

1 TW, 50 fs レーザーと薄膜の相互作用による粒子生成

和田 芳夫, 小方 厚, 久保田 哲生

広島大学大学院 先端物質科学研究科 (〒739-8530 広島県東広島市鏡山1-3-1)

Particle Generation by Interaction between 1 TW, 50 fs Laser and Thin Foils

Yoshio WADA, Atsushi OGATA, and Tetsuo KUBOTA

Department of Quantum Matter, Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8530

(Received May 23, 2003)

Thin ($< 10 \mu\text{m}$) plastic and metal foils were irradiated by 1 TW, 50 fs laser pulses at an incident angle of $\pi/4$. Particle beams were obtained on both sides of the foil with respect to the laser injection. A laser intensity of up to $10^{17} \text{ W cm}^{-2}$ produced only neutral particle beams on the forward side of the laser propagation with small ($\sim 15^\circ$) divergence. When the laser intensity was higher than $10^{17} \text{ W cm}^{-2}$, a particle beam with larger ($> 70^\circ$) divergence was observed in addition to that with smaller divergence. The components of the neutrals and ions were contaminants of the foil surface. On the other hand, mainly ions were produced on the backward side, which were components of the target foils. The most energetic particles were protons on both sides, whose energy was about 550 keV.

Key words : Ion source, Neutral beam, Table-top terawatt laser, CR39, Thomson parabola

1. はじめに

近年, レーザーと物質の相互作用の研究, 特に 10^{18} W/cm^2 以上の高強度レーザーと固体の相互作用による, MeV以上の高エネルギーイオンの発生の研究が活発である¹⁻⁹⁾. もし, 小型・低価格・高繰り返し可能なテーブルトップレーザーでも十分な強度の高エネルギーイオンが発生できれば, 加速器のイオン源として応用できよう. Zhidkovらはシミュレーションにより¹⁰⁾, レーザー強度が 10^{17} W/cm^2 から, 核子あたりMeVを越えるイオンが発生する可能性を示唆している. Badziakら¹¹⁾はパルス幅1 ps, エネルギー500 mJのレーザーを2重薄膜ターゲットに照射して, 最大300 keVの陽子を検出した. しかしこれを除けばレーザー強度が 10^{18} W/cm^2 以下の実験報告は, 見あたらない.

われわれは, 加速器のイオン源としての実用化を意識して, Badziakらのレーザーよりさらに小エネルギー(50 mJ), 短パルス(50 fs)のレーザーと, 厚さ $12 \mu\text{m}$ 以下の有機または金属薄膜との相互作用に関する実験を行っている. この実験により, 前方すなわちターゲット裏面にはイオン発生のためのレーザー強度のしきい値 $\sim 10^{17} \text{ W/cm}^2$ が存在すること, しきい値以下では中性粒子ビームだけが狭い角度拡がりで発生すること, 一方, 後方すなわちターゲット表面へのイオン発生には明確なしきい値はみられないことが明らかになった. 発生したイオンの主な成分は陽子で, 最大エネルギーは薄膜のどちら側でも約

550 keVであった.

本論文では次の第2章で実験のセットアップ, 続く第3章では実験結果を述べ, 第4章では結果について考察する.

2. 実験装置と実験方法

実験にはTi:Sapphireレーザーを使用した. 中心波長800 nm, パルスエネルギー50 mJ, パルス幅50 fs(パルスパワー1 TW), 繰り返し周波数は10 Hzである. レーザーのプリパルスはナノ秒領域でメインパルスの1/200である. 薄膜はレーザー入射方向に対し 45° の角度に設置した. レーザー偏光方向は水平方向・薄膜と垂直な方向で後述するFig. 1の面内にある. 集光には真空容器内に設置した焦点距離120 mmのレンズを用い, 集光径 $20 \mu\text{m}$ とした. 薄膜位置におけるレーザー強度は平均 $2 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ となる. 使用した薄膜は厚さ1-12 μm のマイラー($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$)_nとアルミニウム(AI)である. 実験時の典型的な真空度は 10^{-3} Pa であった.

Fig. 1は強度 $\sim 4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ のレーザーと厚さ $3 \mu\text{m}$ のAI薄膜との相互作用を, レーザーの進行方向および薄膜と垂直な方向から市販のデジタルカメラで撮影したものである. カメラのCCDの感度は500-800 nmの間はほぼ一定で, 400 nmでは半減する. 時間分解をしていないので, レーザー1パルスに関連するすべての現象がこの一枚に積分されている. 前方には指向性のよい光が, また後方にはこれより広がった強い光が観測されている. 最初

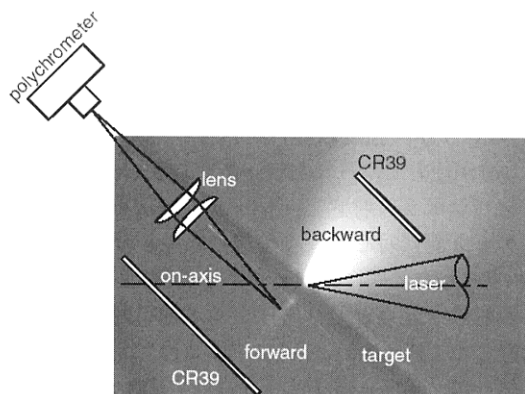


Fig. 1 Picture of the interaction between the laser with intensity of $\sim 4 \times 10^{16} \text{ Wcm}^{-2}$ and the $3 \mu\text{m}$ -thick Al target foil with schematic of the experimental setup. Definitions of “backward” and “forward” sides are also given.

にCR39により発生粒子の空間分布を測定した。次にトムソンパラボラとCR39を組み合わせて粒子エネルギーおよび質量電荷比を測定した。本実験ではCR39に対して7N, 70°C の水酸化ナトリウム水溶液で4時間エッチングを行った。この操作のためCR39の表面は約 $10 \mu\text{m}$ 削りとられる。

トムソンパラボラは直流電磁場によるエネルギー・質量電荷比 (e/m) 分析器で、ターゲットから85 mmの位置に設置した直径0.5 mmの入射窓と一組の双極磁石(0.48 T)から成る。この磁石には電圧を印加して電極としても用いた。電場は $2.9 \times 10^5 \text{ Vm}^{-1}$ であった。分析器内の電磁場分布を電磁場解析コードMAFIA[†]を用いて計算し、得られた電磁場分布に基づき荷電粒子の軌道を4次のRunge-Kutta法で計算した。

また、可視分光器(ポリクロメータ)を使用し、相互作用時の発光を分光した。測定範囲は約400~900 nmで、分光器の分解能は0.07 nmであった。Fig. 1に示す様に、発光点の像をレンズを用いて真空容器外の分光器のスリット上に結像し、空間分解スペクトルを観測した。このときの空間分解能は約1 mmであった。観測されたスペクトルから、NIST Spectra Line Database^{†2}に基づき原子、イオン種の同定を行った。

3. 実験結果

Fig. 1のようにCR39を薄膜の両側から距離30 mmで挟むように配置し、発生した粒子の分布を調べた。Fig. 2(a)と2(b)の写真は、前方に配置したCR39上のピット分布である。使用したターゲットは厚さ $3 \mu\text{m}$ のAlであった。図中の黒線のクロスはレーザー照射点を起点としターゲット面に垂直な方向を示し、白線のクロスはFig. 1に一点鎖線で示されているレーザーの進行方向を示す。上部と左部の曲線はそれぞれ図中の白線に沿った水平および垂直方向の光学濃度分布を示す。CR39は通常透明であるが、ピットが形成されるとそこで光が散乱されるため白くみ

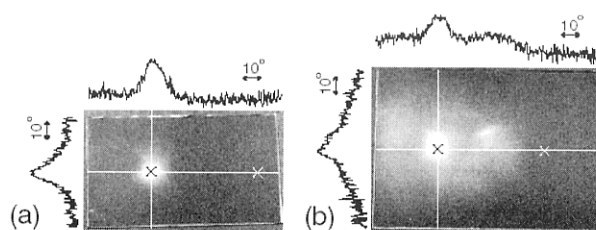


Fig. 2 Typical images of generated particles on the CR39 plates in the forward direction with distributions of etch pits. Target was Al in $3 \mu\text{m}$ -thick. Black cross indicates the direction normal to the target surface and white cross indicates on-axis direction. Curves show distributions of etch pits along the path indicated in white lines. Laser intensities were $1.1 \times 10^{17} \text{ Wcm}^{-2}$ in (a) and $2.1 \times 10^{17} \text{ Wcm}^{-2}$ in (b).

える。すなわち白い部分はピットが集中していることを示す。粒子はターゲット表面に垂直な方向を中心に分布し、レーザー進行方向にはほとんど存在しない。レーザー強度 $1.1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ のとき、粒子はFig. 2(a)に示す角度分布を持つ。分布の半値全幅は水平方向 $14 \pm 0.21^\circ$ 、垂直方向 $15 \pm 0.30^\circ$ であった。後述する様に、同程度のレーザー照射強度における、トムソンパラボラを用いた計測により、観測された粒子の大部分は磁場・電場にまったく影響されないため、これらの粒子を中性粒子と判断した。レーザー強度 $2.1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ のときはFig. 2(b)に示すように、さきの半値全幅約 15° の成分に、より広い分布を持つ成分が加わる。後者の垂直方向の半値全幅は $69 \pm 0.94^\circ$ であったが、水平方向は単純にガウス関数の和では近似できなかった。また、同様な測定によれば、後方には発生粒子はレーザー入射軸方向からターゲットに垂直な方向にわたって広範囲(半値全幅 $> 45^\circ$)に分布する。

Fig. 3に、厚さ $3 \mu\text{m}$ のAlターゲットを用いた際のトムソンパラボラによる測定結果を示す。トムソンパラボラ入射窓は、レーザー照射点を起点としターゲット面に垂直な方向に設置した。Fig. 3(a)と(b)は前方に設置したトムソンパラボラによるCR39上のピット分布で、レーザー強度はそれぞれ $2.0 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ (a)と $5.8 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ (b)であった。ここで、図中の曲線はMAFIAにより得られた計算結果である。中性粒子は電磁場に影響されないため、原点に集中する。レーザー強度が 10^{17} W/cm^2 以上ではイオンと中性粒子が検出されたが、 10^{17} W/cm^2 以下ではイオンはほとんど検出されない。Fig. 3(c)は後方に設置したトムソンパラボラによるピット分布である。ここではAlイオンだけが検出され、前方において主要成分である中性粒子や、陽子はほとんど検出できない。

Fig. 4に、Alターゲットを用いた時の、前方における陽子エネルギースペクトル(a)と粒子数のレーザー強度依存性を示す。Fig. 4(a)から、得られた陽子の最大エネルギーは約150 keVである。また、Fig. 4(b)に示す様に、レーザー強度が 10^{17} W/cm^2 を下回ると発生粒子はほとんど

[†]See <http://www.cst.de>

^{†2}The NIST SpectraLine Database is available at http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main_asd

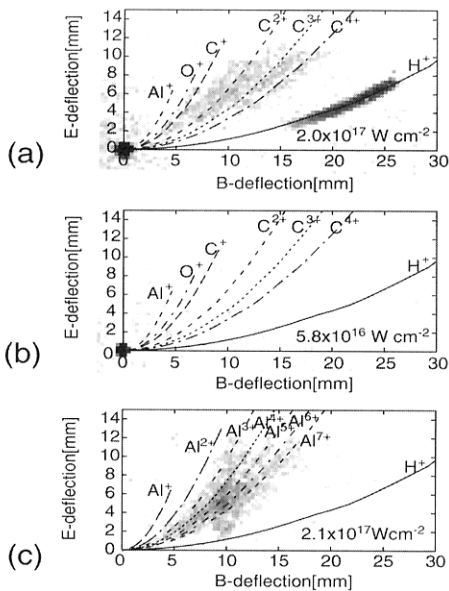


Fig. 3 Thomson parabola spectra by Al 3 μm -thick targets on the forward side (a)-(b) and on the backward side (c). The laser intensities were $2.0 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ in (a), $5.8 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ in (b), and $2.1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ in (c).

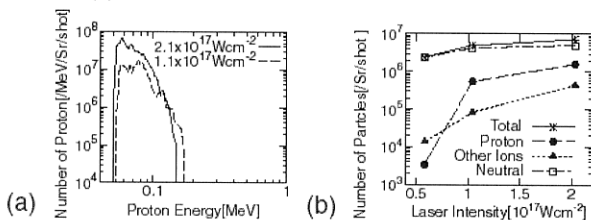


Fig. 4 Dependence of proton energies (a) and the number of particles (b) on laser intensity obtained on the forward side. The target was 3 μm -thick Al.

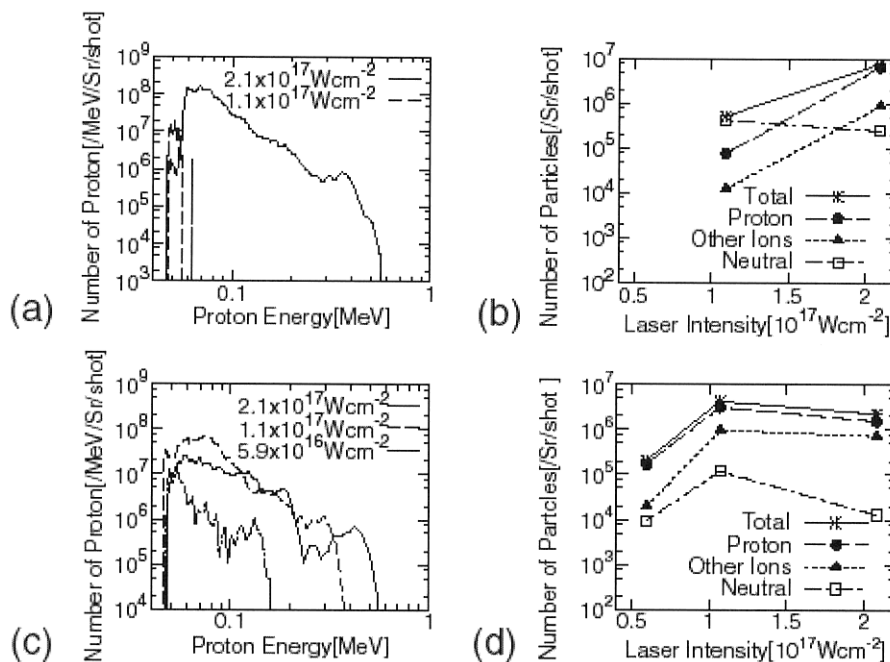


Fig. 5 Dependence of proton energies ((a) and (c)) and the number of particles ((b) and (d)) on laser intensity obtained on the forward side ((a) and (b)) and on the backward side ((c) and (d)). The target was 5.7 μm -thick mylar in (a) and (b), and 8.7 μm -thick mylar in (c) and (d).

中性粒子のみになり、陽子を含めイオンはほとんど検出されなくなる。Fig. 5に、マイラーターゲットを用いた時の、陽子エネルギースペクトル((a),(c))と粒子数((b),(d))のレーザー強度依存性を示す。(a),(b)が前方,(c),(d)が後方で得られたデータである。(a),(b)ではトムソンパラボラ入射窓を、レーザー照射点を起点とし、ターゲット面に対し垂直な位置からレーザー進行方向側に 20° ずらした位置に設置した。また(c),(d)では、レーザー照射点を起点とし、ターゲット面に対し垂直な位置に設置した。Fig. 5(a),(c)に示すように、陽子の最大エネルギーは、前方・後方とも550 keVであった。(b)に示すように、前方への粒子数はレーザー強度とともに増加するが、レーザー強度が $1.0 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ より下では粒子発生は観測されなかった。また、(d)のように、後方への粒子数は $1.0 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ で飽和する。

Fig. 6には後方における陽子エネルギースペクトル(a)と粒子数(b)の、マイラーターゲットの厚さ依存性を示す。レーザー強度は $2 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ であった。粒子数は厚さに伴って増加する傾向にある。最大陽子エネルギーは8.7 μm までは厚さとともに増加するが、より厚い領域では減少する。

可視光の分光では、Alターゲットを用いたときは、H, C, O, Al原子と $\text{Al}^{1+,2+,3+}$, C^{1+} , O^{1+} イオンの線スペクトルが、またマイラーターゲットでは、H, C, O原子と $\text{C}^{1+,2+,3+,4+}$, $\text{O}^{1+,2+}$ イオンの線スペクトルが観測された。可視光分光ではこのようにトムソンパラボラでは観測できなかった中性原子やイオン種が同定された。しかし逆に4価以上のAlイオンなどは、トムソンパラボラでは観測されたにもかかわらず、われわれの分光器では検出が不可能であった。これは多荷イオンのスペクトルが可視域よ

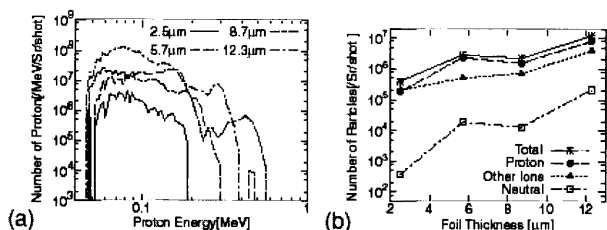


Fig. 6 Dependence of proton energy spectra (a) and the number of particles (b) on the thickness of mylar foils in the backward direction. Laser intensity was $2 \times 10^{17} \text{ W cm}^{-2}$.

り短波長側に存在するためである。このように分光測定とトムソンパラボラによる電磁的測定は相補的である。可視光分光において最も強度の高い線スペクトルは水素原子のバルマー- α 線であり、次いでバルマー- β 線であった。Fig. 7には、厚さ $1.8 \mu\text{m}$ のマイラーと、厚さ $3 \mu\text{m}$ のAlからのスペクトルの発光強度を、ターゲットからの距離の関数として示した。ターゲット上を 0 mm として、マイナスは前方を、プラスは後方を表している。Alターゲットからの前方への発光は強度が小さくデータに誤差が大きいため、図には後方のデータのみを示した。ターゲットに関わらず、薄膜表面からの距離が増大するにつれ、これらのスペクトル線強度は減少する。

Fig. 8には、強度 $2 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ においてマイラーターゲットから前方(a)および後方(b)に発生したバルマー線の強度とターゲット膜厚との関係を示した。Fig. 8(a)によれば前方では膜厚が薄くなるほどバルマー線の強度が増大する。この傾向は強度 $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ においてCR39に残されたピット数から求めた中性粒子数の膜厚依存性と一致する¹²⁾。しかし後方では、(b)が示すようにバルマー線強度には系統的な膜厚依存性が見られない。また、中性粒子がCR39に残した飛跡は水素イオン(陽子)のもの

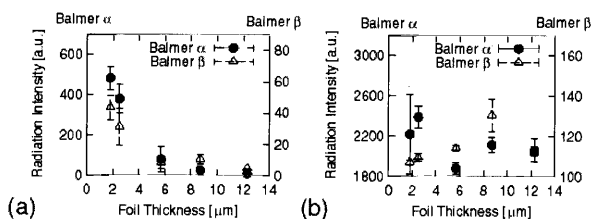


Fig. 7 Spatial dependences of some lines obtained from $1.8 \mu\text{m}$ -thick mylar target (a) and $3 \mu\text{m}$ -thick Al target (b).

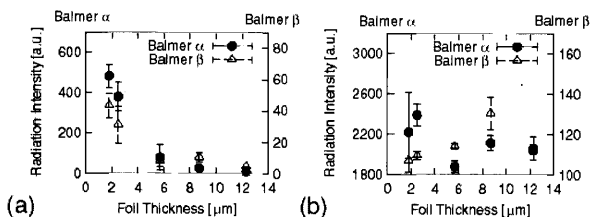


Fig. 8 Foil thickness dependence of intensities of Balmer lines from mylar targets at $2 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ on the forward side (a) and on the backward side (b).

酷似している¹²⁾。これらの結果から、前方方向に放射された中性粒子は水素原子が主であると考えられる。

トムソンパラボラ・分光測定とも、Alターゲットの場合は前方への粒子がターゲット表面付着物、後方への粒子はターゲット生成物から生じていることを示している。ターゲットがマイラーのときは前方、後方の両側で観測されたイオン種はほぼ同種のものであり、また付着物も標的構成物質も同じ有機物なので、イオンがどこから生じたかを推測するのは難しい。しかしAlターゲットのデータとあわせて考えると、やはり、前方への粒子はターゲット表面付着物から生じ、後方への粒子はターゲットそのものから生じていると考えてよいであろう。これらは過去の実験結果¹⁻⁶⁾と一致する。

中性粒子発生の結果をまとめると以下のようになる。

1) 中性粒子は主に前方に発生する。2) ターゲット表面に垂直な方向に半値幅 15° 程度で分布する。3) 粒子数はターゲットの厚さが増加すると減少する。4) 今回得られた結果ではないが、CR39のピットサイズから水素イオンのエネルギーを求める方法をそのままこれらの中性粒子が残したピットのサイズに当てはめると、中性粒子の最大エネルギーは 1 MeV を越える。また、これらの粒子が各種の薄膜を貫通する能力は、 100 keV 台の陽子の能力に匹敵する¹²⁾。

4. 考 察

これまでに述べてきた様に、前方へ高エネルギーの中性粒子の発生が観測されている。本節ではこの中性粒子ビームの発生について考察を行う。これまでの実験結果からここでは中性粒子の主成分は水素原子であると仮定する。これらの水素原子は、原子の状態でターゲットを離れるのであろうか、それともターゲットを出た後、飛行中に電子と水素イオンが結合した結果であろうか。飛行中に中性化するのであれば、トムソンパラボラをターゲットに近づけて設置すればCR39上のピット位置に変化が現れるはずである。しかし実験では磁石の位置を 95 mm から 10 mm まで変化させても有意の差が観測されなかった¹²⁾。また真空容器内の残留ガスとの電荷交換により中性化しているのであれば、容器内の真空度を改善すれば残留ガス構成原子との衝突が減り中性粒子数が減少するはずである。しかし真空度を 10^{-3} Pa から 10^{-5} Pa まで二桁改善してもやはり有意の差が観測されなかった¹²⁾。これらの結果から真空容器内の残留ガスとの電荷交換により中性化する可能性は排除できる。

中性粒子発生メカニズムは不明である。レーザー照射によりターゲット表面で生成された高エネルギーイオンが、ターゲット内部を裏面方向に進んでいくうちに電子と再結合するか、あるいはターゲット構成原子やターゲット裏面の不純物原子との電荷交換により中性粒子化し、生成時のイオンエネルギーをある程度保持しながら前方へ飛散すると考えるのが妥当である。この仮説では、イオンは従来の理論に従って加速される。レーザー強度が低い時は薄膜が完全にプラズマ化されないか、プ

ラズマ化されても低温かつ高密度であり、再結合・電荷交換する確率は高い。またこの場合、ターゲットが厚いほど生成されるイオンのターゲット内でのエネルギー減衰率は大きい。これはターゲット膜厚が厚いほど発生粒子数が減少するという過去の結果ともつじつまは合う¹²⁾。

メカニズムを云々するにはもっと実験を重ねることが必須である。すでに述べたように、中性粒子のエネルギーをCR39のピットサイズから求めると最大1 MeV程度となるが、薄膜貫通能力は100 keVの陽子と同程度であり、両者の間には大きな差がある。中性粒子のエネルギー同定には多様な実験を行う必要がある。今後、実験により中性粒子の起源を調べる予定である。

本実験で発生した粒子数は 10^7 [Sr/shot] 以下であった。この値は、これまでの高強度レーザーによる薄膜照射実験⁶⁾と比べるとかなり小さい。加速器のイオン源としての利用を考えると、本実験で使用したレーザー(50 mJ, 50 fs)では、発生粒子のエネルギーはともかく、発生粒子の数は不十分である。ターゲットに何らかの前処理を施すなどして、粒子の発生効率の向上や発生イオン種の選別などを行う余地がある^{4,5,7,11)}。また、中性粒子ビームについては今後応用の可能性を探る必要がある。

最後に本実験の所見をまとめる。1 TW, 50 fsのレーザーと薄膜の相互作用により、中性粒子とイオンを検出した。前方には、レーザー強度が 10^{17} W/cm²以下で $\sim 15^\circ$ 程度の角度拡がりを持つ中性粒子を、これを越えるレーザー強度では中性粒子に加えて、イオン、主に陽子を検出した。前方に発生した粒子はターゲット表面の付着物から生じたものである。一方、後方には、レーザー強度が 10^{17} W/cm²以下でも、ターゲット物質のイオンを検出したが中性粒子はほとんど検出されなかった。検出された陽子の最大エネルギーはマイラーターゲットを用いたときで、ターゲットの前方・後方においてともに550 keVであった。

謝 辞

実験にご協力いただいた、西山文隆、松門宏治、勝部涼子、清木昭夫、植本裕二、福田大輔、澤山昌宏、田中将人の各氏、MAFIAコードの使用の際に親切なご指導を賜った、上垣外修一、坂本成彦、飛山真理の各氏、中性粒子の起源を議論していただいた小山和義氏に深い感謝の意を申し上げます。本研究は文部科学省先進小型加速器開発計画、および日本原子力研究所関西研究所との協力研究の一環において行われました。

参考文献

- 1) E. L. Clark, K. Krushelnick, J. R. Davies, M. Zepf, M. Tatarakis, F. N. Beg, A. Machacek, P. A. Norreys, M. I. K. Santala, I. Watts, and A. E. Dangor: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 670.
- 2) A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo, and D. Umstadter: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 4108.
- 3) R. A. Snavely, M. H. Key, S. P. Hatchett, T. E. Cowan, M. Roth, T. W. Phillips, M. A. Stoyer, E. A. Henry, T. C. Sangster, M. S. Singh, S. C. Wilks, A. MacKinnon, A. Offenberger, D. M. Pennington, K. Yasuike, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, J. Johnson, M. D. Perry, and E. M. Campbell: *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 2945.
- 4) M. Roth, A. Blazevic, M. Geissel, T. Schlegel, T. E. Cowan, M. Allen, J. -C. Gauthier, P. Audebert, J. Fuchs, J. Meyer-ter-Vehn, M. Hegelich, S. Karsch, and A. Pukhov: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **5** (2002) 061301.
- 5) M. Hegelich, S. Karsch, G. Pretzler, D. Habs, K. Witte, W. Guenther, M. Allen, A. Blazevic, J. Fuchs, J. C. Gauthier, M. Geissel, P. Audebert, T. Cowan, and M. Roth: *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 085002.
- 6) P. McKenna, K. W. D. Ledingham, I. Spencer, T. McCany, R. P. Singhal, C. Ziener, P. S. Foster, E. J. Divall, C. J. Hooker, D. Neely, A. J. Langley, R. J. Clarke, P. A. Norreys, K. Krushelnick, and E. L. Clark: *Rev. Sci. Instrum.* **73** (2002) 4176.
- 7) S. C. Wilks, A. B. Langdon, T. E. Cowan, M. Roth, M. Singh, S. Hatchett, M. H. Key, D. Pennington, A. MacKinnon, and R. A. Snavely: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 542.
- 8) A. Pukhov: *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 3562.
- 9) T. Nakamura and S. Kawata: *Phys. Rev. E* **67** (2003) 026403.
- 10) A. Zhidkov, A. Sasaki, and T. Tajima: *Phys. Rev. E* **61** (2000) R2224.
- 11) J. Badziak, E. Woryna, P. Parys, K. Yu. Platonov, S. Jabtowski, L. Ryc, A. B. Vankov, and J. Notowski: *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 215001.
- 12) Y. Wada, T. Kubota, and A. Ogata: *AIP Conf. Proc.* **634** (2002) 329.