

「ひとみ」と電波の同時観測で探る かにパルサー巨大電波パルスのX線特性



寺田 幸功

〈埼玉大学理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: terada@phy.saitama-u.ac.jp

かにパルサーは電波パルサーの中でもスピンドアウン光度の高い活発な中性子星パルサーで、まれに電波放射が二桁から三桁も明るくなる巨大電波パルスを放出する。「ひとみ」衛星は、事故直前に、その時刻精度の検証のためにかにパルサーのX線と電波の同時観測を実施しており、1,000パルス程度の巨大電波パルスに同期したX線増光を探索できた。結果、統計的に有意な増光は発見できなかったが、軟X線から硬X線帯域において高い時刻精度で光子計測できる能力を示せた。

1. 時刻決定システムの開発と較正

ミリ秒で明滅する中性子星パルサーを観測する上で、光子到来時刻に高い決定精度が必要となる。「ひとみ」衛星は、350マイクロ秒の時刻決定精度の科学要求を満たすべく、35マイクロ秒精度を目標にシステムが開発された¹⁾。衛星上で自走する時計をダウンリンク時に較正しX線到来時刻を推定していた「すざく」衛星までとは異なり²⁾、数十ナノ秒の精度を誇るGPS受信機を搭載した「ひとみ」衛星なら、容易に達成しうる精度だと思われるかも知れない。しかし、時計と搭載機器とのタイミング同期の信号は専用線ではなくテレメトリーやコマンドの通信線で配信するため、どうしても遅延と揺らぎが発生する。これが時刻精度を劣化させる。「ひとみ」では、衛星開発の効率化と省力化を目指して衛星組み込みの世界標準通信規格SpaceWireが採用されたが、その通信品質の保証のための仕組みのおかげで時刻タイミングの同期時の精度悪化も最小限におさえられている¹⁾。時刻決定システムの開発においては、これら時刻精度を悪化させる要因を全て列挙し、管理した。

時刻決定システムは、衛星搭載機器のみならず、きめ細かな時刻付け処理を行う地上ソフトウェアが無いとトータルのパフォーマンスは出ない。筆者は搭載機器開発者との強い協力のもと、地上ソフトウェアの専門部隊であるSoftware Calibration Team (SCT) を指揮し、ひとみ専用の時刻付け処理ツールの開発と較正データベースの整備を行った。地上試験等では、光子検出から衛星軌道を用いた太陽系中心時刻までのEnd-to-endでの検証は難しいものの、時刻精度を悪化させる要因をすべて個別に確認して目標精度を達成できるとして打ち上げに望んだ¹⁾。End-to-endでの検証は打ち上げ後の時刻較正観測で可能だが、中性子星パルサーのパルス到来時刻を利用するのがほぼ唯一の方法で、検証精度も限定的である。本記事の主題である「かにパルサー」の電波同時観測は、時刻決定システムに大きな見落としが無いかの確認を第一の目的として計画された。かにパルサーからのパルス信号は、電波からX線、ギガ電子ボルトガンマ線まで数百マイクロ秒以内によくそろそろことが知られており、NICT鹿島宇宙技術センターと東北大学の飯舘観測所の協力で同時観測を実施した³⁾。

太陽パドルを背負う形の日本の科学衛星は、太陽と約90度離れた天体しか観測できないため、なかなか地上望遠鏡との同時観測が難しい。かに星雲は夏冬期に観測可能な天体で、2月打ち上げの衛星にとっては、かに星雲を用いた検出器較正がどうしてもやりにくい。本観測は、「ひとみ」によるかにパルサーの観測可能時期が終わりつつある2016年3月25日に実施、電波観測も途中で地没したため、完全同時は2200秒程度であった。

2. パルサーからの巨大電波パルスの謎

かにパルサーは、電波パルサーの中でもスピンドウンエネルギーが 10^{38} erg/sにも達する活動的なパルサーである。「安定した高速回転をする強力磁石」として理解される中性子星パルサーの磁気圏からの放射は意外と安定ではなく、電波帯域でたまに二桁から三桁も増光してみえる巨大電波パルスを放射することが知られている⁴⁾。この増光は、マイクロ秒オーダーでパルスに同期しており、ナノ秒オーダーで見ると複数の速い増光が重畳して見える不思議な現象である⁵⁾。可視光帯域でも主パルスに同期した増光が発見されており⁶⁾、増光のエネルギーは電波と可視光とで同程度と計算できる。定常的には、かにパルサーからの放射エネルギーは単位波長あたりの光度が最も明るいのはX線帯域である⁷⁾。巨大電波パルスが発生したタイミングでX線増光が無いが、非常に興味深い。

チャンドラ衛星やニュートン衛星とは異なり、「ひとみ」衛星に搭載したマイクロカロリーメータは光子ごとに計測が行えるため、10キロ電子ボルト以下でも35マイクロ秒の絶対時刻精度で観測できる点が大きな強みとなる。そこで本研究では、「ひとみ」が事故直前に取った「かにパルサー」のX線と電波の同時観測のデータから、巨大電波パルスに同期したX線増光を探索した³⁾。

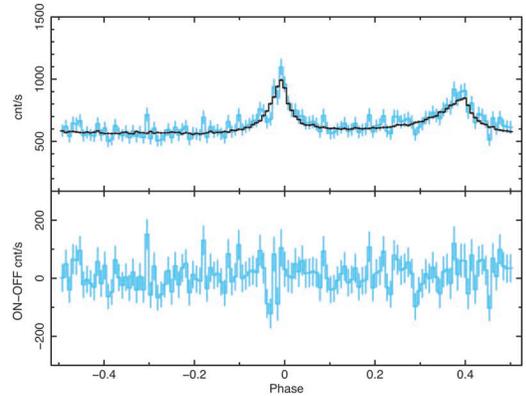


図1 メインパルスの巨大電波パルスに同期したX線パルス波形(上段水色)と平穩時の波形(上段黒)、およびその差分(下段)。

3. 果して電波に同期したX線増光は?

幸いX線も電波も無事に観測を実施でき、それぞれ独立に、かにパルサーの自転周期(33.7ミリ秒)とその変化率(10^{-13})が導出できた。すなわち「ひとみ」の時刻決定システムも大きな問題なく稼働できていることが確認できた。また、今回の電波観測において巨大電波パルスは2,000以上も検出され、「ひとみ」搭載の3機器と同時観測できたものは、メインパルスの巨大電波パルスが各1,000パルス程度、インターパルスのものが各100パルス程度、確保できた。このX線光子数の明滅を自転周期で畳み込み、静穏期と比較したパルス波形を図1に示す。「ひとみ」論文³⁾では巨大電波パルスの前後のサイクルも探索したが、いずれもご覧のようにX線の光子統計が不足して有意なX線増光は見られなかった。変動の上限は25%程度と見積もられ、4.5-10キロ電子ボルト、70-300キロ電子ボルトの帯域では初の観測制限となった。

観測では、巨大電波パルスの前後でパルス波形に擾乱は見られなかった。故に、巨大電波パルスは磁気圏全体の構造が変化する現象ではなく、局所的に電磁波を出す粒子が増加するような現象で

あることが示唆された。本観測で得た上限値はまだ緩く、可視光増光のようにパルス付近のごく短時間に増光する現象なら、より大有効面積で高い時刻決定精度をもつX線観測機器が必要である。最近稼働したNICERや将来の観測に期待する。

謝 辞

本稿は「ひとみ」衛星の時刻決定システムの開発¹⁾ およびかにパルサー観測による科学成果³⁾ の2本の論文を元にしたものである。「ひとみ」衛星の搭載機器のハードウェア開発、ソフトウェア開発、および、サイエンス観測や較正観測の検討等を行ったメンバー全員に感謝する。また、電波との同時観測を実施するにあたり、「ひとみ」メンバーである榎戸輝揚氏(京都大)や、電波観測を指揮された寺澤敏夫氏(理化学研究所)、関戸衛氏(NICT鹿島)、岳藤一宏氏(NICT鹿島)、川合栄治氏(NICT鹿島)、三澤浩昭氏(東北大)、土屋史紀氏(東北大)、青木貴弘氏(山口大)ほかの皆様、科学的議論を深めていただいた山崎了氏(青山学院大)、小林瑛史氏(青山学院大)、木坂将太氏(青山学院大)、および「ひとみ」データ解析を行った小山志勇氏(立教大)、馬場彩氏(東大)、大清水健也氏(埼玉大)、高見一輝氏(埼玉大)には深く感謝する。

参考文献

- 1) Terada, Y., et al., 2018, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 4, 011206
- 2) Terada, Y., et al., 2008, *PASJ*, 60, S25
- 3) Hitomi Collaboration, 2018, *PASJ*, 70, 15
- 4) Staelin, D. H., & Reifenstein, E. C., III, 1968, *Science*, 162, 1481
- 5) Sallmen, S., et al., 1999, *ApJ*, 517, 460
- 6) Shearer, A., et al., 2003, *Science*, 301, 493
- 7) Bühler, R., & Blandford, R., 2014, *Rep. Prog. Phys.*, 77, 066901

X-ray properties of giant radio pulses from the Crab pulsar by the simultaneous observation of Hitomi and Radio observatories

Yukikatsu TERADA

*Graduate School of Science and Engineering,
Saitama University, 255 Shimo-Okubo,
Sakura-ku, Saitama, 338-8570*

Abstract: The Crab pulsar is the one of the most energetic neutron-star pulsars with bright spin down luminosities. It sometimes emits giant radio pulses (GRPs) whose flux reach over three or four orders of magnitude higher than that in the stable periods. In order to verify the timing system of the Hitomi mission, a simultaneous observation of the Crab pulsar with Hitomi and Japanese radio observatories has been performed just before the failure of the mission. Possible X-ray enhancements synchronized with about 1,000 GRPs were searched in the data. Although no significant X-ray enhancements have been discovered, the high performance capabilities of the photon counting instruments onboard Hitomi with the high timing accuracy in the soft to hard X-ray bands were well demonstrated.