

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610064

研究課題名(和文)電波観測実験用ウルトラコールドウインドウの開発研究

研究課題名(英文)Ultra-cold window for high-sensitive radio sensing

研究代表者

田島 治 (Tajima, Osamu)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：80391704

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)：宇宙マイクロ波背景放射観測を代表とする電波計測分野では、高感度な計測を追求するために、検出器を冷却して低ノイズ化を追求することと、大口径化によって統計(計測光量)を稼ぐという2つの手段を用いる。しかしながら、大口径化に伴い電波以外の入熱(赤外線放射)を遮蔽することに困難を有していた。本研究はRadio-transparent multi-layer insulation (RT-MLI)という、電波に対して透明であるが、熱放射の大部分を担う赤外・可視光に対しては不透明な材料を多重化することにより、真空多層断熱を実現する原理と技術を発明し、従来の困難を打破することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In a field of a high-sensitive radio sensing, e.g. observation of the cosmic microwave background radiation, our main approach for improving the sensitivity of the system is a combination low-temperature detectors (i.e., low noise) and a large aperture (i.e., high photon statistics). A big difficulty of this approach is that the large aperture induces extra thermal radiations, i.e. infra-red radiations, into the low-temperature detectors. We invented a technology to solve this difficulty: Radio-transparent multi-layer insulation, named RT-MLI. The RT-MLI is transparent for the radio, however, it effectively reflects the infra-red radiations. We proofed this technology based on the laboratory tests. We also developed various applications, e.g. prevention of dew condensation in a meteorological atmospheric monitor.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射 CMB 極低温 ミリ波

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)等の電波観測実験では、多数の超伝導検出器を搭載した受信器を用いる。超伝導検出器を用いる理由は、微弱な信号を検出するためであり、多数($\approx 1,000$ 個)の検出器を用いる理由は、フォトンノイズと呼ばれる観測する電波の統計的なゆらぎに勝てるような統計精度を達成するためである。そして、光量(統計)を稼ぐためには、受信機が大開口径であることが必須となる(直径 30 cm 以上)。

大きな開口径を持つことと超伝導検出器を使用することは相反する要求である。検出器は 0.3 K 以下の極低温下で使用する。極低温を実現するために、受信器の開口部は真空を保持するための窓「ウインドウ」でシールする。電波帯域で透明かつ長期間の耐久性を実現する窓材として、ポリエチレンや発泡剤が使用されている。これらの物質は電波帯域(≤ 300 GHz)では、透明ではあるが、数 THz(数千 GHz)以上の赤外、可視帯域においては不透明である(可視光で透明な材質が電波帯において透明とは限らない)。そのため、大気熱放射の大部分はウインドウで遮蔽できるが、ウインドウ自身からの熱放射は遮蔽されない。受信器内部に降り注ぐ熱放射の 99.99% 以上はウインドウからの熱放射である。

2. 研究の目的

熱放射を遮蔽するために、受信器内部に熱フィルターを段階的(例えば 50K, 4K)に何重にも配置する。しかしながら、実際には熱フィルター自身が入射熱によって暖められてしまう。その結果、熱放射が遮蔽しきれないため超伝導検出器を十分に冷却できず、その性能を発揮できていないという困難を抱えている。対策研究として、熱放射を効率的に遮蔽するフィルターの開発が世界中で精力的に行われているが、困難解決には至っていない。本研究は、従来とは真逆のアプローチに挑戦する。ウインドウからの熱放射がフィルターに流入する前の段階で大幅に削減して現状を打破することを目指す。

本研究成功の暁には、検出器の冷却能力が向上する。例えば、検出器の温度を 0.3 K から 0.25 K に向上することが可能となる。CMB 実験に用いる超伝導検出器アルミニウム製 MKID の場合、このわずかな変化が 10 倍もの感度向上をもたらす。当該分野にとっては、革新的なブレイクスルーとなる。さらに、受信器の開口をさらに広げることが可能になる。これにより、光量(統計)の大幅増強が可能となり、実験感度を容易に向上することが可能となる。

3. 研究の方法

ウインドウからの熱放射を削減する方法は以下の 3 パターン考えられる。

- (1) 低放射率の材料をウインドウに用いる
- (2) ウインドウを冷やす
- (3) ウインドウとフィルターの間に熱放射の反射と電波の透過を両立する機構を実装する

既に(1)の追求は 10 年以上に渡って継続されており、現状から桁違いに改善する見込みは小さい。本研究は、当初(2)を追求する予定であったが、ウインドウの結露を抑えるため、冷やしたウインドウの外側にまたウインドウを配置する必要があり、「いたちごっこ」状態となる。別の言い方をすれば、ウインドウとフィルターの間にもう一枚フィルターを入れて、それを冷却することに他ならないため、従来のアプローチからの新規性が乏しい。本研究開始当初に、この「いたちごっこ」問題に気付いたため、本研究は(3)の追求を行った。結果として当初予想しなかったアイデアを創出し、学術論文のみならず、特許出願も行なった。

本研究で創出した発明 Radio-transparent multi-layer insulation (RT-MLI) は、電波に対して透明であるが、熱放射の大部分を担う赤外・可視光に対しては不透明な材料を多重化することにより、真空多層断熱を実現する。

図 1 の概念図に示すように、高温(T_{high})と低温(T_{low})系の間に赤外線透過しない薄い中間レイヤーを配置することを考える。熱放射は温度の 4 乗に比例するため、例えば、実際の状態、 $T_{high}=300$ K, $T_{low}=50$ K とすると、中間レイヤーへの入熱の 99.9% は T_{high} に起因する。中間レイヤーは入熱を吸収し、熱をもつ。熱を持つという事は熱放射する。ここで、

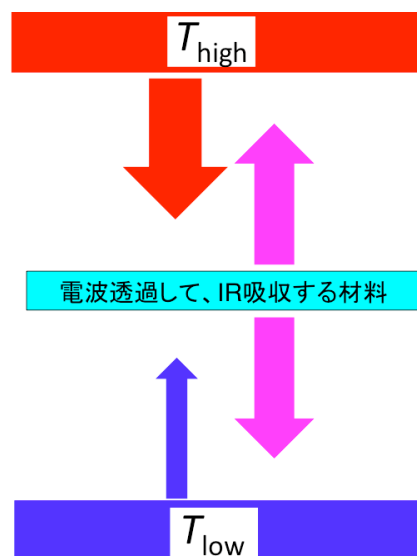


図 1 RT-MLI の基本原理

薄いレイヤー状であれば、放射される熱量は上側と下側で均等に半分ずつとなる。つまり、中間レイヤーを入れるだけで、入熱の半分を実効的に高温系へ反射し、低温系への入熱が半分になることを意味する。そして、中間レイヤーをN枚配置すれば、低温系への入熱量は $1/(N+1)$ となる。この原理は本研究グループによる論文⑩によって、クリアに定式化されている。

4. 研究成果

CMB 実験では主として 300 GHz 以下の周波数帯域の電波を計測する。その帯域で透明で、赤外線を吸収する安価な材料として、発泡ポリスチレンを用いた試験を行った。図2にレイヤー状に薄く切った発泡ポリスチレン性 RT-MLI の写真を示す。

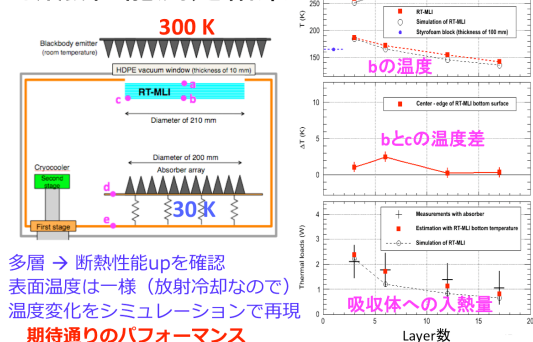


図2 発泡ポリスチレン性 RT-MLI の一例

この RT-MLI の性能を図3に示すように、高温系 (300 K) と低温系 (30 K) の間に枚数を変えながら配置し、その性能評価をおこない、定式化した性能を確認した。RT-MLI は放射冷却によって一様に冷やされるため、

- (1) 表面温度が一樣である
- (2) 熱コンタクト等が不要で適用が容易なども大きなメリットである。試験とその結果に関する詳細は論文⑩などに記す。

断熱性能測定結果



多層 → 断熱性能upを確認
表面温度は一樣 (放射冷却なので)
温度変化をシミュレーションで再現
期待通りのパフォーマンス

図3 RT-MLI の評価試験のセットアップとその結果

研究期間の延長によって、RT-MLI の応用研究も目覚ましく進展した。冷却受信器開発において、内部が冷却されているために開口部が結露してしまうという問題に直面することが多々ある。従来は乾燥空気を循環するなどの対処方をこうじていたが、開口部裏面に RT-MLI を配置することにより開口部の冷却を抑制する手法を確立した (さらに受信器内部への入熱も低くなる)。これは RT-MLI が赤外線を実効的に反射するという性質を利用したものである。これにより、乾燥空気を循環することなく結露を防止できる。本成果は、クモデスという気象観測装置に実用され、新たな特許出願発明へと発展した (論文⑤, 出願①, その他②などを参照)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① N. Tomita, H. Jeong, J. Choi, H. Ishitsuka, S. Mima, T. Nagasaki, S. Oguri, O. Tajima, ``World's Cheapest Readout Electronics for Kinetic Inductance Detector by Using RedPitaya,`` J. Low Temp. Phys., online 19 Jan., pp1--6 (2016). 査読あり
DOI:10.1007/s10909-016-1485-0
- ② H. Ishitsuka, M. Ikeno, S. Oguri, O. Tajima, N. Tomita, T. Uchida, ``Front-End Electronics for the Array Readout of a Microwave Kinetic Inductance Detector Towards Observation of Cosmic Microwave Background Polarization,`` J. Low Temp. Phys., online 13 Jan., pp1--7 (2016). 査読あり
DOI:10.1007/s10909-015-1467-7
- ③ A. Suzuki, O. Tajima (80 番目), 他 88 名 ``The POLARBEAR-2 and the Simons Array Experiments,`` J. Low Temp. Phys., online 6 Jan., pp1--6 (2016). 査読あり
DOI:10.1007/s10909-015-1425-4
- ④ S. Oguri, J. Choi, T. Damayanthi, M. Hattori, M. Hazumi, H. Ishitsuka, K. Karatsu, S. Mima, M. Minowa, T. Nagasaki, C. Otani, Y. Sekimoto, O. Tajima, N. Tomita, M. Yoshida, E. Won, (the GroundBIRD group), ``GroundBIRD: Observing Cosmic Microwave Polarization at Large Angular Scale with Kinetic Inductance Detectors and High-Speed Rotating Telescope,`` J. Low Temp. Phys., online 30 Dec., pp1--7 (2015). 査読あり

あり
DOI:10.1007/s10909-015-1420-9

- ⑤ T. Nagasaki, K. Araki, H. Ishimoto, K. Kominami, O. Tajima, ``Monitoring System for Atmospheric Water Vapor with a Ground-Based Multi-Band Radiometer: Meteorological Application of Radio Astronomy Technologies,`` J. Low Temp. Phys., online 29 Dec., pp1--7 (2015). 査読あり
DOI:10.1007/s10909-015-1412-9
- ⑥ K. Karatsu, S. Mima, S. Oguri, O. Tajima (22 番目), 他 22 名, ``Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Cosmological Observation,`` IEICE Trans Electron, Vol. E98-C, No. 3, pp. 207-218 (2015), 査読あり
DOI:10.1587/transele.E98.C.207
- ⑦ S. Oguri, H. Ishitsuka, J. Choi, M. Kawai, and O. Tajima, ``Sub-Kelvin refrigeration with dry-coolers on a rotating system,`` Rev. Sci. Instru., 85, 086101, 1-3 (2014). 査読あり
DOI:10.1063/1.4891618.
- ⑧ S. Oguri, J. Choi, O. Tajima, M. Hazumi, E. Won, M. Yoshida, M. Kawai, ``GroundBIRD Experiment -- Detecting CMB polarization Power in a Large Angular Scale from the Ground,`` J. Low Temp. Phys., 176, Issue 5, 691-697 (2014). 査読あり
DOI:10.1007/s10909-014-1138-0
- ⑨ K. Takahashi, S. Mima, S. Oguri, C. Otani, O. Tajima, H. Watanabe, M. Yoshida, ``Callibration System with Modulated Polarization Source for Superconducting Detectors at 0.1 K,`` J. Low Temp. Phys., 176, Issue 5, 822--828 (2014). 査読あり
DOI:10.1007/s10909-013-1054-8
- ⑩ J. Choi, H. Ishitsuka, S. Mima, S. Oguri, K. Takahashi, and O. Tajima, ``Radio-transparent multi-layer insulation for radiowave receivers,`` Rev. Sci. Instru., 84, 114502, 1 - 6 (2013). 査読あり
DOI: 10.1063/1.4827081
- ⑪ S. Oguri, J. Choi, M. Kawai, and O. Tajima, ``Cryogenic cooling with cryocooler on a rotating system,`` Rev. Sci. Instru. 84, 055116, 1 -- 5 (2013).

査読あり
DOI:10.1063/1.4807750

[学会発表] (計 26 件)

1. 小栗秀悟, 美馬覚, 石塚光, 内田智久, 大谷知行, 沓間弘樹, 関本裕太郎, 田島治, Thushara DamayanthiA, Jihoon Choi, 富田望, 永井誠, 長崎岳人, 羽澄昌史, 服部誠, 蓑輪眞, 吉田光宏, Eunil Won, 「GroundBIRD 搭載用超伝導検出器 MKID アレイのデザイン設計」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016. 3. 19-22, 東北学院大学(宮城県仙台市)
2. 美馬覚, 小栗秀悟, 石塚光, 内田智久, 大谷知行, 沓間弘樹, 関本裕太郎, 田島治, Thushara Damayanthi, Jihoon Choi, 富田望, 永井誠, 長崎岳人, 羽澄昌史, 服部誠, 蓑輪眞, 吉田光宏, Eunil Won, 「GroundBIRD 搭載用超伝導検出器 MKID アレイの製作と評価」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016. 3. 19-22, 東北学院大学(宮城県仙台市)
3. 石塚光, 池野正弘, 内田智久, 小栗秀悟, 田島治, 富田望, 「超伝導検出器 MKID の周波数分割多重化読み出しロジックの実装と評価」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016. 3. 19-22, 東北学院大学(宮城県仙台市)
4. 長崎岳人, 荒木健太郎, 石元裕史, 田島治, 「雲発生予測システムの開発 - 60 GHz 帯試作受信機開発と大気観測試験」, 日本天文学会 2016 年春季年会、2016. 3. 14-17, 首都大学南大沢キャンパス(東京都八王子市)
5. 田島治, ``CMB Polarization - recent & future,`` 宇宙電波懇談会シンポジウム, 2016. 3. 9-10, 国立天文台(東京都三鷹市)
6. 長崎岳人, 荒木健太郎, 石元裕史, 田島治, 「電波天文技術を応用した大気水蒸気モニター KUMODES の開発」, 第 16 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ, 2016. 3. 8-9, 電気通信大学(東京都調布市)
7. 美馬覚, 大谷知行, Thushara Damayanthi, 小栗秀悟, 内田智久, 田島治, 吉田光宏, 長崎岳人, 羽澄昌史, 石塚光, 関本裕太郎, Jihoon Choi, Eunil Won, 蓑輪眞, 富田望, 永井誠, 沓間弘樹, 服部誠, 古谷野凌, 「GroundBIRD 焦点面検出器アレイの開発」, 第 16 回ミリ波サブミリ波受信機

- ワークショップ, 2016. 3. 8-9, 電気通信大学 (東京都調布市)
8. O. Tajima, 'CMB Polarization - recent & future,' KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2016), 2016. 2. 9-12, KEK (茨城県つくば市)
 9. 長崎岳人, 荒木健太郎, 石元裕史, 田島治, 「電波天文学技術を応用した高感度マイクロ波放射計による次世代大気観測」, 日本気象学会 2015 年秋季大会, 2015. 10. 28-30, 京都テルサ (京都府京都市)
 10. 美馬覚, 大谷知行, 田島治, 関本裕太郎, 小栗秀悟, 服部誠, 「インフレーション宇宙解明のための CMB 偏光パターン地上観測実験 GroundBIRD」, 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) 2015. 10. 8-9, 東北大学電気通信研究所 (宮城県仙台市)
 11. O. Tajima, 'Rotation of Telescope !?', Cosmology with CMB-S4 Workshop, 2015. 9. 21-22, ミシガン (米国)
 12. 小栗秀悟, 田島治, 川井正徳, 長崎岳人, Jihoon Choi, 石塚光, 富田望, 羽澄昌史, 吉田光宏, Eunil Won, 「GroundBIRD 実験用超伝導検出器 MKID の光学測定試験」, 日本物理学会秋季大会 (2015), 2015. 9. 25-28, 大阪市立大学 (大阪府大阪市)
 13. 石塚光, 池野正弘, 内田智久, 小栗秀悟, 田島治, 富田望, 「超伝導検出器 MKID の周波数多重読み出し用フロントエンド回路の開発」, 日本物理学会秋季大会 (2015), 2015. 9. 25-28, 大阪市立大学 (大阪府大阪市)
 14. 古谷野凌, 美馬覚, 成瀬雅人, 明連広昭, 大谷知行, 田島治, 田井野徹, 「Ti/TiN 積層膜を用いた力学インダクタンス検出器の性能評価」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 (2015), 2015. 9. 13-16, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)
 15. 美馬 覚, 大谷知行, ダマヤンティ R. M. トゥシャラ, 田島 治, 小栗 秀悟, 関本 裕太郎, 「CMB 偏光観測実験 GroundBIRD の MKIDs アレイの開発」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 (2015), 2015. 9. 13-16, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)
 16. 長崎岳人, 荒木健太郎, 石元裕史, 田島治, 「電波観測技術を応用した雲発生予測システムの開発-18-32GHz 帯試作機による大気水蒸気量観測試験」, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 2015. 9. 9-11, 甲南大学 岡本キャンパス (兵庫県神戸市)
 17. 田島治, 「宇宙誕生の電波観測技術を応用した革新的気象予報装置の開発」, TIA-ACCELERATE 光・量子計測シンポジウム, 2015. 9. 9, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
 18. 田島治, 「宇宙マイクロ波背景放射で迫る宇宙創世の物理」, 原子核三者若手夏の学校 2015, 2015. 8. 19, ホテルたつき (愛知県蒲郡市)
 19. T. Nagasaki, K. Araki, H. Ishimoto, O. Tajima, 'Monitoring system for atmospheric water vapor with a ground-based multi-band radiometer -- meteorological application of radio astronomy technologies,' 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2015. 7. 20-24, Grenoble (France)
 20. Satoru MIMA, Kenichi Karatsu, Kenta Takahashi, Masakazu Sekine, Osamu Tajima, Otani Chiko, Shugo Oguri, Tom Nitta, Yoshiro Kibe, Yutaro Sekimoto, 'Modulated Blackbody Polarization Source for Characterization of CMB Detectors at 0.1 K,' 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2015. 7. 20-24, Grenoble (France)
 21. S. Oguri, J. Choi, T. Damayanthi, M. Hattori, M. Hazumi, H. Ishitsuka, K. Karatsu, S. Mima, M. Minowa, T. Nagasaki, C. Otani, Y. Sekimoto, O. Tajima, N. Tomita, M. Yoshida, E. Won, 'GroundBIRD -- observation of CMB polarization at large angular scales with a combination of MKID arrays and a high-speed rotating telescope,' 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2015. 7. 20-24, Grenoble (France)
 22. H. Ishitsuka, M. Ikeno, S. Oguri, O. Tajima, N. Tomita, T. Uchida, 'A front-end electronics for MKID-array readout towards observation of CMB polarization,' 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2015. 7. 20-24, Grenoble (France)

23. N. Tomita, H. Jeong, J. Choi, H. Ishitsuka, S. Mima, T. Nagasaki, S. Oguri, O. Tajima, ``World's cheapest readout electronics for kinetic inductance detector by using RedPitaya,`` 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2015. 7. 20-24, Grenoble (France)
24. S. Mima, C. Otani, N. Tomita, O. Tajima, R. M. Damayanthi, S. Oguri, ``Development of a MKID array for measurements of the Cosmic Microwave Background (CMB) polarization,`` The 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), 2015. 7. 6-9, 名古屋大学/名古屋能楽堂 (愛知県名古屋市)
25. 田島治, 「竜巻・ゲリラ豪雨等の予兆をとらえる革新的気象予測装置」, 野村オープンイノベーションセミナー, 2015. 5. 28, 野村コンファレンスプラザ 日本橋 (東京都中央区)
26. O. Tajima, ``Radio-transparent multi-layer insulation: a novel technology enhances cooling of radiowave receivers,`` SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2014. 6. 22 - 2014. 6. 27, モントリオール (カナダ).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

- ① 名称：放射測定器
 発明者：田島治、長崎岳人、高エネルギー加速器研究機構
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願 2016-022689
 出願年月日：出願日 2016 年 2 月 9 日
 国内外の別： 国内、国外ともに出願中
- ② 名称：電波測定装置
 発明者：田島治、小栗秀悟、高エネルギー加速器研究機構
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願 2013-116571
 出願年月日：出願日 2013 年 6 月 3 日
 国内外の別： 国内、国外ともに出願中

〔その他〕

- ① 研究室ホームページ
http://cmb.kek.jp/page03_progress.html#GB
- ② 本研究成果を応用した研究の特集 web
<https://www2.kek.jp/ipns/articles/kumodes/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島治 (Osamu Tajima)
 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授
 研究者番号：80391704

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

川井正徳 (Masanori Kawai)
 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・技師
 研究者番号：50391735