

# 惑星学D

## 宇宙の始まりから惑星形成まで

牧野淳一郎

神戸大学 惑星学専攻

# 事務連絡

- 講義の前半3回は牧野が担当し、後半は保井先生、その後には試験です。
- 試験は、オンラインで「なんでも参照化」です。
- 牧野の講義資料は <http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-d-2021> にあります。
- 今回(本当は前回)小レポートがあります。✕切は10/23日です。

# 講義概要

一応シラバスには

1. 宇宙の始まり・宇宙最初の天体
2. 銀河の形成と進化
3. 星形成・惑星形成

と書きましたが様子ををみながら

# 講義の目的

- 惑星を、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、現代の惑星科学研究を天文学・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

# 宇宙の始まり・宇宙最初の日体

- 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

# 銀河の形成と進化

- 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
- 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
- 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

# 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



# 星形成についてわかっていること

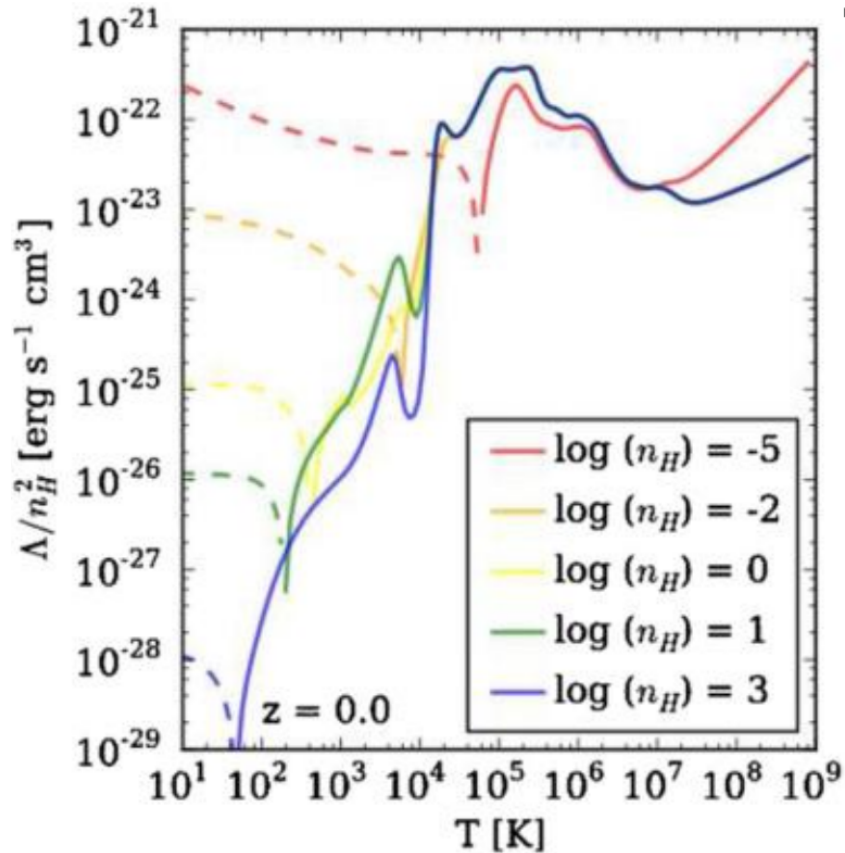
- この講義では、「星形成についてわかっていること」を整理しようと思っていた
- しかし、なかなか難しい。
- なので、まず、なぜ難しいか、を整理して、それからもう一度わかっていることを整理したい。

# 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



(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

Kim et al. 2014(AGORA)

# 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

# 「天文学でいう」メタルとは

水素とヘリウム以外の全ての元素のこと。炭素とか酸素も「メタル」なことが多い。天文学の論文で **metallicity** という言葉がでてくると大抵こっち。

# 銀河形成の観点からのガスの振舞い

理想化した話:

- ダークマター+バリオンの自己重力系が重力収縮していくと、ダークマターは冷えない(輻射をださない)ので最初の密度ゆらぎで決まる大きさに落ち着く
- バリオンは輻射をだして冷えて中心に集まる。角運動量で支えられた薄い円盤になる
- 薄い円盤はさらにスパイラルモードや、スパイラルアームの中での重力不安定を起こし、冷却しながら小さなものに分裂していく
- 星ができると、超新星爆発や若い星からの紫外線でガスは加熱されたり圧縮されたりする。

# 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。

# 一方、星間ガスの理論の観点からの ガスの振舞い

- 初期状態として「無限一様で背景の輻射場と平衡なガスを考える」
- 熱不安定 (温度が低いガスは平衡温度が低いのでさらに温度が下がる) によって、高温ガスの中に低温ガスの塊ができる
- 但し、これは星形成につながるかということそうならない。より高密度のガスを衝撃波圧縮等で作る必要がある



# 星形成のシミュレーションの観点

1つの星の形成シミュレーション

星形成シミュレーション

連星形成シミュレーション

- 初期に適当な密度をもつガス球を置く。通例としては、ある温度で自己重力平衡な解を密度あげて収縮するようにする。一様な磁場とか回転もあったりする
- そこからシミュレーション

色々なことが起こってその過程は沢山の人が詳細に研究している一方、「その初期条件に意味はあるのか」はなかなか難しい。

# 星形成のシミュレーションの観点

星団形成のシミュレーション

## Star formation with SPH

- もっともらしく沢山星はできる。
- 初期条件は？
- 星ができるところを本当に計算できてるのか？

# 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。

# 銀河形成と比べてみる

- 銀河形成の理論・シミュレーションは、現在は初期条件は決まったといっている。
- これは、既にのべたように宇宙論的パラメータと呼ばれる、バリオンの量、ダークマターの量、ダークエネルギーの量、膨張速度、密度ゆらぎのパワースペクトルといったものがマイクロ波背景輻射や超新星の観測から正確に決まったため。
- 密度ゆらぎのパワースペクトル(言い換えるとダークマターの性質)が決まる前は銀河形成理論も初期条件と形成過程について大論争があった。 **Monolithic collapse** と **hierarchical formation**

## 銀河形成と比べてみる(2)

- コールドダークマターシナリオが一般的になると、**Monolithic collapse** 説は段々フェードアウト(といっても最近の教科書でも生き残っていたりする)
- 銀河形成の教訓: 初期条件がわからないとなかなかサイエンスにならない、、
- そういう意味で、星形成の理解はまだかなり初期段階といえる

# 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

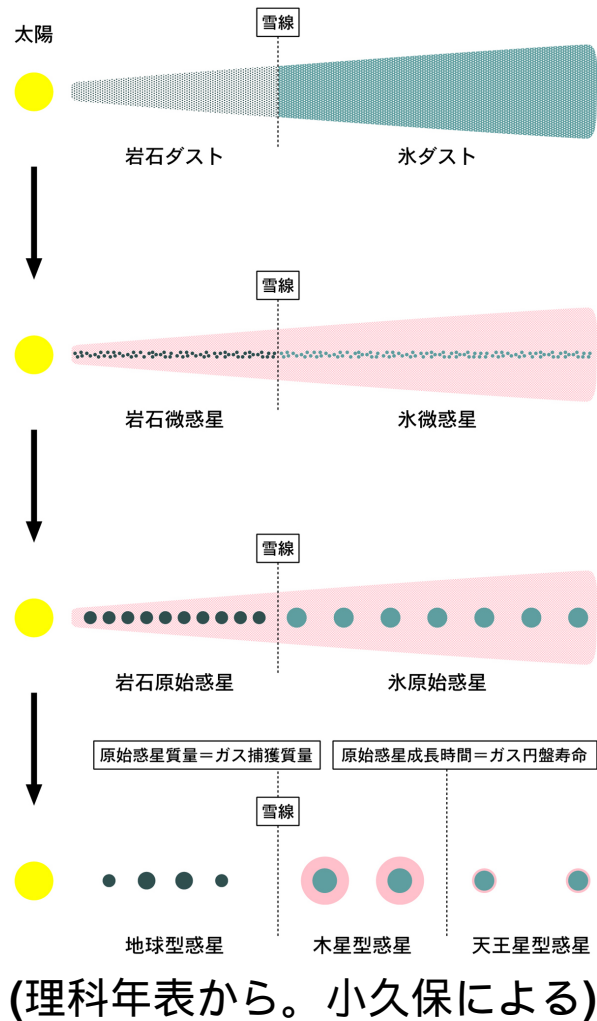


# 21世紀の惑星形成理論

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



- 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>15</sup>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<sup>23</sup>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

# 40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

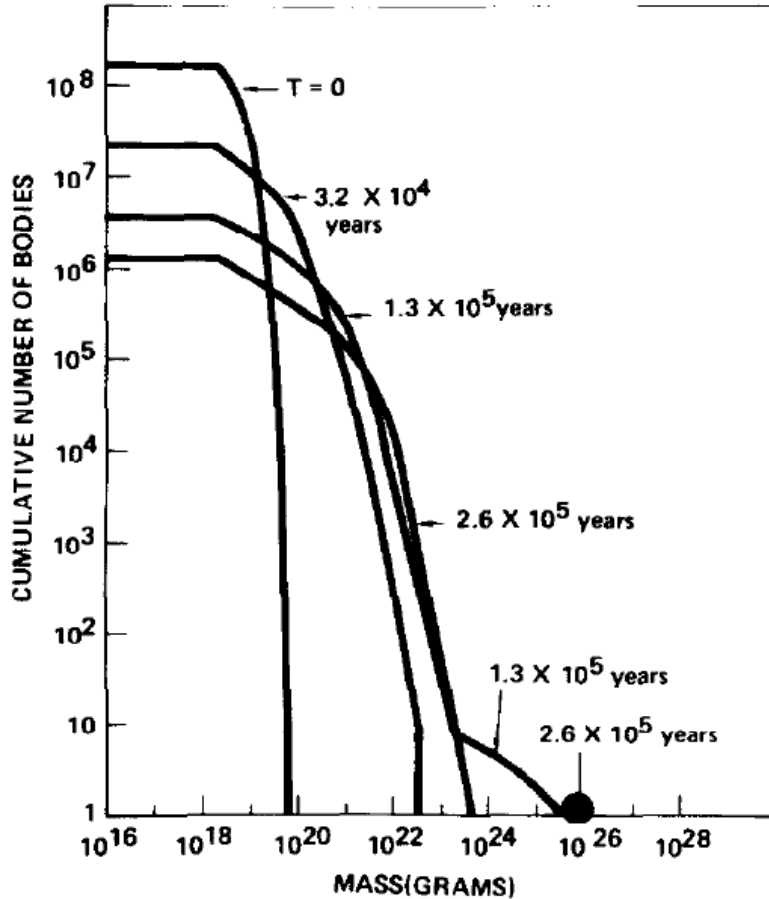
## 暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- それまでの理解: 秩序的成長。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

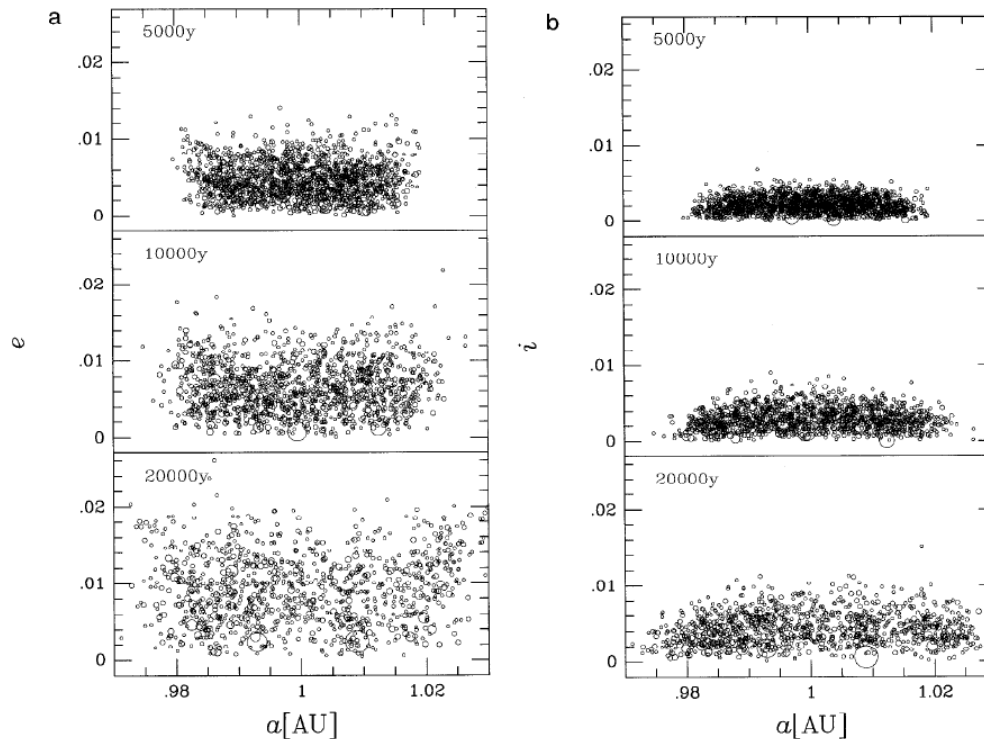
# Wetherill and Stewart 1989



- 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

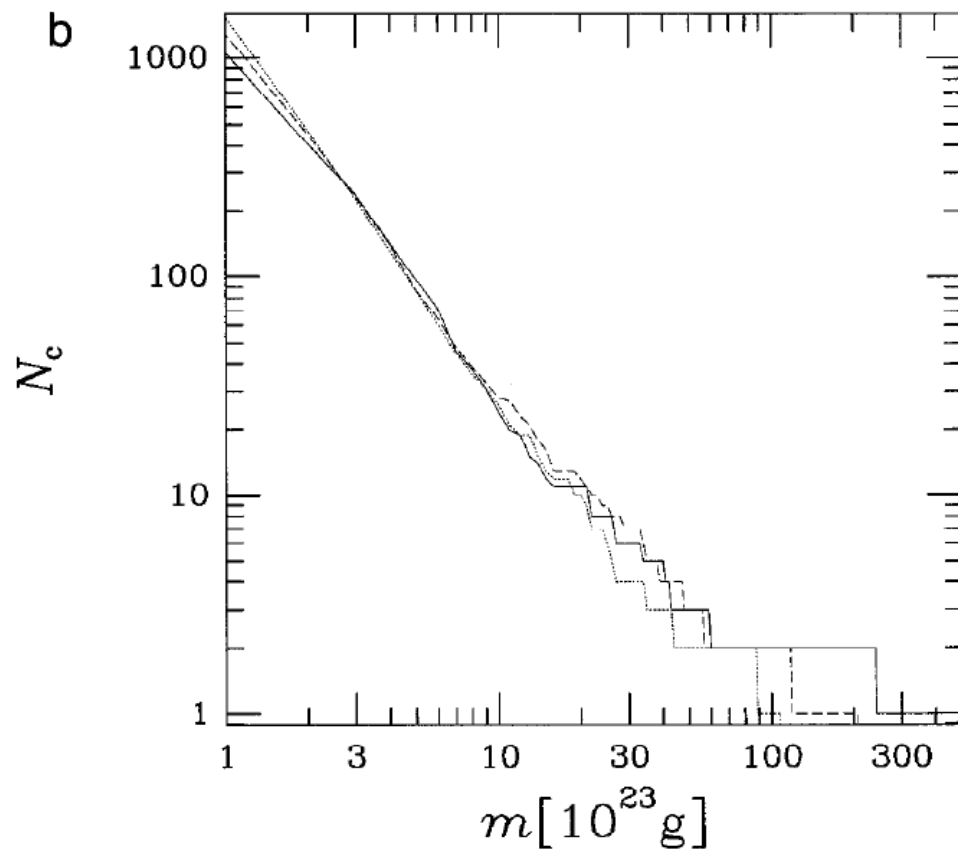
# Kokubo and Ida 1996

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位置



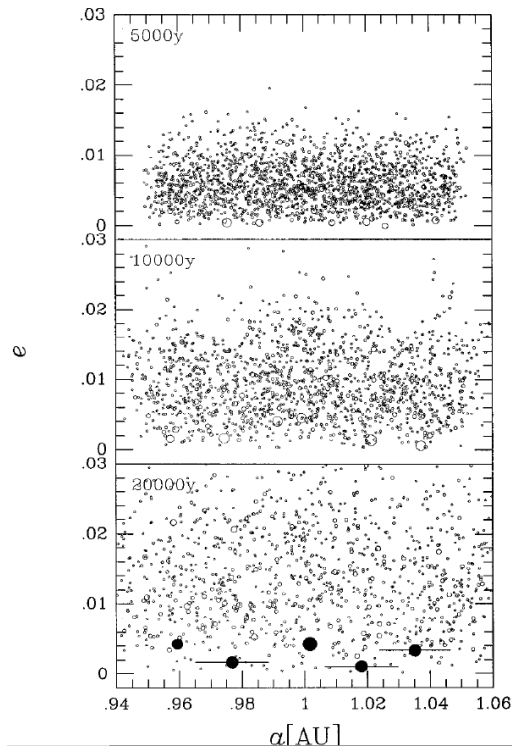
- 細いリング状領域のシミュレーション、衝突・合体も扱う
- 衝突の時間スケールは惑星大きくして短く
- 暴的成長が起きることを確認

# 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？

- ガス抵抗をいれたシミュレーションはいくつかあり
- ガス円盤自体は解かない。抵抗を式でいれる
- なので、どうしても落ちる
- 惑星一つとガス、という計算もあり。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

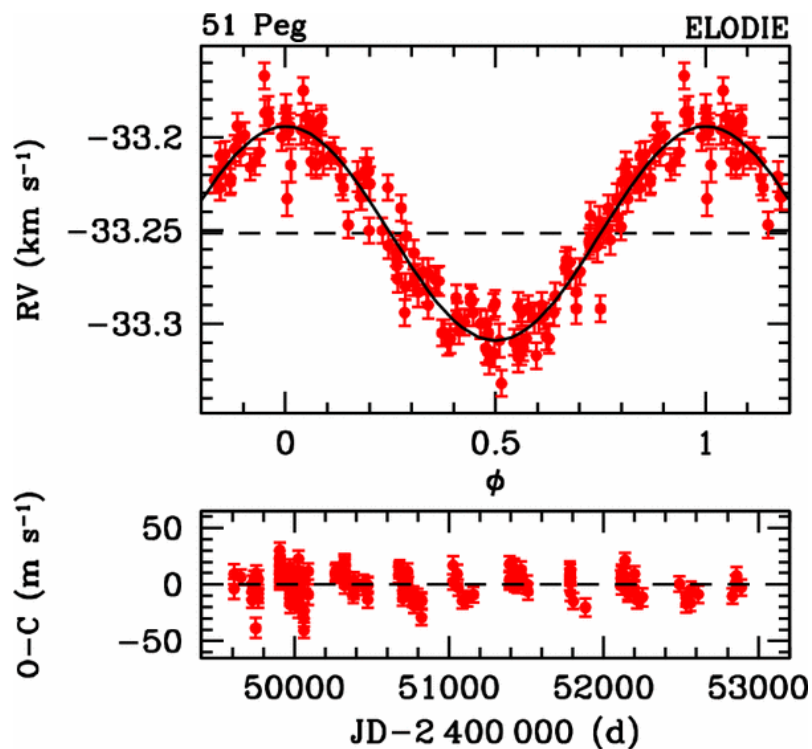
# 発見以前

- 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」**

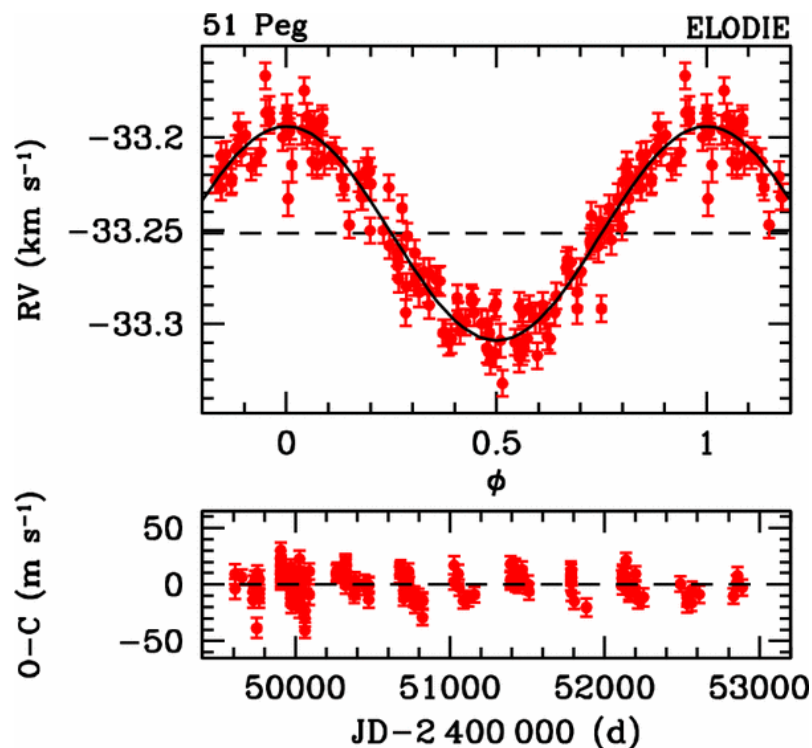
# 発見

- **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  $70\text{m/s}$  程度の変化。
- 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

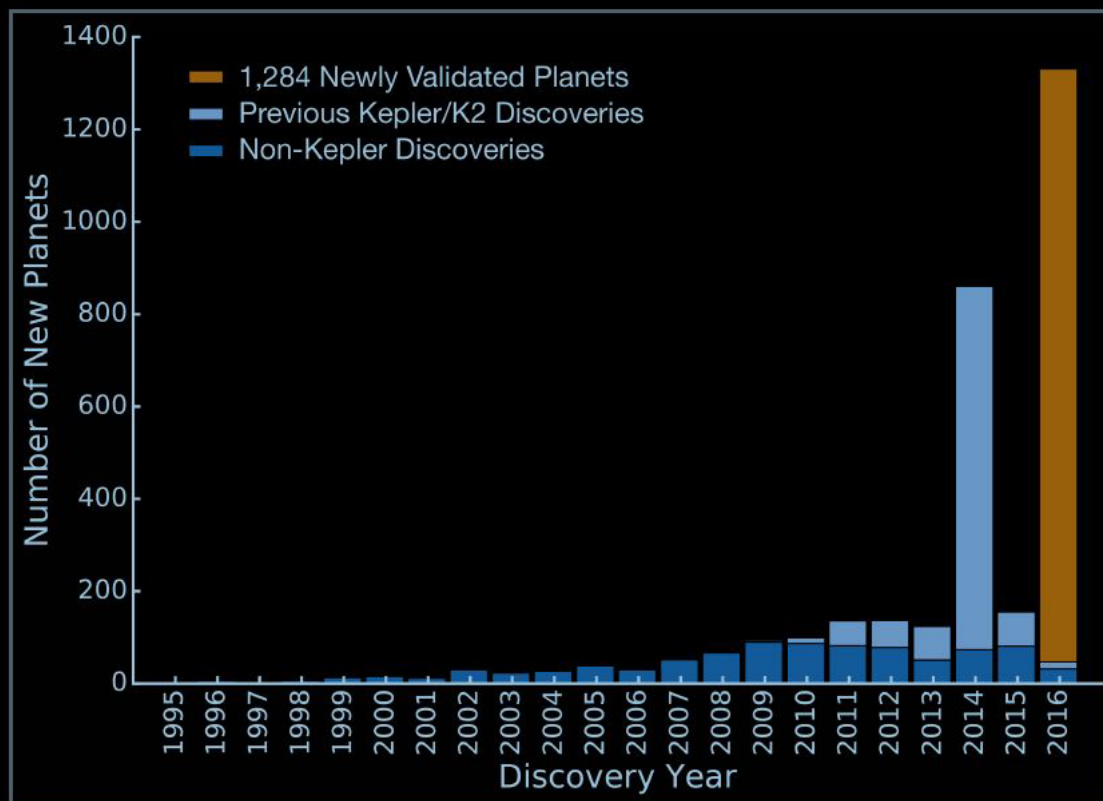
「木星は遠くにしかできない」という「理論」もあった、、、

(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。欧米では有名教授がセクハラ・パワハラで処分される事例は結構ある)

# その後の発展

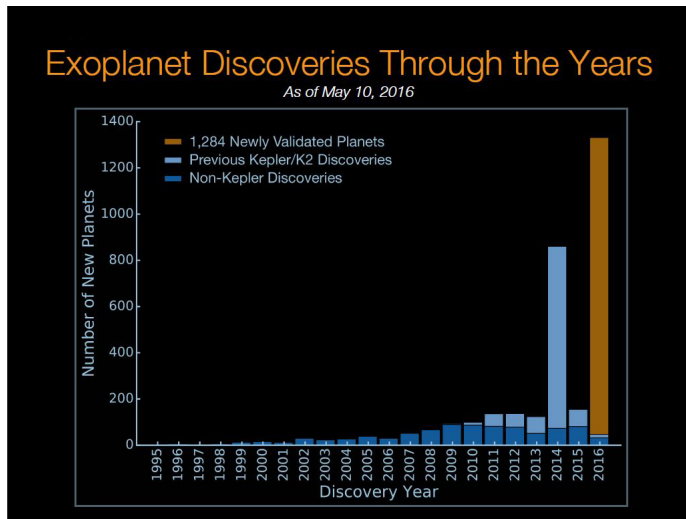
## Exoplanet Discoveries Through the Years

*As of May 10, 2016*





# その後の発展



- 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**」

**2018**年に **TESS** 衛星が上がったのでこれからさらに**1万**個以上みつかる  
と期待されている。

# 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

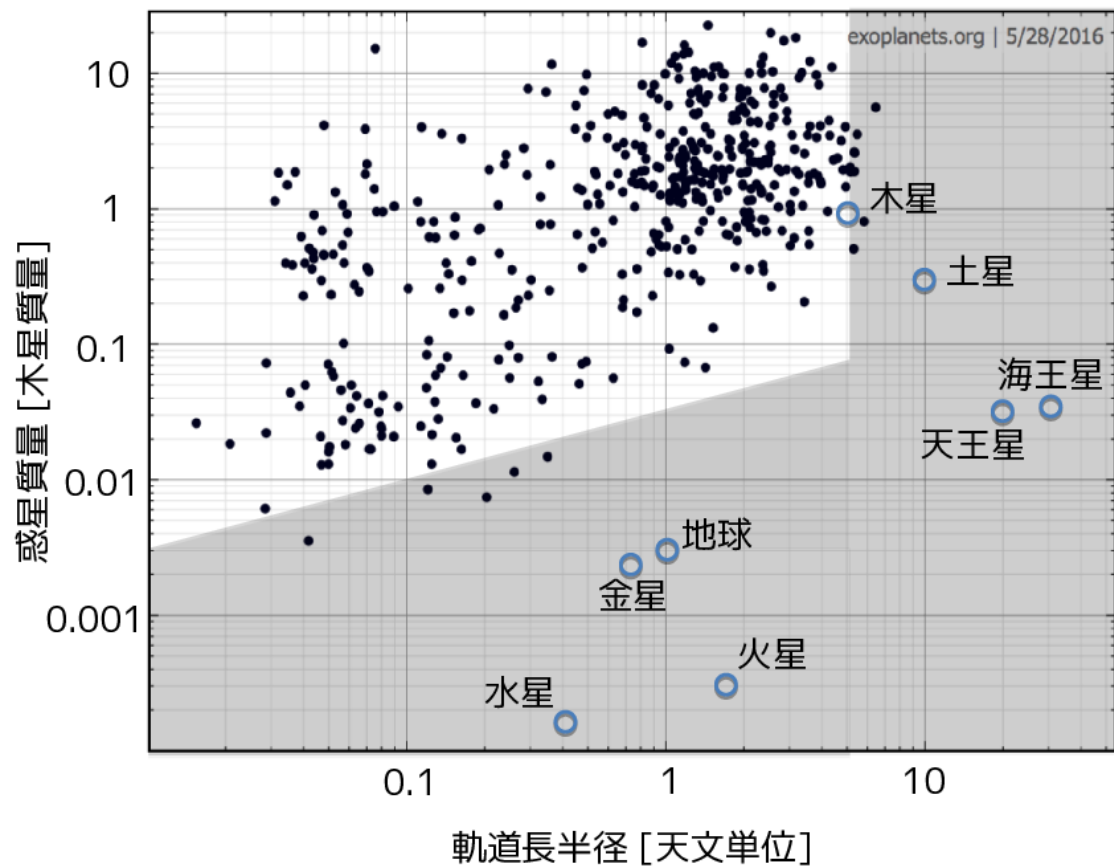
今後、直接撮像が発展すると期待。ハワイに建設中の 30m 望遠鏡等

(但し、反対運動(マウナケアに沢山望遠鏡作りすぎたこともあり、、、)ハワイでなくなる可能性も。)

# 現在の理解と今後の発展

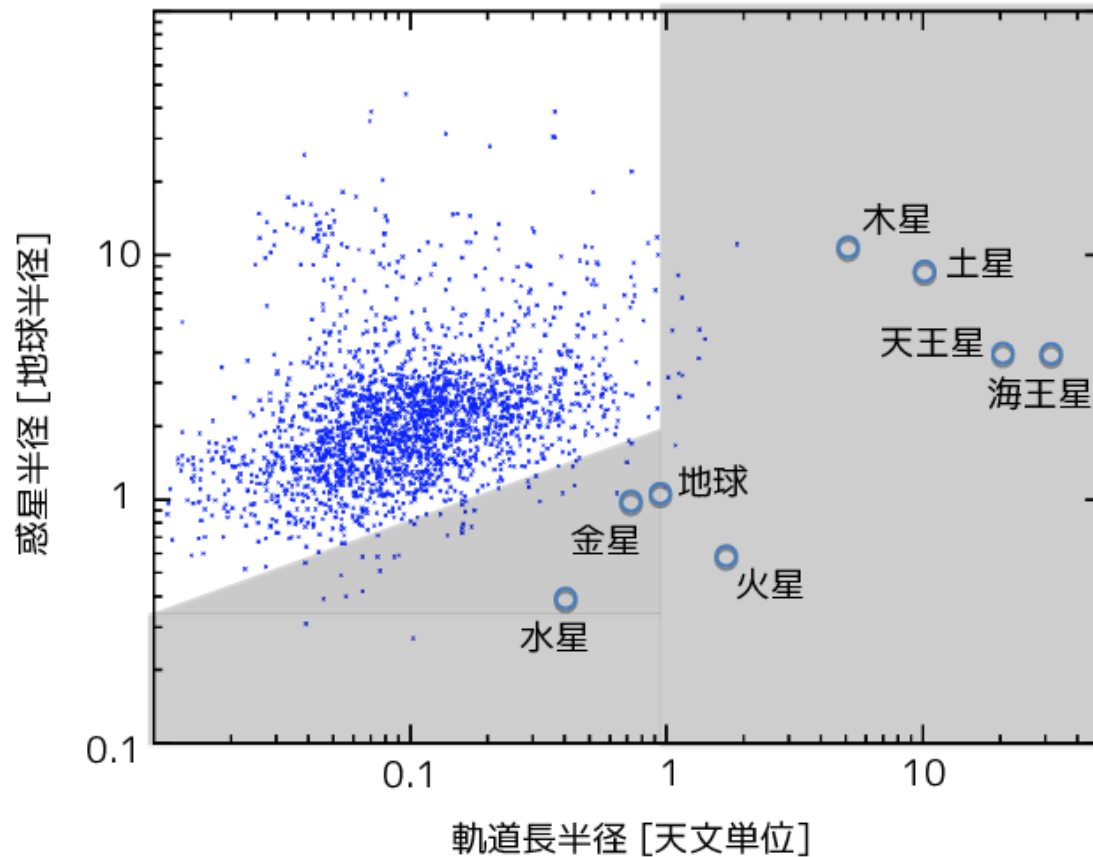
- 多様な系外惑星
- 理解、、、
- 今後の発展

# 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。



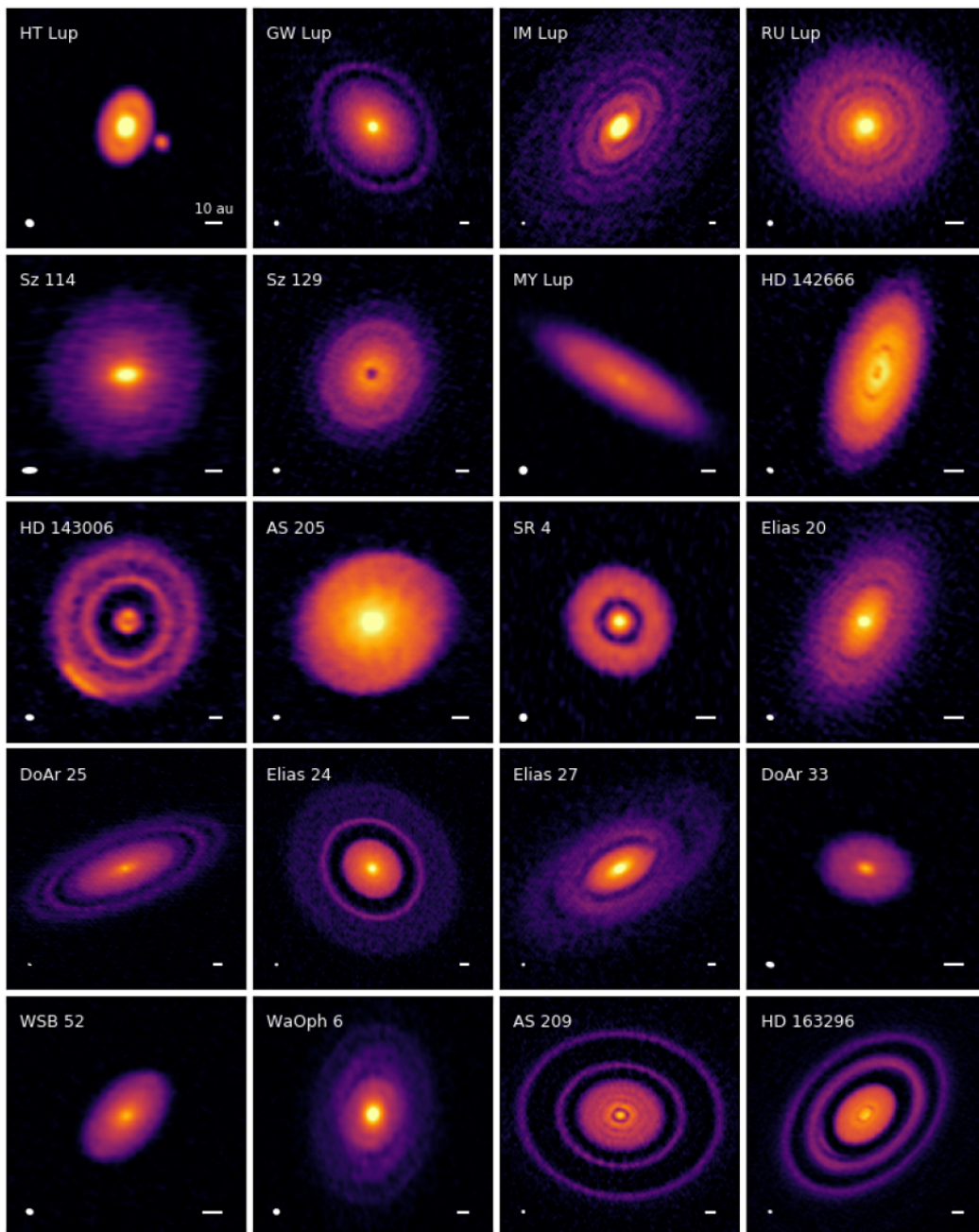
# 理解

- 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): かなり進んできた。さらに混乱が深まりつつある。
- 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 10-20 年でかなり進むと期待、、、



## ALMA 望遠鏡による原始惑星系円盤の観測

「色々ある」

惑星ができてギャップができた？ なにか別の理由？ まだ不明。

# 事務連絡

- 講義は、最初の3回を牧野、後半4回を保井が担当し、その次の回は試験です。
- 試験は、対面で実施、ノート、配布プリント(オンライン配布を印刷したもの)、参考指定した図書は持ち込み可です。
- 牧野の講義資料は  
<http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-d-2022>  
にあります。
- 今回(本当は前回)小レポートがあります。✂切は10/23日です。

- **10/25** から担当が保井なので、**Zoom** の **URL** も変わります。注意して下さい。