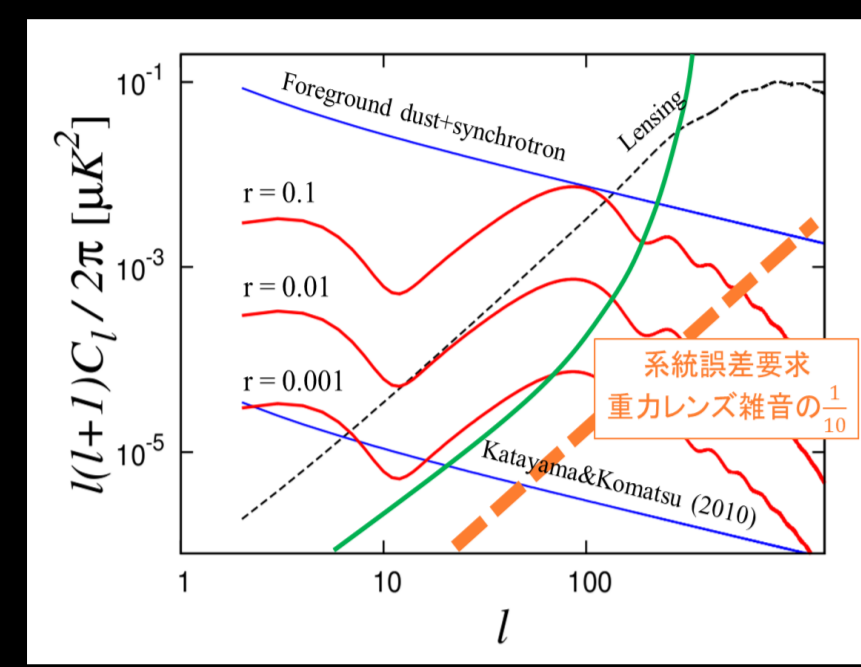


LiteBIRD 解析パイプラインの構築と 系統誤差シミュレーション

石野宏和(岡山大学)、永田竜(KEK) 他 LiteBIRD ワーキンググループ

研究の背景



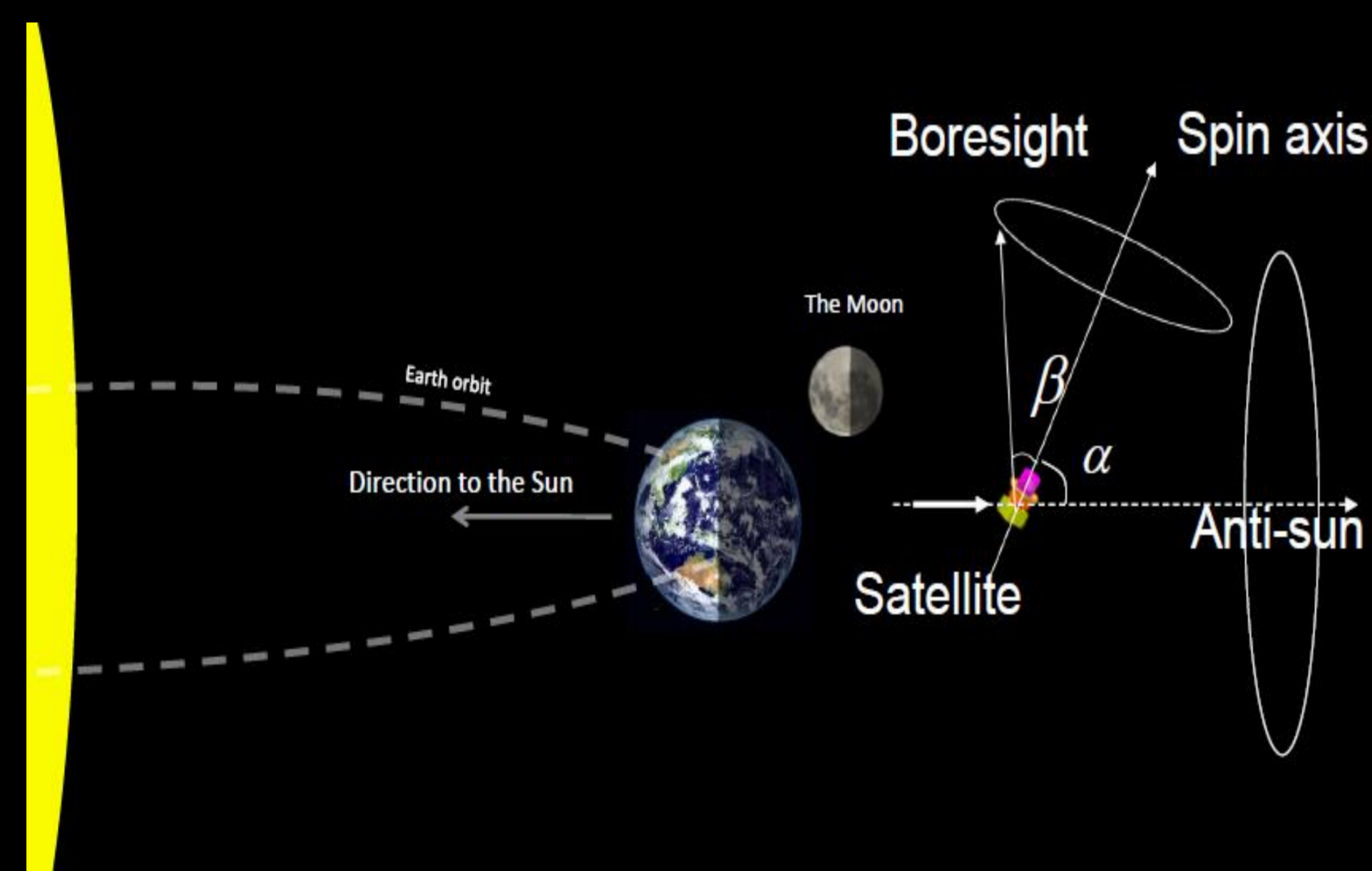
原始重力波の存在はインフレーション理論に通有の予言であり、その波の強度は「何時インフレーションが起こったか」の指標である。CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD は、偏光地図のBモード奇パリティ成分に刻印された原始重力波の信号検出を目的とし、2020年代前半の打ち上げを目指す計画である。

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である。検討グループでは、重力波の作る揺らぎのシミュレーションから観測/データ解析までを包括的に取り扱うソフトウェアの構築が進んでおり、一貫した枠組みの中で系統誤差の評価を行う体制ができつつある。

二つのアプローチから系統誤差の評価を行っている。一つは、End-to-End シミュレーションを用いた評価で、もう一方は、解析的に評価する方法である。

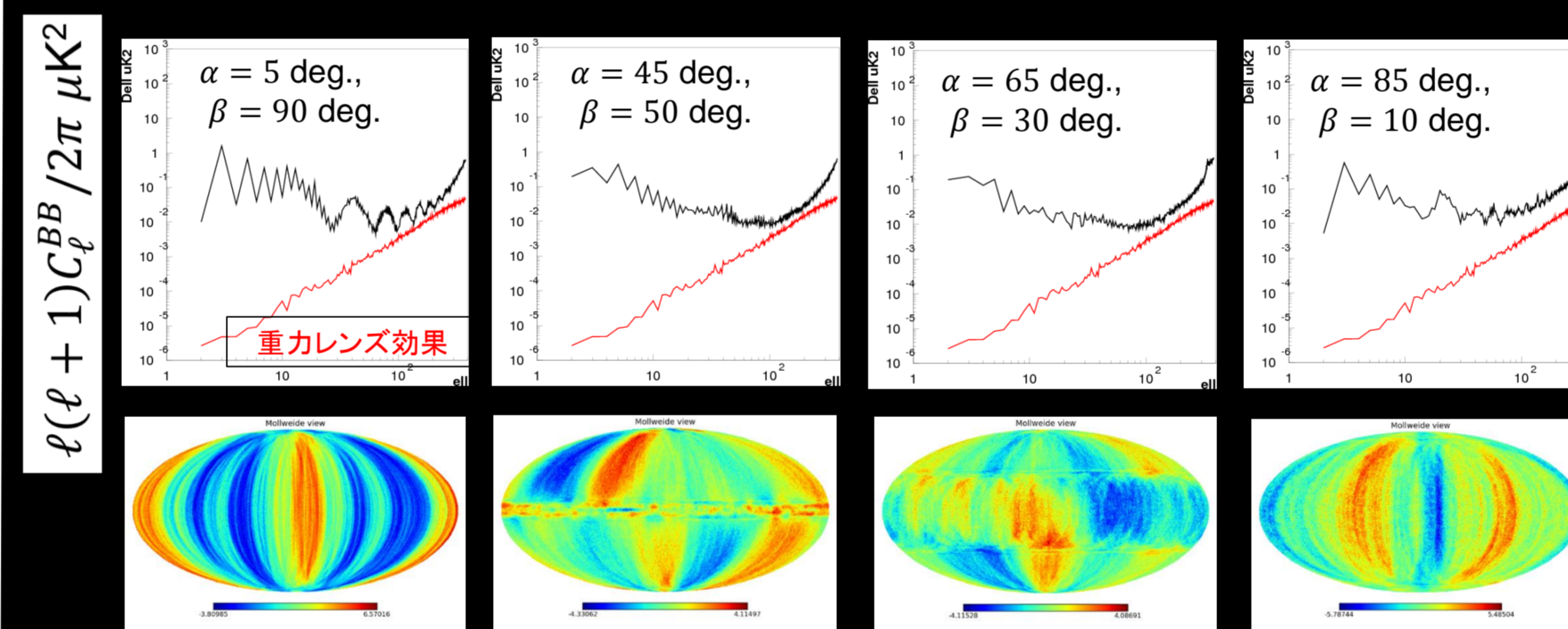
シミュレーションによる評価

シミュレーションでは、焦点面検出器において、337個の検出器ピクセルを配置し、光学系から決まるビーム間隔とビーム幅をとり入れる。一つの検出器ピクセルには、直交する片偏波検出器ペアを準備し、空に投影する。空に固定されたある座標系において、検出器の片偏波方向と座標軸方向の間の角度を計算する。LiteBIRDのポアサイト(視線方向)は、歳差運動とスピン運動の組み合わせによって決まる。太陽・地球L2においてLiteBIRDが全天スキャンする方法を下に図示する。系統誤差の評価において、決定する事項は、全天スキャン方法・半波長板の必要性・その他の衛星設計要求を決定することである。



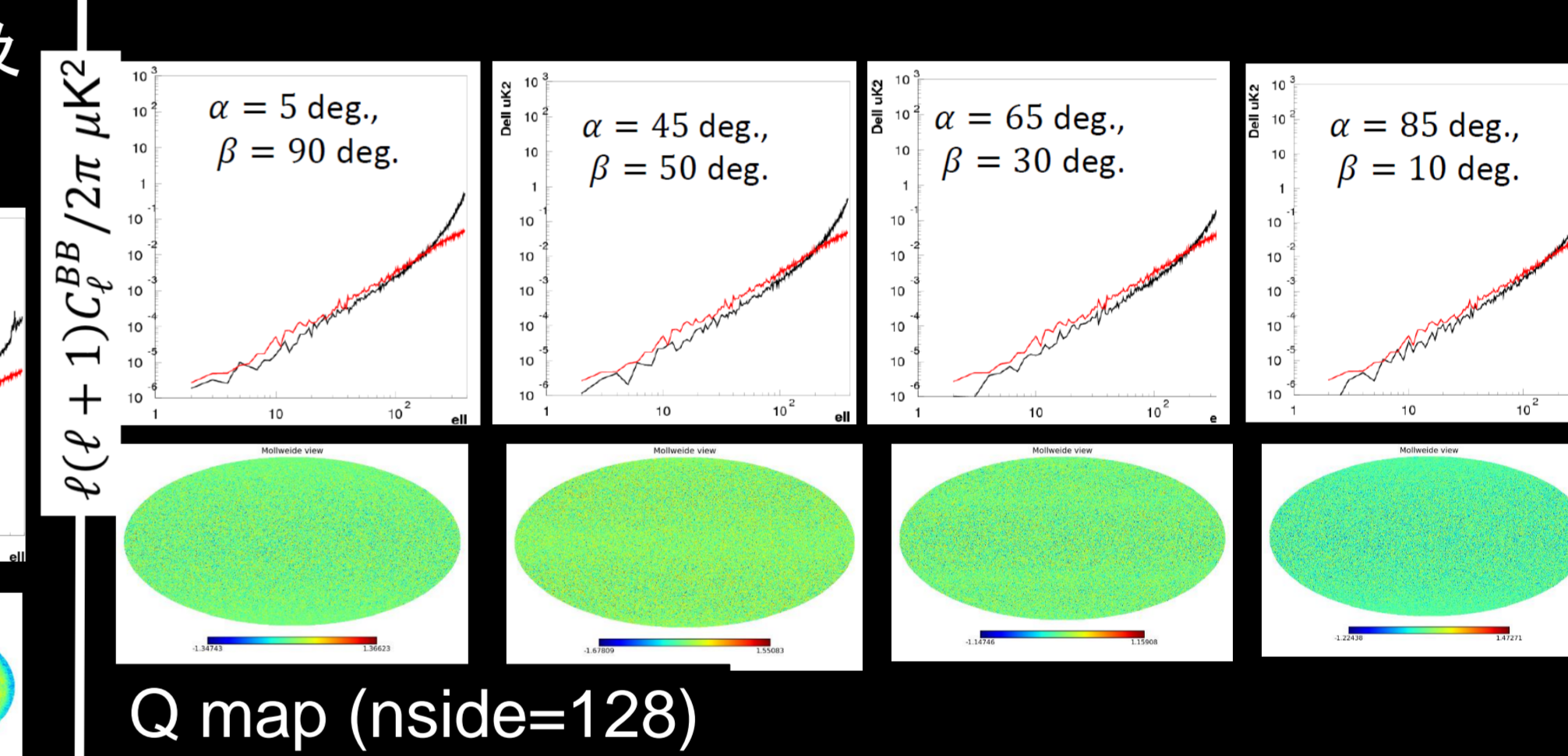
系統誤差の要因には多種あるが、最も影響力がある一つに 1/f 雑音がある。この雑音は、低い周波数ほどパワーが大きくなるために、大角度相関(小さいl)において大きな影響力を持つ。この影響がどの程度あり、全天スキャンとどのように相関があるのかを、シミュレーションを用いて調べた。

シミュレーションにおいて、3年間分全天スキャンし、10Hzのサンプリングで時系列データを生成する。それを全天マップに焼き直し、スピン球面調和関数を用いて展開することにより、Bモードパワースペクトルを算出する。今回の解析では、時系列データから全天マップにする際には、ノイズの相関行列は対角(白色雑音のみ)があると仮定して、1/f雑音が結果にどのように影響を及ぼすのかを調べた。結果を下記に示す。



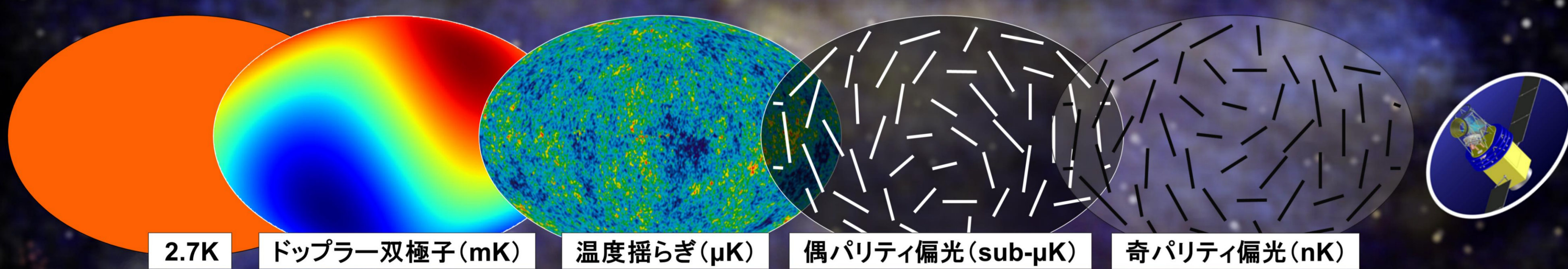
1/f 雑音の影響は全天スキャン方法にあまり寄らないが、大角度相関(小l)において、白色雑音のケース(右図)よりも大きな影響を及ぼすことが分かった。

1/f 雑音の影響を減らすために、半波長板(HWP)を入れたシミュレーションを走らせた。HWPは、入力信号の偏光を変調する役割を持つ。シミュレーションにおいては、入力ストークスパラメータ(l, Q, U)に3x3の行列をかけることにより、HWPを表現する。偏光が変調されるので、片偏波一つの検出器の時系列データの差を取ることで、偏光成分のみを抽出できる。この方法により、低周波のオフセットの揺れを除くことができ、1/f雑音の影響を1次のオーダーで除去できることが予想される。実際にシミュレーションを走らせ、以下のパワースペクトルを得た。

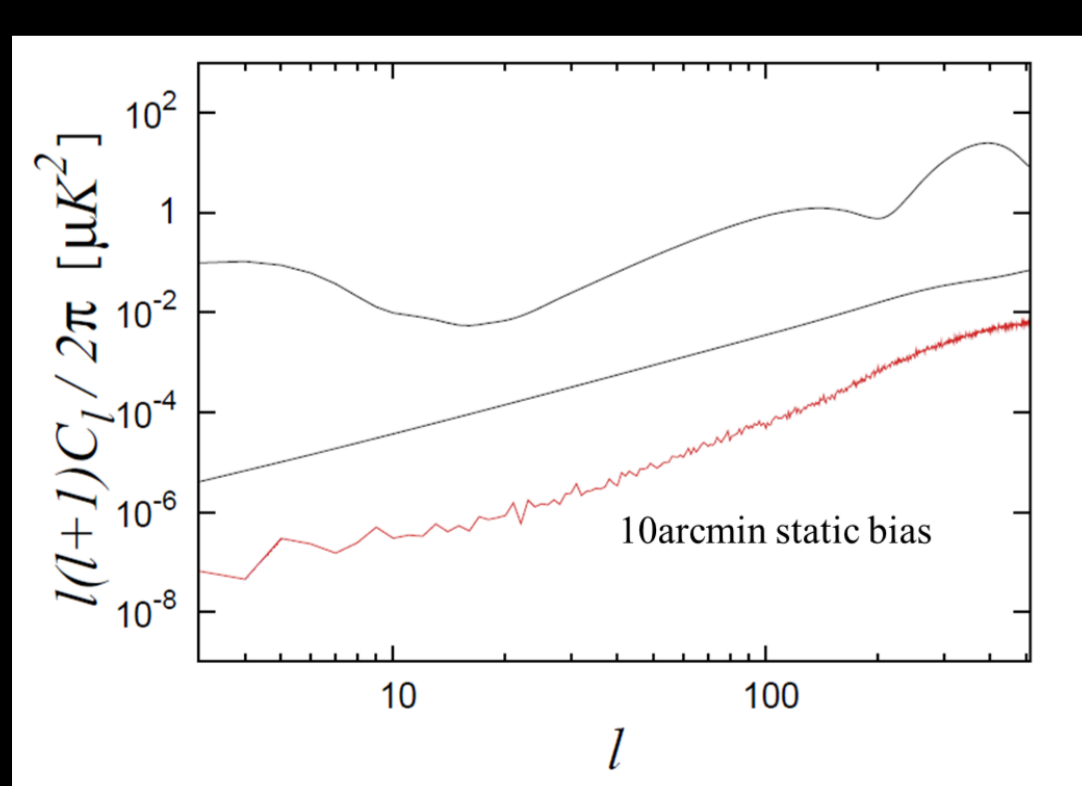


HWPとデータサンプルの時間差を取ることで、1/f 雑音を落とすことができ、白色雑音とほぼ等価にすることができた。一方で、HWP自身に由来する系統誤差が存在し、その効果をと入れることが今後の課題である。また、それが全天スキャン方法と結合する可能性も指摘されており、それを評価するコードを開発中である。

解析的な方法による評価



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 (uK) および偶パリティ偏光 (sub-uK)、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。CMB 偏光の精密測定には、それ以外の成分を精度良く分離することが要求される。

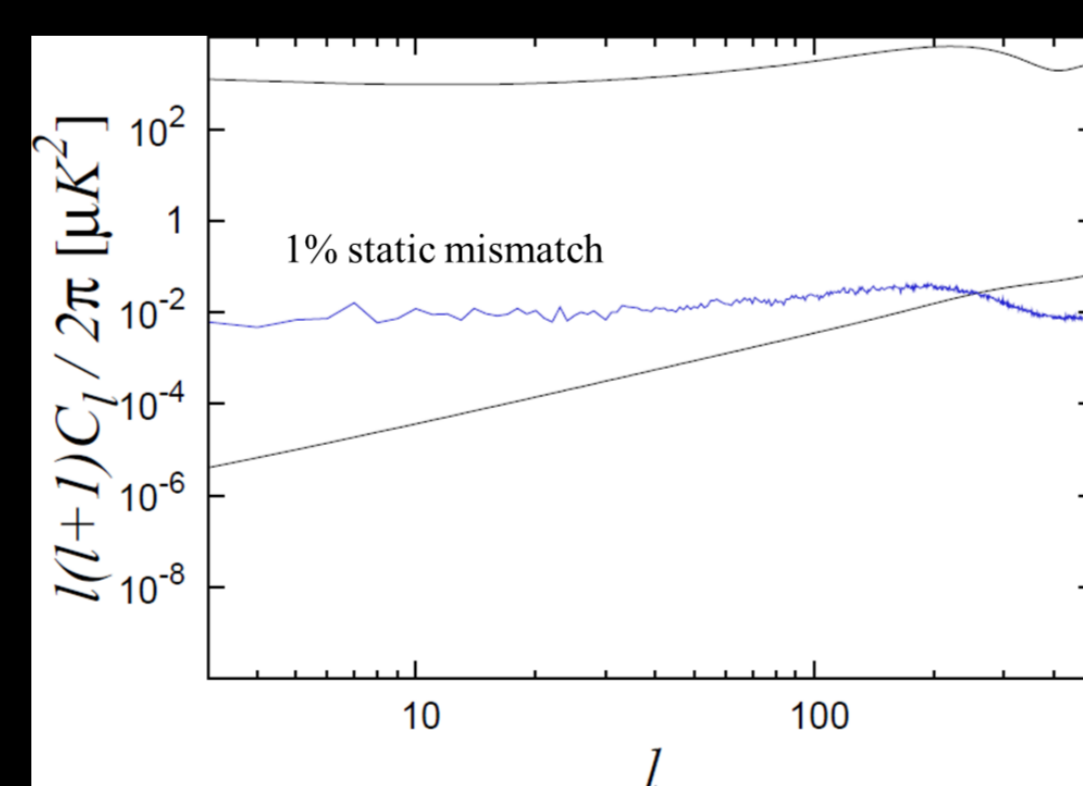
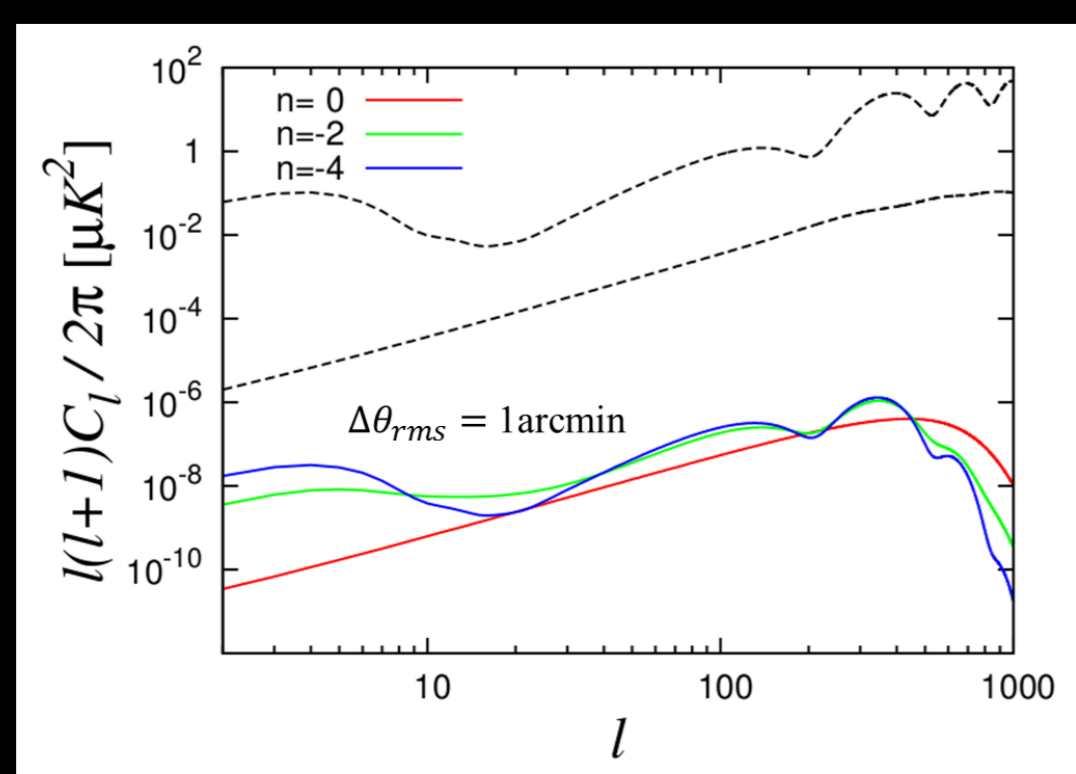


偏光地図の位置精度は衛星の指向方向決定精度と対応している。位置の不定性による空間分布の歪曲が偽の奇パリティ成分を生じてしまうことは重力波検出において大きな障害となる。これは形式的に光路の屈折と同等のものであり、重力レンズ効果と相似した系統誤差をもたらす。

指向決定精度への要求は数分角が見込まれているが、スタートラッカーによる姿勢決定や惑星を用いた指向較正の評価から十分達成可能な範囲内であることが確認されている。

一方、偏光角の誤差は偏光分布の偶パリティパターンを奇パリティへと変換する。大きな偶パリティ成分を持つ CMB の偏光地図から奇パリティ成分を検出するには、偏光角の精密測定が要求される。

偏光角のバイアスに対する較正精度としては、1 分角が要求されている。これは偏光地図の偶パリティパターンと奇パリティパターンの間の相関を評価することで、解析手続において補正可能な精度であることが知られている。

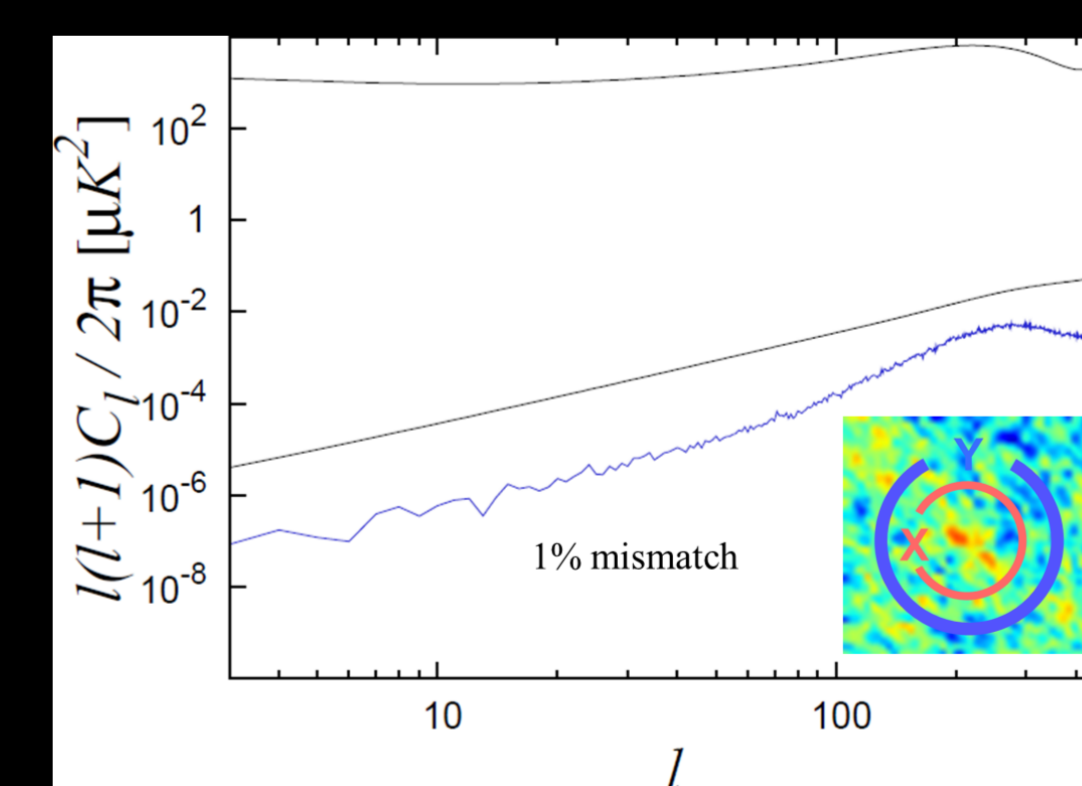


LiteBIRD に搭載される検出器は直線偏光の強度に感度を持ったものであり、直行する二つの偏光計に生じる信号の差を取ることで偏光が測定される。そのため検出器ペアの較正にミスマッチが生じると、無偏光な光源から偽の偏光を観測してしまう。

CMB の無偏光成分(温度揺らぎ)は、奇パリティ偏光と比べて何桁も大きな信号であるため、較正のミスマッチは最大の系統誤差源の一つであると考えられている。

検出器ゲインの相対較正誤差に由来する偽偏光の効果は、温度揺らぎの持つ空間的な相関を継承するため、原始重力波の信号が大きい大角度の相関を強く汚染する。

一方、光学特性のミスマッチは温度揺らぎの局所的な構造と結合して偽偏光を生成する。空間分布の二次までの効果として、ビーム指向のミスマッチ、ビーム径のミスマッチ、ビーム楕円率のミスマッチによるものが知られている。



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の2倍だけ回転を受ける。これによって入射光の偏光成分のみが変調され、無偏光成分由来の系統誤差から分離される。

先述の4種の偽偏光はいずれも半波長板による変調によって系統誤差から分離されるが、中でも相対ゲインのミスマッチに由来するものは、半波長板による変調の恩恵を最も強く受ける。サンプリング毎の偽偏光の残差が擬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。

また、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ないが、半波長板による変調によって、他のビームミスマッチの場合と同様に偽偏光信号を相殺してその大きさを強く抑制することが可能である。