

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244034

研究課題名(和文) ロケット実験によるX線偏光宇宙物理学の開拓

研究課題名(英文) Exploration of the X-ray polarimetry astrophysics using rocket experiments

研究代表者

玉川 徹 (Tamagawa, Toru)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・准主任研究員

研究者番号：20333312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,900,000円、(間接経費) 8,670,000円

研究成果の概要(和文)：「X線偏光天文学」を開拓する目的で、米国NASAとロケット搭載型のX線偏光望遠鏡の開発を行った。X線偏光計は実験室プロトタイプを元に、宇宙利用が可能なものを設計・製作し、高い偏光度のX線ビームが得られる放射光施設において性能評価を行うことで、要求性能が満たされていることを確認した。また偏光計を含むシミュレーターを開発し、実際の実験データを用いて調整を行った。これにより、観測時のバックグラウンド、検出器レスポンスなどの見積りができ、ロケット実験における性能を詳細に評価することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：To explore the X-ray polarimetry astrophysics, we have developed an X-ray polarimeter for using space missions in collaboration with NASA Goddard Space Flight Center. The X-ray polarimeter is designed and fabricated based on the laboratory prototype detector. We have evaluated the performance of the polarimeter at the synchrotron facility in Brookhaven National Laboratory and confirmed that the detector satisfied our requirements. We also developed a simulator of the polarimeter with the Geant4 toolkit. By tuning the simulator, background and detector response of the polarimeter was precisely estimated.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線(実験) ガス電子増幅フォイル X線偏光計

1. 研究開始当初の背景

宇宙では人類が地上で到達できないほど高エネルギーまで粒子が加速されている。しかし発見より 70 年以上が過ぎた今でも、宇宙線がどこでどのように加速されているのか、定量的に満足な回答は得られていない。超新星残骸の衝撃波面でのフェルミ加速は最も有力な候補であるが、それだけでは宇宙線エネルギーの全体を説明できないことが明らかになりつつある。粒子加速を行っている天体は多いと考えられるが、より直接・網羅的に加速源を明らかにし、それを定量的に評価するには、新しい手法が求められている。

TeV 以上の超高エネルギーに加速された電子は磁場に巻きつき、シンクロトロン放射により X 線を出す。しかしスペクトルだけでは、数 keV の電子が引き起こす逆コンプトン散乱からの X 線と厳密に区別することができない。これまで X 線の観測は、光子の持つ「時間」「空間(撮像)」「エネルギー(分光)」という 3 つの物理量を観測することにより発展してきたが、シンクロトロン放射は磁場と垂直な面内で強い直線偏光を示すので、X 線の持つもう一つの物理量である「偏光」を観測することができれば、粒子加速現場を疑いなく直接検証できる。X 線偏光観測は、全く新しい物理量で宇宙を見ることになるので、成果が大いに期待されている。しかし、天体からの X 線はフラックスが少ないこと、光子を一つずつカウントし電気ベクトルを決める必要があることから、技術的に大変難しく、1970 年代にブラッグ散乱計を用いて挑戦的な観測が行われたのみにとどまっている。その後 40 年近くも、ほぼ空白状態が続いており、偏光観測は X 線天体物理に残された最後のフロンティアである。

2. 研究の目的

観測ロケットに独自開発した X 線偏光計を搭載し、カニ星雲にあるパルサー(回転する中性子星)を観測することで、世界で初めて中性子星における粒子加速現場を直接検証し、その加速メカニズムを解明する。この目的のため、理研で独自に改良した、素粒子・原子核実験で標準的な検出器になりつつある「ガス電子増幅フォイル(GEM)」を応用し、新しいタイプの X 線偏光計を製作する。これにより、宇宙における粒子加速源を感度

よく発見する技術を初めて実用化する。将来は X 線偏光計を衛星に搭載し系統的な探査をおこなうことで、新たな学術分野「X 線偏光宇宙物理学」を開拓することにつながる。

3. 研究の方法

我々は 1997 年に欧州共同原子核研究所(CERN)において開発された GEM を、位置分解能の優れたものに改良すれば、光電効果を用いた X 線偏光計が開発できることに気づいた。光電子が入射 X 線の電場ベクトルの方向に飛び出す確率が高いことを利用し、500 μm 程度の光電子飛跡をトラッキングして、入射 X 線の偏光方向を確定する。プロトタイプの試験が成功し、宇宙応用できる可能性が出て来たので、一気にロケット実験に展開し、宇宙における粒子加速現場を解明するのが本研究である。ロケット実験は米国ゴダード宇宙飛行センター(NASA/GSFC)との共同研究となるが、プロトタイプ機を宇宙実験用に改良する作業と、その性能評価および性能の向上が我々の担当である。

本研究ではロケット実験の観測対象をカニパルサーに絞り、その粒子加速メカニズムを解明する。カニパルサーは 33 ミリ秒の回転周期をもち、パルス位相ごとの X 線フラックスは、2 ヶ所の放射領域が交互に見える構造を持つ。パルサーは 10^8 テスラにも達する磁場を持ち、そのダイナモ効果により極付近に発生する大きな電位差で、粒子が加速されると考えられている。いっぽう、磁力線が宇宙に向かって開くライトシリンダー付近の電場ギャップで加速される可能性も指摘されている。前者の場合は、パルス位相ごとに偏光観測を行えば、大きな変動となって現れ、後者の場合は、パルス位相ごとの違いはほとんど無い。よって、パルス位相に分けた偏光観測を実現することで、中性子星における粒子の加速現場を直接明らかにすることができる。さらに、このような観測ではパルスのオンからオフのデータを差し引くことができるので、バックグラウンドフリーな、パルサーのみの偏光データが得られ、実験の信頼度を飛躍的に向上させることができる。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、実験室プロトタイプであった X 線偏光計を宇宙実験用に設計し、

その性能を実機で確認したことである。予定していたロケット実験は、残念ながら共同研究者である NASA/GSFC 側の実験計画の都合で期間内に実施することはできなかったが、フライトに即応可能な偏光計を完成させ、その性能が我々の想定した仕様通りであることが確認できた。世界中のグループで、宇宙利用を主目的としてこのレベルまで装置の技術レベルを達成しているものは無く、宇宙への運搬手段があれば、いつでも X 線偏光観測実験を実施できる状態にある。X 線偏光計以外の装置は、ロケット実験用のフェアリング内構造体（望遠鏡本体）は完成しており、X 線集光ミラーも大半がそろっており、その一部は組み立てられた状態にある。読み出しエレクトロニクスも end-to-end で準備が完了している。

もう一つの大きな成果は、検出器シミュレーションツールキット Geant4 を用いたモンテカルシミュレーターを組み上げ、上空でのバックグラウンドや偏光測定精度の評価、検出器のレスポンスの評価ができるようになったことである。最終的にこのシミュレーターを X 線集光ミラーの特性まで含めて拡張し、カニ星雲を観測した際にどの程度のモジュレーションが得られるか、より精度良くシミュレーションをおこなった。その結果、X 線偏光計の内部ガス圧を下げることにより性能改善することが示されたので、低圧でのガス電子増幅フォイル、X 線偏光計の動作試験をおこない、その最適値を決定した。また、実際の X 線実験データとシミュレーションを比較することにより、いくつかのパラメータ調整をおこない、シミュレーションの精度向上をはかった。また、上空におけるガンマ線バックグラウンドの除去は、品質の良いデータを得るために必須であるが、シミュレーターを用いてパッシブシールドの追加設計を実施した。 ^{60}Co ガンマ線源を用いたデータ取得をおこない、パッシブシールド等が想定通り動作していることを確認した。

フライト用 X 線偏光計を用い、2013 年 4 月に米国ブルックヘブン国立研究所の放射光施設において性能評価試験を実施した。偏光検出能力の限界を左右する系統誤差の調査を行うため、2.7~10 keV のエネルギースキャン、ドリフト距離（ビーム入射位置）のスキャンを行った。その結果、ドリフト距離が

大きなほど電子ドリフト中の拡散が大きく、X 線偏光検出能力が劣化することがわかった。また、モンテカルロシミュレーションを用いてこれらを補正する方法を開発し、系統誤差を最小限に抑えこむことに成功した。さらにシミュレーションと実験結果を詳細に比較することにより、時間方向と空間方向の電子拡散度合いが違うことから系統誤差が生み出されることを突き止めた。GEM フォイルと読み出しストリップの間のギャップを減らすことで、この誤差も減少させられることを示した。これら一連の調査より判明した系統誤差を減らすため、フライトモデルの一部改造をおこない、エンジニアリングとしての製作手順等を確立した。

2013年11月に米国ブルックヘブン国立研究所の放射光施設において再度の性能評価試験を実施した。特に、X線ビームそのものの偏光度が不明であったので、日本でコンプトン散乱型のX線偏光計を製作し、ブルックヘブン研究所に持ち込み測定した結果、おおむね90%程度のビーム偏光度であることがわかった。これにより、これまで考えられていた偏光検出性能は約10%程度改善することがわかった。

米国の国内事情に左右されずにロケット実験等を実施するために、日本国内でもX線偏光計を立ち上げる作業を行った。基本的には米国で立ち上げたフライト品と同等の設計であるが、CERNのガス検出器開発グループ（RD51）と協力し、読み出し回路等の協力を受けることで開発時間を短縮し、10ヶ月足らずで立ち上げを完了した。飛跡検出能力等はすでに確認済みであり、これで日本と米国の両方において、ロケット実験を実施するための足場が確立した。

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11件)

Y. Takeuchi, T. Tamagawa, T. Kitaguchi, S. Yamada, W. Iwakiri, F. Asami, A. Yoshikawa, K. Kaneko, T. Enoto, A. Hayato, T. Kohmura, "Property of LCP-GEM in Pure Dimethyl Ether at Low Pressure", 査読有り, Journal of Instrumentation 9,

C01002 (2014), DOI:
10.1088/1748-0221/9/01/C01002
T. Iwahashi, T. Enoto, S. Yamada, H.
Nishioka, K. Nakazawa, T. Tamagawa, K.
Makishima, “Suzaku Follow-Up
Observation of the Activated Magnetar
1E 1547.0-5408”, 査読有り,
Publications of the Astronomical
Society of Japan 65, 52-1-52-12
(2013). DOI: 10.1093/pasj/65.3.52
A. Yoshikawa, T. Tamagawa (14 名中 2
番目), “Development of Resistive
Electrode Gas Electron Multiplier
(RE-GEM)”, 査読有り, Journal of
Instrumentation 7, C06006 (2012).
DOI: 10.1088/1748-0221/7/06/C06006
K. Gendreau, T. Tamagawa (33 人中 31
番目), et al., “The x-ray advanced
concepts testbed (XACT) sounding
rocket payload”, 査読無し, Space
Telescopes and Instrumentation 2012:
Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings
of the SPIE, Volume 8443, 84434V
(2012). DOI: 10.1117/12.926418
J. K. Black, T. Tamagawa (11 名中 11
番目) et al., “The GEMS
photoelectric x-ray polarimeters”,
査読無し, Space Telescopes and
Instrumentation 2010: Ultraviolet to
Gamma Ray. Proceedings of the SPIE,
Volume 7732, 77320X (2010). DOI:
10.1117/12.857736

[学会発表](計46件)

Toru Tamagawa, GEM-TPC X-ray
Polarimeter onboard GEMS Satellite,
3rd International Conference on Micro
Pattern Gaseous Detectors, 2013 年 7
月 3 日, Zaragoza (Spain)
玉川 徹, 高強磁場測定ツールとしての
X 線偏光観測、高強磁場の物理研究会、
招待講演、2013 年 1 月 7 日、高エネルギー
加速器研究機構(つくば市)
玉川 徹, X 線偏光観測衛星 GEMS とロケ
ット実験 XACT、日本天文学会秋季年会、
2012 年 9 月 19 日、大分大学(大分市)
Toru Tamagawa, The Sounding Rocket
Polarimetry Program XACT, The 39th

COSPAR Scientific Assembly, 2012 年 7
月 15 日, Mysore (India)
Toru Tamagawa, Laser Etched LCP-GEMS
and Their Applications to Space
Missions, 2nd International
Conference on Micro Pattern Gaseous
Detectors, 2011 年 8 月 30 日, Kobe
(Japan)

6. 研究組織

(1)研究代表者

玉川 徹 (Tamagawa Toru)
独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究
センター・准主任研究員
研究者番号: 20333312

(2)研究分担者

中川 友進 (Nakagawa yujin)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科
学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員
研究者番号: 50513454

(3)連携研究者

林田 清 (Hayashida Kiyoshi)
大阪大学・理学部・准教授
研究者番号: 30222227

牧島 一夫 (Makishima Kazuo)
東京大学・理学部・教授
研究者番号: 20126163