

星・惑星系の形成過程 入門

中本泰史 (東工大)

1. 形成過程の概観
2. 分子雲の重力収縮
3. 原始惑星系円盤
4. 固体微粒子の進化
5. 微惑星から惑星へ
6. 惑星系の形成

A. 惑星系の誕生の様子を探る

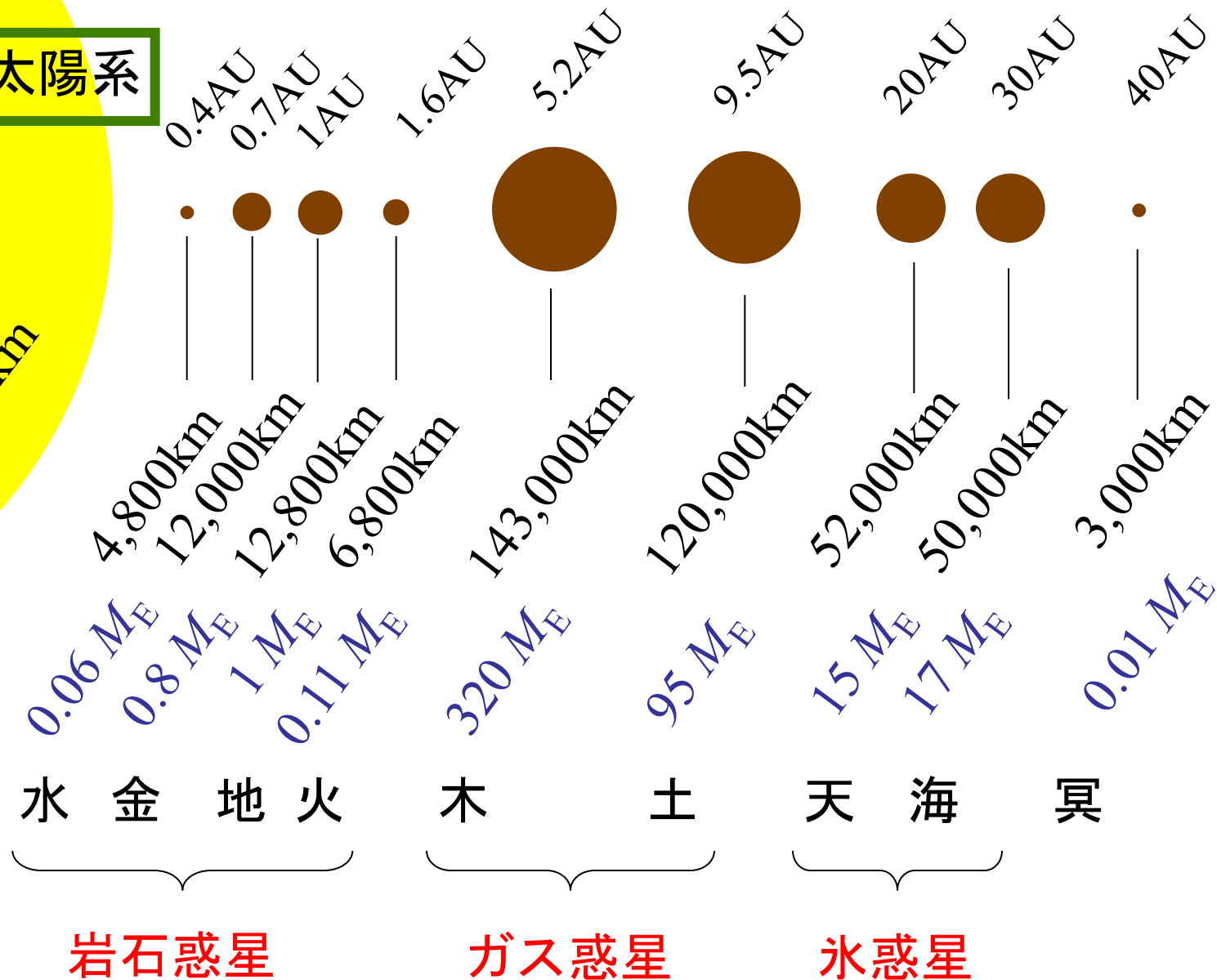
3つの見方

1. 太陽系の現在の姿から推測する
2. 太陽系の過去の痕跡を探す
3. 太陽系の外の例から探る

A-1.太陽系の 現在の姿から探る

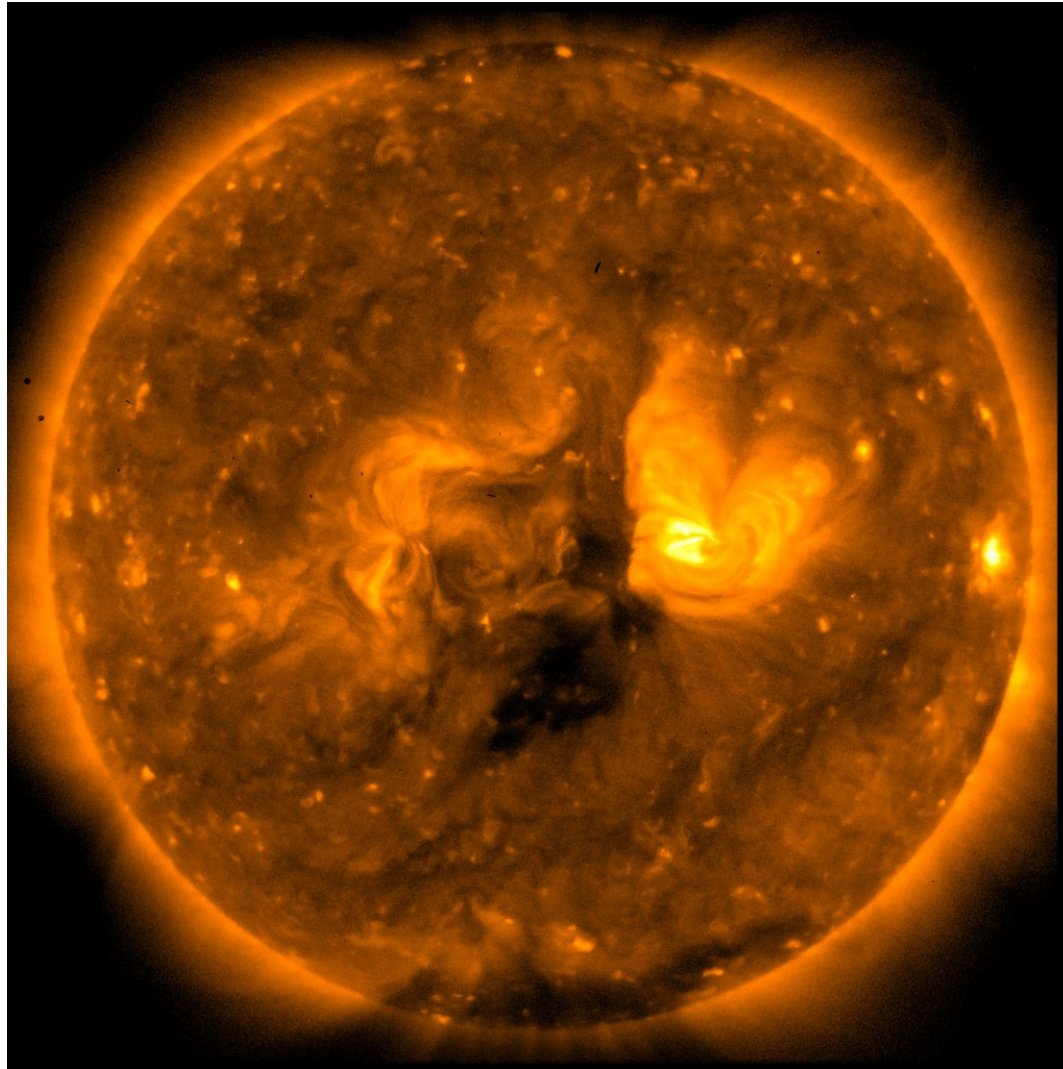
私たちの太陽系

1,400,000km



1 AU = 太陽と地球の距離

太陽



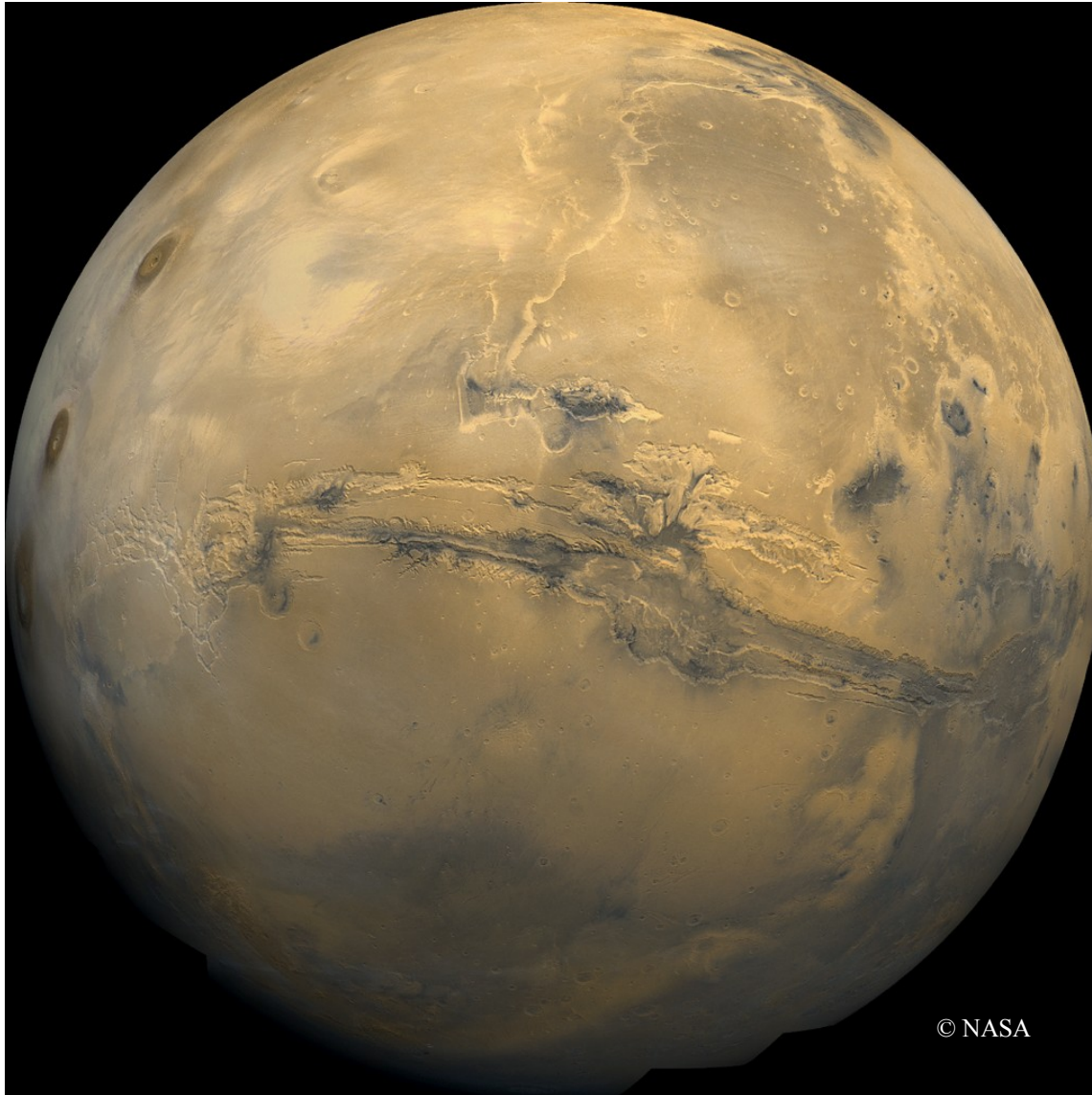
「ひので」 X線望遠鏡

「かぐや」ハイビジョン映像

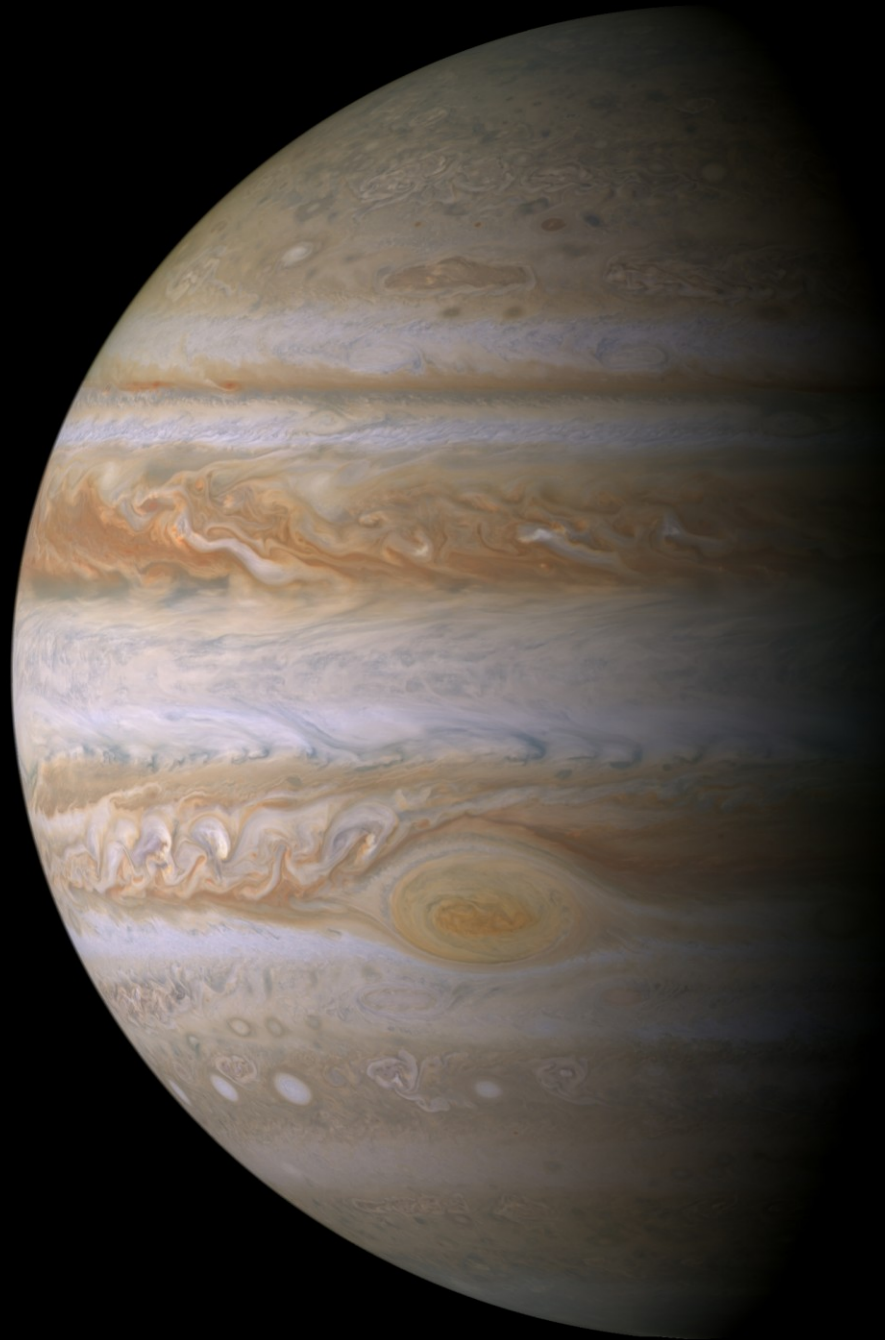


2007年9月29日

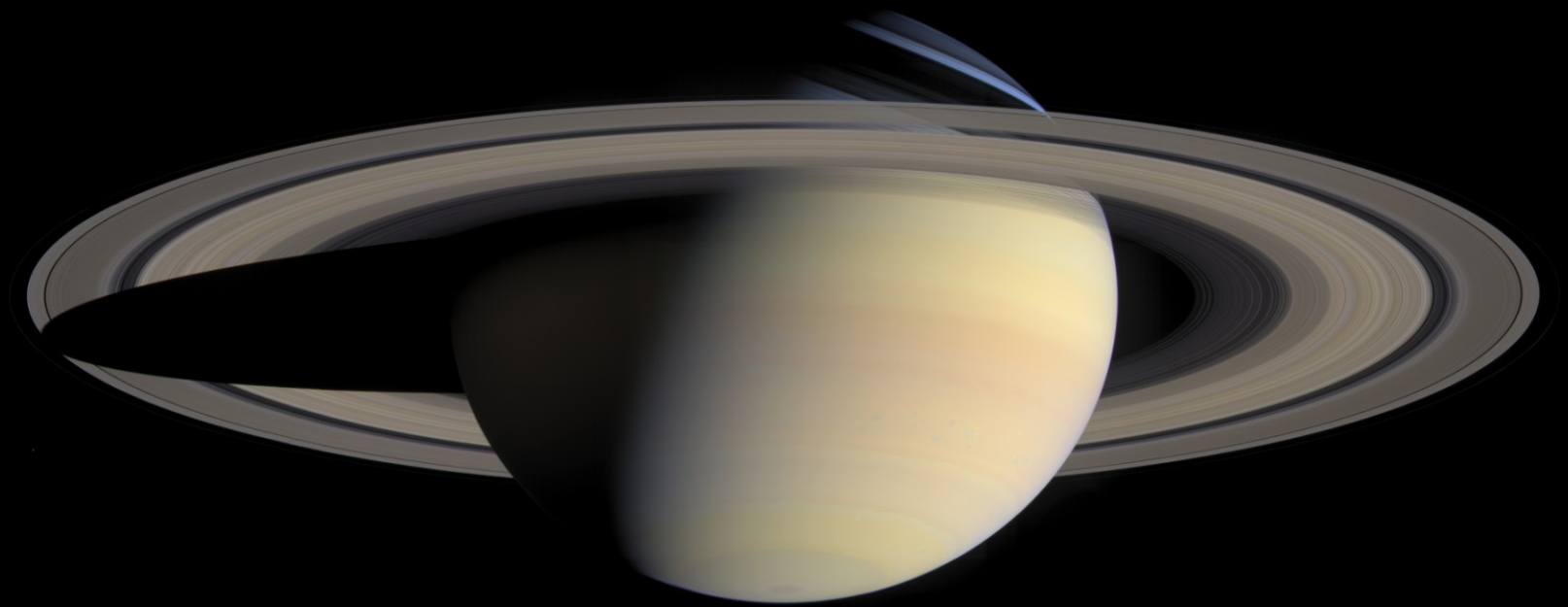
火星



木星

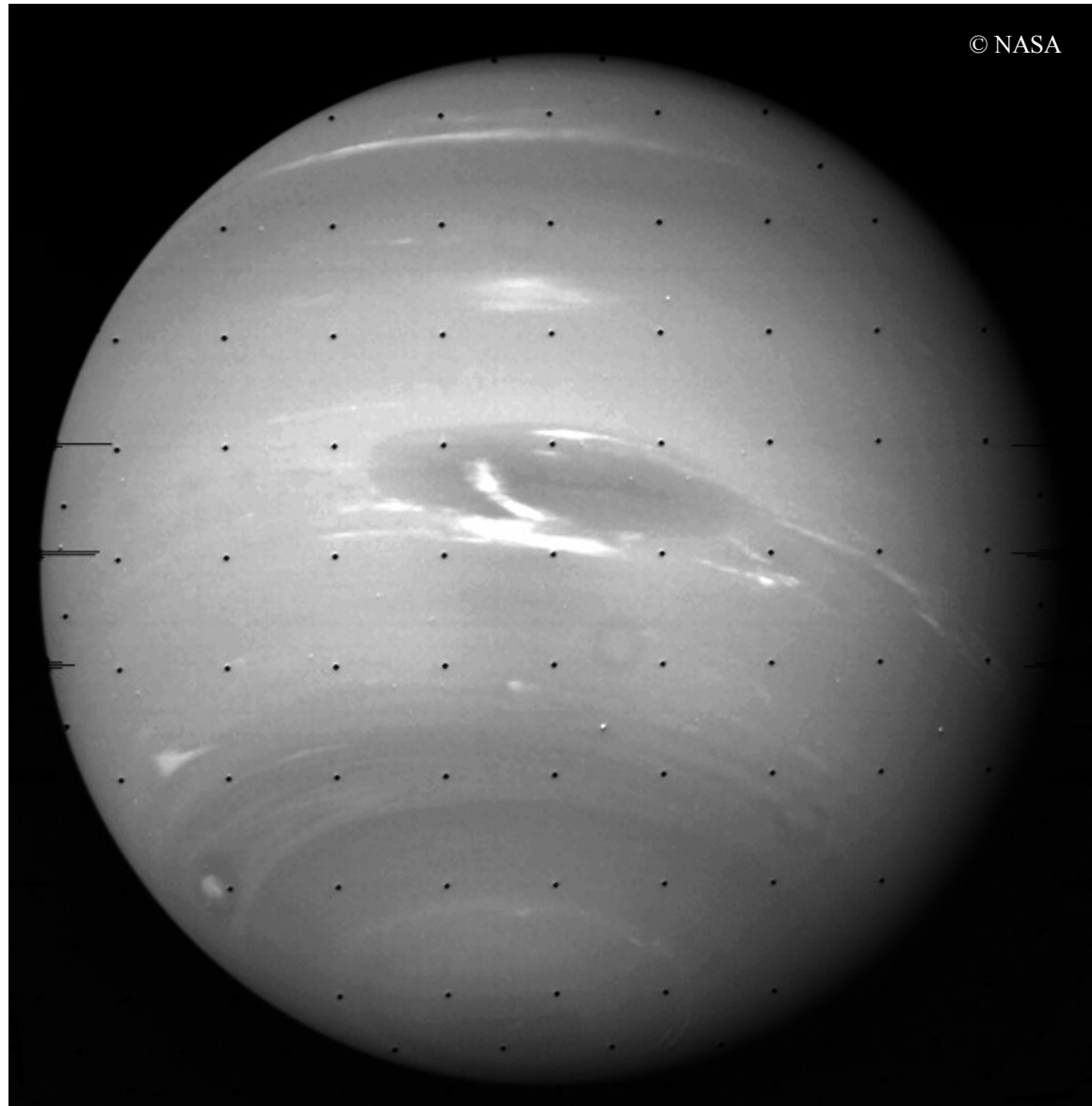


土星

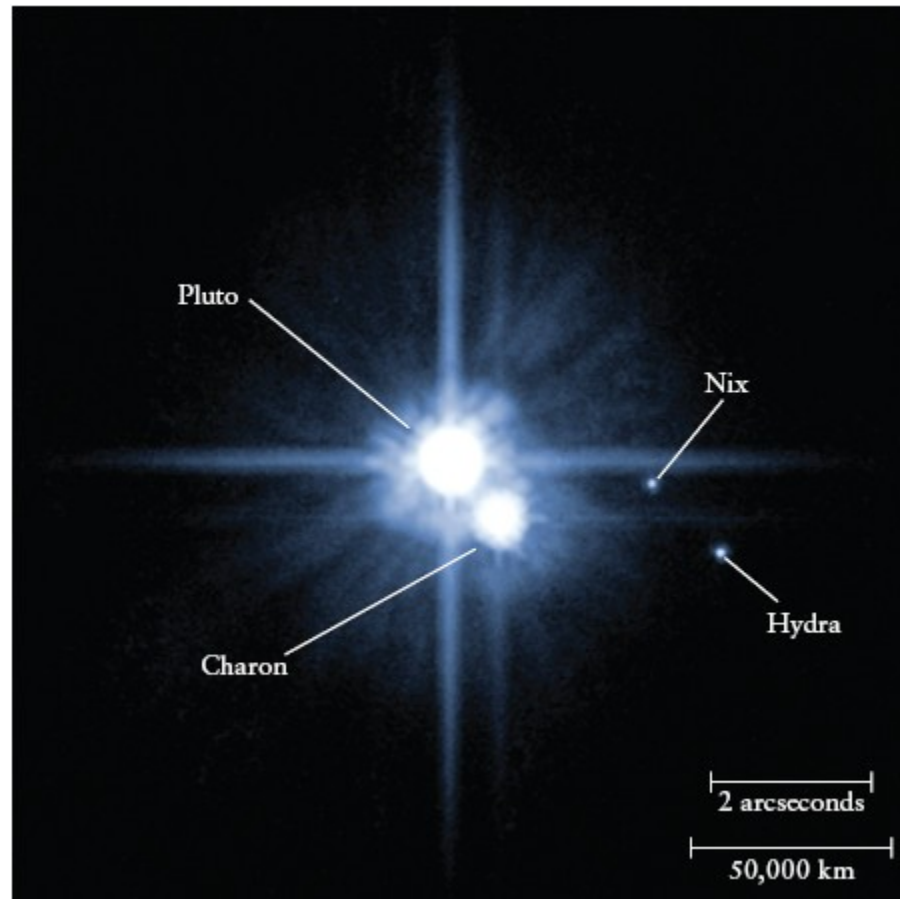


© NASA

海王星



冥王星系



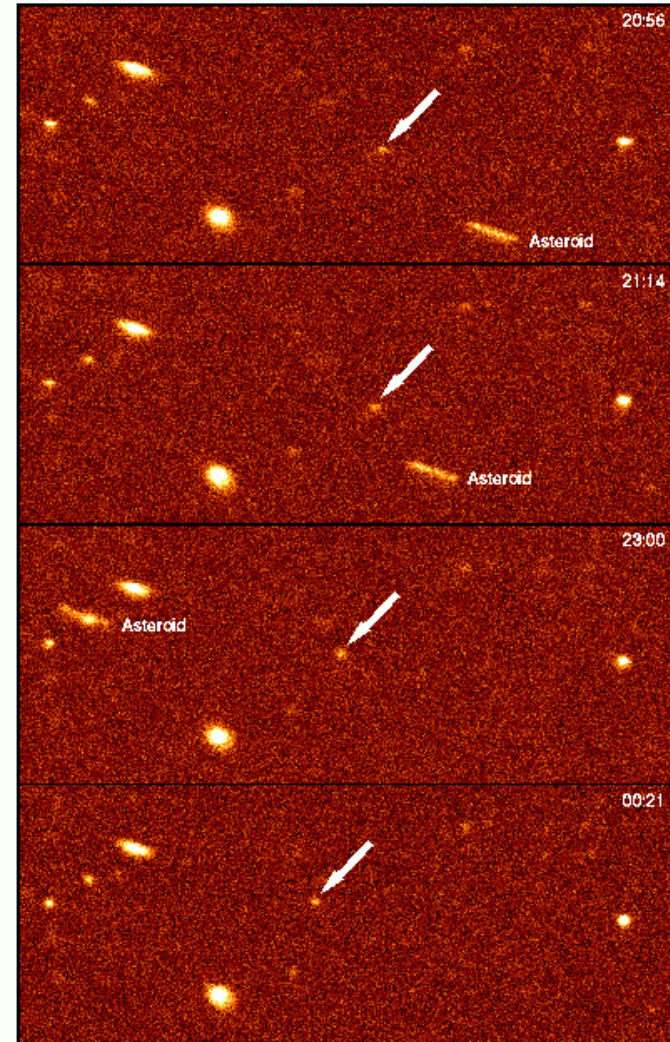
NASA

海王星以遠の天体

1992 QB1

$a = 30\text{-}50 \text{ AU}$

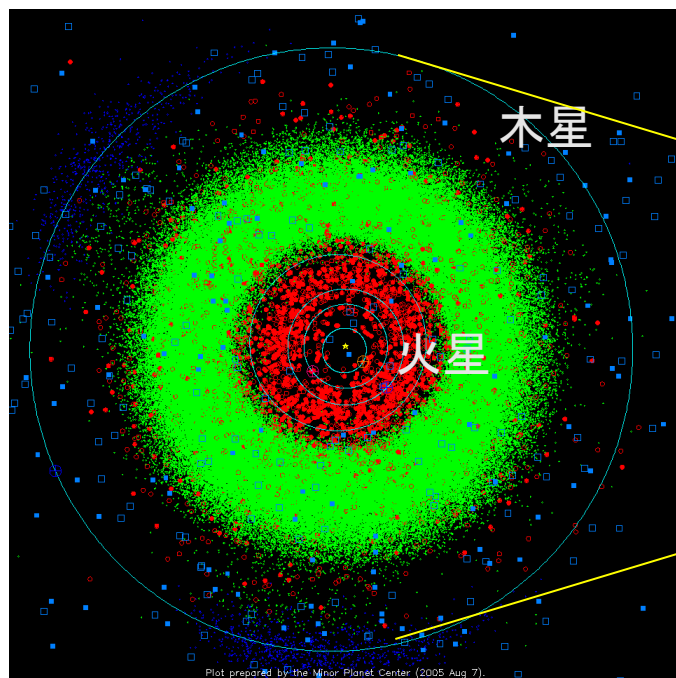
$R \sim 190 \text{ km}$



NASA

太陽系內小天體：小惑星， 太陽系外緣天體

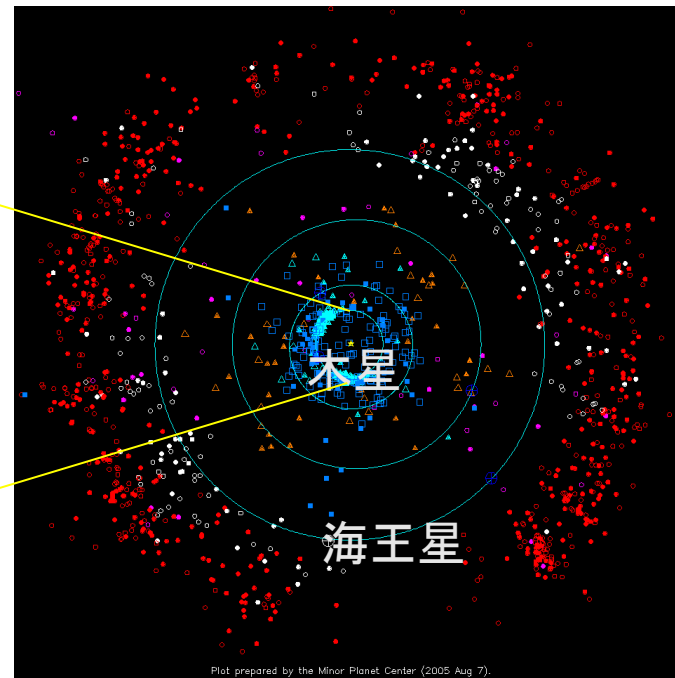
NASA



內側領域 (25萬天體)



5 AU

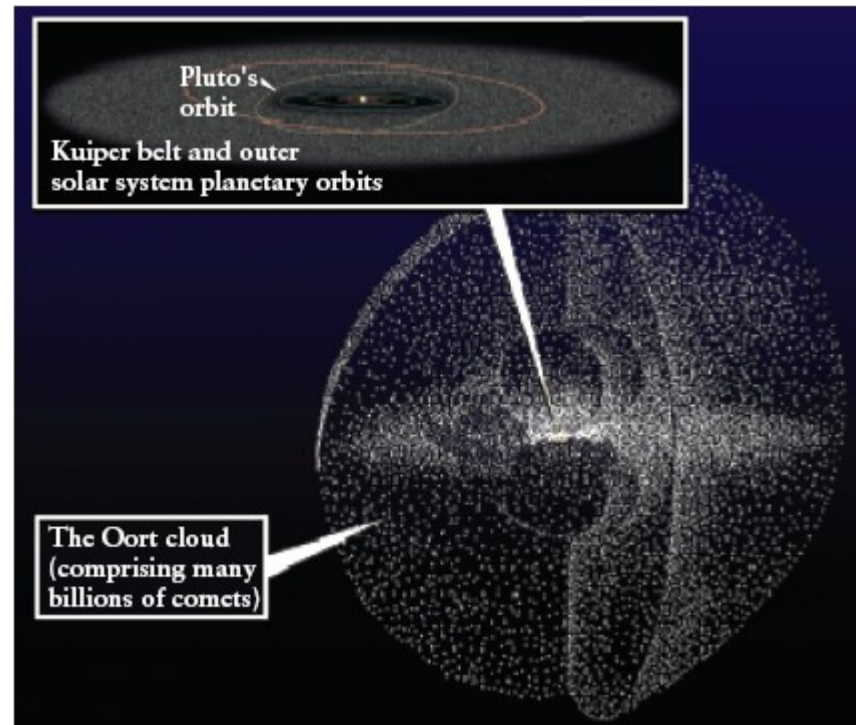


外側領域



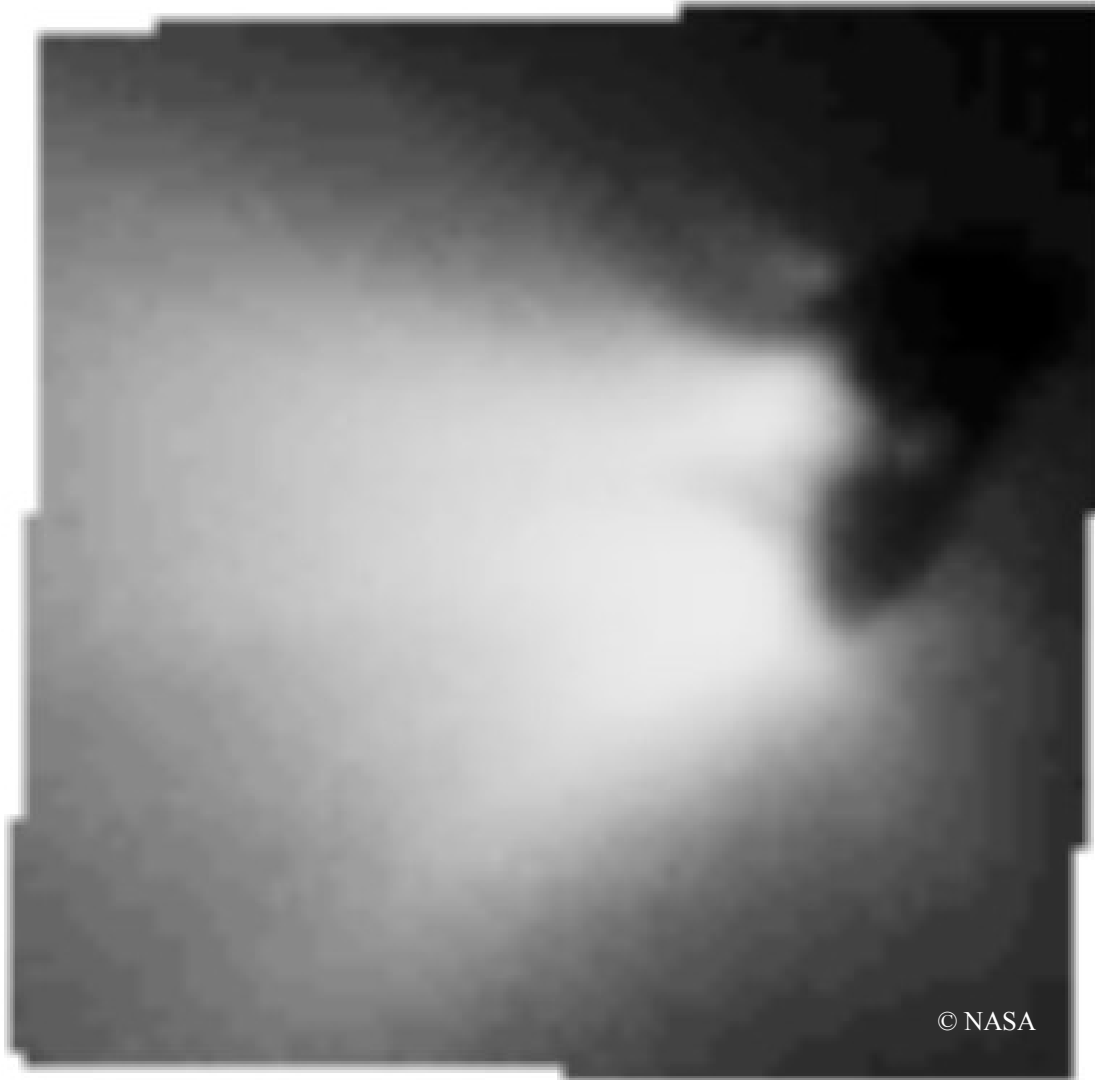
50 AU

オールトの雲

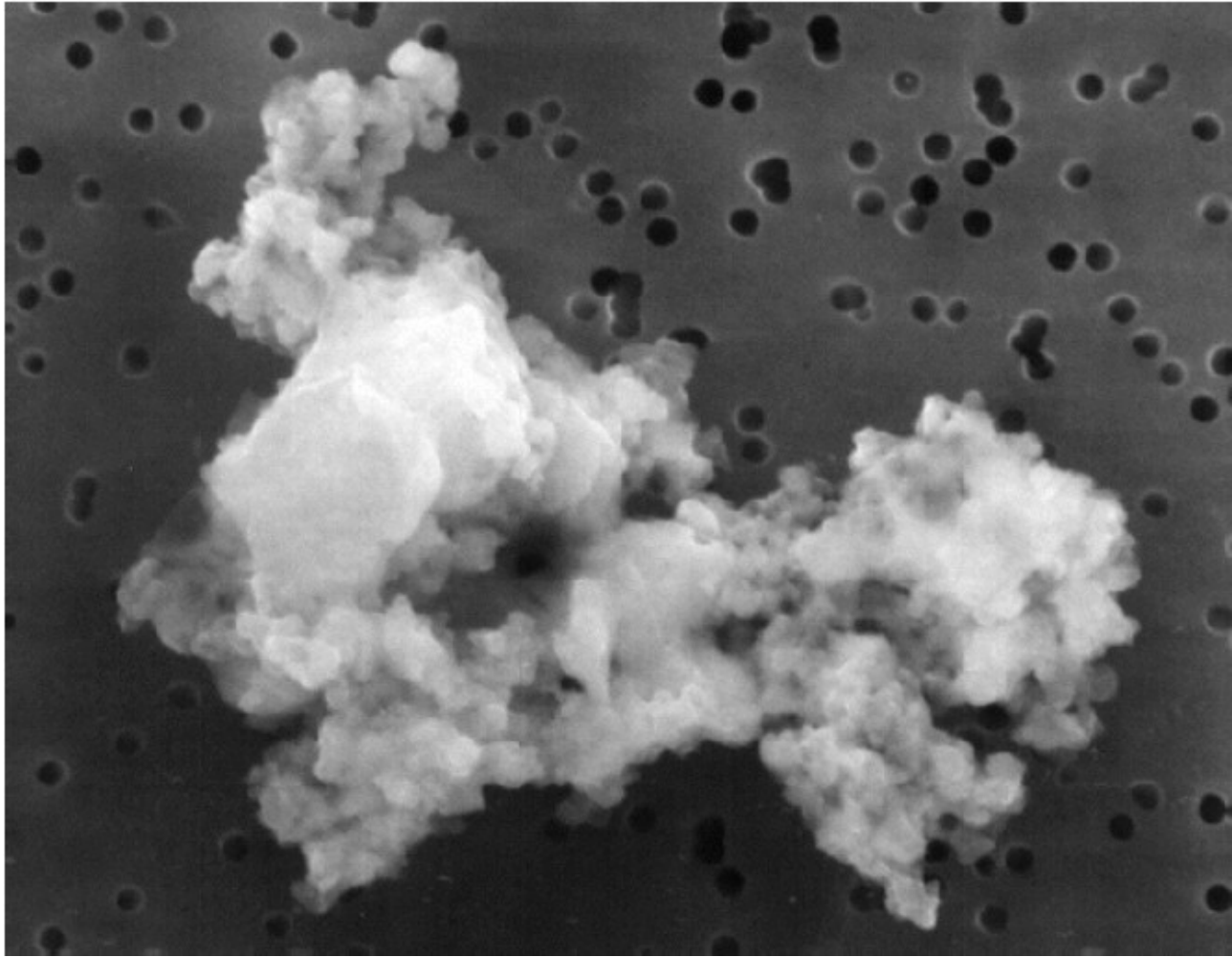


NASA

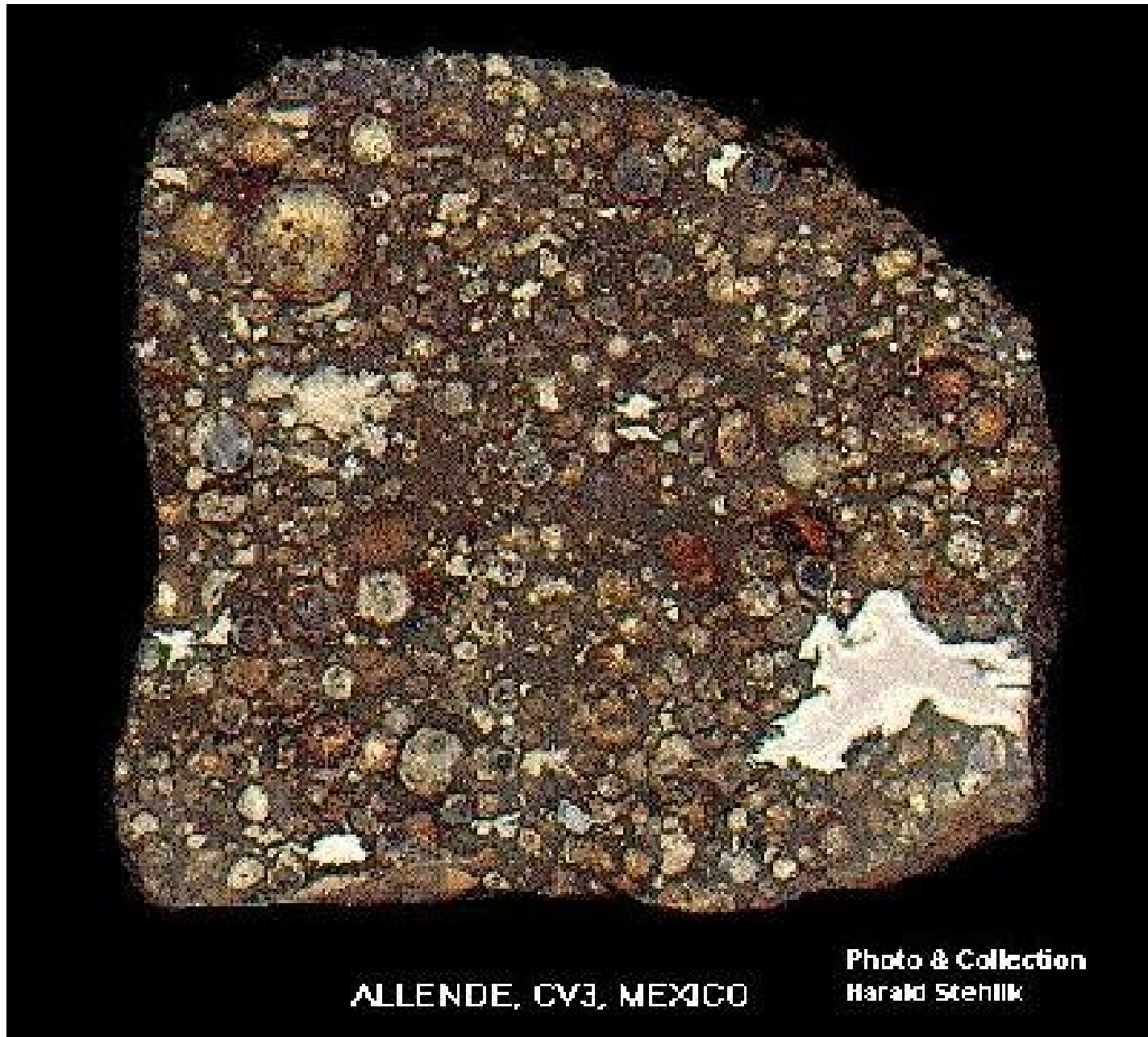
ハレー彗星



惑星間塵



隕石（コンドライト隕石）

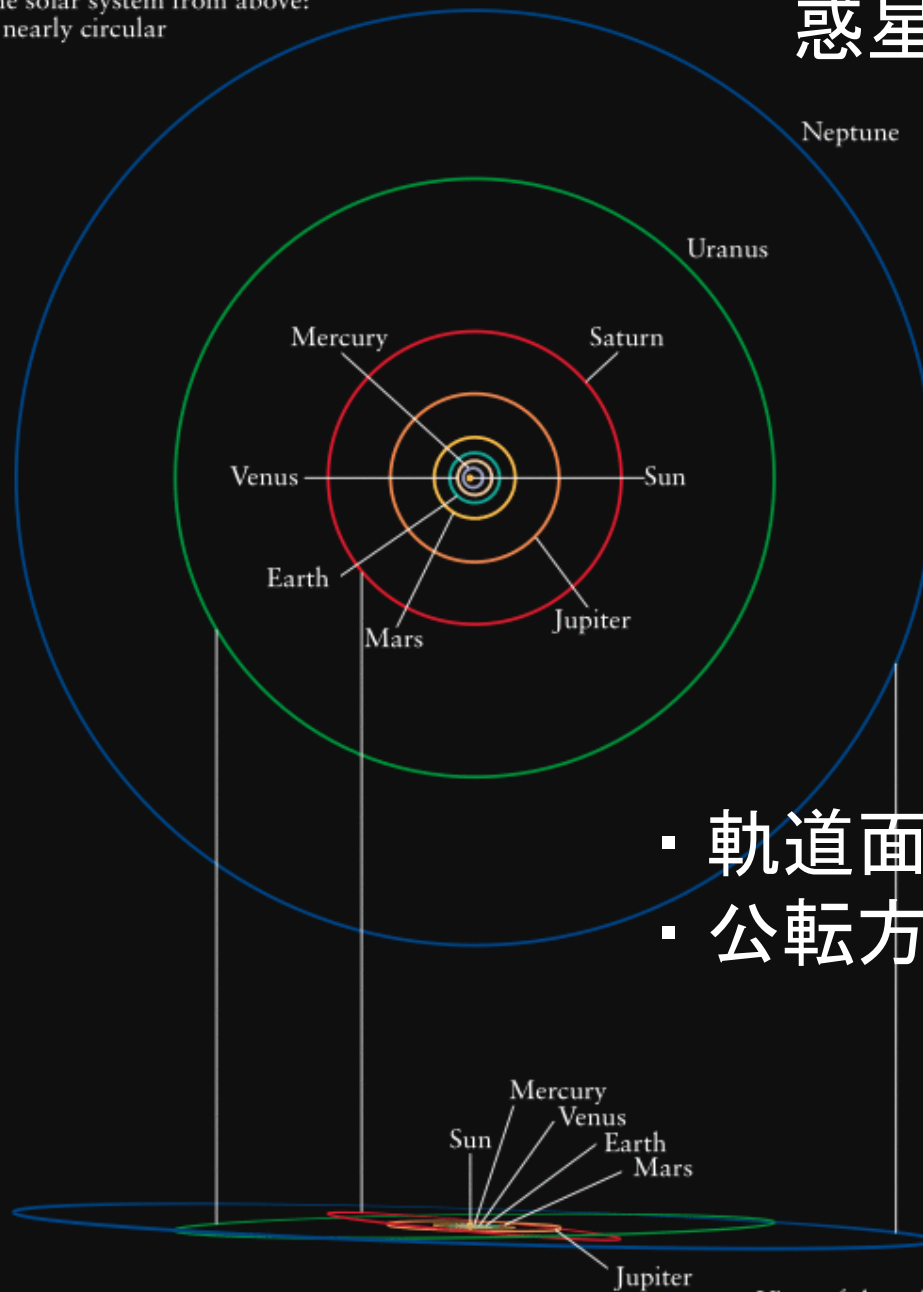


ALLENDE, CV3, MEXICO

Photo & Collection
Harald Stehlik

View of the solar system from above:
orbits are nearly circular

惑星の軌道面



- 軌道面が一致
- 公転方向が一致

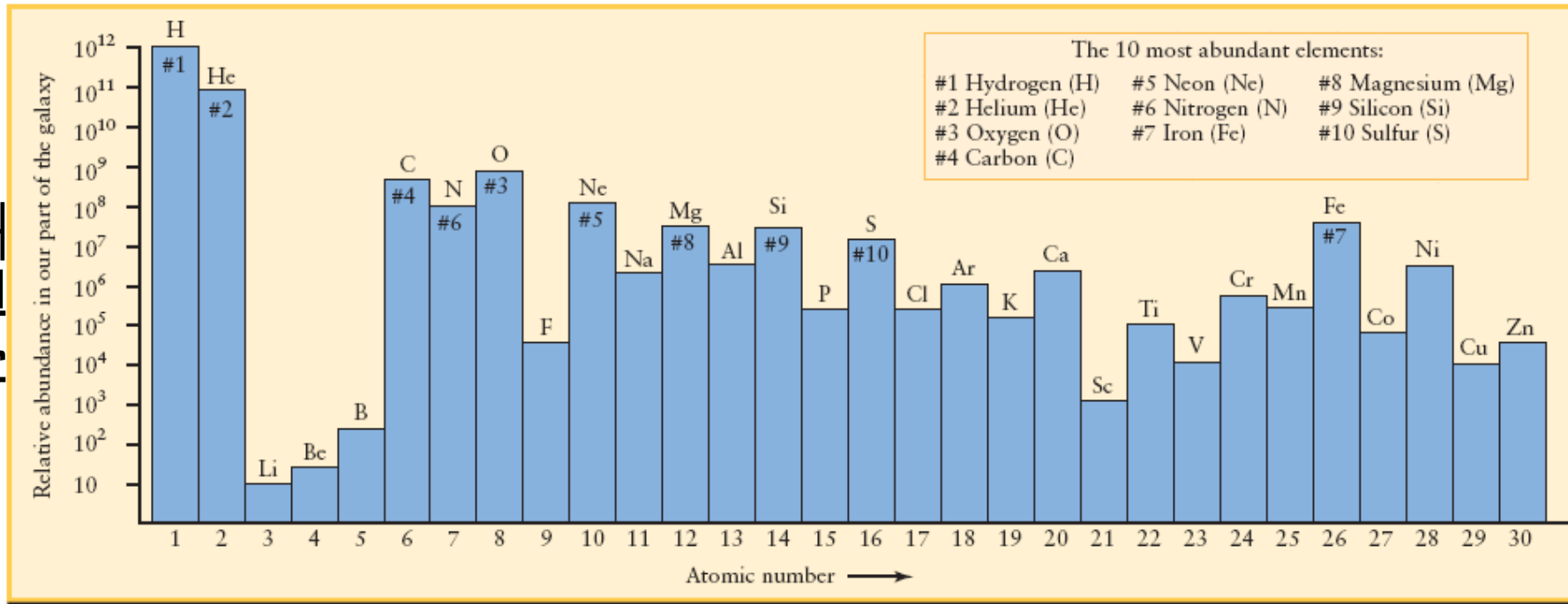
View of the solar system from the side:
orbits are all in nearly the same plane

元素の存在量

水素 ヘリウム 炭素 窒素 酸素 フッ素 ナトリウム マグネシウム アルミニウム シリコン 硫黄

鉄

存在量



原子番号 (= 陽子の数)

大気

内部



木星型惑星の構造

ガス惑星

表面(大気)

内部



太陽系の姿

構成要素：

太陽，惑星，衛星，小惑星，彗星，外縁天体...

質量分布：

太陽 --- 2×10^{30} kg 99.86%

全惑星 -- 3×10^{27} kg 0.14%

公転：

惑星はほぼ同じ面上を，同じ方向に公転
軌道はほぼ円

組成：

水素 70.6%

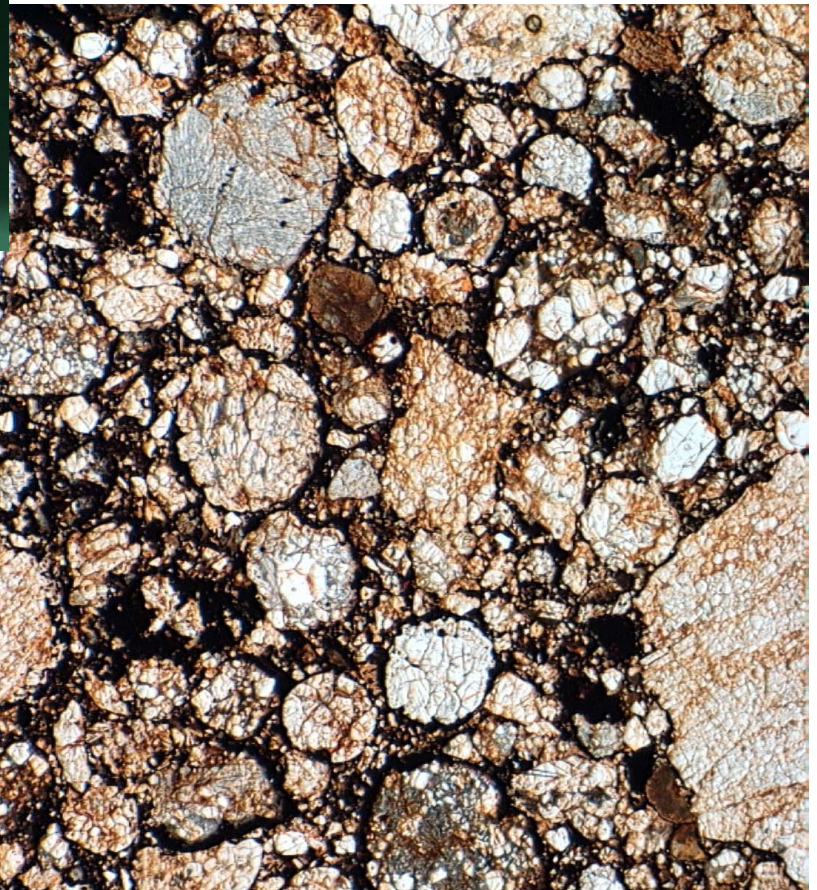
ヘリウム 27.5%

重元素 1.9% (原子番号3以上の元素)

惑星の組成は太陽とは異なる

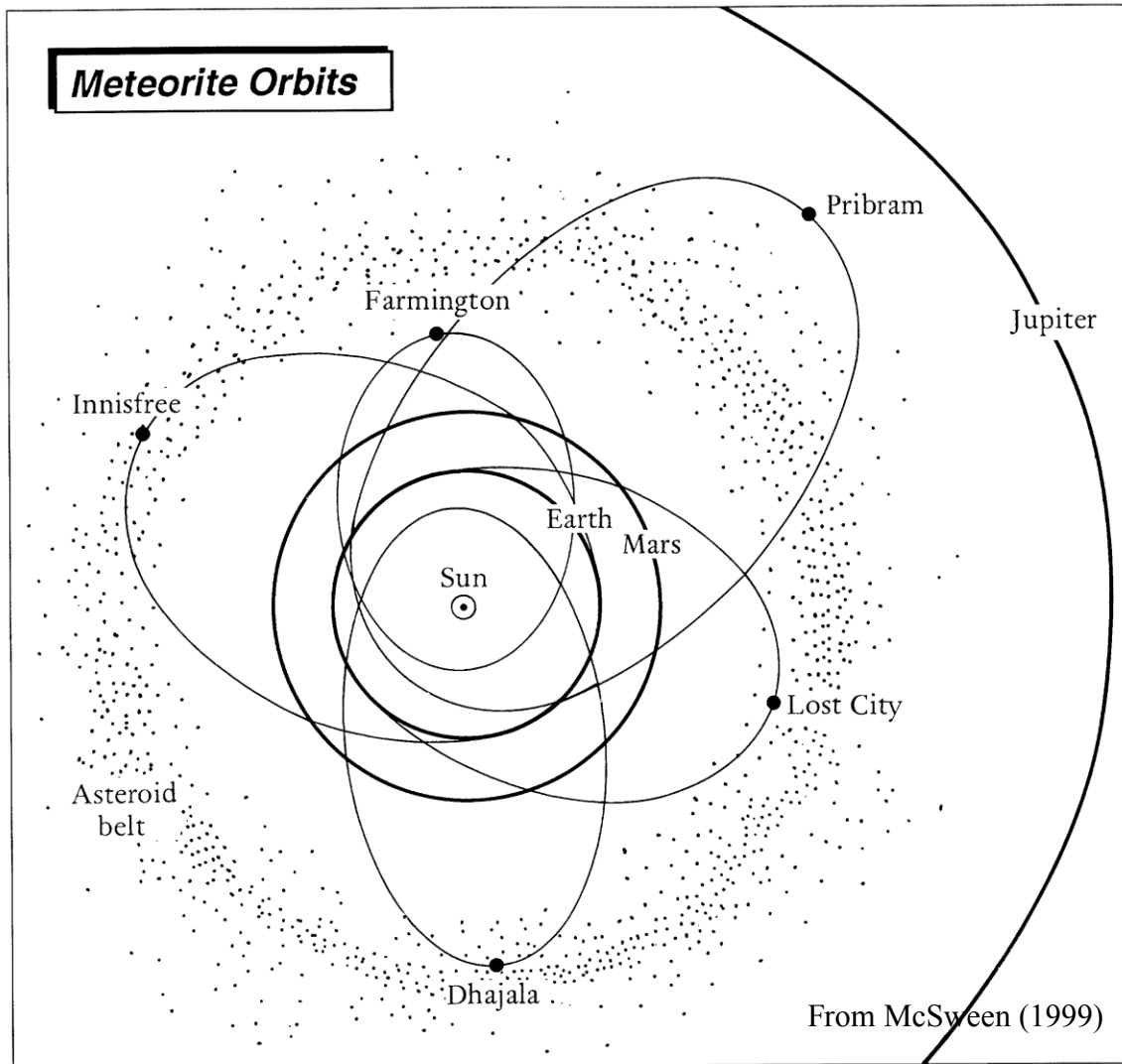
A-2.太陽系の 過去の痕跡から探る

隕石



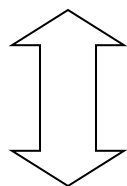
1mm

隕石の軌道



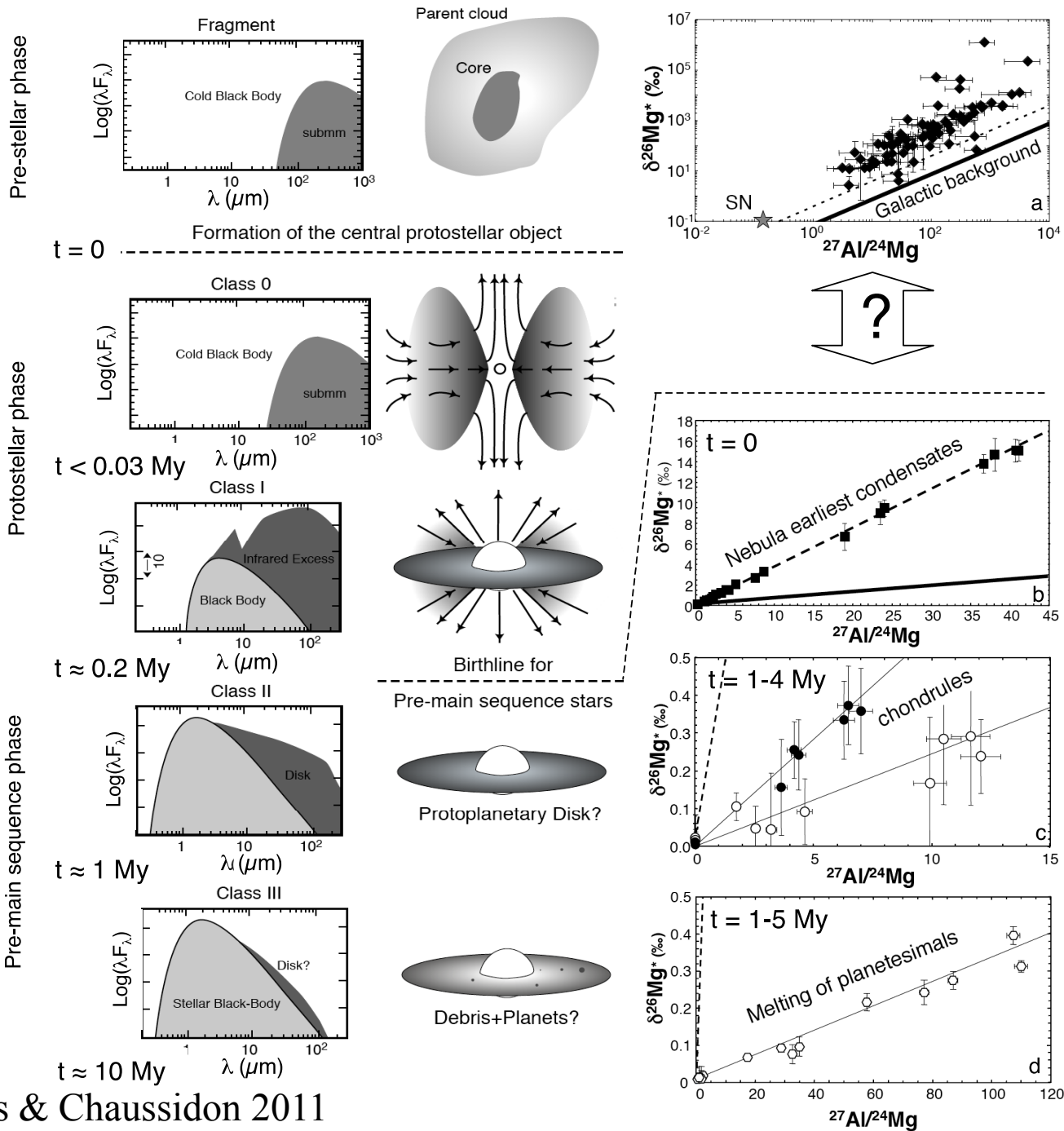
隕石の年齢

45.6億年 --- 放射性年代測定

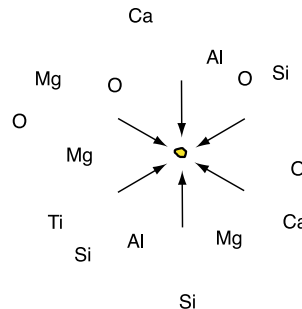
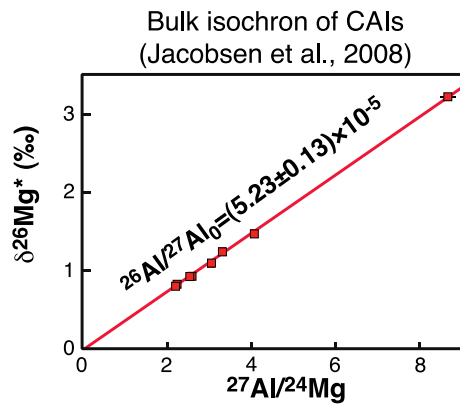


太陽系の年齢

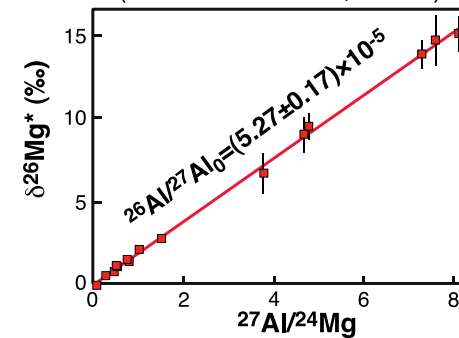
注：宇宙の年齢 = 137億年



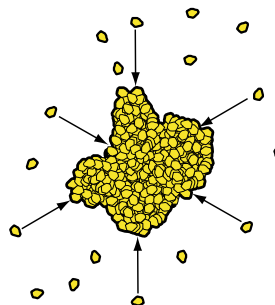
Condensation of 1-10 μm dust from nebular gas



Internal isochron of a fine-grained CAI
(MacPherson et al., 2010a)



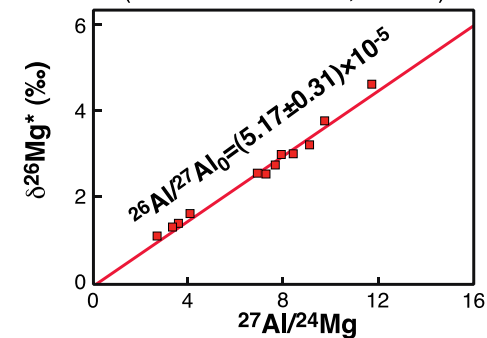
Agglomeration into mm-cm objects



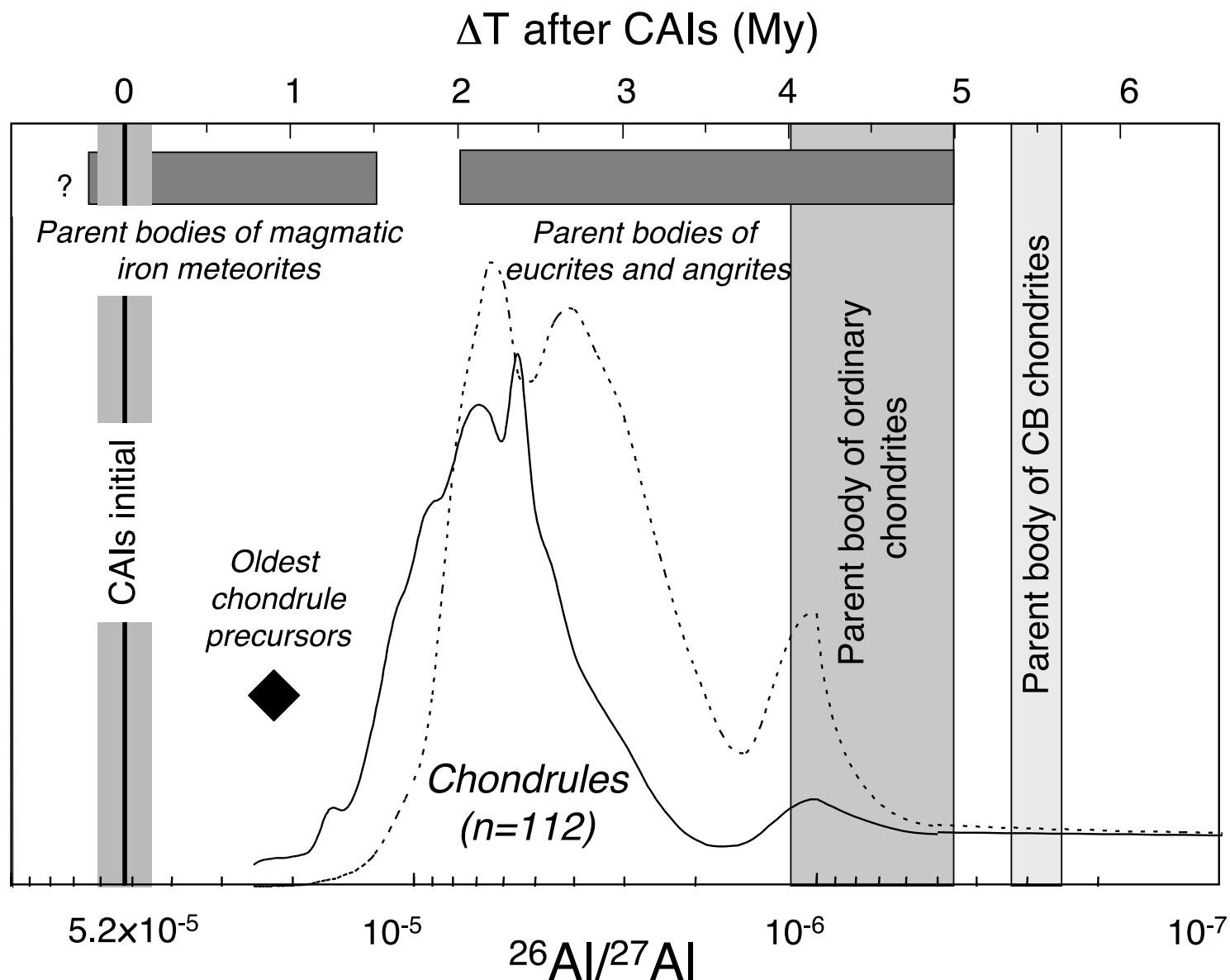
Melting and crystallization

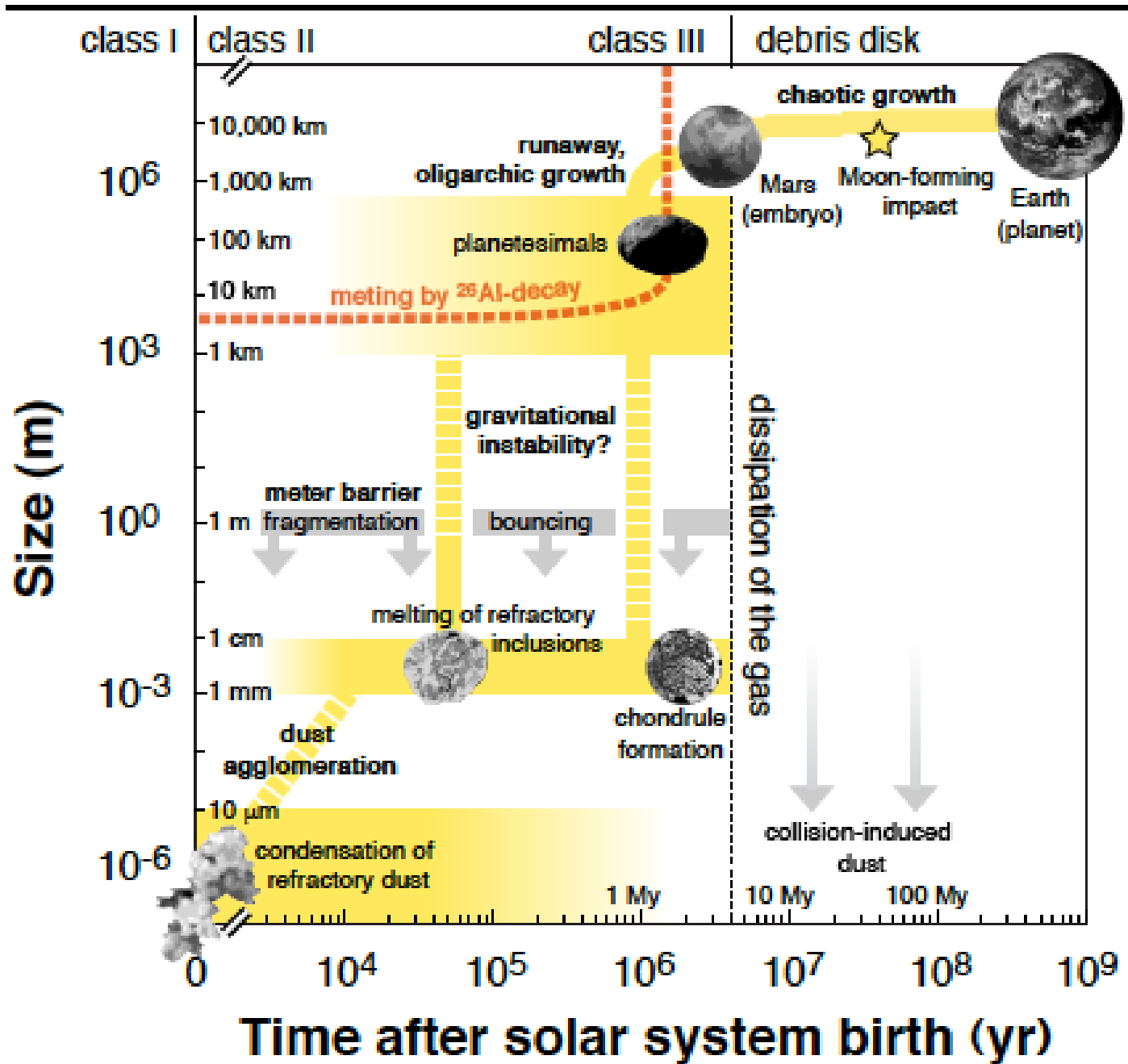


Internal isochron of an igneous CAI
(MacPherson et al., 2010b)



< 50 ky





A-3. 太陽系の外の例 から探る

星形成領域 (1)

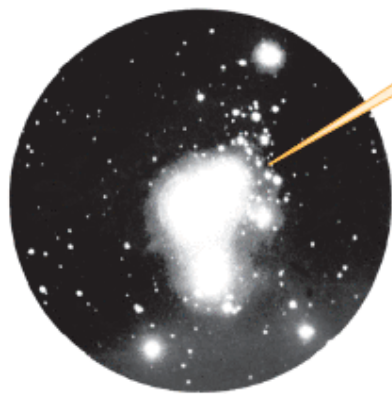
オリオン座

巨大分子雲

距離：1500光年

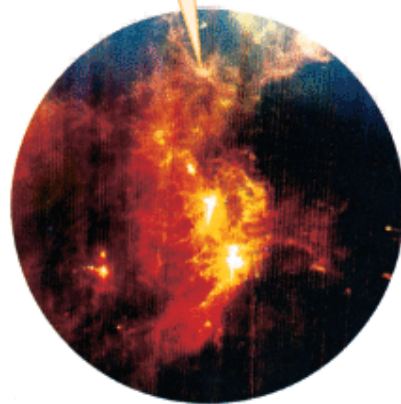
大質量星・
小質量星が
生まれている





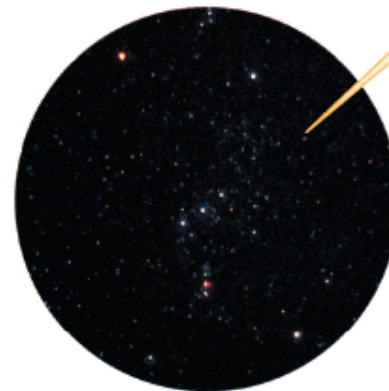
R I V **U** X G

(a) Ultraviolet Orion



R **I** V U X G

(b) Infrared Orion



R I **V** U X G

(c) Visible Orion



(d) A star chart of Orion

Immense clouds of dust are heated by hot, luminous, newly-formed stars; the clouds glow at (a) ultraviolet and (b) infrared wavelengths

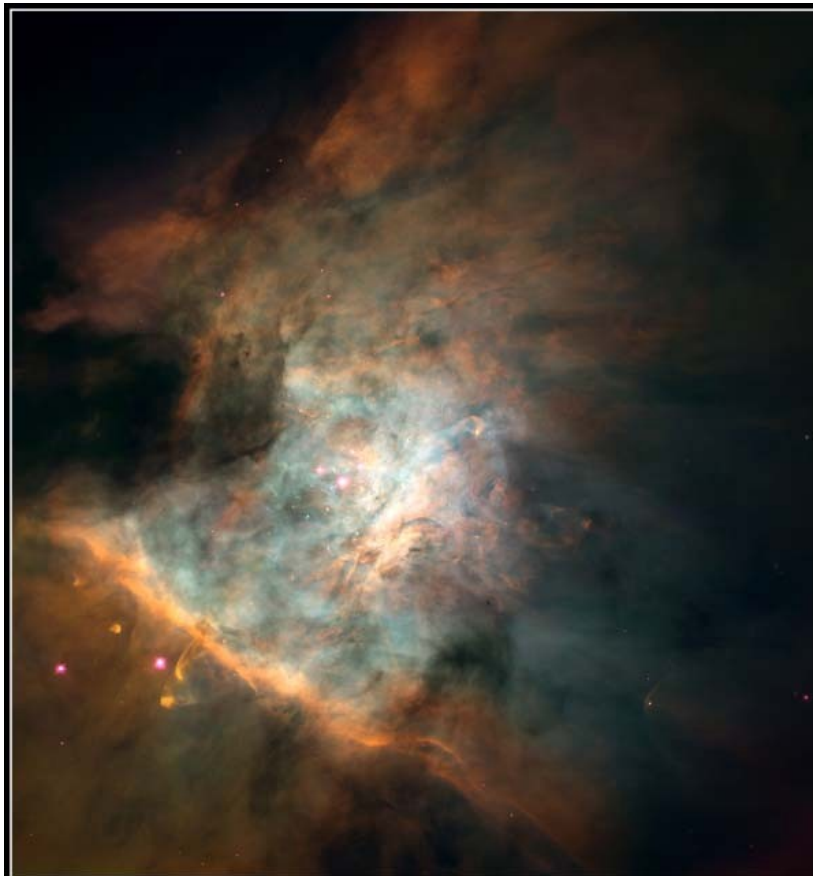
At visible wavelengths the dust is opaque, obscuring the newly-formed stars

紫外線

赤外線

可視光

NASA



Orion Nebula Mosaic

HST · WFPC2

PRC95-45a · ST ScI OPO · November 20, 1995
C. R. O'Dell and S. K. Wong (Rice University), NASA



**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

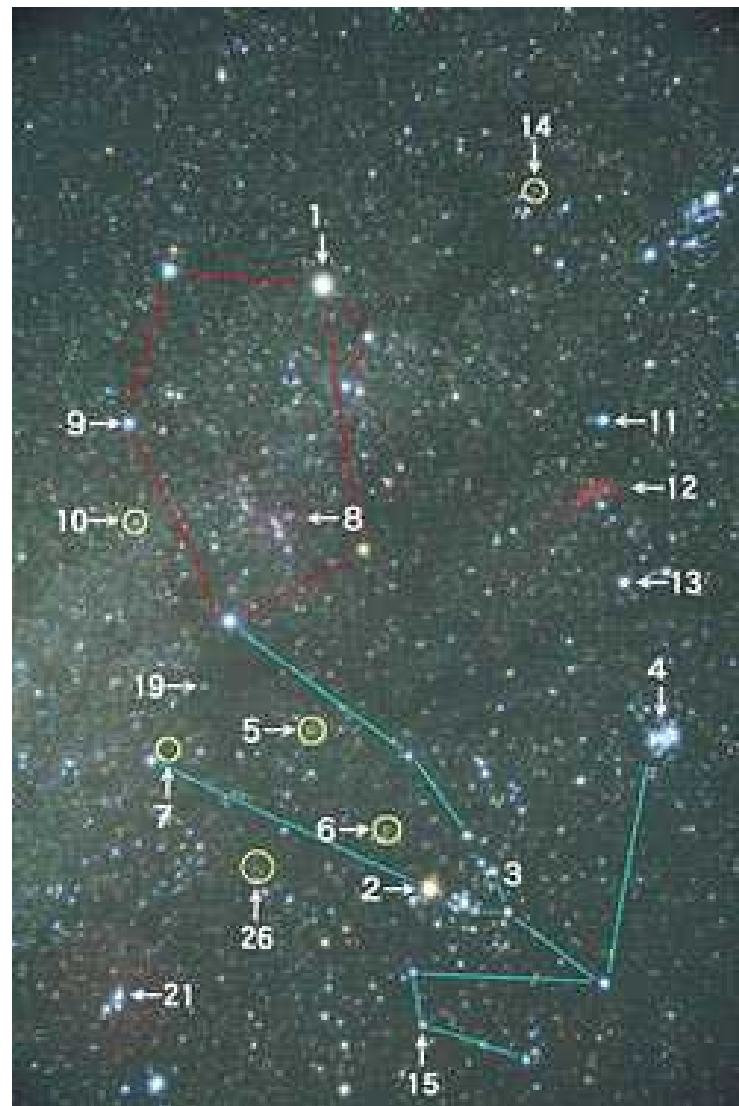
星形成領域 (2)

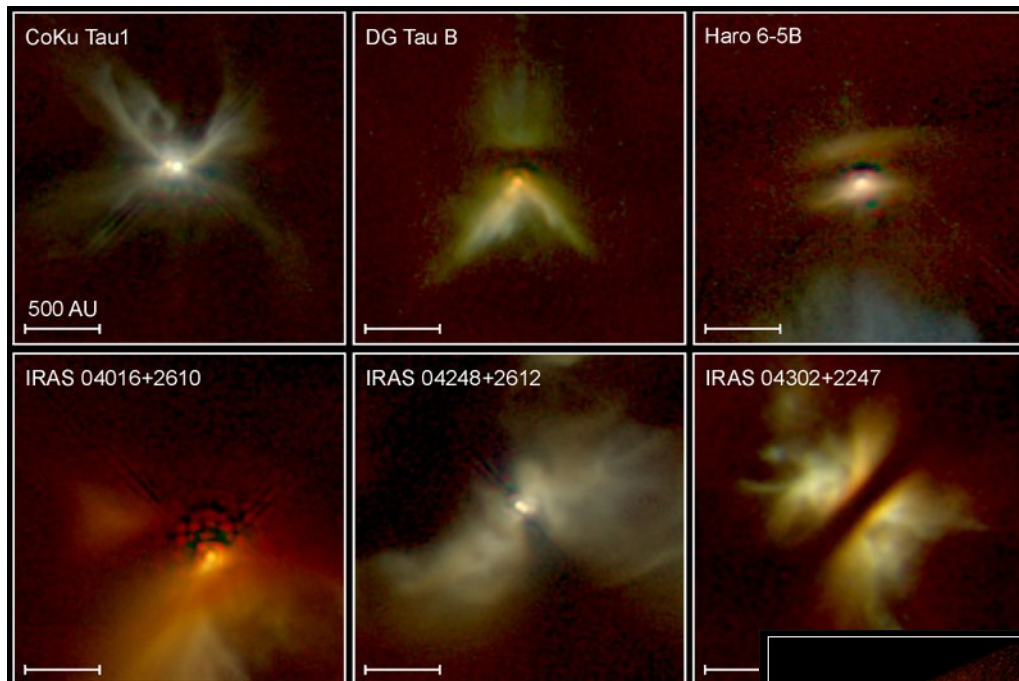
おうし座・ぎょしゃ座

暗黒星雲

距離 140pc

小質量星のみが
生まれている

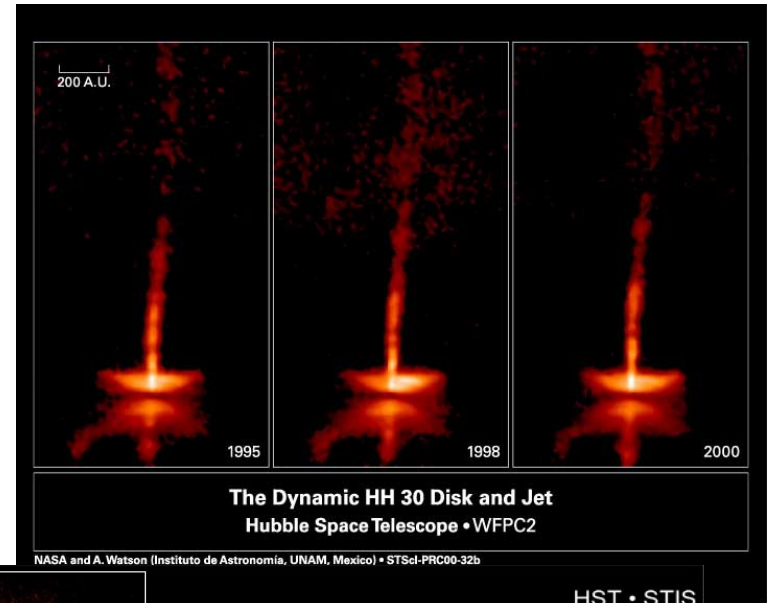




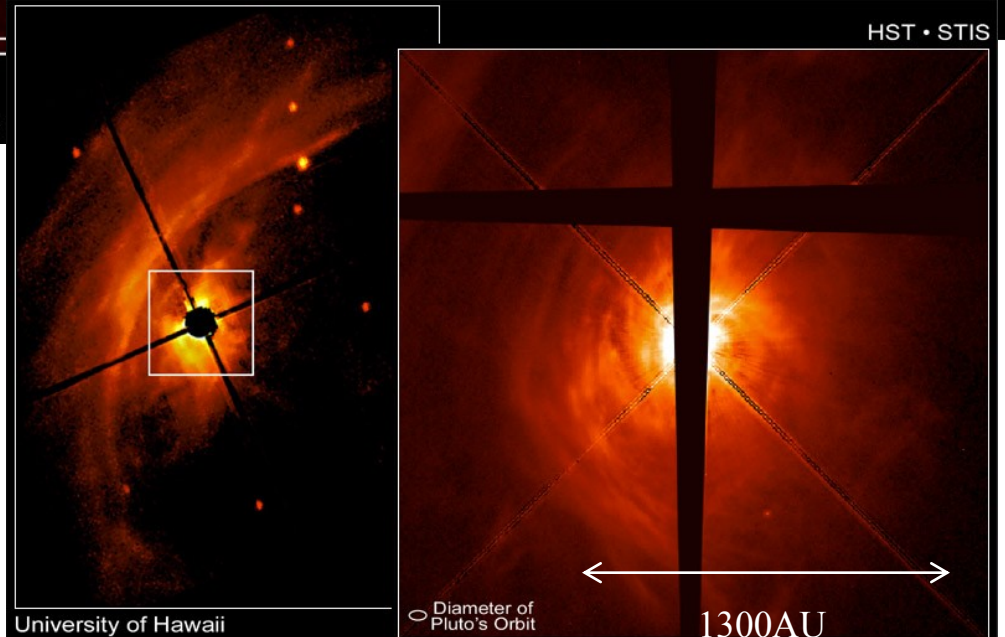
Young Stellar Disks in Infrared

PRC99-05a • STScI OPO

D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and



NASA and A. Watson (Instituto de Astronomía, UNAM, Mexico) • STScI-PRC90-32b



University of Hawaii

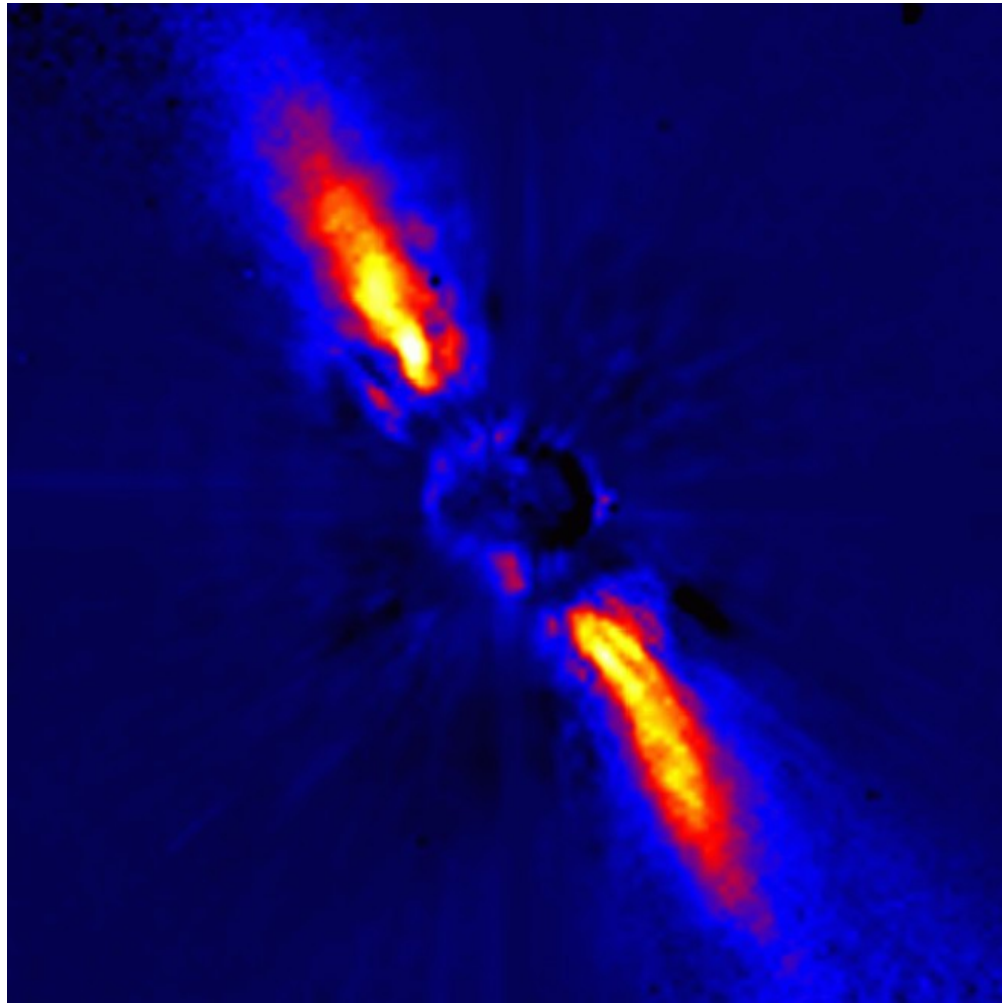
AB Aurigae Disk

PRC99-21 • STScI OPO • C. Grady (NOAO at NASA Goddard Space Flight Center) and NASA

原始惑星系円盤

水素・ヘリウムガス
ダスト微粒子

画架座 β 星



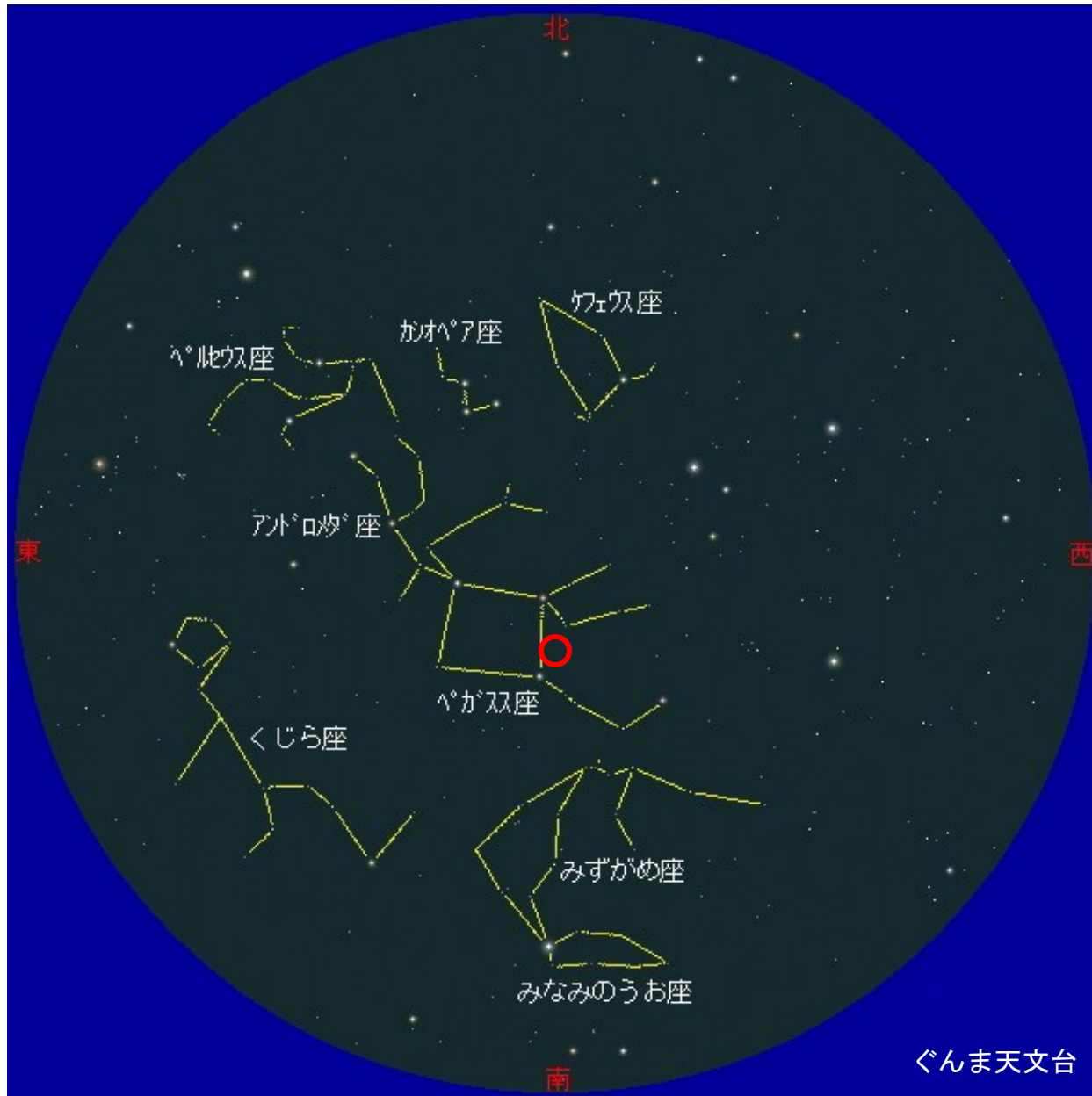
ガスがない(ダスト粒子だけ)の円盤

系外惑星系の姿

太陽系外惑星の観測手法

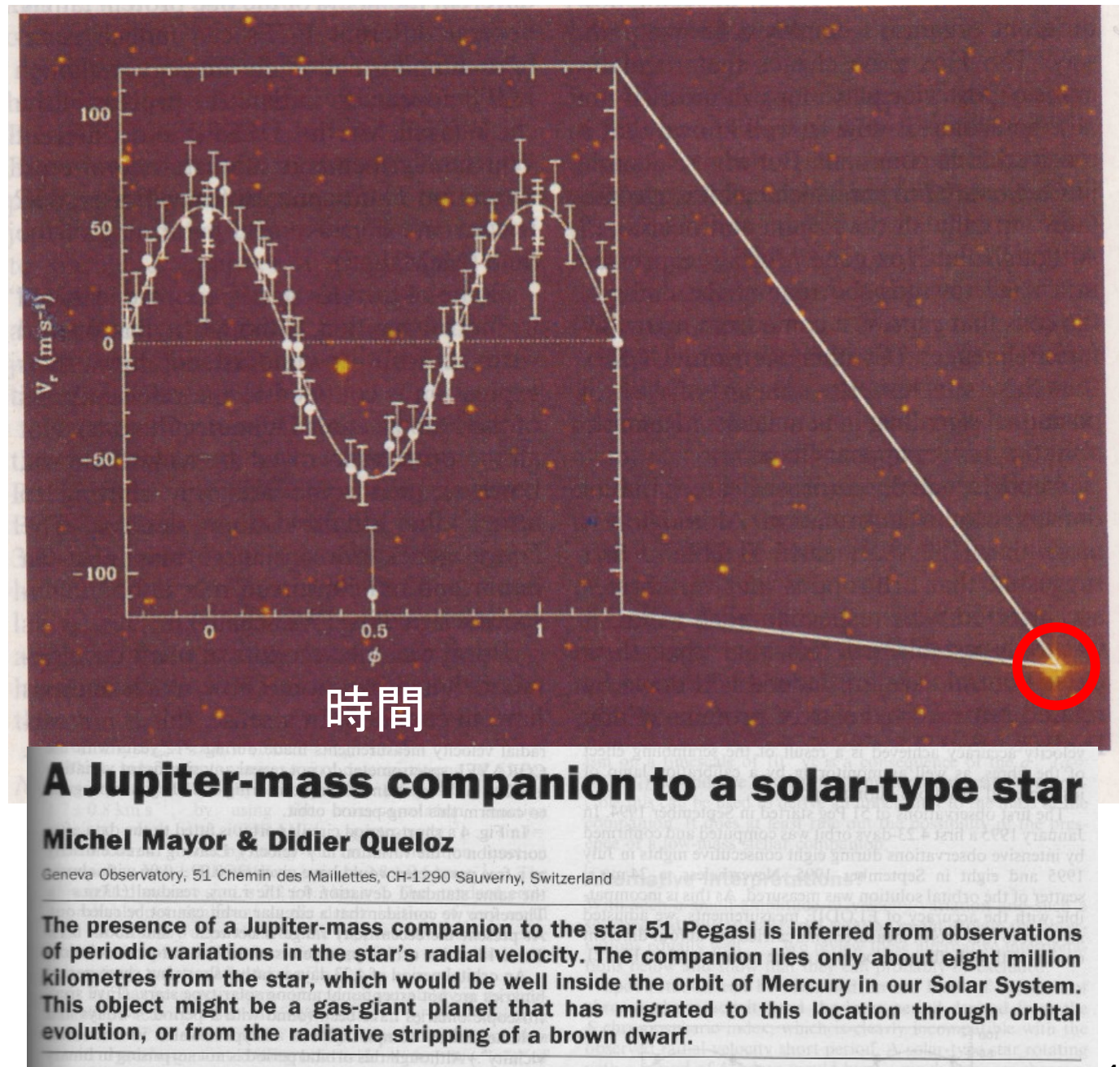
- 視線速度(ドップラー効果)
- 恒星面通過
- 重力レンズ効果
- 直接撮像
- 位置移動

ペガサス座51番星：51 Peg



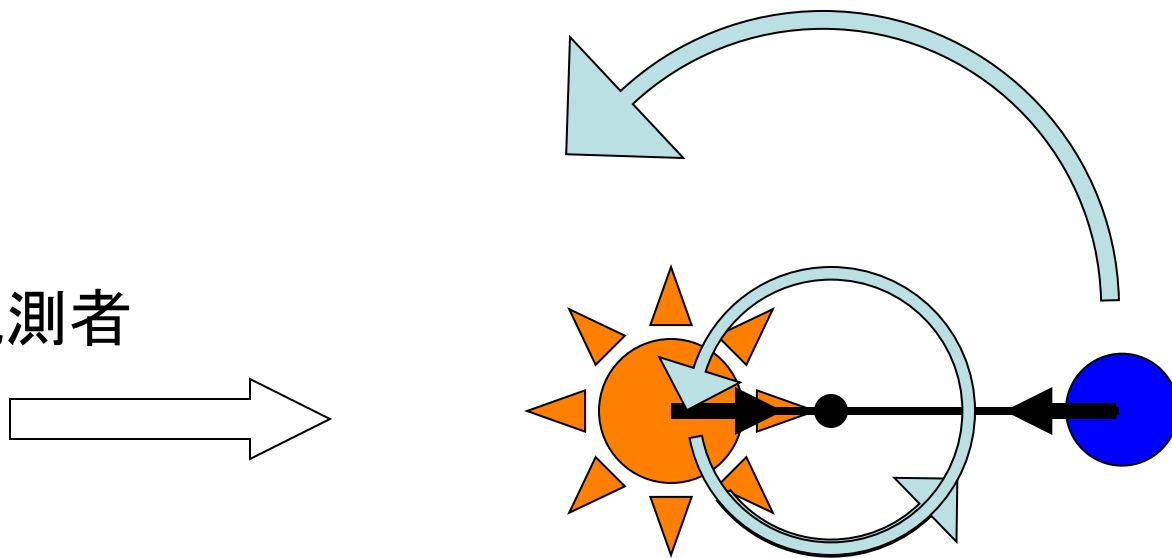
Nature **378**,
355-359,
1995

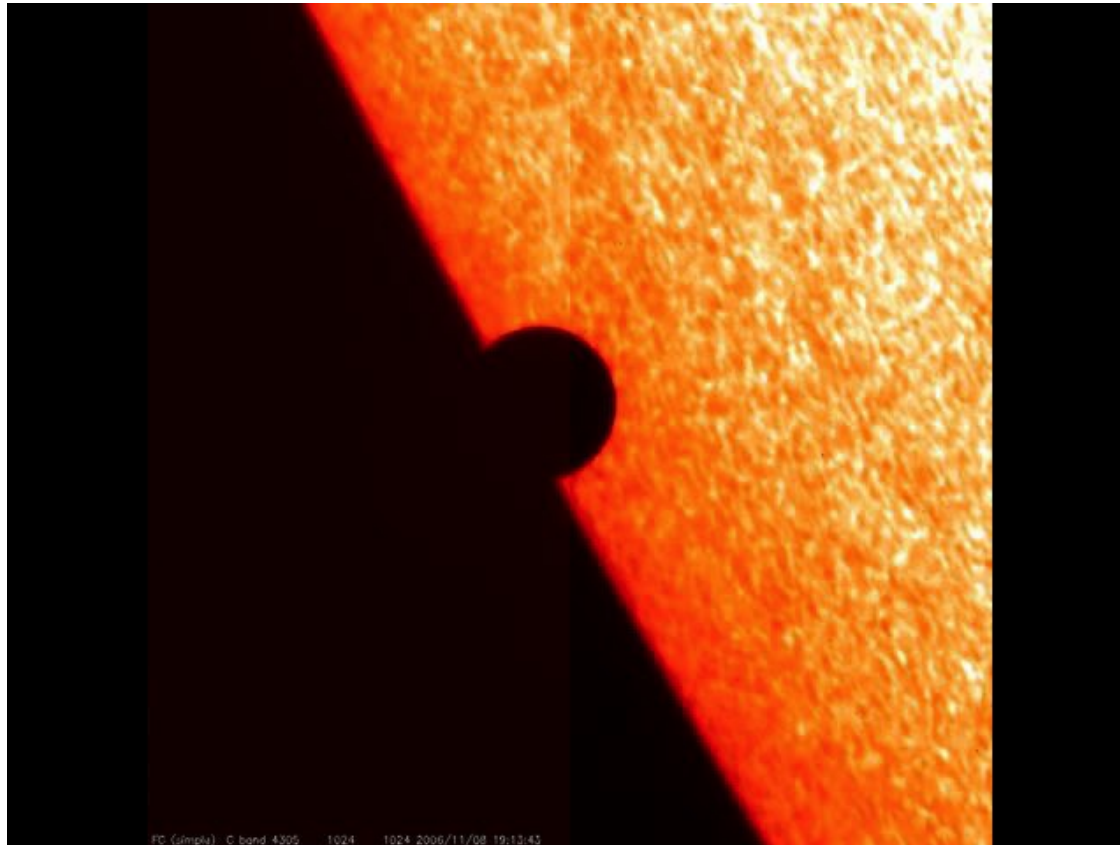
周期：4.23日



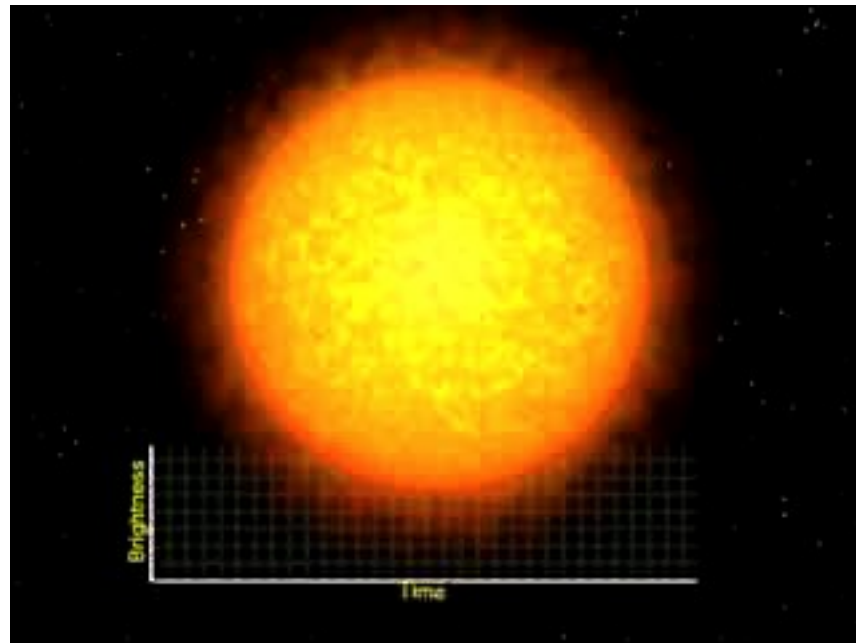
ドップラー効果

観測者



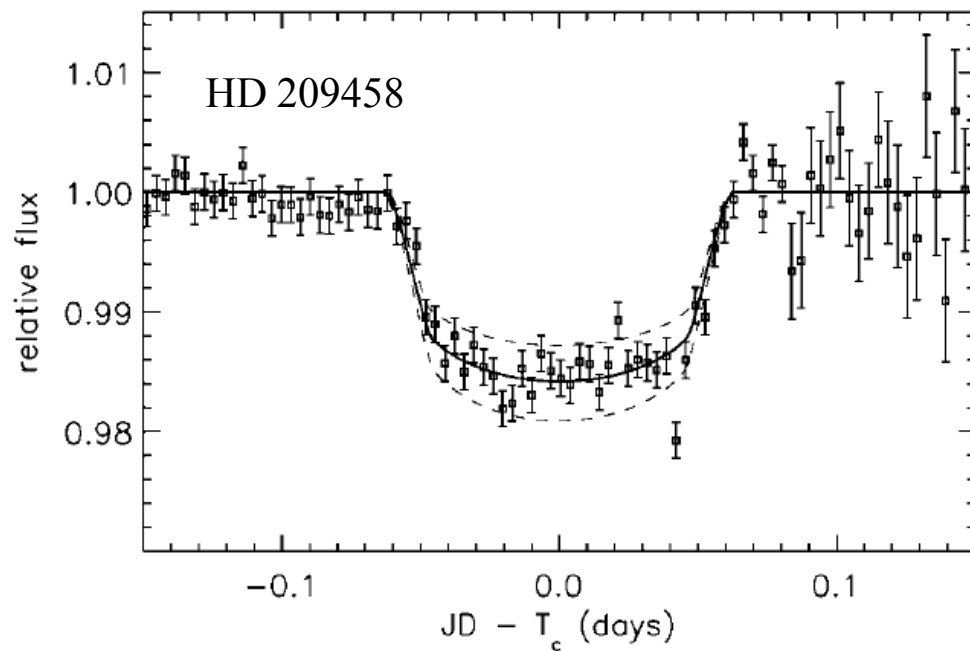
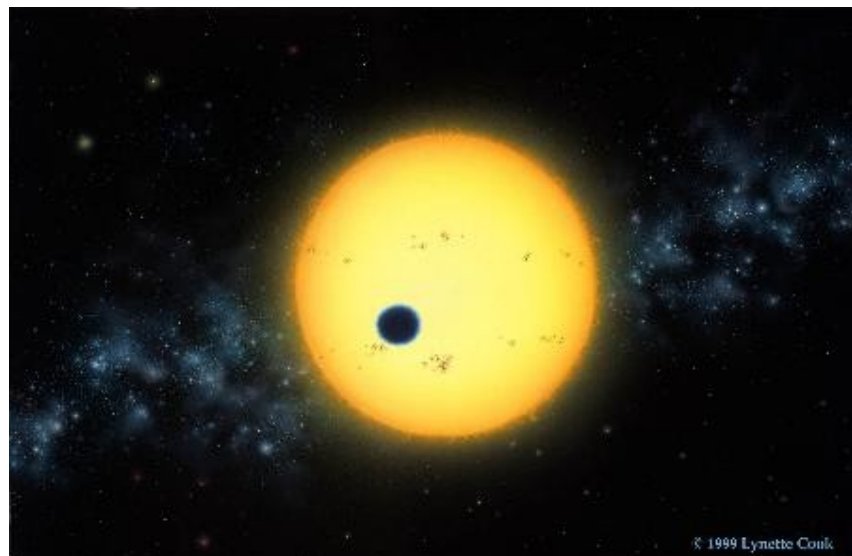


恒星面通過



恒星面通過

Charbonneau *et al.* 2000, ApJ



$$a = 0.0467 \text{ AU}$$

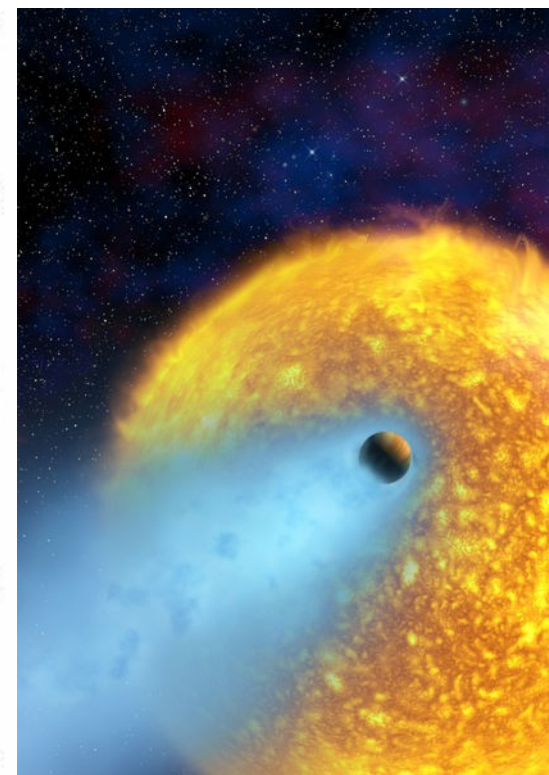
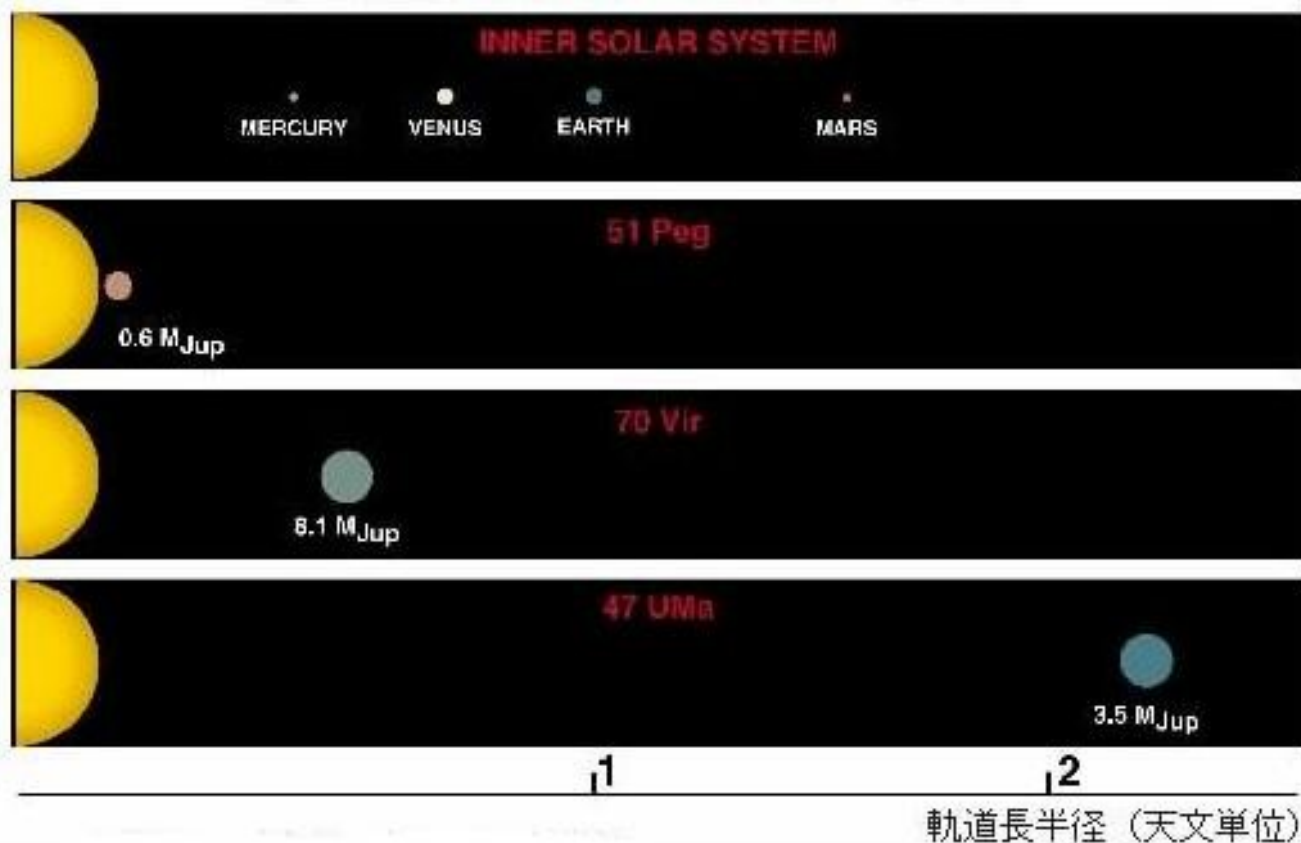
$$i = 87.1^\circ$$

$$R_p = 1.27 R_J$$

$$M_p = 0.63 M_J$$

$$\rho = 0.38 \text{ g cm}^{-3}$$

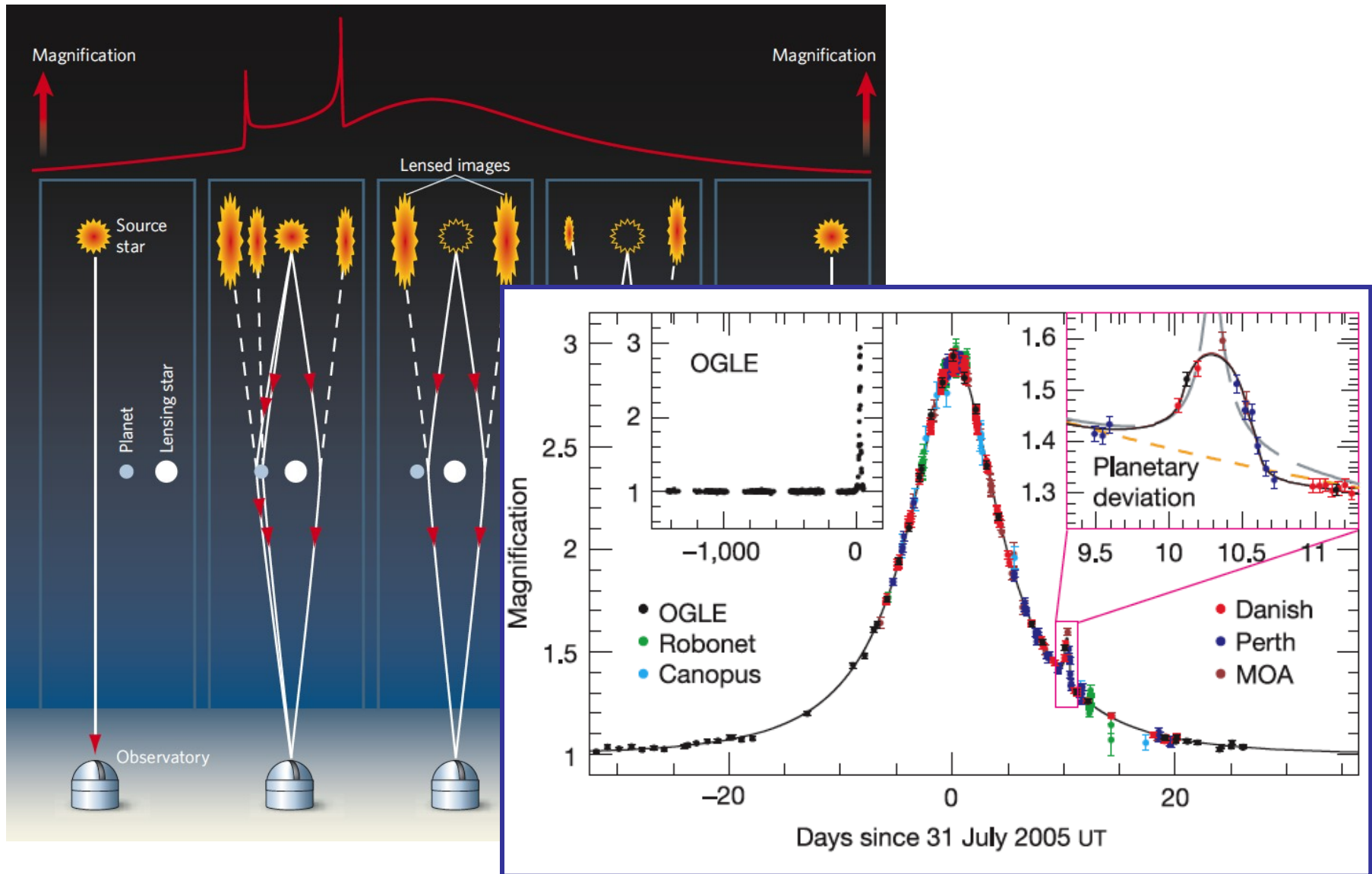
“ホットジュピター” (灼熱木星)

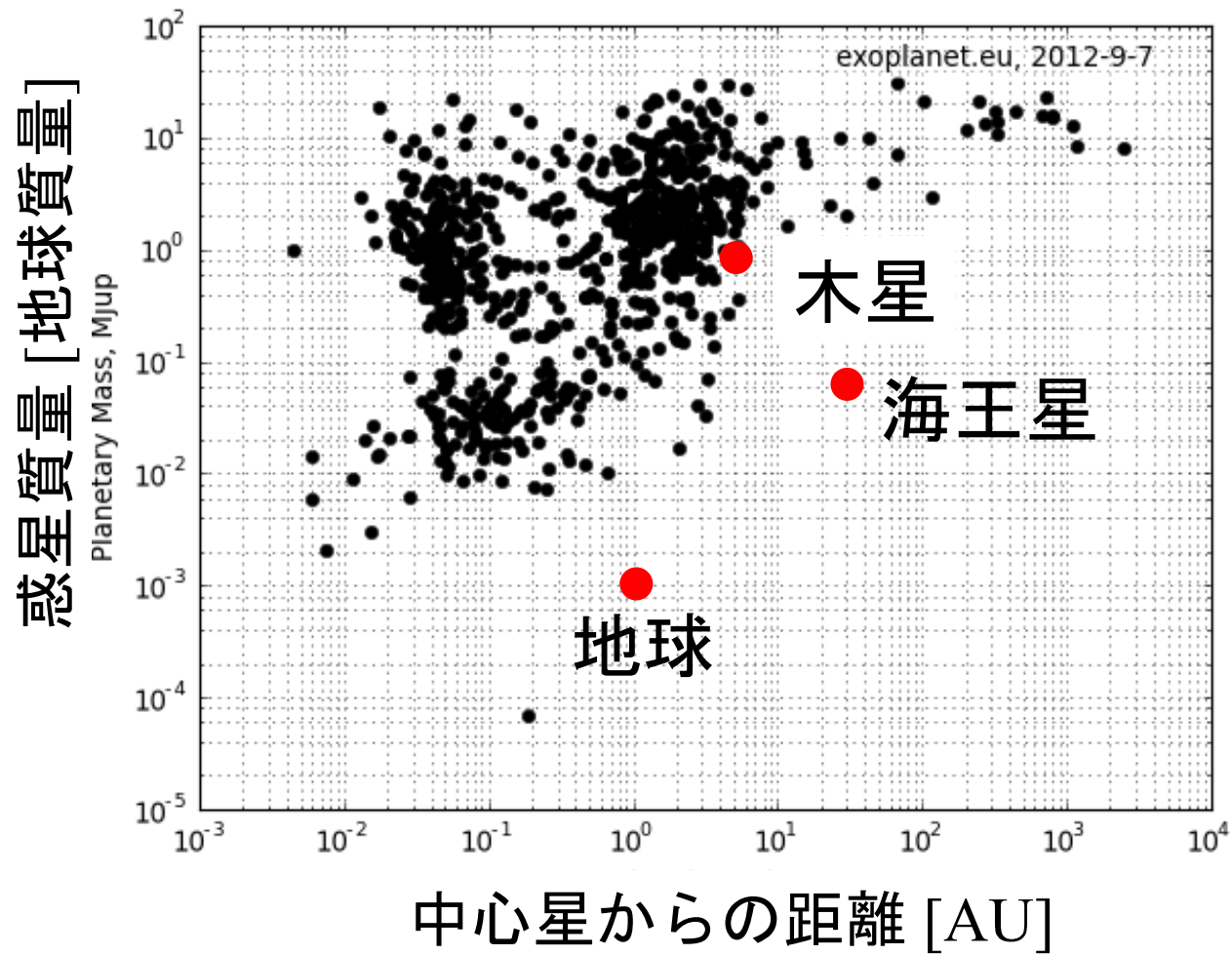


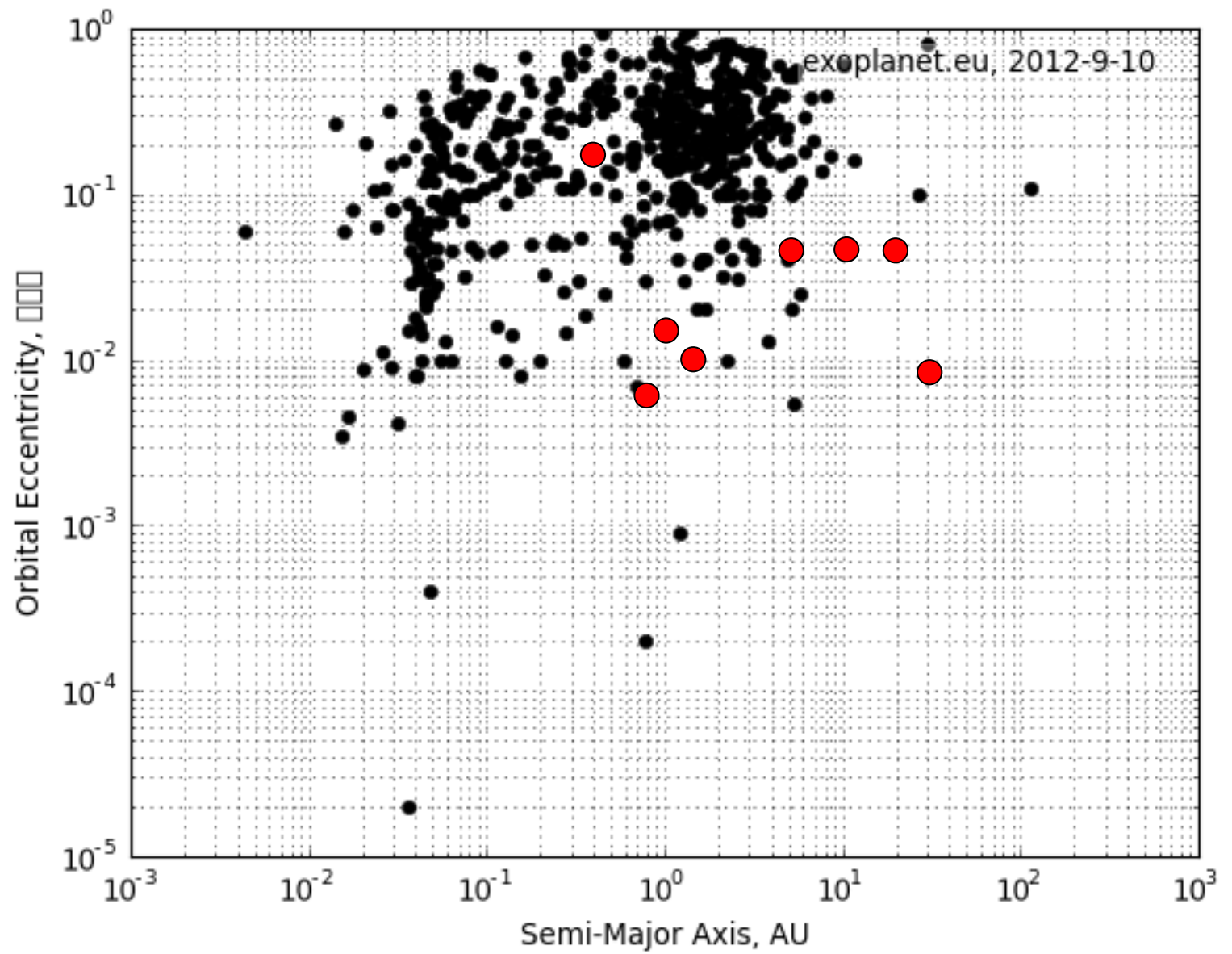
想像図

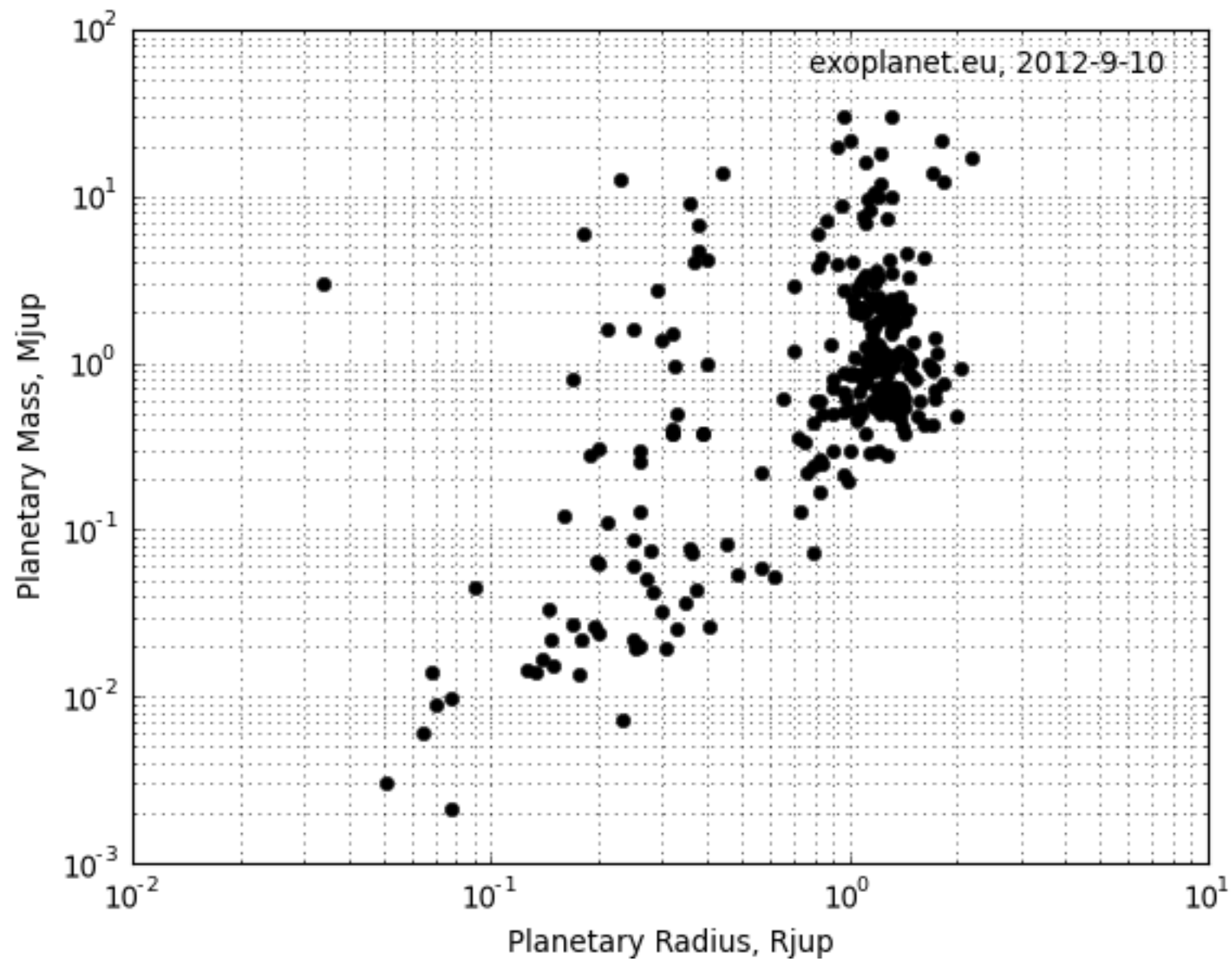
重力レンズ効果

Beaulieu *et al.* 2006, Nature, Jan 26







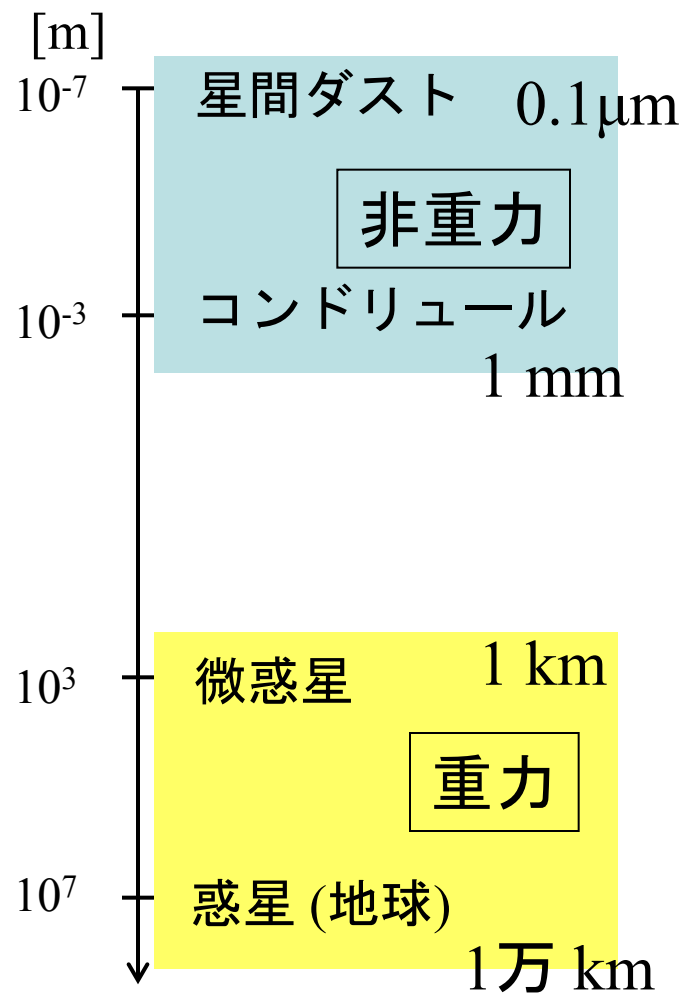
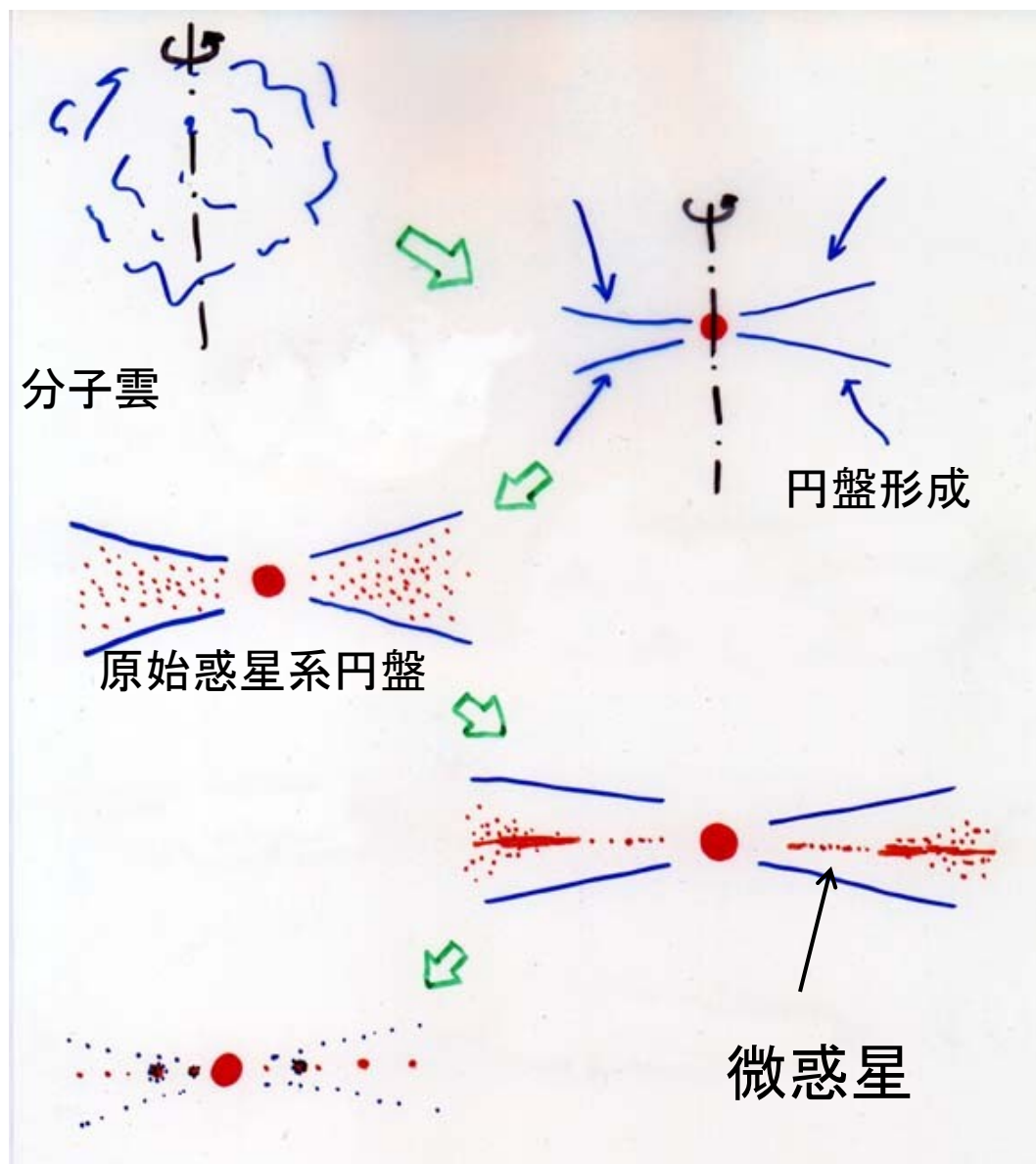


系外惑星系の姿

- 灼熱木星, 巨大天王星,
超低密度ガス惑星, 巨大コア惑星, ...
- 大きな軌道離心率
- 逆行惑星

太陽系とは異なる姿のものもある

惑星系形成シナリオ



参考文献

- 国立天文台 <http://www.nao.ac.jp/>
- 県立ぐんま天文台 <http://www.astron.pref.gunma.jp/>
- Beaulieu, J.-P., et al., 2006: Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing, *Nature*, 439, Issue 7075, 437-440
- Charbonneau, D., et al., 2000: Multicolor Observations of a Planetary Transit of HD 209458, *Astrophysical Journal*, 540, Issue 1, L45-L48
- Dauphas, N. and Chaussidon, M. , 2011: A Perspective from Extinct Radionuclides on a Young Stellar Object: The Sun and Its Accretion Disk, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 351-386
- ISAS <http://www.isas.jaxa.jp/j/>
- JAXA <http://www.jaxa.jp/>
- Mayor, M. and Queloz, D., 1995: A jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, 378, 355-359
- McSween, H. Y. , 1999: Meteorites and their Parent Planets, University of Tennessee, Knoxville Paperback
- NASA <http://www.nasa.gov/>
- The Extrasolar Planets Encyclopaedia <http://exoplanet.eu//>