

双曲面ミラーにより ペタワットレーザーの集光性能を向上

サリー・コール・ジョンソン

回転双曲面ミラーを放物面ミラーに組み合わせることで、現在のフェムト秒ペタワット級レーザーや将来のエクサワット級レーザーにおいて、単一波長の集光スポットを実現できることが解明された。

中国・上海光学精密機械研究所 (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics: SIOM) 超高強度レーザー科学技術重点研究室 (Key Laboratory of Ultra-Intense Laser Science and Technology) の李朝陽氏 (Zhaoyang Li) が率いる研究チームは、双曲面ミラーによってペタワット (超高強度) レーザーの集光性能を向上させた。これは画期的な成果である。光学素子である双曲面ミラーが、強磁場レーザー物理学に応用される初のケースだからだ。

ピークパワーは集光前の超高強度レーザーの強度を測定するが、実験において真に重要なのは、ターゲットに集光されたレーザーの強度である。超高強度レーザーの真の性能を決定づけるのは、

ピークパワーではなく、集光強度だ。

「レーザーは20世紀で最も重要な発明の1つであり、超高強度レーザーはレーザーの高強度を極限まで高めたものだ」と、超高強度レーザー科学技術重点研究室内の教授兼副所長である李氏は言う。「物理学者は、超高強度レーザーが物質の性質や宇宙の起源を探究する上で重要な役割を果たすと予測している。このような基礎物理学の疑問に対する興味と好奇心から、高強度場レーザー物理学のための超高強度レーザー研究に携わることができて光栄だ」。

超高強度レーザーの設計

超高強度レーザーは通常、非軸放物面 (OAP) ミラーを使用して実験ターゲッ

トに集光され、そのビーム開口径は150～500nm (集光スポット径は2～10波長) である。

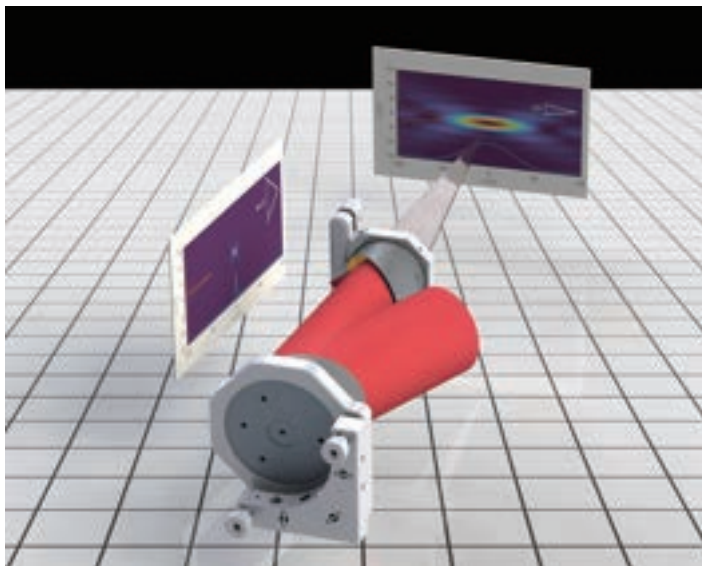
李教授の研究チームは、回転双曲面ミラーを放物面ミラーに組み合わせることで、レーザーの集光スポット径を大幅に縮小できることを発見した。

「双曲線は、2つの焦点を持つ曲線の一種であり、一方の焦点に向けた直線が、双曲線を反射してもう一方の焦点を通過する、という特徴がある」と李教授は説明する。「この特徴を利用して、双曲面ミラーを放物面ミラーに組み合わせると、片方の焦点に収束するはずだった光がもう一方の焦点に収束するようになる」。

双曲面ミラーのパラメータを最適化することにより、収束角を劇的に拡大でき、集光スポット径を単一波長へと大幅に縮小できるのだ。

集光スポット径を極限まで小さくすることで、「超高強度レーザーの実験能力が大幅に向上し、レーザー施設の性能を最大限に高めることができる」と李教授は述べる。「この技術は、レーザー施設のエネルギーを継続的に増加させたり、レーザーパルス幅を減少させたりする従来の技術よりも、経済的、効率的、かつシンプルだ。というのも、後者2つの技術は困難かつ非常にコストがかかるからだ」。

単一の放物面ミラーで集光する場合



放物面ミラーに双曲面ミラーを組み合わせて使用した場合と、単一の放物面ミラーのみを使用した場合の、極微小領域への集光を比較した模式図 (画像提供: 李朝陽氏)

に比べ、双曲面ミラー法は、極微小集光スポットを得るといった従来の課題を解決し、集光スポットをほぼ極限まで最小化、つまり単一波長サイズまで縮小できる、というのが李教授の指摘だ。

同研究チームがこの設計をテストしたところ、超高強度レーザーの集光強度を直接20～30倍に増強できることが判明し、驚嘆した。「特筆すべきは、当チームが以前提案した「広角非共線光パラメトリックチャープパルス増幅(WNOPCPA)法」と組み合わせることで、超高強度レーザーを極限まで高強度状態にできると期待していることだ。つまり、全レーザーエネルギーを、レーザーの中心波長を逸とする時空間な焦点キューブ(立方体状の領域)に集中させるのだ」と、李教授は述べる。

この2つの技術を組み合わせることで、同チームは「単一サイクルパルスにおいて最短のパルスと、単一波長集光スポットにおいて最小の集光スポットを同時に実現できる」と李教授は言



10ペタワットの上海超高強度超高速レーザー施設(写真提供:李朝陽氏)

う。「その結果、超高強度レーザー施設において究極の高集光強度を実現できた。これまで、超高強度レーザーの性能を工学的な限界まで向上できたことはなかった。さらに、将来的にはシュヴィンガー限界(量子電気力学の臨界場)に到達する可能性もある」。

同チームの本研究における最大の課題は、「加工精度、取り付け・調整精度、双曲面ミラー、特に10ペタワットレーザー用の大口径双曲面ミラーの損傷の可

能性」であったと、李教授は補足する。

ペタワットレーザーによる集光性能の向上

同研究チームの技術は、ルーマニアのELI-NP(Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics)、中国の上海超高強度超高速レーザー施設(Shanghai Super-Intense Ultrafast Laser Facility)、米国のローレンス・リバモア国立研究所(Lawrence Livermore National Laboratory)のNIF-ARCレーザーなど、世界中のペタワットレーザー施設にて直接活用できるものだ。同技術は、集光強度を向上させ、強磁場レーザー物理学研究にこれまでにない極限の光環境を提供できるだろう。

李教授のチームは現在、同技術を活用して、上海超高強度超高速レーザー施設において、10ペタワットレーザーの集光強度を 10^{22}W/cm^2 から 10^{23}W/cm^2 、さらには 10^{24}W/cm^2 にまで向上させる取り組みを進めている。

「単一波長で極微小領域に集光させた光場は、まだ研究段階だ」と李教授は言う。「そして現在、当チームは大口径双曲面ミラーを製造中である。これを10ペタワットレーザーによる単一波長での極微小領域集光実験に使用する予定だ」。



研究室のチーム、李教授と劉燕綺氏(Yanqi Liu)(写真提供:李朝陽氏)