

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540259

研究課題名（和文） 衝撃波加速理論による宇宙線陽子・電子比の起源解明

研究課題名（英文） Study of Cosmic Ray p/e Ratio based on Shock Acceleration Theory

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙空間・宇宙の極限環境におけるさまざまな粒子加速機構について、最新の理論と観測結果を用いた研究を行い、長年の謎である宇宙線陽子・電子比決定メカニズムに迫った。中心的に扱われたのは衝撃波加速機構、乱流統計加速機構であり、それらを共通のキーワードとして、地球定在衝撃波から超新星衝撃波、ガンマ線バーストに伴う相対論的衝撃波まで、広範なパラメタ領域における加速機構の描像の最新化に寄与した。

研究成果の概要（英文）：We have studied various particle acceleration processes in space and astrophysical extreme environments based on the newest theoretical and observational results toward the understanding of the long-lasting enigma about cosmic ray proton-electron ratio. As central topics, we have conducted researches on shock acceleration processes, and stochastic acceleration processes in turbulences, covering the earth's bow shock, supernova remnant shocks, as well as relativistic shocks in gamma ray bursts. We have successfully contributed to the renewal of the understanding of acceleration processes for wide range of parameters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・[素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理]

キーワード：宇宙線(理論)

## 1. 研究開始当初の背景

20世紀初頭に発見された宇宙線粒子は早くから超新星爆発との関連が推測されていたが、具体的な生成機構が数十年も謎であった。ようやく1970年代末に至って超新星残骸(SNR)での衝撃波統計加速過程が提唱・定説化された。最近では、実際の超新星残骸の高マッハ数の衝撃波において期待される状況、

すなわち被加速陽子が持つエネルギー密度が背景プラズマ圧・磁場圧と同程度に達する非線形加速段階の理論的考察が可能となってきた。一方、1990年代半ば以降のX線・TeV領域 $\gamma$ 線天文学の進展により、宇宙線加速の現場の情報を得ることが可能になったが、陽子と電子のそれぞれに対する加速効率決定の問題は、未解決のまま残されてきた。

それは、(1)準熱的領域から非熱的領域への予備的加速(注入機構)が陽子と電子では異なること、(2)そして、それぞれの注入機構が多彩なプラズマ波動・粒子相互作用に依存すること、のため磁場、衝撃波速度等の衝撃波パラメタへの依存性が複雑で、解明が困難であったためである。

こうしたなか、近年の研究の進展により、電子の注入問題解決の鍵は次の2つの過程の解明に絞られるに至った。すなわち(1)衝撃波サーフィン機構による電子の選択的加速過程、(2)ホイスラー波励起とそれに共鳴する準熱的電子の加速過程、である。

一方、超新星残骸の観測においては、2008年に打ち上げられた Fermi 衛星が、陽子起源である数十~数百 GeV 領域の $\gamma$ 線をこれまでにない感度・精度で観測し、従来からの X 線領域、TeV 領域 $\gamma$ 線の観測と合わせることで、電子加速と分離して、陽子加速の様相を曖昧さなく決定できると期待されている。

## 2. 研究の目的

以上のような情勢に鑑み、宇宙物理学、プラズマ物理学の理論的研究と、データ解析による観測的研究とを有機的に結合し、天体衝撃波加速過程における陽子・電子比決定機構を明らかにするべく本研究計画を企画した。非熱的粒子の加速は宇宙の爆発的現象に伴って極めて一般的にみられる現象であるが、その解明の手がかりが得られたのは前項で述べた衝撃波統計加速過程が提唱されて以後のことである。日本におけるこの過程の研究は欧米にやや遅れて始まったが、その多くの局面において本研究計画参加者が重要な役割を果たしてきた。ただし、1970年代末に太陽系空間内に生起する衝撃波を舞台に始められた衝撃波統計加速の研究は陽子などの核子が対象であり、電子加速については、1990年代半ばの本計画代表者のグループによる先駆的な観測例の提示を例外として、その展開は遅れていた。

一方、1990年代に始まった超新星残骸の衝撃波などにおける非熱的粒子加速の研究では、多波長の電磁波観測によるリモートセンシングが主体である。その際、電波領域・X線領域ではシンクロトロン放射された光子より電子の情報が得られるが、TeV ガンマ線領域の光子には逆コンプトン過程による電子起源のもの、 $\pi^0\gamma\gamma$ 過程を通じた陽子起源のものとの両者の可能性があり、それらの区別が困難であった。このため、陽子加速現場の同定は極めて遅れ、ごく最近その端緒が得られたにすぎない。このような現状から、光子観測から得られる加速源の情報の精度を格段に高めるためには、加速源での陽子・電子比の理論的決定が是非とも必要であると、本研究計画の着想に至った。

## 3. 研究の方法

衝撃波統計加速過程への陽子・電子の注入問題に対し、さまざまな観点からのアプローチを行う。

- 陽子・電子の観測例と問題点の整理、
- 電子サーフィン加速理論の拡張・整備。
- 衝撃波近傍の電子の散乱過程解明
- 衝撃波加速過程反作用が電子加速に及ぼす影響
- Fermi 衛星の観測結果による理論結果の検証。

そのため、研究参加者(代表者、連携研究者、研究協力者)を東京・名古屋地区、九州地区、広島地区の3つのサブグループに分け、細部を詳細に追求するとともに、サブグループ間の情報交流により、全体像把握の進展を図る。

[東京・名古屋地区]: 寺澤敏夫、浅野勝晃、天野孝伸(平成24年に東京大学に転任)、  
[九州地区]: 羽田亨、[広島地区]: 山崎了(平成22年に青山学院大に転任)。

## 4. 研究成果

(1)衝撃波により反射された準熱的電子のロスコーン分布はホイスラー波励起に対し不安定となる(図1)。こうして励起されたホイスラー波による電子の散乱を考慮することにより、無衝突衝撃波における電子注入問題の新しい解決策を提唱した。

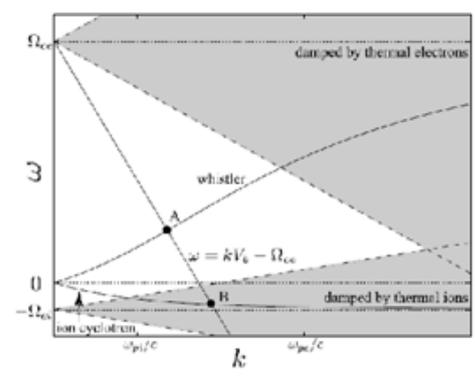


図1. ロスコーン分布により励起されうるホイスラー波のモード(A)を $\omega$ - $k$ 図上に示す。

(Amano & Hoshino, 2010)

さらに、ホイスラー波励起過程の線形・準線形・非線形段階の発展を明らかにし、それにより衝撃波統計加速過程の全体としての効率を見積もった。

(2)陽子により励起された大振幅アルフェン波の非線形カスケード過程を考察し、電子成分の散乱への寄与を定量的に見積もった。

(3)拡散近似では記述しきれない波動粒子相互作用(超拡散作用、亜拡散作用)について考察し、それらが粒子加速過程に及ぼす効果を見積もった。

(4) 宇宙論的ガンマ線バーストにみられる特異なスペクトル形状を、衝撃波における電子一次加速過程と衝撃波下流における電子二次統計的加速過程の両者の寄与により説明する新しいモデルを提出した(図2)。また、関連研究として、相対論的衝撃波下流における相対論的プラズマ乱流モデルを定量的に考察し、二次統計加速の効率を定量的に求めた。

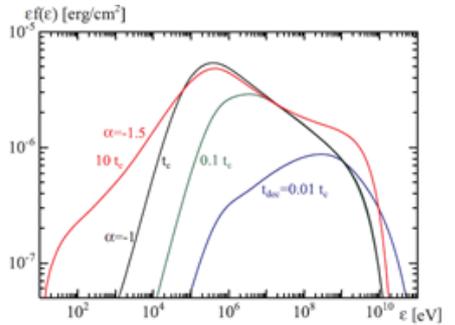


図2. ガンマ線バーストからの光子スペクトルの新しいモデル(Asano & Terasawa, 2009)

(5) サイクロトロン共鳴相互作用はプラズマ・高エネルギー粒子のエネルギー・運動量交換に本質的であるが、いくつか誤った解釈が流通しており、特に異常サイクロトロン共鳴について問題であった(図3)。その点を正すため、レビュー論文を執筆し物理過程の正しい理解に寄与した。

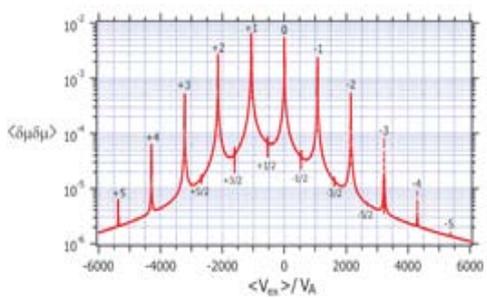


図3. 斜め伝搬ホイッスラー波と電子の間の共鳴散乱断面積を示す。整数を付したピークがサイクロトロン共鳴(+1:基本, -1:異常, ±2, 3, …:高次)に対応し、半整数を付したピークがサブサイクロトロン共鳴に対応する。従来、異常サイクロトロン共鳴について誤った解釈が流通していた。

(Terasawa & Matsukiyo, 2012)

(6) 超新星残骸 RCW86 の X線と可視光詳細観測を行い、衝撃波速度が 6000km/s 程度であるにもかかわらず、下流の温度が 2keV 程度と低いことがわかった。これにより、この超新星残骸で大変効率のよい宇宙線加速が起こっていることを明らかにした(図4)。

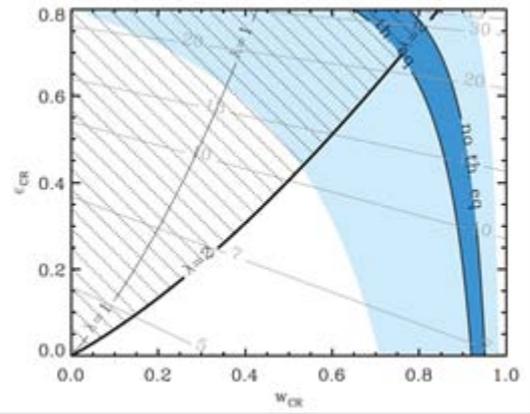


図4. 宇宙線エネルギー損失率(縦軸)と衝撃波下流側宇宙線分圧の比率(横軸)のグラフにRCW86の観測から許されるパラメタ領域を濃い青でハッチして示した。(Helder, Yamazakiほか, 2009)

(7) 超新星残骸 CasA のガンマ線観測を行い、先行のTeVガンマ線データと合わせて、モデルフィットを行った。その結果、年齢300年程度の若い超新星残骸に対して従来期待されていた被加速粒子のスペクトル形状(べき指数2のまま、10\*\*15eV程度までスペクトルが延びている)をもたないことが明らかとなり、新たな宇宙線加速の問題を提起した。

(7) 直接探査可能な新しい粒子加速領域として、「かぐや」データによる月・太陽風相互作用領域の研究を行い、月が有限の電気伝導度を持つことにより、地球定在衝撃波が変形されることを見いだした(図5)。

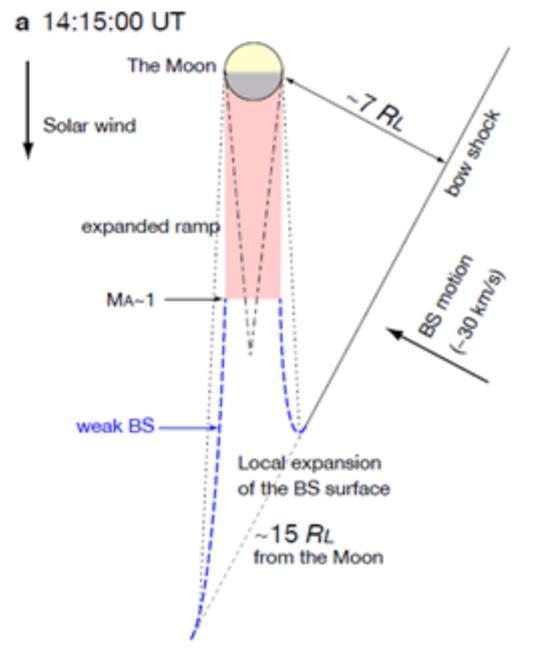


図5. 月の周りの地球定在衝撃波の変形。(Nishino, Terasawaほか, 2011)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① 大平豊、山崎了、寺澤敏夫、宇宙線の源と加速・伝搬の理論、物理学会誌、査読有、67 巻、832-837、2012.
- ② Terasawa, T., and S. Matsukiyo, "Cyclotron resonant interactions in cosmic particle accelerators", Space Science Reviews, 査読有、vol. 173, 623-640, 2012. DOI:10.1007/s11214-012-9878-0
- ③ Ohira, Y., R. Yamazaki, N. Kawanaka, and K. Ioka, Escape of cosmic-ray electrons from supernova remnants, Mon. Not. R. Astron. Soc., 査読有、427, 91-102, 2012. DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21908.x
- ④ Nariyuki, Y., T. Hada, and K. Tsubouchi, Nonlinear dissipation of circularly polarized Alfvén waves due to the beam-induced obliquely propagating waves, Phys. Plasmas, 査読有、19, 082317.1-8, 2012. DOI:10.1063/1.4748296
- ⑤ Matsumoto, Y., T. Amano, and M. Hoshino, Electron accelerations at high Mach number shocks: Two-dimensional particle-in-cell simulations in various parameter regimes, Astrophys. J., 査読有、755, 109.1-11, 2012. DOI:10.1088/0004-637X/755/2/109
- ⑥ Asano, K., and P. Macszaros, Delayed Onset of High-energy Emissions in Leptonic and Hadronic Models of Gamma-Ray Bursts, The Astrophysical Journal, 査読有、Volume 757, 115-126 (2012) DOI:10.1088/0004-637X/757/2/115
- ⑦ Terasawa, T., Collisionless shocks and particle acceleration: Lessons from studies of heliospheric shocks, in Advances in Plasma Astrophysics, IAU Symposium, Volume 274, p. 214-219, International Astronomical Union, 2011. DOI:10.1017/S174392131100696X
- ⑧ Terasawa, T., Shocks in the Heliosphere, Chapter 12, in The Sun, the Solar Wind, and the Heliosphere, by M.P. Miralles and J. Sanchez Almeida. Proceedings of the conference held 23-30 August, 2009 in Sopron, Hungary. IAGA Special Sopron Book Series, Vol. 4. Berlin: Springer, 2011. ISBN: 978-90-481-9786-6, p.121
- ⑨ Nishino, M. N., T. Terasawaほか 11 名、Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE, Planet. Space Sci., 査読有、59, 378-386, Apr. 2011. DOI: 10.1016/j.pss.2011.01.002
- ⑩ Matsukiyo, S., Y. Ohira, R. Yamazaki, and T. Umeda, Relativistic electron shock drift acceleration in low Mach number galaxy cluster shocks, Astrophys. J., 査読有、742, 47.1-9, 2011. Doi:10.1088/0004-637X/742/1/47
- ⑪ Masada, Y., S. Nagataki, K. Shibata, and T. Terasawa, Solar-type magnetic reconnection model for magnetar giant flares, Pub. Astron. Soc. Jpn, 査読有、62, 1093-1102, 2010.
- ⑫ Shimada, N., M. Hoshino, and T. Amano, Structure of a strong supernova shock wave and rapid electron acceleration confined in its transition region, Phys. Plasmas, 査読有、17, 032902.1-10, 2010. DOI:10.1063/1.3322828
- ⑬ Ohira, Y., K. Murase, and R. Yamazaki, Escape-limited model of cosmic-ray acceleration revisited, Astron. Astrophys. 査読有、513, A17.1-10, 2010. DOI: 10.1051/0004-6361/200913495
- ⑭ Nariyuki, Y., T. Hada, and K. Tsubouchi, Heating and acceleration of ions in nonresonant Alfvénic turbulence, Phys. Plasmas, 査読有、17, 072301.1-5, 2010. DOI:10.1063/1.3449592
- ⑮ Amano, T., M. Hoshino, A critical Mach number for electron injection in collisionless shocks, Phys. Rev. Letters, 査読有、104, 181102.1-4, 2010. DOI:10.1103/PhysRevLett.104.181102
- ⑯ Hedler, E.A., R. Yamazakiほか 8 名、Measuring the Cosmic-Ray Acceleration Efficiency of a Supernova Remnant, Science, 査読有、325, 719-722, 2009. DOI: 10.1126/science.1173383
- ⑰ Yamazaki, R., K. Kohri, and H. Katagiri, Gamma-ray spectrum of RX J1713.7-3946 in the Fermi era and future detection of neutrinos, Astron. Astrophys. 査読有、495, 9-13, 2009. DOI:10.1051/0004-6361:200810845

- ⑱ Ohira, Y., T. Terasawa, and F. Takahara, Plasma instabilities as a result of charge exchange in the downstream region of supernova remnant shocks, *Astrophys. J. Lett.*, 査読有、703, L59-L62, 2009. DOI:10.1088/0004-637X/703/1/L59
- ⑲ Asano, K., and T. Terasawa, Slow heating model of gamma-ray burst: Photon spectrum and delayed emission, *Astrophys. J.*, 査読有、705, 1714-1720, 2009. DOI:10.1088/0004-637X/705/2/1714

[学会発表] (計 22 件)

- ① 浅野勝晃、レーザー放射スペクトルのフェルミ二次加速モデル、天文学会春季大会 2013. 3. 21 埼玉大学
- ② 武石隆治、寺澤敏夫、古徳純一、太陽フレアにおけるニュートリノ放射の数値的研究、天文学会春季大会 2013. 3. 21 埼玉大学
- ③ 小尾善男、寺澤敏夫、相対論的Shear flow 起源の乱流場における粒子加速、天文学会春季大会 2013. 3. 21 埼玉大学
- ④ 天野孝伸、星野真弘、相対論的強度の円偏波電磁波に関するパラメトリック不安定の線形解析、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2012. 10. 22 札幌コンベンションセンター
- ⑤ 羽田亨、非定常地球磁気圏衝撃波の同時多点観測、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2012. 10. 22 札幌コンベンションセンター
- ⑥ 天野孝伸、相対論的電磁波変性衝撃波の構造、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2012. 10. 21 札幌コンベンションセンター
- ⑦ 浅野勝晃、時間発展シミュレーションによるガンマ線バースト光球モデルの検討、天文学会秋季大会 2012. 9. 19 大分大学
- ⑧ 寺澤敏夫、招待講演 宇宙X線観測と宇宙線物理学、物理学会秋季大会 2012. 9. 12 京都産業大学「シンポジウム宇宙X線観測の50年と物理学へのインパクト」
- ⑨ 浅野勝晃、P. Meszaros、ガンマ線バーストにおけるハドロン起源放射の光度曲線、天文学会春季大会 2012. 3. 22 龍谷大学
- ⑩ 山崎了、天文コミュニティ側から実験室宇宙物理に期待すること、天文学会春季大会 2012. 3. 20 龍谷大学
- ⑪ 羽田亨、松清修一、変成衝撃波による衝撃波統計加速のテスト粒子シミュレーション、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2011. 11. 4 神戸大学
- ⑫ 松清修一、羽田亨、衝撃波ドリフト加速に伴う電子注入過程、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2011. 11. 4 神戸大学
- ⑬ 浅野勝晃、P. Meszaros、時間発展シミュレーションによるガンマ線バースト放射機構の探索、天文学会秋季大会 2011. 9. 22 鹿児島大学
- ⑭ 山崎了、寺澤敏夫、確率微分方程式を用いた宇宙線粒子加速シミュレーション・コードの開発、天文学会秋季大会 2011. 9. 21 鹿児島大学
- ⑮ 浅野勝晃、村瀬孔大、寺澤敏夫、ガンマ線バーストにおける陽子加速と電子・陽電子対注入、天文学会春季大会 2011. 3. 18 筑波大学(震災で大会は中止。講演は有効扱い)
- ⑯ 松清修一、羽田亨、反射イオンを用いた非定常衝撃波のリモートセンシング、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2010. 11. 1 沖縄県市町村自治会館
- ⑰ 天野孝伸、揺らいだ衝撃波面におけるドリフト加速、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2010. 11. 1 沖縄県市町村自治会館
- ⑱ 浅野勝晃、ガンマ線バーストのハドロンモデル、天文学会秋季大会 2010. 9. 24 金沢大学
- ⑲ 浅野勝晃、フェルミが観測したガンマ線バーストの物理、天文学会春季大会 2010. 3. 25 広島大学
- ⑳ 松清修一、羽田亨、相対論的アルフヴェン波の非線形発展に伴う粒子加速、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2009. 9. 28 金沢大学
- 21 天野孝伸、環電流粒子の自己無撞着な運動論的数値シミュレーション、地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会 2009. 9. 28 金沢大学
- 22 浅野勝晃、寺澤敏夫、相対論的プラズマにおける2次統計加速とガンマ線バースト、物理学会秋季大会 2009. 9. 26 甲南大学岡本キャンパス

[その他]

ホームページ等

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/hea/hea-j.html>

## 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

なし

### (3) 連携研究者

浅野 勝晃 (ASANO KATSUAKI)  
東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：80399279

天野 孝伸 (AMANO TAKANOBU)  
東京大学・理学系研究科・助教  
研究者番号：00514853

羽田 亨 (HADA TORU)  
九州大学・大学院総合理工学研究院・教授  
研究者番号：30218490

山崎 了 (YAMAZAKI RYO)  
青山学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号：40420509