

53. X線宇宙観測によるニュートリノ研究を可能にする高角度分解能 X線望遠鏡の開発

明治大学理工学部 専任講師 佐藤 寿紀

概要

本研究では、次世代 X 線天文学において求められる高角度分解能 X 線望遠鏡の実現を目的として、Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー型 X 線望遠鏡に適した高精度ミラーアライメント技術の開発を行った。従来の多重薄板型 X 線望遠鏡ではミラー配置が保持機構の加工精度に依存し、角度分解能はおよそ 1 分角程度に制限されていた。本研究では、ミラーを 1 枚ずつ調整可能なアライメントシステムを構築し、 μm 精度での配置制御を実現した。開発したシステムは、レーザ変位計によるサブミクロン精度の位置計測と、Z 軸ステージおよびピエゾチルトステージによる高精度位置・角度調整から構成される。評価実験の結果、アライメント調整時の誤差を約 $1\ \mu\text{m}$ 以内に抑えることに成功し、接着および支持機構変化に伴う系統誤差を含めても、最終的に $\pm 3\ \mu\text{m}$ 程度の精度でミラーを固定可能である見通しを得た。本研究の成果は、高角度分解能 X 線望遠鏡の実現に向けた基盤技術となるものであり、将来の高分解能 X 線天文学の発展に寄与することが期待される。

背景および目的

太陽質量の約 10 倍以上の大質量星が寿命の最後に起こす大爆発「超新星」は、強い力・弱い力・電磁力・重力の全ての相互作用が密接に絡む稀有な自然現象であり、その複雑さゆえ、超新星の爆発機構は現代の宇宙物理学上の未解決問題になっている。中でも現在の理論モデルで最有力の「ニュートリノ駆動型超新星」では、弱い力のみで相互作用するニュートリノによる加熱が、太陽の何倍もの質量を持つ超マクロな天体の爆発現象の要だと考えられているが、その第一原理計算は未だに観測を説明出来ていない。

1987 年 2 月 23 日、マゼラン星雲で爆発した超新星 1987A から放射された 11 個のニュートリノがカミオカンデで検出され、この研究に対して 2002 年に小柴昌俊氏へノーベル物理学賞が贈られた。この検出によってニュートリノ天文学が幕開けとなり、超新星爆発機構としてニュートリノ駆動型爆発を最有力候補へ押し上げる事になった。一方で、超新星からのニュートリノ検出は、この超新星からの一例のみになっている。そのため、より詳細な超新星ニュートリノ物理の探究には、次の近傍での超新星が必要となるが、天の川銀河内で約 100 年に一回程度しか起きない超新星から系統的な性質を引き出すには、ハイパーカミオカンデ(2027 年運用開始予定)などのより大規模なニュートリノ検出器の長期運用が必要になる。加えて、地上で検出されるニュートリノは、基本的には超新星物質をすり抜けたものであり、爆発を駆動した際の物質との相互作用情報を持たない。つまり現状、超新星爆発を説明する上で本質的な物理情報の取得が困難であり、ニュートリノ観測のみでは解決できない問題がある。

この解決には、「超新星内部で起きるニュートリノ-物質間の相互作用の検証方法」が必要になる。そこで我々が注目するのが、超新星内部のニュートリノ過程に関係する超新星物質内の元素の測定である²⁾。そして本研究では、X 線観測からニュートリノと物質の相互作用を検証するために必要不可欠な高角度分解能 X 線望遠鏡の開発を行う。この望遠鏡が実現されれば、日本において、ニュートリノ直接検出とは独立にニュートリノ天体物理を探究する研究領域を展開することが可能になる。

方法

超新星爆発後、数百年や数千年経った後の名残の天体であり、爆発時の様々な物理情報を保持している。その中でも、我々の近年の研究において、ニュートリノ相互作用の証拠となる希少元素が超新星残骸で観測可能であることを示した²⁾。例えば、局所構造がニュートリノ加熱機構と関連していると元素合成的観点から示唆されており、複数の関連元素 (F, P, Cl, K, Ti, Mn, Ni など) を調査することで、ニュートリノ温度(エネルギー)や総量などのパラメータ推定が可能になる³⁾。これらの研究は、超新星残骸の観測研究とニュートリノ元素合成理論を融合させた世界初の研究結果であり、宇宙ニュートリノ研究の新たな道筋になる。

希少元素の微小なシグナルへの観測感度を上げるためにも、X線帯域の精密分光観測が有用である。そして、複数の元素の観測がニュートリノパラメータの縮退を解くためには必要であり(検出が確実と言えるのは現状 Ti のみ)、日本のX線天文学は現在、この点の観測技術において世界トップを独走している状態にある。その理由が2023年9月に打ち上げられたXRISM衛星搭載の「X線カロリメータ」の登場であり、これによって宇宙の精密X線分光時代に突入したと言える。X線カロリメータは従来のX線CCDなどの検出器と比べ20倍以上のエネルギー分解能を持っており⁴⁾、これまで申請者が確立してきた手法と組み合わせることで、ニュートリノ相互作用の証拠となる複数の希少元素の同時観測が可能になる。我々の研究は、スーパーカミオカンデなどによるニュートリノの直接観測とは独立に超新星ニュートリノを検証する新手法となり、宇宙物理学分野のみならず、素粒子物理学分野まで幅広く影響を与える結果が得られるだろう。一方で、このようなニュートリノ反応を検証するためには、超新星ニュートリノと反応した局所構造を観測するための「高角度分解能X線望遠鏡」が必要になるが、現在の日本のX線望遠鏡技術では目標を達成できない。例えば、ニュートリノの影響を受けた領域は、星の内部のほんの一部であり、この局所構造の観測には、現状では60秒角を超えてしまう角度分解能を、10秒角程度以下まで抑える技術が必要である。

そこで我々は、研究室独自の技術として「反射鏡精密アライメント技術」を確立し、将来的な宇宙におけるニュートリノ物理の開拓へ向けた開発研究を遂行する。X線望遠鏡開発において、アライメント技術(反射鏡を配列する技術)は大きな課題である。また、開発研究と並行して、XRISM衛星を用いた超新星残骸観測からニュートリノ反応を議論することを目指す。

結果および考察

本研究では、Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー型X線望遠鏡の実現に向け、ミラーを1枚ずつ μm 精度で配置するアライメントシステムの開発を行った(図1)。レーザ変位計を用いた位置計測系と、Z軸ステージおよびピエゾチルトステージによる位置・角度調整機構を組み合わせることで、ミラー配置をリアルタイムでモニタリングしながら高精度に調整することが可能となった。

試作システムを用いた評価実験では、アライメント調整時の相対距離誤差を約 $1\mu\text{m}$ 以内に抑えることに成功した。一方で、接着剤の硬化過程および支持機構の変化に伴い数 μm 程度の変位が発生することが確認された。これらの変位について解析を行った結果、接着剤硬化時の収縮応力およびミラー支持条件の変化による重力たわみが主な要因であることが分かった。CAE解析による評価から、これらの系統誤差を事前に考慮したアライメントを実施することで、最終的には $\pm 3\mu\text{m}$ 程度の精度でミラーを固定できる見込みが得られた。

この精度は焦点面で十数秒角程度の角度誤差に相当し、目標とする高角度分解能X線望遠鏡の実現に向けた基盤技術として十分に有望であると考えられる。今後は、本研究で確立したアライメント技術を用いて実際のX線望遠鏡試作機を構築し、ビームラインを用いた結像性能評価を行うことで、望遠鏡としての性能実証を進める予定である。

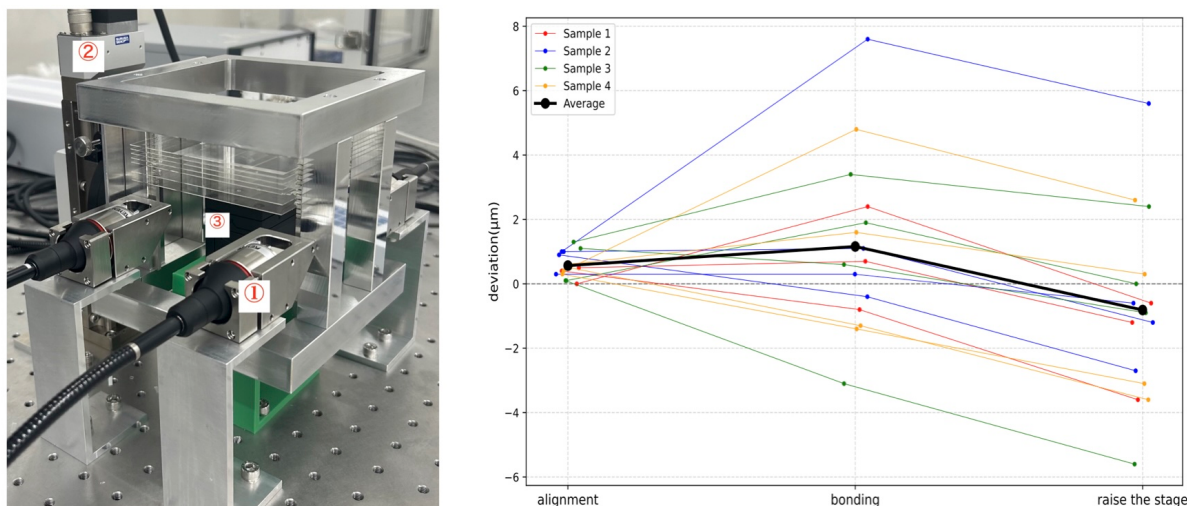


図 1. 構築したアライメントシステムとアライメント精度

(左) アライメントシステム。① レーザー変位計: ガラス基板の相対位置をモニターする。② z ステージ: ガラス基板の高さを調整。③ 高精度ピエゾステージ: ガラス基板の角度を調整。(右) 理想的な設計値からアライメント後のずれを測定した結果。アライメント直後では $\pm 1\mu\text{m}$ 程度で調整可能だが、接着剤で基板を固定する際に、ずれが生じている点が課題。

将来への展望

本研究の最終的な目標は、超新星内部でのニュートリノと物質の相互作用を検証するための高角度分解能 X 線観測を実現することである。近年、XRISM 衛星による高分解能 X 線分光観測が開始され、我々の研究グループは超新星残骸における元素分布から新たにニュートリノ相互作用の影響を議論した(発表論文 1)。現状、ニュートリノ駆動型爆発に伴う顕著な非対称構造が存在することが示唆されており、これらの局所構造のニュートリノ反応を通じた形成プロセスを理解するためには、従来よりも高い角度分解能を持つ X 線望遠鏡が不可欠である。

本研究で開発を進めている高角度分解能 X 線望遠鏡は、XRISM によって示されつつある非対称構造の起源を解明する観測装置として重要な役割を担うと期待される。将来的には、本研究で確立したミラーアライメント技術を発展させ、10 秒角以下の角度分解能を持つ X 線望遠鏡の実現を目指す。現状の課題は、接着剤硬化時の収縮応力およびミラー支持条件の変化による重力たわみの影響によるアライメントの悪化である。これらの改善のために (1) 最適な反射鏡厚さの検討 (2) 接着剤硬化プロセスの理解と応力の最小限化の 2 点に取り組んでいる。来年度には、今回の助成金で構築したアライメントシステムで複数の試作機の開発予定であり、それらの結果をもとに論文化を進める。これらの新規開発によって、超新星残骸におけるニュートリノ相互作用の痕跡を空間的に分離して観測することが今後可能となり、ニュートリノ駆動型超新星爆発モデルの検証に新たな観測的制約を与えることが期待される。

(完)

発表論文

- 1) Toshiki Sato, Shin-ichiro Fujimoto, Koji Mori, Jun Kurashima, Hiroshi Nakajima, Paul P. Plucinsky, Manan Agarwal, Liyi Gu, Adam Foster, Kai Matsunaga, Hiroyuki Uchida, Aya Bamba, Jacco Vink, Yukikatsu Terada, Hironori Matsumoto, Lia Corrales, Hiroshi Murakami, Satoru Katsuda, Makoto Sawada, Haruto Sonoda, Ehud Behar, Masahiro Ichihashi, Hiroya Yamaguchi "Asymmetric distribution of Fe-peak elements in Cassiopeia A revealed by XRISM" The Astrophysical Journal, Volume 1001, 46 (2026)

引用文献

- 1) Hirata, K., Kajita, T., Koshiba, M., Nakahata, M., Oyama, Y., Sato, N., Suzuki, A., Takita, M., Totsuka, Y., Kifune, T., Suda, T., Takahashi, K., Tanimori, T., Miyano, K., Yamada, M., Beier, E. W., Feldscher, L. R., Kim, S. B., Mann, A. K., Newcomer, F. M., Van, R., Zhang, W., Cortez, B. G., “Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A,” *Physical Review Letters* 58, 1490–1493 (1987).
- 2) Sato, T., Maeda, K., Nagataki, S., Yoshida, T., Grefenstette, B., Williams, B. J., Umeda, H., Ono, M., Hughes, J. P., “High-entropy ejecta plumes in Cassiopeia A from neutrino-driven convection,” *Nature* 592, 537–541 (2021).
- 3) Sato, T., Maeda, K., Umeda, H., Nagataki, S., Yoshida, T., Ono, M., Hughes, J. P., “Examining Neutrino-Matter Interactions in the Cassiopeia A Supernova,” *The Astrophysical Journal* 954, 112 (2023).
- 4) Hitomi Collaboration, “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster,” *Nature* 535, 117–121 (2016).