

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：14201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03626

研究課題名(和文) 扁長ハロー中の銀河円盤に励起されるウォープの維持に関する研究

研究課題名(英文) Research on the maintenance of the warps excited in the galactic disk surrounded by prolate halos

研究代表者

穂積 俊輔 (HOZUMI, Shunsuke)

滋賀大学・教育学系・教授

研究者番号：90229203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：円盤銀河の円盤を真横から見たとき、外縁部の一端が上方に折れ曲がり、対応する他端が下方に折れ曲がった積分記号のような形状であるウォープと呼ばれる構造について、宇宙年齢程度維持するメカニズムを調べた。その結果、円盤銀河を取り巻くダークマターハローの形状がラグビーボールのような扁長で、ハローの赤道面に対して円盤が傾いて形成されれば、円盤はハローから常にトルクを受けて、ウォープを宇宙年齢程度維持できることをN体計算で示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

円盤銀河で観測されるウォープは、衛星銀河の降着による潮汐作用では形成できても長期間維持できなかった。この未解決問題に対して、銀河を取り巻くハローの形状がラグビーボールのように扁長で、円盤がその赤道面に対して傾いて形成されれば、観測で示唆される宇宙年齢程度維持できることを明らかにした。実際、宇宙論的シミュレーションでは扁長ハローも扁平ハローも同程度形成されているので、我々の結果は扁長ハローの重要性を示したことになる。

研究成果の概要(英文)：We investigate, using N-body simulations, the maintenance mechanism of a warp which looks like an integral sign with one end of the outer edge bent upward and the other end bent downward when the disk of a disk galaxy is viewed from edge-on. As a consequence, we have found that if the dark matter halo surrounding the disk is prolate like a rugby ball, and the disk is inclined with respect to the equatorial plane of that halo, the excited warp is maintained for about the age of the Universe owing to the torque that is constantly exerted to the disk from the halo.

研究分野：天体物理学

キーワード：銀河ウォープ構造 円盤銀河 ダークマターハロー 恒星系力学 N体計算

1. 研究開始当初の背景

円盤銀河の多くで、円盤を真横から見ると、外縁部の一端が円盤面に対して上方に折れ曲がり、対応する他端が下方に折れ曲がった積分記号に似たウォーブ構造が観測されている。このようなウォーブは、衛星銀河が親銀河に降着する際にはたらく潮汐作用で励起されることが数値計算で示されているが、同時に、その後 20 億年から 30 億年程度で減衰することも示されている。しかし、ウォーブには近赤外線で見られる古い星が含まれていることから、宇宙年齢程度維持されていると考えられている。このように、円盤銀河で観測されるウォーブがどのようにして宇宙年齢程度維持されているのかが未解決問題として残されている。

2. 研究の目的

円盤銀河を取り囲むダークマターハローの形状が球状ではなく、どら焼きのような扁平な場合や、ラグビーボールのような扁長な場合は、円盤がそれらのハローの赤道面に対して傾いて形成されれば、円盤はハローから常にトルクを受けてウォーブが形成されるとするモデルに着目する。ただし、扁平ハローではウォーブは数十億年程度で消失することが明らかになっている。一方、扁長ハローでは 50 億年以上維持されることが示されたが、そのハローモデルは自己重力で相互作用する系ではなく外場として扱われているので、ウォーブの減衰にはたらく力学摩擦の効果が考慮されていない。そこで、実際に、自己重力で相互作用する扁長ハローの赤道面に傾いて形成された円盤で、ウォーブが力学摩擦を受けても宇宙年齢程度維持できるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

ウォーブの励起とその後の時間進化を調べるために、円盤とハローを粒子でモデル化してその重力相互作用を計算して時間発展を追跡する N 体シミュレーションを行う。円盤銀河の表面密度は、観測から半径方向に指数関数的に減少することが知られている。一方、ウォーブは円盤の外縁部の現象であることから、非常に低密度な領域を扱うことになる。したがって、そのような領域で生じるウォーブを詳細に調べるためには、円盤を大量粒子でモデル化する必要がある。さらに、ハローは円盤の 10 倍程度の質量を持つが、ハロー粒子を円盤粒子と等質量にしないとハロー粒子が円盤を通過する際のショットノイズで円盤の構造が変わってしまう。そのため、ハローも大量粒子でモデル化することになり、非常に大規模な N 体計算を行う必要がある。そこで、高速な N 体計算コードを開発し、可能な限りの大量粒子で円盤とハローをモデル化して、ウォーブの形成からその時間発展を詳細に調べる。

4. 研究成果

(1) 高速 N 体計算コードの開発

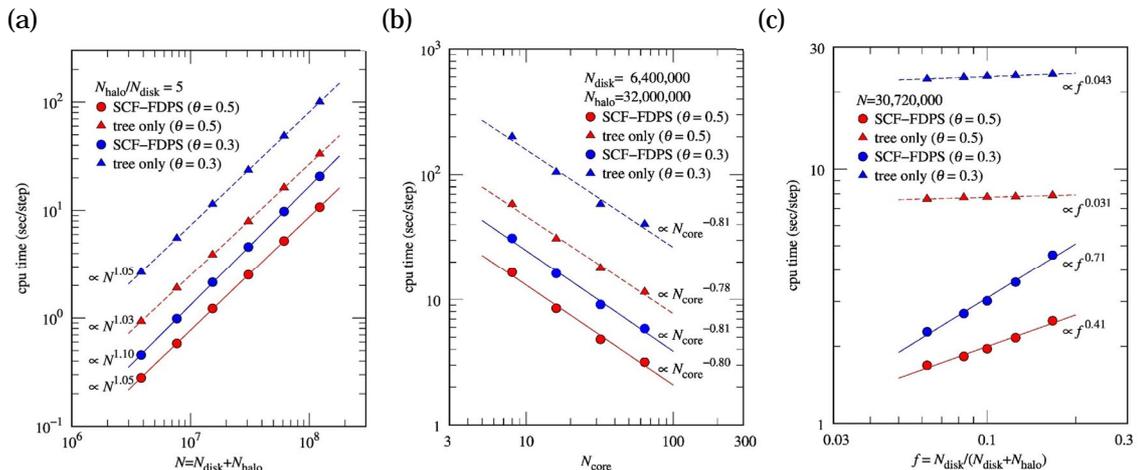


図 1. 開発した N 体計算コードと従来の N 体計算コードの性能評価の比較。(a) 64 コアを使って 1 ステップあたりの円盤とハローの総粒子数に対する CPU 時間 (秒) で、ハローと円盤の粒子数の比は 5 とした場合、(b) 1 ステップあたりのコア数に対する CPU 時間 (秒) で、円盤粒子数を 640 万とし、ハロー粒子数を 3,200 万にした場合、(c) 64 コアを使って 1 ステップあたりの全粒子における円盤粒子の割合に対する CPU 時間 (秒) を表す。いずれも、丸印が開発した計算コードの結果であり、三角印が従来の計算コードの結果を示す。赤と青の色は重力の計算精度を変えた結果を示す。

円盤とハローからなる円盤銀河のシミュレーション用の高速な N 体計算コードを開発した。従来の計算コードで使われるツリー法は円盤の自己重力の計算のみに適用することとし、ハローの自己重力とハロー粒子と円盤粒子の相互作用は SCF 法と言われる方法を適用した。図 1 は、円盤とハローからなる同じ銀河モデルを並列コンピュータで計算した場合に、開発した計算コードと従来のツリー法のみによる計算コードで要した CPU 時間を比較したものである。基本的に従来の計算コードよりも最低でも 3 倍程度、最高で 1 桁程度高速化することができた。この成果は論文として、国際的な天文学の専門ジャーナルに掲載された¹⁾。

(2) 扁長ハロー中でのウォーブの維持

いくつかの銀河モデルを総粒子数 2 千万体程度で作成して予備計算を行った。その中から代表的なモデルを当初計画よりも 1 桁程度少ない粒子数で作成して N 体シミュレーションを行った。図 2 に円盤粒子 10,001,920、ハロー粒子 240,046,080 で作成した銀河モデルの結果を示す。扁長ハローの赤道面に対して 30° 傾けて置かれた円盤は、時間とともにウォーブが励起されて、それが 100 億年程度維持されることがわかった。また、円盤にはバー不安定と呼ばれる力学不安定によってバーが形成され、続いてファイアーホース不安定と呼ばれる円盤面に垂直な方向の力学不安定によって円盤中心領域にバルジ状の構造(擬バルジ)が形成されるが、図 3 に示すように、このような構造とウォーブが共存することもわかった。

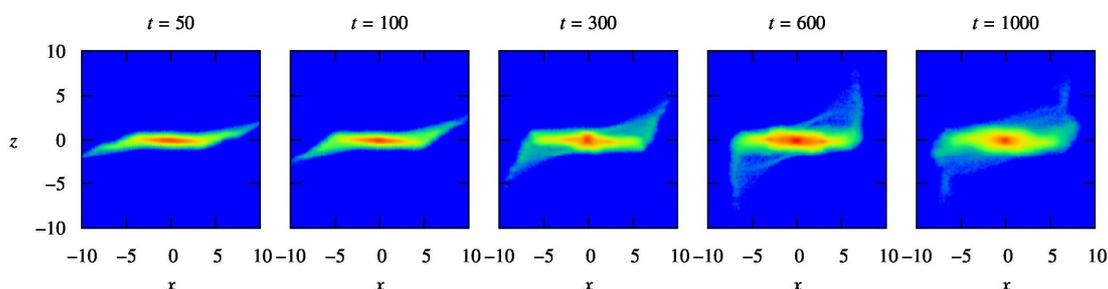


図 2. 扁長ハローの赤道面に対して、 30° 傾けて置かれた円盤を真横から見た時の投影された表面密度の時間進化。シミュレーション開始後、円盤の力学時間程度でウォーブが励起され、その後、減衰されながらも 100 億年程度維持されている。時間の単位は、円盤質量を 4.1×10^{10} 太陽質量、円盤の半径方向のスケール長を 2.6 kpc としたとき、 9.77×10^6 年となる。図の各時刻で、円盤の赤道面を $z = 0$ とし、ウォーブのノードが xy 軸上になるような座標系に変換している。

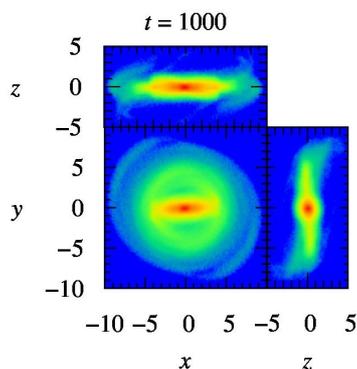


図 3. $t = 1000$ における円盤の赤道面を xy 平面にとり、その円盤を xy 方向、 yz 方向、 zx 方向に投影した表面密度。バーの長軸が x 軸方向になるように円盤を回転している。 yz 面から見ると中心領域に球状の構造が形成されていて、これを zx 面から見ると箱型の形状になっている。このような擬バルジとウォーブが共存していることがわかる。

< 引用文献 >

- 1) S. Hozumi, K. Nitadori, M. Iwasawa, "A Fast N -body Code for Simulating Disk-Halo Systems", *Astrophys.J.*, 2023, Vol.948, 29 (10pp)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hozumi Shunsuke, Nitadori Keigo, Iwasawa Masaki	4. 巻 948
2. 論文標題 SCF-FDPS: A Fast N-body Code for Simulating Disk/Halo Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acbea5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 穂積俊輔
2. 発表標題 FDPS-SCF: 円盤銀河の高速N体計算コードの開発
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Hozumi
2. 発表標題 A Fast N-body Code for Simulating Disk-Halo Systems
3. 学会等名 Challenges and Innovations in Computational Astrophysics IV (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Hozumi
2. 発表標題 SCF-FDPS: A Fast N-body Code for Simulating Disk-Halo Systems
3. 学会等名 令和4年度天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunsuke Hozumi
2. 発表標題 SCF-FDPS: A Fast N-Body Code for Simulating Disk-Halo Systems
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 穂積俊輔
2. 発表標題 SCF-FDPS: A Fast N-Body Code for Simulating Disk-Halo Systems
3. 学会等名 シミュレーション天文学のこれまでとこれから - ハードウェア・アプリケーション・サイエンス -
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	岩澤 全規 (IWASAWA Masaki) (10650038)	松江工業高等専門学校・情報工学科・准教授 (55201)	
研究 分担者	似鳥 啓吾 (NITADORI Keigo) (80600824)	国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・技師 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------