



高強度レーザーが開く実験室天文学 (2)

— 輻射・非平衡原子過程を中心に —

高 部 英 明

〈大阪大学レーザー核融合研究センター 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6〉

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

第1部では超新星爆発等で問題となる高マッハ数の爆風波、流体不安定、物質混合など流体現象の実験室への相似変換の可能性について述べた。第2部の本稿では、輻射流体力学、オパシティー、非平衡原子過程に関するレーザープラズマの話題を紹介し、天文学の研究課題との関連性について述べる。

1. はじめに

レーザー核融合研究用に開発されてきた大出力高強度レーザーを用いることにより、星の内部や周辺に近い温度・密度を持つプラズマを実験室で生成することができる。プラズマの流体・磁気流体現象を調べることにより、宇宙で長い時間かけ大スケールで起こると理論的に考えられている現象を、1 cm空間にナノ秒の現象で模擬することができる。レーザーを用いた宇宙模擬実験を行い、コードチェック等を通して宇宙物理の新たな研究方法を切り拓く可能性について考察を進めている^{1),2)}。第1部に続き、本稿では輻射や非平衡原子過程に関する物理の共通性、模擬実験の可能性について述べる。

固体表面に高強度レーザーを照射した際のプラズマ生成の様子を図1に示す。物質が比較的低Zの場合、レーザー吸収により生成した自由電子が熱伝導波を形成し、物質内部を加熱する。この結果、表面近傍は高圧(数10~100 Mbar)となり、流体運動が開始する。しばらくして、準定常的な温度(T)と密度(ρ)の分布が形成される。つまり、内方へ向かう衝撃波領域、密度が外方へ低下を始める剥がれ面(アブレーション面)からレーザー吸収領域までの電子熱伝導領域(deflagration heat wave region)、そして低密度膨張領域(希薄波)である。

図1の(2)から(3)へ移行する時間は極めて短く、一般には図の最下段の分布が準定常的に続く。レーザーが直接加熱している部分の温度は数keV、密度は 1 mg/cm^3 程度である。

物質が金のように高Zの場合、吸収されたレーザーのエネルギーの大半は軟X線輻射に変換され、アブレーション面までの領域は輻射熱伝導が支配的となる。さらにエネルギーはX線として右方へ逃げ、入射レーザーエネルギーの70~80%が軟X線へ変換される。右方へ放出される軟X線のスペクトルはプランク分布に近い。輻射熱伝導領域(数100 eV)でX線が生成されるため、その温度程度の輻射温度を持つ。レーザーを金で作った数mm程度の円筒キャビティの内面に照射すると、X線をキャビティ内に閉じ込めることが可能であり、数100 eVの黒体輻射X線源を作ることができる³⁾。低Zの場合ではX線への変換率は数%~数10%程度で、エネルギーの大半は真空中の膨張するイオンの運動エネルギーとなる。

2. 輻射流体の世界

宇宙の諸々の局面で、輻射圧や輻射エネルギー輸送が流体の駆動力となる。例えば星の内部でのエネルギー輸送や星風による星表面の剥がれなどがその例である。レーザープラズマでは輻射温度300 eVとしても、その輻射圧は0.4 Mbarであるの

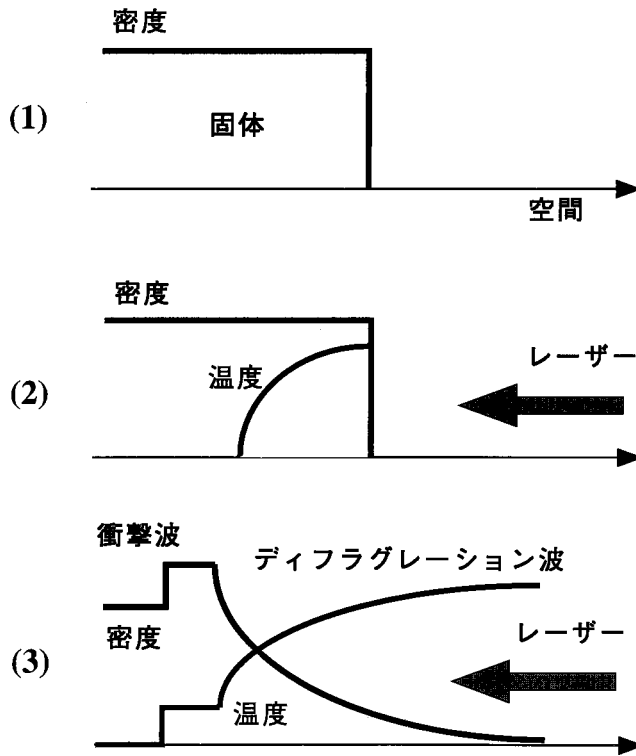


図1：固体に高強度レーザーを照射した際、生成されるプラズマの温度・密度分布の時間変化。

に対し、流体圧は数 10 Mbar もあり相対的に低い。これは密度が高いことによる。輻射は電子を加熱・冷却するため、その結果の圧力変化を通して流体に影響を及ぼす。輻射の輸送方程式は

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I^\nu}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla I^\nu = \eta^\nu - \chi^\nu I^\nu + S^\nu \quad (1)$$

と表現することができる。ここで Ω は輻射の伝播方向の単位ベクトル、 c は光速。式 (1) で輻射放出率 η^ν は制動輻射（自由-自由遷移）、輻射性再結合（自由-束縛遷移）及び輻射脱励起（束縛-束縛遷移）により決まる。一方、 χ^ν は輻射吸収係数を示し、放出の逆過程により輻射が吸収され、自由電子加熱、電離、励起が起こる。ただし、 χ^ν は誘導放出による項も同時に含む。(1) 式で S^ν はコンプトン散乱等による散乱の効果を示す。

部分電離プラズマの η^ν や χ^ν を計算すること自体、高度な研究課題である⁴⁾。図2に輻射流体系の関連を示した。非理想プラズマを流体近似で解こうとする場合、状態方程式や輻射加熱・冷却率を与える必要が有る。これらは、部分電離プラズマのイオン状態や輻射輸送により決まる。例えば、Hartree-Fock 等のコードで与えられた電子配置での固有エネルギーや波動関数を求める準備をした上で、これから得られる振動子強度や励起・電離等の断面積を求めておく必要がある。これらを用いて各イオン状態間の遷移を支配する速度方程式（レート方程式）を解く。流体と時々刻々結合して速度方程式を解くのは大変であり、その平衡解で十分な場合も多い。平衡解には局所熱平衡 (LTE)、衝突

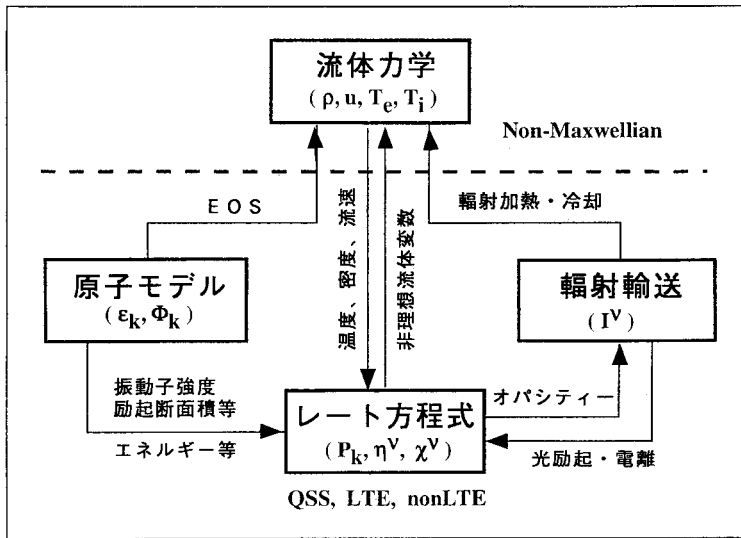


図2：輻射と流体が結合した世界における各物理要素間の関連。

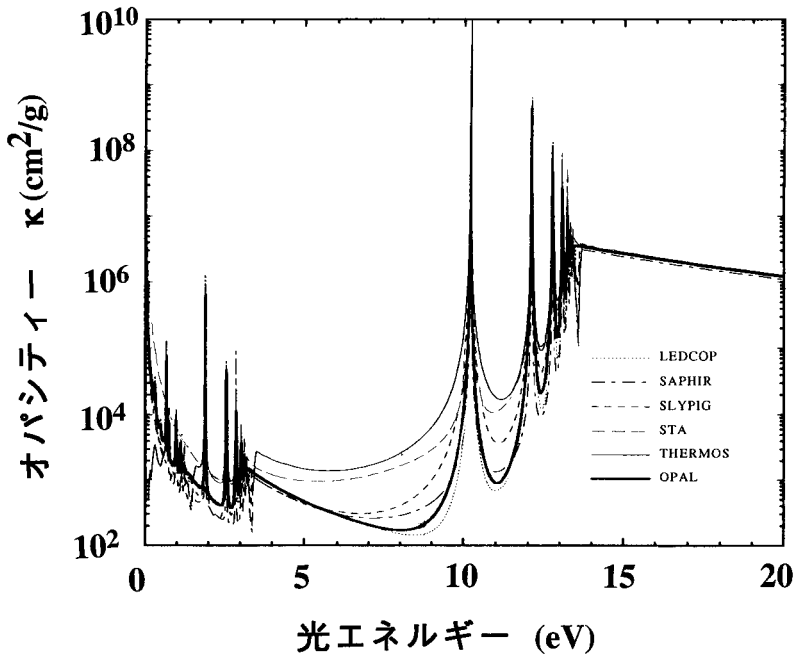


図3：色々なコードで計算した水素のオパシティー。温度は1eV、密度は 10^{-6}g/cm^3 。

輻射平衡 (CRE), コロナ平衡 (CE) 等がある。

部分電離イオンの分布が決まれば, これより原子モデルのデータを用い η^v や χ^v が求まる。次に (1) 式を解けばよい。(1) 式は簡単な式に見えるが, v 空間も含めて 6 次元であり, 何らかの近似解法が必要となる⁵⁾。(1) 式を解くことにより, 計測される X 線や光の時間, 空間変化やスペクトルが求まる。上の計算で流体と直接結合するかどうかは, 計算機の能力や扱う問題による。通常, 平均イオンモデル等を用いて計算された η^v , χ^v を用い輻射流体現象を解き, 分光計測との比較は後処理 (post-process) で行う。

3. オパシティー

星の中心部では核融合反応によりエネルギーが生まれ, 輻射輸送により外部へ運ばれる。表面近くで低温になるに従い, 今度は対流輸送により運ばれる。第 1 部で説明した流体不安定は対流輸送の物理機構である。一方, 輻射輸送を支配するのがオパシティー (光子に対する不透明度) である。宇宙では, 輻射輸送が支配的な現象が多く見られる。例えば, 「超新星爆発ではオパシティーがすべてを支配する, と言っても過言ではない」と表現されたりしている⁶⁾。

レーザー核融合の方式に X 線駆動型爆縮がある⁷⁾。高強度レーザーを高 Z 物質 (金など) に照射し, 100% 近く軟 X 線のエネルギーに変換し, この X 線で燃料球を爆縮しようという方式である。燃料球表面で効率よく X 線を吸収させるよう設計するために, 高温・高密度プラズマのオパシティーが重要となる。また, レーザーを直接照射して爆縮する場合も, X 線加熱を制御し, 密度分布を調整することにより流体不安定を制御するなど, オパシティーの詳細を知る必要がある。

英国の Seaton を中心に, オパシティー・コードを作るための OP プロジェクトが世界の研究者を組織して進められている。一方, レーザー核融合関連の研究者間で, 独立に開発してきたオパシティー

・コードを比較するワークショップが定期に開催されている。例えば, 水素のように単純な物質でも, 図 3 に示すようにコードによりわずかな違いがある⁸⁾。ライン形状の違いがみられる。束縛-自由遷移にしても少し高密度になるとモデリングは必ずしも確立されていない。しかし, このようなワークショップを重ねることにより, 複雑なオパシティー計算も精密科学へと進化しつつある。

コードは実験との比較でテストされるべきである。高強度レーザーを用いたオパシティー実験が複数の研究期間で行われてきている。実験方法は単純である²⁾。例えば, 鉄のオパシティーを調べたい場合, 薄い鉄のサンプルをプラスチックではさみ, これにレーザー生成 X 線を当て, 加熱する。すると, 数 10 eV で数 mg/cm^3 程度の均一な鉄プラズマができる。ここに, 他のレーザービームで生成した X 線を計測用に通過させ, その透過スペクトルを結晶分光器を用いて調べる^{9), 2)}。図 4 に, アルミニウムの吸収スペクトルの実験データと OPAL コードによる計算結果を示す⁹⁾。温度は 48 eV で詳細なライン分布・形状にわたり, 良い一致が見られる。

OPAL に代表されるオパシティー・コードの精度向上は, 宇宙観測データ解析に力を発揮している。例えば, 新星の光度曲線は星表面での輻射吸収に強く依存している。OPAL のデータを用いることにより新星 Cygny 1987 の光度曲線が良く説明できることがわかった¹⁰⁾。セファイド型変光星の脈動機構は, 輻射によるエネルギー輸送と加熱が星内部の加圧・膨張と連動したものである。OPAL コードを用いた解析結果が脈動周期の観測データを良く説明すると報告されている¹¹⁾。また, 白色矮星の輻射冷却率などもオパシティーの問題であり, 銀河年齢算定に関係してくる¹²⁾。

4. 輻射輸送

宇宙物理では, 輻射輸送や輻射流体力学が諸々の局面で重要となってくる⁵⁾。例えば, 星の形成とその統計学を考える時, 重力相互作用しながら輻

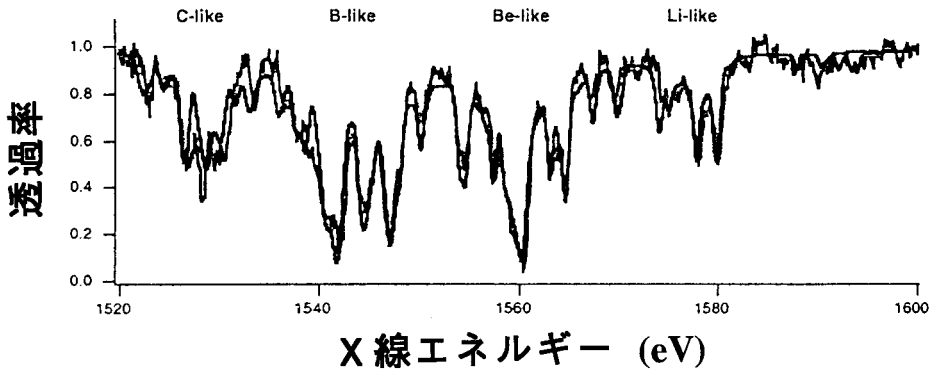


図4：レーザーを用いたオパシティー実験で測定されたアルミニウム・プラズマのオパシティー。スムーズな線は OPAL コードで求めたオパシティー。温度は $48\text{eV}^{9)}$ 。

射冷却・加熱して行く系を扱う必要がある。これを第1原理から解いて始めて、何故、多重連星が5割以上も宇宙には存在するのかという疑問に答えることができる。さらに、輻射ジェット構造¹³⁾の解明等にも絡んで興味深い。

高強度レーザー照射物質中の輻射熱伝導波の伝播¹⁴⁾や輻射によるバーン・スルー実験¹⁵⁾が行われている。金キャビティーにレーザーを入射することにより、300 eV 程度の輻射温度を持った黒体輻射源を作ることが可能である。このX線を用いることにより、輻射駆動の流体現象に関する模擬実験を行うことが出来る。

超新星爆発や星風の解析を行う際、星表面の物質が内部からの光を吸収し加熱され膨張する現象を評価しなければならない。膨張速度が輝線の平均自由行程と同程度のスケールで変化している場合、Doppler de-coupling が起こる。宇宙では可視、紫外での輝線に於けるこの効果が問題となる。レーザープラズマを用い、X線領域の輝線に対してこの効果が調べられている¹⁶⁾。アルミニウム薄膜にレーザーを照射し、その水素様原子からの輝線の放射スペクトルの角度（膨張方向に対する）依存性を調べている。Sobolev 近似を用いた輻射輸送コ

ードとの比較が行われており、モデルの改良等のためのデータが得られている。

5. 非局所熱平衡原子過程

プラズマが急激に加熱されたり、冷却されたりした場合、電離状態が熱平衡に達しないまま現象が進行する 경우가多々見られる。ここで、急激に、といっても星間物質の様に低密度の場合は数千年の時間スケールであったりするのに対し、レーザー生成プラズマでは数ナノ秒であったりする。これは、局所熱平衡 (LTE) に至る緩和時間が密度に強く依存することによる。非局所熱平衡状態 (non-LTE) にあるプラズマのイオン分布の実効的温度を T_z で表す。一般に、電子、イオンも異なる温度を持ち、それぞれ T_e , T_i とする。さらに、輻射場も実効的な温度 T_R を持つとしよう。主に、 T_z , T_e , T_R の間の関係で色々な non-LTE 状態が考えられる。まず、LTE とそれ以外の平衡電離状態を分類しよう。

- (1) 完全 LTE：星の内部やレーザー照射金ホーラムの内部では $T_e = T_z = T_R$ がほぼ成立しており、物質も輻射場も熱平衡状態にある。このような場合は、(1) 式の輸送式も Roseland 平均オパシティー等を用いて v に平均

化した式を解いて十分良い近似となる。

- (2) 広義のLTE：物質はLTE状態にあるが、プラズマのサイズや変化長が光子の平均自由行程より小さいため放射場は平衡とはならず、 $T_r \ll T_e$ であるような場合。例えば、密度が高く、衝突による励起・電離と脱励起・再結合が釣り合っており、放射脱励起等の効果が無視できる場合である。レーザー生成プラズマの高密度部で見られる。この場合、オパシティー χ^v 、 η^v は温度、密度だけの関数である。 χ^v がわかれば、 $\eta^v = \chi^v I_p^v$ の関係より η^v が求まる。ここで、 I_p^v はプランク分布である。
- (3) 衝突放射平衡 (CRE)：相対的に低密度で高温ではあるが、 $T_r \ll T_e$ であるような場合、放射脱励起や再結合の寄与を無視できなくなる。このような状況下での平衡解をCREといい、広くレーザープラズマのシミュレーションに用いられている⁴⁾。さらに、低密度の極限がコロナ平衡 (CE) である。CRE, CEでは、 $\eta^v = \chi^v I_p^v$ の関係は成立せず、 η^v 、 χ^v を別々に求める必要がある。
- (4) 光電離状態：低温のプラズマに強い放射場が外部より照射されている場合、つまり $T_r \gg T_e$ の場合、光励起、光電離が重要となる。例えば、レーザー生成プラズマを用いる光励起型X線レーザーや、X線星周りの光電離ガス等がその例である。

上に述べた4つは平衡状態であり、 η^v 、 χ^v は温度、密度、さらに(4)の場合は放射場 I^v だけの関数であり、時間を陽に含まない。しかし、急激な加熱・冷却が起こるとこの限りではない。この場合は非平衡で各イオンの電離、励起状態の時間変化をレート方程式を解いて決定する必要がある。この非平衡状態には代表的に2つの場合がある。それは、

- (1) 電離進行プラズマ (ionizing plasma)
- (2) 再結合進行プラズマ (recombining plasma)

である²⁾。

超新星残骸 (SNR) の爆風波で加熱された星周物質は千年経っても電離が進行中である。X線観測衛星 ASCA で観測されているラインX線から元素組成を同定する際には、レート方程式解法コードが不可欠である¹⁸⁾。また、レーザーで急激に加熱されたプラズマは温度上昇に電離が追いつかない。

一方、加熱されたプラズマを急激に冷却すると、再結合が追いつかず、負温度に近い状態を作ることができる。このような再結合進行中のプラズマを高強度レーザーで作成し、X線領域のレーザー発振を行うのが再結合型X線レーザーである。宇宙に於いても急加熱・急冷却の現象が期待できるはずで、X線レーザー現象が観測される可能性がある。

第一部に述べたようにガス中に爆風波を作り、加熱、電離していく様子を調べることができる。この際、SNRの場合を非平衡励起過程の観点から相似変換できるか評価する必要がある。

電離過程を支配する無次元量は電離パラメーター(τ)であり $\tau = nt$ [(密度) × (時間)]で定義される。例えば、チコのSNRでは $\tau = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ である。同程度の電離パラメーターを持つ爆風波は、第1部で述べた値を用いると $n = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ として $t = 30 \text{ ns}$ となる。これは、流体现象の相似変換の場合とほぼ一致する。SNRでは自由電子の衝突による直接電離が支配的であることから、 τ は非平衡原子過程を特長づける唯一のパラメーターとなる。しかし、レーザーの場合、密度が高いことから衝突励起を介して電離する、いわゆる梯子様の電離¹⁷⁾が相対的に重要となる可能性があり、より詳細な評価を行う必要がある。

SNRの非平衡原子過程に関し、未解明の問題がまだ多々有るようだ¹⁹⁾。今まで触れてきたように電離平衡に達していないことだけではない。電子とイオンの温度緩和時間 τ_{ie} は、 $n_e = 1 \text{ cm}^{-3}$ 、 $T_i = 1 \text{ keV}$ として $\tau_{ie} = 10^4$ 年程度である。従って、若いSNRは $T_i \gg T_e$ の状態にある。さらに、電子の熱化(Maxwell分布になる)時間を評価してみると 10^3



年程度となる。観測技術がさらに向上した将来、非マックスウェル分布下での非平衡原子過程を議論する必要が出てくる可能性がある。

レーザー加熱電子は非マックスウェル分布となる。この効果が電子熱輸送に影響を与えることから、Fokker-Planck 方程式を解いて非局所熱伝導の効果が調べられている²⁰⁾。最近、超短パルスのレーザーで電離したプラズマ中の自由電子が非マックスウェル分布であることが直接計測されている²¹⁾。

太陽 X 線観測衛星「ようこう」の観測データ解析から、太陽フレア現象における非平衡原子過程の重要性が指摘されている²²⁾。太陽フレアでは 100 秒程度の間に温度が 1–2 keV に上昇する。電子密度は 10^{10} cm^{-3} 程度である。従って、電離パラメーターは $\tau = 10^{12} \text{ cm}^3 \text{ s}$ 程度で、わずかに含まれる鉄の水素、ヘリウム様原子は非平衡電離状態にある。元素組成や温度・密度の同定に非平衡原子過程が重要となる。

Cygnus X-3 の観測で 10–20eV のプラズマ中に完全電離に近いケイ素が同居していることがわかっている。これは、光電離プラズマの存在を示唆している。光電離プラズマの原子状態を理論的に導出する試みが播動散逸定理を用いて行われており、コードでその精度が確認されている²³⁾。レーザー生成 X 線の放射温度 T_R を変化させ低温のプラズマに照射し、そのオパシティーを調べることにより原子状態のデータが得られる。現在、この理論を検証する実験の提案がなされている。

レーザー爆縮プラズマの X 線分光計測のデータ解析には、非平衡原子過程を陽に扱う必要がある。このために開発された FLY コード²⁴⁾や、その平衡解を求めるコード RATION コードは世界中の研究所で広く用いられている。

6. まとめ

第 1 部では流対現象、第 2 部では放射・非平衡原子過程を中心にレーザープラズマと宇宙の問題の関連性を説明した。その他、高密度プラズマの

状態方程式や核反応率のレーザーを用いた実験、さらに、近年登場した超強度レーザーを用いた相対論的プラズマの研究などの話題については割愛した。

宇宙で登場する流体は圧縮性流体で、高 Reynolds 数のプラズマである。また、超新星爆発やスター・バースト等では高マッハ数の爆風現象が重要な役割を担っている。一方、放射過程は星の進化を支配する物理機構であると共に、流体现象と結合し放射流体力学として宇宙現象の様々な局面で登場してくる。

宇宙は H, He が元素の主成分とは言え、わずかに含まれる Si, Mg, Fe 等の重元素は観測の点からも絶好のターゲットとなる。また、重元素は星周りの放射輸送を大きく支配することが分かっている。このような部分電離重元素の原子物理や非平衡原子過程の研究が宇宙研究に要求されている。

レーザー核融合の爆縮物理を支配するのは、圧縮性流体の物理であり、原子・放射物理である。そして、星の内部や周辺と同程度の温度・密度を持つプラズマを実験室で生成し、研究対象としてきている。従って、宇宙物理とレーザー核融合を結び着ける、という発想が生じるのはごく自然なことである。この論文を通して、異なる二つの分野の研究が少しでも理解し合う契機になればと思っている。

本稿の内容をまとめると次のようになろうか。レーザーを用いた核融合実験による物理解明には流体、放射、核反応過程の理論及びシミュレーションが不可欠である。ところが、これらは宇宙物理の研究テーマと直結することから、レーザー核融合物理の解明は理論とシミュレーションを通して宇宙物理研究の高度化を促すといえる。さらに一歩踏み出して、実験室で宇宙物理の模擬実験を進める体制が整えば、直接、実験室で天体物理研究を行うことになる。そうなれば、結果としてレーザー核融合研究への刺激も大いに期待できる。レーザー核融合も、宇宙物理も、高密度・高温の流体・原子物理にその基礎を置いており、学問とし

ては同じ対象を相手にしているということである。

大出力レーザーの技術は飛躍的に進歩し、実験室に於ける宇宙物理モデル実験を可能としてくれるようになった。そこで、高強度レーザーを用いた実験室天文学という新たな研究分野が天文学の中に生れるのは自然であり、そのための大型レーザー装置があってもいいと私は考えている。そして、この装置で「宇宙物理の各種モデル実験を行い、余力でレーザー核融合関連の研究もする」という発想を持つ人が現れることを期待するものである。

謝 辞

著者と宇宙物理との関係は、超新星 1987A の爆発後ほどなく掛かって来た一本の電話から始まった。あれから 10 年。実験室天文学のアイデアは、電話の主、野本憲一（東大）氏との共同作業なくしては生まれなかった。この場を借りて、改めて同氏に感謝したい。

本稿の内容は多くの方からの情報提供や議論を通して発展してきたものである。天体・宇宙物理や原子・衝撃波物理に関し、以下の方々に感謝の意を表したい。

蜂巢, 茂山, 鈴木, 岩本 (東大), 戎崎 (理研), 加藤万里子 (慶應大), 柴田 (天文台), 田島 (テキサス大), 加藤隆子 (核科研), 政井 (都立大), 常深 (阪大), 藤本 (京大), 高山, 佐宗 (東北大流体研), D. Salzmänn (SNRC), S. Blinnikov (ITEP), B. Remington, G. Mathews, S. Rosen (LLNL), B. H. Ripin (APS, NRL)

レーザー核融合に関しては、三間囀興センター長を始めとする阪大レーザー研のスタッフ一同に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 高部英明: 天文月報 91(1998)2月号
- 2) 高部英明, 野本憲一: 物理学会誌 53(1998)2月号
- 3) H. Nishimura et. al.: Phys. Rev. A 44, 8323 (1991).
- 4) H. Takabe and K. Nishikawa: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 51, 379 (1994).
- 5) 梅村雅之, 中本泰史, ながれ 15, 457 (1996).
- 6) R. G. Eastman, in "Thermonuclear Supernovae", NATO ASI Ser.(C) Vol.486 (Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 1977) p.571.
- 7) J. Lindl, Phys. Plasmas 2, 3933(1995).
- 8) A. Rickert, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 54, 325(1995)
- 9) T. S. Perry et. al., Phys. Rev. E 54, 5617 (1996).
- 10) M. Kato and I. Hachisu, Ap. J. 437, 802 (1994).
- 11) P. Moskalik et al., Ap. J. 385, 685 (1992).
- 12) 例えば, 齊尾英行著「星の進化」(培風館, 1992) 第9章.
- 13) J. M. Blondin et. al., Ap. J. 360, 370 (1990).
- 14) J. Massen et. al., Phys. Rev. E 50, 5130 (1994).
- 15) T. Loewer et. al., Phys. Rev. Lett. 72, 3186 (1994).
- 16) J. S. Wark et. al., Phys. Plasmas 4, 2004 (1997).
- 17) T. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. 47, 273 (1979).
- 18) H. Tsunemi et al., 文献 6), p.561.
- 19) 小山勝二, 私信.
- 20) A. R. Bell, Phys. Fluids 28, 2007 (1985).
- 21) T. E. Giover et. al., Phys. Rev. Lett. 75, 445 (1995).
- 22) T. Kato, Physica Scripta T73, 98 (1997).
- 23) R. L. More, private communication.
- 24) R. W. Lee and J. T. Larsen, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 56, 535 (1996).

Laboratory Astrophysics Opened by Laser Fusion (2)

- Radiation and Non-LTE Atomic Processes - Hideaki TAKABE

*Institute of Laser Engineering, Osaka University,
Yamada-oka 2-6, Suita, Osaka 565-0871 Japan*

In the previous paper, a possible similar transformation of hydrodynamic phenomena seen in the universe to laboratories has been described by picking up high Mach number blast wave, hydrodynamic instabilities, and material mixing. In the present paper, the topics of laser produced plasmas of radiation hydrodynamics, opacity, and non-LTE atomic physics are described by relating to the subjects of astrophysics.