

地球の作り方

牧野淳一郎

神戸大学 惑星学専攻

今日の話の順番

- 宇宙について、我々はどれくらい「わかって」いるか
 - － 宇宙全体
 - － 銀河
 - － 星
 - － 惑星
- 「惑星形成理論」のこれまでの進展
- 「系外惑星」の発見とその意義
- 今後の研究の方向

宇宙について、我々はどれくらい「わかって」いるか

- 宇宙全体
- 銀河
- 星
- 惑星

(Mitaka デモ)

宇宙全体

- これはここ 50 年くらいで随分「わかった」
- ビッグバンで始まって、途中にインフレーションがあってもものすごく一様な宇宙が当時の宇宙の半径の外側まで広がる。同時に量子力学的ゆらぎが密度ゆらぎになる
- それから普通の宇宙膨張になり、そのうちにクォークから陽子・中性子・一部その他の元素(ほとんどヘリウム4)ができる。
- もっと膨張して温度が下がると、陽子と電子が結合して水素原子に(宇宙の晴れあがり)。この時にあった光子が現在まで残って観測されるのがマイクロ波背景放射。

宇宙全体(続き)

- このマイクロ波背景放射の精密観測、遠方の超新星の観測等で、宇宙全体については基本的に「わかった」と思っている。
- 何がわかっているか
 - － 宇宙が何からできているか：普通の物質、ダークマター、ダークエネルギーの割合
 - － 現在の宇宙の物質の平均密度、宇宙膨張の速度、その他色々な量
 - － 特に、銀河等の種になる「密度ゆらぎ」の「パワースペクトル」

ちなみに「密度ゆらぎ」の「パワースペクトル」って一体なに？

- 「ゆらぎ」：一様な状態からの確率的なずれ。場所によって物質の濃い薄いがあること。
- 「パワースペクトル」：どれくらいの大きさのゆらぎがどれくらいあるか。

銀河

- 観測すると色々な銀河が見える。渦巻銀河・楕円銀河・不規則銀河
- 宇宙全体で見ると、銀河が集まっているところ・あまりないところ、という構造がある (宇宙の大規模構造)
- 銀河や、その大規模構造の起源: ビッグバン直後の宇宙の「密度ゆらぎ」

宇宙の大規模構造のシミュレーションの例

計算の 1 例（現在千葉大准教授・石山さん提供）

ここでやっていること：

- 基本的には「一様」な宇宙を、なるべく沢山の粒子で表現する
- 理論的に「こう」と思われる揺らぎを与える
- 理論的に「こう」と思われる初期の膨張速度を与える

わかること

- 最初に密度が高いところは、他に比べて相対的に密度がどんどん大きくなっていく。
- 特に密度が高いところは、そのうちに膨張しきって潰れ出す。
- （このシミュレーションでは）最初に小さいものが沢山できて、それらがだんだん集まって大きなものになる
- 大雑把にいうと、銀河とか銀河団はこのようにして潰れたもの。

この計算はダークマターだけ。

銀河形成シミュレーション

- 「ガスが収縮して星になる」ところも全部シミュレーション
- とはいえ、個々の星ができるところはシミュレーションできてないので、「ガスの塊」が「多数の星を代表する粒子」になるみたいなモデル

animation

それなりに銀河らしい？

animation (Baba et al 2009) 1 2

銀河に関する理解の現状

- 何から銀河ができたかは「わかっている」(宇宙初期の密度ゆらぎ)
- その「銀河の種」の、さっきの「パワースペクトル」とかは非常に良くわかっている(少なくともそう信じている)
- なので、原理的には銀河ができる過程は理論的に(あるいは計算機シミュレーションで)わかる
- 今のところ計算機シミュレーションでできる銀河は色々違う(詳しい話は省略)んだけど、これは「解決できる」と思って研究中

星

- 星は、銀河の中で高密度・低温なガスが重力で集まってできる、というのは間違いない
- が、「高密度・低温なガス」がどこからどうやって供給されるかは理論的には明確にわかっているわけではない。観測すれば見えるのでそういうものはある。
- どうやって集まって星になるのかもよくわからない。シミュレーションは非常に難しい

Star formation with SPH

星形成シミュレーション

- 星形成をちゃんとシミュレーションするには、ガスが星につもってくるところを100万年間くらい計算しないといけない。星の表面では時間刻みが分程度なのでこれは全然無理。
- 色々方法はあるが、、、

というわけで星形成過程の研究はまだまだこれから (牧野の個人的意見かも)

惑星形成

星形成はまだなんだかよくわからないというのが現状だが、では惑星形成は？

非常に大雑把なところはわかっていると思っている。

- ガスが冷却・重力収縮して星になる。
- 角運動量が大きな成分は星に落ちないでガス円盤に
- このガス円盤がさらに冷却するかなんかしてダスト成分が集まって惑星に (天文学ではガスではない固体状態のものをなんでも「ダスト」ということあり)

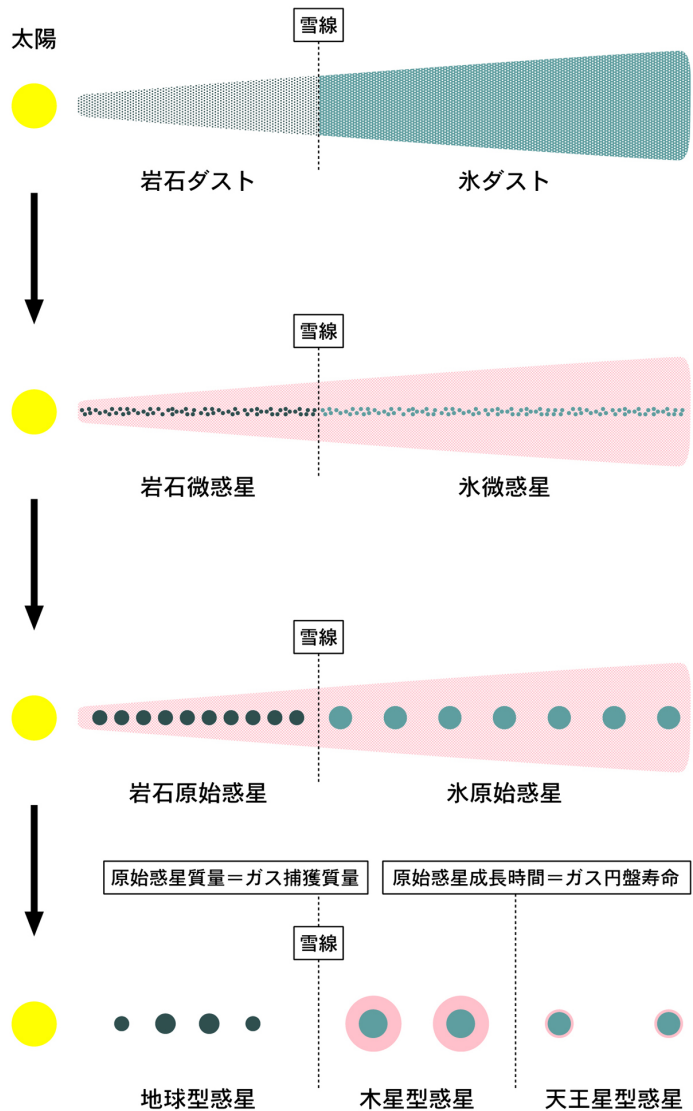
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

21世紀の惑星形成理論

といっても基本的には 1970 年代にできた「京都モデル」ないし「標準モデル」

- 「原始太陽系星雲」を想定: これは、大雑把には「現在ある惑星」がその場所にあるダストが集まってできたとして、最初はダストの他に水素・ヘリウムもあったとする
- その中で、ガスとダストが分離して、、、
- 詳しくは次のスライド以降で

標準的な惑星形成理論



(理科年表から。小久保による)

- 太陽の周りに原始惑星系円盤。水素、ヘリウム＋それ以外。
- 太陽に近いところでは水は気体。外側は氷：惑星材料の量が違う
- ダストは赤道面に沈降、集まって「微惑星」になる。 $(10^{15}\text{kg}$ くらい)
- 微惑星同士がさらに重力相互作用で衝突・合体して「原始惑星」に $(10$ 万年くらい？ 10^{23}kg くらい)
- 原始惑星がさらに合体して地球型、あるいはガスを集めて木星型に

30年くらい前の状況

Hayashi, et al. 1985

- 微惑星から惑星へ、という基本的な描像は既にあった
- しかし、理論的には惑星ができるのに時間がかかりすぎる、という問題があった

何故時間がかかるということになっていたか？

- 惑星が成長すると成長速度が遅くなる (質量の $1/3$ 乗)
- 太陽から遠いと成長速度が遅くなる (距離の 3 乗)

海王星は存在しないはず (形成時間 100 億年以上)

形成時間問題への解

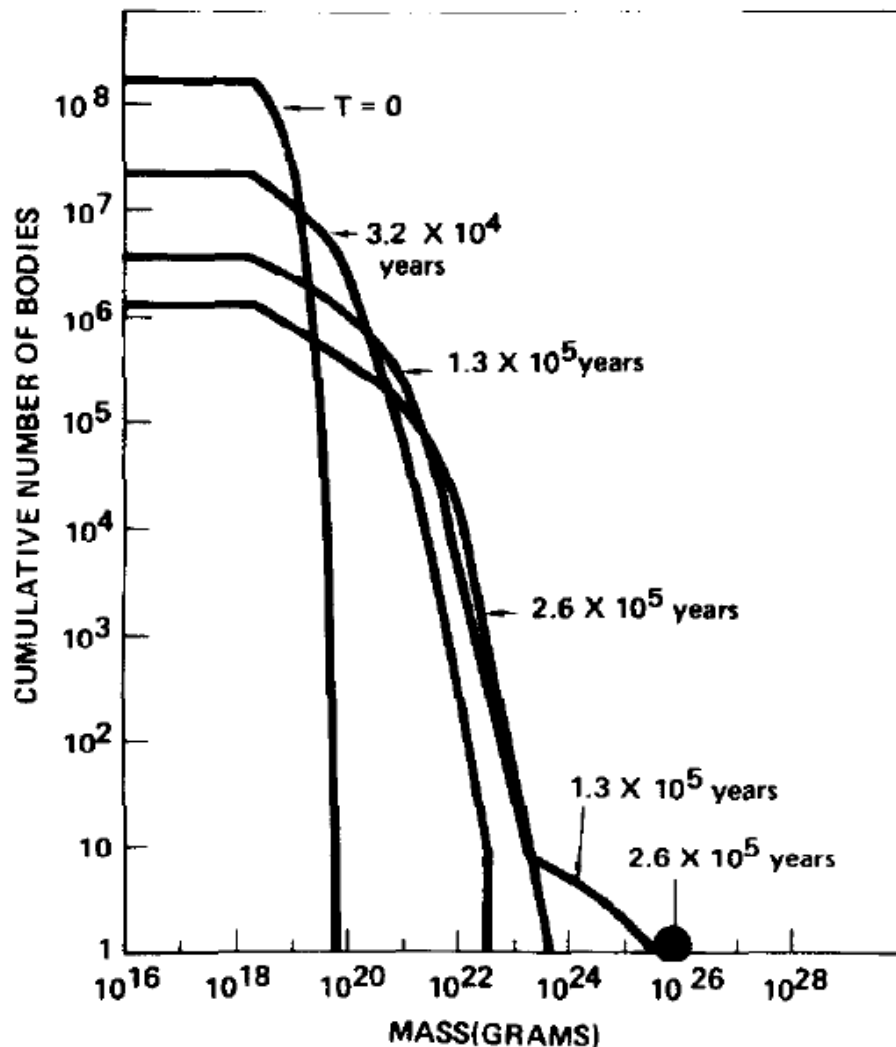
暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- それまでの理解:秩序的成长。微惑星は同じように重くなる
- 暴走的成長: 周りよりも少し重くなったものが他より速く成長してどんどん大きくなる

速く成長する理由

- 大きいので衝突しやすい
- 重いので、微惑星同士の重力の効果も大きい
- 円軌道に近いので、重力の効果がいかに大きい

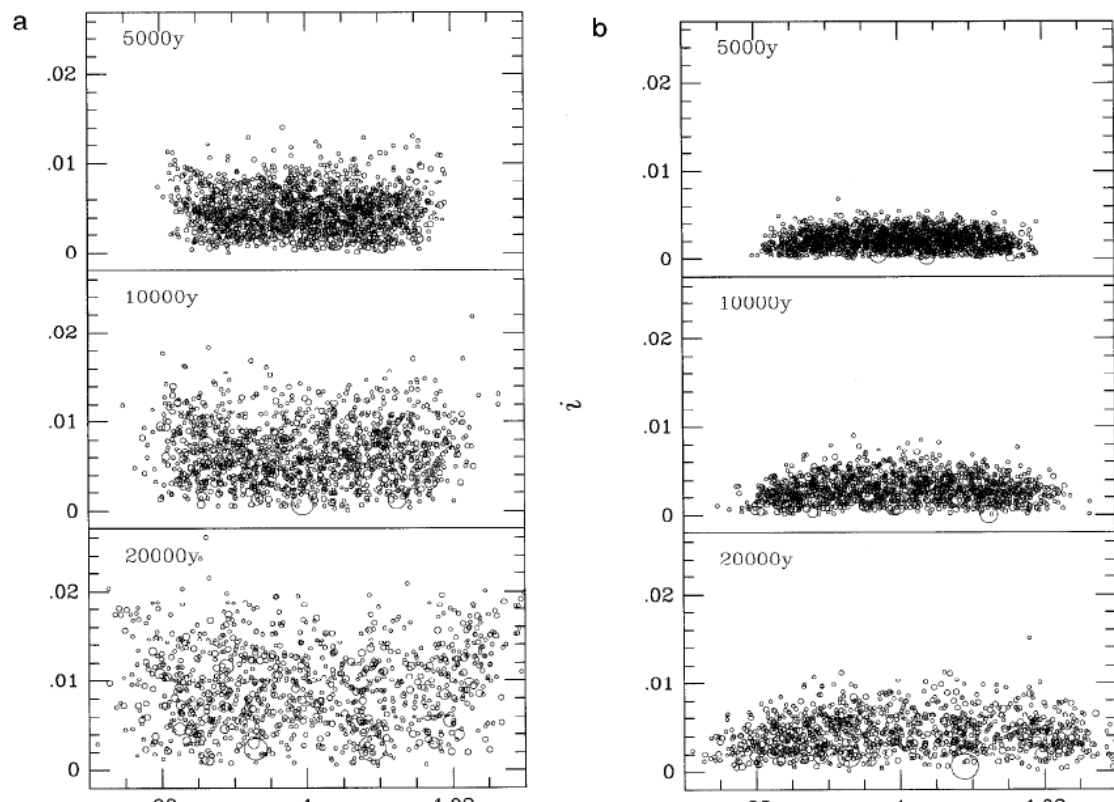
Wetherill and Stewart 1989



- 微惑星の質量分布の時間変化を「モンテカルロ」計算
- 衝突・合体の効果、速度分散等はモデル
- 水平方向空間分布は「一様」
- 最初深いべき (-2.5 乗くらい) の質量分布ができて、そこからさらに重いものができる

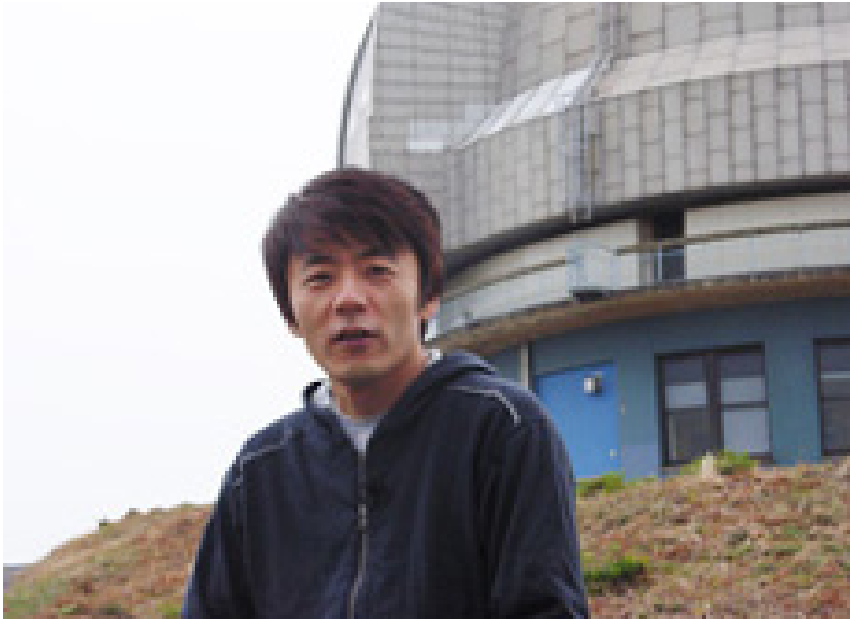
Kokubo and Ida 1996

グラフの横軸は太陽からの距離、縦軸は「離心率」、○の大きさは微惑星の質量



- 細いリング状領域のシミュレーション、衝突・合体も扱う
- 衝突の時間スケールは惑星大きくして短く
- 暴的成長が起きることを確認

小久保さんと井田さん



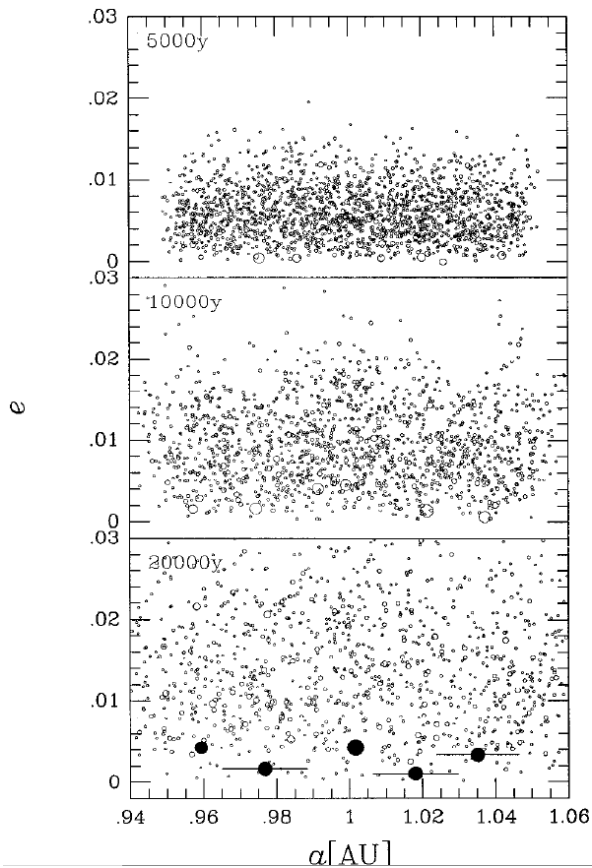
小久保さん

(「情熱大陸」のページから)



井田さん

寡占的成長



- Kokubo and Ida 1998
- 少し広い領域を計算
- ほぼ同じ質量の原始惑星がほぼ等間隔に並ぶ
- 大雑把には、この間隔にある質量を集める、ということで原始惑星の質量が決まる。

暴走的成長＋寡占的成長

- 形成時間の問題 (特に木星型) を解決 (?)
- 地球型惑星：原始惑星からさらに作らないといけない
 - － 少数多体問題。理論的理解も計算も難しい
 - － 普通にやると、地球が作れないわけではないが現在の
ような離心率の小さい状態にはなかなかならない
 - － 色々なモデルが提案されている

問題は形成時間だけ？

実はなんとか問題というのは他にもある

- ダスト落下問題 (微惑星形成問題)
- 惑星落下問題

ダスト落下問題

- ダストは最初は小さい。これが原始太陽系星雲の中で衝突・合体で成長していくと考えると、途中の1メートルくらいになったところでガスの抵抗でエネルギー、角運動量を失って、太陽のほうに落ちてしまう。
- 落ちないようにするのが、「自己重力不安定モデル」。合体とかする前に赤道面に薄い層を作り、それが自己重力で一気に分裂、いきなりキロメートルサイズになるとする。
- 静かに赤道面につもるのは無理 (乱流が起こるはず) という批判あり
- ガス抵抗は普通の流体力学的抵抗

未解決の問題

惑星落下問題

- 微惑星が原始惑星に成長していく途中で、やっぱりガスの抵抗でエネルギー、角運動量を失って、太陽のほうに落ちてしまう。
- 落ちないようにする都合の良いモデルもあまりない
- ガス抵抗は重力相互作用によるもの。

これも未解決

何故未解決か？

もちろん、未解決なので何故かわからない。

と、いってしまってはしょうがない。

形成時間問題では？(後知恵で見ると、という話)

- みんなそろって大きくなる、という仮定が全然嘘だった
- が、その仮定に問題がある、とは多くの人とは思ってなかった

では本当のところどうなのか？

- 京都モデルはあくまでも「仮定」。そこから太陽系ができないといけないうとそうではない。
- 系外惑星(系)は極めて多様。これは少なくとも初期条件が多様だということ。
- 京都モデルで多様性を説明できるか？
- そもそも京都モデルで太陽系を説明しないといけないうのか？

色々よくわからない(わからなくなった)のが現状

系外惑星

- 系外惑星発見からの歴史
- 現在の理解と今後の発展

系外惑星発見からの歴史

- 発見以前
- 発見
- 現在まで

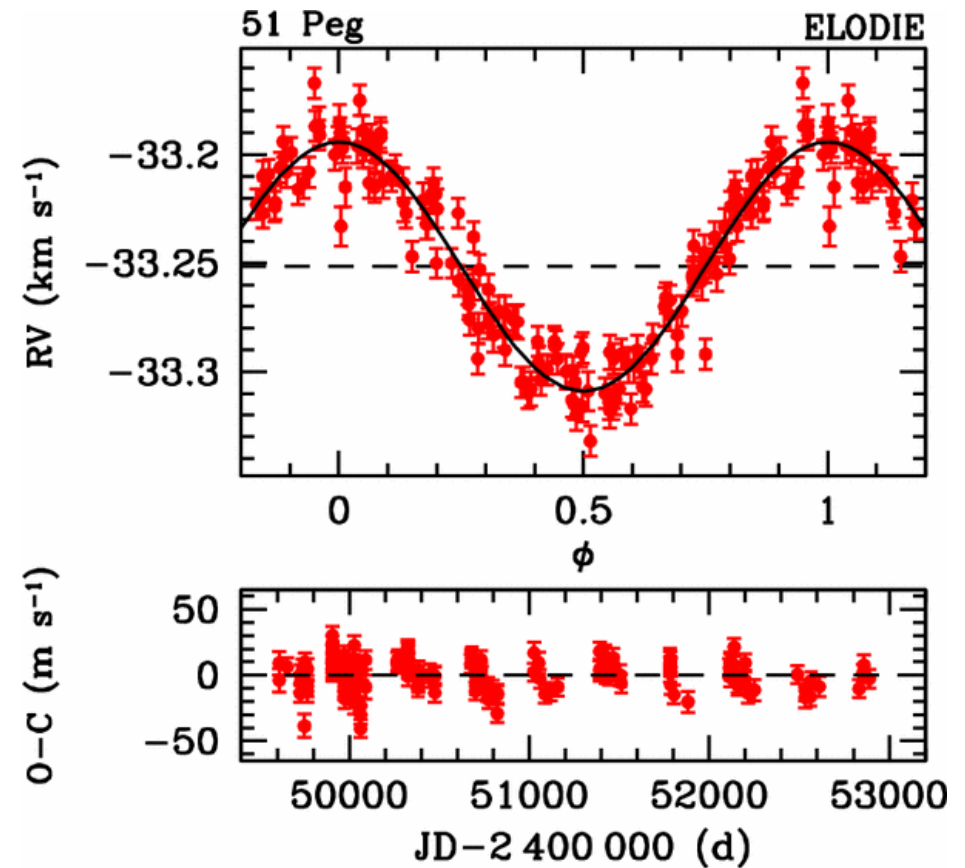
発見以前

- 太陽以外の恒星にも惑星はあるはず、とは考えられていた。
- 色々な探査の試みもあった。
- が、発見にはいたっていなかった。

「発見できなかった」という報告の例: 1995/8 Walker et al. 21 個の恒星の12年にわたる精密観測で「惑星はない」

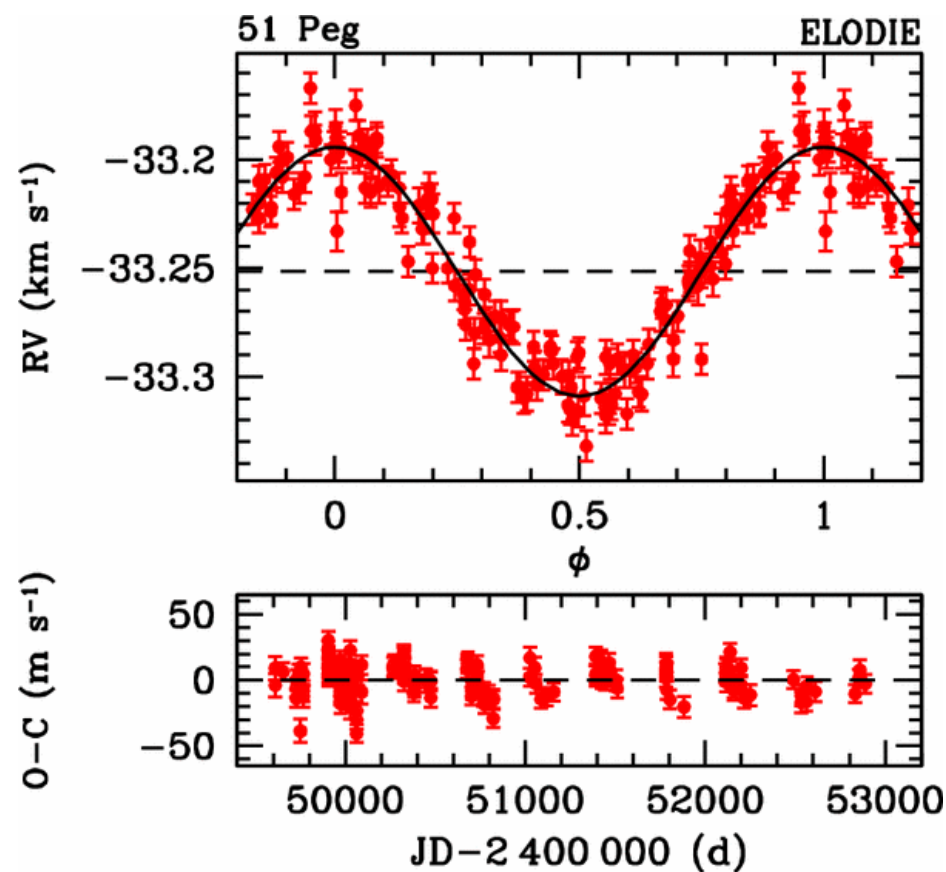
発見

- 1995/11 Mayor and Queloz: ペガサス座 51 番星の周りを「4日」の公転周期で回る木星質量の半分程度の惑星を発見。
- 発見した方法: 視線速度法



視線速度法

- 惑星を直接観測するわけではなく、恒星の「視線速度」を精密測定
- 視線速度：我々に近づく / 遠ざかる方向の速度
- この星の場合最大 70m/s 程度の变化。
- 視線速度の観測： ドップラー効果によるもの。恒星からの光の「吸収線」の位置のずれを観測 (前にでてきた赤方変移と原理は同じだがものすごく小さい量)



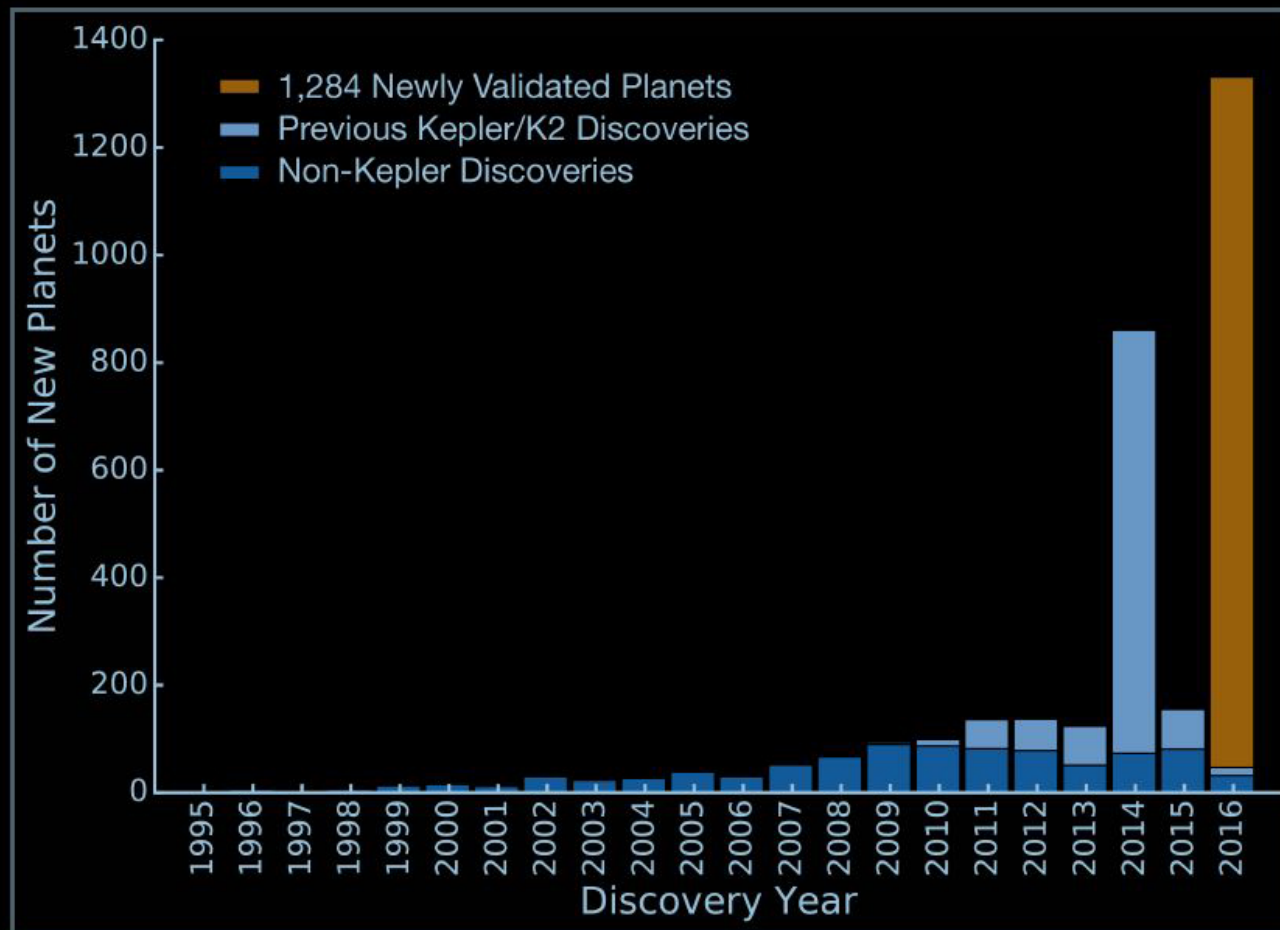
発見の経緯

- Mayor は元々連星系の研究者。1994 年から惑星探査を開始 (そのために新しい分光器を開発)
- 95 年 1 月にはペガサス座 51 番星で速度変化発見。追加調査のあと 8 月に Nature に投稿。9 月には再観測も。11 月に論文掲載
- 論文掲載のすぐあと、アメリカの 2 グループ (Marcy and Butler, Noyes and Brown) が検証
- 当初は、これは惑星ではなく恒星大気の脈動ではという説もあったが、色々な状況証拠、他の惑星の発見で否定。
- Marcy たちは、1995/11 から半年の間に 6 個もの惑星を発見。

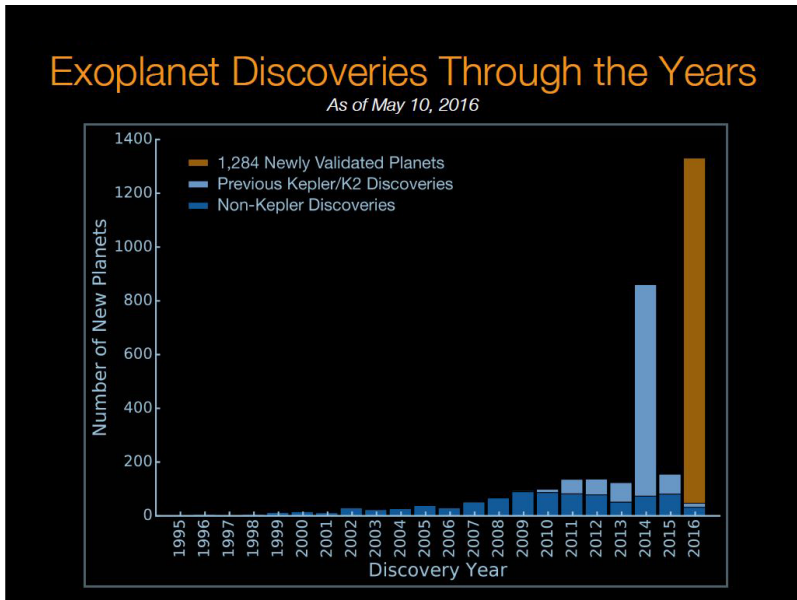
その後の発展

Exoplanet Discoveries Through the Years

As of May 10, 2016



その後の発展



- 2016 年時点で 3400 個ほどの系外惑星 (2600 個の惑星系、600 個の複数惑星をもつ星)
- 2000 個ほどは、系外惑星探査専用衛星「ケプラー」が発見したもの
- ケプラーで使っている方法: 「トランジット法」

トランジット法とは？

NASA のサイトのトランジット法説明動画

- 惑星が主星の前を通ると主星からの光を惑星がさえぎるので暗くなることを利用
- 惑星の軌道面が我々のほうを向いていないと観測できないが、向いていると観測しやすい。
- 衛星からだと、大気のゆらぎや雲等の影響がなく、ちょっと暗くなるだけでも観測できる。

惑星探査の方法

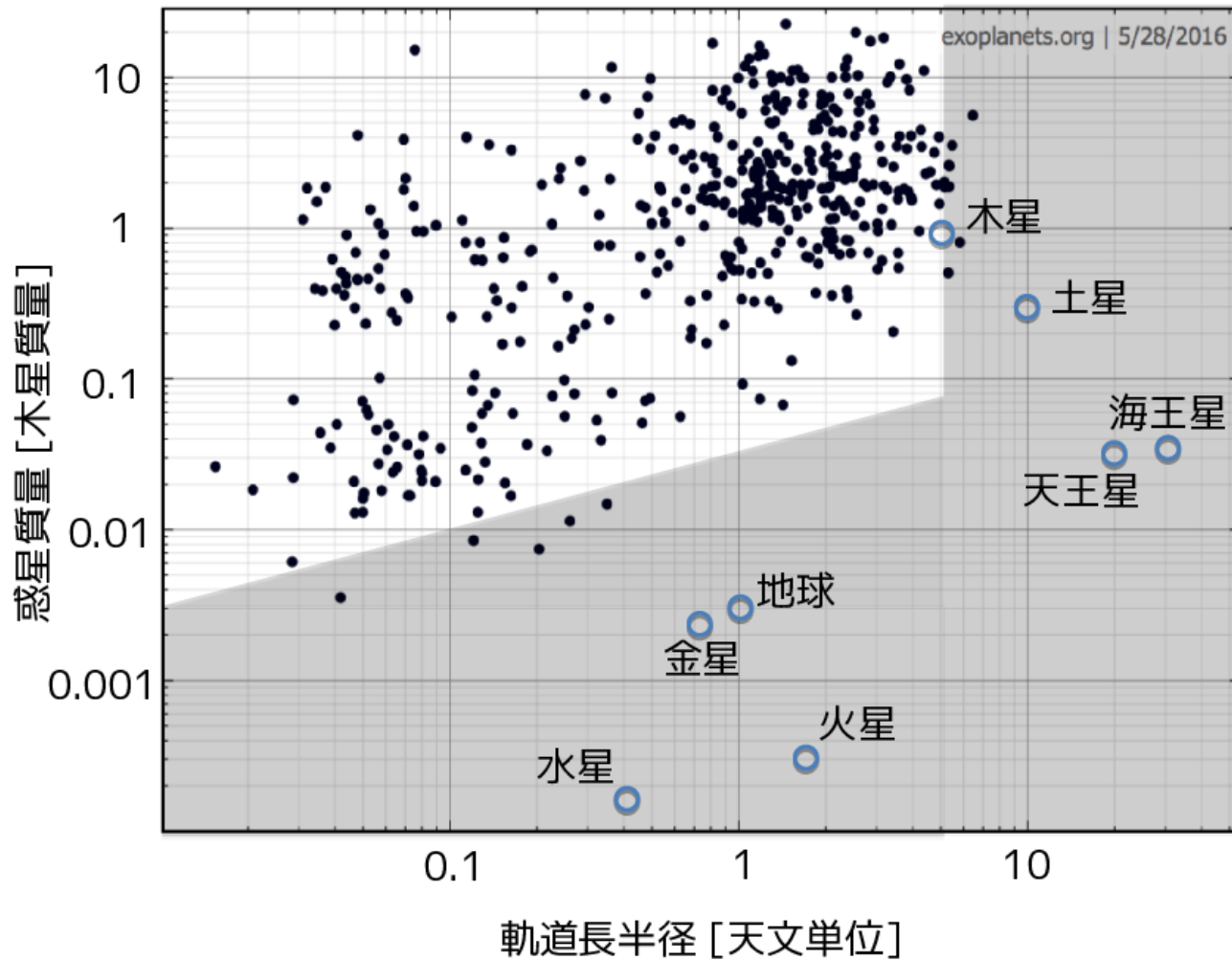
- 視線速度法
- トランジット法
- 直接撮像
- 重力レンズ

今後、直接撮像が発展すると期待。ハワイに建設中の 30m 望遠鏡等

現在の理解と今後の発展

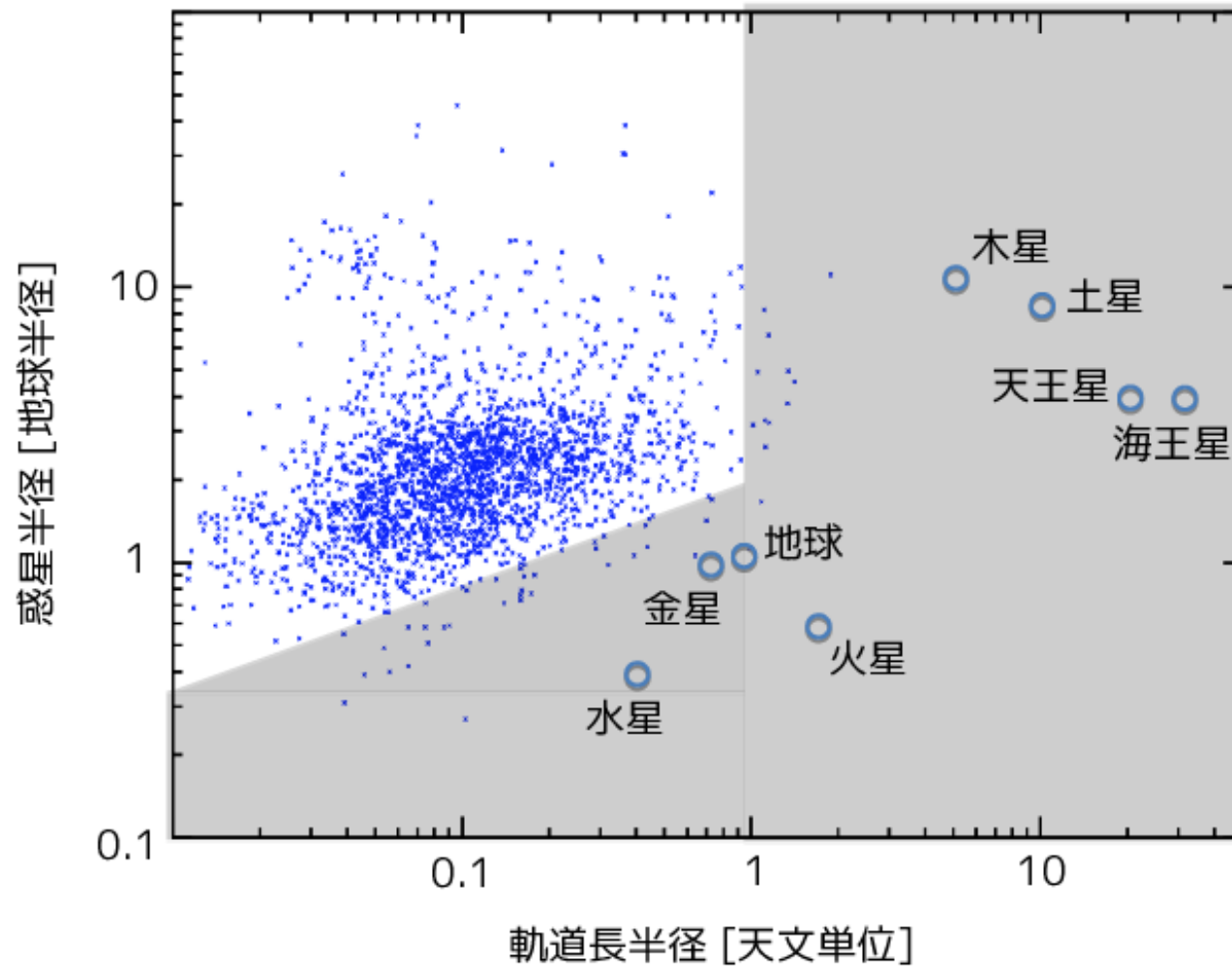
- 多様な系外惑星
- 理解、、、
- 今後の発展

多様な系外惑星



これは質量がわかっているもののみ (視線速度法)

多様な系外惑星 (2)



これは半径がわかっているもののみ (トランジット法)

多様とはいえ、、、

- 質量と軌道半径では

- 同じ軌道半径なら太陽系の惑星よりはるかに重いもの
- 同じ質量なら太陽系の惑星よりはるかに主星に近いもの

- 惑星半径と軌道半径では

- 地球半径とかその数倍のことが多い。
- 0.1 天文単位 (1500 万 km) あたりが多いが、、、

我々(の太陽系)はすごく特殊か？

そうかもしれないが、「観測バイアス」も考えないといけない。

- 視線速度法では重い惑星、主星の近くの惑星がみつきやすい。特に、軌道周期が20年以上のものはまだ見つかっていない(観測が95年からなので、、、)
- トランジット法でも、大きな惑星、主星の近くの惑星(トランジットの回数が多い)がみつきやすい。ケプラー衛星の寿命より長い周期のものは惑星と確認できない。
- トランジット法の場合、さらに、トランジットが起こる確率が軌道半径に反比例するので、遠くの惑星はみつきにくくなる。

つまり：現在のところ確かなことはいえない。理論・観測の発展を待つ必要あり。

理解

- 基本的に「大混乱中」
 - － まだ何を説明するべきかよくわからない：系外惑星の「本当の」分布はまだ謎
 - － とはいえ：これまでの惑星形成理論は基本的に我々の太陽系が対象。木星のような巨大惑星が主星のすぐ近くにあるとかは想定外
 - － 離心率が大きい(細長い楕円軌道の)惑星も多数発見
- 様々な惑星系を統一的に説明できる理論体系が必要だが、、

今後の発展

- 「惑星ができる過程」の直接観測 (電波望遠鏡でのガス円盤の観測)
- より高精度な視線速度法、トランジット法、直接撮像による「観測バイアス」の影響の低減
- 理論・計算機シミュレーションによる惑星形成過程の再現

がこれから10年でかなり進むと期待、、、

まとめると、、、

- 宇宙全体、銀河、星、惑星と小さくなるにつれて、段々わからなくなるのが現状。
- 惑星の観測、特に系外惑星の観測は非常に進んで、色々な惑星系がみつかった
- その中で太陽系は必ずしも典型的ではない
- でも、典型的ではないのが本当にそうなのか、「観測バイアス」なのかはまだよくわかっていない
- 色々な惑星系の形成を統一的に説明できる理論モデル(シミュレーション含めて)はまだ全然ない。これからの研究課題