

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 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654068

研究課題名（和文） 輻射場とプラズマの相互作用による磁場生成

研究課題名（英文） Magnetic Field Generation under Interaction between Radiation Field and Plasma

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）：相対論的電磁粒子コード（PIC コード）を用いて、大振幅電磁場（輻射場）とプラズマとの相互作用を調べた。無限一様プラズマ中を伝搬する高周波の電磁波は、斜めラマン散乱によって電子が加熱され、その温度異方性によりワイベル不安定が励起されて直流磁場が生成されることを示した。

研究成果の概要（英文）：The interaction between a large amplitude electromagnetic wave (radiation field) and plasma was studied by using a relativistic electromagnetic particle-in-cell (PIC) simulation code. It is found that the high-frequency electromagnetic wave propagating into a uniform plasma medium leads to temperature anisotropy by the oblique Raman scattering process, as a result, the magnetic field is generated by Weibel instability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	0	1,400,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	360,000	2,960,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：相対論プラズマ、磁場生成、輻射場、ラマン散乱、ワイベル不安定、粒子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

宇宙における高温プラズマ中ではしばしば輻射場の圧力が、動力学を支配することがあり、輻射場（大振幅電磁場）とプラズマの

相互作用は重要な問題となってきた。特に、大振幅波動の位相が揃っているコヒーレントな輻射場中においては、プラズマのポンデラモーティブ力（動重力）が働くため、プラズマと輻射場の相互作用は強くなる。宇宙

においてコヒーレントな大振幅電磁場とプラズマの相互作用は、例えば、相対論的衝撃波で重要になることが期待されている。実際、宇宙での超高エネルギー粒子加速のメカニズムとして、レーザー加速として研究されてきた航跡場加速 (Tajima & Dawson, Phys. Rev. Lett., 1979) が、衝撃波面で発生する大振幅電磁波領域に応用できる可能性が指摘されている (Chen et al., Phys. Rev. Lett., 2002; Lyubasky, Astrophys. J., 2007)。また我々はこの先行研究を受けて、相対論的衝撃波での航跡場加速について研究を進め、航跡場領域での「乱流加速」が重要であることを示した (Hoshino, Astrophys. J., 2008; Kuramitsu et al., Astrophys. J., 2008)。

本研究を始めるにあたって、我々は衝撃波でのこの乱流加速の効率を更に上げるために必要な磁場が、航跡場中に発生できるかどうかを検討していた。航跡場加速領域では、輻射場 (大振幅電磁場) とプラズマの相互作用の結果生ずるプラズマ密度の揺らぎが、電子電流の局在化を導き磁場を生成する可能性を探っていた。

本研究では、大振幅波動とプラズマの相互作用による磁場生成に絞って調べるために、衝撃波の上流域だけに着目して、一様な大振幅電磁波をプラズマ中に注入するプラズマ粒子 (PIC) シミュレーションを実施して、その非線形相互作用を調べることにした。

2. 研究の目的

輻射場とプラズマの相互作用による新しい磁場生成メカニズムを提案する。波の位相が揃ったコヒーレントな大振幅電磁波 (輻射場) がプラズマ中を伝搬すると、ポンデラモーティブ力 (動重力/輻射圧) を介して電磁波とプラズマの相互作用が起き、電磁波はラングミュア波により散乱され、その反作用として電子は運動量を獲得することが知られている。この過程はラマン散乱と呼ばれている。本研究では、斜め伝搬のラマン散乱効率がよいことに着目して、斜め方向に運動量を

獲得した電子の温度異方性と、その結果励起されるワイベル不安定性の磁場発生について研究する。輻射場の性質 (コヒーレンス度合い、パルス長など) による磁場生成の定量的な評価を行い、宇宙での磁場形成・粒子加速に応用する。

特に、先行研究としてレーザー実験では、有限幅のビームによる磁場生成の研究はあったが、本研究では、輻射場の形状によらない一般的な相互作用を調べ、またコヒーレンスの度合いによる磁場生成の理解も目指すことで、宇宙から実験室プラズマまで、相対論的プラズマ中での輻射場とプラズマの相互作用についての新しい知見を得る。本研究ではこの新しいメカニズムを確立するために理論シミュレーション研究を行うこととした。

3. 研究の方法

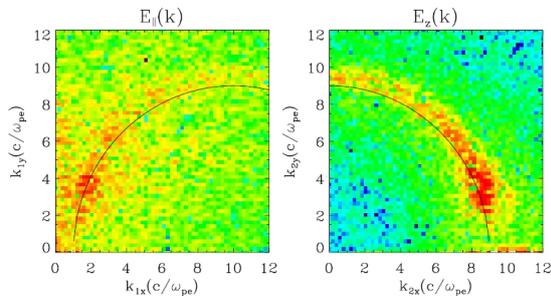
相対論的電磁粒子コード (PIC コード) を用いて、大振幅電磁場 (輻射場) とプラズマとの相互作用を調べた。一様に満たされたプラズマ中に、左側境界からプラズマ周波数に比べて十分高い周波数を持つ電磁場 ($\omega \gg \omega_{pe}$) を注入することで、加熱される電子の速度分布関数の特性を調べ、その温度非等方性から励起されるワイベル不安定の磁場生成について解明した。領域サイズはイオン慣性長程度、グリッドサイズは、後方ラマン散乱も考慮して、注入する電磁波の波長 ($\lambda = 2\pi/k$) の 50 分の 1 程度に細かくとった PIC シミュレーションを実行した。

まず 2 次元 PIC シミュレーションを用いて、輻射強度の関数として磁場生成強度の定量的な評価を行う。次に 3 次元シミュレーションを行い、ワイベル不安定磁場の非線形発展について調べ、航跡場加速中に生成される磁場増幅について考察する。またこの結果を踏まえて、コヒーレンスが悪い輻射場 (白色光) の場合についても研究を発展させる。単一周波数帯の輻射場からブロードバンドな周波数帯へと変化させたシミュレーションを

行い、位相コヒーレンスの度合いの関数として磁場生成強度の定量的な評価を行う。

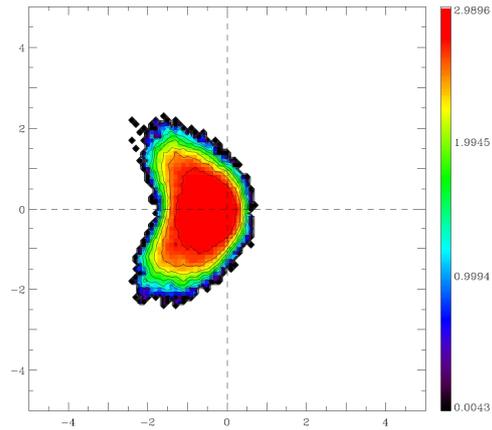
4. 研究成果

静止したプラズマにプラズマ周波数より高周波数の大振幅電磁波を入射させると、効率よくラマン散乱が励起され、前進ラマン散乱による縦方向の電場（ラングミュア波動）に加えて、特に斜め伝搬のラマン散乱（約60度程度の伝搬角をもったラングミュア波動）による電場が励起されること、そして、この斜め方向に伝搬する電場によって電子が選択的に伝搬方向に対して垂直方向に加熱されることが明らかになった。



図の説明：2次元フーリエスペクトル（左図）電場（縦波）のスペクトル、（右図）電磁波（横波）のスペクトル。両者のスペクトルから、前方ラマン散乱に加えて、斜め方向の散乱強度も強いことがわかる。ラマン散乱の理論式と良い一致を示す。

電子の温度異方性は、伝搬方向に対して垂直方向と平行方向の比が、およそ2倍程度まで発達することを見出した。そしてこの温度異方性を自由エネルギーとしてワイベル不安定が励起され、電子慣性長スケールで非伝搬特性を持つ磁場が励起され、その振幅は入射した磁場振幅に対して、約数パーセント程度にも達することがシミュレーション結果から明らかになった。



図の説明：電子の2次元速度分布関数。横軸が注入した電磁波の伝搬に平行方向の速度、縦軸が垂直方向の速度。温度異方性として垂直方向の温度が平行方向より約2倍程度大きい。注入した大振幅電磁波は右方向に伝搬しているため、電子全体が右方向に加速されている。

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10件）

1. M. Hoshino, Stochastic particle acceleration in multiple magnetic islands during reconnection, *Phys. Rev. Lett.*, 108(13), DOI:10.1103/PhysRevLett.108.135003 (2012)
2. Katsuaki Higashimori and Masahiro Hoshino, The relation between ion temperature anisotropy and formation of slow shocks in collisionless magnetic reconnection, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1029/2011JA016817 (2012)
3. E. 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)

4. N. Yokoi and M. Hoshino, Flow-turbulence interaction in magnetic reconnection, *Physics Plasmas*, 18, 111208 (2011/11)
 5. C.-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)
 6. S. 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.*, DOI:10.1029/2011JA016575, (2011)
 7. Y. 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*, DOI:10.1103/PhysRevE.83.026401 (2011)
 8. Y. 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*, DOI: 10.1063/1.3528434 (2011)
 9. Y. 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*, DOI: 10.1063/1.3528434 (2011)
 10. T. 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)
- 〔学会発表〕 (計 23 件)
1. M. Hoshino, Particle acceleration in collisionless accretion disk, International workshop on Particles and radiation from cosmic accelerators CA2012, Chiba University (February 20-22, 2012)
 2. M. Hoshino, Collisionless magneto-rotational instability and particle acceleration in an accretion disk, *Frontiers of Plasma Astrophysics*, Berkeley University (January 26-27, 2012)
 3. M. Hoshino, Magnetic reconnection in magnetotail and beyond, Workshop on magnetotail current sheets, IKI, Moscow, Russia (September 26-30, 2011)
 4. M. Hoshino, Stochastic Particle Acceleration in Magnetic Reconnection, 2nd International Space Plasma Symposium 2011, Tainan, Taiwan (August 15-19, 2011)
 5. 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)
 6. M. Hoshino, Stochastic Particle Acceleration in Multiple Magnetic Reconnection Sites, International Astrophysics Forum Alpbach (IAFA) 2011, Alpbach, Austria (June 20-24, 2011)
 7. 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)
 8. M. Hoshino, Particle Acceleration in Relativistic Reconnection, Understanding Relativistic Jets, Krakow, Poland, (May 23-26, 2011)
 9. M. Hoshino, Electron Acceleration in Reconnection, ISSI Workshop on particle acceleration in cosmic plasmas, Bern, Swiss (May 16-20, 2011)
 10. M. Hoshino, Fermi Acceleration in Turbulent Magnetic Reconnection, 10th Annual International Astrophysics

- Conference, Maui, Hawaii, USA (March 13-18,2011)
11. M. Hoshino, Particle Acceleration in Turbulent Magnetic Reconnection, Earth-Sun System Exploration: Variability in Space Plasma Phenomena, Kona, Hawaii, USA (January 16-21, 2011)
 12. M. Hoshino, Magnetic Reconnection in Relativistic Astrophysics, 4th East Asia Numerical Astrophysics Meeting, EANAM 2010, Taipei, Taiwan (November 2-5, 2010)
 13. M. Hoshino, Reconnection Modeling: Particle Acceleration in Turbulent Reconnection, MMS Science Working Team Meeting, St Michael, Maryland, USA (October 19-21, 2010)
 14. M. Hoshino, Magnetic Reconnection as Studied in Space and Astrophysical Plasmas by using PIC Simulation, 39th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany (July 18-25, 2010)
 15. M. Hoshino, Physics of Nonthermal Particle Acceleration in Collisionless Shocks, International Space Plasma Symposium 2010, Taina, Taiwan (June 27-30, 2010)
 16. M. Hoshino, Plasma Heating and Acceleration in a High Mach Number Shock, Western Pacific Geophysics Meeting 2010, Taipei, Taiwan (June 22-25, 2010)
 17. M. Hoshino, Magnetic Reconnection in Space and Astrophysical Plasmas, West Lake International Symposium on Space Plasma Physics, Hangzhou, China (April 19-21, 2010)
 18. M. Hoshino, First Order Fermi Acceleration in Turbulent Reconnection, US-JAPAN Workshop on Magnetic Reconnection MR2010, Nara, Japan (December 6-9, 2010)
 19. M. Hirai and M. Hoshino, Production of Energetic Particles in Driven Magnetic Reconnection, US-JAPAN Workshop on Magnetic Reconnection MR2010, Nara, Japan (December 6-9, 2010)
 20. K. Higashimori and M. Hoshino, Ion Kinetic Effects on Collisionless Magnetic Reconnection: Ion Temperature Anisotropy and Slow Shocks. US-JAPAN Workshop on Magnetic Reconnection MR2010, Nara, Japan (December 6-9, 2010)
 21. K. Shirakawa and M. Hoshino, The effect of dusty plasma on the evolution of Magneto-Rotational Instability, 39th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany (July 18-25, 2010)
 22. M. Hirai and M. Hoshino, Nonthermal ion acceleration in magnetic reconnection: Results from magnetospheric observations and particle simulations, 39th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany (July 18-25, 2010)
 23. A. Matsuoka, T. Takada, and M. Hoshino, Estimation of the electromagnetic energy carried by the Alfvén waves traveling in the plasma sheet, 39th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany (July 18-25, 2010)
- 〔図書〕 (計 1 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)、総説宇宙天気、京都大学学術出版会 (2011/5)
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://www-space.eps.s.u-tokyo.ac.jp/group/hoshino-lab/>
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 無し
 - (3) 連携研究者 無し