

PROSPECT FOR DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF MONOENERGETIC ELECTRON ACCELERATION BY LASER PULSES

Kazuyoshi Koyama*,

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

Abstract

Recent reports of the monoenergetic acceleration in the laser produced plasmas opened the way to realize the compact accelerators. Experimental results, which covered the plasma-density range of $6 \times 10^{18} \sim 1.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ and the laser-power range of $2 \sim 30 \text{TW}$, show the empirical scaling law of the laser-driven electron accelerators, which suggests the GeV-electrons might be obtained by using a few-hundreds TW lasers. On the bases of recent theoretical and experimental reports, the future prospect of the monoenergetic electron accelerations by laser pulses are discussed.

レーザーによる準単色電子ビーム加速の展望

1. はじめに

加速器は、20世紀前半に原子核物理学を進めるための実験装置として発明されその後大きく発展した。加速される粒子も多様化し、さらに二次的に発生する粒子や放射光などの多彩なビームの応用が多方面に広がり、今日の科学技術の発展に大きく貢献している^[1]。高エネルギー粒子ビームの有用性が認識されているにもかかわらず国内の加速器総数が約1000台(約半分が医療用)でしかないのは、加速器施設が大型化し膨大な資金と立地が必要とされるからである。これまで加速器開発の主題は高エネルギー、低エミッタンス、大強度といった出力ビームの性能向上に向けられ、多くの努力にもかかわらず未だ加速器を飛躍的に小型化するには至っていない。

加速器の小型化のためには加速電界を大きくすれば良い。しかし、高周波加速器は絶縁破壊によって加速電界が制約を受ける。周波数を上げて破壊電界を高くしても熱による構造材破壊によって加速電界が制限されるので1GV/mの加速電界を得ることは難しい^[2]。一方、始めから電離しているプラズマ中に起こる電子プラズマ波の電界を加速器に応用しようというアイデアがある。レーザー粒子加速に関する基本的アイデア^[3]が発表された後、大型レーザーが世界各地で建設され始めた1980年代にはレーザーを加速器に応用するために多くのアイデアが出され実験も行なわれた。しかし、当時のレーザー技術は未熟であり、実用化とは大きな隔たりがあった。

レーザーによる粒子加速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。最近の十年間で最高エネルギーは二桁以上の伸びを示し、数ミリの長さのプラズマで最高エネルギーが400MeVの電子ビームが得られるまでになった。しかし、出力ビームは100%に近いエネルギー幅でボルツマン分布に近く、高エネルギー成分の粒子数が極端に少ないことから、

加速器としての可能性を疑問視する声もあった。ところが、2003年から2004年にかけて産総研^{[7][9]}を始めとして、英^[11]仏^[12]米^[10]の4機関でレーザープラズマによる単色電子ビームの加速に成功した。その後、我が国では産総研の他に2機関で単色ビーム加速に成功している。このことはレーザー粒子加速による超小型加速器の実現に大きく近付いたものと言えることができる。

2. レーザーによる粒子加速

2.1 加速の原理

レーザーによる粒子加速はレーザーパルスのポンデロモーティブ力を利用する。ポンデロモーティブ力によって真空中で電子を直接的に加速する方法と電子プラズマ波を励起してプラズマ波の静電場によって加速する方法が提案されている。後者の方が、容易に長い距離にわたって大きな加速電場を発生できる。そのために、レーザーによる粒子加速の実験のほとんどはプラズマ波の電場を用いている。相対論的な強度のレーザーによってプラズマ波を励起して粒子加速に応用するというアイデアは田島等によって1979年に提案された^[3]。レーザーのパルス幅がイオンが動けない程の短時間であると、強力なレーザー場によって動かされたプラズマ中の電子はレーザーパルスの後ろに大振幅のプラズマ波(航跡場)を作る。航跡場の位相速度はレーザーの群速度に等しい。航跡場に電子を波乗りさせることによって、電子は加速される。密度が n_e のプラズマ中で維持できる一次元航跡場の最大電場は「碎波(wavebreaking)」のときに発生し $E_{WB} [V/m] \approx 96 \sqrt{n_e [cm^{-3}]} \sqrt{2(\gamma_\phi - 1)}$ である。ここで $\gamma_\phi = 1/\sqrt{1 - v_\phi^2/c^2}$ は航跡場の位相速度(レーザーパルスの群速度)に対するローレンツ因子である。実験に用いられている多くのレーザー強度(規格化されたベクトルポテンシャル a_0 で表わすと、 $a_0 < 2$)では E_{WB} まで励起できず、航跡

* E-mail: k.koyama@aist.go.jp

場の振幅はレーザー電場 a_0 で決まる大きさでしかない。そして、その時の最大エネルギー利得は $W_{\max} = 2\gamma_{\phi}^2 m_e c^2 (a_0^2 / \sqrt{1 + a_0^2/2})$ となる。その時の最適加速距離 (航跡場と電子の位相ズレで決まる長さ) は $L_{dp} \approx (2c/\omega_{pe}) \gamma_{\phi}^2 = (\lambda_{pe}/\pi) (n_c/n_e)$ で与えられる^[4]。例えば、 $a_0 \approx 2$ の強度のレーザーを用いると密度が $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のプラズマ中に長さ 6mm の航跡場を励起することによって 1GeV 強のエネルギー利得を得ることができる。このように、高い電場強度のある距離にわたって発生できれば、従来の高周波加速器の 1/100~1/1000 の大きさの加速器を実現できる。

航跡場の励起方法は航跡場の振動周期 ω_p^{-1} とレーザーのパルス幅 τ_L との大小関係で一般に二つに分類される。一つは Standard Laser Wakefield Accelerator (LWFA) と呼ばれるものでレーザーのパルス幅と航跡場の周期の間には $\omega_p \tau_L \approx 1$ なる関係がある。もう一つはレーザーのパルス幅が航跡場の周期よりも長い場合 $\omega_p \tau_L > 1$ で、プラズマ波 (密度変調) とレーザー光および散乱光の 3 波の結合による航跡場励起で Self Modulated Laser Wakefield Accelerator (SMLWFA) と呼ばれている。

レーザー粒子加速のどの方法においても、高周波加速器と違って金属の構造体を使わずに電離気体であるプラズマ中にパルス的に加速場を生成して粒子を加速する。加速場の大きさは 100GeV/m に達する。また、レーザーのスポット径が小さく電子ビームの径も小さいので、最先端の高周波加速器と同程度の大きさの横方向規格化エミッタンスが得られる。

2.2 研究開発の経緯と現状

2.2.1 開発の歴史

レーザー粒子加速の研究の黎明期は、2 波長のレーザーのビート周波数とプラズマ周波数の共鳴を利用したレーザービート波加速 (LBA) の研究が行われていた^[5] が、共鳴条件を満たすプラズマ生成が難しいこととレーザービートとプラズマ波の位相ズレによってプラズマ波の振幅が碎破よりずっと低いレベルで飽和が起こったために、その後の発展が伸び悩んでいた。その後、画期的な超短パルスレーザー増幅法であるチャープ・パルス増幅法 (CPA)^[6] が発明されると、核融合研究用に開発された Nd:ガラスレーザーの一部を改造して得られる数十 TW、数百 fs のパルスを用いたレーザー加速 (SMLWFA) の研究が行われた。図 1 に示すようにここ十数年で最高エネルギーは一桁以上高くなっている。

しかし、ガラスレーザーは増幅できる波長帯域からくる制約によって、数百 fs 以下の超短パルスにすることはできない。つまり、ガラスレーザーで更に大きなパワーを得るためには、大型化してエネルギーを更に増加しなければならないという問題があった。また、イオンプラズマ振動の周波数は数 THz 程度であり、数百 fs のパルス幅の間には航跡場形成にイオンの運動も影響するなどの問題もある。その後、増幅できる波長帯域が広くて冷却特性に優れたチタン・サファイアレーザーが発明されると、100fs 以下のパルス幅領域でのレーザー粒子加速の研究が進んだ。チタン・サファイアレーザーを用いて得られた最高エネ

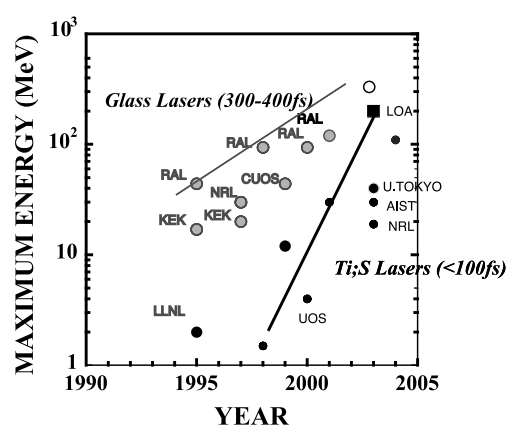


図 1: レーザー粒子加速で得られた最高エネルギー利得の進歩。

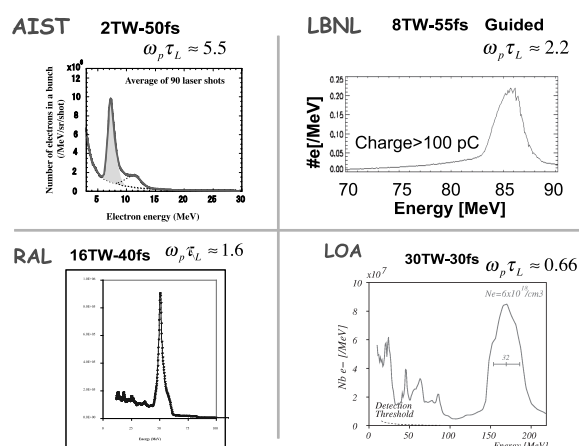


図 2: AAC04 で発表されたレーザー粒子加速による単色エネルギースペクトル。

ルギーは、図 1 に示すように最近の十年間で 2 桁以上の伸びを示している。特に最近の数年間、イオンの動きが全く影響しない約 50fs より短いレーザーパルスでの実験が主流である。パルス幅が 50fs 以下では、2TW のレーザーパワーでも 30MeV 以上に加速されることが実証されている。チタン・サファイアレーザーはパルスエネルギーの増加ではなくパルス圧縮によって大きなパワーを得ているので、出力の割には小型で済むという特徴がある。

これだけを見ていると、今にもレーザー粒子加速が高周波加速器に取って代りそうに思えるが、大きな問題があった。それは出力ビームの横エミッタンスは小さいものの、エネルギースペクトルがかほぼ 100% の幅を持ちマクスウエル分布に近いことであった。これでは最高エネルギー近傍の電荷量は小さい上に応用範囲が限定されてしまう。

2.2.2 単色電子ビーム加速

2003 年に産総研が、単色ビーム加速の可能性を示す実験結果^[7] を発表した後、2004 年になると産総研を始めとして^{[8][9]}、RAL(英)^[11]、LBNL(米)^[10]、LOA(仏)^[12] で、相次いでエネルギー広がり数が数%以下の単色電子ビームが得ら

れるようになり、レーザープラズマ加速もやっと加速器と呼べるようになった。図2に2004年のAACで発表された4機関のエネルギースペクトルを示す。

この後、原研関西研と電中研のグループ^[13]および東大原研^[14]でも単色ビームが得られたように、レーザー粒子加速で単色ビームが得られることは確かである。これら単色ビームはどのような実験条件で得られたのであろうか。ここにあげた4つの実験はレーザーパワーが2TW~30TWと一桁以上、電子密度は $6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3} \sim 1.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ と二桁以上の範囲をカバーしている。しかし、発表されているデータから単色ビームが得られる条件をまとめると、図3のように、レーザーパワーにほぼ比例して単色ビームのエネルギーは増加しているが、レーザーパワーが与えられると、電子密度の狭い範囲(2倍程度)でしか単色ビームを得ることができない。いずれの場合もこの領域より高密度ではマックウェル分布に近くなる。エネルギー利得の密度依存性は概ね電子密度に反比例している。このことから電子は高速で動く航跡場(プラズマ中のポテンシャル)に捕捉されてエネルギーを得ているとみることができる。しかし、図2の中に記したようにそれぞれの $\omega_p \tau_L$ が0.6(LOA)~5.5(AIST)と大きく違い航跡場の励起機構は必ずしも同じではない。また、加速距離 L_{acc} と航跡場と電子の位相ズレの距離 L_{dp} の比 L_{acc}/L_{dp} は1以下から5程度までの違いがある。図3をみるとRALとLBNLは同程度の電子密度で実験を行ない同程度のエネルギー利得を得ているが、プラズマチャンネルを形成してレーザーパルスのガイドを行なっているLBNLの方がレーザーパワーが約半分である。この結果は、あるエネルギー利得を得るためにはプラズマチャンネルを用いると約半分のレーザーパワーで済むことを示唆している。パルス当りの電荷量は、30TWのレーザーで加速したLOAの結果がもっとも大きくて、170MeVの単色ピークの中に約500pCの電荷が含まれている^[12]。

3. 課題と展望

3.1 現状と課題

レーザー粒子加速において単色ビームが得られるようになった。しかしまだ単色ビームは条件を整えれば必ず得られるというまでには至っていない。その原因を探り、単色ビームを思い通りに得られるようにすることが当面の課題である。一方、既に100MeVのエネルギーは得られているので、エネルギー幅が問題にならない分野への応用は可能である。レーザー粒子加速器開発の促進のためには、単色ビーム制御に係る物理の研究と応用を見据えた周辺技術開発の2つを実行することが重要である。

レーザー粒子加速では、加速エネルギーがGeV以下であれば一段加速で間に合いそうであるが、GeVを超える加速には10cm以上のレーザーガイドや多段加速などが必要になる。当面はGeV以下の単色ビームを確実に得られるような技術開発を行ない、その過程で航跡場制御やプラズマによるビーム制御に関する知見が深まればレーザーによる \gg GeV加速器も

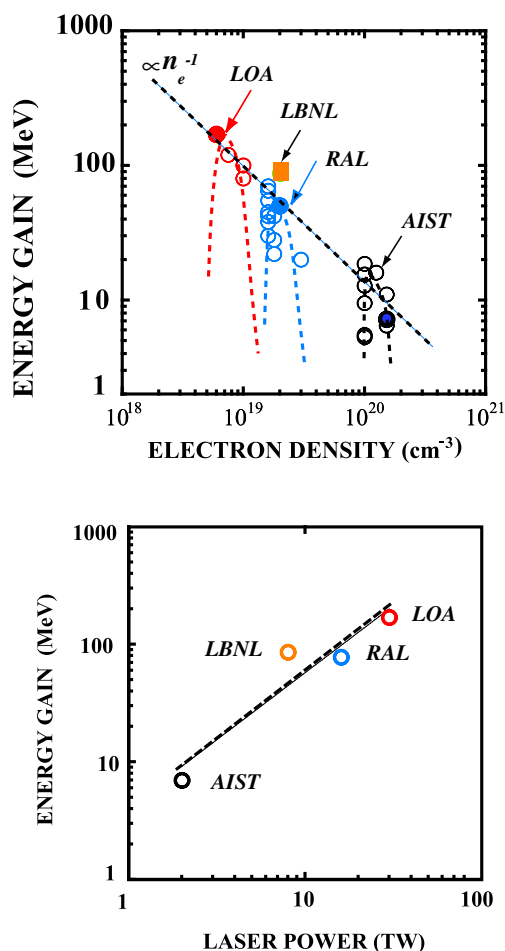


図3: 単色ビーム加速のエネルギー利得の実験的比例則。上の図はレーザーパワーが一定の場合の密度依存性。下の図は得られた最高エネルギー利得のレーザーパワー依存性。

夢ではなくなる。

レーザー粒子加速では航跡場に電子を供給する必要がある。入射電子のエネルギーは航跡場による捕捉条件を満たせば良いが、航跡場によって捕捉される時の位相は加速相になければならない。また、航跡場の半径方向電場分布は電子バンチの集束と発散に影響するが、加速・減速の位相とは約 $\pi/2$ のズレがあるので、入射電子のバンチ長は航跡場の波長の1/4以下、すなわち電子密度が $10^{18} \sim 10^{19} \text{W/cm}^2$ のプラズマを使う場合には $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ($\approx 3 \sim 6 \text{fs}$)にしなければならない。このような超短バンチの発生方法として様々な提案がなされているが、ここでは省略する。

最近の単色ビーム加速に関する一連の実験では、外部からの電子バンチの入射ではなく背景プラズマを電子源とする「自己捕捉」(Self-trapping)に依っている。特に制御された条件でないにもかかわらず、超短バンチが生成され加速される機構に関して示唆に富んだ論文が出た^[15]。そこでは、航跡場の位相速度が半径方向に異なるので、航跡場の伝播につれて波面のたわみが増大し、半径方向(横方向)の碎波が

起こり、局所的に超短パルスの電子入射が起こったと考えている。これとは別に、レーザーのプリパルスによって発生した衝撃波が作る密度の跳びの部分で（進行方向の）砕波が発生し電子入射が起こるという研究もある^[16]。条件を固定して実験しても、単色ビームが得られる場合とそうでない場合があるのは、これら（砕波による電子入射）の効果が都合よく発生したときだけ、微妙なバランスの上で単色ビームが得られているものと思われる。単色ビームを必ず発生させるためには、別のレーザーパルスを用いたりプラズマの密度分布のパラメータ等を変化させて、砕波による電子入射の効果を外的に制御する技術を開発する必要がある。

安定して出力ビームを得るためには、超短バンチの電子入射の制御の他に、航跡場の振幅と持続距離（加速距離）の制御も必要である。航跡場の振幅はプラズマ密度とレーザー強度の平方根でほぼ決まってしまう。つまり、加速長を何らかの方法で限定すればエネルギー利得は航跡場の振幅だけの関数になるので、プラズマ密度とレーザー強度に多少の変動があっても影響は少ない。一方、加速長に変化があるとエネルギー利得はそれに比例して変動する。現在行われている多くの実験では、真空中にパル的に吹き出したガスに集光してプラズマを生成し電子を加速している。つまり電子加速の距離はガスジェットの幅もしくはレーザービームの自己集束の終了で制限されており、特別に制御している訳ではない。従って、図3のようにエネルギー利得にバラつきがあっても不思議ではない。

3.2 展望

以上のことから、(1) 入射電子のバンチ長・航跡場への入射位相および入射点の制御、(2) 大振幅航跡場の励起、(3) 加速長の制御ができれば、安定して単色エネルギーの出力ビームを得られることがわかる。これらは、いずれもあたりまえの項目であるが、最近の単色ビーム加速の実証実験によって、以前とは比べ物にならないくらい電子入射機構・航跡場の励起・加速距離の制限などの実際が明確になってきた。そのことによって、やっと具体的に対策を立てることができるようになった。電子ビームのエネルギーは、図3から分かるように、プラズマの密度を変えることによって制御できる。プラズマの密度を下げると大振幅の航跡場を作るために大きなレーザーパワーを必要とするが、この図からは GeV のエネルギーでも 200-300TW のレーザーで加速可能なことが分かる。長さは数 cm でよい。200-300TW のレーザーは 100m² 程度の部屋に納まる大きさにできる上に、レーザーは放射線とは無縁である。またビームを止めるためにはレーザー発振器直後の極く弱いビームを止めれば良いので極めて安全性が高い。

エネルギーが GeV で電荷量が数百 pC、バンチ長が数十 fs の電子とレーザーパルスを衝突させると MeV 級のエネルギー可変・超短パルスガンマ線を得ることができる。将来は高性能の放射線を利用するために大型施設に出かける必要が無くなるかも知れない。このようなことを実現するためには、レーザーの安定

化とプラズマ制御技術（密度制御、分布形状制御）の開発が不可欠である。

組織立って開発を進めれば、数年後には GeV 級レーザー粒子加速の実証機設計が可能になるであろう。加速部分が小さくなくてもビームの集束や偏向には大きな場所が必要になるという意見もあるが、プラズマ中の電場や磁場を使うとこれらの機器も超小型化が可能にできるかもしれない^[17]。本稿では、電子加速に関してだけ述べてきたが、GeV 級レーザー粒子加速技術の開発の過程で航跡場励起の物理と技術が進めば、現在のように固体薄膜に照射するのではなく、プラズマ波によるイオン加速に応用できる可能性もある^[18]。

3.3 周囲の情勢

これまで盛んに研究を進めてきたアメリカや EU は、単色ビーム加速の発表後は開発に本腰を入れ始めた。レーザー粒子加速は従来の高周波加速器に比べて低コストで高エネルギービームが得られる可能性が高いことから、従来からの研究グループに加えて、新興勢力も勢いを増してきている。近年はインド、中国、韓国、台湾などのアジア各国で数十～百 TW の出力で、パルス幅が 30fs の超短パルスレーザーを整備しており、いずれも 2005 年内に実験に供される計画になっている。我が国では、これまでは個々の小さな組織が独立して研究を進めてきたが、個々のグループの独自性を活かしつつ集約して開発を進める場が必要であろう。

4. まとめ

レーザー粒子加速の基本的概念が出てから四半世紀経ち、超高強度レーザーが一般に広まり、レーザー粒子加速の実験が盛んになってから約十年経って、ようやく単色電子ビームが得られるようになった。まだ再現性には問題はあっても、世界の各地で独立に行なった実験で似たような結果が得られている。このことによって、レーザー粒子加速の物理が急速に明らかになりつつあり、電子入射、航跡場励起、加速距離の制御に関する研究も進んでいる。現在のレーザー技術でも少し広めの実験室があれば、数百 pC でエネルギーが GeV の電子バンチを 10Hz で得ることは可能であり、ここで手を抜かなければ、数年後には GeV 級レーザー粒子加速の実証機設計が可能になる。

また、イオンが動けずに流体的不安定性が成長しないような時間スケールでのプラズマ制御技術の開発によって、高エネルギービーム施設を驚くほど小型にできる可能性がある。

なお、蛇足になるが、1946 年に完成した世界初の電子計算機 ENIAC は、1 万 7 千本の真空管を使い、重量が 30 トン、消費電力が 170kW であった。その 3 年後に、専門家の将来予測が雑誌に掲載され「いつの日か、ENIAC は、5 千本の真空管で、重量は 1.5 トン、消費電力は 10kW まで小型化するであろうと」書かれている^[19]。ところが、この将来予測があった

前年(1948)には、ショックレイ等がベル研で接合型のトランジスタを発明していた。その後の世の中がどのように進んだかは、説明の必要が無い。レーザー粒子加速も同様な発展をするであろうが、現状のままでは日本の先導で発展するという保証はない。

5. 謝辞

論文の中心課題である単色ビーム加速とその応用に関する研究は、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」によって実施中のものである。

参考文献

- [1] J.Particle Accelerator Soc. of Japan, **1**, 2, 2004.
- [2] P.W.Wilson, "Linear Accelerators for TeV Colliders", Laser Acceleration of Particles, AIP Conf. Proc. **130**,560, 1985.
- [3] T.Tajima and J. M. Dawson, "Laser Electron accelerator", Phys. Rev. Lett. , **43**, 267, 1979.
- [4] S.V.Bulanov, et al., "Relativistic Interactions of Laser Pulses with Plasmas", in *Reviews of Plasma Physics*, Vol.22, ,(Kluwer Academic,NY,2001.
- [5] Y.Kitagawa, et al., "beat-Wave Excitation of Plasma Wave and Observation of Accelerated Electrons", Phys.Rev.Lett. **68** , 48, 1992.
- [6] D.Strikland and G.Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses", Opt.Commun. **56**,219,1985.
- [7] K.Koyama, et al., "High-Energy Electron Beam Possessing Energy Peaking at 6 MeV Generated by a TW laser Pulse with a Dense Pulsed Gas Jet", Bulletin of the APS, 45th-DPP, Albuquerque,NM, UPI 50, **48**, No.7,350, 2003.
- [8] K.Koyama, et al., "レーザー・プラズマ加速で単色ビームの発生に成功・世界初", J.Particle Accelerator Soc. of Japan, **1**, 158, 2004
- [9] E.Miura, et al., "Demonstration of quasi-monoenergetic electron-beam generation in laser-driven plasma acceleration", Appl.Phys.Lett. **86**, 251501, 2005.
- [10] C. G. R. Geddes, et al., "High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding", Nature **431**, 538, 2004.
- [11] S. P. D. Mangles, et al. , "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions", Nature **431**, 535, 2004.
- [12] J.Faure, et al., "A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams", Nature **431**, 541, 2004.
- [13] H.Kotaki, et al., "レーザープラズマ相互作用による単色ビーム発生", ビーム物理熊取研究会 2004. URL: <http://www.wal.kuicr.kyoto-u.ac.jp/bpc/meet04/proc.html>
- [14] T.Hosokai, et al., "レーザープラズマカソード実験に用いる超音速ガスジェット標的", 日本物理学会第 60 回年次大会,25pXM-7, 2005.
- [15] S.V.Bulanov and T.tajima, "On the Quasi-Monoenergetic Electron Beam Generation in the Laser Wakefield Acceleration", J.Particle Accelerator Soc. of Japan, **2**, 35, 2005.
- [16] T.Hosokai, et al., "Effect of a laser prepulse on a narrow-cone ejection of MeV electrons from a gas jet irradiated by an ultrashort laser pulse", Phys.Rev. E **67**, 036407, 2003.
- [17] R.Kodama, et al., "Plasma devices to guide and collimate a high density of MeV electrons", Nature, **432**,1005, 2005.
- [18] A.Ogata and T.Katsouleas, "Proton Acceleration in Plasma Waves Produced by Backward Raman Scattering", AIP Conference Proceedings, **472**, 551, 1999.
- [19] Physics Today on line. Jan, 2000 "Disruptive technology ", URL: <http://www.physicstoday.org/vol-53/iss-1/p38.html>