

平成 21 年 6 月 9 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19740252  
 研究課題名（和文） トムソン散乱によるプラズマチャンネル中のレーザー集光強度の評価  
 研究課題名（英文） Evaluation of laser irradiance in a plasma channel via Thomson Scattering  
 研究代表者  
 神門 正城（KANDO MASAKI）  
 日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹  
 研究者番号：50343942

## 研究成果の概要：

高強度レーザーとプラズマの相互作用により、航跡波が励起され高エネルギーの電子が生成される。このレーザー航跡場加速において、基本的なパラメータであるレーザー光の集光強度をその場で観測する手法を試みる。我々は、レーザー光が伝播する際に散乱される光（トムソン散乱と予測）に着目し、その光量と電子発生との相関をまず調べた。発生する電子数と散乱光を同時計測した結果、低密度領域では高い相関が見られたが、高密度領域では低下が見られた。これらはトムソン散乱以外の光成分の混入が示唆され、我々は相対論的ソリトンからの電磁放射であるとの仮説を立て、その計測に初めて成功した。集光強度の評価に関しては、非線形トムソン散乱を利用する手法を考案した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
19年度	800,000	0	800,000
20年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	180,000	1,580,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：高強度レーザー、レーザー加速、プラズマチャンネル

## 1. 研究開始当初の背景

高強度・フェムト秒レーザー（典型的には、10TW, 50fs）による高エネルギー電子の発生は、小型・高加速勾配という利点から精力的に研究が進められ、最近では、申請者のグループを含めて、準単色の電子ビームの発生が確認されている。この極めて高品質の電子ビームは応用上魅力的である。しかし、現状で

は、実験的には同一（と研究者が考えている）の条件にも関わらず、電子ビームの発生、電子ビームの緒特性はショット毎に異なり、安定性が悪い。高安定化のためには、不安定な要素を探り、それを改良する必要がある。我々は今までの実験から、プラズマからのレーザー光自身の散乱光強度が電子発生と相関を持っていることに着目した。この散乱光強度は、レーザー光のプラズマ中での集光強

度に比例すると予測される。集光強度の評価は、一般には、別の実験で行われる。本来はガスプラズマ中での集光強度が重要であるが、対象とする集光強度が  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> を越えるような強度であり直接の評価は難しい。実際の評価は、真空中で、しかもレーザーの強度を5桁以上減光して行なわれている。薄いガスを導入し、そのイオン化率により評価された例もあるが、電離過程は複雑で、また、我々の興味は薄いガスではなく、電子発生が行われる同一の条件下での集光強度である。いずれにしろ、今までの計測は、初期集光強度の参考値としての意味しかなく、物理機構の解明のためには不十分であり、新たな計測方法が待たれていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、高強度超短パルスレーザーがプラズマと相互作用するとき生ずるプラズマチャンネル中での実際の集光強度を評価することである。現在、実際に相互作用している媒質中での集光強度は直接的に計測されていない。そこで、我々はプラズマ電子とレーザー光子のトムソン散乱光を「精密に」計測する手法を提案する。この集光強度というパラメータを計測することにより、高強度レーザーとプラズマの相互作用をより深く理解でき、レーザー加速電子発生などの安定化に貢献する。

## 3. 研究の方法

パルスエネルギー180 mJ、パルス幅40 fs、中心波長820 nmのチタンサファイアレーザーをヘリウムガスジェット中に集光し、レーザー航跡場加速によって高エネルギーの電子ビームを発生させた。実験のセットアップを図1に示す。レーザーのピーク出力は4.5 TWであり、直径30 μmに集光され、真空中での集光強度は、 $6.4 \times 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>であった。プラズマ源となるヘリウムガスジェットは、電磁

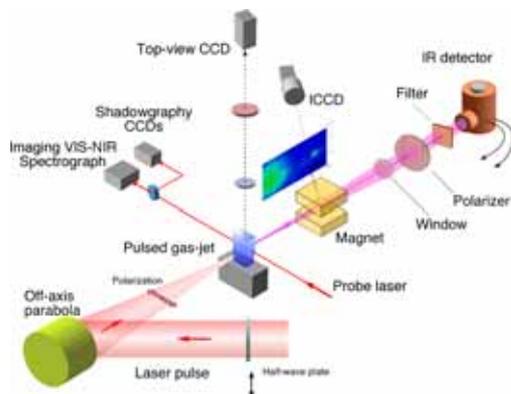


図1. 実験セットアップ

的に駆動されるガスバルブから直径3 mmのオリフィスを通して真空中にガスを吹き出すことで生成される。バルブに印可する圧力を変えることでガス密度を  $10^{18}$ - $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> 程度の範囲で調整可能である。レーザーの進行方向には、永久磁石からなる偏向磁石があり、発生した電子を曲げ、蛍光板に導く。この蛍光板の発光像をイメージ増倍管付 CCD カメラにて取得し、電子のエネルギーと空間分布を計測した。ガスジェット上部にはガスプラズマからの発光像を取得する観測系を設置した。この系は、アクロマティックレンズとバンドパスフィルター、減光用の ND フィルター、CCD カメラで構成されている。バンドパスフィルターは、レーザー光の波長を含む  $750 \pm 40$  nm のバンドパスフィルターを用いる。これはレーザーが水平偏光の場合、トムソン散乱が計測される方向であり、本研究では中心となる計測器である。なお、レーザーは、我々の実験では通常、水平方向に直線偏光しているが、レーザー光路に薄い  $\lambda/2$  波長板を挿入することにより垂直偏光に変えることが可能である。さらに、この CCD カメラを分光器に変えることで散乱光のスペクトル計測も行った。また、本研究開始当初は想定していなかったが、研究を遂行中に近赤外光 ( $\sim 5 \mu\text{m}$ ) 領域の InSb 計測器をレーザー進行方向に設置し、赤外透過窓 (KRS5) から取り出して計測を行うことも試みた。

## 4. 研究成果

### 4-1. 高速電子と散乱光の相関計測

典型的な電子エネルギー分布と上部カメラ

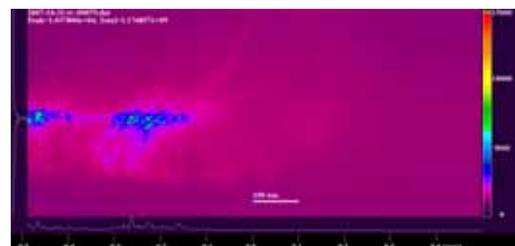
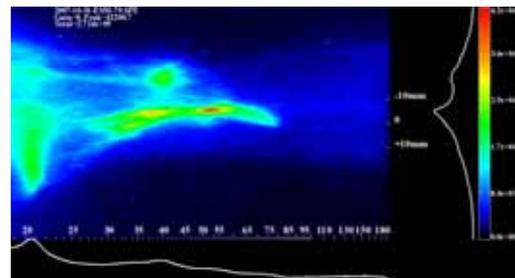


図2. (典型的な電子のエネルギースペクトル(上)と上部散乱光像(下)。スペクトルで横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は、空間広がりを表す。散乱光像では、レーザー光は図の左から右へ伝播している。

ラでの散乱光計測結果を図2に示す。この場合のHeガス圧力は、2.4 MPaであり、Heガス密度  $1.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  であった。このガス密度は、予め Mach-Zehnder 干渉計を用いて計測した。完全電離プラズマを仮定すると、電子密度  $2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  に相当する。

この電子数と上部散乱光の強度の相関を見るために、両者をプロットしたものを図3に示す。この図では、レーザー光の偏光を変えた場合に、電子数と散乱光の全強度とピークの強度を比較している。図3a)では、レーザー光は水平偏光であり、上部カメラには、レーザー光がプラズマ電子とトムソン散乱した光が検出されるはずである。全強度、ピーク強度共に、電子数と相関のある(相関係数0.8程度)。一方、レーザー光が垂直偏光である場合、トムソン散乱は理論的には軸方向にはゼロである。(実際の検出系ではある立体角領域をカバーしているのでゼロとはならない)。従って、図3b)で観測された上部カメラでの光量はトムソン散乱ではない散

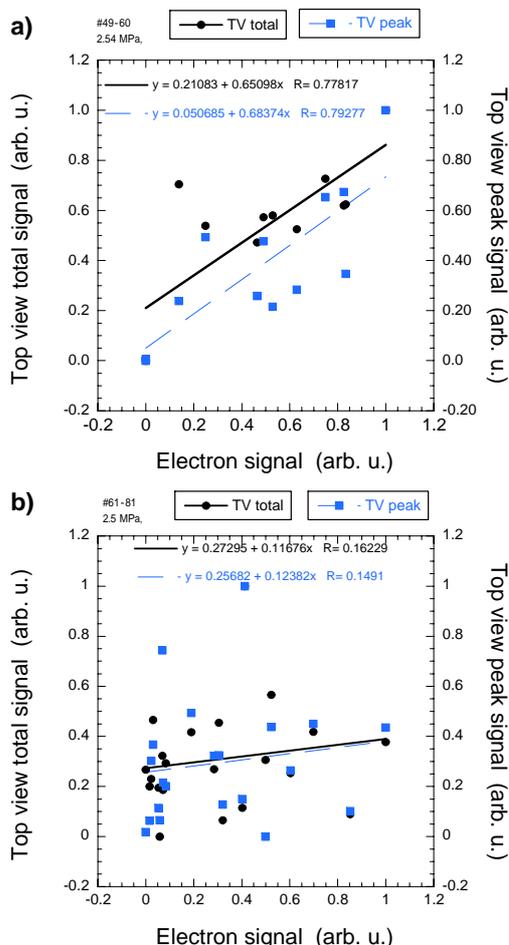


図3. 電子数と上部散乱光強度の相関。レーザー光が水平偏光(a)、垂直偏光(b)の場合。ヘリウムガス圧力は共に、2.5MPa。

乱または発光が主であり、電子発生数との相

関は低いということがわかる。これにより、レーザー航跡場加速による電子発生数とトムソン散乱には一定の相関があることがわかった。

次に、この関係が圧力を変えても成り立つかを調べた。図4は、ガス圧力を変えた場合の電子数と上部カメラへの散乱光強度を表したものである。ここでは、レーザー光は全て水平方向に偏光している。この結果からは、ガス圧力2.5 MPaの場合に見られた電子数と上部への散乱光強度の相関は見られなかった。

この原因として、(i)トムソン散乱以外の機構による光が含まれている、(ii)レーザー光が強く自己集束し、非線形トムソン散乱が発生している、(iii)実際のレーザー光の伝播過程は複雑であり、単純な光強度と電子数といった関係では定義できない、ことなどが考えられる。(i)に関しては、特にプラズマからの再結合光やラマン散乱に加えて、高強度レーザー光とプラズマの相互作用により、相対論的ソリトンと呼ばれる構造が出来て、そ

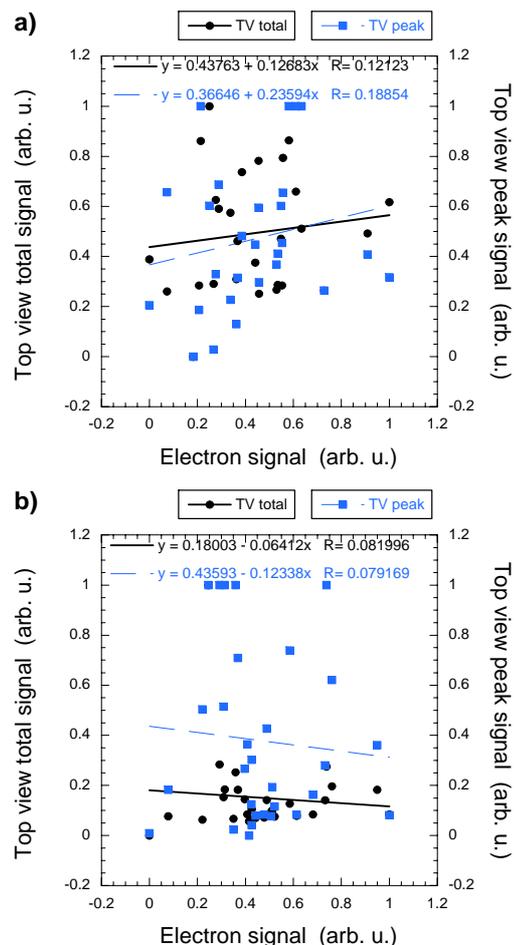


図4. 電子数と上部散乱光強度の相関。ガス圧力が4 MPa (a)、8 MPa (b)の場合。

こに蓄えられたレーザー光が放射されると

いう機構があることが知られている。これに関しては次小節にて議論する。(ii)に関しては、特に集光強度を計測するという本研究の本質に関わるもので、4-3節にて議論を行う。(iii)に関しては、まずプラズマから観測される光の発生機構を同定し、それにより改めて議論する必要があると思われる。

#### 4-2. 散乱光の放射源

高強度レーザーがプラズマ中を伝播する際に、光電離過程によりガスを電離し、プラズマ波を励起するためにエネルギーを失う。断熱的と考えれば、光子数は保存されるので、レーザー光の波長は長波長へと変移していく。また、レーザー光の持つ動重力により密度ディップが作られ、レーザー光の一部はその密度ディップに捕捉される。この構造が相対論的ソリトンと呼ばれ、プラズマ中を光速の $\sim 1/10$ 程度で密度勾配に沿って移動し、プラズマ境界で蓄えた電磁波を放出するとされている。この描像は、理論的、数値計算により示されているが、実験的に放射を検出した例はない。この放射は、一例では、レーザーの周波数の $1/5$ からレーザー光の元の波長までの幅広いスペクトルを持つとされる。我々は、実験で観測された成分にこのような機構による放射が混在していると予測し、この放射の検出を試みた。

図5はレーザー光の偏光を変えた場合の $5\ \mu\text{m}$ の波長の赤外光の強度を偏光毎にプロットしたものである。図のように、レーザー光と赤外光の偏光が平行の成分が多く含まれていることがわかった。ソリトンからの電磁放射はレーザー光と同一方向に偏光していることから、この検出された赤外光はソリトンからの電磁放射であると考えられる。ガス圧が高くなった場合は、レーザー光とプラズマの相互作用が強くなり、すなわち、レーザー光のエネルギーはプラズマ化やソリトンへの電磁エネルギーへと変換され減衰する。4-1節で見たように、圧力が高い場合にトムソン散乱と電子数の相関が低くなったことは、このソリトンからの放射機構で定量的には説明がつく。定量的な評価のためには、このソリトンからの放射の角度分布などの詳細や、他の発光成分との区別が必要であることがわかった。

#### 4-3. 非線形トムソン散乱の見積もり

我々の実験領域では、超短パルス高出力レーザーを用いているので、トムソン散乱には高次の非線形性が入ってくる可能性がある。真空中でのレーザーの集光強度は、 $10^{18}\ \text{W}/\text{cm}^2$ を程度であり、非線形性の指標となる強度パラメータ $a_0 = 8.5 \times 10^{-10} \lambda [\mu\text{m}] I^{1/2} [\text{Wcm}^{-2}] = 1$ 程度であるが、プラズマ中ではレーザーパルスの自己集束効果により $a_0 = 3$ 程度となってい

ると予測される。ここで、 $\lambda$ はレーザー波長、 $I$ は集光強度である。非線形トムソン散乱の1次の散乱光の波長は、対向反射の場合、

$$\lambda_r = \lambda(1-\beta)(1+a_0^2/2)/(1+\beta) \quad (1)$$

と表され、通常のトムソン散乱とは $(1+a_0^2/2)$ の因子だけ赤方変移する点が異なっている。この表式はアンジュレータに入射された電子ビームからの放射光の波長の表式と同じであるが、高強度超短パルスレーザーと電子ビームの相互作用で赤方変移を計測した例は著者らの知る限り存在しない。この非線形トムソン散乱は $a_0$ が大きくなる高強度レーザーで実験的に調べられた例はほとんどなく、物理的にも興味がある一方、本研究テーマとも深く関連する。本研究では、レーザー光がプラズマ中を伝播する際の実際の「その場」強度が知りたいのであり、特にレーザーが自己収束などにより真空中での値(プラズマと相互作用しない場合の値)よりも高くな

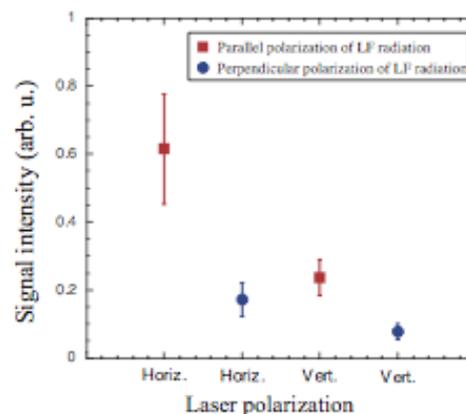


図5. レーザー光の偏光方向と前方方向で計測された赤外光の信号強度。

っている場合なども対象となる。この場合、式(1)でわかるように、赤方変移を明確に計測できれば $a_0$ すなわち集光強度を知ることができる。我々は、この様子を調べるための実験系を設計し、高強度レーザーを用いた予備的な実験を行った。また、予備的な計測を実施した。420 mJ, 27 fsのチタンサファイアレーザー(中心波長 800 nm)をヘリウムプラズマ中に集光し、後方135度へ散乱する光のイメージング分光計測を実施した。本方式では、レーザー進行方向に空間分解し、かつ、散乱光のスペクトル分光も同時に行える点で昨年度までの計測方式を高度化したものである。また同時に、前方方向に散乱したレーザー光のスペクトルも計測を行った。詳しい解析は、現在行っているが、予備的な解析では、高エネルギー電子が発生する場合には、この計測器で計測される散乱光のスペク

トル幅が増大(780-910 nm)している傾向があることがわかった。ショットによっては、スペクトルが単に広がるだけでなく、変調された構造もあった。この点では、電子発生に関連すると思われる系統的なデータを取得できた。しかし、目標とする定量評価を行うには、密度評価や元々のレーザー光が伝播中に大きな波長シフト量の評価を注意深行う必要がある。また、レーザーの進行方向に設置した真空紫外計測器にて、10 nm 程度までの短波長化した変調光を観測した。これは、従来知られていた高次高調波の機構では説明ができず、非線形トムソン散乱にて、スペクトル形状は説明できた。しかし、計測された光量は、集団効果を入れねば説明ができない程の強度であり、新たな知見と考えられる。これらの当初予測外の成果は、本研究から派生したテーマであり、将来の研究課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

神門正城、他「レーザー・プラズマ相互作用により生成されるソリトンからの電磁放射の検出」、日本物理学会、2009。

M. Kando et al., "Observation of Low Frequency Electromagnetic Radiation from Laser-Plasmas", The Second International Symposium on Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Industry and Medicine, 2009.

M. Kando et al., "Experimental studies of the high and low frequency electromagnetic radiation produced by relativistic mirrors in nonlinear laser plasma interaction", Extreme Light Infrastructure (ELI) Workshop and School on Fundamental Physics with Ultra-high Fields, 2008.

西森信行、羽島良一、神門正城、ブランフセルゲイ、「レーザー強度依存トムソン放射光波長シフト測定へ向けた検討」、日本物理学会、2008。

〔その他〕

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

神門 正城 (KANDO MASAKI)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研

究部門・光量子科学研究ユニット・研究副主幹

研究者番号：50343942

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし