

惑星学 A
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

- 講義の後半4回は牧野が担当し、その次の回は試験です。(7/13は臨時休講としたため講義は3回)
- 試験は、配布資料と手書きノートのみ持込可です。(スライドを印刷したものは配布資料とみなします)
- 牧野の講義資料は <http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-A-2017> にあります。
- 7/27 の講義の最後では、前回の課題提出と授業評価アンケートの提出をお願いします。

講義概要

一応シラバスには

1. 宇宙の始まり・宇宙最初天体
2. 銀河の形成と進化
3. 星形成・惑星形成 (I. 標準モデル)
4. 星形成・惑星形成 (II. 系外惑星と最近の発展)

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

なぜ銀河は潰れないか？

太陽系 太陽が圧倒的に重い — 2 体問題 + 摂動

一般の 3 体問題：不安定

安定（最終）状態：2 体の連星 + もう一つ（無限遠に飛ばされる）

銀河ではなにが起きるか？

銀河の「力学平衡状態」

星の数が非常に多い時には、それぞれの星は勝手に(他の星からの重力を受けて)動いていても、星全体(ダークマターも含めて)の質量分布、つまり、銀河のどこにどれくらい質量があるか、は「あまり」変わらない、という状態がある。

これは、時間がたっても銀河は「ほぼ同じ」形を保つことができるということ(特にダークマターについてはこれはかなり正しい)

これを「力学平衡状態」という。

銀河が潰れないわけ

銀河とかがどうして潰れてしまわないかという問題にたいする形式的な答：

ほぼそのような「力学平衡状態」にあるから

まあ、これはちょっと言い換えでしかないところもある。つまり、依然として

- なぜそのような状態に到達できるか？
- 到達できるとしても、どのような初期状態から始めたらどのような平衡状態に行くのか？

はよくわからない。

なぜ力学平衡にいくのか？

第一の問題に対する一般的な答：

初期状態が特別の条件をみたしていない限り、振動があったとすればそれは急激に減衰するので定常状態にいく。

(但し、回転があると別：渦巻銀河、棒渦巻銀河、、、)

前に見せた銀河形成のシミュレーションはその一例。

ビッグバンからの天体のできかた

現在の標準的な理解は以下のような感じ

- ダークマターの密度ゆらぎからの成長が、宇宙の色々な天体・構造の起源。
- 密度ゆらぎの大きさは、波長が短いところでは「ほぼ一定」、銀河くらいまでは徐々に、銀河団くらいから上で急速に小さくなる。
- ここで「大きさ」は、「不安定が十分成長して天体になるまでの時間」
- このため、銀河ができる時には、その中のそれより短い波長のゆらぎも成長している。言い換えると、ダークマター天体は質量が小さいものがまず形成され、それらが合体して大きくなっていく。

ビッグバンからの天体のできかた(続き)

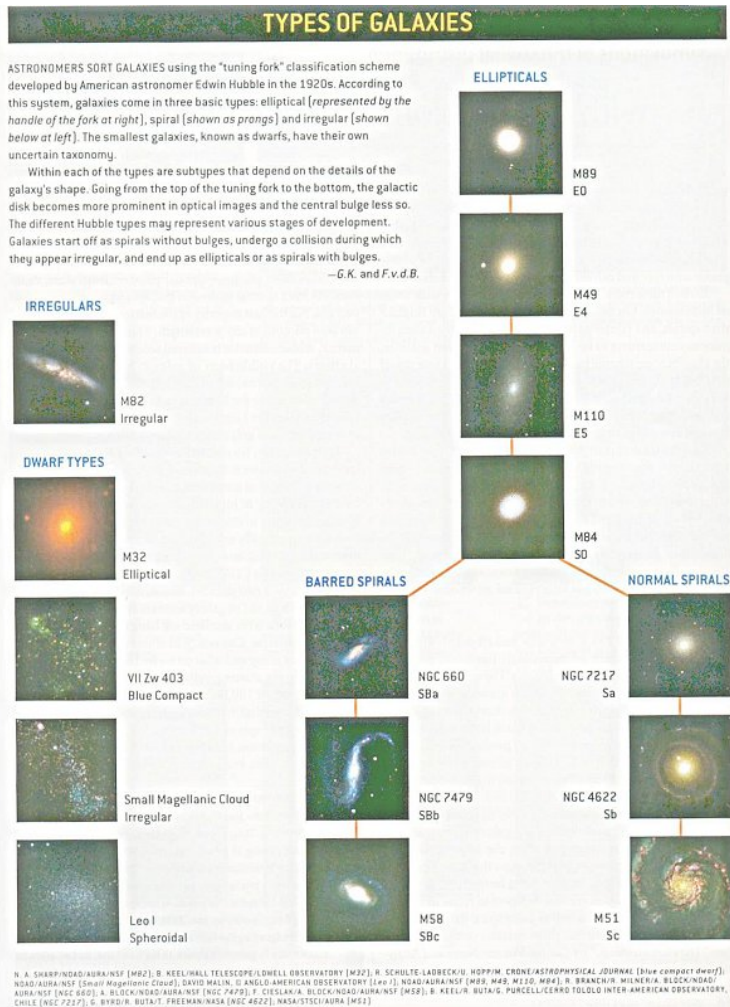
- 現在のところ、最初にできるダークマター天体は地球くらいの質量と考えられている。これはダークマターを構成する素粒子(だとして)の質量できまる。
- ダークマター天体(専門用語では「ダークマターハロー」ということが多い)の質量が太陽の10-100万倍くらいまで成長すると、その重力で集めたガスが宇宙で最初の(第一世代の)星ができると考えられている。
- この星がどういうものかはよくわかっていないが、質量が太陽の100倍程度ある重いものができ、紫外線や超新星としての爆発エネルギーで宇宙全体の水素ガスをもう一度電離すると考えられている。

ビッグバンからの天体のできかた (続き 2)

- 但し、この電離には、その頃形成されつつあった(?) 巨大ブラックホールからの放射がきいているという説もある。
- ダークマター天体がさらに成長すると、電離したガスも重力で集めることができるようになる。そうなるとそのガスが冷却し、星ができる。冷えたガスはダークマター天体の中心に集まるが、全体として回転があると円盤状になる (円盤銀河、渦巻銀河)
- この辺、観測からも理論からもまだよくわかっていないことが多い。理論は、シミュレーションがまだ精度がないため。観測は、非常に遠くの暗い天体を観測する必要があり、単純に望遠鏡の性能の問題。

- ブラックホールの成長については、今まで全く観測されていなかった重力波の観測で今後 10-20 年の間には色々なことがわかると期待はできる。

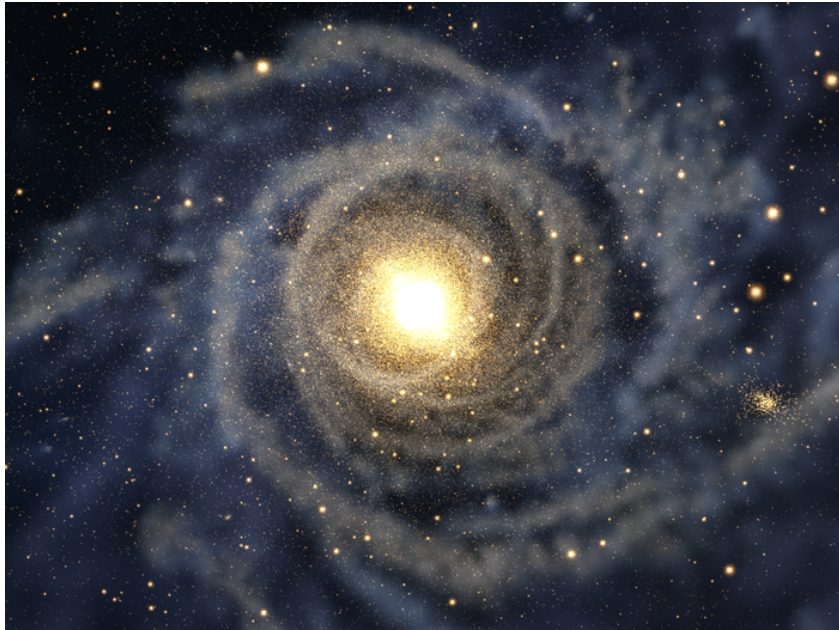
銀河形成シミュレーション



基本的な考え方:

- 初期条件からの、銀河の「まると」シミュレーション
- 銀河の多様性の起源を理解したい

Saitoh et al. 2005



animation

- ダークマター+ガス+星
- 200万粒子、GRAPE-5
で1年(!) くらいの計算
- 1粒子の質量: 1万 太陽
質量くらい

星形成過程のモデル

- 本当に星1つを作るシミュレーション:分解能が太陽質量より 4-5桁高い必要あり
- 現在できる限界: 粒子の質量が太陽の1000倍。8桁くらい足りない
- 星ができる過程のモデルが必要
 - ガスが十分に低温・高密度になったら、星に変わる、とする
 - いくつかフリーパラメータがある
 - できる銀河の構造がパラメータのとりかたによってしまう、、、
- 超新星の扱いにも同様な問題

どれくらいの分解能でどうすればいいか？

- 答があうようになったらわかる？
- ガス粒子が星形成領域や分子雲より大きいようでは多分駄目
- 理論的には、十分な分解能があれば単純にガスを星に変えるだけでよくなるはず。
- そこに近付いている？
- あと 1-2 桁？

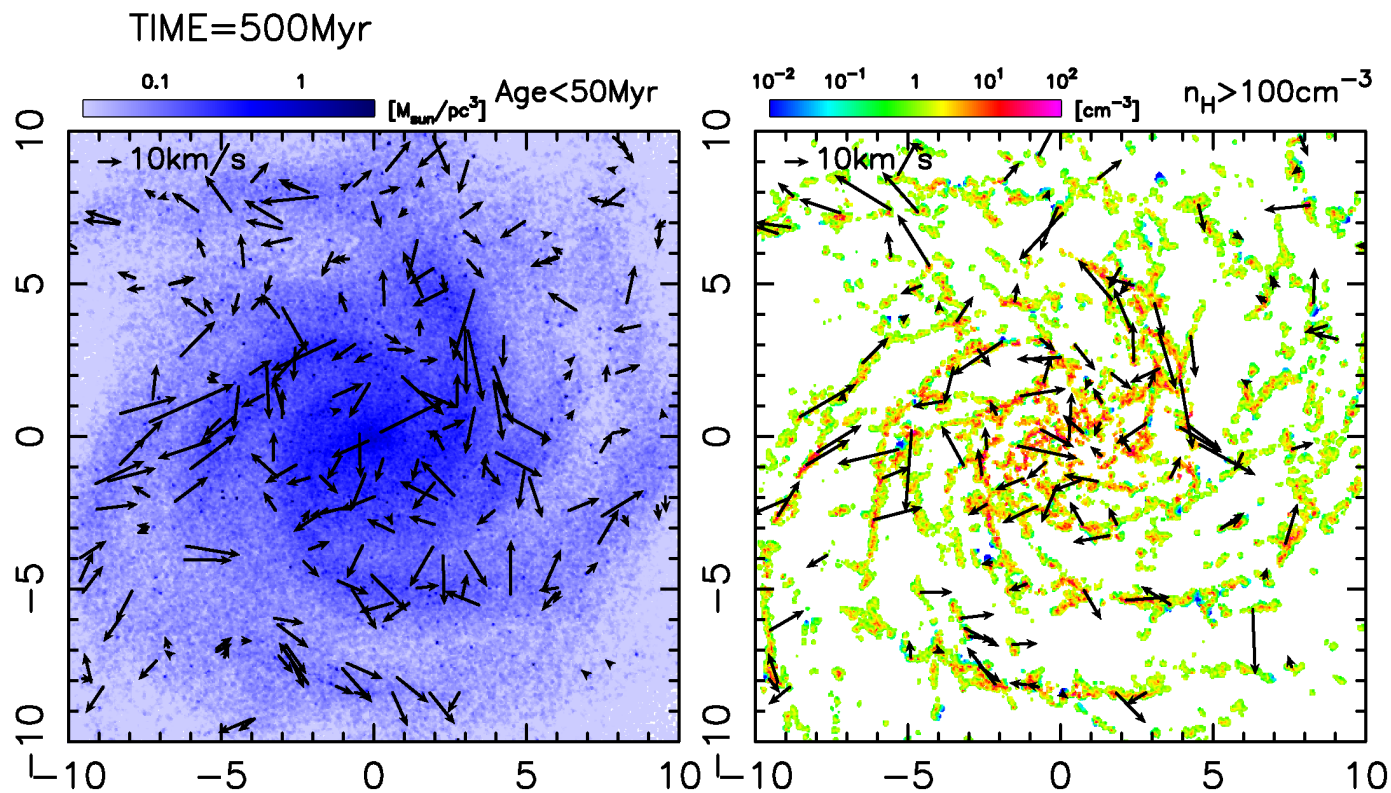
アニメーション

Star formation with SPH

Large scale structure formation with AMR

銀河円盤

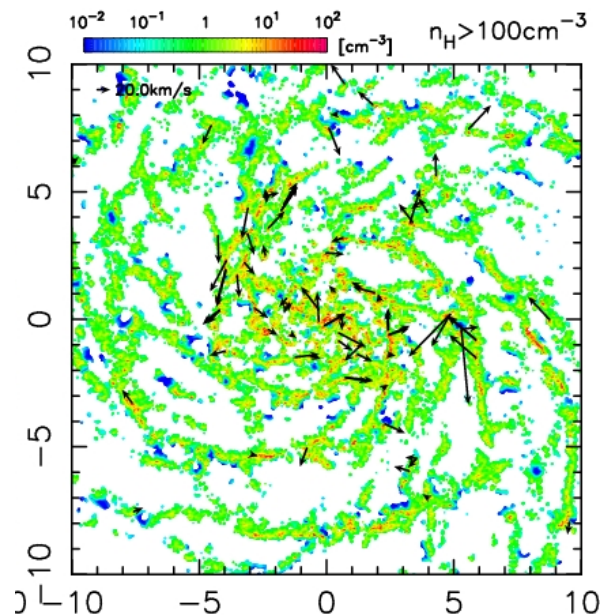
渦巻構造と、円運動からのずれ animation (Baba et al 2009) 1 2



星の分布

冷たいガスの分布

高分解能モデルと観測



ガス+星の銀河円盤シミュレーションのまとめ

- 高分解能計算ではスパイラルアームは自然にできる
- アームは定常ではなく、常に生成消滅している
- シミュレーション結果を「観測」すると、我々の銀河系の観測の色々な特徴を再現できる

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

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？

まだ全く計算機の速度や計算精度が不足、、、

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。

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

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

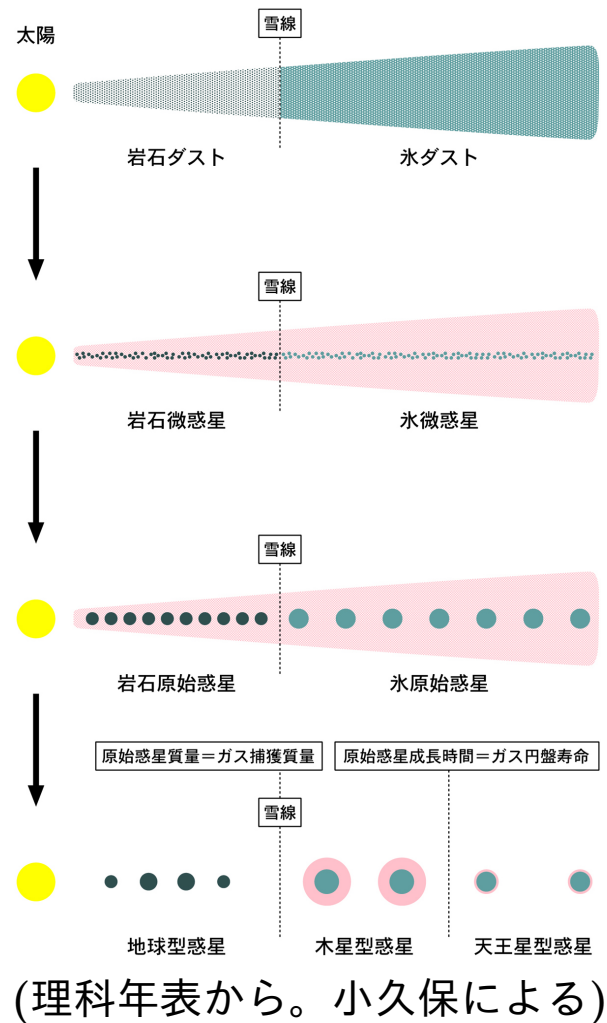
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

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

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。(10¹⁵kg 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? 10²³kg 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

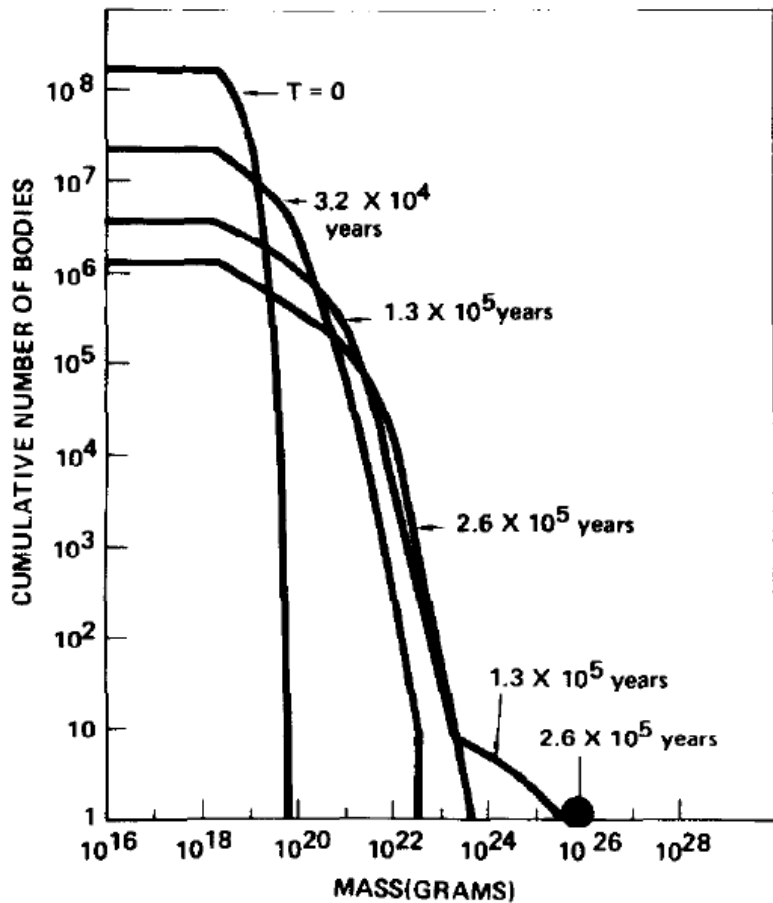
暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- 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

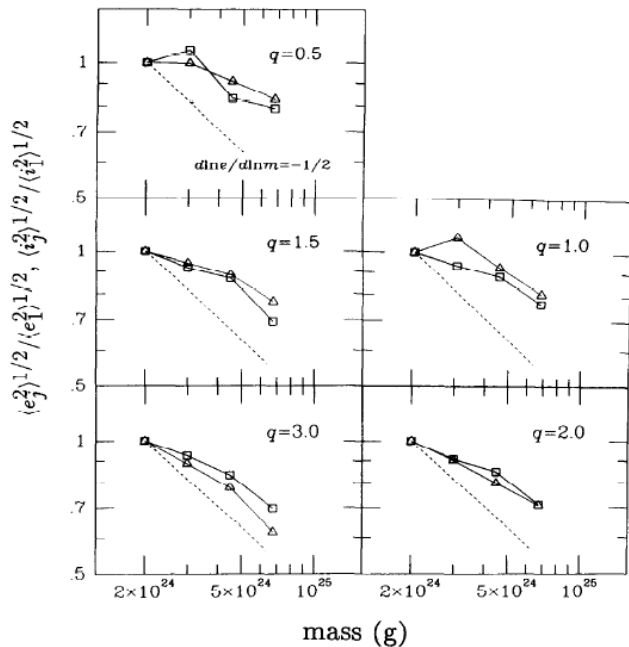
- 大きいので衝突しやすい
- 重いので、微惑星同士の重力の効果も大きい
- 円軌道に近いので、重力の効果がいかに大きい

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

Ida and Makino 1992a,b, 1993



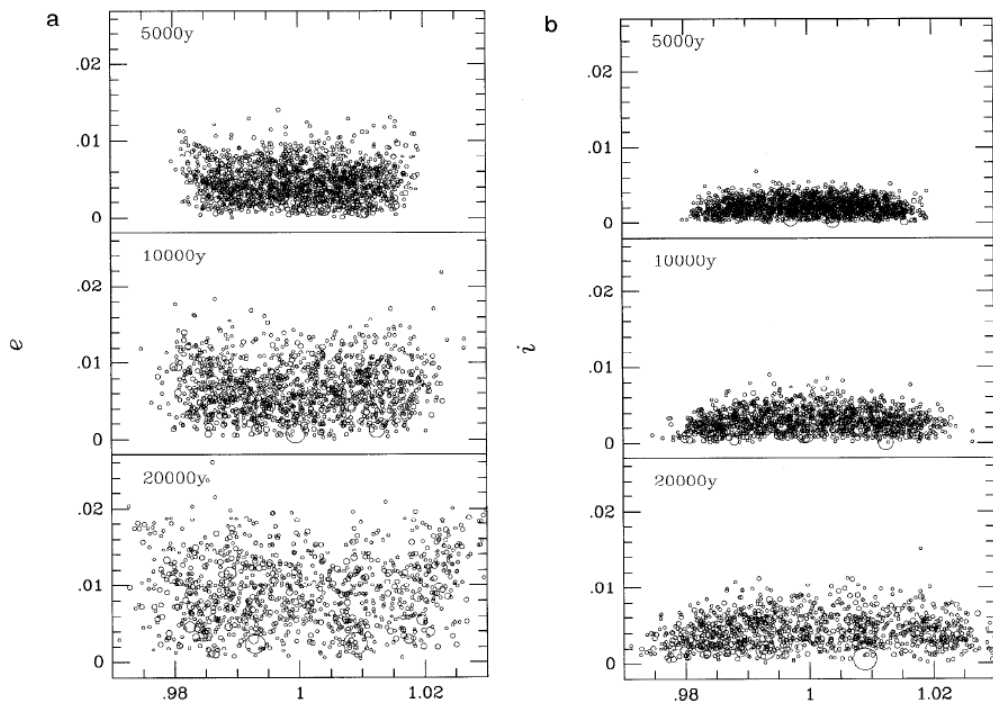
- (1992a) 単一質量での速度分散の時間進化を計算機シミュレーション
- (1992b) 複数質量での速度分散の質量依存性を計算機シミュレーション
- 重いものが速度分散小さくなることを確認

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)

(実際の合体・成長過程をシミュレーションで調べてはいない)

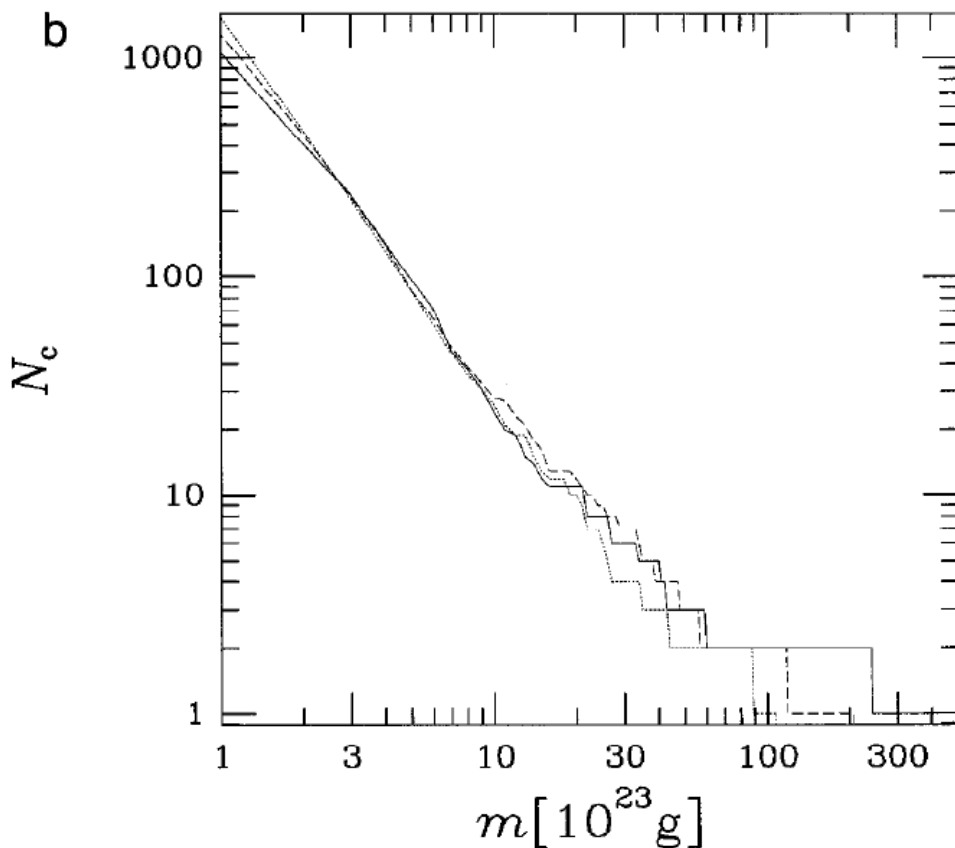
Kokubo and Ida 1996

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



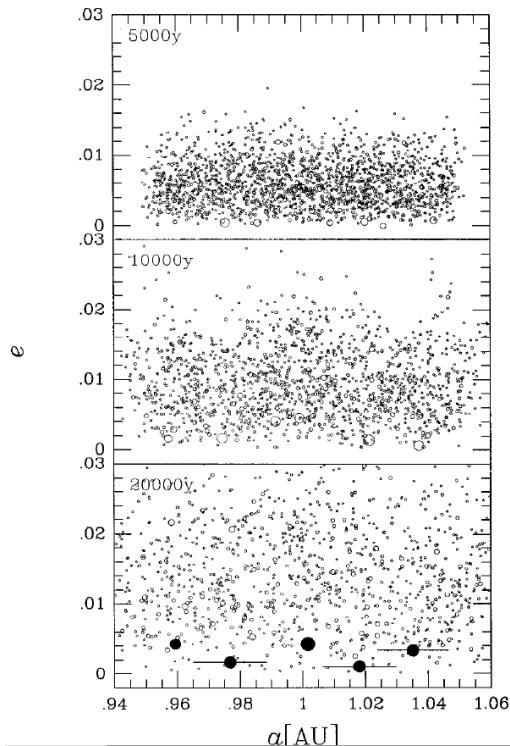
- 細いリング状領域のシミュレーション、衝突・合体も扱う
- 衝突の時間スケールは惑星大きくして短く
- 暴的成長が起きることを確認

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

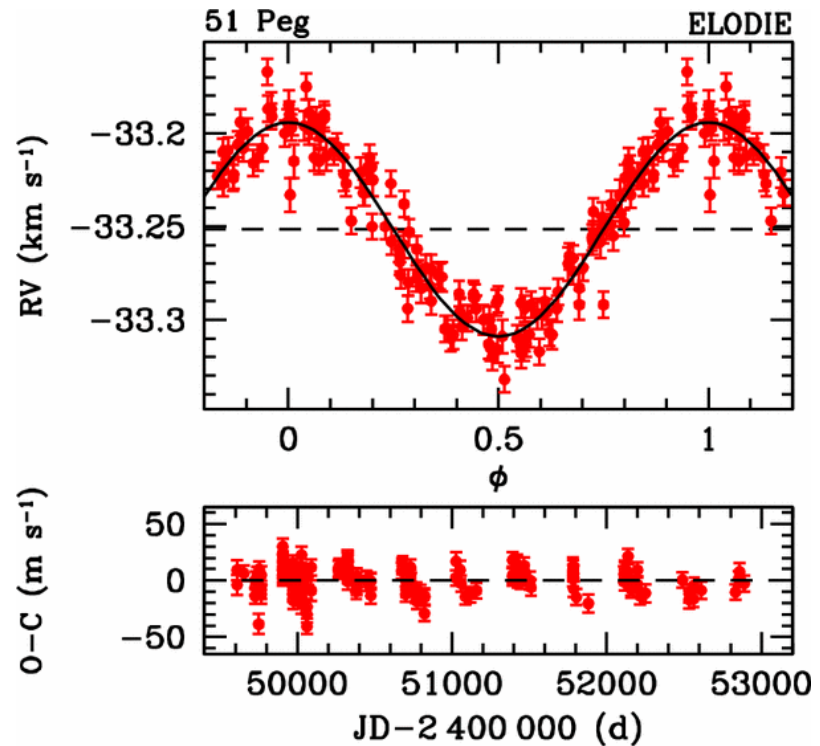
発見以前

- 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」

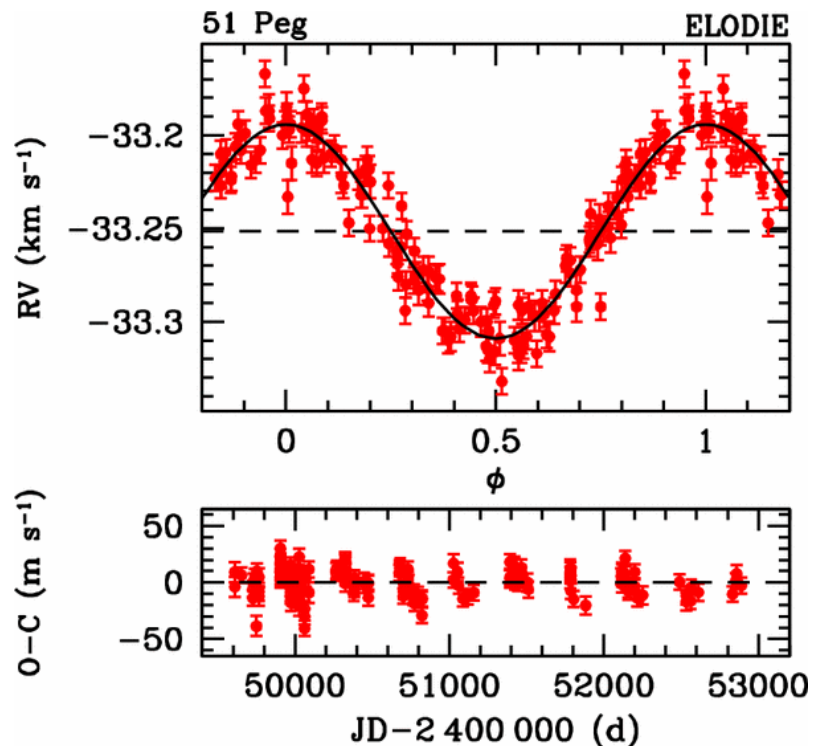
発見

- 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)



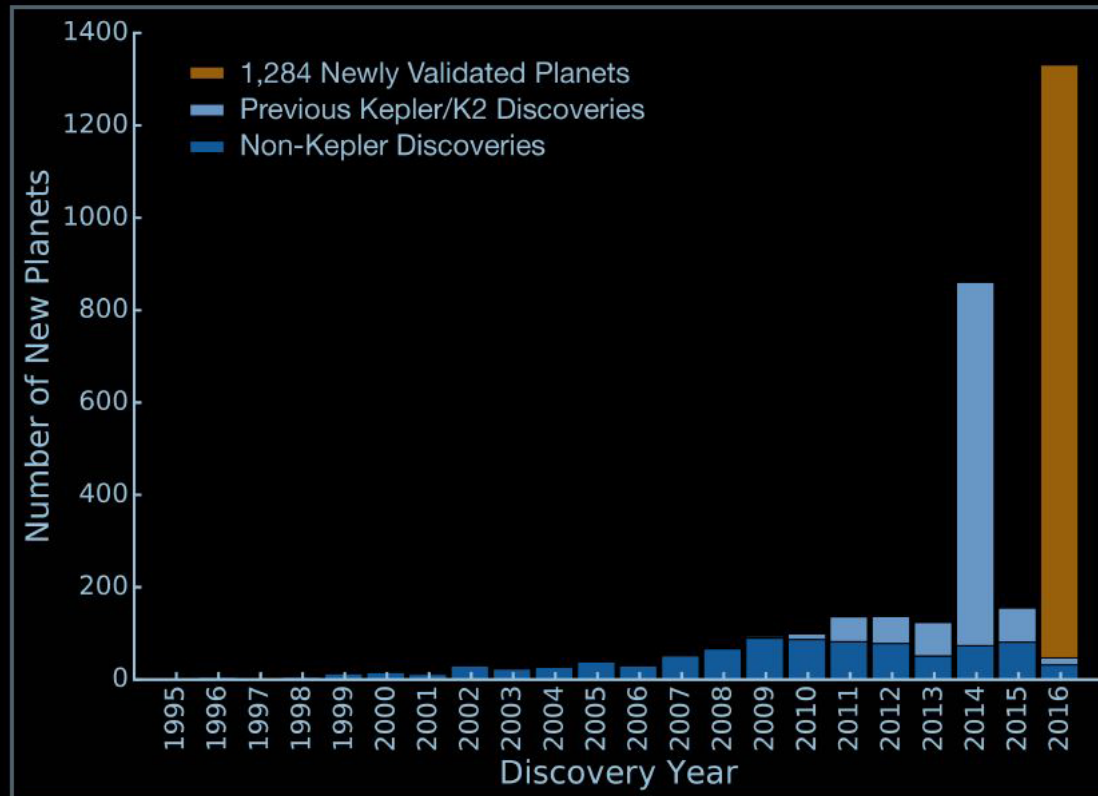
発見の経緯

- 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。

その後の発展

Exoplanet Discoveries Through the Years

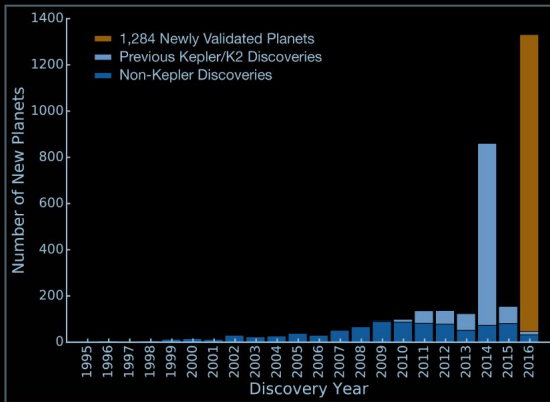
As of May 10, 2016



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

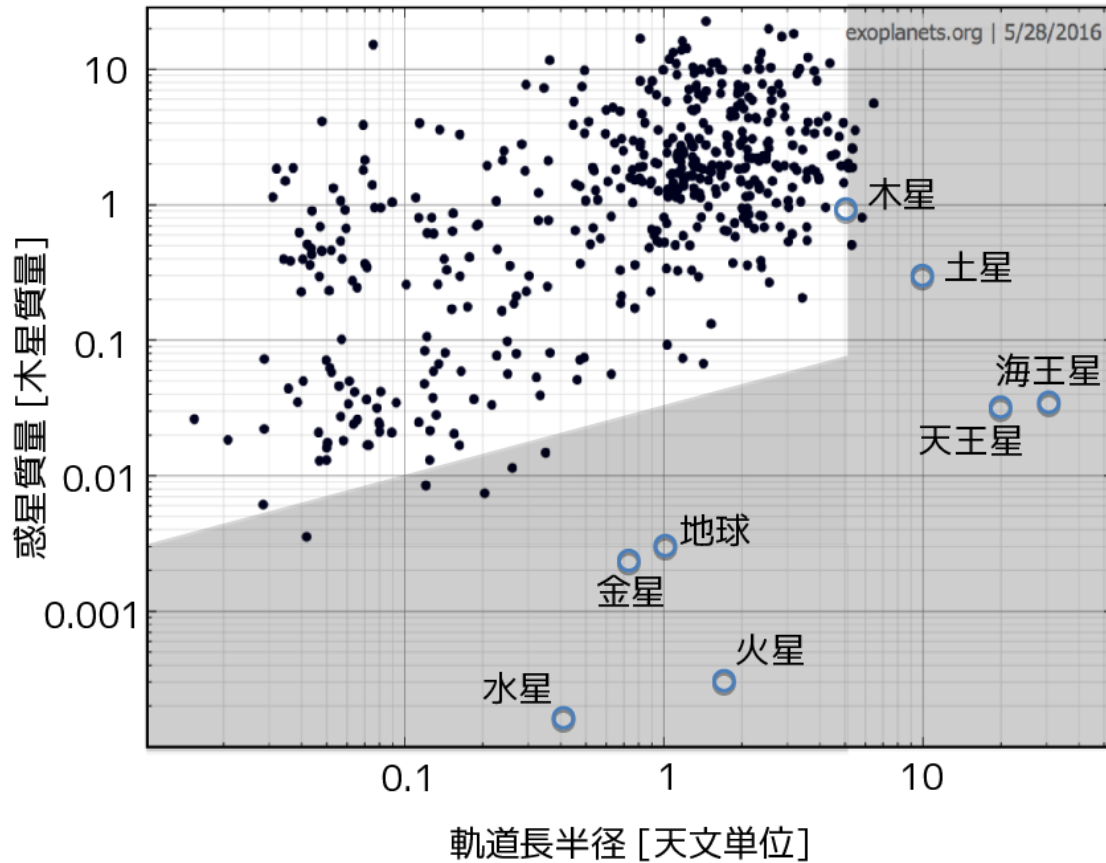
- 視線速度法
- トランジット法
- 直接撮像
- 重力レンズ

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

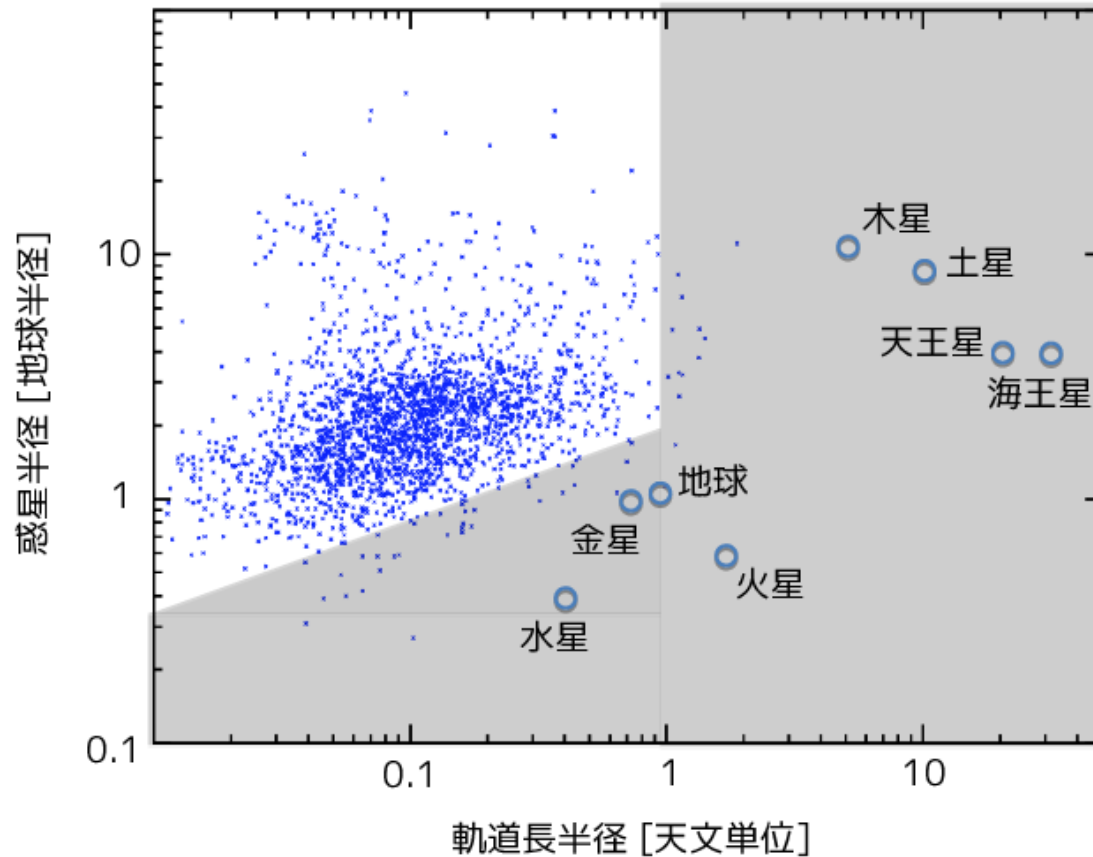
- 多様な系外惑星
- 理解、、、
- 今後の発展

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、、、

事務連絡

- 試験は、配布資料と手書きノートのみ持込可です。
- 牧野の講義資料はとりあえず
<http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-A-2017>
にあります。
- 7/27 の講義の最後では、前回の課題提出と授業評価アンケートの提出をお願いします。