

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740190

研究課題名(和文) 次世代高精度天体観測に向けたX線放射モンテカルロコードの開発と観測的実証

研究課題名(英文) Development and observational verification of Monte-Carlo X-ray radiation code toward next-generation observations

研究代表者

小高 裕和 (Odaka, Hirokazu)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：50610820

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)：新世代・次世代の高精度宇宙X線観測に向けて、モンテカルロ法に基づくX線放射計算コードの開発を行った。このコードはさまざまな天体に適用可能な高い汎用性を持つフレームワークMONACOとして完成した。物理プロセスとして、高温の降着流における逆コンプトン散乱、光電離プラズマ、低温物質からのX線反射を扱うことができる。これらを中性子星・ブラックホールへの降着流、活動銀河核からの超高速アウトフロー、活動銀河ダストトラス、白色矮星の降着円盤コロナに適用し、モンテカルロ計算による高精度データをすざく衛星、チャンドラ衛星、XMM-Newton衛星などのデータに適用する仕組みを確立した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new X-ray radiation calculation code based on Monte Carlo methods toward new/next generation high-precision observations of cosmic X-rays. This code called MONACO is a multi-purpose framework applicable to a variety of astrophysical objects. MONACO treats physical processes of inverse Compton scattering in a hot accretion flow, a photo-ionized plasma, and X-ray reflection from cold matter. We have applied these astrophysical models to accretion flows onto neutron stars and black holes, ultra fast outflows from active galactic nuclei, dusty tori in active galaxies, and accretion disk coronae around white dwarfs, and established data analysis system based on precise Monte-Carlo models for X-ray observatories such as Suzaku, Chandra, and XMM-Newton.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：中性子星 ブラックホール 活動銀河核 X線天文学 輻射輸送

1. 研究開始当初の背景

宇宙 X 線の観測的研究において、2000 年以降、米国の Chandra 衛星、欧州の XMM-Newton 衛星、日本のすざく衛星による観測装置の発展はデータ品質の飛躍的な向上をもたらした。さらに、我が国が主導する次世代国際 X 線天文衛星「ASTRO-H」(2015 年度軌道投入予定)はエネルギー分解能約 7 電子ボルトという超精密分光を実現し、精度・統計ともにかつてない質のデータを得る予定である。これらのデータは天体の物理状態についての情報を豊富に含み、X 線天体物理学の分野も他の実験物理学分野と同様の**精密定量科学の時代**を迎えようとしている。しかし、その情報を正確に抽出するためには、同時に高精度の天体物理モデルが必要である。従来の観測的研究はデータが持つ情報量を十分に活かすことができず、データ解釈のための精密なモデルを構築する手法の開発が急務となっていた。

2. 研究の目的

ブラックホールや中性子星などの強重力天体に物質が落下すると、その降着過程で莫大な重力エネルギーを解放し、X 線で明るく輝く。この X 線放射の直接成分スペクトルや X 線放射が降着天体周辺の物質により反射・散乱されたスペクトルを正確にモデル化することが本研究の目的である。スペクトルを正確に求めるには放射輸送問題を解く必要があり、複雑な天体ジオメトリにおいて、光子の吸収、散乱、再放出を扱うには、モンテカルロ計算が最も適している。

したがって、本研究は、新世代・次世代の宇宙 X 線観測によって得られる高精度データの解析に耐える精密な天体物理モデルを構築可能なモンテカルロ放射コードの開発を目的とする。具体的には、対称性の仮定に頼らない現実的な天体の形状を扱うことができ、正確な光子の追跡を行い、関連する物理相互作用を一般性のある形で導入できる汎用の放射計算フレームワークを開発する。さらに、これを適用し、高密度天体周辺の降着プラズマ流や光電離プラズマの精密モデル化を行い、すざく衛星や Chandra 衛星などで得られた実データを用いて検証する。

天体の様々な環境によって、そこで重要になる放射物理過程も異なる。本研究では、降着天体とその周辺で重要な働きをする放射過程を整理し、次の 3 つの課題について、モンテカルロコードでの物理プロセスを設計・実装した。(1) 中性子星・ブラックホール降着流からの熱的な逆コンプトン放射、(2) 光電離プラズマ、(3) 分子雲・AGN ダスト・トラスなどの低温ガスからの X 線反射。

3. 研究の方法

本研究ではモンテカルロコードの開発と観測データを用いた検証を行った。コード開発はソフトウェアフレームワークの設計・開

発、光子相互作用のモデル化、そして、天体物理モデルの構築に分解できる。もともと研究代表者が開発を進めていたコードをベースに汎用性を高め、整理しなおして MONACO というフレームワークを完成させた。

具体的にモデル計算を行うテーマとして、強磁場を持つ中性子星への降着流を選んだ。中性子星からの降着流は強重力場・強磁場・強放射場という極限環境で実現しており、非常に複雑で、これまで物理的な放射モデルの構築が困難であったが、モンテカルロ計算により可能になる。構築したモデルとすざく衛星による Vela X-1 の観測データを比較することで、中性子星降着流の物理に迫ることができる。ここで構築した計算コードは弱い磁場の中性子星やブラックホールにも適用できる。

次に光電離プラズマの研究を行った。Chandra 衛星により Vela X-1 観測し、中性子星からの強力な X 線により光電離した星風からの輝線を捉えて、放射モデルの構築に役立てた。このモデルは大質量 X 線連星(中性子星やブラックホールと大質量星の連星系)のほか、超巨大ブラックホールからの高速なアウトフローや白色矮星の降着円盤周辺のコロナのモデル化に適用できる。

ソフトウェア開発は研究代表者自身が行い、天体物理モデルの検討やデータの解析は海外の研究者や大学院生との共同研究で進めた。

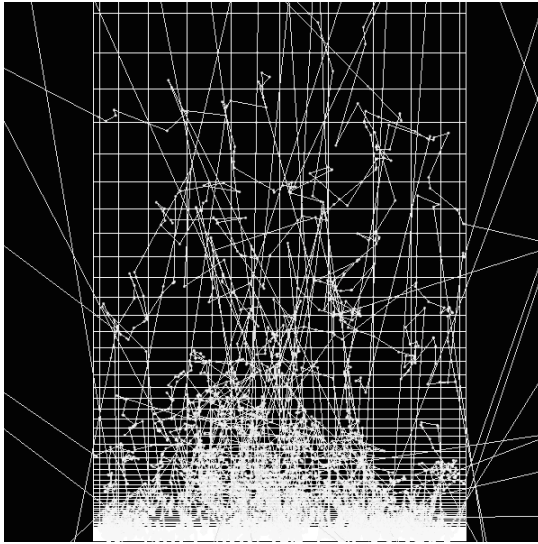
4. 研究成果

(1) MONACO フレームワークの開発

モンテカルロ法を用いた粒子追跡により天体からの X 線放射を計算するソフトウェアフレームワーク MONACO を完成させた。MONACO は様々な天体、様々な物理過程を統一的に扱えるように設計されており、高い汎用性を持つ。(学会発表 8, 7, 5)

(2) 中性子星降着流からの熱的な逆コンプトン放射

MONACO を用いて、強い磁場を持つ中性子星への降着流における熱的なコンプトン放射を計算し、すざく衛星の Vela X-1 の観測データを用いて検証を行った。すざく衛星が誇る高いシグナル・ノイズ比を活かして、スペクトルの時間変動を 2000 秒程度の短い時間スケールで詳しく追跡することに初めて成功した。この時間変動は降着プラズマの物理条件の変動を反映しており、モンテカルロ計算と比較して、放射が熱・バルク運動による逆コンプトン散乱により生じることを示し、降着流の半径が数 100 メートルと非常に細いことを突き止めた。また重要な副産物として、星風の非一様構造に制限を与えた。(雑誌論文 7, 5, 1, 学会発表 13, 12, 9)。



図の説明：中性子星降着流からの放射のモンテカルロ計算を可視化した。半径数百メートルの円柱状の降着流を真横から見ている。描かれているのは複数の光子の飛跡であり、光子がランダムに散乱している様子がわかる。

(3) ブラックホール降着流からの熱的な逆コンプトン放射

中性子星降着流の計算コードは弱磁場の中性子星やブラックホールにも適用可能である。そこで、ブラックホール降着流からのX線スペクトルに適用し、スペクトル変動や準周期的振動のメカニズムを理論的に検討した。(学会発表 6, 5)

(4) 活動銀河核からの超高速アウトフロー

光電離プラズマからの輝線・吸収線の計算コードを開発した。活動銀河核 PDS 456 は超巨大ブラックホールから吹き出る光速の30%にも達する「超高速アウトフロー」を示している。光電離プラズマの枠組みでMONACOによるモデル計算を行い、すざく衛星のデータと比較を行った。これによりアウトフローの物理パラメータを決定し、超高速アウトフローが降着円盤からの紫外線放射により加速されるというシナリオを支持する結果を得た。(雑誌論文 2)

(5) 白色矮星降着円盤コロナのモデル化

光電離プラズマのコードを超軟 X 線天体(表面で恒常的に核燃焼する白色矮星)の降着円盤コロナに適用し、スペクトルモデルを構築した。このモデルをXMM-Newton衛星のデータと比較し、コロナの物理量を推定した。(学会発表 1)

(6) 活動銀河核ダストトーラスのモデル化

活動銀河核ダストトーラスからの反射・透過スペクトルをMONACOで計算した。ここで重要な物理プロセスは冷たい物質からのX線反射である。同じ物理を共有する銀河中心領域の分子雲からの反射について、すでに

MONACOの結果を報告しており(Odaka et al. 2011)、そのコードを再利用することができた。トーラスが非一様な密度分布を持つときのスペクトルモデルを構築し、将来のASTRO-H衛星の観測に備えている。(学会発表 4, 2)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- 1) [解説記事] 小高裕和、「中性子星降着流からのX線放射—モンテカルロ計算による放射モデル」, 天文月報、2014年10号、日本天文学会
- 2) “The origin of ultrafast outflows in AGN: Monte Carlo simulations of the wind in PDS 456”, Hagino, K., Odaka, H., Done, C., Gandhi, P., Watanabe, S., Sako, M., Takahashi, T., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 663-676, 2015
- 3) “Discovery of recombining plasma in the supernova remnant 3C 391”, Sato, T., Koyama, K., Takahashi, T., Odaka, H., Nakashima, S., *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, 1249-1257, 2014
- 4) “Bin mode estimation methods for Compton camera imaging”, Ikeda, S., Odaka, H., Uemura, M., Takahashi, T., Watanabe, S., Takeda, S., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 760, 46-56, 2014
- 5) “Short-term Variability of X-rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. II. Monte Carlo Modeling”, Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y., Watanabe, S., Takahashi, T., Makishima, K., *Astrophysical Journal*, 780, 38-49, 2014
- 6) “Three-Dimensional and Multi-Energy gamma-ray Simultaneous Imaging Using a Si/CdTe Compton Camera”, Suzuki, Y., Yamaguchi, M., Odaka, H., and 13 co-authors, *Radiology*, 267.3, 941-947, 2013
- 7) “Short-term Variability of X-rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. I. Suzaku Observations”, Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y., Watanabe, S., Takahashi, T., Makishima, K., *Astrophysical Journal*, 767, 70-86,

2013

- 8) "High-resolution Compton cameras based on Si/CdTe double-sided strip detectors", **Odaka, H.**, and 15 co-authors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 695, 179-183, 2012

[学会発表] (計 13 件)

- 1) 和田師也 (共著者に研究代表者を含む)、モンテカルロ法を用いた超軟 X 線天体 CAL87 の X 線スペクトルシミュレーション、大阪、日本天文学会、2015 年 3 月 19 日
- 2) 古井俊也 (共著者に研究代表者を含む)、フレームワーク MONACO を用いた活動銀河核トーラスの X 線スペクトルシミュレーション 2、大阪、日本天文学会、2015 年 3 月 21 日
- 3) 小高裕和、ASTRO-H による中性子星の研究、中性子星核物質第 3 回研究会、熱川、2014 年 9 月 23-25 日
- 4) 古井俊也 (共著者に研究代表者を含む)、フレームワーク MONACO を用いた活動銀河核トーラスの X 線スペクトルシミュレーション、大阪、日本天文学会、2014 年 9 月 13 日
- 5) Hirokazu Odaka, "ASTRO-H & MONACO for X-ray Polarimetry", X-ray Polarisation in Astrophysics - a window about to open?, ストックホルム、スウェーデン、2014 年 8 月 25-28 日
- 6) Hirokazu Odaka, "Monte Carlo Modelling of Comptonised X-ray Radiation from Accretion Flows onto Neutron Stars and Black Holes", The X-ray Universe 2014, ダブリン、アイルランド、2014 年 6 月 16-19 日
- 7) 小高裕和、MONACO: モンテカルロシミュレーションによる放射計算フレームワーク、第 5 回アウトフロー研究会、愛媛大学、2014 年 6 月 9 日
- 8) Hirokazu Odaka, "MONACO: Calculation framework of X-ray Radiation in Astrophysical Objects based on Monte Carlo Simulations", The HXI/SGD Science Workshop, 広島大学、2014 年 2 月 24-25 日
- 9) Hirokazu Odaka, "X-ray Observations of Accreting Neutron Stars", The 12th Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, つくば、2013 年 11 月 18-21 日
- 10) Hirokazu Odaka, "X-ray & Gamma-ray Polarimetry with ASTRO-H", The 4th High Energy Phenomena in Relativistic

Outflows Meeting, ハイデルベルク、ドイツ、2013 年 4 月 26-29 日

- 11) Hirokazu Odaka, "X-ray Observations of X-ray & Gamma-ray Binaries", Workshop on Variable Galactic Gamma-ray Sources, バルセロナ、スペイン、2013 年 4 月 16-18 日
- 12) 小高裕和、降着駆動パルサー Vela X-1 の広帯域 X 線スペクトルの時間変動とその解釈、日本天文学会、大分大学、2012 年 9 月 19-21 日
- 13) Hirokazu Odaka, "Short-term variability of Comptonized X-rays from Accreting Neutron Star Vela X-1", COSPAR 2012, マイソール、インド、2013 年 7 月 14-22 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

小高 裕和 (ODAKA, Hirokazu)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
研究員

研究者番号：50610820