

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800113

研究課題名(和文) 回折限界を超える赤外線天体撮像装置の開発

研究課題名(英文) Development of imaging device beyond the diffraction-limit for infrared astronomy

研究代表者

藤代 尚文 (FUJISHIRO, Naofumi)

京都産業大学・神山天文台・専門員

研究者番号：60601789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙望遠鏡もしくは補償光学を有した地上望遠鏡の赤外線天体観測装置に組み込むことによって、望遠鏡口径で決まる回折限界を超える角度分解能が得られるようになる、フォトニック結晶スーパーレンズについて理論検討を行い、2光子吸収レーザー・リソグラフィ技術で成形する場合の理論成立解を得た。さらに、理論モデルを検証する光学実験を実施するために、本理論成立解にもとづくフォトニック結晶スーパーレンズの試作と、望遠鏡シミュレータの設計・制作を行った。

研究成果の概要(英文)：I obtained a theoretical solution of photonic crystal superlens which realizes angular resolution beyond the diffraction-limit of an astronomical telescope. The superlens is fabricated by two-photon polymerization technique and can be integrated into infrared astronomical instruments installed in space telescopes or ground-based telescopes with adaptive-optics. I also carried out a trial manufacture of the superlens and a telescope simulator to verify the theoretical model by optical experiment.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：フォトニクス フォトニック結晶 赤外線天文学 スペース天文学 補償光学

1. 研究開始当初の背景

研究代表者が研究を開始した当初、あかり宇宙望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡、ハーシェル宇宙望遠鏡の深宇宙探査により、波長 10 ミクロン～200 ミクロンの中間～遠赤外線の波長帯においても赤方偏移 1 を超える遠方銀河が検出されるようになり、その特性が次第に明らかになってきた。銀河から放射される中間～遠赤外線は、生まれたての若い星、または活動銀河核の活動により暖められた塵からの放射と考えられており、銀河の形成と進化を調べる上で重要な波長帯である。遠方宇宙にある赤外線光度が高い銀河について、電波、サブミリ波の干渉計観測、およびハッブル宇宙望遠鏡の可視光撮像観測によって物理的なサイズを測定すると、赤方偏移 0.5 以上の遠方銀河は 5kpc 程度であるのに対して、近傍の銀河は 1kpc 以下であり、両者に明らかな違いがあることがわかってきた。これは、赤外線を放射する物理プロセスが、近傍(=現在)と遠方(=過去)の宇宙で異なることを示唆しており、精査が必要である。しかし当然ながら、電波、サブミリ波、可視光を放射する物理プロセスと、赤外線を放射するプロセスは異なっているので注意が必要であり、赤外線を放射する構造の物理的なサイズを直接測定できることが望ましい。しかし、波長 20 ミクロンの中間赤外線においては、既存の赤外線宇宙望遠鏡の角度分解能は、回折限界により 5 秒角程度(赤方偏移 1 で 40kpc に相当)にとどまっており、十分な解像度を得ることができなかった。

古典的な光学理論においては、望遠鏡の角度分解能は回折限界で制限され、角度分解能を向上させるためには望遠鏡口径を大きくする必要がある。2018 年以降に打ち上げが計画されている口径 6.5m のジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を用いれば、同波長帯で 0.5 秒角程度(赤方偏移 1 で 4kpc に相当)の角度分解能を得られることが期待されるが、遠方銀河の赤外線を放射する構造の物理的なサイズを測定する目的には、まだ十分な解像度とは言い難い。また、数 kpc におよぶ物理的なサイズが分かったとしても、1kpc 未満の銀河の内部構造(星形成領域、活動銀河核)の分解には至らない。

望遠鏡の巨大化は、必然的に開発期間の長期化とコストの増大につながる。昨今の我が国、および世界各国の経済状態から鑑みるに、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を超える巨大宇宙望遠鏡の早期実現は困難である。事実、中間赤外線の波長帯においてジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を超える角度分解能の実現を目指していた、赤外線干渉計を原理とした地球型惑星探査機(TPF-I; Terrestrial Planet Finder Interferometer)の開発計画は無期限延期となっている。

以上の通り、中間～遠赤外線の波長帯においては、遠方銀河の内部構造を調べるうえで十分な角度分解能が得られる望遠鏡が実現

される見通しは立っておらず、遠方銀河の真の姿を解き明かすことが不可能な状況が続くことは明らかだった。

一方、フォトリソ、プラズモニクス、ナノフォトリソといった古典的な光学理論を超えた最先端光技術分野においては、スーパーレンズ、ファイバースコープのような回折限界を超える分解能をもつ光学デバイスが実現されてきた。そこで研究代表者は、これらの光学デバイスに注目することで、望遠鏡口径で決まる回折限界を超える光学機器が実現可能であるかを検討してきた。

2. 研究の目的

本研究では、フォトリソ結晶スーパーレンズを用いて、望遠鏡口径で決まる回折限界を超える高角度分解能が得られる撮像装置の実現を目指す。フォトリソ結晶スーパーレンズは、誘電体の微細構造によって人工的に負の屈折率をもたせたデバイスであり、(特長 1) 入射角度の変化に対して射出角が敏感に変化する、(特長 2) 凹凸形状がない平板のため集光の仕方が入射位置によらない、という通常のレンズには見られない特長をもつ。(特長 1)を用いた F 値変換作用によって、ビームサイズを調整することができる。さらに、(特長 2)によって、望遠鏡焦点位置において分解不可能な 2 つの画角のビームが、結像位置を変えずに同様に集光する。その結果、図 1 の概念図に示すように、フォトリソ結晶スーパーレンズの焦点面において両ビームを分解可能と考えられる。本研究では、波長 10 ミクロンの中間赤外線において機能するフォトリソ結晶スーパーレンズの設計・試作・実験を行い、達成可能な角度分解能を理論的・実験的に明らかにすることを目標とする。

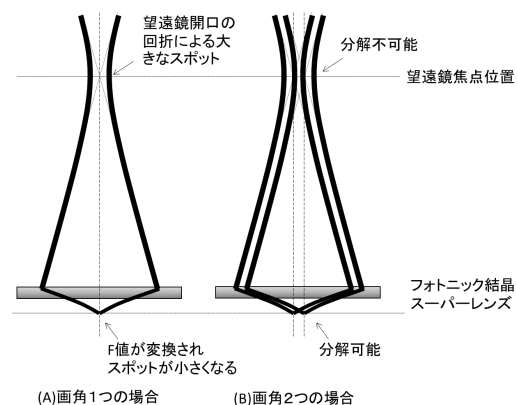


図 1 撮像装置の原理

3. 研究の方法

以下の 2 ステップに分けて行う。

(1) フォトリソ結晶スーパーレンズの設計

平面波展開法、厳密結合波理論(以下、RCWA 法)、時間領域差分法(以下、FDTD 法)の 3 つの電場解析法による理論計算によって、フォトリソ結晶スーパーレンズの設計を行う。

第1に、フォトニック結晶に用いる光学材料と、フォトニック結晶の加工方法を選択する。第2に、平面波展開法によって波数空間におけるフォトニックバンド構造および等振動数曲線を計算し、負の屈折効果をもちスーパーレンズとして機能するフォトニック結晶の周期構造を決定する。第3に、RCWA法によってフォトニック結晶の透過率を計算し、光が入射・射出するフォトニック結晶のインターフェース部の構造を最適化する。最後に、FDTD法によって光の伝播シミュレーションを実施し、点像分布関数を確認する。上記手順を繰り返し行い、フォトニック結晶スーパーレンズの最適解を探索する。

(2) 試作・実証実験

フォトニック結晶スーパーレンズを用いた赤外線天体撮像装置は、レンズやミラーなどの古典的な光学素子で構成された望遠鏡と組み合わせて使用し、その角度分解能を向上させるものである。そのため、本デバイスの実証試験のためには、既存技術で作られた実証光学系が必要である。

回折限界を超える角度分解能を目指すため、試験で使用する望遠鏡光学系は幾何収差を十分に補正したものでなければならない。また本研究で開発する天体撮像装置は、宇宙望遠鏡もしくは究極補償光学と組み合わせた使用を想定しており、大気揺らぎ(シーイング)の影響があってはならない。そこで本研究では、大気揺らぎの影響が小さい実験室において使用可能な、収差をよく補正した望遠鏡シミュレータを設計・製作する。

最後に、望遠鏡シミュレータを用いて試作したフォトニック結晶スーパーレンズの試験を行い、分解能の向上を確認する。

4. 研究成果

フォトニック結晶の製造方法として、フォトリソグラフSU-8を用いた2光子吸収レーザー・リソグラフィによる3次元造形法を選定し、その条件におけるフォトニック結晶スーパーレンズの理論成立解を得た。詳細は以下の通りである。

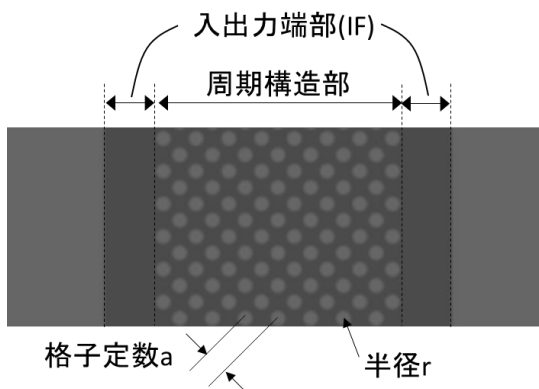


図2 フォトニック結晶の構造

本研究で考案したフォトニック結晶スーパーレンズの構造を図2に示す。本デバイスを側面からみると、SU-8製平板に円孔が周期的に並んだ構造と、光が入射・射出する入出力端面からなっている。所望の集光効果を実現させるために、周期構造部を伝播する電磁波が負の屈折効果に対応する群速度をもつように、格子定数 a と円孔半径 r の最適化を実施した。

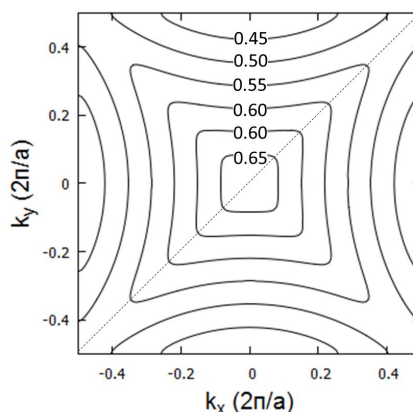


図3 等振動数曲線(TE偏光、第2バンド)

図3は、平面波展開法によって計算・最適化した等振動数曲線(TE偏光、第2バンド)である。等高線上の数値は格子定数で規格化した電磁場の振動数を示し、等高線の法線ベクトルは群速度に対応する。規格化振動数0.55~0.65においては、図中の点線で示した光の入射方向近傍において等高線の曲率が大きく、本素子がレンズとして作用することを示している。このようなブロッホモードを効率的に励起するために、入出力端面の構造を工夫した。

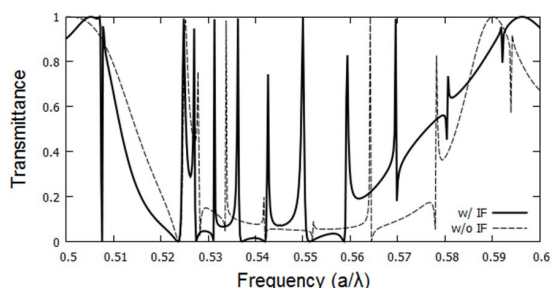


図4 透過率(TE偏光)

図4は、RCWA法で計算したフォトニック結晶の透過率である。点線は、入出力端面を設けず、周期構造のみがある場合の結果である。実線は、レンズとして作用するブロッホモードのみを励起させ、レンズとして作用しない他のモードを励起させないように、入出力端面の厚みを最適化した場合の結果である。最適化によって規格化振動数0.55のブロッホモードが励起されるようになったため、この振動数において透過率が向上している。

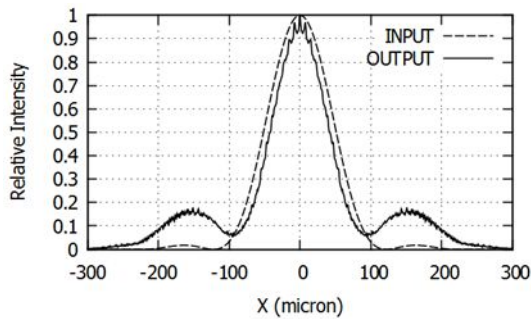


図 5 点像分布関数

図 5 は、以上の手順によって最適化したフォトニック結晶スーパーレンズに対して FDTD 法による伝播シミュレーションを実施し、その結果得られた点像分布関数である。点線は、入射ビームの望遠鏡焦点面における点像分布関数であって、波長 10 ミクロン、 $F/10$ のビームによって生じたエアリー関数である。実線は、フォトニック結晶スーパーレンズの出射ビームの点像分布関数であり、半値全幅は入射ビームの 80%程度と小さくなり、望遠鏡の回折限界よりも小さなスポットが得られている。

上記の理論検討成果については、論文としてまとめあげるべく執筆中である。また、上述のフォトニック結晶スーパーレンズの理論成立解をもとに試作を実施している。本報告書執筆時点ではその加工精度の確認中である。その完了後、既に設計・構築済みの望遠鏡シミュレータを用いた光学実験によって、上記理論の検証を実施予定である。

5. 主な発表論文等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤代 尚文 (FUJISHIRO, Naofumi)
 京都産業大学・神山天文台・専門員
 研究者番号：60601789