

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29日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340169

研究課題名（和文） 放射減衰を考慮した相対論的プラズマシートの動力学と粒子加速

研究課題名（英文） Particle Acceleration and Dynamics of Relativistic Plasma Sheet Mediated by Radiation Loss

研究代表者

星野 真弘 (HOSHINO MASAHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90241257

研究成果の概要（和文）：相対論的高温プラズマ中での磁気リコネクションは、超高温プラズマシートを閉じ込めるために強磁場領域で存在するので、リコネクションの時間発展に伴って作られる相対論的高エネルギー粒子は、シンクロトロン減衰を受ける。輻射減衰効果を取り入れた相対論的電磁粒子コードでリコネクションの粒子加速を調べた。その結果、輻射減衰によってプラズマシートとガス圧が下がり、高速リコネクションが起きることがわかった。また更に、孤立系でのリコネクションだけでなく、複数のプラズマシートが相互作用する複数の磁気島が相互作用する系についても研究し、粒子加速の効率が著しく向上することを見出した。

研究成果の概要（英文）：Relativistic particles generated in the course of relativistic magnetic reconnection is subject to the synchrotron radiation loss, because the strong magnetic field is needed to confine the relativistic hot plasma in the plasma sheet. The nonlinear dynamics and its particle acceleration is investigated by means of a relativistic electro-magnetic, particle-in-cell code, in which the synchrotron radiation effect is implemented. As a result, we found that fast magnetic reconnection can occur by the feedback effect of the reduction of gas pressure due to the radiation loss. In addition to the above isolated reconnection system, we also studied the complex system with multiple magnetic islands, and found that the efficiency of particle acceleration is dramatically improved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2012年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	12,000,000	3,600,000	15,600,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：磁気リコネクション、相対論的プラズマ、粒子加速、放射減衰

1. 研究開始当初の背景

相対論的磁気リコネクションの研究は、近年になり Blackman & Fields (Phys. Rev.

Lett., 1994) や Lyutikov & Uzdensky (Astrophys. J., 2003) などにより、非相対論的なリコネクション過程を相対論的領域に

拡張する考察が行われ、相対論的電流層では、非相対論に比べて、磁気エネルギーが効率よく解放されることが議論された。しかしこれらは電磁流体的取扱いに留まっており、非熱的高エネルギー粒子形成やそのエネルギー・スペクトルについては議論出来ていない。また磁場散逸機構についても現象論的モデルであったため、運動論的取扱いの研究が俟たれた。

そこで我々は 10 年ほど前から、電流層の磁場エネルギー散逸過程を、粒子コードを用いて運動論の枠組みで調べてきた。電流層での磁場散逸過程には、(a)反平行の磁場を含む面内でおきる「磁気リコネクション (MRX)」と、(b)電流方向に波数ベクトルを持つ「ドリフト・キンク不安定 (DKI)」がある (図参照)。通常の非相対論のプラズマシートでは、(a)の MRX が主要なエネルギー散逸を担うことが知られていたが、我々はそれらの不安定性が相対論的領域でどのようにしているかを調べることから着手した。その結果 (1) 反平行磁場形状のときは、MRX ではなく DKI が、主要な磁場のエネルギー散逸過程を担い、強い乱流を伴うプラズマシートへと発展すること、(2) 但し、電流層を貫く一様な縦磁場 (B_y) があるときは、DKI が抑制され、MRX が優勢に発達することを明らかにした (Zenitani & Hoshino, Phys. Rev. Lett., 2005)。

また更に (3) 相対論的リコネクションでは、プラズマ加熱に加えて非熱的高エネルギー粒子が効率よく生成されることを見出した (Zenitani & Hoshino, Astrophys. J., 2001)。この粒子加速の結果は、ドイツのグループによる大規模計算でも確認され (Jaroschek et al. Phys. Plasma, 2004)、これらの結果を受けて、かに星雲などの相対論的パルサー風と星雲での観測を説明するための磁場エネルギー解放問題に応用した研究もおこなわれるようになった (Kirk et al. Phys. Rev. Lett., 2004)。このように相対論的プラズマシートでは、MRX および DKI により、効率よく非熱的高エネルギー粒子が形成され、その非熱的粒子のガス圧が熱的プラズマのガス圧に対して無視できなくなる状況になってくることが分かってきた。

さて非熱的粒子のエネルギー密度が無視できないプラズマシートが実現されることがわかってきたので、次に解決すべき問題は放射効果である。高エネルギー粒子に対して、シンクロトロン放射などの放射減衰が無視できなくなり、放射効果はプラズマシートの構造変化に重要となる。放射減衰でプラズマ

シートの温度は下がるので、力学平衡を満たそうとプラズマシートは収縮し、強い電流が流れるので成長が速くなると考えられる。そこで最近我々は、粒子コードにアブラハム・ローレンツ方程式を組み込んだ計算を開始している。反平行磁場の場合の初期結果では、DKI も MRX も両者とも速く成長するようになるが、放射減衰がない場合とは逆の現象で、DKI よりも MRX のが速く成長するという意外な事実が解ってきた (Jaroschek & Hoshino, Phys. Rev. Lett., 2009)。

このように近年、超高温プラズマシートにおける相対論的プラズマ特有のダイナミクスが次第に明らかになってきたが、相対論プラズマの研究は未だ黎明期であり、未解決の問題が山積している。本研究では、放射減衰の効果が無視できる領域から無視できない領域まで含めて、プラズマシートの構造進化および粒子加速について研究を行うことにした。

2. 研究の目的

パルサー磁気圏やマグネター (超強磁場天体) などの宇宙プラズマでは、強磁場で閉じ込められた超高温プラズマシートでの磁場エネルギー開放過程が、磁気圏構造や高エネルギー粒子形成で重要な役割を担っていると考えられている。このような高エネルギー天体では、アルフベン速度がほぼ光速となるので相対論的な取扱いが必要であり、また高エネルギー粒子からの放射が卓越してくるので放射とプラズマの相互作用も重要となる。しかしこのような相対論プラズマでの性質は、非線形性に強く支配されるため、その重要性にも拘わらずあまり理解が進んでいない。本研究では、超高温プラズマで満たされるプラズマシートでの放射とプラズマとの相乗効果で起きる、磁気リコネクションやドリフト・キンク不安定の非線形発展を、放射減衰の効果を取り入れた相対論的電磁粒子コードを用いたシミュレーションで調べることにより、磁場のエネルギー解放機構とそれに伴う粒子加速過程を研究する。

3. 研究の方法

これまで独自に開発してきた相対論的電磁粒子コードに、ディラック形式のアブラハム・ローレンツ方程式に従って、放射効果を取り入れた粒子コード (PIC) を新たに開発する。そして開発したコードを用いて相対論的高温プラズマシートのダイナミクスを調べる。

プラズマ組成は高エネルギー領域に興味

があるので電子と陽電子プラズマとする。放射減衰効果をパラメタとして、放射の効く領域から効かない領域まで計算することで、リコネクションおよびドリフト・キンク不安定の時間発展解と粒子加速を研究する。

またプラズマシートの初期条件については、プラズマシートにおける孤立したリコネクションの非線形発展だけでなく、リコネクションによる磁気島が多数同時に形成される系についても調べる。磁気島間の相互作用による粒子加速は、特に高エネルギー天体現象においては重要であると考えられている。

4. 研究成果

まず放射効果については、既に発表した論文 (Jaroschek & Hoshino, Phys. Rev. Lett., 2009) で、リコネクションにより加熱されたプラズマシートのガス圧が、輻射損失を受け低下し、プラズマシートが押しつぶされる形でリコネクションが高速に発展することを明らかにした。今回は、空間3次元へと拡張した大規模計算も行い、2009年PRLの論文の結果が幅広いパラメタ領域で成り立つことを確かめることが出来た。

次の課題として、輻射損失系でのリコネクション効率が上がるときに、輻射損失以上に非熱的な高エネルギー粒子加速が出来るかどうかを、輻射損失の効果をパラメタで制御することで調べることにした。高エネルギー粒子になればなるほど、シンクロトロン損失率が大きくなるので、輻射損失効果を大きくすると、リコネクションの発達は早くなるものの、高エネルギー側からエネルギーの損失が始まるので、非熱的粒子加速という観点では、輻射損失は抑制に働くことが分かった。

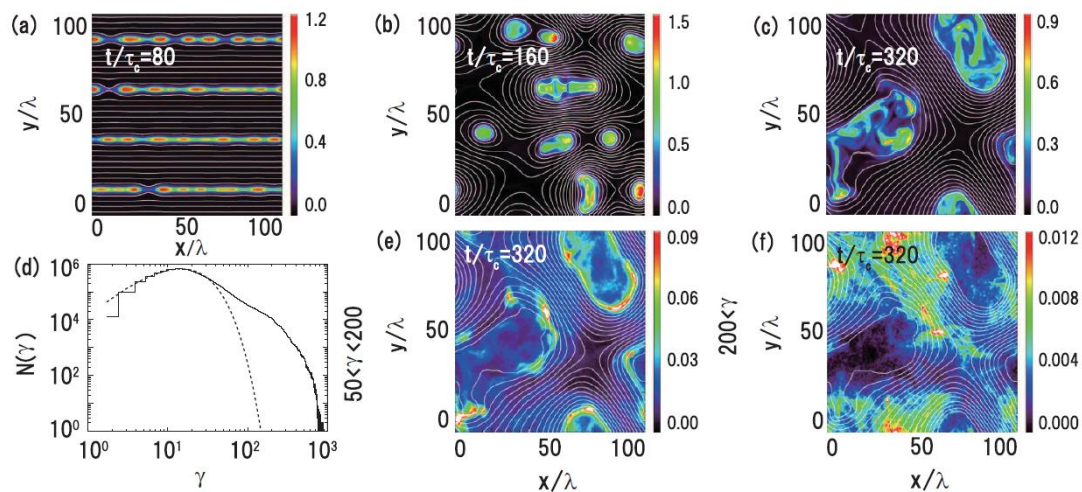
更に、孤立系のリコネクションに加えて、リコネクションが複数個所で同時に起きる複数リコネクション系での粒子加速の研究

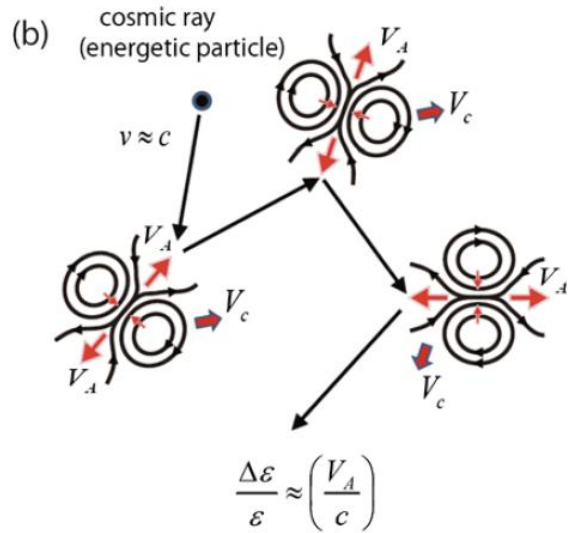
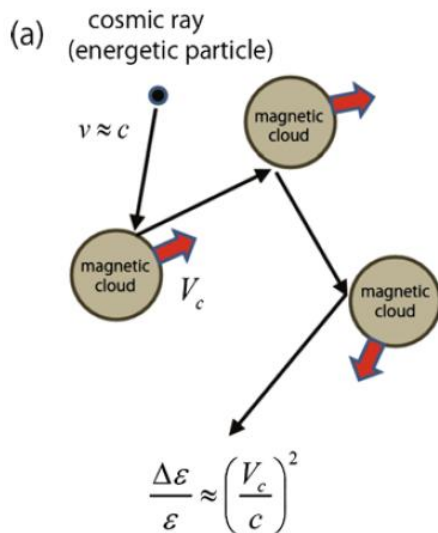
もおこなった。図1に示したのは、空間2次元、初期条件として4枚のプラズマシートを仮定し、時間発展と共に沢山の磁気島がリコネクションによって形成されるときの様子である。

図(a)から(c)は、カラー等高線でプラズマ密度、白線が磁力線を示している。T=80 (図(a))では、リコネクションの線形不安定により沢山の磁気島が形成されているが、時間発展により T=160 (図(b))では磁気島が合体を始め、T=320 (図(c))では二つの大きな磁気島へと成長した。図(d)は、その時のエネルギースペクトルであり、粒子のエネルギーは、ローレンツ因子で1000程度まで加速されており、非常に効率の良い加速メカニズムが働いていることが分かる。ローレンツ因子1000の最高エネルギーの粒子のジャイロ半径は、およそシミュレーションのサイズとなっている。

図(e)および(f)は、T=320における中間エネルギー(粒子のエネルギーのローレンツ因子が20から200)および超高エネルギー粒子(ローレンツ因子が200以上)だけを抜き出して計算した密度を表しているが、中間エネルギーの粒子は磁気島を取り囲むように分布しているのに対して、超高エネルギーは磁気島の外側に存在していることが分かる。ローレンツ因子200の超高エネルギーの粒子のジャイロ半径は、磁気島のサイズを超える程度になっている。

効率のよい粒子加速のメカニズムについては、磁気島の合体によって加速される粒子が、リコネクションの磁力線トポロジーの観点から、常に磁気島の外の領域へと注入される性質があり、またその粒子は磁気島合体中のリコネクションによって作られたアルファベン速度を持つ高速ジェットと相互作用することができる。複数の磁気島の成長に於い





て、この二つの性質を考えると、上図に示したようなモデルを提案できる。

図(a)は、フェルミが提案した古典的フェルミ加速であり、磁気雲と高エネルギー粒子がランダムに衝突および追突を繰り返すことで、粒子はエネルギーを獲得する。そして、その加速効率は、磁気雲のランダムな速度 V_c と光速 c の比の2乗オーダーであることが知られている。一方今回発見したメカニズムは、図(b)に模式的に示してある。磁気雲の代わりに磁気島の合体を考えることで、高エネルギー粒子は、リコネクションのジェットと選択的に衝突できるので、加速効率がアルフベン速度 V_a と光速 c の1次のオーダーで起きることを提案した。

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 18 件) (すべて査読有)

- ①A. V. Artemyev, M. Hoshino, V. N. Lutsenko, A. A. Petrukovich, S. Imada, and L. M. Zelenyi, Double power-law spectra of energetic electrons in the Earth magnetotail, *Ann. Geophys.*, 31, 910106, doi:10.5194/angeo-31-91-2013 (2013)
- ②Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, T. Morita, T. Ide, K. Nishio, H. Tanji, H. Aoki, S. Dono, C. D. Gregory, J. N. Waugh, N. Woolsey, A. Dizière, A. Pelka, A. Ravasio, B. Loupias, M. Koenig, S. A. Pikuz, Y. T. Li, Y. Zhang, X. Liu, J. Y. Zhong, J. Zhang, G. Gregori, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Mori, E. Miura, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. Mima, K. A. Tanaka, H. Azechi, T. Moritaka, Y. Matsumoto, T. Sano, A. Mizuta, N. Ohnishi, M. Hoshino

and H. Takabe, Laboratory investigations on the origin of cosmic rays, *Plasma Phys. and Control. Fusion*, 54, 124049, doi:10.1088/0741-3335/54/12/124049 (2012)

- ③M. Hoshino and Y. Lyubarsky, Relativistic reconnection and particle acceleration, *Space Sci. Rev.*, DOI: 10.1007/s11214-012-9931-z (2012)
- ④Y. Matsumoto, T. Amano and M. Hoshino, Electron acceleration at high Mach number shocks: two-dimensional Particle-in-Cell simulations in various parameter regions. *Astrophys. J.*, 755 (2) 109, DOI:10.1088/0004-637X/755/2/109 (2012)
- ⑤J. Birn, A.V. Artemyev, D.N. Baker, M. Echim, M. Hoshino and L. M. Zelenyi, Particle acceleration in the magnetotail and aurora, *Space Sci. Rev.*, DOI:10.1007/s11214-012-9874-4, (2012)
- ⑥Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, M. Hoshino, S.-H. Chen, and H. Takabe, On the universality of nonthermal electron acceleration due to quasi-turbulent wakefields, *High Energy Density Physics*, 8, 2068, DOI:10.1016/j.hedp.2012.03.016 (2012)
- ⑦M. Hoshino, Stochastic particle acceleration in multiple magnetic islands during reconnection, *Phys. Rev. Lett.*, 108(13) DOI:10.1103/PhysRevLett.108.135003 (2012)
- ⑧K. Higashimori and M. Hoshino, The relation between ion temperature anisotropy and formation of slow shocks in collisionless magnetic reconnection,

- J. Geophys. Res., 117 (A1)
DOI:10.1029/2011JA016817 (2012)
- ⑨E. Grigorenko, L.M. Zelenyi, M.S. Dollgonosov, A.V. Artemiev, C.J. Owen, J.-A. Sauvard, M. Hoshino and M. Hirai, Non-adiabatic Ion Acceleration in the Earth Magnetotail and Its Various Manifestations in the Plasma Sheet Boundary Layer, Space Science Review, 164, 133-181, DOI 10.1007/s11214-011-9858-9 (2011)
- ⑩N. Yokoi and M. Hoshino, Flow-turbulence interaction in magnetic reconnection, Physics Plasmas, 18(11), DOI:10.1063/1.3641968 (2011)
- ⑪C.-C. Hung, L.-N. Hau, and M. Hoshino, Magnetic reconnection in an anisotropic plasma: Observation and theory, Geophys. Res. Letters. 38, Issue 18, CiteID L18106 (2011)
- ⑫S. Imada, M. Hirai, M. Hoshino and T. Mukai, Favorable conditions for energetic electron acceleration during magnetic reconnection in the Earth's magnetotail, J. Geophys. Res., 116 (A8), CiteIDA08217, DOI:10.1029/2011JA016576 (2011)
- ⑬Y. Kuramitsu, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Sakawa, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashihara, T. Tanimoto, H. Nakamura, T. Ishikura, K. Takeda, M. Tampo, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. Mima, K. A. Tanaka, H. Takabe, and M. Hoshino, Experimental Evidence of Nonthermal Acceleration of Relativistic Electrons by an Intensive Laser Pulse, Phys. Rev. E, 83 (2) DOI:10.1103/PhysRevE.83.026401 (2011)
- ⑭Y. Kuramitsu, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Sakawa, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashihara, T. Tanimoto, H. Nakamura, T. Ishikura, K. Takeda, M. Tampo, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. Mima, K. A. Tanaka, M. Hoshino, and H. Takabe, Model Experiment of Cosmic Ray Acceleration due to an Incoherent Wakefield Induced by an Intense Laser Pulse, Phys. of Plasmas, 18 (1) DOI: 10.1063/1.3528434 (2011)
- ⑮Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, M.N. Nishino, T. Yamamoto, Y. Terakawa, M. Fujimoto, H. Hasegawa, H. Hayakawa, M. Hirahara, M. Hoshino, S. Machida, T. Mukai, T. Nagai, T. Nagatsumo, T. Nakagawa, M. Nakamura, K. Oyama, E. Sagawa, S. Sasaki, K. Seki, I. Shinohara, T. Terasawa, H. Tsunakawa, H. Shibata, M. Matsumoto, H. Shimizu, F. Takahashi, In-Flight Performance and Initial Results of Plasma Energy Angle and Composition Experiment (PACE) on SELENE (Kaguya), Space Science Reviews, 154, 265-303 (2010)
- ⑯T. Amano and M. Hoshino, Critical Mach number for electron injection in collisionless shock, Physical Review Letters, 104(18), DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.181102 (2010)
- ⑰N. Shimada, M. Hoshino, and T. Amano, Structure of a Strong Supernova Shock Wave and Rapid Electron Acceleration Confined in its Transition Region, Physics of Plasmas, 17, 032902 (2010)
- ⑱W. Baumjohann, A. Matsuoka, W. Magnes, M. Delva, K. Schwingenschuh, T. Zhang, H.-U. Auster, K.-H. Fornacon, U. Motschmann, I. Richter, A. Balogh, C. Carr, M. Dougherty, P. J. Cargill, T. S. Horbury, E. A. Lucek, F. Tohyama, T. Takahashi, M. Tanaka, T. Nagai, H. Tsunakawa, M. Matsushima, M. Shinohara, H. Kawano, A. Yoshikawa, H. Shibuya, T. Nakagawa, M. Hoshino, Y. Tanaka, R. Kataoka, B. J. Anderson, C. T. Russell, Magnetic Field Investigation of Mercury's Magnetosphere and the Inner Heliosphere by MMO/MGF, Planetary Space Science, 58, 279-286 (2010)
- [学会発表] (計 16 件) (すべて招待講演)
- ①M. Hoshino, Magnetic reconnection, turbulence, and particle acceleration in magnetotail, AGU Chapman Conference, Reykjavik, Iceland (March 10-15, 2013)
- ②M. Hoshino, Particle acceleration during magnetorotational instability (MRI) in collisionless accretion disk, Nonlinear Wave and Chaos 9, La Jolla, USA (March 4-8, 2013)
- ③M. Hoshino, Particle acceleration in plasma universe, 8th International Conference on Computational Physics (ICCP8) Hong Kong (January 7-11, 2013)
- ④M. Hoshino, Particle acceleration during magneto-rotational instability (MRI) in kinetic accretion disk, Asia-Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) workshop on Astrophysics: Magnetic Fields in Astrophysics, Pohang, Korea (November 19-22, 2012) (Keynote)
- ⑤M. Hoshino, Plasma dynamics and magnetic

reconnection with anisotropic plasmas in magnetotail, COSPAR, Mysore, India (July 14-22, 2012)

- ⑥ M. Hoshino, Magnetic reconnection and particle acceleration during magneto-rotational instability (MRI) in an accretion disk, COSPAR, Mysore, India (July 14-22, 2012)
- ⑦ M. Hoshino, Magnetic reconnection and particle acceleration during magneto-rotational instability in an accretion disk, US-Japan magnetic reconnection workshop, Princeton University, USA (May 23-25, 2012)
- ⑧ M. Hoshino, Particle acceleration in collisionless accretion disk, International workshop on Particles and radiation from cosmic accelerators CA2012, Chiba University (February 20-22, 2012)
- ⑨ M. Hoshino, Collisionless magneto-rotational instability and particle acceleration in an accretion disk, Frontiers of Plasma Astrophysics, Berkeley University, USA (January 26-27, 2012)
- ⑩ M. Hoshino, Magnetic reconnection in magnetotail and beyond, Workshop on magnetotail current sheets, IKI, Moscow, Russia (September 26-30, 2011)
- ⑪ M. Hoshino, Stochastic Particle Acceleration in Magnetic Reconnection, 2nd International Space Plasma Symposium 2011, Tainan, Taiwan (August 15-19, 2011)
- ⑫ M. Hoshino, Particle Acceleration in Turbulent Magnetic Reconnection and in Accretion Disks, 11th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS), Whistler, Canada (July 10-15, 2011)
- ⑬ M. Hoshino, Stochastic Particle Acceleration in Multiple Magnetic Reconnection Sites, International Astrophysics Forum Alpbach (IAFA) 2011, Alpbach, Austria (June 20-24, 2011)
- ⑭ M. Hoshino, Lecture on Kinetic Reconnection, Summer School of MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas, KIAA, Peking University, China (May 30-June 3, 2011)
- ⑮ M. Hoshino, Particle Acceleration in Relativistic Reconnection, Understanding Relativistic Jets, Krakow, Poland, (May 23-26, 2011)
- ⑯ M. Hoshino, Electron Acceleration in

Reconnection, ISSI Workshop on particle acceleration in cosmic plasmas, Bern, Swiss (May 16-20, 2011)

[図書] (計2件)

- ① 星野真弘、磁気リコネクション：宇宙天気予報の基礎過程 (17章) (p. 573-p. 590)、総説宇宙天気、京都大学学術出版会 (2011)
- ② F. S. モーザー、P. L. プリチュエット、星野真弘 訳、第一原理からみた磁力線再結合、パリテイ、(p. 4-p. 11)、丸善出版 (2011)

[その他]

2012年論文成果 (M. Hoshino, Stochastic particle acceleration in multiple magnetic islands during reconnection, Phys. Rev. Lett.)は、科学新聞(2012年4月)などに掲載。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

星野 真弘 (HOSHINO MASAHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：90241257

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし