

# 光学的進歩が天文干渉法を 次の10年で飛躍的に改善する

ミシェル・クリーチ=イクマン、ジェラルド・バン・ベル、  
テオ・テン・ブルメラール

高度な望遠鏡とディテクタ、可変形状ミラー、光ファイバビーム伝送、集積フォトニクスは、長基線光赤外干渉法を飛躍的に前進させる技術のごく一部である。

1920年12月の寒い夜、アルバート・マイケルソン氏とフランシス・ピース氏は、100インチのコントロールルームにすわっていた。20フィートのブームと望遠鏡前面に据え付けられていた小さなミラーを使用して数ヶ月前から彼らはマウントウイソンのホッカー望遠鏡で実験に取り組んでいた。この夜、彼らはオリオン星座の最も明るい星を観察していた。それとともに、彼らは、干渉縞を観察することでベテルギウス星の直径

が0.047秒角であることを示すことができた。また、一定のミラーの組合せで干渉縞がどのようになくなるかを示すことができた。こうして高角分解能天文学の分野が始まったのである<sup>(1)</sup>。

現在、光赤外干渉計は、数千の天体のサブミリ秒角解像度画像を普通に実現できる。これらの画像は、数と精巧さの両方で増加すると見られている。これは、新たなイノベーションや現代技術が現行の光学および近赤外(NIR)望

遠鏡ファシリティに導入されているからである<sup>(2)~(4)</sup>。

手短に言うと、天文干渉計は、著しく離れた個別の位置で集光し、はるかに大きな望遠鏡のアパチャ(開口部)を統合して作る。これは、個別の望遠鏡のアパチャで達成できるよりもはるかに遠く離れている。この光は、コヒーレントに結合され、すべてのアパチャ間の位相を維持し、観察対象の天体の画像を再現する。本質的に、その計測装置は、画像のフーリエ変換を計測する、さらにその変換を反転することによって画像が生成される。

天文干渉法を非常に厳しくしている制約がいくつかある。特に地球の大気は、非常に速い時間スケール(数十ミリ秒)で変動する一連の「シーイング」条件を生み出す。基本的に、「シーイング」は天文用語であり、望遠鏡情報の空気の屈折率が地球の大気の影響をどの程度受けるかを記述している。従って、データは迅速に収集する必要がある。コヒーレンスそのものの位相と位相面のひずみを防ぐためである<sup>(5)</sup>。

現代のディテクタは、つい最近まで、雑音が多すぎて、これらの信号の増幅ができなかった、従ってガラスやディテクタで直接干渉縞を生成するためにすべてのデータをとった。これは、各望遠鏡で局部発振器を使う無線/サブミリ波干渉計とまったく違う。つまり、



10望遠鏡MRO干渉計施設の写真を示している。これは、望遠鏡の重ね合わせ図である。(写真提供者: タイソン・イクマン、およびアンドレ・オリバーによる干渉望遠鏡、MRO干渉計)

データが記録され、発振器信号を使ってコンピュータ後処理段でデータを再結合するからである。

天文学者が、これまでにない暗い天体を見たいなら、もっと大きな直径の望遠鏡が必要になる。ある角度で相対的に小さな天体を観察するには、望遠鏡を遠く離して設置しなければならないが、それでも望遠鏡ラインに沿ったコヒレンスは維持されなければならない。

最後に、素早い観測には、フォトン数は常に少ないので、集光検出を高めるより効率的な方法が常に探求されている。この基本的な説明に一定の工夫を適用することで、研究者は最新の光学干渉計の改善で数々の領域を考えつくことになり、その多くは実装されつつある。

## 望遠鏡と適応光学

コヒレンスを維持し、より大きなアパチャの望遠鏡を使う1つの方法は、各望遠鏡で波面をフラットにすることで天文シーイングの効果を取り除くことである。従来、適応光学(AO)を用いて達成したが、最近までほとんどのAOシステムは数個から12を超えるミラー必要とし、ディテクタで集められるフォトン数が減少した。現在、デフォーダブルミラーにより、かつてなく暗い、より正確な観察が可能になっている。

カリフォルニアのマウントウイソン天文台、Center for High Angular Resolution Astronomy (CHARA) アレイで開発中の、画期的なアプローチは、各望遠鏡への“Sky AO”実装であり、これは最高感度で大気波面を補正する。星光ビームがまだ、本質的に損失の多いプロセス、結合まで送られていないからである(図1)。そのポイントで、2つ目の“Lab AO”システムによりバックエンドセンシングのために、



図1 CHARAアレイの“Sky AO”システムは、地球の大気によって生ずる天文波面のひずみを補正する。“Sky AO”とともに、CHARAは、“Lab AO”システムを開発している。これには、干渉計システムの感度と効率を改善するデフォーダブルミラーが使用されている。(画像提供: グルノーブル天文台の天文研究所とCNRS)

ある望ましい(非天文的)波長で、人工ビーコンをビームに注入することができる。これは、「ノンコモンパス」問題として知られており、すべてのAOシステムが悩まされる問題である。しかし、この場合、ノンコモンパスは数百m長となり、多くの光学系(電動であることが多い)を含む。この第2システムが、ビーム伝送中に蓄積された波面誤差を補正し、波面誤差は人工ビーコンであるので、高SNR動作が可能になる。同様のアーキテクチャは、海軍精密光干渉計(NPOI: Navy Precision Optical Interferometer)にも適用されつつある。

最後に、この世代の光干渉計をさらに進めるために探求されている1つの方法は、画期的な集光アプローチである。大きなストロークの適応光学で始まる望遠鏡設計は、ほぼ軸上の回折限界性能に焦点を当てており、ローコストの未加工フロートガラスを大型オプティクスに利用できる。干渉法の2~3mクラスの集光装置で、この10~20倍のコスト削減は、現在のファシリティを大幅に拡大し、そのうえ、経済的に次世代のものも可能にする。

## ビームトランスポートと遅延補正

望遠鏡でビームが集光された後、ビ

ームは真空ビーム伝送線を使い再結合ラボに中継される。この真空システムは広帯域、安定で、分散はない。しかし、そのシステムは機械的によく理解されているとはいえ、課題の多い日常メンテナンス要素である。

次に、アパチャ間の距離が離れており、また短いタイムスケールの大気ひずみ、すなわち信号位相にノイズを付加する、いわゆるピストンを除去するために、遅延補正が行われる。この補正は非常に高価な手段である。500mにもなる距離でナノメートル精度で動くミラーを収容する建物が必要になるからである。こうしたシステムは成熟しているが、多数の反射をとめない、その各々で光の一部が失われる。NPOIと米マグダレナ・リッジ天文台干渉計(MROI)では、これらのシステムはすべて真空内にある。

固定の個別ミラーバッテリーで、静的な「かなりの量」のパス遅延も可能である。これは、CHARAアレイやNPOIで使用されている。ミクロンレベルのピストンひずみ補正は、干渉計ではどこでも行えるが、今日では、すべてのステップが大気シーイングタイムスケール内で完了するように、遅延線の小型ミラーの圧電補正や音声コイルで行われることが多い。

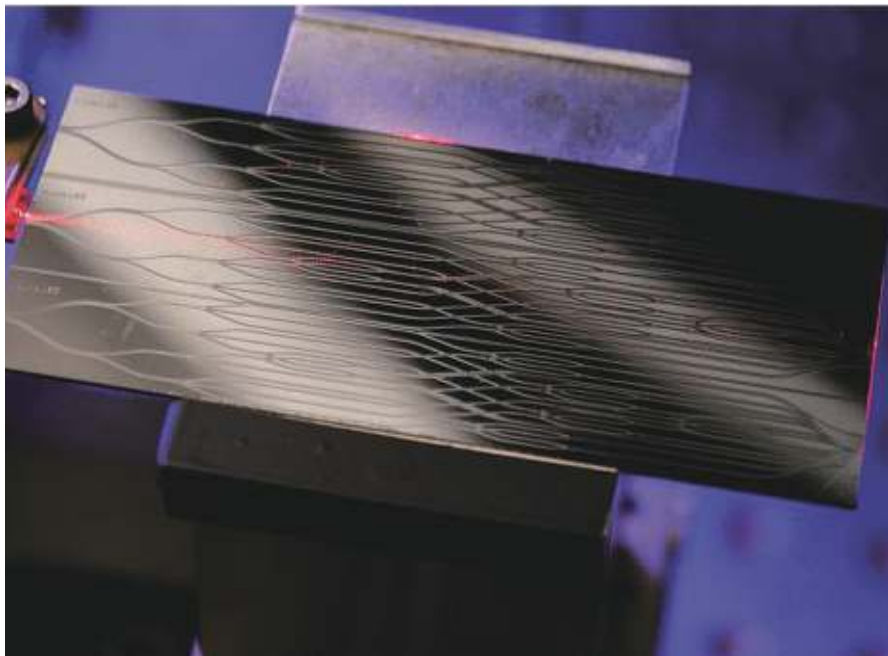


図2 CHARAアレイで使われている集積オプティクスビームコンバイナシステムは数cm径であり、シングルモードファイバを使って4望遠鏡のビームを空間的に結合することができる。以前は、大きな光学テーブルサイズの機器で使用されていた。(画像提供：スティーブ・ギールデン/CHARA Array)

数年来、有望であるがまだ実現していないコンセプトは、光ファイバによる光伝送あるいは光パス長の制御である。2000年代初め、マウナケア山頂のいくつかの望遠鏡を使って、遅延補正ではないが、ファイバ伝送を実証する実験が行われた<sup>(6)</sup>。

ほかのファシリティは、実験は初めてであったので、非常に限られた帯域でビーム伝送を実証した。しかし、ファシリティは、まだ、いくつかの課題に直面している。これらは以下のものである。(1)500nmから2.4 $\mu$ mまでの範囲の低損失、ブロードバンド能力の必要性。(2)天文ターゲットを忠実に再構成するためにファイバ材料の分散特性を補償する能力。(3)物理的な遅延線なしで、ことによるとファイバを伸ばすことで、遅延パスを迅速かつ正確に変える方法。(4)温度、振動などの環境要素に影響されることのない安定した伝送。

光ファイバ技術は、ブロードバンド配信に使用されている。多くの、あるいは今日のすべての干渉計遅延線を置き換えるかもしれない光赤外ファイバによって、天文干渉計ファシリティ運用は著しく容易になり、コスト低下になる。

### 干渉縞を作る 集積光学ビームコンバイナ

そのプロセスの最終段は、望遠鏡から干渉縞を作り記録し、コヒレンスの振幅と位相の計測である。何十年間も、これはビームスプリッタを搭載したビームコンバイナを使って行われてきた、非常に高品質の光部品を必要とするアプローチである。光部品は、一般に高価な、高帯域のカスタムコーティングが施されており、光学テーブル全体で正確に一致したパスで動作する(図2)。

余分な反射と、それとの関連で付随する光損失を避ける1つの方法は、望

遠鏡のビームを結合して、集積光回路で干渉縞を作ることである。この技術は大部分は通信業界のために開発されたが、地上設置の干渉計に直接適用可能である。集積オプティクスにより、数cmサイズの小さなデバイスで、光学テーブル全体を埋めるような完全な光学系の構築が可能になる。これらのデバイスにより、ディテクタピクセルサイズおよびレイアウトに最も効率的に適合するビームコンバイナの出力再設定が著しく容易になる。

ファイバベースシステムのもう1つの利点は、そのようなシステムが空間フィルタとして機能することである。従って各望遠鏡からのビームのコヒレンス性能が向上する。もちろん、ビームはまずシングルモードファイバに結合しなければならない。従って、各望遠鏡にAOシステムがあることの重要性が増すのである。

### 高速、低雑音ディテクタと アップコンバージョン能力

どんな天文干渉計でも最終ステップは、天文画像を再現するために干渉縞を検出し記録することである。最近まで、IRおよび水銀・カドミウム・テルル(MCT)のような光学ディテクタや電荷結合素子(CCD)ディテクタには大きなノイズがあり、利得の変化における直線性の問題があった。従って、この最終段は、ほとんどの干渉計が機能しないような著しい微光領域では困難を極めた。

ディテクタ技術の最近の数々のイノベーションにより、ファシリティの感度が向上すると期待が高まっている。特に2つは、フォトンカウンティングIRディテクタとより短い波長に変換できるIRディテクタである。このディテクタでは、一段と高感度の光アバラン

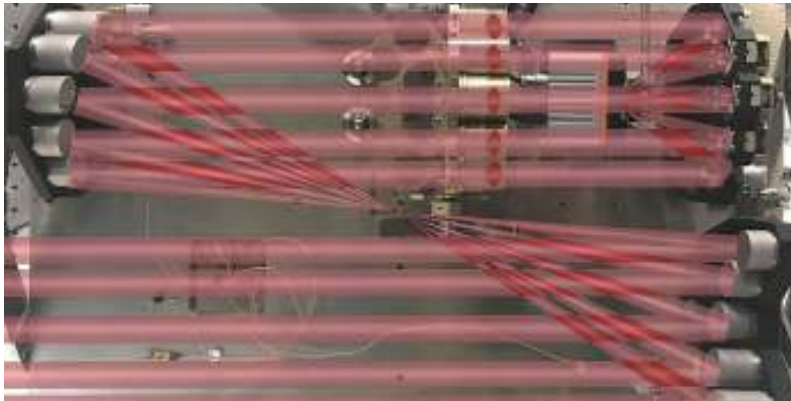


図3 MROIのフリンジトラッカー、ICoNNは、新しいフォトンカウンティングAPDを搭載して、段階的にアレイを実行する5ペアの望遠鏡からの光を同時結合して前例のない感度を達成する。(画像提供:ロバート・リンゴン/MROI)

シュフォトダイオード (APD) により、微弱光の統合が容易になる。

従来の天文MCTディテクタは、天文学会で広く用いられているが、2つの基本的な点で、干渉計アプリケーションに十分適合しているとは言えなかった。まず、ほとんどの天文アプリケーションでディテクタのために必要なピクセル数が非常に多い。これは、干渉計やAOアプリケーションでは、大気シーイングに遅れないようにするために必要とされる高速性 (kHz フレームレートより高い) と直接競合する。2つ目に、微光アプリケーションに求められる固有感度と読み出しノイズである。理想的には、計測毎に1フォトンRMS以下である。

幸いなことに、新世代のMCT APDアレイは、小型構成で、干渉計アプリケーションに必要とされる超低読み出しノイズ、超高速読み出しである。MROIでは、ICoNNフリンジトラッカーが開発されている。これは、SELEX Saphiraディテクタを活用して、 $1.6\mu\text{m}$ でフリンジ追跡マグニチュード14に、つまりほかの干渉計の旧来のMCTアレイ技術を使って観察できるよりも約100倍弱い微光の追跡を達成するためである(図3)<sup>(7)</sup>。

干渉計で安定した干渉縞がトラッキングされると、研究対象のより精巧な

データ取得のためにほかの計測が実行できる。これには、微分位相、ヌル、および狭角天文測定が含まれる。

CHARA Arrayで進行中の実験は、一方から他方へ光を変換するために非線形光学の利用可能性の研究である。最初の試験は、2つのビーム間のコヒレンスが、そのプロセスで維持されることを確認するものである。この技術の主要な利点は、単一ファイバ伝送と1個のビームコンバイナだけが必要であり、空についての科学的関心群ごとに異なるコンバータがあることを前提としている。マイナス面は、光帯域、従ってスループットが非線形部品には励起源の関数であること、今日までそれは本質的に狭い光帯域のレーザー光源であった。とはいえ、レーザー周波数コムを用いた実験は、こうした問題を

軽減する明るい見通しを示している。

高分解能干渉計イメージングの領域は、マイケルソンとピーズの時代から著しく進歩した。恐らく最良の成果の例は、星の表面のイメージングである。連星システム  $\sigma$  Gem (Gemini 星座の連星) のスポットの解像度は優れている<sup>(8)</sup>。技術の進歩が干渉計コミュニティを前進させるので、われわれが使うミラーの数はより少なく、システムはよりコンパクトになると期待でき、恐らくいずれは遅延線の必要性がなくなる。個々のフォトンにカウントするディテクタに供給するのは片手で持てるビームコンバイナであり、これにより、われわれは前例のない感度でイメージングできるようになり、今日のほかの技術では判定できない新しい天文物理現象が発見される可能性がある。

#### 参考文献

- (1) A. A. Michelson and F. G. Pease, *Astrophys. J.*, 53, 249-259 (1921).
- (2) T. A. ten Brummelaar et al., *Astrophys. J.*, 628, 453-465 (2005).
- (3) J. T. Armstrong et al., *JAI*, 2, 2, 1340002 (2013).
- (4) D. F. Buscher et al., *JAI*, 2, 2, 1340001 (2013).
- (5) D. L. Fried and G. E. Mevers, *Appl. Opt.*, 13, 11, 2620-2622 (1974).
- (6) G. Perrin et al., *Science*, 311, 5758, 194 (2006).
- (7) C. Jurgenson et al., *Astron. Instrum.*, 2, 2, 1340006 (2013).
- (8) R. Roettenbacher et al., *Astrophys. J.*, 849, 120-135 (2017).

#### 著者紹介

ミシェル・クリーチ=イークマンは、物理学教授、米ニューメキシコ工科大 (NMT) が運用する、マグダレナ・リッジ天文台 (MROI) のプロジェクトサイエンティスト。e-mail: michelle.creechekman@nmt.edu URL: www.mro.nmt.edu。ジェラルド・バン・ベルは海軍精密光学干渉計 (NPOI) のディレクター。テオ・テン・ブルメラルは、高分解能天文学センター (CHARA) アレイ、マウントウイソン天文台のディレクター。URL: www.chara.gsu.edu