

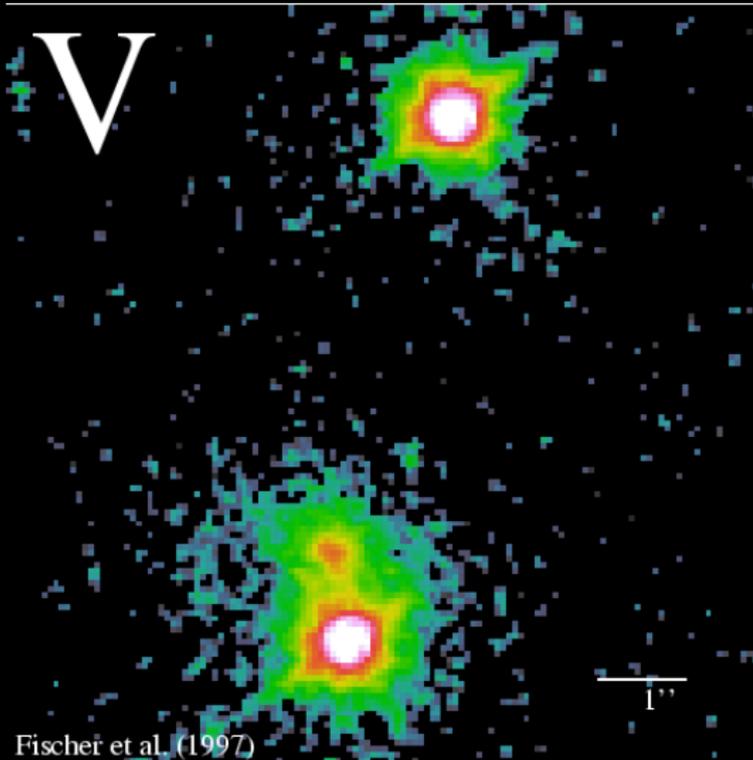
# Gravitationslinsen

Bernhard Scherl

20. Juni 2011

**Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg**

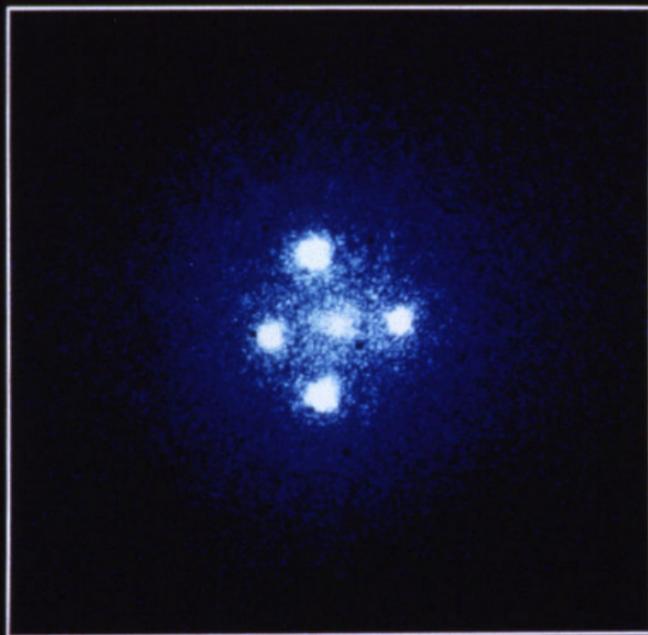




Doppelquasar Q0957V (CASTLEs)



Galaxienhaufen Abell 2218, Einsteinring (HST)



**Gravitational Lens G2237+0305**

Einsteinkreuz (Hubblesite)

# Inhalt

- 1 Einführung
- 2 Theoretischer Überblick
  - Lichtablenkung
  - Effekte
- 3 Gravitationslinsen
  - Microlensing
  - Macrolensing
  - Massen-/Entfernungsbestimmung
  - Bestimmung anderer Parameter
- 4 Surveys
  - Microlensing-Surveys
  - Macrolensing-Surveys
- 5 Zusammenfassung

# Historisches

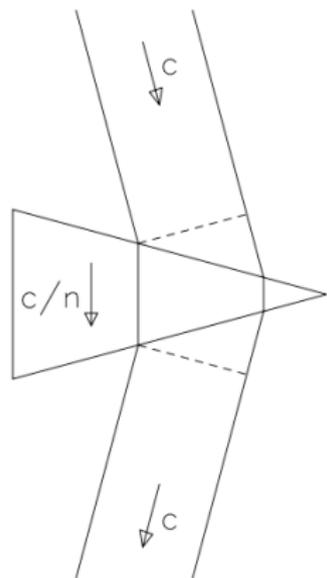
- Anfang 20. Jahrhundert: ART (Einstein)
- Voraussage: Lichtablenkung im Gravitationsfeld
- Überprüfung 1919 (Sonnenfinsternis)
- Gute Übereinstimmung mit Theorie
- Im Laufe der Zeit höhere Genauigkeiten (VLBI, Hipparcos, Gaia)

# Massenbestimmung im All

- Masse-Leuchtkraft-Beziehung (Sterne)
- Helligkeitsprofile (Galaxien)
- Rotationskurven
- Röntgenstrahlung
- Linseneffekte

# Licht im Gravitationsfeld

- Raumzeit bei Linse schwach verformt
- Näherung gültig für kleine  $\Phi$ , langsame Linsen
- Im Gravitationsfeld Brechungsindex  
 $n = 1 + \frac{2}{c^2}|\Phi|$
- Geschwindigkeit des Lichts  
 $v = \frac{c}{n} \approx c - \frac{2}{c}|\Phi|$
- Effekt ähnlich Prisma



(Narayan/Bartelmann)

# Lichtablenkung

- Ablenkwinkel  

$$\hat{\alpha} = - \int \vec{\nabla}_{\perp} n dl = \frac{2}{c^2} \int \vec{\nabla}_{\perp} \Phi dl$$
- Potential Punktmasse  

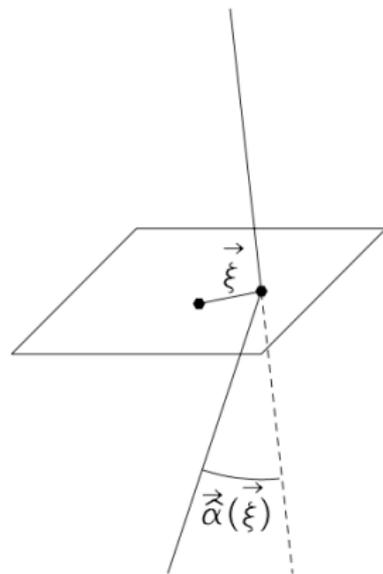
$$\Phi(b, z) = - \frac{GM}{(b^2 + z^2)^{1/2}}$$
- Somit  $\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 b}$



(Narayan/Bartelmann)

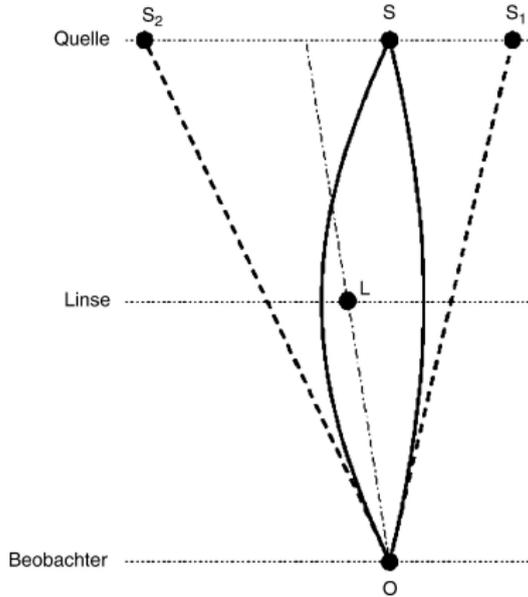
# Thin Screen Approximation

- $\Delta Z \ll$  Abstand  
Beobachter-Objekt  $\rightarrow$  thin screen approximation
- Massenpunkt durch Massenschirm ersetzt
- $\vec{\xi}$  Abstand Massenpunkt-Lichtstrahl auf Schirm,  $M(\xi)$  Massenverteilung in Zwischenbereich
- Integration über Massenelemente auf Schirm
- Somit  $\hat{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4GM(\vec{\xi})}{c^2\xi}$



(Narayan/Bartelmann)

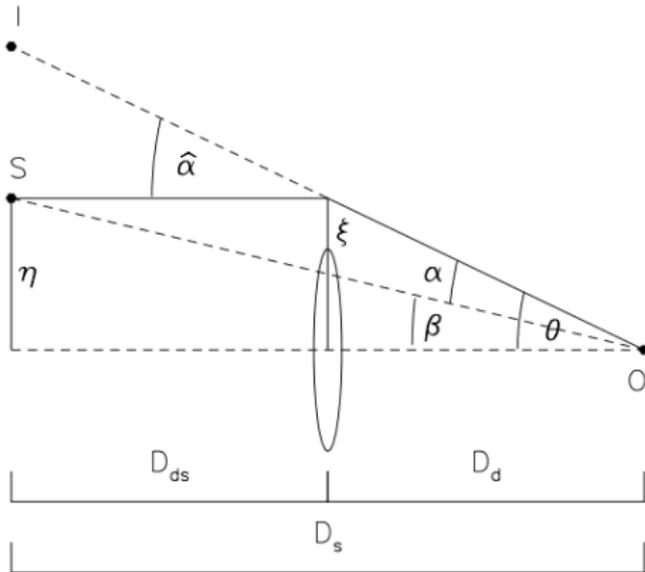
# Lichtlaufweg



(Schneider)

Ablenkung auf zwei  
verschiedenen Wegen  
möglich  $\rightarrow$  Doppelbilder

# Linsengleichung



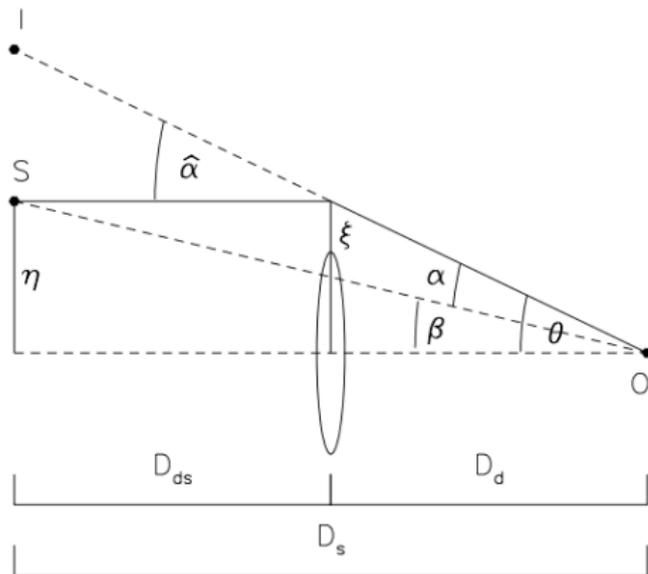
(Narayan/Bartelmann)

- Reduzierter Ablenkwinkel  
 $\alpha = \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}$
- $\theta D_s = \beta D_s + \hat{\alpha} D_{ds}$

## Linsengleichung

$$\beta = \theta - \alpha(\theta)$$

# Einsteinradius



(Narayan/Bartelmann)

- Einsetzen von  $\alpha$  in  
Linsengleichung:  
$$\beta(\theta) = \theta - \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \frac{4GM(\theta)}{c^2 \theta}$$
- Ringförmige Darstellung  
von Objekten auf  
optischer Achse ( $\beta = 0$ )  
bei zirkularer Linse

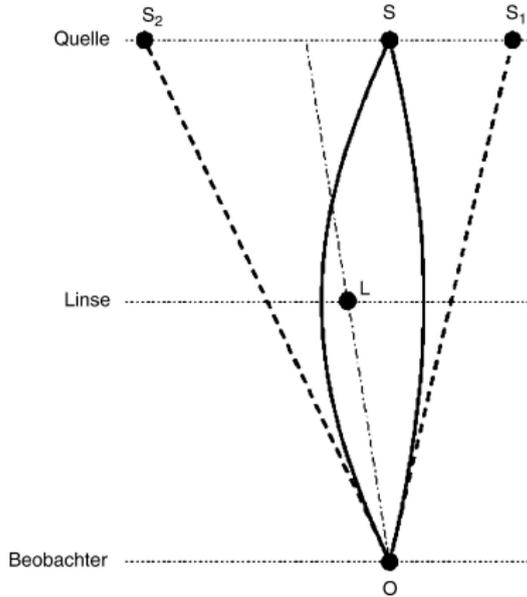
## Einsteinradius

$$\theta_E = \left[ \frac{4GM(\theta_E)}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \right]^{1/2}$$

# Doppelbilder und Vergrößerung

- Linsengleichung Punktlinse  $\beta = \theta - \frac{\theta_E^2}{\theta}$
- Doppelbilder  $\theta_{\pm} = \frac{1}{2} \left( \beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2} \right)$
- Unberücksichtigt bei Einstein: Vergrößerung =  $\frac{\text{Bildfläche}}{\text{Quellenfläche}}$ ,  
zirkular symmetrische Linse:  $\mu = \frac{\theta}{\beta} \frac{d\theta}{d\beta}$
- Punktlinse:  $\mu_{\pm} = \frac{u^2+2}{2u\sqrt{u^2+4}} \pm \frac{1}{2}$  mit  $u = \beta\theta_E^{-1}$
- Für Quelle auf Einsteinradius:  $\mu = 1.34$

# Erinnerung: Lichtlaufweg



(Schneider)

Ablenkung auf zwei  
verschiedenen Wegen  
möglich  $\rightarrow$  Doppelbilder

# Fermatsches Prinzip und Time Delay Function

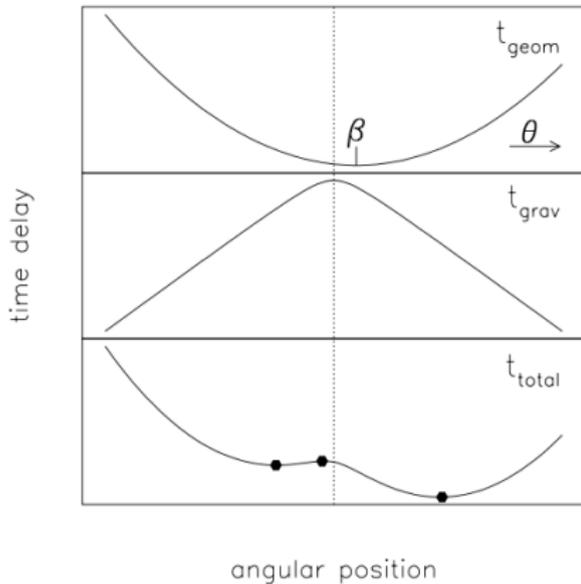
- Fermatsches Prinzip: Licht nimmt schnellsten Weg
- Aus Linsengleichung ergibt sich

## Time Delay Function

$$t(\theta) = \frac{(1+z_d)}{c} \frac{D_d D_s}{D_{dS}} \left[ \frac{1}{2} (\theta - \beta)^2 - \psi(\theta) \right] = t_{geom} + t_{grav}$$

- $t_{geom}$  geometrische Verzögerung,  $t_{grav}$  gravitative Verzögerung
- $t_{grav}$  ist Shapiro delay  $\Delta t = \int_{quelle}^{beobachter} \frac{2}{c^3} |\Phi| dl$

# Time Delay Function

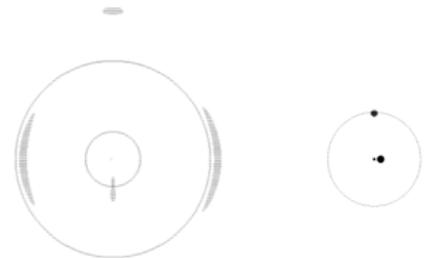


(Narayan/Bartelmann)

- Bilder an stationären Punkten der Oberfläche  $t(\vec{\theta})$
- Lichtankunft zuerst an niedrigstem Punkt, gefolgt von höheren Extrema
- Minima/Maxima: positive Vergrößerung
- Sattelpunkte: negative Vergrößerung
- Krümmung ist inverse Vergrößerung
- Immer ungerade Anzahl an Extrema (und Bildern)

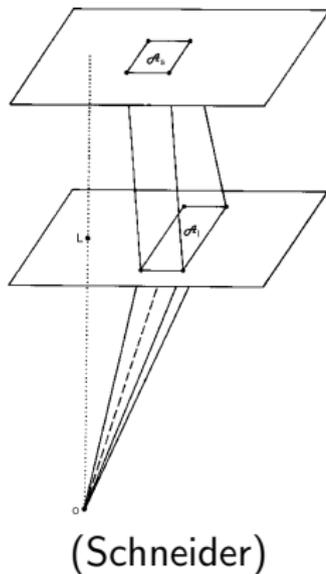
# kritische Lines und Kaustiken

- Ausgedehnte Linsen bilden kritische Lines und Kaustiken
- Bei kritischen Lines verschwindet Determinante der Ableitung der Time Delay Function
- Zu jeder kritischen Line gehört eine Kaustik
- Bei kreissymmetrischen Linsen: 2 kritische Lines, 2 Kaustiken (innere kreisförmig, äußere punktförmig)



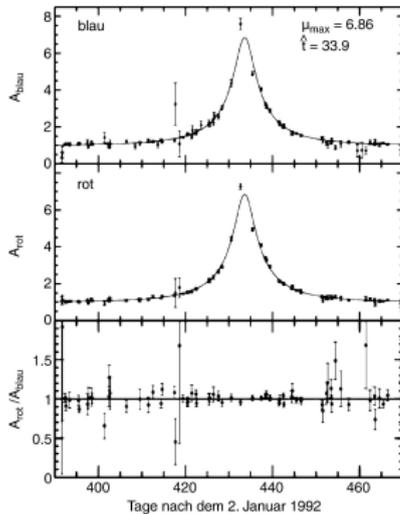
(Narayan/Bartelmann)

# Bewegliche Linsen und Lichtverstärkung



- Microlensing: Benutzung von Sternen als Linsen
- Stern als Linse in unserer Galaxis bewirkt Ablenkung, die so klein ist, dass sie nicht beobachtbar ist (mas-Bereich)
- Verstärkungseffekt der Linse (durch differentielle Ablenkung) ist jedoch beobachtbar (Liouville-Theorem)
- Fluss der Quelle müsste bekannt sein, ist er aber nicht

# Bewegliche Linsen und Lichtverstärkung



(Schneider)

- Lösung: Zeitliche Variation durch Relativbewegung von Quelle, Linse und Beobachter
- Gut geeignet als Quelle: Magellansche Wolken
- Quelle muss innerhalb Einsteinradius sein

# Sterngas

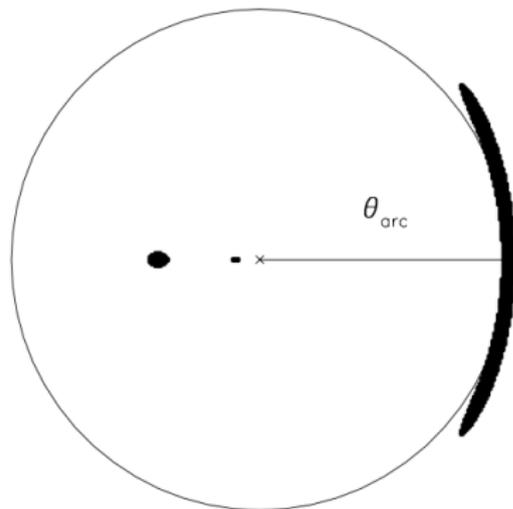
- Macrolensing: Begriff für Nutzung von Galaxien als Linsen
- Galaxien können als Gas mit Materie als Teilchen aufgefasst werden
- Annahme: Isotherme Verteilung (Teilchen maxwellverteilt, aber „Temperatur“ nicht von Radius abhängig)
- Im hydrostatischen Gleichgewicht Druckgradient gleich Gravitationsbeschleunigung, also  $\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2}$
- Dichte einfach mittelbar mittels  $\rho(r) = \langle m \rangle n(r)$
- Mit  $P = nk_B T$  und  $\frac{3}{2}k_B T = \frac{\langle m \rangle}{2} \langle v^2 \rangle$  folgt:  
$$\frac{dP}{dr} = \frac{\langle v^2 \rangle}{3} \frac{d\rho}{dr} = \sigma_v^2 \frac{d\rho}{dr}$$

# Sterngas

- Mit der eindimensionalen Geschwindigkeitsdispersion  $\sigma_v$ , die durch den Dopplereffekt (z. B. durch die Rot-/Blauverschiebung der H-Linie) beobachtet werden kann, und bei isotroper Maxwellverteilung gilt dann  $\langle v^2 \rangle = 3\sigma_v^2$
- Da eine Galaxie als abgeschlossenes System im hydrostatischen Gleichgewicht betrachtet werden kann, gilt das Virialtheorem  $2\overline{E_{kin}} + \overline{E_{pot}} = 0$
- Dabei sind  $E_{kin} = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$  und  $E_{pot} = -1/2 \sum_{i \neq j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}}$

## Massen-/Entfernungsbestimmung

- Mit Einsteinradius kann Masse oder Entfernung gut bestimmt werden
- Annahme typischer Massen und Entfernungen
- Microlensing:  $\frac{M}{M_{\odot}} = (0.9\text{mas})^2 \left(\frac{D}{10\text{kpc}}\right)^{-1} \theta_E^2$
- Macrolensing:  $\frac{M}{10^{11}M_{\odot}} = (0.9\text{as})^2 \left(\frac{D}{\text{Gpc}}\right)^{-1} \theta_E^2$



(Narayan/Bartelmann)



Galaxienhaufen Abell 2218, Einsteinring (HST)

# Hubble-Konstante

- $H_0 \Delta\tau$  (mit Time Delay  $\Delta\tau$ ) hängt nur von Linsenart und Systemgeometrie ab, von nichts anderem
- Vorteil: Direkte Messung ohne vorherige Stufen
- Problem: Unbekannter Faktor  $\kappa$  abhängig von die Linse umgebendem Cluster
- Lösbar z. B. mittels Messung der Geschwindigkeitsdispersion

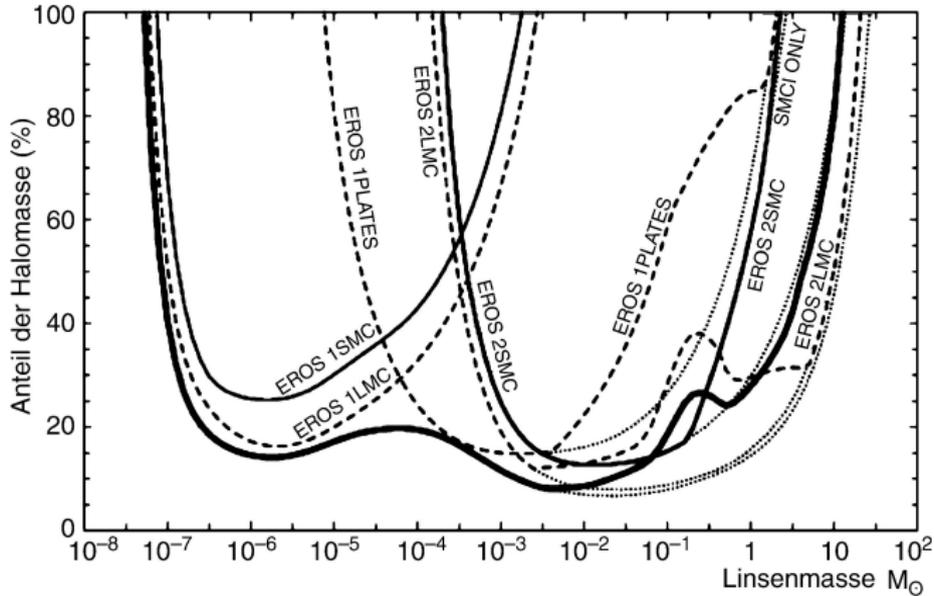
# Kosmologische Konstante

- Methode 1: Anzahl gelinster Quellen für feste vorbeiziehende Galaxienanzahl steigt stark mit ansteigendem  $\Lambda_0$  an
- Methode 2: Höhere Rotverschiebung  $z_d$  bei steigendem  $\Lambda_0$
- Methode 3: Bildtrennungen vergleichen mit vorgegebenem  $\Lambda_0$
- Ergebnisse mit Methode 1:  $\Lambda_0 < 0.62$  ( $2\sigma$  c.l.)
- Ergebnisse mit Methode 3:  $\Lambda_0 = 0.64^{+0.15}_{-0.26}$  ( $1\sigma$  c.l.)

# Microlensing-Surveys

- Derzeit MACHO, EROS, OGLE und DUO
- EROS, MACHO: LMC
- DUO, MACHO, OGLE: Galactic Bulge
- Nützlich u. a. zur Suche nach Dunkler Materie

# Microlensing-Surveys



(Schneider)

# Macrolensing-Surveys

- Wichtigste: CASTLEs
- Andere: ANGLES, CLASS, COMBO-17, DLS
- Galaxienstrukturdetails
- Galaxienentwicklung
- Dunkle Materie
- Bestimmung kosmologischer Parameter

# Zusammenfassung

- ART: Lichtablenkung durch Gravitation
- nützlich zur Bestimmung von Massen oder Entfernungen
- interessante optische Effekte
- Verwendung von kleinen oder großen Objekten (Sterne oder Galaxien/Galaxienhaufen) als Linsen möglich
- Möglichkeit zur Bestimmung kosmologischer Parameter

# Quellen

-  Uli Heber: Skript zur Vorlesung Gravitationslinsen, SS 2005
-  Peter Schneider: Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie, Springer-Verlag, 2006
-  <http://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinse>
-  R. Narayan, M. Bartelmann: Lectures on Gravitational Lensing, Cambridge/Garching, 1995
-  Hubble Space Telescope, <http://www.spacetelescope.org>
-  Hubblesite, <http://www.hubblesite.org>
-  Castles Survey, <http://www.cfa.harvard.edu/castles/>