

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

今日は講義の終わりに小テストをします。

恒星円盤、スパイラル構造

ここからは円盤状の系を扱う。銀河円盤、原始惑星系円盤等で同じメカニズムが現れる。

円盤状の系の例

円盤に近い恒星 (とは限らない) 系の代表的な例は以下のものである

- 円盤銀河の円盤
- 原始惑星系円盤
- 惑星の周りのリング

これらは、円盤である、ということについては同じであり、物理プロセスにも共通の部分が多い。

そもそもなぜ円盤になるか？

- 自己重力的なガス雲を考える。
- 基本的は輻射でどんどん冷える＝エネルギーを失う。
- もしも自分が球対称で周りから力も受けてなければ、そのまま1点に集まれるが、実際には自分が球対称ではなく、周りの構造も一様ではないので、トルクをうける。このため、角運動量がゼロにはならない。
- エネルギーは輻射でどんどん抜けて収縮するが、角運動量はなかなかそうはいかないので、最終的には回転による遠心力と重力がつりあう

円盤銀河はこういう説明がもっともらしいが、惑星系とかだとではほとんどの質量は星に行くのは何故か？というのはそれほど自明ではない。

ではみんな同じか？

色々違う。

- 円盤の質量
- 重力ポテンシャルの形
- 円盤の粒子が物理的に衝突するかどうか

質量の違い

- 銀河円盤は重い、つまり、ダークマターハローやバルジの質量と、円盤の質量は同程度。自己重力の効果が大
- 惑星リング: 土星リングでもその質量は土星本体の 10^{-9} 程度
- 原始惑星系円盤では、太陽の質量の 1% 以下

質量の違いは、不安定モードやパターンの大きさに違いをもたらす。

重力ポテンシャルの違い

- 銀河円盤では円盤自身やダークマターハローが作るポテンシャルになって単純なケプラーポテンシャルではない: 軌道が閉じた楕円軌道ではない
- リング、惑星系では基本的には中心星のケプラーポテンシャル、軌道は閉じた楕円軌道

閉じた軌道の場合には平均運動共鳴や永年摂動の役割が閉じない場合よりもはるかに大きくなり、ケプラー軌道であることに固有の様々な現象が起きる。

平均運動共鳴・永年摂動

- 平均運動共鳴

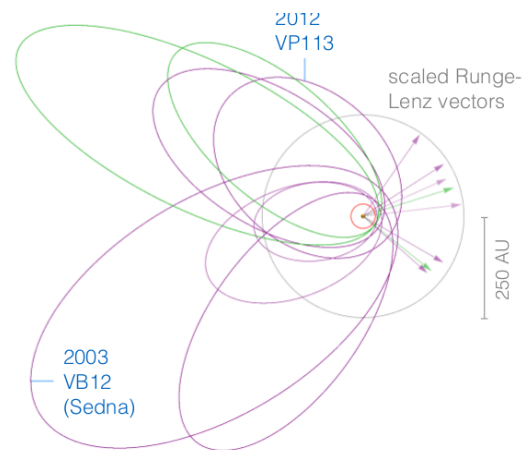
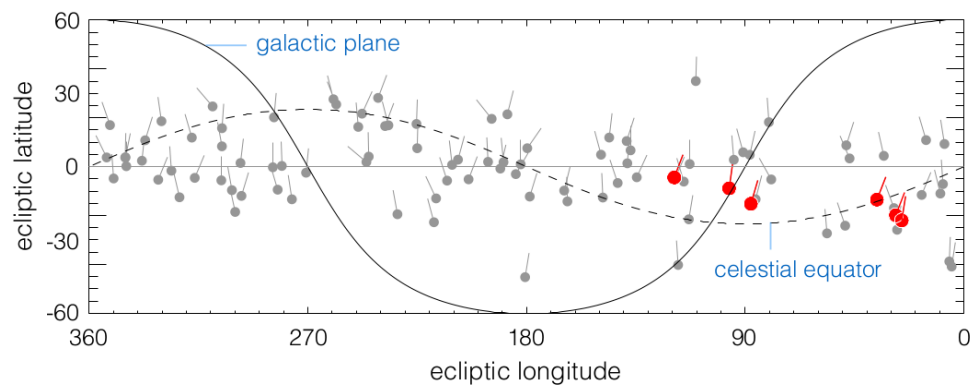
- 2つの惑星の軌道周期の比が整数の時に起こる。多くの場合惑星をトラップする効果
- 海王星と冥王星の 2:3 共鳴: 軌道は交差しているがぶつからないように回る

- 永年摂動

- 共鳴関係になくとも起こる効果。惑星を、軌道の形のリングに置き換えて、それからの重力の効果、ともいえる。
- 惑星軌道は近点が止まっていたりゆっくり動く楕円なので、一般のポテンシャルとは違って複雑な永年摂動が働く。

永年摂動

「第9惑星」という話も理論はこれに基づいている



衝突の効果

- 惑星リングでは典型的には1つの粒子は軌道周期程度の時間で他の粒子と衝突
- 原始惑星系では、重力相互作用と衝突・合体の双方が重要になる。またガス円盤も重要
- 銀河円盤：恒星同士は衝突しない。重力による散乱の効果のみ。

この講義では、理論としては安定性を扱う。衝突が十分に効くなら流体と考えられるし、そうでなければ恒星系(6次元位相空間での分布関数)としては扱う。

非軸対称モードの安定性は理論的・解析的にはほとんど手がでないので、軸対称モード(リングに分裂するモード)を扱う

軸対称モードの安定性

式の誘導は結構大変なので、まず流体の場合に結果だけ書く。
 k を半径方向の波数、 ω を時間方向の角振動数、 v_s を音速、 Σ を面密度、 κ をエピサイクル角振動数として、分散関係が

$$\omega^2 = \kappa^2 - 2\pi G \Sigma |k| + v_s^2 k^2 \quad (1)$$

で与えられることがわかっている。

エピサイクル角振動数:与えられた円盤ポテンシャル上での粒子の運動の、半径方向の振動の角振動数

エピサイクル振動数の計算

今、ポテンシャルが中心からの距離 R の関数として $\Phi(R)$ で与えると、有効ポテンシャルは

$$\Phi_{eff} = \Phi + \frac{L_z^2}{2R^2} \quad (2)$$

である。 R 方向の運動方程式は

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{d\Phi_{eff}}{dR} \quad (3)$$

で、これを円軌道の周りに展開して、 $R = R_0 + x$ とすると

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\kappa^2 x \quad (4)$$

$$\kappa^2 = \frac{d^2 \Phi}{dR^2} + \frac{3}{R_0} \frac{d\Phi}{dR} \quad (5)$$

もうちょっと変形

κ を円軌道自体の角振動数 Ω で書き直す

$$\Omega^2 = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dR} \quad (6)$$

なので、

$$\kappa^2 = R_0 \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2 \quad (7)$$

となる。 κ はケプラー軌道の時に Ω に等しく、調和ポテンシャルの時に 2Ω に等しいので、普通の銀河円盤等のポテンシャルでは

$$\Omega < \kappa < 2\Omega \quad (8)$$

となる。

分散関係の意味

式(1)の意味を考える。まず、ジーンズ不安定の式と並べてみる。ジーンズ不安定の分散関係は

$$\omega^2 = v_s^2 k^2 - 4\pi G \rho_0 \quad (9)$$

だった。これと、円盤の軸対称モードの式を比べると、

$$\omega^2 = \kappa^2 - 2\pi G \Sigma |k| + v_s^2 k^2 \quad (10)$$

ジーンズ方程式との比較

- 音速に関する項 $v_s^2 k^2$ は普通の波動方程式になる項で、どちらでも同じ形
- 重力の項は、ジーンズ不安定では $-4\pi G \rho_0$ だったのが、円盤では $-2\pi G \Sigma |k|$ ところにも波数がいってくる。
 - ジーンズ不安定では重力は3次元的に無限一様に広がったもの同士=ポテンシャルは距離に比例
 - 円盤では重力は2次元的なので対数ポテンシャルになり、距離が近いほうが強い、
- κ^2 の項は、元々の重力ポテンシャル上のエピサイクル運動の効果

温度0の極限

$v_s = 0$ の極限、つまり、温度 0 の極限では

$$k_{crit} = \frac{\kappa^2}{2\pi G\Sigma}; \quad \lambda_{crit} = \frac{2\pi}{k_{crit}} = \frac{4\pi^2 G\Sigma}{\kappa^2} \quad (11)$$

という臨界波数と臨界波長があって、これより高い波数(短い波長)は不安定

ジーンズ不安定との違い:

- エピサイクル運動が重力を抑える効果になる
- 重力が2次元的で距離が近いと強くなるために、波長が短いと不安定で、成長速度も波長が短いほど大きい

有限温度の場合

あらゆる波数 k に対して振動数 ω が実数であるためには

$$\kappa^2 - 2\pi G\Sigma|k| + v_s^2 k^2 \geq 0 \quad (12)$$

であればよく、このためには

$$\frac{v_s \kappa}{\pi G\Sigma} > 1 \quad (13)$$

であればよい。

$$Q = \frac{v_s \kappa}{\pi G\Sigma} \quad (14)$$

のことを Toomre の Q 値と呼ぶ。

恒星円盤の場合

(流体との違いは、星同士が衝突するかどうか)

同じような分散関係から安定性限界を導くことができる

$$Q = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 G \Sigma} > 1 \quad (15)$$

ここで σ_R は半径方向の速度分散である。ジーンズ不安定の場合と違って、係数が流体の場合と微妙に違う (π と 3.36)。

「現実の」円盤

ここまでの解析の仮定:

- ディスクが無限に薄い
- 重力場や回転の影響はローカルなポテンシャルの微分だけで書ける

従って、「波長が半径 R に比べて十分小さく、なおかつディスクの厚さに比べて十分長い」場合しか正しくない。

ついでのみ適用できる。

ディスクが厚さをもっている場合

- 十分短い波長では重力が3次元的になって普通のジーンズ不安定の表式になる
- 問題は、 λ_{crit} とディスクの厚さの関係

$$\lambda_{crit} = \frac{4\pi^2 G \Sigma}{\kappa^2} \quad (16)$$

なので、系のトータルの質量。半径、重力定数を1程度に規格化した単位系を考えると λ_{crit} はほぼ Σ だけで決まる(κ も1前後になるため)。原始惑星系円盤や惑星リングのような、 Σ が非常に小さい場合には λ_{crit} も系のサイズに比べて非常に小さくなる。

現実のディスク

- 原始惑星系円盤や惑星リングは非常に冷たくなければ安定である。
- 惑星リングの場合には実際に非常に冷たく、このために非常に小さなスケールで多様な構造が現れることが最近ではカッシーニ等の観測で明らかになっている。
- 原始惑星系円盤の場合には、円盤ガスは安定というのが京都モデル。但し観測的にはリングやスパイラルがどんどん見つかってきている。
- 円盤銀河の場合には、面密度は1まではいかにしても0.1より大きい程度になり、このために λ_{crit} は結構大きい。このため、普通の恒星円盤では厚さは臨界波長より小さく、 Q 値がそれなりに安定性を表す

スパイラルモードの場合

- 現状の系外銀河や原始惑星系円盤では結構色々なスパイラル構造が見つまっている
- でも、解析的に計算できるのは「tight winding 近似」くらい
- なので、その話のあと、数値計算ベースの話を少しする

tight-winding 近似

tight winding の近似:要するに、ピッチアングル(スパイラルアームと円の回転方向のなす角度)が小さい=大体軸対称と同じようにあつかえる

m 本腕モードの分散関係は

$$(\omega - m\Omega)^2 = \kappa^2 - 2\pi G\Sigma |k| + v_s^2 k^2 \quad (17)$$

と書ける

tight-winding 近似

- 安定・不安定の条件は $m = 0$ のモードと全く同じ
- 不安定な時には実部に $m\Omega$ が入る
- 不安定モードはラグランジュ的に回転にくっついて成長する

これは、tight-winding 近似してさらに半径方向に対して波長が短いという近似もしたので、 Ω の半径依存性もどこかで落として解析したような話になっている。

グローバルなスパイラルモード



M101 銀河。スピッツァー衛星
での赤外線画像

実際の銀河では、全く
tight-winding も局所近似
も成り立たないような大き
なスケールでのスパイラル
構造が見つかっている。
中間赤外で見える低温のガ
スは複雑な構造をもつ
大きなスケールでのスパイ
ラルアームがあるように見
える。

多くの銀河についてそういう構造があるように見える。

グローバルなスパイラルモードの理論的 困難

- そのような構造を定常的に維持するメカニズムはなにか
- そもそもそのようなメカニズムはあるのか

は依然未解決の問題。

- 不安定モードは基本的にローカルな角速度で回転するため、半径方向に広がったモードはどうしても差動回転の効果で時間がたつと巻き込んでしまう (巻き込みの困難)
- ある形をもったスパイラルアームが時間的に成長したり、定常状態になったりしてくれない

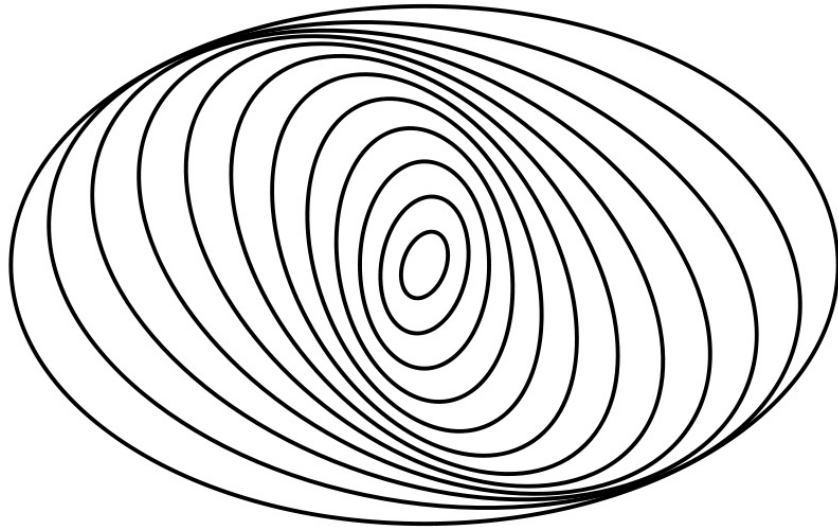
巻き込みの問題の回避(?)

これまで唱えられていた理論は例えば以下のようなものがある

1. 定常密度波理論 (いわゆる Lin-Shu 理論)。これは、大雑把にはスパイラルアームは実体ではなく、「密度波」だということのもの
2. 非定常理論。これは要するに、アームは次々にできたり消えたりするものである、ということのである。

定常密度波理論

これは、大雑把にはスパイラルアームは実体ではなく、



こんな感じにうまいこと軌道がずれていくことでできる見かけのパターンであるとするものである。エピサイクル周期も半径に依存するし、なぜ同じ半径では大体位相がそろうのかとか、うまいことスパイラルパターンができるようにその位相が半径によってずれるのかとかは良くわからない。

定常密度波理論

これで全くなにも説明できないというわけではない。アームはともかくポテンシャルが実際に非軸対称の時に、このようなパターンは確かにできる

- 棒渦巻銀河
- 相互作用銀河

但し、棒渦巻銀河の詳細なシミュレーションでは、アームはバーの先端からでていますが時間変化は結構する(定常ではない)ということもわかってきた。

非定常理論

- 要するに、アームは次々にできたり消えたりするものである、という考え
- 。1970年代から1980年代にかけて、ディスク構造の多体計算は盛んに行われた。
- れらの計算では、 Q 値が1より少し大きい、軸対称モードに対しては安定なはずのディスクから計算を始めると、かなり強いスパイラル構造が数回転で成長する。しかし、数十回転までいかないうちに Q 値が大きくなり、そのような構造は消える。

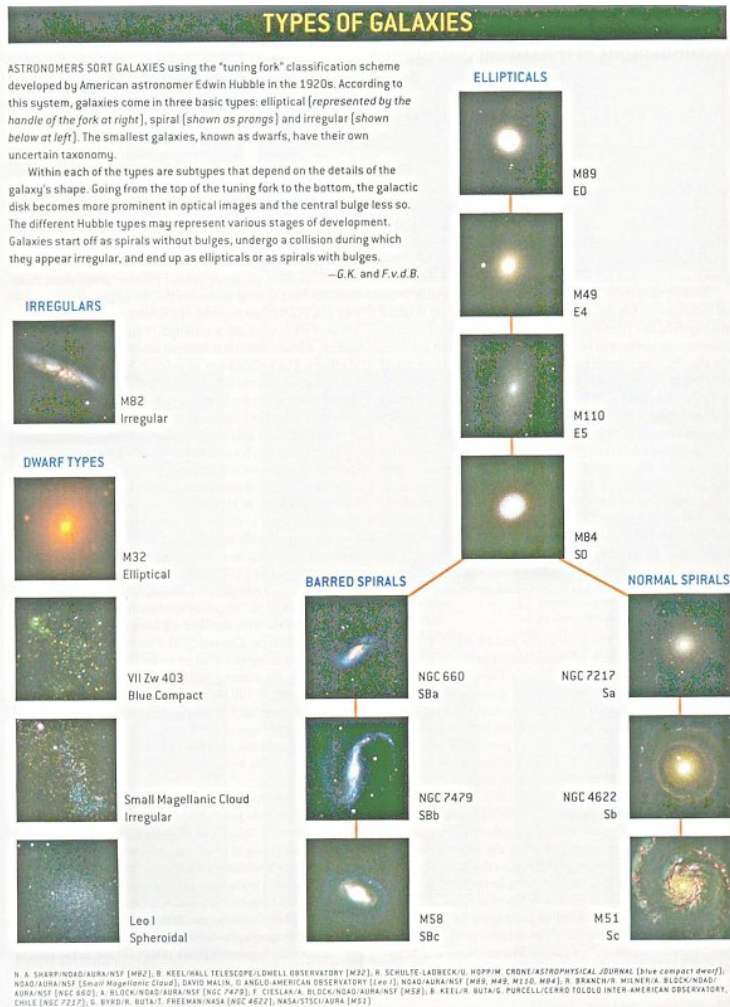
非定常理論

- 実際の銀河では、ガスが放射冷却で温度を下げることができるので、ガスがあるうちは Q 値がある程度小さくたもたれていると考えることができ、このために常に不安定性により新しいアームが作られている、と考える。
- 90年代以降この辺はあまり研究されていなかった
- 最近の大粒子数での数値計算 (Fujii et al, 2011) では、初期の Q の値や粒子数によっては、ガスによる冷却効果がなくても非常に長い時間にわたって非定常なスパイラル構造が見える、ということがわかってきた。

バーとバー不安定

- 上でみたように、スパイラル構造についてはそれを定常的に維持するメカニズムが何か、そもそもそんなものがあるのか、ということが良くわかっていない。
- しかし、グローバルな非軸対称モードとしてはスパイラルの他にバー不安定があり、これについては非線型領域で定常なバー構造が存在できることは古くからわかっている。
- Q 値的には安定なディスクであっても、ディスクだけでダークマターハローやバルジがないと必ずバー不安定を起こす、ということが1970年代から知られている。但し、グローバルモードであることから安定性条件等が単純な形で得られているわけではない。

銀河形成シミュレーション

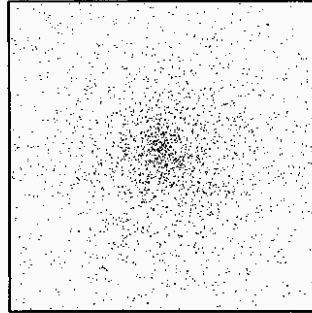
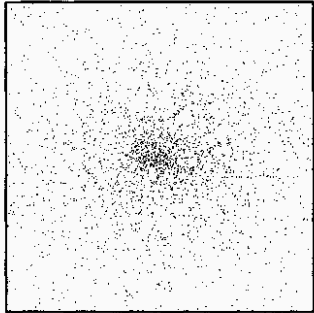


基本的な考え方:

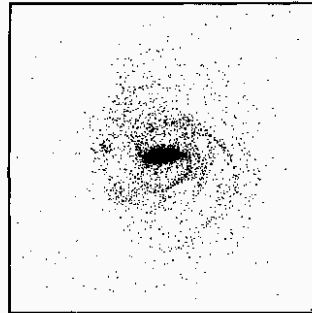
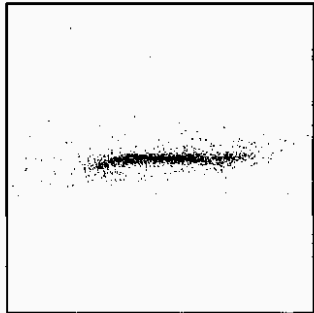
- 初期条件からの、銀河の「まると」シミュレーション
- 銀河の多様性の起源を理解したい

Katz and Gunn 1992

dark particles

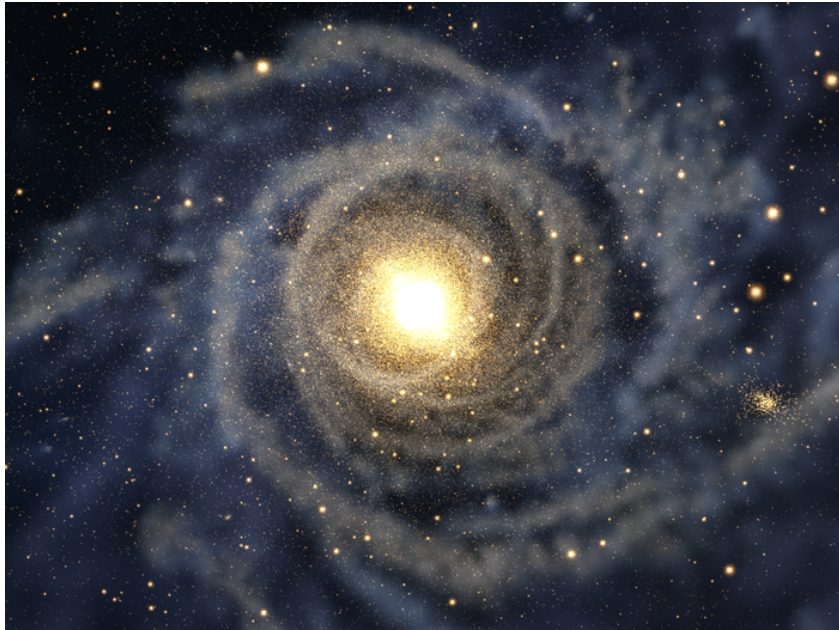


gas particles



- 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

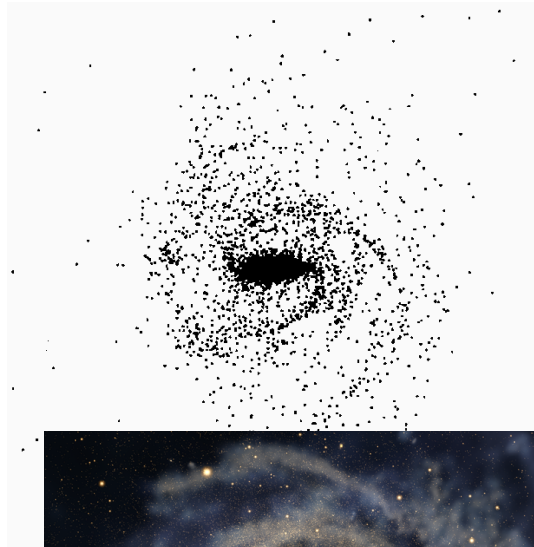
Saitoh et al. 2005



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？