

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：特別推進研究
研究期間：2004 ～ 2008
課題番号：16002004
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
研究者番号：90116062

研究成果の概要：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。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	69,600,000	20,880,000	90,480,000
2005年度	102,500,000	30,750,000	133,250,000
2006年度	58,500,000	17,550,000	76,050,000
2007年度	40,000,000	12,000,000	52,000,000
2008年度	40,000,000	12,000,000	52,000,000
総計	310,600,000	93,180,000	403,780,000

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-E 打上げ失敗の後、必死に ASTRO-EII の準備を進めていた。そこでは、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 開発を進めており、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。また、開発した素子は、小惑星のサンプルリターンミッションのはやぶさに搭載され、成果を挙げていたし、国際宇宙ステーション搭載の MAXI ミッションの準備も進んでいた。そこで、これらを一括して将来の衛星開発に応用する他、いろいろな分野で応用できるように技術開発を進め、またそこで得られた知識やノウハウを元に衛星のデータ解析を進め、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期待される物理量は、宇宙における化学進化、すなわち重元素の合成と拡散の様子、また宇宙構造、すなわち物質や重力質量の分布など、宇宙物理の基本とすべき量である。高温プラズマの研究手段で最も適したものは、そこからの放射が一番強く期待される 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熱分布から外れる、いわゆる非熱分布をした成分も広く知られている。熱分布は、その温度で決まる範囲にあるが、一般的に非熱成分はエネルギースペクトルにおいて高エネルギー側に延びている。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。

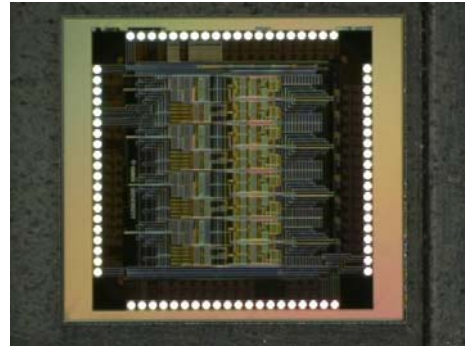
超新星爆発やそれに伴って生じる磁場を含んだ衝撃波面における加速により、非熱粒子が発生すると考えられている。これらの非熱成分は、スペクトルではべき関数型であるため、高エネルギー側まで延びているが、光子密度としては低エネルギー側が強い。従って、熱成分と非熱成分とが分離し始めるエネルギー領域(数十 keV)を観測するのが有利である。また、熱成分とその延長上にある非熱成分とを同時に観測することが望ましい。

実際に我々が観測できる X 線は、種々の物理現象が複雑にからみあった結果として放出、伝搬されたものである。つまり、これら複雑に絡み合った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。試作された素子は阪大で試験し、その性能を評価して問題点を洗い出すと言う方式である。これにより、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った。最終的には、国立天文台との協力により、従来型の N チャンネル型ではなく P チャンネル型を採用し、極めて厚い空乏層を実現した。厚い空乏層は、赤外線感度が高く、裏面照射型素子では紫外線感度も高いために、いろいろな応用が可能である。

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。この開発には、回路デザインのアメリカの John Doty 博士、ASIC 開発のためのオープン IP を作られた JAXA の池田教授の協力の下に進めた。一回目の試作品は、動作こそしたものの低雑音とはいえない状態だった。そこで、この経験を下に低雑音化を進め、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。この実物写真を上図に示す。3mm 四角のチップ上にアナログからデジタルに変換する回路が 4 チャンネル搭載されている。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。現在は、放射線耐性の詳細な試験中である。

X 線 CCD の検出効率は高くなったものの、素材がシリコンであるために、限度がある。そこで、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。名古屋大学で開発中のスーパーミラーは、人工多層膜を使ったもので、有効エネルギー範囲を従来の 10keV から 80keV にまで伸ばした。そこで、名古屋大学と協力し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。下図は編隊飛行による FFAST の軌道上での状態である。



開発した素子の広い応用を目指した。我々の素子の特徴は、有効面積が大きいこと、波長分光能力が優れていること、位置分解能が高いことである。そこで、地上実験での応用として、 μ フォーカス X 線発生装置を導入して、屈折コントラストの実験に取り組んでいる。最初は、X 線発生装置の発光点のサイズ測定から始まり、システムを除震台に搭載することや、冷凍方法として、振動のない液体窒素を使用する方法とかを採用した。

我々の開発した素子を元に、CCD の使用方法を改良した。チャンドラ衛星での低エネルギー

プロトンによる CCD 損傷を元に、その回復方法を検討した。回復方法としては、電荷注入法と冷却法とがある。我々は、操作が比較的簡単な電荷注入法を検討した。この方法をすざく衛星に適用し、性能劣化を抑えることが出来た。また、MAXI の SSC にはこの方法を最初から取り入れることになっている。

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。白鳥座ループは超新星爆発後一万年程度経過した超新星残骸であり、周辺の星間雲と衝突し、いろいろな現象が起こっている。我々は白鳥座ループを始めとする超新星残骸を重点的に観測している。

4. 研究成果

素子の開発: 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、NeXT1 と呼ぶ素子を試作した。画素の大きさは $12\mu\text{m}$ で、受光部分は $2\text{K}\times 2\text{K}$ 個の画素からなる。これは 25mm 四角の受光面を持ったフレーム転送型素子で、三面バッタブルである。次に、NeXT2 と呼ぶ素子を試作した。これは NeXT1 と同じ大きさで、画素サイズが $24\mu\text{m}$ 四角のもので、扱いやすい。いずれも、 6keV の X 線に対するエネルギー分解能として $135\sim 140\text{eV}$ を達成できている。空乏層厚さは、使用できる基板比抵抗の限界もあり、これ以上厚くすることは難しい。これを基にした素子を使用し、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。我々はより高い比抵抗の基板を使うために、Pch 素子の開発を天文台と共同で進めた。これまでのところ、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。空乏層の厚さでは世界で一番厚い素子の一つと言える。また、信号引き出しのためのケーブルの工夫により、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。下図に、我々の開発した X 線 CCD を示す。有効面積は $3\text{cm}\times 6\text{cm}$ である。

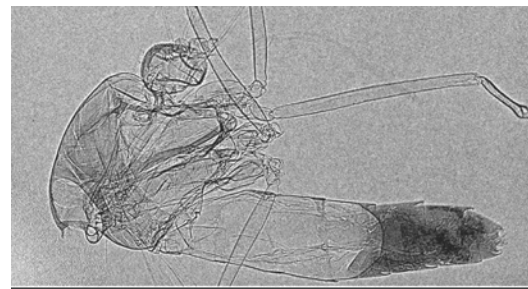


高エネルギー側の感度を上げるために CCD とシンチレータとを直接接合する技術開発 (SDCCD) を進め、 $300\mu\text{m}$ 厚の CIS を直接接着し、 100keV 程度まで十分な感度をもたせることができた。SDCCD の特徴は、高い検出

感度と撮像能力にある。名古屋大学では 80keV まで集光できる望遠鏡技術(スーパーミラー)を開発している。そこで、スーパーミラーと SDCCD とを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し、平成 18 年 11 月、ブラジルのカショエラパウリスタにある気球基地から放球した。しかし、高度 39km に上昇したあと、南風で南下、大西洋に着水させ全損状態となった。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。技術やノウハウは残ったものの、全装備を失った。今後は気球による再起ではなく、さらに進んだ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が長いこと、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、多数のノードを持った素子にも対応し、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。今後は、一部デジタル回路を組み込み、動作の簡便さを追及した素子を完成させる予定である。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。下図には、この手法で X 線撮像した蚊の診断図を示す。吸収コントラストではないので、物質の境界面だけが強調されているのがわかる。



この技術は、原子番号の低い物質からなる生体などの構造を調べるのに適している手法であり、今後応用が広まるものと考えられる。

平成 17 年 7 月に「すざく」衛星が軌道に載ったあと、大阪大学を中心に日米共同で準備した CCD カメラの軌道上での観測を進めるとともに詳細な較正を行っている。軌道に載った後、CCD カメラは宇宙環境下での放射線損傷で次第に性能劣化を起こしたが、素子の一端から電氣的に電荷注入する手法を軌道上で使用して、性能を回復させることに成功した。軌道上での性能回復はこれが初めてであり、それには我々がこれまで地上実験を通じて蓄積したノウハウが十分に発揮できたものと言える。CCD 素子は陽子など荷電粒子を受けると次第に性能劣化をきたす。この問題に対して、我々の示した電荷注入などは極めて有効であり、その応用範囲は広い。

現在稼働中の X 線観測衛星すざくなどを使って超新星残骸の観測を進めた。若い超新星残骸は、超新星からの噴出物で溢れているが、時間の経過した超新星残骸では、衝撃波による星間物質の加熱により、噴出物の痕跡は消えていると思われていた。我々は、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、周辺こそ衝撃波加熱された星間物質で覆われていることが解ったが、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。このことから、元の星の質量を推定すると、太陽質量の 10~15 倍とわかり、確かに質量の大きな星であったことが判った。このときに誕生した中性子星などは今でも見つかっていない。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り、いろいろなところに穴の開いていることも判った。さらに、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. 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 14 件) 全て査読有

- 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 S. Katsuda, H. Tsunemi, 他 2 名, "Chandra Observations of the Northeastern Rim of the Cygnus Loop" Astrophysical Journal, 680, 1198-1205, 2008.
- ③ S. Katsuda, H. Tsunemi, K. Mori, "The Slow X-Ray Expansion of the Northwestern Rim of the Supernova Remnant RX J0852.0-4622" Astrophysical Journal, 678, L35-L38, 2008.
- ④ N. Nemes, H. Tsunemi, E. Miyata, "XMM-Newton Observation of the Northeastern Limb of the Cygnus Loop" Astrophysical Journal, 675, 1293-1303, 2008.
- ⑤ S. Katsuda, H. Tsunemi, 他 5 名, "Asymmetric Ejecta Distribution of the Cygnus Loop Revealed with Suzaku" Publ. Astron. Soc. Japan, 60, S107-S144, 2008
- ⑥ H. Tsunemi, E. Miyata, 他 5 名, "Development of a large format charge-coupled device (CCD) for applications in X-ray astronomy" Nucl. Inst. and Meth. A., 579, 866-870, 2007.
- ⑦ 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.
- ⑧ H. Tsunemi and S. Katsuda, "Origin of the shrapnels around the Vela SNR" New Astronomy Reviews, 50, 521-525, 2006.
- ⑨ S. Katsuda, H. Tsunemi, "Spatially Resolved X-Ray Spectroscopy of Vela Shrapnel A" Astrophysical Journal, 642, 917-922, 2006
- ⑩ E. Miyata, N. Tawa, K. Mukai, H. Tsunemi, K. Miyaguchi, "High Resolution X-ray Photon-Counting Detector with Scintillator-deposited Charge-coupled Device" IEEE Trans. Nucl. Sci., 53, 576-583, 2006.
- ⑪ H. Tsunemi, "Development of the X-ray CCD in Japan" Nucl. Inst. and Meth. A., 541, 295-303, 2005.
- ⑫ E. Miyata, M. Miki, 他 2 名, "X-ray Responsivities of Direct-scintillator-deposited Charge-coupled Device" Jpn. J. Appl. Phys., 44, 1476-1484, 2005.
- ⑬ E. Miyata, N. Tawa, 他 3 名, "Unprecedented Imaging Capability Hard X-ray Detector Employing Scintillator-Deposited Charge-Coupled Device" Jpn. J. Appl. Phys., 43, L808-L818, 2004.
- ⑭ 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.

[学会発表] (計 20 件)

- ① H. Tsunemi, "X-ray observation of the Cygnus Loop with Suzaku and XMM-Newton" The X-ray Universe 2008, 2008 年 5 月 28 日, Operations Centre
- ② H. Tsunemi, "The SXI: CCD camera onboard the NeXT mission" SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2008, 2008 年 6 月 24 日, Le Palais des Congrès Parc Chanut Conference Centre

- ③ H. Tsunemi, “High-energy sky observation by two small satellites using formation flight” SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2008, 2008年6月28日, Le Palais des Congrès Parc Chanot Conference Centre
- ④ H. Tsunemi, “FFAST: Formation Flight All Sky Telescope Covering the High Energy X-Ray Sky” 2008 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, 2008年10月21日, Center Dresden
- ⑤ H. Tsunemi, “Diffuse Source Mapping with MAXI” Swift-MAXI workshop, 2009年1月22日, Kauai Quest Beach
- ⑥ 常深博, “高分解 X・ガンマ線撮像分光学の開拓” 日本物理学会春季大会, 2009年3月30日, 立教大学
- ⑦ 林田清, “X線 γ 線偏光観測小型衛星計画 Polaris” 日本物理学会秋季大会, 2007年9月24日, 北海道大学
- ⑧ 宮田恵美, “国際宇宙ステーション搭載 MAXI用X線 CCDカメラ SSCの開発の現状” 日本天文学会秋季年会, 2007年9月26日, 岐阜大学
- ⑨ 林田清, “すざく衛星搭載X線 CCDカメラ XISの現状報告 打ち上げ後2年を経過して” 日本天文学会秋季年会, 2007年9月28日, 岐阜大学
- ⑩ K. Hayashida, “Suzaku Observation of A2256” The Suzaku X-ray Universe, The Suzaku X-ray Universe, 2007年12月11日, San Diego
- ⑪ K. Hayashida, “Status of XIS Calibration” Suzaku Users Meeting, 2007年12月13日, San Diego
- ⑫ 林田清, “すざく衛星による銀河団 A2256の観測” 日本天文学会春季年会, 2008年3月24日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑬ 常深博, “Suzaku 衛星による白鳥座ループの北東端の観測” 日本天文学会秋季大会, 2006年9月23日, 奈良女子大学
- ⑭ 常深博, “超新星残骸、惑星状星雲の輝線からさぐる元素合成史” 日本物理学会春季大会, 2007年3月27日, 首都大学東京
- ⑮ 常深博, “小型衛星の編隊飛行による広天硬 X線観測計画” 日本天文学会春季年会, 2007年3月29日, 東海大学
- ⑯ H. Tsunemi, “Soft x-ray properties of XIS FI and BI CCD onboard Astro-E2” SPIE annual meeting, 2005年8月2日, San Diego Convention Center
- ⑰ H. Tsunemi, “Observation of the shrapnels around the Vela SNR” Activity with Radioisotope, 2005年9月7日, Clemson University
- ⑱ H. Tsunemi, “Recent progress of X-ray Astronomy” Collaboration meeting, 10月26日, University of Groningen
- ⑲ H. Tsunemi, “ASTRO-E2 prospects and its observation of the Galactic diffuse emission” Physics of Supernova Remnants in the XMM-Newton, Chandra and INTEGRAL Era, 2004年9月26日, International Space Science Institute
- ⑳ H. Tsunemi, “Recent Progress of X-ray Astronomy” 9th APPC, 2004年10月24日, Ho Chi Minh Museum

6. 研究組織

(1) 研究代表者

常深 博 (TSUNEMI HIROSHI)
大阪大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：90116062

(2) 研究分担者

林田 清 (HAYASHIDA KIYOSI)
大阪大学大学院理学研究科・准教授
研究者番号：30222227

(3) 研究分担者

宮田 恵美 (MIYATA EMI)
大阪大学大学院理学研究科・助教
研究者番号：40283824