

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19684008
 研究課題名（和文）X線イメージング偏光観測による宇宙における粒子加速現場の解明
 研究課題名（英文）Reveal the site of particle acceleration in the Universe by using an X-ray imaging polarimeter

研究代表者
 玉川 徹 (Tamagawa Toru)
 独立行政法人理化学研究所・牧島宇宙放射線研究室・専任研究員
 研究者番号：20333312

研究成果の概要（和文）：

宇宙における粒子加速の現場を、X線偏光観測により解明することをめざし、イメージング可能なX線偏光計を製作し、そのコア技術であるガス電子増幅フォイルの改良と宇宙利用に向けた試験を行った。気球による天体観測は実施できなかったが、本研究によりGEMの宇宙利用技術、偏光計の製作技術が確立し、米国航空宇宙局(NASA)との共同ロケット実験の実施、X線偏光観測衛星GEMSへの参加に発展した。

研究成果の概要（英文）：

To reveal the site of particle acceleration in the Universe, we have fabricated an imaging X-ray polarimeter. We manufactured a newly designed Gas Electron Multipliers (GEMs) for space use, and performed environment tests of them. Although we could not carry out the balloon observation of Crab Nebula during the grant period, we established the GEM operation method in space and completed the X-ray polarimeter development. Those results lead us to the collaboration works with NASA on a rocket experiment and the X-ray polarimetry satellite GEMS.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	18,600,000	5,580,000	24,180,000

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：X線偏光計、粒子加速、カニ星雲

1. 研究開始当初の背景

宇宙では、地上で人類が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ことが知られている（宇宙線）。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なメカニズムで加速されているのか、明確な回答は得られていない。超新星残骸における衝撃波面でのフェルミ加速は、一つの候補とされているが、それだけでは宇宙線の持つ全エネルギー

を説明できないことが明らかになりつつある。

回転する中性子星であるパルサーは、 10^{15} ボルトにも達する強い電場で直接的な粒子加速が起きていると考えられており、これも粒子加速源の候補である。粒子加速を行っている天体は多いと考えられるが、より直接的に加速源を明らかにするには、新しい手法が求められている。

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主にX線を放出する。これまでのX線観測は、光子の持つ「時間(測光)」「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線の持つもうひとつの物理量「偏光」を観測することができれば、粒子加速現場を直接検証できるのである。

X線の偏光観測は、全く新しい物理量で宇宙を観測することになるので、その成果が大いに期待されてきた。しかし、天体からのX線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定してや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に止まっている。その後40年近くも、観測の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

イメージング可能なX線偏光計を開発し、気球による観測を通して、宇宙における荷電粒子の加速メカニズムを解明することを目的とする。

偏光計の製作では、高エネルギー物理・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)と、最近の技術的な進歩のおかげで、さまざまな局面で使われるようになってきたCMOSセンサーを組み合わせることにより、CCD並みのイメージング能力を持つ偏光計を実用化する。加えて、結像・集光能力を持たせるため、シリコン基板上の機械要素部品集積技術を応用し、軽量かつ安価なX線ミラーを開発する。以上を組み合わせたX線偏光イメージャーを気球に搭載し、25~35keV領域でカニ星雲および、その中に含まれているパルサーの偏光観測を行い、強い電場による粒子加速の現場をおさえる。

本研究ではカニ星雲にターゲットを絞り、その粒子加速メカニズムを解明する。カニ星雲の中には、 10^{12} ガウスもの強い磁場を持ち、回転する中性子星(パルサー)が存在することが知られている。双極子磁場を仮定すると、極付近の大きな電位差で加速される可能性

と、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が考えられる。前者の場合は、パルス周期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周期ごとの違いはきわめて少ない。よって偏光観測により、粒子の加速場所を直接明らかにすることができる。ただし、カニ星雲自体が複雑な構造を持っており、あらゆるところでシンクロトロン放射をしていると考えられている。よって、その磁場構造の全体像を正確に知っておくことは重要である。このためには、全体を平均した偏光度を求めても不十分で、イメージングすることが必要不可欠である。

ここ数年の技術進歩に刺激され、X線偏光計の開発研究は、世界的な競争状態に入っている。この分野でイニシアチブを取るには、いかに早く実用的な偏光計を開発するかというのが、決定的に重要である。本研究の要素技術の大半は、すでに我々の希望する性能を有しており、大きなブレークスルーを必要としないところが、他のチームと比較して、圧倒的に有利な点である。また、世界的に主流であるブラッグ反射やコンプトン散乱を用いた偏光計に比べ、われわれの偏光計では散乱過程が必要なく、X線の検出原理そのものが偏光検出原理となる。これにより、イメージング能力(焦点面での位置分解能)は反射・散乱型の約1cmから、われわれの約 $50\mu\text{m}$ へ、200倍ちかくも飛躍的に向上する。

X線の偏光は、これまでほとんど観測されていないので、本研究が新しい分野を切り拓くことを期待している。特にイメージングできるX線偏光計を開発しているのは、われわれとイタリアのピサ大学のみなので、世界的に見てもユニークかつ最先端である。われわれは日本独自のGEM開発を研究の中心に据えており、装置自体も、他が真似のできないものである。この独自のX線偏光計を核に、粒子加速の現場に切り込むのが本研究の最大の特色である。

GEMの開発を通して、高エネルギー物理・原子核実験のグループと密接な共同研究を進めており、企業とも組んで、積極的に産業界へのスピノフを図っている。

3. 研究の方法

気球実験によるカニ星雲のX線偏光イメージング観測を、3年計画の最終目標に定め、以下の4つのステップで開発研究を進め、将来の衛星計画に発展させることを狙う。

- ① GEM, CMOSを用いた偏光計を気球搭載用に改良、
- ② MEMSミラーの開発、
- ③ 偏光計とMEMSミラーを組み合わせたX線偏光イメージャーの製作と試験、
- ④ 気球実験の遂行とデータ解析。

われわれはすでに、CMOS, GEMを用いた偏光計のプロトタイプ開発に成功している。具体的には、

放射光施設において、ネオンガス、アルゴンガス、キセノンガスを用い、偏光検出能力の試験を行い[KEK-PF・課題番号 2005 留 05, 2006G029・代表者：玉川徹]、5keV から 60keV における広いエネルギー範囲において、予想される偏光検出能力 $M \sim 0.4$ (100%の偏光X線を入れたとき、約 40%のモジュレーションが観測される) が得られることを確認した。

このプロトタイプを元に、気球搭載および、カニ星雲とパルサー観測に適合させる改良を行う。具体的には、(1) CMOS センサーの読み出し回路改良、(2) GEM の放電耐性の向上、の二点をおこなう。

現在われわれが用いている CMOS センサーは、 $100 \mu\text{m}$ ピッチの電極が $5 \times 5 \text{cm}^2$ に並んだアレーを持ち、1/50 秒フレームをシーケンシャルに読み出す方式だが、トリガ回路を組み込み、イベントが発生したときのみフレームを読み出す方式に切りかえる。これによりミリ秒以下の時間分解能を得ることができ、33 ミリ秒のカニパルサーの、周期毎の偏光測定が可能になる。また、CMOS センサーは、テルル化カドミウムガンマ線検出器用に開発されたものなので、われわれの目的に合わせたダイナミックレンジの最適化を行う。データ読み出しは、現在は汎用の PCI バスを用いているが、宇宙利用の小型・低消費電力 PC である Space Cube による読み出しに切りかえる。

GEM はわれわれが独自に理研で開発を進めてきた、ファインピッチ ($50 \mu\text{m}$) かつ $100 \mu\text{m}$ 厚のものを用いる。世界標準の GEM ($140 \mu\text{m}$ ピッチ、 $50 \mu\text{m}$ 厚) に比べると、位置分解能が良く、放電耐性も 2 桁以上高いことが売りである。最新の GEM では、電子増幅率が 1 万倍あたりで放電が始まるが、さらにリスクを低下させるため、これを 4-5 万倍まで伸ばす。加工の表面粗さが放電を誘発しているため、加工方法を見直し、最終処理により表面の平滑化を試みる。

X線の集光・結像系は、X線領域では物質の屈折率が負になることから、全反射を利用する場合、入射角度はほとんど反射面すれすれとなる。よって、多数回反射をさせ、屈折角をかせぐ。われわれが利用しようとしている光学系は、JAXA が中心となって開発を進めている MEMS 光学系であり、今のような微細構造を持つ同種のを多数組み合わせるときに威力を発揮する。

われわれの要求である短焦点、25-35keV のエネルギー範囲に合わせて、表面層に金を蒸着し、反射角度を $0.1-0.3$ 度、多数回反射させ、焦点距離を 1m 以下に抑えたものを作る。これで 30keV の X線に対し、80%以上の反射率を得られる。また、 π 偏光、 σ 偏光いづれに対しても反射率が変わらないので、システムエラーを最小限に抑えることができる。

予想される困難は、単体での技術はすでに存在しているが、表面に金を蒸着する方法、個々のパーツをどのようにアラインメントしてミラーにするかの検討が十分でないことによる。開発が始まる平成 19 年度までに、JAXA のミラー専門家の協力を得て、製造手法について、技術を確立させるつもりである。

ミラーの開発と偏光計の開発は平成 20 年度中旬まで続け、そのあとで、二つを組み合わせた X線偏光イメージャーの製作に入る。30keV 付近で、 200cm^2 程度の有効面積を持つものを、半年くらいの開発期間で完成させる。空間分解能は $1 \sim 2$ 分角を目標とし、カニ星雲なら、 3×3 ないし 4×4 のパートに分解できる。平成 20 年度の最後には、放射光施設 Spring-8 の平行 X線ビームを用いて、装置の end-to-end テストを行う。キャリブレーションの過程で、入射させるビームの偏光度を予めどこまで正確に押さえられるかが、測定器全体の系統エラー評価に効く。モジュレーションの高いキャリブレーション用偏光計を作り、3%以下のエラーでの測定器評価をめざす。

気球用ゴンドラの設計・製作については、われわれは気球実験のノウハウを持っていないので、JAXA 大気球グループの全面的な協力のもとで進める。平成 21 年度後半には、三陸気球センターから偏光計を気球に搭載して打ち上げ、6 時間程度の観測で、カニ星雲を 5%程度の最低観測可能偏光度でイメージング観測することをめざす。

4. 研究成果

2007 年度

ガス電子増幅フォイル (GEM) の試作試験、X線ミラーの開発検討、読み出し回路の開発を行った。GEM の試作試験では、X線偏光計への搭載に適した十分な位置分解能を持つ、80 ミクロンピッチ、40 ミクロン穴直径のフォイルを作った。開発の過程で電子増幅度が低下する現象が見られたが、取り扱い環境のクリーン度を上げることにより解決できることがわかった。この遅れのため、プロトタイプ偏光計の製作は、2008 年度に繰り越した予算をベースに行った。

試作した GEM に対し、印加電圧に対する電子増幅度の振る舞い、電子増幅度の時間安定性を測定した。二週間にわたり電子増幅度の変動を調べたが、3%程度の変動しか見られず、海外の研究機関で製作された GEM には無い優れた特徴を有していることがわかった。さらに、気球実験で GEM に電圧を印加するための小型高電圧電源を購入し、動作試験を行った。GEM に電圧を印加しながら 6000 回の電圧昇降試験を行ったが、特に問題はみられなかった。

高エネルギー X線に対する集光ミラーの製作について検討したが、高エネルギーの光子を気球で用いるような短焦点距離のミラーで集めるのは、初期に想定していた以上に技術的に難しく、さらなる開発研究が必要であるという結論に達した。

読み出し回路については既存のアナログ ASIC をベースにして、宇宙関連機器で標準になりつつある通信インターフェース SpaceWire を用いたものを設計、製作した。以上により、要素技術の開発が完了して、プロトタイプ偏光計を製作する準備が整ったことが、本年度の最大の成果である。

2008 年度

X線偏光計のフライト用プロトタイプを製作し、その性能評価を行った。プロトタイプ機のアナログ信号読み出しには VA32TA ASIC を用い、信号処理回路からコントロール用のコンピューターまでは SpaceWire 規格を用いた処理回路を構築した。このプロトタイプ機を用いて、Fe-55 放射線源からの 5.9 keV X線スペクトルを取得することで、X線の検出が可能であることを示した。さらに、17 keV のX線を照射したところ、光電子が予想通りに広がっており、偏光観測が可能であることを確認した。その後、プロトタイプ機を理研のX線ビームラインに設置し、わずかに偏光した 20 keV の制動放射X線を照射することで、実際に偏光が観測できることを示した。

GEM の性能評価については、HIMAC において重イオン照射実験を行い、上空において放電の大きな原因となる重イオン入射に対する GEM の耐性を調査した。試験は将来の衛星計画まで考え、衛星軌道上 40 年分に相当する鉄 (500 MeV/n; 銀河宇宙線を想定) を照射し、GEM は何らダメージを受けないことを確認した。また、今回のように大面積の GEM を利用するときの問題になる、電子増幅度の面内一様性の調査も行なった。増幅度の不均一性は標準偏差 4~5% であり、偏光計への利用には全く問題にならないことを確認した。

Geant4 シミュレーターを用いて、気球に搭載する検出器のモデルを作り、気球高度でのバックグラウンド見積もりを行った。ガス検出器なので、特にガンマ線の影響を評価した。バックグラウンドを最小限にするために、タングステンと鉛の二重シールドを考え、その厚みの最適値を決定した。

2009 年度

2008 年度に開発したフライト用偏光計プロトタイプ機による偏光測定実験と並行して、ガス電子増幅フォイルの気球高度・宇宙環境利用に向けた高度化開発、環境試験をおこなった。

ガス電子増幅フォイルは高電圧を印加するので、上空での放電が問題となる。我々は、放電を意図的に継続させる系統的な実験をおこない、放電を繰り返すことによりガス電子増幅フォイルが破壊される様子を調べた。

その結果、放電率が時間とともに指数関数よりも急に増加していくことを見つけた。これは放電を繰り返すとフォイルが破壊されることを意味しており、ワイヤー型比例計数管で知られているようなエージングによる放電率の減少が起きないので取り扱いに注意すべきであることを初めて明らかにした。

GEM フォイル表面の銅酸化による劣化を調査し、X線光電子分光法により表面酸化がどのように進むのかを定量評価し、それを防ぐ表面処理方法を確立し、気球、衛星に用いるための最適化をおこなった。

Geant4 シミュレーターによる高高度でのバックグラウンド調査も引き続きおこない、荷電粒子が引き起こすバックグラウンドを大幅に軽減する手法を確立した。

最終目標である、プロトタイプ偏光計を気球に搭載して天体を観測することは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の大気球放球場が三陸から北海道に移る時期と重なり、残念ながら実施することはできなかった。しかし、本研究で改良したガス電子増幅フォイルと偏光計の技術が確立したことにより、米国航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙飛行センターのX線グループと協力して、ロケット実験を実施する新たな計画へと結実した。さらに、NASA が主導するX線偏光観測専用衛星GEMSへの参加を求められ、われわれが開発したGEMが偏光計のコアデバイスとして宇宙に打ち上げられることが確定した。

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 7 件)

原著論文

1. T. Tamagawa et al., “Development of thick-foil and fine-pitch GEMs with a laser etching technique”, Nucl. Instrum. Meth. A 608, pp390-396 (2009). [査読あり]

国際会議集録等

2. T. Iwahashi, et al., ” Development of Gas Electron Multipliers for the X-ray Polarimetry Mission GEMS”, Suzaku Conference Proceedings, pp442-443 (2010). [査読無し]
3. F. Asami et al., ” Mapping Study of Hole Diameters and Gain of Japanese GEMs”, Nuclear Science Symposium Conference Record NSS09, pp734-737 (2009). [査読無し]
4. T. Iwahashi et al., ” Basic Properties of Gas Electron Multipliers for Cosmic X-ray polarimeters”, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record NSS08, pp1959-1962 (2008). [査読無し]

5. T. Tamagawa, et al., "Gain properties of gas electron multipliers (GEMs) for space applications", Proc. of SPIE 7011, 70113V-1 (2008). [査読無し]
6. A. Hayato, et al., "Heavy ion irradiation test to gas electron multipliers", Proc. of SPIE 7011, 70113W-1 (2008). [査読無し]
7. T. Tamagawa, et al., "The Ideal Gas Electron Multiplier (GEM) for X-ray Polarimeters", Proceedings of X-ray Polarimetry Conference (2009). [査読無し]

[学会発表] (計 28 件)

国際会議口頭発表

1. T. Tamagawa, et al., "Progress of Fine-Pitch GEM Development in Japan Using a Laser Etching Technique", IEEE NSS Symposium, October 2009 (Orlando, USA)
2. A. Hayato et al., "The Ideal Gas Electron Multiplier (GEM) for X-ray Polarimeters", June 2009 (Rome, Italy)
3. T. Iwahashi, et al., "Basic Properties of Gas Electron Multipliers for Cosmic X-ray Polarimeters", IEEE NSS Symposium, November 2008 (Dresden, Germany)
4. T. Tamagawa, et al., "Fine-pitch and thick-foil GEM production in Japan", IEEE NSS Symposium, October 2007 (Hawaii, USA)

国際会議ポスター発表

5. F. Asami, et al., "Mapping Study of Hole Diameters and Gain of Japanese GEMs", IEEE NSS Symposium, October 2009 (Orlando, USA)
6. T. Tamagawa et al., "Performance Studies of Gas Electron Multipliers for X-ray Polarimeters", June 2009 (Rome, Italy)
7. T. Iwahashi, et al., "Development of Gas Electron Multipliers for the X-ray Polarimetry Mission GEMS", The Energetic Cosmos from Suzaku to ASTRO-H, June 2009 (Otaru, Japan)
8. T. Tamagawa, et al., "Gain properties of gas electron multipliers (GEMs) for space applications", SPIE Conference, June 2008 (Marseille, France)
9. A. Hayato, et al., "Heavy ion irradiation test to gas electron multipliers", SPIE Conference, June 2008 (Marseille, France)

国内学会口頭発表

10. 岩橋孝典ほか「X線偏光観測衛星 GEMS を模擬した X線偏光計のバックグラウンドシミュレーション」日本天文学会春季年会、2010年3月(広島大)
11. 玉川徹ほか「ガス電子増幅フォイルの静電容量と放電の関係」日本物理学会第65回年次大会、2010年3月(岡山大)
12. 玉川徹ほか「GEMを用いたTPC-X線偏光計」第六回Micro Pattern Gas Detector 研究会、2009年12月(神戸大)
13. 太田真秀ほか「GEMの静電容量と放電の関係」第六回Micro Pattern Gas Detector 研究会、2009年12月(神戸大)
14. 玉川徹ほか「X線偏光観測専用衛星GEMS」日本天文学会秋季年会、2009年9月(山口大)
15. 玉川徹ほか「X線偏光観測衛星GEMS」日本物理学会秋季大会、2009年9月(甲南大)
16. 阿佐美ふみほか「GEMの電子増幅度のマッピング調査」日本物理学会秋季大会、2009年9月(甲南大)
17. 玉川徹ほか「理研におけるGEM開発」MPGD基礎開発班GEM研究会、2009年2月(東大)
18. 岩橋孝典ほか「GEMの宇宙利用に向けた陽子・重イオン照射試験」第五回Micro Pattern Gas Detector 研究会、2008年12月(理研)
19. 阿佐美ふみほか「GEMのゲイン一様性調査」第五回Micro Pattern Gas Detector 研究会、2008年12月(理研)
20. 早藤麻美ほか「ガス電子増幅フォイルの宇宙利用に向けた重イオン照射実験」日本天文学会春季年会、2008年3月(代々木)
21. 原山淳ほか「ガス電子増幅フォイルの宇宙利用に向けた電圧 ON/OFF 試験」日本天文学会春季年会、2008年3月(代々木)
22. 岩橋孝典ほか「ガス電子増幅フォイルを用いた X線偏光計の気球実験に向けたバックグラウンド評価」日本天文学会春季年会、2008年3月(代々木)
23. 玉川徹ほか「Thick-foil GEMのゲイン変動と放電率調査」日本物理学会第63回年次大会、2008年3月(近畿大)
24. 門叶冬樹ほか「細孔型マイクロパターンガス検出器を用いた X線偏光計の開発」日本物理学会第63回年次大会、2008年3月(近畿大)
25. 玉川徹ほか「Thick-foil GEMの開発と宇宙利用に向けた性能評価」第四回Micro Pattern Gas Detector研究会、2007年12月(大阪市大)
26. 早藤麻美ほか「fine-pitch and thick-foil GEMを用いた2次元イメージングにおける位置分解能の性能評価」日本物理学会第62回年次大会、2007年9月(北大)
27. 林田清ほか「X線 Y線偏光観測小型衛星計画 Polaris」日本物理学会第62回年次大会、2007年9月(北大)
28. 阿部幸二ほか「光電子追跡型 X線偏光計に用

いるガス電子増幅フォイルの性能評価」
日本天文学会秋季年会、2007年9月（岐
阜大）

〔図書〕（計2件）

1. 古澤彰浩、玉川 徹「意外な超新星の立
体構造」科学 2009年1月号（岩波書店）
pp7-9
2. 玉川 徹「微量なX線をとらえる魔法の
シート」日刊工業新聞 2008年11月25
日

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・牧島宇宙放射線
研究室・専任研究員

研究者番号：20333312