

Galaktische Rotationskurve; Dunkle Materie und Suche nach MACHOs; Galaktisches Zentrum

8. Februar, 2007

Laura Baudis, lbaudis@physik.rwth-aachen.de
Physikalisches Institut Ib, RWTH Aachen

Inhalt

- Galaktische Rotationskurve

 - Erwartung

 - Messung

 - Dunkle Materie

- Der Gravitationslinseneffekt

- Der galaktische Mikrolinseneffekt

- Suche nach MACHOs

- Das Galaktische Zentrum

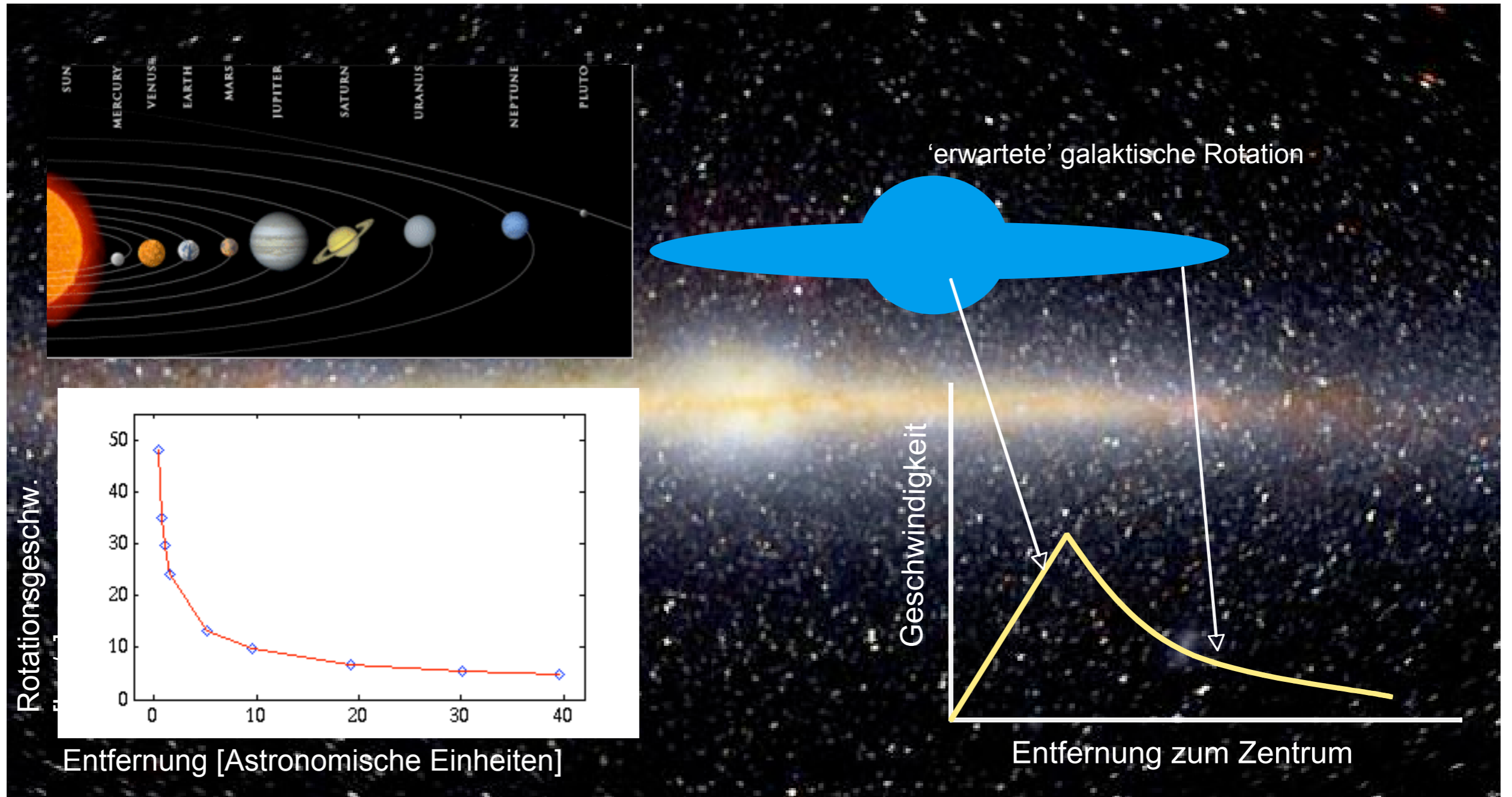
- Das zentrale Schwarze Loch

- Literatur:

 - Carroll, Ostlie, Kapitel 24; P. Schneider, Kapitel 2, Weigert, Wendker, Wisotzki, Kapitel 9; Unsöld, Baschek, Kapitel 11

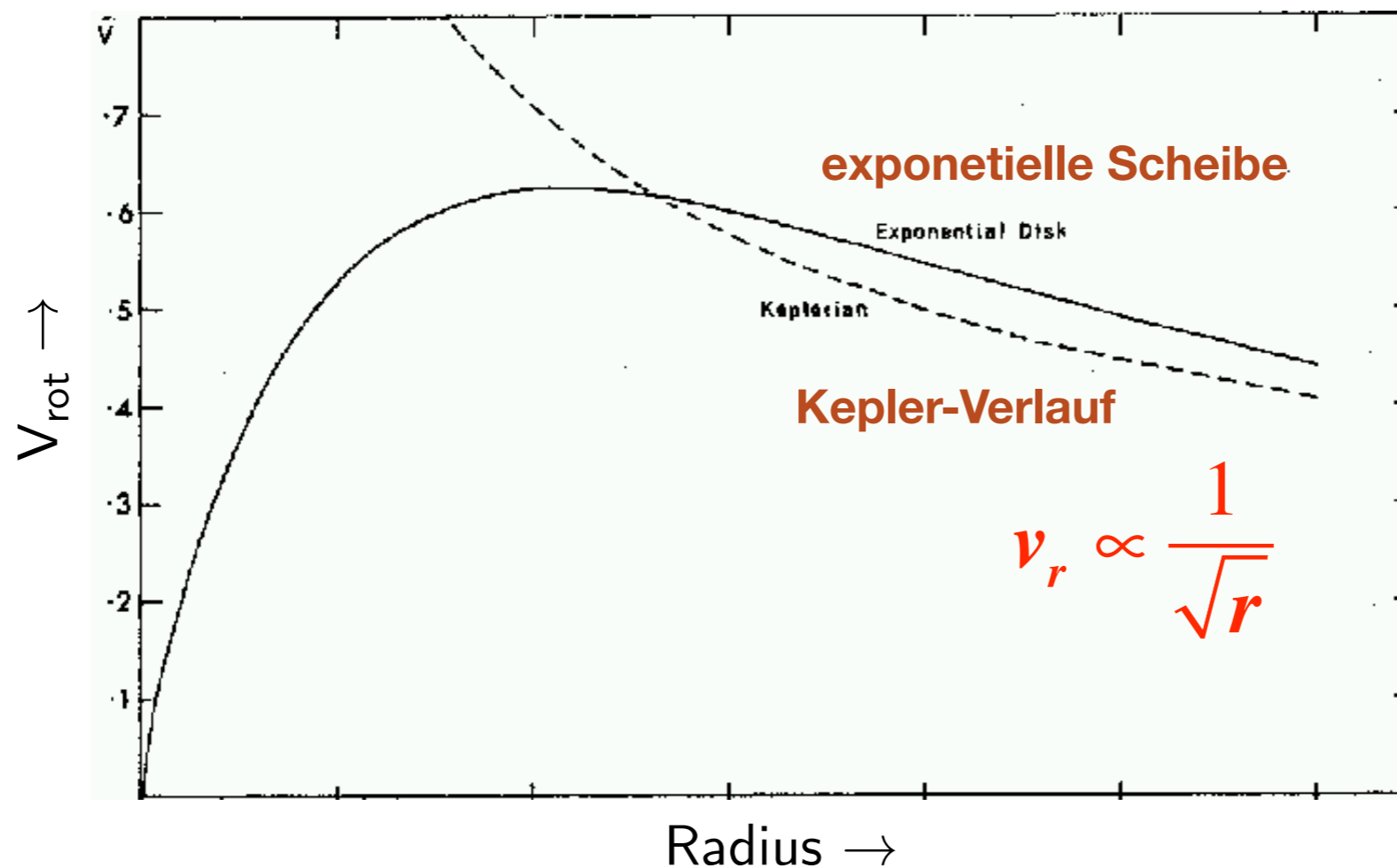
Galaktische Rotationskurve

- Erwartung: falls der Großteil der Masse im sichtbaren Teil der Galaxis konzentriert ist: die Rotationskurve sollte nach außen hin abfallen :



Galaktische Rotationskurve

- falls also die Masse so verteilt ist wie die Leuchtkraft $\rightarrow V_{\text{rot}}$ in der äußeren Scheibe sollte mit $1/\sqrt{r}$ gehen \Rightarrow Kepler-Verlauf (siehe auch Übung):



Galaktische Rotationsgeschwindigkeit

- **Erwartung:** aus Zentripetalkraft = Gravitationsanziehung

$$\frac{mv_r^2}{r} = G \frac{M_r m}{r^2}$$

$$v_r^2 = G \frac{M_r}{r}$$

$$v_r = \sqrt{\frac{GM_r}{r}}$$

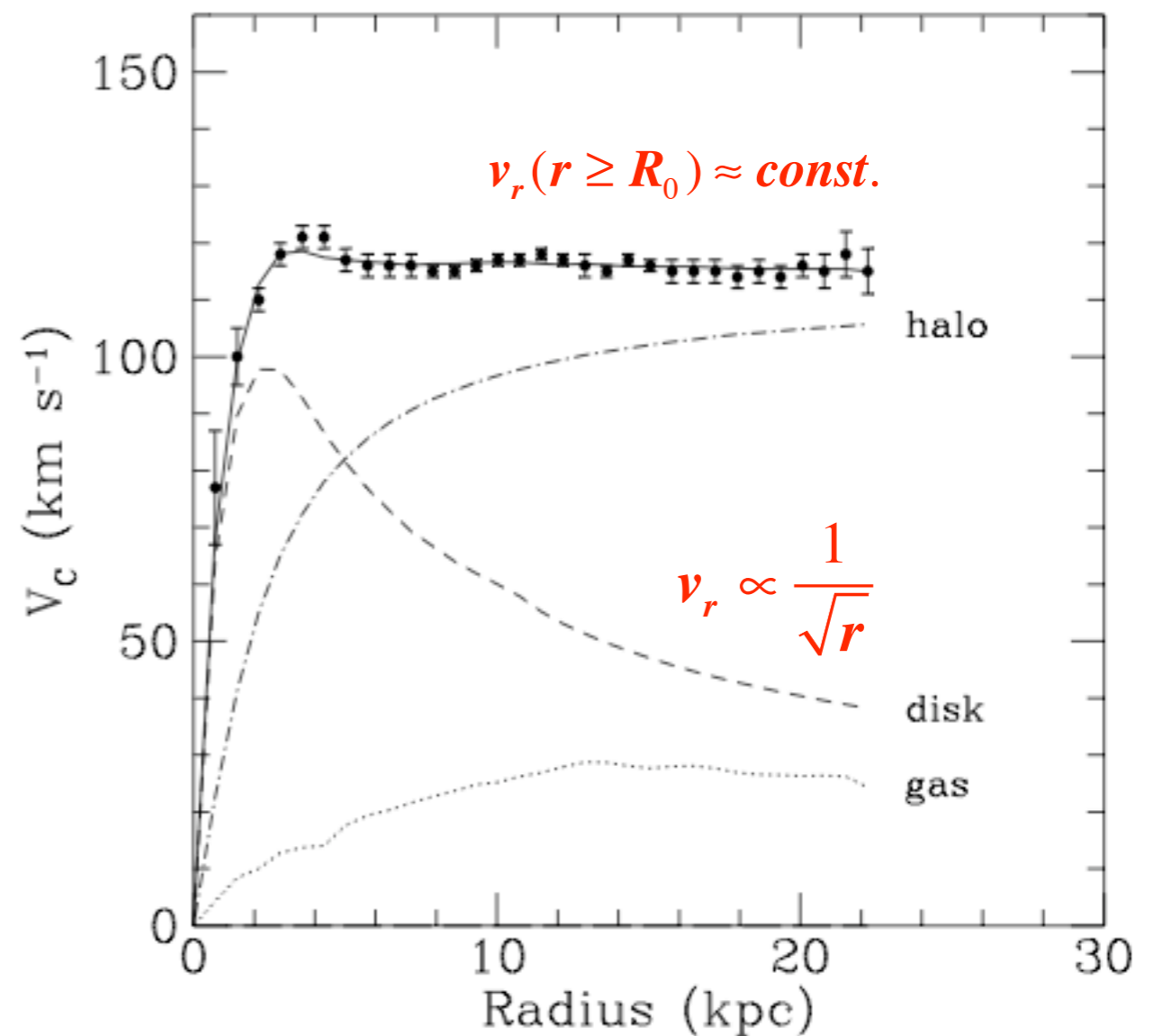
$$\Rightarrow v_r \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

- **Messung:**

$$v_r(r \geq R_0) \approx \text{const.}$$

$$\Rightarrow M_r \propto r$$

=> es gibt eine nicht sichtbare Massenkompente, die linear mit dem Galaxienradius wächst!



Galaktische Rotationskurve

- Die Rotationskurve hängt von der Massenverteilung ab => **wir können aus der Rotationskurve Information über die Massenverteilung erhalten**

“Rigid body” Rotation: die Masse muss \sim sphärisch verteilt sein (siehe Übung) und die Dichte ist $\rho \sim$ konstant

Flache Rotationskurve: der Großteil der Masse im äusseren Teil der Galaxis ist **sphärisch verteilt**, wobei die **Dichte**

$$\rho(r) \propto r^{-2}$$

- um dies zu sehen, nehmen wir an, dass $\Theta(r) = V$, wobei $V = \text{konst.}$ Die Kraft, die auf ein Stern der **Masse m** durch die **Masse M_r** der Galaxis innerhalb der Sternposition r wirkt, ist:

$$\frac{mV^2}{r} = \frac{GM_r m}{r^2}$$

- unter der Annahme von sphärischer Symmetrie. Wir lösen nach M_r auf:

$$M_r = \frac{V^2 r}{G}$$

- und differenzieren bezüglich des Radius r der Verteilung:

$$\frac{dM_r}{dr} = \frac{V^2}{G}$$

Galaktische Rotationskurve

- Wir benutzen die Gleichung für die **Erhaltung der Masse** in einem sphärisch symmetrischen System:

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

- daraus folgt für die Massendichte in den äußeren Bereichen der Milchstraße:

$$\rho(r) = \frac{V^2}{4\pi G r^2}$$

- Die **r⁻²-Abhängigkeit** ist in starkem Kontrast zur Anzahldichte der Sterne im sichtbaren, stellaren Halo, die mit r^{-3.5} variiert, also viel schneller abfällt, als man es von der galaktischen Rotationskurve erwarten würde.

=> der Hauptanteil der Masse in der Milchstraße ist in Form von dunkler Materie, die sich (bisher) nur durch ihren Gravitationseinfluß auf die sichtbare Materie bemerkbar macht

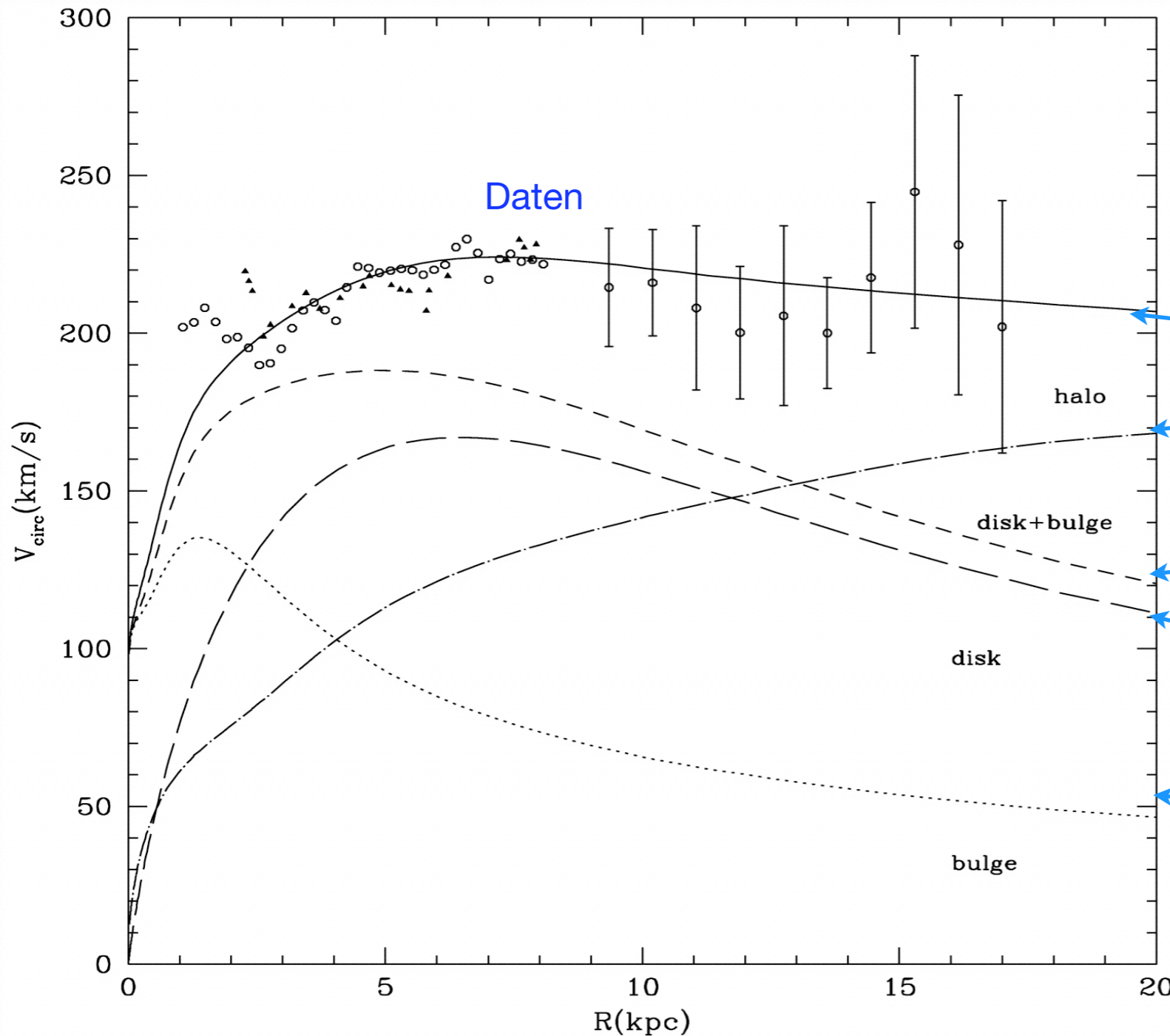
- Eine bessere **Form für die Dichteverteilung** ist gegeben durch (ρ_0 und a werden durch Fits an die Rotationskurve erhalten):

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/a)^2}$$

für $r \gg a \Rightarrow \rho(r) \propto r^{-2}$

für $r \ll a \Rightarrow \rho(r) \propto \text{konst.}$

Fits der beobachteten Rotationskurve



(Klypin, Zhao & Somerville 2002)

basierend auf der Dichtefunktion
aus Sternzählungen und Kinematik
=> Modelle der galaktischen
Rotationskurve

Summe aus Halo + Scheibe + Bulge

Dunkle Materie Halo

Scheibe + Bulge

Scheibe

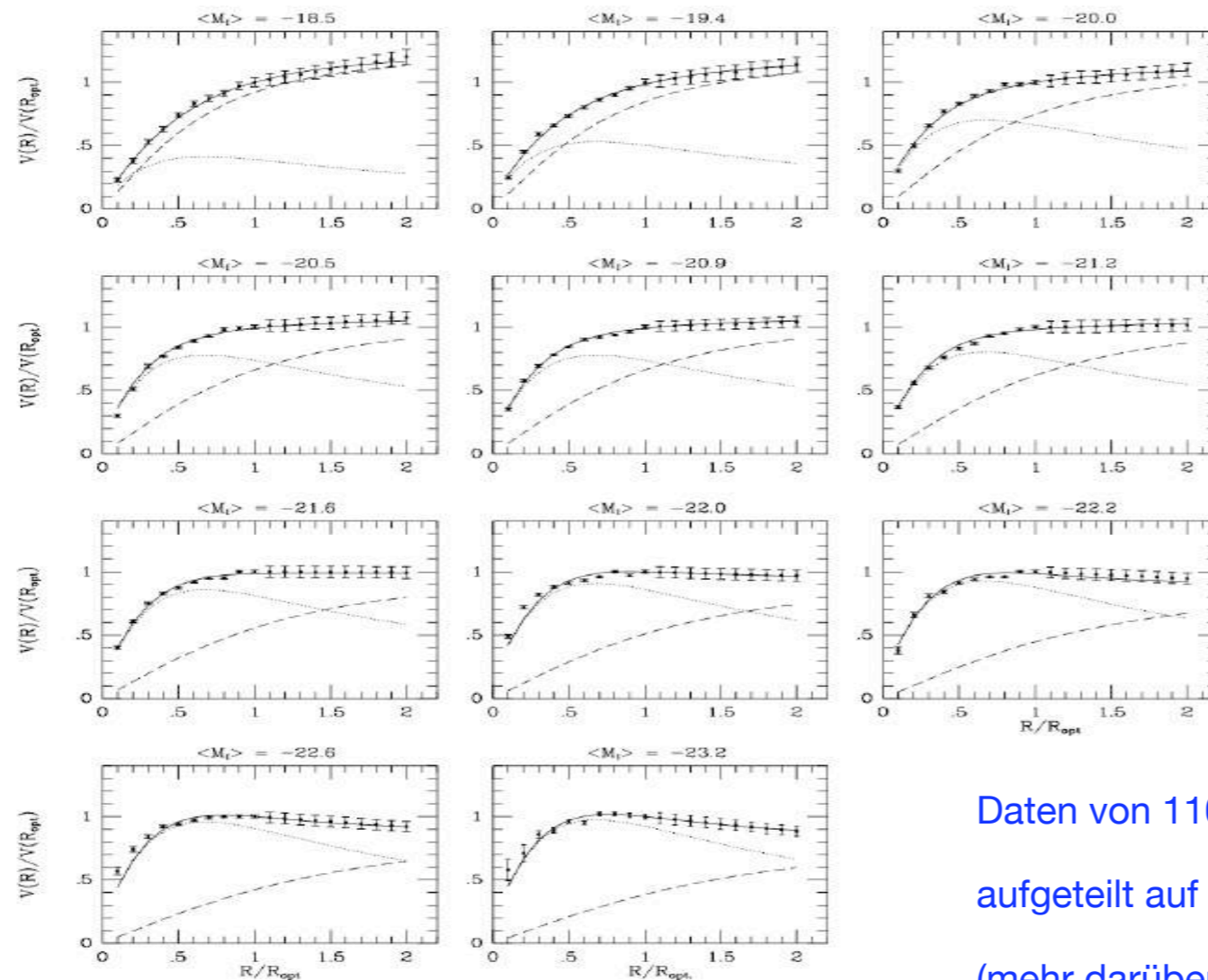
Bulge

$$M_{tot, lum} \approx 9 \times 10^{10} M_{\odot}$$

$$M_{virial} \approx 1..2 \times 10^{12} M_{\odot}$$

Rotationskurven

- **historisch:** Vera Rubin, in den 70er, erste Hinweise, dass galaktische Rotationskurven flach sind
- **heute:** Rotationskurven von mehreren 10^3 Galaxien, können durch ein universelles Dichteprofil beschrieben werden



Daten von 1100 Spiralgalaxien
aufgeteilt auf 11 Leuchtkraft-bins
(mehr darüber in Vorlesung über Galaxien)



Vera Rubin

Was ist die Dunkle Materie?

- **Die Natur der dunklen Materie ist noch nicht bekannt**

- 2 Möglichkeiten:

Baryonische dunkle Materie: astrophysikalische Objekte, die sehr leuchtschwach sind

Nicht-baryonische dunkle Materie: neue Elementarteilchen, die bisher noch nicht entdeckt wurden

- Auch wenn es viele starke Argumente gegen ein Universum aus purer baryonischer dunkle Materie gibt (Nukleosynthese im frühen Universum, Strukturbildung, kosmischer Mikrowellenhintergrund, etc, siehe Vorlesungen im nächsten Semester), stellt sich die Frage, ob es leuchtschwache astronomische Objekte im Halo der Milchstraße gibt, sogenannte MACHOs (Massive Compact Halo Objects), die die dunkle Materie in Halo zum Teil erklären könnten

- **Besipiele für MACHOs:**

Braune Zwerge ($M \leq 0.08 M_{\odot}$), Rote Zwerge ($0.08 M_{\odot} \leq M \leq 0.45 M_{\odot}$)

Weißer Zwerge ($M \approx 0.5 - 0.6 M_{\odot}$)

Neutronensterne

Schwarze Löcher

- 1986: Bohdan Paczynski schlug vor, die Anwesenheit von MACHOs durch **Mikrolinsenexperimente** zu prüfen

Der Gravitationslinseneffekt

- **Der Einsteinsche Ablenkwinkel:**

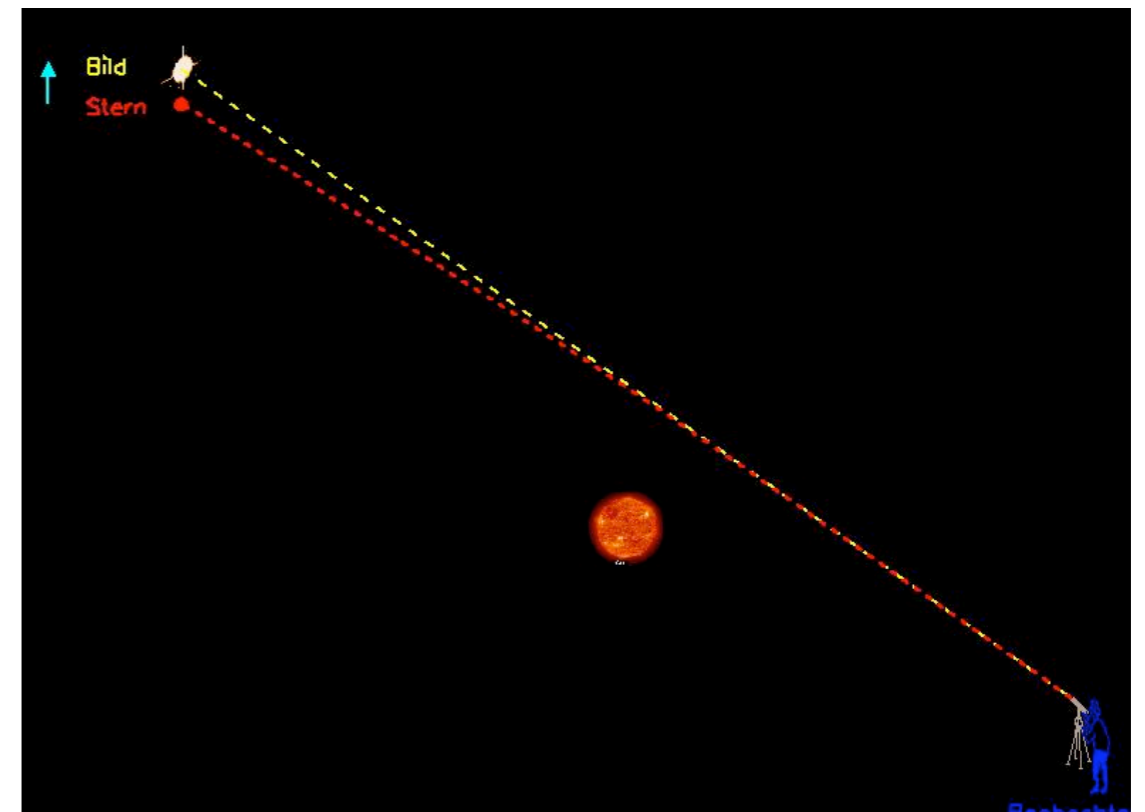
- Zentrale Aussage der ART: Licht wird im Schwerfeld abgelenkt -> ein Lichtstrahl, der im Abstand d an einer sphärisch symmetrischen Masse vorbeiläuft, wird um den Winkel α abgelenkt:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 d}$$

- dies gilt solange $\alpha \ll 1$ (schwache Gravitationsfelder). Mit $M = 1M_{\odot}$ und $R = 1R_{\odot}$, folgt die Lichtablenkung am Sonnenrand:

$$\alpha \approx 1.74''$$

- Diese Lichtablenkung ist während der Sonnenfinsternis in 1919 gemessen worden, durch Verschiebung der scheinbaren Position von Sternen nahe der Sonnenscheibe



Der Gravitationslinseneffekt

- Falls sich zwischen uns und Quelle eine große Massenkonzentration befindet so kann die Quelle an zwei verschiedenen Positionen am Himmel beobachtet werden

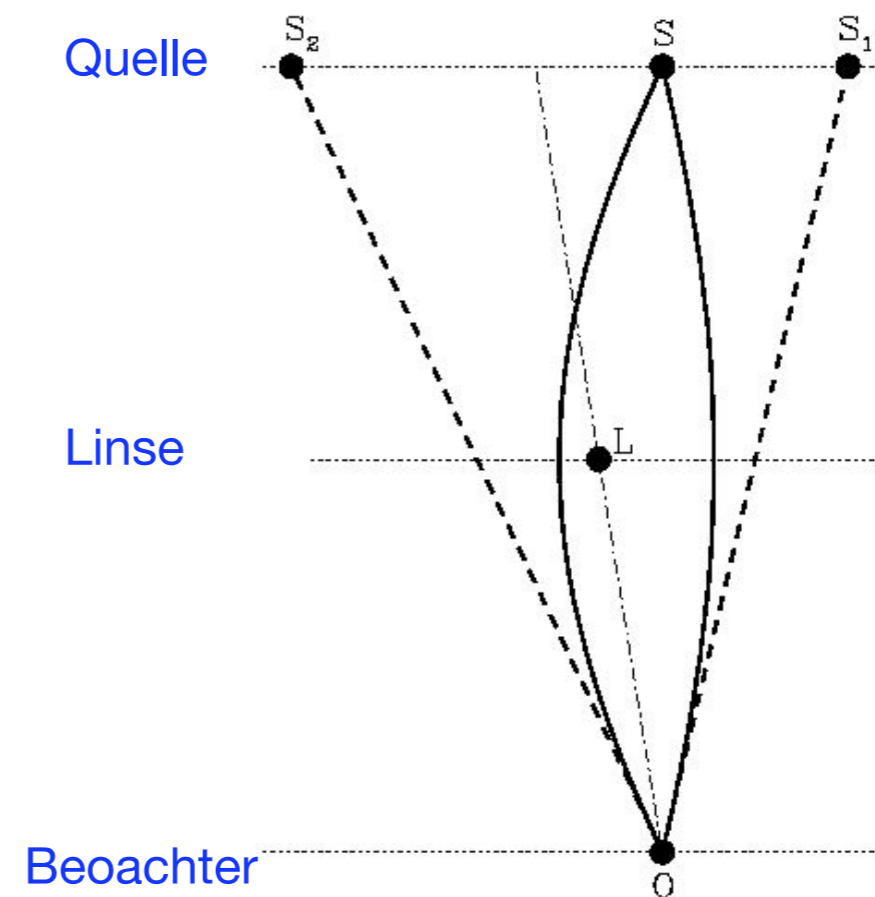
=> **gravitative Lichtablenkung = Gravitationslinseneffekt**

- Kann die Sonne Mehrfachbilder weitentfernter Quellen erzeugen?

- **Nein:** der Ablenkwinkel α_{\odot} ist wesentlich kleiner als der Winkeldurchmesser der Sonne, so dass 2 Lichtstrahlen, die “rechts” und “links” am Sonnenrand vorbeilaufen, durch Lichtablenkung nicht zur Konvergenz gebracht werden können

=> Sonne ist zu nahe, oder zu groß, um Mehrfachbilder zu liefern

- **Jedoch: weit entfernte Sterne können Mehrfachbilder von dahinter liegenden Quellen erzeugen**



Der Gravitationslinseneffekt

- **Linsengeometrie:** betrachte Lichtstrahlen von einer Quelle im Abstand D_s , die im Abstand ξ an einer Massenkonzentration propagieren

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{\eta}}{D_s}$$

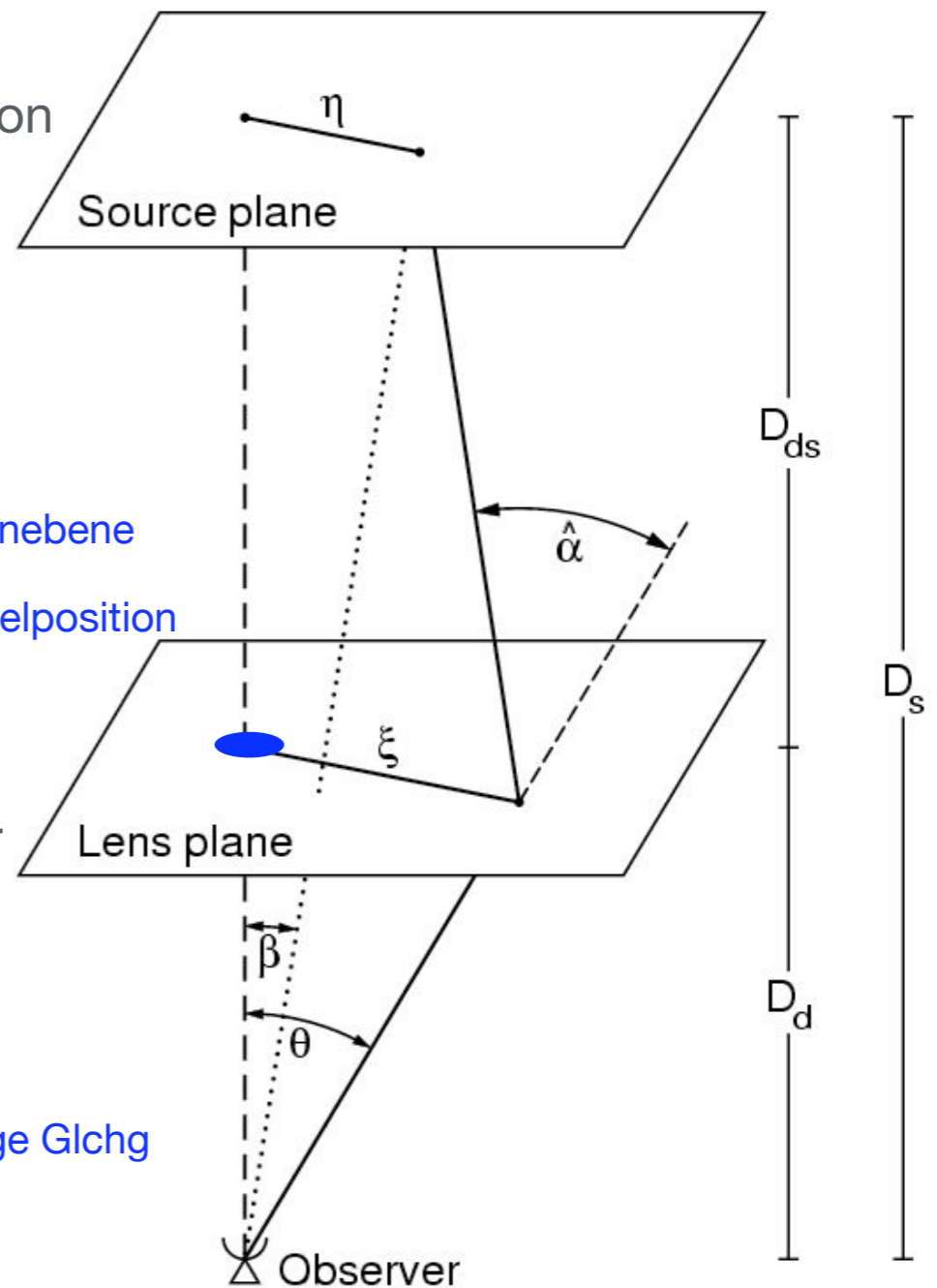
η = wahre, 2d Position der Quelle

β = wahre Winkelposition der Quelle

$$\vec{\theta} = \frac{\vec{\xi}}{D_d}$$

ξ = Position des Lichtstrahls in der Linsenebene

θ = entspr. (und auch beobachtete) Winkelposition



Die Linsengleichung (Bedingung, dass ein Lichtstrahl von der Quelle aus der Richtung $\vec{\theta}$ uns erreicht):

$$\vec{\eta} = \frac{D_s}{D_d} \vec{\xi} - D_{ds} \hat{\alpha}(\vec{\xi})$$

Division durch D_s + obige Glchg

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}(D_d \vec{\theta})$$

Der Gravitationslinseneffekt

Mit dem 'reduzierten' Ablenkwinkel

$$\vec{\alpha}(\vec{\theta}) := \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}(D_d \vec{\theta})$$

ergibt sich die einfache Form für die Linsengleichung:

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta})$$

β =wahre Winkelposition der Quelle

θ = beobachtete Winkelposition

für Punktmasse:

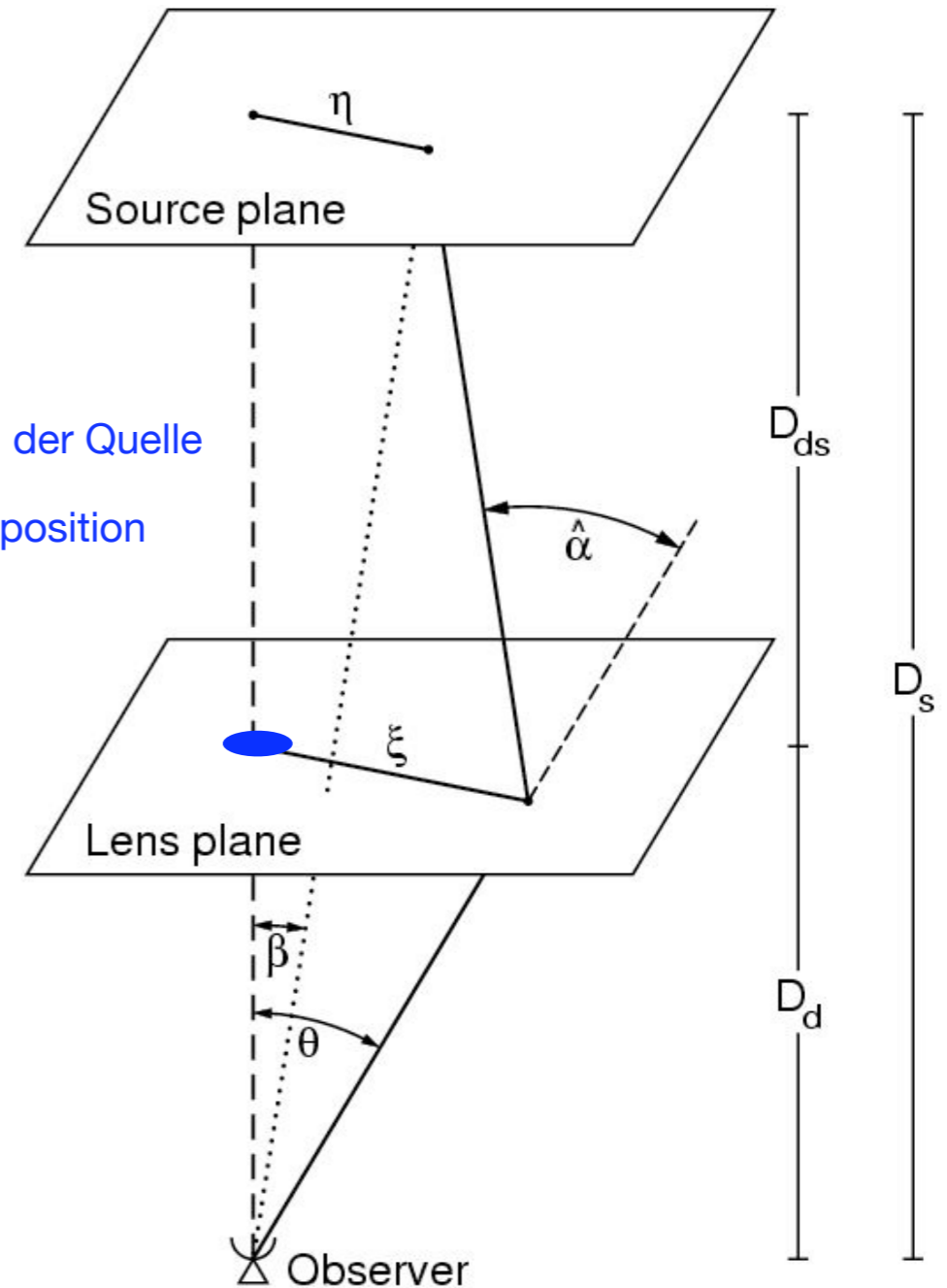
$$|\vec{\alpha}(\vec{\theta})| = \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_s D_d} \frac{\vec{\theta}}{|\vec{\theta}|^2}$$

Einsteinwinkel:

$$\theta_E \equiv \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_s D_d}}$$

Linsengleichung:

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \theta_E^2 \frac{\vec{\theta}}{|\vec{\theta}|^2}$$



Der Gravitationslinseneffekt

Mit der Skalierung: $\vec{y} \equiv \frac{\vec{\beta}}{\theta_E}; \quad \vec{x} \equiv \frac{\vec{\theta}}{\theta_E}$

=> Linsengleichung $\vec{y} = \vec{x} - \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|^2}$

Lösung: $\vec{x} = \frac{1}{2} \left(|\vec{y}| \pm \sqrt{4 + |\vec{y}|^2} \right) \frac{\vec{y}}{|\vec{y}|}$

- die (quadratische) Linsengleichung besitzt für jede Quellposition **2 Lösungen** => jede Quelle wird doppelt abgebildet
- die beiden Bilder sind kollinear mit Linse und Quelle (Beobachter, Linse und Quelle definieren eine Ebene)
- eines der Bilder befindet sich auf der gleichen Seite wie die Quelle, das 2. auf der anderen Seite
- falls $y = 0$, die Quelle sich also genau hinter der Linse befindet => der gesamte Kreis $|\vec{x}|=1$ ist die Lösung der Linsengleichung => die Quelle erscheint als **ringförmiges Bild = Einstein-Ring mit Durchmesser $2\theta_E$** (solche Ringe wurden beobachtet, siehe Vorlesung nächstes Semester)
- der Winkeldurchmesser des Rings ist **$2\theta_E$** ; der Abstand der beiden Bilder beträgt $\approx \Delta x = |x_1 - x_2| \geq 2$ => $\Delta\theta \geq 2\theta_E$: der Einstein-Winkel gibt den charakteristischen Bildabstand an

Der Gravitationslinseneffekt: Verstärkungseffekt

- Lichtstrahlen werden nicht nur als Ganzes abgelenkt, sondern auch differentiell: zB werden Strahlen näher an der Linse stärker abgelenkt
=> **der Raumwinkel, unter dem man die Quelle sieht ändert sich**
- da sich die Flächenhelligkeit (oder spezifische Intensität) nicht ändert, wird der Fluss einer Quelle modifiziert (Fluss einer Quelle = Flächenhelligkeit x Raumwinkel):

Flussänderung ('magnification')

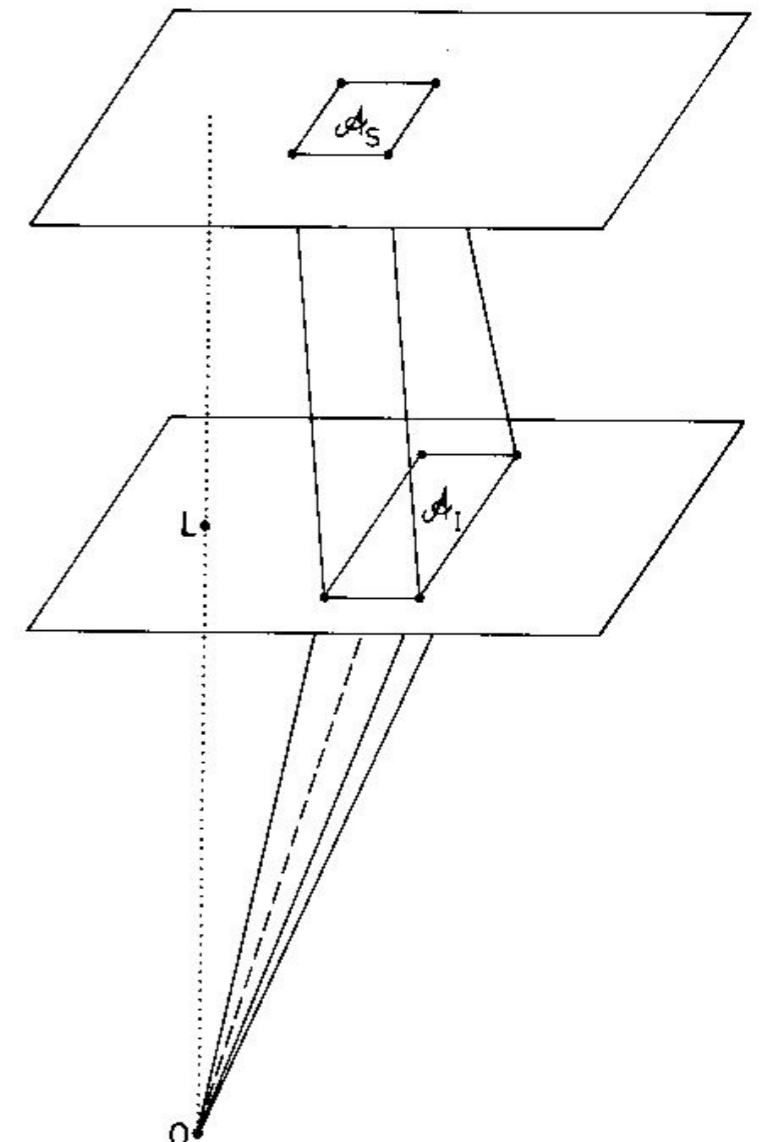
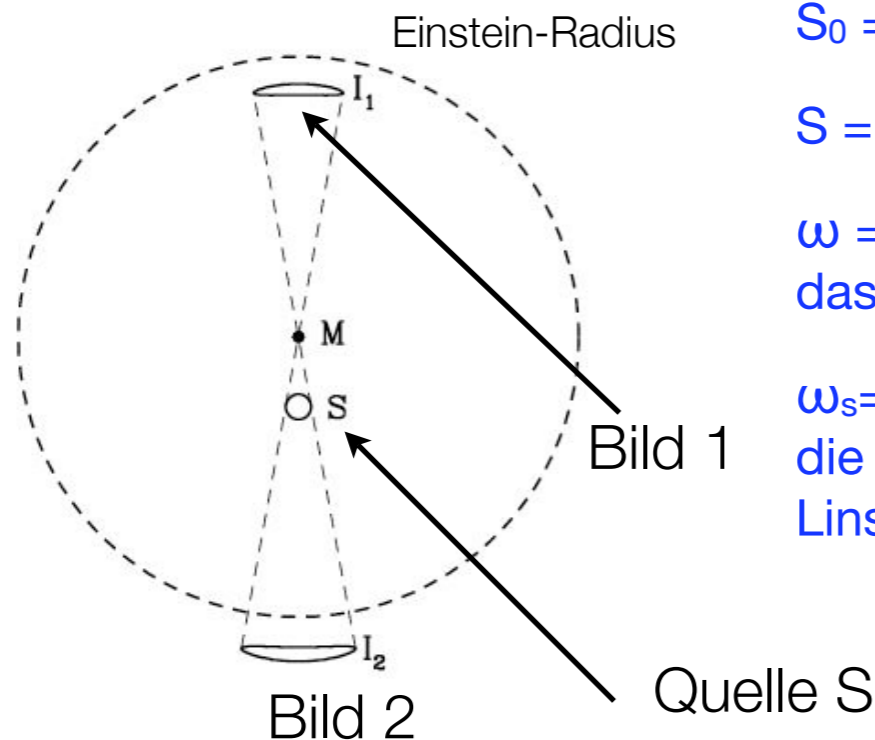
$$\mu = \frac{S}{S_0} = \frac{\omega}{\omega_s}$$

S_0 = Fluss der ungelinsten Quelle

S = Fluss eines Bildes der Quelle

ω = Raumwinkel, unter dem man das Bild der Quelle sieht

ω_s = Raumwinkel, unter dem man die Quelle sehen würde, falls keine Linse vorhanden wäre



Der galaktische Mikrolinseneffekt

- Wir betrachten als Linse ein Stern in unserer Galaxis; der **Einsteinwinkel** ist:

$$\theta_E = 0.902 \text{ mas} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{D_d}{10 \text{ kpc}} \right)^{-1/2} \left(1 - \frac{D_d}{D_s} \right)^{1/2}$$

- der Winkelabstand $\Delta\theta$ der beiden Bilder ist $\approx 2\theta_E \Rightarrow$ typische Winkelabstände in Linsensysteme mit galaktischen Sternen \approx eine Millibogensekunde. Solche Winkelabstände sind mit optischen Teleskopen noch nicht beobachtbar. **Einstein 1936**: Linseneffekt kommt vor, ist aber nicht beobachtbar
- **1986, Paczynski**: die Bildaufspaltung ist zwar nicht beobachtbar, jedoch sollte der Verstärkungseffekt messbar sein. Die absolute Verstärkung ist nur dann beobachtbar, wenn ungelinster Fluss der Quelle bekannt wäre; dies ist unrealistisch!
- Aber: die Verstärkung, und damit der beobachtbare Fluss, ändert sich mit der Zeit, durch Relativbewegung von Quelle, Linse und uns!

\Rightarrow der Fluss ist eine Funktion der Zeit, das Licht der Quelle variiert (scheinbar)

Der galaktische Mikrolinseneffekt

- **Charakteristische Zeitskala der Variation**
- sei v die typische transversale Geschwindigkeit der Linse
- wenn Quelle und Beobachter ruhen ist die Winkelgeschwindigkeit der Linse:

$$\dot{\theta} = \frac{v}{D_d} = 4.22 \text{ mas} \cdot \text{y}^{-1} \left(\frac{v}{200 \text{ km / s}} \right) \left(\frac{D_d}{10 \text{ kpc}} \right)^{-1}$$

- daraus resultiert die charakteristische Zeitskala für die Variabilität:

$$t_E \equiv \frac{\theta_E}{\dot{\theta}} = 0.214 \text{ y} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{D_d}{10 \text{ kpc}} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{D_d}{D_s} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{200 \text{ km / s}} \right)^{-1}$$

=> Zeitskala \approx **1 Monat** für Linsen mit etwa Sonnenmasse und typischen galaktischen Geschwindigkeiten => **im Prinzip meßbar!**

(falls sich Quelle, Linse und Beobachter bewegen, ist v die Relativgeschwindigkeit)

Der galaktische Mikrolinseneffekt: Lichtkurven

- Da Zeitskalen kurz, kann die Relativbewegung als linear betrachtet werden. Die Position der Quelle in der Quellebene ist von der Form:

$$\vec{\beta} = \vec{\beta}_0 + \dot{\vec{\beta}}(t - t_0)$$

- wir benutzen die skalierte Position $y = \beta/\theta_E$ und erhalten für $y = |\vec{y}|$:

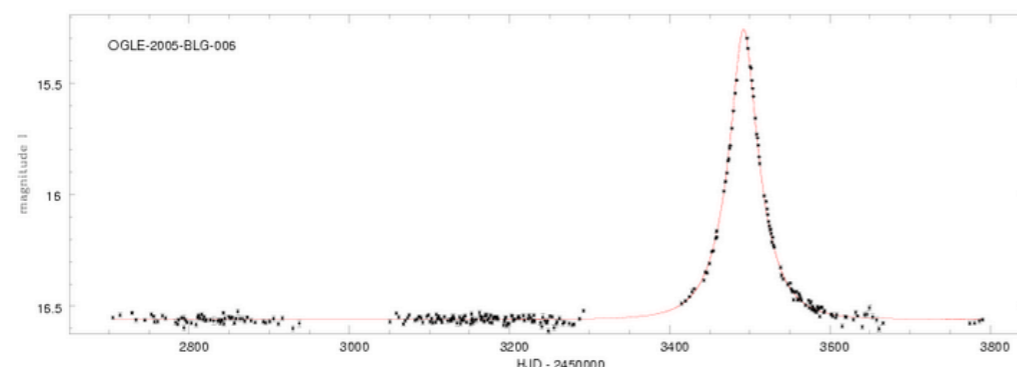
$$y(t) = \sqrt{p^2 + \left(\frac{t - t_{\max}}{t_E}\right)^2}$$

p = minimaler Abstand von optischer Achse

t_{\max} = Zeitpunkt, wo y = minimal, $y = p$, also $\mu = \mu(p) = \mu_{\max}$

- daraus folgt die **Lichtkurve**

$$S(t) = S_0 \mu(y(t)) = S_0 \frac{y^2(t) + 2}{y(t) \sqrt{y^2(t) + 4}}$$



Der galaktische Mikrolinseneffekt: Lichtkurven

- Die Lichtkurven hängen nur von 4 Parametern ab:

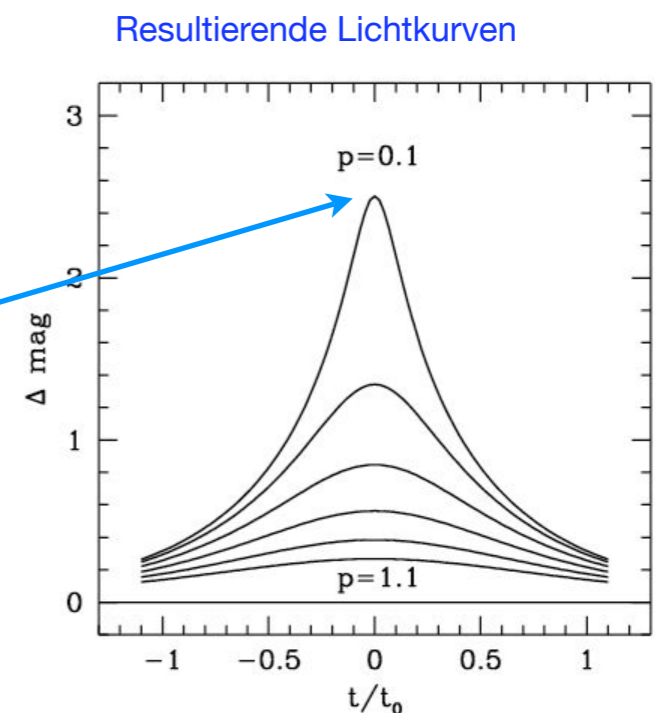
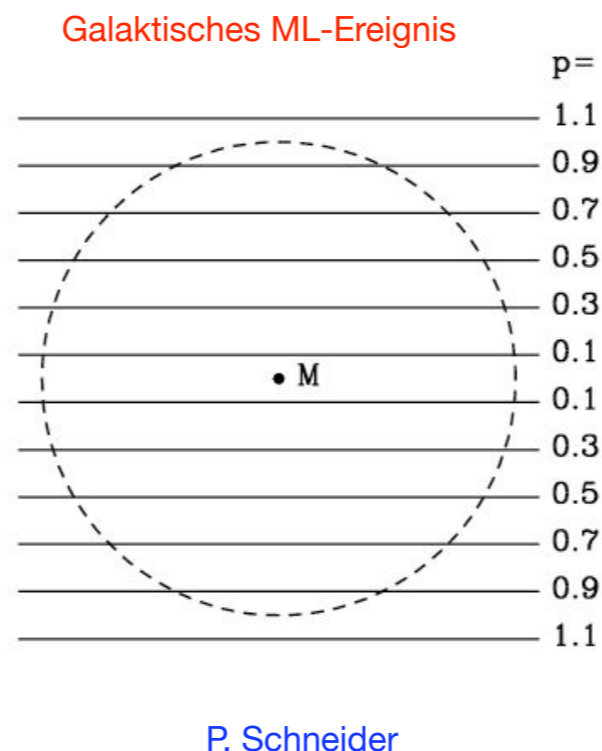
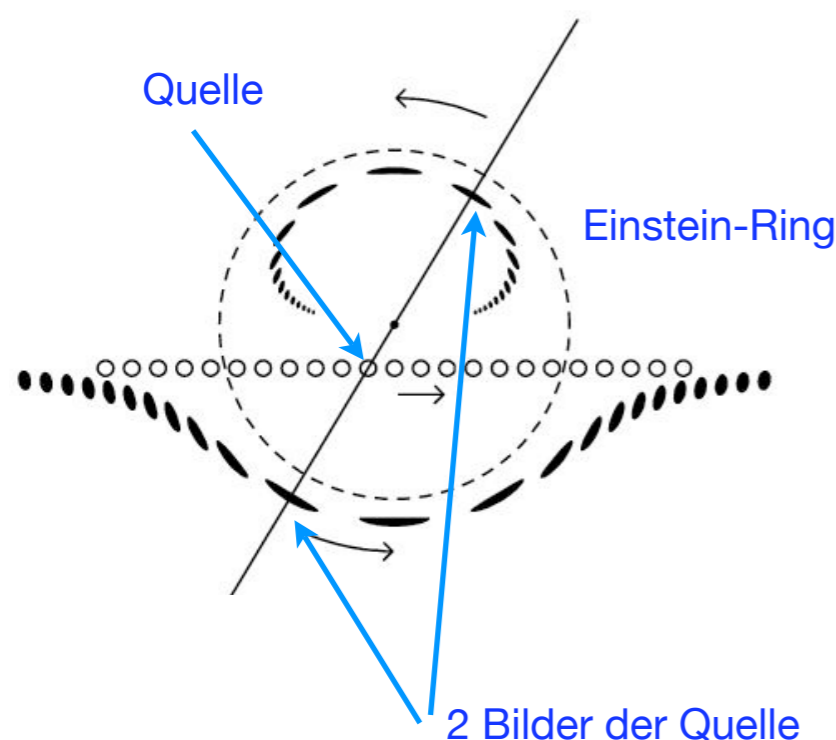
S_0 = Fluss der ungelinsten Quelle

t_{\max} = Zeitpunkt der maximalen Verstärkung

p = kleinster Abstand der Quelle von der optischen Achse

t_E = charakteristische Zeitskala

- Diese Größen sind direkt meßbar: t_{\max} aus der Maximum der Lichtkurve, S_0 ist der Fluss, der sich für große und kleine Zeiter ergibt $S_0 \approx S(t)$ für $|t-t_{\max}| \gg t_E$, p ergibt sich aus dem maximalen Verstärkungsfaktor $\mu_{\max} = S_{\max}/S_0$, und t_E aus der Breite der Lichtkurve



Der galaktische Mikrolinseneffekt: Lichtkurven

- Nur t_E enthält astrophysikalisch relevante Information zur Linsenmasse, Linsenabstand und transversale Geschwindigkeit:

$$t_E \propto \sqrt{\frac{MD_d}{v^2}}$$

- jedoch ist nur diese **Kombination aus der Lichtkurven messbar**, und nicht Masse, Abstand und Geschwindigkeit einzeln
- Idee von Paczynski:** wenn Halo unserer Milchstraße zum Teil aus kompakten Objekten bestünde, so sollte eine entfernte kompakte Quelle von Zeit zu Zeit durch eines dieser MACHOs gelinst werden und somit charakteristische Flußveränderungen zeigen. **Die Anzahldichte der MACHOs ist proportional zur Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit der Linsenereignisse, die charakteristische Masse der MACHOs proportional zum Quadrat der typischen Variationszeitskala t_E**



Carroll & Ostlie

Wahrscheinlichkeit eines Linsenerignisses

- Für gegebenes Halomodell => Dichteverteilung und Geschwindigkeitsverteilung der MACHOs => statistischer Vergleich mit Beobachtungen => ein "sample" von Linsenerignissen wird benötigt!
- System von Vordergrund-Objekt und Hintergrund-Quelle wird als Linsensystem betrachtet, wenn $p < 1$, dh wenn relative Trajektorie von Quelle durch Einsteinkreis der Linse läuft
- Annahme: dunkler Halo besteht vollständig aus MACHOs => die Wahrscheinlichkeit, eine weitentfernte Quelle gelinst zu sehen ist $\approx 10^{-7}$ (hängt von Sehrichtung ab), dh zu jedem Zeitpunkt wäre eine von 10^7 weit entfernten Quellen innerhalb des Einstein-Radius eines MACHOs in unserem Halo

=> damit der Effekt nachgewiesen werden kann, müssen Lichtkurven von **Millionen von Quellen** beobachtet werden! Als Quelle zB Sterne der LMC oder der SMC.

- **Probleme:**

Photometrie so vieler Quellen => riesige Datenmengen

Photometrie der einzelnen Sterne ist schwierig (Sterne der LMC/SMC dicht am Himmel)

Quellen besitzen instrinsische Variabilität: wie kann man diese vom Mikrolinseneffekt unterscheiden?

Wie kann man sicher sein, dass man tatsächlich für Mikrolinseneffekte empfindlich ist?

Wahrscheinlichkeit eines Linsenerignisses

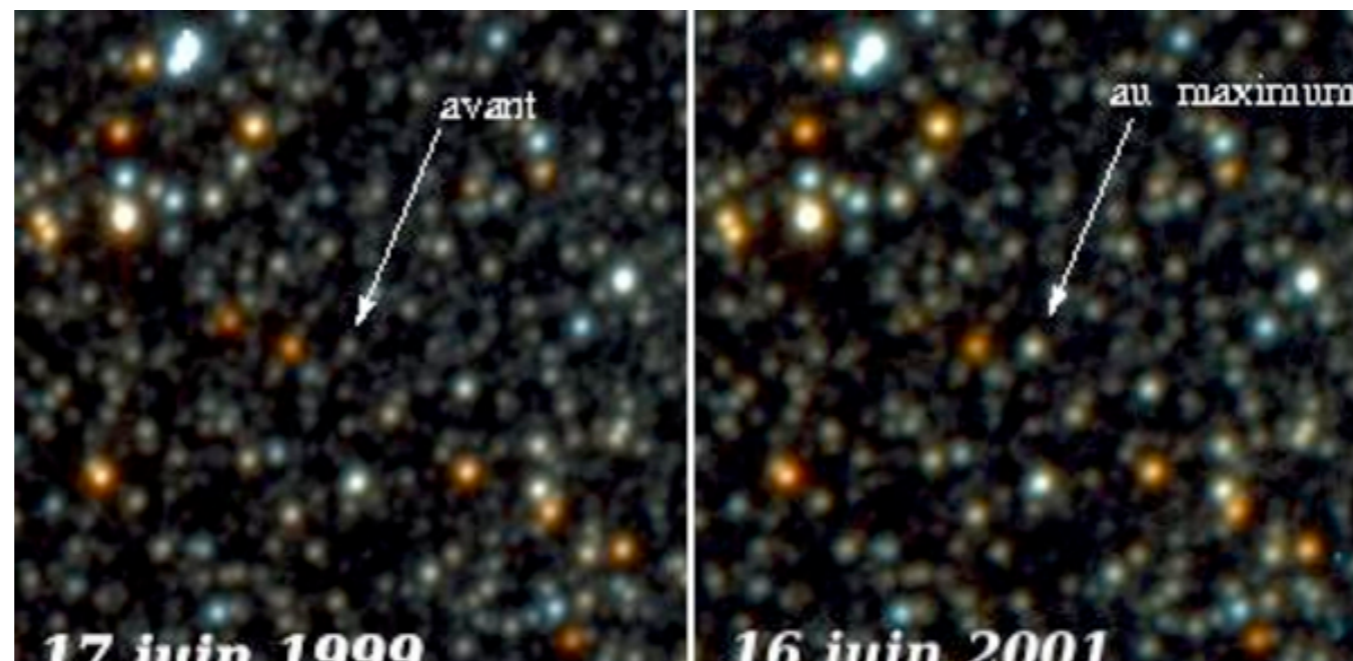
- **Antworten:**

1986: die Datenmenge war noch ein Problem, wenige Jahre später handhabbar; Entwicklung von Weitwinkelkameras, mit Hilfe derer große Felder am Himmel simultan beobachtet werden

Entwicklung von Software, die auf Photometrie von Objekten in dichten Gebieten spezialisiert ist => man kann Lichtkurven vermessen, auch wenn individuelle Sterne nicht klar auf den Aufnahmen getrennt sind

Mikrolinsen-Kurven haben charakteristische Form, und sind nur durch 4 Parameter beschrieben. Die Lichtkurve sollte symmetrisch und achromatisch sein (Lichtablenkung unabhängig von der Frequenz). Wegen der sehr kleinen Wahrscheinlichkeit sollte die Quelle eines Mikrolinsenereignisses nur einmal variieren, danach konstanter Fluss (die intrinsische Variation von Sternen ist oft periodisch und meistens chromatisch).

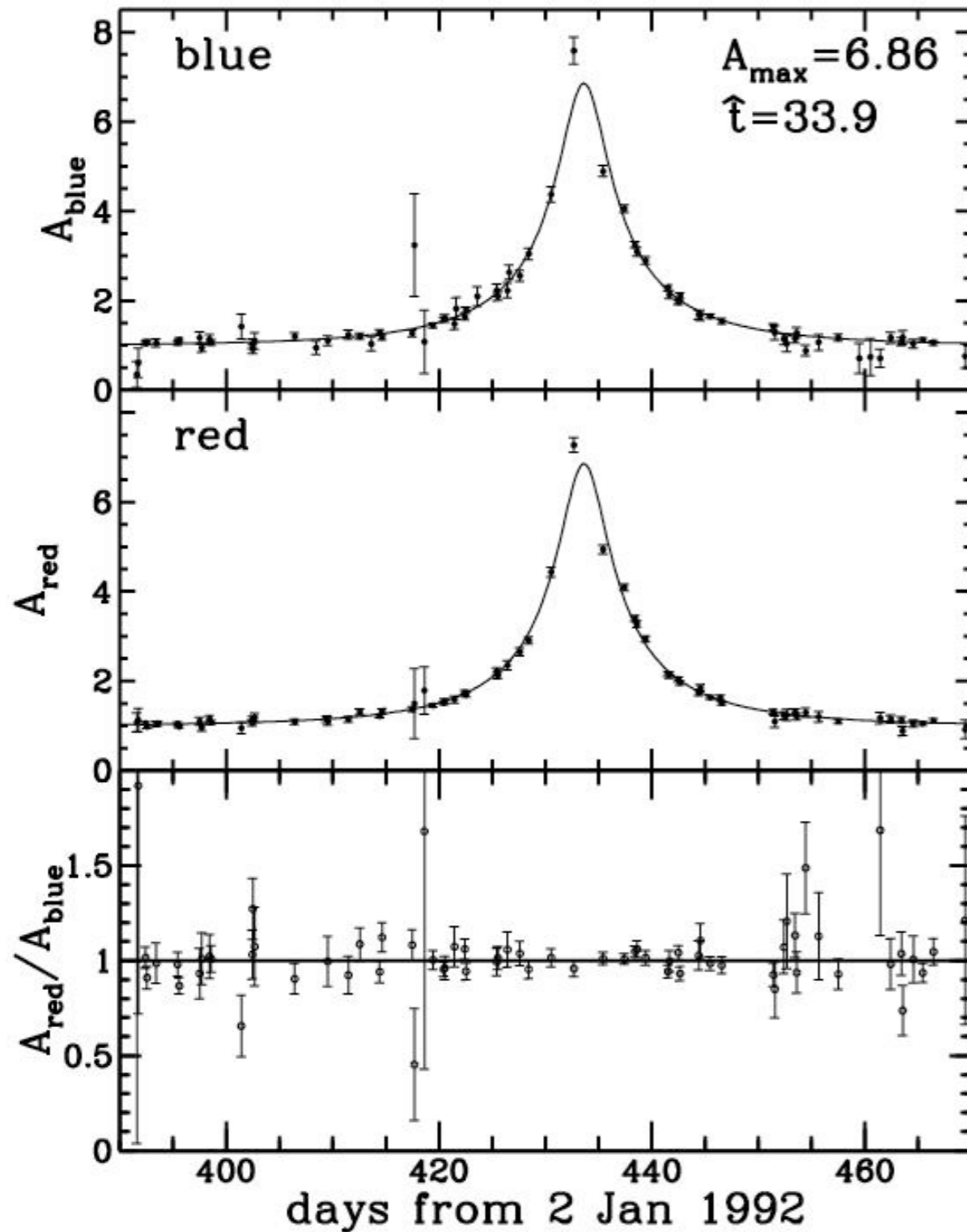
Linsenwahrscheinlichkeit in Richtung des galaktischen Bulge ist bekannt (gegeben durch Sterne in der Scheibe). Kontrolllexperiment: Mikrolinsensuche in dieser Richtung soll Ereignisse liefern (da höhere Wahrscheinlichkeit)



Der galaktische Mikrolinseneffekt: Ergebnisse

- Anfang der 90er Jahre: 2 Kollaborationen (MACHO und EROS) begannen mit der Suche nach Mikrolinsen-Ereignissen in Richtung der Magellanschen Wolken, eine Kollaboration (OGLE) in Richtung der Galaktischen Bulge
- 1993: erste Ereignisse! MACHO-Gruppe: 1 Ereignis im LMC; EROS-Gruppe: 2 Ereignisse im LMC; OGLE: 1 Ereignis im Bulge
- Inzwischen: weitere Gruppen suchen nach Mikrolinsenergebnissen, in verschiedene Richtungen
- **Wichtigsten Ergebnisse:**
 - ≈ 20 Ereignisse in Richtung LMC/SMC; hunderte Ereignisse in Richtung Bulge
 - Linsenwahrscheinlichkeit in Richtung Bulge ist größer als erwartet: dadurch zu erklären, dass unsere Galaxie einen Balken aufweist (auch im IR mit COBE nachgewiesen)
 - Linsenwahrscheinlichkeit in Richtung der LMC/SMC ist kleiner als erwartet, wenn Halo vollständig aus MACHOs bestehen würde
 - bester Fit der Linsenwahrscheinlichkeit in Richtung LMC/SMC ergibt sich, wenn etwa 20% der Halomasse in MACHOs wäre, mit einer charakteristischen Masse von $M \approx 0.5M_{\odot}$

Beispiel für eine Lichtkurve



Lichtkurve des ersten ML-
Ereignisses in der LMC in 2 Filtern

Bester Fit (durchgezogene Kurven):

$$\mu_{\text{max}} = 6.86$$

SMC/LMC



Interpretation der Ergebnisse

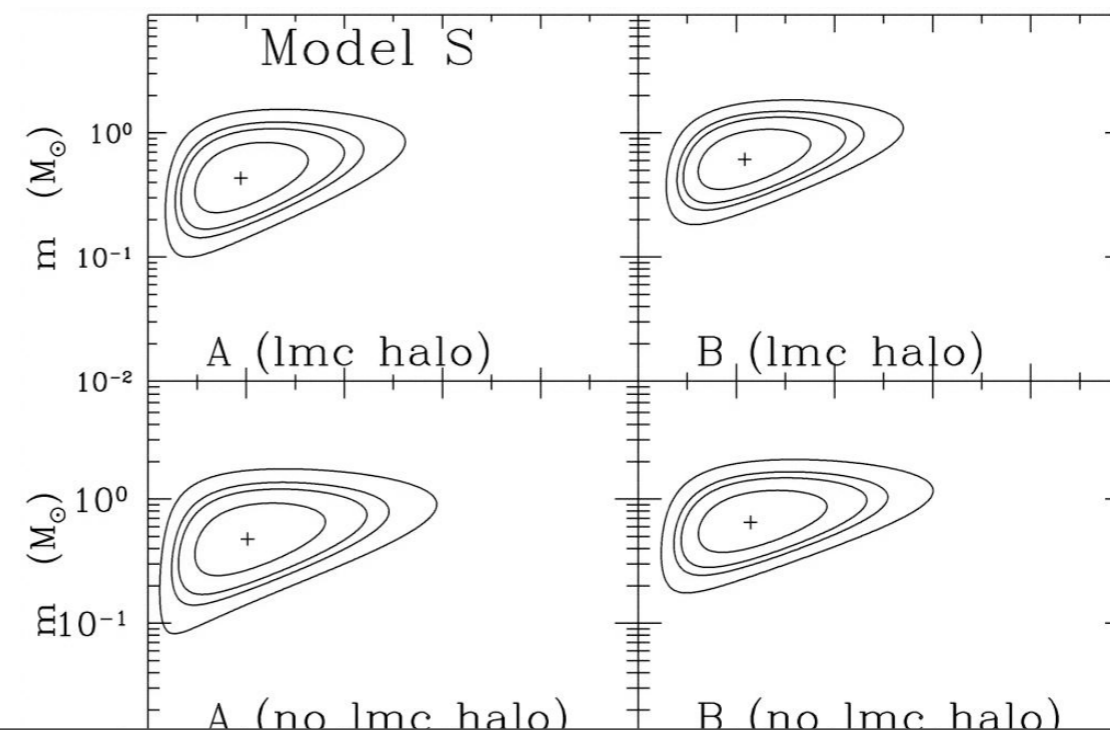
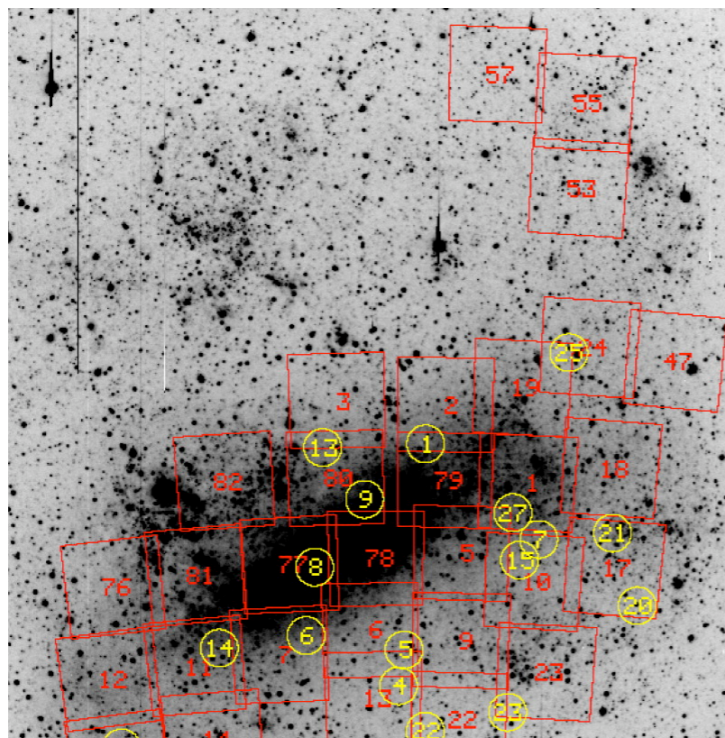
- Was bedeutet 20% der dunklen Materie in MACHOs, und was könnten MACHOs mit $M \approx 0.5M_{\odot}$ sein?

Normale Sterne? Hätte man schon beobachtet, da viel zu leuchtkräftig.

Weißer Zwerge? WD entstehen am Lebensende nicht allzu massiver Sterne, das Hüllenmaterial wird in das ISM abgestoßen (planetarische Nebel) => das ISM wird mit Metalle angereichert, und die Anreicherung wäre viel größer als die beobachtet

Neutronensterne? Zu massiv ($M > 1 M_{\odot}$) und entstehen bei SN-Explosionen => Metallizitätsproblem

Schwarze Löcher? Falls in SN entstanden => Metallizitätsproblem; eine Möglichkeit sind primordiale Schwarze Löcher, die in einer frühen Phase des Universums entstanden sind



Interpretation der Ergebnisse

- Es existieren Mikrolinsenereignisse, bei denen mehr als t_E gemessen werden kann, zB Ereignisse bei denen ein Doppelstern als Linse fungiert $\Rightarrow \approx$ Abstand der Linse
- 3 solche Ereignisse sind in Richtung der Magellanschen Wolken bekannt, in allen 3 Fällen sehr wahrscheinlich, dass sich Linse in den Magellanschen Wolken befindet (self-lensing) und nicht im Halo der Milchstraße

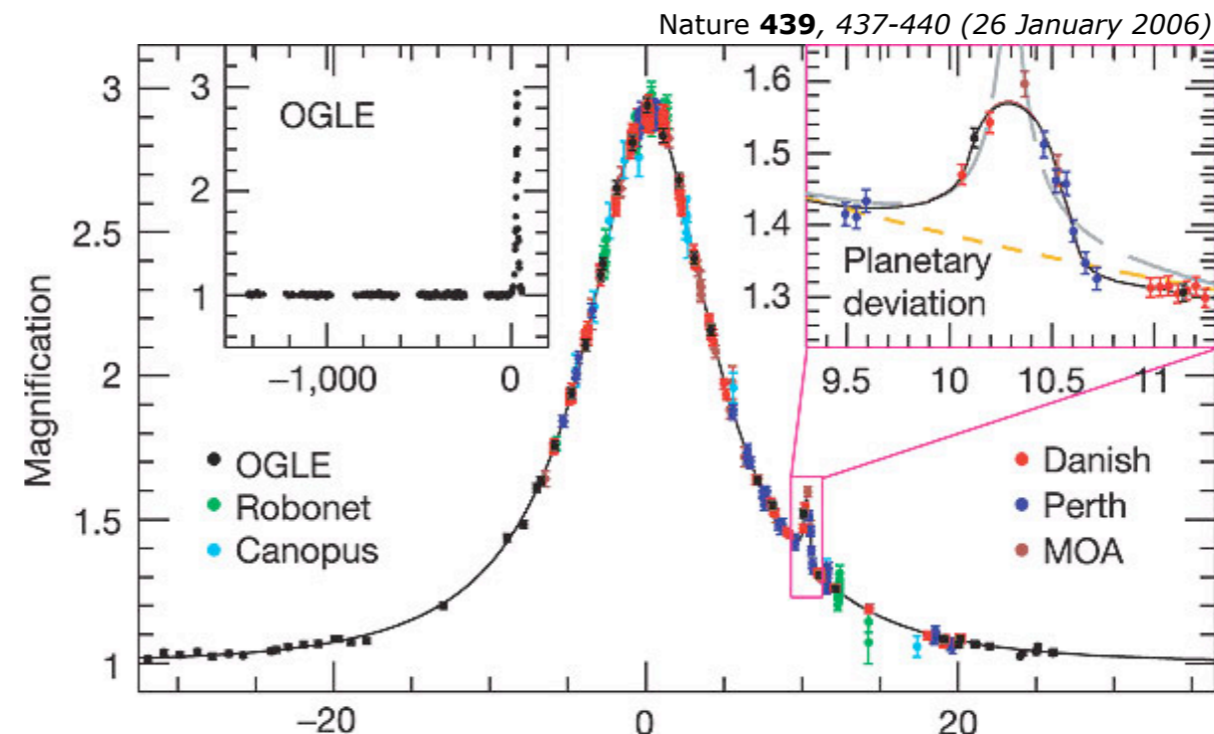
- **Unklar, wie viele der Ereignisse von self-lensing stammen!**

- **Andere Ergebnisse:**

Sternverteilung innerhalb der Galaxis

Entdeckung und Vermessung vieler (mehrere 1000) variabler Sterne

Suche nach Exoplaneten!



Nicht-baryonische Dunkle Materie

- **Kandidaten aus der Teilchenphysik:**

- neue Elementarteilchen, die im frühen Universum produziert worden sind, sehr langlebig ($\tau \gg t_U$) oder stabil

- Beispiele:

- **Neutrinos:** existieren, jedoch ist die Masse viel zu klein, und es entstehen Probleme bei der Strukturbildung ('hot dark matter', relativistisch zur Zeit der Entkopplung)

- **Axionen:** $m \approx 10^{-5}$ eV

- **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particles): $M \approx 10$ GeV - einige TeV

diese Teilchen sind Beispiele für Cold Dark Matter (CDM) -> Teilchen, die zur Zeit der Entkopplung nicht-relativistisch waren

WIMP-Kandidaten: aus der Supersymmetrie (Neutralinos); aus Theorien mit extra Dimensionen (leichteste Kaluza-Klein Teilchen), etc

Suche nach WIMP mit direkten, indirekten und mit Beschleuniger-Experimenten

- mehr nächstes Semester!

Cold Dark Matter Simulationen von galaktischen Halos



$$M_{halo} = 1.8 \times 10^{12} M_{\odot}$$

www.ucolick.org/~diemand

800 kpc

Verteilung der dunklen Materie

- **NFW - Profil (Navaro, Frenk, White, 1996)**, durch numerische Simulationen der Bildung von dunkle Materie Halos:

$$\rho_{NFW}(\mathbf{r}) = \frac{\rho_0}{(\mathbf{r} / \mathbf{a})(1 + \mathbf{r} / \mathbf{a})^2}$$

- das NFW Dichte-Profil verhält sich wie $\sim r^{-2}$ über ein Großteil des Halos, ist aber flacher $\sim r^{-1}$ in der Nähe des Zentrums und fällt am Rande des Halos steiler ab $\sim r^{-3}$.

- **Allgemeiner:**

$$\rho(\mathbf{r}) = \rho_0 \left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{a}} \right)^{\gamma-1} \left[1 + \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{a}} \alpha \right]^{(\gamma-\beta)/\alpha}$$

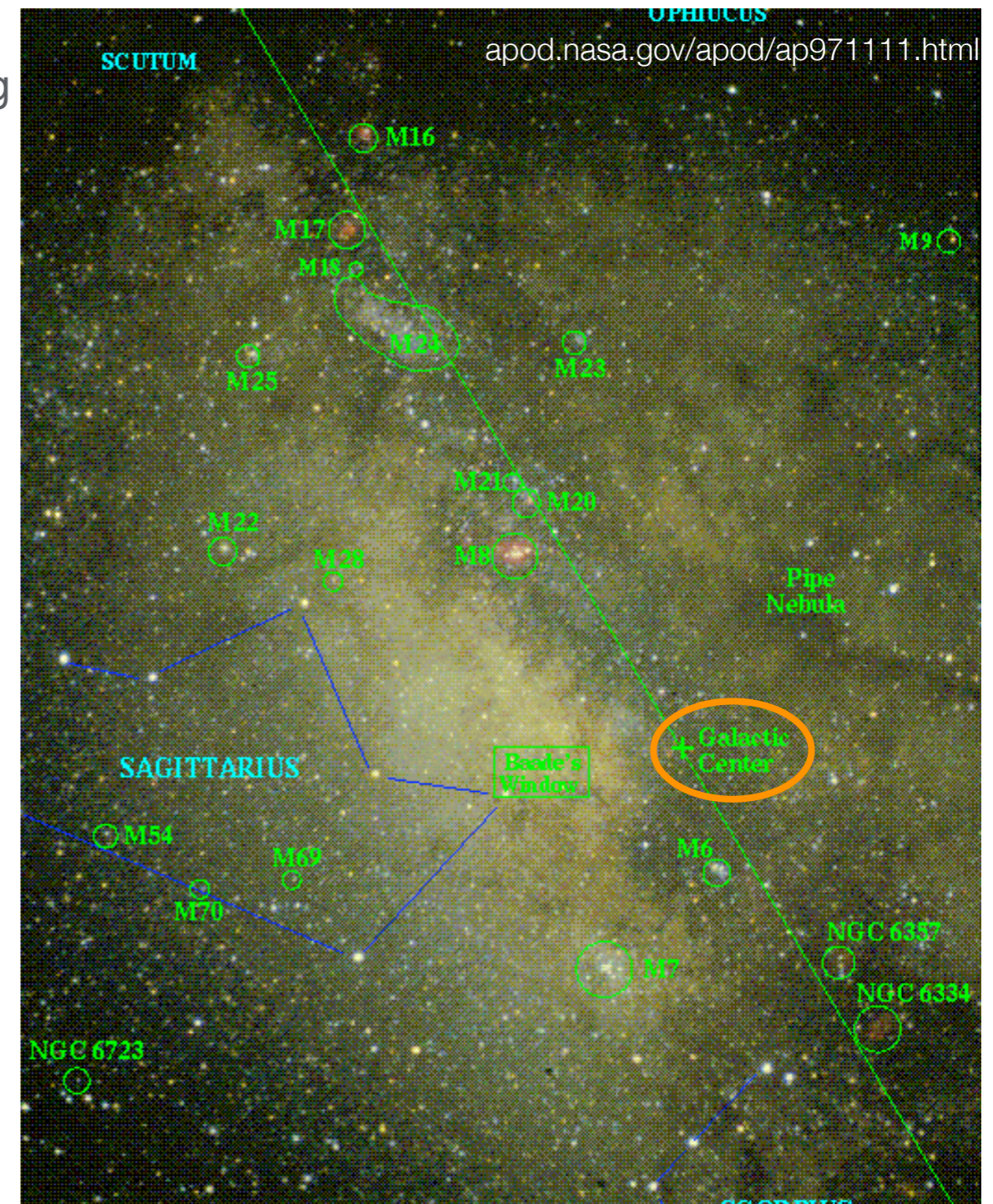
	α	β	γ	$a(\text{kpc})$
Kravtsov	2.0	3.0	0.4	10.0
NFW	1.0	3.0	1.0	20.0
Moore	1.5	3.0	1.5	28.0
Isother.	2.0	2.0	0	3.5

verschiedene Gruppen erhalten unterschiedliche Profile für den inneren Teil der Galaxis (aus MC Simulationen)

Das Galaktische Zentrum

- Beobachtung des Galaktischen Zentrums sehr schwierig: > 30 mag Extinktion im V-Bereich durch Gas + Staub in der galaktischen Ebene
- Information über das GC: Radio, IR, X-ray, γ -Strahlung
- Im optischen: mehr Durchblick in Baade's Fenster, $\approx 3^\circ$ vom Zentrum entfernt, relevant für den Bulge
- **Molekülwolken:** größte Konzentration in der gesamten Galaxis, einige $10^7 M_\odot$ in ≈ 300 pc
- **Zentraler Sternhaufen:** innerster Teil des Bulge, Population I K- und M-Riesen mit Dichteverteilung $\rho(r) \propto r^{-1.8}$ bis $\approx 0.1 - 1$ pc; im Innenbereich so dicht, dass WW zwischen den Sternen möglich sind
- **“Lobes” ionisierten Gases,** einige 100 pc senkrecht zur Scheibe \rightarrow Zusammenhang mit zentraler Aktivität und Magnetfeldern?

GC Übersicht im optischen Bereich



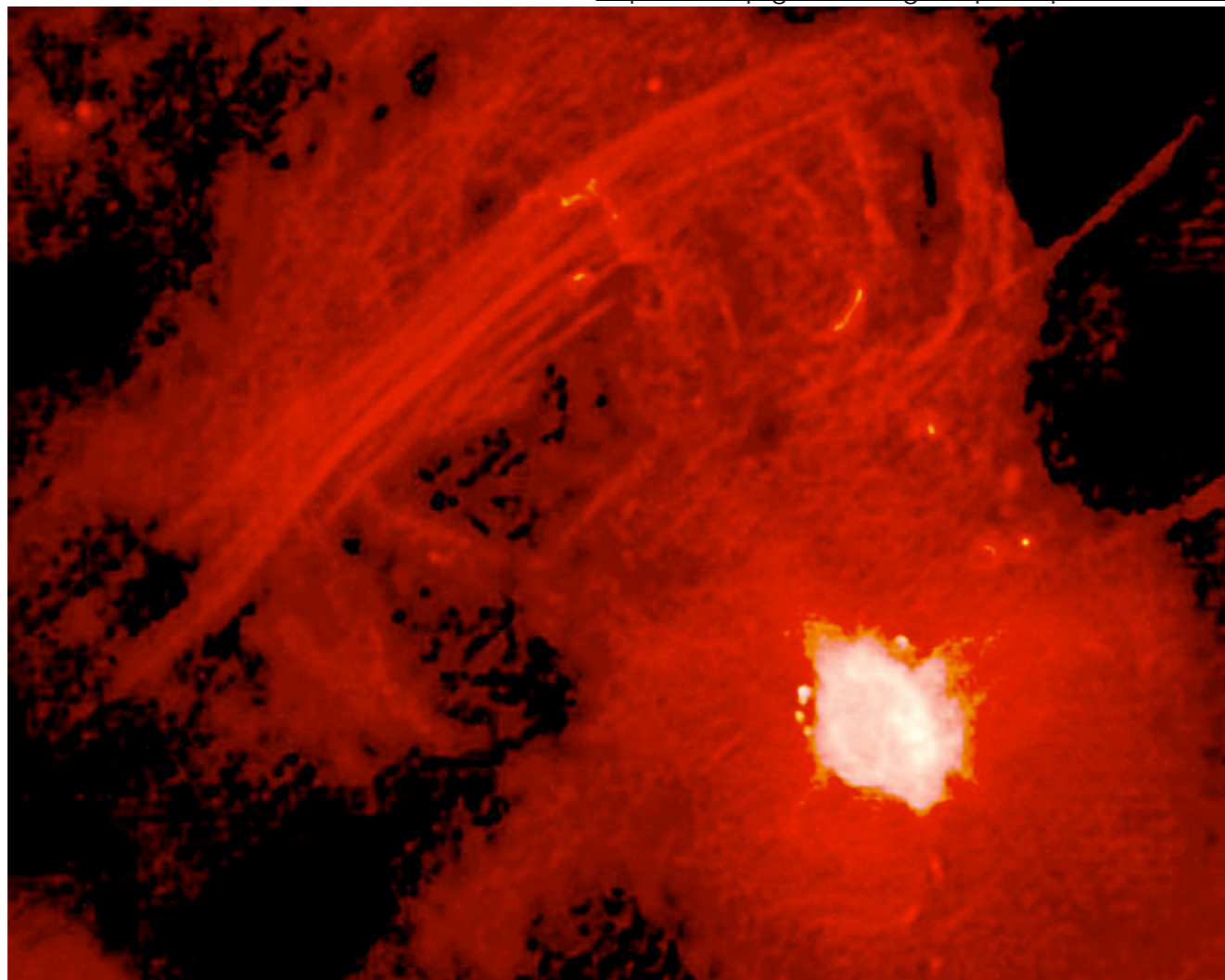
Das Galaktische Zentrum

- **Wo ist das Galaktische Zentrum?**
- Radiobeobachtungen in Richtung GC zeigen komplexe Struktur:

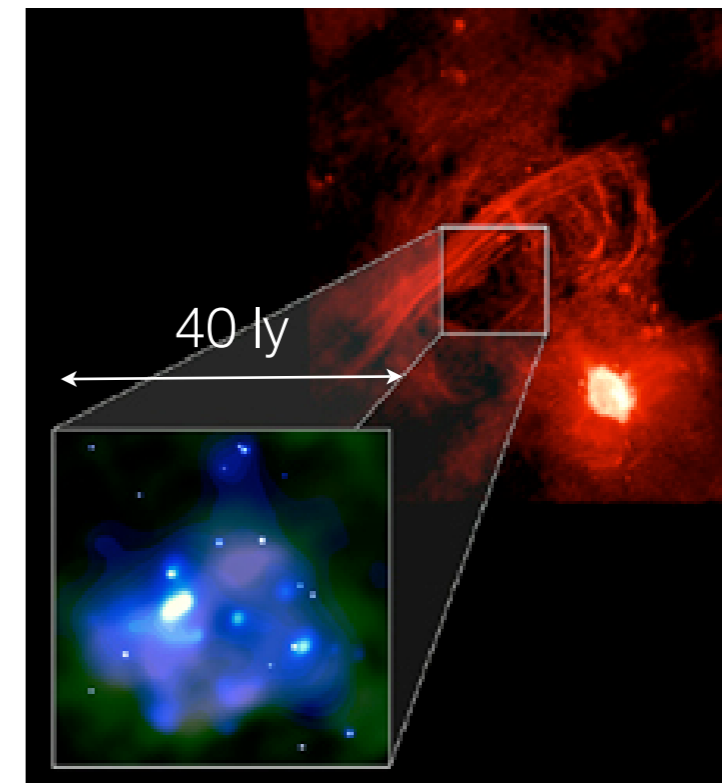
HI Gas-Scheibe zwischen einigen 100 pc bis $R \sim 1$ kpc \rightarrow die Rotationsgeschwindigkeit erlaubt Massenbestimmung $M(R)$ für $R \geq 100$ pc

Radio-Filamente, senkrecht zur Galaktischen Scheibe

<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020521.html>



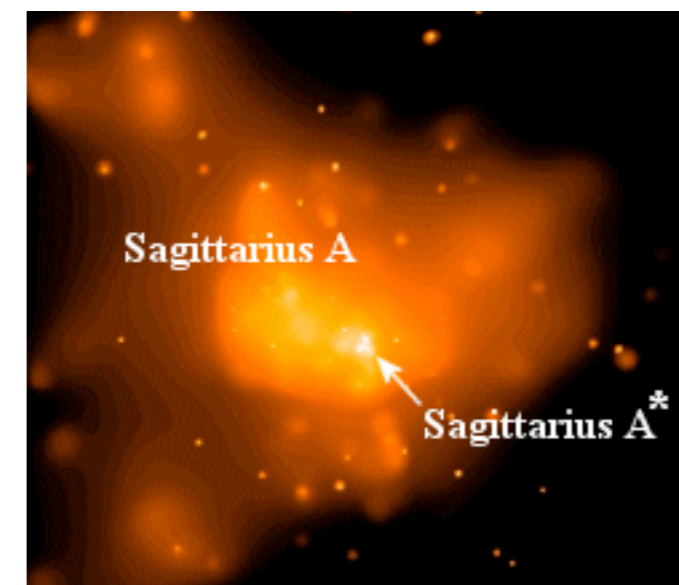
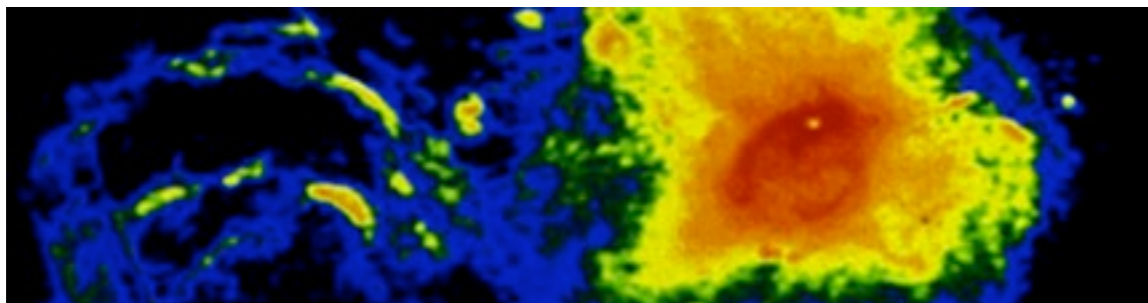
chandra.harvard.edu/



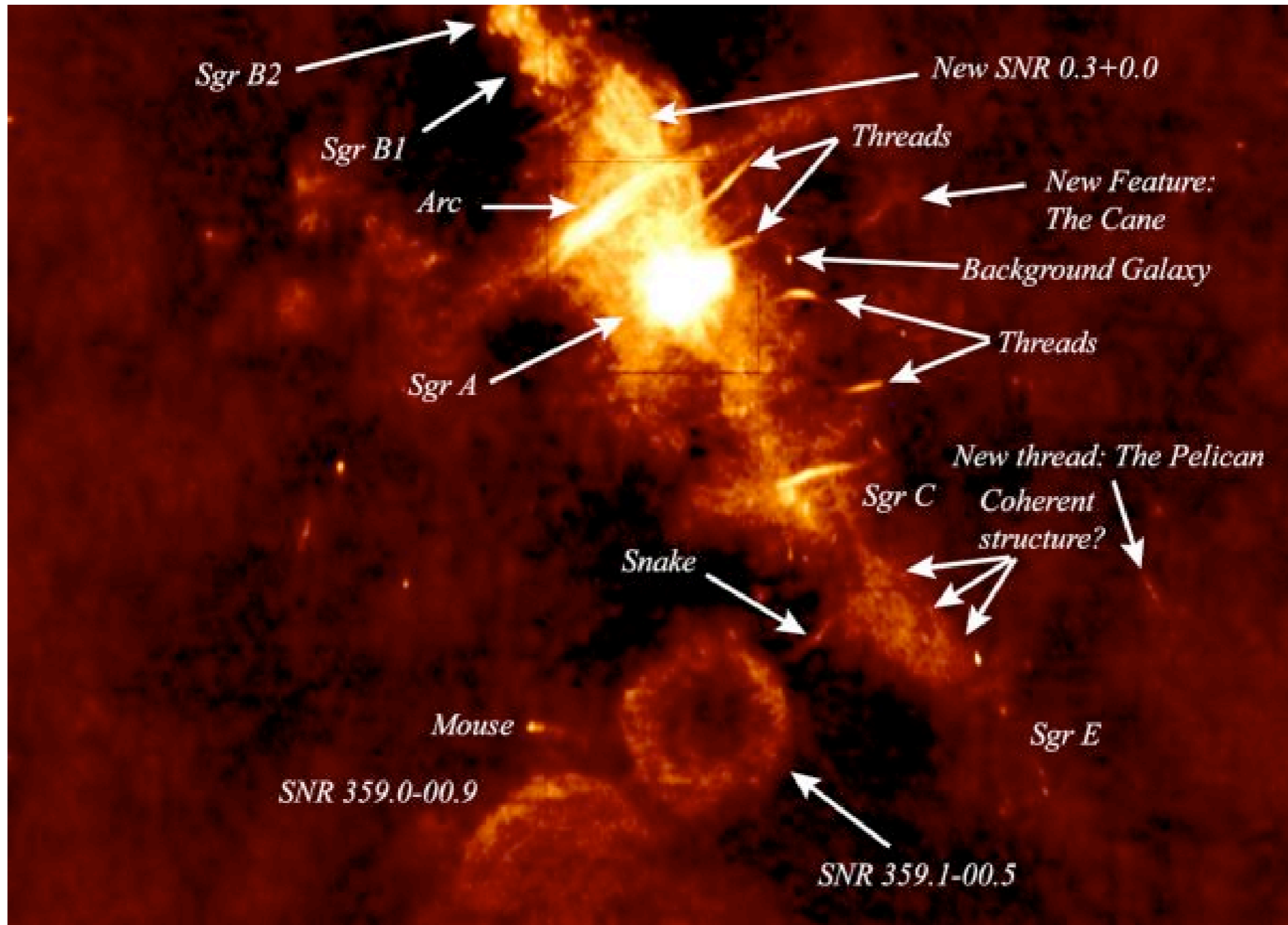
Röntgenemission: energiereiche e^- aus den Radiofilamenten kollidieren mit der kalten Gaswolke (Dunkelwolke)

Das Galaktische Zentrum: die inneren 8 pc

- Die inneren 8 pc enthalten die **Radioquelle Sgr A** (Sagittarius A) bestehend aus:
- **molekularer Ring** -> Torus zwischen $2 \leq R \leq 8$ pc, etwa 20° relativ zur Galaktischen Scheibe geneigt; Rotationsgeschwindigkeit des Rings ~ 110 km/s, unabhängig von R
- **Sgr A East**: nicht-thermische (Synchrotron) Quelle mit schalen-artiger Struktur, vermutlich SN Überrest (SNR) zwischen 100 und 5000 Jahre alt
- **Sgr A West**, 1.5' von Sgr A East entfernt: thermische Quelle, ungewöhnliche HII-Region mit spiral-artiger Struktur
- **Sgr A***: starke, kompakte Radioquelle nahe des Zentrum von Sgr A West; das VLBI zeigt, dass die Ausdehnung kleiner als 3 AU ($\sim 10^{-4}$ pc) ist, und die Radioleuchtkraft: $L_{\text{radio}} \approx 2 \times 10^{34}$ erg/s
- Da andere Galaxien oft eine kompakte Radioquelle in ihrem Zentrum haben, ist Sgr A* ein guter Kandidat für das Galaktische Zentrum

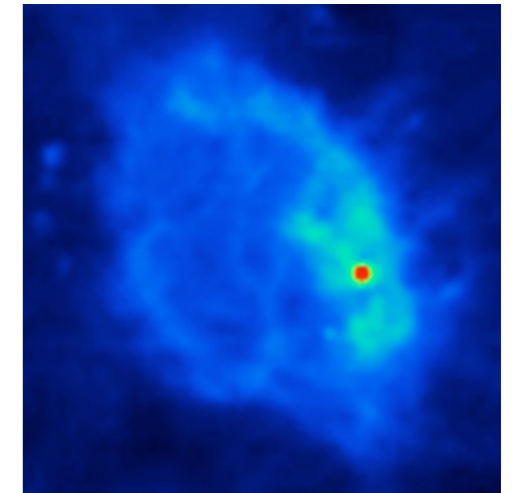


Das Galaktische Zentrum: die inneren 8 pc

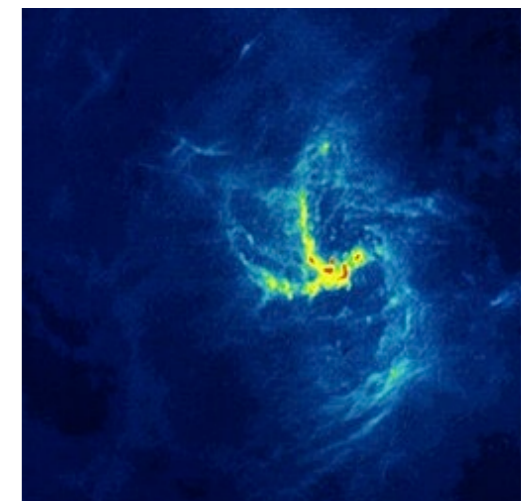


VLA-Großfeldaufnahme der Region um das GC

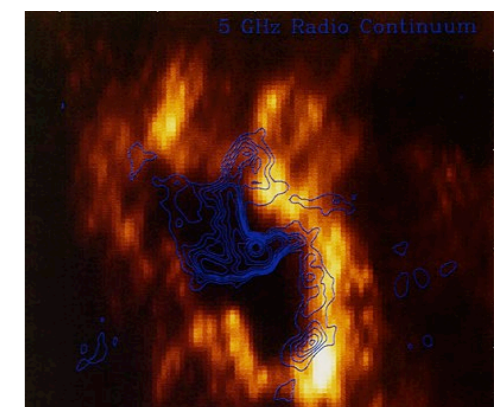
Sgr A east



Sgr A West



Molekülring in HCN-Emission



Der zentrale Sternhaufen

- Beobachtungen bei $\lambda \approx 2 \mu\text{m}$ zeigen **kompakten Sternhaufen**, zentriert auf Sgr A*; die Dichte $\rho(r) \propto r^{-1.8}$ für $0.1 \leq r \leq 1 \text{ pc}$ \Rightarrow nahe Begegnungen nicht selten, etwa alle $\sim 10^6$ Jahre für einen Stern
- es wird also erwartet, dass die Verteilung der Sterne 'thermalisiert' ist \Rightarrow 'isotherme' Verteilung mit $n \sim r^{-2}$, in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen
- Aber: isotherme Verteilung impliziert konstante (radiale) Geschwindigkeitsdispersion σ der Sterne. Dagegen wird eine starke radiale Abhängigkeit von σ gemessen:

$$\sigma \sim 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{bei } r=5\text{pc}$$

$$\sigma \sim 180 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{bei } r=0.15\text{pc}$$

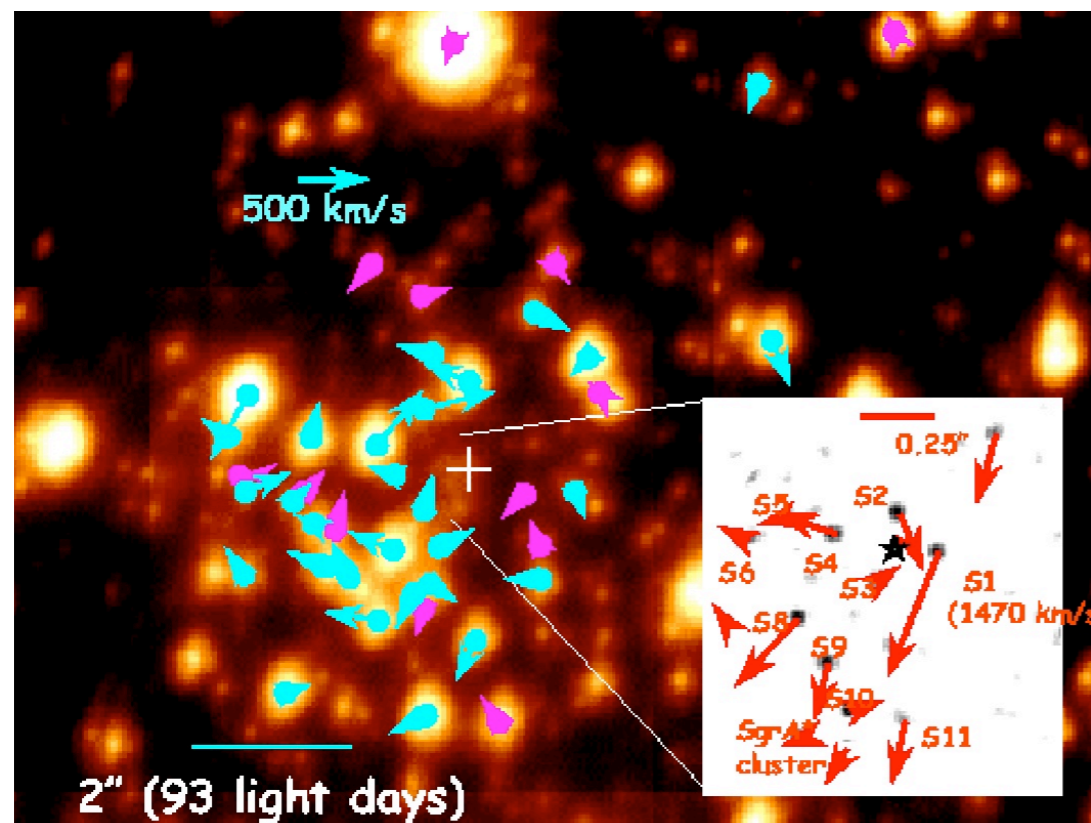
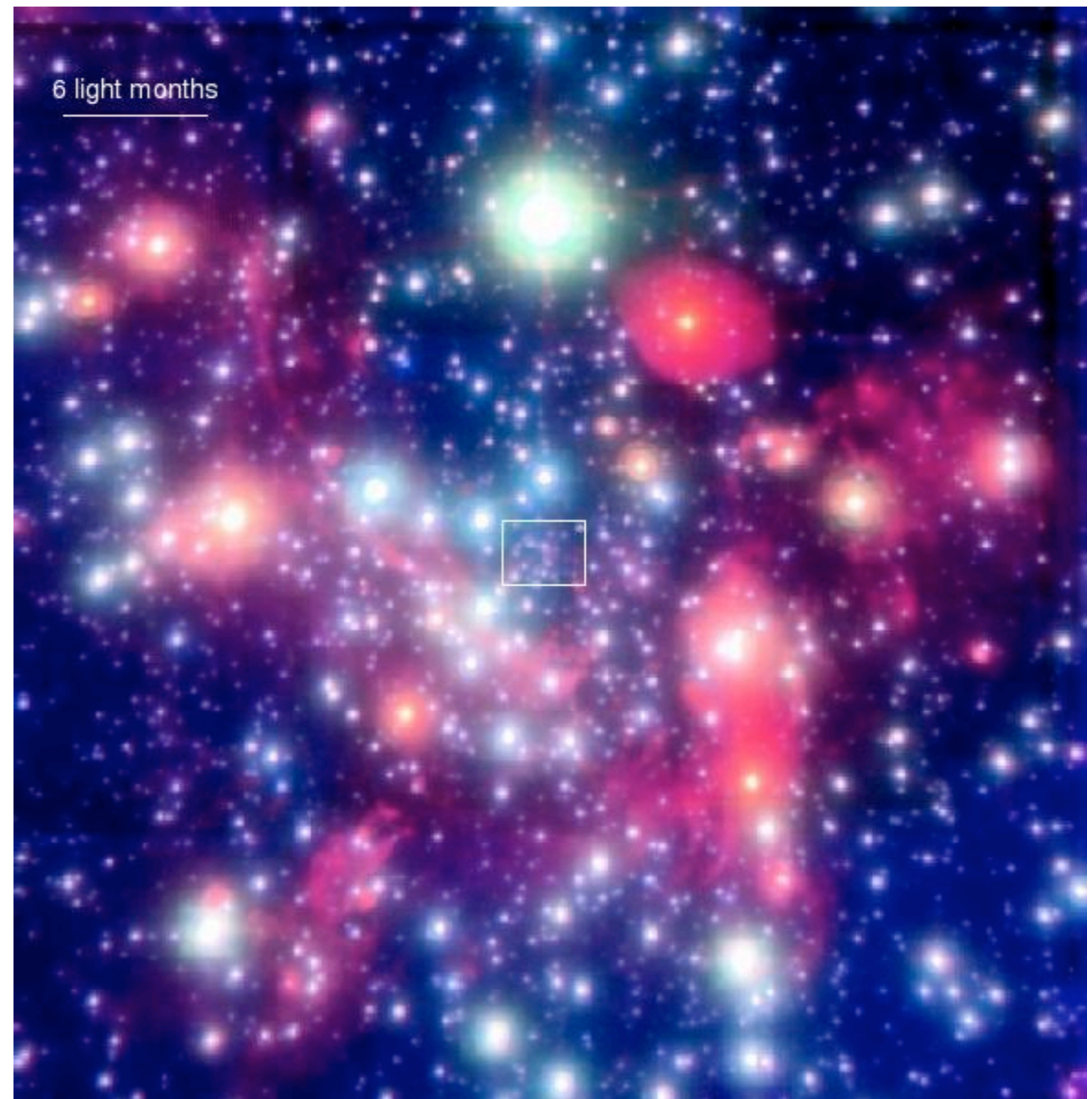
\Rightarrow zentrale Massenkonzentration im Sternhaufen!



Innerer Teil des zentralen Sternhaufens

<http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/index.php>

- Mit adaptiver Optik konnte die Eigenbewegung der Sterne nahe am Sgr A* studiert werden, zB 3D-Geschwindigkeiten von ≈ 32 Sterne $< 5''$ von Sgr A* bekannt



Eigenbewegungen von Sternen im zentralen Bereich;
der schnellste Stern (S1) hat eine Eigenbewegung von ~ 1500 km/s!

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

- Einige Sterne innerhalb $< 0.6''$ von Sgr A* haben Eigenbewegungen $> 1000 \text{ km s}^{-1}$!
- Aus Kombination der Geschwindigkeitsdispersion in radialer und tangentialer Richtung: Kepler-Verlauf $\sim r^{-1/2}$ bis hinunter zu 0.01 pc \Rightarrow Bestimmung der Masse aus Kinematik

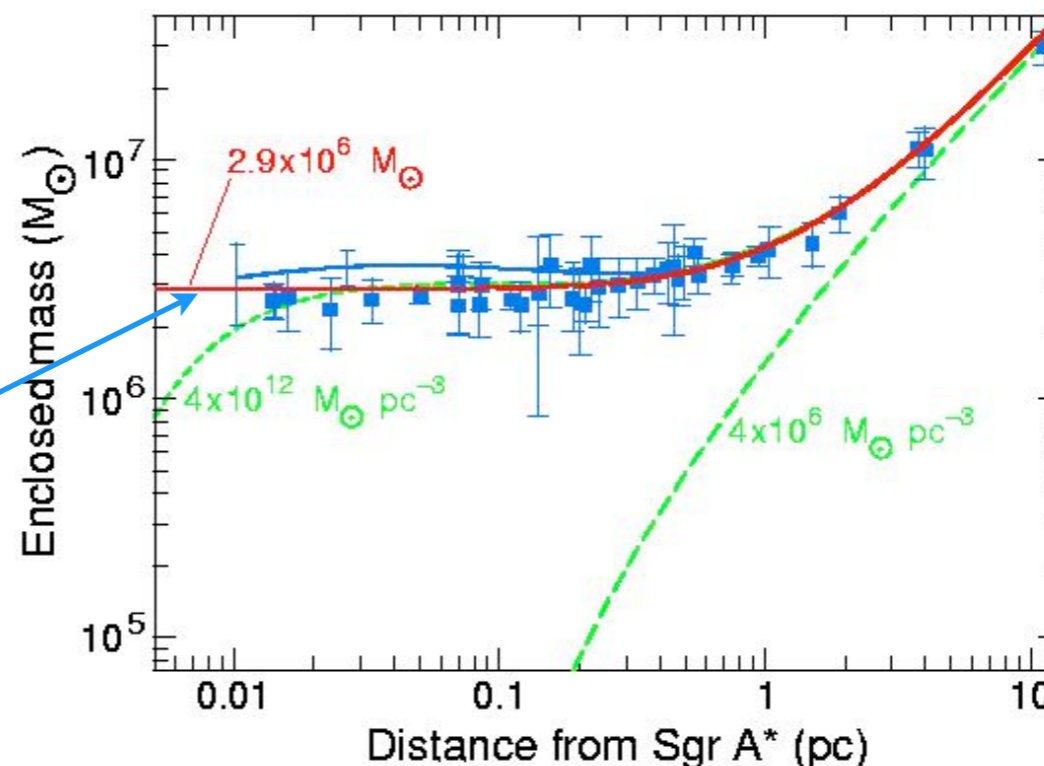
$$M = (2.7 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$$

$M(r)$ konstant im Bereich $0.01 \text{ pc} \leq r \leq 0.5 \text{ pc}$
 \Rightarrow Punktmasse

- Bei $r \geq 0.05 \text{ pc}$: die Masse des Sternhaufens dominiert, mit zentraler Dichte von $4 \times 10^6 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$
 \Rightarrow Massenkonzentration von $\sim 3 \times 10^6 M_{\odot}$ innerhalb eines Gebiets $< 0.01 \text{ pc}$
 \Rightarrow SL im Zentrum der Milchstraße

Bestimmung der Masse $M(r)$
 innerhalb des Radius r von Sgr A*

$M(r)$ für $2.9 \times 10^6 M_{\text{BH}} + \text{Sterhaufen}$



Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

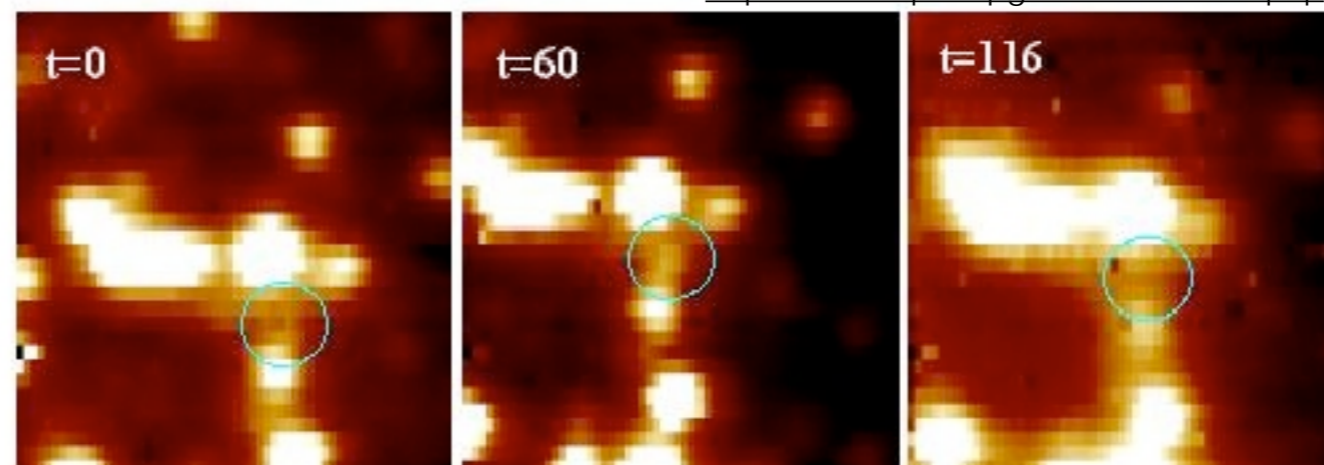
- Mit $M \approx 3 \times 10^6 M_{\odot}$ ergibt sich für den Schwarzschildradius des SL:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = 6 \times 10^9 m = 0.09 AU$$

- Die Ausdehnung von Sgr A* $< 17 R_s \Rightarrow$ es gibt hier keine ausgedehnte (100 - 1000 R_s) Akkretionsscheibe, wie in den Kernbereichen anderer Galaxien
- Materiestrom auf SL: $\leq 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, gelegentliche “Kernaktivität” \rightarrow Akkretionsereignisse, bemerkbar durch Aufblitzen im Röntgen- oder IR-Bereich
- Umlaufperiode P eines Sterns mit Bahnachse $a = 0.004 \text{ pc} = 850 \text{ AU}$ ergibt sich nach dem 3. keplerschen Gesetz zu ≈ 15 Jahre. Daher konnte für die dem GC nächstgelegenen Sternen schon fast einen ganzen Umlauf verfolgt werden

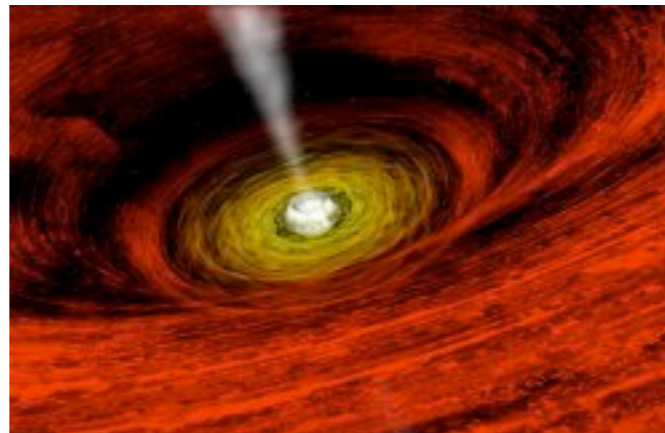
<http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/index.php>

“Flare” im NIR-Bereich,
Zeit t in Minuten



Warum Schwarzes Loch?

- Um die Massenfunktion $M(r)$ mit ausgedehnter Massenverteilung in Einklang zu bringen, muss die Dichteverteilung steiler als $\propto r^{-4}$ sein, damit stark verschieden von der erwarteten isothermer Verteilung
- Auch wenn ein ultradichter Sternhaufen (mit zentraler Dichte $\geq 4 \times 10^{12} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$) vorhanden wäre, kann dieser nicht stabil sein. Durch häufige Stöße zwischen den Sternen würde sich dieser nach $\sim 10^7$ Jahren auflösen
- Sgr A* selbst hat Eigenbewegung kleiner als $20 \text{ km s}^{-1} \Rightarrow$ dynamisches Zentrum der Milchstraße. Aufgrund der großen Geschwindigkeiten des umgebenden Sternhaufens würde man bei Äquipartition der Energie $M \gg 10^3 M_{\odot}$ für den Radiobereich ableiten; aus der oberen Grenze für die Ausdehnung kann man eine untere Grenze für die Dichte von $10^{18} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ angeben
- Supermassive SL in den Zentren von Galaxien liefern Energie der AGN Aktivität in Quasaren, Radi-Galaxien etc (siehe Vorlesung nächstes Semester), dh Milchstraße ist nicht aussergewöhnlich



Film: GC und das zentrale schwarze Loch

chandra.harvard.edu



Gamma Strahlung aus und um das Galaktische Zentrum

- Das HESS Cerenkov Teleskop-System hat hochenergetische Gamma Strahlung aus der Region um das GC entdeckt

Bild im Licht der Gamma-Strahlen von der Region um das Galaktische Zentrum. Zwei Quellen dominieren: HESS J1745-290, eine mysteriöse Quelle genau im Zentrum der Galaxie und im Abstand von etwa einem Grad der Supernovaüberrest G0.9+0.1. Unten: Bild der gleichen Region, jedoch nach Subtraktion der beiden starken Quellen, wodurch Emission mit einer viel schwächeren Intensität sichtbar wird. Die ausgedehnte Emission von Gamma-Strahlung entlang der Galaktischen Ebene ist deutlich erkennbar, ebenso wie eine weitere mysteriöse Quelle: HESS J1745-303. Die gestrichelte Linie zeigt die Galaktische Ebene an, die Ringe die Position der subtrahierten Quellen über H.E.S.S.

