

T³ レーザーによる「実験天文学」への挑戦

田 島 俊 樹

〈テキサス大学物理；原研先端基礎センター〉

e-mail:ttt@dino.ph.utexas.edu

卓上テラワット (10^{12} W) レーザー (略して T³ レーザー) が 1990 年代になって出現し、従来地上の実験室では実現されると考えられなかった天文学的物理条件が実験的に作り得るという状況が生まれ、白色矮星の内部のような超高圧物質とか宇宙初期やブラックホール近傍のプラズマの研究など新局面を紹介する。

1. T³ レーザーとは？

1990 年代になって急速に進歩したレーザー科学技術の結果、卓上型でもテラワット (10^{12} W) 以上のパワーが出せるレーザーが出現し、これを愛称して T³ (Table-top terawatt) レーザーと言うようになった。レーザーのピークパワーは、核融合レーザーなどの開発にもかかわらず、1970 年頃より 20 年間に渡って停滞していたが、一つには CPA (共鳴パルス増巾) 法という、大空間に拡げて増巾する従来形に対して大時間に拡げて増巾する方法の発明と、二つには高飽和固体素子 (例えばチタンサファイア) の発見開発とを待って、最近革命的進展を見せこの数年で数桁の飛躍が起こっている。

CPA 法によると、レーザーは従来の大レーザーと較べて高エネルギーでないにせよ、レーザーのパルスが著しく極短化する為に以下のような顕著な性能を持つに至る。

- 1) 短パルス性。レーザーパルス長がフェムト秒 (10^{-15} sec) で測る程度 (10^{-14} から 10^{-13} 秒) に時間的圧縮を受けられる様になり、「超高速光学」の出現を見るに至っている。この時間は原子的 (或いは量子的) 時間、即ち電子が原子を徘徊する時間の程度である。
- 2) 超大強度。レーザーエネルギーはさほどでないが、上記のパルス長が極端に短いので、パ

ワーがテラワットを軽く越え最近ではペタ (10^{15}) ワットに肉薄している。又集光性も良いのでレーザー強度は著しく 10^{18} から 10^{23} W/cm² が可能である。この強度に対応する光の電場は 10^{11} から 10^{13} V/cm の程度で、原子内電場をはるかに凌ぐようになる。

- 3) 広帯域。レーザーパルスが短い為にスペクトルの巾が極めて広く可視領域を広くまたぐ事も可能で色々の相互作用に使える。
- 4) 小型で安価。空間拡張増巾を行わない原理の為に増巾素子が小型で従って安価になり、卓上型で上記の著しい性能が可能になり、一研究室単位の実験も可能にしている。
- 5) 高繰返し。小型素子なので増巾に伴う冷却が容易で、数時間に一発といった大レーザー操作と比し、一秒に数十～千発といった頻度の操作が可能であり、精密実験にも向く。

T³ レーザーは、以上の五大性能のどれか一つが達成されていると言うのではなく、全五性能が同時に実現されている点が大切である。上に略記した様に、いくつかの物理量において数桁の飛躍を見せるレーザーが、新しい領域の物理、極限物性の世界を大きく押し広げる事は明白である。五大性能に依拠した様々な魅惑あふれ胸おどるような応用が多々あるが、幸い、最近世界に先駆け日本で宅間教授を座長とした「光量子懇談会」の報告

子とイオンは数 eV の比較的低温のプラズマを作り、プラズマは元の固体表面を“きれい”に保ったままである。一方高強度でかなり（或いは殆ど全て）の電子が光でイオン化するので、固体表面での電子プラズマ密度は 10^{23} とか $10^{24}/\text{cc}$ といった高密になっている。どの位の光子エネルギーが固体表面のプラズマに入るかは、固体の物性、光の諸元によって違い、諸々のシナリオが作りうる。例えば、数 eV よりも高温にする事も可能であろう。前節で述べたような超高光圧をうまく利用して、より高密にできるかどうか、未詳である。

こうして作られた比較的低温の高密度プラズマは色々奇妙な性質を持っていそうである。高密低温なので、強結合プラズマと呼ばれる。図 1 には、水素の相図を示す。仮に氷化した水素の固体に T^3 レーザーを短時間照射したと考えると、電子温度のみが急に一定の温度（シナリオによる）にまで上昇するが、プラズマの密度はこの間一定である。1 ピコ秒位からプラズマは流体力学的に電子の圧力で膨張をはじめ、より低密、低温へと変動して

行く。広い矢印でこの過程を示した。この相図にあるように、この一連の過程で通過する内には、木星の水素状態とか白色矮星の水素状態もあり得そうである。以上は光圧によって何の圧縮もしない実験の場合であるが、もし利口な方法で圧縮も可能だとしたら、上記の広い矢印が経めぐる相図の領域とは違う領域も到達可能かも知れない。これには将来研究を要しよう。非常に高密になると（例えば質量密度 10 g/cc 程度）、熱核融合とは違い密度核融合と言われる過程が起ると考えられる。この過程は超新星生成に必要と考えられているもので、その実験室的検証が出来うるだろうか？（一方、レーザー核融合での熱核融合過程が枠外の斜線 ICF と示してある）。

水素以外の物質、例えば炭素とか珪素への照射も天文学的意義が多いと考えられる。例えば炭素液化、その金属性の有無など惑星や星の内部の物理状態、ダイナモなどにも関連しよう。更に金属物質と T^3 レーザーの相互作用も重要であろう。図 2 には鉄の相図を掲げる。鉄は進化を遂げた星の

内部や地球内部にふんだんにある物質で超新星や宇宙進化にとって重要な物質だ。再び単純に鉄の表面を T^3 レーザーで短時照射した場合のシナリオを広い矢印で示してみた。もし多量の光子を注入し得、かなりの高温到達が出来たとすると、陽電子・電子対生成の領域まで踏み込めるかもしれない。こうした物性研究²⁾ が天文研究の一翼になって行くだろうか？

こうした物質の状態診断は、時間が短いと言う事などで多難であろう。高速の X 線や可視光による診断技術の発展が必要となる。

比較的簡単なレーザーの物質照射のもう一例としては、金属などの固体クラスター照射（とか気

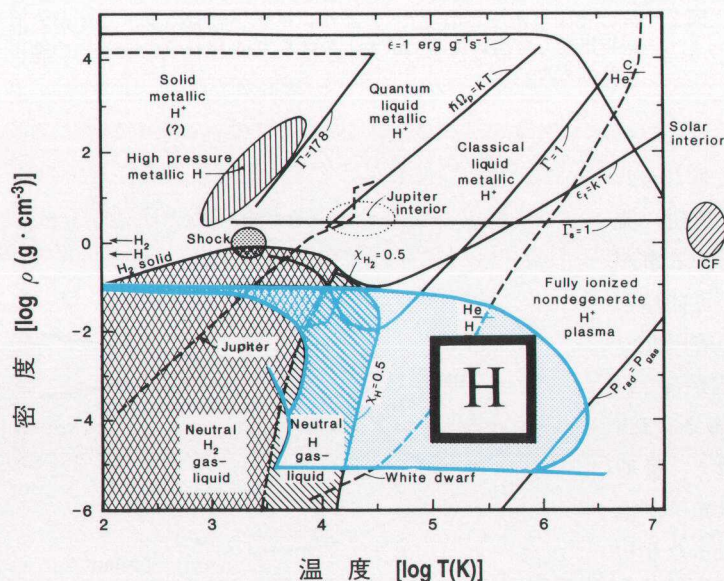


図 1 水素の相図（密度と温度）。H.van Horn (Science 誌) の図に手を加えた。左手中央の固体条件から出発したレーザー照射のシナリオが広い矢印で示してある。

体・液体クラスター照射)がある。宇宙にはよく見えないが多量の微粒子があると考えられている。有名な炭素サッカーボールも最初は宇宙から発見されている。有名な川畑・久保理論にあるように、ナノクラスターは電磁波に対してプラズマ異常吸収を起こす。一方、クラスターは一般に冷たく適当に荷電化している事が多いので(強結合した)プラズマとして存在する事も多い。更に、こうしたクラスターに強いレーザー場を加えると、異常に強いレーザー吸収と輝度の高いX線放射を行うことも最近わかって来た³⁾。これらは、クラスターという一塊の物質がとりわけ強くレーザー場と相互作用する事を示している。これは、手ごろの塊が電子の集団相互作用を極端化したりする為であろうが、素過程はわかっていない。

最後に、ブラックホール近傍の高温プラズマの話を推測まじりに語って見よう。ブラックホールの事象水平線から3倍の R_s (シュワルツシルド半径)以内は、軌道不安定性の為に一般には物質はこの空間に安定に存在しえないと信じられているが、流体としてのプラズマには(電磁)流体的平衡解として一定の物質が存在しえる事が我々の研究からわかって来ている⁴⁾。一可能性として、図3に示すような事象水平線と降着円盤ではさまれる空間に高温で薄いプラズマが広がってよい。このプラズマは非常に高温と考えられ、特に事象水平線 R_s 近くでは1 MeVを越え、量子電磁力学(QED)の海をなしそこからは光子が絶えず陽電子と電子を放出したり逆が起こったりしている境界層プラズマがあるであろう。その物質生成のエネルギーは漸近的プラズマの事象線への降下とそれに伴う磁場粘性などによっていると考え

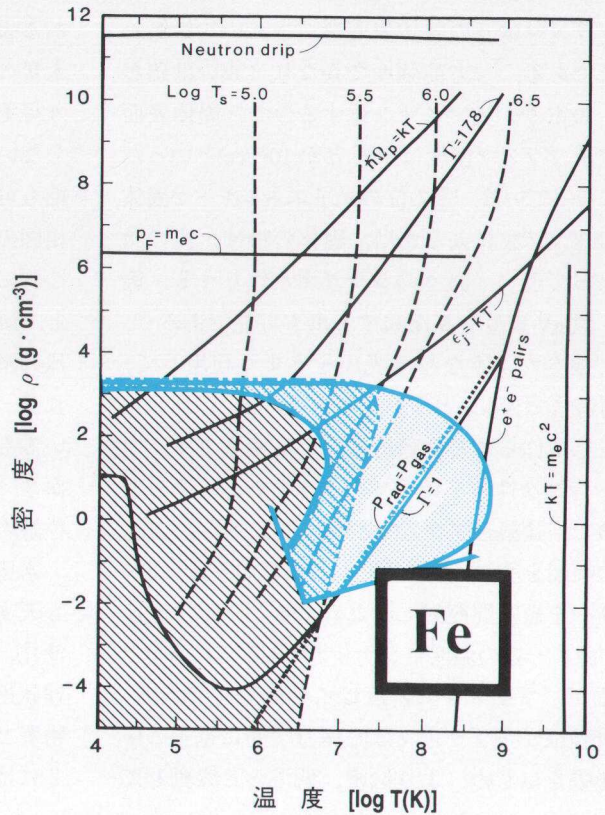


図2 鉄の相図(密度と温度)。やはりレーザー照射のシナリオが室温から出発して広い矢印で示す。やはり Van Horn (Science) の図に手を加えた。

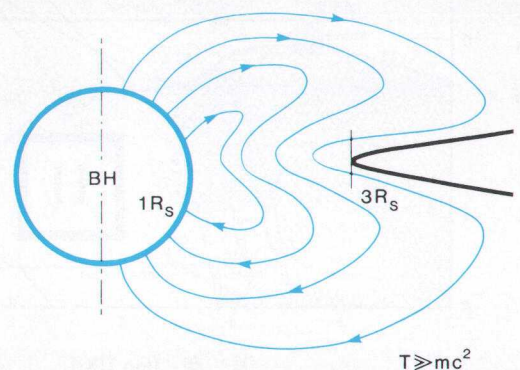


図3 ブラックホール近傍の超高温プラズマと量子電磁力学の海

られよう。このようなプラズマの物理は従来は理論のみの領域と考えられて来たが、 T^3 レーザーによる超高温プラズマはその一局面を切り口として示してくれるかもしれない。

3. 科学の横糸としての T^3 レーザー

20 世紀末を迎えて、天文学にしてみても、物理学にしてみても、又生物学でさえも、その研究の方法と装置は日一日と大がかりで専門性の高いものへの道を歩んでいるように見える。より口径の大きな望遠鏡とか、よりエネルギーの高い加速器とかである。加速器の例では、一時代前までは各国で一台かよければ数台ずつあって実験をやっていたが、今では一つの型で世界で良くて二台あればいい方である。その内それも一台しか作れなくなり、ついに零になる時代が来るのだろうか？ 又、こうした装置は数少ないのみならず、極めて複雑・大型になって来ている為に、科学に興味はあっても素人ではとてもその全容はわからず、大学院生や駆出しの研究者にとっても、その極一部が見えるに過ぎない。こうして科学はいよいよ深くなっては行くものの、各研究者はお隣の領域が益々見えなくなっていくという傾向になって来ている。ここに紹介した T^3 レーザーの発展は、ひょっとすると、こうした最近の科学分野細分化傾向に抗して、諸分野をむしろ統合するように働くかもしれないという気がする。これは、 T^3 レーザーが小型・安価であると同時に極限を色々の形で引き出せる能力を持つために、 T^3 レーザーを丁度横糸のごとくに、X線を使う生物学者がいたり、物性学者がいたり、一方小型加速器を作り核や素粒子を研究する者がいたり、上述したような天文学的極限物性を研究する者がいたりし、その皆々がかなり容易に議論ができたりするような状況が生まれるのではないだろうか？ 例えば、超短レーザーパルスによって励起される航跡場と呼ばれる電場は極めて強いために、高エネルギー粒子加速に使えそうであるが、一方同時にその強い加速場はアイ

ンシュタインの「等価原理」に基づきそれは強重力場に対応するので、例えば 10^{18} W/cm^2 のレーザーパルスによる航跡場で太陽の百万倍のブラックホールに対応する“重力場”を作り得そうである。このような強い加速場＝重力場中で光子がどう赤方偏移して観測されるか等、いわば卓上ブラックホールの天体物理実験ができるのではないか？ T^3 レーザーを介して、天文学者と物理学者、化学者、物質科学者、…と色々対話が生まれそうなのを私は想像して一人悦に入っているのである。この潜在的可能性をもって私は、 T^3 レーザーを科学のインテグレーター（横糸）と呼びたい。色々の領域の科学者が従来の垣根を越えて T^3 レーザーの開く極限物性＝実験天文学の扉を開いてほしいと思う。幸い最近、原研関西研究所が T^3 レーザーを中心に研究開発を進める事になったので、諸賢がこれを利用して諸前線を広げていただきたいと願っている。

参考文献

- 1) 光量子の高度利用に関する懇談会「報告書」(科学技術庁原子力局、平成8年)。
- 2) S. Ichimaru, 1993, Rev. Mod. Phys. 65, 255
- 3) T. Donnelly, et al., 1996, Phys. Rev. Lett. 76, 2472
- 4) G. Tarkenton and T. Tajima, to be published.

A Challenge of “Experimental Astrophysics” by T^3 Lasers

Toshiki TAJUMA

Physics Dept., University of Texas at Austin
and JAERI, ASRC

At the advent of table-top terawatt (T^3) lasers in 1990's, it has become possible to create on Earth astronomical conditions that have been thought not possible to terrestrially realize. We discuss examples of emerging possibilities such as ultrahigh pressure matter in the interior of a white dwarf and plasmas in the early Universe or in the neighborhood of a black-hole.