

# 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・宇宙最初の天体
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パダウンで話を進める

## 宇宙の始まり・宇宙最初の天体

- 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

## 宇宙の始まり・宇宙最初の天体

- 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

## どんなふうにゆっくりになるか？

- 現代の宇宙物理学の基本問題だった。2000年代はじめまでは1世紀に渡る論争
- 15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
- 最近の観測からの示唆:実はゆっくりにならない。無限の未来に無限に速くなる

非常に予想外な発見。

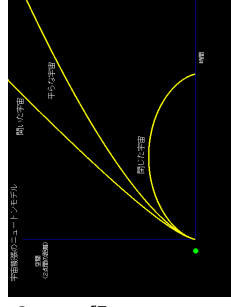
## 系外惑星

- 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ない

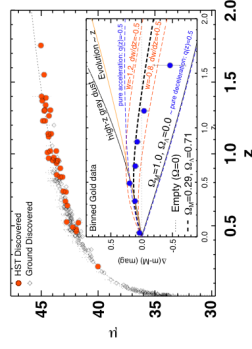


- もうちょっとと感性的な説明:

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、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。

## 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て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り落ち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？
- 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。

## 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。全く正体不明。

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？

- 宇宙全体は一樣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は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。

## 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てきて、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

- 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。
- これはいろいろなる状況証拠があるが、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。

## 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)一樣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樣からずれている。
- 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？

## 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はない。

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？
- なんんだかわからないものがある？

## 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。

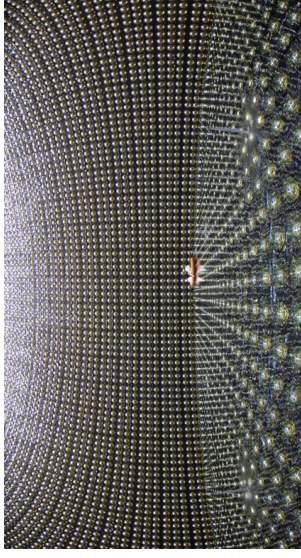
実はニュートリノではうまくいかないということがわかっていいる。この場合銀河団とか大きいものではできていても銀河はまだできていないことになってしまいうため。

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らない。

## ニュートリノ

- 光に対応する素粒子(光子、フォトン)と同じような、色々な核反応で発生する素粒子
- 光子と違って物質と「あまり」相互作用しない
- 観測(測定)には巨大な設備必要。国内の例:(スーパー)カミオカンデ

## スーパーカミオカンデ



## スーパーカミオカンデ

岐阜県神岡鉱山の跡の地下に巨大な水槽を作って、その壁に「光電子増倍管」という微弱な光を観測する装置を並べる。

水の電子とニュートリノがごく稀に衝突して、電子が光るのを捉える。

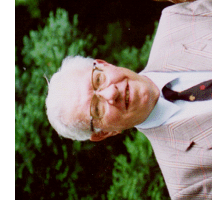
(もちろん他の色々な宇宙線や放射線でも光るので、それらの影響が少ない地下に)

## 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、傳そうに言えば「未知の素粒子」、わかりやすくいえばはなんだかわからないものがある。
- 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。 2001
- 「ビッグバン」という名前はこのひとが悪口としていいでした。

## 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バクグラウンド

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
- マイクロバクグラウンド

(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。
- どの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、、、)

## マイクロバクグラウンド

- 元素合成が終わるとほぼ水素+ヘリウムの宇宙。最初は温度が高いのでプラズマ状態
- 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

## マイクロバクグラウンドの観測

- 1964年、ベル研のペンジアスとウィルソン、電波天文学のための電波望遠鏡を作っていた
- 謎な雑音がどうしても消えなかった。
- ちよどこそのころ、プリンストン大学(ベル研と同じニュージャージー州)のデイック、ピーブルスといった人達が、全く独立にビッグバンからの電波の観測計画をたてようとしていた。
- ペンジアスの友人がピーブルスの論文のプレプリントをみていて、関係あるのでは?といたので、ペンジアスらはデイックらにコンタクトして相談し、「同時に」「別々に」Astrophysical Journal にレター論文をだした。(1965)

## マイクロバクグラウンドの観測

- 1978年にペンジアスとウィルソンはノーベル賞もらった。デイック、ピーブルスは、、、

<https://www.bell-labs.com/about/stories-changed-world/Cosmic-Microwave-Background-Discovery/>

## 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ものすごく高い精度で同じ強さまで

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、「あまりに正確に一樣過ぎる」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樣になるためには、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くてはならない。
- 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(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)

## 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

## 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
- マイクロ波背景放射がきているの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？という気がするが、...

## 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。

## 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

## 話がちよっともどってダークマター

- 1970年代になると、宇宙にある物質は通常のバリオン、つまり、普通の原子を作っている陽子・中性子と電子だけではないらしいということが明らかになってきた。
- 大きな理由:円盤銀河(我々の銀河系のような渦巻銀河)があること、その回転曲線(回転速度を中心からの距離の関数として書いたもの)
- 銀河系外の円盤銀河のガスを電波で観測することで、その回転速度の半径方向の分布を求めることができた。
- 多くの銀河で、回転速度がかなり外側まではほぼ一定で、なかなか小さくならない、ということがわかってきた
- 見えている星の明るさから、質量を推定して回転曲線を作ったものとはあわない。
- また、円盤銀河は、見えている星だけだとすると円盤が不安定で、薄い円盤銀河は存在できない(これはあとでもうちょっと詳しく)

## こんな都合のいいものが本当にあるのか？

- わかっている(と思っっている、、、)ことは、重力以外では相互作用していない、ということだけ
- あらゆる可能性が検討された:太陽質量の100万倍程度のブラックホールからニュートリノまで
- 現在のところ一番もっともらしい:未知の素粒子で比較的質量が大きいもの

## コールドダークマター

というわけ

- ダークマターは重い素粒子であるというのが現在の支配的理論
- 銀河团より大きなスケールでは大きいほどゆらぎの振幅が小さく、それより小さなスケールでは漸近的に一定となる。
- この一定値は無限に続くわけではなく、ダークマター粒子の質量に関係した限界のところまでならされる。(地球質量くらい)

これをCDM(コールドダークマター)モデルという。CDM モデルは、銀河团や銀河の空間分布、質量分布を非常に良く再現できていることが知られている。

## 円盤銀河とダークマター

- 普通の物質とは違う、重力以外ではほとんど相互作用しない物質が実は宇宙の物質の大半を占めると「仮定」する。
- そうすると、そういう物質は、バリオンと違って重力で集まっても薄い円盤にならない。球状の形をとる
- みえている銀河は薄い円盤だが、実はそれはダークマターがほぼ球状に分布しているものの底に沈んでいるものだということになる。
- 回転曲線の問題も安定性の問題も解消

## 何故他は駄目か

- ニュートリノは相互作用が非常に弱く、また質量があることはほぼ確定した(2015年ノーベル物理学賞)
- もしもダークマターの大半がニュートリノだとすると、宇宙初期のゆらぎのうち銀河团くらいの大ささより小さいものは、ニュートリノの運動によってさらされて、消えてしまうこと
- つまり、銀河が存在していないはず。
- なので、もっと重い素粒子でないといけない。(一部はニュートリノというのは最近流行のきざし)

## 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

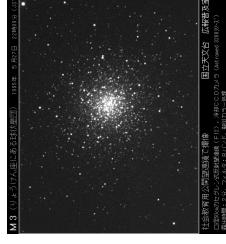
- とりあえず見た目を
- 重力(だけ)による天体形成

## とりあえず見た目を

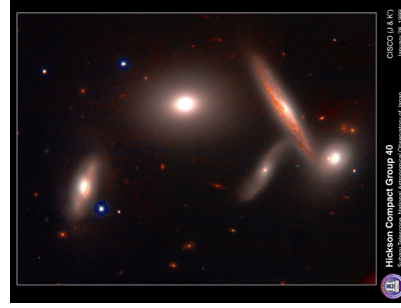
銀河



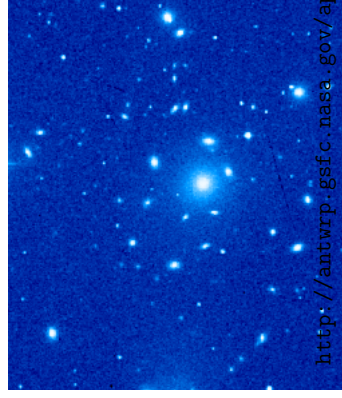
球状星団



銀河群

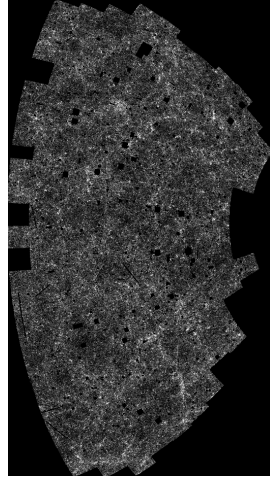


銀河団

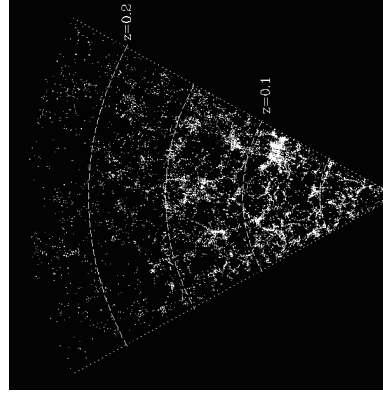


<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap950917.html>

大規模構造 (天球面)



大規模構造 (距離情報あり) — SDSS スライス



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