

■ 研究紹介

レーザープラズマ加速の進歩と課題と夢と

— エネルギーフロンティアへの挑戦 —

KEK 加速器研究施設

中島 一久

kazuhisa.nakajima@kek.jp

2005 年 8 月 29 日

1. はじめに

もうかれこれ一年になるが、Dream beam のタイトルで Nature 2004 年 9 月 30 日号のカバーページを飾ったレーザープラズマ加速を示すシミュレーション写真 (図 1) をご覧になった方もいらっしゃると思う。ただ加速器研究をしている方でも従来の高周波加速器に似ても似つかぬ格好の加速器の加速機構まで理解された方は少ないと思う。また、もう少し理解や関心のあった読者は、いまさら 20 年以上前の Tajima Dawson[1] の論文で知られる laser electron accelerator の古いアイデアの検証がそれほど Nature のトップ記事になるほど価値ある成果かと思われたことだろう。英米仏の三グループが独立に行い、同時に発表した成果の価値は、初期論文が予想しなかった実用になかう 170 MeV 単色電子ビームが 3 mm 径のパルスガスジェットに高強度レーザーを集光しただけで発生できることを初めて実証したことだ[2]。Dream beam の所以は 100 GeV/m という驚異的な加速勾配やビームの自己単色化だけでなく、単純な高周波加速器では不可能なフェムト秒、低エミッタンスビームがテーブルトップサイズで自動的に得られることを発見



図 1 Nature 2004 年 9 月 30 日号のレーザープラズマ加速を報ずるカバータイトル Dream beam と laser wakefield シミュレーション。

したからである。実際、従来の技術でフェムト秒のバンチングから 100 MeV までの加速、低エミッタンスビームの生成まで行おうとしたら、テーブルトップでできないことは加速器専門家なら誰でも知っていることだが、Nature の表紙は高品質ビーム生成の一連のプロセスが数 mm の加速空間で起こることを示しており、先端加速器研究 (advanced accelerator) にとって十分インパクトのある快挙であった。実は、この事実は Nature 論文の一年前に産総研のグループがプラズマ密度をコントロールすると単色ピークが出ることを APS で発表しており、われわれも原研関西研の実験でその兆候を見つけていたが、電力中央研究所との共同研究で明確な単色化に成功したのは、去年 6 月に行われた米国 DOE 主催のワークショップ Advanced Accelerator Concepts (ACC) 2004 で単色ビーム発生が話題になった後である。

レーザー加速研究は 1982 年に Los Alamos で The Laser Acceleration of Particles Workshop が開催されたことに始まる。以後米国では DOE の主催で Advanced Accelerator Concepts Workshop が主要な加速器研究所・大学がホストとなって二年毎に米国内で開催されている。国際的にもこのワークショップはこの分野の牽引力となって新規理論や実験結果の発表と議論の場となっているばかりでなく、次期ステップの研究目標設定を毎回行い、米国内だけであるが学生に対する支援もあって、最近では学生や若手研究者の参加が非常に多く、新分野を発展させる上で重要な若い頭脳の啓発と教育の場となっている。

私も米国 AAC のプログラム委員を過去何度か務め、日本でも先端加速器研究で先導的役割を果たすような組織またはプロジェクトの旗揚げと研究分野の拡大を狙って、数少ない研究者とともに関連分野との連携を視野に入れて何度か研究会をもったが、結局日本では大きな進展を見ていないのが実情で、むしろ国内の研究規模も研究者数も縮小傾向に向かっていることに非常に危機感をもっている。もともと開拓者精神が旺盛で長い研究の歴史をもつ米国や、最近ヒットをいくつか放ち、研究分野のリーダーシップを

米国から奪った感のあるヨーロッパの状況はもとより、先端科学の分野で急速に伸びている中国、韓国、インドなどのアジアの国々においてすら、Nature 効果は当然研究への高い関心を呼び起こした。

レーザー加速やプラズマ加速器については、かつて「高エネルギーニュース」の誌面でも取り上げられたと聞いているし、「パリティ」や学会誌などで私自身紹介記事[3]を書いているほか、優れた解説記事がすでにいくつかの学術雑誌に書かれているので[4]、本稿ではレーザープラズマ加速器に関わる物理学的背景や加速機構に関して今更詳しく解説することはやめ、現在の研究の到達点に立って、最近の世界の研究動向と私が進めているアジアでの研究状況を述べ、高エネルギー関係者がもっとも関心をもっている高エネルギーフロンティア加速器への展望に触れてみたい。

2. レーザープラズマ加速とは

文字通りレーザーでプラズマの加速構造をつくり荷電粒子を加速するメカニズムのことである。ただプラズマは電離気体と呼ばれるようにイオンと電子がばらばらの状態になった物質にすぎないのでプラズマができただけでは粒子の加速は起こらない。加速すなわちエネルギーを増加させるには粒子の運動方向と電場の向きが一致（電子では逆向き）し続けなければ連続的に加速されない。高周波加速器からの類推からも明らかのように電磁場の位相速度が粒子と同じ（真空中の光速以下の）速さで伝播できる構造が必要である。この構造が高周波加速器では金属でできた加速管あるいは加速空洞（キャビティ）となっている。表面状態にもよるが大体の物質は1GV/mの電場のもとでは放電破壊を起こしプラズマ状態になってしまうので、金属空洞中に電磁場のエネルギーを閉じ込めてもこれ以上の電場を発生させることはできない。現在のリニアコライダー計画を含め通常の高周波加速器では100MV/m以下であり、マルチ TeV コライダーとして期待される30GHzの超高周波を用いるCLICでも加速勾配は150MV/mに設定されている[5]。またキャビティ中で高電場を発生させるための高周波パワーは電場の二乗に比例して増加するから大出力クライストロンが必要になる。1GV/mの加速電場を通常のライナックで使われる3GHzのキャビティで発生させるには1GW以上のクライストロンが必要である。ご存知のようにクライストロンは電子ビームから高周波パワーを取り出すために金属キャビティからできた装置であるから、高出力化に限界がある。CLICはこのクライストロンをもう1本の加速管に置き換え、大強度電子ビームが加速管中で発生する高周波を高勾配の加速管に直接導いて加速するコンセプトでtwo beam acceleratorと呼ばれる。

レーザープラズマ加速器コンセプトはこれら従来の高周波加速器の限界である1GV/m以上の加速電場勾配と高出力駆動パワー源の問題を解決してくれる。プラズマ加速の単純なモデルは図2に示されるように一様な中性プラズマにレーザーパルスが入射するとレーザーパルスのポンデロモータビリティによってプラズマ電子は選択的に排除されてパルスの後流に電子密度波（プラズマ波）が励起される。

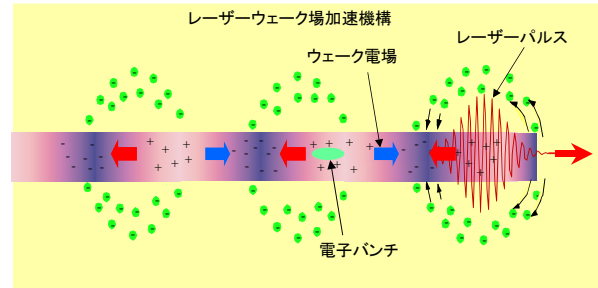


図2 Laser wakefield accelerator の加速機構

この場合イオンは十分重いので相互作用の間動かないと考える。プラズマ波の励起にはレーザーパルスの代わりに電子バンチを使うこともできる。プラズマは電磁波の伝播に対して導波管と同様の分散関係をもっており、励起されるプラズマ波は電子バンチによって加速管やキャビティに励起される wakefield と同じである。この plasma wakefield の位相速度は駆動電子バンチの速度またはレーザーパルスの群速度と同じであるから、適当な加速位相に粒子を入射してやれば、あとは高周波加速と同じ原理で加速できる所以である。それでこの plasma wakefield を用いる加速コンセプトを Plasma Wake-Field Accelerator (PWFA) あるいは Laser Wake-Field Accelerator (LWFA) と呼んでいる。電子密度 n_p [cm⁻³] の最大加速電場は $E_{\max} \sim n_p^{1/2}$ [V/cm] で与えられるから、レーザープラズマでは容易に実現可能な 10^{18} cm⁻³ の電子密度で100GV/mの加速電場が発生できる。実際にこの LWFA の加速機構と数十GV/mの驚異的な加速勾配を、私は1993年に阪大レーザー研の当時世界でも数少なかったチャープパルス増幅型(CPA)TW級固体レーザーを用いて世界初の検証実験を行い確かめた[6]。その後、T³ (Table Top Terawatt) レーザーと称される数十fsecから1psec程度のパルス幅をもち数TWから100TWまでのピーク出力をもつ小型高強度レーザーが出現するとともに世界的に研究が進展し、1000GV/mに及ぶ加速勾配と数百MeVまでの電子ビームがミリメートルスケールのプラズマで発生できることが明らかになった。

このレーザープラズマ加速研究の進展を加速器の発達を示すのによく用いられるLivingston chart風に図3にプロットしてみた。この図には1931年に創られたE. O. Lawrenceの最初の高周波加速器であるtable top cyclotronから始まってILC将来計画がめざす1TeVに到る電子加速器の発達

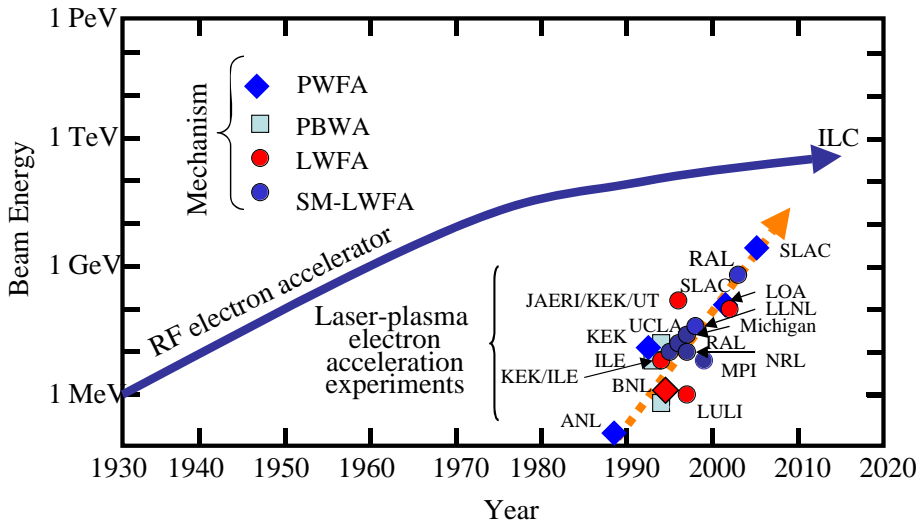


図3 レーザープラズマ電子加速実験の Livingston chart

PWFA は Plasma Wakefield Accelerator, PBWA は Plasma Beat Wave Accelerator, LWFA は Laser Wakefield Accelerator および SM-LWFA は Self-Modulated Laser Wakefield Accelerator のそれぞれ略号で、レーザープラズマ加速機構による分類を表す。

の軌跡を同時に示した。到達エネルギーゲインについて言えば最高3~4GeVになる。これは昨年 SLAC の FFTB で行われた電子ビーム励起の PWFA の実験結果で30GeV, 1nC, 0.1mmパンチ長の電子ビームを10cmのプラズマに入射してそのエネルギーシフトを測定した実験である。1GeV加速というのは高エネルギー加速器の最初のマイルストーンであり、図からも分かるように1MeV以下の原理検証実験から始まってほぼ10年で1GeVの壁に到達したことになる。これに対し高周波加速器は30年近くを要している。そもそも Livingston chart は実用加速器として認知された加速器ビームエネルギーの増強を年代順にプロットしたもので実用になっていない加速実験のビームエネルギーを直接比較しても意味がないという批判を頂くことがある。しかし、このチャートは何をアピールしたいかによっていかようにも変形されて用いられていることをご存知だろうか。また、従来の高エネルギー加速器が国家的規模の巨大プロジェクトで建設されたものであるのに対し、レーザープラズマ加速はいわば大学の実験室で実証されたものである。原理の正しさが証明されたら規模を拡大し実用化する仕事はもはや純粋の意味で科学者の手を離れている。すなわち過去10年間の研究で100MeVの実用的強度の高品質電子ビームが簡単なテーブルトップシステムで発生可能であることをアピールしたい訳である。この時点で有用なツールとして実用化や物質・生命科学などへの利用研究が始められるべきで、その方面に研究が広がることは望ましいことである。しかし本来の研究の目的は従来加速器では到達できない高エネルギーを実現することであった。これは高エネルギー加速器の使命でもあり、今後次の10年間にどのような目標をめざし進むべきか、この Livingston chart は教えてくれる。

3. 単色ビーム加速の成功

従来のレーザープラズマ加速実験で得られた電子のエネルギーは温度を定義できる Maxwell 分布かベキ乗則に従うような100%の広がりを持っていた。このような熱的加速は加速位相空間が非常に狭く、粒子の入射あるいは捕捉がランダムに起こることに起因している。このため単色ビームを得るための方法の開発はレーザープラズマ加速が加速器として認知されるための至上命題のひとつであり、いくつか wakefield への電子入射方法が提案された。外部入射と内部入射に大きく分けられるが、外部入射はフォトカソード RF ガンなどの従来の技術を用いて wakefield の加速位相に整合する入射ビームをつくることを重視した方法で、内部入射は別のレーザーパルスを用いたり、プラズマ電子密度分布を制御してプラズマ電子を wakefield に直接入射する方法が研究され、光入射あるいはプラズマカソードなどと呼ばれている。加速を制御しようとする点で一歩進んだアイデアであるが、フォトカソード RF ガン自身がまだ開発途上で、ビーム系や光学系が複雑になって、実験的には難しくなかなか成功しなかった。Nature の単色ビーム加速は内部入射の延長上にあるものであるが、30~50fsecの数十TWクラスのレーザーパルスを使った加速実験が行えるようになって、ガスジェットのプラズマ密度を精密制御していたところ偶然、単色的なビームが得られた訳である。ただし同じ条件下でも再現性は10%くらいで、理論家による我田引水的な説明は行われているが、決定的な発生メカニズムは分かっていない。図4にRAL-ICLグループのレーザープラズマ加速実験で得られた電子エネルギースペクトルを、図5にわれわれが電力中央研究所の共同研究で行った単色ビーム発生実験の結果を示す[7]。われわれの実験は、比較的長パルス、低密度でも単色ビームが発生することを示している。

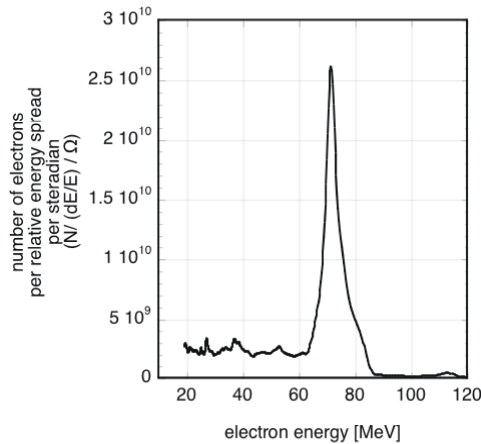
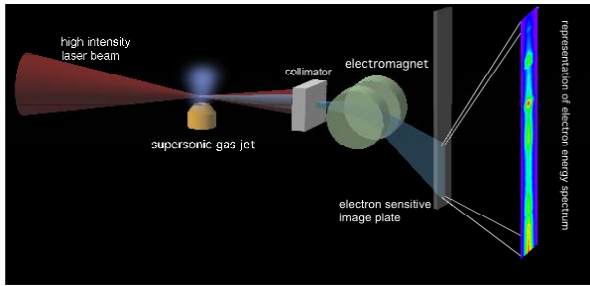


図4 RAL-ICL グループのレーザープラズマ加速実験のセットアップ（上）と11 TW, 45 fsec レーザーパルス、プラズマ電子密度 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で得られた電子ビームエネルギースペクトル（下）

（S. Mangles, Imperial College London の好意による）

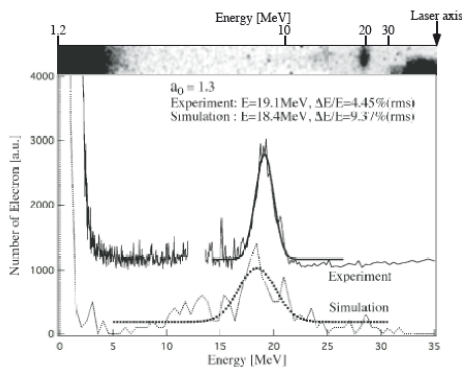


図5 KEK-JAERI-CRIEPI グループによる5.5 TW, 70 fsec レーザーパルス、プラズマ電子密度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の加速実験で得られたビームエネルギースペクトル

単色ビーム発生メカニズムが不明であるのは、wakefieldの内部の構造を直接観測することができないからだが、PIC (Particle in Cell) コードによる三次元シミュレーションは単色ビーム発生の様子を如実に示してくれる。図6は、単色ビームを発生するときのwakeの3D PICシミュレーションの結果である。これはblowout (噴出) モデルと呼ばれる相対論的なレーザー強度（レーザー場で加速

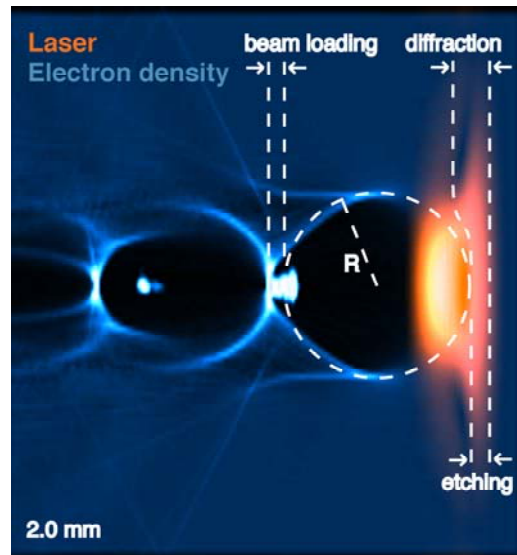


図6 3D PICシミュレーションが描く超相対論的レーザーパルスによって形成されるプラズマ球状キャビティ (bubble) とイオンチャンネル内に噴射された電子バンチ (W. Lu, UCLA の好意による)

されるプラズマ電子の運動が相対論的になる強度) で励起される極限的な nonlinear wakefield によって起こるプラズマ電子の自己入射と加速のメカニズムで、そのwakeの形状が水中にできる気泡に似ているので bubble (気泡) acceleration と呼ぶプラズマ理論屋さんもいるが、まさに bubble は加速空洞そのものである。噴出モデルによると単色ビーム加速の物理的描像は次の通りである。①平衡状態にあるプラズマ中をレーザーが伝播するときレーザー場のポンドロモーティブ力でプラズマ電子が吹き飛ばされ、パルスの後方には電子の空乏領域 (気泡または空洞) ができる。イオンはほとんど動かないので電子空乏領域はイオンチャンネルとなっている。②吹き飛ばされた電子はパルスが通過したあとイオンチャンネルの収束力を受けてパルスの伝播軸に引き戻され、空洞後方の end cap から軸上の強い加速電場で空洞に再入射される。③一度電子が入射されるとイオンチャンネルは電気的に中和 (電子が loading) されるので加速電場は減衰し入射が止まる。この後のバンチングと加速のプロセスは高周波空洞における加速と同じである。違いは高周波空洞が金属でできた静止構造であるのに対し、プラズマの空洞構造はレーザーパルス自身がつくり、内部で電子ビームを加速しながらその群速度で動く。いわば光速飛行する加速空洞である。加速はパルスのエネルギーが失われ、空洞が消滅するまで続く。噴出自入射説は波破壊説よりも単色ビーム発生機構をよく説明してくれる。ただ疑問がないわけではない。実験では噴出理論が要求するほど高いレーザー強度でなくとも単色ビームが得られているからだ。しかしこのモデルはレーザーパルスが単にプラズマ波を励起する船の役割をするだけと考えられていた

初期のモデルが、無秩序状態のプラズマからマイクロサイズの精巧な加速空洞という秩序状態を創り出し、さらにナノメートルサイズの電子ビームを入射・加速生成するという互いに生物組織のように振る舞い、自己組織化過程を暗示させてくれる点で、単に技術としての有用さに止まらない新しい物理の存在を垣間見せてくれないだろうか。

4. 高エネルギー加速の課題

高エネルギー加速を行うには加速距離すなわちプラズマ長が必要となる。ガスジェットではノズルから超音速で噴出するガスにレーザーを集光するが、様なガス密度(すなわちプラズマ密度)が得られるノズルの長さはせいぜい1cmである。長いプラズマをつくるだけならガスを真空容器に満たしたり、ガスセルを用いる方法も考えられるが、100fsec以下のレーザーパルスで数TW以上の高強度レーザーではパルス長が伸びたり、ガスのプラズマ化により集光できなかつたり、レーザービームが何本ものフィラメントに分裂するといった実際には多くの不都合な非線形光学効果が発生するため、集光するまでは真空中を伝播させなければならない。プリパルスや背景光、パルス形状といったパルスのクオリティも再現性のある安定なビーム発生には重要な要因であることが分かってきて、これらの研究も進んでいる。集光したレーザービームは回折によりエネルギーを失い Rayleigh 長程度しか集光状態が続かない。この長さは半径10 μm のスポットに集光したとき高々1mm程度である。100GV/mの加速勾配があってもエネルギーゲインは100MeV程度にしかならない。したがって集光させたままレーザーパルスを1cm以上伝播させることができれば1GeV以上のエネルギーゲインが得られることは容易に分かる。これは optical guiding (光導波) と呼ばれ、その方法を開発することは単色ビーム発生と同様、実用化する上で重要な要素技術として早くから取り組まれてきたが、決定的な成功例は報告されていない。光導波路は光ファイバー同様、半径方向に屈折率分布を作ってやればよい。プラズマでは中心の電子密度が低く、周辺部で高くなるようなチャンネルを作る。直径100 μm くらいのプラズマチャンネルの構造をセンチメートルスケールでいかに安定に作るかは簡単な問題ではなく、いろいろな方法が提案された。今では繰返し使用可能な方法としてガスセルやガスジェットにチャンネル励起用のレーザーパルスを集光してプラズマを生成し、その膨張過程でできる密度チャンネルに wakefield 励起用のパルスを通すという完全にレーザーに依拠する方法と、キャピラリー管の両端に電極をつけ高電圧をかけ、放電によりプラズマを発生させ、その膨張過程でチャンネルを生成する方法がある。前者は光学系のみで構成可能であるのでシステムは簡単であるが、高々1cm程度

が限度である。図7に台湾 IAMS グループが行った optical guiding の実験例を示す。後者は高圧放電回路が必要であるが、長尺導波路を作ることができ、チャンネルのプラズマ制御も可能である。私は今、キャピラリー放電型のチャンネル開発ではパイオニアであるヘブライ大学の A. Zigler 教授と共同研究を始めている。学生の杉山精博君がヘブライ大学に2ヶ月滞在して、世界最長となる12cmのプラズマチャンネルの開発とTWレーザーパルスのガイディングに成功した。図8にガイディングの結果を、図9にはこの時の実験セットアップとプラズマチャンネルの電子密度分布を示す。また、LWFA のスケーリング則を用いれば10cmのプラズマチャンネルで120TW, 30fsecの駆動パルスを入射することにより10GeVの加速が可能である。現在、これを実証するための国際共同実験を企画しており、日、中など5カ国のチームにより始められそうである。アジアにおける関心の高まりと合わせ、次章で述べてみたい。

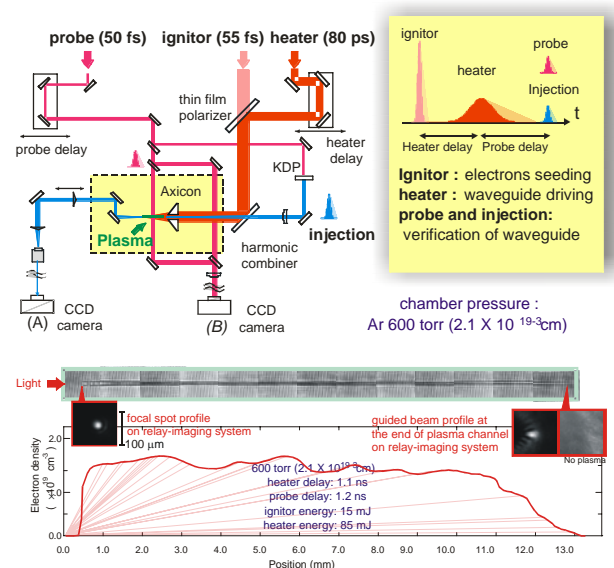


図7 台湾 IAMS グループによるレーザー励起プラズマ光導波路の実験セットアップと長さ12mmにわたって生成されたプラズマチャンネル

(Szu-Yan Chen, IAMS の好意による)

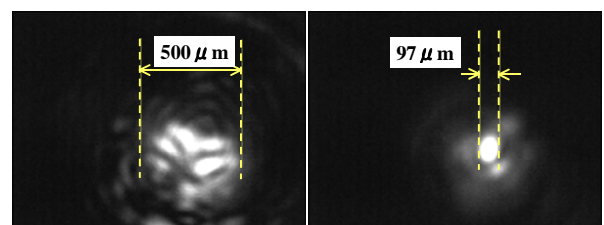


図8 Hebrew 大学での0.3TW, 30fsecレーザーパルスを用いた12.6cmプラズマ光導波路ガイディング実験。左がガイドなし、右がガイドありのキャピラリー出口でのレーザープロファイル (杉山精博、総研大の好意による)

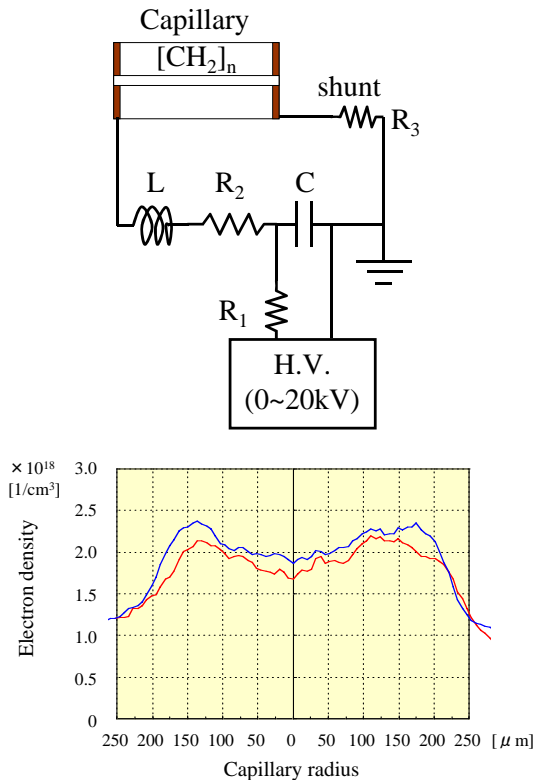
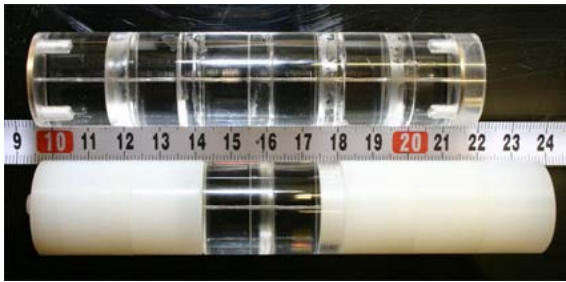


図 8 Hebrew 大学で開発された長さ 12.6 cm、孔径 0.5 mm のキャピラリー管 (上) と放電回路 (中) およびプラズマ分光計測により得られた電子密度分布 (下)

5. レーザー加速国際協力

レーザー光で加速するアイデアは、レーザーがまだ光メーザーと呼ばれた時代からあって新しいことではない。霜田は電磁場の位相速度をガス圧で制御する逆チェレンコフ加速のコンセプトを提案し、実験的にも最も早くから試みられたアイデアである[8]。レーザー場による加速は電子による放射過程の逆過程と考えられるので、未だに非プラズマレーザー加速のアイデアは根強く残っている。レーザー加速による単色化もアンジュレタ場で加速する逆自由電子レーザー加速法で最初に成功した[9]。レーザープラズマ加速のアイデアは 25 年以上前であるが、実験的には 1980 年代になって超短パルスレーザーが出現する以前は、二波長レーザービート波でプラズマ波を励起するビート波加速の実験が行われていた。1990 年代になってチャープパルス増幅の方法が開発され、小型高強度レーザーが普及すると

laser wakefield 加速の実験が中心になり、ビームエネルギーも強度も実用レベルまで向上した。また小型化の面だけではなくビームクオリティにおいて従来の高周波加速器では不可能な特質をもつことも明らかになった。エネルギーフロンティアの探求において高周波加速器は限界に達していることが指摘されて久しいが、これに代わる高エネルギー加速技術としてレーザープラズマ加速は最右翼にあると云える。75 年に及ぶ加速器の歴史においてエネルギーフロンティアは常に新加速原理によって創られてきたことは Livingston chart から明らかであるが、新原理の発見・検証から実用化され、その成果を手にするまでにはエネルギーフロンティア加速器の場合 20 年から 30 年を要すると云われている[10]。ILC に採用された超伝導高周波加速技術により最初のビーム加速実証実験が行われたのは 23 年前のコーネル大学である。幸い、私もこの世界初のビーム加速実験 (電子蓄積リングの放射損失エネルギーを回復するだけであったが) に携わる機会を得た。このときすでに超伝導加速器の原理的側面、基本的技術は完成していた訳で実用化への体制づくりに 20 年という歳月がかかったということだろう。すなわちレーザープラズマ加速の場合、開発研究の速度は決して遅いわけではなく、原理検証研究の段階から実用化へのサイクルをいかに促進するかがむしろ問われなければならない問題である。最も理想的にはレーザープラズマ加速技術を用いる大型プロジェクトが推進されることであるが、日本では先駆的な研究では先行した仕事が行なわれたものの、実用化のプロジェクトが組織化できずに応用発展段階において世界から遅れてしまっている。このため国内の施設や研究者層が貧弱なわが国においては先端研究に関心が高く、研究施設をもつ国々との国際協力しかこの分野の研究を発展させていくことができないだろうと考えている。

欧米における advanced accelerator の研究が活発なのは今に始まったことではないが、ここ数年の変化は今まで個々の大学・研究所の中で小グループでやっていたのが、中核となる加速器研究所などに統合されてひとつのプロジェクトとして動き始めたことだ。米国では SLAC の ORION, LBNL の L'OASIS, LLNL の PLEIADES, FNAL の FNPL, Michigan 大の FOCUS, UCLA の NEPTUNE, ANL の AWA, BNL の ATF, NRL の LIPA などである。ヨーロッパでは英国の Strathclyde 大, Oxford 大, RAL や Daresbury Lab などによる ALPHA-X, イタリア Pisa 大や Frascati Lab の PLASMONX が進行中であるほか、ヨーロッパの大学・研究所を網羅する ELAN (Electron Linear Accelerator Network) という研究ネットワークがフランスを中心に活動している。

日本以外のアジアにおける研究の端緒は米国で学んだ研究者が本国に帰って始めたり、直接には Nature の論文が刺

激となっており、その関心の高まりは注目すべきものがある。とくに韓国、中国、台湾、インド、イスラエルにおいてはすでに研究が立ち上がり始めていて、昨年3月韓国で行われた APAC2004 の際に6カ国の研究者でアジア先端加速器研究会 (Asian Advanced Accelerator Community) を結成した。11月にはアジアにおける研究の推進を目的に ACFA 内に Advanced Accelerator Research WG も発足し、ここを基盤に共同研究 FLASH-QUBE (Frontier Laser Acceleration Science on High Quality Quantum Beams) プロジェクトを提案している[11]。これはアジア内のレーザー・加速器研究施設を用いて、①10 MeV から1 GeV レンジの高品質電子ビームの発生と加速を行うテーブルトップサイズのレーザー加速器を開発し、②新しいコンパクトなフェムト秒 X 線源やテラヘルツ放射光源として実用化をめざす計画である。この計画は高強度レーザーが利用可能であれば現在の研究の到達段階において実現可能であり、学際的な色彩の濃い当分野において一致できる目標である。1 GeV までのテーブルトップレーザー加速器の実用化はコミュニティの至近の短期目標となっており、欧米のいくつかのプロジェクトもこれを目指している。また GeV 加速はエネルギーフロンティア加速器への出発点であり、TeV へのスケールアップと技術的可能性もそのとき開けるという戦略である。これにはレーザーとして100 TW クラスのフェムト秒レーザーが必要で、各国ともこのレーザー開発を先行して進めている。日本では原研関西が早くに100 TW を達成したが、残念ながら実験に利用できる体制になっていない。アジアでは中国がいわゆる先端レーザー開発において世界のトップレベルにあって、四川省綿陽市にある中国工程物理研究院 (CAEP) では300 TW、30 fsec のレーザーを開発し、国際的な共同利用実験に供されている。私は7月末から2週間、CAEP・清華大のチームに加わり(図10)、日本からガスジェットを持ち込んで、中国では最初となるレーザープラズマ加速実験を成功させた。図11はCAEP



図10 中国工程物理研究院 (CAEP) で行われた日中レーザー加速共同研究チームのスナップ

後方が直径1mの実験チェンバー、左端が筆者



図11 CAEP の最高ピーク出力300 TW、パルス幅30 fsec の SILEX-I レーザーシステム (上) と7月に行われた第1回日中共同実験におけるレーザー集光時のプラズマ CCD イメージ (下)

長さ10mmの超音速ガスジェットノズル(日本製)上方に長さ5mmのプラズマチャンネルができ、0.5 nC の電子ビームの加速を観測した。(Y. Gu, CAEP の好意による)

のレーザーシステムとレーザープラズマ加速実験の様態を撮った写真である。9月には国際共同研究としてマシンタイムをもらっており、日本から原研のチームも加わり世界最初の GeV 加速に向けた実験が行われる予定である。500 TW に増強後、来春にはプラズマチャンネルを用いた10 GeV 加速計画を予定しており、日・中・米・仏・イスラエルが参加するエネルギーフロンティアに向けた国際協力を準備している。このほか中国では北京の中国科学院物理研究所 (IOP) と上海光学精密機械研究所 (SIOM) がそれぞれ300 TW および1 PW レーザーを独自に開発中で来年には使用可能になる。また韓国光州科学技術大学院 (GIST) も、すでに30 TW を完成し、予備的な加速実験に成功し、今100 TW を整備中である。インドもレーザープラズマ加速研究には非常に関心が高く、放射光源施設 INDAS があるインドールの CAT とムンバイの TIFR では、10 TW レーザーを導入し実験を始めており、さらに100 TW クラスレーザーを独自に開発すると声明している。数年のうちにはインドも確実に研究の仲間入りをしてくるはずである。

6. エネルギーフロンティアへの夢

去る6月にパリ大学のアンリ・ポアンカレ研究所でICFA, ICUIL, ENSTA, エコールポリテクニクなどの共催で International Workshop on High Energy Electron Acceleration Using Plasmas 2005 (HEEAUP2005) が開かれた[12]. この会議は単色ビーム加速というブレイクスルーの上になつて次のステップである高エネルギー加速を如何に実現するか、さらに将来の高エネルギーコライダーに要請されるビームをレーザープラズマ加速で如何につくりだすかを課題として開かれた。会議の参加者は80名くらいにのぼり、レーザー、プラズマ、加速器屋だけでなく、こういった会議には初めて加速器ユーザーである高エネルギー屋も主催する側に加わった。ワークショップは3日間だけであったが、同じ週の前半にはロンドンで Laser-Driven Plasma Accelerators: new sources of energetic particles and radiation という Royal Society Discussion Meeting が開かれている。また中国では11月に北京でレーザー加速シンポジウムを中国科学院の主催でノーベル賞学者も加わって開くという話を聞いている。これら英、仏、中のレーザープラズマ加速器に対するにわかな関心の高揚は次世代加速器として広く注目され始めた証である。

パリ会議の主題は主催委員長である CPA 高強度レーザーの発明者で現 LOA 所長の G. Mourou が提起したが、議論された要点は次の3点である。

- ①高周波加速に代わる加速技術：ビーム駆動プラズマ加速 (PWFA) かレーザー駆動プラズマ加速 (LWFA) の選択。
- ②マルチ TeV 重心エネルギーの可能性とその方法：single stage (単段) か multi-stage (多段) かの選択。プラズマチャンネルの生成とチャンネル間のマッチング。
- ③高ルミノシティ ($10^{35} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$) は達成可能か。

これら3点はエネルギーフロンティア加速器をめざす次のステップで必ず最初に突きつけられる課題である。現時点でこれらの課題にはまったく答えが出ていない。初めて議論のテーブルに載ったというところだ。ビーム駆動かレーザー駆動かは高エネルギー加速とともに高ルミノシティが達成できるかできまる。

ビーム駆動方式とは ILC をフロントエンドとし先頭バンチをドライブビームとして後続バンチを200mのPWFA (afterburner と呼ばれる) で2倍のエネルギーにブーストしてマルチ TeV を実現しようとする構想で、SLAC の ORION グループが基礎実験を FFTB で行っている[13]. この方式は高周波加速とのハイブリッド方式で、繰返し・エネルギー効率の問題、強いては高ルミノシティの問題も解

決してくれる。PWFA のメカニズムは energy transformer で一種のエネルギー回収型のプラズマ加速器である。ILC ができさえすれば afterburner を挿入するだけであるのでエネルギー増強計画において低コストの最有力候補となるだろう。まだ解決すべき課題は多いが、ドライブバンチと加速バンチ間隔が1ピコ秒程度のマイクロバンチ構造をつくるという advanced technology が必要である。図12はこの原理を示す plasma wakefield のシミュレーションである。

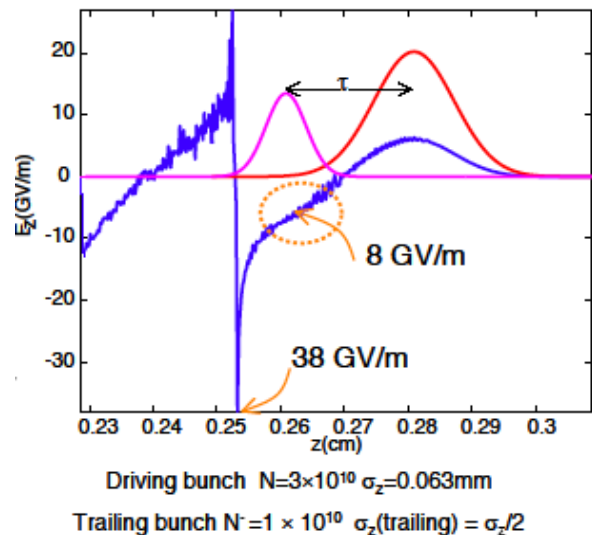


図12 Afterburner コンセプトによる plasma wakefield のシミュレーションと最適加速位相 $\tau = 1 \text{psec}$ (Tor Raubenheimer, AAC2004)

レーザー駆動方式の場合 ILC とのハイブリッド方式も考えられるが30kmもあるライナックの果てにレーザー加速器を付けても大してメリットがあるとは考えられない。コンパクト化という観点からはオールレーザー方式が理想であるが課題は多い。単段加速と多段加速があるが、問題点は単段の場合、現実にはまだ存在しない高出力レーザーを仮定しなければならないことであり、多段の場合100 μm 径のプラズマチャンネル1,000台をナノメータの精度でアラインメントし、ビームとチャンネルとのマッチングをどうするかという気の遠くなるような話がある。単段で1TeVまで加速するために必要となるレーザープラズマ加速器の設計値をUCLAのW. Luは噴出モデルに基づくスケーリングから与えている(表1)。これによるとレーザーエネルギーはプラズマチャンネル使う場合120kJ、加速器長は280m、チャンネルを使用しない場合1MJ、加速器長80mである。MJレーザーは核融合または核兵器管理技術として米・仏で開発されつつあるが高ルミノシティを得るためのkHzオーダーの高繰返し加速が可能かは現在の技術では否である。また高強度レーザーの効率は数%とRFクライストロンに比べ極端に低い。しかし、これをもって将来にわたってエネルギーフロンティア加速器の選択肢からレーザ

表 1 1TeV LWFA の設計パラメーター

	20% プラズマ チャンネル使用	一様プラズマ
Power	120 PW	1000 PW
Pulse duration	1 psec	1 psec
Plasma density	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Spot radius w_0	470 μm	450 μm
Length	280 m	80 m
a_0	4	12.1
Charge	40 nC	120 nC
Energy	1.12 TeV	1.012 TeV

$a_0 = 6.8 P^{1/2} \lambda / w_0$ は無次元ベクトルポテンシャル。
 $P[\text{TW}]$ はピークパワー、レーザー波長は $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 。
(W. Lu, HEEAUP2005)

ープラズマ加速器を外してしまっただけで顧みないということでは高エネルギー物理に未来はない…と思う。産業界においてレーザーの市場規模は高周波加速器に使われる高出力クライストロンの 100 倍近いという現状をご存知だろうか。先端レーザーと光関連技術は日進月歩で、次々と新しい製品技術が産み出されている。効率が 40% を超すファイバーレーザーもすでに光通信分野ではできている。G. Mourou は最近もっとも進歩の著しいこのファイバーレーザーを用いて CLIC のマシンパラメータを例にとり 3TeV コライダーをレーザー加速器で造った場合の駆動レーザーを提案し、その可能性を約束するトークを行った。

重心系のエネルギー 3TeV の CLIC ではバンチ当たり 4×10^9 個の電子をメインライナックで 1.5TeV まで加速する。このために必要なエネルギーは 1kJ である。LWFA でレーザーエネルギーのうち wakefield を励起して加速に使われる効率が 20% とすれば必要なパルスエネルギーは 5kJ となる。パルス幅を 100fsec とすれば駆動レーザーパルスのピークパワーは 50PW である。2 本のレーザーライナックを駆動するための平均パワーはパルスの繰返しを 15kHz とすれば 150MW となる。ファイバーレーザーの AC-光変換効率は 20~40% なので間をとり 30% とすると total AC power は 500MW となり、ほぼ CLIC と同程度になる。現在ファイバーレーザーの飽和フルエンスは 100 J/cm^2 でファイバー 1 本当たりのレーザーエネルギーは 1mJ である。したがって 2 ビームを加速するための駆動パルスエネルギー $2 \times 5 \text{ kJ} = 10 \text{ kJ}$ を発生するためには 10^7 本のファイバーレーザーがあればよい。1 本あたり 100 μm 径のファイバーであれば内部にプラズマ加速管を通すようにした中空構造にしても外径 1m の大きさにしかならない。ファイバーレーザーはそのままで高出力超短パルスを生

できるので CPA のような発振器—パルスストレッチャー—増幅器—コンプレッサーといった複合レーザーシステムはいらなくなり、光変換効率の向上とコンパクト化がさらに押し進められる。まさに加速器ドライバーレーザーとして理想的かもしれない。コストについても言及があり、現在のファイバーダイオードの価格は \$10/W であるので 150MW レーザーで \$1.5G すなわち 15 億ドル、約 1,500 億円ということである。プラズマ加速管自体はたいしてかからないから多く見積もっても 3TeV レーザーコライダーの建設費用は 20 億ドル、約 2,000 億円だろうという。ファイバーレーザーは光通信分野や産業用レーザーとして今後ますます発展が見込まれるので量産化が進めばコストはさらに下がることが期待できる。すなわちマルチ TeV コライダーのキャピタルコストも一国で建設可能な範囲に入ってくることを意味している。この際、高周波加速器と異なり、サイトはせいぜい 1km で既存の加速器施設に納めることができるであろう。

エネルギーフロンティアコライダーを考えると、なぜ将来のオプションとしてプラズマにこだわるのか。単に加速勾配が著しく高いだけでなく、ルミノシティを得るためのビームフォーカスと陽電子源をどうするかもレーザープラズマで解決できそうだからだ。もともとプラズマのピンチ効果を使って荷電粒子ビームの収束を行うアイデアは古くからある。リニアコライダーにおいても加速よりもビーム収束に、従来の電磁石よりも 4 桁も高い収束勾配を発生できるプラズマレンズを用い final focus を著しく短縮するアイデアが提案された。われわれも日米協力で SLAC の FFTB において 30GeV 電子・陽電子ビームの収束効果を確かめる実験を行った[14]。前述のように wakefield には強い収束力があり加速中も外場による収束を必要としないし、final focus に自己収束型のプラズマレンズを用いればルミノシティの増大に著しく貢献する。すなわちオール・プラズマコライダーが可能である[15]。

陽電子源をどうするか、オール・レーザープラズマ加速器に挑戦する立場からは難題であるが興味深いテーマである。ご存知のように陽電子は自然界に存在しないから高エネルギー電子を物質にあて電磁シャワーから創り出す。もちろんレーザープラズマ加速でも電子ビームを加速し、High-Z ターゲットにあて陽電子ビームをつくる実験が行われている[16]。もっと効率的に陽電子ビームをつくり出し加速する方法はないかというのも、今 advanced accelerator の重要なテーマである。最近、high energy density physics (高エネルギー密度物理) という研究分野が生まれている[17]、というよりも従来のレーザー (高強度場科学)、プラズマ、加速器、ビーム物理を大きく一つに括ったような分野である。これには宇宙プラズマや宇宙物理も入っている。もちろん既成のどの分野からも継ぎ接ぎされてきたレーザ

ープラズマ加速器も立派な構成員である。この宇宙プラズマには高密度電子・陽電子プラズマがあり、ガンマ線バースト源と関係があると考えられている。高強度レーザーを用いて宇宙と同じ環境を造り出し高エネルギー現象を地上実験で探索できないかというのが実験室宇宙物理の立場だが、ここで提案されている電子—陽電子ペアプラズマの生成法がコライダースourceに適用できないかと考えている[18]。簡単に述べると高強度レーザーを High-Z ガスに集光し、プラズマの電子運動エネルギーが $\gamma > 3$ 以上になる相対論的プラズマができると原子核の場と相互作用し対発生するトライデント過程が起こる。この生成した電子陽電子ペアを同時に wakefield で加速し衝突させるというアイデアである。これによってビーム物理の立場からは空間電荷力を減じ、衝突時のビーム崩壊をなくすことを狙っているが、素粒子過程からもペアビームコライダーができたなら対称性に絡む面白い物理ができるかもしれないというコメントをパリ会議で H. Videau, Ecole Polytechnique がしてくれた。

7. おわりに

学会や学会誌などにレーザープラズマ加速器の研究紹介を何度か頼まれているが、その都度、非常に初歩的な用語の定義から始めなければならないほど、日本では加速器専門家さえなじみの薄い特異なジャンルであると思われる。最近 AAAC をともに立ち上げた5カ国を訪問する機会を得て、その国の大学や研究所でのシンポジウムやセミナーに招かれ、レーザー加速器に関する講演を行ったが、研究者の関心の高さとともに専門家の理解の深さに驚かされた。それゆえ逆に日本における人気の無さ、研究が根付かないのは何故かと考えさせられてしまった。

レーザーや加速器といった研究はあらゆる科学研究におけるエンジンの役割を担っている。日本の科学技術がこのエンジンの開発に遅れをとってきたことは原子力や宇宙開発だけではない。逆に、中国やインドが高い関心を示し、重点分野として国が積極的に研究を推進し始めたのは 21 世紀の科学技術競争を制するエンジンと認識しているからだろう。レーザープラズマ加速器はハードボイルドな研究分野が 3 つも融合してできた分野である。どうも日本人の感性には合わないジャンルであるからかも知れないが、グローバルな視野で研究を進めていくならば自ずと活路が開けるものと楽観している。

余談になるが、共同研究を始めた CAEP のある綿陽 (Mian-Yang) は四川盆地にある地方都市で、最近の中国の経済発展を裏付けるかのような近代的な街造りが急ピッチで進む科学研究都市である。研究所はまさに「科学城」と

呼ばれる地区にある。レーザー研究では中国は 1960 年に IBM が世界最初の発振に成功した翌年に最初のレーザーを造っている。日本で最初のレーザー発振がいつか知らないが、いまだに科学研究用レーザーは外国製品に頼っている。CAEP は世界トップクラスの高強度レーザーを 3 年間で開発し、利用研究に休みなく使っている。日本のトップレーザーを使った私の経験からすると先端レーザー自身がまだまだ研究段階で、安定な運転が要求される加速器の応用はまだ先になるだろうというのが正直な感想だった。しかも実験がうまく行かなくなったとき、日本では考えられないが、マシンタイムを延長し一週間の夏休みを返上して全員が実験の成功まで頑張ってくれた。最後に結果が出て全員で乾杯をしたとき胸に熱いものが込み上げ、酔ってしまったのは 50 何度の強い地酒と辛い四川料理のせいばかりではなかった。綿陽は詩仙李白と三国志の古里でもある。

最後に執筆の機会を与えてくださった高橋徹氏と誌面の校正に奮闘いただいた武藤建一氏に感謝申し上げる。本稿がレーザープラズマ加速や先端加速器研究理解の一助になれば幸いである。また忌憚のないご意見、ご叱咤をお寄せ頂ければ、さらに研究の励みとなるであろう。

参考文献

- [1] T. Tajima, J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett., **43** (1979) 267.
- [2] S. P. D. Mangles *et al.*, Nature **431** (2004) 535; C.G.R. Geddes *et al.*, Nature **431** (2004) 538; J. Faure *et al.*, Nature **431** (2004) 541.
- [3] 中島一久「超短パルスレーザーを用いる粒子加速器」パリティ, **11** (1996) 34; 「レーザーウェーク場による電子加速」放射線化学, **70** (2000) 43; 「超高強度場科学の最前線 —レーザー高エネルギー物理の可能性—」日本物理学会誌, **56** (2001) 667; 「超高強度レーザーとプラズマの相互作用による粒子加速」真空 **45** (2002) 687.
- [4] たとえば E. Esarey, P. Sprangle, J. Krall, and A. Ting, IEEE Trans. Plasma Science **24** (1996) 252.
- [5] G. A. Loew, "Report from the international linear collider technical review committee," Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference (2003) pp.647-651.
- [6] K. Nakajima *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4428.

- [7] A. Yamazaki *et al.*, *Physics of Plasma*, to be published.
- [8] K. Shimoda, *Applied Optics* **1** (1962) 33.
- [9] W. D. Kimura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 054801.
- [10] M. Tigner, *Physics Today*, **54** (2001) 36.
- [11] K. Nakajima *et al.*, “Frontier Research and Development on Advanced Accelerator Physics and Technology in Asia,” available in URL:
http://acc-physics.kek.jp/sokensympo/AAAC-homepage/1stAAACmeeting/ACFAWG_AAR&D.pdf
- [12] ワークショップ URL: <http://polywww.in2p3.fr/actualites/congres/heeaup2005/> でトークの presentation ファイルがダウンロードできる。
- [13] T. O. Raubenheimer, “An Afterburner at the ILC: The Collider Viewpoint,” *AIP Conference Proceedings* 737 (2004) 86.
- [14] J. S. T. Ng *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 4801.
- [15] K. Nakajima, “Laser Ponderomotive Electron-Positron Collider,” *AIP Conference Proceedings* 737, 614-620 (2004).
- [16] C. Gahn *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) 2662.
- [17] National Research Council, “Frontiers in High Energy Density Physics,” The National Academies Press (2003)
- [18] K. Nakajima, “Electron-positron pair-beam production and acceleration in ultra-strong laser-plasma interactions,” *Quantum Aspects of Beam Physics 2003*, World Scientific (2004) pp.218-231.

追記

われわれコミュニティにとって重要な ICFA workshop series となっている Laser-Beam Interactions と Laser and Plasma Accelerators の二ワークショップが台湾大学と KEK の共催で 12 月 12-16 日に台北の台湾大学で開催されるので、この場を借りて「高エネルギー物理学研究者会議」会員の皆さんにお知らせしたい。

ICFA 38th Beam Dynamics
and
9th Advanced & Novel Accelerators
Joint Workshop
on
Laser-Beam Interactions
and

Laser and Plasma Accelerators
4th LBI Workshop and 7th LPA Workshop
jointly held in celebrating
the United Nations International Year of Physics
Co-organized by
National Taiwan University (Taiwan) and KEK (Japan)
National Taiwan University, Taipei, Taiwan
December 12–16, 2005

<http://hep1.phys.ntu.edu.tw/~ytshen/icfa/index.html>
Co-Chairs:

W-Y. Pauchy Hwang, National Taiwan University
Shin-ichi Kurokawa, KEK

Conference Topics:

The workshop will address the most recent results and prospects on the following topics:

- Physics and applications of laser-beam and plasma interactions, including the generation of energetic particles, high-energy Gamma rays, short-pulse X-rays and Tera Hertz radiations
- Laser applications for beam and plasma diagnoses, and beam cooling and handling
- Laser and plasma particle acceleration concepts and experiments including computer modeling of experiments
- Mono energetic high quality particle beam generation in laser-plasma accelerators: mechanism, control and applications
- Over-GeV laser-plasma accelerator technology
- Extreme high-energy accelerator and collider concepts
- High energy density beam-plasma physics including Laboratory astrophysics
- High energy density astrophysics including ultrahigh energy cosmic ray acceleration, Gamma ray burst and Cosmic jet
- Fundamental physics related to laser and particle beams