

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料
〔事後評価用〕

平成16年度採択分

平成21年 3月31日現在

研究課題名（和文）宇宙高温プラズマの観測的研究と偏光分光型
超高精度 X 線 CCD 素子の開発研究
研究課題名（英文）Observational study of the cosmic hot plasma
and the development of the high performance
X-ray CCD
研究代表者
常深 博 (TSUNEMI HIROSHI)
大阪大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要：X線を効率よく撮像分光する CCD 素子を開発した。空乏層が厚く、裏面照射型で、いろいろな X 線を検出できる。画素の大きさも色々あり、エネルギーの高い X 線に対しては偏光情報も得られる。さらに SDCCD を導入し、名古屋大学と共同で気球観測装置を完成させた。CCD の高速低雑音読み出しを簡素化する目的で、アナログ ASIC を開発した。これらの技術やノウハウを使い、すざく衛星を利用して宇宙高温プラズマの研究を進めた。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙科学、宇宙物理、X線天文学、人工衛星、電子デバイス、電子機器

1. 研究開始当初の背景

宇宙 X 線観測技術について、研究課題の申請時は、アメリカのチャンドラ、ESA のニュートンが活躍していた。日本では、ASTRO-EII の準備を進めており、国際協力の下、何としても日本の実力を世界に発揮したかった。

我々は、X 線撮像のための CCD を開発しており、世界で最初の X 線偏光検出実証、電荷雲測定技術、低雑音読み出し回路など基礎技術を持っていた。そこで、これらを一括して将来の衛星開発に応用する他、そこで得られた知識やノウハウを元に宇宙高温プラズマの解明に取り組もうとした。

2. 研究の目的

高温プラズマは宇宙における物質の基本的存在形態の一つであり、その観測的研究から、宇宙における化学進化や、物質や重力質量の分布など、宇宙物理の基本量が測定できる。高温プラズマの研究手段で最も適したものは、10keV 以下の X 線領域での観測である。宇宙には高温プラズマ以外に、高エネルギー宇宙線に代表されるような非熱分布をした成分も広く知られている。熱分布と非熱分布とを分離する有力な手段は、10keV を越える高エネルギー領域での観測にある。

超新星爆発やそれに伴って生じる磁場を含んだ衝撃波面における加速により、非熱粒子が発生すると考えられている。これらの非熱成分は、スペクトルではべき関数型であるため、高エネルギー側まで延びているが、光

子密度としては低エネルギー側が強い。従って、熱成分と非熱成分とが分離し始めるエネルギー領域(数十 keV)を観測するのが有利である。また、熱成分とその延長上にある非熱成分とを同時に観測することが望ましい。これらの観測から物理現象を解き明かし、熱い宇宙と非熱的な宇宙の高エネルギープラズマの実体解明、それに含まれる基礎物理量の導出方法の確立とその実証が本研究の目的である。

3. 研究の方法

これまで共同開発を進めてきた浜松ホトニクス社と X 線 CCD の開発を進めた。裏面照射型素子の開発もスムーズに進み、空乏層も確実に厚くなり、極めて厚い空乏層を実現した。低雑音読み出し回路の技術は、回路実装技術に留まらず、調整方法など厄介な問題を含んでいる。そこで、これらのアナログ部分を全てまとめて専用 IC を作ることにした。多くの人の協力により、三回の試行により入力換算雑音レベルとして $30 \mu\text{V}$ 以下を達成、使用方法を工夫すればさらに半減できることを実証した。この ASIC を通過した後は全てデジタル信号化されるので、極めて雑音耐性が高い。

X 線 CCD の検出効率をさらに高くするため、シンチレータを接着した素子 SDCCD を開発し、検出有効 X 線領域を 100keV 近くまで伸ばした。名古屋大学で開発したスーパーミラーとあわせて気球実験に取り組むことになりその開発研究を進めた。さらにそれ

を進めて、二機の人工衛星による編隊飛行技術を使った FFAST の研究開発にも取り組んでいる。

開発した素子の広い応用を目指した。地上実験での応用として、屈折コントラストの実験に取り組んでいる。

我々の開発した素子を元に、低エネルギープロトンによる CCD 損傷を回復する方法として電荷注入法を開発し、すざく衛星に適用し、性能劣化を抑えることが出来た。この他、すざく衛星など現在活動中の衛星に対してプロポーザルを出し、あるいは既に観測されたデータを使い、宇宙高温プラズマの観測を進めた。

4. 研究の主な成果

CCD 素子には、従来まで広く使われてきた P 型基板を使った素子で $90\mu\text{m}$ 程度の空乏層を確保できることを実証した。これを基にした素子を、平成 21 年にスペースシャトルで打ち上げ予定の MAXI の CCD カメラに使用している。我々は天文台と共同で新しい CCD 開発を進め、空乏層厚さ $200\mu\text{m}$ で、完全空乏化した裏面照射素子を完成している。また、四面バッタブルも可能になるので、広い面積を敷き詰めることが可能になるなど応用範囲が広い。電荷雲測定手法とあわせ、画素の大きさを選べば、高エネルギー X 線の偏光状態も測定できる。

高エネルギー側の感度を上げるために CCD とシンチレータとを直接接合する技術開発 (SDCCD) を進めた。名古屋大学で開発した 80keV まで集光できる望遠鏡技術 (スーパーミラー) と組み合わせた望遠鏡システムを作り、気球観測を計画した。姿勢制御装置を含めて全ての装置の準備を完了、ブラジルからの観測に挑んだ。飛行中のテレメータデータで、装置の正常動作や、望遠鏡の視野方向などを確認できたが、予想外の南風で南下、全損状態となり、技術やノウハウは残ったものの、全装備を失った。今後は二衛星を使った観測を目指す FFAST に引き継いだ。エネルギーの高い X 線を集光するには、長い焦点距離が有利であること、編隊飛行に関する日本の工学技術が進んでいること、衛星のほうがはるかに観測時間の長いこと、我々は十分に衛星に進める技術レベルにあることなどから判断した。

CCD の時間分解能を上げる目的で、アナログ ASIC の開発を進めた。これは、高速読み出しを実現すること、消費電力を低くし、サイズを小型化すること、誰でも容易に高性能を達成できることなどが可能である。最新型のもは、衛星搭載の個別部品で作った電子回路と同じ雑音レベルあるいはそれ以下であり、誰でも無調整で衛星搭載品と同じ性能を出せるようになった。この素子は CCD カメラの低雑音動作での低電力化を実現す

るもので、天体観測以外にも応用範囲は広いと期待されている。

地上での応用実験を目指して、マイクロフォーカス X 線発生装置を導入した。これは、高い精度の X 線ビームを実現できるので CCD の高い位置分解能と組み合わせ、高性能撮像を可能にする。更に、吸収コントラストではなく、屈折コントラストによる撮像を行った。こうして、生体内のいろいろな構造の境界面だけを強調して撮像できるようになった。

現在稼働中の X 線観測衛星すざくなどを使って、爆発後一万年ほど経過した白鳥座ループを重点的に観測した。その結果、中心部では超新星からの噴出物が大量に残っていることを発見した。また、噴出物を覆っている星間物質の量も場所によってまちまちであること、物質分布の非対称性から、爆発そのものが非対称に起こったことも観測的に判った。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

これまで X 線用の高性能 CCD といえば、欧米の素子を指したが、いまでは日本の素子が世界のトップレベルになっており、欧米から引き合いが来るようになった。CCD からの信号を低雑音で読み出す方法に ASIC を取り入れることで、簡便に実現できるようになった。X 線に限らず、広く応用されるだろう。これらの技術を含め、日本の得意分野を中心に、将来新しい形態の観測手法を確立したい。宇宙高温プラズマの研究では、超新星残骸の研究に新しい視点を持ち込んだ。我々の解析手法により、超新星の非対称爆発などが観測的に示されるようになった。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

- (1) **H. Tsunemi**, M. Kimura, 他 3 名, "Another Abundance Inhomogeneity in the South East Limb of the Cygnus Loop" Publ. Astron. Soc. Japan, 61, S147-S153, 2009.
- (2) **H. Tsunemi**, S. Katsuda, 他 2 名 "The Plasma Structure of the Cygnus Loop from the Northeastern Rim to the Southwestern Rim" Astrophysical Journal, 671, 1717-1725, 2007.
- (3) **H. Tsunemi**, "Development of the X-ray CCD in Japan" Nucl. Inst. and Meth. A., 541, 295-303, 2005.
- (4) **H. Tsunemi**, M. Miki, E. Miyata, "Application of a Mesh Experiment for a Proton Beam Onto the Charge-Coupled Device" IEEE Trans. Nucl. Sci., 51, 2288-2292, 2004.