

レーザー粒子加速器

北川 米喜

大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Laser Particle Accelerator

Yoneyoshi KITAGAWA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Yamadaoka, 2-6, Suita, Osaka 565-0871

(Received January 30, 2004)

Plasma is an attractive medium for the advanced accelerator. When combined with an ultra-intense laser, it makes an acceleration field one thousand times greater than that produced by current microwave accelerators. The major fields, which now require the particle accelerator, are not high energy physics, but the medical, industrial and low energy material fields. Over the last ten years, laser accelerator research has advanced the electron gain from 22 MeV to 200 MeV. Recently, use of a glass capillary has succeeded in increasing the plasma length, the acceleration length, from 2 mm to 10 mm. This will be a breakthrough in the development of the second generation advanced accelerator.

Key Words: Laser acceleration, Ultra-intense laser, Wavebreaking limit, Wakefield, Beatwave, Self-modulated wakefield, Raman scattering, Ponderomotive force, Relativistic plasma wave

1. 序 論

レーザー加速器は、光の塊がプラズマに穴を掘って荷電粒子をとじ込め、穴が光速で進むのにつれて加速するものである。その穴というのは、強電場を保持するプラズマ波動の谷間である。超高強度レーザーでは、プラズマの加速電場 E_{\max} は、 $E_{\max} = E_0/\gamma_\phi$ とレーザー電場に直接比例する¹⁾。ここで $\gamma_\phi = \omega_0/\omega_p$ で、 ω_0 と ω_p はそれぞれレーザー周波数とプラズマ周波数とを表す。 $\omega_p \equiv (n_0 e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$ と定義されるので、プラズマ密度の平方根にも比例する。現在、加速勾配は従来型加速器の1000倍を越える所まで来た。実際に加速器をつくるのに2つの方向が考えられる。従来型巨大加速器の要素を置き換えて最終的に1000倍のエネルギーの超高エネルギー加速器を実現してゆく方向、従来型の加速器を出来る限りコンパクト化し、フォトカソードは勿論、レーザープラズマイオン源、レーザープラズマ加速器をフロントエンドに持ち込もうというもの。もう一つは、最初から1000分の1の大きさのテーブルトップ超小型加速器を実現しようというもの。21世紀の加速器需要に関する技術予測の報告書が、平成11年6月科学技術政策研究所からだされた^{2,3)}。これによると、需要は、この2つに分かれる。利用エネルギー範囲は数100 keVから無限大までであるのだが、圧倒的に潜在重要の大きいのは、産業、医療、生命科学、材料科学など、能力はMeV以下であってよいが、可能な限りコンパクトでパソコン並に身近にあって欲しいものである。

2. 加速器の原理

2.1 ポンデラモーティブ力によるプラズマ波の励起

プラズマを加速媒質とし、電磁波はマイクロ波でもレーザーでもいいのだが、実用上レーザーあってこそなので、プラズマ加速器というよりレーザー加速器のほうで通っている。却ってプラズマ加速器は、電子ビームでプラズマ波を励起する場合を意味する事が多い⁵⁻⁷⁾。超短パルスのレーザー光をプラズマに突っ込めば、縦波のプラズマ波が簡単に励起される。しかも位相速度が光速近くまでとれる。

レーザーパルスの塊をプラズマに投げ込むと、電子は跳ねとばされる。イオンはその瞬間にはほとんど動かないので、電子だけを考える。密度揺らぎ δn はレーザーによるポンデラモーティブ(ponderomotive)ポテンシャル Φ_L ⁸⁾から、

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \omega_p^2\right)\delta n = \frac{\omega_p^2 \epsilon_0}{e} \nabla^2 \Phi_L \quad (1)$$

で与えられる¹⁾。式(1)は、プラズマ波がレーザーパルスで強制励起できる事を示している。ポテンシャルも同じように表される：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \omega_p^2\right)\Phi = \omega_p^2 \Phi_L \quad (2)$$

右辺のポンデラモーティブ力は極めて非線形な効果で、レーザー出力が弱いときは苦しい所以である。

$$\begin{aligned}\Phi_L &= \frac{e}{4m_e^2\omega_1\omega_2}(E_1(r)\cdot E_2(r)) \\ &= \frac{m_e c^2}{4e} \left(\frac{eA_1}{2m_e c} \right) \cdot \left(\frac{eA_2}{2m_e c} \right) \\ &= \frac{m_e c^2}{4e} \left(\frac{a_1}{2} \right) \cdot \left(\frac{a_2}{2} \right).\end{aligned}\quad (3)$$

と求まる．添字1,2はレーザー1, レーザー2を意味し, それぞれ別のレーザー光でも, 同じレーザー光でもよい．振幅の積の空間変位のみが効き, 前者ならビート波⁹⁻¹¹, 後者なら航跡場(wakefield)¹²⁻¹⁴を表す．ビート波なら差周波数にしたがって, 振幅変調を持っている．航跡場の時は, 共鳴波長程度の超短パルスとか, ラマン変調とか, 何らかの空間変調を与える必要がある．

簡単な航跡場というものを見るのに, プラズマ波長と同じパルス幅のレーザーをプラズマに注入すると, その後方にプラズマ波が航跡波として立つ(Fig. 1参照)．レーザーパルスのプラズマ中の伝搬は, 分散式

$$\omega_0^2 = \omega_p^2 + c^2 k_0^2 \quad (4)$$

に従う．パルスの速度は, 群速度(group velocity)で定義され, 式(4)を波数 k_0 で微分すれば得られる．即ち

$$\frac{d\omega_0}{dk_0} = \frac{c^2 k_0}{\omega_0} = c \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2}} \quad (5)$$

とわずかに光速より小さいが, ほとんど光速で進むとってよい．後ろに立つ航跡波の位相速度 $v_\phi = \omega_p/k_p$ は,

$$v_\phi = \frac{\omega_p}{k_p} = \frac{\omega_0 - (\omega_0 - \omega_p)}{k_0 - (k_0 - k_p)} \equiv \frac{d\omega_0}{dk_0} \quad (6)$$

とおけ, レーザーパルスが進むのに同期しているから, 式(5)としてよい． $\omega_0/\omega_p \equiv \gamma_\phi$ と定義したので, 航跡波の位相速度 $\beta_\phi c$ から,

$$\beta_\phi = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_\phi^2}} \quad (7)$$

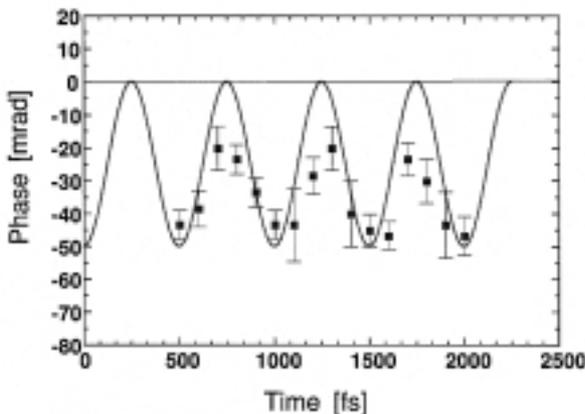


Fig. 1 Frequency domain interferometry of a laser driven wakefield: Laser of 800 nm, 150 mJ, 500 fs in Helium of 0.75 Torr. Plasma density of $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ corresponds to a plasma period of 500 fs.¹⁴⁾

と見やすい関係が得られる．

共鳴航跡場としてのプラズマ波が立つ様子は, Fig. 1のように, ミラジアン位相シフトが評価できる巧妙なプローブレーザー光干渉法(周波数領域干渉法)で検証されている¹²⁻¹⁴．

大振幅プラズマ波の相対論振舞 荷電粒子の加速利得はプラズマ波の振幅が大きい程良い．しかし, プラズマ波は電子の粗密波だから, 変調度100%が最大でそれ以上は行かない筈である．それを波の破壊限界(Wave breaking limit)という． $\delta_n = n_0$ としたときの電場

$$\begin{aligned}E_{\text{ob}} &= -\nabla\Phi = \frac{mc\omega_p}{e} \\ &= 30 \sqrt{\frac{n_0}{10^{17} \text{ cm}^{-3}}} \quad [\text{GV/m}]\end{aligned}\quad (8)$$

で与えられる．最近, 破壊限界以上の振幅を得たという¹⁵⁻¹⁷．式(8)は, サイン波である限りこれが限界のはずなのだが, 振幅は100%でもたとえそれ以下でも, 波形がサイン波からずれて, 鋸波とかデルタ関数とかになれば, 局所的に密度が上がって, δ_p/n_0 が1以上になりうる．非線形作用としては, 粒子の相対論効果による共鳴周波数の離調によって波の成長が飽和してしまうことがあげられる．ローゼンブルース(Rosenbluth)らは, 1972年に, $a_0 < 1$ のとき, ビートプラズマ波の飽和値として $(a_1 a_2 / 16)^{1/3}$ を出した¹⁸⁻¹⁹．

$a_0 \cong 1$ では, レーザー電場で直接電子がゆすられる(quiver motion)場合でも共鳴周波数の離調が生じる．高強度場で, 電子のローレンツ因子は $\gamma^2 = 1 + a_0^2$ となる²⁰．これらのもとに,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \zeta^2} = \frac{k_p^2}{2} \left[\frac{1 + a^2}{(1 + \phi)^2} - 1 \right] \quad (9)$$

と, 強制振動の項にレーザーパルスと同時に分母に振幅を含む簡単な非線形方程式が得られる^{21,22}．ここで, $\zeta \equiv z - c\beta_\phi t$ と, 波の系に乗ってみるからでもある．その解として,

$$E_{\text{max}} = E_{\text{ob}} \frac{a_0^2}{\sqrt{1 + a_0^2/2}} \quad (10)$$

$a_0 \cong 1.2$ だと, 波の破壊限界を越えてもよいことになる．実際問題として, 単一パルスでそのような航跡波を励起するには, 数十フェムト秒で数十mJクラスのレーザーを数マイクロンに絞る必要があつて難しい．出力の大きいレーザーは, パルス幅が数百フェムト秒なので, 自己変調型航跡波が有利となる．

2.2 自己変調航跡場

自己変調航跡場(Self-modulated wakefield)は, パルスが前方ラマン散乱(Forward Raman scattering)を起こして, プラズマ波と散乱波に分かれる場合のうち²³, パルスが極端に強くて, 結果的にプラズマ波も強く, 散乱波も強くそれがもとのパルスに跳ね返って更に不安定性が成長する場合をいう^{17,20,24-26}．単純な航跡場は, プラズマ波を励

起するのに共鳴密度が決まっているのに対し、こちらは遙かに高密度のプラズマ密度に自動的に共鳴する。不安定性が成長する程度のパルス幅があれば、ビート波とおなじく、パルス列で励起されるプラズマ波の振幅は大きい。加速勾配は密度の平方根に比例するので、勾配に関しても遙かに有利で、最近の超高強度レーザーでの電子加速は専らこれである。阪大の40 TW GMIIレーザーの結果では、 $a_0 = 1.5$ のレーザーを水素ガスパフに照射したときの前方向ラマン散乱光の第1Stokes, 第2Stokesスピークの強度比から、プラズマ波の振幅を見積もると、77%に達する¹⁷⁾。

2.3 プラズマ波での粒子の捕捉と加速

プラズマ波に捕捉された電子のエネルギー利得は、 W が初期エネルギー、 W_+ が最終エネルギーとすると、

$$W_{\pm} = \gamma_{\phi} (1 + \gamma_{\phi} \beta_{\phi} \epsilon) (1 \pm \beta_{\phi} \beta_0) \quad (11)$$

となる。位相速度が光速に近く、且つ大振幅のプラズマ波では、

$$W_+ \cong 2\gamma_{\phi}^2 \epsilon, \quad (12)$$

$$W_- \cong 1 \quad (13)$$

なので、運動エネルギーゼロの電子も捕捉され、最大で式(12)まで加速される。波長800 nmのレーザーを 10^{16} cm^{-3} のプラズマに照射すると、 $\gamma_{\phi} = 10^4$ なので、 $W_+ \cong 100 \text{ TeV}$ が得られることになる。ただし次に述べるように、加速距離つまりプラズマ長は20 mになってしまう。加速距離 L_d は、エネルギー利得を加速勾配で割って

$$L_d = \frac{W_+}{k_{\phi} \phi} \cong \frac{\gamma_{\phi}^2 \lambda_0}{\pi} \sqrt{1 + a_0^2} \quad (14)$$

と与えられる。 L_d は、離調距離 (dephasing distance) である。

Fig. 2は、航跡波に捕捉された電子の加速が加速距離とともに変化するのを1次元Particle-in-cellコードで求めたものである。レーザー伝搬距離、即ち加速距離は(a) 2 mmと(b) 10 mmであるが、個々の航跡波の谷間に捕捉された電子が距離とともに加速され集まっている様子が見える。後続の航跡波は振幅が減衰し、それとともに電子も急速に減速域に入って頭打ちになって行く。(c)は、(a)、(b)それぞれの時の電子エネルギースペクトルを足しあわせたものである。

L_d の間、加速されれば最大エネルギー W_+ が得られるが、そこに辿り着くまでに終わってしまうことが多い。様々の原因のうち、実験的に解明されていないが、蓋然性のあるものとして、励起光の消耗 (Pump depletion) がある。レーザーパルスのエネルギーと航跡場エネルギー E_p^2 の和が一定とすると、後者にエネルギーが移ればレーザーはエネルギーを消耗して、伝搬中にへたる。それを励起光の消耗といい、レーザーパルス幅 $L_0 = (a_0/\pi)\lambda_p$ に対し、 $L_p E_p^2 = L_0 a_0^2$ とすると、その距離 L_p は²⁷⁾

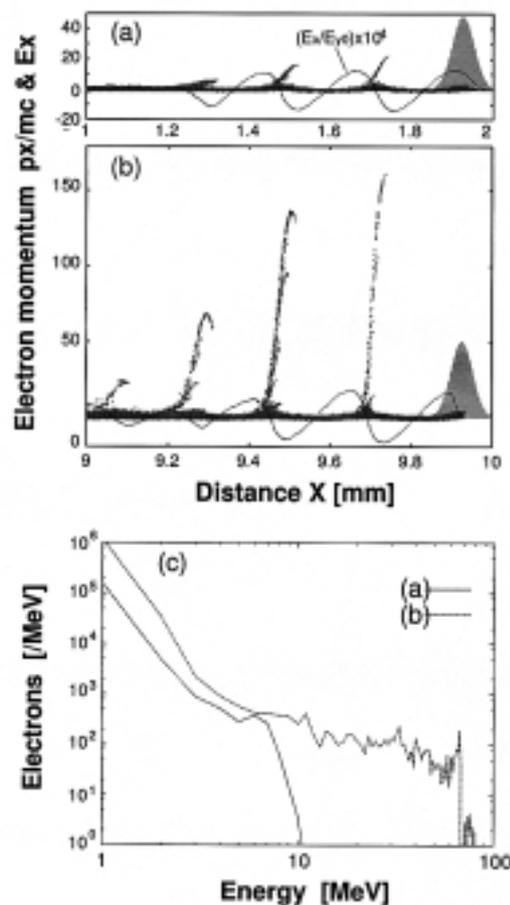


Fig. 2 Resonant wakefield and the field-trapped electron momentum in 1-dimensional particle-in-cell simulation. Propagation after (a) 2 mm and (b) 10 mm: Laser pulse on the right edge. maximum acceleration field is 9 GV/m. (c) Electron energy spectrum for (a) and (b), respectively.

$$L_p \cong \frac{\sqrt{1 + a_0^2}}{3\pi} \gamma_{\phi} \lambda_p \quad (15)$$

となる。

これ以外にレーザーの回折によるレーリー (Rayleigh) 長

$$L_r = \pi r_s^2 / \lambda_0 \quad (16)$$

がある。 r_s はレーザーのスポット径である。目下、これをクリアするのが課題で、その候補がキャピラリー (capillary) プラズマガイドである。もう一つは、レーザーのプラズマ中での自己収束による光ガイドで、

$$P_{\text{crit}} = 17.4 \left(\frac{\omega_0}{\omega_p} \right)^2 = 17.4 \gamma_{\phi}^2 \quad [\text{GW}]. \quad (17)$$

P_{crit} 以上のレーザーパワーで自己収束がおこるとい²⁸⁾。密度が高い方が効果は大きい。

加速勾配に関しても、式(8)のように、プラズマ密度が高い方が有利と見えるが、こと利得に関しては式(12)、式(15)といずれも γ_{ϕ} に正依存することで、返って密度は低い方が良いということになる。

プラズマを使わない、別の媒質、例えばフォトニック

結晶などを使おうとの試み、媒質を使わない真空中でのレーザー加速、直接レーザー加速^{29,30}、磁場を付加するレーザープラズマ加速、すなわちサーファトロン (surfatron) などのアイデアもある^{5,31,32}。

3. プラズマと電子加速

レーザーの強度が強ければ、電場で中性ガスから直接電子を引き剥がすケルディッシュ (Keldysh) の直接電離 (トンネル電離) が働き、ほとんど予備電離なしでプラズマが生成でき、多くの実験が行われている³³。

プラズマの密度及びプラズマ波の振幅計測は、周波数領域干渉計測 (frequency domain)^{12-14,34} の他、レーザーによる集団トムソン散乱、すなわちブラッグ (Bragg) 散乱も有力である^{5,35,36}。別にプローブレザーを用いる時も、励起レーザーそのものの散乱、つまりラマン散乱から評価することもある³⁷。

加速電子のエネルギースペクトル計測には、ダイポール磁場分析器が使われる。検出部として、富士フィルムで開発された、輝尽性フィルム (イメージングプレート, IP) が使われる^{38,39}。エミッタンス計測⁴⁰にも使われる。1979年の田島・ドーソン (Dawson) の論文⁹に始まったレーザープラズマ加速の研究は、1992年に2波長炭酸ガスレーザーによるビート波加速の原理実証が阪大、UCLA^{10,11}と引き続いて発表されて実質的にスタートした。このときの加速電場は数GV/mで、マイクロ波加速器と比して圧倒的に大きいとは言え、加速電子は20 MeV程度であった (Fig. 3)。

超短パルス超高強度レーザーの出現で、レーザープラズマの加速勾配は急速に増大し、200~300 GV/mに至った。航跡場加速である。プラズマ密度揺動で100%近い。自己変調航跡場より1995年には、阪大、高エネルギー物理学研究機構等の共同研究で30 GV/m、加速電子18 MeV/cが得られた²⁴。フランスエコールポリテクニク光応用研究所 (LOA) で2002年に200 GV/m、電子を200 MeV以上に加速し⁴²、単ショットでは2003年、ラザフォード研のペタワットバルカンレーザーで、500 MeV以上の電子を得たと報告している。

もし、電子が、規格化強度 a_0 なるレーザー光で励起したプラズマ波のポテンシャルで完全に加速されるとする

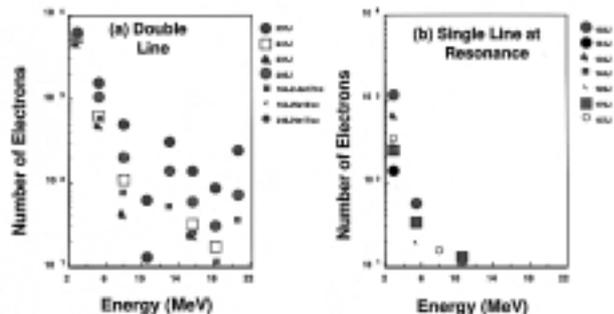


Fig. 3 (a) Electron spectrum when a double line CO₂ laser excites a plasma wave, (b) Electron spectrum for a single line CO₂ laser case.¹⁰

と、加速利得は、 $2a_0mc^2\gamma_0^2$ である。最初のビート波実証以来、加速距離はせいぜい2から3 mmにすぎない。ガスパフの大きさとレーザーのレーリ長で制限されてしまうからである。10¹⁸ cm⁻³のプラズマ中では、1 cmの距離で電子は1 GeVまで加速される可能性があるが、現実には2 mmなので200 MeVどまりである。その困難を克服できる候補としてキャピラリーが阪大を含め、盛んに研究されている⁴⁵⁻⁵³。田島の提案⁴³が最初である。外に向かうほどプラズマ密度が高い負の勾配の中で、レーリ長を遙かに越えてレーザー光が拡散せずに強度を保ったまま伝搬できるため、離調距離一杯まで粒子が利得を得ることが出来る。Fig. 4(a)に長さ1 mmのコーンガイド付き10 mmキャピラリーの写真を示す。内径は60 μm。 (b)は1 cmの長さについて生成されたプラズマ。内壁のアブレーションプラズマと思われる。Fig. 5は、電子エネルギースペクトルをキャピラリーの長さについて比較したもので、100 MeVの電子が観測される。はじめて電子加速を観測したキャ

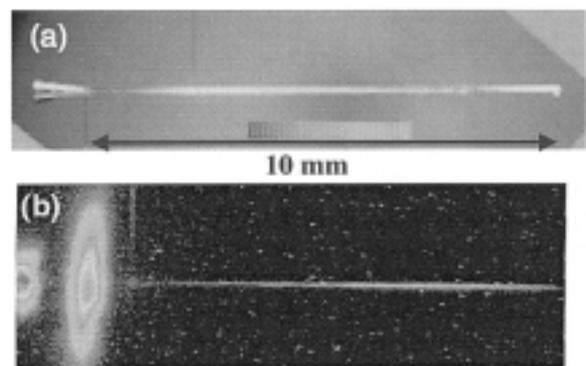


Fig. 4 (a) Cone-guided glass capillary of 10 mm long. Inner diameter is 60 μm and wall thickness is 60 μm. Cone is 1 mm-long, entrance aperture is 0.5 mm and the exit aperture is 60 ~ 30-μm in size, respectively. (b) Plasma emission from the capillary around 527 nm. This capillary accelerated electrons to 100 MeV to the right direction.⁵³

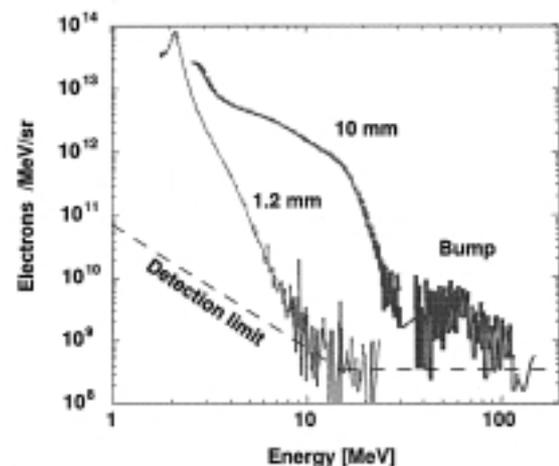


Fig. 5 (a) 10-mm long and 60-μm bore capillary (Laser: 9.7 J): a shoulder around 20 MeV and a bump at 60 MeV exting to 100 MeV, (b) 1.2-mm long (7.3 J): 4.5 MeV shoulder is shown but no bump at higher tail.

ピラリーである。それだけでなく、従来のガスプラズマ中での加速は、現在200 MeV以上得られているが、概ね図中の1.2 mm長のものに見られるように、右下がりの指数関数形をしており、その最大エネルギーで評価されてきた。キャピラリー加速の特徴は、加速勾配は比較的低いまま、加速距離が長いために、粒子は波に補足されて指数関数型とは異なる様相を見せ始めている。肩が盛り上がり、バンプが形成されるなどである。実用加速器としては、加速、減速によってなるべく単色エネルギー化されるのが望ましい。その方向へさらに進むことも期待の一つである。

4. イオン加速

今まで述べてきた加速法は、原理的にイオンでも電子でも使える。レーザーイオン加速法も、マイクロ波加速器と同じである。イオンは重くて、相対論的プラズマに乗りにくいということで、敬遠されているが、式(13)のように、十分振幅が大きければ、遅いイオンでも捕捉できないことは無い。挑戦すべき課題である。

プラズマ波に捕捉して加速するのではなく、厚さ数ミクロンから数十ミクロンの固体薄膜に直接超高強度レーザーを照射して、その前面、後面からでてくる高エネルギーイオンを利用する試みがある。最も簡単にでてくるのが薄膜壁に付着した水分からのプロトンで、照射面(前面)からも、後面からも発生する。前面からのものは、レーザーのポンデラモーティブ力によるもので、数MeV以下が多い。その比例則が得られている⁵⁴⁾。

後面からは、前面から突き抜けた高速電子が真空中に飛び出して仮想陰極を形成し、それに引っ張られて加速される機構が主要と考えられる。従ってそのエネルギーは高速電子の温度と電流束で決まる。おまけにこのとき高速電子の作り出すトロイダル磁場で、Fig. 6にあるように発生イオンがエネルギー選別され、結果的に高エネルギー成分が絞込まれる⁵⁵⁾。ここでは10 MeVプロトンが選択的に得られた。イオン検出には、飛跡検出用CR-39プラスチックフィルムが用いられる^{56,57)}。

エネルギーはそれほど高くはならないかもしれないが、パルス幅が制御でき、指向性もよく、従来型加速器のイオン源⁵⁸⁾として実用化がすぐにも期待できる。プローブ光源として像撮影も試みられている。電子源としてのレーザーフォトカソード^{59,60)}について、レーザーイオ

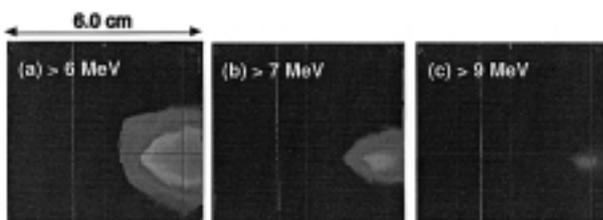


Fig. 6 Proton rear emissions from 100 μm -thick plastics: a stack of CR-39 films analyzes the proton energy and spatial distributions. 10 MeV protons are focused into a cone of 6 degree.⁵⁵⁾

ン源として実用化されるであろう。

5. これからの開発とまとめ

ペタワットレーザーという世界最超高強度レーザーによって、ガスパフの電子加速は行き着くところまで来たようで、このあたりで第1段階は終了としてよからう。現状をまとめると、

レーザー強度に対する利得比例則
 $\sim 10 \text{ MeV/TW}$
 最大電子利得 $\sim 200 \text{ MeV/10 Hz}$
 加速勾配 $\sim 100 \text{ GV/m}$
 最大イオン利得 $\sim 100 \text{ MeV}$
 規格化emittance $\sim \gamma\pi \text{ mm mrad}$

キャピラリー加速で第2段階レーザー加速開発は始まった。レーザー関連、プラズマ関連、ビーム物理関連の観点からすべきことを分けてみると、

- 超高強度レーザーをコンパクト化し、誰でもスイッチポンで扱えるようにすること：
コンパクトスケールの目安を面積 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ とすると、レーザーは $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ぐらいに納める必要がある。
- ビーム品質(エネルギー単色化、低エミッタンス化)向上：
第一段階が終わったとあって、加速機構が確定したり、実用化に向けて収束しているわけではない。むしろ百花繚乱であり、長尺キャピラリープラズマによって、物理現象が鮮明になることを期待する。パルス幅、指向性、エミッタンスとも、従来型ビーム源より良好なデータがでてくる。その分、再現性、ビームエミッタンス等のビーム品質が本格的に問われ、それに向かわねばならない。
- 現状での電子源、イオン源応用と将来の超小型応用のための研究：
超短パルスレーザーフォトカソードは、ほぼ実用化され、エネルギー単色化のためのレーザー冷却も実用が近い。
レーザーイオン源の実用化にも大いに期待したい。

参考文献

- 1) 北川 米喜：核融合研究 **79** (2003) 985.
- 2) 瀬谷 道夫, 桑原 輝隆：“加速器技術に関する先端動向調査” 文部科学省科学技術政策研究所NISTEP Report (June, 2001) No. 67.
- 3) 北川 米喜, 瀬谷 道夫：日本物理学会誌 **57** (2002) 678.
- 4) 熊谷 寛夫編：実験物理学講座28「加速器」(共立出版, 東京, 1975).
- 5) 小方 厚：“超小型加速器”—プラズマレーザー加速器—, 杉原, 西田, 小方編著, (アイピーシー出版, 1998) (第5章プラズマ航跡場加速).
- 6) T. Katsouleas: Phys. Rev. A **33** (1986) 2056.
- 7) J. B. Rosenzweig, D. B. Cline, B. Cole, H. Figueroa, W. Gai, R. Konecny, J. Norem, P. Schoessow, and J. Simpson: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 98.

- 8) Francis F. Chen: "INTRODUCTION TO PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION" Vol. 1, Second Ed (Plenum Publishing Corp, NY, 1984) p. 305.
- 9) T. Tajima and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 267.
- 10) Y. Kitagawa T. Matsumoto, T. Minamihata, K. Sawai, K. Matsuo, K. Mima, K. Nishihara, H. Azechi, K. A. Tanaka, H. Takabe, and S. Nakai: Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 20.
- 11) C. E. Clayton, K. A. Marsh, A. Dyson, M. Everett, A. Lal, W. P. Leemans, R. Williams, and C. Joshi: Phys. Rev. Lett. **70** (1993) 37.
- 12) J. R. Marques, J. P. Geind, Amiranoff, P. Audebert, J. C. Gauthier, A. Antonetti, and G. Grillon: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 3566.
- 13) C. W. Siders, S. P. LeBlanc, D. Fisher, T. Tajima, M. C. Downer, A. Babine, A. Stepanov, and A. Sergeev: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 3570.
- 14) E. Takahashi, H. Honda, E. Miura E, N. Yugami, Y. Nishida, K. Katsura, and K. Kondo: Phys. Rev. E **62** (2000) 7247.
- 15) A. Modena, Z. Najmudin, A. E. Dangor, C. E. Clayton, K. A. Marsh, C. Joshi, V. Malka, C. B. Darrow, C. Danson, D. Neely, and F. N. Walsh: Nature **377** (1995) 606.
- 16) D. Gordon, K. C. Tzeng, C. E. Clayton, A. E. Dangor, V. Malka, K. A. Marsh, A. Modena, W. B. Mori, P. Muggli, Z. Najmudin, D. Neely, C. Danson, and C. Joshi: Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 2133.
- 17) Y. Kitagawa, M. Mori, H. Asatsu, S. Akamatsu, R. Kodama, K. A. Tanaka, H. Yoshida, T. Norimatsu, T. Jitsuno, S. Sakabe, Y. Izawa, K. Mima, T. Yamanaka, and Y. Sentoku: *Proc. Adv. Accelerator Concept AAC2002*, ed. by P. Muggli and C. Clayton, (AIP, vol.647, December, 2002) 634.
- 18) M. N. Rosenbluth and C. S. Liu: Phys. Rev. Lett. **29** (1972) 701.
- 19) 北川 米喜 : 核融合研究 **58** (1987) 369.
- 20) A. Modena, Z. Najmudin, A. E. Dangor, C. E. Clayton, K. A. Marsh, C. Joshi, V. Malka, C. B. Darrow, and C. Danson: IEEE. Trans. Plasma Sci. **24** (1996) 289.
- 21) P. Sprangle, E. Esarey, and A. Ting: Phys. Rev. A **41** (1990) 4463.
- 22) S. V. Bulanov, I. N. Inovenkov, V. I. Kirsanov, N. M. Naumova, and A. S. Sakharov: Phys. Fluids B **4** (1992) 1935.
- 23) K. Nishikawa, C. S. Liu, and P. K. Kaw: Advances in PLASMA PHYSICS Vol. 6, Part I. *Parametric Instabilities in Plasma*, Edited by Simon and Thompson (John Wiley & Sons, NY, 1976).
- 24) K. Nakajima, D. Fisher, T. Kawakubo, H. Nakanishi, A. Ogata, Y. Kato, Y. Kitagawa, R. Kodama, K. Mima, H. Shiraga, K. Suzuki, K. Yamakawa, T. Zang, Y. Sakawa, T. Shoji, Y. Nishida, N. Yugami, M. Downer, and T. Tajima: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4428.
- 25) N. E. Andreev, V. I. Kirsanov, L. M. Gorbunov, and A. S. Sakharov: IEEE. Trans. Plasma Sci. **24** (1996) 363.
- 26) W. B. Mori, C. D Decker, D. E. Hinkel, and T. Katsouleas: Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 1482.
- 27) A. Ting, E. Esarey, and P. Sprangle: Phys. Fluids B **2** (1990) 1390.
- 28) P. Sprangle, Cha-Mei Tang, and E. Esarey: IEEE. Trans. Plasma Sci. **PS-15** (1987) 145.
- 29) 杉原 亮, 竹内 智 : プラズマ核融合学会誌 **73** (1997) 1101.
- 30) A. Pukov, Z. M. Sheng, J. Meyer-ter-Vehn: Phys. Plasmas **6** (1999) 2847.
- 31) 小方 厚 : "現代物理最前線2「プラズマによる粒子加速」" 大槻義彦編 (共立出版, 東京, 2000).
- 32) M. Tanimoto, S. Kato, and E. Miura, N. Saito, K. Koyama, and J. K. Koga: Phys. Rev. E **68** (2003) 026481.
- 33) L. V. Keldysh: Soviet Phys. JETP **20** (1965) 1307.
- 34) E. Tokunaga, A. Terasaki, and T. Kobayashi: Pot. Lett. **17** (1992) 1131.
- 35) J. Sheffield: Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation (MacGraw-Hill, NY, 1975).
- 36) 北川 米喜 : プラズマ核融合学会誌 **73** (1997) 1087.
- 37) Amnon Yariv: "Quantum electronics" Second Ed. (John Wiley & Sons, NY, 1967) 470.
- 38) 高橋 輝吉, 佐藤 隆史, 藪内 俊毅, 児玉 了祐, 北川 米喜, 誉田 義央, 池田 俊治, 奥田 修一, 田中 和夫 : 放射線 **28** (2002) 203.
- 39) 日本アイソトープ協会 : "アイソトープ手帳" 10版 (丸善, 2001) 118.
- 40) 亀井 亨, 木原 元央 : "加速器科学" (丸善, 東京, 平成5).
- 41) Y. Kitagawa, M. Mori, Y. Murakami, R. Kodama, H. Habara, K. Sawai, K. Suzuki, T. Kawasaki, K. A. Tanaka, and K. Mima: *Proc. SPIE* **3886** (2000) 105.
- 42) V. Malka, S. Fritzler, E. Lefebvre, M. M. Aeonard, F. Burgy, J. P. Chambaret, J. F. Chemin, K. Krushelnick, G. Malka, S. P. D. Mangles, Z. Najmudin, M. Pittman, J. P. Rousseau, J. N. Scheurer, B. Walton, and A. E. Dangor: Science **298** (2002) 1596.
- 43) T. Tajima: Laser and Particle Beams **3** (1985) 351.
- 44) S. Jackel, R. Burris, J. Grun, A. Ting, C. Manka, K. Evans, and J. Kosakowski: Opt. Lett. **20** (1995) 1086.
- 45) Y. Ehrlich, C. Cohen, A. Zigler, J. Krall, P. Sprangle, E. Esarey: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 4186.
- 46) F. Dorchies, J. R. Marques, B. Cros, G. Matthieussent, C. Courtois, T. Velikorousov, P. Audebert, J. P. Geindre, S. Rebibo, G. Hamoniaux, and F. Amiranoff: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 4655.
- 47) D. Kaganovich, A. Ting, C. I. Moore, A. Zigler, H. R. Burris, Y. Ehrlich, R. Hubbard, and P. Sprangle: Phys. Rev. E **59** (1999) R4769.
- 48) T. Hosokai, M. Kando, H. Dewa, H. Kotaki, S. Kondo, N. Hasegawa, K. Nakajima, and K. Horioka: Opt. Lett. **25** (2000) 10.
- 49) M. C. Downer, C. Chiu, M. Fomyts'kyi, E. W. Gaul, F. Grigsby, N. H. Matlis, B. Shim, P. J. Smith, and R. Zgadzaj: *Proc. Adv. Accelerator Concepts* (AIP conf. Proc. No. 647 AIP, NY, 2002) 654.
- 50) D. J. Spence and S. M. Hooker: Phys. Rev. E **63** (2000) R015401.
- 51) C. Courtois, A. Couairon, B. Cros, J. R. Marques, and G. Matthieussent: Phys. Plasmas **8** (2001) 3445.
- 52) A. Butler, D. J. Spence, and S. M. Hooker: Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 185003.
- 53) 白神 宏之, 北川 米喜, 横井 幸司, 松永 博英, 加藤 義章, 大谷 俊哉, 山川 考一, 山中 千代衛 : 物理学会58回東北学大 (2003年3月28-31日)
- 54) Y. Sentoku, V. Y. Bychenkov, K. Flippo, A. Maksimchuk, K. Mima, G. Mourou, Z. M. Sheng, and D. Umstadter: Appl. Phys. B **74** (2002) 207.
- 55) Y. Murakami, Y. Kitagawa, Y. Sentoku, M. Mori, R. Kodama, K. A. Tanaka, K. Mima, and T. Yamanaka: Phys. Plasmas **8** (2001) 4138.
- 56) Glenn F. Knoll: "放射線計測ハンドブック" 2版 (日刊工業新聞社, 東京, 1991).
- 57) A. Szydlowski, M. Sadowski, T. Czyzewski, M. Jaskola, and A. Korman: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **149** (1999) 113.
- 58) 河野 功 : 月刊フィジックス **43** (1984) 749.
- 59) Richard L. Sheffield: *Proc. IEEE Particle Accelerator Conf.*, ed. by F. Bennett and J. Kopta, Vol. 2 of 3 (Chicago, March 20-23, 1989) 1098.
- 60) T. Inoue, S. Miyamoto, S. Amano, M. Yatsuzuka, and T. Mochizuki: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 7402.