

EOSの超大型望遠鏡は 4倍ファーストライトが見える

マーチン・エンダーライン、ヴィルヘルム・G・ケンダース、ドメニコ・ボナッチーニ・カリア

EOSのVLT望遠鏡の1つで、大きなアップグレードが行われた。これは、高い角度分解能と増強された適応光学補償を可能にする4つのガイドスターレーザの同時動作の結果である。

強力な可視光レーザを広い空に放射させる機会はすべてのレーザエンジニアにとって夢である。さらに、その4つが同時に砂漠の澄んだ空に感動的な光の柱を印象付け、南十字星に照準を合わせることは、最近のイベントの見ものだった(図2)。

2016年4月26日、南の空に4つの新しい20Wクラスのナトリウムガイドスターレーザの「初光」が見えた。チリ、アタカマ砂漠にあるヨーロッパ南天天文台(EOS)のパラナル天文台でガイドスターレーザは星空の方に向けられていた⁽¹⁾。このイベントで、レーザサプライヤーである、独トプティカフォニクス社とカナダのMPBコミュニケーションズ社は、開発パートナーおよび顧客としてのEOSとの7年契約と協働が完了する。

今回のファーストライトイベントは、ユニットテレスコープ4を最先端の適応型望遠鏡ファシリティ(AOF)に変えるためのESOのVLT主要アップグレードの重要な節目となる⁽⁸⁾。変更にはさらに次の段階がある。2016年後半、新しい1.1m可変第2ミラー導入、2017年には2つの適応型オプティクスモジュール、GRAALとGALA-CSIが稼働する。

自然のガイドスターと人工ガイドスター、波面センサ、リアルタイムコンピュータ、可変ミラーで構成される適応型オプティクスシステムは、地上設

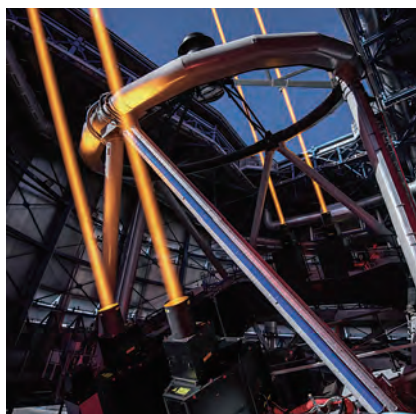


図1 VLTのUnit Telescope 4の新しいレーザシステムから4つのビームが出る。各レーザは、レーザとエレクトロニクス筐体(グレーフロント)および、ラマンアンプのレーザヘッドと第2高調波発生ステージを含むレーザ放射望遠鏡からなる(画像提供: ESO/G. Hüdepohl)。

置の光学望遠鏡で不可避の大気乱流による画像ぶれ効果を相殺する最適な方法である。実際、セロ・パラナル山頂2600mあるいはハワイのマウナ・ケア山頂4205mのような地球上の最良の光学サイトでさえ、8.2m VLT望遠鏡では、大気の屈折率変動が、理論的回折限界解像度0.02秒角以下に対してシーイング解像度が0.4秒角に制限される。

夜空の大部分では、十分な輝度、自然のガイドスターがないので、適応光学システムの小さな視界を持つ大型望遠鏡は、独自の人工星を作る必要がある。1980年代に、フォイ(Foy)とラベリイ(Labeyrie)、彼ら以前の極秘JASONレポートのハッパーとマクドナ

ルドが、中間圏エッジ約10km厚の層、地上80~100km上空で、原子ナトリウム高濃度を利用する方法を考案した⁽²⁾⁽³⁾。共鳴蛍光の大きな横断面と豊富さ(平方センチメートルあたり約40億のナトリウム原子のコラム密度、つまり立方メートルあたり40万原子)のために、これらの原子の励起は全大気乱流のはるか上空の位置からの高いフォトンリターンを約束するものであり、一般に高度25kmに広がるすべての乱流層の完全サンプリングにとって好ましい条件である。

ガイドスター

今回VLTに導入された新しいレーザは、第3世代ナトリウムガイドスターレーザを構成し、量子オプティクス技術を天文学界に持ち込むものである⁽⁴⁾。わずか過去10年で、大規模コンピュータシミュレーションが、ラーモア歳差運動(Larmor precession)、非共鳴励起、大気中ナトリウム飽和の悪影響を特定し、これがこのような最適化された可変ダイオードレーザベースの技術開発につながった。核心のコンポーネントは、種光として安定した量子ドット分布帰還(DFB)ダイオード、偏光保持狭帯域ラマンファイバ増幅器、これは特許となっているESO技術に基づいており、MPBCが供給している。それに共鳴第2高調波発生による効率

的な周波数通倍である(図1)。

80%を超える倍増効率により、各レーザーは589nm付近のナトリウム共鳴で、回折限界の22W(20nm RMS波面変動)出力、狭帯域、連続波(CW)を照射する。これには第2再励起周波数で最大12%出力も含まれている。

ナトリウムD_{2b}波長で第2再励起レーザーを使うことで光励起を強化し、アクセスできる原子の基底状態の枯渇を減らす。これは原子物理学や量子光学、特に原子のレーザー冷却ではよく知られた技術だ。単一原子レベルでのそのような実験では、信号は非常に小さく、統計をとるためには何度も繰り返し計測しなければならない。したがって、実験条件が不完全であっても、同じ手続きを信頼性良く再現することが重要である。不完全な実験条件は、検出用レーザーで励起ができない(ダークな)原子状態への無用な移行につながる。追加の再励起レーザーは、ダーク状態から検出可能な状態に遷移を誘導することでこのような原子を回復する。

適応光学では、ガイドスターレーザーと相互作用する上部中間圏のナトリウム層で原子の数が比較的大きい。これはナトリウムが流星によって継続的に補充されているためである。一方、「実験」条件は量子光学ラボと比較すると、不安定である。これは地球磁場状態の変動、高高度を流れる風、温度のためであり、したがって、原子の運動により原子線のドップラー広がりが起こる。しかし、最近のシミュレーションは、再励起がガイドスターの効果的な輝度、蛍光フォトンリターンを最大4倍に高めることができることを明確に示している⁽⁵⁾。

初めて、この新しい世代のガイドスターレーザーが「組込み」再励起を特徴づけることになる。第2レーザーの周波

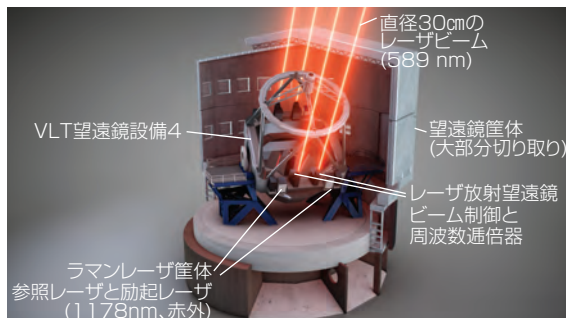


図2 概略図は、EOSのVLTの望遠鏡設備4に設置された4レーザーガイドスター設備を示している(画像提供: ESO/L. Calçada)。

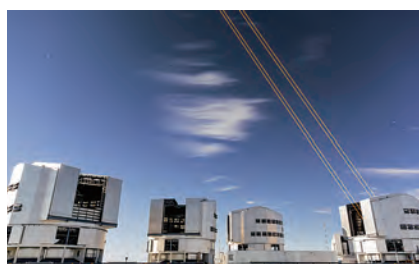


図3 ESOのVLTの4Unit Telescopesを示している。長時間露光写真では、4つのガイドスターレーザーが、Unit Telescope 4 (UT4)から出ているのが見える(画像提供: ESO/S. Lowery)。

数は、共振器の周波数変調によって同じレーザーアーキテクチャ内で実現される。これは、ダイオードの種光の電流を変調することで電気的に行えるので、EO変調器などの追加コンポーネントは不要である。したがって、光波面をさらに乱すことはない。この点は、このアプリケーションでは非常に重要なパラメータである。

この技術を使うことで、このレーザーシステムのパフォーマンスは、ビーム品質と達成可能なガイドスター輝度に関して、前世代の50Wシステムの性能を凌駕することができる。人工星は、正に裸眼で見ることのできる限界、視等級6に達している。リターンフラックスの一般的な絶対数は、1平方メートルあたり1秒に数1000万のオーダーである。

効果四倍

複数のレーザーを使い、望遠鏡の主鏡上方の全空気量を大気トモグラフィと

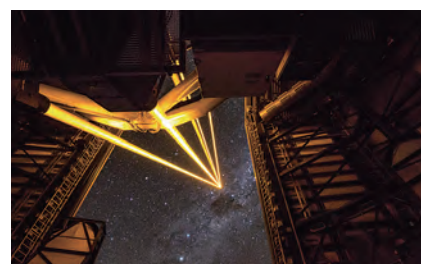


図4 ESOの超大型望遠鏡のUT4が南十字座を指している。第5ビームは、2013年に技術デモンストラータとして始動したPARLAレーザーから出ている(画像提供: Toptica/M. Hager)。

いうプロセスで調べることができる。VLTでは初めて、適応光学の先進モード実装に4つのCW、589nm、22Wレーザーを同時に使った(図3、4)。この方法で、完全視野の回折限界に近い画像是別にして、一段と小さな関心領域で角分解の向上が可能になる。VLT適応光学ファシリティは、2024年、隣接するセロ・アマゾネスに建設される39m主鏡の欧州超大型望遠鏡(E-ELT)の重要な先駆けとなる。

AOFの一部として⁽⁸⁾、4レーザーガイドスターファシリティ(4LGSF)は、レーザーガイドスター適応光学により、銀河系外天体のルーティーン観測を可能にする。また、天の川銀河内の暗い星あるいは塵に霞んだ星の形成領域の観測も可能にする。

新システムで探求する1つの目的は、ガス雲G2と言われている。これは、2014年にわれわれの銀河中心とその超大質量ブラックホール射手座A-スター

(Sg A*)に最接近した。その質量は、 4.3×10^6 太陽質量と推定されている。それが20光時内に近くなったとき、天文学者はブラックホールによってガス雲の大きな部分の融合を目撃できると期待した。しかし、最近の観測は、ガス雲は相対的に影響を受けることなく衝突を乗り切ることを示唆している。これは星雲の形成について新たな推測を刺激するものである。今年と来年は、衝突後の星雲の動きの追跡が極めて重要であり、一段と解像度が向上した最新のディテクタ稼働をスタートさせるために気運が高まりつつある。

ガイドスターレーザは、宇宙の廃棄物検出を助けるためにも使用されている。ロケットや人工衛星からのこれらの残骸は過去数年で緊急の問題になっている。特に2007年に中国の風雲-1C衛星を狙った対衛星ミサイル実験や2009年人工衛星イリジウム33(米国)とコスモス2251(ロシア)の衝突など大きな事件が原因となっている。現在、専門家は、いわゆるケスラーシンドローム(偶然の衝突による小さなデブリ量の予測された自己増強成長)がすでに始まっている。

今日、宇宙のごみの発見は主に、2019年にフル稼働になるとされている、米国空軍の新しいスペースフェンス(Space Fence)システムなどの高解像度レーダー技術によって行われている。しかし、レーダーの解像度には限界がある。直径5cm以上の約2万の物体のカタログがあるが、もっと小さな粒子も人工衛星や宇宙船には致命傷になり得る。1秒に数十kmという相対速度は珍しくないからである。サイズが1~10cmの物体が推定で67万個、もっと小さな物体は数百万個存在する。

適応光学アシスト光学観測で、レーザガイドスターは小さなデブリ(破片)

の検出や追跡に役立つ。それとは別に、宇宙のデブリをレーザを利用して軌道から逸らすという提案がある⁽⁶⁾。最も現実的な(政治的な危険性を有する宇宙空間でのレーザ使用を回避する)バージョンは、地上設置のハイパワー赤外(IR)レーザとレーザガイドスター適応光学との組み合わせである。レーザガイドスターは、デブリ物体と同期して空を動くだけの力強さが必要であり、高速適応光学ループがアップリンクハイパワーレーザビームを補正できる輝度を必要としている。レーザアブレーションによる光子圧力と光子反跳がデブリ物体を減速させ、結果として大気圏への高速再突入や大気中で燃え尽きることになる。

1996年、プロジェクトORIONというNASAの研究で最初に提案された際、必要とされるハイパワーレーザや大型の高速回転する望遠鏡が理由で、非常に高価になると考えられていた⁽⁷⁾。今、再考の時が来ている。ハイパワーレーザ技術は著しく進歩し、高速回転望遠鏡のための強力なナトリウムレーザが、今では利用可能になっているからだ。

商業的成功

トプティカ社とMPBCにとって、ESOとの協働は、レーザの専門家としては非常に面白いということを別にして、技術的にもプロジェクトマネジメントや情報管理プロセスの両面で大きな進展をもたらした。オールファイバポンプや、ESOのライセンスにより、狭帯域ラマンファイバ増幅器を製造しているMPBCは、派生製品ラインとして、多くの可視光および近赤外波長で単一周波数増幅器を発表することができた。

さらに、トプティカ社は科学研究や商用研究コミュニティ向けの新しいアプリケーションをサポートするフルデ

ジタルSHGおよびFHGレーザシステムの提供を始めている。天文学や産業用レーザシステムの両方でメンテナンスフリーパフォーマンスを目的とした遠隔制御や自己最適化ハードウェアおよびソフトウェアも含まれている。

次世代ELTプロジェクトが、基準となるアプローチとしてSodiumStarを選択したと言う点で、われわれの仕事に対する幅広い天文学計測コミュニティの評価は明らかである。初めて、ターンキー、メンテナンスフリーガイドスターレーザシステムが商用市販製品としてごく普通に利用でき、世界中の既存の望遠鏡や計画されている望遠鏡向けの準スタンダードとして認められている。

参考文献

- (1) See www.eso.org/public/news/eso1613.
- (2) R. Foy and A. Labeyrie, *Astron. Astrophys.*, 152, L29-L31 (1985).
- (3) W. Happer and G. MacDonald, JASON Report No. JSR-82-106, MITRE Corp., McLean, VA (1983), and cited in R. Q. Fugate et al., *Nature*, 353, 144-146 (1991).
- (4) See <http://bit.ly/1Ygl5oD> and B. Ernstberger et al., "Robust remote-pumping sodium laser for advanced LIDAR and guide star applications," *Proc. SPIE*, 9641, 96410F (Oct. 8, 2015).
- (5) R. Holzlohner et al., *Astron. Astrophys.*, 510, A20 (2010).
- (6) F. Bennet et al., "Adaptive optics to enhance tracking of space debris," *Proc. SPIE*, 9148, 91481F (2014).
- (7) J. W. Campbell et al., "Project ORION: Orbital Debris Removal Using Ground-Based Sensors and Lasers," NASA Technical Memorandum, 108522 (1996).
- (8) R. Arsenault et al., "ESO Adaptive Optics Facility: under test," *Proc. AO4ELT3* (2013); <http://bit.ly/28YtB6G>.

著者紹介

マーチン・エンダーラインはシステムエンジニア、ヴィルヘルム・G・ケンダースは社長で、2人ともトプティカフォトニクス社(e-mail: wilhelm.kaenders@toptica.com URL: www.toptica.com)。ドメニコ・ボナッチェニ・カリアは、ヨーロッパ南天天文台の物理学者(URL: www.eso.org)。