

# 惑星学D

## 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

- 講義の前半**3**回は牧野が担当し、後半は保井先生、その後には試験です。
- 試験は、オンラインで「なんでも参照可」です。
- 牧野の講義資料は **<http://jun-makino.sakura.ne.jp/kougi/wakuseigaku-D-2021>** 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

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・宇宙最初为天体

- 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

# 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

# 宇宙論の歴史

- 何故歴史を述べるか？
- 古代・ギリシャ
- 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。まだ変わるかも。
- 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)基本的にはこの数十年変わっていない
- 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。

# 何故歴史を述べるか？(おまけ)

- まあその、「間違いなく正しいこと」だけ教えることにすると物理法則とか星は核融合でエネルギーをだしているとか結構少ないというのが問題、、
- それに対して、「宇宙論」は古代から、「宇宙はどうできたか」を「説明」するもの。

というわけで、ここからは「古代から現代までの宇宙観」

# 古代・ギリシャ

- ホメロス・ギリシャ神話の世界: 大体地中海世界くらいの周りに「オケアノスの大河」
- 「地球」という考え: 少なくともヘレニズム世界では普通だった模様。エラトステネスによる地球の半径・月の半径・月までの距離・太陽までの距離・太陽の半径の測定(太陽は**10**倍くらい小さく評価)
- プトレマイオスの「天文学」(アルマゲスト): 天動説に基づいた体系で天体の運動を高い精度で説明。円運動+周転円・エカント等。

# 文化・神話と宇宙論

- 大抵の文化・社会・文明は創成神話を持つ。文化人類学の研究対象の様々な社会、古代文明、そして現代の我々も。
- 「我々はどこからきて、どこに行くのか」
- 創成神話と宇宙論はどの社会でも一体。創成神話はたいいてい、「大地はどうやって作られたか」を含む。「どうやって支えられているか」も結構ある。
- ローマ世界、中世からルネサンスまでのヨーロッパ世界を支配したキリスト教の宇宙像は、プトレマイオスの宇宙をキリスト教の教義にあわせたもの
- 「地球」は中世には一度失われたようでもある、、、

# 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、周転円やエカント等がやはり必要。コペルニクスはエカントを使わなかったので周転円(次で説明)の数が増えたりした。

# 周転円って？

- 天上の世界は「完全」である
- 完全な運動とは等速円運動である

ということで、月から上の天体(太陽も、金星等の惑星も)全て等速円運動しかしないとした。

- 惑星はあっちいたったりこっちいたりする
- 正確に測定すると太陽も月も等速円運動ではない

→ 複数の円運動の重ね合わせだとする。

# エカント

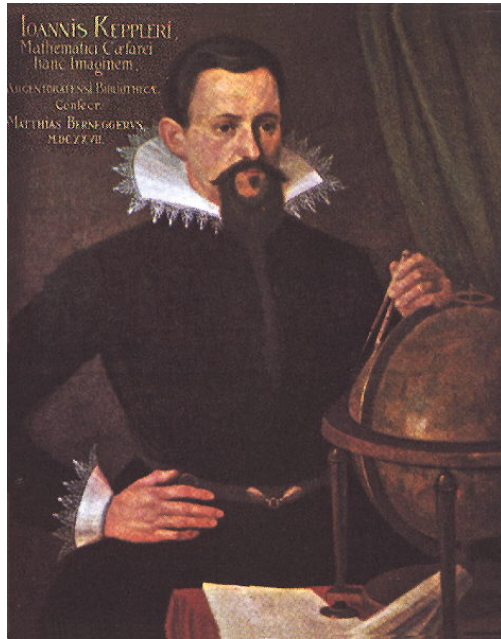
- 実は周転円だけではなかなか上手くいかない
- 天体の軌道の円の中心を地球からずらし、さらにその中心からみて地球の反対側で地球と同じ距離にある点からみて天体は等角速度運動をしているとした
- これだとかなり上手くできる。

# では何故地動説のほうがよいのか？

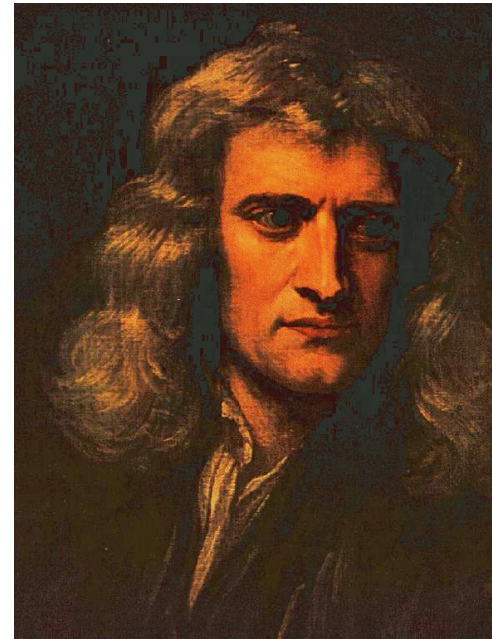
## その後の経緯

- 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

# ケプラーとニュートン



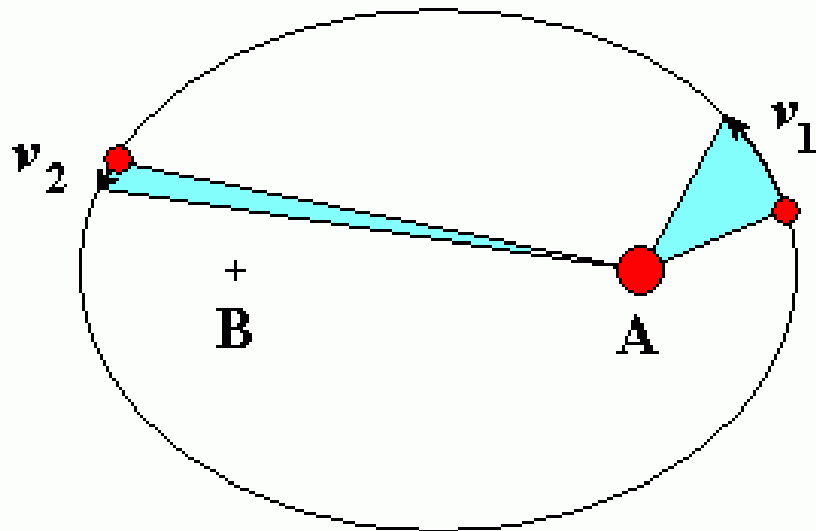
ケプラー (1571-1630)



ニュートン (1642-1727)

# 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**法則とニュートン力学

- 第一法則(楕円になる)は難しいのでここでは省略
- 第二、第三法則をニュートン力学、万有引力の法則から出すのは割合簡単。
- ケプラーの法則からニュートン力学、万有引力の法則ができるかということ、、、

# ニュートン力学、万有引力の法則

ニュートン力学とはどういうものか？

言葉では：「ある物体の加速度は、物体が受ける力を物体の質量で割ったものである」

式で書くと：

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

これを見て簡単と思うか、意味がわからないと思うかは、、、  
どうでしょう？



# ニュートン力学の前提

色々前提がある。

- 空間と時間というものがあり、空間は**3次元**、時間は**1次元**。
- 空間は曲がったりしていない、「ユークリッド空間」(ピタゴラスの定理が成り立つ)
- 時間も場所によって進みかたが変わったりしない

当たり前に見えるが特殊相対論・一般相対論によれば我々の現実の世界はそうではない。

但し、ずれが問題になるのは、ものすごく正確な測定している場合 (**GPS** とか)、あるいは速度や重力が非常に大きい場合。

# 加速度と力

空間が「**3次元ユークリッド空間**」：ものの場所を「座標」で表すことができる。座標は**3次元**だと**3個**の数。それぞれが、お互いに直交する**3つ**の方向での距離。

これは意外にややこしい概念。例えば **(1km, -1km, 3km)** と書いたとして、

- **(0,0,0)** の場所はどこ？
- **3つ**の方向のとりかたは？

# 座標のとりかた

ニュートン力学の要請: 「慣性系」であればよい。

「慣性系」 = 「何も力が働いていない座標系」

ちょっと循環論法的なところはある。例えば、この教室の縦、横、高さで座標系をとると、ここでは色々な力が働いているしそれによる運動もしている。

- 地球の重力がある
- 地球が自転している
- 地球が太陽の周りを公転している
- 太陽は銀河系の中を運動している

- 銀河系も宇宙の中を運動している。例えばアンドロメダ銀河からの重力によって速度が変わる
- さらに大きなスケールでの重力や運動もある

この観点からは、「宇宙」に対して座標系が1つだけきまっているはずで、これが「絶対空間」。それに対応する座標が「絶対座標」。ニュートン力学はその「絶対空間」に対して成り立つ。

但し、この場合、座標軸は勝手な方向にとってよい。

# 算数としてのニュートン力学のポイント

実は、上のような色々なものが組合さった運動をしていても、「この部屋(私の部屋なり皆さんそれぞれの部屋)の中の物体の運動」は

$$\vec{a} = \vec{g} + (\text{空気抵抗とかの力})/m$$

で十分正確に書ける。(「十分」というのは曖昧だが、例えば私がパソコンに向かって何かを投げたとして当たるかどうかを予測するとかには十分) ここで  $\vec{g}$  は地球の重力で、「この部屋の中」の座標では  $(0, 0, -9.8\text{m/s}^2)$  と下向きで定数の「ベクトル」

# 十分正確に書けることの説明

これは意外に大変。加速度がない運動だけなら以下のように計算できる。

ある物体 **A**(例えば私)の「絶対座標」を  $\vec{x}(t)$  とする。速度は  $\vec{v}(t)$ 、加速度は  $\vec{a}(t)$ 。

これに対して、絶対座標で加速度をうけない運動している点 **B**の座標は、 $\vec{x}_1(t) = \vec{x}_0 + \vec{v}_0 t$  と書くことができる。 $\vec{x}_0$  も  $\vec{v}_0$  も時間がたっても変わらない。

# 説明続き

「速度」は「位置」の時間微分、「加速度」は「速度」の微分

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a},$$

点 **B** を基準にした点 **A** の座標は  $\vec{X}(t) = \vec{x}(t) - \vec{x}_1(t)$  となる。

速度は

$$\vec{V}(t) = \vec{v}(t) - \vec{v}_0$$

なので、加速度は

$$\vec{A}(t) = \vec{a}(t)$$

# 何をしてたっけ？

いえたこと：一定速度で動いている点を基準に座標系を作っても、「絶対空間」と同様にニュートン力学は成り立つ。これは厳密に成り立つ。

まだいえてないこと：回転とかややこしい運動をしている「この部屋」にとった座標系で、地球の引力を考えるとニュートン力学が成り立つ。

これをちゃんと説明するには、「回転する座標系での運動方程式」を計算する必要がある。計算はできるがこの講義を1回使って皆様の子守歌をとなえることになりそうなので省略。



# 回転についての説明のようなもの

- 宇宙に「この部屋」の中だけしかなくて、この部屋は「絶対座標」で止まっているとする：部屋の中で止まっているあなたは止まったまま。力を感じない。
- この部屋が、中心周りにゆっくり回っているとする。
  - － 部屋の中で止まっているあなたは「遠心力」を感じる
  - － 部屋の中で絶対座標でまっすぐ動いているものは、部屋に対して止まっているあなたからは曲がって動いているようにみえる
  - － 言い換えると、部屋の中で絶対座標でまっすぐ動いているものは、部屋座標では謎の力を受けているようにみえる(これをコリオリ力という)

# 遠心力

- ひもの先になんかつけて振り回すと引っ張られる力を感じる
- これが遠心力
- ひもの長さ (回転半径) が同じなら回転速度が**2倍**になると力は**4倍**
- 回転速度が同じなら回転半径が**2倍**になると力は**2倍**

# 遠心力

式で書くと、、、

$$F = mr\omega^2$$

$r$ : 回転半径

$\omega$ : 回転の「角速度」というもの。1秒1回転なら  $2\pi$ .

使う単位系を **SI** (メートル、キログラム、秒を基本単位) にするとこれで力になる。あるいは加速度と考えると単に

$$a = r\omega^2$$

ちゃんと計算して加速度や力を出すには運動を三角関数で表して時間微分 (**2回する**) を計算すればいい。

# 地球の自転の回転速度

1日 = 86400秒で(大体)1回転。

角速度は  $2\pi/86400$ ,  $7.3 \times 10^{-5}$  くらい。

部屋の中心から **1m** のところでの加速度が  $10^{-4}\text{m/s}^2$  となる。重力の**10**万分の**1**くらい。まあ小さい。

コリオリ力も同様に計算してまあ小さいことはわかる。非常に精密な測定とかするのでなければ無視できる。

というのが、「この部屋内でニュートン力学が概ね成り立つ」ことのあまり厳密ではない説明

# 「天動説と地動説」の話は、、、

- というわけで、細かいことをいうと太陽も地球も動いている
- 「この部屋」だけを考えたように、太陽と地球しか宇宙にないとすると、太陽と地球はそれぞれ相手からの重力を受けて運動。やはり太陽も地球も動いている
- でも、太陽のほうがはるかに重い(地球の大体 **100** 万倍)なので、太陽はほとんど動かないで地球だけが動いている
- 他の惑星をあわせても太陽のほうがまだ**3**桁くらい重いので、精密な計算でなければ他の惑星も考えないで太陽の重力だけ考えればいい

- (現在の天文学の観測精度ではもちろん他の惑星の重力の影響は見える)

# 「天動説と地動説」とニュートン力学

- ニュートン力学に従う太陽系だけを考えて、(現在の観点からみて)大雑把な計算であれば「地動説」が成り立っているといっている。
- 但し、ニュートン力学に従う運動では、宇宙に太陽系しかななくても太陽もちょっとだけ動く。つまり、「厳密には」地動説でも天動説でもない。
- ある意味、「天動説と地動説」の論争は最終的にはどちらでもない別の宇宙観にとってかわられたといえる。

# ケプラーの**3**法則とニュートン力学

**2**番目もちょっと大変なので**3**番目だけ。

太陽に比べて十分軽い惑星が太陽の周りを円運動していると  
する。太陽からの重力は太陽からの距離の**2**乗に反比例。

これは式にすると

$$a \propto 1/r^2$$

これと遠心力の式  $a = r\omega^2$  から

$$\omega \propto 1/r^{3/2}$$

がでる。



# この話のポイントのようなもの

- ニュートンの重力法則とニュートン力学の運動方程式から、ケプラーの**3**法則が(近似的に)成り立つことがしめせる
- ここで、より正確なのはニュートン力学のほう。精密に観測するとケプラーの**3**法則は厳密には成り立たない(他の惑星の影響が最大の効果)

なお、ものすごく精密にはニュートン力学も成り立たない。一般相対論的效果を考える必要がある。

# 太陽系はいいとして、「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：

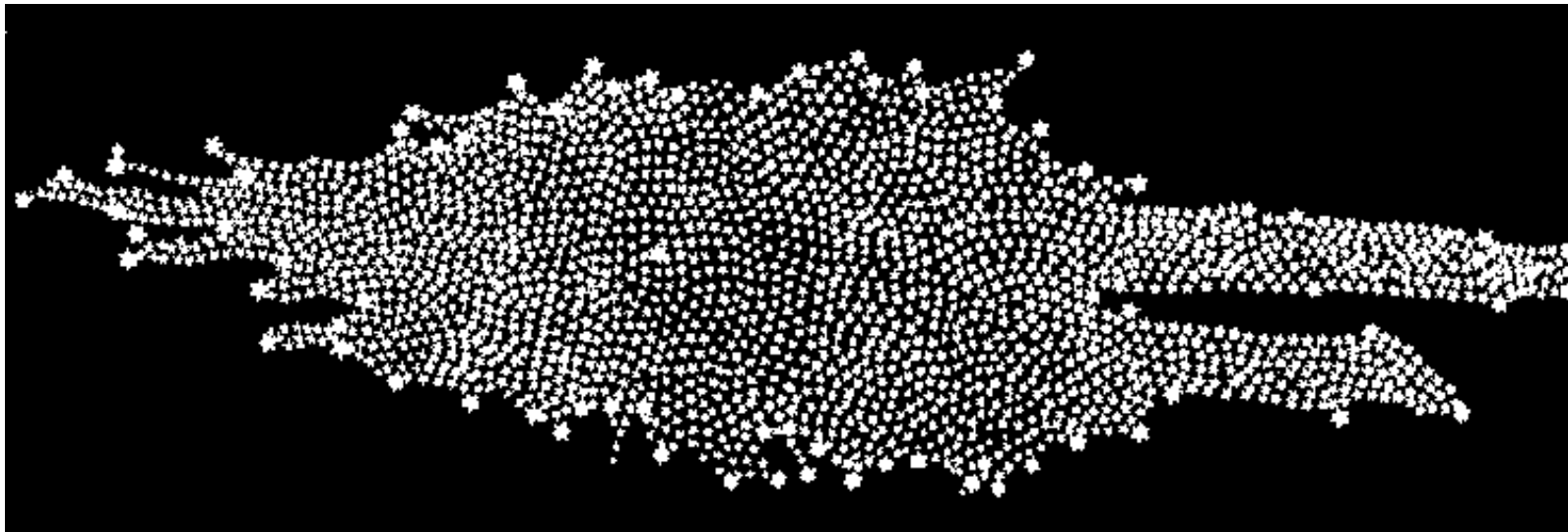
落ちてくるのには**1億年**くらいかかるから大丈夫（というか、宇宙の年齢がこれで決まる？）

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)**

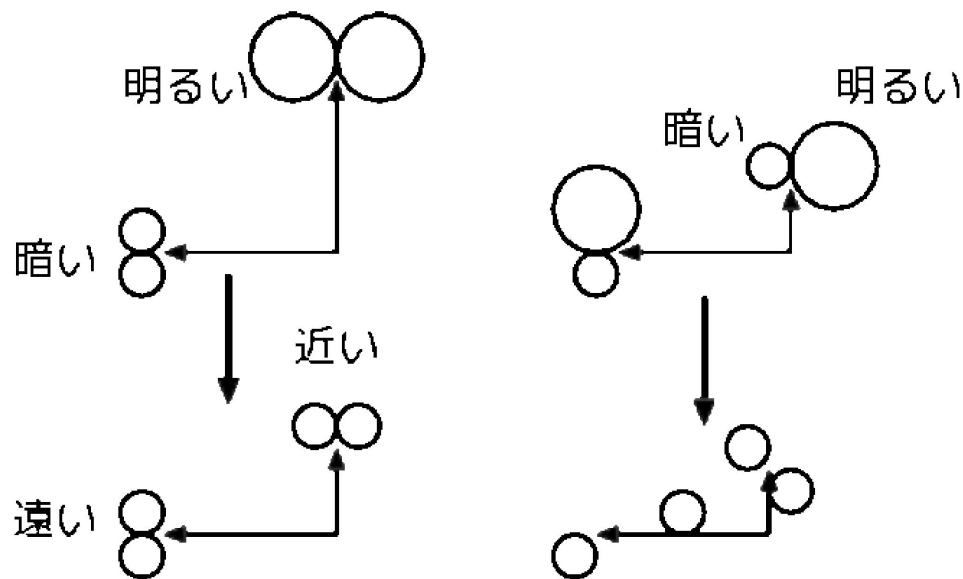
「全ての星は同じ明るさ」と仮定して距離を求めて書いてみた。



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。

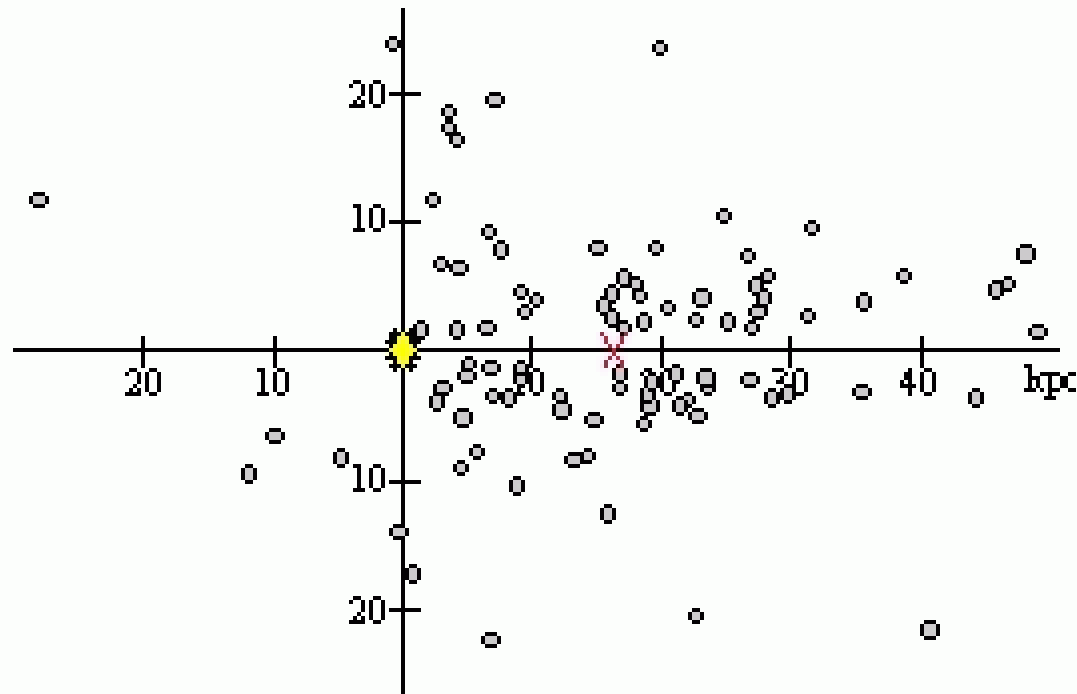


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

# 20世紀初め: H. シャプレー

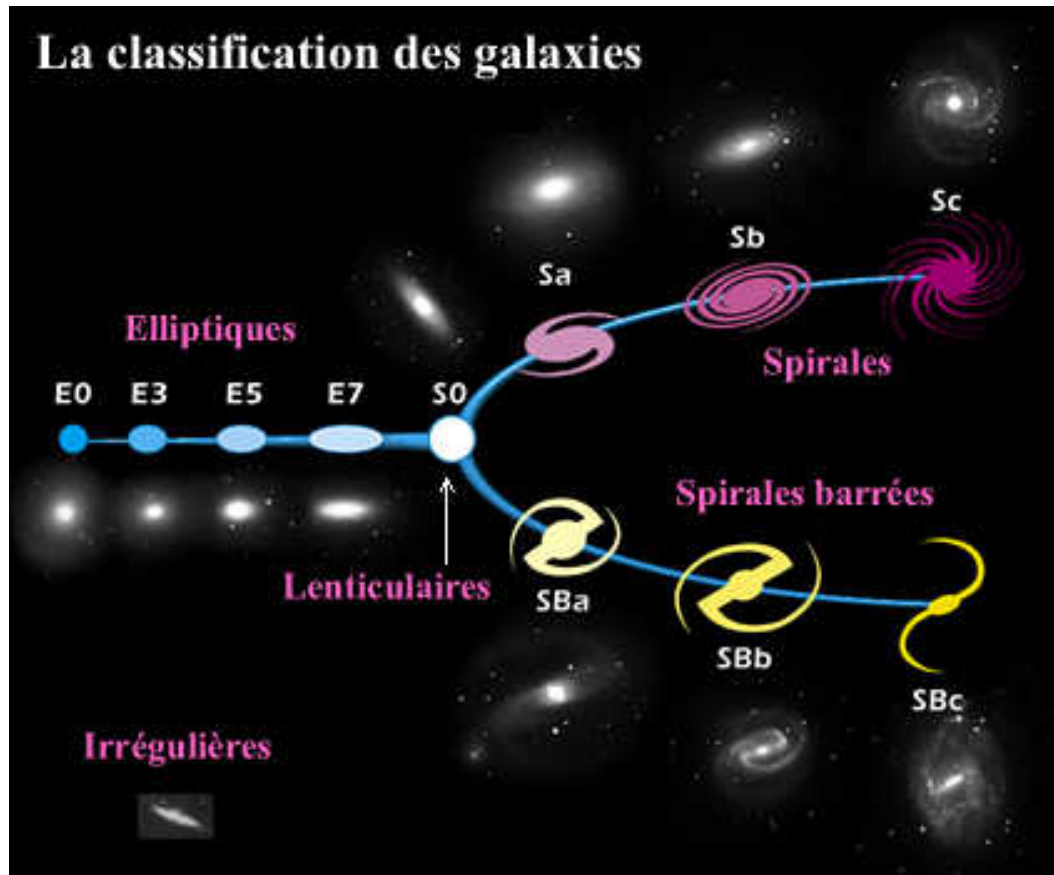
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある  
= 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

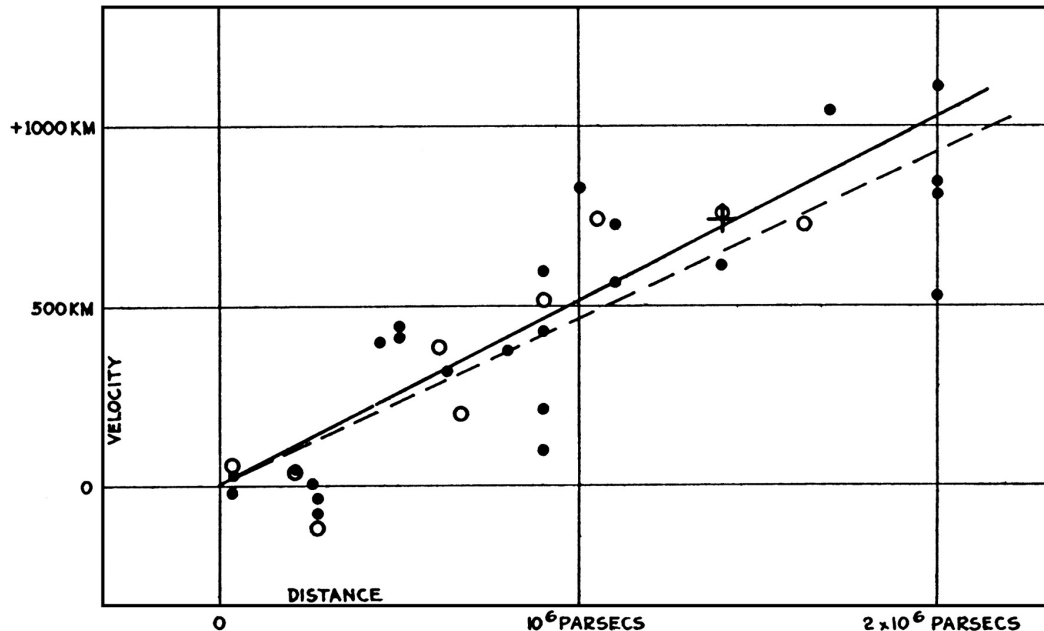
# 20世紀初め: E. ハッブル (1)



「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惑星学科の私でない誰かにきいて下さい)



# 余談

- 系外銀河と我々の銀河系の関係についても、太陽と恒星の関係のような論争があった。(シャプレー・カーティス論争、あるいは「大論争 **The Great Debate**」) 1920年
- シャプレー:アンドロメダとかの星雲は銀河の中にある
- カーティス:外にある

決着がついたのは、ハッブルによってアンドロメダ星雲の中に変光星が見つかって距離が(間違っていたけど)わかったあと。

宇宙論の歴史は、地球が宇宙の中心でなくなっていく歴史ともいえる。太陽、我々の銀河、系外銀河、..

# 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？

現代的な「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:

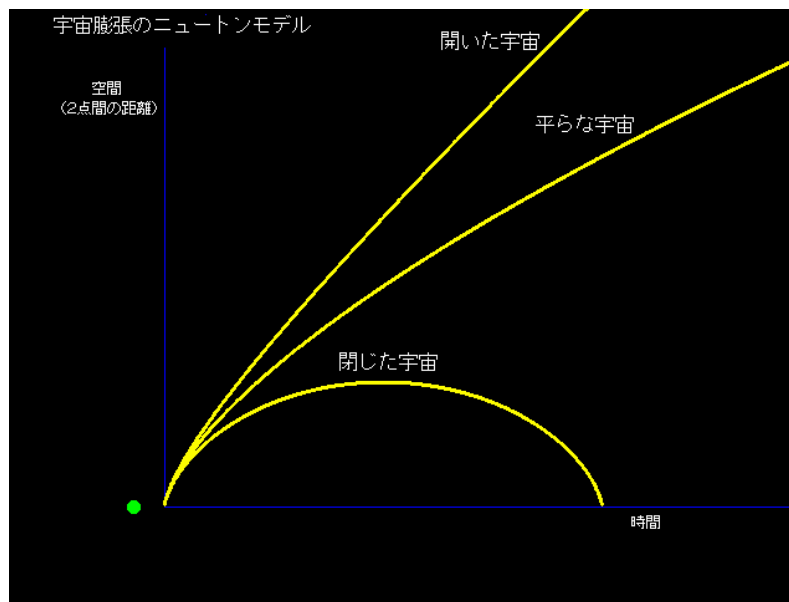
アインシュタインの一般相対性理論の方程式を、「宇宙が空間的に一様」として解くと、「静止している」という解はなくて「膨張している」か「収縮している」である

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。



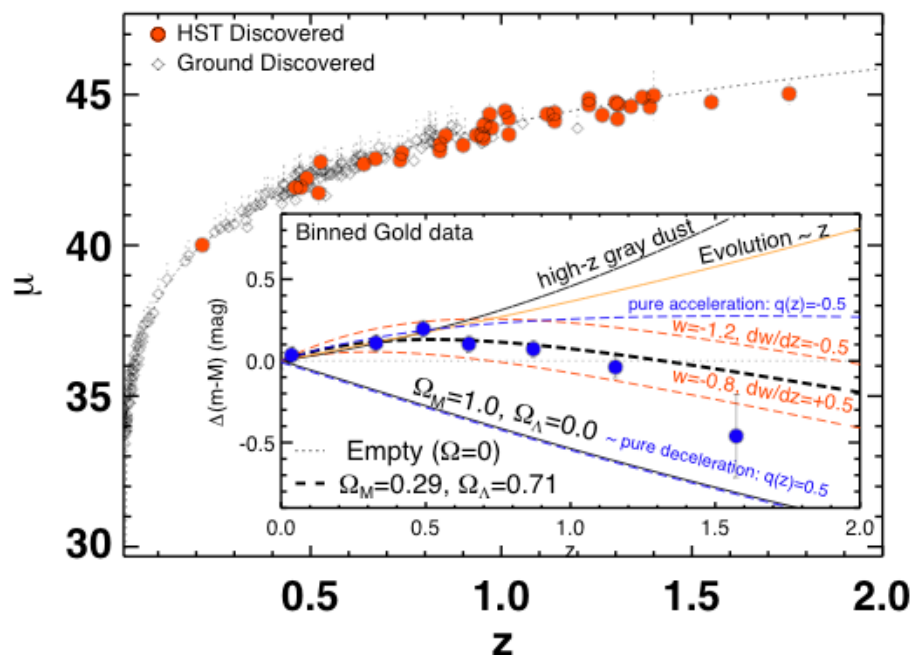
# どんなふうによっくりになるか？

- 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：「**I**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。

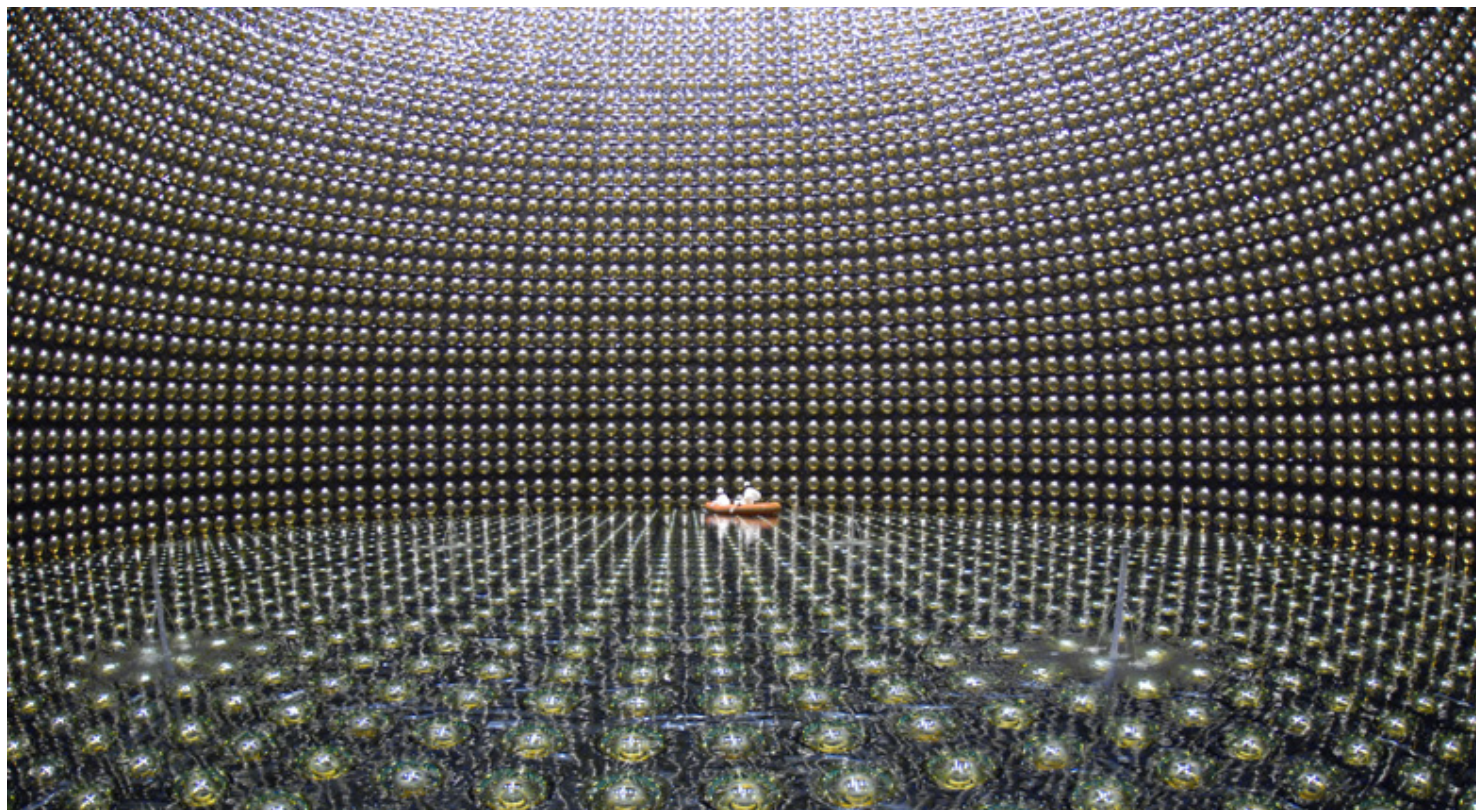
実はニュートリノではうまくいかないということがわかっている。この場合銀河団とか大きいものはできていても銀河はまだできていないことになってしまうため。

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。

# 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、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。 **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、宇宙初期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
- 最近では、インフレーションが終わったところの相転移による加熱のことを「ビッグバン」というようになってきている。インフレーションが先。ビッグバンが後。

# 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。



# 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