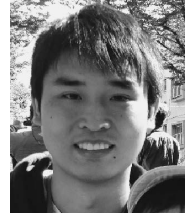


世界最高感度を実証した「ひとみ」 搭載の硬X線撮像検出器HXI

中澤 知 洋¹
萩野 浩 一²



中澤



萩野

〈¹名大 KMI 現象解析研究センター 〒464-8602 名古屋市千種区不老町,

²東京理科大学理工学部物理学科 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641〉

e-mail: ¹nakazawa@u.phys.nagoya-u.ac.jp, ²hagino@rs.tus.ac.jp

10 keV を超える硬X線帯域は高エネルギー天体からの放射が熱的放射から非熱的放射に切り替わるため重要であるが、技術的に高感度の観測が難しい。「ひとみ」の硬X線撮像分光システムは硬X線望遠鏡HXTと硬X線撮像検出器HXIを組み合わせることで5-80 keVを高感度で撮像分光する。HXIはシリコンとテルル化カドミウム半導体を用いた日本独自のイメージャを「すざく」硬X線検出器の低バックグラウンド技術と組み合わせた硬X線観測装置である。「ひとみ」が通信途絶となるまでの13日間だけであるが、想定通りの性能を発揮した。HXTの集光力とHXIの世界一優れたバックグラウンド低減化により、角分解能に優れるNASAのNuSTAR衛星と比較しても、点源で同等以上、広がった放射の観測では3-5倍以上に高い感度を実現できる世界一の性能を持っていた。この技術は次世代の硬X線観測にぜひ引き継いでいきたい。

1. 硬X線の重要性和感度向上の歴史

硬X線と呼ばれる10 keV以上の帯域では、非熱的な電子からのシンクロトロン放射、コンプトン散乱や制動放射、ブラックホール周りの高温コロナなど、10 keV以下の軟X線では観測できない非熱的な現象が顕著に現れる。超新星残骸の観測を例にとれば、軟X線では熱的プラズマの温度や速度、重元素の分布が得られるのに対し、硬X線ではその中で加速された非熱的な粒子を探ることが可能である。

硬X線観測は、その重要性にも関わらず、軟X線観測と比べて大きく感度の劣る観測しか実現できていなかった。それはひとえに透過力の高い硬X線を集光することが困難だったからである。1993年打ち上げの「あすか」衛星以降、10 keV

までの軟X線ではX線集光鏡による高感度の撮像分光観測が実現し、0.2 μ Crabまで観測することが可能となった。一方で、硬X線帯域では非集光型であるがゆえに、最高感度を誇る「すざく」硬X線検出器¹⁾ですら0.2 mCrab程度の明るい天体しか観測できなかった。21世紀に入り、名古屋大学やデンマークのグループが多層膜スーパーミラーの実用化に成功したことで、硬X線の集光鏡が実現した。バックグラウンドが低く硬X線での高い検出効率を併せ持つ検出器と組み合わせることで、従来の100倍もの高感度観測が可能となった。2012年打ち上げのNuSTAR衛星が最初に硬X線望遠鏡を搭載した衛星であり²⁾、「ひとみ」が2つ目の適用例である(図1)。硬X線望遠鏡HXT³⁾については別の稿に譲り、本稿ではその焦点面検出器である硬X線撮像検出器Hard X-ray Imager

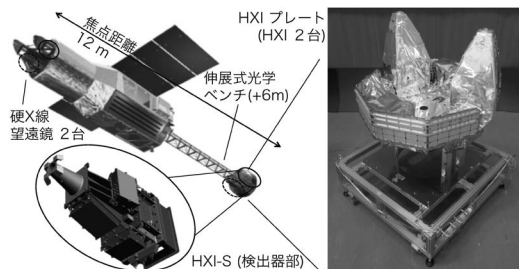


図1 「ひとみ」の硬X線撮像分光システム.

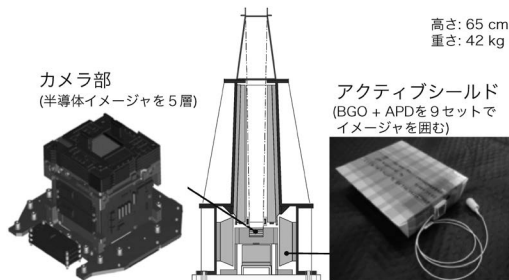


図2 HXI 検出器の概要.

(HXI) を紹介する.

2. HXI 設計の概要

HXIには硬X線帯域での究極の高感度観測を実現するための工夫が多く仕込まれている⁴⁾. HXIの検出部の概要を図2に示す. イメージャ本体は5層の32 mm角の半導体検出器で構成され, 9分角の視野を持つ. 5層のうち上の4層はシリコン両面ストリップ検出器で, 0.5 mm厚のものを4枚重ねて30 keVまでカバーする. より高エネルギーの光子は5層目のテルル化カドミウムの両面ストリップ検出器で受けとめる. 低いエネルギーでは下段の検出器を使わずかつ放射化の少ないシリコンのみとすることでバックグラウンドを削減できる. 両者は10 cm角のトレーに実装され, 専用のアナログASICで読み出す⁵⁾. 半導体検出器はいずれも日本独自の技術であり, ASICも欧州の技術に日本独自の工夫を加えたものである.

このイメージャの周りを厚さ3-4 cmの結晶シンチレータBGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) のユニット9個で囲む(アクティブシールド). その信号はAvalanche Photo Diode (APD) で読み出す. 宇宙背景X線を止め, 宇宙線を阻止して放射化を抑制するとともに, 貫通する宇宙線や高エネルギーガンマ線の散乱を反同時計数で同定して, バックグラウンドを大きく削減する.

日本は, 「あすか」に代表されるようにX線の観測帯域を広げ感度を向上する方針に立ち, 「すざく」衛星でも硬X線検出器を搭載して当時の最

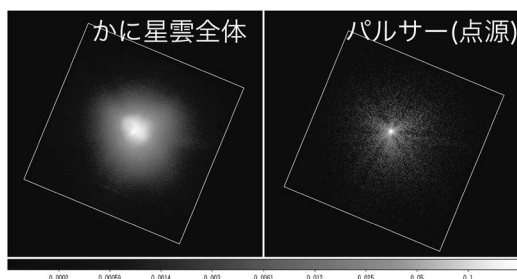


図3 かに星雲の硬X線 (5-80 keV) イメージ. 左図は時間平均イメージでパルサーと星雲が見える. 右図はパルス成分だけを抽出したイメージで, パルサーだけが見える.

高感度を達成した. HXIのバックグラウンド低減策は全て, これらの実績に基づいている.

3. 軌道上での実績

HXIは2月27日から立ち上げ始め, 1台目は3月12日に, 2台目は14日に観測を開始した. 銀河面上などを観測しつつ, 19日に超新星残骸G21.5-0.9, そして25日に「かに星雲」を観測した. その直後に衛星が失われてしまったが, イメージャ, アクティブシールド共に正常に動作し, 図3に示すように精細な硬X線イメージが得られ, 当初予定した角度分解能 (Half Power Diameter HPDで $1'.7$) と有効面積 ($>300 \text{ cm}^2$ at 30 keV) を達成していることも確認した⁶⁾.

短時間の動作ではあったが, HXIは軌道上で極めて高い感度を有することを実証した. 我々は地球に視野を遮られている時間のデータを集め,

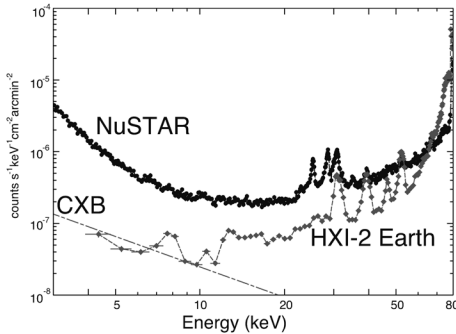


図4 視野あたり・有効面積あたりのバックグラウンド。HXIで地球を見ている時のデータ。参考を示したのは、NuSTAR衛星の例と宇宙背景X線放射(CXB)。

HXIの検出器バックグラウンドを確認した(図4)。そのレベルはNuSTARの1/3-1/5と極めて低い。NuSTARは衛星が小型ゆえにシールドが不完全となり、宇宙背景X線放射や近傍の明るい点源の漏れ込みが激しいために、時間的にもイメージ上でもバックグラウンドが大きく変動していた。それに対し、HXIでは空間的・時間的な安定性も非常に高いことがわかった。この結果、角分解能に優れたNuSTAR (HPD 1')と比較しても点源で同等以上、バックグラウンドの低さと安定性が重要な広がった放射の観測では3-5倍以上に高い感度を実現できる性能を持っていたことがわかった。NuSTAR衛星は広がった天体に対して十分な感度を持っていないことから⁷⁾、硬X線帯域でHXIが果たすはずだった相補的な検出器の不在は大きな科学的損失となっている。

4. おわりに

HXIは軌道上で完璧に動作し、要求性能を達成した。これまでの日本の硬X線観測技術の積み重ねの上に実現した検出器であり、半導体イメージャやシールド検出器、全体構造や回路も、開発時の多くの苦勞を乗り越えたものである。多くの大学院生やポスドク、フランスの共同研究者を含むHXIチームメンバー、そして検出器の製造や

試験に携わった三菱重工業ほか関係者の皆様に深く感謝したい。この世界一と言える検出器を失ったのは、とても残念である。この技術を是非次世代の硬X線観測に引き継いで行きたい。

参考文献

- 1) Kokubun, M., et al., 2007, PASJ, 59, 53
- 2) Harrison, F., et al., 2013, ApJ, 770, 103
- 3) Awaki, H., et al., 2014, SPIE, 9144, 26
- 4) Nakazawa, K., et al., 2018, JATIS, 4, 1410
- 5) Sato, G., et al., 2016, NIM-A, 831, 235
- 6) Hagino, K., et al., 2018, JATIS, 4, 1409
- 7) Wik, D. R., et al., 2014, ApJ, 792, 48

Hitomi Hard X-ray Imager; the best hard X-ray instrument to date

Kazuhiro NAKAZAWA and Kouichi HAGINO
KMI, Nagoya University, and Graduate School of Science and Technology Tokyo University of Science

Abstract: The Hard X-ray Imager (HXI) onboard Hitomi (ASTRO-H) is an imaging spectrometer covering hard x-ray energies of 5 to 80 keV. Combined with the Hard X-ray Telescope, it enables imaging spectroscopy with an angular resolution of 1'.7 half-power diameter in a field of view of 9' × 9'. The main imager is composed of four layers of Si detectors and one layer of a CdTe detector, stacked to cover a wide energy band up to 80 keV, surrounded by an active shield made of BGO scintillators to reduce the background. The HXI started observations 12 days before the Hitomi loss and its in-orbit performance was evaluated. All pre-flight performance requirements were verified. Thanks to its low and stable background, HXI should have been the most sensitive detector in hard X-ray band, especially for diffuse objects.