

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：21602

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20387

研究課題名（和文）短寿命放射性核種と銀河シミュレーションで探る46億年間の太陽系移動

研究課題名（英文）4.6 billion years of solar system migration explored by short-lived radionuclides and galaxy simulations

研究代表者

藤本 裕輔 (Fujimoto, Yusuke)

会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：90965691

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：太陽系を含む銀河系円盤の星々は、誕生時の軌道から逸脱し、半径方向の混合と垂直方向の加熱を経験してきた。私達は銀河円盤の流体シミュレーションを行い、円盤内に初期配置されたトレーサー粒子が、巨大分子雲との重力相互作用によって初期軌道からどれだけずれるかを調べた。半径方向と鉛直方向の速度分散の時間発展を調べた結果、1Gyrの間、急激で効率的な円盤加熱をしていることがわかった。また、その効率的な散乱によって星の角運動量が変化し、半径方向に1kpc以上の移動が起こることがわかった。この効果は古い円盤星よりも生まれたばかりの星で顕著である。力学的加熱と半径方向の移動は最初の数億年で急激に起こる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系が誕生した46億年前から現在に至るまで、銀河円盤内における太陽系やその他恒星の移動についての理解を目指す本研究は、隕石分析や小惑星探査機「はやぶさ2」などが持ち帰った小惑星資料の解析による太陽系形成研究と、ALMA電波望遠鏡やすばる望遠鏡などによる系外惑星研究を繋ぐ橋渡しの役割を担うという学術的意義を持つ。また、太陽系が天の川銀河のどこで生まれ、どのように彷徨い、今現在どのような所に存在し、そして今後どこに向かうのかを理解することは天文学や惑星科学の学術範囲を超え、広く人類にとっての社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：Stars in the Galactic disc, including the Solar system, have deviated from their birth orbits and have experienced radial mixing and vertical heating. By performing hydrodynamical simulations of a galactic disc, we investigate how much tracer particles, which are initially located in the disc to mimic newborn stars and the disc stars, are displaced from initial near-circular orbits by gravitational interactions with giant molecular clouds (GMCs). We investigate the time evolution of the radial and vertical velocity dispersion and find that they keep fast and efficient disc heating for 1 Gyr. We find that the efficient stellar scattering by GMCs also causes a change in angular momentum for each star and, therefore, radial migration of more than 1 kpc in the radial direction for 1 Gyr. This effect is more pronounced in newborn stars than old disc stars. The dynamical heating and radial migration drastically occur in the first several hundred Myr.

研究分野：天文学

キーワード：銀河系 太陽系 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

隕石に含まれる太陽系形成時の最古物質(コンドリュールやカルシウムアルミニウム含有物など)や、探査機「はやぶさ2」などによる小惑星サンプルなどにより、46億年前の原始太陽系に対する研究が進展している。また、太陽系近傍の系外惑星もこれまでに数多く発見され、特に2015年の電波望遠鏡ALMAによる原始惑星系円盤上の溝構造の観測成功を皮切りに、惑星形成、特に地球のような生命居住可能な惑星系の形成に関する研究が、観測的にも理論的にも盛んに行われている。そしてこれら二つの研究領域の知見を統合することで、惑星系形成をより広く統一的に理解しようと試みられ始めている。

しかし、私はここで本質的に重要な指摘をしたい。太陽系は46億年も昔に形成されたため、その当時の周囲環境は現在の太陽系近傍のそれとは異なる可能性がある、という点である。例えばもし太陽系が現在よりも銀河中心に近い所で生まれた場合、そこは星形成活動並びに超新星爆発などが盛んに起こる場所であるため、太陽系原始ガス雲の乱流度合いや金属量は比較的高かった可能性がある。つまり、隕石や小惑星探査などで議論される我々の太陽系の形成と、ALMAやすばる望遠鏡を用いて研究されている太陽系近傍の系外惑星の形成については、時間的にも空間的にも異なる時代・場所での惑星形成を比べていることに注意しなければならない。このギャップを埋めるためには、太陽系が誕生した46億年前から現在に至るまで、銀河円盤内における太陽系やその他恒星の変遷・移動についてを統一的に理解する必要がある。つまり、太陽系が46億年前に銀河系内のどのような場所・環境で生まれ、どのような経路で現在の位置までたどり着き、そして銀河系のどのような環境に今存在しているのかを理解する必要がある。

46億年間の太陽系の軌跡については、銀河系円盤における金属量勾配の観測や宇宙論的銀河形成シミュレーションなどによって、銀河中心部から外側に向かって移動してきたことが指摘されてきた。しかし、太陽系移動を引き起こす物理的要因は未だに特定されておらず、本研究でまさに取り組む問題である。この太陽系移動問題では星々の重力多体問題を解くN体銀河モデルが広く用いられてきており、多くの先行研究では銀河渦状腕や棒状構造、そして衛星銀河の衝突などによる角運動量供給が注目されてきた。しかし、巨大分子雲による重力散乱については十分に研究されていない。なぜなら、銀河円盤内の巨大分子雲の分布と運動を正しく記述するためには、星のN体重力計算に加え、星間ガスの流体力学シミュレーションが必要であるためである。巨大分子雲による重力散乱を考慮した最近の銀河シミュレーションにおいても、巨大分子雲は星と同様のN体粒子として簡易的に扱われている。つまり、太陽系移動の調査に対して、銀河の星間ガス流体力学計算を用いることが本研究の特色である。

2. 研究の目的

太陽系が誕生した46億年前から現在に至るまでの銀河系全体の進化と、その銀河円盤内における太陽系やその他惑星系の変遷と移動を統一的に理解することが本研究の目的である。本研究の意義は、隕石分析や小惑星探査機「はやぶさ2」などによる太陽系形成研究と、ALMA電波望遠鏡などによる系外惑星研究を繋ぐ橋渡しの役割を担う点である。特に、銀河系の星間ガス流体力学シミュレーションを行うことで、巨大分子雲によって、太陽系がどれほどの角運動量を獲得し、どれほどの距離を移動することが可能なのかを明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

銀河系の星間ガス流体力学シミュレーションを行う。そして巨大分子雲によって太陽系がどれほどの角運動量を獲得し、どれほどの距離を移動することが可能なのかを調査する。銀河ポテンシャル中の星間ガス進化については格子法を用いた流体力学計算を、そして太陽系移動についてはトレーサー粒子の質点運動計算を行う。銀河モデルはN体粒子ではなく、外場ポテンシャルを用いる。

初期条件となる銀河モデル、つまり銀河円盤の星々とダークマターの分布は、外場ポテンシャルを用いた滑らかな分布を仮定する。広く使用されるN体銀河モデル(Live disc)をあえて使わない。こうすることで、銀河スパイラル構造(渦状腕)や棒状構造の影響を排除することができる。また、N体銀河モデルでの粒子質量は少なくとも1万太陽質量以上であり、非現実的な重力散乱を引き起こしてしまう可能性がある。外場ポテンシャルではそれを排除できる。

上記の初期条件に加え、各流体格子に対し、ガス冷却、ガス自己重力、星形成とフィードバックなど、銀河円盤での星間ガス進化に必要な物理モデルを実装する。こうすることで、巨大分子雲の形成、進化、破壊を自己一貫的(セルフコンシステント)に扱うことができる。

太陽系移動を調べるため、初期条件において太陽系を模したトレーサー粒子を銀河円

盤内各所に配置し、そのトレーサ粒子の角運動量変化や、それに伴う銀河半径方向の移動距離を計測する。

シミュレーション Box の一辺は 128 kpc、銀河円盤の半径は約 20 kpc とする。巨大分子雲は小さいもので数 10pc であることを踏まえ、分解能は 8pc とする。シミュレーション時間に関しては 1Gyr 程度を行う。太陽系の年齢 46 億年 (4.6 Gyr) よりも短い、各要因による角運動量供給の特徴を捉えるには十分な長さと考えられる。

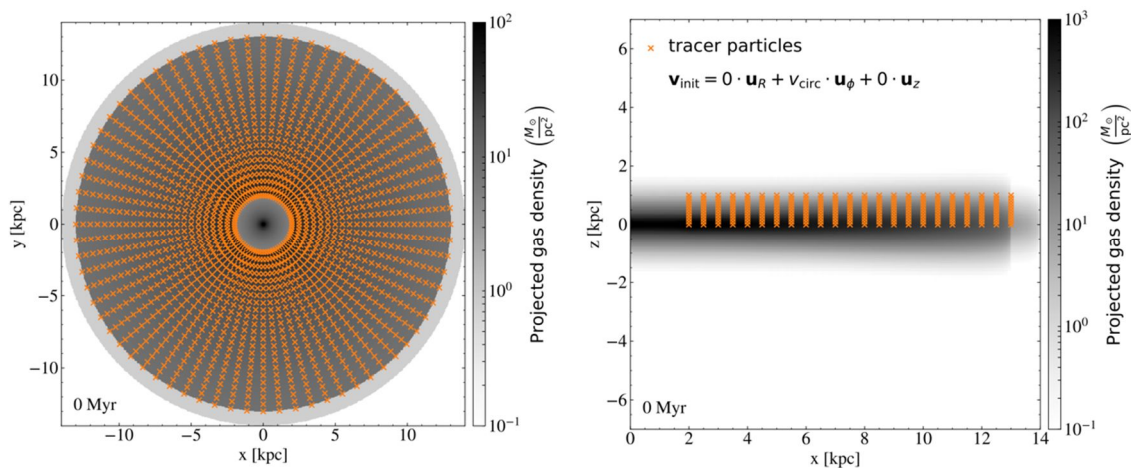


Figure 1 : 銀河星間ガス流体シミュレーションの初期条件。カラーは星間ガスの表面密度を、オレンジのマーカーはトレーサ粒子を示している。(Fujimoto et al. 2023; MNRAS, 523.3049F より引用)

4 . 研究成果

その結果、図 2 に示すように、ほとんどの粒子が初期の半径方向位置からずれており、初期高さ z_{init} が小さい星ほど散乱が効果的であることがわかった。一般に、生まれたばかりの星は初期高度が小さいので、この結果は、散乱が古い星よりも生まれたばかりの星に対してより効果的であることを示唆している。次の段落以降では、円盤加熱や半径方向の移動など、より定量的な議論を行う。

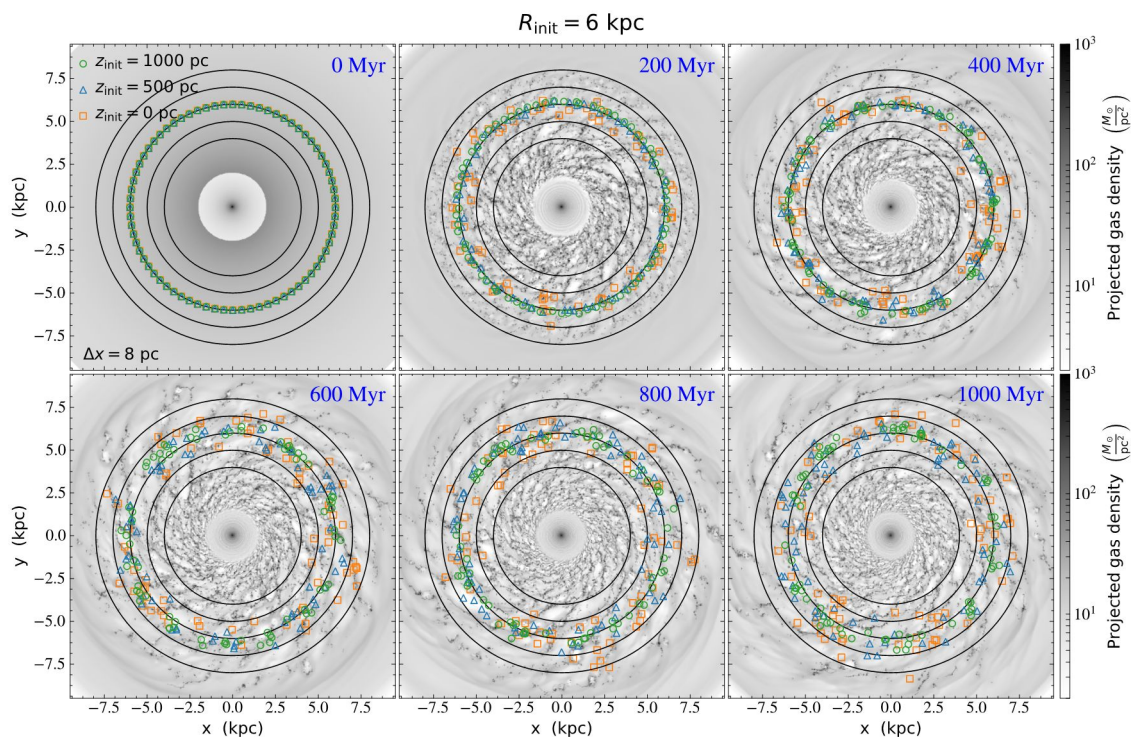


Figure 2 : トレーサ粒子の空間分布とその時間変化 (Fujimoto et al. 2023; MNRAS, 523.3049F より引用)

銀河円盤の加熱進化

銀河系中面の近くで形成された新生星は、1Gyr 以内、特に最初の数百 Myr 以内に GMC によって効率よく散乱され、若い円盤は大きな加熱指数 β で運動論的に加熱される。

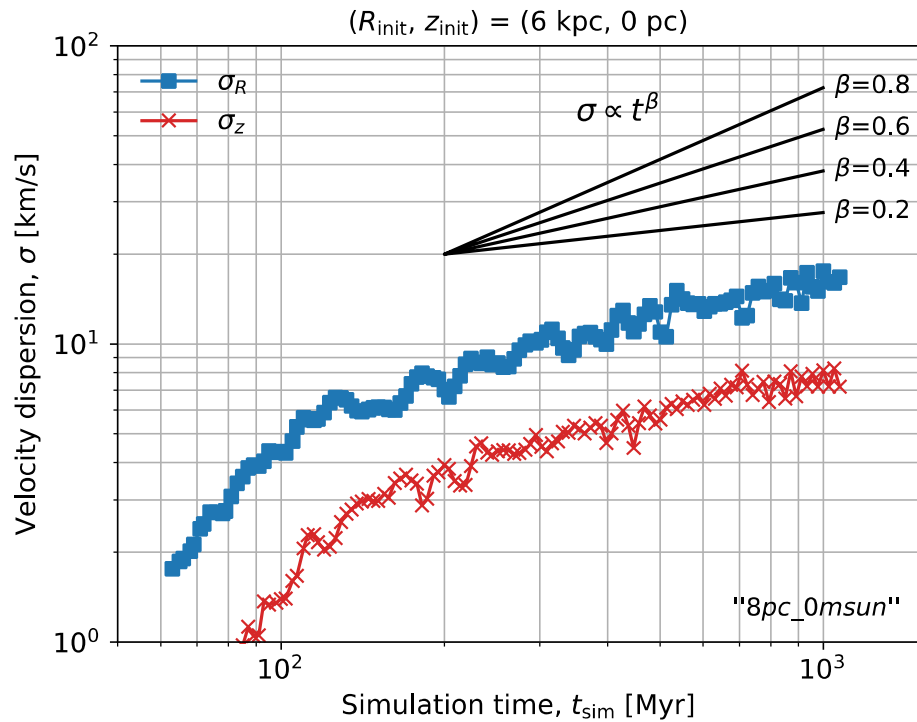


Figure 3 : 動径方向並びに鉛直方向の速度分散の時間変化 (Fujimoto et al. 2023; MNRAS, 523.3049F より引用)

トレーサー粒子の動径移動

半径方向の移動は銀河円盤内でより多く起こっている。 $z_{init} = 0$ pc の粒子の 30% 近くが、軌道半径を 1 kpc 以上内向きか外向きに変えている。

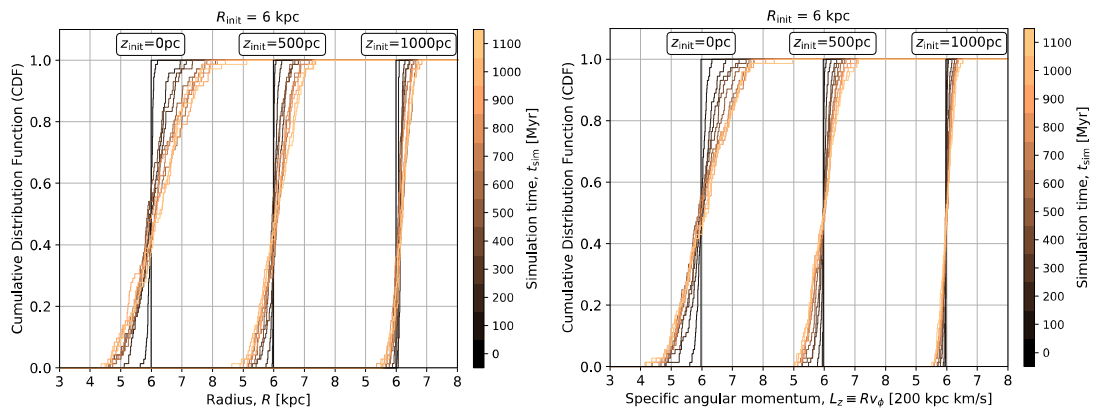


Figure 4 : 初期半径を $R_{init} = 6$ kpc、初期高さを $z_{init} = 0, 500, 1000$ pc としたトレーサー粒子の、瞬間的な半径方向の位置 (左) と比角運動量 (右) の正規化累積分布関数の時間発展 (Fujimoto et al. 2023; MNRAS, 523.3049F より引用)

円盤加熱と動径移動の関係

明確な相関関係はなく、ほとんどランダムな分布に見える。これは、各粒子が必ずしもそれらの物理量を同時に変化させるわけではないことを示唆している。

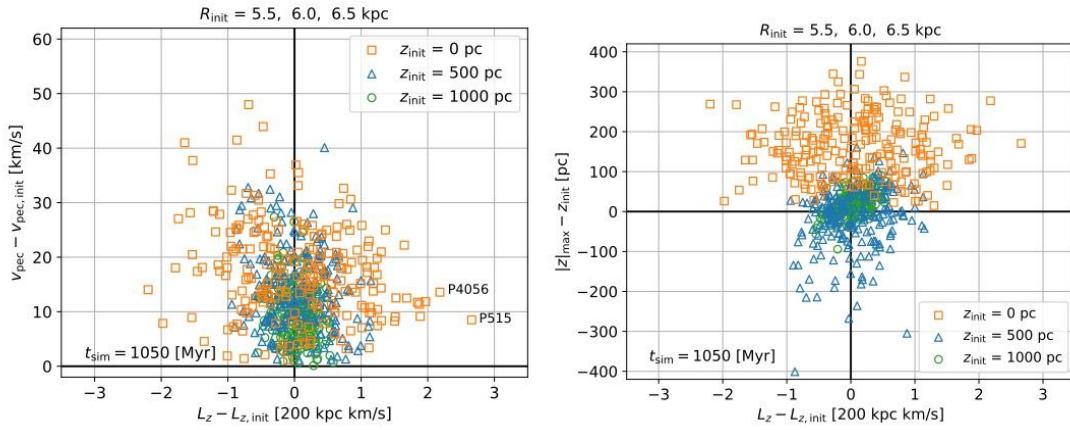


Figure 5 : 散布図 : 特異速度対比角運動量 (左) と高さの局所最大値対比角運動量 (右) (Fujimoto et al. 2023; MNRAS, 523.3049F より引用)

まとめ

- GMC は銀河円盤を効果的に加熱し、速度分散は最初の数百 Myr で急速に増大する。
- 円盤の効率的で急速な加熱は、初期高さが小さい粒子で顕著であり、この粒子は銀河の中間面に近いところで新しく形成された星と考えられる。
- 円盤加熱だけでなく、半径方向の移動も起こる。新生星の 30 パーセントは角運動量の変化を示し、その結果、軌道半径が内向きか外向きに 1kpc 以上変化する。
- 半径方向の移動は、最初の数百 Myr で急激に起こる。その後、粒子は銀河面を垂直に振動し始め、角運動量の変化は遅くなる。
- 角運動量に変化する粒子が同時に特異運動を変化させるとは限らず、その逆も同様である。

これらの結果は、太陽系が誕生して間もない 4.6Gyr 前に、近傍の GMC との重力相互作用によって、大きな半径方向の移動を経験した可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujimoto Yusuke, Inutsuka Shu-ichiro, Baba Junichi	4. 巻 523
2. 論文標題 Efficient radial migration by giant molecular clouds in the first several hundred Myr after the stellar birth	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3049 ~ 3068
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stad1612	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 -

1. 著者名 Desch, S. J.; Young, E. D.; Dunham, E. T.; Fujimoto, Y.; Dunlap, D. R.	4. 巻 9
2. 論文標題 Short-Lived Radionuclides in Meteorites and the Sun's Birth Environment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomical Society of the Pacific Conference Series	6. 最初と最後の頁 759-798
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤本裕輔
2. 発表標題 Galaxy evolution and Solar system formation connected by numerical galaxy simulations of short-lived radioactive nuclides
3. 学会等名 TJR研究会「階層をつなぐ科学：宇宙から生命まで」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本裕輔
2. 発表標題 巨大分子雲の重力散乱による太陽系移動
3. 学会等名 新学術領域「新しい星形成理論によるパラダイムシフト」大研究会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本裕輔
2. 発表標題 地質学的試料に残る超新星起源の ^{60}Fe と銀河化学進化シミュレーションで探る太陽系の周囲環境
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fujimoto Yusuke
2. 発表標題 Efficient radial migration by giant molecular clouds in the first several hundred Myr after the stellar birth
3. 学会等名 The 2023 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本裕輔
2. 発表標題 星形成から数100Myrの短時間に起こる、巨大分子雲による円盤加熱と恒星の動径移動
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本裕輔
2. 発表標題 星形成から数100Myrの短時間に起こる、巨大分子雲による円盤加熱と恒星の動径移動
3. 学会等名 天の川銀河研究会2024
4. 発表年 2024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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------