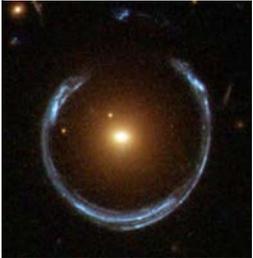
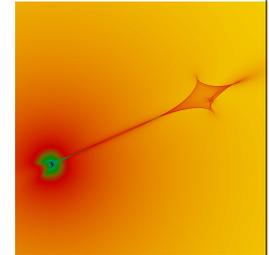


Licht auf krummen Wegen:
Wie uns Gravitationslinsen helfen, das Universum
zu erforschen und Planeten zu entdecken



Prof. Joachim Wambsganz
(Universität Heidelberg)

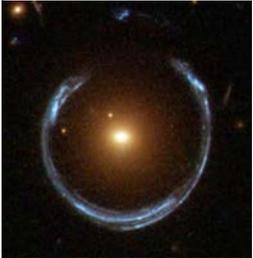


12. – 14. NOVEMBER 2015
ETH ZÜRICH, DO: SIEMENS AUDITORIUM
FR/SA: AUDITORIUM MAXIMUM

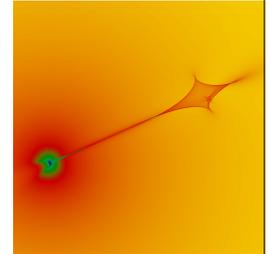
100
Jahre

ALLGEMEINE
relativitäts-
THEORIE

Licht auf krummen Wegen: Wie uns Gravitationslinsen helfen, das Universum zu erforschen und Planeten zu entdecken



Prof. Joachim Wambsganß
(Universität Heidelberg)



- Kurze Geschichte der Lichtablenkung ...
... und was Einstein dazu beigetragen hat
- Wie eine Gravitationslinse funktioniert ...
... und warum Einstein so skeptisch war
- Die Phänomene des Gravitationslinseneffekts ...
... leuchtende Bögen, Einstein-Ringe, Mikrolinsen
- Aktuelle Forschungsgebiete der Lichtablenkung ...
... Messung der Größe des Universums
... Mikrolinseneffekt bei Quasaren
... Suche nach Planeten um andere Sterne
- Zusammenfassung ...
... und warum sich Einstein heute wundern und freuen würde

Worum geht es bei der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)?

Raum und Zeit sind eng miteinander verwoben

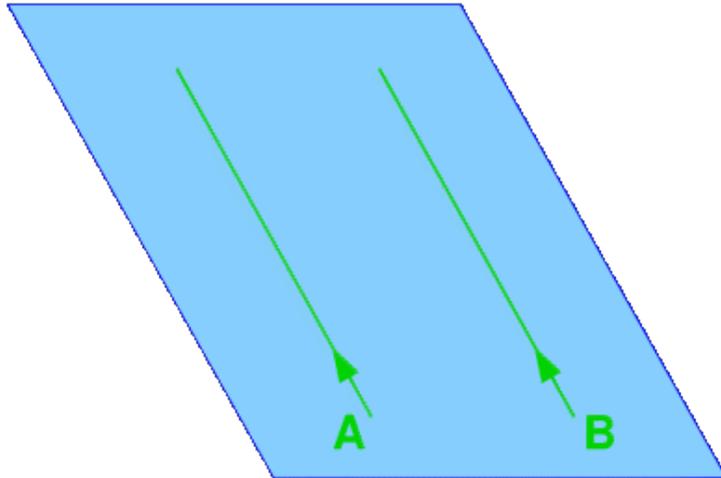
Schwerkraft und Beschleunigung sind äquivalent:
Äquivalenzprinzip

Objekte/Massen beeinflussen („verbiegen“) den Raum

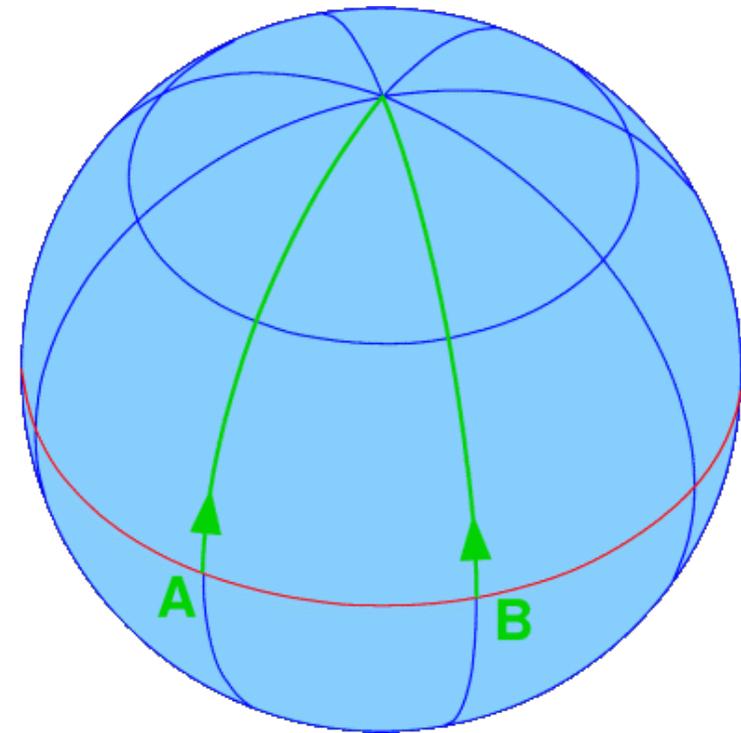
Der „verbogene“ Raum gibt den Objekten/Massen vor,
wie sie sich zu bewegen haben

Schwerkraft zieht auch Lichtstrahlen an und zwingt sie
auf „krumme“ Wege

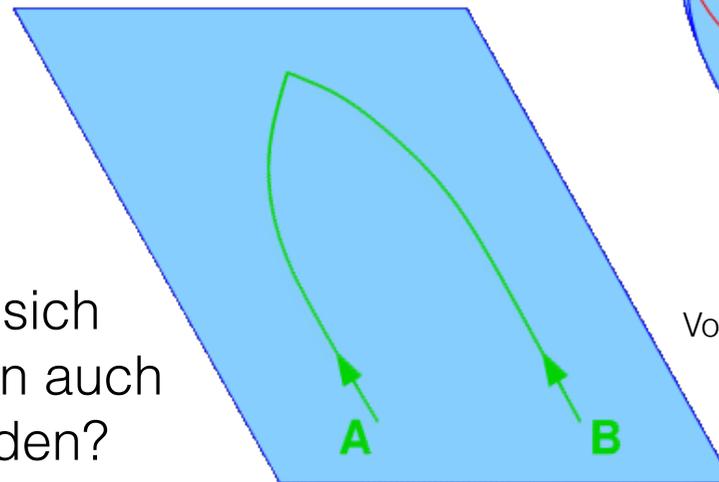
Euklidische Geometrie:
Parallelen bleiben immer parallel:



Ja !
In gekrümmten Räumen können sich
„Parallelen“ schneiden !

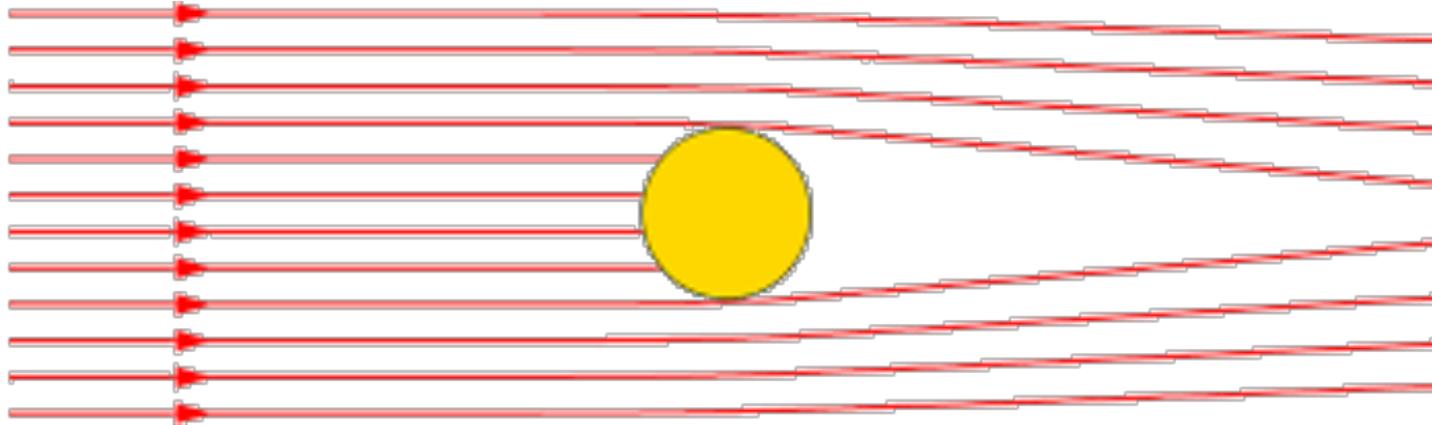


Oder können sich
parallele Strahlen auch
treffen/schneiden?



Von der Webseite: <http://www.einstein-online.info/>

Nach Einstein:
Sonne „zieht Lichtstrahlen an“ bzw. „lenkt Lichtstrahlen“ ab !



Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie !

Kann überprüft werden während einer Sonnenfinsternis !!

Von Webseite: <http://www.einstein-online.info/>

Kurze Geschichte der Lichtablenkung

Einstein 1911:

4. *Über den Einfluß
der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes;
von A. Einstein.*

$\alpha_{\odot}, \text{Einstein 1911} = 0.84''$

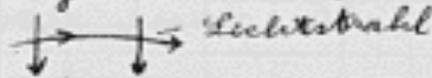
Da die Fixsterne der der Sonne zugewandten Himmelspartien bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar werden, ist diese Konsequenz der Theorie mit der Erfahrung vergleichbar.

Zürich. 14. I. 13.

Aus

Hoch geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.



Aus Sonnenrande müsste diese Ablenkung $0,84^\circ$ betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (R = Sonnenradius).
($R = \text{Abstand vom Sonnenmittelpunkt}$)

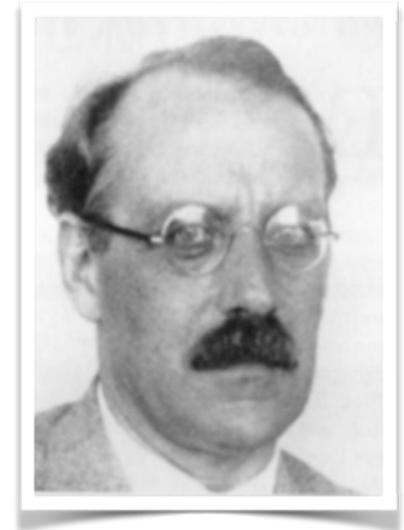


Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnennähe ^{helle} Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

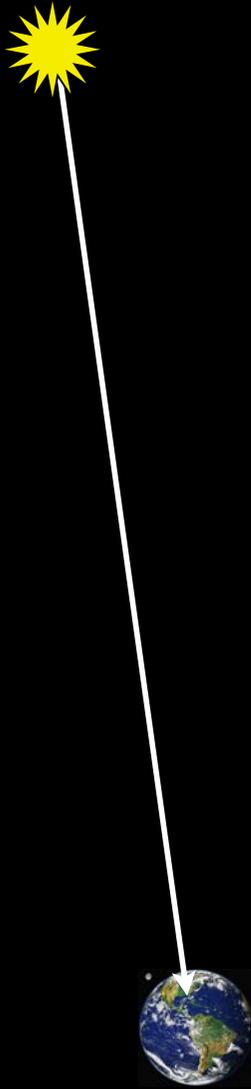
Kurze Geschichte der Lichtablenkung

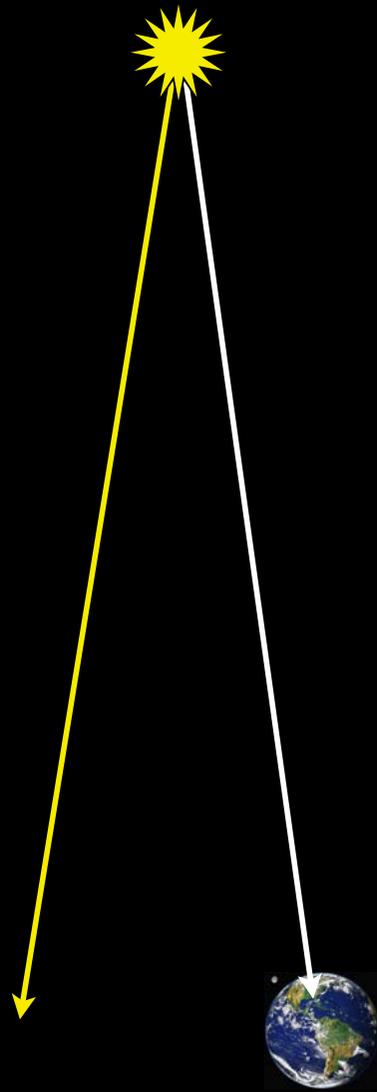
Gibt es eine Möglichkeit,
Einstein's Vorhersage zu messen/verifizieren?

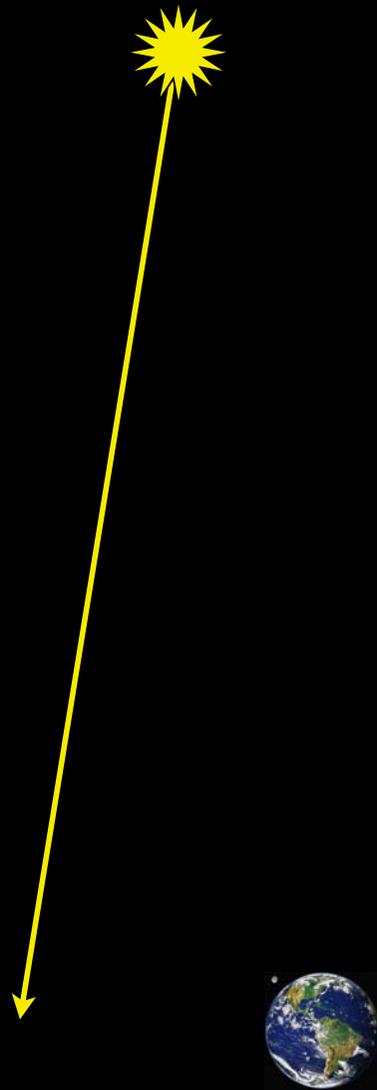
- Wie? Während einer Sonnenfinsternis!
- Wer? Erwin Freundlich!
- Wann? 21. August 1914!
- Wo? Halbinsel Krim!

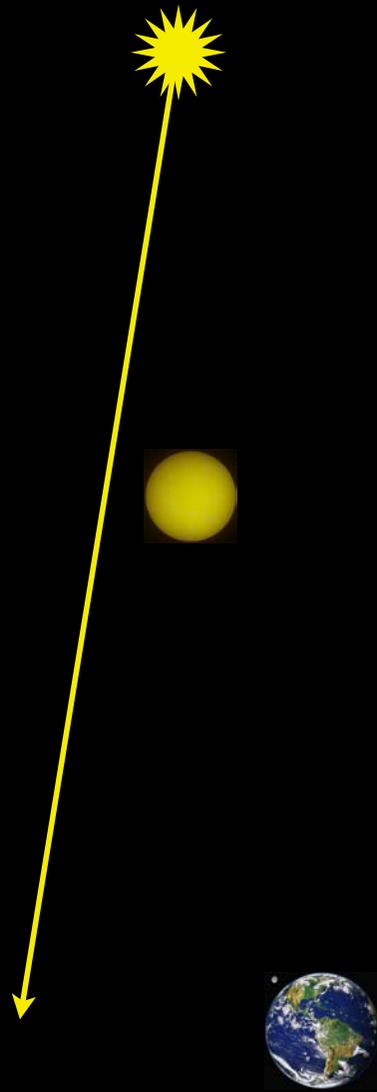


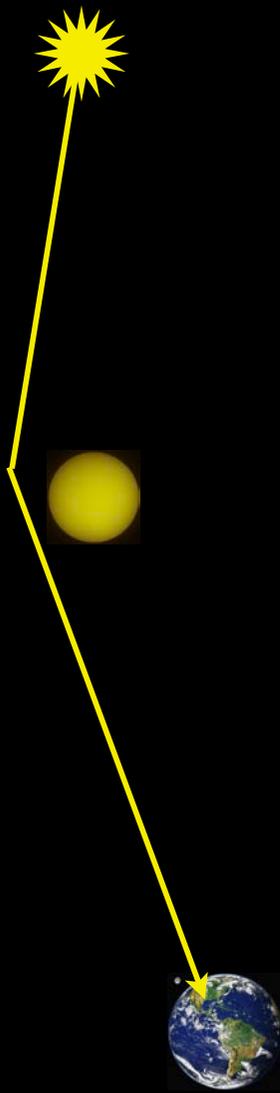
... und los ging die Potsdamer Expedition !

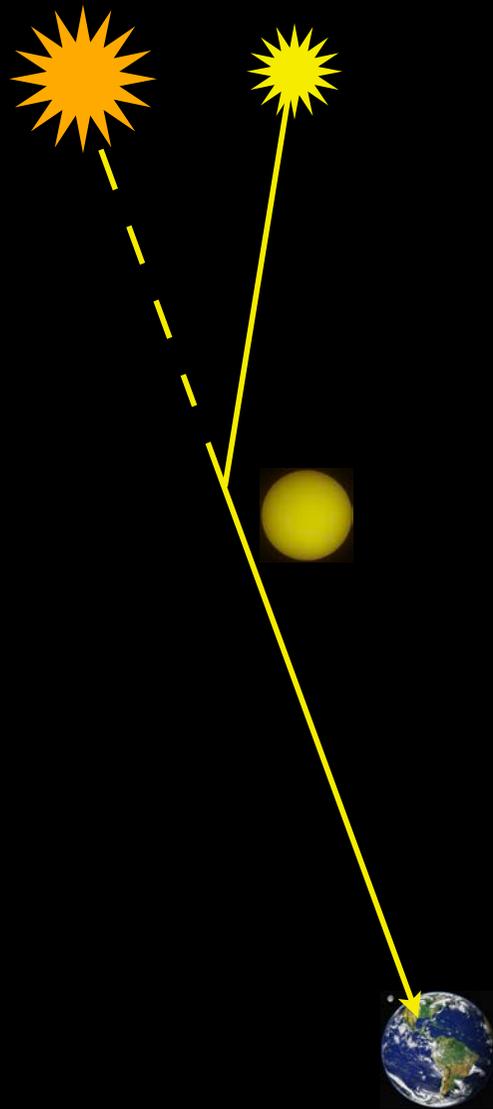




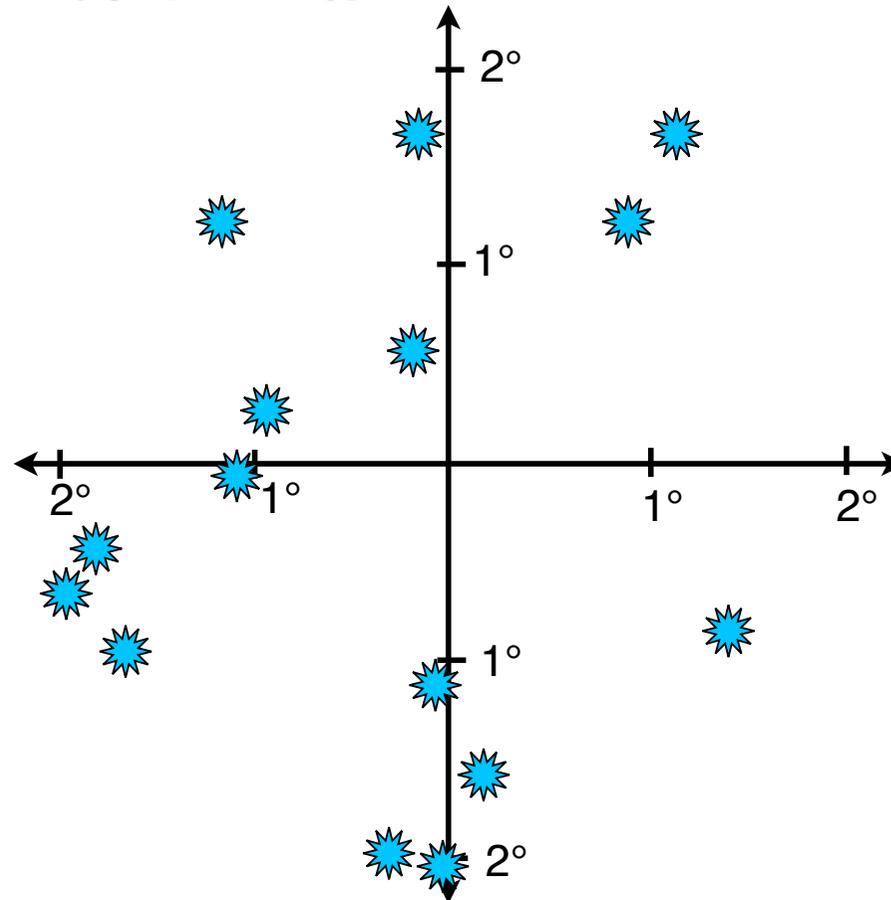




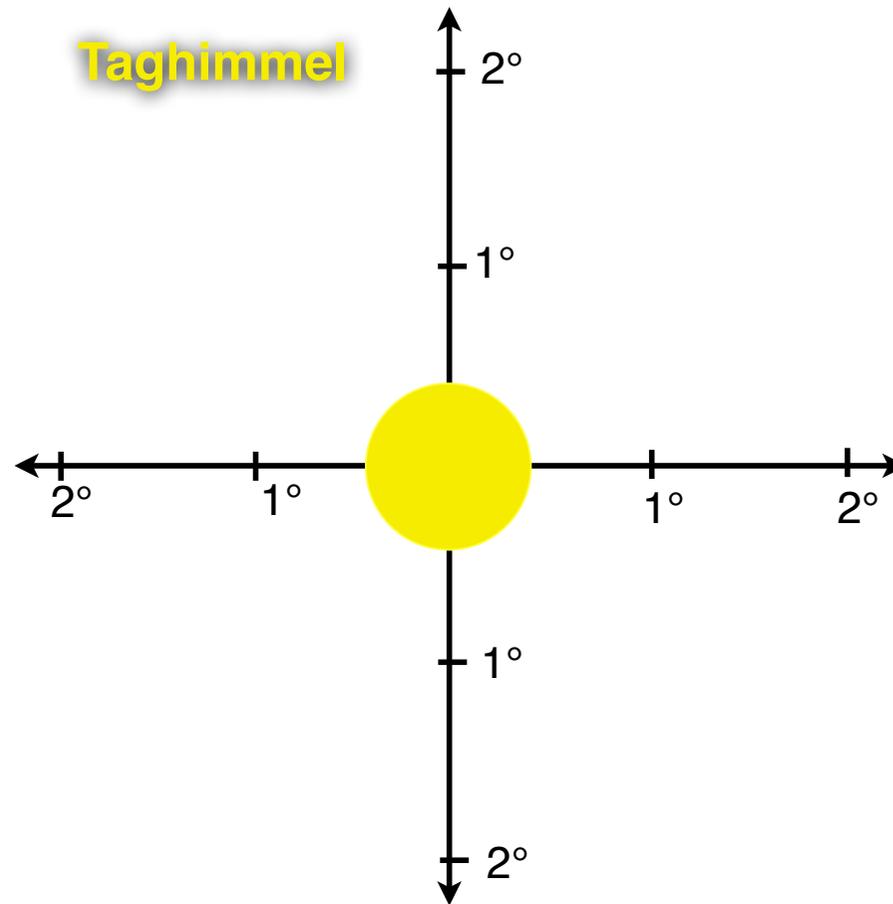




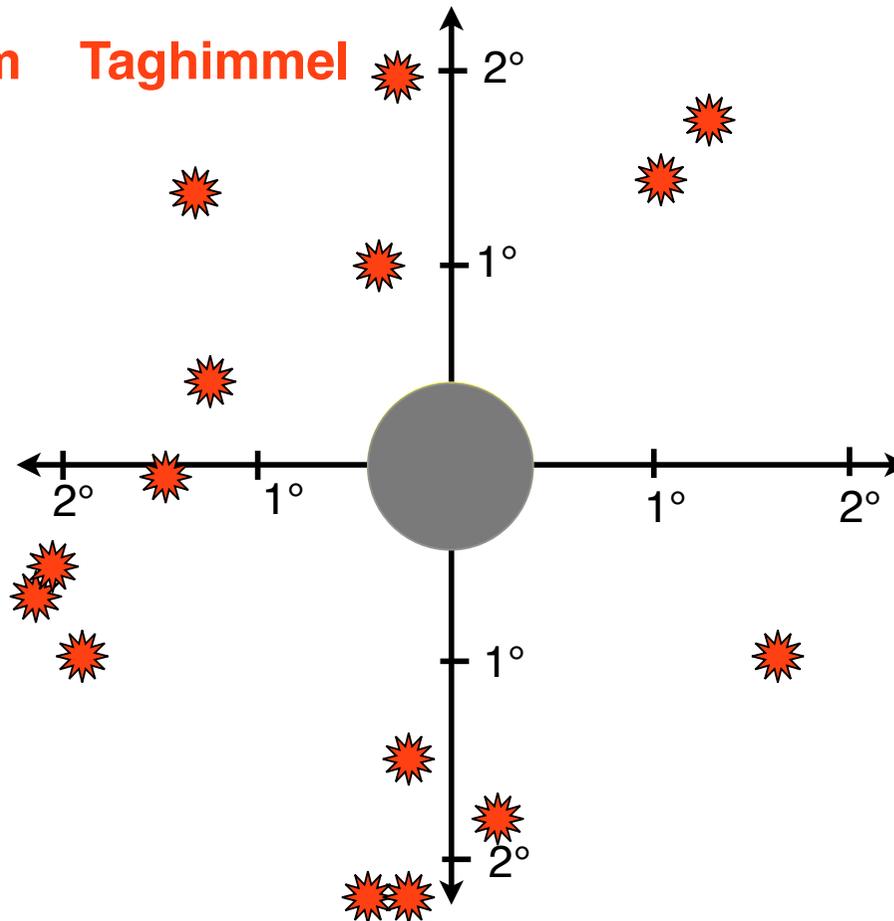
Sterne am Nachthimmel



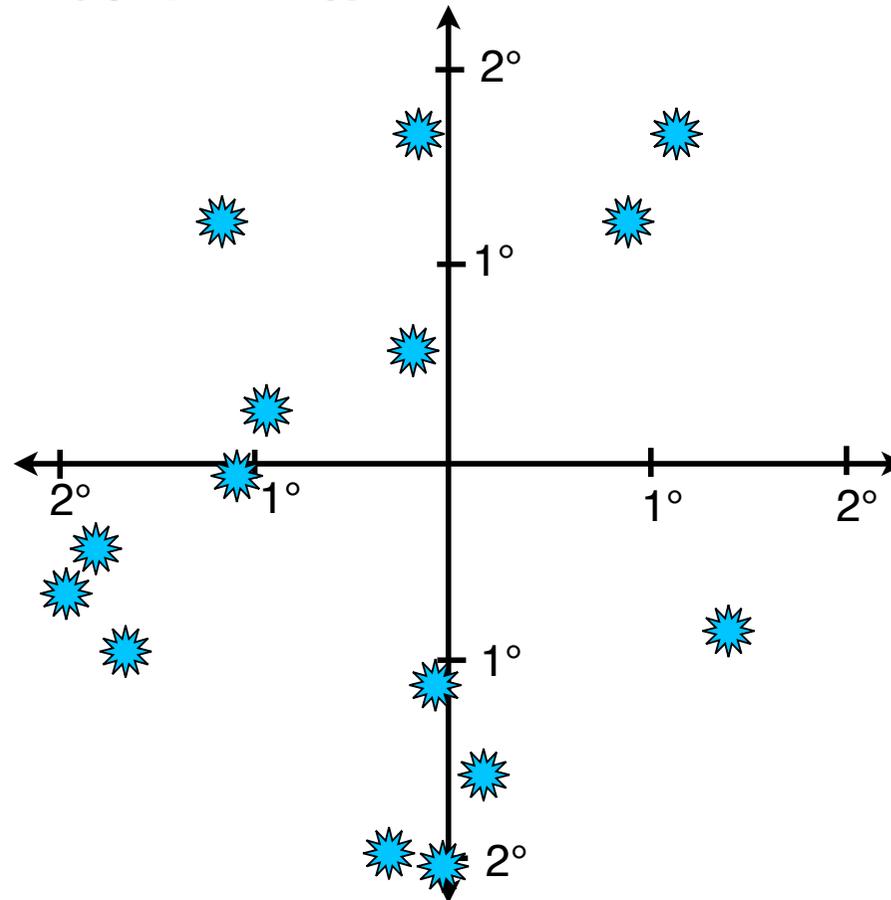
Taghimmel



Sterne am Taghimmel

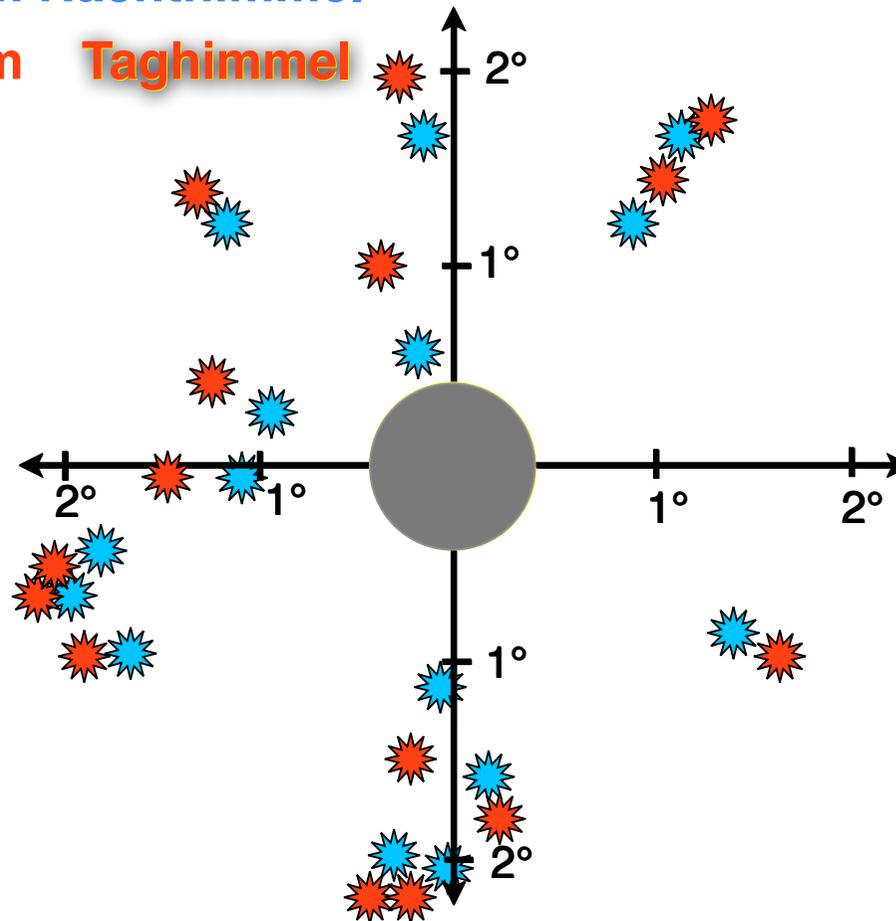


Sterne am Nachthimmel

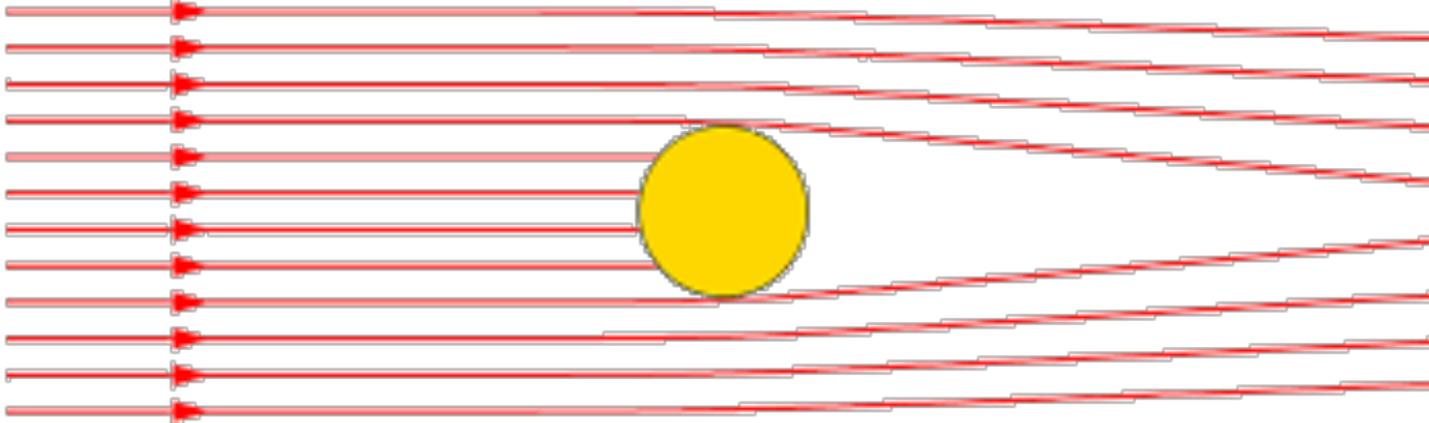


Sterne am Nachthimmel

Sterne am Taghimmel



Nach Einstein:
Sonne „zieht Lichtstrahlen an“ bzw. „lenkt Lichtstrahlen“ ab !



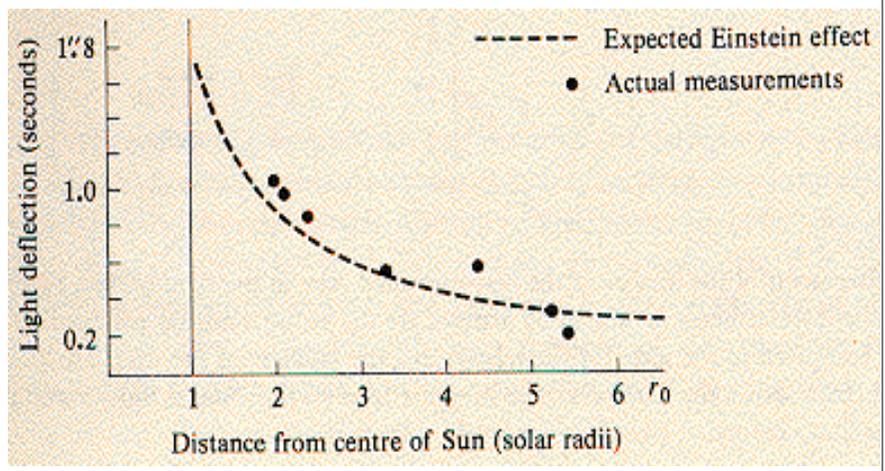
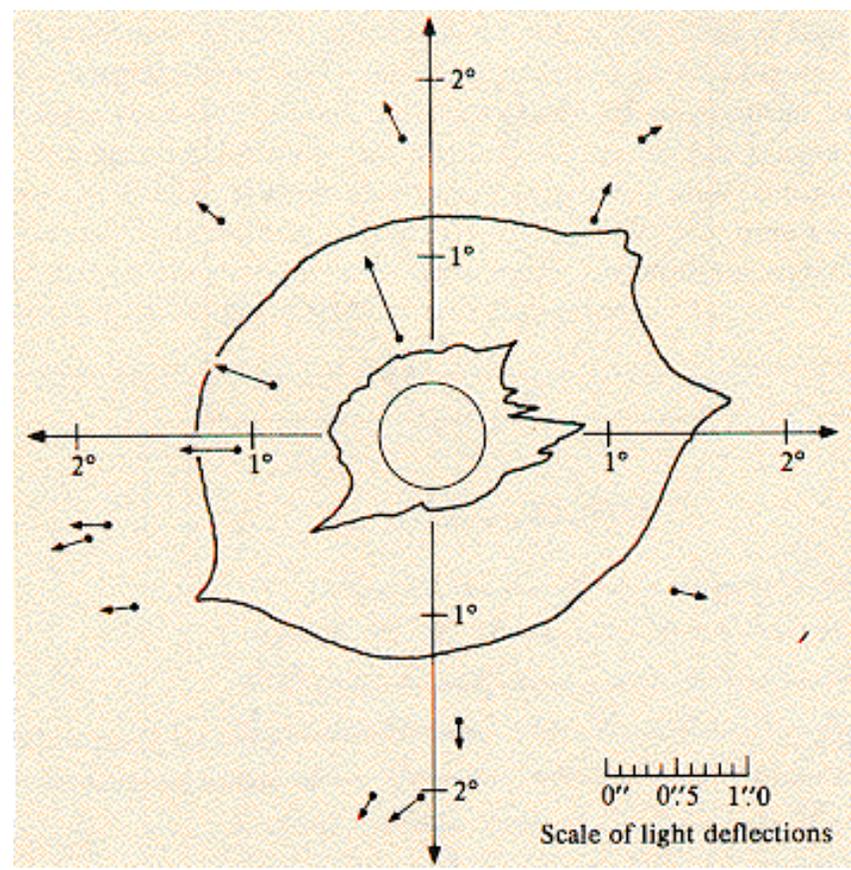
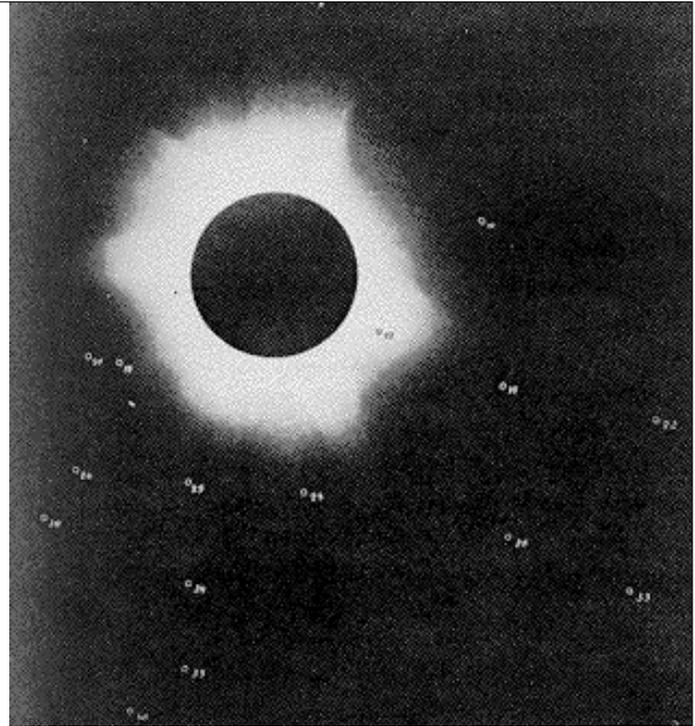
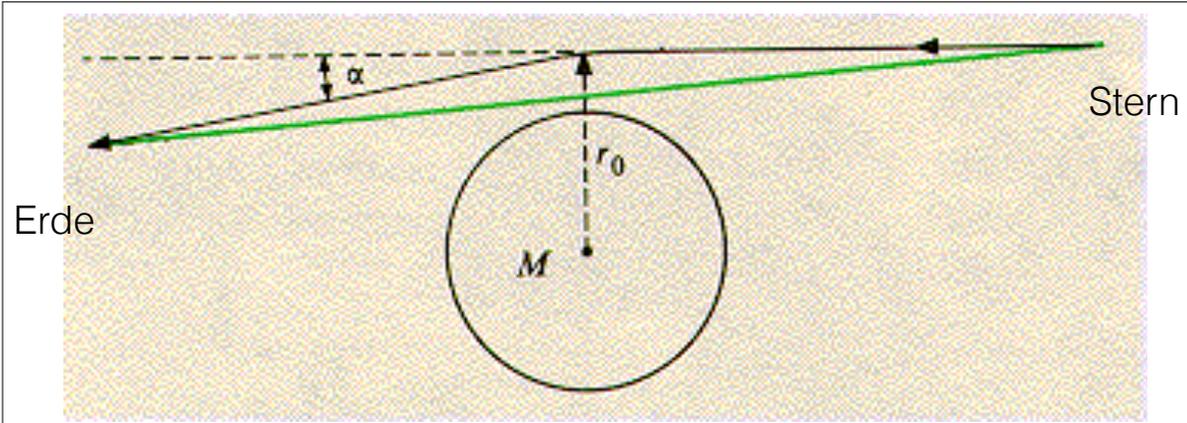
Von Webseite: <http://www.einstein-online.info/>

Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie !

Kann überprüft werden während einer Sonnenfinsternis !!

Wird bei Sonnenfinsternis-Expedition
im Mai 1919 durch Eddington bestätigt:

Triumph für Einstein und die Allgemeine Relativitätstheorie !!!



Die Lichtablenkung am Sonnenrand wird bei Sonnenfinsternis-Expedition im Mai 1919 durch Sir Arthur Eddington bestätigt:

$$\alpha_{\odot, \text{Einstein 1915}} = 1.74''$$

Triumph der Allgemeinen Relativitätstheorie !!!



№ 068

30

prof einstein huberlandstrasse 5
berlin. =

22.9.19. 1-N
30

Telegramm Nr. _____

genommen den 22.9. 1919
von Hbr. Min. WACH-
WACH.

Telegraphie des  Deutschen Reichs.

Berlin, Haupt Telegraphenamts

Befördert den _____

in Lit. _____ an _____

durch _____

34

Min. de an
sonst

22. IX. 19

Liebe Mutter!

Heute eine freundige Nach-
richt. H. A. Lorentz hat mir
telegraphiert, dass die englischen
Expeditionen die Lichtablenkung
an der Sonne wirklich bewiesen
haben. Maja schreibt mir lie-



New York Times,
November 9, 1919

ECLIPSE SHOWED GRAVITY VARIATION

Diversion of Light Rays Ac-
cepted as Affecting New-
ton's Principles.

HAILED AS EPOCHMAKING

British Scientist Calls the Discov-
ery One of the Greatest of
Human Achievements.

Copyright, 1919, by The New York Times Company.

November 10, 1919

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry

14. Dezember
1919
Nr. 50
28. Jahrgang

Berliner

Cinzelpreis
des Heftes
25 Pfg.

Illustrierte Zeitung

Verlag Ullstein & Co, Berlin SW 68



Eine neue Größe der Weltgeschichte: Albert Einstein,
dessen Forschungen eine völlige Umwälzung unserer Naturbetrachtung bedeuten
und den Erkenntnissen eines Kopernikus, Kepler und Newton gleichwertig sind.

Phot. von Böh.

14. Dezember 1919

Eine neue Größe der Weltgeschichte:
Albert Einstein,
dessen Forschungen
eine völlige
Umwälzung unserer
Naturbetrachtung
bedeuten, und den
Erkenntnissen eines
Kopernikus, Kepler
und Newton
gleichwertig sind.

Kurze Geschichte der Lichtablenkung

Einstein 1936:

1
Die Lichtablenkung durch Gravitation an einem Fixstern.

Vor kurzem besuchte mich Herr Ing. Rudi Mandl aus Washington, der über die Lichtablenkung durch Gravitation an Fixsternen Überlegungen angestellt hatte. Auf seinem Wunsch habe ich eine elementare Rechnung ^{über diesen Gegenstand} angestellt und geführt, deren Ergebnis er veröffentlicht wünscht. Diesem Wunsche komme ich hiermit nach. Ich glaube zwar ~~nicht~~, dass die Ergebnisse zu neuartigen Beobachtungen führen werden; dieselben haben aber wegen ihres ^{teilweise} paradoxen Charakters ein gewisses Interesse.

Nach der Relativitätstheorie erfährt ein Lichtstrahl, der neben einem Fixstern ^{in der Distanz Δ von dessen Mittelpunkt} vorbeizieht, eine nach diesem zu gerichtete Ablenkung ε vom Betrage

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 \Delta_0}{\Delta} \quad \dots (1)$$

Kurze Geschichte der Lichtablenkung

Einstein 1936:

DECEMBER 4, 1936

LENS-LIKE ACTION OF A STAR BY THE DEVIATION OF LIGHT IN THE GRAVITATIONAL FIELD

SOME time ago, R. W. Mandl paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request. This note complies with his wish.

Therefore, there is no great chance of observing this phenomenon, even if dazzling by the light of the much nearer star B is disregarded. This apparent amplification of q by the lens-like action of the star B is a most curious effect, not so much for its becoming infinite, with x vanishing, but since with increasing distance D of the observer not only does it not decrease, but even increases proportionally to \sqrt{D} .

ALBERT EINSTEIN

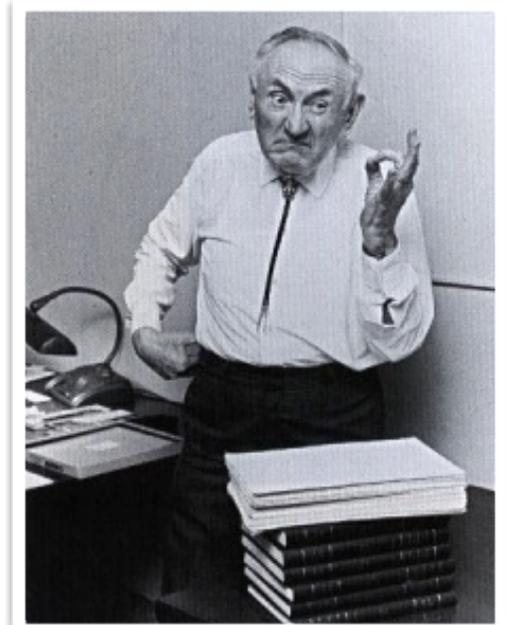
INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY,
PRINCETON, N. J.

Kurze Geschichte der Lichtablenkung

Zwicky 1937: "Nebulae as gravitational lenses"

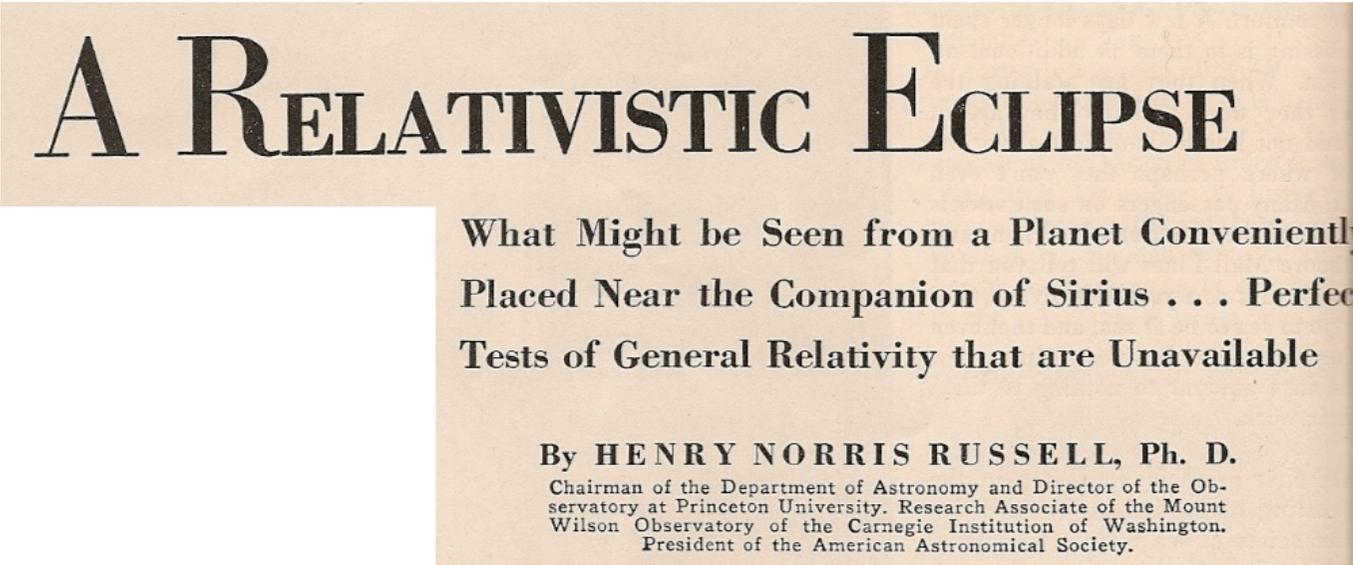
As a consequence I made some calculations which show that extragalactic *nebulae* offer a much better chance than *stars* for the observation of gravitational lens effects.

In the first place some of the massive and more concentrated nebulae may be expected to deflect light by as much as half a minute of arc. In the second place nebulae, in contradistinction to stars, possess apparent dimensions which are resolvable to very great distances.

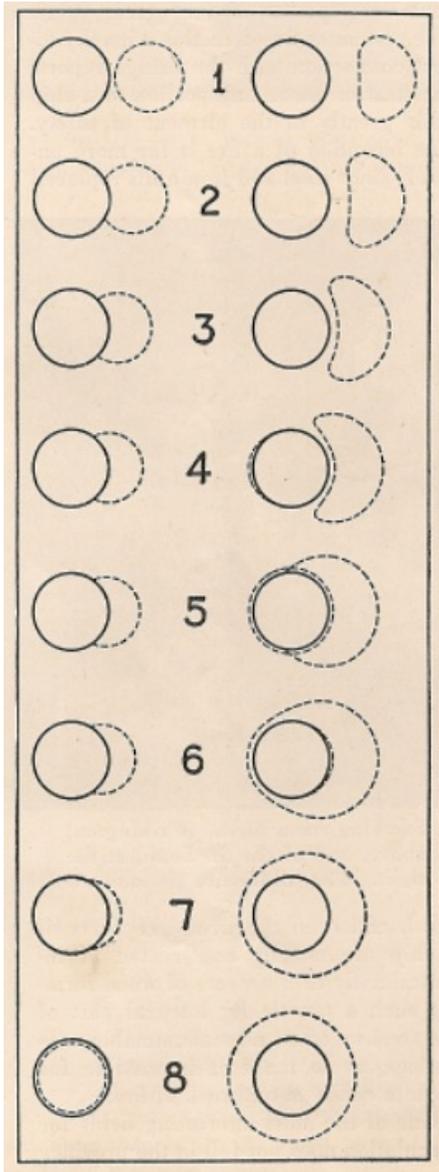


- 1) zusätzlicher Test für Relativitätstheorie
- 2) "Teleskop": schwächere Objekte sichtbar
- 3) Massen bestimmen: Bestätigung der Massen der "Nebel" ("dunkle Materie")

Henry Norris Russell, Scientific American, Feb 1937



- 1) “Einstein effect” is perfect (but unavailable) test for GR: “effects conspicuous to the immediate gaze”
- 2) source is not point-like: “finite angular size”
- 3) image “appears to be enlarged vertically”, “bright crescent”, “image has developed pointed horns”
- 4) “most spectacular phenomena of the heavens”



My hearty thanks are due to Professor Einstein, who permitted me to see the manuscript of his note before its publication.—*Princeton University Observatory, December 2, 1936.*

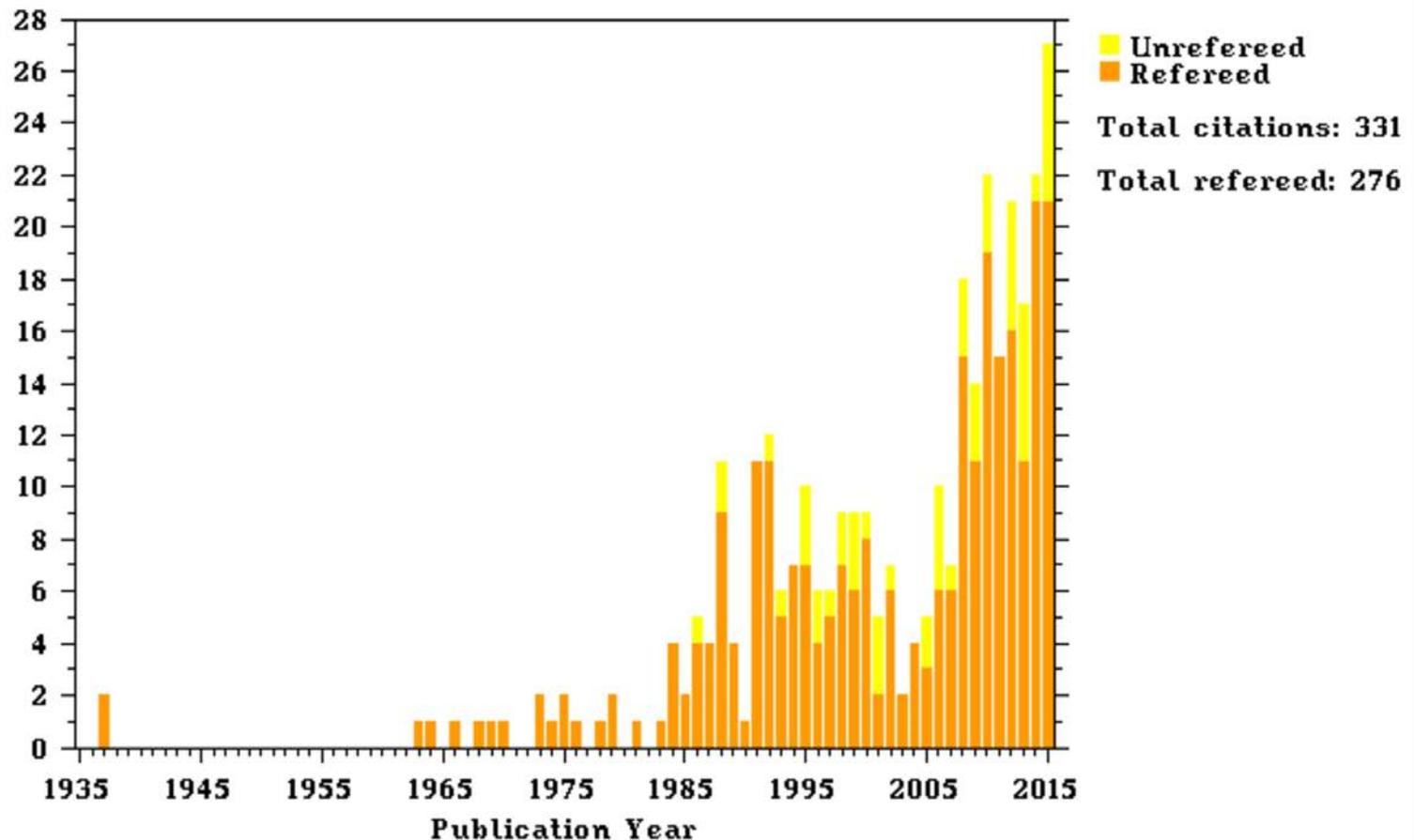
Kurze Geschichte der Lichtablenkung

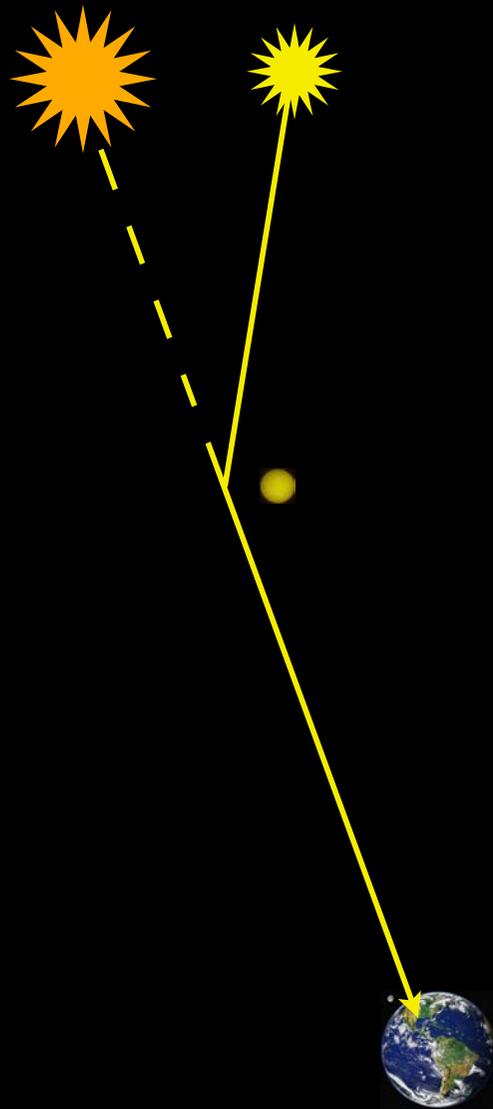
Einstein 1936:

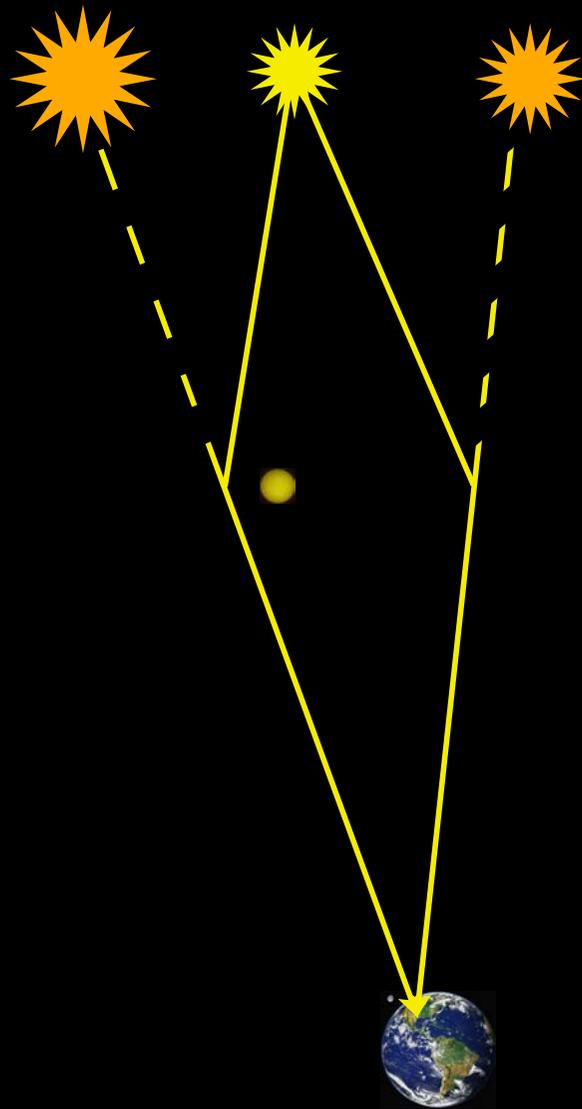
Citations history for [1936Sci....84..506E](#) from the ADS Databases

The Citation database in the ADS is **NOT** complete. Please keep this in mind when using the [ADS Citation lists](#).

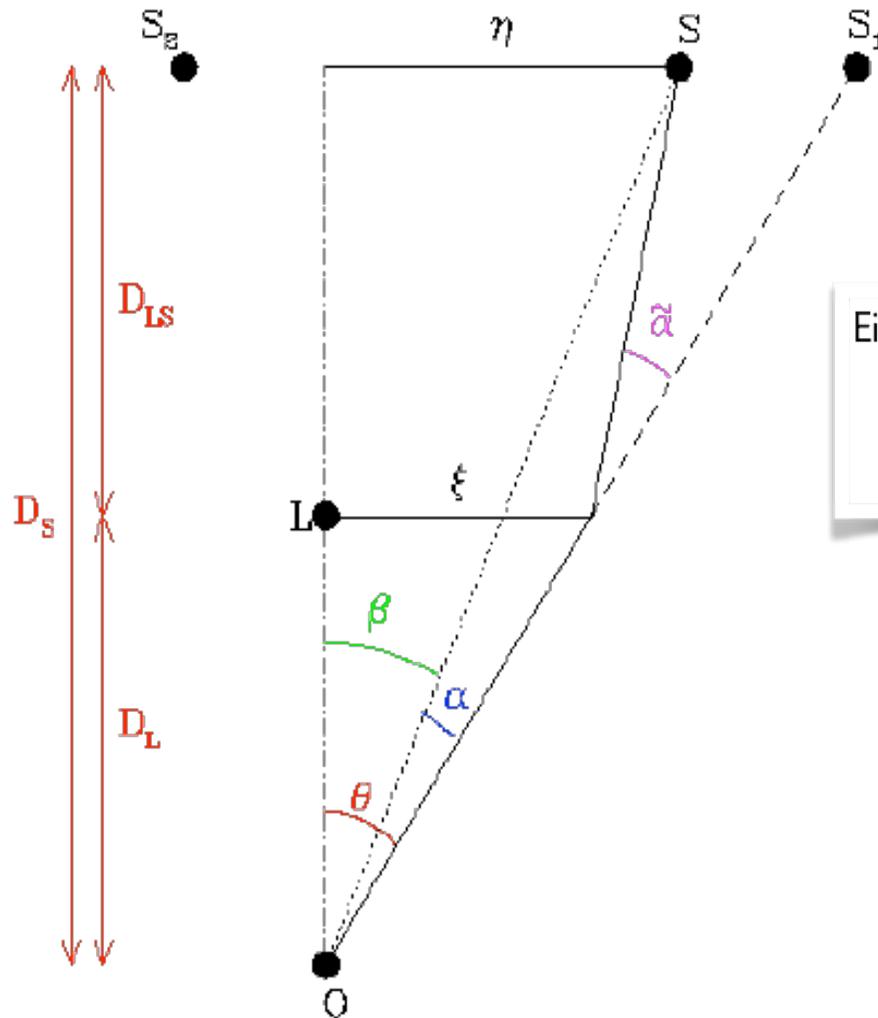
Citations/Publication Year for 1936Sci....84..506E







Geometrie und Mathematik des Gravitationslinseneffekts



Punktlinse (mit $\xi = D_L \theta$):

$$\beta(\theta) = \theta - \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{\theta}$$

Einsteinradius:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$$

Damit Linsengleichung:

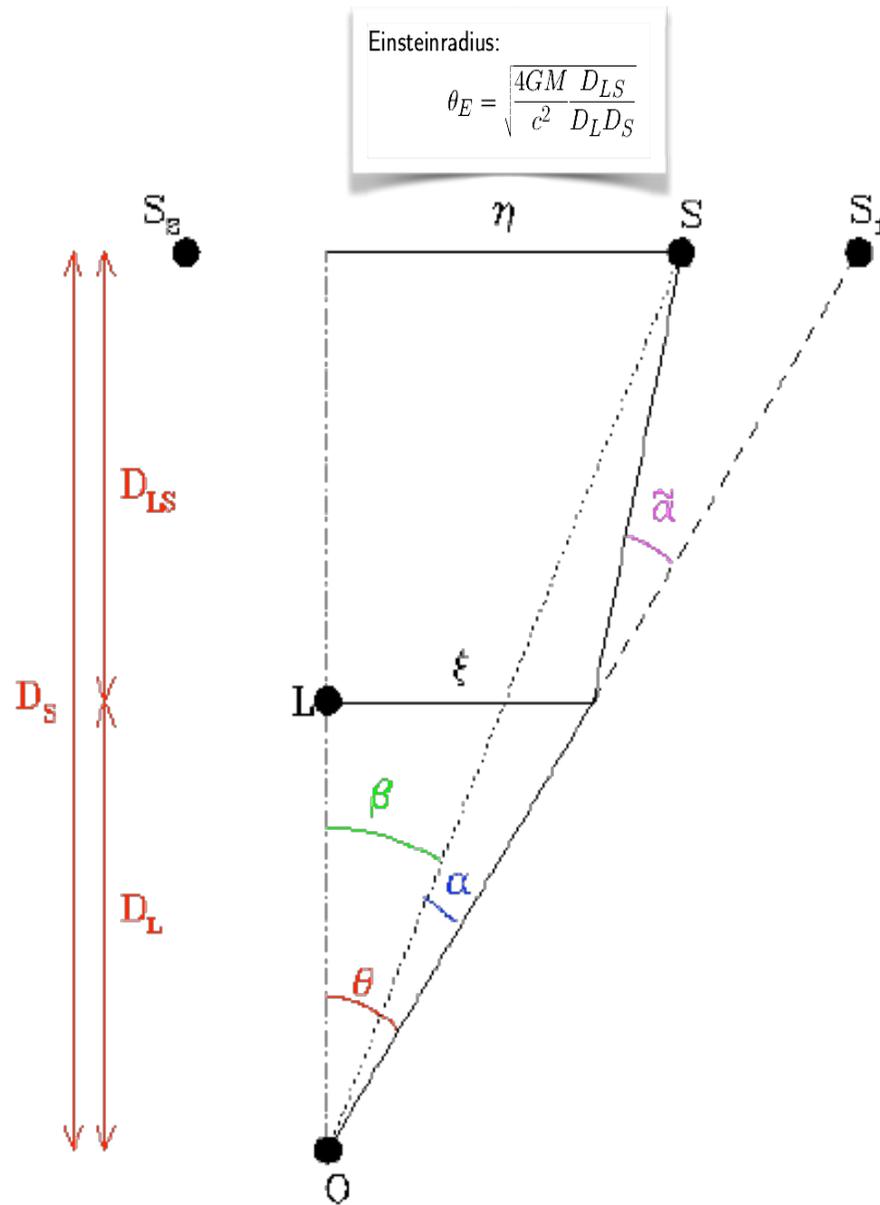
$$\beta(\theta) = \theta - \frac{\theta_E^2}{\theta}$$

Bildpositionen für Punktlinse:

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

$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2} \right)$$

Geometrie und Mathematik des Gravitationslinseneffekts



Einsteinradius für Stern in Milchstraße:

$$\theta_E \approx 0.5 \sqrt{\frac{M}{M_\odot}} \text{ Millibogensekunden}$$

Einsteinradius für weit entfernte Galaxie:

$$\theta_E \approx 1.8 \sqrt{\frac{M}{10^{12} M_\odot}} \text{ Bogensekunden}$$

Verstärkung der beiden Bilder einer Punktlinse (Einstein 1936):

$$\mu_{1,2} = \left(1 - \left[\frac{\theta_E}{\theta_{1,2}} \right]^4 \right)^{-1} = \frac{u^2 + 2}{2u\sqrt{u^2 + 4}} \pm \frac{1}{2}$$

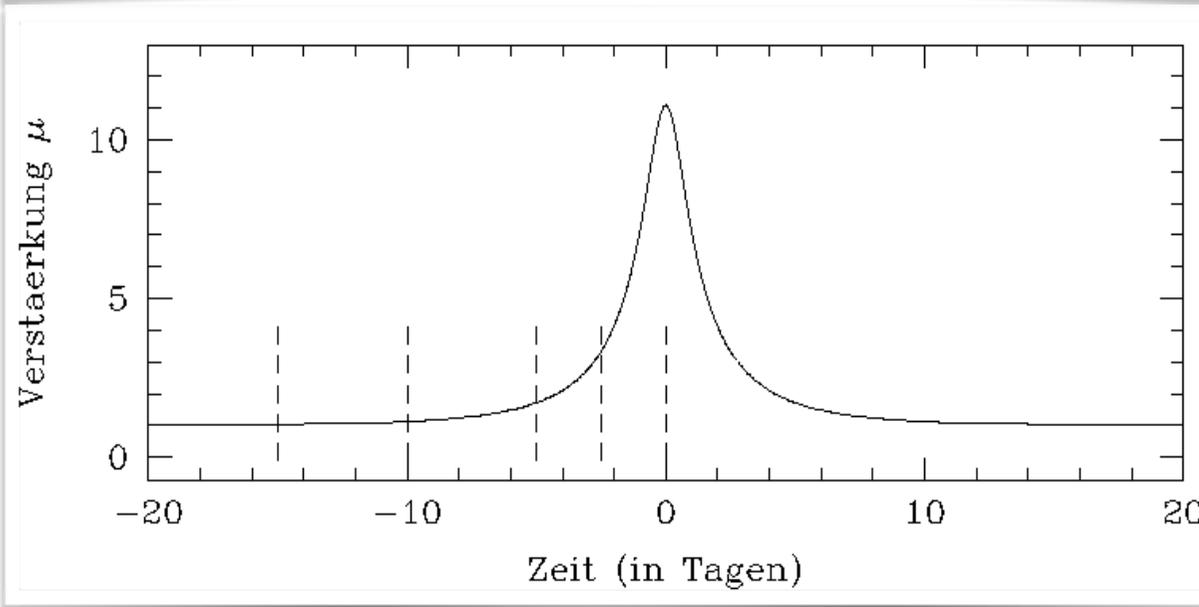
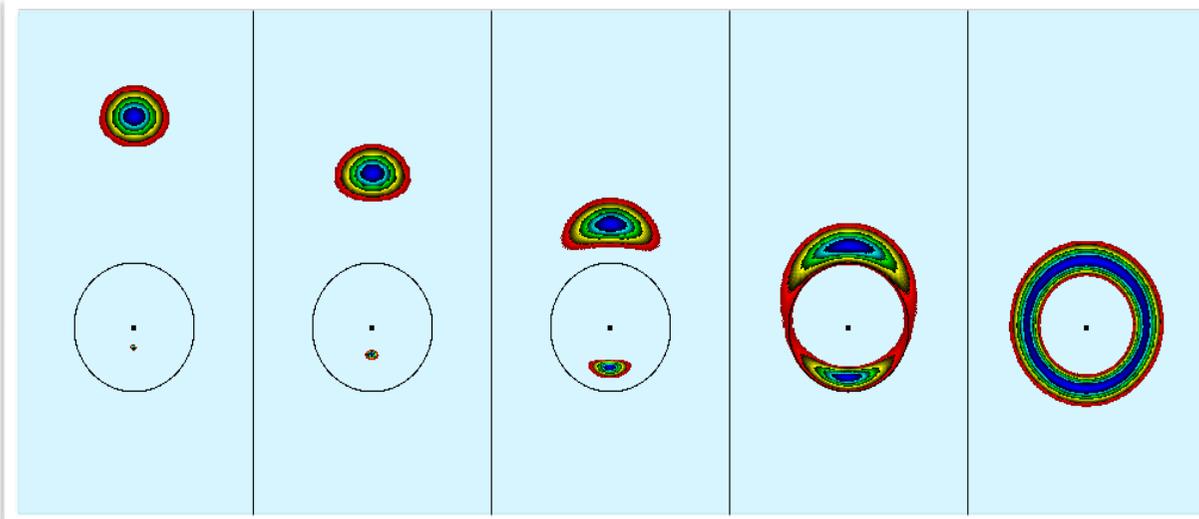
(where $u = \beta/\theta_E$)

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

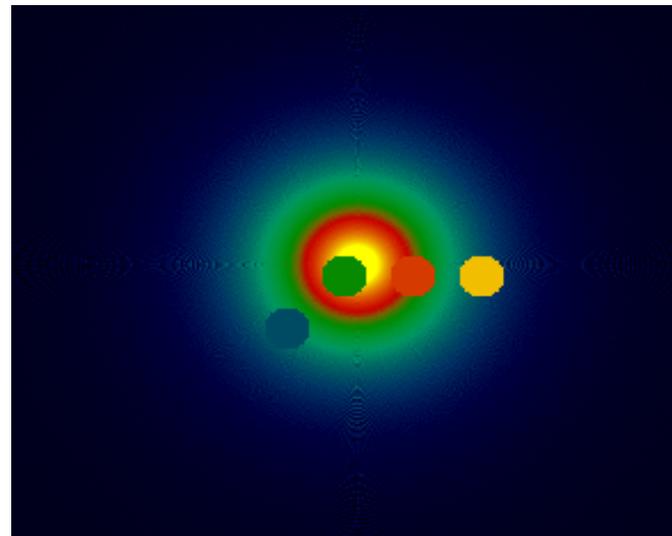
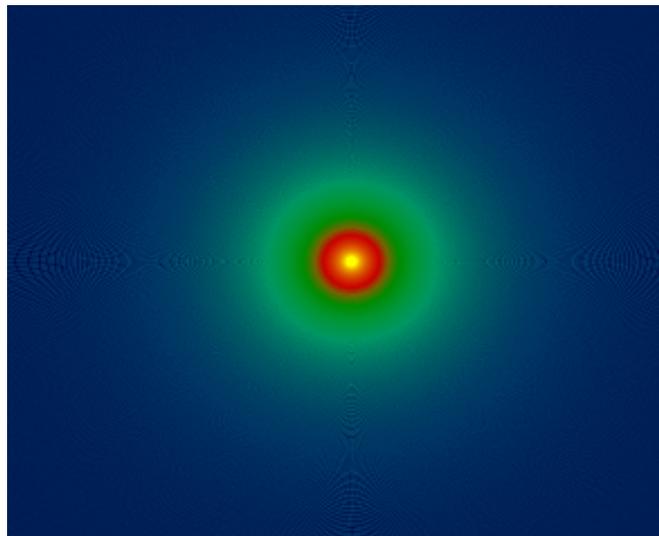
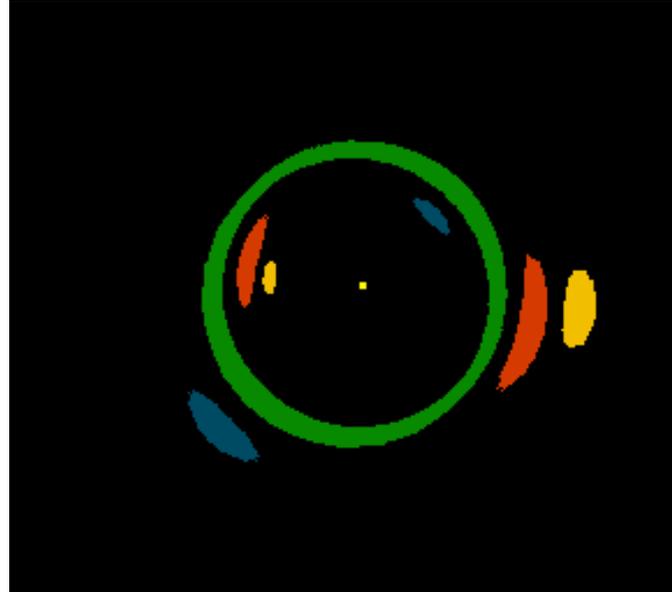
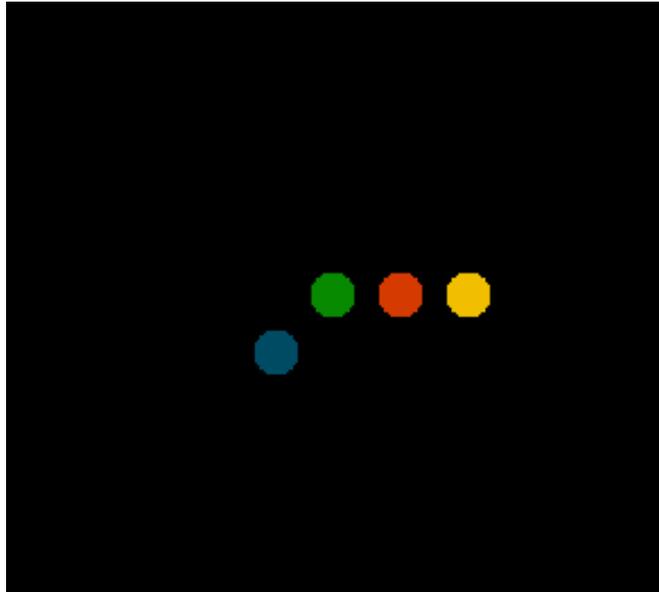
Wirkungen des Gravitationslinseneffekts

- Positionsänderung
 - erste Bestätigung der Lichtablenkungs-Theorie
 - im »Normalfall« nicht beobachtbar
- Verzerrung
 - ausgedehnte Quellen: Galaxien
- Verstärkung/Schwächung
 - Sterne: heller/weniger hell
 - Galaxien: größer/kleiner
- Mehrfachabbildung
 - dramatischste Auswirkung

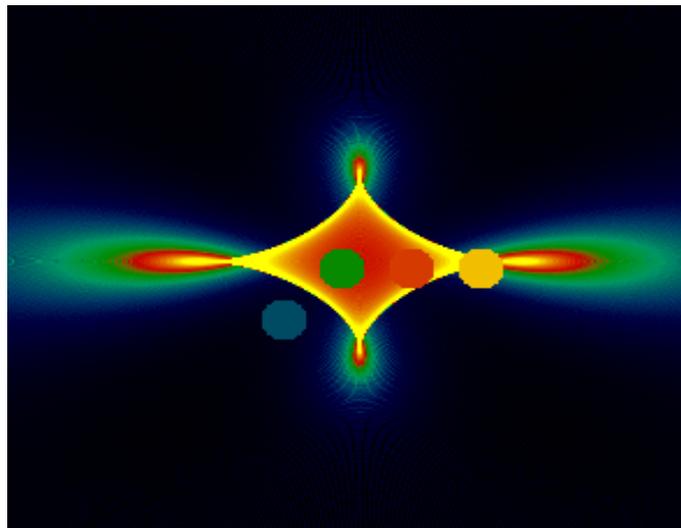
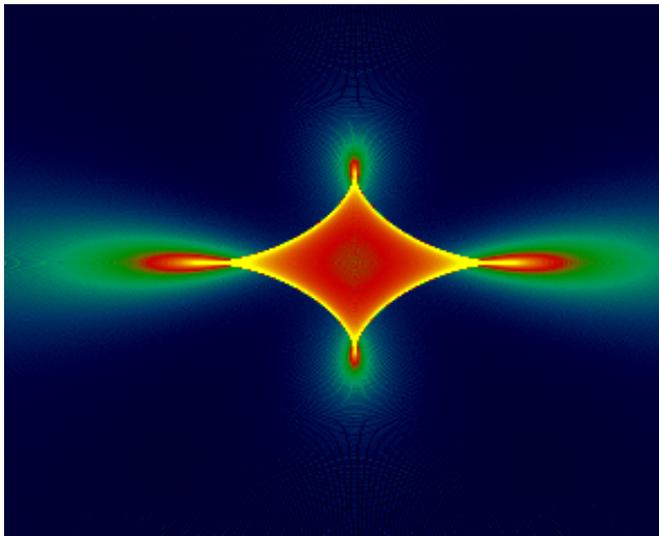
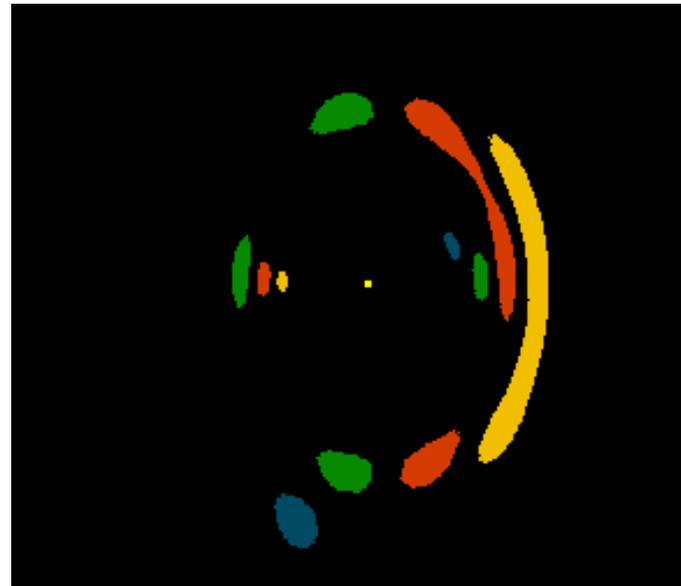
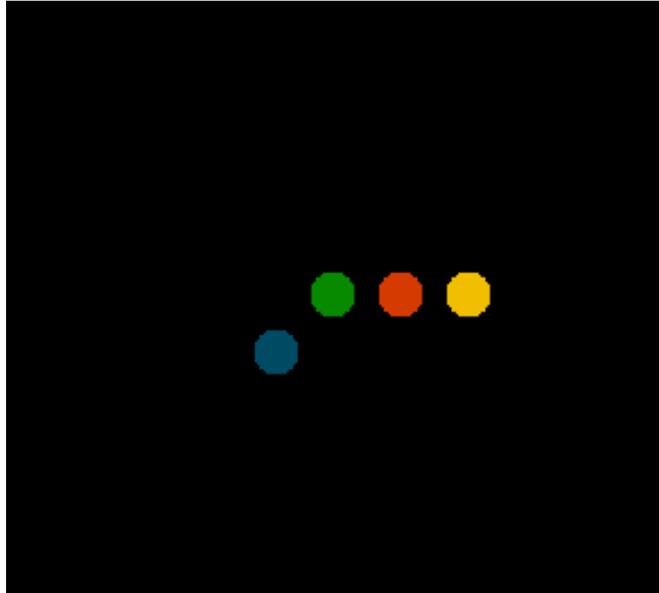
Wirkungen des Gravitationslinseneffekts: Punktlinse und ausgedehnte Quelle



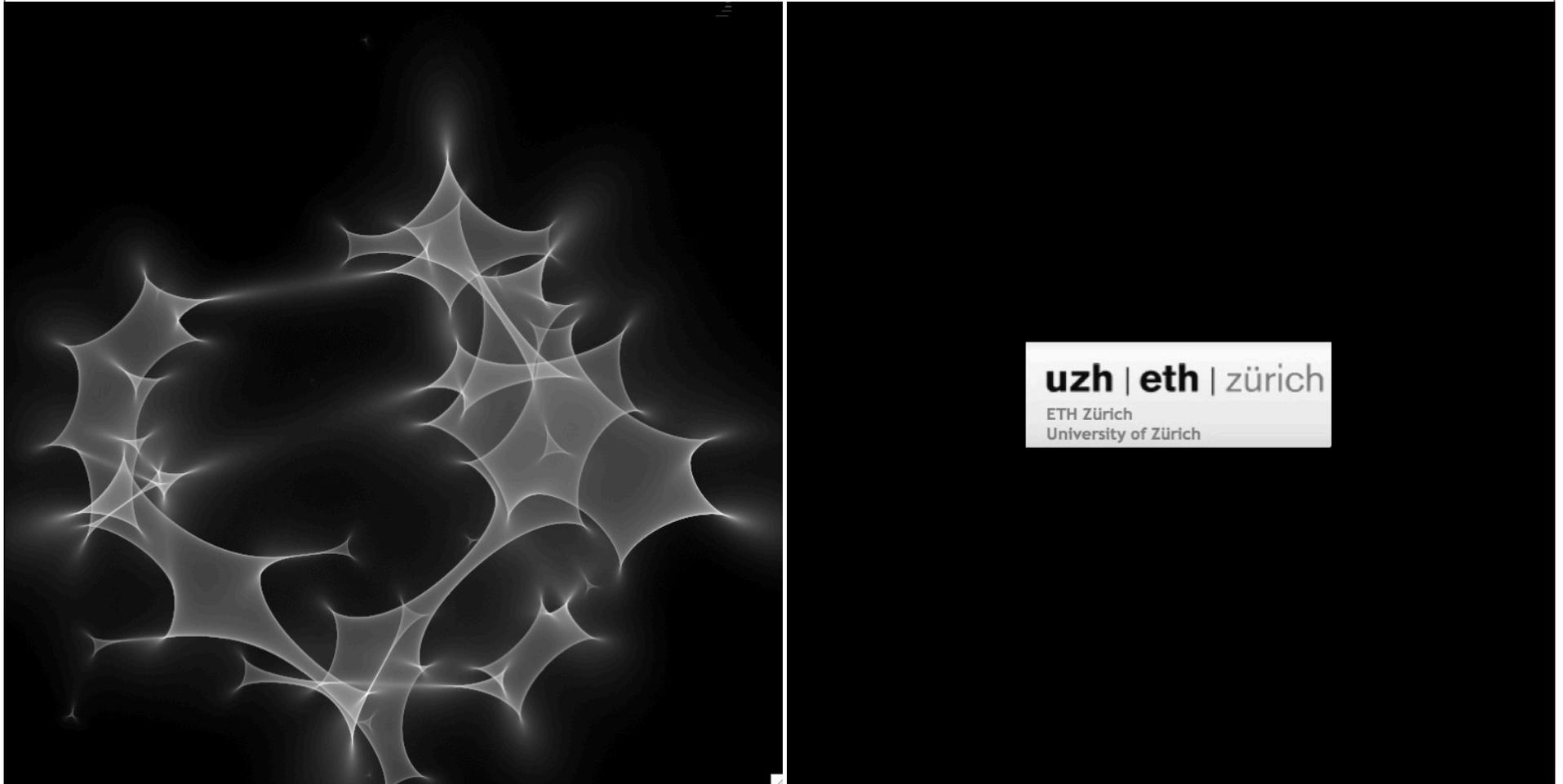
Wirkungen des Gravitationslinseneffekts: Punktlinse und ausgedehnte Quelle



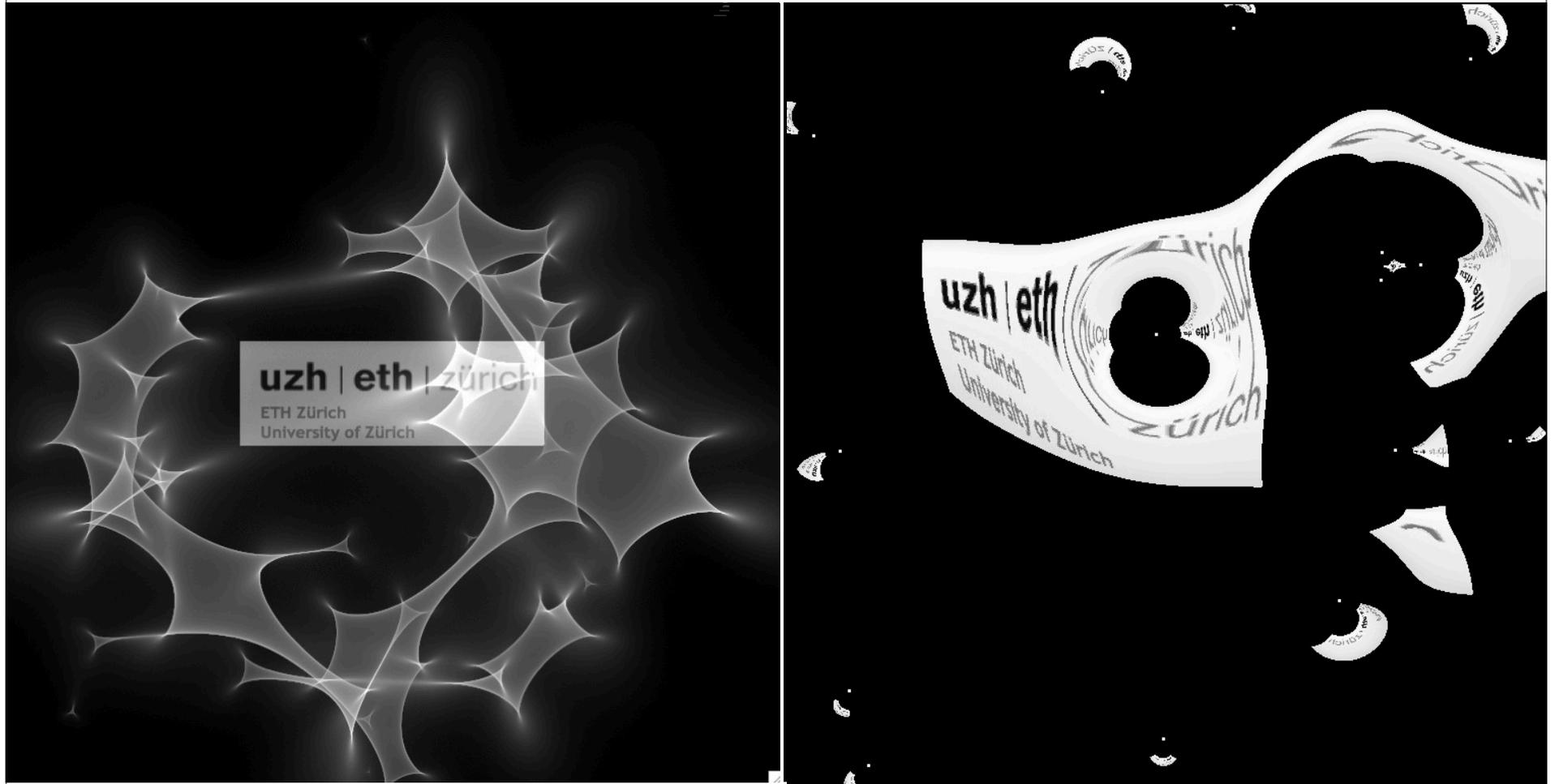
Wirkungen des Gravitationslinseneffekts: Punkt-Linse plus äußere Störung



Der Mikrolinseneffekt bei Quasaren



Der Mikrolinseneffekt bei Quasaren



Wirkungen des Gravitationslinseneffekts: Experiment für Punkt-Linse



(from Phil Yock)

Wirkungen des Gravitationslinseneffekts: Experiment für zwei Punkt-Linsen

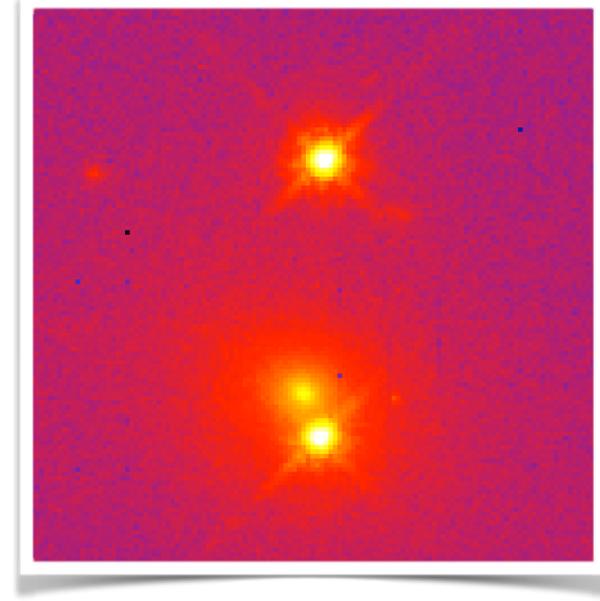


(from Phil Yock)

Phänomene des Gravitationslinseneffekts: Doppelbilder, Leuchtende Bögen, Einstein-Ringe

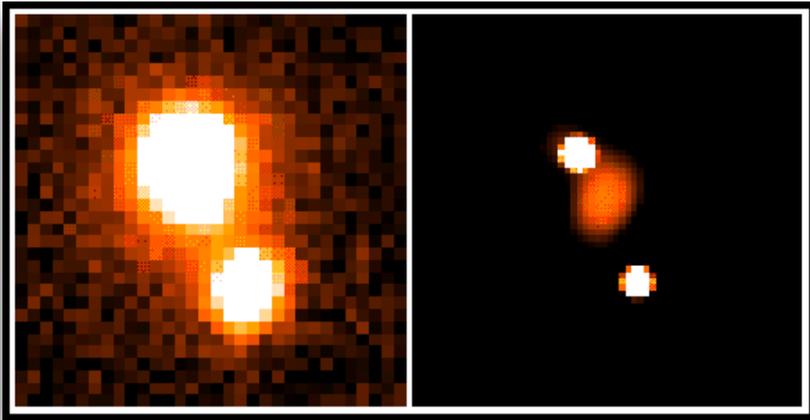
- Mehrfachquasare:
 - Doppelquasar Q0957+561
 - Vierfachquasar Q2237+0305
- Einsteinring:
 - B1938+666
 - „Horseshoe“
- Gigantische Leuchtende Bögen:
 - Galaxienhaufen CL0024+1654
 - Galaxienhaufen Abell 2218

Phänomene des Gravitationslinseneffekts: Doppelquasar Q0957+561



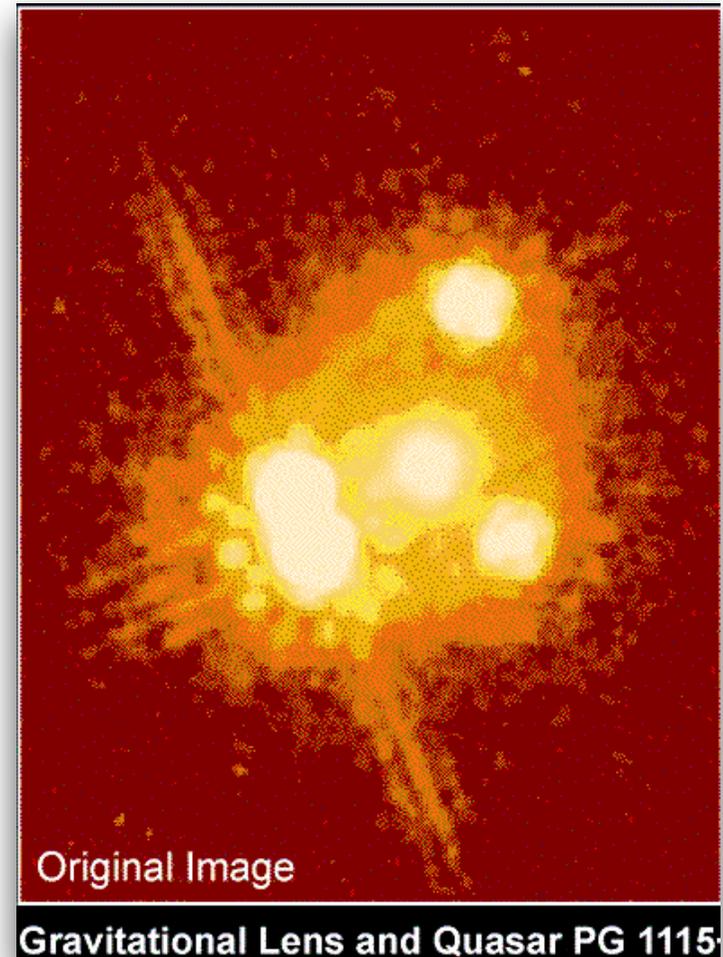
- Zwei Bilder des selben Quasars
- 6.1 Bogensekunden Abstand
- Rotverschiebung der beiden Quasare: $z = 1.41$
- Rotverschiebung der Galaxie: $z = 0.36$

Phänomene des Gravitationslinseneffekts:



Doppel quasar HE1104-1805 (Courbin et al.)

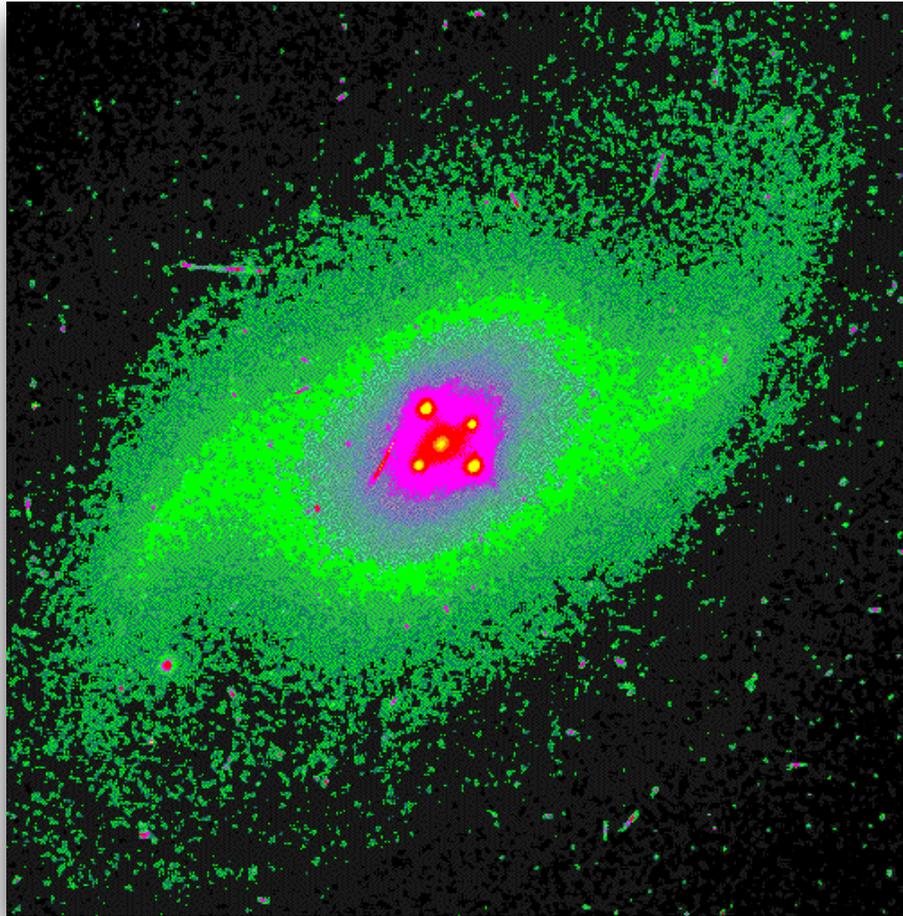
- $z_Q = 2.32$
- separation $\Delta \theta = 3.2$ arcsec



Vierfachquasar PG1115-080 (Impey et al.)

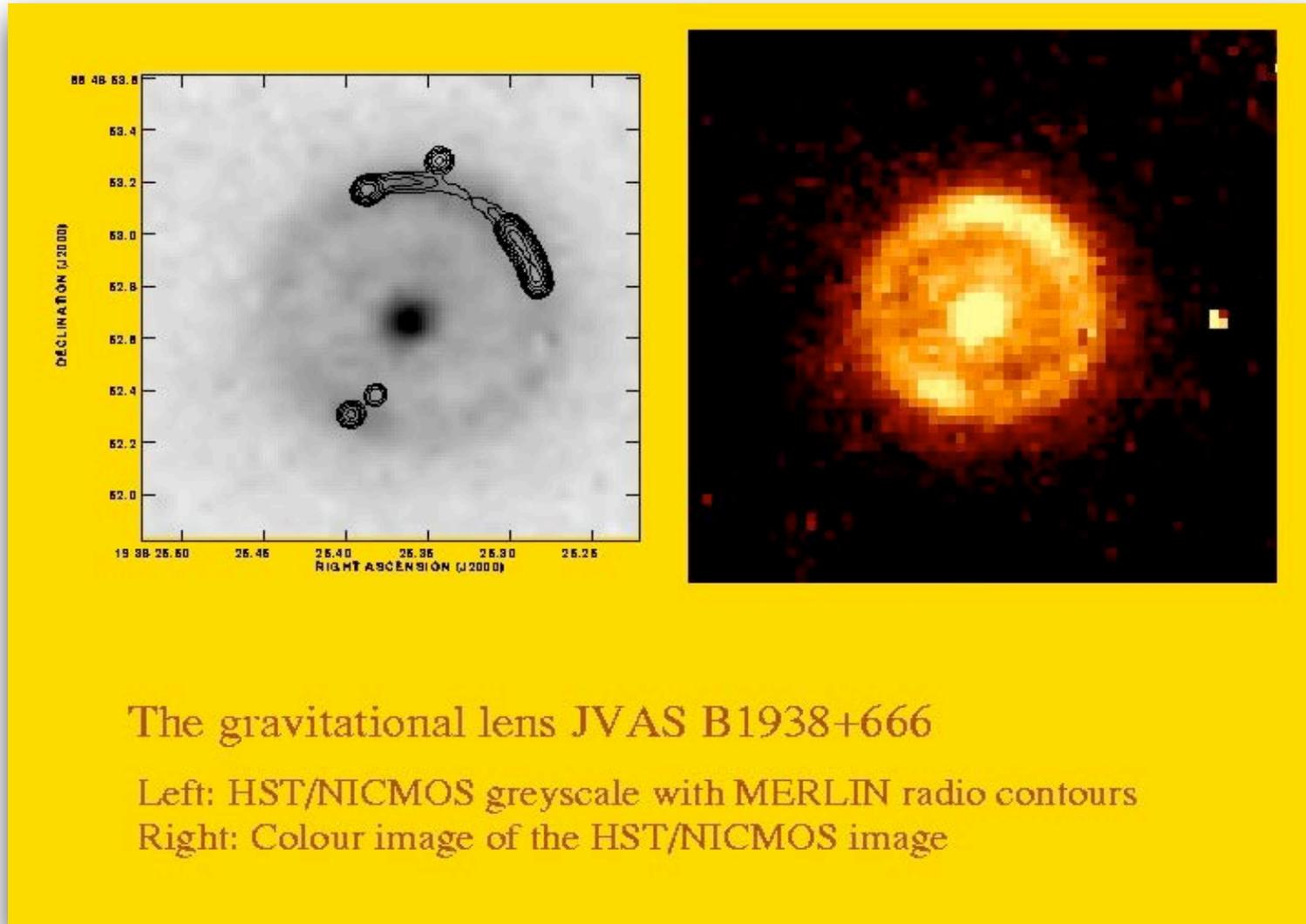
- $z_Q = 1.72$
- $\Delta \theta = 2.4$ arcsec

Phänomene des Gravitationslinseneffekts: Vierfachquasar Q2237+0305



- $z_Q = 1.695$, $z_G = 0.039$
- Bildabstand $\Delta \theta = 1.7$ arcsec

Phänomene des Gravitationslinseneffekts: Einstein-Ring B1938+666:



The gravitational lens JVAS B1938+666

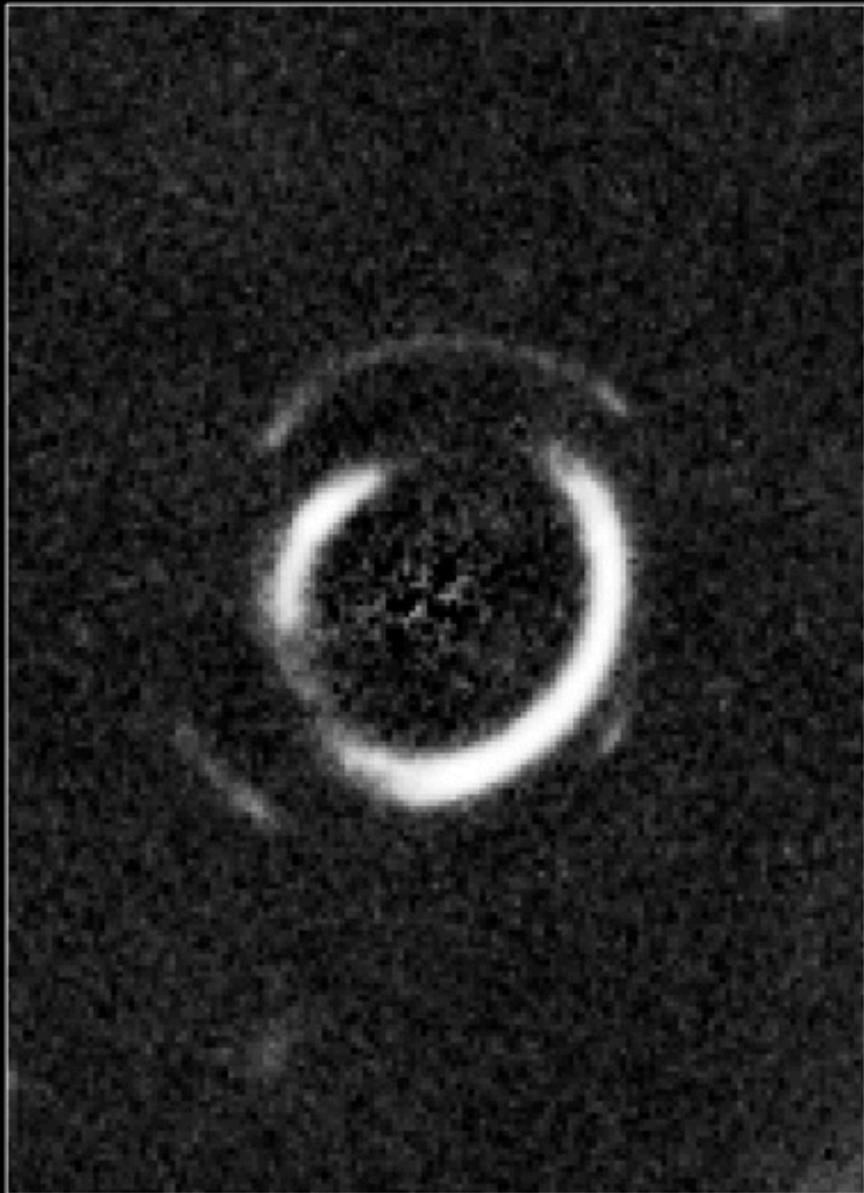
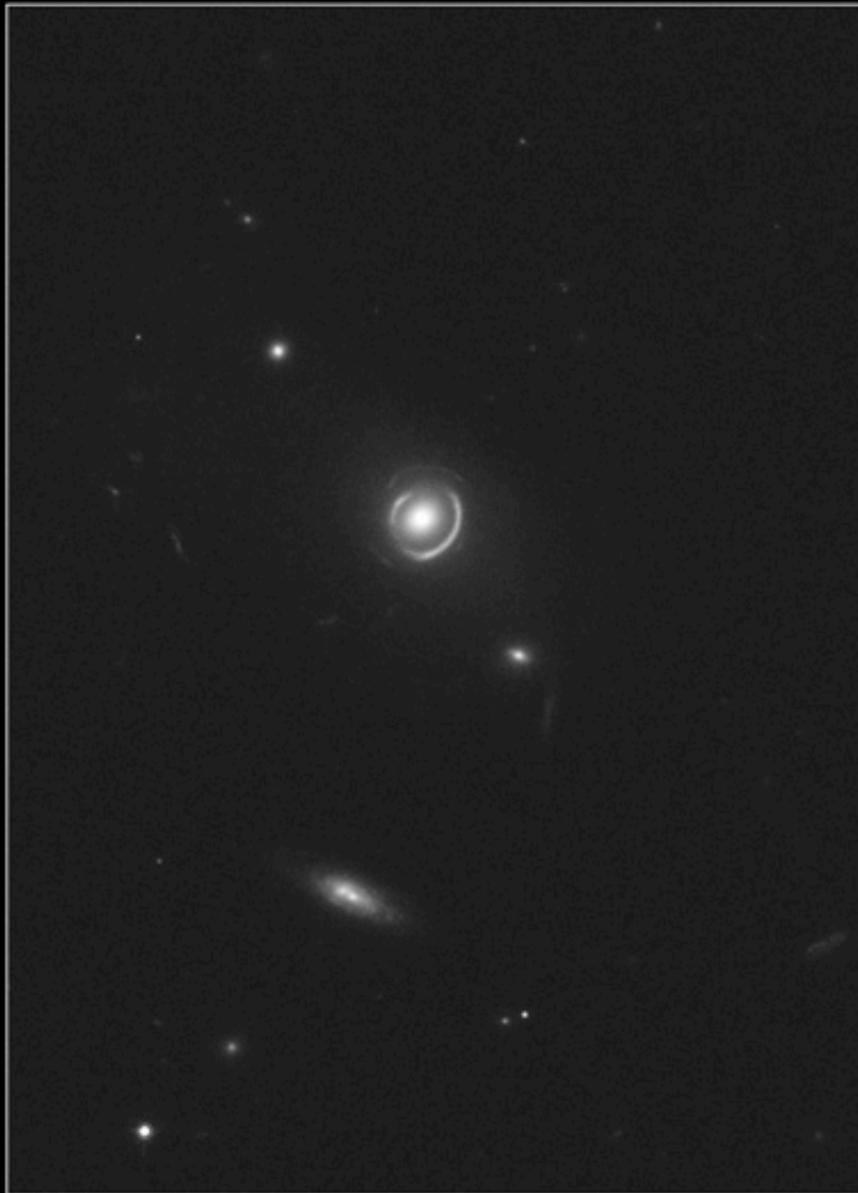
Left: HST/NICMOS greyscale with MERLIN radio contours

Right: Colour image of the HST/NICMOS image



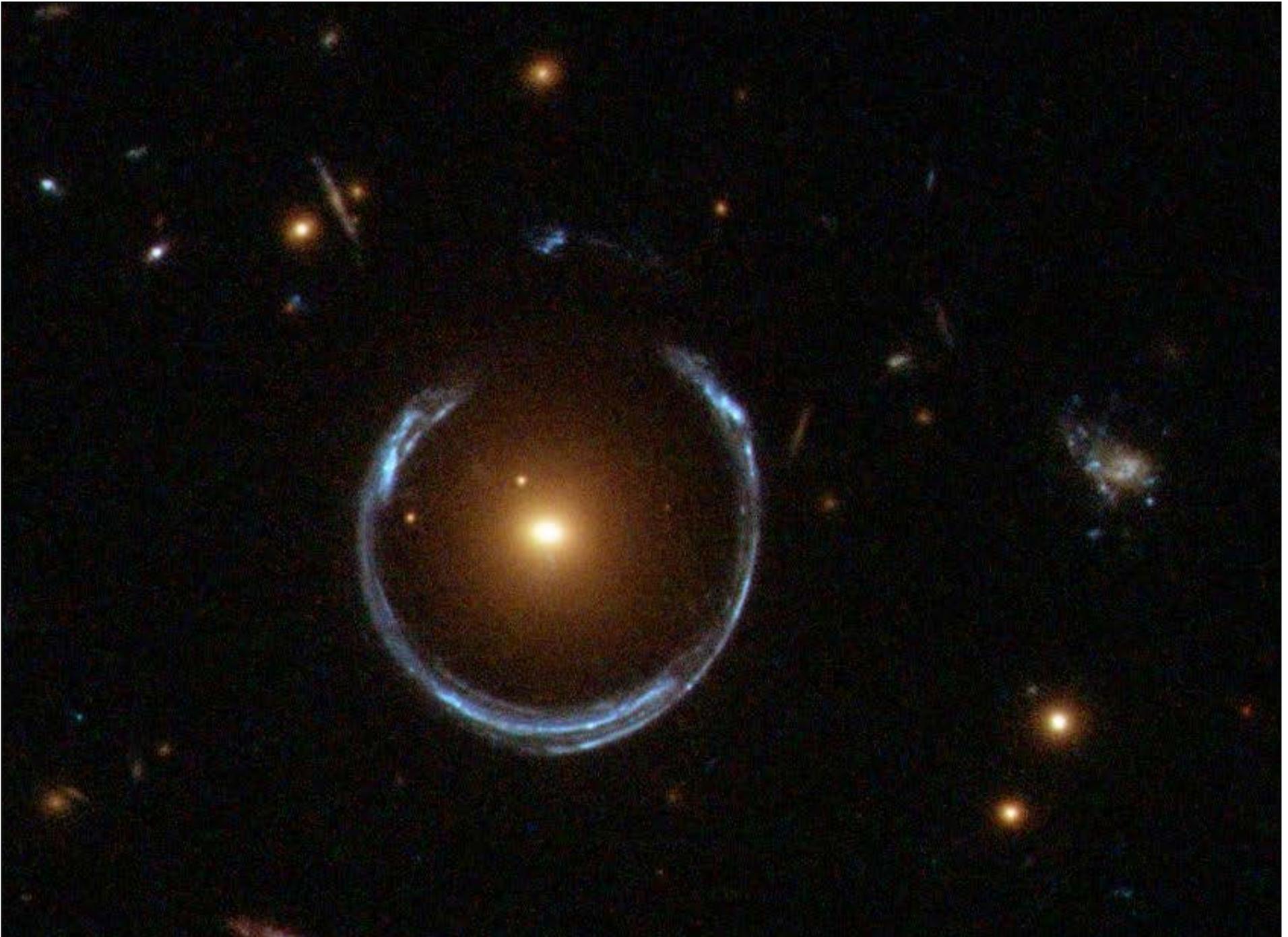
Double Einstein Ring SDSSJ0946+1006

Hubble Space Telescope ■ ACS/WFC



NASA, ESA, R. Gavazzi and T. Treu (University of California, Santa Barbara), and the SLACS Team

STScI-PRC08-04

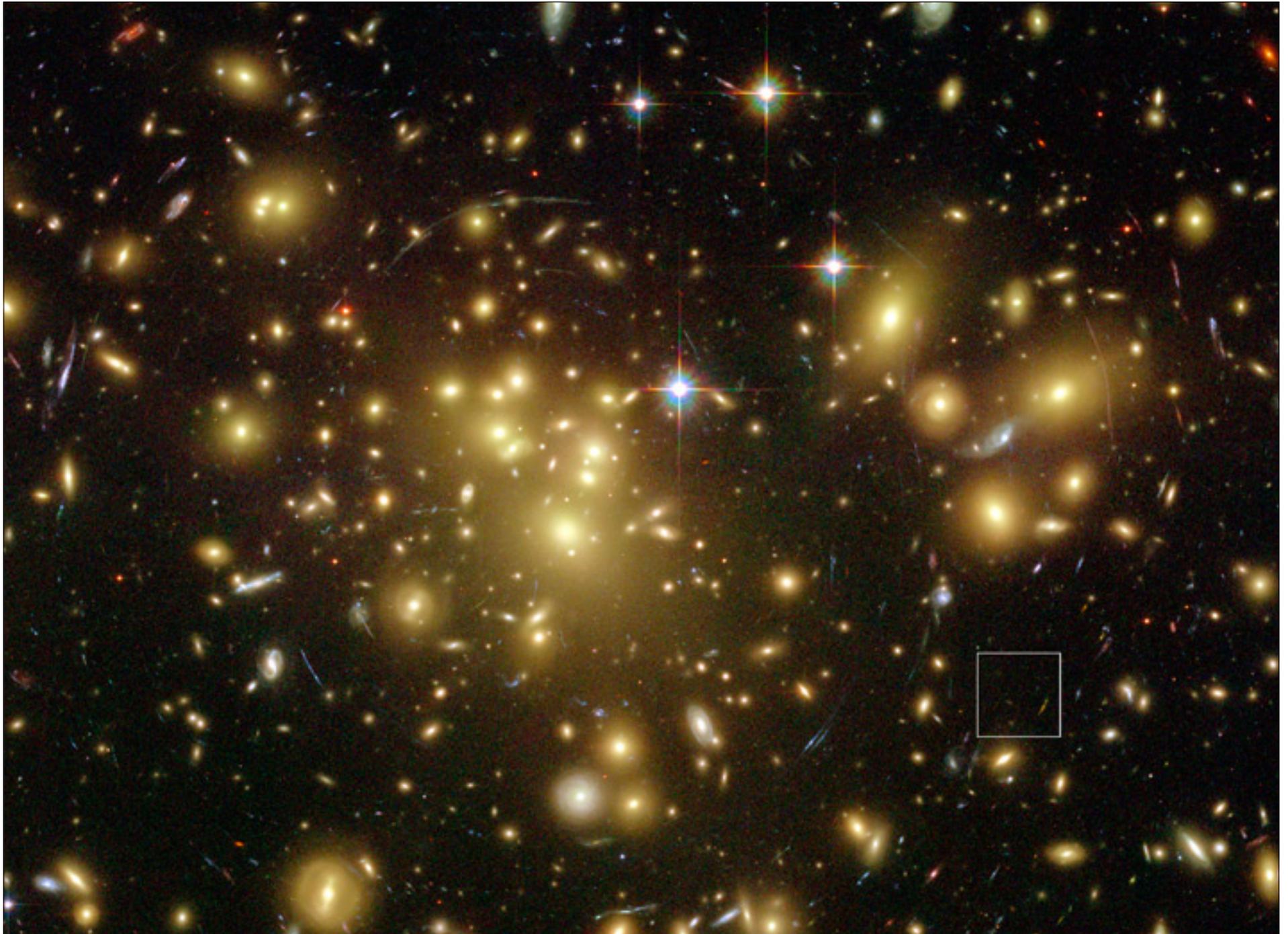






100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie – ETH Zürich – 12./14. November 2015 – Joachim Wambsganss: „Licht auf krummen Wegen - Gravitationslinsen“





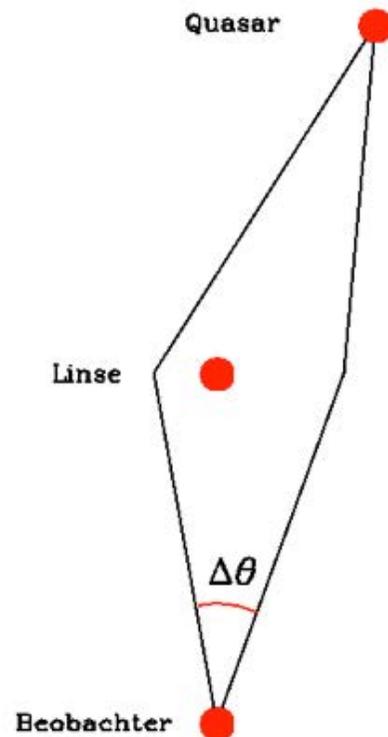
Astrophysikalische Anwendungen des Gravitationslinseneffekts:

Drei aktuelle Anwendungen

- Wie groß/alt ist das Universum:
 - Der Laufzeitunterschied hilft
- Sterne als “kleine” Linsen:
 - Der Mikrolinseneffekt bei Quasaren
- Extrasolare Planeten:
 - Mit dem Gravitationslinseneffekt auf der Suche nach erdähnlichen Planeten!

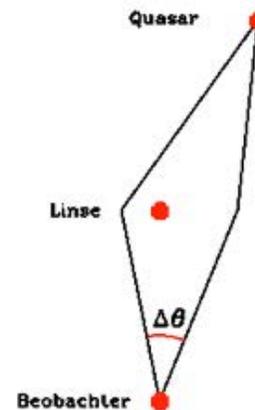
Lichtlaufzeitunterschied & Größe des Universums

Situation 1:



Situation 2:

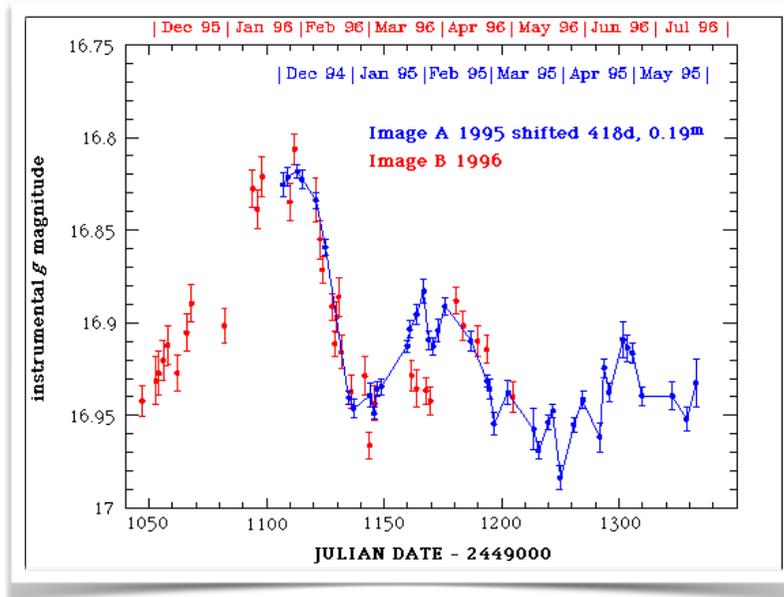
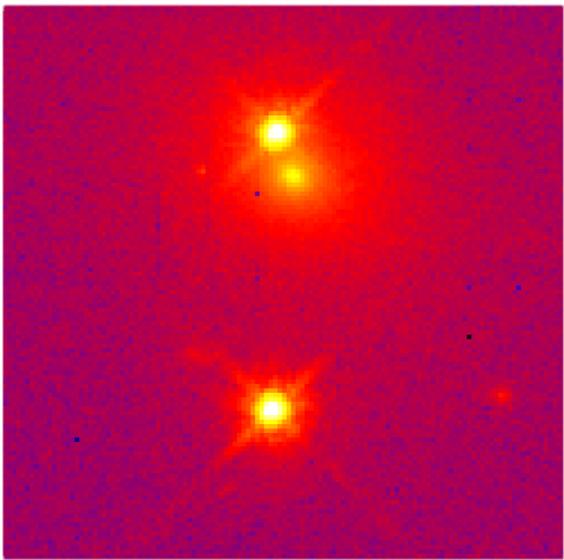
Geschwindigkeit: 300 000km/s
Längen-Unterschied: 10^{-10}
Ankunftszeitunterschied: 1 Jahr



Gesamtstrecke:
entspricht also
10 Mrd Lichtjahre

Astrophysikalische Anwendungen des Gravitationslinseneffekts:

Wie groß/alt ist das Universum: Der Laufzeitunterschied hilft



Lichtlaufzeitdifferenz im Doppelquasar:

$$\Delta t_{Q0957+561} = 418 \pm 3 \text{ Tage}$$

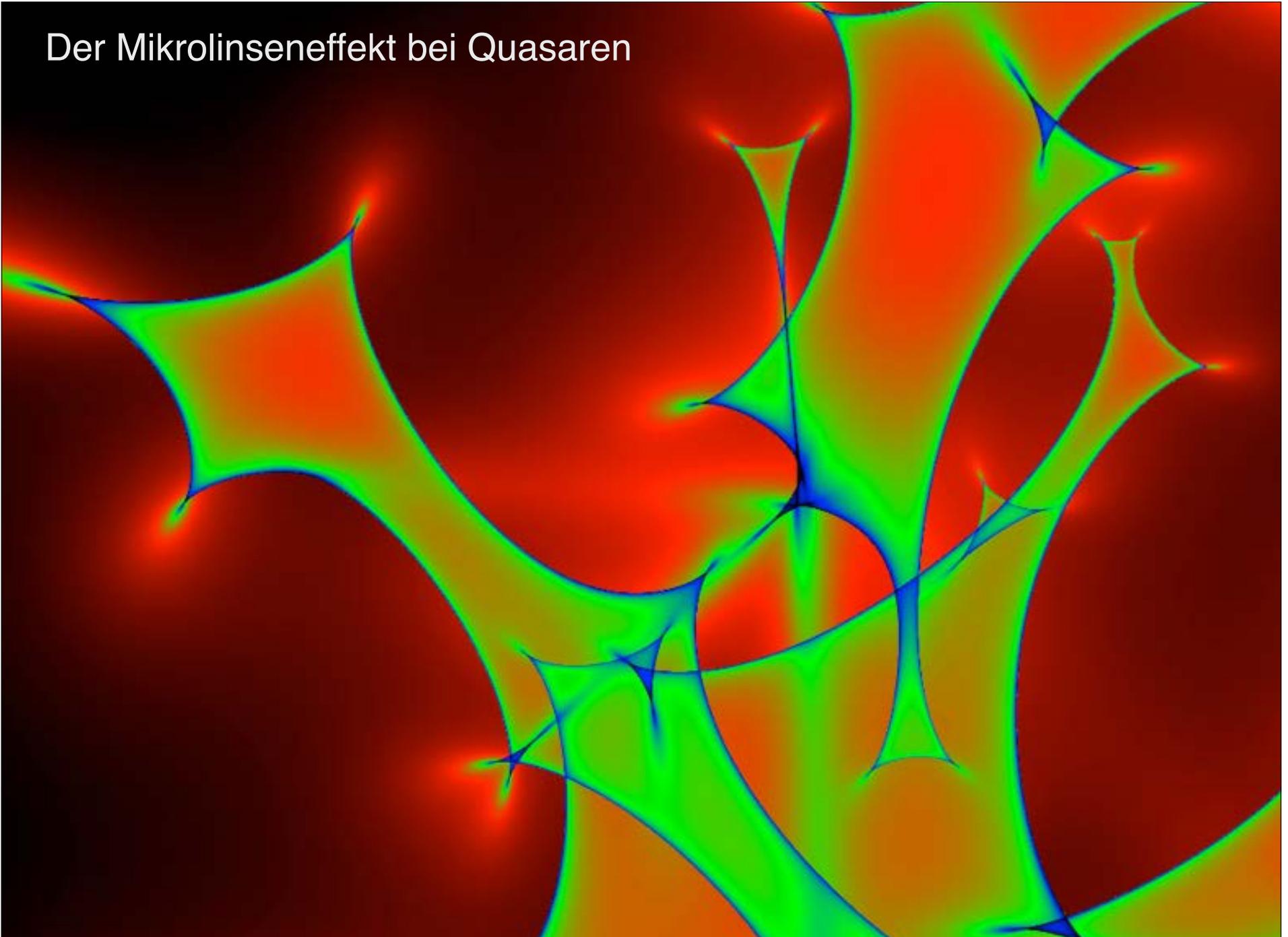
Daraus Hubble-Konstante:

$$H_0 = 64 \pm 13 \text{ km/sec/Mpc} \quad (\text{Kundic et al. 1997})$$

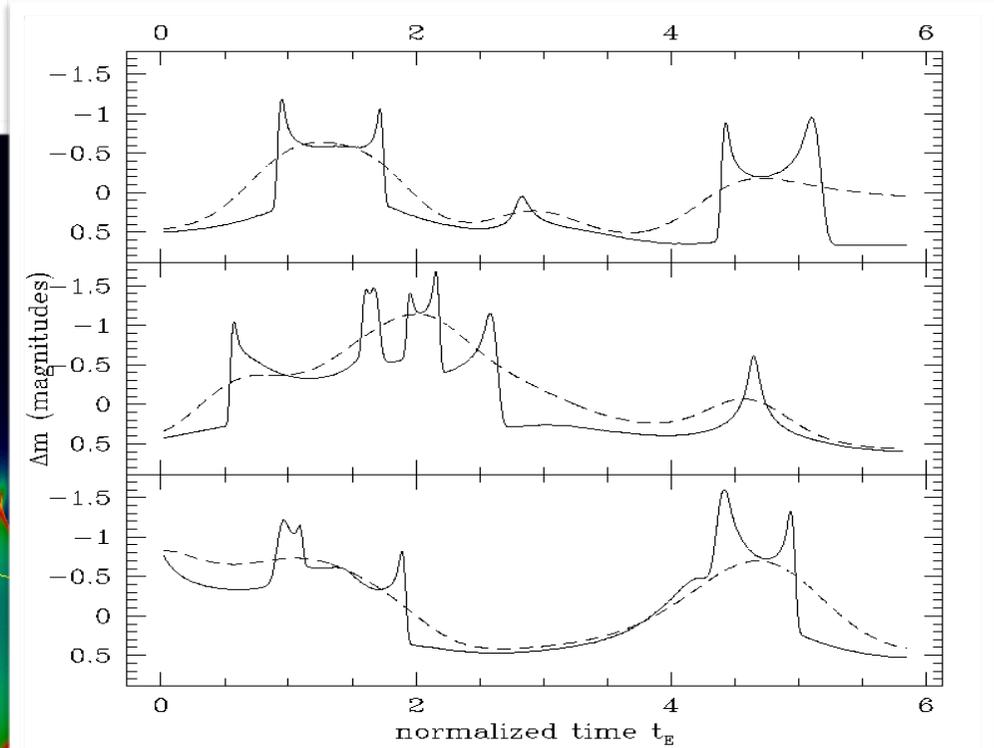
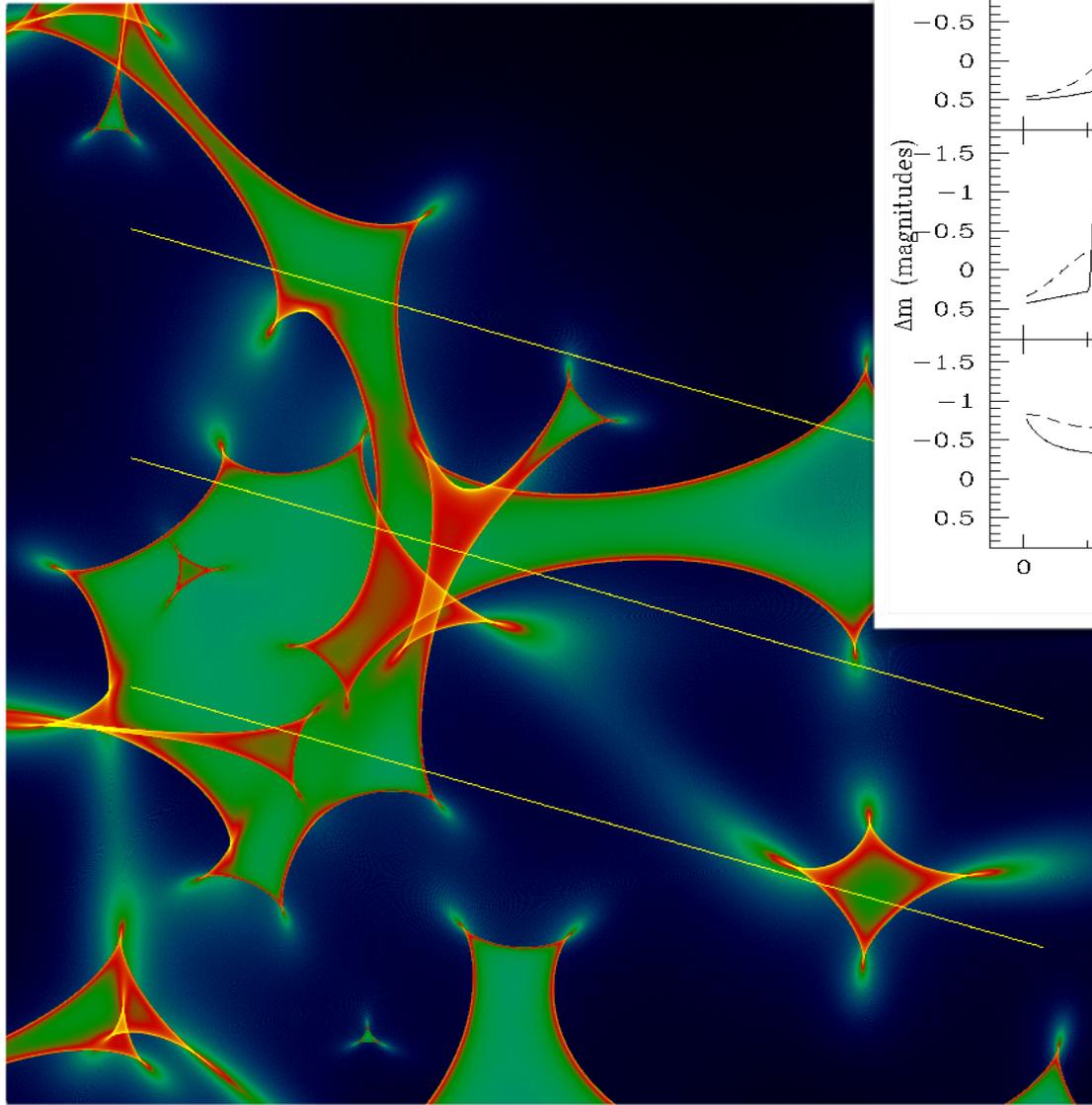
Daraus Alter/Größe des Universums:

$$t = 1/H_0 \approx 14 \text{ Mrd. Lichtjahre}$$

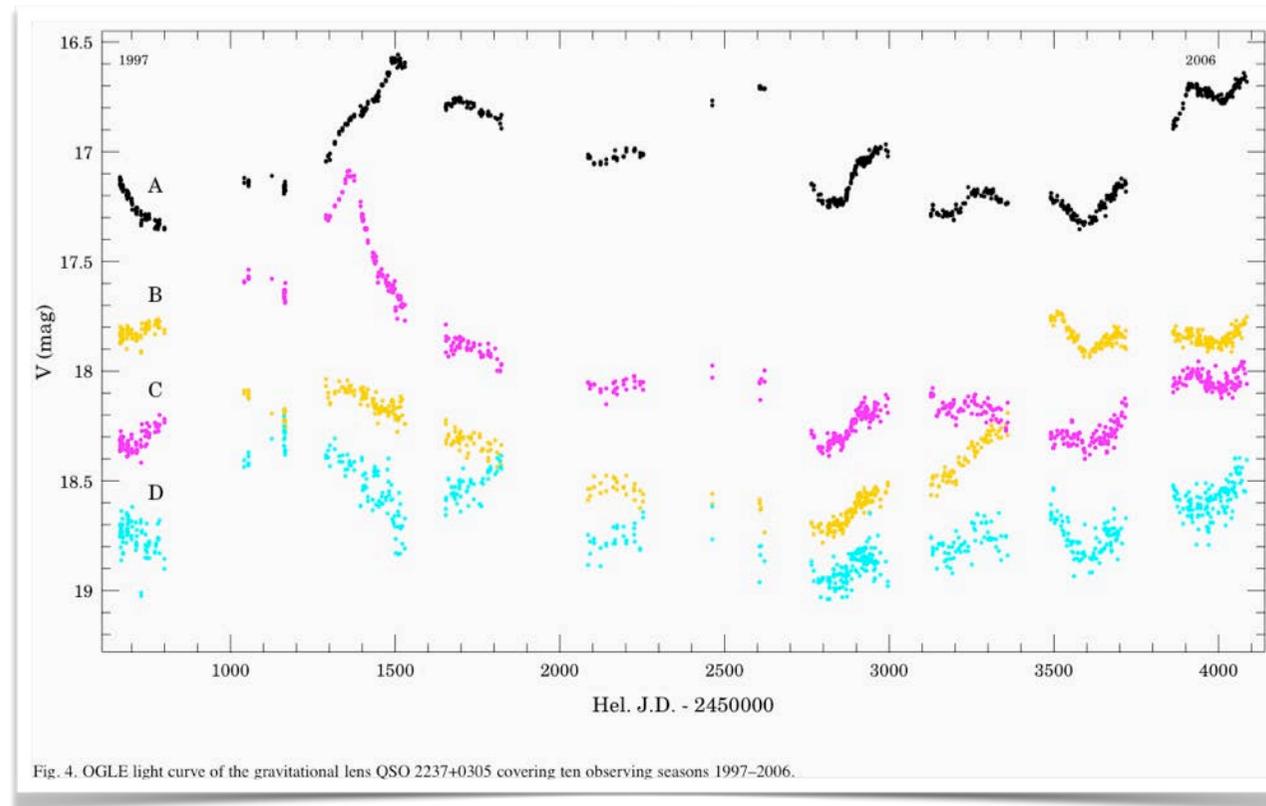
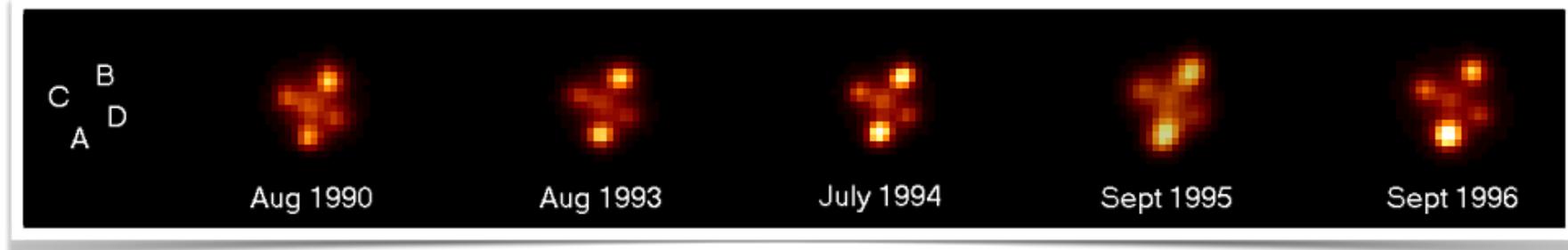
Der Mikrolinseneffekt bei Quasaren



Der Mikrolinseneffekt bei Quasaren

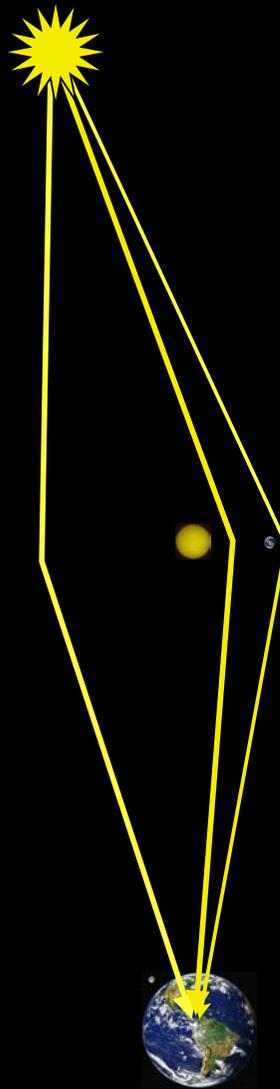


Astrophysikalische Anwendungen des Gravitationslinseneffekts: Der Mikrolinseneffekt bei Quasaren

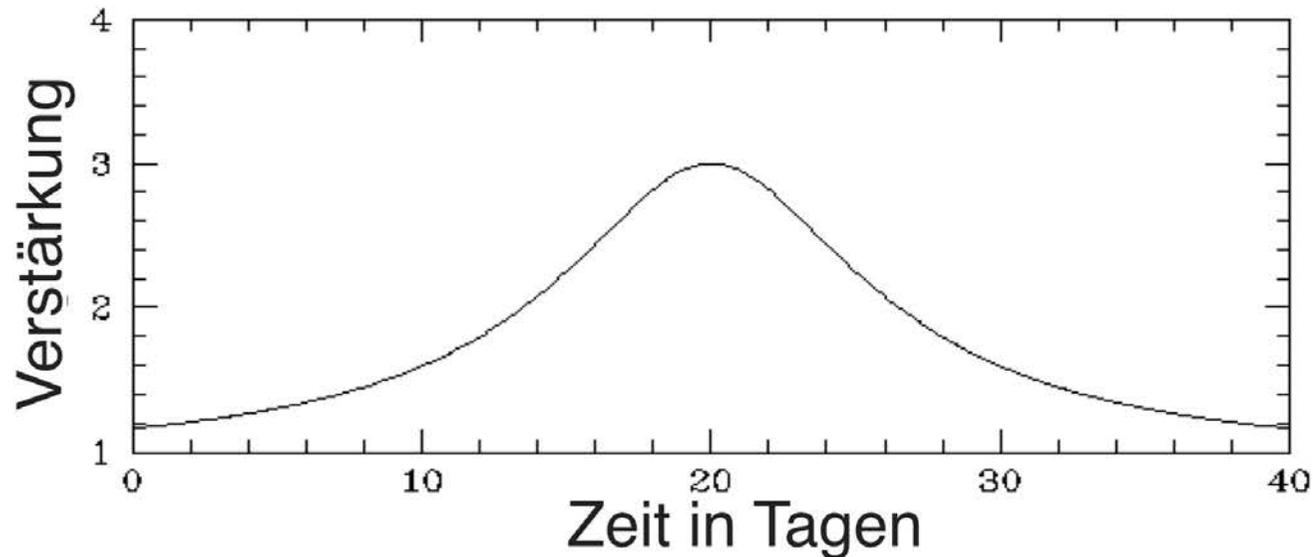


Die Suche nach Planeten um andere Sterne

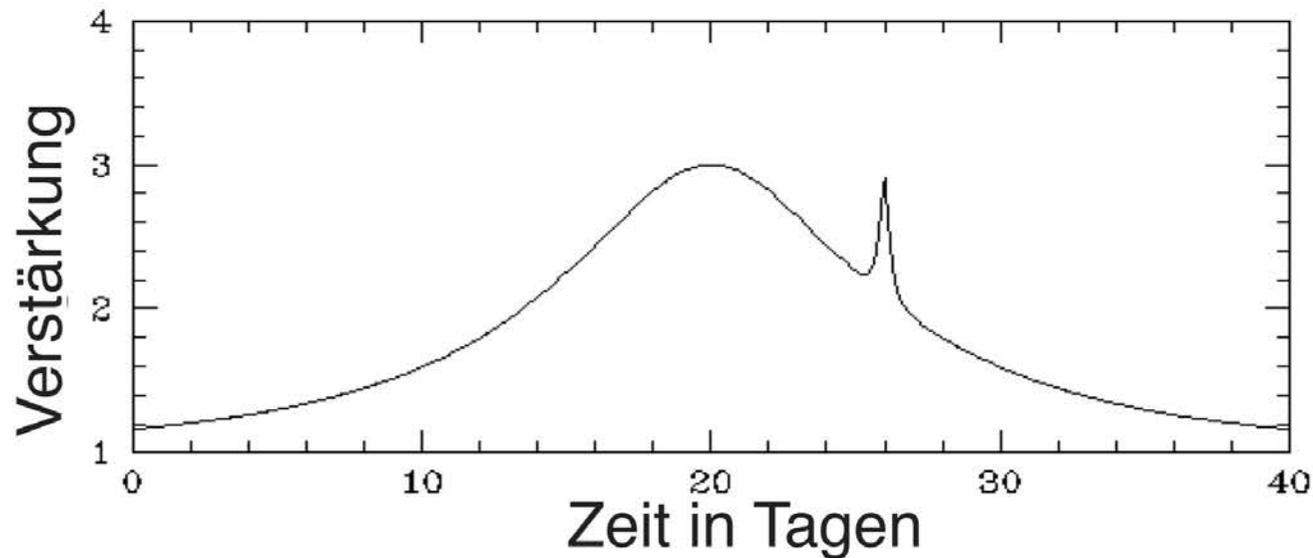




Astrophysikalische Anwendungen des Gravitationslinseneffekts: Die Suche nach Planeten um andere Sterne



Hintergrundstern
verstärkt durch
Einzelstern

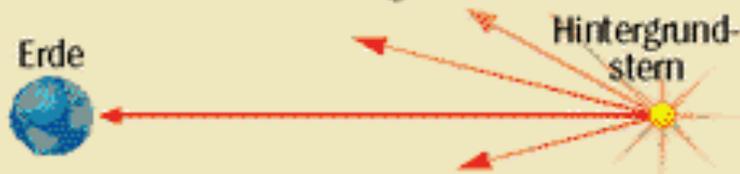


Hintergrundstern
verstärkt durch
Einzelstern
plus Planet

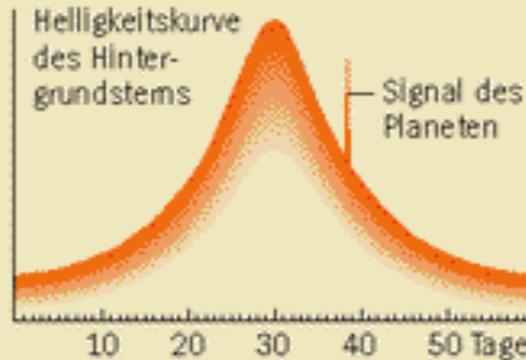
Planet im Brennglas

Das Prinzip der Gravitationslinse

Trifft das Licht eines fernen Sterns auf direktem Wege ein, so erreicht nur ein kleiner Teil der Strahlung die Erde.



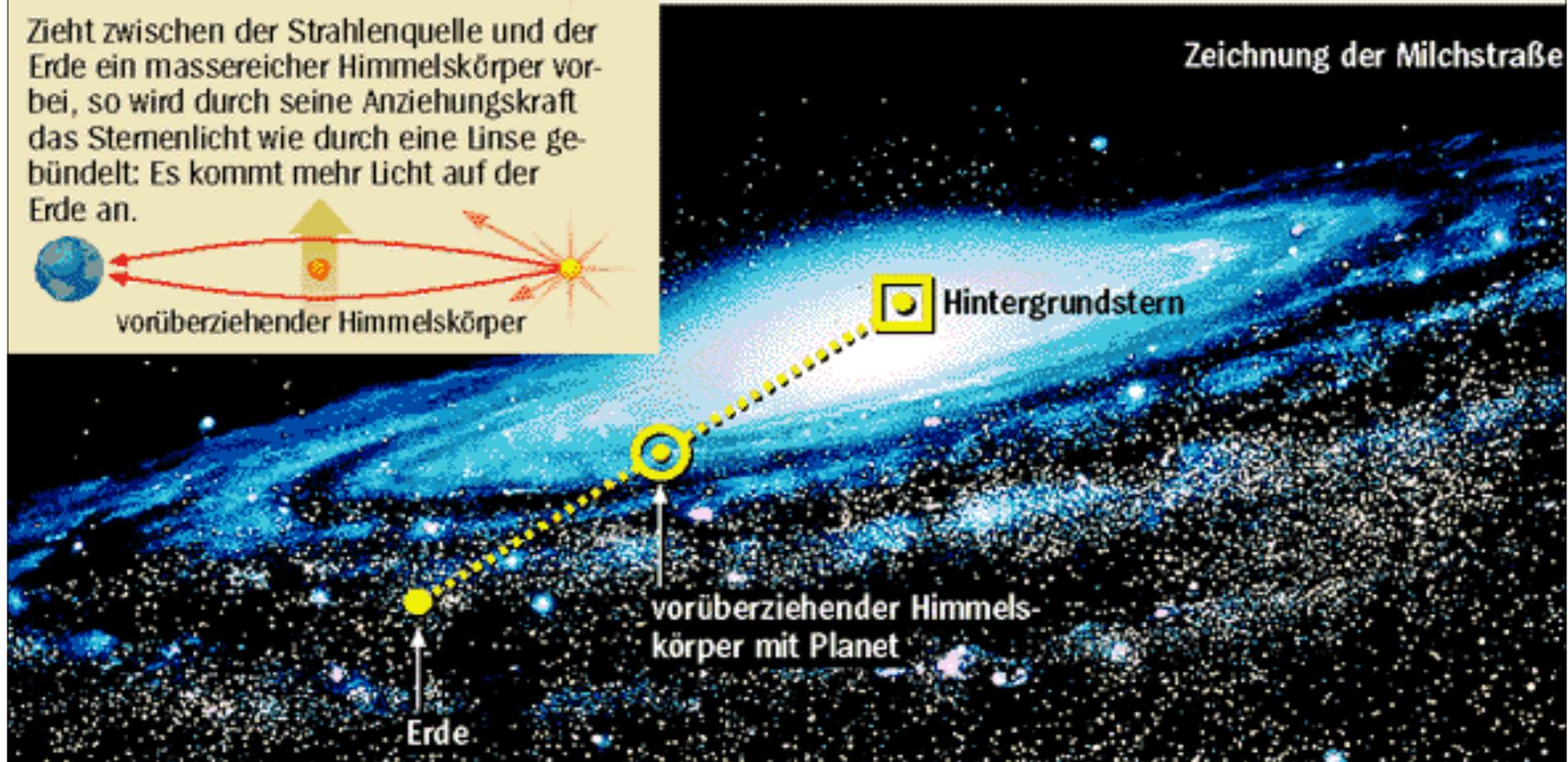
Zieht zwischen der Strahlenquelle und der Erde ein massereicher Himmelskörper vorbei, so wird durch seine Anziehungskraft das Sternenlicht wie durch eine Linse gebündelt: Es kommt mehr Licht auf der Erde an.



Astronomen registrieren die vorübergehende Helligkeitszunahme in Gestalt einer glockenförmigen Kurve. Wird der als Linse wirkende Himmelskörper von einem Planeten umkreist, tritt in der Helligkeitskurve eine zusätzliche Zacke auf.

BER SPIEGEL

Zeichnung der Milchstraße



Die Suche nach Planeten um andere Sterne mit der Mikrolinsenmethode

Die 24-Stunden-Nachtschicht: Die Teleskope



Die Suche nach Planeten um andere Sterne mit der Mikrolinsenmethode

Vol 439 | 26 January 2006 | doi:10.1038/nature04441

nature

LETTERS

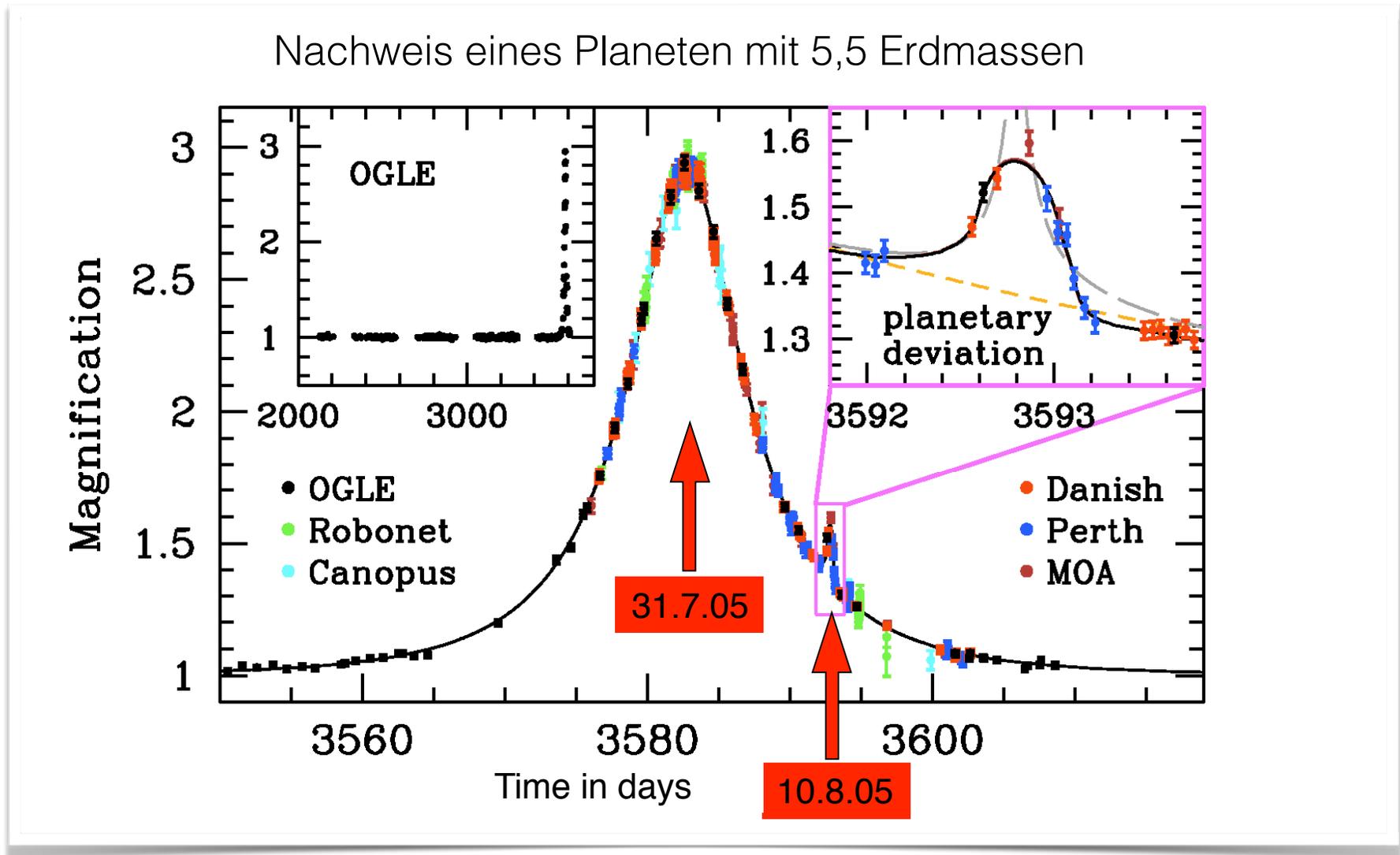
Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing

J.-P. Beaulieu^{1,4}, D. P. Bennett^{1,3,5}, P. Fouqué^{1,6}, A. Williams^{1,7}, M. Dominik^{1,8}, U. G. Jørgensen^{1,9}, D. Kubas^{1,10}, A. Cassan^{1,4}, C. Coutures^{1,11}, J. Greenhill^{1,12}, K. Hill^{1,12}, J. Menzies^{1,13}, P. D. Sackett^{1,14}, M. Albrow^{1,15}, S. Brilliant^{1,10}, J. A. R. Caldwell^{1,16}, J. J. Calitz^{1,17}, K. H. Cook^{1,18}, E. Corrales^{1,4}, M. Desert^{1,4}, S. Dieters^{1,12}, D. Dominis^{1,19}, J. Donatowicz^{1,20}, M. Hoffman^{1,19}, S. Kane^{1,21}, J.-B. Marquette^{1,4}, R. Martin^{1,7}, P. Meintjes^{1,17}, K. Pollard^{1,15}, K. Sahu^{1,22}, C. Vinter^{1,9}, J. Wambsganss^{1,23}, K. Woller^{1,9}, K. Horne^{1,8}, I. Steele^{1,24}, D. M. Bramich^{1,8,24}, M. Burgdorf^{1,24}, C. Snodgrass^{1,25}, M. Bode^{1,24}, A. Udalski^{2,26}, M. K. Szymański^{2,26}, M. Kubiak^{2,26}, T. Więckowski^{2,26}, G. Pietrzyński^{2,26,27}, I. Soszyński^{2,26,27}, O. Szewczyk^{2,26}, Ł. Wyrzykowski^{2,26,28}, B. Paczyński^{2,29}, F. Abe^{3,30}, I. A. Bond^{3,31}, T. R. Britton^{3,15,32}, A. C. Gilmore^{3,15}, J. B. Hearnshaw^{3,15}, Y. Itow^{3,30}, K. Kamiya^{3,30}, P. M. Kilmartin^{3,15}, A. V. Korpela^{3,33}, K. Masuda^{3,30}, Y. Matsubara^{3,30}, M. Motomura^{3,30}, Y. Muraki^{3,30}, S. Nakamura^{3,30}, C. Okada^{3,30}, K. Ohnishi^{3,34}, N. J. Rattenbury^{3,28}, T. Sako^{3,30}, S. Sato^{3,35}, M. Sasaki^{3,30}, T. Sekiguchi^{3,30}, D. J. Sullivan^{3,33}, P. J. Tristram^{3,32}, P. C. M. Yock^{3,32} & T. Yoshioka^{3,30}

67

Die Suche nach Planeten um andere Sterne mit der Mikrolinsenmethode

Nachweis eines Planeten mit 5,5 Erdmassen



Planeten sind die Regel, nicht die Ausnahme:

**Die Sterne in der Milchstraße haben im Schnitt
alle mindestens einen Planeten !**

LETTER

One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations

A. Cassan^{1,2,3}, D. Kubas^{1,2,4}, J.-P. Beaulieu^{1,2,25}, M. Dominik^{1,5}, K. Horne^{1,5}, J. Greenhill^{1,6}, J. Wambsganss^{1,3}, J. Menzies^{1,7}, A. Williams^{1,8}, U. G. Jørgensen^{1,9}, A. Udalski^{10,11}, D. P. Bennett^{1,12}, M. D. Albrow^{1,13}, V. Batista^{1,2}, S. Brilliant^{1,4}, J. A. R. Caldwell^{1,14}, A. Cole^{1,6}, Ch. Coutures^{1,2}, K. H. Cook^{1,15}, S. Dieters^{1,6}, D. Dominis Prester^{1,16}, J. Donatowicz^{1,17}, P. Fouqué^{1,18}, K. Hill^{1,6}, N. Kains^{1,19}, S. Kane^{1,20}, J.-B. Marquette^{1,2}, R. Martin^{1,8}, K. R. Pollard^{1,13}, K. C. Sahu^{1,14}, C. Vinter^{1,9}, D. Warren^{1,6}, B. Watson^{1,6}, M. Zub^{1,3}, T. Sumi^{21,22}, M. K. Szymański^{10,11}, M. Kubiak^{10,11}, R. Poleski^{10,11}, I. Soszynski^{10,11}, K. Ulaczyk^{10,11}, G. Pietrzyński^{10,11,23} & L. Wyrzykowski^{10,11,24}

nature

12 JANUARY 2012 | VOL 481 | NATURE | 167

Frei fliegende Planeten !?!

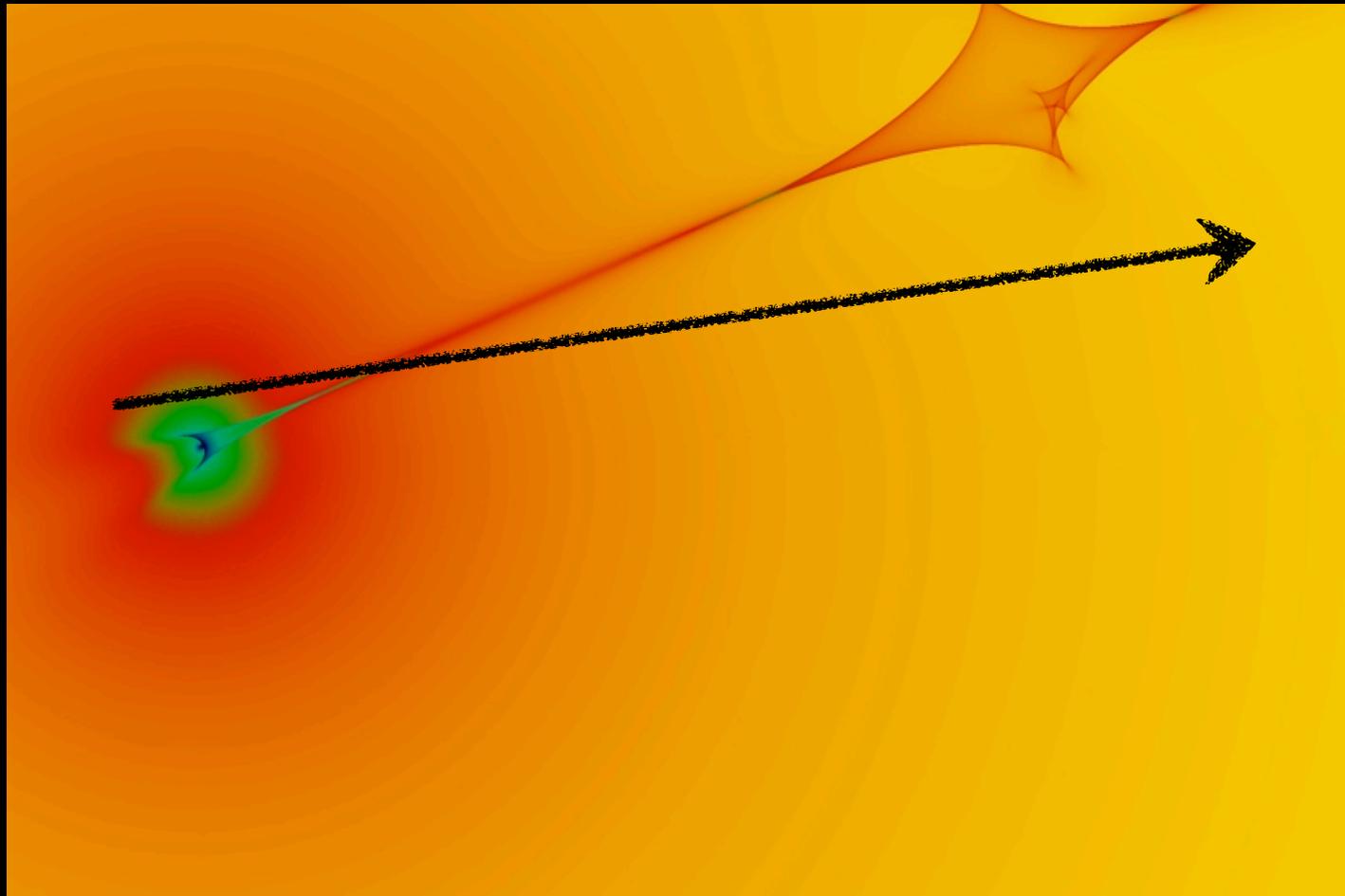
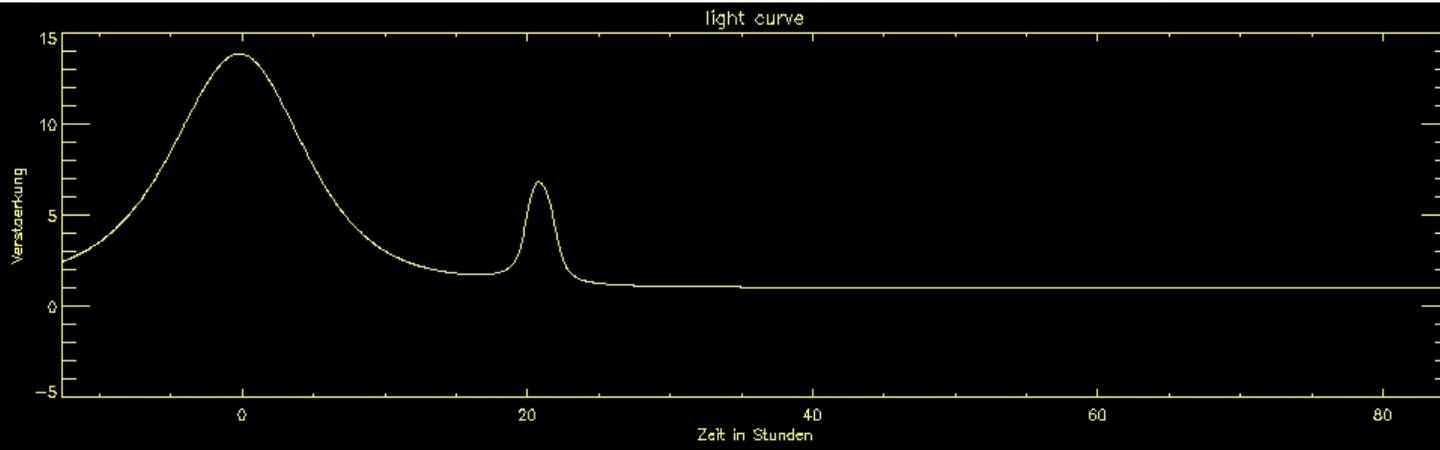
LETTER

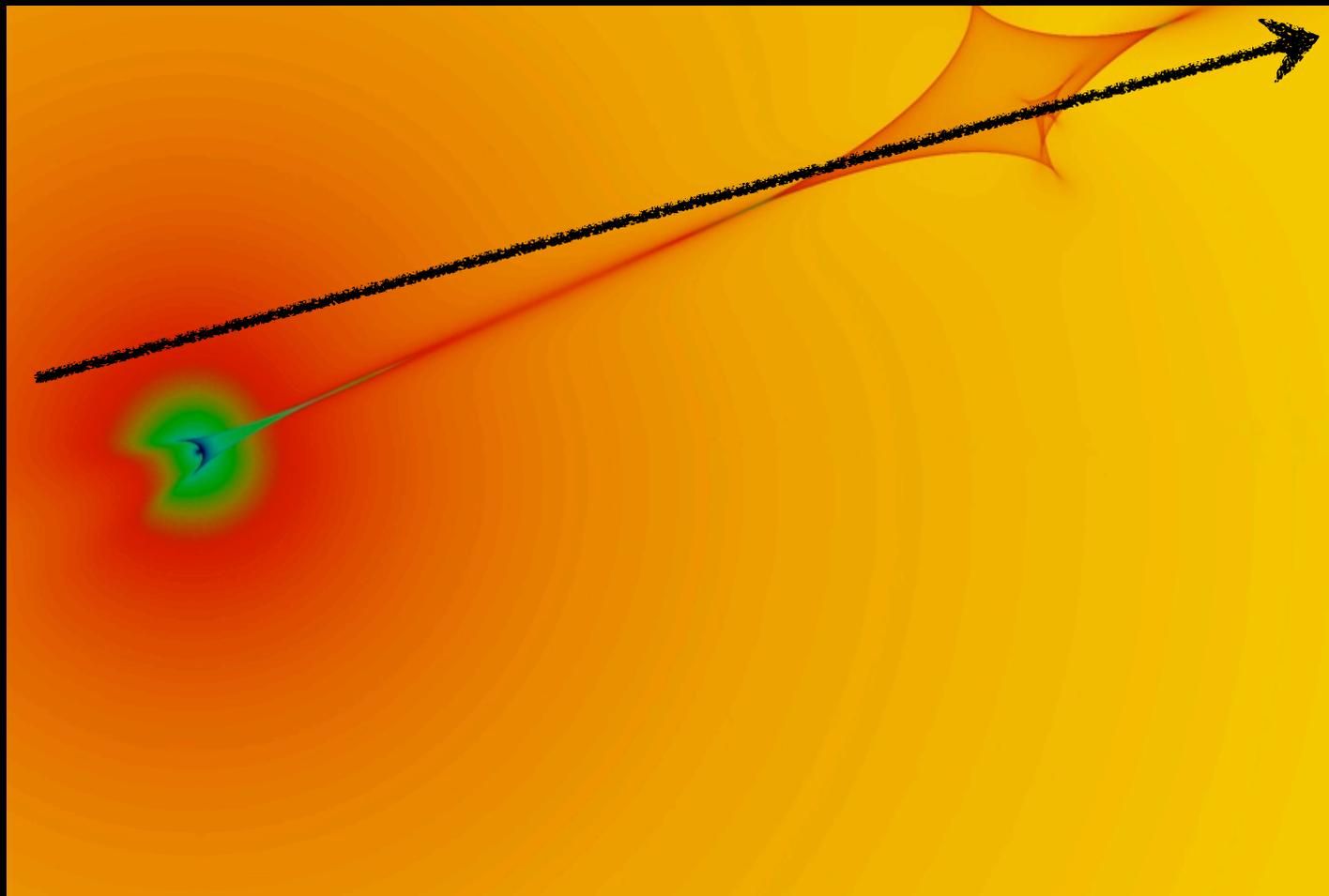
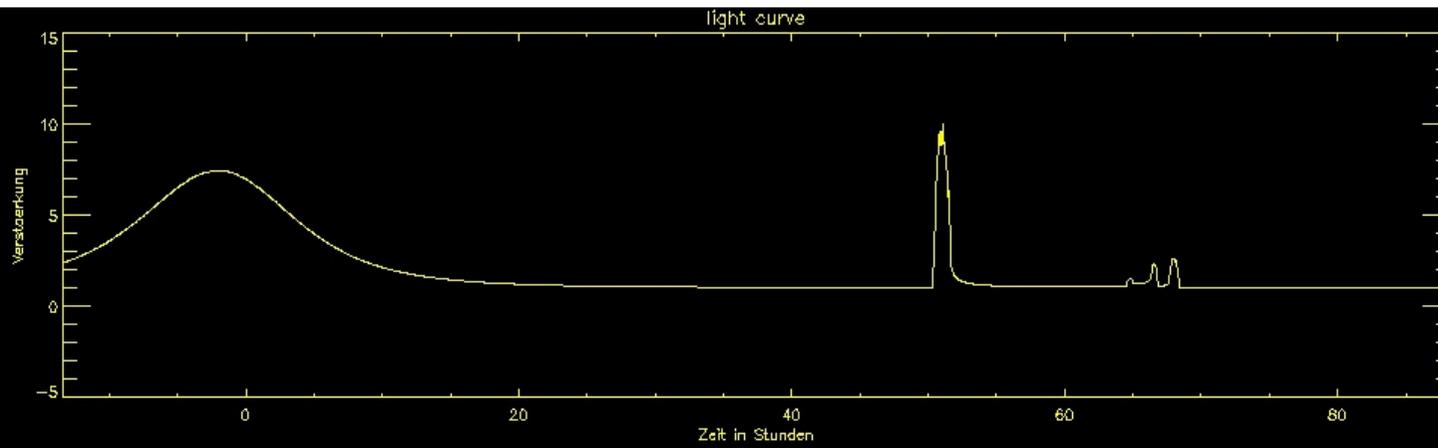
Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing

The Microlensing Observations in Astrophysics (MOA) Collaboration & The Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) Collaboration*

nature

Sumi et al., Nature 473, 349 (May 19, 2011)





Wirkungen des Gravitationslinseneffekts:

- Massen-Skalen:

- Von wenigen Erdmassen ($10^{-5} M_{\odot}$) bis Galaxienhaufen ($10^{15} M_{\odot}$)

⇒ 20 Größenordnungen (und es geht weiter ...)

- Winkel-Skalen:

- Von Quasar Microlensing (10^{-6} arcsec) bis „Giant arcs“ (100 arcsec)

⇒ 8 Größenordnungen

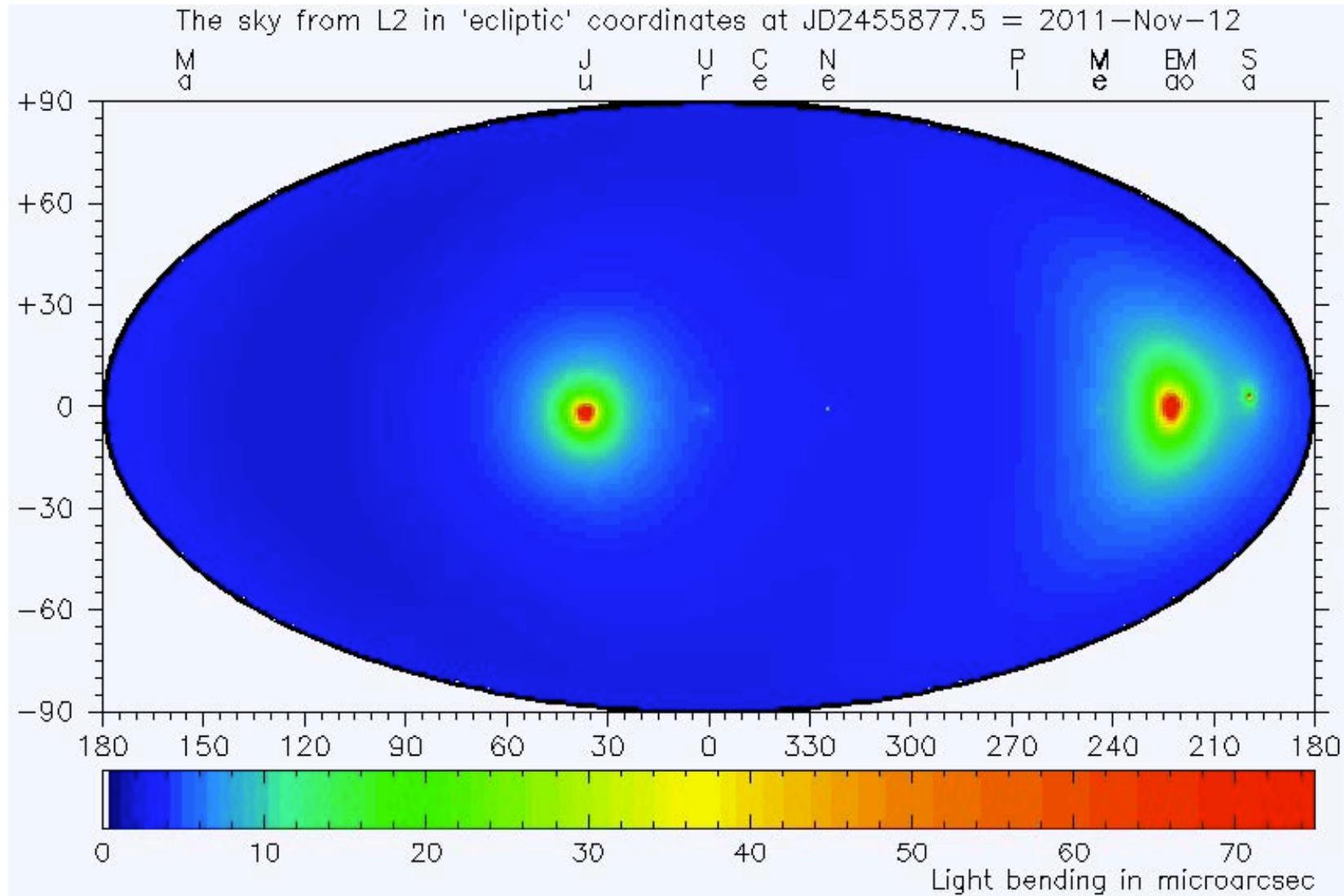
- Entfernungs-Skalen

- Milchstraßen-Sterne (wenige kpc) bis Quasare (einige Gpc)

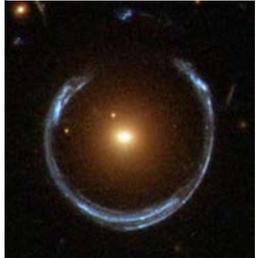
⇒ 6 Größenordnungen

(oder sogar 15 Größenordnungen, wenn man unseren nächstgelegenen Stern im Abstand von ein paar Microparsec einbezieht ...)

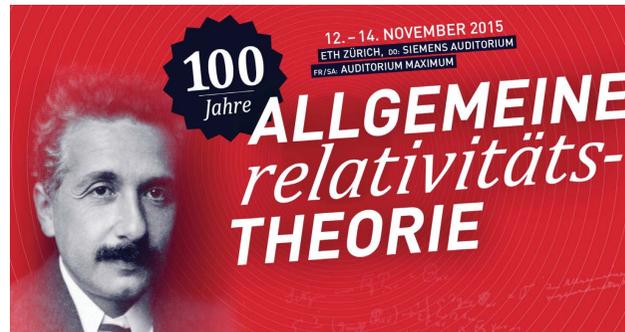
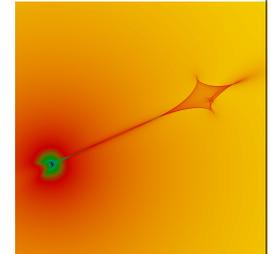
Gaia: Positionsänderungen durch allgemein-relativistische Lichtablenkung



Licht auf krummen Wegen: Wie uns Gravitationslinsen helfen, das Universum zu erforschen und Planeten zu entdecken



Prof. Joachim Wambsganß
(Universität Heidelberg)



Der Gravitationslinseneffekt ist ein extrem nützliches Werkzeug der Astrophysik:

- Mehrfachquasare helfen uns, die Größe des Universums zu messen
- Mit den „Leuchtenden Bögen“ bestimmen wir die Massenverteilung von Galaxienhaufen
- Der Verstärkungseffekt lässt uns weit entfernte Galaxien detailliert studieren
- Der Mikrolinseneffekt hilft uns, Größe und Struktur von Quasaren zu verstehen
- „Microlensing“ ist eine effiziente Methode zur Entdeckung von extrasolaren Planeten: empfindlich für kleine Massen und gut geeignet, um festzustellen, wie viele es gibt
- Der Gaia-Satellit wird durch die Positionsverschiebung neue Mitglieder des Sonnensystems entdecken