



Extreme light

究極の光

Nature Vol.446 (16-18) / 1 March 2007

物理学者たちは、時空の織物を引き裂く強力なレーザーを開発しようと計画している。Ed Gerstnerが報告する。

欧州原子核共同研究機関 (CERN) が37億ユーロ (約5900億円) の費用を投じて建設した大型ハドロンコライダー (LHC) は、初期の加速器の約1億倍の高エネルギーを達成することができ、この100年間で驚くべき進歩を遂げてきた物理学の1つの到達点といえるものになっている。LHCは2007年の後半に正式に運転を開始し、2008年には設計どおりのエネルギーを達成する見込みになっており、このレベルの高エネルギーでなければ見つけることができないヒッグス粒子などの重要な粒子の探索に着手することになる。しかし、素粒子物理学者たちの目は、LHCが動き出す前からその先に注がれており、より高いエネルギーを達成できる国際リニアコライダー (ILC) の建設が計画されている。ILCの建設には、約67億ドル (約7900億円) の費用がかかると見積もられている。

LHCがヒッグス粒子を探している頃には、米国カリフォルニア州のローレンスリバモア国立研究所の国立点火施設 (NIF) が完成する。こちらも約40億ドル (約4700億円) という多額の費用がかかった物理学研究施設であるが、LHCほどには期待を集めていない。NIFは、192本のレーザーを組み合わせて、地球上のすべての発電所が作り出す電力の50倍以上のエネルギーを10億分の1秒間だけ出すことができる。その目標は、レーザーの焦点にある小さな水素ペレットに核融合の火をともし、これをヘリウムに変えることにある。

NIFでの研究は、恒星内部で起きている反応を小規模で再現することにより、宇宙物理学を実験室にもち込むことになる。さらには、未来の発電の基礎技術にもなるかもしれない。しかし、NIF建設の主たる目的は、米国の核兵器を確実に使える安全なものにすることにあり、だからこそNIFはこれだけの予算を集めることができたのである。NIFの数年後に「点火」を達成するとみられているフランスのレーザーメガジュール (LMJ) も、同様の目的をもつ施設である。

LMJとNIFのレーザーは、物理学者を興

奮させるという点ではLHCなどの加速器には及ばない。少なくとも、現時点ではそうである。しかし、今後数十年のうちにNIFよりもさらに強く、はるかに低いコストで生み出されるレーザービームが、粒子加速器に代わって物理学の最先端の研究を担うようになるかもしれない。今後、LHCやILCに比べて格段に高い出力の従来型粒子加速器が登場することはないかもしれない。しかし、NIFの100万倍の強さのレーザーは、すでに物理学者の頭の中で計画されており、彼らはそのため

真空は可能性の海

研究者たちが極限レーザー (超高強度レーザー) を作りたいと考えるのは、光と真空の相互作用を調べたいからである。場の量子論によれば、真空は「可能性の海」であり、この奇妙な海では、仮想の粒子と反粒子の対が絶え間なく現れたり消えたりしている。光が十分に強いとき、光を構成している電磁場は、この「海」との間で奇妙な相互作用をし始める。真空はもはや単純で予測可能な媒質ではなく、まったく奇妙で予測不可能で非線形な何かになる。

真空に十分なエネルギーを注入すると、仮想の粒子対が現実の粒子対になり、その途端に非常に強い場によって引き離される。これには $8 \times 10^{18} \text{ Vm}^{-1}$ よりも少し大きな電場が必要になると考えられており、この場の強さを「シュウィンガー限界」とよぶ。真空の海はここで沸騰し始める。

極限レーザーの研究に力を入れている南カリフォルニア大学 (ロサンゼルス) のTom Katsouleasは、「一般の人たちにこの話をすると、夢中になって聞いてくれる」という。問題は、シュウィンガー限界ははるかに遠いことである。 $8 \times 10^{18} \text{ Vm}^{-1}$ の電場を作るためには、 10^{30} Wcm^{-2} を超える強度のレーザーが必要なのである。これはNIFの1000兆倍の強さである。NIFの建設に数十億ドルを要したことを考えると、あまりにも遠大な目標のようにみえる。

しかし、パリ近郊の応用光学研究所の所長であるGérard Mourouが率いる研究チームは、この目標を比較的少ない費用で達成できると考えている。彼らはまた、最終目標への途上で、いくつもの驚くべき物理現象に出会うだろうと予測している。レーザーは、その歴史を通じて常に光の新しい可能性を切り開き、物理学者たちに刺激を与えてきた。1960年代に開発された初期のレーザーは、媒質の屈折率を変えるほど強力であったことから、非線形光学への新たな展望を開いた。今日の最先端研究のキャッチフレーズは「相対論的光学」である。これは、レーザー光に伴う場が、媒質中のすべての電子を光速近くまで加速するような系についての研究である。

ハイパワーレーザーをめざして

Mourouが提案する極限光研究施設 (ELI) は、電子だけでなく電子がはぎ取られたイオンまでも光速近くまで加速して「超相対論的な系」を研究しようとするものである。Mourouは、「1960年代にレーザーが明らかにした非線形効果は、予想をはるかに超えていた。予測されていたのは氷山の一角にすぎなかった」と指摘する。彼は、ELIで達成できるエネルギーがもたらす成果についても楽観的だ。

フランス政府は2007年2月15日、ELI計画の意義を認め、ELIがうまくいかどうかを調べるために、応用光学研究所に新しいレーザービームラインを建設する予算を認めたと発表した。「ELI計画が実現すれば、科学者はこの施設を利用して物理学の根底に迫る興味深い研究をすることができるはずだ」とMourouは話す。もしかすると、ELIにかかる費用が比較的安く、建設に1億3800万ユーロ (約220億円)、運営には年間600万ユーロ (約10億円) しかかからない点のほうが重要であるかもしれない。これは、例えば英国に最近完成した大型放射光施設「ダイヤモンド」の3億8000万ポンド (約900億円) と比べるとかなり少ない。

ハイパワーレーザーのすさまじい強度は、比較的少量のエネルギーを極めて短

時間のパルスに押し込め、パワー（エネルギーを時間で割ったもの）を押し上げることによって達成される。だから、NIFのレーザーのパワーは信じられないほど高いように思えるが、実際には比較的少量のエネルギーしか使わない。1つのパルスに含まれるエネルギーは2000キロジュール（約0.5キロワット時）にすぎない。このエネルギーが10億分の数秒という短時間に押し込められていることがポイントなのだ。

チャープパルス増幅

ELIは同じ原理をさらに進めたものである。ELIはかなり早い段階で、NIFの100万分の1に相当する5フェムト秒（1フェムト秒は 10^{-15} 秒）のパルスを作ることにより、わずかに数ジュールのエネルギーからペタワット（ 10^{15} ワット）を超えるピークパワーを作り出せるようになると期待されている。わずかなエネルギーしか必要としないELIでは、いろいろなことがNIFに比べて容易になる。ELIの提案者らは、パルスの長さをさらに約100分の1に短縮し、数十アト秒（1アト秒は 10^{-18} 秒）にすることにより、100ペタワットを超えるピーク強度に到達したいと考えている。

ELIの超短パルスは、Mourouが1980年代半ばにロチェスター大学（ニューヨーク州）で開発したチャープパルス増幅とよばれる技術を使って作られる。チャープパルス増幅ではまず、プリズムのように働くストレッチャー（パルス伸長器）という回折格子を使って、レーザーパルスの中の光を分解する。引き伸ばされたパルスの成分は、空間と時間の両方で広がった形で個別に光増幅器に送り込まれる。そして、この逆の働きをするように設計されたコンプレッサー（パルス圧縮器）という回折格子がパルスの成分を再結合して、元のパルスよりもはるかに短くて強いパルスにする。

このストレッチャーとコンプレッサーは現在、ナノ秒（ 10^{-9} 秒）程度の比較的長いパルスが必要なNIFやLMJなどをのぞく、世界の高出力レーザーのほとんど

すべてで使われている。大阪大学とラザフォードアップルトン研究所中央レーザー施設（英国ディドコット）は、いずれもペタワットを出すチャープパルス増幅レーザーをもっている。ロチェスター大学なども、チャープパルス増幅レーザーを作成中である。Mourouやその他の研究者たちは、この技術には今のところ明確な限界はないと感じている。パルスはさらに短くできそうなのである。

2006年に欧州の国際研究プロジェクトへの資金支援を行うために「欧州研究基盤ロードマップ」が検討され、ELIは35件のプロジェクトの1つに選ばれた。ロードマップには、チャープパルス増幅レーザーを使う計画がもう1件選ばれている。それが、中央レーザー施設が率いる研究コンソーシアムが建設しようとしているハイパワーレーザーエネルギー研究施設（HiPER）である。HiPERの建設費用はELIよりも多く、8億5500万ユーロ（約1400億円）である。HiPERはNIFやLMJとは少し異なる道筋から核融合をめざすことになるが、軍事的な目的はない。NIFとLMJは、メガジュールビームを使ってターゲットを押しつぶすことで核融合を引き起こそうとするのに対して、HiPERはターゲットを比較的やさしく押しつぶし、はるかに短時間のハイパワーパルスを用いて核融合を起こそうとする。

HiPERには、NIFよりもはるかに高い頻度でレーザーを発射できるという利点がある。パルス回数が多く、兵器研究の必要もないHiPERでは、核融合以外の研究を行うチャンスもずっと大きくなるはずだ。NIFでは、核融合以外の研究は1週間に1パルス程度に制限されるだけでなく、出せるパワーも小さい。中央レーザー施設の施設長であるMike Dunneは、チャープパルス増幅の技術がもっと進めば、HiPERのビームを結合させて、ペタワットどころかエクサワット（ 10^{18} ワット）を達成できる可能性があると予測する。「これはまだ相当不確実な話だが、そうしたビームラインをコヒーレントに結合することができたら、2エクサワットまでのビームが実現可能だと考え

ている。実際には極めてむずかしいだろうが」とDunneは話す。

ブラックホールに迫る

基礎物理学の観点からみれば、エクサワットレベルのエネルギーを実現できれば、真空の奇妙な性質がみえてくる可能性があり、非常に興味深い。これにより、ブラックホールの境界でみられるような現象を初めて研究できるようになるかもしれない。スティーン・ホーキングは1970年代に、ブラックホールのわずかに外側で仮想粒子・反粒子対が生まれると、ブラックホールの重力による局所的な真空の強いゆがみがその対を引き離し、1つはブラックホールの中に消え、もう1つはその外側で物質として生き残るだろうと予測した。

この効果は、シュウィンガー限界での電場による電子・陽電子対の生成と似ている。ラザフォードアップルトン研究所のBob Binghamは「真空は、電場であろうと、磁場であろうと、重力場であろうと気にしない。それどころか、弱い相互作用の場合なのか、強い相互作用の場合なのかさえ気にしない。十分なエネルギーを真空に押し込めることさえできれば、真空から粒子を励起させることができるのだ」という。ホーキング放射の興味深さは、それが重力場に依存している点にある。これは、放射の詳細が場の量子論と一般相対論との関わり合いに依存していることを意味しており、重力の量子論について何らかの示唆を与えてくれる可能性があるからだ。

極限レーザーを建設しようとする研究者たちは、ホーキング放射を見いだすためにブラックホールを作ろうと考えているわけではない。その必要はないのだ。一般相対論の等価原理は、重力場と加速度は、それを経験する物体にとっては同じものであると主張しているからである。だから、1970年代に理論物理学者のウィリアム・アンルーが指摘したように、時空の曲率と構造に関するある仮定が正しいならば、十分な加速度で加速された粒子は、それ自身の座標系でホーキ

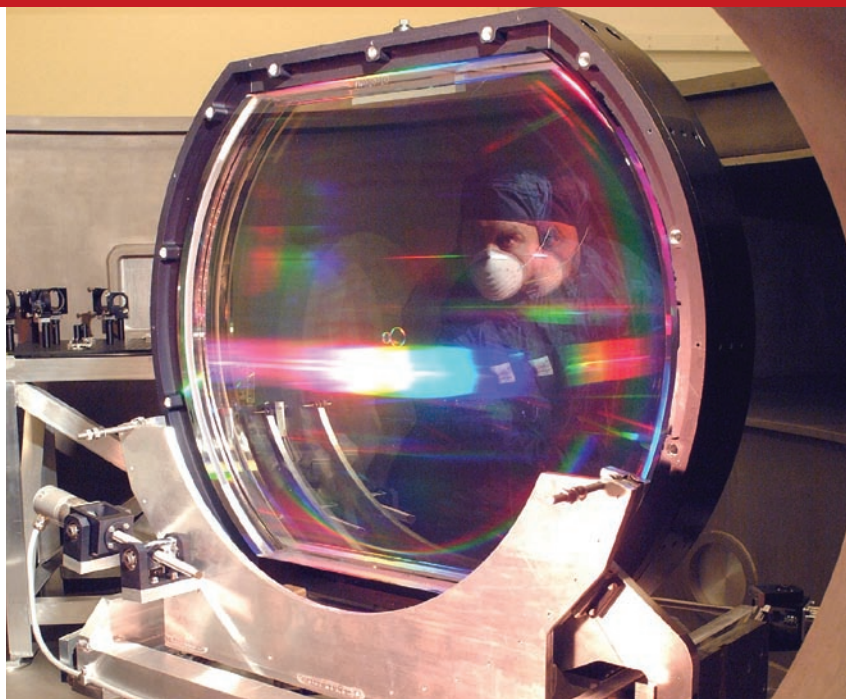
ング放射のような放射を経験し、その影響を受けることになる。

アンルー放射がみられるような加速は、従来型の加速器には不可能であるが、ELI規模のレーザーには可能であるかもしれない。Binghamは、「超高強度レーザーが作る場に近い場を作れるものは、おそらくブラックホール以外にはない。ラザフォードアップルトン研究所のレーザーの一部は約 $3 \text{兆} \text{V cm}^{-1}$ の場を作る。これほどの場を作れるものはほかにはない!」と話す。

ELIやHiPERやほかの極限レーザーには、アンルー効果が生じるほど電子を加速することはむずかしいかもしれない。現在はカナダ・バンクーバーのプリティッシュコロビア大学にいるアンルーは、「それほど強く短いパルスを作ることは、非常にむずかしいように思われる。しかし、実験家がひとたび心を決めたら、驚くべきことをやってのけてしまうことも知っている」と話す。

レーザーが加速器のお株を奪ったり加速器の性能を上げるのを助けたりする方法は、これだけではない。相対論的光学はその定義上、光速近くまで電子を加速することを必要とする。このとき、LHCやILCの限界を超えた素粒子物理学研究を行うことが可能になるかもしれない。光速近くまで電子を加速する方法の1つに、レーザー航跡場加速器というアイデアがある。これは、プラズマ中を進む強力なレーザーパルスが残す「航跡」に電子を乗せて加速するという方法である。

Katsouleasは、「レーザー航跡場加速器研究の進歩と、ELIで実現しようとしているパワーのことを考えてもらえれば、プラズマ中のごく短い距離で粒子を(ILCのエネルギーまで)加速できる可能性について理解してもらえらるだろう」と話す。しかし、こうした加速器の開発過程で直面すると思われる大きな技術的課題が乗り越えられたとしても、現存する加速器やこれから建設される加速器に取って代わることはないだろう。レーザー航跡場加速器の平均パワーは、これらに比べてはるかに小さいからである。



極限パワーを達成するベタワットレーザーで使う2つの回折格子の一方を、研究者が調べている。

従来型の巨大加速器は、ビームに大量のエネルギーを蓄えることができるのだ。

この点についてKatsouleasは、「このレーザーの平均パワーは、高エネルギー物理学に必要なルミノシティ(粒子の衝突頻度を表す量)を得るためにも、無理のない時間内にイベントを検出できるようにするためにも不十分であり、3桁くらいは上げていく必要がある。しかし、そのための方法はすでにいくつも考えられている」と話す。

次世代の主役をめざして

ILCの国際設計作業チーム(GDE)のリーダーを務めるBarry Barishは、レーザーを使って粒子を加速する方法にも興味を示し、これが素粒子物理学を前進させる未来の技術の1つになるかもしれないと考えている。「この方法は試してみる価値がある。明らかな限界はないように見えるし、長期的には何かの役に立つ可能性があるからだ」と彼は話す。しかし彼は、この方法が唯一のものであるとは思っていないし、確実に成功するとも考えていない。「これよりもっとすばらしい方法が出てくる可能性がある。この方法は、ばく大な資金や人手を必要としないというなら研究しておこうという程度のものにすぎない」と彼は話す。

Mourouはレーザー航跡場加速器に関しても強気である。彼は、レーザーを使ったILCの後継装置について、「たぶん20年以内を実現する!」と宣言してから、少しだけいい直した。「設計と建設には10年程度の時間がかかる。また、こうしたものは必ず既存の技術で作られる。だから、20年というときには、極めて慎重にならなければならない。しかし、10年か20年後にはこの技術が手に入っていて、もう10年あれば建設できることだろう」。Mourouらは、もっと注目すべき技術があるという。今日の加速器の100万倍のエネルギーを実現できるガンマ・ガンマ衝突器、さらには光をシュウィンガー限界に近づけ、それを越えさせる「相対論的鏡」である。

Mourouは熱っぽく強調する。「私たちは真空の屈折率を変えようとしているのだ」。彼は、屈折率を変えるというレーザーの特性を究極の形で実現することを想像している。「私たちは新しい粒子を作り出すだろう。真空はすべての粒子の母なのだ。私たちはさらに多くのことを発見するだろう」。

Ed Gerstnerは、*Nature Physics*のシニア・エディター。