

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540258

研究課題名(和文) 相対論的パルサー風内の電波伝搬・回折現象の研究

研究課題名(英文) Radio wave propagation and diffraction in relativistic pulsar winds

研究代表者

寺澤 敏夫 (Terasawa, Toshio)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：30134662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：最も有名な中性子星であるかにパルサーは、通常の電波パルスより数千倍以上の強度をもつ謎の巨大電波パルス(GRP)を放出している。

本計画ではGRPを観測・理論の両面から研究し、観測的には、325MHzから8GHzの全域に及ぶ広い周波数帯域を持ったGRPの世界初の観測例を得るとともに、2.3GHz以下で得られた多数のGRPの統計的解析により、GRPの約半分は単一のべき則に従う周波数スペクトルを持つとの新知見を得た。理論的には、GRPのような高強度をもつ電波の伝搬に際し、誘導コンプトン散乱過程に基づき電波の低周波側への輸送が起きることを定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：One of the most famous neutron stars, the Crab pulsar, emits enigmatic giant radio pulses (GRP) which are more than several thousands stronger than normal radio pulses.

In this research project, we study the GRP phenomenon both observationally and theoretically. Observationally, we have obtained the world's first example of wide-frequency GRPs extending from 325MHz to 8GHz. Further, from the statistical study of many GRP observed below 2.3GHz, we discovered that about the half of GRP follows single power law frequency spectrum. Theoretically, we have quantitatively shown that transfer of wave energy toward the lower frequency region occurs via induced-Compton scattering process along with the propagation of high-intensity radio waves, such as GRP.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：中性子星 かにパルサー 巨大電波パルス 相対論的粒子加速

1. 研究開始当初の背景

高速回転する中性子星、電波パルサーは、その発見以来、超強電磁場、相対論的対プラズマの充満した磁気圏形成など、極限状況の物理過程を検証できる場所として注目されてきたが、いまだ解けない多くの謎を秘めている。我々はその謎の1つとして、カニパルサーの巨大電波パルス (GRP; 図1) をとりあげ、その観測的・理論的研究から、中性子星の物理に迫ろうとしてきた。

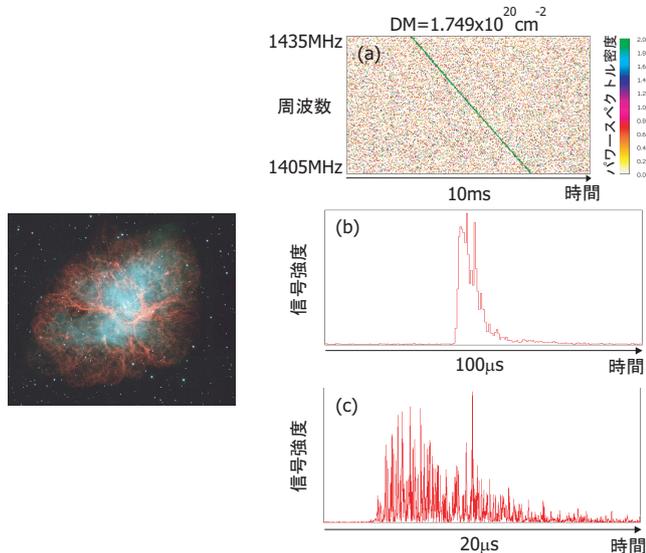


図 1: (左) カニ星雲のすばる望遠鏡像。中心にカニパルサーがある。(右) カニパルサーから放出された GRP の観測例 (NICT 鹿島 34m パラボラアンテナでの観測による)。(a) 生データ (10ms 間) のダイナミックスペクトル。緑色の斜めの線が GRP に対応し、1435MHz → 1405MHz の間にカニパルサーに特徴的な群遅延 (約 4.9ms) が見られる。これは視線方向に積分した電子の柱密度 $1.749 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$ に相当する。(b) 群遅延補正後のパルス波形 (100 μ 秒間、0.5 μ 秒で平滑した値) を示す。平均的パルスに比べ数千倍の強度を持つ。(c) 平滑前の生データによるパルス波形 (20 μ 秒間、時間分解能 1/32 μ 秒) を示す。豊富な微細構造を持つことが見てとれる。

(1) 長い間、GRP は電波だけの現象であって、他波長域のパルスとは相関を持たないと考えられてきたが、2003 年にパルサーの可視光パルスが GRP と相関して 3% の増光を示すことが見いだされ、従来の考えは覆された。

(2) GRP の周波数特性 (狭帯域か広帯域か?) について結論が得られていなかった。

(3) 日本におけるこれまでの電波パルサー観測データ処理は、専用ハードウェアを用いたアナログ処理が主体であり、近年、欧米諸国・豪で一般的なデジタル処理の経験が浅かった。

(4) 発生直後の GRP は大振幅を持ち、伝搬に際しての非線形効果が重要と考えられながら、理論的考察は十分進んでいなかった。

2. 研究の目的

(1) 増光の判定の得られていない GRP と硬 X 線・軟 γ 線

波長域パルスとの相関の有無の判定を行い、GRP の輻射メカニズム・輻射領域についての情報を得る。

(2) GRP の周波数特性の知見を広帯域に渡って取得し、GRP の発生メカニズムを特定するための基本的情報を得る。

(3) 日本における電波パルサー観測データ処理を世界標準に近づける。

(4) 電波パルサー観測と相補的な電波パルサー理論研究 (特に伝搬理論) を発展させる。

3. 研究の方法

(1) X 線天文学衛星「すざく」の硬 X/軟 γ 線望遠鏡と地上電波望遠鏡群によるかにパルサー同時観測を企画・実行する。

(2) 地上の複数の電波望遠鏡を有機的に結合して、これまでにない広い周波数帯域をカバーする。

(3) 日本の電波観測陣が得意とする VLBI 処理系を電波パルサー観測に応用し、高速大容量データ取得を可能とする。データ取得後の処理は全てソフトウェアで実現する。

(4) 大振幅電磁波の伝搬に際し、これまで考察の不足していた誘導コンプトン散乱効果を扱える数値手法を開発・適用する。

4. 研究成果

(1) 硬 X 線・軟 γ 線領域と GRP について、本研究では、残念ながら有意な相関の検出には至らなかったが、増光上限として、従来より約 2 倍強い制限を得ることができた。

(2) 平成 25-26 年度には、従来からの情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター 34m パラボラアンテナ、宇宙航空研究開発機構白田宇宙空間観測所 64m パラボラアンテナによるセンチ波帯 (1.4-1.7GHz、2.2-2.3GHz、8GHz) による観測に、東北大飯館観測所による 325MHz 帯の観測を加えた多周波数同時観測を数回に渡り企画実行した。中でも、平成 25 年 9 月の観測時にはこれら 3 局に加え、国立天文台水沢 VLBI 観測所所属の水沢局 20m パラボラアンテナ (6GHz)、茨城局 32m パラボラアンテナ (6GHz)、山口局 32m パラボラアンテナ (8GHz) の同時観測を実現した。それにより、325MHz から 8GHz の全域に及ぶ広い周波数帯域を持った GRP の世界初の観測例を得た (図 2)。また 325MHz-2.3GHz 帯で得られた多数の GRP の統計的解析により、GRP の約半分は単一のべき則に従う周波数スペクトルを持つとの新知見を得た。

(3) 電波パルサー観測データの取得からデータ処理まで一貫した自前のプロセスを確立した。特に、GRP 判定のために重要となる地球起源の RFI (人工電波雑音) の除去方法について、生データと群遅延補正済データの比較により、自動的に RFI を排除するアルゴリズムを完成させた。

(4) 誘導コンプトン散乱効果の理論的研究において、高次カンパニエツ方程式の数値解を得ることに成功し、それに基づいて輻射場の冷却過程を定量的に明らかにした (図 3)。

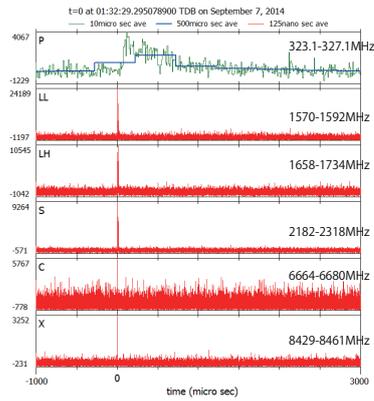


図2: 325MHz帯(最上段)から8MHz帯(最下段)にわたって観測されたGRPの例。パルスのピーク時刻を0とし、その前1000 μ s、後3000 μ sの観測データを示す。325MHz帯では星間空間の密度揺らぎによる散乱効果のためパルス幅が1msほどに広がっているのが見られる。

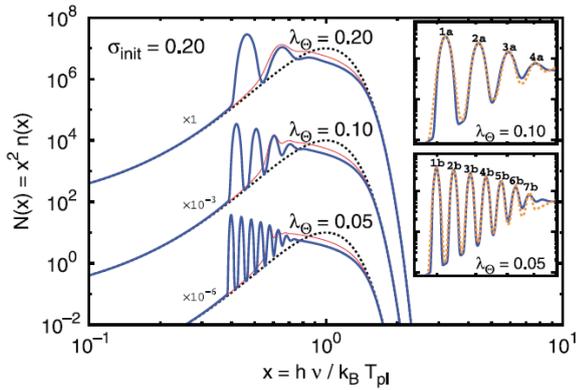


図3: 誘導コンプトン散乱による電波パルススペクトルの発展の数値計算結果。横軸は規格化された電波の周波数を示し、縦軸は規格化された周波数成分ごとの強度(光子数)である。時間発展は黒点線→赤細線→青太線で示されている。3つの曲線群 $\lambda_{e0} = 0.20, 0.10, 0.05$ は初期の電子温度の違いに対応する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Kohmura, T., K. Asano ほか、Infrared AKARI observations of magnetars 4U0142+61 and 1E2259+586, IAU Symposium、査読なし、vol. 291, 2013, pp.422-424
- ② Mikami, R., T. Terasawa ほか、Search for correlation between giant radio pulses and hard X-ray pulses from the Crab pulsar, JPSJ Conference Proc.、査読あり、vol. 1, 2014, pp.015012.1-4
- ③ Tanaka, S. J., K. Asano, and T. Terasawa, Avalanche photon cooling by induced Compton scattering: Higher-order Kampaneets equation, Prog. Theor. Exp. Phys.、査読あり、vol. 2015, 2015, pp.1-14

[学会発表] (計13件)

- ① 寺澤敏夫ほか、Crab パルサー巨大電波パルスの抽出処理における RFI の自動除去、天文学会春季年会、2013.3.21、埼玉大学
- ② 三上諒、寺澤敏夫ほか、Crab パルサーの巨大電波パルスと硬 X 線パルスとの相関の検証、天文学会春季年会、2013.3.22、埼玉大学
- ③ 三上諒、寺澤敏夫ほか、1.4GHz 帯観測により得られた Crab パルサー巨大電波パルスの放射エネルギーの評価、天文学会秋季年会、2013.9.10、東北大学
- ④ 木坂将大、寺澤敏夫、パルサー磁極領域におけるプラズマのダイナミックスの研究、天文学会秋季年会、2013.9.11、東北大学
- ⑤ 寺澤敏夫、三上諒ほか、Crab パルサーの巨大電波パルスと硬 X 線パルスの相関探索、物理学会秋季大会、2013.9.21、高知大学
- ⑥ 三上諒、寺澤敏夫ほか、Hard X-ray observations with Suzaku HXD at the time of giant radio pulses from the Crab pulsar, Suzaku-Maxi 2014 symposium、2014.2.19、愛媛大学
- ⑦ 三上諒、寺澤敏夫ほか、Crab pulsar における Giant Radio Pulse 発生時の硬 X 線から軟 γ 線帯域の放射、天文学会春季年会、2014.3.20、国際基督教大学
- ⑧ 三上諒、寺澤敏夫ほか、多地点連携によるカニパルサー電波高時間分解能観測、天文学会秋季年会、2014.9.11、山形大学
- ⑨ 寺澤敏夫、日本におけるパルサー電波観測の現状と FRB 探索の可能性、高エネルギー宇宙物理学研究会、2014.11.24、九州大学
- ⑩ 三上諒、寺澤敏夫ほか、多地点連携により得られたかにパルサー巨大電波パルスの広帯域スペクトル、天文学会春季年会、2015.3.19、大阪大学
- ⑪ 田中周太、浅野勝晃、寺澤敏夫、誘導コンプトン散乱による光子冷却過程、物理学会秋季大会、2015.9.25、大阪市立大学
- ⑫ 寺澤敏夫、中性子星磁気圏のリモートセンシング、天文学会春季年会招待講演、2016.3.15 首都大学東京
- ⑬ 三上諒、寺澤敏夫ほか、カニパルサー巨大電波パルスの Stacking 解析、天文学会春季年会、2016.3.16、首都大学東京

[図書] 該当なし

[産業財産権] 該当なし

[その他] 該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺澤 敏夫 (TERASAWA, Toshio)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：30134662

(2) 研究分担者

浅野 勝晃 (ASANO, Katsuaki)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：80399279

(3) 連携研究者

関戸 衛 (SEKIDO, Mamoru)
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・
主任研究員
研究者番号：60359057

岳藤 一宏 (TAKEFUJI, Kazuhiro)
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・
研究員
研究者番号：70534121

竹内 央 (TAKEUCHI, Hiroshi)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・助教
研究者番号：90329029

亀谷 収 (KAMEYA, Osamu)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教
研究者番号：70202025

三澤 浩昭 (MISAWA, Hiroaki)
東北大学・理学研究科・准教授
研究者番号：90219618

柴田 晋平 (SHIBATA, Shimpei)
山形大学・理学研究科・教授
研究者番号：90187401

(4) 研究協力者

田中 康之 (TANAKA, Yasuyuki)
三上 諒 (MIKAMI, Ryo)
木坂 将大 (KISAKA, Shota)
田中 周太 (TANAKA, Shuta)