黎明期のレーザープラズマ相互作用研究

山中 龍彦[†]

Laser Plasma Interaction Research in Early Stage of Laser Fusion

Tatsuhiko YAMANAKA[†]

(Received November 9, 2009)

Reviewed are the laser plasma interaction researches which were performed by the author in 1970s. The anomalous absorption is discovered by irradiating 10 GW-2 ns pulse from one beam glass laser system on to the deuterium solid targets. The absorption mechanism is identified to be the parametric decay instability. Scattered light from irradiated targets was intensively studied to be found the ion acoustic wave excited parametrically, and also is found the laser beam self-focusing due to the Ponderomotive force. The anomalous transmission of laser light is observed in the polyethylene films back-coated with thin metal film when pico-seconds high intensity laser of above 10^{14} W/cm² is irradiated. This effect had triggered the fast ignition idea by me.

Key Words: Laser plasma interaction, Anomalous absorption, Scattered light from plasma, Anomalous transmission of light, Self-focusing

1. はじめに

レーザーとプラズマとの相互作用の研究は、それ自体、今まで経験することがなかった領域への取り組みであると共に1962年にN. G. Basov, O. N. Krokhin¹⁾により提案され、1963年にJ. M. Dowsonによりその可能性を定量的に取り扱われたレーザー核融合への道筋を明らかにするための第一歩である。筆者は、大学院修士課程の学生であった1964年よりレーザー核融合研究の遂行のために、高出力レーザー開発研究を進めながら、Qスイッチレーザーによる気体、固体プラズマ生成の研究を進めてきた。1969年、名古屋大学プラズマ研究所(核融合科学研究所の前身)の客員教授として同所でレーザー核融合の研究に本格的に着手されることになった山中 千代衛先生の助手としてレーザープラズマの研究を本格的に展開することになった。ここでは、大阪工業試験所、三菱電機、旭ガラス、指月電気、ウシオ電機の協力を得て1970年3月に完成させることが出来た我が国初の大出力レーザーである「激光I号」ガラスレーザー(出力50 GW, 1ビーム5段増幅)を用いて行った1970年代のレーザープラズマ相互作用研究を中心に記したい。

2. 異常吸収の発見

核融合でエネルギーを取り出すためには、1億度近い温度まで燃料を加熱する必要がある。当時、我々が持っていた知識は、レーザーによるプラズマの加熱もマイクロ波放電と同様、電磁波で振られた電子とイオンのクーロン衝突を介して起こり、吸収係数は電子温度の $-3/2$ 乗に比例して減少すると云うものであった。この吸収過程では、固体密度プラズマに於いても数100万度までの加熱がせいぜいである。そのため、当初よりプラズマの集団運動である電子プラズマ波やイオン音波との相互作用を介しての非線形加熱機構を初めとするレーザーとプラズマの非線形相互作用の理論研究が活発に行われていた。

このような状況下、我が国初の大出力ガラスレーザー「激光I号」よりの10 GW, 2 nsパルスの固体重水素ターゲット(2 mm角, 長さ ~ 10 mm)への照射実験で、1971年7月、 10^4 個のDD核融合中性子の発生に成功した。そして、中性子が発生するレーザー強度 10^{13} W/cm²以上では、電子温度 T_e のレーザー強度依存性がそれ以下での $T_e \propto P^{0.6}$ から急勾配の $T_e \propto P^{1.2}$ へと変わり、高速イオンが発生、反射率も 10^{14} W/cm²より顕著に低下することが明らかになった。これは待望されていた異常吸収の発見で

[†]大阪大学 名誉教授, 福井工業大学 (〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1)

[†]Professor Emeritus, Osaka University, Fukui University of Technology, 3-6-1 Gakuen, Fukui-shi, Fukui 910-8505

Fig.1 Irradiated laser intensity dependence of electron temperature of deuterium plasma measured by x-ray absorption method. Temperature increases with steep slope above 10^{13} W/cm². This is the first observation of anomalous absorption.

あった。また、固体重水素ターゲットでの核融合中性子の発生は、1970年に発表されたフランスのF. Floux等³⁾の成果に次ぐもので、名古屋大学のヘリウム液化装置のオーバーホール期間で液体ヘリウム陸揚所の横浜より取り寄せて実験を行っていた時であった。

この中性子の発生を伴う急激な電子温度の上昇や高エネルギーイオンの発生のはっきりした値は、西川 恭治氏の提唱した、遮断密度領域でレーザー光が電子プラズマ波とイオン音波に崩壊するパラメトリック崩壊不安定性の理論⁴⁾より求めた値と一致することが解り、これによる異常加熱であると結論、Physics Letters, 日米セミナー(京都, '72. 9), Physical Review A等⁵⁾に発表することができた。

3. 散乱光による相互作用の研究

直径1 mm以下で、かつ固体密度近傍のプラズマ中の現象は、測定器を挿入して直接測定することは困難である。それゆえ、レーザープラズマの研究はプラズマよりの散乱光や放射等を調べるパッシブな方法が常套手段として用いられていた。この散乱光の研究を通して以下のことを明らかにすることができた。

3.1 パラメトリック不安定性の検証

ガラスレーザーよりもスペクトル幅の狭いYAGレーザーを発振器として、イオン質量の異なる水素H₂、重水素D₂ターゲットを照射、遮断密度点で発生する2倍高調波域のスペクトル観測を行った。その結果、Fig. 2に示すように2倍高調波の赤方にイオン質量に関係しない電子プラズマ波によるピークとイオン質量に依存するイオン音波によるピークを観測、パラメトリック崩壊不安定性の発生を、直接、確認することができた⁶⁾。

また、YAGレーザーとスペクトル幅の広いガラス

Fig. 2 Spectrum of backscattered light around the second harmonic light when H₂ and D₂ solid targets are irradiated by the narrow band YAG laser system. Observed red shifted two peaks correspond to the modulation by the electron plasma wave and the ion acoustic wave, respectively, produced by the parametric decay instability.

レーザー発振器の両者を用いて加熱実験を行った結果、ガラスレーザーの場合の方が異常加熱の発生しきい値が低下することを見出し、イオン音波の周波数の2倍のビート周波数成分が励起光に含まれているとパラメトリック崩壊不安定性の閾値が低下するという西川氏等の“Parametric Double Resonance”の理論⁷⁾を検証することができた。

3.2 プラズマ中でのレーザー光の自己集束

誘電体中にレーザー光を集光すると3次の非線形効果による自己集束が起こることは実験的にもよく知られた現象である。1よりも小さい屈折率を持つプラズマ中でこの現象が起こると、1972年にJ. Nuckollus等⁸⁾により発表された爆縮核融合での圧縮の一様性を阻害する可能性がある。このことを念頭に置き、ターゲットの固体H₂、D₂へのレーザー集光位置を変化させて散乱光スペクトルの角度分布およびその時間分解計測を行った結果、特定のレーザー集光条件下で、動重力(ポンデロモーチブ力)によりプラズマが排除された結果生ずるレーザー光の自己集束を初めて観測することができた⁹⁾。

この実験では、散乱光をビデオンで取り込んだスペクトル強度分布をオシロスコープ上に表示するシステムおよび出口を4チャンネルに分割した像転送光ファイバに高速応答パイプライン光電管を接続したシステムを開発、それぞれ時間積分スペクトル計測、時間分解スペクトル計測に用いた。

入射光の偏光方向およびレーザー集光位置を変えて入射光波長域の散乱光を後方0°, 45°, 90°方向で測定した結果、照射強度が 10^{14} W/cm²以上で且つレーザー集光位置がターゲットの初期表面位置より50-150 mm(H₂ターゲット)前方の時のみ、偏光方向に関係なく後方散乱光のみに青方シフト光が観測された。この青方シフト

光は入射光のピークより立ち上がり、入射光と共に消滅した(Fig. 3参照).

この実験で始めて観測された青方シフト光の発生は以下のように説明できる. 入射光パルスの前半で自己集束が起こり, そのポンデロモーチブ力によるプラズマの排除で密度の低下したチャンネルが形成される. レーザー強度が低下するパルス後半ではポンデロモーチブ力が減少する結果, チャンネル部の密度が上昇に転ずる. この密度上昇時に生ずる位相の時間変化による青方シフトであることがJ. W. Shearer等¹⁰⁾による理論を基にした解析の結果判り, プラズマ中でのレーザー光の自己集束であるとの結論を得た.

4. 光子圧による密度変調

レーザーの吸収率はプラズマの密度勾配に依存する. 密度勾配が急峻になるとクーロン衝突による古典吸収やパラメトリック崩壊不安定性による吸収効率は減少する. 密度勾配に対して斜めにp偏光ビームが照射すると, ビームは遮断密度近傍で折り返しスペキュラー反射す

Fig.3 Spectra of backscattered light around the irradiated light spectrum. (a); the time integrated spectra. The blue shifted spectrum is observed above the intensity of 10^{14} W/cm^2 . (b); the temporal change of the spectra at intensity of above 10^{14} W/cm^2 . The blue shifted light appears behind the peak of the irradiated pulse which is due to the temporal phase change of the plasma channel induced by Ponderomotive force.

る. 折り返し点ではレーザーの電界方向が密度勾配の方向と一致する. 密度勾配が急峻になるとレーザー電界は遮断密度点まで達し, 共鳴的に電子プラズマ波を励起する共鳴吸収¹¹⁾が支配的となる.

高強度照射時での生成プラズマの遮断密度近傍での密度変調(ステッピング)の有無を調べるために1974年に完成した「激光II号」2ビームレーザーよりの30 psパルスを, ガラスマイクロバルーンをターゲットとして対向照射した. 照射強度は左側 10^{15} W/cm^2 , 右側 10^{16} W/cm^2 である. 遮断密度近傍での密度勾配の時間変化をレーザー顕微干涉計およびシュリーレン法で測定した. プロブ光には照射ビームの一部を抜き出して波長変換した530 nm光を用いた. 観測計の時間, 空間分解能はそれぞれ30 ps, $2 \mu\text{m}$ である. 照射強度 10^{16} W/cm^2 側で光子圧による密度勾配の急峻化を観測(参照Fig. 4), 高密度爆縮に必要なレーザー照射強度化では共鳴吸収が重要な役割を果たすことを示すことができた¹²⁾.

5. 高Z薄膜ターゲットでの異常透過現象

爆縮核融合研究の進展の結果, 現在では爆縮時のレイリー・テイラー流体不安定性の抑制の観点からDT固体燃料とアブレターとしても働く薄いプラスチック層よりなる2層構造ターゲットが良いとされている. しかし, 初期の段階では異常加熱で発生した高エネルギー電子による燃料の先行加熱の抑制と爆縮燃料の長時間保持の観点から, 燃料とプラスチックアブレター(低Z層)の間に質量密度の高い金属層(高Z層)をタンパーとして配する3層構造が提案されていた. このターゲットでのエネルギー輸送を調べるためにアブレター・タンパー構造を模したプラスチック($4 \mu\text{m}$ 厚)と金属($1.25\text{--}2.5 \mu\text{m}$ 厚)の

Fig.4 Temporal change of axial density profile when 10^{16} W/cm^2 laser is irradiated to the glass microballoon. The density gradient is steeper at the higher density region, and gradient decrease with decreasing the laser intensity in the pulse. The inserted picture is the interferograph of laser irradiated target. Diameter of glass microballoon is $50 \mu\text{m}$.

Fig. 5 Transmittances of laser light as a function of the incident laser intensity. Irradiated targets are curve (a); 2.5 μm Ni foil, curve (b); 2.3 μm Ni foil plated on 4.0 μm polyethylene film, curve (c); 1.25 μm Ni foil curve (d); 1 mm Ni foil plated on 4 μm polyethylene film, and curve (e); 4 μm polyethylene film. Laser is irradiated from the polyethylene side for every target. The metal coated targets showed anomalous transmittance.

ニッケル)よりなる2層構造ターゲットを、異常加熱による高エネルギー電子を多量に発生する半値幅(FWHM) 160 psの高強度パルスで45°方向より照射する実験を行った。得られた結果をFig. 5に示す。図より分かるように厚さ4 μm の単純ポリエチレンでの後面への透過率が10%程度であるのに対して金属で裏打ちしたターゲットでは後面への透過率が異常に高くなる現象を発見した。照射レーザー強度は増幅器の励起入力を変化させることで行ったため、高励起下での増幅器からの強いASEやプレパルス強度の増加等の異常透過の原因になる効果を調べたが、総て排除された。この異常透過現象は高エネルギー電子と高ZプラズマよりのX線放射の輸送で説明ができ、1977年、Phys. Rev. Lett.に報告した¹³⁾。これは、筆者が1983年に提案した「爆縮プラズマを40 TWのピコレーザーで加熱すると、発生する高エネルギー電子でコアプラズマを5 keV過熱できる」¹⁴⁾と云う高速点火の発想に繋がった実験結果である。

我々による異常加熱の発見をきっかけに、国際会議“Conference on Anomalous Absorption”が米国でスタート、以降、活発な研究が展開されるようになった。パラメトリック不安定性による異常加熱は密度勾配がステイプになると発生のしきい値が上昇する。その後の研究の結果、密度勾配がステイプになる核融合実験でのレーザー条件では、主たる異常過熱機構は共鳴吸収が主役となることが明らかにされた。

さらに、爆縮実験の進展の結果、異常加熱により発生する高エネルギー電子は、爆縮時の燃料の先行過熱を誘起するため好ましくないとの認識が共有され、異常過熱を伴わない条件での爆縮が追求され、短波長レーザーが使用されるようになった。

現在、活発に研究が進められている極短パルス超高強度レーザーと物質との相互作用研究でいくつかの新しい現象が発見されているが、そんなことが起こるのかと云うような現象を提起してくれるであろうと期待している。

参考文献

- 1) N. G. Basov and O. N. Krokhin: *Proc. the Conference on Quantum Electronics, Paris* (1963).
- 2) J. M. Dowson: *Phys. Fluid* **7** (1964) 981.
- 3) F. Floux, D. Congnard, et al: *Phy. Rev. A* **1** (1970) 821.
- 4) K. Nishikawa: *J. Phys. Soc. Jpn* **24** (1966) 916; *ibid* **24** (1968) 1152.
- 5) C. Yamanaka, T. Yamanaka, et al: *Phys. Lett.* **38A** (1972) 495; *ibid Phys. Rev. A* **6** (1972) 2335.
- 6) C. Yamanaka, T. Yamanaka, et al: *Phys. Rev. Lett.* **32** (1974) 1038.
- 7) D. Arnush, B. Fried, C. Kennel, K. Nishikawa, et al: *UCLA Rep. No. PPG139* (1972) unpublished.
- 8) J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen, and G. Zimmerman: *Nature* **239** (1972) 139.
- 9) C. Yamanaka, T. Yamanaka, et al: *Phys. Rev. A* **11** (1975) 2138.
- 10) J. W. Shearer and J. L. Eddleman: *Phys. Fluids* **16** (1973) 1753.
- 11) V. L. Ginzburg: *Propagation of Electromagnetic Wave in Plasmas* (Pergamon Press, New York, 1970).
- 12) H. Azechi, S. Oda, K. Tanaka, T. Sasaki, T. Yamanaka, and C. Yamanaka: *Phys. Rev. Lett.* **39** (1977) 1144.
- 13) J. Mizui, N. Yamaguchi, T. Yamanaka, and C. Yamanaka: *Phys. Rev. Lett.* **39** (1977) 619.
- 14) 山中 龍彦: 大阪大学レーザー核融合研究センター「金剛計画(第1期)検討作業報告書別冊」(1983) p.5.