

# ひとみ衛星による超新星残骸 G21.5-0.9の観測

内田 裕之<sup>1</sup>・田中 孝明<sup>2</sup>

〈<sup>1,2</sup> 京都大学大学院理学系研究科物理学第二教室

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: <sup>1</sup> uchida@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp



内田



田中

ひとみ衛星は、運用終了までに3つの超新星残骸を観測した。本稿では、そのうちG21.5-0.9の科学的成果について述べる。G21.5-0.9は、過去のさまざまなX線天文衛星で較正線源として利用されてきた。ひとみ衛星における観測目的もまさに装置間の相互キャリブレーションだった。較正線源、すなわち素性のよくわかった安定な天体から、新規性のある結果を出すのは一般に容易ではない。しかし、ひとみ衛星のデータは良質だったため、軟X線(SXI)から硬X線(HXI)まで一挙にカバーする広帯域スペクトル、カロリメータ(SXS)を用いた精密分光スペクトルをよく吟味した結果、この天体に関しても、科学的に価値のあるいくつかの成果を創出することができた。

## 1. 超新星残骸G21.5-0.9

### 1.1 キャリブレーション天体として

超新星残骸G21.5-0.9は、ひとみ衛星初期運用において較正目的で観測された天体である。サイエンスの話は後述するが、この天体は時間的に安定なX線源で、スペクトルは輝線のない単純な冪関数で表せる。この特徴を利用して、過去のX線天文衛星はG21.5-0.9で検出器のキャリブレーションを行ってきた<sup>1)</sup>。逆に言えば、このよく知られた「特徴のない」超新星残骸から新しいサイエンスを引き出すのは、そう簡単なことではない。仮に、ひとみ衛星の事故がなければ、G21.5-0.9は本当に較正天体としてのみ用いられて、ほとんどの研究者は、より「旨味のある」天体のデータ解析に向かっていたかもしれない。本稿では、このG21.5-0.9のひとみ衛星の観測から、著者一同が辿り着いた諸成果について紹介したい。

### 1.2 若いパルサー風星雲として

G21.5-0.9は、明るいパルサー風星雲の周囲を

シェルが取り巻く典型的なコンポジット型の超新星残骸である。角度分解能の良いChandra衛星によるX線画像からは、中心からある半径まで明るいパルサー風星雲が支配的な様子が見て取れる<sup>2)</sup>。これは、パルサー風が爆発噴出物を伝搬する過程で終端衝撃波を生じ、下流でシンクロトン放射が卓越する、というパルサー風星雲の基本的な描像とよく一致する<sup>3)</sup>。とくにG21.5-0.9は年齢が約870年<sup>4)</sup>と若く、周辺環境の影響をほとんど受けていないため、この種の天体を研究するうえで格好の教科書的なサンプルである<sup>5)</sup>。

### 1.3 先行研究のX線スペクトル

冒頭でG21.5-0.9のX線スペクトルは単純な冪関数で表せると説明した。厳密には、過去のX線の観測からだいたい10 keVを境にシンクロトン放射の光子係数がソフトになることが知られている。2012年に打ち上げられたNuSTAR衛星は、G21.5-0.9の硬X線スペクトル(3-45 keV)を取得し~9 keVで冪関数が折れ曲がることを示した<sup>6)</sup>。こうした冪関数の折れ曲がりには、古典的

ないいわゆる Kennel & Coroniti モデル<sup>7)</sup> (KC モデル) では説明できない. そもそも, 光円柱内の電磁エネルギーがパルサー風のどの段階で粒子の運動エネルギーに転換されるかがわかっておらず (磁化率問題), 粒子の分布関数に折れ曲がりを取り入れたり, より複雑な空間構造を仮定するなど種々の要素を考慮しても, 観測事実をうまく説明する放射モデルは今のところ存在しない.

## 2. ひとみ衛星による超新星残骸 G21.5-0.9 の観測結果

### 2.1 広帯域 X 線スペクトル

ひとみ衛星は, G21.5-0.9 を 2016 年の 3 月 19 日から 23 日まで約 4 日間観測した. 目的は SXS, SXI, HXI の相互キャリブレーションである. 幸い観測中に姿勢系のトラブルなどは起きなかったため, この 3 つの装置については統計のいい長期データを得ることができた. SGD は立ち上げ中だったため部分的な観測データのみ存在する. SXS, SXI, HXI の同時観測ができたことで, G21.5-0.9 の 0.8 keV から 80 keV まで, つまり NuSTAR 衛星よりさらに広帯域の X 線スペクトルを得られたことになる.

図 1 に実際の X 線スペクトルを示す. 軟 X 線を担当する SXI と, 硬 X 線を担当する HXI, および両者を繋ぐ帯域に SXS の高統計データが存在し, 各々の観測が相補的であることがわかる.

良質なデータは手に入ったが, すでに NuSTAR 衛星が類似の結果を出しているなかで, G21.5-0.9 のひとみ衛星のスペクトルをどのように料理すればよいか. 筆者らは, ひとみ衛星サイエンス検討チームの一員でもあり, Chandra 衛星による G21.5-0.9 の先行研究者でもある, マニトバ大学の Samar Safi-Harb 氏を 2017 年春に訪問して, 3 人でこの問題を話し合った. Chandra 衛星が取得した G21.5-0.9 の X 線画像を見ると, 中心の明るいパルサー風星雲の周囲に拡散放射が確認できる<sup>2)</sup>. この構造は低エネルギー側でそれなりに

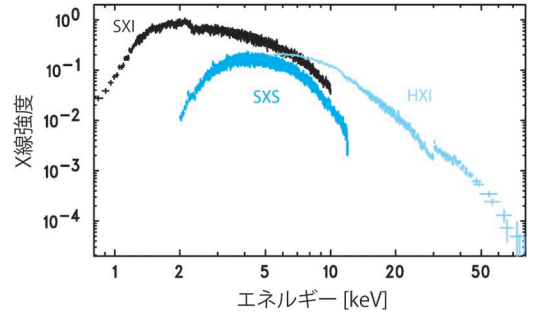


図 1 ひとみ衛星が取得した G21.5-0.9 の広帯域 X 線スペクトル. 軟 X 線領域 (>0.8 keV; SXI) から硬 X 線領域 (<80 keV; HXI) まで高統計のデータを取得できた. HXI は 2 つの検出器から成るが (HXI1, HXI2), 両方のデータを同色で表示している.

明るいので, パルサー風星雲そのもののスペクトル形状, ことに冪関数の折れ曲がりを求めるにあたっては, これらの成分の寄与をきちんと見積もる必要がある. パルサー風星雲を記述する, 折れ曲がりのある冪関数に加えて, 考えられる放射成分 (パルサー自体や周辺の非熱的成分および爆発噴出物からの熱的成分) をすべて取り込んだところ, 冪の折れ曲がりのエネルギーは NuSTAR 衛星の結果 (~9 keV) と有意に異なる  $7.1 \pm 0.3$  keV という値を得た. 試しに我々は NuSTAR 衛星のバンド (3-45 keV) に制限して, 単純な (折れ曲がりのある) 冪関数でスペクトルを合わせた. この場合は, 彼らの先行研究とほぼ同じ結果が得られた. つまり, 正確に冪の折れ曲がりを見積もるには, 我々がやったように低エネルギー側の複雑な放射構造まできちんと考慮する必要があったということである. 広帯域が売りのひとつだった, ひとみ衛星の利点をうまく活かすことができた.

図 2 に今回のひとみ衛星の結果を入れた G21.5-0.9 のスペクトルエネルギー分布 (SED) を示す. パルサー風星雲の放射機構を研究するうえで常に問題になるのは, 電波からガンマ線までを統一的に説明する放射モデルはなにかということである.

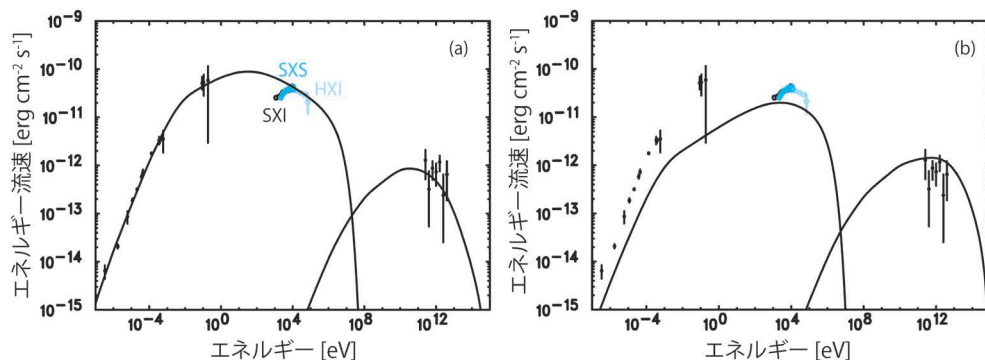


図2 G21.5-0.9のスペクトルエネルギー分布. エネルギーの低い側から電波, 赤外, X線 ( $10^4$  eV付近; 今回のひとみ衛星の観測結果), ガンマ線のデータ点をプロットしている. 左図(a)の実線は時間発展を取り入れたパルサー風星雲の放射モデル. 右図(b)は同じモデルでX線帯域の折れ曲がりを説明するようパラメータを調整した結果を示す.

古典的な1次元KCモデルでG21.5-0.9を説明することは難しい. 筆者らは, 最近の理論<sup>8,9)</sup>を踏まえて, 放射に寄与する粒子数がパルサーからの供給とシンクロトン冷却によって時間発展するモデルを採用した. 結果は図2(a)に示すとおり, 電波からガンマ線の大局的なスペクトルはうまく説明できるが, 肝心の冪の折れ曲がりが102 eV付近にあってX線帯域と一致しない. そこで注入粒子のエネルギー分布を考えたとき, 折れ曲がりがシンクロトン冷却に起因するなら, 単純には磁場強度を下げると良さそうである. ただし磁場強度を下げると, 逆コンプトン散乱の寄与が相対的に大きくなるので, ガンマ線のフラックスによってある程度制限される. 図2(b)は, この制限のなかで7.1 $\pm$ 0.3 keVの折れ曲がりを説明しようとしたモデルである. 今度は電波と赤外線フラックスが合わなくなった. もう少し複雑な空間構造を仮定するか, 電波・赤外放射を別起源と考えるか, なにかさらに発展的な放射モデルを構築する必要がある. 今後の理論研究に期待したいところだが, 観測屋としては, ともかくひとみ衛星でG21.5-0.9に対して新たな問題提起ができたことを是とした.

## 2.2 輝線・吸収線の探索

広帯域スペクトル解析とは別に, 我々はひとみ衛星の本来の目玉だったカロリメータSXSによるG21.5-0.9の精密分光観測も行った. 前項で説明したとおり, G21.5-0.9のX線放射はパルサー風星雲が支配的だが, 低エネルギー側では弱い熱的成分やパルサーそのものからの寄与が無視できない. SXSはゲートバルブを開ける前の状態だったために, 低エネルギー側の光子を集めることが難しかったが, 2-12 keVのX線は検出できたのでこの帯域で輝線・吸収線探索を行った (SXSチームの辻本匡弘氏が主導). 結果を図3に示す. 4.2345 keVと9.296 keVに有意と言える ( $3.56\sigma$ ) 吸収線構造を発見した. 同じパルサー風星雲でも, かに星雲からは受かっておらず, またデータプロセス (スクリーニング) の前後で構造が変化していないことから, これらはG21.5-0.9由来の可能性が高い. この2つの吸収線構造の起源は何だろうか. ドップラーシフトを考慮してもこの2点をうまく説明できる元素が見当たらない. また電子サイクロトン共鳴だとすると, エネルギーは整数倍になるべきだが, これも観測事実と符合しない. やや有望と思われるのは, 中性子星表面 (大気) による吸収である<sup>10,11)</sup>. 回折分光装

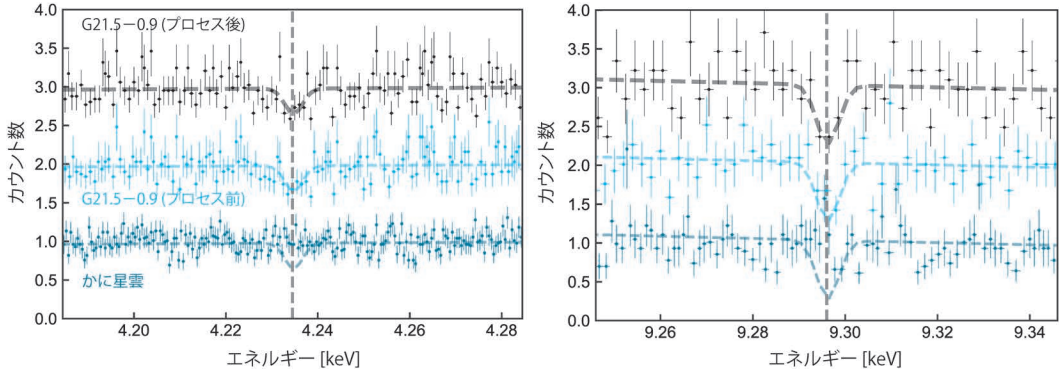


図3 G21.5-0.9のSXSスペクトルの一部。データプロセスの前後で構造が変化しないことから、スクリーニングの過程でできた構造ではないと考えられる。また、同じエネルギー帯域のかに星雲のSXSスペクトルには構造が見えないことから、G21.5-0.9に固有の構造であることを示唆する。

置などを利用した孤立中性子星の観測から、それを示唆する先行研究はいくつかある<sup>12, 13)</sup>。もしこれが正しければ、超新星爆発で噴出せずに中性子星表面に戻った(フォールバックした)元素の組成を探る重要なプローブになるはずである。ASTRO-HのサイエンスオフィスUSリーダーRichard Mushotzky氏は、これをひとみ衛星の成果のうち最もエキサイティングなもののひとつ、とまで言って我々を鼓舞してくれた。しかしG21.5-0.9のパルサーは星雲に比べて非常に暗く、中性子星表面の大気による吸収で観測された等価幅を説明できるかどうかは、今後慎重に検討すべきである。可能性の切り分けという意味では、検出した吸収線構造がパルサーの周期と同期しているかどうか、ひとつのテストになる(ちなみに、今回のひとみ衛星の観測からは、有意な周期変動は検出できなかった; 寺田幸功氏が主導)。また中性子星大気の場合、他のエネルギーにも複雑な吸収線構造が予想される<sup>14)</sup>。XRISMでもG21.5-0.9はキャリブレーション天体として必ず観測されるだろうから、統計を上げたデータでこの問題を再検討して、次回はきっちりと決着を付けたい。

### 3. XRISMに寄せて

幸か不幸かと言えば不幸だったと言うしかないが、ひとみ衛星の事故がなければ、このような研究を行う時間はなかったかもしれないのも事実である。ともかく、ひとみ衛星の貴重なデータを無駄にしないために、著者一同はG21.5-0.9から引き出せるだけのものを引き出した。キャリブレーション天体でサイエンス論文を書くこと決まったとき、筆者(内田)には多少の逡巡があった。しかし、新規性に乏しそうな天体でも、データに向き合って知恵を絞れば、それなりに価値のある結果を出し得る、ということを再認識する教訓的な仕事になった。もちろんこれは、ひとみ衛星の良質なデータがあつてのことである。

ひとみ衛星を事故で喪失した2016年は、シェイクスピアの没後400年という記念の年でもあった。『テンペスト』には、次のような台詞がある—“Do not, for one repulse, forego the purpose that you **resolved** to effect (成し遂げようとした志を、たった一度の挫折によって諦めることはない).”—XRISM搭載のカロリメータをあえて“Resolve”と改称した含意を、筆者はこの用例によってよく理解することができた。

## 謝 辞

本稿の内容は2018年に筆者らが発表した投稿論文<sup>15)</sup>に基づいている。執筆の機会を与えていただいた馬場彩氏に御礼申し上げたい。また、解析の土台となる機上較正やソフトウェアの整備には、ひとみ衛星チームスタッフのみならず、各機関の学生の多大な貢献があったことを強調しておきたい。G21.5-0.9はキャリブレーション天体としての役割も十分果たしたのである。

なお冒頭の写真はSXIを衛星に搭載する直前の記念撮影時のもの。あの頃は大変でした。

## 参考文献

- 1) Tsujimoto, M., et al., 2011, A&A, 525, A25
- 2) Matheson, H., & Safi-Harb, S., 2005, Adv. Space Res., 35,1099
- 3) 齋藤隆之, 2015, 天文月報, 108, 122
- 4) Bietenholz, M. F., & Bartel, N., 2008, MNRAS, 386, 1411
- 5) Gaensler, B. M., & Slane, P. O., 2006, ARA&A, 44, 17
- 6) Nynka, M., et al., 2014, ApJ, 789, 72
- 7) Kennel, C.F., & Coroniti, F.V., 1984, ApJ, 283, 694
- 8) 田中周太, 2013, 天文月報, 106, 34
- 9) Tanaka, S.J., & Takahara, F., 2011, ApJ, 741, 40
- 10) Miller, M.C., & Neuhauser, D., 1991, MNRAS, 253, 107
- 11) Miller, M.C., 1992, MNRAS, 255, 129
- 12) Borghese, A., et al., 2017, MNRAS, 468, 2975
- 13) Hohle, M.M., et al., 2012, MNRAS, 419, 1525
- 14) Mori, K., & Ho, W.C.G., 2007, MNRAS, 377, 905
- 15) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 38A

### Hitomi X-ray Observation of the Pulsar Wind Nebula G21.5-0.9

Hiroiyuki UCHIDA & Takaaki TANAKA

*Department of Astronomy, Kyoto University,  
Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto  
606-8502, Japan*

Abstract: We present results from the Hitomi X-ray observation of a young composite-type supernova remnant G21.5-0.9. The X-ray spectra in the 0.8-80 keV range obtained with the SXS, SXI, and HXI show a significant break, which cannot be reproduced by time-dependent particle injection one-zone spectral energy distribution models. We also found narrow absorption line features in the SXS data at 4.2345 keV and 9.296 keV. The origin of these features is not understood.