

惑星学要論  
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

- 講義資料は  
**<http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-youron-2020/>** にあります。
- レポート課題をだします

# 講義概要

1. ビッグバン宇宙論: **1**コマ分くらい
2. 天体形成・進化 (主に銀河・星団): **2**コマ分くらい
3. 惑星形成: **1**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(星形成の話はあんまりしない)
- 天体の形成過程を支配する基本的な物理法則を理解する。

# 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

- 恒星系力学の基礎
- 大規模構造・重力不安定 (ジーンズ不安定)
- 熱力学的緩和
- 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

# 惑星形成

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
- シミュレーションの諸問題

# 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



# 宇宙論の歴史

- 何故歴史を述べるか？
- コペルニクスと地動説
- 星、銀河、系外銀河
- 宇宙膨張
- ビッグバン宇宙論とマイクロ波バックグラウンド
- 宇宙の大規模構造: **CfA** サーベイから **SDSS** サーベイまで
- マイクロ波精密観測: **COBE**、**WMAP**、**PLANCK**、そして、、、

# 何故歴史を述べるか？

- 物理学(力学とか量子力学とか)の講義では(まあ教科書によるが)歴史はあんまりやらない。
- 「最新の素粒子研究」とかだとどうしても歴史は必要。
- 力学とか量子力学は、(その研究が専門の一部の研究者以外には)数十年とかもっと前に確立してあんまり変わっていないもの。ニュートンのプリンキピアに書いてあることが根本的に変わったわけではない。
- 宇宙論は、**10-20**年程度でかなり大きく変わってきた。
- なので、現在只今の宇宙論を、力学とか量子力学程度に確立した正しいものと考えるのはちょっと無理。

# 何故歴史を述べるか？(続き)

- 一方、宇宙論を考える上での物理法則は、素粒子論の色々はあるが(この話はあとで詳しく)基本的にはこの**30**年くらい変わっていない
- なので、(おそらく)変わらず正しいことと、変わるかもしれないことがある、ということを書いてほしい。

# 天動説と地動説

## キリスト教的天動説

- 地球は宇宙の中心
- 天上・地上・地獄の同心球構造 (ダンテ「神曲」とか、、、)
- 天上の世界は神・天使のもの

なので: 天動説と地動説の対立は、単に地球が太陽の周りを回っているのかその逆か、という話ではない。地動説はキリスト教の世界観の根本からの否定。

- 太陽が中心
- 地球は他の惑星と同じ (逆にいうと他の惑星も「天上の存在」ではない)

# 天動説と地動説

ありがちなお話: 天動説では惑星の動きを上手く説明できない

- 天動説は多数の周転円を必要とする。プトレマイオスではエカントも必要とした。
- 地動説は単純

これは実は正しくない。コペルニクスの地動説では、太陽や惑星は円運動する、というのはプトレマイオスと同じなので、周転円やエカントは必要やはり必要。何故か数が増えたりした。

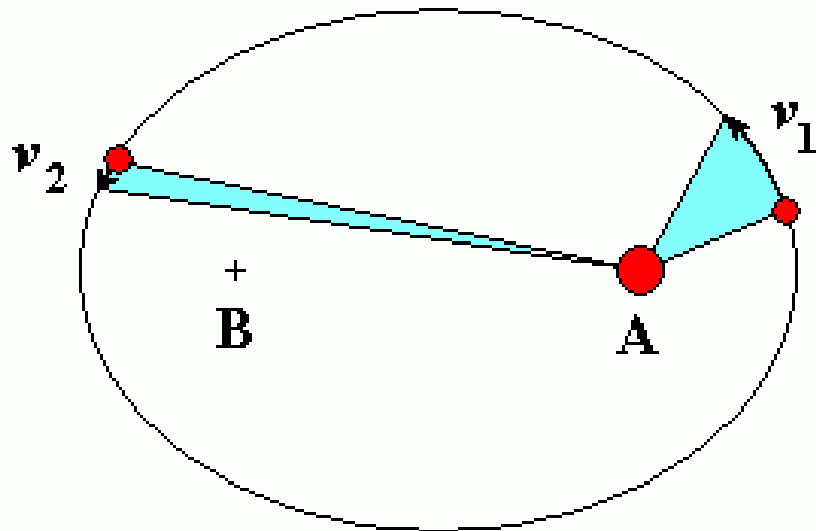
# では何故地動説のほうがよいのか？

## その後の経緯

- ティコ・ブラーエによる精密観測 (但し、ティコ本人は、恒星の年周視差が観測できなかつたので地動説には否定的)
- ティコの観測からの、ケプラーによる、惑星が太陽の周りを楕円運動することの発見
- ガリレオによる木星の衛星の発見 (天動説というよりキリスト教的宇宙観と矛盾)
- 古典力学の成立: ニュートンによる楕円軌道の説明

# 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

# ケプラーの3法則と楕円軌道

- 第三法則: 離心率が同じ楕円軌道同士なら容易に証明できる
- 第二法則: 中心力場での角運動保存則そのもの

では第一法則の証明は？



# ケプラーの第一法則

ここでは、通常の教科書にのっているのとは違うが有用な方法で解をだしてみる。

2次元座標  $\mathbf{r} = (x, y)$  を、

$$x = u_1^2 - u_2^2 \quad (1)$$

$$y = 2u_1u_2 \quad (2)$$

という関係を満たす新しい変数  $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$  に変換し、さらに独立変数を時間  $t$  から  $rds = dt$  という変数変換で得られる変数  $s$  に置き換える。

# 正則化された方程式

すると**2**体問題の運動方程式

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{\mathbf{r}}{r^3} \quad (3)$$

が単振動の方程式

$$\frac{d^2\mathbf{u}}{ds^2} = \frac{E}{2}\mathbf{u} \quad (4)$$

に変換される。ここで  $E$  はシステムの全エネルギー。

これは、軌道角運動量が  $\mathbf{0}$  の直線解も扱える。

解析解でつなぐ必要はない。

# 証明

運動方程式から力任せに導出する方針で。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{du_1} \frac{du_1}{ds} \frac{ds}{dt} + \frac{dx}{du_2} \frac{du_2}{ds} \frac{ds}{dt} \quad (5)$$

$$= 2 \left( u_1 \frac{du_1}{ds} - u_2 \frac{du_2}{ds} \right) \frac{1}{r} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{dx}{dt} = \frac{d}{ds} \left[ 2 \left( u_1 \frac{du_1}{ds} - u_2 \frac{du_2}{ds} \right) \frac{1}{r} \right] \frac{ds}{dt} \quad (7)$$

ちょっと面倒なので、 $u$ 等の $s$ による微分を $u'$ 、 $t$ による微分を $\dot{u}$ と書くことにする。

$$\dot{x} = 2\dot{s}(u_1 u_1' - u_2 u_2') \quad (8)$$

$$\dot{y} = 2\dot{s}(u_1 u_2' + u_2 u_1') \quad (9)$$

運動エネルギーは

$$\frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}{2} = 2\dot{s}^2(u_1^2 + u_2^2)(\dot{u}_1^2 + \dot{u}_2^2) \quad (10)$$

ここで

$$u_1^2 + u_2^2 = 1/\dot{s} = r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (11)$$

と、エネルギー保存

$$\frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}{2} - \frac{1}{r} = E \quad (12)$$

から

$$2(\dot{u}_1^2 + \dot{u}_2^2) - E(u_1^2 + u_2^2) = 1 \quad (13)$$

$$\dot{u}_1^2 + \dot{u}_2^2 = \frac{E(u_1^2 + u_2^2) + 1}{2} \quad (14)$$

$$\ddot{x} = 2\dot{s} \frac{d}{ds} \left[ \frac{u_1 u_1' - u_2 u_2'}{u_1^2 + u_2^2} \right] \quad (15)$$

$$= 2\dot{s} \left( \frac{u_1 u_1'' + u_1'^2 - u_2 u_2'' - u_2'^2}{u_1^2 + u_2^2} - 2 \frac{(u_1 u_1' - u_2 u_2')(u_1 u_1' + u_2 u_2')}{(u_1^2 + u_2^2)^2} \right) \quad (16)$$

$$= \frac{2}{(u_1^2 + u_2^2)^3} [(u_1 u_1'' + u_1'^2 - u_2 u_2'' - u_2'^2)(u_1^2 + u_2^2) - 2(u_1^2 u_1'^2 - u_2^2 u_2'^2)] \quad (17)$$

$$= \frac{2}{(u_1^2 + u_2^2)^3} [(u_1 u_1'' - u_2 u_2'')(u_1^2 + u_2^2) - (u_1'^2 + u_2'^2)(u_1^2 - u_2^2)] \quad (18)$$

$$(19)$$

ここで

$$\ddot{x} = -\frac{x}{r^3} \quad (20)$$

から

$$2(u_1 u_1'' - u_2 u_2'')(u_1^2 + u_2^2) - (E(u_1^2 + u_2^2) + 1)(u_1^2 - u_2^2) + (u_1^2 - u_2^2) = 0 \quad (21)$$

$$(u_1 u_1'' - u_2 u_2'') = \frac{E}{2}(u_1^2 - u_2^2) \quad (22)$$

$y$  についての方程式から同様に

$$(u_1 u_2'' + u_2 u_1'') = E u_1 u_2 \quad (23)$$

この**2**つから

$$u_1'' = \frac{E}{2}u_1 \quad (24)$$

$$u_2'' = \frac{E}{2}u_2 \quad (25)$$

# 意味

- $u$  の軌跡は「原点を中心とする楕円」
- 複素平面上の  $x, u$  を複素平面上の点とすると、 $x = u^2$ 、この時、 $u$  の軌跡が原点を中心とする楕円なら  $x$  の軌跡は原点を焦点とする楕円になる
- 軌道の数値計算に適している。非常に離心率が高い軌道でもあまり問題なく計算できる。系外惑星の計算等に使われるケースもある。

# 歴史

**Levi Civita (1905)** が2次元の変換を提案

3次元で摂動がある場合に拡張: **Kustaanheimo and Stiefel (1965)**

2次元の場合の本質: 位置ベクトルを複素数とみなしてその平方根をとる

**Kustaanheimo and Stiefel** はスピノルを使って4次元に軌道を拡張



# 「宇宙」は？

## 地動説の宇宙

- コペルニクス・ケプラー・ガリレオ：宇宙の中心に太陽
- ジョルダノ・ブルーノ (1548-1600)：太陽は恒星の1つ (この説と、他の色々な説のせいで異端審問、火刑)
- ニュートンの頃には太陽は恒星の一つという理解になっていた模様。

恒星の年周視差が実際に観測されたのはベッセルによって**1838**年のこと。ニュートンが活躍した頃からさらに**150**年後。

## ニュートンが考えたこと：

太陽と同じような星が宇宙全体に広がっているとすれば、それらはお互いの重力で集まったり落ちてきたりぶつかったりしないか？

本人が考えた解答：

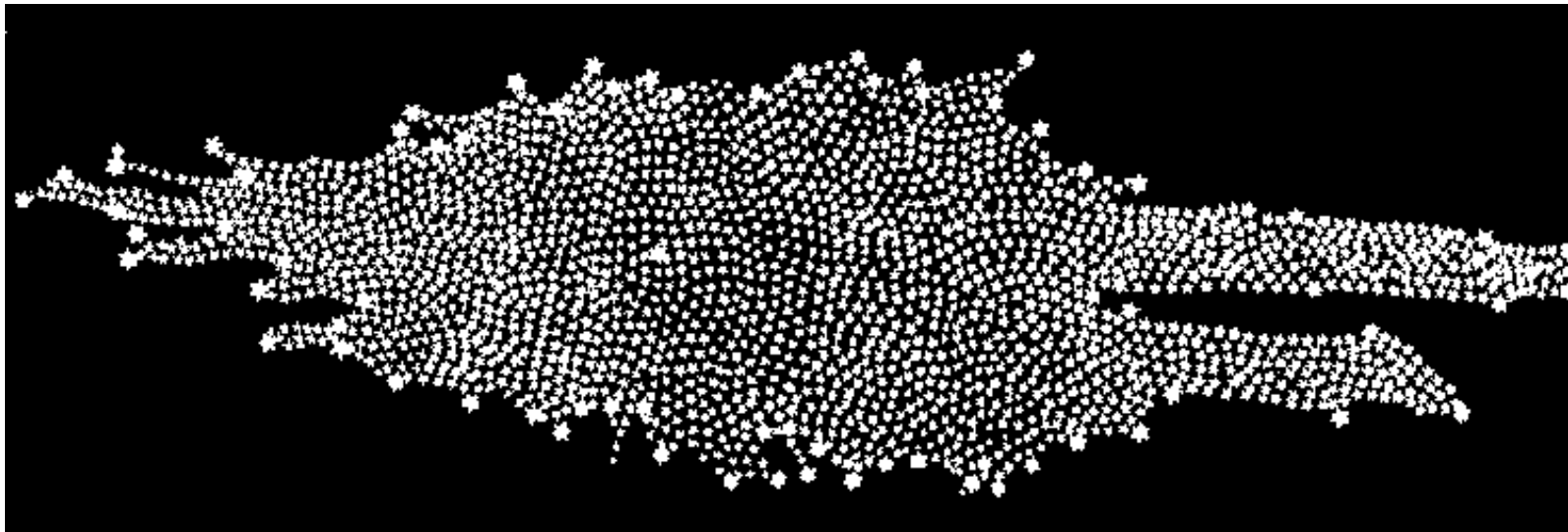
落ちてくるのには**1億年**くらいかかるから大丈夫（というか、宇宙の年齢がこれで決まる？）

以下この辺の話

# 星、銀河、系外銀河

**18世紀: W. ハーシェル(1738-1822)**

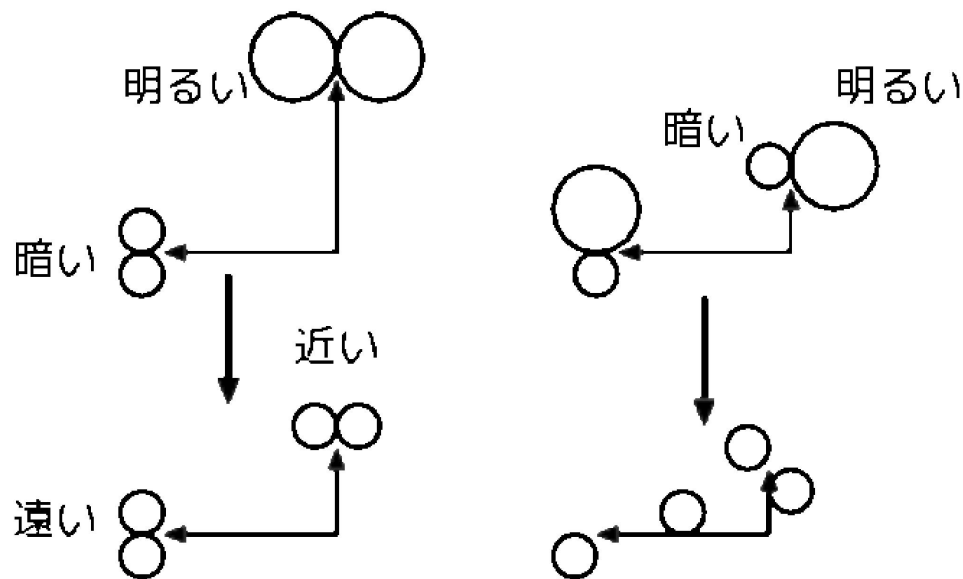
「全ての星は同じ明るさ」と仮定して距離を求めて書いてみた。



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

# 星がみんな同じ明るさのはずないのでは？

それはまあそうなんだけど、地球からみた方向によって星の明るさが違うのでなければ傾向は同じ。

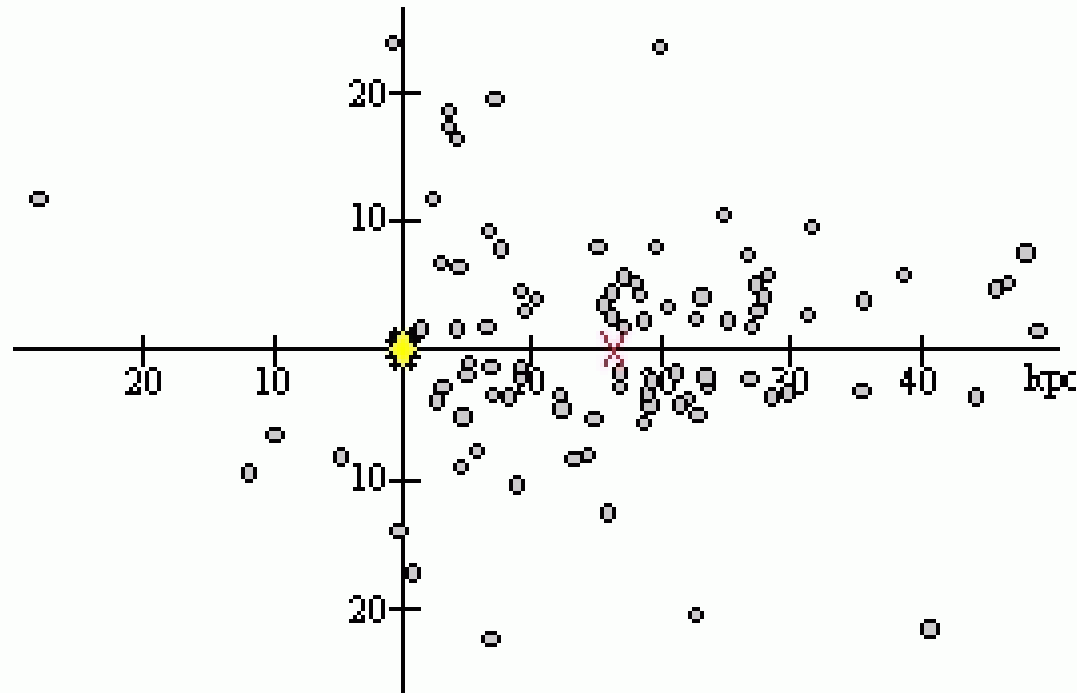


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

# 20世紀初め: H. シャプレー

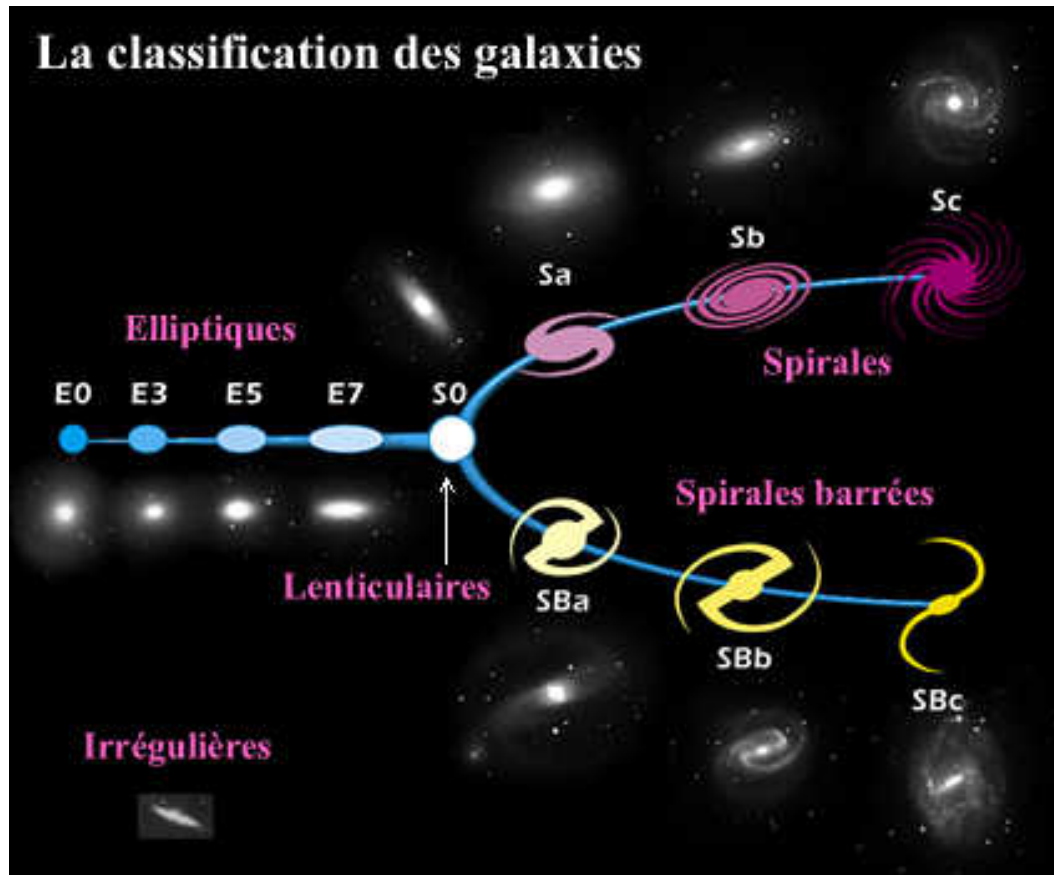
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある  
= 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

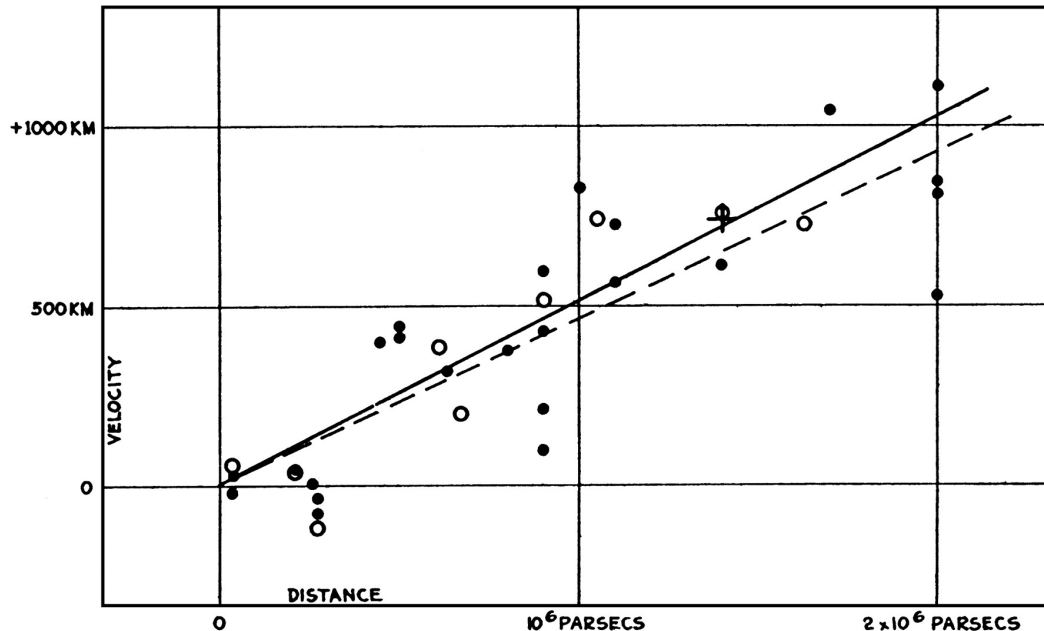
# 20世紀初め: E. ハッブル (1)



「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、、、

(地球の年齢はいつごろどうしてわかったかは私でない誰かにきいて下さい)

# 宇宙膨張と銀河

2つの問題がある。

- 宇宙全体としてはなにがおきているのか
- 一つ一つの星、太陽系、銀河とかについてはどうか？

ちょっと別の(でも重要な)問題:

- 本当に「宇宙の始まり」があるのか？
- あるなら、最初はどうなっていて、「その前」はどうなってるのか？



# 宇宙全体としてはなにがおきているのか？

「宇宙論」の基本的問題。

=宇宙空間というものはどうやってそこに存在できているか？

一般相対性理論で初めて本当に扱えるようになった問題。

私は良く知らない

# ものが落ちないようにする方法

- 「反重力」でささえる
- 宇宙は広がっているということにする。重力で減速はしている。
- 上の**2**つの組み合わせ

「反重力」なんての超科学かトンデモかと思うかもしれないけど、これはそうでもなくて**アインシュタイン自身のアイディア**。そういうもの（宇宙項）があるということにすると空間が落ちてこないで済む。

# 宇宙膨張

宇宙が全体として膨張しているとすれば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。

# 宇宙膨張の問題点

当初の問題：

宇宙の年齢が今の **1/10** になって、放射性元素で決めた地球の年齢よりずっと若くなった。

これを回避するために、「膨張するけれど定常で年齢は無限大」といったモデルも考えられた。

最近は大きな矛盾はなくなってきている（一応）。

# 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:

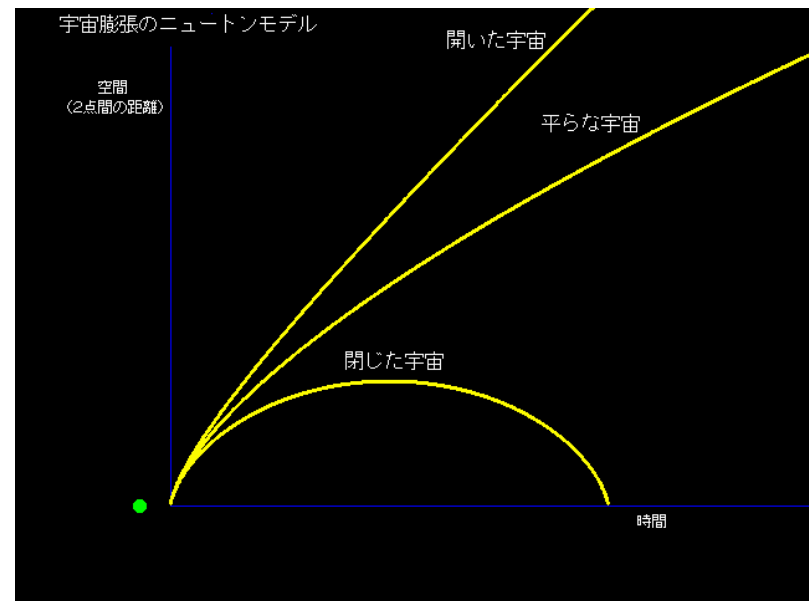
アインシュタインの一般相対性理論の方程式を、「宇宙が空間的に一様」として解くと、「静止している」という解はなくて「膨張している」か「収縮している」である

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。



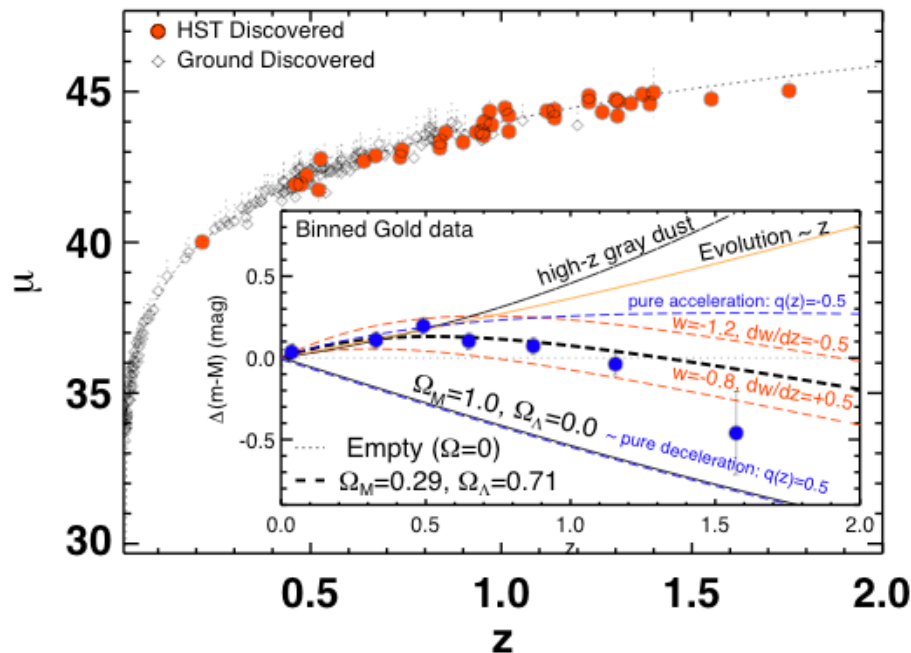
# どんなふうによっくりになるか？

- 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
- **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。
- 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 (これもダークマターと同様、名前つけただけ)

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。

# 「ダークマターなんかない」という主張



特集

## 宇宙の暗黒問題

変容する暗黒エネルギー

超弦理論が示す新たな予想……34 ページ

中島林彦 (日本経済新聞)

協力: 大栗博司 / 村山 斉 (いずれも東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)

暗黒物質は幻か?

修正重力理論の新たな展開……42 ページ

S. ホッセンフェルダール (独フランクフルト高等研究所)

S. S. マツガウ (ケース・ウェスタン・リザーブ大学)

見たり触ったりできない幽霊のようなものが、それも2つ、宇宙のあらゆる場所、例えば私たちの眼と鼻の先にも、体の中にも存在する。一方はある種の純粋なエネルギーであり、もう一方は質量を持つ一種の物質だが、普通の物質とは性質が全く違うと考えられている。「暗黒エネルギー」と「暗黒物質」だ。暗黒エネルギーは永劫不変とみられているが、時とともに移ろいゆく存在ではないかとの理論予想がなされ、論議を呼んでいる。暗黒物質は実は存在しないとの理論もある。暗黒物質は銀河や銀河団に作用している重力から存在が推定されているが、「そもそも重力の作用の仕方について、私たちは考え違いをしている」という主張だ。宇宙の暗黒問題は新たな局面にさしかかりつつあるのかもしれない。

特にヨーロッパには結構いる



# 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。



**Fred Hoyle (1915-2001)**

- 「ビッグバン」という名前はこのひとが悪口として言いだした。

# 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

# マイクロ波バッ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。
- ちょうどそのころ、プリンストン大学(ベル研と同じニュージャージー州)のディッケ、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、ペンジアスらはディッケ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)**

# マイクロ波バッ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。ディッケ、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性度ゆらぎの波長依存性が、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

# 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

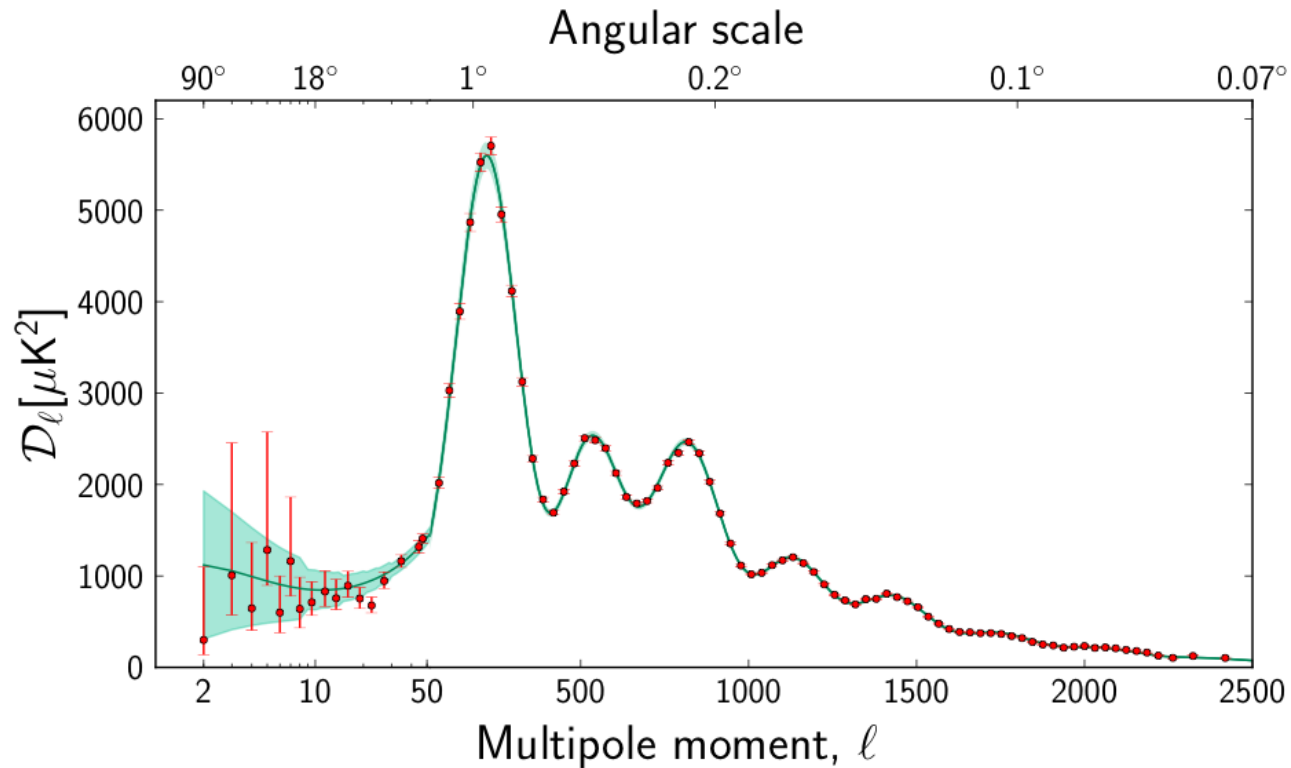
- 始まりは適当な場を仮定すれば起こるが、何故止まるのか？
- 適当な場は本当にあるのか？
- あるかどうか確認する方法はあるのか？

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。

# マイクロ波精密観測



**PLANCK** 衛星によるマイクロ波背景放射ゆらぎの角度依存性の観測結果

# マイクロ波精密観測

これだけからやたら色々なものが精密に決まる。

$\Omega$ : 物質・エネルギーの密度 (物質だけの場合、放物線  
解:  $\Omega = 1$ )

$\Omega_\Lambda$ : 物質以外のエネルギーの密度

$\Omega_b$ : 物質 (宇宙物理では「バリオン」という) 密度

ダークマターの密度

宇宙年齢

密度ゆらぎの大きさ

密度ゆらぎのスケール依存性 (べき指数)

# 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」  
(臨界密度に等しい、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

# 話がちょ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る。
- 多くの銀河で、回転速度がかなり外側までほぼ一定で、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)

# 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

# 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

# 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団くらいの大きさより小さいものは、ニュートリノの運動によってならされて、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)

# コールドダークマター

というわけで

- 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
- 銀河団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であらされる。(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、銀河団や銀河の空間分布、質量分布を非常に良く再現できることが知られている。

# ダークマター探査

## 2つの方針:

- 直接検出: 検出器を通り抜けるダークマター粒子が普通の物質とぶつかり、はね飛ばすのを検出(日本の **XMASS**、アメリカの **CDMS-II** など) **CDMS-II** は「発見したかも」と数年前に発表したが???
- 間接検出: 宇宙の中でダークマター粒子が集まっているところでの対消滅からでてくるなにか( $\gamma$ 線? 電子? 陽電子?)を人工衛星で観測(**Fermi** 望遠鏡の天体の中にないか? **AMS** 実験:**ISS** 上で反粒子を観測) **AMS** も「発見したかも」と数年前に発表したが???

もちろんまだ見えてないので、どこにどれだけあるのかよくわからない

# 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