

Electron Acceleration by Laser Driven Plasma Waves
in Inhomogeneous Plasmas

Youichi Takada^A, Noboru Nakano^A and Hiroto Kuroda^{A,B}

^AThe Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo
Roppongi 7-22-1, Minato-ku, Tokyo, 106, Japan

^BNational Laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken, 305, Japan

Abstract

A new method of electron acceleration is proposed. Electrons can be accelerated by the electrostatic field of plasma waves excited by a high power laser in inhomogeneous plasma. The method is numerically studied and proved to accelerate electrons to 1 GeV in 18 m distance for 1 μm , 10^{17} W/cm² or 10 μm , 10^{16} W/cm² laser pulse. Phase stability is numerically shown to be as good as that for conventional accelerators. Beam divergence in the transverse direction may be suppressed by appropriate selection of the laser transverse modes.

将来の線形加速器として TeV 領域の衝突形線形加速器の構想があるが、その実現のために現在のマイクロ波技術の大幅な向上、新しい加速機構の開発という面から精力的な研究が進められている。前者の研究にレーザートロンの開発⁽¹⁾、強電界加速管の開発などがある。後者の研究の中で大出力レーザーの強電界を利用したレーザー加速の方法が霜田⁽²⁾により提案されて以来、いくつかの異なる原理に基づく方法が提案され検討されてきた⁽³⁾。その中でレーザーとプラズマの非線形相互作用により励起されるプラズマ波の静電場による加速方法は Tajima, Dawson により提案された⁽⁴⁾もので、 ~ 1 GeV/cm に達する加速電場が得られること、絶縁破壊という問題により利用できるレーザーパルスの制限されることがないなどの利点がある。我々は建設中の大出力ガラスレーザーの応用テーマのひとつとしてこの方法を検討し、Tajima の提案に欠けていた加速電子とプラズマ波の完全な位相整合条件を、プラズマの電子密度を空間的に不均一にし、加速粒子及び、レーザーパルスの進行方向に密度を連続的に減少させることで実現できることを示した。その結果 Wave breaking limit のプラズマ波に比べて1桁から2桁振幅の小さいプラズマ波を励起し、レーザー加速にとって不都合な誘導 Brillouin 散乱やレーザー光の自己集束作用を避けることができ、1 μm , 10^{17} W/cm² あるいは 10 μm , 10^{16} W/cm² のレーザーパルスの場合に 18 m で 1 GeV の加速が可能であることを明らかにした⁽⁵⁾。

プラズマ波に伴う静電場Eはレーザー光がZ軸方向に進みZ軸方向に偏光している場合、

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \omega_p^2 E + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = - \frac{e \omega_p^2}{2 m c^2} \frac{\partial}{\partial z} A_z^2 \quad \text{----- ①}$$

という式により記述できる。 ω_p はプラズマ振動数、 $\frac{1}{2}$ はプラズマ波の緩和定数。右辺がプラズマ波を励起する項で、レーザーとプラズマの非線形相互作用によって発生するポンドロモティブ力(ponderomotive)である。 A_z はレーザー光のベクトルポテンシャル。上式からわかる通りプラズマ波の位相速度 v_p はレーザーパルスのプラズマ中の群速度に等しく $v_p = c \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ によって与えられる。このことから電子のプラズマ波中の位相はプラズマの電子密度を変化させることで調整することができる。図1はこの位相の制御方法を仮定してレーザー加速の数値計算を行った結果である。 10^{16} W/cm^2 の矩形波のレーザーパルスと仮定し、波長・パルス幅はそれぞれ(1) $0.5 \mu\text{m}$, 30 ps , (2) $1 \mu\text{m}$, 30 ps

(3) $10 \mu\text{m}$, 0.5 ns と仮定している。

$10 \mu\text{m}$ の波長では18mで1 GeV加速されていることがわかる。

$1 \mu\text{m}$ の波長でも 10^{17} W/cm^2 の強度の場合には18mで1 GeV加速できる。

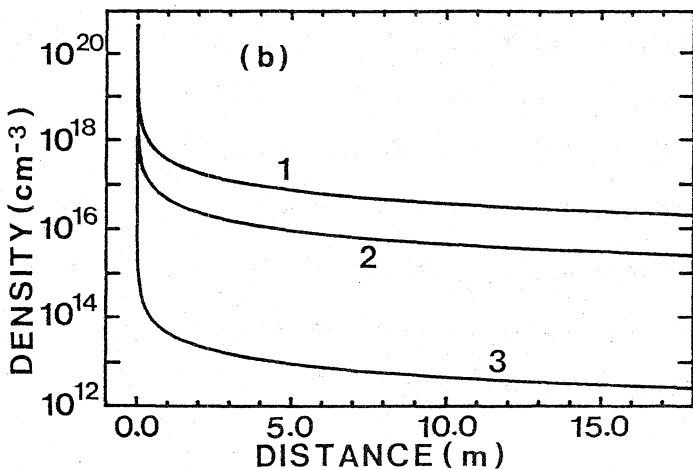
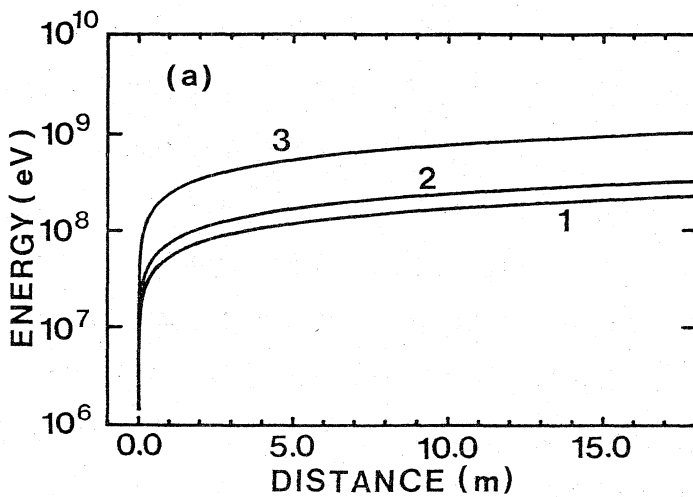


図1.

(a) 加速電子のエネルギーと加速距離との関係。(b) プラズマの電子密度と加速距離との関係。

図1から明らかな様に、電子のエネルギーは加速の始めに急激に増加し、一方プラズマの電子密度 n_e は急激に減少する。これは加速電場が $n_e^{1/2}$ に比例し、プラズマの電子密度が大きい所ほど大きな加速電場が得られることと、低エネルギーでは電子の速度の光速からのずれが大きいために位相を適当な値に保つためのプラズマの電子密度の低下が大きいことが原因である。この数値計算から明らかなように、不均一プラズマ中のレーザー加速は既存の加速器に比べて大幅な加速距離の短縮を可能にする。

一方加速器の重要な性質として進行方向の位相安定性及び、横方向の安定性がある。上記の不均一プラズマ中のレーザー加速について、プラズマ波中の電子の位相を加速距離に対して初期位相をいくつか変えて計算したのが図2である。位相は加速電場が最も大きい所が 0° で、波の進行方向に増えるように教える。 $1\mu\text{m}$ $10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$ のレーザーパルスを仮定し、プラズマの電子密度は位相が常に 30° に保

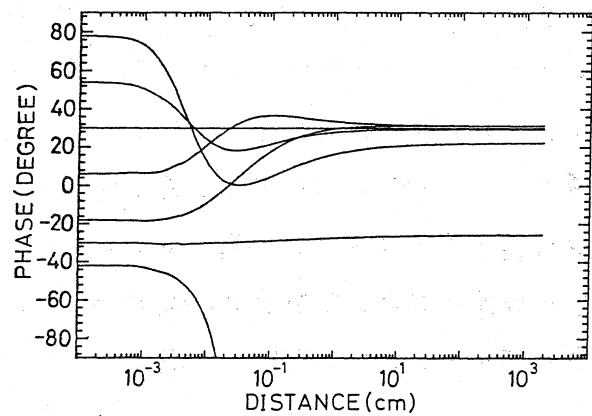


図2. 位相と加速距離の関係

たれるように与えてある。 30° 近傍の初期位相から加速された電子は $1\mu\text{m}$ の加速距離でい

ずいも図3の様に 1GeV まで加速されている。位相の変動も 30° の値に漸近しているのがわかる。この計算からわかる通り、 -30° から 80° 付近までの位相で安定であり、既存の

加速器の場合と同等の位相安定性があることがわかる。

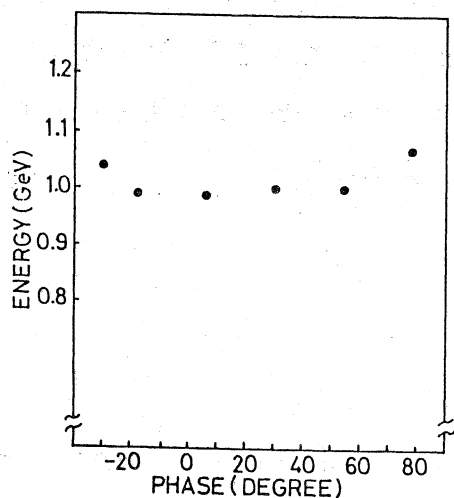


図3. 加速エネルギーと位相の関係

これまで提案されたレーザー加速の方法については横方向の安定性について全く議論されていなが、加速器の評価・設計にとっては欠くことのできない問題である。電子が横方向に受ける力は電子ビーム中の電子間の Coulomb 力、レーザー光による ponderomotive 力の2種類がある。議論を簡単にするために電子ビームを進行方向に一様で軸対称と仮定する。加速電子がレーザーパルス及び、レーザーパルスによって励起されたプラズマ波と同期して

動いているという条件をつけると、電子の横方向の動きはレーザー光の偏光に依存せず軸対称となり次式によって記述される。

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \frac{dr}{dt} = -\frac{e^2}{4m^2\gamma^2\omega^2} \frac{\partial}{\partial r} E_0^2 + \frac{2\pi n_0 e^2}{m\gamma r} \int_0^r f(r') r' dr' \quad \dots \textcircled{2}$$

右辺第1項がレーザーパルスによる ponderomotive 力によるドリフトで、第2項がビーム内の電子間の Coulomb 力である。Coulomb 力は常に斥力として働きビームを発散させる原因となる。ponderomotive 力は図4(a)の様な単純な強度分布の場合にはビームを発散させる斥力としてしか働かないが、(b)の様な強度分布の場合には中心付近で集束力として働く。このような強度分布はレーザーの横モード TEM₀₀ と TEM₁₀ あるいは TEM₂₀ と合成することで得られる。レーザー加速には従って横方向の集束作用も併せ持たせることが可能だと考えられる。

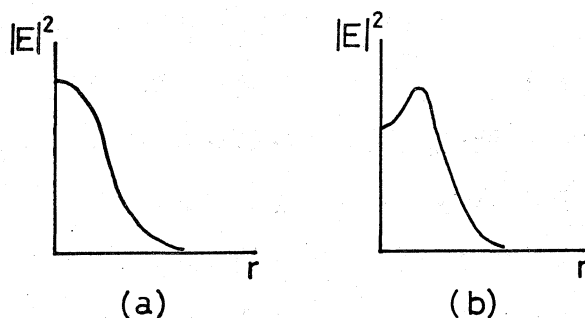


図4. レーザー光の動径方向の強度分布

まとめ

1 μm , 10^{17} W/cm^2 あるいは $10 \mu\text{m}$, 10^{16} W/cm^2 の大出力レーザーパルスを用いれば不均一プラズマ中、18 m で 1 GeV の加速が可能である。これは加速器を大幅に短縮できる可能性を与える。また位相安定性は既存の加速器と同程度に良好である。レーザー加速の横方向の安定性についてはこれまで全く議論がなかったが、レーザー光の横モードを適当に選択できれば横方向の集束作用も併せ持たせることができる。以上の事から大出力レーザーによる不均一プラズマ中の電子加速は有望な加速手段であると言える。

参考文献

1. Y. Fukushima et al. INS-Rep. 490 (March, 1984)
2. K. Shimoda Applied Optics 1, 33 (1962)
3. Laser Acceleration of Particles, P.J. Channell editor, AIP Conf. Proc. No.91 (1982)
4. T. Tajima and J.M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979)
5. Y. Takada, N. Nakano and H. Kuroda, to be published in Appl. Phys. Lett.