

シミュレーションで見る宇宙

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

藤井 通子

自己紹介

◇ 藤井 通子 (ふじい みちこ)

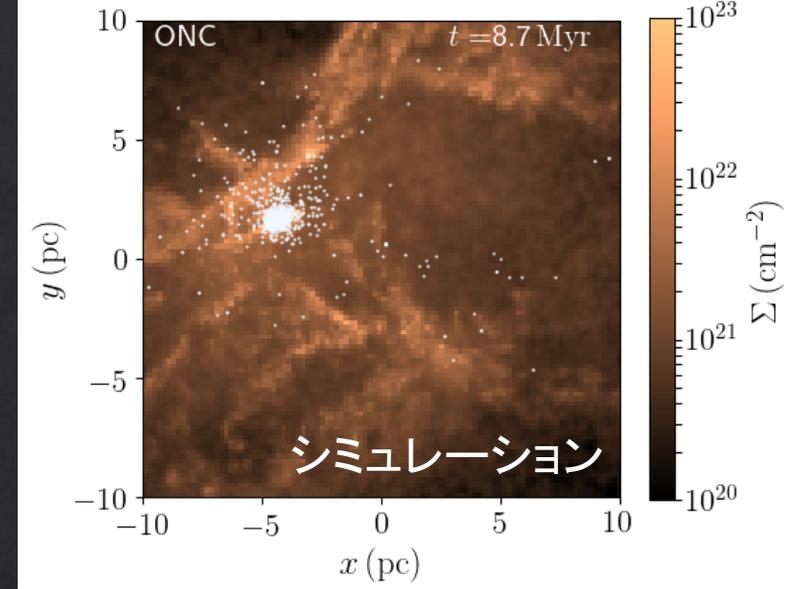
◇ 現在の研究テーマ

- ◇ シミュレーションを用いた銀河や星団の進化の研究
 - ◇ 星団内で形成したブラックホール連星からの重力波放出
 - ◇ 星団中での惑星の生存率
 - ◇ 銀河の渦状腕の形成
- ◇ 共通点: たくさんの粒子の分布が重力によって変化



本物(オリオン大星雲)

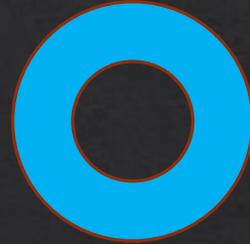
(c) ESO/G. Beccari



国立天文台のスーパーコンピューター:アテルイII

Credit:NAOJ

天文学者のお仕事



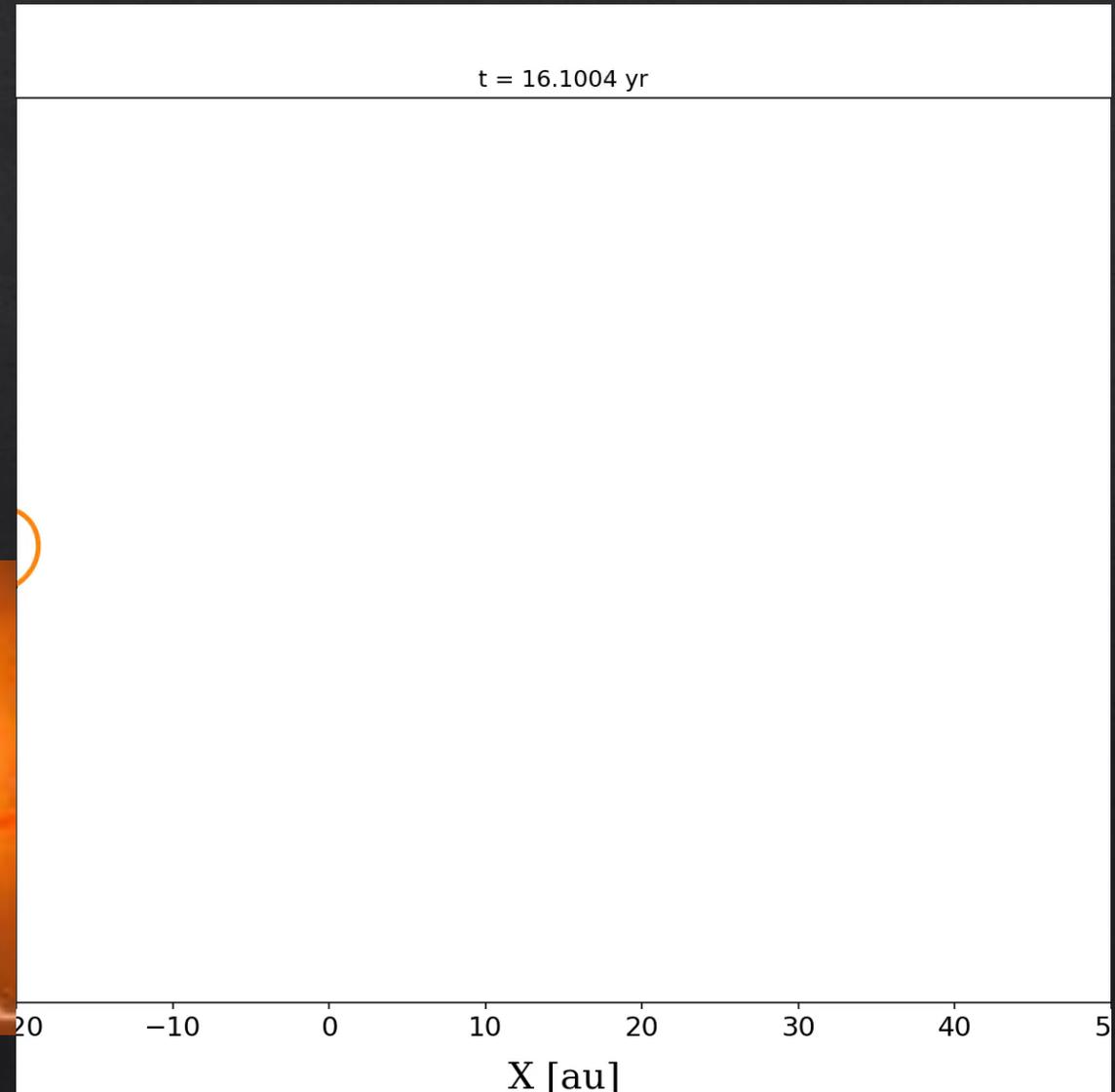
- ◇ 観測でも、現地に行かないことも多い
- ◇ 理論天文学者の多くは観測しない

ほとんどの時間は解析

シミュレーション天文学

© Alessandro Trani

- ◇ コンピュータシミュレーションで宇宙を再現
 - ◇ 宇宙の「進化」がわかる
- ◇ 私の研究は銀河・星団・惑星形成
- ◇ *N*体シミュレーション
 - ◇ 星(惑星)同士は重力で引かれ合う
 - ◇ 3体以上の問題は解析的に解けない→シミュレーション
 - ◇ 運動方程式を数値積分



シミュレーションに必要なもの

◇ シミュレーションコード

- ◇ 最近は、GitHubなどで公開されているものも多い

◇ コンピュータ

- ◇ ノートPCで計算できる規模のシミュレーションもある
- ◇ もっと大きいシミュレーションをしたいなら
→ スーパーコンピュータに利用申請

◇ データ解析

- ◇ データを置いておくハードディスク
- ◇ データを解析するためのコンピュータ

天文学専用のスーパーコンピュータ
ATERUI-II



スーパーコンピュータでシミュレーション

◇ 普通のコンピュータと何が違う？

◇ 基本的には、たくさんCPUがある

◇ たくさんのCPUを使って、効率良く計算するのは大変

◇ CPU間のデータ転送に時間がかかる、CPU間の計算量を揃える必要がある

◇ GPUなど異なる計算機

◇ CPU用とは異なるコードを書く必要がある

◇ 新しいCPU(「富岳」など)

◇ 今までのコードがそのまま効率良く動くとは限らない

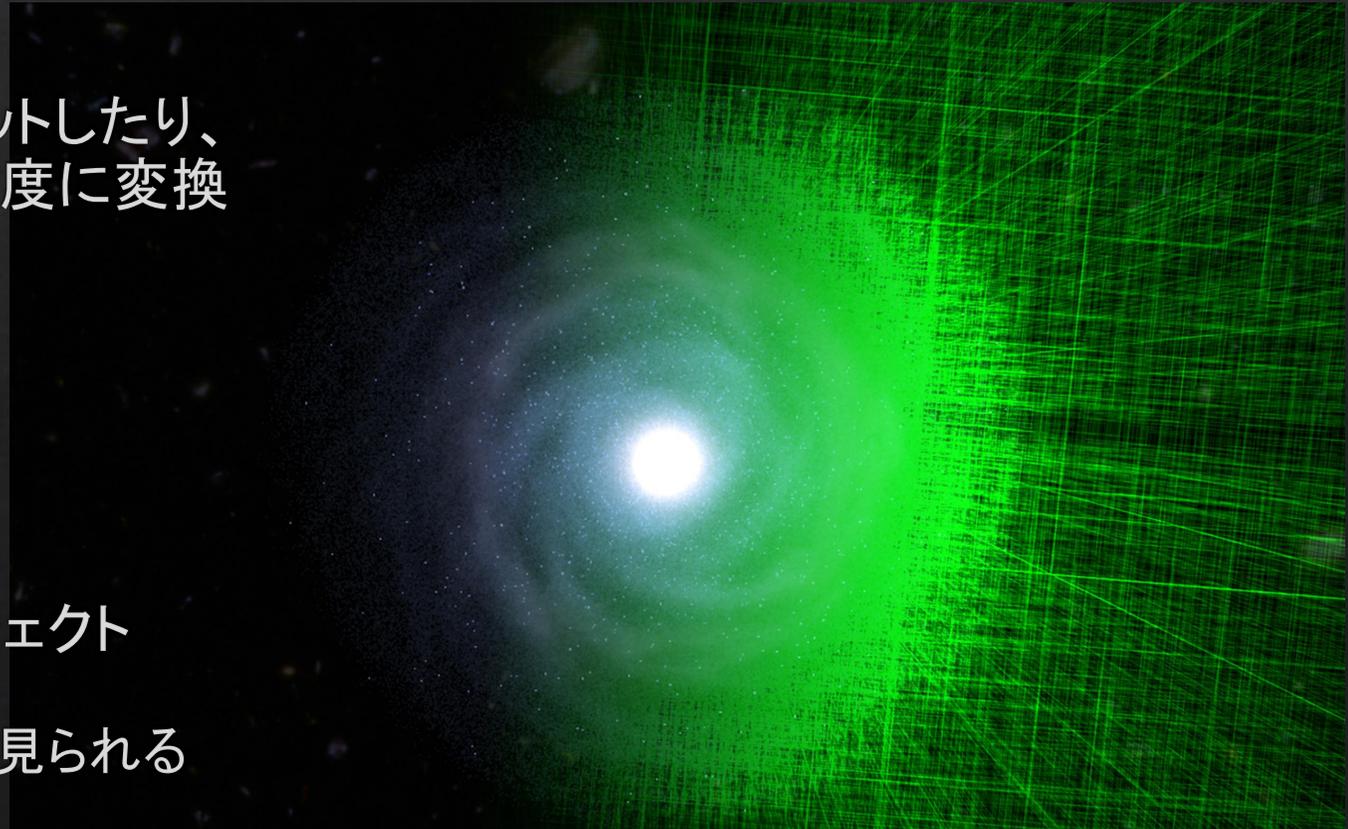
可視化

◇ 元データは数字の羅列

- ◇ N体シミュレーションの場合は星の位置、速度、質量など
- ◇ 星の明るさごとに大きさを変えてプロットしたり、たくさん星がある場合は場所ごとの密度に変換したり
- ◇ 見る角度を変えてみたり

◇ 可視化を専門とするチームもある

- ◇ 国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト (4D2U)
Webサイトでたくさんのシミュレーションが見られる



観測との比較・理論的予測

- ◇ シミュレーションは、観測で見ることができないところを「見る」ことができる
 - ◇ 130億年前から現在までの時間進化
 - ◇ 宇宙の歴史は人間より遥かに長い
 - ◇ 「現在」を比較して、シミュレーションから「過去」「未来」を推測する
 - ◇ 2021年ノーベル物理学賞：地球温暖化の予測
(これまで、シミュレーションはノーベル賞を取れないと思われていた)
 - ◇ N体シミュレーション→天体の運動
 - ◇ 例えば、銀河の星の運動(速度)を測ることは非常に難しい
 - ◇ 地球から遠い星ほど難しい
 - ◇ シミュレーションでは距離は関係ないし、全体を俯瞰して見ることもできる

渦巻銀河

- ◇ 星とガスでできた円盤
- ◇ 渦巻き腕を持つ
 - ◇ 渦状腕(かじょうわん)、スパイラルアーム
 - ◇ 真ん中に棒がある⇒棒渦巻銀河
- ◇ 腕は星が集まっているところ

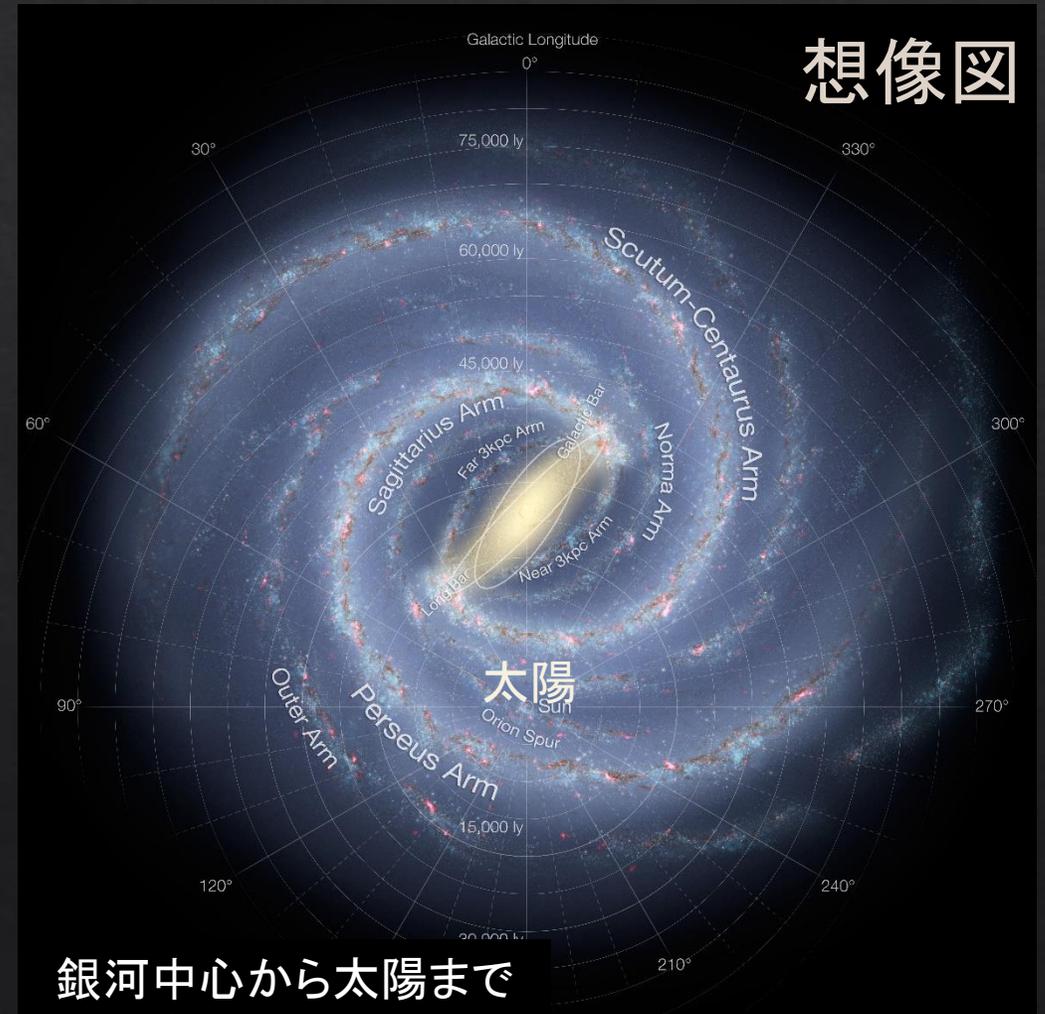


天の川銀河

◇ 私たちの住んでいる銀河

天の川銀河も渦巻銀河

- ◇ 上から見ると渦巻き
 - ◇ 棒渦巻銀河
- ◇ 観測から渦巻き腕があることがわかっている
- ◇ 本当は誰も上から見たことはない
- ◇ 星の運動は、太陽の近くなら測れる
 - ◇ 位置天文学衛星 : Gaia
 - ◇ シミュレーションと比較して、銀河全体の運動を理解したい



円盤銀河の構造

- ◇ 主にバルジ、円盤、ダークマターハローの3つから成る
 - ◇ シミュレーションでは、この3つの構造のパラメータ(サイズや質量など)を決めて初期条件を作る
- ◇ 円盤は星とガス(ほとんど水素)から成る
- ◇ 質量の大半はダークマターハロー
- ◇ 円盤は回転している(ダークマターハローの中心に降着したガスの中で星ができて円盤になる)
- ◇ 中心にバーと呼ばれる棒状構造があるものもある(天の川銀河にもある)



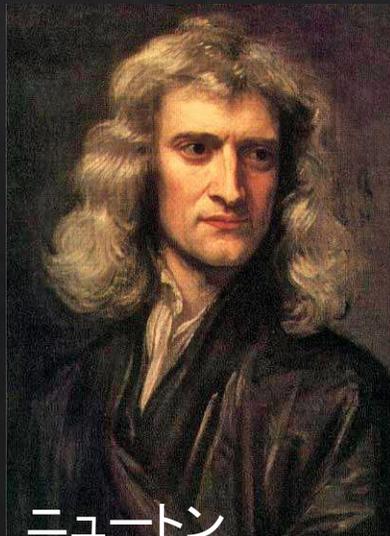
銀河の星は動いている

- ◇ 円盤はぐるぐる回っている
- ◇ 銀河中心から太陽まで約3万光年
- ◇ 一周約2億5千万年
 - ◇ 動いているように見えない
- ◇ 内側の星ほど、一周にかかる時間は短い
(差動回転)



重力が星を動かす

- ◇ 重力(万有引力)
- ◇ 物はお互いに引き合う
- ◇ 質量が大きいものほど強い力
 - ◇ 地球と月
 - ◇ 太陽と惑星
 - ◇ 銀河の星



ニュートン



回転 + 重力 =

- ◇ 星は重力で集まろうとする
- ◇ 星は円盤の中を回る



回転 + 重力 = 渦巻き

- ◇ 星は重力で集まろうとする
- ◇ 星は円盤の中を回る
- ◇ 内側の方が先に進む
- ◇ 星の集まりが引き伸ばされる



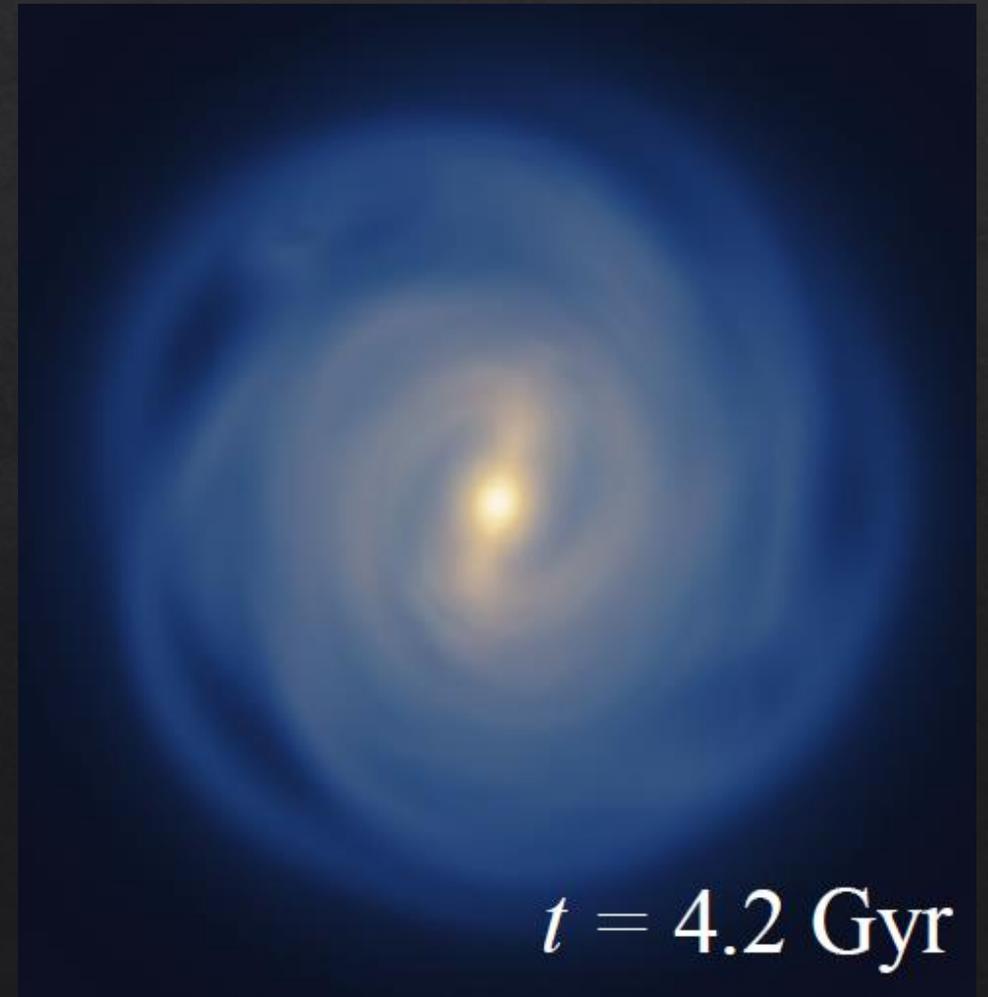
違うでき方の腕もある



銀河のシミュレーション

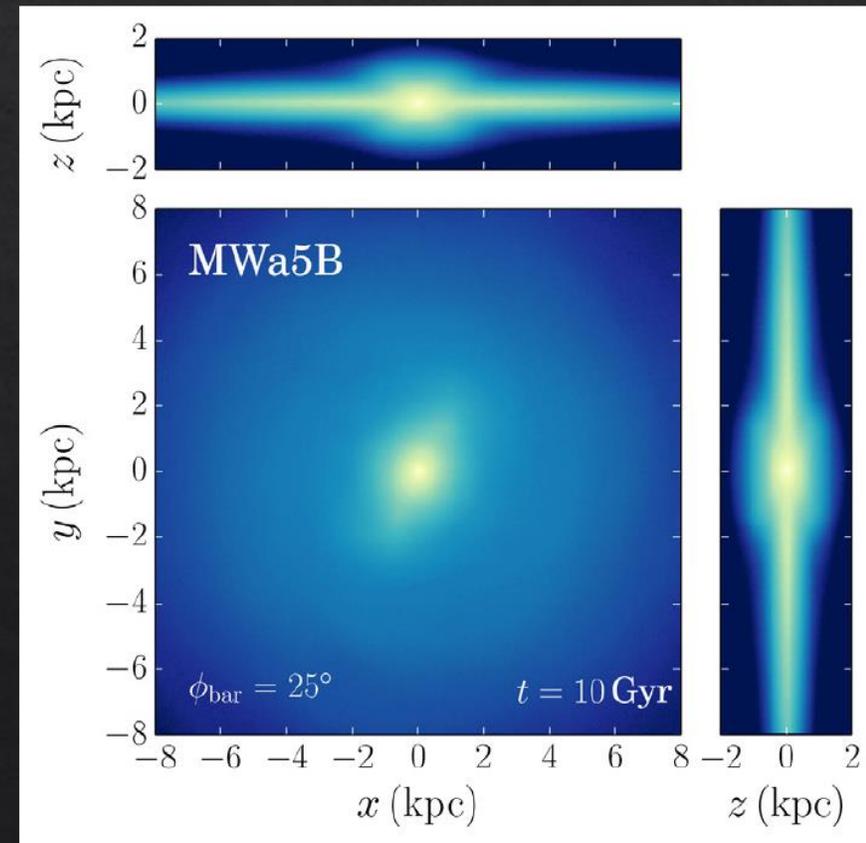
- ◇ 一つ一つの星が重力によってどう動くかを計算
- ◇ 銀河の動きがわかる
- ◇ 計算する星の数：
現在は最大2千億個！
- ◇ 銀河の100億年間にわたる
進化を数週間で計算

シミュレーションを見てみましょう



天の川銀河モデル

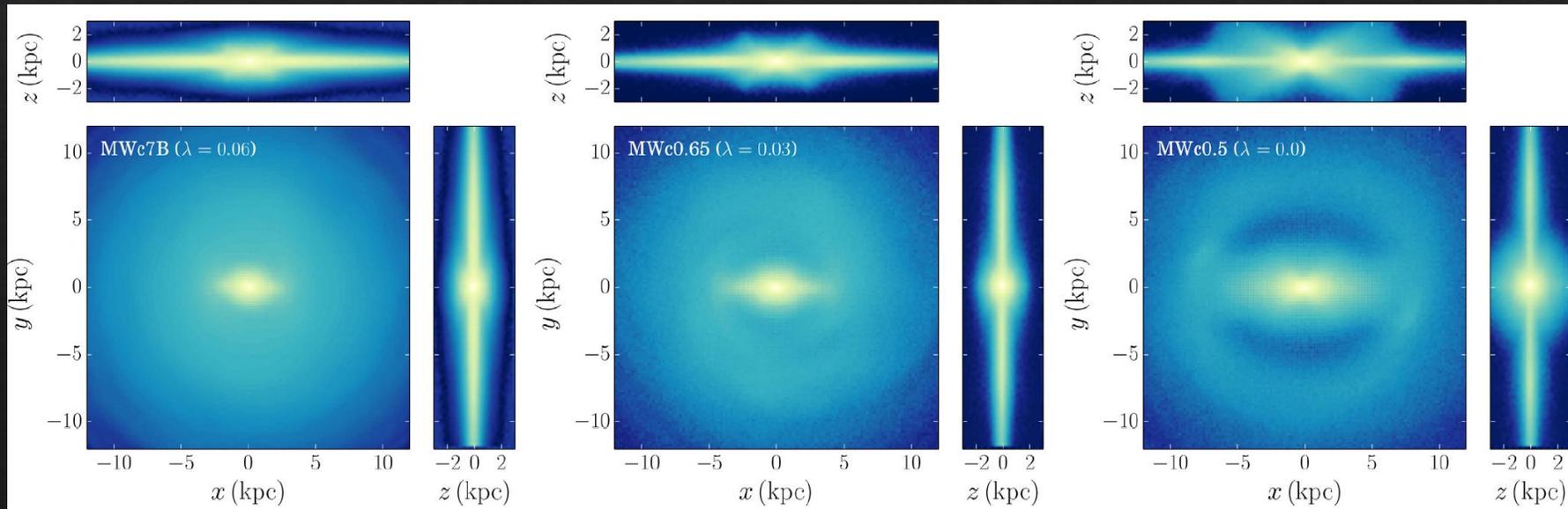
- ◇ 初期条件のパラメータを調整しながら、50モデルくらい計算
- ◇ 天の川銀河に近い構造(円盤やバルジの星の密度や運動)になったモデルについて、粒子数を増やして再計算(世界最大粒子数:合計700億粒子)
- ◇ 天の川銀河の構造を解明
- ◇ 重要な発見: ダークマターハローは銀河円盤と同じ方向に回転している



バーの長さやとダークマターハローの回転

- ◇ ダークマターハローは銀河円盤と同じ方向に回転している
- ◇ バーは角運動量をダークマターハローに渡すことで長くなり、回転が遅くなる
- ◇ ダークマターハローは角運動量をもらい回転する
- ◇ どこかで角運動量輸送が止まる(ダークマターハローが最初から回転していると、もらえる角運動量が少ない)
- ◇ 天の川銀河に近いバーを維持するためには、ダークマターの回転(スピン)が必要

回転強い



円盤銀河の形成

- ◇ 実際は、宇宙の構造形成と共に集まってくるダークマターハローの中で、中心にガスが集まり、円盤を作り、その中で星が形成して、円盤銀河が形成する
- ◇ ガス入りの計算は星だけより計算量が多いので、まだまだシミュレーションの分解能が足りない → これから



シミュレーションコード開発とこれから

- ◇ 新しいシミュレーションのためには、新しいコードが必要
 - ◇ コード開発=プログラミング
 - ◇ GitHubなどで公開することも多い
- ◇ SIRIUS project: 星一つ一つを再現した銀河形成シミュレーションを最終目標に
 - ◇ プロジェクト名をつけるのは大事
- ◇ 今は、星団(数百から数百万の星の集まり)形成シミュレーション
 - ↔ 銀河は 10^{10} 個以上の星

