

N体シミュレーションで何がわかるか？ (と海外でポスドク生活2年目)

鹿児島大学/Leiden Univ.
日本学術振興会特別研究員
藤井 通子

今日の目的

- ▶ N体シミュレーションがどういうもので、どんなことができるのかを知ってほしい
 - 学会等で、N体シミュレーションを用いた研究の発表がよりわかるようになる!?
 - 興味があれば、ぜひ挑戦してほしい
 - 今、熱いテーマもあるよ
- ▶ ついでに、自分の研究紹介
 - 今日紹介する研究は大学院時代にやっていたこと
- ▶ 海外で研究してみたい人を応援

構成

- ▶ N体シミュレーションとは
 - N体シミュレーションがわかるようになる用語解説
- ▶ N体シミュレーションの発展
 - 渦巻銀河の渦状腕が維持されるメカニズム
- ▶ 今後の方向性は？
 - 銀河中心部での星団の進化
- ▶ 海外でポスドク生活
 - 海外でポスドクをするには？
 - メリットとデメリット

N体シミュレーションとは

▶ 重力多体系の時間進化を計算

- 星やダークマターなどを粒子で表現
- 粒子の軌道を時間積分

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i}^N G m_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3}$$

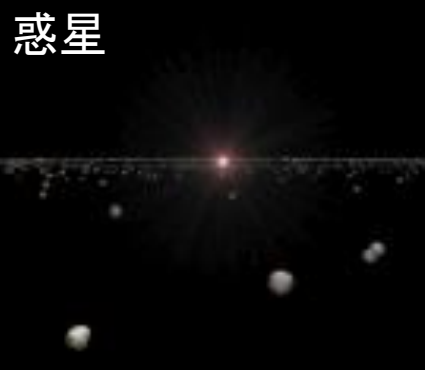
▶ 様々な対象

- 惑星(形成)、星団、銀河、宇宙の大規模構造 など

▶ (今日はガスの話はしない)



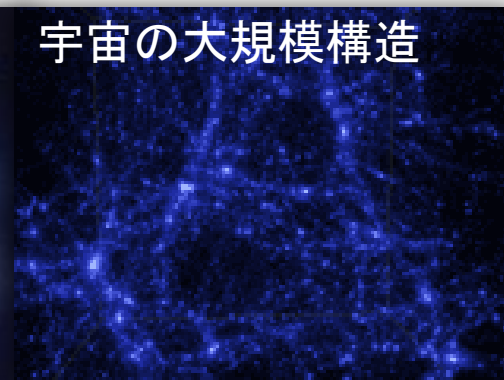
土星のリング



惑星



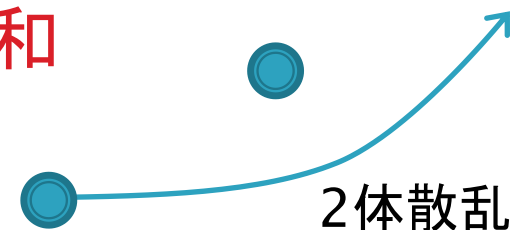
銀河



宇宙の大規模構造

重力多体系の時間進化

- ▶ 孤立系の場合
- ▶ 2体散乱の積み重ねによって、系は進化する
(粒子は元の軌道を忘れる): **2体緩和**



▶ 緩和時間

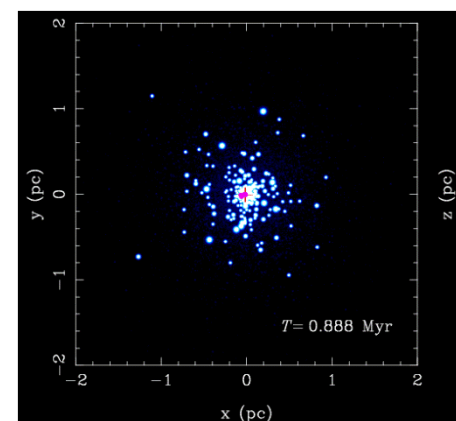
- 系が2体緩和によって進化するタイムスケール
 - $t_{\text{rlx}} \simeq 0.1 N / \ln N t_{\text{cross}}$; N は粒子数
 - 粒子数が少ない・コンパクトな系ほど緩和時間が短い
= 進化が速い(分布が変わる)
- ▶ もちろん、銀河の衝突など緩和と関係なく派手に進化する系もある

衝突系と無衝突系

- ▶ 緩和時間によって重力多体系の性質は大きく2つに分けられる

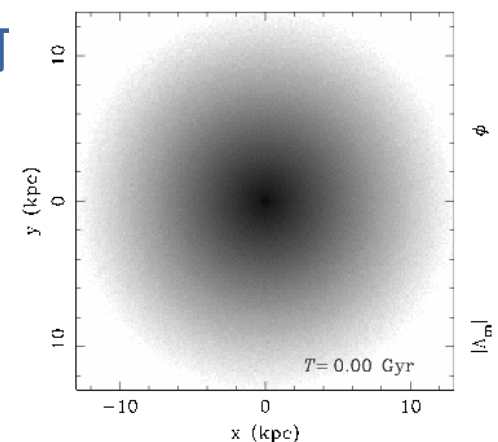
星団

- ▶ **衝突系**: 緩和時間 < 宇宙年齢
 - 緩和による進化が重要
 - 星団、惑星関係、大質量ブラックホール周り



- ▶ **無衝突系**: 緩和時間 > 宇宙年齢
 - 緩和によってほとんど進化しない
 - 銀河、宇宙の大規模構造

銀河



- ▶ それぞれ、適する計算方法が異なる

それぞれに適する計算法

▶ 衝突系

- 粒子数: 比較的少ない
- 系の中で、密度コントラストが大きい=タイムスケールの幅が広い
- 高い時間・空間分解能が必要

▶ 無衝突系

- 粒子数: 多い(N が大きいと緩和時間が長い)
- 系の中の密度差は比較的小さい
- 緩和時間が十分に長いことが保たれれば、粒子をある程度まとめて一つとして取り扱う (super particle) が有効

N体シミュレーションの主な方法

高精度な方法 衝突系

▶ ダイレクト法

- 2体間の重力を全てまじめに計算: $O(N^2)$
- 精度は良いが、計算コストは大きい

低精度だが高速な方法 無衝突系

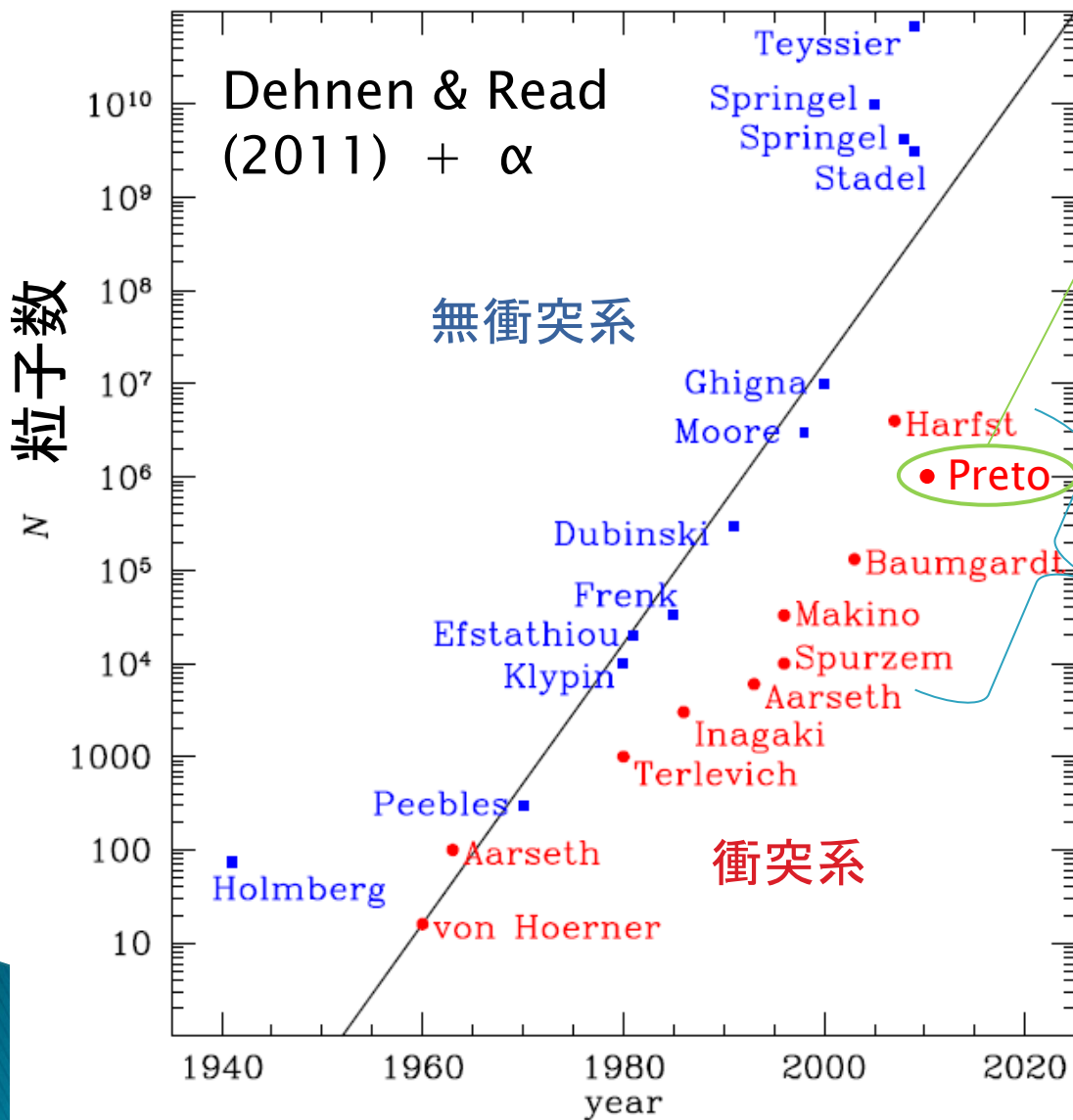
▶ ツリー法 (Barnes-Hut 1986)

- 遠くの粒子はまとめて一つの粒子として扱う: $O(N \log N)$

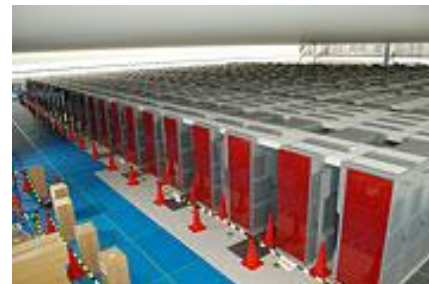
▶ メッシュ法とその応用

- 粒子をメッシュに割り当てる: 計算コストはメッシュ数に依存
- ツリー法などと組み合わせて改善:
P³M (Efsthathiou et al. 1985), TreePM (Bode et al. 2003)

粒子数の進化と計算機



CPU クラスタ



京

GPU(Graphic Processing Unit)

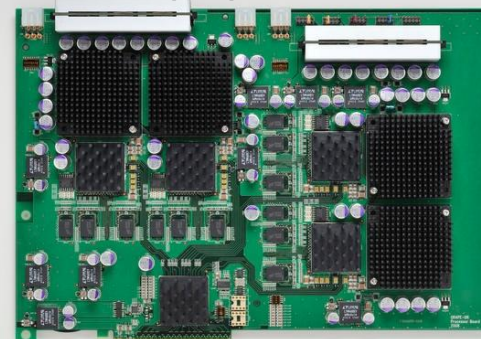


NVIDIA
GeForce8800

GRAPE(GRAVity piPE)

重力多体問題専用計算機
日本で開発

GRAPE-1 杉本ら(1989)



GRAPE
-DR

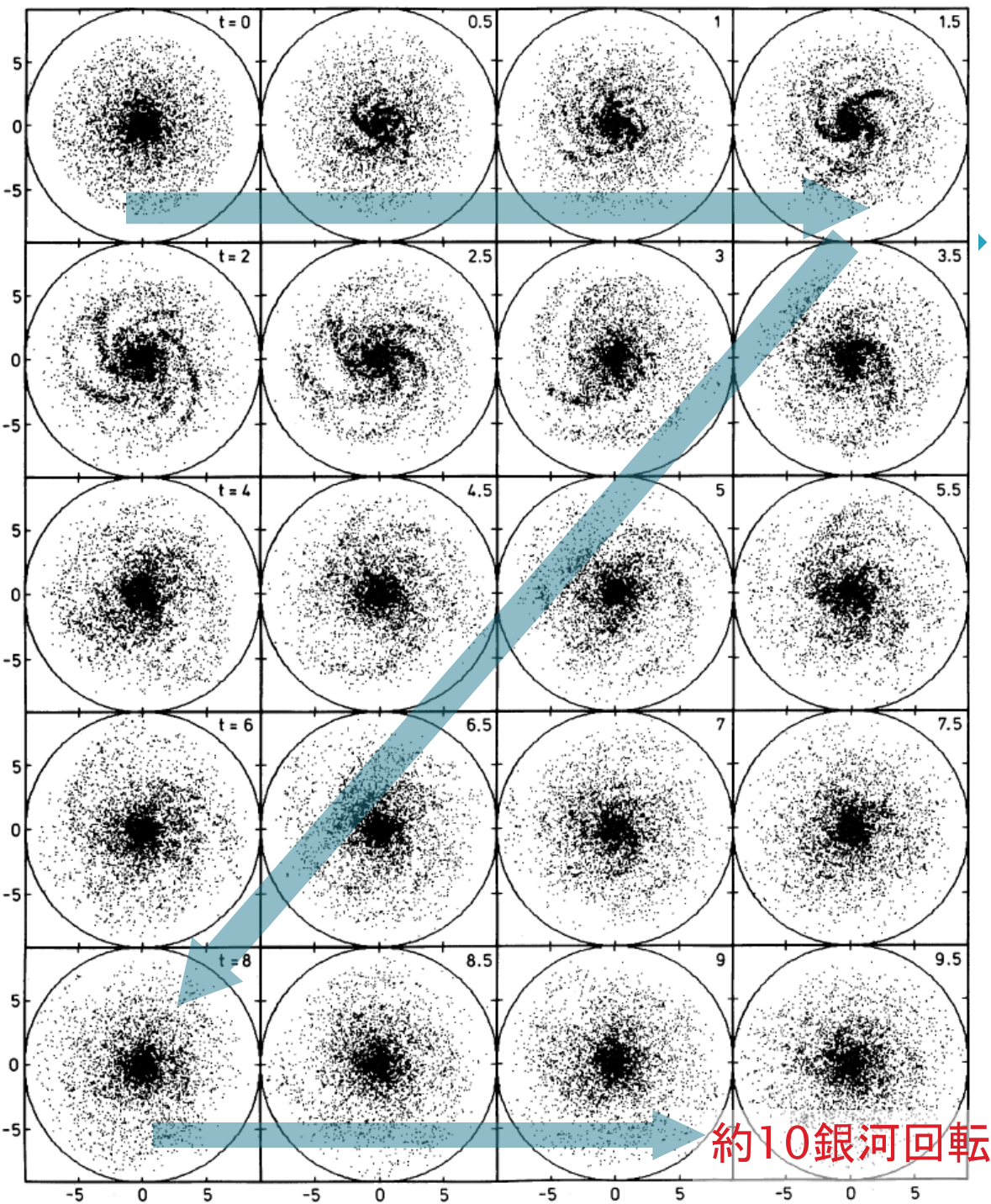
渦巻銀河の渦状腕を長時間 維持するメカニズム

共同研究者：馬場淳一、斎藤貴之、牧野淳一郎(東工大)
小久保英一郎(国立天文台)
和田桂一(鹿児島大学)

渦巻銀河の腕の仕組み

- ▶ 不安定な円盤では、自己重力によって腕が発達する
 - 冷たい＝円盤内の星の速度分散が小さい＝不安定
 - 実際は、完全に不安定でなくても腕はできる。現実中存在する銀河はこの範囲。
- ▶ 腕によって、円盤は温められる
(星の速度分散が上昇し、安定性が増す)
- ▶ 腕が発達しにくくなる

- ▶ N体シミュレーションで再現できる
 - 20年以上前、すでにN体シミュレーションが行われている
 - Sellwood & Carlberg (1984)



腕が消える!

▶ Sellwood & Carlberg (1984)

- 粒子数約1万體
- 2次元
- N体シミュレーションをやってみた
 - 腕がすぐ消える (円盤が加熱される)
- 実際の銀河の腕は消えていないので、どうにかして腕を維持しないといけない
 - ガスと星形成を入れる = 冷却

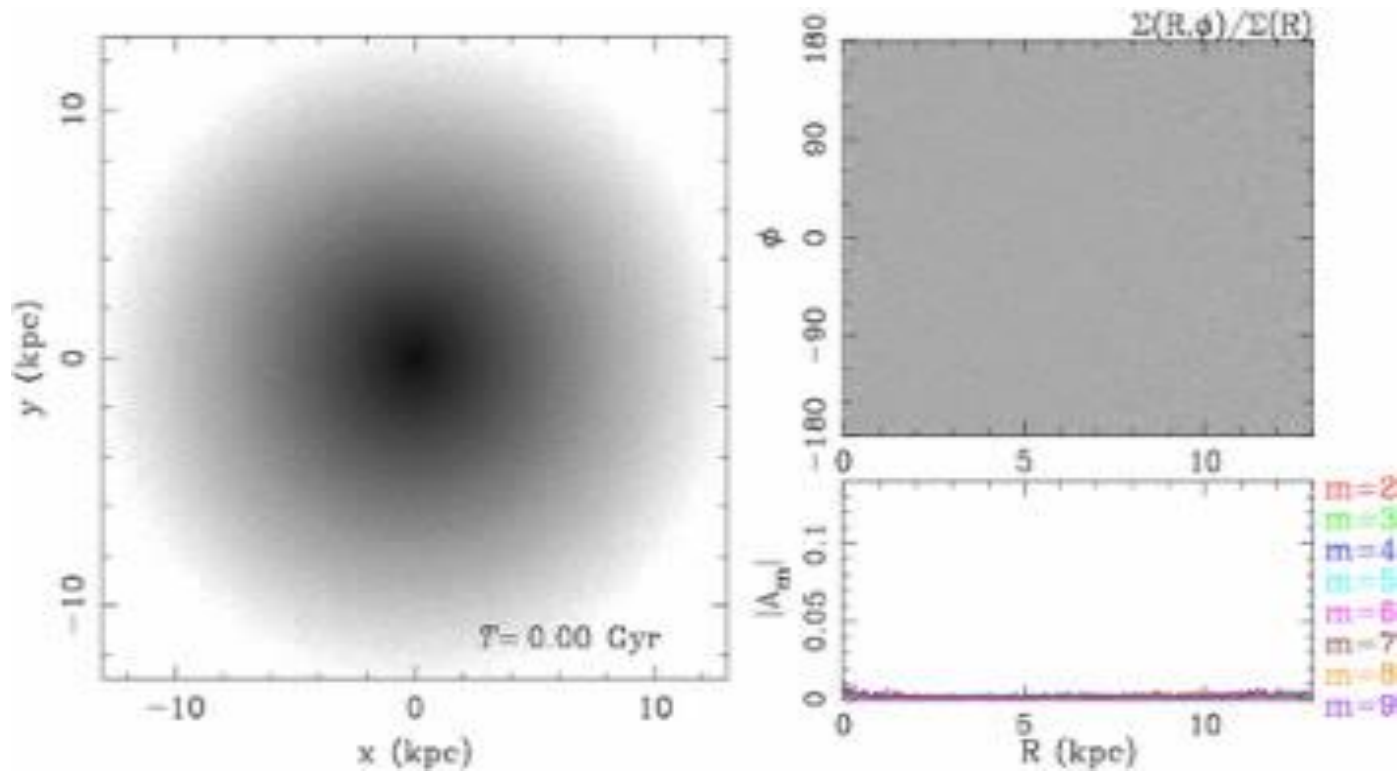
約10銀河回転

N体シミュレーション

- ▶ ハロー(外場) + ディスク(N体)で計算
 - ガスや星形成は入れない(pure N-body)
- ▶ ディスク
 - Exponential disk
 - $R_d = 3.4 \text{ kpc}$
 - $Z_d = 0.34 \text{ kpc}$
 - $M_d = 3 \times 10^{10} M_\odot$
 - $\epsilon = 30 \text{ pc}$
 - $N = 30\text{M}, 9\text{M}, 3\text{M}, 1\text{M}, 300\text{k}$
 - $Q_0 = 1.1, \underline{1.2}, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7$
- ▶ ハロー
 - NFW, $c = 10$
 - $M_h = 6 \times 10^{11} M_\odot$
 - $R_h = 80 \text{ kpc} (= r_{200})$

計算機: GRAPE7@MUV
コード: ツリーコード

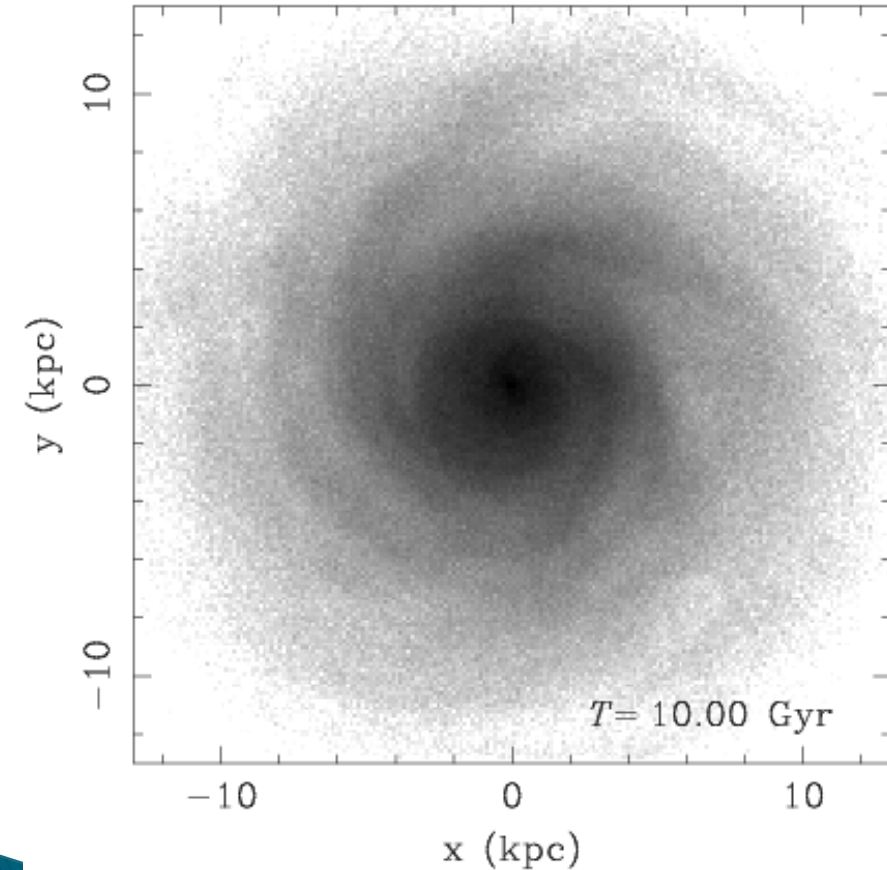
アニメーション



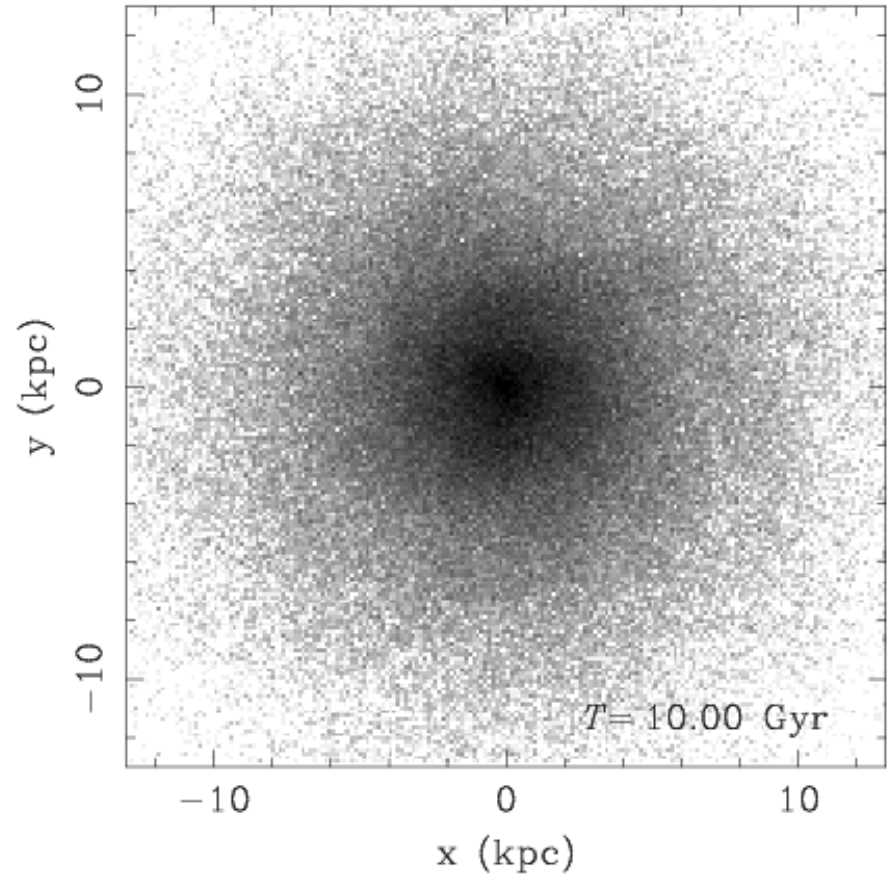
- ▶ 腕は繋がったり壊れたりしながら宇宙年齢維持される
 - 定常的ではない
 - 従来の密度波理論による理解の見直しが必要

粒子数が少ない場合との比較

$N=3M$ (300万)

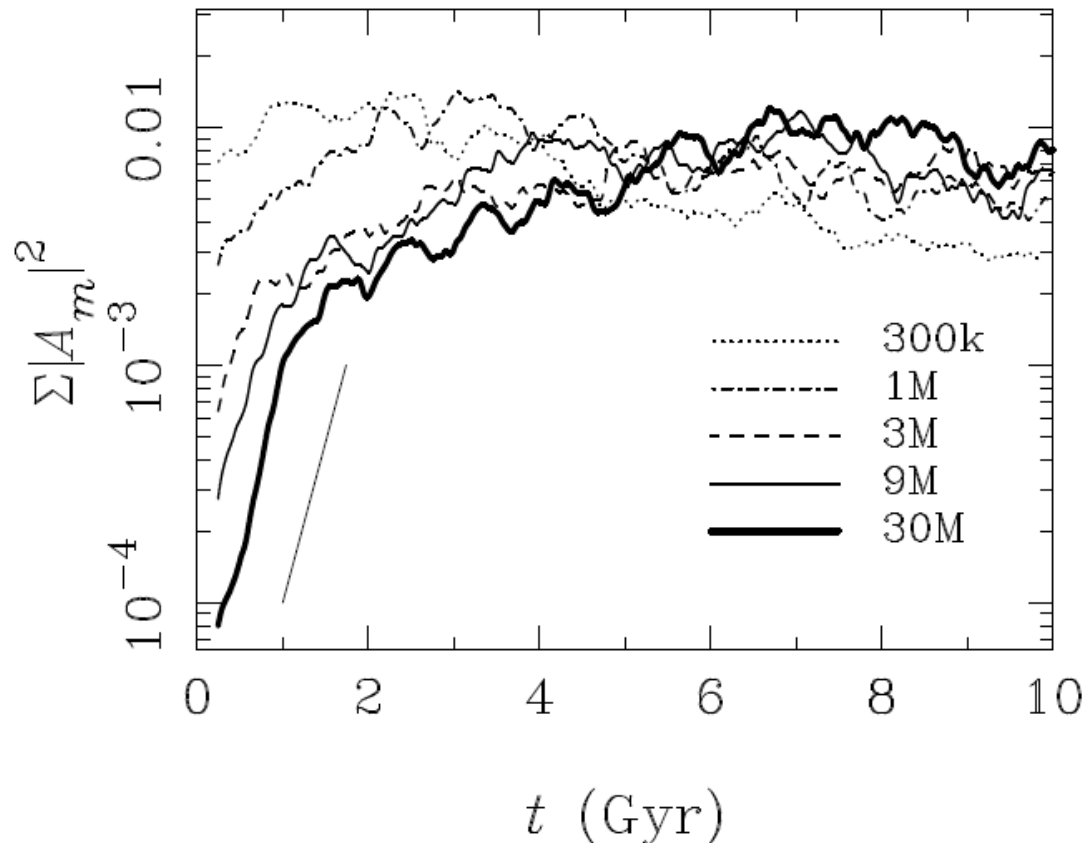


$N=300k$ (30万)



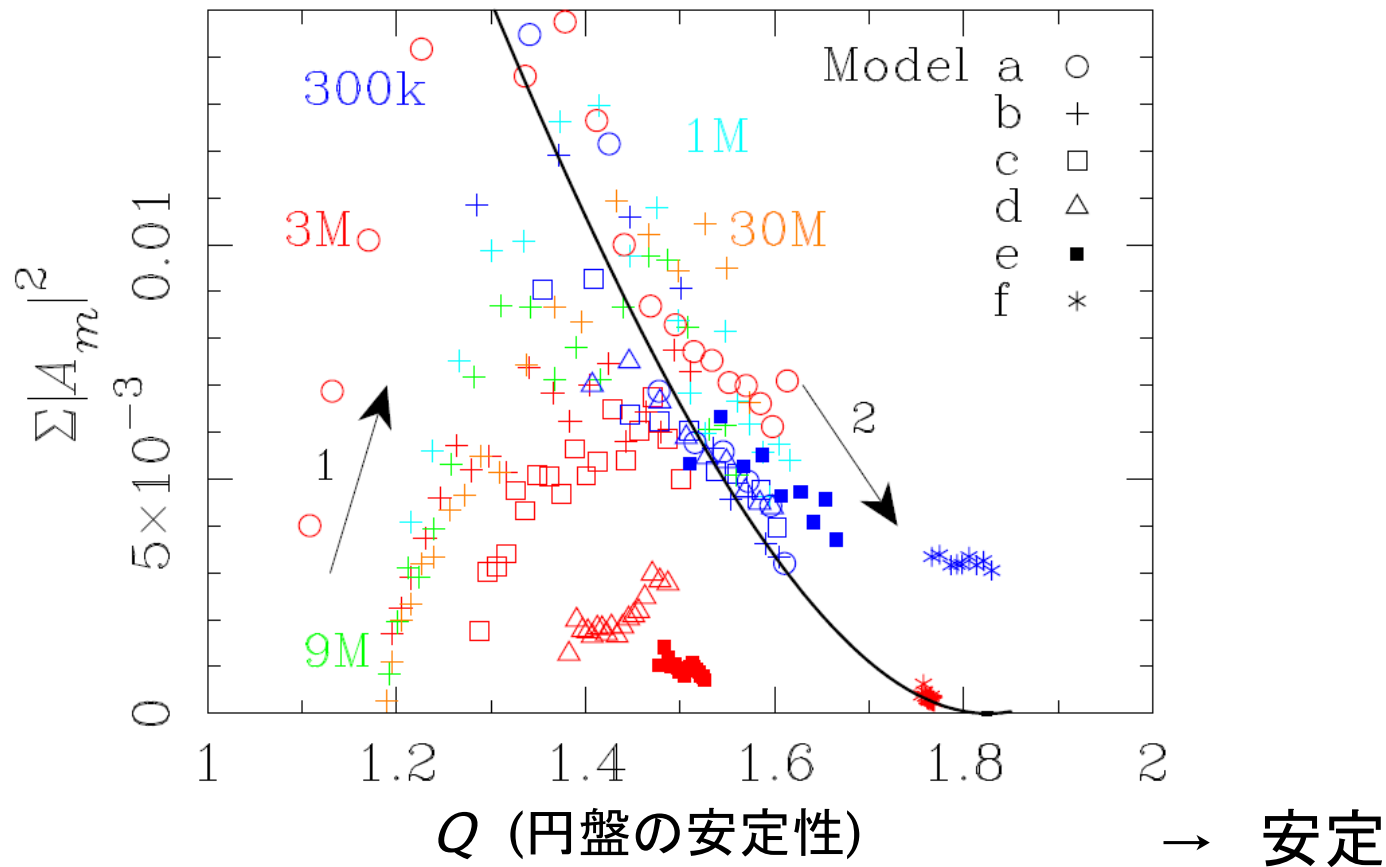
▶ 粒子数が十分多ければ、腕は消えない！

腕の強さの時間変化



- ▶ 粒子数が十分多いと、腕は徐々に発達し、なかなか強度が落ちない
- ▶ 腕がすぐに消えてしまうのはシミュレーションの問題だった

円盤の安定性と強度の関係

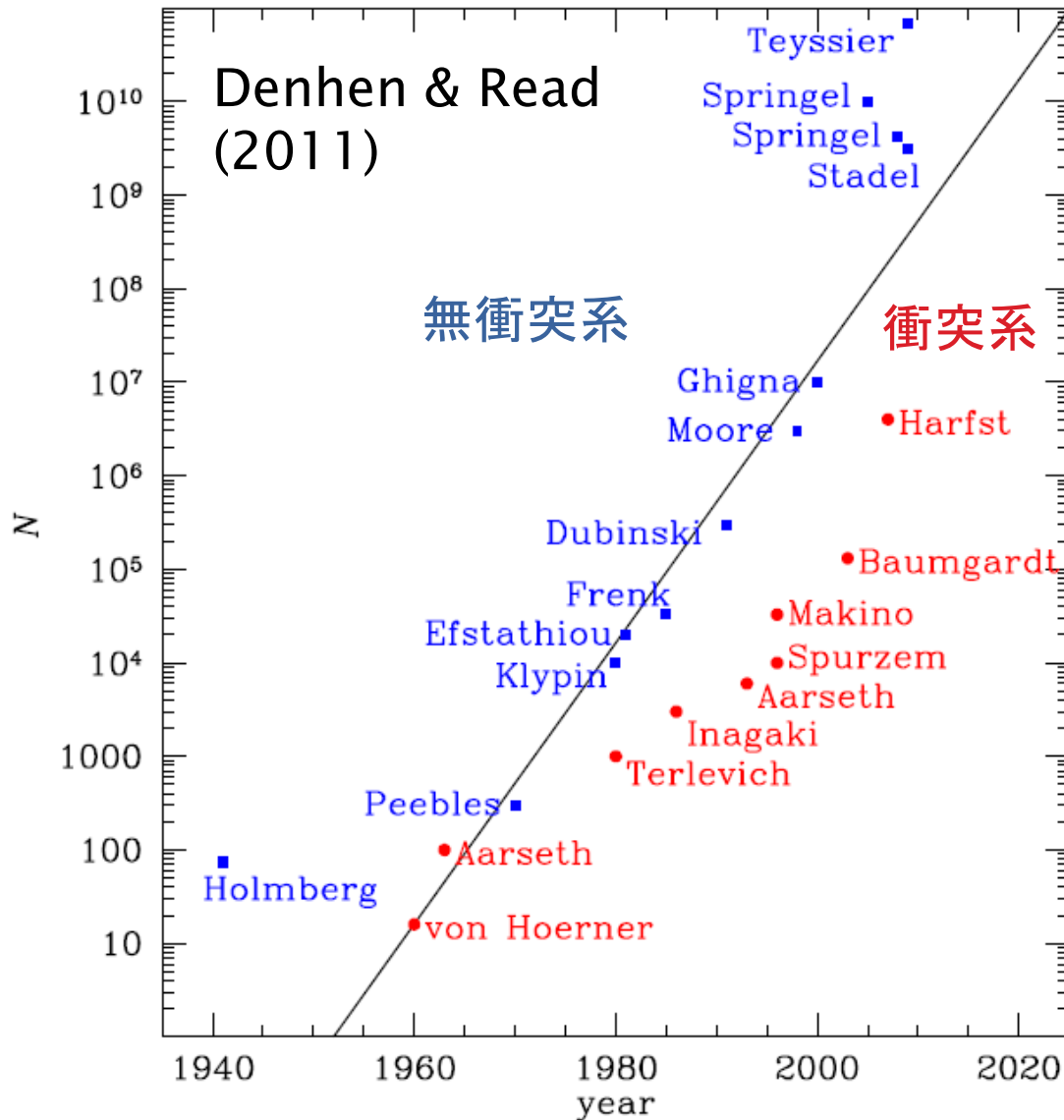


- ▶ 円盤が不安定なほど、腕の強度は高い
- ▶ 腕によって円盤は安定な方へ進化し、腕の強度は落ちる
- ▶ 腕の強度が落ちると、腕の消えるスピードも落ちる → 腕が長持ち

渦巻銀河・まとめ

- ▶ 渦状腕はガスや星形成による冷却がなくても、自己制御により長時間存在できる
- ▶ 計算機が発達し、粒子数を増やせたことによって、今まで見落としていたものが見えるようになった
 - 近年、ガスを含めた、より現実に近いシミュレーションが主流になりつつある
 - しかし、それ以前に理解されていないことはたくさんある
 - N体シミュレーションは、根底にあるよりシンプルな物理を理解するのに有効
- ▶ **渦巻銀河のN体シミュレーションやりたい人募集中！**
 - 世界では今、注目を浴びつつある分野 (Gaiaなど)

(再び)粒子数の進化



無衝突系

- 粒子数の多い計算は、宇宙論 N体(大規模構造形成)シミュレーション
- 比較的、性能が出やすいから

衝突系

- 粒子数は現実の球状星団の数(>100万體)に
 - しかし、星団内の連星など、タイムスケールの短い部分がボトルネック
- 連星だけ特別扱い

銀河は？

- 無衝突系の中に衝突系(BHや星団)が混ざっている
- ガスも入れたい
- 計算効率がとても悪い

N体シミュレーションの今後の課題

- ▶ 粒子数を増やす・精度を上げる



- ▶ より細かい構造まで分解できる
= より細かいタイムステップが必要
- ▶ 計算コストが増大
 - 一部の粒子の計算に時間がかかり、効率が悪い
- ▶ 計算アルゴリズムの改善が必要
- ▶ 一つの方法→ハイブリッド
 - 高精度(短いタイムステップ)が必要なのは一部だけ
 - それ以外の部分は大きめのタイムステップで、重力も近似計算でよい

BRIDGE

Bridge is for Realistic Interactions in Dense Galactic Environment

▶ ツリー法とダイレクト法のハイブリッド

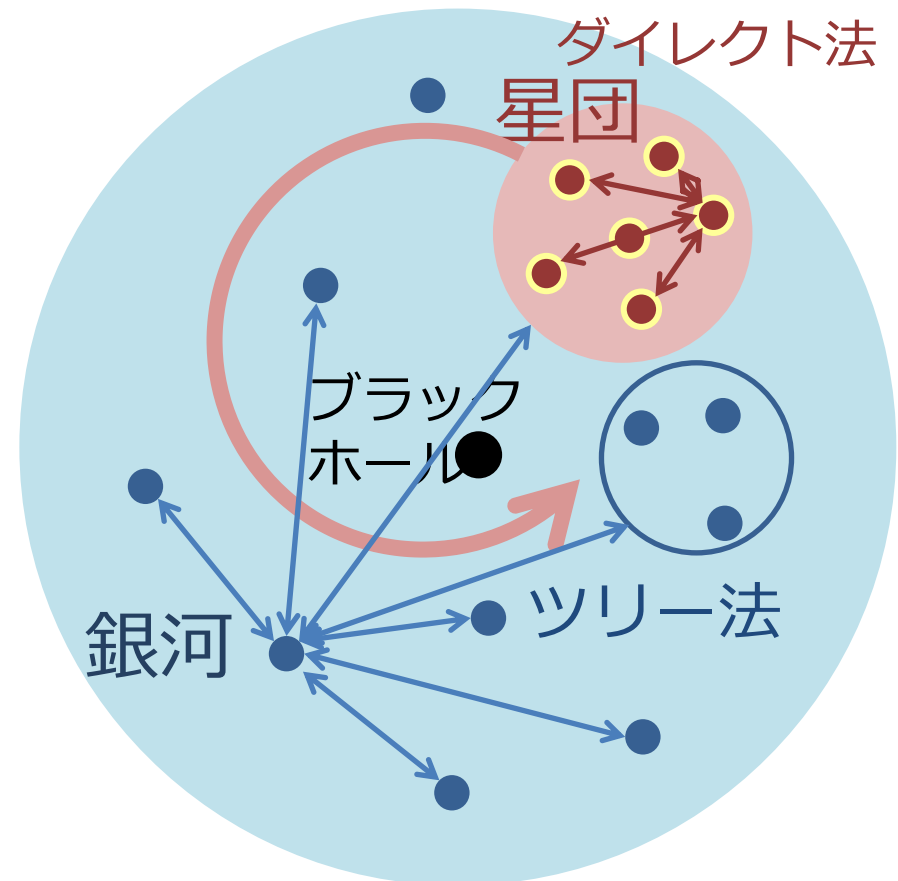
- 相互作用によって異なる計算方法
- それらを組み合わせる

▶ ダイレクト法

- 星団の星の相互作用に
- 粒子数少ない、高精度

▶ ツリー法

- その他の相互作用に
- 粒子数多い、低精度でよい



BRIDGEを用いたシミュレーション: 銀河中心での星団の進化

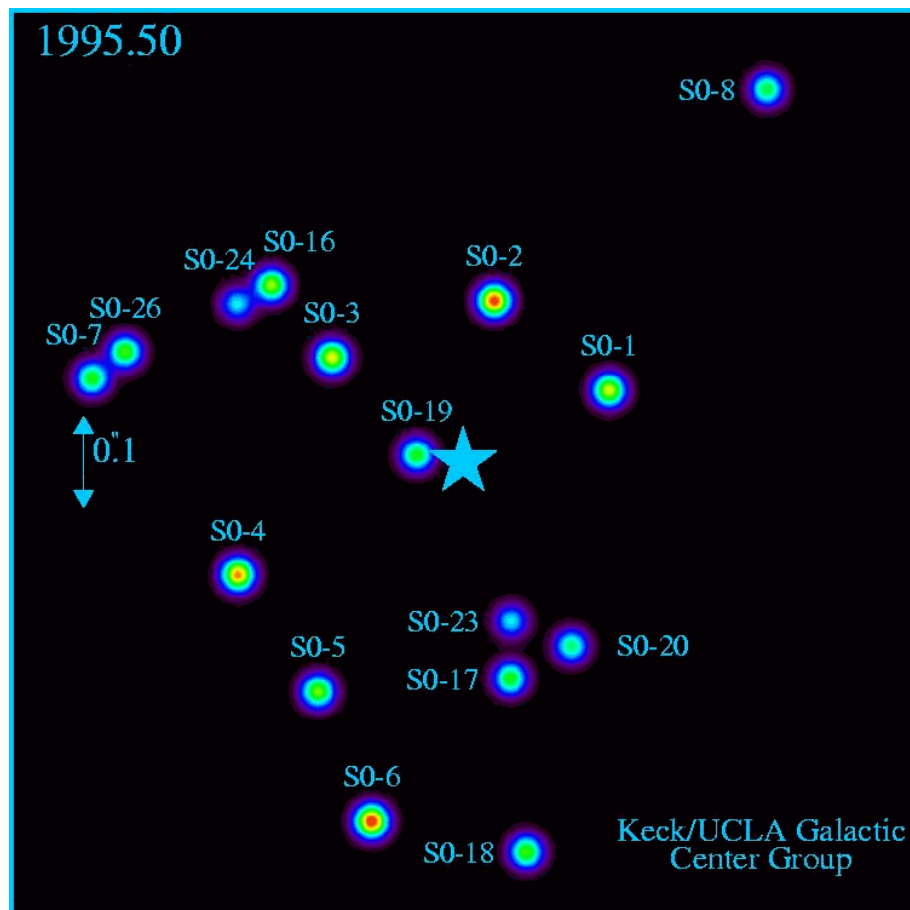
共同研究者: 岩澤全規(Leiden Univ.)

船渡陽子(東大)

牧野淳一郎(東工大)

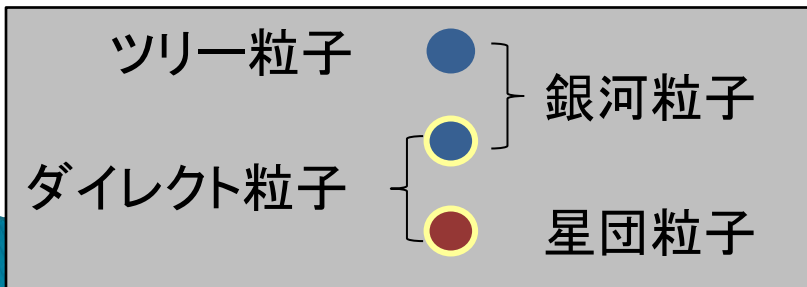
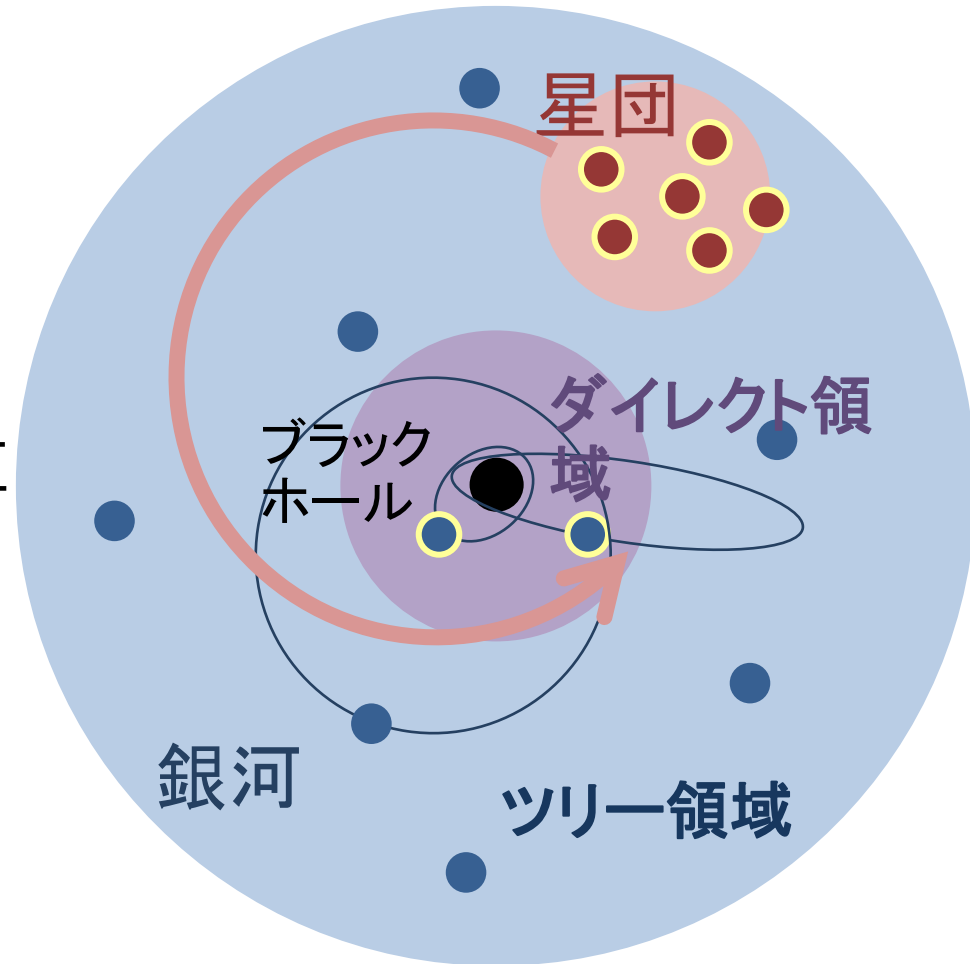
銀河系中心の若い星

- ▶ 銀河系中心 < 1 pc の非常に若い星 (S-stars)
- ▶ 銀河中心ブラックホールの潮汐力が非常に強いので、その場で星形成は難しい
- ▶ 少し離れたところでできた若い星団によって運ばないか？ (Arches ~ 30 pc)
 - 星団も銀河もN体で表現したい

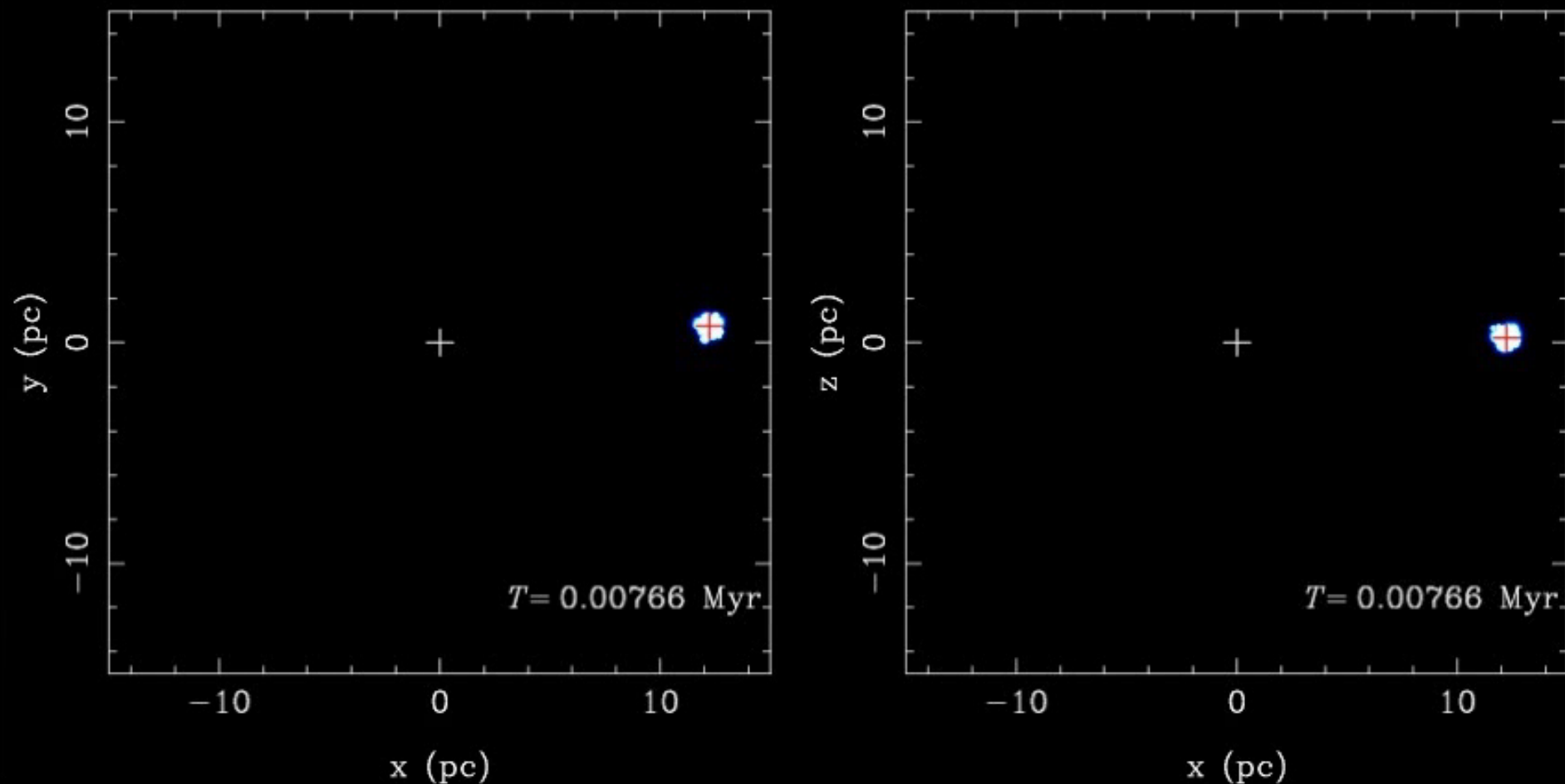


モデル・計算方法

- ▶ 星団 6万個
- ▶ 銀河 600万個
 - 銀河中心ブラックホールを含む
- ▶ 星団と銀河中心の星の一部をダイレクト法で計算



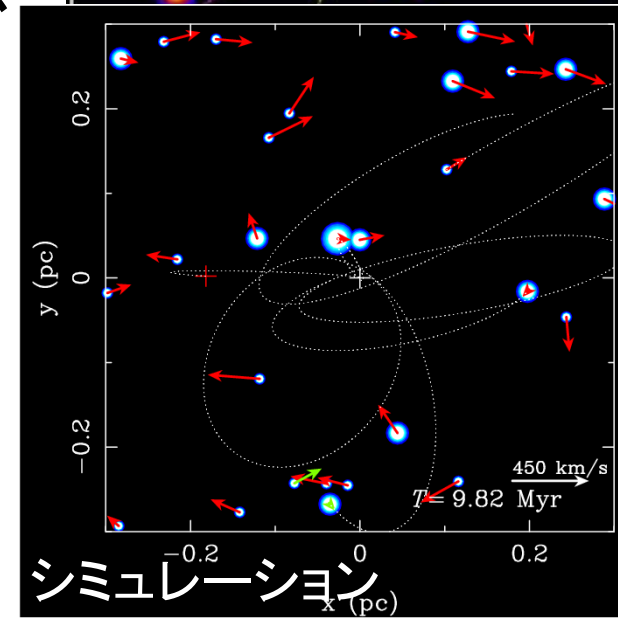
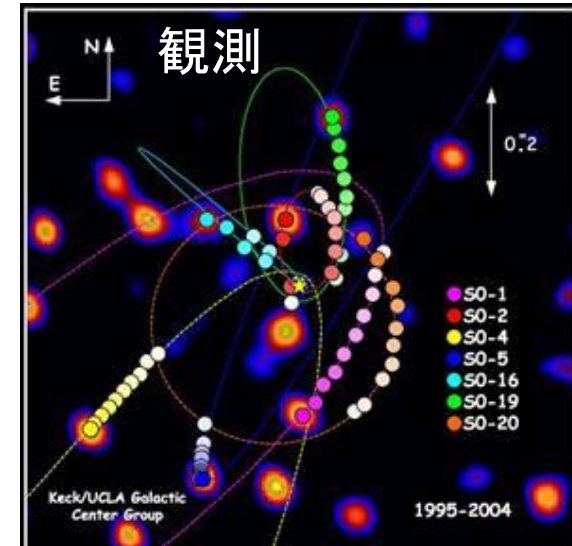
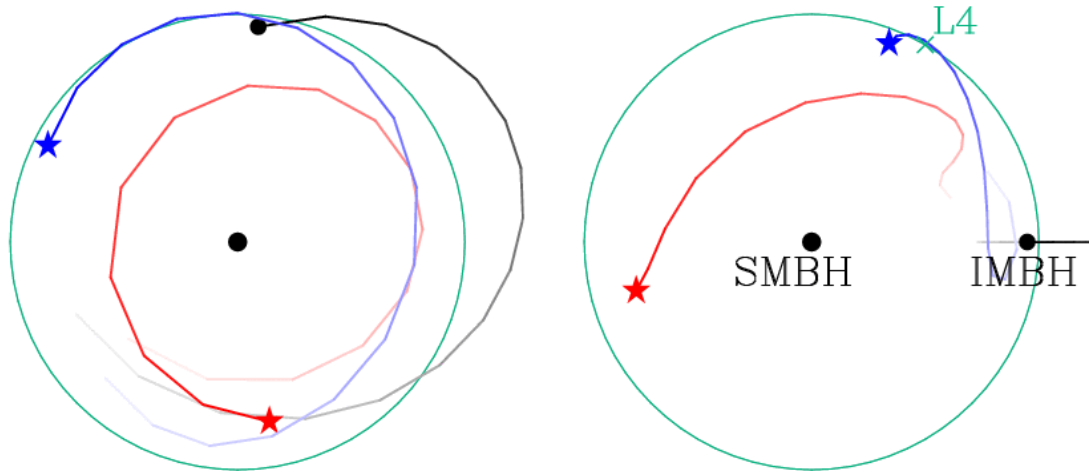
アニメーション



- ▶ 星団のみをプロット
- ▶ 国立天文台XT4 512コア 約3カ月

銀河中心に運ばれる星

- ▶ 銀河中心から 10^{-4} pcまで分解可能
- ▶ 銀河中心ブラックホール周りの星の運動を追える
- ▶ 星団だった星がブラックホールの周りを回る様子を分解
- ▶ 平均運動共鳴が銀河中心に星を運ぶ



N体シミュレーション・まとめ

- ▶ 計算機の発達・アルゴリズムの開発と共に、扱える粒子数が増加
 - 分解能の向上
 - それによって、新たにわかったことがたくさんある
 - 渦巻銀河の腕の進化
- ▶ 衝突系と無衝突系
 - これまでは、別々に計算していた
 - 分解能が上がると、これらの混ざった系(より現実に近い系)を扱う必要が出てくる
 - 銀河中心部での星団の進化
- ▶ 今後: もっと分解能を上げる
 - アルゴリズムの開発が重要

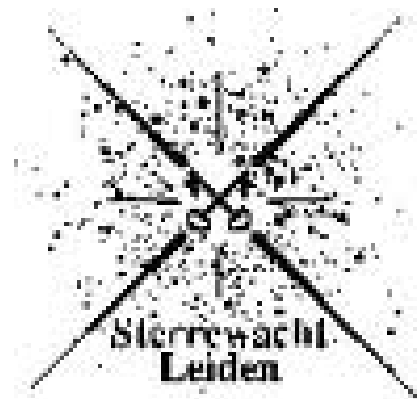
海外(オランダ)でポストドク生活 2年目

これまでの履歴

- ▶ 去年3月：学位を取得
- ▶ 4月：学振PDになる
- ▶ 6月：オランダ・ライデン大学へ
 - と言っても国内の学振PDなので、長期出張扱い
- ▶ 現在、オランダ2年目
 - ようやく共同研究の論文を投稿

ライデン大学・ライデン天文台
(Leiden Observatory)
オランダで一番大きな天文学科

ライデン天文
台のマーク→
ライデン市内↓



海外でポスドクをしてみても思ったこと

ただし、個人的な感想

- ▶ 日本の研究のレベルはけっこう高い
 - 海外へ行かないと良い研究ができないわけではない
 - ただ、国内だけでは分野やトレンドに偏りがある
 - 国内の研究者の数は限られているので
 - ▶ ポスドクするなら、大きなinstituteがオススメ
 - いろんな分野の人がいた方が勉強になる
 - 有名どころでは、世界中からいろんな人が来てくれる
 - ▶ 英語は最低限、自分の研究について議論できればなんとかなる
 - 「興味があれば、英語が下手でも聞いてくれる」
- by 元指導教員

海外でポスドクをするには

1. 研究して成果を出しましょう
 - 自分を売り込むための成果が必要
 - 論文もあった方が良い
2. 国際会議に行って発表しましょう
 - そして、偉い人(じゃなくてもいいけど)を捕まえて自分の研究について話をしましょう
 - 「こいつは使える」と思ってもらえないと雇ってもらえません
3. 運が良ければ・・・
 - ポスドクに来ない？と呼んでくれるかもしれません

海外でポスドクをするには・つづき

▶ いろんなルート

- 海外で募集しているポスドクに応募
 - 面接に呼んだり、人づてに評判を聞いたりして決める
 - 自分の指導教員の顔が広いと有利
- 海外学振・国内学振の半分
 - 受入側の負担はほとんどないので、どこでも行ける
- 海外のフェローシップに応募
 - 学振みたいなものが国ごとにいろいろある
 - 受入先と事前に打ち合わせは必要

海外でポスドクのメリット・デメリット

- ▶ 私もポスドクを始めたばかりなので、最終的に何がメリットとなるのかよくわからない・・・
- ▶ メリット
 - 研究の幅が広がる
 - 日本国内だけでは研究分野に偏りがある
 - 英語ができるようになる
 - 毎日使わざるをえないので...
- ▶ デメリット
 - 教育経験を積めない
 - 日本で大学等のポストを得るのに、非常勤講師などの経験があると良い

女性研究者の話

- ▶ ヨーロッパは日本より女性研究者・学生の割合が高い
 - Leiden Observatoryで3割くらい
- ▶ 抱えている問題は同じ
 - 結婚、出産、育児・・・
 - “2-body problem”
 - 日本人の方が単身赴任に抵抗がない
 - ドイツは女性で子供がいる人を優遇
 - 子供のいない女性からは反発も・・・
- ▶ 育児との両立：オランダの場合
 - 男女共、ワークシェアリング
 - 男性でも、平日一日休みで、家で子守をしながら研究
 - **女性だけの問題ではない！**

海外でポスドク生活・まとめ

- ▶ 海外でポスドクは良い経験になる(と思う)
- ▶ 海外へ行きたければ、
まずは研究を頑張りましょう！