

EXOPLANETEN: NACHWEIS UND CHARAKTERISIERUNG

DAS SONNENSYSTEM UND SEINE NÄCHSTEN VERWANDTEN FÜR NICHT-PHYSIKER

MARKUS PÖSSEL

HAUS DER ASTRONOMIE

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, WS 2022/2023

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)

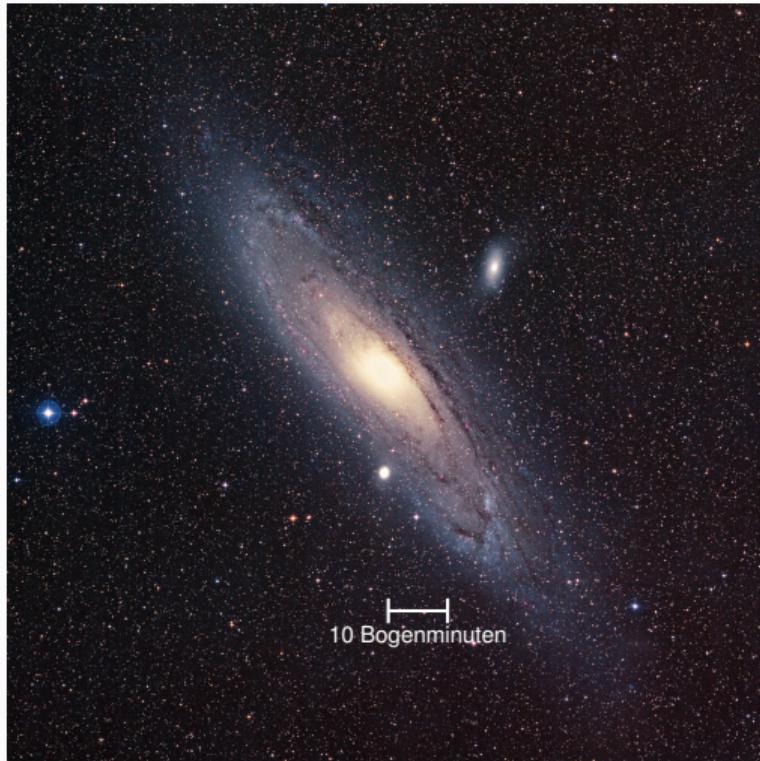
Jupiter

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. 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)

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

WINKELGRÖSSE = SCHEINBARE GRÖSSE ÄNDERT SICH MIT ENTFERNUNG

200fache Entfernung



Mars

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

2000fache Entfernung



20.000fache Entfernung

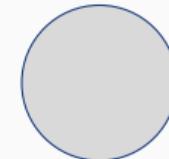
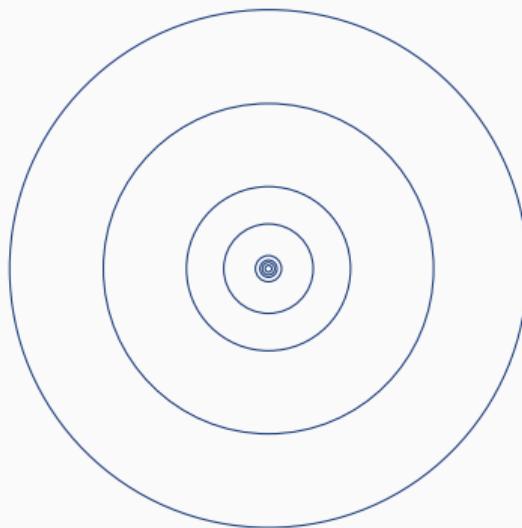


○ 0.006'' Beugung
ELT

α Cen: Abstand > 100.000· größter Abstand Mars-Erde

KÖNNEN WIR DENN PLANETENBAHNEN DIREKT BEOBACHTEN?

Unser Sonnensystem in Entfernung von 6 pc (≈ 20 Lj),
entspricht den nächsten ~ 100 Exosystemen



1.5'' gutes Seeing
Königstuhl



0.66'' mittleres Seeing
Paranal / ESO

LIMITIERENDER FAKTOR: HOHER KONTRAST



+



⇒



Glühwürmchen in Assos (Türkei).
Bild: Nevit Dilmen via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

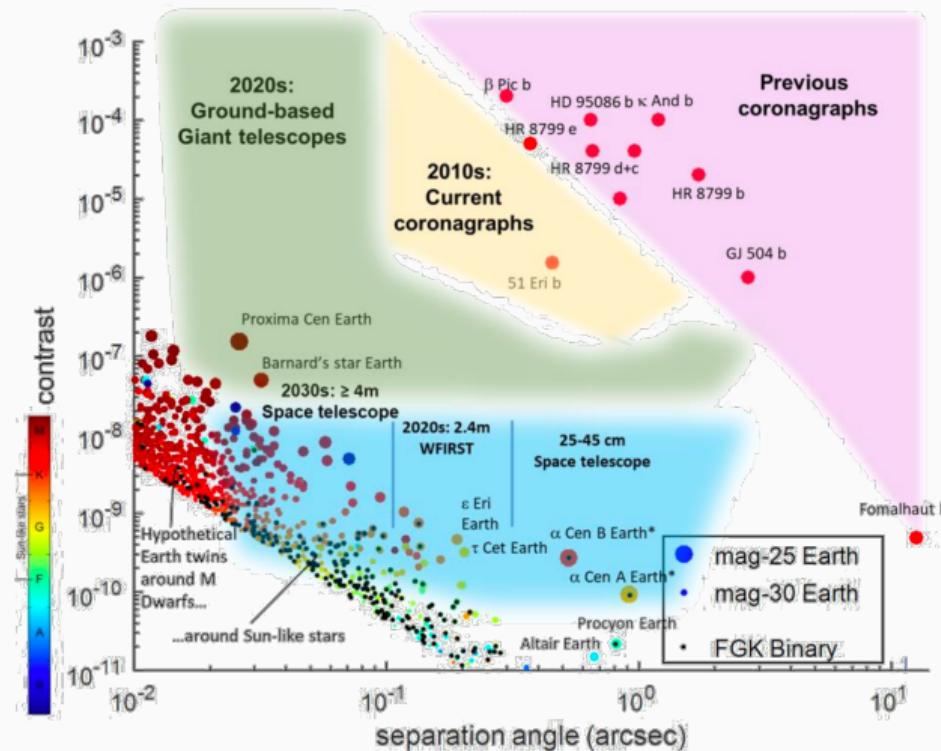
Flutlicht aus einzelnen Lampen im Rosenaustadion in Augsburg. Bild: Nutzer Monroe (monroe commonswiki) via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

Abbey Hey F.C. vs F.C. United of Manchester in a Manchester Premier Cup quarter final fixture at The Abbey Stadium on 16 November 2016. Bild: Nutzer Delusion23 via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 4.0

Jupiter (Radius, Bahngröße, Helligkeit) bei Alpha Centauri entspricht
Glühwürmchen 10 cm neben Stadionflutlicht aus 4 km Entfernung

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

DIREKTE ABBILDUNGEN: MÖGLICHKEITEN



Belikov 2019 et al. für Astro2020 Decadal Survey

- Coronographen schirmen Sternenlicht ab
 - wenn Kontrast gut genug: Vollständigkeit!
 - vom Boden: adaptive Optik
 - bessere Stabilität:
Weltraumteleskope

DIREKTE ABBILDUNGEN VON EXOPLANETEN

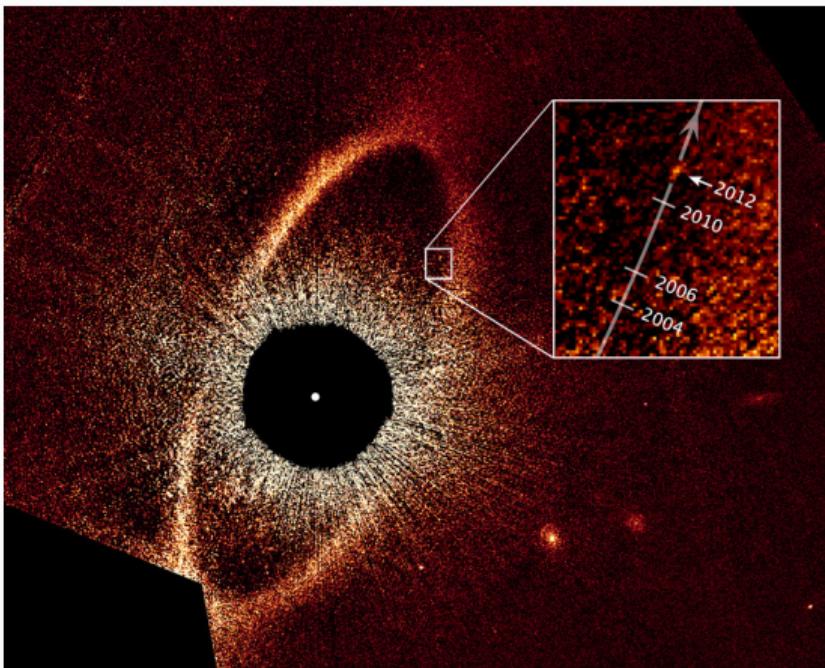


Bild Formalhaut b: NASA, ESA and P. Kalas (UC Berkeley und SETI Institute)

- Bislang vor allem Exoplaneten in großem Abstand von ihren Sternen
- erstes Beispiel: Formalhaut b (in Trümmerscheibe)
- wiederholte Beobachtungen
⇒ Bewegungen
- ... in diesem Falle:
ungebunden, Trümmerwolke?

DIREKTE ABBILDUNGEN VON EXOPLANETEN

- HR 8799b, c, d, e
- 130 Lichtjahre Entfernung
- wiederholte Aufnahmen mit Keck-Teleskopen
- Film hier: interpoliert
- Stern durch Koronograf abgedeckt
- Insgesamt aber nur 213 von 5225 Exoplaneten abgebildet

Film: Jason Wang (Caltech)/Christian Marois (NRC Herzberg)

INDIREKTE NACHWEISMETHODEN

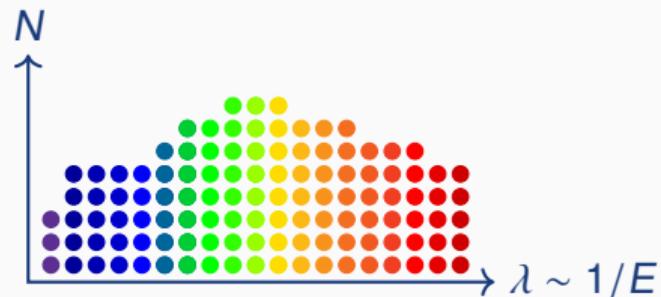
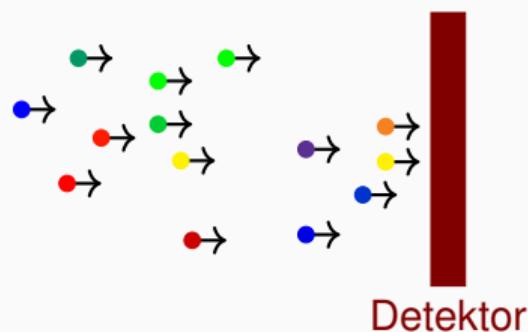
- Transitmethode (3652)
- Radialgeschwindigkeitsmethode (1017)
- Mikro-Gravitationslinseneffekt (225)
- Transit-Zeitvariationen (49)
- astrometrische Methode (17)

SPEKTREN: LICHT IN BESTANDTEILE ZERLEGEN



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
in einem gegebenen Messzeitraum ankommen.

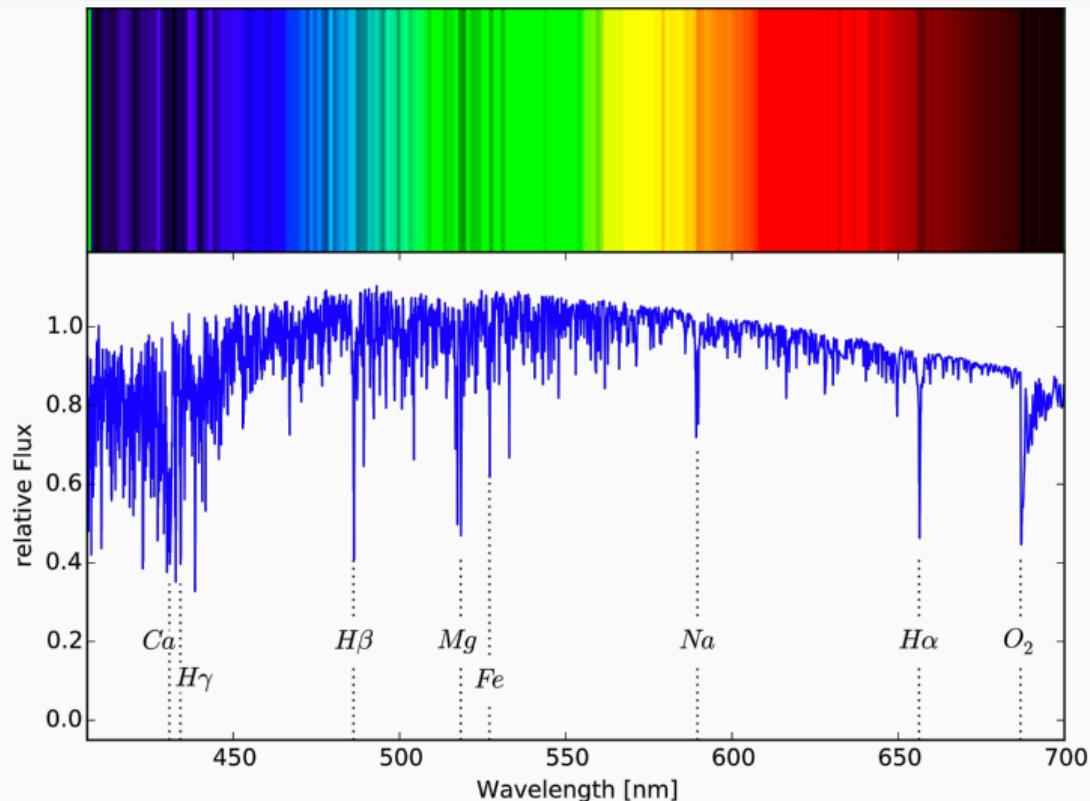
SPEKTREN UND BILDER ÜBERLAGERN SICH



SPEKTREN UND BILDER ÜBERLAGERN SICH

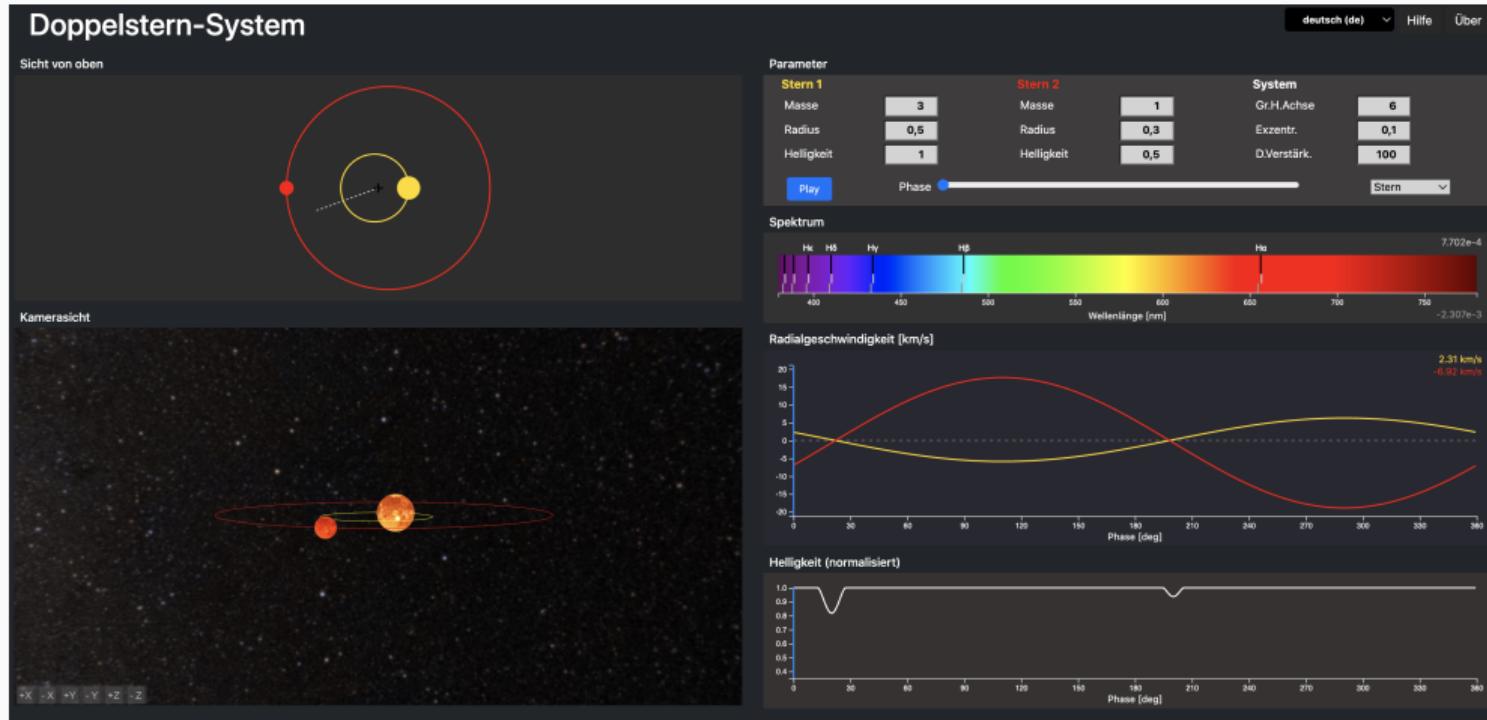


SPEKTREN: VOM BILD ZUM DIAGRAMM



Sonnenspektrum. Daten nach Reiners et al. 2016

EINFACHES BEISPIEL: DOPPELSTERNSYSTEM



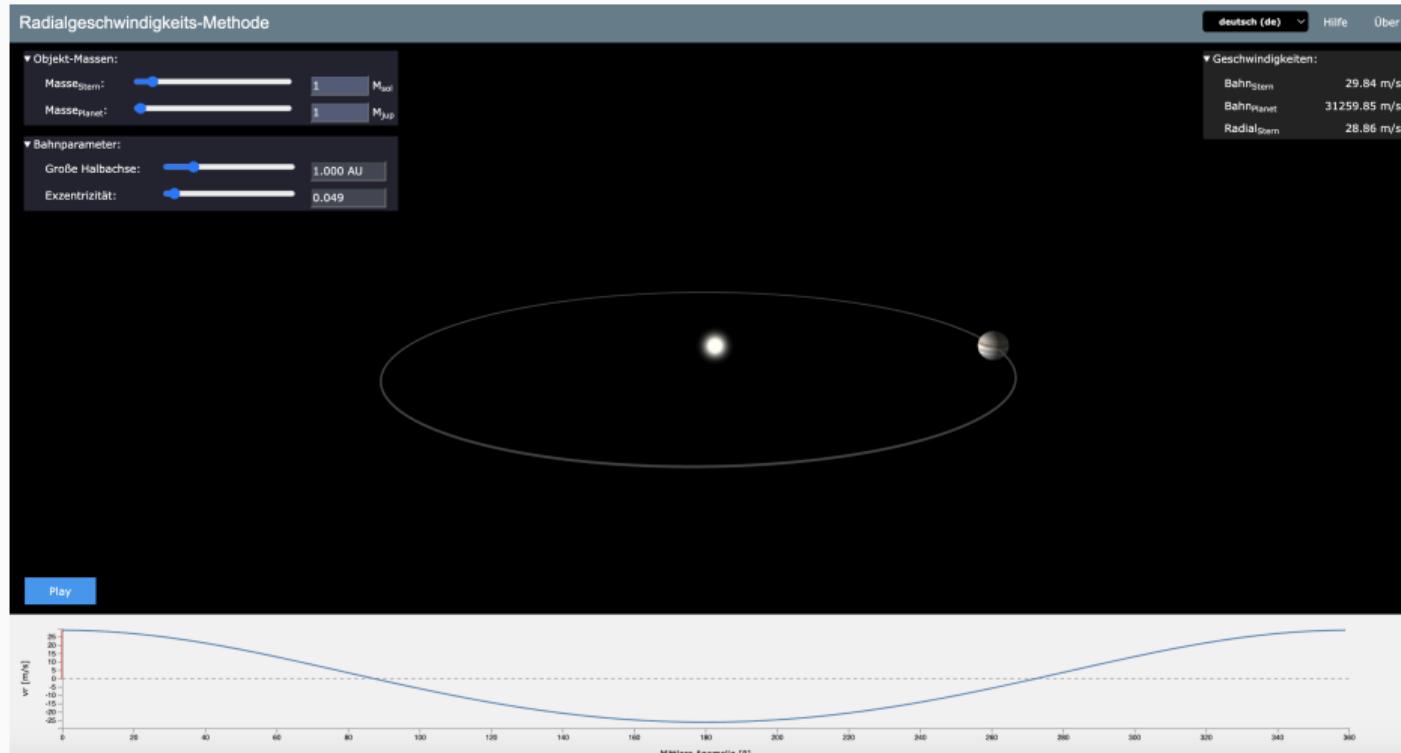
Interaktive, browserbasierte App von Thomas Müller (HdA) auf <https://astro-apps.org/BinaryStarSystem/index.html>

STERNBEWEGUNG VERRÄT ANWESENHEIT VON PLANET

Via Dopplereffekt: Nachweis Radialanteil der Bewegung,

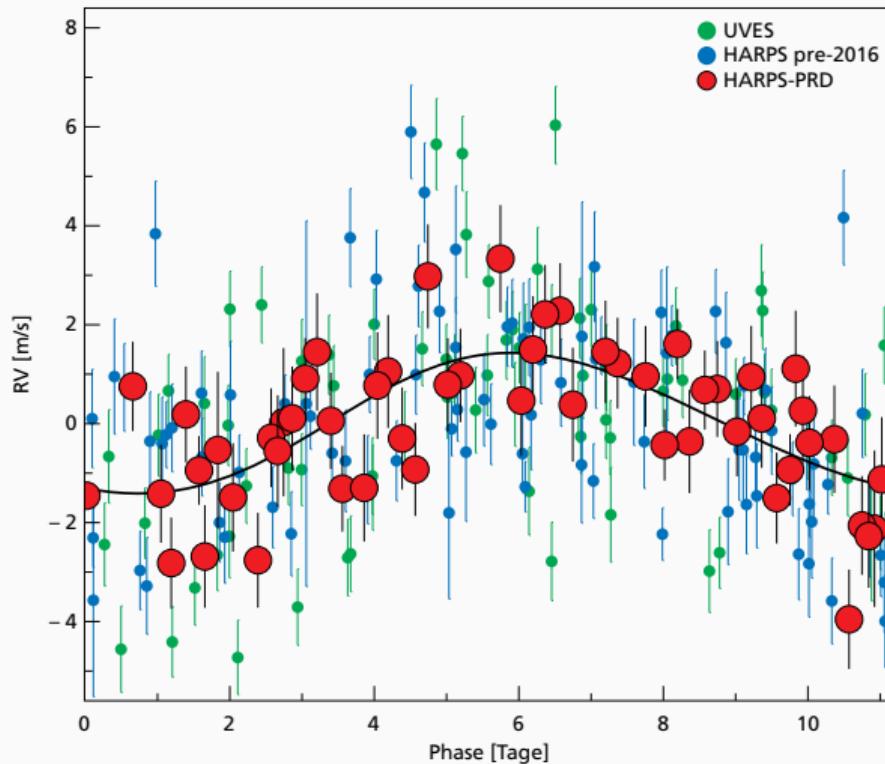
$$v_S \approx 100 \text{ m/s} \left(\frac{M_P}{M_J} \right) \cdot \left(\frac{10 \text{ Tage}}{P} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{M_S}{M_\odot} \right)^{-2/3} \approx 10 \text{ cm/s} \left(\frac{M_P}{M_\oplus} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ Jahr}}{P} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{M_S}{M_\odot}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

RADIALGESCHWINDIGKEIT: NUR $M_P \sin \iota$ NACHWEISBAR



Interaktive, browserbasierte App von Thomas Müller (HdA) auf <https://astro-apps.org/RadialVelocityMethod/index.html>

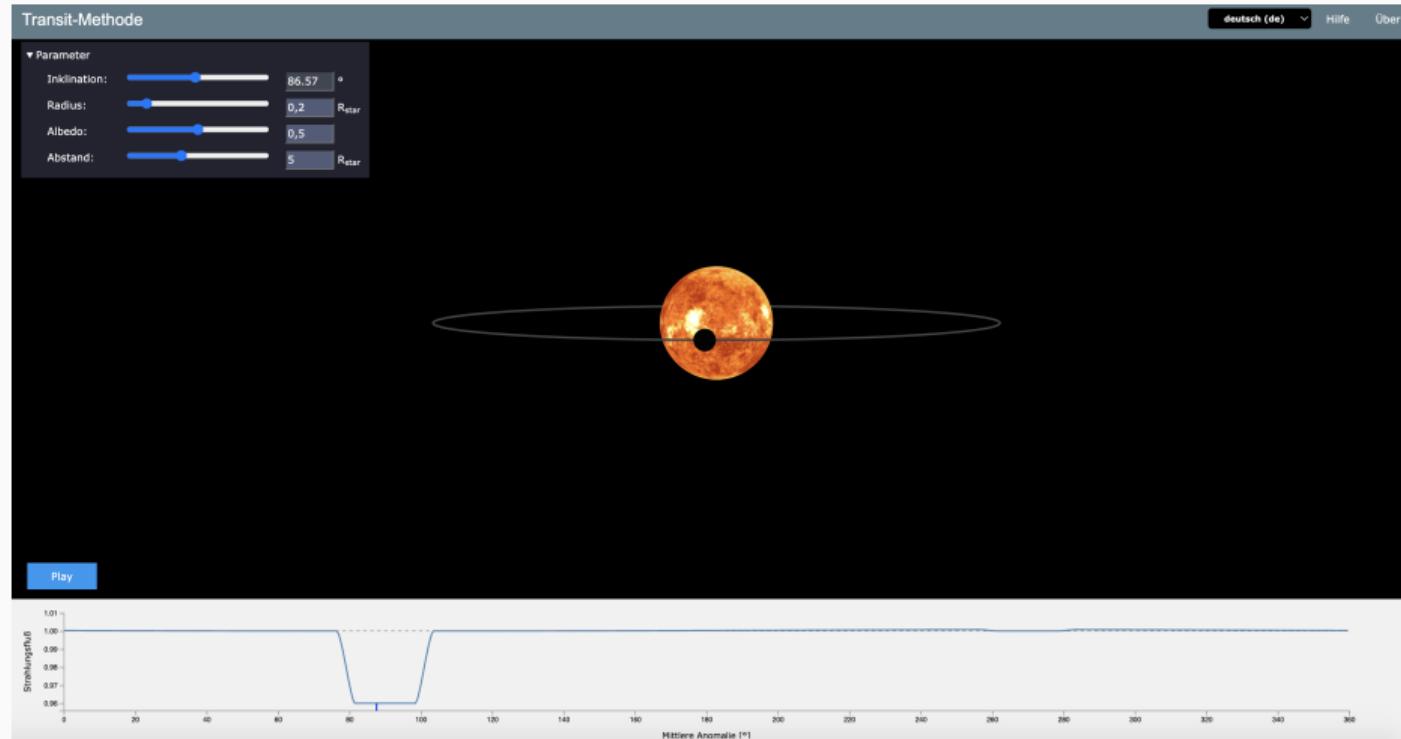
RADIALGESCHWINDIGKEITSMETHODE: DATEN



Anglada-Escudé et al. 2016

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

TRANSITMETHODE



Interaktive, browserbasierte App von Thomas Müller (HdA) auf <https://astro-apps.org/TransitMethod/index.html>

- Genaue Photometrie Voraussetzung
(Helligkeitsmessung)
- Boom durch Kepler (2009–2018), TESS (2018–)
- Nur bei geeigneter Geometrie
(Blick fast von der Seite!)
- Aufschluss über
relative Größe Stern und Planet, R_P/R_*
- aus Transitdauer: a_P/R_*
- mit R_* aus Spektrum/Sternmodellen: R_P , a_P
- Zeitliche Abweichungen können auf weitere
Planeten hindeuten (Transit Timing Variations)
- Möglichkeit von Transitspektroskopie!

Details siehe Handout im Moodle

TRANSIT: TELESKOP-LICHTKURVEN



Bild: E. Jehin/ESO

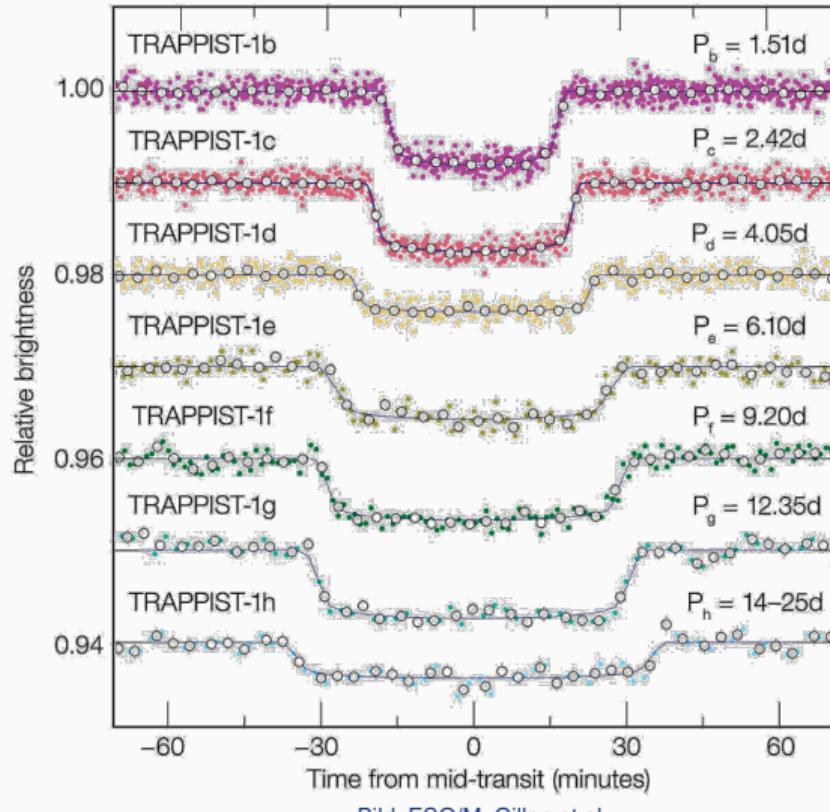


Bild: ESO/M. Gillon et al.

TRANSIT ERMÖGLICHT ATMOSPHÄREN-SPEKTREN

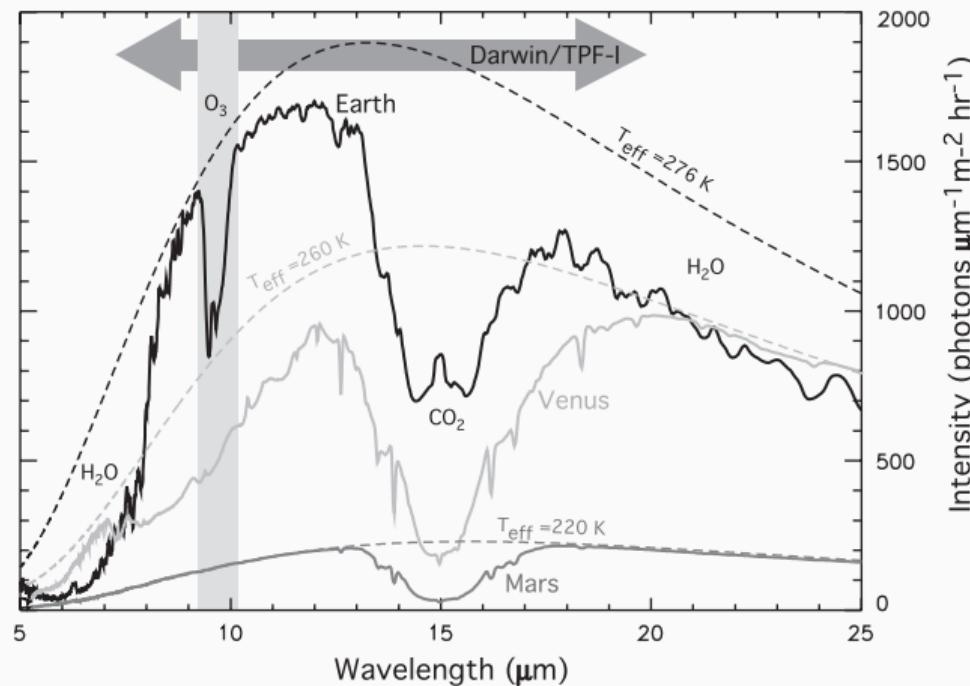
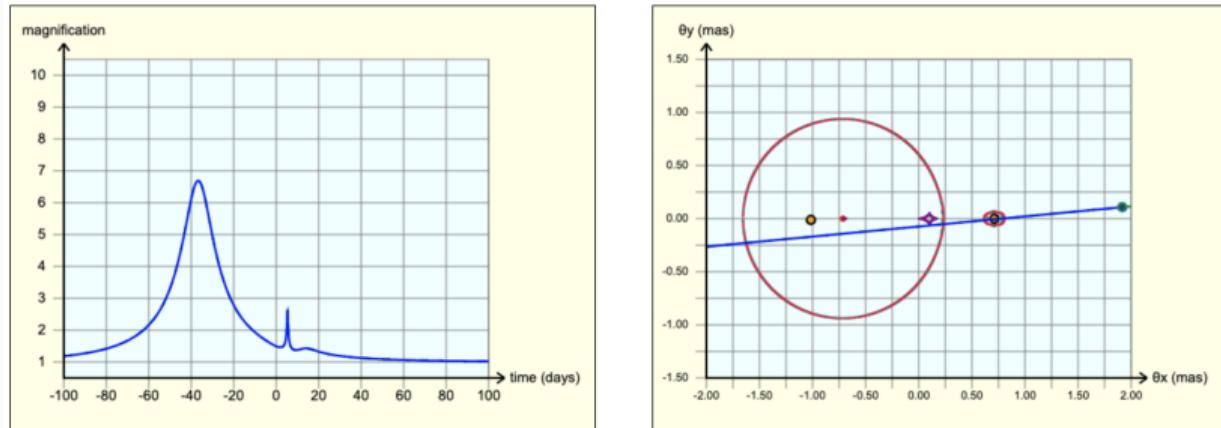


Abb. 1 (rechts) aus Selsis, Kaltenegger & Paillet 2008

Informationen über Atmosphären-Bestandteile

MIKROGRAVITATIONSLINSENEFFEKT: STERN MIT PLANET



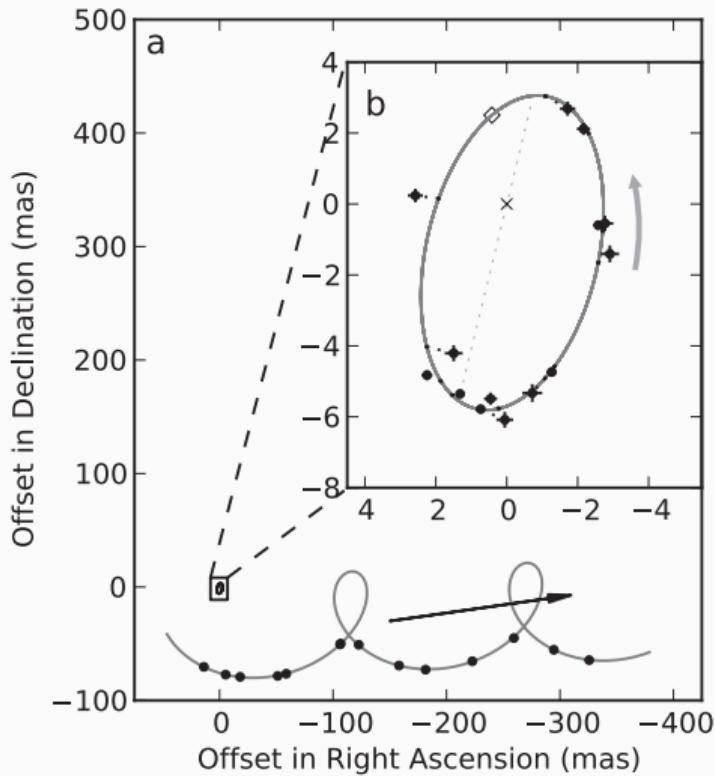
Shanen Cross, <https://microlensing-source.org/interactive/85/>

Lichtablenkung nach Einstein kann temporäre Aufhellung bewirken,
Effekt größer als Summe der Teileffekte (Mao, Paczynski 1991)

Stand 10/2022 (via exoplanet.eu): 225 Planeten in 202 Systemen so nachgewiesen

Vorteil: Keine (starken) Auswahleffekte nach Sterntyp, -abstand, Planetenmasse, Umlaufzeit —
erlaubt statistische Schätzungen: 2 Exoplaneten pro Hauptreihenstern (Cassan et al. 2012)

ASTROMETRIE (BISLANG SEHR SELTEN)



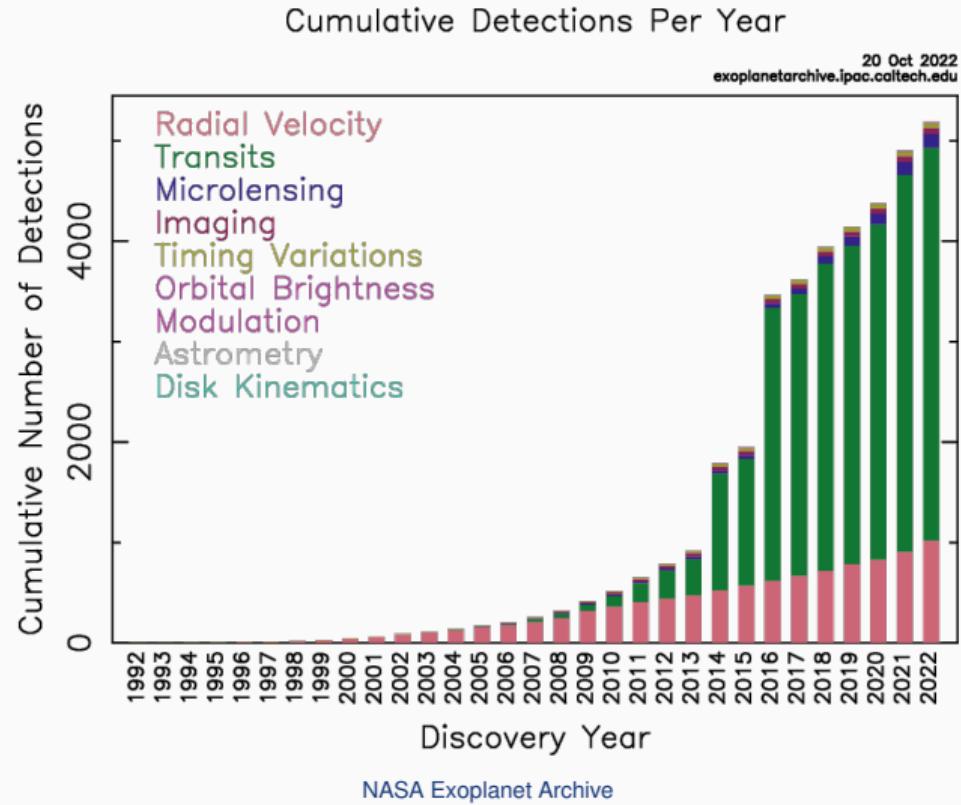
Sahlmann et al. 2013

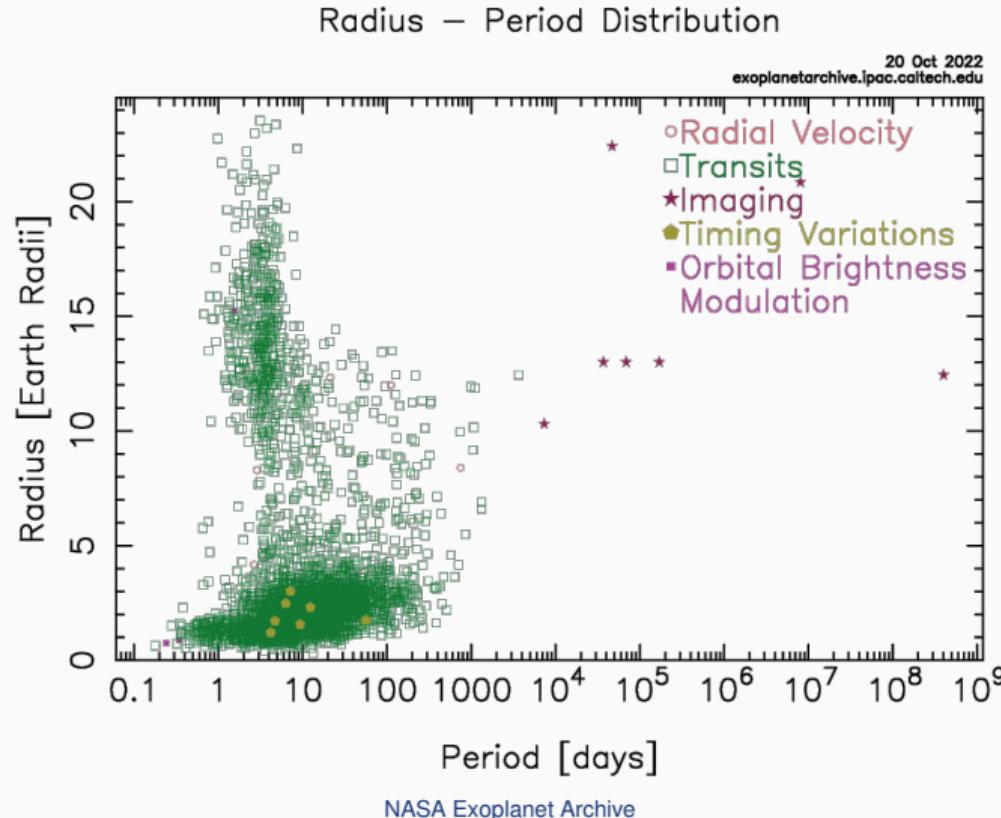
- Sternverschiebungen am Himmel durch “Zerren” eines oder mehrerer Planeten
- hier leuchtschwacher Zwergstern DENIS-P J082303.1-491201 $78 M_J$, Begleiter $29 M_J$ (Brauner Zwerp)
- Sollte sich durch Gaia DR4 ändern (nicht vor Ende 2025)

WAS HABEN WIR DAVON?

- jeweils nur Einzeldaten: P , a_P , R_P , $M_P \sin \iota$
- Transit und Radialgeschwindigkeit zusammen: mittlere Dichte!
- Mittlerweile große Stichprobe: 5225 Planeten in 3854 Systemen
- (aber Vorsicht: Bias durch Methoden!)
- Statistik möglich!

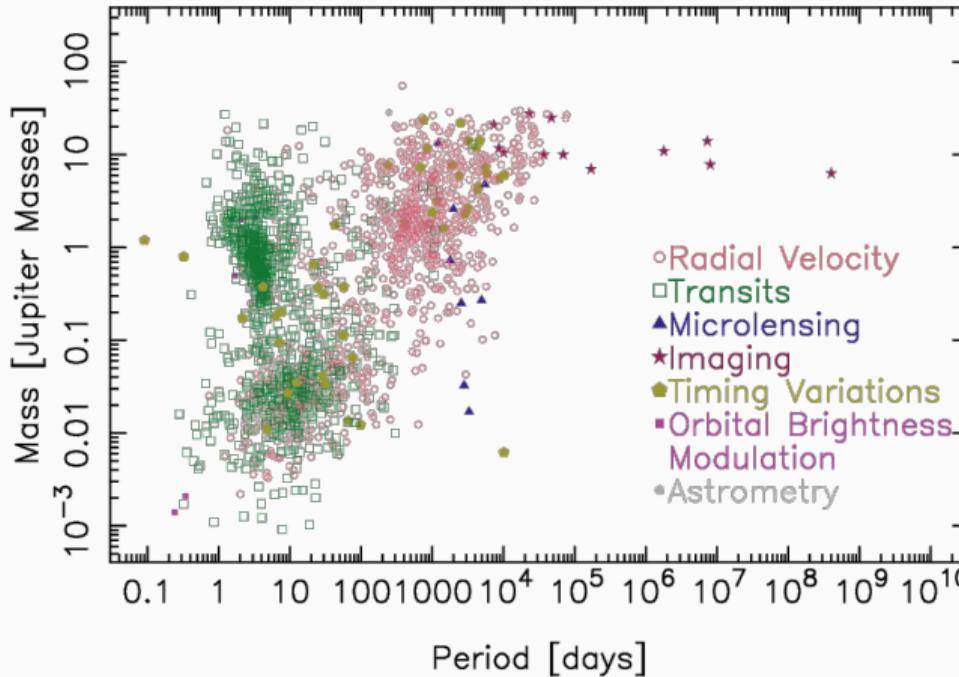
ENTDECKUNGSSTATISTIK





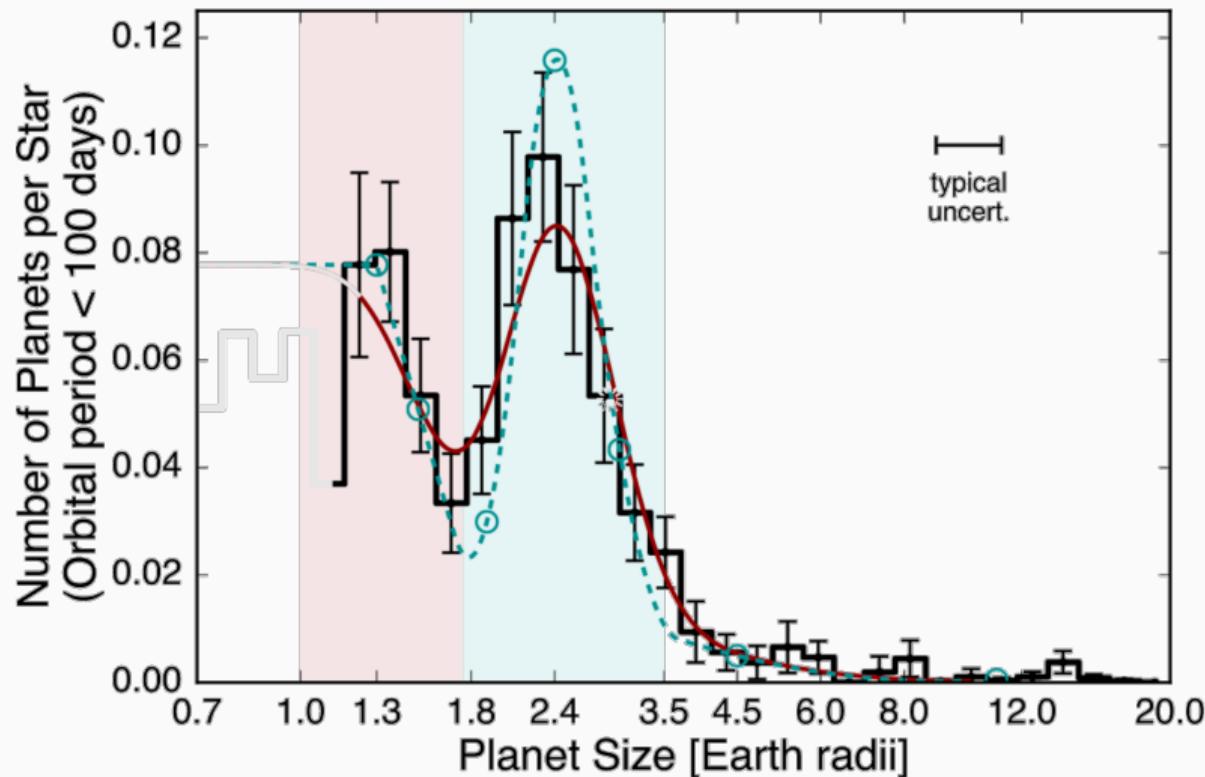
Mass – Period Distribution

20 Oct 2022
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

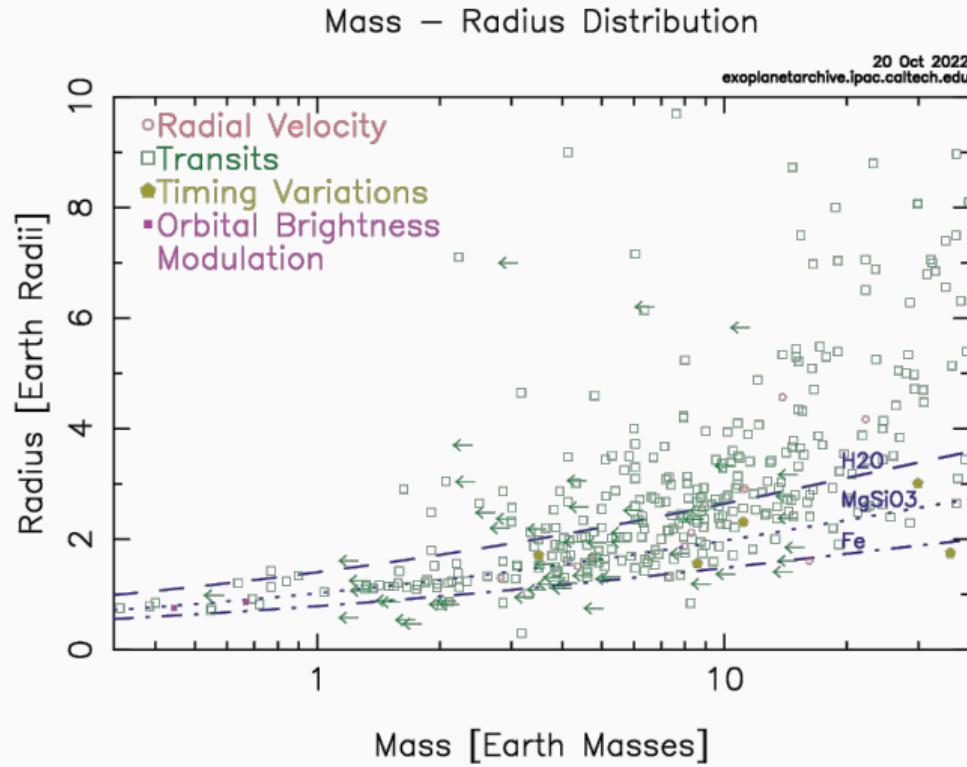


NASA Exoplanet Archive

STATISTIK MIT KORRIGIERTEM BIAS: SUPERERDEN UND MINI-NEPTUNE

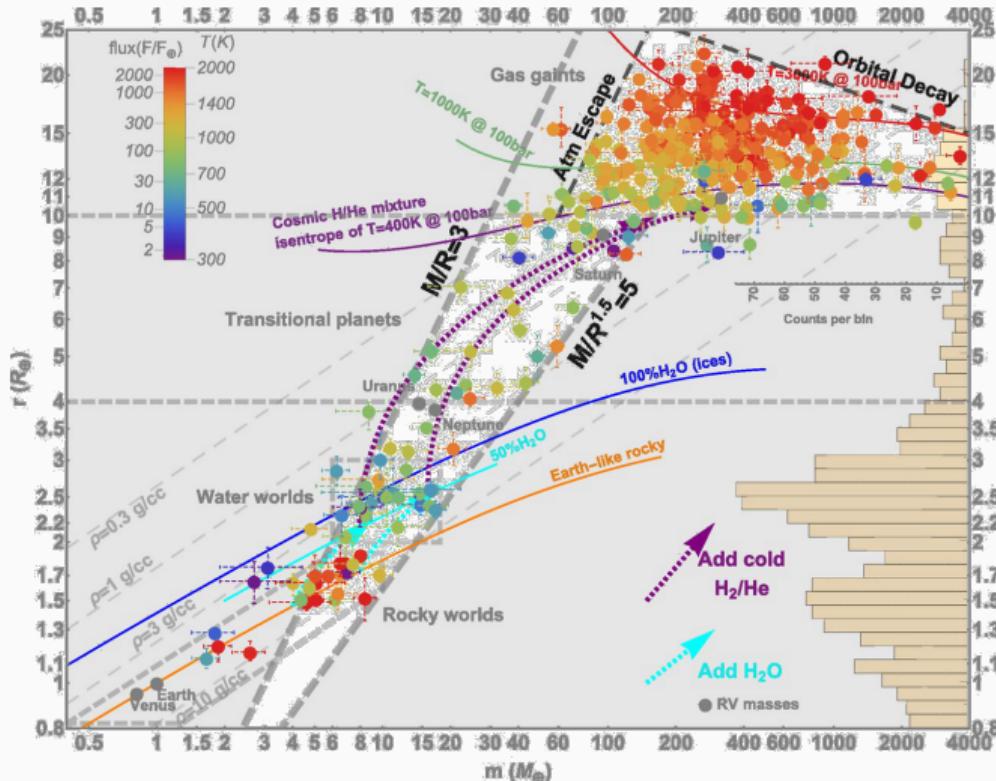


Fulton et al. 2017



NASA Exoplanet Archive

ZIEL: STATISTIK DER VERSCHIEDENEN ARTEN VON PLANETEN



Zeng et al. 2019

LOGISCHE FORTSETZUNG: WIE ENTSTEHEN DENN NUN EIGENTLICH PLANETEN?

Lecture Staub -> Planetesimale

Wie baut man aus Staub Planeten?

10/04/2010 Hubert Klahr - Planet Formation -
MPIA Heidelberg