

Energy compression of a laser-produced proton beam by the application of a synchronous RF field

Akihisa Wakita^{1,A)}, Akira Noda^{A)}, Toshiyuki Shirai^{B)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masahiro Ikegami^{C)}, Hiromu Tongu^{A)}, Hikaru Souda^{A)}, Michiaki Mori^{C)}, Akifumi Yogo^{C)}, Satoshi Orimo^{C)}, Mamiko Nishiuchi^{C)}, Koichi Ogura^{C)}, Akito Sagisaka^{C)}, J. -L. Ma^{C)}, A. Pirozhkov^{C)}, Hiromitsu Kiriyama^{C)}, Yoshiki Nakai^{C)}, Takuya Shimomura^{C)}, Manabu Tanoue^{C)}, Atsushi Akutsu^{C)}, Hiroshi Okada^{C)}, Tomohiro Motomura^{C)}, Shuji Kondo^{C)}, Shuhei Kanazawa^{C)}, Hironori Sugiyama^{C)}, Hiroyuki Daido^{C)}

A) Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

B) National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

C) Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency
8-1 Umemidai, Kizugawa, Kyoto, 619-0215

Abstract

We have succeeded to compress the energy spread of a laser-produced proton beam to 1.6% at FWHM by the application of an RF electric field synchronous to the pulse laser. This laser originally generated protons with an energy spread of 100%. Radial focusing and defocusing effects caused by the transverse component of the RF field were also observed. Concerning this effect, we simulated the energy spectra from the calculated value of the electric field by POISSON; the simulation could almost reproduce the experimental results.

高周波電場によるレーザー駆動陽子線のエネルギー幅圧縮

1. はじめに

近年、加速器が医療・産業にも応用されるようになっており、特に粒子線がん治療においては、施設の小型化が望まれている。高強度・短パルスのレーザーによるイオン加速では、従来よりも高い100 GeV/mという高い加速勾配を持ち、加速器の小型化に貢献できる可能性を持っている^[1-4]。しかしながら、このレーザー駆動のイオン(主に陽子)ビームはエネルギーの増加とともに指数関数的に粒子数が減少するという特徴があり、エネルギーピークを持たず、エネルギー広がり形式的に100%といえるものである。この陽子ビームに高周波(RF)電場を印加してやることにより特定のエネルギー領域にピークを形成し、利用できる粒子数を増やすことに成功した^[5,6]。

2. 位相回転

このレーザー駆動陽子線は、1 ps以下の時間幅で発生し、今回印加するRF周波数79.33 MHzに比べて十分短く、ほぼ同時に発生するとみなすことができる。この陽子線を一定距離走らせてから、RF電場を印加することでlongitudinalの位相空間上で回転させ、エネルギー幅を圧縮する。粒子が得るエネルギーは

$$\Delta E = qVT \sin(\phi + \phi_0) \quad (1)$$

となる。ここで q は粒子の電荷、 V はRF電圧、 T は

Transit Time Factorである。また ϕ はイオンがRFギャップに到達するときの位相で、 $\phi = 2\pi f L / v$ と表される。 f はRF周波数、 L はターゲットからギャップまでの距離、 v は粒子の速度である。つまり ΔE は粒子の運動量の関数になり、初期位相 ϕ_0 、RF電圧 V を変化させることにより調整することができる。

3. 実験

実験は日本原子力研究開発機構関西光科学研究所のJ-KARENレーザーを用いて行った。

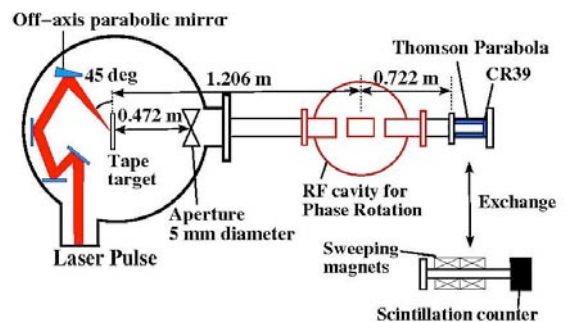


図1 実験セットアップ

¹ E-mail: wakita@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

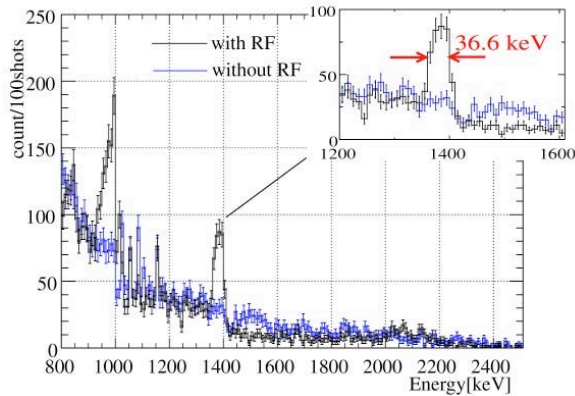


図2 RF電圧60 kVのときのエネルギースペクトル

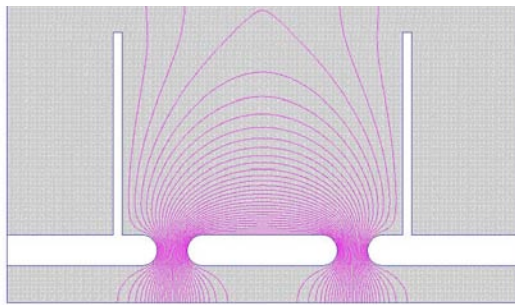


図3 RFギャップでの等電位面

実験のセットアップは図1に示したものである。検出器はTOF測定用のシンチレータ^[7,8]と、運動量測定用の入口を0.1 mmのピンホールで絞ったトムソンパラボラとCR39を用いた。TOF測定ではRFを印加した場合には正確な運動量測定ができないので、パラメータ調整用に用い、エネルギースペクトルの測定はトムソンパラボラとCR39を用いる。RF電圧はギャップあたり60 kV, 80 kV, 95.5 kVの3つの電圧で行った。

3.1 エネルギースペクトル

得られたエネルギースペクトルのうち、RF電圧60 kVのときのものが図2である。RFを用いない場合のスペクトルが青線で示してあり、これに比べ1 MeV, 1.4 MeV付近にピークができていことが見て取れる。1.4 MeVに最も効率よく陽子を集めることのできるRF電圧が60 kVであり、このときのピークは半値巾で36.6 keVであった。

また、トムソンパラボラとCR39を用いた場合、入口の0.1 mmのピンホールの幾何学的な大きさがそのまま分解能へとつながる。これを差し引くと、ピーク半値巾は約1.6%と見積もることができる。

3.2 RFによる横方向の効果

よく知られているように、RFギャップを通過するときには図2のような電気力線の形状から、進行方

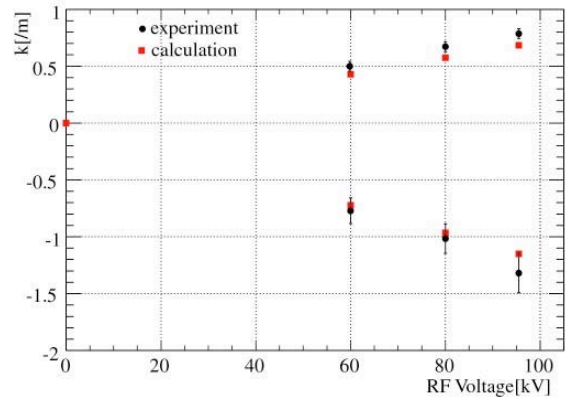


図4 RF電圧と焦点距離

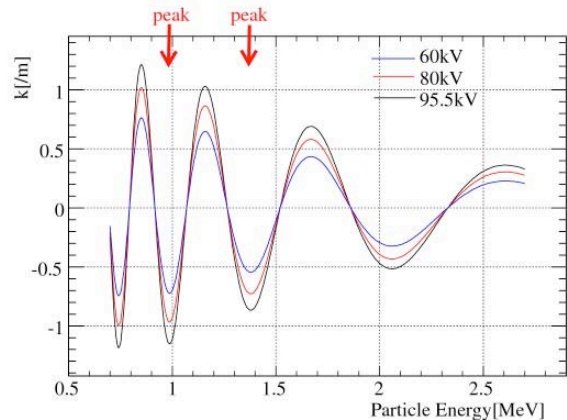


図5 数値計算による陽子エネルギーと焦点距離

向(longitudinal)だけでなく、横方向(transverse)にもkickを受ける。この影響は粒子の運動量により異なり、トムソンパラボラに入射する粒子の運動量の空間分布の一様性を失わせる。

この効果をターゲット後方134 mmに設置したメッシュと、cavity後方のCR39に結像したメッシュの間隔を比較することで測定した。後述の焦点距離がピークになる部分で結像すると考え、図4のデータは陽子エネルギーが1 MeV($k < 0$)と1.6 MeV($k > 0$)の場合のデータである。

3.3 POISSONによる数値計算

前述の横方向のkickにより、トムソンパラボラに入射する粒子の個数はfocusされる場合に増え、defocusされる場合に減る。この効果を考慮し、トムソンパラボラ入射前の陽子のエネルギースペクトルを見積もるため、RFギャップ付近の電場を計算した。ギャップ間隔が20 mmとRF波長に比べ短いので、静電場を時間的に変動させれば十分だと考え、POISSONを用いた。

計算結果を用いて、陽子エネルギーと焦点距離の関係を表したのが図5である。焦点距離は、cavity

中心をthin lensで近似し、ターゲット上の点光源から発生した場合で定義している。図5にも示しているが、スペクトル上でピークになるエネルギーで最も強くdefocusされる。これは電気力線の形状とRF加減速の原理からもわかることである^[9]。

3.4 シミュレーション

これらの結果をふまえて、実験を再現するようにシミュレーションを行った。元となるRFギャップ入射前のスペクトルは、RFなしの実験結果を指数関数でfittingしたものを用いている。RF電圧を60 kVとした場合の実験結果とシミュレーションの比較が図6であり、実験をよく再現していることがわかる。

さらに、トムソンパラボラに入射前のスペクトルを知るために、横方向の効果を考慮にいれずにシミュレーションを行った。図7の青線が横方向の効果を考慮しない、つまりトムソンパラボラ入射前のスペクトルを表すものである。確かにピーク部分の個数が横方向のkickを考慮する場合よりも多く、それ以外では少なくなっていることがわかる。

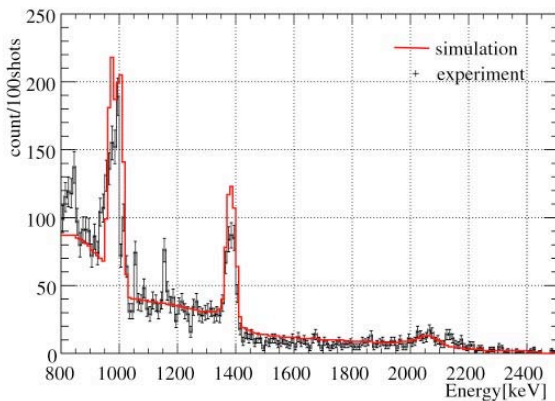


図6 RF電圧60 kVの
実験とシミュレーションの比較

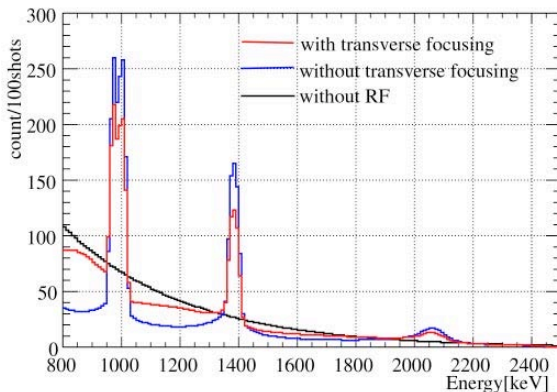


図7 RFによる横方向の効果

4. まとめ

以上のように、実験から位相回転による効果が測定され、数値計算によるシミュレーションにより実際のスペクトルを見積もることができた。またこれら一連の実験の詳細は別論文にまとめてある^[10]。この陽子線を利用する場合、ピークの部分を分析磁石で切り出して用いるため、実際に利用できる個数は、図7の青線のスペクトルから評価できると考えている。

参考文献

- [1] A. P. Fews et al., Phys. Rev. Lett. 73, 1801 (1994).
- [2] F. N. Beg et al., Phys. Plasmas 4, 447 (1997).
- [3] A. Yogo et al., Phys. Rev. E 77, 016401 (2008)
- [4] M. Nishiuchi et al., Phys. Plasmas 15, 053104 (2008)
- [5] A. Noda et al., Proceedings of the 7th Linear Accelerator Conference, LINAC2002, Vienna, p. 644 (2002).
- [6] S. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46 L717 (2006).
- [7] S. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45 L913 (2006)
- [8] A. Yogo et al., Phys. Plasmas 14 043194 (2007)
- [9] M. Ikegami et al., submitted to Phys. Rev. ST Accel. Beams.
- [10] A. Wakita et al., submitted to Nucl. Inst. & Methods section A