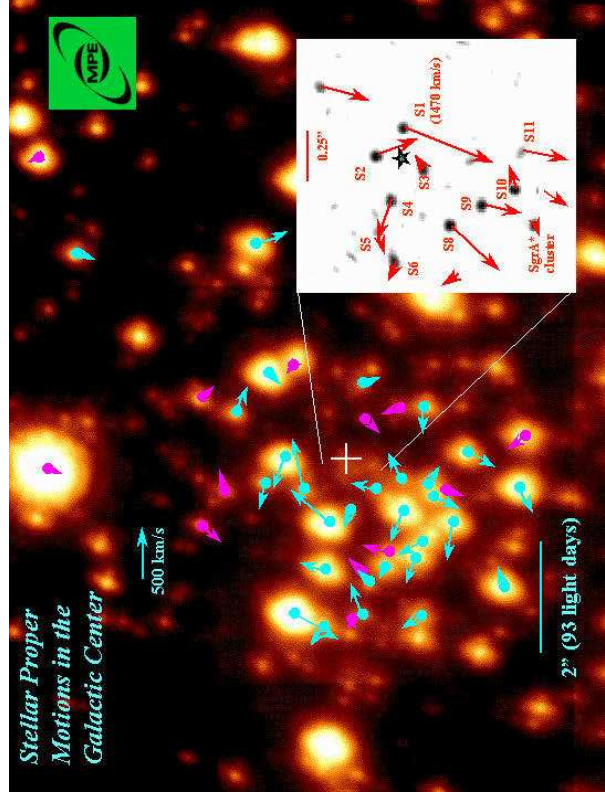
1996



Genzel/Eckart

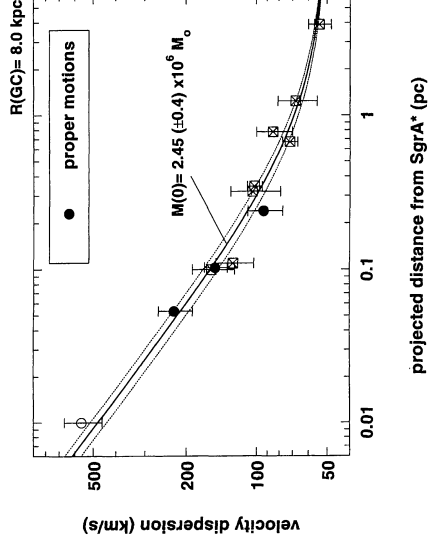


Genzel/Eckart



Genzel et al. (MPE)/Ghez et al. (UCLA): Dynamische Massenbestimmung durch Messung der Eigenbewegung von ~ 40 Sternen des zentralen Haufens (Abb.: MPE Ergebnisse 1991–2000).

Der innere Parsec: Massenbestimmung, V



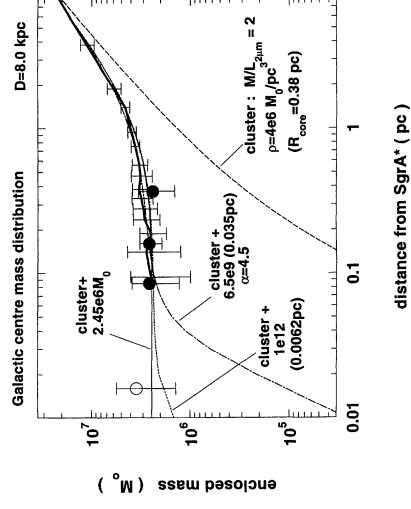
Geschwindigkeitsdispersion im Galaktischen Zentrum
Für $r \geq 0.057$ pc: Kepler'sches Geschwindigkeitsprofil ($\sigma v \propto v^{-0.5}$), beeinflusst durch Haufen bei kleineren Entfernungen

Eckart & Genzel, 1997, MNRAS, 284, 576

Das galaktische Zentrum



Der innere Parsec: Massenbestimmung, VI

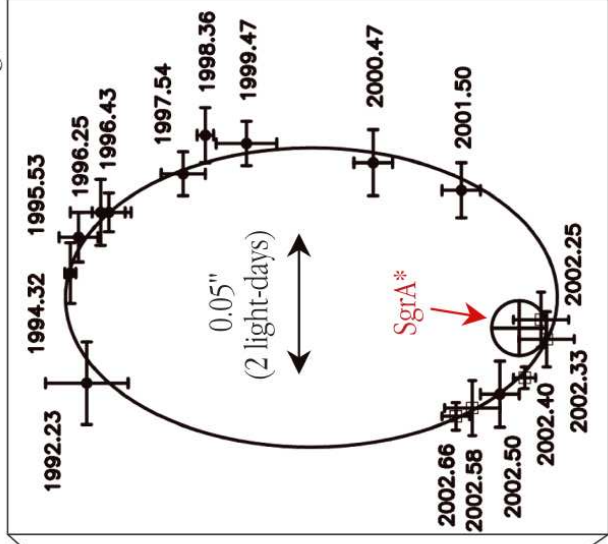
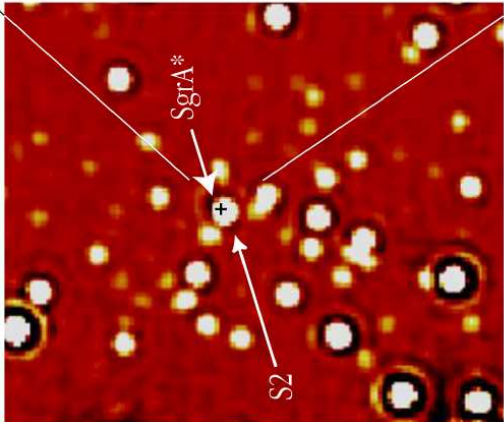


Modell: Punktquelle plus isothermer Haufen mit Geschwindigkeitsdispersion von $50 \text{ km s}^{-1} \implies$ Zentralmasse: $2.4 \times 10^6 M_{\odot}$.

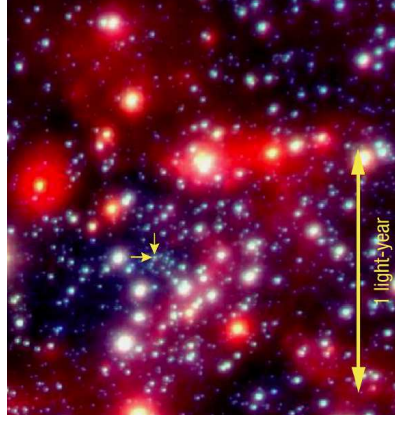
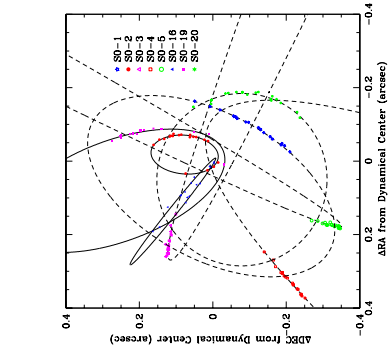
Eckart & Genzel, 1997, MNRAS, 284, 576

Evidenz für ein sehr massereiches kompaktes Objekt im galaktischen Zentrum \implies Schwarzes Loch?

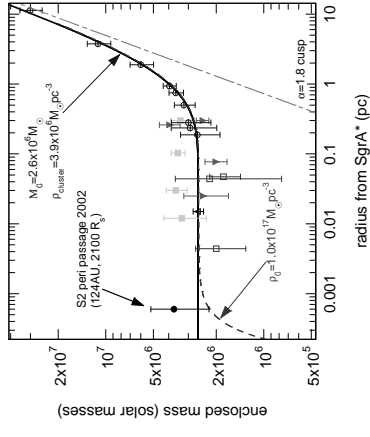
Das galaktische Zentrum



Der innere Parsec: Massenbestimmung, VIII



Der innere Parsec: Massenbestimmung, IX

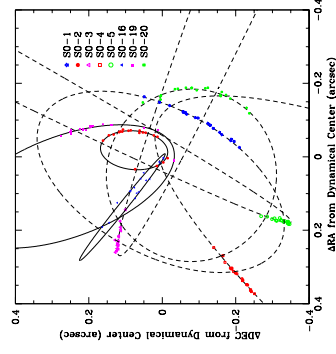


Massenbestimmung: 3. Kepler'sches Gesetz:

$$a = 5.5 \text{ Lichttage} \quad \Rightarrow \quad \frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_* + M_{\text{BH}})}$$

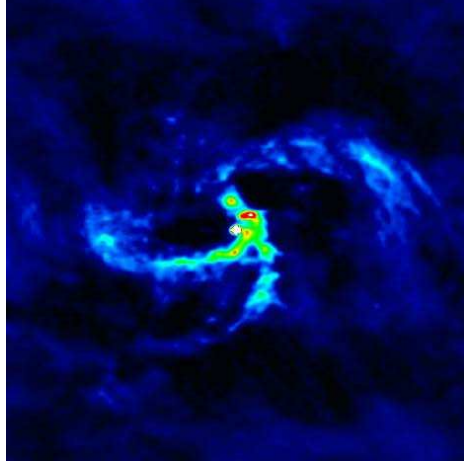
$$P = 15.2 \text{ Jahre}$$

Der innere Parsec: Massenbestimmung, X



Im Zentrum der Milchstraße befindet sich ein schwarzes Loch mit $M_{\text{BH}} = (3.7 \pm 1.0) \times 10^6 M_{\odot}$

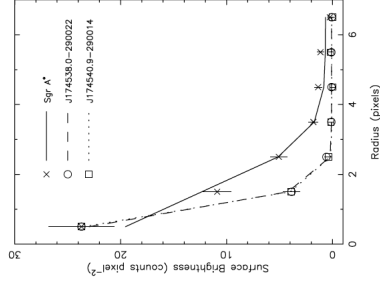
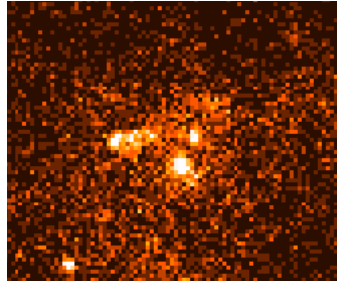
Beobachtungen von Sgr A*, I



Balick & Brown (1974, ApJ, 194, 265): \exists Kompakte Radioquelle nahe des Galaktischen Zentrums
 Menten et al. (1997, ApJ, 475, L111): Sgr A* stimmt bis auf Millibosekunden mit dem dynamischen Zentrum der gemessenen Sternbewegungen überein
 Doeleman et al. (2008, Nature, 455, 78): Gemessene Grösse liegt bei $37_{10}^{+16} \mu\text{as}$ ($\sim 0.37 \text{ AU}$) bei einer Wellenlänge von 1.3 mm

NRAO/AUI
 Das galaktische Zentrum

Beobachtungen von Sgr A*, II



NASA/F. Baganoff (MIT) / G. Garmire (PSU)
 Baganoff et al. (2003, ApJ, 591, 891): *Chandra* entdeckt 2001 ein Röntgen-Gegenstück zur Radioquelle Sgr A*, hoch absorbiert: $N_{\text{H}} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$; nicht punktförmig.

Das galaktische Zentrum

Sgr A*: niedrige Leuchtkraft, I

Betrachte Proton m_p , das auf BH M_{BH} fällt:
 Gravitation auf Proton:

$$F_{\text{grav}} = \frac{GmM}{r^2}$$

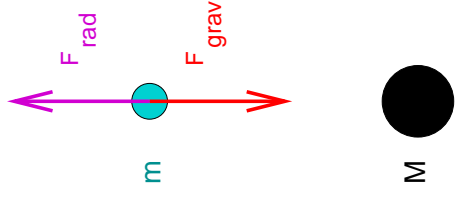
Aber: Strahlungsdruck auf Elektron:

$$F_{\text{rad}} = \frac{\sigma_T S}{c} = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c}$$

Damit Kräftegleichgewicht bei

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} = 1.3 \times 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ erg s}^{-1} = 3.3 \times 10^5 (M/M_{\odot}) L_{\odot}$$

Für $M_{\text{BH}} = 10^6 M_{\odot}$: $L_{\text{Edd}} \sim 10^{11} L_{\odot}$.



Das galaktische Zentrum

Sgr A*: niedrige Leuchtkraft, II

Beobachtungen:

$$L_{\text{Sgr A}^*} < 5 \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1} = 10^{-8} L_{\text{Edd}}$$

ABER: Wir sehen Sternwinde ($v_{\text{Wind}} \sim 700 \text{ km s}^{-1}$, $\rho_{\text{Wind}} \sim 5.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) und anderes heißes Gas. \Rightarrow Sphärisch symmetrische (Bondi-Hoyle) Akkretion:

Einfangradius (Akkretionsradius) für Wind mit v_{Wind} :

$$R_A = \frac{2GM}{v_{\text{Wind}}^2} = 0.05 \text{ pc} = 1.3''$$

Massenakkretionsrate:

$$\dot{M}_A = R_A^2 \rho_{\text{Wind}} v_{\text{Wind}} = 5.5 \times 10^{22} \text{ g s}^{-1} = 8.7 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Damit erwartete Leuchtkraft:

$$L_A = \frac{GM_{\text{BH}} \dot{M}_A}{R_{\text{Schwarzschild}}} = 2.4 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1} \sim 0.06 L_{\text{Edd}}$$

Das Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum ist extrem unterleuchtkräftig!

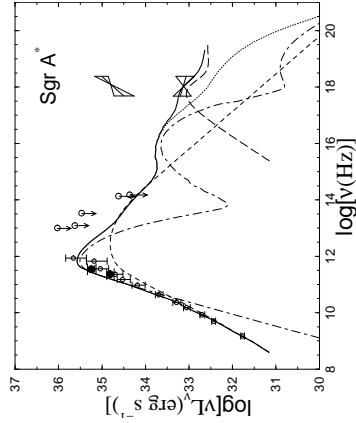
Das galaktische Zentrum

Alternative 1: ADAFS

Ichimaru (1977): \exists ineffiziente Akkretionsflüsse

Narayan (1997ff): "Advection Dominated Accretion Flows (ADAFs) können prinzipiell Spektrum des galaktischen Zentrums erklären"

ADAFs allein haben Probleme die niedrigen IR Flüsse und die Variabilität von Sgr A* zu erklären!

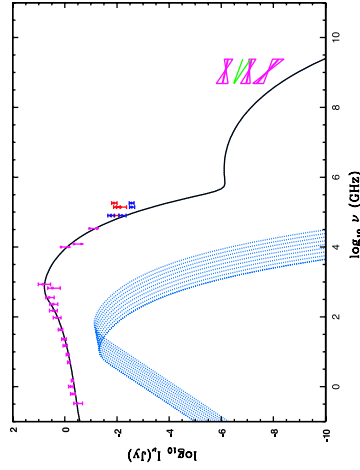


Narayan (1997)

Das galaktische Zentrum

Alternative 2: Jets?

Falcke & Biermann 1995, A&A, 293, 665: Einzelne Jet-Segmente überlagern sich zu einem flachen Spektrum. Jet erzeugt Synchrotronkomponente, die im sub-mm Bereich ihr Maximum hat. Hochenergie-Komponente entsteht durch den Synchrotron-Self-Compton (SSC) Prozess.



Markoff, Bower, Falcke (2008)

Kann im Prinzip durch VLBI getestet werden

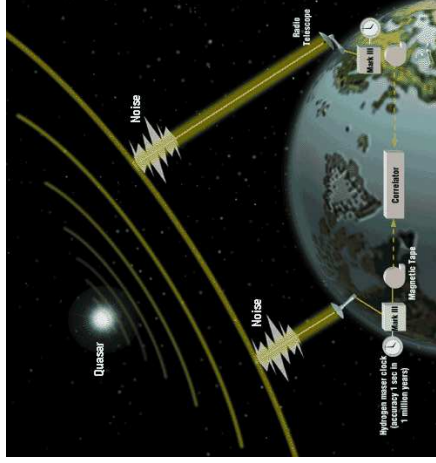
Das galaktische Zentrum

VLBI Beobachtungen von Sgr A*, I

Very Long Baseline Interferometry (VLBI): Ein sogen. "Array" aus Einzelteleskopen, die gleichzeitig dieselbe Quelle beobachten.

Signale werden korreliert \Rightarrow Visibility = Fourier-Transformierte der Helligkeitsverteilung

Winkelaufösung entspricht der Größe der maximalen Basislänge \Rightarrow Millibogensekunden!



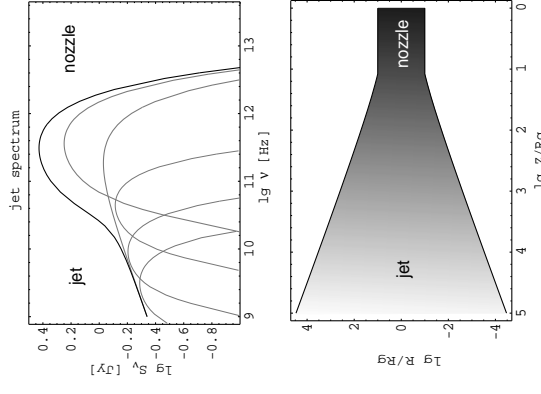
Das galaktische Zentrum

VLBI Beobachtungen von Sgr A*, II

Vorgehensweise: Messe die Größe von Sgr A* bei verschiedenen Radiofrequenzen.

Problem: Die Größe D von Sgr A* liegt im Sub-Millibogensekundenbereich.

Problem 2: Dichtes interstellares Medium verschmiert selbst Punktquellenbilder bei typischen Radiowellenlängen auf $D \gtrsim 1$ mas: $D \propto \lambda^2$

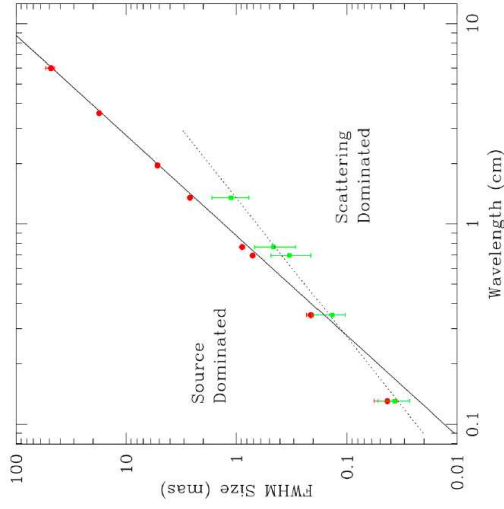


Credit: H. Falcke

Das galaktische Zentrum



VLBI Beobachtungen von Sgr A*, III



Vorgehensweise: Messe die Grösse von Sgr A* bei verschiedenen Radiofrequenzen.

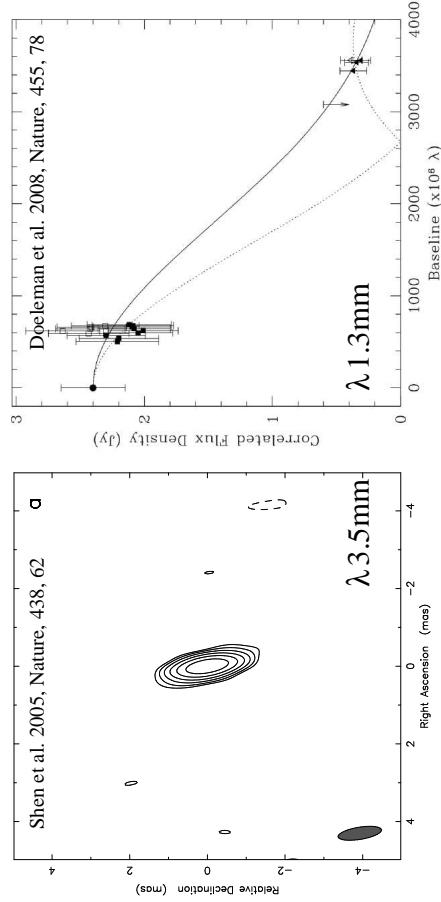
Problem 1: Die Grösse D von Sgr A* liegt im Sub-Millibogensekundenbereich.

Problem 2: Dichtes interstellares Medium verschmiert selbst Punktuellenbilder bei typischen Radiowellenlängen auf $D \approx 1$ mas:
 $D \propto \lambda^2$

Das galaktische Zentrum



VLBI Beobachtungen von Sgr A*, IV



Intrinsische Grösse von Sgr A* bei 7 mm, 3.5 mm und 1.3 mm gemessen:

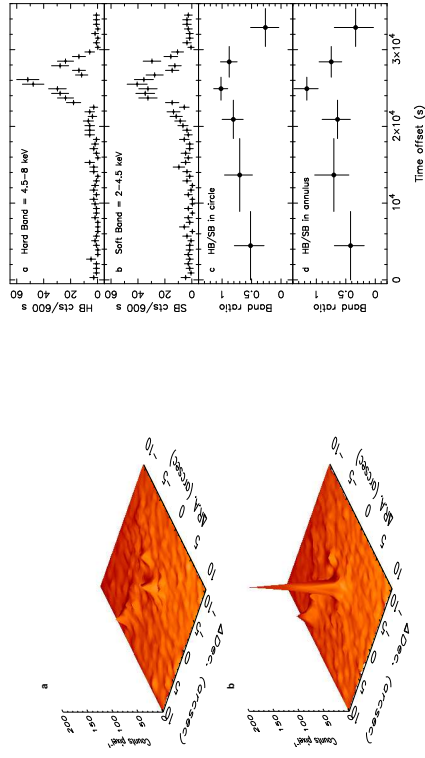
$$D_{1.3 \text{ mm}} = 37_{-10}^{+16} \mu\text{as} \approx 3.7 R_{\text{Sch}} = 0.37 \text{ AU}$$

$$\text{Massendichte: } 9.3 \times 10^{22} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$$

Das galaktische Zentrum



Röntgenflares von Sgr A*, I

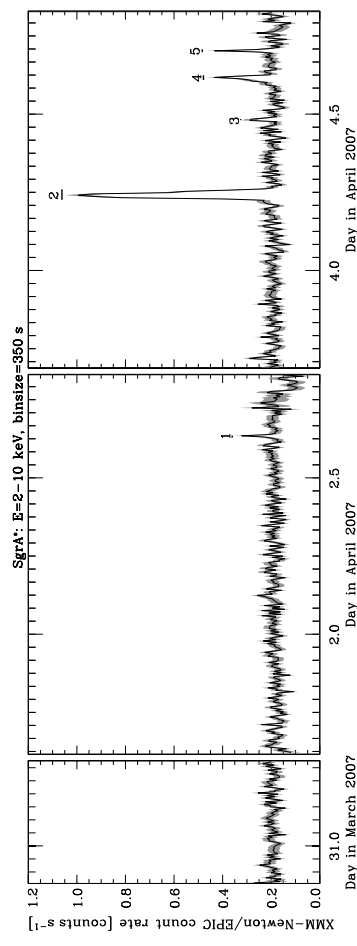


Baganoff et al. (2001, Nature, 413, 45): Sgr A* zeigt Röntgenausbrüche mit 45-fachem des "ruhigen" Röntgenflusses; Zeitskala: Stunden

Das galaktische Zentrum



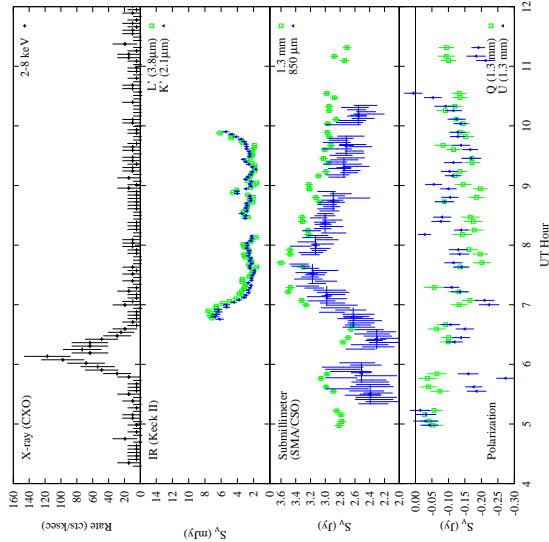
Röntgenflares von Sgr A*, II



Porquet et al. (2008, A&A, 488, 549): "X-ray hiccups from Sagittarius A*"; Röntgenausbrüche sind häufig: Duty Cycle 1-5%. Zwei Klassen: "Bright and soft or not so bright and hard" (Bélanger et al., 2005, A&A, 635, 1095)

Das galaktische Zentrum

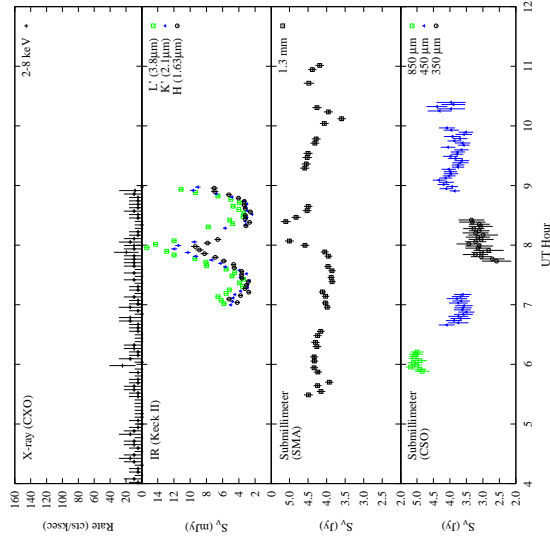
Multiwellenlängenbeobachtungen von Flares in Sgr A*



Sgr A* Ausbrüche auch beobachtbar im Infrarot und Submillimeter Bereich. Röntgen und IR typischerweise simultan, Sub-mm verzögert (Marrone et al. 2008, ApJ, 682, 373).

Das galaktische Zentrum

Multiwellenlängenbeobachtungen von Flares in Sgr A*



IR+Sub-mm Ausbruch am 31. Juli 2005 hatte kein messbares Röntgengegenstück.

Das galaktische Zentrum

Zusammenfassung

- Das Galaktische Zentrum: ein Laboratorium der Hochenergie-Astrophysik
 - Dichter Sternhaufen; viele Supernova Überreste
 - Minispirale Sgr A West: ionisiertes Gas umgeben von molekularem Ring
 - Diffuses, heisses Gas
 - Starke Magnetfelder; Relativistische Elektronen; Synchrotronstrahlung
- Sternbewegungen um Sgr A*
 - Ein supermassives Schwarzes Loch mit Masse $M_{BH} \sim 10^6 M_{\odot}$
 - Durch Sternbewegungen: Alternativklärungen scheinen ausgeschlossen
- Zentrale Quelle extrem kompakt und unterleuchtkräftig
 - Vorhersagen für Leuchtkraft liegen stark daneben
 - Andere (ineffiziente) Akkretionsmechanismen und/oder Jets?
 - Sgr A* ist extrem kompakt (< 1 AU); VLBI beginnt, Struktur aufzulösen
 - (Korrellierte) Strahlungsausbrüche bei verschiedenen Wellenlängen

Zusammenfassung