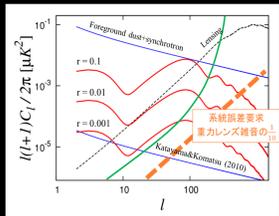


LiteBIRD 系統誤差評価の現状

LiteBIRD ワーキンググループ

小栗秀悟、木村誠宏、佐藤伸明、鈴木敏一、田島治、茅根裕司、都丸隆行、永田竜、羽澄昌史、長谷川雅也、服部香里、森井秀樹、山口博史、吉田光宏(KEK) 秋葉祥希、石塚光、井上優貴、瀬川優子、渡辺広記(総研大) 高倉理(大阪大) 宇都宮真、河野功、坂井真一郎、佐藤洋一、篠崎慶亮、杉田寛之、竹井洋、西城邦俊、西堀俊幸、野田篤司、福家英之、松原英雄、松村知岳、満田和久、山崎典子、吉田哲也、四元和彦、和田武彦(JAXA) 石野宏和、樹林敦子、岐部佳朗、山田要介(岡山大) William Holzapfel, Adrian Lee, Paul Richards, Aritoki Suzuki, Yasuto Hori(UC Berkeley) Matt Dobbs(McGill U.) Julian Borrill(LBNL) 永井誠(筑波大) 片山伸彦、菅井肇、西野玄記(Kavli IPMU) 中村正吾、夏目浩太、水上邦義、入江郁也、藤野琢郎、山下徹(横浜国大) 井上将徳、岡田望、小川英夫、木村公洋、高津湊(大阪府大) 高田卓(核融合研) 小松英一郎(MPA) 石徹白晃治、服部誠、森嶋隆裕(東北大) 大田泉(甲南大) 成瀬雅人(埼玉大) 並河俊弥(Stanford U.) 鹿島伸悟、唐津謙一、関本裕太郎、野口卓(国立天文台) 鶴澤佳徳(NICT) 大谷知行、古賀健祐、美馬覚(理研)

研究の背景

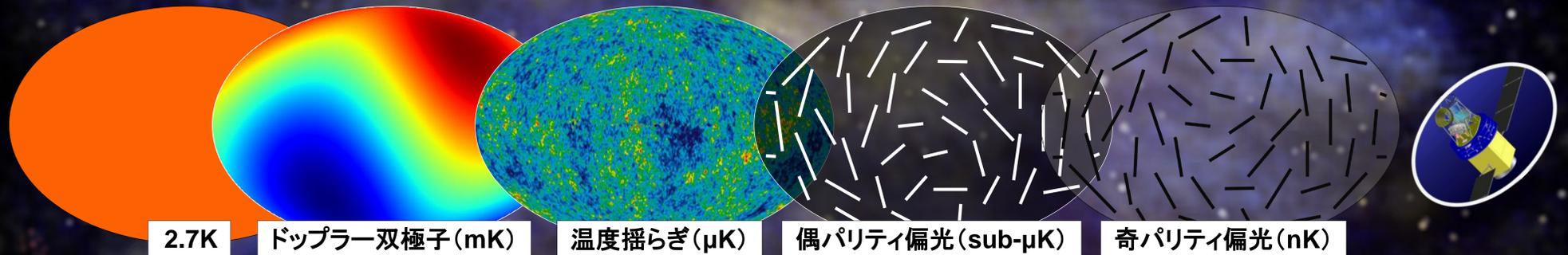
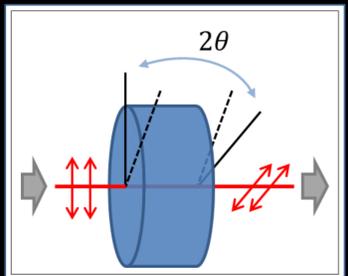


原始重力波の存在はインフレーション理論に通有の予言であり、その波の強度は「何時インフレーションが起こったか」の指標である。CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD は、偏光地図の奇パリティ成分に刻印された原始重力波の信号検出を目指して現在進行中の計画である。

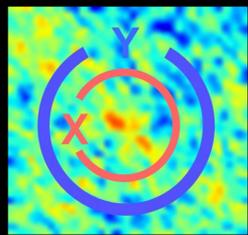
微弱な原始重力波信号の検出に向けた取り組みにおいては、高感度の装置を開発するだけでなく、徹底した系統誤差の理解と克服が必要不可欠な要素である。中でも、無偏光成分に由来する偽偏光信号は大きな系統誤差源であり、これを効果的に分離することは原始重力波信号の検出において極めて重要であると考えられている。今回の発表では、光学変調装置を使った偽偏光の分離に関する議論を中心に紹介する。

CMB の信号は、2.7K の等方成分、太陽系の運動に由来するドップラー双極子 (mK)、宇宙の密度揺らぎに起因する温度非等方性 (μK) および偶パリティ偏光 (sub- μK)、原始重力波や重力レンズ効果に起因する奇パリティ偏光 (nK) からなる。偏光はアンテナの向きを変えた時の微弱な信号強度の変化として同定されるが、CMB の偏光度は 10^{-7} 程度であり、奇パリティ偏光に限って言えば更にその数十分の一である。偏光を正確に測定するためには、それ以外の成分を精度良く分離することが要求される。

LiteBIRD では偽偏光を分離するための変調器として、連続回転半波長板が検討されている。直線偏光した入射光が半波長板を透過する際、光学軸と偏光面のなす角度 θ の2倍、すなわち 2θ だけ回転を受ける。半波長板を連続的に回転させることで、入射光の偏光成分のみが変調され、変動をしない無偏光成分由来の系統誤差から分離される。

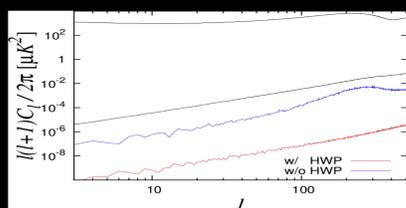


ビーム径ミスマッチ



差分偏光計の個々の検出器に対応するビームの振る舞いにミスマッチが存在すると、相対較正誤差と同様に偽の偏光が生じてしまう。温度分布の二次までの効果として、ビーム指向のズレ、ビーム径のズレ、ビーム楕円率のズレが挙げられる。図は縦方向の強度を測る検出器と、横方向の強度を測る検出器でビーム径に差があった場合を例示したものの。

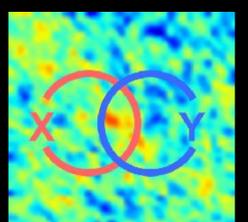
温度揺らぎ(無偏光成分)の Hot Spot を観測した際、相対的に横方向の強度が勝ってしまうため、偽の偏光が観測されてしまう。



図は時々刻々のビーム径が1% バイアスされた場合の系統誤差。大角度相関に対しては比較的害の少ない形状であり LiteBIRD の観測戦略には影響しにくいと言える。

半波長板による変調で偽偏光がランダム化された結果、B-mode のパワースペクトルにおける系統誤差が約3桁ほど低減している。これはピクセル毎におよそ1000サンプルを計上している事実と符合している。

ビーム指向ミスマッチ



検出器毎のビームの形状が全く同じであっても指向方向がずれることによって CMB の無偏光成分の非一様性が差分偏光計の残差となり、偽の偏光信号を生じる。この効果は望遠鏡を正確に180度回転してサンプリングし直すことで相殺することができるものの、要求値の現状は数秒角程度である。

図は縦方向の強度を測る検出器と、横方向の強度を測る検出器でビーム指向方向がずれていた場合を例示したものの。温度勾配によって横方向の強度が勝ってしまい、偽偏光が観測されてしまう。

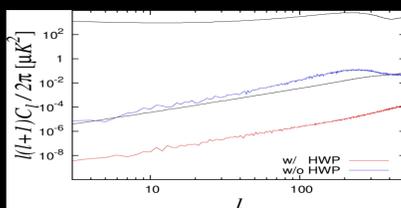
相対ゲインミスマッチ

検出器ペアのゲインのミスマッチに由来する系統誤差は大角度の温度揺らぎと結合するため、LiteBIRD の観測戦略の妨げとなる最大の系統誤差源の一つであると考えられている。望遠鏡を回転しながら空の各ピクセルを等方的に繰り返し掃くことである程度は軽減されるが、依然として大角度相関に大きな汚染が残る。これは半波長板による偽偏光の分離を強く要請する理由の一つとなっている。

$$\frac{2}{1 - \langle e^{i(4\theta+8\omega t)} \rangle \langle e^{-i(4\theta+8\omega t)} \rangle} \times [\Delta g e^{\pm i(2\theta+4\omega t)} - \Delta g e^{\mp i(2\theta+4\omega t)}] \langle e^{\pm i(4\theta+8\omega t)} \rangle T$$

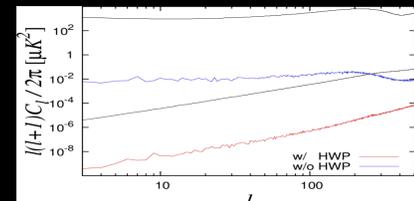
Δg はゲインのミスマッチ、 θ は検出器の向き、 ω は半波長板の回転角周波数、 T は温度揺らぎ。

Effects	Requirement w/o HWP	Requirement w/ HWP
Diff. gain calibration	0.002 %	3 %
Diff. beam width	0.8 % @ ell=2 0.2 % @ ell=200	10 %
Diff. beam pointing	3 arcsec.	2 arcmin.
Diff. beam ellipticity	7 % @ ell=2 0.04 % @ ell=300	10 %



図は時々刻々のビーム指向方向が1分角バイアスされた場合の系統誤差。スペクトルの形状はビーム径のミスマッチの場合と似た振る舞いを見せる。

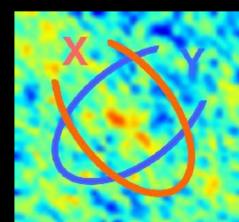
半波長板による変調も、ビーム径のミスマッチの場合と同様の効果を与えている。系統誤差由来の B-mode のパワーが約3桁減少し、指向のミスマッチに対する要求値は(ズレの方向に依らず)2分角まで許容される見込みとなる。



図は時々刻々の検出器の較正が、相対的に1% バイアスされていた場合の系統誤差を示したものの。無変調の場合では大角度相関が系統誤差に圧倒されることが窺える。

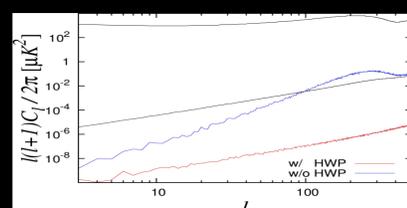
偽偏光の漏れこみの中でも、相対ゲインミスマッチは半波長板による変調の恩恵を最も強く受ける。変調によってサンプリング毎の偽偏光が疑似的にランダムになり、系統誤差の振る舞いが白色雑音的に変質することによって、大角度相関における汚染が劇的に改善される。

ビーム楕円率ミスマッチ



検出器対のビーム楕円率のミスマッチに由来する偽偏光は、取り分け扱いの難しい系統誤差である。これは温度揺らぎの局所四重極と結合することで偽偏光を生み出すが、局所四重極モーメントは真の偏光と同じ回転対称性を保持しているため、望遠鏡の回転では相殺することができない。

図は縦方向の強度を測る検出器と、横方向の強度を測る検出器でビームの長軸がずれていた場合を例示したものの。この図のようにビームの四重極の向きが検出器の感度の向きと45度をなす場合は、生じる偽偏光が全て B-mode となる。



図は時々刻々のビーム楕円率が1% バイアスされた場合の系統誤差。無変調の場合、小角度の温度揺らぎと強く結合し、1度角にピークを作っている。

ビーム楕円率のミスマッチに由来する偽偏光は望遠鏡の回転では軽減できず、変調器を用いて処理するほかない。半波長板による変調は、他のビームミスマッチの場合と同様に偽偏光信号をランダム化して大きさを減らす、また一方でスペクトル形状を平坦にする。