

令和 5 年 12 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21873

研究課題名（和文）ミリ波望遠鏡用の高集積度検出器アレイにおける量子光学的効果の研究

研究課題名（英文）Study of quantum optical effect in high-density detector arrays for millimeter-wave telescopes

研究代表者

日下 暁人（Kusaka, Akito）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：20785703

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ミリ波望遠鏡の検出器アレイにおける光子の強度相関（Hanbury-Brown & Twiss効果）を理論・実験の両面で研究した。次世代宇宙マイクロ波背景放射(CMB)観測実験であるSimons ObservatoryやCMB-S4実験は、数万から数十万の検出器を擁するミリ波電波望遠鏡群であり、その焦点面に検出器が高密度に配置される。我々は、このような実験で光子がボーズ統計に従うことによる強度相関が無視できないことを指摘した。本研究によりこの効果の計算手法を確立し、ミリ波望遠鏡設計における新たな指針を示した。また、その実証へ向けCMB検出器を用いた相関測定のための開発を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、光の量子力学的な振る舞いの研究を通して、電波望遠鏡の設計に新しい指針を与えるものである。特に、宇宙背景放射と呼ばれるビッグバン直後の宇宙初期から来る「宇宙最古の光」のための観測装置の高度化により、宇宙初期や宇宙の進化の研究に寄与する。また、量子力学が身の回りの比較的良好に知られた「望遠鏡」という装置にまで影響を及ぼすことを示すことで、量子力学の応用可能性をより身近なものにまで広げた。

研究成果の概要（英文）：We studied the photon intensity correlation (Hanbury-Brown & Twiss effect) in the detector array of the millimeter-wave telescope, both theoretically and experimentally. The next-generation cosmic microwave background (CMB) experiments, such as the Simons Observatory and CMB-S4, are arrays of millimeter-wave radio telescopes with tens or hundreds of thousands of detectors, and comprise focal planes with densely packed detectors. We pointed out that the intensity correlation due to the Bose statistics of photons in such configuration cannot be ignored. This study established a calculation method for this effect and provided a new guideline for millimeter-wave telescope design. We also developed a correlation measurement setup using CMB detectors.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ミリ波望遠鏡 量子光学 光子相関 宇宙マイクロ波背景放射

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

次世代 CMB 実験は、複数の望遠鏡に数万から数十万の超伝導ボロメータ検出器を、焦点面検出器アレイとして配置し、かつてない精度での観測により宇宙物理学の新しい地平を拓く。これらの実験の鍵となるのは、焦点面単位面積あたりの感度を最大化することである。このとき、検出器を高密度で配置すれば単位面積あたりの感度が向上するかのように見える。本研究代表者らは、光子がボーズ統計に従うため、Hanbury-Brown & Twiss 効果[1,2]により複数の検出器の間で雑音が正の相関を持ち、ある程度以上に高密度に検出器を配置してもノイズ低減が期待できなくなる可能性を指摘した。従来 CMB 望遠鏡の設計においてこの効果が正しく見積もられてこなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ミリ波望遠鏡の検出器アレイにおける光子の強度相関を理論・実験の両面から研究する事である。本研究により、量子光学的効果を考慮に入れた望遠鏡光学設計という新しい考え方を導入し、次世代 CMB 実験の設計に改良を加える。

3. 研究の方法

(1) 理論計算

① Zmuidzinis の回路モデルによる量子統計からの定式化[3]を用いて、光子強度揺らぎと 2 検出器間の光子強度相関を同一の枠組みから導出する。ここで散乱行列を光学的結合定数と同一視することで、一般化された van Cittert-Zernicke の定理による 1 次振幅の相関と強度相関 (2 次相関) を関連付け、一般的なミリ波光学系における強度相関計算手法を導出する。また、これを応用して偏光 (ストークスパラメータ) 測定における相関を定式化する。

② CMB 観測用望遠鏡への入射光における占有数(occupation number)を、感度周波数帯、大気や CMB などの光源、そして望遠鏡・クライオスタットの光学設計・物理的配置から見積もる。

③ 検出器の角度・偏光応答関数と占有数をもとに、光子強度相関を計算する。

④ 光子揺らぎ以外に由来する雑音(読み出しなど)を推定し、光子強度相関が検出器アレイ感度に与える影響を見積もる。

(2) 実験測定

CMB 検出器に現れる Hanbury-Brown & Twiss 効果を実験室系での測定するために、希釈冷凍機における超伝導検出器評価システムを用いて、計測を行なうためのシステムを開発する。冷凍機内に黒体放射光源を設置し、またその黒体光源の温度を変化させることで、占有数の関数として相関の強度を測定できる。

4. 研究成果

理論計算においては、上記の通り、量子統計的な定式化から、一般化された van Cittert-Zernicke の定理が強度相関と関連付けられることを示した。さらに、ミリ波望遠鏡の構造、特に低温開口絞りを含む低音光学系が用いられるという特性にこの定式化を適用することで、近代的なミリ波望遠鏡システムのほとんどが、強度相関の計算という文脈においては、一つの収差のない冷却レンズと開口絞りからなる極めてシンプルな光学系に縮約できることを示した。これにより、多くのミリ波望遠鏡光学系に適用可能で数値計算が容易な計算手法を導出した[4]。

図 1 に、検出器ピクセル感の相関パターンの一例を示す。口径比 F と波長 λ を用いると、ピク

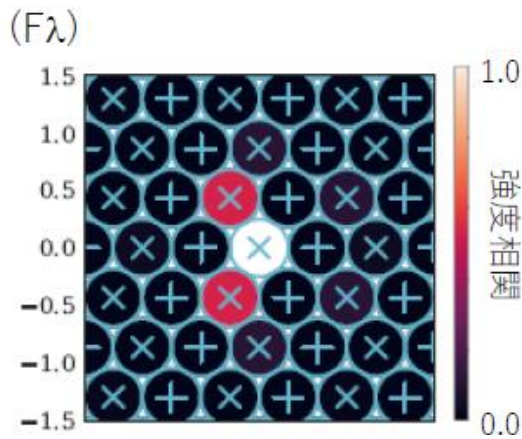


図 1: ピクセル間の相関パターンの例。色で中央のピクセルとの相関を表す。

セル感の距離が $F\lambda$ を下回り始めるときに、強度相関が顕著に現れ始める。また、ピクセル間の偏光角が 45 度異なる場合には、線偏光ストークスパラメータ間の相関がゼロになる。これらの影響を織り込むことで、図 2 のように検出器システム全体の感度をピクセル間隔の関数として書く事ができる。強度相関を考慮しない場合は、検出器間隔を小さくすると多数の検出器を焦点面に配置することができ、それによる統計の増加で感度が向上する。ピクセル間隔が $0.7 F\lambda$ など極めて小さいときに感度が最大化される。これに対して、強度相関を正しく考慮した場合には、ピクセル間隔が $F\lambda$ を下回ると相関の影響により感度が頭打ちとなる。これらの影響については、次世代大規模実験である CMB-S4 の装置設計でも我々の成果が反映され考慮されている[5]。

実験的測定においては、超伝導検出器 Transition Edge Sensor (TES) の光学測定に向け、希釈冷凍機内で動作する黒体光源を開発した(図 3)。この黒体光源および検出器評価システムは検出器の強度相関測定に用いる他、検出器の光応答・ノイズ測定・時定数測定等にも用いられる[6, 7]。

<引用文献>

- [1] R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, Nature 177, 27-29 (1956)
- [2] R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, Proc. Royal Soc. A 243, 1234, 291-319 (1958)
- [3] J. Zmuidzinas, Applied Optics 42, 4989 (2003)
- [4] C. A. Hill and A. Kusaka, “Photon noise correlations in millimeter-wave telescopes,” [arXiv:2309.01153 \[astro-ph. IM\]](https://arxiv.org/abs/2309.01153) (2023), submitted to and provisionally accepted by *Applied Optics*.
- [5] Draft CMB-S4 Preliminary Baseline Design Report (https://indico.cmb-s4.org/event/3/attachments/5/51/PBDR_v0.1.pdf)
- [6] 西ノ宮ゆめ、「CMB 偏光観測に用いる TES 検出器の性能評価環境・手法の開発」、東京大学修士論文
- [7] Yume Nishinomiya, Akito Kusaka, Kenji Kiuchi, et al., “Development of the characterization methods without electrothermal feedback for TES bolometers for CMB measurements,” *J. Low Temp Phys* **209**, 1079-1087 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10909-022-02864-z>

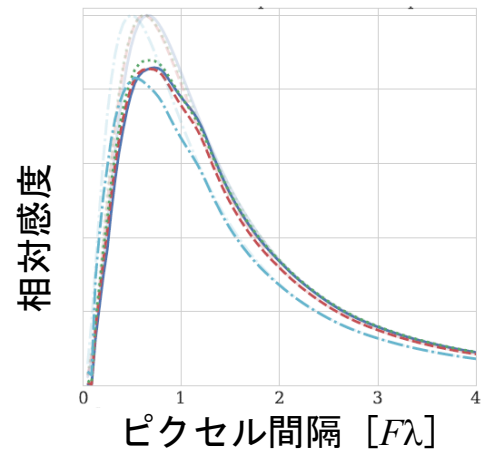


図 2: ピクセル間隔と感度の関係。淡色の線は強度相関を考慮しなかった場合。

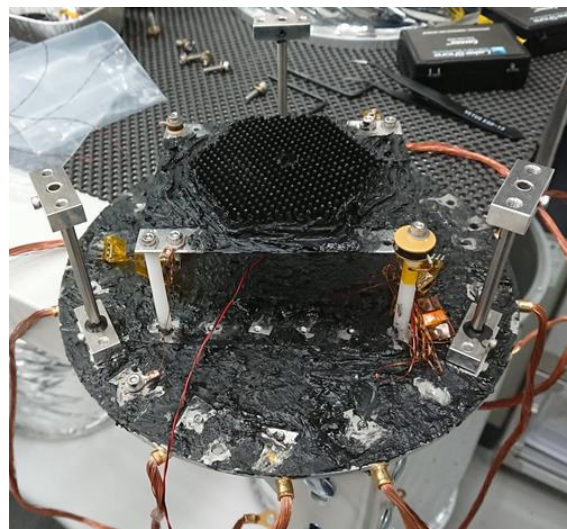


図 3: 超伝導検出器試験用黒体光源。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 C. A. Hill and A. Kusaka	4. 巻 provisionally accepted
2. 論文標題 Photon noise correlations in millimeter-wave telescopes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2309.01153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yume Nishinomiya, Akito Kusaka, Kenji Kiuchi, Tomoki Terasaki, Johannes Hubmayr, Adrian Lee, Heather McCarrick, Aritoki Suzuki & Benjamin Westbrook	4. 巻 209
2. 論文標題 Development of the Characterization Methods Without Electrothermal Feedback for TES Bolometers for CMB Measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J Low Temp Phys	6. 最初と最後の頁 1079-1087
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-022-02864-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西ノ宮 ゆめ 他
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるTESの光学特性評価における測定環境・手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西ノ宮 ゆめ 他
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるTESの熱的特性評価および光学試験の進捗状況
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yume Nishinomiya, Akito Kusaka, Kenji Kiuchi, Tomoki Terasaki, Johannes Hubmayr, Adrian Lee, Heather McCarrick, Aritoki Suzuki, Benjamin Westbrook
2. 発表標題 Development of the characterization methods for tes bolometers for cmb measurements
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	木内 健司	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教	
	(Kiuchi Kenji)		
	(00791071)	(12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	カリフォルニア大学バークレー校	プリンストン大学	ローレンスバークレー研究所	他1機関