

# 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

(というわけで神戸大学のサイトにあるのとちょっと順番かわってます)

# 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らないもの。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、変わるものかもしれないことがある、ということを学んでほしい。

# 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」という考え方: 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・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）
- 正確に真北でなくとも、また正確に正午でなくともあまり答はずれない。（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必要やはり必要。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ったりする
  - 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

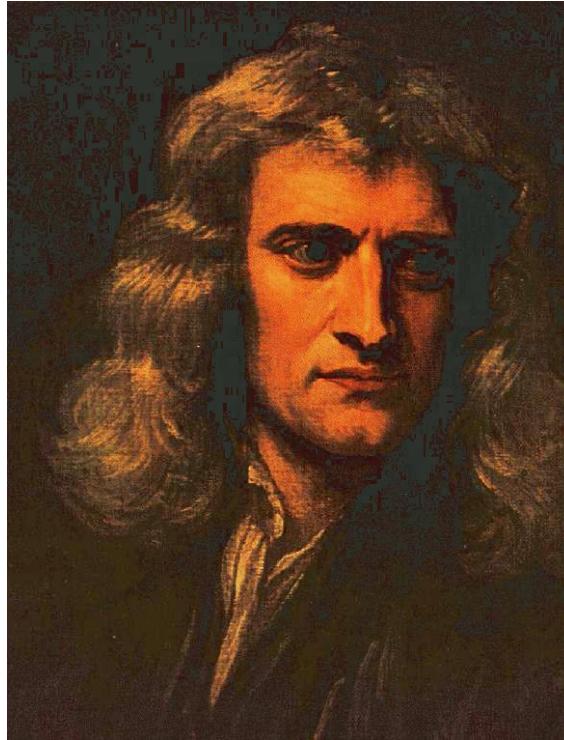
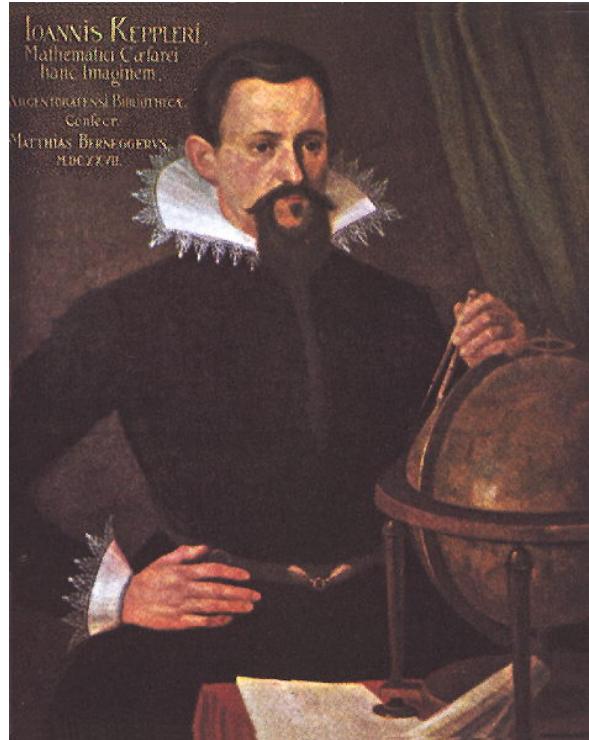
- 実は周転円だけではなかなか上手くいかない
- 天体の軌道の円の中心を地球からずらし、さらにその中心からみて地球の反対側で地球と同じ距離にある点からみて天体は等角速度運動をしているとした
- これだとかなり上手くできる。

# 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橍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：ニュートンによる橍円軌道の説明

# ケプラーとニュートン

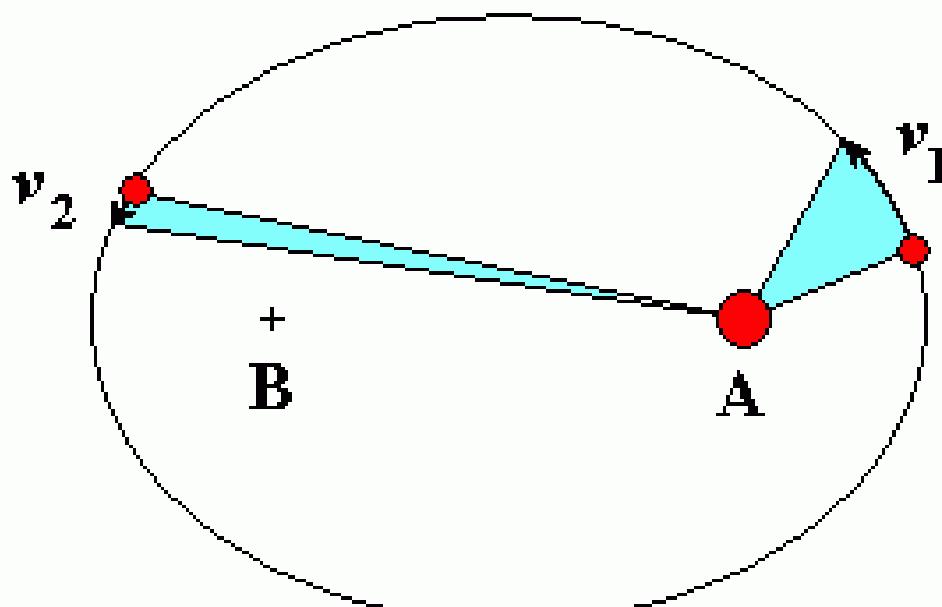


ケプラー (1571-1630)

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つの焦点とする橍円
- 「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）：太陽は恒星の一つ（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：

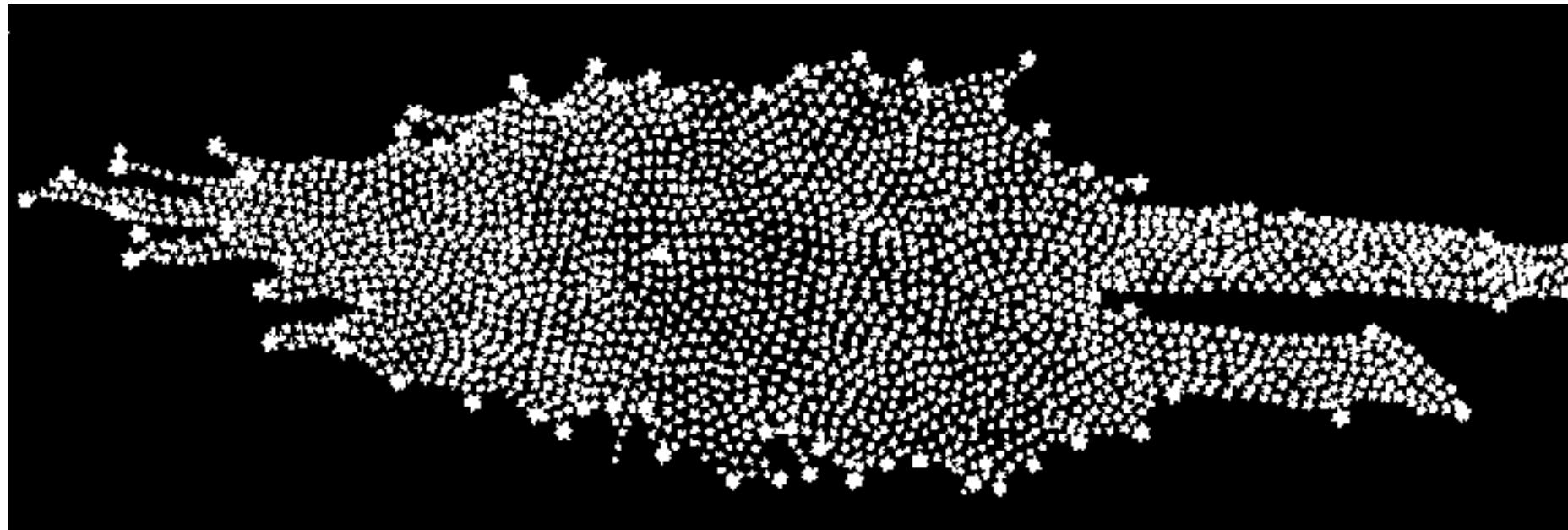
落ちてくるのには1億年くらいかかるから大丈夫（というか、宇宙の年齢がこれで決まる？）

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)

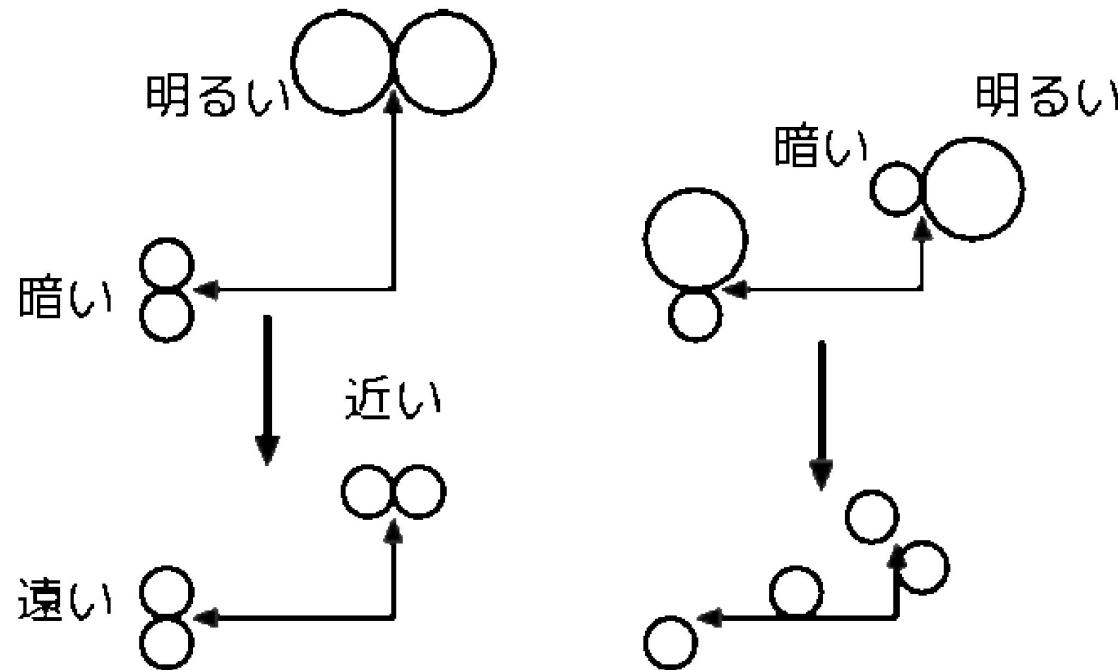
「全ての星は同じ明るさ」と仮定して距離を求めて書いてみた。



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。

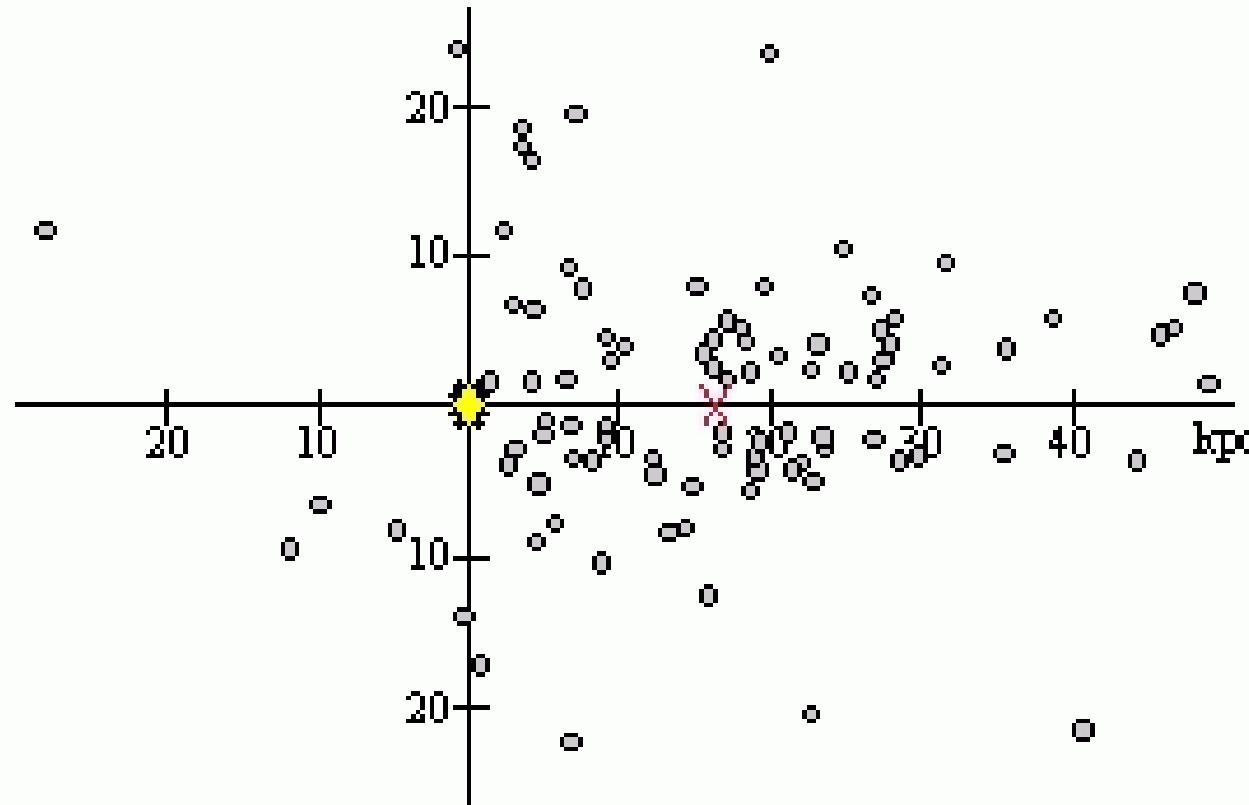


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

# 20世紀初め: H. シャプレー

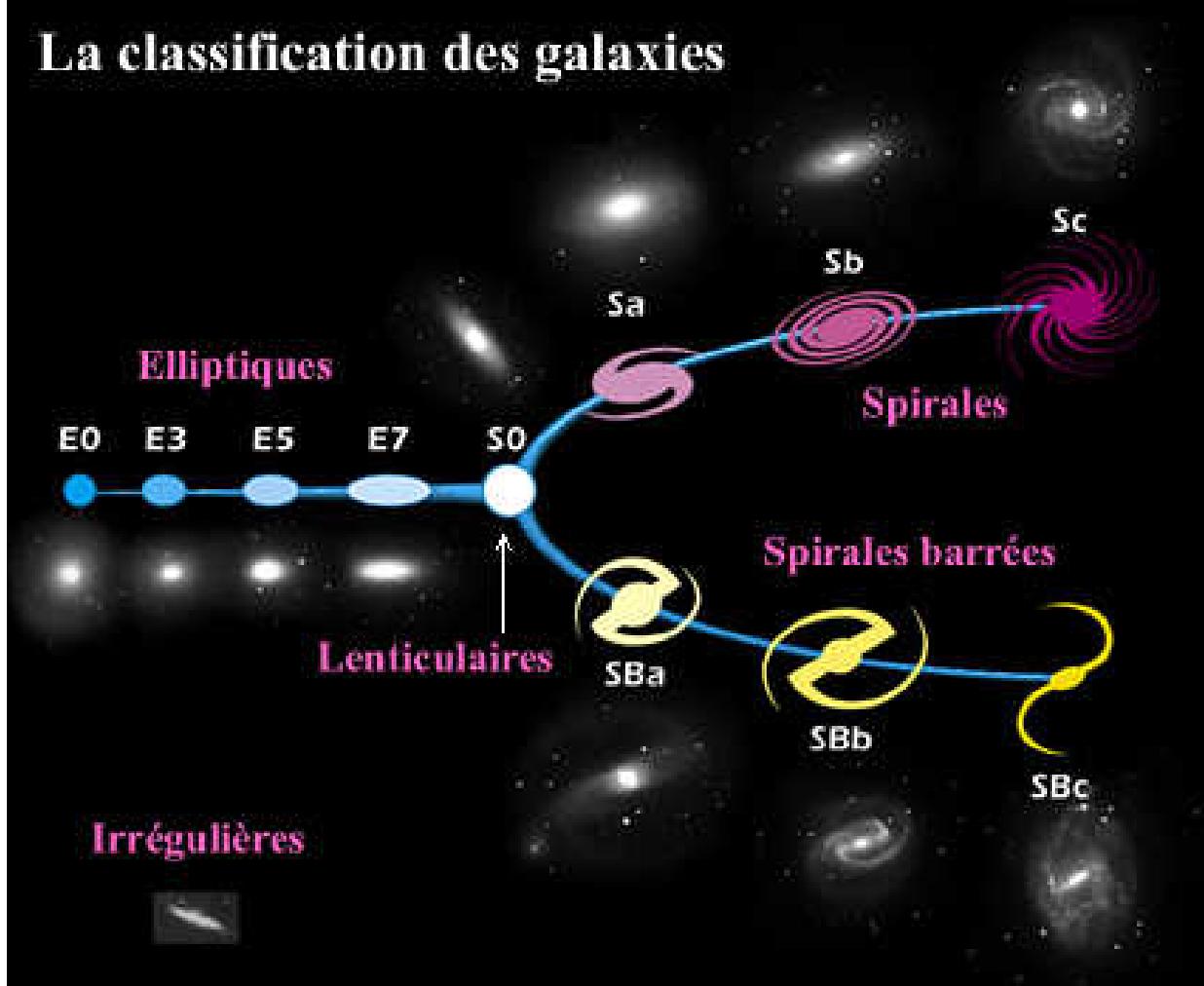
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある  
= 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

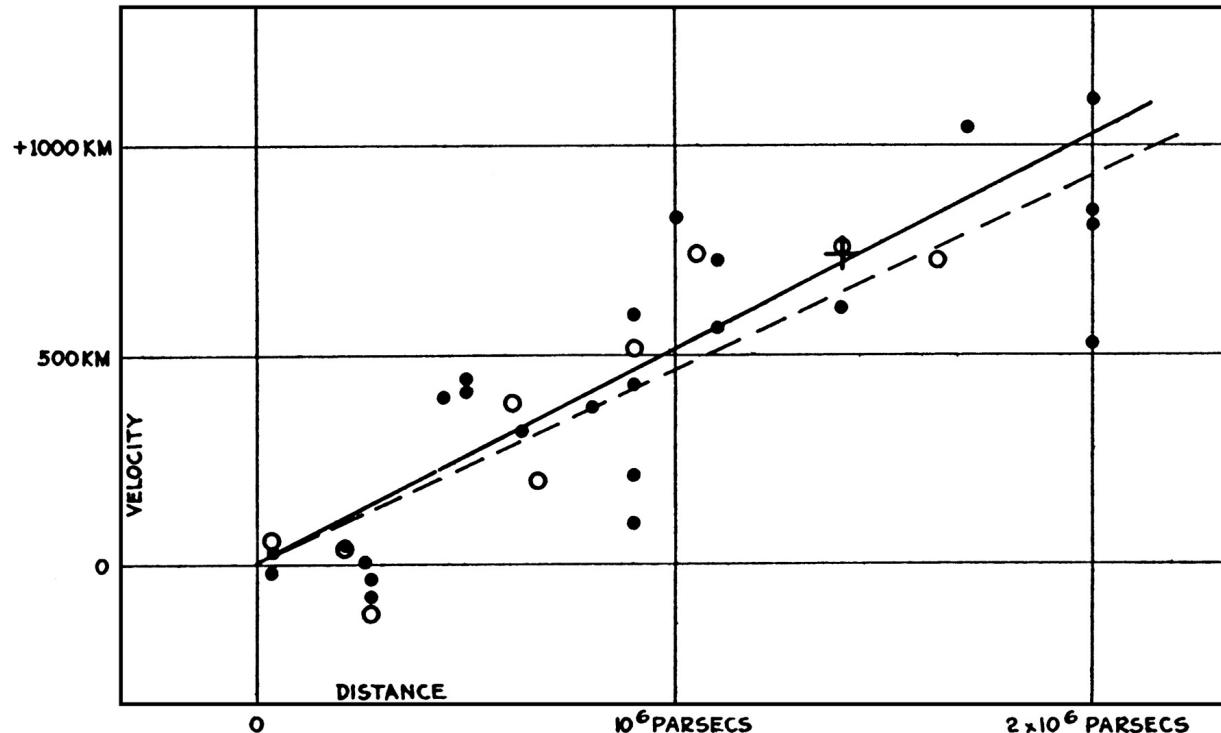
# 20世紀初め: E. ハッブル (1)



「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つた、、、

(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つの組合せ

「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な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つてきただのが 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た（一応）。

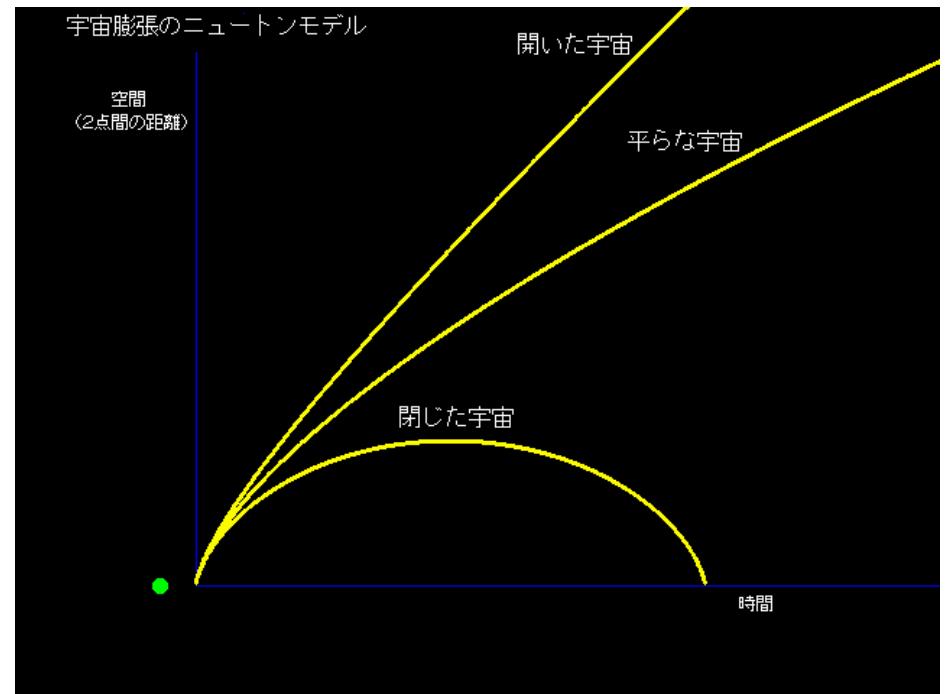
# 宇宙が膨張するって？

- 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。

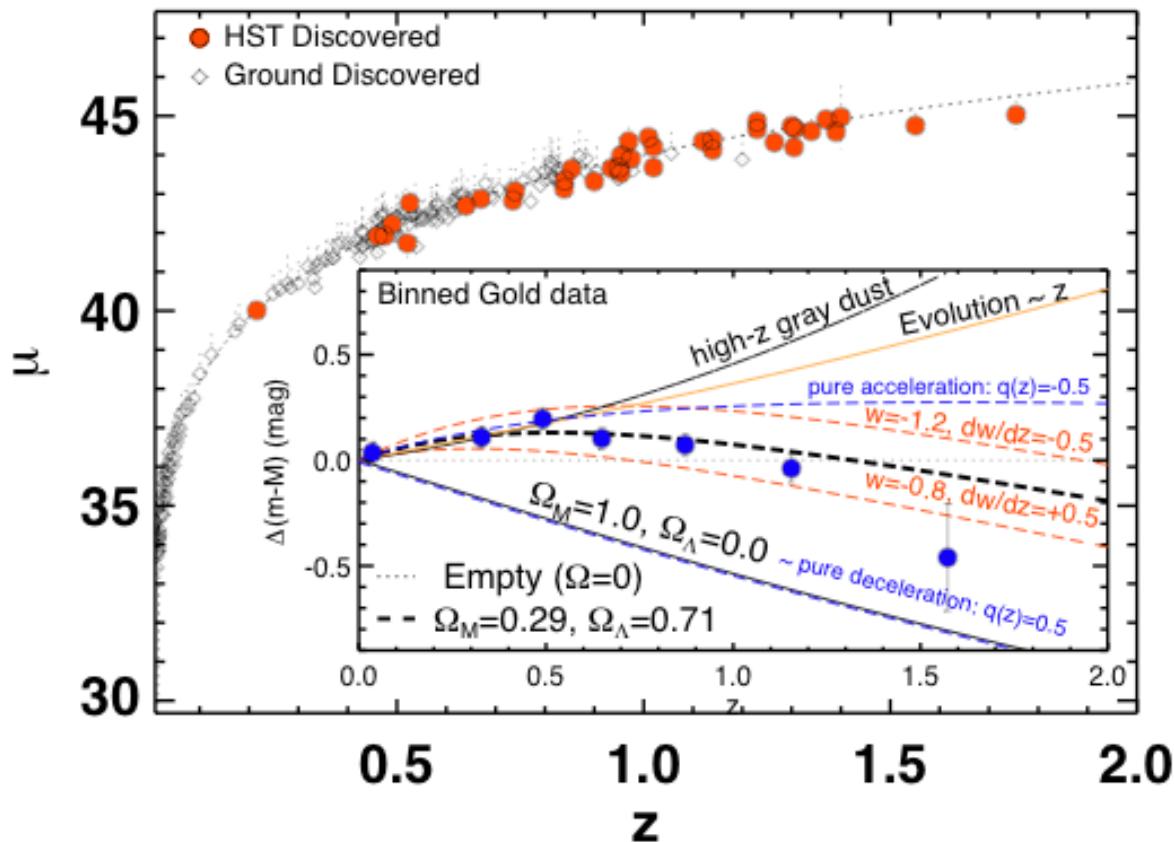
# どんなふうにゆっくりになるか？

- 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方:(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。

# 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、ものが集まつ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つけて、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、偉そうにいえば「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 Thoretical Astrophysics の所長もやった、Sir の称号もある。
- 「ビッグバン」という名前はこのひとが悪口としていました。



Fred Hoyle (1915-2001)

# ビッグバンでないとすると...、

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、その後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つた。
- 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立てようとしていた。
- 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?といったので、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輻射は、当時の宇宙の「外側」からきている。
- つまり、違う方向からの輻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

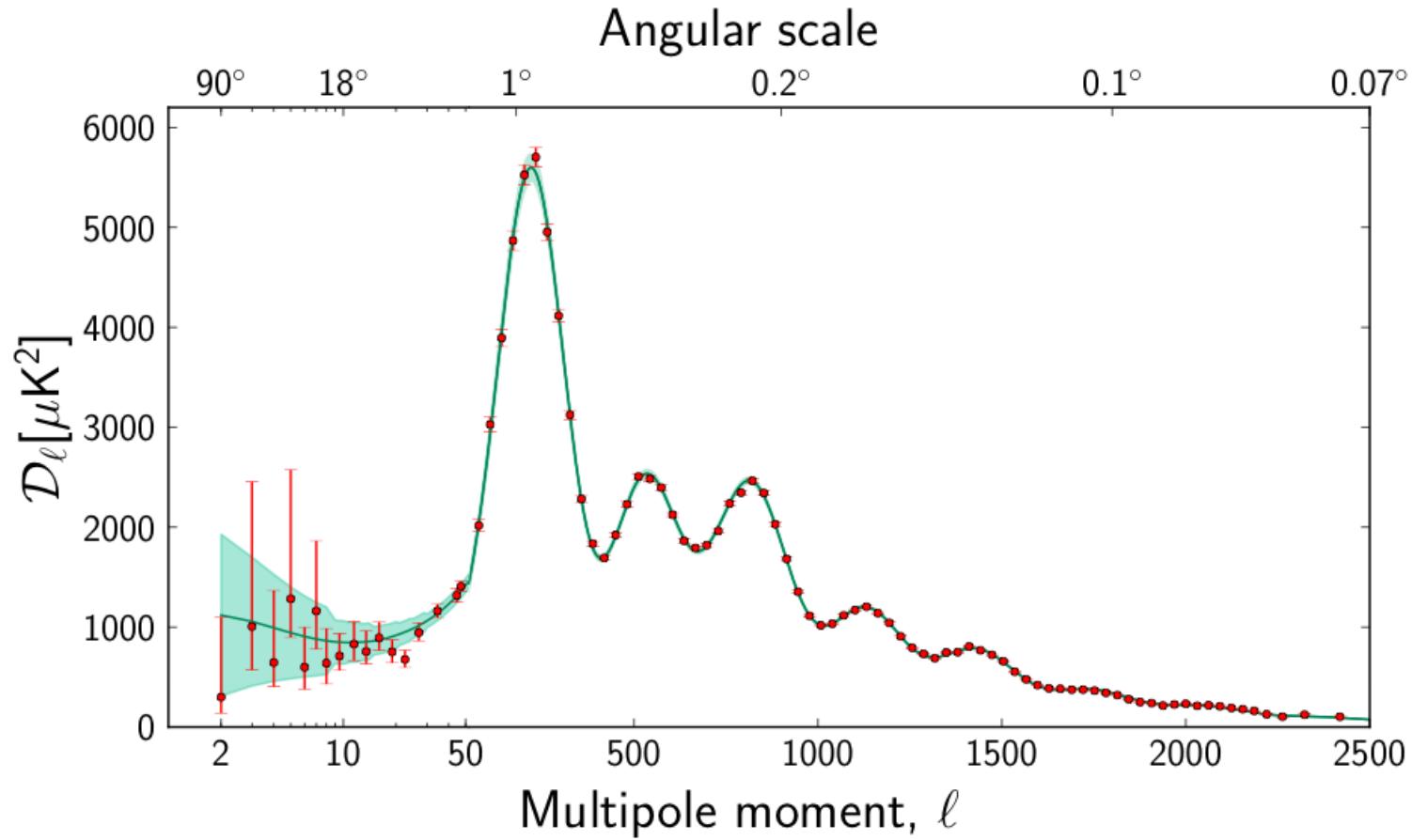
- 始まりは適当な場を仮定すれば起こるが、何故止まるのか？
- 適当な場は本当にあるのか？
- あるかどうか確認する方法はあるのか？

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輻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、ということがわかつってきた
- 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hs  
ニュートリノという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(γ線? 電子? 陽電子?)を人工衛星で観測(Fermi 望遠鏡の天体の中にはないか? 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
- 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年代にはいってから
- 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

# 天体形成

- とりあえず見た目を
- 重力(だけ)による天体形成

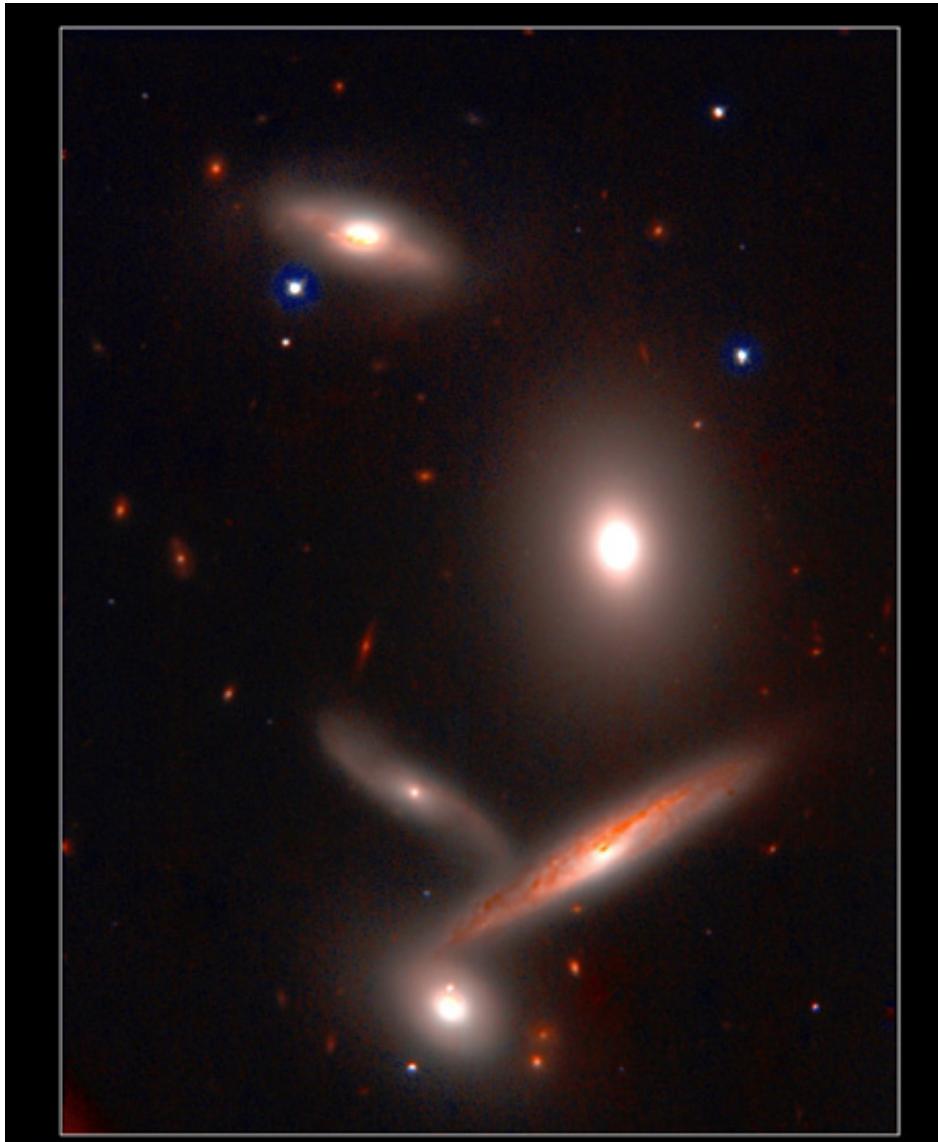
# とりあえず見た目を

銀河

球状星団



# 銀河群



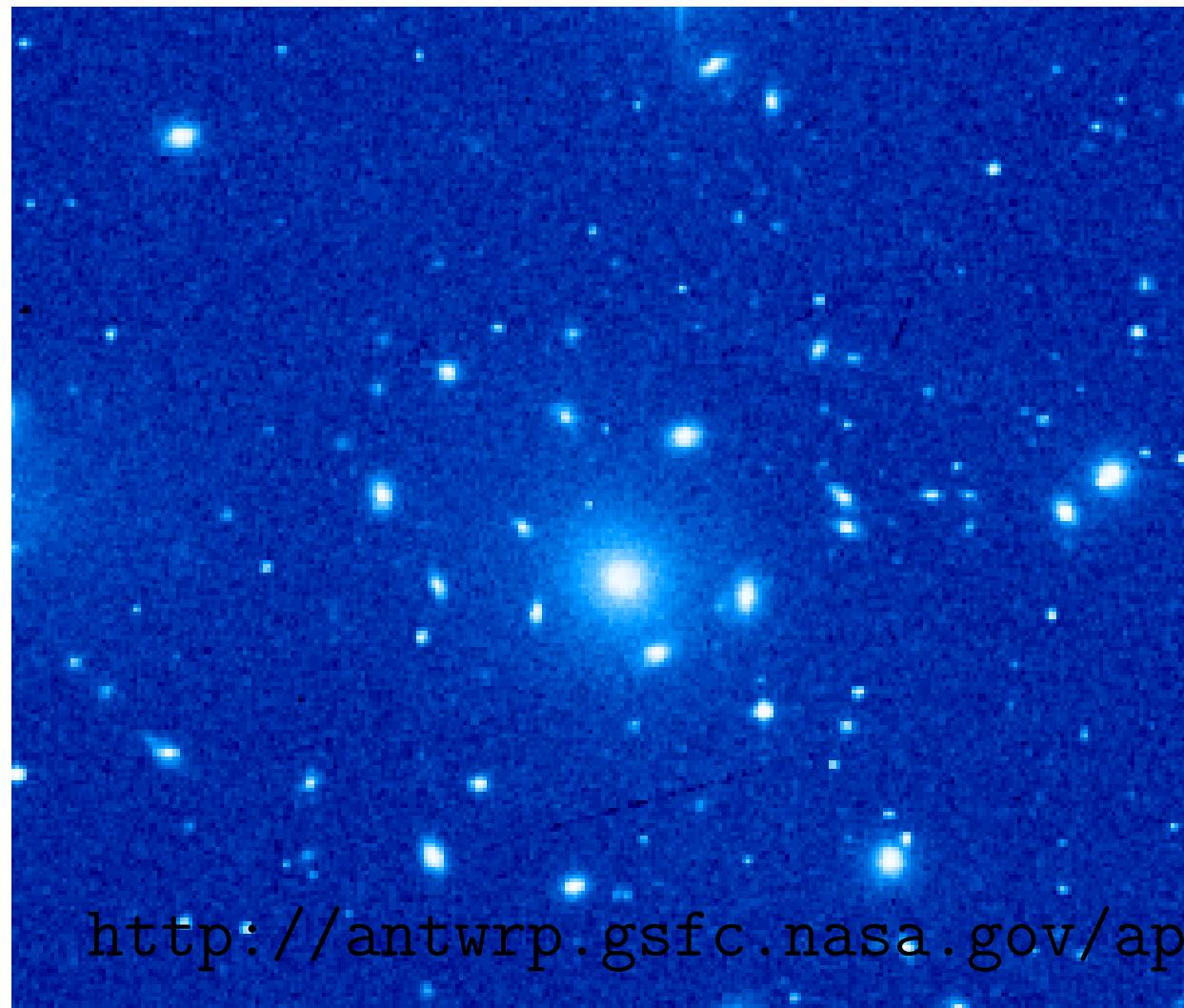
Hickson Compact Group 40

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J & K')

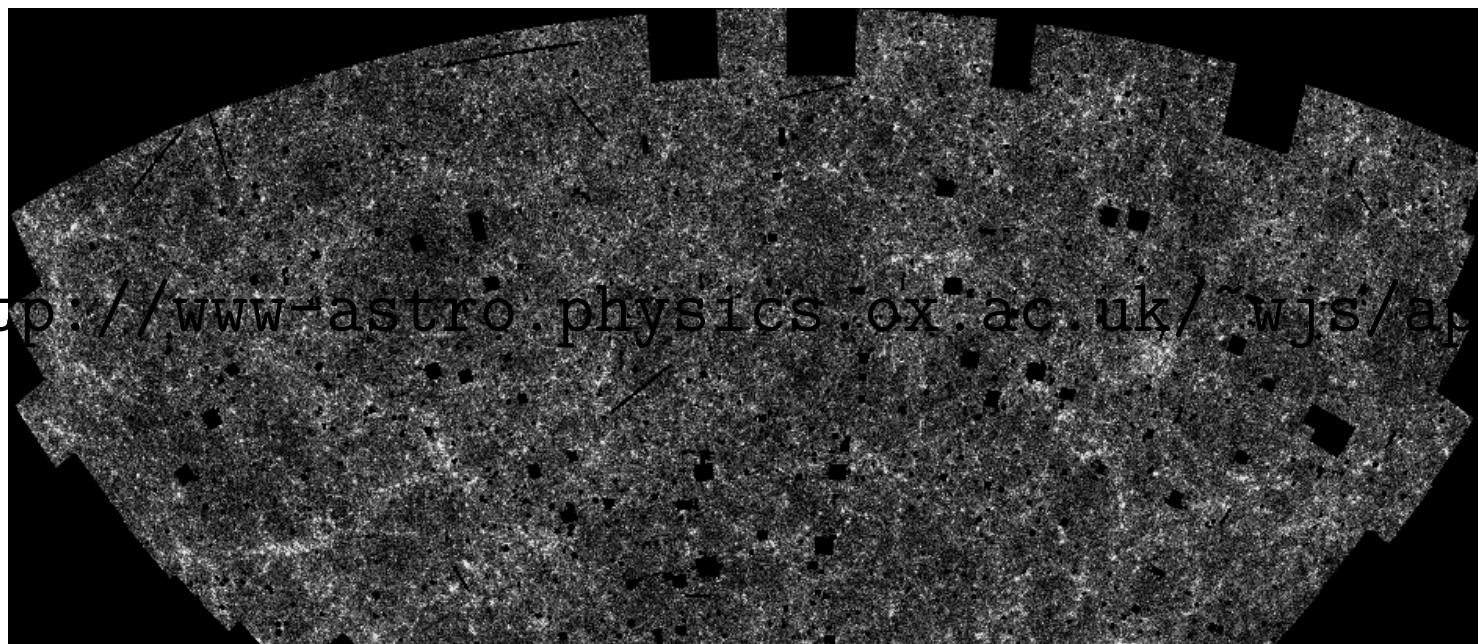
January 28, 1999

# 銀河団



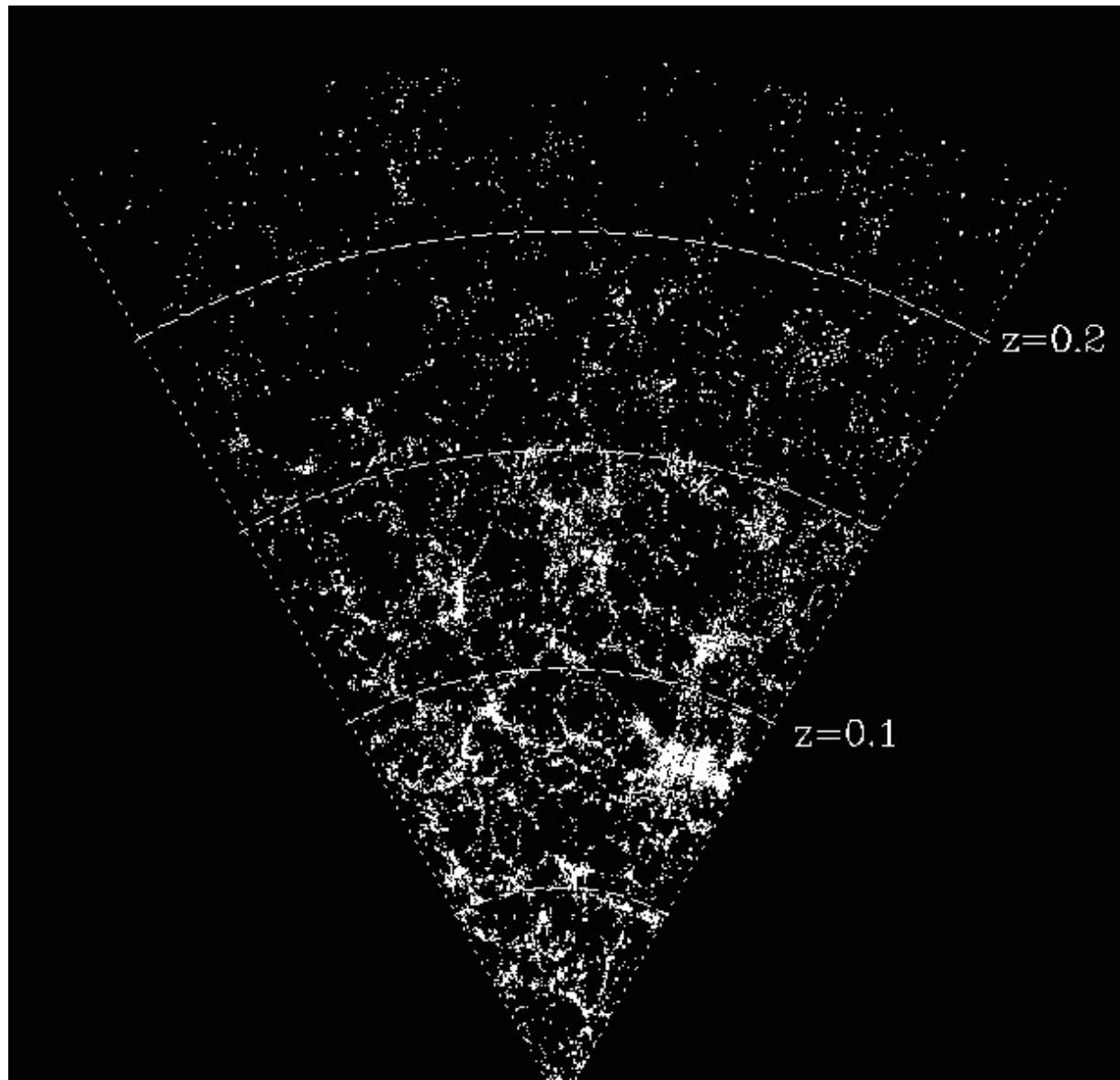
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap950917.html>

# 大規模構造(天球面)



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

# 大規模構造(距離情報あり) — SDSS スライス



# 支配方程式:

太陽系、星団、銀河、銀河団、宇宙の大規模構造などの基本方程式

$$\frac{d^2\mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} -\frac{Gm_j r_{ij}}{r_{ij}^3}$$

- それぞれの星（あるいは惑星）を一つの「粒子」と思った時に、ある粒子は他のすべての粒子からの重力を受ける。
- 大抵の場合に相対論的效果は考えなくていい（速度が光速にくらべてずっと小さい）

# こういう系をどうやって研究するか

- 観測する: ほとんど「ある瞬間」しかわからない。恒星の運動は最近ある程度見えるものも。
- 理論を立てる: 立てた方程式が簡単には解けない、、、
- 実験する: 重力が重要な系の実験は実際上不可能

「計算機実験」が割合重要。

# 計算機「実験」

実際に星や惑星をどこかにおいて実験するのは不可能

計算機で支配方程式を積分することで実験の代わりにする

= 「計算機実験」

実験そのものとはちょっと違う

- こちらが入れた物理法則以外は入ってこない（はず）
- 計算があっているとは限らない

# 重力多体系の基本的性質

惑星や星と、それ以上の大きさの構造の基本的な違い：

圧力が重力とつりあっているわけではない

では、どうして潰れてしまわないか？

— Newton 以来の疑問。

- 太陽系
- 銀河
- 宇宙全体

# 太陽系の場合

太陽の回りを各惑星が回っている。

惑星同士の重力は太陽からのに比べて 3 衡程度小さい（木星の質量は太陽のほぼ 0.1%）。従って

## ケプラー問題 + 摂動

とみなせる。で、各惑星はほぼ周期的な運動をする、つまりずっと同じような軌道を回る。

といっても、これは本当にそうか？（惑星の軌道は本当に安定か？）というのは現在でもまだ完全に解決されていない大問題。

# 古典的な（19世紀くらいの）理解

「ラプラスが太陽系の安定性を証明した」

これは摂動展開したという話。

- ラプラスの頃にはまだ無限級数の収束条件はそもそも知られていなかった
- 摂動展開すればいいというものではないということをポアンカレが示した
- 冥王星、海王星などの新しい惑星がみつかった
- 単純な力学系でも「カオス」になるということがわかつてきた

# 近代的な（20世紀後半の）理解

20世紀後半には太陽系が本当に安定かどうか？というのは、

「なんだかよくわからない問題」

に戻ってしまった。

# 用語の整理

安定 太陽系だと、要するに惑星がどっかにとんでいってしまってとか、2つがぶつかるとか太陽に落ちるとかそういういった大きな変化はないということを定義にする。

可積分 任意の初期条件で解析的な解が求まる。（多重）周期的なので、フーリエ級数で書ける

# 用語の整理(続き)

カオス的 これも定義はかならずしもはっきりしない。可積分なもののはカオス的ではないが、一般には可積分かどうかわかるとは限らないし、可積分でなくともある初期条件の範囲で安定な解が求まるような力学系もある。

## ややこしい例

可積分ではないけれど安定な解がある古くて新しい問題：重力3体問題。

3個の質点がお互いの重力に引かれて運動する。

銀河、星団等のもっとも簡単なモデルともいえる。

(2体問題は可積分)

# 3体問題の性質

一般の3体問題は可積分ではない： ポアンカレによって「証明された」

が、これはどんな初期条件でも安定ではないというわけではない。

# 安定な解の例

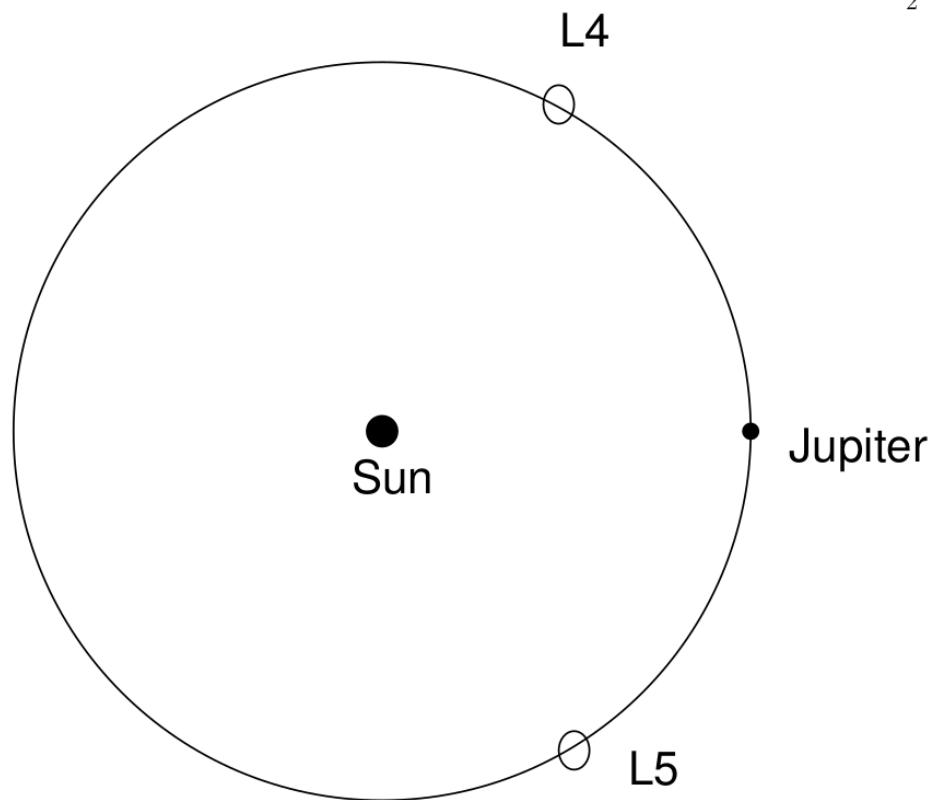
2

ラグランジュ解（正3角形解）。

2,3個めの質量が十分小さければ安定。

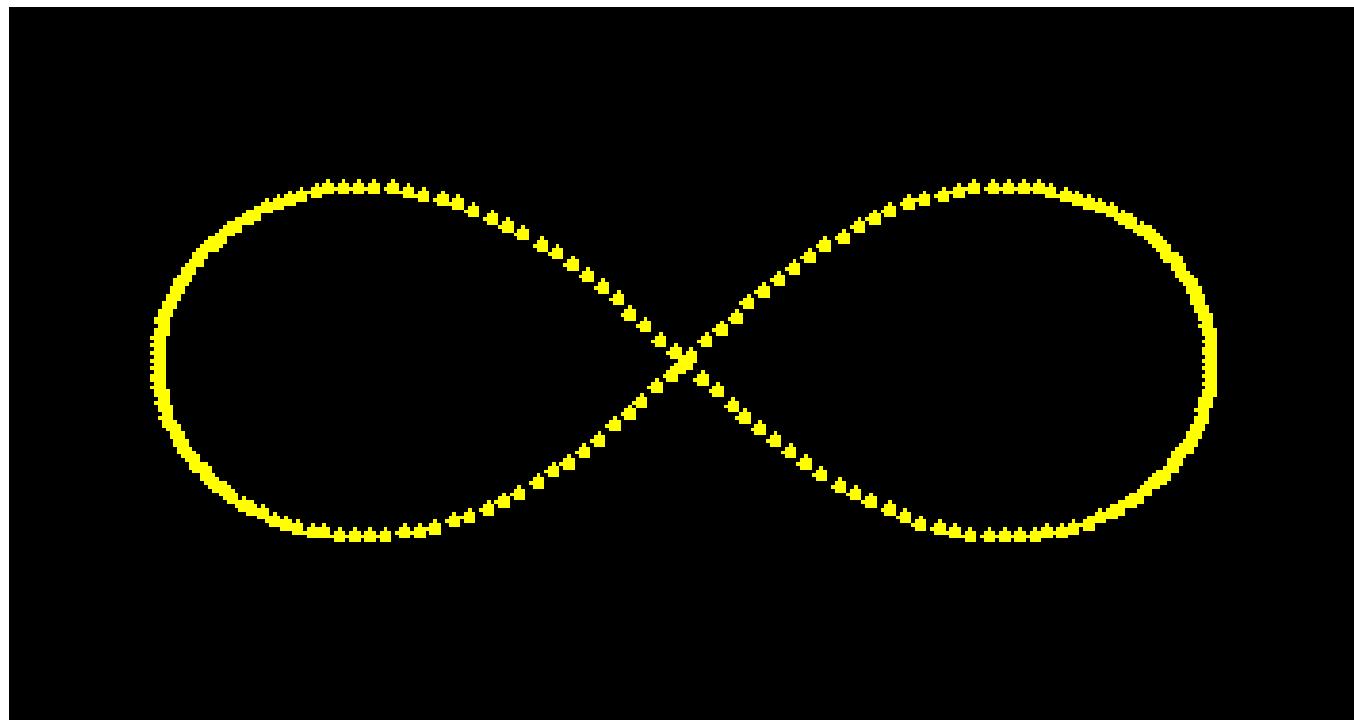
太陽・木星・トロヤ群の小惑星は実際にこのラグランジュ解を作っている。

（ラグランジュではなくてオイラーによって発見されたとか、、、）



# ちょっと余談

20年くらい前に発見された新しい安定軌道 — Figure-8 Solution



# Figure-8 solution

- 3個の質量がほぼ等しい (0.005% 程度) の時にだけ安定 (らしい)
- 数値的に (計算機で) 周期軌道を見つける新しい方法が開発されて求まってきたもの。

# 太陽系の安定性について

結局、「計算機で長い間惑星の軌道を追いかけていって、どうなるか見る」のが唯一信用できる方法（信用できないとわかっていない方法）ということになった。

「計算機で軌道を追いかける」とはどういうことか？

# 計算機による軌道計算

ある運動方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f(x) \quad (1)$$

と初期条件

$$x(0) = x_0, \frac{dx}{dt}_{t=0} = v(0) = v_0 \quad (2)$$

が与えられたとして、そのあとの時間発展を計算機で求めること。

# 具体的な方法

基本的には、最初の位置（と速度）からちょっと後の時刻の位置を求めるというのを繰り返す。

もっとも基本的な方法：オイラー法

1変数で書くと

$dx/dt = f(x)$  に対して、

$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t f(x(t))$  と近似するもの。

つまり、ある時刻での解のティラー級数展開の 1 次の項までをとったもの

もっと効率の良い方法が一杯研究されている

で、安定性はどうなったかというと

と、こういうような、いろいろな方法が出てきたこと、計算機が速くなつたこともあるって、

太陽系の惑星の軌道は「安定ではない」

ということが 1987 年には示された

ここでの「安定ではない」の意味は：

「非常に近い初期条件の太陽系を 2 個つくってそれぞれ別に計算すると、それぞれでの惑星の位置の差がどんどん大きくなっていく」ということ

# 不安定のタイムスケール

大きくなるタイムスケール：リアプノフ時間といわれるもの。  
軌道間の距離が $e$  倍になる時間。

求まったリアプノフ時間： 2千万年

これ自体は 8.5 億年の計算をして求まったもの。

# 太陽系はでは 45 億年間どうして存在を続いているのか？

さらに長い時間の計算（主に国立天文台の木下・中井・伊藤らによるもの）でわかったこと：

- リアプノフ時間は確かに 2 千万年 程度と短い
- だからといって惑星がどこかに飛んでしまうというようなことはおこらない（らしい）

つまり、軌道の安定性ということからみるとカオス的だが、だからといって全くなんでも起こるというわけではなくてある狭い範囲（どういう範囲かはよくわからない）に軌道が収まっている（らしい）

# 冥王星は惑星じゃなくなつた

だからいうわけでもないが、2009年に Nature にでた論文：

Vol 459 | 11 June 2009 | doi:10.1038/nature08096

nature

LETTERS

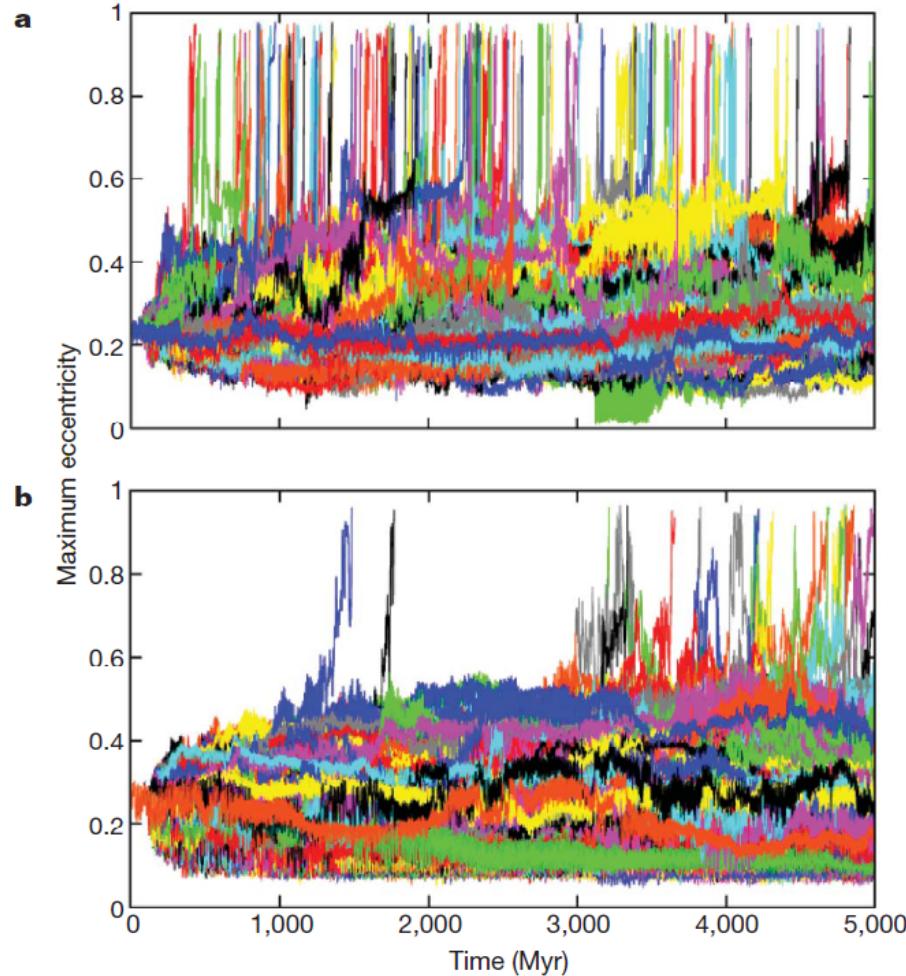
---

## Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth

J. Laskar<sup>1</sup> & M. Gastineau<sup>1</sup>

地球が水星や金星とぶつかる ???

# Laskar and Gastineau 2009



- 水星の初期の位置をほんのちょっとだけ(0.38mm)づつ変えて、沢山の「太陽系」の進化を計算した
- 結構な数の「太陽系」で、水星の離心率が大きく上がって金星や地球とぶつかった
- 但し、一般相対論的效果を入れると、いれない場合より安定になった

本当に計算あってるのかどうかは？

# 結局のところ

そういうわけで安定かどうかはまだよくわかっていない。

色々な人が色々な方法で研究中。

以下、太陽系の話はしばらくおいて銀河とか星団の話に移る。

# なにが問題か？

銀河とか星団とかはそもそもどうしてそこにあるのか？

それらは安定なのか？

どうやってできたのか？

というようなことが問題。

# 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にどうして潰れてしまわないのか？

という問題。

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ということになる。つまりは、ニュートンが最初に心配した、「星が落ちてくるのではないか」という問題に対する答は、「おちてきちゃってる」というもの。

では、銀河はどうやって形を保っているか？

# 宇宙はなにからできているか

(復習)

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。

# 現在の宇宙に対する我々の基本的な理解と その「検証」

- 宇宙の物質のほとんどは、偉そうにいえば「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。

# 宇宙の大規模構造形成のシミュレーション

計算の 1 例（現在千葉大准教授・石山さん提供）

ここでやっていること：

- 基本的には「一様」な宇宙を、なるべく沢山の粒子で表現する
- 理論的に「こう」と思われる揺らぎを与える
- 理論的に「こう」と思われる初期の膨張速度を与える
- あとは各粒子の軌道を数値的に積分していく。基本的には太陽系の時と同じこと

# わかること

- 宇宙全体としては膨張していく
- 最初に密度が高いところは、他に比べて相対的に密度がどんどん大きくなっていく。
- 特に密度が高いところは、そのうちに膨張しきって潰れ出す。
- (このシミュレーションでは) 最初に小さいものが沢山できて、それらがだんだん集まって大きなものになる
- 大雑把にいようと、銀河とか銀河団はこのようにして潰れたもの。

# 宇宙論の問題としては：

- 観測される銀河や銀河団の性質、特に分布
- シミュレーションでできた銀河や銀河団の分布

を比べて、「どうすれば現在の宇宙ができるか」を決めることで、「宇宙の始まりはどうだったか」を逆に決めたい。

例えば宇宙の膨張速度、密度、宇宙項、 初めの揺らぎの性質、 ダークマターの性質

# Ill-posed problem?

つまり、、、

- 宇宙初期の揺らぎ：（銀河や銀河団になる細かいところまでは）直接には見えない
- 昔の宇宙の膨張速度：直接には見えない
- ダークマター：見えるかどうか（あるかどうかも）わからない

これらを、全部同時に銀河の観測から決めたい。

そんなことは可能か？ という問題。

# 問題点

シミュレーションで出来るのは、本来はダークマターの分布だけ。

銀河になるにはそのなかでガスが収縮して星にならないといけない。

つまり、どういう条件で星ができるかが決まらないと本当に比べられない

- 銀河の数が変わる（合体するとか）
- 銀河の明るさが変わる（若い星があると明るい。古くなると暗くなる）

# 原理的には

- こういった問題点の解決: 「ガスが収縮して星になる」ところも全部シミュレーションすればいい
- そういう方向の研究ももちろん進められている
- が、まだ、シミュレーションの信頼性その他に問題が、、、