

宇宙惑星科学

牧野淳一郎

惑星学専攻

評価等

- 小テスト (初回はなし)+レポート

講義概要

1. ビッグバン宇宙論: 2コマ分くらい
2. 天体形成 (主に銀河): 2コマ分くらい
3. 星形成・進化、惑星形成: 3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

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

- 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
- 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

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
- 恒星進化
 - 星の一生
 - 中性子星・ブラックホール・重力波
- 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

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？
- 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。

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・離心円等。

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ナの町では、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 $7/360$ 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、シェナ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、シェナ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。

答はもちろん:

- アレクサンドリアはシェナのほぼ真北にある。
- 「同じ時刻」でなくても、アレクサンドリアでの正午でいい(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宇宙像の根本からの否定。

- 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やはり必要。何故か数が増えたりした。

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

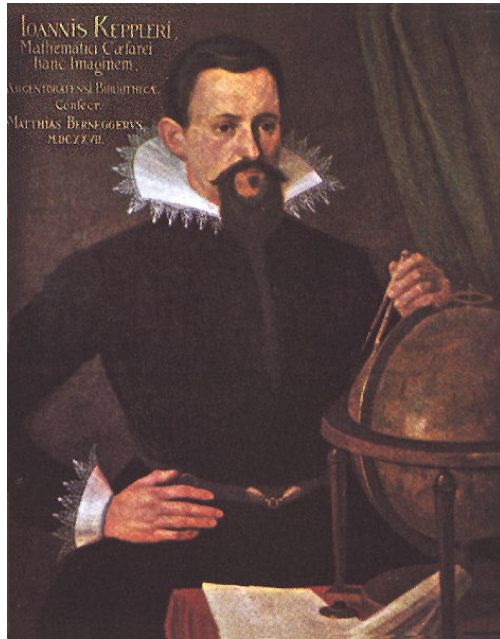
- 実は周転円だけではなかなか上手くいかない
- 天体の軌道の円の中心を地球からずらし、さらにその中心からみて地球の反対側で地球と同じ距離にある点からみて天体は等角速度運動をしているとした
- これだとかなり上手くできる。

では何故地動説のほうがよいのか？

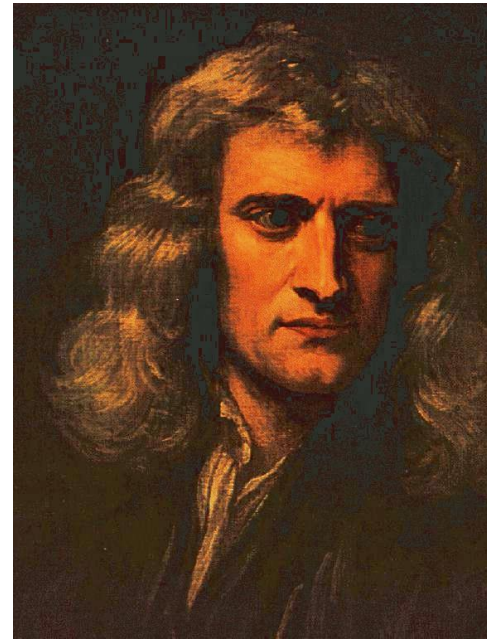
その後の経緯

- 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



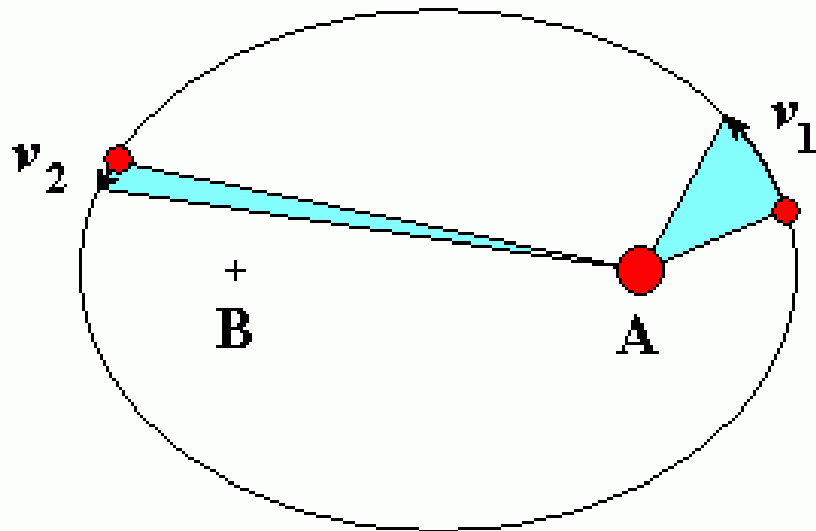
ケプラー (1571-1630)



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

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：

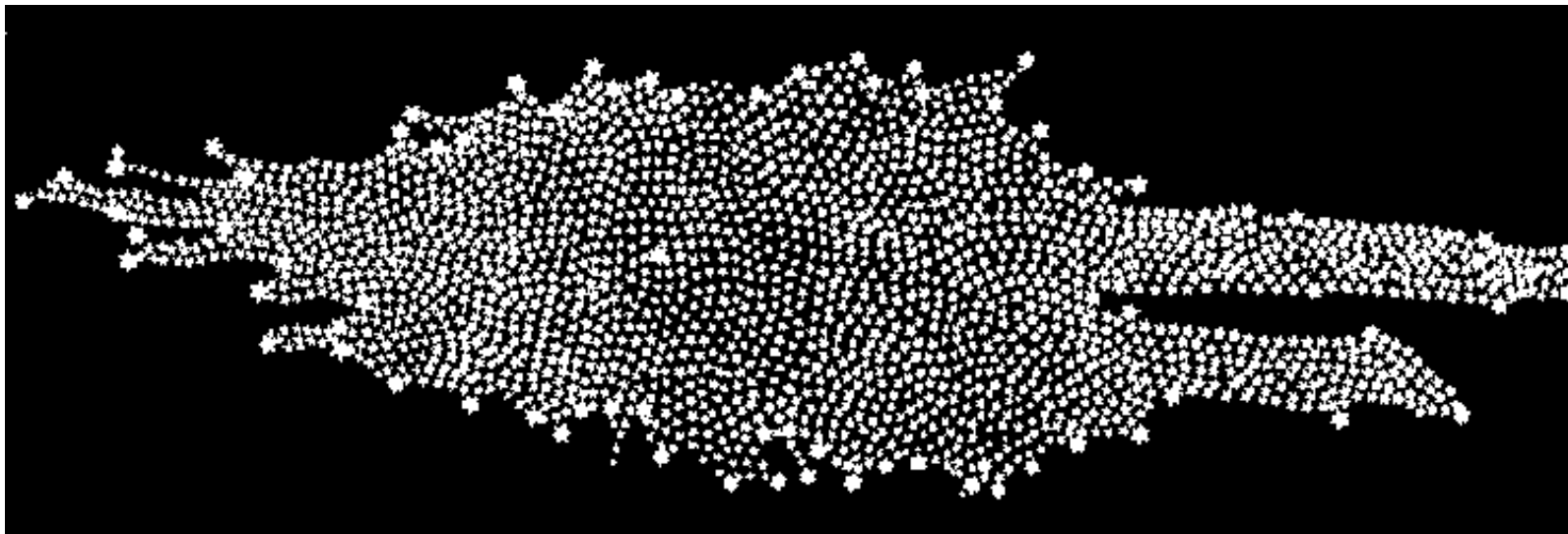
落ちてくるのには1億年くらいかかるから大丈夫（というか、宇宙の年齢がこれで決まる？）

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)

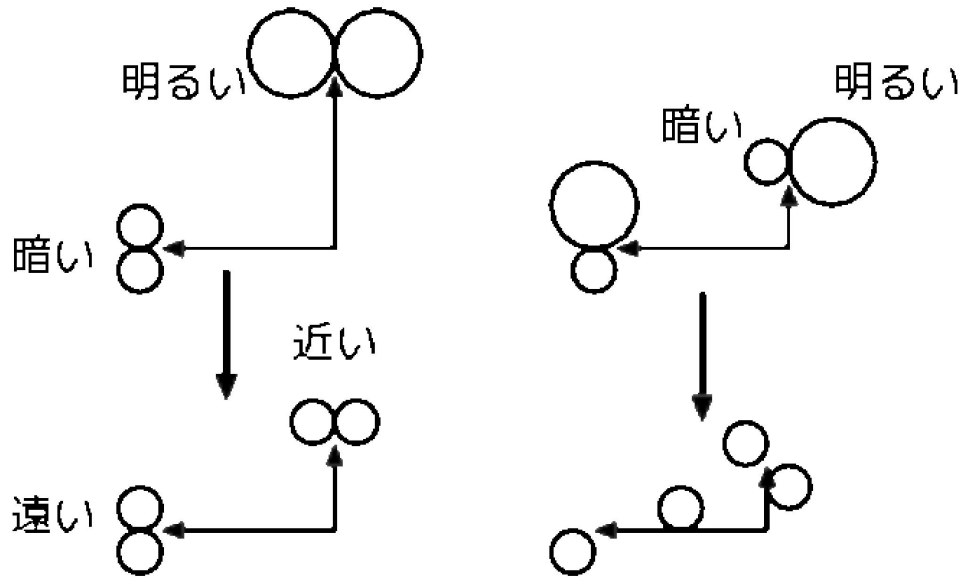
「全ての星は同じ明るさ」と仮定して距離を求めて書いてみた。



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。

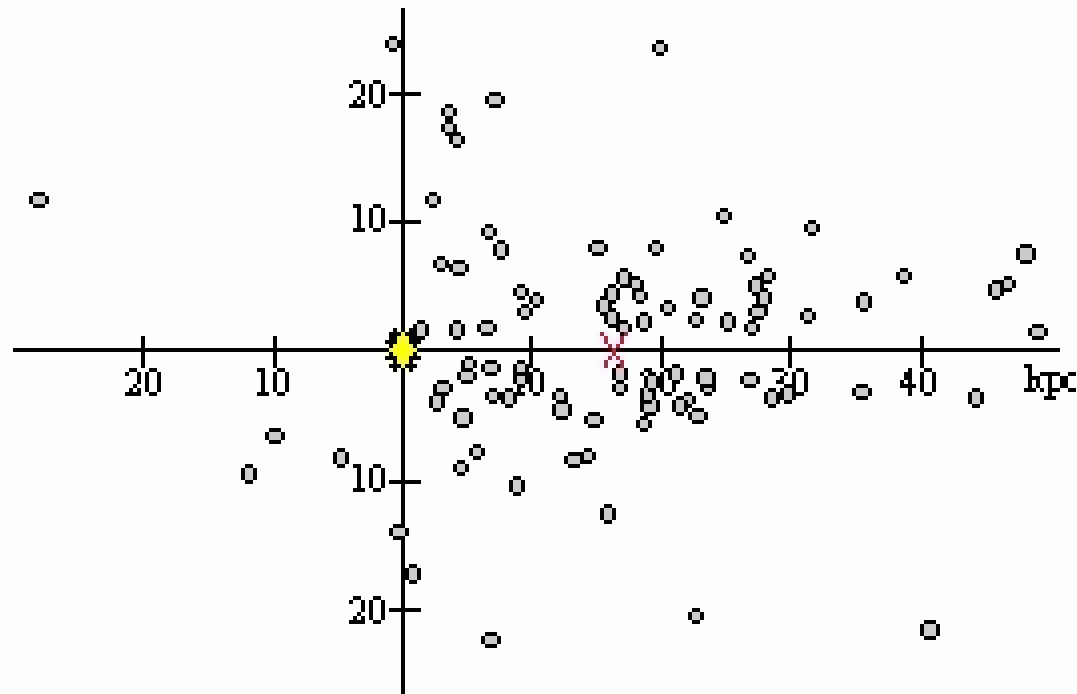


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

20世紀初め：H. シャプレー

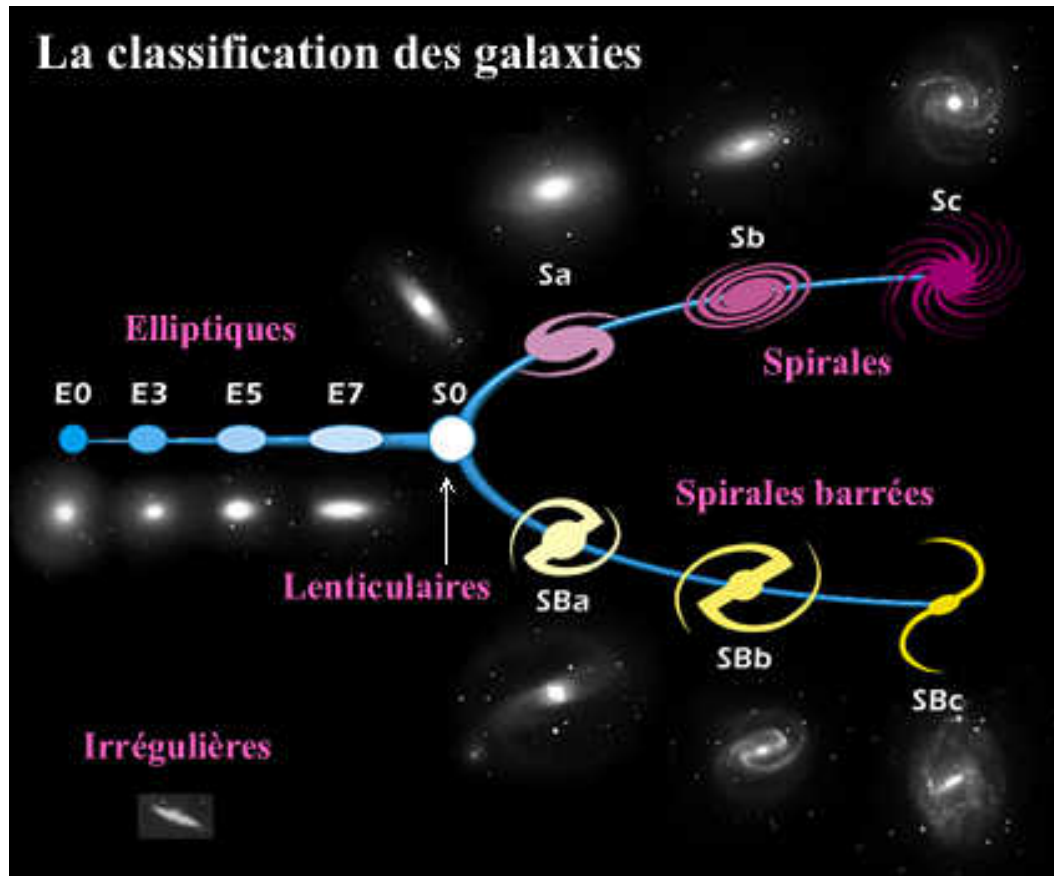
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある
＝ 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

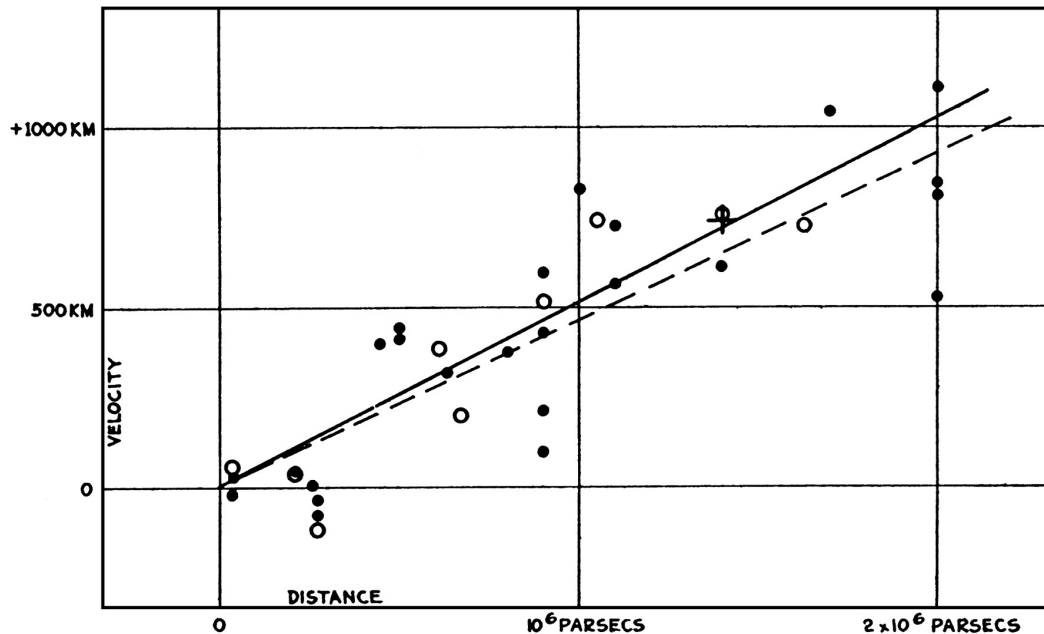
20世紀初め: E. ハッブル (1)



「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私でない誰かにきいて下さい)

ちなみに

ケルビン卿 (とても偉い物理学者) は、「進化論はおかしい」とダーウィンを攻撃したらしい

- 太陽の明るさが今とあまり変わらない期間: 7000 万年よりずっと短い (重力収縮で光っているとした)
- ダーウィンの進化論での、現代の生物に進化するまでの必要時間: 数億年

ケルビン卿の時代には知られてなかったけど現代の我々は知っていること: 太陽は核融合で光っていて、寿命は 100 億年

もうひとつ余談

- 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でもある。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？

「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。

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）。

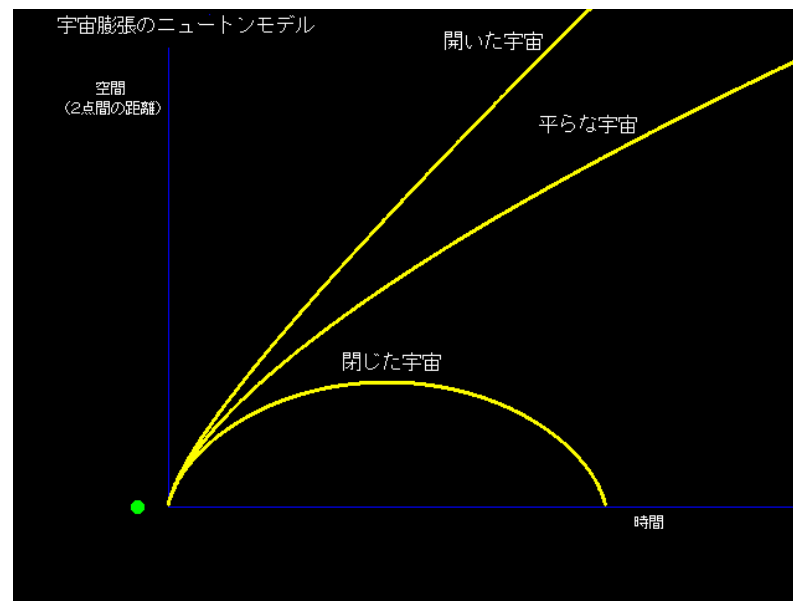
宇宙が膨張するって？

- 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。

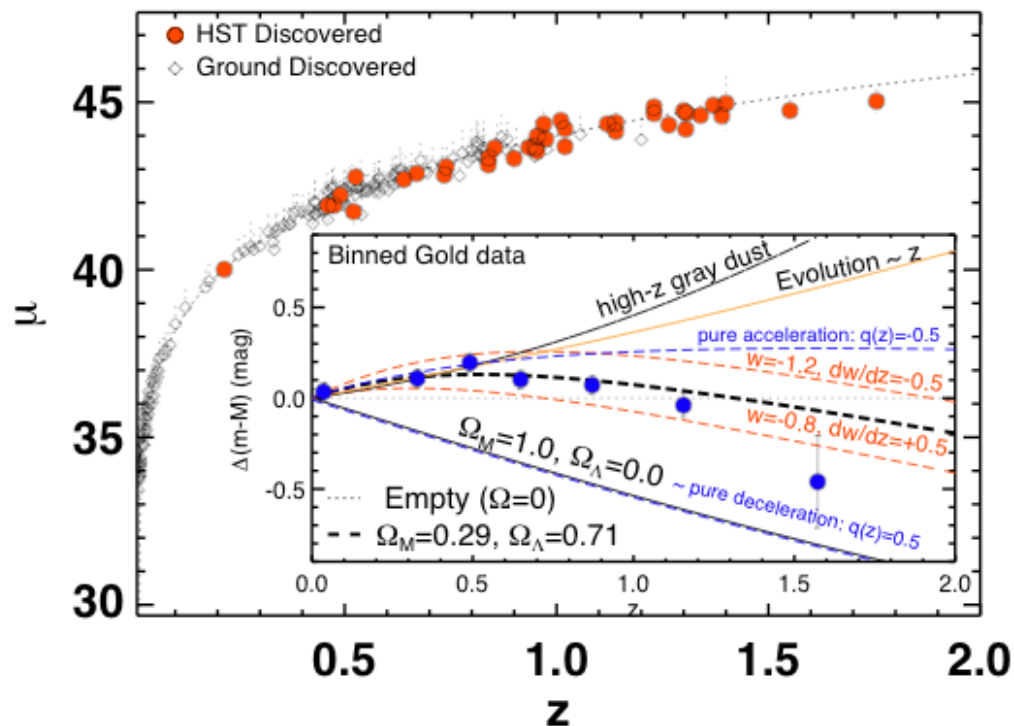
どんなふうによっくりになるか？

- 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。

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

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、（僕の意見としては）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。