



内外情報

■会議報告

高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理 第2回国際ワークショップ (Tucson, Arizona, March 19-21, 1998)

高部英明 (大阪大学レーザー核融合研究センター)

Heaven (天) は、何も特定の分野の専有物ではない。古代においては、星の動きを知ることは天の意志を知ることであったし、近代科学は惑星の運動の解明から生まれ、今日の科学への飛躍の先駆けとなった。物理を研究するとは最終的に宇宙の成り立ちを理解することに帰結していくと考えてもそんなに不自然ではないだろう。

「天」の研究のあり方も他の科学分野の発展と無関係ではなく、時代とともに変化してきた。最近では、CCD カメラの技術進歩や人工衛星搭載の望遠鏡などのお蔭で、宇宙の詳細が解明されつつある。これだけ観測が進歩すると、1枚の写真を手に「これはどうで、こうなっていて、だからこうで、ああなんです」といったシナリオだけの物理では説得力を持たない。そこで、今や高度なシミュレーションを駆使して、宇宙の大構造から星の形成まで、あらゆることを数値実験で実証しようとしている。

一方、レーザー核融合研究も成熟期を迎え、高エネルギー密度プラズマの基礎実験から総合実験まで幅広い研究が進められている。そして、その解析には圧縮性流体、輻射流体、非平衡原子過程云々と、天体物理と同じキーワードを持つ高度な物理研究が要求されている。このような状況下、高強度レーザーをむしろ積極的に宇宙物理解明に活用すれば宇宙と核融合がともに利益を享受する新たな関係が生まれるとの認識が広がり、標記のワークショップが人々の関心を引くようになってきた。

会議は3月19日から21日まで、米国アリゾナのツーソンで開催された。リバモア研究所の B. Remington が3年前、超新星爆発の流体不安定とレーザー爆縮の不安定の相似性にいたく感心し、さっそく NOVA レーザーで模擬実験を行い、同時に、第1回のワークショップを2年前に開催した。その時は、発表も32件で天体関係の出席が11件であったのに比べ、今回は120人の参加、112件の発表、宇宙研究者の発表40件で、13ヶ国からの参加者

があった。第1回の参加者で「なぜレーザーで宇宙物理なのか」と懐疑的であったメリーランド大学の J. Stone など、今や、レーザーこそ面白いと、積極的に加わっている。

会議は異なる2分野の研究者の集まりとあって、この状況を十分理解し専門用語の使用をさけた第1原理からの説明を求める、との主催者よりの注文付きの会議であった。私にとっては、最新の話題吸収と、改めて天体物理の重要課題の勉強、と楽しい参加となった。2日半の会議で、計5セッション。以下のように各セッションごとにレビュー(40分)を設け平均8件のオーラル(20分)と続いた。ポスターでは70件の発表があった。セッション名とレビューのタイトルからポイントがつかめると思うので以下に記す。

1. Supernovae, Supernova Remnants, and Burn
Dave Arnett (Univ. Arizona) "Review of hydrodynamic mixing in astrophysics"
2. Supernovae, Supernova Remnants, and Hydrodynamics
Hideaki Takabe (Osaka Univ.) "Review of astrophysics with intense lasers"
3. Relativistic Plasmas
Eli Waxman (Ins. Advanced Study) "Review of gamma-ray bursts, afterglow, high energy cosmic-rays, and neutrinos"
4. Radiative Shocks
John Raymond (Harvard Center for Astrophysics) "Review of shocks in astrophysics"
5. Opacities, Equation of State
Don Lamb (Univ. Chicago) "Review of emerging models of x-ray bursts"

口頭発表の半分は天体物理研究者による最新の話題提供で、あとの半分がレーザープラズマ研究者による模擬実験などの発表であった。互いに接点を見いだそうという努力が感じられた。つまり、宇宙物理からは「こんな問題を解明したいと思うが、ここがクリティカルでレーザーを用いてその基礎過程が調べられないか」といったものや、「高強度レーザーを用いるとこんな極限プラズマが作られる。これと類することが宇宙でみられるはず

内外情報

だ」といったものである。

まだ、距離はあるものの、将来の可能性を信じ、互いに「近づこう」と積極的に努力する姿勢が感じられた。これは、第1回の雰囲気と大いに違うところではあるまいか。とくに、米国ではアリゾナ大学、ライス大学、メリーランド大学など、天文分野で実験室宇宙物理に真剣に取り組む組織が形成されてきており、これがリバモア研究所と共同で人材豊かに強力に進めつつある様子が印象的であった。新しいことにすばやく対応し、それを、第一級の研究者が推進する様子は、とかく石橋をたたいて渡る式の国民性には大いに学ぶべし、と感心させられた。

以下に会議内容を私なりに分類して報告する。

1. Astrophysics

1.1 Supernova Explosions

超新星内での核合成のシミュレーションでは、対流によるマクロな混合と拡散によるミクロな混合が重要となる。超新星のように短時間に現象が進む場合、混合距離理論のような均一モデルは適用できず、多次元シミュレーションを行う必要がある。しかし、薄い核燃焼波面を数値的に追いかける困難さがあり計算手法により結果が変わってしまう。輻射熱輸送とも絡めた高度な数値計算技術が要求されている。超新星 1987A の放出物質が 1.3 光年隔てて取り囲むリング物質と衝突し始めている。すでに、衝突部では光度が 2 倍に増大しており今後 10 年間で赤外から X 線まで 3 桁近い増光が期待される。この流体、原子過程の研究がハッブル宇宙望遠鏡 (HST) や ASCA などの観測データ説明に必要な。

1.2 Shock Interactions

超新星爆発により星間物質が刺激され星の卵が生まれたりする。Cygnus Loop には超新星による衝撃波面とその衝撃を受けたクラウドがみられる。マッハ数 10 以上の強い衝撃波が高密度部に衝突し圧縮され同時に渦が形成され乱流へと発展する。このような現象の模擬実験が提案され、三次元シミュレーションの結果が報告され、二次元と本質的に異なる結果となることが強調された。

1.3 Radiation Hydrodynamics

たとえば、HST がとらえた HH47 などの宇宙ジェットや、星がまさに生まれようとしている Eagle Nebula (ワシ星雲) などでは、輻射冷却、UV 光によるアブレーション等が重要となる。宇宙は輻射流体の世界といっても過言ではない。当然、そのシミュレーションコード開発が必要となる。流体力学 (HD)、電磁流体力学 (MHD)、輻射流体力学 (RHD) となる。HD は多くの実験や解析解

があり、航空分野で高性能計算手法が開発されてきている。MHD は数値計算例は多々あり、また解析解もいくつかある。しかしモデル実験に乏しい。RHD は解析解も数値計算例もほとんどなく、実験は皆無といってもいい。高強度レーザーを使う模擬実験の強みは高温、高密度プラズマがつかれることで、輻射流体力学の研究、コードチェックが可能となることである。ホーラム X 線を用い衝撃波を発生しジェットをつくり輻射冷却効果を調べる実験が行われようとしている。このようにして信頼性を高めたコード (ZEUS コード等) を用い HST が捕らえた Eagle Nebula を第一原理から出発して再現しようとしている。まさに 計算科学の grand challenge ではないか。

1.4 Gamma-ray Bursts

今や宇宙物理最大の関心事、 γ 線バースト。宇宙のあらゆる方向から日に 1 件はサブ MeV 領域で数ミリ秒から 1 秒続く γ 線パルス (バースト) が観測されている。1997 年 5 月観測された GRB970508 等のアフターグローのスペクトルなどから、源は宇宙論的距離 (数十億光年) にあり、2 つの中性子星が合体することにより相対論的な爆風波が形成され、電子・陽電子を多量に発生しながら、光速に近い速度で膨張する。このとき放出される γ 線がバーストとなり観測される。いわゆる、fireball (火の玉) モデルではほぼ落着いた感あり。その爆発のエネルギーは 10^{52} erg 程度と評価されている。超高エネルギー宇宙線 (10^{20} eV) の起源がこの fireball 波面でのフェルミ加速で説明できる。超高強度レーザー (10^{20} W/cm²) を金の薄膜に照射し発生する電子・陽電子プラズマの膨張波面のエネルギー密度が fireball 波面の値と一致する。そこで、波面を低密度物質に衝突させ発生する γ 線や X 線を調べることにより、fireball の素過程が研究できる。また、ここに磁場を印加することにより相対論的無衝突衝撃波の実験が可能となる。

1.5 X-ray bursts, NOVA explosions

連星の 1 つが中性子星 (NS) で伴星からの水素、ヘリウムが堆積し、その底部で核反応が起こると X 線バーストとして観測される。バーストは 1 秒程続き、そのエネルギーは 10^{39} erg 程度である。バーストは $10^3 - 10^6$ 秒間隔で繰り返される。磁場が強いと核反応が抑制されると思われてきていたが、2 年前に強磁場 NS からバーストが観測され、強磁場下での核燃焼理論に修正が求められている。星が白色矮星の場合、同様の機構による核暴走は新星爆発として観測される。輝きも 1 年程度続き、 10^{45} erg ものエネルギーが放出される。新星爆発のコー

ドはレーザー爆縮コードによく似ている。堆積部の底部は 30 keV 程度に達し、輻射流体力学が重要となり、その光度曲線はオパシテイ等に敏感である。

1.6 Solar Model

太陽は詳細な状態方程式研究の良い実験室である。太陽地震学 (helioseismology) により太陽の内部の音速分布は正確にわかっている。高温、高密度状態を記述する理論モデルのチェックができる。OPAL コードはオパシテイだけでなく、それに矛盾しない熱力学量も与えてくれる。ヘリウムの電離などが実効的な比熱比を小さくする。太陽地震学で得られた音速分布はこのコードで 1% 以下の精度で再現できる。

2. Laser Model Experiments

2.1 Nonlinear QED

超高強度レーザーを SLAC で加速した 47 GeV の電子ビームと衝突させ、逆コンプトン散乱により 2.35 eV のレーザー光子を 30 GeV のガンマ線に変換し、同時にこのガンマ線と 4 個以上のレーザー光子を衝突させ、多光子過程で光から電子・陽電子対生成を行う実験である。10¹⁸ W/cm² に絞られた 0.53 μm 光は単位体積あたり 10²⁸/cm³ の光子が密集する。実験では、10⁷ の散乱を観測し、69 ± 6 個の陽電子を検出した。陽電子発生率はレーザー強度の 5.2 乗に比例して増大する。たぶん、このような非線型量子電気力学 (QED) 効果は活動銀河核 (AGN) や、先に触れた fireball で重要となるのではあるまいか。

超高強度レーザー照射下のプラズマからの共鳴線を観測すると、レーザー光子のエネルギーだけシフトした衛星線が共鳴線の両脇に見られる。これは、共鳴線の上準位と下準位にバーチャルな準位ができることによる。綺麗な実験結果が報告された。

2.2 Opacities

変光星の振動解析や新星爆発の光度曲線解析に威力を発揮した OPAL オパシテイコードに代表されるように、オパシテイの詳細コードは輻射流体現象研究に不可欠である。高強度レーザーを使うことにより高温かつ高密度の部分電離プラズマを作ることができる。これに計測用 X 線を照射し、その透過率評価よりオパシテイが実験的に測れる。米、仏、独、英で実験、コード比較が行われている。我が国でも、核融合、宇宙分野の基礎体力向上のため、実験と同時に、多電子原子物理および統計力学の専門家による国際オパシテイ研究集団への参加が急がれる。

超新星爆発や星風では、ドップラーシフト (場所によりシフト量が異なる) する共鳴線のエネルギー輸送が本質的となる。レーザーをアルミのファイバに照射し同様の状況を再現し、共鳴線のライン構造の詳細が調べられている。これを、非平衡原子過程を含む流体コードと対比し、escape factor モデルのチェックが行われている。

2.3 Radiative Properties

NIF レーザー点火燃焼実験では、密度 500 g/cm³、温度 25 keV 程度のプラズマが期待できる。これをコンプトン散乱の実験に使えないか。DT にクリプトンを 0.1% 混ぜそのラインが散乱で広がる効果をみるという提案があった。レーザー生成 X 線で低密度フォーム (発砲プラスチック) を加熱、条件により超音速輻射熱伝導波を発生可能である。温度、密度分布を計測し、コードと比較し、電離やオパシテイのモデリングを調べている。

2.4 Hydrodynamic Instabilities

超新星 1987A の爆発が教えたことは、流体力学不安定による物質混合の重要さであった。レーザー爆縮も同様である。非線型 Richtmyer-Meshkov (RM), Rayleigh-Taylor (RT) 不安定の理論、実験研究がレーザーや衝撃波管、はたまたリニアモーター装置を用いて進められている。単一モードの時間発展や多モードの場合の乱流への発展。理論もかなり出尽くした感あり。Bubble/spike の発展はこうなり云々の議論は「もはや幼稚である」との Zabusky 先生のコメントが印象的であった。超新星 1987A の RT 非線型発展でもいまだ膨張先端部の ⁵⁶Co の速度が二次元シミュレーションでは説明できていない。三次元性が重要な要素である。

2.5 Equation of State

水素の高密度下での金属相転移は木星内部や褐色矮星研究の面白みの一つである。レーザー核融合に関連しては爆縮燃料の状態方程式は当然重要である。固化重水素中を伝搬するレーザー駆動衝撃波を捉え衝撃波曲線を求める。温度 1 eV 近辺で従来の予想より圧縮性が高い (圧縮しやすい) ことがわかっているが、それを確認する一連の実験がなされた。新たに、計測レーザーの反射実験 (衝撃波面からの) も加え、前回のデータが正しいことを確認した。得られたユゴニオ曲線が Ross の提案する "linear mixing model" によく合うことが確認された。

3. ASCI (Accelerating Strategic Computing Initiative)

レーザー核融合や宇宙物理研究には三次元の輻射流体コード開発が求められる。基礎科学研究のための高度な

内外情報

シミュレーション技術や複雑なコードの開発は世界中どこにおいても defense program と無縁である、と言い切れば嘘になる。コンピュータの誕生からして暗号解読、マンハッタン計画と繋がる。米国は「国防の国」であり(あったため?)、この傾向はとくに強い。我々は、我々の確とした論理を構築し、それに従って複雑なコード開発に従事していく必要があり、また、それなしでは、将来の研究発展は阻害されると考えている。

会議では ASCI program に新たに加わった "ASCI Academic Strategic Alliances Program Centers of Excellence" の 5 研究機関の 1 つ、シカゴ大学の "Astrophysical Thermonuclear Flashes" グループの報告があった。5 機関へは 5 年でそれぞれ 2 千万ドルの予算がコード開発のため投入されている。シカゴのグループは 30 人の研究者を抱え、"ASTRO-3D" というコード開発をしており、その内容たるや、到底、レーザー研規模の組織では及びもつかない内容であった。リバモアのレーザー核融合統合コード開発チームといい、たとえ、実験や観測データを日本が持っていたとしても、将来的には総合的な解析はすべて米国でやられてしまうのではないかと、危機感を抱いた。何とか宇宙や航空の分野と連合で統合コードを開発していかないと、鑑賞に耐えるシミュレーション結果を発表できない時代が近づいていると、ひしひし感じた次第である。

会議中に得た情報としては

- (1) あの Rochester 大学も実験室宇宙物理研究に乗り出す。すでに、リバモア等のグループから共同実験の提案が出されている。FY99 年は 15 件の実験テーマの内 3 件が実験室宇宙物理関連テーマとか。
- (2) NIF (National Ignition Facility) は 8 ビーム、30 kJ が 2003 年、192 ビーム、1.8 MJ が 2005 年稼働予定。2 年ほど計画が遅れているようだ。
- (3) NIF (12 億ドルのプロジェクト) は、single shot laser としては最後のレーザーになるだろう、とは M. Campbell 副所長の言。NIF レーザーによる "maximum credible DT fusion energy" は 45

MJ. 20 MJ 高利得実験を年 50 ショット。基礎実験を含め年、千ショット行う。その 25% を大学との共同実験とする。

- (4) 仏、メガジュールレーザーも、基礎科学への応用を考える。実験室宇宙物理がやはりその目玉。

今回の会議、まだ模擬実験のデータは十分出そろわなかったものの、気分の盛り上げが第一義であった。なお、会議の proceedings は Astrophysical Journal Supplement の特集号として出版される。次回は 2 年後、西暦 2000 年の 3 月、ライス大学 (Prof. Edison Liang) が主催する。かなりの件数の実験やシミュレーションの結果が出てくると期待している。

Banquet speech は宇宙の泡構造を見つけたハーバード大学の Margaret Geller であった。何年も論文 1 本書かず、千以上の銀河のデータを整理し、宇宙の大規模構造を意に反して見つけてしまったというエピソードから想像される人物とは異なり、明るく、よく喋るのには感心した。ツビッキーの個性豊かな顔写真から話が始まり、最新の deep sky survey の話と、楽しませてくれた。

最後に、上記紹介した内容に関連した最新のわかりやすい文献を参考に記す。

- [1] Physics Today, January, 1998: (p. 22: Ultra-intense lasers, p. 31: The highest-energy cosmic rays)
- [2] Physics Today, February, 1998: (p. 17: Nonlinear QED, p. 26: Gamma-ray burst, p. 61: Deep sky survey)
- [3] Science, Vol. **276**, 1997, pp. 1350-1391, 特集 "Stellar Birth and Death".
- [4] ハッブル宇宙望遠鏡の成果は Web の <http://oposite.stsci.edu/> や「ハッブル望遠鏡が見た宇宙」(野本陽代, ウィリアムス著, 岩波新書 499, 1997 年刊)
- [5] ASCI の詳細は Web の <http://www.sandia.gov/ASCI/>
- [6] NIF の詳細は Web の <http://www.dp.doe.gov/ifnif/icf.htm>
- [7] NIF による科学研究紹介 (宇宙物理含む) http://www.llnl.gov/science_on_lasers/
(1998 年 4 月 21 日受理)