コンファレンスレポート

第2回粒子のレーザー加速ワークショップ
(昭和60年1月6日—18日, 於カリフォルニア, マリブ)

田 中 和 夫*

The 2nd Workshop on Laser Acceleration of Particles
(Jan. 6—Jan. 18, 1985, Malibu, California, U.S.A.)

Kazuo A. TANAKA*

1. はじめに

レーザーによる電子加速は近年特に興味をもって見守られている非常に新しいfieldである。未だ第2回のこのワークショップも新鮮な雰囲気が満ちており、加速器、レーザープラズマ、レーザー製作の各方面から集った約80名の科学者は真剣にしかしリラックスして討議を重ねた。ワークショップは二週間に渡り、朝9時から午後5時頃迄行なわれた。場所はUCLAが持つ別荘で Los Angeles 郊外、美しい海岸線沿いにある Malibu と呼ばれるところで、良く T. V. のロケ等にも使われている所である。別荘は元億万長者の家であったとかで部屋数はワークショップのグループが夫々討議するにも十分な数があった。一階の居間は海岸線に向けて全面ガラス張りであり、波の打ち寄せるのや、時折海岸線に沿って泳ぐイルカの群れを見るのは心むものであった。一つ困った事は別荘の周りに食事をするレストランがなく、UCLA側で準備してくれたビーフサンドを毎日毎日二週間食べざるを得ない事であった。第一日目には、B. Richter (S. L. A. C. スタンフォード大) が将来の加速器に要求される性能について講演した。

トップクォークの観測された今～TeV級のエネルギーが、必要になり、既成概念的な加速器ではとてもそうした高エネルギー粒子を作り出せそうにもなく、このようなワークショップからの新しい発想が実を結ぶのを期待するというものであった。日本からは他に高エネルギー研の生出氏が参加しておられた。第一日目に参加者の Group 分けが行なわれた。グループは 1. Plasma (media) 2. Near field 3. Far field 4. Inverse Cerenkov 5. Two beams 6. Plasma focus 7. Laser technology と分かれており、筆者は今迄の専門分野(レーザーとプラズマ相互作用)から最も近い Plasma のグループに参加した。このグループは主に UCLA (USA), Rutherford (UK), Limeil (France), Osaka (Japan) で構成されており、このメンバーの殆んどは他のプラズマ核融合の会議等で見慣れた人達であった。第一週目は tutorial talks の週で各分野からの人々がその分野を紹介する形のセミナー形式で行なわれた。第二週はこの tutorial seminars とグループに分かれての working Sessions が行なわれた。

今回のワークショップではUCLAのグループのみが実験結果を報告するというもので、しかも実験の内容は実際に電子が超高速に加速され

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

* Institute of Laser Engineering Osaka University (2-6, Yamada-oka, Suita Osaka 565)

たという実証ではなく、加速をする事ができるであろう電子波が励起されているのを観測したというものであった。レーザープラズマ実験の観点からはこれは難かしい実験ではないのだが、このワークショップに参加していた特に加速器系の人達には十分なインパクトを与えた印象であった。以下には筆者の参加したグループの内容を中心に他のグループの内容に関しては紙面の許す範囲で述べる事にする。

2. プラズマを媒体とした電子加速

UCLAの理論グループの一人Tom Katsouleas (カツレアス) の話からまとめる。どうしてプラズマ加速器が必要とされるかは今迄の加速器では20MeV/mの電界が限界であり、将来の目標値1 TeVのエネルギーを得るには50kmの長さの装置が必要となる。又このように高い電界では加速器自体が潰れてしまうことになる。それに比してプラズマを媒体とした加速器では、破壊の心配はなく非常に高い縦電場を作り出す事ができる。例えばPoissonの式より

$$\vec{\nabla} \cdot E \sim kE \sim 4\pi en_i \quad (1)$$

ここで E は電子波の振幅 η_1 で励起された縦電界である。この最大値は、 $\eta_{1\max}$ を n_0 と周辺密度の値にとると

$$eE_{\max} \sim \frac{4\pi n_0 e^2}{\omega_p/c} = m\omega_p c \simeq \sqrt{n_0} \text{ eV/cm} \quad (2)$$

となりプラズマ密度を 10^{18}cm^{-3} にとると $eE_{\max} \sim 1 \text{ GeV/cm}$ となる。こうして上記目標値1 TeVは10mで達成される事になる。

二つの波長の異なるレーザーをその差周波数に相当する密度プラズマに照射すると、レーザー差周波数とプラズマ固有周波数が共鳴するビートにより電子波が励起される。電子の加速はこの励起電子波の縦電界で起こりその最大エネルギーは $W_{\max} = 4\gamma m_e c^2$ で表わされる。¹⁾
($\gamma = \omega/\omega_p = \frac{\text{Laser freq.}}{\text{Plasma freq.}}$) つまりレーザーの周波数が高ければ高い程エネルギーは大きくなる。ちなみに $1 \mu\text{m}$ のレーザーを 10^{17}cm^{-3} の密

度プラズマへ注入すると約20GeVの電子が得られる。Laserの入射エネルギーから来るエネルギーの上限も $W_{\max}' \leq 8\gamma^2 m_e c^2$ と上記 $W_{\max}$ と同程度になる。この上限に制限されないようにするには最初からレーザー周波数をdetuneしておくとなり、時間的に周波数を変化させる事が必要となる。ビート波で電子を加速しようとするエネルギーには先にも述べたように上限がありそれ以上のエネルギーを得る事は無理である。これを克服する為に、プラズマ中にDCのB-fieldを電子波のk-vectorと垂直に印加するとあるpbaseで掴った電子は波に対して $\vec{v} \times \vec{B}$ の力の影響をうけて斜めに走る。Bの強さを適当にとってやると電子はDCで電界を感じる事が可能である。これはsurferがより速い速度を得る為に波の進行方向に対して斜めに滑るのと似ているところからsurfatron²⁾と呼ばれている。電子がtrapされ続ける条件は $\gamma_{ph} B < E_0$ で印加磁場がこの値を超えるとdetrapが起きてしまう。

実験サイドの話としては同じUCLAグループのChan Joshiが主に報告した。このグループはあらかじめ θ ピンチで作ったプラズマ中に、二波長発振CO₂レーザーを照射して実験を行なった。実験条件は、

発振波長 $\lambda_0 = 9.6 \mu\text{m}$, $\lambda_1 = 10.6 \mu\text{m}$

エネルギー $E_0 = 4 \text{ J}$ $E_1 = 12 \text{ J}$

レーザーパルス巾 $\tau_p = 1 \text{ nsec}$

レーザースポット径 $\sim 300 \mu\text{m}$ ϕ

θ ピンチに使用したガス H_2 (fully ionized)

θ ピンチ中プラズマ密度 10^{17}cm^{-3} 。

プラズマ診断はプローブ用のRubyレーザーをCO₂レーザー軸90°方向から同期して照射し、そのThomson散乱を見た。加えて、CO₂レーザー自身のプラズマ中からの透過光をスペクトルに分解した。図1にThomson散乱の例を示す。 $\omega_R + \omega_p$ のところに丁度、プラズマ密度分丈シフトしたピークが出ておりこの周波数で電子波が励起されていることがわかる。

図2はそのkスペクトルの広がりを見せている。スペクトルは所定の値に、シャープに出ていたのではなく少し広がっているが、明確な解

図1 θ ピンチプラズマからの Ruby レーザーによる Thomson 散乱。

図2 電子波の K スペクトル

釈は報告されなかった。図のような k スペクトルがどの位レーザー軸方向に励起されているかを示したものが図3で、軸上1.5mmにわたって二波長のビートによる電子波が励起されていることがわかる。

CO_2 のプラズマ中透過光のスペクトル分析でも電子波による Stokes と Anti-Stokes 光コンポーネントが観測された。以上の観測データは一波長で θ ピンチプラズマ中に打ち込まれた際には観測されず、ビートによる電子波の存在は

$$\lambda_p \sim 100 \mu\text{m}$$

$$\text{Dephasing Length} \sim 2 \epsilon_p \frac{c}{\omega_p} \sim 3.3 \text{ mm}$$

図3 軸方向の k スペクトルの広がり。

間違いないと報告された。Thomson 散乱光の強度から電子波の電界の強さが推定でき、その値は、 $E_L = 330 \text{ MeV/m} \sim 1 \text{ GeV/m}$ であり、これが事実であればこのプラズマでは MeV 級のエネルギーに電子は加速されている筈であり、仮に 1 m のプラズマ中を加速されたなら GeV 級の超高エネルギー電子を得る事になる。他の実験結果としては、Thomson 散乱で stimulated Brillouin scattering (SBS) のコンポーネントが観測され更に面白いのは、通常の赤側に $\Delta\omega = \omega_{ia}$ (ω_{ia} : イオン音波周波数) 丈シフトしたピークに加えて、青側にも同量にシフトしたピークが見られ、二波長の入射波 (10.6 と 9.6 μm) が複雑に組み合わせあって SBS が起っていると考えられた。

英国からは J. Lawson (Rutherford Appleton 研, 核融合で Lawson 条件を定義した人) をリーダーとするグループが参加しており本格的にこの電子加速の実験に取り組むプランが報告された。レーザーには Nd ガラスレーザーを使い、同研

究所に既存の増幅器列を使用する。発振器は新しく開発が必要で YAG と Ylf と発振波長の違う ($\lambda_{YAG} = 1.054\mu\text{m}$, $\lambda_{Ylf} = 1.064\mu\text{m}$) ロッドを入れて同時発振させ、この周波数の差に相当する固有周波数を持つバックグラウンドプラズマ中に照射しそのビートで電子波を励起して加速を行なおうというものである。電子に与えられるエネルギーは $\left(\frac{\omega_L}{\omega_p}\right)^2$ とレーザー周波数とプラズマ周波数の比の二乗に比例するので、CO₂ の場合より ω_p が同じなら 10^2 倍エネルギーの高い状態に電子は加速され得る。バックグラウンドのプラズマとしては θ ピンチプラズマを使う。この実験は85年11月頃から開始の予定との事であった。レーザー発振器の開発に技術的な困難が残っており、波長の違うレーザーの増幅、増幅後の2波長レーザーの位相を修正する問題等を考え合わせると11月即座に実験を行なうのは難かしいのではと思われた。Lawsonより、更に大きなシステムの概念的プランが述べられた。それによると、プラズマ中で加速長を充分に長くするため 500 m の半径の集光鏡を使う。電子エネル

ギーを徐々に広げていく staging は加速の終わった場所へ他のレーザーをミラー ($r = 500\text{ m}$) で集光するが同軸上では行なえないので off-axis に照射するとの事であった。

3. 高繰返し高アヴェレージパワーレーザー

R. Byer (スタンフォード大) によってレーザーの review が行なわれた。個体レーザーでは今迄慣性核融合用の高ピークパワーを持つレーザーが作られて来たが、効率、コスト、平均パワー、繰返し等の事については余り考慮されていなかった。技術的には、しかし、熱の流れを固体中から取り除いてやれば高繰返し高アヴェレージパワーの固体レーザーを作れる所迄来ている。熱歪みは所謂ゆるスラブ型と呼ばれる形状(図4の右下の絵)をとる事によってビームへの影響を少なくする事ができる。このスラブ形状は1971年に GE 社(米国)で考案され、現在 GE 社とスタンフォード大で研究されている。種類としてはスラブ状ロッド内を内的全反射させ乍ら、増幅するものや、鏡形状のディス

図4 ガラスレーザーの増幅の形態。ロッド型増幅(上図) スラブ型でフラッシュランプのポンプ方向とレーザー進行方向は直角(下左図) スラブ型でフラッシュランプのポンプ方向とレーザー進行方向は平行(下右図)

クガラスの後ろにフラッシュランプを置いて反射時に増幅を行なうもの等が考えられる。こうしたレーザーはレーザー加速のみならず、ダメージテスト、リソグラフィとその応用範囲は今後広がって行くと思われる。

4 他の加速方法

紙面の都合で詳細⁷を割愛するが、他の加速機構としては逆 cerenkov radiation, 逆自由電子レーザー, 電子ビーム航跡ポテンシャル場 (wake field)⁸⁾, Near field 等が討議された。このうち wake field は Linac 中であつてもしくはプラズマ中に2つの電子束を時間差をつけて打ち込む。最初の電子で、できた。航跡ポテンシャルで2番目の電子束 (最初の束に比べて電子数は少ない。) を加速する。Near field 法は、小さな ($\sim 1 \mu\text{m}$) プラスチック球をレーザー進行方向に、例えば2列に $\lambda/2$ 間隔で並べ、電磁波の横波を、縦波の電場に変化させ Linac のように電子加速を行なう。逆 radiation を使ったものは、radiation によるエネルギーロス、機械自体の break down 等に問題があり余り高エネルギーは期待できない。同様に Near field にもプラスチック球の ionitation 等、break down の問題がある。

5. おわりに

このワークショップに出てみて、実に様々な

加速方法が提案されている事がわかり、加速器の科学者は、どうかして、より高いエネルギーを得ようと研究しているのを肌で感じた。只、レーザー加速にしても、他の方法にしても、実験のデータが殆んど存在しないというのは、少し心細く、今後、様々な方法での実験がなされ、少しづつ加速に適した実験が絞り込まれていくというのが、流れであると思われた。幸い大阪大学レーザー核融合研究センターでは、加速の実験を行なおうと思えば殆んどどんなレーザー加速の方法も可能な実験施設が既に存在する利点を活かす事ができる。既に CO_2 レーザーを使った加速の実験は開始されており、2-3年後のレーザー加速のワークショップには、相当面白いデータを携えて出かけていけるのではないだろうか。

参 考 文 献

- 1) T. Tajima and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 267.
- 2) T. Katsouleas and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 392.
- 3) P. Chu, J. M. Dawson, R. Hoff and T. Katsouleas: SLAC-PUB-3487, SLAC IAP-39, Nov. 1984 (unpublished).