

Nachweis- und Untersuchungsmethoden für (Exo-)Planeten

Das Sonnensystem und seine entfernten Verwandten

Markus Pössel

Haus der Astronomie/Max-Planck-Institut für Astronomie

6. November 2018

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)

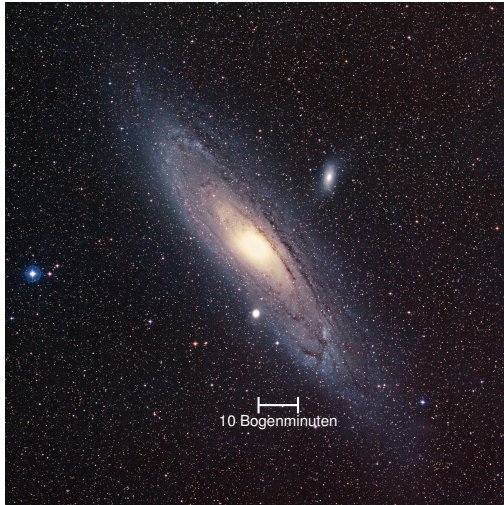
Jupiter

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

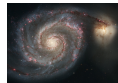


Mond



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)

Nutzung von Teleskopen

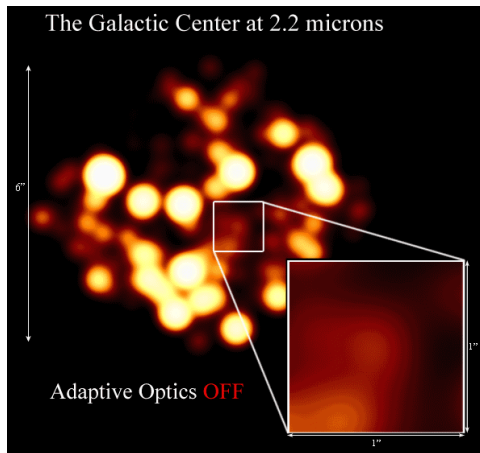


ESO/José Francisco Salgado (josefrancisco.org)

Vorteil von Teleskopen:

- Lichtsammelfunktion $\Rightarrow$
Lichtschwache Objekte vom
Hintergrundrauschen
(zufällig ankommende Photonen)
unterscheiden
- Höhere Auflösung: kleinere Details
abbilden

Limitierung von der Erde aus: Seeing



Animation: Ghez et al. / UCLA

Atmosphärendurchgang verzerrt Punktquellen zu Scheibchen.

Königstuhl; ca. 2"
Exzellenter Standort; 0.5" bis 0.7"

Ausgleich ab den 1990er Jahren dank Adaptiver Optik an Großteleskopen

Jenseits der Atmosphäre: Weltraumteleskope



Bild: NASA/ESA

Weltraumteleskop
Hubble

Seit 1990 im Weltraum

Ab 1993 mit "Brille"

2.4-Meter-Spiegel

UV, sichtbar,
(Nah-)Infrarot

(Wide Field and)
Planetary Camera

HST Wide Field and Planetary Camera(s)

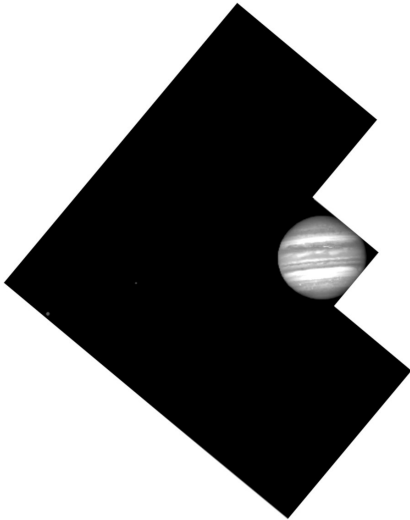
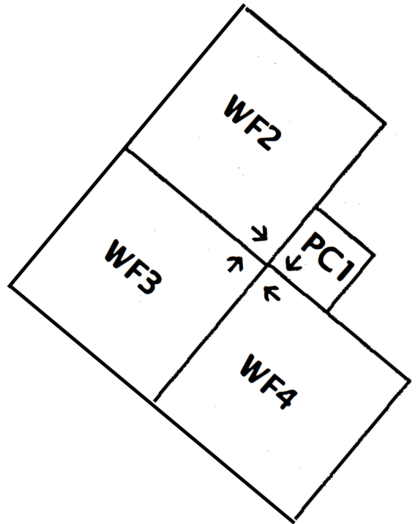


Bild: NASA/ESA/Hubble Legacy Archive (STScI/NASA)



Beugungsbegrenzung von Teleskopen

Licht ist ein Wellenphänomen — Beugung:

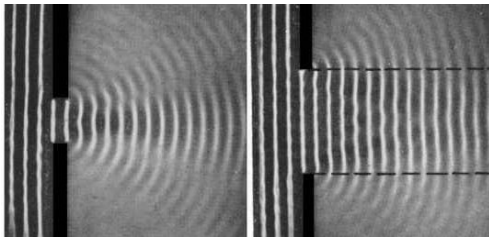
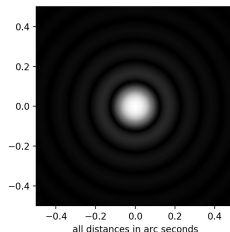


Bild Wellenwanne: Joachim Herz Stiftung, www.leifiphysik.de

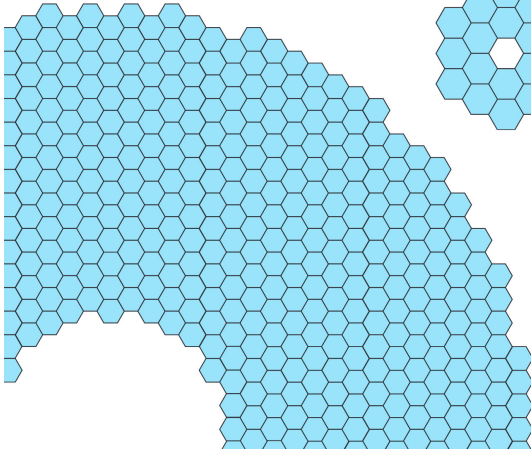
Teleskop mit
Öffnungsdurchmesser D :
Punktquelle bei Wellenlänge λ
wird aufgeweitet
zu Scheibchen mit Durchmesser

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

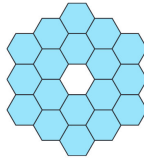


Größen von Teleskopen

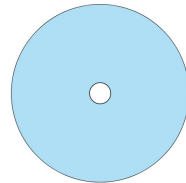
European Extremely Large Telescope
39,3 m (Ausschnitt)



James Webb Space Telescope
6,5 m



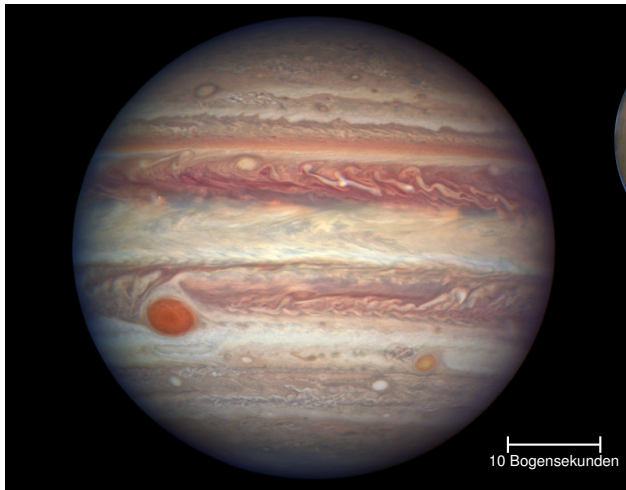
Hubble-Weltraumteleskop
2,4 m



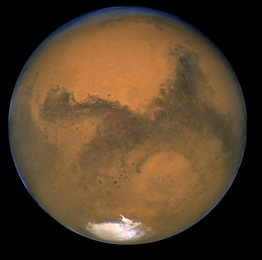
Very Large Telescope
4 x 8,2 m

Grafik: MPIA-Grafikabteilung

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



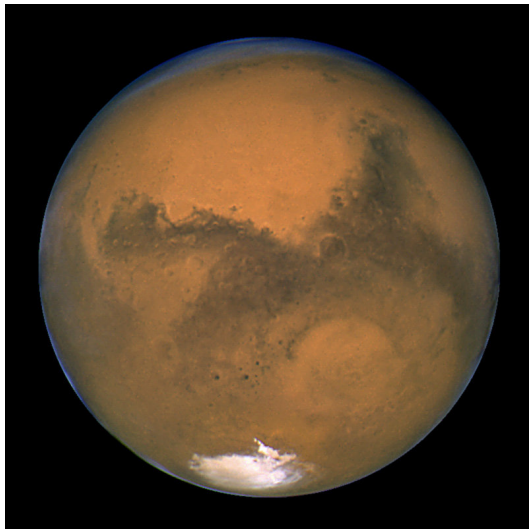
Jupiter
NASA, ESA, and A. Simon (GSFC)



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

Erkundung aus der Nähe: Sonden

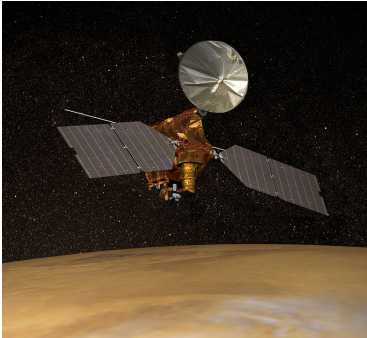


Bild: NASA



Bild: NASA

Beispiel Mars Reconnaissance Orbiter

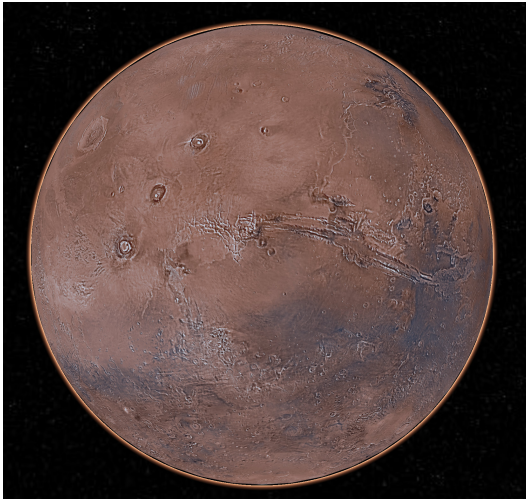
NASA-Mission seit 2006

Flughöhe ca. 300 km

HiRISE-Kamera 50 cm

Beugungsbegrenzt 0.5"
entspricht 0.7 m auf dem Mars

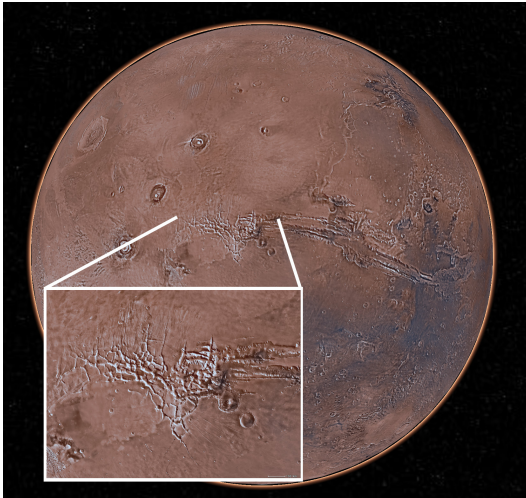
Scheinbare Größen astronomischer Objekte



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

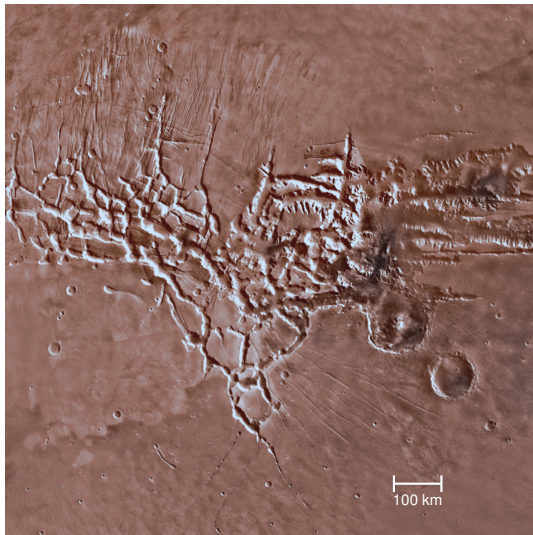
Scheinbare Größen astronomischer Objekte



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

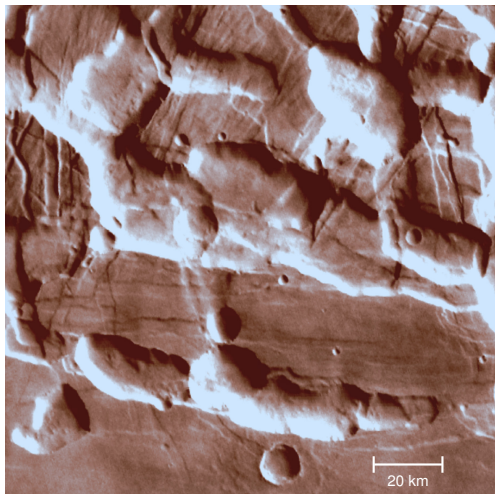


0.03'' Beugung
VLT

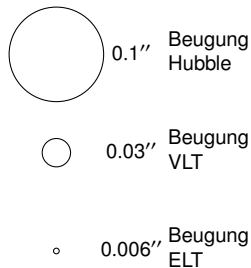


0.006'' Beugung
ELT

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



NASA's Explore Mars Trek



Untersuchungen auf der Oberfläche

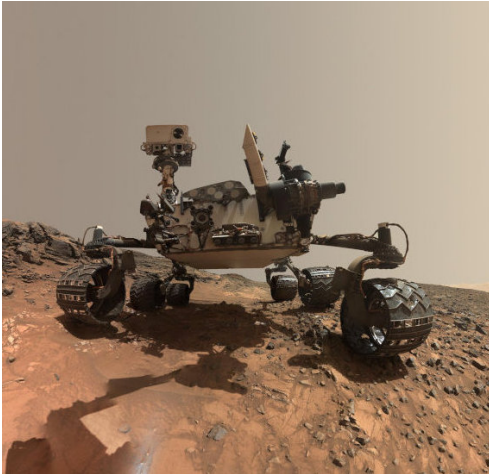


Bild: NASA/JPL-Caltech/MSSS

Curiosity-Rover

Seit 2012 auf dem Mars
(Gale-Krater)

Fahrbares Laboratorium
(dazu später noch mehr)

Mehrere Kameras

Scheinbare Größen astronomischer Objekte



Bild: Curiosity-Rover, NASA/JPL-Caltech/MSSS

$10 \mu\text{s}$
Beugungsbegrenzung eines
hypothetischen 25-km-Spiegels

Spektren: Licht in Bestandteile zerlegen

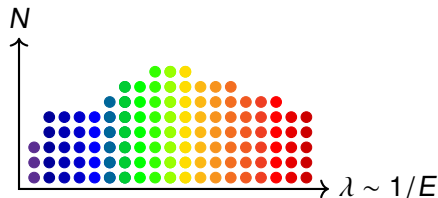
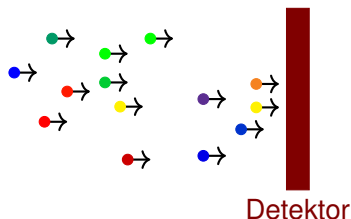


Eigenes Bild

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

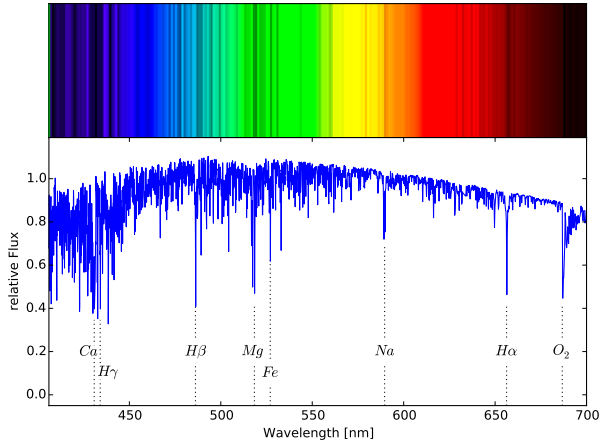
Spektren und Bilder überlagern sich



Eigenes Bild

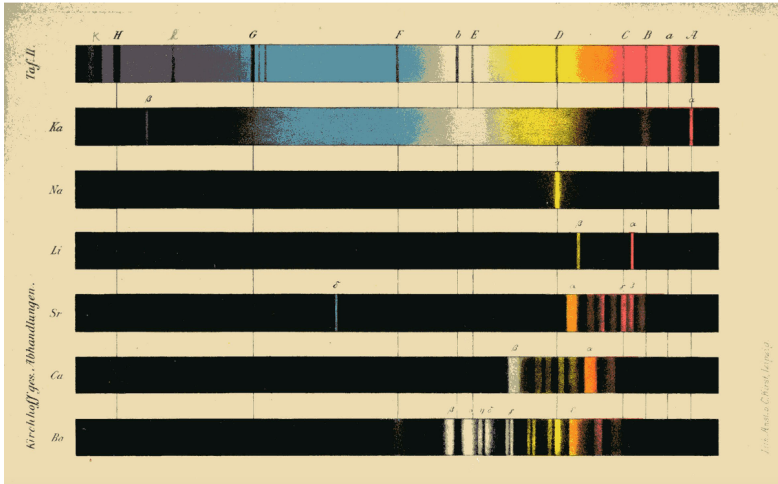
Vorgeschalteter Spalt: Überlagerung weitgehend ausgeschaltet

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

Planeten: Reflektionsspektren

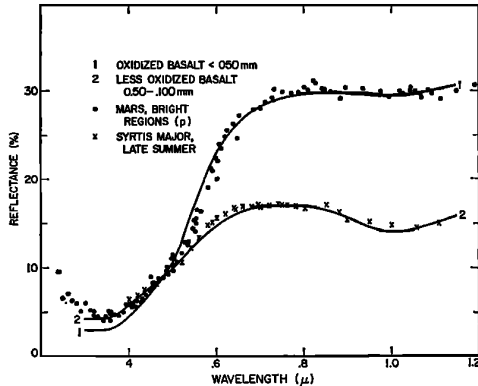


Diagramm: Adams & McCord 1969

Planeten im/nahe sichtbarem Licht: Reflexion von Sonnenlicht dominiert.
Teilchengröße wird wichtiger Faktor

Interaktiv: CheMin auf Curiosity

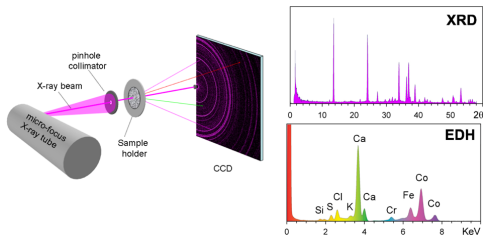


Diagramm: Fig. 1 in Blake et al. 2012

Mudstone Mineralogy from CheMin

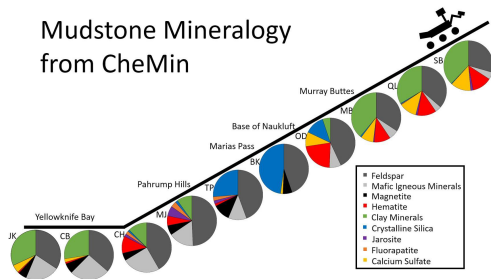
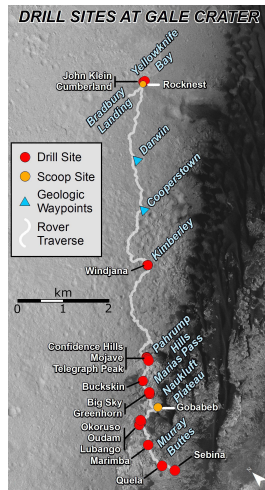
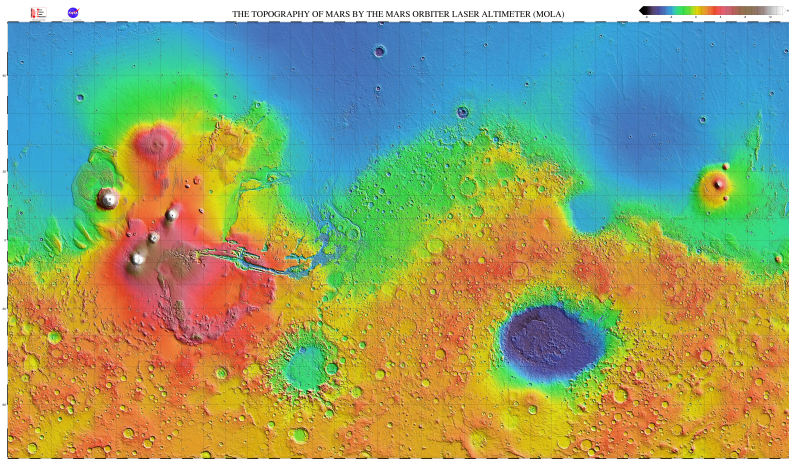


Diagramm: NASA/JPL-Caltech
Markus Pössel



Grafik: NASA/JPL-Caltech/MSSS/UA

Interaktiv: Laser- und Radarmessungen



Karte: Mars Orbiter Laser Altimeter

Laser-Höhenmessung, (Boden-)Radar, Spacecraft-Tracking für
Gravitationsmessungen

Exoplaneten

Exoplaneten: Abstand 4–9 Größenordnungen größer als Sonnensystem

Exoplanet neben Stern entspricht Glühwürmchen 10 cm neben Stadiumscheinwerfer aus 5 km Entfernung, im IR günstiger (siehe Blogbeitrag Dezember 2016)

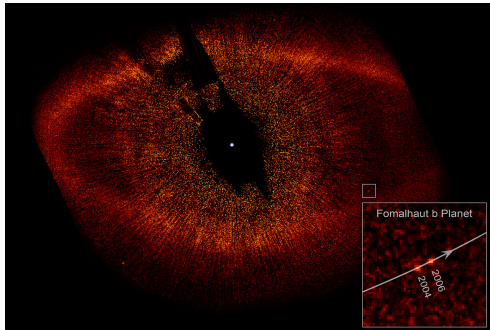


Bild Fomalhaut b: NASA, ESA and P. Kalas (University of California, Berkeley, USA)

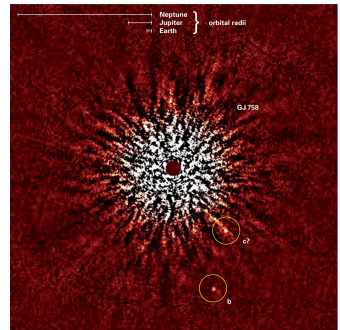
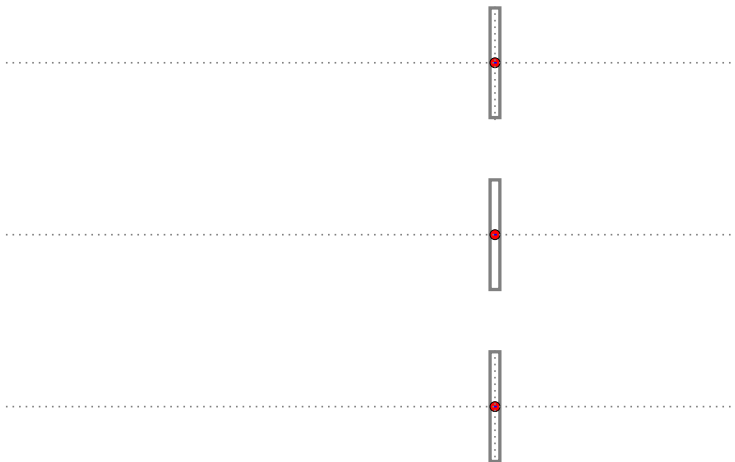
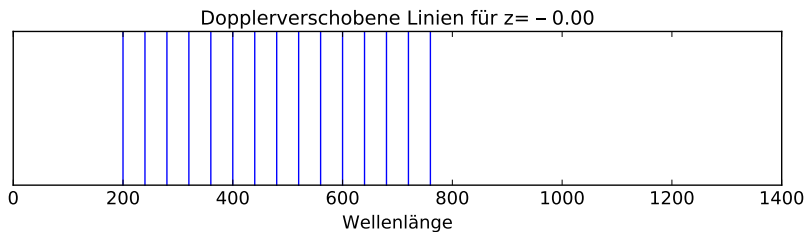


Bild GJ 758b: MPIA/NAOJ

Dopplereffekt: Spektren

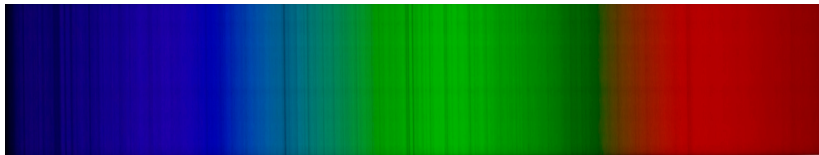


Dopplereffekt: Spektren

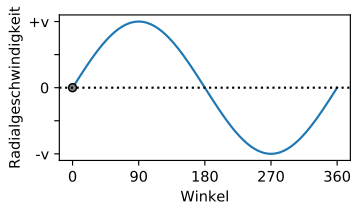
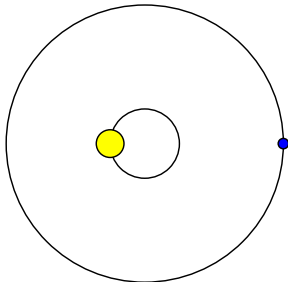


Linien werden um denselben Faktor verschoben:

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



Sternbewegung verrät Anwesenheit von Planet

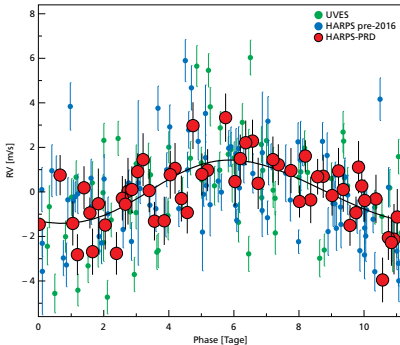


Via Dopplereffekt: Nachweis Radialanteil der Bewegung,

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

Radialgeschwindigkeitsmethode und Astrometrie

Radialgeschwindigkeits-Plot

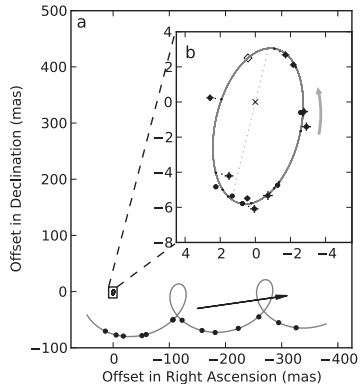


Anglada-Escudé et al. 2016

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

Markus Pössel

Astrometrie (sehr selten)

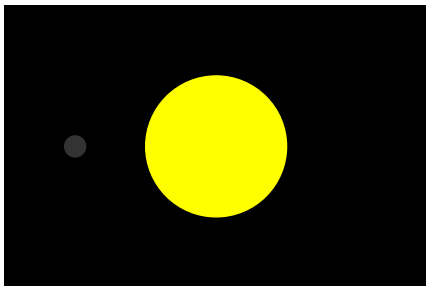


Sahlmann et al. 2013

hier Zwerg $78 M_J$, Begleiter $29 M_J$
— später: Gaia!

Nachweis- und Untersuchungsmethoden für (Exo-)Planeten

Transitmethode

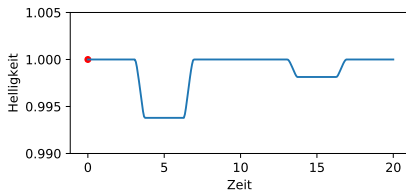


Genaue Photometrie (Helligkeitsmessung)

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

Aufschluss über relative Größe Stern und Planet

Möglichkeit von Transitspektroskopie!



Teleskop-Lichtkurven

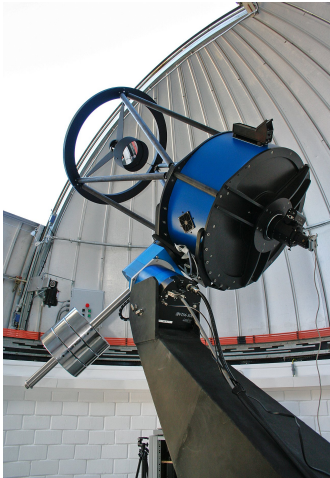


Bild: E. Jehin/ESO

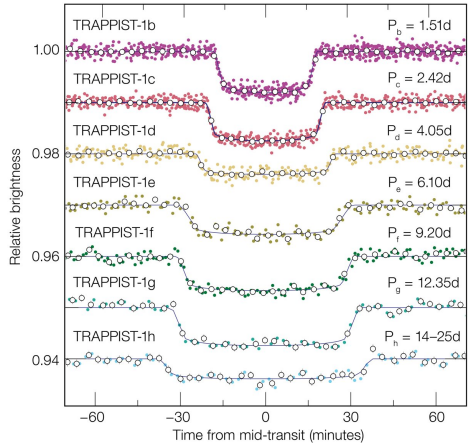


Bild: ESO/M. Gillon et al.

Transit ermöglicht Atmosphären-Spektren

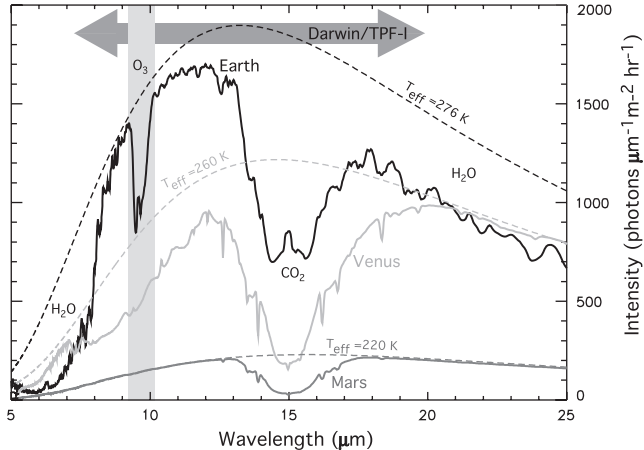


Abb. 1 (rechts) aus Selsis, Kaltenegger & Paillet 2008

Informationen über Atmosphären-Bestandteile