

zeptosecond extreme light

田島 俊樹、ジェラルド・ムル、ジョナサン・ウィーラー

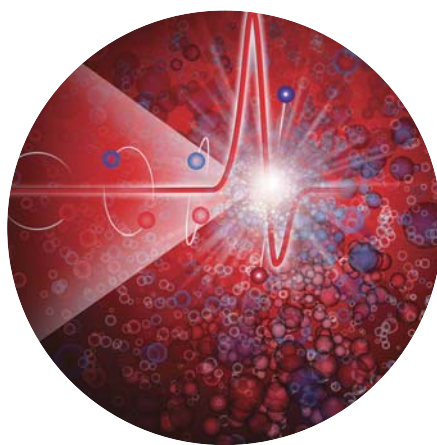
数十ジュールのペタワットレーザーパルス、それ以上のレーザーパルスをシングルサイクルレベルに圧縮すると、アト秒やzeptosecondアプリケーションへの扉が開く。センチメートル当たりで巨大なテラ電子ボルトのエネルギー勾配、コンパクトで効率的なレーザーイオン加速器、真空中の光の物質化がこれに含まれる。

伝統的に、パルス圧縮は低エネルギーレーザーパルスに関係している。しかし最近、数十ジュールのペタワットレーザーパルス、それ以上のレーザーパルスを圧縮できることが実証された。このようなパルスと相対論的プラズマミラーとの相互作用は、一段と圧縮されてサブアト秒時間領域に達し、シングルサイクルX線領域のマルチエクサワットパルスへの道が開ける。

このような高エネルギーパルス圧縮技術は、コンパクトで効率的なレーザーイオン加速器、オンチップテラ電子ボルト粒子加速器、真空光物質化などの新しいアプリケーションの扉を開く。さらに、アト秒・zeptosecond幅のパルスは当然、X線領域(1-10keV)にあり、テラ電子ボルトおよびそれ以上のエネルギーにおける基礎物理学研究を可能にする。この他に、宇宙加速器、真空非線形性、ダークマターやダークエナジーなどの光と物質の弱い結合領域、シュウィンガー(Schwinger)フィールド付近の放射線物理学、真空におけるzeptosecond分光法、および陽子線治療向けの安価なプロトン光源などの研究も可能になる。

パルスが短いほど高エネルギーに

長年にわたる高エネルギーレーザーの研究を活用した結果、10PWを超えるピークエネルギーに到達する道はパルスエネルギーを増やすことではなく、つ



エクストリームレーザーパルスと量子真空との相互作用は、仮想粒子対を破壊し、それらを実粒子に変換する(提供: フィル・ザウダーズ/フィル・ザウダーズグラフィックス社)。

まりコストのかかることではなく、パルス幅をアト秒・zeptosecondのスケールに圧縮することであることが分かった⁽¹⁾。このような方法で、エクサワットパワーは簡単なエネルギージュールで達成可能になる。

チャープパルス増幅(CPA)、後の光パラメトリックCPA(OPCPA)が発見されたことで、レーザーパルスのピークパワーは6~8ケタ増と著しく飛躍し、ピークは 10^{15} から 10^{22} W/cm²、つまり電子振動エネルギーと静止質量エネルギー(電子の 10^{18} W/cm²)が等しくなるレベルより4ケタ増加した。これは相対論的レーザープラズマ相互作用、サブアトミック領域の到来を告げるものである。これには、原子核物理学や粒子物理学が含まれる^{(2), (3)}。

次の強度レベルは、プロトン静止質量、つまり 10^{25} W/cm²に等しい振動エネルギーになる。ELI(Extreme Light Infrastructure: イーライ)、LMJ、アポロン(Apollon)と言った大規模欧州レーザーインフラストラクチャー、そのほか、ロシア、中国、韓国のインフラストラクチャーが競って実現しようとしているのが、この途方もない強度である。とは言え、非線形量子力学領域に入るためには、はるかに高い 10^{29} W/cm²領域に到達しなければならない。

光・真空物質化

戦略は、ELI-NP(<http://www.eli-np.ro>)と協力してわれわれが採用したエネルギー $>10^{25}$ W/cm²の高エネルギーサブアト秒パルスの効率的生成に向けたもので、簡素、ローコストであり、既存のペタワットもしくはペタワットが見込めるファシリティを使用する。圧縮技術は2段階で行われる。まず代表的な20fs、20J近赤外(NIR)パルスシングルサイクルに圧縮し同時に15Jのエネルギーを維持する。次に相対論的プラズマミラーを用いてパルスを2.5fsからアト秒・zeptosecond(10^{-21} s)レジームに圧縮する。

現在の圧縮技術は、溶融シリカファイバもしくは中空キャピラリに依存する。必要なスペクトル広がりを得られるように、これらには希ガスが充填されている^{(4)~(6)}。しかし収容できるのはナノジュールからミリジュールの低エネルギーのパルスにすぎないので、1つの技術からもう1つの技術に移行することで圧縮できるエネルギーが鋭く上昇する(図1)。

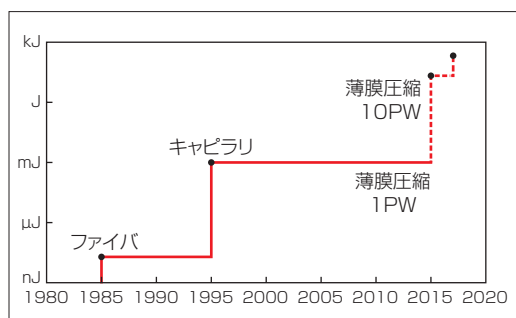


図1 シングルサイクルレジームにおけるパルス圧縮は、まずシングルモードファイバ、次に中空コアキャピラリ内の希ガス内の高強度パルスに対する非線形応答に依存している。個々の方法が実証していることは、20fsパルスは、実用的なエネルギー範囲内でさらにサブ5-fsパルスまで圧縮できるということである。近赤外パルス圧縮に向けてエネルギーでさらに飛躍するために薄膜技術が提案されている(出典: ジュラール・ムル et al)。

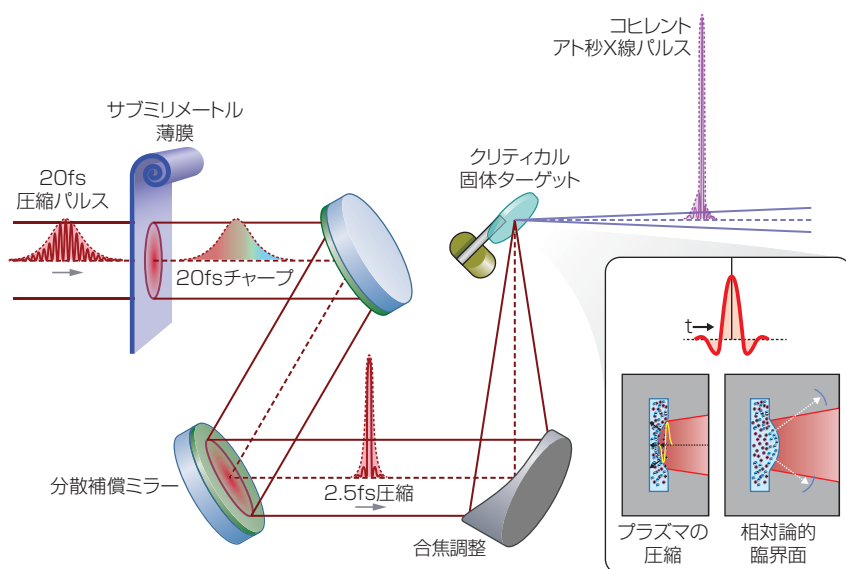


図2 圧縮には2段階ある。まず、薄膜圧縮は自己位相変調 (SPM)によって生ずるスペクトル広がり と群速度分散 (GVD)との間の相互作用に依存している。GVDは、大口径膜でパルスを広げるのに必要。最初のパルスと比較して増加したスペクトル成分を持つ線形周波数チャープパルスは、チャープミラーのような分散素子を用いて、圧縮することができる。圧縮の第2段階は、適切に合焦調整したシングルサイクルパルスが必要とする。相対論的強度フィールドを適用して固体標的のプラズマをX線パルスにアップコンバートするためである。

パルスエネルギーを一層増やすために、コークム(Corkum)とロランド(Roland)は体積圧縮を行った⁽⁷⁾。ところが、材料の非線形性は、ビームの gaussian強度プロファイルの影響を強く受け、ピーク強度付近の中央部分を除いて、パルスの均一圧縮ができない。非均一圧縮は、体積圧縮の魅力著しく弱める。

均一性の問題を解決するために、われわれは最新のペタワットレーザの使用を提案している。そのレーザは、薄い(サブミリメートル)バルクフィルムで振幅と位相がトップフラットプロファ

イルのパルスとなり、数十ジュールパワーレベルでシングルサイクルパルスを生成する(図2)。薄膜圧縮(TFC)技術は安価なプラスチックプレート、あるいは厚さが均一な、しかし必ずしも平坦ではない、サブミリメートルのガラス板に依存している。プレートは、ペタワットパルスビーム輸送内に置かれ、エネルギー損失を最小化しながらビーム全体にほぼ一定の自己位相変調(SPM)を起こす。大口径材料は、壊れることな高強度レーザショットに耐えることができなければならない、簡単に取り換えられないからである。

プラスチックフィルムとレーザの相互作用が先頃CETAL PWペタワットレーザファシリティで稼働したものと同じであると仮定して行った数値シミュレーションは、800nm波長で27fs内の27Jエネルギーのパルスは、2つの薄膜ステージを利用して3fs(800nmでシングルサイクル)に圧縮可能であることを示した⁽⁸⁾。CETAL PWペタワットレーザファシリティ (<http://cetal.inflpr.ro>)は、ルーマニアのInstitut National de Laser, Plasma et Radiophysique (INFLPR)に拠点がある。

提案方法の効率性により、3程度に制限される各ステージでB全体を維持しながら、多段コンプレッサが所望の圧縮を実現できる。このシングルサイクルへのしっかりとした合焦が、 λ^3 ディメンション空間に楕円体を形成することに留意が必要である。

さらにNIRシングルサイクルパルスをアト・zept領域に圧縮するために、われわれは非常に強力な入射パルスの影響下で出入りするレーザ駆動反射面を用いる。ここでは、強度は途方もない光圧力に付随する 10^{23}W/cm^2 領域が可能であり、相対論的速度で臨界面を動かすことができる。この λ^3 相対論的領域で、ナオモバ(Naumova)他は、反射パルス幅T-ミラーの相対論的運動によるパルス圧縮が次のようにスケールすると予測した。

$$T=600(\text{attosecond})/a_0$$

ここで、 a_0 はレーザパルスの規格化ベクトルポテンシャルで、これは 10^{18}W/cm^2 での単位であり、強度の二乗根としてスケールする⁽⁹⁾。 10^{23}W/cm^2 では、 a_0 は約500であり、1アト秒パルスが生成可能。アト秒パルスから得られる1J反射エネルギーでエクサワットパワーレベルに十分届くことへの留意は注目

に値する。

高エネルギー電子とイオン加速

高周波光子は、高密度物質における航跡場駆動に有利である。レーザー航跡場加速法(LWFA)エネルギー利得を増やそうとする現在のメインフレームアプローチは、固定レーザー光周波数のためにプラズマ密度を下げることである。これは、よく知られているレーザー航跡場スケーリング技術に基づいている⁽¹⁰⁾。

LWFAでは、エネルギー利得はプラズマの臨界密度によって制限される。高強度LWFAエネルギー利得は次のように与えられる。

$$\varepsilon_e = a_0^2 m c^2 (n_e/n_c)$$

ここでは n_e は電子密度。プラズマ臨界密度、 n_c はレーザー周波数によって規定され、光子周波数、エネルギーの増加にともなって増加する。1eV光学フォトンでは、 n_c は約 $10^{21}/\text{cm}^3$ 、一方10keVのX線フォトンでは、 n_c は約 $10^{29}/\text{cm}^3$ であり、優に固体密度を超えている。

より高いエネルギー利得(および、さらに小さく、よりコンパクトな加速器)へのわれわれの新しい方途は、 n_e を下げることなく n_e/n_c 比を大きく保つことによってフォトンエネルギーをX線レベルに高めることである。したがって、より高いフォトンエネルギーに進むことによって、より高いエネルギーが達成できるようになる。より高密度のプラズマは、より大きな加速勾配をサポートできるからである。

極限的なX線駆動航跡場加速への移行によって、より大きなエネルギーへの加速は、より短い距離で達成できる、つまりセンチメートルの距離でテラ電子ボルトエネルギー(つまり、チップ上でテラ電子ボルト)-ガスで光学レーザー

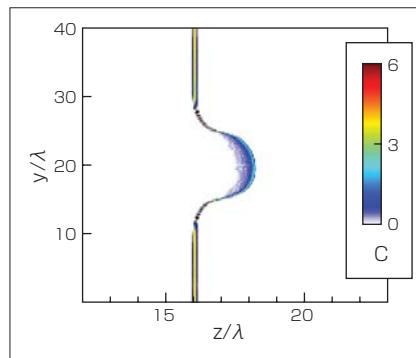


図3 シングルサイクル光学レーザーパルスは、高密度物質の薄膜から、コヒーレントにイオンを加速する。

が達成した以前の成果の 10^3 倍、現在の無線周波数技術で達成できる成果の 10^6 倍である。

今日まで、このようなエネルギーレベルはスイスのCERNでしか達成できなかった。数センチではなく、現在建設中のベタワットファシリティのようなレーザーファシリティを利用すると数キロメートルが必要になる。

高密度領域におけるわれわれの材料選択は現在、ナノホールを持つナノマテリアルである⁽¹¹⁾。さらに、現在の光学レーザーの圧縮をシングルサイクル(圧縮されてX線レーザーにならなくても)にすることで、イオン加速器のドライバのような固有のアプリケーションができる(図3)。シングルサイクルレー

ザパルスのポンデルモティーブ力による、効果的、コンパクト、コヒーレントなイオン加速器により、他のレーザー駆動法で生ずる不安定性を回避することで、高品質、1GeVパルスが得られる。エネルギー利得の大きな要因は、このレーザーピストン領域に見られる⁽¹²⁾。

要約すると薄膜・プレートコンプレッサと相まって、トップハットプロファイルのベタワットパルスを生成する今日の高ピークパワーレーザーは、2.5fsシングルサイクルで100PWパルスを生成することができる。レーザー波長によって制限されるスポットサイズに集光すると、予測されるのは、レーザーと固体との相互作用によってアト秒あるいはzeptosecondのマルチエクサワットパルスをX線領域に生成することで、結晶ではセンチメートル範囲でテラ電子ボルトまでの巨大な加速になることが洞察できる。

この成果は、すでに述べた高エネルギー物理学の全光的理解だけでなく、陽子、中性子およびミューオンの新しいコンパクトなソースに根拠を与えることになり、基礎物理学のアプリケーションが増え、コンパクトな陽子線治療、あるいは核廃棄物変換のような社会的なアプリケーションの根拠にもなる。

参考文献

- (1) G. Mourou et al., Eur. Phys. J. Spec. Top., 223, 1181(2014).
- (2) D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun., 56, 219-221(1985).
- (3) A. Dubietis et al., Opt. Commun., 88, 437-440(1992).
- (4) D. Grischkowsky, Appl. Phys. Lett., 41, 1, 1-3(1982).
- (5) R. L. Fork et al., Opt. Lett., 12, 7, 483-485(1987).
- (6) M. Nisoli et al., Appl. Phys. Lett., 68, 20, 2793-2795(1996).
- (7) C. Rolland and P. B. Corkum, J. Opt. Soc. Am. B, 5, 3, 64-647(1988).
- (8) M. Guillaume et al., CLEO 2013 paper CTh5C.5(2013).
- (9) N. M. Naumova et al., Phys. Rev. Lett., 92, 063902(2004).
- (10) T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett., 43, 4, 267-269(1979).
- (11) T. Tajima, Eur. Phys. J. Spec. Top., 223, 1037(2014).
- (12) T. Esirkepov et al., Phys. Rev. Lett., 92, 175003(2004).

著者紹介

田島俊樹は、米カリフォルニア大アーバイン校物理学・天文学部Rostoker Chair教授、ジェラルド・ムルはフランス、パレゾのエコール・ポリテクニーク DER-IZEST教授/ディレクター、ジョナサン・ウィーラーは研究者。

e-mail: jonathan.wheeler@polytechnique.edu URL: www.izest.polytechnique.edu

LFWJ