

計算機の中の銀河

牧野淳一郎

東京工業大学大学院 理工学研究科 理学研究流動機構

今日話をしようと思っていること

- 銀河形成についてどんなことがわかっているか
- 特に、渦巻銀河の渦巻はどういうものか
- シミュレーションによる研究の進め方

銀河形成

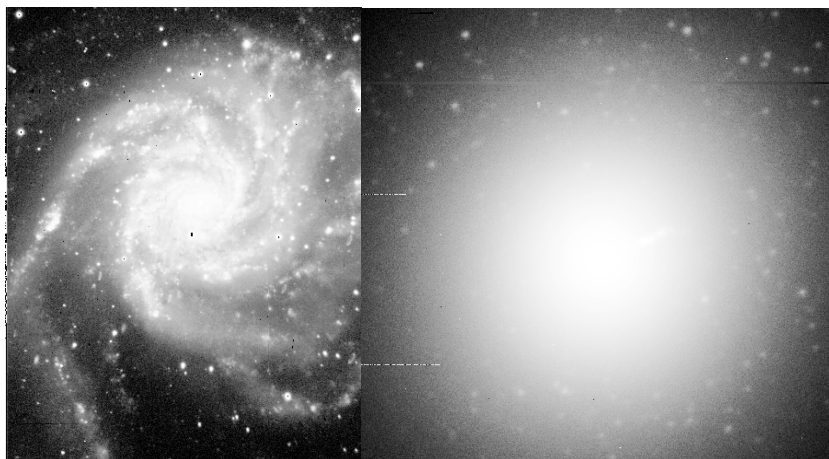
なにが問題か？

銀河とか星団とかはそもそもどうしてそこにあるのか？

それらは安定なのか？

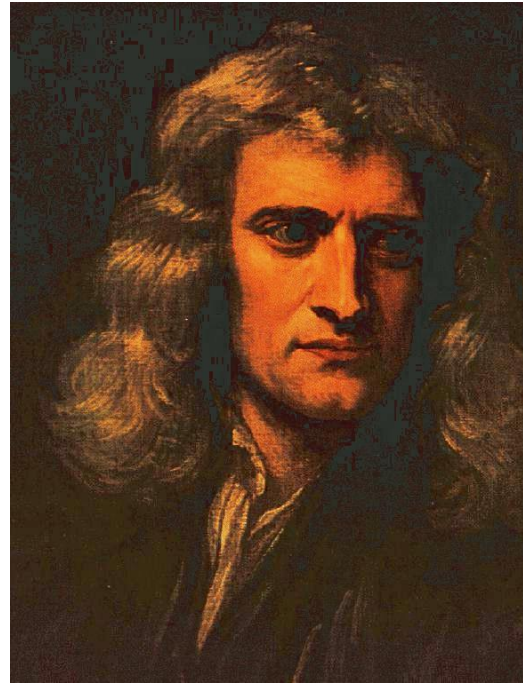
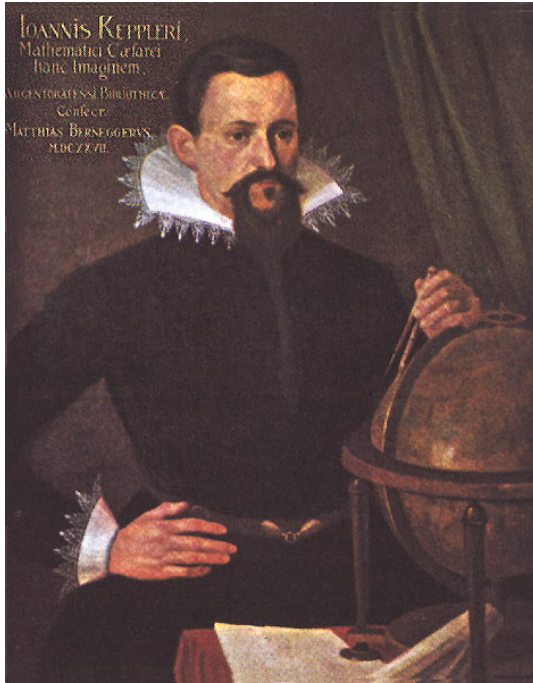
どうやってできたのか？

というようなことが問題。



ちょっとだけ歴史の話

ケプラーの惑星運動の3法則が、ニュートンの万有引力の法則と運動の法則によって説明された。

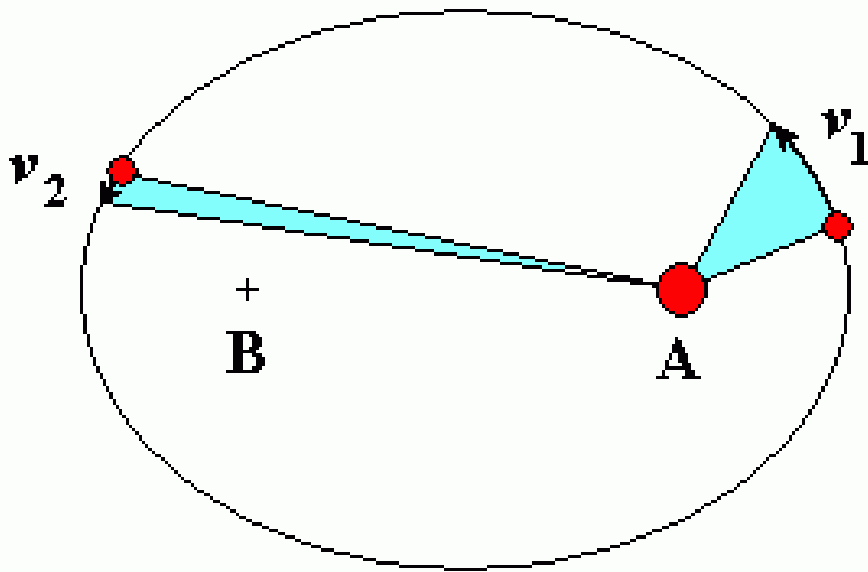


天体の運動も、地球上と同じ物理法則に支配されている。

惑星はそうとして、星や銀河は？

ケプラーの3法則

- 惑星の軌道は太陽を1つの焦点とする楕円
- 「面積速度」は一定
- 軌道周期は軌道長半径の 1.5 乗に比例



ニュートンの
万有引力の法則

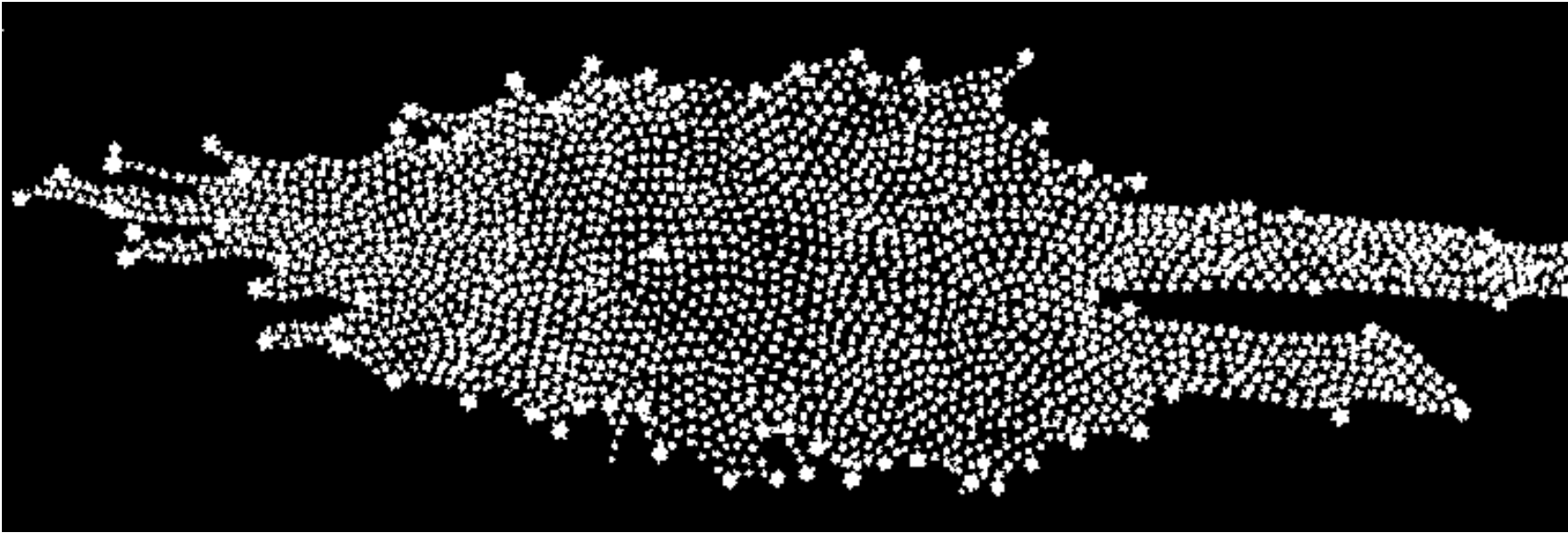
$$F = -G \frac{Mm}{r^2}$$

こっちが大事、ということ

銀河というものについての理解

18世紀: W. ハーシェル

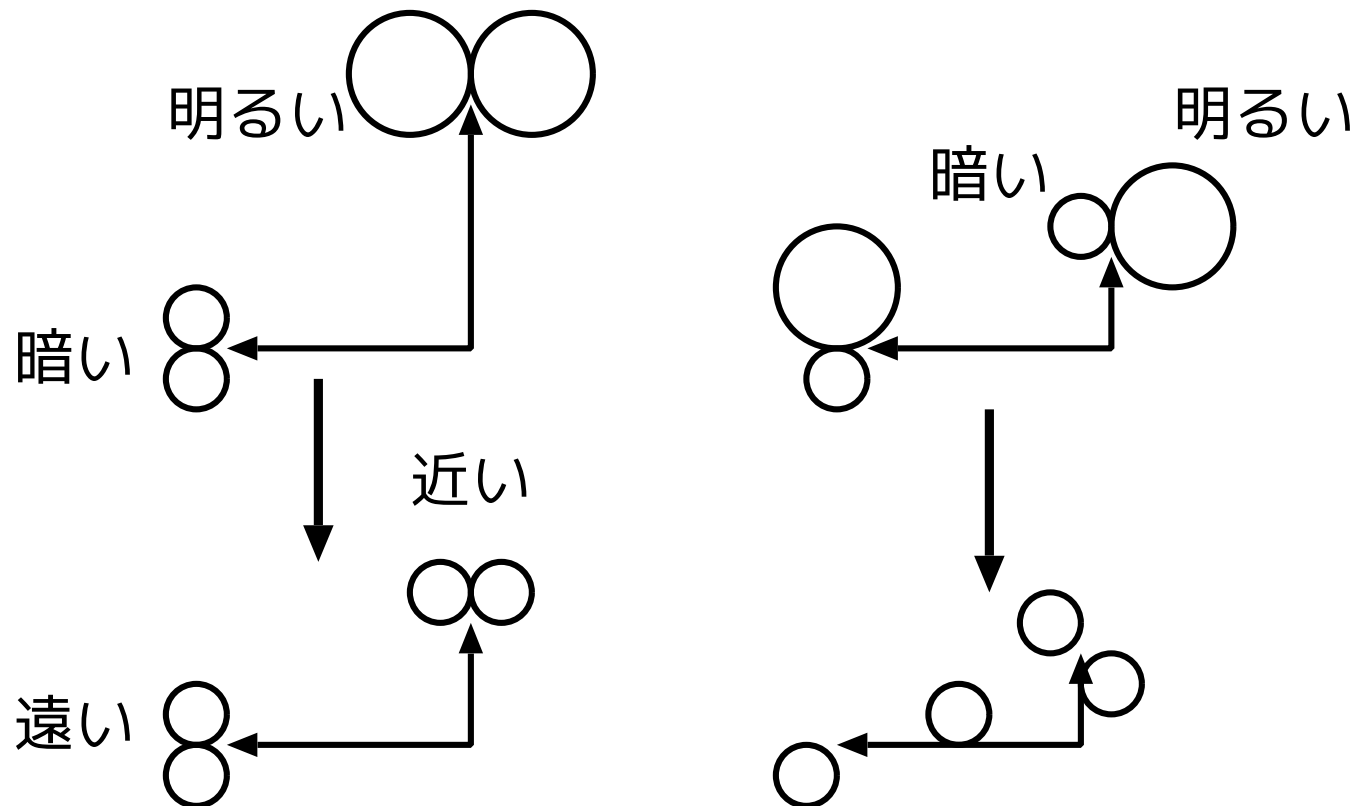
「全ての星は同じ明るさ」と仮定して距離を求めて書いてみた。



星の分布は一様ではなくてひらたくなっている = 銀河の発見

星がみんな同じ明るさのはずないのでは？

それはまあそうなんだけど、地球からみた方向によって星の明るさが違うのでなければ傾向は同じ。

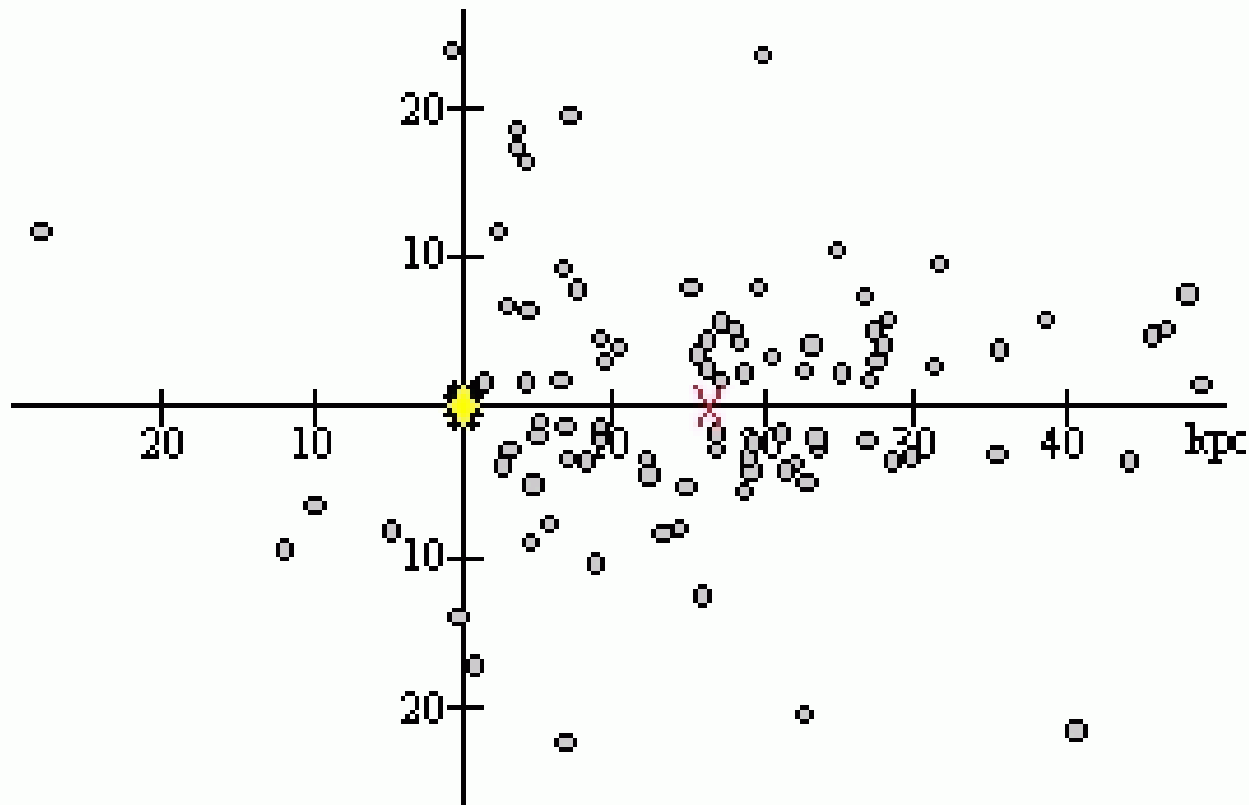


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

20世紀初め：H. シャプレー

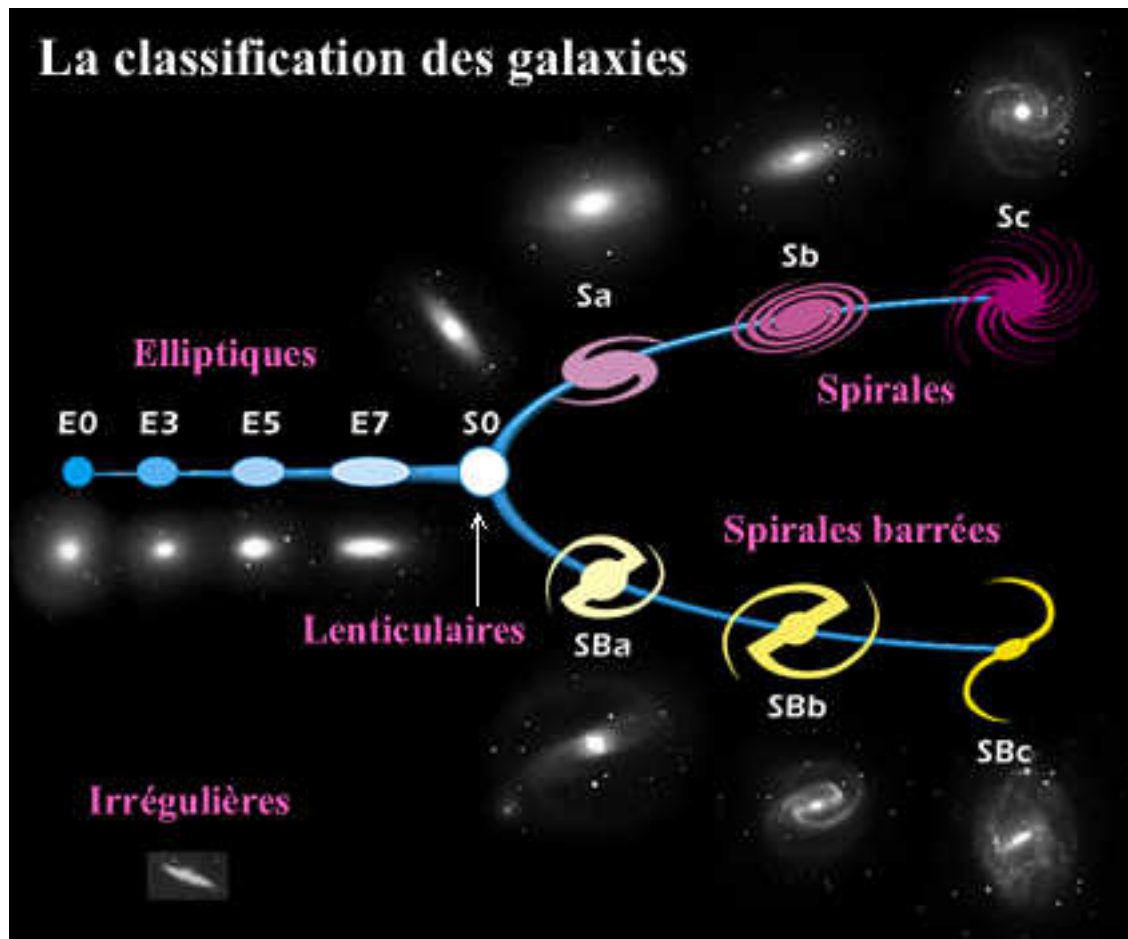
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある
＝ 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

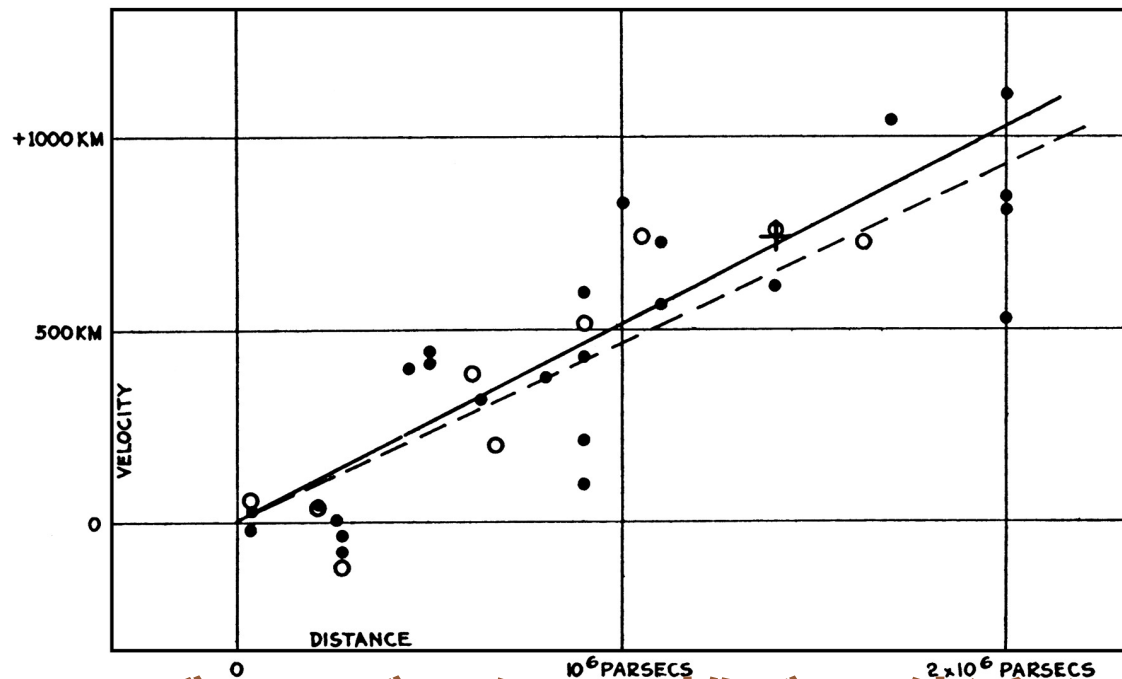
20世紀初め: E. ハッブル (1)



「星雲」と呼んできたものの多くは我々の銀河系と同じような銀河

銀河は「ハッブル系列」によって分類できる

20世紀初め: E. ハッブル (2)



遠くの銀河ほど速く
我々の銀河系から遠
ざかっている

「宇宙膨張」

我々の宇宙は「ビッグバン」から始
まった

ハッブルのデータは距離が10倍近く間違ってたので、宇宙の
年齢が地球の年齢より短くなった...

宇宙膨張と銀河

2つの問題がある。

- 宇宙全体としてはなにがおきているのか
- 一つ一つの星、太陽系、銀河とかについてはどうか？

宇宙全体としてはなにがおきているのか？

「宇宙論」の基本的問題。

＝宇宙空間というものはどうやってそこに存在できているか？

一般相対性理論で初めて本当に扱えるようになった問題。

私は良く知らない

ものが落ちないようにする方法

- 「反重力」でささえる
- 宇宙は広がっている。重力で減速はしている。
- 上の2つの組み合わせ

宇宙膨張

宇宙が全体として膨張しているとすればアインシュタイン方程式に宇宙項をつけなくても解がある：ルメートルとかド・ジッターのアイディア。これは 1920 年ころ。

遠くの銀河を観測すると本当に距離に比例した速度で遠ざかっているらしいとわかってきたのが 1930 年頃。

最初は速度－距離の比例係数の見積りがいと 10 倍違ったのでいろいろ混乱があった。

宇宙膨張の問題点

当初の問題：

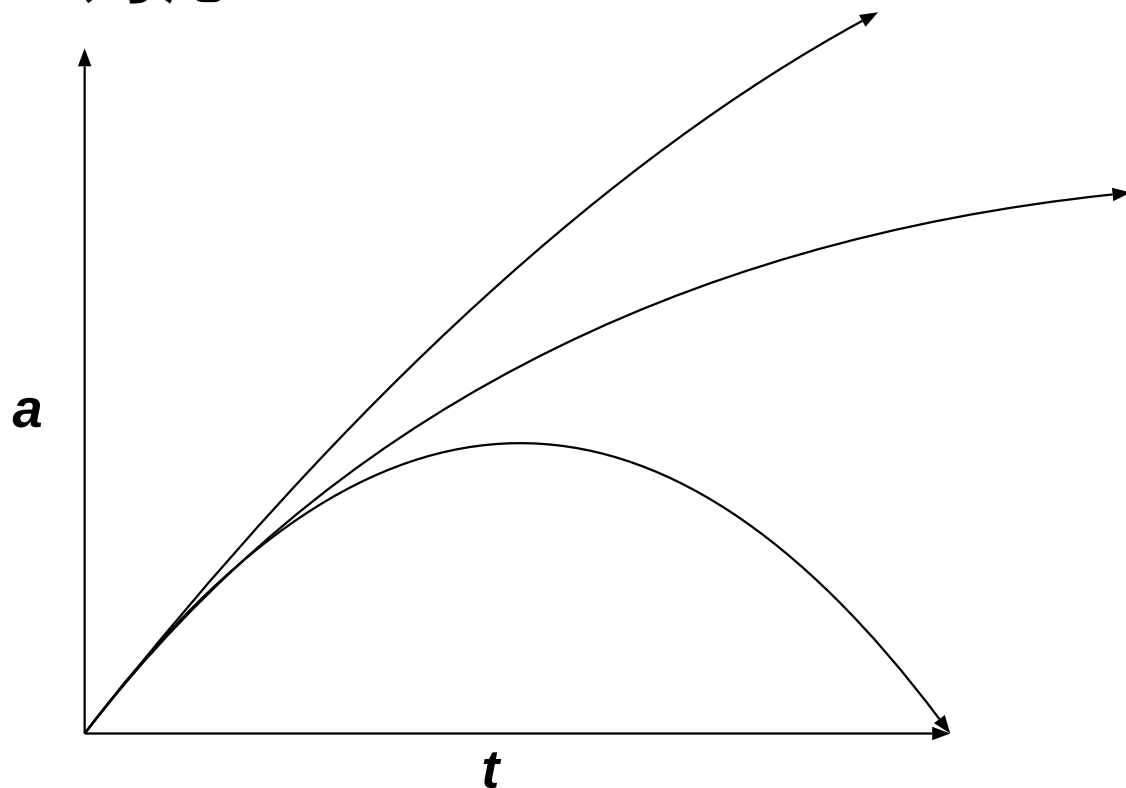
宇宙の年齢が今の $1/10$ になって、放射性元素で決めた地球の年齢よりずっと若くなった。

これを回避するために、「膨張するけれど定常で年齢は無限大」といったモデルも考えられた。

最近は大きな矛盾はなくなっている（一応）。

宇宙膨張の3通り

それぞれが2体問題の双曲線解、放物線解、楕円解
に対応



現実の宇宙は？

決定的な証拠があるかどうかにはまだ議論がないわけではないが、いまのところいろいろな観測結果ともっとも矛盾しないのは、

- 無限に膨張する
 - しかも、単純な双曲線解よりも最近膨張が速くなっている
- というのが一番「本当らしい」

加速するもの = ダークエネルギー (これもダークマターと同様、名前つけただけ)

ちなみにこの観測が2011年のノーベル賞

銀河等はどうやってできたか？

- 宇宙全体は一様に膨張しているとする、惑星とか、太陽とか、銀河はどうやってできたのか？
- 銀河は重力で星が集まっているだけなのにどうして潰れてしまわないのか？

という問題は依然として残っている。
まず、どうしてそれら、とりあえず銀河とか、ができたのか？
ということ。

重力不安定による揺らぎの成長

- 宇宙全体としては、(非常に大きなスケールでは) 一様で密度一定であるとしても、小さなスケールになると揺らぎのために一様からずれている。
- 宇宙が熱い火の玉から現在まで膨張する過程で、その揺らぎが自分自身の重力のために成長して、ものが集まってできるのが銀河とか銀河団

では、銀河はどんなふうにできるのか？

宇宙はなにからできているか

- そのへんにある普通の物質：バリオン（陽子、中性子）＋電子でできている。
- 宇宙のバリオンのほとんどは水素原子のまま（ビッグバンの最初にヘリウムやリチウムが少しできて、あとは星のなか、特に超新星爆発の時にもっと重い元素が核反応で作られる）

ダークマター？

見えるバリオンの量（星と、あとは電波や X 線でみえる水素ガスの量）：例えば銀河系の質量や、銀河団の質量のほんの一部でしかない。

銀河：回転曲線

銀河団：X 線ガスの温度から質量を推定

- 重力の理論が間違っている？
- なんだかわからないものがある？

ダークマター

- どちらが本当かというのは簡単にはいえないわけだが、今のところ「なんだかわからないものがある」というほうが主流。
- これはいろいろな状況証拠があるが、(私の意見としては) 大きいのは重力理論が違ふことにした時に、銀河毎に重力理論が違ふというわけにはいかない(統一的な説明があるはず) とすると説明が難しいということ。
- 但し、最近でも、重力法則を修正する、という話は消えてはいない

ダークマターは何か？

大きくわけて 2 つの理論：

- Hot dark matter 質量をもったニュートリノが大量にあって、それが宇宙の物質のほとんどを占めている。
- Cold dark matter 未知の素粒子があってそれが宇宙の物質のほとんどを占めている。

実はニュートリノだけではうまくいかないということがわかっている。この場合銀河団とか大きいものはできていても銀河はまだできていないことになってしまうため。

現在の宇宙に対する我々の基本的な理解

- 宇宙の物質のほとんどは、偉そうに言えば「未知の素粒子」、わかりやすくいえば**なんだかわからないもの**である。
- 宇宙は全体としては一様だが、揺らぎがあって完全に一様なわけではない。宇宙膨張の間にその揺らぎが成長して銀河とか銀河団ができてきた。

こういった理解が正しいかどうか：本当にこういうやり方で現在の宇宙の構造ができるかどうかを計算機シミュレーションで調べることである程度はチェックできる。

宇宙の大規模構造形成のシミュレーション

計算の 1 例（国立天文台理論研究部（当時）・石山さん提供）
できた構造の 1 つ
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
- あとは各粒子の軌道を数値的に積分していく。

わかること

- 宇宙全体としては膨張していく
- 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。
- （このシミュレーションでは）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。

但し

- このシミュレーションではダークマターだけを計算している
- 普通の物質 (バリオン) はない。なので星もなにもない「暗黒銀河」しかできない
- 観測と比べる時には、色々モデルをいれてこういうふうにダークマターが集まってきたらこんな銀河になるはず、みたいなことをする

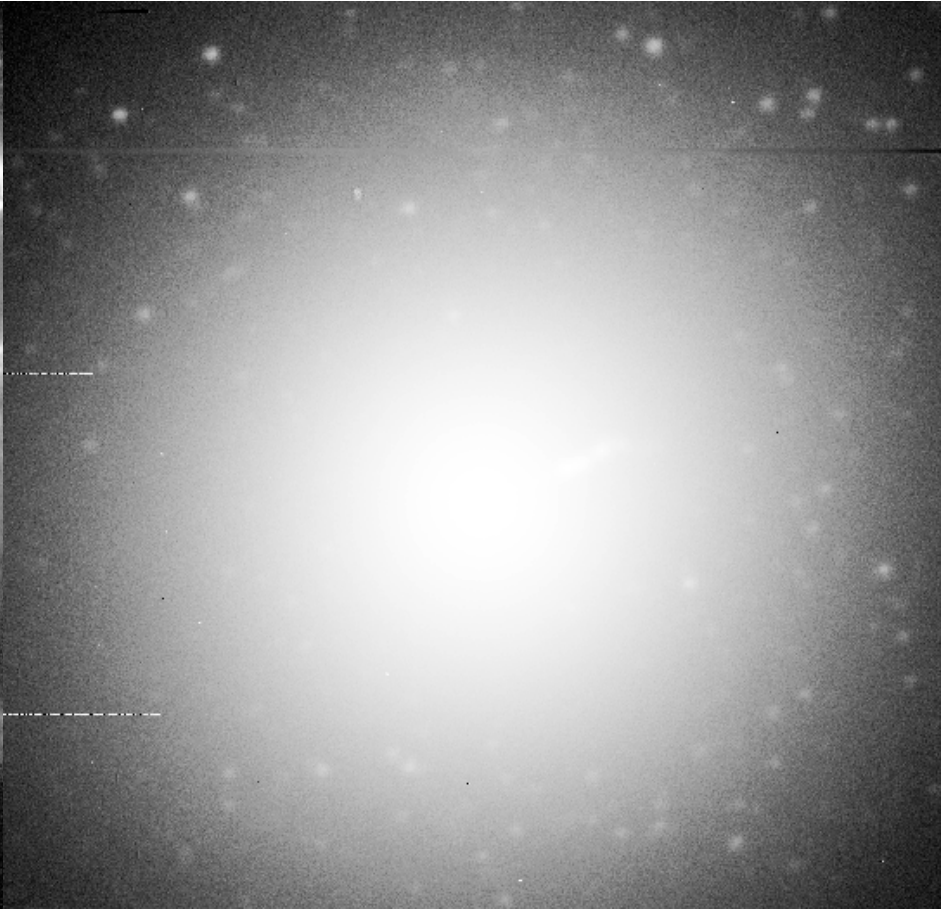
何かちょっとやりたかったことと違うような気がする

やりたかったこと: シミュレーションで銀河を作る

銀河

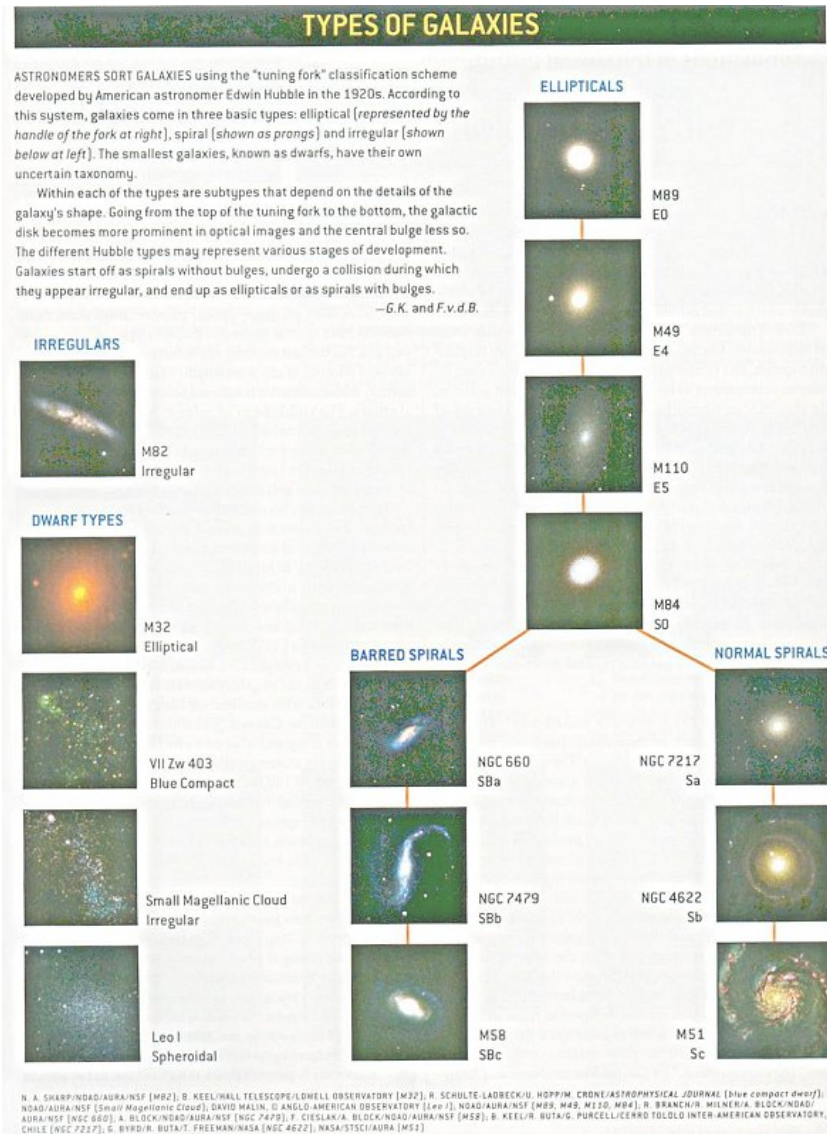


M101



M87

銀河形成シミュレーション

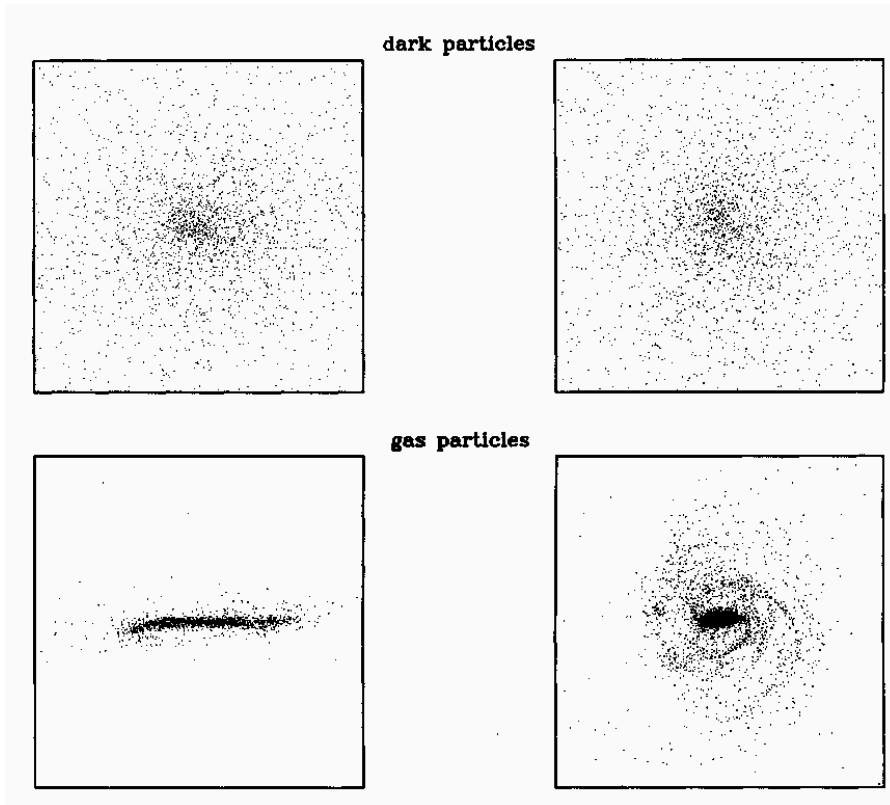


基本的な考え方

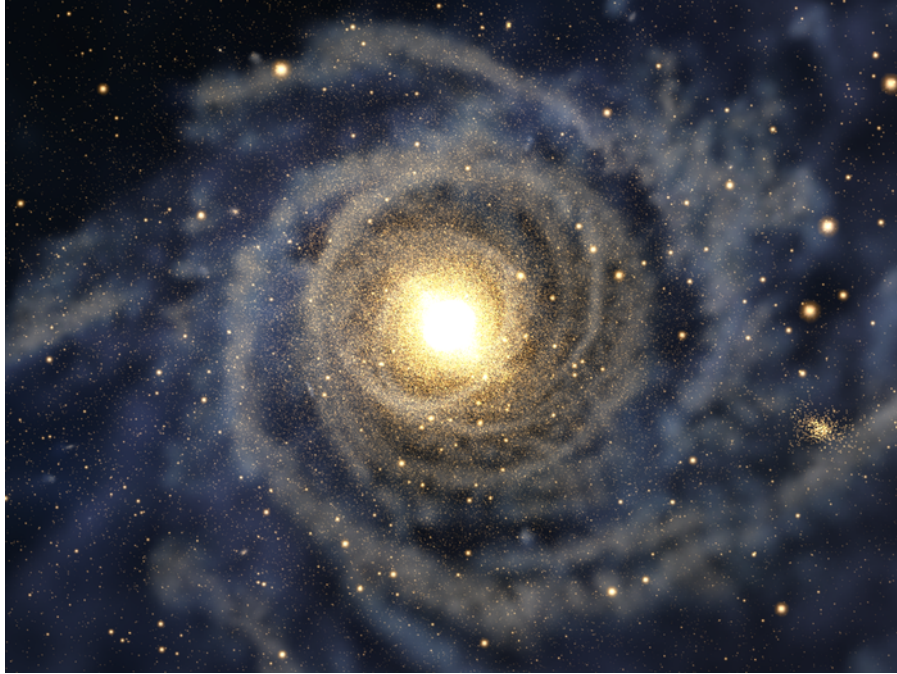
- 宇宙の初期ゆらぎから星形成までを「まるごと」シミュレーション
- 何故銀河には色々あるのか？
どうやってできたのか、を明らかにしたい。

Katz and Gunn 1992

- Dark Matter + ガス + 星
- DM, 星: 粒子、ガス:SPH 粒子
- 10^4 粒子、Cray YMP 500-1000時間
- 質量分解能: 10^7 太陽質量くらい



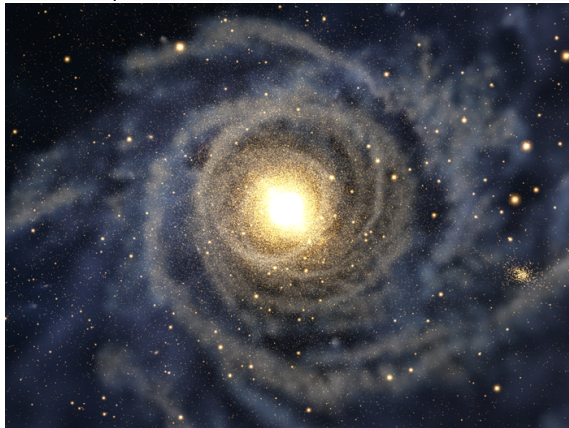
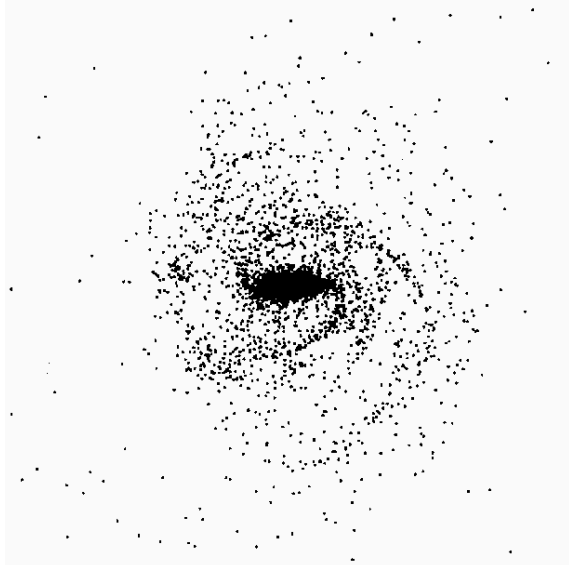
Saitoh et al. 2005



アニメーション

- Dark Matter + ガス + 星
- DM, 星: 粒子、
ガス:SPH 粒子
- 2×10^6 粒子、GRAPE-5
11 ヶ月
- 質量分解能: 10^4 太陽質量
くらい

分解能をあげたことの御利益



- たいして変わらない？
- 実はこの計算では本当はたいして変わらない。
- 本当の利益: サブグリッドの星形成、超新星フィードバックモデルの「精密化」

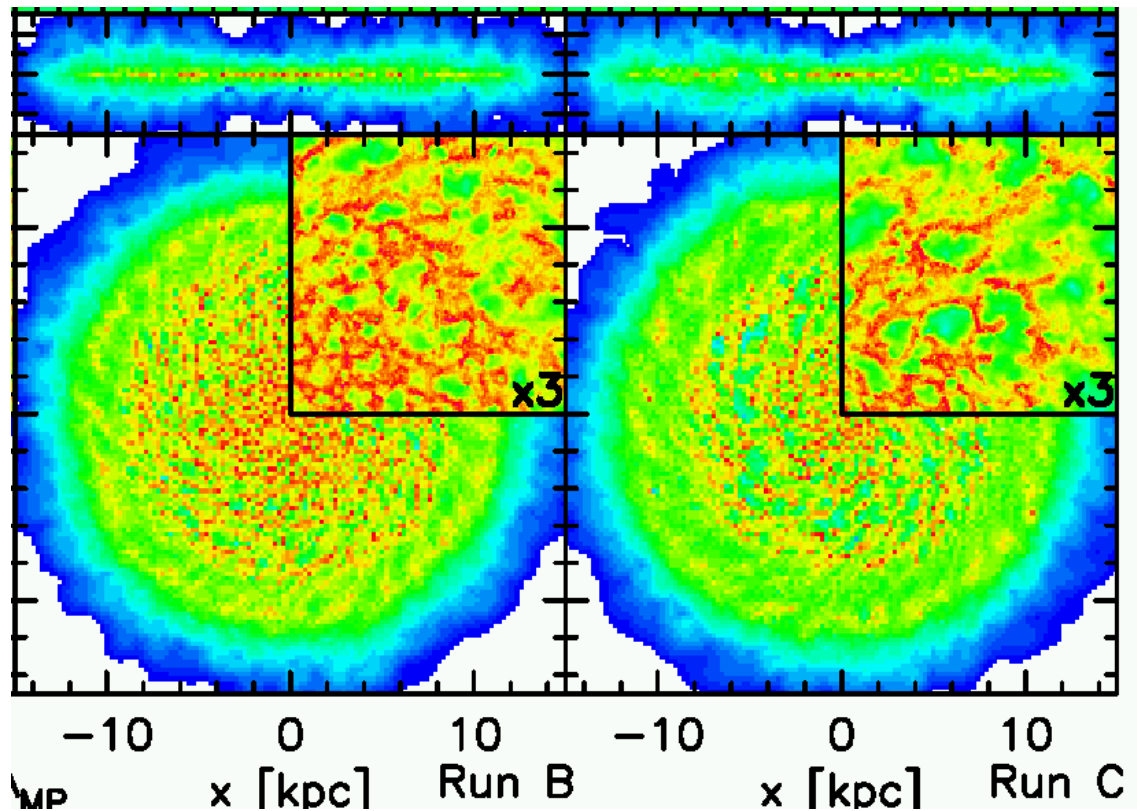
星形成のモデル

- 星形成シミュレーションに必要な質量分解能: 最低限 10^{-4} 太陽質量くらい
- 現在の銀河形成シミュレーションの最高の分解能: 10^3 太陽質量
- 「適当に」星を作る必要あり
 - ガスの密度、温度、速度場の発散がある条件を満たしていると、「適当な」タイムスケールで星ができる、とするのが普通
 - パラメータ 3 個くらい
 - パラメータの選び方でどんな銀河ができるかが変わる
- 超新星爆発の扱いも同様な問題あり

どこまで分解能上げる必要があるか？

- やって見ないと本当はわからない
- 理論的には、「ある程度密度が上がればそこから先はほぼ全部星になる」でいいはず
 - 星を作り過ぎると超新星による加熱で星形成率が下がる
 - 星があまりできてないと星形成率があがるという調節が働くはず
- そういうきざしが見えてきた。

Saitoh et al. 2007

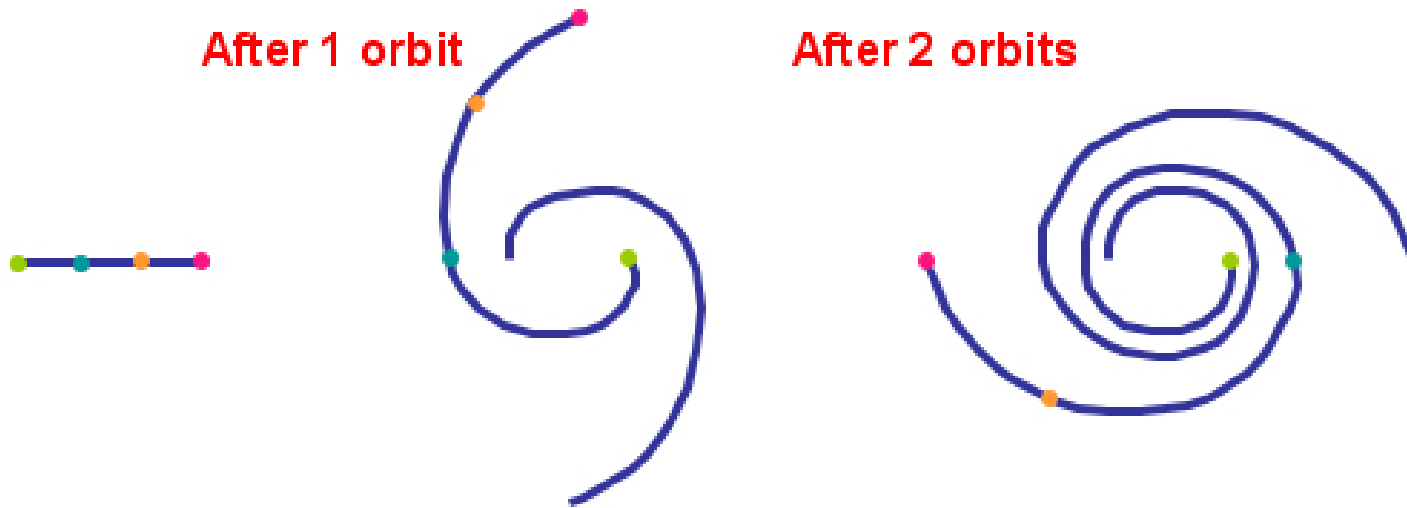


- 星ができる速度を 15 倍変えている。
- 実際にできる星の量はあまり変わらない。銀河の構造もあまり変わらない。
- 昔の、分解能が低い計算だと 15 倍変えたら銀河が爆発した

銀河をいきなり作る前に もうちょっと地道に

- 銀河の渦巻構造はシミュレーションで再現できるか？(斎藤君のも実はあんまり渦巻銀河らしくない)
- そもそも銀河の渦巻構造はどういうふうに行っているのか？— これが実は良くわかっていない

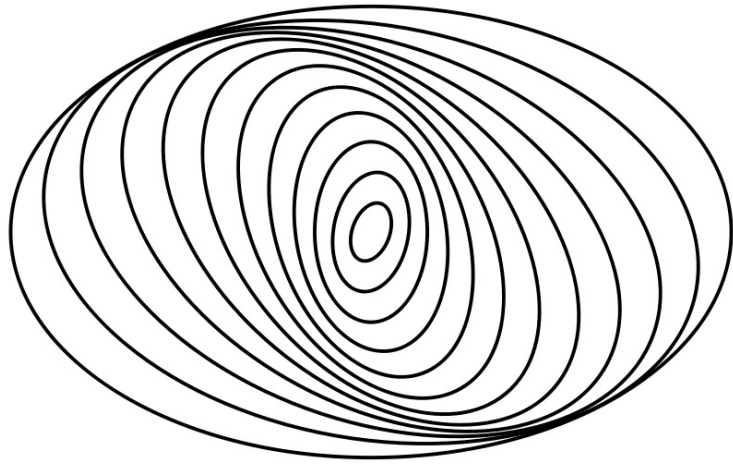
巻き込みの困難



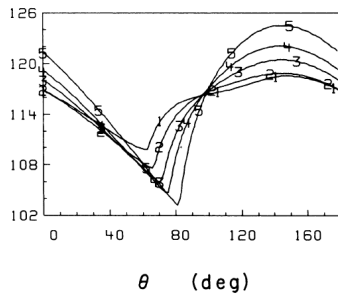
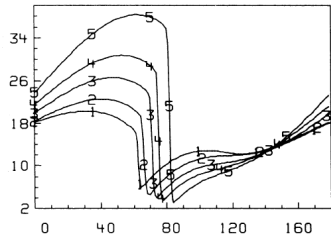
外側のほうがゆっくり回っているので、どんどん巻き込んでいくはずなのに、観測されている銀河の腕はそうになってない

30年くらい前から教科書にのってる理論

— 定常密度波理論



- 左の図のように、「何故か」星は楕円軌道をそろって回っていて、その軸が半径によってずれると「仮定」する
- そう仮定すると時間たっても消えない渦巻構造はできる
- 「何故か」は不明なんだけど、、、
- 他の説も色々あるけどこれが正しいという決定的なものはない
- 数学的には色々議論できるのは密度波理論

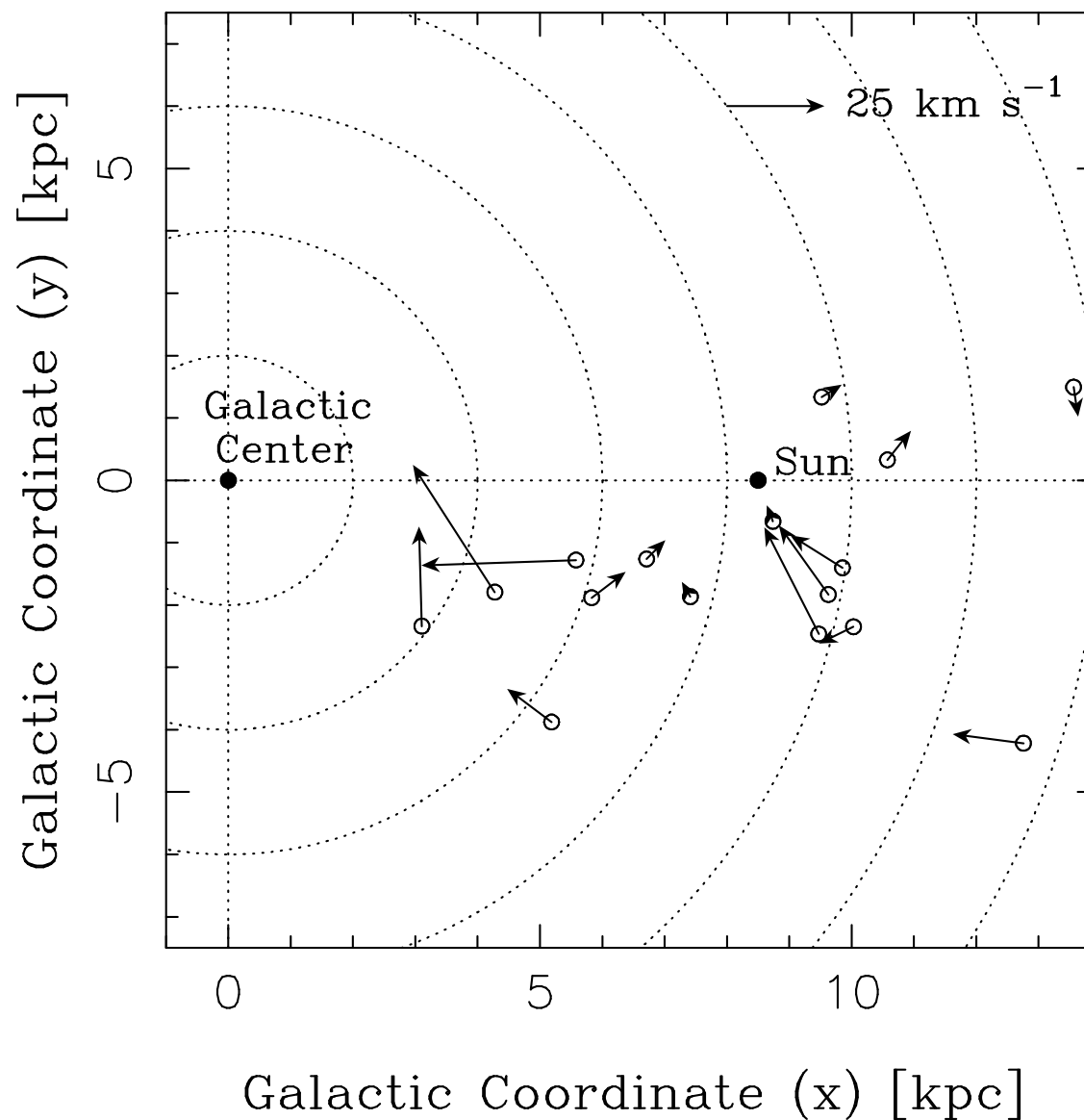


良くわかってなかった理由

- 現実の銀河系の中で腕がどう動いているかわかってなかった
- シミュレーションでは長時間腕を維持出来てなかった

最近の観測

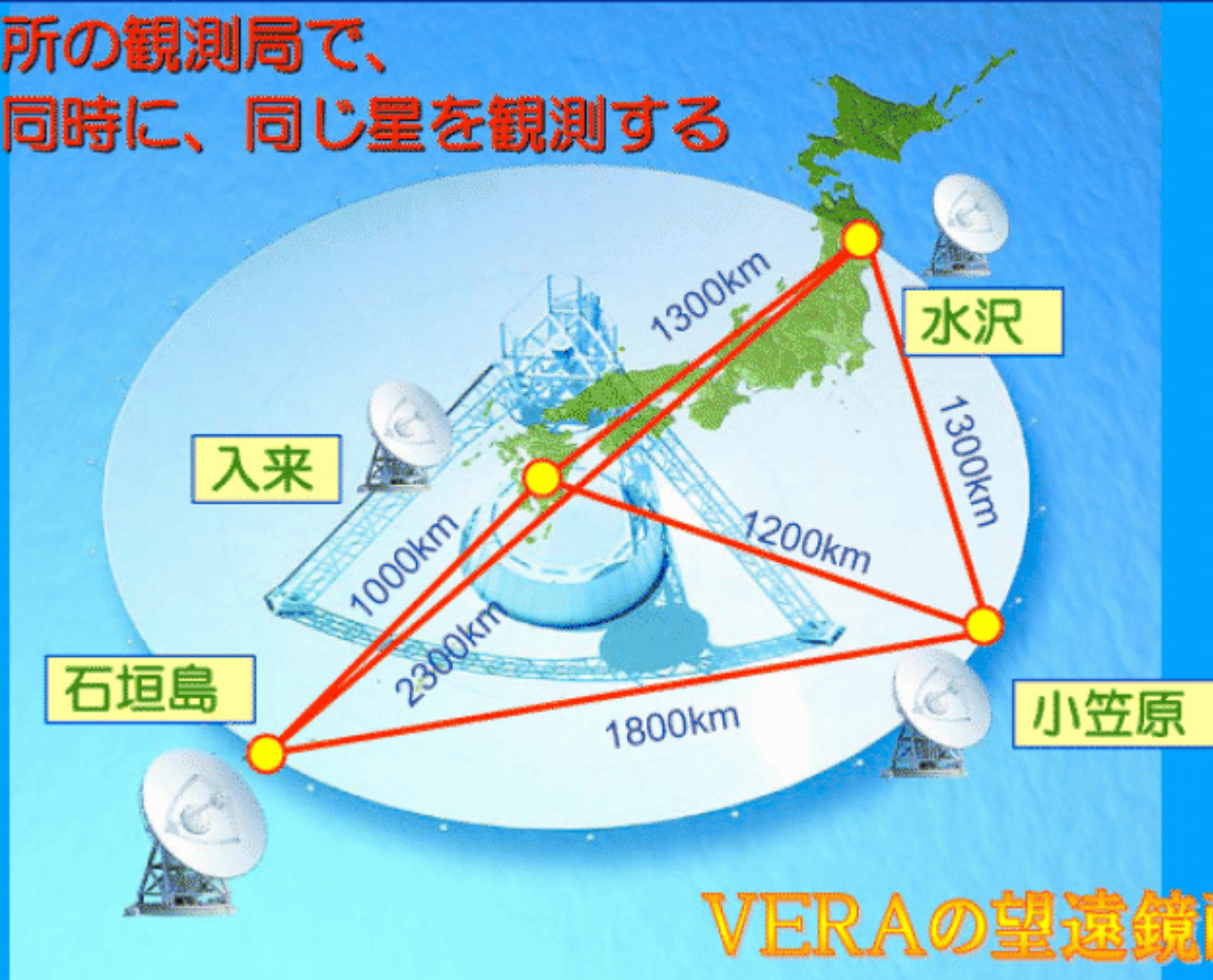
- VLBI (超長基線干渉計) で遠くの星の距離と動く速度を三角測量で決める
- アメリカの VLBA と日本の VERA の観測結果が主
- データ集めたのが右図



VERA

口径2300kmの電波望遠鏡！

4ヶ所の観測局で、
同時に、同じ星を観測する



VERAの望遠鏡配置

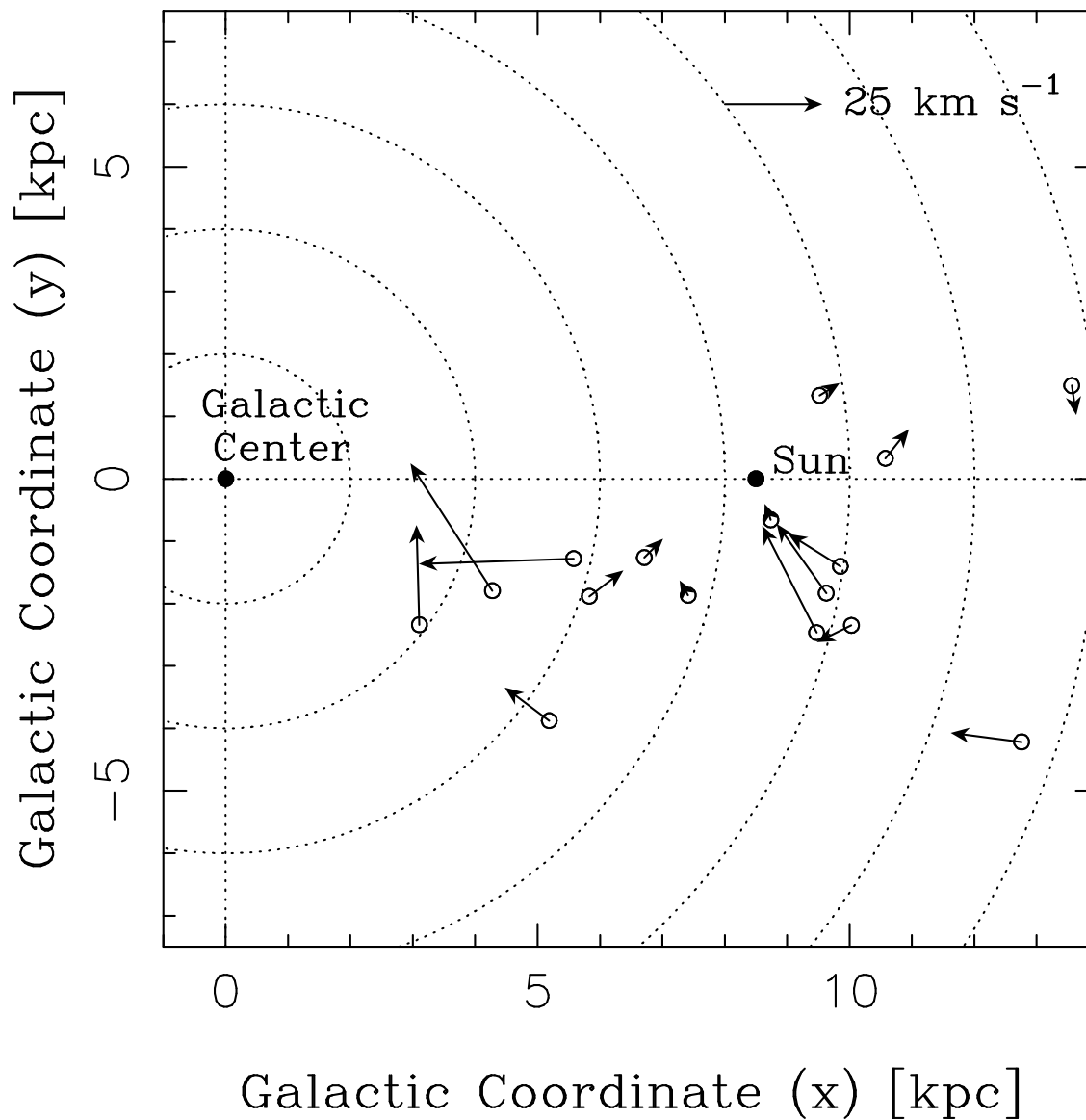
但し

とても大変な観測

- 空間分解能は高いけれど、感度はそんなに高くない
＝ 特別に明るい天体しか見えない
- 三角測量 ＝ 年に何回も観測しないといけない (原理的には最低3回)
- 実はその間に明るい場所が変わったりする
- 望遠鏡の位置、大気による遅延その他の誤差が 1cm 以下でないといけない
- 天体のほうの広がりやその変化の影響もある

最近の観測

- 結構円運動からはずれて動いている
- 定常密度波理論はこういうことはいはず



はて？

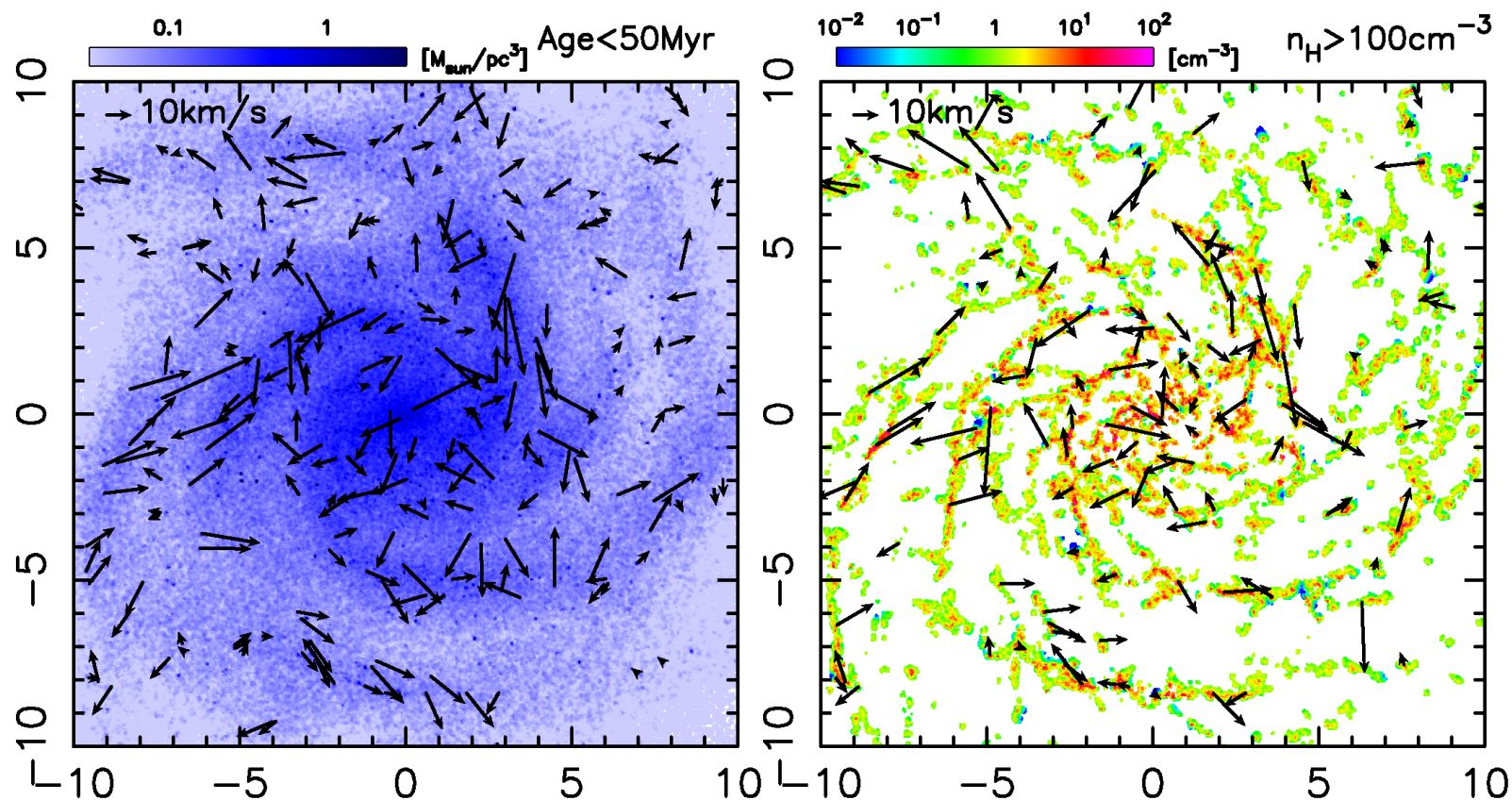
最近のシミュレーション

(馬場他 2009)

animation 1 2)

空間構造と、円運動からのずれ

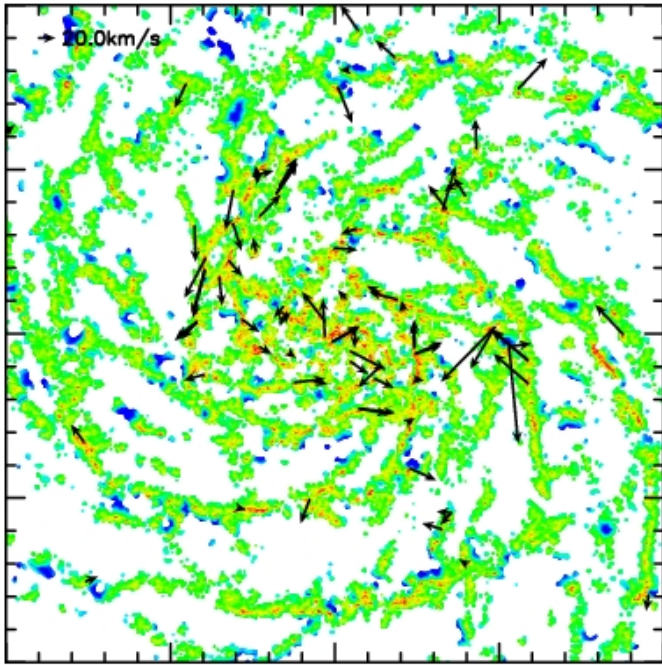
TIME=500Myr



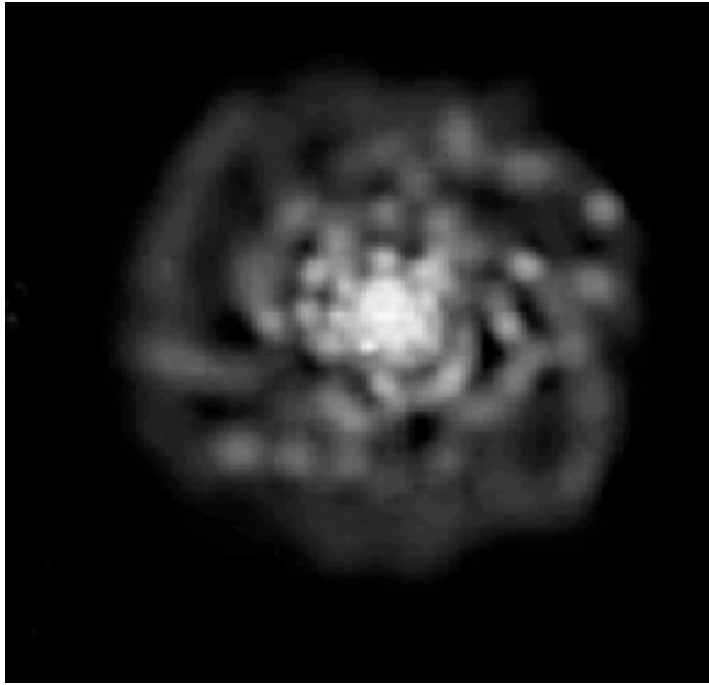
左:星の分布

右: 冷たい星間ガス

観測と比べると



ちょっと昔のシミュレーションは



昔の計算と何が違うか？

昔の計算

- 空間分解能 $\gg 100\text{pc}$
- ガスの温度は1万度以上を保たせる
- 星は $\rho \geq 0.1\text{cm}^{-3}$ (銀河内の平均密度くらい) でできる

(こうしないと計算できなかった)

最近の計算

- 空間分解能 $\sim 10\text{pc}$
- ガスは絶対温度 20K まで冷却できる
- 星は $\rho \geq 100\text{cm}^{-3}$ (まあ分子雲くらい) でできる

数値計算法の色々な改良(というか、原理的に問題があったところの修正等)で可能になった。

星の運動を見ると

motion of stars
motion in $E - L_z$ plane

- 渦状腕は常に新しく作りだされる
- 星は半径方向にかなり大きく動く

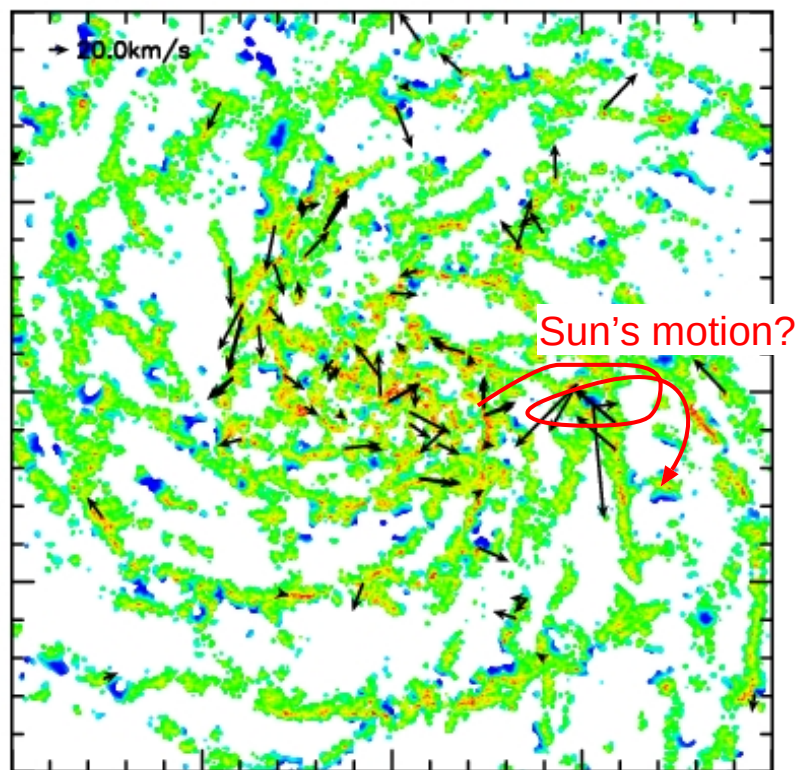
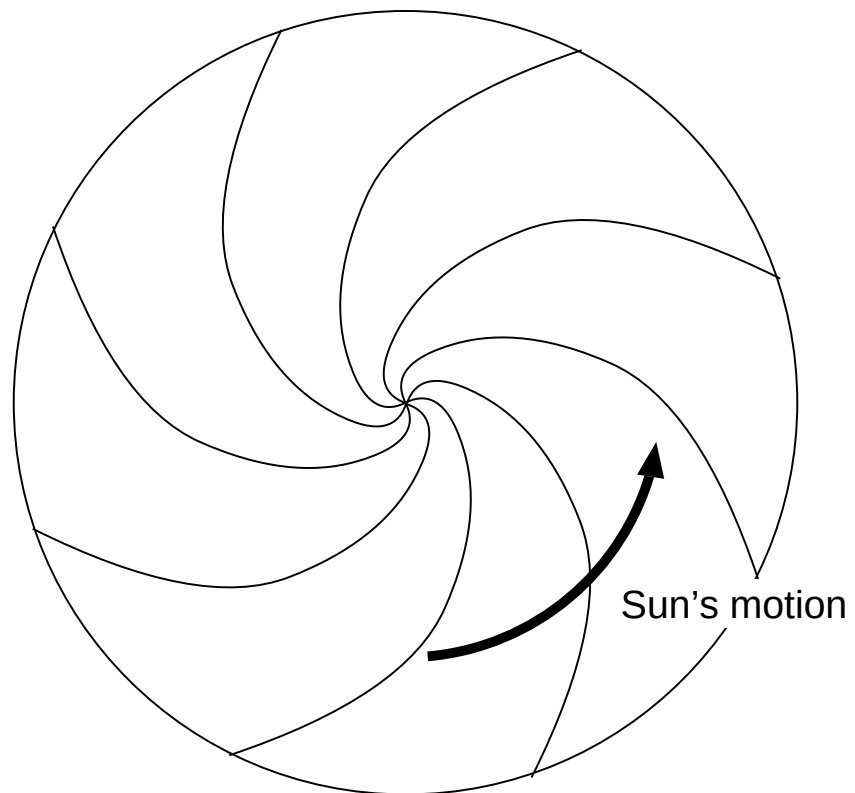
星だけの円盤の計算

(藤井他 2010)

Animation a1
Animation a2
Animation b1

- 軸対称な、腕がないところから計算始める
- 腕は勝手にできて、100 億年くらいはきえない
- ある種の定常状態になっている

従来の見方と新しい見方



ここまでのまとめ

- 銀河の渦巻構造についての理解はここ数年で全く変わりつつある。
- 渦巻は時間定常な構造ではなく、常に生成消滅している。
- いわゆる「巻き込みの困難」は、常に新しい腕を作り出すことで解決された。
- 星もガスも単純な円軌道ではなく複雑な運動をする

理論研究のやり方

色々なスタイルがある。

- 新しい観測結果に対して説明する理論モデルを作る
- 昔からある大問題に取り組む
- 統一的な理解を構築していく
- その他

どれが良い、というものでもない(ノーベル賞狙いなら最初の)。

シミュレーション研究

シミュレーション：数学モデルの方程式に対して、数値解を与えること

- **利点：解析的に解けない方程式でも答はでる**
- **問題点：なんでも解けるほど計算機は速くない。そのために答が間違ってる（信用してはいけないところの答を使ってしまう）ことも多い。**

なので、「より信用できる答を出す方法の研究」は極めて重要なテーマになる。

- **研究者個人にとって：他の人と戦うための強力な武器**
- **分野全体にとって：確実にできることが広がる有用な成果**

というわけで、方法の研究に結構集中してきたと思う。他の人より良い道具をもつてるとできる研究はいくらでもある。

方法の研究等

1. シミュレーション用のプログラムを書く (デバッグする)
2. シミュレーション用の新しい計算方法を研究する
3. シミュレーション用の計算機を作る
4. シミュレーション用の計算機のための予算をなんとかする

プログラムの開発

- 最近どんどん計算機が使いにくくなっているので大変
 - － 沢山の計算機の上での並列プログラム
 - － GPGPU の利用、CPU 内複数コアの利用、キャッシュの有効利用、、その他もろもろ
- 分野によっては、多数の研究者からなるチームでプログラム開発
- 方法やできる研究が制限される危険性がある。あんまり良い方向ではない

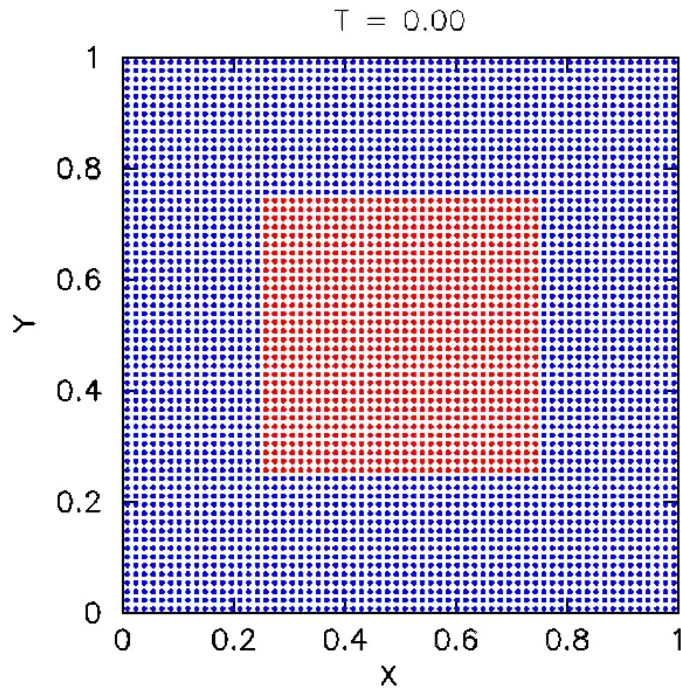
新しい計算方法の研究

- 計算機シミュレーションはそんなに長い歴史はない(せいぜい70年)。
- なので、方法はまだまだ未熟。改良の余地はいくらでもある
- 数学的な定式化、、物理的モデル、計算アルゴリズム、と様々なレベルでの研究がある。

これは普通の理論研究に近い進めかた。解決したい問題があって、色々考えてアイデアをだして、それが実際に上手くいくかどうかさらに検討、という感じ。
アイデアはあとから見ると当たり前に見えるので、どういふふう
に思い付いたのかよくわからない。

方法の研究

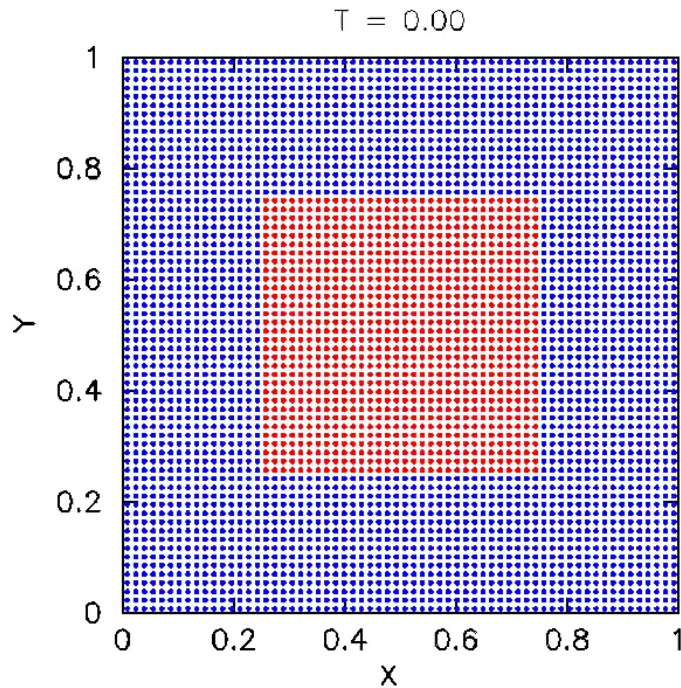
最近やっていること (Saitoh and Makino 2012)
SPH 法 (粒子によって流体を表す方法) の改良
密度が違うだけの2種類の流体



従来の方法 改良した方法
空間微分の定式化を変更した

方法の研究

最近やっていること (Saitoh and Makino 2012)
SPH 法 (粒子によって流体を表す方法) の改良
密度が違うだけの2種類の流体



従来の方法 改良した方法
空間微分の定式化を変更した
(今までの計算は大丈夫なんだろうか?)

計算機を作る話

基本的アイデア—近田提案

1988 年、天文・天体物理夏の学校

88/11(2)

ス、ス、

12 26

「計算機を使う，計算機の技術を使う」

近田義広（国立天文台・野辺山）

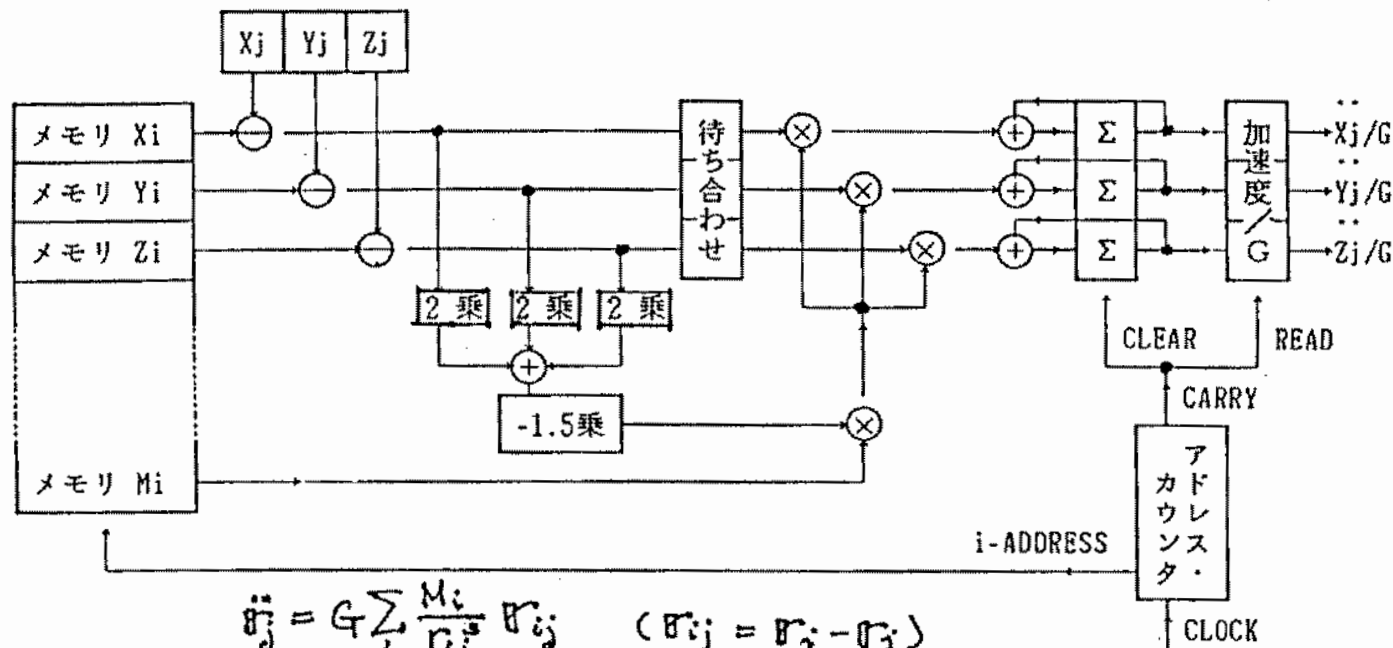
観山さんは理論の立場から見ると，現在の日本ではスーパーコンがどんどん使えるからイニシアチブをとる良い機会だと話されました。私は，その素晴らしい計算機を作り出す技術をうまく使いこなし，天文に応用すれば，計算機の利用者に止まる場合よりもっと大きな成果を期待できるぞ！ということをお話します。

- 計算機買うんでなくて作れ！
- 近田さんは電波天文学の専門家。データ処理用の計算機を開発した。

近田提案のポイント

- 計算機は10年で100倍速くなる
- 同じ製品系列だと10倍しか速くならない
- 専用化すれば2－3桁価格性能比をあげられる
- 多体問題なら 400万円 250 Mflops
- 数億円なら 100 Gflops
- 「但し、近田電子製作所の見積もりは甘いという声もあることを付け加えます」

近田さんによるパイプライン概略図



+, -, ×, 2乗は1 operation, -1.5乗は多項式近似でやるとして10operation 位に相当する。
 総計24operation.

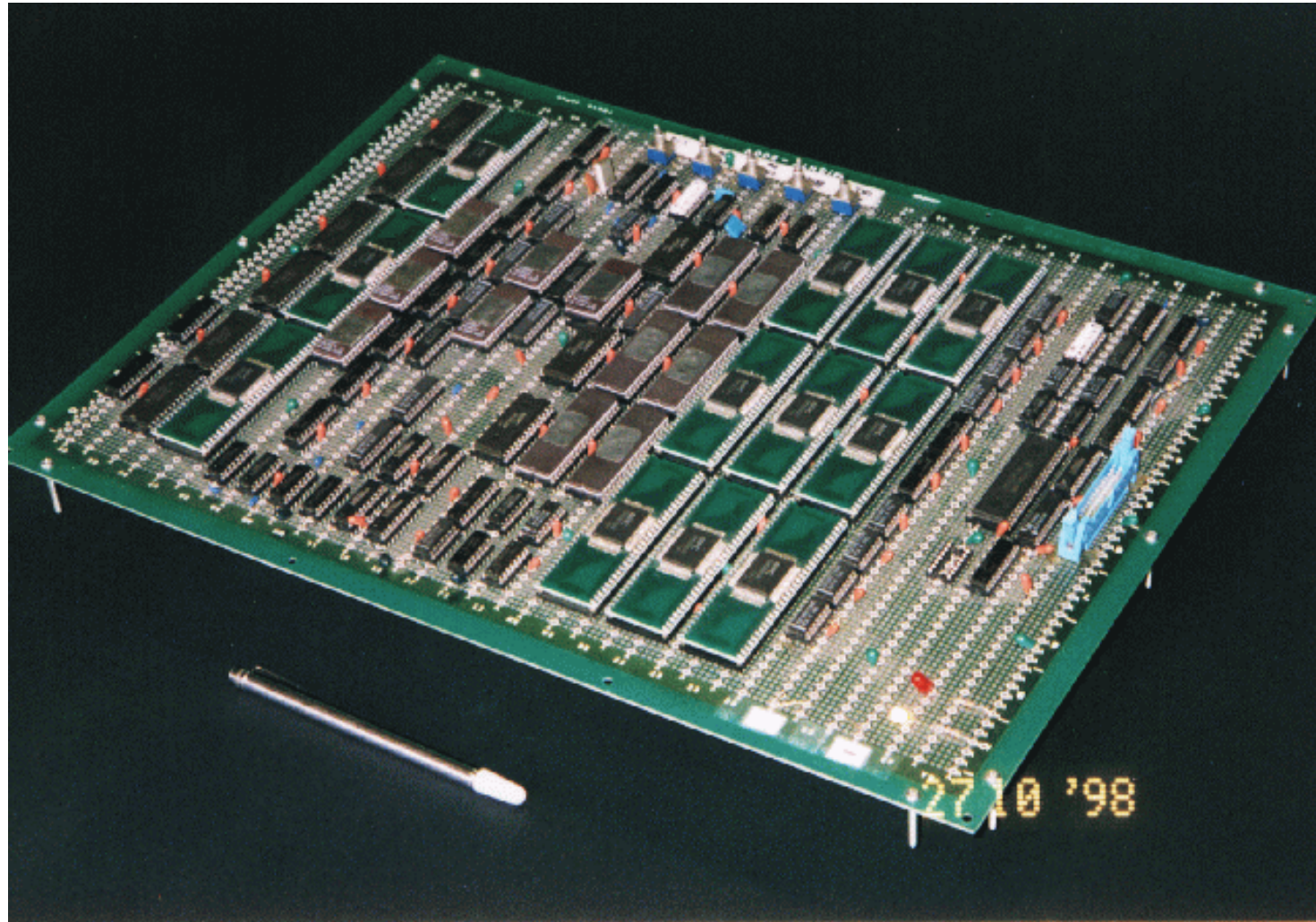
各operation の後にはレジスタがあって、全体がpipelineになっているものとする。

「待ち合わせ」は2乗してMと掛け算する間の時間ズレを補正するためのFIFO(First-In First-Out memory)。

「Σ」は足し込み用のレジスタ。N回足した後結果を右のレジスタに転送する。

図2. N体問題のj-体に働く重力加速度を計算する回路の概念図。

GRAPE-1(1989)



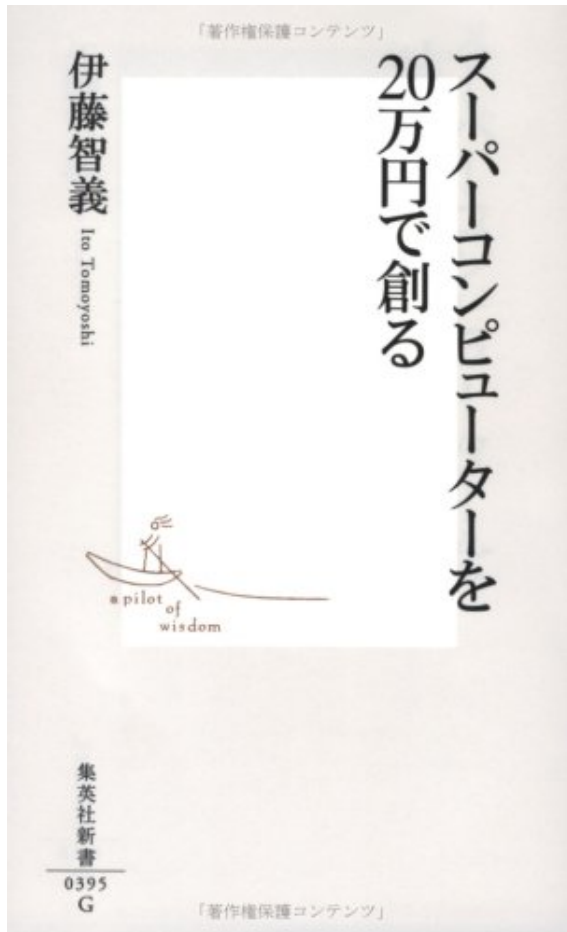
当時 M1 の伊藤君 (現在千葉大工学部教授) が作った。

近田さんによる当初案との違い

中間での語長を8ビット、座標表現、加速度の積分は固定小数点でそれぞれ 16, 48 ビットにした

- 掛け算しないところは語長長くてもハードウェアは(それほど)大きくならない
- 2粒子間の力の必要な精度は低い。多数の粒子があることで統計的に高い精度が出れば十分(な場合がある、ということを経験的に示せた)。
- 銀河合体による楕円銀河の形成(奥村ら)
- 「激しい緩和」(船渡ら)

伊藤君の本



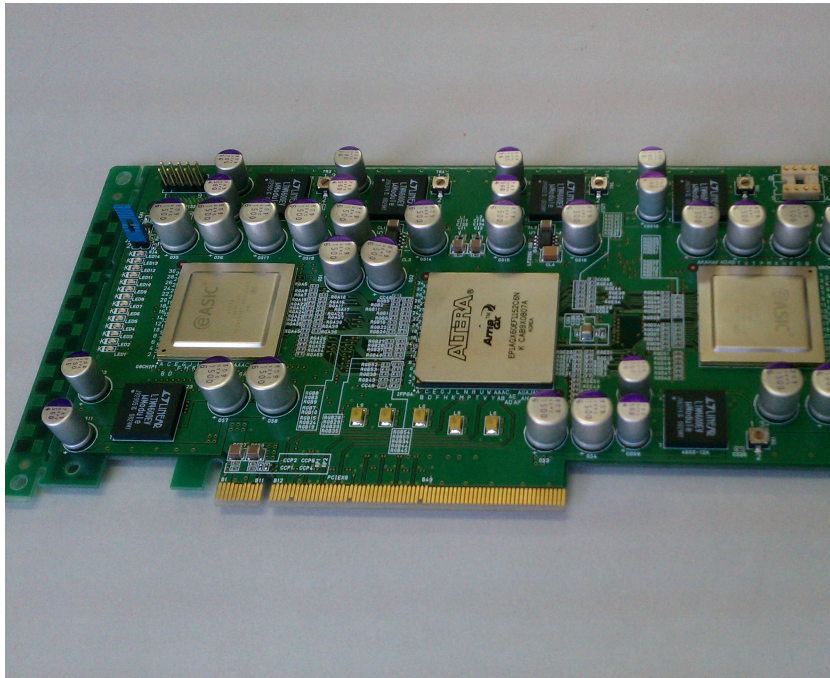
- 伊藤君はコミック「栄光なき天才たち」の原作をやった
- 数年前に本出した
- どんなふうの開発進んだか、は本を参照

GRAPE-3 — 低精度計算用 LSI

- 大雑把には GRAPE-1 パイプライン(但し、大きなROMは使えないので対数での加算の実装は全く違う)
- 仕様決定、シミュレータ(Cで記述)は牧野
- 論理設計以降は富士ゼロックス(橋本、富田)
- SCS Genesil で設計
- ファブは NS. $1\mu\text{m}$
- ボードは奥村
- 1千万ちょっとの予算で 20Gflops を実現。

この後

- 1992-1995 GRAPE-4 640Mflops/chip
- 1997-2001 GRAPE-6 30Gflops/chip
- 2004-2008 GRAPE-DR 400Gflops/chip (65W、プログラム可能)
- 2009-2011 GRAPE-8 480Gflops/chip (13W)



GRAPE

- GRAPE は極めて高い価格及び電力あたり性能を実現し、サイエンスをかなり進めた
- 単純に専用化したというのではなく、必要精度、アルゴリズム等を見直し、ハードウェアからアルゴリズムまでを一体のものとして設計、最適化することで高い性能を実現した。
- 今後も続けていく。

御静聴ありがとうございました。