

氏名	たかぎ しんいちろう 高木 慎一郎
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2982号
学位授与の日付	平成18年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Development of Back Supportless CCD and Focal Plane Assembly for Soft X-ray Imager onboard the NeXT Satellite (NeXT衛星搭載予定SXI検出器に向けた透過型CCDと焦点面アセンブリの開発)
論文調査委員	(主査) 助教授 鶴 剛 教授 小山勝二 教授 今井憲一

論 文 内 容 の 要 旨

日本の次期 X 線天文衛星 NeXT は、多層膜を用いた硬 X 線望遠鏡の採用により 80keV の X 線まで集光する能力を持つ。従来の衛星では 10keV 以下に大きい有効面積を持つ X 線結像系を用いており、この帯域で卓越する熱的 X 線放射の研究に大きな成果を上げた。一方小山らにより発見された非熱的 X 線放射は熱平衡から逸脱した 10-100TeV まで加速された荷電粒子の存在を示唆し、それが宇宙の様々な階層において発見されていることから、非熱的な加速現象は宇宙に普遍的に存在する重要な物理過程であることが明らかになってきた。しかしその起源はまだ十分に解明されていない。決定的な要因の一つは従来の 10keV 以下の観測では熱的放射が卓越し、非熱的放射を隠してしまう点にある。NeXT は 10keV 以上の帯域の撮像観測により非熱的 X 線放射の現場をかつてない高感度で特定し、その本質を解明することを目指す。

申請者はその焦点面検出器として、CCD 素子 (SXI) と CdTe 検出器 (HXI) を組み合わせた WXI という検出器を考案し、特に SXI の開発を主導した。CCD は主に軟 X 線帯域で他の追随を許さない高い撮像分光能力を誇る。CCD はシリコンで出来ているため硬 X 線には感度が低いが、硬 X 線に高い感度を持つ HXI を CCD の後段に置くことでカバー出来る。通常の CCD はシリコンの厚みの 10% 程度を占める空乏層で X 線を検出するにすぎず、検出できない硬 X 線のほとんどは不感層や素子を取めるパッケージで吸収される。そこで申請者は不感層とパッケージを除去し、硬 X 線を透過させる「透過型 X 線 CCD」を考案した。申請者は NeXT の能力にマッチした SXI の仕様を検討・決定し、現在の CCD 開発技術動向と合わせ、比較的保守的なベースライン案と、リスクはあるが積極的な性能改善を目指すゴール案という二つの開発計画を立案し、それに沿った開発を進めた。

ベースライン案では、実績のある素子の裏面 (不感層側) を機械的に削り込み不感層を除去する。従来 600 μm 程度ある Si ウエハを 150 μm まで削り込むことに成功した。組立上の理由で有感層の厚みである 80 μm まで削り込むことは出来なかったが、大幅に硬 X 線透過率を向上させることに成功した。また、裏面の削り込みにより CCD の性能劣化がないことを明らかにした。一方、ゴール案では不感領域を削るのではなく、有感領域を増やすことを目指した。p 型半導体ではなく n 型半導体を用いることで有感層を著しく増大させることが出来る。しかし製造実績が全くないため、申請者らはテスト素子により製造プロセスの確立から行った。その結果、有感厚は 300 μm を越え、従来の p 型半導体を用いた CCD (Nch CCD) のそれに比べ 4 倍以上増大することが分かった。またウエハを 200 μm まで削り込むことにより、ウエハ厚み全てで X 線を検出する素子が実現できることも立証し、ゴール案の実現が極めて有望であることを示した。

CCD は熱雑音を低減するため、また宇宙線による放射線損傷を抑制するため -90 $^{\circ}\text{C}$ まで冷却して運用する。申請者は CCD 素子と thermal electrical cooler (TEC) という小型の冷却素子を一体化した焦点面アセンブリ (FPA) の設計開発を行った。組立の容易さや熱変形による破損を防ぐため極力簡素な構造とし、また冷凍に要する消費電力抑制のため熱流入を低減させる熱設計と新型 TEC の設計開発を行った。結果、既存の FPA よりも遙かに簡素で効率よく素子を冷凍できるシステムを実現する見通しを得た。

論文審査の結果の要旨

これまでの X 線天文学では、10keV 以下のバンドで結像集光系が開発され、X 線天文衛星に搭載され華々しい成果を残して来た。すなわち、主に熱的な輻射起源の X 線天体に監視、撮像観測から宇宙 X 線天体の空間的構造の詳細、スペクトル観測から数多くの輝線や吸収構造が発見されてきた。

一方 10keV 以上のバンドにも、広大なフロンティアが広がっていることが近年の研究で分かって来た。すなわち、非熱的放射と極めて強く吸収を受けたブラックホール天体である。前者は超新星残骸での衝撃波による粒子加速に代表される。銀河系内のエネルギー密度の重要な構成要素であり、明らかに宇宙の熱平衡から外れた存在である宇宙線の起源の最重要候補であり、今後の宇宙物理が解決すべき重大なテーマの一つである。後者のブラックホールは現代物理学最重要テーマである。小さな銀河系の質量に匹敵する巨大なブラックホールが銀河系の中心領域に存在しているが、その誕生のメカニズムは全く手がかりがない。この巨大ブラックホールは発見当初は特別な銀河に存在する特別な天体だと考えられていたが、最近の観測からどの銀河系にも存在することがわかってきた。銀河中心領域で冷たい物質で覆われた中から銀河形成と密接な関係を持ちながら誕生することがわかってきた。すなわち、巨大ブラックホールの誕生を解き明かすことは宇宙とその進化の解明に直接繋がる。

この重要性にもかかわらず、10keV 以上を含む 0.1-100keV 帯域でのバンドでは撮像観測が全く実現されていなかった。一つは撮像集光系の技術的問題であり、もう一つは撮像分光器の問題であった。しかし、ここ数年の進歩により前者は多層膜スーパーミラーにより実現可能性が高くなった。一方で、後者については 0.1-100keV という 3 桁に達する広帯域全体を高い性能でカバーする方法についてはまだ確固たる方法が確立されていなかった。

申請者の研究の最大の成果は、その方法の確立にある。0.1-100keV の 3 桁という極めて広い帯域全体を最高の性能でカバーする単一検出器は存在しない。そこで申請者は、20keV 以下で最高性能を持つ X 線 CCD と、それ以上のバンドで最高性能を持つ CdTe ピクセル検出器を組み合わせたハイブリッドカメラを実現することを考えた。従来の X 線 CCD の構造そのままでは実現ができない。そこで申請者は新型の透過型 CCD を考案し、多大な努力により実現に成功した。さらにその性能を飛躍的に延ばすために、空乏層の厚い素子の基礎開発に成功した。また、この X 線 CCD 素子を実際に衛星に搭載する際に必要となる冷却システムの開発に成功した。

申請者は、以上の研究成果を論文としてまとめ既に公表をしている。審査の結果、この学位申請論文の公表は共著の形をとっているが、申請者の独自の貢献を確認した。また、共著者の承諾が得られていることも確認した。

以上より、本論文は博士（理学）の学位論文として価値があるものと認めた。また、論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。