

次世代AO天文学への準備が整った 高出力レーザガイド星

驚くほど高い光出力をもつ2種類のナトリウムレーザガイド星がAFRIのスターファイア光放射施設とヨーロッパ南部天文台から個別に発想され、それぞれが個別に開発された。現在は両者のレーザがそれぞれ製品化されている。

地上に配置された主要な天体望遠鏡は、適応光学(AO)を採用して、大気乱流の影響を仮想的に除去し、宇宙空間で動作した場合とほとんど同様の解像力を実現している。現在計画されている複数の光学望遠鏡はあまりにも大型なため、宇宙空間に打ち上げることはできない。このような地上配置の巨大観測装置を動かすにはAOが必須の手段になる。

望遠鏡用のAO光学系の多くは、大

気乱流よりも上層にあり、望遠鏡の視野のどこかに現われる明るい点状の光源を頼りにして動作している。この点光源は「ガイド星」として使われ、測定された波面収差がAO補正の入力として使用される。最初のガイド星は実際の星であったが、明るい星の数は限られるため、これらのAO補正望遠鏡は非常に狭い範囲の夜空しか観測できなかった。

はるかに汎用性のあるアプローチは

ナトリウム原子の589nm波長を放射するナトリウムガイド星レーザを使用し、レーザビームを照準光にして、夜空の中間層に明るい点光源を生成する。この人工ガイド星は所望のすべての場所に配置できるため、天空のすべての場所からAO補正された鮮明な画像を取得できる。高出力ガイド星レーザは大きな利点をもつが、信頼性と簡便性を備え、数十ワットの出力が589nmで得られる産業用品質のレーザの構築は容易なことではなかった。しかしながら、以下の二つの論文が示すように、その構築は不可能ではなくなった。

(ジョン・ウォレス)

注入同期と和周波数発生による50Wガイド星レーザ

クレイグ・デンマン

現在は設計段階にある次世代の望遠鏡は、AOを使用して宇宙空間に配置された望遠鏡と同等の解像力を実現する。これらの望遠鏡の設計に必要となるナトリウムガイド星レーザは25W以上の光出力、回折限界のビーム品質およびナトリウムD₂スペクトル線の589.15905±0.00005nmの波長精度が必要になる。この光出力と波長精度をもつレーザビームが90km上空の中間層にあるナトリウム層(流星の残留物)に入射すると、ナトリウムは非常に強い蛍光を発生し、遠く離れた地上のAO光学系にとって必要な点状の参照光源になる。

現在のガイド星レーザは色素レーザと

和周波数発生モード同期固体レーザが使用されている。これらのレーザを用いることで、そうでなければ不可能であった天体観測が可能になった。しかしながら、さらに強い光出力と自動操作による信頼性の改善が必要であった。

2001年に、米国陸軍研究所のスターファイア光放射施設(Starfire Optical Range)は新しいガイド星レーザの設計を提案した。スターファイア光放射施設の任務は「宇宙空間の状況認識」にある。つまり、軌道上の人工衛星の観測と定義され、その結果、この組織はAOの開拓者として知られるようになった。新しいガイド星レーザの設計は周波数付加光放射光源(FASOR)と命名された。

スターファイアFASORは1064nmと1319nmの2台の連続波Nd:YAGレーザの和周波数混合に基づいて589nm光を発生する。これらのNd:YAGレーザは低出力の単一周波数ビームを共鳴增幅する注入同期技術を使用して高い単一周波数出力を実現する。二つの近赤外線は三ホウ酸リチウム(LBO)非線形光学材料内部の共鳴和周波数混合により589nmの可視光になる。スターファイアFASORは米ジェイディーエスユニフェーズ社(JDSU)コマーシャルレーザ部門が開発した非平面リング発振器と直接結合励起の技術に基づく同社の能動レーザ部品を使用している。



図1 スターファイア光放 射施設の3.5m天体望遠鏡からの50W FASOR ビームは、2005年4月26日の夜空の中間層ナトリウム層にガイド星を生成した。FASORトロニクス社が製品化したレーザ装置(挿入図は装置の外観と容器パネルを外した状態)は単一周波数IRレーザモジュールと和周波数発生器から構成されている。(資料提供:FASORトロニクス社)

2005年になると、FASORは常に使用されるようになり、AO関係者は大量の光がナトリウム層から戻り、レーザが簡単で一貫性のある動作を示すことに驚いた。その強力な戻り光にはレーザの50Wを超える光出力ばかりでなく、非常に狭くて安定な単一周波数スペクトル線幅から予想外に高い蛍光効率が得られたことも寄与している(図1)。

2008年になると、スターファイア研究グループのクレイグ・デンマンとポール・ヒルマンおよびJDSUのトム・ケ

ーンはそれぞれ退社し、FASORトロニクス社(FASORtronics)を創立した。FASORトロニクス社の事業目的は単一周波数FASOR技術をナトリウムガイド星レーザとして商品化することにある。主要な天文台との契約に支えられて、FASORトロニクス社は次世代望遠鏡の使用に適したレーザ設計を行った。

著者紹介

クレイグ・デンマン(Craig Denman)はFASORトロニクス社(FASORtronics LLC)の創業者。
e-mail: craig@FASORtronics.com

FASORトロニクス社のナトリウムガイド星レーザは、完全に近いビーム品質と測定器の能力だけに制約される波長精度によって、50Wの光出力を得ることができる。この設計をD2bポビュレーション励起用に選択できる光周波数に組合せると、ガイド星の放射輝度の増強が可能になる。レーザヘッドと電源装置は30m以上の距離で分離し、あるいは積層して600×900×1200mm(高さ)の体積に収めることもできる。全体システムは重力方向の変化が許容されるため、望遠鏡の最後部にある最も移動する構造に搭載することもできる。

ナトリウム吸収スペクトル線への589nm周波数の高速オンオフ同調、波長計とナトリウムセルを用いる絶対周波数較正、光出力制御および光学的アラインメントは、いずれもグラフィカルユザインターフェースによる遠隔制御が可能である。

コーヒーレント結合したRFAによる第2高調波が高出力ガイド星レーザビームを生成する

ウォレス・R・クレメンツ、ウィルヘルム・カエンダース

最近の高出力可視レーザ技術の進歩からは、次世代天文台用のレーザガイド星を生成する新しい方法が開拓された。近赤外(NIR)のシード光源となる確立された狭帯域周波数安定化半導体レーザ技術、高出力ファイバ增幅器技術および高効率でロバストなオレンジ色への周波数変換技術を組合せることで、新しい望遠鏡のAO光学系用の小型光源が開発された。この光源はカナダの

MPBコミュニケーションズ社(MPB Communications)と独トプティカ・フォトニクス社(Toptica Photonics)との共同開発の成功から生まれた。

高出力で狭線幅のラマンファイバ增幅器(RFA)に基づくレーザーアーキテクチャを用いたヨーロッパ南部天文台(European Southern Observatory; ESO)の革新的な研究成果に誘発されて、われわれはESOからの資金援助契約のもと、

レーザガイド星としての利用に適したレーザシステムの設計を開始した。4年間の研究開発を経て、ESOレーザシステム開発部は卓上型ブレッドボード構成による狭帯域非偏波面保持RFAの実証に初めて成功した。

トプティカ社の自由空間コーヒーレントビーム結合(CBC)技術と最新の小型SHG共振器設計を組合せて、20Wを超えるレーザ出力が589nmの波長

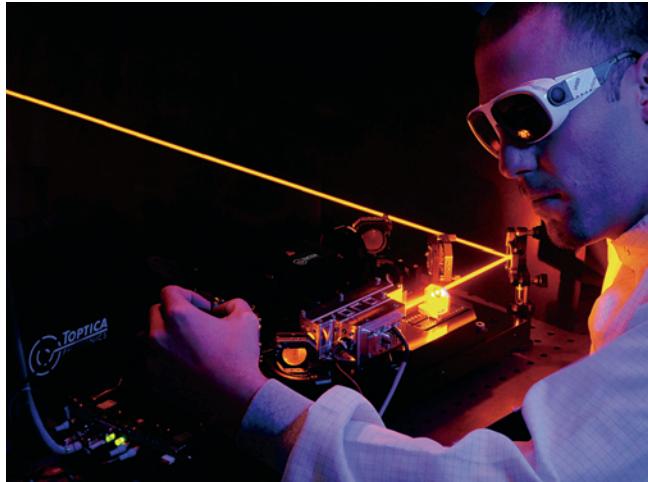


図2 トプティカ/MPB レーザガイド星コンソーシアムがドイツにあるヨーロッパ南部天文台用に構築した589nm狭帯域出力の23W共鳴増強強共振器ガイド星の実証装置を示している。(資料提供:トプティカ社)

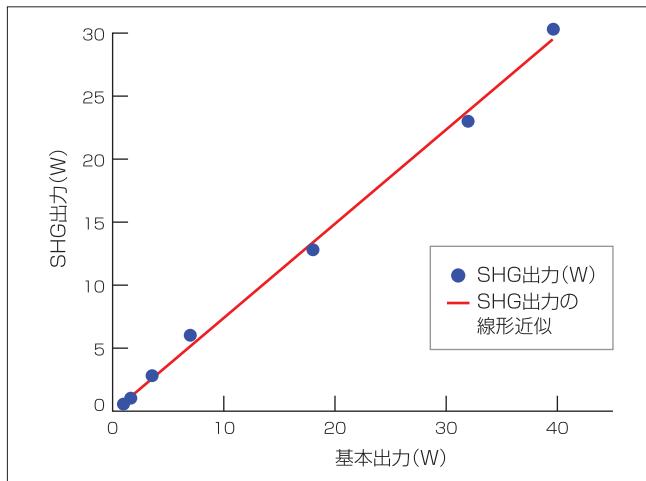


図3 回折格子安定化半導体レーザを主発振器とし、RFAを高効率高出力の第2高調波発生に使用して、共鳴周波数変換が75%以上の変換効率で実現された。

で実証された(図2)^{(1), (2)}。使用可能なレーザガイド星を開発するために必要となつたわれわれの課題は、偏波面保持ファイバを使用するためのRFA技術の進歩、RFAを励起する高出力偏波面保持ファイバレーザの開発、全ファイバCBC方式の実現、高地での遠隔動作のための小型で信頼性のあるレーザシステムの設計などであった。

開発されたレーザは589nmの精密なナトリウム共鳴スペクトル線において30Wの連続波光出力が得られ、その線幅は1MHz以下、可変同調性は30GHzであった。われわれは、まず回折格子安定化半導体レーザから1178nmのビームを100kHz以下の線幅で発生

させ、次にMPB社が開発した2台の高出力1178nm RFAに対して同時に注入した。さらに能動制御した全ファイバマイケルソン干渉計を用いて、2台

のRFAからの偏光した狭帯域で高出力のコヒーレントビームのコヒーレント結合を行い、94%を超える全体システムの結合効率を得ることができた。

得られた40Wの光出力を市販の共鳴増強共振器に励振して、589nmへの周波数変換を75%以上の変換効率で実現した(図3)。半導体レーザ発振器のロバストな周波数安定度と狭帯域の性能特性がRFA出力に反映され、コヒーレントなビーム結合と高効率の周波数2倍化が可能になった。最後の挑戦課題は適切な「再ポンバー」方式の開発であった。この方式は擬似二準位配置の中間層ナトリウム原子を使用し、その光ポンピングの効率とレーザガイド星の戻り光束効率を改善するために必要となる⁽³⁾。この開発からは満足な結果が得られ、ESOの200件以上の要求に対応できた。2013年になると、4台のガイド星レーザがチリのパラナル山上に設置されるESO大型望遠鏡の適応光学施設の一部として実装される。

高精密シード半導体レーザ、ラマンファイバ增幅器および共振器2倍化技術を組合せた新しいレーザ設計は、将来のさらに過酷な環境での使用にも適している(例えば、ハワイのマウナケア山上の4200mの高地に建設される新しい口径30mの天体望遠鏡)。

謝辞 著者らはESOの関係者、とくにD・ボナッチャニ・カリア、L・ティラーおよびF・フォン氏の激励と支援に感謝している。トプティカ・フォトニクス社とMPBコミュニケーションズ社はESOが開発した狭帯域ファイバラマン增幅器技術の実施権を所有し、技術移転を受けている。

参考文献

- (1) L. Taylor et al., "20 W at 589 nm via frequency doubling of coherently beam combined 2-MHz 1178-nm CW signals amplified in Raman PM fiber amplifiers," CLEO/Europe 2009, postdeadline paper.
- (2) Y. Feng et al., *Opt. Exp.* 17(21), p. 19021 (2009).
- (3) R. Holzlöhner et al., "Optimization of cw sodium laser guide star efficiency," http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0908/0908.1527v2.pdf.

著者紹介

ウォレス・R・クレメンツ(Wallace R. Clements)はMPBコミュニケーションズ社の技術開発ディレクタ。 wilhelm.holzlöhner@optica.com
e-mail: wilhelm.kaenders@optica.com