Plasma-Based High-Energy Accelerators

プラズマ利用加速器の理論的概説

Ryo Sugihara

Plasma Science Center, Nagoya University, Nagoya 464-01

(Received 25, December 1989)

(Accepted 31, May 1990)

Principles of plasma-based high-energy accelerators are presented. Particles are accelerated by a high field gradient of plasma waves. Three concepts of accelerators will be discussed; the Beat Wave Accelerator (BWA), the Plasma Wake Field Accelerator (PWFA) and the $V_p \times B$ accelerator. BWA is characterized with a wave excitation by laser beat waves. The wave for PWFA is a wake of a high velocity bunch of electrons. The $V_p \times B$ accelerator has its uniqueness in the acceleration mechanism where V_p is the wave phase velocity and B is an external field applied perpendicularly to $\vec{V}_p$. A brief discussion on needs of accelerators is also given.

Keywords; accelerators, plasma waves, laser, beat wave, wake field, $V_p \times B$.

1. はじめに

プラズマ利用加速器は、これまでの加速器の概念を変える可能性のある新しい加速器である。一方、いま、新しい方式の加速器が世界的に強く求められている。それはなぜであろうか。その最も大きな理由は、現在の素粒子研究用の超大型加速器が、加速勾配、資金、スケールといった点で、限界に達しているということである。さらに最近は、社会的に種々のエネルギー、粒子束の加速器の需要が多く、小型、高効率の加速器の出現を待ち望む空気の強いことなどが、別の大きな理由となっている。

これらの事に付いて少し詳しく説明する。まず、素粒子研究用の加速器であるが、高エネルギー研究所の、日本を代表する加速器トリスタンは円周3 kmで、加

速される粒子のエネルギーは32 GeVである。一方、将来の加速器で、建設が決定したのが、米国のSSCで、円周83 km、20 TeVのエネルギーの粒子を取り出す予定である。現在日本で計画中の直線型加速器JLCは、長さ20 kmで100 GeVの粒子エネルギーを期待している。トリスタンの開発費は850億円かかったとされている、しかし、JLCのそれは、1兆円かかるのではないかとされている。

一方、加速器の社会的な応用の例としては次のようなものがある。まず、中間子を使ったガン治療、高エネルギー電子から出るエックス線の露光による超LSI製作、原子炉の壁に重イオンをあてる照射損傷の研究、イオンビームによる慣性核融合の開発研究、など、あげれば切りがないほどである。

2. プラズマ利用加速器とは

プラズマ中に発生するプラズマ波（ラングミュアー波など）の電場は非常に強くなり得る。プラズマ密度を n とすると、電場 E は $n^{1/2}$ に比例する。もし、 $n = 10^{19}/\text{cm}^3$ のプラズマをつくり得るとすると、 10^{11}V/m の電場を発生させることが可能であると理論的に予測されている。この電場を使えば、新しい加速器の長さは現在の線形加速器の $1/1000$ になるのではないだろうか。それにつれて、値段も安くなるのではないだろうか。これらのことがあって、プラズマ加速器が急速に注目を浴びるようになってきたのである。

プラズマ利用加速器には、沢山の種類があるが、それらの中で最も研究がすすんでいるものは、以下の3種である。

- ビート波加速器（Beat Wave Accelerator）
- プラズマ航跡波加速器（Plasma Wake Field Accelerator）
- $V_p \times B$ 加速器（ $V_p \times B$ Accelerator）

しかしながら、いずれの方式も、加速器としての必要条件の幾つかを、理論的に満たす程度の成熟度であり、現在、実験的検証にさしかかった段階である。以下、それぞれの加速器について、少し詳しく解説することにしよう。

2.1. ビート波加速器 1) 2)

二本のレーザー光をプラズマ中を通して、ビートを作る。二本のレーザー光の周波数 ω_0, ω_2 は、共に、プラズマ周波数 ω_p よりかはるかに高いとする。さらにビート周波数 $\Delta\omega$ は $\Delta\omega \approx \omega_p$ であるとする。この様にして、強力なプラズマ波（ラングミュアー波）を励起する。加速されるべき粒子は励起された波に捕捉され、そのポテンシャルの谷に落ち込むときエネルギーをうる。レーザー光、プラズマ波と加速される粒子との相互作用をさらに実際に近い状態で想像すると次のような図になると思われる。

Fig.1 A short laser pulse of length I is sent into a plasma and excites a plasma wave which traps bunches of electrons and accelerates them in its large E field. (From Ref.2).

ここで、 L は加速に必要な距離である。さて、具体的に獲得エネルギー ΔW を計算すると、

$$\Delta W = 2\epsilon mc^2 \omega_0^2 / \omega_p^2. \quad (1)$$

ここで $\epsilon \equiv e\phi/mc^2$ で、 ϕ は励起された波のポテンシャルである。 $e\phi$ は mc^2 の程度にまでなり得ることが理論的に予測されるので、 ϵ は $O(1)$ になり得る。従って、 $\omega_0^2/\omega_p^2 \gg 1$ であれば、 $\Delta W/mc^2 \gg 1$ となる。これがビート波加速器の原理である。

具体的例をあげる。電子を考える。 $\omega_0/\omega_p = 100$, $\epsilon = 0.2$ とすると $\Delta W \approx 2\text{GeV}$, $k_0 = 2\pi \times 10^4/\text{cm}$ (ガラス・レーザーの波数) とすると、 1TeV の電子を得るには、この様な系を 1000 個の程度接続 (staging) する必要がある。

2.2. プラズマ航跡波加速器 3) 4)

ビート波加速器も波の励起に特徴があったが、この加速器も特徴がある。すなわち、下記の図にあるように、プラズマ中に特別な形をした荷電粒子のかたまりを走らせ、その後に強いプラズマ波（“航跡”）を立てるやり方である。この波の電場のポテンシャルで被加速粒子を加速するのである。

Fig.2 Numerical solution of 1D wake field produced by a triangular bunch. (From Ref.4).

すこし定量的に述べる。この加速の効率は変換効率 R で決められる。これは次の様に定義される。

$$R = \Delta\gamma/\gamma_b. \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\gamma$ は 1 個の加速される粒子の最大獲得エネルギーであり、 γ_b は波を励起するビーム中の 1 個の粒子のエネルギーである。

さて、波を励起するビームは、自己の作る減速電場 E_- のため、 Δx の間にゼロまで減速されるとする。すなわち、 $\Delta x \approx \gamma_b mc^2 / qE_-$ 。一方、加速される粒子は、発生したプラズマ波の電場で $E_+ \Delta x = (E_+/E_-) \gamma_b mc^2$ だけエネルギーを得る。従って、 R は $R = E_+/E_-$ と書ける。半定量的な解析で

$$R \approx 2\pi N, \quad (3)$$

$$N \equiv l(\text{パンチの長さ})/\lambda_p(\text{プラズマ波の波長}).$$

この R は、種々の不安定性を考慮に入れても、数 10 から数 100 まで可能であるとされている。4) この加速法で本質的に重要なものは加速用ビームの形状である。

例をあげよう。底辺の半径 $20\mu\text{m}$ 、高さ 3mm の円錐形の電子ビームを考える。 n_b (ビーム全電子数) $= 5 \times 10^{10}$ 、ビームのエネルギー $= 50\text{GeV}$ 、 n_p (プラズマ

の密度) $= 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。このような塊を使うと、 20m で 1TeV の粒子エネルギーが得られる ($R = 20$)。

2.3. $V_p \times B$ 加速器 5)

この方式の最も大きな特徴は、波の進行方向に垂直に定常磁場 B_0 をかけることである。この磁場を横切って粒子を走らせることによって、粒子にローレンツ力を感じさせ、その力で粒子を加速させるのである。しかしながら、運動に拘束をもうけない場合には粒子は回転運動を初めて、時間平均をとるとエネルギーの獲得はない。粒子の回転を抑えて、力が一方向に働くようにするために、進行電磁場をかけて粒子を捕捉しながら (位相速度 V_p で) 走らせるのである。この方式を一般に $V_p \times B$ 加速と呼ぶ (世界的には呼び方は統一されていないが、わが国ではこのように呼ぶ)。 $V_p \times B$ 加速器は、Surfatron 加速器 (縦波を使う) と磁気捕捉加速器 (MTA) (横波を使う) とにわけられるので、ここでも、それぞれにわけて紹介する。

2.3.1. Surfatron 加速器 6)

使用する波は縦波であることが本質的である。一般に、プラズマ波としてラングミュア波を考える。さて、この方式では、粒子はポテンシャルの壁に張り付いて (phase lock)、磁場 B_0 を横切って波と一緒に走りながら、波の波面に沿って加速される。

Fig.3 Schematic diagram of $V_p \times B$ acceleration (Surfatron).

定量的な議論を以下に行なう。第 3 図のように座標系

を定める。二次元空間 (x, y 空間) で運動方程式を解く。捕捉された粒子は $\cos(k'x') = -\gamma_p B_0/E_0$ できまる平衡点に収束する。ここで、 k', x' は波の系で見た k, x であり、 $\gamma_p = (1 - V_p^2/c^2)^{-1/2}$ 。即ち、粒子は、波が崩壊しなければ波と共に”永久に”走る。このようなことが、起こるための必要条件の大事な一つは

$$E_0 \geq \gamma_p B_0, \quad (4)$$

である。そして、最終的に、

$$mc^2 \gamma(t) \approx mc V_p \gamma_p \omega_c t, \quad (5)$$

が得られる。これが求める獲得エネルギーである。

2.3.2. 磁気捕捉加速器 7) 8)

磁気捕捉加速器 (MTA) では、粒子が横波進行波の磁場成分によって捕捉されることが本質的である。従って、TE-モードの遅波が必要となる。これは、例えば、Ref.7 の第1図のような平行平板導波管を使えば可能である。条件を整えると粒子は波の磁場と静磁場とで作られる磁気中性点に捕捉される。その場所でローレンツ力を感じて波面に平行に加速される。

定量的に獲得エネルギーを考える。Surfatron の場合とよく似た計算を行う。やはり、今の場合も、捕捉粒子は波の系で見るとある1点に収束し、実験室系で見ると一定の速さ (位相速度) V_p で走る。そして、獲得エネルギーは

$$mc^2 \gamma \approx mc V_p \gamma_p \omega_c t \quad (6)$$

で、時間に比例して増大する。これは、(5) 式と全く同じである。これはとりもなおさず、この機構が $V_p \times B$ 加速の一つであるということを示している。捕捉条件を見よう。

$$E_0 \geq \gamma_p^2 B_0. \quad (7)$$

この場合、 E_0 は横波の電場の振幅である。この式は、Surfatron の場合と比べると γ_p が右辺に一つ多くかかっている。

3. まとめ

以上、3種類のプラズマ利用加速器について概略を述べた。ビート波加速器では二本のレーザー光のビートで、プラズマ波を励起し、その強い波のポテンシャル中に粒子を落とし込んで加速する。プラズマ航跡波加速器では、荷電粒子の塊を走らせ、その後に来るプラズマ波のポテンシャル中に、粒子を落とし込んで加速する。この様にみると、これら二つの方式は、波の励起法が異なるだけで、粒子の加速され方は全く同じである。一方、 $V_p \times B$ 加速器では、ローレンツ力を使うという点で全く特殊である。粒子は波の波面に沿って加速され、位相は固定されて、波が存在する限り加速されるという特徴がある。わが国の研究はこの方式において世界の最先端にある。

さて、前にも述べたように、これらの加速器は未だ概念的なもので、一人前の加速器として成長するかどうかは、関係者のこれからの熱意に大きく依存している。いまは、実験的検証が世界のあちこちでおこなわれかけ、希望の持てる結果が少しずつ現れ始めたところである。このなかで、わが国の実験研究者の寄与が非常に大きいことを強調しておきたい。

References

- 1) T.Tajima and J.M.Dawson, Phys.Rev.Lett. **43** (1979)267.
- 2) F.F.Chen in Proc. 12th Int'l Symp. on Phys. of Ionized Gases, Sibenik, Yugoslavia (World Scientific, Singapore, 1985) p.937.
- 3) P.Chen, J.M.Dawson, R.W.Huff, and T.Katsouleas, Phys.Rev.Lett.**54**(1985)693.
- 4) T.Katsouleas, Phys.Rev. **A33** (1986)2056.
- 5) R.Sugihara and Y.Midzuno, J.Phys.Soc.Jpn **47** (1979)1290.
- 6) T.Katsouleas and J.M.Dawson, Phys.Rev.Lett. **51** (1983)392.
- 7) S.Takeuchi, K.Sakai, M.Matsumoto and R.Sugihara, IEEE Trans. on Plasma Science **PS-15**(1987)251.
- 8) S.Takeuchi, J.Advanced Science **1** (1989)42.