

Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Kompaktseminar „Das frühe Universum“

Materiedichte Ω_m

Florian Ritter

25. März 2004

Übersicht

- Problemdarstellung
- Historisches
- Galaxienrotation
- Galaxienhaufen
- Cooling flows
- Gravitationslinsen
- Ausblick

Problemdarstellung

Bisherige Vorträge:

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Hierbei steht das Ω_m für die an der Gravitation teilnehmende bzw. mitwirkende Materie.

Ausgedrückt im Verhältnis von Masse zu Leuchtkraft bedeutet dies:
(nach Peacock, 1999, S. 368)

$$\frac{M}{L_{crit}} \approx 1400 \frac{M_\odot}{L_\odot}$$

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Problemdarstellung

Galaxien drehen
sich zu schnell...



Bild 1: NGC 1232

Spiral Galaxy NGC 1232 - VLT UT 1 + FORS1

ESO PR Photo 37/d/98 (23 September 1998)



© European Southern Observatory

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Problemdarstellung



Galaxienhaufen
entstehen, obwohl die
Gravitation der
sichtbaren Masse zu
gering ist...

Bild 2 : Coma Cluster

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Historisches

1844, Friedrich W. Bessel: Sirius wackelt \rightarrow unsichtbarer Begleiter
 \rightarrow dunkle (= nicht sichtbare) Materie im Universum!

1862, Alvan G. Clark: Begleiter optisch nachgewiesen.

1925, Walter S. Adams: Weißer Zwerg!

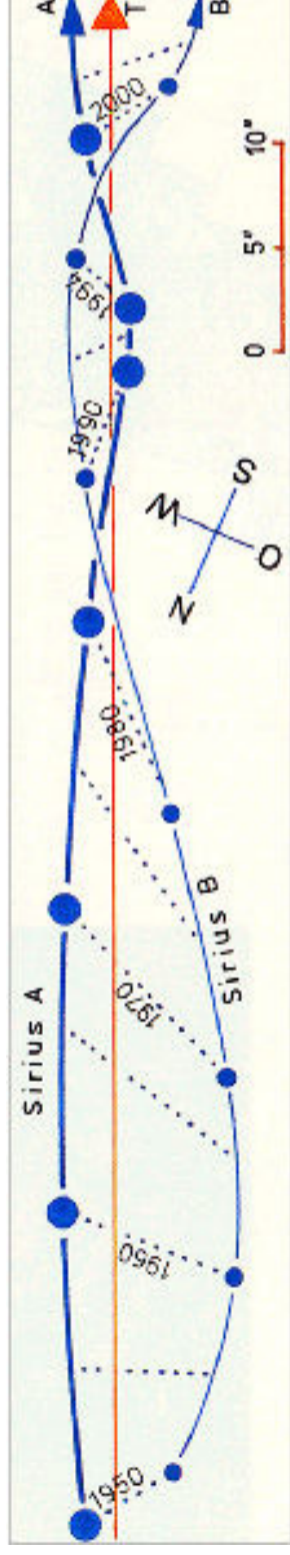


Bild 4: Bewegung von Sirius A und B



Bild 3: F. W. Bessel

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Historisches

Fritz Zwicky stellt 1933 fest, dass die Geschwindigkeit, die die Galaxien des Coma-Clusters haben, zu groß sind.

Der Haufen dürfte also garnicht existieren.



Bild 5: F. Zwicky

Erklärung: In den Clustern gibt es sehr viel mehr Materie als die sichtbare!

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Galaxienrotation

Spiral- / Balkengalaxien:

HI (21 cm) - Linie \rightarrow größere Ausdehnung als sichtbar

Dopplerverschiebung \rightarrow Geschwindigkeit des Zentrums (entspricht Bewegung der Galaxie bezgl. Erde/Sonnensystem/Milchstraße)

Lage der Galaxie und Annahme von Kreisbahnen \rightarrow

Rotationsgeschwindigkeit um das Zentrum

Elliptische Galaxien:

statistische Bewegung der Sterne im Gravitationspotential \rightarrow Virialsatz

\rightarrow Galaxienhaufen

Galaxienrotation

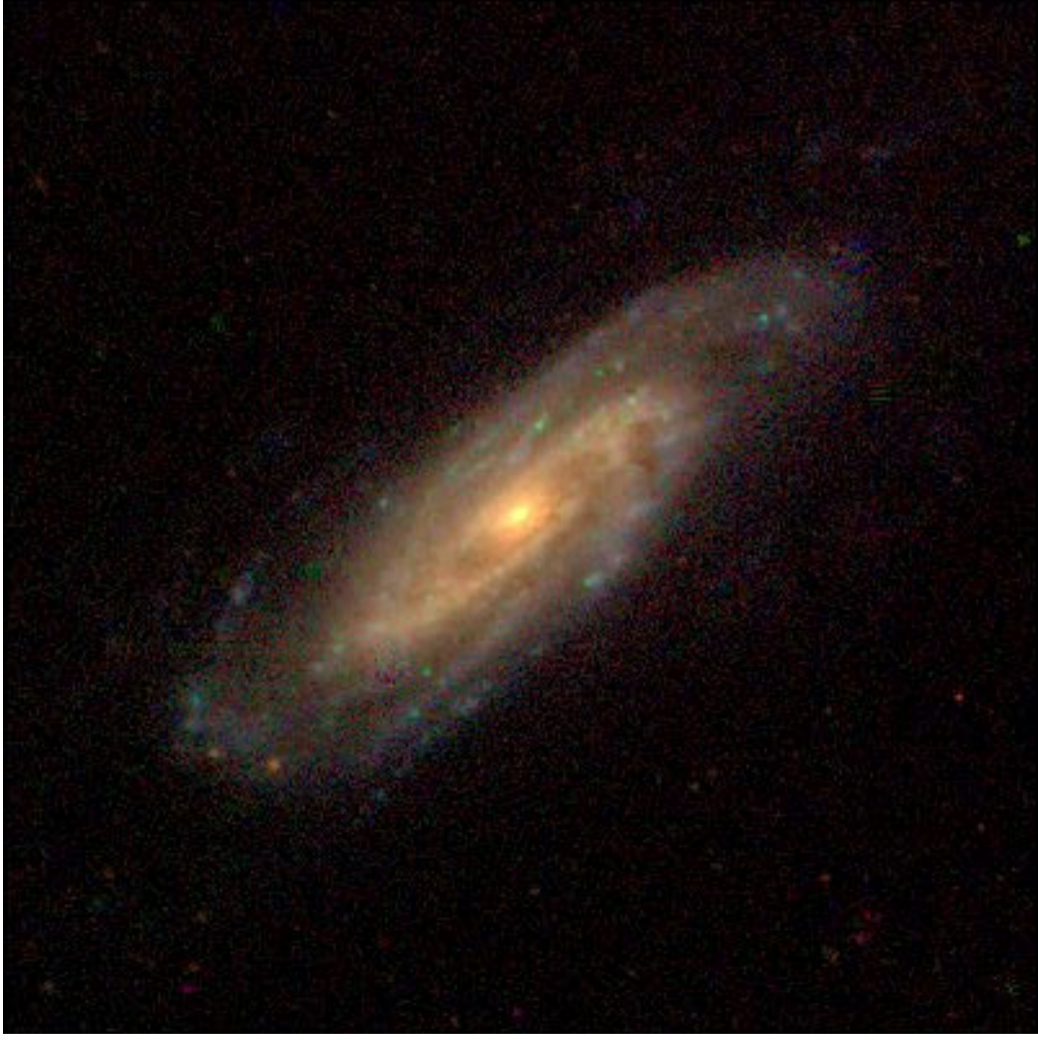


Bild 6: NGC 3198 im Optischen

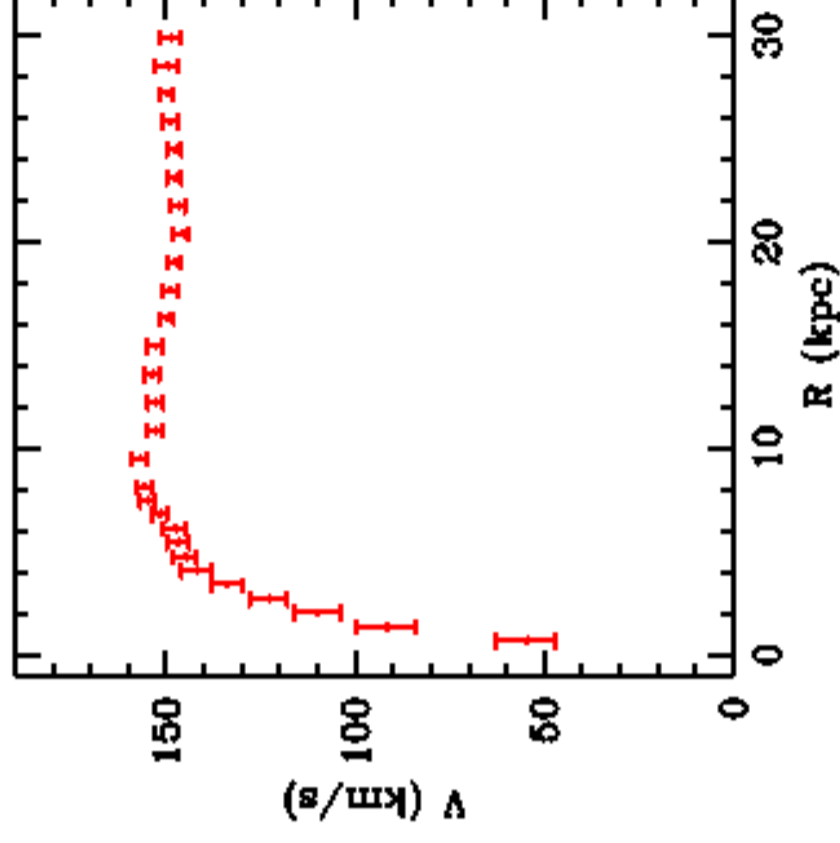


Bild 7: Rotationsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Entfernung zum Zentrum von NGC 3198

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Galaxienrotation

Für verschiedene Galaxien erhält man ähnliche Grafiken:

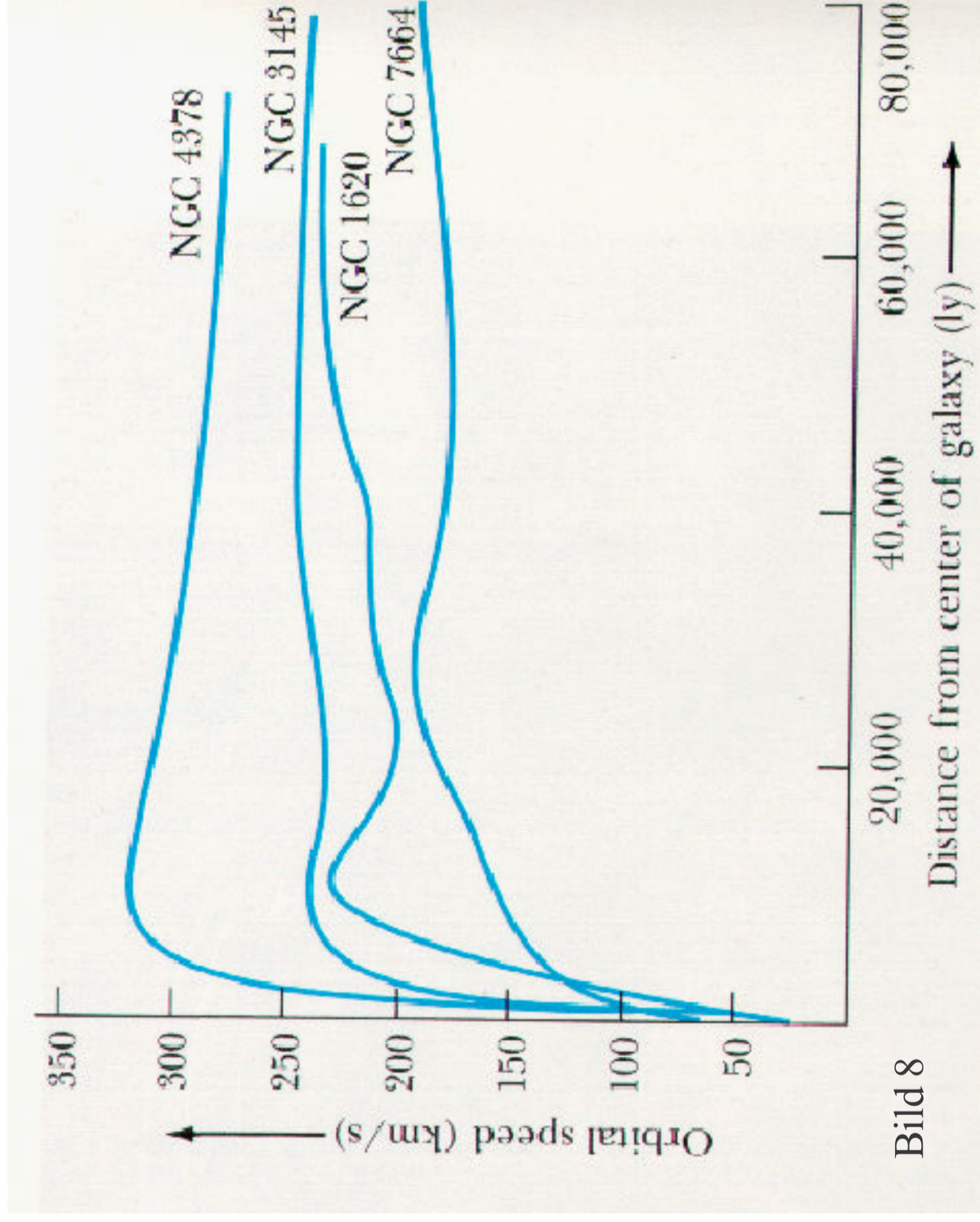


Bild 8

Galaxienrotation

3. Keplersches Gesetz (hinreichend weit außerhalb, die Masse ist im Wesentlichen in der Scheibe):

$$G \frac{mM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Hieraus folgt sofort: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$, mit $M(r) = \frac{4}{3}\pi\rho r^3$

innerhalb der Galaxie folgt $v(r) = \sqrt{\frac{4}{3}G\pi\rho r^2} \sim r$

außerhalb (hier ist $M = \text{const.}$):

$$v(r) \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Galaxienrotation

Wie man aber sieht, wird dieser Ansatz nicht durch die Beobachtungen bestätigt!

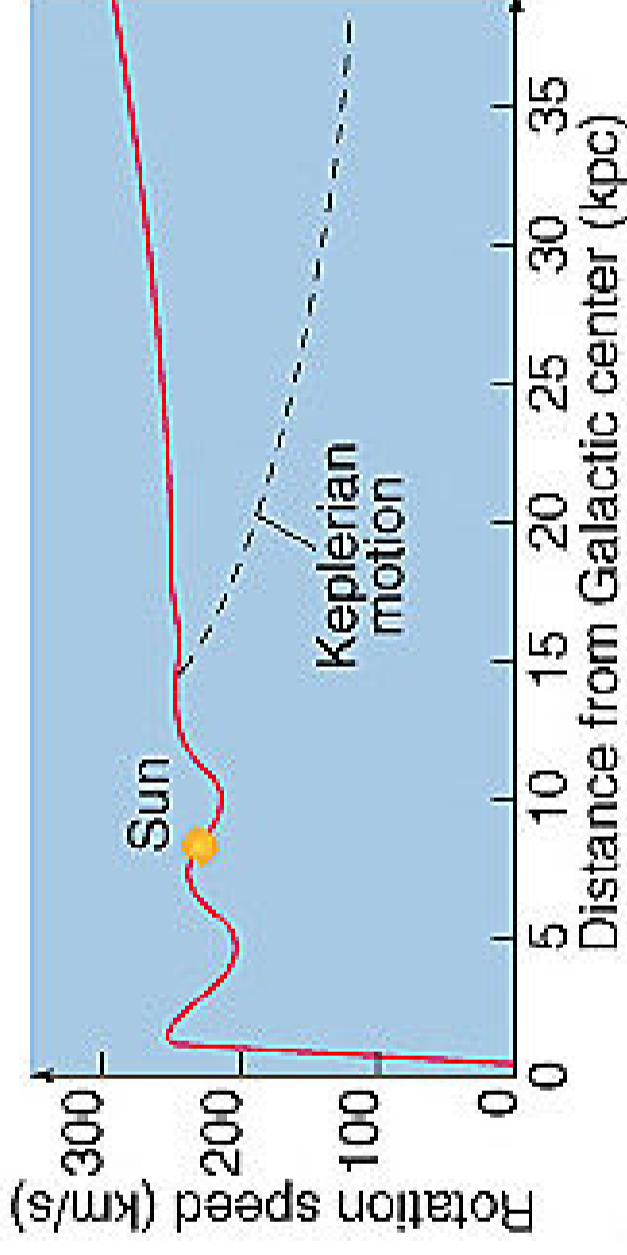


Bild 9: Rotationskurve der Milchstraße

Im Gegenteil, die Rotationsgeschwindigkeit bleibt nahezu konstant!

$v = \text{const.} \rightarrow M \sim r \rightarrow$ Sphärische Verteilung der gravitierenden Masse

—► Dunkle Materie!

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Galaxienrotation

Tatsächlich kann man die Rotationskurve folgendermaßen erklären:

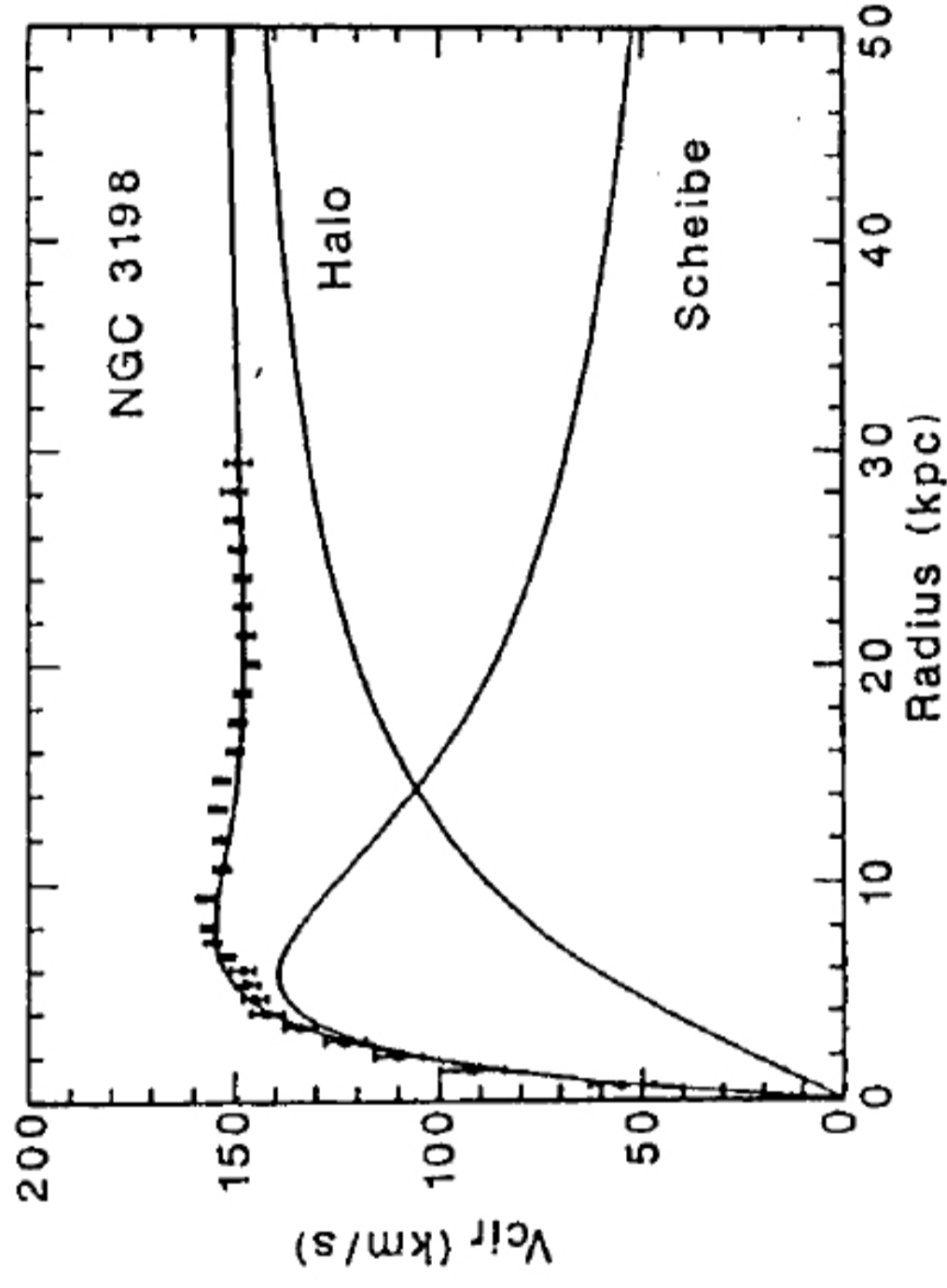


Bild 10: Rotationskurve von NGC 3198

Galaxienrotation

Masse/Leuchtkraft-Beziehung:

$$\frac{M}{L_{Galaxie}} = 10 \dots 20 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

Aber für Sterne gilt:

$$\frac{M}{L_{Stern}} = 1 \dots 3 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

→ **Nur etwa 10% der Materie in einer Galaxie strahlt!**

Die Gesamtmasse einer (recht großen) Galaxie ist $\sim 10^{11} \dots 10^{12} M_{\odot}$

Galaxienhaufen

Masse eines Galaxienhaufens: Virialsatz.

Annahme: Haufen ist abgeschlossen und im statischen Gleichgewicht.

Einzelne Galaxien = Teilchen in einem Vielkörpersystem

Gravitative Beschleunigung eines Teilchens:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^3}$$

mit $m_i \mathbf{r}_i$ multipliziert und geeignet umgeformt ergibt sich dann

$$\frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} (m_i \mathbf{r}_i^2) - m_i \dot{\mathbf{r}}_i^2 = \sum_{j \neq i} \frac{Gm_i m_j \mathbf{r}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^3}$$

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Galaxienhaufen

Summation über alle Teilchen, und eine (langwierige) Umformung ergibt:

$$\frac{1}{2} \sum_i \frac{d^2}{dt^2} (m_i \mathbf{r}_i^2) - \sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i^2 = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} \sum_{j \neq i} \frac{G m_i m_j}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|}$$

$$\frac{1}{2} \sum_i \frac{d^2}{dt^2} (m_i \mathbf{r}_i^2) = \sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \sum_{j \neq i} \frac{G m_i m_j}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} = 2T - U$$

Im statischen Gleichgewicht ist die linke Seite gleich null, also gilt auch $2T - U = 0$, dies führt direkt auf das Virialtheorem

$$T = \frac{1}{2} |U|$$

Galaxienhaufen

Eine isotrope Verteilung vorausgesetzt, gilt für die Geschwindigkeit:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle = 3 \langle v_{\parallel}^2 \rangle$$

Weitere Voraussetzung: Geschwindigkeitsverteilung ist von den einzelnen Massen unabhängig (M ist die Gesamtmasse):

$$T = E_{kin} = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 = \frac{3}{2} M \langle v_{\parallel}^2 \rangle$$

Für einen sphärisch-symmetrischen Haufen können wir einen durchschnittlichen Abstand R_{cl} zum Haufenzentrum annehmen.

$$U = E_{pot} = -\frac{GM^2}{R_{cl}}$$

Galaxienhaufen

Für die Gesamtmasse M ergibt sich also:

$$M = \frac{3}{G} \langle v_{\parallel}^2 \rangle R_{cl}$$

Mit den typischen Werten für $v_{\parallel} \sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ und $R_{cl} \sim 1 \text{ Mpc}$:

→ Gesamtmasse eines Haufens $\sim 10^{15} M_{\odot}$.

Typischer Haufen ~ 100 Galaxien, → Masse $\sim 10^{13} - 10^{14} M_{\odot}$

→ hier spielt die **dunkle Materie** eine gewichtige Rolle!

Detailliertere Berechnungen mit komplizierteren Masseverteilungen (Merritt, 1987) ergibt folgendes Masse/Leuchtkraft-Verhältnis:

$$\frac{M}{L_{Cluster}} \sim 350 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}, \text{ vgl. } \frac{M}{L_{Galaxie}} = 10 \dots 20 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

Cooling flows

NASA-Röntgensatellit „UHURU“: erstmals Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen.

Ausdehnung der Röntgenstrahlung (bis zu \sim Mpc) $>$ Galaxie
und zeitlich nicht variabel.

Gemessene Emission im keV-Bereich erfordert Temperaturen
von $\approx 10^7$ - 10^8 K und geringe Dichten ($N \leq 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$).

Allerdings haben viele Haufen im Zentrum eine hohe Dichte...

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Cooling flows

Hohe Dichte \rightarrow Gasteilchen stoßen häufiger aneinander
 \rightarrow Gas verliert Energie (Strahlung), kühlt ab \rightarrow Druck sinkt
 \rightarrow von außen fließt Gas nach innen (cooling flow) \rightarrow

Dichte und Strahlung nehmen zu, usw. usf.

Schlußendlich: Gas so kalt, dass sich Sterne bilden können

\leftrightarrow Röntgenstrahlung aus einem Gebiet $>$ Galaxie...

\rightarrow Dunkle Materie!

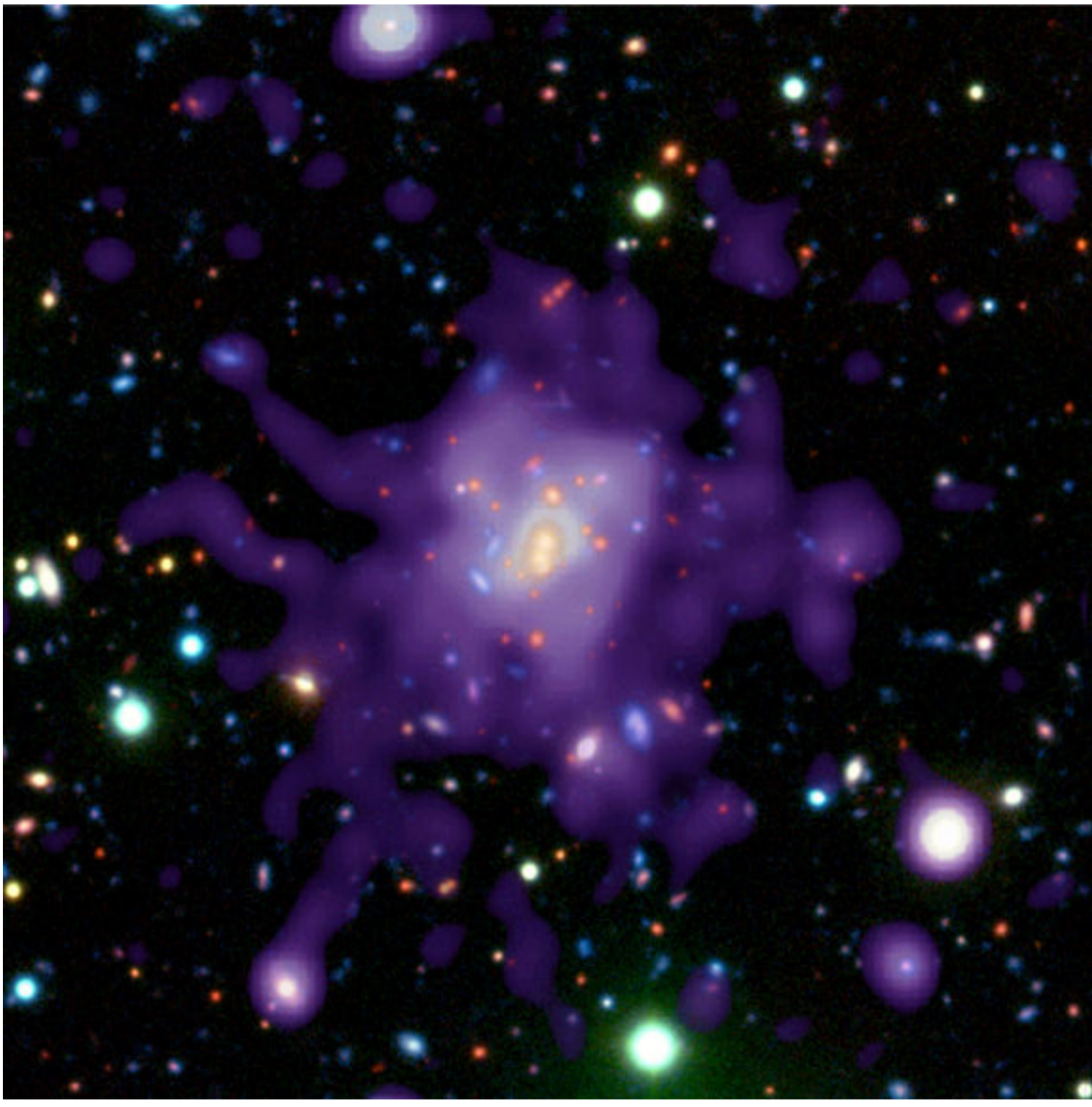
Cooling flows

Bild 11:

RDCS 1252.9-2927

Dieser Galaxienhaufen ist fast $9 \cdot 10^9$ Lichtjahre von uns entfernt. Er ist mit $2 \cdot 10^{14}$ Sonnenmassen das Schwergewicht unter den bisher gefundenen Objekten des frühen Universums.
rot, grün und gelb: Galaxien des Haufens
(sichtbares Licht)
violett: röntgenstrahlendes
intracluster-Gas

(APOD vom 26.02.2004)



Gravitationslinsen

1915, Albert Einstein:
theoretische Vorhersage,
1919, Sir Arthur S. Eddington:
experimentelle Bestätigung
durch eine Sonnenfinsternis.
(Dies war auch der erste und
beste Nachweis für die
Gültigkeit der ART)

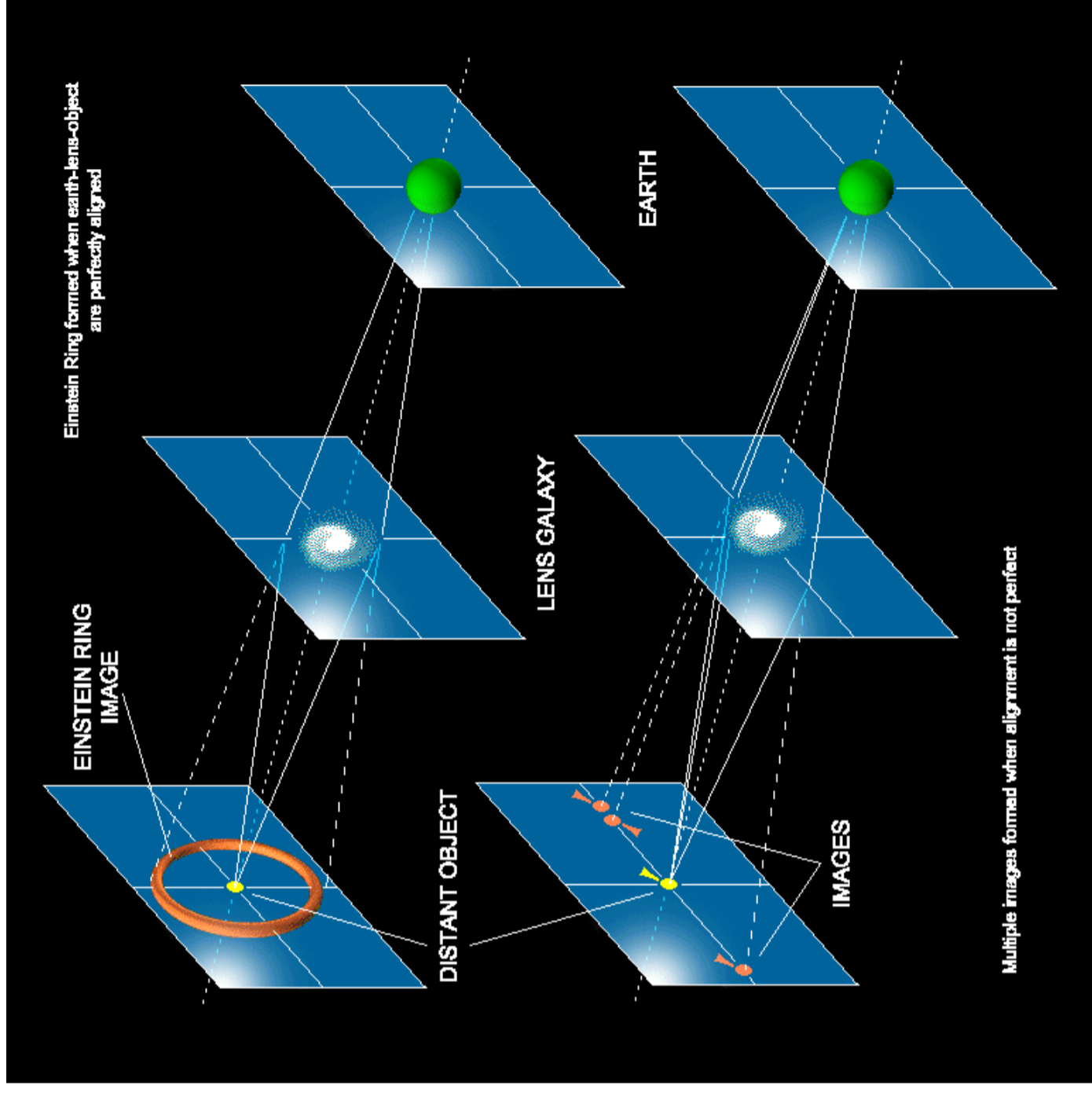


Bild 12: schematische Darstellung des Gravitationslinseneffekts

Gravitationslinsen

ART:

$\tilde{\alpha}$: Winkelablenkung (Bogenmaß)

M: Masse des „Linsenobjekts“,

a: Abstand Linse – Lichtstrahl

$$\tilde{\alpha} = 2 \frac{R_{\text{Schwarzschild}}}{a} = 4 \frac{GM}{ac^2}$$

Dies ist gerade das Doppelte, wie die klassische Mechanik uns liefert. Aber die klassische Mechanik berücksichtigt die Raumkrümmung nicht...

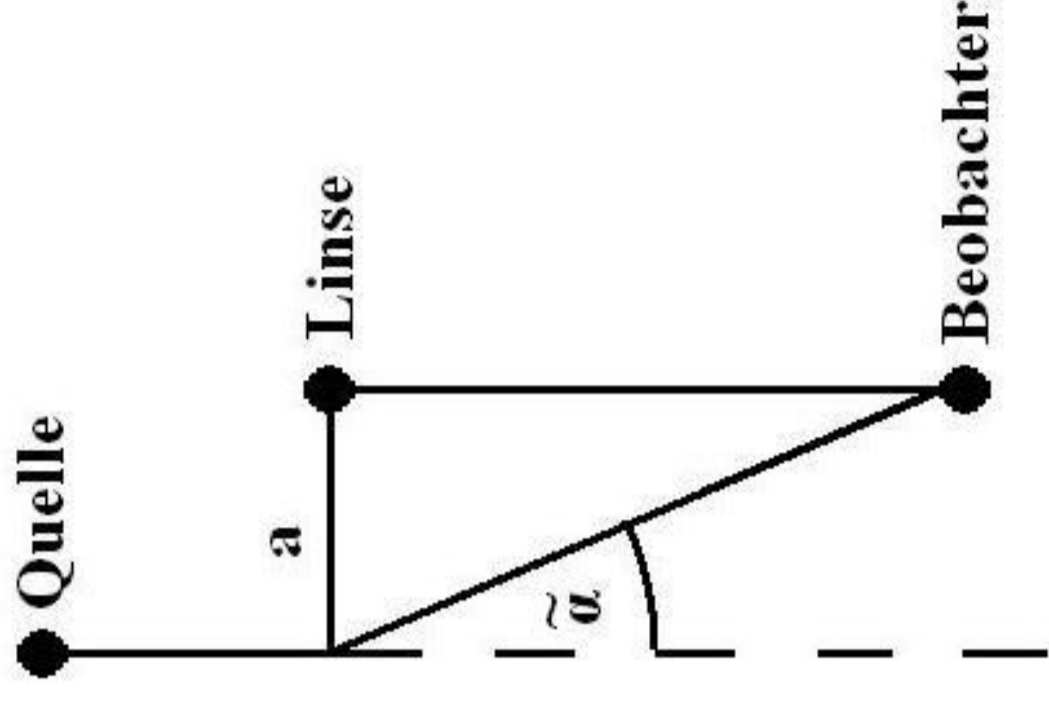


Bild 13: Skizze zur Gravitationslinse

Gravitationslinsen

Kleine Winkel:

$$\theta D_S = \beta D_S + \tilde{\alpha} D_{LS}$$

reduzierter Ablenkungswinkel:

$$\alpha = \frac{D_{LS}}{D_S} \tilde{\alpha}$$

→ Linsengleichung:

$$\beta = \theta - \alpha = \theta - \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \frac{4GM}{c^2}$$

$$\beta = \theta - \frac{1}{D} \frac{4GM}{\theta c^2}$$

(Letztere Gleichung für eine Punktmasse)

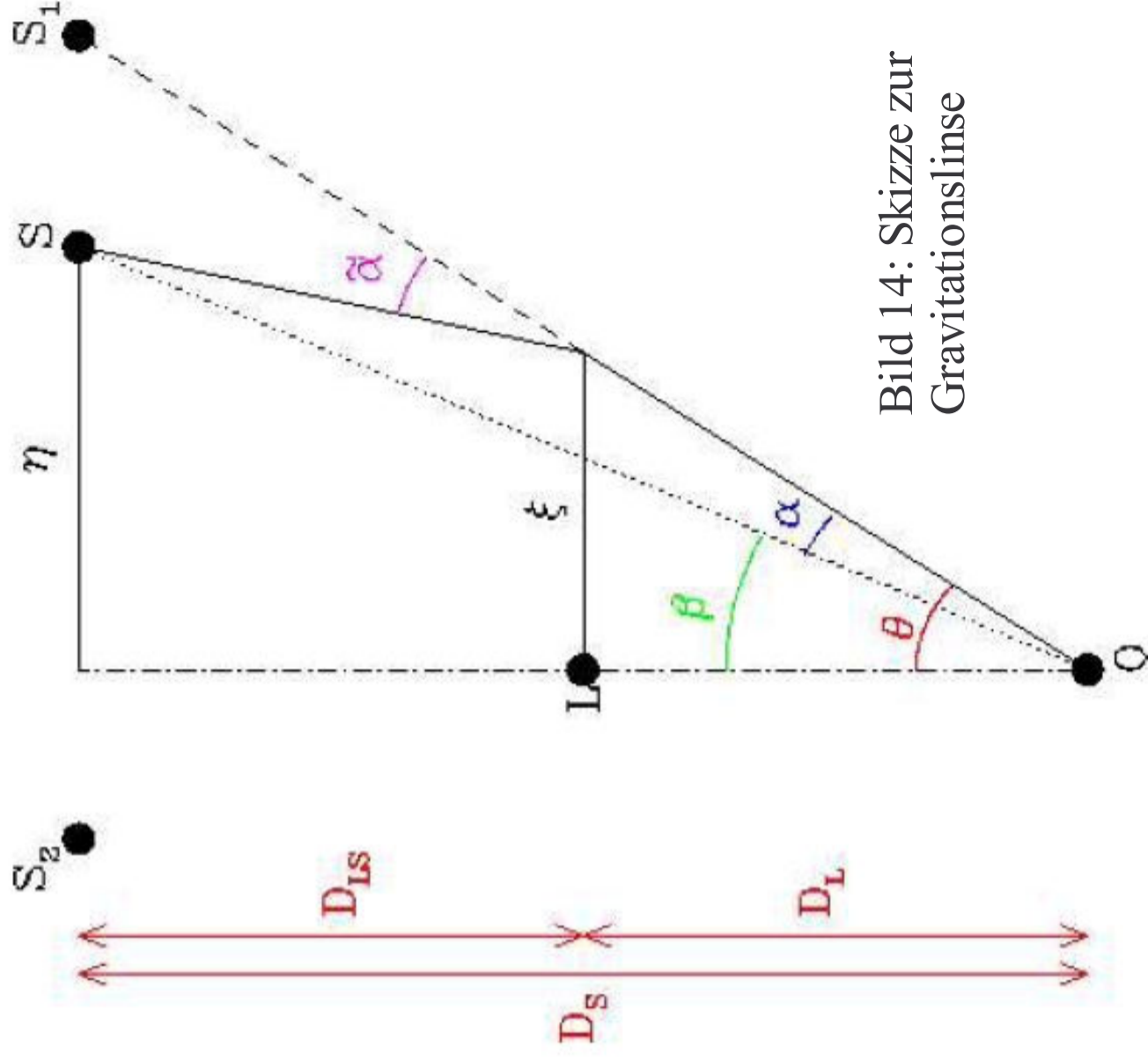


Bild 14: Skizze zur Gravitationslinse

Gravitationslinsen

Einsteinringe, -bögen und -kreuze nennt man die daraus resultierenden Objekte, die man auf Aufnahmen entdecken kann.

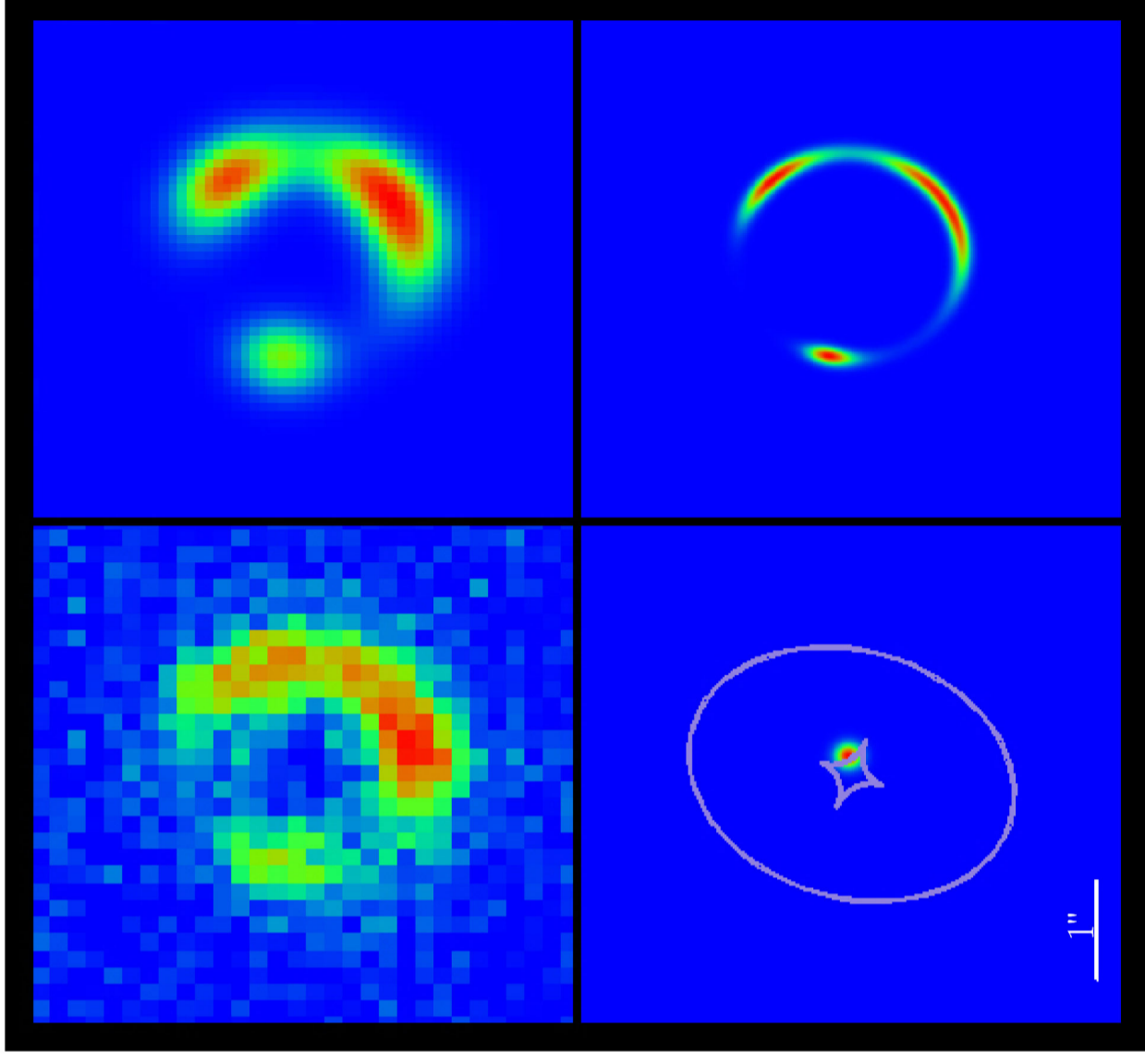


Bild 15: Einsteinring;
oben links: Originalbild;
oben rechts: optimiertes
Bild; unten links:
Simulation: rot/grün:
Quelle, Im Zentrum der
Ellipse: Linse;
unten rechts: Resultat der
Simulation

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Gravitationslinsen



Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

Bild 16: Abell 2218 mit einigen Einstein-Bögen

Gravitationslinsen

Auch bei diesen Berechnungen bekommt man als Resultat eine größere Masse als die leuchtende.

Damit gibt es mehrere Hinweise für die Existenz von dunkler Materie.

Kompaktseminar „Das frühe Universum“ - Materiedichte Ω_m

Zusammenfassung

Alles in allem lässt sich also zusammenfassen:

Wenn wir davon ausgehen, dass $\Omega = 1$ ist, dann ist

$$\Omega_\Lambda \approx 0,7, \text{ da } \Omega_m \approx 0,3$$

$$\Omega_m \approx 0,3, \text{ davon:}$$

$\Omega_{\text{baryon}} \approx 0,02..0,05$ (aus der primordialen Nukleosynthese)

$$\Omega_{\text{sterne}} \approx 0,005..0,01$$

$$\rightarrow \Omega_{\text{dm}} \approx 0,25..0,28 !!$$

Ausblick

Doch woraus besteht dann der Großteil der an der Gravitation beteiligten Masse im Universum?

- WIMPs
- MACHOs
- Axionen
- Neutralinos
- Andere SUSY-Teilchen

...



Literatur

- A. Unsöld, B. Baschek; Der neue Kosmos, 6. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- Karttunen, Kröger, Oja, Poutanen, Donner; Fundamental Astronomy, 4th Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003
- M. Treichel, Teilchenphysik und Kosmologie, 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000
- H. Goenner, Einführung in die Kosmologie, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin Oxford, 1994
- Vorlesungsskript „Beobachtende Kosmologie“, J. Wilms, WiSe 2002/2003
- Vorlesungsskript „Röntgenastronomie II“, R. Staubert, J. Wilms, WiSe 2001/2002
- verschiedene Internetseiten

Bildnachweis

- Deckblatt: Sombroergalaxie, VLT ANTU + FORS1, www.eso.org
- Bild 1: NGC 1232, ESO www.eso.org
- Bild 2: Coma-Cluster, www-eep.physik.hu-berlin.de
- Bild 3: F.W.Bessel, www.chemie.uni-bremen.de
- Bild 4: Wackeln des Sirius, www.galerie-universum.de
- Bild 5: F.Zwicky, www.zwicky-stiftung.ch
- Bild 6: NGC 3198 optisch, www.astro.princeton.edu
- Bild 7: Rotationskurve NGC 3198, www.astro.psu.edu
- Bild 8: Rotationskrven verschiedener Galaxien, zebu.uoregon.edu
- Bild 9: Rotationskurve der Milchstraße, www.astro.psu.edu
- Bild 10: Rotationskurve2 NGC 3198, www-eep.physik.hu-berlin.de
- Bild 11: RDCS 1252.9-2927, antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap040226.html
- Bild 12: Gravitationslinse 1, ww.jb.man.ac.uk
- Bild 13: Gravitationslinse 2, nach Longair 1998, Fig. 4.8a
- Bild 14: Gravitationslinse 3, Nach Wambsganss, 1998, Fig. 3 (aus J. Wilms, „Beobachtende Kosmologie“)
- Bild 15: Einsteinring, ESO, www.eso.org
- Bild 16: Abell 2218, HST, hubblesite.org
- Bild Ausblick: Einstein, S. Hawking, „Das Universum in der Nussschale“, 3. Auflage, Verlag Hoffman und Campe, 2001
- The End: NGC 613, ESO, www.eso.org



-- THE END --