

オンライン型トムソンパラボラスペクトロメータによる
レーザー加速イオンのリアルタイム計測

東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 神野 智史*

量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 福田 祐仁

A Thomson parabola spectrometer for on-line ion detection was constructed to apply to laser driven ion acceleration experiments using cluster targets. We have demonstrated the energy analysis of ions accelerated by the Coulomb explosion of the CO₂ clusters using the present apparatus at the J-KAREN laser facility of the National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology. The maximum energy of the detected ions was 2.5 MeV/q, which was corresponding to about 0.9 MeV/u in converting to energy per nucleon. This result is consistent with the results obtained using CR-39. It was shown that the present apparatus is very useful for searching optimal experimental parameters and measuring ion energy owing to the characteristic of on-line ion detection.

Keywords: laser driven ion acceleration, Thomson parabola spectrometer

1 はじめに

レーザー駆動イオン加速は従来型の加速器で作られる電場を凌駕する 100 GV/m という加速電場を発生できるために、コンパクトかつ低コストに加速器を構築できる可能性を秘めているとして、10 年以上注目を集めている^{1,2)}。

近年のレーザー技術の向上により、PW クラスのレー

ザー^{3,4)}が登場し、これを用いることで 100 MeV/u 以上のイオン発生が予測されており、工学および医学応用に貢献することが期待されている。このような高エネルギーイオン加速を実現するために、高強度レーザーの開発はもちろん、ターゲット開発の研究も進められている。イオンのエネルギースペクトルや指向性はいくつかの実験条件に依存している。たとえば、レーザーのメインパルスよりも時間的に前に存在する自然放出光成分の割合（いわゆるコントラスト比）、ターゲットの厚みや密度などである。これらの実験条件を変えて、高効率な加速条件を見いだしていくことが今後とも重要である。実際のレーザー駆動イオン加速実験においては、数十 MeV 級の白色のエネルギースペクトルを有する多種のイオンが発生する。このようなイオンのエネルギースペクトル計測には、Radiochromic film (RCF)⁵⁻⁷⁾ や CR-39⁸⁾ を積層したスタック検出器、飛行時間型エネルギー分析器⁹⁾、トムソンパラボラスペクトロメータ¹⁰⁻¹⁵⁾ 等が相補的に使用されている。一般的にはイオンにのみ感度がある CR-39 が使用されるが、実験条件毎にエッチングや計数処理をオフラインで行わなければならない、解析に時間がかかるため、イオン加速研究の進展の妨げとなっていた。そこで、我々は、実験条件を次々と変えてイオン加速の最適条件を迅速に探索できるように、イオン検出部に蛍光板付き MCP を用いて、オンラインでイオン種とエネルギースペクトルを取得可能なトムソンパラボラスペクトロメータを開発した。

2 トムソンパラボラスペクトロメータの原理

トムソンパラボラスペクトロメータ¹⁶⁾ は、静電場と静磁場を用いて、荷電粒子の質量電荷比とエネルギーによって進行方向を偏向させる装置である。従って、多種類のイオンに対して、そのエネルギースペクトルを得ることができる。

イオン光学的には、Fig 1 に示すように、電場で各イ

Measurements of laser driven ions by Thomson parabola spectrometer

Satoshi JINNO* (Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo), Yuji FUKUDA (Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology),
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22
TEL: 029-283-2374, E-mail: jinno@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

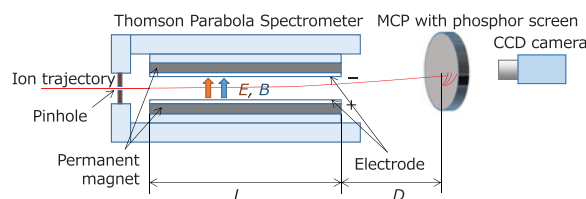


Figure 1. Schematic view of real-time Thomson parabola spectrometer.

オンのエネルギーを、磁場で質量電荷比を弁別する。即ち、電場を E 、磁場を B 、その長さを L 、ドリフト空間の長さを D とし、粒子の電荷を q 、質量を M 、エネルギーを E_k とし、検出面を (x, y) とすれば

$$x = \frac{qE}{2E_k} L \left(\frac{1}{2}L + D \right), \quad (1)$$

$$y = \frac{qB}{\sqrt{2ME_k}} L \left(\frac{1}{2}L + D \right) \quad (2)$$

であるから、

$$y^2 = \frac{q}{M} \frac{B^2 L D}{E} x \quad (3)$$

という放物線が得られる。原点はエネルギーが無限大の位置になるが、光や中性粒子が、検出器の原点に来るので、これを頼りに原点を決定することができる。実際に用いられたトムソンパラボラスペクトロメータのパラメータは、 $E = 400 \text{ V/mm}$ 、 $B = 0.165 \text{ T}$ 、 $L = 100 \text{ mm}$ 、 $D = 261.25 \text{ mm}$ である。本研究では、リアルタイム性を持たせるために、検出面に蛍光板付き MCP を設置し、イオンによる光点を CCD カメラにより撮影した。蛍光板付き MCP では、比較的低エネルギーの数 MeV/u のイオンの計測が可能である。スペクトロメータは 2 軸の回転ステージに乗っており、アライメントを微調整することができる。ピンホールの前面には放射線シールドのための厚さ 3 mm のステンレス板と厚さ 5 mm のポリエチレン板が取り付けられている。我々は本装置を比較的小型に作製し、シールド部、分析部、検出部に分割して持ち運びできるようにした。そのため、様々な施設に持ち込んで、使用できるところに特徴がある。

3 レーザー駆動イオン加速実験

我々は、クラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速実験を推進している。クラスターター

ゲットを用いたイオン加速研究では、たとえば、 CO_2 クラスターとヘリウムの混合ターゲットを用いて、レーザー駆動イオン加速実験を行ったところ、磁気渦の効果¹⁷⁾により最大加速エネルギーが従来方法のおよそ 10 倍という著しい増加が実証されている⁸⁾。ここでは、オンライン型トムソンパラボラスペクトロメータの動作試験を行うため、クラスターのクーロン爆発によって等方的に生成する数 MeV/u のイオン検出を試みた。

Figure 2 に実験体系を示す。レーザーは量子科学技術研究開発機構の J-KAREN レーザー¹⁸⁾を用いた。スポット径は約 $20 \mu\text{m}$ 、集光強度は $1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ である。このレーザーをクラスターターゲットに照射し、そこから加速されたイオンをオンライン型トムソンパラボラスペクトロメータを用いてイオンの質量電荷比とエネルギーとに分離した。Figure 2 に示されたとおり、トムソンパラボラスペクトロメータはレーザー軸に対して、60 度の角度で設置した。

ターゲットは H_2 (70 %) と CO_2 (30 %) の 6 MPa の混合ガスを使用した。この混合ガスを特殊なノズル¹⁹⁾から噴射することで CO_2 クラスターが生成される。クラスターサイズをミー散乱を利用して計測したところ、直径 250 nm であった^{20,21)}。

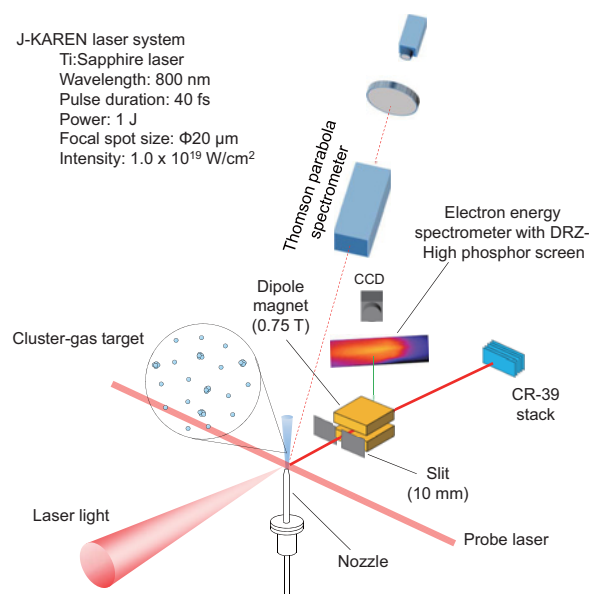


Figure 2. Experimental system.

4 イオン計測結果

撮影された画像は LabVIEW にプログラムを組んで解析した。Figure 3 は実際の解析画面を示す。電場と磁場のパラメータや幾何的な配置等を入力しておく、得られた画像からエネルギースペクトルを出力できるようにになっている。画像の自動取り込みを実装していないので、リアルタイム解析に至っていないが、オンラインで解析することができ、実験中に結果を確認できる。

加速されたイオンをトムソンパラボラスペクトロメータを用いて分離した 2 次元マップに、それぞれのイオン種とエネルギースケールを重ねた結果を Fig. 4 に示す。この図からもわかるとおり、検出面に到達したイオンはエネルギー E_k に依存して、放物線を描く。検出される可能性のあるイオンとしては、ターゲットを構成している原子から C^{q+} , O^{q+} および H^+ である。結果として、 O^{6+} までははっきりと判別できる。 C^{5+} ($M/q = 2.4$) あるいは O^{7+} ($m/q = 2.29$) に関しては位置分解能が不十分のため分離できていないが、検出が認められるため、片方または両方のイオンが発生し

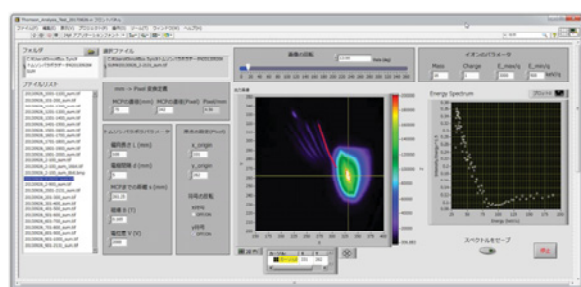


Figure 3. Analysis screen.

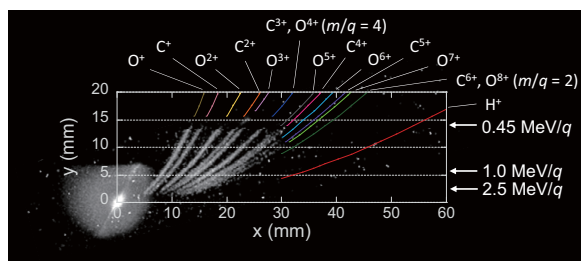


Figure 4. Results of identification of ion species and energies in acquired image.

ていると考えられる。裸のイオンである C^{6+} と O^{8+} は検出されなかった。水素イオンに関しては、本装置の観測範囲である 0.45 MeV 以上では観測されなかった。検出できているイオンに関して、最大のエネルギーは概ね 2.5 MeV/q である。最大エネルギーについて、CR-39 により測定した結果と比較するために、核子あたりのエネルギーに変換すると、約 0.9 MeV/u となる。この結果は CR-39 により測定した結果^{22,23)} と矛盾がない。

5 まとめと展望

以上のように、オンラインイオン検出のためのトムソンパラボラスペクトロメータを構築し、クラスターをターゲットとしたレーザー駆動イオン加速実験に適用した。本装置を用いて得られた結果は、CR-39 を用いて得られた結果と矛盾がなく、MeV 級イオンのオンライン検出に有用であることが示せた。

また、本装置の特徴として比較的小型にできていることがあげられる。この特徴を活かして、様々な高強度レーザー施設に、本装置を持ち込み、利用することができる。既に、台湾国立中央大学にて、実験室宇宙物理の研究のひとつである無衝突衝撃波加速の実証実験に利用された。比較的低エネルギーのイオン (≤ 10 MeV/u) に限定されるが、本装置を用いることで、レーザー駆動イオン加速研究が進展すると期待している。

〈謝 辞〉

本研究は、日本学術振興会「最先端・次世代研究開発支援プログラム」、および、「科学研究費基盤研究 (A)」の支援を受けて実施された。

〈参 考 文 献〉

- 1) H. Daido, M. Nishiuchi, A. S. Pirozhkov, Rep. Prog. Phys., 75 (2012) 056401.
- 2) A. Macchi, M. Borghesi, M. Passoni, Rev. Mod. Phys., 85 (2013) 751.
- 3) C. Danson, D. Hillier, N. Hopps, D. Neely, High Power Laser Sci. Eng. 3, (2015) e3.
- 4) H. Kiriyama, M. Mori, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, A. Sagisaka, A. Kon, T. Z. Esirkepov, Y. Hayashi, H. Kotaki, M. Kanasaki, H. Sakaki, Y. Fukuda, J. Koga, M. Nishiuchi, M. Kando, S. V. Bulanov, K. Kondo, P. R. Bolton, O. Slezak, D. Vojna, M. Sawicka-Chyla, V.

- Jambunathan, A. Lucianetti, T. Mocek, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 21, (2015) 1601118.
- 5) F. Nürnberg, M. Schollmeier, E. Brambrink, A. Blažević, D. C. Carroll, K. Flippo, D. C. Gautier, M. Geißel, K. Harres, B. M. Hegelich, O. Lundh, K. Markey, P. McKenna, D. Neely, J. Schreiber, M. Roth, Rev. Sci. Instrum., 80 (2009) 033301.
 - 6) D. Kirby, S. Green, F. Fiorini, D. Parker, L. Romagnani, D. Doria, S. Kar, C. Lewis, M. Borghesi, H. Palmans, Laser Part. Beams, 29 (2011) 231.
 - 7) L. Romagnani, M. Borghesi, C. A. Cecchetti, S. Kar, P. Antici, P. Audebert, S. Bandhoupadhyay, F. Ceccherini, T. Cowan, J. Fuchs, M. Galimberti, L. A. Gizzi, T. Grismayer, R. Heathcote, R. Jung, T.V. Liseykina, A. Macchi, P. Mora, D. Neely, M. Notley, J. Osterholtz, C. A. Pipahl, G. Pretzler, A. Schiavi, G. Schurtz, T. Toncian, P. A. Wilson, O. Willi, Laser Part. Beams, 26 (2008) 241.
 - 8) Y. Fukuda, A. Ya. Faenov, M. Tampo, T. A. Pikuz, T. Nakamura, M. Kando, Y. Hayashi, A. Yogo, H. Sakaki, T. Kameshima, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, M. Mori, T. Zh. Esirkepov, J. Koga, A. S. Boldarev, V. A. Gasilov, A. I. Magunov, T. Yamauchi, R. Kodama, P. R. Bolton, Y. Kato, T. Tajima, H. Daido, S. V. Bulanov, Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 165002.
 - 9) L. A. Gizzi, C. Altana, F. Brandi, P. Cirrone, G. Cristoforetti, A. Fazzi, P. Ferrara, L. Fulgentini, D. Giove, P. Koester, L. Labate, G. Lanzalone, P. Londrillo, D. Mascali, A. Muoio, D. Palla, F. Schillaci, S. Sinigardi, S. Tudisco, G. Turchetti, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 829 (2016) 144.
 - 10) S. Sakabe, T. Mochizuki, T. Yamanaka, C. Yamanaka, Rev. Sci. Instrum., 51 (1980) 1314.
 - 11) M. J. Rhee, R. F. Schneider, D. J. Weidman, Rev. Sci. Instrum., 58 (1987) 240.
 - 12) M.-F. Lu, C.-Z. Liu, S.-Z. Yang, Rev. Sci. Instrum., 68 (1997) 3738.
 - 13) W. Mróz, P. Norek, A. Prokopiuk, P. Parys, M. Pfeifer, L. Laska, M. P. Stöckli, D. Fry, K. Kasuya, Rev. Sci. Instrum., 71 (2000) 1417.
 - 14) K. Harres, M. Schollmeier, E. Brambrink, P. Audebert, A. Blažević, K. Flippo, D. C. Gautier, M. Geißel, B. M. Hegelich, F. Nürnberg, J. Schreiber, H. Wahl, M. Roth, Rev. Sci. Instrum., 79 (2008) 093306.
 - 15) H. Sakaki, M. Kanasaki, Y. Fukuda, M. Nishiuchi, T. Hori, A. Yogo, S. Jinno, K. Niita, Rev. Sci. Instrum., 84 (2013) 013301.
 - 16) J. J. Thomson, Philos. Mag. Ser. 6, 21 (1911) 225.
 - 17) T. Nakamura, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, M. Kando, Phys. Rev. Lett., 105 (2010) 135002.
 - 18) H. Kiriya, M. Mori, Y. Nakai, T. Shimomura, H. Sasao, M. Tanoue, S. Kanazawa, D. Wakai, F. Sasao, H. Okada, I. Daito, M. Suzuki, S. Kondo, K. Kondo, A. Sugiyama, P. R. Bolton, A. Yokoyama, H. Daido, S. Kawanishi, T. Kimura, T. Tajima, Opt. Lett., 35 (2010) 1497.
 - 19) A. S. Boldarev, V. A. Gasilov, A. Ya. Faenov, Y. Fukuda, K. Yamakawa, Rev. Sci. Instrum., 77 (2006) 083112.
 - 20) S. Jinno, Y. Fukuda, H. Sakaki, A. Yogo, M. Kanasaki, K. Kondo, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, T. A. Pikuz, A. S. Boldarev, V. A. Gasilov, Appl. Phys. Lett., 102 (2013) 164103.
 - 21) S. Jinno, Y. Fukuda, H. Sakaki, A. Yogo, M. Kanasaki, K. Kondo, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, T. A. Pikuz, A. S. Boldarev, V.A. Gasilov, Opt. Express, 21 (2013) 20656.
 - 22) M. Kanasaki, S. Jinno, H. Sakaki, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, M. Nishiuchi, H. Kiriya, M. Kando, A. Sugiyama, K. Kondo, R. Matsui, Y. Kishimoto, K. Morishima, Y. Watanabe, C. Scullion, A. G. Smyth, A. Alejo, D. Doria, S. Kar, M. Borghesi, K. Oda, T. Yamauchi, Y. Fukuda, Radiat. Meas., 83 (2015) 12.
 - 23) M. Kanasaki, S. Jinno, H. Sakaki, K. Kondo, K. Oda, T. Yamauchi, Y. Fukuda, Plasma Phys. Control. Fusion, 58 (2016) 034013.

〈著者略歴〉

神野 智史：2007年3月 東京都立大学大学院理学研究科博士課程修了，博士（理学）。2007年4月 千葉大学工学部共生応用化学科産学官連携研究員。2010年1月 立教大学理学部先端科学計測研究センターポスドクトラルフェロー。2011年7月 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門特定課題推進員。2014年4月 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻助教。

福田 祐仁：1993年3月 慶応義塾大学理工学部化学科卒業。1998年3月 東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了，博士（理学）。科学技術振興事業団

博士研究員などを経て，2001 年 3 月 日本原子力研究 上席研究員，
所博士研究員，2013 年 7 月 日本原子力研究開発機構
研究主幹，2016 年 4 月より量子科学技術研究開発機構