

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

- 試験は、配布資料と手書きノートのみ持込可です。(スライドを印刷したものは配布資料とみなします)
- 牧野の講義資料は <http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-A-2019> 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

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

# 宇宙膨張

宇宙が全体として膨張しているとすれば宇宙全体に対する一般相対論の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。

# 宇宙が膨張するって？

- 一応正しいんだけどあんまりわかった気がしない説明:

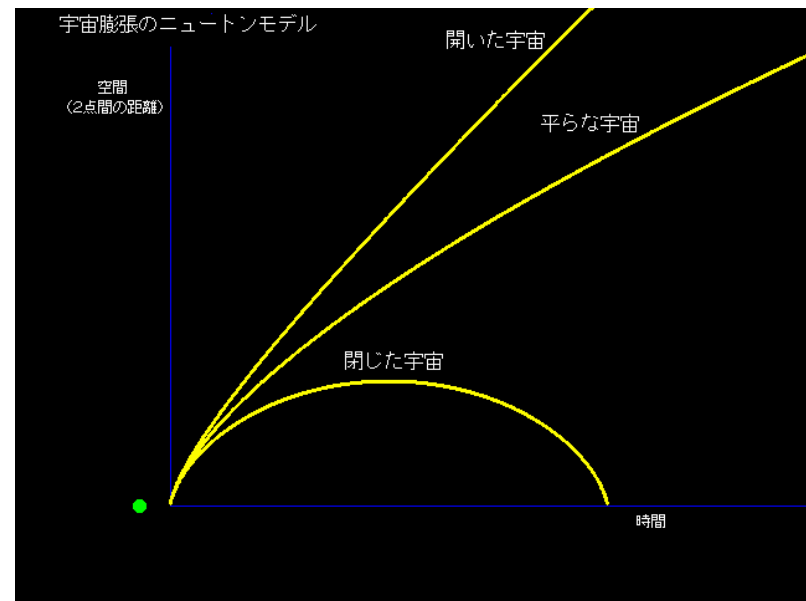
アインシュタインの一般相対性理論の方程式を、「宇宙が空間的に一様」として解くと、「静止している」という解はなくて「膨張している」か「収縮している」である

謎な定数をいれて静止解も出すことはできるが

- もうちょっと感覚的な説明:

宇宙に物質があれば、必ず重力があって、お互いにひきあう。なので、「止まっている」解はない。全体として膨張、全体として収縮、はありうる。

重力のため、段々膨張がゆっくりになる。



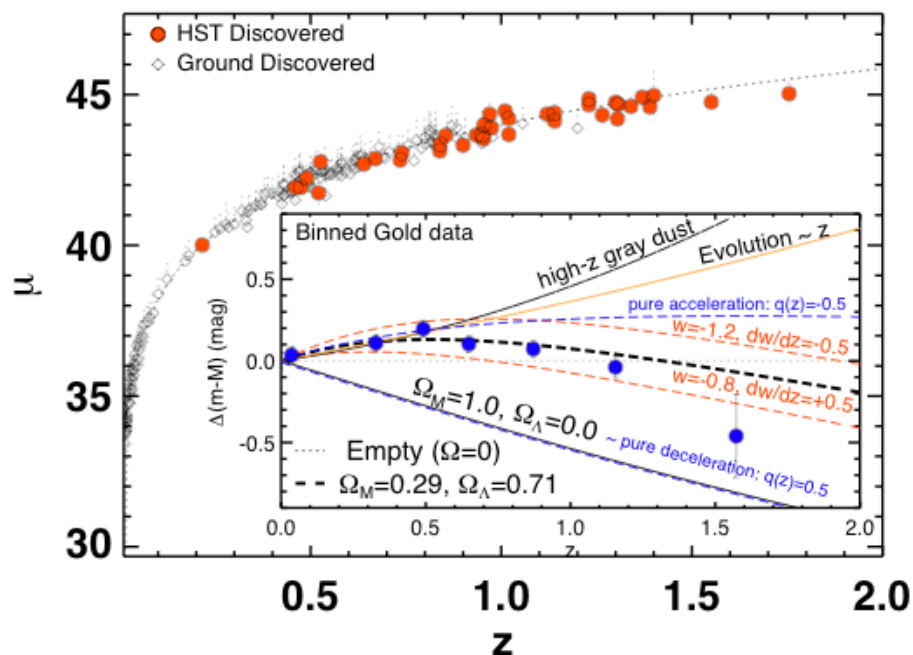
# どんなふうによっくりになるか？

- 現代の宇宙物理学の基本問題だった。2000年代はじめまでほぼ1世紀に渡る論争
- 20年くらい前までの支配的な考え:(意味はちょっとおいて)「平坦な宇宙」
  - 無限の未来に膨張速度がゼロに近づく
- 近年の観測からの示唆:実はよっくりにならない。無限の未来に無限に速くなる

非常に予想外な発見。

# 宇宙膨張の加速

遠方の超新星の明るさを観測する：同じ「赤方偏移」でも膨張のしかたで距離、従って明るさが違う



- 普通に平坦な宇宙:  
明るい
- 物質が少ない宇宙:  
暗い
- 膨張が加速している  
宇宙: もっと暗い  
これが我々の宇宙

2011 年ノーベル物理学賞

膨張を加速しているなにか=ダークエネルギー

# 赤方偏移って？

- 宇宙 (空間) が膨張すると、空間を伝搬する電磁波の波長も伸びる。(何故かはきかないで、、、)
- 光でこれが起こると、可視光も波長の長いほうにシフト＝赤方偏移
- 普通  $z$  で表す。波長が  $1 + z$  倍になる
- 光のドップラー効果と考えてもいい。遠くのもののは速く遠ざかっているので波長が伸びて赤っぽく見える。

# 超新星って？

- 普通の「超新星」：太陽の8倍よりも重い星が寿命の最後にする爆発。これは、天文学の用語では「II型超新星」
- ここで距離の目安に使っているもの：「II型超新星」

# 星の一生の概略

- 宇宙空間 (普通銀河円盤の中) で冷たくなった星間ガスが重力で集まって星になる。
- 星になって中心の密度・温度が十分に上がると、水素原子4個からヘリウムができる核融合反応が始まる。中心で水素がなくなるまで、安定な核融合が続く (主系列)
- 中心がヘリウムだけになると、ヘリウムの核融合が始まる。炭素や酸素ができる。
- 軽い星だと、炭素や酸素から先には核融合が進まない。段々収縮して「白色矮星」と呼ばれる星になる。太陽くらいの質量でも半径は1万 km 程度と小さい。
- 軽い星の一生は基本的にはこれでおしまい。



## 星の一生の概略(2)

- 太陽の8倍より重い星だと、核融合が鉄元素まで進む。ところが、そこから先には進まない(進むとエネルギーを吸収する)
- このため、星は自分の重力を圧力で支えられなくなり、一気につぶれる。
- 質量が大きいとブラックホールになるが、中間的な質量だと「中性子星」(中性子だけでできた半径10kmくらいの星)が中心に残り、残りは反動で吹き飛ばされる
- これが「II型超新星」
- 1987年2月にマゼラン星雲で超新星爆発があり、その時にでたニュートリノが「カミオカンデ」で観測された(小柴教授ノーベル賞)

# I型超新星

- 白色矮星がなんらかの理由で爆発的核融合を起こすと考えられている。
- モデルは2つ。1つは、白色矮星が連星になって、相手からガスがゆっくり降ってきて最終的に重くばって爆発。
- もうひとつは、2つの白色矮星が衝突して爆発(元々連星系で、重力波をだして軌道が縮む)
- 最近は後者が有力？どっちもある？
- 明るさと、「光度曲線」(時間が立つと暗くなるなりかた)に関係があるので、それを使って明るさから距離がわかる。

# 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 (一般相対論) 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、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。

# 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。

ダークマター候補として最近有力だった粒子の存在の証拠は LHC で見つかるかもと言われていたがまだ見つかってない。



# 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。

# ビッグバン宇宙論とマイクロ波バックグラウンド

- 宇宙膨張はいいとして、「宇宙に始まりがある」なんてのは認め難い、という人は一杯いた(まだ生きている人もいる)
- 有名な人の一人: Fred Hoyle
- ケンブリッジの Institute of Theoretical Astrophysics の所長もやった、Sir の称号もある。
- 「ビッグバン」という名前はこのひとが悪口としていだした。



Fred Hoyle (1915-2001)

# ビッグバンでないとする、...

色々な理論が提案された(されている、...)

- 定常膨張モデル: 宇宙膨張はある。どこからともなく物質がわいてくる。
- そもそも膨張していない。赤方偏移は膨張によるものではない。

# ビッグバン宇宙論とマイクロ波バックグラウンド

ビッグバン宇宙論から予言できたこと (1950年前後)

- 元素合成
- マイクロ波バックグラウンド

(ガモフ他による)

# 元素合成

- 最初の宇宙はものすごく密度が高い。どういう物質かは素粒子論の話。
- どっかの時点で通常の核物質 (中性子、陽子+電子) になり、さらに膨張して密度が下がる過程で水素原子、重水素、三重水素、ヘリウムになる。
- 当時の「弱い相互作用」の理論からヘリウムの量を予言した。恒星内に大量のヘリウム4(質量比で大体 1/4) あることを自然に説明。
- 他の元素 (ヘリウム3、重水素、リチウム7) 等の量から「物質の量」が決まる。(観測と、、、)

# マイクロ波バックグラウンド

- 元素合成が終わるとほぼ水素+ヘリウムの宇宙。最初は温度が高いためプラズマ状態
- 30万年くらいたつと、温度が3000Kくらいまでさがってプラズマから中性の原子に
- それまで、輻射と物質が熱平衡だったのが、物質がいきなり透明になる
- 輻射は、そのあと宇宙膨張によってひきのばされて、現在の宇宙では2.7Kのマイクロ波となって観測される

これもガモフ他が1940年代に予言。1965年に実際に観測された。

# マイクロ波で実際に見えるもの

- ものすごく正確に熱平衡分布 (プランク分布) に近い電波が
- 宇宙のあらゆる方向からものすごく高い精度で同じ強さで

きているのが観測された。これは、一方ではビッグバン宇宙論をサポートする証拠である。陽子と電子の結合 (何故か再結合 recombination という) が起こったことを示す。

が、他方で、「あまりに正確に一様過ぎる」という問題を引き起こした。

# 一様過ぎることの問題

- ある範囲で十分に一様になるためには、その範囲でほぼ熱平衡になる必要がある。
- しかし、そのためには少なくともその範囲の大きさがその時点での宇宙年齢で光が届く距離より小さくなければならない。
- ところが、普通の宇宙モデルでは、宇宙膨張は次第に減速していくため、現在見えているマイクロ波背景放射は、当時の宇宙の「外側」からきている。
- つまり、違う方向からの放射が全て熱平衡にあったはずはない。



# インフレーション

## A. Guth、佐藤勝彦らがほぼ同時、独立に提唱

- インフレーションモデルでは、ビッグバン後のある時期に宇宙が指数関数的に膨張したとする。
- 宇宙膨張が指数関数的なため、元々は宇宙の内側だった領域がはるかに外側まで広がる
- マイクロ波背景輻射がきているのははその時には宇宙の外側だったとしても、インフレーション前には内側だったので問題ないことになる。

それ単に都合のいい仮定をもちこんだだけでは？という気もするが、、、

# インフレーション(続き)

- 何故インフレーションのようなことが起きるか、ということに説明がついているわけではない
- が、そのようなことがおきたとすると、いろいろなことが決まってしまう。(しかも妙に上手くいく)
- 特に、銀河等の成長の種となる密度ゆらぎの振幅と大きさ(波長)の関係が、インフレーションを仮定すると、宇宙そのものに量子ゆらぎがあるということから説明される。
- 「宇宙全体」がもっていた量子ゆらぎが、インフレーションによって宇宙がひき伸ばされるとそのまま固定されるので、基本的には波長によらずゆらぎの大きさが同じになる(んだそうです)

# インフレーションモデルの問題点と現状

## 明らかな問題点

- 始まりは適当な場を仮定すれば起こるが、何故止まるのか？
- 適当な場は本当にあるのか？
- あるかどうか確認する方法はあるのか？

よくわからないが、しかし

- マイクロ波背景放射のゆらぎ (あとでもうちょっと述べる)
- 銀河の分布

はインフレーションが予言するものと非常に良く一致。

# というわけで、現在の理解をもう一度

- 物質＋ダークエネルギーで「平坦」
- ダークエネルギーは重力とは逆に働いて、空間を膨張させる。遠い未来には指数関数的に膨張
- つまり、宇宙初期のとは違うけれど、現在の宇宙も「インフレーション」的な膨張過程にある
- 「ダークエネルギー」は、全く正体不明。ほぼ名前つけただけ

# では「物質」のほうは？

- 観測の示唆: ダークエネルギー+物質=「1」  
(宇宙が「平坦」になる密度に等しい、ということ)
- ダークエネルギー: 68.3%, 「ダークマター」:26.8%, 普通の物質: 4.9%
- 普通の物質: 陽子、電子、中性子からなる普通の元素。それぞれクォークからできている。
- ダークマター: 普通の物質「ではない」なにか。現在の宇宙ではほぼ重力しか働いていない

# 宇宙の始まりから今まで

をもう一度簡単にまとめておく

- 宇宙初期には非常に高温・高密度であり、普通の元素はまだ存在していなくて全てがクォークである状態があったはずである (クォーク・グルーオンプラズマ)
- ある程度膨張が進むと、普通の陽子、中性子、電子になる
- さらに膨張が進み、温度、密度が下がると、陽子、中性子の集合状態から原子核に分かれる。この過程を元素合成という
- さらに膨張し、温度が下がると、それまで電離していた陽子 (水素原子イオン) と電子が結合する (宇宙の晴れあがり)
- このあと、重力不安定によりダークマターやバリオン (普通の物質) が集まって天体が形成され、それらからの放射によって水素原子がもう一度電離する (宇宙の再電離)

# どこまで信用できるか？

- 現在の標準的な理解が確立したのは、比較的最近のこと
- ビッグバンの確実な証拠とされるマイクロ波背景放射が発見されたのは1960年代
- インフレーションモデルの提案は1980年代
- 超新星の観測結果からダークエネルギーが必要という理解が標準的になったのは2000年代にはいつてから
- 現在の標準的理解はまだ15年ほどの歴史しかない。

# どこまで信用できるか？

- ビッグバンがあって、宇宙の始まりがある、という仮説については、近年あまり疑う余地はなくなってきたかに見える。
- 上に述べたマイクロ波背景放射は重要だが、他の傍証の一つとして、遠方(赤方偏移大)の銀河は形態も数も質量も我々の近傍と大きく違う、というのがサーベイ観測でわかってきた、ということがある。
- 仮にビッグバンがなく、宇宙が無限の過去から定常であるなら、見える範囲の過去で銀河の形態等が大きく変わる、ということは考えにくい。
- 他の細かいこと、ダークマターやダークエネルギーについてはまだガラガラ変わるかもしれない



# 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

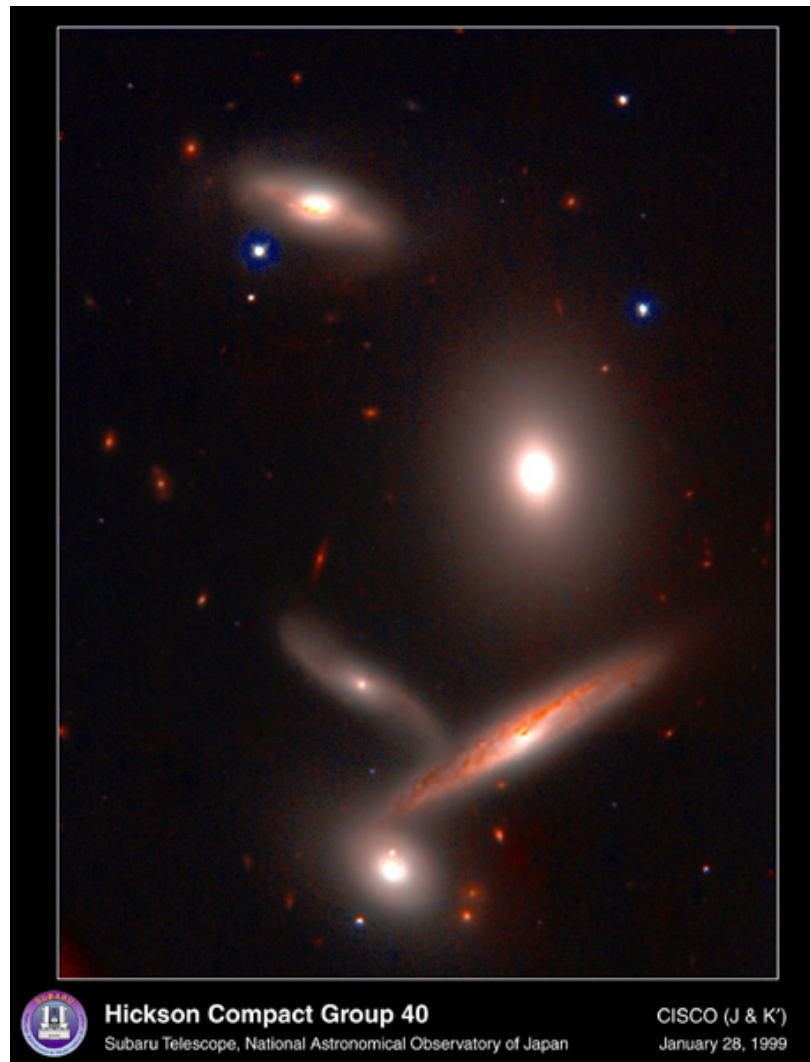
## 銀河



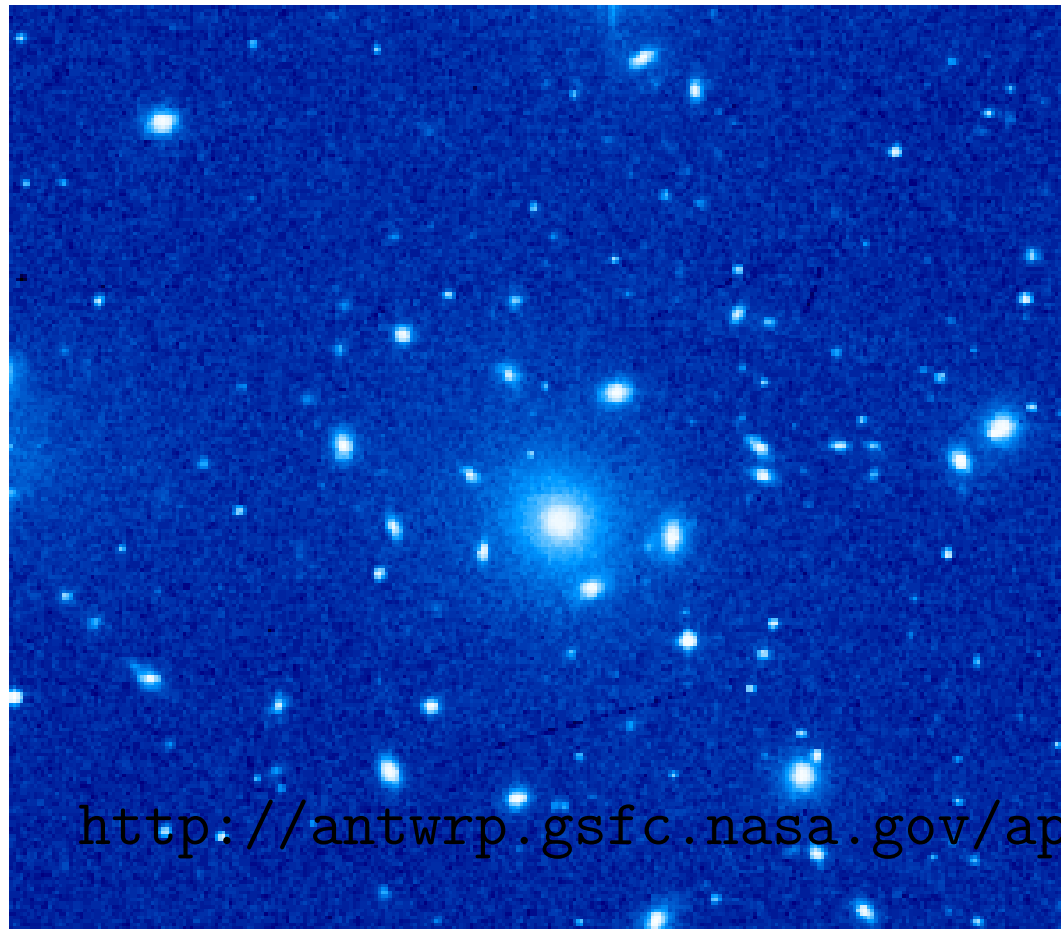
## 球状星団



# 銀河群

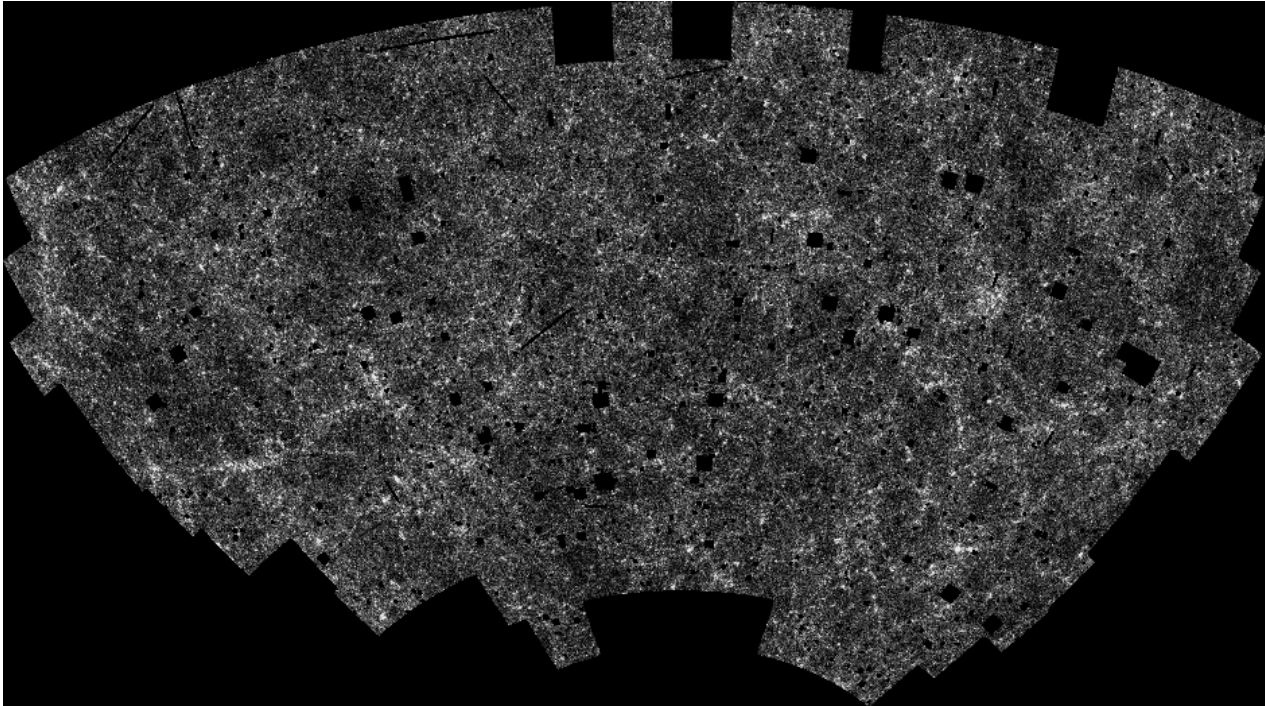


# 銀河団



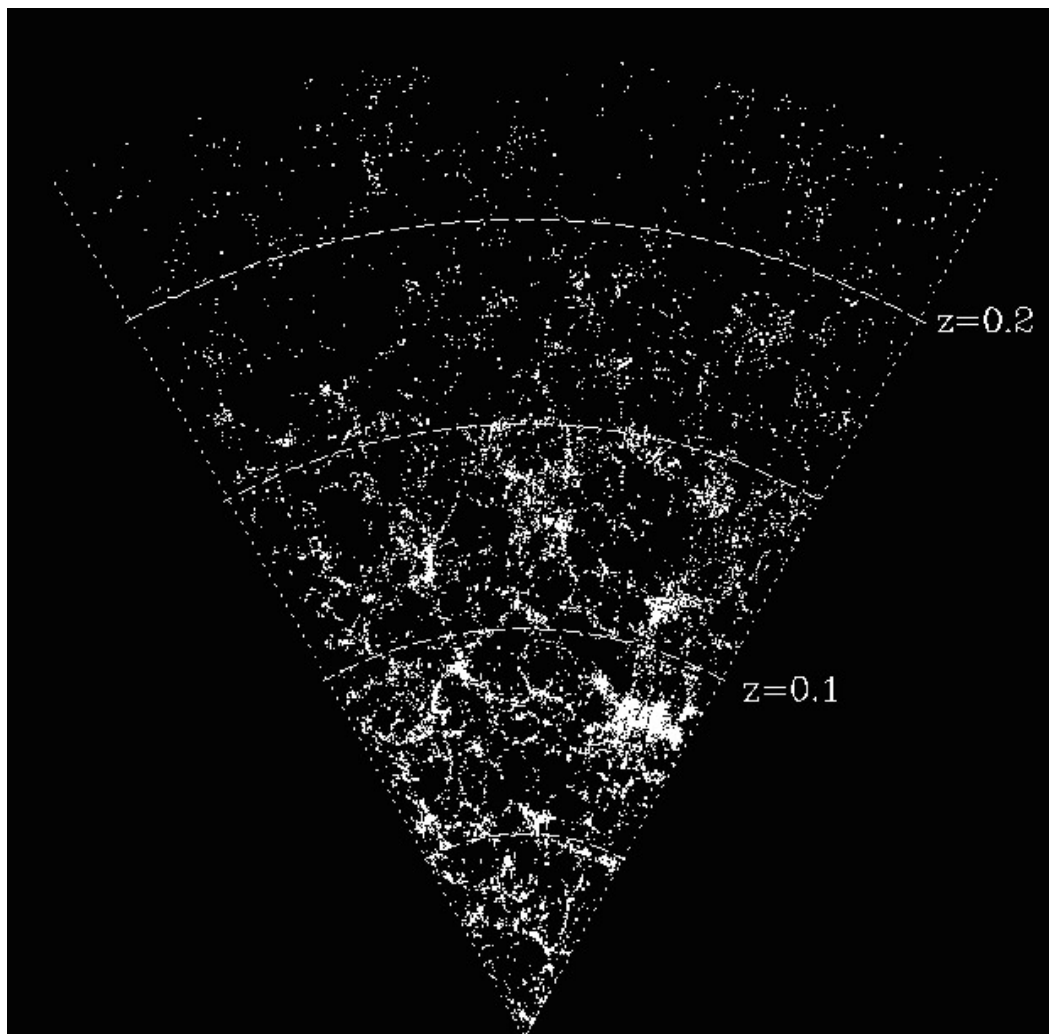
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap950917.html>

## 大規模構造 (天球面)



[http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~wjs/apm\\_grey.gif](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。



# 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 (すみません、今日は省略)
- 銀河
- 宇宙全体

# 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と、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。

# 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）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る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。まだ「安定性」が理解されてはいないが、、、

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。

# なぜ力学平衡に行くのか？

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行く。

(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。

# 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10-100万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。

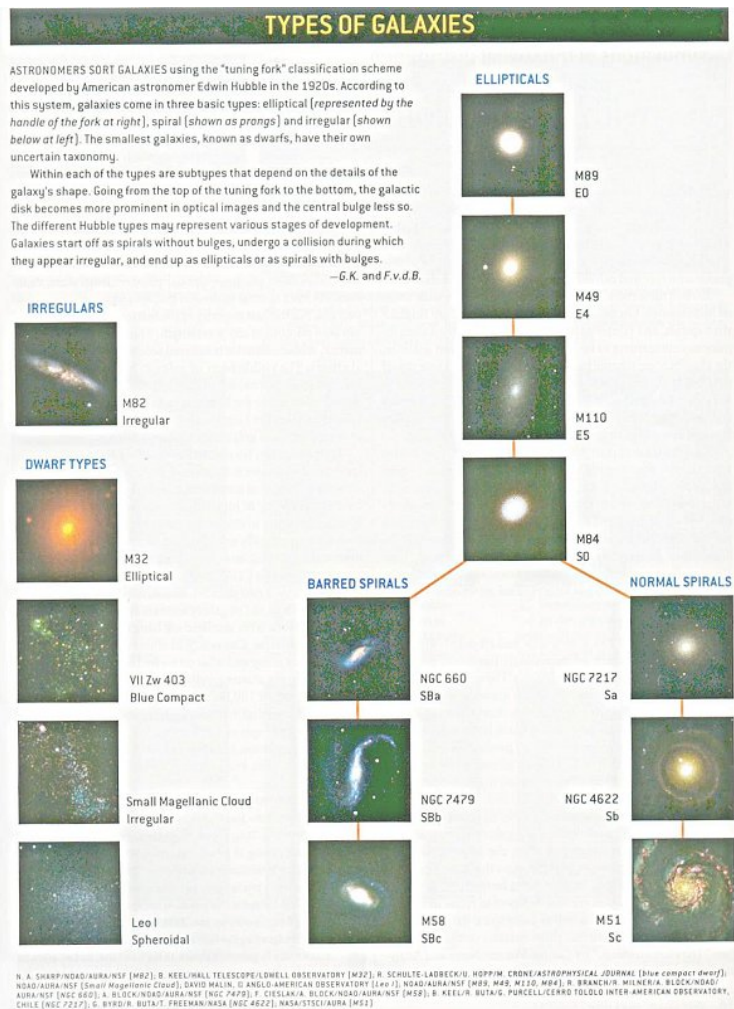


# ビッグバンからの天体のできかた (続き 2)

- 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。

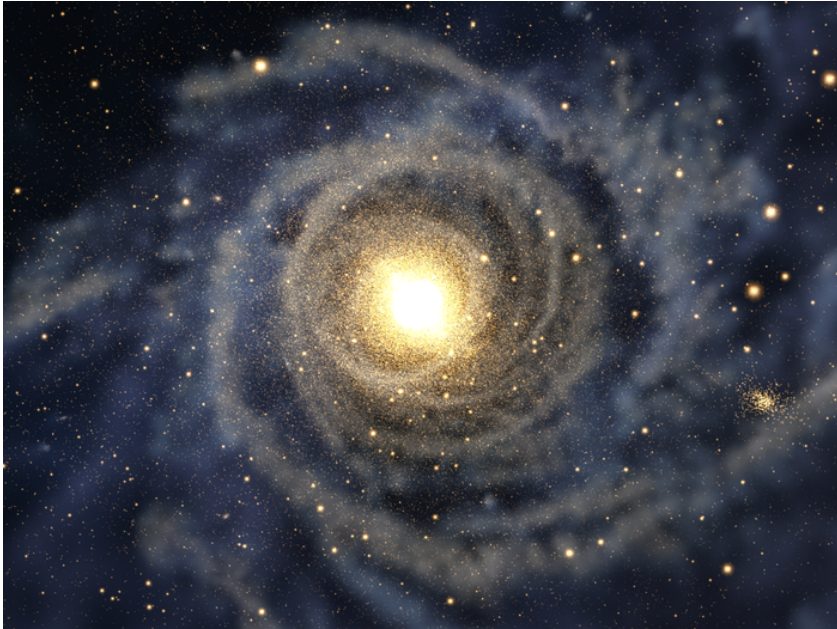
# 銀河形成シミュレーション



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

# 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？

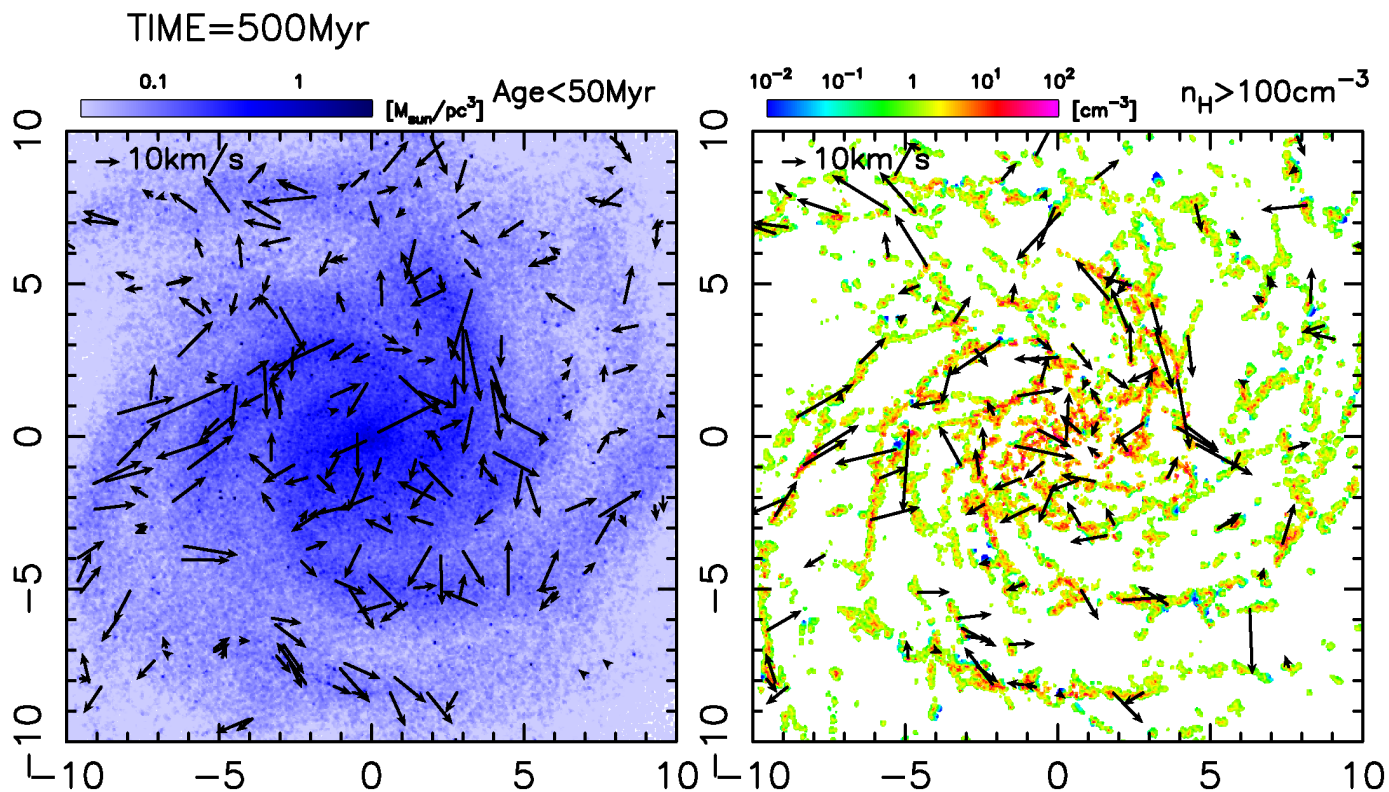
アニメーション

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

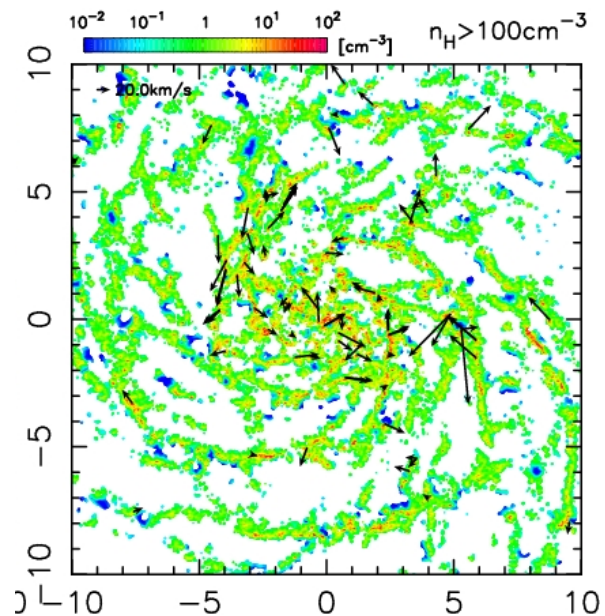


星の分布

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

# 星形成についてわかっていること

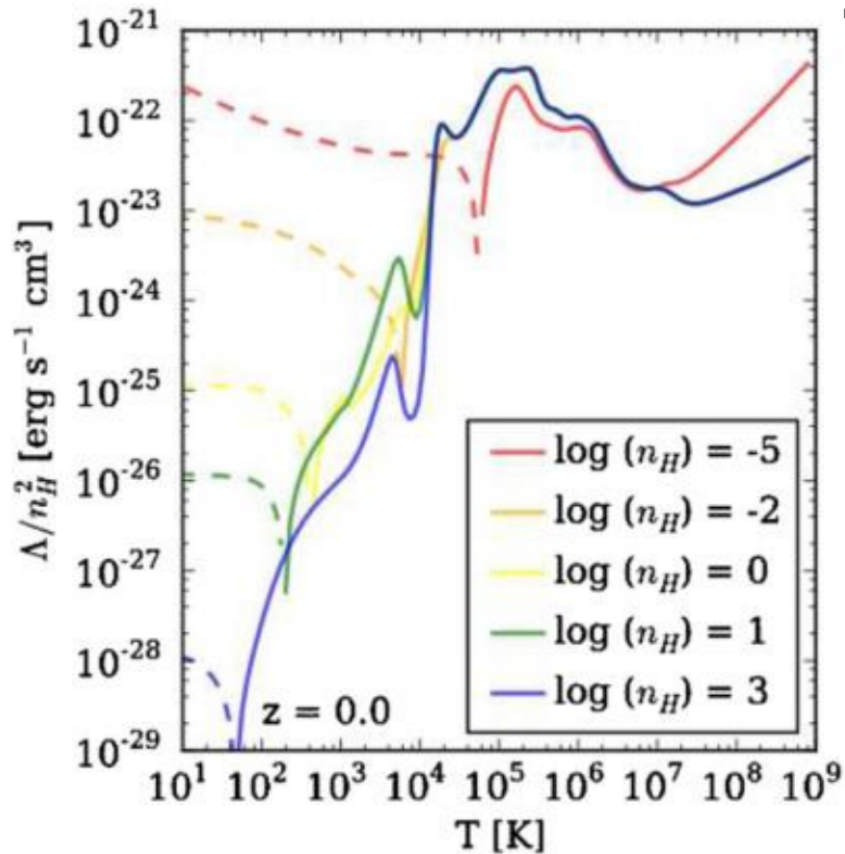
- この講義では、「星形成についてわかっていること」を整理しようと思っていた
- しかし、なかなか難しい。
- なので、まず、なぜ難しいか、を整理して、それからもう一度わかっていることを整理したい。

# 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

- $10^4\text{K}$  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)
- $10^4\text{K}$  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

# 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いっている。
- 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

# 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