



Microlensing



-Dunkle Materie in der Galaxis-

Seminar Astro- und Teilchenphysik WS 07/08

Universität Erlangen-Nürnberg

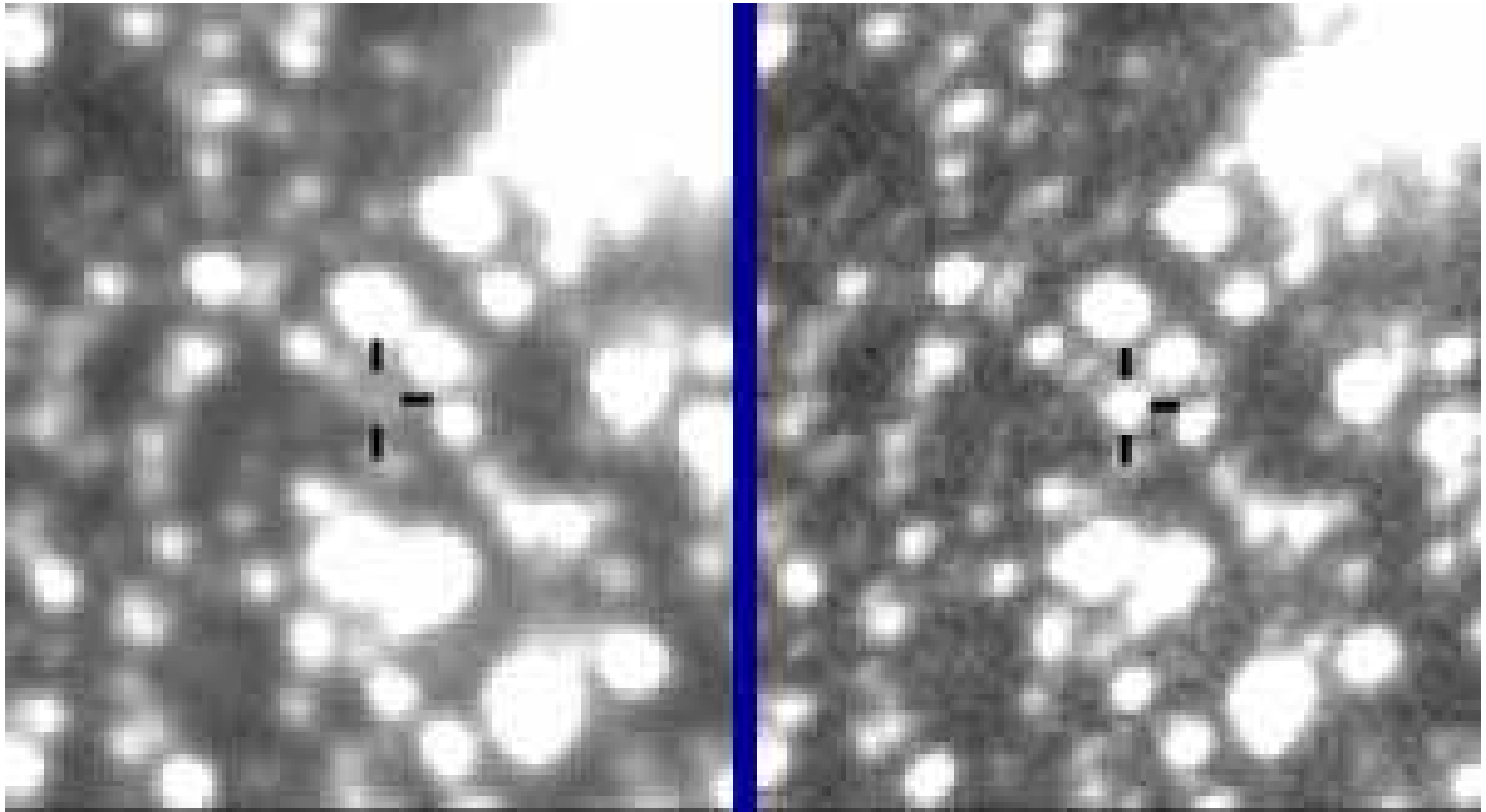
Referent: Julian Jaus

19. Nov. 2007

1. Einführung
2. Aufbau der Galaxis
3. Charakteristische Eigenschaften des ML-Effekts
4. Beobachtungsprogramme und deren Ergebnisse
5. Weitere Anwendungsmöglichkeiten
6. Zusammenfassung und Ausblick

- Nicht Galaxie, sondern kompaktes, stellares Objekt dient als Linse für das Licht eines Hintergrundsterns
- Entstehende Bilder der Quelle nicht auflösbar (μas - mas -Bereich)
- Charakteristische zeitliche Änderung des gemessenen Quellenlichts durch Relativbewegung Erde/Quelle/Linse

1. Einführung - Mikrolinsenereignis



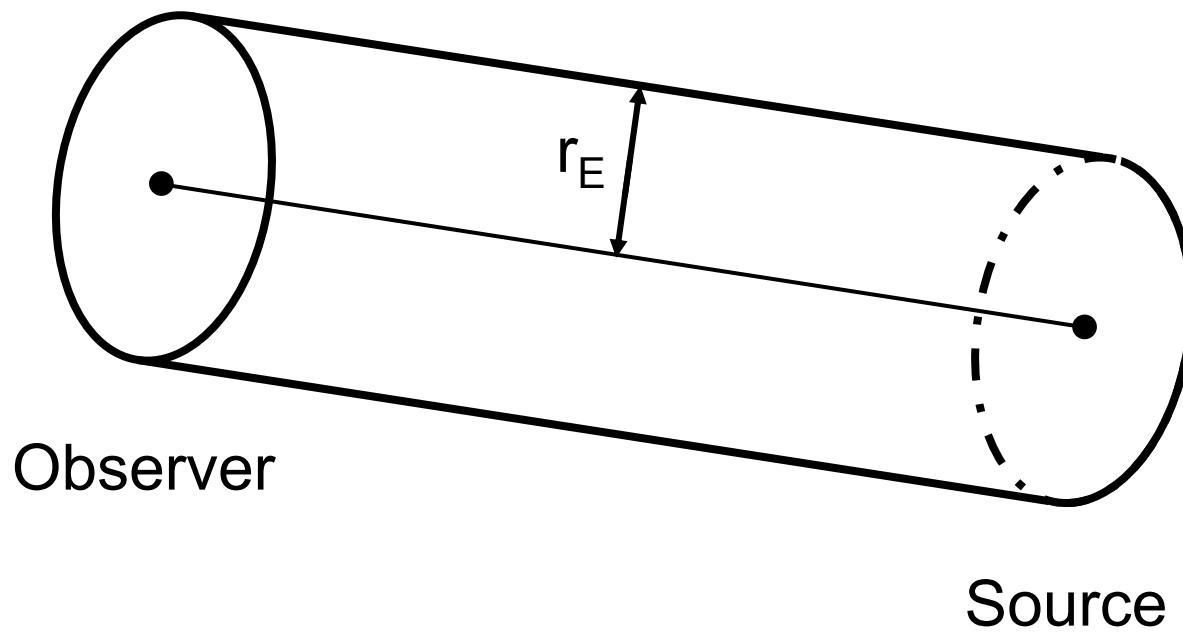
- Theoretische Vorhersage durch Einstein (1936)
- Zwicky proklamiert Macrolensing (1937)
- Theoretische Beschreibung des ML-Effekts durch Liebes und Refsdal (1960er)
- Erste Anwendungsidee des MLE von Paczynski zur Lösung des DM-Problems (1986)

- Viele Hintergrundsterne (z.B. in LMC) beobachten
 - Ereignisrate gibt Aufschluss über Gehalt an dunklen Linsensternen, sog. MACHOs (**MA**ssive **C**ompact **H**alo **O**bject) in unserer Halo
- Bei „hoher“ ML-Ereignisrate:
 - (Teil-)Lösung zum Problem der fehlenden Masse in unserem Universum
- Bei entsprechend niedriger Ereignisrate:
 - Verstärkte Suche nach anderen Lösungen, wie z.B. WIMPS

2. Aufbau der Galaxis – Optische Dicke

- Fragestellung: Wie viele Hintergrundsterne muss man beobachten, um ML-Ereignisse entdecken zu können?
- Einführung des Begriffs der optischen Dicke
 - Wahrscheinlichkeit, dass ein Quellenstern in einer bestimmten Zeit mit einer minimalen Verstärkung von 1,34 gelinst wird
- Effekt erst relevant, wenn die Quelle den Einsteinradius der Linse passiert

„Microlensing Tube“



2. Aufbau der Galaxis – Optische Dicke III

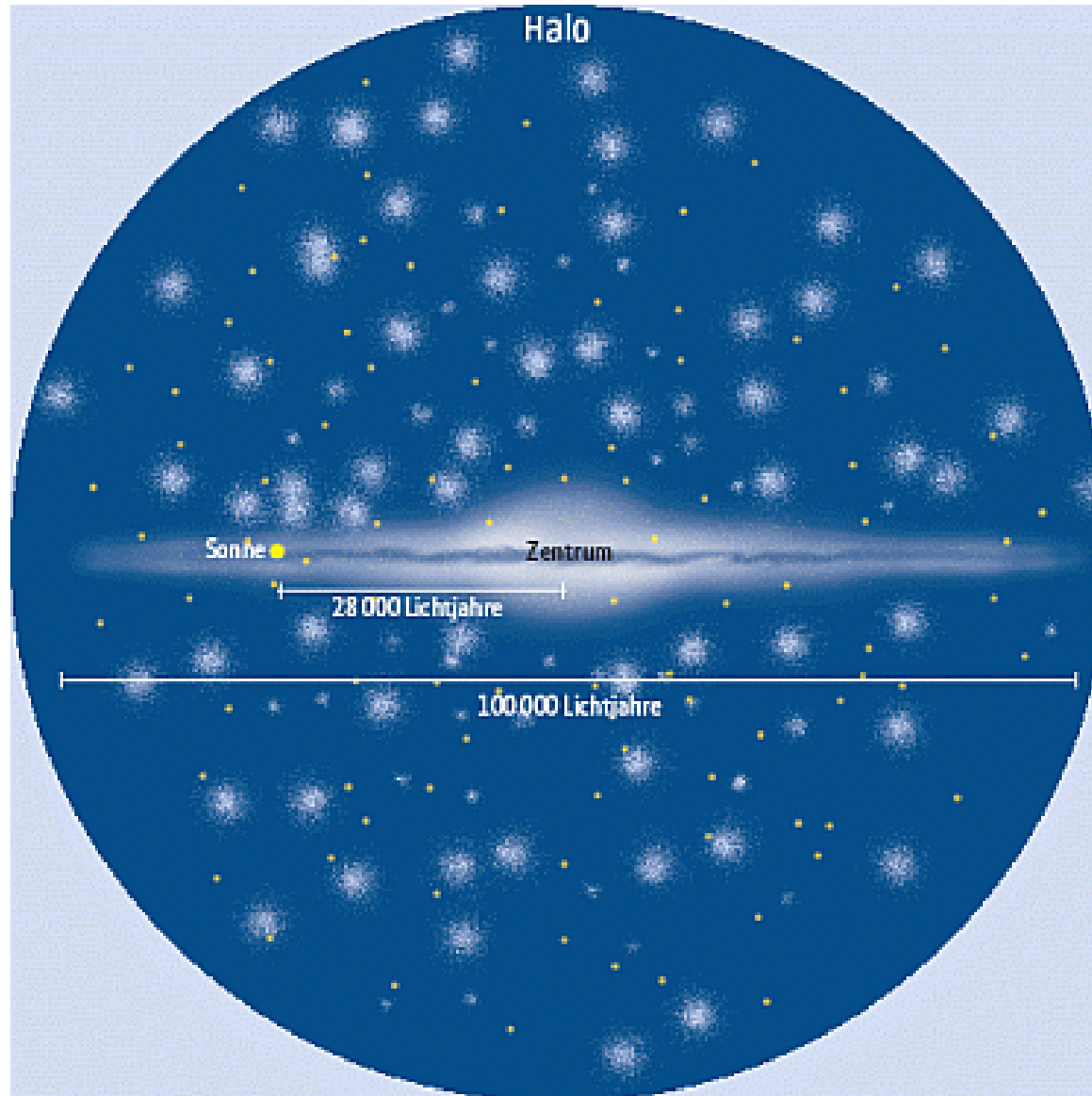
theoretische optische Dicke:

$$\tau(D_{OS}) = \int_0^{D_{OS}} dD_{OL} \int_0^{\infty} dm \frac{dn_L}{dm} \pi r_E^2 \quad \text{mit} \quad \rho_L = \int_0^{\infty} dm m \frac{dn_L}{dm}$$

gemessene optische Dicke:

$$\tau = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^{N_{Events}} \frac{t_i}{\varepsilon(t_i, A_{\max,i})}$$

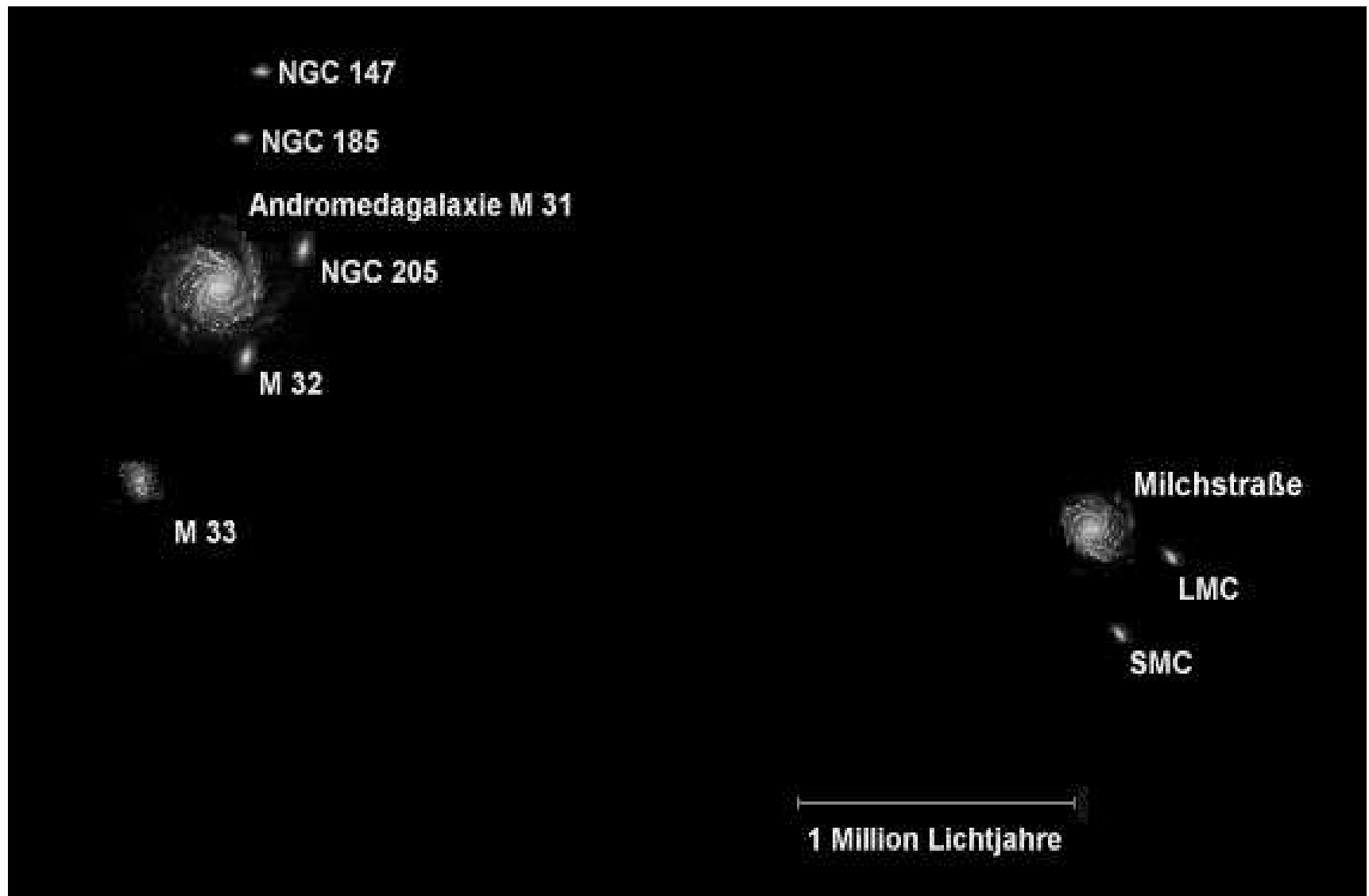
2. Aufbau der Galaxis – Beobachtungsgebiete



2. Aufbau der Galaxis – Beobachtungsgebiete II



2. Aufbau der Galaxis – Beobachtungsgebiete III



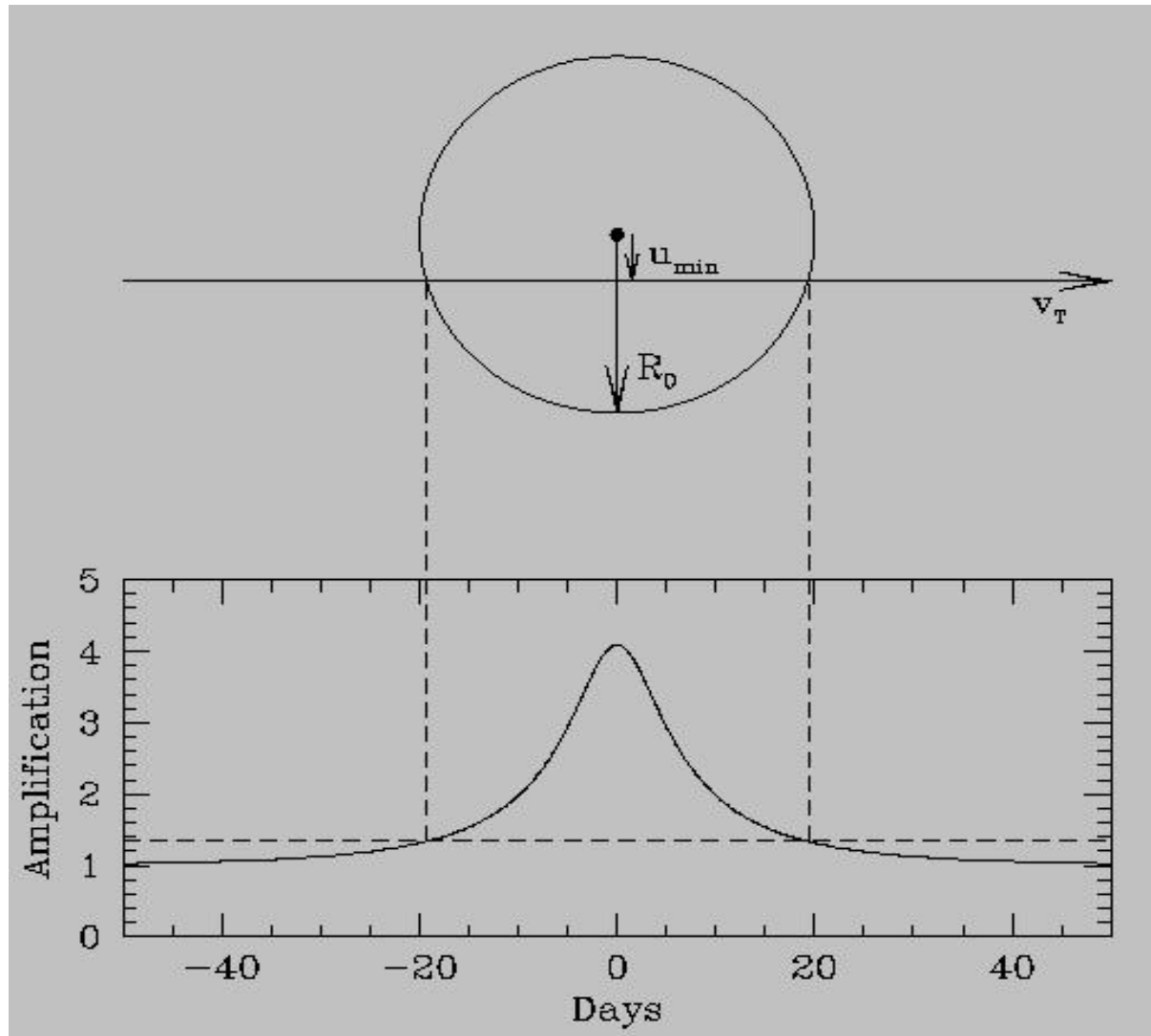
3. Charakteristische Merkmale des ML-Effekts

Unterscheidung von Veränderlichen:

2 Arten von Veränderlichen  eruptiv
periodisch

- ML-Effekt ist achromatisch
- ML-Ereignisse nur einmal bei einem Stern
- Unterscheidung durch Andersartigkeit der Lichtkurven

3. Charakteristische Merkmale des ML-Effekts – Lichtkurve I



3. Charakteristische Merkmale des ML-Effekts – Lichtkurve II

Verstärkungsfaktor: $A = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$ mit $u \equiv \frac{\beta}{\Theta_E}$

mit $u^2(t) = \frac{b^2 + [v^\perp(t - t_0)]^2}{r_E^2} \equiv u_0^2 + \left[\frac{(t - t_0)}{t_E} \right]^2$

$$t_E = \frac{r_E}{v_\perp} = \frac{\Theta_E(M, D_L, D_S) D_L}{v_\perp}$$

Beispiel: $D_S = 50 \text{ kpc}$ $D_L = 10 \text{ kpc}$
 $v_\perp = 300 \text{ km/s}$ $\rightarrow t_E \sim 47 d \sqrt{\frac{M}{M_\odot}}$

4. Beobachtungsgruppen und deren Ergebnisse

- 90erJahre: erste Beobachtungsgruppen (MACHO, EROS, OGLE)
- Regelmäßige Beobachtung
- Erste Beobachtungsziele: Magellansche Wolken und Zentrum der Galaxis
- Photometrie: Generierung der Lichtkurven (für zwei Wellenlängen)
- Errichtung eines internationalen Netzwerkes

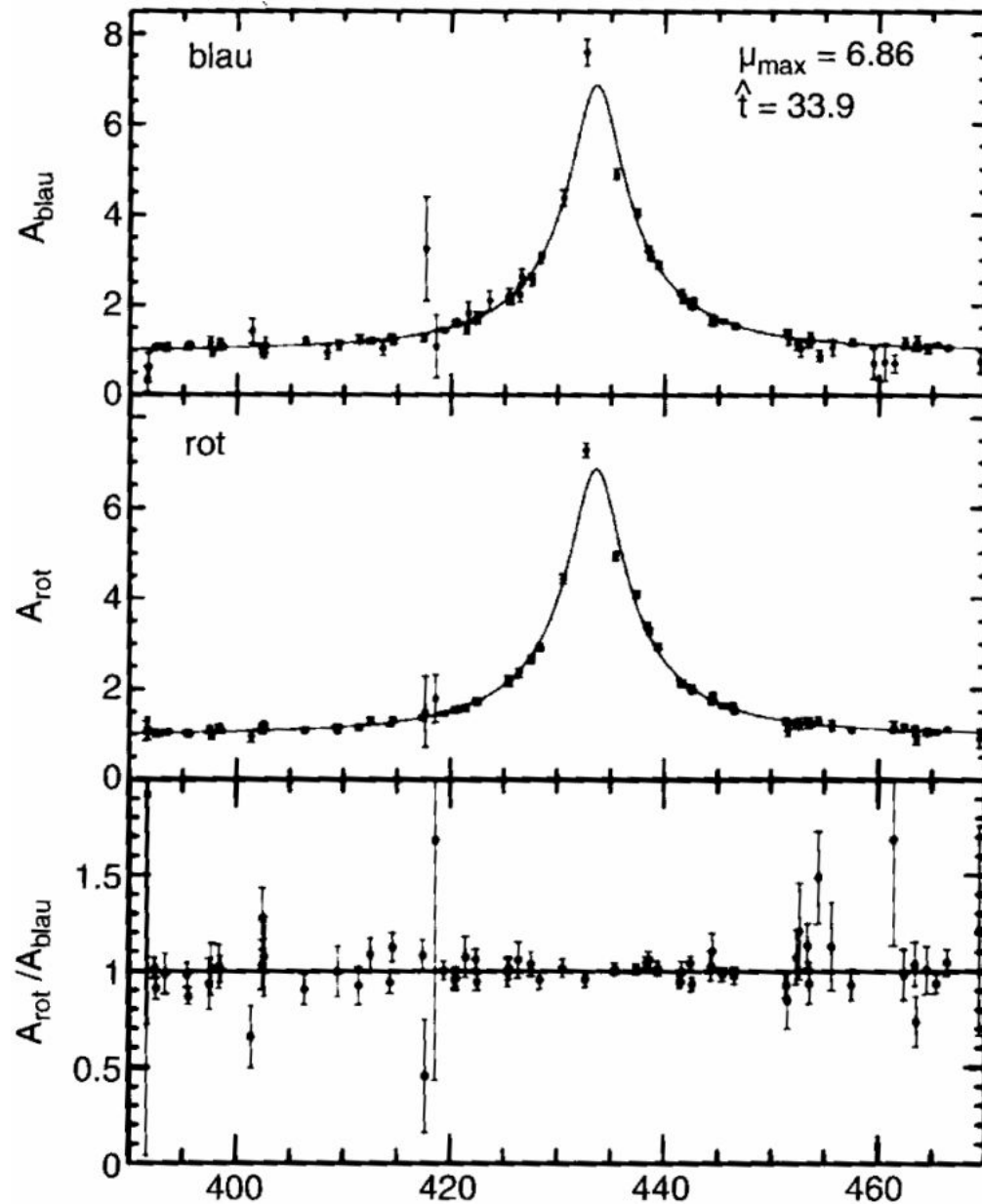
MACHO-Projekt

- Besteht die galaktische Halo aus MACHOs?
- 20 Detektionen in 7 Jahren
- Viel zu geringe Rate für Halo, die komplett aus kompakten Objekten besteht

Halodichte: $\rho_0^H \cong 7.9 \times 10^{-3} M_\odot / pc^3$

→ Begrenzung des Anteils von kompakten Objekten im Massenbereich von $10^{-5} - 30 M_\odot$ an der Halodichte

4. Beobachtungen in Richtung LMC II – MACHO-1992-LMC-1



Lichtkurve des
ersten
detektierten
ML-
Ereignisses in
der LMC vom
2. Januar 1992

EROS-Projekt (**E**xpérience pour la **R**echerche d'**O**bjets **S**ombres)

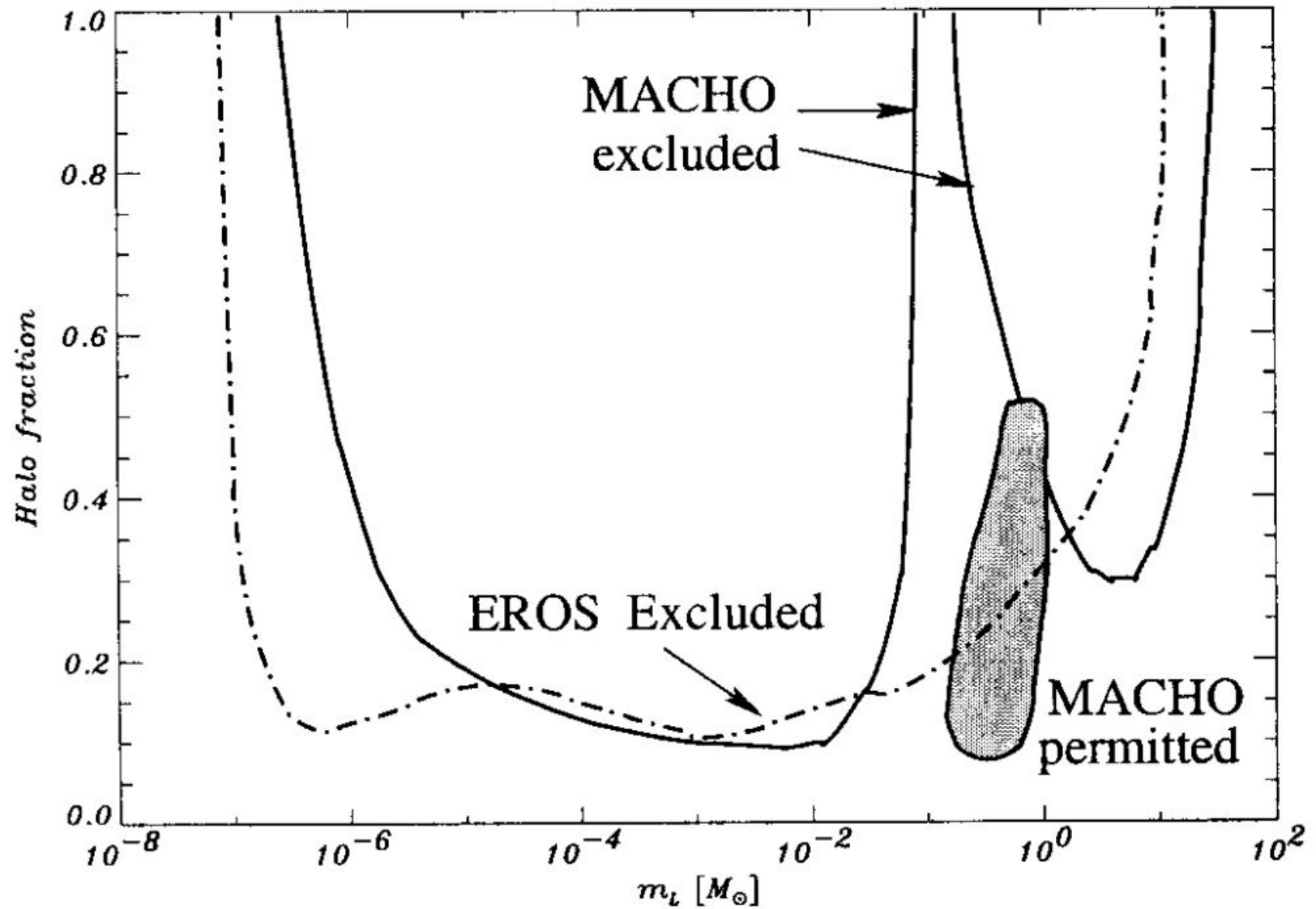
- 5 Detektionen 7 Jahren
- Beobachtungsstrategie:

Messung in kurzen Zeitabständen

→ Test auf kleine MACHO-Massen

→ Bestimmung einer Massenuntergrenze

4. Beobachtungen in Richtung LMC III



4. Beobachtungen in Richtung LMC IV - Ergebnisse

- Eingrenzung des Anteils von MACHOs an der Halomasse auf ca. 20%
- Größtenteils Objekte im Bereich $0,1 - 1 M_{\odot}$:
 - Normale Sterne ausgeschlossen
 - Neutronensterne haben zu hohe Masse
 - Primordiale schwarze Löcher theoretisch möglich
 - Weiße Zwerge am wahrscheinlichsten
- Unsicherheiten:
 - wenig Werte
 - Self-Lensing
 - Annahmen bzgl. Halomodell (v_T , radiale Dichteverteilung)

4. Beobachtungen des galaktischen Zentrums

- Annahme: Beste Beobachtungsregion mit geschätzter optischer Dicke von $\tau_B \cong 0.29 \times 10^{-6}$
- viele 100 Ereignisse beobachtet; ermittelte optische Dicke sogar deutlich höher als erwartet
- OGLE: $\tau_B \cong 2.0 \times 10^{-6}$
- Self-lensing spielt wichtige Rolle (\rightarrow Balkenform des galaktischen Zentrums)

5. Erweiterung – Formalismus Doppelsternlinse

Linsengleichung: $\beta = \Theta - \alpha(\Theta)$

Quellenkoordinaten: $\zeta \equiv \frac{\beta_x + i\beta_y}{\Theta_E}$

Bildkoordinaten: $z \equiv \frac{\Theta_x + i\Theta_y}{\Theta_E}$

Komplexe
Linsengleichung: $\zeta = z - \frac{\mu_A}{z - z_A} - \frac{\mu_B}{z - z_B}$

5. Erweiterung – Formalismus Doppelsternlinse II

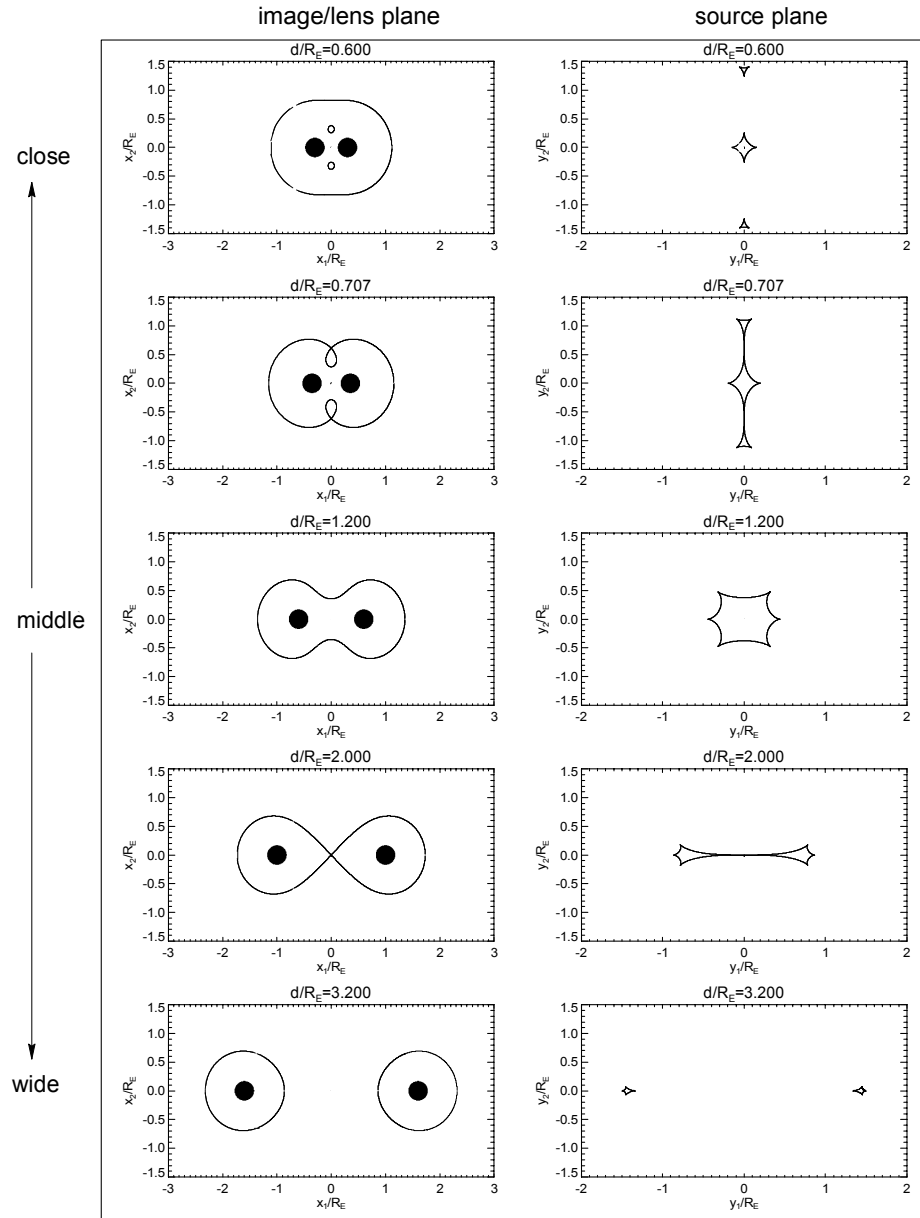
$$A_i = J^{-1} \Big|_{z_i} \quad \text{mit der Jacobideterminante:}$$

$$J(z, \bar{z}) = \det \begin{pmatrix} \frac{\partial \zeta}{\partial z} & \frac{\partial \zeta}{\partial \bar{z}} \\ \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{z}} \end{pmatrix} = \left| \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right|^2 - \left| \frac{\partial \zeta}{\partial \bar{z}} \right|^2$$

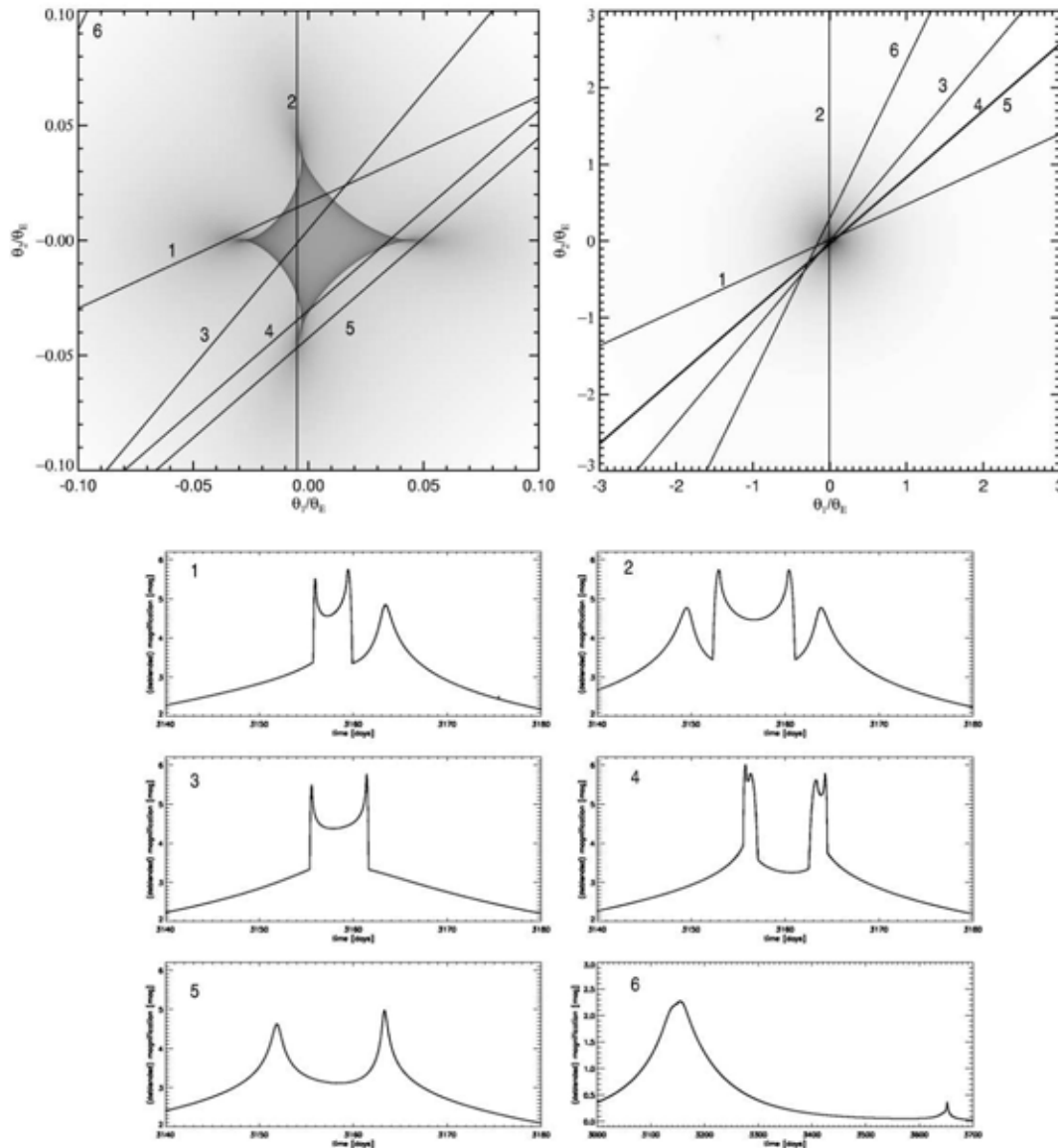
$$\text{mit } \frac{\partial \zeta}{\partial \bar{z}} = \frac{\mu_A}{(z - z_A)^2} + \frac{\mu_B}{(z - z_B)^2} \quad \rightarrow \quad J = 1 - \left| \frac{\partial \zeta}{\partial \bar{z}} \right|^2$$

$$\text{kritische Linien für } J=0: \quad \frac{\partial \zeta}{\partial \bar{z}} = e^{i\varphi}$$

5. Erweiterung – Doppelsternlinse - Kritische Linien und Kaustiken



5. Erweiterung – Doppelsternlinse - Caustic Crossing

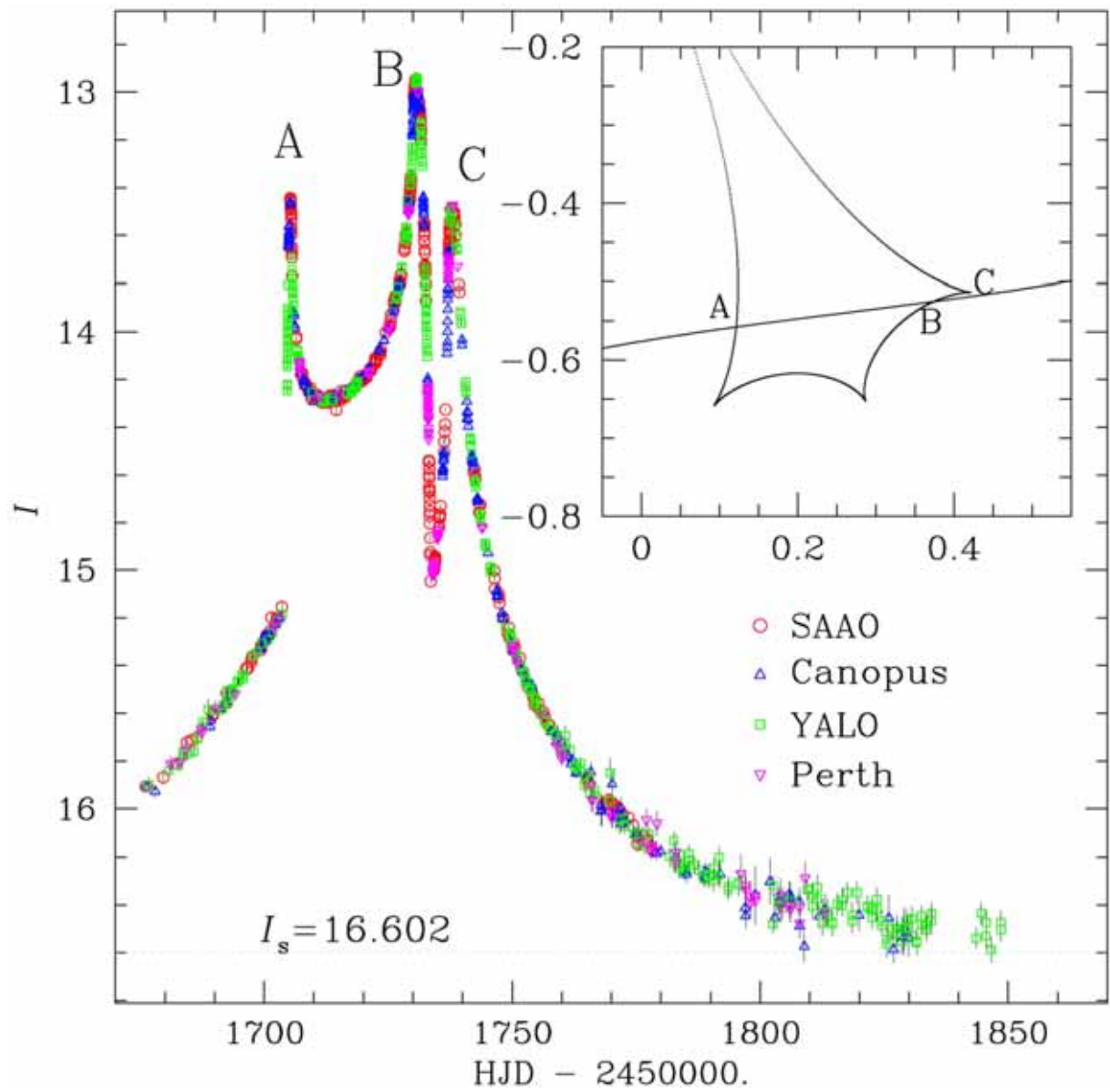


5. Erweiterung – Doppelsternlinse - zusätzliche Parameter

- Komplexere Strukturen, mehr Parameter nötig
- Zusätzlich zu u_0 , t_0 und t_E :
 - Linsenabstand
 - Massenverhältnis der Linsen
 - Winkel zwischen Verbindungsachse der Linsen und Quelle
 - Winkelgröße der Quelle

→ **Information über nicht sichtbare Objekte!**

5. Erweiterung – Doppelsternlinse – EROS-2000-BLG-5



Massen beider
Linsen $\approx 0,5M_{\odot}$

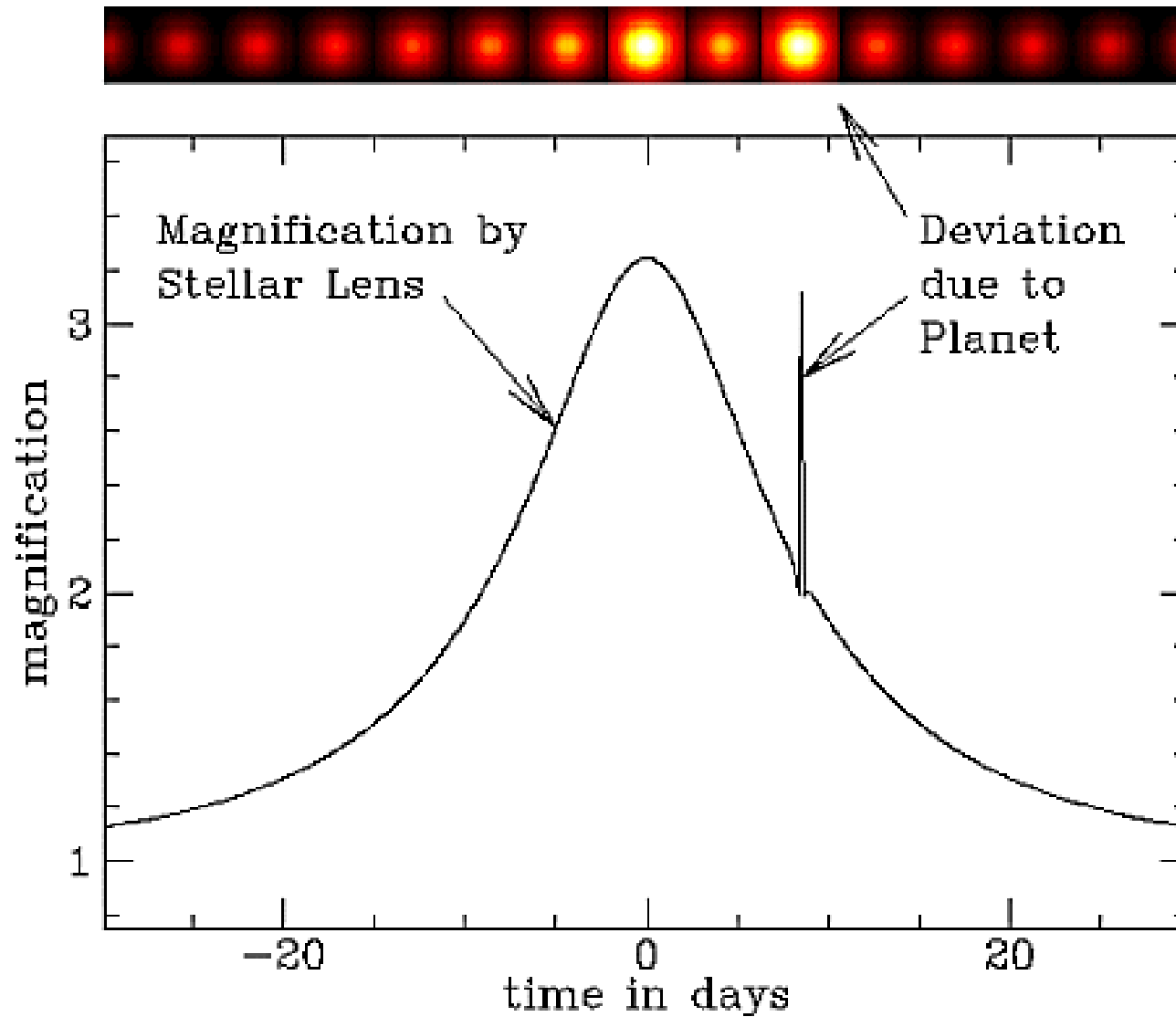
System: Linsenstern – Planet

→ kleine Abweichungen der Lichtkurven, wenn $d_{PS} \approx r_E$

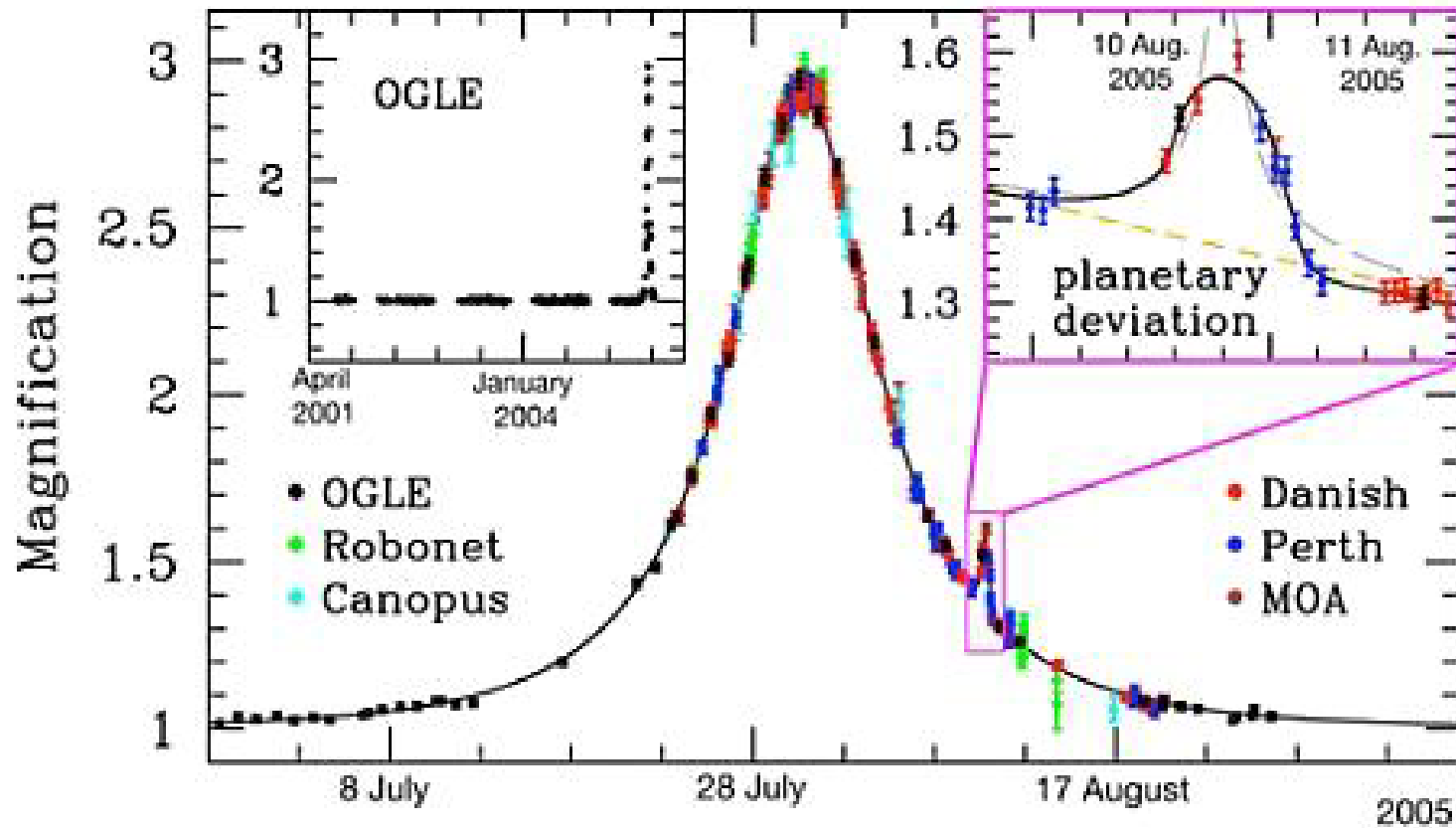
- Gould und Loeb: Annahme alle Sterne des Bulge mit jupiter-ähnlichen Begleiter → bei 20% detektierbar
- Beobachtungsstrategie:

Messungen hoch frequentiert, da Änderungen in sehr kurzen Zeitskalen

5. Erweiterung – Suche nach Planeten II



5. Erweiterung – Suche nach Planeten – OGLE-2005-BLG-390



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

5. Erweiterung – Pixellensing

- Hohe Sternendichte bei weit entfernten Galaxien
- Mit jedem Pixel des CCD → Messung des Lichtflusses einer Sternengruppe
- Bei hohen Verstärkungen → Extraktion der Lichtkurve des gelinsten Sterns möglich
- Andromedagalaxie: Lichtstrahlen laufen durch zwei Halos

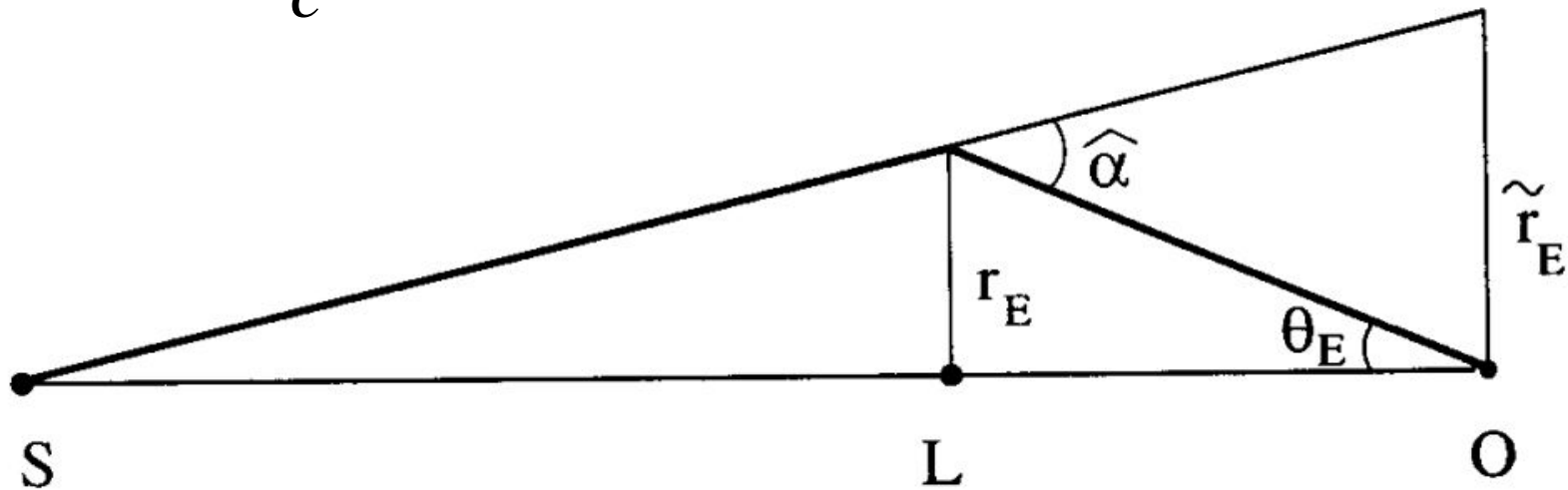
- Eingrenzung von Anzahl und Art der MACHOs in unserer Halo
- Bestimmung von Linsenwahrscheinlichkeiten
- Entdeckung zahlreicher Sterne und Planeten
- Bestätigung der Balkenform des galaktischen Zentrums
- Bestimmung von Linsenparametern

- Fortführung der bisherigen Projekte mit verbesserter Technik
- Alternative zur photometrischen Bestimmung der Linsenparameter
 - astrometrisches Microlensing:
 - Betrachte Verschiebung des Mittelpunktes der Bilder
 - genaue Bestimmung von Θ_E via Satellitenteleskop möglich

6. Zusammenfassung und Ausblick – Astrometrisches Microlensing II

$$\tilde{r}_E = r_E \frac{D_{OS}}{D_{LS}} = \Theta_E \frac{D_{OL} D_{OS}}{D_{LS}} \quad \Theta_E^2 = \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_{OL} D_{OS}}$$

$$\tilde{r}_E \Theta_E = \frac{4GM}{c^2}$$



6. Zusammenfassung und Ausblick – Bestimmung von Θ_E

Mittelpunkts-
verschiebung:

$$\vec{\mathcal{G}} \equiv \frac{A_+ \vec{\Theta}_+ + |A_-| \vec{\Theta}_-}{A_+ + |A_-|} = \Theta_E \frac{u(3 + u^2)}{2 + u^2}$$

relativ zur Quelle:

$$\partial \vec{\mathcal{G}} \equiv \vec{\mathcal{G}} - \vec{\beta} = \Theta_E \frac{u}{2 + u^2}$$

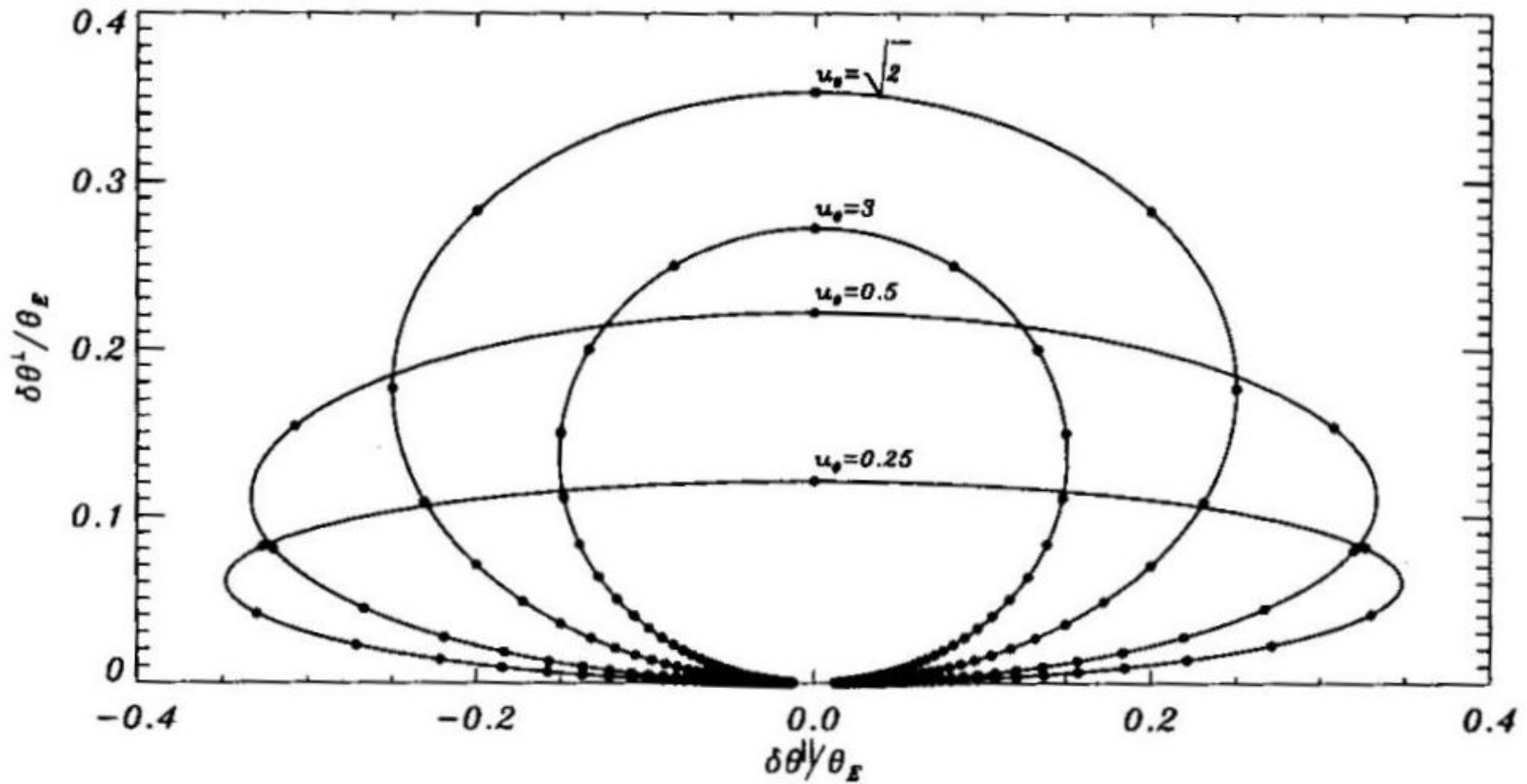
Bewegung parallel:

$$\partial \mathcal{G}^{\parallel}(\Delta t) = \Theta_E \frac{\Delta t / t_E}{2 + u_0^2 + (\Delta t / t_E)^2}$$

Bewegung senkrecht:

$$\partial \mathcal{G}^{\perp}(\Delta t) = \Theta_E \frac{u_0}{2 + u_0^2 + (\Delta t / t_E)^2}$$

6. Ausblick – Astrometrisches Microlensing – Bestimmung von Θ_E



$$a = \frac{\Theta_E}{2\sqrt{2 + u_0^2}}$$

$$b = \frac{\Theta_E u_0}{2(2 + u_0^2)}$$

- Aufnahme zweier Lichtkurven:
 1. von Satellit in Sonnenumlaufbahn
 2. von der Erde aus

$$\tilde{r}_E = \frac{d_{Sat}}{\Delta u}$$

- Messung der Parallaxe und Bestimmung von \tilde{r}_E
- systematische Bestimmung von Linsenparametern

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!!!

Literaturverzeichnis

Bücher:

- Roulet/Mollerach: Gravitational Lensing and Microlensing
- Peter Schneider: Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie

Internet:

- www.bulge.astro.princeton.edu/~ogle
- <http://wwwmacho.mcmaster.ca/>
- www.journals.uchicago.edu