

# スーパーコンピューターの中の宇宙

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

# 概要

- 銀河形成についてどんなことがわかっているか
- 大規模計算の意義
- 渦巻銀河の渦巻の形成・維持のメカニズム

# 銀河形成

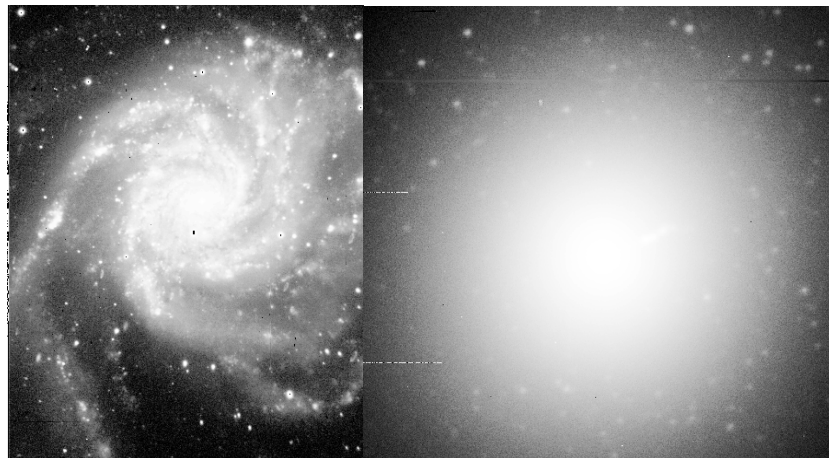
# なにが問題か？

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？

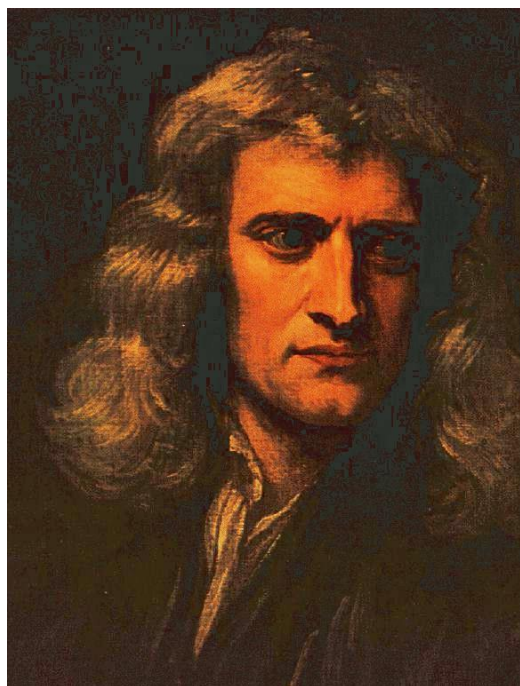
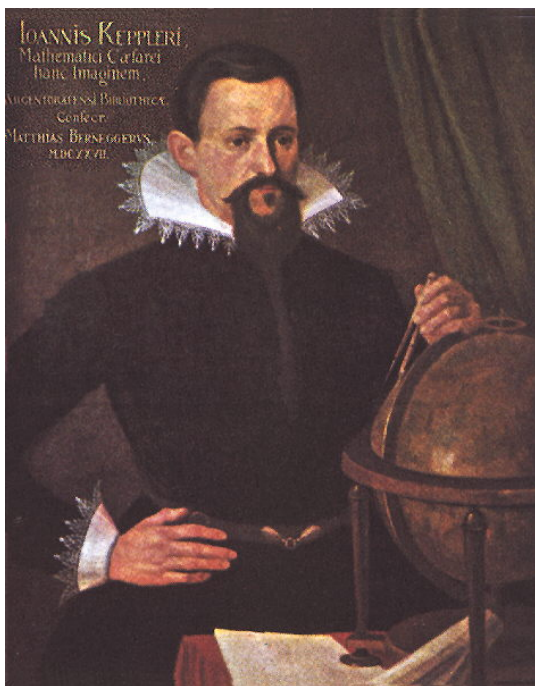
どうやってできたのか？

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。

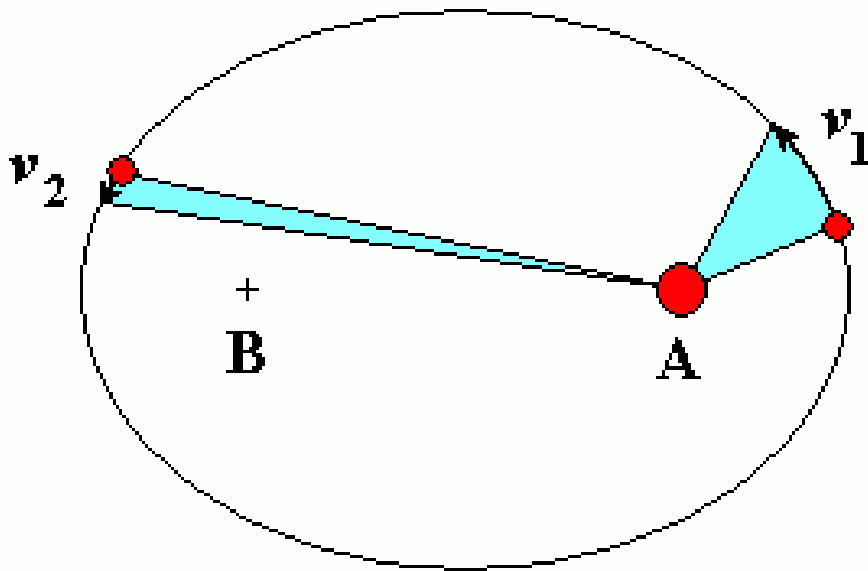


天体の運動も、地球上と同じ物理法則に支配されている。

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

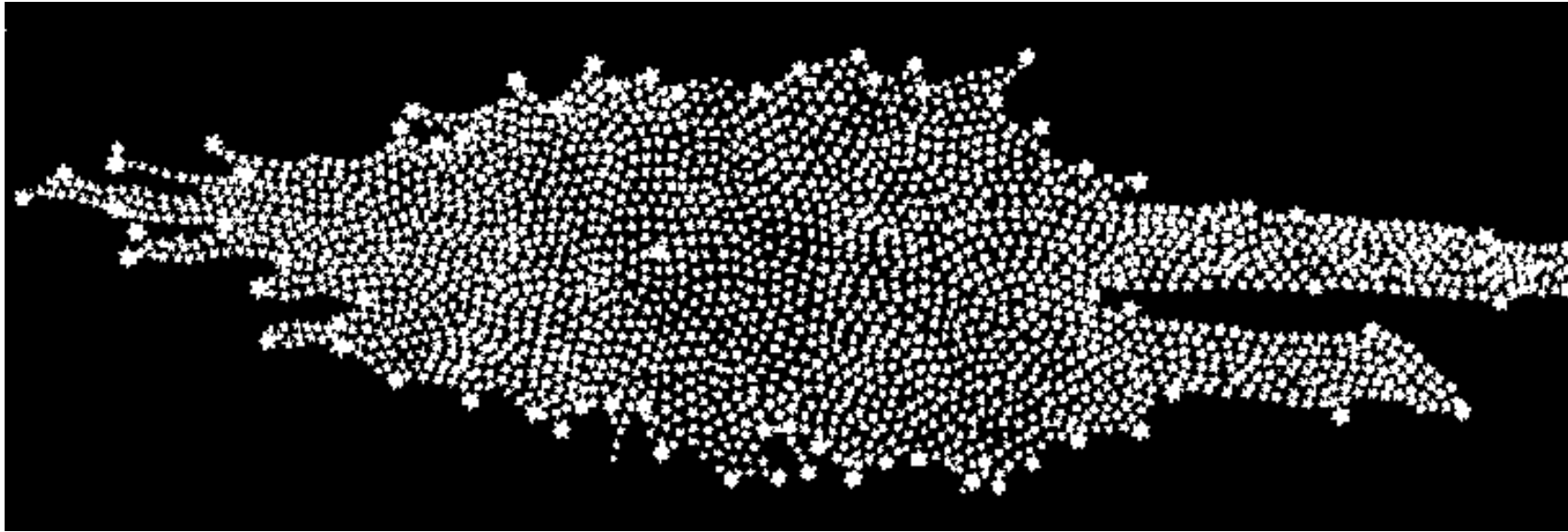
$$F = -G \frac{Mm}{r^2}$$

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。

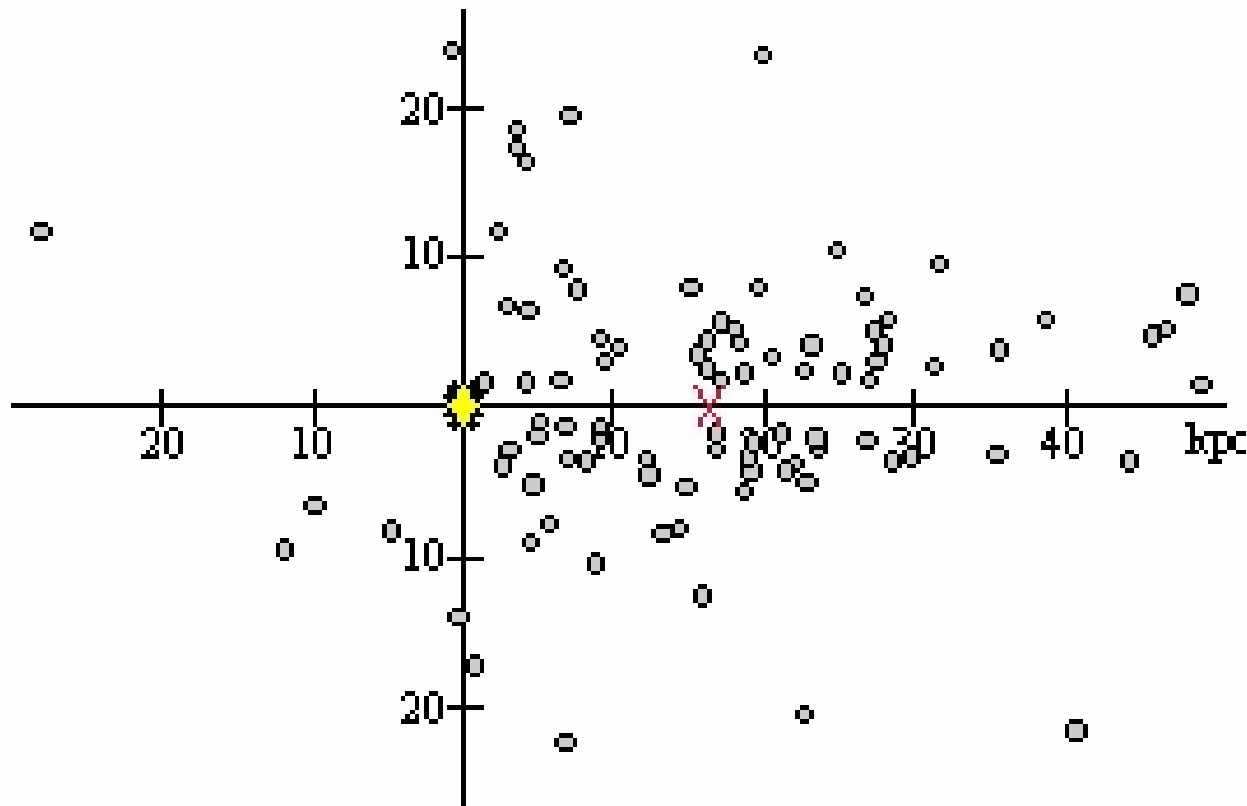


星の分布は一様ではなくてひらたくなっている = 銀河の発見

# 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

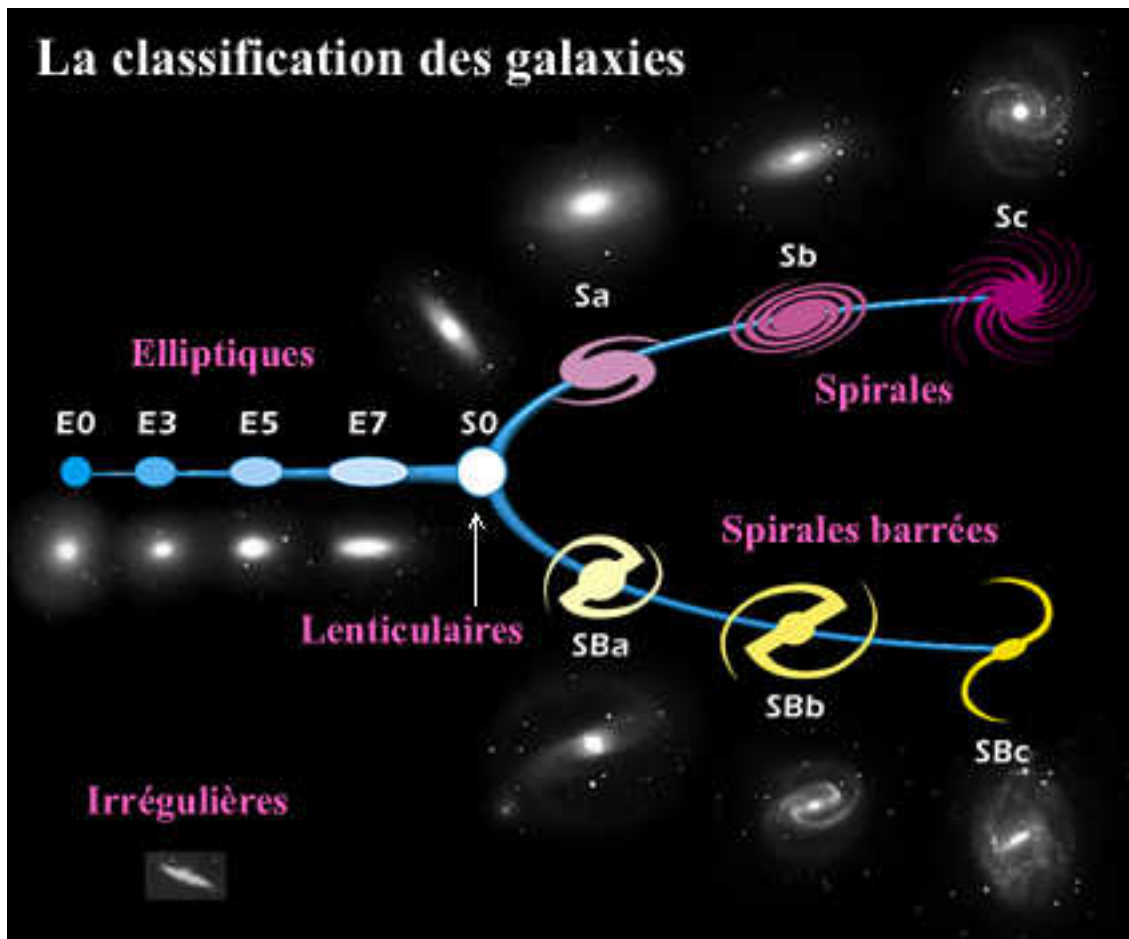
Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。



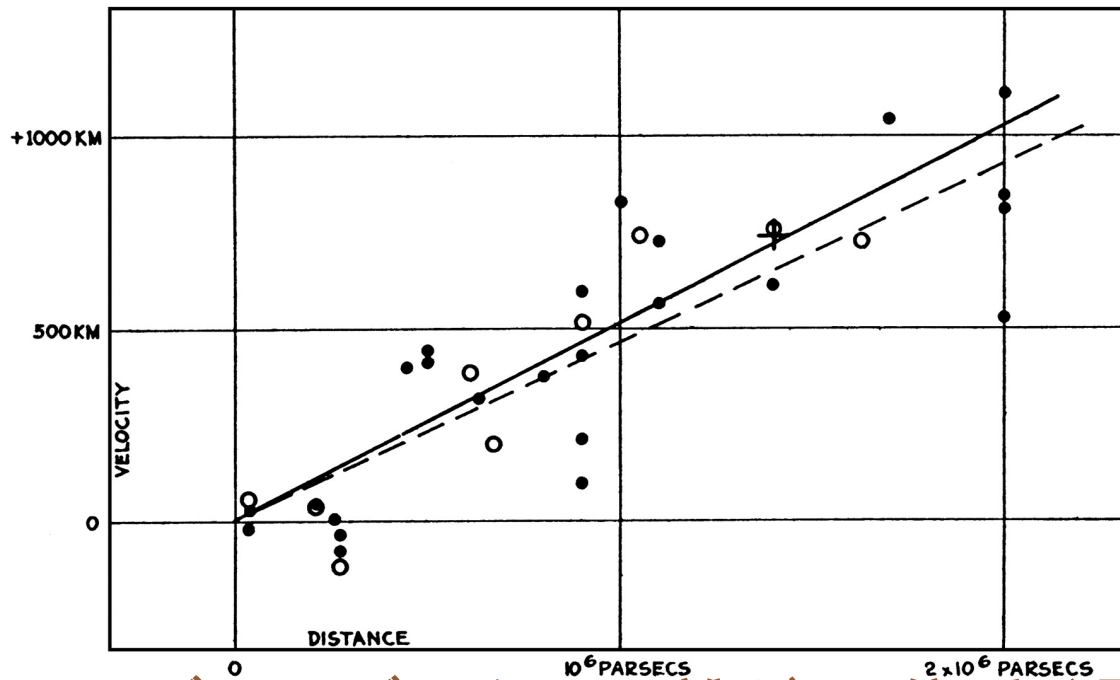
# 20世紀初め：E. ハッブル (1)



「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...

# 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見えるのか？

# 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うことにした時に、銀河毎に重力理論が違う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 戦略分野5 石山さん  
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

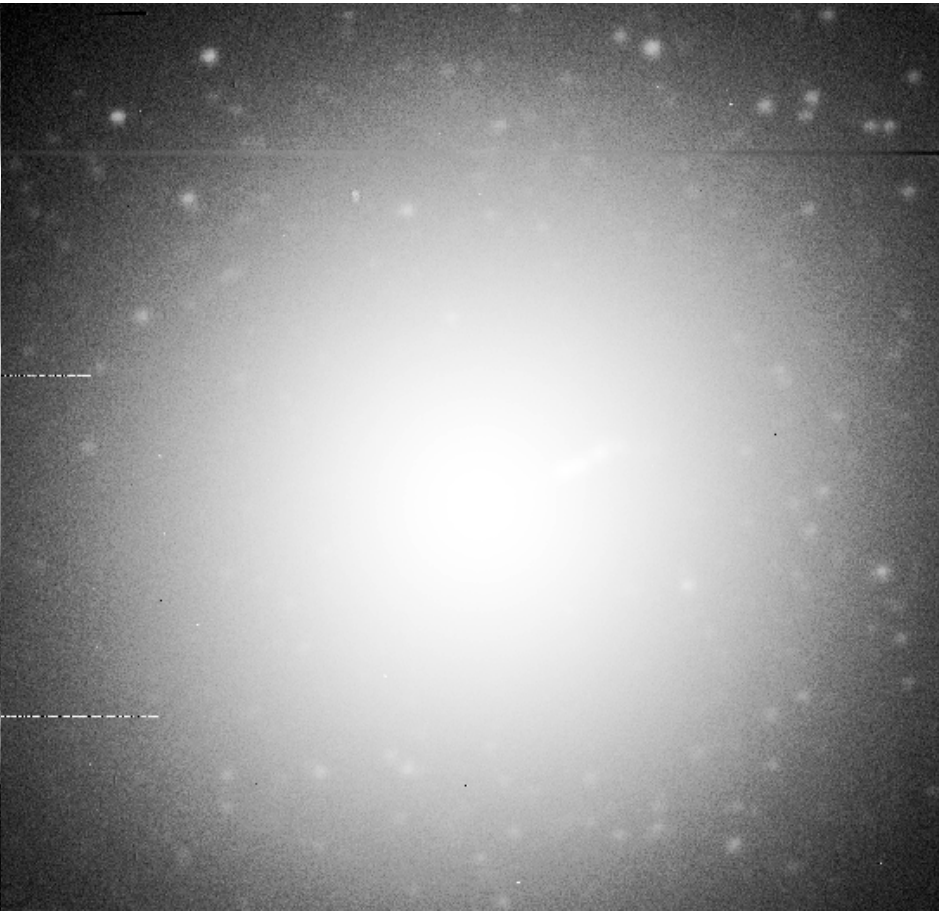
何かちょっとやりたかったことと違うような気がする

やりたかったこと: シミュレーションで銀河を作る

# 銀河

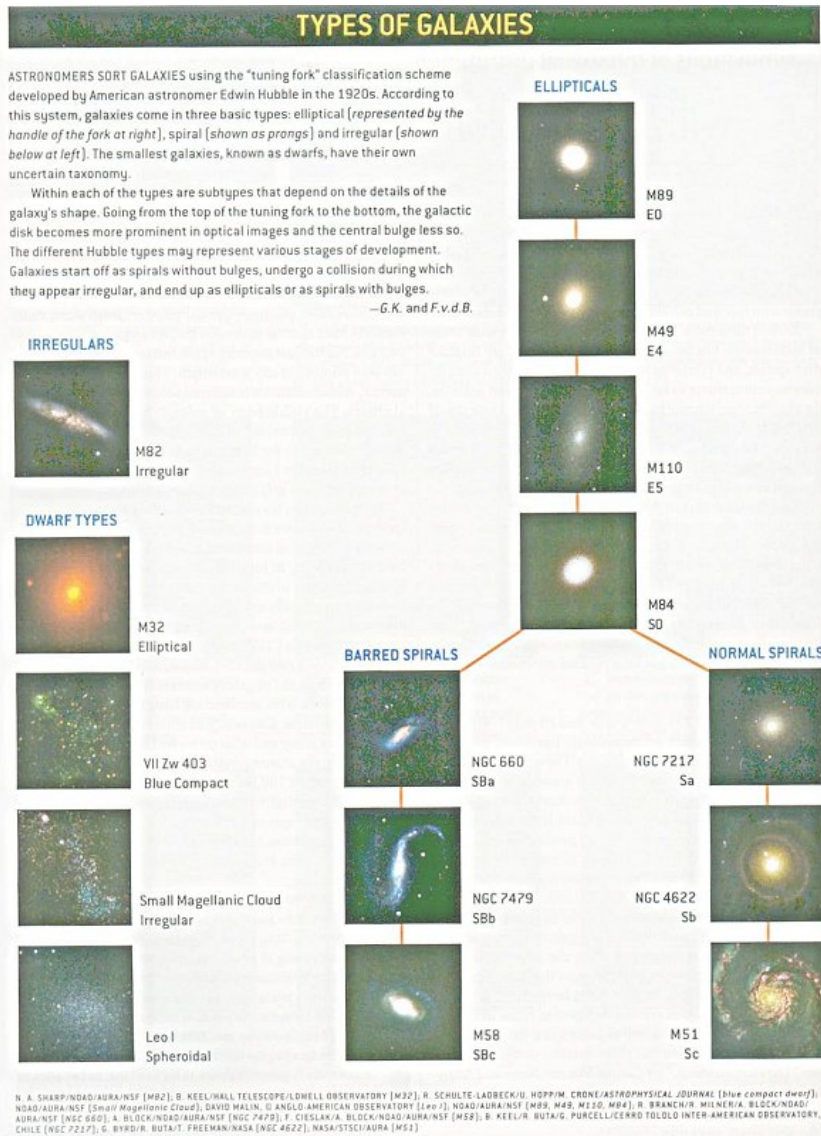


M101



M87

# 銀河形成シミュレーション

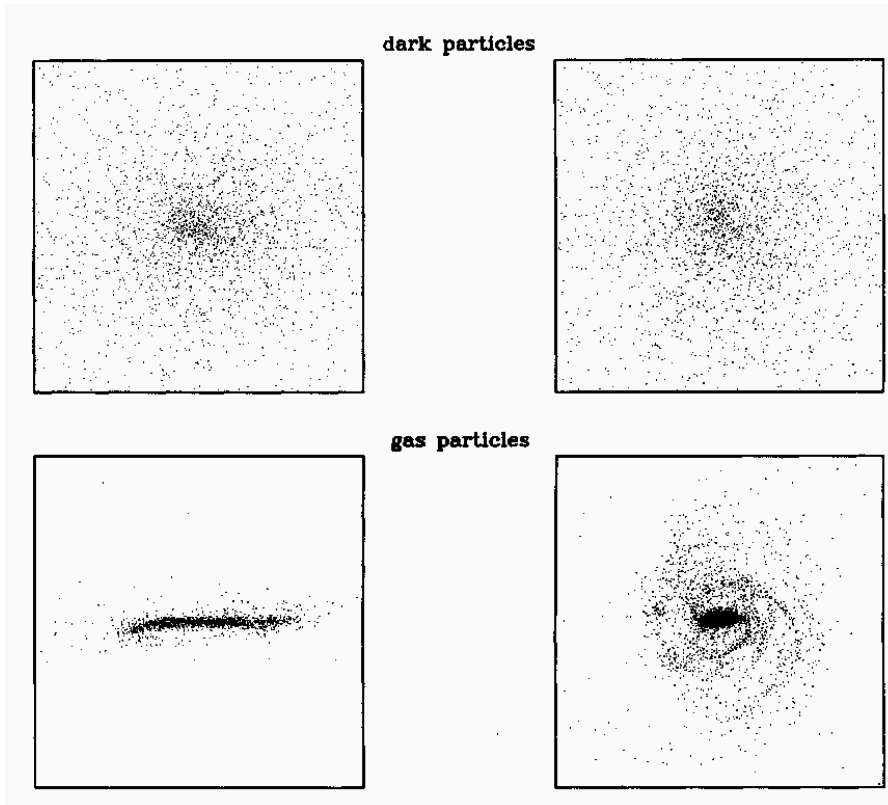


## 基本的な考え方

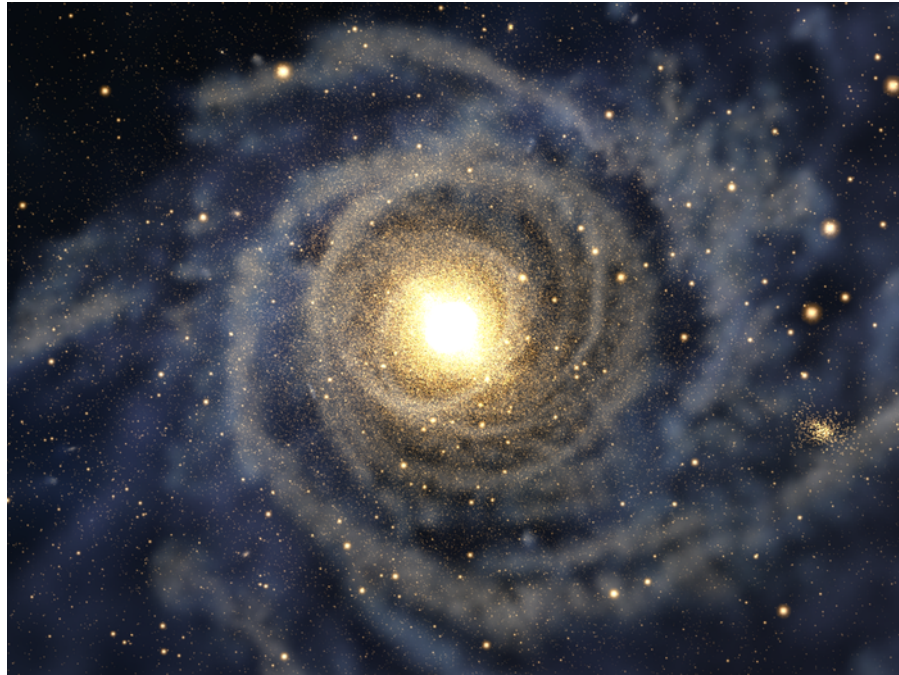
- 宇宙の初期ゆらぎから星形成までを「まるごと」シミュレーション
- 何故銀河には色々あるのか？ どうやってできたのか、を明らかにしたい。

# 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

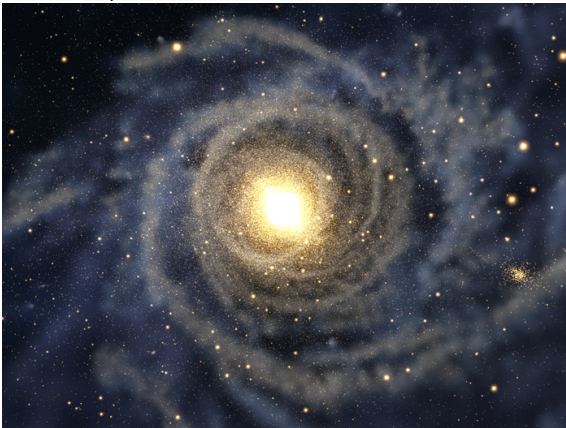
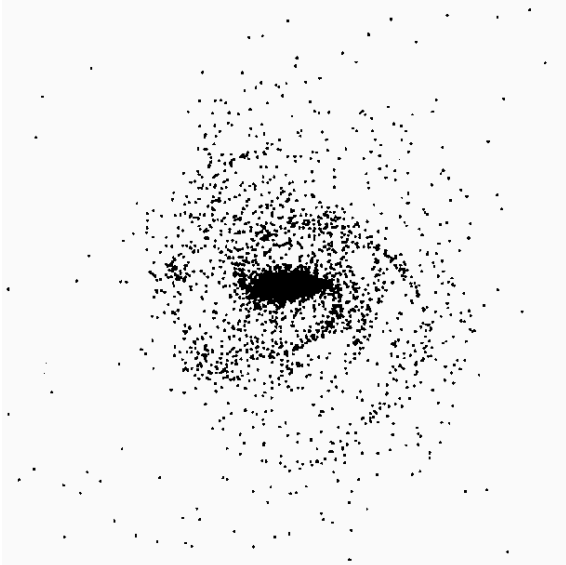


アニメーション

- Dark Matter + ガス + 星
- DM, 星: 粒子、  
ガス:SPH 粒子
- $2 \times 10^6$  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」

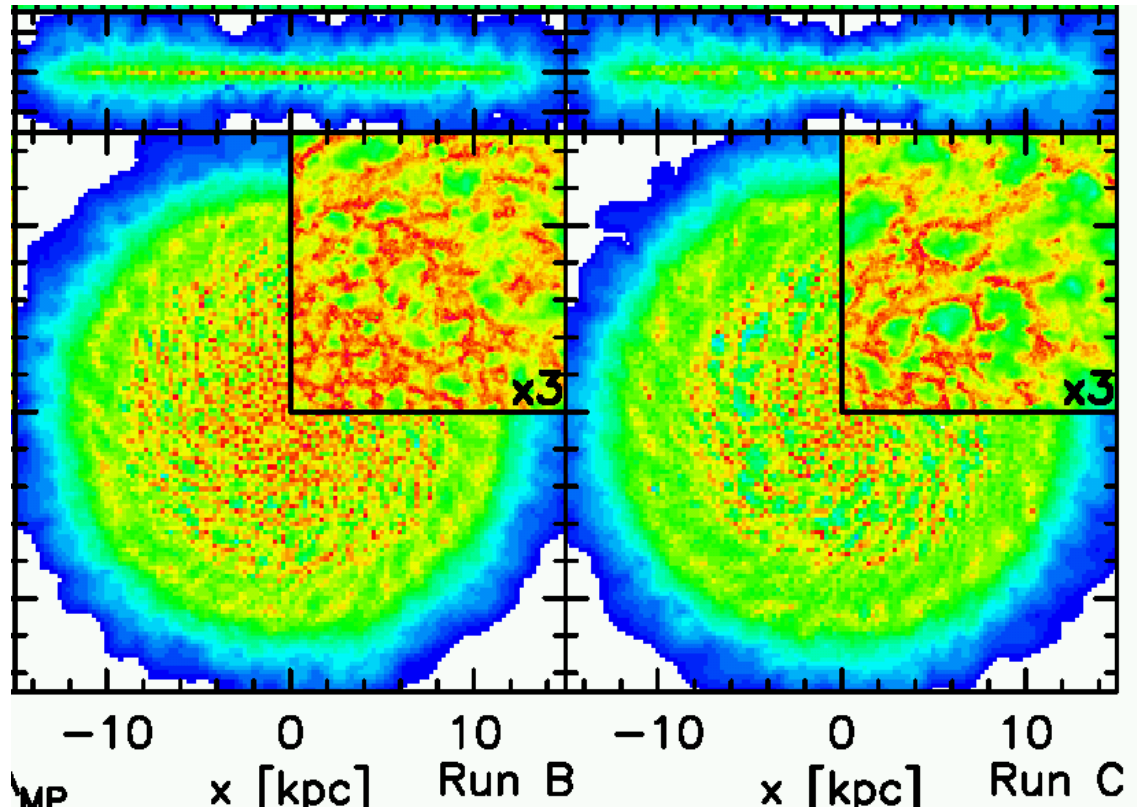
# 星形成のモデル

- 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

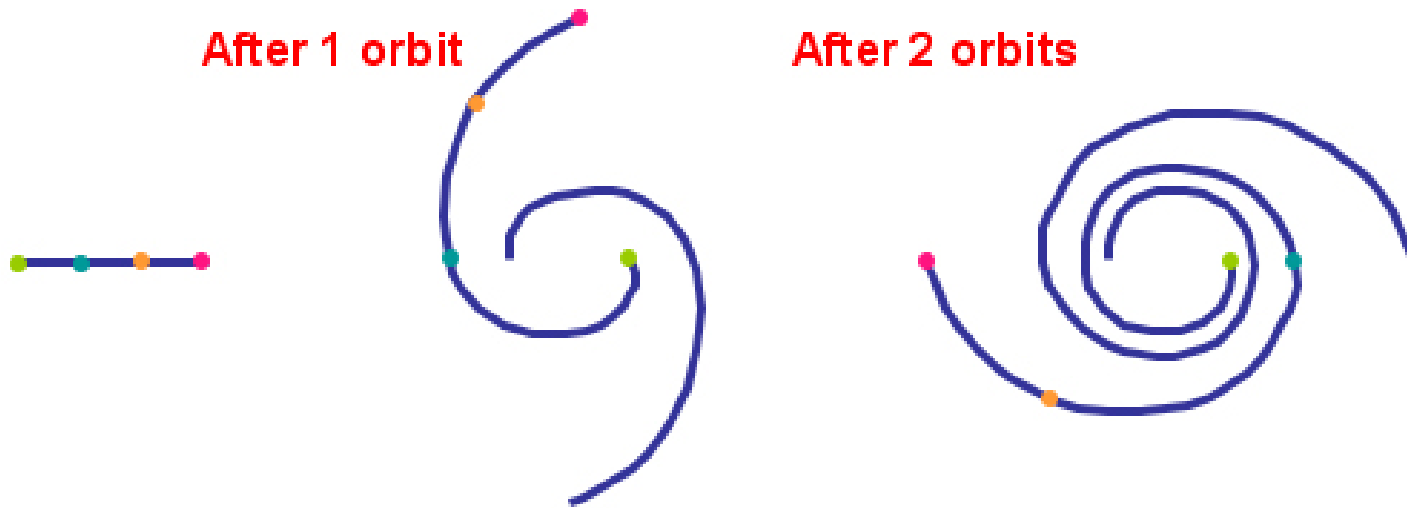


- 星ができる速度を 15 倍変えている。
- 実際にできる星の量はあまり変わらない。銀河の構造もあまり変わらない。
- 昔の、分解能が低い計算だと 15 倍変えたら銀河が爆発した

# 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？— これがい実は良くわかっていない

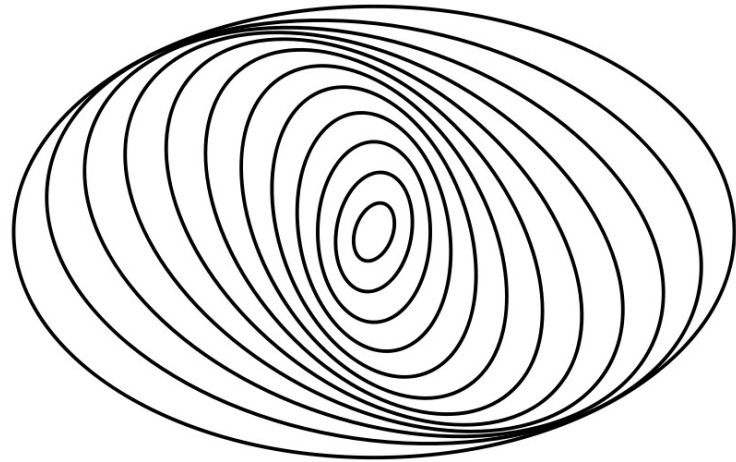
# 巻き込みの困難



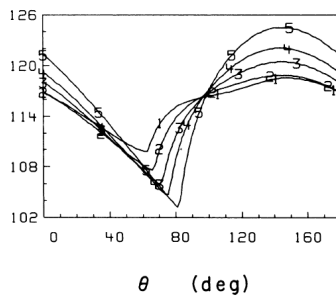
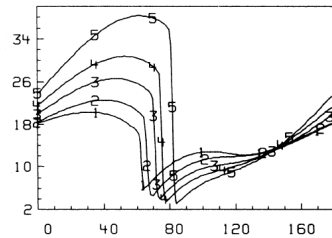
外側のほうがゆっくり回っているのに、どんどん巻き込んでいくはずなのに、観測されている銀河の腕はそうならない

# 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



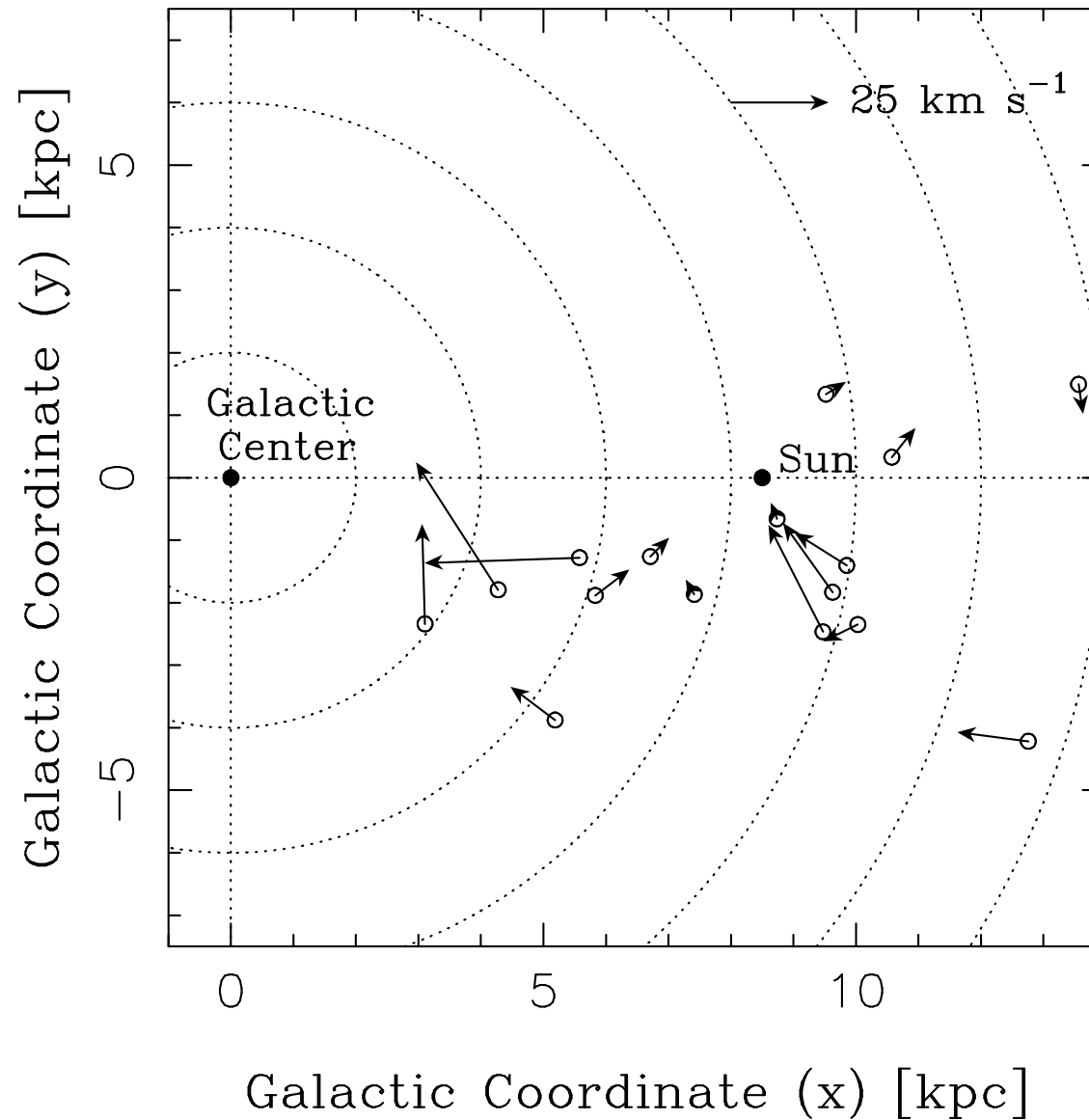
# 良くわかってなかった理由

- 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

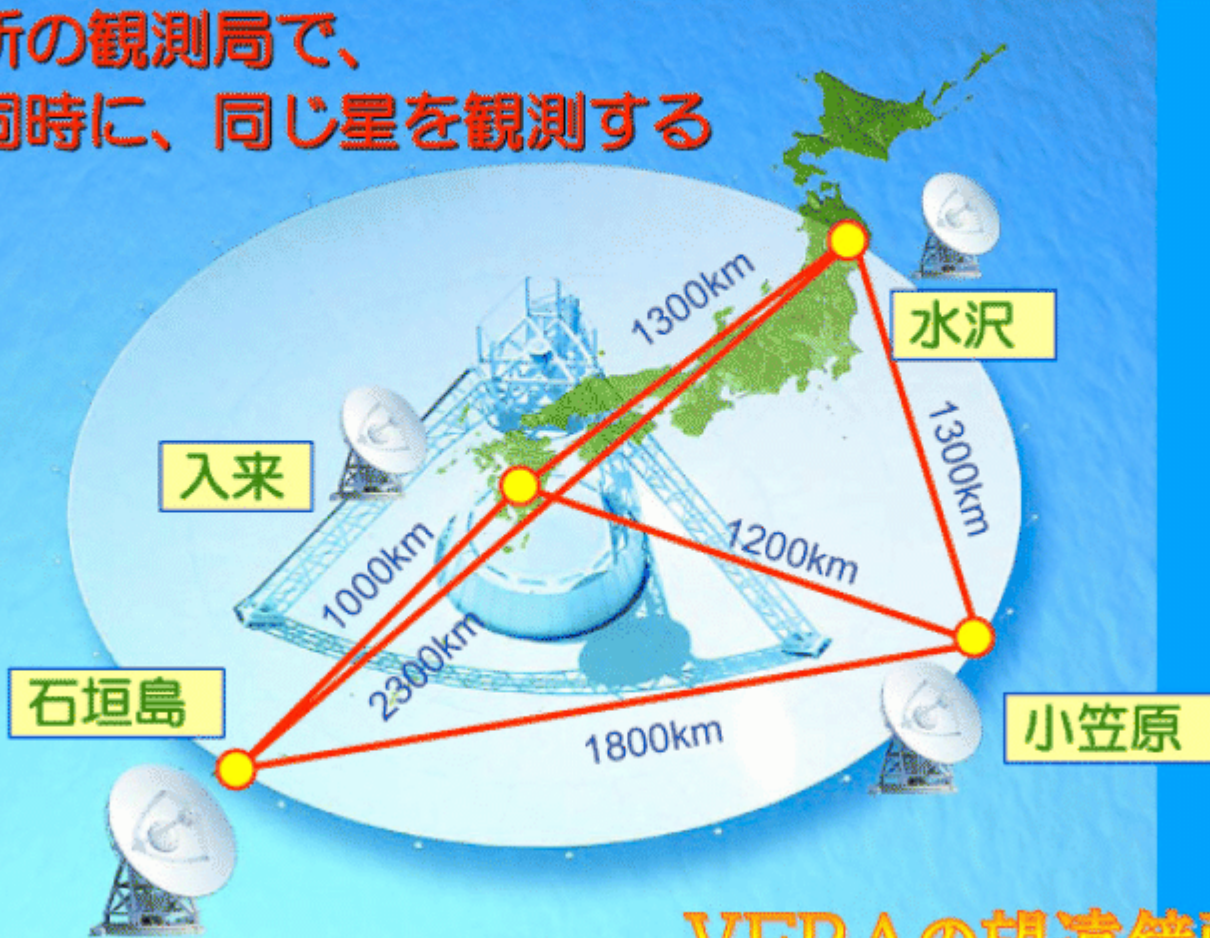
- VLBI (超長基線干渉計) で遠くの星の距離と動く速度を三角測量で決める
- アメリカの VLBA と日本の VERA の観測結果が主
- データ集めたのが右図



# 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

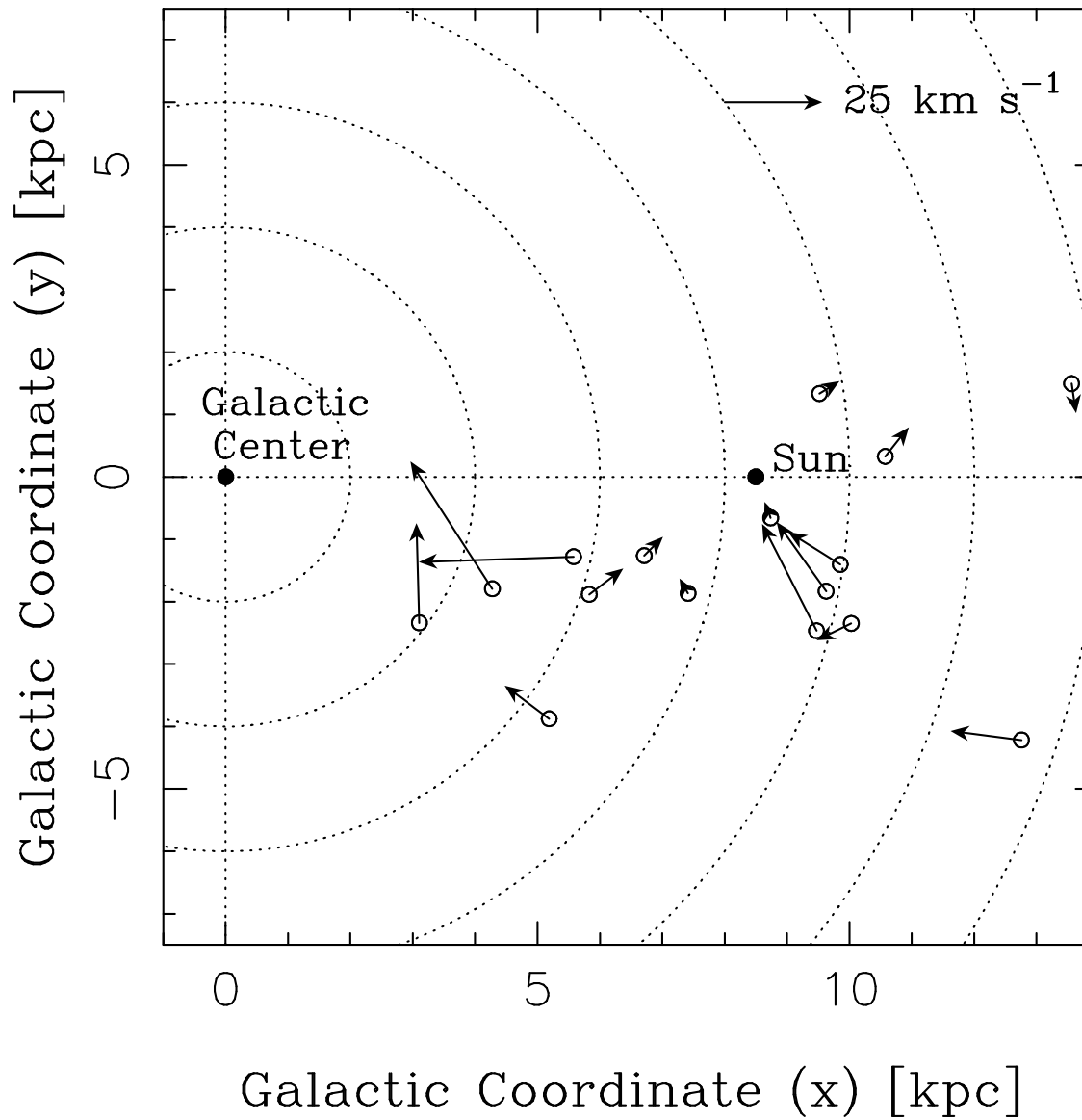
# 但し

## 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ないはず



はて？

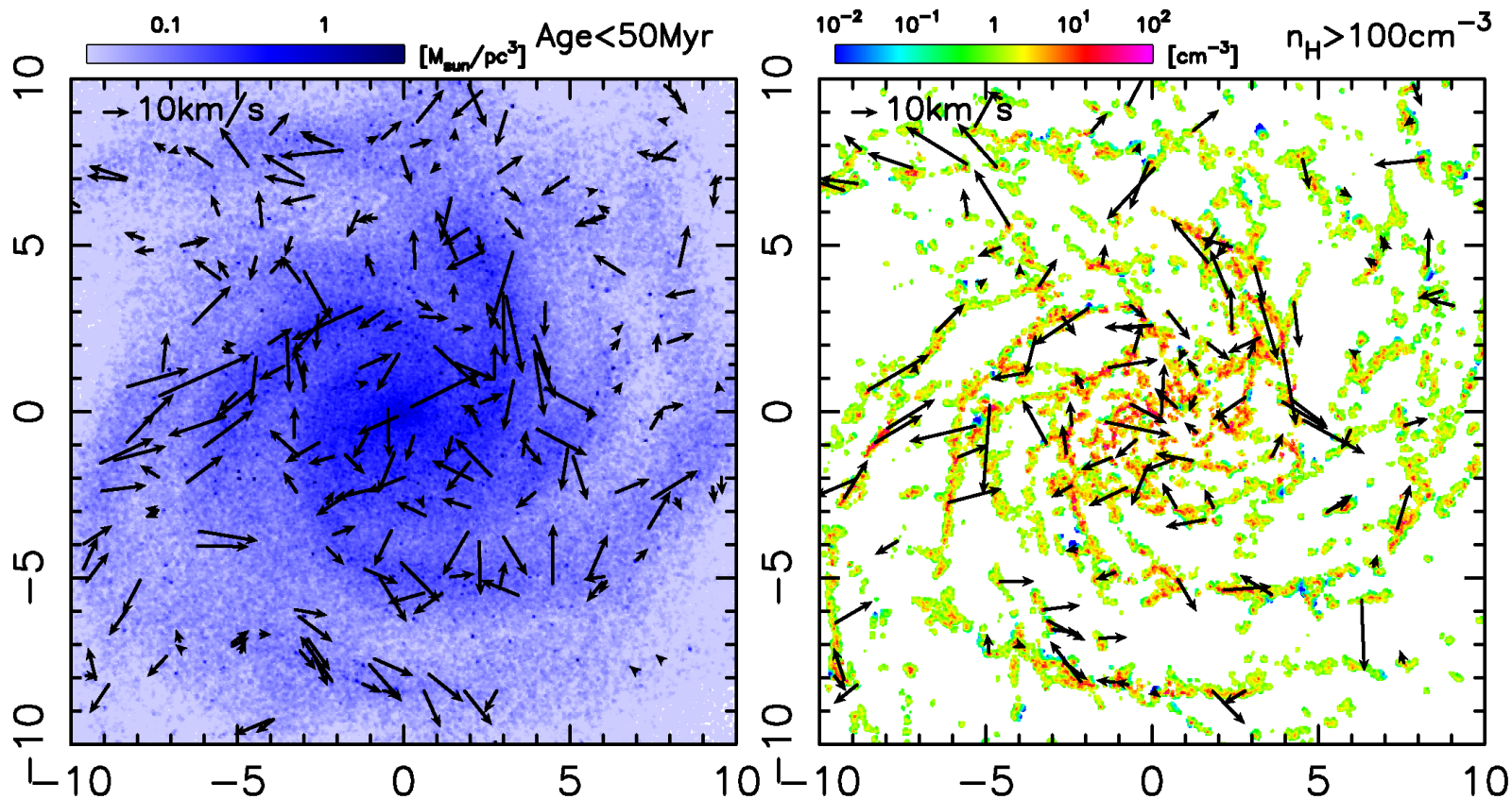
# 最近のシミュレーション

(馬場他 2009)

animation 1 2 )

空間構造と、円運動からのずれ

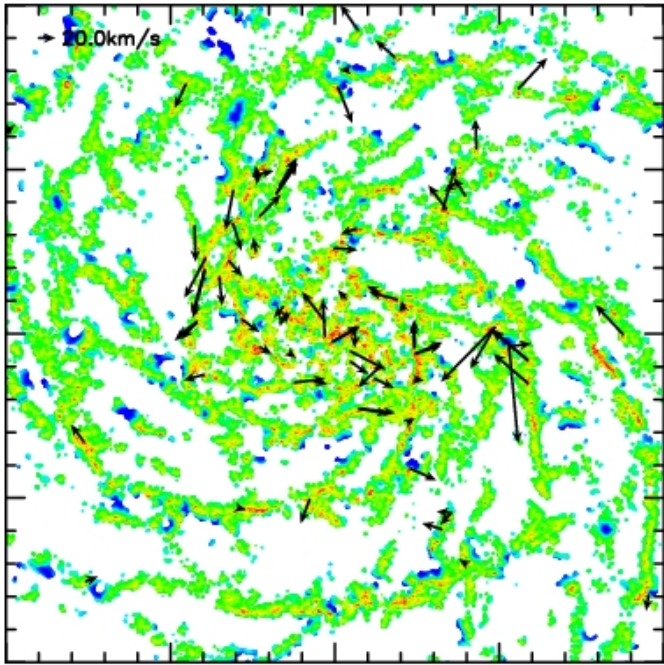
TIME=500Myr



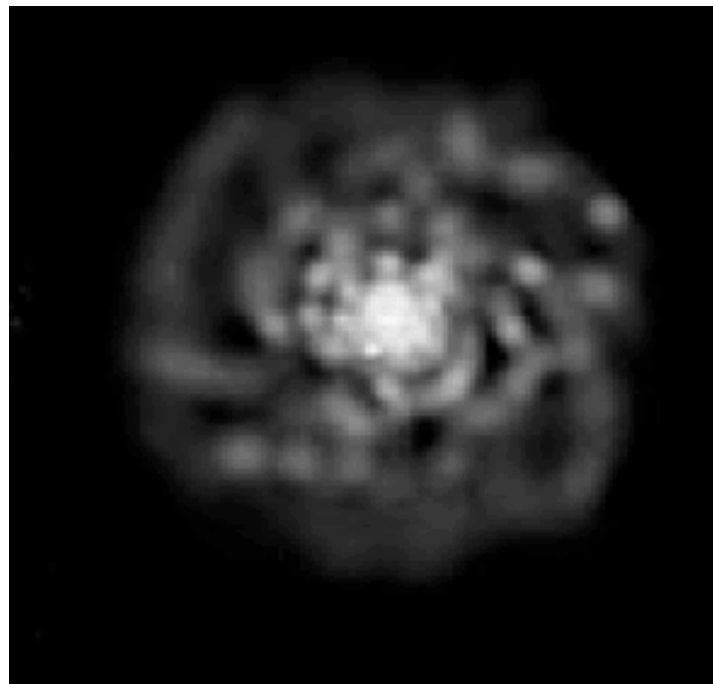
左:星の分布

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

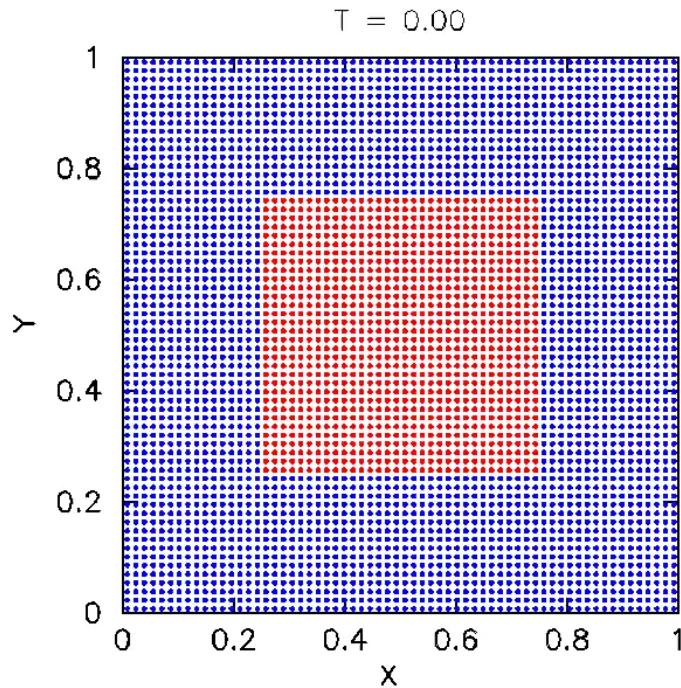
- 軸対称な、腕がないところから計算始める
- 腕は勝手にできて、100億年くらいはきえない
- ある種の定常状態になっている

# 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。
- これは大規模・高分解能な計算、それを可能にする計算方法の発展による。
- 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

# 方法の研究

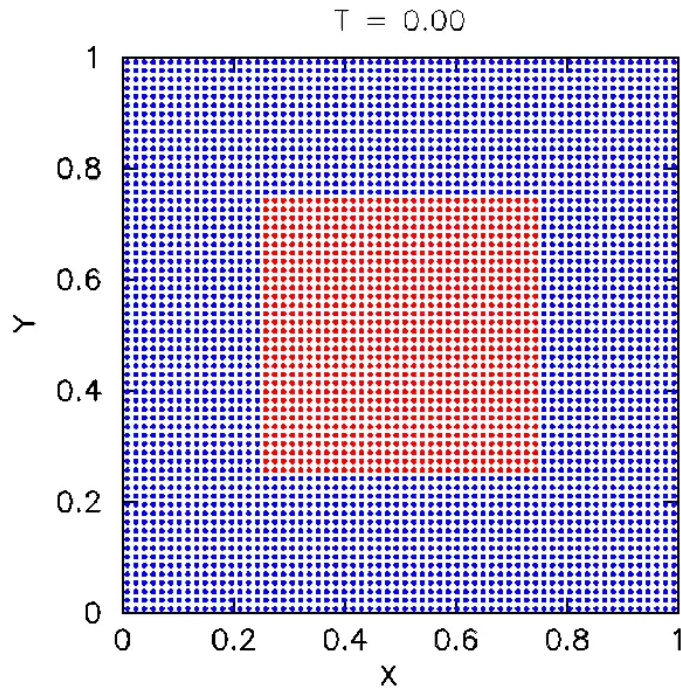
最近やっていること (Saitoh and Makino 2012)  
SPH法 (粒子によって流体を表す方法) の改良  
密度が違うだけの2種類の流体



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?)