

# 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。
- 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10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。

# 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mage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。

# 余談：エラトステネスによる 地球の半径の測定

## 方法の(時々見る)説明

(<http://www.asahi.com/edu/nie/tamate/kiji/TKY200508220108.html>)

- エジプト南部のシェネの町では、夏至の日の正午に太陽は真上にくる。
- そこから800km離れたアレクサンドリアでは、同じ時刻に7度(7.2とか7.5とか資料によって数値がバラバラ、、、)真上からずれていた。
- これは、800kmが地球の一周の $\frac{7}{360}$ に相当するということ。従って地球1周は4万kmくらい。

# これちょっとおかしい

- どうやって、シェネとアレクサンドリアで「同じ時刻」に？
- 紀元前に正確な時計があったわけではない。



# これちょっとおかしい

- どうやって、シェネとアレクサンドリアで「同じ時刻」に？
- 紀元前に正確な時計があったわけではない。

答は:

- アレクサンドリアはシェネのまあまあ北にある (真北からはかなりずれる)
- 「同じ時刻」でなくても、アレクサンドリアでの正午でもいい (もちろん結果的には大体同じ時刻になる)
- 正確に真北でなくても、また正確に正午でなくてもあんまり答はずれない。(ずれの割合を  $x$  として答のずれは  $x^2$  程度)

# アレクサンドリアとシェネ



シェネは現在のアスワンの位置とのこと。

- 全然「真北」ではない。
- が、当時は「真北」にあると考えられていたらしい。

# 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。
- ここで神話学はしませんが、、、
- 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。

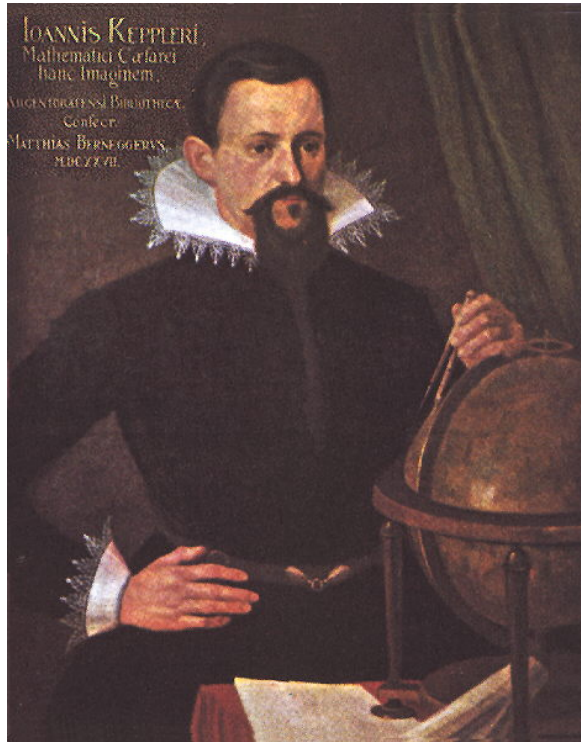
# では何故地動説のほうがよいのか？

## その後の経緯

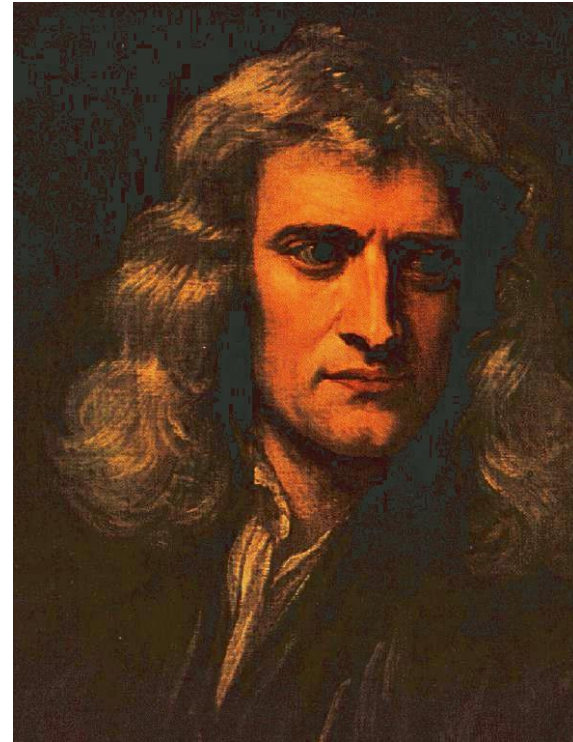
- ティコ・ブラーエによる精密観測 (但し、ティコ本人は、恒星の年周視差が観測できなかつたので地動説には否定的)
- ティコの観測からの、ケプラーによる、惑星が太陽の周りを楕円運動することの発見
- ガリレオによる木星の衛星の発見 (天動説というよりキリスト教的宇宙観と矛盾)
- 古典力学の成立: ニュートンによる楕円軌道の説明



# ケプラーとニュートン



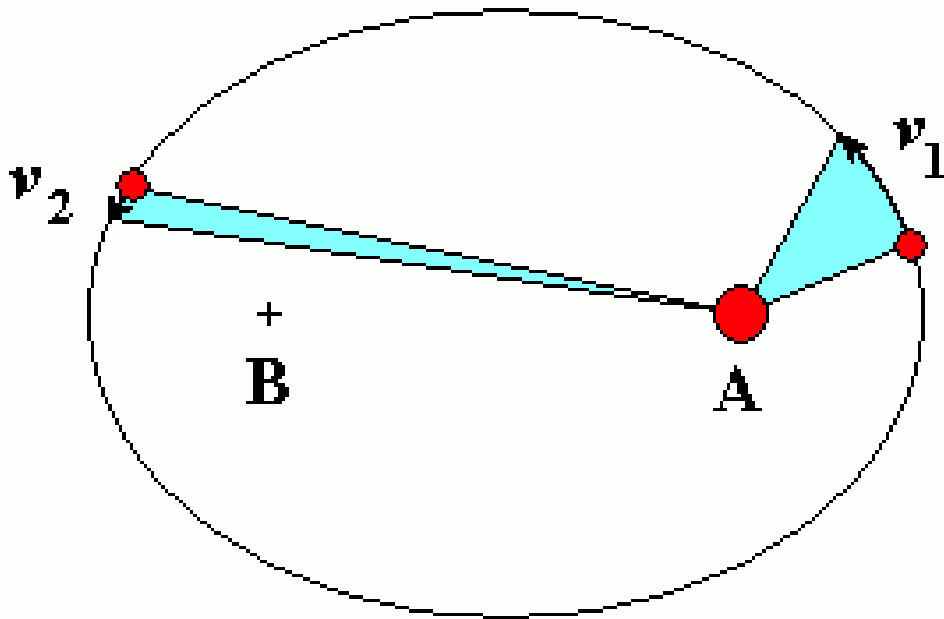
ケプラー (1571-1630)



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  $(1\text{km}, -1\text{km}, 3\text{km})$  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、例えば私が今眠っている誰か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数十分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

- 宇宙にこの教室の中だけしかなくて、この教室は「絶対座標」で止まっているとする：教室の中で止まっているみんなは止まったまま。力を感じない。
- この教室が、中心周りにゆっくり回っているとする。
  - － 教室の中で止まっている皆は「遠心力」を感じる
  - － 教室の中で絶対座標でまっすぐ動いているものは、教室に対して止まっている皆からは曲がって動いているようにみえる
  - － 言い換えると、教室の中で絶対座標でまっすぐ動いているものは、教室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番目もちよっと大変なので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：

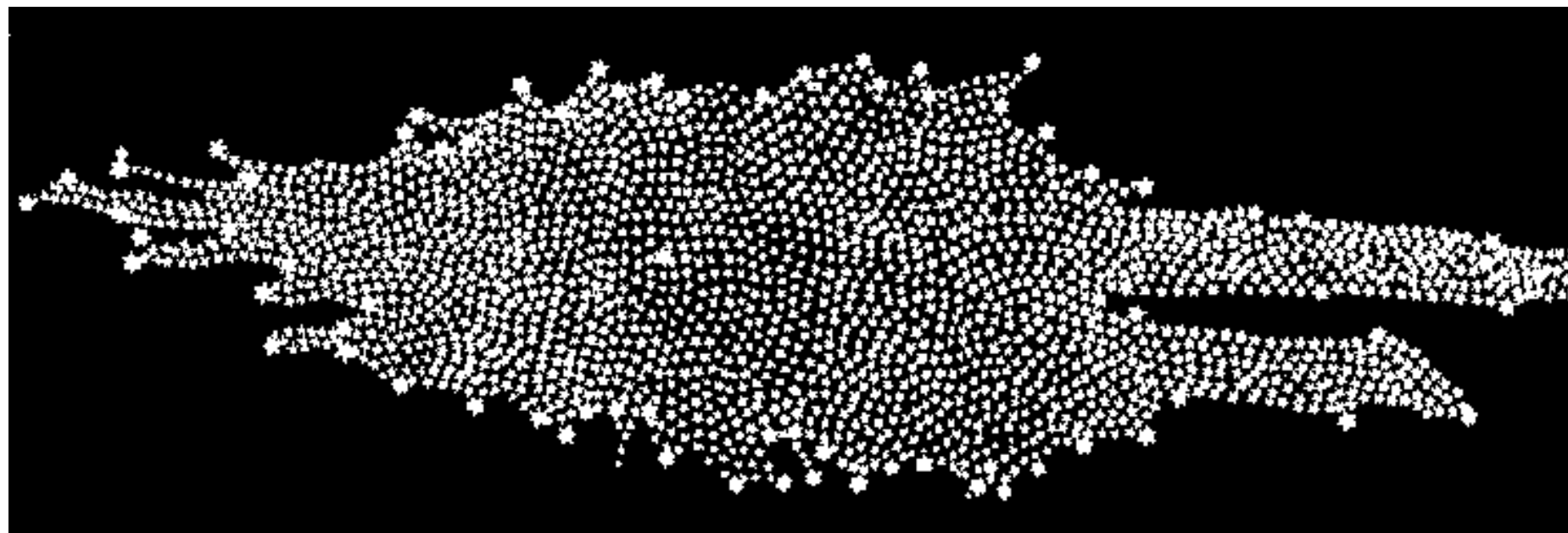
落ちてくるのには1億年くらいかかるから大丈夫（というか、宇宙の年齢がこれで決まる？）

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。

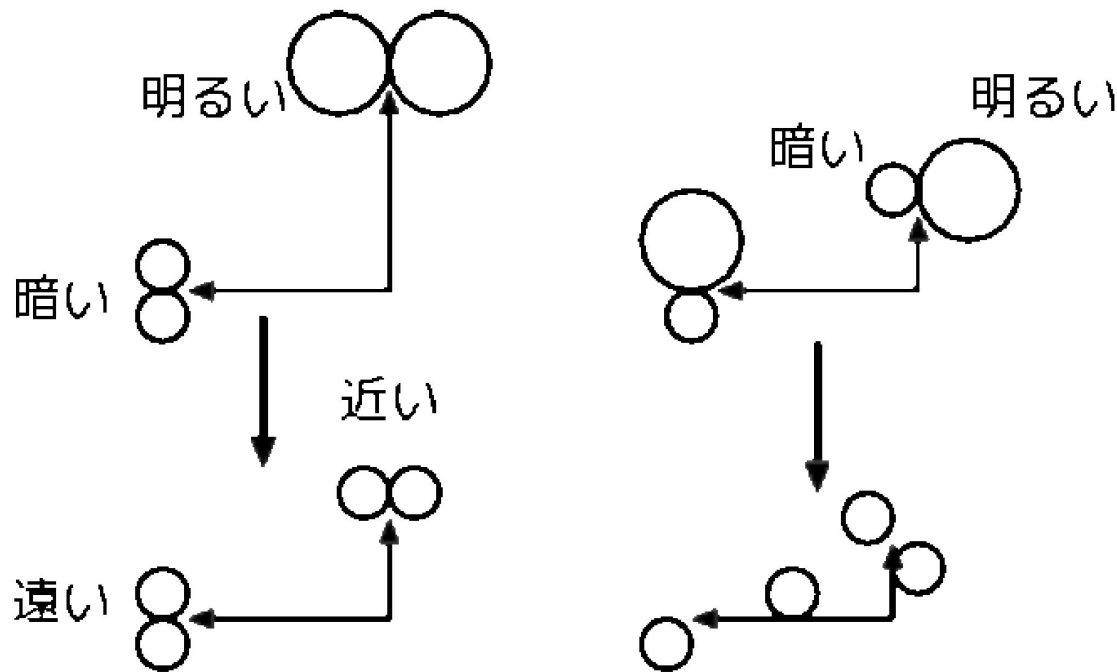


星の分布は一様ではなくてひらたくなっている = 銀河の発見



# 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。

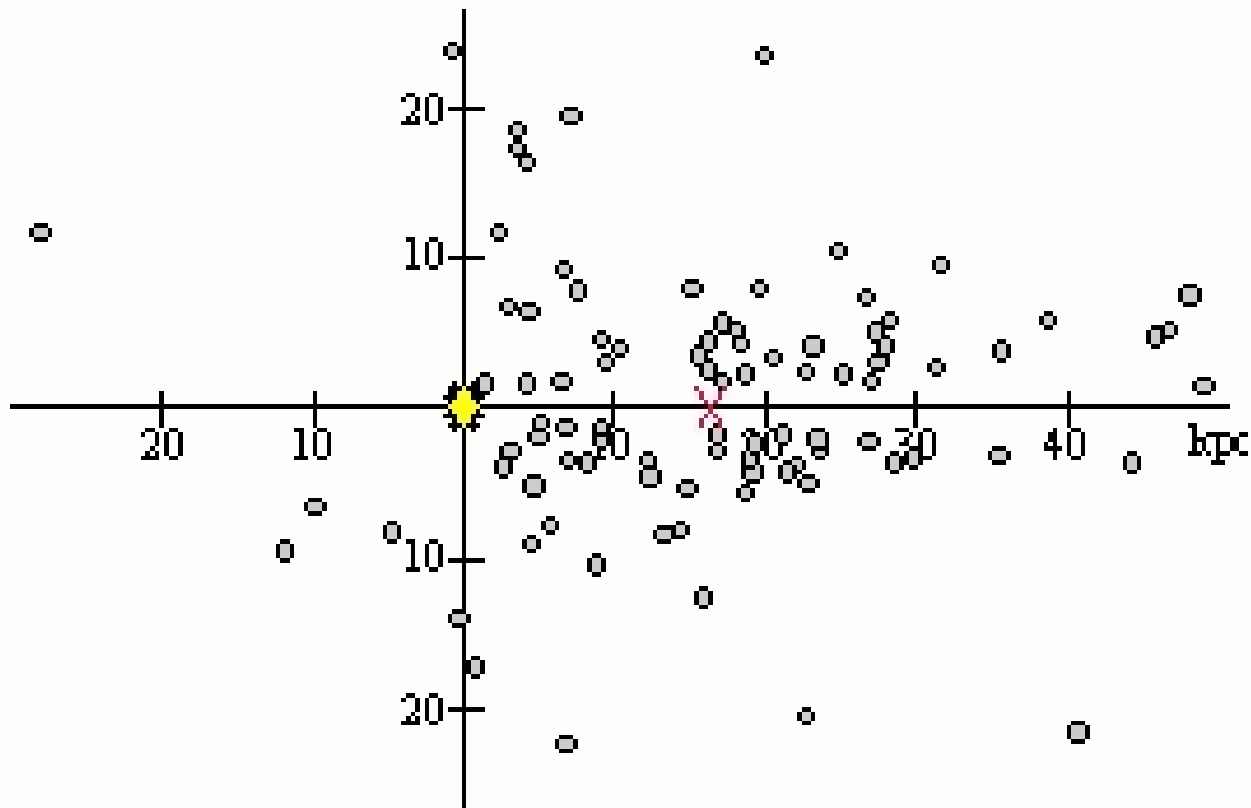


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

# 20世紀初め：H. シャプレー

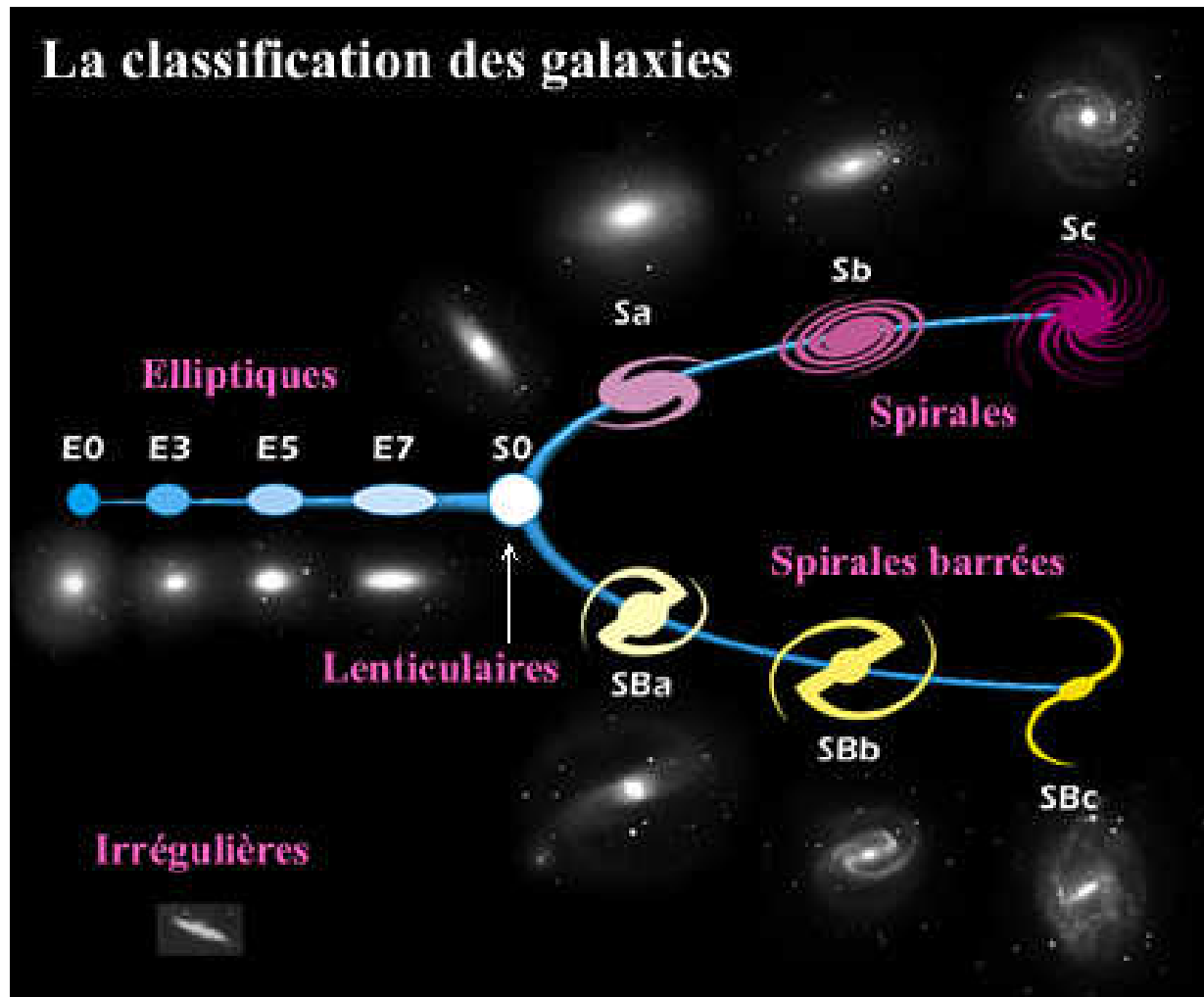
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある  
＝ 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

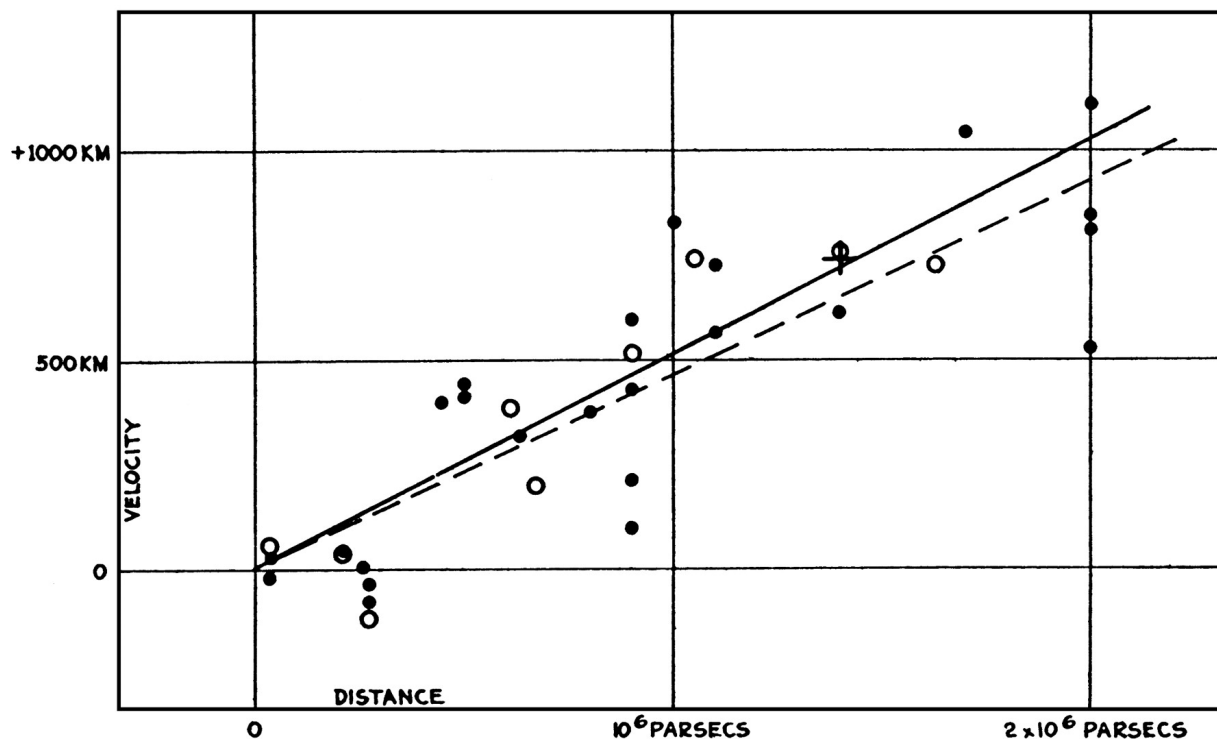
# 20世紀初め：E. ハッブル (1)



「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。

最初は速度－距離の比例係数の見積りがいまと 10 倍違ったのでいろいろ混乱があった。

# 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:

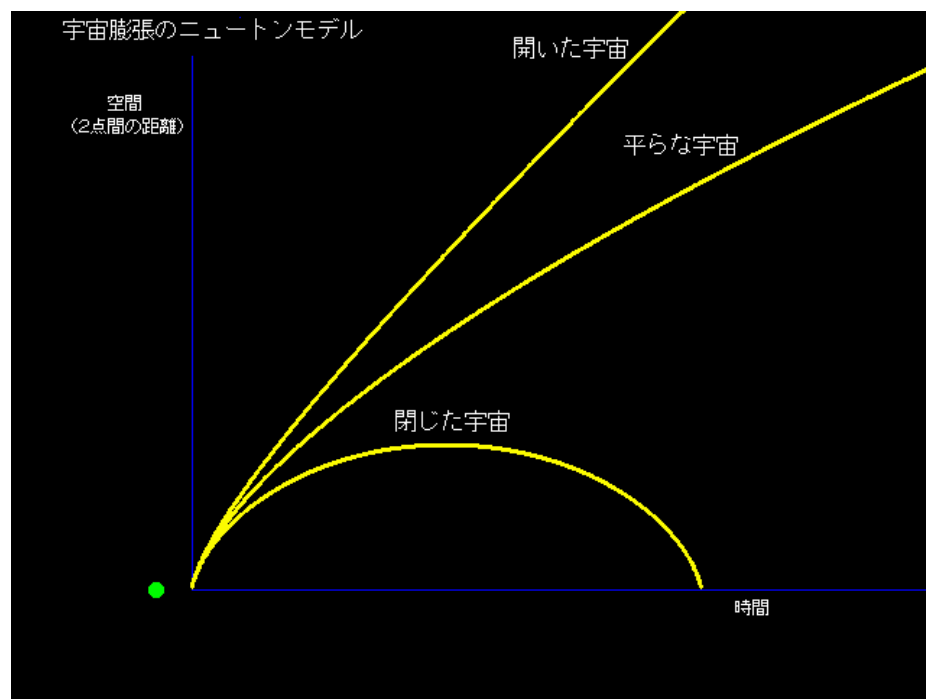
アインシュタインの一般相対性理論の方程式を、「宇宙が空間的に一様」として解くと、「静止している」という解はなくて「膨張している」か「収縮している」である

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。