

Gibt es ein Schwarzes Loch im Mittelpunkt unserer Milchstraße?

Friedrich W. Hehl

Universität zu Köln und University of Missouri, Columbia

Dienstag, 04. August 2009, 20:00h

im Henkel-Saal, Ratinger Str. 25 (Eingang Ratinger Mauer) – Altstadt
40213 Düsseldorf

Vortrag auf Einladung des Heimatvereins “Düsseldorfer Jonges”

für die Vermittlung sei Herrn Jörg Sedlmayr herzlich gedankt

Datei DeJonges3.tex

Nebra-Scheibe (Landesmuseum in Halle)



Astronomie mit den Augen eines Düsseldorfer Dichters

“Das Fräulein stand am Meere
Und seufzte lang und bang,
Es rührte sie so sehre
der Sonnenuntergang.

Mein Fräulein! sein Sie munter,
Das ist ein altes Stück;
Hier vorne geht sie unter
und kehrt von hinten zurück.”

In Königsberg wird dies etwas ernster gesehen

Zwei Dinge erfüllen das Gemüt
mit immer neuer und zunehmender
Bewunderung und Ehrfurcht,
je öfter sich das Nachdenken
damit beschäftigt:

Der gestirnte Himmel über mir
und das moralische Gesetz in mir.

Die Antwort aus Düsseldorf über die Sterne
Aus "Jetzt wohin?"

"Traurig schau ich in die Höh,
Wo viel tausend Sterne nicken –
Aber meinen eignen Stern
Kann ich nirgends dort erblicken."

Vorschau

Was ist ein Schwarzes Loch? Eine Ansammlung von Masse und Energie, die so dicht gepackt ist, dass aus ihr nicht einmal Licht entweichen kann. Diese Ansammlung wird von einer halbdurchlässigen Hüllfläche umschlossen, aus der nichts herauskommt, aber man kann hineinfallen.

Was ist unsere Milchstraße? Unsere Sonne ist ein typischer Stern. Nimmt man dazu 10^{11} Sterne solcher und ähnlicher Art und ordnet sie in Form eines riesigen Badewannenwirbels an, mit den 10^{11} Sternen als Wasserteilchen, dann bildet dies unsere Milchstraße.

Ein solches Schwarzes Loch mit einer Masse von 3 Millionen Sonnen sitzt im **Mittelpunkt** des “riesigen Badewannenwirbels”.

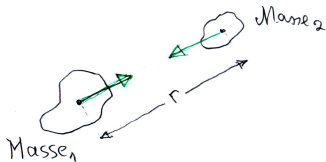


M95 (oder NGC 3351) hat eine Lineardim. von etwas 50 000 Lichtjahren, kann mit einem kleinen Fernrohr in dem Sternbild Löwen (Leo) gesehen werden. Bild von J.-C. Cuillandre & G. Anselmi. Der Milchstraße ähnlich.

Schwarzes Loch: vier notwendige Begriffe, Folgerungen

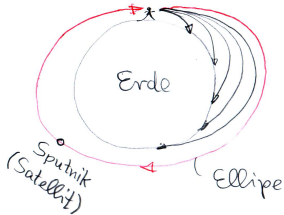
1. Anziehungskraft der Massen M untereinander
 2. Fluchtgeschwindigkeit v_F von einem Himmelskörper weg
 3. Endliche Lichtgeschwindigkeit c (von etwa 300 000 km/s)
 4. Schwere des Lichts (d.h. Licht wird von Massen angezogen)
-
- ▶ 5. *Newtonsche* Theorie der Schwerkraft: Schwarze Löcher nach Michell (1784) und Laplace (1796)
 - ▶ 6. *Einsteinsche* Theorie der Schwerkraft: Schwarze Löcher nach Schwarzschild (1916) und Kerr (1963)

1. Anziehungskraft der Massen



Newton 1687
Anziehungskraft $F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$
stets anziehend
universell
Gravitationskonstante
kann gemessen werden

Wurf



Planeten unterliegen ebenfalls der Newtonschen Anziehungskraft

Planetengesetze (Kepler 1609/19)

1. Bahngesetz
2. Geschwindigkeitsgesetz
3. Ordnungsgesetz

Die Keplerschen Gesetze können aus dem Newtonschen Attraktionsgesetz abgeleitet werden

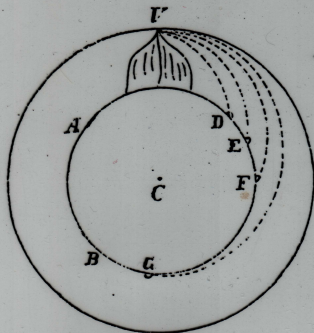
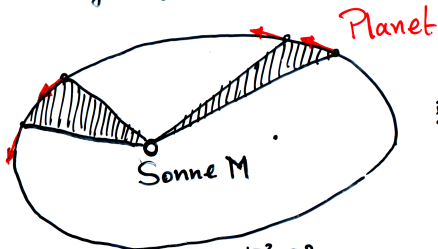


Fig. 213.

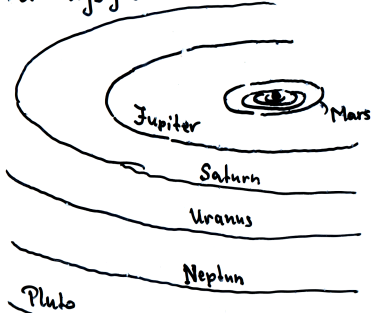
per den kleinsten Bogen VD, mit der grösseren den grösseren Bogen VE beschreibt, mit der noch grösseren Geschwindigkeit bis F und weiter bis G gelangt; wird derselbe endlich, wenn die Geschwindigkeit stets vergrössert wird, über den ganzen Umfang der Erde fortgehen und zu dem Berge, von welchem er geworfen worden ist, zurückkehren. Da

die Oberfläche der Erde, C ihren Mittelpunkt und VD, VE, VF krumme Linien, welche ein, von der Spitze V eines sehr hohen Berges, längs einer horizontalen Linie und mit nach und nach vergrösserter Geschwindigkeit geworfener, Körper beschreibt. Damit der Widerstand der Luft, durch welche die Bewegung der Himmelskörper kaum verzögert wird, nicht in Rechnung komme, wollen wir uns dieselbe ganz fortgenommen oder wenigstens ihren Widerstand als nicht vorhanden denken. Auf dieselbe Weise, wie der mit der kleinsten Geschwindigkeit geworfene Kör-

- (1) Bahngesetz
- (2) Geschwindigkeitgesetz



(3) Ordnungsgesetz: $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3$



Exzentrizität übertrieben

MERKUR
Mein

VENUS
Vater

ERDE
Erklärt

MARS
Mir

JUPITER
Jeden

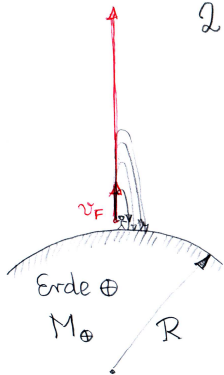
SATURN
Samstag

URANUS
Unsere

NEPTUN
neun

PLUTO
Planeten

1 AU = 150 Mio. km
(astronomische Einh.)



Wurf senkrecht
nach oben
für ⊕ ist $r_s \approx 1\text{cm}$

2. Fluchtgeschwindigkeit

• Aus Energiesatz z:

$$v_F = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

unabhängig von
Masse des Wurf-
körpers

$$v_{F\oplus} \approx 11,2 \frac{\text{km}}{\text{s}} \approx 34 \text{ Mach}$$

$$v_{F\ominus} \approx 2,3 \frac{\text{km}}{\text{s}} \approx 7 \text{ Mach}$$

Falls $R = r_s$,
dann $v_F = c$

• v_F bezogen auf die
Lichtgeschwindigkeit c

$$\frac{v_F}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 R}} = \sqrt{\frac{r_s}{R}}$$

↳ Schwarzschild

• Jede Masse M hat
einen Schwarzschild-
radius r_s zugeordnet

• Verallgemeinerung für
die Einsteinsche Gravi-
tationstheorie möglich

Der Schwarzschildradius $r_S = \frac{2G}{c^2} M$ bestimmter Massen M

	Masse	Größe	Schwarzschildrad.
Atom	10^{-26} kg	10^{-10} m	10^{-53} m
Mensch	75 kg	1,75 m	10^{-25} m
Erde	$6 \cdot 10^{24}$ kg	6 400 km	1 cm
Sonne	$2 \cdot 10^{30}$ kg	700 000 km	3 km
Neutronenstern	$1,4 M_{\odot}$	10 km	4 km
Sagittarius A*	$3,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$	<1 AE	0,07 AE
Milchstrasse	$2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$	100 000 Lj	10^{-2} Lj

Dabei ist 1 Astronomische Einheit (AE) der mittlere Bahnradius Erde-Sonne von etwa 150 Millionen km und 1 Lichtjahr (Lj) die Entfernung, welche Licht im Vakuum in 1 (Erden-)Jahr zurücklegt, nämlich

$$1 \text{ Lj} \approx 9,9 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx 63\,000 \text{ AE}$$

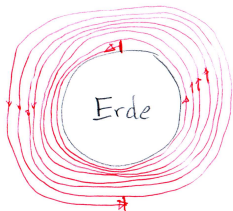
Tabelle nach E.W. Mielke: Sonne, Mond und Schwarze Löcher (1997).

3. Endliche Lichtgeschwindigkeit c

Hatte Olaf Römer 1675 bei der Beobachtung der Umläufe der Jupitermonde entdeckt.

Heute im Labor direkt messbar:

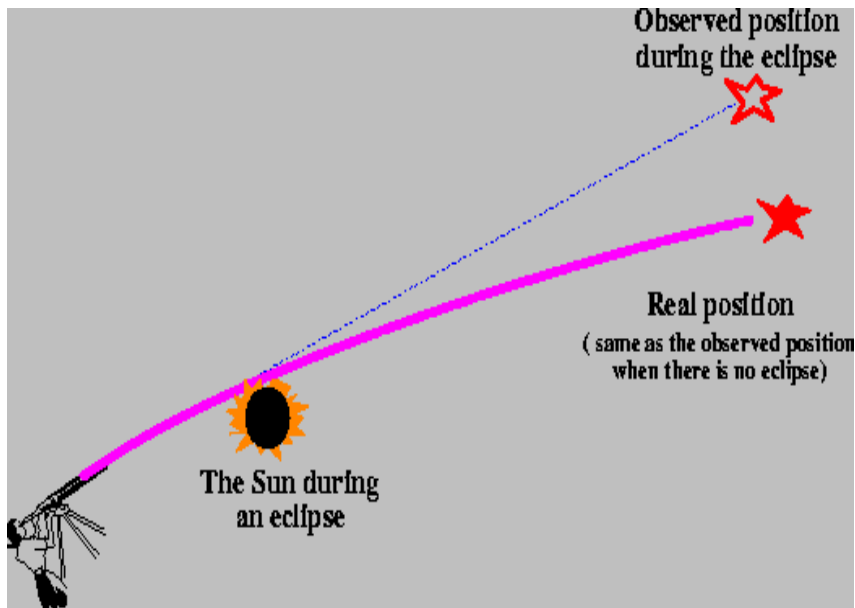
$$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$



$7\frac{1}{2}$ Male um die Erde
in 1 Sekunde

4. Schwere des Lichts

Licht hat eine Energie und damit auch Trägheit und Schwere. Schon nach der Newtonschen Gravitationstheorie wird Licht von der Sonne abgelenkt:



Lichtablenkung am Sonnenrand (Jose Wudka, UCR, 1998)

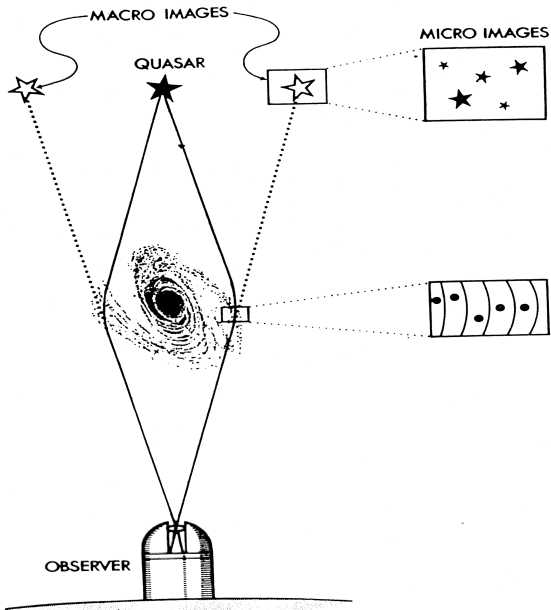
J.G.von Soldner (1804): “Über die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbei geht.”

Nach der Einsteinschen Gravitationstheorie ist die Lichtablenkung **doppelt** groß wie in der Rechnung nach Soldner. Bei Sonnenfinsternissen ist dies seit 1919 mit wachsender Genauigkeit stets nachgewiesen worden:

“Alle Zweifel sind entschwunden
Endlich ist es nun gefunden:
Das Licht, das läuft natürlich krumm
Zu Einsteins allergrößtem Ruhm!”

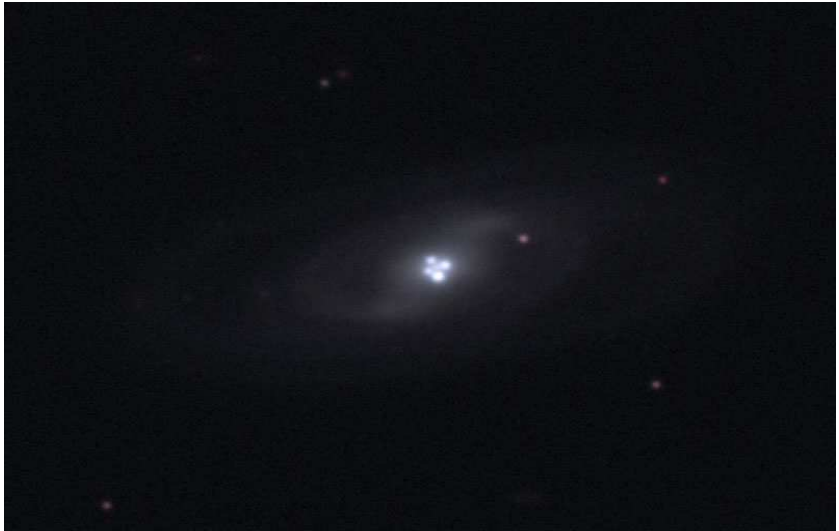
Heute in der Astronomie eine Selbstverständlichkeit: **Gravitationslinsen**. Eine große Massenansammlung (eine Galaxie oder ein Haufen von Galaxien) zieht vorbeistreifende Lichtstrahlen an und wirkt so als Sammellinse.

aus Pöschel & Swiridy





Gravitationslinse Galaxienhaufen 0024+1654, HST, Colley et al.(1996). Entf. zum Haufen $\approx 5 \cdot 10^9$ Lj, die mehrfach abgebildete 'blaue' Galaxie $\approx 10^{10}$ Lj



Einstein-Kreuz (Gravitationslinse) nach Rhoads et al. (2007):
Man sieht schwach eine Galaxie (mit 4 Kernen?)



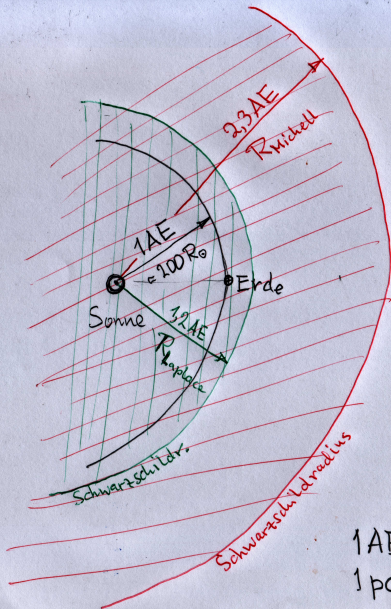
Einstein-Kreuz (ESA/NASA, Hubble Space Telescope): 4 Bilder
des gleichen Quasars

5. "Schwarze Löcher" nach Michell und Laplace

J. Michell (1784) [unsere Übers.]: "Wenn der Radius einer Kugel mit einer Dichte gleich der Sonne das 500-fache desjenigen der Sonne überschritte, ...dann würde das von einem solchen Körper emittierte Licht gezwungen, zu ihr zurückzukehren."

P.S. Laplace (1796) [unsere Übers.]: "Ein Himmelskörper der gleichen Dichte wie die der Erde, dessen Durchmesser 250-fach größer ist als der der Sonne, würde aufgrund seiner Attraktion keinen seiner Strahlen bis zu uns entkommen lassen; es ist deshalb möglich, dass die größten Leuchtkörper des Universums unsichtbar sind."

	Michell	Laplace
Radius	$R = 500 \cdot R_{\odot} \approx 2,3 \text{ AE}$	$R = 250 \cdot R_{\odot} \approx 1,2 \text{ AE}$
Masse	$M = 500^3 \cdot M_{\odot}$ $= 2,5 \cdot 10^{38} \text{ kg}$	$M = 5,6 \text{ g/cm}^3 \cdot 4/3\pi R^3$ $= 1,26 \cdot 10^{38} \text{ kg}$
Fluchtgeschwindigkeit	$v_F = 3,09 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	$v_F = 3,10 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Schwarzschildradius	$r_S _{\text{Michell}} = 500 \cdot R_{\odot} \approx 2,3 \text{ AE}$	$r_S _{\text{Michell}} = 250 \cdot R_{\odot} \approx 1,2 \text{ AE}$



$$M_{\text{Michell}} \approx 10^7 M_{\odot} \quad \rho_M \approx 1,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$M_{\text{Laplace}} \approx 10^6 M_{\odot} \quad \rho_L \approx 5,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{\odot} \approx 700\,000 \text{ km}$$

$$L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Leuchtkraft

$$1 \text{ AE} \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ km}$$

$$1 \text{ pc} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ lj} \approx 10^{16} \text{ m}$$

$$R_{\text{Bahn Pluto}} \approx 40 \text{ AE}$$

6. Schwarze Löcher nach Schwarzschild (1916) [u. Kerr (1963)]

Die Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie (1916) beinhaltet alle drei vorher besprochenen Bedingungen für ein Schwarzes Loch:

- ▶ Attraktion von Massen,
- ▶ Fluchtgeschwindigkeit,
- ▶ endliche Lichtgeschwindigkeit,
- ▶ Schwere der Lichts.

Newtons Attraktionsgesetz wird korrigiert und die Schwere des Lichts von einer anderen Warte aus interpretiert (das Licht läuft längs einer 'kürzesten Linie' in einer 4-dimensionalen gekrümmten Raumzeit)

Nach Schwarzschild (1916) lautet das 4-dimensionale Abstandselement einer kugelsymmetrischen Massenverteilung außerhalb der Massenverteilung ($t = \text{Zeit}$, $r, \theta, \varphi = 3\text{-dimensionale Kugelkoordinaten}$)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_S}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{1}{1 - \frac{r_S}{r}} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2).$$

(Koordinaten-)Singularität bei $r = r_S \implies$ Radius des Ereignishorizonts.

Unsere Milchstraße (Galaxie) und Sagittarius A*

1. Unsere Milchstraße und einige andere Galaxien
2. Annäherungen an unser galaktisches Zentrum bis zu 1 Lj
3. Der zentrale Sternhaufen unserer Galaxie mit Sgr A*

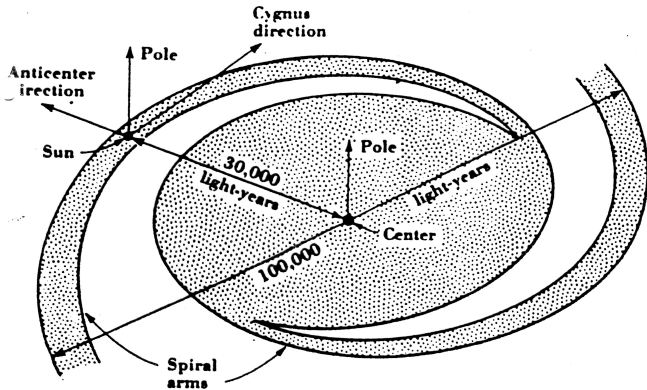
1. Unsere Milchstraße und einige andere Galaxien



Die Milchstraße über dem Devil's Tower in Wyoming, USA, nach W. Pacholka



Die Milchstraße über den französischen Alpen, Copyright: Marc Sylvestre.



Simplified, idealized sketch of our galaxy.

aus Kraus, Radio Astronomy



Zeichnung auf Grund astronomischer Daten von Richard Powell,
<http://www.atlasoftheuniverse.com/milkyway.jpg>



M95 (oder NGC 3351) hat eine Lineardim. von etwas 50 000 Lichtjahren, kann mit einem kleinen Fernrohr in dem Sternbild Löwen (Leo) gesehen werden. Bild von J.-C. Cuillandre & G. Anselmi. Der Milchstraße ähnlich.



Ein Galaxien-Trio im Drachen (Draco). Etwa 100 Mio. Lj
entfernt. 2 Spiralen und eine Elliptische. Nach G. Benintende



M51, Whirlpool-Galaxis, beide sind etwa 31 Mio. Lj entfernt, in Canes Venatici, sehr lange belichtet, nach Jon Christensen

M51

Herschel/PACS

© ESA & The PACS Consortium

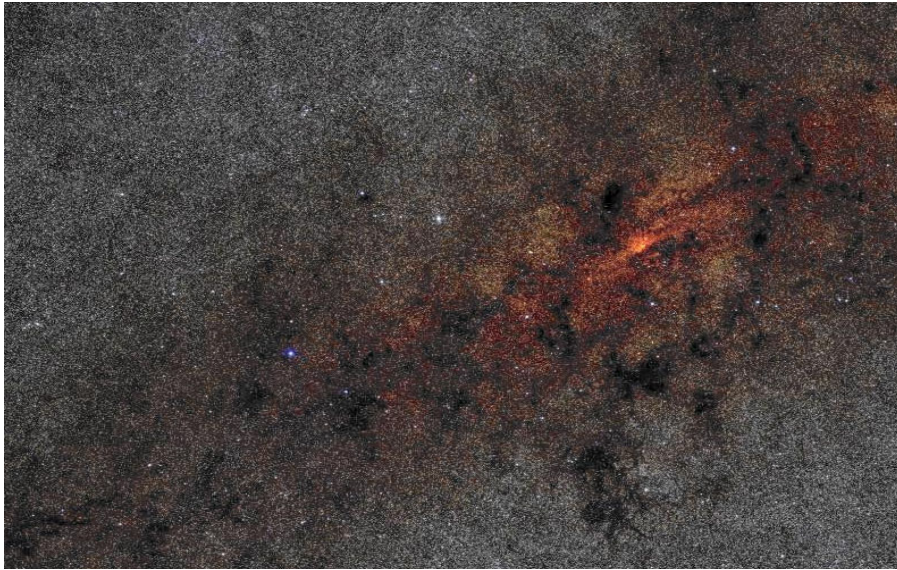


M31: Die Andromeda-Galaxie, unserer Galaxie benachbart, gehört zur Lokalen Gruppe, nach Robert Gendler

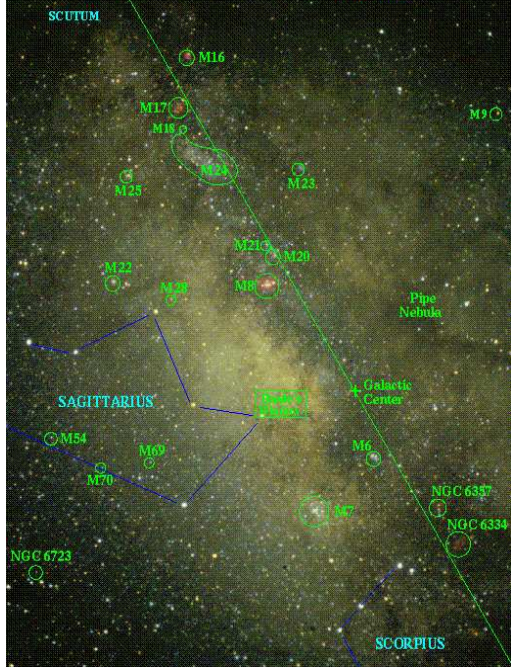


NGC 4565 ist unserer Galaxie ähnlich, sie ist ähnlich dünn,
beachte die Ausbuchtung (bulge), nach Roth Ritter

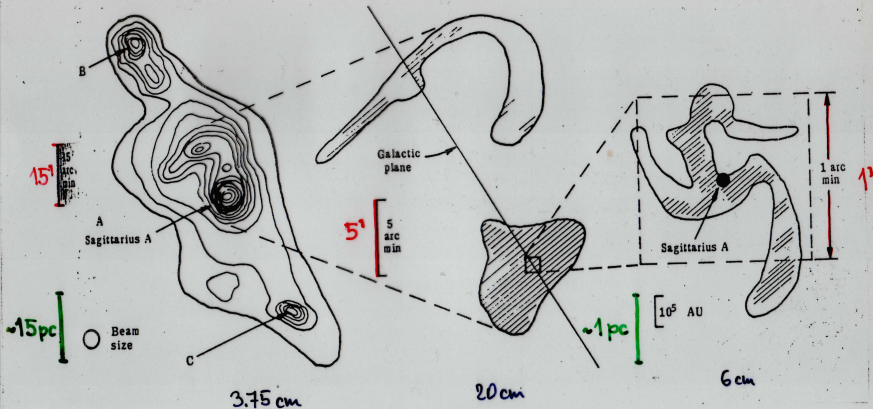
2. Annäherungen an unser galaktisches Zentrum bis zu 1 Lj



Infrarotaufnahme des galaktischen Zentrums, 2MASS Project (2006), im Sichtbaren ist das Zentrum von Dunkelwolken verdeckt.



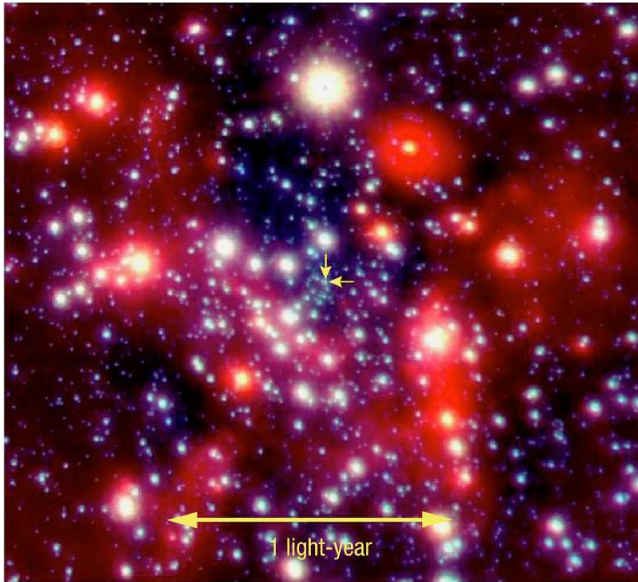
Objekte nahe des galktischen Zentrums, W. Keel (2001)



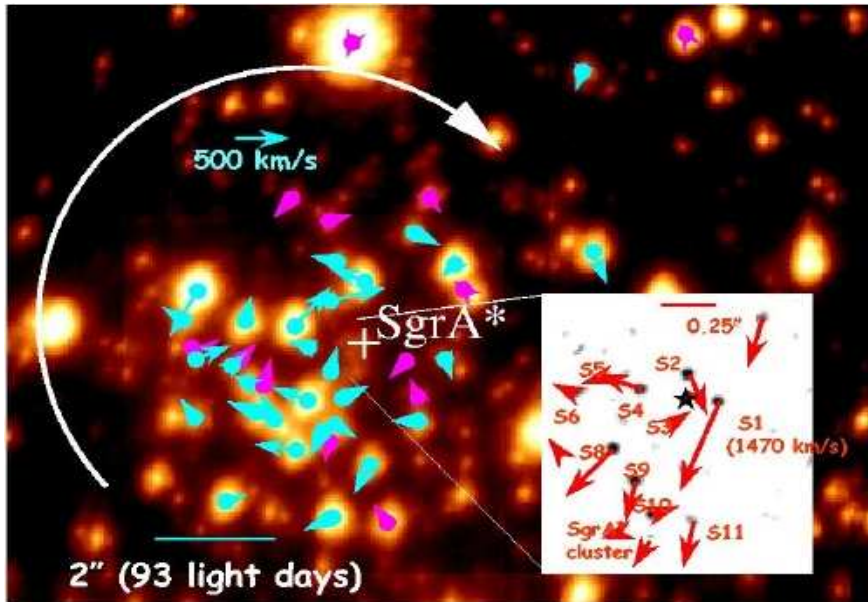
Kraus: Radioastronomy, 2nd ed.

Wir zoomen in das galaktische Zentrum hinein bei verschiedenen Wellenlängen im Radiobereich. Schließlich sehen wir Sagittarius A für sich. Wir sind bei der Größenordnung von 1 parsec (pc) angekommen.

3. Der zentrale Sternhaufen unserer Galaxie mit Sgr A* (2002)

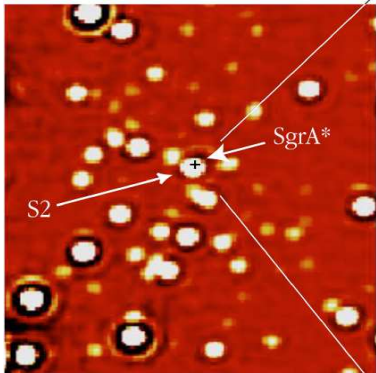


The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

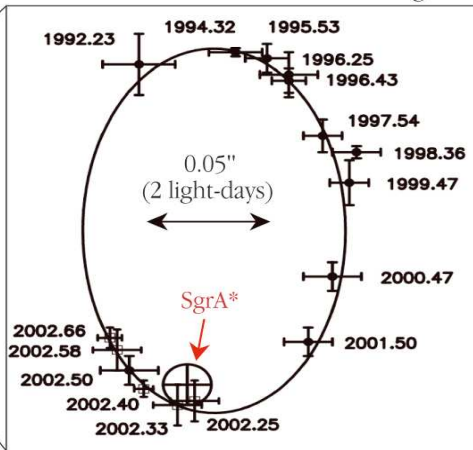


Sternenhaufen, in dessen Zentrum SgrA*, nach Genzel (2000).
 Sterne vorzugsweise im Uhrzeigersinn um SgrA*

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*

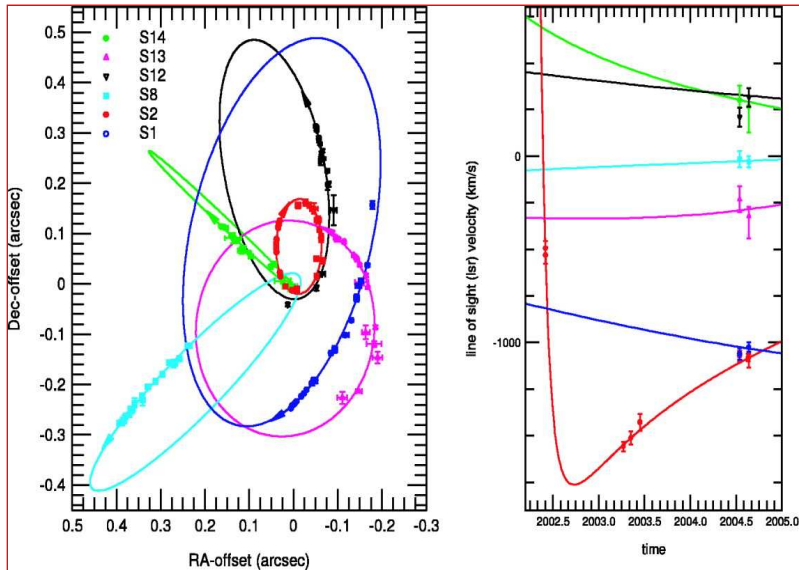


The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

ESO PR Photo 23c/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory





Eckart & Genzel 1996/7, Eckart et al. 2002, Schödel et al. 2002/3, Ghez et al. 2003, Eisenhauer 2005. S2 nähert sich Sgr A* bis auf 17 Lichtstunden.

Mit Hilfe des 3.Keplerschen Gesetzes kann die Masse im Zentrum von Sgr A* bestimmt werden; außerdem kann man aus der Größe der innersten bekannten Keplerbahn und den Fluktuationen der Radiostrahlung von Sgr A* auf eine Linearausdehnung der zentralen Masse von kleiner als etwa 1 AE schließen...

Es existiert ein Schwarzes Loch in Sgr A* im Mittelpunkt unserer Milchstrasse von etwa 3,6 Mio. Sonnenmassen.

Soli Deo gloria!