

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14517

研究課題名（和文）恒星ストリームの重力多体計算で駆動する暗黒衛星銀河探査

研究課題名（英文）Exploration of dark satellites driven by N-body simulations focusing on stellar streams

研究代表者

三木 洋平（MIKI, Yohei）

東京大学・情報基盤センター・助教

研究者番号：70734375

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：銀河衝突シミュレーションの高速化のために、重力多体シミュレーション用のプログラムを最適化し、NVIDIA A100上ではNVIDIA V100の1.2-1.6倍、NVIDIA H100 PCIe上ではNVIDIA A100の1.3-1.4倍程度の高速化を達成した。また、銀河衝突シミュレーションの実行中に、GPU上で行う重力多体計算とCPU上で行う解析処理を同時に行うことで、処理の効率化にも成功した。銀河衝突シミュレーションを通じて、小さな銀河が大きな銀河に衝突した際に、大きな銀河の中心ブラックホール周辺の物質を剥ぎ取ってしまうことでブラックホール活動が停止する可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最新世代のGPUを対象とした性能最適化によって理論ピーク性能比以上の性能向上を達成し、また限られた計算機資源のより効率的な利用にも寄与した。

銀河衝突は銀河中心ブラックホール活動を活性化させるのみだと考えられていたが、銀河の衝突軌道によっては逆に不活性化させる場合もあることを示し、ブラックホールと銀河がお互いに影響を及ぼし合いながら進化していく過程を理解する上で重要な知見をもたらした。

研究成果の概要（英文）：We have optimized an N-body simulation code for the latest GPUs to reduce the time-to-solution of galaxy collision simulations. As a result, NVIDIA A100 achieved 1.2 to 1.6-fold acceleration compared to NVIDIA V100, and NVIDIA H100 PCIe is 1.3 to 1.4 times faster than NVIDIA A100. In addition, we have also improved resource utilization during the galaxy collision simulations: the code simultaneously performs N-body simulation on GPU and data analysis on CPU. We have performed galaxy collision simulations and revealed that a head-on collision of galaxies could strip gas surrounding a massive black hole at the galactic center. Because the surrounding gas is considered the fueling source of the massive black hole, galaxy collisions can shut down the nucleus activity.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力多体シミュレーション 銀河進化 銀河衝突 銀河考古学 GPUを用いた演算加速 銀河と中心ブラックホールの共進化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

現在の標準的な構造形成モデルである cold dark matter (CDM) モデルは、宇宙の大規模構造の統計的性質を非常に高い精度で説明できるため、広く受け入れられている。一方で、銀河や矮小銀河といったより小さいスケールにおいては理論と観測の不一致が報告されており、宇宙の構造形成のすべてが理解できているわけではない。こうした理論と観測の不一致の代表例が衛星銀河問題である。CDM モデルに基づく宇宙論的重力多体計算によって、天の川銀河やアンドロメダ銀河 (M31) 程度の質量を持つ DM ハロー内には、数百個もの DM サブハロー (暗黒衛星銀河) が存在することが示唆されている (e.g. Ishiyama et al. 2009)。これに対して、天の川銀河や M31 周辺で発見された衛星銀河の数は 30 から 40 程度 (e.g. McConnachie 2012) であり、理論と観測の間には一桁程度の不一致があることが知られている。

衛星銀河問題における比較の最大の問題点は、電磁波観測では直接検出できない DM サブハローの数と可視光の観測で検出された衛星銀河の数を比較しているという点である。したがって、「銀河ハロー内にはいったい何個の DM サブハローが存在しているのだろうか?」という問いに対する回答を得ることが、衛星銀河問題を正しく理解する上で欠かせない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、近傍銀河である M31 のハロー内に存在する DM サブハローの数を評価することで、CDM モデルが抱える代表的な問題である衛星銀河問題の解決に寄与することである。M31 は我々が住む天の川銀河と同程度の質量を有する最も近い系外銀河であり、距離が近いために詳細観測が可能である。また銀河の外側から観測することで、天の川銀河とは違って全体の構造を俯瞰できるため、ハロー内の構造を探究する上で理想的な天体である。

本研究では、M31 ハロー内の恒星ストリームをプローブとした DM サブハローの検出を目指す。恒星ストリームを用いた DM サブハローの検出方法は以下の通りである。恒星ストリームと DM サブハローの近接遭遇時に働く強い重力相互作用によって、恒星ストリームの密度分布や速度構造にギャップが形成されると予想されている (e.g. Carlberg 2012)。こうしたギャップの数や大きさは、DM サブハローの数や質量、軌道要素などに依存する。したがって、恒星ストリームと DM サブハローの近接遭遇時におけるギャップに関する観測量と DM サブハローの物理量とを紐づける理論テンプレートを作成しておけば、恒星ストリーム中のギャップに注目した観測データと詳細に比較することで DM サブハローの物理量を明らかにできる。

## 3. 研究の方法

恒星ストリームをプローブとして DM サブハローを検出するためには、(1) 恒星ストリームを精密に再現する重力多体モデルを構築し、(2) 恒星ストリームと DM サブハローの衝突実験を DM サブハローの物理量を系統的に変えながら多数回遂行することで理論テンプレートを作成し、(3) 観測データと詳細に比較するという 3 段階の工程が必要となる。本研究においては、上記 3 工程のうち (1) と (2) に取り組んだ。

工程 (1) の実施にあたっては、恒星ストリームの母体となった元衛星銀河の質量、サイズや軌道要素をパラメータとした多数回の重力多体計算を実行する必要がある。このためには高速な重力多体計算コードを準備する必要があり、本研究では GPU を搭載したスーパーコンピュータ上での実行を想定していたため、まずは重力多体計算シミュレーションコード GOTHIC (Miki & Umemura 2017, Miki 2019) の最新世代の GPU 向けの性能最適化に取り組んだ。また、銀河衝突シミュレーションの実行中に同時に解析処理を施すためのコード改良も実施した。こうして開発されたコードを用いて、多数回の銀河衝突シミュレーションを実施した。

工程 (2) としては、恒星ストリームと DM サブハローの衝突実験を DM サブハローの物理量 (質量、中心集中度、軌道要素) を系統的に変えたシミュレーションを実施した。

また、今後工程 (3) を実施する際には、現在すでに観測されている衛星銀河からの影響を事前に評価しておく必要がある。このために、天の川銀河内で観測されている衛星銀河の軌道進化を計算するコードを実装し、高精度な軌道進化計算を実施した。

## 4. 研究成果

- (1) 重力多体計算シミュレーションコード GOTHIC の高速化

研究開始時点においては NVIDIA P100 や NVIDIA V100 などの NVIDIA 製 GPU 向けに最適化されていた重力多体計算シミュレーションコード GOTHIC を、研究期間中に発表された GPU である NVIDIA A100 や NVIDIA H100 向けに最適化した。V100 において導入された動作モードを無効化して暗黙の同期を利用した実装の方が高速であった。

アンドロメダ銀河を模した粒子分布を 8388608 粒子で表現し、全 4096 ステップの計算に要した時間を測定した結果を図 1 に示す。P100 (黒の菱形) および V100 (黄色の三角) は研究開始時点でのデータ、A100 (青の正方形) と H100 (赤丸) が本研究の成果である。A100 は V100 に対して 1.2-1.6 倍高速であり、V100 と A100 の理論ピーク性能比 1.2 よりも高い高速化率が得られた。H100 は A100 に対して 1.3-1.4 倍程度高速であり、この比はほぼ A100 と H100 の整数演算に関する理論ピーク性能比とよく一致している。

用いた GPU の理論ピーク性能比よりも高い性能向上率を実現できたことにより、当初の想定よりも高速に銀河衝突シミュレーションが実行できる環境が整えられた。こうした成果は HPC-Phys 勉強会や SwoPP といった場を通じて公開してきた。また、NVIDIA 社製 GPU だけではなく AMD 社製の GPU 向けの実装・最適化にも取り組み、直接法の場合には両 GPU の性能がほぼ一致することが分かった。こうした結果についても、天文学会や HPC 研究会などの場で結果を報告した。

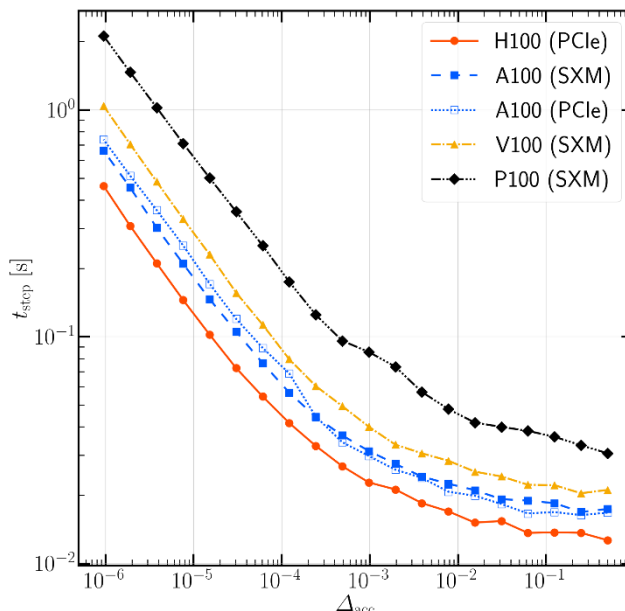


図 1. GOTHIC の実行時間。重力計算の精度を制御するパラメータ  $\Delta_{\text{acc}}$  の関数として、ステップあたりの実行時間を示した。

### (2) 余剰コアを活用した銀河衝突シミュレーションの In-situ 解析

銀河衝突シミュレーションを実行した際には、数値シミュレーションによって得られた構造と観測されている構造とを詳細に比較する解析処理も必要となる。通常はシミュレーション結果をスナップショットファイルとして保存しておき、ポストプロセスとしてデータ解析を施す。しかし、本研究では多数の銀河衝突シミュレーションの実行を念頭に置いているため、生成されるスナップショットファイルのファイル数やディスク容量が膨大となってしまうため、通常の手順の実行は現実的ではない。そこで本研究では、主計算である重力多体シミュレーションを用いた時間進化の計算に加えて、副計算である解析処理も同一の銀河衝突シミュレーションの中で実行することによって、スナップショットファイルを生成せずに研究を遂行することとした。具体的な処理としては、主計算を進めてスナップショットファイルを生成していた時刻に達した段階で処理を中断し、副計算である解析処理を実行し、解析処理完了後に主計算を再開するという手順である。

本研究で用いたコード GOTHIC は GPU 向けに高度に最適化されており、ホスト CPU はほとんど処理をしない状態となっている。こうした余剰コアを活用して、GPU 上で主計算が進行している最中にホスト CPU を用いて副計算である解析処理を同時に処理する機能を実現した。この際に OpenMP の task 指示文を用いることで、プログラム全体の構造を大きく変えずに実装できた。同様のワークフローを採用する数値シミュレーションは数多くあると考えられるので、広範な分野での研究進展に資する研究成果であり、また HPC 研究会において報告済みである。

### (3) 銀河衝突シミュレーション

DM サブハローの検出を目指す研究においては、細い恒星ストリームの母銀河の中心から遠い位置にあるギャップに注目することが重要である。恒星ストリームの細さはストリームを構成する恒星の速度分散によって決まっており、細い恒星ストリームほど速度分散が小さいためギャップ構造が長時間残りやすく、また DM サブハローと近接遭遇の痕跡を検出しやすいという利点がある。また、母銀河の中心部に近い領域においては、バルジや円盤成分から受ける潮汐力および球状星団などの天体から受ける影響が無視できないため、DM サブハローの痕跡の同定が困難になる (Garrison-Kimmel et al. 2017) と考えられており、ハローの外縁部に存在する恒星ストリームが適している。本研究では、こうした望ましい性質を全て満足する恒星ストリームとして、M31 ハローの外縁部に存在する North-Western (NW) ストリームに注目した。NW ストリームは PAndAS プロジェクト (McConnachie et al. 2009, 2018; Richardson et al. 2011) によって最近発見された恒星ストリームであり、M31 の北西方向に 100 kpc 以上伸びている。NW ストリームはかつて M31 に衝突した矮小銀河の残骸であると考えられており、重力多体計算を用いた形成過程の探求が進められている (Kirihara et al. 2017; Komiyama et al. 2018)。

ここまで述べてきた GOTHIC の高速化・多機能化の後に、NW ストリームを再現するためのパラメータ探査を東京大学情報基盤センターが運用する Wisteria/BDEC-01 のデータ・解析ノード群 (Aquarius) を用いて遂行した。しかしこの探査を遂行している途中に、すばる望遠鏡を用いた最新の観測データからは NW ストリームと M31 の距離が今までの結果とは異なることが示唆されるという報告を受けた。距離データが定かではない状態におけるパラメータ探査の強行は、無駄計算となってしまうリスクが高いため、パラメータ探査作業については一旦中断して観測データがアップデートされた後に再度実施することとした。

一方で、恒星ストリームと DM サブハローの衝突実験を行い、理論テンプレート作成の予行演習を行うこととした。数十通りもの衝突パラメータの下で長時間シミュレーションを行い、衝突直後だけではなくその数十億年後に渡っての時間進化を詳細に研究した。これによって、恒星ストリームが DM サブハローの衝突によって受ける影響は短期的・局所的なものにはとどまらず、より大規模な影響を受けることが分かってきた。シミュレーション結果については詳細な解析を進めている段階であり、解析結果がまとめ次第、査読付き論文誌へと投稿する予定である。

#### (4) 銀河衝突による銀河中心ブラックホールの活動休止過程

DM サブハローの軌道分布を推定する上での手がかりとなるデータを得るべく、位置天文観測衛星 Gaia の世界最高精度の観測データに基づいて、天の川銀河周辺で観測されている衛星銀河の精密軌道計算を実施した。この軌道計算の結果からは、衛星銀河が母銀河の中心領域に落下していき潮汐破壊されるような銀河衝突は 1 億年に 1 回程度であると推定された。この結果は、本研究の主題である衛星銀河問題に関する研究とは別に進めていた、銀河と中心ブラックホールの共進化に関する研究を大きく進めることに寄与したため、以下では共進化研究について述べる。銀河中心の大質量ブラックホールに十分な量のガスが降着すれば、ガスの位置エネルギーの解放により、活動銀河核として明るく輝くことが知られている。ただし、大質量ブラックホールへのガス供給は角運動量により妨げられ、トラス状の構造がガスの“ため池”の役割を担うと考えられている。このガスの落下によるブラックホール活動の点火機構は、銀河の進化過程において頻繁に起こる現象である銀河衝突だと考えられているが、活動性を終了させる機構にはいまだ定説がない。一方で、大質量ブラックホールが明るく輝いている期間は、宇宙年齢 138 億年のうちわずか 1 億年程度と非常に短いことが知られている。つまり、多くの銀河中心ブラックホールはガス欠でエネルギー源の枯渇状態にあり、これは我々が住む天の川銀河中心の大質量ブラックホールも同様である。また、急激に活動性が停止した痕跡を示す銀河も近年多数見つかっており、活動停止機構の特定が待たれている。

活動停止機構の仮説として、銀河衝突によって中心ブラックホールへのガス供給源を取り去ってしまうことができれば、やがて中心ブラックホールはガス欠状態に陥り活動停止に追い込まれるため、銀河衝突がブラックホール活動の停止機構としても働くというシナリオを立てた

(図 2)。そして東京大学情報基盤センターと筑波大学計算科学研究センターで共同運用されていた Oakforest-PACS などのスーパーコンピュータを用いた 3 次元数値流体シミュレーションや 1 次元解析的モデルによって、衝突した衛星銀河ガスの柱密度が中心ブラックホール周辺のトラス状ガスの柱密度よりも高い場合には、衛星銀河ガスからの運動量輸送によってほぼ全てのガスが剥ぎ取られることを明らかにした (図 3)。

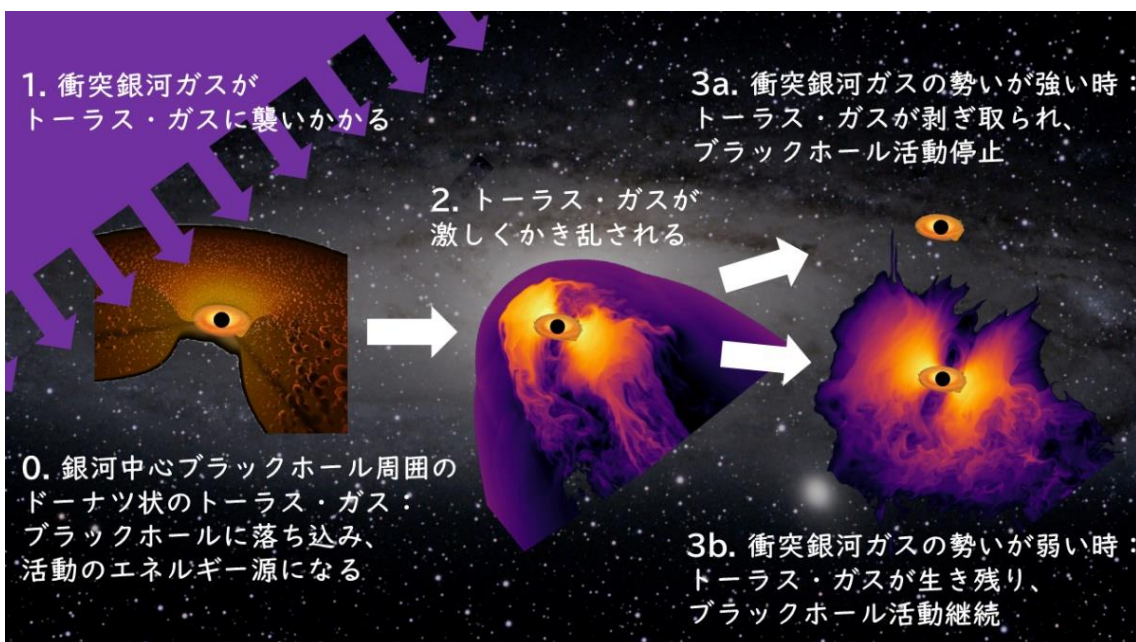


図 2. 銀河衝突が中心ブラックホール活動に与える影響。

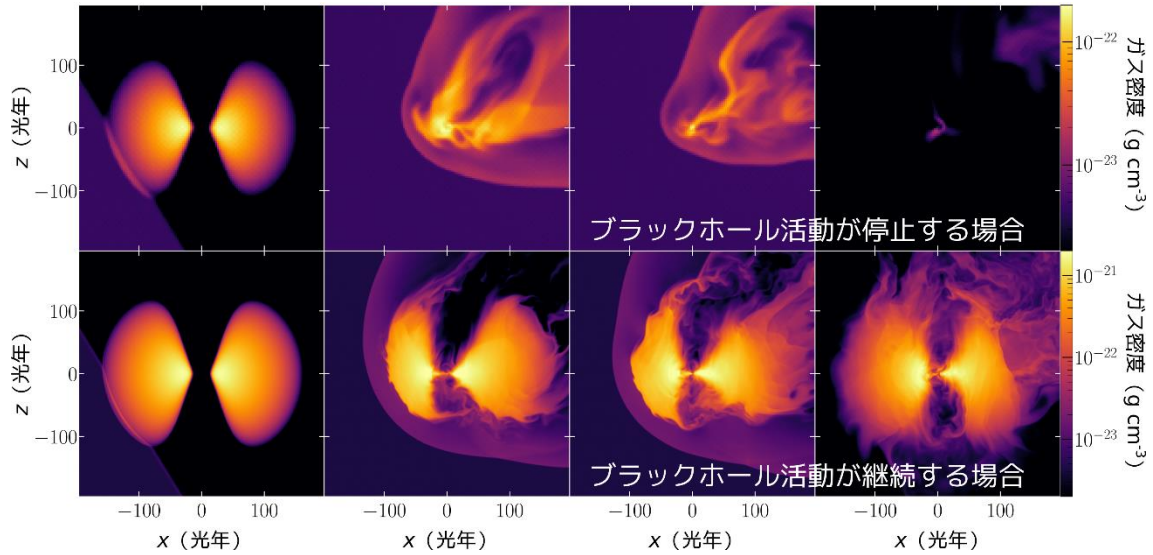


図 3. トーラスガスの時間進化. 上段にはトーラスガスが剥ぎ取られる場合, 下段にはトーラスガスが生き残る場合の結果を,  $x-z$  子午面上における密度分布を用いて示した. 衛星銀河ガスはシミュレーション開始から 110 万年間に渡って, 図中の左下隅から流入し続ける. 左から順に, ガス流入開始から 2 万年, 46 万年, 90 万年, 136 万年後のガス密度分布を示した.

さらに, 特定の銀河衝突モデルを得られたここまでの結果が, 一般の銀河中心ブラックホール活動の停止機構へと拡張できるかを検証した. その結果, 多くの銀河中心ブラックホール周辺のトーラス状ガスの柱密度は銀河衝突によって剥ぎ取り可能な範囲である, つまり銀河衝突によって多くの銀河中心ブラックホール活動の停止が可能であることを示した. 本節冒頭で紹介した, 衛星銀河が母銀河の中心領域に落下していくような銀河衝突は 1 億年に 1 回程度という推定値とあわせて考えると, 活発に活動している銀河中心ブラックホールも 1 億年程度で活動停止に追い込まれることとなる. この結果は大質量ブラックホールが明るく輝いている期間は 1 億年程度であるという事実とよく符合しており, 銀河衝突と大質量ブラックホール活動の関係性の完全解明に向けての大きな一歩となる.

本研究によって, 中心ブラックホールの活動性を活性化するのみと考えられてきた銀河衝突が, 実は反対に活動性の停止にも寄与することが明らかになった. 中心ブラックホールの運命を左右するのは衝突してくる衛星銀河の軌道であり, 銀河の中心領域に突入する際には活動性を停止, 銀河の中心を離れて衝突する際には活動を活性化させると考えられる. こうした軌道の重要性は今まで考えられておらず, 銀河とブラックホールの共進化過程への理解を深める上での重要な視点を提供した. また, 近年の観測によって急激に中心ブラックホールの活動性を停止した兆候を示す天体群が新たに見つかってきており, こうした新天体群の理解にもつながることが期待される. 本研究の成果は査読付き論文誌である *Nature Astronomy* 誌に掲載され, また多数の新聞や web メディアにも取り上げられた.

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 0件）

1. 著者名 Miki Yohei, Mori Masao, Kawaguchi Toshihiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Destruction of the central black hole gas reservoir through head-on galaxy collisions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 478-484
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41550-020-01286-9	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三木 洋平
2. 発表標題 NVIDIA A100における重力ツリーコードの性能評価
3. 学会等名 SWoPP 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三木 洋平, 埴 敏博
2. 発表標題 AMD MI100に向けたN体計算コードの移植と性能評価
3. 学会等名 第182回HPC研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合 直聡, 三木 洋平, 星野 哲也, 埴 敏博, 中島 研吾
2. 発表標題 OpenMPを用いたGPUオフローディングの有効性の評価
3. 学会等名 第183回HPC研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤沢 龍哉, 埴 敏博, 三木 洋平
2. 発表標題 余剰コアを活用したOpenMP TaskによるIn-situ解析の実現
3. 学会等名 第183回HPC研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木 洋平
2. 発表標題 重力多体計算のGPU実装 --CUDAでの実装例--
3. 学会等名 第10回 HPC-Phys勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三木 洋平, 森 正夫, 川口 俊宏
2. 発表標題 Hungry black hole: 銀河衝突によるAGNの活動停止とduty cycleとの関係
3. 学会等名 日本天文学会 2021年 春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三木 洋平, 埴 敏博, 河合 直聡, 星野 哲也
2. 発表標題 AMD製GPU・NVIDIA製GPU両対応direct N-body codeの実装と性能評価
3. 学会等名 日本天文学会 2022年 秋季年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「冬眠するブラックホール」の実態を解明  
[https://note.com/utokyo\\_itc/n/nb2e19a91d322?magazine\\_key=m1125a617429d](https://note.com/utokyo_itc/n/nb2e19a91d322?magazine_key=m1125a617429d)  
冬眠するブラックホール ～銀河衝突がもたらす大質量ブラックホールのエネルギー源の流失～  
[https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0310\\_00026.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0310_00026.html)  
When galaxies collide  
[https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508\\_00162.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508_00162.html)

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