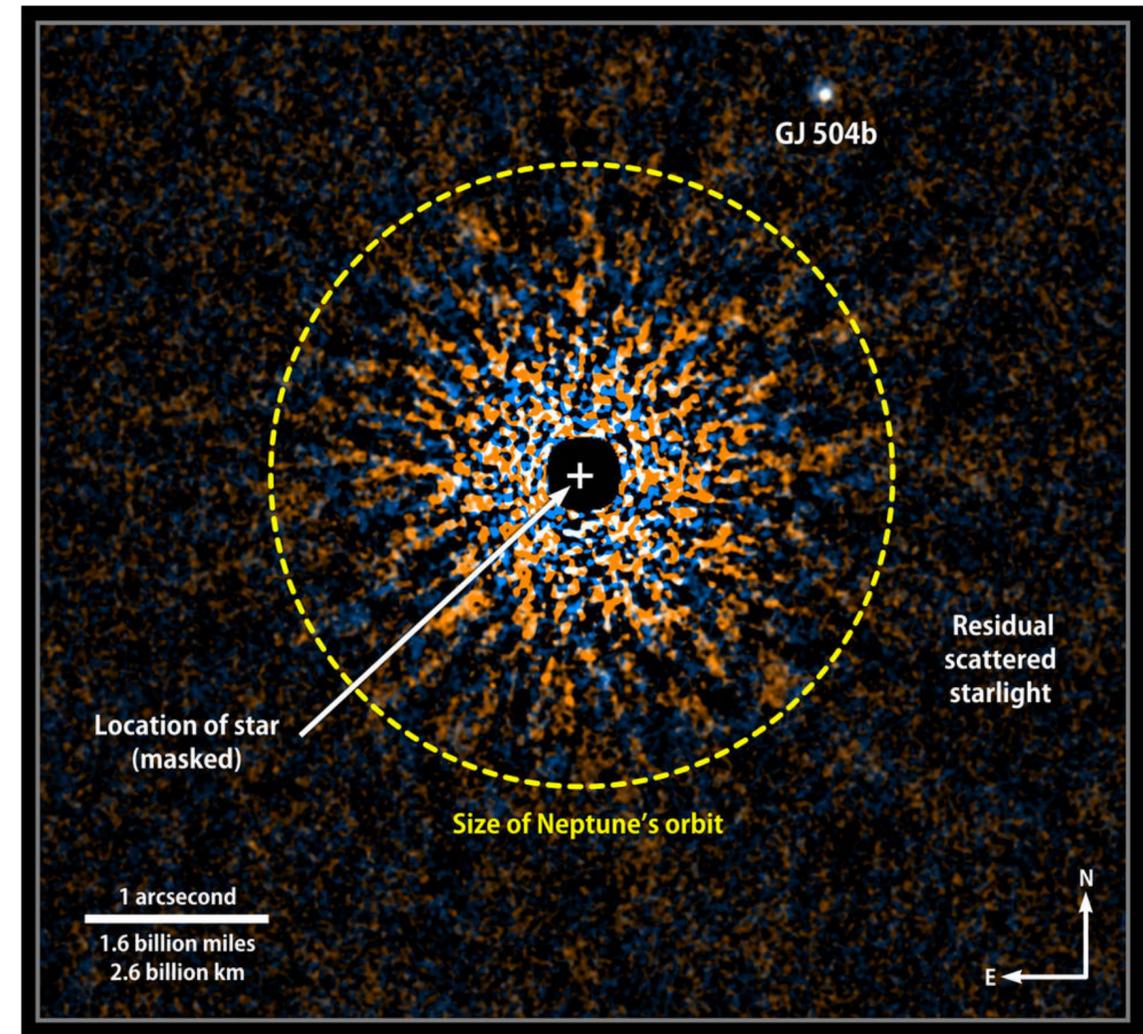


天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限



credit: NASA's Goddard Space Flight Center/NAOJ
<https://www.nasa.gov/content/goddard/astronomers-image-lowest-mass-exoplanet-around-a-sun-like-star>

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

講義のアウトライン

- 第1回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- 第2回: ~~電磁波による宇宙の観測~~
- 第3回: ~~太陽系内天体と天体の運動~~
- 第4回: ~~天体の距離、明るさ、色~~
- 第5回: ~~恒星1 - 恒星のエネルギー源と核反応-~~

講義のアウトライン

- 第6回: ~~恒星2 -恒星の分類と進化-~~
- 第7回: ~~星の誕生と星間物質~~
- 第8回: ~~銀河1 -銀河系の構成要素-~~
- 第9回: ~~銀河2 -銀河の分類と進化-~~
- 第10回: ~~超新星爆発と元素の起源~~

講義のアウトライン

- 第11回: ~~白色矮星、中性子星、ブラックホール~~
- 第12回: ~~ニュートリノ天文学と高エネルギー天体~~
- 第13回: ~~重力波天文学と中性子星・ブラックホール~~
- 第14回: ~~宇宙膨張の発見と宇宙の歴史~~
- 第15回: **系外惑星の世界**

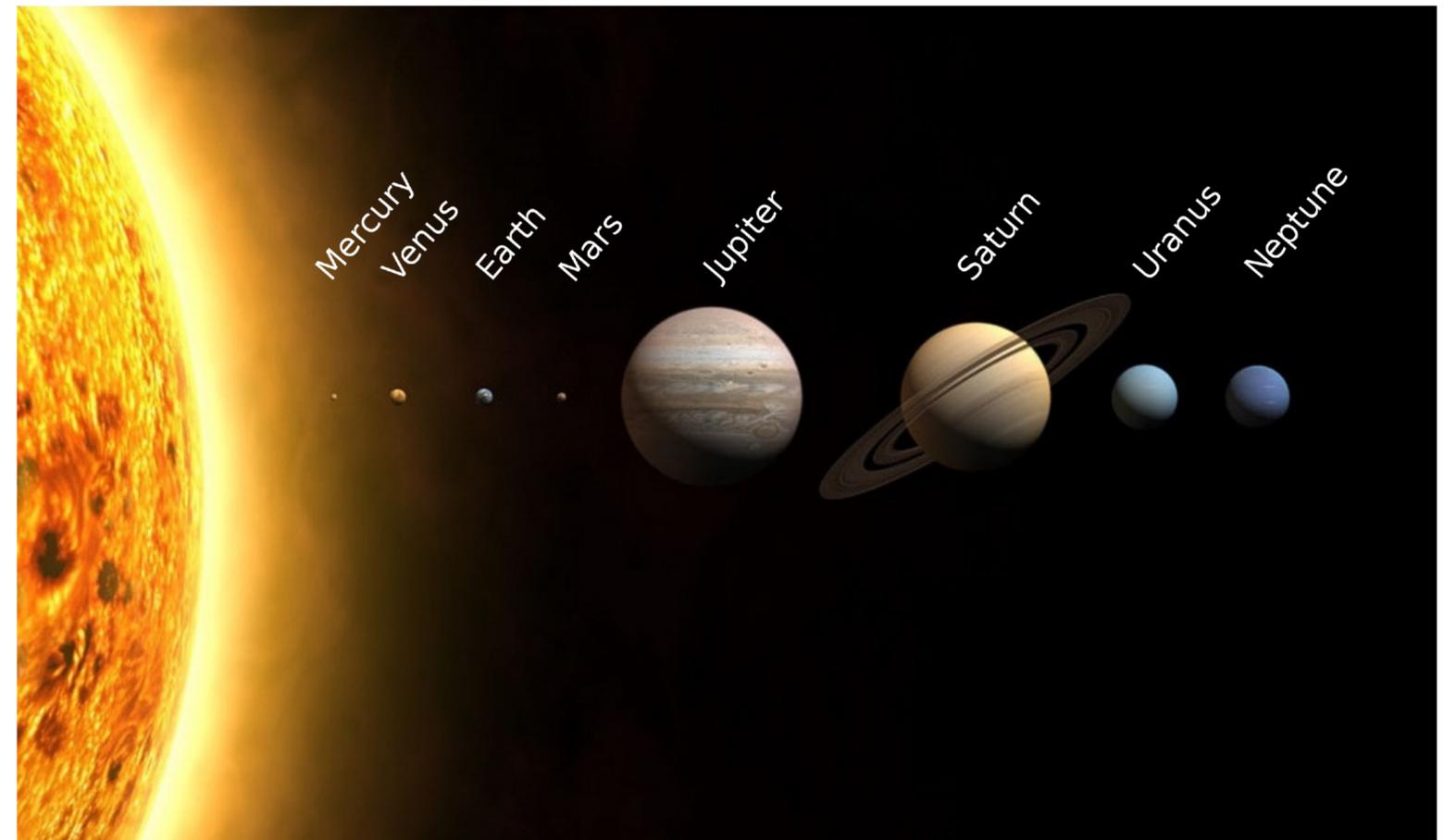
第15回:

系外惑星の世界

- (太陽)系外惑星の発見
- 系外惑星の特徴と多様性
- 原始惑星系円盤と惑星系の起源

系外惑星とは

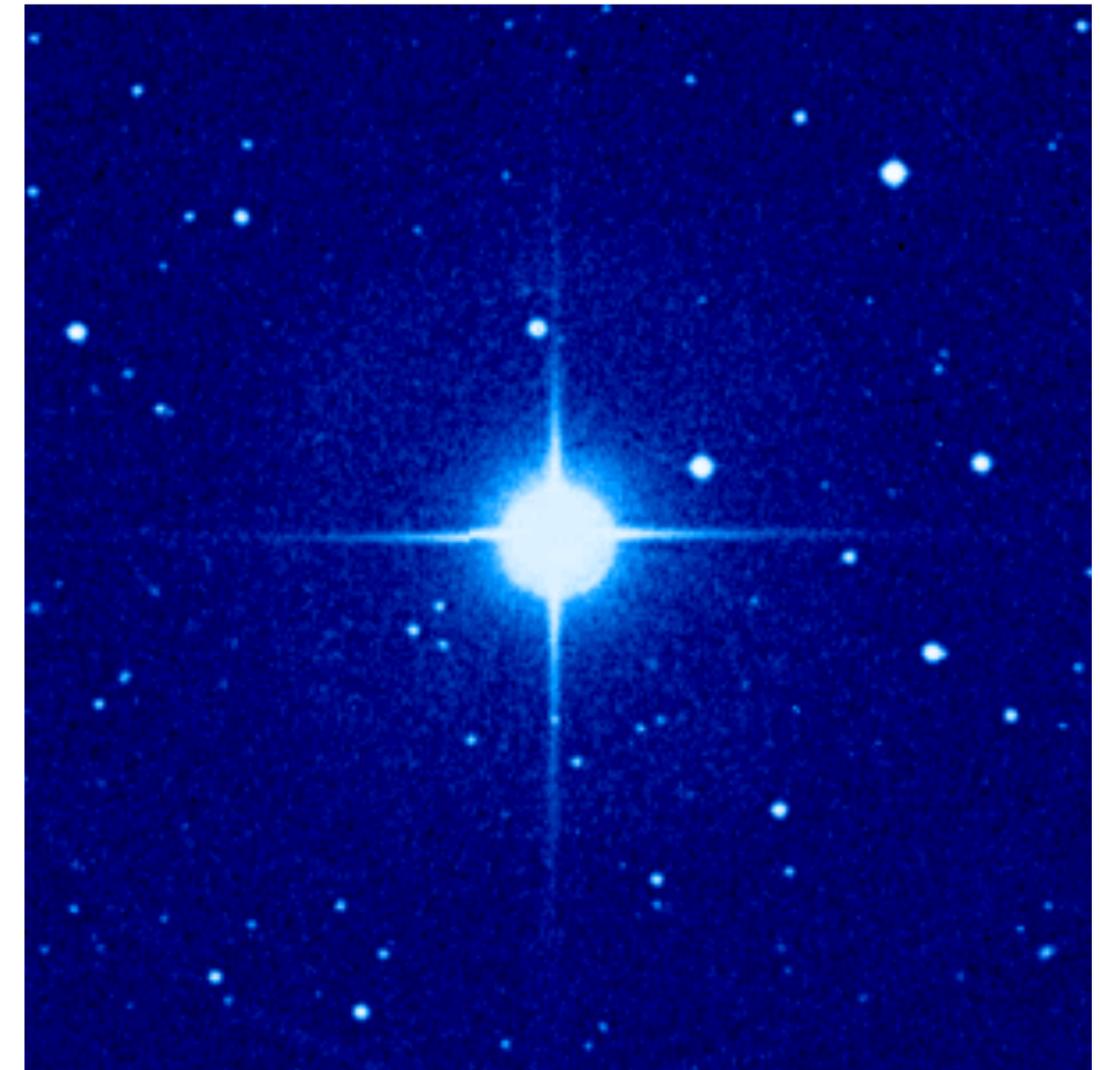
- (太陽)系外惑星(extra-solar planets)
- 太陽以外の恒星に惑星系は存在する
のか？
- 地球のような惑星は存在するのか？
- 人類のような生命は存在するのか？
- 疑問は尽きない



太陽と太陽系惑星. credit: Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_System

系外惑星の発見

- 1995年、M. マイヨールとD. ケローによるペガサス座51番星(51 Peg; G型主系列星)周りの惑星の発見: **51 Pegasi b**
- 実は中性子星周りの惑星は発見されていたが、太陽のような主系列星周りの惑星発見はこれが最初
- 2019年ノーベル物理学賞



ペガサス座51番星

credit: UK Schmidt Telescope, Skyview

copyright: Royal Observatory Edinburgh, Anglo-Australian Observatory, and AURA

<https://apod.nasa.gov/apod/ap951201.html>

系外惑星の発見

- 1995年、M. マイヨールとD. ケローによるペガサス座51番星(51 Peg; G型主系列星)周りの惑星の発見: **51 Pegasi b**
- 実は中性子星周りの惑星は発見されていたが、太陽のような主系列星周りの惑星発見はこれが最初
- 2019年ノーベル物理学賞



M.マイヨール氏とD.ケロー氏

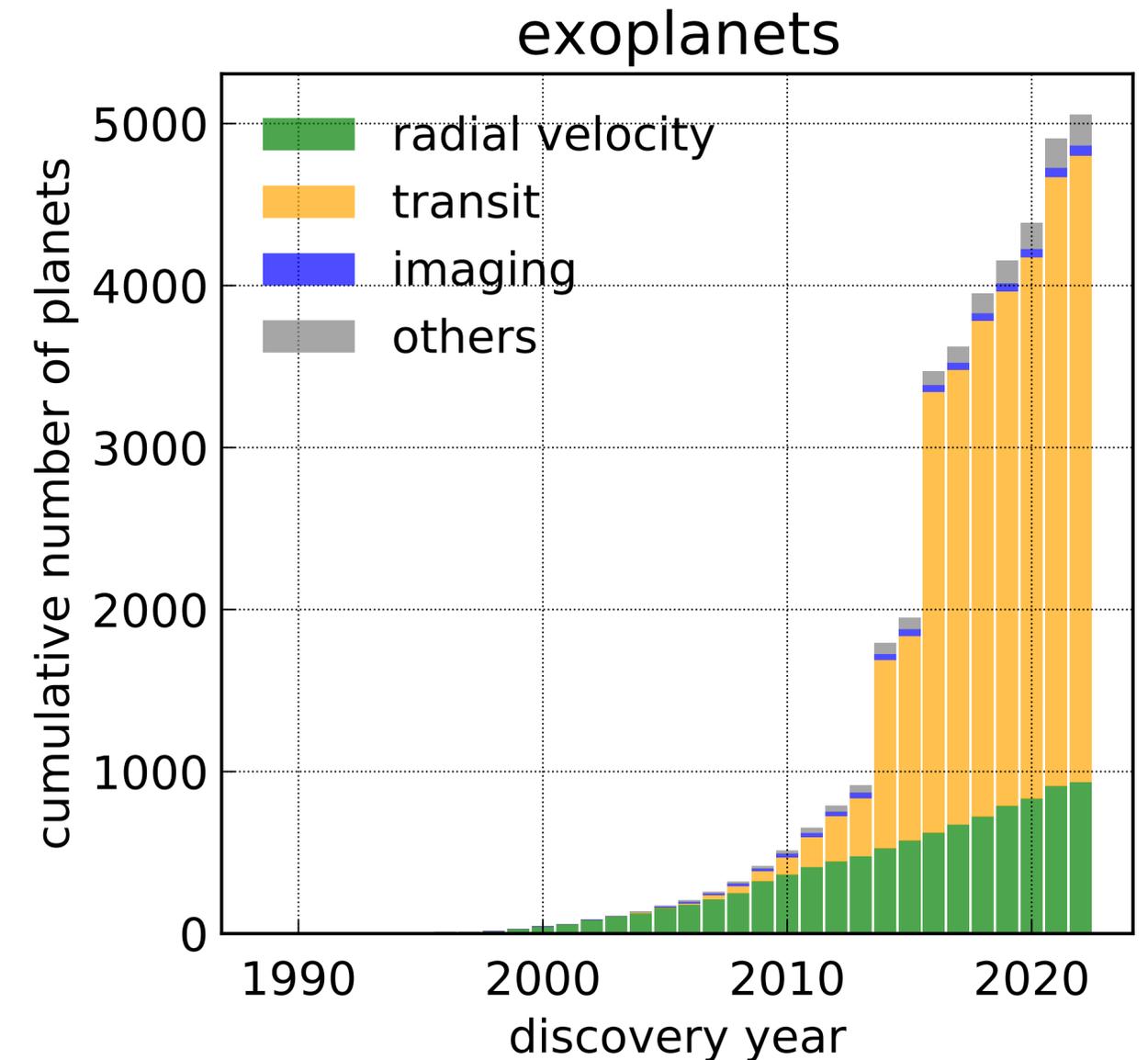
credit: A. Mahmoud, Nobel foundation

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary/>

系外惑星の発見

- その後、現在までに5000個を超える系外惑星が発見されている
- どうやって系外惑星を発見するのか？
- 発見された系外惑星はどんな特徴を持っているのか？

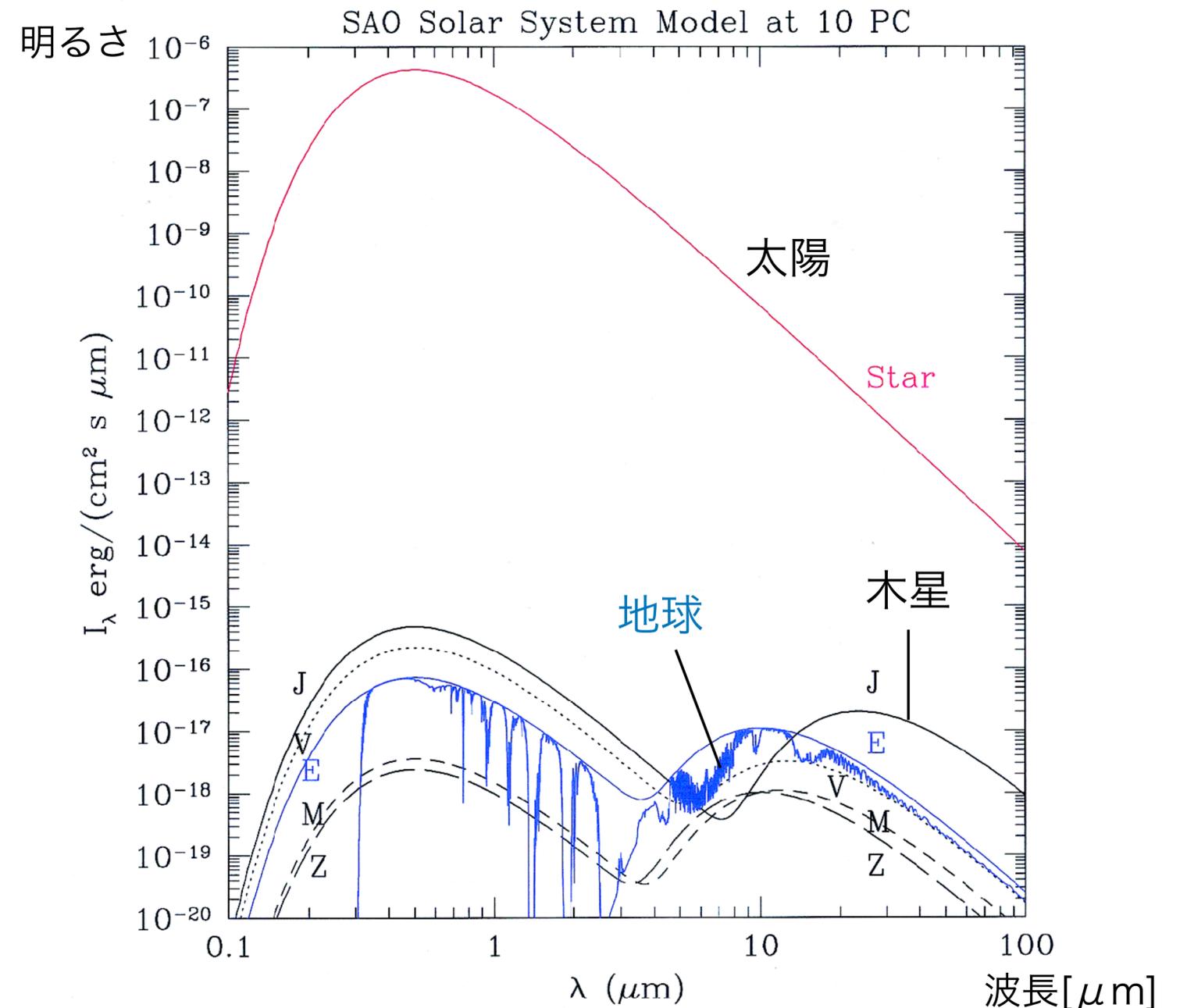
data source: NASA exoplanet archive
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>



系外惑星の発見年と発見数

どうやって系外惑星を見つけるのか？

- 主星に対して惑星は圧倒的に小さい:
太陽系の質量の99%以上は太陽が占める
- 主星に対して惑星は圧倒的に暗い:
可視光では太陽の反射光、赤外では熱放射
- 極めて大変な観測が必要となる



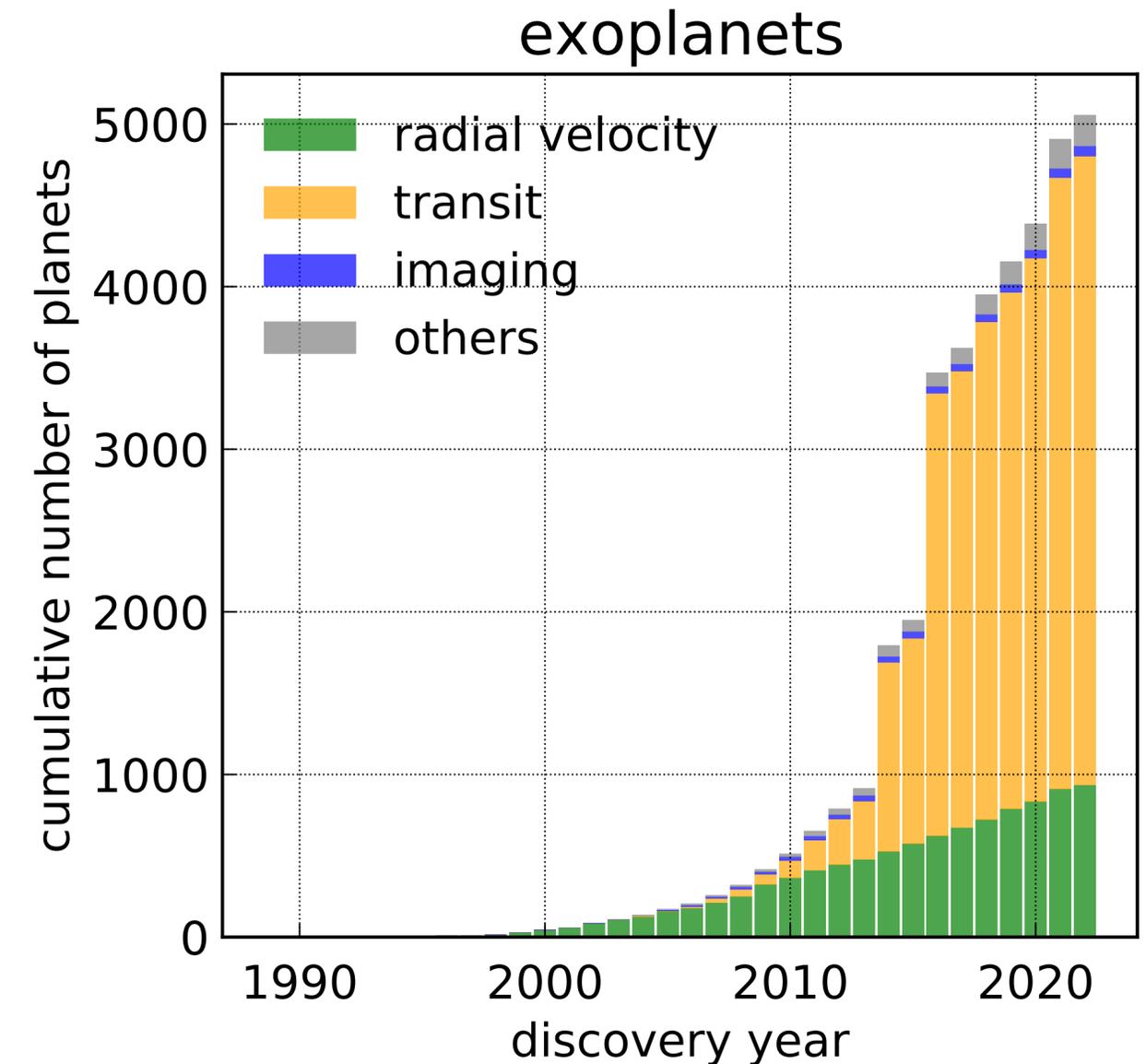
10pcの距離から観測したときの太陽と太陽系惑星のスペクトル.
credit: Traub&Jucks (2002)

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002GMS...130..369T/abstract>

どうやって系外惑星を見つけるのか？

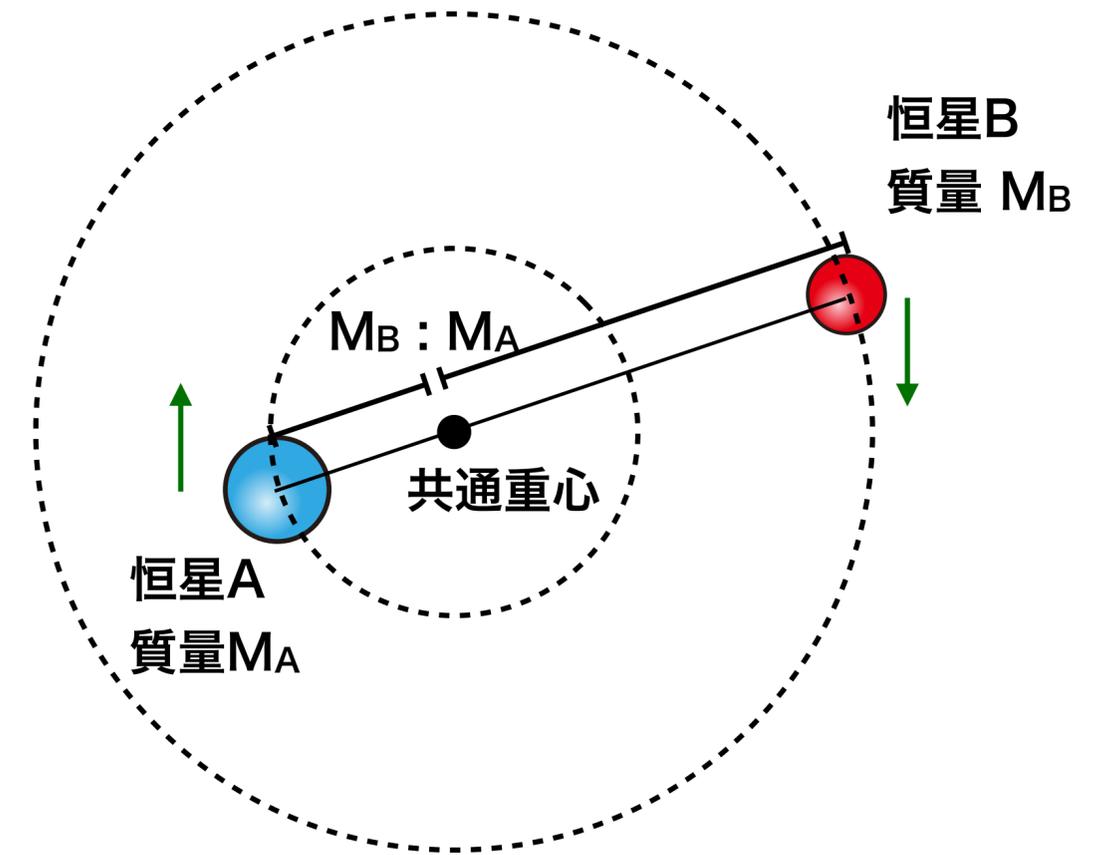
- ドップラー分光法(doppler spectroscopy, radial velocity)
- トランジット法(transit photometry)
- 直接撮像(direct imaging)

data source: NASA exoplanet archive
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>



ドップラー分光法による惑星検出

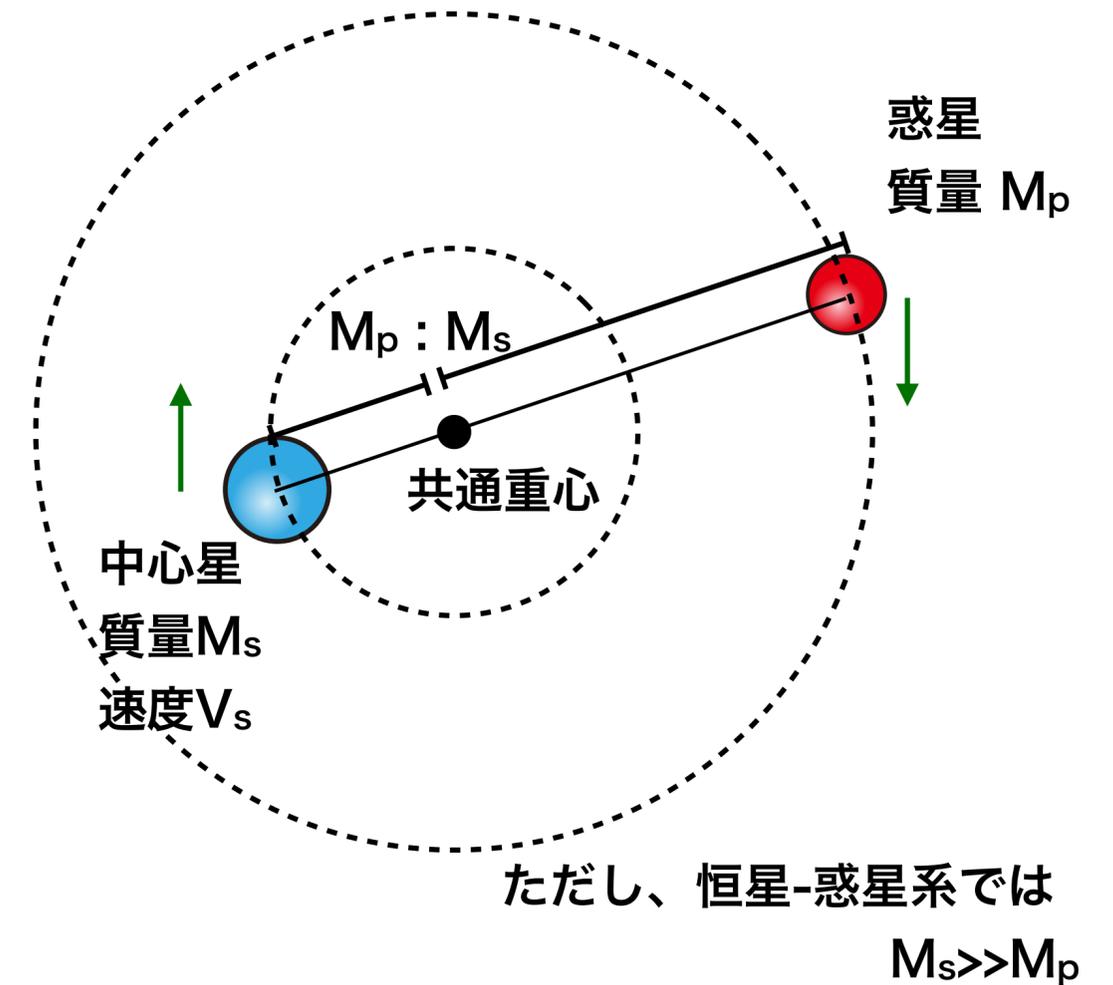
- Radial velocity: 我々からその星を観測したときの視線方向に沿った速度成分
- 惑星の運動による主星の「ふらつき」を捉える方法
- 連星系の場合、主星と伴星は共通重心の周りを回っている
- 太陽系も実は共通重心は太陽の外にある



円運動をする連星の共通重心と軌道

ドップラー分光法による惑星検出

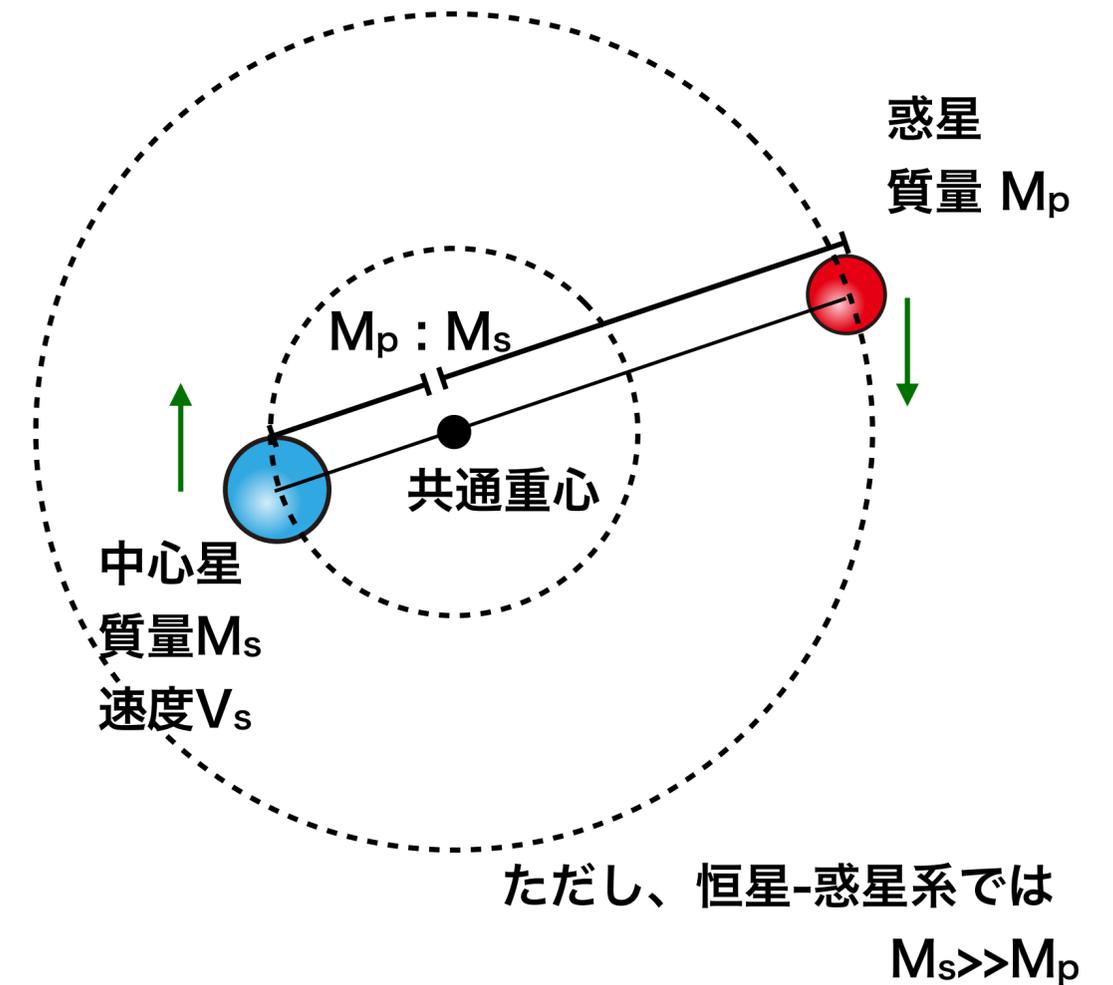
- Radial velocity: 我々からその星を観測したときの視線方向に沿った速度成分
- 惑星の運動による主星の「ふらつき」を捉える方法
- 連星系の場合、主星と伴星は共通重心の周りを回っている
- 太陽系も実は共通重心は太陽の外にある



円運動をする連星の共通重心と軌道

ドップラー分光法による惑星検出

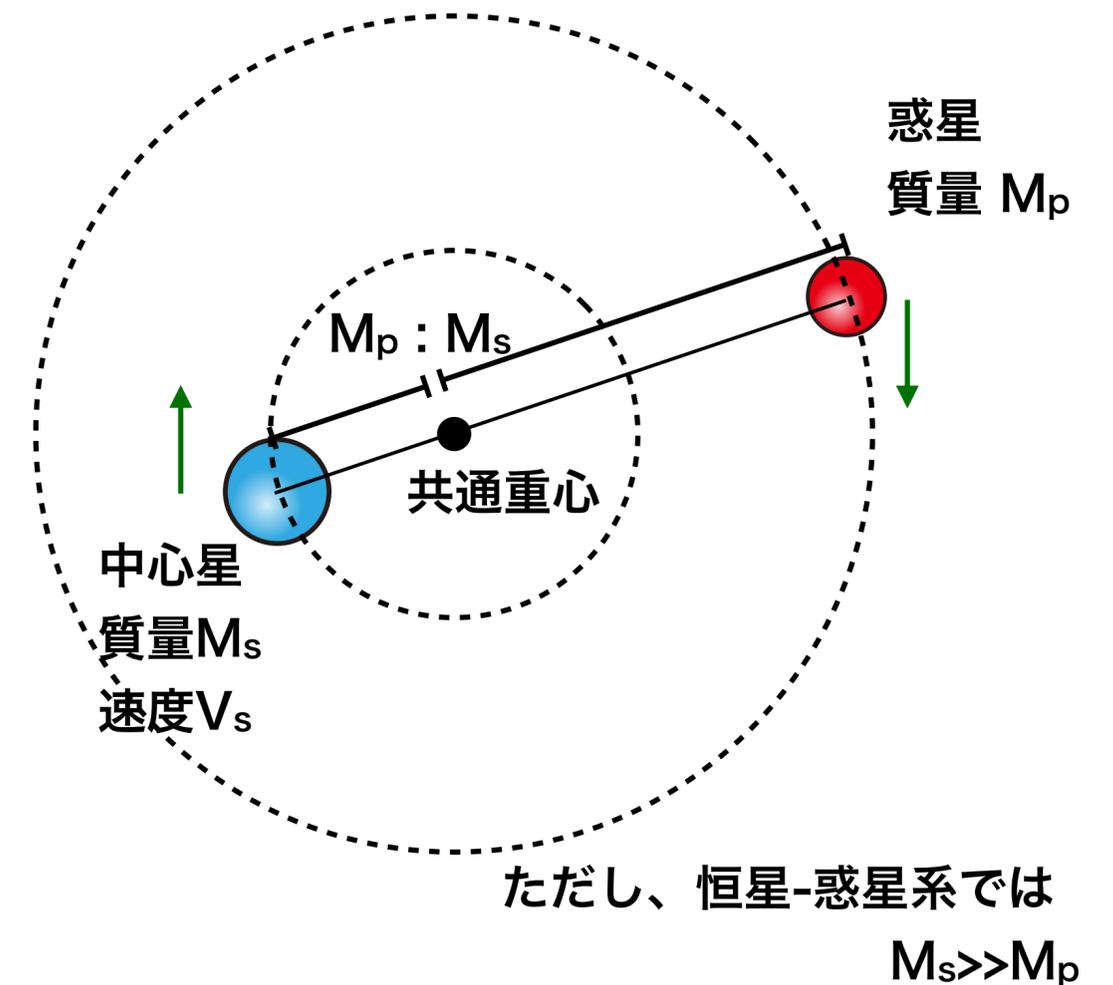
- 太陽質量と木星質量: $M_{\odot}:M_{\text{Jup}} \doteq 1000:1$
- 木星の平均軌道半径 $\doteq 5[\text{au}] \doteq 7.8 \times 10^8 [\text{km}]$
- 太陽-共通重心距離 $\doteq 8 \times 10^5 [\text{km}]$
- 太陽半径 $R_{\odot} \doteq 7 \times 10^5 [\text{km}] < 8 \times 10^5 [\text{km}]$
- 常に一定ではないが...



円運動をする連星の共通重心と軌道

ドップラー分光法による惑星検出

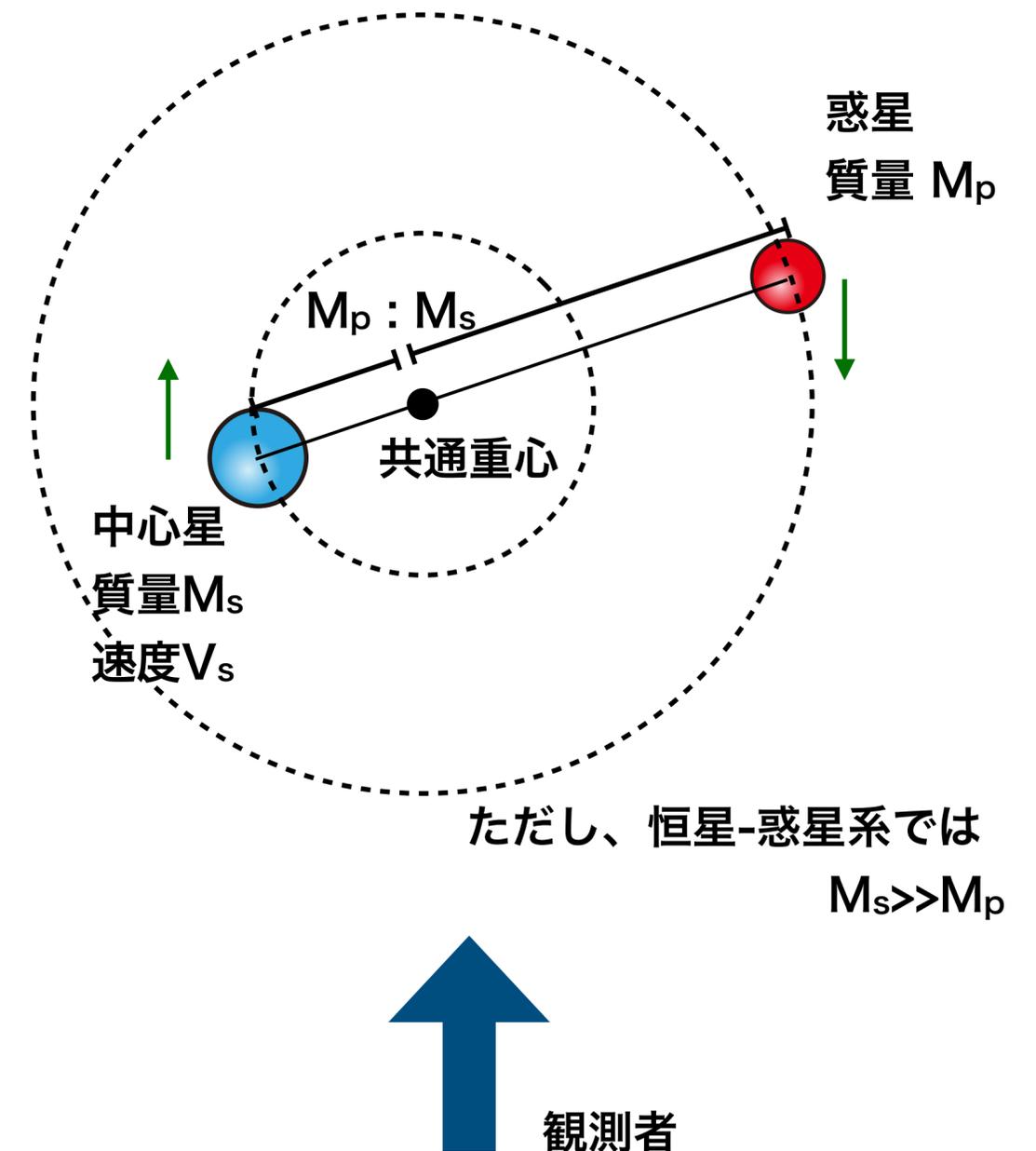
- 太陽-共通重心距離 $\approx 8 \times 10^5$ [km]
- 木星の公転周期は11.87年なので、太陽-木星系のみを考えると、太陽も11.87年 ($= 3.74 \times 10^8$ 秒) で半径 8×10^5 km の円周を一周する
- $2\pi \times 8 \times 10^8$ [m] / 3.74×10^8 [s] = 13.4 [m/s]
- これが、太陽が木星の重力によってふらつく運動の速度



円運動をする連星の共通重心と軌道

ドップラー分光法による惑星検出

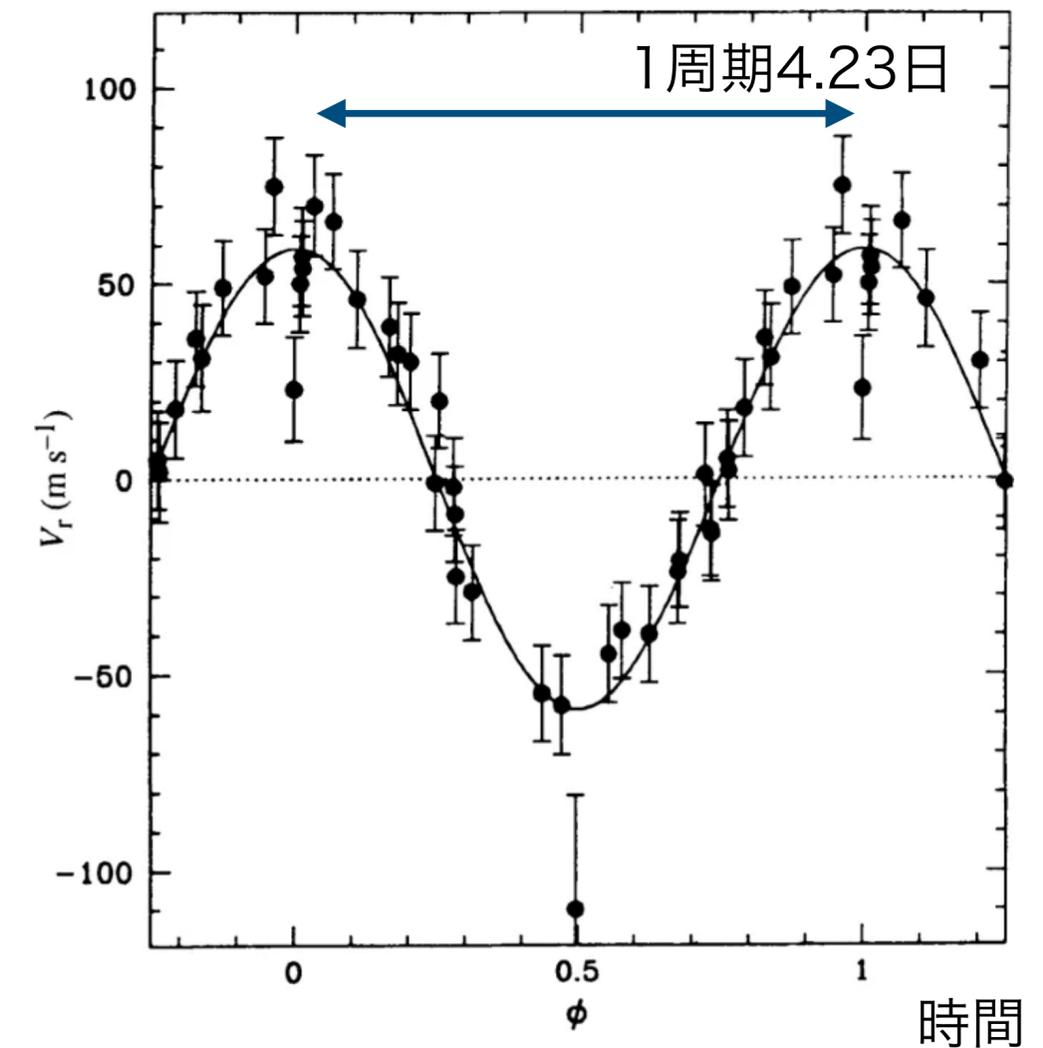
- 例えば、軌道面から観測すると、恒星が惑星によって振り回されているのが見えるはず
- どうやって？
- ドップラー効果による視線速度とその変化の計測



ドップラー分光法による惑星検出

- 51 Peg b: 主星(51 Peg)が4.23日の周期で最大約60[m/s]の速さでふらついているのが観測された
- $M_p \sin i = 0.42 \pm 0.02 M_{\text{Jup}}$ (i は見込み角)という制限がついた
- 主星を振り回している星は惑星だろう

主星の視線速度変化



Mayor&Queloz(1995)によるPeg 51の観測

credit: Mayor&Queloz (1995) Nature, 378, 355

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995Natur.378..355M/abstract>

ドップラー分光法による惑星検出

- ケプラーの法則: 中心星と惑星の回転周期 P と中心星-惑星間距離 a の関係

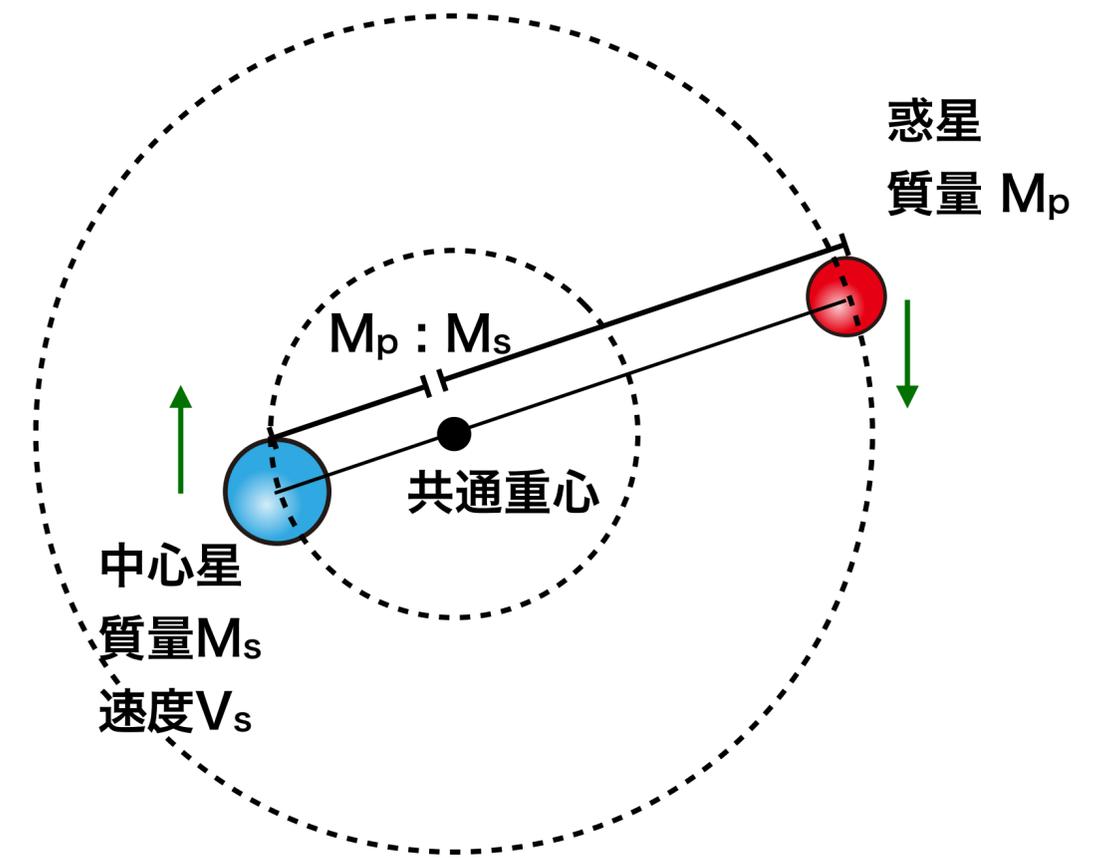
$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_s + M_p)}{4\pi^2} \simeq \frac{GM_s}{4\pi^2}$$

主星質量 M_s が惑星質量 M_p より十分に大きいと仮定

- 中心星は共通重心の周りを回っており、円周 $2\pi a M_p / (M_s + M_p)$ を周期 P かけて回るので、速度は

$$V_s = \frac{2\pi a}{P} \frac{M_p}{M_s + M_p} \simeq \frac{2\pi a}{P} \frac{M_p}{M_s}$$

主星質量 M_s が惑星質量 M_p より十分に大きいと仮定



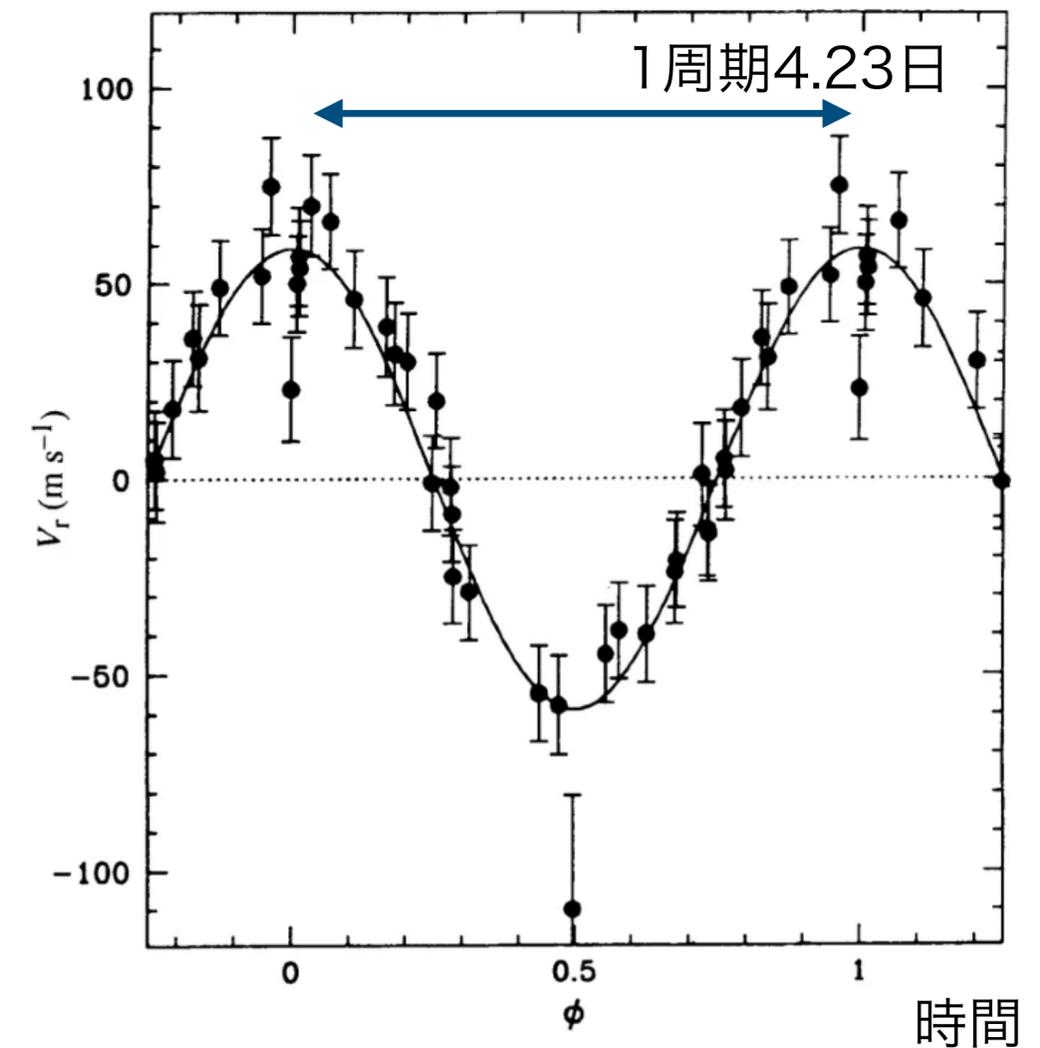
ただし、恒星-惑星系では $M_s \gg M_p$

円運動をする連星の共通重心と軌道

ドップラー分光法による惑星検出

- 51 Peg b: 主星(51 Peg)が4.23日の周期で最大約60[m/s]の速さでふらついているのが観測された
- $M_p \sin i = 0.42 \pm 0.02 M_{\text{Jup}}$ (i は見込み角)という制限がついた
- 主星を振り回している星は惑星だろう

主星の視線速度変化



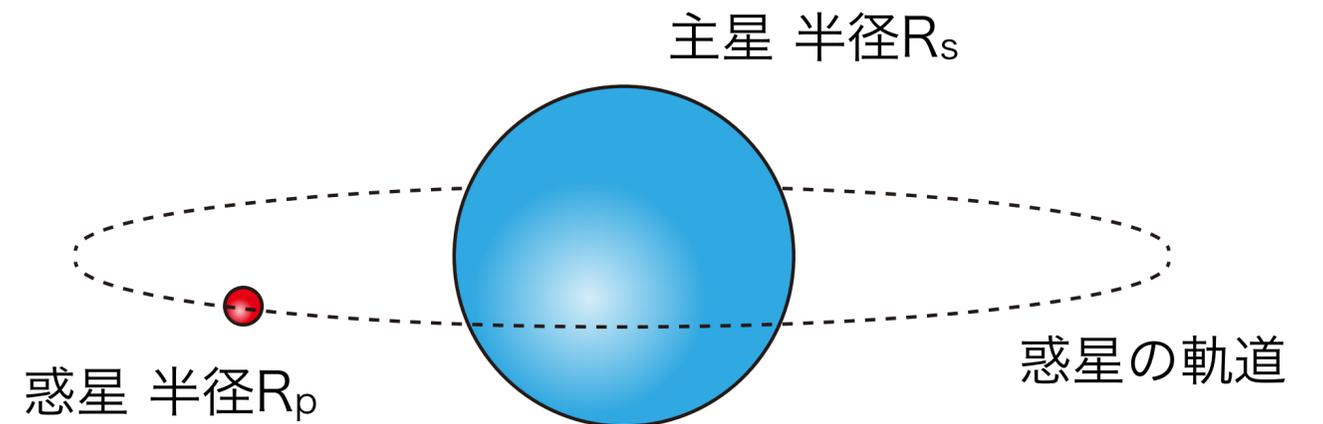
Mayor&Queloz(1995)によるPeg 51の観測

credit: Mayor&Queloz (1995) Nature, 378, 355

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995Natur.378..355M/abstract>

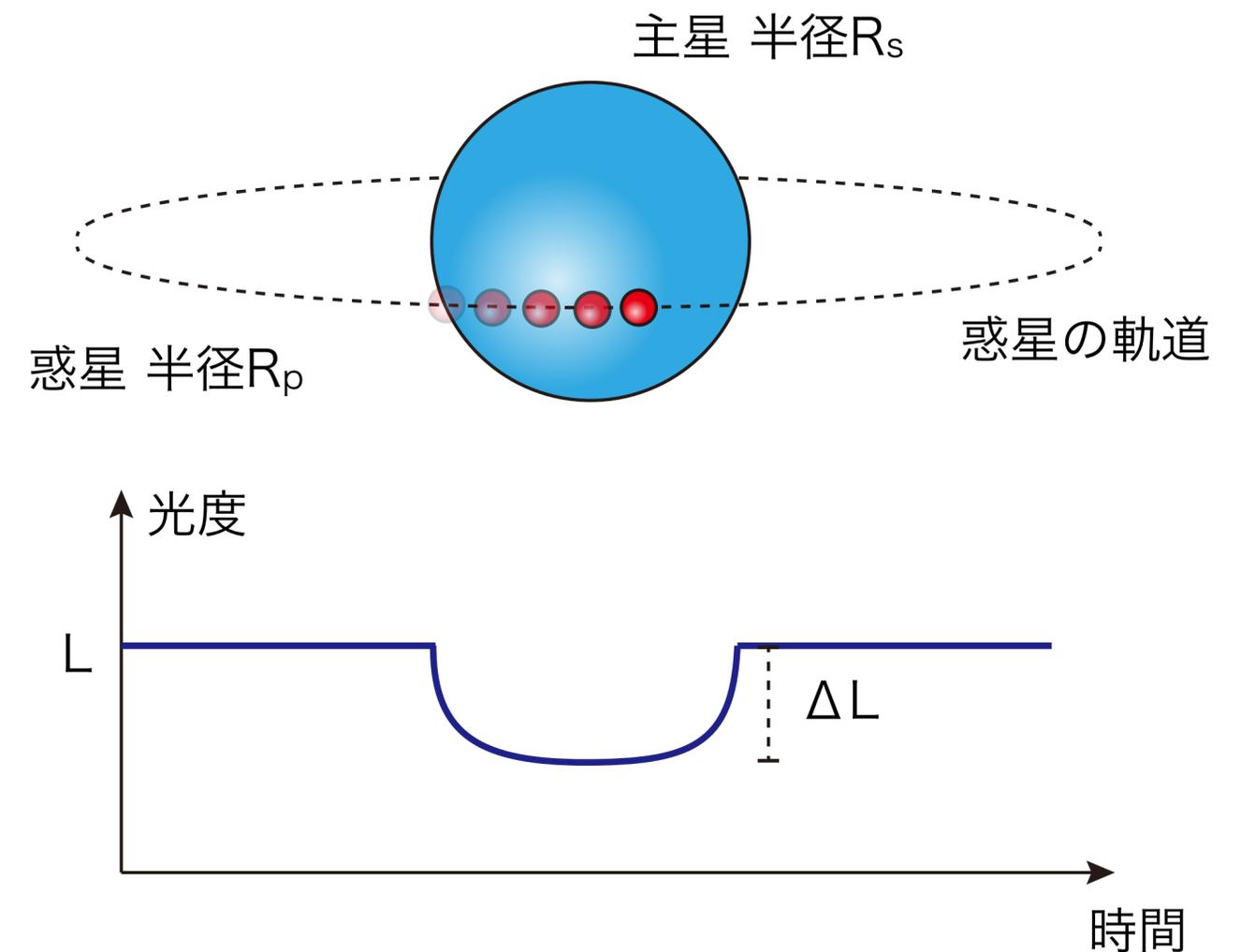
トランジット法による惑星検出

- トランジット(惑星による主星の「食」)を利用する
- 惑星の通過によって中心星が減光する
- 惑星そのものの光度は0ではないが、極めて暗いとする
- 惑星軌道面を横から観測しているときに有効な方法



トランジット法による惑星検出

- トランジット(惑星による主星の「食」)を利用する
- 惑星の通過によって中心星が減光する
- 惑星そのものの光度は0ではないが、極めて暗いとする
- 惑星軌道面を横から観測しているときに有効な方法



トランジット法の模式図

トランジット法による惑星検出

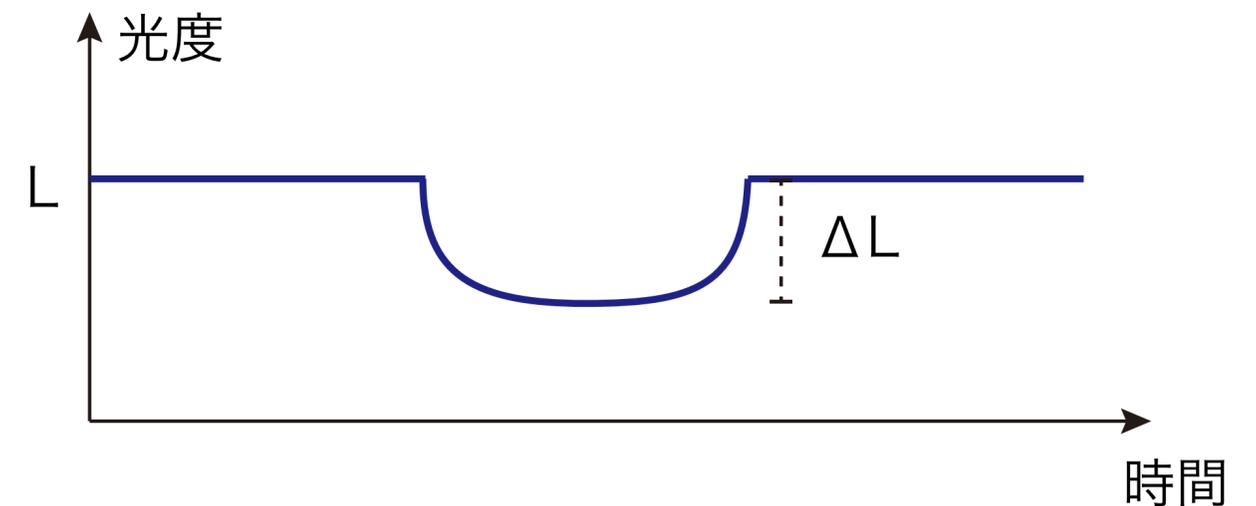
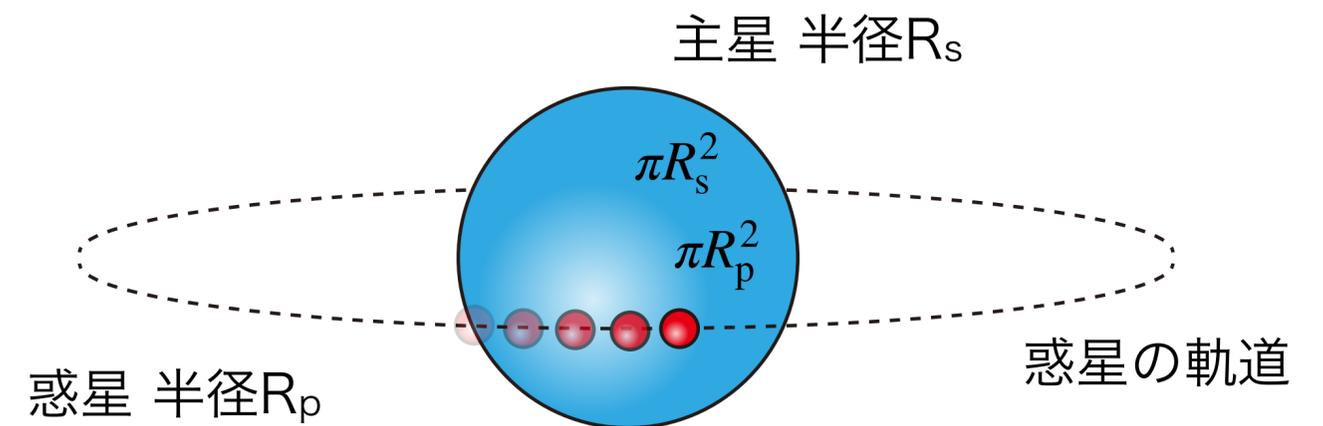
- 惑星が主星を隠していないときの光度: L
- 惑星が主星を隠しているときの光度: $L - \Delta L$

- それぞれの観測者から見えている面の面積は πR_s^2 および πR_p^2 なので、減光率は

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\pi R_p^2}{\pi R_s^2} = \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$$

例えば、木星と太陽だと $(R_{\text{jup}}/R_{\odot})^2 \approx 0.01$

- 惑星と主星の半径比の2乗 → 惑星半径が観測から分かる



トランジット法の模式図

トランジット法による惑星検出

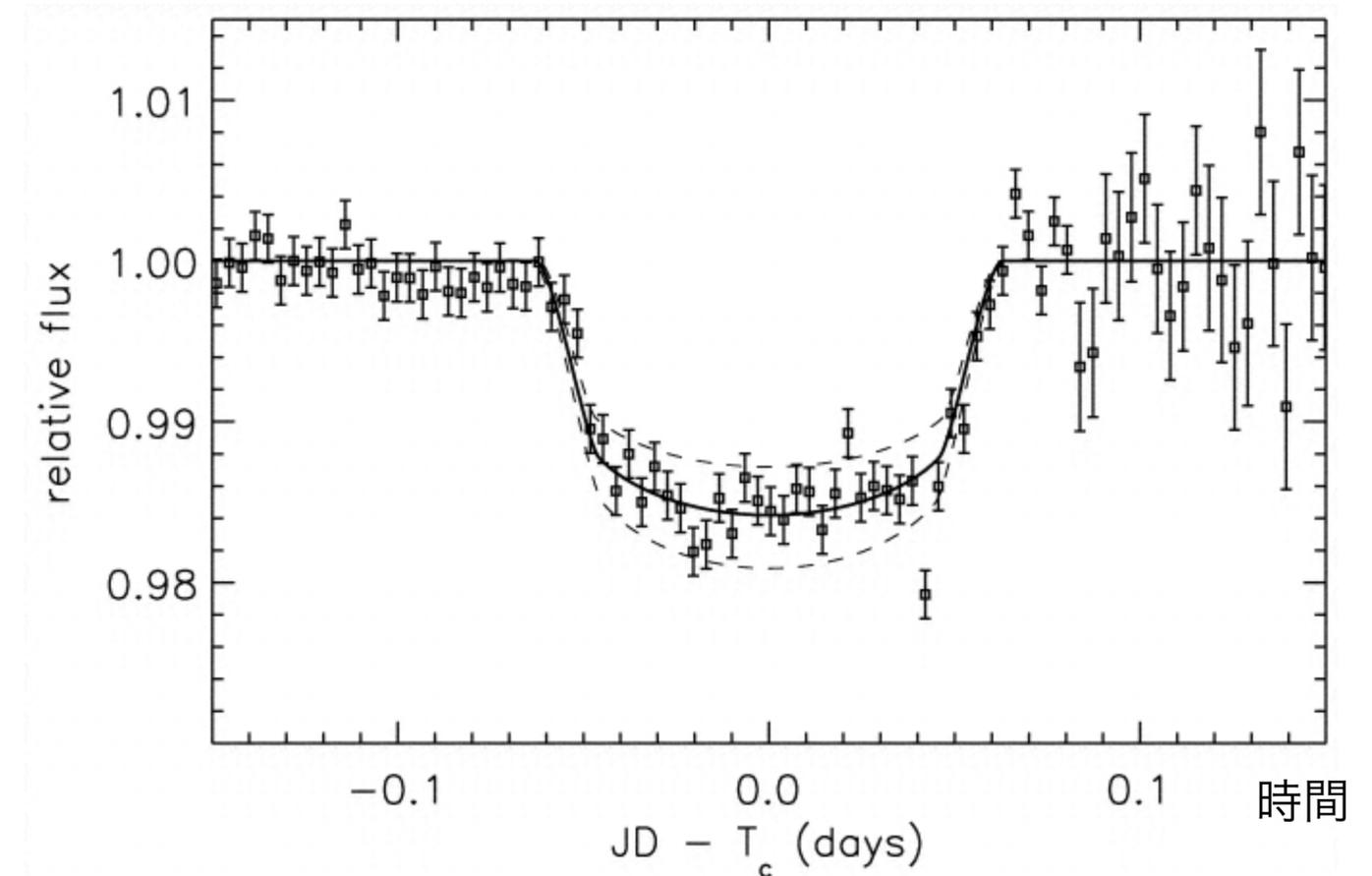
- 惑星が主星を隠していないときの光度: L
- 惑星が主星を隠しているときの光度: $L - \Delta L$
- それぞれの観測者から見えている面の面積は πR_s^2 および πR_p^2 なので、減光率は

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\pi R_p^2}{\pi R_s^2} = \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$$

例えば、木星と太陽だと
 $(R_{\text{jup}}/R_{\odot})^2 \approx 0.01$

- 惑星と主星の半径比の2乗 → 惑星半径が観測から分かる

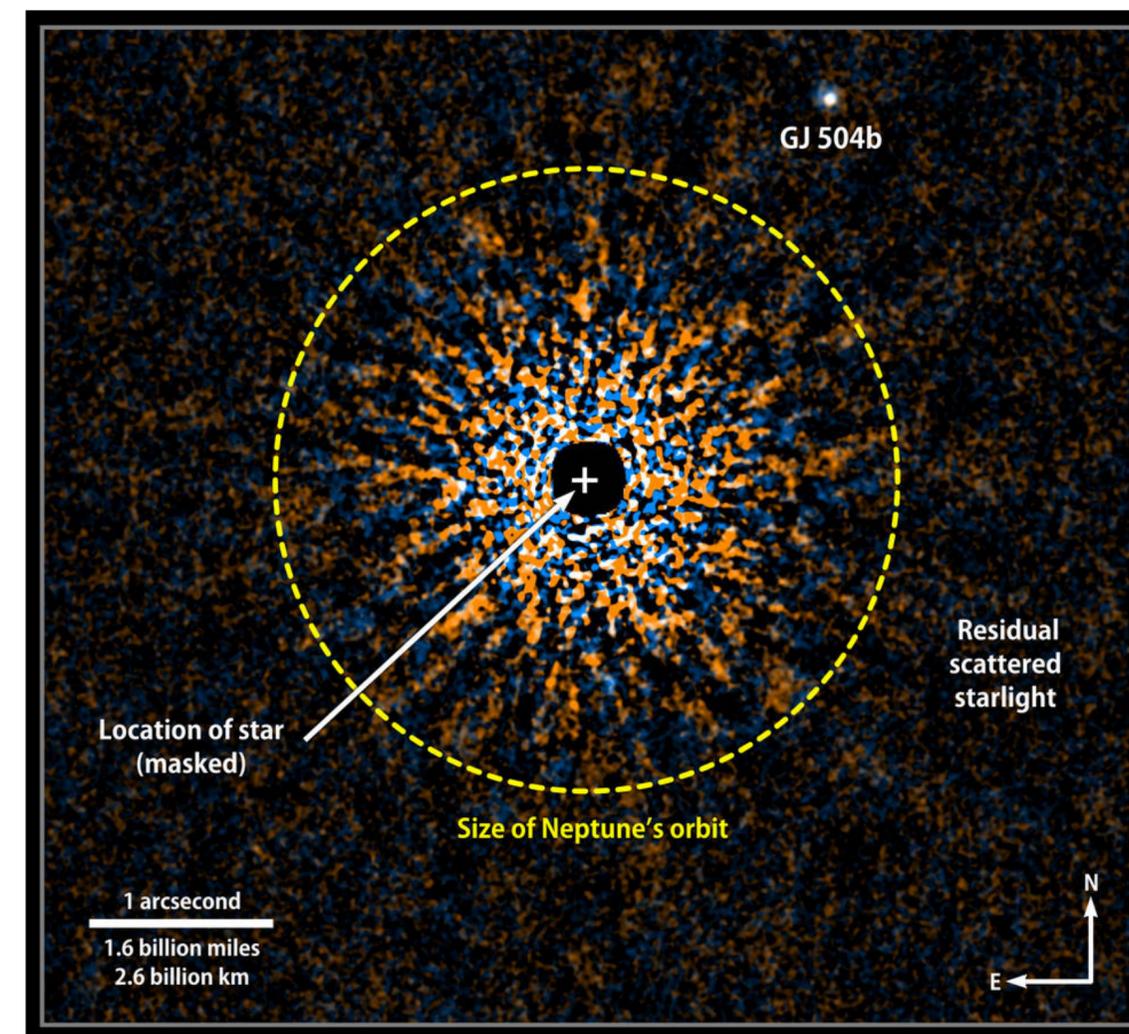
(相対的な)明るさ



HD 209458bのトランジットによる主星の明るさ変化
credit: Charbonneau et al. (2000) ApJ, 529, L45
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000ApJ...529L..45C/>

直接撮像による惑星検出

- 直接的に惑星を撮像観測によって捉える
- 主星の光が圧倒的に明るいため、マスクする必要がある: コロナグラフ(coronagraph)
- それでも回折や散乱によって主星の明かりがもれこむ
- 主星から遠くにある大きな惑星が検出しやすい



コロナグラフを用いた直接撮像での惑星検出例(GJ 504b)
credit: NASA's Goddard Space Flight Center/NAOJ
<https://www.nasa.gov/content/goddard/astronomers-image-lowest-mass-exoplanet-around-a-sun-like-star>

第15回:

系外惑星の世界

- (太陽)系外惑星の発見
- **系外惑星の特徴と多様性**
- 原始惑星系円盤と惑星系の起源

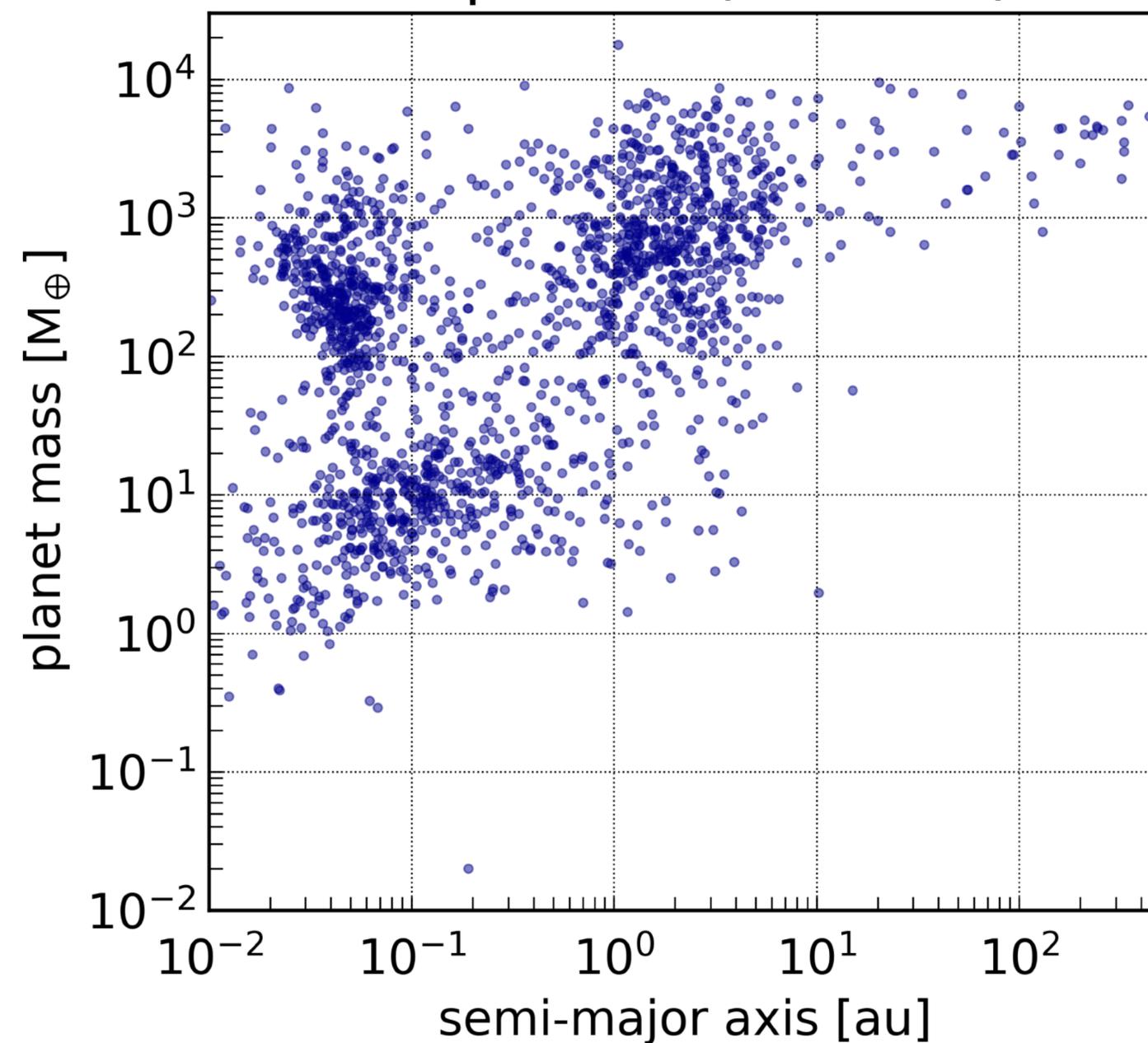
系外惑星の性質

- 太陽系とはかなり性質の異なる惑星が次々と発見されている

data source: NASA exoplanet archive

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

惑星質量 [地球質量] exoplanets (N=5054)



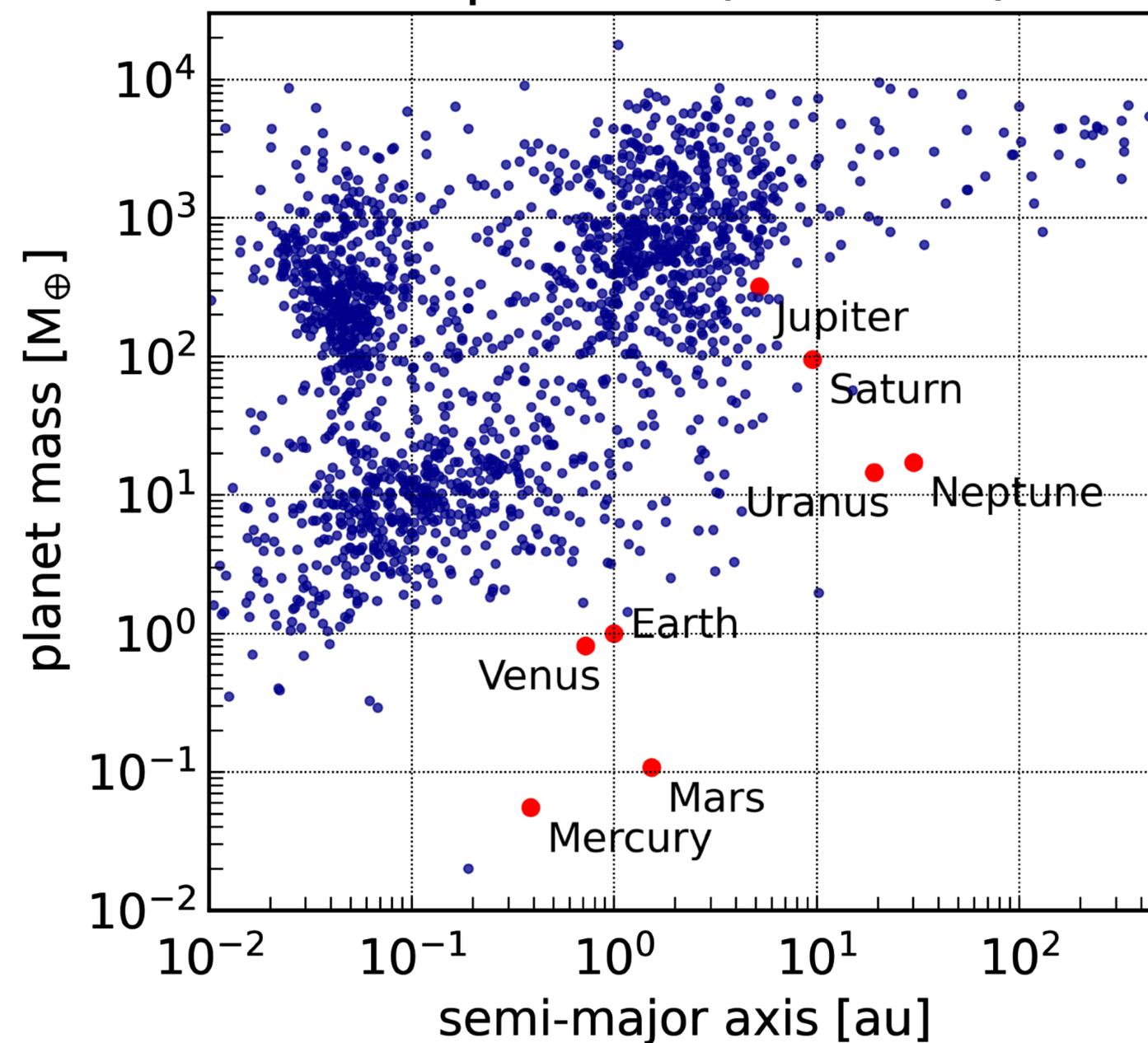
軌道長半径 [au]

系外惑星の性質

data source: NASA exoplanet archive
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

惑星質量 [地球質量] exoplanets (N=5054)

- 太陽系とはかなり性質の異なる惑星が次々と発見されている
- 地球や火星のような惑星と似た系外惑星があまり見つからないのは検出のしにくさ(観測バイアス)による
- (現在の技術では)小さい岩石惑星は検出しにくい



軌道長半径 [au]

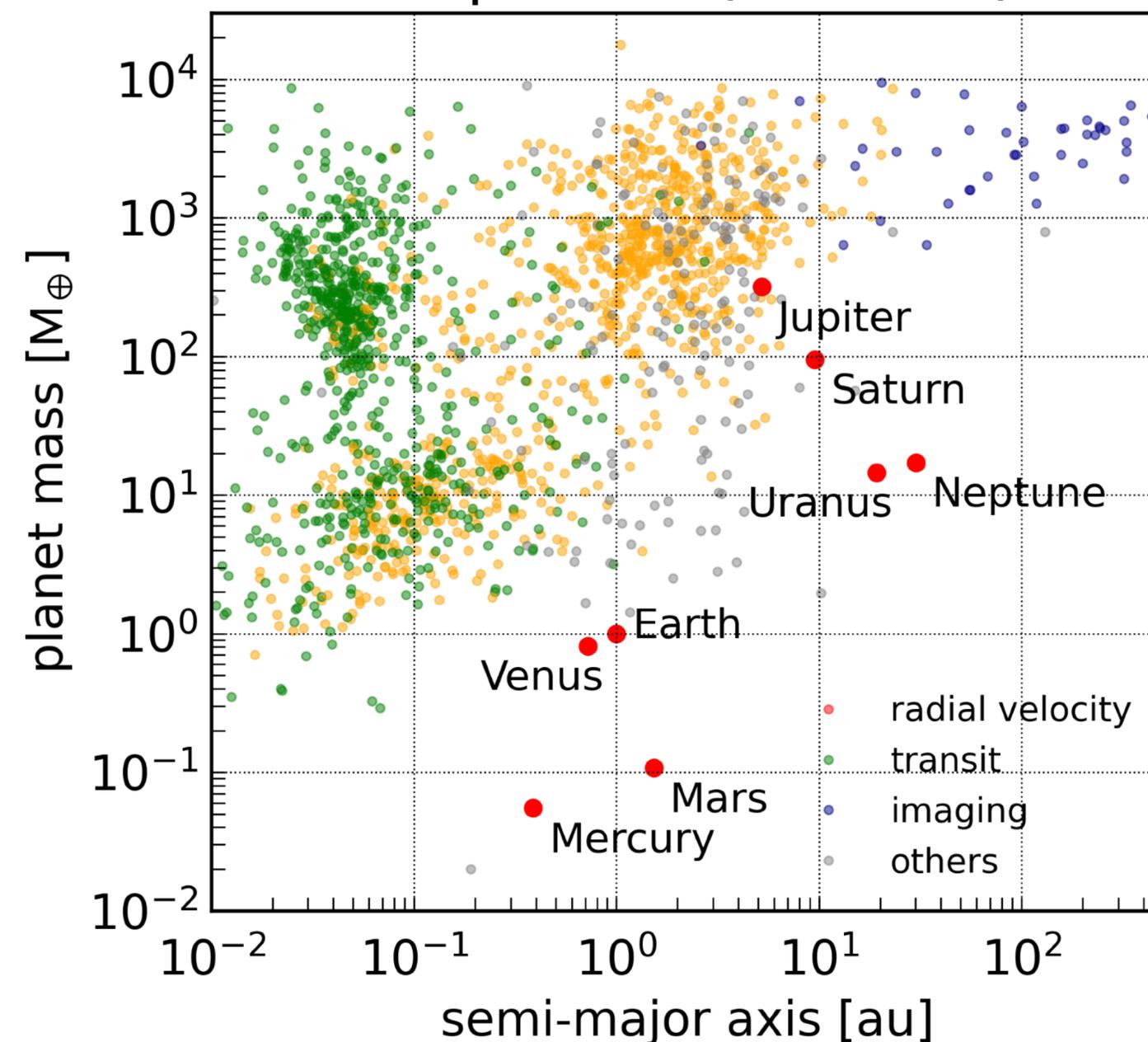
系外惑星の性質

data source: NASA exoplanet archive

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

惑星質量 [地球質量] exoplanets (N=5054)

- 太陽系とはかなり性質の異なる惑星が次々と発見されている
- 地球や火星のような惑星と似た系外惑星があまり見つからないのは検出のしにくさ(観測バイアス)による
- (現在の技術では)小さい岩石惑星は検出しにくい



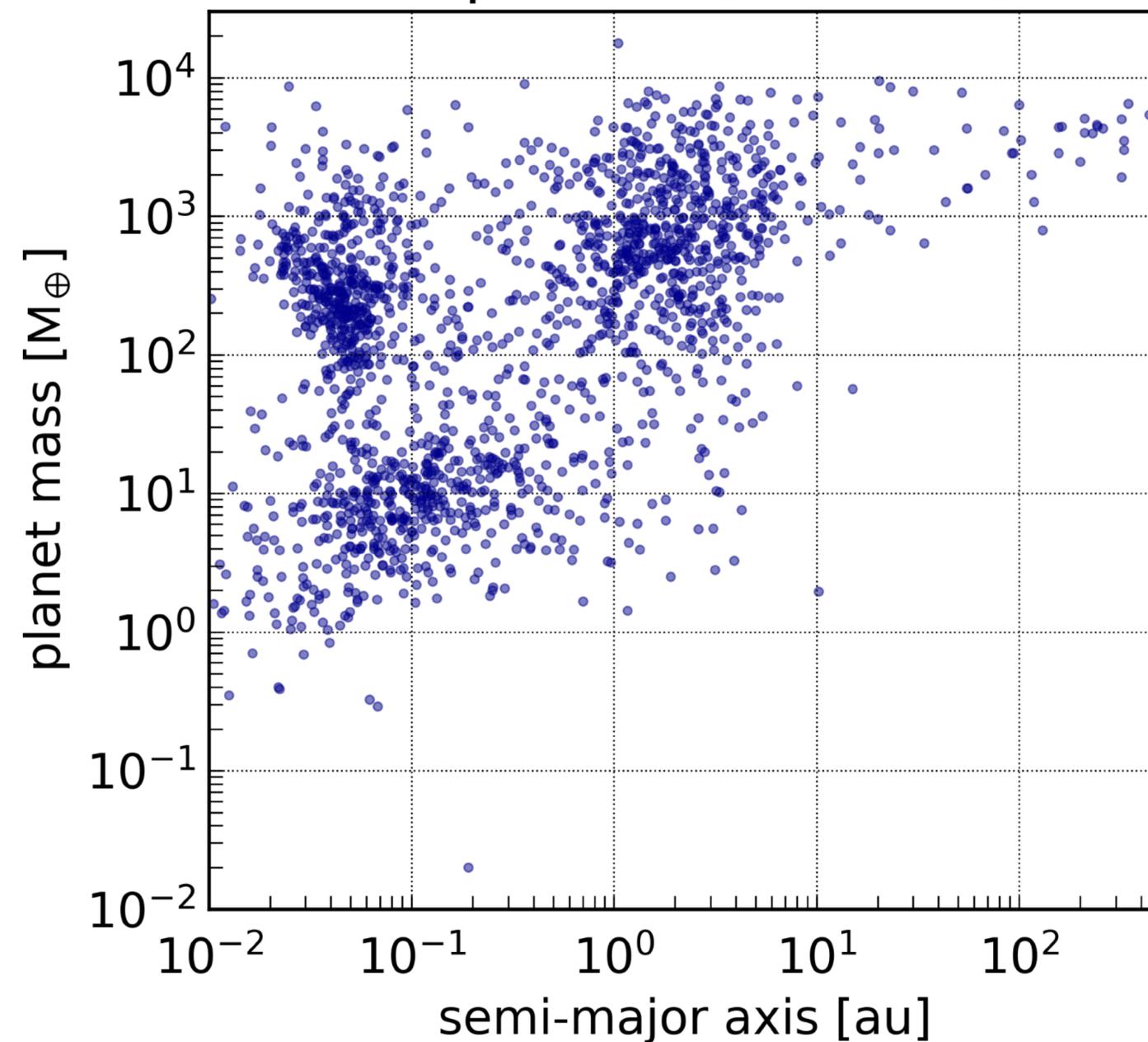
軌道長半径 [au]

系外惑星の性質

data source: NASA exoplanet archive
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

惑星質量 [地球質量] exoplanets (N=5054)

- それでも太陽系とは異なる惑星が存在するのは確かな観測事実
- 木星型巨大ガス惑星
- ホットジュピター (hot Jupiter)
- ホットネプチューン (hot Neptune)
- スーパーアース (super earth)



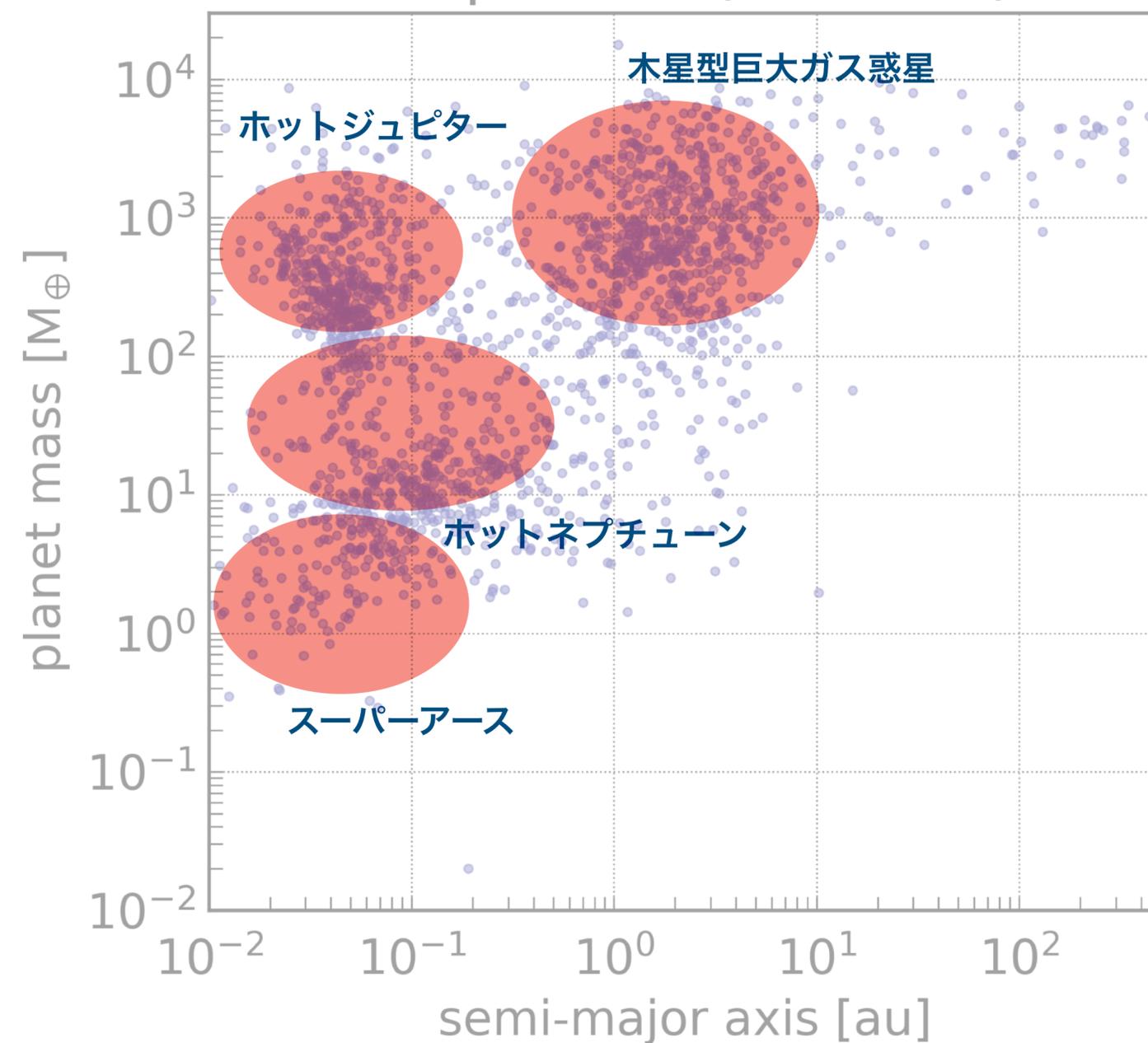
軌道長半径 [au]

系外惑星の性質

data source: NASA exoplanet archive
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

惑星質量 [地球質量] exoplanets (N=5054)

- それでも太陽系とは異なる惑星が存在するのは確かな観測事実
- 木星型巨大ガス惑星
- ホットジュピター (hot Jupiter)
- ホットネプチューン (hot Neptune)
- スーパーアース (super earth)



軌道長半径 [au]

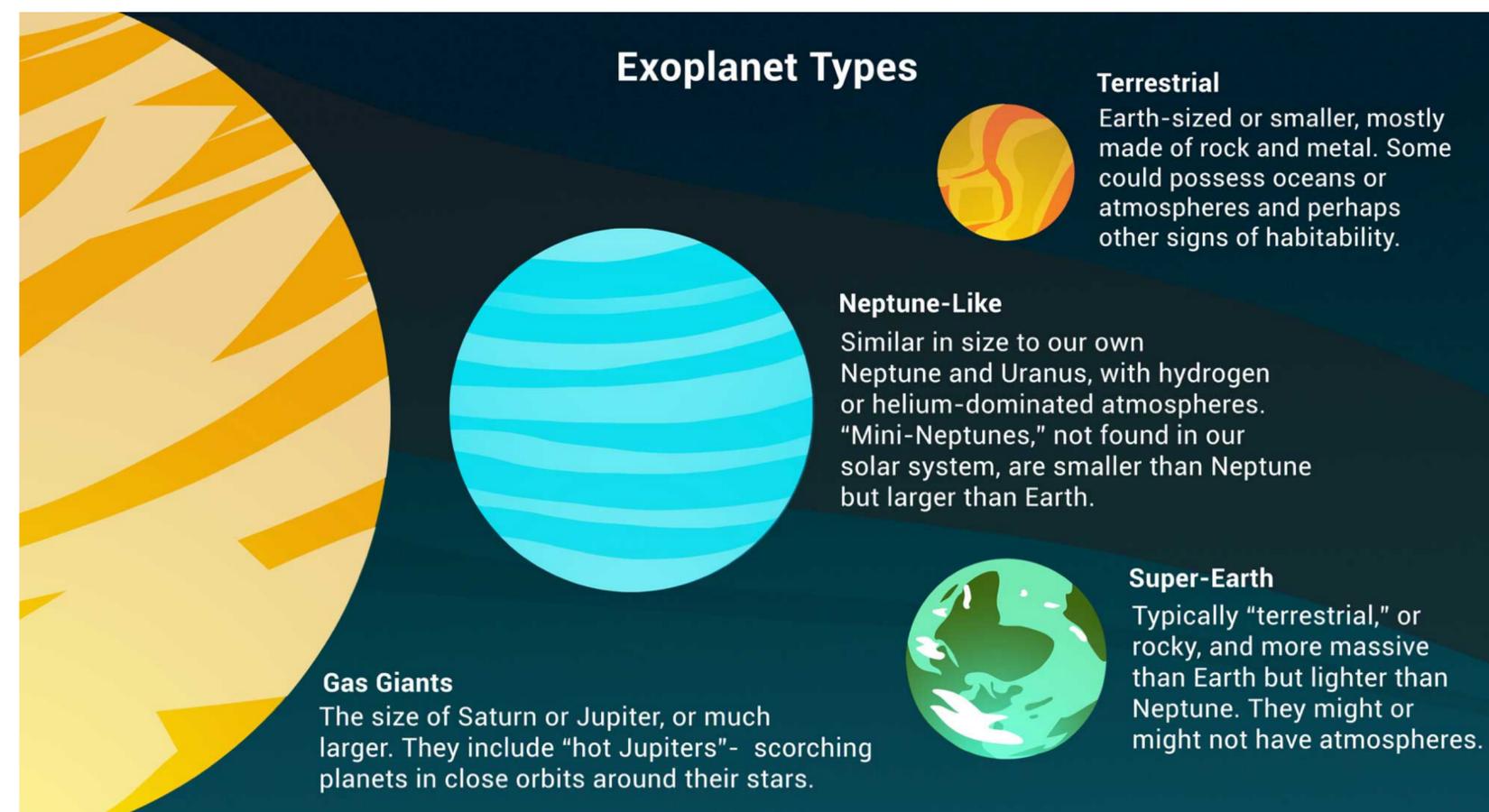
系外惑星の性質

- それでも太陽系とは異なる惑星が存在するのは確かな観測事実
- 木星型巨大ガス惑星
- ホットジュピター(hot Jupiter)
- ホットネプチューン(hot Neptune)
- スーパーアース(super earth)

系外惑星の大まかな分類

Credit: NASA/JPL-Caltech

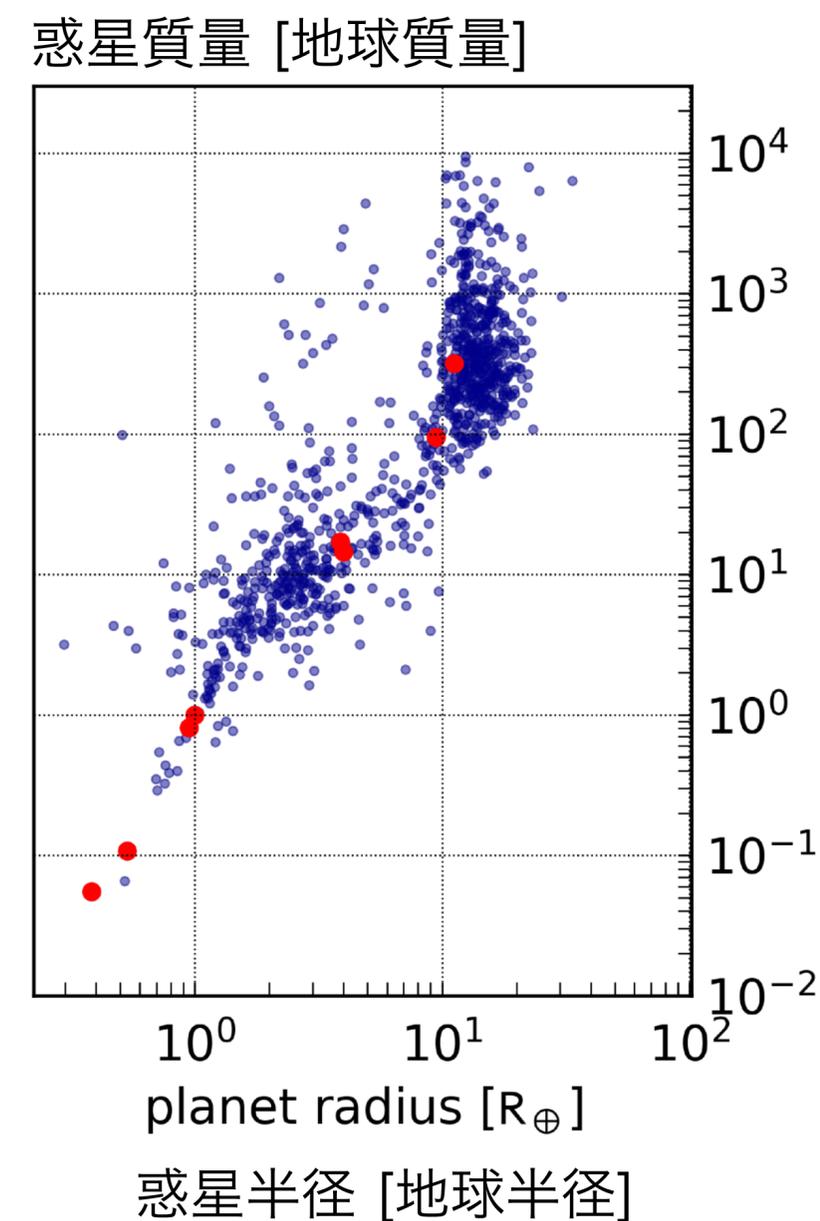
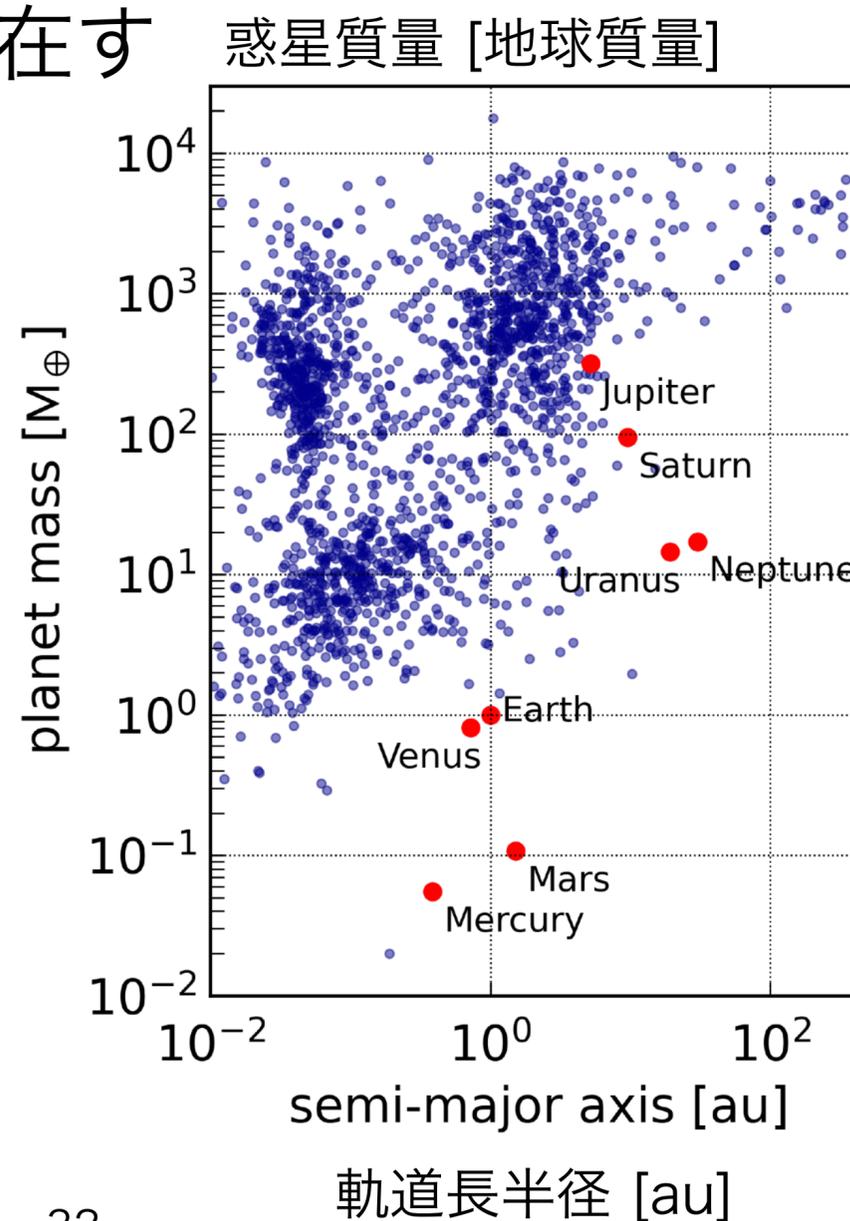
<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/>



系外惑星の性質

data source: NASA exoplanet archive
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

- それでも太陽系とは異なる惑星が存在するのは確かな観測事実
- 木星型巨大ガス惑星
- ホットジュピター(hot Jupiter):
- ホットネプチューン(hot Neptune):
- スーパーアース(super earth):



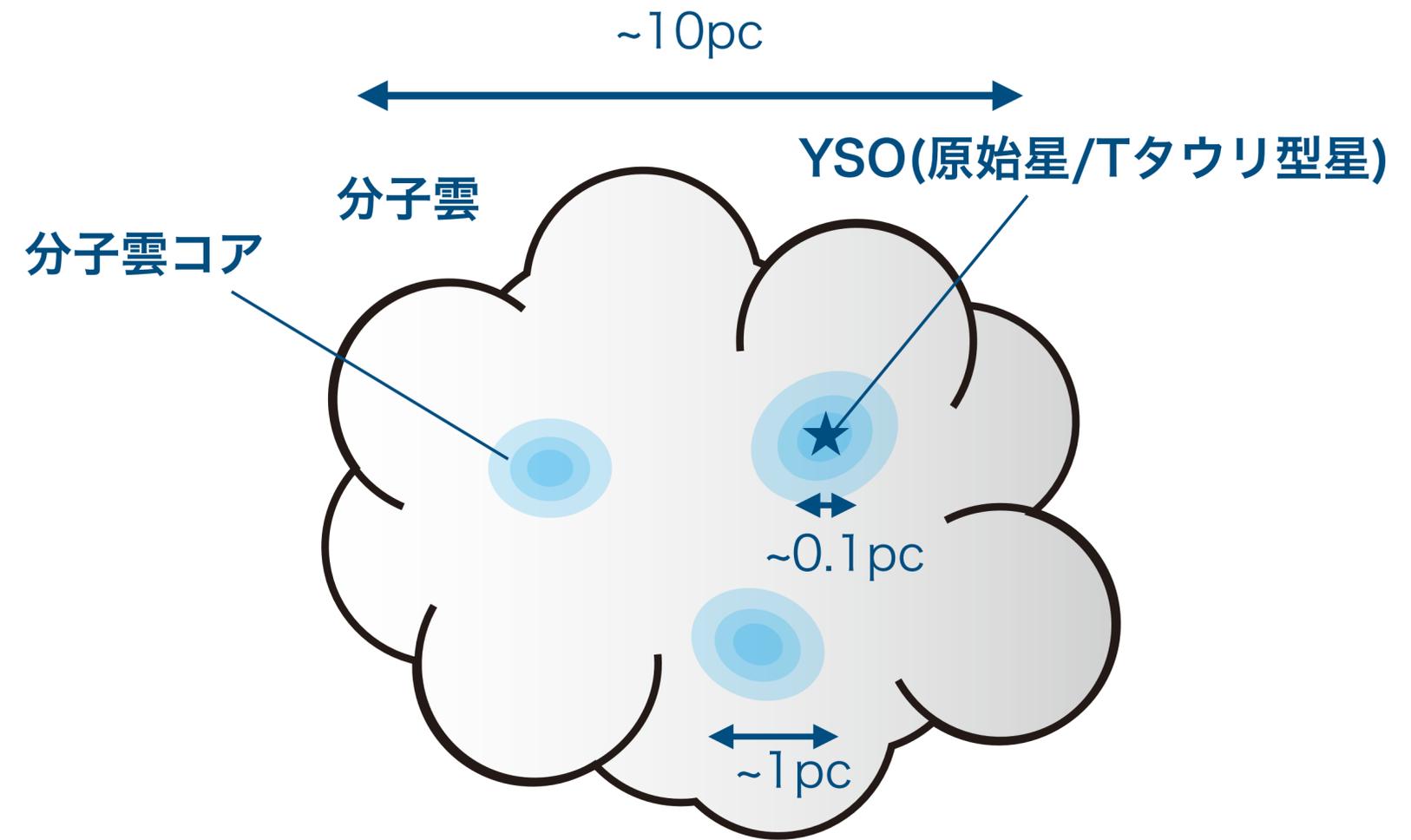
第15回:

系外惑星の世界

- (太陽)系外惑星の発見
- 系外惑星の特徴と多様性
- **原始惑星系円盤と惑星系の起源**

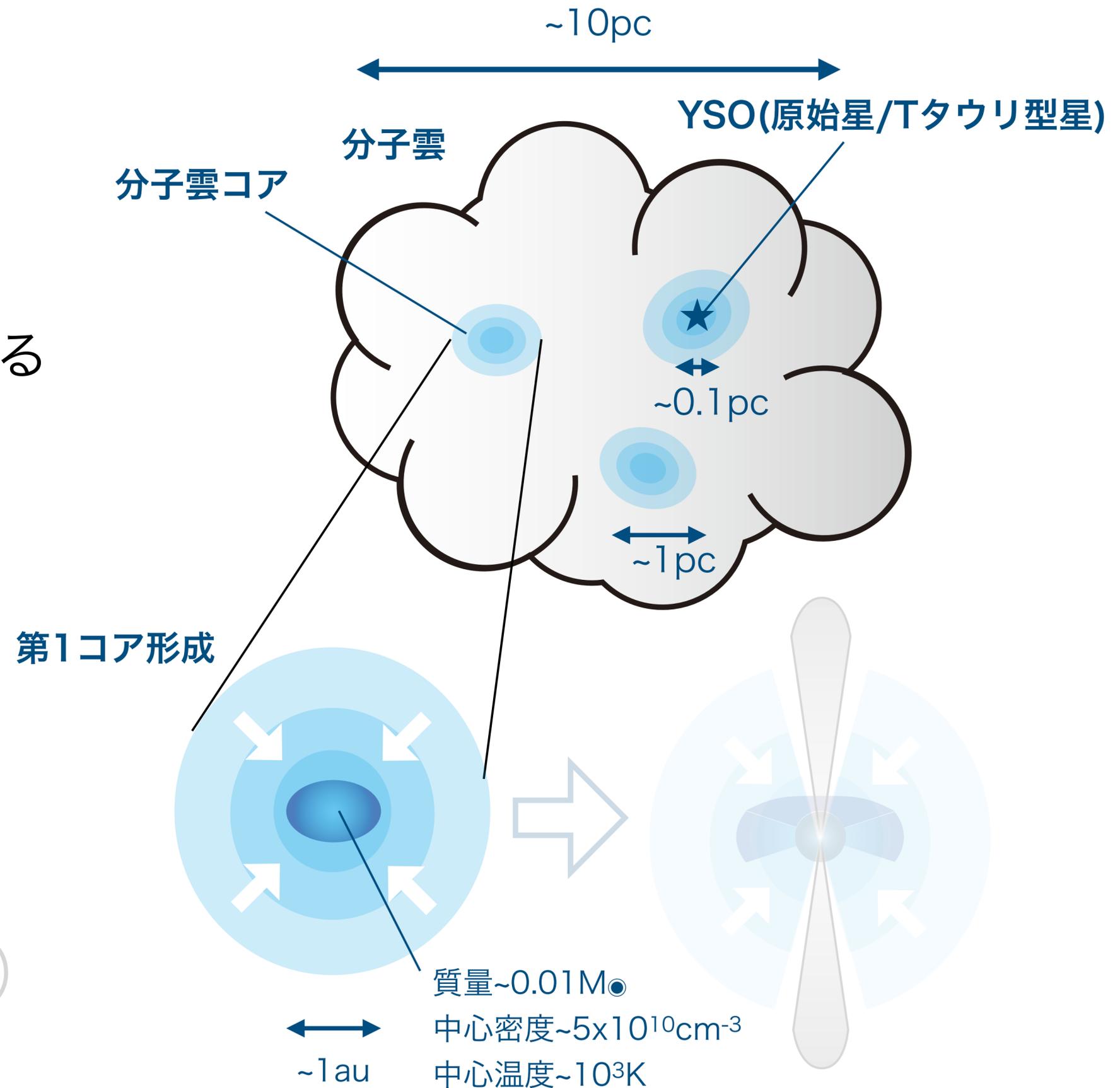
星形成の現場

- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2 [\text{cm}^{-3}]$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4 [\text{cm}^{-3}]$
- **Young Stellar Object (YSO)**
- 原始星
- Tタウリ型星



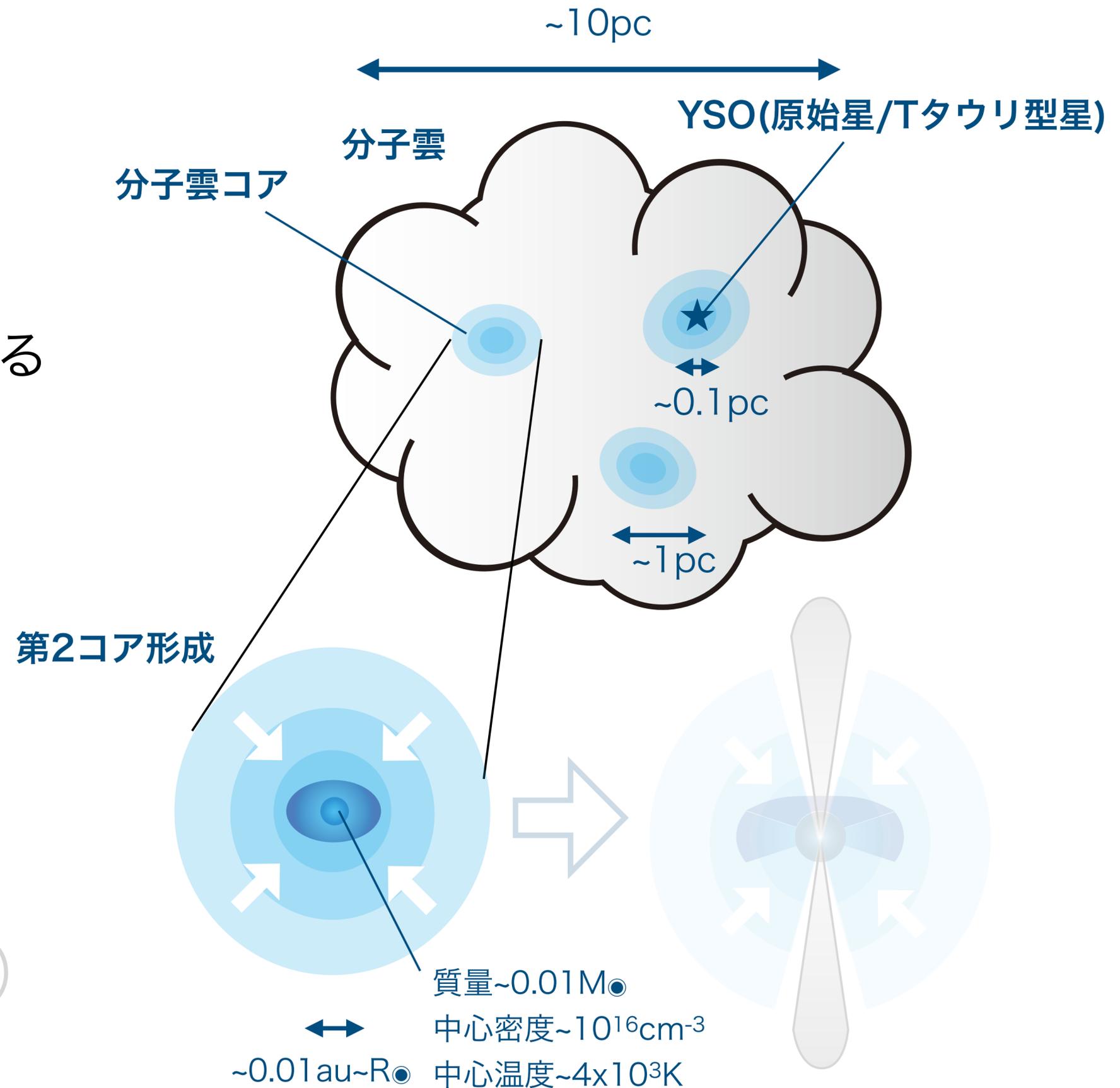
星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離 ($H_2 \rightarrow 2H$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期 (Tタウリ型星など)



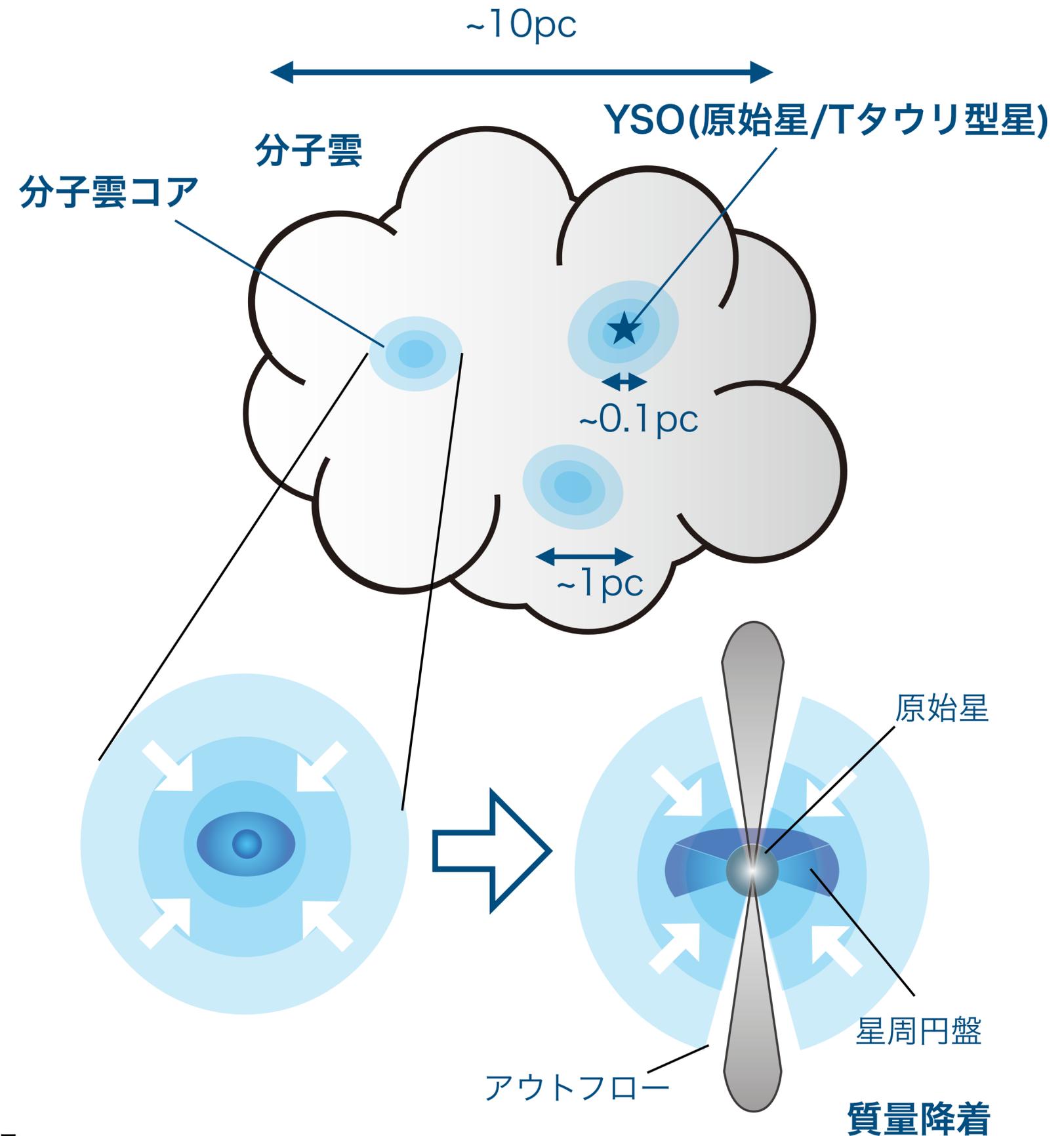
星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離 ($H_2 \rightarrow 2H$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期 (Tタウリ型星など)



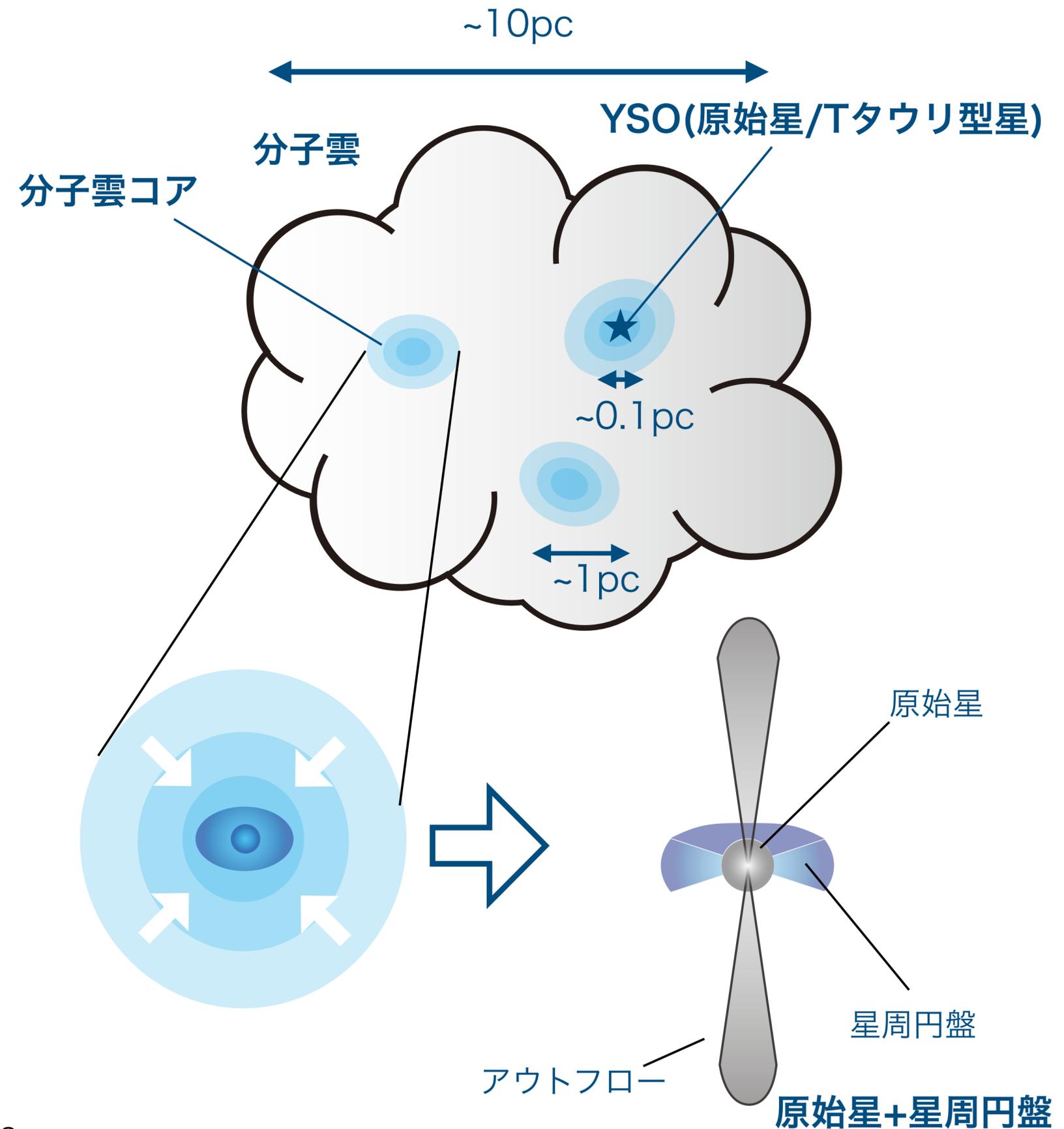
星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離 ($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期 (Tタウリ型星など)



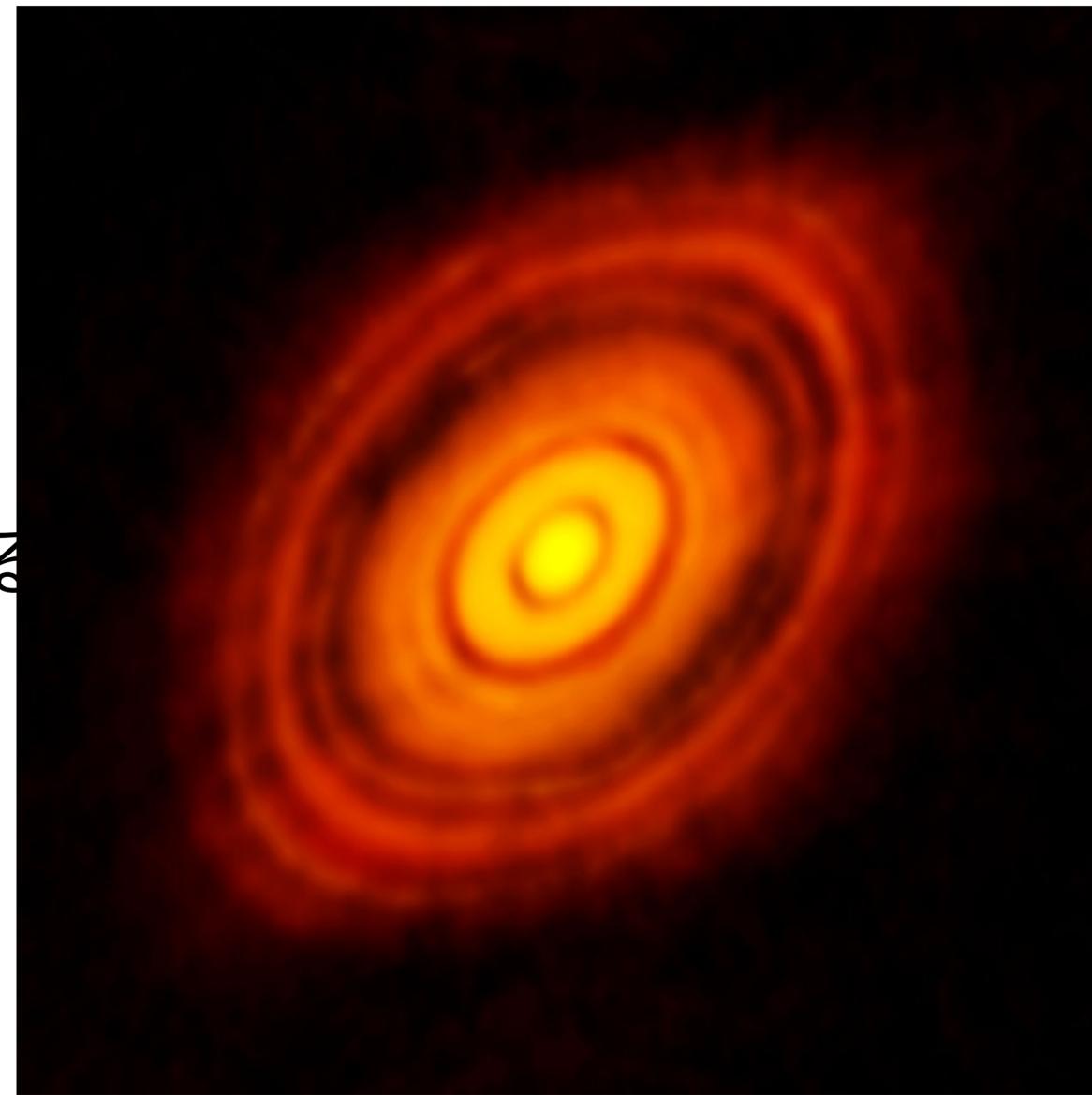
星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離 ($H_2 \rightarrow 2H$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期 (Tタウリ型星など)

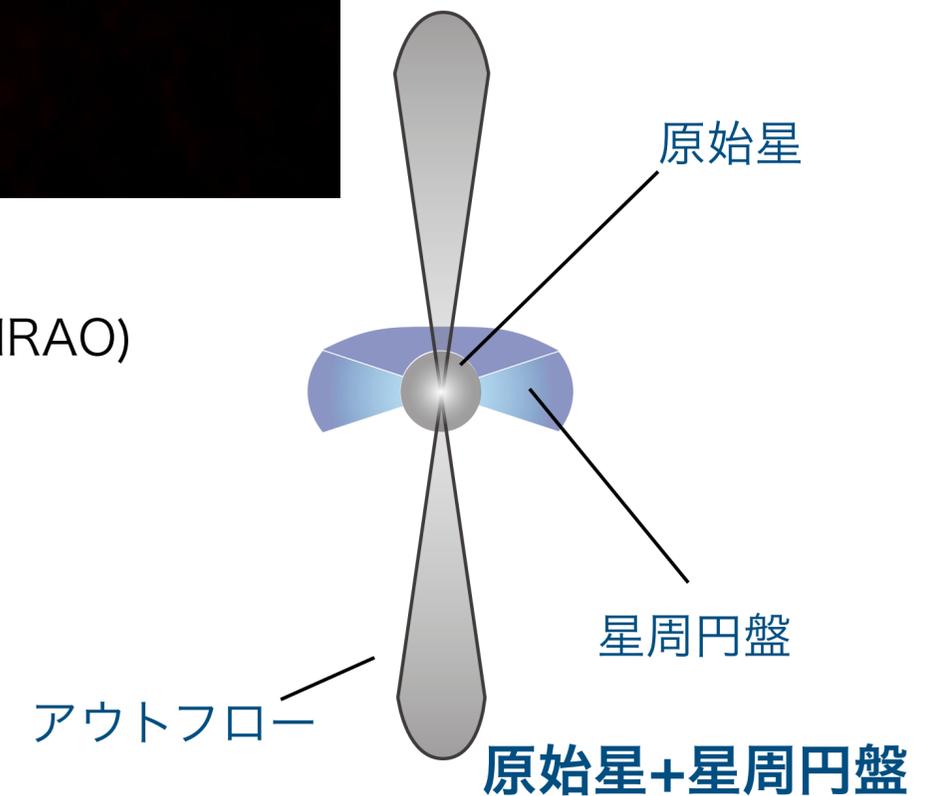


星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)

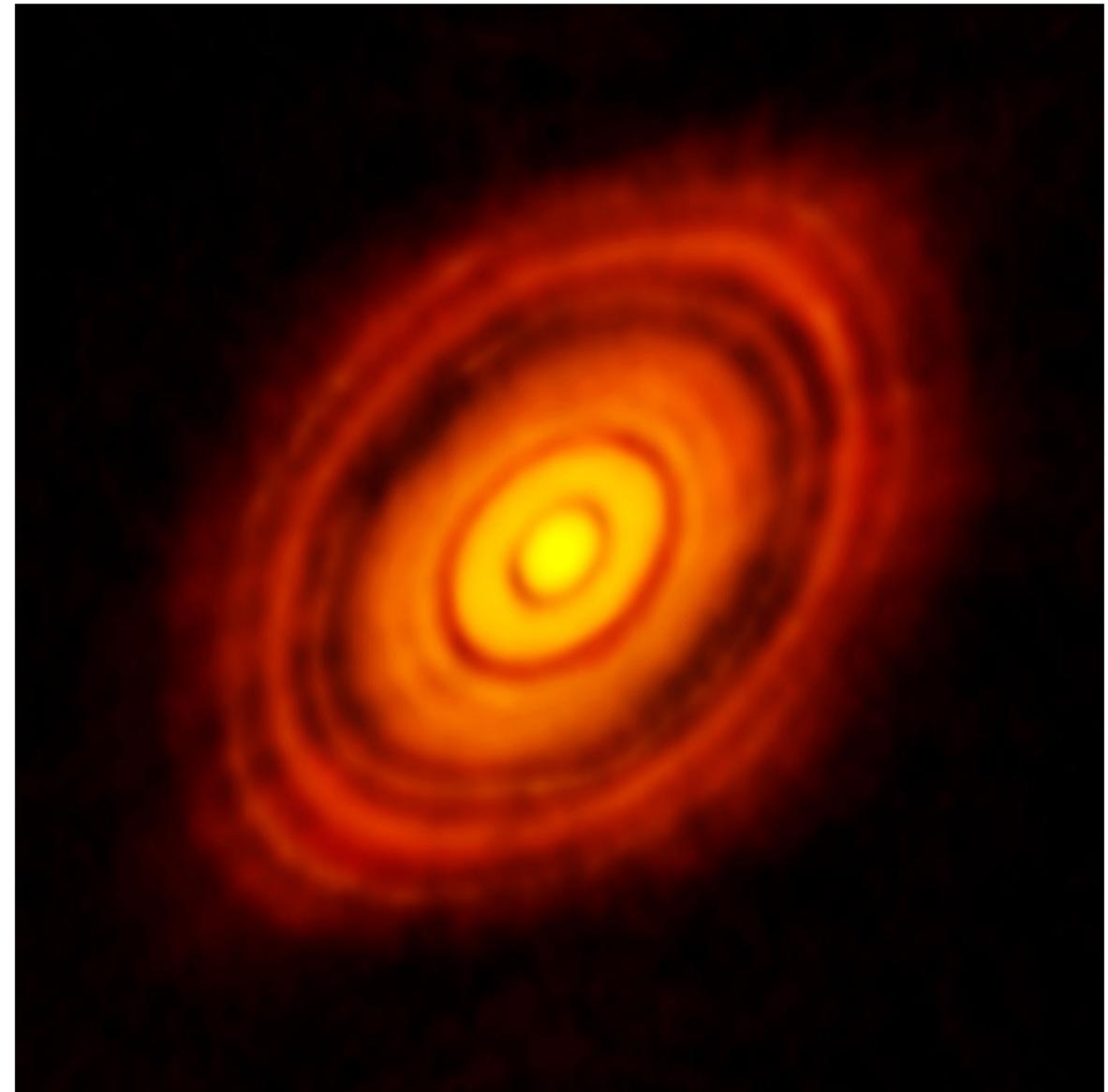


原始惑星系円盤 HL Tau
credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



原始惑星系円盤(proto-planetary disk)

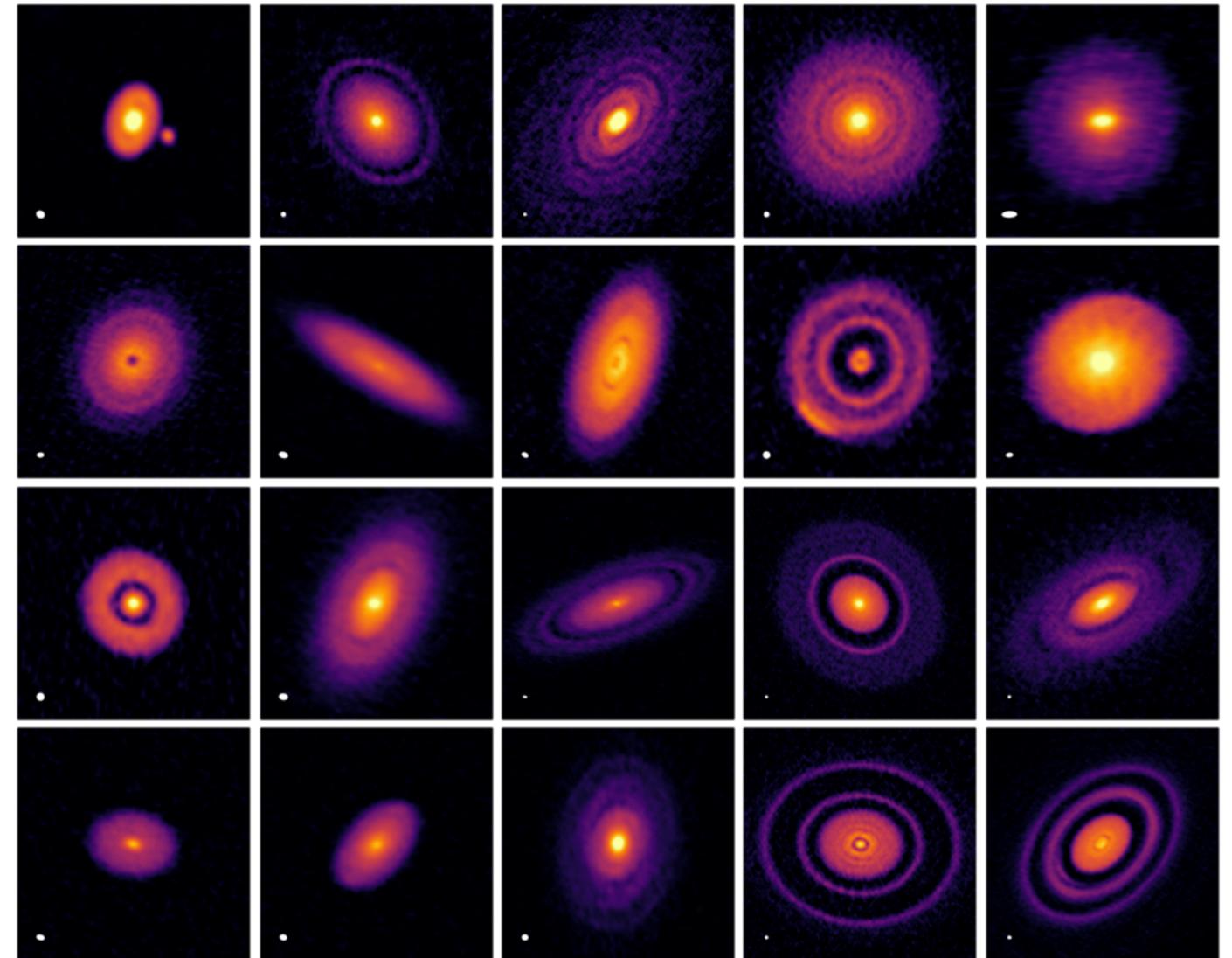
- できたての星の周りに存在するガスやダスト(星間塵)でできた円盤構造
- 中心星の重力を受け、回転している
- この中で次第に惑星が形成されていくと考えられる
- 様々な形の原始惑星系円盤



原始惑星系円盤 HL Tau
credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

原始惑星系円盤(proto-planetary disk)

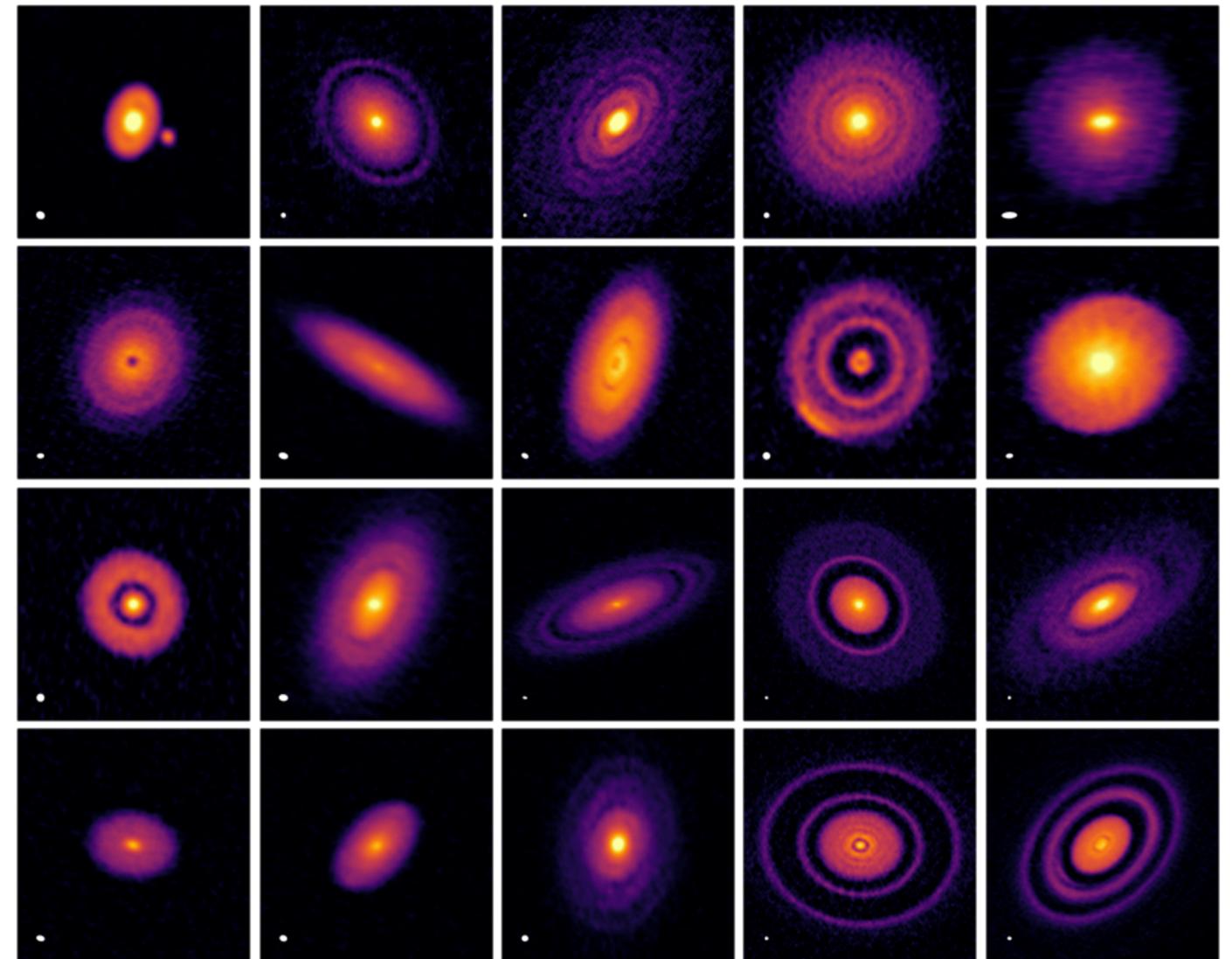
- できたての星の周りに存在するガスやダスト(星間塵)でできた円盤構造
- 中心星の重力を受け、回転している
- この中で次第に惑星が形成されていくと考えられる
- 様々な形の原始惑星系円盤



アルマ望遠鏡(電波)で観測された原始惑星系円盤
credit: ALMA, DSHARP, Andrews et al. (2018)
<https://almascience.eso.org/almadata/lp/DSHARP/>

原始惑星系円盤(proto-planetary disk)

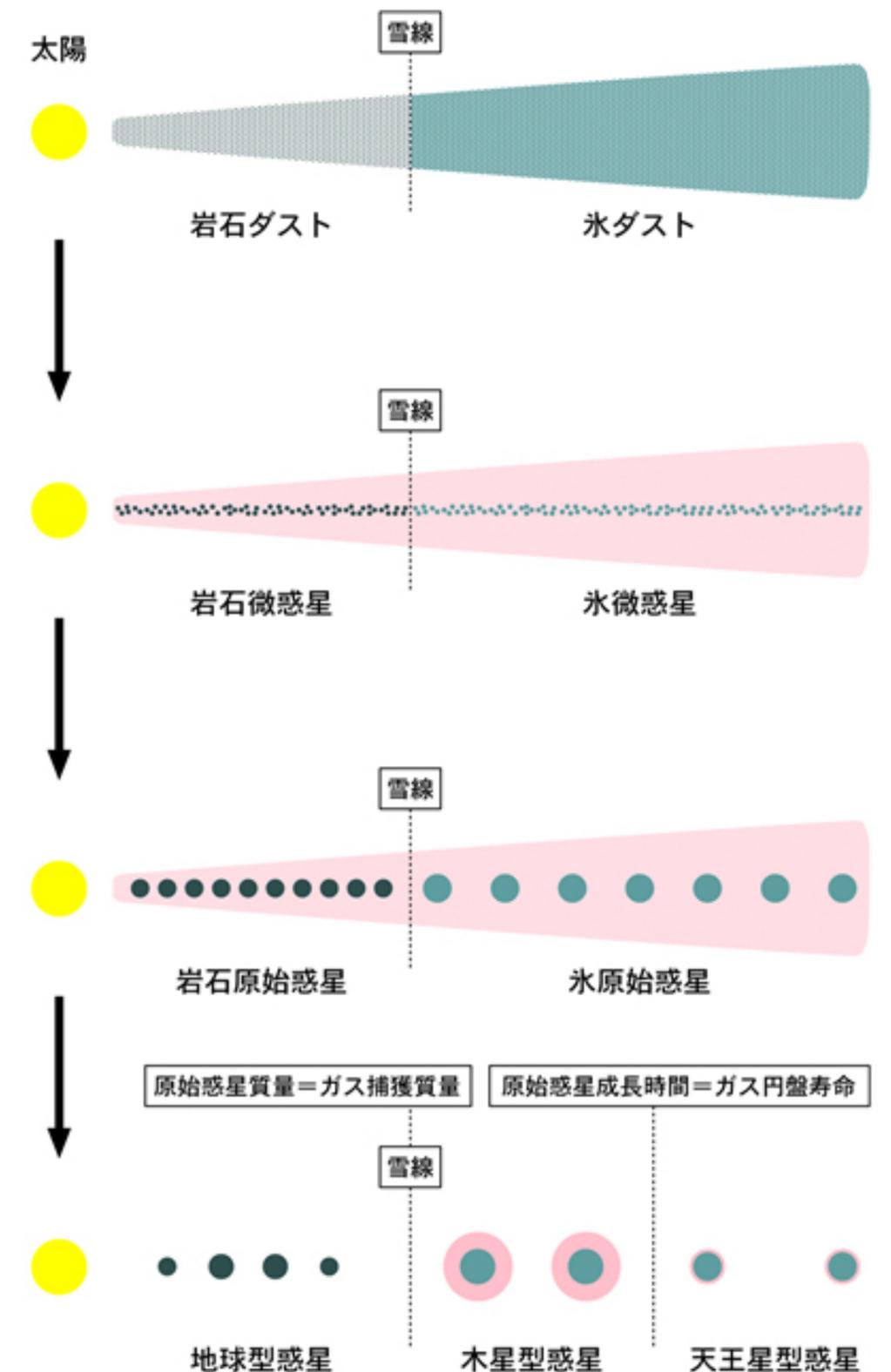
- ギャップ(暗い部分が溝として観測される)の存在
- 惑星ができている証拠? 中心星を周回する原始惑星が軌道上にあるガスやダストを掃き集めながら成長している?
- まだ不明な部分は多い



アルマ望遠鏡(電波)で観測された原始惑星系円盤
credit: ALMA, DSHARP, Andrews et al. (2018)
<https://almascience.eso.org/almadata/lp/DSHARP/>

太陽系形成の標準シナリオ

- **原始太陽系円盤の形成 (~10⁵yr):** 星形成領域で観測されている原始惑星系円盤と同様なガスとダストからなる円盤が形成される段階
- 円盤質量≒0.01M_☉, ダスト比率≒1%
- 半径約3auに**雪線(snow line)**: 内側では岩石ダスト、外側では氷ダスト

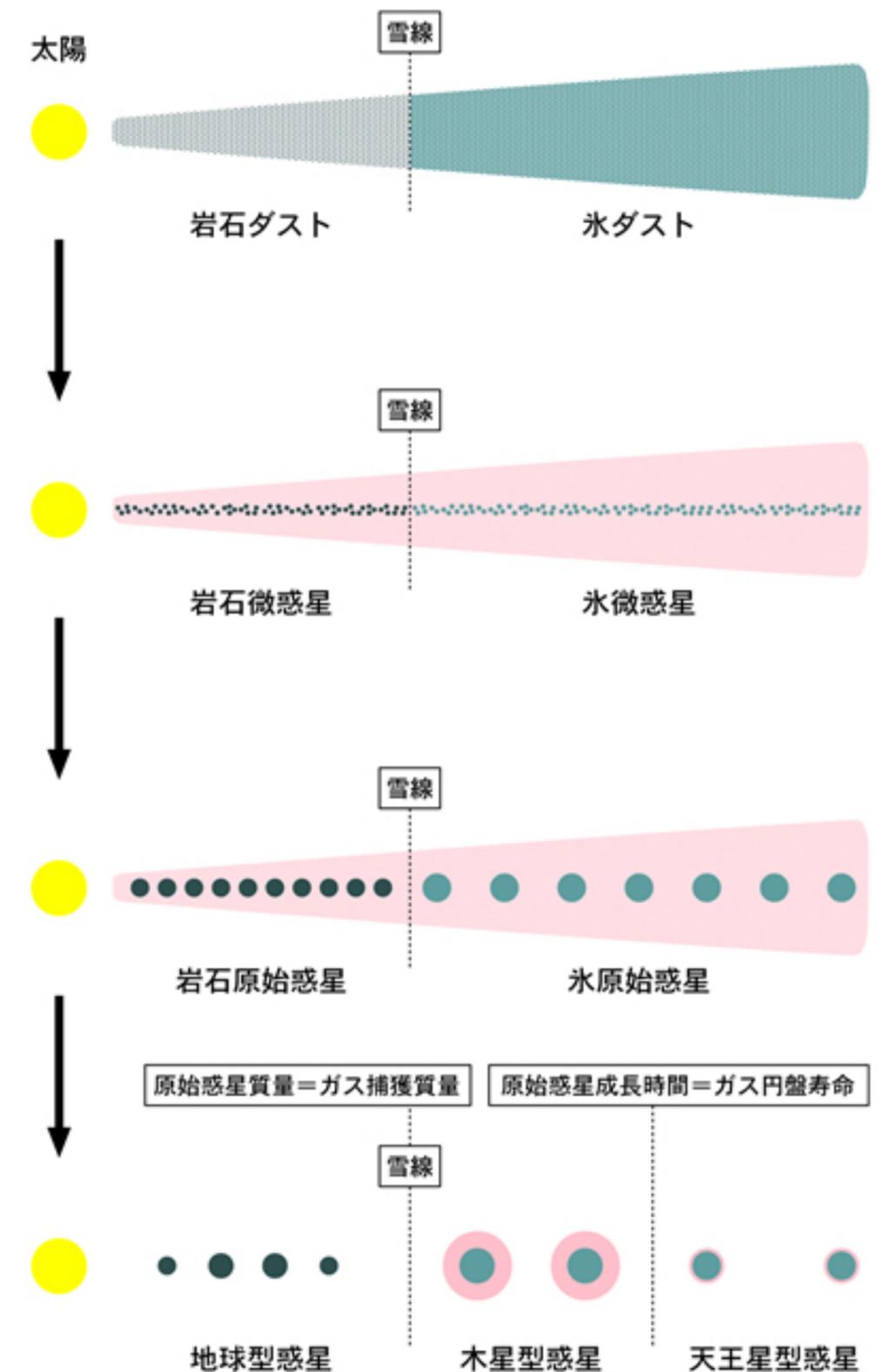


太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成の標準シナリオ

- **材料物質集積期(10⁵-10⁶yr):** ダスト微粒子が成長しつつ、円盤赤道面に沈澱していく
- 固体層(赤道面付近の固体微粒子からなる層)が形成される
- 固体層での微粒子の合体成長及び層の分裂により**微惑星(直径数km)**が形成される

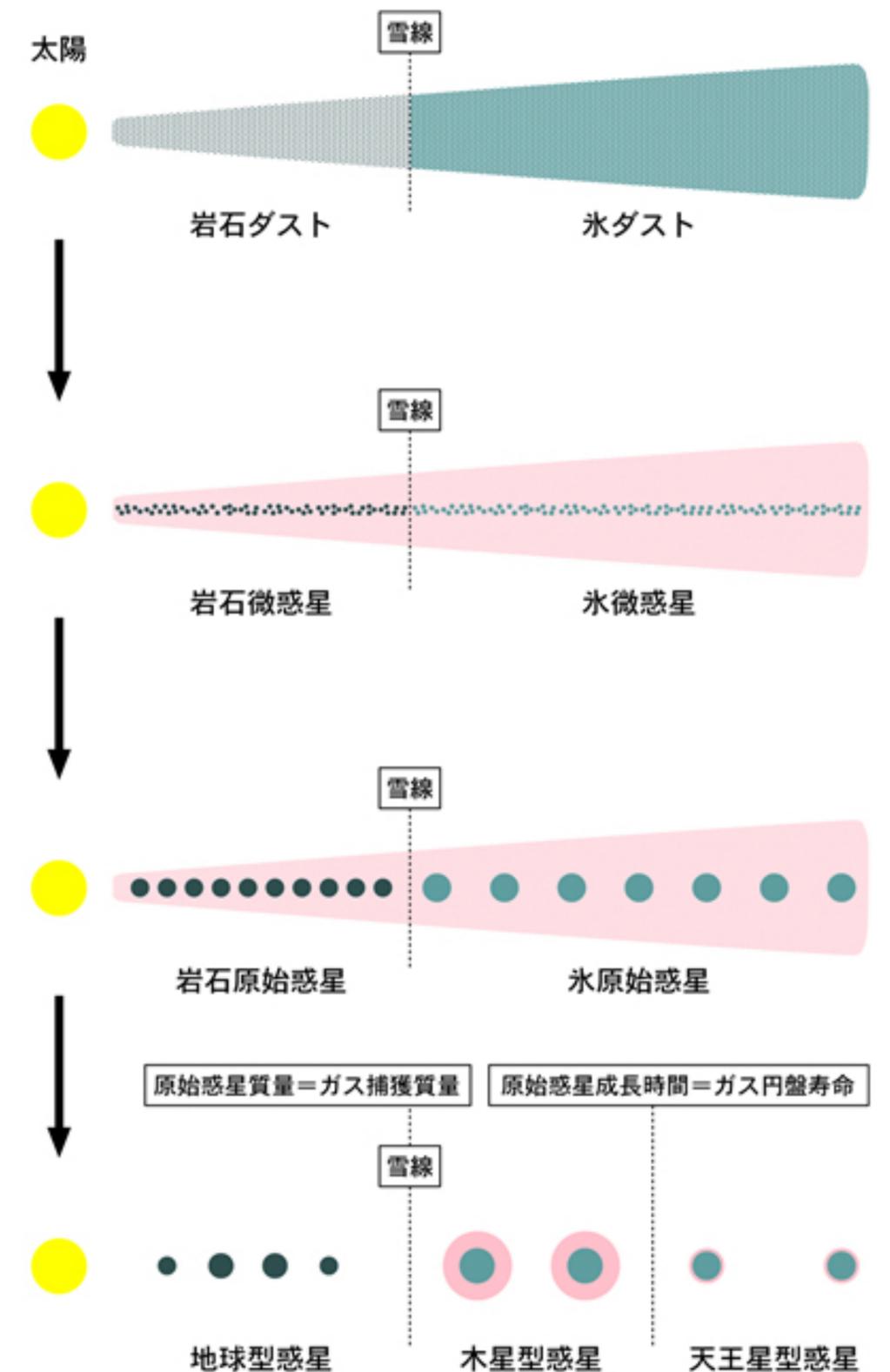


太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成の標準シナリオ

- 惑星の前期成長期(10^6-10^7 yr): 集積期に引き続いて固体層での微惑星の進化
- 微惑星どうしは互いに衝突や合体を繰り返す
- その過程で次第に質量を獲得し大きな塊に成長していく
- 原始惑星(火星サイズ ~ 0.1 地球質量, 数1000km)の形成

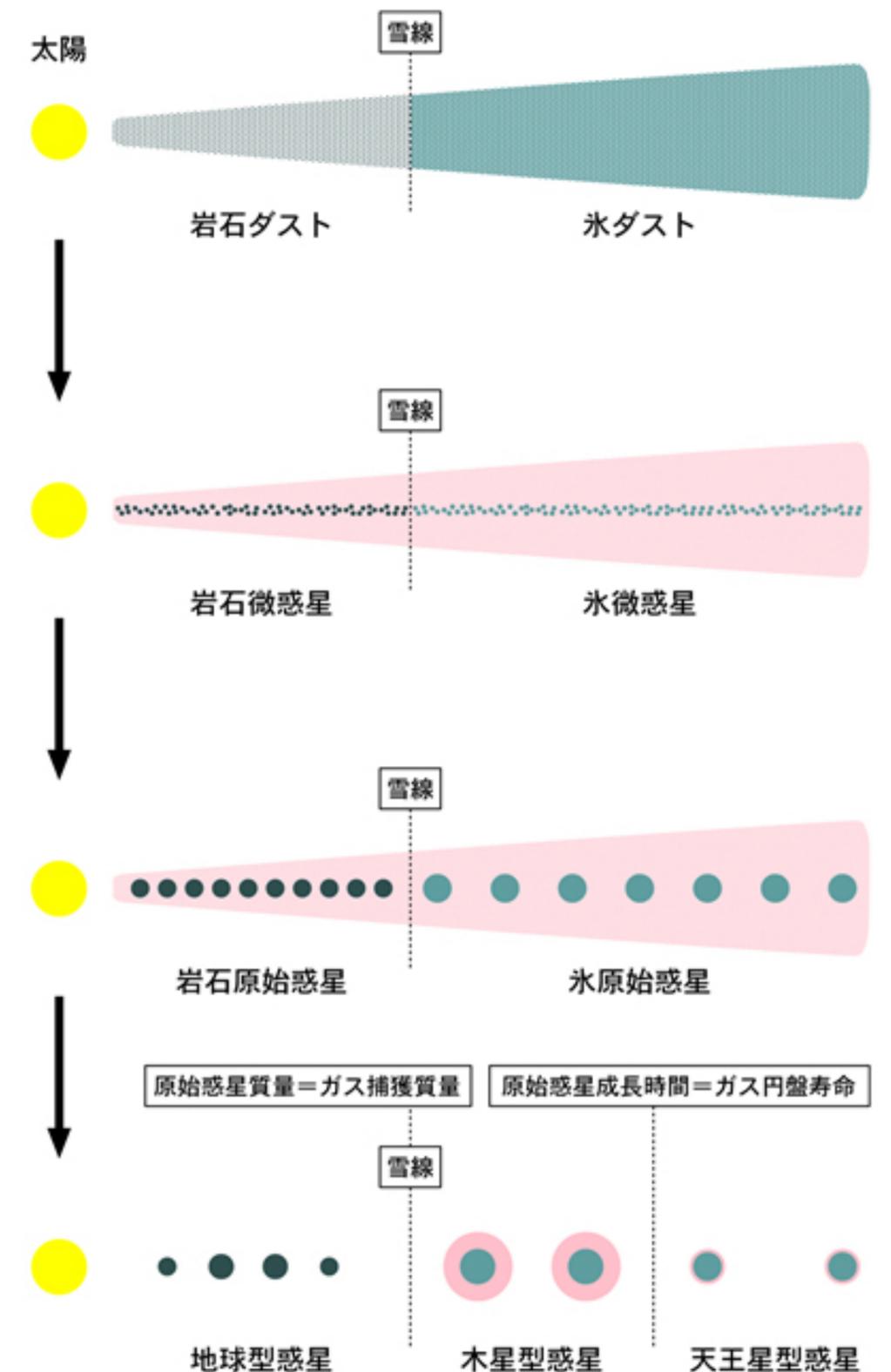


太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成の標準シナリオ

- 惑星の後期成長期(10^7-10^8yr): 原始惑星同士の衝突合体によって惑星が形成されていく段階
- 原始惑星の軌道交差によって**巨大衝突(giant impact)**が起こる
- 原始惑星が合体成長し、地球サイズの岩石惑星が生まれる

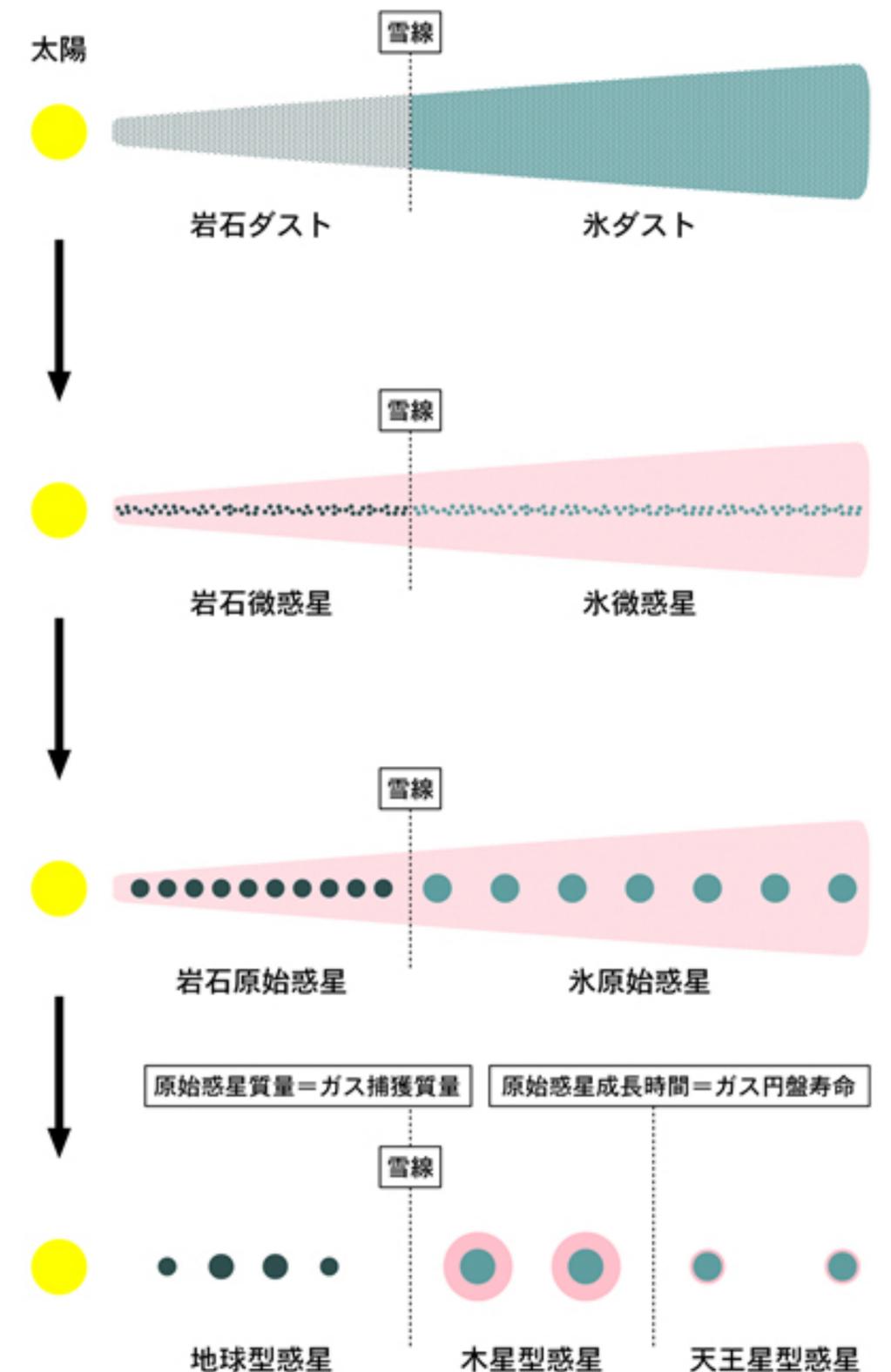


太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成の標準シナリオ

- 惑星の後期成長期(10^7-10^8yr): 原始惑星同士の衝突合体によって惑星が形成されていく段階
- 雪線以遠($>3\text{au}$)では、固体微粒子の質量が大きく、形成される微惑星も大きい
- 地球より大きく重い原始惑星が生まれ、周りのガスを獲得する
- 木星のようなガス惑星の形成

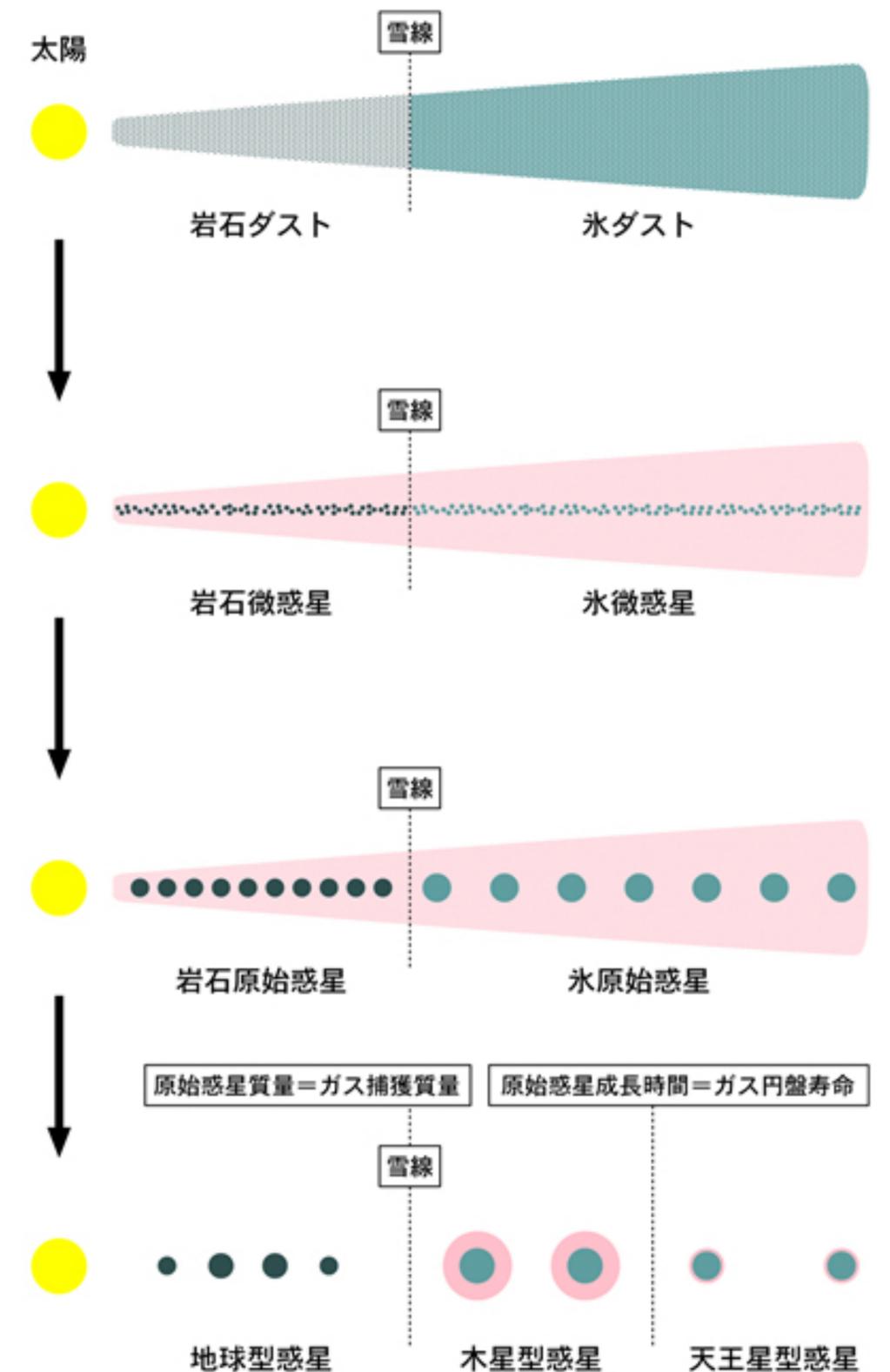


太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成の標準シナリオ

- **太陽系完成期(10^8-10^9 yr):** 最終的に太陽系が完成する段階
- ガス成分が散逸し、固体成分が残る
- 天王星や海王星は、成長しきらない段階でガス円盤が消失するため現在のような状態になったと考えられる
- このようにして現在の太陽系が形成されたと考えられる

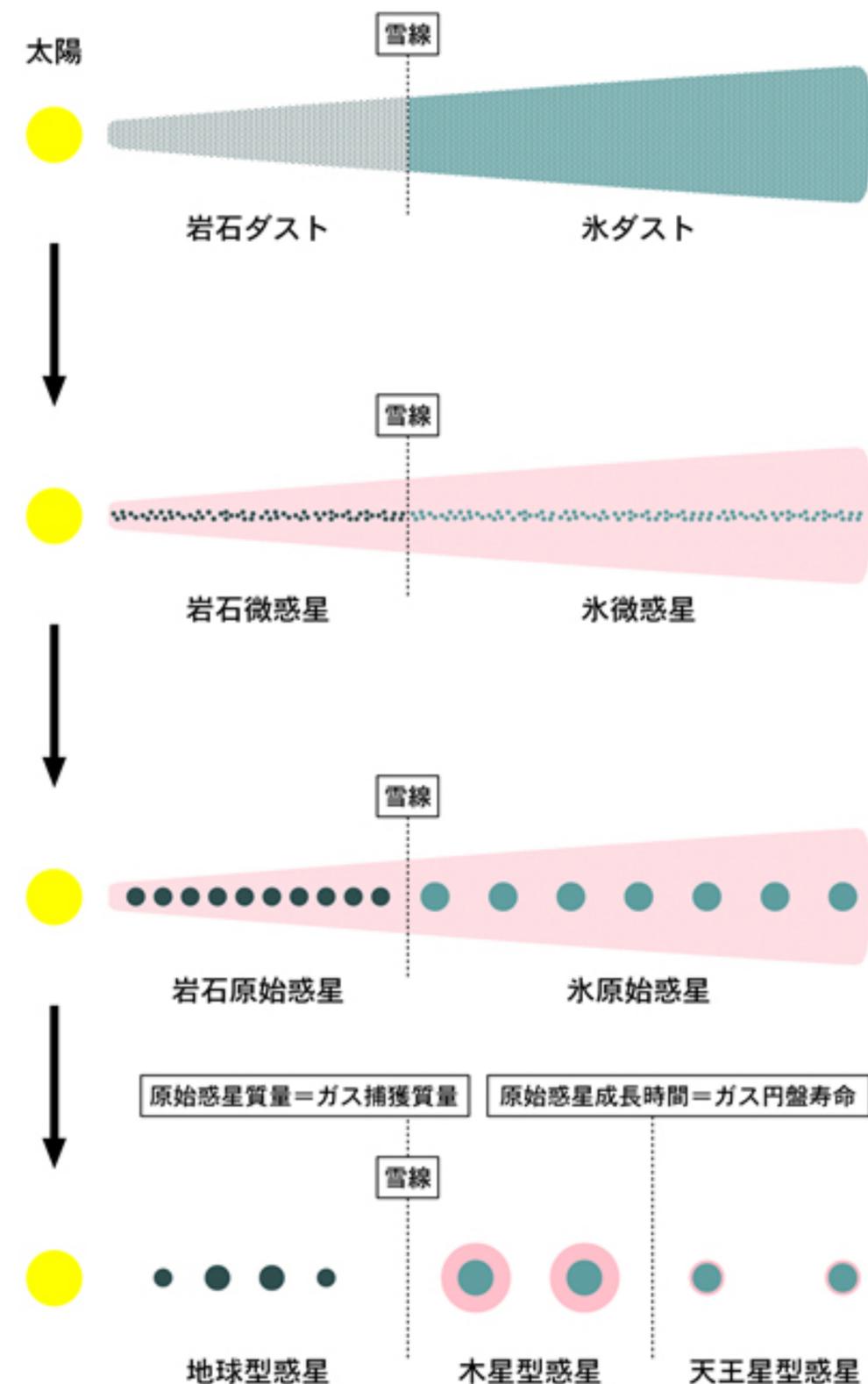


太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成から惑星系形成へ

- 太陽系形成の標準シナリオは定性的に太陽系惑星の成り立ちや特徴を説明する
- まだ不定な要素は多い
- 系外惑星の多様性や太陽系惑星との相違点(ホットジュピターの存在など)を統一的に説明するシナリオの構築が必要
- また、系外惑星大気の化学組成や生命の存在可否などはこれからの天文学の課題



太陽系形成シナリオの模式図

credit: 理科年表オフィシャルサイト「太陽系の作り方」
<https://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/toku2/index.html>

太陽系形成から惑星系形成へ

data source: NASA exoplanet archive

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

- 太陽系形成の標準シナリオは定性的に太陽系惑星の成り立ちや特徴を説明する
- まだ不定な要素は多い
- 系外惑星の多様性や太陽系惑星との相違点(ホットジュピターの存在など)を統一的に説明するシナリオの構築が必要
- また、系外惑星大気の化学組成や生命の存在可否などはこれからの天文学の課題

