レーザー航跡場加速器の実用化に向けた課題と開発現状

中新 信彦^{1,2}, 益田 伸一^{1,2}, 細貝 知直^{1,2}

¹大阪大学光科学センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²科学技術振興機構CREST (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Current Status of Development of Laser Wakefield Accelerator towards Practical Use

Nobuhiko NAKANII,^{1,2} Shin-ichi MASUDA,^{1,2} and Tomonao HOSOKAI^{1,2}

¹Photon Pioneers Center, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

²Japan Science and Technology Agency (JST), CREST, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received August 24, 2012)

Laser wakefield accelerator is expected to be one of the novel accelerators for a new energy frontier and an ultrashort electron source for many attractive applications such as ultrafast electron microscopy. In recent studies, pointing stability of an electron beam emitted from laser wakefield acceleration has been extremely improved by applying an external magnetic field to preplasma. Emission direction of the electron beam can be controlled by the direction of the magnetic field. This stable and controllable electron beam can be a precise injector of staged laser wakefield acceleration and the energy spectrum of electron bunch can be modified by further acceleration and phase rotation in next wakefield. Also conventional beam optics is available for such stable electron beam. We are developing a reliable laser wakefield accelerator/electron source based on staged laser wakefield acceleration and new ultrashort electron bunch transport system with conventional beam optics towards practical use.

Key Words: Stable injector, Staged laser wakefield acceleration, Ultrashort electron bunch transport

1. はじめに

レーザー航跡場加速(Laser Wakefield Acceleration: LWFA)は超短パルス高強度レーザーによって励起される電子プラズマ波が持つ極めて高い加速勾配を利用した粒子加速法であり, 次世代の超高エネルギー加速器として期待されている。一方, 近年の物性材料科学研究では物質の高速過渡現象解明のため, 極短かつ電荷量が大きい高品質な電子バンチがプローブビームとして必要とされており, LWFAがもつ極短パルス性, 大電荷量, 低エミッタンス性等のビーム源としての高いポテンシャルが注目されている。

LWFAは1979年にTajimaとDawsonによって提唱されてから30余年が経過し¹⁾, 研究開始当初の目標であった単色ビーム発生やGeVの電子加速は世界各国の研究機関で既の実証されてきた^{2,3)}。現在は更なるエネルギーフロンティアに向かって研究開発競争が進んでいる。それにもかかわらず, ユーザが利用可能なレーザー航跡場加速器は未だに存在しない。現実的な加速器としてLWFAを考えると, 従来の高周波加速器並みの高い信頼性と制御性が必要なのは言うまでもない。高エネルギー加速器分野のみならず物性材料科学等の応用研究分野からも

LWFAに大きな期待が寄せられている今, その実現は急務である。

これまでの研究で高強度レーザーのプレパルスによって生成されるプレプラズマがメインパルスの伝播と集光を阻害し, 電子ビームの発生の安定性に大きく影響することが明らかにされてきた^{4,5)}。近年, 著者らは磁場を用いてプレプラズマの挙動を制御し, 高強度レーザーパルスの伝播を制御する手法を考案・実証し, 非常に安定な入射用電子源の開発に成功した⁶⁾。レーザー航跡場への電子入射はLWFAにおいて制御が難しい大きな課題の一つであり, この安定な電子入射技術の確立によって多段レーザー航跡場加速が現実味を帯びてきた。

本稿では, 現在著者らが取り組んでいる応用研究への実用化を目指した多段レーザー航跡場電子加速による高品質電子源の開発状況について概説する^{7,8)}。また, 電子入射の安定性と制御性の劇的な向上によって, 従来加速器で用いられる電磁石などのビーム輸送技術の使用が可能になった。このビームオペティクスを使用したエネルギー分散を持つフェムト秒電子バンチの輸送システムについても紹介する⁷⁾。

2. 多段レーザー航跡場による電子加速

2.1 自己入射方式のレーザー航跡場加速

LWFAにおいて高品質ビーム生成の鍵となるのはレーザー航跡場への電子入射である。電子がプラズマ波（レーザー航跡場）に捕獲され加速されるためには、あらかじめ相対論的エネルギーまで加速した電子バンチが航跡場の加速位相に入射される必要がある。ガス標的に集光された超短レーザーパルスはFig. 1に示すようにレーザーの進行方向と半径方向に電場を励起するが、これらの電場の位相は $\pi/2$ ずれており、進行方向位相の $\pi-3\pi/2$ の区間に電子バンチを入射できれば電子バンチが発散することなく軸方向へ効率的に加速される。このとき入射電子のバンチ長はプラズマ波長の1/4以下でなければならない。実際には、LWFAの典型的なプラズマ波長は10–100 μm 程度なので、時間幅が6–60 fs程度、空間的にも2–20 μm 程度の極短電子バンチを生成して加速可能な位相に整合するように入射しなければならない。

LWFA研究黎明期においては、電子入射に高周波加速器が用いられたものの⁹⁾、この航跡場の非常に狭い位相への電子入射の要求を満足する極短パルス超低エミッタンス電子ビーム発生 of 困難さと、高周波加速器とレーザー航跡場のフェムト秒オーダの同期が大きな技術的課題となり¹⁰⁾、現在は従来加速器を用いない自己入射 (Self-injection) 型の電子入射が主流である^{11,12)}。

自己入射方式の電子入射では、超短パルスレーザーを用いて背景プラズマ電子を航跡場の加速位相に直接入射させるが、その中で最も簡単かつ現実的なものは、非線形プラズマ波の破碎による電子入射法である¹³⁾。相対論的なプラズマにおいて (位相速度が光速 c に近いプラズマ波を相対論的プラズマ波と呼ぶ。), プラズマ波はその振幅がしきい値 $E_B \sim [2(\omega/\omega_p - 1)]^{1/2} m c \omega_p / e$ を越えると破碎する¹⁴⁾。ここで ω , ω_p はそれぞれレーザーとプラズマ振動数を、 m , c , e はそれぞれ電子の質量, 光速, 電荷素量を示す。この方法では非線形プラズマ波の成長に依存するため波破碎を制御することが難しい。これに対してプラズマ中に急峻な密度勾配があるときにはこの密度境界でも局所的にプラズマ波破碎が起きる¹⁵⁾。この場合は

Fig. 1 Longitudinal and radial electric field.

線形プラズマ波でも破碎が可能であり、より安定な入射が期待できる。急峻な密度勾配を作るために様々な方法が提案されており、この密度勾配を利用した電子入射も報告されている^{16–18)}。

2.2 多段レーザー航跡場加速

自己入射方式のLWFAにおいては、1つの高強度レーザーパルスが駆動する非線形レーザー航跡場の中で電子の入射と加速を連続的に行う。高強度レーザーパルスの伝播は標的プラズマ中の密度分布に極めて敏感であるため、プレプラズマなどの密度擾乱で回折し安定な電子入射を得ることが難しいことに加えて^{4,5)}、被加速電子のビームパラメータを精密に制御するためにはレーザー航跡場の狭い位相への正確な電子入射が必要不可欠である。従って、1つのレーザーパルスによる詳細なビームパラメータ制御は極めて困難であると考えられる。以上のことから、安定かつ制御性の高い加速器を作るためには電子入射と加速を分け複数のレーザー航跡場 (入射電子を発生するレーザー航跡場と加速を行うレーザー航跡場) を独立に制御する多段加速がより現実的である。

Fig. 2 (a) に一般的な多段レーザー航跡場加速の基本原則を示す。多段加速とは独立した複数の航跡場によって電子を段階的に加速するものであり、図に示すように一つの航跡場で発生、加速した電子バンチをその後方にある独立した航跡場に入射させ、さらなる加速を行う。これまで多段加速は高エネルギー化を目的とした追加速のために提案されており、LWFAによるもの以外にも従来加速器からの電子ビームをプラズマに入射して航跡場を励起するプラズマ航跡場加速による多段加速 (追加速) 実験も行われている¹⁹⁾。

Fig. 2 (a) Typical staged laser wakefield acceleration. (b) Staged laser wakefield acceleration with step-density gas-jet target.

一方、著者らはFig. 2 (b)に示すような階段状ガスジェット標的を用いた多段加速法を提案している。ガスジェット標的の高密度部分では短焦点集光のレーザーパルスで励起された非線形レーザー航跡場の波破碎によって後段航跡場への入射用電子を発生させる。高密度領域の先にある低密度領域では長焦点集光のレーザーパルスによって長尺の線形航跡場を励起し後段の加速を行う。急峻な密度境界面で効率の良い波破碎を起こすとともに、2つの航跡場を隣接させることによって後段への入射効率のよい多段加速を行うことができると見込まれる。

高エネルギー化を目的とした追加速のために提案されてきた多段加速だが、同期した2つのレーザーパルスのタイミングを制御し、後段のレーザー航跡場の適当な位相に正確に低エミッタンス極短電子バンチを入射することができれば、位相回転による電子ビームスペクトルの準単色化も可能である。例えば、前方に減速位相、後方に加速位相がある境界部分に電子バンチが入射すると低エネルギー成分は加速され、高エネルギー成分は減速されるため、Fig. 2 (a)の吹出し中に示すようなエネルギースペクトルの狭帯化が起こる。なお、位相回転ではエネルギー幅が狭くなる一方、バンチ幅は多少伸びるが航跡場の波長(数十fs)以下程度に維持される。このように、多段航跡場加速ではエネルギースペクトルの制御性の高い極短パルス電子加速器/電子源の実現が期待できる。

一般的にプラズマ波破碎から発生する入射電子は熱的な幅広いエネルギースペクトルを持つ。Fig. 3に示すように、熱的なスペクトル(一点鎖線)を持つ電子バンチを後段のレーザー航跡場の適当な位相に入射させると、位相回転によってエネルギースペクトルを狭帯化でき、入射位相 ϕ [rad]を選ぶことでピークの値も制御できることが数値計算によって確認されている(点線と実線を参照)⁸⁾。

Fig. 3 Phase rotation of injected electron bunch in 2nd laser wakefield.

3. 電子入射器の現状

多段加速の実現には航跡場の中の極めて狭い位相に正確に電子バンチを入射させる必要があり、安定した低エミッタンス極短電子入射器が必要不可欠となる。近年、プレプラズマを積極的に利用した光導波技術の開発によって、レーザー航跡場から発生する電子ビームの品質と安定性が飛躍的に向上した。詳細は文献6)に譲るが、本節ではレーザー航跡場加速におけるプレプラズマの影響と磁場印加による電子ビームの安定生成の手法について紹介する。

3.1 レーザープレパルス効果

一般に、CPA(Chirped Pulse Amplification)法を用いた超短パルス高強度レーザーシステムより生成される数十フェムト秒、数十TWの高強度レーザーパルス前方にはナノ秒〜ピコ秒オーダのプレパルスが存在する。このプレパルスが集光点付近に球状のプレプラズマを形成し、高強度のメインパルスがこのプレプラズマによって集光点の手前で回折され、集光強度が低下し集光スポットのプロファイルも悪化する。結果として、LWFAで発生する電子の電荷量とエネルギーは低下、ビームは大きく飛散し、加えて再現性も乏しい。実際にプレパルスの強度を小さくし、プレプラズマの発生を抑えることによって電子ビームの指向性と安定性が向上するとの報告がある^{20,21)}。最近ではプレパルス効果を完全に除去するため、プレパルスフリーのCPAレーザーの開発も進められている²²⁾。

3.2 安定な電子入射源開発

一方、著者らはプレパルスによるプレプラズマを積極的に用いることによって電子ビーム発生を安定化している。ガス標的内部の集光点付近のレーザー軸方向に平行な磁場を印加し、さらに、プレパルスの大きさを適当に調整することで、電子ビームの指向性と位置安定性が劇的に向上する。Fig. 4に安定した入射用電子発生の実験配置を示す。シート形状の超音速ヘリウムガスジェット標的を挟むように二つのリング状永久磁石を配置し、ガスジェット内にレーザー伝播軸方向に約0.2 Tの磁場を印加する。リング状磁石の中心穴を通して高強度レー

Fig. 4 Extremely stable electron beam generation with external magnetic field.

ザーパルス(~ 10 TW, ~ 30 fs)を標的ガス上に比較的短焦点の軸外し放物面鏡(F 値 ~ 3.5)を用いて集光する。集光強度は $\sim 8.0 \times 10^{19}$ W/cm 2 で、ASE(Amplified Spontaneous Emission)プレパルスのメインパルスに対する典型的なコントラスト比は $10^6 \sim 10^7$ 程度である。磁場を印加しなかった場合($B = 0$)と印加した場合($B = 0.2$ T)に対して得られた電子ビームの空間プロファイルをFig. 5 (a), (b)に示す。磁場を印加しない場合はFig. 5 (a)に示されるように電子ビームは広い領域に飛散し空間プロファイルの再現性もきわめて悪い。これは前節で述べたプレプラズマ効果によってメインパルスの集光が阻害されたためである。一方、Fig. 5 (b)の磁場を印加した場合は、非常に指向性の高い電子ビームが発生する。このときの横方向幾何学的エミッタンスは 0.02π mm mrad程度で、総電荷量は1 nC近くに達し、これは磁場を印加しない場合(a)の十倍以上の電荷量である。この電子のエネルギースペクトルは熱的に広がっており、その有効電子温度は ~ 25 MeVである。

Fig. 6 (1) - (6)に連続6ショットのビームプロファイルの再現性を示す。磁場を印加した場合、繰り返しショットにおいても高品質なビームが再現性良く発生している。この電子ビームのエネルギースペクトルは熱的に広がっているが、プラズママイクロオプティクスと呼ばれる光導波技術を用いて長尺な航跡場を励起することで、積極的な入射位相の制御は行えないものの、ポインティングの安定性と指向性の良さを維持したまま、チャネル内の航跡場によって電子が加速され、同時に位相回転によるエネルギースペクトルの準単色化も明確に観測されている²³⁾。

Fig. 5 Electron beam profiles. (a) $B = 0$, (b) $B = 0.2$ T.

Fig. 6 Electron beam profiles of 6 successive shots. $B = 0.2$ T.

このビーム品質と再現性の劇的な向上は磁場中でのプレプラズマのダイナミクスに起因している。集光点付近で $\omega_L t_{ei} > 1$ (ただし、 ω_L : ラーマー周波数、 t_{ei} : イオン-電子の衝突時間)の条件を満足するようなレーザー軸方向の磁場を印加すると、焦点近傍の微小領域のプレプラズマのみが磁化し、膨張が抑制され密度が高い状態を維持する。焦点から外れた磁化されていない部分は膨張するため、最終的に光導波特性を持つコーン形状のプレプラズマが形成される。メインパルスはこのコーンプラズマ中を光導波され、密度の高いコーンの先端部に小さいスポット径を維持したまま高い強度で集光される。集光点ではスポットサイズ程度の微小領域で強いプラズマ波破碎が起こるようになり、指向性の良い大電荷の電子ビームが発生する。この場合、レーザーパルスの回折が抑制されるためプラズマ波破碎の発生源のずれもなくビームの位置安定性は極めて高くなる⁶⁾。

さらに、このプレプラズマによる光導波を用いた電子入射器はポインティングの制御も可能であることが最近明らかになった²⁴⁾。Fig. 6で示した指向性の良いビームは磁場の方向に正確に沿って放出される。Fig. 7に外部磁場の方向を変化させたときの電子ビームプロファイルを示す。 0° をレーザー軸とし水平垂直方向に $\pm 3(2.5)^\circ$ 外部磁場を傾けた。外部磁場の方向を変化させると、電子ビームの発生方向は外部磁場の方向に完全に沿って変化するが、エネルギースペクトル・電荷量・エミッタンスは変化しない。これは磁場の方向を制御することによって、電子のエネルギーに依存しないビームの方向制御が可能であることを意味し、後段の航跡場への空間的に正確な入射が可能であることを示している。この方式は多段加速における電子入射器としての高い機能を有する。

4. 多段レーザー航跡場加速器開発現状

現在、著者らは安定な高品質極短電子パルスの発生を目指し3.2節で述べた電子入射器をベースに二つの高強度レーザーパルス駆動の多段レーザー航跡場加速のシステムを構築中である^{7,8)}。システムの概観をFig. 8に示す。このシステムは高品質極短電子ビーム発生部(電子入射器)、ビームパラメータ制御(追加速、位相回転によ

Fig. 7 Pointing control of electron beam by external magnetic field. $B = 0.2$ T.

Fig. 8 High-quality repeatable electron source based on staged LWFA and the ultrashort electron bunch transport system.

るスペクトルの狭帯化など)のための後段レーザー航跡場、さらに発生した極短電子パンチを任意の地点まで輸送するために新たに開発している輸送系で構成されている。

4.1 2パルス駆動多段レーザー航跡場加速

高品質極短電子ビーム発生部では前述の多段レーザー航跡場加速を一つのガスジェット標的を用いて効率的に行う。超音速スリットノズルの形状を工夫し、意図的に内部に衝撃波を駆動することでFig. 2 (b)に示したような急峻な密度勾配がある階段状密度のガスジェット標的を開発した²⁵⁾。そのガスジェット標的に入射用電子の安定化を図るため、磁石を配置し外部磁場を印加する。光同期可能な二つの高強度レーザーパルスを二種類の軸外し放物面鏡(OAP)を用いて同軸で集光する。階段状ガスジェット標的の高密度部分では短焦点のOAPでレーザーパルスを集光して励起した非線形レーザー航跡場の波破碎によって入射用電子を発生させる。高密度領域の先にある低密度領域では長焦点のOAPで集光したレーザーパルスによって位相回転用の長尺の線形航跡場を励起する。二つのレーザーパルス間にはジッターが存在しないため同期のタイミングを正確に調整することができる。これにより、電子パンチの航跡場への入射位相を正確に制御することができ、発生する電子ビームのエネルギーやエネルギースペクトルなどのビームパラメータをコントロールすることが可能となる。実際の多段航跡場加速実験を行う真空チャンバー内部の様子をFig. 9に示す。2つのパルスを同軸で集光するために中心軸上に穴のある短焦点OAPを使用する。

4.2 極短電子パンチ輸送

LWFAから発生する電子パンチは、発生点においてはプラズマ波長以下程度(数~数十フェムト秒)の非常に短いパンチ長を持つ。しかし、高密度電子パンチの空間電荷効果やエネルギー分散の影響により輸送される距離にともないパンチ幅が大きく伸張してしまう。応用研究等にこの極短電子パンチを利用するためには、電子発生点における極短パンチ幅を任意の地点で得ることができる輸送系を構築することが必要である。

Fig. 9 Experimental setup of staged LWFA with two pulses.

これまでに述べたLWFAによる電子ビームの飛躍的な位置安定性と指向性の向上によって、従来加速器で 사용되는四極磁石や偏向磁石などの磁気回路を用いたビーム輸送技術が使用できるようになった。LWFAから発生するエネルギー分散を持つ大電荷でフェムト秒の電子パンチの輸送はこれまでに行われておらず、著者らは新しい極短電子パンチ輸送法を考案し、現在構築中である⁷⁾。Fig. 10に極短電子ビーム輸送系の概念図を示す。この輸送系は図に示すようなシケイン磁気回路からなるパンチストレッチャーとパンチコンプレッサーで構成される。まず、パンチストレッチャーによって正の時間分散を与え、低エネルギーの電子がパンチの前方に、高エネルギーの電子が後方にくるように電子パンチ幅を伸長する。続いて、極短パンチが必要な場所の直前に設置したパンチコンプレッサーによってストレッチャーで与えた時間分散と輸送中の時間分散を相殺する負の時間分散を与える分散補償を行い、パンチ圧縮を行う。このシステムによってエネルギー分散によるパンチの伸張を補償しつつ空間電荷効果も抑えて極短電子パンチを輸送することができる。さらに、圧縮器の磁気回路を電磁石で構成することでパンチ幅の調整も可能となる。著者らはこれを極短レーザーパルスの生成法であるCPA法になぞらえチャープ電子パンチ輸送(Chirped electron bunch transport: CeBT)と命名した。

このシステムは電子パンチの極短性を利用する応用研究(例えば、材料物性科学研究における超高速電子イメージングなど)にとって必要不可欠であるが、エネルギーフロンティア研究に向けた高エネルギー化への展開においても、さらなる多段加速を行うために離れた別の航跡場の狭い位相に極短電子パンチを入射するにはこのようなシステムが必要となる。

Fig. 10 Chirped electron bunch transport (CeBT).

5. まとめ

本稿では、信頼性の高い加速器・電子源の構築を目指した多段レーザー航跡場による電子加速への取り組みについて概説した。長年にわたる大勢の研究者達の努力によってLWFAの粒子加速機構としての高いポテンシャルは実証されてきたものの、現実的な加速器の実現は未だに遠いと思われていた。LWFAは加速媒質にプラズマを用いることから、本質的に不安定性を克服できないとの悲観的な意見も未だ根強い。しかしながら、近年、レーザープレパルス制御、外部磁場印可、光導波路、安定な超音速ガスジェットの開発等の要素技術開発の積み上げと新たな知見の発見によって、ようやく、安定かつ制御性の高いLWFA駆動の極短入射電子源が実証されつつある。この安定なLWFA電子源の登場によってレーザー航跡場を加速管のように並べて加速を行う多段レーザー航跡場加速が現実味を帯びてきた。加えて、入射電子ビームの位置安定性が飛躍的に向上したことにより従来加速器で使用されるビームオプティクスをLWFAでも使用できるようになるため、プラズマの制御だけで取り組んでいたビームパラメータの制御に従来の加速器の技術を取り入れて行くことも可能になる。

現在、LWFA研究は原理実証の段階から極短高エネルギー電子パンチを利用する応用研究のフェーズに向かう過渡期にある。信頼性の高い安定なLWFA駆動超高エネルギー電子加速器や極短パルス電子源が登場すれば、高エネルギー加速器科学や超高時間分解電子イメージング等の物性科学研究を始めとし、今後は様々な応用が期待されると同時に、新しいビーム源を用いた新しい研究が創出されるであろう。これからのレーザー航跡場加速器研究の大きな進展を期待したい。

謝 辞

本稿をまとめるに当たりご協力、ご助言いただきました大阪大学児玉了祐教授、佐野智一准教授、Alexei G. Zhidkov特任教授、島根大学荒河一渡准教授、日本原子力研究開発機構神門正城博士、森道昭博士、小瀧秀行博士、Sergei V. Bulanov博士、高エネルギー加速器研究機構吉田光宏准教授、野崎光昭教授、小山和義特任研究員、名古屋大学山崎淳助教に深く感謝いたします。また、著者は日本学術振興会から特別研究員奨励制度(PD No. 23-853)による支援を頂いている。

参考文献

- 1) T. Tajima and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 267.
- 2) S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin, A. G. R. Thomas, J. L. Collier, A. E. Dangor, E. J. Divall, P. S. Foster, J. G. Gallacher, C. J. Hooker, *et al.*: Nature **431** (2004) 535; C. G. R. Geddes, Cs. Tóth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary, and W. P. Leemans: Nature **431** (2004) 538; J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy, and V. Malka: Nature **431** (2004) 541; E. Miura, K. Koyama, S. Kato, N. Saito, M. Adachi, Y. Kawada, T. Nakamura, and M. Tanimoto: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 251501; A. Yamazaki, H. Kotaki, I. Daito, M. Kando, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, S. Kondo, S. Kanazawa, T. Homma, K. Nakajima, *et al.*: Phys. Plasmas **12** (2005) 093101.
- 3) W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Tóth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder, and S. M. Hooker: Nature Phys. **2** (2006) 696; S. Karsch, J. Osterhoff, A. Popp, T. P. Rowlands-Rees, Z. Major, M. Fuchs, B. Marx, R. Hörlein, K. Schmid, L. Veisz, *et al.*: New J. Phys. **9** (2007) 415; N. A. M. Hafz, T. M. Jeong, I. W. Choi, S. K. Lee, K. H. Pae, V. V. Kulagin, J. H. Sung, T. J. Yu, K. Hong, T. Hosokai, *et al.*: Nature Photon. **2** (2008) 571.
- 4) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, K. Nakamura, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, and M. Uesaka: Phys. Plasmas **11** (2004) L57.
- 5) T. Hosokai, K. Kinoshita, T. Ohkubo, A. Maekawa, M. Uesaka, A. Zhidkov, A. Yamazaki, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, *et al.*: Phys. Rev. E **73** (2006) 036407.
- 6) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, A. Maekawa, A. Yamazaki, and M. Uesaka: Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 075004.
- 7) N. Nakanii, T. Hosokai, S. Masuda, A. G. Zhidkov, Z. Jin, Y. Mizuta, H. Nakahara, S. Kajino, K. Makito, A. Nishida, *et al.*: Proc. International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (2012) HED-P12.
- 8) T. Hosokai, S. Masuda, N. Nakanii, A. Zhidkov, Z. Jin, T. Sano, K. Arakawa, Y. Mizuta, S. Kajino, K. Makito, *et al.*: Proc. International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (2012) HED-6-4.
- 9) C. E. Clayton, K. A. Marsh, A. Dyson, M. Everett, A. Lal, W. P. Leemans, R. Williams, and C. Joshi: **70** (1993) 37; K. Nakajima: Phys. Plasmas **3** (1996) 2169.
- 10) M. Uesaka, T. Watanabe, T. Kobayashi, T. Ueda, K. Yoshii, G. Wu, X. Li, Y. Muroya, J. Sugahara, K. Kinoshita, *et al.*: Radiation Physics and Chem. **60** (2001) 303.
- 11) D. Umstadter, J. K. Kim, and E. Dodd: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 2073; E. Esarey, R. F. Hubbard, W. P. Leemans, A. Ting, and P. Sprangle: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 2682; V. Malka, S. Fritzler, E. Lefebvre, M.-M. Aleonard, F. Burgy, J.-P. Chambaret, J.-F. Chemin, K. Krushelnick, G. Malka, S. P. D. Mangles, *et al.*: Science **298** (2002) 1596.
- 12) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, K. Nakamura, T. Watanabe, T. Ueda, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, and M. Uesaka: Phys. Rev. E **67** (2003) 036407.
- 13) S. V. Bulanov, F. Pegoraro, A. M. Pukhov, and A. S. Sakharov: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 4205.
- 14) J. M. Dawson: Phys. Rev. **113** (1959) 383; T. Katsouleas and W. B. Mori: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 90; S. V. Bulanov, V. I. Kirsanov, and A. S. Sakharov: JETP Lett. **53** (1991) 565.
- 15) S. V. Bulanov, N. Naumova, F. Pegoraro, and J. Sakai: Phys. Rev. E **58** (1998) R5257; H. Suk: J. Appl. Phys. **91** (2002) 487; J. U. Kim, N. Hafz, and H. Suk: Phys. Rev. E **69** (2004) 026409.
- 16) M. C. Thompson, J. B. Rosenzweig, and H. Suk: Phys. Rev. ST Accel. Beams **7** (2004) 011301.
- 17) K. Koyama, A. Yamazaki, A. Maekawa, M. Uesaka, T. Hosokai, M. Miyashita, S. Masuda, and E. Miura: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **608** (2009) S51.
- 18) T.-Y. Chien, C.-L. Chang, C.-H. Lee, J.-Y. Lin, J. Wang, and S.-Y. Chen: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 115003.
- 19) I. Blumenfeld, C. E. Clayton, F.-J. Decker, M. J. Hogan, C. Huang, R. Ischebeck, R. Iverson, C. Joshi, T. Katsouleas, N. Kirby, *et al.*: Nature **445** (2007) 741.
- 20) S. P. D. Mangles, A. G. R. Thomas, M. C. Kaluza, O. Lundh, F. Lindau, A. Persson, Z. Najmudin, C.-G. Wahlström, C. D. Murphy, C. Kamperidis, *et al.*: Plasma Phys. Control. Fusion **48** (2006) B83.
- 21) E. Miura and S. Masuda: Appl. Phys. Express **2** (2009) 126003.
- 22) F. Döller, C. Zülke, A. G. R. Thomas, V. Chvykov, J. Davis, G. Kalinchenko, T. Matsuoka, C. McGuffey, G. M. Petrov, L. Willingale, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 175005.
- 23) T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Yamazaki, Y. Mizuta, M. Uesaka, and R. Kodama: Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 121501.
- 24) H. Nakahara, T. Hosokai, S. Masuda, N. Nakanii, Y. Mizuta, S. Kajino, K. Makito, A. Zhidkov, and R. Kodama: Proc. International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (2012) HED-P20.

25) 梶野 祥平, 神門 正城, 水田 好雄, 西田 明憲, 益田 伸一,
小瀧 秀行, S. Bulanov, 細貝 知直, 兒玉 了祐: 日本物理学

会講演概要集 **65** (2010) 23aQJ-1.

レーザーワード

ラーマー周波数 (Larmor frequency)

磁場からのローレンツ力によって荷電粒子が回転する運動のことをラーマー運動といい, その回転周波数のことをラーマー周波数という. サイクロトロン周波数, ジャイロ周波数とも呼ばれる. ラーマー周波数は磁場の強度と荷電粒子の電荷に比例し, 質量に反比例する. ローレンツ力は磁場の向きと磁場に垂直な速度成分に対して垂直に働くため, 荷電粒子はエネルギーを保存した

状態で磁場の方向と垂直方向に回転する. 磁場の方向には力が働かないため, 磁力線に沿って等速直線運動を行い, 結果として軌道は磁力線に巻き付くような螺旋状になる. 文献によってはラーマー周波数は粒子の持つ磁気モーメントが外部磁場によって歳差運動を起こす時の回転周波数を表すこともあり注意が必要である.

(中新 信彦)