

Fremde Welten vermessen: Exoplaneten

**Astronomie für Nicht-Physiker:
Die Vermessung des Weltalls**

Markus Pössel

Haus der Astronomie

14. November 2019

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



Andromedagalaxie

K. Birkle, MPIA



Mond



Orionnebel

NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA) and Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team



M51

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

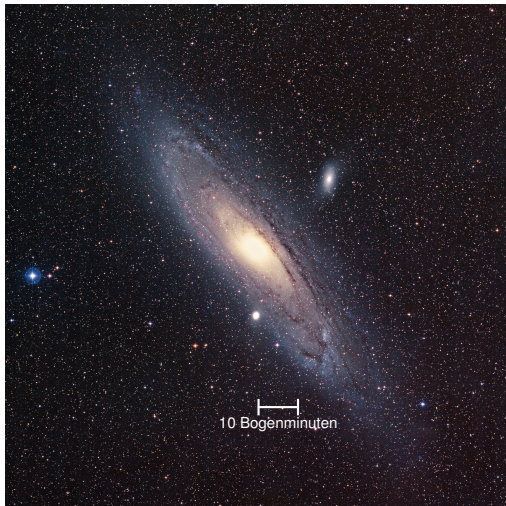
Jupiter

NASA, ESA, and A. Simon (GSFC)

Mars

NASA/ESA, J. Bell (Cornell U.) and M. Wolff (SSI)

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



Andromedagalaxie
K. Birkle, MPIA



Mond



Orionnebel

NASA, ESA, M. Rotundo (STScI/ESA) and
Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team



M51

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI)
and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



Jupiter

NASA, ESA, and A. Simon (GSFC)



Mars

NASA/ESA, J. Bell (Cornell U.)
and M. Wolff (SSI)

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



Mond



Orionnebel

NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA) and
Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team



M51

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI)
and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



Jupiter

NASA, ESA, and A. Simon (GSFC)



Mars

NASA/ESA, J. Bell (Cornell U.)
and M. Wolff (SSI)

Scheinbare Größen astronomischer Objekte

**M51**

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI)
and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

**Jupiter**

NASA, ESA, and A. Simon (GSFC)

**Mars**

NASA/ESA, J. Bell (Cornell U.)
and M. Wolff (SSI)

Beobachtungsgrenzen von Teleskopen

Auflösungsvermögen begrenzt durch
Seeing (Atmosphäre).

Bestenfalls $\alpha \approx 0.5''$. HD $\approx 2''$

Weltraumteleskope/adaptive Optik:
beugungsbegrenzt,

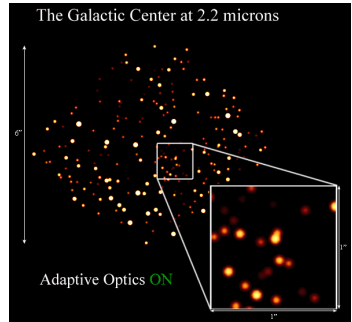
$$\alpha \approx 0.25'' \cdot \left(\frac{\lambda}{500 \text{ nm}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}}{D} \right)$$

wobei

D Teleskopdurchmesser

λ Wellenlänge

[Menschliches Haar auf 72 cm: $20''$!]

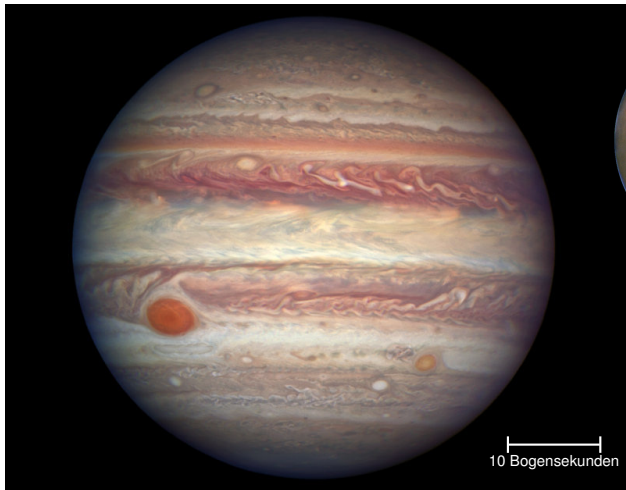


Animation: Ghez et al. / UCLA

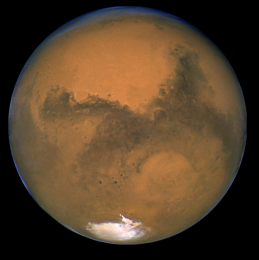


Bild: NASA Fremde Welten vermessen: Exoplaneten

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



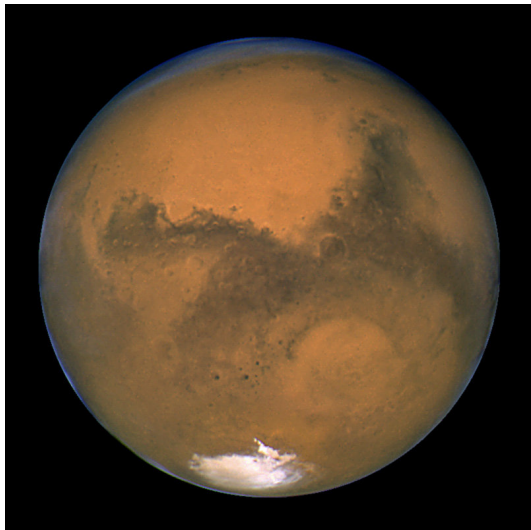
Jupiter
NASA, ESA, and A. Simon (GSFC)



Mars
NASA/ESA, J. Bell (Cornell U.)
and M. Wolff (SSI)

- 1.5'' gutes Seeing
Königstuhl
- 0.66'' mittleres Seeing
Paranal / ESO
- 0.1'' Beugung
Hubble
- 0.03'' Beugung
VLT

Scheinbare Größen astronomischer Objekte

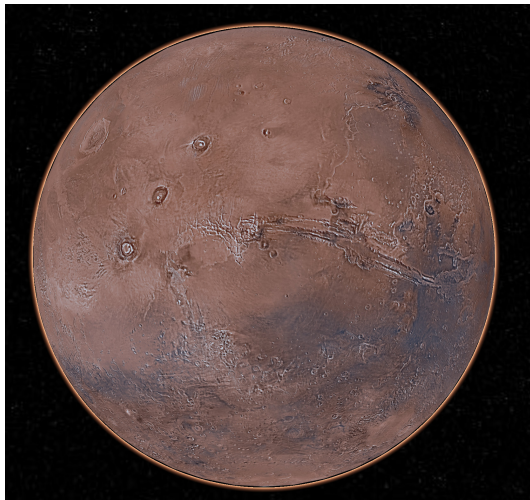


Mars

NASA/ESA, J. Bell (Cornell U.)
and M. Wolff (SSI)

- 1.5'' gutes Seeing
Königstuhl
- 0.66'' mittleres Seeing
Paranal / ESO
- 0.1'' Beugung
Hubble
- 0.03'' Beugung
VLT
- 0.006'' Beugung
ELT

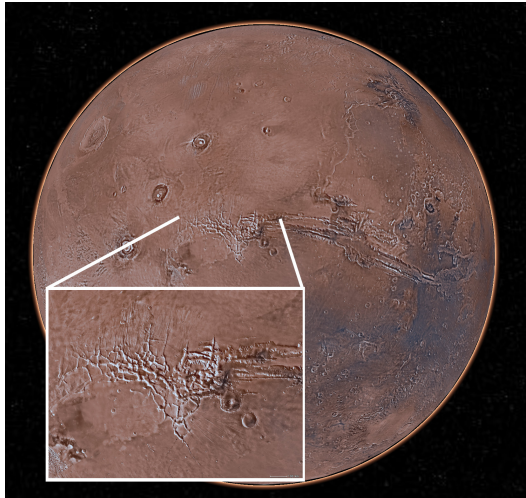
Scheinbare Größen astronomischer Objekte



NASA's Explore Mars Trek

- 1.5'' gutes Seeing
Königstuhl
- 0.66'' mittleres Seeing
Paranal / ESO
- 0.1'' Beugung
Hubble
- 0.03'' Beugung
VLT
- 0.006'' Beugung
ELT

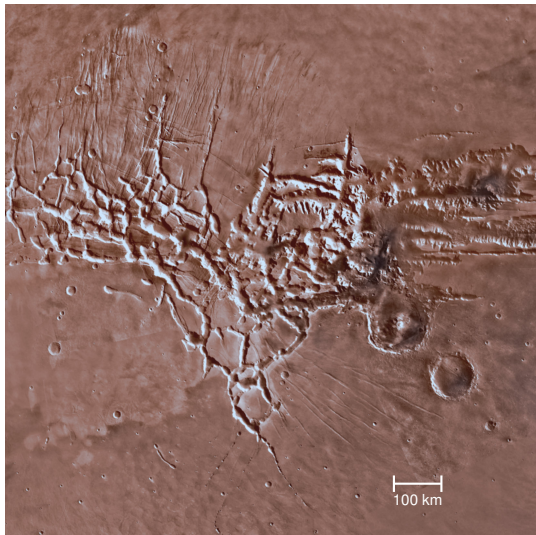
Scheinbare Größen astronomischer Objekte



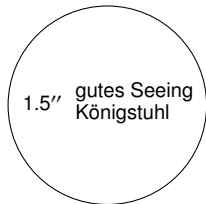
NASA's Explore Mars Trek

- 1.5'' gutes Seeing
Königstuhl
- 0.66'' mittleres Seeing
Paranal / ESO
- 0.1'' Beugung
Hubble
- 0.03'' Beugung
VLT
- 0.006'' Beugung
ELT

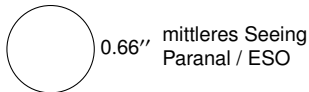
Scheinbare Größen astronomischer Objekte



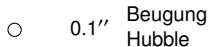
NASA's Explore Mars Trek



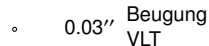
1.5'' gutes Seeing
Königstuhl



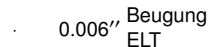
0.66'' mittleres Seeing
Paranal / ESO



0.1'' Beugung
Hubble

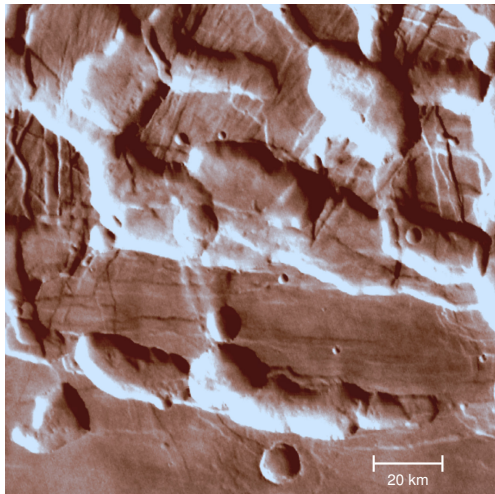


0.03'' Beugung
VLT

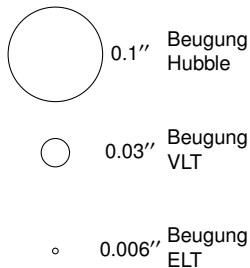


0.006'' Beugung
ELT

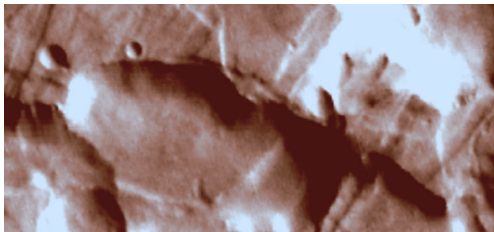
Scheinbare Größen astronomischer Objekte



NASA's Explore Mars Trek



Bilder von Exoplaneten-Oberflächen?



NASA's Explore Mars Trek

Exo-Jupiter bei einer Entfernung von. . .



0.1 Lj
(0,03")



1 Lj
(0,003")

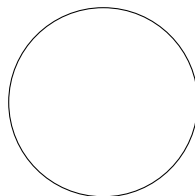


2 Lj
(0,0015")



4 Lj
(0,0008")

**... für herkömmliche Teleskope
bis auf weiteres Punktquellen!**



0.1" Beugung
Hubble



0.03" Beugung
VLT

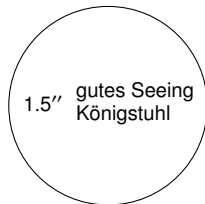
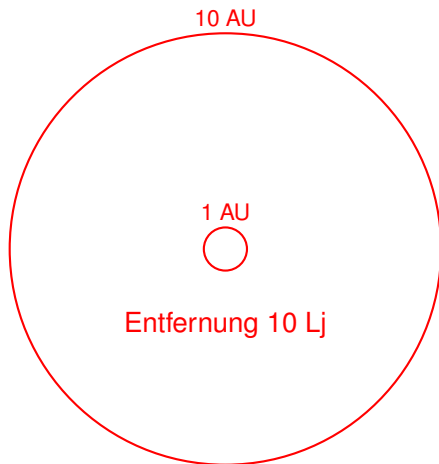


0.006" Beugung
ELT



0.002" Beugung
GRAVITY

Bilder von Exoplaneten-Bahnen



0.66" mittleres Seeing
Paranal / ESO



0.1" Beugung
Hubble



0.03" Beugung
VLT



0.006" Beugung
ELT

Exoplaneten-Direktbilder: Kontrastproblem I

Leuchtkraft Sonne:

$$L_{\odot} = 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Halb reflektierender

Voll-Jupiter:

$$L_{VJ} = \frac{1}{2} \frac{\pi r_J^2}{4\pi a_J^2} L_{\odot} = 3 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

⇒ 1 : 500 Millionen.

(Vergleich Jupiter mit Sonnen-Hälfte)

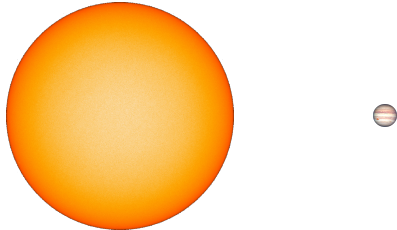
Glühwürmchen 0,025 lm vs.

Flutlicht 8 Mio. lm

⇒ 1 : 300 Millionen.

Genauere Werte:

<https://scilogs.spektrum.de/relativ-einfach/exoplaneten-gluehwuermchen-neben-flutlicht/>



Links: HMI Intensitygramm der Sonne. Bild: NASA/SDO und die AIA, EVE und HMI Science Teams. Rechts: Jupiter maßstabsgetreu zur Sonne. Bild: NASA/JPL/University of Arizona



Links: Flutlicht aus einzelnen Lampen im Rosenaustadium in Augsburg. Bild: Nutzer Monroe (monroe commonswiki) via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0. Rechts: Glühwürmchen in Assos (Türkei). Bild: Nevit Dilmen via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

Exoplaneten-Direktbilder: Kontrastproblem II

Wie nah ist das Glühwürmchen am Scheinwerfer, bei welcher Entfernung?

Jupiter-Bahnradius: 780 Mio. km

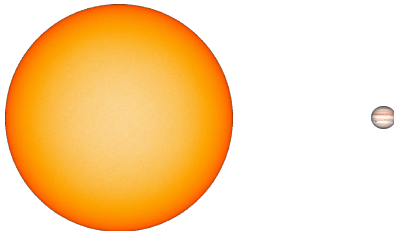
Abstand nächster Stern:

4 Lichtjahre

⇒ Winkelabstand

$4'' \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$

⇒ 10 cm neben Flutlicht
aus 5 km Entfernung



Links: HMI Intensitygram der Sonne. Bild: NASA/SDO und die AIA, EVE und HMI Science Teams. Rechts: Jupiter maßstabsgetreu zur Sonne. Bild: NASA/JPL/University of Arizona



Links: Flutlicht aus einzelnen Lampen im Rosenstadion in Augsburg. Bild: Nutzer Monroe (monroe commonswiki) via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0. Rechts: Glühwürmchen in Assos (Türkei). Bild: Nevit Dilmen via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

Lösung: Koronograf

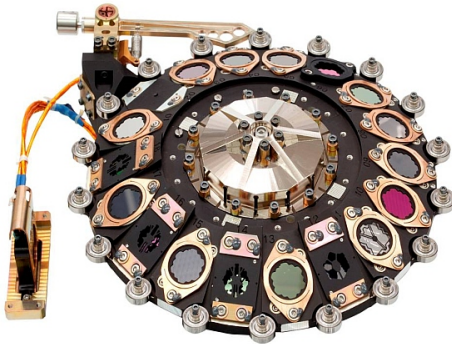
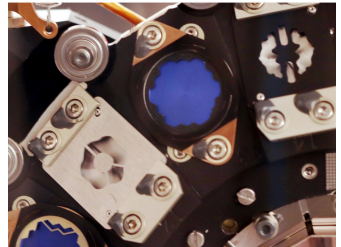
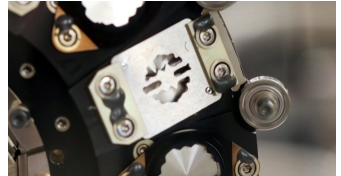


Bild: MPIA Infrarotgruppe



Exoplaneten

Erste Exoplaneten-Bilder: Weiter vom Stern entfernte Planeten

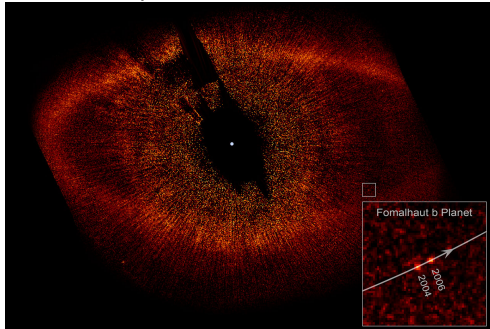


Bild Fomalhaut b: NASA, ESA and P. Kalas (University of California, Berkeley, USA)

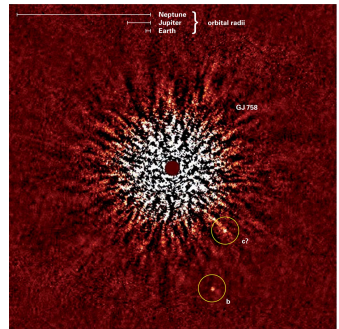
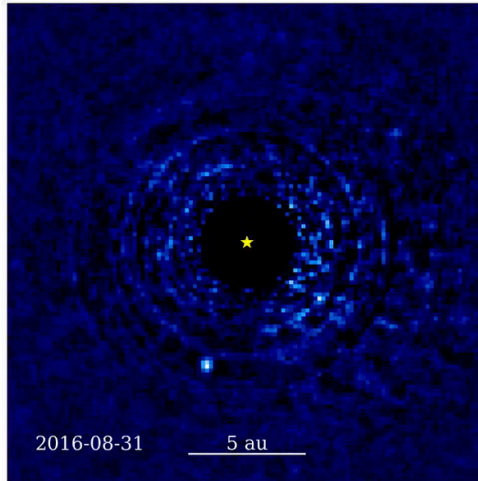


Bild GJ 758b: MPIA/NAOJ

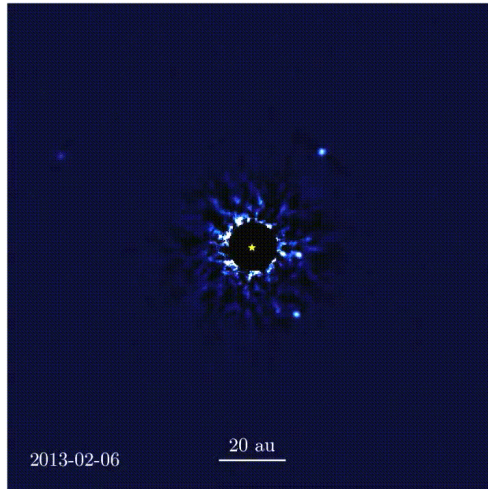
Derzeit rund 3% aller Exoplaneten abgebildet

Exoplaneten-Bahnfilme



ε Eri b über 4 Jahre, Jason Wang using data from De Rosa et al. 2019, arXiv:1910.10169

Exoplaneten-Bahnfilme



HR 8799, Jason Wang et al. 2018

Astrometrischer Nachweis (sehr selten)

Stern und Planet umkreisen
gemeinsamen Schwerpunkt

Diagramm rechts:
Zwerg $78 M_J$, Begleiter $29 M_J$

In ein paar Jahren: Gaia!

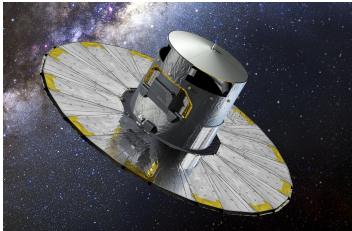
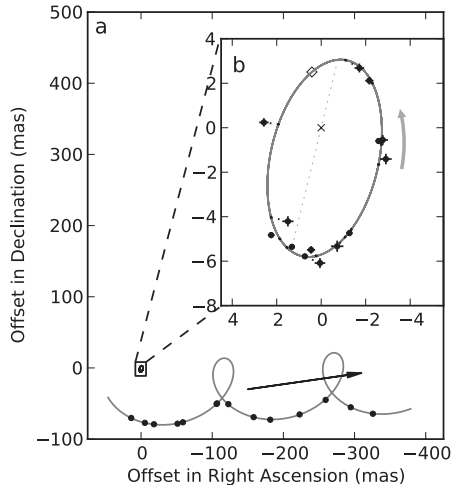
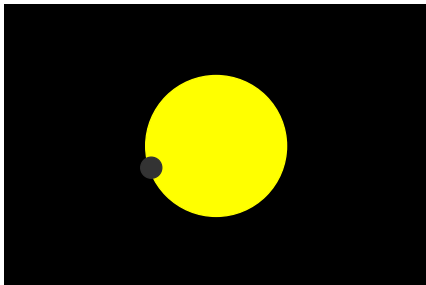


Bild: ESA-D. Ducros, 2013



Sahlmann et al. 2013

Transitmethode

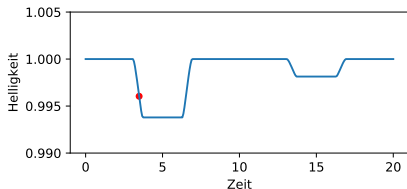


Genaue Photometrie
(Helligkeitsmessung)

Nur bei geeigneter Geometrie
(Blick fast von der Seite!)

Aufschluss über relative Größe
Stern vs Planet
Sterndaten aus Spektrum erschließen

Möglichkeit von Transitspektroskopie!



Exoplaneten: Transit-Lichtkurven

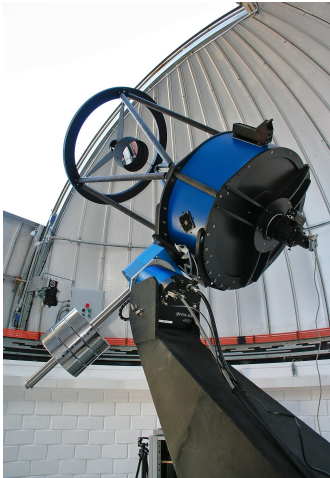


Bild: E. Jehin/ESO

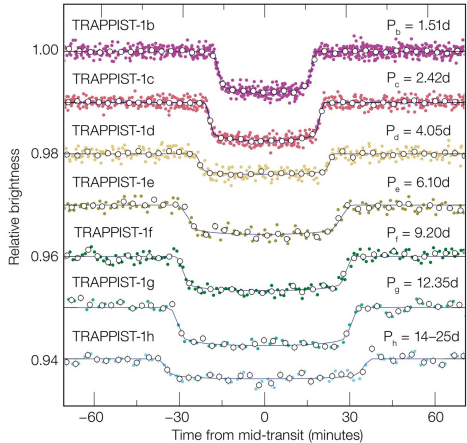
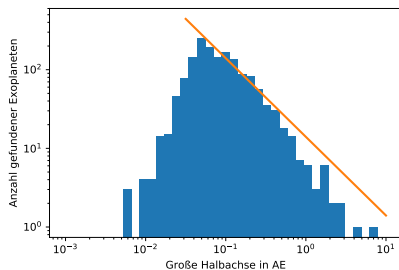
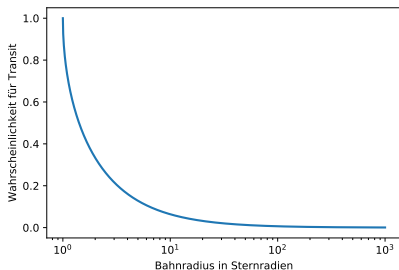


Bild: ESO/M. Gillon et al.

Transit-Lichtkurven: Messungen haben Vorurteile!



Das Nachweisverfahren bestimmt mit, welche Planeten wir nachweisen können und welche nicht!

⇒ muss bei Auswertung berücksichtigt werden

Spektren: Licht in Bestandteile zerlegen

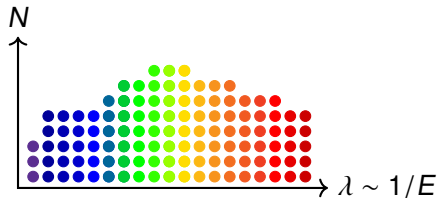
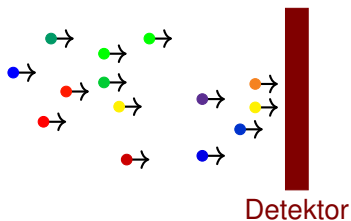


Eigenes Bild

Gitter erzeugen Spektrum, hier: CD als Reflexionsgitter
(Musik und andere Daten sind als Punktmuster gespeichert)

Was ist Licht?

Teilcheneigenschaft: Lichtenergie kommt am Detektor in Form von Paketen an, genannt Lichtquanten oder Photonen



Jedes Photon hat eine eindeutige *Energie*, die einer *Farbe* (=Wellenlänge) entspricht. Wellenlänge $\sim 1/\text{Energie}$.

Spektrum: Dokumentiere, wieviele Photonen mit welcher Energie im Messzeitraum ankommen.

Spektren und Bilder überlagern sich



Eigenes Bild

Bild + Spektrum durch Gitter: Information geht verloren / wird vermischt

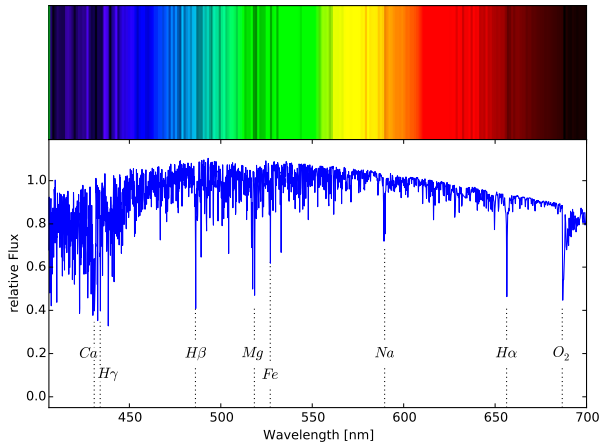
Spektren und Bilder überlagern sich



Eigenes Bild

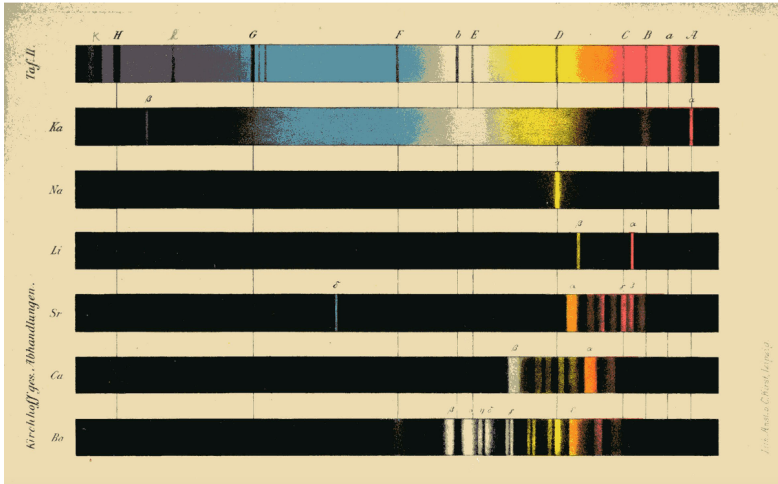
Vorgeschalteter Spalt: Überlagerung weitgehend ausgeschaltet

Spektren: Vom Bild zum Diagramm



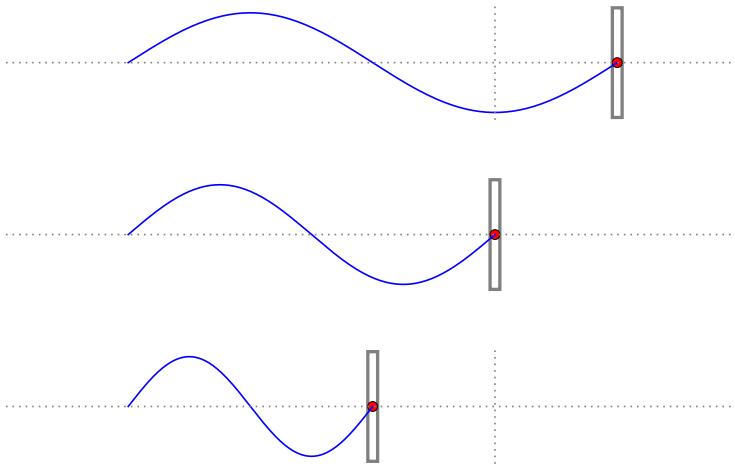
Sonnenspektrum. Daten nach Reiners et al. 2016

Gasflammen: Spektren zeigen Chemie

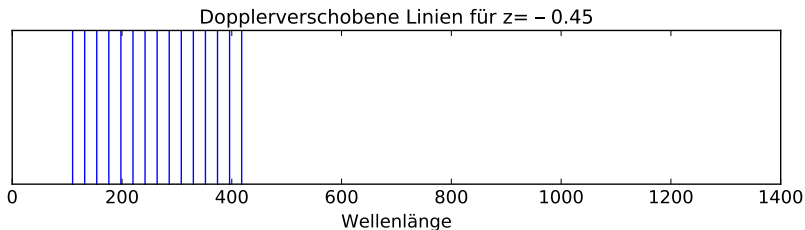


Kirchhoff und Bunsen: „Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen“ in Annalen der Physik und Chemie, Bd. 110 No. 6, 1860, S. 161-189. Neu herausgegeben von Gabriele Dörflinger, Universitätsbibliothek Heidelberg

Dopplereffekt: Spektren

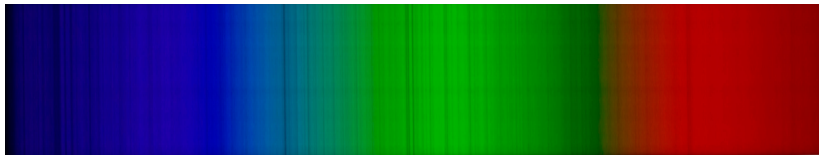


Dopplereffekt: Spektren

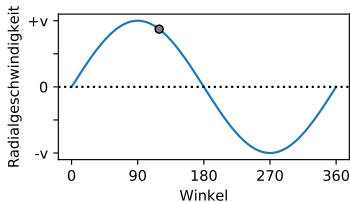
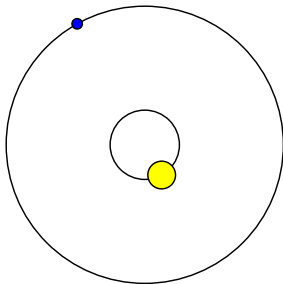


Linien werden um denselben Faktor verschoben:

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



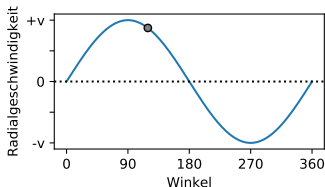
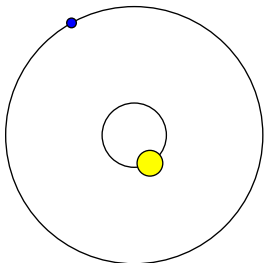
Sternbewegung verrät Anwesenheit von Planet



Via Dopplereffekt: Nachweis Radialanteil der Bewegung,
 nutze $r^3 = T^2 \cdot GM/4\pi^2$ (Kepler 3):

$$v_S \approx 100 \text{ m/s} \left(\frac{M_P}{M_J} \right) \cdot \left(\frac{P}{10 \text{ Tage}} \right)^{-1/3} \cdot \left(\frac{M_S}{M_\odot} \right)^{-2/3} \approx 10 \text{ cm/s} \left(\frac{M_P}{M_\oplus} \right) \cdot \left(\frac{P}{1 \text{ Jahr}} \right)^{-1/3} \cdot \left(\frac{M_S}{M_\odot} \right)^{-2/3}$$

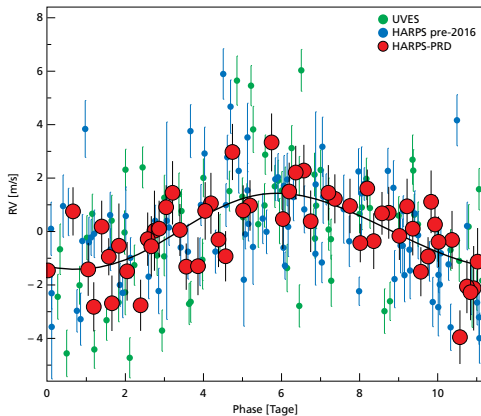
Sternbewegung verrät Anwesenheit von Planet



Genauere Rechnung:

$$\begin{aligned}
 v_s &\approx \frac{100 \text{ m/s}}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \left(\frac{M_P \cdot \sin i}{M_J} \right) \cdot \left(\frac{10 \text{ Tage}}{P} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{M_S + M_P}{M_\odot} \right)^{-2/3} \\
 &\approx \frac{10 \text{ cm/s}}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \left(\frac{M_P \cdot \sin i}{M_\oplus} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ Jahr}}{P} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{M_S + M_P}{M_\odot} \right)^{-2/3}
 \end{aligned}$$

Radialgeschwindigkeits-Plot



Anglada-Escudé et al. 2016

Proxima Centauri b mit Periode von 11.2 Tagen,
erstmalig nachgewiesen 2016, $M < 3M_{\odot}$

Transit ermöglicht Atmosphären-Spektren: Leben?

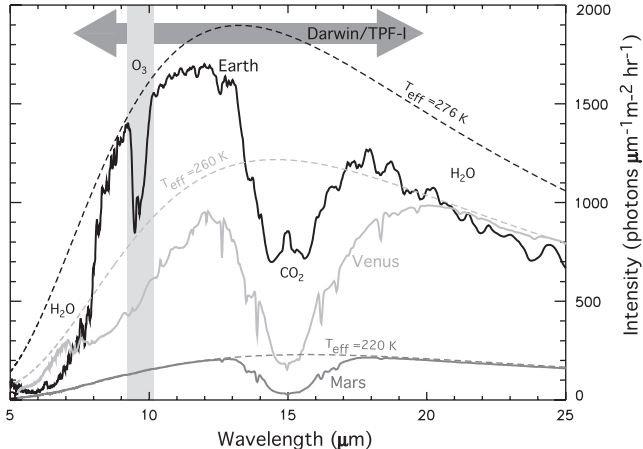
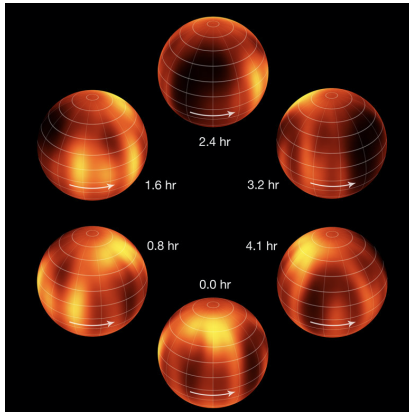


Abb. 1 (rechts) aus Selsis, Kaltenegger & Paillet 2008

Informationen über Atmosphären-Bestandteile

Oberflächenabbildung via Spektral-Scan

Karten aus Spektrum (und dessen Zeitabhängigkeit)
rekonstruieren:



Luhmann 16B in 16.5 Lj Entfernung, Bild: MPIA / I. Crossfield

Zusammenfassung

Exoplaneten vermessen: vor allem indirekte Messungen!

- direktes Oberflächenbild: auf absehbare Zeit unmöglich
- Bahnen abbilden (ca. 3%)
- Radialgeschwindigkeit (ca. 20%)
- Transitmethode (70%)
- Zukunft: Astrometrie
- Zukunft: Spektral-Scan
- Zukunft: Lebensspuren in Spektren