

ACCELERATION EXPERIMENT BY PLASMA WAKE-FIELD

Takao URANO, Atsushi ENOMOTO, Takao OOGOE, Satoshi OHSAWA, Atsushi OGATA,
Hitoshi KOBAYASHI, Kazuhisa NAKAJIMA, Hiroshi NAKANISHI and Yasushi NISHIDA

National Laboratory for High Energy Physics

*Department of Electrical Engineering, Utsunomiya University

ABSTRACT

Experiments of plasma wake-field accelerator have started at KEK utilizing a high-intensity electron beam for positron production. Acceleration and deceleration have been observed in the fourth and the fifth bunches of a 250 MeV, 2 ns, >6 A beam at plasma densities around $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

1. はじめに

次世代の高エネルギー物理学に必要となるであろう超高加速電界をもつ加速器の可能性が、ここ十年の間、理論的な議論となってきた。プラズマを利用した加速器もその一つで、プラズマビート波加速器=Plasma Beat-Wave Accelerator (PBWA)、プラズマ航跡波加速器=Plasma Wake-Field Accelerator (PWFA)、 $V_p \times B$ 加速器 (または、Cross-Field Accelerator (CFA)) の三種類が考えられている。それぞれの得失については別の報告¹⁾にゆずるが、このうち、PWFAは先行する駆動ビーム (Driving beam) が励起したプラズマ波により、後続のビーム (Trailing beam) を加速しようというものである。PWFAでは、励起されるプラズマ波が駆動ビームの形状によるため、その制御を要するなどの技術的問題点を持つが、反面加速装置が比較的簡単であるという特長をもっている。

PWFAの実験は、米国アルゴンヌ国立研究所のAATF (Advanced Accelerator Test Facility) で初めて行われた。報告によると²⁾、密度約 $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマ中に、電子ライナックで加速された大電荷 (2-3 nC)、21 MeV の1個のピコ秒電子バンチを駆動ビームとして入射した。後続ビームは小電荷の1個の15 MeV電子バンチで、駆動ビームからの遅延時間 (0-200 ps) により約 $\pm 50 \text{ keV}$ の範囲で周期的に加減速を繰り返した。プラズマ長 (約30 cm) と後続ビームのサイズを補正して、約 1 MeV/m のプラズマ航跡波が励起されたと結論している。

われわれは、より大きな加速電場を得るべく、KEK陽電子発生装置の短パルス大電流ビーム (2 ns、10 A) を利用して実験を開始することにした³⁾。われわれの実験の特徴は1) 駆動ビームも後続のビームもエネルギーが高く、超相対論的なこと、2) 陽電子ビームも利用できること、3) 複数個の駆動バンチの相乗効果が期待できること、4) ビーム強度が大きく、非線形効果により強いプラズマ波の発生があること、5) 加速装置が他と比較し簡単 (プラズマ容器のみ) で、大部分既存の設備を利用するため費用がかからないことである。

2. 駆動ビームによるプラズマ波の励起

図1にプラズマ中に電子バンチを入射したときにできるプラズマ航跡波のイラストと航跡波ポテンシャルのシミュレーションの計算例⁴⁾を示す。航跡波は、それを励起する駆動バンチの中では一般に

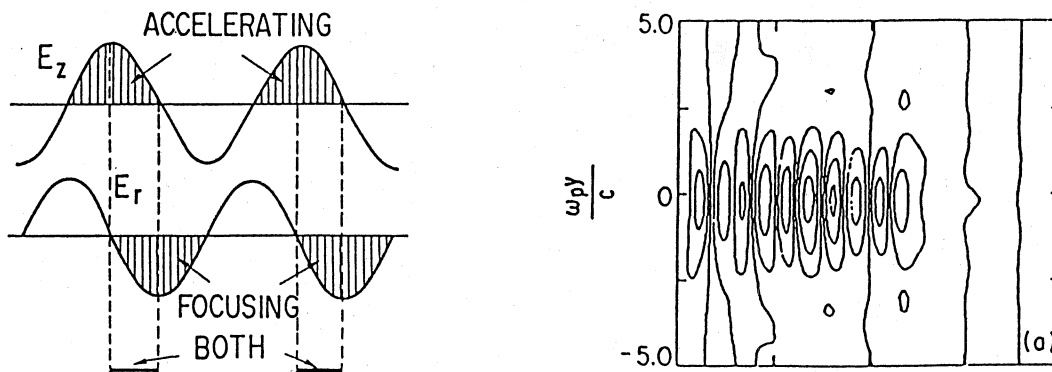


図1. (a) プラズマ波の電場分布

(b) 等ポテンシャル面の計算例 (文献4)

減速かつ集束の効果を与える。そして、駆動バンチの後に $\omega_p = (4\pi e^2 n_0 / m_0)^{1/2}$ (n_0 : プラズマ密度、 m_0 : 電子質量) の角周波数をもち正弦波的に繰り返す静電場を残す。この波の位相速度は駆動バンチの速度 v_b である。従って、この波の波数と波長は $k_0 = \omega_p / v_b$ 、 $\lambda_0 = 2\pi / k_0$ である。駆動ビームの通過する中心軸上では、軸方向 (z 方向、縦方向ともいう) の電場成分 E_z しか持たないが、軸からずれたところでは横 (r) 方向の成分 E_r を持つ。このことから、後続ビームは、 $E_z > 0$ かつ $E_r < 0$ の位相で加速する必要がある。

航跡波の強度は、駆動バンチの形状に大きく依存するため数値計算のシミュレーションに依らねばならない。文献²⁾によると、ディスク状バンチの場合、駆動バンチの電荷、横方向の半径、縦方向の長さ (バンチ長) を各々 Q 、 σ_r 、 $2\sigma_z$ とすると、縦方向の航跡波は $(Q/\sigma_r^2)\eta(k_0\sigma_r) \times \exp(-(k_0\sigma_z)^2/2)$ に比例する。ここで $\eta(k_0\sigma_r)$ は航跡波の波長に比べてバンチの半径が小さいとき、航跡波が横方向にひろがり縦方向の成分が弱まる効果である。バンチ長は短いほど強く励起される。

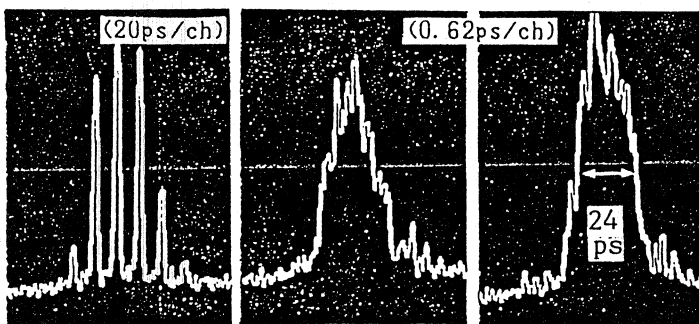
3. 実験装置及び実験方法

実験は K E K 陽電子発生装置⁵⁾ の短パルス大電流ビームをビームダンプに導いて行った。ビームダンプの前にはプラズマ容器とエネルギー分析電磁石を設置した。また、バンチ毎のエネルギースペクトルを測定する必要があるので、分析電磁石の後ろに空気チェレンコフ光を発生させるスペースをとり、この光を平面鏡と無収差レンズの光学系でギャラリーのストリークカメラに導いている。

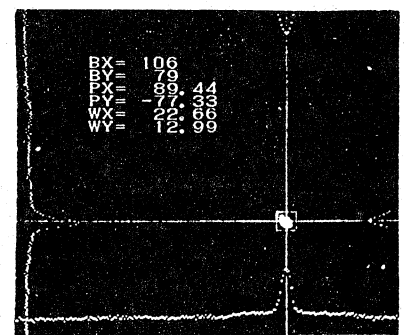
1) 電子ビームのパラメータ

陽電子発生装置は中央付近に陽電子発生用標的を置き、前半、後半が各々 250 MeV の電子、陽電子を加速する。しかし、プラズマ加速実験時は標的を遠隔操作でビームラインから引き抜き、また放射線申請の関係で、現在は後半の加速を止め、さらにビームパルスの繰り返しを 1 Hz 以下に下げている。陽電子を発生させるための 1 次ビームは、トリスタンリングに単バンチの陽電子を供給する必要上、パルス幅全幅が 2 ns 以下である。この中に、2856 MHz の加速周波数でバンチされた 6 個のバンチが 350 ps の間隔で入っている。パルスビームのピーク電流は約 10 A である。この内、7 A 前後をビームダンプに導いき、プラズマ容器に集束させている。図 2 に、2 ns 分解能のストリークカメラで観測したパルストレインの形、バンチ幅、及び画像処理装置でみたプラズマ容器前のスクリーン上のビームスポットを示す。また以下にビームパラメータをリストする。

beam energy (E):	250 MeV	radius(σ_r):	1-1.5 mm	normalized emittance:	0.001π m.rad
bunch length (σ_z):	10 ps	bunch distance:	350 ps	total charge:	5 nC



(a) PULSE (b) 2nd-BUNCH (c) 3rd-BUNCH



(b) 画像処理したビームサイズ

図 2. (a) 2 ns 電子ビームのバンチ構造

2) プラズマの発生

プラズマ容器を図 3 に示す。プラズマはタングステンフィラメントをカソードとして、容器の内面との間でアルゴンガスをパルスの放電させて作り、永久磁石によるマルチダイポール磁場で閉じ込めている。長さ約 1 m、中心から半径約 10 cm の領域で、最大密度 10^{12} cm^{-3} 、最高温度 3 eV

程度の一様なプラズマが得られることを確認している。温度、密度の測定はラングミュアプローブで行っている。

3) バンチのエネルギースペクトルの分析

この実験ではバンチ毎のエネルギースペクトルを分離して測定することが不可欠である。そのため偏向電磁石によるエネルギー分析と、ストリークカメラによるピコ秒の時間分析を組み合わせることが必要である。

すなわち、図4に示すように分析磁石で分散したビームから出るチェレンコフ光をストリークカメラに入れて、ストリークチューブのスイープ軸とこれに垂直な軸において同時に分析することにより、このことが可能である。チェレンコフ光を反射させる平面鏡は直径15cmでビームのエネルギー分散が18.7mm/%の位置にある。平面鏡に一度にはいるエネルギー幅は約8%である。この平面鏡上の物点がストリークカメラのスリット上に集束し、かつ像のエネルギー分散軸がストリークチューブのスイープ軸と垂直になるように調整した。図5に観測例をあげる。この図では上下方向が時間分析軸、横方向が空間的なエネルギー分散像をあらわしている。図で上、右が各々時間が早く、エネルギーの低い方向である。画面の全幅は縦約3.4ns、横約25%である。図の例では上から第4、5バンチのストリーク像と分析された第4バンチのスペクトルを示している。

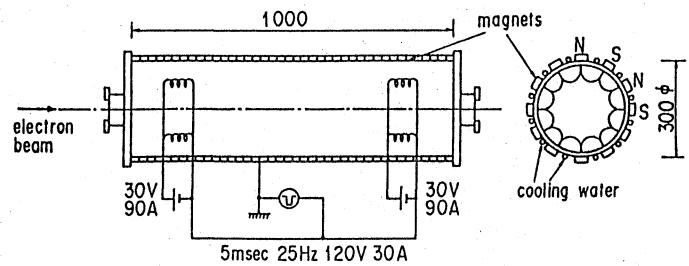


図3. プラズマ発生装置

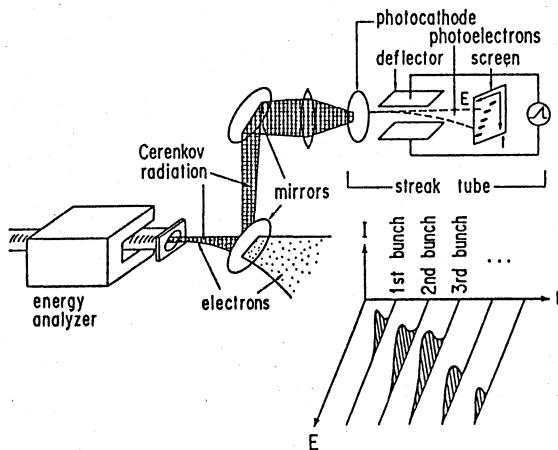


図4. バンチエネルギー分析系

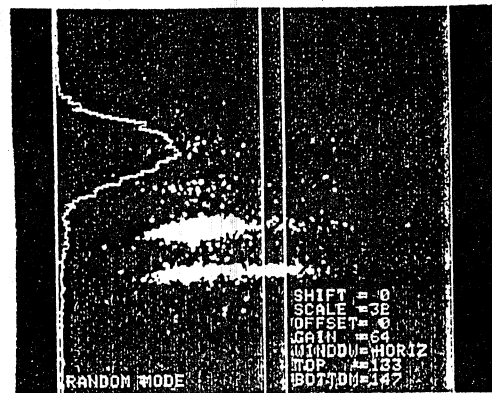


図5. ストリークカメラの表示例

4. 実験結果およびその解析

実験はプラズマ密度を変えながら、プラズマ航跡波の影響の大きな第4、5バンチに注目して、そのエネルギー変化を調べた。第2節に示したように、ある特定の密度の時、プラズマの波長とバンチ間隔が一致して、影響が大きく現れるはずである。

図6の測定結果は横軸がプラズマ密度、縦軸がバンチのエネルギーシフトを示している。バンチのエネルギーはスペクトルの平均値をとった。このグラフから、第4、第5バンチ共に、プラズマ密度が $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 付近で、大きく減速されていることが明かである。特に第5バンチに減速の効果が著しい。

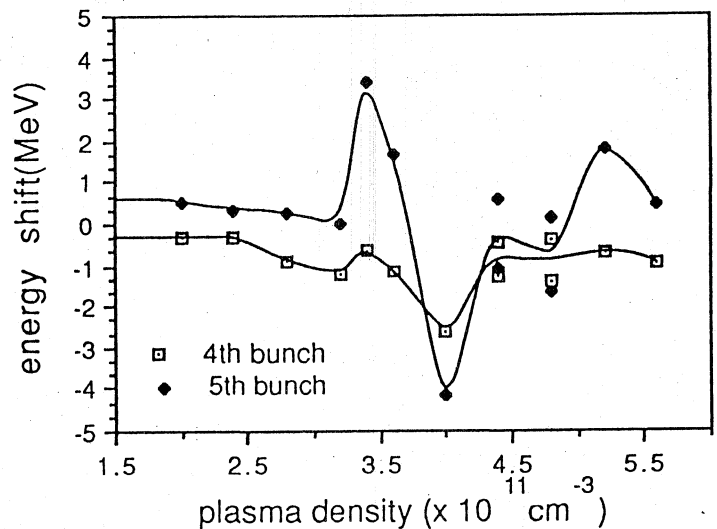


図6. 第4、5バンチのエネルギーシフト

図7 (a)、(b)は計算によるシミュレーションの結果⁶⁾である。(a)はプラズマ密度を変えたとき、それぞれのバンチの場所での縦方向の電場を示す。0を中心として正が加速、負が減速である。また、(b)はプラズマ密度が $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ のときの縦方向の電場分布をプロットしたものである。これらの解析結果と実験の結果は概略一致している。 $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 付近のピークはプラズマの波長がバンチ間隔の $1/2$ に一致するときのピークと考えられる。

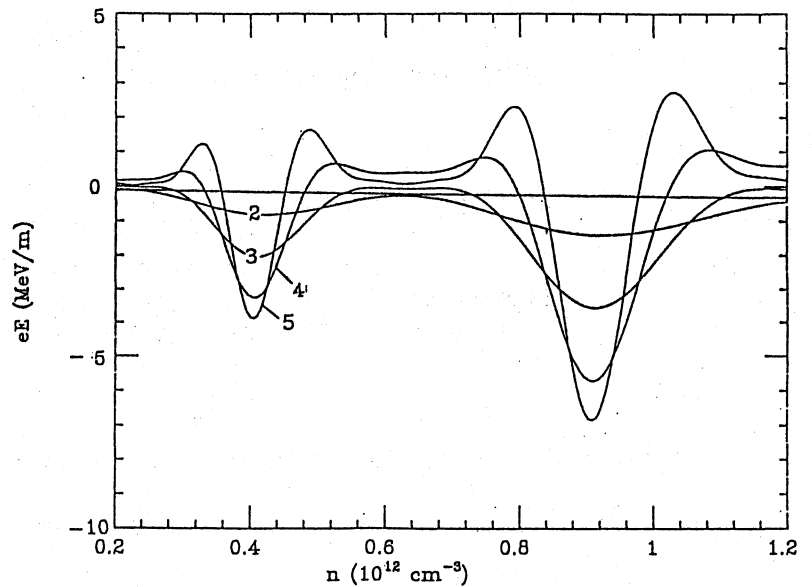


図7 (a) プラズマ密度 vs 電場

5. 結論および今後の方向

KEKにおけるプラズマ加速の実験はまだ始まったばかりである。その最初のデータにおいて、電子ビームによりプラズマ波が励起されて著しく干渉しバンチが加減速することが確認された。これまでの実験は殆どありあわせの装置をあつめて行ったものであり、またプラズマ密度もまだ十分とはいえない。入射ビームの制御も十分とは言えず、エネルギー分析系も含めたモニター系もより精密な測定が可能ないように改良していくことが必要である。

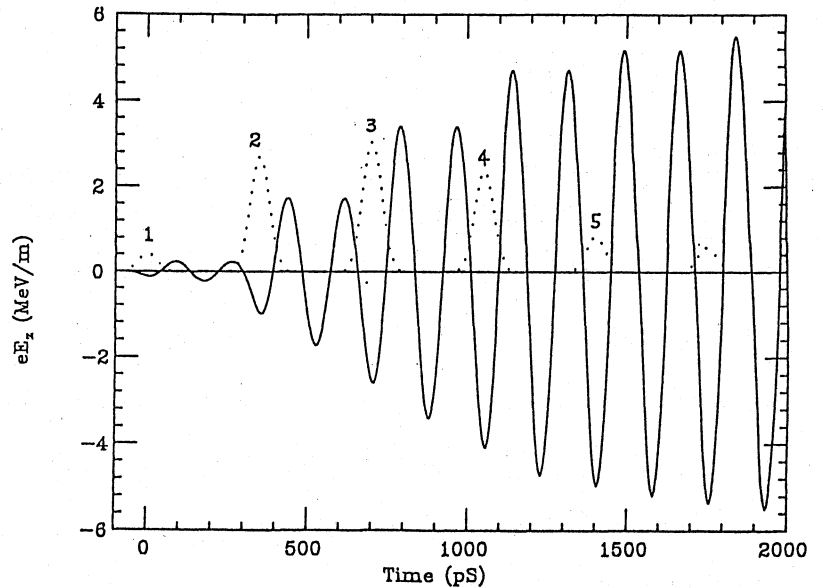


図7 (b) 縦方向の電場分布

reference

- 1) 西田靖(代表者)「プラズマを用いる新方式粒子加速」名大プラズマ研究所 プラズマ・フロンティア共同研究報告書、名古屋大学プラズマ研究所専門委員会、1989年2月。
- 2) J.B.Rosenzweig et al., Phys. Rev. Lett. 61, 98 (1988).
- 3) A. Ogata et al., to be published in Proceedings of the 1988 IEEE PAC.
- 4) T. Katsouleas, Phys. Rev. A33, 2056 (1986).
- 5) A. Enomoto et al., to be published in Nucl. Instr. Meth.
- 6) K. Nakajima et al., to be published in Proceedings of the 1989 International Accelerator Conference.