

ELECTRON ACCELERATION BY LASER PRODUCED PLASMA AND ITS APPLICATIONS

Kazuyoshi Koyama^{1 (A)}, Shinichi Masuda^(A), Susumu Kato^(A), Naoaki Saito, Eisuke Miura^(A),
Mitsumori Tanimoto^(B), Reiko Taki^(C)

^{A)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
Tsukuba Central-2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-8568

^{B)} Meisei University

2-1-1, Hodokubo, Hino, Tokyo, Japan, 191-8506

^{C)} The Graduate University for Advanced Studies (SIKENDAI)-KEK
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

Abstract

A scaling law of a self-modulated laser wakefield accelerator (SMLWFA) was experimentally obtained by using 6-TW laser pulses. An energy gain was inversely proportional to an electron density and proportional to the laser power. A quasi-monoenergetic electron bunch was emitted in a limited density region of $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ at a fixed laser power of 3-4 TW and 5-6 TW, respectively. This characteristic is similar to our previous experiments.

We studied feasibility of applications of laser wakefield accelerator and showed prospects.

レーザー・プラズマによる電子加速とその応用

1. はじめに

超高強度・超短パルスレーザーによって励起され、光速で伝播する電子プラズマ波（航跡場）は、相対論的効果によって密度変調 $\delta n/n_0$ が1以上、すなわち正弦波から大きく外れてピケットフェンス状になり得る。そのときの最大加速勾配は、

$$eE_{WB} = e\sqrt{2(\gamma_{ph} - 1)}E_0, \quad (1)$$

で与えられる。ここで、プラズマ波の位相速度を v_{ph} として、 $\gamma_{ph} = 1/\sqrt{1 - (v_{ph}/c)^2}$ であり、 E_0 は線形理論での碎波電場強度であり、プラズマ周波数を ω_p として、 $E_0 = m_e \omega_p c / e$ で与えられる。例えば、波長が800nmのレーザーパルスによって電子密度 n_e が $1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマにプラズマ波を励起するときの非相対論的な碎波の限界電場は $E_0 \approx 100 \text{ GV/m}$ であるが、相対論的効果によってプラズマ波は電場強度が800GV/mまで成長できる。このような大振幅のプラズマ波を励起するためには、レーザー電場中の電子の速度が相対論的になるようなレーザー強度 ($> 10^{18} \text{ W/cm}^2$) が必要である。

レーザーによる粒子加速の研究が大きく進歩したのは、超高強度・超短パルスレーザーが市販されるようになった1990年代の中頃からである。2004年には、産総研を始めとして世界の4研究所で準単色電子加速に成功した。その後の発展は目覚ましく、2005年末には世界の10ヶ所以上で準単色電子加速に成功している。

ある条件を満たせば準単色電子加速が可能である

事は明らかであるが再現性に問題がある。この分野における当面の課題は、再現性の向上と加速の制御である。昨年の講演で紹介した経験則は航跡場の励起方法の違いに関わらず成り立っているが^[1]、単色電子加速の機構を解明して再現性の向上と加速の制御技術を確立するためには、励起方法を固定した研究を行う必要がある。そのために、我々は、この種の研究にとっては比較的小型のテラワット級レーザーでも大振幅航跡場を励起できる自己変調航跡場加速の領域で実験を行った。具体的には、レーザーのパルス幅がプラズマ振動周期よりも長い領域である。

2. 加速の相似則に関する実験

2.1 実験条件と方法

我々の2004年の発表では、2TWの出力のレーザーを用いて電子密度が $(1-1.5) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のときに準単色電子ビームを得る事ができた。加速エネルギーは式(1)で表される加速勾配と加速距離の積で与えられる。加速距離に波と粒子の位相ずれで制限される脱位相距離を採ると、加速エネルギーは

$$W_{WB} = \pi m_0 c^2 \sqrt{2(\gamma_{ph} - 1)} \left(\frac{\omega_L}{\omega_p} \right)^2, \quad (2)$$

となる。式(2)および文献[1]の図3からは、電子密度を下げると加速エネルギーが増加することが予想

¹ k.koyama@aist.go.jp

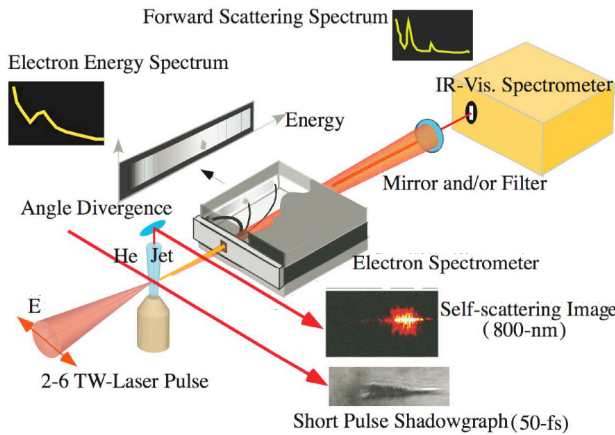


Fig.1: The schematic drawing of the experimental setup.

	Low-Density Experiment	High-Density Experiment
Density (cm ⁻³)	(2.6-5) × 10 ¹⁹	(1-2) × 10 ²⁰
Laser Power (TW)	2-6	2
Pulse Width (fs)	50	50
Focal Length (mm)	300	160
F-Number	6	3.3
Focus Diameter(μm)	9 (fwhm)	5 (fwhm)
Intensity (W/cm ²)	(1-4) × 10 ¹⁸	5 × 10 ¹⁸
Gas	He	He / N ₂

Table 1: Experimental conditions of low-density and high-density^[1] experiments.

される。

そのことを実証するために、電子密度を約4×10²⁰ cm⁻³に下げて実験を行った。脱位相距離は電子密度の1.5乗に反比例し、電子密度の低下によって急激に長くなる。その長さにわたってレーザーの集光強度を保つために、集光用反射鏡（軸外し放物面鏡）の焦点距離を伸ばして焦点の面積を大きくした。大きな焦点面の中で集光強度を10¹⁸ W/cm²以上に保ちレーザーによる電子の運動を相対論的にするために、レーザーパワーを最大6TWまで上げた。Fig.1に実験配置を、Table 1に実験条件を示す。

2.2 実験結果

得られた電子のエネルギースペクトルとそこに現れた単色エネルギーの電子密度依存性およびレーザーパワー依存性をFig.2に示す。結果からは、ほぼ予想通りに電子密度に反比例して単色成分のエネルギーが変化している事が分かる。また、2TWの実験

(□で表示) の時と同様に、電子密度を準単色電子が観測された領域よりも下げると高エネルギー電子はほとんど観測されない。一方、電子密度を上げると、単色ピークは消えて熱的な分布になる。Fig.2(b)(c)ではレーザーパワーが5-6TWで電子密度が3×10¹⁸cm⁻³の時の加速エネルギーが3-4TWの場合と同程度になっている。これは加速距離が脱位相長ではなくプラズマ長（ガスジェットの大きさ）で制限されているためであると考えられる。式(2)で与えられる加速エネルギーはレーザーパワーに依存しない。しかし実際には式(2)の大きさまでに振幅が増大させる事は難しく、振幅はレーザーパワーで制限されるものと考えられる。その効果を考慮すると加速エネルギーは、

$$W_{\max} = 4\pi \left(\frac{e^2}{m_0 c \omega_L^2} \right) \left(\frac{\omega_L}{\omega_p} \right)^2 \frac{P_L}{r_L^2}, \quad (3)$$

となり、Fig.2(b)(c)と良く一致している。ここで r_L は

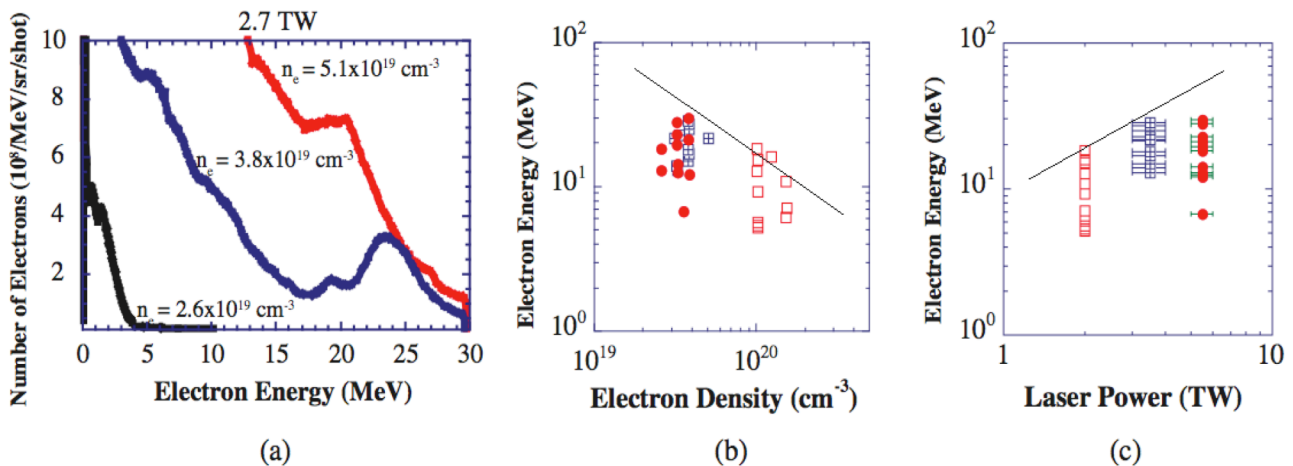


Fig.2: (a) Energy spectra of electrons at different electron densities. Each spectrum is the averaged of ten-shots. (b) Electron-density dependence of acceleration energies of electrons. (c) Laser-power dependence of acceleration energies of electrons.

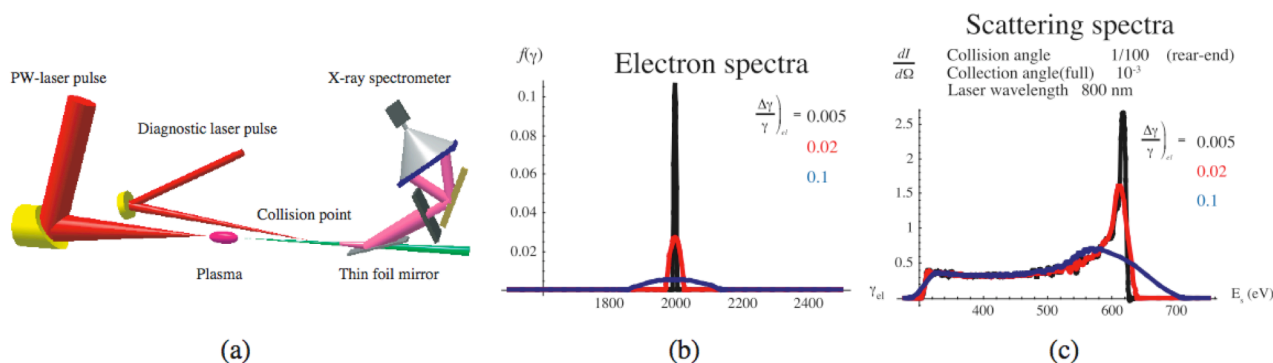


Fig.3: (a) A schematic drawing of GeV-class single-shot electron spectrometer based on a Thomson scattering. (b) Trial functions of electron spectra. (c) Calculated spectra from each electron bunch of (b).

焦点半径である。

Fig.2(a)は10回のショットの平均を示したものであり、連続成分とのコントラスト比は、再現性の低さが影響したためであると考えられる。単色成分の平均電荷量はレーザーパワーの増加につれて1ショットで得た最大値に近づく。このことは、レーザーパワーによって再現性の頻度が変わることを示唆している。

3. レーザープラズマ粒子加速の応用

レーザープラズマ粒子加速で得られる電子のバンチ長は100 fs以下の超短パルスであり電荷量が0.1-1nCと大きい上に、共通のレーザーパルスから超短パルスの電子バンチ、レーザーパルス、X線パルスを得る事ができるので、フェムト秒での同期が可能でありポンプ・プローブによる物性研究に最適である。また、数メートル四方に収まるレーザーでも50MeV級の電子を得る事ができる上に、レーザーは放射線を出さないで局所的遮へいで済む。これらのことから、医療や産業への応用も容易になると期待される。

応用に当たっては、ビーム伝送や集束技術も重要である。現在は磁石が使われる事が多いが、体積と重量が大きい上に電力消費量も大きい。レーザープラズマ粒子加速の基礎課程であるプラズマ中の静電場または動重力で押される電子流が作る磁場 ($>MG$)²を応用すると、放射方向を自由に変える事ができる可能性があり、ビーム伝送などの部分もセンチメートル級にできる。

我々は、レーザープラズマ粒子加速の応用の可能性を広げるために、電子顕微鏡の電子銃への応用と、トムソン散乱によるパルス硬X線源への応用を検討した。電子バンチが超短パルス・高エネルギーであるという特性を活かすことによって、課題は多いものの、従来にない性能の電子顕微鏡を実現できる可能性がある。一方、散乱X線を30keVにする事に

よって血管造影等への応用が可能になる。また散乱X線を測定する事によって、場所をとらずに使用する電子バンチ自身のエネルギースペクトルを知ることができる。Fig.3に示すように、電子ビームとレーザーの衝突角度を適当に選んで散乱X線の光子エネルギーをkeV以下にすると、多くの分散素子と高感度撮像機器を利用してシングルショットでエネルギースペクトルを得ることができる。これは、将来GeV級のレーザープラズマ粒子加速器ができた場合に有用なものになる。

4. まとめ

加速エネルギーは電子密度に反比例しレーザーパワーに比例するという、自己変調航跡場励起レーザープラズマ粒子加速の相似則を得た。プラズマの特性を応用すると、ビーム伝送系の超小型化も可能にして、加速・伝送・集束の全てをプラズマが担う従来とは全く異なる加速器システムが可能になる。

レーザープラズマ粒子加速の可能性を広げるために、電子ビームの直接的利用として電子顕微鏡への応用を検討し課題等を明らかにした。またトムソン散乱によるX線発生の実験も行い、電子のエネルギースペクトロメータへの応用の可能性を示した。

謝辞

この研究は、原子力委員会の評価に基づく文科省「原子力試験研究費」および文科省「先進小型加速器の要素技術の普及事業」によって行われた。

参考文献

- [1] K.Koyama, “第2回日本加速器学会年会、第30回リニアック技術研究会報告集Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, July. 20-22, p.92-96, 2005
- [2] M.Tanimoto, et al., Phys. Rev. E, **68**, 026401 (2003).