

シミュレーションによる宇宙物理 —「京」、「富岳」、さらにその先へ

牧野淳一郎

神戸大学 惑星学専攻

日本物理学会大阪支部 **2020** 年度 公開シンポジウム「**AI**で切り拓く物理の世界」 **2020/12/19**

今日の話の順番

- 宇宙について、我々はどれくらい「わかって」いるか
 - － 宇宙全体
 - － 銀河
 - － 星
 - － 惑星
- 計算機の進歩と今後の方向

宇宙について、我々はどれくらい「わかって」いるか

- 宇宙全体
- 銀河
- 星
- 惑星

宇宙全体

- これはここ **50** 年くらいで随分「わかった」
- ビッグバン、インフレーションがあってもものすごく一様な宇宙が当時の宇宙の半径の外側まで広がる。同時に量子力学的ゆらぎが密度ゆらぎになる
- それから普通の宇宙膨張になり、そのうちにクォークから陽子・中性子・一部その他の元素(ほとんどヘリウム**4**)ができる。
- もっと膨張して温度が下がると、陽子と電子が結合して水素原子に(宇宙の晴れあがり)。この時にあった光子が現在まで残って観測されるのがマイクロ波背景放射。

宇宙全体(続き)

- このマイクロ波背景放射の精密観測、遠方の超新星の観測等で、宇宙全体については基本的に「わかった」と思っている。
- 何がわかっているか
 - － 宇宙が何からできているか：普通の物質、ダークマター、ダークエネルギーの割合
 - － 現在の宇宙の物質の平均密度、宇宙膨張の速度、その他色々な量
 - － 特に、銀河等の種になる「密度ゆらぎ」の「パワースペクトル」

ちなみに「密度ゆらぎ」の「パワースペクトル」って一体なに？

- 「ゆらぎ」：一様な状態からの確率的なずれ。場所によって物質の濃い薄いがあること。
- 「パワースペクトル」：どれくらいの大きさのゆらぎがどれくらいあるか。

銀河

- 観測すると色々な銀河が見える。渦巻銀河・楕円銀河・不規則銀河
- 宇宙全体で見ると、銀河が集まっているところ・あまりないところ、という構造がある(宇宙の大規模構造)
- 銀河や、その大規模構造の起源: ビッグバン直後の宇宙の「密度ゆらぎ」

宇宙の大規模構造のシミュレーションの例

計算の 1 例（現在千葉大准教授・石山さん提供）

ここでやっていること：

- 基本的には「一様」な宇宙を、なるべく沢山の粒子で表現する
- 理論的に「こう」と思われる揺らぎを与える
- 理論的に「こう」と思われる初期の膨張速度を与える

わかること

- 最初に密度が高いところは、他に比べて相対的に密度がどんどん大きくなっていく。
- 特に密度が高いところは、そのうちに膨張しきって潰れ出す。
- 最初に小さいものが沢山できて、それらがだんだん集まって大きなものになる
- 大雑把にいうと、銀河とか銀河団はこのようにして潰れたもの。

この計算はダークマターだけ。

銀河形成シミュレーション

- 「ガスが収縮して星になる」ところも全部シミュレーション
- とはいえ、個々の星ができるところはシミュレーションできてないので、「ガスの塊」が「多数の星を代表する粒子」になるみたいなモデル

animation

new animation

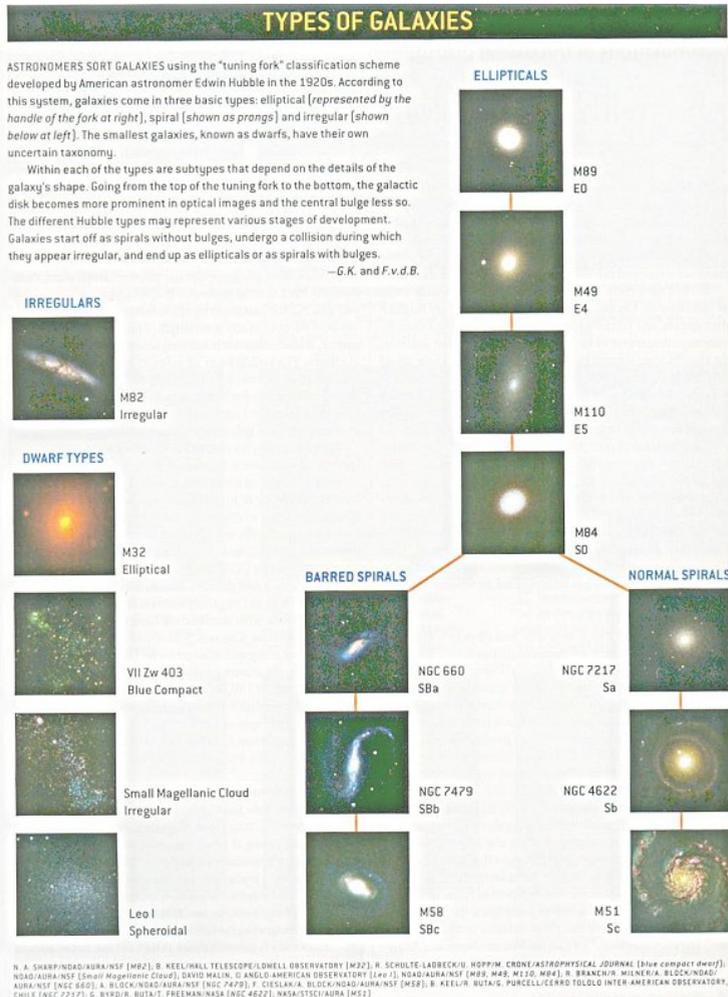
それなりに銀河らしい？

animation (Baba et al 2009) 1 2

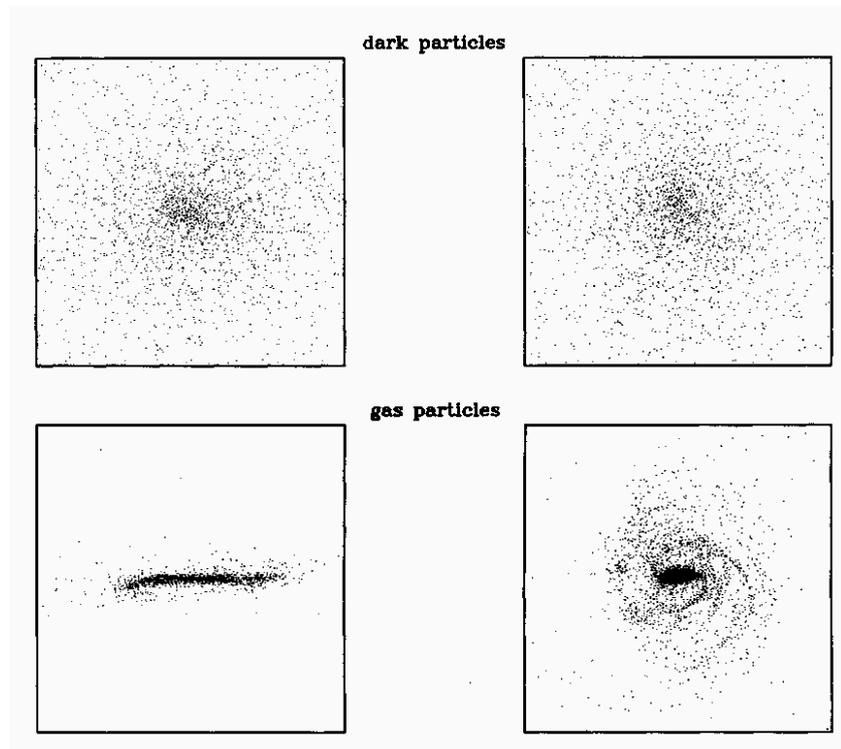
銀河形成シミュレーション

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



Katz and Gunn 1992



- ダークマター+ガス+星
- 1万粒子くらい、 **Cray YMP** で **1000**時間くらいの計算
- 1粒子の質量: **1000**万 太陽質量くらい

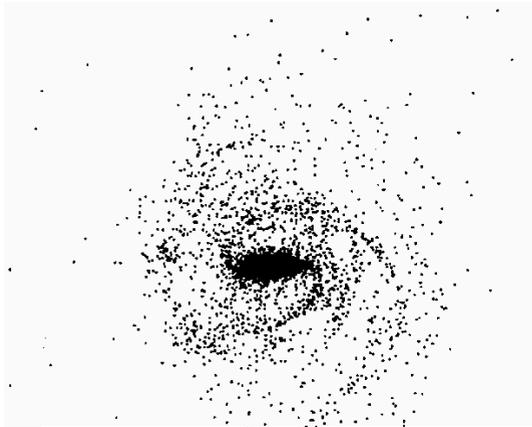
Saitoh et al. 2005



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

分解能を上げるといいことがあるか？



- そうでもない？
- 大事なこと:物理過程のより適切な扱い
 - 星形成
 - 超新星爆発からのエネルギーインプット

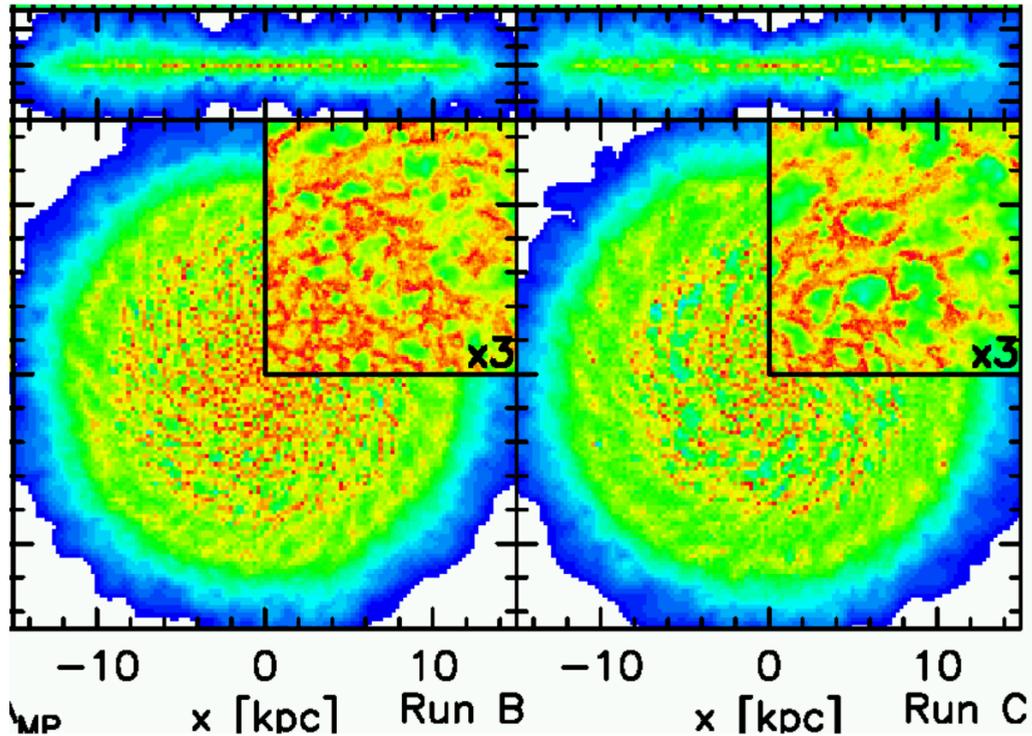
星形成過程のモデル

- 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？

Saitoh et al. 2007



星形成のタイムスケールを **15** 倍くらい変えてみた。

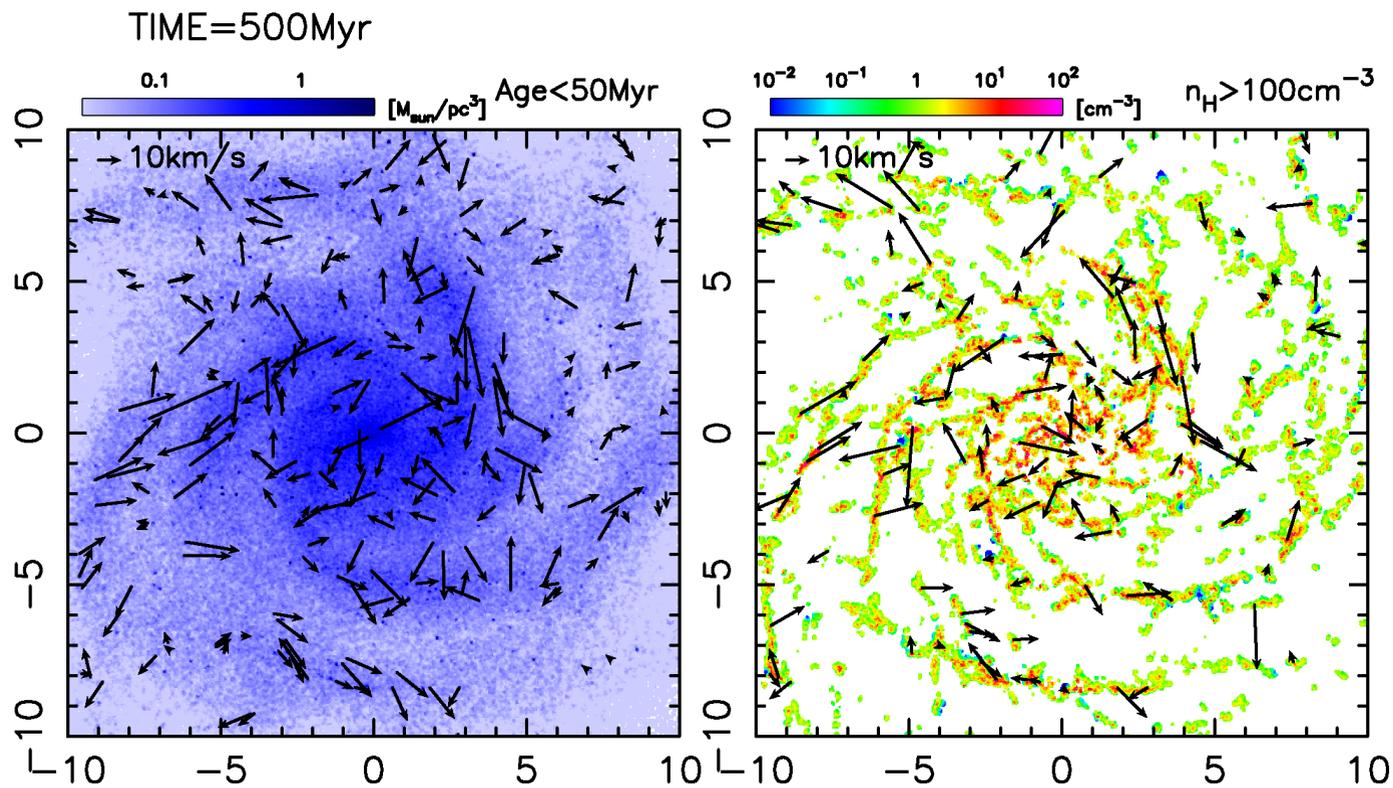
あんまり大きくは結果が変わらなかった。

分解能が低い計算では、星形成のタイムスケールを **15** 倍小さくしたら銀

河が爆発。

銀河円盤

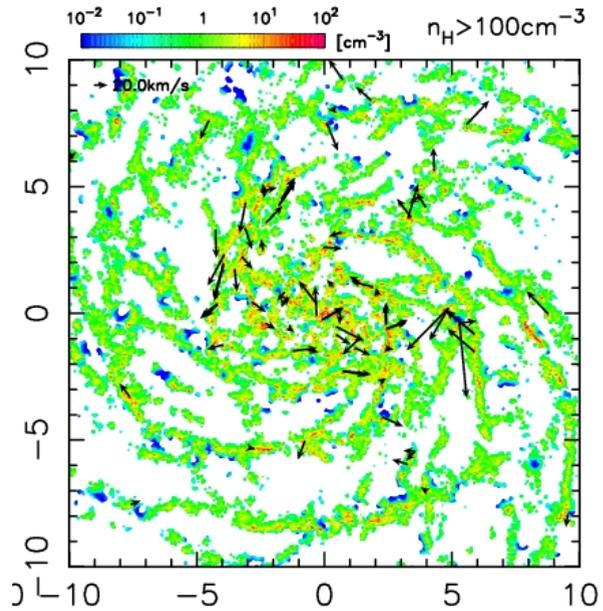
渦巻構造と、円運動からのずれ animation (Baba et al 2009) 1 2



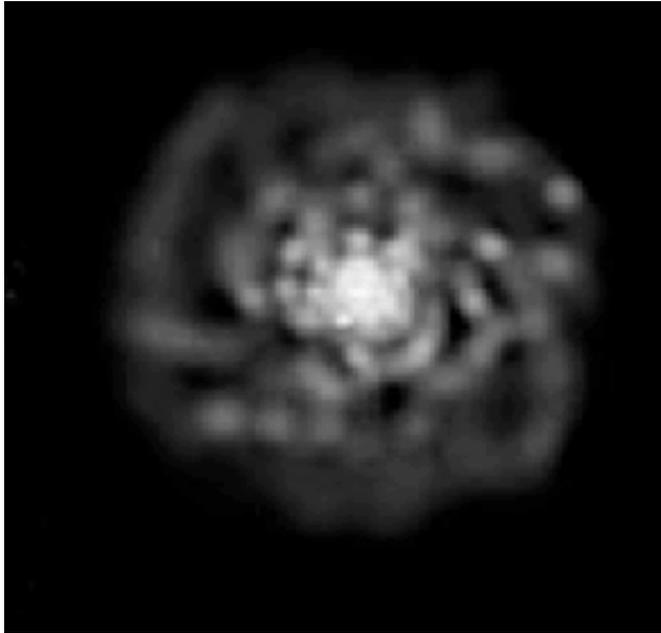
星の分布

冷たいガスの分布

高分解能モデルと観測



低分解能モデルと観測



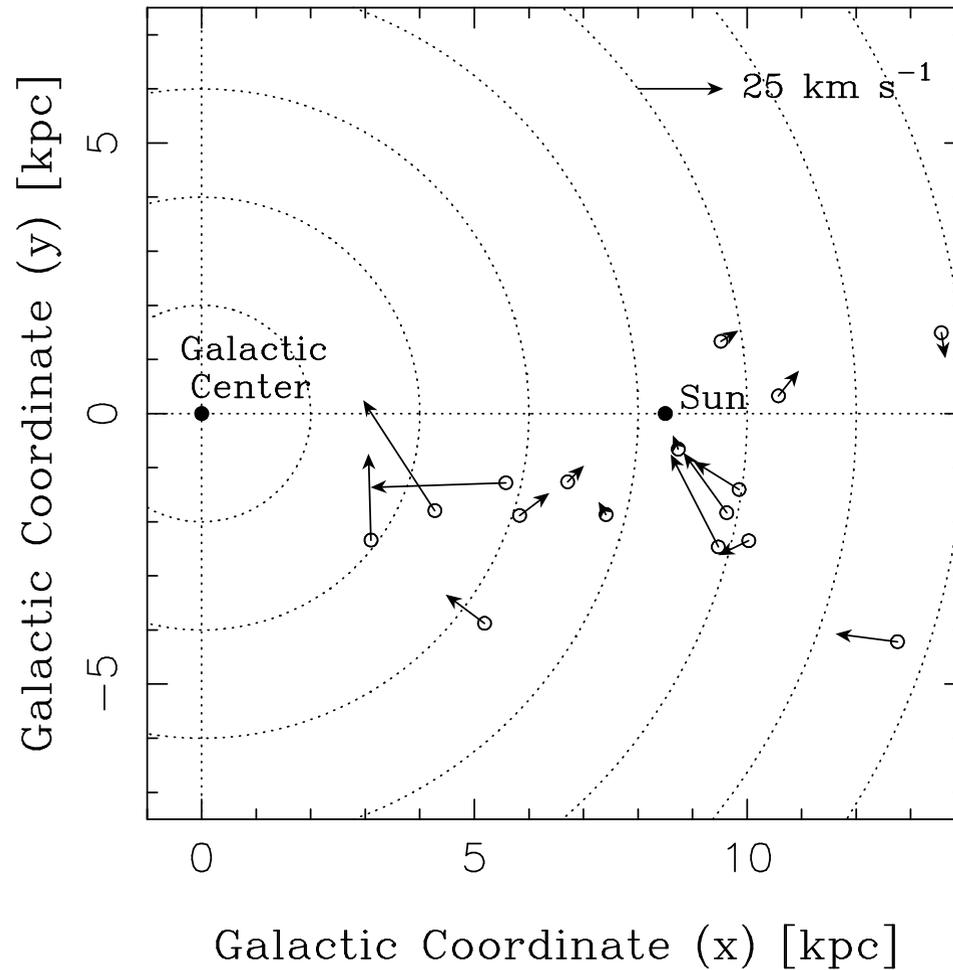
高分解能シミュレーションで わかってきたこと

- 星形成は大きなスケールの渦巻構造と関係
- 観測で見える複数アームがある渦巻は、定常ではなく形成・消滅を繰り返している
- この結果は、星形成のモデルの詳細にほとんど依然しない

電波干渉計による観測

- 2006: Xu et al, Science 311, 54
- Nov 2008: Burst of results from VLBA
- Several data from VERA

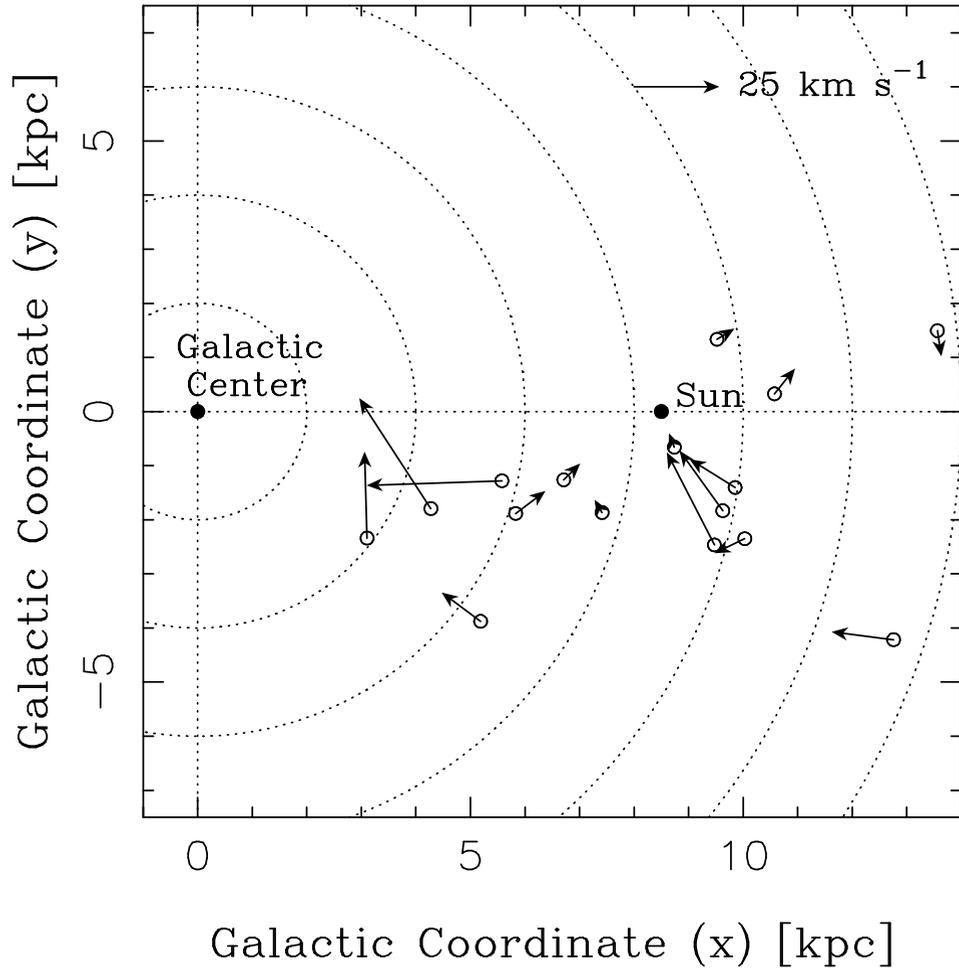
(Compiled by Dr. Asaki)



電波干渉計による観測

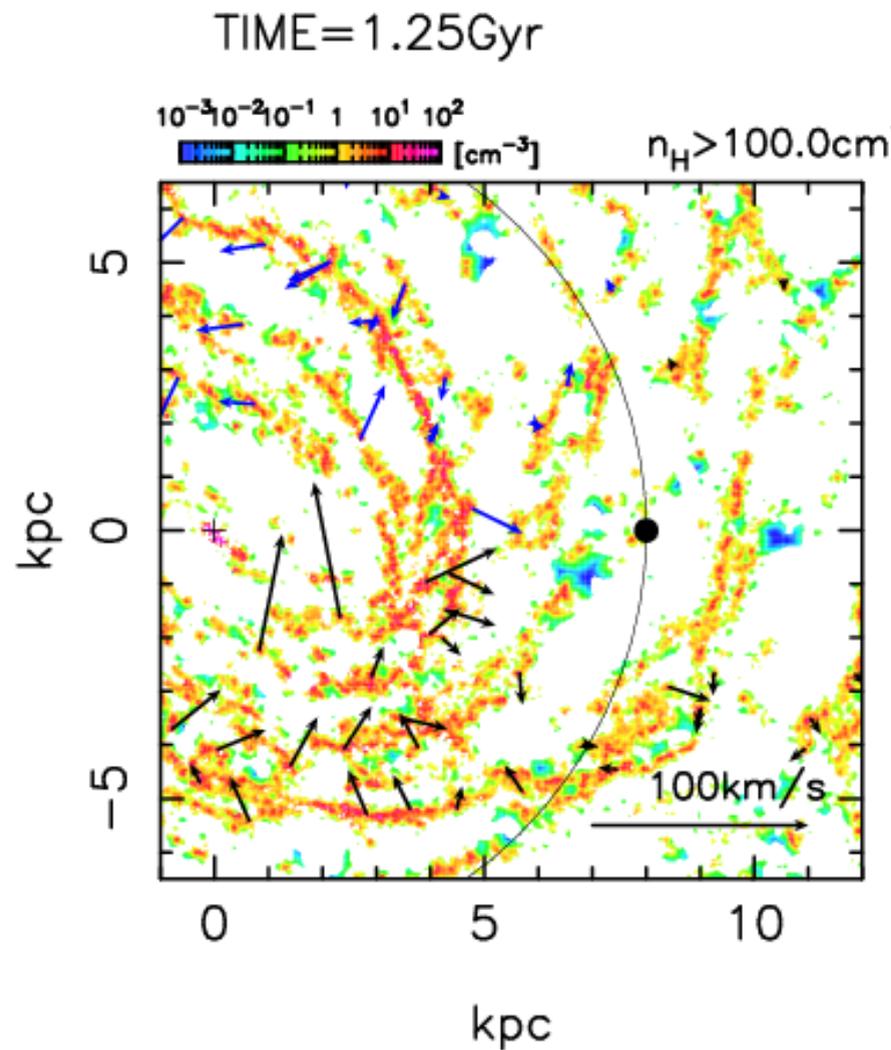
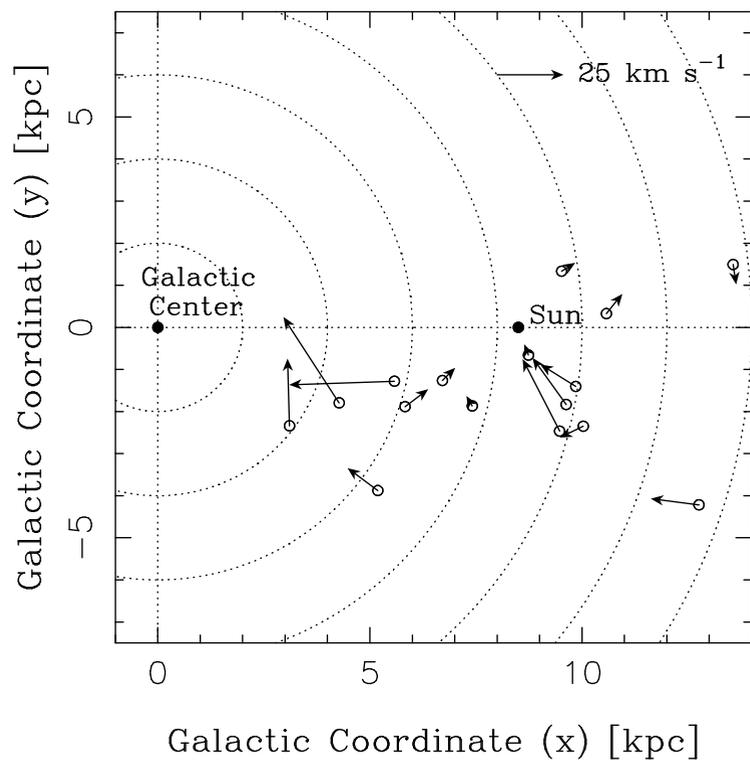
- 円運動からの大きなずれ ($\sim 30\text{km/s}$)
- 空間相関もあり？

このような大きな運動の起源は？



比較

観測とシミュレーション



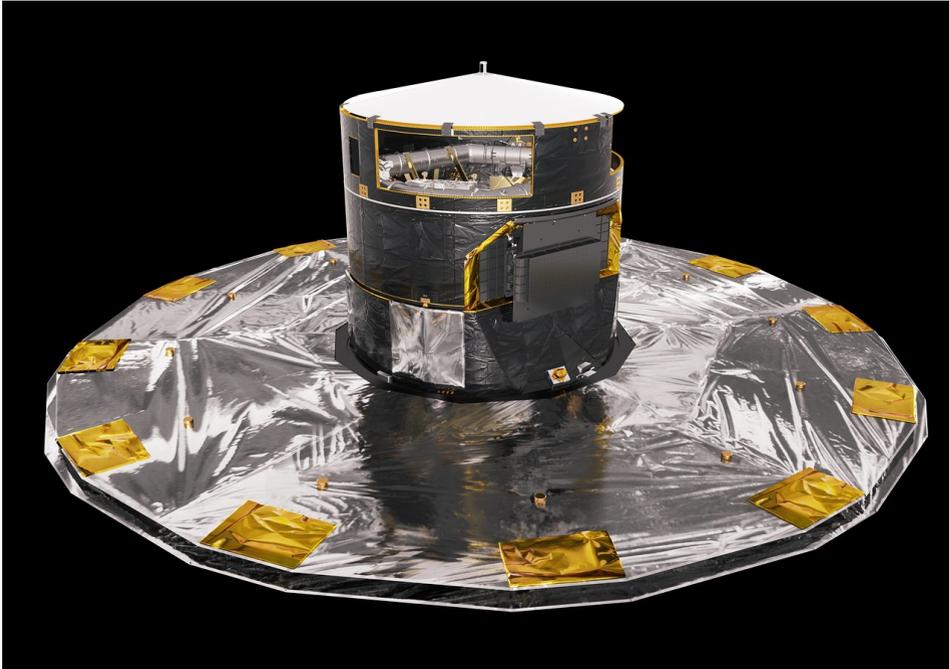
似ているような気が？

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

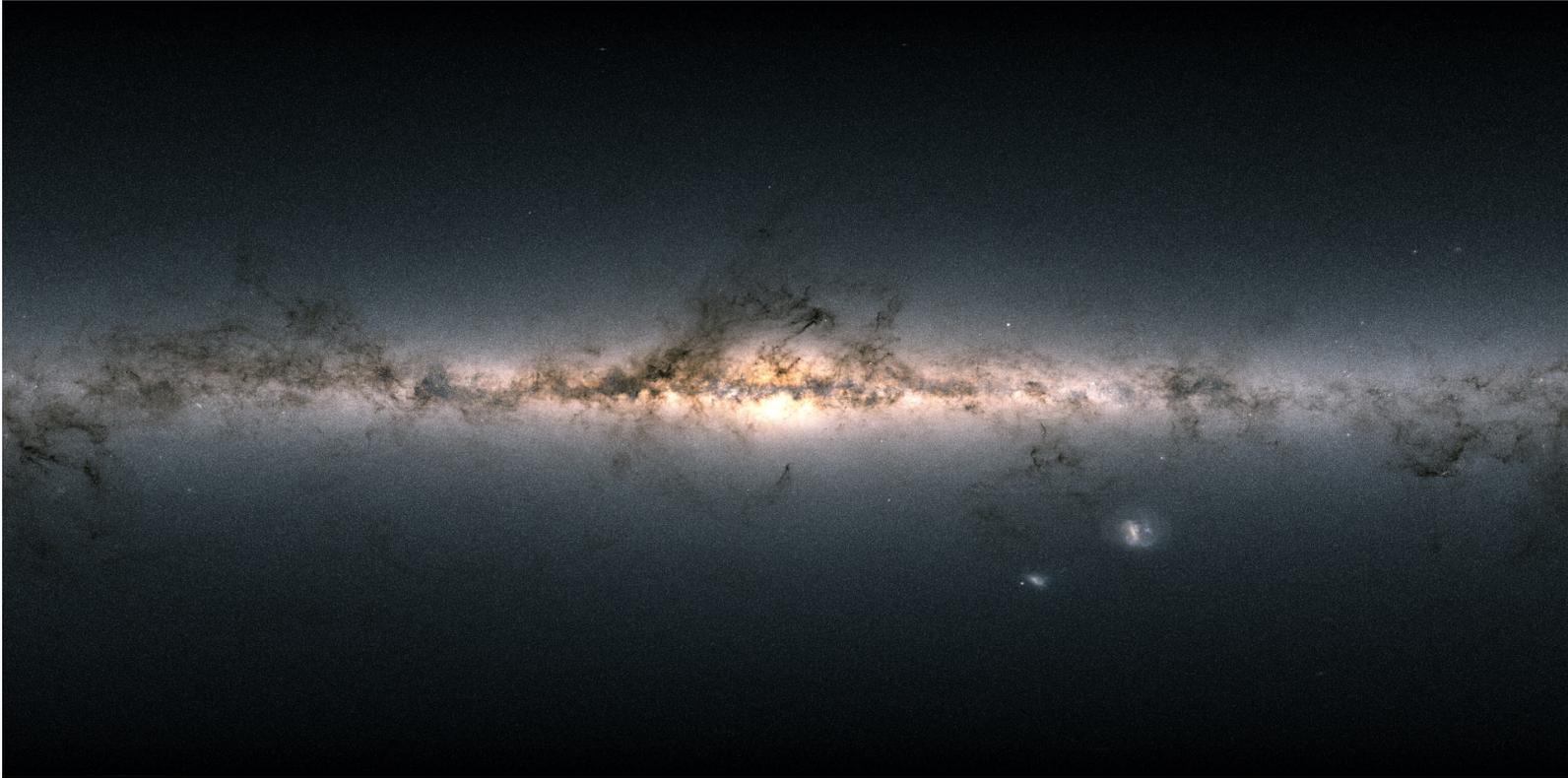
GAIA のデータは？

GAIA:



ヨーロッパが打ち上げた位置天文衛星。
21等までの**15**億個の星の距離と固有運動を測定。

GAIA EDR3



まだあんまり渦巻構造とかの話にはなっていない(ガスが多いところは見えないという問題もある)

銀河に関する理解の現状

- 何から銀河ができたかは「わかっている」(宇宙初期の密度ゆらぎ)
- その「銀河の種」の、さっきの「パワースペクトル」とかは非常に良くわかっている(少なくともそう信じている)
- なので、原理的には銀河ができる過程は理論的に(あるいは計算機シミュレーションで)わかる
- 少しずつだが目標に近づいている気がする。観測で見える銀河に近づいている。

星

- 星は、銀河の中で高密度・低温なガスが重力で集まってできる、というのは間違いない
- が、「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。
- どうやって集まって星になるのかもよくわからない。シミュレーションは非常に難しい

Star formation with SPH

Star formation with SPH 2

星形成シミュレーション

- 星形成をちゃんとシミュレーションするには、ガスが星に集まってくるところを **100** 万年間くらい計算しないといけない。星の表面では時間刻みが分程度なのでこれは全然無理。
- 色々方法はあるが、、、

というわけで星形成過程の研究はまだまだこれから(牧野の個人的意見かも)

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。

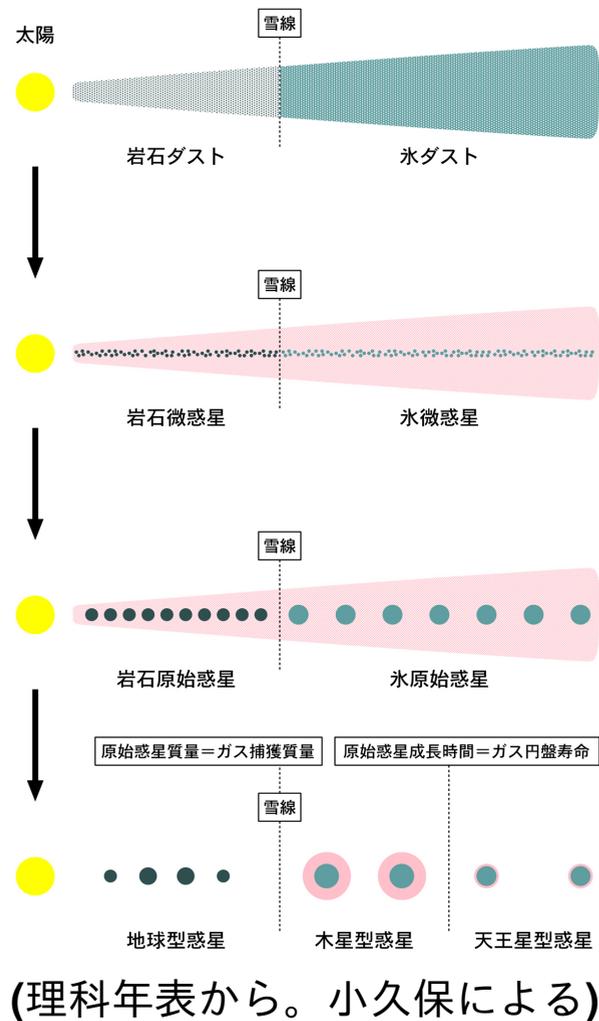
- ガスが冷却・重力収縮して星になる。
- 角運動量が大きな成分は星に落ちないでガス円盤に
- このガス円盤がさらに冷却するかなんかしてダスト成分が集まって惑星に(天文学ではガスではない固体状態のものをなんでも「ダスト」ということあり)

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、、、

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)

形成時間問題の解決

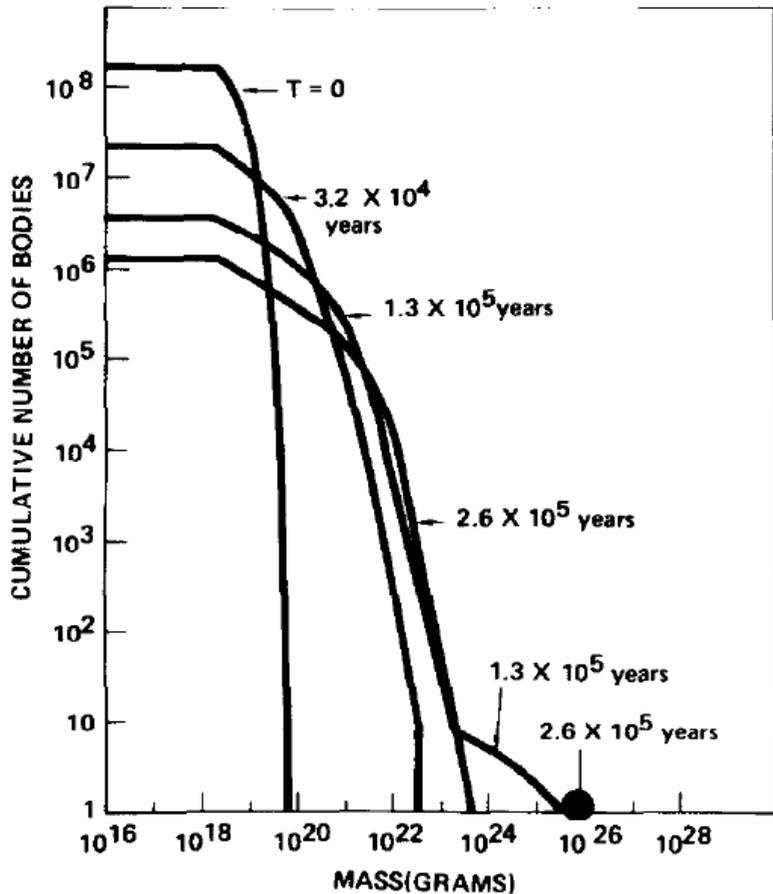
暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- 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

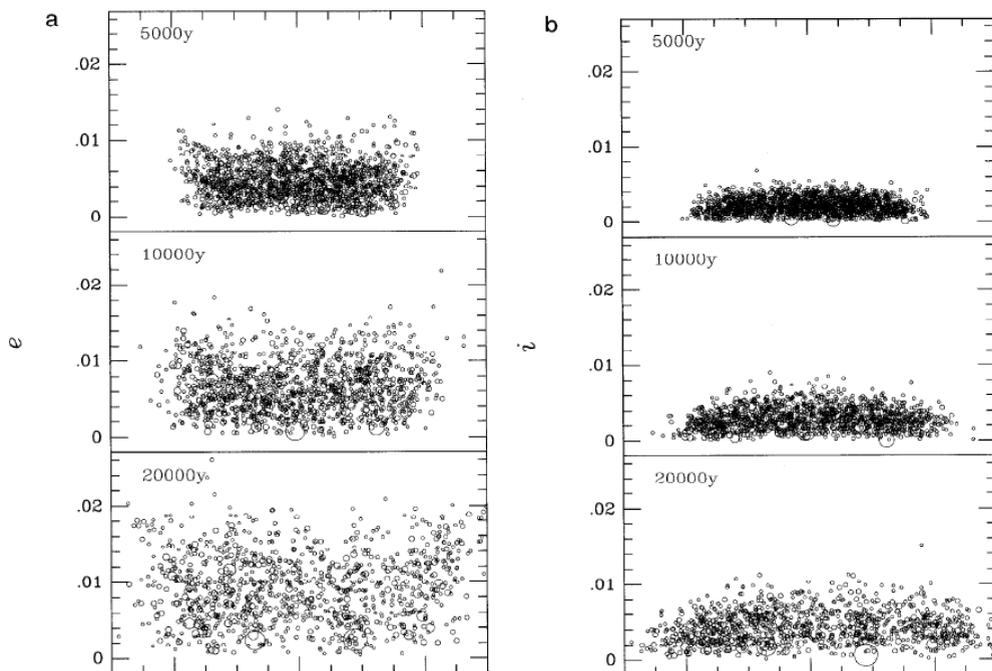
Wetherill and Stewart 1989



- 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
- 暴走成長が起きることを確認

小久保さんと井田さん



小久保さん

井田さん

(「情熱大陸」のページから)

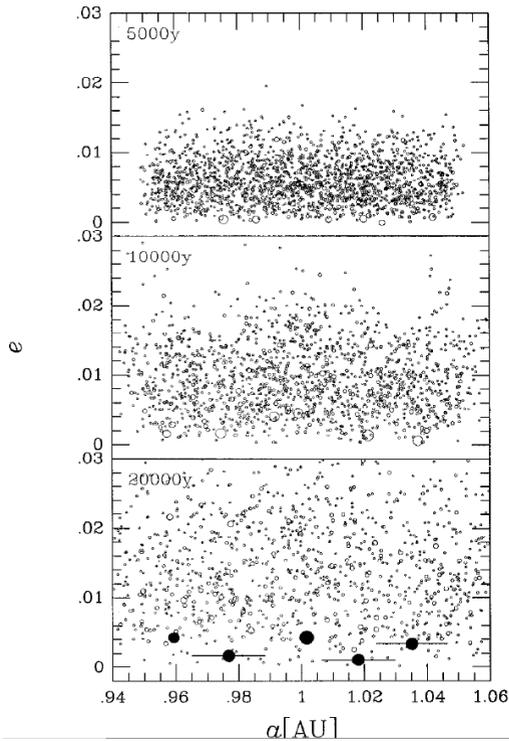
寡占的成長

- **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

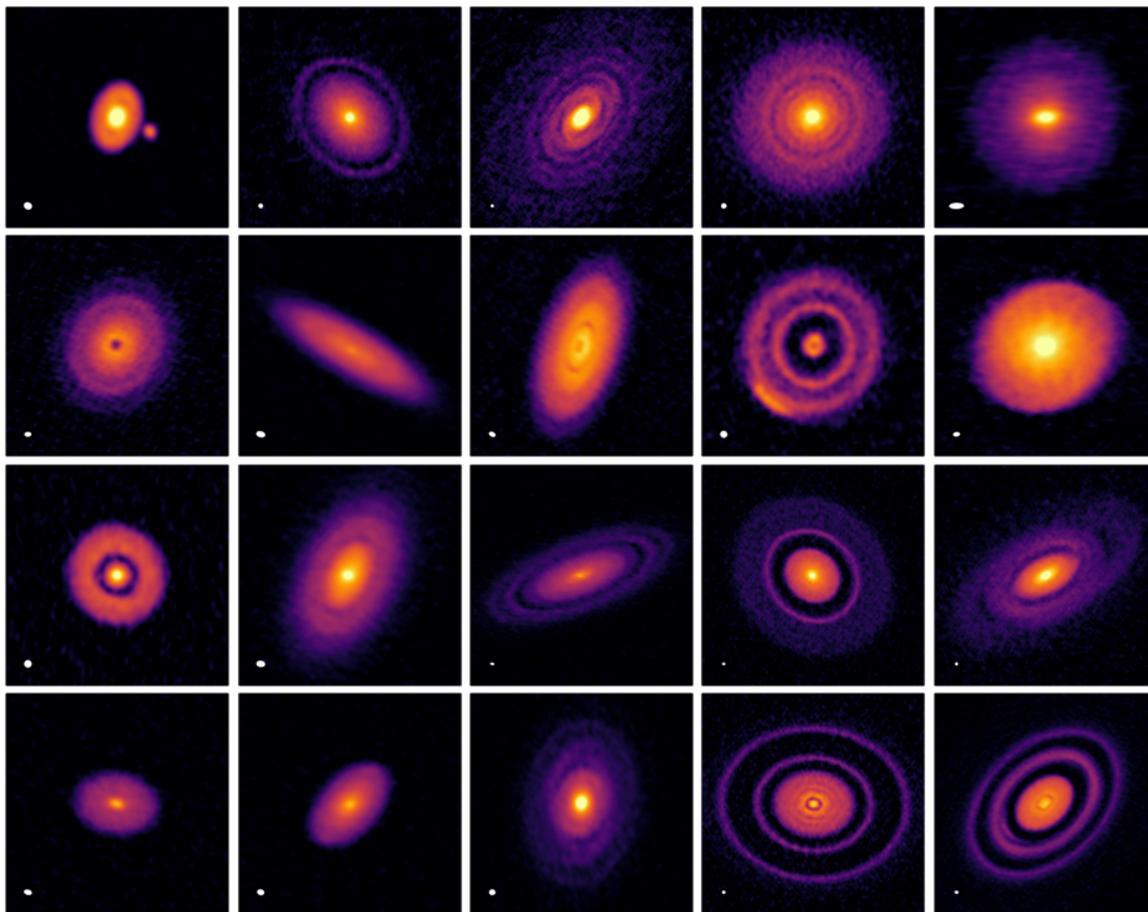
問題は形成時間だけ？

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

観測は？

「原始惑星系円盤」であるかもしれないものがみえてきた。



DSHARP

プロジェ
クト

ALMA

望遠鏡で
の観測

分解能

[35mas]

ALMA 望遠鏡



チリ アタカマ砂漠
に、アメリカ、ヨー
ロッパ、東アジア、
チリの共同で作った。

66 台のミリ波・サブ
ミリ波望遠鏡からの
信号をスーパーコン
ピューターで合成。

分解能: **60km** 先にある **1cm** のものを見分けられる

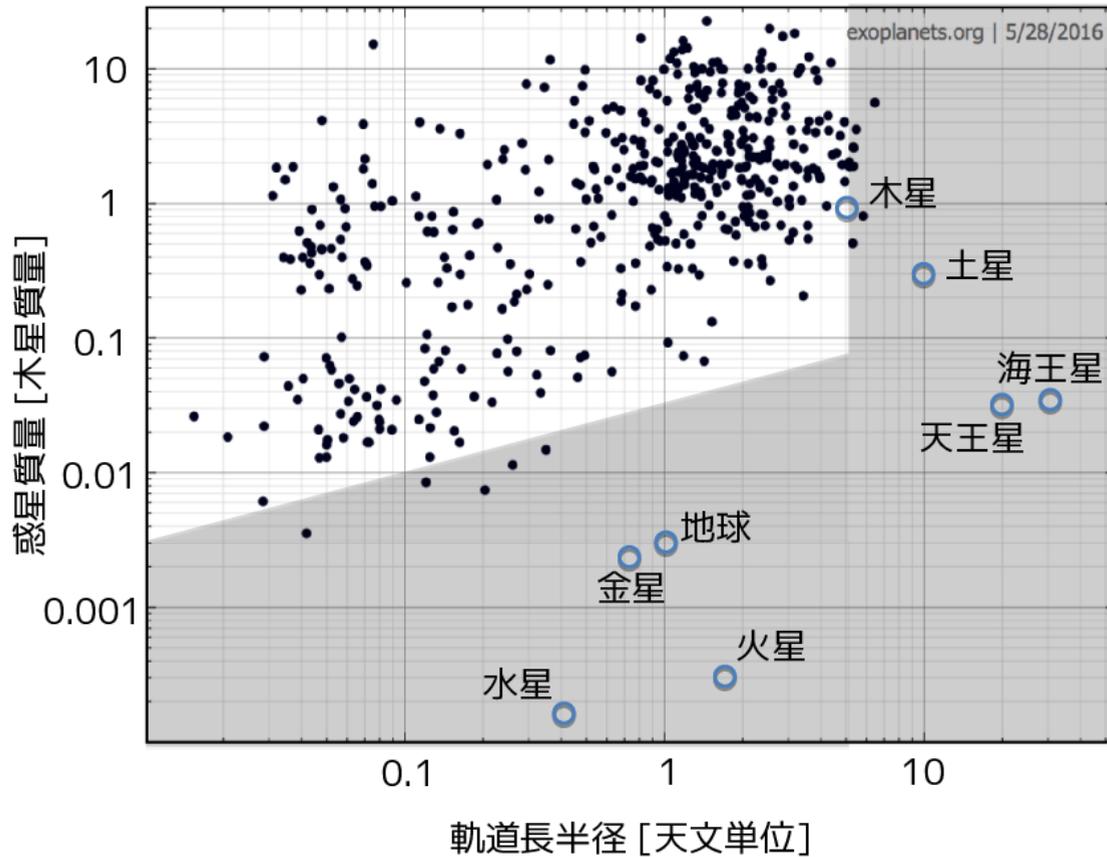
これらの円盤は一体なにか？

- 特になにか変わったものを見つけようとしたわけではない。比較的近くにある円盤ある (=低温のガスがみえる) 原始星の観測
- とりあえず明らかかなこと：京都モデルで想定していた「のっぺりした円盤」ではないものが一杯ある。
- 円盤の不安定性？もう惑星ができてるせい？というあたりから全然分からない。
- みているのは「ずっと遠く」太陽から地球までの距離の数十倍。

系外惑星

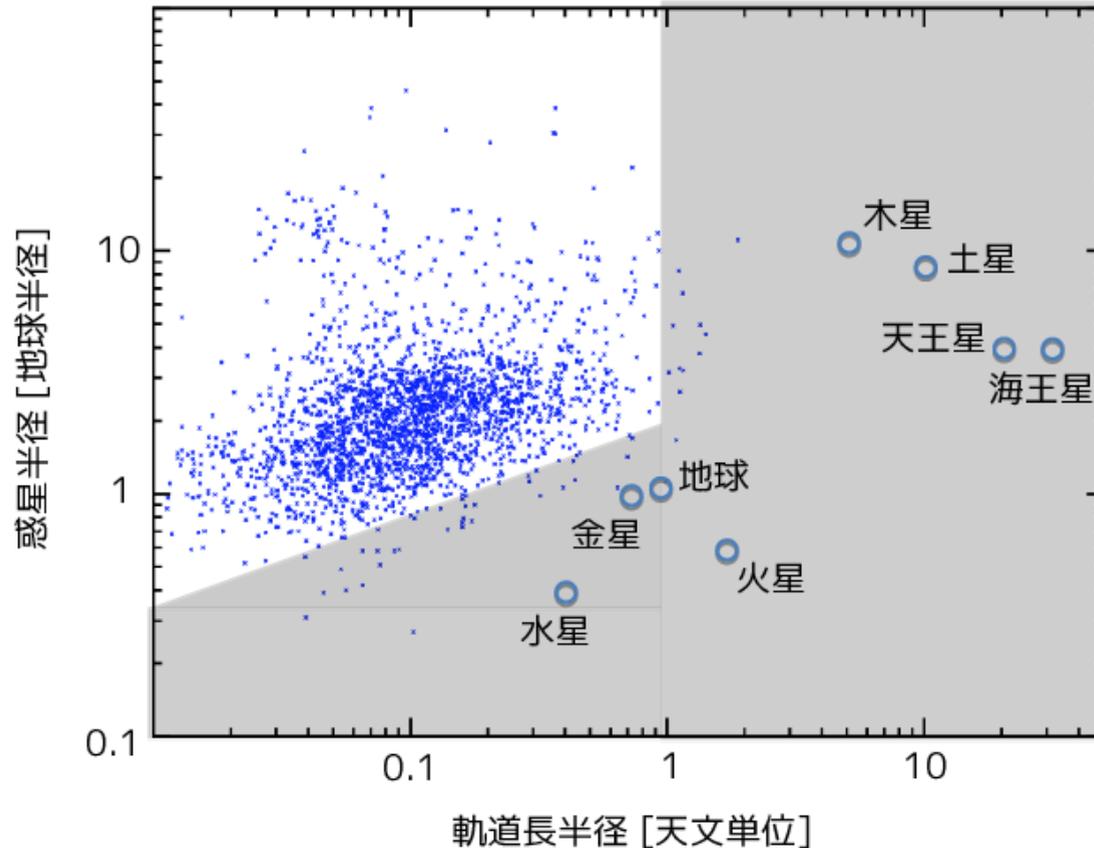
- 多様な系外惑星
- 今後の発展？

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に主星に近いもの
- 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
 - － 原始惑星系円盤も、今までの理論の想定と全然違う
- 新しい理論の枠組みが必要だが、、、

今後の発展

- 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

がこれからかなり進むと期待、、、

まとめると、、、

- 宇宙全体、銀河、星、惑星と小さくなるにつれて、段々わからなくなるのが現状。
- 惑星の観測、特に系外惑星の観測は非常に進んで、色々な惑星系がみつかった
- その中で太陽系は必ずしも典型的ではない
- でも、典型的ではないのが本当にそうなのか、「観測バイアス」なのかはまだよくわかっていない
- 色々な惑星系の形成を統一的に説明できる理論モデル(シミュレーション含めて)はまだ全然ない。これからの研究課題

ここでまだ時間あれば計算機の話。

計算機の話

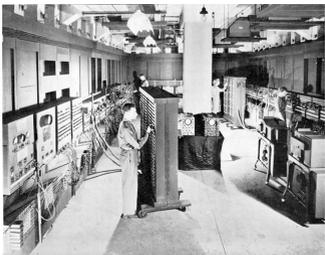
- これまでの進歩
- 現在の困難
- 今後の方向・深層学習向けプロセッサ

これまでの計算機の進歩

1940年代から現在までの**70**年間、ほぼ**10**年で**100**倍。何故そのような指数関数的進歩を長期に続けたのか?(今後はどうか?)

基本的な理由:

- 使うスイッチ素子が高速になった
- 使うスイッチ素子が小型、低消費電力になって、沢山使えるようになった
- 使うスイッチ素子が安くなって、沢山使えるようになった
(スパコンの物理的大きさは**70**年代が最小。そこまで段々小さくなって、そこからまた大きくなった)



「富岳」



- **2020** 年完成、カスタムプロセッサを **16** 万個使用。**6** 次元トーラスネットワーク
 - ピーク性能 **488PF**
 - 商用版富士通 **FX700,FX1000**
-
- (牧野は開発プロジェクト副プロジェクトリーダーの**1**人)

現在 (2000 年以降) の普通のスパコン

- **Intel** のプロセッサを使用
- アプリケーションにあってれば **NVIDIA** の **GPU** を使用
- 沢山並べる
- 高速ネットワークを使う、あるいは **Cray** 社のシステムを買う
- 独自プロセッサとかはあまり使われない。
- あんまり芸がないので写真は省略

過去のスパコンの進化

何の話をしたかったかということ：何故計算機はどんどん速くなったのか？

基本的な理由：

- 使うスイッチ素子が高速になった
- 使うスイッチ素子が小型、低消費電力になって、沢山使えるようになった
- 使うスイッチ素子が安くなって、沢山使えるようになった
(スパコンの物理的大きさは**70**年代が最小。そこまで段々小さくなって、そこからまた大きくなった)

素子の高速化

- といっても、真空管でもそれなりに速かった。
- スイッチング速度が重要でないわけではないが、配線を信号が伝搬する速度のほうが昔から重要。
- 昔は信号はほぼ光の速さでつたわった。
- 最近の **LSI** 上の配線は非常に細く (抵抗が大きく)、キャパシタンスを充電しないといけないことによる **RC**(抵抗とキャパシタンス) 遅延のため、信号が伝わる速度は光速度よりはるかに低い。
- 太い配線に大電流を流せば速いが、大量の電力消費になる

素子の小型化

- 真空管 → トランジスタ → IC という進化は **1970** 年代までは重要
- サイズだけでなく、消費電力が下がることが重要
- **80** 年代から重要になったのは **CMOS LSI** の微細化。**10** 年でサイズが **1/10** になる
- **CMOS** 素子では (**2000** 年くらいまでは) 微細化すると電圧を下げることができ、消費電力が下がり、速度は向上した。
いわゆる **CMOS スケーリング**。
- **2000** 年頃からは電圧が下がらないので、電力はちょっと下がるが速度は上がらなくなった。いわゆる **CMOS スケーリングの終焉**。
- そろそろ微細化も困難になってきた。また、トランジスタの構造・製造工程が複雑になり、微細化するとかえって価格上昇するようになった。いわゆる **ムーアの法則の終焉**。

CMOS スケーリングって何？

「Dennard Scaling」とも。

トランジスタのサイズ (3次元的にすべて)、電源電圧を $1/k$ にし、不純物濃度を k 倍にすると、トランジスタの速度は k 倍、スイッチングあたりの消費電力は $1/k^3$ になる。

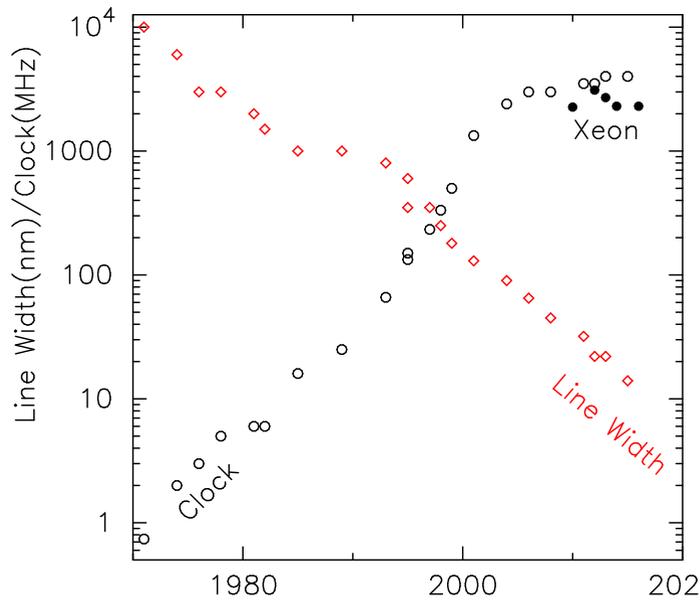
これが成り立つなら、

動作周波数 $\propto 1/\text{線幅}$

動作電圧 $\propto \text{線幅}$

性能 $\propto 1/\text{線幅}^3$ (電力、面積一定で)

現実には



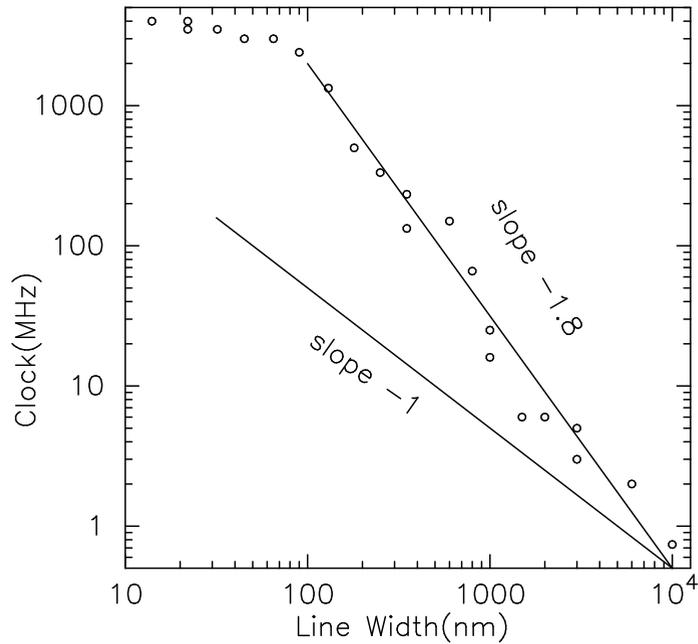
40年間の Intel マイクロプロセッサの線幅(トランジスタサイズ)と動作クロック

線幅は**40年**間で**3桁**縮小。ク

ロックは**25年**間で**3桁**上昇、そのあと停止。(コア数の多い

Xeon は段々クロック下がる)

線幅とクロック



線幅とクロックの関係

90nm までは

クロック \propto 線幅^{-1.8}

そのあとはほぼクロック一定

(Xeon は下がる、、、)

つまり

- ムーアの法則(トランジスタサイズは時間の指数関数)は確かに成り立っている
- いわゆる **CMOS** スケーリング(速度が線幅に反比例)は実は成り立っていない

何が起こったのか？

- **90nm** までは電圧をあまり下げず、パイプライン段数を増やすことでクロックをあげた
- これは非常に消費電力増やすので、**1チップ100W** になったところで限界
- そこからは、コア数やコア内演算器数を増やすことで性能向上
- これも現在結構限界。半導体技術進歩も限界

これからの計算機の進歩

現代の「最先端のマイクロプロセッサ」の設計は驚くほど非効率的

- チップ上のトランジスタの**97%**以上
- 消費電力の(多分)**90%**以上

は、「演算論理以外」に使われている (**Xeon Phi** の場合。 **Xeon** だともっと非効率)。

何故それほど非効率なのか？

根本的な理由：「計算機的设计」はまだ科学にも工学にもなっていない。

- 熱機関的设计：熱力学第一、第二法則が理論限界=理想の熱機関を与える
- 航空機的设计：誘導抗力・摩擦抗力・それ以外（「圧力抗力」）への分離が「理想の航空機」を与える

つまり：科学的设计=理論限界に近づけること。

ところが：(トランジスタではなくて)計算機の理論限界、という考え方自体がまだ存在していない。この辺から問題。

というわけで

計算機設計者が本来していないといけないこと:

1. 理想の計算機=理論的限界を明らかにする
2. 現実の設計をそれに近づける

現状やっていること

1. 現在ある設計を、現在ある色々な制約の範囲で色々いじってみる。思い付きのアイデアもいれたりする。
2. よさげなものを作ってみる
3. 会社がつぶれていなければ上を繰り返す

現状批判はいいとしてどうしたものか？

明らかにすべきこと:

理想の計算機を明らかにし、それに近づいていくべく努力する

では、理想の計算機とは？

- 飛行機、エンジンの類推では:同じ電力で一番沢山計算できる計算機(「省エネ性能」)
- といっても、計算機では、アプリケーションプログラムが色々
- 最近: **AI (深層学習)** が重要

深層学習と行列乗算

少しだけ **AI** の話ということで、...

- 深層学習は多段ニューラルネット。ということは
 - 計算の **99.9%** くらいが行列乗算(学習でも)
 - **GPU** が使われてるのは結局単精度行列乗算専用マシンとして
 - **NVIDIA** がものすごく成長したくらいの需要。

深層学習向けの計算機

- ニューラルネットワークの1層は「行列ベクトル積」
- 特に、現在主流の「畳み込みネットワーク」では「行列行列積」
- 計算精度はあんまりいらんらしい。最近は**16**ビット表現が使われることもある。

現在の最先端

- **NVIDIA A100 (2020年発表)**
- **16ビット**で 4×4 の行列同士の乗算の専用回路をもつプロセッサ
- **1チップで 312 Tflops** 程度を実現。(「富岳」の1チップは **11Tflops** なので、**30倍**近く速い)
- 通常の **64ビット**だと **10Tflops** 程度。

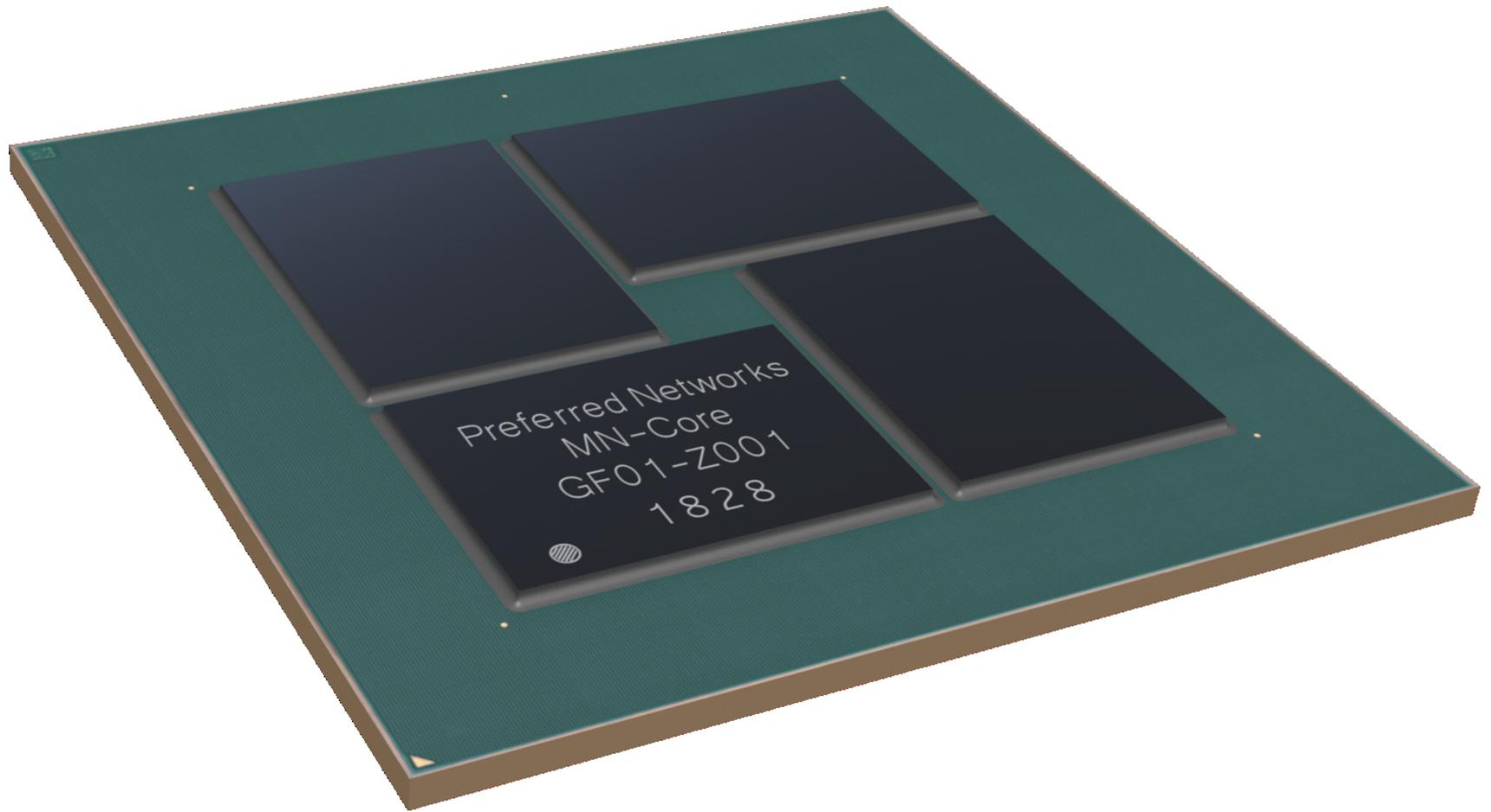
他のところの状況

- **Google** は **TPU1** から **TPU3** までを開発、社内で利用。
- **Intel**、**IBM** は色々なものを発表しているが、、、
- 日本メーカーも富士通、ルネサスその他
- 牧野も **Preferred Networks** と共同研究開発中。以下その話を少し。

MN-Core/GRAPE-PFN2

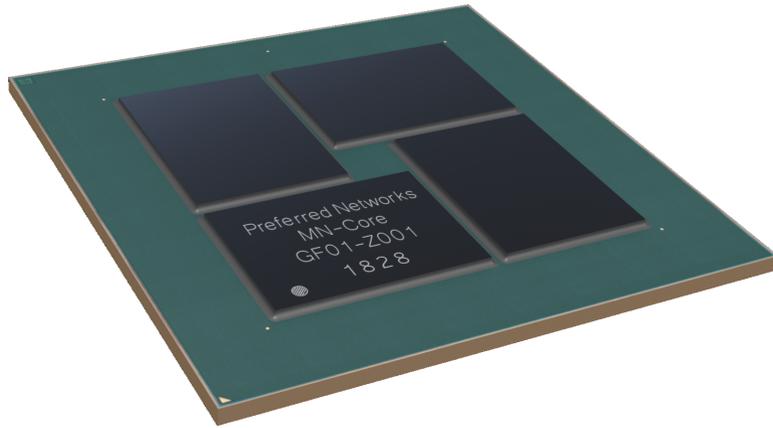
- **PFN** と牧野のところで開発した。
- 深層ニューラルネットワーク (**DNN**) の学習で世界最高の電力あたり性能を実現することが目標。
- **FP16** (ライク) フォーマットでピーク **524TF**
- 電力消費 (チップレベル) **500W** 以下、**1.2TF/W** あたり
- (**NVIDIA Volta: 300W, 132Tops, 0.44 Tops/W**。A100 は消費で不明)
- 概ね目標通りにできた。

MN-Core



MN-Core/MN-3 system

MN-core 紹介ビデオ



The GREEN 500 CERTIFICATE

MN-3 - MN-Core Server, Xeon 8260M 24C 2.4GHz, MN-Core, RoCEv2/MN-Core DirectConnect

Preferred Networks, Japan

is ranked

No. 1 in the Green500

among the World's TOP500 Supercomputers

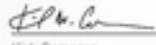
with 21.11 GFlops/Watt Linpack Power-Efficiency

on the Green500 List published at ISC 2020 Digital Conference, June 22nd, 2020

Congratulations from the Green500 Editors



Wu-chun Feng
Virginia Tech



Kirk Cameron
Virginia Tech

PFNのスパコン「MN-3」が世界1位に、消費電力性能ランキングのGreen500で

岡林 凛太郎 日経クロステック/日経コンピュータ

2020.06.23



PR

Preferred Networks (PFN) のスーパーコンピューター「MN-3」が2020年6月22日（欧州時間）、スーパーコンピューターの消費電力性能ランキング「Green500」で世界1位を獲得した。HPC（ハイ・パフォーマンス・コンピューティング）に関する国際会議「ISC 2020 Digital」が同日ランキングを発表した。



PFNのスーパーコンピューター「MN-3」

（出所：PFN）

（画像のクリックで拡大表示）

MN-3はPFNが独自開発した深層学習専用プロセッサ「MN-Core」を使ったスーパーコンピューターだ。PFNのスーパーコンピューター「MN-2」の後継機で、2020年5月に運用を始めた。160個のMN-Coreを搭載し、1ワット当たり21.11ギ

深層学習と計算機

- 「深層学習」は、計算機の能力の発展とともに進歩してきた。
- 今は、色々なところで深層学習向けプロセッサを開発。
- これは、使いやすさとかよりとにかく値段あたり、電力あたり性能が問題。
- ある意味、「科学的」な計算機設計にやっとむかってくるかも。