大型レーザーによる実験室宇宙物理：レーザー宇宙物理

坂和 洋一

大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Laboratory Astrophysics with Large-Scale Lasers: Laser Astrophysics

Youichi SAKAWA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received June 13, 2016)

Utilizing high-temperature, high-density, high-flow-velocity, and high-pressure states observed in the Universe, by large-scale lasers in the laboratories, we aim at understanding plasma physics, astrophysics, and high-density/high-pressure physics. In this article, recent progress on laser plasma astrophysics and laser earth/planetary physics, and future perspective are presented.

Key Words: Laboratory astrophysics, Laser astrophysics, Plasma astrophysics, Earth/planetary physics

1. はじめに

宇宙物理学とは、宇宙の諸現象について得られた観測結果を、現代物理学の理論と研究方法を駆使して分析し、得られた結果に対し理論的な説明や解釈を与えることを試みる学問である¹⁾。我々は、実験室で、宇宙の興味深い現象を実験的に研究する、「実験室宇宙物理 (Laboratory Astrophysics)」の研究を進めている。

2012年にSavin等によって出された実験室宇宙物理のレビュー論文では²⁾，“US National Research Council Astro 2010 Survey on Astronomy and Astrophysics”に従い³⁾，宇宙物理をPlanetary systems and star formation, Stars and stellar evolution, The galactic neighborhood, Galaxies across time, Cosmology and fundamental physicsの5つのカテゴリーに分類している。Savin等はこれら5カテゴリーを、さらにatomic, molecular, condensed matter, plasma, nuclear, particle physicsの6つの物理分野に分類し、それぞれの物理分野での実験室宇宙物理の成果をまとめている²⁾。

本特集では、特に、大型レーザーを用いた実験室宇宙物理を取り上げる。本来なら、上記の分類に従って記述すべきなのかもしれない。しかしここでは、我々なりの分類で、カテゴリーの範囲を広めたレーザーを用いた実験室宇宙物理、「レーザー宇宙物理 (Laser Astrophysics)」についてまとめる。

レーザー宇宙物理において実験対象とする分野は、天文学 (Astronomy)・天体物理 (Astrophysics)，宇宙空間物理 (Space Physics)，地球・惑星物理 (Earth/Planetary Physics) が挙げられる。天文学・天体物理は、恒星・銀河・星間

物質などの天体の物理的性質や天体間の相互作用などを研究対象としている。宇宙空間物理は、地球近傍の宇宙空間における物理現象を研究する学問分野であり、電離圏、磁気圏、磁気圏外の太陽風が流れる領域である惑星間空間、などを研究対象とする。地球・惑星物理は、太陽系の形成・進化、地球の進化、地球内部の物理、惑星の進化に重要な衝突・破壊などの基礎物理を研究している。

以下に、天文学・天体物理と宇宙空間物理の共通のテーマとして無衝突衝撃波を例にとって、レーザー宇宙物理の特徴を述べる。

天文学・天体物理の分野で対象となる無衝突衝撃波として、超新星残骸 (supernova remnants: SNR)，銀河団、活動銀河核、 γ 線バースト、等における衝撃波がある。これらの無衝突衝撃波は、高エネルギー粒子である宇宙線のうち、ほぼ 10^8 eVから 10^{20} eVの領域で、約-2のベキ乗エネルギースペクトルを持つ、太陽系外宇宙線の起源と考えられており、電磁波によるイメージング・スペクトル観測を中心とした研究が行われている。例えば、光子エネルギーが 10^{-6} eVの電波から 10^4 eVのX線領域には、電子のシンクロトロン放射が観測される。 10^0 eV (GeV) から 10^{12} eV (TeV) を超える γ 線領域には、電子の制動輻射がある。また、宇宙マイクロ波背景放射や星からの可視・赤外光といった低エネルギー光子が、電子の逆コンプトン放射として観測される。さらに、宇宙線核子が星間ガス中の陽子との衝突によって生成される、中性パイ中間子 π^0 の崩壊によって放出される γ 線等も観測される。これら電磁波のスペクトルを詳細に計測することによって、放射機構を同定し、多くの情報を得ることが出

来る。例えば、SNRからのシンクロトロン放射によって、電子がSNRで約10 TeVにまで加速されていることや⁴⁾、約1年周期の放射強度の時間変化から、SNRにおいて典型的な星間磁場である3–10 μG から約100倍の磁場増幅が行われていることが示された⁵⁾。さらに、SNRから π^0 崩壊による γ 線も観測され、陽子の加速も示された⁶⁾。このように、天文学・天体物理では、電磁波観測によって衝撃波のグローバルな情報を得ることができる。しかし、十分な空間分解能を持ったローカルな計測は困難である。

宇宙空間物理では、地球バウショックや太陽圏(太陽風)終端衝撃波、等の無衝突衝撃波が研究されており、後者は約 10^7 – 10^8 eVの、太陽近傍とは異なる化学組成を示す宇宙線異常成分の起源と考えられている⁷⁾。太陽圏では、観測衛星を打ち上げ、プラズマ分布関数や電場・磁場、波動等の詳細なその場計測が行われている。このように、宇宙空間物理研究では、無衝突衝撃波のローカルな計測が可能である。しかし、衝撃波のグローバルな情報は得ることができず、全体像をイメージすることは困難である。

レーザー宇宙物理では、天文学・天体物理と宇宙空間物理で研究されている、例えば無衝突衝撃波のような興味深い物理現象を、レーザーを用いて実験室で時間・空間的にスケールダウンして検証する。初期条件や各種パラメータを変化させ、現象発生時からの時間発展を、受動的・能動的な様々な計測器を用いて、ローカルとグローバルな情報、ミクロとマクロな物理量を同時に得ることができる。

また、地球・惑星物理研究では、レーザーを用いることによって、惑星中心部に相当する高压状態や、小天体が惑星に衝突したと考えられている高速度の飛翔体加速を実験室で実現することが可能となり、精力的に実験が行われるようになった。

2. レーザー宇宙物理のあゆみ

レーザーは1960年に発明された。そのわずか4年後に、Dawsonはレーザーを用いた無衝突衝撃波やバウショック生成等の宇宙物理実験の可能性を提案している⁸⁾。1980年代前半に、米国、英国、日本、フランスで相次いでnsパルスのTWレーザーが建設された。これらのレーザーを用いて、1980年代後半から1990年代にかけて、SNR衝撃波や地球のバウショックを模擬した外部磁場中の無衝突衝撃波実験や⁹⁾、爆風波の不安定性実験¹⁰⁾、Rayleigh-TaylorやRichtmyer-Meshkov不安定性の実験^{11,12)}、等が行われた。

1996年には米国ローレンス・リバモア研究所で、第1回の高エネルギー密度実験室宇宙物理国際会議(International Conference of High-Energy-Density Laboratory Astrophysics: HEDLA)が開催されるに至った。

1999年には、高出力レーザーを用いた宇宙物理研究に関する論文が相次いで発表され、超新星爆発の流体不安定性、高強度レーザーを用いた電子・陽電子生成とFireballの模擬実験、巨大惑星内部の状態方程式、等が議

論・提案された¹³⁻¹⁶⁾。

我が国では世界にさきがけて、超新星SN1987Aの爆発における流体不安定性に関連して、1993年に宇宙模擬実験の可能性が示唆され¹⁷⁾、1998年には輻射流体力学、非平衡原子過程、衝撃波・流体不安定性、電磁流体プラズマ、リコネクション、相対論的プラズマ、等が宇宙とレーザー・プラズマの観点から検討されている¹⁸⁾。

このように、我が国ではいち早く、高出力レーザーを用いた宇宙物理実験の提案がなされていたが、本格的に実験が行われるようになったのは、2006年に阪大レーザー研が全国共同利用施設化してからになる。

以下に、レーザー宇宙物理を、レーザー宇宙プラズマ物理(3節)とレーザー地球・惑星物理(4節)に分けて、それぞれの進展をまとめる。

3. レーザー宇宙プラズマ物理の進展

3.1 無衝突衝撃波の生成

無衝突衝撃波とは、荷電粒子間のクーロン衝突の平均自由行程よりも、はるかに短い領域で生成される衝撃波である。その散逸過程は、粒子間衝突ではなく、プラズマの集団現象によって生成される、電場や磁場と荷電粒子との相互作用によるものである。1節で示した宇宙で観測される衝撃波は、ほとんどが無衝突衝撃波であり、宇宙線の生成に重要な役割を果たすと考えられている。

我々は、高出力レーザーを用いてこれら衝撃波の生成機構や物理を研究している。本特集では、坂和によって詳しい解説がなされている¹⁹⁾。

3.2 磁場生成・増幅

宇宙には、いたるところに磁場が存在している。磁場の存在しない初期の宇宙から、どのようにして磁場が生成されたのか、またどのようにして磁場が増幅されて、現在観測されている値に達したのかを明らかにすることは、宇宙物理の大きな課題である。

3.2.1 磁場生成

Kulsrud等は、数値計算で、プラズマ密度と温度の勾配のずれによるバロクリニック効果(Biermann battery効果)によって約 10^{-21} Gの原始銀河の種磁場が生成されることを示した²⁰⁾。我々はレーザー実験で、無磁場中で生成された衝撃波において、Biermann battery効果によって磁場が生成され、相似関係を用いることによって、この過程で原始銀河の種磁場生成が可能であることを示した²¹⁾。実験では、数mbarのヘリウムガス雰囲気中で数100 Jのレーザー(527 nm, 1.5 ns)をカーボンロッドターゲットに照射し、衝撃波(Sedov-Taylorプラスト波)を励起した(Fig. 1(a))。数100 nsまでの衝撃波の時間発展を、干渉計測および可視自発光計測で観測し、その結果を、輻射流体シミュレーションを用いて、磁気プローブが設置された場所(ターゲットから約30 mm)と時間(約1 μs)におけるプラズマ密度、温度の情報に外挿した。Fig. 1(b)に示す磁気プローブで得られた磁場の値(約20 G)を、ス

Fig. 1 (a) Experimental setup showing the laser beams and diagnostics configuration. The inset on the left shows an example of an interferometric (IF) image. The inset on the right shows a streaked self-emission optical pyrometry (SOP) image in a narrow band centered at 450 nm. (b) Magnetic-field measurements from induction coils. The rise and gradual decay of $B_{\perp}$ (lines) was consistent with the shock front crossing the coil and the subsequent evolution of the shocked material.²¹⁾

ケーリング則に当てはめると、約7億年の時間をかけて Biermann battery効果により、約 10^{-21} Gという原始銀河の種磁場が生成されることを示した²¹⁾。

3.2.2 磁場増幅

レーザー実験で、この種磁場が乱流によって増幅されることを示した²²⁻²⁴⁾。磁場生成実験と同様のレーザー・ターゲット条件で、プラズマ流を生成し、Biermann battery効果によって磁場が作られた。プラズマ流をターゲットから10 mmの位置に設置したグリッドを透過させることによって、乱流磁場を実現し、磁気プローブによって周波数スペクトルを測定した。その結果、グリッドを挿入することによって磁場強度は約2倍増加し、周波数スペクトルは $\omega^{-11/3}$ となった。 $\omega \sim v_0 k$ の分散関係を用いると、波数スペクトルは $k^{-11/3}$ のGolitsyn power-lawを示すことになる²²⁾。

さらに、2組のレーザー、ターゲット、グリッドを用いて対向するプラズマ乱流を生成し衝突させた場合 (Fig. 2(a), 2(b))、乱流磁場強度はさらに2-3倍増加した^{23,24)}。磁気プローブの周波数スペクトル($\omega^{-7/3}$)から求めた乱流磁場の波数スペクトルも $k^{-17/9}$ となり (Fig. 2(c))、乱流化が進むにつれてスペクトルが緩やかになることが示された^{23,24)}。

Fig. 2 (a), (b) Focused pulsed laser beams (triangles) launch a pair of plasma jets. (a) The jets collide 800 ns after each laser pulse, and (b) a region of turbulence develops within another 700 ns. (c) The magnetic energy spectrum $M(\omega) = |B(\omega)|^2$. The slope of the spectrum in the case of colliding jets is shallower than in the case of a single jet.²²⁻²⁴⁾

3.3 磁気リコネクション

「太陽コロナはなぜ熱い?」。これは2016年日本物理学会誌の「物理学70の不思議」の5番目に出てきた「不思議」である²⁵⁾。太陽の表面である光球や、太陽の内層大気である彩層に比べ、外層大気のコロナの温度が2桁以上高い。この太陽コロナ加熱機構の1つとして磁気リコネクションが有力視されている²⁵⁾。

磁気リコネクションの室内実験は1960年代から多くの磁場閉じ込め装置を用いて行われてきた^{26,27)}。近年、激光XII号を含む世界の大型レーザーを用いた磁気リコネクション実験が行われるようになり、注目されている。本特集では、森高氏が最新の研究動向をまとめている²⁸⁾。

3.4 電子・陽電子対生成

活動銀河核ジェット、 γ 線バースト、X線連星等の宇

宙における高エネルギー現象では、相対論的な電子・陽電子プラズマが生成されていると考えられている。早くから注目されていた、高強度レーザーを用いた電子・陽電子対生成では、2015年に、電子と陽電子の数が等しくなる電子・陽電子プラズマの生成が報告され²⁹⁾、今後の進展が期待される。

本特集では、中井氏等によって電子・陽電子対生成実験の結果がまとめられている³⁰⁾。

3.5 非コヒーレントWakefield電子加速

約 10^{15} eVを超える宇宙線は、天の河銀河の外で生成された、銀河系外宇宙線であると考えられている。ここでは、この銀河系外宇宙線の起源の1つとして考えられている、Wakefield加速に関する研究結果を示す。

Wakefield加速のPICシミュレーションの結果、規格化されたレーザー強度 a_0 が相対論的な領域($a_0 > 1$)で、なおかつレーザーパルスの空間的スケール(w_0 : レーザースポット径)が電子のスキン長(c/ω_{pe} , c は光速, ω_{pe} は電子プラズマ振動数)よりも十分に大きな領域であれば、Self-modulationとFilamentationにより、Wakefieldの後面が非コヒーレントとなり、電子は加速と散乱によって非熱的に加速される事が示された³¹⁾。その結果、電子エネルギースペクトルは、レーザー強度とプラズマ密度によらず、ほぼ -2 の指数を持つべき乗の分布を示した³¹⁾。

このシミュレーション結果の実験的な検証が、激光XII号(GXII)と激光ペタワット(PW)レーザーを用いて行われた³²⁻³⁴⁾。Fig. 3(a)に示すように、プラスチック製のシリンダーを、6本のGXIIレーザーで爆縮することによって、ホロー状のプラズマを生成した。3.1 ns後にPW

のポンプレーザー(4.3×10^{18} W/cm²)を照射し、PWレーザーの前方に設置した電子スペクトロメータ(ESM)を用いて、電子のエネルギースペクトルを計測した。高エネルギー成分に着目すると、Fig. 3(b)に示すように、 $\gamma > 200$ の領域で、爆縮レーザーのエネルギー、すなわちプラズマ密度によらず、ほぼ -2 の指数を持つべき乗のエネルギースペクトルを示し、シミュレーション結果と良く一致した^{33,34)}。ここで、実験結果から求めた無次元パラメータは $a_0 = 1.87$, $w_0 \omega_{pe}/c = 37-82$ となり、非コヒーレントなWakefield加速の条件を満たす。

このように、PICシミュレーション³¹⁾とレーザー実験^{33,34)}から、非コヒーレントなWakefield加速によって、宇宙線と同様の、 -2 に近い指数を持つ、普遍的なべき乗の電子エネルギースペクトルが得られたことは注目に値する。

3.6 光電離プラズマのX線天文学

ブラックホール(BH)と伴星からなる連星においては、伴星から放出された物質がBHの重力に引かれてBHの周りに降着円盤を形成し、重力エネルギーを解放してkeV領域のX線を放出する。これがX線連星である。

激光XII号を用いてX線連星の模擬実験が行われた³⁵⁾。レーザーをプラスチック球に照射することによって、面密度 0.1 g/cm²、 0.5 keVのプランク分布を持つ爆縮プラズマコアを生成した。この熱放射をコアから約 1 mmはなれた位置に設置した低密度のケイ素プラズマ(10^{20} cm⁻³, 30 eV)に照射することによって、光電離がおこり、ケイ素からkeV領域のX線が観測され、X線観測衛星から得られたスペクトルとの比較が行われた³⁵⁾。

本特集では、藤岡氏によって詳しい解説がなされている³⁶⁾。

4. レーザー地球・惑星物理の進展

4.1 惑星の内部構造探査：状態方程式

太陽系の惑星は、(a)地球型、(b)木星型、(c)天王星・海王星型の3つに分類できる。

(a)地球の核では、固体の鉄の内核を、軽元素を含んだ液体の鉄からなる外核が取り囲んでおり³⁷⁾、中心部の圧力は約 350 GPaと言われている³⁸⁾。(b)木星は、そのほとんどが水素で構成されており、巨大ガス惑星と呼ばれている。中心部には、岩石や氷でできたコアが存在し、その周りに、主に水素からなるエンベロープと呼ばれる外層があると考えられている³⁹⁾。また、エンベロープの水素は、表面付近では分子の状態で存在しているが、中心部に近づくにつれて、 $200-400$ GPaで圧力電離による水素分子の金属化が起これと予想されている⁴⁰⁾。(c)天王星や海王星の内部には、水、アンモニア、メタンが多く含まれており、巨大氷惑星と呼ばれている。それらが $20-600$ GPaの領域で凝縮液体として存在していると考えられている⁴¹⁾。

このように、惑星の内部構造を探るためには、鉄、水素、水等の数 100 GPa領域での状態方程式(EOS)を理解

Fig. 3 (a) Schematic of the experiment.³²⁻³⁴⁾ (b) Energy distribution functions of the electrons in logarithmic scales.^{33,34)}

することが必要不可欠となる。このような高圧力状態を実現する方法として、レーザーによる衝撃圧縮が最も有効な手段の1つである⁴²⁾。レーザー以外の衝撃圧縮法として、ガス銃やZピンチも用いられている。例えば水素の場合、2段式ガス銃で得られた圧力は、10 GPaが最高記録である⁴³⁾。激光XII号を用いることによって、55 GPaまでのEOSが調べられた⁴⁴⁾。また、水の衝撃圧縮では、激光XII号を用いて、260 GPaが得られている⁴⁵⁾。近年は、米国サンディア国立研究所のZピンチ装置Z-Machineを用いたEOS研究も進められている⁴⁶⁾。

さらに、ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた静的圧縮によって、比較的高い圧力まで予備圧縮した後、レーザー衝撃圧縮を行うことによって、温度上昇を格段に抑えた高圧状態を実現できる^{47,48)}。このようなDACと衝撃圧縮の組み合わせは、レーザー実験でしか実現できない手法である。

本特集では、関根氏によって地球型惑星の状態方程式に関する最新の研究結果がまとめられている⁴⁹⁾。

4.2 弾丸飛翔体加速実験

惑星集積過程の末期には、小天体が惑星に10 km/s以上の速度で衝突した、と考えられている。この高速衝突が、惑星表層環境にどのような影響を与えたのかを、実験室で探る試みが行われている。これまでに、2段式軽ガス銃や静電加速器を用いた飛翔体加速実験が行われていた。門野等は、激光XII号を用いて、0.1 mm以上のマクロサイズ飛翔体によって、10 km/s以上の衝突速度をもつ弾丸飛翔体加速実験を行い、衝突蒸気の分光測定・質量分析、衝突クレーターのスケーリング則の導出、放出破片回収実験、等を行っている^{50,51)}。

本特集では、大野氏⁵²⁾と境家氏⁵³⁾等によって詳しい解説がなされている。

5. 今後の展望

本稿では、レーザー宇宙物理研究の特徴や歴史、レーザー宇宙プラズマ物理とレーザー地球・惑星物理の進展をまとめた。

今後の展望として、nsレーザーを用いた実験では、これまでの数kJレーザーを用いて行ってきた実験を、数10 kJ～数MJの大型レーザー(Omega, NIF, LMJ)を用いることにより、より宇宙現象に近いパラメータでの実験や、これまでに実現できなかった現象をとらえることができる可能性がある。また、レーザーをコイル型ターゲットに照射することにより(本特集で藤岡氏によって解説されている)³⁶⁾、10 MG(kT)級の磁場生成が可能となった⁵⁴⁻⁵⁶⁾。この超高強度磁場を用いることによる、これまで得られなかった新たなパラメータ領域での宇宙物理実験が注目される。また、高エネルギーnsレーザーを用いた実験では、高強度ps, fsレーザーを用いたX線バックライトやプロトンバックライトによる、密度・電場・磁場等の詳細な計測が必要不可欠になりつつある。

fsレーザーでは現在、世界各国でPW級レーザーが稼

働しており、さらに、10 PWレーザーの建設が進められている。今後は、psやfsパルスレーザーを用いた相対論的プラズマ物理研究が注目されると思われる⁵⁷⁾。理化学研究所のX線自由電子レーザー(XFEL)SACLAでは、XFELと同時照射が可能な2台のfsレーザー(500 TW)が、2016年度に稼働予定である。fsレーザー生成プラズマのXFELによるプローブ計測によって、今後、相対論的プラズマ物理の詳細が明らかになる可能性がある。

最後に、レーザー研は2016年度からも共同利用・共同研究拠点活動を継続して行う事になった。レーザー宇宙物理研究がますます発展して行く事を目指して、これからも共同研究を推進していく。

謝 辞

本稿をまとめるにあたって、議論していただいた佐野孝好氏に感謝します。

参考文献

- 1) 桜井 邦朋：宇宙物理学(共立出版、2006)。
- 2) D. W. Savin, N. S. Brickhouse, J. J. Cowan, R. P. Drake, S. R. Federman, G. J. Ferland, A. Frank, M. S. Gudipati, W. C. Haxton, E. Herbst, *et al.*: Rep. Prog. Phys. **75** (2012) 036901.
- 3) National Research Council: *New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics* (National Academies Press, 2010)。
- 4) G. Cassam-Chenai, J. P. Hughes, E. M. Reynoso, C. Badenes, and D. Moffett: *Astrophys. J.* **680** (2008) 1180.
- 5) Y. Uchiyama, F. A. Aharonian, T. Tanaka, T. Takahashi, and Y. Maeda: *Nature* **449** (2007) 576.
- 6) M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, M. G. Baring, D. Bastieri, K. Bechtol, R. Bellazzini, *et al.*: *Science* **339** (2013) 807.
- 7) M. E. Pesses, D. Eichler, and J. R. Jokipii: *Astrophys. J.* **246** (1981) L85.
- 8) J. M. Dawson: *Phys. Fluids* **7** (1964) 987.
- 9) A. R. Bell, P. Choi, A. E. Dangor, O. Willi, D. A. Bassett, and C. J. Hooker: *Phys. Rev. A* **38** (1988) 1363.
- 10) J. Grun, J. Stamper, C. Manka, J. Resnick, R. Burris, J. Crawford, and B. Ripin: *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991) 2738.
- 11) B. A. Remington, S. V. Weber, M. M. Marinak, S. W. Haan, J. D. Kilkenny, R. J. Wallace, and G. Dimonte: *Phys. Plasmas* **2** (1995) 241.
- 12) B. A. Remington, J. Kane, R. P. Drake, S. G. Glendinning, K. Estabrook, R. London, J. Castor, R. J. Wallace, D. Arnett, E. Liang, *et al.*: *Phys. Plasmas* **4** (1997) 1994.
- 13) B. A. Remington, D. Arnett, R. P. Drake, and H. Takabe: *Science* **284** (1999) 1488.
- 14) R. P. Drake: *J. Geophys. Res.* **A 7** (1999) 14505.
- 15) D. Ryutov, R. P. Drake, J. Kane, E. Liang, B. A. Remington, and W. M. Wood: *Astrophys. J.* **518** (1999) 821.
- 16) H. Takabe, H. Nagatomo, A. Sunahara, N. Ohnishi, A. I. Mahdy, Y. Yoda, S. Naruo, H. Azechi, H. Nishimura, and K. Mima: *Plasma Phys. Cont. Fusion A* **41** (1999) 75.
- 17) 高部 英明：プラズマ・核融合学会誌 **69** (1993) 1285.
- 18) 高部 英明：プラズマ・核融合学会誌 **74** (1998) 1254.
- 19) 坂和 洋一：レーザー研究 **44** (2016) 583.
- 20) R. M. Kulsrud, R. Cen, J. P. Ostriker, and D. Ryu: *Astrophys. J.* **480** (1997) 481.
- 21) G. Gregori, A. Ravasio, C. D. Murphy, K. Schaar, A. Baird, A. R. Bell, A. Benuzzi-Mounaix, R. Bingham, C. Constantin, R. P. Drake, *et al.*: *Nature* **481** (2012) 480.
- 22) J. Meinecke, H. W. Doyle, F. Miniati, A. R. Bell, R. Bingham, R. Crowston, R. P. Drake, M. Fatenejad, M. Koenig, Y. Kuramitsu, *et al.*: *Nature Phys.* **10** (2014) 520.
- 23) J. Meinecke, P. Tzeferacos, A. Bell, R. Bingham, R. Clarke, E.

- Churazov, R. Crowston, H. Doyle, R. P. Drake, R. Heathcote, *et al.*: PNAS **112** (2015) 8211.
- 24) J. Miller: Phys. Today **68**, No. 9 (2015) 16.
 - 25) 会誌編集委員会: 日本物理学会誌 **71** (2016) 209.
 - 26) E. G. Zweibel and M. Yamada: Annu. Rev. Astron. Astrophys. **47** (2009) 291.
 - 27) M. Yamada, R. Kulsrud, and H. Ji: Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 603.
 - 28) 森高 外征雄: レーザー研究 **44** (2016) 602.
 - 29) G. Sarri, K. Poder, J. M. Cole, W. Schumaker, A. Di Piazza, B. Reville, T. Dzelzainis, D. Doria, L. A. Gizzi, G. Grittani, *et al.*: Nature Commun. **6** (2015) 6747.
 - 30) 中井 光男, 有川 安信, 西村 博明, and Hui Chen: レーザー研究 **44** (2016) 595.
 - 31) Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, T. Kato, H. Takabe, and M. Hoshino: Astrophys. J. Lett. **682** (2008) L113.
 - 32) N. Nakanii, K. Kondo, Y. Kuramitsu, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashiara, T. Tanimoto, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 081501.
 - 33) Y. Kuramitsu, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Sakawa, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashiara, *et al.*: Phys. Rev. E **83** (2011) 026401.
 - 34) Y. Kuramitsu, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Sakawa, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashiara, *et al.*: Phys. Plasmas **18** (2011) 010701.
 - 35) S. Fujioka, H. Takabe, N. Yamamoto, D. Salzmann, F. Wang, H. Nishimura, Y. Li, Q. Dong, S. Wang, Y. Zhang, *et al.*: Nature Phys. **5** (2009) 821.
 - 36) 藤岡 慎介: レーザー研究 **44** (2016) 589.
 - 37) F. Birch: J. Geophys. Res. **57** (1952) 227.
 - 38) D. Alfe, M. J. Gillan, and G. D. Price: Nature **401** (1999) 462.
 - 39) T. Guillot, D. J. Stevenson, W. B. Hubbard, D. Saumon: in *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, eds. F. Bagenal, T. E. Dowling, W. B. McKinnon (Cambridge University Press, Cambridge, 2004) p. 35.
 - 40) N. Nettelmann, B. Holst, A. Kietzmann, M. French, R. Redmer, and D. Blaschke: Astrophys. J. **683** (2008) 1217.
 - 41) W. B. Hubbard: Science **214** (1981) 9.
 - 42) G. W. Collins, L. B. da Silva, P. Celliers, D. M. Gold, M. E. Foord, R. J. Wallace, A. Ng, S. V. Weber, K. S. Budil, and R. Cauble: Science **281** (1998) 1178.
 - 43) W. J. Nellis, A. C. Mitchell, M. van Thiel, G. J. Devine, R. J. Trainor, and N. Brown: J. Chem. Phys. **79** (1983) 1480.
 - 44) T. Sano, N. Ozaki, T. Sakaiya, K. Shigemori, M. Ikoma, T. Kimura, K. Miyanishi, T. Endo, A. Shiroshta, H. Takahashi, *et al.*: Phys. Rev. B **83** (2011) 054117.
 - 45) T. Kimura, N. Ozaki, T. Sano, T. Okuchi, K. Shimizu, K. Miyanishi, T. Terai, T. Kakeshita, Y. Sakawa, and R. Kodama: J. Chem. Phys. **142** (2015) 164504.
 - 46) M. D. Knudson, M. P. Desjarlais, R. W. Lemke, T. R. Mattsson, M. French, N. Nettelmann, and R. Redmer: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 091102.
 - 47) P. Loubeyre, P. M. Celliers, D. G. Hicks, E. Henry, A. Dewaele, J. Pasley, J. Eggert, M. Koenig, F. Occelli, K. M. Lee, *et al.*: High Pressure Research **24** (2004) 25.
 - 48) J. Eggert, S. Brygoo, P. Loubeyre, R. S. McWilliams, P. M. Celliers, D. G. Hicks, T. R. Boehly, R. Jeanloz, and G. W. Collins: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 124503.
 - 49) 関根 利守: レーザー研究 **44** (2016) 617.
 - 50) 門野 敏彦, 重森 啓介, 境家 達弘, 弘中 陽一郎, 佐野 孝好, 大谷 一人, 藤原 隆史, 持山 智浩, 藤岡 慎介, 黒澤 耕介, 他: 日本惑星科学会誌 **18** (2009) 4.
 - 51) T. Kadono, T. Sakaiya, Y. Hironaka, K. Otani, T. Sano, T. Fujiwara, T. Mochiyama, K. Kurosawa, S. Sugita, Y. Sekine, *et al.*: J. Geophys. Res. **115** (2010) E04003.
 - 52) 大野 宗祐: レーザー研究 **44** (2016) 608.
 - 53) 境家 達弘, 門野 敏彦, 近藤 忠: レーザー研究 **44** (2016) 613.
 - 54) S. Fujioka, Z. Zhang, K. Ishihara, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Johzaki, A. Sunahara, N. Yamamoto, H. Nakashima, *et al.*: Sci. Reports **3** (2013) 1170.
 - 55) J. J. Santos, M. Bailly-Grandvaux, L. Giuffrida, P. Forestier-Colleoni, S. Fujioka, Z. Zhang, P. Korneev, R. Bouillaud, S. Dorard, D. Batani, *et al.*: New J. Phys. **17** (2015) 083051.
 - 56) P. Korneev, E. D'Humieres, and V. Tikhonchuk: Phys. Rev. E **91** (2015) 043107.
 - 57) S. V. Bulanov, T. Z. Esirkepov, M. Kando, J. Koga, K. Kondo, and G. Korn: Plasma Phys. Rep. **41** (2015) 1.