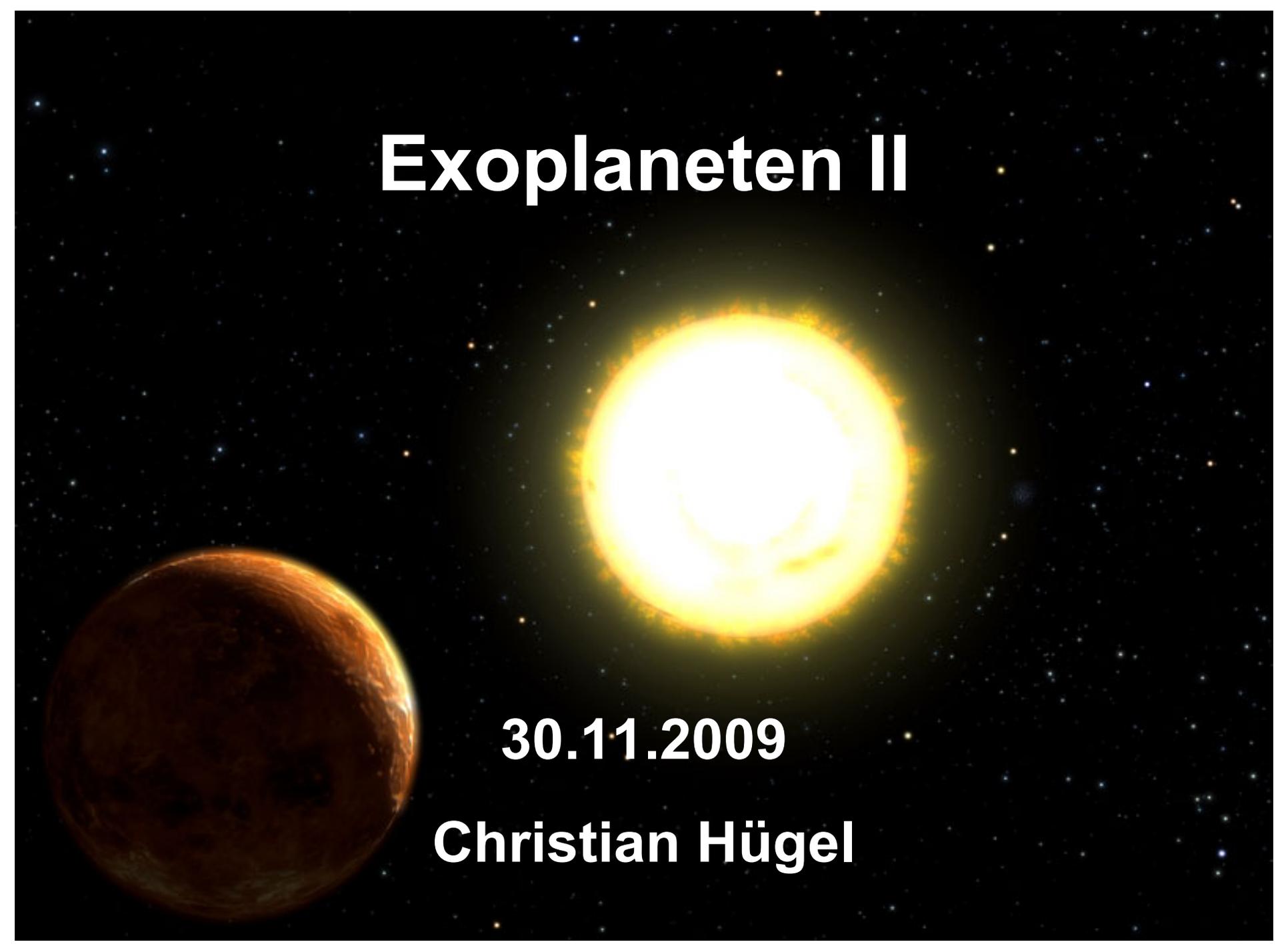


Exoplaneten II

The image features a bright, glowing yellow star in the upper right quadrant and a reddish-brown planet in the lower left quadrant. The background is a dark, star-filled space. The text is overlaid on the image in white.

30.11.2009

Christian Hugel

Inhaltsübersicht

Direkte Methoden

Koronographie

Interferometrie

Weltraumteleskope

Adaptive Optiken

Radialgeschwindigkeit

Indirekte Methoden

Transitmethode

Gravitationslinsen

Astrometrie

Laufzeitvariation

Zusammenfassung



Exoplaneten
Teil I

Inhaltsübersicht

Direkte Methoden

Koronographie
Interferometrie
Weltraumteleskope
Adaptive Optiken

Radialgeschwindigkeit

Indirekte Methoden

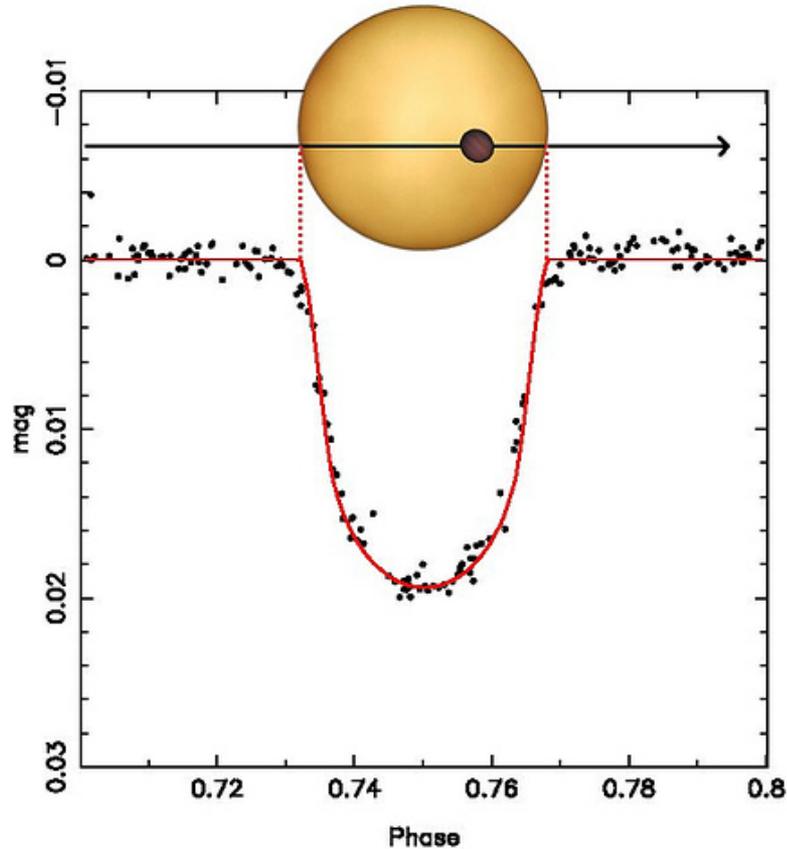
Transitmethode
Gravitationslinsen
Astrometrie
Laufzeitvariation

Zusammenfassung



Exoplaneten
Teil I

Transitmethode

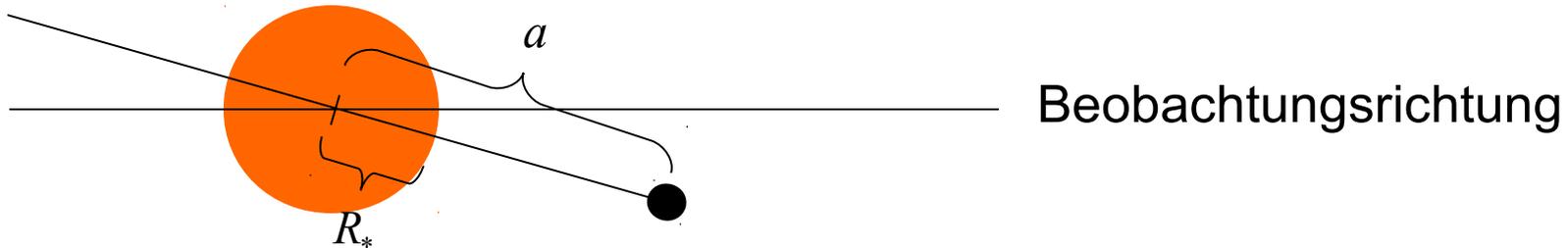


Prinzip:

Planet verdeckt einen Teil des umkreisten Sterns

⇒ charakteristische Intensitätsschwankung im Sternenlicht messbar

Transitmethode - Beobachtungswahrscheinlichkeit



Wahrscheinlichkeit einen Transit zu beobachten:

$$p_{trans} = \frac{R_* + R_p}{a} \approx \frac{R_*}{a}$$

➡ Methode begünstigt kleine Umlaufbahnen

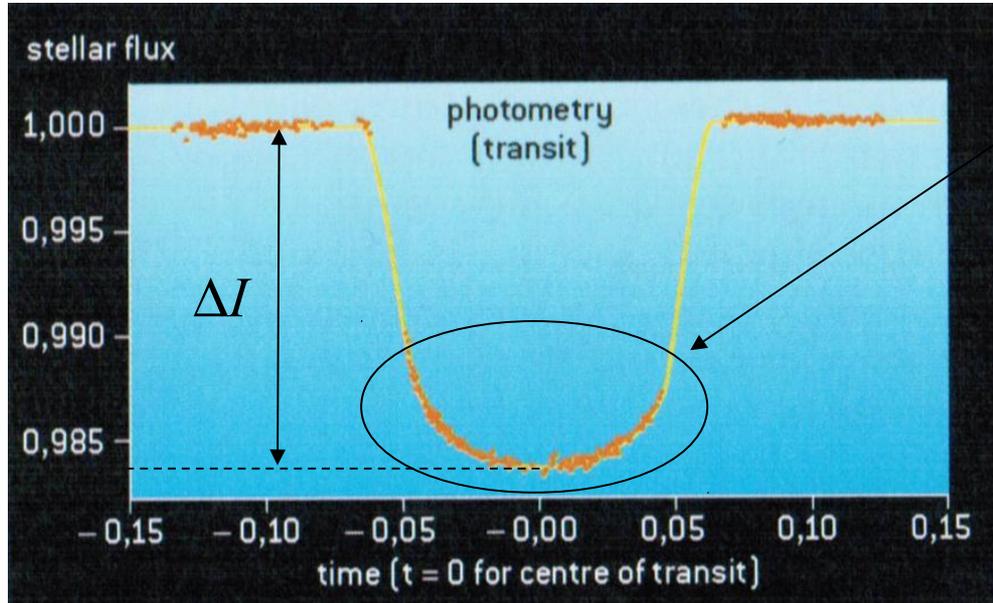
Bsp: $R_* \approx R_{Sonne}$ $R_p \approx R_{Erde}$

$$a = 5 AU \longrightarrow p_{trans} \approx 0,01\%$$

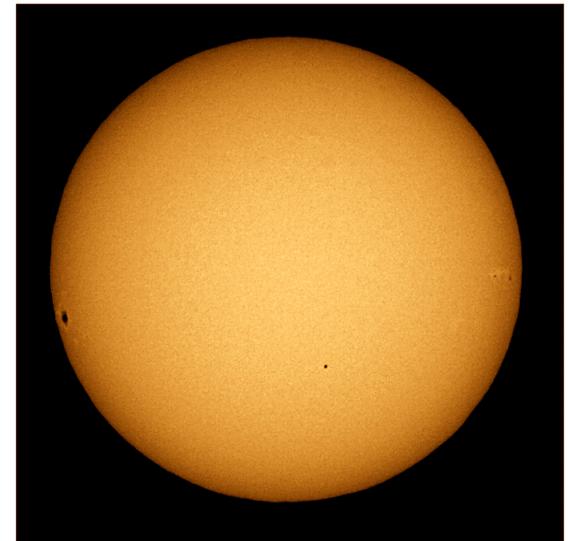
$$a = 1 AU \longrightarrow p_{trans} \approx 0,5\%$$

$$a = 0,05 AU \longrightarrow p_{trans} \approx 10\%$$

Transitmethode – Helligkeitsverlauf



Kurvenform durch „limb darkening“
(Intensität im Zentrum des Sterns höher als am Rand)

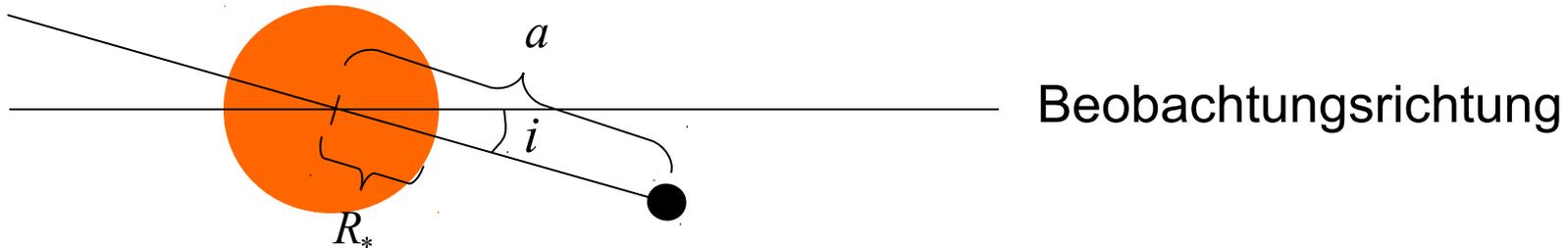


Charakteristische Flussänderung abhängig von

Planetengröße $\Delta I = \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2$

Inklination des Orbits i + „limb darkening“
(je größer i desto kleiner der Intensitätsverlust durch Transit)

Transitmethode - Transitzeit



Transitzeit:
$$t_{trans} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_* + R_p)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a} \right)$$

für $a \gg R_* \gg R_p$
$$t_{trans} = \frac{P}{\pi} \cos \left(\left(\frac{R_*^2}{a} \right) - \cos^2 i \right)$$

Transitmethode liefert

Planetenradius R_p

Umlaufzeit P

Inklination des Orbits i



Keine Planetenmasse!!

Transitmethode

Unser Sonnensystem

	P_{trans} [%]	t_{trans} [h]	ΔI [%]
Merkur	1,2	8	0,0012
Venus	0,64	11	0,0076
Erde	0,47	13	0,0084
Jupiter	0,09	30	1
Saturn	0,05	41	0,75

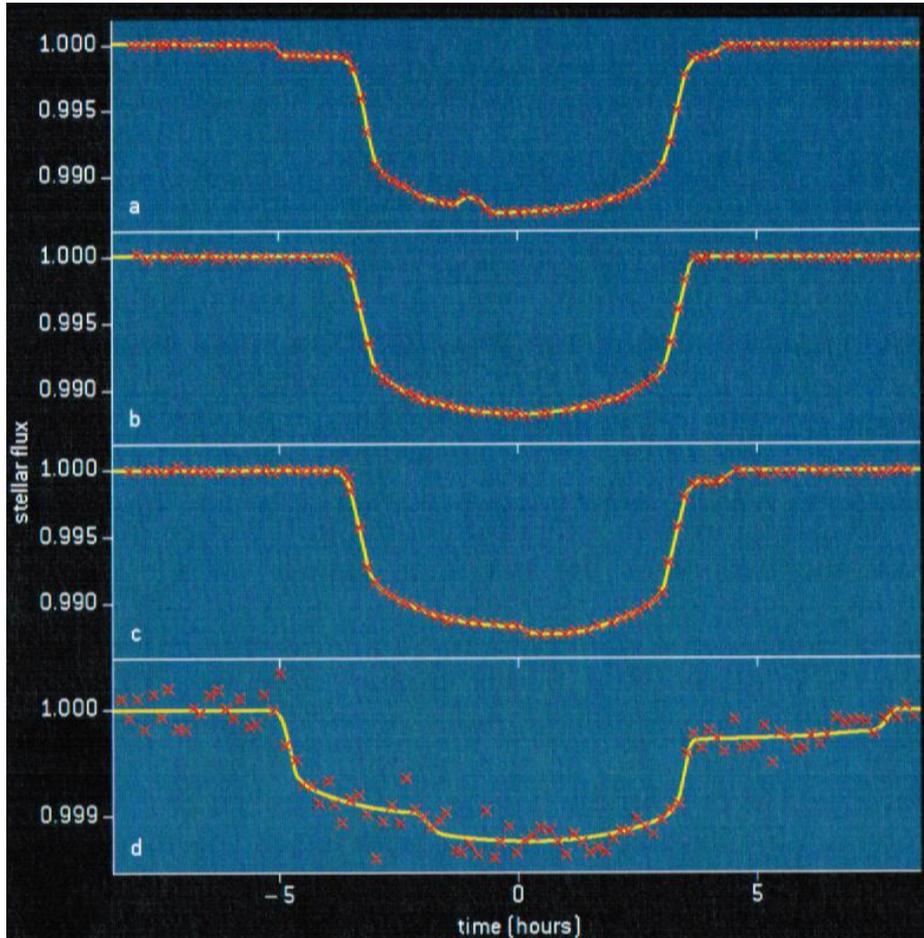


Hot Jupiters

(groß und nahe an ihren Sternen)

	a [AU]	M_P [M_{Jup}]	P [d]	P_{trans} [%]	t_{trans} [h]	ΔI [%]
51 Pegasi b	0,0527	0,472	4,2	9,1	3	1
HD 209458 b	0,045	1,3	3,5	10,8	3	1,6

Transitmethode – Helligkeitsverlauf mit Mond



Planet: Jupitergröße

Mondumlaufzeit: 0,5 Tage

Ohne Mond

Mondumlaufzeit: 1,5 Tage

Planet: 2,5 Erdradien

Mond: geringfügig kleiner als Planet

Theoretische Kurven für verschiedene Konfigurationen von Exoplaneten mit einem Mond

Transitmethode – Photometrische Fehlerquellen

- Photonenrauschen
- Stellar Noise (Hintergrund)
 - Flares
 - Sonnenflecken

→ Suche nach charakteristischer Intensitätskurve mit typischer Dauer ($< 1\text{Tag}$)
- Atmosphärische Störungen
 - Szintillation
 - Seeing
 - Änderung der Extinktion mit Zeit und Zenitwinkel
- Rauschen der Messgeräte
 - Elektronisches Rauschen
 - Intensitätsschwankungen bei Pixelübergängen

Transitmethode – Zusammenfassung

- Regelmäßige Fluktuationen erkennen
genaue Messungen über lange Zeiträume
- Genauigkeit von mindestens 1% nötig um Riesenplaneten zu erkennen
Maximale Erkennungsreichweite beschränkt
- Geringe Beobachtungswahrscheinlichkeit bei großen Bahnradien und großen Inklinationen



Erhöhen der Erfolgswahrscheinlichkeiten:

Gleichzeitige Beobachtung von Sternfeldern mit Millionen Sternen

⇒ riesige Datenmengen ⇒ viele mögliche Kandidaten

⇒ Untersuchung mit anderen Methoden

bis 2009: 62 bestätigte Exoplaneten

Inhaltsübersicht

Direkte Methoden

Koronographie
Interferometrie
Weltraumteleskope
Adaptive Optiken

Indirekte Methoden

Radialgeschwindigkeit

Transitmethode
Gravitationslinsen
Astrometrie
Laufzeitvariation

Zusammenfassung



Exoplaneten
Teil I

Gravitationslinsen

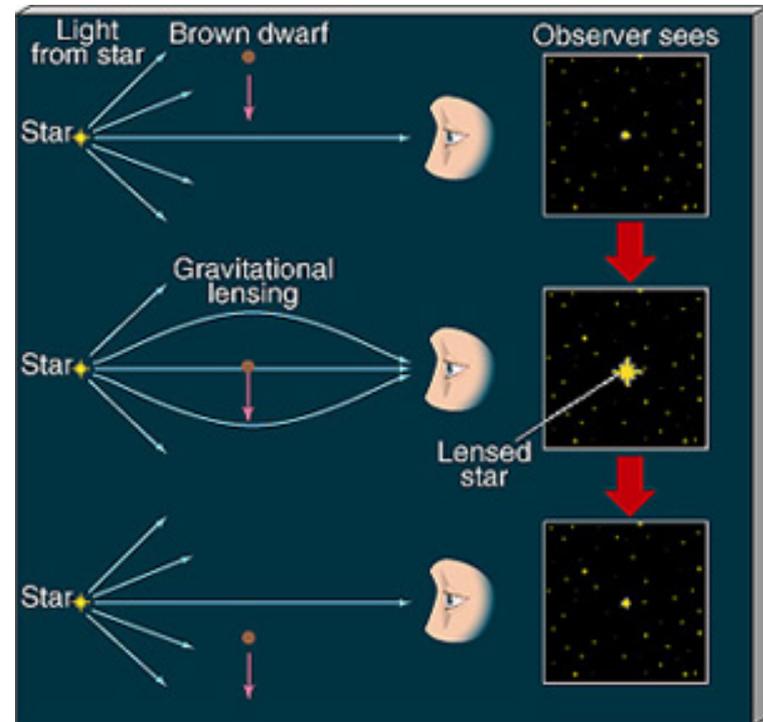
Allgemeine Relativitätstheorie:

Lichtstrahlen werden im Gravitationsfeld massereicher Objekte abgelenkt

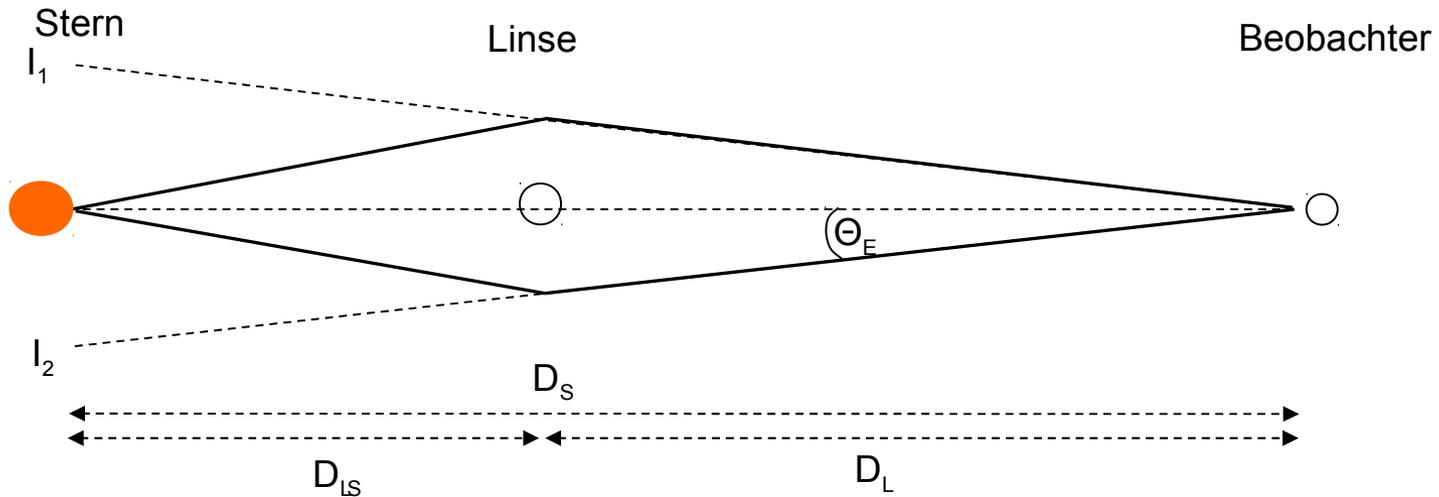
→ Gravitationsfeld kann wie eine Linse wirken

Prinzip:

Licht eines Hintergrundsterns wird durch Fokussierung durch eine Gravitationslinse verstärkt



Gravitationslinseneffekt - Geometrie



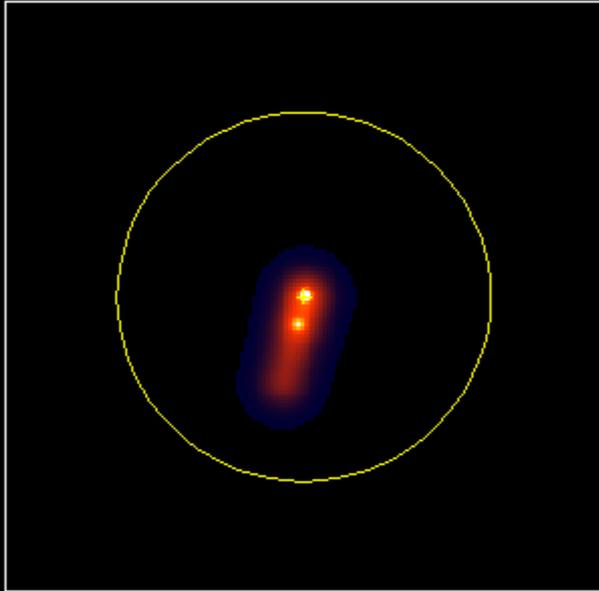
Strahlen des Sterns werden durch Linse abgelenkt und auf Beobachter fokussiert \longrightarrow Beobachter sieht Bilder I_1 und I_2

Hintergrundstern erscheint als Ring bei Beobachter (Einstein-Ring)
(wenn Stern auf optischer Achse des Abbildungssystems)

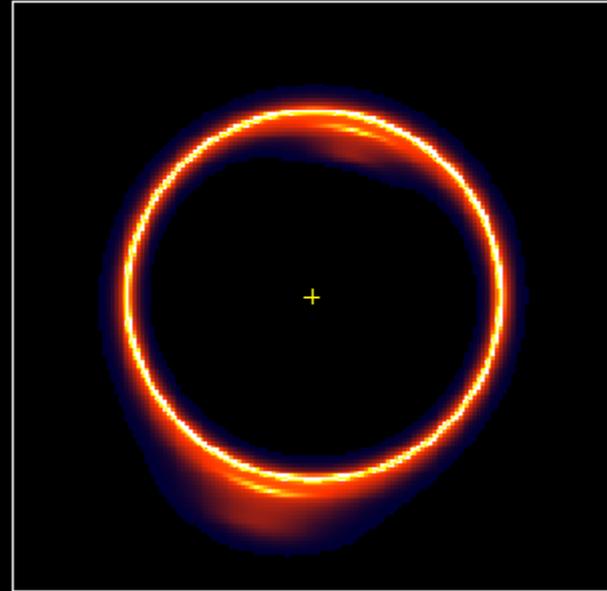
Einsteinradius:
$$\Theta_E = \sqrt{\frac{4GM_L \cdot D_L}{c^2 D_S \cdot D_{LS}}}$$

Gravitationslinseneffekt

Background Radio Source



Lensed Image of the Radio Source



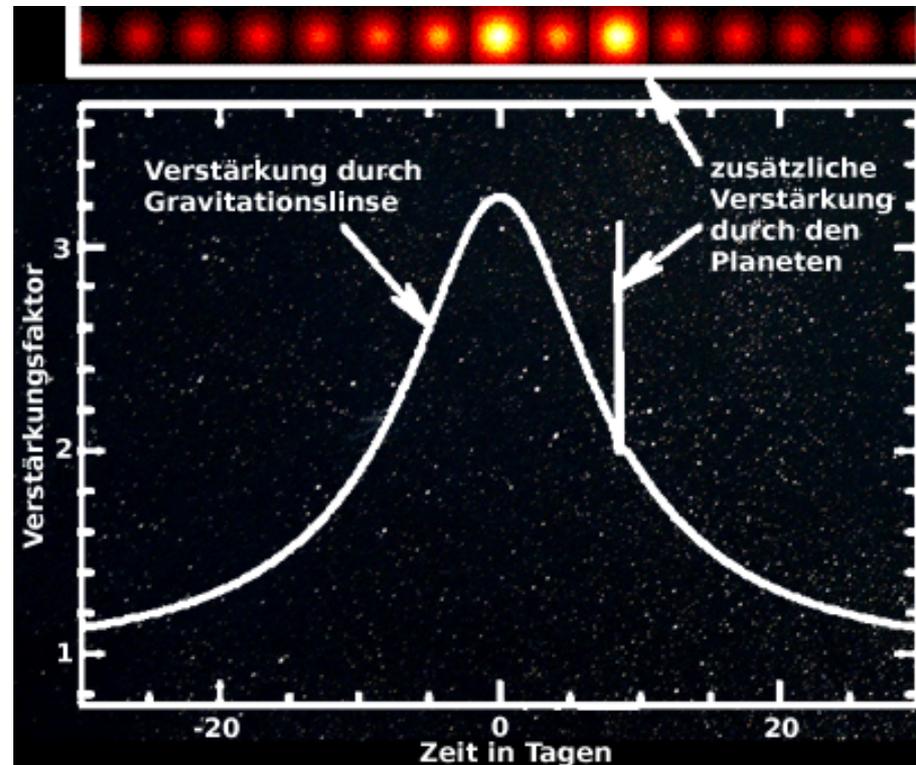
Gravitationslinseneffekt - Planetensuche

Für Sterne unserer Milchstraße als Hintergrundsterne:

$$\Theta_E \approx 0,001 \text{ arc sec} < \text{Teleskopauflösung (ca. } 0,07 \text{ arc sec)}$$

Planetensuche nicht möglich durch Betrachtung von Einsteinringen.

→ Betrachtung der charakteristischen Verstärkungskurve
Planeten verursachen Störung der Verstärkungskurve



Gravitationslinseneffekt - Beobachtungswahrscheinlichkeit

geringe Beobachtungswahrscheinlichkeit für Exoplaneten:

- Kurze Ereignisdauer

Ereignisdauer für den „Galactic Bulge“:

Sternmasse: ca. 1 Monat

Jupitermasse: ca. 1 Tag

Erdmasse: ca. 1 Stunde

Trotzdem: Insgesamt über 100 Mikrolinsenereignisse entdeckt
(durch Beobachtung großer Sternfelder)

- Einmaliger Effekt

- Ereigniswahrscheinlichkeit ca. $1/10^6$

- Erkennungswahrscheinlichkeit $\propto \sqrt{M_L}$

- Wenn Planet vorhanden: nur wenige Prozent der Lichtkurven stark genug beeinflusst

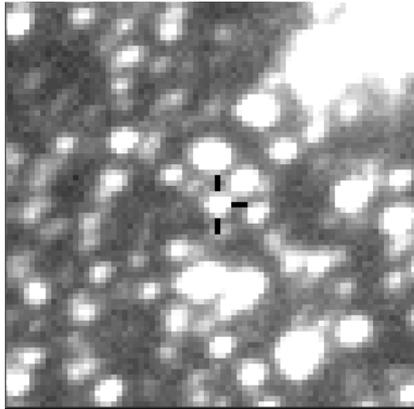
Gravitationslinseneffekt – Zusammenfassung

- Geringe Beobachtungswahrscheinlichkeit
- Massebestimmung schwer und nicht eindeutig

Aber:

- Große Reichweite
- Planeten bis zu Erdmasse erkennbar
- empfindlich bzgl. Planeten in bewohnbarer Zone

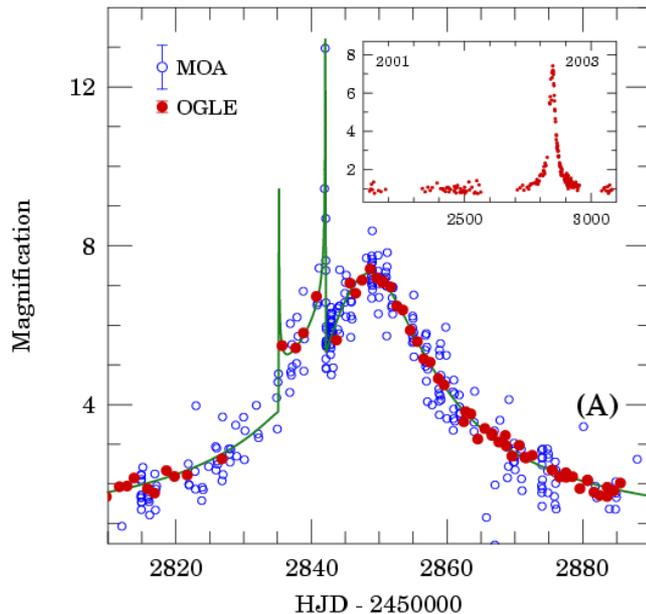
Gravitationslinseneffekt – Erste Entdeckung



OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53:

Erste Entdeckung eines Exo-Planeten
mittels Microlensing im Juni/July 2003

Verstärkungsfaktor ~ 7



Größter Teil der Kurve:
Lichtkurve einer Einzellinse

Aber: 17.-21. Juli 2003 Doppelsternlinse

Masseverhältnis ca. 0,4%

➔ leichterer Linsenanteil = Planet

Inhaltsübersicht

Direkte Methoden

Koronographie

Interferometrie

Weltraumteleskope

Adaptive Optiken

Radialgeschwindigkeit

Indirekte Methoden

Transitmethode

Gravitationslinsen

Astrometrie

Laufzeitvariation

Zusammenfassung



Exoplaneten
Teil I

Astrometrie („star wobbling“)

Stern und Exoplanet kreisen um gemeinsamen Schwerpunkt

Prinzip:

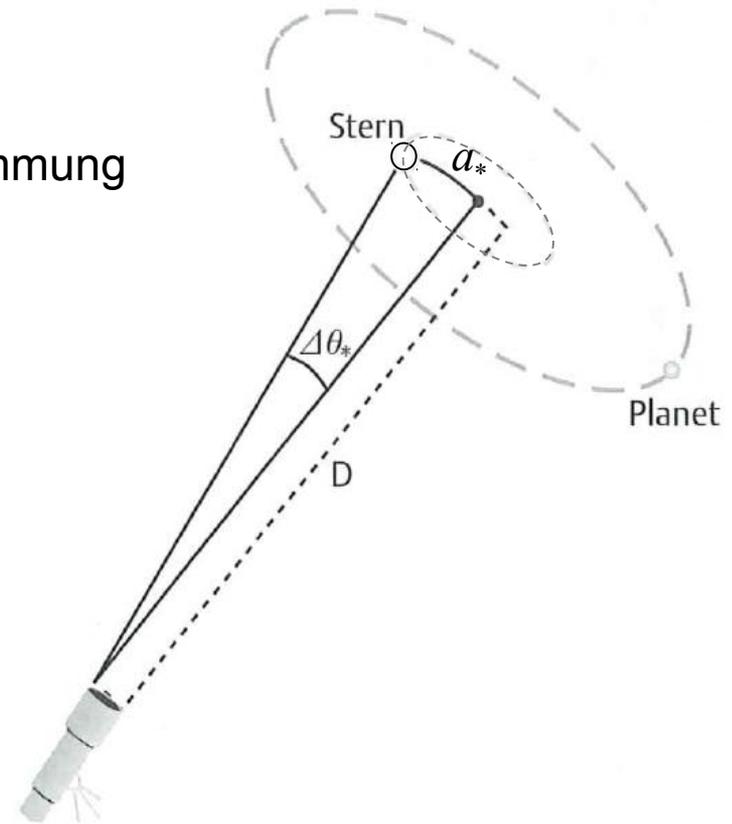
Beobachtung der Sternbewegung und Bestimmung der Rotationsbewegung des Sterns

Mit $a_* \cdot M_* = a_P \cdot M_P$ und $\tan(\Delta\Theta_*) = \frac{a_*}{D}$

$$\tan(\Delta\Theta_*) \approx \Delta\Theta_* = \frac{M_P a_P}{M_* D}$$

Mit a_P aus Radialgeschwindigkeitsmethode:

M_P bestimmbar



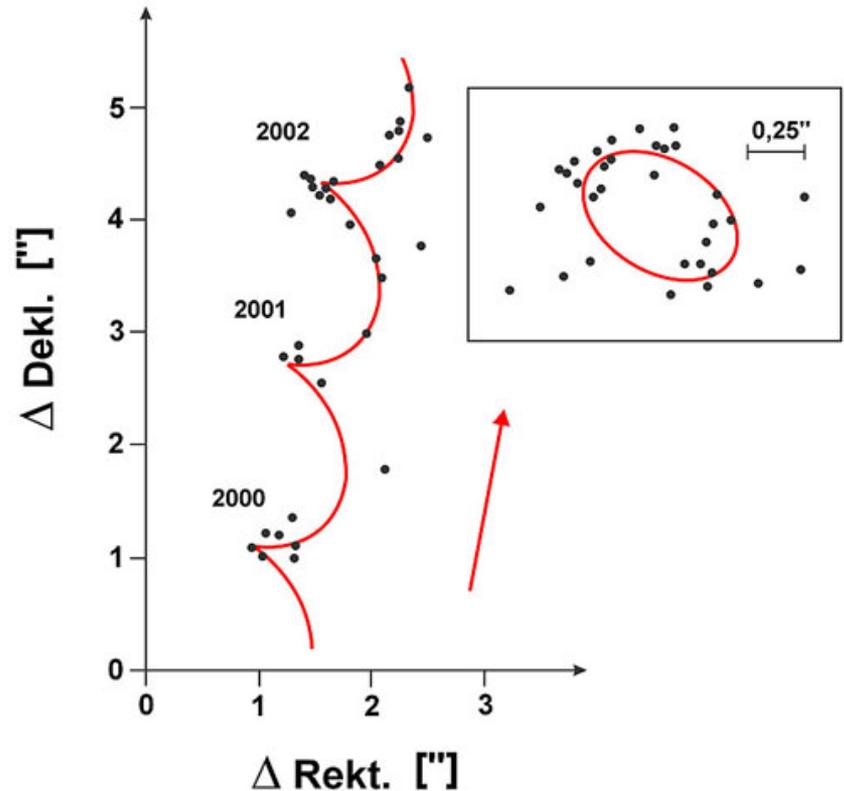
Astrometrie - Sternbewegung

2 Komponenten der Bewegung:

- Parallaxe
- Eigenbewegung

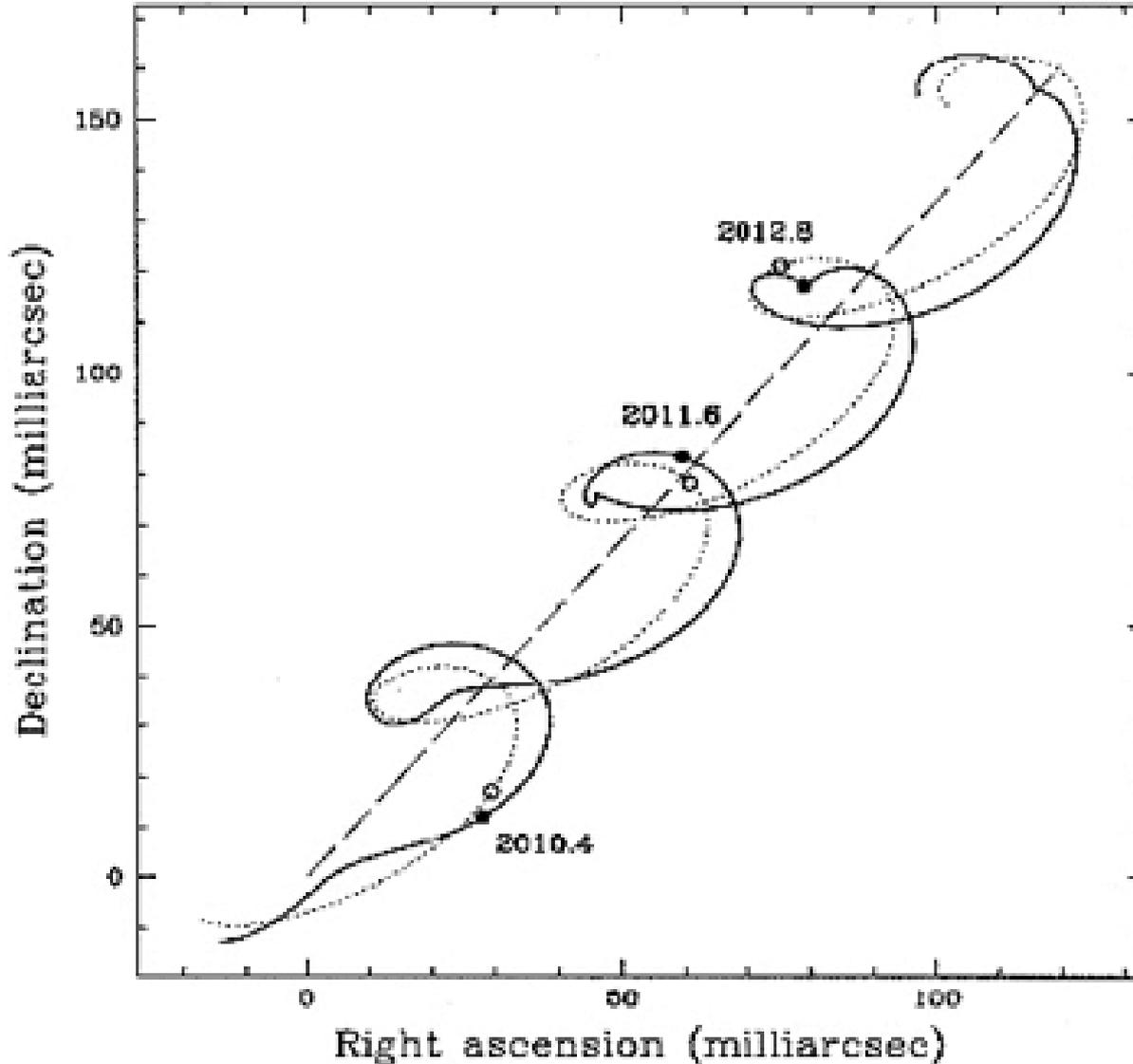
Vorteil gegenüber Radialgeschwindigkeitsmethode:

unabhängig von Inklination des Orbits



ROSS 248 im Sternbild
Andromeda (Abst. ca. 10,3 ly)

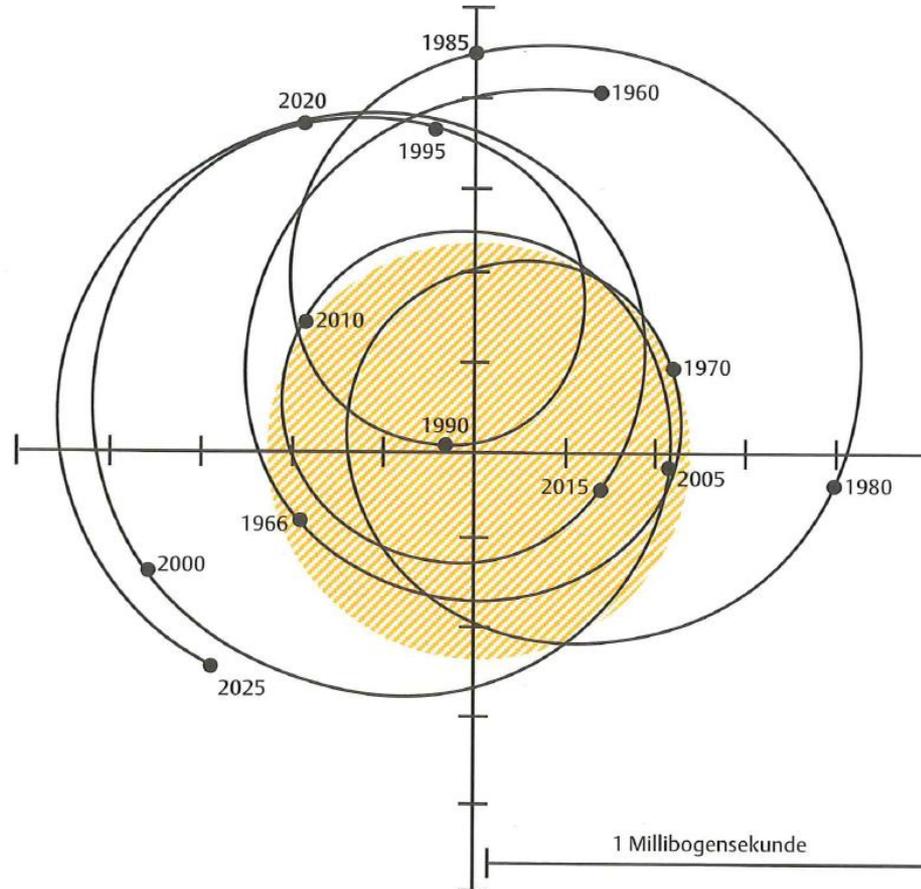
Astrometrie - Sternenbewegung



Simulation:

- Abstand 50pc
- Planetenmasse: $15 M_J$
- Orbit: $e = 0,2AU$
 $a = 0,06AU$

Astrometrie – unsere Sonne



Astrometrische Bewegung der Sonne verursacht durch Jupiter
Betrachtet aus einem Abstand von 10pc (33ly).

Astrometrie – Stärken & Schwächen

- $\Delta\Theta_*$ klein gegenüber der Genauigkeit von Standard-Astronomietechniken
- $\Delta\Theta_*$ variiert stark (von $\leq 1\mu\text{as}$ bis $\sim 1\text{mas}$)
Schwierigkeit der Planetenbestimmung variiert stark
- Empfindlichkeit fällt linear mit Abstand zu Sternen
 begrenzte Reichweite
- bevorzugt Planeten mit großen Halbachsen
- Probleme beim Beobachten
 - Seeing
 - SNR groß bei lichtschwachen Planeten  lange Belichtungszeiten

Lösung: Beobachtung mit Satelliten (z.B. Gaia)

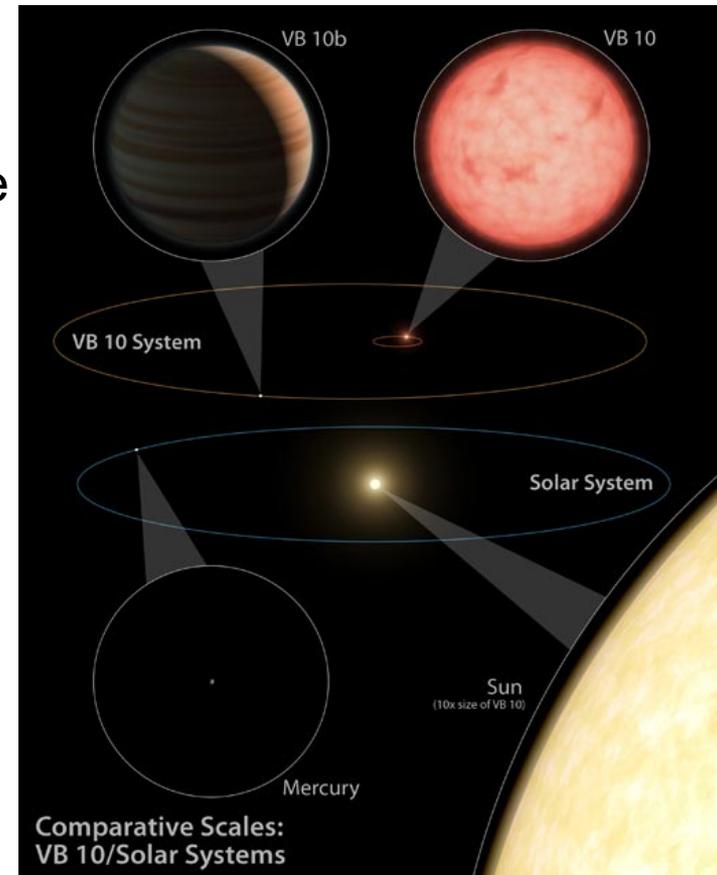
Astrometrie – Erste Entdeckung

VB 10 b

- Entdeckung im May 2009 im Sternbild Adler
- erste Planetenentdeckung mittels Astrometrie
- Entdecker: Nasa's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Californien

Astronomische Daten:

- Abstand: 20 ly
- Gasplanet: $M = 6,4 M_J$ $R = 0,973 R_J$
- Große Halbachse: $a = 0,36\text{AU}$
- Periode: $P = 271,56\text{d}$



Inhaltsübersicht

Direkte Methoden

Koronographie
Interferometrie
Weltraumteleskope
Adaptive Optiken

Indirekte Methoden

Radialgeschwindigkeit

Transitmethode
Gravitationslinsen
Astrometrie
Laufzeitvariation

Zusammenfassung

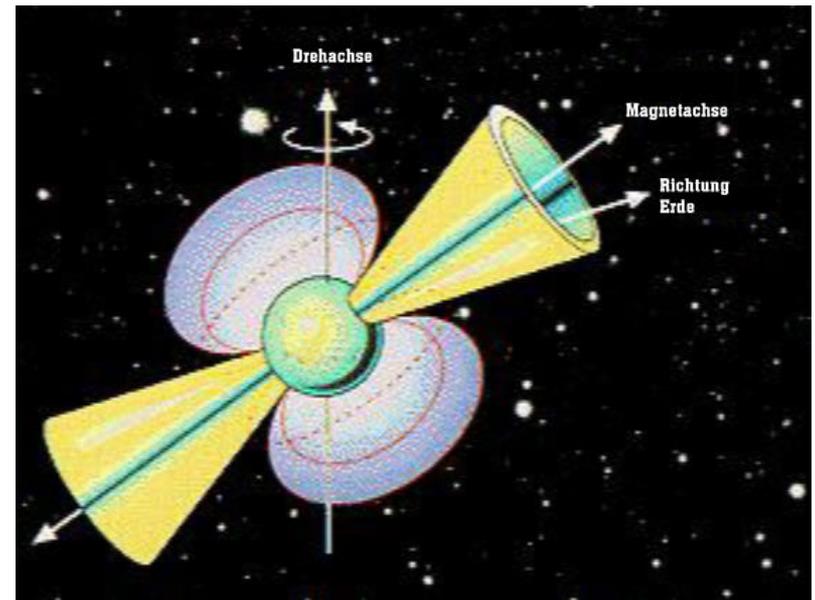


Exoplaneten
Teil I

Laufzeitvariation („Pulsar Timing“) - Pulsar

Pulsar: Neutronenstern

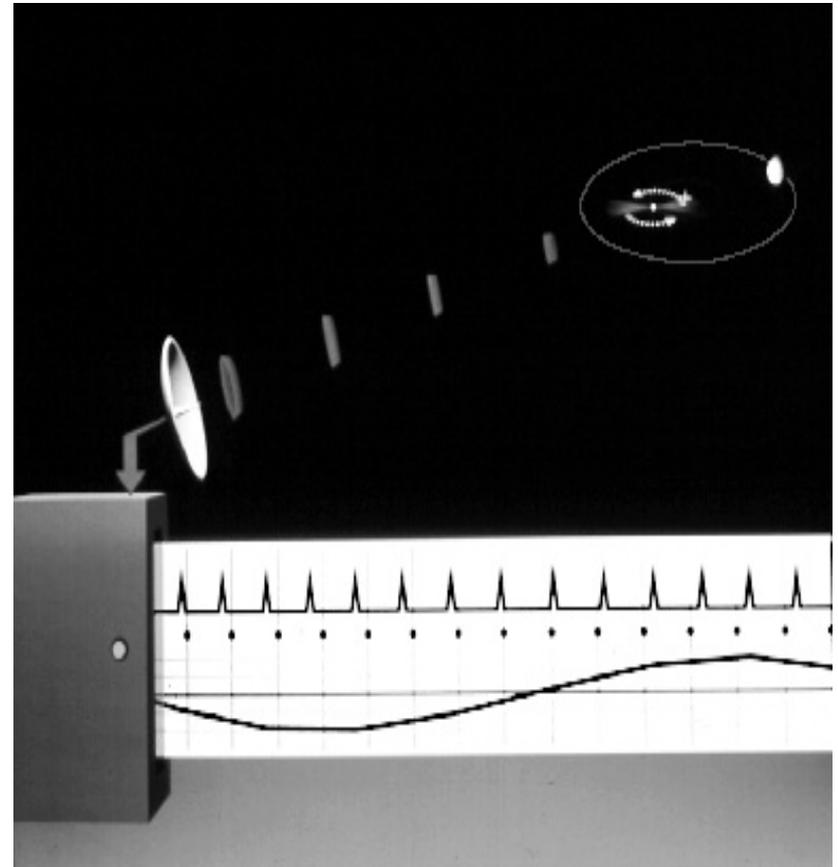
- typische Daten: Durchmesser 20km, Masse 1,4 bis 3 Sonnenmassen
hohe Dichte →
- Rotationsdauer sehr klein (Sekunden bis Millisekunden)
- Symmetrieachse des Magnetfelds weicht von Rotationsachse ab
Synchrotronstrahlung →
- Wenn Erde in Strahlungskegel:
sehr regelmäßiges periodisches
Signal („Leuchtturm“)
- Genauigkeit vergleichbar mit
Atom-Uhren



Laufzeitvariation („Pulsar Timing“) - Methode

Prinzip:

- Pulsar-Planet bewirkt periodische Änderung der Laufzeit der Signale durch Rotationsbewegung im gemeinsamen Schwerpunkt
- empfindlich genug zur Erkennung planetarer Massen kleiner als Erdmasse



Laufzeitvariation – erste Entdeckungen

Erste Pulsar-Planeten: PSR B1257+12 B und C

- Sternbild Jungfrau
- Abstand 980 ly
- Starke gegenseitige Störungen der Umlaufbahnen auf Grund ähnlicher Massen
- Entdeckung 1992 mit dem Arecibo Radioteleskop (Puerto Rico)

	Masse	Große Halbachse	Umlaufzeit
PSR B1257+12 B	4,3 M_E	0,36 AU	66,5 d
PSR B1257+12 C	3,9 M_E	0,46 AU	98,2 d

Inhaltsübersicht

Direkte Methoden

Koronographie

Interferometrie

Weltraumteleskope

Adaptive Optiken

Radialgeschwindigkeit

Indirekte Methoden

Transitmethode

Gravitationslinsen

Astrometrie

Laufzeitvariation

Zusammenfassung



Exoplaneten
Teil I

Zusammenfassung – indirekte Methoden

Methode	Meßgröße	Abstand des Sterns	große Halbachse	Masse
Radial-geschwindigkeit	Geschwindigkeit	unabhängig; nah günstig	0-5AE	groß ($\geq M_J$)
Astrometrie	Parallaxe	nah < 300ly	groß	groß ($\geq M_J$)
Transit	Helligkeit	unabhängig; nah günstig	unabhängig; nah günstig	großer Durchmesser
Microlensing	Helligkeit	5000-20000ly	1-5AE	groß ($\geq M_E$)
Pulsar-Timing	Pulsänderung	Abstand Pulsar	groß günstig	groß ($\geq M_E$)

Zusammenfassung – Methodenkombination

Radialgeschwindigkeitsmethode liefert $M_p \cdot \sin i$

Transitmethode liefert Inklination i und Radius R_p



Dichtebestimmung möglich



Entscheidung ob Gas- oder Gesteinsplanet

Bisher: nur Entdeckung von Gasplaneten wie

Saturn ($0,687 \text{ g/cm}^3$)

Jupiter ($1,326 \text{ g/cm}^3$)

Neptun ($1,638 \text{ g/cm}^3$)

Zusammenfassung – Methodenkombination

Aber: Januar 2009 Entdeckung von CoRoT 7 b

- Entdeckung nach 40d Beobachtungszeit mit Transitmethode
- Sternbild Einhorn, Entfernung 490ly (bzw. 150pc)
- große Halbachse: 0,0172 AU
- Periode: 0,85d
- Radius: 1,6 R_E
- Masse: 4,8 M_E



Dichte: $6,5 \text{ g/cm}^3$ (vgl. Erde: $5,7 \text{ g/cm}^3$)

erster exo-terrestrischer Planet



Super-Erde

Zusammenfassung – Extrasolare Planeten

Stand: 25.11.2009:

Methode	Planeten-systeme	Planeten	Systeme mit mehreren Planeten
Radialgeschwindigkeit und Astrometrie	320	376	38
Transitmethode	62	62	3
Microlensing	8	9	1
Bildgebende Verfahren	9	11	1
Pulsar Timing	5	8	2



Insgesamt 404 Planeten

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!