

# シミュレーション天文学

牧野淳一郎

神戸大 理学研究科 惑星学専攻  
理研 計算科学研究機構

# 概要

## 1. シミュレーション天文学とは？

- シミュレーションとは？
- 「理論」と「シミュレーション」
- カオスと理論

## 2. 太陽系

## 3. 星団

# シミュレーション天文学とは

- シミュレーションとは？
- 「理論」と「シミュレーション」

# シミュレーションとは？

- 「シミュレート」 simulate: 模擬すること
- 最近の普通の使いかた: 「計算機内にモデルを作って、計算して振舞いを調べる」

# 「理論」と「シミュレーション」

イメージとしては:

- 理論: 紙と鉛筆で計算
- シミュレーション: 計算機をぶんまわす

# 「理論」と「シミュレーション」

イメージとしては:

- 理論: 紙と鉛筆で計算
- シミュレーション: 計算機をぶんまわす

(理論: 頭がよい・スマート)

(シミュレーション: 馬鹿でもできる)

そういうところが

そういうところが  
ないわけではない

# 例:太陽系の惑星の運動・太陽系の安定性

- 太陽系の惑星の運動: 基本的には太陽からの重力をうけて楕円軌道
- 精密な予測、長期予測: 惑星間の相互重力、太陽が動くことによる間接項等を考える必要あり。

# 古典力学の体系化としての「天体力学」

- ガウス・ラプラスといった人々が大きな貢献をした、「理論的科学」の典型のような存在
- 「ガウスの惑星方程式」
- 摂動展開の理論
- 「ポアソン級数」による軌道計算

19世紀終わりくらいまでの天体力学は、美しい理論(摂動展開)の世界であったとまあいえる。「近似の精度をあげていけば、どんどんさきまで予言できる」

(ラプラスの悪魔)

ところが

ところが  
20世紀になると

ところが  
20世紀になると  
世界にかけりが、、、

# ポアンカレ

一般の3体問題は「解析的に解けない」

# カオス

極めて単純な力学系でも、「予測不可能」なものがある

- これは3体問題が「解析的に解けない」と本質的に同じ意味なので、こっちの解説をすこし。
- 有名なのはローレンツのカオスですが、折角なので天文学に関係の深い話: エノン・ハイレス系

# Michel Hénon

1931-2013



- 球状星団の力学進化の研究で(私的には)有名。M1の時にフランス語の論文みてどうしようかと思った記憶が。
- 今日の私の話であとでまたでてくるかも。
- カオス・力学系の研究ではるかに有名(多分)
- 89年くらいにニース天文台にいった時、「Michel Hénon (だけ)は土曜もきてる。夜もいる」とかいう話を聞いたような。今はニースは随分活発な場所になったけど。

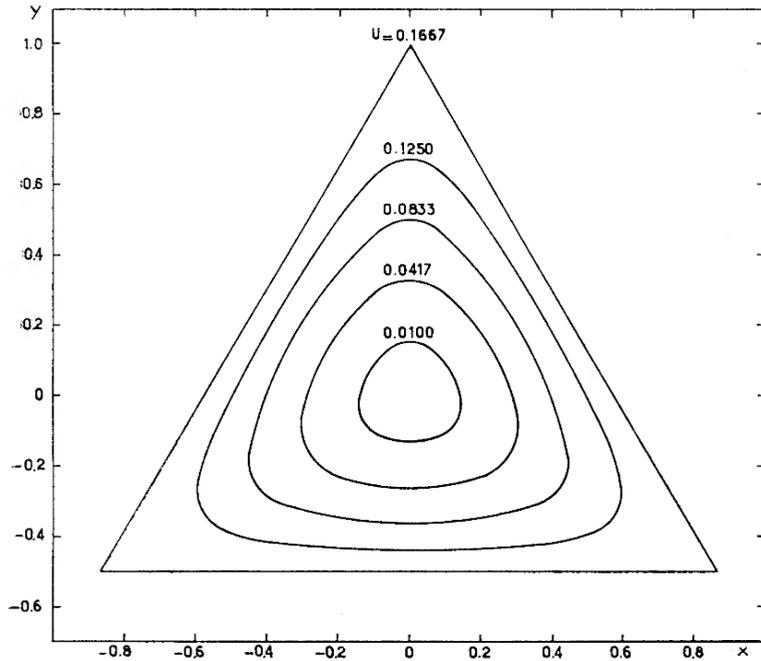
# Hénon-Heiles 系

1964 年の *Astronomical Journal* にのった論文なので天文学の論文とっていいはず。

$$H = \frac{1}{2}(p_1^2 + p_2^2) + \frac{1}{2}(q_1^2 + q_2^2) + q_1^2 q_2 - \frac{1}{3}q_2^3 \quad (1)$$

- 若干講義っぽいことをして時間を埋めると、、、これは「解析力学」でいうところの「ハミルトニアン」
- 基本的には、単に系の全エネルギーを表すもの。
- $p$ : 「一般化」運動量、 $q$ : 「一般化」座標
- この場合単に速度と位置と思って大丈夫。

# Hénon-Heiles 系のポテンシャル



$q$  に依存する部分:ポテンシャル ( $p$  に依存:運動エネルギー)

- 原点に近いところでは、3次の項は効かないので調和振動子的
- 離れると3次の項が見える。

# 単純なケース

後ろのほうのややこしそうなものを落とすと

$$H = \frac{1}{2}(p_1^2 + p_2^2) + \frac{1}{2}(q_1^2 + q_2^2) \quad (2)$$

運動方程式:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}, \quad (3)$$

(どっちかにマイナス符号ついたはず。どっちでしたっけ)

# 計算してみると

$$\frac{dp_i}{dt} = q_i \quad (4)$$

$$\frac{dq_i}{dt} = p_i \quad (5)$$

これは「単振動」の方程式なので、「加速度が距離に比例、符号は逆」でないといけない。上の式が間違い。

単純なケース。修正。

$$H = \frac{1}{2}(p_1^2 + p_2^2) + \frac{1}{2}(q_1^2 + q_2^2) \quad (6)$$

正しい運動方程式:

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}, \quad (7)$$

# 単純なケースの運動方程式

$$\frac{dp_i}{dt} = -q_i \quad (8)$$

$$\frac{dq_i}{dt} = p_i \quad (9)$$

単振動の方程式。これは解析的に解ける。

$q_i = a_i \sin t + b_i \cos t$  ( $a_i, b_i$  は任意の定数)

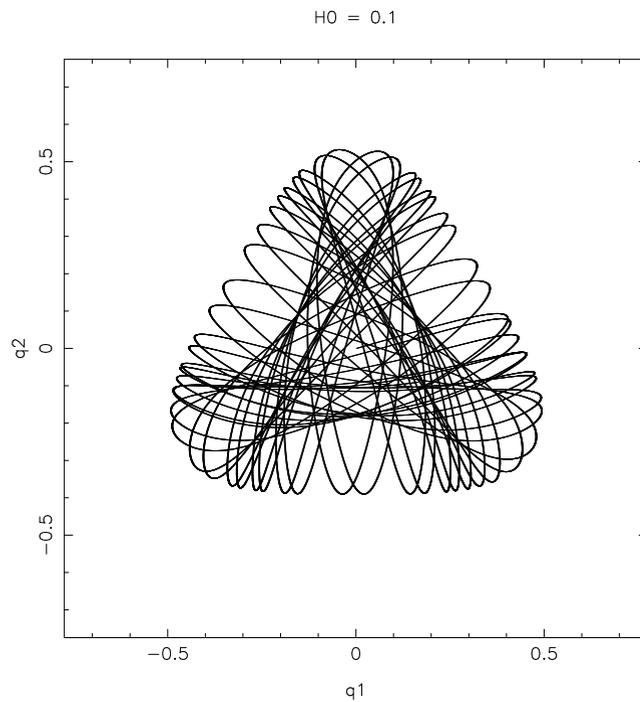
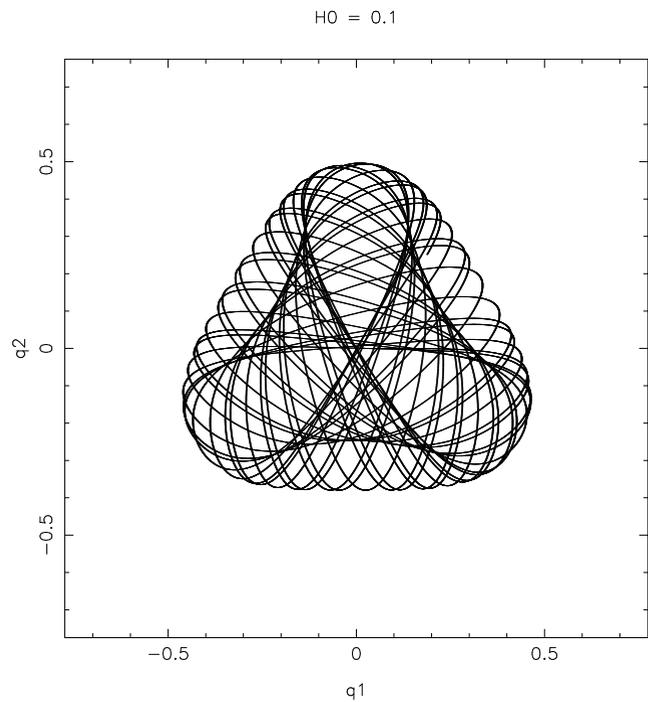
# Hénon-Heiles 系の運動方程式

$q_i$  の式は同じなので  $p_i$  の分だけ

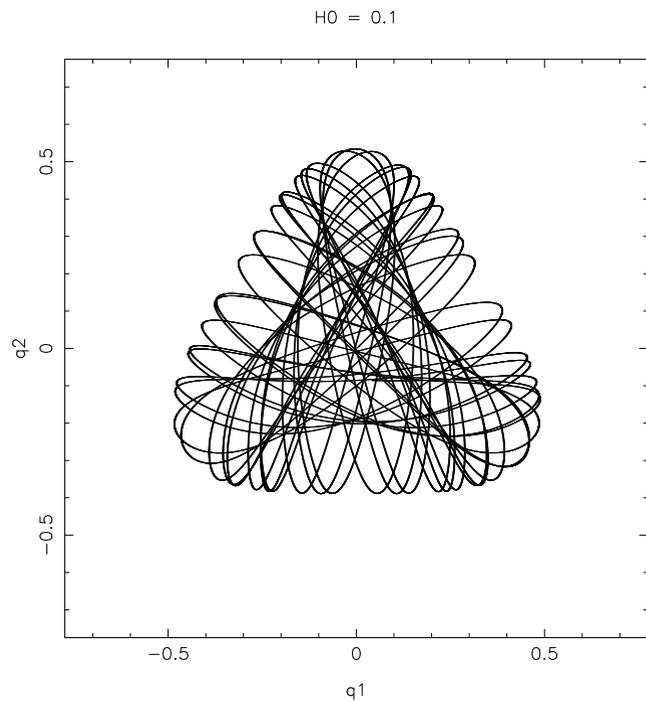
$$\frac{dp_1}{dt} = -q_1 - 2q_1q_2 \quad (10)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -q_2 - q_1^2 + q_2^2 \quad (11)$$

これの解は、、、



この解は、、、



これらみてもよくわかりませんが、、、

# 「ポアンカレ断面」

ポアンカレ断面とは、この場合のような自由度が2のハミルトン力学系で、一方の変数、例えば  $q_1$  が0になる時に  $q_2, p_2$  の値を書いたもの。

まず、 $H = 1/12$  の場合を示す。

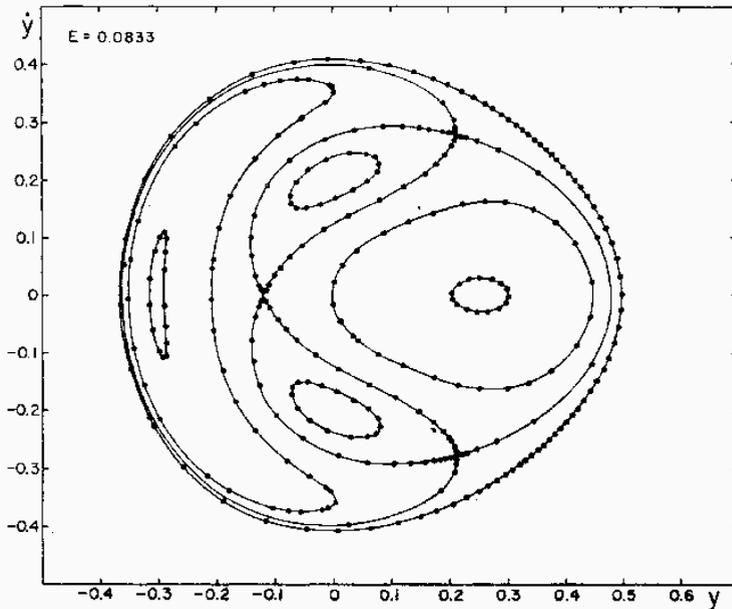


FIG. 4. Results for  $E=0.08333$ .

# 「ポアンカレ断面」

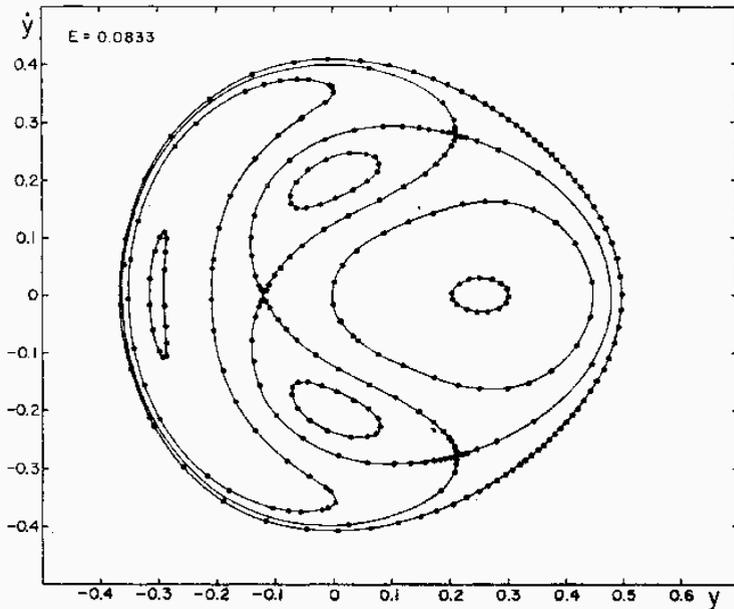


FIG. 4. Results for  $E=0.08333$ .

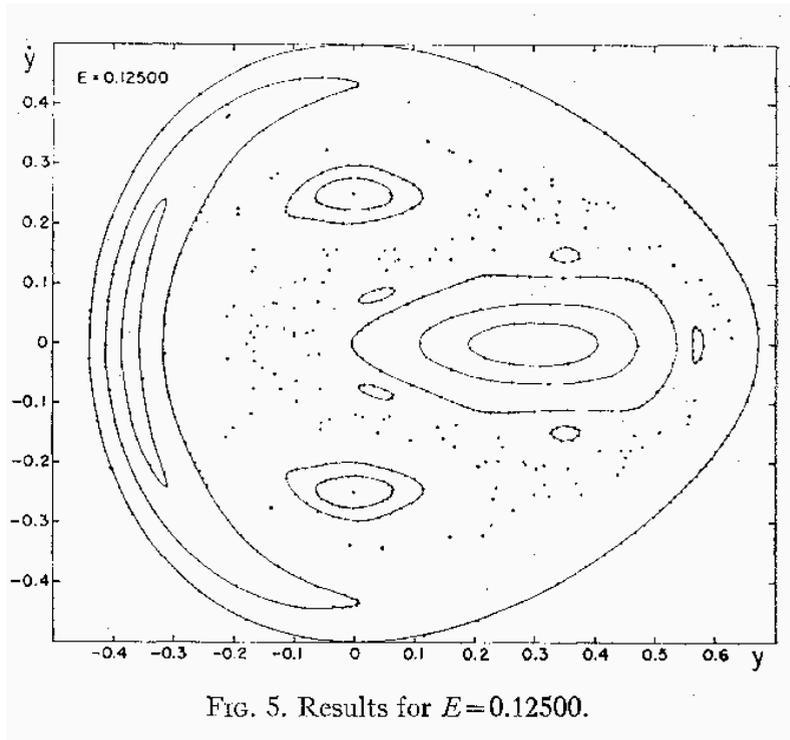
ここで、つながって線になっているのは基本的には一つの軌道であり、分かれた曲線は別の初期条件からの軌道に対応している。  
軌道が分かれている＝エネルギー以外に保存する量がある。  
(銀河力学でいう「第三積分」)

# 細かい話、、、

- ポアンカレ断面積での「一つの周期軌道」：「必ず」閉曲線になる
- つまり、ポアンカレ断面上で2つの軌道がまじわることは「ない」
- でも、まじわってるのがあるよね？

「周期軌道」ではないものが存在している

# $E = 1/8$ の場合



保存量を持つ、規則的な運動をする領域よりも、規則的ではない運動をする領域のほうが広がってしまっていることが分かる。少なくとも恒星系力学では、このような場合に 規則的な軌道を regular orbit, そうでないものを irregular orbit または chaotic orbit という。

# $E = -1/6$ の場合

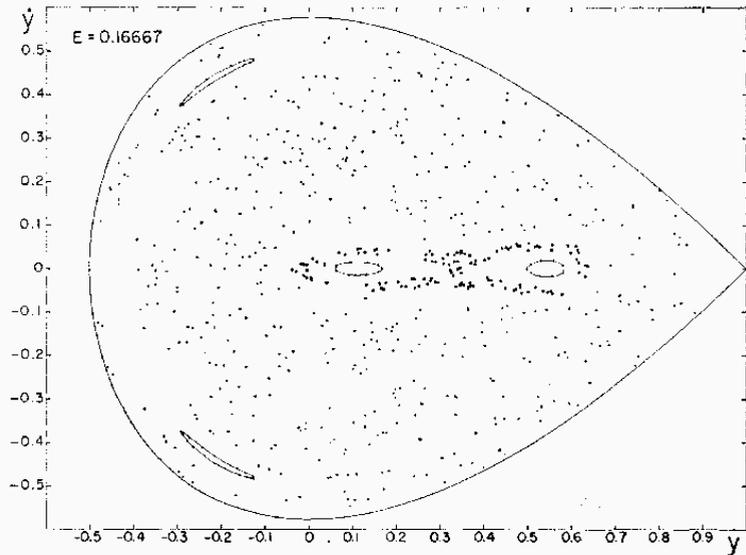


FIG. 6. Results for  $E=0.16667$ .

この場合にはほとんどの領域が規則的でない、つまり、第3積分をもたないような軌道になっていることが分かる。

これはカオス的な運動の典型的な例。

# カオスと理論とシミュレーション

時々誤解があるような気が。

- カオスになる＝予言できない「ではない」
- (1) 方程式と (2) 初期条件 (と (3) 十分な計算能力) があれば (原理的には) なんでも予言できる
- そもそも、カオスというものがある、割合簡単な式で書ける系がカオスになる、ということがわかったのが、計算機で解が求められるようになったから。

# なんとなく格好いい引用

フォン・ノイマンは他ならぬプリンストンでMANIACを開発した。私たちはたまたま何回か話をする機会があり、彼は膨大な手計算で何とか解ける強い非線形性を持つ問題のいくつかの例に徐々に関心を示すようになった。彼が望んでいたのは、あまりに複雑で解析的には解くことができず、数値計算の役割が、解析的に完全に理解できる事柄をただチェックするに留まらないような問題であった。

Martin Schwartzschild

惑星の話に戻ると

# 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。

# 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示した
- 冥王星、海王星などの新しい惑星が見つかった
- 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、

「なんだかよくわからない問題」

に戻ってしまった。

# ややこしい例

重力3体問題に安定な解があることもある。

(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。

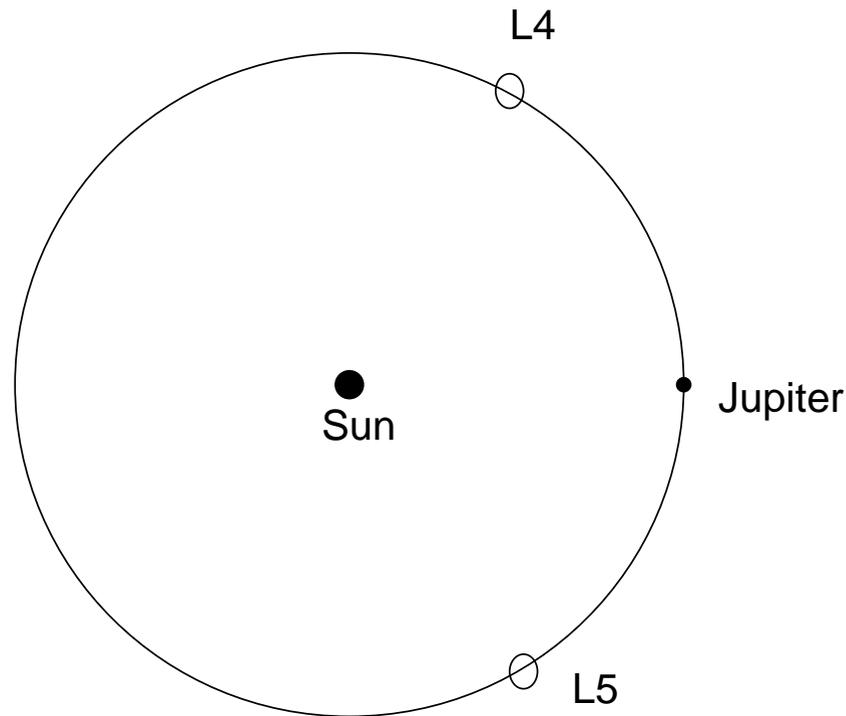
# 安定な解の例

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、、、）



# 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？

(シミュレーションとはなにか？でもある)

# 計算機による軌道計算

ある運動方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f(x) \quad (12)$$

と初期条件

$$x(0) = x_0, \frac{dx}{dt}_{t=0} = v(0) = v_0 \quad (13)$$

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：

- 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）

# 冥王星は惑星じゃなくなったし

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>

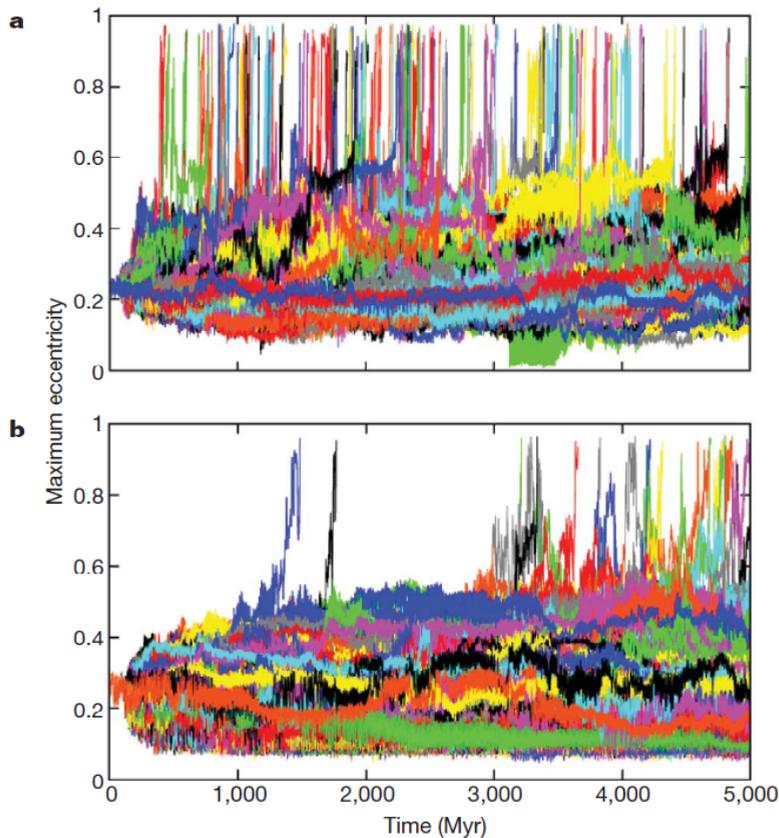
地球が水星や金星とぶつかる ???

# 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。

# というわけで、理論とシミュレーションの関係？

ここまでの話:

- 系を表す方程式が完全にわかっていても、「理論的」になにが起こるか分からない、ということは割合普通に起こる。
- その時に、「計算機シミュレーション」(方程式を数値積分すること)で、初期条件に対応する解を求めることはできる。
- 但し、「カオス」である場合(割合普通はそう)、初期条件のわずかな違いで将来の答が大きく変わるので、「何が本当か」がわかるといえるのかどうかは難しい問題。

# 惑星の運動だけが天文学なわけではなく

20世紀後半以降の天体物理: 色々なことがわかるようになった

1980年代くらいまで

- 恒星の構造・進化
- 星団・銀河の構造・進化

そこから先

- 宇宙の大規模構造
- 惑星形成
- 超新星爆発
- ブラックホール・中性子星の合体
- その他様々な天体現象

# 非常に雑にいうと

- 1980年代くらいまでの計算機的能力だと、空間1次元なら色々計算できる。3次元だと分解能が非常に低い計算のみ(粒子数だと数百とか)
- 現在は、「計算機的能力としては」割合なんでも3次元計算できるようになってきている
- 但し、放射伝達がはいると波長も含めて7次元問題になり、色々近似をしないとできない

# 例

(単に私がよく知っているので)

星団の進化 = 重力多体問題

「多数の恒星が集まってできている星団ではどんなことが起こるのか」

# 「もっとも単純な」 ケース

- それぞれの星は「質点」(大きさ 0、質量は有限)
- 星は進化したり超新星爆発したりしない
- 親銀河の重力ポテンシャルとない。孤立して存在
- ガスとかダークマターもない
- 全ての星の質量は同じ
- 初期に連星系とかない

# 逆にいうと

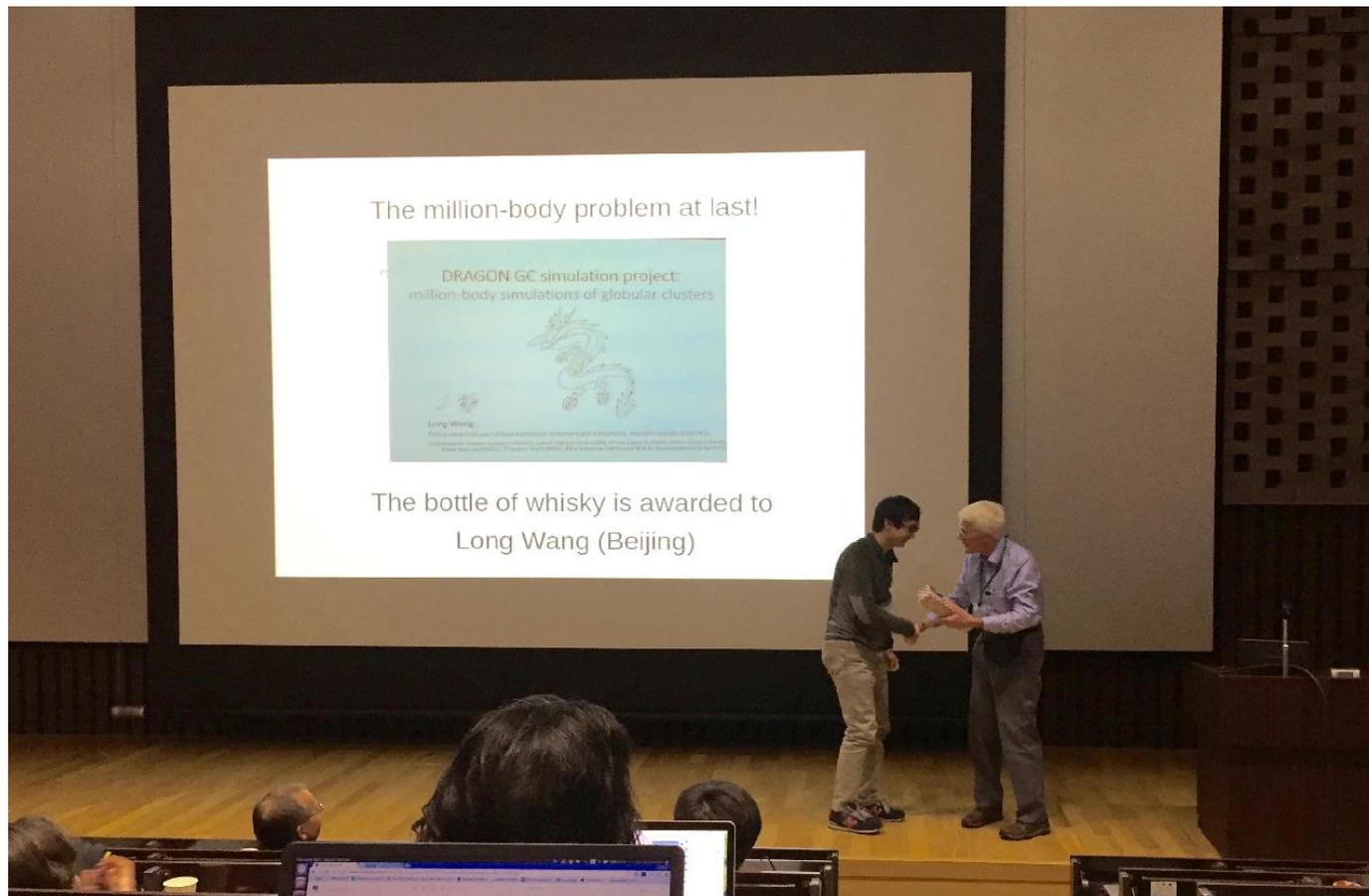
実際の星団では

- それぞれの星は大きさを持ち、物理的な衝突や潮汐相互作用を起こす
- 星は進化し、超新星爆発して中性子星になったりブラックホールになったりする
- 親銀河の重力ポテンシャルの中で複雑な運動をしている
- 初期にはガスがあり、恒星から放出されるガスもある
- 星の質量はそれぞれ違う
- おそらく星団ができ、星ができた時に、多くの星は連星系として生まれる

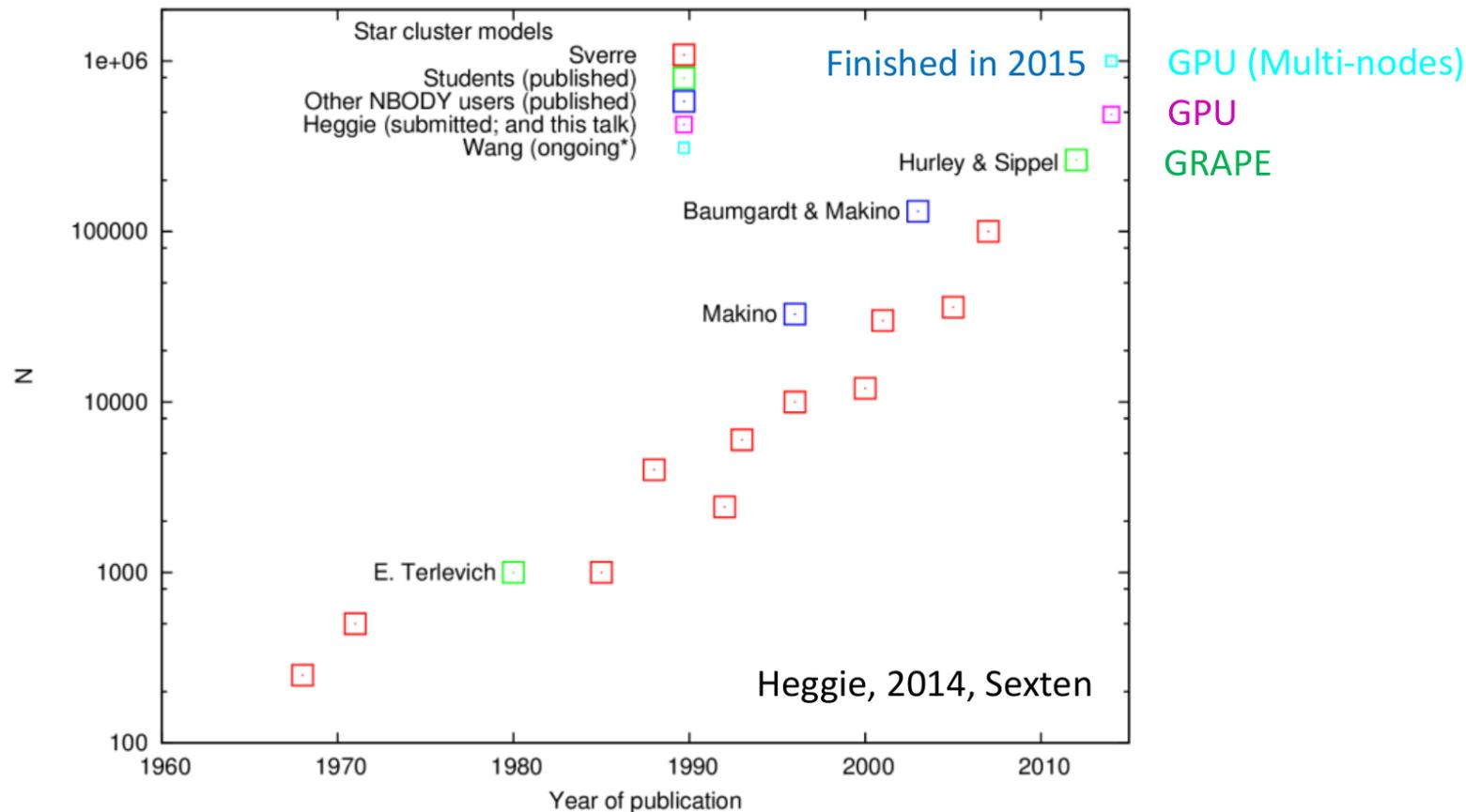
# シミュレーションの現状

- 多体シミュレーションでは100万体が(すごく頑張ると)できるようになった
- 小さい球状星団なら完全に star-by-star。大きいのはまだ。

# Whisky Bottle for Million Bodies awarded to Long Wang 2015



# 過去50年間の進歩



# 疑問

- 「実際の星の数の」 シミュレーションすれば全部なんでもわかるのか
- そんなことを本当にしないといけないのか
- そもそももうちょっと賢い方法はないのか

# 「実際の星の数の」シミュレーションすれば全部なんでもわかるのか

細かい話は色々ある

- 初期の星の質量の分布
- 初期の星団のサイズ・空間構造
- 特に大質量の星の進化モデル
- 連星系の進化モデル

「細かい」からといって重要でないとは限らない。

# 現在の星団シミュレーションの目的は？

- もちろん、第一には、「球状星団はどうやってできてなぜそこにあるか
- しかし、それだけではない。球状星団の中で生まれる (のかもしれない) 色々なものの理解にも必要
  - X線連星 (特に低質量 X線連星)
  - ミリ秒パルサー
  - 中性子星連星？
  - ブラックホール連星??
- 他のところの不定性はあるにしても、せめて星団の力学シミュレーションは正しくないといけない。
- 他のところの不定性の影響を見積もることができる

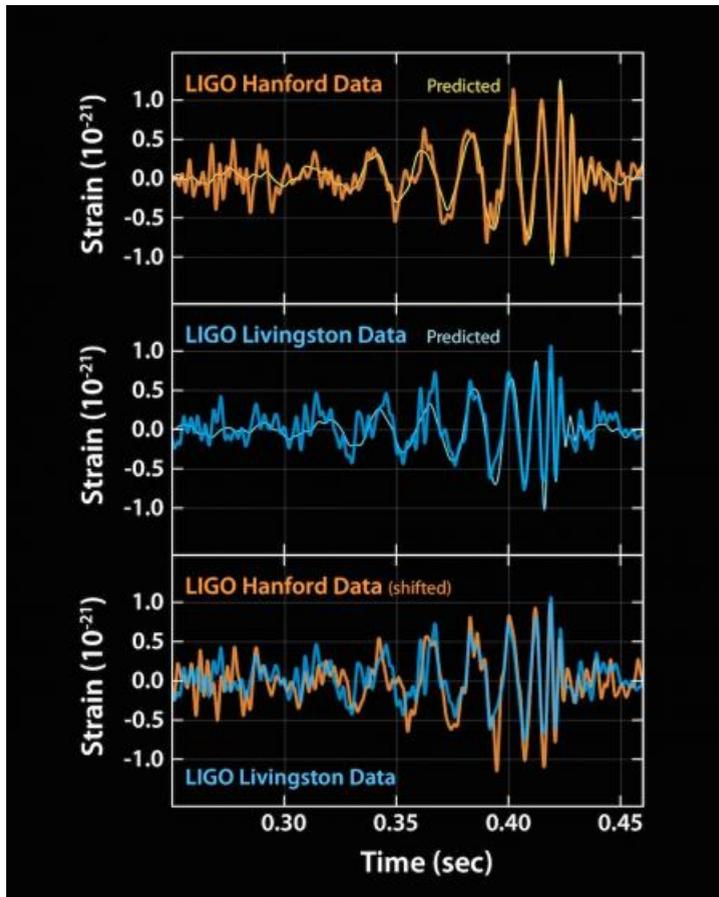
# 例:ブラックホール連星

以下去年の2月にした話

# 重力波初観測

- 2016/2/11 10:30 (東海岸時間) LIGO グループ発表  
“We have detected gravitational waves. We did it!”
- どこにあるどういう天体だったか
  - 13億光年先
  - 太陽質量の 36 倍のブラックホールと 29 倍のブラックホールが合体、62 倍のブラックホールになった (3 太陽質量が重力波のエネルギーになった)

# 検出された波形



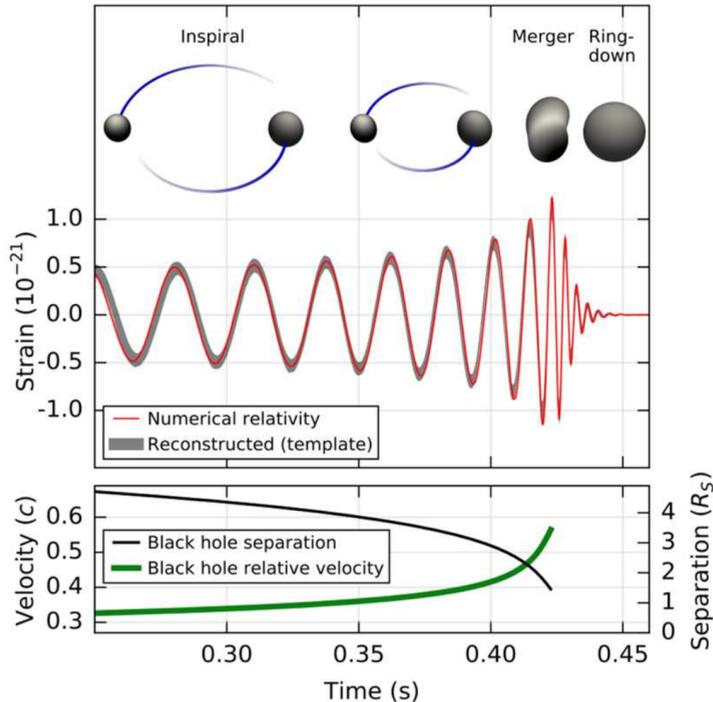
横軸: 時間

縦軸: 歪み (「空間の歪み」)

最大振幅:  $10^{-21}$

3000km 離れた2つの測定器  
(基線 4km のマイケルソン・  
モーレー干渉計) で同じ波形  
観測

# LIGO が捉えたもの



**Inspiral:** 合体直前、重力波放出によって軌道が近付き、周期が短く、振幅が大きくなる

**合体の瞬間:** 大振幅、高周波数の波

**リングダウン:** 1個のブラックホールになってからの時空の振動

シミュレーションで予測されていたものと非常に良く一致:  
逆に合計の質量・質量比、距離を決められる

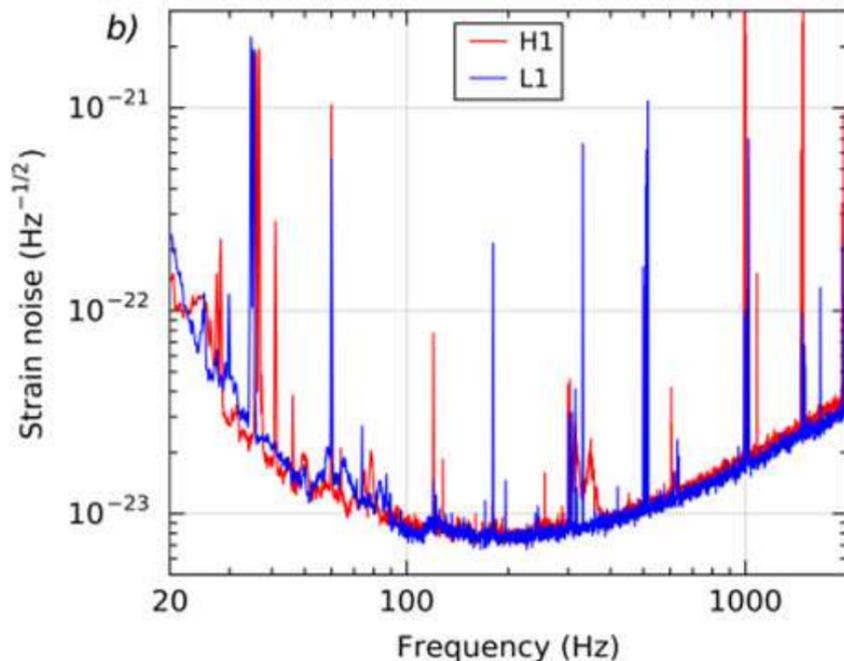
# 重力波検出の意義と今後の研究の方向

- 本当に重力波が世界で初めて検出された
  - 一般相対性理論が本当にそこまで正しいことの完全な証明 (線型の範囲で正しい代替理論はすべて否定されたといっている)
  - より精密な重力理論、ブラックホールの性質の研究への道 (スピン、電荷の影響他)
- 36 太陽質量と 29 太陽質量のブラックホール同士の合体
  - 全く予想外
  - 見つかると思っていた/見つけようとしていたもの:  
連星中性子星の合体

# 何故予想外だったか？

- 中性子星は多数見つかっている。超新星爆発の後に普通にできる (かに星雲パルサー: 1054年の超新星爆発でできた)。球状星団1つだけでその中に数十から数百個ある。
- 中性子星連星もいくつかは見つかっている。(連星パルサー)
- ブラックホールは10太陽質量を確実に超えるものは見つかっていなかった。ブラックホール連星はもちろん見つかっていない。
- なお、100万太陽質量を超える大きなブラックホールは多数見つかっている。これらは銀河中心にある。我々の太陽系の中心:400万太陽質量のブラックホール。

とはいえ理論的には、、、



LIGO の感度: 100Hz あたり  
で最も高い  
今回のイベントはちょうどそ  
の辺  
イベントの重力波強度: 距離  
が同じなら質量に比例。

宇宙の体積あたりのイベントレートが同じなら、(感度が落ちない範囲で) 重いものは質量の3乗に比例して検出レート上がる。

ブラックホール合体が多いわけではない。中性子星合体の 1/1000 より多い、という程度。

# これから期待されること

- 非常に沢山のイベントが検出される。
- 観測される質量の上限: 100-200 太陽質量。そこから上は LIGO は感度がない。
- 中性子星合体もそこそこの数検出されるはず

つまり: (200 太陽質量以下に限ると) 宇宙のどこでいつどういう質量のブラックホールや中性子星が合体したか、が大体わかる。

言い換えると:

メカニズムも距離も謎なガンマ線バーストや、Kepler 衛星まで数が少なかった系外惑星に比べると、突然膨大な観測情報がやってくる。

# 今後の研究課題 (についての個人的見解)

- 観測: 最重要なのは、より長波長で感度があるミッションの加速。計画は LISA とかあるけど20年先に必要な感度より5桁上を実現することになってる。
- 理論、シミュレーション: 膨大な数観測されるであろう数十太陽質量ブラックホール合体の「理解」

# 理論的理解の目標

- それらのブラックホールがどのようにして形成され、連星になり、合体したか
- それらのブラックホールはより大きなブラックホール形成にどう寄与しているか、あるいはしていないか

を理解すること。

# もうちょっと具体的には

- 形成チャネルの理論的検討
- シミュレーションによる各形成チャネルから期待できるイベントレート、質量分布、イベントレートの年齢依存(赤方変移依存)の推定
- 形成チャネルの検証

# 形成チャネルの例

- 大質量星が始めから連星で生まれ、連星を壊すことなくそれぞれがブラックホールになり、宇宙年齢以内に合体
- 若い、星の数密度が高い星団の中で、3体相互作用や2体の非弾性相互作用でブラックホール連星やブラックホールと大質量星の連星が形成、ブラックホール連星に進化。そのまま重力波で合体
- 球状星団の形成直後に同様なメカニズムでブラックホール連星形成、星団から打ち出されたあと、重力波で次第に軌道が縮んで合体
- その他エキゾチックなメカニズムも提案されている

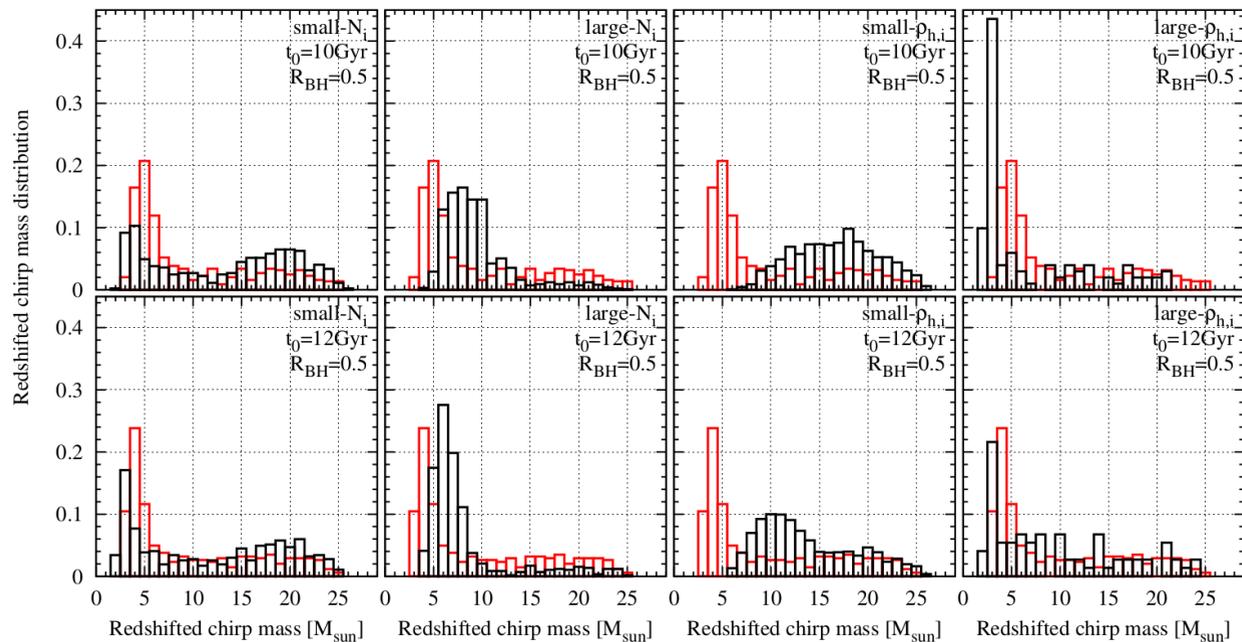
# シミュレーション計算の例

谷川 2013

Dynamical evolution of stellar-mass black holes in dense stellar clusters: estimate for merger rate of binary black holes originating from globular clusters

- 球状星団の中での恒星進化、ブラックホール形成、ブラックホールと恒星の3体相互作用、連星形成を  $N$  体シミュレーションで調べた

# 結果の例



モデルの仮定により色々な分布が、、、

もうちょっとモデルを精密にして色々調べる必要あり。

他にも理論としてすべきことは  
沢山ある、、、

特に重要なのは

- 大質量星の形成
- 大質量星の進化
- ブラックホール形成につながるような (failed) supernova のモデル計算

# 重力波関係まとめ

- 重力波が検出された。
- かなり予想外の、ほぼ 30 太陽質量のブラックホール 2 つの合体だった
- 理論・シミュレーション研究としては、何故そういうものが起こるか、の検証が急務
- このあとちゃんと中性子同士の合体も観測された。こっちは木内さんから詳しい話があるはず。

# 実際の星の数のシミュレーションが本当に必要か？

もちろん、時と場合による

- 「原理的になにが起こるか調べる」であれば、いくつかの粒子数でやってみて、、、というのがむしろ普通
- 計算機の能力的にまだ無理、という時にも、少ない粒子数でいくつかやって、粒子数依存性を調べて外挿、というのができる「こともある」
- 系の性質によっては実際の粒子数は全く不要 (不可能だからでもあるが) というケースもある。

# 不要(不可能)な例 — ダークマターハロー

- ダークマターは現在のところ「未知の素粒子」。質量とか不明。
- とはいえ、 $10^{-20}g$  とかそういうオーダー。
- 銀河一つは  $10^{12}$  太陽質量として  $10^{45}g$  なので、粒子数としては  $10^{65}$  とか。どんなに計算機が速くなっても、、、
- 現在できるのは最大で  $10^{12}$  粒子くらい。

# 「粒子数無限大の極限」

- 系は連続的な「分布関数」で表現できる。
- 粒子同士の(重力的な)衝突は個別のものは無視できる。

逆にいうと：有限の粒子数では、粒子同士の重力的な衝突による粒子の軌道変化が無視できない。(2体緩和)

2体緩和のタイムスケール：球状星団では数億年程度。ダークマターハローでは、、、ものすごく長い。

# 粒子数有限の系

- 個人的にはここで2体緩和の理論から連星形成までの話をしたいが多分時間足りないので省略。時間あったら講義ノートからちょっとします。

# そもそももうちょっと賢い方法はないのか

100万粒子の軌道を100億年計算するような(なんとなく賢くなさげな)ことをしなくても、もうちょっと格好よくさっとできないか？

球状星団の場合: 2つの(といっても本質的には同じ)アプローチ

- フォッカー・プランク方程式
- モンテカルロ法

# フォッカー・プランク方程式

基本的な考え方: さっきの「分布関数」に、「有限粒子数の効果」を「統計的に正しく」いれて偏微分方程式として表し、それを数値計算

- 星団を球対称とし、速度分布を等方的とする (分布関数がエネルギーだけに依存して角運動量に依存しないとする) やり方で、1979年に H. Cohn が初めて計算に成功
- 球対称のままだが角運動分布もいれる「2次元フォッカープランク」は日本の高橋広治が1995年に成功
- 軸対称は色々論文あるがみんな失敗

色々制限は多い、、、銀河ポテンシャルとか、連星形成とかを上手く扱うのは難しい。

# モンテカルロ法

基本的な考え方: フォッカー-プランク方程式を、もう一度粒子に戻して粒子の軌道要素を「ランダム」に変える。

2つの流派(?)があった?

- **Hénon Monte Carlo:** Hénon が1960年頃に開発。計算アルゴリズムは単純。
- **Princeton Monte Carlo:** Spitzer らが1970年代に開発。かなり複雑、、

どちらも「正しくやれば正しい」はずなんだけど、、、

最近もいくつかの研究グループが(概ね独立に開発したクローズドなコードで) 計算している。論文みる限り怪しいものもある。

最後に：シミュレーションの結果は「正しい」か

# 最後に：シミュレーションの結果は「正しい」か

- 多くの論文の多くの結果はおそらく間違っている

# 最後に：シミュレーションの結果は「正しい」か

- 多くの論文の多くの結果はおそらく間違っている
- 「今までできなかったこと」を頑張ってやるので、どうしても結果が信頼できるかどうか微妙なところまで主張したりする

# 最後に：シミュレーションの結果は「正しい」か

- 多くの論文の多くの結果はおそらく間違っている
- 「今までできなかったこと」を頑張ってやるので、どうしても結果が信頼できるかどうか微妙なところまで主張したりする
- そもそも数値計算法に無理があったりすることも結構ある

# 最後に：シミュレーションの結果は「正しい」か

- 多くの論文の多くの結果はおそらく間違っている
- 「今までできなかったこと」を頑張ってやるので、どうしても結果が信頼できるかどうか微妙なところまで主張したりする
- そもそも数値計算法に無理があったりすることも結構ある
- 検証の努力は常に必要