

# 宇宙惑星科学

牧野淳一郎

惑星学専攻

# 評価等

- 小テスト (初回はなし) (レポートはなし)

# 講義概要

1. ビッグバン宇宙論: 2コマ分くらい
2. 天体形成 (主に銀河): 2コマ分くらい
3. 星形成・進化、惑星形成: 3コマ分くらい

# 講義の目的

- 惑星形成を、宇宙における階層的構造形成全体の中で理解する
- 同時に、惑星形成研究を天文学・天体物理学研究の中で位置付ける
- そのために宇宙の始まり、銀河等の天体形成、星形成、惑星形成の順にトップダウンで話を進める

# ビッグバン宇宙論

- 宇宙論の歴史
- 現在の描像
- 残っている問題
  - インフレーション
  - ダークマター
  - ダークエネルギー

# 天体形成

- 大規模構造・重力不安定 (ジーンズ不安定)
- 重力熱力学的不安定
- 円盤構造、軸対称不安定、スパイラルモード
- 銀河形成
- 銀河と太陽

# 星形成と惑星形成

- 星形成
  - 星形成を考えるいくつかの立場
  - 初代星
- 恒星進化
  - 星の一生
  - 中性子星・ブラックホール・重力波
- 惑星形成の標準ないし京都/林モデル
  - minimum solar nebula model
  - シナリオ紹介
  - 理論的問題
  - わかっていないこと

# 事務連絡

今日は講義の終わりに小テストをします。



# 星形成と惑星形成

- 星形成
- 惑星形成

# 星形成についてわかっていること

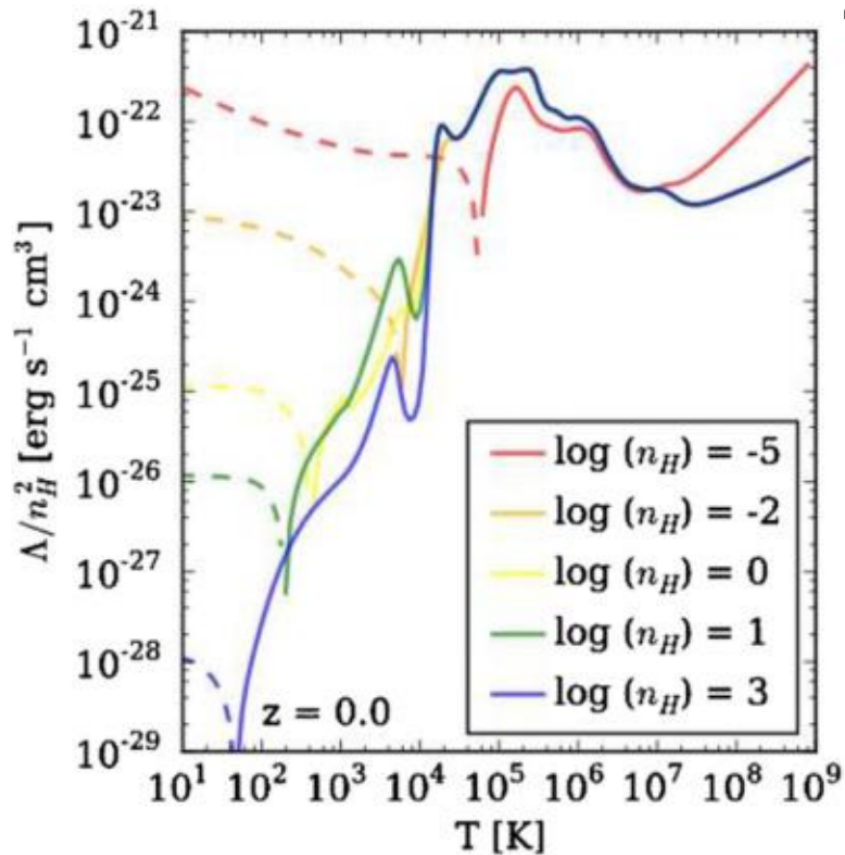
- 「星形成についてわかっていること」の整理はなかなか難しい。
- なので、まず、なぜ難しいか、を整理して、それからもう一度わかっていることを整理したい。

# 銀河形成の理論の側からみた星形成

- 銀河形成シミュレーションで、星ができたり超新星爆発したりもっともらしい振舞いをしていた
- 但し、星1つ1つのレベルまで計算しているわけではない。ガスやダークマターを表す粒子の質量が、最近の「高分解能」の計算でも太陽質量の1万倍くらいある
- なので、「星間ガスが冷えて、自己重力で集まってくると適当に星になる」と考える。

いろいろいい加減だが、「定性的には」正しい

# ガスの冷え方



Kim et al. 2014(AGORA)

(破線は加熱。紫外線バックグラウンドによる)

密度が低い (0.01 個/cc とか以下) ガスは  $10^4$ K から冷えない

密度が高くなると平衡温度は下がる。但し、冷却率は  $10^4$ K 以下では小さい

# 冷却率を決めているもの

- $10^4\text{K}$  以上: 水素ガスは電離してプラズマになっている。:電子と光子の相互作用:Bremsstrahlung (制動輻射)
- $10^4\text{K}$  以下: 水素はまず水素原子 (HI) になる。そうすると非常に冷却しにくくなる。水素ガスだけではほとんど冷えないが、(天文学でいう)「メタル」があると、ダストが形成され、ダストは固体なので熱輻射をだして冷える。水素原子とは衝突によって熱平衡にいくので、密度が高いと冷却率は大きくなる

# 銀河形成の観点からのガスの振舞い

現実の話:

- 円盤形成・重力不安定による進化は確かに起こる
- その途中で、形成中の銀河同士が合体したり、小さな衛星銀河が落下してきたりする。
- ガス円盤同士も衝突して、衝撃波圧縮の結果爆発的星形成を起こす
- また、一部の(多くの?)ガスは角運動量を失って銀河中心に落ちる(バルジの起源?別の理論もある)

というわけで、ガスはかなりダイナミックに圧縮されたり加熱されたりする。

# シミュレーションの問題点

- 星になる前のガスとできた星の両方を流体シミュレーションで一気扱うのは現在のところ不可能
- 星ができるタイムスケール: 周りのガスが全部落ちてくるまで。典型的には100万年くらいと考えられている。
- 星を流体として解く: タイムステップ1分くらいが必要 (内部は上手くやって解かないとしても)。
- 1タイムステップ1ミリ秒でできても10年かかる。論文書けない、、、 というのはさておき、計算精度も問題になる。

# ではどうしているか

- 普通やっていること： 適当な半径 (1-5AU とか) から内側にはいったガスは「星」に落ちたとみなす (sink particle)
- これにはもちろん問題がある。本当は星の表面近くまで降着円盤が形成されるだろうし、円盤ガスの一部は磁場や輻射圧で赤道面から飛ばされたりするはず。そういう色々な効果を見捨てて単に中心星にくっつけると、成長速度やそもそも成長するかどうかも計算できなくなっているかもしれない
- とはいえ、現状他に方法がない



# 星形成について整理

- 星は、重力不安定な高密度・低温なガスが重力収縮してできる、というのは間違いない
- が、「重力不安定な高密度・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。
- シミュレーションも、計算機の速度という以上に原理的困難がまだある。

# 理論的には

もうちょっとわかっていると考えていること (あまり初期条件に依存しないこと) もある。

- ファーストコアの形成
- 林フェーズ

このへんの話をしておく。

# ファーストコア

「なんらかの理由によって」重力収縮に対して不安定な、ほぼ一様密度のガスがあるとしよう。

で、ほぼ球対称な領域が収縮をはじめたとする。

- 収縮して密度があがると、輻射で冷えるタイムスケールが短くなる (輻射にも原子力同士の衝突が必要なため)
- そうすると、ほぼ等温のまま、高密度で小さなコアができていく (メカニズムは厳密には違うが、重力熱力学的崩壊に似た自己相似解が現れる)
- コア密度が高くなり過ぎると輻射に対して不透明になって、収縮が止まる

これがファーストコア

# ファーストコアのあと

- 外側のガスがコアにふりつもる
- ふりつもりって、力学平衡にある質量が増えるにつれて急速に明るくなる。
- 周りにまだガスがあれば赤外線で見える。ガスがなくなったら可視光で見えるようになる
- まだ中心温度は核融合が起こるほど高くないので、星はこのあと収縮に重力エネルギーの放出で光る＝原始星

# 原始星と林フェーズ

## 原始星の特徴

- 全体で対流が起こっている (輻射に対して不透明)
- この時、表面温度はほぼ一定 (説明省略、、、)
- このために、収縮していくに従って暗くなる。逆にいうと、最初の半径が大きい時には非常に明るくなっている

この段階を林フェーズ (京大にいた宇宙物理学者林忠四郎が発見したので) という

# 星形成の理解の現状

- 「星間ガスが冷えて、重力収縮して星になる」のは間違いない。
- 具体的にどんなふうにして重力不安定を起こすガスができるのかは銀河形成・進化とカップルした問題。まだ非常に良くわかっているわけではない。
- 初期条件についてはよくわかっていると考えられる初代星でも、まだシミュレーションやる人によってできる星が違う状態。

# 恒星進化

- 星の一生・内部構造
- 中性子星・ブラックホール・重力波

# 星の一生・内部構造

星形成は謎が多いができたあとはかなりよくわかっている。以下まず大雑把な話

- 中心の密度・温度が十分上がると、水素の核融合が始まって「主系列星」に
- 主系列星段階の寿命: 大質量星で数百万年。太陽くらいだと100億年
- 中心で水素燃焼が終わる(全部ヘリウムになる)と、ヘリウムの核融合が始まる。この時には赤色巨星になり、半径が不安定な振動を起こしたりする(変光星)
- 太陽質量の8倍以下の恒星は炭素・酸素から先には核融合が進まない。ヘリウムがなくなると白色矮星になる
- 太陽質量の8倍以上では、核融合がさらに進み、最終的に鉄までいくが、鉄コアの温度がさらに上がると一気にヘリウムに分解する吸熱反応が起きてコアが重力崩壊し、II型超新星になる。超新星のあとには中性子星ないしブラックホールが残る。



# 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

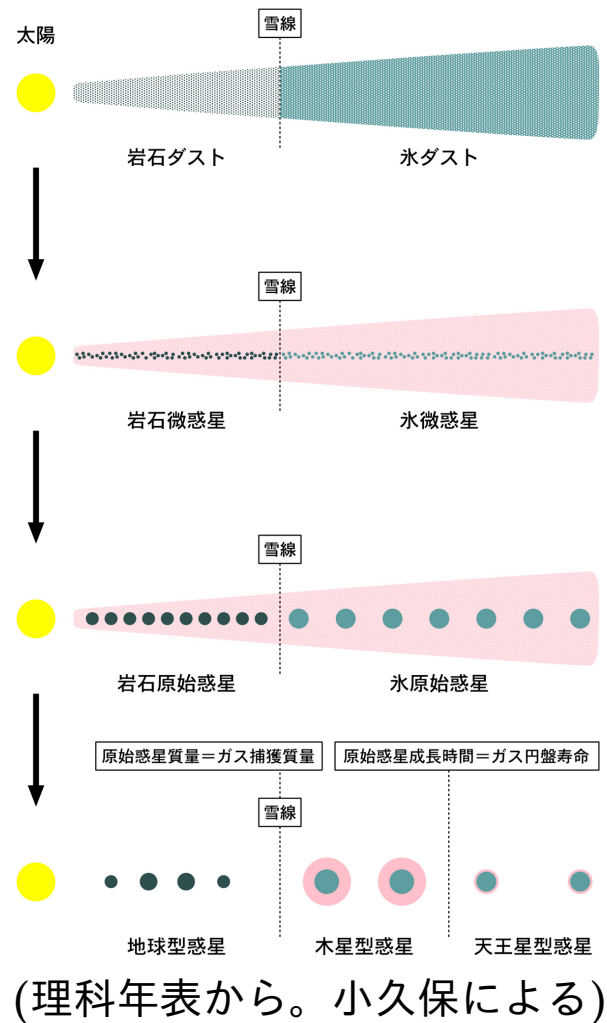
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

# 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
- 大槻さんの講義でもっと詳しくやるよね？

# 標準的な惑星形成理論



- 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<sup>18</sup>g 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<sup>26</sup>g 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

# このシナリオが解決しようとした問題

- 「原始太陽系星雲」(現在の太陽系の惑星の質量をバラバラにして星雲にして、元々あったはずの水素・ヘリウムを足した仮想的なもの)からどうやって惑星ができたか
- 沢山ある困難の1つ: 小さなダストが合体して成長していくとすると、メートルサイズくらいになったところで成長速度よりガス抵抗で太陽に落ちる速度のほうが大きくなる
- 「ダスト落下問題」

# ダスト落下問題

- ダストはケプラー回転する
- ガスは圧力もあり、外側のほうが圧力が小さいのでその圧力勾配の力があり、ケプラー回転よりちょっとゆっくり回る
- このために、ダストは抵抗を受ける。
- ダストが非常に小さいうちは、抵抗が非常に大きいのでガスにダストはくっついて動き、落ちない。
- ダストがすごく大きくなると、重力に比べてガスの流体力学的な抵抗は小さくなり、落ちない。
- 中途半端なサイズ(1メートルくらい)で落ちる

# ダスト落下問題の「解決」

- 京都モデル: 赤道面に集まったダストが重力不安定で一気にキロメートルサイズの「微惑星」になる
- 本当にそうなるかどうかはまだ議論がある。
  - ダストが赤道面に沈むと、赤道面近くは回転が速くなり、速度差からケルビン・ヘルムホルツ不安定が起きて円盤が乱流化するという説が有力
  - 但し、これが本当かどうかはよくわかってはいない

# ケルビン・ヘルムホルツ不安定

- 密度が違う流体が2つあって、違う速度で動いていると境界面に渦が発生して混ざる。
- 雲の上面とかで見えることあり。

アニメーション (Saitoh and Makino 2013 から)

# 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 (1/3 乗)
- 太陽から遠いと成長速度が遅くなる (3 乗)

海王星は存在しない (形成時間 100 億年以上)



# 形成時間問題への解

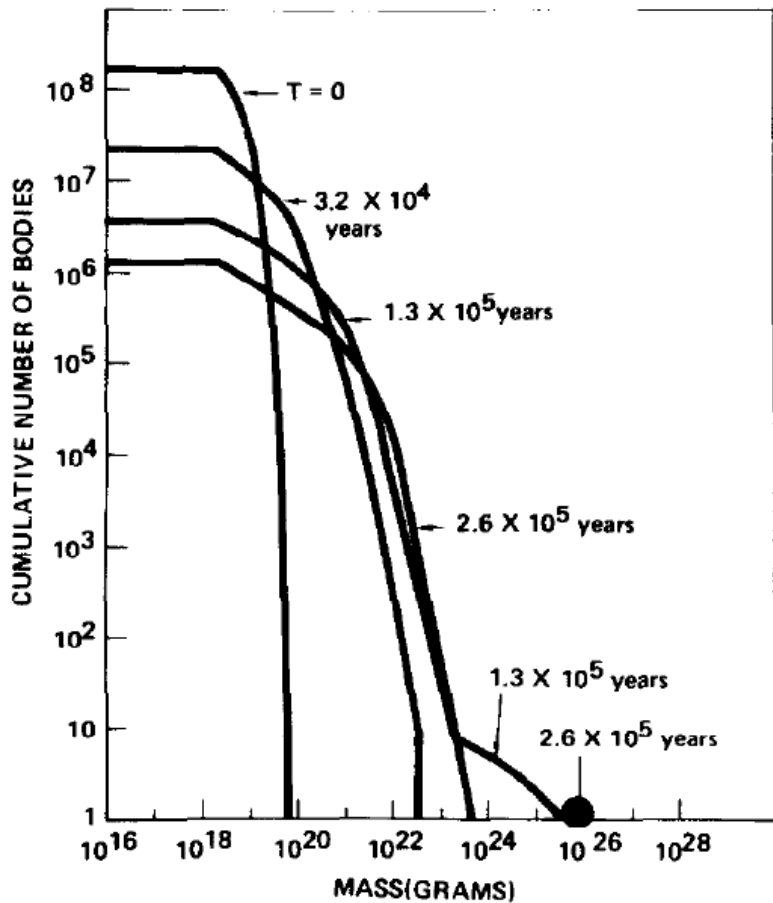
## 暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- 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

- 大きいので衝突断面積大きい
- 重いので、重力フォーカシングの効果も大きい
- ランダム速度が小さい(円軌道に近い)ので、重力フォーカシングの効果がさらに大きい

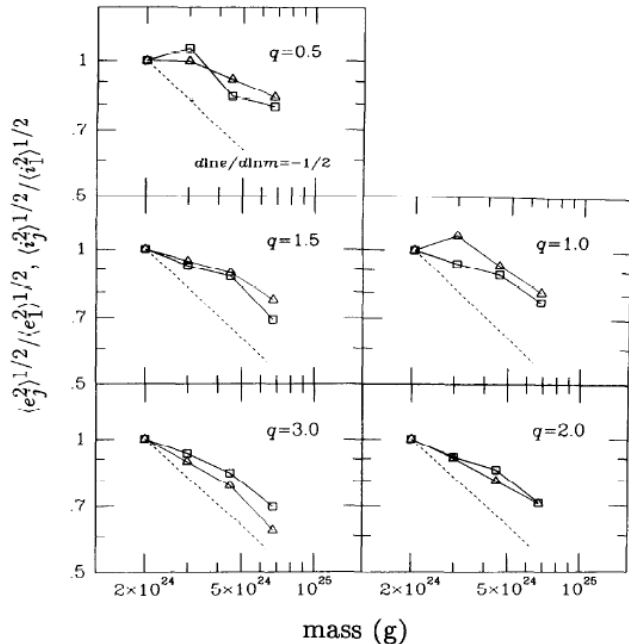
# Wetherill and Stewart 1989



- 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

# Ida and Makino 1992a,b, 1993

(私の名前は論文にはいってるけど全部井田さんの仕事、、、)

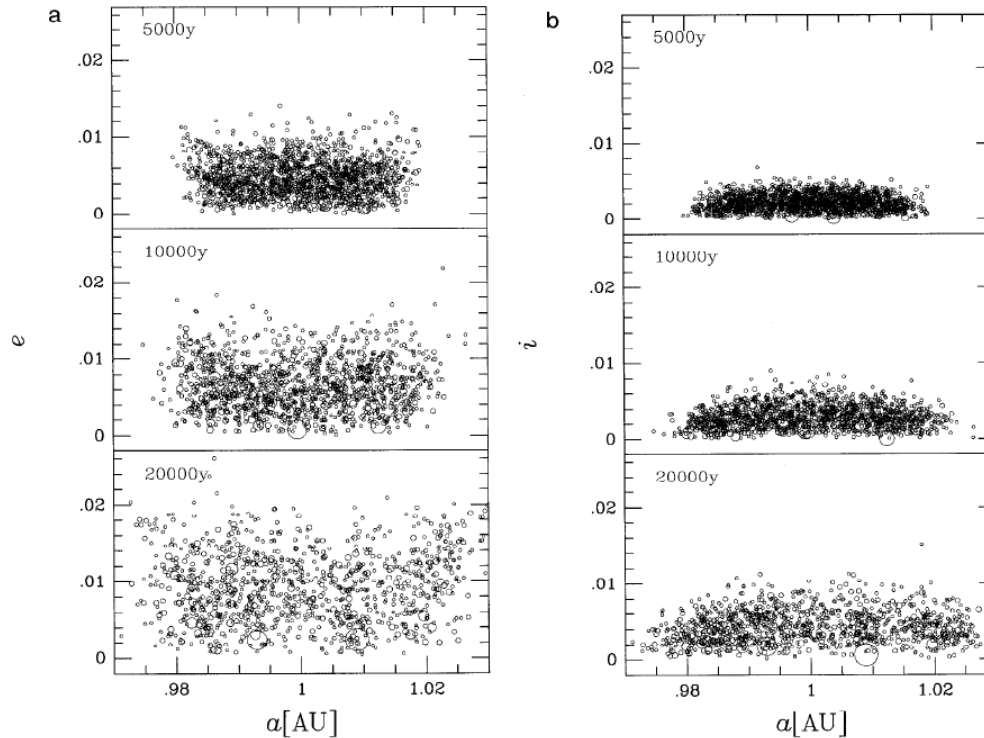


- (1992a) 単一質量での速度分散の時間進化を  $N$  体計算
- (1992b) 複数質量での速度分散の質量依存性を計算
- 重いものが速度分散小さくなることを確認

(1993) 暴走的成長には限界があることを指摘。ある程度重くなると、自分自身が周りの微惑星の速度分散を大きくするので成長できなくなる (=原始惑星)

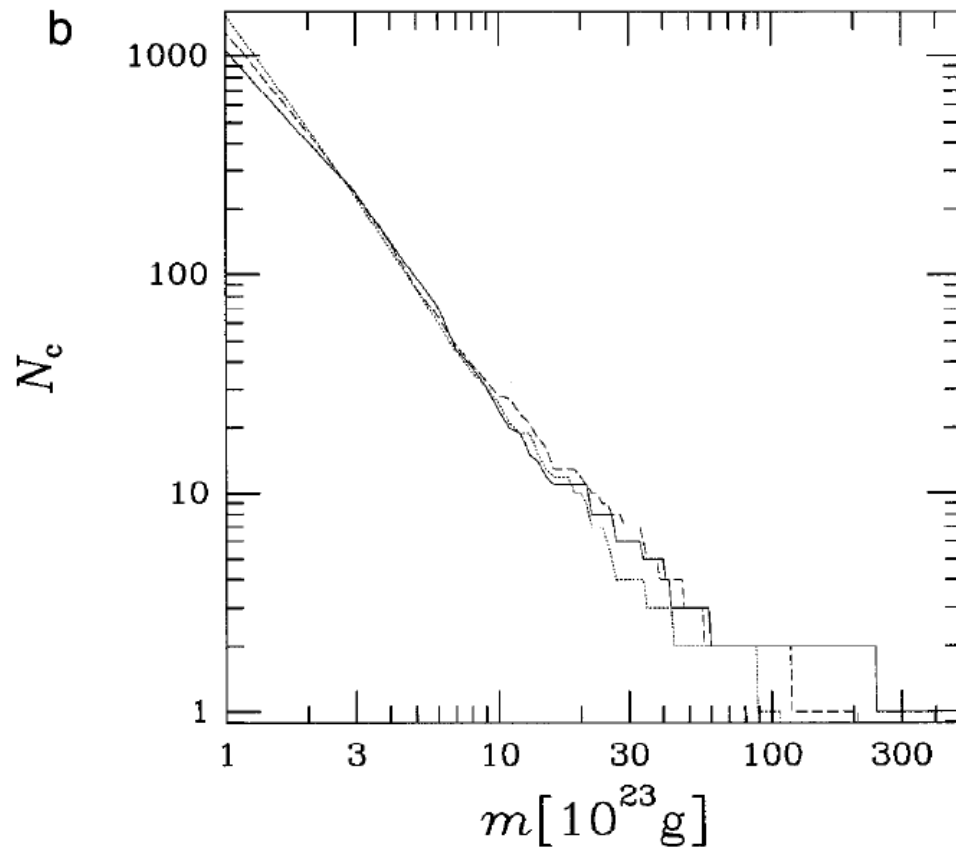
実は実際の合体・成長過程を  $N$  体計算で調べてはいない

# Kokubo and Ida 1996



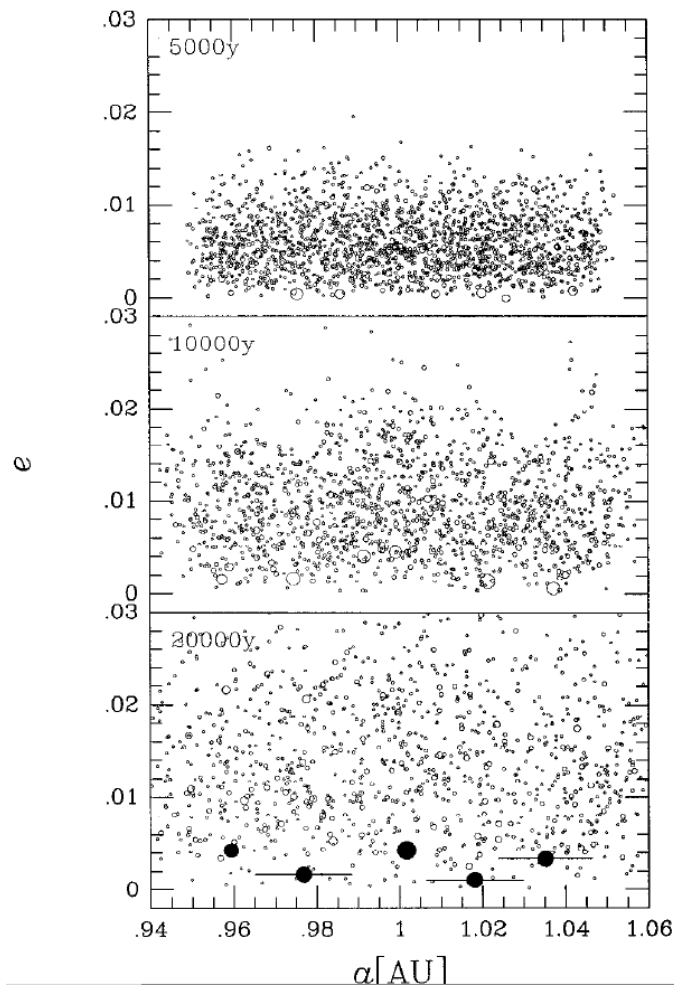
- 細いリング状領域の  $N$  体計算、衝突・合体も扱う
- 衝突の時間スケールは惑星大きくして短く
- 暴走的成長が起きることを確認

# 累積質量分布



- 等質量だったものが累積質量では  $n \propto m^{-1.5}$  にまず進化
- もっとも重い一つがさらに成長
- 基本的に、Wetherill and Stewart 1989の結果を確認

# 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 (大体 10 ヒル半径)
- 大雑把には、10 ヒル半径の質量を集める、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) — 既に話をした
- 惑星落下問題



# 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、とは多くの方は思ってなかった

# ダスト落下問題ではどうか？

- ダスト成長時間スケール、落下時間スケールのどちらも、かなり単純なモデルによる理論的見積もり
- 実際に基礎過程からシミュレーションしたわけではない
- 理由: どうやって基礎過程からシミュレーションできるのか？だから

# 惑星落下問題は？

- ガス抵抗をいれた  $N$  体計算はいくつかある
- ガス円盤自体は解かない。抵抗を式で入れる
- なので、どうしても落ちる
- 惑星一つとガス、という計算もある。これはやはり落ちる

# ではこのストーリーは本当か？

- 京都モデルは「仮定」
- 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のか？

# 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

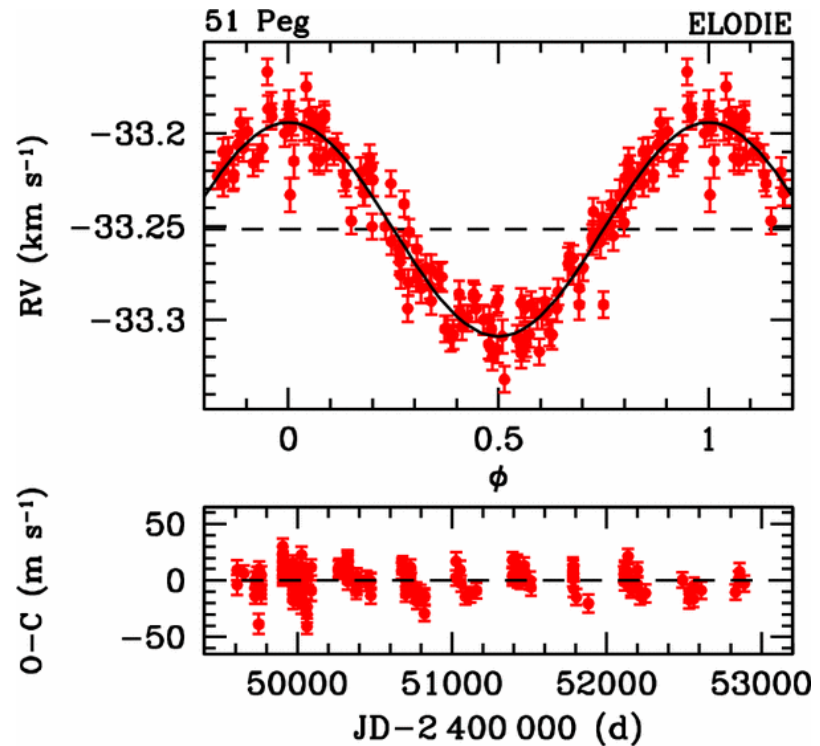
- 太陽以外の恒星にも惑星はあるはず、とは考えられていた。
- 色々な探査の試みもあった。
- が、発見にはいたっていなかった。

「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」



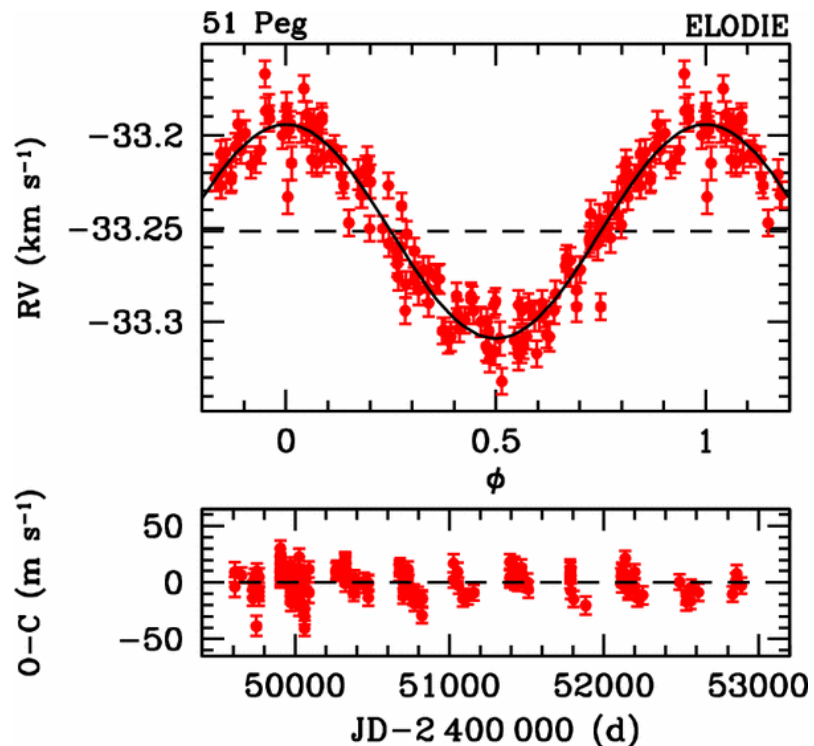
# 発見

- 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。

# なぜ Mayor たちが最初に発見できたか？

- Marcy たちはその前の 7 年にわたって 100 個の恒星の観測をしていた。
- が、そもそも「4日」というようなとてつもなく短い公転周期の巨大惑星が存在しているとは想像もしていなかった。木星は 12 年。
- もちろん、太陽にも水星のような周期の短い惑星があるが、小さく、軽いので視線速度法では発見できないと考えられていた。
- Mayor たちは連星系の研究者だったので、(おそらく)何も考えないで周期の短いところから観測した。

「思い込み」が発見を妨げた例

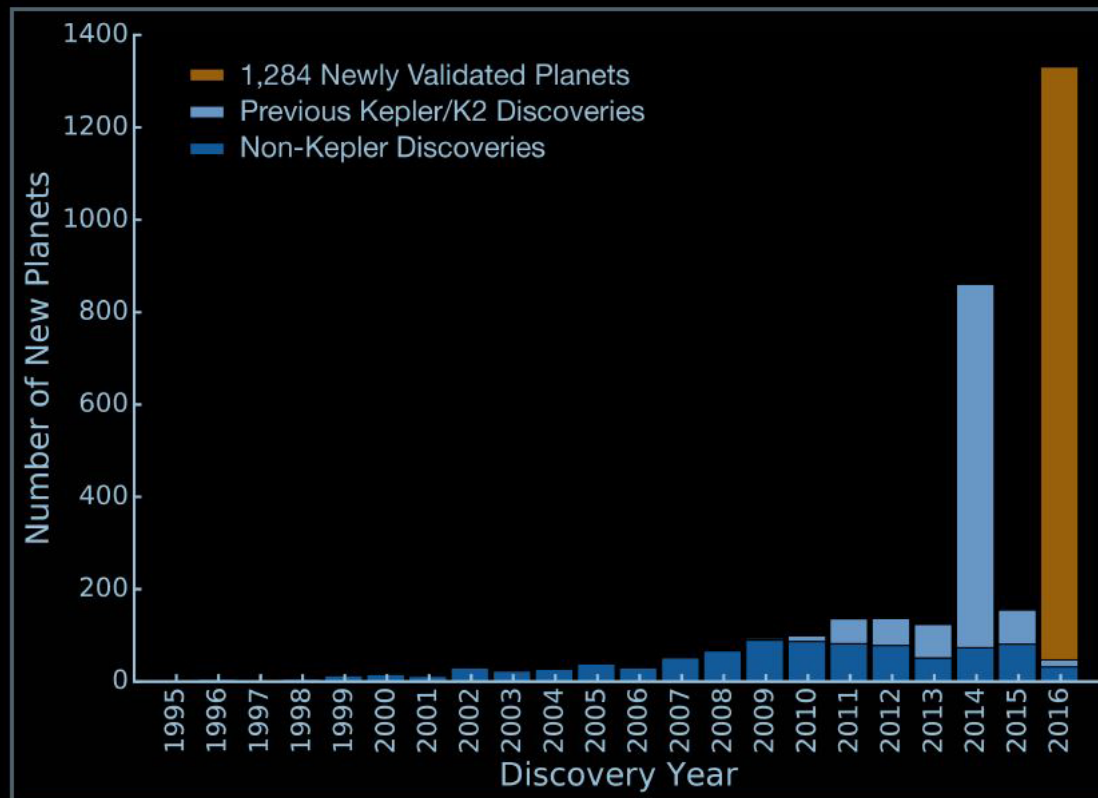
「木星は遠くにしかできない」という「理論」もあった、、、

(全く余談: Marcy は 2015 年、大学院生、ポスドクへのセクハラで処分。アメリカでは有名教授がセクハラで処分される事例は結構ある)

# その後の発展

## Exoplanet Discoveries Through the Years

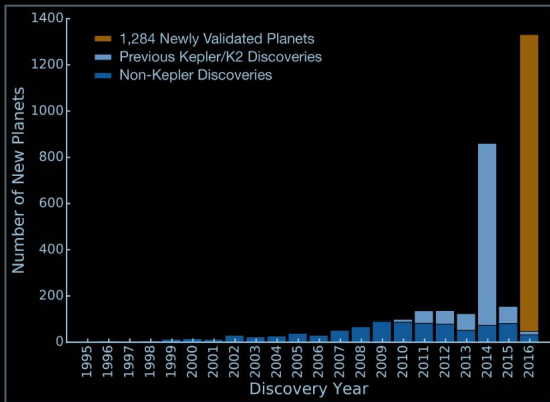
*As of May 10, 2016*



# その後の発展

## Exoplanet Discoveries Through the Years

As of May 10, 2016



- 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、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

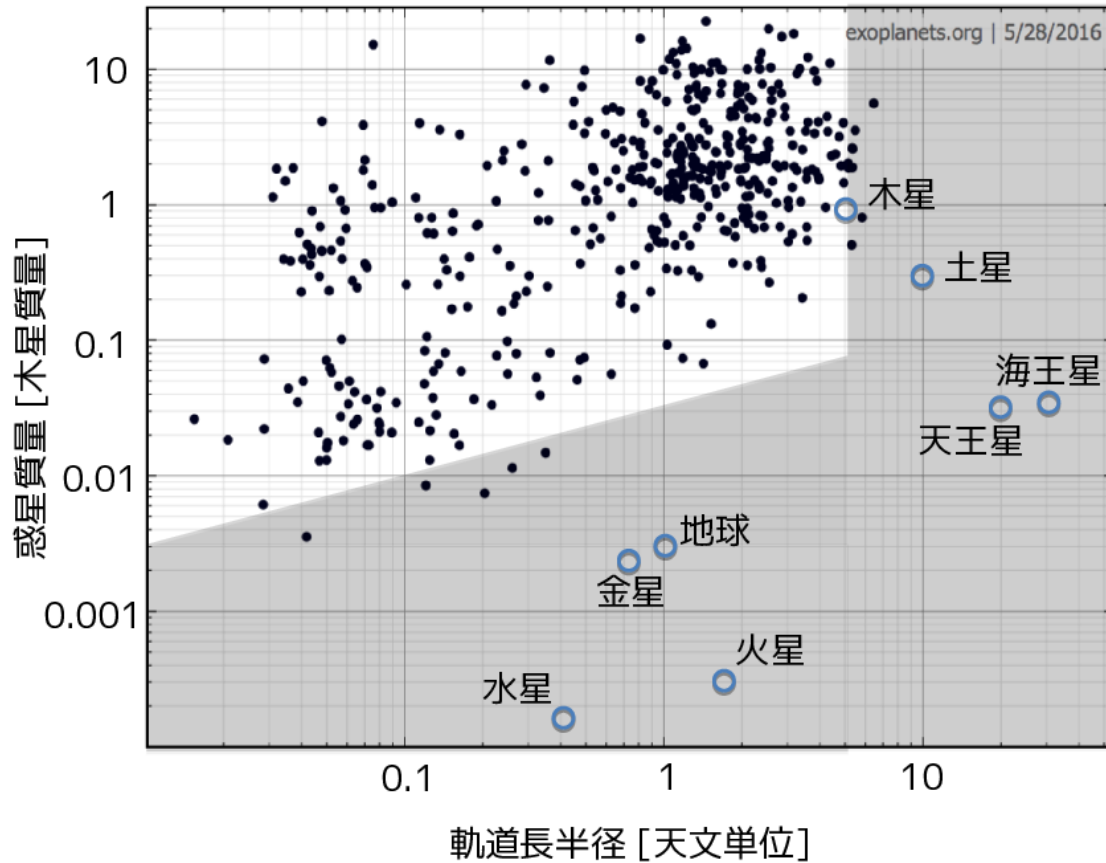
今後、直接撮像が発展すると期待。ハワイに建設中の 30m 望遠鏡等



# 現在の理解と今後の発展

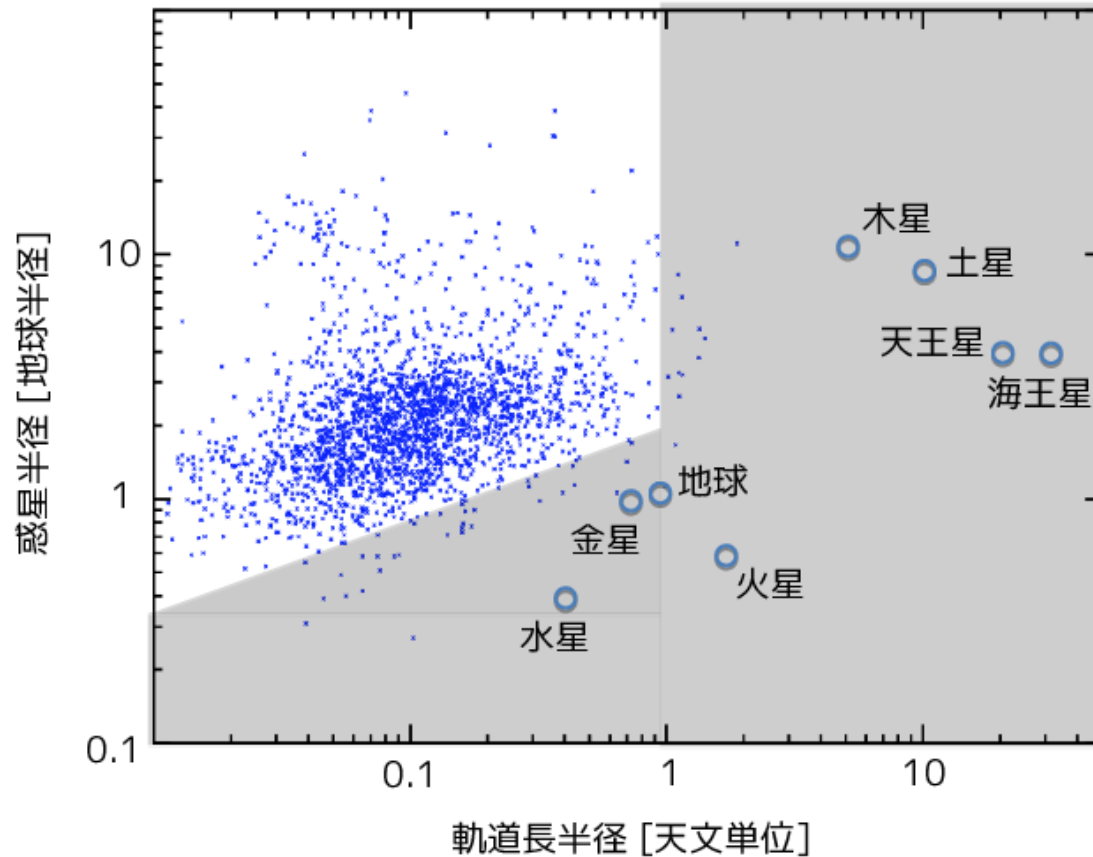
- 多様な系外惑星
- 理解、、、
- 今後の発展

# 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ものが多い。
  - 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らない(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、、、