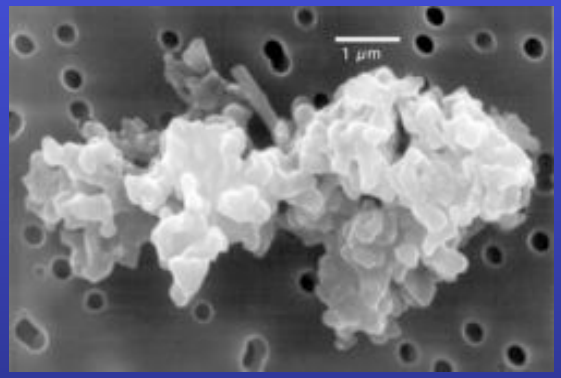
Planetenentstehung II: Gas Riesen und Planetenwanderung

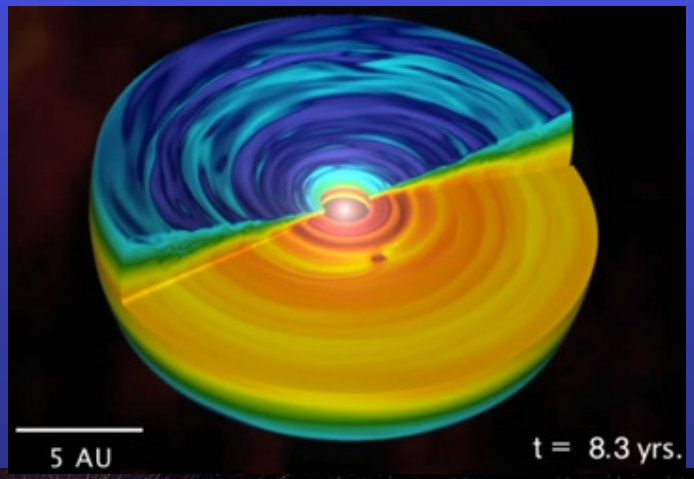
Das Sonnensystem und seine nächsten Verwandten für Nicht-Physiker

Hubert Klahr

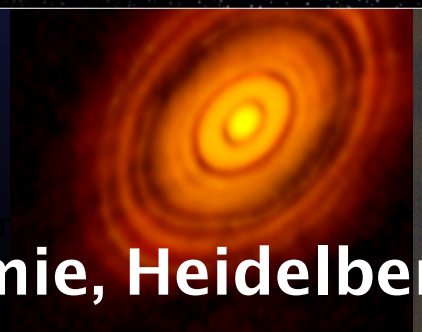
Haus der Astronomie / Max-Planck-Institut für Astronomie

20.11.2018



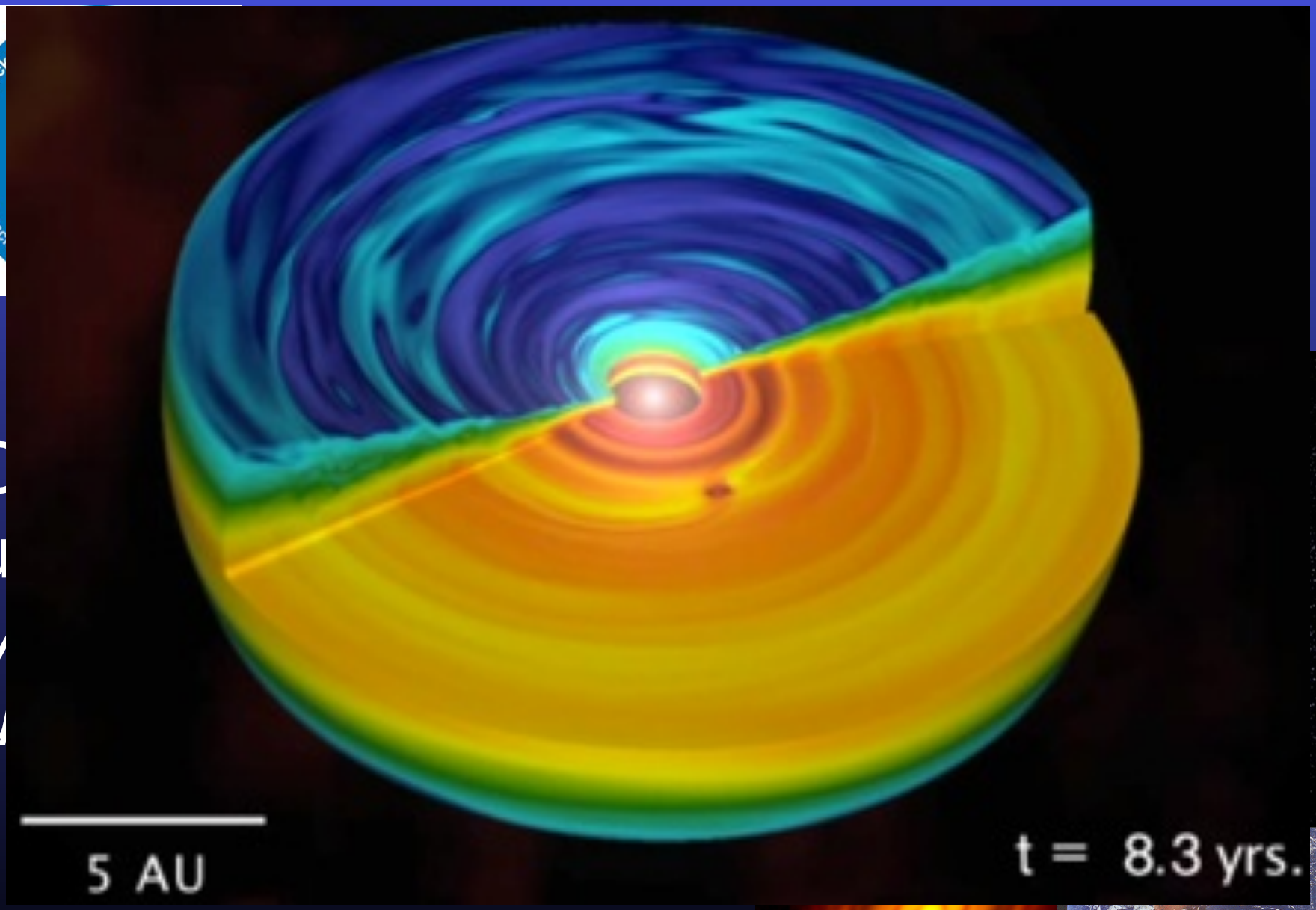


Die Geburt der Sonne und ihrer Planeten: *Von Briefumschlägen und Super-Computern.*



Hubert Klahr,
Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

D
u
v
u

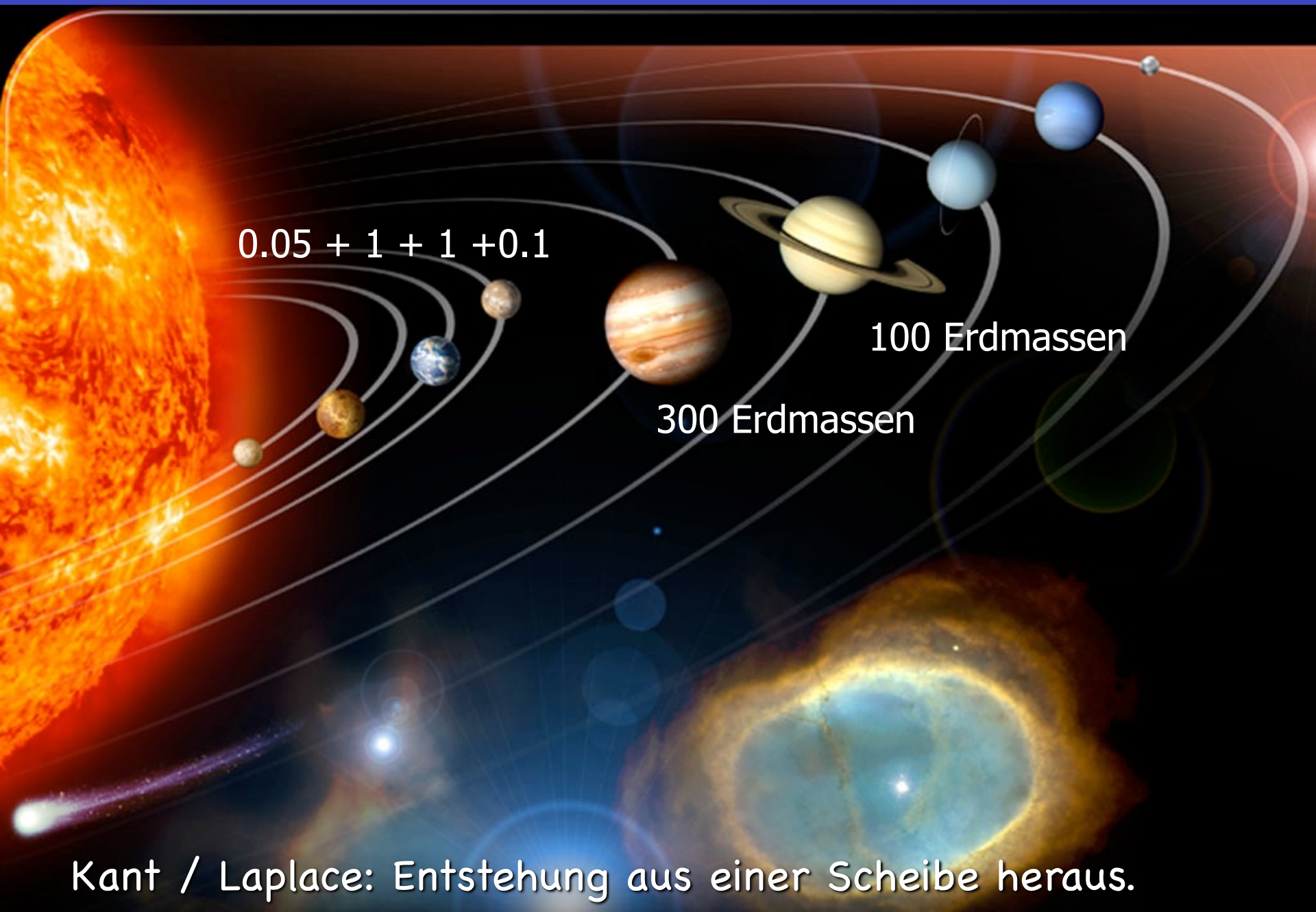


Hubert Klahr,
Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

3D-Radiation Hydro Simulation of Planet-Disk Interaction

"Jupiter opens a gap in the solar nebula. The gas around the planet is heated from the accretion process onto the planetary surface."

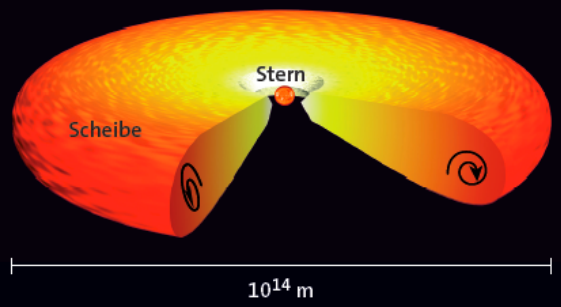
Simulation by Hubert Klahr, MPIA and Wilhelm Kley, Uni Tübingen
Animation by Markus Feldt and Hubert Klahr,
Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg



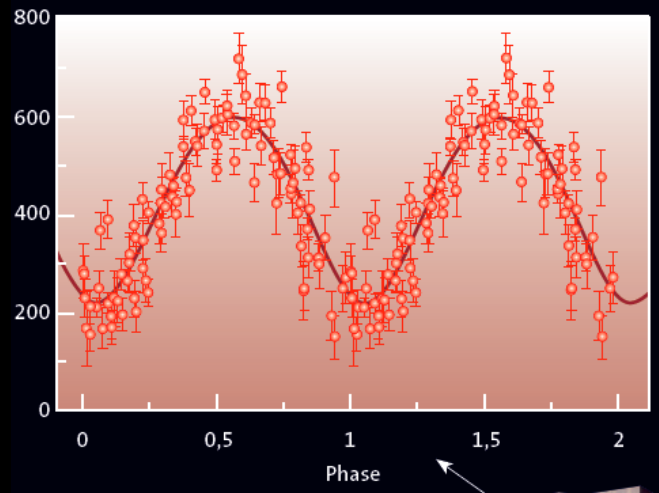
Kant / Laplace: Entstehung aus einer Scheibe heraus.

“Geburtsstätten von Planeten:” Gas- und Staubscheiben um junge

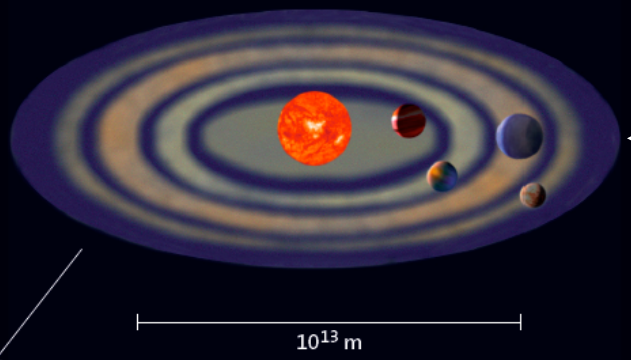
=



(a) Turbulente Scheibe aus Gas und Staub

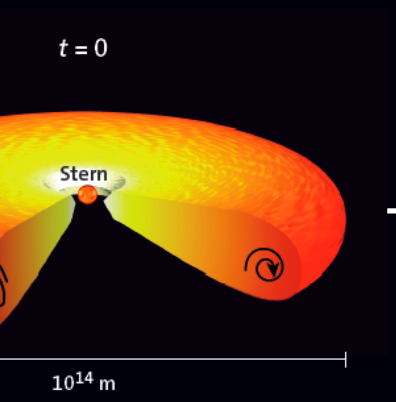


$t = 10^6 - 10^7$ Jahre

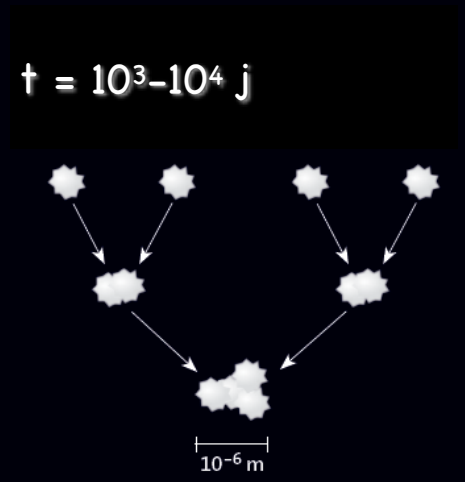


(f) Migration und resonante Wechselwirkung

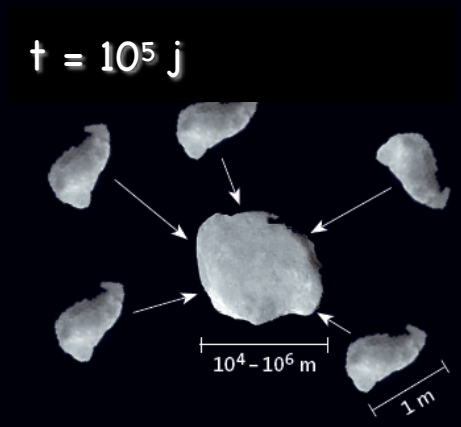
… Ein Wunder geschieht im Dunkel …



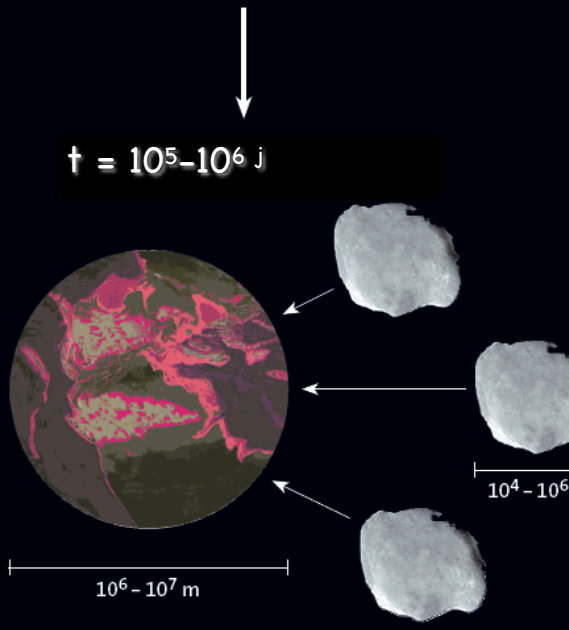
a. Turbulente Scheibe



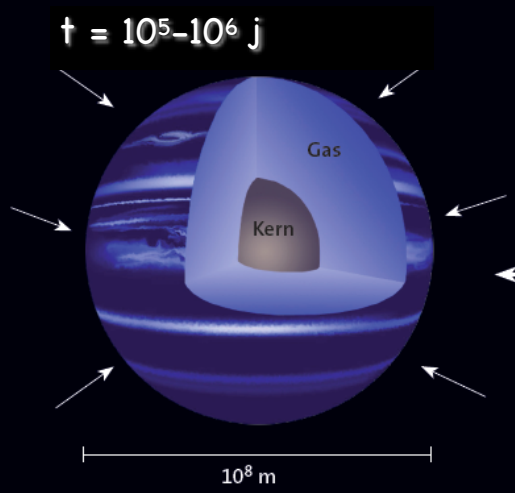
b. Stossen und Kleben



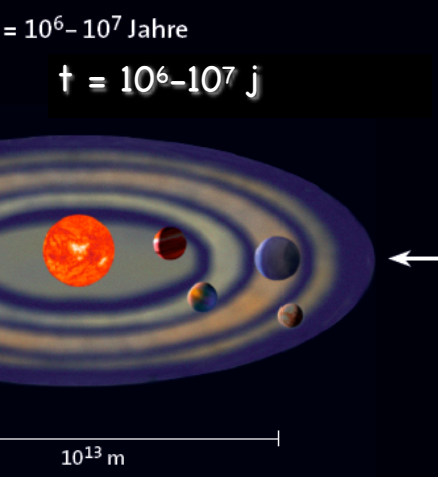
c. Gravotubulente Fragmentation



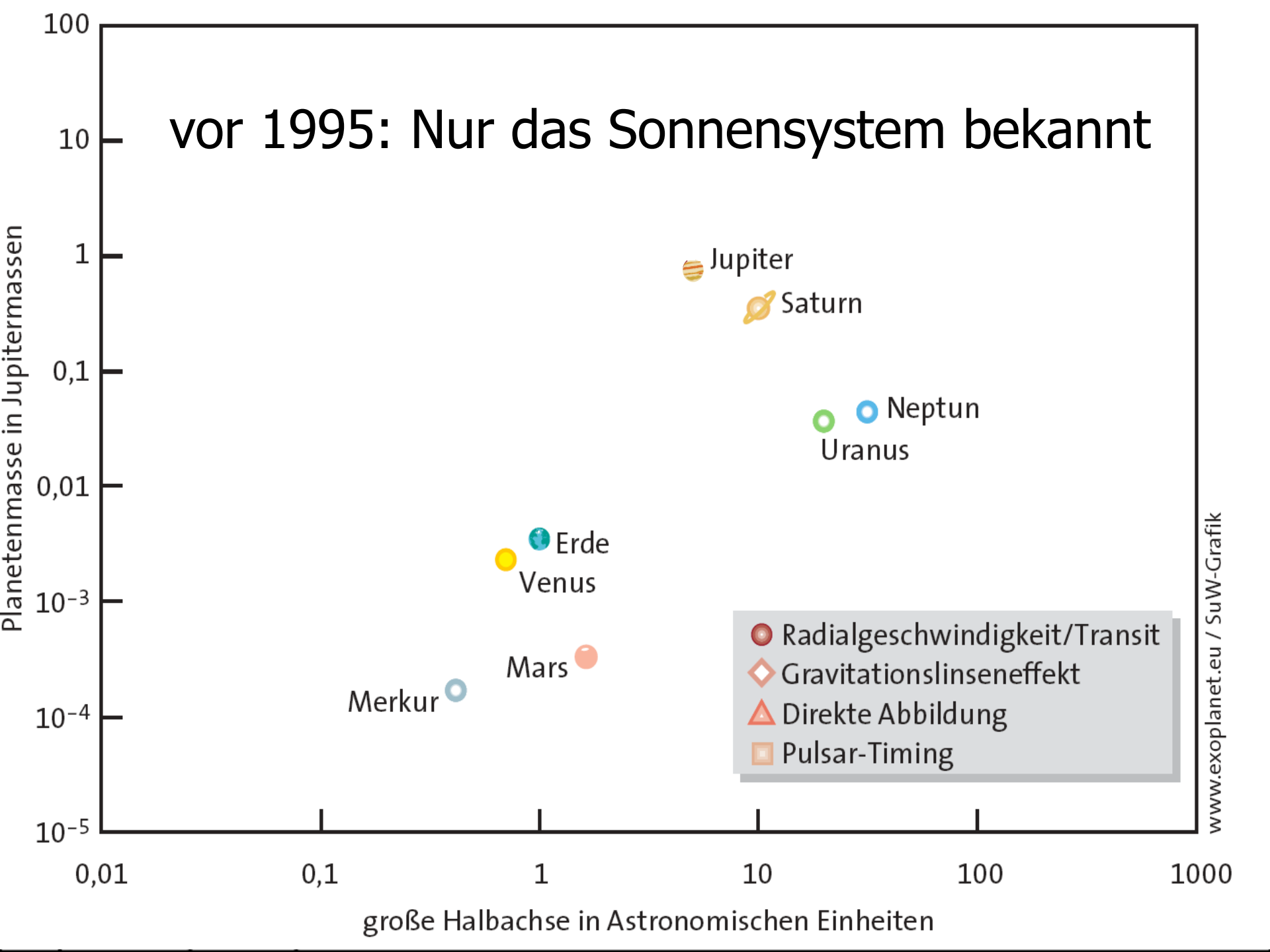
d. Gravitation

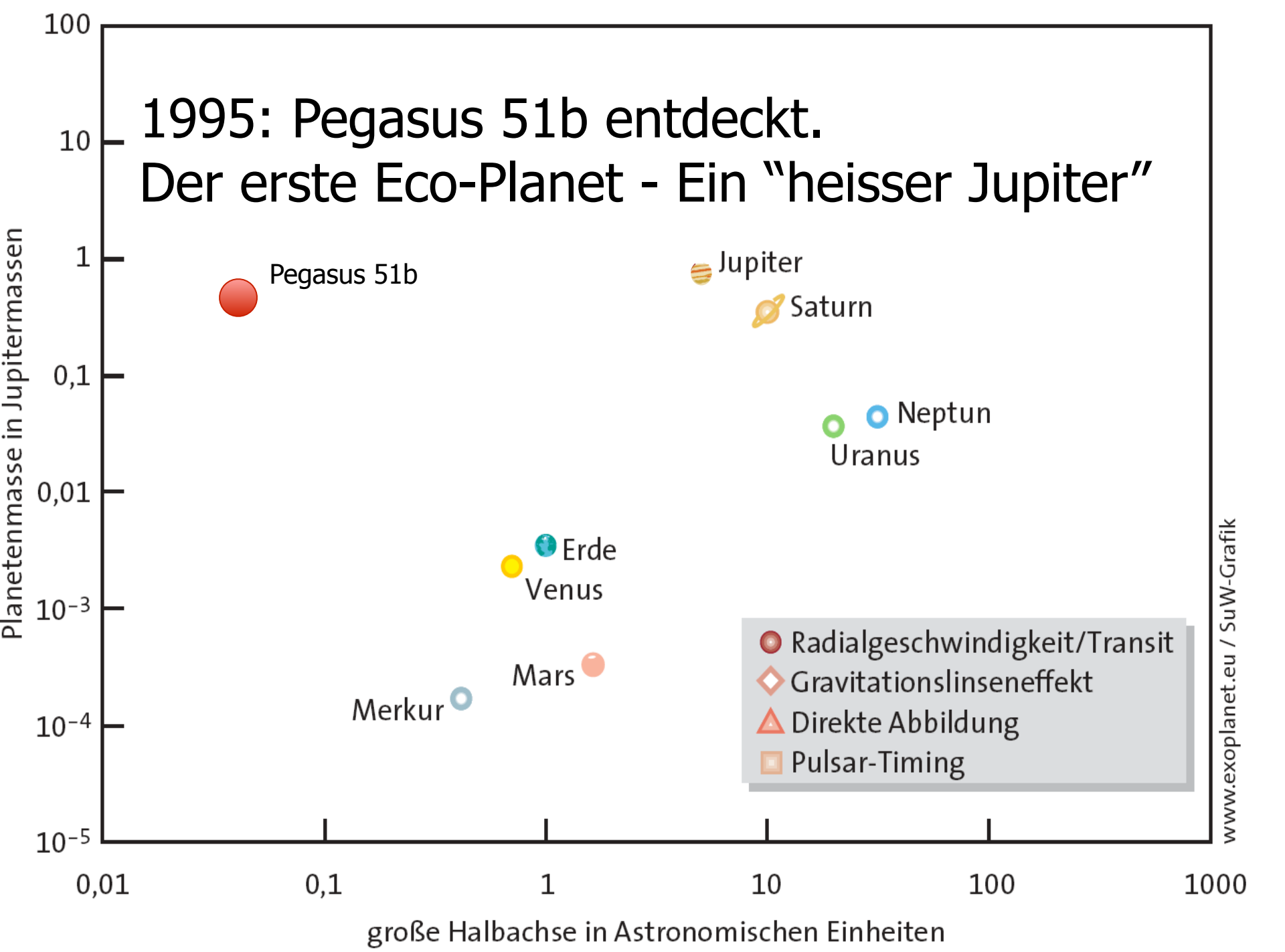


e. Gasakkretion

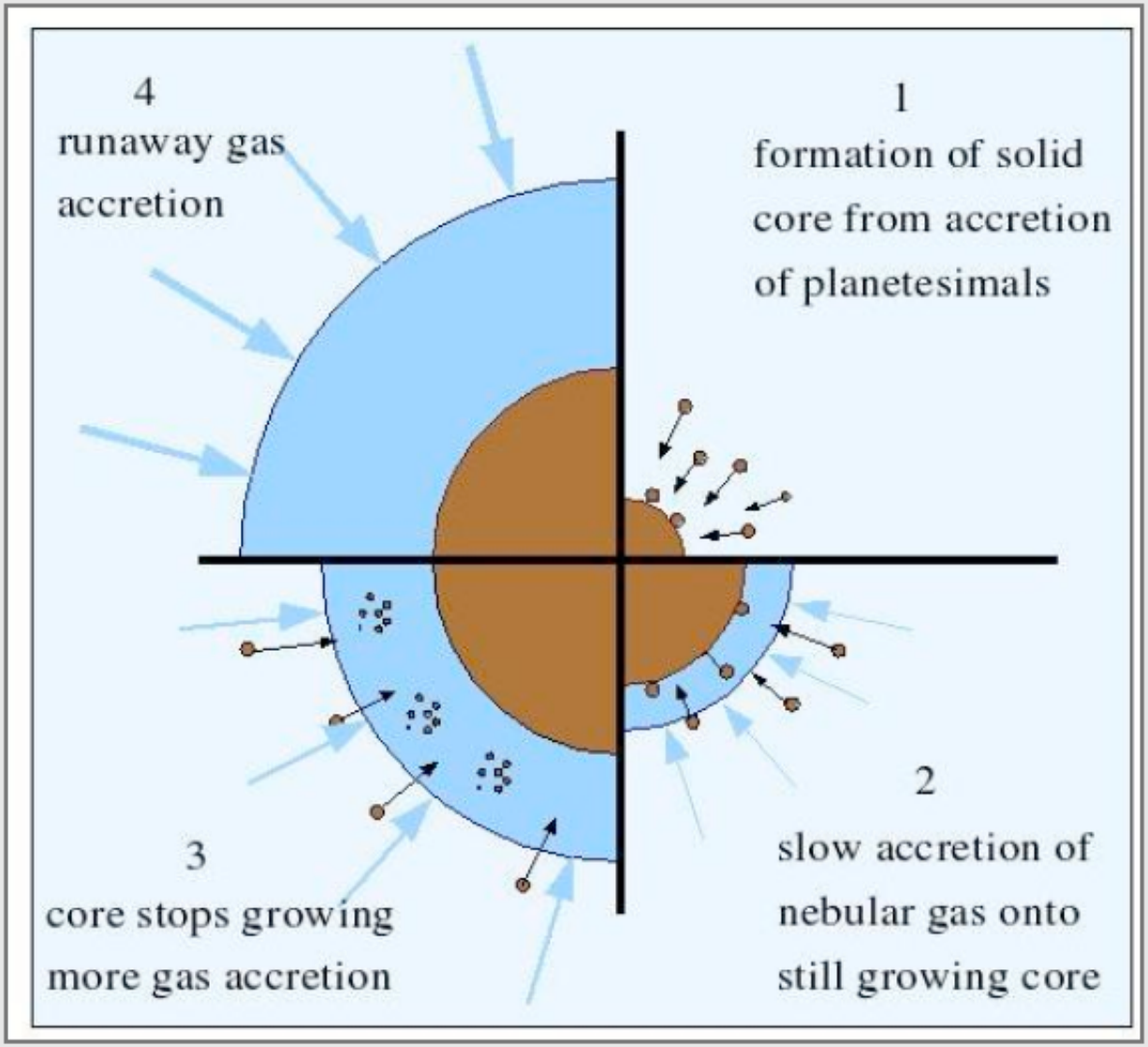


f. Migration

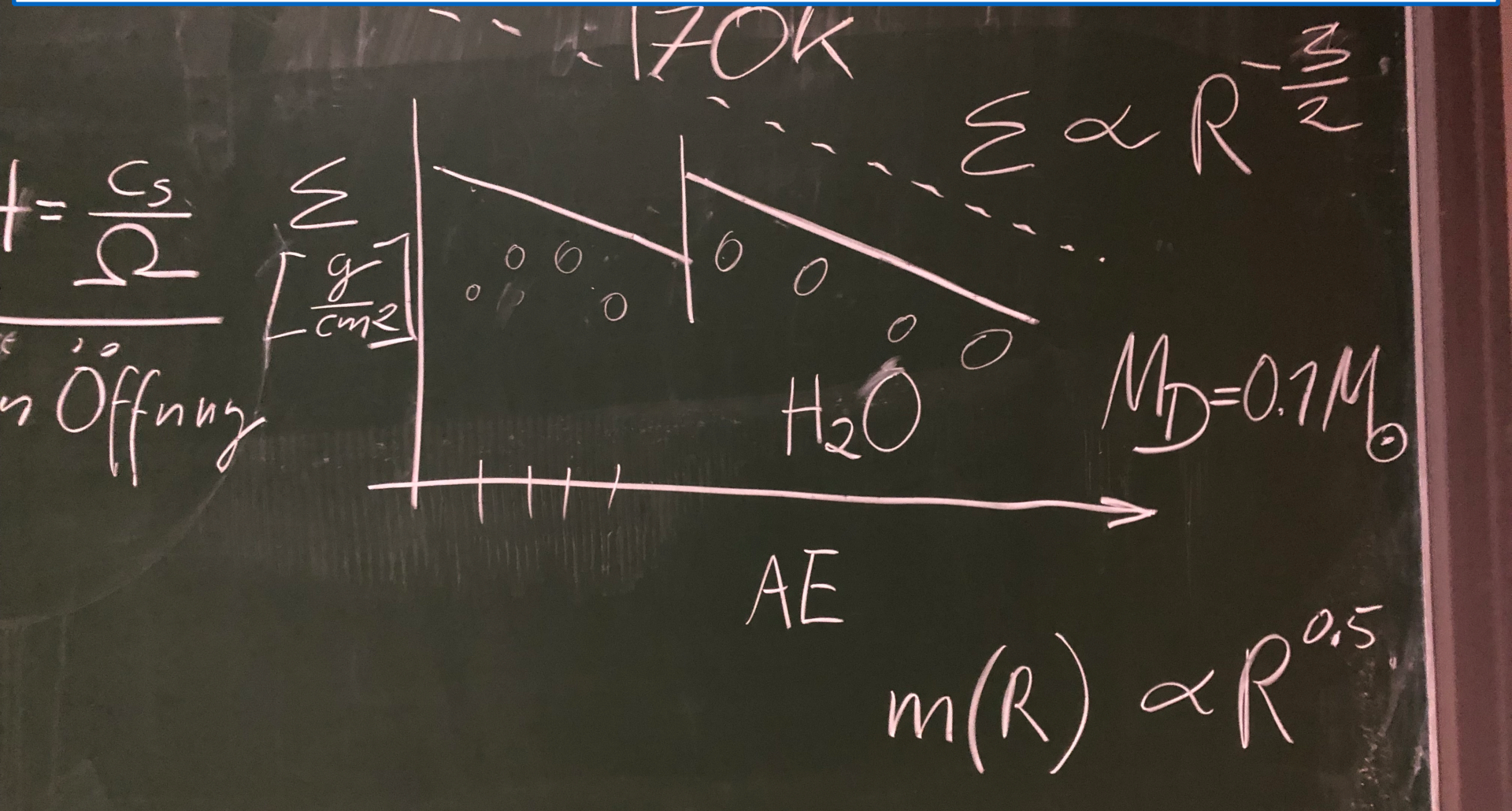

vor 1995: Nur das Sonnensystem bekannt
Planetenmasse in Jupitermassen
100
10
1
0,1
0,01
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
Jupiter
Saturn
Neptun
Uranus
Erde
Venus
Mars
Merkur
Radialgeschwindigkeit/Transit
Gravitationslinseneffekt
Direkte Abbildung
Pulsar-Timing
0,01
0,1
1
10
100
1000
große Halbachse in Astronomischen Einheiten
www.exoplanet.eu / SuW-Grafik


1995: Pegasus 51b entdeckt.
Der erste Eco-Planet - Ein “heisser Jupiter”
Pegasus 51b
Jupiter
Saturn
Neptun
Uranus
Erde
Venus
Mars
Merkur
Radialgeschwindigkeit/Transit
Gravitationslinseneffekt
Direkte Abbildung
Pulsar-Timing
Planetenmasse in Jupitermassen
100
10
1
0,1
0,01
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
0,01
0,1
1
10
100
1000
große Halbachse in Astronomischen Einheiten
www.exoplanet.eu / SuW-Grafik

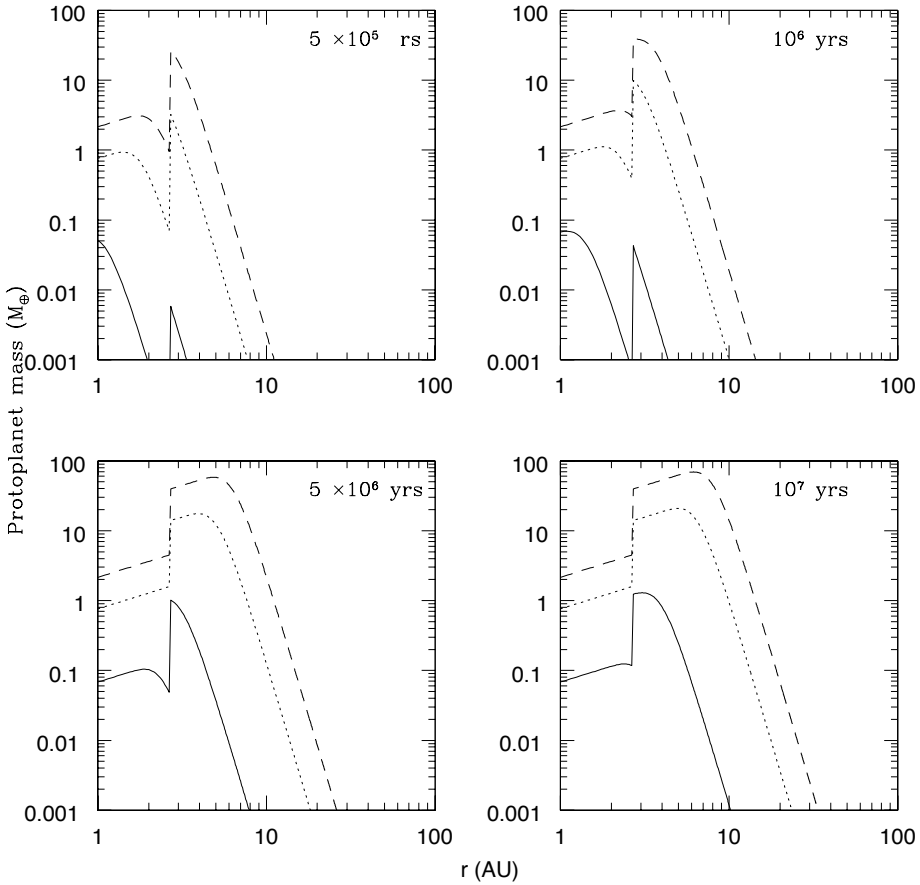
Giant planet formation: core accretion model



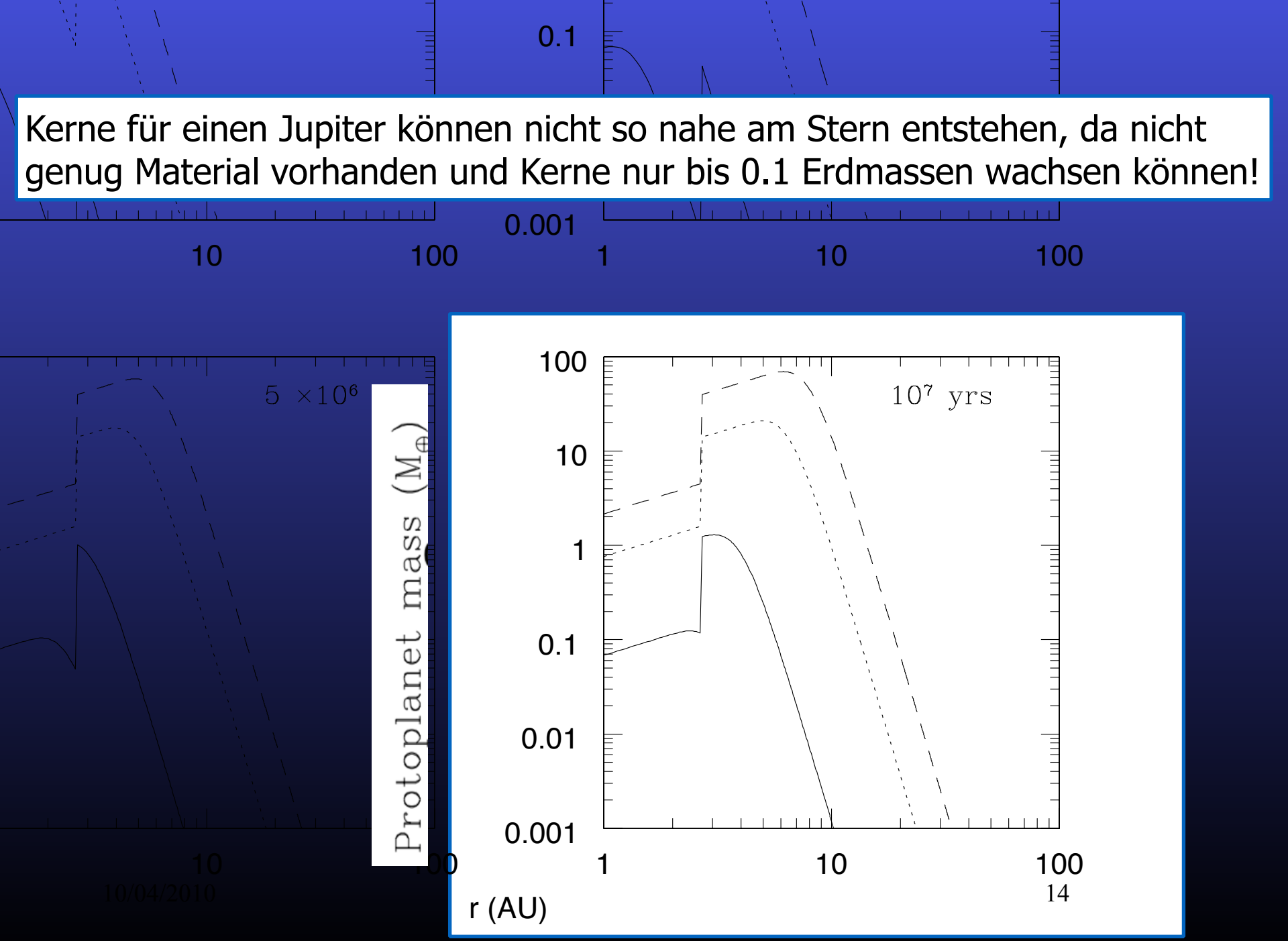
Im solaren Nebel Modell wurden die heutigen Planeten “zermahlen” und um Gas angereichert, welches nach solarer Häufigkeit der Elemente da gewesen sein muss. So sehen wir wieviel Material (Eis und Staub) zum Planetenbauen zur Verfügung stand. Innerhalb der Eislinie ist es schwer GasPlanetenKerne zu bauen. Daher keine “in situ” Entstehung möglich. Ergo Migration von Aussen nach Innen.



Kerne für einen Jupiter können nicht so nahe am Stern entstehen, da nicht genug Material vorhanden. Und weit aussen dauert es zu lange: Simulation des Wachstums von Planetenkernen in einem Solaren Nebel (——- = Masse des heutigen Sonnensystems plus Helium und Wasserstoff: sowie 10x …. oder 20x - - -mehr)

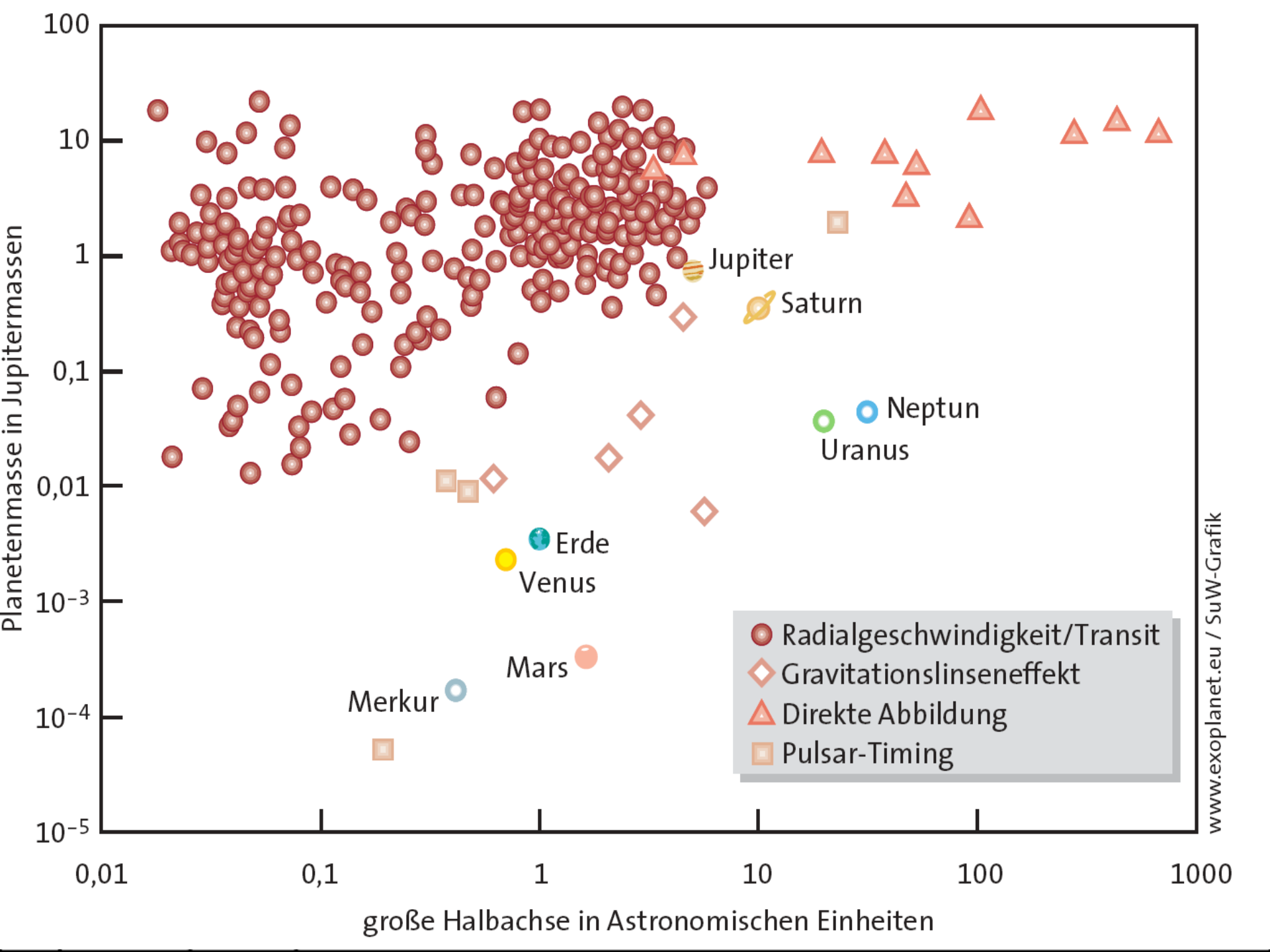


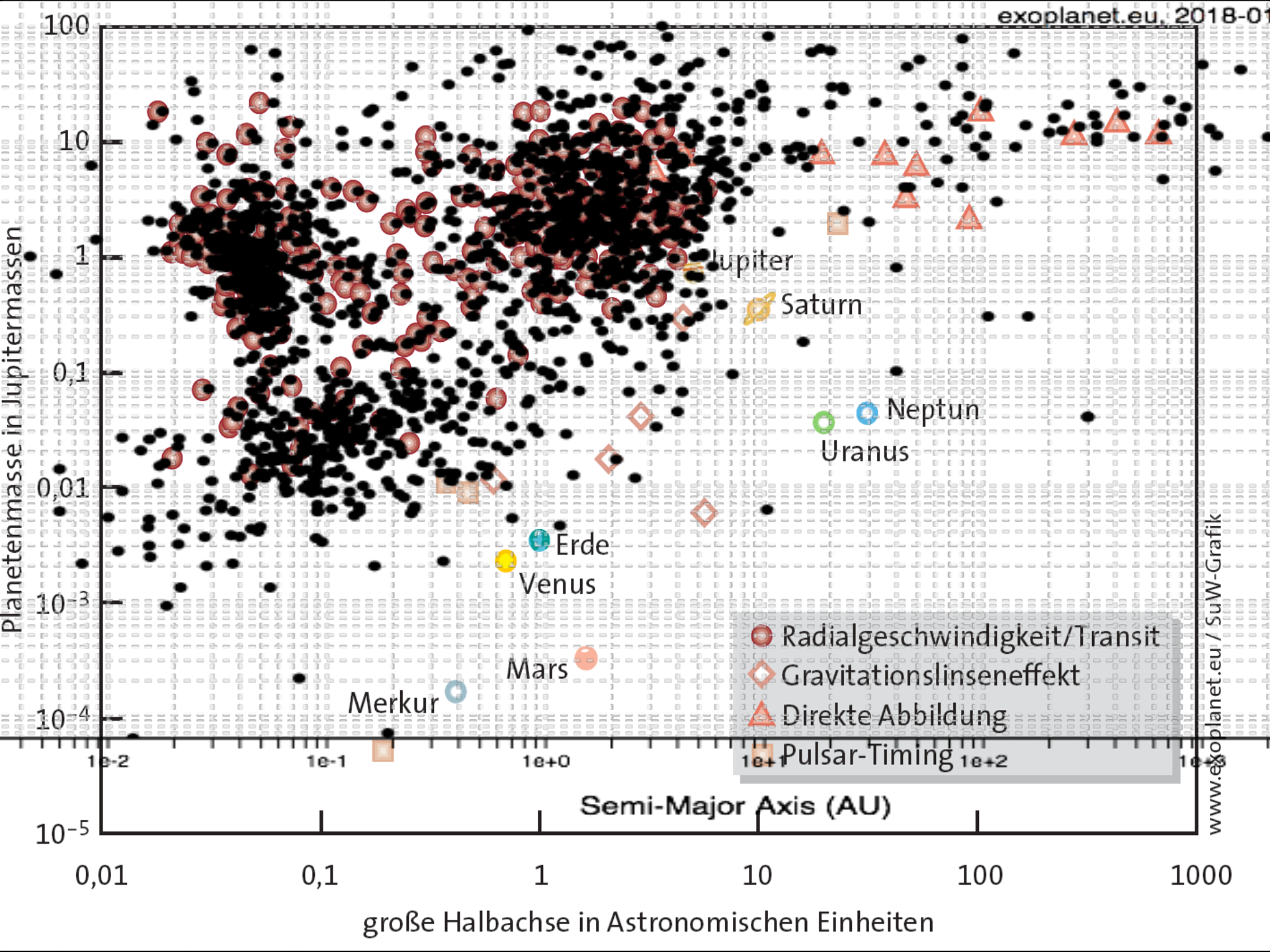
Kerne für einen Jupiter können nicht so nahe am Stern entstehen, da nicht genug Material vorhanden und Kerne nur bis 0.1 Erdmassen wachsen können!



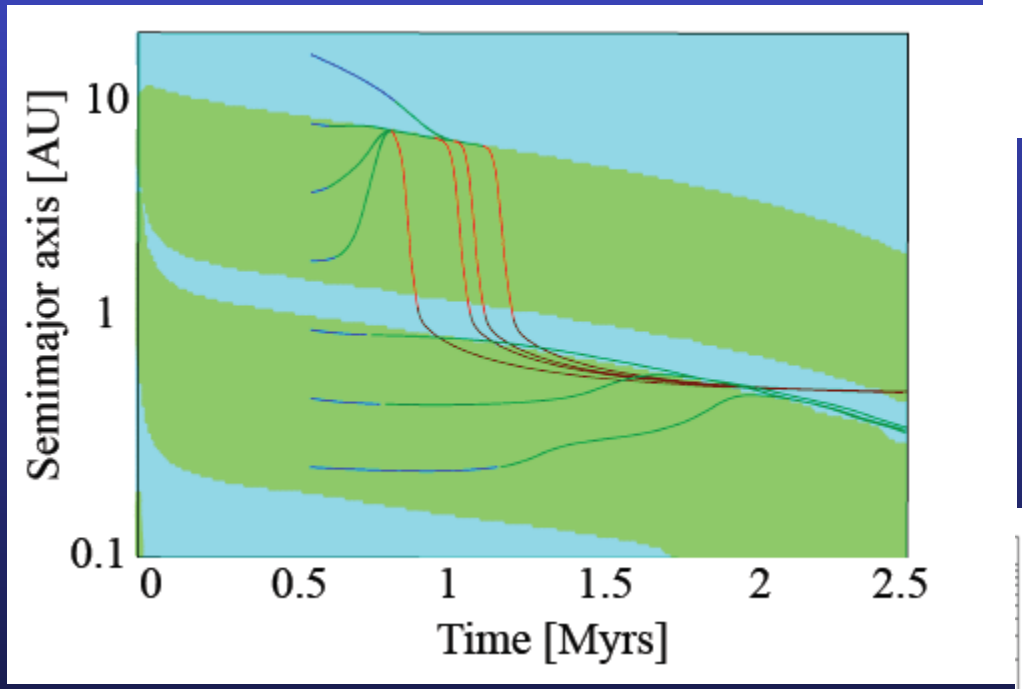
Kerne für einen Jupiter können nicht so nahe am Stern entstehen, da nicht genug Material vorhanden und Kerne nur bis 0.1 Erdmassen wachsen können: Ergo: Die junge Erde hatte nur 0.1 Erdmassen. Dafür gab es ~30 solche Planeten, die erste viele später zu den heutigen 4 Planeten verschmolzen.

Letzte Verschmelzung zweier Baby-Planeten: Baby Erde + Theia bilden gemeinsam das Erde - Mond System.


100
10
1
0,1
0,01
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
Planetenmasse in Jupitermassen
0,01
0,1
1
10
100
1000
große Halbachse in Astronomischen Einheiten
Jupiter
Saturn
Neptun
Uranus
Erde
Venus
Mars
Merkur
Radialgeschwindigkeit/Transit
Gravitationslinseneffekt
Direkte Abbildung
Pulsar-Timing
www.exoplanet.eu / SuW-Grafik


exoplanet.eu, 2018-01
Planetenmasse in Jupitermassen
100
10
1
0,1
0,01
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
Jupiter
Saturn
Neptun
Uranus
Erde
Venus
Mars
Merkur
Radialgeschwindigkeit/Transit
Gravitationslinseneffekt
Direkte Abbildung
Pulsar-Timing
1e-2
1e-1
1e+0
1e+1
1e+2
1e+3
Semi-Major Axis (AU)
0,01
0,1
1
10
100
1000
große Halbachse in Astronomischen Einheiten
www.exoplanet.eu / SuW-Grafik

Synthetische Populationen..



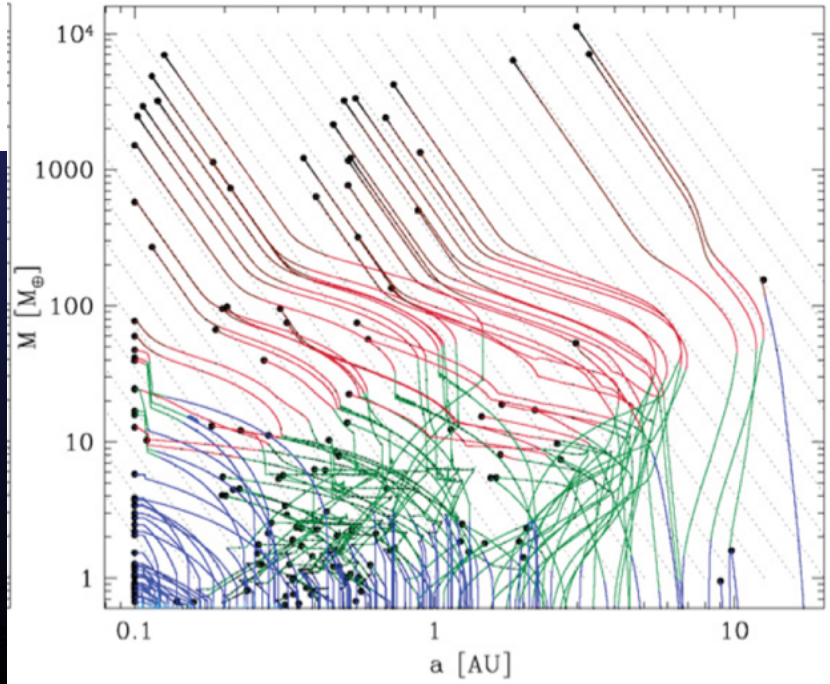
Application of recent results on the orbital migration of low mass planets in planetary population synthesis

C. Mordasini[1], K.-M. Dittkrist[1], Y. Alibert[2], H. Klahr[1], W. Benz[2] and T. Henning[1]

[1]Max Planck Institute for Astronomy, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg, Germany
email: mordasini@mpia.de

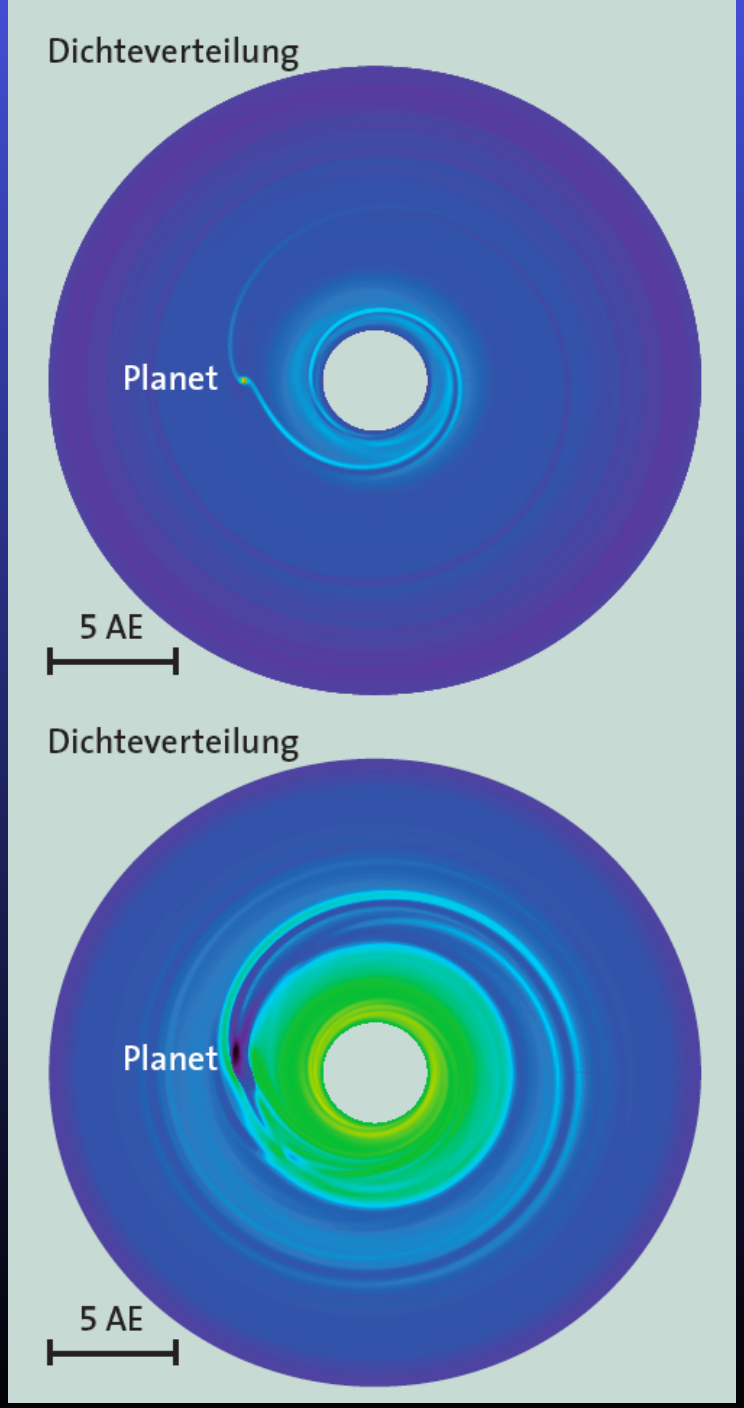
[2]Physikalisches Institut, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern, Switzerland

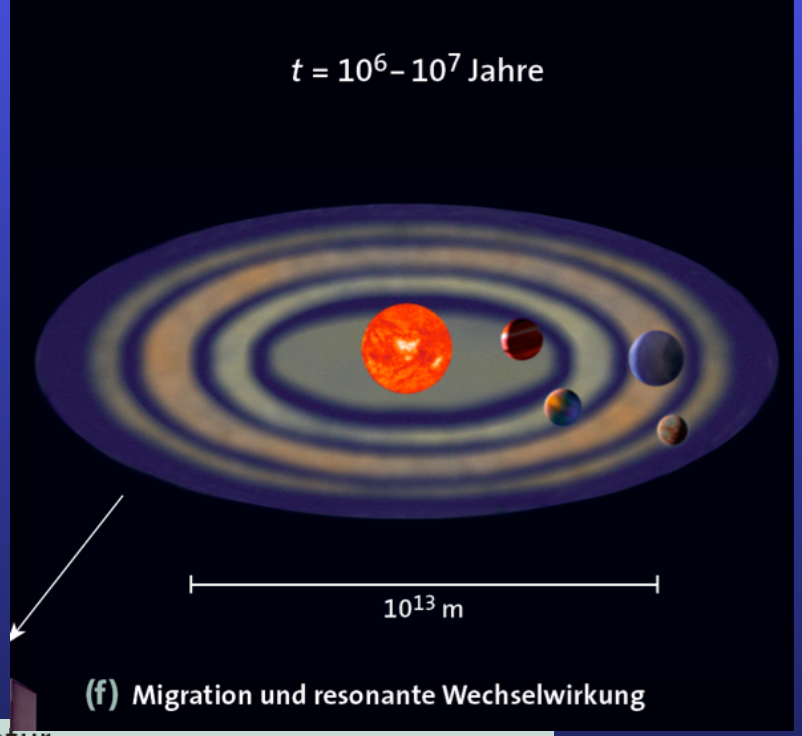
...vorherzusagen wo welche Planeten entstehen...



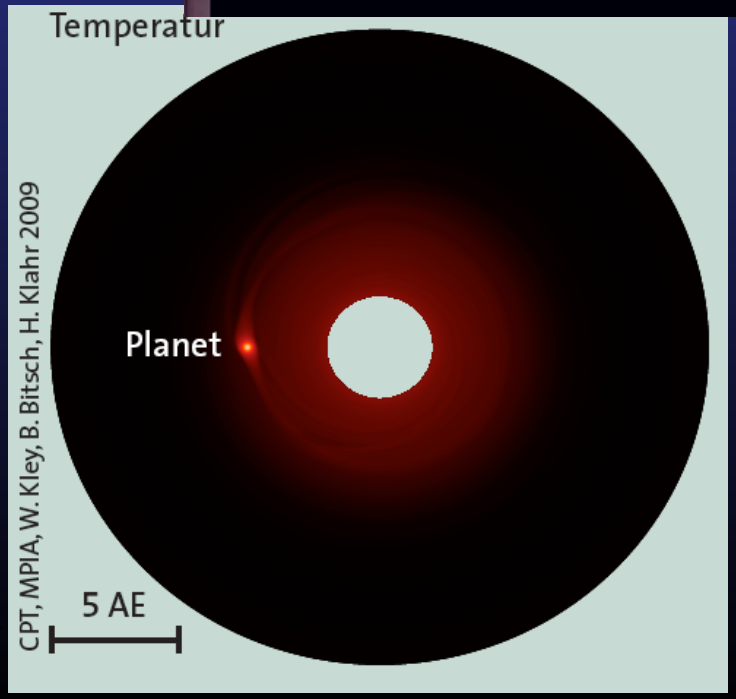
...und durch Testen der Vorhersagen die Physik überprüfen!

10000nde Simulationen!

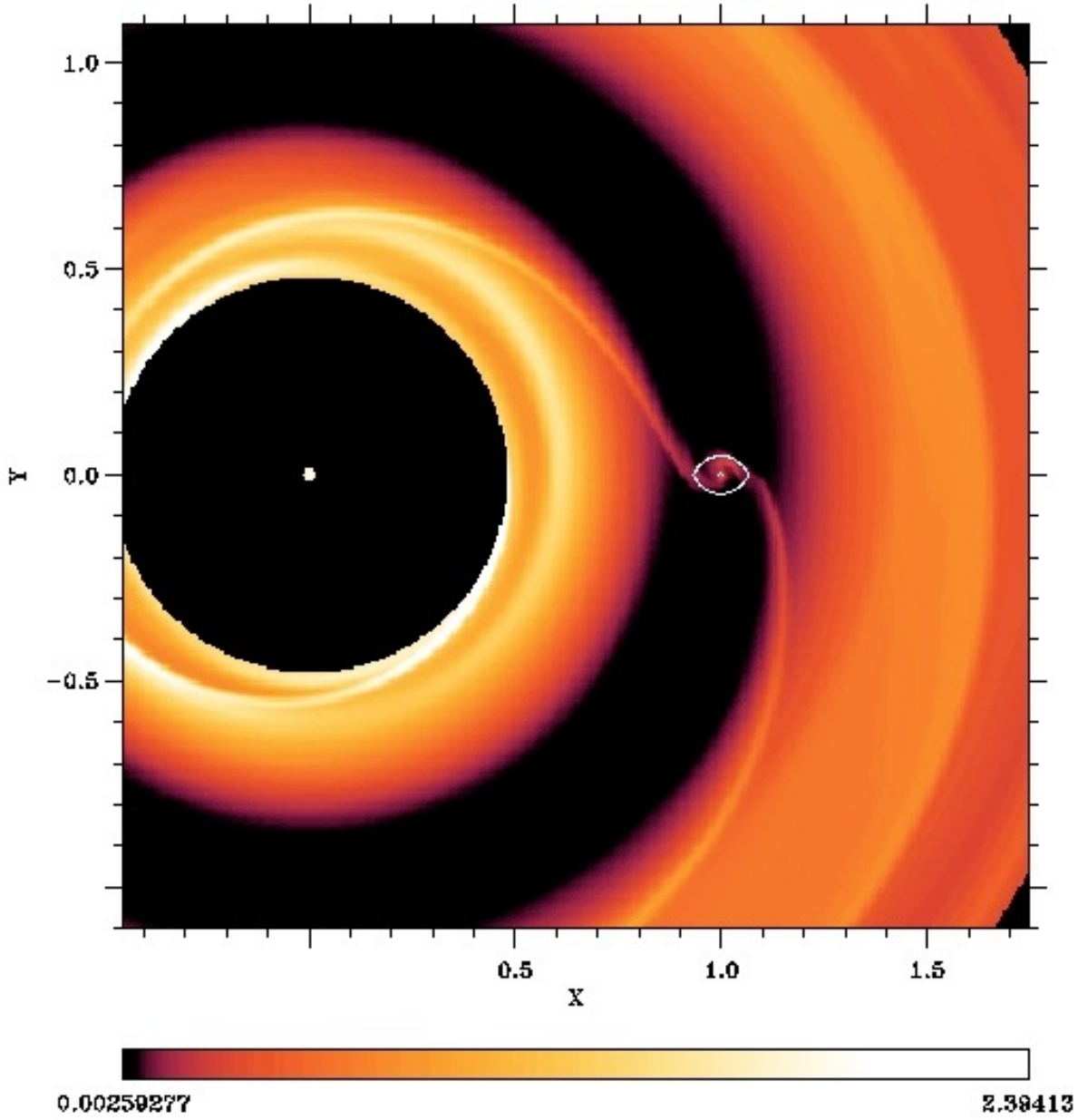




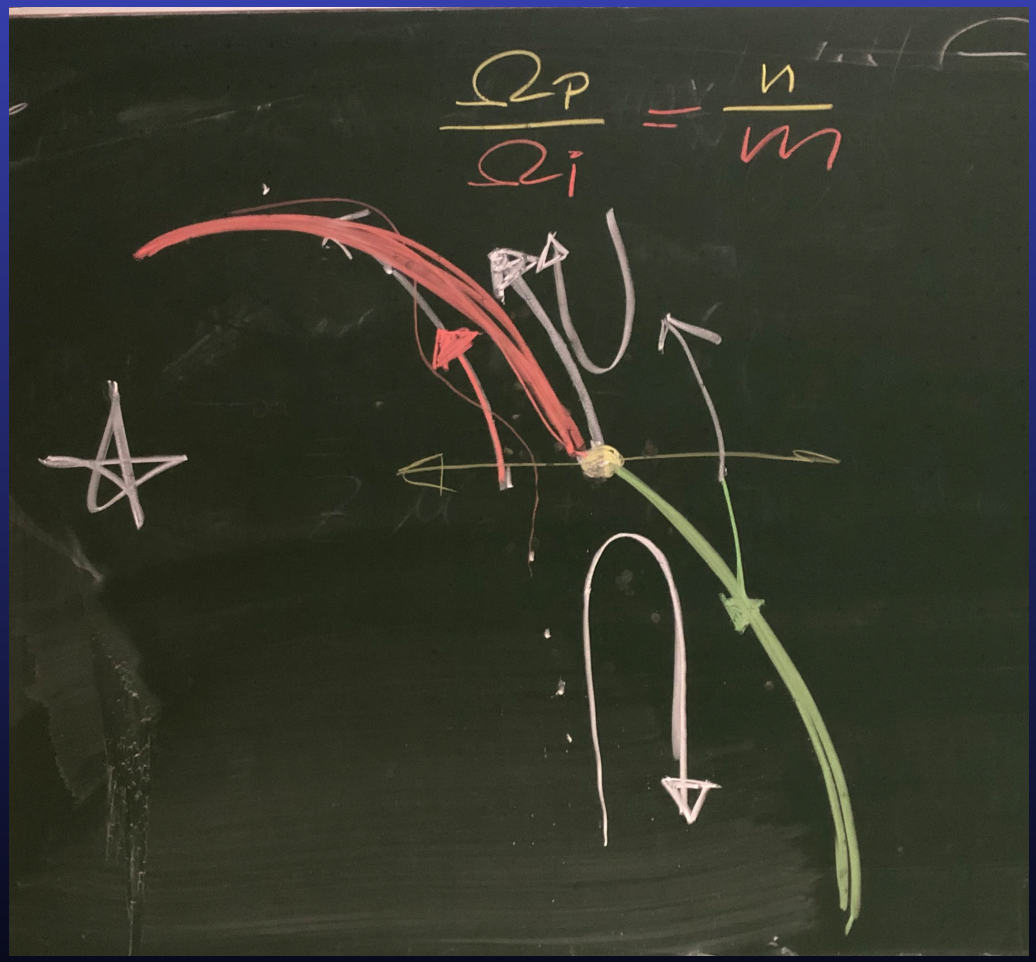
(f) Migration und resonante Wechselwirkung



CPT, MPIA, W. Kley, B. Bitsch, H. Klahr 2009

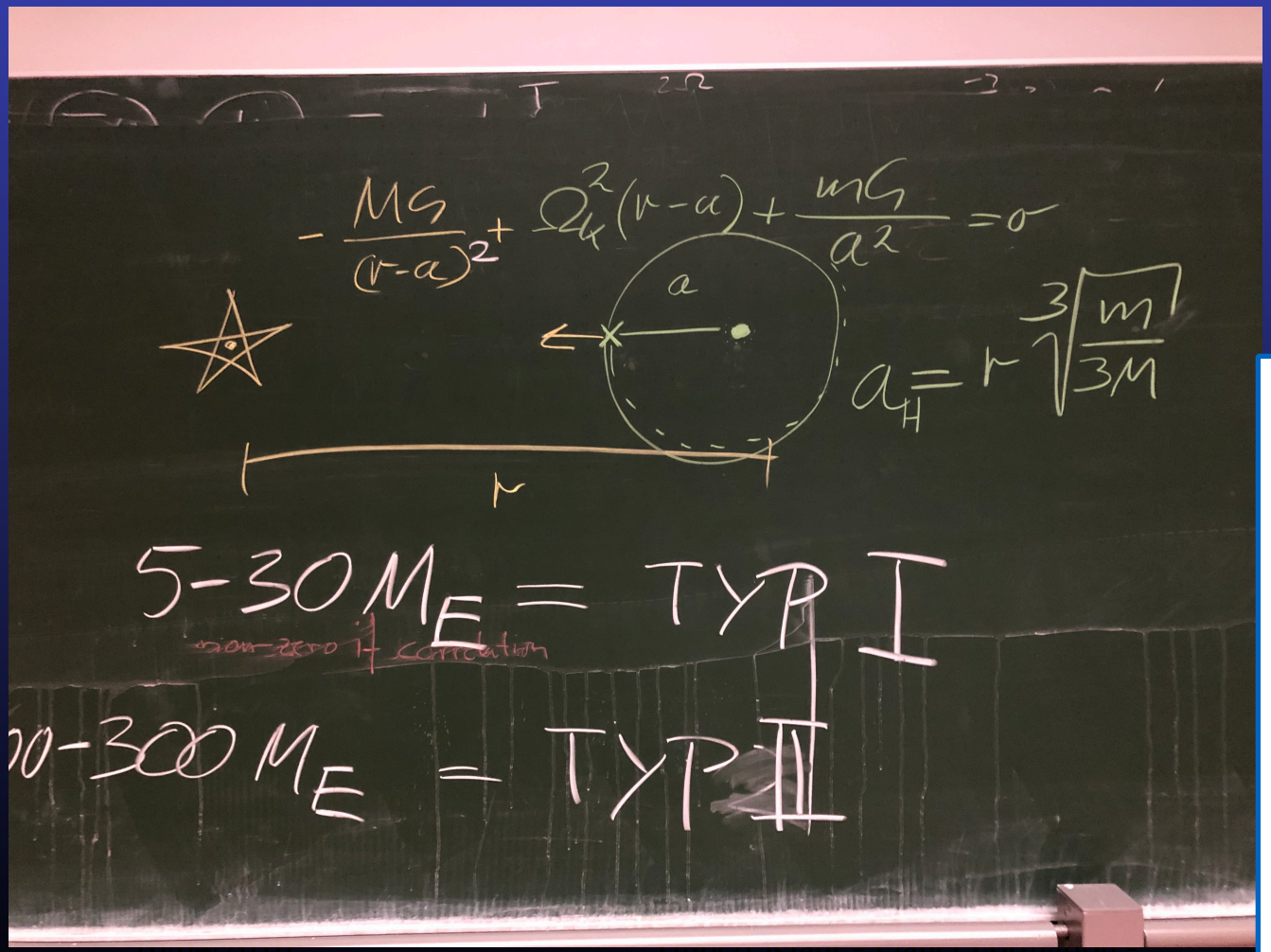

1.0
0.5
0.0
−0.5
Y
0.5
1.0
1.5
X
0.00259277
2.39413

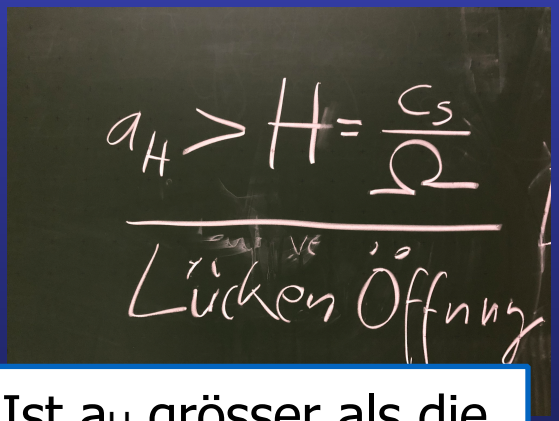
Die Gezeitenkräfte eines Planeten verformen die Gasscheibe. Sie bekommt ein Spiral-Muster, welches durch Resonanzen zwischen Gas und Planet entsteht, also wenn das Verhältnis zwei Orbital-Frequenzen ein rationaler Bruch ist.



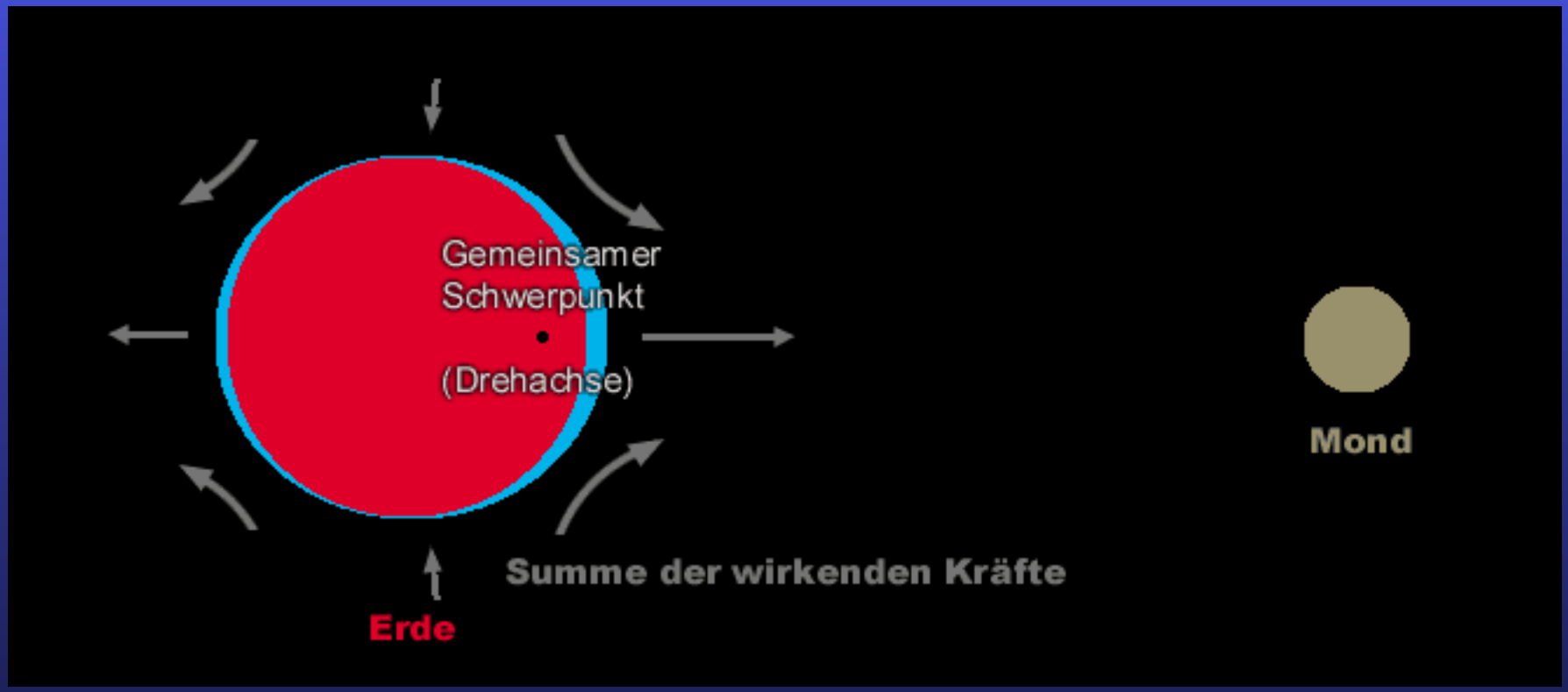
Der rote vorauslaufende Arm zieht am Planeten, der Grüne bremst ihn. Da Grün meist stärker als Rot, wandert der Planet nach Innen.

Ein Volumen mit dem Radius a_H wird durch die Gravitation des Planeten dominiert. a_H definiert die Hill-Sphäre, in der zum Beispiel die Trabanten eines Planeten sind (unser Mond). Ausserhalb dominieren die Gezeitenkräfte der Sonne.

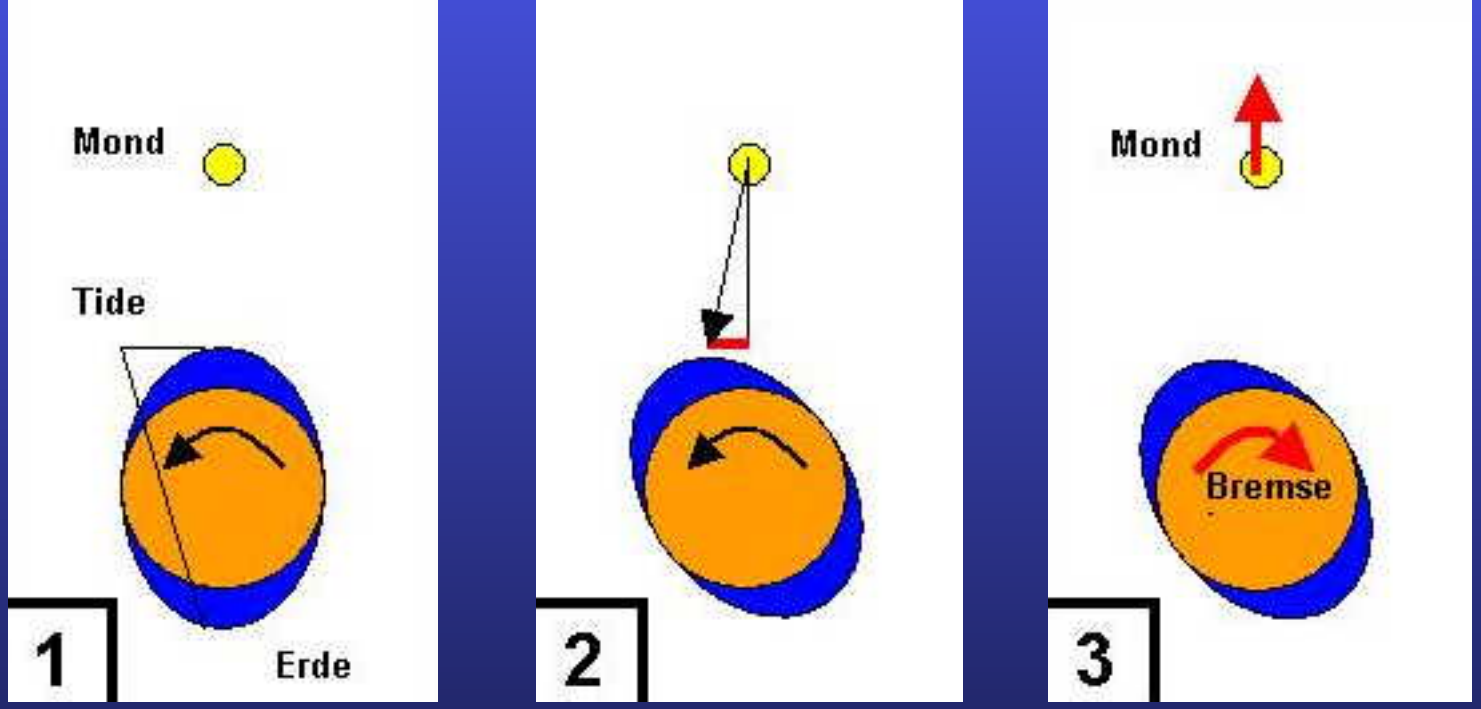




Ist a_H grösser als die Druckskale der Scheibe, so öffnet sich eine Lücke in der Scheibe = weniger Resonanzen möglich - Ergo: Grosse Planeten wandern langsamer (Typ2) als kleinere Planeten (Typ1).



Gezeitenkräfte durch Deformation der Erde.

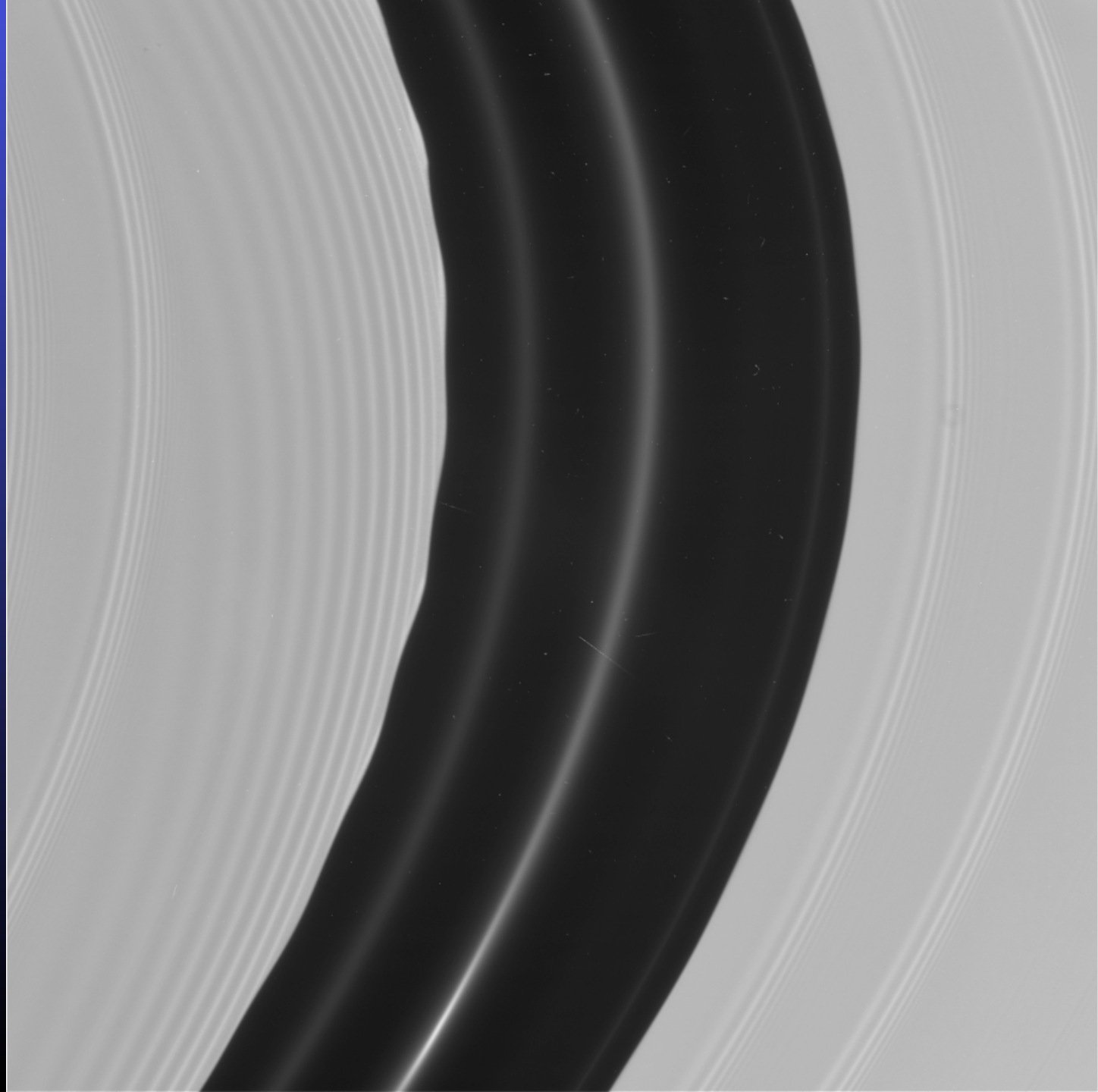


- Drehimpulstransport von Rotation des Erd-Ellipsoiden auf die Mondbahn.
- Ergo entfernt sich der Mond.

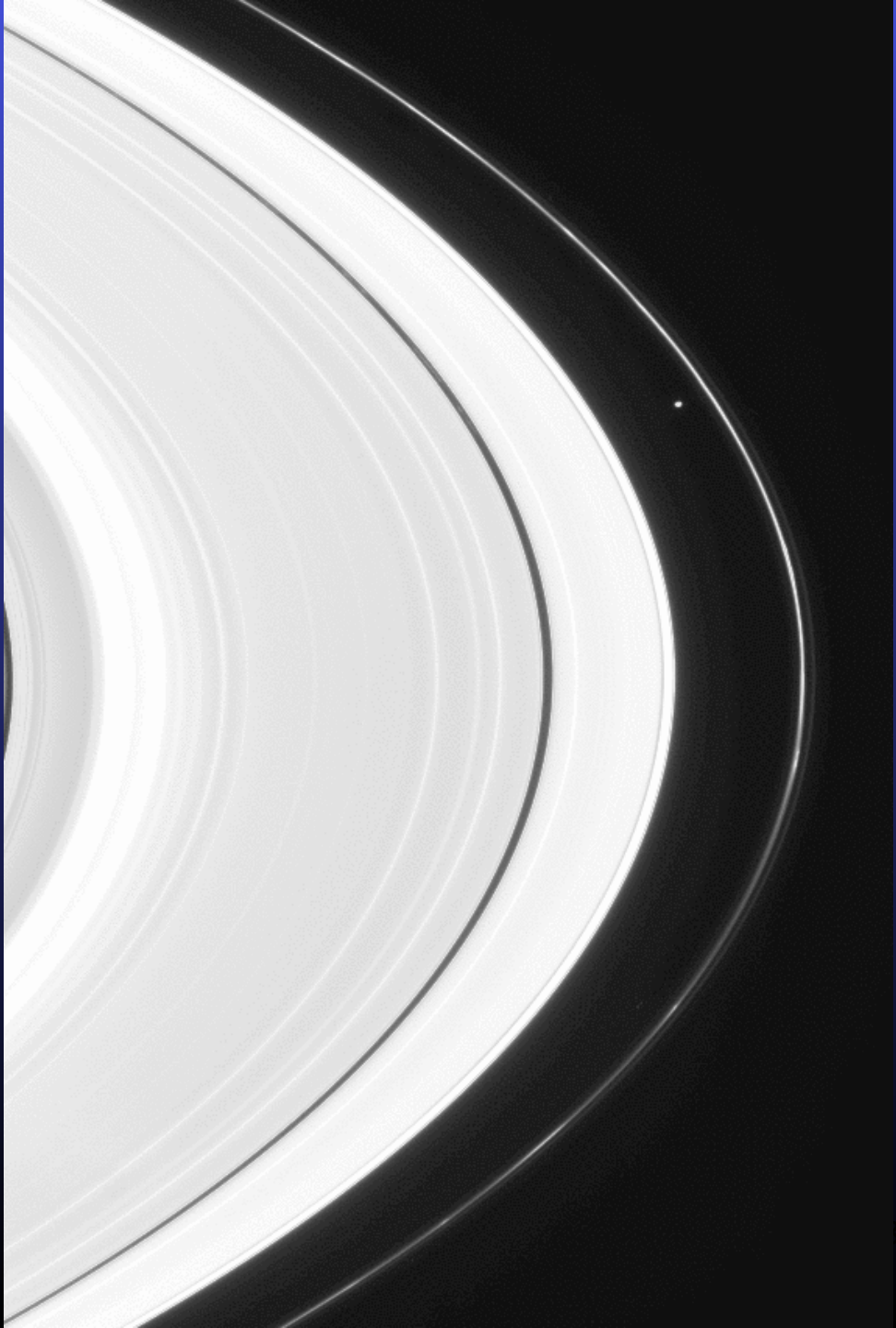
Abstand Erde - Mond wächst

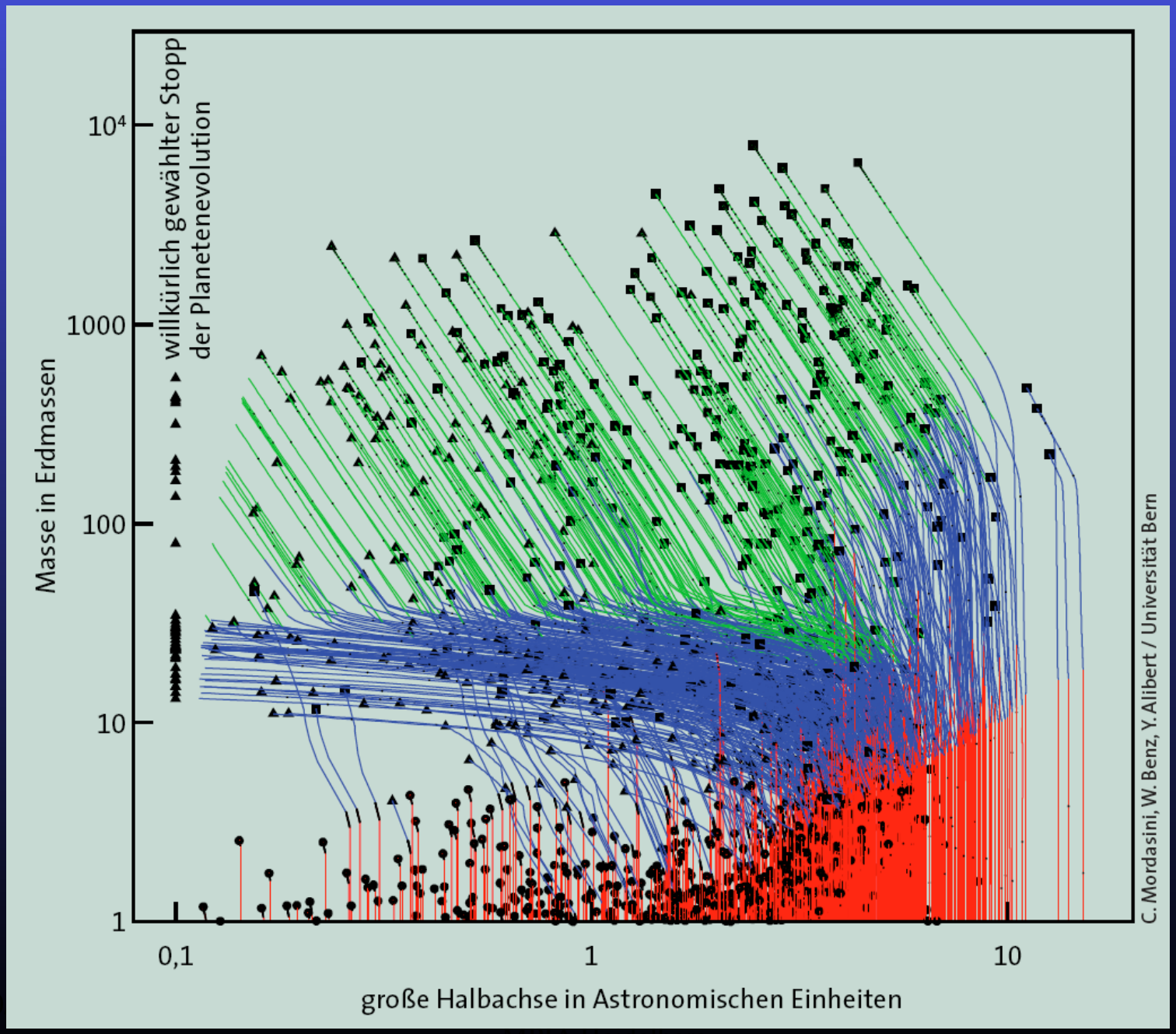
- Heute 384.400 km
- Vor 4527 Millionen Jahren: 60.000 km

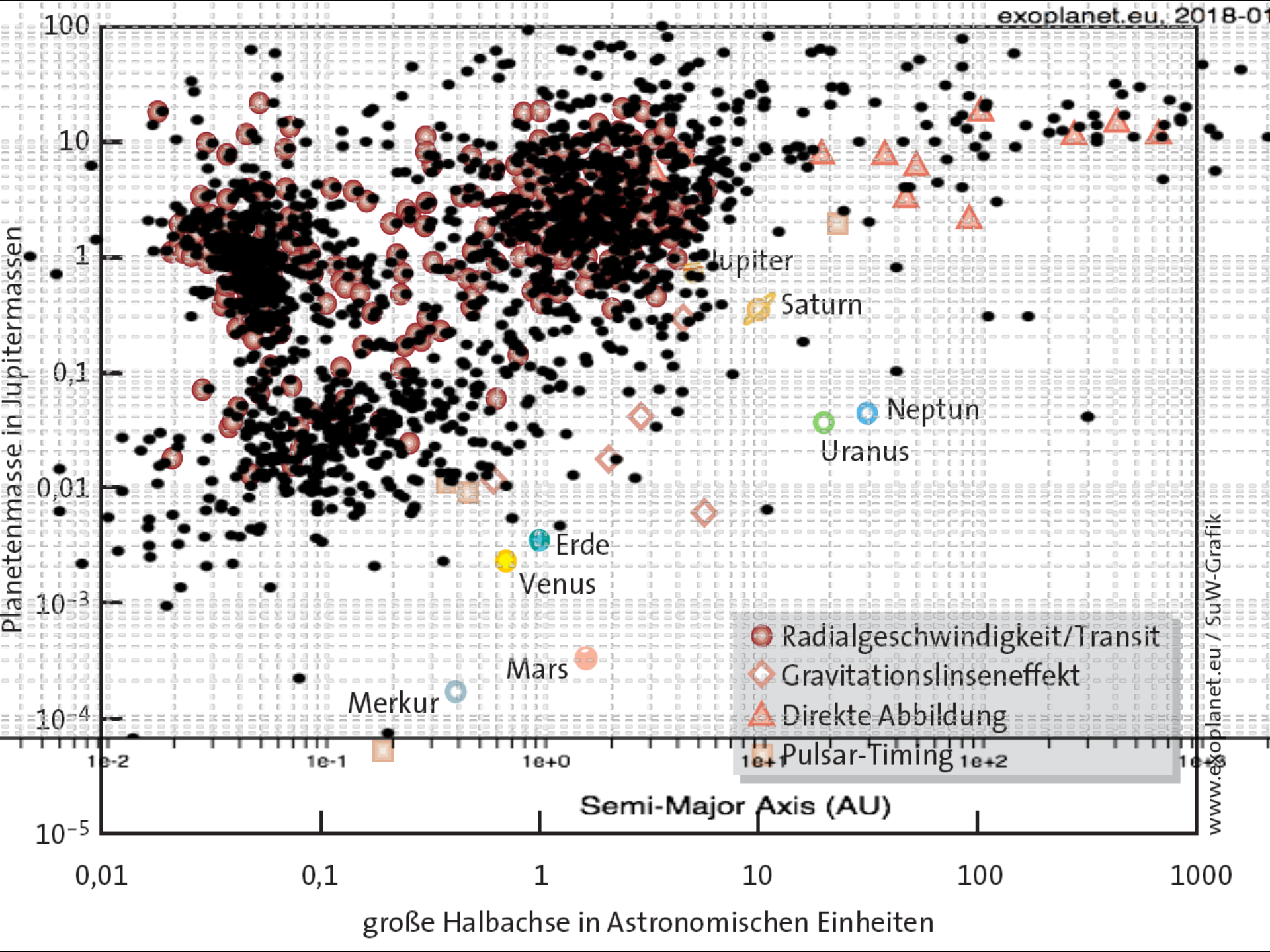
Pan öffnet Encke Trennung im Saturnring



Pan öffnet Encke Trennung im Saturnring




willkürlich gewählter Stopp der Planetenevolution
Masse in Erdmassen
10^4
1000
100
10
1
0,1
1
10
große Halbachse in Astronomischen Einheiten
C. Mordasini, W. Benz, Y. Alibert / Universität Bern


exoplanet.eu, 2018-01
Planetenmasse in Jupitermassen
100
10
1
0,1
0,01
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
Jupiter
Saturn
Neptun
Uranus
Erde
Venus
Mars
Merkur
Radialgeschwindigkeit/Transit
Gravitationslinseneffekt
Direkte Abbildung
Pulsar-Timing
1e-2
1e-1
1e+0
1e+1
1e+2
1e+3
Semi-Major Axis (AU)
0,01
0,1
1
10
100
1000
große Halbachse in Astronomischen Einheiten
www.exoplanet.eu / SuW-Grafik

LETTER

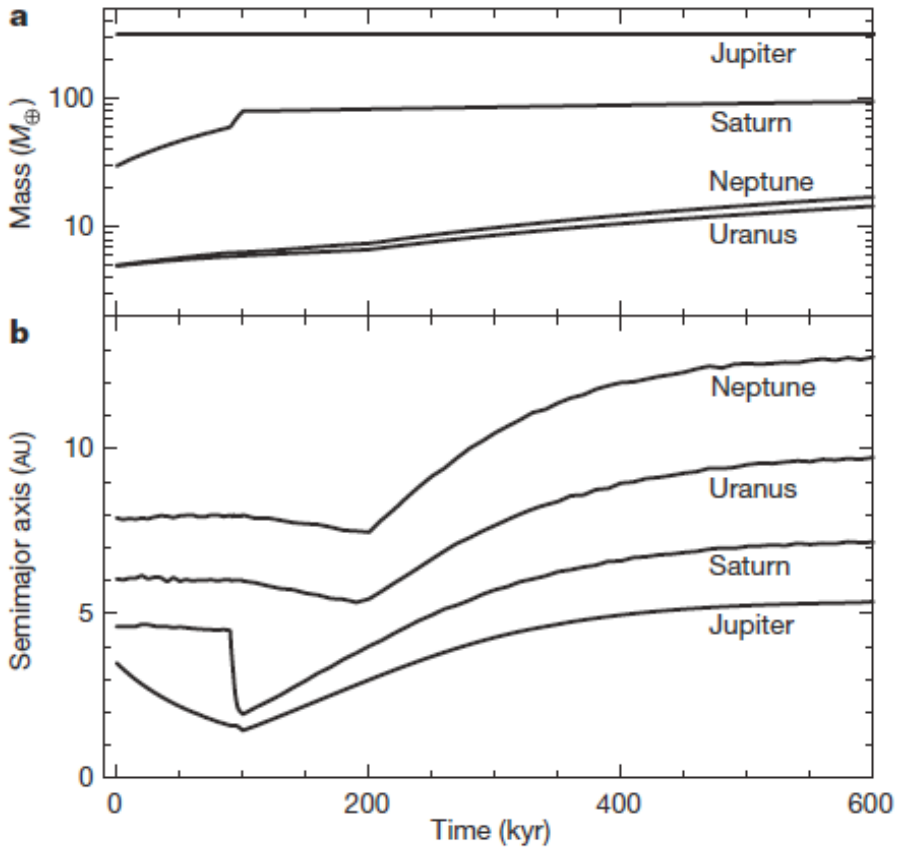
doi:10.1038/nature10201

A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration

Kevin J. Walsh[1,2], Alessandro Morbidelli[1], Sean N. Raymond[3,4], David P. O'Brien[5] & Avi M. Mandell[6]

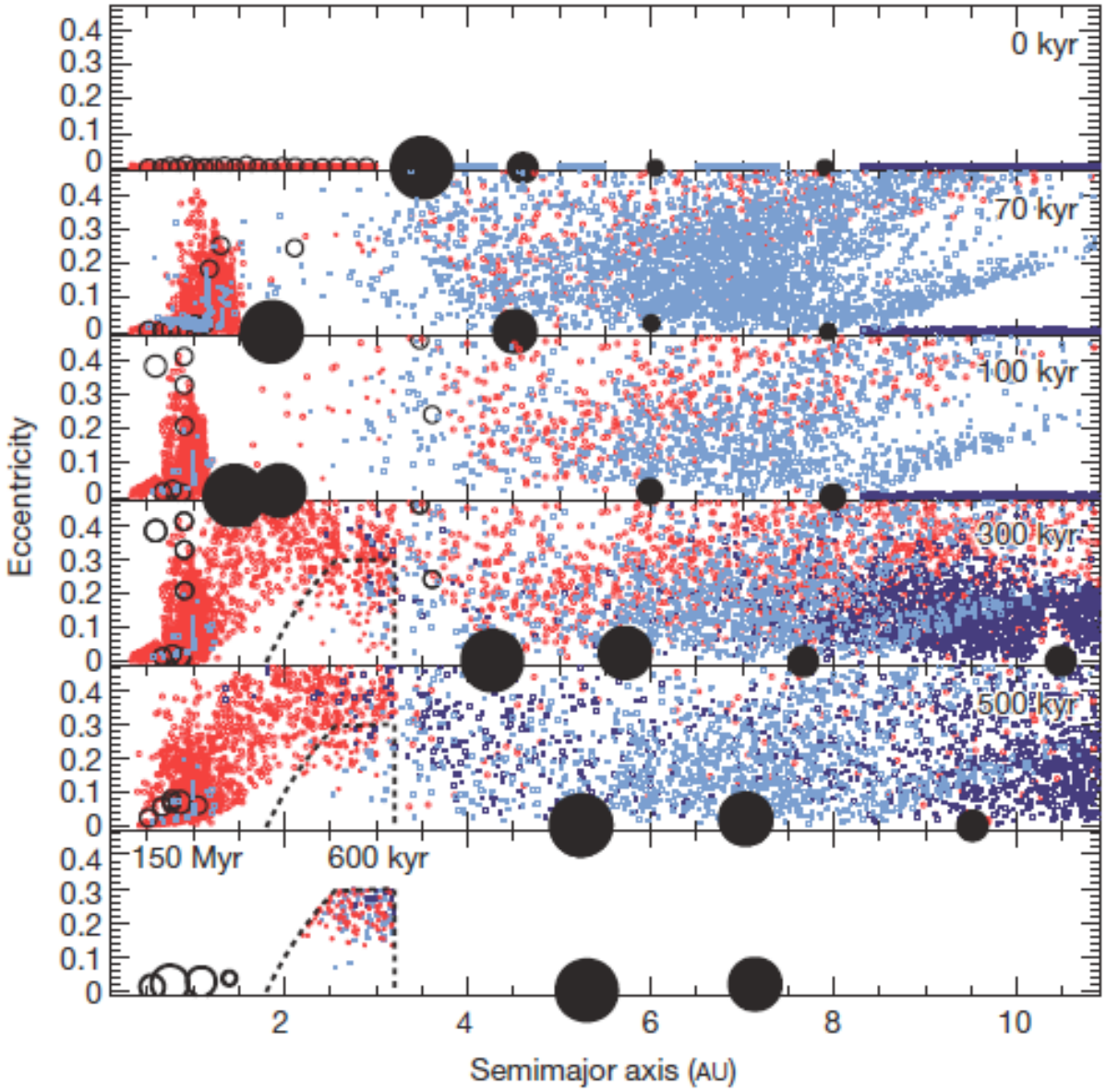
Auch Jupiter und Saturn könnten gewandert sein!

Erst rein, dann wieder raus... ;)



A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration

• **Kevin J. Walsh, Alessandro Morbidelli, Sean N. Raymond, David P. O'Brien & Avi M. Mandell**

Nature **475**, 206–209 (14 July 2011) doi:10.1038/nature10201
Received 01 September 2010 Accepted 01 April 2011 Published online 05 June 2011

Geburtshilfe für die terrestrischen Planeten: