European Research Council
Established by the European Commission

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Die Entdeckung Ferner Welten

– Exoplaneten und das Rätsel der Planetenentstehung –

Prof. Dr. Til Birnstiel
LMU München

Schloss Schweinsburg | Workshop: Quantenphysik an der Schule | 17.07.2021

Credit: ESO/L. Calçada

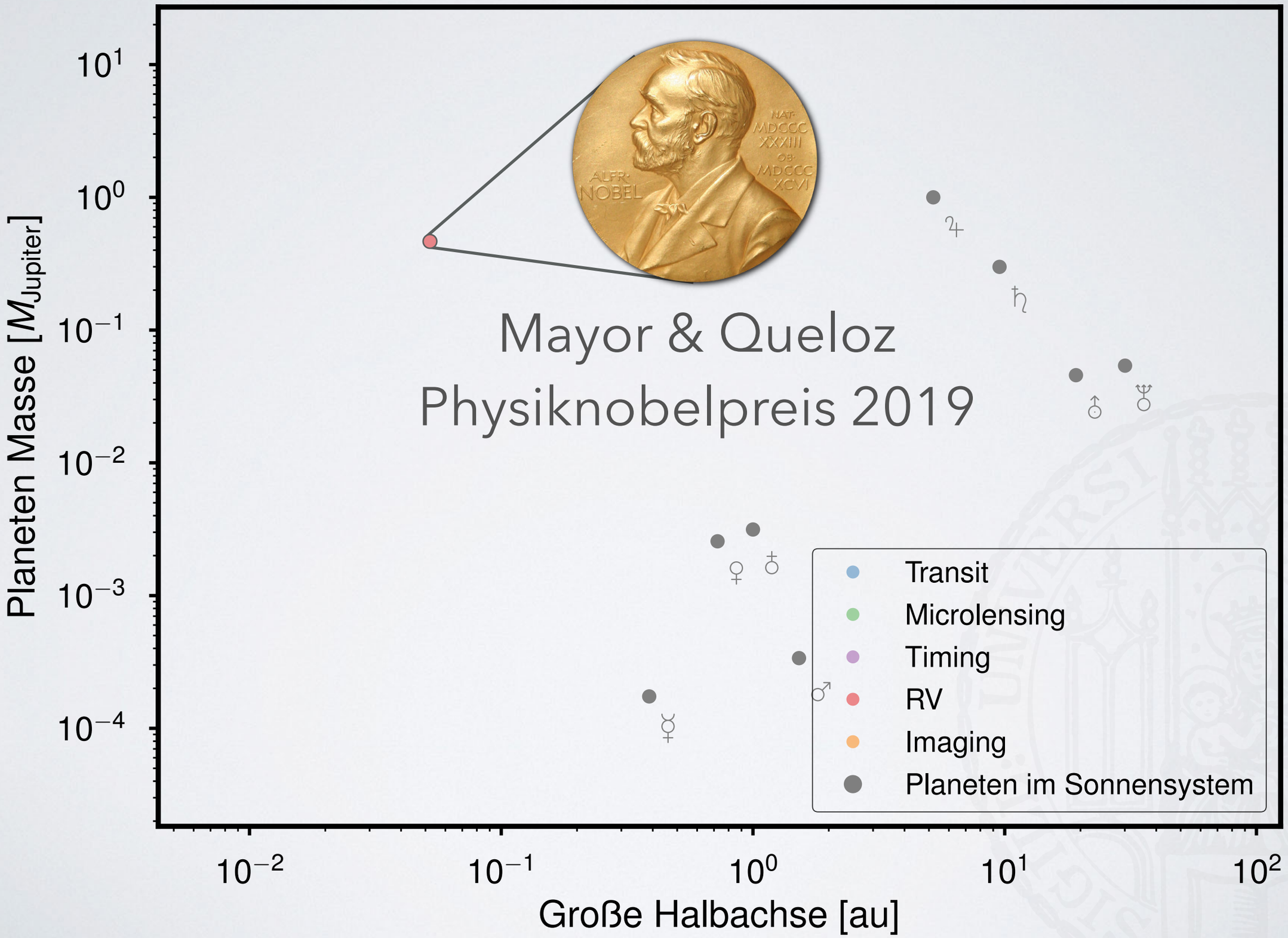
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Motivation: Exoplaneten

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

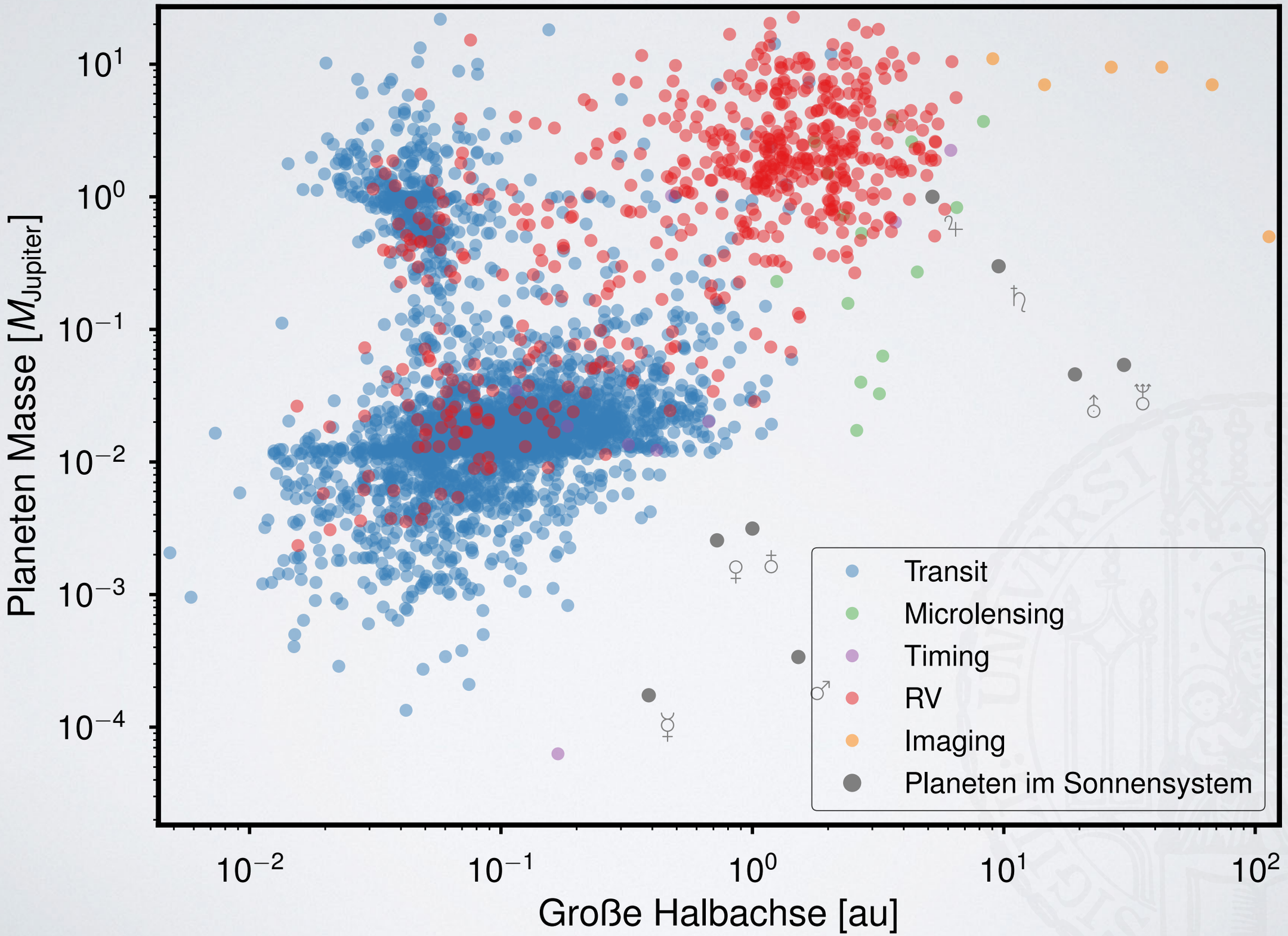
Exoplaneten

Mayor & Queloz
Physiknobelpreis 2019



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Exoplaneten



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

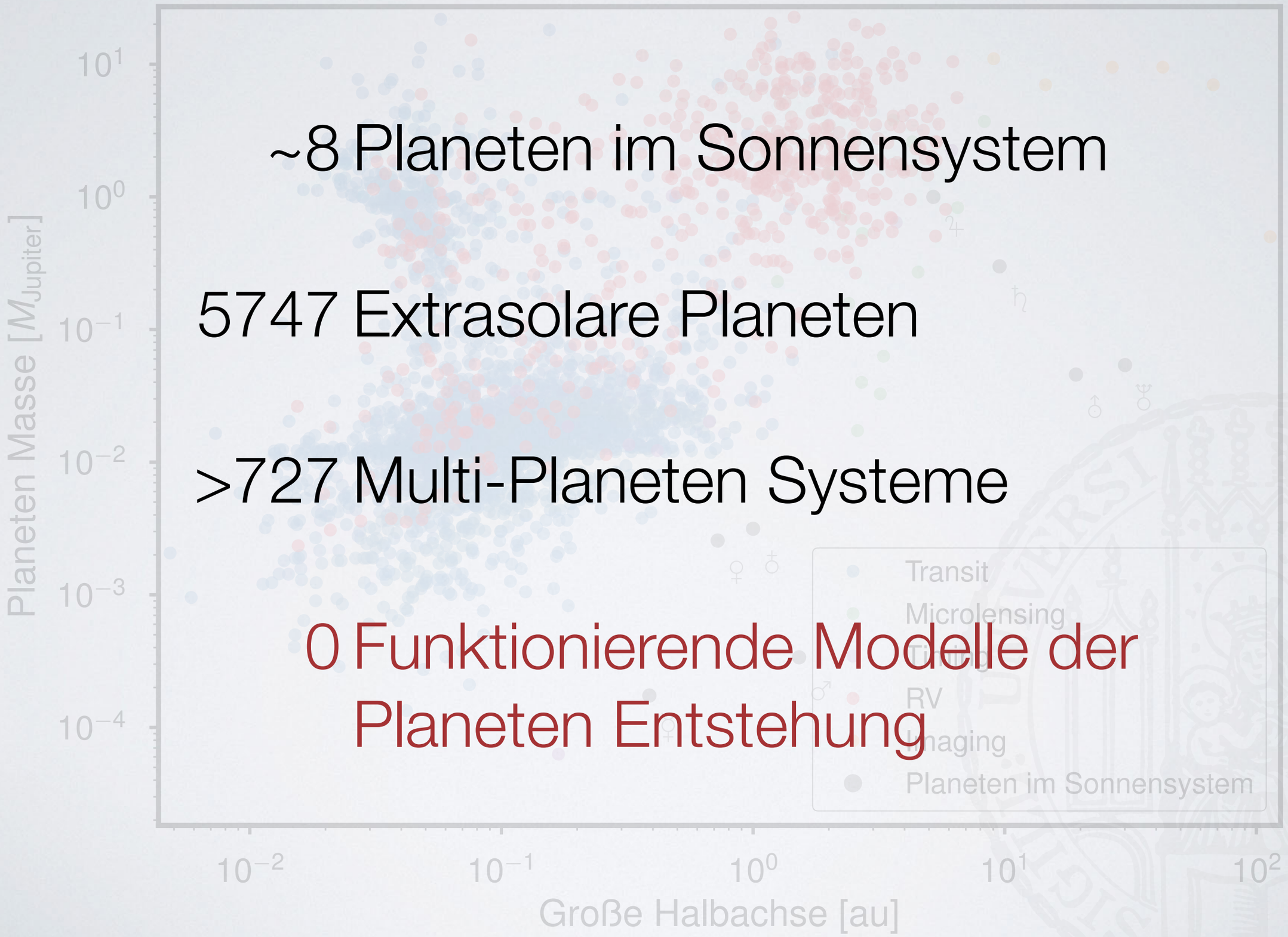
Exoplaneten

~8 Planeten im Sonnensystem

5747 Extrasolare Planeten

>727 Multi-Planeten Systeme

0 Funktionierende Modelle der Planeten Entstehung



Teil 1:

Wie findet man Planeten?

Teil 2:

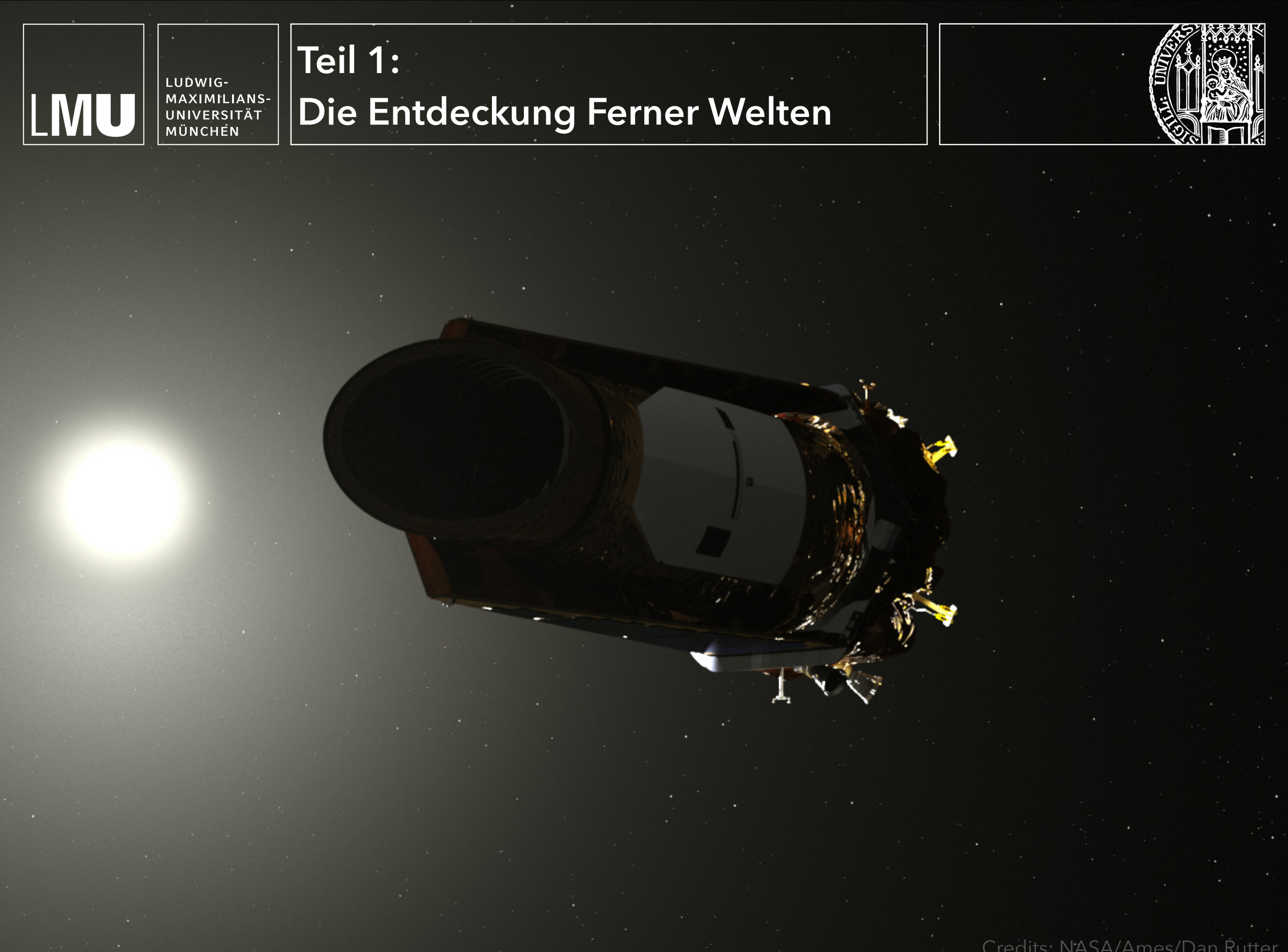
Wie entstehen Planeten?

Teil 3:

Einblick: Aktuelle Forschung

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Teil 1:
Die Entdeckung Ferner Welten



Credits: NASA/Ames/Dan Rutter

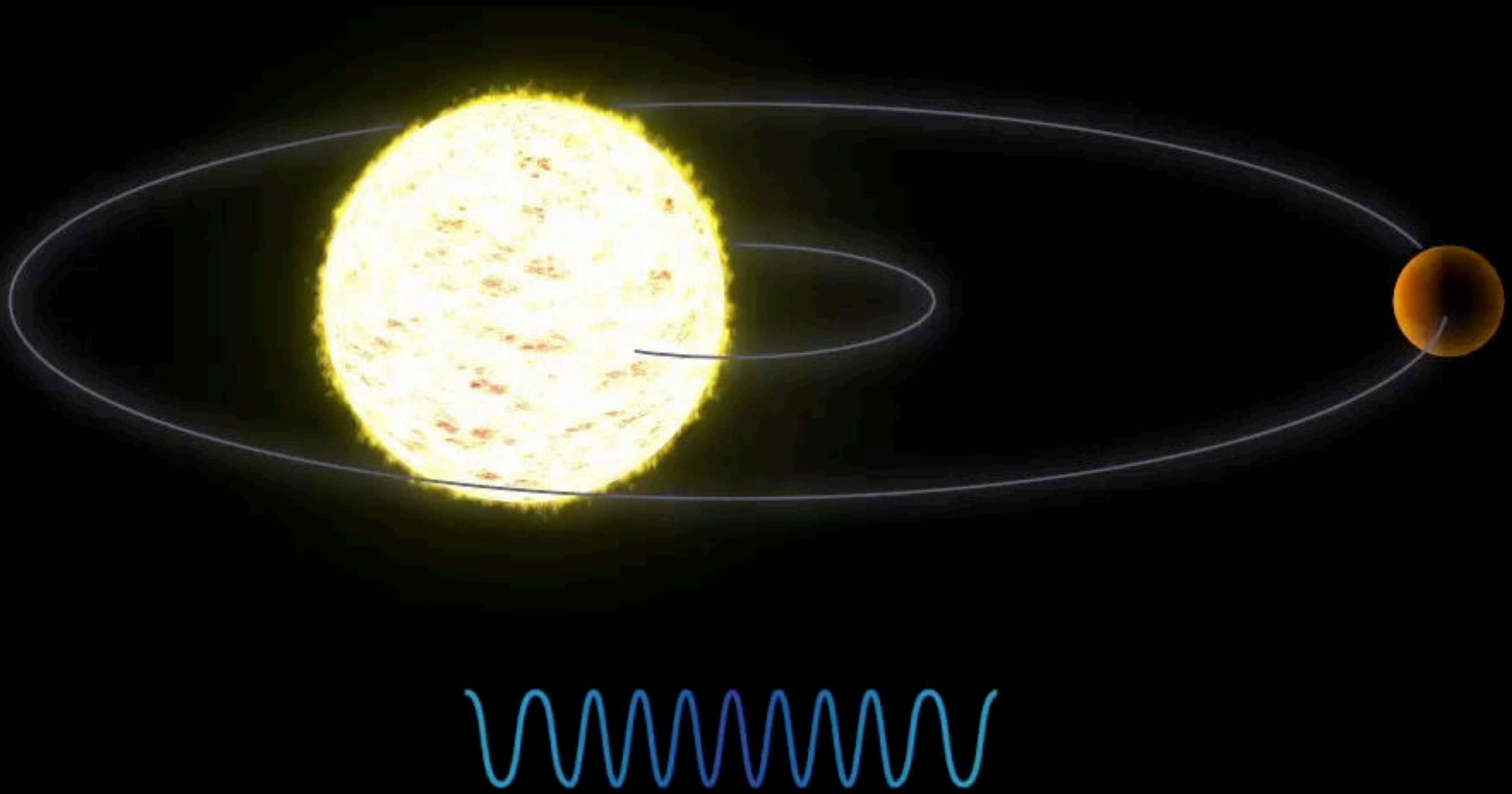
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Radialgeschwindigkeits Methode

https://exoplanets.nasa.gov/interactable/11/

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Radialgeschwindigkeits Methode



https://exoplanets.nasa.gov/interactable/11/

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

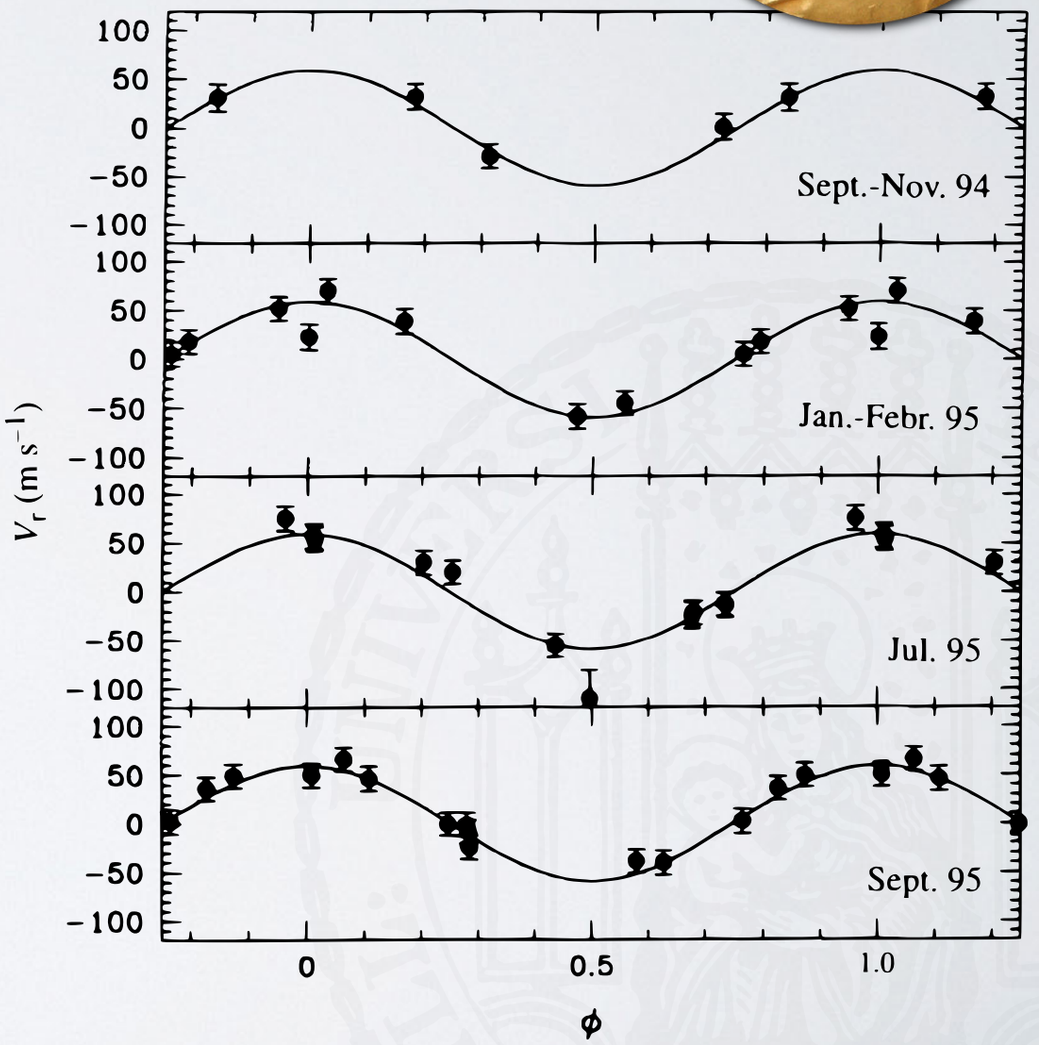
Erste Erfolge

Erste* Entdeckung eines extrasolaren Planeten um einen sonnenähnlichen Stern

Mayor & Queloz (1995)

- Stern: 51 Pegasi
- Planet: Gasriese
- Periode: 4.2 Tage

- Kein Äquivalent im Sonnensystem
- Erster „Hot Jupiter“



* Latham et al. (1989) delektierte einen 11 $M_{Jupiter}$ Planet, aber hielt es für massereicher (Inklinationseffekt)

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Für die Schule: Kepler & Doppler

Kepler:

$$v_\star = v_{planet}\frac{M_{planet}}{M_\star} \propto \frac{M_{planet}}{\sqrt{a_{planet}}}$$

$$v_{planet} = \sqrt{\frac{G\,M_\star}{a_p}}$$

Doppler:

$$\omega = \omega_0 \underbrace{\left(1 + \frac{v_r}{c}\right)}$$

Erde: 1.0000000003

Extreme spektrale Auflösung nötig!
Verschiebung < 1/1000 Pixel!

Gegebene Messgenauigkeit $\Rightarrow v_\star \Rightarrow M_{planet} \propto \sqrt{a_{planet}}$

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

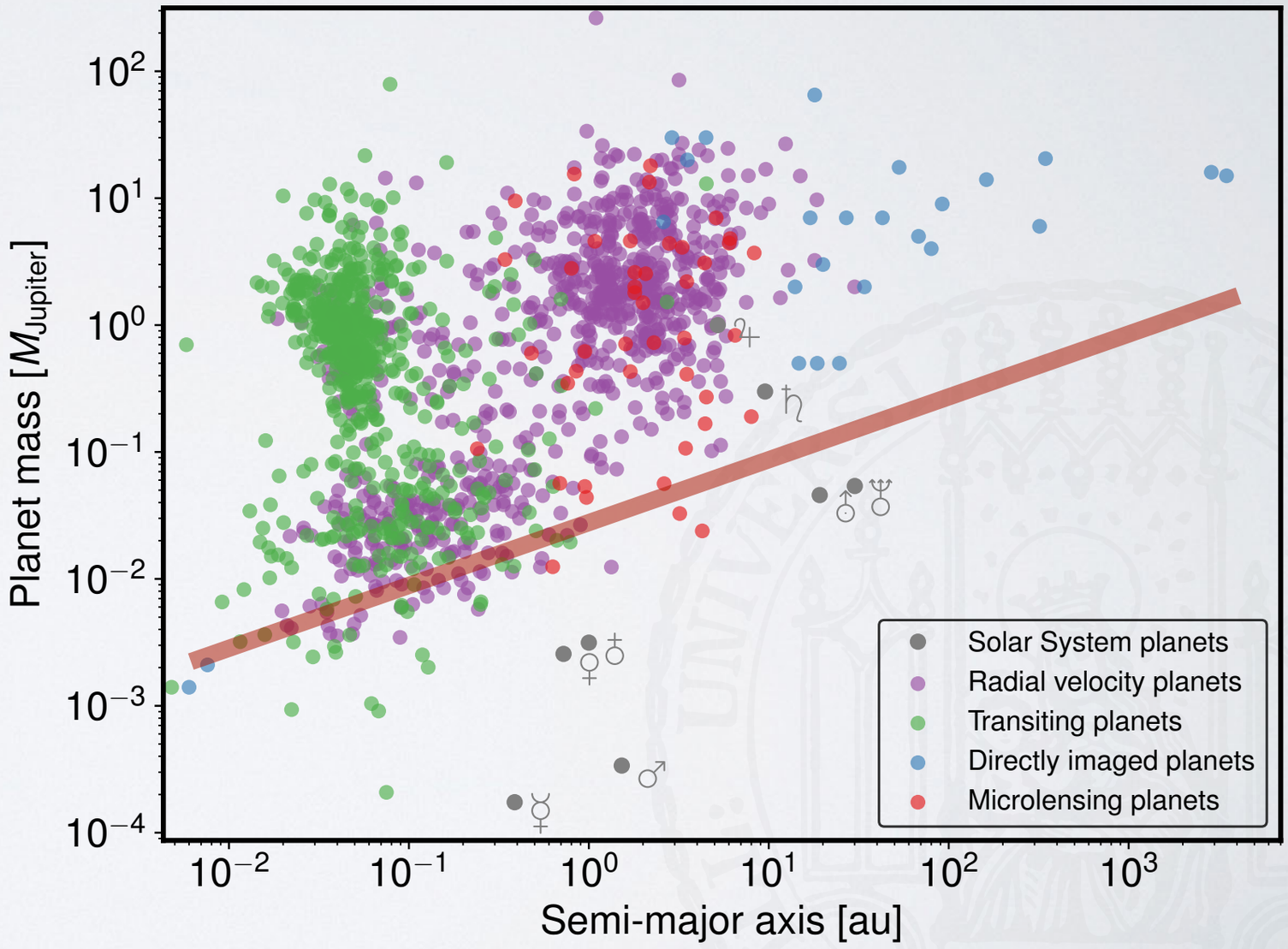
Radialgeschwindigkeits Methode

$$K = \sin i \left(\frac{M_p}{M_\star} \right) \sqrt{\frac{G M_\star}{a}}$$

<u>Beispiel:</u>

Jupiter: 12.5 m/s

Erde: 9 cm/s



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Transit Methode

PLANET QUEST
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

https://exoplanets.nasa.gov/interactable/11/

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Transit Methode

Anteil des ausgeblendeten Lichts *f*

$$f = \left(\frac{R_\mathrm{p}}{R_\star}\right)^2$$

„Jupiter“: $f \sim 10^{-2}$

„Erden“: $f \sim 10^{-4}$

Transitwahrscheinlichkeiten:

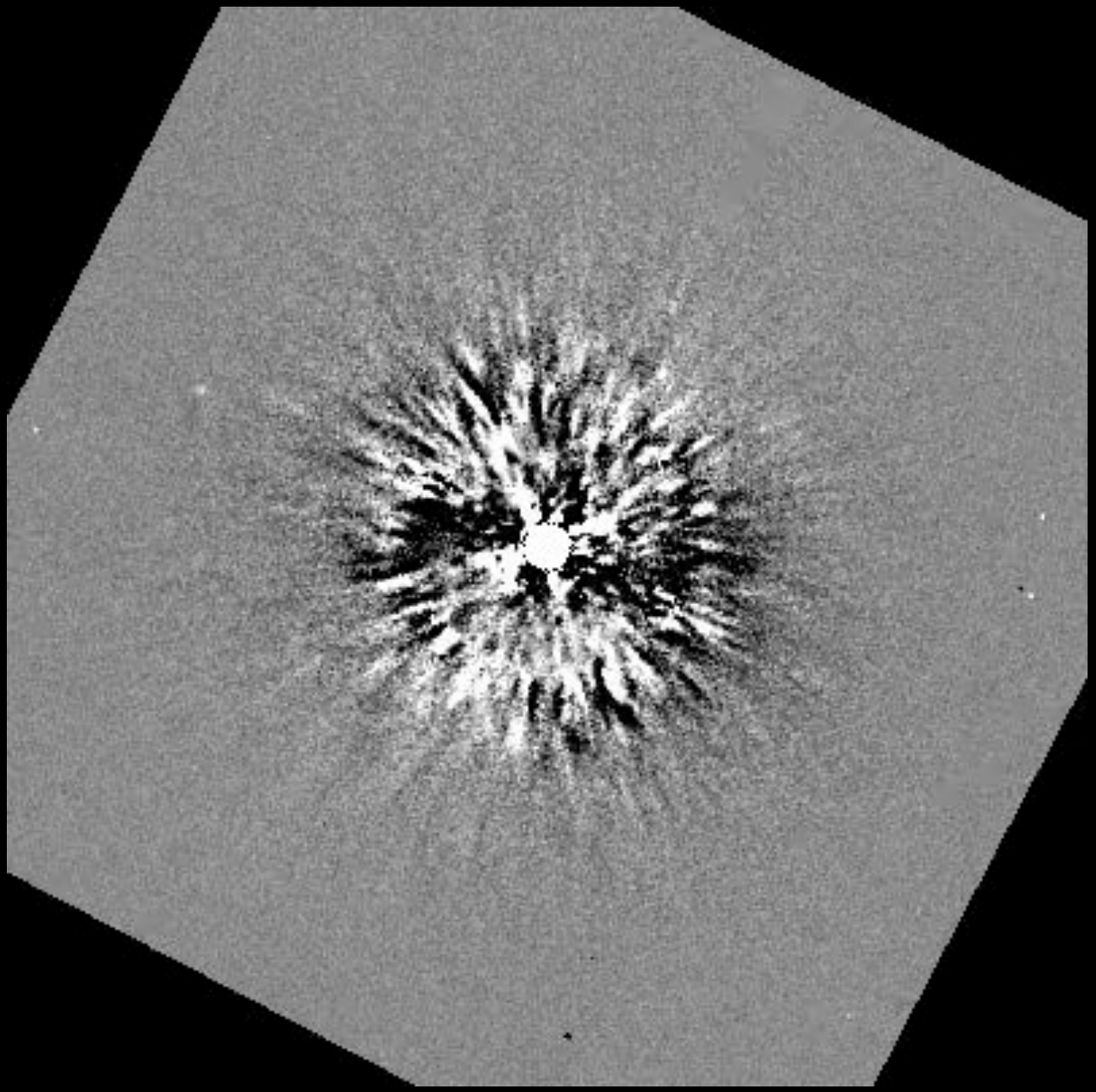
~ 10 % für „Hot Jupiters“

~ 0.5 % für die Erde

Interaktives Beispiel: kurzelinks.de/m8xd
FIDS! Projekt: Transit selber aufnehmen - bald hier verfügbar: kurzelinks.de/695i
WIS! Projekte: kurzelinks.de/mtpi

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

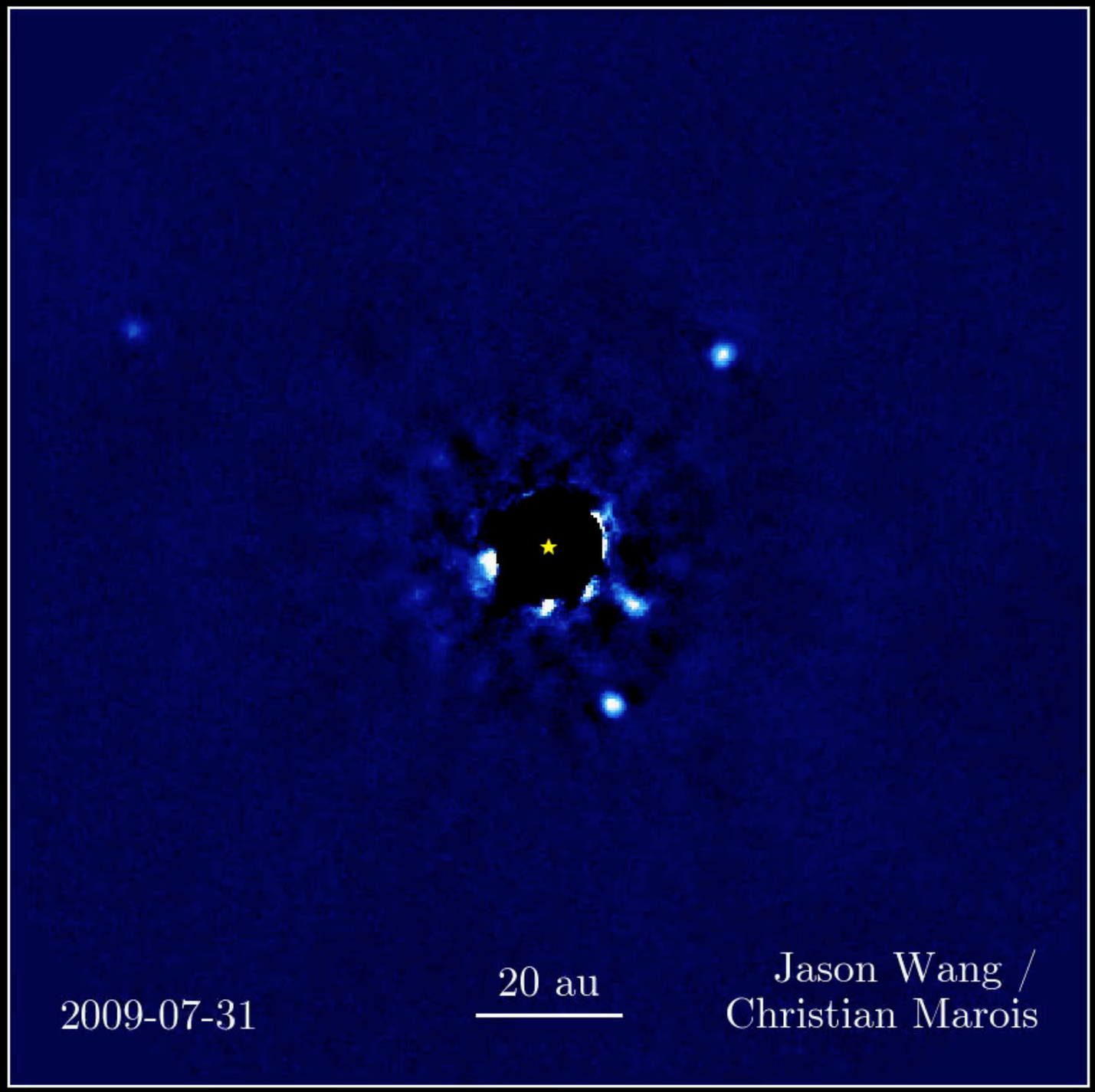
Direkte Abbildung:
Thermische Emission



Courtesy of the SPHERE consortium.

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

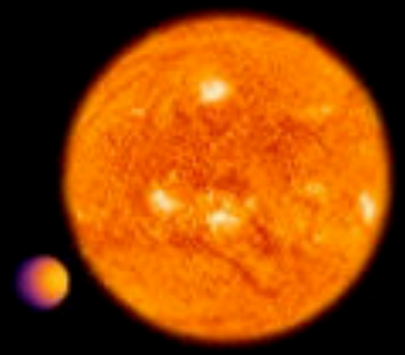
Direkte Abbildung:
Thermische Emission

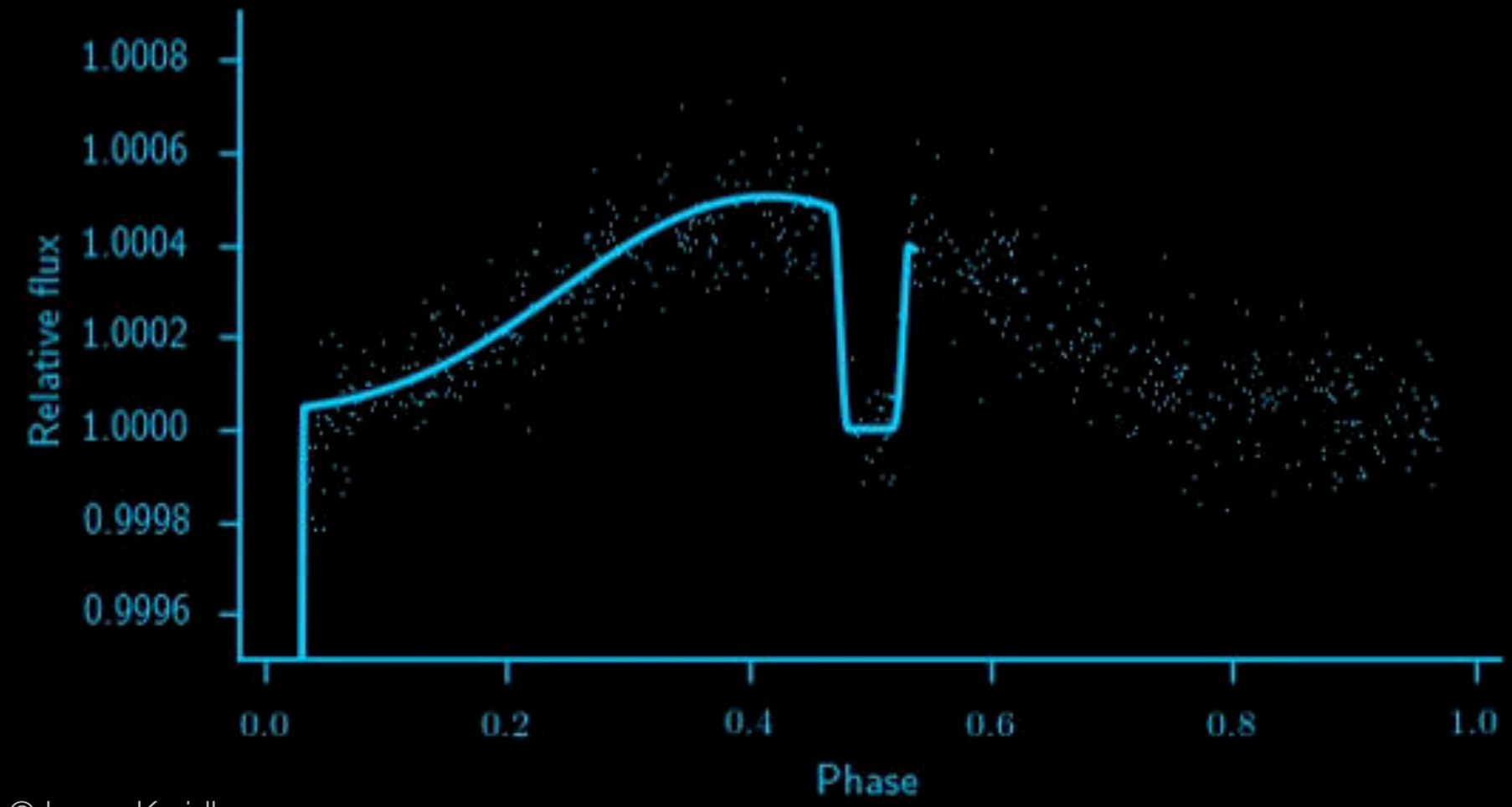


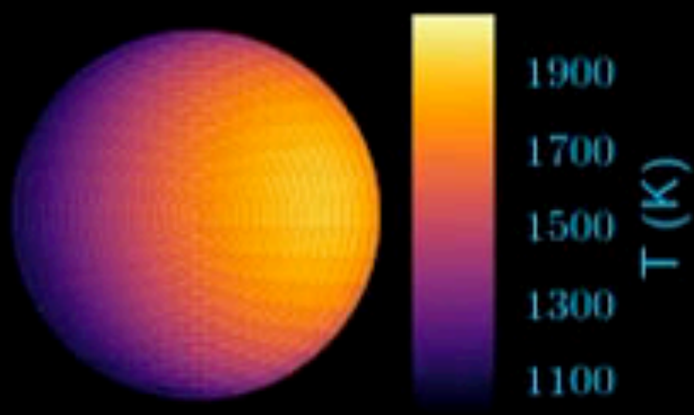
https://exoplanets.nasa.gov/interactable/11/

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Transit Methode weitergedacht







© Laura Kreidberg

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Transmissions-Spektroskopie

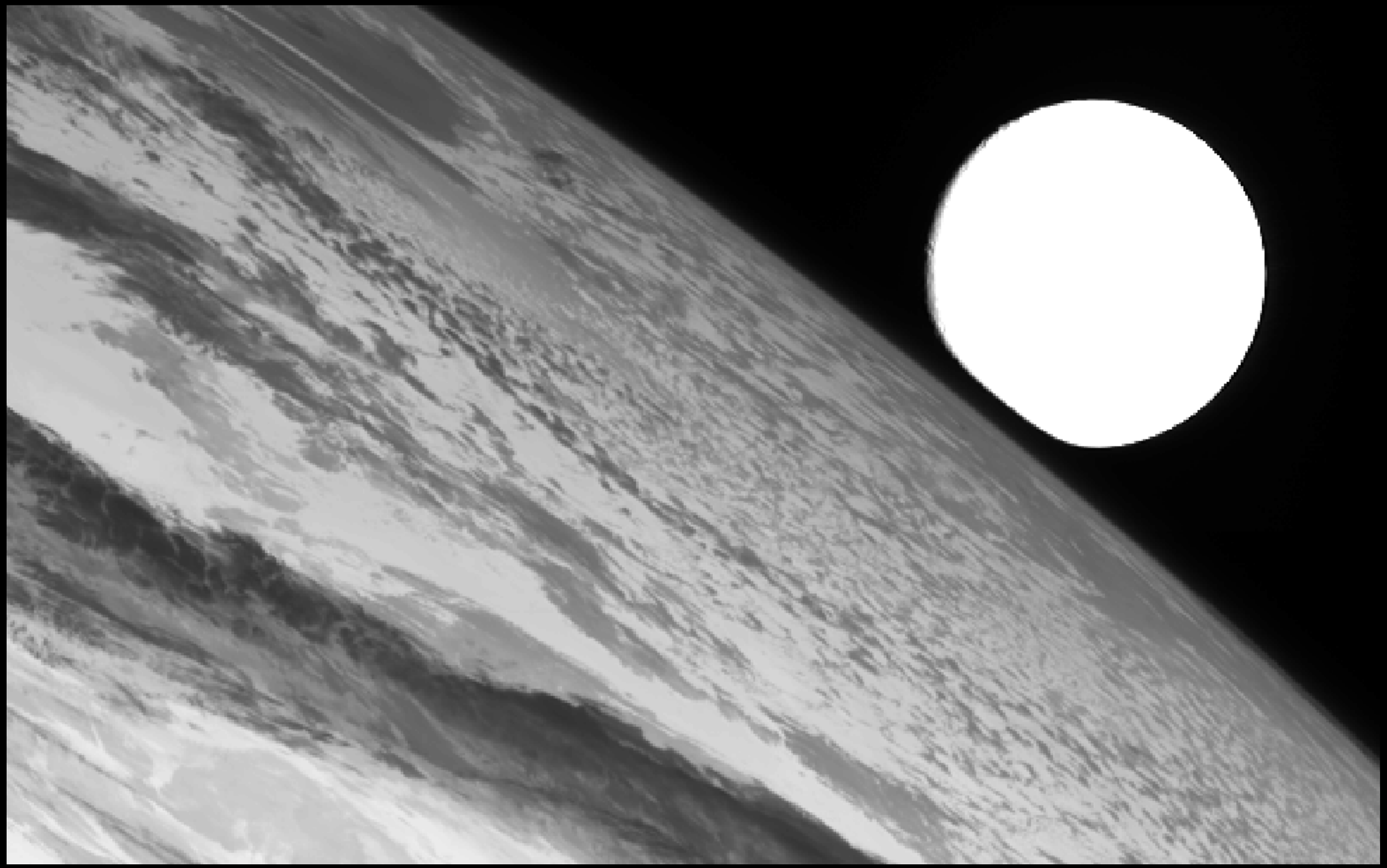
Real color

Credit: Himawary/Simon Proud/Vivien Parmentier

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Transmissions-Spektroskopie

8.6 microns

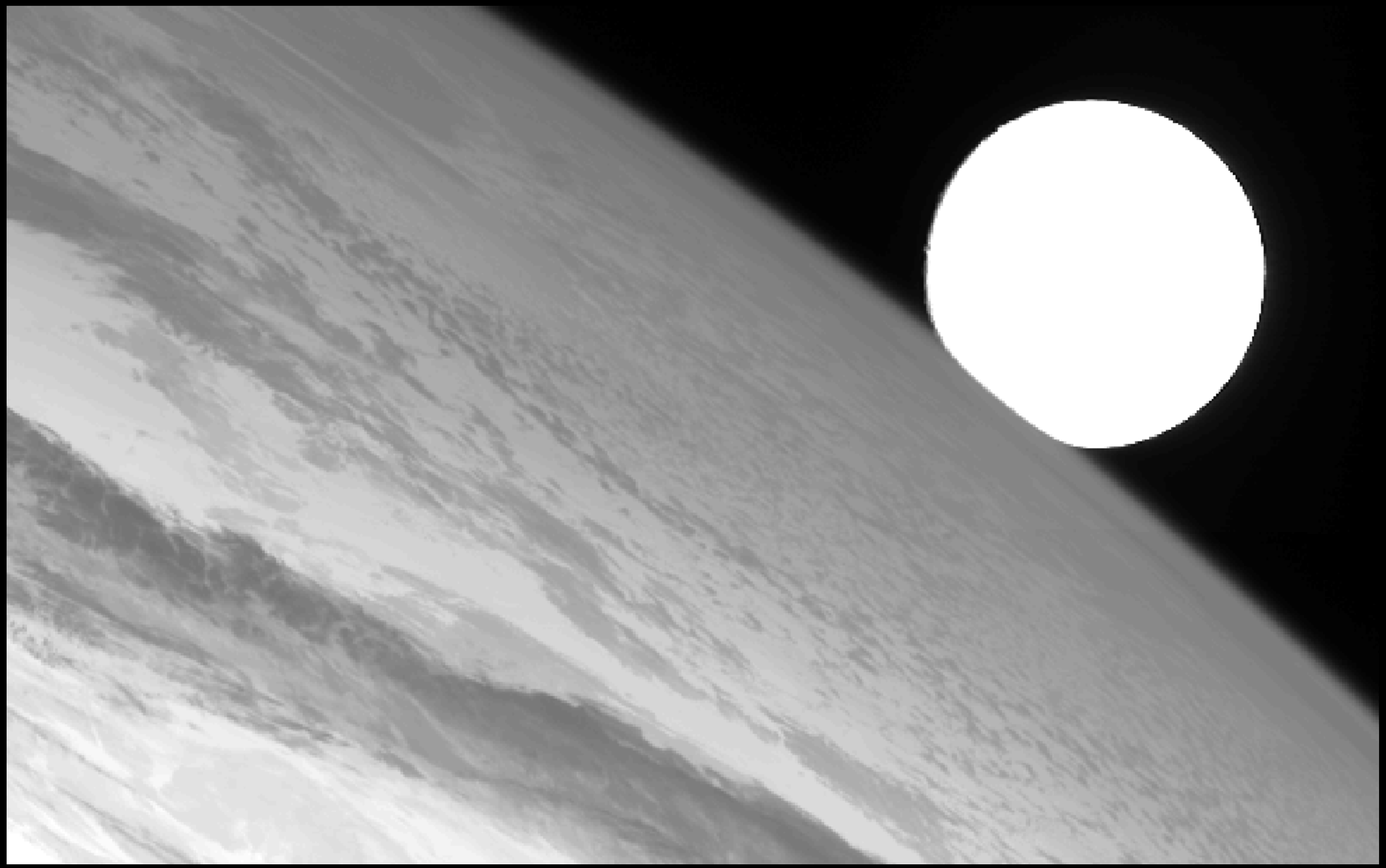


Credit: Himawary/Simon Proud/Vivien Parmentier

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Transmissions-Spektroskopie

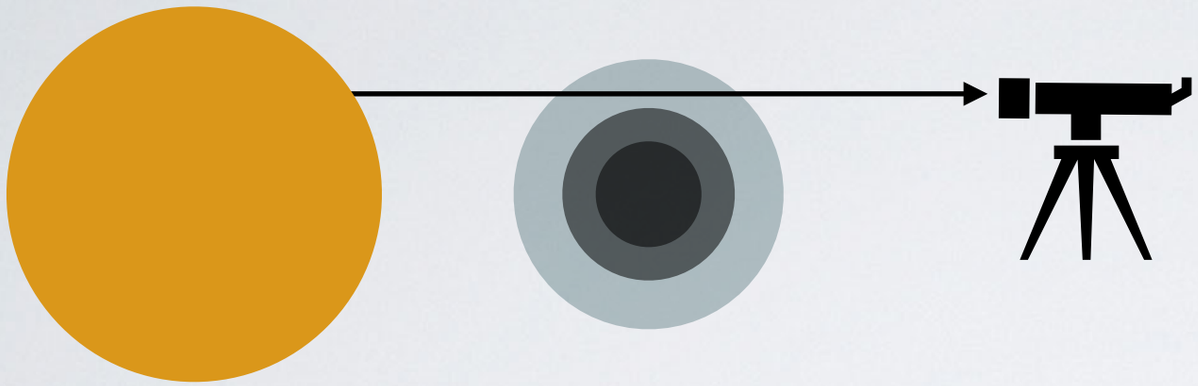
9.6 microns — O_3 band



Credit: Himawary/Simon Proud/Vivien Parmentier

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Was Bringt die Zukunft?



<u>Heute möglich:</u>

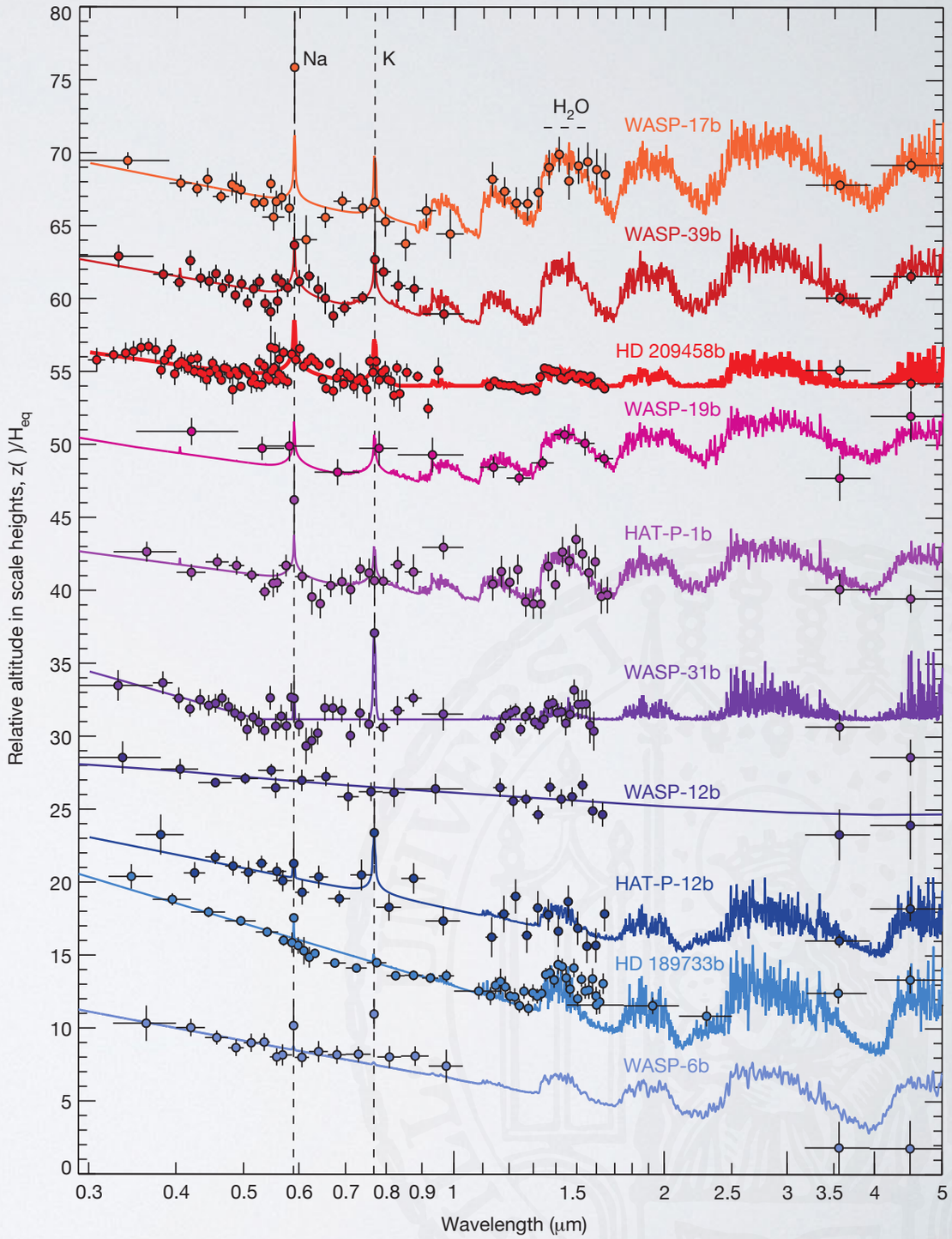
Spektren von Gasriesen →

<u>Zukunft:</u>

Erdähnliche Planeten-Atmosphären

Biomarker!

→ Motivation zum Physikstudium!



Sing et al. 2016

Planeten entdecken

Einfache Konzepte & faszinierende Ergebnisse!

mittl. Anzahl von Planeten pro Stern $= 0.90 \pm 0.03$

Zukunft bleibt spannend! *Science Fiction* wird *Science*.

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

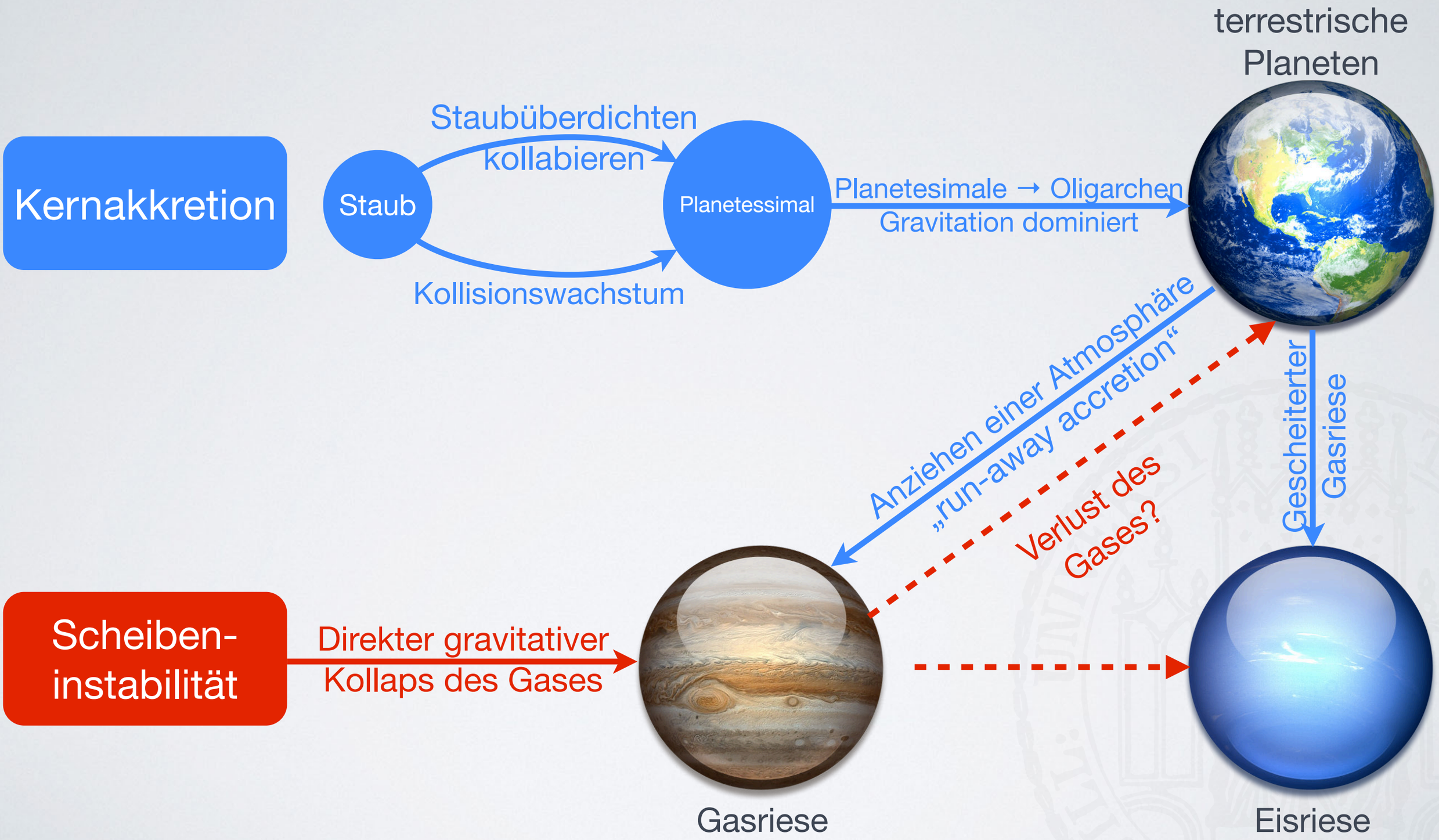
Teil 2:
Entstehung der Planeten

© NASA

© NASA / SwRI / MSSS / Gerald Eichstädt / Seán Doran

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

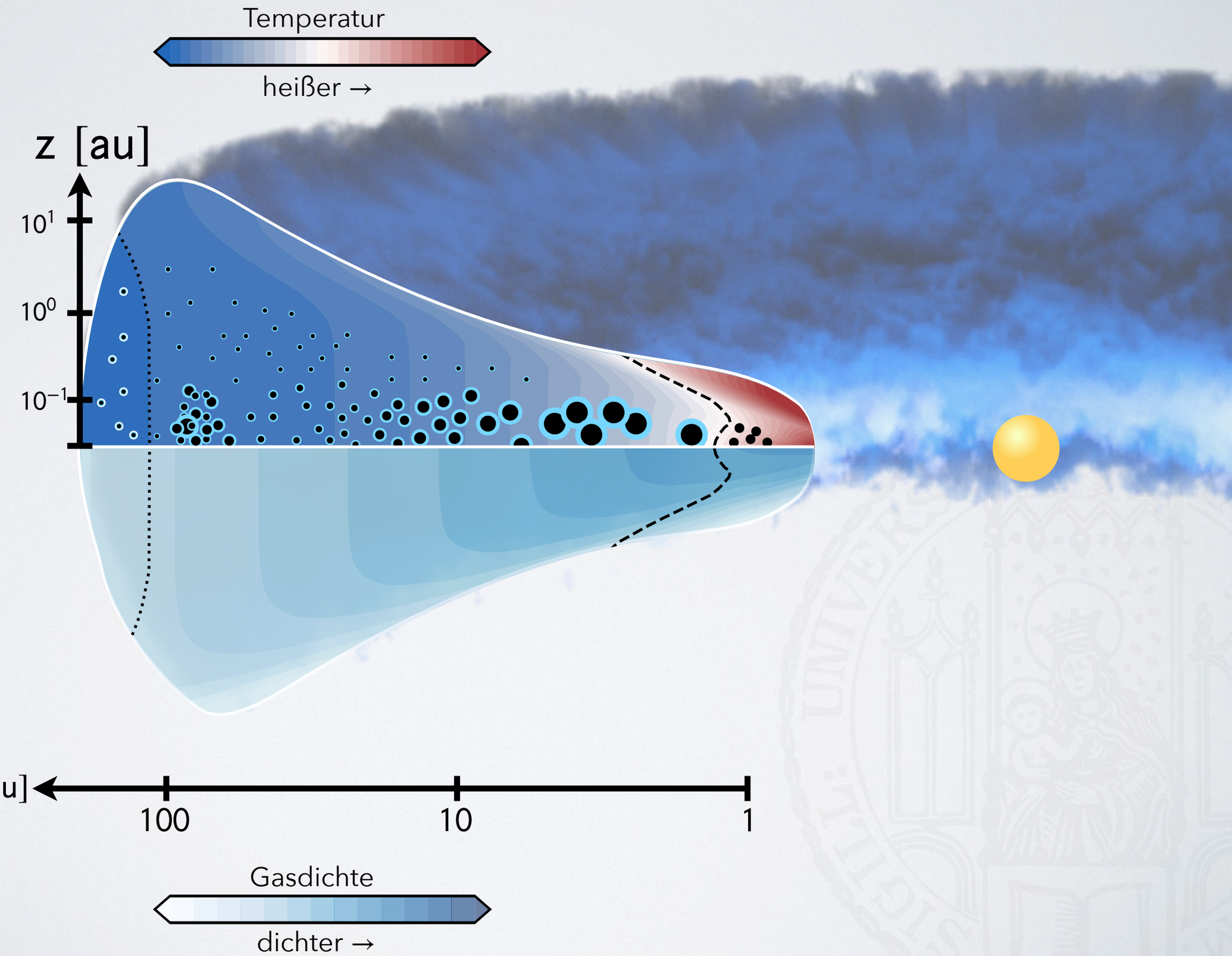
Übersicht: Theorien



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

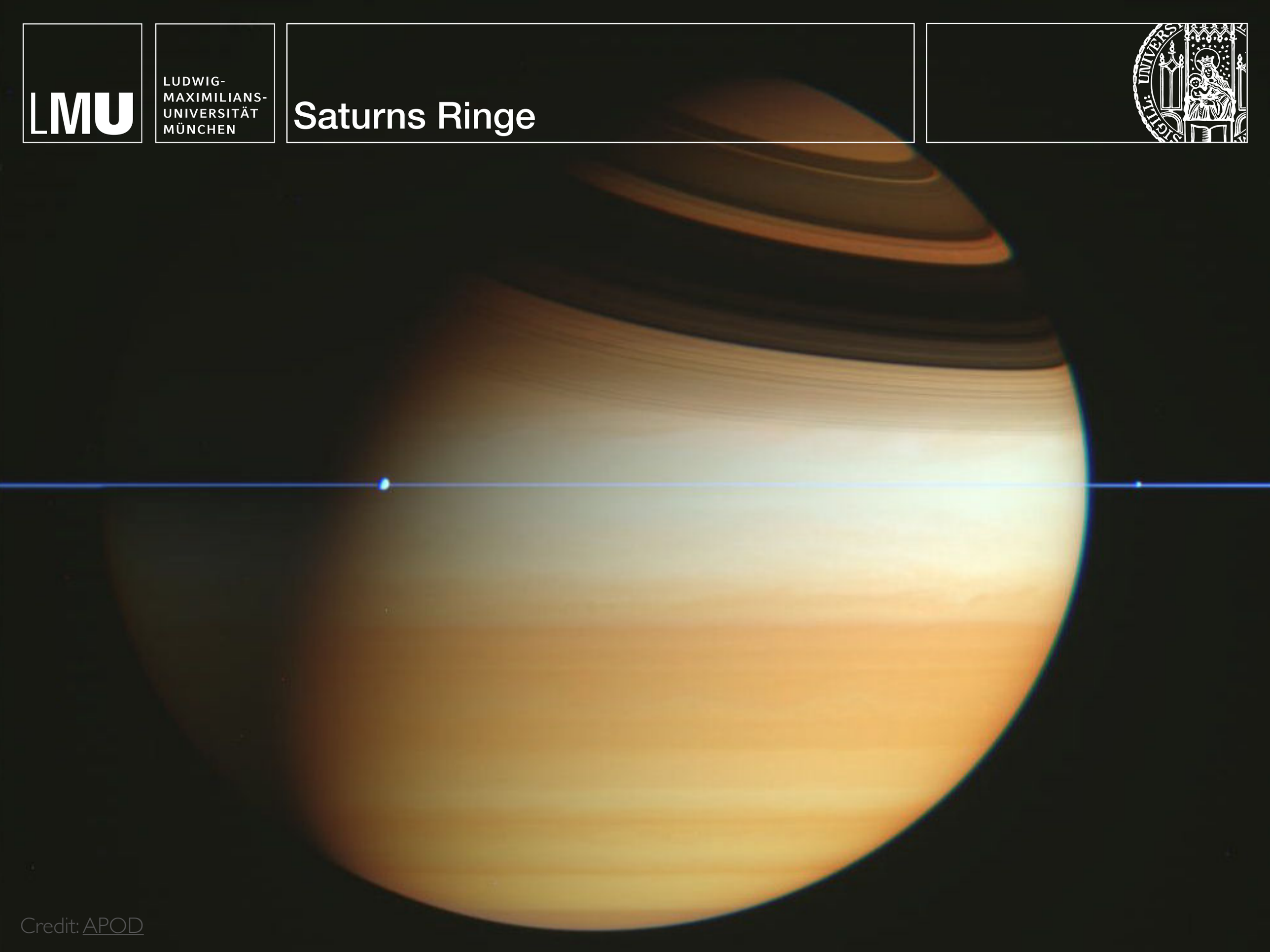
Geburtsstätten der Planeten

99% Gas
1% Staub



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Saturns Ringe



Credit: APOD

LMU LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Die Entwicklung einer um einen Zentralkörper rotierenden Gasmasse

I. Lösungen der hydrodynamischen Gleichungen mit turbulenter Reibung

Von Reimar Lüst

Aus dem Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen

(Z. Naturforschg. 7a, 87–98 [1952]; eingegangen am 6. September 1951)

Herrn Professor Werner Heisenberg zum 50. Geburtstag

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Protoplanetare Scheibe

Staub & Gas verhalten sich
unterschiedlich aber nicht **unabhängig**!

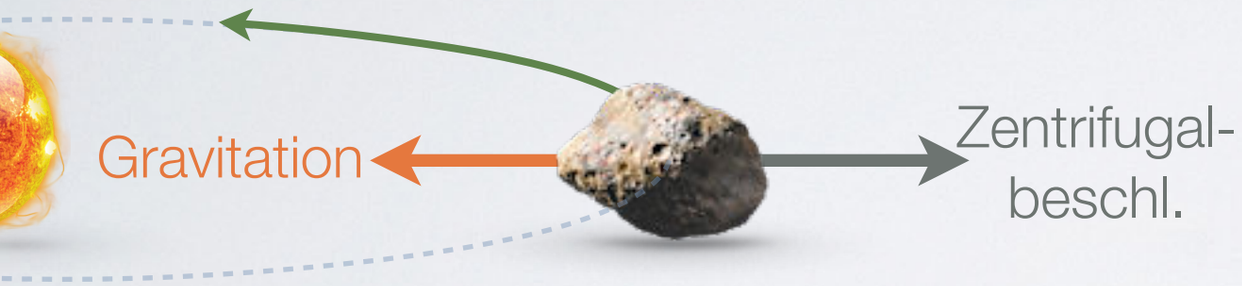
https://youtu.be/p_f6lWWc9jQ

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Radiale Drift

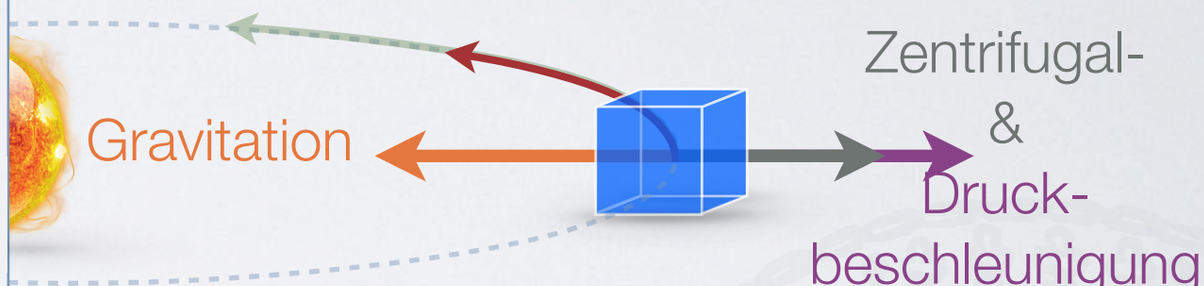
Festkörper

Kepler Geschwindigkeit



Gas

sub-Kepler Geschwindigkeit

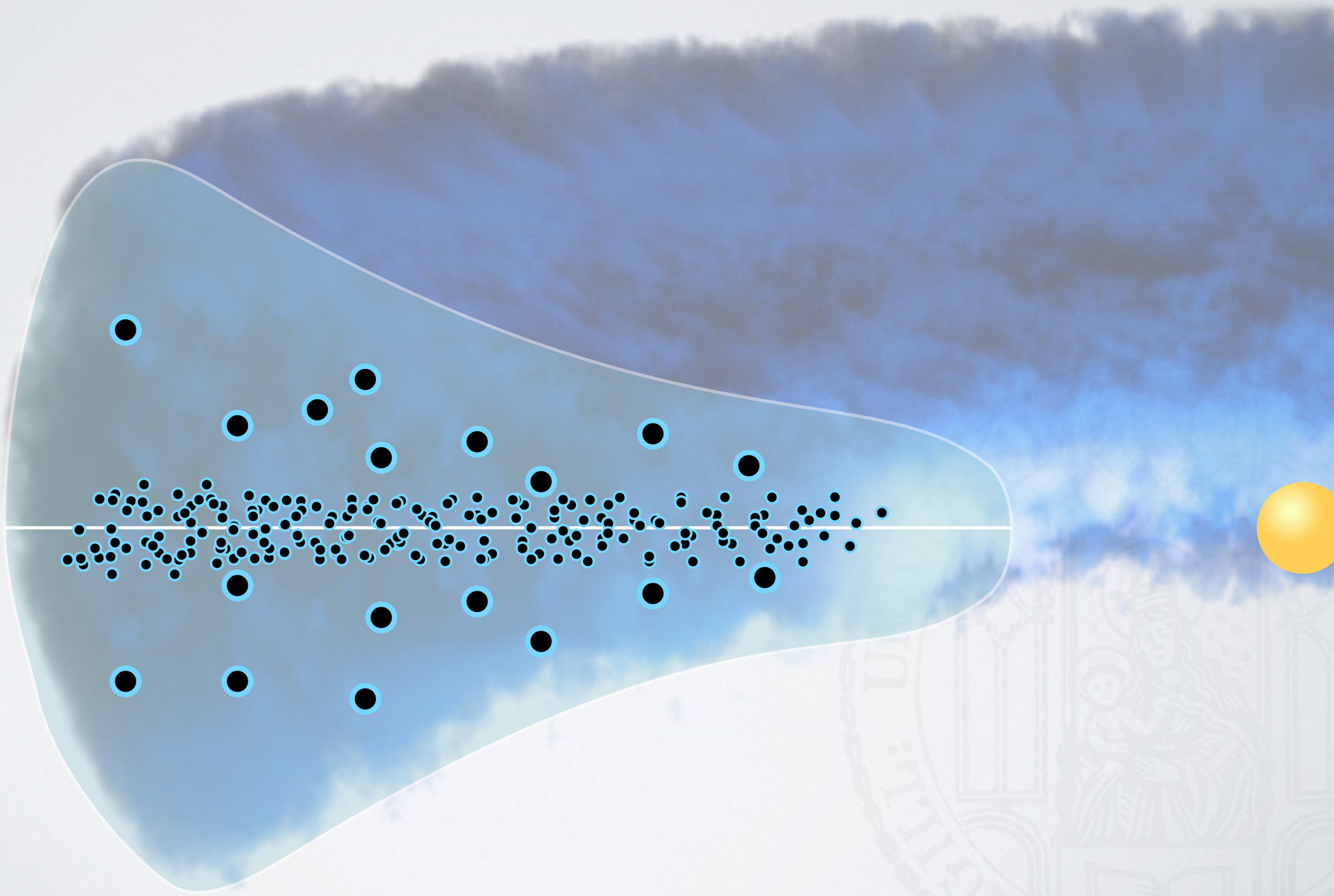


$$\frac{v_{\phi,\mathrm{gas}}^2}{r} = \frac{\mathrm{G}\,M_\star}{r^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}r} \xrightarrow{P = P_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\gamma_\mathrm{P}}} v_{\phi,\mathrm{gas}} = v_\mathrm{K}\sqrt{1 - \gamma_\mathrm{p}\left(\frac{H}{r}\right)^2}$$

typischerweise ~ 30-60 m/s langsamer Kepler

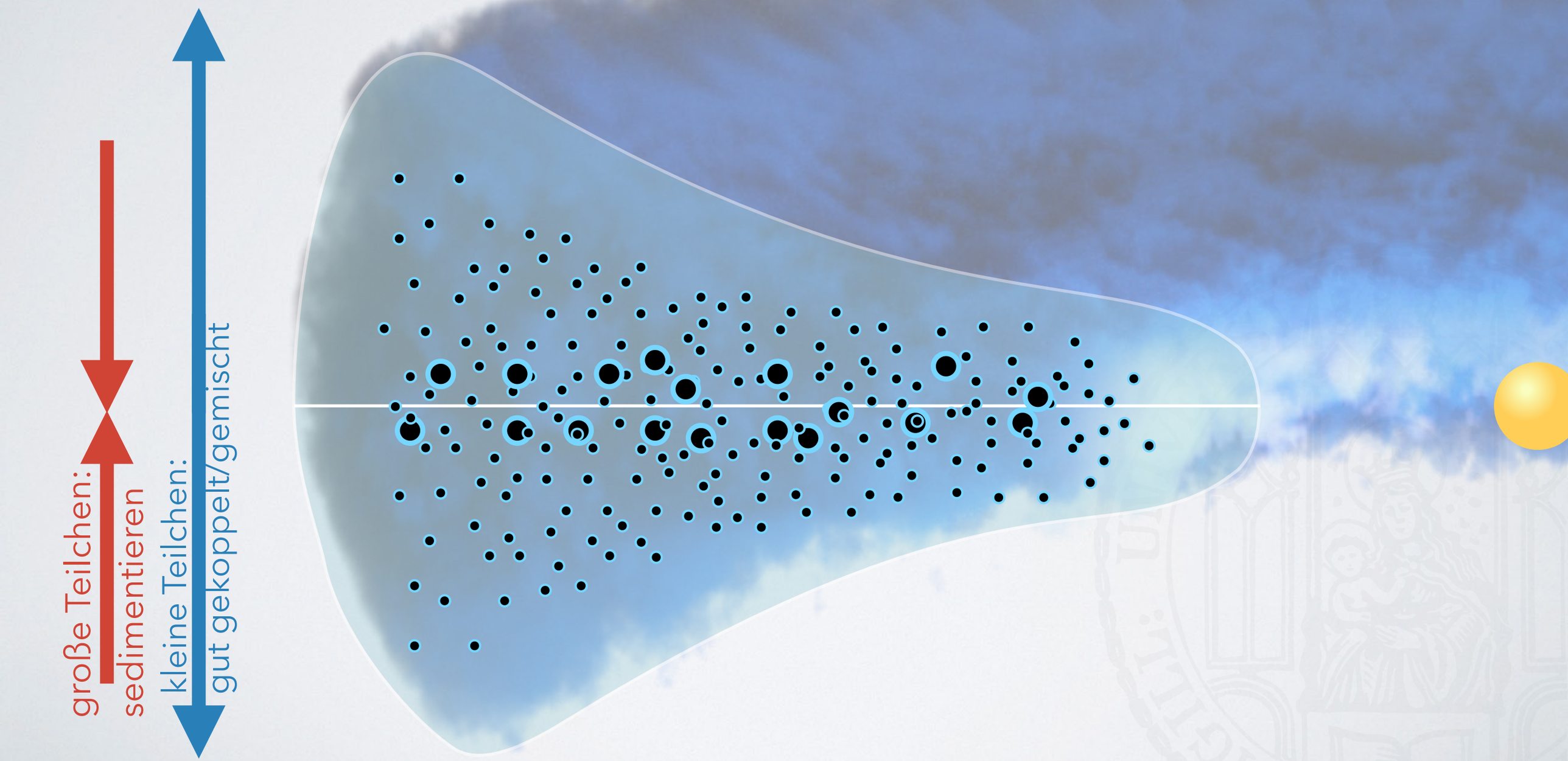
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Drift & Turbulente Mischung



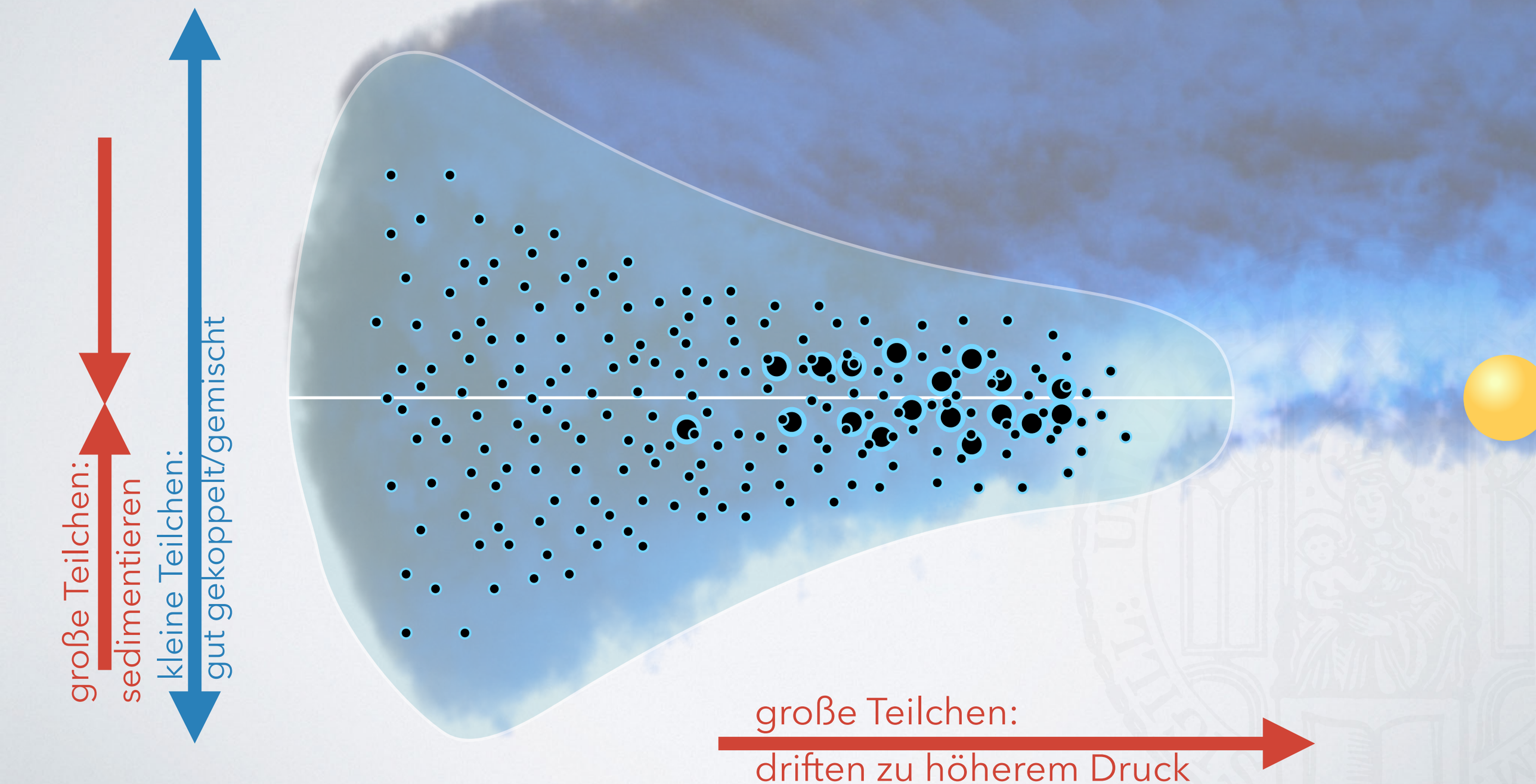
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Drift & Turbulente Mischung



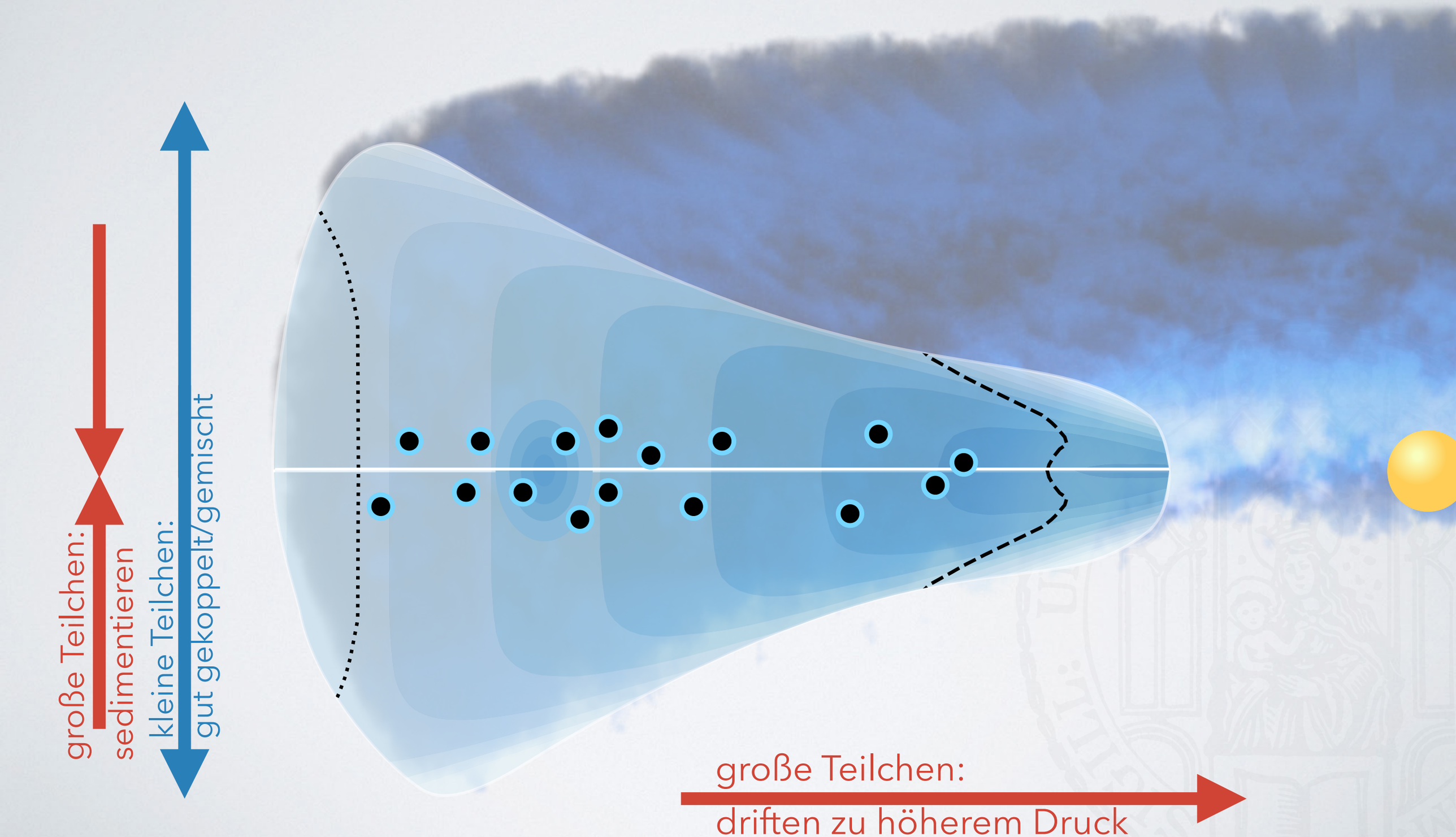
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Drift & Turbulente Mischung



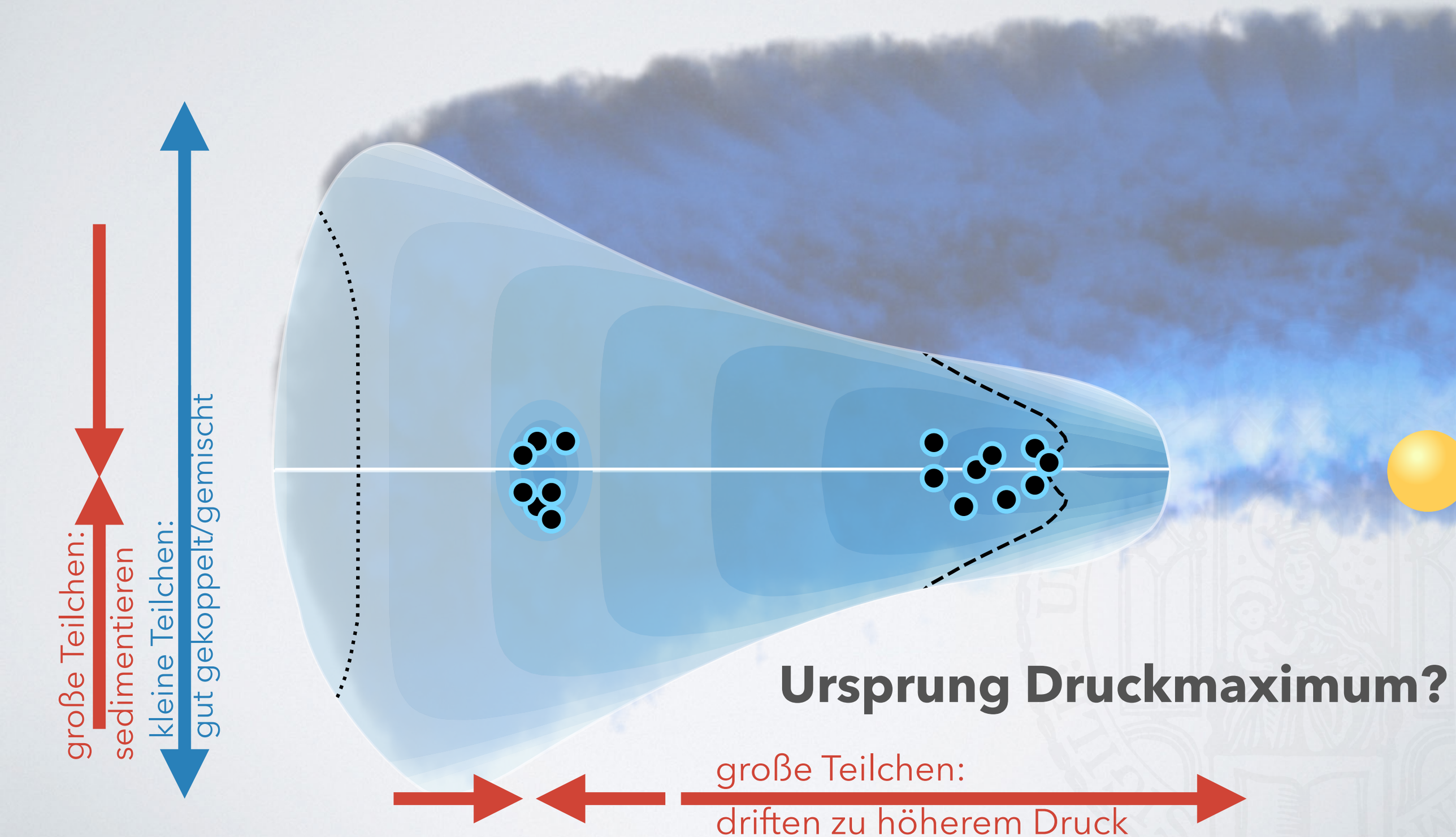
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Drift & Turbulente Mischung



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

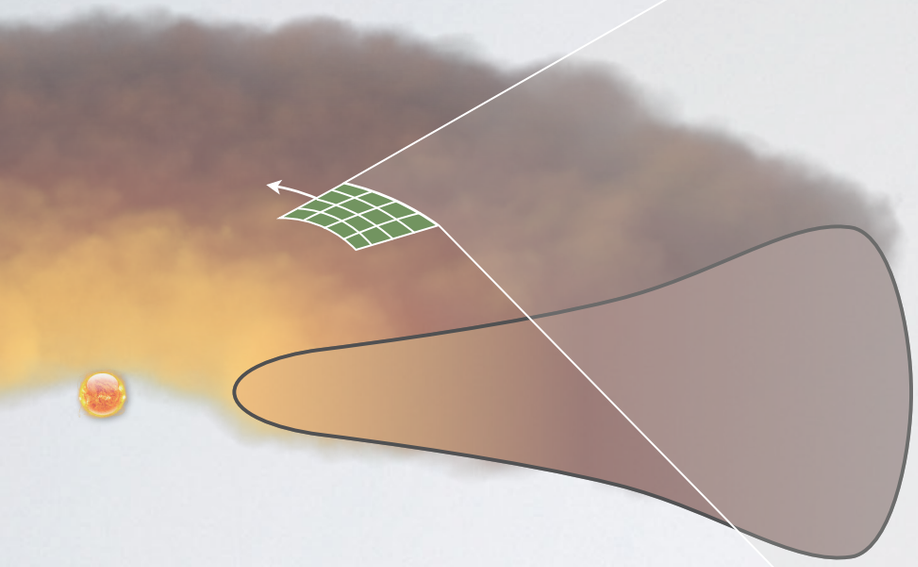
Drift & Turbulente Mischung

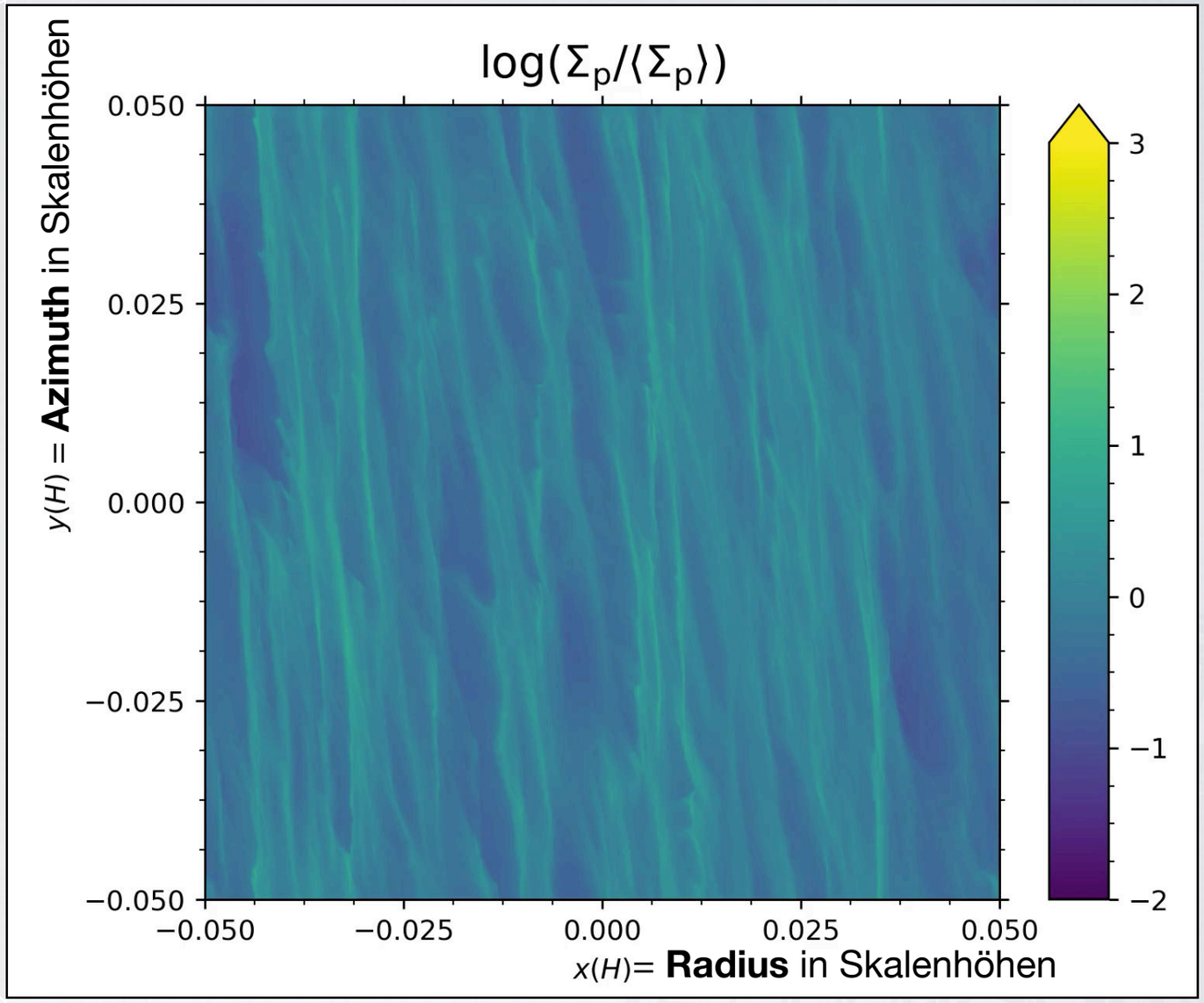


Ursprung Druckmaximum?

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Gravoturbulente Planetesimal Entstehung





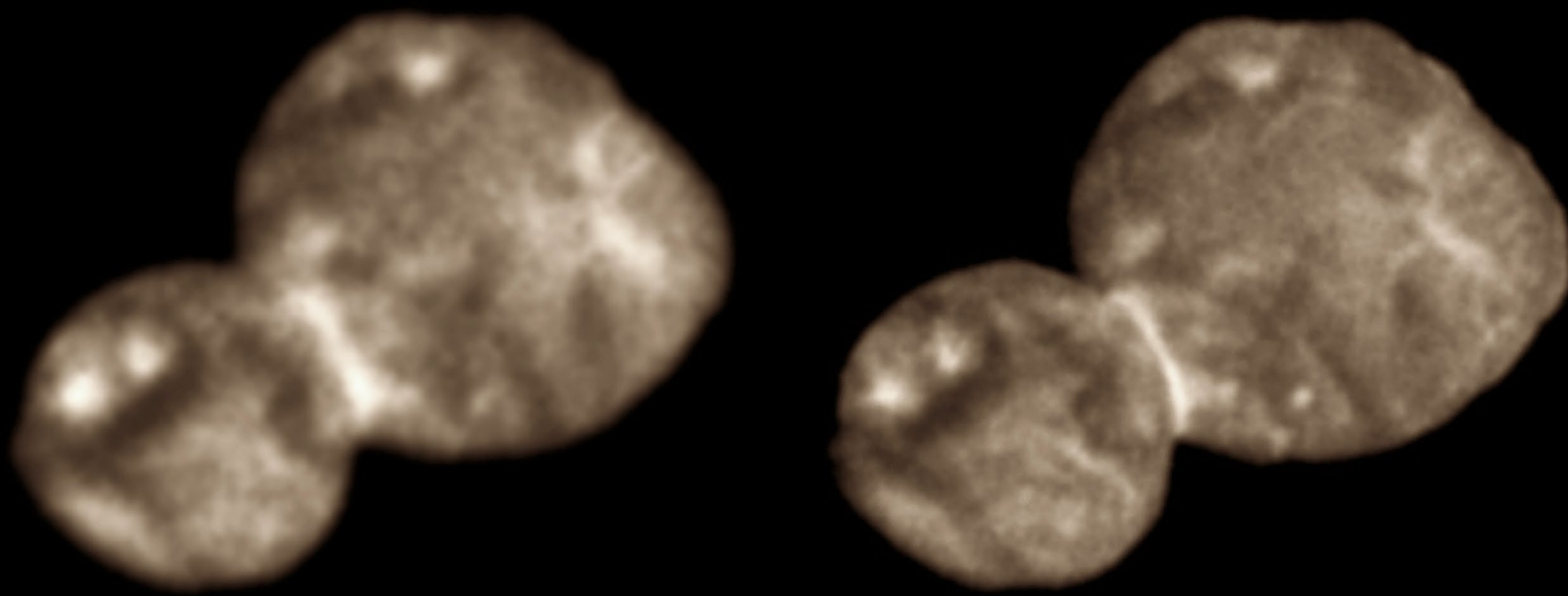
Benötigt: - "große" Teilchen

- Staubüberdichten (~3% statt 1%)

Nesvorny et al. 2019

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

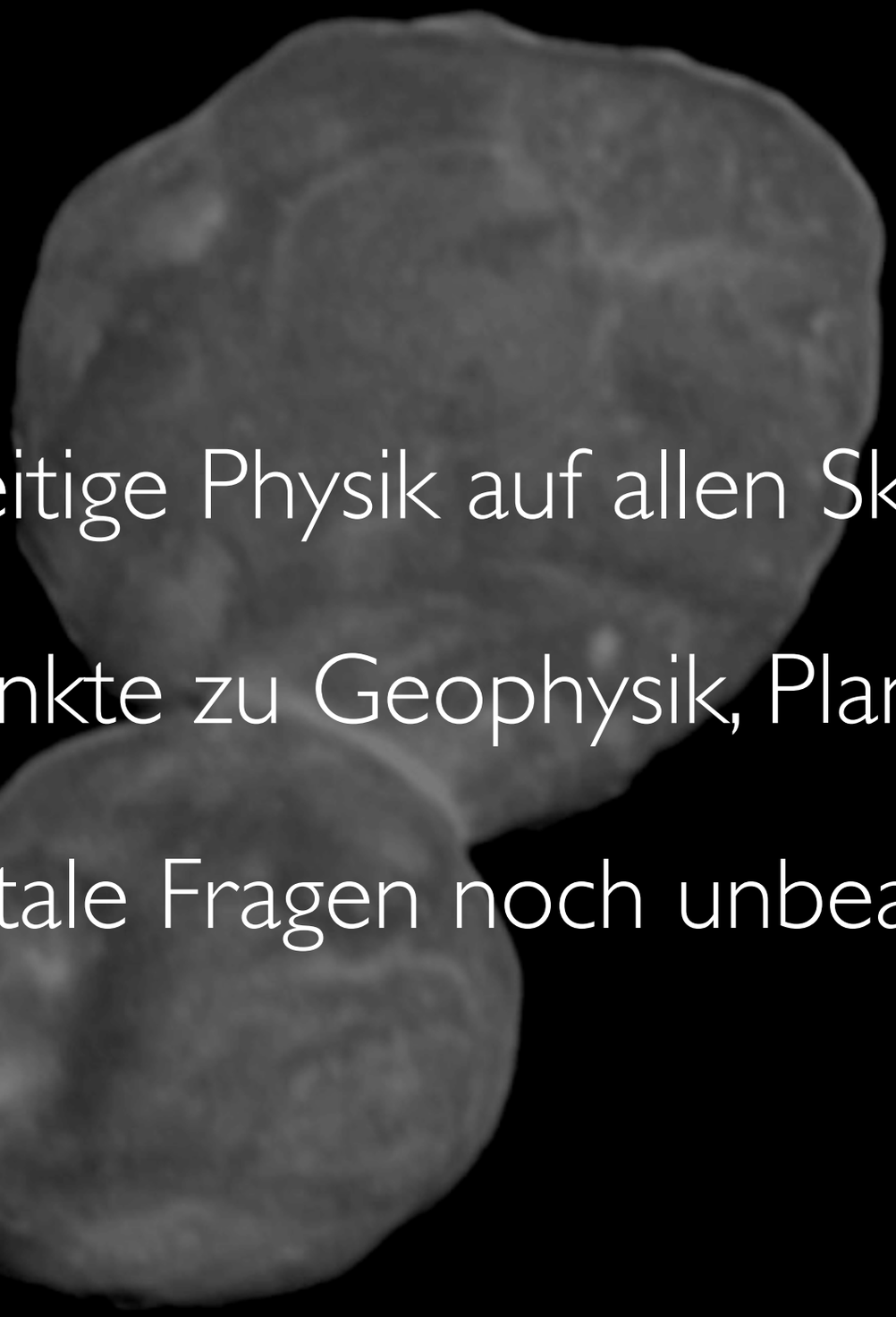
Arrokoth



Credit: Dr. Brian May

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Teil 2 – Zusammenfassung



Vielseitige Physik auf allen Skalen

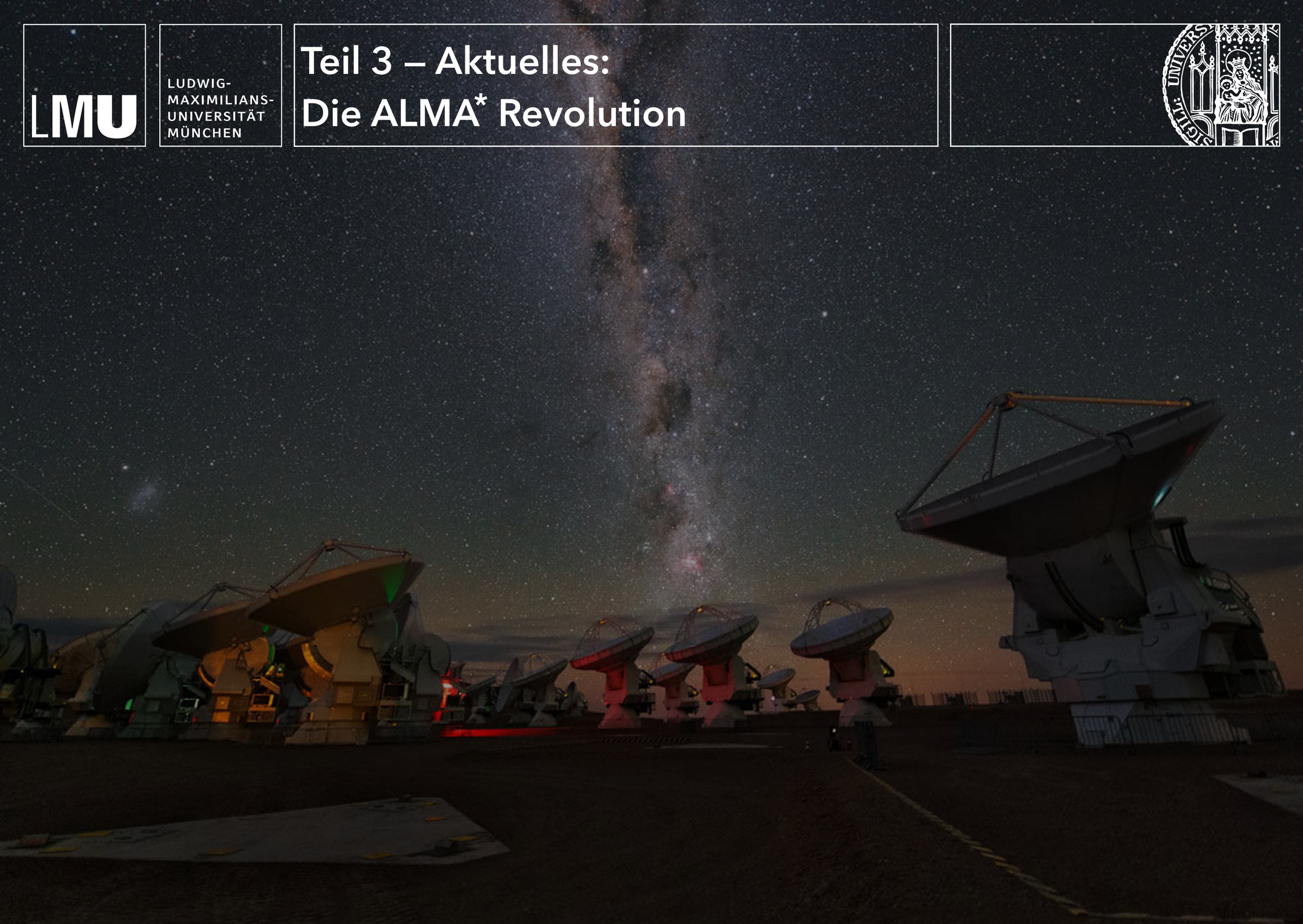
Anschlusspunkte zu Geophysik, Planetologie, ...

Fundamentale Fragen noch unbeantwortet

NASA / JHUAPL / SwRI / Roman Tkachenko

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Teil 3 – Aktuelles: Die ALMA* Revolution



*Atacama Large Millimeter/sub-Millimeter Array

$1'' = \frac{1}{3600}$ Grad

30 au

Thermische Strahlung
von Festkörpern ≲ 1 cm
Kwon et al. 2011

1
0
−1
$\Delta\delta$ [′′]

1
0
−1
$\Delta\alpha$ [′′]

$1'' = \frac{1}{3600}$ Grad

Lücken

Neptuns Orbit = 30 au

30 au

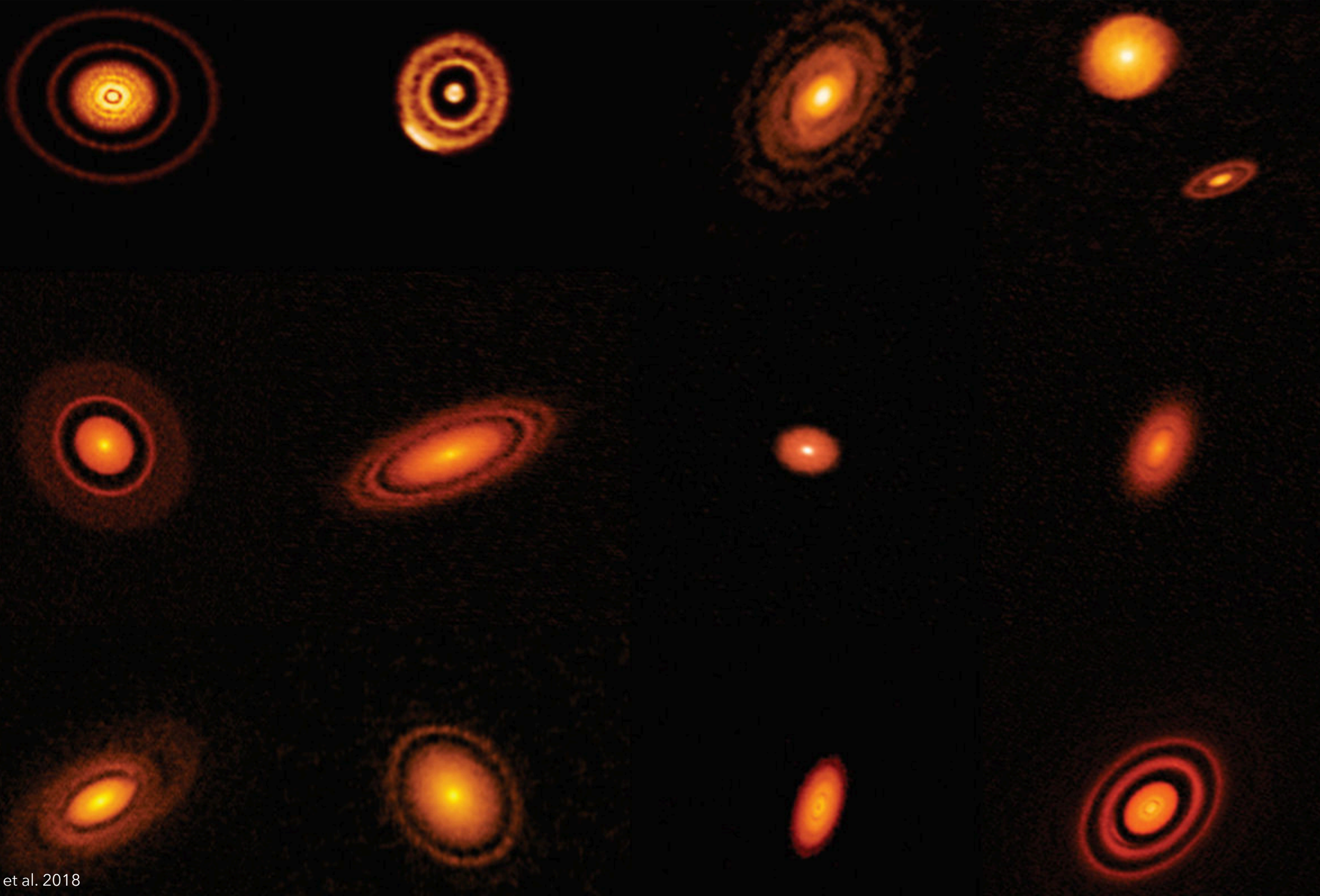
Thermische Strahlung
von Festkörpern ≲ 1 cm
ALMA Partnership 2015

1
0
−1
$\Delta\delta$ [″]

1
0
−1
$\Delta\alpha$ [″]

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Das DSHARP Projekt



Andrews et al. 2018

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Das DSHARP Projekt

München 18°

Shop Jobs Immobilien An

Login

Süddeutsche Zeitung

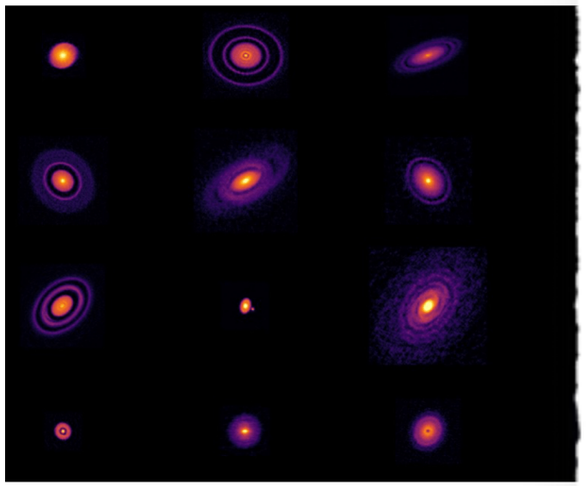
SZ.de Zeitung Magazin

Politik Wirtschaft Meinung Panorama Sport München Bayern Kultur Gesellschaft Wissen Digital Karriere Reise Auto mehr...

Home > Wissen > Astronomie und Raumfahrt > Teleskop in Chile fotografiert Geburt von Planeten

13. Dezember 2018, 14:11 Uhr Astronomie

Im Kreißsaal der Planeten



Aufnahmen des Alma-Observatoriums von jungen Sternsystemen (Foto: ALM

Forbes

Billionaires Innovation Leadership Money Consumer Industry

20 Incredible New Images Show How Planets First Form Around Stars

Ethan Siegel Contributor
Starts With A Bang Contributor Group
Science
The Universe is out there, waiting for you to discover it.

20 new protoplaneta
Resolution Project (D
systems look like. s

Abonnemente

Neue Zürcher Zeitung

Menü Startseite > Wissenschaft

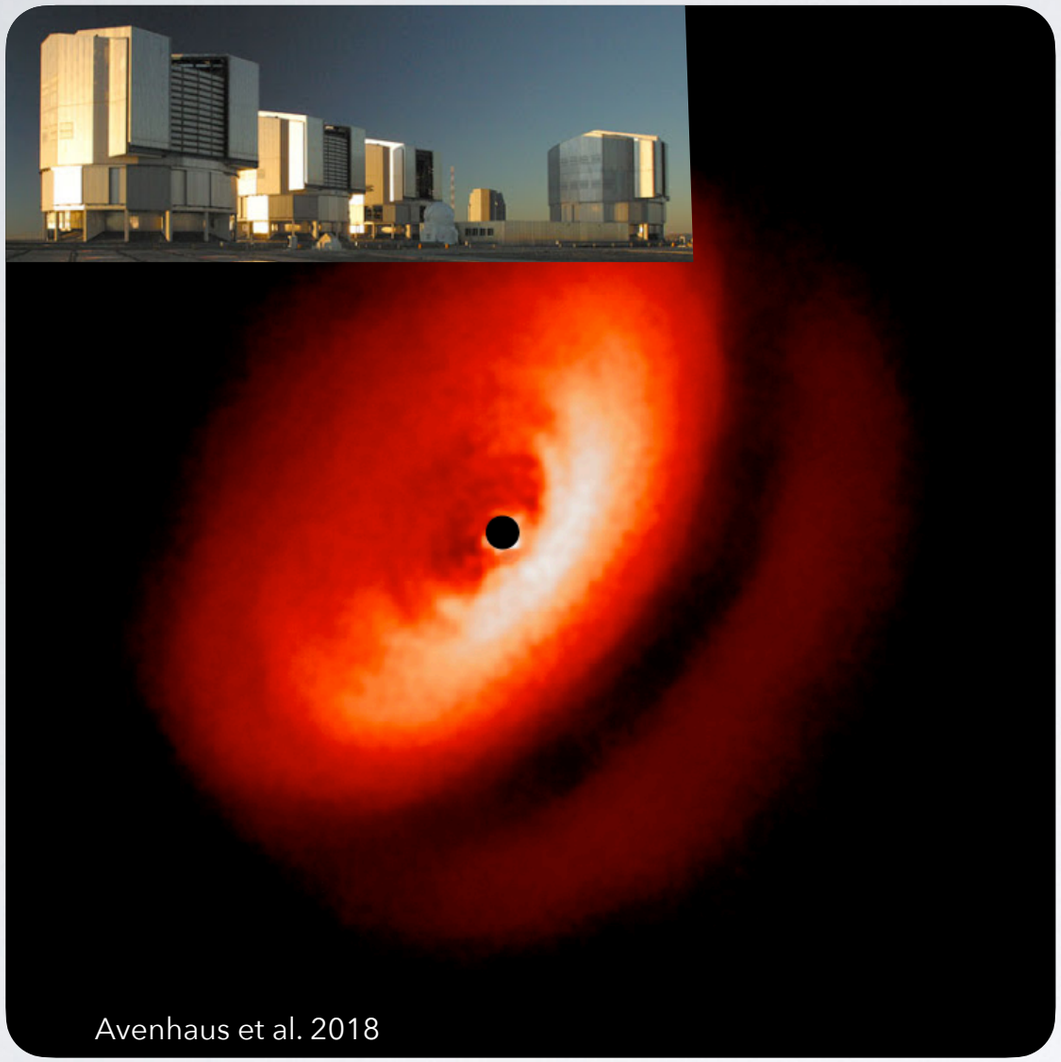
Junge Sternsysteme sind vielfältiger als gedacht

Selbst die jüngsten Planetensysteme weisen eine erstaunliche Fülle von Details wie Ringen und Spiralarmen auf. Das hat eine Durchmusterung naher Sterne mit dem Alma-Teleskop ergeben. Die Ergebnisse überraschen die Forscher: Bisher hatte man geglaubt, dass derartige Strukturen viel mehr Zeit benötigen, um sich zu bilden.

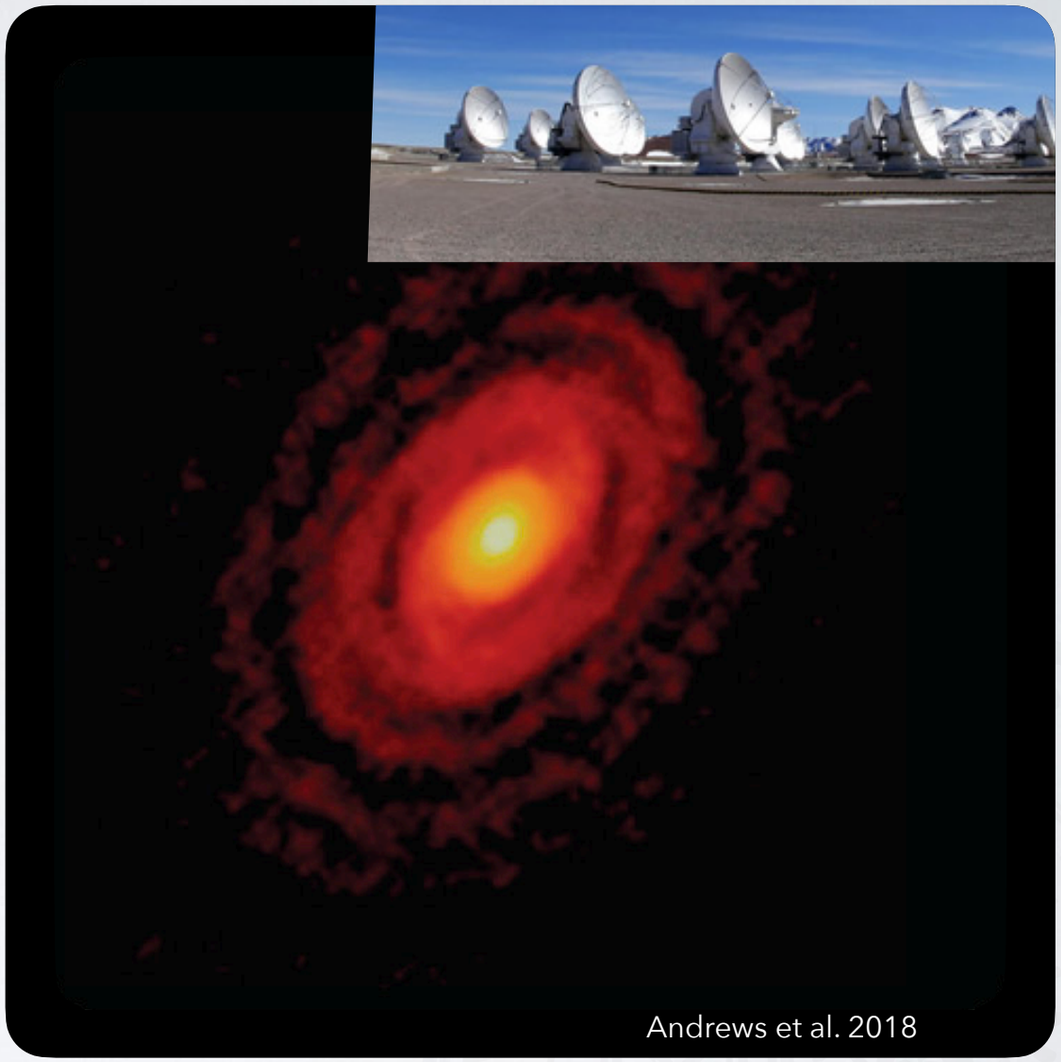
Andrews et al. 2018

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

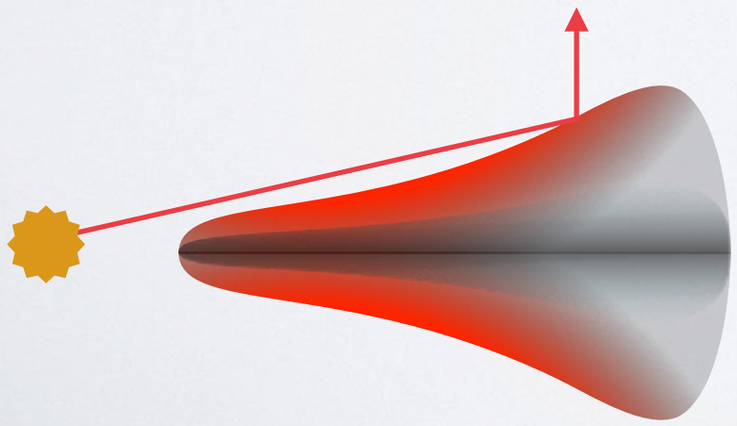
Staubdynamik live



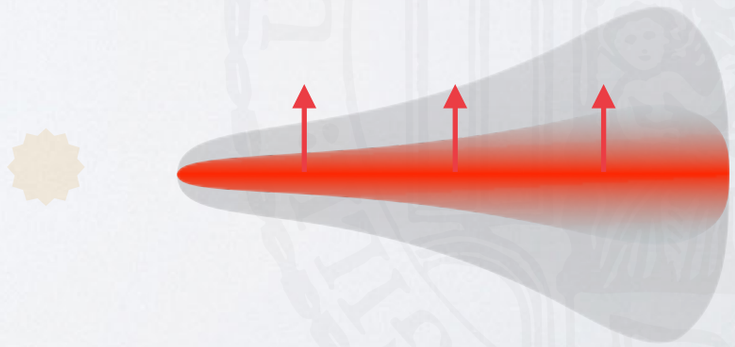
Avenhaus et al. 2018



Andrews et al. 2018



Streulicht

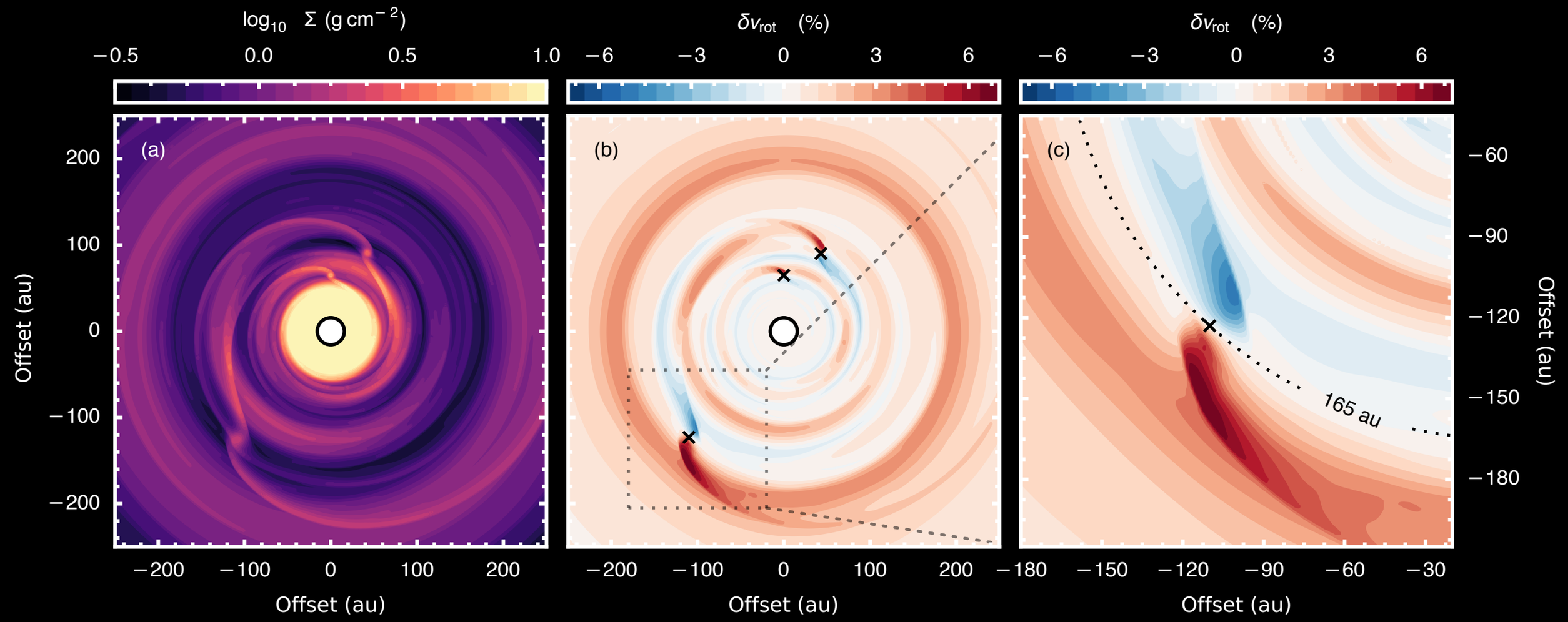


Radio: thermische Strahlung des Staubs

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Im Kielwasser der Planeten

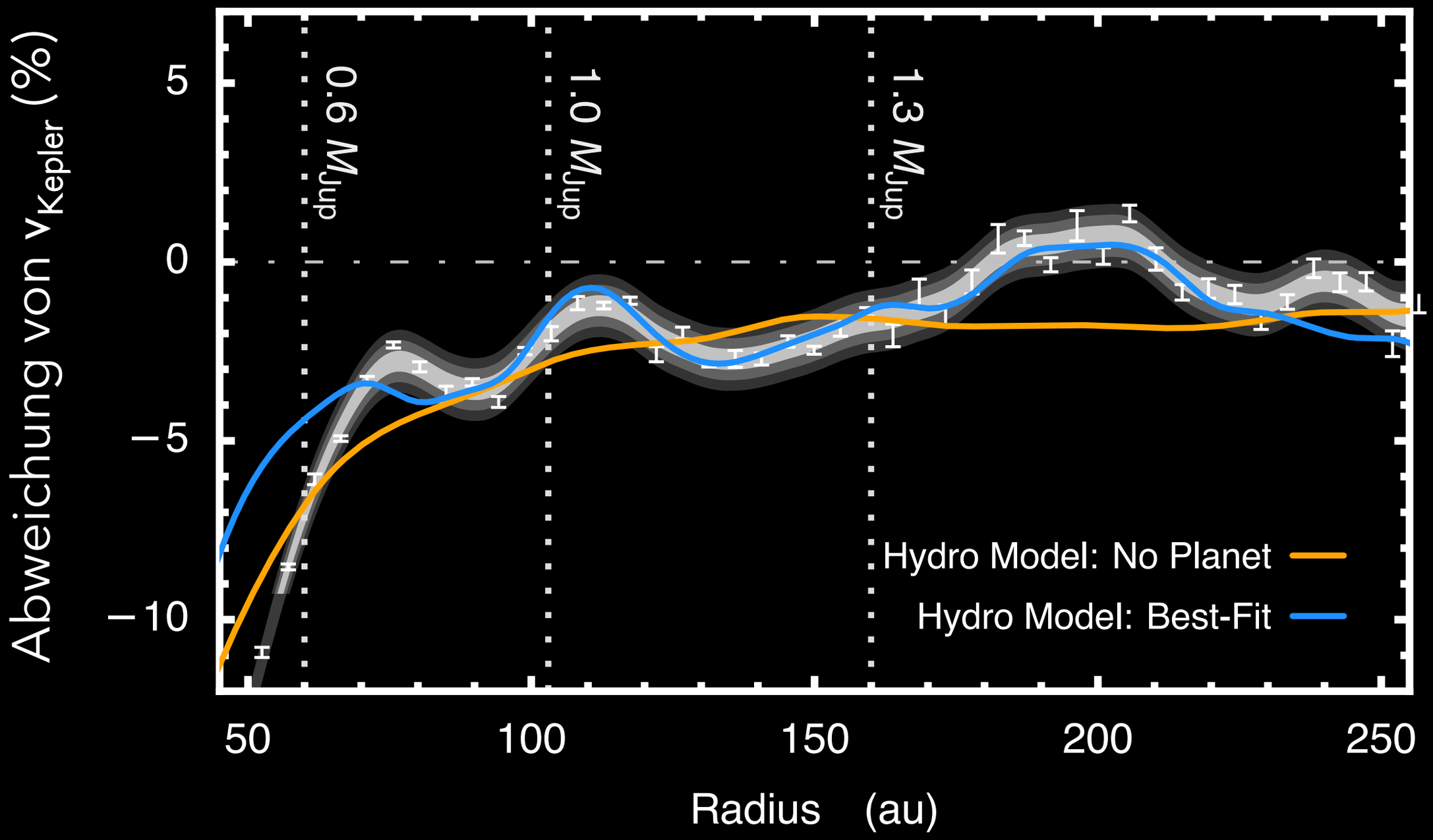
Huhn oder Ei?



Teague, Bae, Bergin, Birnstiel et al. 2018

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Im Kielwasser der Planeten



Teague, Bae, Bergin, Birnstiel et al. 2018

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Im Kielwasser der Planeten

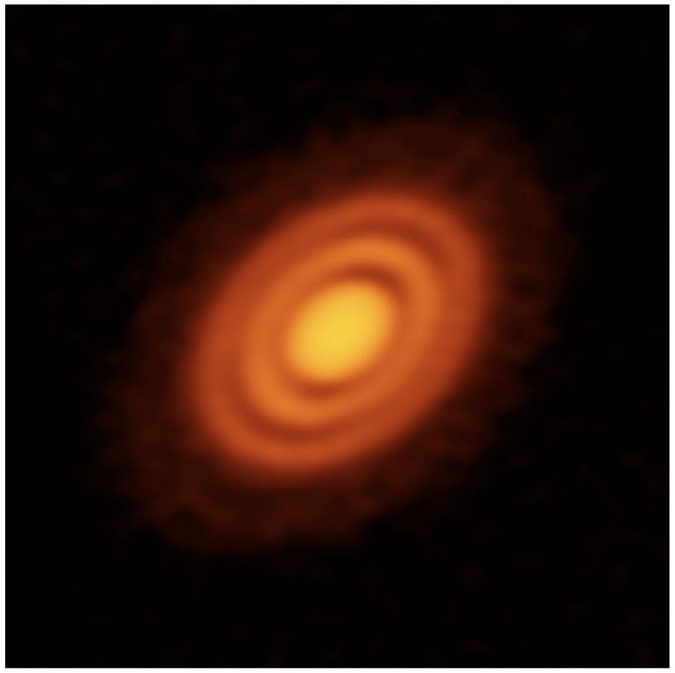
Forbes Billionaires Innovation Leadership

561 views | Jun 13, 2018, 10:00am

Astronomers Use The Doppler Effect To Find Three Newborn Planets

Matthew Francis Former Contributor
Science
I am a writer specializing in physics, astronomy, and related topics.

We can't witness the birth of our own Solar System, but the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) is providing a picture of how it may have happened. ALMA spotted signs of three giant planets forming around a young star in our cosmic neighborhood. The technique astronomers used to study these planets is one that can be used to find other newborn worlds, and see exactly how clouds of gas and dust turn into something like the Solar System.



ALMA image of the protoplanetary disk around the star HD 163296. The gaps in the disk are where three newborn giant planets are hiding. ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); A. ISELLA; B. SAXTON (NRAO/AUI/NSF)

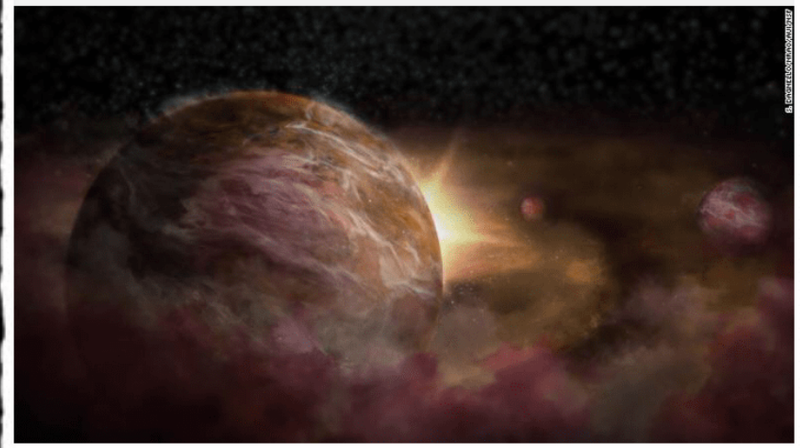
edition.cnn.com

CNN Home

How many types of smile are there?

The master architect behind Japan's remote 'art island'

World buzz

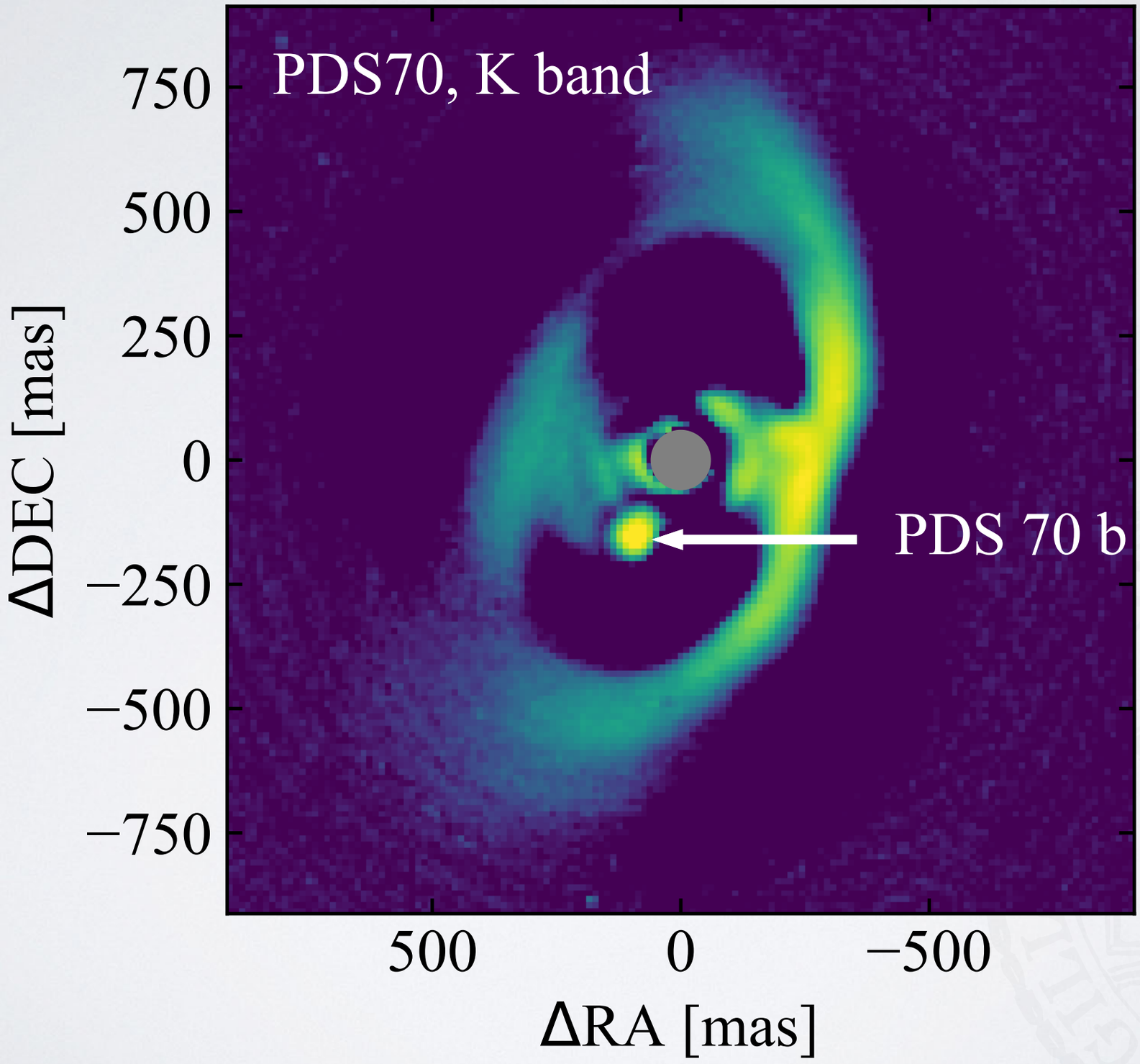


Three 'baby' planets found forming around newborn star

Teague, Bae, Bergin, Birnstiel et al. 2018

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

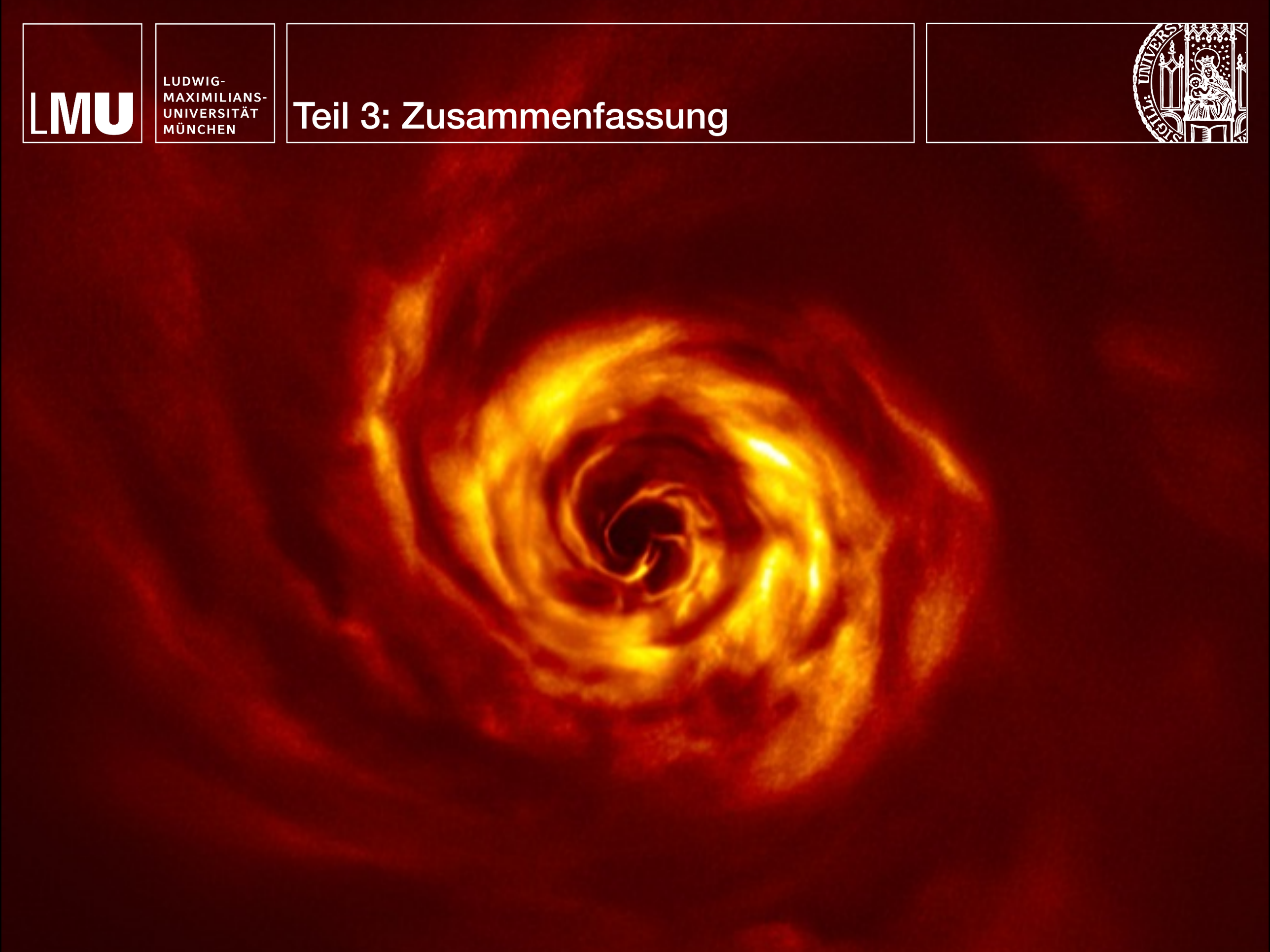
Erster "Keppler" Planet



Keppler et al. 2018

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Teil 3: Zusammenfassung



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Teil 3: Zusammenfassung

I.

Scheiben sind dynamischer als gedacht

II.

Planeten entstehen viel schneller als gedacht

III.

Manche Fragen beantwortet, viele neue gestellt

– Danke für die Aufmerksamkeit –

til.birnstiel@lmu.de

til-birnstiel.de