

機関番号：82118

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740158

研究課題名 (和文) CMB 偏光成分の広帯域測定による原始重力波起源の B モード偏光の探索研究

研究課題名 (英文) Search for B-modes in CMB polarization with Multi-Frequency Observation

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

研究成果の概要 (和文)：

インフレーション宇宙論の決定的証拠となる宇宙背景放射(CMB)の特殊な偏光パターン「Bモード」の探索を地上観測実験 QUIET を用いて行う。40GHz 帯の観測結果から世界第2位の B モードの上限値を得た。将来的に B モードの検出を決定的なものとするには、その妨げとなるフォアグラウンド (銀河系からの前景放射) の寄与見積もることが必須条件となり、本研究では 40GHz 帯の観測領域の 1 つにフォアグラウンドの寄与を確認した。90GHz 帯データも既に取得済みであり、両周波数帯での観測を組見合わせて世界最高レベルの B モード探索が期待される。

研究成果の概要 (英文)：

“B-modes”, faint polarization pattern in Cosmic Microwave Background (CMB) is smoking gun signature of inflationary universe. We searched B-modes with QUIET experiment which is ground-based CMB polarization telescope. Based on 40GHz band data, we obtained the second best upper limits for B-modes. We also have evidence for foreground (Galaxy emission) contamination in one of our four observation fields. Understanding of the foreground contamination is the important in future. Since we already have 90GHz band observation data in addition to the 40GHz band data, we have prospects to obtain the world best B-modes limits with combined results for both bands.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：インフレーション宇宙、原始重力波、宇宙背景放射、偏光

## 1. 研究開始当初の背景

「宇宙はどのように誕生・進化したか?」という疑問は、宇宙物理学のみならず素粒子物

理学の究極テーマである。そして、宇宙はその誕生直後に指数関数的な膨張をしたと記述するインフレーション宇宙論の観測的検証が重要である。インフレーションの決定的

証拠が原始重力波であり、その痕跡は重力が「スピン2」を持つことに起因する CMB 偏光の B モードである。B モードの大きさは  $r$  というパラメータであらわされ、直接探索の上限値は当時  $r < 3$  程度、WMAP 実験ら複数の実験結果を合わせた間接的な上限値は  $r < 0.55$  (95% C.L.) であった。多くのモデルが  $r = 0.01 \sim 0.1$  と期待している。

一般的なインフレーションモデルにおいて、そのポテンシャルは  $V^{1/4} \sim 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV}$  と記述されるため、B モードの測定が  $10^{16} \text{ GeV}$  という超高エネルギーの物理と深く関わることをあらわしている。これは現在の最高エネルギー加速器 LHC の 1 兆倍もの大きさであり、究極の高エネルギー物理学の実験的研究という非常に興味深い側面を持つ。力の統一理論を研究する上でもきわめて重要なテーマである。

現在、衛星実験(WMAP や Planck) よりも B モードの測定に最適化された地上実験が米国を中心に複数あるが、B モードの検出を決定的なものとするには、その妨げとなるフォアグラウンド(銀河系からの前景放射)を精度良く見積もることが必須条件となる。

## 2. 研究の目的

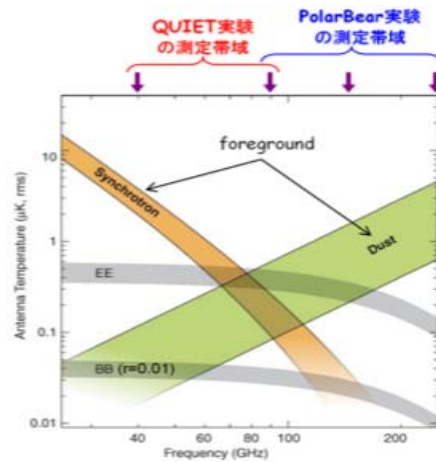
黒体放射である CMB 偏光と異なり、フォアグラウンドの寄与は周波数と共に大きく変化する。本研究は複数の周波数帯の観測結果を組み合わせることにより、フォアグラウンドの周波数依存性を理解し、その寄与が最小となる 90GHz 帯で観測において世界最良の探索感度を達成する事を目指す。

観測結果からインフレーションポテンシャルの大きさかわかるので、沢山あるモデルの中から有力なものを選別することかできる。たとえ B モードが検出できなくても E モード(既に検出されている別の偏光成分)の精密測定は可能である。その結果からインフレーションモデルに間接的制限を与えていくことも大きな学術成果となる。また、原始重力波起源の B モードだけでなく、宇宙にある物質の重力レンズ効果に起源をもつレンジング B モードの探索も(視野角の違いを使って)同時に行えるので、ニュートリノ質量の測定やダークマター、ダークエネルギーに対する情報も導きたせることも大きな意義がある。

## 3. 研究の方法

フォアグラウンドには主として2つの成分があり、周波数とともに強度が減少するシン

クロトン放射、逆に周波数と共に強度を増すダスト放射がある。本研究では主として、QUIET 実験の観測 40GHz 帯をもちいて 90GHz 帯でのシンクロトン放射の影響を見積り、最良の探索感度を達成する。

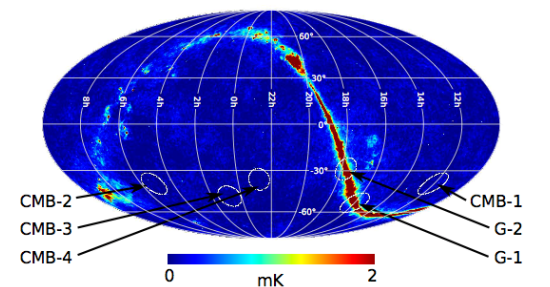


QUIET 実験はその観測を、チリのアタカマ高地(海拔 5,080m)にて、2008 年 10 月～2010 年 12 月にかけて行った。

HEMT アンプを内蔵した 検出器が偏光を記述するストークス・ハラメータの Q と U 成分を同時に測定する。観測した偏光パターンから E モード(パリティ正)と B モード(パリティ負)を識別する。



QUIET 実験では過去の観測にもとづきフォアグラウンドの寄与が小さいと予想される観測領域を 4 つ(下図 CMB-1, 2, 3, 4) 選びだし、それぞれを重点的に観測した。地球が自転するため、およそ 5 時間毎に観測領域を変えな



Patch	RA (J2000)	Dec. (J2000)	Integration Hours
CMB-1	12 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup>	-39°00'	905
CMB-2	05 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	-39°00'	703
CMB-3	00 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup>	-48°00'	837
CMB-4	22 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>	-36°00'	223
G-1	16 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	-53°00'	311
G-2	17 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup>	-28°56'	92

から24時間体制で観測をおこなう。また、それら4つの領域が観測できない時間（1日あたり2〜3時間）は銀河面研究のための観測に費やす(G-1、G-2)。上記テーブルに、それぞれの領域の座標と40GHz帯検出器による観測時間を示す。

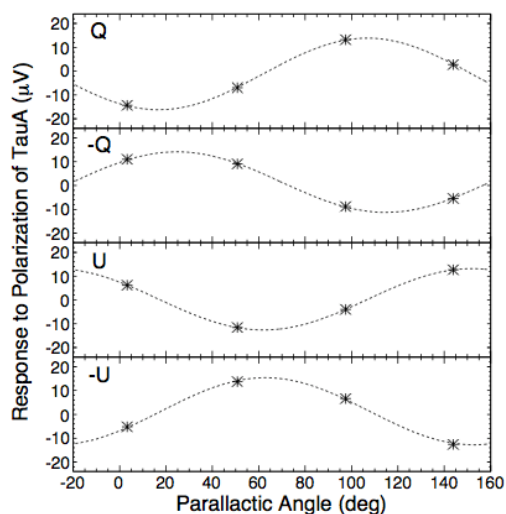
実際の観測においては、観測装置の系統誤差を理解するには、フォアグランドやCMB偏光強度の測定はできない。検出器の特性を理解するための較正を定期的に行い、環境の変化に伴う微小な特性変動を理解することが必要不可欠である。本研究では基準天体や大気の厚みの変化を利用した様々な較正手法を組み合わせ、系統誤差を最小化する。

また、研究代表者は観測開始に先立ち、QUIET実験の活動拠点となるシカゴ大学に2008年4月から2年間滞在し、さらに観測の立ち上げ（コミショニング）に際しては現地チリアタカマ高地に長期滞在して、装置較正や系統誤差の理解において中心的役割を担った。

#### 4. 研究成果

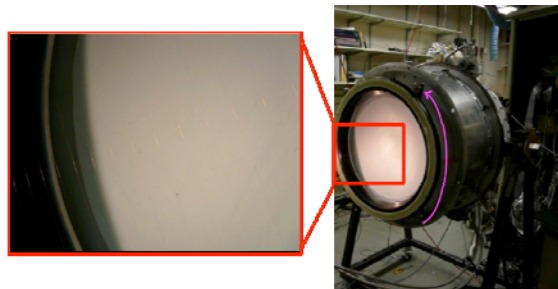
##### (1) 装置較正ストラテジーの確立

CMB偏光観測のための装置較正ストラテジーを確立した。世界最良の系統誤差を達成した（後述）。下図は基準天体（かに星雲）を使った較正結果である。検出器が基準天体を見込む角度（Parallactic Angle）を $45^\circ$ ステップでまわしながら観測することにより、検出器の偏光強度への応答性を6%、偏光角を $1.7^\circ$ の精度で較正することに成功した。

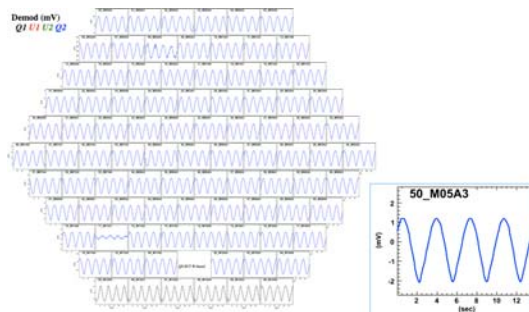


##### (2) 新しい較正装置の開発

下図のように疎密な(1.2cm 間隔)ワイヤーグリッドを検出器前で回転させる事により、冷却容器内にある90個の検出器の全てをいっぺんに較正できる装置を開発した。



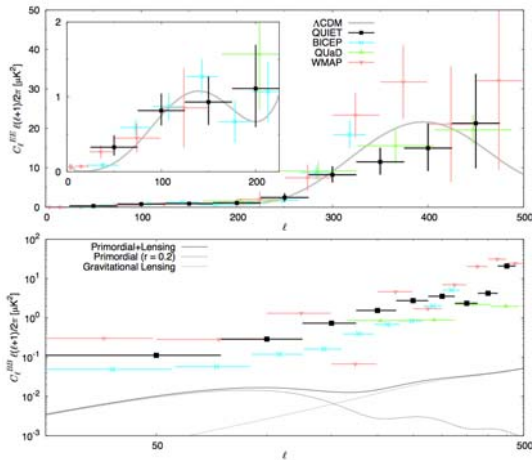
従来の基準天体を使った較正では同時に複数の検出器の較正は不可能であったが、本装置により全検出器をいっぺんに短時間で較正することが可能になった。右上図はワイヤーグリッドを7秒周期で回転させたときの偏光検出器の信号強度変化である。全90個の検出器において偏光信号を明確に確認できる（偏光の入れ替わり周期は回転周期の2倍となる）。このような較正装置は世界初の試みであった。



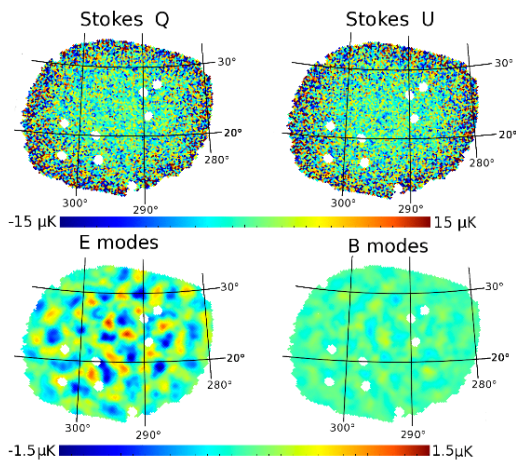
##### (3) QUIET実験の初期データによるBモード探索

総観測期間の1/3にあたる約8ヶ月の観測にもとづきBモードの探索をおこなった。残念ながら、まだBモードの発見に至らなかったが、Bモードに対して世界第二位の上限値( $r < 2.2$  @ 95% C.L.)を与えました。下図の下段はQUIET実験とその他の実験によるBモードの上限値です。現在1位のBICEP実験は2年間の観測結果( $r < 0.73$  @ 95% C.L.、本研究開始後の2010年に公表された)であるので、QUIET実験の観測装置と互角の感度

であることがわかる。今回の 40GHz 帯の結果と 90GHz 帯の観測を組見合わせるにより、世界最高レベルの B モード探索が期待される。



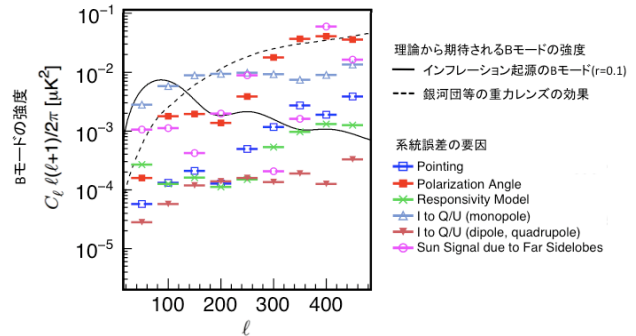
また、すでに観測されている E モードに関しては過去の実験と一致する結果をえた (上図上段のスペクトル)。下図は CMB-1 領域の偏光マップと呼ばれる 2次元分布である。E モードに対応した信号が右下図に明確に確認できる。



#### (4) 世界最良の系統誤差の達成

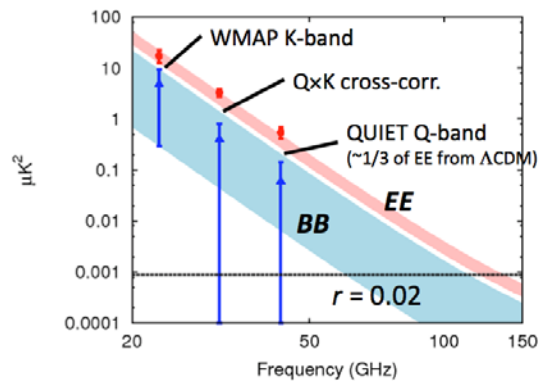
本結果で、もう一つ注目すべき点は、QUIET 実験が系統誤差に対して極めて強固であることを証明したことである。B モードは極めて微弱な信号である。近い将来、B モードを確実に発見するためには、検出器感度の向上だけでは不十分である。従来の観測実験よりも桁違いに小さな系統誤差を達成する必要がある。下図は QUIET 実験が達成した世界最良の系統誤差である。本格的な B モード探索へ向けて、十分な精度であるこ

とを証明した。また、主要な系統誤差の原因は特定されており、既に 90GHz 帯レーザでの観測に反映されている。今後の結果ではさらに優れた精度を達成する見通しである。



#### (5) 40GHz 帯におけるフォアグラウンド信号の観測

CMB-1 の領域に他の観測にもとづいたモデルから予想される E モードよりも有意に大きな信号も検出した。下図に示すように、これはさらに低い周波数帯の WMAP K-band の結果とも一致しており、90GHz 帯におけるフォアグラウンドの寄与は  $r=0.02$  程度の大きさであることを示した。



なお、本研究の成果は QUIET 共同実験の成果として Astrophysical Journal へ投稿中である。投稿中の原稿は以下の URL から参照できる <http://arxiv.org/abs/1012.3191> .

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①. 著者 : MASAYA HASEGAWA, OSAMU TAJIMA, YUJI CHINONE, MASASHI HAZUMI, KOJI ISHIDOSHIRO, and MAKOTO NAGAI,  
論文標題 : Calibration System with Cryogenically-Cooled Loads for CMB Polarization Detectors  
雑誌名 : Rev. Sci. Instrum. **82**, 054501 (2011).  
査読の有無 : 有り

[学会発表] (計 4 件)

- ①. 発表者 : 田島治  
発表標題 : 「将来の CMB 偏光実験において B モード発見を確実にするための偏光角較正装置の開発」  
学会名 : 日本物理学会  
発表年月日 : 平成 23 年 3 月 26 日  
発表場所 : 新潟大学
- ②. 発表者 : 田島治  
発表標題 : ” Search for B-modes in CMB Polarization - QUIET and other experiment ” (招待講演)  
国際会議名 : Rencontres de Moriond EW Interactions and Unified Theories  
発表年月日 : 平成 23 年 3 月 19 日  
発表場所 : イタリア・ラトユーユ
- ③. 発表者 : 田島治  
発表標題 : ” QUIET Experiment - Ground-based Probe for Inflationary Universe ”  
国際会議名 : Time and Matter  
発表年月日 : 平成 22 年 10 月 5 日  
発表場所 : モンテネグロ・ブドヴァ
- ④. 発表者 : 田島治  
発表標題 : 「QUIET 観測ストラテジーと装置較正の達成度」  
学会名 : 日本物理学会  
発表年月日 : 平成 22 年 9 月 13 日  
発表場所 : 九州工業大学
- ⑤. 発表者 : 田島治  
発表標題 : 「QUIET 実験 概要と 2008 年度現状報告」  
学会名 : 日本物理学会  
発表年月日 : 平成 21 年 3 月 27 日  
発表場所 : 立教大学

[その他]

ホームページ等

[http://quiet.kek.jp/public/News/FirstResult/quiet\\_1st\\_results.html](http://quiet.kek.jp/public/News/FirstResult/quiet_1st_results.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 治 ( TAJIMA OSAMU )

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

( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :