photonic frontiers 極端光施設

真空の破壊を目的にしたELI

ジェフ・ヘクト

今年は高強度短パルスレーザを開発する欧州の意欲的な研究プロジェクトが始まる。このプロジェクトは物理学の最先端を実験するための200PWレーザの実現を目指して、3方式のペタワット級レーザによる研究に着手する。

極端光施設(Extreme Light Infrastructure: ELI)は欧州が計画した巨大で大胆な研究プロジェクトだ。ELIは超短レーザパルスのピークパワーを二桁増強して200PWを実現することが、その目的である。フランスにある極端光研究所(Institute for Extreme Light)の所長とこのプロジェクトの調整官を務めるジェラール・ムールー氏(Gerard Mourou)は、超短レーザパルスを時間と空間で集束すると、10²⁵W/cm²のピーク強度が得られると語っている。ムールー氏の目標は、物理学の最先端の研究、例えば、空間・時間構造としての真空の破壊誘起実験を試みることにある。

今年は3年間にわたり実施されたプロジェクトの予備調査段階を引き継ぐパルス発射段階の開始を目標にしている。欧州委員会はプロジェクトの「支

柱」となる最初の三つのインフラ構築に対して、それぞれ2億8000万ユーロ(約3億7000万米ドル)を支出し、チェコ共和国、ハンガリー、ルーマニアの3国に超短パルスレーザ研究所を建設する。このプロジェクトは、東欧3国における科学インフラ構築を支援し、3国はそれぞれ10PWクラスのレーザ設備を設ける。また、2012年に建設場所が確定する200PWレーザ構築のための土台にもなる予定。

技術基盤

ムールー氏と、かつて彼の学生で最近は米国光学会(OSA)の副会長に選任されたドンナ・T・ストリックランド氏(Donna T. Strickland)は、米ロチェスター大学で研究していた1980年代の中頃に、チャープパルス増幅(CPA)

を発明し、この発明がELIの土台となった。彼らの発明の要点は超短パルスを分散媒質に通した後に増幅することにある。このチャーピング過程はパルスの波長を非常に広い間隔で広げ、増幅前のピークパワーを減少させる。ピークパワーが減少すると、増幅器の光損傷の機会も減少する。増幅後のパルスは最終段のパルス圧縮器を用いて分散過程の逆変換が行われ、増幅された光は時間的にスクイージングされて、最初のパルスよりもはるかに高い振幅をもつ超短パルスが再生される。

CPAは短パルスのピークパワーを劇的に増加させるが、この過程はTi:サファイア増幅器の利得帯域幅の制約を受け、パルスの最小持続時間が制限される。広い帯域幅と短い持続時間をもつ出力パルスは光パラメトリックチャープパルス発振器(OPCPA)を用いることで実現できる。Ti:サファイア増幅器を光パラメトリック増幅器で置き換えるOPCPAは非線形過程に基づいて動作するため、レーザ遷移の利得帯域が制限されることはない(図1)。

ELIの最終設計はOPCPAあるいは最終段のTi:サファイアチャープパルス増幅器とのハイブリッド方式を使用すると考えられる。ムールー氏は「高強度のパルスパワーをできるだけ広い帯域幅で欲しい場合は、CPAを使うとエネルギーが増加し、OPCPAを使うと帯域幅が広がる」と語っている。例えば、OPCPAはナノジュールのパルスを $10^6 \sim 10^7$ 倍に増強することから、最終段にCPAを使うとCPAはパルスの一部しか増幅しないため、帯域幅の著しい減少は起こらない。

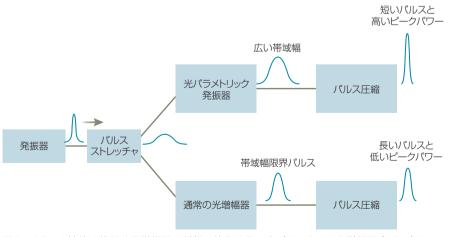


図1 CPAの性能は使用する増幅器の種類に依存する。光パラメトリック増幅器(OPA)はレーザ遷移で動作する通常の光増幅器よりも広い波長帯域を増幅できる。この図はシステムの各段を通過して進行する光パルスの時間波形を示している。OPAの広い帯域幅を利用すると、高いピークエネルギーをもつ短いパルスの発生が可能になる。

Vescent

究極の

周波数安定化 半導体レーザー

<100kHz



JILAが培った技術がふんだんに盛り込まれ(
John Hall設計極低ノイズ、ハイスピードレー
ザーコントローラー、極低ノイズ電源、多機能
サーボコントローラー、DBRレーザー、CECレ
ーザー、スペクトロスコピーモジュール等)、商
品化に際しさらにブラッシュアップしました。い
つでも、どこでも、使用可能な究極のターンキ
ー周波数安定化レーザーです。

ライン幅<100 kHz

メカニックパーツ、ピエゾ素子 などを使用せず振動に強い

アナモリフイックプリズム使用 円ビーム

35dBオプティカルアイソレー ター内蔵

広帯域高速モードポップフ リーチューニングが電流制御 のみで可能

10PWへの第一段階

極端光研究所が構築する10PWのApollonレーザはELI開発の重要な段階になる。この単一ビームハイブリッドシステムは、100Hz半導体励起薄型ディスクイットリビウムレーザを装備したOPCPAに100mJパルスを送り込む、高繰返しフェムト秒Ti:サファイア発振器から始まる。この段階での出力は毎分少なくとも一つのパルスを生成する大型Ti:サファイアレーザシステムのなかで増幅され、その後、パルス圧縮回折格子へと送られる。

今日のペタワットレーザをはるかに超える巨大ペタワットレーザ実現のための課題には、Ti:サファイア増幅器用の強力な二重ネオジムレーザ光源の開発と光増幅器の光損傷の防止技術、さらには高いレーザフラックスに耐えられる大型広帯域圧縮回折格子の開発が含まれる。この計画では2013年末までにApollonレーザから5~7PWパルスを発生させ、最終的には2015年に150Jのエネルギーをもつ15fsパルスを発生させ、10PWピークパワーを実現する。このピークパワーからは10²³~10²⁴W/cm²のパワー密度を十分に得ることができる。

ムールー氏は、三つの新しい支柱インフラがApollon設計に基づいてペタワットレーザの異なる応用を追及すると語っている。ハンガリーの支柱インフラはアト秒物理学の研究を専門に行い、チェコの支柱インフラは強力なレーザ・物質相互作用とレーザ加速により生成されるビームの研究に集中する。ルーマニアの支柱インフラは原子核の相互作用の研究に集中する(図2)。

三つのペタワット方式

ハンガリーのELIは、相対論的ドップラー効果を利用してアト秒科学の最前線を探究している。低パワーのフェ

ムト秒パルスは、適切な気体中の電子 を励起すると約100アト秒(as)の高次 高調波パルスを発生する。10PW領域 のピークパワーをもつハンガリーの ELIはレーザ生成プラズマ中の電子を フェムト秒の相対論的速度へ加速し、 また、これらの相対論的電子は入射光 子に対してドップラーシフトを誘起す る。一つのアイデアでは薄い金属箔を 標的にして10PWパルスを照射する。 その結果、電子は強い放射場によりコ ヒーレント加速され、レーザ光にドッ プラーシフトをもたらす動的反射鏡が 形成される。ドップラーシフトしたレ ーザ光は波長が非常に短くなり、パル スの持続時間が圧縮される。設計者は このアプローチによって10asパルスを 発生できると推定している。

ELIの「偉大な挑戦」と題する報告書には「このようなアト秒光源の新しい 創成を目標にした極端条件下での物質の駆動と制御は、それ自体が高価で挑戦的な科学プロジェクトである」と記述されている。この場合の重要な問題にはプラズマ相互作用を必要な時間スケールで制御できるレーザパルスの生成と、このような短パルスに適した測定技術の開発が含まれる。

チェコのELIの支柱インフラは、高 強度レーザ場を利用して、高エネルギ ービーム粒子ビームと X 線およびガン マ線放射の発生に焦点を合せている。 これらの概念は低強度のレーザ場の場 合に実証されているが、チェコの支柱 インフラが目指している非常に高い強 度と高い繰返し率の ELI は、パルスの 持続時間と輝度の技術の進歩にとって 重要な役割を果す。

レーザが超高強度になると、荷電粒子はレーザにより加速されて「バブル体制」になり、そこでは低強度の場に存在するウェイク場が孤立バブルの形に

オーテックス株式会社

URL http://www.autex-inc.co.jp E-mail Sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067

東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル TEL.03(3226)6321 FAX.03(3226)6290

大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29 TEL, 06 (6344) 6328 FAX, 06 (6344) 6342

◆photonic frontiers 極端光施設

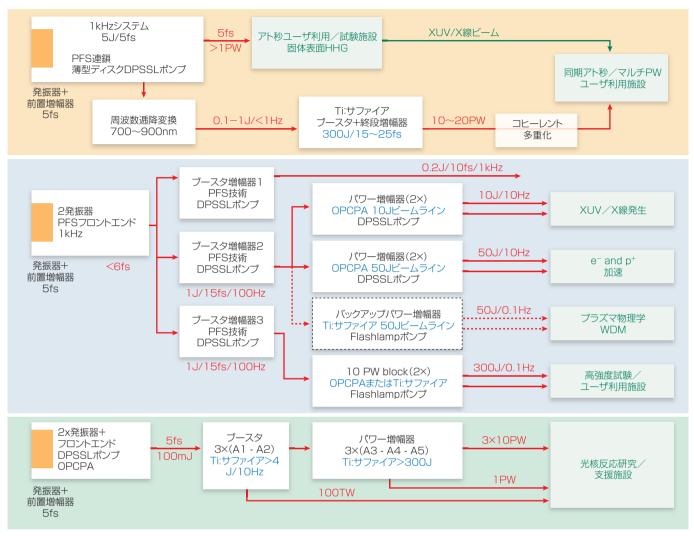


図2 三つのELI支柱インフラの設計を示している。上段はハンガリーに設置されるアト秒研究インフラ、中段はチェコに設置されるビームライン研究インフラ、下段はルーマニアに設置される光核反応研究インフラの構成である。(資料提供:ジェラール・ムールー氏)

なる。このバブルは多数の電子を相対 論的速度へと加速し、加速された電子 は均一に近いエネルギーをもつ高密度 バンチのなかに捕獲される。電子パル スはレーザパルスと同期され、必要に 応じてポンププローブ実験に使われる。 モデルによる解析は、初期段階のELI にはギガ電子ボルト(GeV)の電子の超 短バースト発生が必要になることを明 らかにしている。このような超短バース トの発生は小型レーザプラズマ加速器 の開発に向けての重要な段階になる。

10PWへの拡張は高エネルギー電子の発生が必要になり、ELIは電子加速

器をテラ電子ボルト(TeV)領域に拡張する問題を評価する実験にも使用できなければならない。もう一つの可能性は、第2のフェムト秒レーザパルスをレーザ生成電子パルス上に集光し、コンプトン散乱を用いて、強いX線またはガンマ線パルスを発生させる応用にある。

より実用的な応用も可能になる。高い繰返し率をもつ小型ペタワットレーザは、陽子を癌治療に必要な70~250メガ電子ボルト(MeV)のエネルギーに加速できる。このようなエネルギーへの陽子加速は巨大なサイクロトロンを

必要としているが、この応用は陽子加速装置のサイズ、コスト、利便性の進歩に役立つ。

ルーマニアのブカレスト近郊に配置されるELI支柱インフラは、光子・光核物理学に基づく原子核の研究を行う。核エネルギーは個々の光子のエネルギーよりも数桁大きいため、これらの実験は非常に高いレーザビーム強度と非常に高いエネルギー光子の片方または両方の発生が必要になる。

広範囲の実験可能性を確保するために、この施設はApollonなどの3台の10PWレーザビームラインに加えて、1台



多彩な機種の 高出力固体レーザ-

LEE LASERでは、 用途に応じた発振方式・波長・ エネルギー・出力・パルス幅の 機種を選択できるように、 多彩な光源を ラインアップしています。



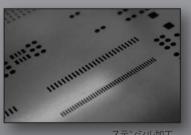
LEPシリーズ

■ 主な仕様 ■

波長:355、532、1064<mark>nm</mark> 発振方式: CWまたはパルス 最大エネルギー: 20 J/pulse 最大平均出力: 1 k W パルス幅: 30ナノ秒~10ミリ秒

■ 主な用途 ■

- ・メタルカット
- ・トリミング
- ・ビアホールドリリング
- ・ソーラーセルスクライビング
- •非接触加熱
- ・ライティングショ・
- •可視化用光源



http://www.japanlaser.jp/

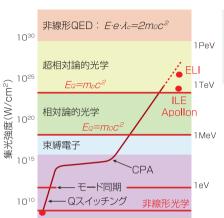
E-mail: lase@japanlaser.jp

ピ」LC 類日本レーサー

〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1

TEL: 03-5285-0863(直)

大阪支店 TEL: 06-6323-7286 名古屋支店 TEL: 052-205-9711



超相対論的強度は 陽子の $E_a=m_oc^2$ に 対して定義され、 約10²⁴W/cm²の 強度になる。

1960 1970 1980 1990 2000 2010

の電子加速器を配置する。約10²⁴W/ cm²のレーザ強度を到達目標にもつこ のシステムは、0.1~1Hzの中程度の繰 返し速度で動作する。一つの可能性と しては、このような高強度の光子を原 子核に照射したときの効果の研究が挙 げられる。もう一つの可能性としては、 強い光パルスによる高エネルギー電子 バンチのトムソン散乱を用いた、キロ ボルトからマルチ MeV 光子の可変同調 パルスの研究が考えられる。研究計画 のほとんどは基礎研究だが、光核物理 学の研究は放射性廃棄物の技術に革新 をもたらす可能性がある。

究極のELI

最初に構築されるELIの三つの支柱 は、それぞれが自らの成果を挙げなけ ればならないが、それらはより高度で 挑戦的なインフラ、つまり $10^{25} \mathrm{W/cm^2}$ の放射強度が得られる200PW レーザ の踏み台としても役立つ(図3)。

技術はまだ確立されていないし、場 所も2012年までは選定されないが、 ムールー氏は大胆な計画を持ってい る。彼は約10台のApollon級レーザか らの出力をコヒーレント結合すること を想定している。これらのビームは球 形の周りから集束され、最小の点に集 光し、最高の強度を達成する。最も興 味深い成果は「無」への集光から得ら れるであろう。量子電気力学は極端に 高強度の放射場の場合に真空が破壊さ れ、電子 - 陽電子対が形成されると予 測している。この破壊は準閾値効果に 基づくため、理論的に予測される破壊 の閾値は非常に広い。

図3 ELIの4番目の支

柱インフラによる集光強

度は10²⁵W/cm²に達

し、超相対論的領域が

実現される。濃赤の曲線

はレーザの発明以来の最

大集光強度がどのように

増加したかを示してい る。(資料提供: ジェラー

ル・ムールー氏)

計画のすべてが順調に進展すると、 ELIの4番目となる超高強度の支柱は 2017年に稼動し、レーザは真空の破壊 という未踏の領域に踏み込む。しかし、 この目標が達成できなくても、ELIがい くつかの重要な知見をもたらすことは 間違いない。

参考文献

- (1) Extreme Light Infrastructure website, at http://www.extreme-light-infrastructure.eu.
- (2) Extreme Light Infrastructure: Report on the Grand Challenges Meeting (European Commission, December 2009), available at http://www.extreme-light-infrastructure.eu/pictures/ Grand-Challenges-Meeting-Report-id66.pdf.
- (3) F. Amiranoff et al., Proposal for a European Extreme Light Infrastructure (ELI), available at http://www.extreme-light-infrastructure.eu/pictures/ELI-scientific-case-id17.pdf.
- (4) T. Tajima, Scientific Advisory Committee of Extreme Light Infrastructure: Report on the ELI Science (May 2009), available at http://www.extreme-light-infrastructure.eu/pictures/ Scientific-Advisory-Committee-SAC-Report-id65.pdf.