

Das galaktische Zentrum:

Ein Überblick

Jeanette Lorenz - Sommerakademie La Villa

Es gab Zeiten, da stand
die Erde im Mittelpunkt
des Universums...
die Erde im Mittelpunkt
des Universums...

Es gab Zeiten, in denen die Sonne im
Mittelpunkt der Galaxis
stand...

**Heute steht weder Sonne
noch Erde im Mittelpunkt
der Galaxis.**

Aber was ist im Zentrum der Galaxis???

Galaxien - Allgemeines

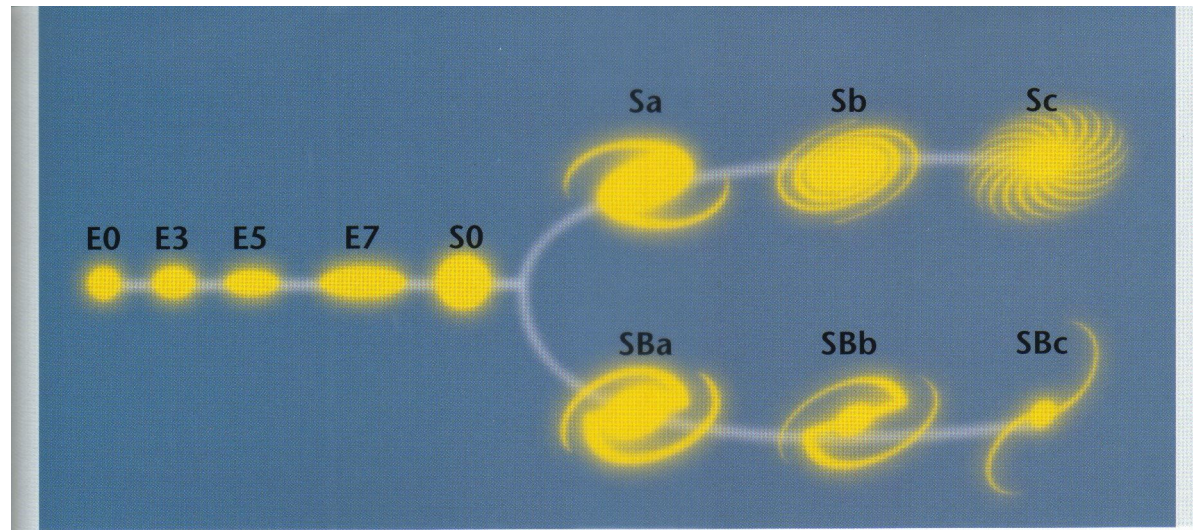
Doch zunächst: Was ist eine Galaxie?

- Galaxien sind eine Ansammlung von **Sternen, Gas und Staub**
- Durch die Bewegung der Sterne um das Zentrum wird ein **Gravitationskollaps**, d. h. ein Zusammenstürzen verhindert

Es gibt
verschiedene
Formen von
Galaxien

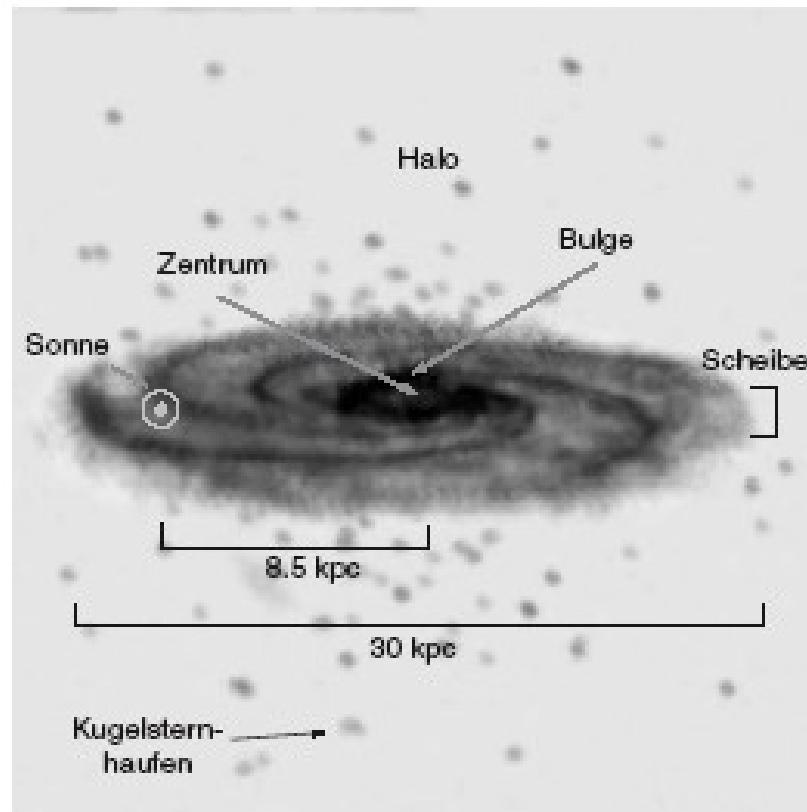
[5]

⇒ **Hubble -
Sequenz**



Galaxien - Milchstraße

- Die Milchstraße ist eine **Spiralgalaxie**
- Aufbau:

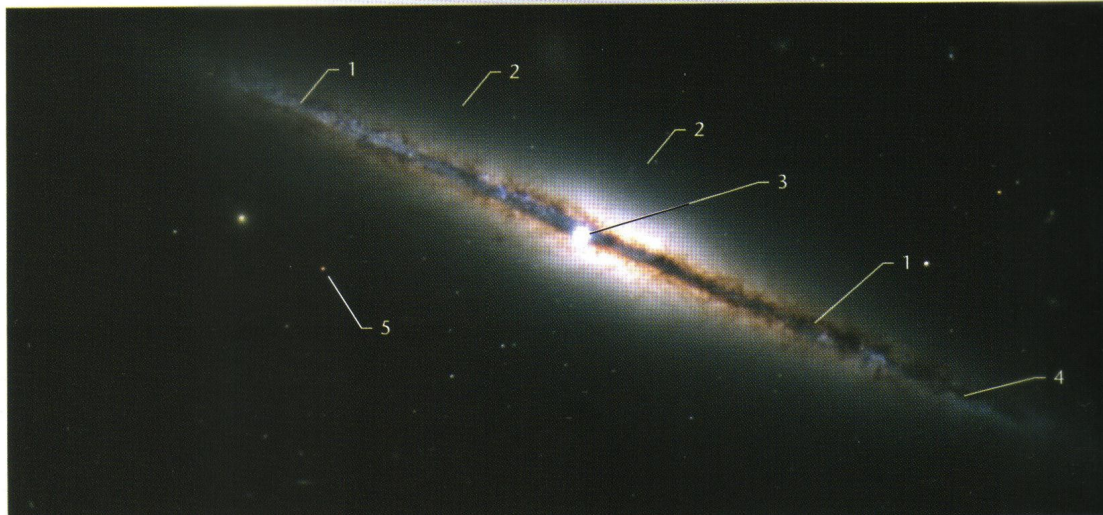


[4]

Die Milchstraße

Ausgewählte Daten:

- **Durchmesser** der Scheibe: 30 kpc
- **Durchmesser** des Halos: 200 kpc
- **Masse** (sichtbar): $10^{11} M_{\odot}$; Alter der Scheibe: 10^{10} Jahre
- Mittlere Dichte: $0.1 M_{\odot}/\text{nc}^3$; **Durchmesser** des Kerns: 5 kpc



[5]

Die Milchstraße

Weitere Daten:

Daten zur Milchstraße

Durchmesser der Scheibe: 30 kpc¹
Dicke der Dünnen Scheibe: 100 pc – 1 kpc
Dicke der Dicken Scheibe: 1–6 kpc
Durchmesser des Halos: 200 kpc
Gesamtmasse (sichtbar): $10^{11} M_{\odot}$ ²
Gesamtmasse (gravitierend): $10^{12} M_{\odot}$
Gesamtmasse der Halosterne: $10^9 M_{\odot}$
Gesamtmasse des Balkens (Bulge): $2 \times 10^{10} M_{\odot}$
Anzahl der Kugelsternhaufen: 200
Abstand der Sonne vom Zentrum: 8,5 kpc
Umlaufgeschwindigkeit der Sterne in Sonnenumgebung: 220 km/s
Mittlere Rotationsperiode der Milchstraßenscheibe: 2×10^8 Jahre
Alter der Scheibe: 10^{10} Jahre
Alter des Halos: $1,6 \times 10^{10}$ Jahre

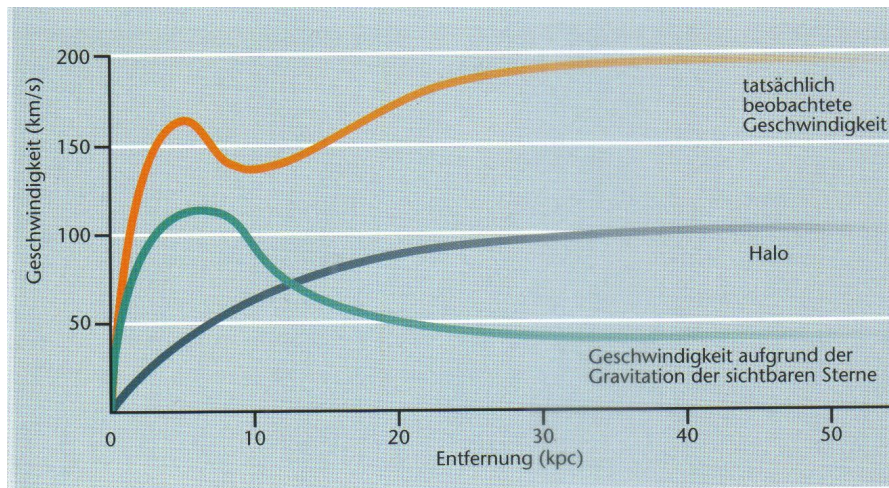
Chemische Zusammensetzung in der Sonnenumgebung (Gewichtsanteile in Prozent):

H	73	N	0,094
He	25	Mg	0,047
O	0,76	S	0,037
C	0,29	Ar	0,018
Fe	0,163	Ni	0,0086
Ne	0,12		

Demgegenüber enthalten Sterne im Halo weniger höhere chemische Elemente. So gibt es dort Sterne mit nur 0,004 % Fe.

[8]

Geschwindigkeitsverteilung



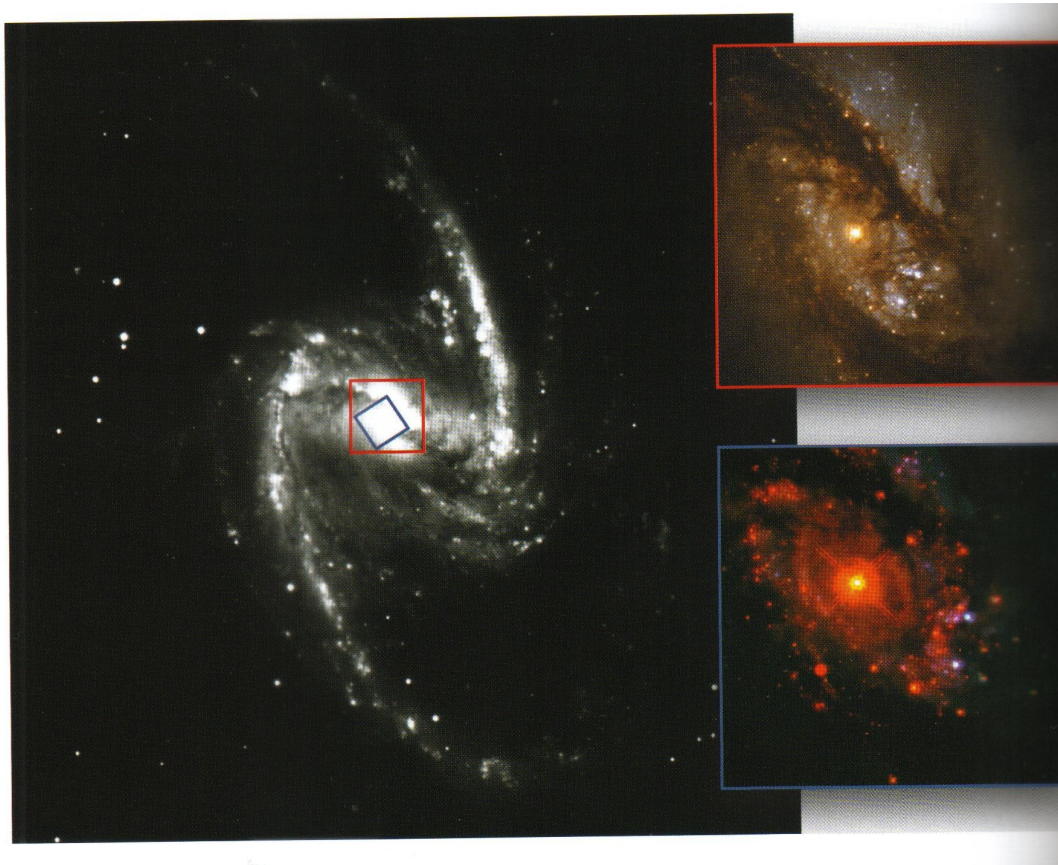
[5]

⇒ Die Geschwindigkeit der Objekte in der Milchstraße ist von ihrem Abstand zum Zentrum abhängig

Mit der sichtbaren Materie kann die Geschwindigkeitsverteilung **nicht** erklärt werden

⇒ In der Milchstraße muss **Dunkle Materie** vorkommen, wie z.B. Braune Sterne und Schwarze Löcher

Das galaktische Zentrum - Auffälligkeiten



Die
Galaxie
NGC 1365

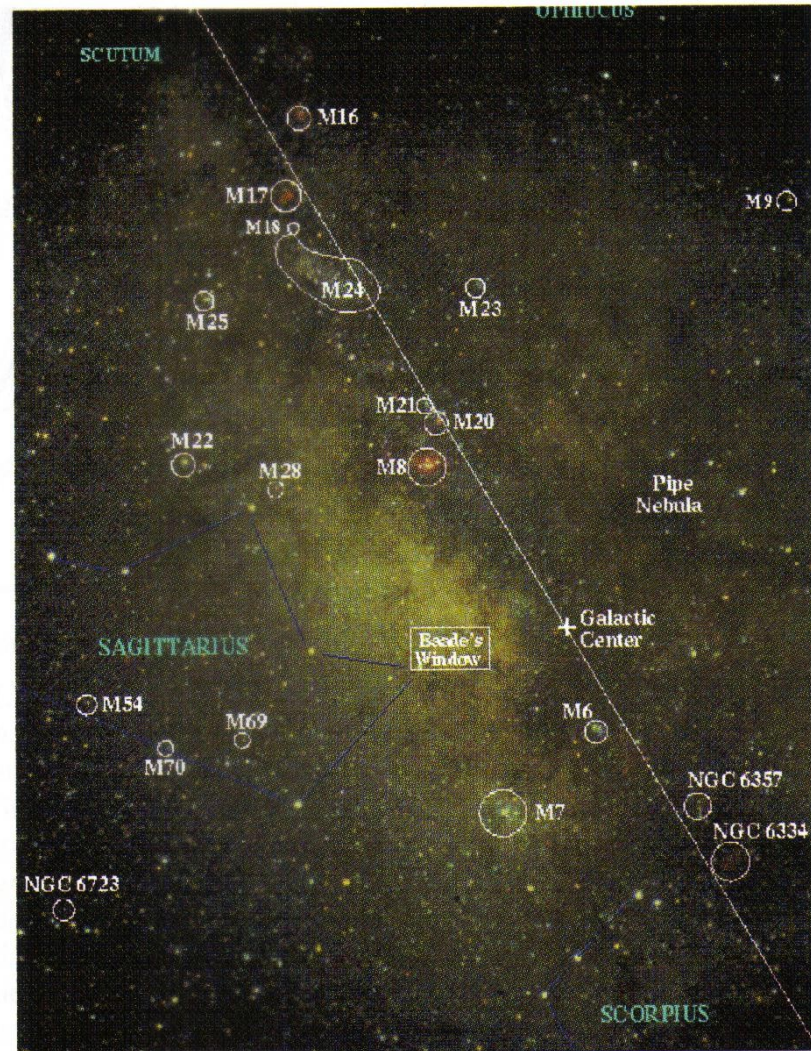
[5]

Die **Sternenkonzentration** steigt auch in unserer Galaxis zum Zentrum hin an (300mal dichter als bei uns)

Das galaktische Zentrum - Auffälligkeiten

Aber: Die Beobachtung des Zentrums ist schwierig, da sie durch **Gas und Staub** behindert wird (hohe Absorptionsrate!)

Optische Aufnahme



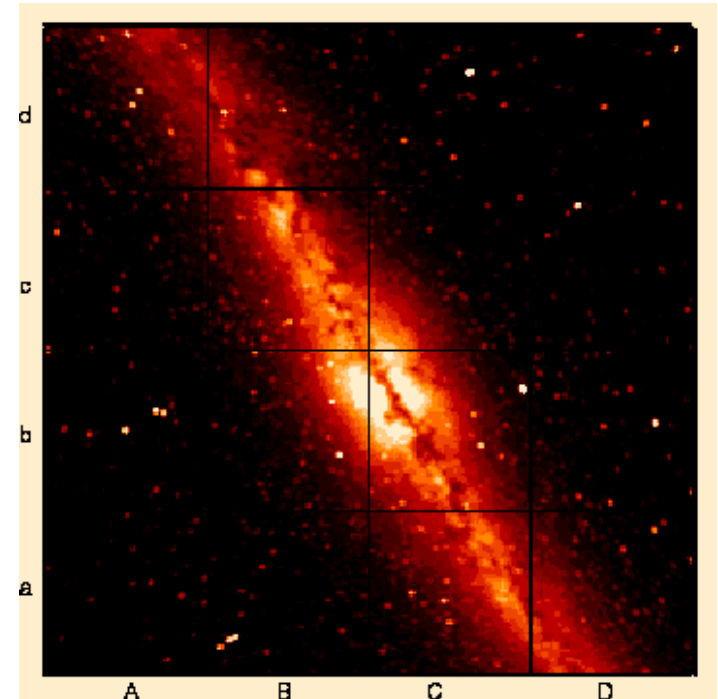
[4]

Das galaktische Zentrum - Auffälligkeiten

⇒ Im Infraroten und im Radiowellenbereich ist die Absorptionsrate niedriger, allerdings strahlen die Sterne in diesem Wellenlängenbereich auch weniger ab

- Das Zentrum scheint ungewöhnlich aktiv zu sein: **UV-Strahlung, Radiowellenemissionen, Plasmajets**

⇒ Erstellung von **Radiokarten** von der Galaxie



Nahe [3]
Infrarot

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Vorüberlegungen - Sternrendezvous

Experiment (siehe später):

⇒ **Hohe Dichte** und **hohe Geschwindigkeiten** im Zentrum

⇒ Sternrendezvous sind unvermeidlich und finden durchschnittlich alle 10000 Jahre statt

⇒ **Was passiert bei einer Begegnung von zwei Sternen?**

⇒ **Viel ist unverstanden**

Weiteres Problem: Sterne sind keine Punktmassen; also können „Gezeiten“ bei einer Begegnung auftreten

⇒ Diese deformieren die inneren Strukturen der beiden Sterne und erhitzen sie

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Vorüberlegungen - Sternrendezvous

⇒ Die Bewegung beider Sterne verlangsamt sich; eventuell werden beide Sterne in eine Umlaufbahn umeinander gezwungen

- Unter Umständen verschmelzen beide Sterne miteinander (dies ist bei Sternen, deren Geschwindigkeiten kleiner als die jeweilige Fluchtgeschwindigkeit ist, wahrscheinlich)

⇒ Ergebnis: Ein **Riesenstern**?

Frage: **Was passiert bei einer Verschmelzung?**

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Verschmelzung zweier Sterne

Die

Das je nach Ablauf der Verschmelzung bzw. der Fusion unterschiedlich;

zwei Möglichkeiten:

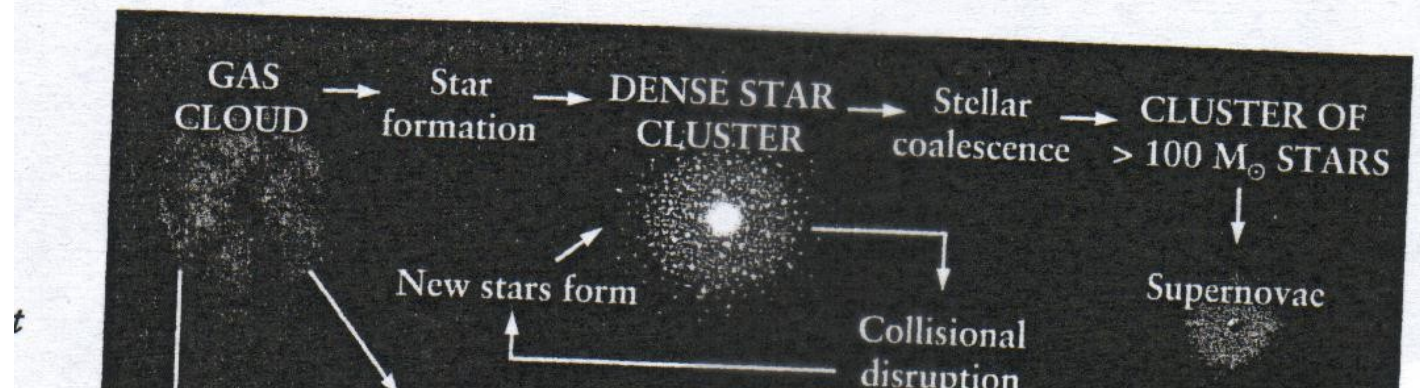
- Bei hoher Relativgeschwindigkeit beider Sterne verschmelzen sie und werden dann unter Ausstoßen von Gas zerstört
- Bei niedriger Relativgeschwindigkeit verschmelzen beide zu einem Stern mit größerer Masse; sein weiteres Schicksal hängt von seiner **chemischen Struktur** und seinem **Aufbau** ab; ist diese zu einem Zeitpunkt bekannt, so können Aussagen über sein weiteres Schicksal getroffen werden

⇒ **Lebenslauf eines Sterns**

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Entwicklung des galaktischen Zentrums

Die

- Viele Sternbegegnungen würden das Schicksal einer Galaxie beeinflussen, denn:
 - Der durchschnittliche, massive Stern würde verlangsamt
- ⇒ Durch die Gravitationskräfte würden die Sterne dann näher zusammenrücken
- ⇒ Sie werden schneller (siehe Virialtheorem!)
- ⇒ mehrere Varianten über den weiteren Verlauf



[1]

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Variante 1

Massenreiche (hier: $>100 M_{\odot}$) Sterne haben ein kürzeres Leben

⇒ Es gibt mehr Supernovae

⇒ Mehr **Schwarze Löcher** und **Neutronensterne**

⇒ Diese wirken weiter gravitationell aufeinander, aber es gibt weniger direkte Zusammenstöße

⇒ Der Kern nimmt eine „**Kern-Halo**“-Struktur an, d.h. viele Sterne werden in größere Entfernungen gestoßen, wenige verbleiben im weiter kontrahierenden Zentrum

Und wie geht es weiter?

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Variante 1

Das hängt von drei Faktoren ab:

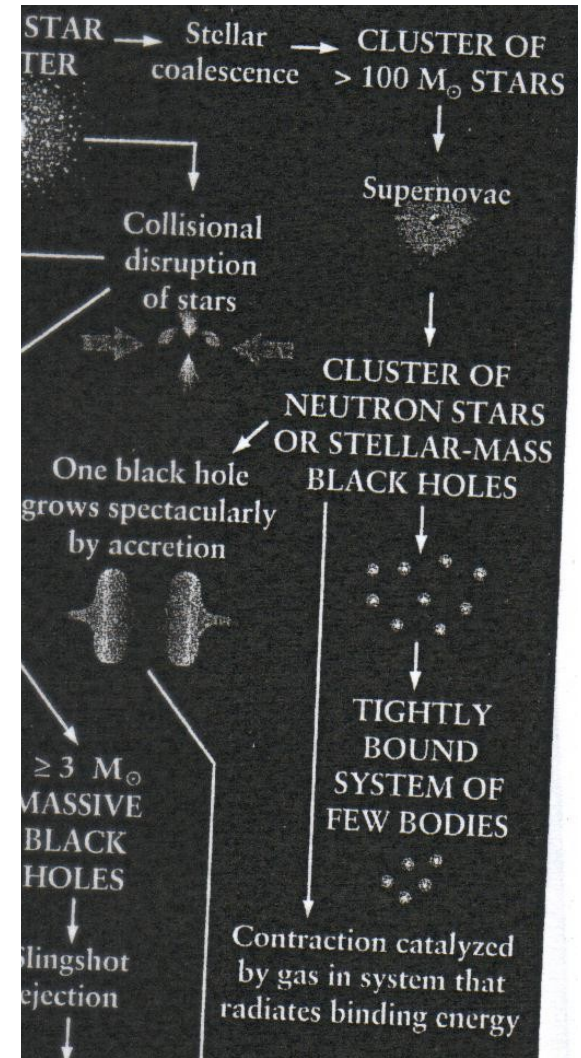
- Von direkten Kollisionen
- Gravitationseinflüsse
- Explosiven Massenverlusten

[1]

Insbesondere gibt es zwei extreme Möglichkeiten:

- Wenige sehr schwere Sterne entstehen; diese sinken in das Zentrum und verschmelzen

⇒ Das Gebilde kollabiert zu einem Schwarzen Loch



Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Variante 1

- Ein geringer Anteil des Gebildes kollabiert und bildet einen stellaren Kern mit wenigen Sternen

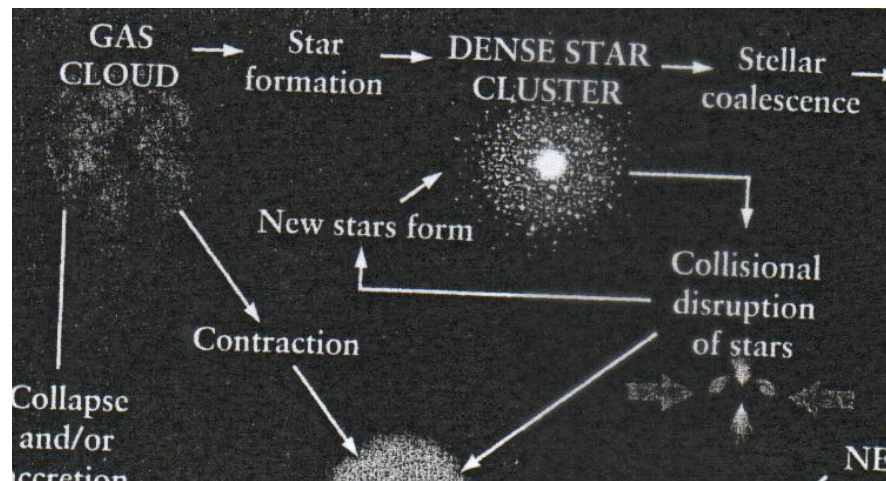
⇒ Hier sind alle Kollisionen **zerstörend**

- Oder, oder...

Variante 2:

Aus einem Zentrum, in dem Sternbewegungen zu Verschmelzungen führen, wird ein Zentrum, in dem es zu **vernichtenden Kollisionen** kommt

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Variante 2



[1]

Die weitere Entwicklung ist ungewiss:

Das von den Kollisionen übriggebliebene Material sammelt sich wegen der Gravitationskraft im Zentrum

⇒ Möglicherweise entstehen neue, kleinere und schnellere Sterne

⇒ **Wiederholung** des ganzen Prozesses?

Was befindet sich im galaktischen Zentrum? - Variante 2

Oder:

Das Gebilde kontrahiert irgendwann wegen seiner eigenen Gravitation

⇒ **Schwarzes Loch**

Weitere Variante:

Man muss ein ein galaktisches Zentrum nicht als abgeschlossenes System ansehen

⇒ Durch Supernovae oder stellare Winde kann Gas aus dem Zentrum entfernt werden

Was befindet sich im galaktischen Zentrum?

⇒ Möglichkeiten:

Schwarzes Loch, große Gaswolke, ein einziger Superstern

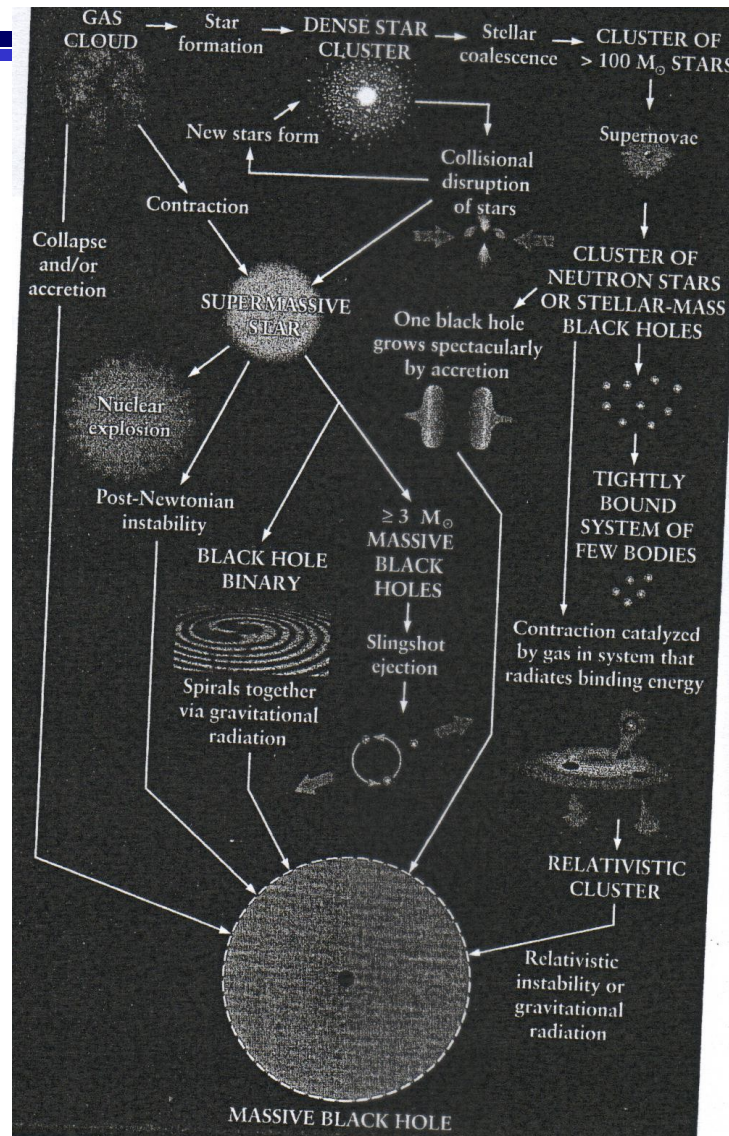
Schlussfolgerung:

Es gibt viele offene Fragen, aber es wäre keine Überraschung, wenn man im Zentrum einer Galaxie ein sehr massives Schwarzes Loch findet!

Nur das Experiment kann weiterhelfen!

Nur das Experiment kann weiterhelfen!

Was befindet sich im galaktischen Zentrum?



[1]

Experimentelle Aussagen

- Die Milchstraße ist besonders interessant, da sich ihr Zentrum wegen des verhältnismäßig kleinen Abstandes relativ gut beobachten lässt

⇒ Beobachtungen im **Infrarot-,
Röntgenstrahlen-,
Gammastrahlen- und
Radiowellenbereich**

⇒ Aus dem Zentrum kommen starke Radioemissionen; ihre Quelle wird **Sagittarius A** (Sgr A) genannt;
Ursache: relativistische Elektronen in Magnetfeldern



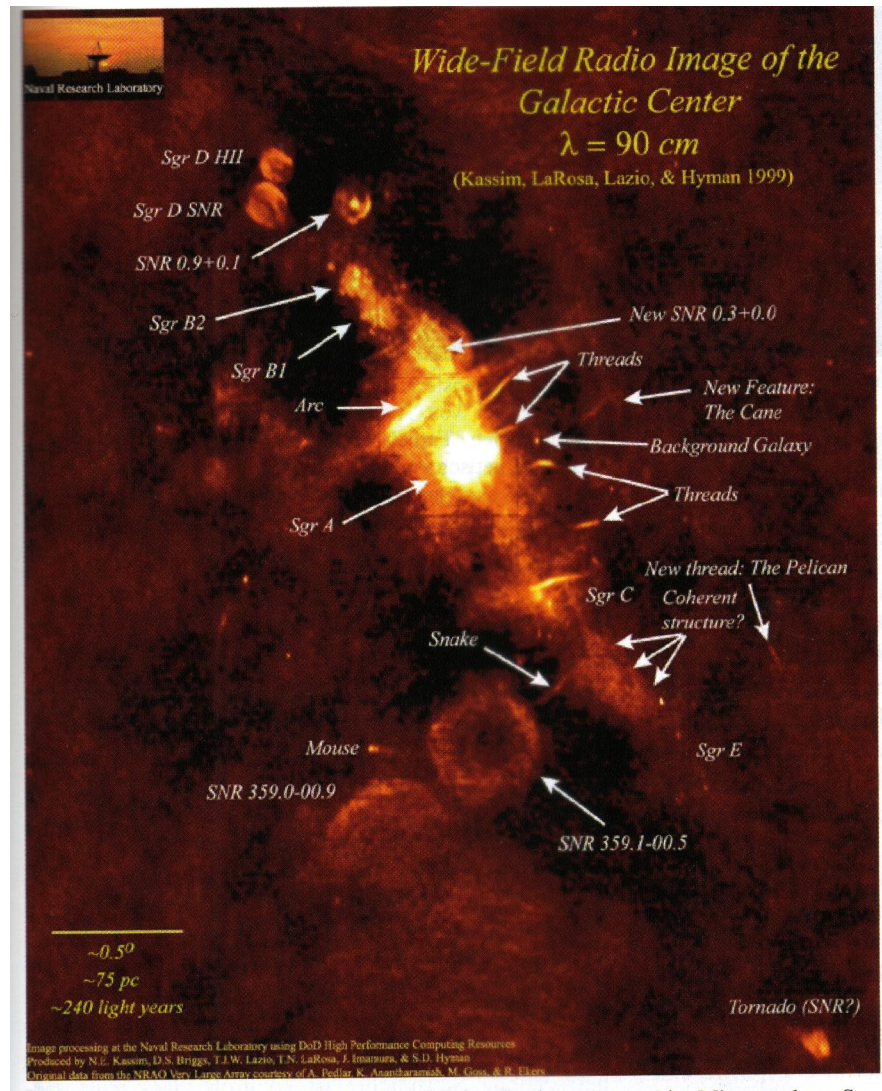
[7] Infrarot

Struktur

Radiobeobachtungen in Richtung des Zentrums:

Es ergibt sich eine relativ komplexe Struktur

[4]



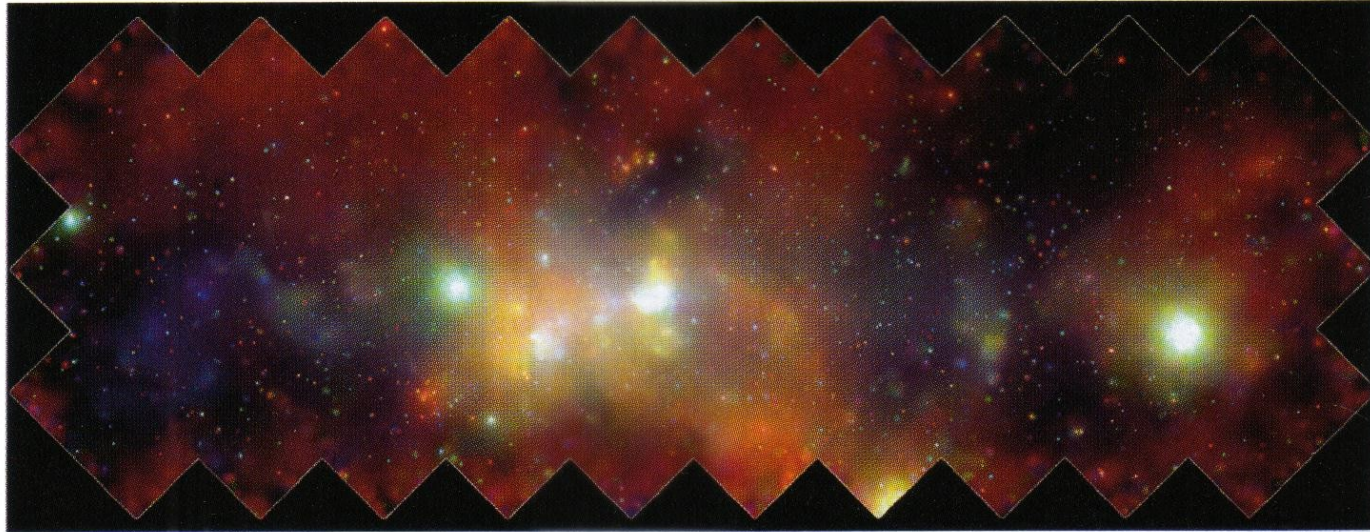
Struktur

Schauen wir uns die Struktur mal von außen nach innen an:

- **Innerhalb von 2 kpc:** $3 * 10^7 M_{\odot}$ atomarer Wasserstoff
- Immer wieder Gebiete, in denen die **Extinktion geringer** ist (z.B. Baades-Fenster)
- **100 pc - 1 kpc:** Zentrale Scheibe aus H_I -Gas; aus ihrer Rotationsgeschwindigkeit ist eine Massenbestimmung für $R \geq 100$ pc möglich
- Außerdem **Radio-Filamente** senkrecht zur Scheibe
- Viele **Supernovae-Überreste**
- **Kugelsternhaufen und Gasnebel**

Struktur

- Weiterhin: Auf Röntgenaufnahmen sind Röntgen-Doppelsterne und diffuse Emissionen von heißem Gas ($T \sim 10^7$ K) zu erkennen

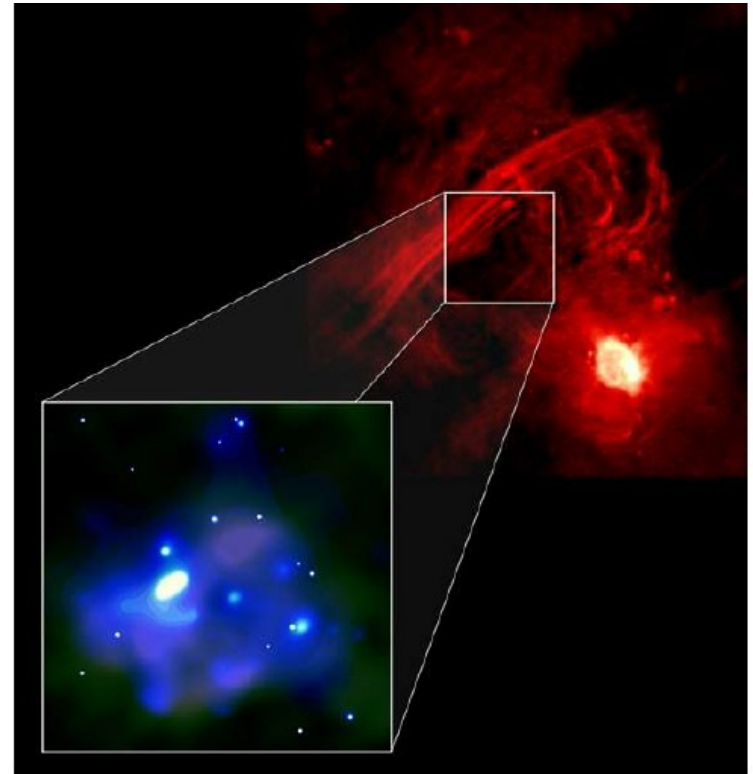


[4]
130 pc ×
300 pc,
Mosaik aus
Röntgenauf-
nahmen

- Innerhalb der innersten 8 pc befindet sich die **Radioquelle Sgr A**; sie ist von einem Bogen umgeben

Arc

- Durch Radiobeobachtungen ist ein **Arc/Bogen** erkennbar; der wohl Teil eines größeren Bogens senkrecht zur galaktischen Scheibe ist
- Beinhaltet Radiofilamente (0,2 pc) und strahlt **Synchrotronstrahlung** ab
- Rund um Sgr A befindet sich ein Radio-Halo (Durchmesser: 24 pc)



courtesy F. Yusef-Zadeh; Chandra (blue) / mm (green): $8' \times 7'$,
radio: $30' \times 30'$

[7]

Sagittarius A

- Sgr A besteht aus mehreren Teilen:

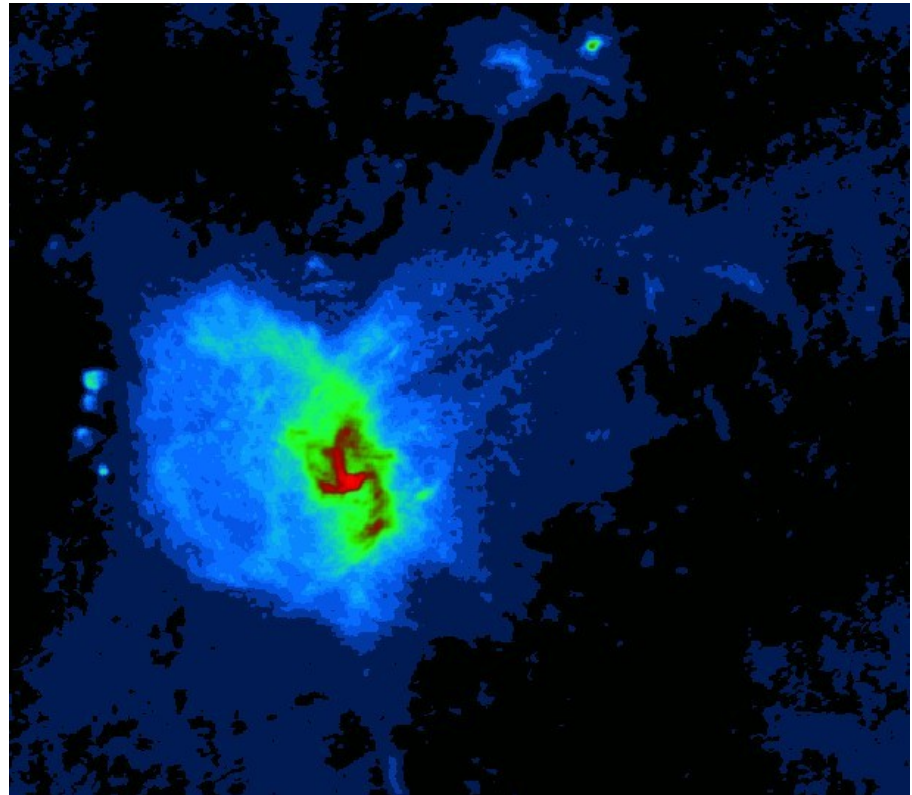
**Zirkumnuklearer
molekularer Ring**

Sagittarius A West

Sagittarius A East

Sagittarius A*

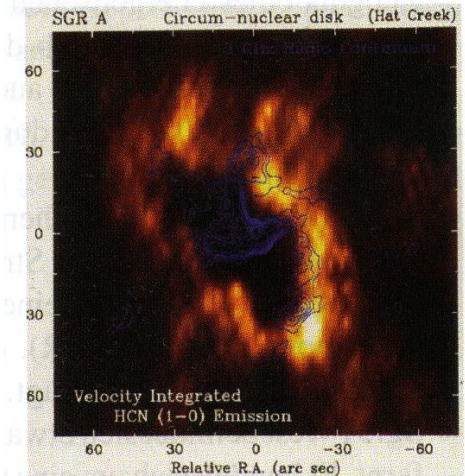
[2]



Sagittarius A

Zirkumnuklearer molekularer Ring:

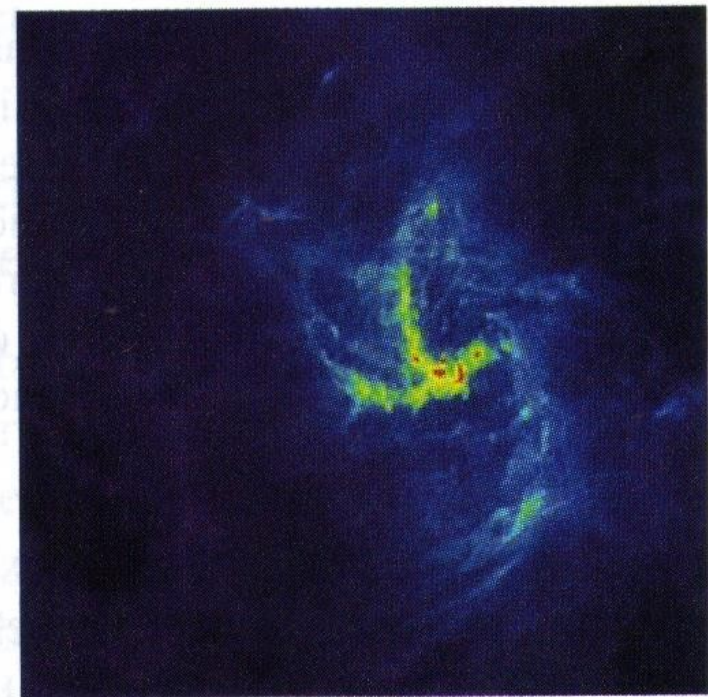
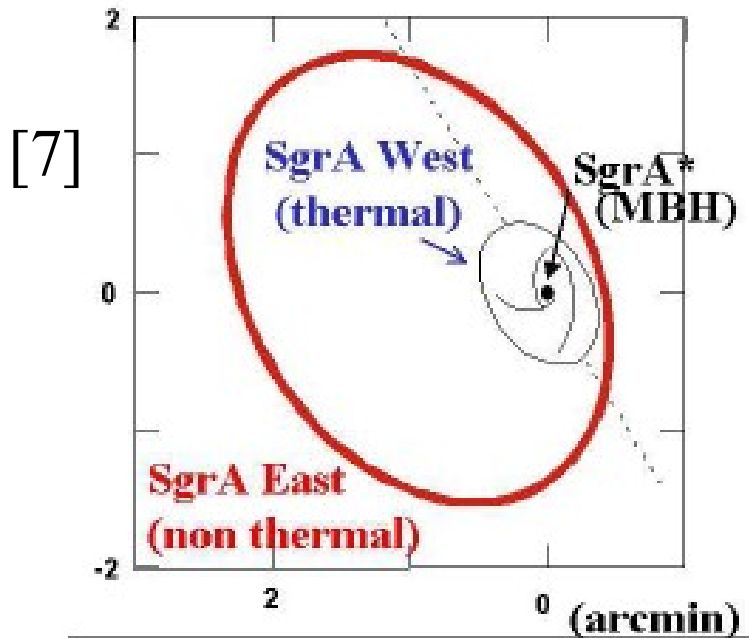
- Torusform
 - Zwischen 2 pc und 8 pc
 - 20° gegen die Galaktische Scheibe geneigt
 - Rotationsgeschwindigkeit: ~ 110 km/s, von R unabhängig
 - Scharfe innere Kante $\Rightarrow$ kann nicht aus einer Gleichgewichtsströmung resultieren, die die Kante verwischen würde
- $\Rightarrow$ Energetisches Ereignis im Galaktischen Zentrum während der letzten 10^5 Jahre?



Sagittarius A West

Sagittarius A West:

- Aussehen: **Dreiarmig, spiralförmig; thermischer Bereich**
- Besteht aus ionisierten Gas (ca. $60 M_{\odot}$) und Ionen; H_{II}-Region



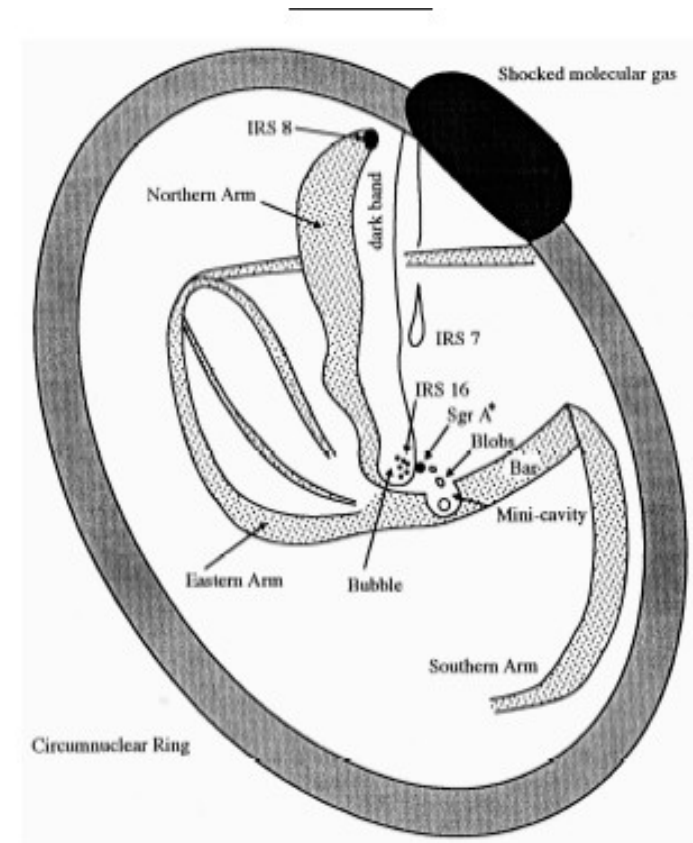
Sagittarius A West

- Der **östliche Arm** rotiert; ebenso der **westliche Bogen**
- Vom Norden könnte neutrales Gas einfallen
- Es ist nicht ganz klar, woher Sgr A West seine Energie bzw. Wärme bezieht - vielleicht von Sternen?
- Z.B. von den Sternen, die eher im Zentrum sitzen?
- Auf dem Infrarot-Bild sind mehrere helle Bereiche zu sehen: Sind dort Sterne?
- Möglicherweise handelt es sich um Sterne, die erst in den Gasströmen entstanden sind, oder sie liegen gar nicht im interessanten Bereich, sondern nur in der Sichtlinie

Sagittarius A West

Das Gas von Sgr A West bewegt sich um das Zentrum:

- Spektroskopische Beobachtungen von dem heißen Gas in den Minispiralstrukturen zeigen eine Bewegung von 150 km/s gegen den Uhrzeigersinn um Sgr A*
- Es konnten sogar schnelle Objekte („bullet“ - 400 - 1200 km/s schnell) beobachtet werden (mit dem Very Large Array);



Yusef-Zadeh, 1994

[7]

Sagittarius A West

⇒ Der Strom verläuft wohl entlang eines mG- Magnetfeldes
(Nachweis durch Polarisationsmessungen)

- weiteres interessantes Phänomen scheint die „**minicavity**“ am Treffpunkt von dem nördlichen und dem südlichen Arm zu sein, denn hier befindet sich ein „**Loch**“ in der Radiowellenemission

⇒ **Erklärungen:**

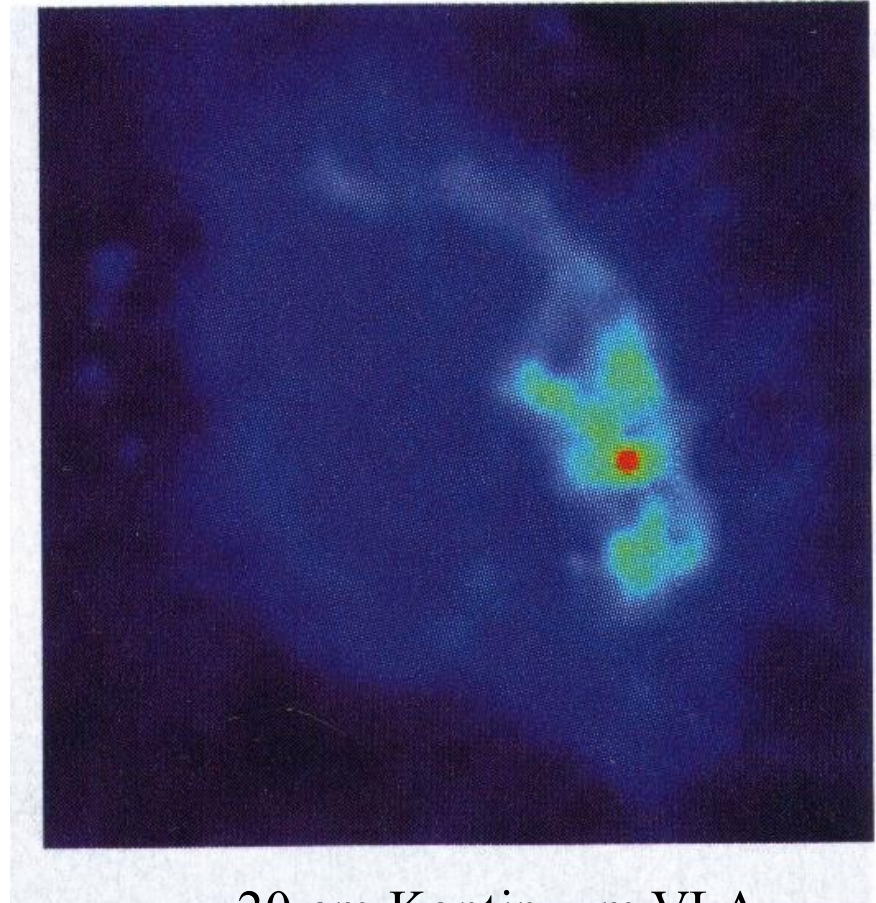
- Von sphärischen Winden hervorgerufen aus unbekannter Quelle
- Durch Gas, das aus der Richtung von Sgr A* kommt, hervorgerufen

- In der Nähe findet man viele **Infrarotquellen**; sie blasen oft Materie in den Raum

Sagittarius A East

⇒ Was ist Sagittarius A East?

- **Nicht-thermische** Synchrotronquelle, schalenartige Struktur
- Alter: 100 - 5000 Jahre



[4]

20 cm-Kontinuum VLA-Aufnahme, roter Punkt Sgr A*

Sagittarius A East

Könnte ein **Supernovarest**, oder der **Rest von mehreren Supernovae** sein, vielleicht aber auch ein Gammastrahlen-Ausbruch

- Beobachtungen zeigen: Sgr A East ist mit einer 50 km/s schnellen Gaswolke in der Nähe des Galaktischen Zentrum verbunden

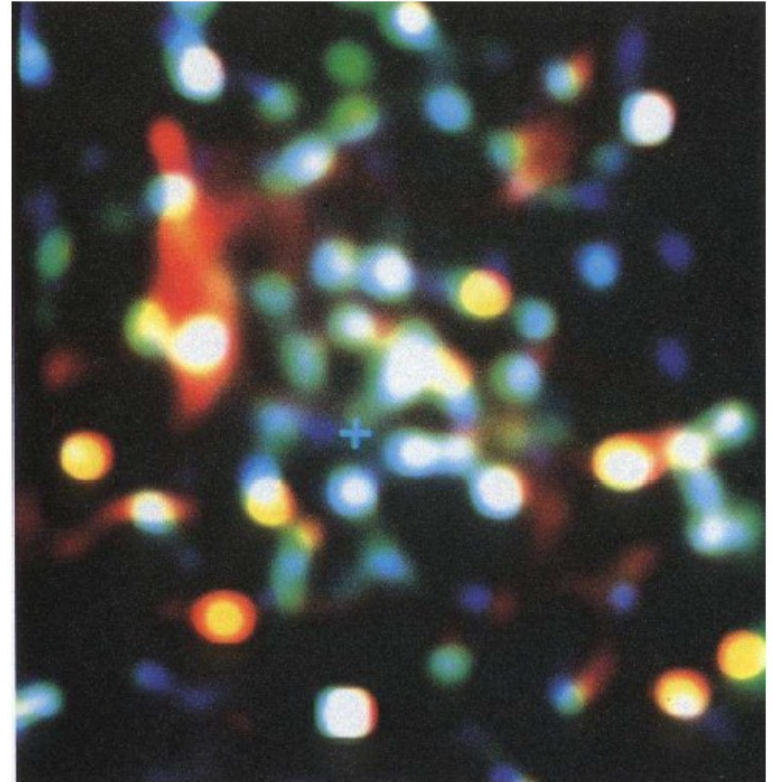
⇒ Dies würde eine Energie von 10^{52} erg benötigen

⇒ Dies würde für einen **Hypernovarest** sprechen

- Neuere Röntgenstrahlenmessungen könnten auch auf einen jungen, metallreichen Supernovarest hinweisen

Sternecluster

- Im Zentrum von Sgr A (0,1 - 0,2 pc Abstand vom Zentrum) befinden sich ziemlich **dichte Sternecluster**; diese sind ziemlich **massiv** und bestehen aus **heliumreichen** und relativ **jungen** Sternen
- etwas weiter außerhalb findet man auch ältere Sterne der Population II



[7]

*Sagittarius A**

Sagittarius A* scheint im Zentrum zu stehen und ist eine kompakte Radioquelle mit einer Ausdehnung $< 10^{13}$ cm; Leuchtkraft: $2 \cdot 10^{34}$ erg/s (Radio)

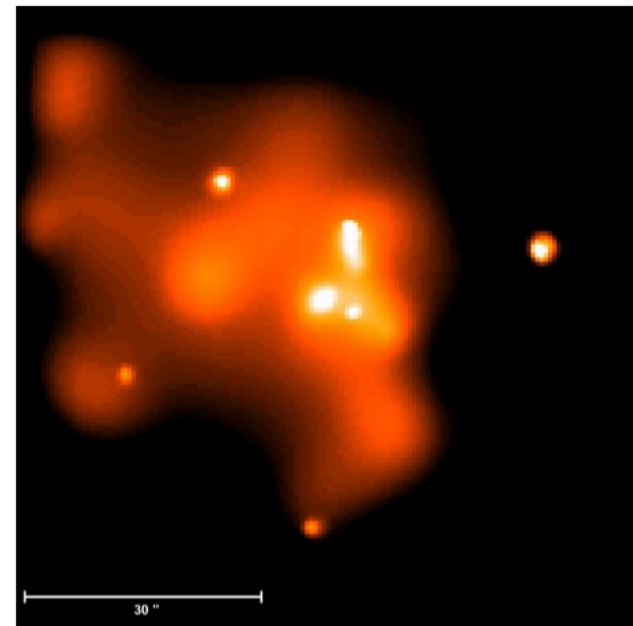
Sgr A* ist nur im mm- und im cm-Bereich eine schwache Quelle

Ist das ein schwarzes Loch?

Argumente dafür:

- kompakte Größe
- ungewöhnliches Strahlungsspektrum
- Seine Bewegung

Das galaktische Zentrum: Ein Überblick



[7]

Baganoff et al., 2000

Jeanette Lorenz
Sommerakademie La Villa

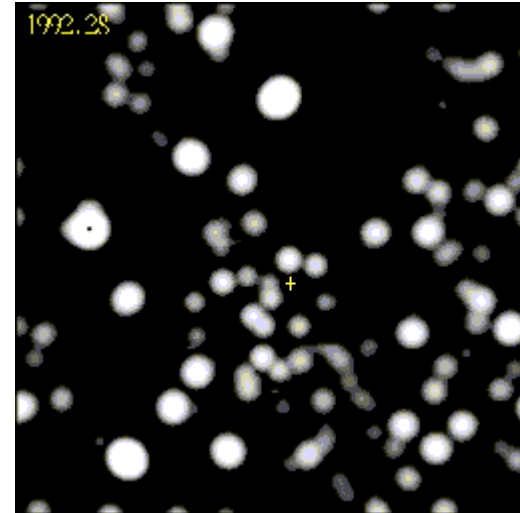
Schwarzes Loch?

⇒ Aus jährlichen Beobachtungen:

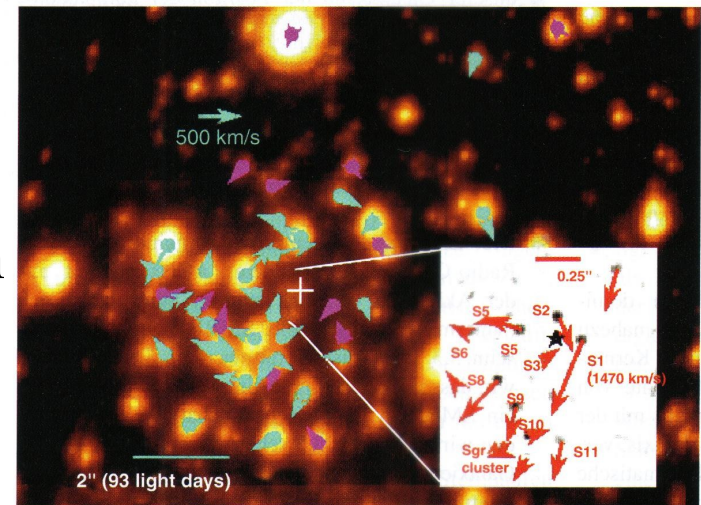
- Die **Sterne um das Zentrum** (Beobachtungen im K-Band: Es gibt einen kompakten Sternhaufen, der auf Sgr A* zentriert ist) bewegen sich mit bis zu 1500 km/s **schnell**; das Zentrum selber bewegt sich kaum (20 km/s); auch eine **Beschleunigung** einiger Sterne wurde beobachtet

⇒ Das Zentrum muss sehr **massiv** sein

⇒ **Massenbestimmung** ⇒ Tim [4]



[2]



Schwarzes Loch?

Argumente dagegen:

- Die Phänomene könnten möglicherweise durch mehrere Sterne im Zentrum erklärt werden; aber (vgl. Überlegungen vorher) dieser Sternhaufen wäre vermutlich **instabil**
- Der Energieausstoß ist eigentlich zu gering für ein Schwarzes Loch

Schwarzes Loch?

Wie identifiziert man ein Schwarzes Loch?

- **Massenbestimmung** $\Rightarrow$ min. $2,6 * 10^6 M_{\odot}$
- **Größenbestimmung** $\Rightarrow < 0,01$ pc
- **Radioquelle**
- Geschwindigkeitsmessungen von Molekülwolken

Die Beobachtungen weisen auf ein **Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße** hin.

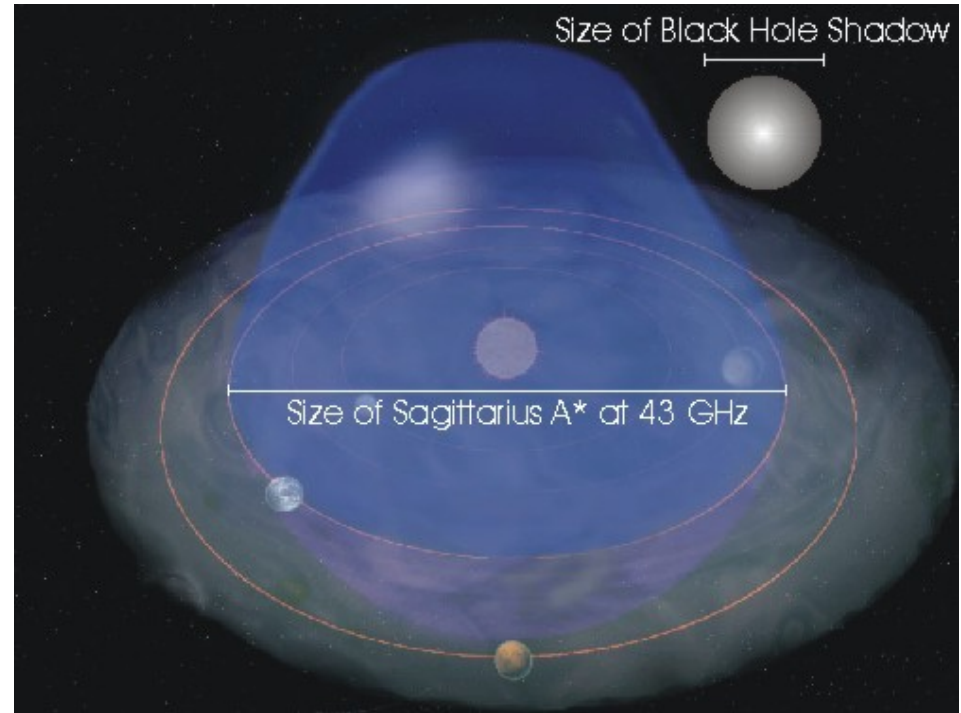
*Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße und Sgr A**

Ist dieses mit Sgr A*
verknüpft?

⇒ Referat von Tim

⇒ **Beobachtungen mit VLBI** (Very Long Baseline Interferometry)

⇒ Sgr A* (Masse: $2,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$) scheint ein **Schwarzes Loch** zu sein



[2]

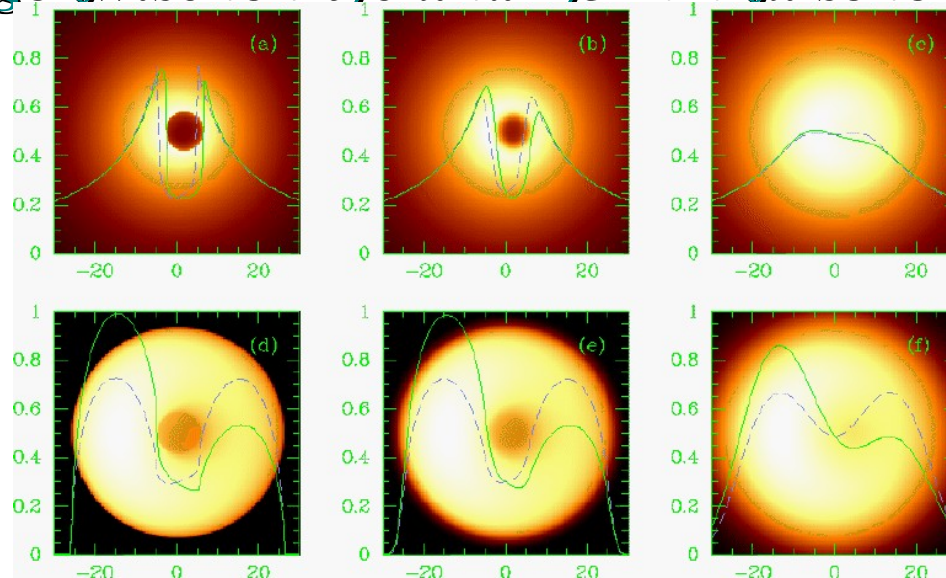
Und in Zukunft?

Alle Beobachtungen weisen auf ein Schwarzes Loch hin

Aber: Wir haben es noch nicht gesehen!

D.h. man versucht weiterhin den Schatten des Schwarzen Lochs zu sehen, dazu verbessert man weiter die mm-VLBI-Technik und erwartet den Schatten irgendwo bei einer Wellenlänge zwischen 0,6 und 1,3 mm zu sehen

[2]



Das galaktische Zentrum: Ein
Überblick

Jeanette Lorenz
Sommerakademie La Villa

Literatur

[1] Begelman & Rees. Gravity's final attraction: black holes in the universe. New York 1996.

[2] H. Falcke, F. Melia, E. Agol. The Black Hole in the Galactic Center. <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/hfalcke/bh/sld1.html> .

[3] Falcke, Heino; Melia, Fulvio. The Supermassive Black Hole in the Galactic Center. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, Vol. 39.

[4] Schneider, Peter. Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie. Berlin Heidelberg 2006.

[5] Rigutti, Adriana. Das große Buch der Astronomie. Klagenfurt 2005.

[6] Duschi, Wolfgang. Das Zentrum der Milchstraße. Spektrum der Wissenschaft April 2003.

[7] Wilms, Jörn. X-Rays from Normal Galaxies.

[8] Burkert, Andreas. Kippenhahn, Rudolf. Die Milchstraße. München 1996. Überblick

Das galaktische Zentrum: Ein

Jeanette Lorenz

Sommerakademie La Villa