

# 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

# 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

- 今日は講義のおわりの小テストはありません。
- 来週は金曜振替のためこの講義はありません。(で、あっていますね?)
- これまでの小テストを欠席している等で提出していない人で、提出を希望する人は、11/28 に回答を提出して下さい(講義開始前に回収します)。

# 内部構造の基本方程式

球対称で定常な星の構造は、

- 質量保存の式
- 静水圧平衡の式
- 状態方程式
- エネルギー生産と輸送の式

で決まる。この辺をまずだしておく。(10/25に一部書いた)

# 質量保存の式

半径を  $r$ 、密度を  $\rho$ 、ある半径の内側の質量を  $M_r$  とすれば

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (1)$$

これは特に難しいところはない？半径  $r$  から  $r + dr$  の範囲の体積は半径  $r$  の球の表面積  $4\pi r^2$  に厚さ  $dr$  を掛けたものなので、質量はそれにさらに単位体積あたりの質量である  $\rho$  を掛けたもの。

# 静水圧平衡の式

さらに圧力を  $p$  として

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \quad (2)$$

さて、これはどういう式だったかということ、、、高踏的な説明は、「流体は圧力勾配から力を受ける。星の静水圧平衡ではそれが重力と釣り合う」というもの。

もうちょっと丁寧なつもりの説明: 半径  $r$  から、 $r - dr$  に下がった時にどれだけ圧力が増えるかを考える。そこでの重力加速度が  $g$  なら、新しく上に載ることになる流体の質量は  $\rho dr$  であり、重力の増加は  $g\rho dr$  である。これが圧力の増加  $dp$  と等しい。なので  $dp/dr = -\rho g$ 。ここで  $g = GM_r/r^2$  なので上の式になる。

# 状態方程式

これは、温度はそこそこ高くて電離した理想気体の方程式で、温度が高いと輻射圧 (光子の圧力) も無視できないので

$$p = \frac{\rho k T}{\mu m_H} + \frac{a T^4}{3} \quad (3)$$

ここで  $k$  はボルツマン定数、 $a$  は輻射定数、 $m_H$  は水素原子の質量、 $\mu$  は平均分子量である。

地球上なら理想気体といえば話は簡単だが、恒星内部で高温だと、原子の電離状態が組成、温度、密度の関数になるので少し複雑である。輻射圧は、あとで述べるような理由で大質量星では重要になる。

# エネルギー生産の式

エネルギー生産：熱核反応。

- 主系列星の中心温度： $10^7\text{K}$  程度。  $1\text{eV} \sim 10^3kT$  なので  $10\text{keV}$  程度。
- 核融合反応で得るエネルギーは  $10\text{MeV}$  程度。なので、 $10^{10}\text{K}$  くらいまで温度が上がらないと普通には核融合は起きない(これは何故核融合炉は難しいかという話)

## エネルギー生産の式(2)

- 「普通には」起きないが、量子力学的効果(トンネル効果)でほんのちょっとだけ起きる。
- おきやすさ:  $\exp(-\sqrt{E_G/E})$  くらい。  $E_G$  が量子力学的な効果を表す係数で単位はエネルギー、  $E$  は2つの原子核の相対運動のエネルギー
- 原子核のエネルギーの分布はマックスウェル・ボルツマン分布なので  $\exp(-\frac{E}{kT})$  になる

## エネルギー生産の式 (3)

このため、典型的に反応が起こるところは、 $\exp(-\sqrt{E_G/E}) \exp(-\frac{E}{kT})$  が最大値をとるところで、これの対数をとって  $E$  で微分して 0 になるところを求めると、

$$\frac{1}{2} \sqrt{E_G} E^{-3/2} - \frac{1}{kT} = 0 \quad (4)$$

から

$$E = E_0 = \left( \frac{\sqrt{E_G kT}}{2} \right)^{2/3} \quad (5)$$

# エネルギー生産の式(4)

で、この時の値は

$$\exp\left(-\frac{3E_0}{kT}\right) \quad (6)$$

になる。ここで、 $E_G$  は  $kT$  よりはるかに大きいので、 $E_0$  も  $kT$  よりかなり大きくなる。

$E_0$  が  $kT$  よりずっと大きいということには、恒星の核融合反応には、エネルギーがマックスウェル・ボルツマン分布の典型的な値よりずっと大きな、非常に少数の原子核だけが関わっている、ということである。

このことから色々重要な帰結がでてくるが、まずその前に核融合反応の紹介。

# 核融合反応

恒星の中で起こる核融合の主要なものは水素原子核4個からヘリウム原子核ができる反応で、 $p-p$  チェインと CNO サイクルが主要な反応である。

- $p-p$  チェインは水素原子核 (陽子) だけがあればできる。陽子2個から重水素、重水素と陽子からヘリウム3ができ、ヘリウム3同士からヘリウム4と陽子2個になる。
- もうちょっと温度が高いとか、ヘリウム4の量が多いとかすると、ヘリウム3と4の融合でベリリウム7ができ、それが電子捕獲でリチウム7になり、さらにリチウムが水素と反応して2つのヘリウム4になる。あるいは、ベリリウム7が陽子捕獲してベリリウム8になり、これが分裂して2つのヘリウム4になる。

# CNO サイクル

星があらかじめ C, N, O 等の元素をもっていると、それらが触媒として働く、要するに  $^{12}\text{C}$  から 3 個陽子を捕獲して  $^{15}\text{N}$  になり、これが陽子と反応して  $^{12}\text{C}$  と  $^4\text{He}$  に戻る反応が起こる。

これを CNO サイクルという。

# 水素燃焼の先

- 水素燃焼は数千万度 (1-2 千万度でも) 起こる。
- 水素がほぼなくなつたあと、恒星の中心の温度が 1 億度程度まであがると、ヘリウム 4 の燃焼が起こる。これは、 $^{12}\text{C}$  と  $^{16}\text{O}$  を作る。
- さらにもっと高温になると、炭素、酸素がそれぞれ核融合を始める。
- さらにもっと高温になると、最終的には  $^{56}\text{Fe}$  まで進む。
- $^{56}\text{Fe}$  は「核子あたりのエネルギー」が最小の原子核で、そこから先はエネルギーが増える (吸熱反応になる) のでここで普通の核融合は終わり。
- 鉄から先は、超新星爆発や中性子星の合体の時にできる。

# エネルギー輸送の式

恒星の中でエネルギーが運ばれる主要なメカニズムは輻射と対流である。まず輻射について。

表面近くを別にすると、星は「光学的に厚い」つまり、光学的厚さが1よりはるかに大きい。この時、光子は拡散的に振舞う。つまり、多数の原子核とぶつかってランダムウォークをしている。

## エネルギー輸送の式 (2)

このため、輻射によるエネルギー輸送は熱伝導と同様、温度勾配に比例して

$$L_r = -4\pi r^2 \left( \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \right) \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

となる。ここで、 $L_r$  は半径方向のエネルギー流速、 $a$  は輻射定数 (既にでてきた)、 $c$  は光速、 $\kappa$  は吸収係数である。

本当は光子のエネルギーには波長方向の分布があって吸収係数も波長依存性がある。ここでの $\kappa$  は波長方向の平均 (ロスランド平均という特別なもの) をとったものである。

# 普通の熱伝導と同じ？

といったけどなんか式は変ではないか？単純な熱伝導なら、何か熱伝導の係数  $C$  があって

$$L_r = -4\pi r^2 C \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

となる。なので、輻射輸送の式は

$$C = \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \quad (9)$$

となっていることを意味する。なぜそうなるかを簡単に説明しておく。

# 輻射輸送の係数の意味

$c$  は光速である。熱流が光速に比例するのは、動いている光子が熱を運ぶのでそういうことになる。

$4aT^3$  は、輻射の体積あたりのエネルギーが  $4aT^4$  であることからくる。普通の熱伝導ではエネルギーは  $T$  に比例するだけなので、輻射のエネルギーは  $T^3$  に比例して普通の熱エネルギーより大きい。

$\kappa\rho$  は光子の吸収されやすさなので、小さいと光子が遠くまで物質とぶつかることなく飛ぶ。このため、小さいと流れる熱は大きくなる。

(ここは本当はもうちょっと定量的に議論するべきだが、べき指数はこれで正しい)

# 対流

- 普通の気体や液体では、下から上にエネルギーを運ぶ主要なメカニズムは対流である。
- 粘性が大きくない対流では、温度・密度構造は断熱的 (等エントロピー的) になる
- これは、対流に対して、断熱温度勾配は中立安定であるため。断熱温度勾配より小さい勾配であれば対流は起きない。
- 星のある程度温度が高いところでは、輻射によるエネルギー輸送が非常に効率的になるため、対流が起こらない。
- 極度に小さい星を除いては、星の (質量で) 大部分は輻射でエネルギーが輸送される。

## 対流 (2)

- 前回話をした林フェーズでは全体が対流的。これは温度が低いから。
- CNO サイクルになると、中心付近の一部が対流的になる
- 外側のちょっとは必ず対流的になるが、星の構造・光度には (林フェーズや巨星段階以外は) あまり影響がない。

# 星の内部構造・進化の方程式のまとめ

まとめると、エネルギー生産以外は、対流がおこっているところを無視すると

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \quad (11)$$

$$p = \frac{\rho k T}{\mu m_H} + \frac{a T^4}{3} \quad (12)$$

$$L_r = -4\pi r^2 \left( \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \right) \frac{dT}{dr} \quad (13)$$

# 星の内部構造・進化の方程式のまとめ(2)

状態方程式は、非常に大質量の星以外では輻射圧優勢にはならない。

エネルギー生産は、「温度に敏感にエネルギー生産が変わる」という性質のため、近似的には、星の中心温度は1-2千万度で、外側に流れるのに必要なだけのエネルギーが生産される、と考えてよい。

# 恒星の質量-光度関係

ここまでの議論から、星の質量と明るさの間関係を導くことができる。以下その議論をする。

まず、星の中心温度は質量によらずに一定とする。これは厳密に正しいわけではないが、上でみたようにまあそんなに大きくは違わない。ある質量  $M$  の星の密度分布が

$$\rho = \rho_0 f(r/r_0) \quad (14)$$

で与えられたとしよう。これは、この関数と、それに対応した質量分布、圧力、温度で、熱流  $L_r$  が半径によらず一定になる、ということである。

## 恒星の質量-光度関係 (2)

さて、そうになっていると、密度や半径を適当にスケールした、

$$\rho = \rho_1 f(r/r_1) \quad (15)$$

も、熱流が一定になる、という意味で解にはなっている。

但し、 $\rho_1/\rho_0$  と  $r_1/r_0$  の間に何か関係をつけないと、中心温度が変わってしまい、条件としてつけた中心温度一定をみたさない。

## 恒星の質量-光度関係 (2)

例えば、星の半径を  $a$  倍にしてみよう。これは、 $r_1/r_0 = a$  ということである。この時に、中心密度が  $x$  倍になったとする。星の質量は  $a^3x$  倍であり、圧力勾配は同じ相対位置のところで  $r^2$  の分が  $a^{-2}$ 、質量は  $a^3x$ 、密度は  $x$  倍なので  $ax^2$  倍となり、圧力自体は2倍外側から積分してくるので  $a^2x^2$  となる。つまり、温度は、状態方程式から  $a^2x$  倍である。

つまり、温度一定であるためには、 $a^2x = 1$  でなければならないことがわかる。つまり、

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2 \quad (16)$$

# 質量と半径

星の総質量は  $\rho_1 r_1^3$  に比例して、 $\rho_1$  は  $r_1^{-2}$  に比例するので、結局、質量が半径に比例する非常に簡単な関係

$$M \propto R \quad (17)$$

が導かれる。ここで、 $M$ ,  $R$  は星の総質量と半径である。

# 質量・半径と光度

では  $L_r$  はどうなるかである。同じように半径を  $a$  倍にすることを考える。同じ相対位置で、 $r^2$  から  $a^2$ 、 $1/\rho$ 、 $1/\kappa$  からそれぞれやはり  $a^2$  がでてきて、 $dT/dr$  から  $1/a$  がでてくるので、結局

$$L \propto a^5 \propto M^5 \quad (18)$$

つまり、星の明るさは質量の5乗に比例する、ということがわかる。

( $\kappa$  が  $\rho$  に比例するのは比較的低温)

# 光度と表面温度

表面温度がどうなるかを考える。ここまでの議論は、実はエネルギー輸送については、「表面で温度 0」という境界条件を仮定して解を求めたことに相当しているが、実際には太陽を見ればわかる通り有限の温度を持つ。

この温度は、ほぼ全体が輻射でエネルギーが流れている星については、表面から輻射でていくエネルギーが内部での熱流と等しい、という条件で決まる。これはシュテファン・ボルツマン則から

$$L \propto 4\pi R^2 T_s^4 \quad (19)$$

なので

$$T_s \propto M^{3/4} \quad (20)$$

である。

# 大質量星

星の質量が太陽あたりだとここまでの議論はそれほど悪くないが、もっと大きな星では、密度が非常に低くなるために輻射輸送に効くのが主に電子になり、この時は  $\kappa$  は  $\rho$  に依存しない。この領域では、ここまでの議論と同様にして

$$L \propto M^3 \quad (21)$$

になる。さらに大質量では、輻射圧が圧力の主体になる。この領域では、温度と圧力の両方が一定で、議論を省略するが、

$$L \propto M \quad (22)$$

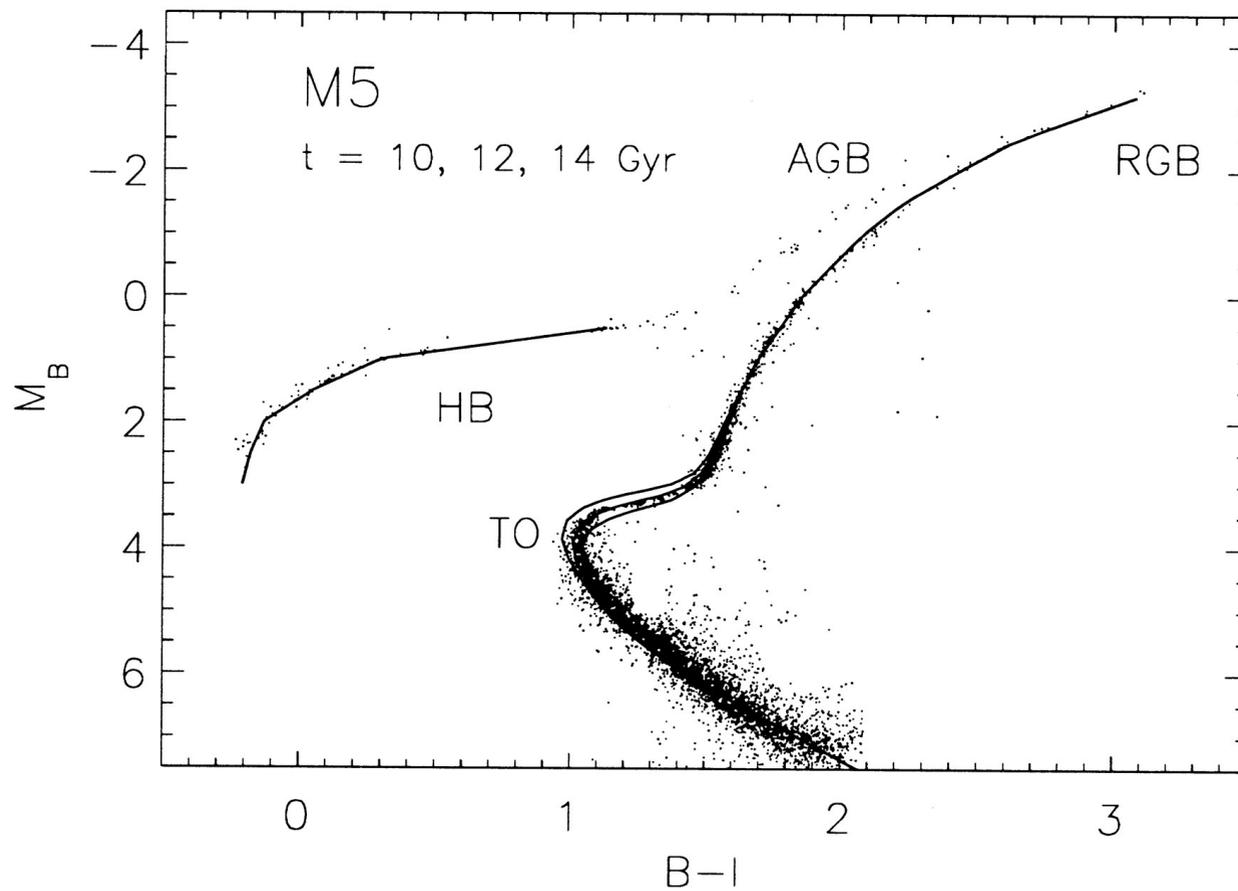
が導かれる。

# 色-光度関係、ないし HR 図

ここまでの議論から、恒星の表面温度 (実際には「表面」ではないので、「有効温度」という) と星の明るさの間には関係があり、(超大質量星を除いて) 明るいほうが温度が高いことがわかった。

これを天文学の言葉でいうと、「絶対等級で明るい星は青い」ということになる。この関係をプロットしたのが HR 図 (最近の論文では色-等級図、CMD ということが多い) である。

# CMDの例



(球状星団の例なのでちょっと特殊)

# 主系列星

星が水素燃焼を始めて時間が立つと、段々中心の水素がなくなってくる。しかし、前に述べたように、核融合反応は温度に敏感なので、水素がほとんどなくなっても温度を少しあげれば最初と同じだけエネルギーを供給できる。

このため、水素燃焼が続いている間、CMD 上で恒星はほとんど同じ位置にあり、その位置はほぼ質量だけで決まる (星が持つ金属量でもちろん少し変わる)。

この、水素燃焼段階にある星を主系列星といい、CMD 上で主系列星が作るシーケンスを主系列という。

ある質量の星が主系列にいる時間は、理論とシミュレーションでかなり精密に決まる。

# 主系列の後の進化

ここから先は概ね「お話」である。

- 2 太陽質量以下の星
- 2-8 太陽質量の星
- 8-20 太陽質量の星
- 20 太陽質量以上の星

## 2 太陽質量以下の星

- 中心で水素がなくなっていて、ヘリウムコアができる。そのあとしばらく、水素殻燃焼という、ヘリウムコアと周りの水素外層の境界面の水素が燃えるフェーズがあり、ヘリウムコアが成長して温度・密度があがるとヘリウム燃焼が始まる
- この段階では星は赤色巨星になっている。なぜ水素外層が膨らむかは、、、
- ヘリウム燃焼が終わると今度はヘリウム殻燃焼が始まる。この時、水素殻燃焼もおきるが、安定ではなく発生したり止まったりする。この段階を AGB (漸近巨星分枝) 星という。

- ヘリウム殻燃焼が終わると核融合はそこから先には進めないなので、C+O 白色矮星になる。

## 2-8 太陽質量の星

- ヘリウムコアの性質が2太陽質量以下の場合とは色々違うが、起こることは本質的には変わらない。

## 8-20 太陽質量の星

- C+O の先にどんどん核融合が進み、核子あたりのエネルギーが最も小さい鉄までいく。最後のほうはニュートリノ損失が大きいため、非常に短時間で進む。
- 鉄コアから収縮して温度があがると、鉄がヘリウム・陽子・中性子等に分解する(鉄の光分解)。この結果鉄コアは重力崩壊し、中心の一部は中性子星になり、残りは吹き飛ばされる(と考えられている)これがII型超新星である。
- 何故重力崩壊が大部分の質量を吹き飛ばす結果になるかは、大規模なシミュレーションで盛んに研究されているがまだ決着がついていない。言い換えると、シミュレーションではまだ超新星爆発が起こっていない。

## 20 太陽質量以上の星

- 8-20 太陽質量の星と同様、II型超新星を起こして終わると考えられている。
- 但し、最終的に残るのは中性子星ではなくブラックホールであると考えられている。
- 星の初期質量・金属量と、最終的なブラックホール質量、吹き飛ばされるものの元素組成等の関係は宇宙物理としては極めて重要な問題だが、まだよくわかっているとはいえない(理論計算の予言に不定性がある)

# 白色矮星

- 白色矮星は「電子の縮退圧」で支えられている。太陽質量で半径1万km くらい。
- 限界質量がある (チャンドラセカール限界)。1.46 太陽質量以上は存在できない。
- 質量が大きいほうが半径小さい
- I型 (Ia型) 超新星は、白色矮星同士の合体、ないしは白色矮星への伴星からの質量降着で、チャンドラセカール限界を超えて炭素の暴走的核燃焼が起こったものと考えられている。
- これもまだシミュレーションで爆発するかというと難しいようである。

# 中性子星

- 中性子の縮退圧で支えられている。太陽質量くらいで半径 10km くらい。
- 限界質量があるはずだが正確にはわかっていない。2 太陽質量以上。
- 見つかっている中性子星は基本的に電波パルサーか X 線天体 (X 線連星)
- 中性子星同士の連星の合体が重力波源として期待されている。その可能性が高いものが GW20170817 として観測された。

# ブラックホール

- 物質の縮退圧等では支えられなくなって事象の地平線の向こう側にいってしまったもの。
- これまで観測されていたのは X 線天体
- ブラックホール同士の合体からの重力波が観測された。

# 星の構造・進化のまとめ

- 星の構造・進化は天文学・天体物理学の中で例外的に「良くわかっている」
- 質量・金属量を定めれば進化は大体計算できる。また、計算しなくても主系列での明るさとか寿命はスケールングからわかる。
- スケールングは、本質的に、核融合の温度依存性が非常に大きいため、星の中心温度は星の質量等によらないことによる。
- この結果、広い質量範囲で星の半径は (ほぼ) 質量に比例する
- 主系列の後の進化は質量によって色々である

# 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

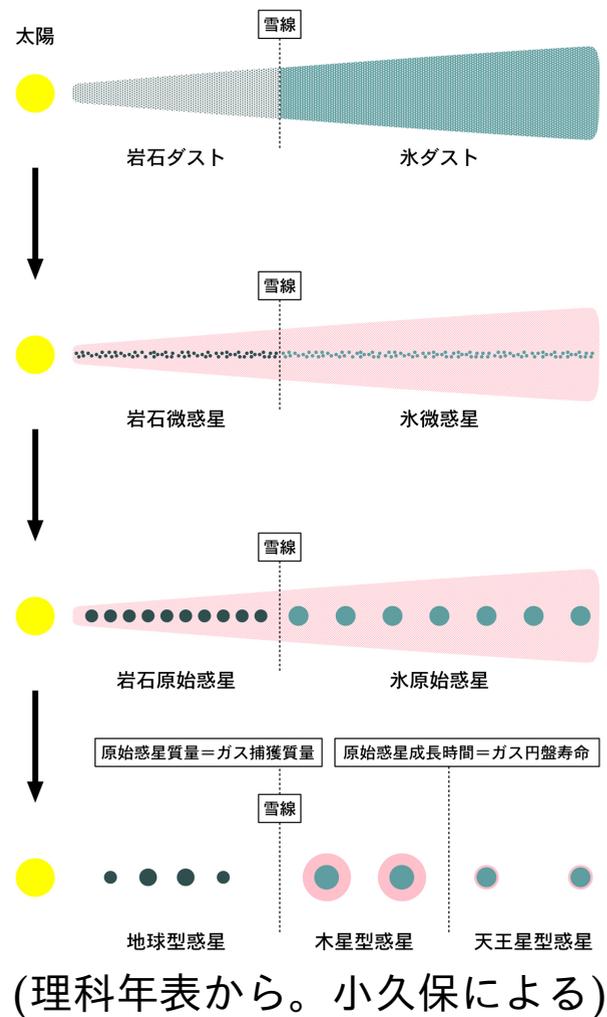
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

# 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
- 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

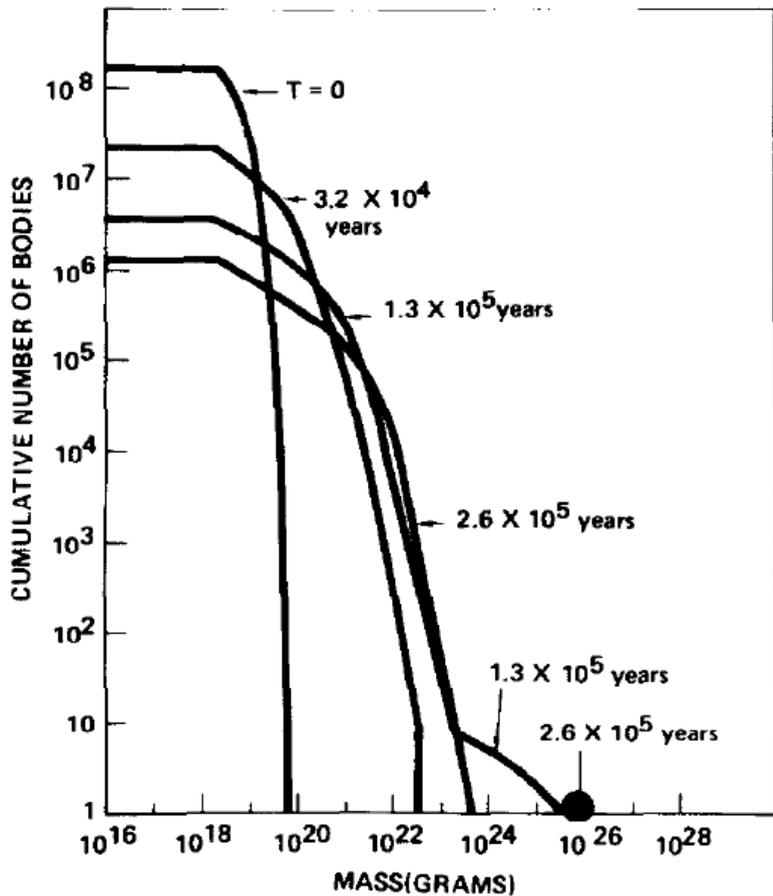
## 暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- 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

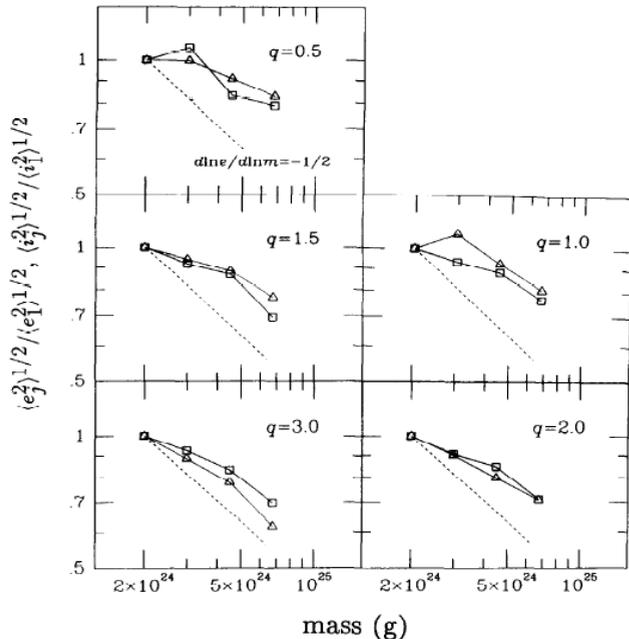
# Wetherill and Stewart 1989



- 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、、、)

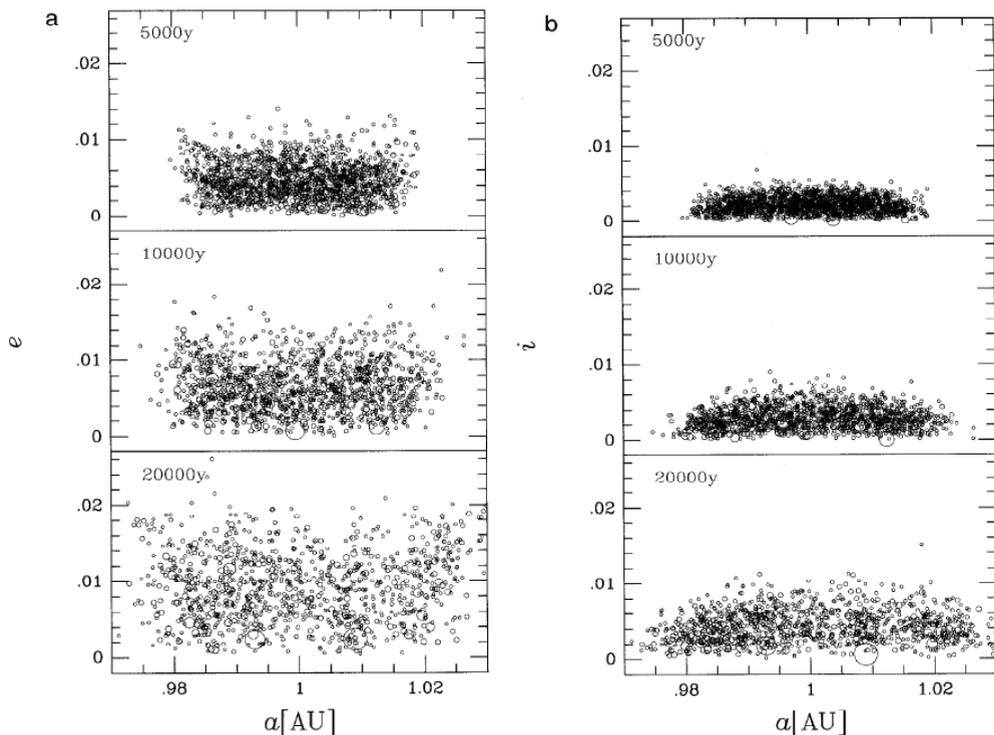


- (1992a) 単一質量での速度分散の時間進化を  $N$  体計算
- (1992b) 複数質量での速度分散の質量依存性を計算
- 重いものが速度分散小さくなることを確認

(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)

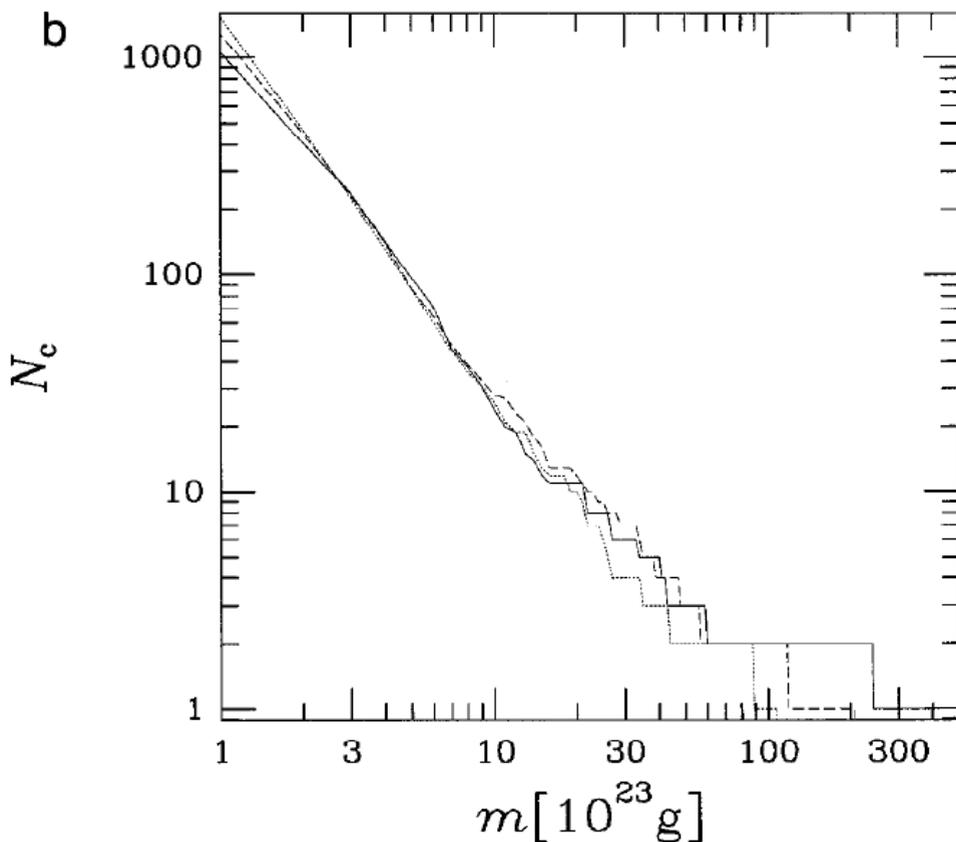
実は実際の合体・成長過程を  $N$  体計算で調べてはいない

# Kokubo and Ida 1996



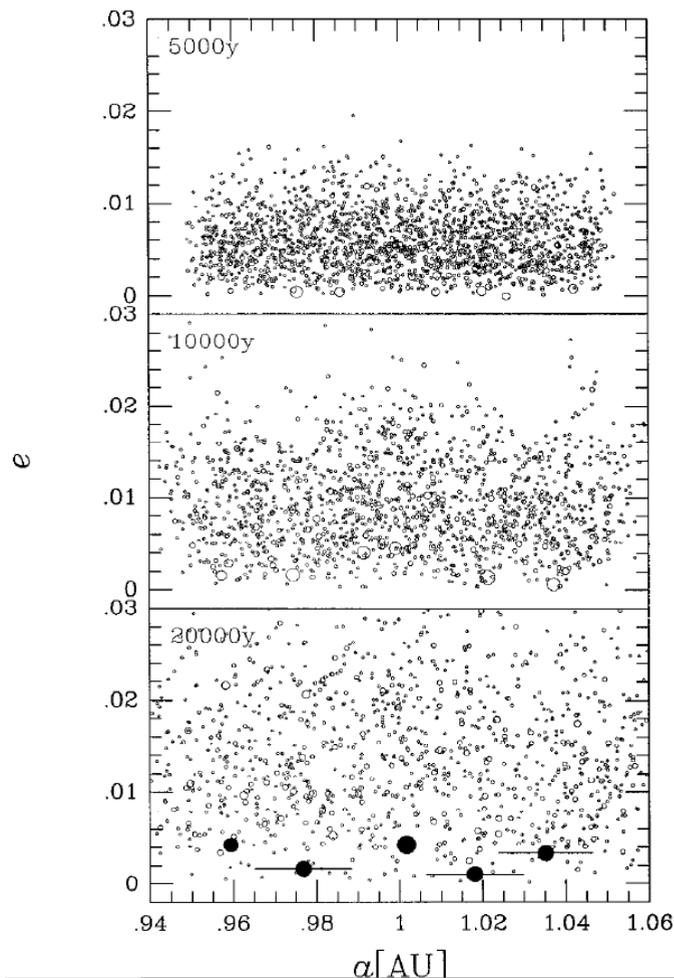
- 細いリング状領域の  $N$  体計算、衝突・合体も扱う
- 衝突の時間スケールは惑星大きくして短く
- 暴的成長が起きることを確認

# 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  $N$  体計算はいくつがある
- 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

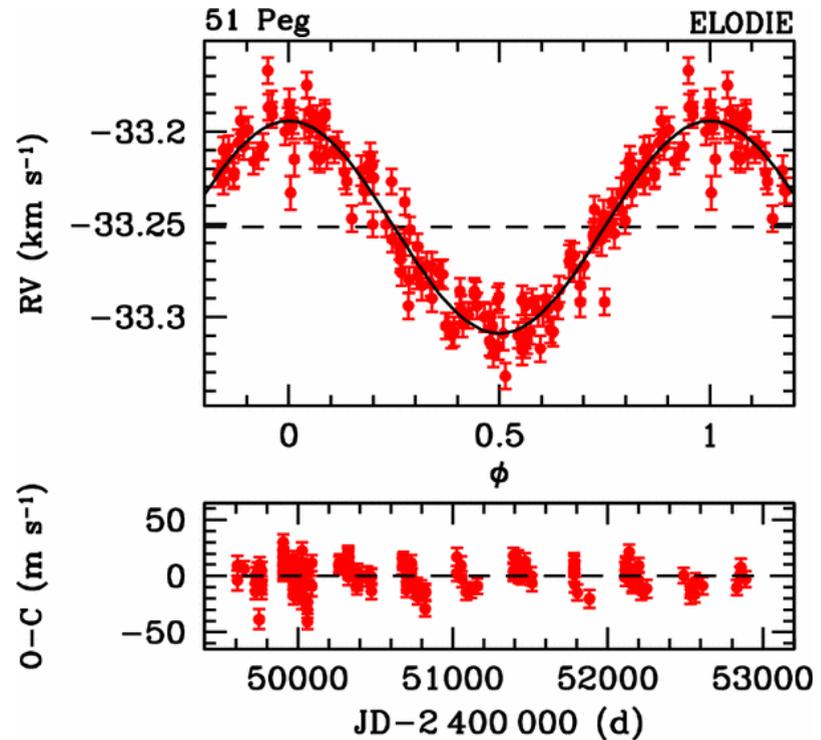
# 発見以前

- 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」

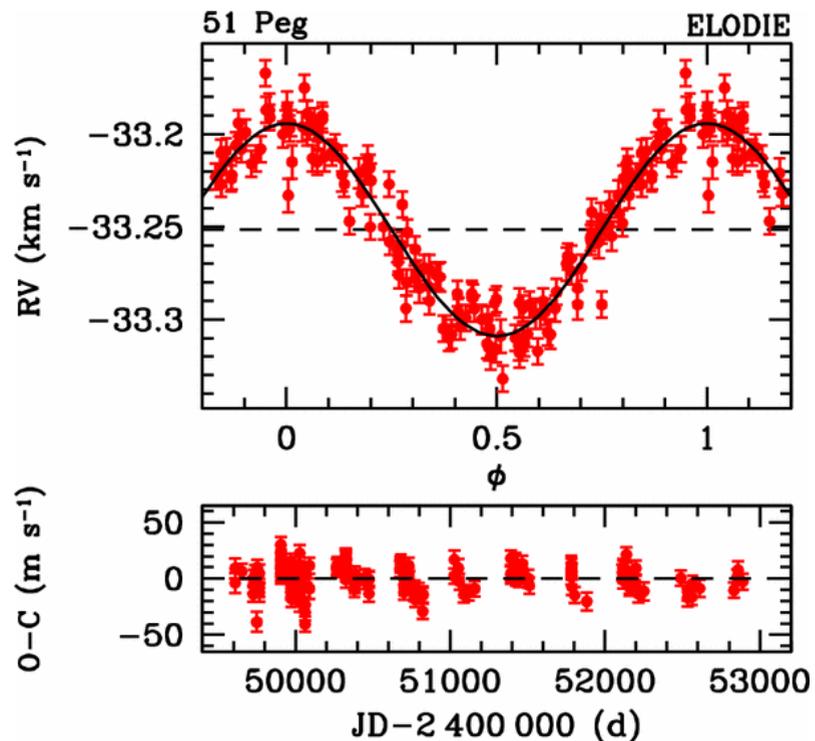
# 発見

- 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

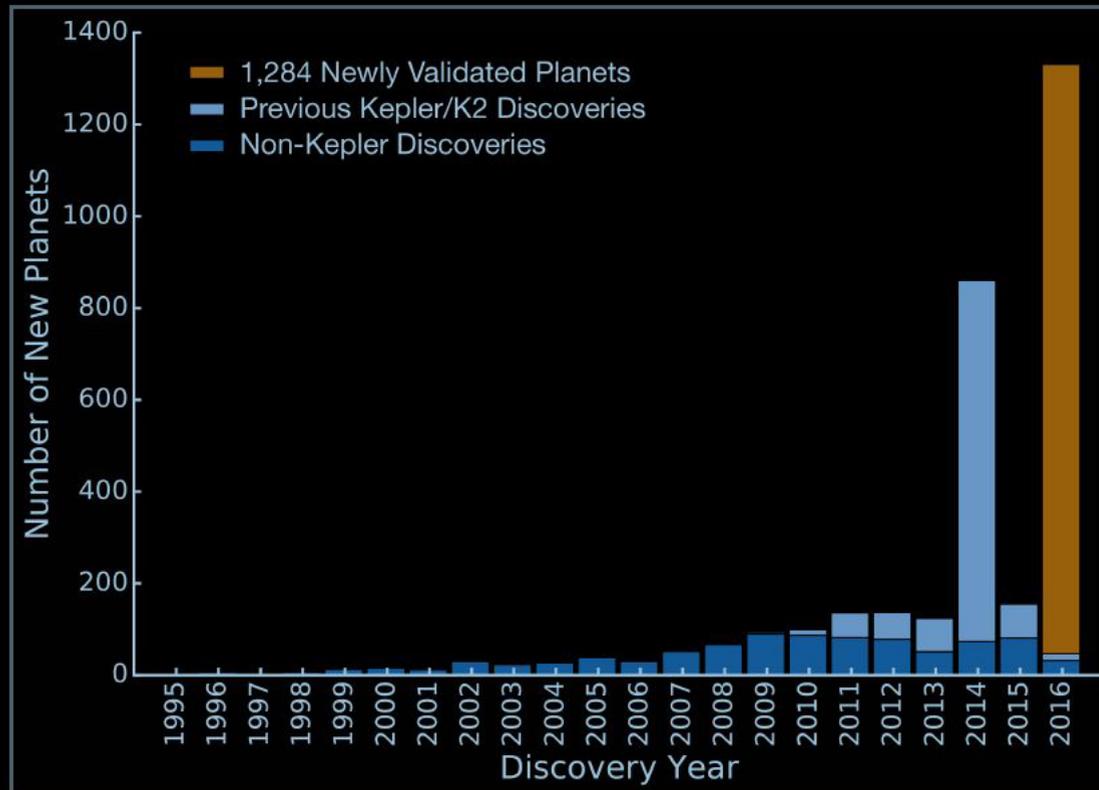
「木星は遠くにしかできない」という「理論」もあった、、、

(全く余談: Marcy は昨年、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

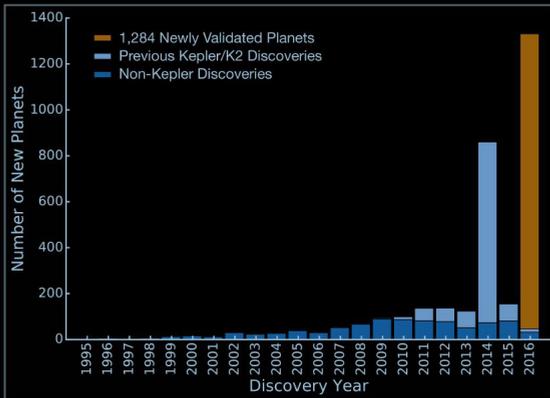
*As of May 10, 2016*



# 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

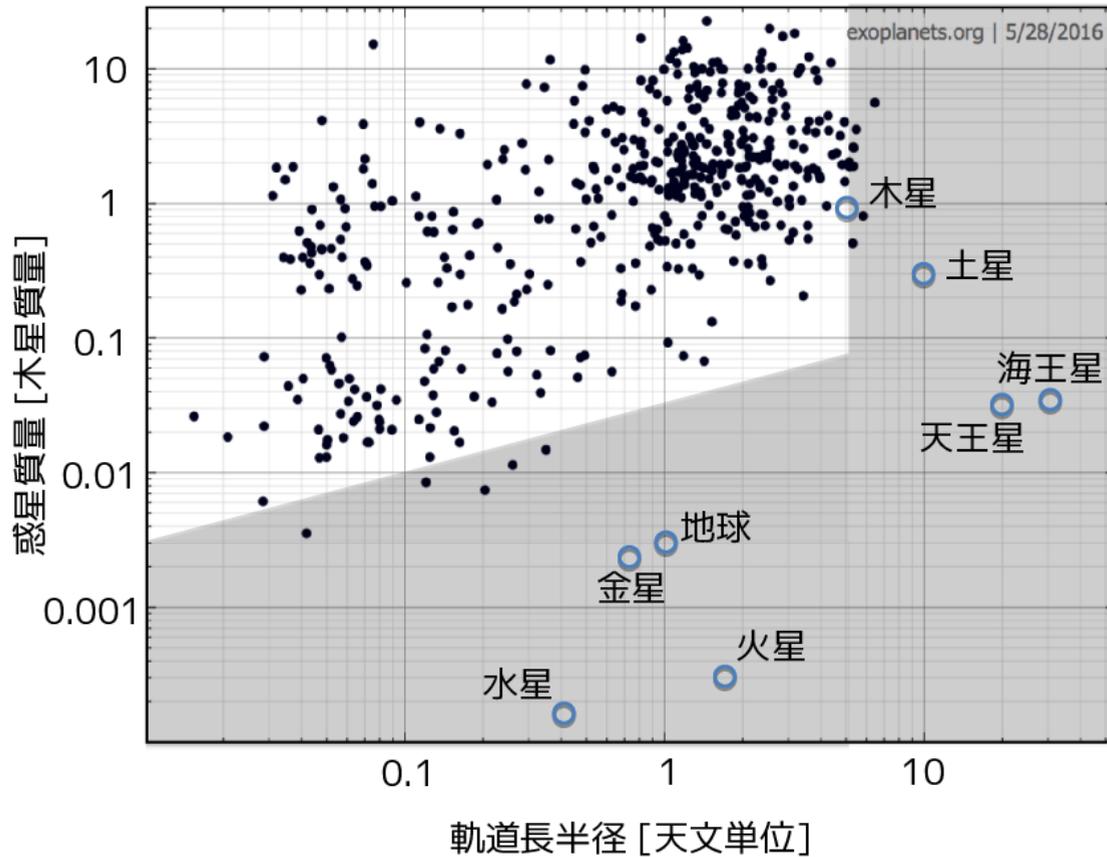
- 視線速度法
- トランジット法
- 直接撮像
- 重力レンズ

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

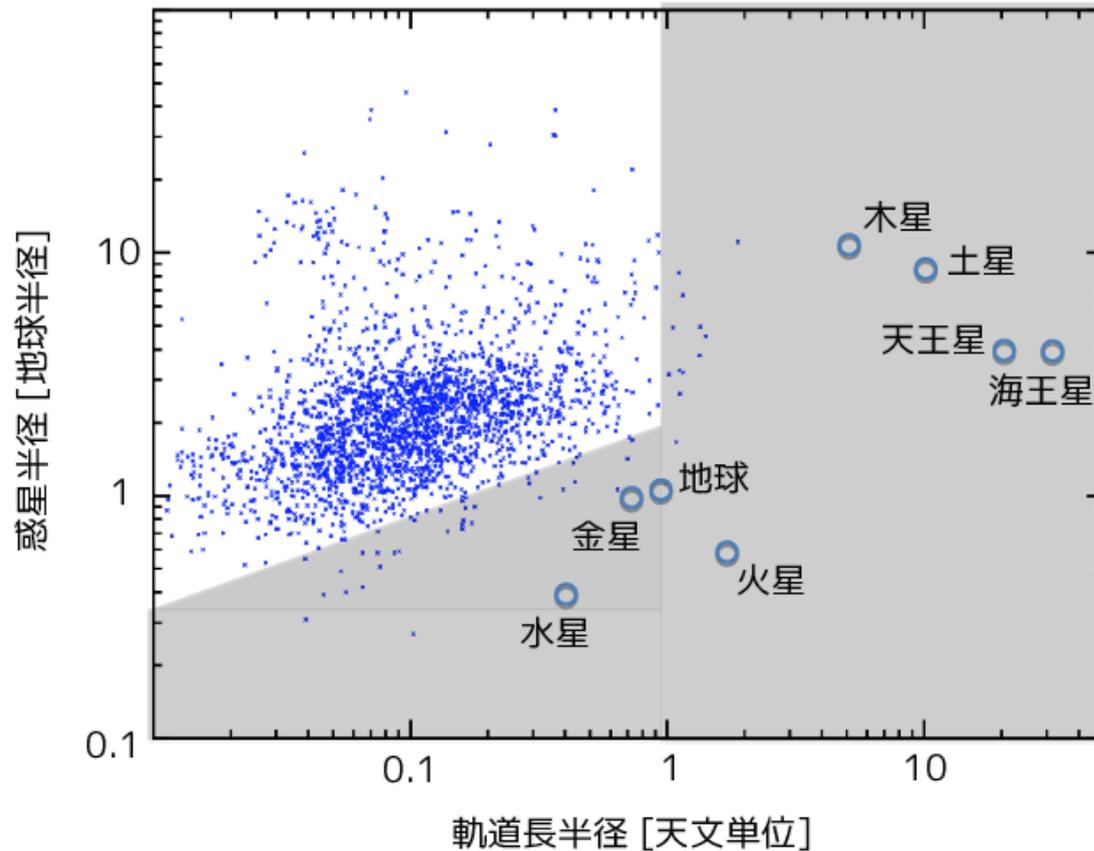
- 多様な系外惑星
- 理解、、、
- 今後の発展

# 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、、、