

小特集 宇宙と実験室の無衝突衝撃波—粒子加速と磁場生成・増幅—

3. 高出力レーザーを用いた無衝突衝撃波と磁場生成・増幅実験

3. Experiments on Collisionless Shock and Magnetic Field Generation/Amplification using High-Power Laser Systems

3.1 レーザー生成プラズマにおける磁場生成・増幅実験

3.1 Magnetic Field Generation and Amplification in Laser Produced Plasmas

蔵満 康浩

KURAMITSU Yasuhiro

國立中央大學物理學系

(原稿受付：2015年12月15日)

宇宙空間における磁場は無衝突衝撃波の生成や高エネルギー粒子・宇宙線の加速に本質的な役割を果たしている。しかし、そもそもなぜ宇宙のいたるところに磁場が存在するのか、どのように最初の磁場が作られ、それがどのように現在観測される値にまで増幅されるかは、宇宙物理における未解決の大問題である。近年のレーザー技術の進歩により、直接観測することが難しい宇宙の現象を実験的に検証することが可能になってきている。本節では近年我々が取り組んでいるレーザーを用いた宇宙の磁場に関する実験的研究の中から、磁場の起源、磁場が存在しない状態から有限の磁場を生成する実験、および、宇宙線の加速に必要なと考えられている磁場の増幅に関する近年の成果と今後の展開を俯瞰する。

Keywords:

magnetic field, collisionless shock, cosmic ray, instability, turbulence, laboratory astrophysics

3.1.1 はじめに

本小特集第2章にあるように、宇宙空間は磁場とプラズマに満たされており、これらの相互作用が様々な現象を引き起こす。無衝突衝撃波とそれに伴う粒子加速もその一つであり、特に無衝突衝撃波を介した Fermi 加速、いわゆる Diffusive shock acceleration (DSA) は宇宙線の起源の有力候補と考えられている。DSA では、プラズマの粒子が磁場で繰り返し散乱されることで加速されるため、磁場の存在が不可欠な要素となっている。我々が住む地球や、最も身近な恒星である太陽も星内部のダイナモによる磁場をもっており、恒星の集合である銀河や、その銀河の集合である銀河団なども、その構成要素の運動に伴うダイナモ効果による磁場を有している。さらには天体の存在しないボイドと呼ばれる領域にも磁場が存在することが知られている。磁場が存在しない状態から、どのように最初の種磁場をつくり、それをどのように現在観測される値まで増幅するかは、宇宙物理における未解決の重要な問題である。

このような「歴史的な」問題は一般に物理には現れないが、天文や地球物理ではしばしば「なぜこうなったか」という歴史が大きな問題になる。宇宙の進化や地球の磁場がその良い例で、なぜ現在のような宇宙になったか、どのよ

うに我々の住む惑星が形作られたかは、天文や惑星科学でも重要なテーマになっている。これらの問題に答えるためには、限られた痕跡を観測的に探るか、理論モデルを数値的に検証する方法がとられる。これらに加え、近年のレーザー技術の進歩により、直接観測できない宇宙の現象を、相似則を用いて実験室内で模擬し、実験的に検証することが可能になってきている。太陽・地球近傍の宇宙空間プラズマでは人工衛星を用いたその場観測により、プラズマや磁場の詳細な情報が得られるが、現象のどこを見ているのかは、ローカルな物理量の変化から類推するしかない。

一方、直接アクセスできない天体現象からはローカルな物理量は得られないが、望遠鏡などを用いた撮像によりグローバルな現象の描像を得ることができる。宇宙ではグローバルな物理量とローカルな物理量は同時に得られないが、レーザーを用いた実験室宇宙物理ではこれらを同時に計測することができる。

天体現象の撮像と同様に、実験室ではレーザー生成プラズマからの発光を捉えることで衝撃波の構造を受動的に撮像することが可能である。さらに、外部からのプローブ（可視光、X線、粒子線等）を用いてプラズマの密度分布や電磁場の分布を能動的に捉えることも可能である。これら

Department of Physics, National Central University, Jung-Li 32001 Taiwan

author's e-mail: yasu@ncu.edu.tw

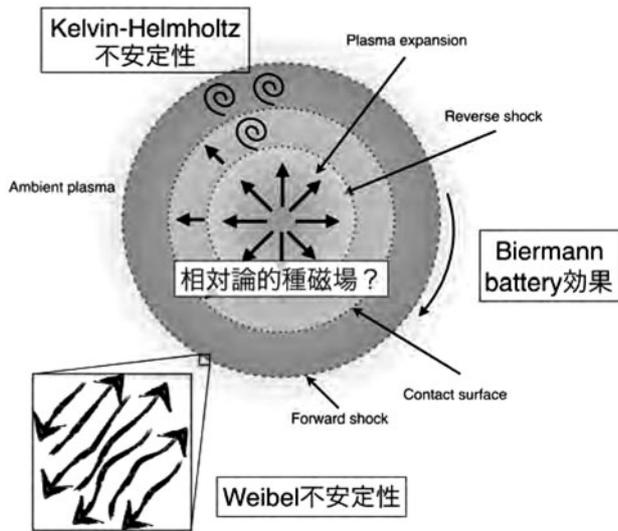


図1 宇宙における磁場の起源の模式図。

プラズマのマクロな構造に加え、磁気プローブやトムソン散乱計測を用いることで、磁場やプラズマのローカルな物理量も同時に得ることができる。これらは実験室宇宙物理のユニークで強力な特徴であり、我々はこれまで無衝突衝撃波を始め様々な問題を実験的に研究してきた（本小特集1, 3, および4章）。ここでは、近年我々が特に注目している宇宙の磁場に関する実験について紹介する。

3.1.2 磁場生成実験

A. 磁場生成の理論的背景

宇宙の磁場生成には幾つかのモデルがあるが、観測的にそれを実証することは極めて難しい。実験室宇宙物理では、このように直接観測的に実証できない宇宙の現象を、実験室で模擬することを目的としている。図1は超新星爆発のように、雰囲気プラズマ中でのプラズマの爆発的な膨張と、それに伴うであろう磁場の生成を模式的に示している。膨張するプラズマと雰囲気プラズマの相互作用によ

り、フォワード衝撃波とリバース衝撃波がそれぞれのプラズマ中に励起され、これらのプラズマをコンタクト面が隔てている。Biermann 効果は、熱的なバロクリニック効果で、温度の勾配と密度の勾配がずれている場合に ($\nabla T \times \nabla n \neq 0$) 磁場が生成される磁気流体 (MHD) 的效果で、特に衝撃波面で有効だと考えられている。

磁場が存在しない系では、膨張するプラズマと雰囲気プラズマが対向流を形成し、Weibel 不安定性により磁場フィラメントが励起される。不安定性の初期段階では、電子スケールの細かいフィラメントが形成されるが、フィラメントの統合により徐々に大きなフィラメントが形成され、イオンを捕捉できるくらいまで成長すると、プラズマの流れが散乱され衝撃波が形成される [1]。Weibel 不安定性は、対向流系のような速度空間に異方性がある場合に有効で、運動論的な効果である。

また、広く知られているように2つの流体が接しており、そこに速度シアアがある場合は、Kelvin-Helmholtz 不安定性が励起される。図1中のコンタクト面においても、速度シアアがある場合は Kelvin-Helmholtz 不安定性が成長しうる。近年の数値計算によると、Kelvin-Helmholtz 不安定性に伴う電子の運動論的な効果で、磁場の無い状態から有限の磁場を生成されることが示唆されている [2]。この電子スケールの磁場がイオンのスケールを超えてグローバルなスケールまで成長しうるかは、今後の研究の展開を待たねばならない。

Kelvin-Helmholtz 不安定性により磁場が生成されれば、衝撃波下流域全体にわたって磁場が存在することになり、Biermann 効果や Weibel 不安定性よりもより大きなスケールで磁場を生成することが可能である。さらに広い範囲に磁場を生成する可能性があるのが、相対論的なバロクリニック効果による種磁場生成である [3]。Biermann battery 効果は熱的なバロクリニック効果で、密度と温度勾配にずれがある熱力学的な非平衡状態が磁場のソースになっているが、相対論的なバロクリニック効果では、プラズマ

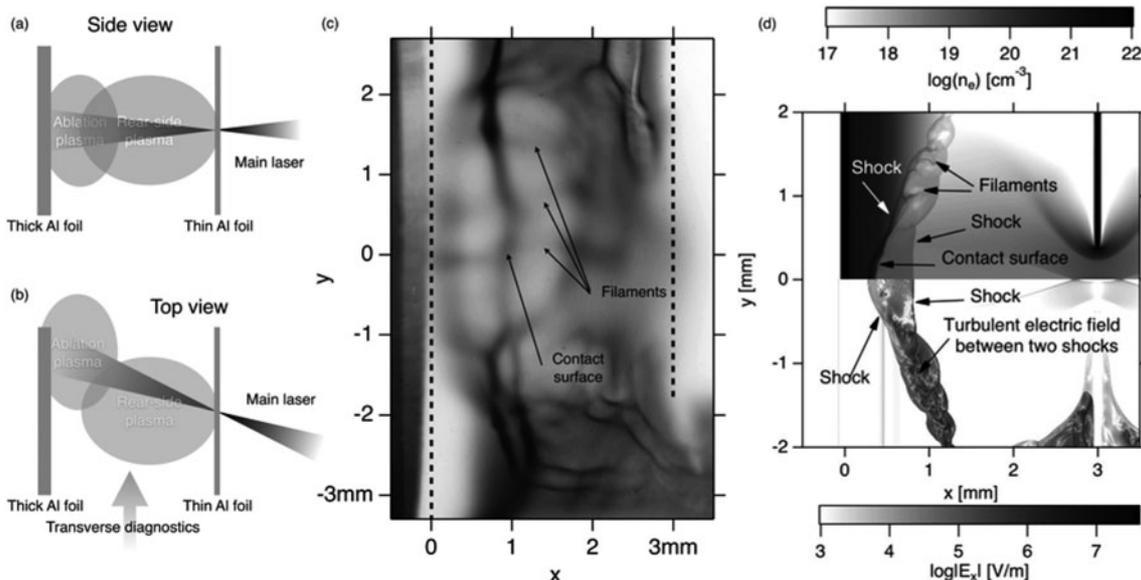


図2 二つの衝撃波の下流域を分けるコンタクト面に励起される Kelvin-Helmholtz 不安定性。

のローレンツ因子と熱力学量の勾配にずれがある場合に磁場生成され、熱力学的に準平衡な状態でも磁場を生成することができる。相対論的なプラズマの広がりがあれば、どこでも磁場を生成することが可能である。

B. 著者らがこれまで行ってきた実験結果

我々はこれまで衝撃波に伴う Biermann battery 効果による磁場生成実験を行った[4]。磁場が存在しない状態で、固体ターゲットを高出力レーザーで照射し、爆発的に膨張するプラズマを生成する。雰囲気媒質が存在する場合は衝撃波が生成される。計測はプローブレザーを用いた干渉計による衝撃波のイメージング、ストリークカメラを用いた衝撃波の伝搬の時間発展、磁気プローブを用いたローカルな磁場計測を行った。このような衝撃波などのプラズマのグローバルな構造と、ローカルな磁場の同時計測は、宇宙空間プラズマや天体プラズマでは不可能であり、実験室宇宙物理の大きな強みである。実験結果は磁場の無い状態でも、衝撃波があれば Biermann battery 効果により種磁場が生成されることを示している[4]。

Kelvin-Helmholtz 不安定性による磁場生成の一つの直接的な検証方法として、レーザーを用いた実験が行われている。図2は、フランスの LULI で行われた実験の (a) 側面からの概念図、(b) 上からの概念図、(c) プロトンビームを用いた電磁場のイメージ、(d) 流体シミュレーションの結果を示している。プロトンのエネルギーは数 MeV で、実験で生成される程度のプラズマの密度では、数メートルの平均自由行程を持つ。プロトンのイメージの濃淡は、プロトンの軌道がプラズマの電磁場構造で曲げられたことを示している。実験の詳細は[5]を参照してほしいが、レーザーを用いて高速の対向流を作り、その相互作用により2つの衝撃波を励起し、図1の一部を実験的に再現している。実験では1ビームのレーザーにより平行平板を照射し対向流を生成している[図2(a), (b)]。このため、左右のプラズマは速度や広がりにおいて非対称であり、コンタクト面に速度シアが存在する。このシアが Kelvin-Helmholtz 不安定性を励起し下流域に渦を生成する。これらは輻射流体コードと流体コードを組み合わせると数値的にも再現されている[図2(d)]。数値計算では、渦による圧力勾配と電場の準平衡状態を仮定することで、電場を見積もることができ、下流全域にわたって乱流的な電場が励起されることが示唆されている[図2(d)下]。プロトンのイメージに見られる横方向の擾乱は、Kelvin-Helmholtz 不安定性に起因する乱流電場によると考えられる[5]。

C. 著者らがこれから行おうとする実験計画

Weibel 不安定性を介した衝撃波生成は、世界最大のレーザーである米国国立点火施設 (National Ignition Facility : NIF) で検証が進められている。詳細は本小特集3.3章にあるが、NIF 実験では Weibel 不安定性を介した無衝突衝撃波の生成に焦点が当てられている。宇宙磁場の起源としては、磁場が励起される領域が比較的狭い衝撃波の遷移層に限られるという問題が残される。

衝撃波は超音速の上流の運動エネルギーを亜音速の下流の熱エネルギーに変換するマクロな構造で、一般のプラズ

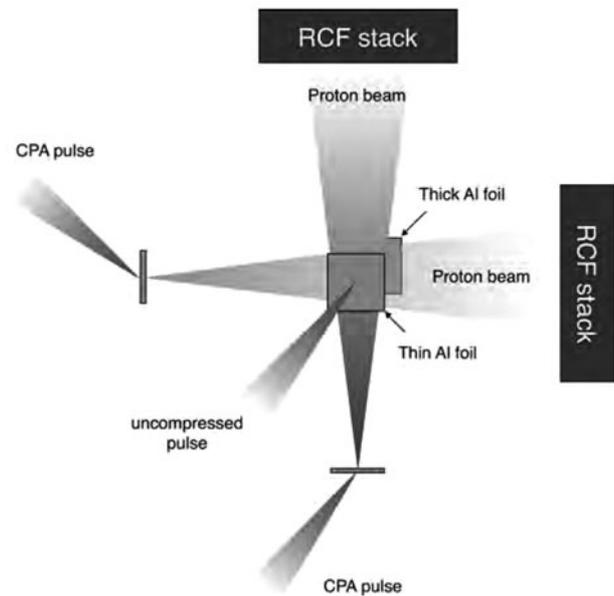


図3 電磁場の分離実験の模式図。複数のプロトンビームを用いることで電場と磁場を分離し、Kelvin-Helmholtz 不安定性にともなう磁場生成を実験的に検証する。

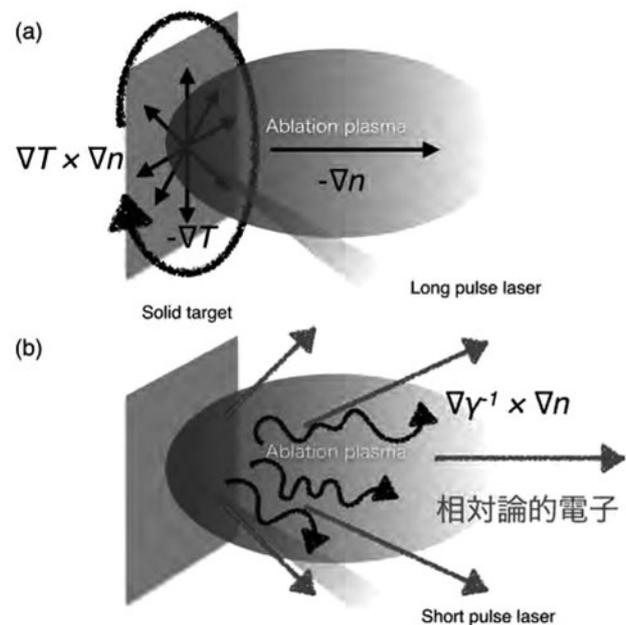


図4 (a)非相対論的なレーザーによる磁場生成と(b)相対論的なレーザーによる磁場生成の概念図。

マではクーロン衝突が無視できるため、プラズマ中の電磁場がこの変換を担っている。外部磁場が存在しない場合には、静電衝撃波[6]と Weibel 不安定性を介した衝撃波が励起されるが、数値計算による見積りによると Weibel 不安定性を介した衝撃波を励起するには NIF クラスのレーザーが必要になると考えられている[1]。このため、先に述べた Kelvin-Helmholtz 不安定性についての実験では、プロトンのイメージを解釈するために、電場を仮定したが、Kelvin-Helmholtz 不安定性により磁場が生成される可能性も残されている[2]。実験的に電磁場の分離を検証するためには、複数のプロトンビームを用いる必要がある。単純な静電場構造なら、静電場と直交する方向からプロトンを入射

しても得られるイメージに変化はない。しかし、磁場構造が存在する場合には、磁場に垂直に一つのビームを入射した場合と、例えばそれに180度の方向から入射した場合は、 $\vec{v} \times \vec{B}$ により粒子軌道のずれは逆になる。

現在、我々は台湾の国立中央大学（NCU）で稼働中の100 TW レーザー施設を用いた電磁場の分離実験を計画している。NCU 100 TW レーザーは3本のエネルギーと波長の異なるビームライン、ビームラインあたり2つの独立な短パルス、さらに4つのターゲットチャンバーを有しており、複数のプロトンビームを生成することもできる[7]。

図3は実験の概念図を示している。1本もしくは2本の非圧縮ビームで対向流プラズマを生成し、2本の短パルスで2方向からのプロトンを用いた電磁場のイメージングを行う。ディテクターは radiocromic film (RCF) のスタックを用い、プロトンの向きとエネルギーの違いによる、軌道のずれの違いから電磁場の分離を行う予定である。

また、NCU 100 TW レーザーを用いることで、相対論的な電子を生成することができる。図4は、(a)非相対論的な強度の（長パルス）レーザーで固体を照射した場合の磁場の生成と、(b)相対論的な強度の（短パルス）レーザーを用いた場合の磁場の生成を模式的に示している。真空チャンバーの中で固体を長パルスで照射すると、固体と垂直方向に広がるアブレーションプラズマが生成される。プラズマの密度はこの広がり方向に勾配を持つが、プラズマの温度は真空中の膨張なので、この方向にはほぼ等温で広がる。温度勾配はむしろ固体ターゲットにそって存在する。このため図4(a)に示すように、レーザーの照射面を取り囲むような磁場が生成される。一方短パルスで固体を照射する場合は、この熱的なバロクリニック効果に加えて相対論的な効果で磁場が生成されると考えられる。レーザーの電場で強制振動される電子のローレンツ因子(γ)は、規

格化されたレーザーの電場の振幅程度になる。NCU 100 TW レーザーを用いると、 $\gamma \sim 10$ 程度になり、この相対論的な電子の広がり起因する磁場の生成を実験的に検証する計画である。磁場の計測には先に述べた多ビームのプロトンを用いたイメージングを用いる。

プロトンビームの生成も、基本的には短パルスと固体の相互作用である。我々が計測に用いるように、プロトンビームの応用は広く、近年では医学的な応用をめざした研究も多くなされている。このためにはプロトンのエネルギーをさらに上げる必要があるが、一つの足かせになっていると考えられるのが、この短パルスと固体の相互作用による自己生成磁場である。プロトンのエネルギーを上げるために、レーザーの強度を上げると、この自己生成磁場も強力になり、プロトンを捕捉して加速を妨げると考えられる。超相対論的な強度のレーザーと固体の相互作用で生成される磁場を理解することは、プロトンビームの生成とそれを用いた応用に本質的に関わっている。

また、レーザーと固体との相互作用で生成される磁場は、レーザーを用いた磁気リコネクションの研究にしばしば用いられる[8-10]。これまでは、図4(a)の非相対論的なレーザーを2ビーム用いて、二つの膨張する磁場を用いてリコネクション実験を行ってきたが、これを相対論的なレーザーに置き換えることで、相対論的な磁気リコネクションを実験的に研究することができる。NCU 100 TW レーザーでは、磁場を生成するために2本の相対論ビームを用い、磁場の計測にさらに2本の相対論ビームを用いることができる。このように、NCU 100 TW レーザーは、複数本の相対論ビームを同時に使え、他に類を見ない多彩な実験を遂行することが可能である。

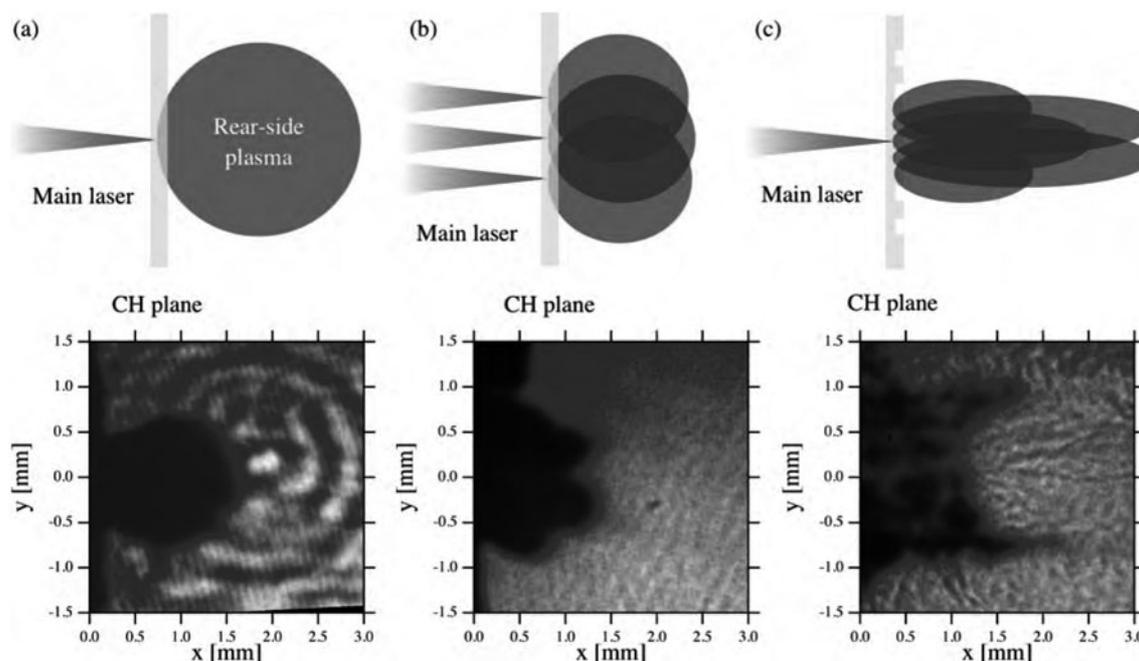


図5 側面からのレーザーとプラズマの概念図（上段）、及び側面からのシャドー計測の結果（下段）。(a)レーザーのオフセットなしの場合、(b)レーザーのオフセットがある場合、及び(c)ターゲットに複数のスリットがある場合。

3.1.3 磁場増幅実験

磁場をどのように増幅し維持するかは、地球磁場や太陽のダイナモや乱流などと関連して、実験室から宇宙論的大規模構造にわたる広い分野で活発に研究が行われている。また、先に述べたように粒子の加速には磁場が不可欠だと考えられており、さらにその効率を上げるためには、粒子の加速サイトで磁場が増幅されている必要があると考えられている。ここでは、その1例として、磁場の非一様と衝撃波を介した磁場増幅に関する、我々の取り組みを紹介する。

近年の超新星残骸の X 線計測によると、磁場が背景のレベルから100倍のオーダーで増幅されていることが示唆されている [11]。本小特集2.2章にあるように、MHD シミュレーションでは、密度の非一様と衝撃波により Richtmeyer-Meshkov 不安定性を介して数百倍の磁場の増幅が可能である [12, 13]。これを実験的に検証するために必要な要素は、衝撃波、外部磁場、さらに密度の非一様である。衝撃波に関する実験は本章や本小特集3.1章及び3.3章でも紹介されているように、すでに様々な実験が行われている。外部磁場を用いた実験も進められている [14]。図 5 は、大阪大学の Gekko XII レーザーを用いて行われた密度の非一様についての要素実験の概念図と結果である [15]。上段が側面から見たレーザーとプラズマの概念図を、下段が側面からのシャドウ計測の結果を示している。図 5 (a)では一点にレーザーを集光した場合を表しており、比較的等方にプラズマが広がっている。図 5 (b)では複数ビームをずらして照射することで、複数のプラズマを相互作用させることでプラズマの広がりに構造をもたせてある。図 5 (c)ではターゲットに複数の溝を掘ってあり、ターゲットの薄いところからは比較的希薄で高速のプラズマが、ターゲットの厚い部分からは高密度で低速のプラズマが生成される。これらの相互作用からフィラメント状の密度構造が生成されていることがわかる。さらに、最近はこれらの3つの要素を統合した実験が行われており、詳細については著者によって専門誌上で報告の予定である。

3.1.4 まとめ

宇宙の磁場は、宇宙の様々な高エネルギー現象に本質的に関わっている。

特に本小特集で広く議論されているように、無衝突衝撃波とそこで生成される高エネルギー粒子・宇宙線の加速メカニズムには磁場が必要不可欠な要素となっている。この宇宙磁場がそもそもどのように生成され、どのように現在観測される値まで増幅されたかは未解決の問題であり、様々なモデルが考えられているが観測的な検証は困難である。

ここでは、それらの中からレーザーを用いて行われている検証実験と、今後の実験計画を紹介した。幾つかのモデルはすでに実験的に検証されており、また検証が進められている。これらの実験は、観測的には実証不可能な現象において、他で得られない実際のデータと知見を提供してくれる。

宇宙の磁場の起源を理解するために、レーザー生成プラズマ中の磁場の生成を理解することで、さらにその磁場を他の現象にも応用できる。レーザープラズマ中で磁場の生成をコントロールし、またその為に磁場の計測を開発・改良することで、今後はさらに、生成された磁場を用いた磁気リコネクションなどの実験を計画している。

参考文献

- [1] H. Takabe *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **50**, 124057 (2008).
- [2] E.P. Alves *et al.*, ApJ **746**, L14 (2012).
- [3] S.M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. **105**, 095005 (2010).
- [4] G. Gregori *et al.*, Nature **481**, 480 (2012).
- [5] Y. Kuramitsu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 195004 (2012).
- [6] Y. Kuramitsu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 175002 (2011).
- [7] Y. Kuramitsu *et al.*, High Energy Density Physics **17**, Part A, 198 (2015).
- [8] P.M. Nilson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 255001 (2006).
- [9] J. Zhong *et al.*, Nature Phys. **6**, 984 (2010).
- [10] Q.-L. Dong *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 215001 (2012).
- [11] Y. Uchiyama *et al.*, Nature **449**, 576 (2007).
- [12] T. Inoue *et al.*, ApJ **695**, 825 (2009).
- [13] T. Sano *et al.*, ApJ **758**, 126 (2012).
- [14] H. Yoneda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 125004 (2012).
- [15] Y. Kuramitsu *et al.*, Ap&SS **336**, 269 (2011).