

XI. Sternhaufen, Galaxien

XI-1

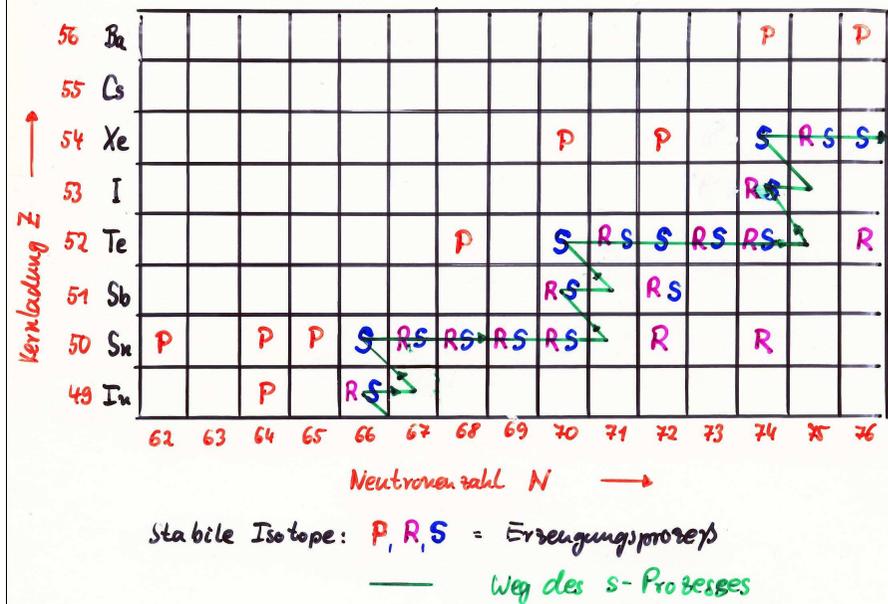
Die Entstehung der Elemente (Nukleosynthese)

- H, He, etwas Li: im Big Bang ("primordial")
- "Schwere Elemente" ab C¹²:

Erzeugung in Sternen

- Fusion** $H \rightarrow He \rightarrow C \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow Mg \rightarrow Si \rightarrow \dots \rightarrow {}^{56}Fe$
meist mit 4He nur massereiche Sterne (Pre-SN)
- Neutronen-Einfang**
 - s-Prozess**
s = "slow": niedriger Neutronenfluß
→ genug Zeit für β -Zerfall (vor nächstem Einfang)

(nach: Cambridge Atlas, p. 281)



XI-03

11-02

Quelle der Neutronen:

z.B. Nebenreaktionen des He-Brennens



- r-Prozess**
r = "rapid": extrem hoher Neutronenfluß
→ sukzessive n-Einfänge ohne β -Zerfall dazwischen

Quelle der Neutronen:

Photo-Disintegration von Fe in Supernova-Explosionen

- p-Prozess**
p = Proton: Kernreaktionen mit Protonen oder Positronen
($T \geq 10^9 K$, in SN-Explosionen)

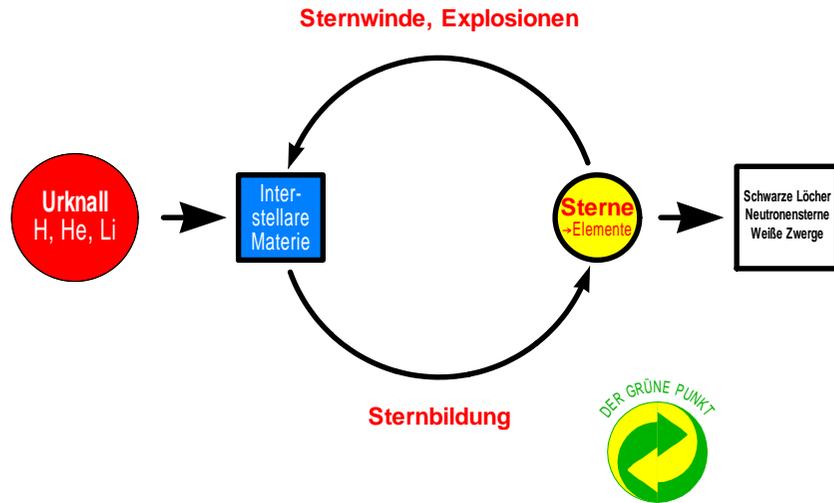
11-04

Rückgabe ans Interstellare Medium:

- Sternwinde**
 - massearme Sterne (Rote Riesen, Planetarische Nebel):
→ s-Prozess-Elemente (innere Mischungsprozesse?)
 - massereiche Sterne (O, B, Wolf-Rayet ...)
→ He, Li, s-Prozess-Elemente
- Supernovae**
→ r- und p-Prozess-Elemente

Der kosmische Materiekreislauf

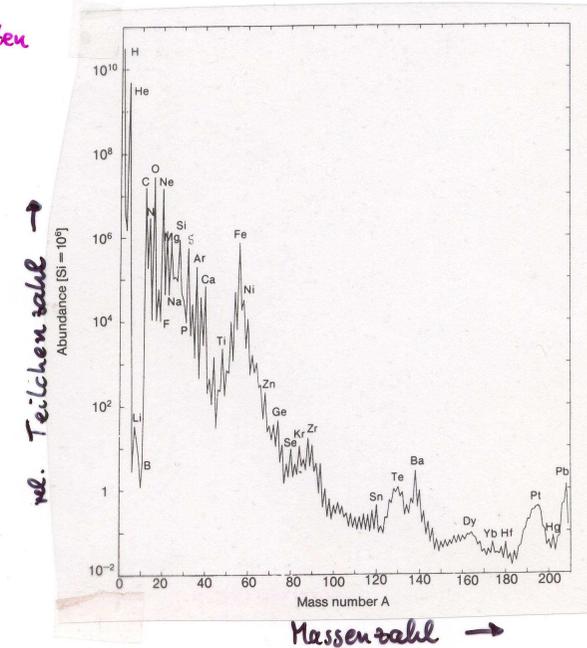
11-05



11-07

Abb.: Elementhäufigkeiten
in der Sonne

aus:
Fundamental
Astronomy
p. 274



• „Leichte Elemente“ zwischen ^1H und ^{12}C (ohne ^4He)

XI-06

• Zerstörung in Sternen

z.B.: Li „verbrennt“ bei $\approx 2 \cdot 10^6 \text{ K}$

→ Abreicherung

z.B. Li in Sonnenatmosphäre \neq Meteorite $\approx 1:100$

Problem: Durchmischung offenbar stärker als
nach dem Standard-Modell

[$2 \cdot 10^6 \text{ K} \approx$ unterer Rand der Konvektionszone
der Sonne]

• Bildung im Interstellaren Medium durch Spallation

Zertrümmerung „schwerer“ Atome [C, N, O]

durch energiereiche [$E \geq 30 \text{ MeV}$] kosmische Teilchen [pp]

• Sternhaufen

XI.4 11-08

• OB-Assoziationen

• 50 - 100 benachbarte Sterne frühen Typs

• nahe von Staub- u. Molekülwolken

= Sternentstehungsgebieten (z.B. Spiralarme; Orion-Nebel)

• Offene Sternhaufen [engl.: Open Clusters]

100 - 1000 benachbarte Sterne

mit gemeinsamer Bewegung [→ Entfernungsbestimmung,

siehe Kap. VI.17: „Sternstromparallaxe“]

schwach gravitativ gebunden, Auflösung in $\approx 10^8$ Jahren

Beispiele: Plejaden, Hyaden, κ Persei

• Kugelhaufen [engl.: Globular Clusters]

11-09

$10^5 \dots 10^6$ Sterne in dichter, kugelsymmetrischer Anordnung

Durchmesser typisch einige 10 pc

metallarme, alte Sterne ("Population II")

$Z \approx 10^{-3} Z_{\odot} \rightarrow$ siehe später

Beispiel: M13; ca. 200 galaktische GC bekannt

In der Großen Magellanschen Wolke

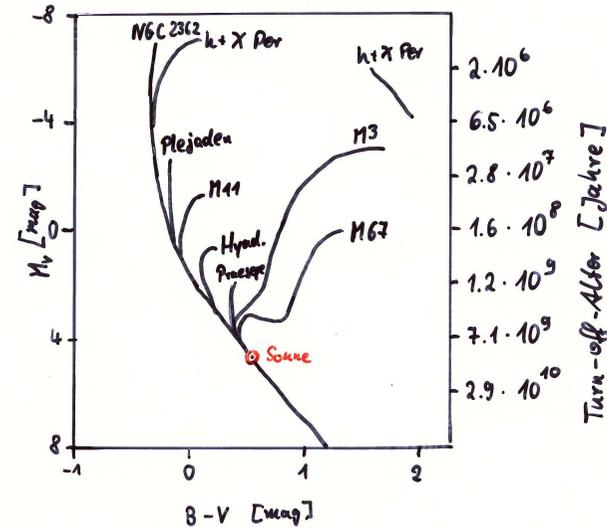
auch junge ($< 10^7$ Jahre) Kugelsternhaufen

Sternhaufen - Mitglieder haben ungefähr

- gleiches Alter
- gleiche chem. Anfangs-Zusammensetzung
- gleiche Entfernung

Beobachtete Galaktische Haufen [Schematisiert]

11-11



nach: Fundamentals Astronomy p. 353
Cambridge Atlas of Astr. p. 289

Die Hyaden

11-10

nächstgelegener Offene Sternhaufen
(der rote Riese Aldebaran steht im Vordergrund)

47 Tucanae
Kugelsternhaufen
(zweithellster nach Omega Centauri)



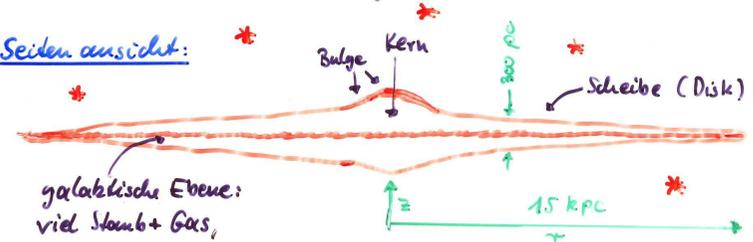
11-12

• Unsere Galaxis

XI.6

Scheibenförmige Anordnung von $\approx 2 \cdot 10^{11}$ Sternen

Seitenansicht:

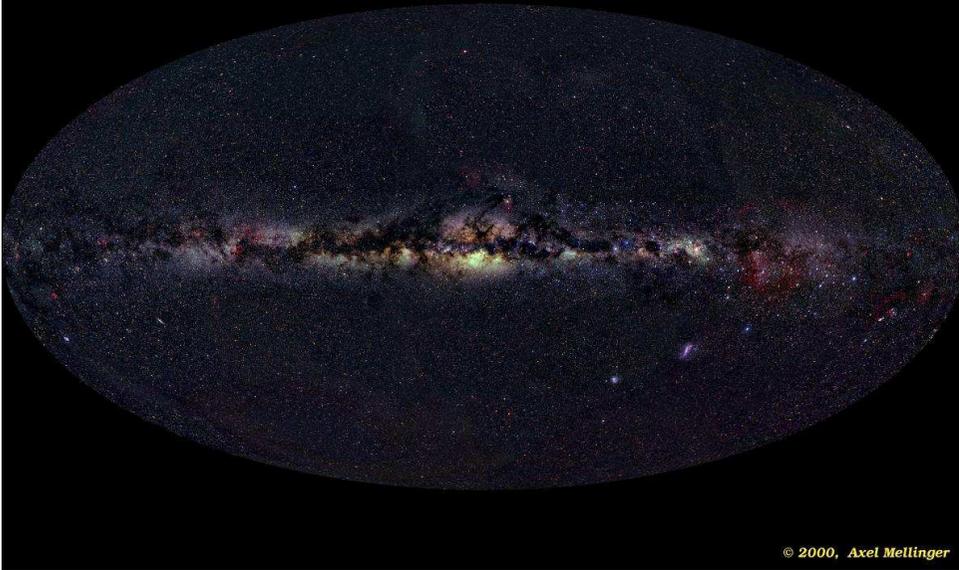


galaktische Ebene:
viel Staub + Gas,
H II - Regionen,
OB - Assoziationen

Halo

Kugelsternhaufen
sphärisch verteilt bis ≈ 60 kpc

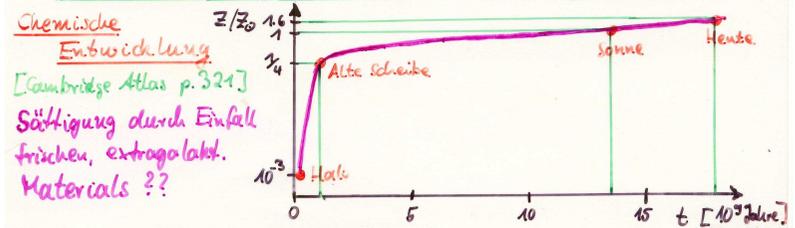
The Deep Sky



© 2000, Axel Mellinger

Populationen der Milchstraße [nach Fundamentals Ab. p. 365]

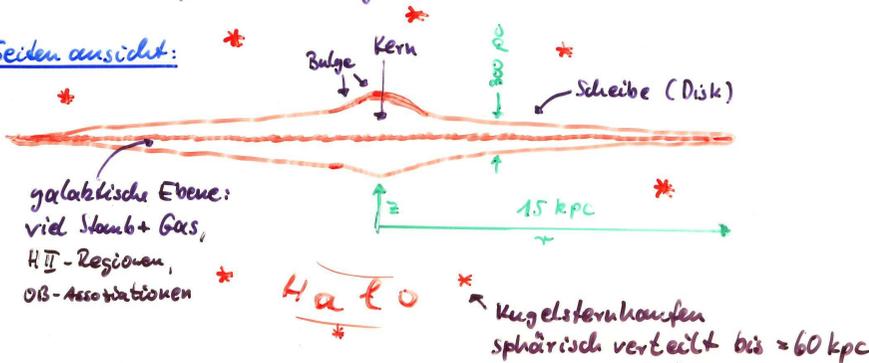
	Halo - Population II	Zwischen-Population I	Scheiben-Population	Alte Pop. I	Junge Pop. I
Objekte	Kugelsternhaufen, Subdwarfs	alte Feldsterne	Zentralsterne, Rausel. Neb., Rote Riesen	A-Sterne	OB-Assoziationen
Alter [10^9 Jahre]	> 6	6-5	5-2	2-0.1	< 0.1
Scheibendicke [pc]					
⊥ Galakt. Ebene	2000	700	400	160	120
Metalle Z (Massebruchteil)	< 0.003	0.01	0.02	0.03	0.04



Unsere Galaxis

Scheibenförmige Anordnung von $\approx 2 \cdot 10^{11}$ Sternen

Seitenansicht:



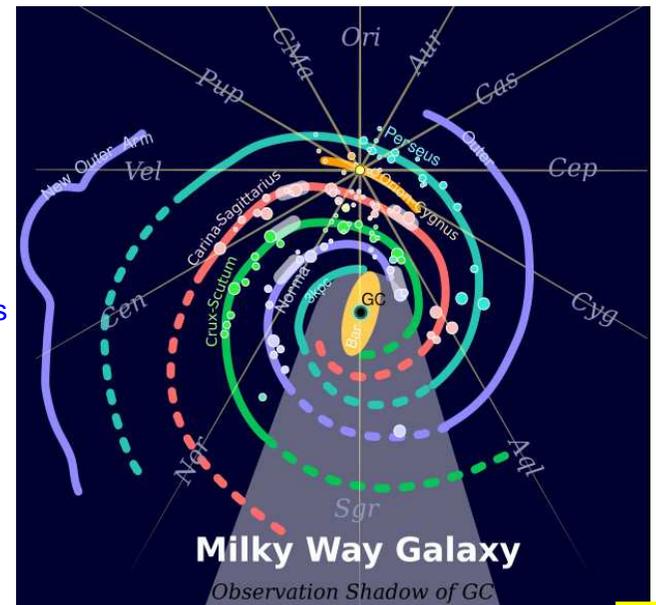
Die Milchstraße

Spiralgalaxis mit Balken
Hubble-Typ Sb I (oder Sb II)

4 ausgeprägte Arme:

- Perseus-Arm
- Norma-Arm
- Scutum-Centaurus
- Carina-Sagittarius

Sonne im/bei Orion-Cygnus-A. ?



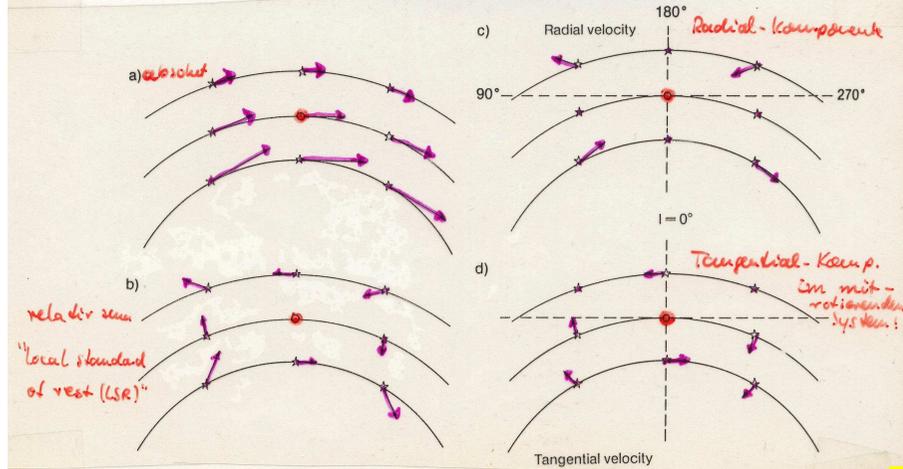
Rotation der Galaxis

11-17

Sterne und Wolken (ISM) der Scheibe bewegen sich auf
= kreisförmigen Kepler-Bahnen

→ Modell der differentiellen Rotation der Galaxis

[Lindblad & Dor, 1926]



Geometrische Überlegungen liefern für die

11-19

Radial-Komponente:

$$v_r = A \cdot d \cdot \sin(2l)$$

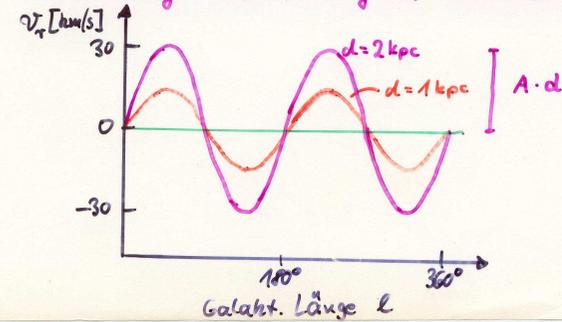
mit $A = \frac{1}{2} \left[\frac{v_0}{r_0} - \frac{d v(r)}{dr} \Big|_{r_0} \right]$

aus lineare Entwicklung,
nur für d klein gegen 8.5 kpc
d = Entfernung Stern - Sonne

r_0 = Abstand zum Mittelpunkt der Galaxis

v_0 = Bahngeschwindigkeit des LSR

Beobachtungen: Bestimmung der "Ortschen Konstante" A



11-18

XI.8

• = LSR = mittleres Ruhesystem für die Sterne der
Sonne umgebung (etwas problematisch, da von Auswahl abhängig)

Local
Standard
of Rest

Die Sonne bewegt sich gegenüber dem LSR
mit 20 km/s in Richtung auf R.A. = $20^h 0^m$, $\delta = +30^\circ$

[→ Sternbild Herkules]

Galaktische Koordinaten: l, b = galakt. Länge, Breite

Grundkreis = Ebene der Milchstraße

→ Galakt. Nordpol: R.A. = $12^h 49^m$, $\delta = +27.40$

Neigung gegen Äquator: 62.6°

Nullpunkt der Länge: Richtung zum galakt. Zentrum

R.A. = $17^h 42^m.4$ $\delta = -28.92$

Tangential-Komponente:

XI.9

11-20

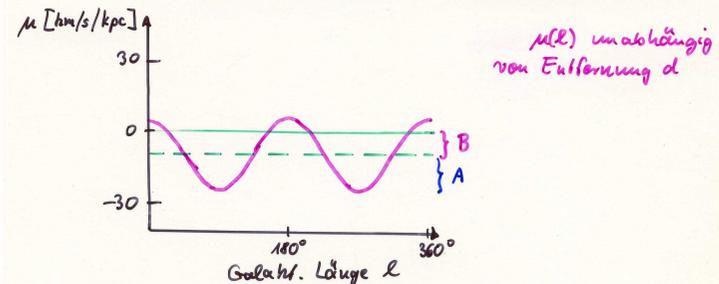
$$v_t = A \cdot d \cdot \cos(2l) + B \cdot d$$

oder für die Eigenbewegung $\mu = v_t / d$

- gemessen gegen ein außergalaktisches
Quellen verankertes Inertialsystem! -

$$\mu = A \cos(2l) + B$$

μ lässt sich auch ausdrücken
in Bogensekunden pro Jahr!



wobei $B = -\frac{1}{2} \left[\frac{v_0}{r_0} + \frac{d v(r)}{dr} \Big|_{r_0} \right]$

→ Bestätigung durch Beobachtungen (wenn auch ungenau!)

Dortige Konstanten: $A = 15 \frac{\text{km/s}}{\text{kpc}}$ $B = -10 \frac{\text{km/s}}{\text{kpc}}$

Beachte: $A+B = - \left. \frac{dv(r)}{dr} \right|_{r_0}$ $A-B = \frac{v_0}{r_0} = \omega_0$
↑
Winkelgeschwindigkeit

Aus A-B ergibt sich: $\omega_0 \approx 0.6$ pro 100 Jahre →

Umlaufzeit der Sonne: 240 Mill. Jahre

Falls sphärisch-symmetrische Massenverteilung:

Masse der Galaxis innerhalb von r_0 aus 3. Keplerschen Gesetz:

$$\left(\frac{v}{1 \text{ Jahr}}\right)^2 = \left(\frac{r_0}{1 \text{ A.U.}}\right)^3 \cdot \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \rightarrow \underline{M \approx 10^{11} M_\odot}$$

Annahme: Galaxis rotiert mit konstanter Winkelgeschwindigkeit
 (wie ein starrer Körper):

$$\rightarrow v = \omega_0 \cdot r \rightarrow - \frac{dv/dr}{v/r} = -1. \quad \downarrow \text{ zur Messung, s.o.}$$

→ Galaxis rotiert differentiell

→ Spiralarme müssten sich schnell "aufwickeln"!

→ Dichtewellen-Theorie:

- Spiralarme sind propagierende Wellen erhöhter Dichte (→ Sternentstehung, H II-Gebiete ...)
- Material durchquert einen Spiralarm in $\approx 10^7$ Jahren

Annahme: Ganze Masse der Galaxis innerhalb von r_0 XI.10

3. Keplersches Gesetz: $v^2 = \text{const.} \cdot \frac{1}{r}$

Ableiten: $\frac{d}{dr}(v^2) = 2v \frac{dv}{dr} = -\text{const.} \cdot \frac{1}{r^2}$

3. Kepler einsetzen für const. $\cdot \frac{1}{r}$: $2v \frac{dv}{dr} = -\frac{v^2}{r}$

$$\rightarrow \boxed{- \frac{dv/dr}{v/r} = 0.5}$$

Vergleiche Messung:

$$- \left. \frac{dv/dr}{v/r} \right|_{r_0} = \frac{A+B}{A-B} \approx 0.2 \quad \downarrow$$

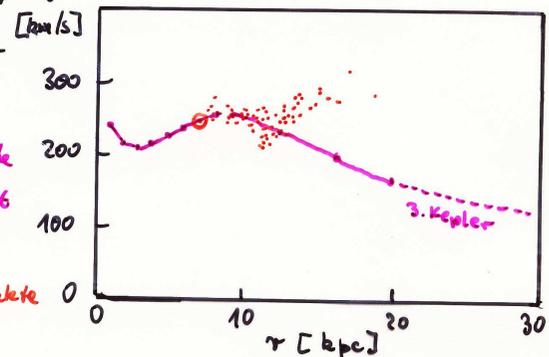
→ Annahme nicht erfüllt, d.h.:

|| ein erheblicher Teil der Masse der Galaxis ||
 || liegt außerhalb von r_0 ||

Rotationskurve der
 Galaxis aus 21cm-
 Linie des HI

—•—•—• alte Werte
 nach Maarten Schmidt
 (1965)

••••• neuere Messpunkte



• Galakt. Halo (Sterne, Kugelsternhaufen)

keine Teilnahme an der galakt. Rotation, sondern
 individuelle Bahnen, langgestreckt, isotrop orientiert

Das Galaktische Zentrum

- Extinction $A_V = 27 \text{ mag}$ → nur im IR + Radio beobachtbar
- Molekülwolken
- $M = 10^{10} M_\odot$ innerhalb von 300 pc
- zentrale Radioquelle Sgr A* :
 - ϕ nur $\leq 13 \text{ A.U.}$?
 - Radialgeschwindigkeit ≈ 0
- "supermassives" Schwarzes Loch von $\sim 10^6 M_\odot$

Region des Galaktischen Zentrums

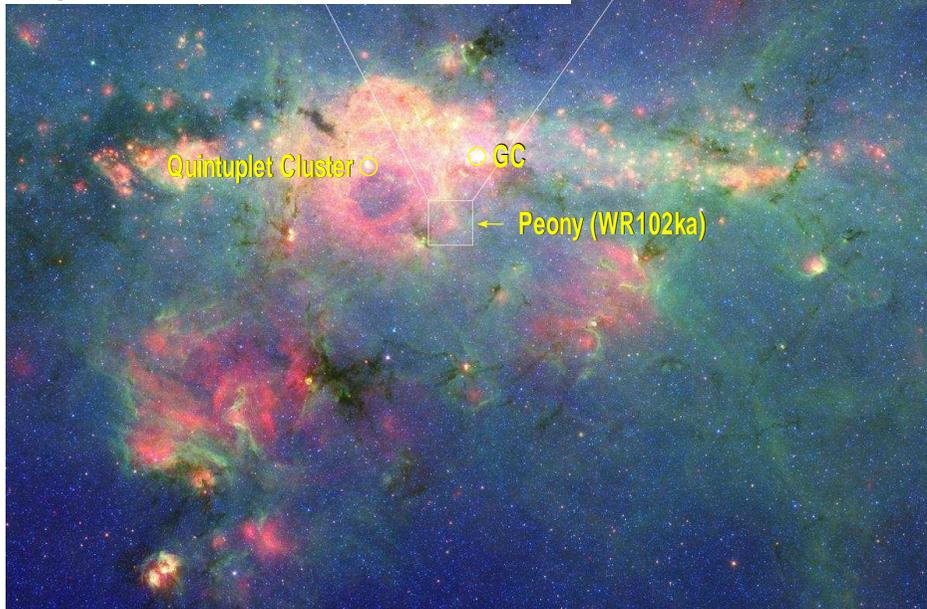
(HST + Spitzer Farb-Komposit)

3 massereiche Sternhaufen: Galactic Center Cluster; Quintuplet Cluster; Arches Cluster



30 pc (100 Lichtjahre)

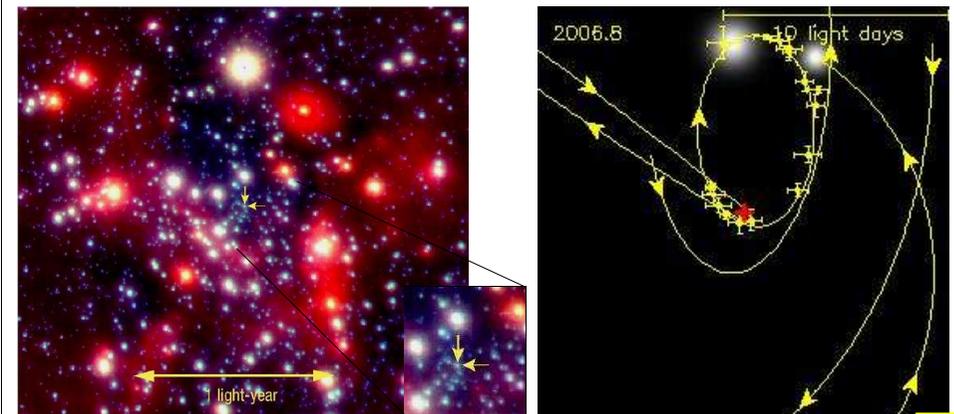
Region des Galaktischen Zentrums



Spitzer Farb-Komposit 3.6 μm / 8 μm / 24 μm

Das Galaktische Zentrum

- Entfernung: 8 kpc (26 000 Lichtjahre)
- Im Zentrum: *supermassereiches Schwarzes Loch* mit $3 \cdot 10^6 M_\odot$, abgeleitet aus der schnellen Bewegung der Nachbarsterne (→ Film)
- Sgr A* ist zur Zeit dunkel (nicht *aktiv*)
- Wolke von ca. 3 Erdmassen im Anflug → Anstieg vorhergesagt



• Stellarstatistik

Def.: Leuchtkraftfunktion eines Samples von Sternen

= Verteilung auf die verschiedenen Leuchtkräfte bzw. absolute visuelle Helligkeiten M_v

$$LF(M_v) dM_v = \text{Zahl der Sterne im Helligkeitsintervall } (M_v, M_v + dM_v)$$

Def.: Anfangs-Leuchtkraftfunktion (Initial Luminosity Function)

ILF = Verteilung der Leuchtkräfte beim Null-Alter (ZAMS)

Rückrechnung aus LF impliziert den zeitlichen

Verlauf der Sternentstehungsrate (Star Formation Rate, SFR)

Falls $SFR(t) = \text{const.}$ seit T_0 = Entstehung der Galaxie, (i.A. schlechte Annahme!)

$$\rightarrow LF(M_v) = ILF(M_v) \cdot \min\{1, T_0/\tau_{\text{ZAMS}}\}$$

d.h. Sterne mit $\tau_{\text{ZAMS}} < T_0$ sind nur noch anteilig vorhanden

Hauptbeitrag zur Gesamt-Leuchtkraft:

- LF der Sonnenumgebung: $M_v \approx 1 \text{ mag}$ (A-Sterne)
- IMF (≙ junge Sternhaufen): O-Sterne

Umrechnung der Leuchtkraft-Verteilung auf eine Massenverteilung

($M_v \rightarrow L \rightarrow M$ mithilfe der Masse-Leuchtkraft-Relation $L(M)$ [siehe Kap. VI.15])

Def.: Anfangs-Massenfunktion (Initial Mass Function, IMF)

$$IMF(M) \cdot dM = \text{Zahl der Sterne, die im Massenintervall } (M, M+dM) \text{ entstehen}$$

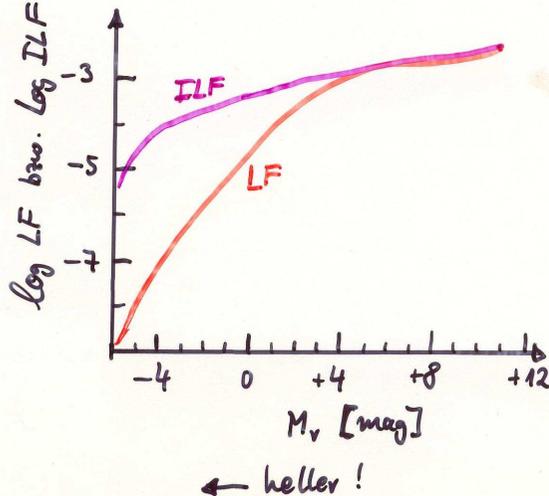
auch üblich:

$$\xi(M) := IMF(M) \cdot M$$

d.h.: $\xi(M) dM = \text{Masse, die auf Sterne im Massenintervall } (M, M+dM) \text{ entfällt}$

Leuchtkraftfunktion LF und Anfangs-LF (ILF) der Hauptreihensterne in der Sonnenumgebung pro pc^3 und pro M_v -Magnitude

[nach Der Neue Kosmos, p. 305]



Erste Näherung: Potenzansatz

$$IMF(M) \propto M^{-(\beta+1)} \quad \text{oder} \quad \xi(M) \propto M^{-\beta}$$

oft verwendeter Wert: $\beta = 1.35$,

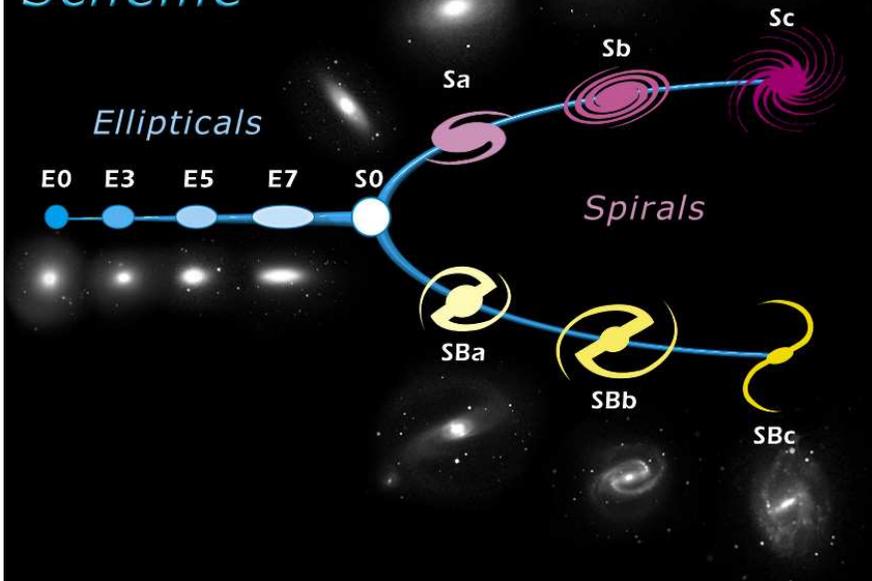
sog. "Salpeter-IMF" (Salpeter, 1955)

Totale Sternentstehungsrate $SFR(t)$

- derzeit in der Galaxie: einige M_{\odot} pro Jahr
- anfänglich viel höher
- zeitweilige "Starbursts" ??
- Modellansatz z.B. $\propto g^2$

Edwin Hubble's Classification Scheme

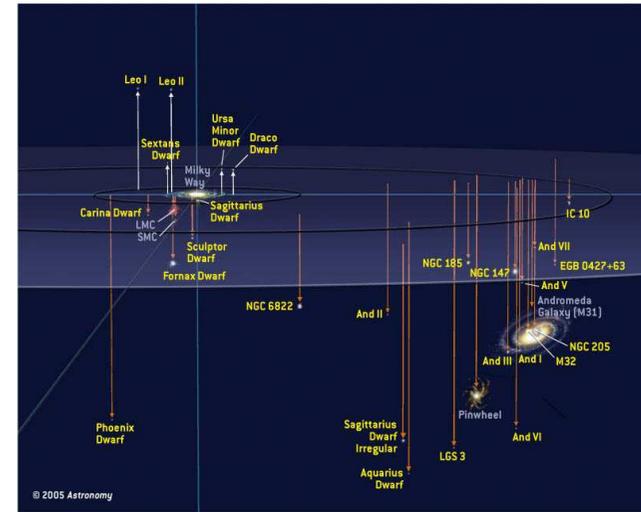
11-33



Die Lokale Gruppe

11-35

- Radius etwa 1 Mpc
- Größte Mitglieder: Andromeda-Galaxie und Milchstrasse
- Etwa 60 weitere Zwerggalaxien



E0... E7: Elliptische Galaxien

11-34

- $E_n, n = 10 \cdot (1 - b/a)$, nur z.T. Projektionseffekt
- alte Sterne, 10^{10} Jahre alt \rightarrow viel Rote Riesen
 - wenig Gas ($< 1\%$); Metallizität Z steigt mit Größe
 - Dynamik nicht durch Rotation bestimmt

Sa ... Sb ... Sc: Spiralgalaxien

SBa ... SBb ... SBc: " mit Balken

vergl. unsere Galaxie: Typ Sb bis Sc

- Bulge + Scheibe + Spiralarme bzw. Balken
- Gas von 2% (in Sa) bis 15% (in Sc)
- starke Rotation

Massen der Galaxien:

- aus Leuchtkraft: $M/M_\odot = \text{const.} \cdot L/L_\odot$
"const." in Sonnen umgebung = 3
- aus Dynamik von Galaxienhaufen: "const." = 200 ?
 \rightarrow Problem der "Missing Mass"

Unsere Nachbarn:

11-36

Große Magellansche Wolke [Large Magellanic Cloud, LMC]

Kleine " " [Small " " , SMC]

Irreguläre Zwerggalaxien

Abstand von uns: LMC 50 kpc, SMC 65 kpc

vergl. ϕ der Galaxie: 30 kpc

Verbindung zur Galaxie: "Magellanic Stream" (HI)

Massen: LMC $10^{10} M_\odot$, SMC $2 \cdot 10^9 M_\odot$

Metallarm: $Z = \frac{1}{4} Z_\odot$ (LMC) bzw. $\frac{1}{10} Z_\odot$ (SMC)

viel Gas, viel junge Sterne \rightarrow noch nicht so weit entwickelt

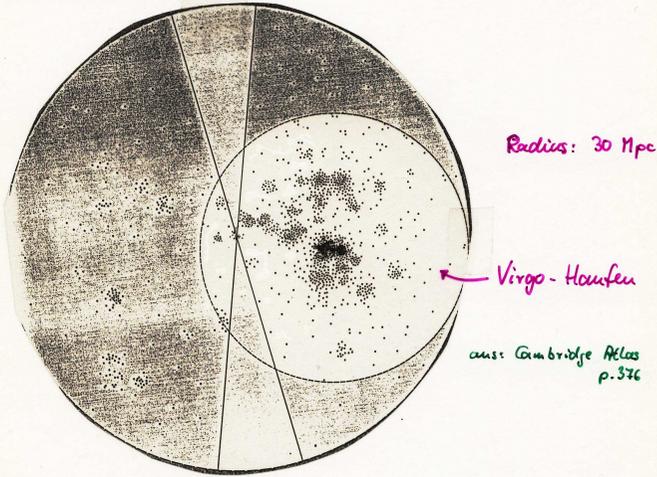
Andromeda-Nebel (M31)

XI. 16

11-37

$d = 670 \text{ kpc}$ Typ Sb flacher Sichtwinkel: 13°
ähnlich unserer Galaxis, aber doppelt so groß
2 Elliptische Zwerggalaxien als Begleiter

- Galaxienhaufen



Galaxienhaufen

11-39

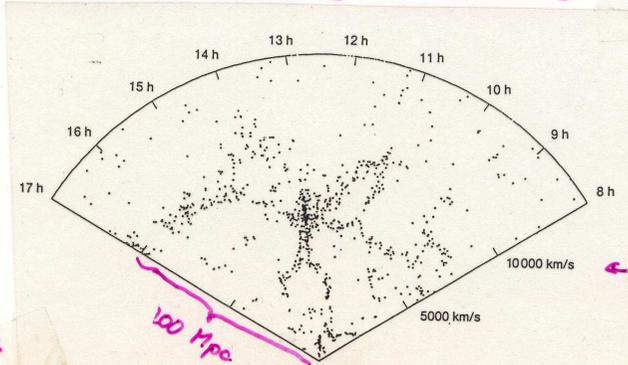
- ~1000 Galaxien, gravitativ gebunden
- Gravitationspotential viel tiefer als durch leuchtende Materie \rightarrow Hinweis auf *Dunkle Materie*
 - hohe Dispersion der Radialgeschwindigkeiten \rightarrow Virialmasse (Zwicky 1933);
 - Röntgenemission zeigt 30MK heißes *Inter-Cluster-Gas* \rightarrow tiefes Gravitationspotential

Abb.: Virgo-Cluster, Entfernung 16Mpc (d.h. nahe!), Radius etwa 2 Mpc

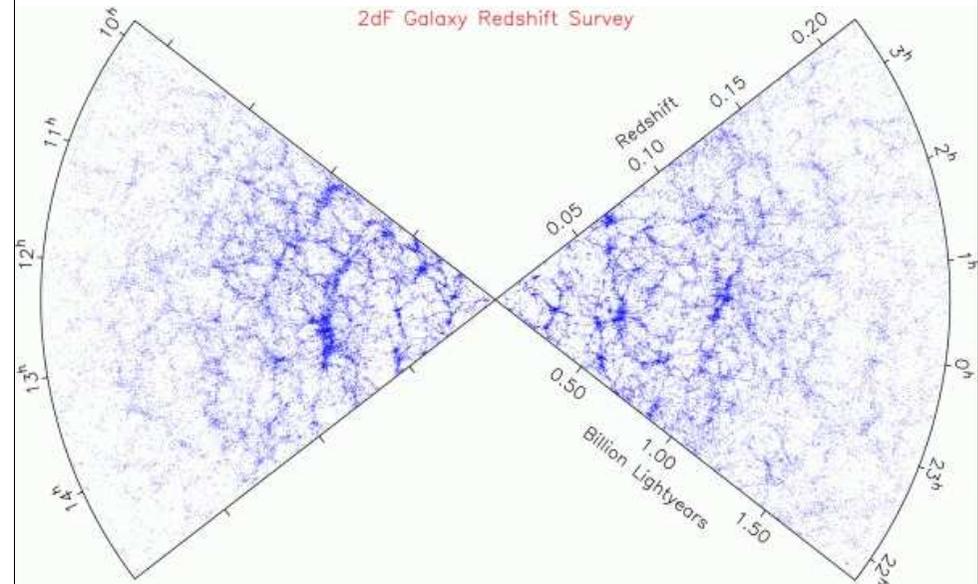


11-38

- Superhaufen und "Voids" [= Leere Regionen]



11-40

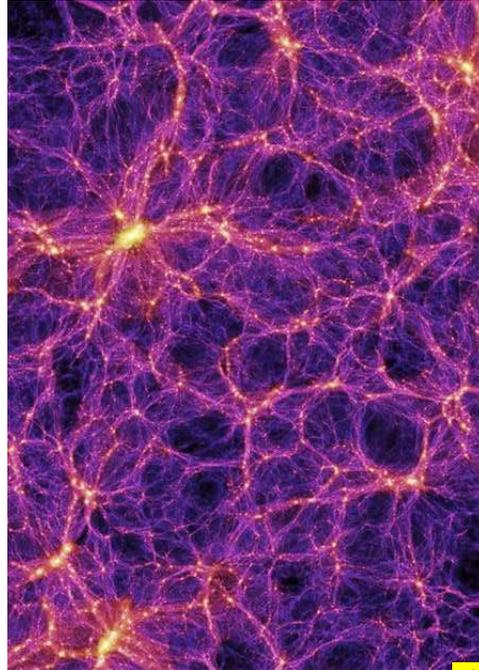


The Cosmic Web

11-41

- Simulationsrechnungen zur kosmologischen Strukturbildung
- Wichtigster (oder oft sogar einziger) Mechanismus: Gravitationswirkung von *Dunkler Materie*
- Hintergrund: kosmologisches Modell
- Modelle mit *Dunkler Materie* erzeugen Strukturen ähnlich der Beobachtung
- Debatte um Diskrepanzen (z.B. Kroupa 2013)

Abb.: Querschnitt-Schnappschuss aus der *Millenium Simulation* (Springel et al.)



XI.11-43

- "Aktive Galaxienkerne"
 - Spektren: Synchrotron-Emission + Emissionslinien
 - Kern viel heller als restliche Galaxis
 - Untertypen: Seyfert-Galaxien, BL Lac-Objekte (keine Linien), Radio-Galaxien ...
 - Quasare (= Quasi-Stellar Objects, QSO's)
- Aktive Galaxienkerne
- Emissionslinien mit enormer Rotverschiebung (→ Doppler-Effekt!)

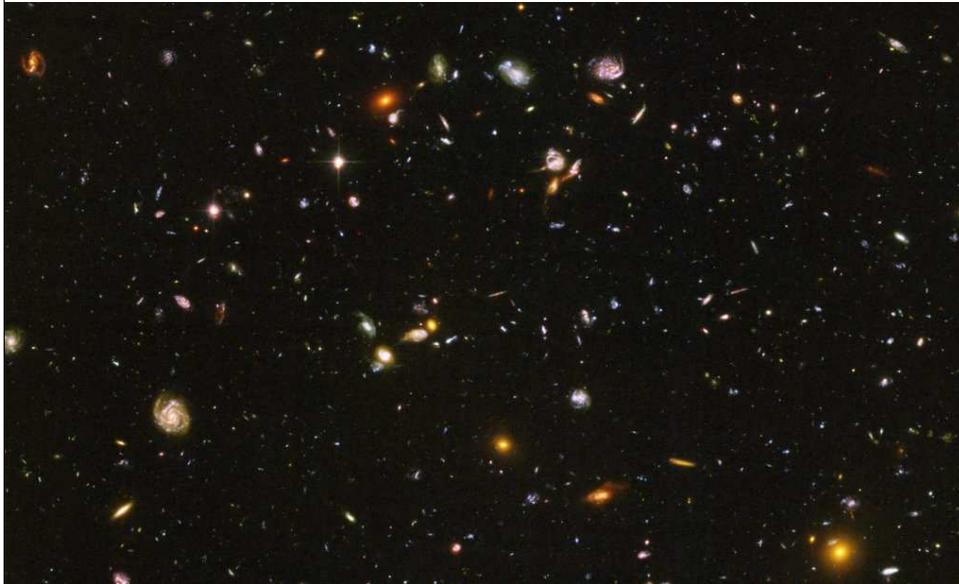
$$\lambda = \lambda_0 (1 + z)$$

$$\text{mit } z = \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \quad \text{relativistisch!}$$

Interpretation als "Nebelflucht": $v_{\text{red}} \sim d$

Das Hubble Deep Field (Ausschnitt)

11-42



11-44

$$\text{Leuchtkräfte} = 10^{45} - 10^{46} \text{ erg/s}$$

$$\text{nach } E=mc^2: \quad \hat{=} 0.05 M_{\odot} \cdot c^2 / \text{Jahr}$$

i.e. 10-100 × heller als normale Galaxien

Variabilitäten innerhalb von Tagen

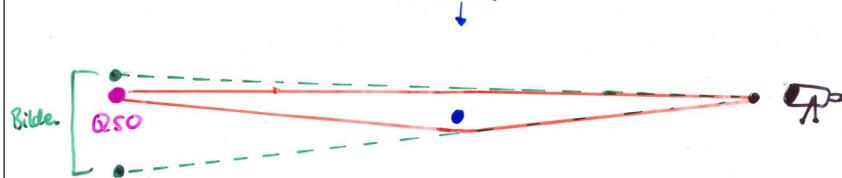
→ Energieerzeugung auf kleinem Gebiet

→ Akkretion auf ein superschweres schwarzes Loch?

Gravitationslinsen

Beobachtung: Doppel- oder Mehrfachquasare
mit identischen Spektren

(schwache) Vordergrund-Galaxis

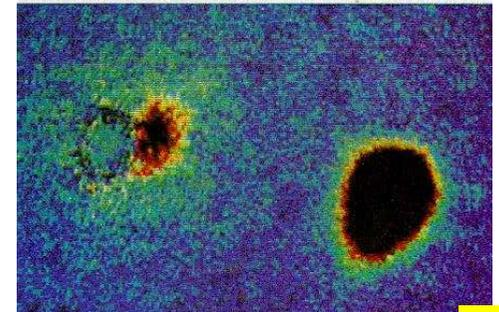
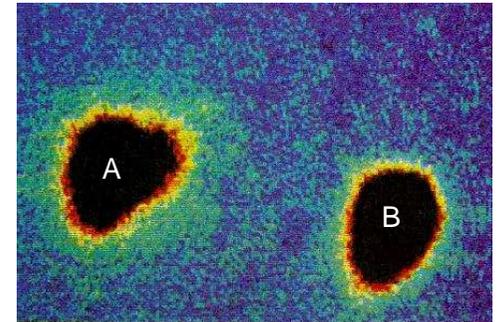


Lichtablenkung im Gravitationsfeld einer Vordergrund-Galaxis (HRT!)

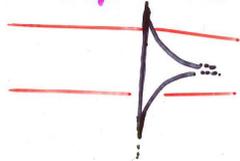
Laufzeitunterschied: Größenordnung 1 Jahr. Beobachtet!?

Der Doppelquasar Q 0957+561

- „Zwei“ Quasare im Abstand von 6"
- Gleiche Spektren, gleiche Rotverschiebung $z=1.41$
- Vordergrundgalaxis mit $z=0.36$ in nur 1" Abstand von B
- Unregelmäßige Lichtkurve von A wiederholt sich in B nach 415 Tagen
- Bestimmung von Linsenmasse und -Entfernung aus Δt möglich
- Abb. oben: Doppelquasar; unten: Wie oben, jedoch nach Abzug der gespiegelten A-Komponente von B \rightarrow übrig bleibt die als Gravitationslinse wirkende Vordergrundgalaxis



Form einer ausgedehnten Glaslinse:



\cong Fokussieren Lichtstrahlen

„Kaustik“ = Ort maximaler Helligkeitsverstärkung



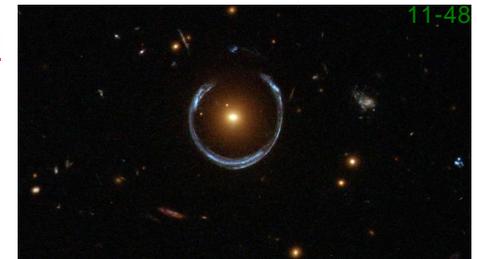
- Kleine, kompakte Vordergrundsterne

verursachen wegen ihres Vorüberfliegens Helligkeitsschwankungen,
die in der Zeit symmetrisch sind.

\rightarrow sog. Microlensing

Gravitationslinsen (Beispiele)

Einstein-Ring: Linse und Quelle fast perfekt auf einer Linie zum Beobachter (Bild: HST)



Einstein-Kreuz: Vierfach-Bild des Quasars Q2237+030; in der Mitte die Vordergrundgalaxis ZW 2237+030 als Linse (Bild: HST)

