

地上に星をつくる

(本原稿は月刊科学誌「固体物理」のサロン欄への寄稿を依頼され書いたものです。)

高部英明

1. はじめに

今、パリにいる。昨日の雨とは打って変わって、とてもいい天気で暖かい。ホテルはモンパルナス駅の近く。先ほど地下鉄6番で凱旋門まで来た。そして、シャンゼリゼ大通りを歩いている。ここは何度歩いても厭きることが無い。コンコルド広場に来ると、オベリスクをかき消すように大きな観覧車が通路をふさいでいる。2年間だけの仮設のようだが、これはグルテスクか芸術か。

ルーブル宮の真中に7年程前出現したガラス張りのピラミッドといい「芸術とは挑戦である」という、ただならぬ雰囲気を感じさせてくれる。ルーブル宮に至る手前のチュイルリー公園で一休みする。きれいに咲いたチュウリップを見ながら原稿を書き始めている。赤、黄、ピンクに咲いた首の長いチューリップの胸元を飾るように紫や橙色の花が咲き乱れる。そして、花々が深緑の芝生にきれいに浮かび上がってくる。

この原稿の締め切りを控えたまま、パリで開催されたユーロ会議に招待され、出席した[1]。私は「レーザー天体物理のレビュー」という題で、結局、質問を含め80分の講演を行った。今から書こうとしていることを喋ったのです。

会議は4月23日から27日まで、パリ郊外のパリ天文台(ムードン)で開催された。会議自体の主題は「高速気流、高温流体、衝撃波、レーザー」という題で、宇宙物理が中心課題であるが、スペース・シャトルのような宇宙往還機の地球再突入時の高温流体の力学や非平衡分子・原子過程、ダストプラズマ、レーザー生成プラズマなどの研究者が集まって、学際的な議論を展開した。

今回は、友人のセルジュ・ブケー(仏原子エネルギー省(CEA)の研究者)からの依頼で講演したもので、日本からの参加者は私一人であった。彼が研究していたパリ天文台の恩師 J-P. J. LAFON が議長。この先生、星間物質や星の進化が専門の天文学者だが、元は数学者で群論の研究をしていたとの事。彼の名がついた公式があるそう。

パリ天文台は1667年に太陽王ルイ14世の命で創設された由緒ある天文台です。初代の台長がカッシーニで、彼は土星の輪が二重になっていることを見つけ、この輪の間は「カッシーニの間隙(すきま)」と今日呼ばれている。場所はパリをちょうど東西に分ける道路の南起点にある。天文台の屋上に上がると、フランス国会の上院会議場となっているルクサンブル宮殿とその広い庭が目の前に広がる。天文台の建物は屋根の高い宮殿風であり、研究棟は広い庭の中に点在する長屋風の建物。外観は当時のまま保存しており、一旦ドアを開けると、中は明るい近代的な研究室になっている。クリーンルームや補償光学系の設計室などを見学した。

天文学という学問は、この建物に象徴されるように、王や富豪などの庇護を受けながら発展し、近代に

においては、最先端の物理、技術を取り入れることにより新たな変貌を遂げてきた。古めかしそうな表紙の中には最先端のページが常に用意されている。この意味で、これからお話するレーザーを用いた天文学の研究は、その端的な例とも言えようか。

2. レーザー天体物理

「地上に星をつくる」という、たいそれた題を頂いた。平たく言えば、高強度のレーザーを使って、宇宙物理、特に、天体に関する物理を研究しようというものです。それを宅間先生が表題のように表現してくださった[2]。天文学、宇宙物理、天体物理。正しくは使い分けが必要ですが、ここでは星の進化や宇宙の爆発現象を中心にレーザーで模擬実験をする話を紹介します。

レーザーの発明から41年。高出力レーザーはレーザー核融合などの特殊用途に牽引され、現在、米国、仏国でパルス出力2MJのレーザーが建設されるまでに発展した。さらに、超短パルス法(CPA法)の発案により、テーブル・トップのTWレーザーが可能となり、原子物理や反応化学などに全く新しい研究分野を誕生させている[3]。一方、体積は小さいものの、単位体積あたりのエネルギー(例えば erg/cm^3 単位で)が星の内部や中性子星などの表面と等しいような状態をレーザーの高エネルギー集光性のおかげで実現できる。そこで、この高エネルギー密度プラズマを利用して、極々小さい星を瞬時に作ったり、天体の爆発現象をスケール・ダウンして実験室で模擬し、それを観測して、遠い空の果ての物理を解明しようというのが「レーザー天体物理」です。

話を少し具体的にしよう。固体物質に集光強度 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度のレーザーを照射すると、表面物質は熱伝導波で高温となりプラズマ化し、真空領域に音速程度の速度で膨張する。この間、数10ピコ秒である。さらに、レーザーが入射し、逆制動輻射過程などで吸収が起こる。ほぼ、ナノ秒の時点には、内方に伝搬する衝撃波が形成され、その下流には弱い燃焼波(Deflagaration wave)領域ができる。この時の膨張プラズマの温度は典型的には1-2keV。密度は数 mg/cm^3 。レーザー加熱により生じるプラズマ圧力は数10Mbar(数千万気圧)となる。

このような、レーザーで生成されるプラズマを総称して「レーザー・プラズマ」と呼んでいる。また、レーザー・プラズマは数学的に流体近似で扱うことが多いことから「高温流体」ということもできる。さらに、通常の放電によるプラズマより密度が10桁近く高いことから「高温高密度流体(プラズマ)」とも呼ぶ。元々、固体をプラズマ化するのだから密度が高い。レーザー・プラズマの研究とは高エネルギー密度物質の物理を研究することを示す。これはまさに天体物理の研究に要求されることと同じです。

著者が25年程前、レーザー・プラズマの研究を始めた頃、適当な専門書は無く、天体物理の教科書や論文をよく参考にした。それは、高温プラズマの平衡・非平衡原子過程、輻射流体力学、オパシティー、高密度プラズマの強結合効果、状態方程式、核燃焼波の物理、爆風波などなど。

さらに最近になって、レーザー技術が進歩し、超高強度レーザーが可能となった[3]。このレーザー・パルスを数10 μm 径に集光すると、強度は $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ を超えることになる。すると、その電場の強さは10kV/にも達し、この電場で加速された電子群は10MeV以上のエネルギーを持つことになる。さらに、この電子が反物質の生成を引き起こし、電子・陽電子の高密度プラズマを実験室に生成する可能性が出てき

た[4]。

レーザー・プラズマと宇宙のプラズマを結びつける際、イメージを掴み易いように以下のように3つに分類して説明している。

- 1 . 同一性 (Sameness)
- 2 . 相似性 (Similarity)
- 3 . 類似性 (Resemblance)

2 . 1 同一性 (Sameness)

まず、「同一性」は分かりやすい。物質の熱力学的性質は、その2つの状態量。例えば、温度と密度が同じであれば、体積の大小に関わらず同一である。その良い例が、高温高密度下での状態方程式であり、また、X線の放射・吸収スペクトルである。後者をまとめて慣習に従い、オパシティーと呼ぶ。

私は講演で「同一性」の説明の際、20年前、米国アリゾナに住んでいた時に、妻と出かけたニュー・メキシコ州のホワイト・サンズの写真を見せる。ここは、スペース・シャトルの滑降地点にもなっているほど広大な土地で、見渡す限り雪と見まがう白い砂の原です。「このホワイト・サンズの物性を知りたければ、何も、日本の狭い庭にこの砂を敷き詰める必要は無い。一握り持ち帰り調べれば砂の物性はわかる」と、講演します。聞いている先生方には子供扱いされたかのように不快感を持つ方もいると思うが、印象に残ることを期待しての賭けです。

状態方程式は、固体物質にレーザーで強い衝撃波を発生させ、その衝撃波曲線(ランキン・ユゴニオ曲線)を求めて調べる。これは、衝撃波の速度とピストンの役を担う物質の境界速度を、他のレーザーで発生させた硬X線を透過させた影絵の時間発展などから観測することにより求まる。最近、衝撃波面からの計測用レーザーの反射率測定などで金属への相転移を調べたり、初期状態を変えるため小さいダイヤモンドで0.1Mbar程度まで静的に圧縮し、ダイヤモンドを透してレーザーを当てることにより、広い初期パラメータで衝撃波のデータが得られるようになってきている。ただし、これらはまだ、仏、英の間で共同研究が始まった段階です。

高強度レーザーで得られる圧力は、木星の中心圧力五千万気圧程度であり、昔から議論されている水素の金属転移などに関するデータが得られる。この場合、水素を液体ヘリウムで固化し、そこにレーザーを照射する。水素の均一な固化技術はレーザー核融合燃料製作技術として経験を積んでおり、すでに重水素については詳細な実験データが得られている[5]。結果として、第1種の相転移は観測されず、実験データは絶縁体と金属状態が連続的に変化していくことを示唆している。

レーザーで得られる状態方程式は、上記のように巨大惑星の内部構造研究に関係してくるし、いわゆる、褐色矮星の研究にも必要である。さらに、低質量惑星の研究などにも関係してくる。

オパシティーは、「レーザー・オパシティー実験」の名前で基礎研究として10年前頃から盛んに研究されてきている。比較的小規模のレーザーで研究が出来ることと、世界中から10種類以上のオパシティーを計算するコードが出揃ったことから、研究が盛んになった[6]。オパシティーは星の進化などを

議論する際に基本的な物理量である。

例えば太陽は中心で発生した核融合エネルギーを主に X 線で外方に運ぶ。この運ぶ速度は太陽プラズマのオパシティーで決まっており、鉄など、僅かしか含まれない原子もその Z 値が高いことから重要になる。そして、表面近くまで X 線として運ばれたエネルギーは、今度は、対流により表面まで運ばれる。容易に想像できるように、オパシティーにより太陽内部の温度分布が決まる。太陽の詳細解析は日震学 (Helioseismology) が研究対象とするところで、このデータを精密に説明するオパシティー・コードが開発されて来ている。それと同じ基礎理論に従って導出された状態方程式を使って、誤差数%で観測データを再現することが報告されている [7]。

オパシティー実験の原理は簡単なので説明しよう。レーザーは最低 2 本必要です。今、Fe の高温状態のオパシティーが知りたいとする。薄い Fe の板をプラスチック (サラップを想像してください) で挟む。通常の実験では、レーザーを一旦、金などの高 Z 物質に当て、そこから出てくる輻射温度 100eV 程度の X 線を Fe に当てる。すると、Fe だけが数 10eV になり、プラスチックは余り加熱されず、Fe プラズマの膨張を防いでくれる。これにより、固体密度に近い高温の Fe プラズマを作ることができる。ここに、第 2 のレーザーで発生した計測用の弱い X 線を当てる。Fe を通過した X 線とそうでない X 線を結晶分光器で計測し、その透過比のスペクトルを求めることでオパシティーが得られる [8]

このようなレーザー・オパシティー実験と詳細なオパシティー・コードの開発で、局所熱平衡下の高温、高密度の原子状態はほぼ研究が完了している。オパシティー関連の研究テーマで現在議論されているのは、1 . 非熱平衡状態 (特に、輻射脱励起と衝突過程が平衡に達した、衝突・輻射平衡)、2 . 高密度におけるプラズマ効果、3 . UTA(Unresolved Transition Array) のモデリング、などです [9]

2.2 相似性 (Similarity)

「相似性」は、まさに物理の醍醐味です。私は講演の際、まず、実物の航空機と風洞内の航空機模型の写真を並べたものを見せる。そして、「相似性の一番良い例がこの風洞実験です。機体のサイズは 10^3 倍も違うのに、マッハ数とレイノルズ数を同じにすれば、風洞実験から得られたデータを基に実機的设计が出来ます。これは、両方とも、圧縮性のナビエ・ストークス方程式に支配されているからであり、これを無次元化した際、残ってくるパラメータは先の 2 つだけであることが理論的根拠です」と、喋る。すると、皆さん「ウン、ウン」と納得してくださる。

その次に、「この理屈を 10^3 のスケール変換から 10^{20} のスケール変換に持っていきます。それが、これから説明する宇宙の爆発現象などを実験室に再現する話です」と言うと、首をかしげる人が出てくる。同僚の技術系教官が「千倍は理解できますよ、しかし、 10^{20} 倍なんて到底受け入れがたい」と、この段階で拒絶反応を示しました。そこで、私も考えて次のようなアナロジーと相似性の例を紹介することにしています。

ニュートンはリンゴが木から落ちるのを見て、「同じ力が地球と月の間に働いている」と考えた、と聞いています。この間の距離の違いを計算してみましょう。なんと、 10^{13} 倍違うではないですか。阪大の初代総長・長岡半太郎は原子の土星モデルを提案しました。これは、力が異なりますが、例として出させていただきます。少し脱線するかもしれませんが、これなど、イメージーションが理屈もスケールも

超越して真実に迫る良い例ではないでしょうか。

実際、現在、ダーク・マターと言って皆が騒いでいる物質。何故必要か、の大きな理由に、これなしでは銀河の回転速度の分布が説明できないことが挙げられています。それほど、銀河の端の星は速い速度で回転しており、ダーク・マターで中心に引っ張ってくれなければ、ばらばらになってしまうからです。しかし、ここで、待ってくださいよ。「10万光年もある銀河に働く重力が地球と太陽の間に働く重力と同じ」である保証はどこにあるのでしょうか。この間のスケールの違いも 10^{13} 倍です。このように考えていくと、我々は巨大なスケールの変換を自然に受け入れているのではないのでしょうか。

「相似性」の一番分かりやすい例が超新星爆発による爆風波の伝播です。星（ただし、単独星の場合）の一生は生まれる時の質量でほぼ決まります。太陽質量の6-8倍以上の星は中心の元素を燃え尽くし、最後には、鉄のコアを形成します。これが、吸熱反応し重力崩壊する。その時、 10^{51} エルグという爆発のエネルギーを生み出すのです。これが超新星爆発です。現在、年間100個ぐらいの爆発が観測されています。

爆発後、イジェクタと呼ばれる星からの放出物質は、周りの物質をかき集め、約500年後には球状の爆風波となります。この球状の衝撃波は宇宙空間物質を加熱し、X線を放出します。これが格好のX線天文学のターゲットになるのです。なぜなら、ヘリウムより重い元素は全て大質量星内部で核合成され、超新星爆発により宇宙空間にばら撒かれるのです。我々の体だって、かつての超新星爆発の名残で出来ているのです。

かように重要な超新星の残骸の情報をX線で観測しても、元素の割合などに結び付けるには、すこし、複雑な物理が介在します。つまり、爆風波の後面は何千年経ってもまだ熱平衡状態に無く、電離が進行しているプラズマなのです。ですから、電離、励起などの係数を取り込んだ、いわゆる原子過程の時間発展をシミュレーションする必要があります。そこで、問題なのは「このシミュレーションは正しいのか」という疑問です。

爆風波の相似解を用いた詳しい計算は省略しますが(詳しくは[10])、粒子密度は宇宙空間が 1cm^{-3} 程度。例えば百分の1気圧(10^{17}cm^{-3})の容器の中央に小さい固体物質を置き、これに、10kJのエネルギーを瞬時にレーザーで与えると、爆風波が形成されます。超新星爆発から千年も経った爆風波の温度は、実験室内で1cmに広がった、爆発から3ナノ秒経過した爆風波と一致します。つまり、時間空間を 10^{20} 倍相似変換するのです。この場合、衝突電離の程度を示す密度と時間の積($\rho \cdot t = \text{nt}$)も同じ値になることが分かります。詳しい計算によると、流体現象と非平衡電離過程を同時にスケール・ダウンして模擬実験できるのです。容器内のガスに不純物を混ぜ、レーザー爆風波で電離させたプラズマからX線を観測し、先ほどのコードを検証すればいいのです。

このような実験であれば何も高価なレーザーを用いずとも、高性能火薬(HE: High Explosive)を用いて爆風波を作ればよい、と米国やロシアの研究者などはすぐ考える(日本の研究者は驚きますが)、所が、化学反応は一原子当たり高々eV程度のエネルギーしか発生しない。これでは、電離を起こすような衝撃波は作れない。また、衝撃波管などを用いても同様です。電離を起こすほどに高温度でかつ高密度なプラズマを実験室に生成するのはレーザー以外に無いのです。ただし、イオンビームによる加熱などの研究が進んでいることは付記しておきます。

爆風波と同様の議論は宇宙の現象でどんな物理が支配的かを考えることにより展開することが出来ます。他の例として、強い衝撃波（マッハ数が 10 以上）と物質の相互作用の物理。これは、超新星残骸と分子雲の相互作用でどのような密度の塊が出来るか、渦の発生と非線形段階での構造学的な興味などにつながる [11]

宇宙ジェットもその対象の一つ。宇宙には色々なスケールのジェットがある。まず、星形成段階で回転する原始星の極軸上に形成される双極ジェット。速度が数 100km/s で宇宙空間に伸びる、ハービック・ハロー(HH)・ジェットと呼ばれる。皆さんはハッブル宇宙望遠鏡のきれいな映像でお馴染みでしょう。その伝播のメカニズムで、輻射冷却時間と音速で太くなる時間の比をパラメータとし、これを宇宙の場合と同じ値にして伝播機構を実験的に探ることがすでに行われている [12]。今は、後で触れる、電子・陽電子プラズマの相対論ジェットの考察に進んでいる。

輻射流体力学もその良い例です。銀河の形成初期は巨大で密度が薄く、円筒密度（半径・密度積）がせいぜい g/cm^2 から mg/cm^2 の物質中の輻射輸送が問題となる。これなど、レーザー爆縮プラズマで $1-100mg/cm^2$ の円筒密度のコアプラズマが実現しており、その中での輻射輸送、それをを用いた X 線計測などと共通の問題です。

2.3 類似性(Resemblance)

講演では時々、息子と私がボートをこいでいる昔のツー・ショットを見せて「親の性格など知りたければ子供を観測すればなんとなく分かる。共に同じ遺伝子で繋がった似もの同士だから」と喋る。人を食ったような話ではあるが、ソウルで昨年 5 月開催されたブラック・ホールの国際会議では大変好評でした。恥ずかしながら、です。

「類似性」の例はごまんとある。ここでは、現在、私たちが着手している研究についてのみ紹介しよう。「類似性」とは「相似性」にまだ成りきっていない段階での似た物理を示す。ただ似ているので研究しているといっても、宇宙の理解にどこまで役に立つか疑問です。従って、以下の話題もレーザー実験を提案する段階で、相似性の視点を明らかにしなければ模擬実験にはならない。

超高強度レーザーで陽電子が生成できた。実験値を用いて計算してみると、この陽電子と電子からなる電子・陽電子プラズマは、そのサイズがデバイ長と同程度でまだプラズマと言いがたい。しかし、将来、ターゲット形状の最適化やレーザー強度の向上で、いつか、「プラズマ」と呼べる電子・陽電子群を生成できるだろう。そうすると、今話題のガンマ線バーストの中心エンジンである相対論的電子・陽電子プラズマのミニチュアを実験室につくり、例えば物質との相互作用の研究ができる。また、ターゲット形状を工夫し、先の天体ジェットの代わりに相対論的電子・陽電子ジェットを生成すれば、活動銀河核から放出されている宇宙ジェットの模擬実験が出来るであろう。夢は広がる。

もう一つ触れておきたい。現在、「宇宙における X 線レーザーの可能性」について理論研究を進めている [13]。宇宙からのレーザーはオリオン星雲で 68 年に観測され、さらに、M106(NGC4258)に代表される活動銀河核からの巨大なレーザーも見つかっている。レーザー現象も僅かであるが観測されている。すると、当然、X 線レーザーである。X 線衛星「あすか」や「Chandra」が、コンパクト星（ブラックホ

ールや中性子星)の伴星が前者からのX線で光電離していることを突き止めている。この光電離プラズマの性質を理論的に研究し、反転分布が光励起により発生する条件を調べている。将来、X線観測装置の空間分解能が上がり、ブラックホールとおぼしき天体の周りから、異常に強い輝線のX線が観測するのを楽しみに、研究を続けている。

3. 経緯・背景と展望

レーザー天体物理という新分野開拓の背景を簡単に説明したい。87年2月に爆発が観測された超新星(SN1987A)についてはご存知の方が多いと思う。近代的観測装置の揃った時点で、400年振りに、ごく近い場所(僅か16万光年の距離)で爆発があった。この爆発の観測で得られた顕著な成果は、私の理解では3つである。1つは超新星爆発の重力崩壊理論が検証されたこと。2つ目は、神岡の純粹タンクに12個のニュートリノが観測され、「ニュートリノ天文学」が誕生し、今日のニュートリノ振動の引き金となったこと。3つ目は、超新星は球対称には爆発せず、流体不安定で内層と外層がかき混ぜられながら爆発していること。

第3点に関し、東大天文の野本教授から電話で「一緒に研究しましょう」と誘われた。レーザー爆縮における流体不安定の研究を、爆発の2年程前、東大で講演したのがきっかけである。そして、野本さんが代表者の重点領域研究の分担者として研究会に出るたびに「宇宙物理とレーザー核融合物理の共通性、類似性」を発見しては感激した。爆発から6-8年経つうちに、宇宙物理の友人も増え、皆で、レーザーの議論などもするうちに「レーザーで天体の模擬実験をしてみてもどうか」という発想に辿り着いた。

一方、6-7年程前から、私は、レーザー核融合が米仏の最先端国では「SBSS」(Science Based Stockpile Stewardship)を主目的にDefense Program(兵器研究)として推進されていることに確信を持つようになった。つまり、地下核実験が出来なくなった代わりに、巨大なレーザーで、核爆発を、まさに、相似変換した(この場合のスケール変換はわずか100倍)実験を行い、3次元のコードをチェック。そのコードで、核兵器の維持管理をしようというものである[14]。国連であれほどCTBT(包括的核実験禁止条約)の批准に反対していたフランスが96年にすんなりサインしたことに驚いたが、同じ頃、仏の巨大レーザー建設計画[15]の発表を聞いて納得した。

このような、レーザー核融合を取り巻く世界情勢。加えて、90年代にクローズ・アップされてきた環境問題。さらに、核融合研究への学术界や社会からの期待感の薄れ。それらから来る研究に対する閉塞感にも近いものを私は感じつつ、発想の転換を図ろうとした。そして、レーザーを単に核融合用の加熱や爆縮の道具ではなく、新しい科学を切り開く先端科学の駆動力と認識を改めることにより、新分野創生が出来ないかと考えてきたのです。

このような考えを好意的に支えてくれた宇宙物理の友人達、そして、米国で実験を始めてくれた友人達。彼等に支えられながら、くじけそうになる気持ちを鼓舞しつつ今日まで来たというのが正直なところです。国内での理論研究の体制は何とか整いつつありますが、実験組織をどのように立ち上げるか。また、何も既存の装置に割り込む必要もないのですから、魅力を訴え、支援して下さる基金を探していく。これも、これからの大きな課題であり、同時に楽しみでもあります。鳥井弘之さんの言葉を借りれば[16]「かつて加速器は高エネ研にしかなかった。それが今では西播磨にもどこにも、という時代になっている。大出力レーザーの場合、同じ事が起こらないと誰が断言できますか」。皆さんが少しでも興味を抱

いていただきましたら、何かの機会にご支援願えれば幸いです。

昨年、米国物理学会でフェローの称号を授与されました。授与の理由は2つあります。1つは、「『高部の公式』とよばれるアブレーション・フロントの流体不安定の成長率を理論的に明らかにしたこと」。2つ目は「レーザー天体物理という新分野開拓の先導者としての先見性に対して」でした。米国の友人や日本の天文、プラズマの友人が推薦してくださり授与されたものです。2番目の授与理由を私は大変気に入っています。授与に恥じないように国内での組織化、予算化を天体・プラズマ・レーザーなどの友人達と協議しながら進めたいと考えています。

ある宇宙物理の大家の本に「宇宙物理とはなにか」について記述がありました。確か、「宇宙物理とは地上で実証された物理を用いて宇宙の現象解明を行う学問である」と、書いていたように記憶しています。地上での実験と宇宙をつなぐもの。それは、今まで学んできた知識だけではなく、それに立脚したイマジネーションです。パリのセーヌ川沿いの露店で20年ほど前買った絵はがきを、講演でよく使います。それが図-1です。この欄を読んで頂いた読者の皆さんのイマジネーションの世界が広がることを願いつつ、筆を置きます。

謝辞

本原稿の執筆をお勧め下さった三浦登先生（東大・物性研）に感謝します。また、そのきっかけを作って下さり、加えて、表題を与えて下さった宅間宏先生に感謝します。

（アインシュタインの写真有り）

参考文献

- [1] 会議の Web-site; <http://euroconferences.obspm.fr/anglais/>
- [2] 宅間宏、固体物理、**36**, 168 (2001).
- [3] G. Mourou et al (畦地訳)、パリテイ、2月号、p. 17 (1999).
- [4] 高部英明、パリテイ、12月号、p. 68 (2000).
- [5] L. B. Da Silva et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 483 (1997).
- [6] F. J. D. Serduke et al., J. Quantum Spectroscop. Radiat. Transfer **65**, 527 (2000)
- [7] F. J. Rogers and C. A. Iglesias, Science **263**, 50 (1994).
- [8] 西村博明、プラズマ・核融合学会誌 **74**, 1259 (1998).
- [9] 高部英明、プラズマ・核融合学会誌 **75**, 1145 (1999).
- [10] 高部英明、数理科学、1月号、p. 36 (1999).
- [11] R. Klein et al., Astrophys. J. Suppl. Series **127**, 379 (2000).
- [12] K. Shigemori et al, Phys. Rev. E **62**, 8838 (2000).
- [13] 高部英明・森田恭代、プラズマ・核融合学会誌、5月号、p. 441, **77** (2001).
- [14] 米国の巨大レーザー "NIF" のWeb-site; <http://www.llnl.gov/nif/>
- [15] R. Pellat, "Ignition: a dual challenge", p. 3 in "IFSA99" edited by C. Labaraune et al, (Elsiver, Paris, 2000).
- [16] 鳥井弘之、「阪大レーザー研・参与会」(01年2月19日)「発言録」より。