



解説

3. 高出力レーザープラズマ研究の新しい展開
3.3 高エネルギー密度プラズマ物理

高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学

高部 英明

(大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター, 理学研究科物理学専攻・宇宙地球科学専攻)

Laboratory Astrophysics Using Intense Lasers

TAKABE Hideaki

Institute of Laser Energetics, Graduate School of Science, Osaka University, Suita 565-0871, Japan

(Received 26 February 2005 / Revised 6 June 2005)

The laboratory astrophysics using intense and ultra-intense lasers is reviewed. It starts with describing what laser plasma is and how high temperature plasma can be produced in laboratories, the temperature of which covers the astrophysical plasmas in a wide range. The coincidence of the disciplines of laser fusion plasma physics and laboratory astrophysics is explained. The historical background why the author came to propose this new research field is described. The aim of the laboratory astrophysics as discipline is explained and three important views are pointed out. They are (1) Validation and verification of the theory and computational codes with laser model experiments. (2) To find a new finding missing in modeling astrophysical phenomena (so-called *serendipity* can be expected as the history has proved in many cases). (3) To construct a bridge between laser plasma and astrophysics and make astrophysics more mature science by using the knowledge accumulated in having promoted the laser fusion and related researches. The structure of the discipline of laboratory astrophysics now I can draw is explained. Finally, the present status, trend and movement in the world in this new field are reviewed for the cases of USA, Europe, China, Taiwan and Japan.

Keywords:

laser plasma, astrophysics, laboratory astrophysics, supernova, blast wave, cosmic-ray, hydrodynamic instability

1. はじめに

大規模高強度レーザーは第2の加速器である。加速器が宇宙初期の物理や超新星内部の不安定核の素過程を実験室で研究する装置であるなら、レーザーは宇宙で観測される様々な高温流体やプラズマ物理の集団現象を実験室で研究する装置である。Fig. 1に、高出力・高強度レーザーを固体物質に照射した時の温度と密度の時間発展のおおよその様子を示す。レーザーの照射で固体表面が加熱され、高温の自由電子が発生し、それによる熱伝導波が内部に伝搬する。数10ピコ秒(10^{-11} s)も経つと、衝撃波が形成され、プラズマの構造は Fig. 1-(3)のように衝撃波と熱伝導領域、膨張波としてほぼ定常的な構造を形成する。レーザーの波形(強度の時間分布)やレーザーを当てる物質の構造や形状(総称して「ターゲット」と呼ぶ)を工夫することにより多様な実験を行うことができる。

ターゲットをガスなども含み工夫することで Fig. 2に示したような温度・密度のプラズマを実験室に生成することができる[1]。このようなプラズマの状態方程式や原子状態、放射の吸収特性、放射特性など調べることで、星の進化の放射物理や惑星内部状態の基礎データを蓄積できる[2]。温度・圧力のダイアグラムを Fig. 3[1]に示すように、巨大惑星内部を超える圧力を生成できる。

author's e-mail: takabe@ile.osaka-u.ac.jp

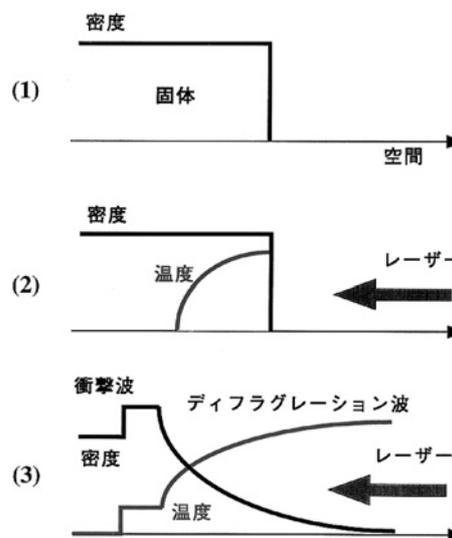


Fig. 1 高強度レーザーを固体表面に照射したときの温度と密度の時間発展を示す。まず、表面が加熱され超音速の熱伝導波が Fig. 1-(2)のように伝搬する。その後、Fig. 1-(3)のように衝撃波が形成され内部に伝搬。真空方向には膨張波ができる。膨張波の臨界密度(固体密度の100分の1程度)近傍でレーザーは吸収され、そのエネルギーは電子が運び、いわゆる、デフラグレーション構造となる。そして、ほぼ定常的に Fig. 1-(3)の様な構造を維持する。

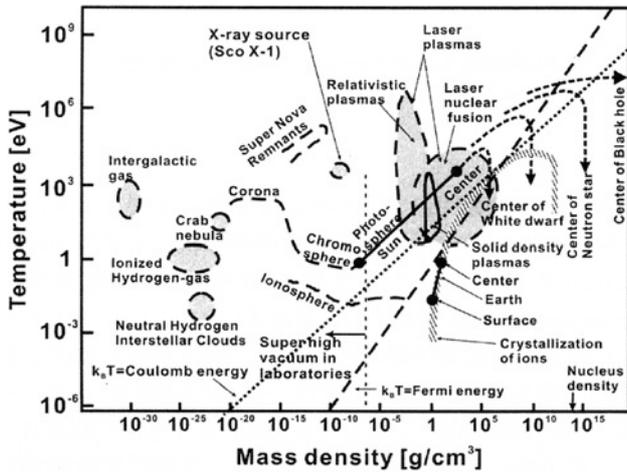


Fig. 2 宇宙で観測される天体など様々なプラズマの典型的な温度・密度やその進化のパスと、高強度レーザーやCPAを付加した超高強度レーザーで実験室に再現できる高エネルギー密度プラズマの領域を示す。図中の Laser plasma がレーザー・プラズマの特徴的な温度密度を示す。

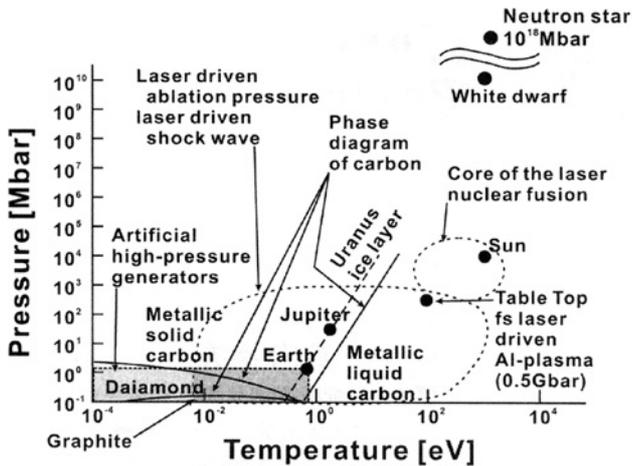


Fig. 3 惑星内部や実験室での高圧発生の状況を圧力と温度の図に示す。レーザーで生成される高エネルギー密度物質の圧力は木星内部の圧力をも超える。

また、レーザーが瞬時（ナノ秒程度）にターゲットを加熱することから、超新星爆発などで引き起こされる宇宙における爆発的エネルギー解放に伴う華々しい現象を実験室で模擬することができる。90年に発案されたパルス圧縮法（略称CPA）[3]を装置に付加すれば、強度は 10^{20} W/cm^2 を超える領域に達し（レーザー自体の電界は 10 kV/\AA にまで達する）、生成されるプラズマの電子の平均エネルギーは 10 MeV を超える相対論的なプラズマとなる。高エネルギー宇宙物理の世界を実験室で垣間見ることができる。

2. レーザー核融合から実験室宇宙物理へ

Fig. 2 に示したように宇宙物理で問題となるプラズマの温度をかなりの部分再現できる。レーザーを用いてこのような高温のプラズマを生成し、その物性を調べることができる。さらには、航空機の風洞実験の考えに立脚し、宇宙での爆発現象など多様なダイナミクスを相似変換し、10

桁以上も小さくして、実験室に模擬し、そのデータから宇宙物理の理論やシミュレーションコードの検証・改良を行う[4]。また、場合によって、予測しなかった物理現象を発見しよう（セレンディピティー）というねらいである[5]。同時に、大規模レーザーでしか作れない相対論的プラズマの物理を研究し、宇宙物理の研究を資することを目指す。具体的な研究テーマとしては、以下のとおりである。

1. 高エネルギー宇宙線の起源の探究
2. 星の進化と超新星爆発の物理の探究
3. 輻射流体力学と非平衡原子物理の探究
4. 宇宙・恒星ジェットの伝搬の物理機構の解明
5. 巨大惑星など超高压状態の物性研究

各項目の具体的な研究内容は第5節で説明する。

ここに挙げた5つの研究テーマは、同時に、大型レーザーを用いたもう一つの重要な柱である、レーザー核融合を推進するための研究内容と重なっている。阪大レーザー研では「高速点火レーザー核融合」方式を推進してきており[6]、その成果が最先端であることは広く世界中の核融合研究者から認められている。しかし、高速点火核融合シナリオも未解明の物理に立脚しており、関連する物理を解明し、制御できる段階に進める必要がある[7]。したがって、エネルギーの取り出し云々の前に、主に、下記の5つの研究を推進していくことが求められている。

1. 大電流密度の相対論的電子の加速機構の解明と制御
2. 圧縮性複雑流体の物理・流体不安定性の解明と制御
3. 輻射による流体現象の物理の解明と制御
4. 相対論的電子流の伝搬、加熱、異常輸送の解明と制御
5. 固体核融合燃料の状態方程式の解明と制御

高速点火核融合の5つの研究テーマは、それぞれ、実験室宇宙物理の5つのテーマと研究内容が重なっており、両者は相補的に高エネルギー密度プラズマの学術体系化に貢献していく。近年、これを高エネルギー密度物理（High-Energy-Density Physics: HEDP）として学術的研究が推進されており、今年には「Journal of High Energy Density Physics」という定期刊行学術誌も出版の運びとなった[<http://www.elsevier.com/locate/hedp/>]。両者で異なるのは、実験室宇宙物理は宇宙で観測される現象の背景にある物理の探求・解明を目的とするのに対し、レーザー核融合は物理の解明を手段とし、その上で、物理を制御することを目的としていることである。

実験室宇宙物理は宇宙物理学に新たな分野を創成し、宇宙物理学に資するだけでなく、学術用語で表現される高エネルギー密度プラズマ物理学として以下のような項目からなる学術の体系化を牽引することができる。

1. 高温複雑流体の物理
 1. 圧縮性流体の不安定性と乱流混合
 2. 輻射流体力学
 3. 非平衡原子過程やオパシティー
2. 極限プラズマの物理
 1. 高マッハ数の無衝突衝撃波の形成と構造、荷電粒子加速
 2. プラズマ乱流と粒子加速

3. 超高压下での物質の状態方程式

3. 相対論的プラズマの物理

1. 相対論的ジェット形成と伝搬
2. 相対論的高密度電子流の異常輸送
3. 電子・陽電子プラズマ

高強度レーザーの技術的發展はめざましく、強度は10年以内には2~3桁上昇する可能性がある。その場合、超高強度レーザーで生成する電子はGeVのエネルギーを越え、薄膜ターゲットなどを利用することで、双極電場を介してGeVのエネルギーのコンパクトな陽子源が可能となる[8]。このような大電流密度の高エネルギー電子源や陽子源を用いたレーザー核・素粒子物理という分野創成も将来展望として検討しながら、高エネルギー密度物理の体系化を推進していくことも視野に入れている[9,10]。これは、宇宙物理の観点から高エネルギー宇宙物理の模擬実験などに繋がっていく意味でも極めて魅力的な研究の方向性である。

3. 実験室宇宙物理の黎明

16万光年の距離を光やニュートリノが駆け、地球に降り注いだ。それが、1987年2月23日に観測された超新星1987Aの爆発(Fig.4)であり、この爆発が表題の研究の出発点であった。この爆発は太陽質量の20倍もある巨星が進化の最後に、中心にできた太陽質量ほどもある鉄のコアが光核反応でアルファ粒子に分裂する際の吸熱反応が原因で起こる。吸熱反応で冷えた鉄コアは周りの物質を支えることができず、重力崩壊する。その際に発生するニュートリノの加熱で星は爆発する。衝撃波が表面に達したときFig.4の写真のように明るく輝く。

我が国のX線衛星GINGAが明らかにしたように、爆発は球対称ではなく、対流や物質混合を引き起こしていた。超新星爆発ではこのような流体力学的な不安定が、爆発による衝撃波の加速、減速を通じて発生することが、超新星1987A以降、一般に受け入れられることになった。しかし、観測できない巨大な星の爆発の流体现象を物理的に正しく記述する数値モデルはまだない。レーザー核融合研究のために開発されてきた大規模レーザー装置は、宇宙での極限

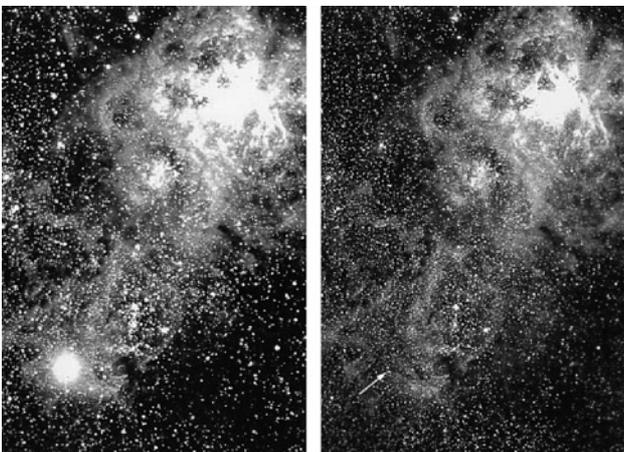


Fig. 4 左が超新星1987Aの爆発。右は爆発前の映像。

的な物理現象を実験室に再現するにふさわしい装置である。物質にレーザーを照射して発生する1億気圧にも達する圧力で電離を伴う爆発現象や、超高速の衝撃波などを発生し、さきほどの流体不安定現象を模擬実験する。その実験データで超新星爆発の流体コードの物理モデルをテスト・検証し、改良することで、見えない世界の極限物理に迫るのが表題の研究である。

1987Aの爆発から既に18年経ち、米国ではNAS(National Academy of Science)がレビューを行い、HED Laboratory Astrophysics(HED: High-Energy Density)の強力な推進を盛り込んだ報告書[11]がホワイトハウスのOSTP(Office of Science and Technology Policy)[<http://www.ostp.org/>]に提出された。このHED Laboratory Astrophysicsを推進するために、DOE, NASA, NSFの科学官による省庁をまたいだタスクフォースが組織されている。

4. 実験室宇宙物理に至る歴史的背景

レーザーが発明されたのは1960年である。短パルス、高強度のレーザーが普及し始めて、レーザーで生成されたプラズマを意味する「レーザープラズマ」という言葉が生まれた。米国のJohn Dawsonはレーザープラズマに関する1964年の論文で、そのプラズマの特性や応用について言及している[12]。論文の最後に、レーザーを使って超新星爆発で発生する無衝突衝撃波や太陽フレア現象の模擬実験が可能であろうと述べている。しかし、この論文が表題の研究のきっかけにはならなかった。

当時は、レーザープラズマがどのようなプラズマか知るものもなく、レーザーを物質に照射し、プラズマを発生し、計測し、解析するのがせいぜいであった。加えて、レーザーとプラズマの相互作用で異常な吸収現象などを引き起こす、パラメトリック不安定などが見つかり、非線型プラズマ物理の花がまずは咲いた[13]。まず、レーザープラズマを理解することが先決であった。

1973年の石油危機を契機に、大型レーザー装置の建設が始まり、核融合のための爆縮の流体物理などが精力的に研究された。レーザー核融合研究が本格化したのは80年代の半ばである。その頃、米国のNRL(Naval Research Lab.)のB. Ripin達は「Pharos」と名づけられたレーザーで一連の爆風波に関する実験を行った[14]。レーザーを用いた干渉計測法を駆使して、爆風波に関する自己相似解を検証したり、条件により、輻射冷却を伴う爆風波が流体力学的に不安定になり、乱流状に広がることを示した。レーザー照射に伴う爆風波の2重コマ撮り写真をFig.5に示す。

また、外部磁場の中での爆風波の伝搬実験も行い、磁場のリコネクションについて議論している[15]。同様の実験は旧ソ連でも行われていた[16]。彼らは、これは宇宙物理の学術的な実験であると主張したが、研究の広がりもできず、彼らの一連の研究は終了した。その一因は、この研究が当時のSDI(Strategic Defense Initiative)の研究で[17]、磁場は地球磁場を模擬し、核弾頭が地球磁気圏で爆発した場合の効果を調べるための模擬実験であったことである。当時、米国がSDI研究に多額の資金を出していたことから

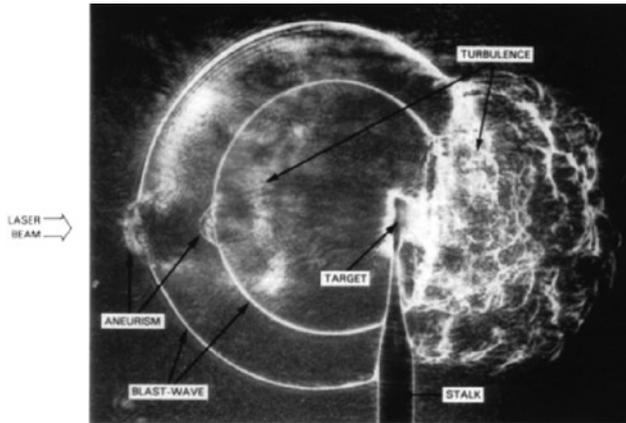


Fig. 5 レーザー駆動の爆風波。超新星爆発で生成する衝撃波を実験室で模擬することができる。外部磁場も印可することで、無衝突衝撃波を観測でき、宇宙線の起源に迫ることができる。

考えて、米国としては意義深い研究であったと言える。

ほぼ同じ頃、S.J. Rose [18] 達はレーザーを用いた宇宙物理関連の研究を提案する論文を書いている。彼らの主張はレーザープラズマで星の進化などに関連した輻射特性を調べる提案であった。例えば、オパシティー、状態方程式、輻射加熱などである。彼らの提案はオパシティー実験として採用され、世界中の多くの研究者が高密度・高温のプラズマのオパシティー研究に従事した [19]。また、並行してオパシティーワークショップが定期で開催され、世界中の10以上のオパシティーコードをレーザー実験の結果と比べたりした [20]。

一方、超新星1987A が教えてくれたことは、流体力学的不安定性がレーザー核融合だけでなく宇宙物理で極めて重要な研究課題であることであった。宇宙の中で、超新星爆発は華々しい物理現象の典型である [21]。ヘリウムより重い元素は大質量星の内部の核合成で造られ、超新星爆発で宇宙空間にまき散らされる。このような爆発を繰り返して宇宙は重元素汚染されていく。それが、50億年ほど前、地球の種になり今日の生命の源になった。このような話は物理に携わる我々に勇気とロマンを与えてくれる。X線やガンマ線のデータから超新星爆発時に流体不安定が起こったことは確かであり、数々の議論がされた [22]。この事実は、1 mm 空間の物理現象を追いかけていたレーザー核融合研究者に、彼らの研究が宇宙の神秘につながる広い研究であることを示してくれた。この教訓は我々に広い視野を持つことの大切さを教えてくれた。

これをきっかけに筆者は宇宙物理の広い領域に引き込まれていった。まず、超新星爆発とレーザー爆縮の相似性と流体不安定性の考察に関する論文を書いたのがはじまりである [23]。その後、本学会誌で小特集「高強度レーザーによる実験室宇宙物理」を刊行した [24]。このように本題の実験室宇宙物理（「レーザー宇宙物理」とも言う）は始まった。そんな中リバモア研の Bruce Remington はその本質的な重要性を素早く理解し、NOVA レーザーで実験を開始した。その辺りの経緯は文献 [24] の前書きに詳しく書いた。

その後の国内での実験などについては本論文の7.5節に詳しく書く。

もちろん、世界にはこの名前を掲げた研究機関が既にある。例えば、カルテックの Kellogg Radiation Lab. [http://www.krl.caltech.edu/] や、コロラド大学の Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) [http://jilawww.colorado.edu/] などが有名です。しかし、これらの研究所では原子物理などの素過程の研究が主体で、ここで述べるような、宇宙の物理現象のダイナミクスを模擬しようというものではない。加速器を用いた実験室宇宙物理も広く行われている。例えば、重力崩壊型超新星の内部で起こる核合成の際に重要な不安定核の実験などがある [25]。加速器による宇宙模擬実験は上記のような原子核のデータベースなど素過程の研究が主であり、レーザーの場合のプラズマの集団現象を模擬しようという実験とは性質を異にする。ただし、金のような重イオンを加速して衝突させ、クォーク・グルオン・プラズマ (QGP) を実験室に瞬時に再現しようという RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider: http://www.bnl.gov/rhic/) のような加速器実験は例外的で、精神は本論文の実験室宇宙物理と同じである。

先に述べた超新星1987A の爆発で2つの重要な物理の発見があった。一つは3千トンの神岡の地下深くの純粋タンクが初めて検出した宇宙からのニュートリノ。観測された11個のニュートリノから大質量星の重力崩壊理論が検証されたこと。これは、プロジェクトの指導者、小柴先生に2002年のノーベル物理学賞をもたらした [26]。

爆発よりわずかに早く、日本のX線天文衛星 GINGA が観測を開始していた。爆発を受けて早速、1987A の方向からのX線の発生を観測することになった。観測を開始して3ヶ月も経った頃、大質量星の内部で核合成された不安定核の ^{56}Ni が核崩壊する際に出るガンマ線が星の内部でコンプトン散乱を何度もうけて硬X線 (10–20 keV) として検出されるシグナルが観測された。超新星爆発の1次元シミュレーションでは、このようなX線が観測されるには1年は掛かると推定されていた。余談だがこのようなめざましいX線天文学の活躍は創始者の一人、ジャコーニに2002年のノーベル物理学賞をもたらした [http://nobelprize.org/]。超新星1987A の偉大なこの2つの発見は故・小田稔先生の描画、Fig. 6 にうまく表されている。

1年掛かるはずのX線が3ヶ月後には観測され始めたという事実は、爆発が球対称ではなく、内部の ^{56}Ni が流体力学的不安定で外部の物質と混合し、表面近くに広がったと考えれば説明がつく。爆発前、宇宙物理理論の大御所にレーザー核融合における爆縮の不安定と2次元、3次元の流体シミュレーションの話をしていすると、「高部君。君の話宇宙に拡張するのは面白いが、宇宙物理には1次元の範囲でも未知の課題が山積みされていて、とうてい多次元問題に手が出せる余裕はない」といわれた。しかし、超新星1987A という「神の一撃」としか思えない「実験」が行われ、観測事実を目の前に宇宙物理屋も複雑な流体現象に取り組みざるを得なくなった。これを契機に、東大の野本氏の誘いがあり、私の宇宙物理との交流が始まった。

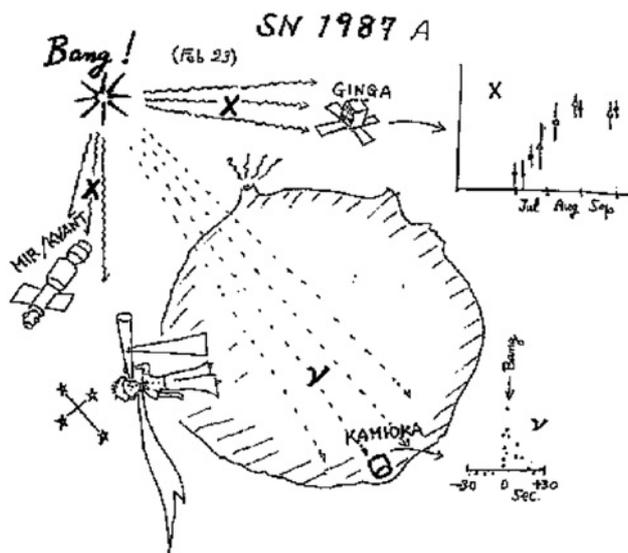


Fig. 6 小田稔先生による超新星1987Aの描画

当時、航空工学の分野では TVD 法に代表される圧縮性流体现象の高精度数値計算法の研究が円熟期を迎えていた。当時、京大航空の松田氏がこの期を捉え「宇宙物理学のシミュレーションはガラパゴス島である。航空の分野では極めて高度な数値計算法が確立している」と喧伝。奮起した若手の宇宙物理研究者を中心に、そのような数値計算法を迅速に導入し、超新星爆発の詳細な物理が明らかになっていった。その迅速な動きには、学術を極めたいという優秀な人材のひたむきな挑戦の姿があり、感激した。しかし、彼らは常に不安と同居していた。超新星爆発をシミュレーションするようなコードがどこまで正しいか検証するためのモデル実験がないからである。高温で高密度のプラズマ物理現象を実験するような手段は当時、地下核実験[27]ぐらいしかなかったのだから当然である。このような困難を前に、私たちは高強度レーザーを用いた宇宙物理

の模擬実験のアイデアにたどり着き、実験を通して輻射なども含む流体コードのテスト・検証をしていこうということになった。

超新星爆発の流体力学的な不安定性の模擬実験のアイデアに刺激され、米国リバモア研の Bruce Remington は当時世界最大のレーザー装置 NOVA を用いて実験を開始した。その成果は多数発表されており[28]、また、筆者と共著でレビューとして発表されている[29]。宇宙物理とレーザー実験の両方からの声援もあり、筆者は考え得る模擬実験のケーススタディーを行い論文にした[30]。Table 1 に縦軸をレーザー核融合の研究課題を、横軸をこれから説明する3つの視点にとって、16の模擬実験を取り上げた。この表の中にある個々の課題の詳しい説明は論文[30]に譲る。

5. 実験室宇宙物理が学術として目指すもの

まず、高強度レーザーで生成されるプラズマの物理や現象を宇宙物理と比較する場合の3つの視点について説明しよう。それは、Table 1 に示されているように、①同一性、②相似性、③類似性、である[4]。同一性はわかりやすい。例えば、実験室に温度・密度が太陽の表面や内部と同じようなプラズマをターゲットなど工夫して造り、その物性を調べることである。Table 1 の2は、巨大惑星の大部分を占める水素やヘリウムの超高压下での物性を調べようという試みであり、状態方程式により内部構造は変わり巨大惑星形成の科学シナリオに強烈なインパクトを与えることになる[31]。相似性は、宇宙物理のある現象の長時間にわたる現象を、その特徴的な無次元パラメータを保ちながら、相似性に着目し、実験室に再現することである。爆風波のセドフ・テラーの自己相似解[32]などその典型である。流体现象に限らず、輻射輸送や原子過程などでも相似解を見いだすことができる。3番目の類似性は、レーザーで生成されるプラズマが宇宙物理で問題になるプラズマと類似している時、実験室プラズマの研究から宇宙物理の理解を深

Table 1 縦軸がレーザー核融合の学術のキーワード。横軸は宇宙での現象とレーザー・プラズマの同一性 (Sameness)、相似性 (Similarity)、類似性 (Resemblance)。レーザー核融合プラズマをこのような3つの視点で眺め直すと、そこには数々の模擬実験が浮かび上がってくる。

	同一性	相似性	類似性
レーザー・プラズマ相互作用			
電子エネルギー輸送			1. 原始中性子星内部でのニュートリノ輸送
圧縮性流体现象と衝撃波	2. 状態方程式(巨大惑星内部)	3. 超新星残骸の衝撃波と分子雲の衝突	4. 無衝突衝撃波と宇宙線の起源
流体不安定		5. 超新星爆発の流体不安定	6. ニュートリノ加熱による流体不安定 7. ワシ星雲の柱状構造形成
原子物理と輻射輸送	8. オパシティー(恒星の進化の物理)	9. 超新星残骸内部の非平衡原子過程 10. 恒星ジェット 11. 初期銀河での輻射輸送 12. 光電離プラズマ	13. 超新星残骸の流体不安定 14. 宇宙における自発的 X 線レーザー
相対論的プラズマ			15. γ 線バーストの電子・陽電子プラズマ 16. 宇宙ジェット

めることを示す。

次に、実験室宇宙物理を推進する3つの目的について説明しよう。1番目の説明から始めよう。目的を説明する例としてTable 1の13番目の爆風波の不安定性を紹介しよう。

レーザー実験でガス容器内に爆風波を作り自己相似則などをGrun達は調べた[33]。ガスがキセノンの場合、爆風波で電離したガスの輻射冷却で爆風波の波面が不安定となる。爆風波面は減速されているのでレイリー・テイラー不安定である。ところが、波面背後の流れにより波面の歪みは安定化される。しかし、輻射冷却などがあると密度の飛びは大きくなり、波面は振動しながら不安定となる。これは、Vishniac不安定として知られている[34]。このレーザー実験の結果を受けて、同様の不安定がどのような宇宙の環境下で起こるか調べられた[35]。

米国のチャンドラX線観測衛星がチコの超新星残骸の詳細なイメージを捉えている[<http://Chandra.harvard.edu/photo/2002/0005/index.html>]。X線のイメージからオランダの天文家チコ・ブラーエが観測した超新星から放出された物質が乱流状態にあることがわかる。これに比較できるレーザー生成爆風波の乱流状態のシャドウイメージが得られている[33]。空間スケールは 10^{18} 倍の違いがある。ある条件下で爆風波が乱流状態になることは10年以上前に実験室のレーザー駆動爆風波ですでに予言されていた[33]。このような発見は実験室宇宙物理が目指す3つの目的の一つで、いわゆる「セレンディピティー」とよばれる。これが科学の発展にいかほど大切であるかは科学の歴史をひもとけば、数々の例を挙げることができる。宇宙物理ではこのように理解されていると思ひ、確認の模擬実験をしたとしよう。その時、思いも掛けなかった計測結果が出たら、「何故なんだ」と考える。そこから、宇宙物理では見逃していた新しい物理要素が現象の理解には必要になってくることがある。これが「発見」の楽しみであり、「実験」の醍醐味ではなからうか。

第2の目的は宇宙物理の研究のために開発された物理統合型のシミュレーションコードをテスト・検証することである。この目的のために、B. Remington 達は流体不安定に関する各種の実験を行い、その結果を超新星1987Aのシミュレーションなどで評価の高かったPROMETIUSコードと比較した[28]。この研究テーマはTable 1の5番目の項目に対応している。より組織的にかつ詳細なコードのテスト・検証がシカゴ大学で開発されているFLASHコードを用いて2つの場合について行われている[36]。1つは、多層構造のターゲットにレーザー駆動の衝撃波を通過させ、界面が流体不安定になる様子を計測し、結果をコードと比較している。2番目の比較は古典的なレイリー・テイラー不安定である。FLASHコードは前者の場合には良く再現できたが、後者はそうではなかった。しかし、比較したことで新しいことがわかったと報告している。この論文を含めて、実験室宇宙物理の数々の論文がAstrophysical Journalの別冊に収められている[2]。

第3の目的は例を出して説明した方がよくわかるだろう。それは、Table 1の課題15に関連した物理である。実験

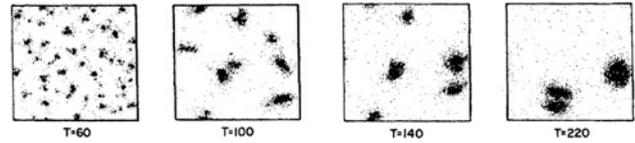


Fig. 7 一様なプラズマに紙面に垂直方向に相対論的な電子ビームが入射された時の電子ビーム密度の時間変化。まず、小スケールのフィラメントがワイベール不安定で成長し、非線形段階で磁場の再結合により巨視的な磁場構造が形成されていく。

室宇宙物理ではレーザープラズマ実験を通して解明されてきた成熟した物理を宇宙の不思議な現象解明に適用することも含む。大強度の相対論的電子ビームがプラズマ中を走る際に発生するワイベール不安定とその非線形段階での磁場の構造形成は、高速点火核融合(Fast Ignition)研究に関連して精力的に研究されている[37]。この課題は高速点火核融合で問題になる前に30年も前に相対論的電子ビームを用いた核融合の実験に関連して研究されている。過去のシミュレーションなどの研究からわかっていることは、まず、短波長の不安定が線形段階では支配的に成長し、細い電流のチャンネルが多数形成される。その後、それらが、ローレンツ力により引き合い、融合し、大きな構造に変化していく。その様子をFig. 7に示す。

Fig. 7では、電子ビームは紙面に垂直に走っており、断面内の電流分布の時間変化を示している[38]。電流のチャンネル同士が融合する際、それを取り巻く磁場がリコネクションするために磁場のエネルギーを介して電子ビームのエネルギーが背景プラズマの加熱のエネルギーに消費される[39]。このため、電子ビームは古典的なクーロン散乱で予想される侵入長に比べ異常に短い距離で熱化されてしまうことになる[40]。現在、宇宙物理で精力的に解明が進んでいるガンマ線バースト[41]において、電子陽電子のファイアーボール(ジェット)内で、内部衝撃波の通過により、ワイベール不安定が発生すると考えられる。これが、観測されたガンマ線の偏向[42]を理解する上で重要であると考えている。ガンマ線バーストにおけるワイベール不安定性の数値計算が大規模に行われている[43]。

実験室宇宙物理を推進する上で上記の3つの目的をまとめておく必要があるだろう。

- (1) 実験室でのレーザー模擬宇宙実験で宇宙現象の新しい発見(セレンディピティー)を期待できる。これは将来の観測への予言につながる。
- (2) 模擬実験の結果は宇宙の物理現象をシミュレーションするためのコードのテスト・検証のためのデータを提供できる。
- (3) 宇宙の不思議な現象解明に、実験で検証されてきたレーザー・プラズマの知識を適用することができる。

6. 実験室宇宙物理の全貌と大系化

実験室宇宙物理研究を学術として体系化していくためには、以下のような多岐にわたる研究組織の構築が必要となる。現時点で理論・シミュレーション研究や一部、実験が

既に行われている研究分野も含めると全体像は以下のようになるであろう。

1. 高エネルギー宇宙線の起源の探求
 - ・無衝突衝撃波の研究
 - ・粒子加速機構の解明
 - ・相対論的プラズマ衝撃波の研究
 - ・プラズマ乱流の研究
2. 星の進化と超新星爆発の物理の探究
 - ・圧縮性流体の流体不安定の研究
 - ・流体不安定に起因する乱流混合・異常輸送の研究
 - ・不安定における球形効果の研究
 - ・分子雲内での乱流生成の物理解明 (Landau-Darrius 不安定など)
3. 輻射流体力学と非平衡原子物理の探究
 - ・鉄など複雑な部分電離イオンのオパシティー
 - ・コンパクト星などによる光電離プラズマの研究
 - ・宇宙における X 線レーザー源の可能性
 - ・低密度フォームなどでの輻射熱伝導と衝撃波の生成過程の研究
 - ・超新星爆発による電離進行プラズマの非平衡原子過程
 - ・ワシ星雲などのような光蒸発による流体加速不安定や構造形成の研究
4. 宇宙や恒星のジェット伝搬と形状の物理機構探求
 - ・恒星ジェットの生成と磁場との相互作用の研究
 - ・ジェット状のプラズマにおける輻射伝搬の研究
 - ・ジェットと星間物質の相互作用の研究
 - ・電子陽電子プラズマの生成とそれによる宇宙ジェット伝搬の研究
5. 超高压状態の物性と相転移の探求
 - ・地球内部の状態方程式の研究
 - ・大質量惑星内部の水素の金属相転移の研究
 - ・超高压力下でのヘリウムの状態方程式 (巨大惑星: 土星, 木星)
 - ・高密度衝撃波による物質の絶縁体・半導体・金属間の非平衡相転移の研究
6. 一般相対論効果の等価原理の探求
 - ・超高強度電場内の激振動孤立電子からのウンルー輻射の研究
 - ・超高強度場による真空の崩壊 (電子陽電子生成) の基礎研究
 - ・超相対論的電子陽電子からのサイクロトロン放射と磁場の構造形成の研究
 - ・超高加速度フォイルからの基礎物理量の時間遅れの研究

上記の 6. については、そのアイデアは例えば P. Chen [44] などが提唱している。実験室で実施するにはまだ距離があるように思えるが、第 7 節で紹介するように野心的な実験計画が進行中である。このように実験室宇宙物理を組織的に展開することで、宇宙物理という観測データはあるが、その解析のベースになる物理が未検証である研究を、実験室で模擬しながら解明していくことができる。テーマ

は当然、具体的な観測などが背景にあり、何を解明したいのか、研究したいのかは具体的で、第 3 者にも理解しやすい。その上で、研究を推進し、成果を積み上げていけば、それを宇宙物理という「縦糸」の観点だけでなく、高エネルギー密度物理の学術という「横糸」で体系化すれば、大型レーザーを用いなければ構築することのできない新しい学術体系を構築することができる。

実際には、それぞれの研究者はその人の価値観に応じて「私は、宇宙のこの物理を解明しようとしているのだ」と考えても良いし、「いや、私は、高エネルギー密度科学のこの部分を知りたくてこの研究をやっているのだ」と考えてもよい。「縦」と「横」。一般に横の言葉で第 3 者に説明するのは難しいのが常だ。宇宙物理の新しい分野創成の評価だけでなく、学術的な体系化についても実験室宇宙物理を通して進むならば、実験室宇宙物理の進展の後に、次元高い世界の研究を展開できると考えている。

7. 実験室宇宙物理に関する各国の動き

実験室宇宙物理についてよく知らない読者のために世界での動きを簡単に紹介する。

7.1 米国の動き

04年3月、米国アリゾナ大学で、筆者を含む7人(米国5、英国1、日本1)が組織委員で「High Energy Density Laboratory Astrophysics」の第5回国際会議を主催した。詳しくは会議ホームページを参照[<http://www.eventmakeronline.com/conf/view/index.asp?meetingid=14>]。

その会議の様子と米国の動きをまとめる。米国の実験室宇宙物理の推進のための動きについて、それと高エネルギー密度物理と関連させながらの推進の実態を述べる。

過去8年(第1回会議は1996年、リバモア)の当該分野の急速な発展に刮目させられた。米国では当該分野が次世代の学際的重要分野になりつつある。現場の研究者が三省(DOE, NASA, NSF)[45]の科学官に熱心に説明し、三省を動かし、NAS(米国科学アカデミー)に新分野の潜在的可能性に関する調査を依頼。2001年4月、NASに委員会が設置され1年間の審査会活動の後、推進の具体的推薦を盛り込んだ報告書が刊行された[11]。この報告書は現在、ホワイトハウスの科学政策決定機関である OSTP (Office of Science & Technology Policy; <http://ostp.org/>)[46]に提出されている。OSTP 主催の公開ワークショップ(5/24-26, at Washington DC)を経て、OSTP から三省に、新分野推進のための勧告が出され、三省内に推進の部局の設置や競争的資金の創設などの具体策を求めている[47]。

第1回の8年前の会議から鑑みて、米国の躍動的な研究転換の実態を目の当たりにし、本研究分野の提唱者の一人として感激している。第1回の会議には多くのレーザー核融合関係者とわずかな宇宙物理関係者が参加したが、全体の雰囲気として皆、可能性について懐疑的であった。しかし、シカゴ大学の数値宇宙物理研究センター(<http://www.flash.uchicago.edu/>)の所長の B. Rosner などが「宇宙物理コードが正しいか物理の検証と確認[V&V (Validation & Verification)]のためには模擬実験が不可欠である」と推進

者に加わり大きな流れができてきた。彼らは米国で基礎科学に予算措置をしている三省に何度も出向き、科学官 (Science Officers) 達に熱心にその将来性、重要性を説いて回った。その積年の努力の結果、三省が足並みをそろえて上記のような科学政策策定のプロセスに踏み出したのである。米国の科学官制度については、拙著[48]を参照してほしい。

ただし、このような米国の科学政策の背景の別の一面を私なりに分析して書いておこう。冷戦の終結を受けて、リバモア研、ロスアラモス研など国立のいわゆる核兵器研究所に優秀な人材が来なくなった。国防の国 (Country of Defense) である米国は深刻な人材不足に直面している。NIF (米国リバモア研に建設中の192ビームレーザー装置: <http://www.llnl.gov/nif/>) のような大型レーザーができて優秀な人材が確保できなければ国家の軍事的安全保障にかかわる。どうして優秀な人材を確保するか。同時に、宇宙物理の分野も冷戦時代は直接・間接的に安全保障の観点から潤沢な資金を得ることができていた。ところが、冷戦の終結は宇宙での爆発現象の研究のようなものより、もっと、テロなどに対する泥臭いものへの資金の流れとなった。このように、人材と資金という異なる要求がレーザー・プラズマ物理と宇宙物理を結びつけるようになった。結果として、「宇宙物理」の名でリバモア研に優秀な人材が集まれば良い。「実験室宇宙物理」の名で宇宙物理に研究資金が投入されればハッピーである。このような両者の利害の一致が、冷戦後の科学政策に煩悶していた米国に答えを与えた。それが、私たちが育てた「実験室宇宙物理」であったと正直に言わざるを得ない。このあたりの背景はレーザー核融合研究ともリンクしてくる。この論理は米国に置いては健全な論理であるが、我が国では当然、通用しない。日本では純粋に学術的な観点から、また、科学技術立国としての平和的安全保障の観点から推進されるべきであり、それを科学者は真剣に議論すべき時代が到来していると考えている。

7.2 欧州

欧州では「Laserlab Europe」という組織が結成されている [<http://www.laserlab-europe.net/>]. これには LOA, LULI (仏), CLF (英), MPQ, GSI, MBI (独) などの17の研究機関が加盟している。EU のどこの国の人間でも加盟研究機関の高強度レーザーを利用した研究申請ができる。英国にはラザフォード研究所 [<http://www.clf.rl.ac.uk/>] がバルカンレーザーを所有し、X線輸送や超新星残骸の無衝突衝撃波などに関する実験室天文学の研究をすでに行っている[49]。今は極めて野心的な超高強度レーザーの定在波による電子の加速度運動に伴う一般相対論の等価原理から期待されるウンラー輻射の実験準備に取りかかっている。この理論は米国スタンフォード大学 SLAC の Pisin Chen の提案であり[44]、ラザフォード研究所の Peter Norreys が実験主任で準備を進めている。

また、ラザフォード研究所ではレーザーに限らず、レーザーと加速器を組み合わせた基礎研究の推進を図るため、昨年夏に Bob Bingham などを中心となり Center for Fun-

damental Science という学際的なセンターを立ち上げた。このセンターには、宇宙物理、レーザー、加速器、原子核などラザフォード研究所内の各部署から研究者が集まり、総合的な実験研究を提案していく。

フランスではエコール・ポリテクニクの Michel Koenig 達が状態方程式[50]や X線輻射輸送の実験を実験室天文学と位置づけて実施している[51]。理論では元々、星の形成などの理論が専門であった Serge Bouquet が国内をとりまとめ実験室天文学を大学だけでなく、ボルドーに建設中の LMJ という巨大なレーザーでも実施する計画である。輻射熱伝導波や流体不安定の非線形発展などを主に研究している[51]。

英国では Z-Pinch というパルス電流でプラズマを作り恒星ジェットの模擬実験などを Sergei Levedev (Imperial College) のグループが行っている[52]。

7.3 中国

中国の動きには目を見張るものがある。中国での実験室天文学の研究推進の中心人物は物理研究所の副所長 Jie Zhang と国家天文台の副台長 Gang Zhao である。Jie Zhang はラザフォード研究所に7年間いた研究者で、中国科学院総裁に請われて帰国した47才の院士 (Academician) である。彼は同時に中国の89の基礎科学研究所の総責任者でもある[48]。

Jie Zhang が中国で研究活性化をするべく急速に動き始めている。04年の夏には Jie Zhang と Gang Zhao のグループの院生や研究者を教育するため、山東半島の景勝地、威海 (ウエハイ) で夏の学校を主催した。講師は筆者と Serge Bouquet (仏, CEA) が務めた。彼らは現在、オパシティーに関する共同研究を行っており、研究対象を徐々に広げるために夏の学校を開催した。筆者の講義は以下のとおりであり、各章2時間ずつ講義した。

- ・ Chapter 1. Background Knowledge for Laboratory Astrophysics
- ・ Chapter 2. Laser Produced Plasmas
- ・ Chapter 3. Introduction to Laboratory Astrophysics
- ・ Chapter 4. Collision-less Shock and Origin of Cosmic Rays
- ・ Chapter 5. X-ray Laser in Universe
- ・ Chapter 6. Young Stellar Jets and Relativistic Cosmological Jets

この講義の ppt-file はダウンロードできる [<http://yac.bao.ac.cn/Weihai2004.html>].

現在、中国では成都 (チャンドウ) から北東に 120 km 行った綿陽 (ミャンヤン) のレーザー核融合研究センター (中国名: 激光聚變研究中心) に大規模なレーザーを建設中である。これは、National High Tech Committee (議長は Weiyang Zhang) が国家プロジェクトとして建設している。筆者はそこでの研究者との研究テーマ議論のため6月に招待されている。Jie Zhang と話し合っているのだが、その際に議長の Weiyang Zhang に実験室宇宙物理をこの大規模レーザーでも推進するように説くことにしている。中国の研究レベルは急速に伸展しており、04年12月の海南島での

日中セミナー[53]では理論・シミュレーションの分野では対等のレベルになったことを確認した。研究者人口は中国が圧倒的に多いことから、今後は、中国との連携が極めて重要と考えている。

現在、Jie Zhang は物理研究所の中に Center for Laboratory Astrophysics を設立するための申請を NSF に提出している。規模（専任の研究者の数など）は未定だが、設立は認められる見通しであり、今年の12月に開所式を行うようである。また、実験室天文学夏の学校は毎夏行うことで合意が得られており、今年も中国で行い、来年は日本で行いたいと考えている。現在、共同実験など含め長期の協力関係を維持するため、「実験室天文学の日中協力」を04年9月、日本は学振に、中国は NSFC (National Natural Science Foundation of China) に同時提出している。内容は日本側が高マッハ数の無衝突衝撃波と粒子加速機構の研究で宇宙線の起源に迫る計画であり、中国側はオパシティー実験が中心で星の進化に迫るというものである。共同研究であるから主テーマは異なるが実験などの研究は共同で実施する。05年3月に採択の通知がきた。これは6月から2年7ヶ月の共同研究であり、この間に阪大での実験室宇宙物理を中国の優秀な院生達の力も借りて立ち上げたいと考えている。

7.4 台湾

国立台湾大学の CosPA プロジェクトのリーダーである Pauchy Hwang と SLAC の Pisin Chen が主催で、第2回の「International Workshop on Laboratory Astrophysics with Intense Photon and Particle Beams」を04年5月、国立台湾大学で開催した[<http://www.cospa.ntu.edu.tw/labastro/>]。こちらは加速器を用いた模擬実験が主であるが、近年のレーザー技術の向上で超高強度レーザーによる宇宙模擬実験なども中心話題になっている。私も招待されて出席した。近い将来、このワークショップと米国での HED Laboratory Astrophysics ワークショップを日本で同時開催したいと考えている。

7.5 日本

読者より日本についても書きなさいと注文があった。文献[24]のまえがきに日本で本題の新分野を始めた経緯について書いたが、引き続き形でその後を書きたい。まず、日本での実験は Bruce Remington から筆者への共同研究の提案から始まった。NOVA で実施していた原始星ジェットの実験[54]をさらに進めて、色々な Z の物質での流体と輻射冷却の関係がジェットに及ぼす影響についてである。実験が実施され、論文化がなされた[55]。筆者はシミュレーションによる解析を院生の水田君にさせていた段階で、その後、水田君の結果は別途、論文とした[56]。

同じ頃、超新星1987A のイジェクタとリングの衝突に伴う X 線の増光や複雑な流体現象の実験を行った。その結果は、インパクトのある計測結果ではなかったが、複数の論文として発表された[57]。同時に、朝日新聞が大きくカラーで取り上げてくれた（朝日新聞1999年7月7日、夕刊）。この実験はまだ初歩的な実験であり、当然、3～5年を掛けて計測のレベルや物理の内容を深めていく必要が

あった。ところが、「実験室宇宙物理の実験データが出たのに、宇宙物理の研究者が注目しない。実験室宇宙物理は宇宙物理にインパクトを与えることができない」と、高々、1回の実験で結論を出してしまう人もいた。自分たちから宇宙物理の世界にはいることもなく、「宇宙関連の実験をしたのに宇宙物理研究者が興味を示さないのは、実験室宇宙物理が魅力的でないからだ」と信じがたい解釈で結論してしまう。それが現実であった。私が1987A 以来、宇宙物理の世界と接するようになり、何とか10年で宇宙物理の仲間に入れてもらったと感じているのに、天文学会など相手の土俵に入って広く伝える努力もせず、宇宙物理のなんたるかも知らずに結論を出した慌て者(?)がレーザー・プラズマの分野には居たことは事実だ。

その後、ITER の日本誘致に端を発した騒動が核融合の世界に蔓延し、レーザー研もその渦中に置かれることになった。ITER の時代を迎え、文部省と科学技術庁の統合による文科省の発足で、学術審議会の下に「核融合ワーキング」が設置された。その中で議論を通して、レーザー研は「核融合エネルギー研究を行う中枢機関」の色彩を鮮明に打ち出し、実験室宇宙物理などとうてい提案できる状況ではなくなった。そんな中、関西原研の大道グループでエネルギーは少ないが高繰り返しのレーザーで実験室宇宙物理研究ができないかと共同で模索した[1]。やはりエネルギーが少ないと実験も難しく、検討に終わった。東京では電通大の米田君が随分前まだ国立天文台にいた柴田君とレーザーを用いたリコネクション実験の検討を始めた。この動きは現在も続いている。

04年4月の国立大学の独法化を前に、事態が急に変化してきた。その予兆は前年から京大基研の存続の問題に関連してあった。小さい研究機関は予算を維持できない。他との統合がネット上でかまびすしく議論された。阪大では03年の1月に文科省に「阪大の特段の要望」という形で、6センターを統合して「量子科学研究所」を発足したいという提案を行った。この中にレーザー研と核物理センターという大きなセンターが含まれていた。新研究所構想のリーダーは核物理センター長の土岐氏であった。6センターの代表が週末にも集まったりして、新研究所の理念や組織などについて話し合った。それは基礎科学を推進する研究所であり、その構想の目玉として実験室宇宙物理が取り上げられた。筆者は加速器を使った模擬実験も含め大きく実験室宇宙物理が花咲くと心躍らせた。

しかし、文科省が03年3月に独法化法案を提出する際、閣議決定前の自民党文教族への説明で「せっかく各大学の独自性を持たせるための法案に、全国共同利用研だけ省令で文科省に直結させるのは良くない」という意見が多く、「省令化」ははずされて法案が可決した。その結果、新研究所構想は求心力を失い、頓挫することになった。

その後、レーザー研の内部で「高エネルギー密度状態の科学」という学術を推進するための全国共同利用研化構想が生まれ、学術推進のための具体的なプロジェクトとして実験室宇宙物理と高速点火核融合の2本柱構想になった。その構想を筆者が委員長の委員会でまとめ[58]、04年12月

15日に学術会議の物理学研究連絡委員会の全体会議で報告。委員の皆さんの積極的な支援をいただいた。また、05年1月25日には天文学研究連絡委員会でも実験室宇宙物理に関して審議いただき、強い支援の言葉を沢山の方からいただいた。05年4月28日の物理研連の全体会議で2度目の審議をしていただき、「開かれた人事の下に、研究者の流動性を促進しながら、魅力的な学術である実験室宇宙物理を推進するべし」との結論をいただいた。

以上のような状況で、学術界がレーザー研に実験室宇宙物理の推進と成果を期待しており、それに応えるためにどのような新組織や新しい人材を獲得して行くかがレーザー研に課された課題となっている。

8. 最後に

実験室のプラズマの場合、計測用のプローブでプラズマの特性を調べるような能動的な観測が可能である。また、境界条件や初期条件がはっきりしており、計測データを説明するために必要な物理の同定作業は、宇宙の不思議な現象に思いめぐらすのと同様にエキサイティングである。先端的な基礎科学は科学技術立国である日本の将来を担う若者達の頭脳の訓練の場として最適である。イメージを広げる訓練、宇宙の現象を何十桁も小さくして実験室に再現しようというロマン。このようなものが夢を持ち続けることのできる優秀な科学者を育てていくと確信している。実験室宇宙物理といっても宇宙物理だけのものではない。学際的に色々な分野からの参入により日本の科学水準の向上に寄与できれば幸いである。

参考文献

- [1] 西内満美子, 大道博行, 高部英明, 松門宏治: レーザー研究 **31**, 711 (2003).
- [2] B. Remington, P. Drake, D. Arnett and H. Takabe (edited), "Laser Astrophysics", Special issue, *Astrophys. J. Supplement*. Vol. **127**, No. 2, Part 1, April (2000).
- [3] G.A. Mourou *et al.*, *Physics Today*, **51**, 22 (1998).
- [4] 高部英明: 数理解科学 **37**, No.1, 36 (1999).
- [5] H. Takabe, *Nucl. Fusion* **44**, S149 (2004).
- [6] R. Kodama *et al.*, *Nature* **418**, 933 (2002); *Nucl. Fusion* **44**, S276 (2004).
- [7] H. Takabe, Sec. 5, *Anomalous transport in relativistic electron heating for fast ignition*, in Ref. [5].
- [8] M. Roth *et al.*, *Plasma Phys. Control Fusion* **44**, B99 (2002).
- [9] H. Takabe, *Laser Nuclear Physics*, A APPS Bulletin **13**, No. 1, 18 (2003). Download freely from <http://www.aapps.org/>.
- [10] K. Nakashima and H. Takabe, *Phys. Plasmas* **9**, 1505 (2002).
- [11] National Research Council of The National Academies, *Frontiers in High Energy Density Physics - The X-Games of Contemporary Science -*, (The National Academy Press, 2003).
- [12] J.M. Dawson, *Phys. Fluids* **7**, 981 (1964).
- [13] その成果は例えば: W.L. Kruer, *The Physics of Laser Plasma Interactions* (Addison-Wesley Pub., 1988).
- [14] B.H. Ripin *et al.*, *Laser & Part. Beams* **8**, 183 (1990).

- [15] B.H. Ripin *et al.*, *Phys. Fluids* **B5**, 3491 (1993).
- [16] V.M. Antonov *et al.*, *Laser Interaction with Matter*, ed. S. Rose, IOP Conf. Ser. No. 140 (IOP, 1995) p. 167.
- [17] 例えば, 吉田文彦: 証言・核抑止の世紀 科学と政治はこう動いた (朝日選書 655, 朝日新聞社, 2000).
- [18] S. J. Rose, *Laser & Part. Beams* **9**, 869 (1991).
- [19] 例えば, T.S. Perry *et al.*, *Phys. Rev. E* **54**, 5617 (1996).
- [20] A. Rickert *et al.*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **54**, 325 (1995).
- [21] 杉本大一郎: 天体と宇宙の進化 I (放送大学教材, 1997) 第4章; 野本陽代, 野本憲一: 超新星1987Aに挑む (Blue Backs B799, 講談社, 1989); 高原まり子: 壮絶なる星の死 (培風館, 1994).
- [22] 例えば, W. Hillebrandt and P. Hoflich, *Rep. Prog. Phys.* **52**, 1421 (1989).
- [23] 高部英明, *プラズマ・核融合学会誌* **69**, 1283 (1993).
- [24] 高部英明編: 小特集「高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学」*プラズマ核融合学会誌* **74**, 1254 (1998).
- [25] 谷畑勇夫: 宇宙核物理学入門 (Blue Backs, B1378, 講談社, 2002).
- [26] 小柴昌俊: やれば, できる (新潮文庫, 2004); ニュートリノ天文学の誕生 (講談社ブツバックス792).
- [27] M. Ross, *Rep. Prog. Phys.* **48**, 1 (1985); V.E. Fortov, *Shock Wave and Extreme States of Matter* (Nauka, 2000).
- [28] B.A. Remington *et al.*, *Phys. Plasmas* **4**, 1994 (1997).
- [29] B.A. Remington *et al.*, *Science* **284**, 1488 (1999).
- [30] H. Takabe, *Progress of Theoretical Physics Supplement* No. **143**, 202 (2001).
- [31] T. Guillot, *Probing the Giant Planets*, *Physics Today*, April issue p. 63-69 (2004).
- [32] ランダウ・リフシッツ: 流体力学2 (東京図書, 1971年) 第99節.
- [33] J. Grun *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2738 (1991).
- [34] E.T. Vishniac and D. Ryu, *Astrophys. J.* **337**, 917 (1989).
- [35] M.M. MacLow and M.L. Norman, *Astrophys. J.* **407**, 207 (1993).
- [36] A. Calder *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **143**, 201 (2002).
- [37] W.Y. Sentoku *et al.*, *Phys. Plasmas* **7**, 689 (2000); R. Kodama *et al.*, *Nature* **418**, 933 (2002).
- [38] R. Lee and M. Lampe, *Phys. Rev. Lett.* **31**, 1390 (1973).
- [39] 例えば高部英明: さまざまなプラズマ (岩波書店, 2004) 第4, 3節.
- [40] 例えば高部英明編: 講座「相対論的プラズマ物理学」, *プラズマ・核融合学会誌* **78**, pp. 335-346, 419-438, 568-581, 668-684 (2002).
- [41] N. Gehrels *et al.*, *Scientific American*, December **287**, 84 (2002).
- [42] W. Coburn and S.E. Boggs, *Nature* **423**, 415 (2003).
- [43] C.H. Jaroschek *et al.*, *Astroph. J.* **616**, 1067 (2004).
- [44] P. Chen, A APPS Bulletin **13**, No. 1 pp. 3-10 (2003) Download at <http://www.aapps.org/>
- [45] DOE (Department of Energy: 米国エネルギー省), NASA (米国宇宙航空局), NSF (National Science Foundation 米国科学基金). DOEの元々は原子力委員会であり, それはマンハッタン・プロジェクトが解散してできた委員会である. 米国の科学技術 R&D 予算は主に NSF, DOE, NASA, DoD (Department of Defense) の4機関 + NIH (National Institute for Health) であり, 割合は3%, 5%, 10%, 50%, 25% (2003年度) である. 例

- えば, *Physics Today*, April issue, 2003. See also, p. 30, February issue, 2004.
- [46] OSTP の所長は大統領科学顧問の John H Marburger III で, 科学部門には副所長の Kathy Olsen の下に専門官 4 名と science policy analyst が 4 人, 技術部門も同規模で, きわめてコンパクトで若手の科学と科学政策の専門家が科学政策立案に関与している.
- [47] 本分野推進のための科学官の委員会「Interagency Working Group on the Physics of the Universe (IWG-POU)」が2002年11月に結成されている. この3省庁にまたがった WG は DOE から10人, NASA から3人, NSF から3人, OSTP から2人, その他2人で構成されている.
- [48] 高部英明: 中央公論, 「科学審査制度の改善こそ国家の急務だ」, 2005年5月号 pp. 222-232 (2005).
- [49] N.C. Woolsey *et al.*, *Physics Plasmas* **8**, 2439 (2001); R.P. Drake *et al.*, *ibid* **9**, 727 (2002); N.C. Woolsey *et al.*, *ibid* **9**, 729 (2002).
- [50] M. Koenig *et al.*, *Nucl. Fusion* **44**, S208 (2004).
- [51] S. Bouquet *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 225001 (2004); p. 245 in Ref. [2].
- [52] S.V. Lebedev *et al.*, *Astrophys. J.* **616**, 988 (2004).
- [53] Shao-ping Zhu and K. Mima edited., *CAS-JSPS Core University Program Seminar on Laser Fusion Science and High Energy Density Plasma Physics*, December 1-4, Sanya City, Hainan, China.
- [54] D.R. Farley *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1982 (1999).
- [55] K. Shigemori *et al.*, *Phys. Rev. E* **62**, 8838 (2000).
- [56] A. Mizuta, S. Yamada and H. Takabe, *Astrophys. J.* **567**, 535 (2002).
- [57] Y.G. Kang *et al.*, *Phys. Rev. E* **64**, 047402-1-4 (2001).
- [58] 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, 「高エネルギー密度状態の科学を探究する全国共同利用研究センター構想」(2004年12月)