

惑星学 A
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

事務連絡

- 講義は、最初の4回を牧野、後半3回を中村が担当し、その次の回は試験です。
- 試験は、配布資料と手書きノートのみ持込可です。
- 牧野の講義資料はとりあえず
<http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-A>
にあります。

講義概要

一応シラバスには

1. 宇宙の始まり・宇宙最初为天体
2. 銀河の形成と進化
3. 星形成・惑星形成 (I. 標準モデル)
4. 星形成・惑星形成 (II. 系外惑星と最近の発展)

と書きましたが様子ををみながら

講義の目的

- 惑星を、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、現代の惑星科学研究を天文学・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

宇宙の始まり・宇宙最初の日体

- 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

銀河の形成と進化

- 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
- 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

系外惑星

- 系外惑星発見からの歴史
- 現在の理解と今後の発展

宇宙の始まり・宇宙最初の日体

- 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

- とりあえず見た目を
- 重力(だけ)による天体形成

とりあえず見た目を

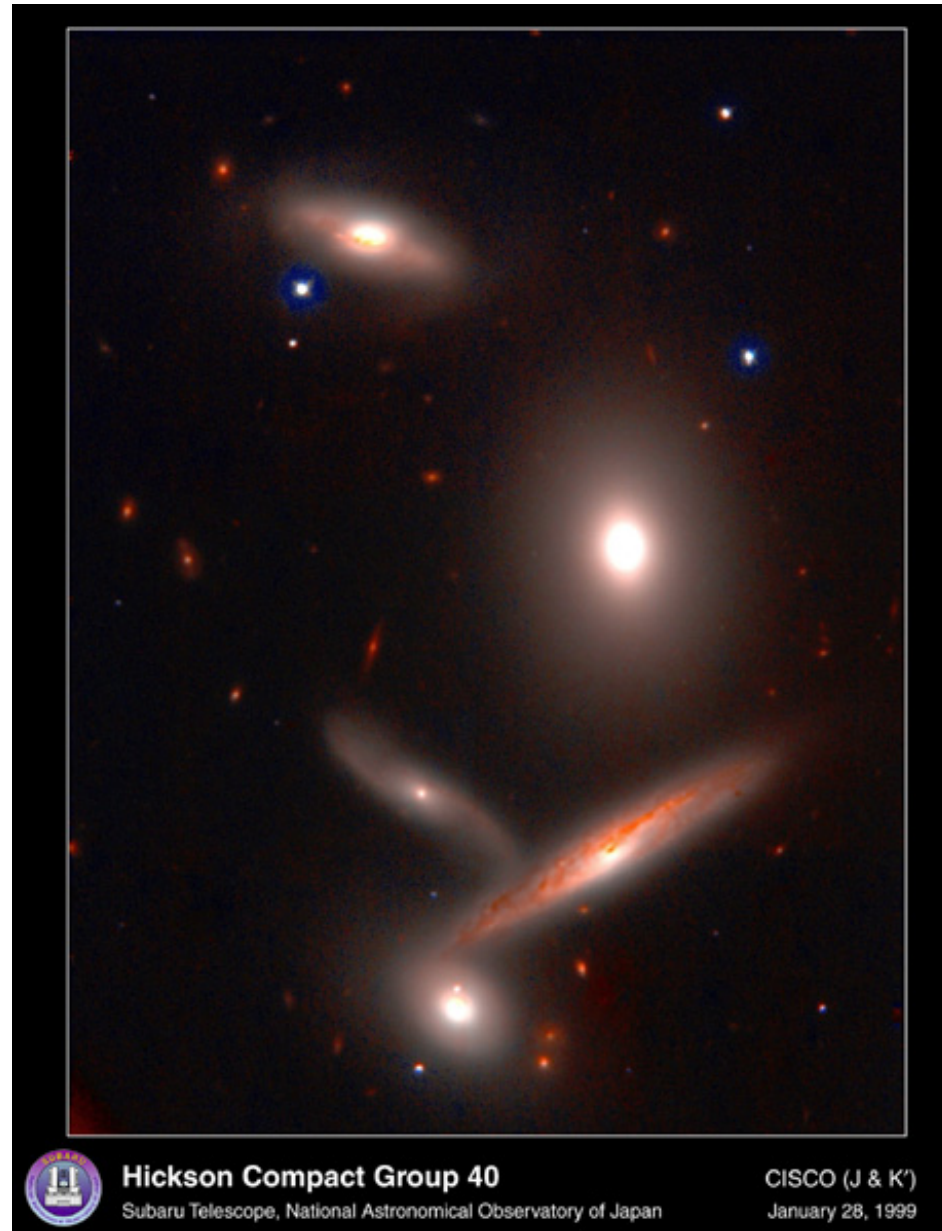
銀河



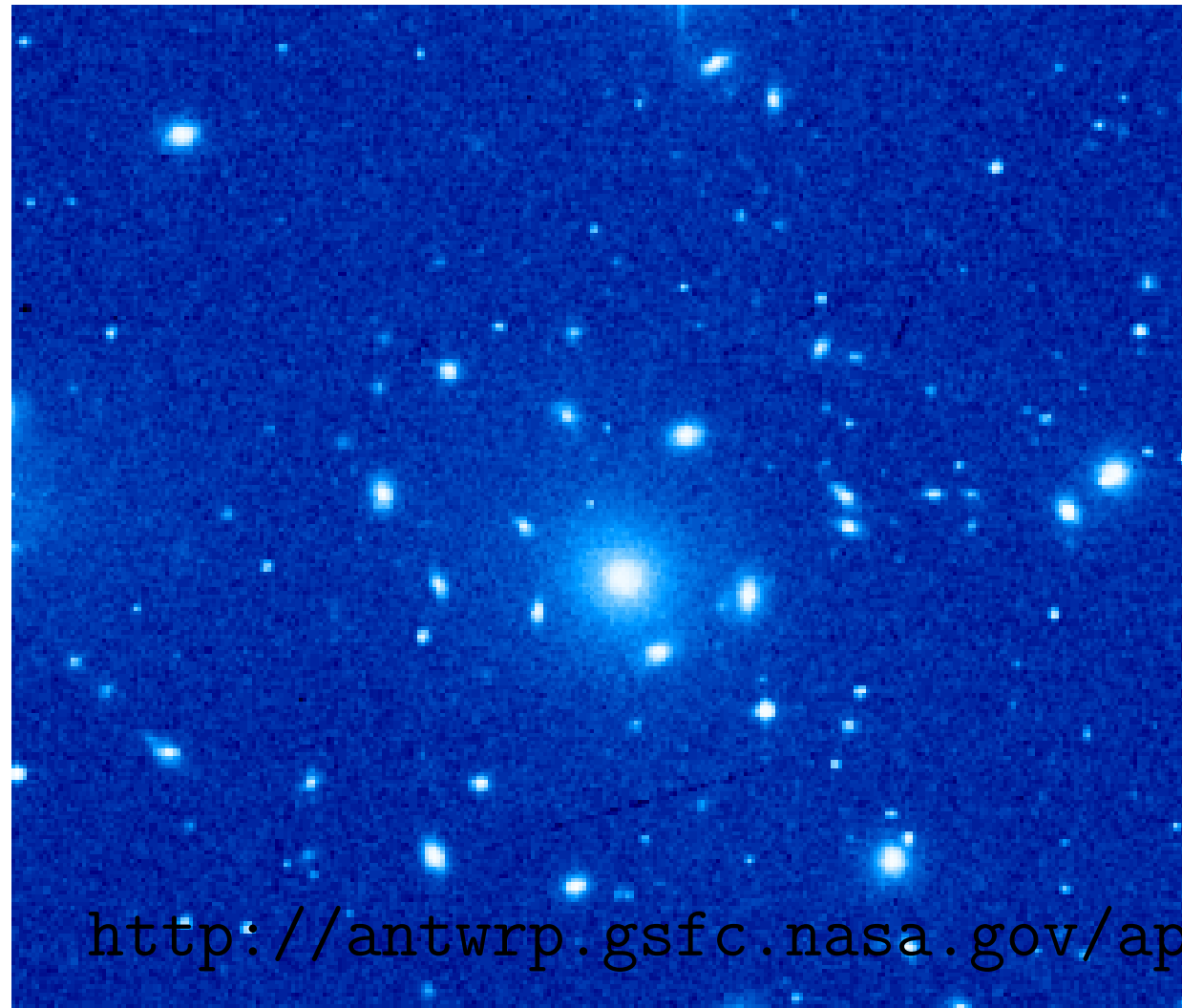
球状星団



銀河群

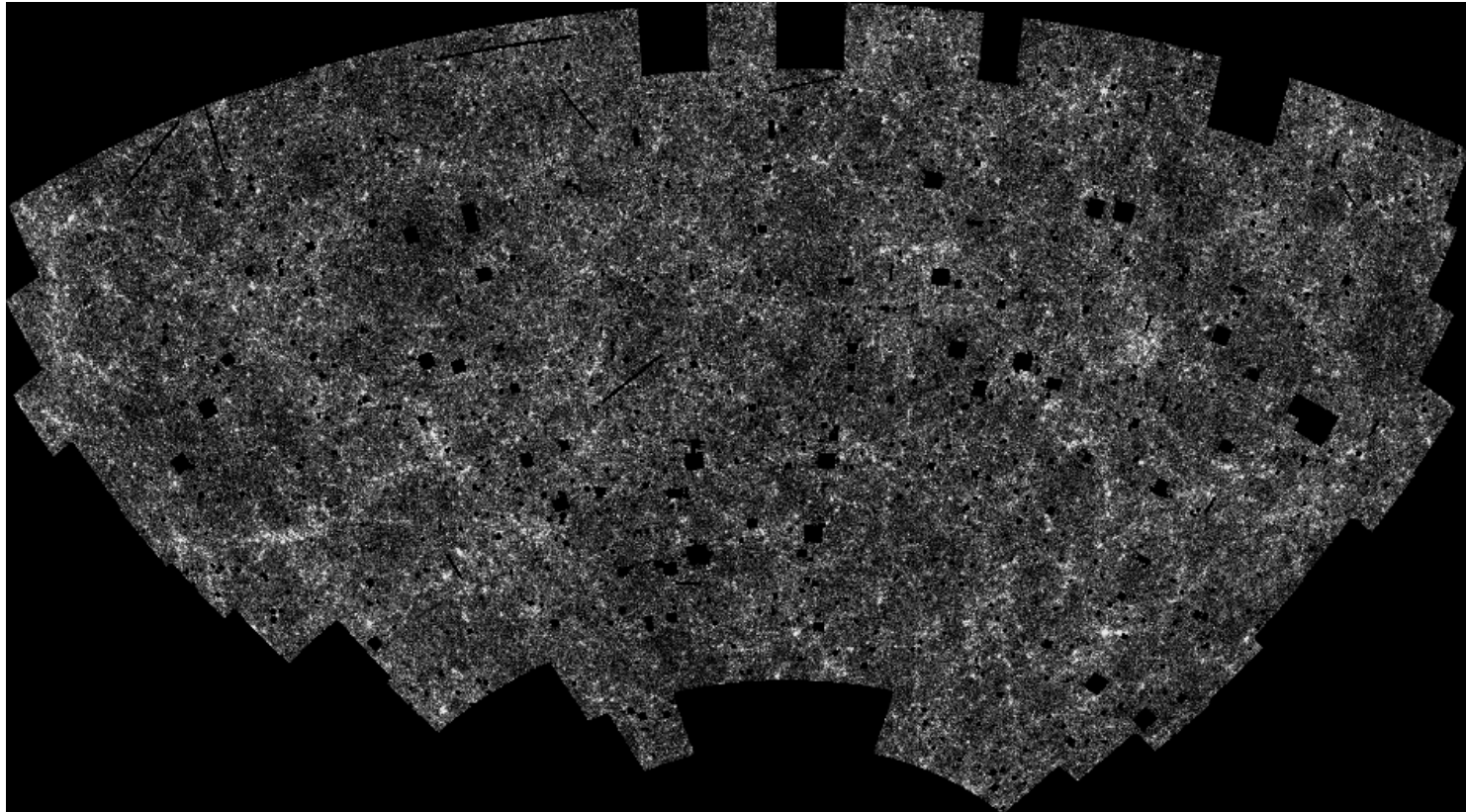


銀河団



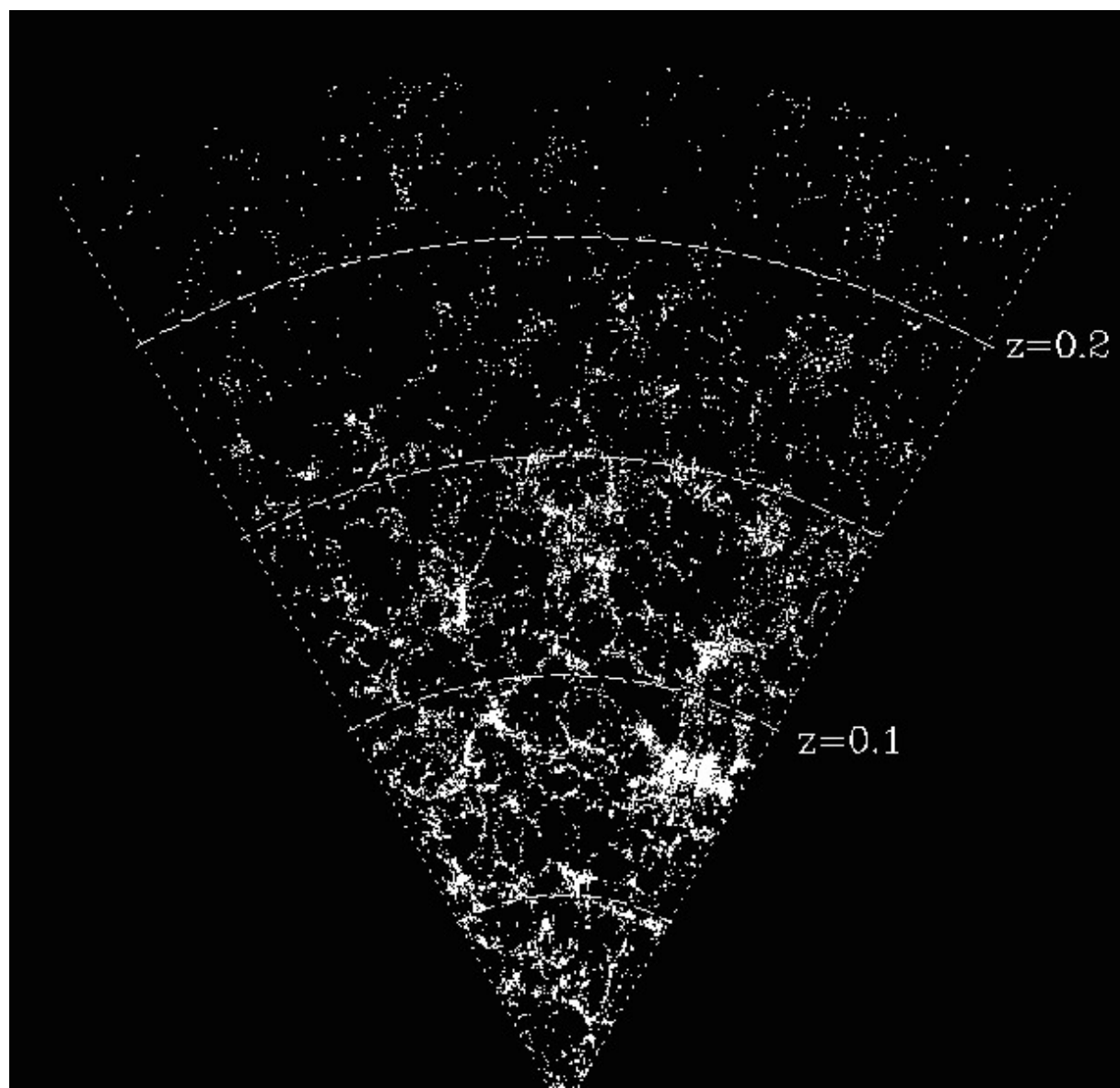
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap950917.html>

大規模構造 (天球面)



http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~wjs/apm_grey.gif

大規模構造 (距離情報あり) — SDSS スライス



支配方程式:

太陽系、星団、銀河、銀河団、宇宙の大規模構造などの基本方程式

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} -\frac{G m_j r_{ij}}{r_{ij}^3}$$

- それぞれの星（あるいは惑星）を一つの「粒子」と思った時に、ある粒子は他のすべての粒子からの重力を受ける。
- 大抵の場合に相対論的効果は考えなくていい（速度が光速にくらべてずっと小さい）

こういう系をどうやって研究するか

- 観測する：ほとんど「ある瞬間」しかわからない。恒星の運動は最近ある程度見えるものも。
- 理論を立てる：立てた方程式が簡単には解けない、、、
- 実験する：重力が重要な系の実験は実際上不可能

「計算機実験」が割合重要。

計算機「実験」

実際に星や惑星をどこかにおいて実験するのは不可能

計算機で支配方程式を積分することで実験の代わりにする

= 「計算機実験」

実験そのものとはちょっと違う

- こちらが入れた物理法則以外は入ってこない（はず）
- 計算があっているとは限らない

重力多体系の基本的性質

惑星や星と、それ以上の大きさの構造の基本的な違い：

圧力が重力とつりあっているわけではない

では、どうして潰れてしまわないか？

— Newton 以来の疑問。

- 太陽系
- 銀河
- 宇宙全体

太陽系の場合

太陽の回りを各惑星が回っている。

惑星同士の重力は太陽からののに比べて 3 桁程度小さい（木星の質量は太陽のほぼ 0.1%）。従って

ケプラー問題＋摂動

とみなせる。で、各惑星はほぼ周期的な運動をする、つまりずっと同じような軌道を回る。

といっても、これは本当にそうか？（惑星の軌道は本当に安定か？）というのは現在でもまだ完全に解決されていない大問題。

といってもこの話だけで講義が終わるのでちょっと省略。

太陽系の安定性

- 古典的には「ラプラスが安定性を証明」。これはでも無限の長期間ではなかった？
- 現在では、「冥王星の軌道はカオスである可能性あり」「水星の軌道も大きく変化して金星や地球とぶつかる可能性も」
- 系外惑星の多様性が明らかになってきたこともあり、問題の意義が大きく変化した

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。

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。

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ということになる。つまりは、ニュートンが最初に心配した、「星が落ちてくるのではないか」という問題に対する答は、「おちてきちゃってる」というもの。

では、銀河はどうやって形を保っているか？

宇宙はなにからできているか

(復習)

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？

現在の宇宙に対する我々の基本的な理解とその「検証」

- 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（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
- あとは各粒子の軌道を数値的に積分していく。基本的には太陽系の時と同じこと

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。

宇宙論の問題としては：

- 観測される銀河や銀河団の性質、特に分布
- シミュレーションでできた銀河や銀河団の分布

を比べて、「どうすれば現在の宇宙ができるか」を決めることで、「宇宙の始まりはどうだったか」を逆に決めたい。

例えば宇宙の膨張速度、密度、宇宙項、初めの揺らぎの性質、ダークマターの性質

そんなことが本当にわかるのか？

つまり、、、

- 宇宙初期の揺らぎ：（銀河や銀河団になる細かいところまでは）直接には見えない
- 昔の宇宙の膨張速度：直接には見えない
- ダークマター：見えるかどうか（あるかどうか）もわからない

これらを、全部同時に銀河の観測から決めたい。

そんなことは可能か？ という問題。

問題点

シミュレーションで出来るのは、本来はダークマターの分布だけ。

銀河になるにはそのなかでガスが収縮して星にならないといけない。

つまり、どういう条件で星ができるかが決まらなないと本当には比べられない

- 銀河の数が変わる（合体するとか）
- 銀河の明るさが変わる（若い星があると明るい。古くなると暗くなる）

原理的には

- こういった問題点の解決: 「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すればいい
- そういう方向の研究ももちろん進められている
- が、まだ、シミュレーションの信頼性その他に問題が、、、

animation

話を戻して、、、

なぜ銀河は潰れないか？

太陽系 太陽が圧倒的に重い — 2 体問題 + 摂動

一般の 3 体問題：不安定

安定（最終）状態：2 体の連星 + もう一つ（無限遠に飛ばされる）

銀河ではなにが起きるか？

銀河の「力学平衡状態」

星の数が非常に多い時には、それぞれの星は勝手に (他の星からの重力を受けて) 動いていても、星全体 (ダークマターも含めて) の質量分布、つまり、銀河のどこにどれくらい質量があるか、は「あまり」変わらない、という状態がある。

これは、時間がたっても銀河は「ほぼ同じ」形を保つことができるということ (特にダークマターについてはこれはかなり正しい)

これを「力学平衡状態」という。

銀河が潰れないわけ

銀河とかがどうして潰れてしまわないかという問題にたいする形式的な答：

ほぼそのような「力学平衡状態」にあるから

まあ、これはちょっと言い換えでしかないところもある。つまり、依然として

- なぜそのような状態に到達できるか？
- 到達できるとしても、どのような初期状態から始めたらどのような平衡状態に行くのか？

はよくわからない。

なぜ力学平衡にいくのか？

第一の問題に対する一般的な答：

初期状態が特別の条件をみたしていない限り、振動があったとすればそれは急激に減衰するので定常状態にいく。

(但し、回転があると別：渦巻銀河、棒渦巻銀河、、、)

前に見せた銀河形成のシミュレーションはその一例。

ジーンズ不安定

良く考えると、宇宙膨張と構造形成の関係はあんまり簡単ではない。

- ビッグバン直後の宇宙は熱平衡、一様密度
- 今の宇宙は全く一様ではない(少なくとも「小さな」スケールでは。メガパーセクとか)
- 理論的にはどうやって一様でなくなったか？

理解する枠組み: 重力不安定 (ジーンズ不安定)

ジーンズ不安定(続き)

- 「理論的」枠組み:大抵、摂動論(解けるものからの無限小のずれを扱う)
- ここでもそういう話
- 方程式書いて計算したりするのはこの講義の趣旨ではないので、そういうことをしないでの説明を試みる。
- ダークマターだと面倒なので断熱のガスで考える。

流体のジーンズ不安定

- 温度、密度がどこでも同じ (一様) で無限に広がっているなガスを考える。宇宙が全部そういう状態とする。
- 「音波」を考える。これは、圧縮されたところは圧力が上がって今度は膨張、膨張したら今度は逆に収縮、ということを繰り返す波。
- 波長と周波数は反比例。

音波と重力

- 音波で圧縮されたところは、重力が強くなるはず。なので、圧力とは逆に、もっと圧縮する方向の力が働く。
- 膨張したところは逆に重力が弱くなるので、ここも圧力とは逆向きの力が働く。
- 圧縮されたものが元に戻るのは、圧力が大きくなることによるわけだから、もしも重力の効果が圧力の効果よりも大きいと、音波が振動するのではなくて、収縮したところがどんどん収縮する、普通ではないことが起こる。

そんな変なことが本当に起こるのか？

波長、圧力、重力



「振幅」(最大圧力、最大密度)が同じで波長が違う波を考える

- 波のある場所(波長の $1/8$)とかでの圧力: 波長が違ってても変わらない
- 元に戻ろうとする力: 波長が長いとそれに反比例して小さい(圧力の「微分」、つまり、ちょっと離れたところとの圧力の差が力)

ところが

- 重力: 波長が長いと強くなる。3次元空間で、無限に広がった板からの重力は距離によらないので、波が長いとその分質量が増えて力が大きくなる。

このため、十分波長が長いと必ず重力が勝って、波が振動でなくて一方的に成長する。この限界の波長を「ジーンズ波長」という。

また、この、重力が圧力に勝って密度が高いところが収縮する不安定性を「ジーンズ不安定」という。

ジーンズ波長

すみません、ちょっとだけ式を:

ジーンズ波長 λ_J を式で書くと、...

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\pi}{G\rho}} v_s \quad (1)$$

G : 万有引力定数。 $f = -Gm_i m_j / r_{ij}^2$

ρ : ガスの密度。

v_s : ガスの音速。

音速が大きい: 圧力は音速の2乗に比例して大きくなる。

音速が2倍大きくなるとジーンズ波長は何倍になるか?

2倍長い波長を考えると：重力は2倍、圧力は4倍、圧力の微分は2倍で、圧力の微分と重力が釣り合う。

このためジョーンズ波長は音速に比例。

膨張宇宙とジーンズ不安定

- ガス：「宇宙膨張」によってガスは断熱膨張、急激に温度が下がる。
- ダークマター：非常に密度が高い時にはガスと同じように振る舞う。密度が下がるとガスと違ってお互いに相互作用しない。このために波長が短いゆらぎは消えて、長いものはそのまま成長。

いずれにしても、宇宙膨張によって、安定だった音波的ゆらぎが不安定になって成長できるようになる。

初期条件と力学平衡の状態の関係

あまり役に立つことはわかっていない。初期条件と最終状態の間関係をいろいろ調べている段階。

このへんは、基本的には前にいった数値計算でやられる。

- 1996 年頃に、宇宙論で考えるような初期条件の範囲内ではいろいろパラメータを変えてもできるものはみんな同じであるというシミュレーション結果が出た。
- が、この結果は実は間違いであったことが、より大規模なシミュレーションからわかった。
- スーパーコンピューター「京」を使ったシミュレーションで、ようやく、現実に近い宇宙モデルでどうなるかが少しわかってきた。

ビッグバンからの天体のできかた

現在の標準的な理解は以下のような感じ

- ダークマターの密度ゆらぎからの成長が、宇宙の色々な天体・構造の起源。
- 密度ゆらぎの大きさは、波長が短いところでは「ほぼ一定」、銀河くらいまでは徐々に、銀河団くらいから上で急速に小さくなる。
- ここで「大きさ」は、「不安定が十分成長して天体になるまでの時間」
- このため、銀河ができる時には、その中のそれより短い波長のゆらぎも成長している。言い換えると、ダークマター天体は質量が小さいものがまず形成され、それらが合体して大きくなっていく。

ビッグバンからの天体のできかた(続き)

- 現在のところ、最初にできるダークマター天体は地球くらいの質量と考えられている。これはダークマターを構成する素粒子(だとして)の質量できまる。
- ダークマター天体(専門用語では「ダークマターハロー」ということが多い)の質量が太陽の10ー100万倍くらいまで成長すると、その重力で集めたガスが宇宙で最初の(第一世代の)星ができると考えられている。
- この星がどういうものかはよくわかっていないが、質量が太陽の100倍程度ある重いものができ、紫外線や超新星としての爆発エネルギーで宇宙全体の水素ガスをもう一度電離すると考えられている。

ビッグバンからの天体のできかた(続き2)

- 但し、この電離には、その頃形成されつつあった(?)巨大ブラックホールからの放射がきいているという説もある。
- ダークマター天体がさらに成長すると、電離したガスも重力で集めることができるようになる。そうなるとそのガスが冷却し、星ができる。冷えたガスはダークマター天体の中心に集まるが、全体として回転があると円盤状になる(円盤銀河、渦巻銀河)
- この辺、観測からも理論からもまだよくわかっていないことが多い。理論は、シミュレーションがまだ精度がないため。観測は、非常に遠くの暗い天体を観測する必要があり、単純に望遠鏡の性能の問題。

- ブラックホールの成長については、今まで全く観測されていなかった重力波の観測で今後 10-20 年の間には色々なことがわかると期待はできる。

恒星円盤、スパイラル構造

ここからは銀河円盤とそれに関する話題を少し。

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。

ではみんな同じか？

色々違う。

- 円盤の質量
- 重力場の形
- 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 (銀河中心近くの星の集まり) の質量と、円盤の質量は同程度。自己重力の効果が大きい
- 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、恒星の質量の 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。

重力場の違い

- 銀河円盤では円盤自身やダークマターハローが作る重力場になって単純な1点からの重力(距離の2乗に反比例)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重力場、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。

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

前に話をした、ジーンズ不安定と原理は同様に調べることができる。違い:

- 薄い円盤なので重力の式が違う (距離が近いと強くなる)
- 回転している効果で、波長が長いと遠心力で安定化

ガス温度が0の時

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

という臨界波数これより高い波数 (短い波長) は不安定

κ : エピサイクル (周転円!) の角速度

Σ : 円盤の面密度 (単位面積あたりの質量)

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 に対して不安定にならないためには

$$\frac{v_s k}{\pi G \Sigma} > 1 \quad (3)$$

であればよい。(v_s は音速)

$$Q = \frac{v_s k}{\pi G \Sigma} \quad (4)$$

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

$$Q = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 G \Sigma} > 1 \quad (5)$$

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。

ついてのみ適用できる。

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

$$\lambda_{crit} = \frac{4\pi^2 G \Sigma}{\kappa^2} \quad (6)$$

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。

腕が複数あるモードでも、安定性の振る舞いは軸対称の場合と本質的に同じ。

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

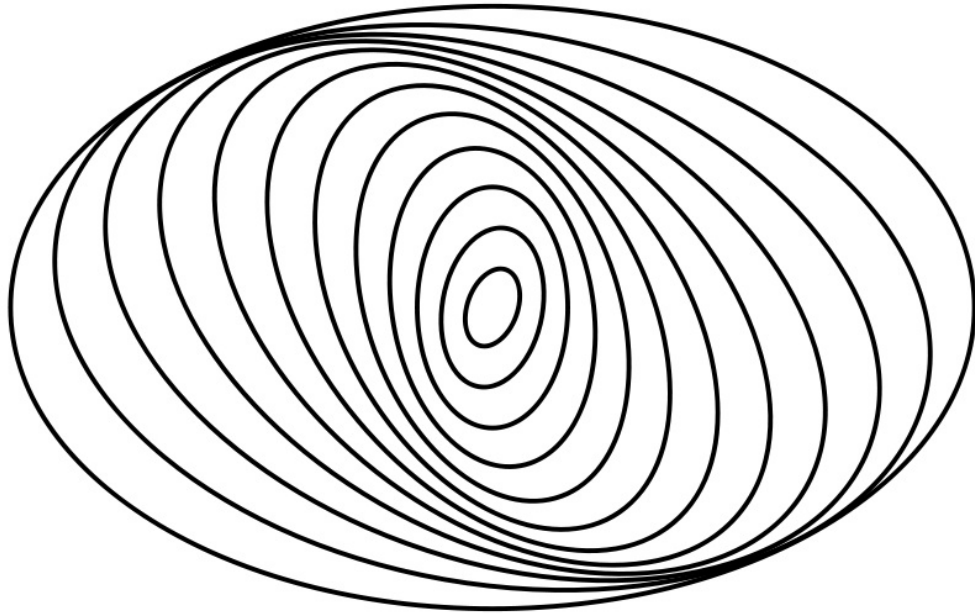
巻き込みの問題の回避(?)

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
- これらの計算では、 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。

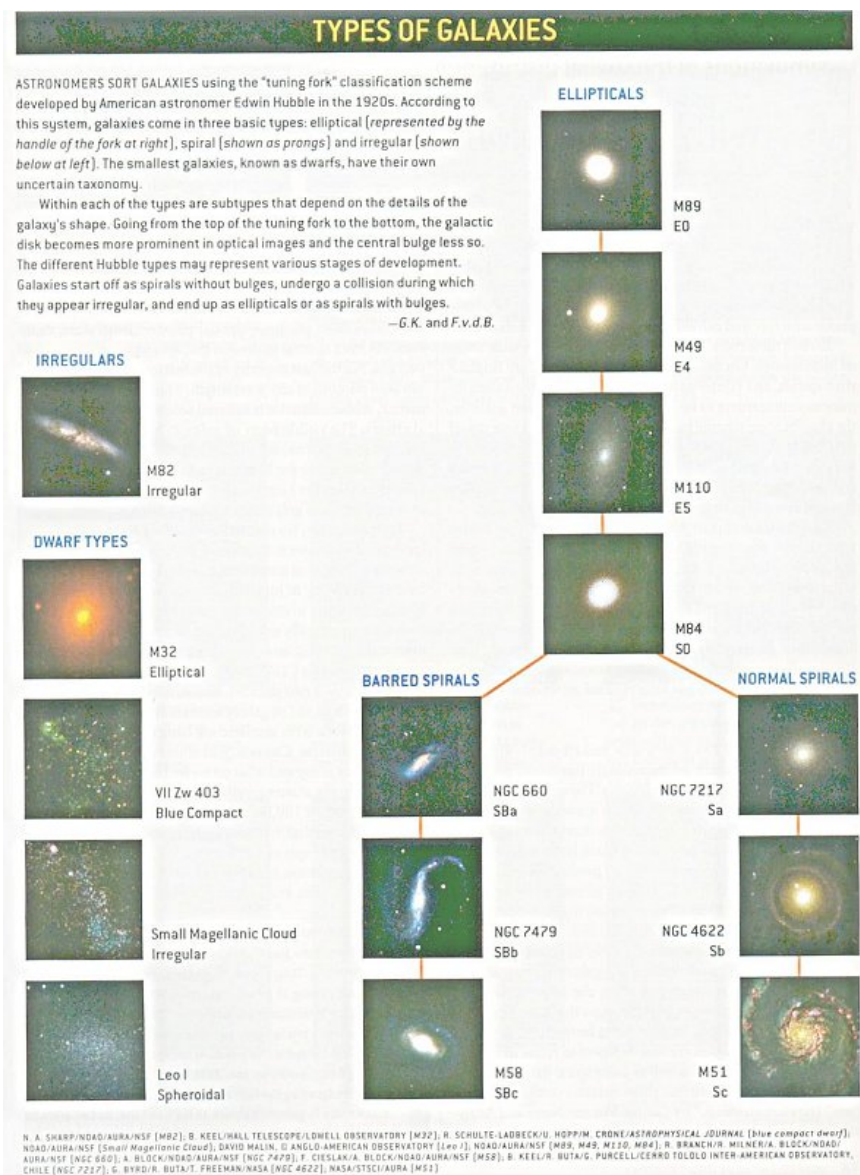
バーとバー不安定

- 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。

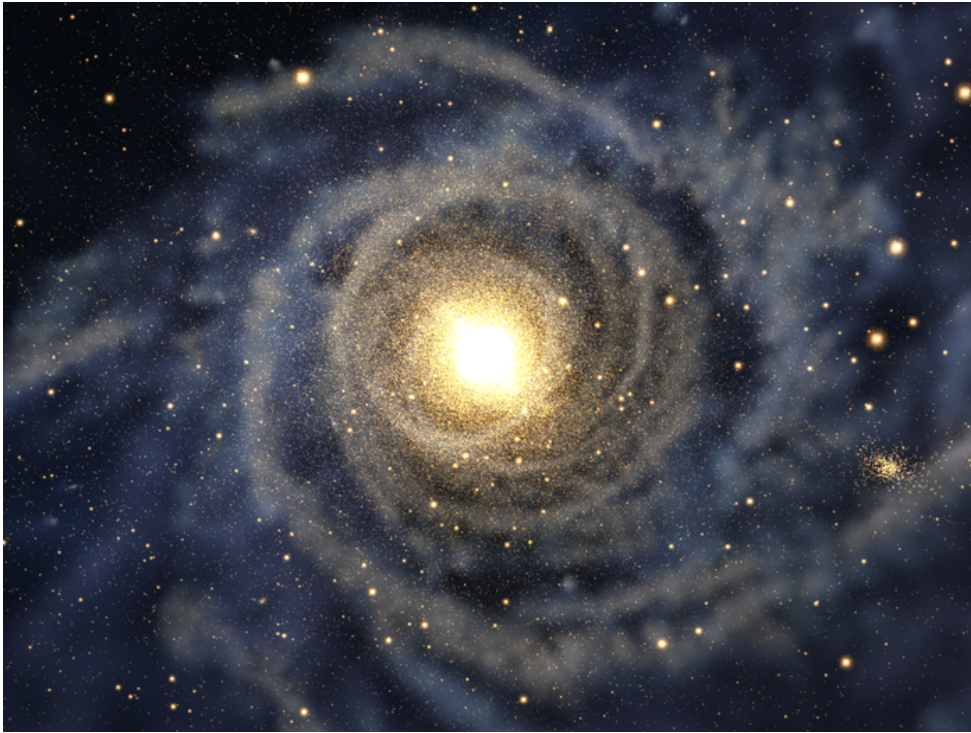
銀河形成シミュレーション

基本的な考え方:

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



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

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？

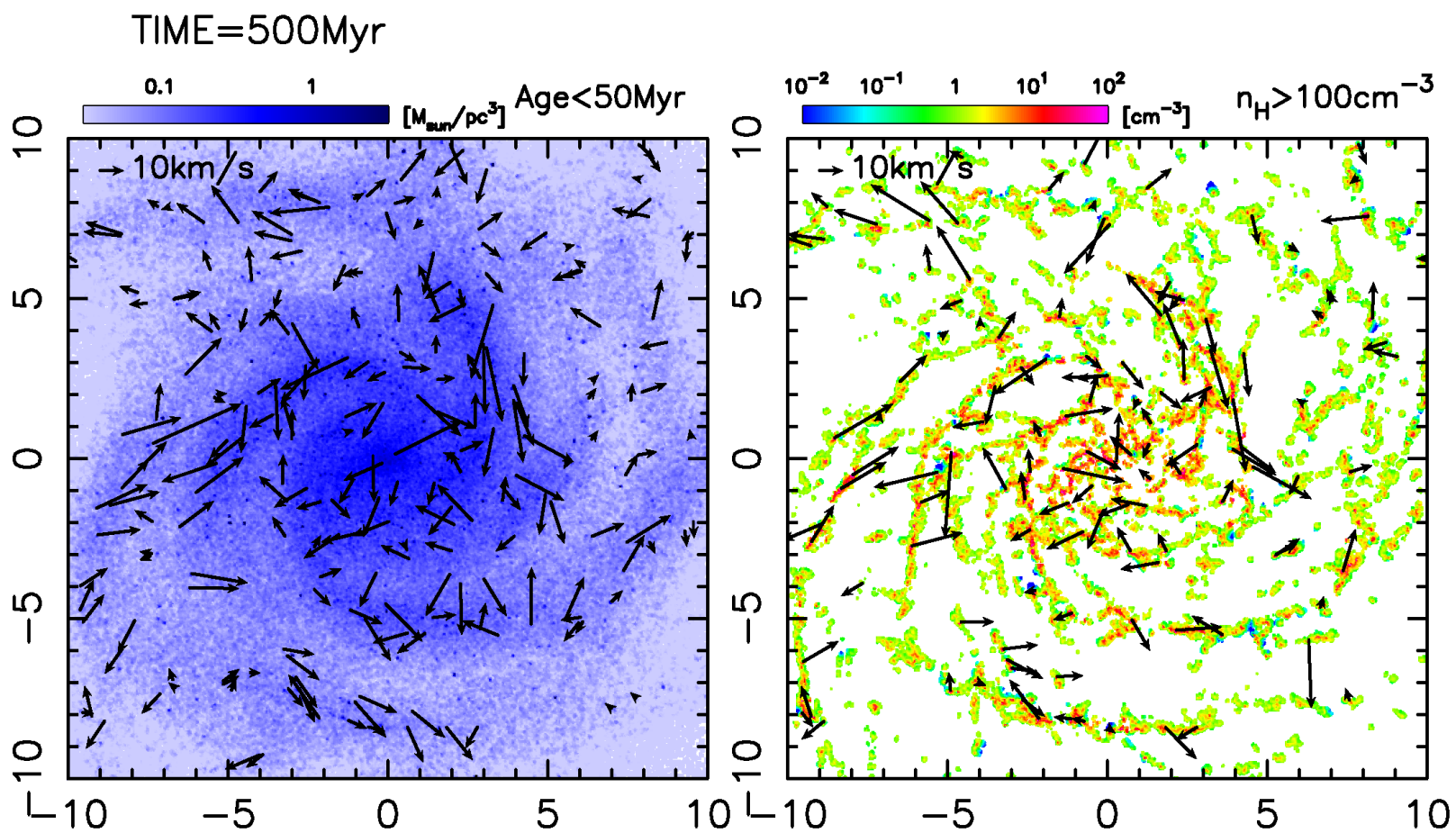
アニメーション

Star formation with SPH

Large scale structure formation with AMR

銀河円盤

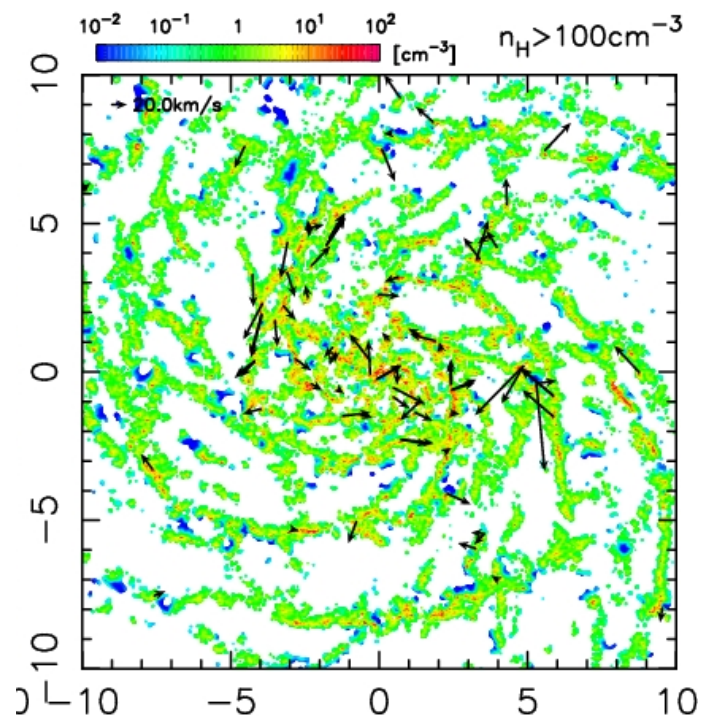
渦巻構造と、円運動からのずれ animation (Baba et al 2009) 1 2



星の分布

冷たいガスの分布

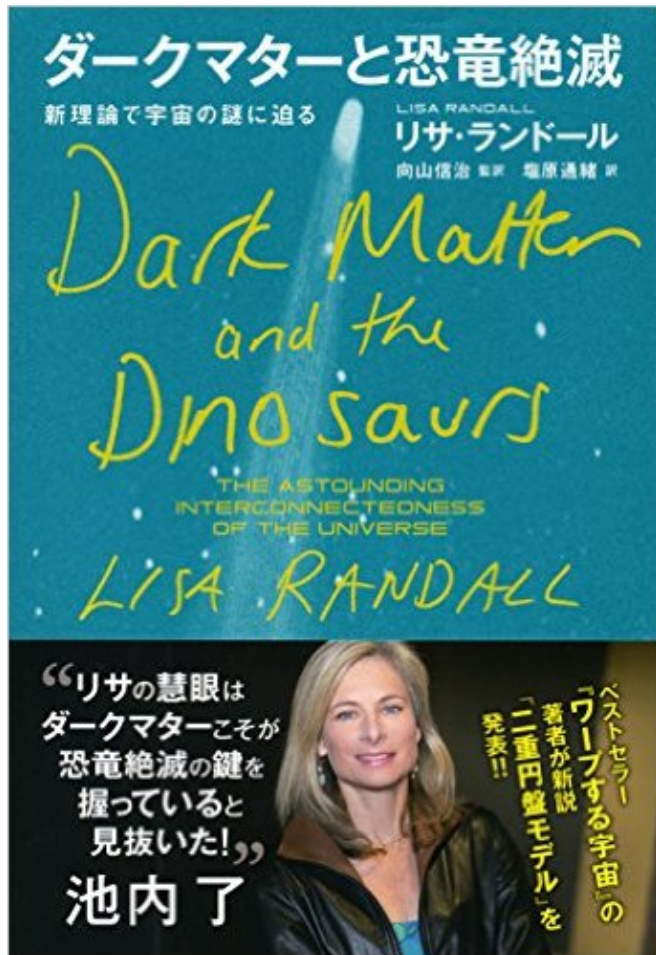
高分解能モデルと観測



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

余談：ダークマターと恐竜絶滅



- こんな本が最近でていた
 - リサ・ランドールは大変有名で業績もある素粒子物理の理論家
 - これは、「未知のダークマター」が薄い銀河円盤を作っていると恐竜絶滅が説明できるという説
 - 今日議論したような円盤の安定性の検討がない(著者達の論文読んでも)。
- 検討すると強い不安定。多分間違っている。

星形成についてわかっていること

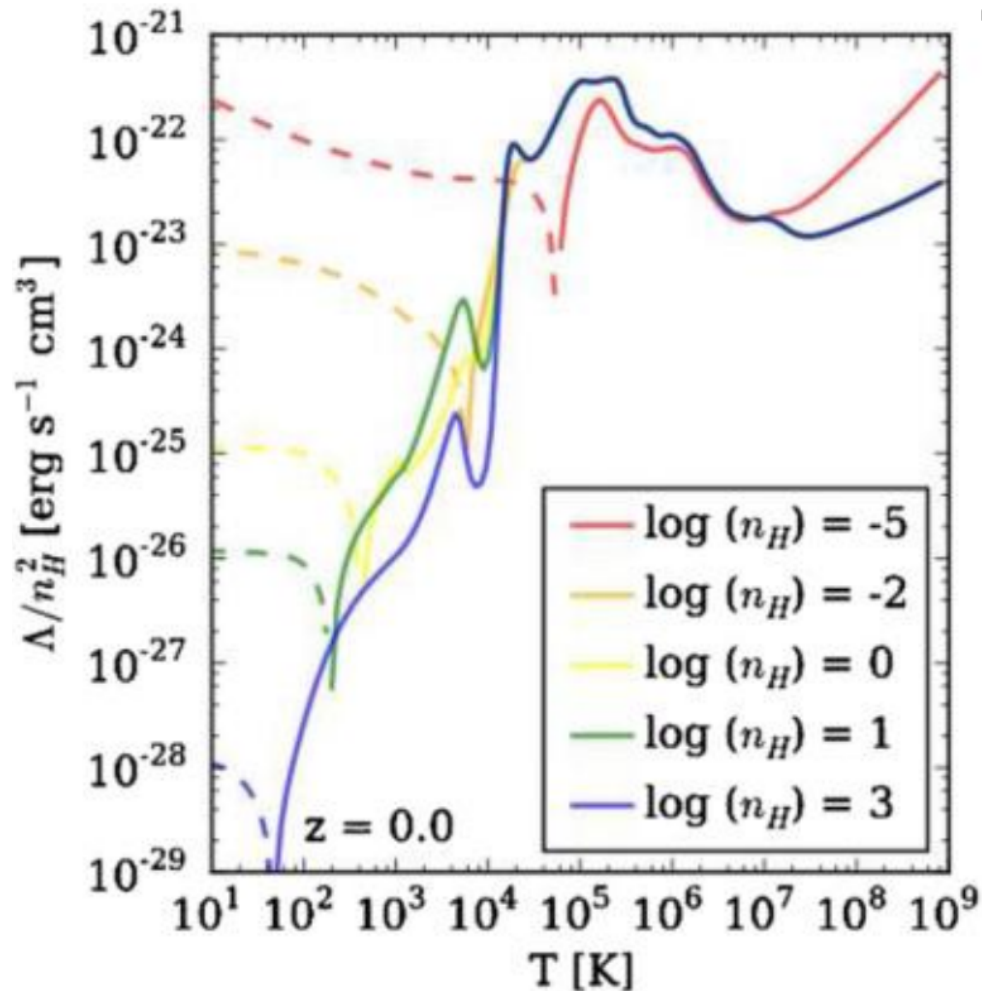
- この講義では、「星形成についてわかっていること」を整理しようと思っていた
- しかし、なかなか難しい。
- なので、まず、なぜ難しいか、を整理して、それからもう一度わかっていることを整理したい。

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

- 10^4K 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)
- 10^4K 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