

# 宇宙惑星科学2

牧野淳一郎

惑星学専攻

# 事務連絡

- 今日の小レポートがあります。

# 事務連絡

- 評価は小テスト(初回はなし)とレポートで行う。

# 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



# 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:

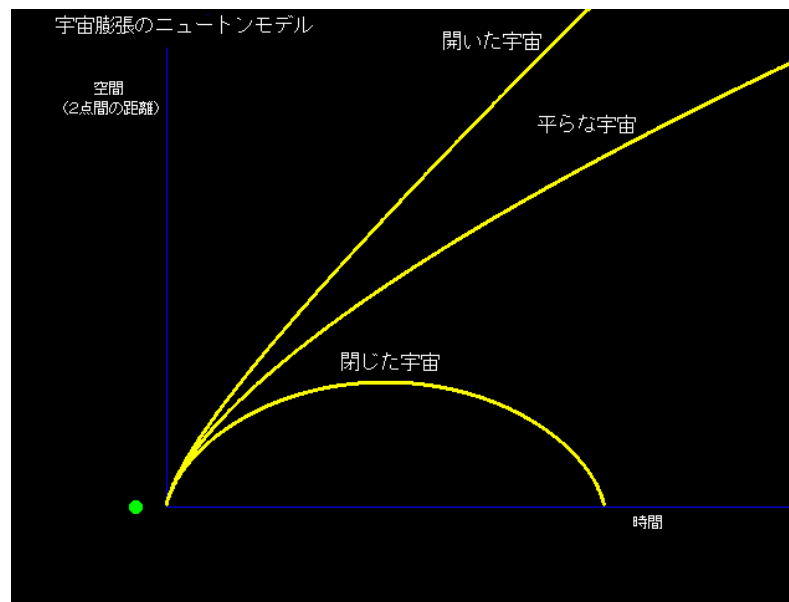
アインシュタインの一般相対性理論の方程式を、「宇宙が空間的に一様」として解くと、「静止している」という解はなくて「膨張している」か「収縮している」である

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。



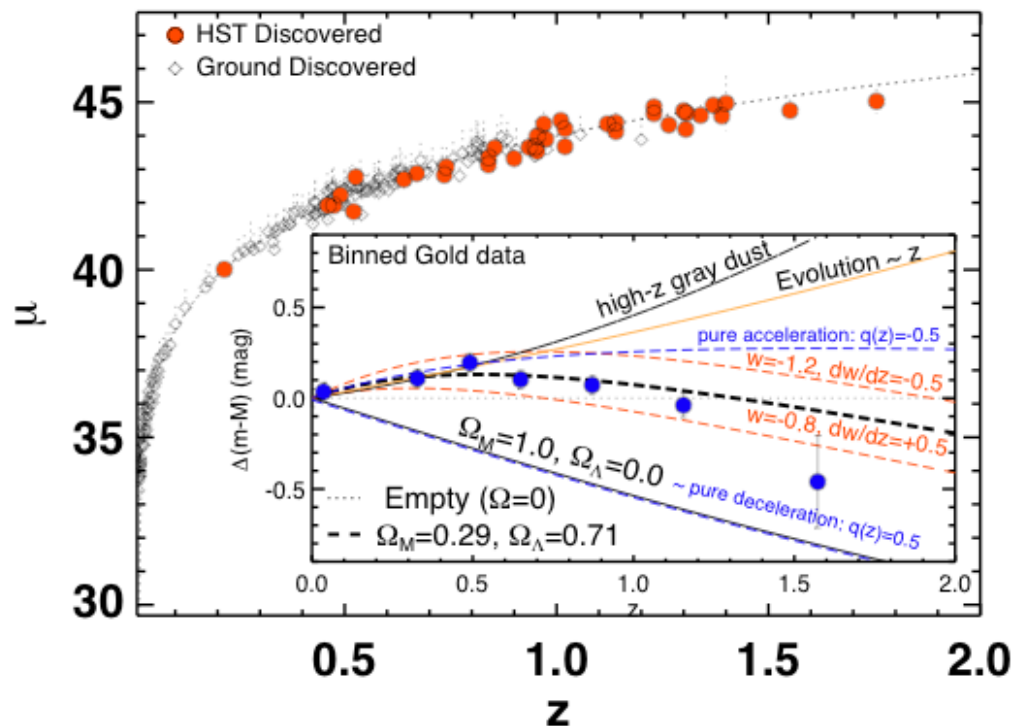
# どんなふうによっくりになるか？

- 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といて)「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ふことにした時に、銀河毎に重力理論が違ふ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。

# 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 **Fred Hoyle (1915-2001)** 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2019年。

<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？

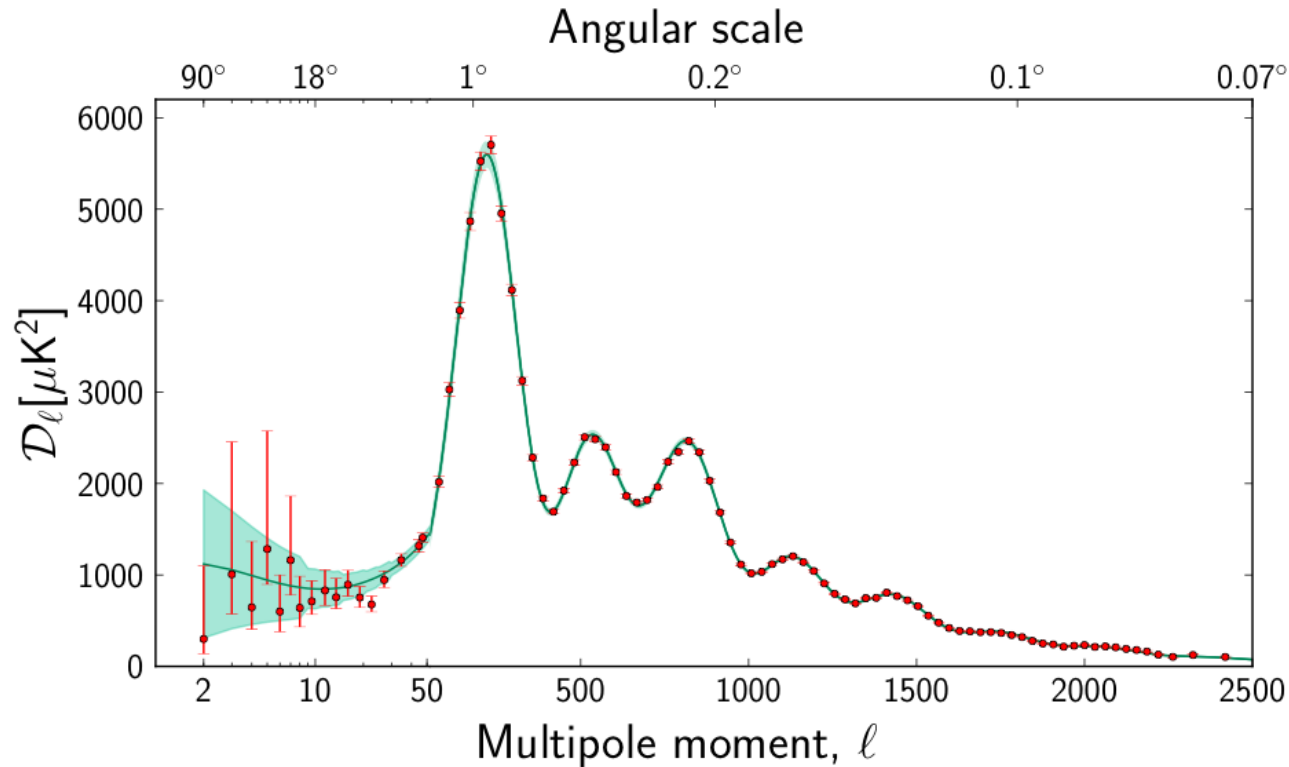
よくわからないが、しかし

- 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

# 最近の考え方

- 宇宙の「始まり」を考えなくても、そこらじゅうでインフレーションしていると思えばいい。
- 何故かインフレーションが止まったところで色々な「宇宙」ができる。
- (これはある意味ビッグバンから定常宇宙にもどっている気も)

# では「物質」のほうは？

- 観測の示唆:  $\text{ダークエネルギー} + \text{物質} = \text{「1」}$   
(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か???
- 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( 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か???

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
- 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

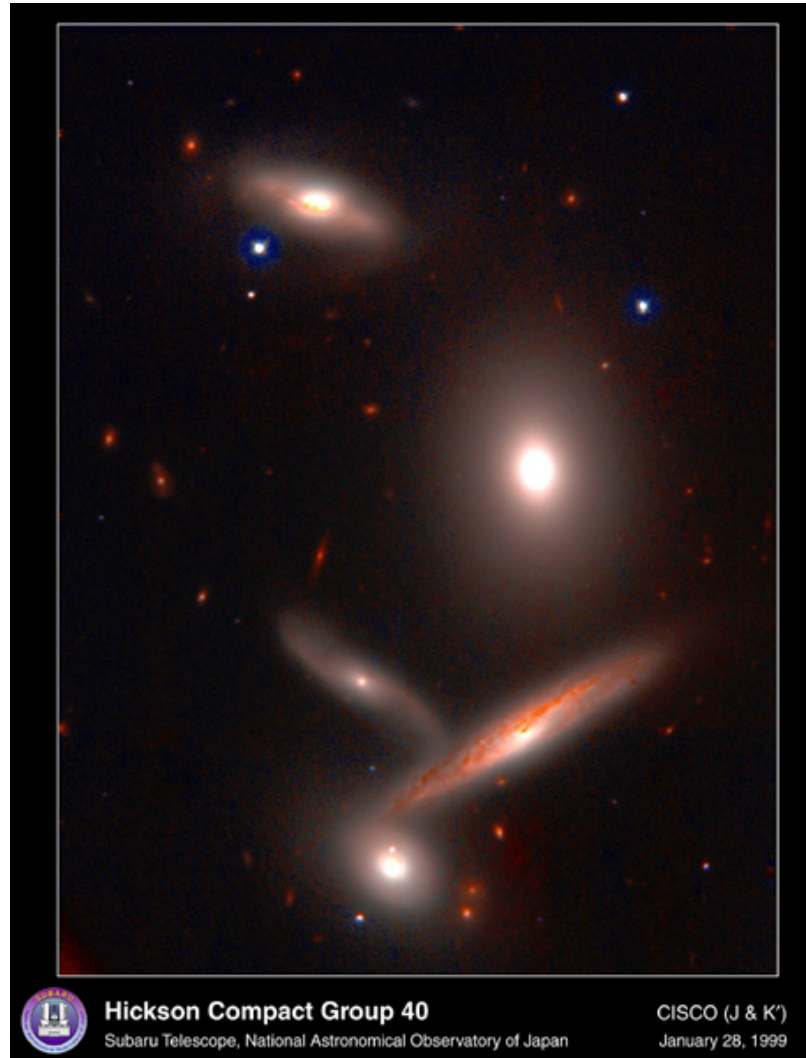
## 銀河



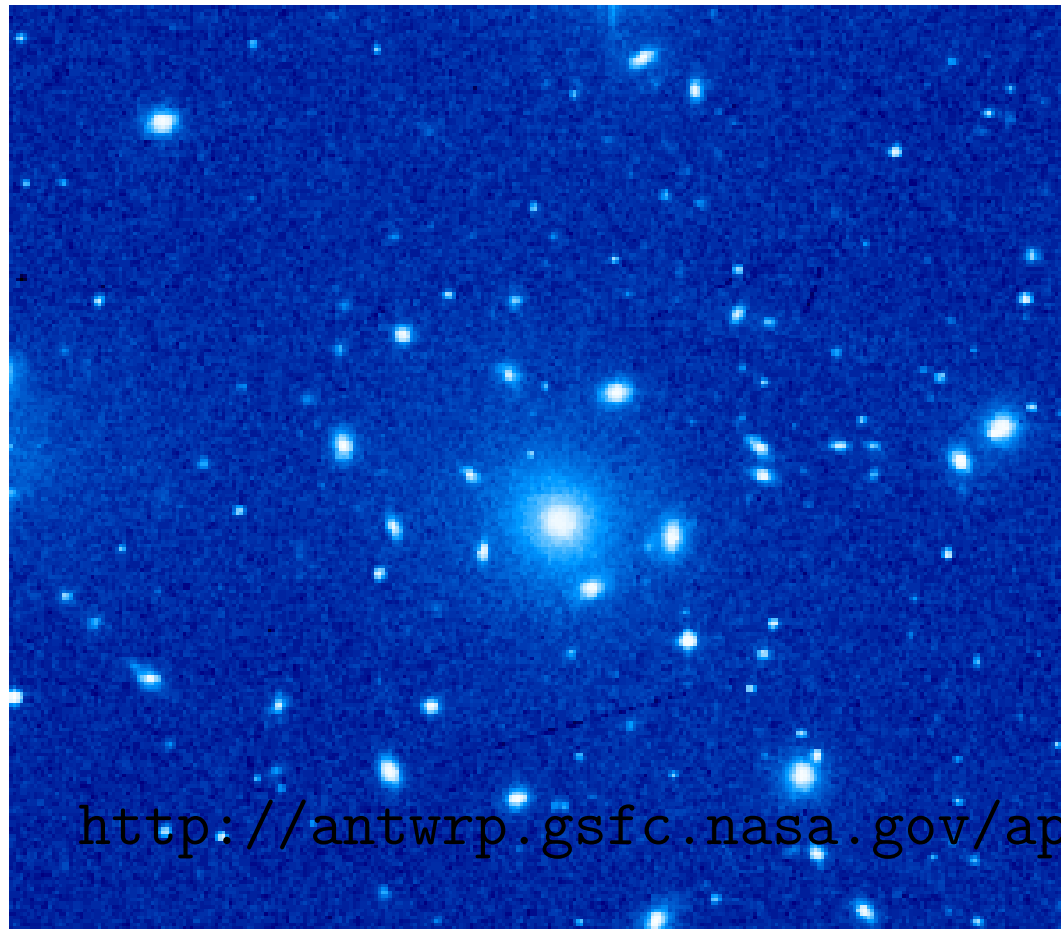
## 球状星団



# 銀河群

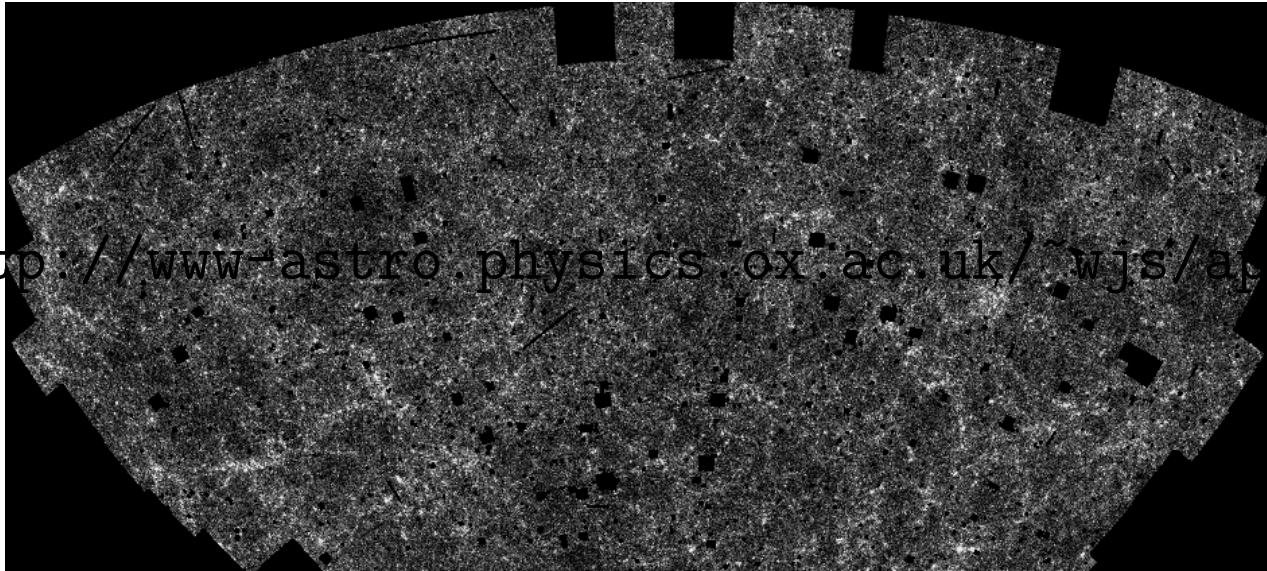


# 銀河団



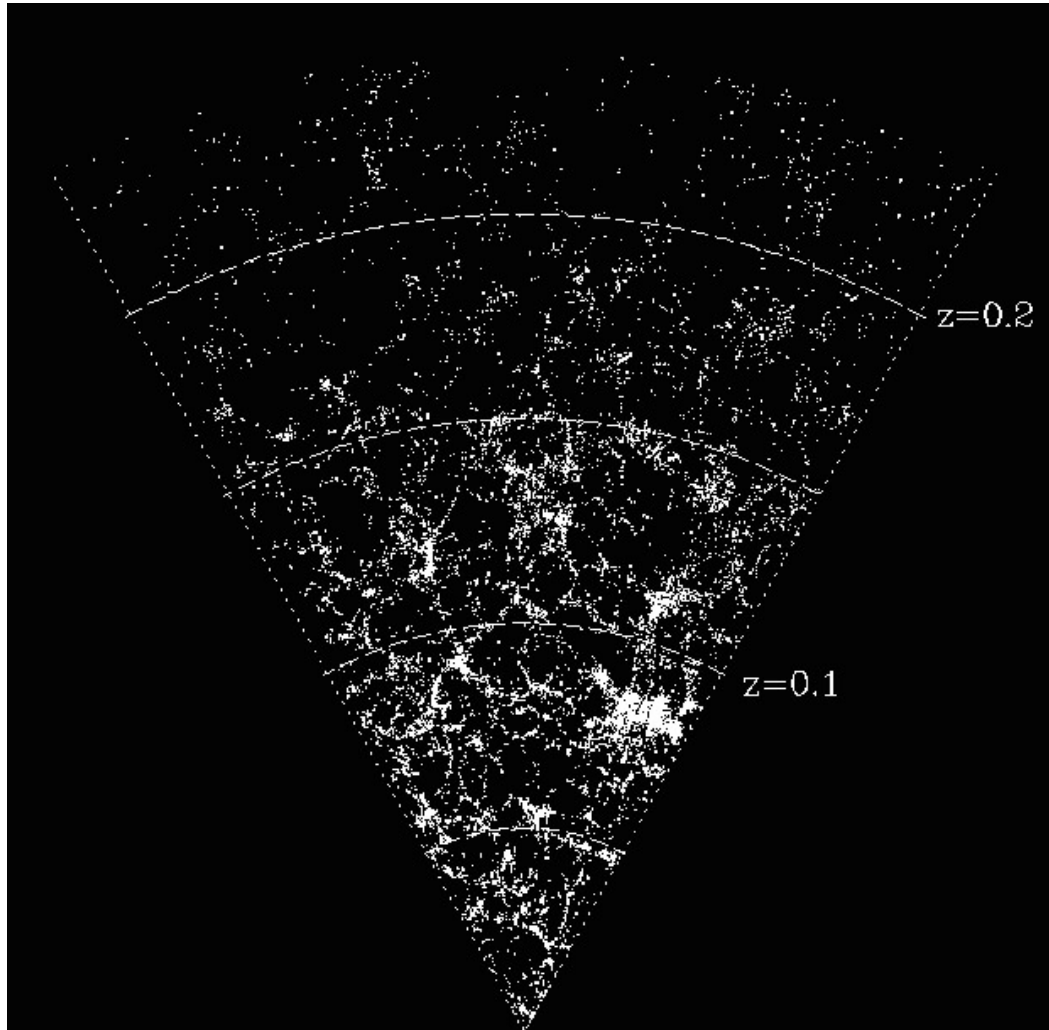
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap950917.html>

# 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

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} -\frac{G m_j r_{ij}}{r_{ij}^3}$$

- 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。位置、質量:  $r_i, m_i$ 、重力定数:  $G$
- 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）



# 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

# 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

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} -\frac{G m_j r_{ij}}{r_{ij}^3}$$

- 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。位置、質量:  $r_i, m_i$ 、重力定数:  $G$
- 大抵の場合に相対論的効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）

# 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のに比べて 3 桁程度小さい（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。

何故(本当に)安定か？は現在、わかったとはいえない。

# 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ってきた

# 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たり、2つがぶつかるとか太陽に落ちるとかそ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、可積分でなくて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。

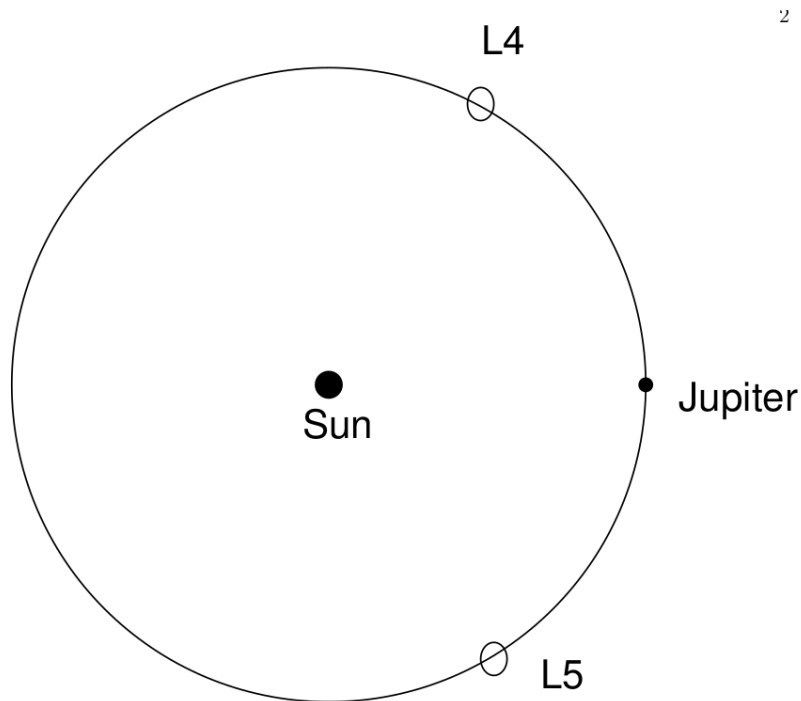
# 安定な解の例

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。

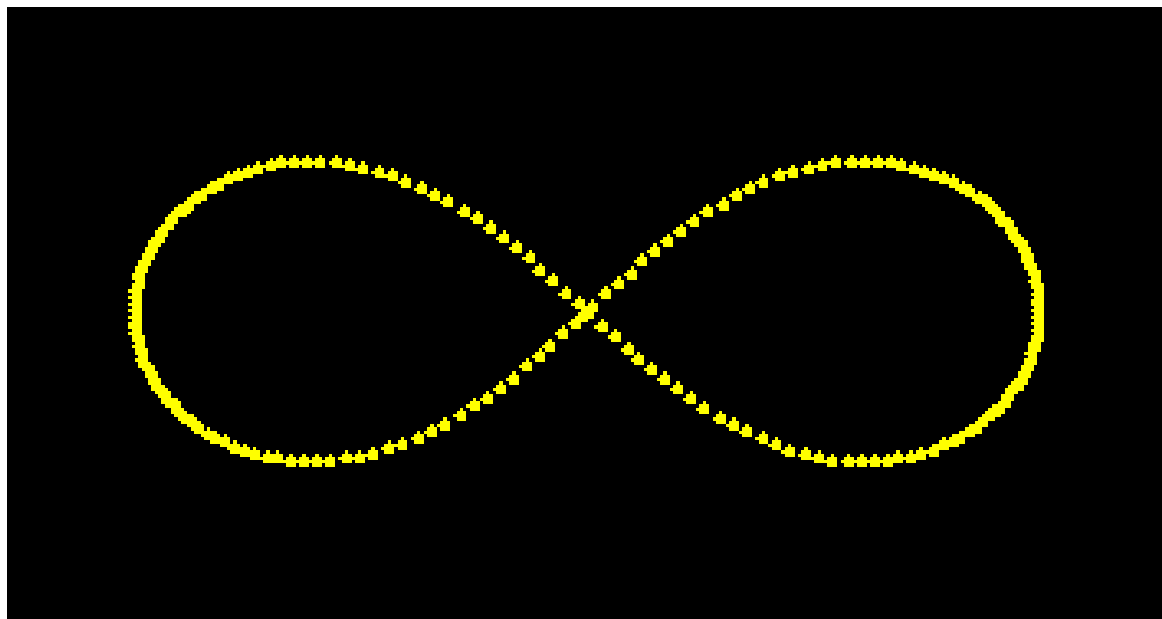
太陽・木星・トロヤ群の小惑星は実際にこのラグランジュ解を作っている。

（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？

面白いかもしれない例

**Game: Super Planet Crash**

# 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イラー級数展開の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こと

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

**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指数関数的に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。

求めたリアプノフ時間： 2千万年

これ自体は 8.5 億年の計算をして求めたもの。

# 太陽系はでは 45 億年間どうして存在を続けているのか？

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：

- 主な問題は冥王星
- 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いって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）

# 冥王星だけが問題か？

冥王星は2006年のIAU総会で「準惑星」に。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

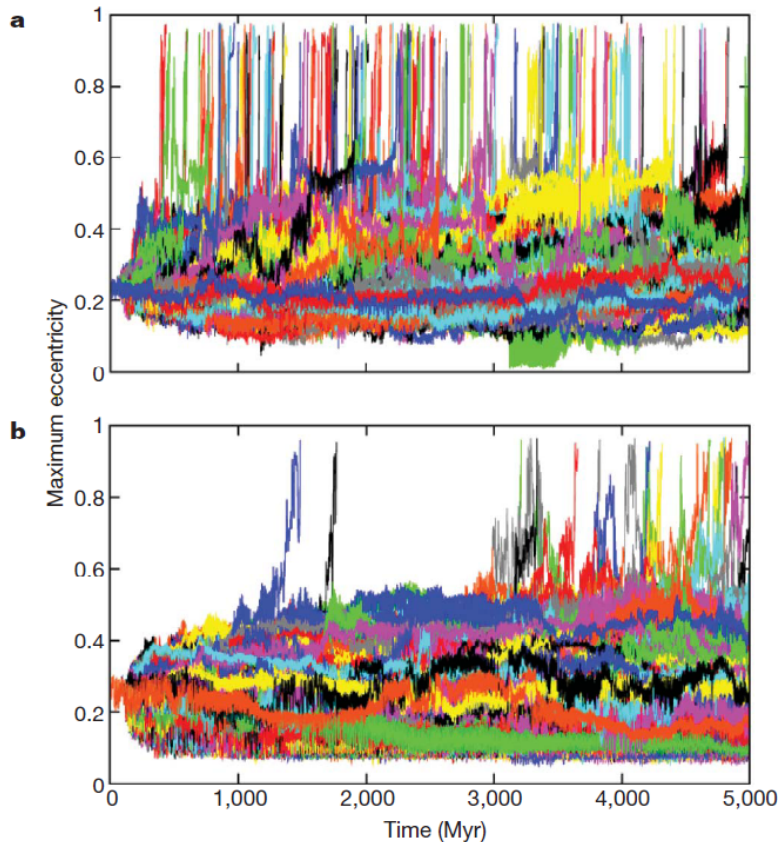
---

## 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) ずつ変えて、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、一般相対論的効果をいれると、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。

系外惑星では変なものが一杯見つかったので、寿命が短い惑星系もあるのかも、、というのが段々一般的に。

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。