

惑星学要論  
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

# 講義概要

1. ビッグバン宇宙論: 1.5 コマ分くらい
2. 天体形成 (主に銀河): 2.5 コマ分くらい
3. 星・惑星形成: 1 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
- 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

# 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

- 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。

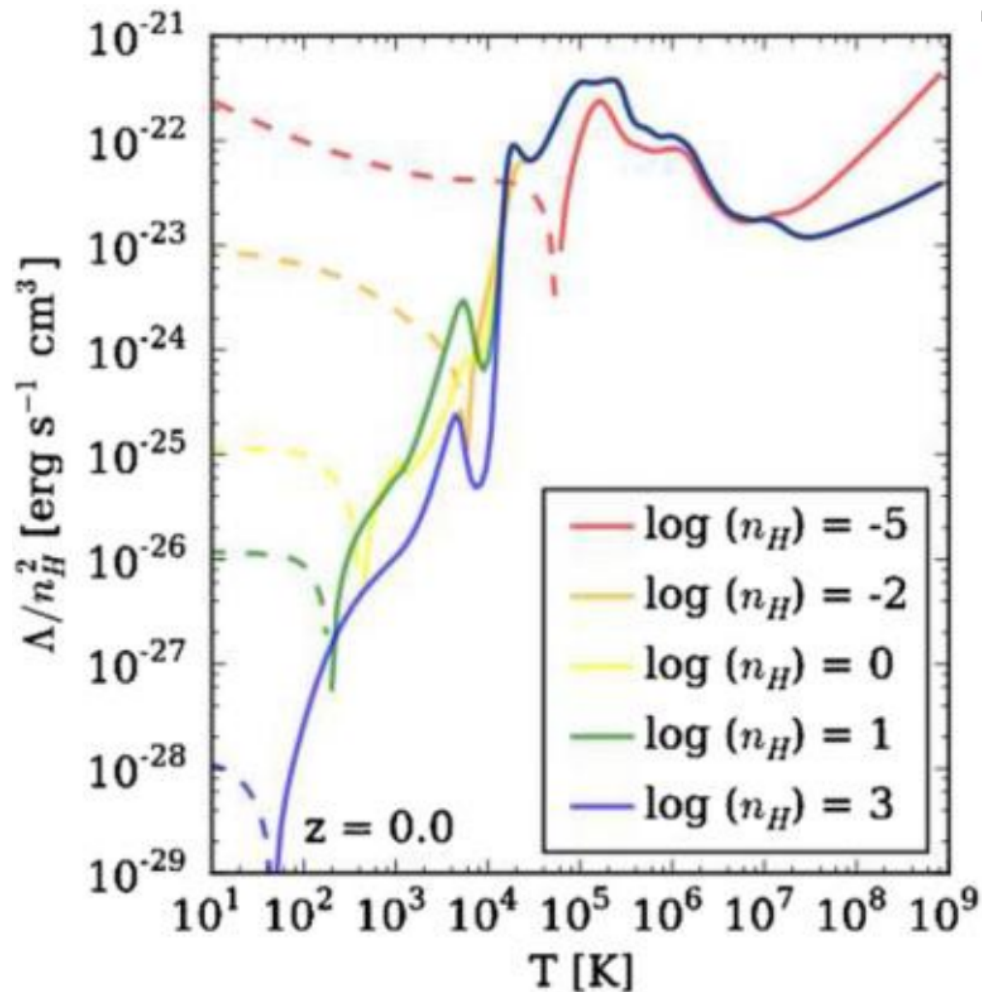


# 銀河形成の理論の側からみた星形成

- 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



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

# 「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

(井上・犬塚 2008 の解説記事等)

# 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っていい。
- 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

# 初期条件が多少わかっている星

- 銀河形成の話で多少ごまかしたところ:星はいつで始め  
るのか
- 「初代星」の問題
- 15年くらい前から理論的(計算機シミュレーションを使っ  
たものも)研究が盛んになってきた。
  - 初期条件が大体わかってきた
  - かなり早い時期に星はでき始めていないといけないと  
いう観測的要請: 宇宙の再電離

# 宇宙の再電離

- 「再」(何故「再」なのか今一つわからないが) 結合: ビッグバンから宇宙膨張が進んで、バリオンが主に陽子になったあと、さらに膨張が進み、温度が  $10^4$  度くらい(もうちょっと正確にいうと  $3000\text{K}$  くらい)になると陽子と電子が結合、中性の水素原子に
- 光子とほとんど相互作用しなくなる。「宇宙の晴れあがり」。マイクロ波背景放射が見える理由。
- ちなみに:この時の「赤方変移」 $z$ は大体 1000 くらい。

ところが:

観測的には、 $z$  が 10-20 のどこかで宇宙が再電離したとわかってきた。



# 宇宙の再電離

## 観測的な証拠

- 昔からわかっていたこと:ガン・ピータースン・テスト。  
遠方のクェーサーからの光のライマン $\alpha$ 輝線を観測すると、「比較的波長の短いところだけ」吸収されている
- 中性水素が、 $z = 5.5$  くらいでなくなって、宇宙のガスはプラズマにもどったということ。
- もうちょっと精密な議論がマイクロ波背景放射の偏光観測から。(私はよくわかってないので追求しないで)
- これだと、 $z = 14$  くらいから始まって $z = 6 \sim 8$  あたりで終わる？

# 宇宙の再電離

なにが再電離を引き起こすか: UV(紫外線)光子が必要。水素原子のイオン化エネルギーを供給する必要がある。何度もでてくるが1万度くらいの熱輻射に相当

問題:何がUV光子を供給するか。候補

- クェーサー (活動銀河核含む)
- 初代星

# クエーサーって？

- 「準星」最初に見つけた時はなんだかわかってなかった
- 水素の輝線から、「大きく赤方変移している」＝「非常に遠くにある」とわかった
- 遠方の銀河の中心にある超巨大ブラックホールが明るく光っているもの

# 遠方の銀河とクエーサー

観測的にもっとも遠くの銀河とクエーサーは、、、

- 銀河: 赤方変移 11.1、ビッグバンから4億年後

## Hubble Team Breaks Cosmic Distance Record

”The combination of Hubble’s and Spitzer’s imaging reveals that GN-z11 is 25 times smaller than the Milky Way and has just one percent of our galaxy’s mass in stars. However, the newborn GN-z11 is growing fast, forming stars at a rate about 20 times greater than our galaxy does today. This makes such an extremely remote galaxy bright enough for astronomers to find and perform detailed observations with both Hubble and Spitzer.”

- クエーサー:  $z = 7.1$ , ビッグバンから8億年

# とはいえ

- クェーサーは銀河より数桁少ないので、「見つかっていない」だけかも
- クェーサーはブラックホール (の降着円盤等) が光っているので、ビッグバンから数億年でどうやってそんな大きなブラックホール作れるの？という議論はある
- でも、銀河があるくらいだからどうにでもなるかもしれない

# クェーサーと初代星

- 初代星は (次に述べるように) 銀河・クェーサーより (平均的には) 先にできる
- が、確率的な話なので非常に早くできる銀河もある。クェーサー (ブラックホール) もできるかも (色々シミュレーションや議論はある)
- 現在のところ、どちらか再電離に寄与したかはよくわかっていない (どちらもそれなりに的的な話になっている)

# 初代星の形成

- 現在のところ、一般的理解：「初代星」はどうやってできたと考えられているか：
  - ダークマターハローは、非常に質量が小さいもの同士の合体で成長していく。(地球質量くらいから？これはダークマター粒子の正体、質量で変わる)
  - バリオンは太陽質量の10万倍程度のダークハローができて初めて重力収縮を始める(と考えられている)。それより小さいスケールのバリオンの密度ゆらぎは光子との相互作用でならされるため。
  - ダークマターハローの中心に、太陽質量の数十から数百倍の星ができる

# 初代星の形成—シミュレーション

- 15年くらい前から精力的にシミュレーション研究がされてきた
- 当初は、ハローの中心に一つ星ができるという「シミュレーション結果」だった
- 最近では2つに分裂するとかいや小さいのが沢山できるとか色々なシミュレーション結果があって混乱中
- 初期条件の(理論的な)違いではなくて、計算手法や「問題ない」としているはずの簡略化、計算精度等の影響



# 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。

# 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

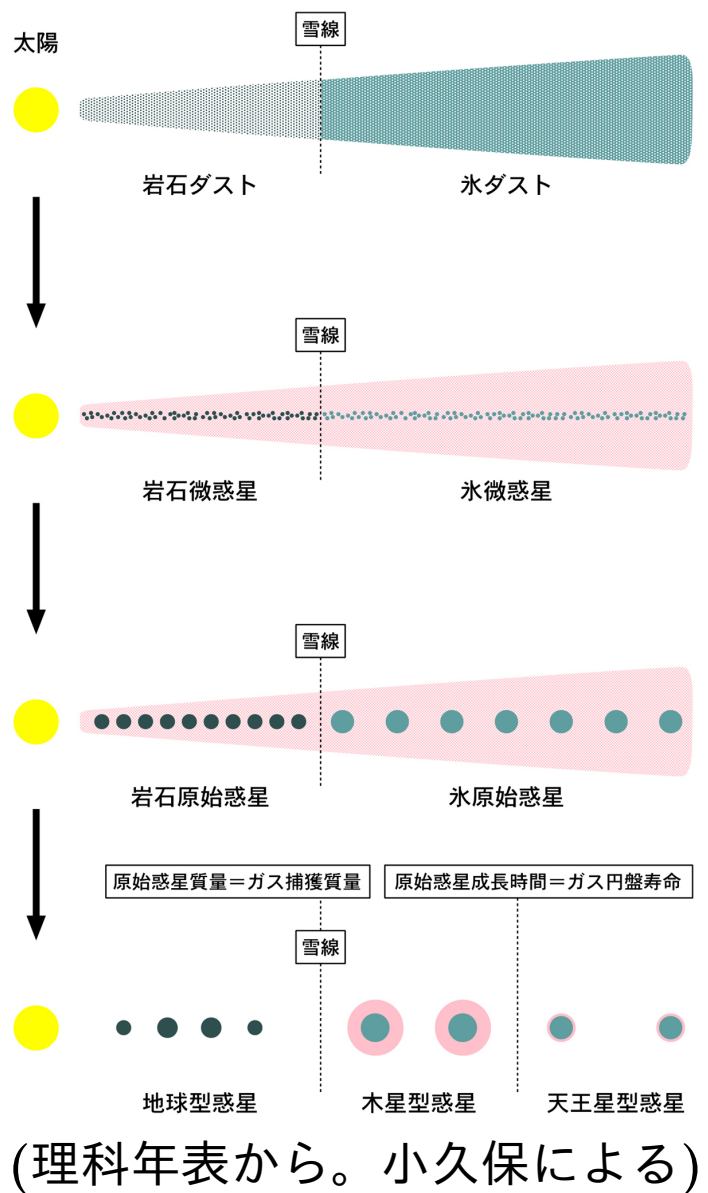
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

# 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。(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

# 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

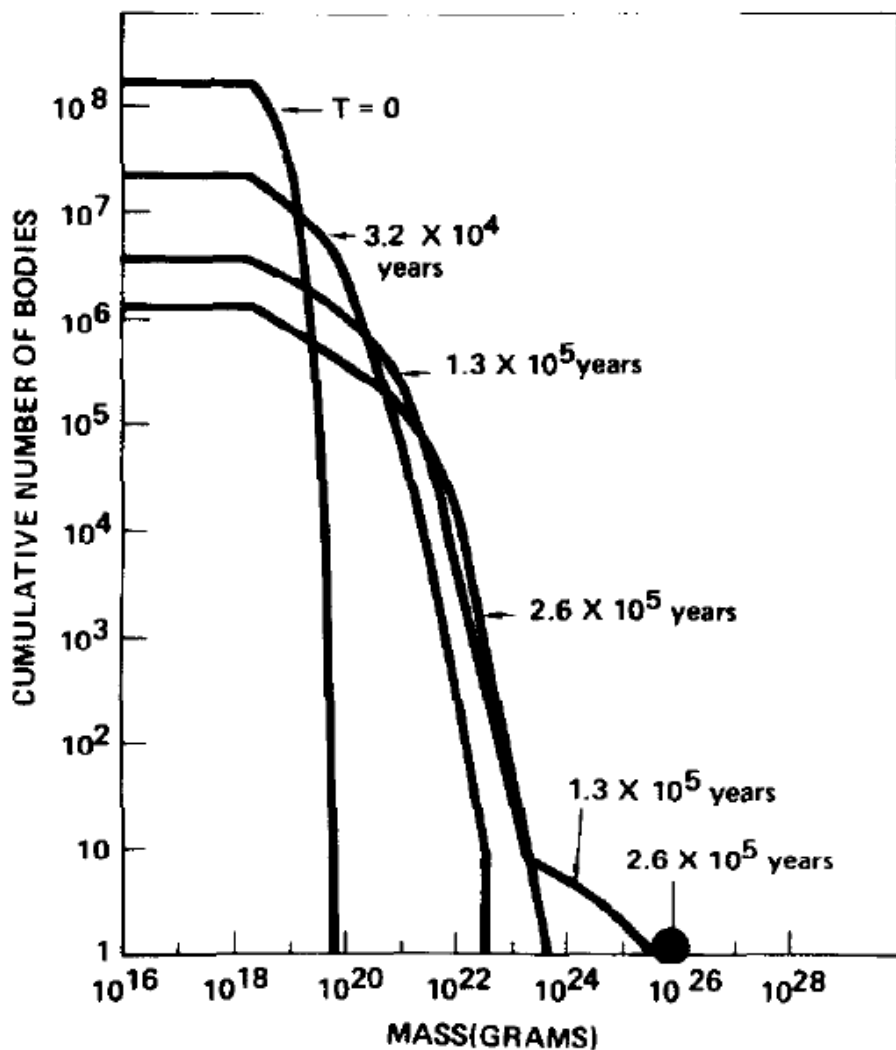
## 暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- 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

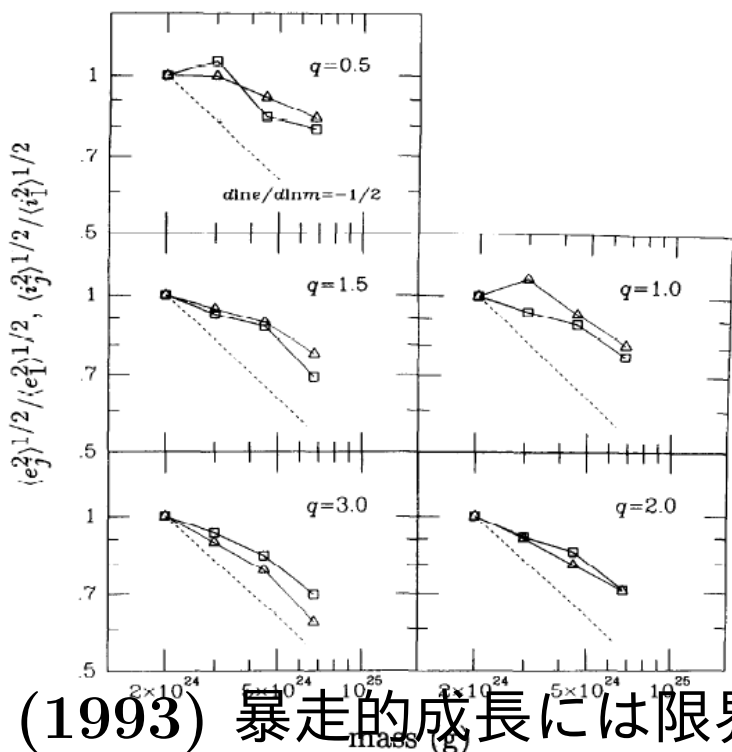


- 微惑星の質量分布の時間変化をモンテカルロ計算
- 衝突・合体の効果、速度分散等はモデル
- 水平方向空間分布は「一様」
- 最初深いべき ( $-2.5$  乗くらい)の質量分布ができて、そこからさらに重いものができる



# 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、、、)



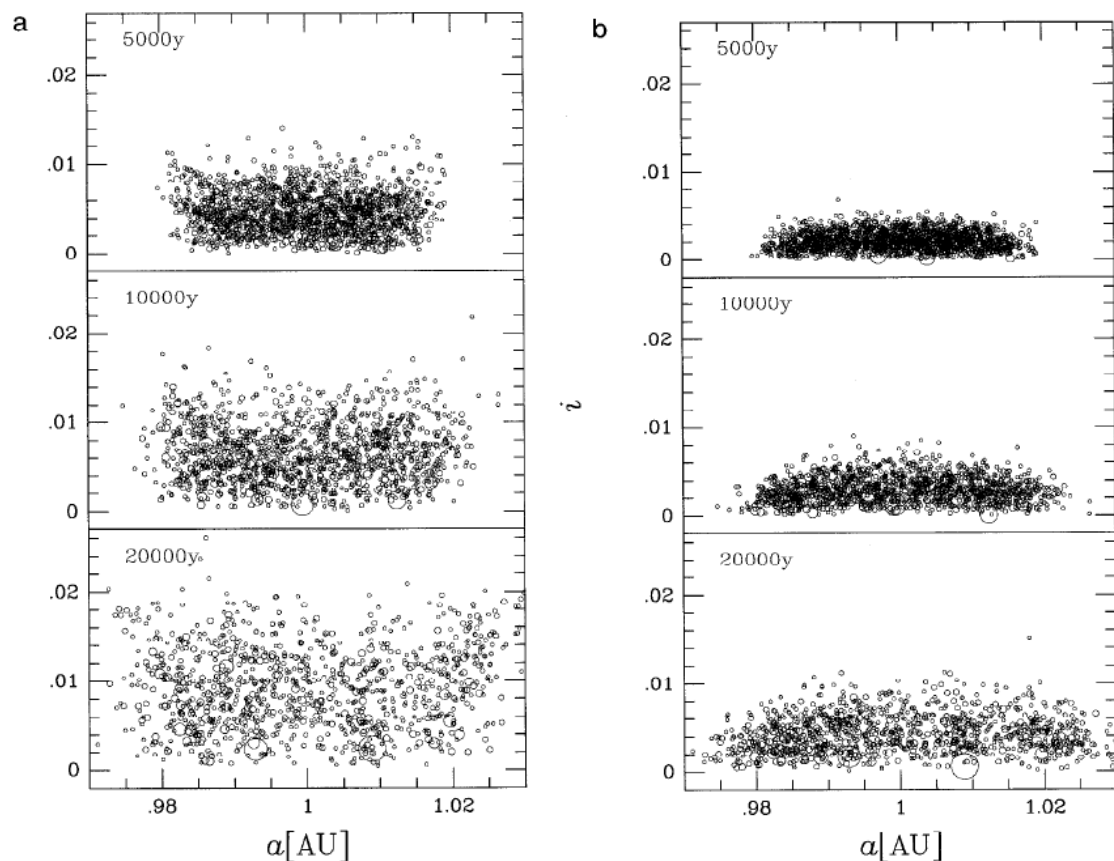
- (1992a) 単一質量での速度分散の時間進化を  $N$  体計算
- (1992b) 複数質量での速度分散の質量依存性を計算
- 重いものが速度分散小さくなることを確認

(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)

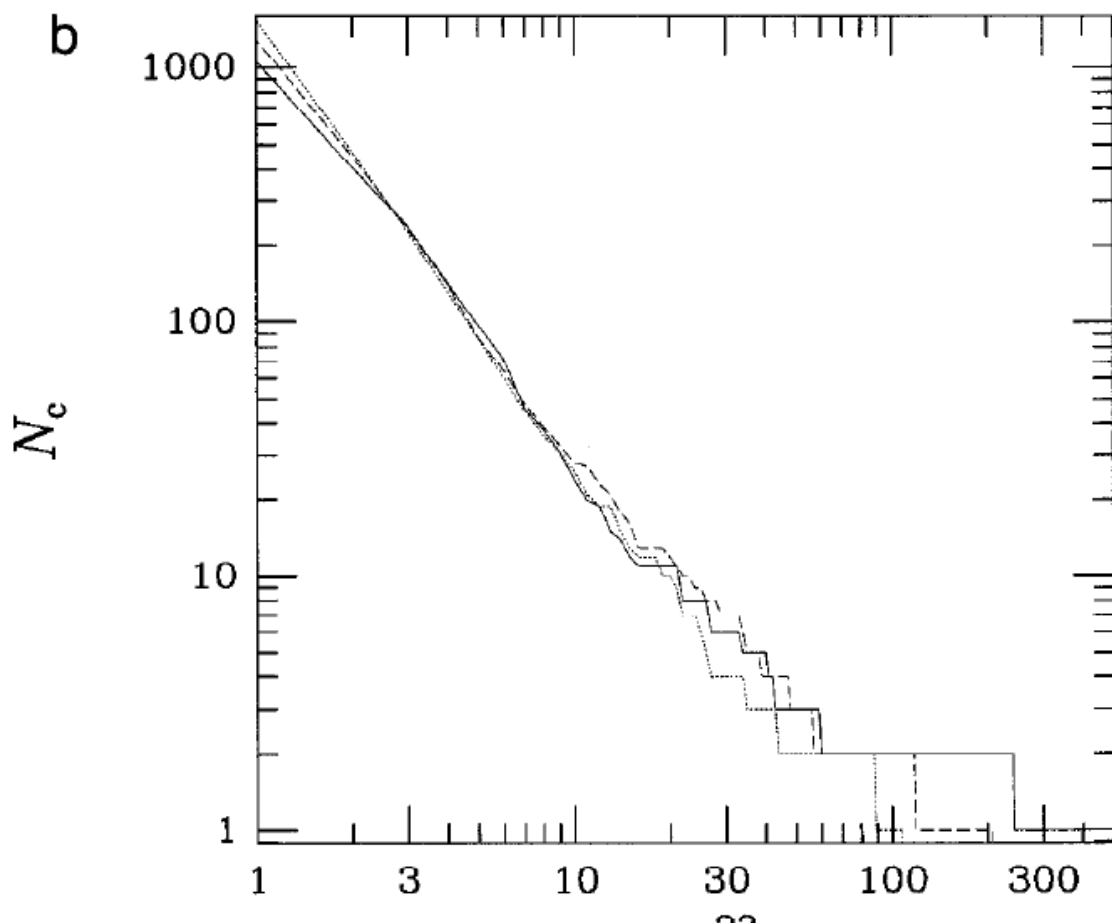
実は実際の合体・成長過程を  $N$  体計算で調べてはいない

# 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

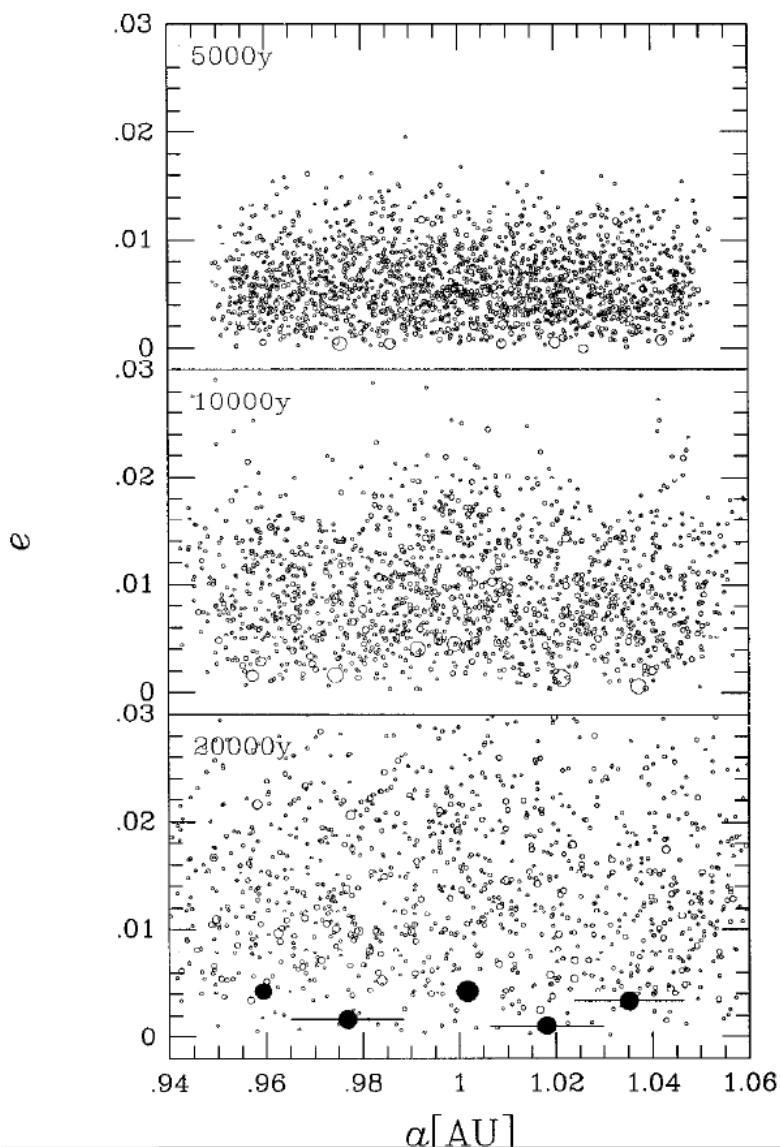


# 累積質量分布



- 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)
- 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いなかった

# 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じゃない
- 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？

# レポート課題

以下について A4 で 1 ページ程度にまとめること (長くなる分は OK です)

1. ジーンズ不安定の分散関係の導出、または不安定性限界の「直観的」説明 (オーダー評価として正しい結果を与えるもの)
2. この講義についての意見、扱うべき / 不要なテーマは何かとか、単なる感想とか、なんでも。

提出先: (メールで) `jmakino -at- people.kobe-u.ac.jp`

サブジェクト: 惑星学要論レポート

〆切: 4/28

レポートは PDF ファイルで提出して下さい。メール本文に

・ 名前 ・ 学生番号

を書くようにして下さい。