LiteBIRDにおける解析プログラムの開発と1/fノイズ・宇宙線グリッチによる影響

石野宏和（岡山大学）

松村知岳（JAXA/ISAS)

羽澄昌史、永田竜（高エネ研）

片山伸彦、菅井肇（Kavli IPMU)

他LiteBIRD WG

2015年9月25日

日本物理学会秋季大会

イントロダクション

- LiteBIRD :
  - 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光を精密測定する科学衛星
  - インフレーション起源の原始重力波の強度を究極の感度で測定
  - 2020年代前半での打ち上げを目指す
- 究極の感度を達成するために必要な評価・研究項目
  - 統計精度:
    - 2022の超伝導検出器素子で3年間の全天観測で2μK arcminを達成
  - 前景放射除去:
    - 25aSK-3での山下さん（横国大）の講演
  - 系統誤差:
    - KEK永田さん（KEK）による解析的な見積もり: 過去の学会で講演
    - 解析的に評価が難しい系統誤差→シミュレーション等による見積もりが必要

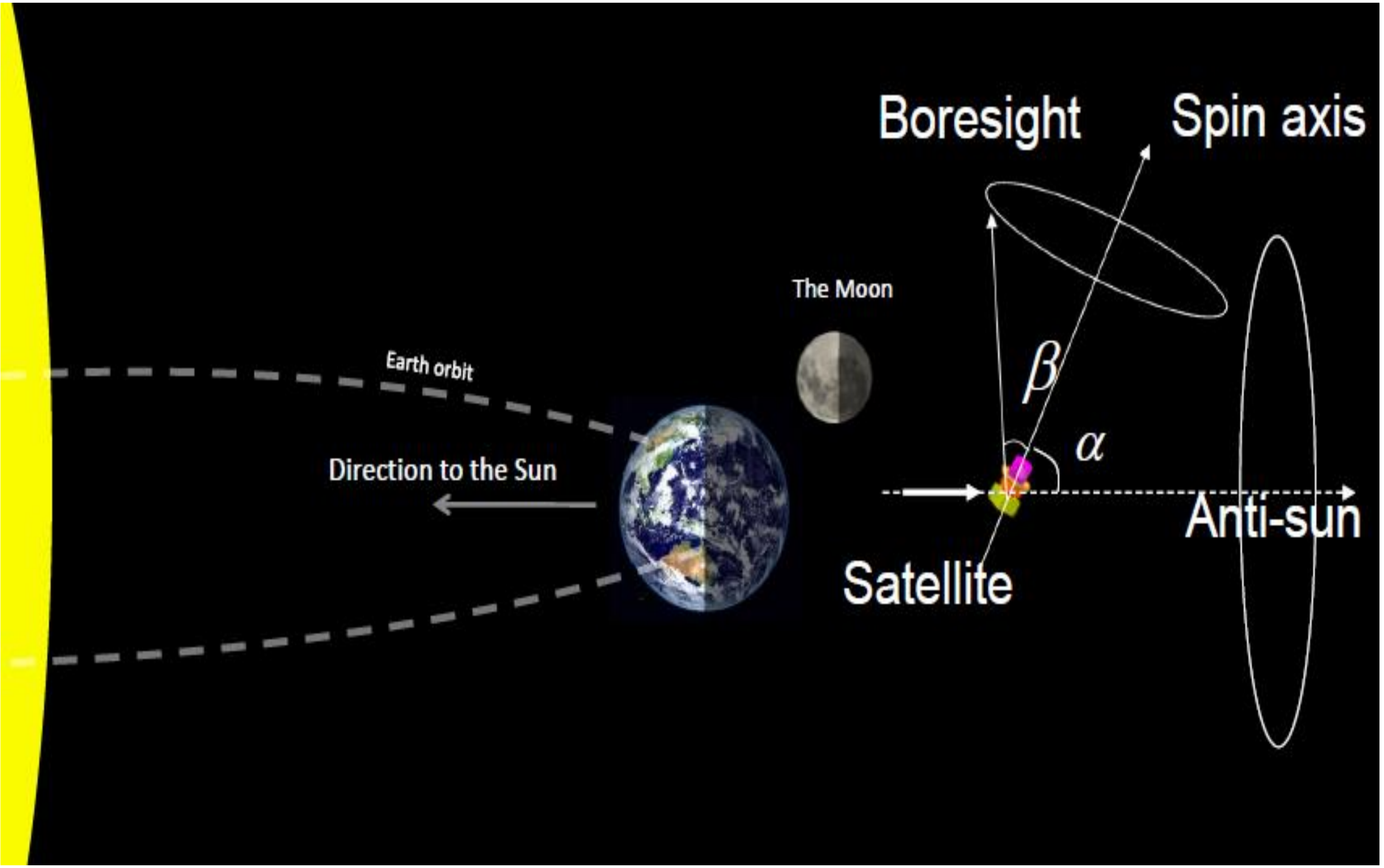
シミュレーション等による評価項目

- 1/fノイズの影響
  - Ｂモードパワースペクトル
  - スキャン依存性（α、βの依存性）
  - HWP（半波長板）の有効性

今回の発表

- 宇宙線の影響
  - 検出器のグリッチ信号
  - 焦点面検出器全体の温度への影響
  - 放射線耐性
    - 放射線医学総合研究所の重粒子加速器HIMACによる陽子ビーム照射試験
    - 光学系部材･検出器･読み出し回路の性能変化の測定
- 較正
  - 検出器ゲインの測定精度と、その不定性による系統誤差
  - ビーム形状の測定精度

LiteBIRDの全天スキャンの方法



- ラグランジュ点L2において3年間観測
- 歳差運動とスピンの組み合わせ
  - クロスリンクを小さくする
  - 歳差軸角度α=65°
  - 歳差周期：90分
  - スピン軸角度β＝30°
  - スピン周期：10分(w/ HWP)

LiteBIRDのシミュレーション

- 検出器素子の空の掃引
  - 衛星の歳差運動・スピン運動により、焦点面検出器の各検出器素子のビームの空の位置を計算
  - 各検出器素子は方偏波のみ検出
    - 空における偏波の方向も同時に計算
  - 各検出器は3色同時測定なので、検出器総数は2022/3 = 674個
  - ２つ検出器のペアで同じ空の位置を両偏波測定
- 約10Hzでデータサンプリング
  - CMBの温度・偏光全天マップから検出器の出力の時系列データを生成
  - 同時にノイズも上乗せする
    - ホワイトノイズレベル　= NET x sqrt(f_sampling) [μK]、 NET=50μK sqrt(s)と仮定

シミュレーション時系列データの解析方法(1)

$$
\begin{aligned}
p &= \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}Q\cos 2\psi + \frac{1}{2}U\sin 2\psi + n \\
&= \boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{s} + n,
\end{aligned}
$$

ある空の位置でのCMBの温度I と偏光Q/Uが与えられたときの検出器の出力p。
n は検出器ノイズ。<(2n)^2> ～ NET^{2}であることに注意。ψは、偏波アンテナの方向。

$$\boldsymbol{w}^t = 1/2(1,\ \cos 2\psi,\ \sin 2\psi) \quad \boldsymbol{s}^t = (I,\ Q,\ U)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sigma_i^2}\left(p_i - \boldsymbol{w}_i\cdot\boldsymbol{s}\right)^2$$

ノイズはホワイトノイズだと仮定して、χ^2を与え、$\boldsymbol{s}$ について偏微分が0のときの解を求める。

シミュレーション時系列データの解析方法(1)

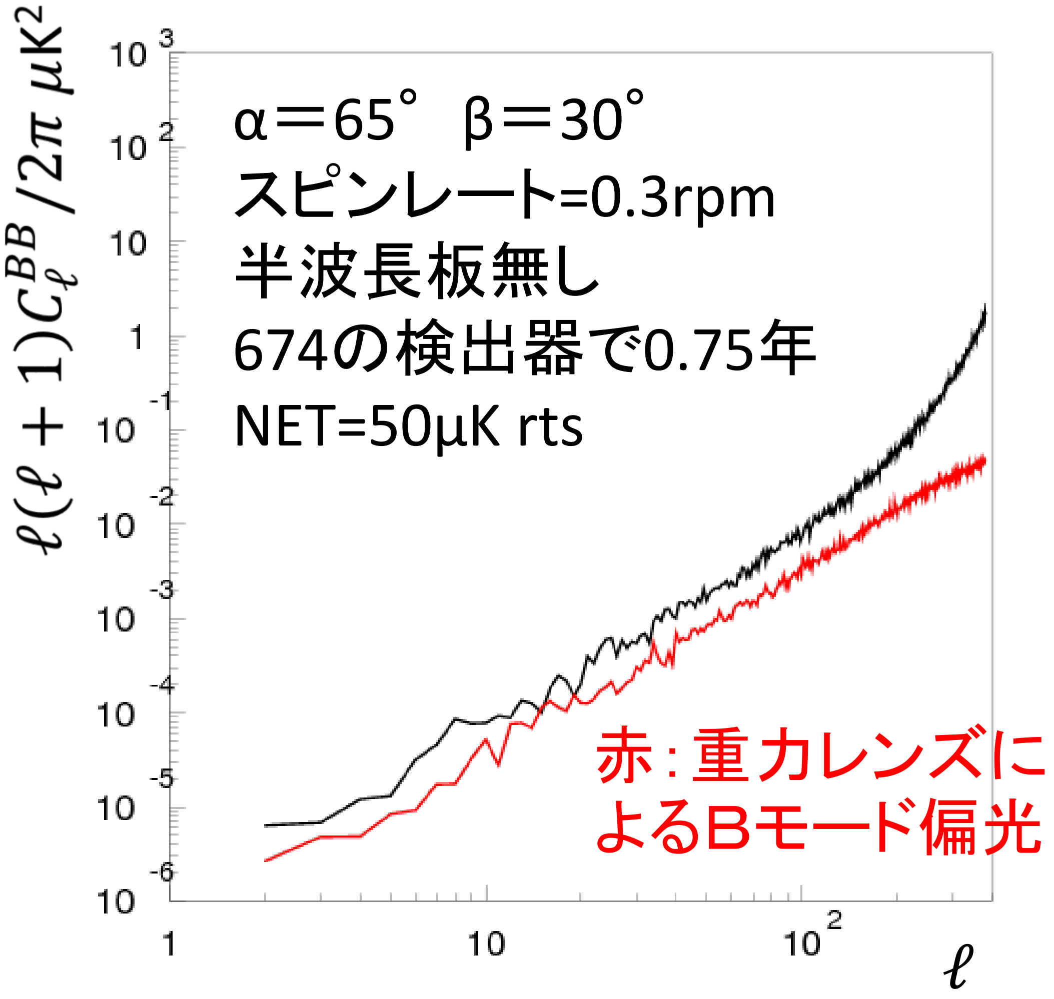
$$\hat{\boldsymbol{s}} = \left(\sum_i \boldsymbol{W}_i\right)^{-1} \sum_i p_i \boldsymbol{w}_i .$$

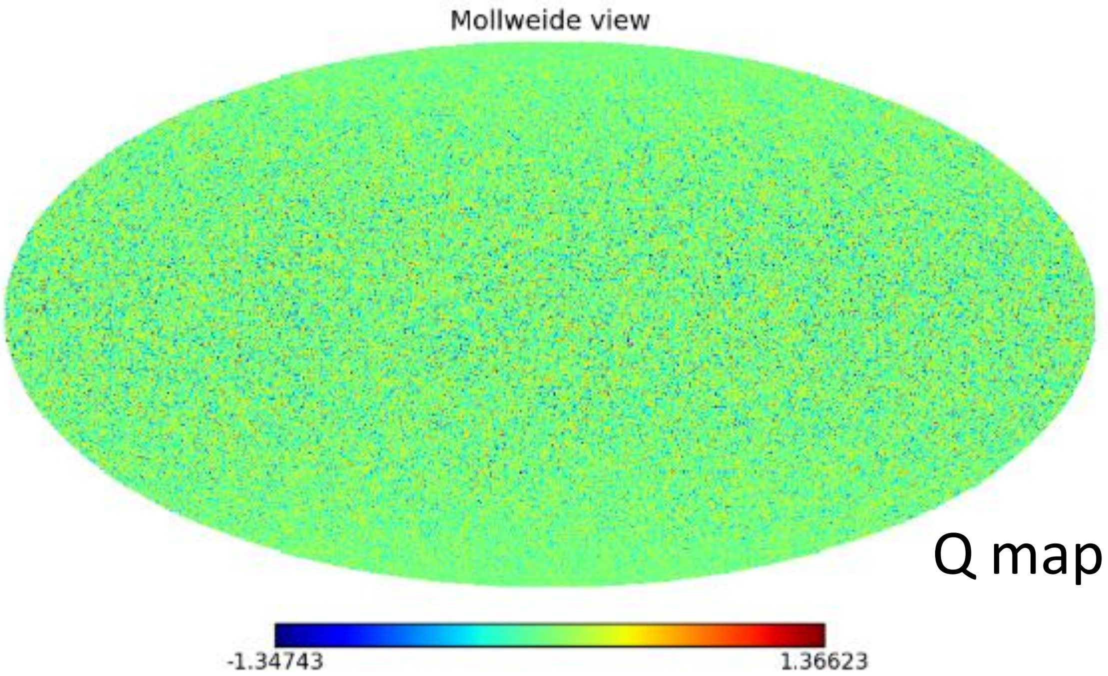
$$\sum_i p_i \boldsymbol{w}_i = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} \sum_i p_i \\ \sum_i p_i \cos 2\psi_i \\ \sum_i p_i \sin 2\psi_i \end{pmatrix}$$

$$\sum_i \boldsymbol{W}_i = \frac{1}{4}\begin{pmatrix} \sum_i & \sum_i \cos 2\psi_i & \sum_i \sin 2\psi_i \\ \sum_i \cos 2\psi_i & \sum_i \cos^2 2\psi_i & \sum_i \cos 2\psi_i \sin 2\psi_i \\ \sum_i \sin 2\psi_i & \sum_i \cos 2\psi_i \sin 2\psi_i & \sum_i \sin^2 2\psi_i \end{pmatrix}$$

各空の位置での(*Q, U*)の情報から、全天にわたるスピン球面調和関数による展開により、C_l^{BB}を計算する。

ホワイトノイズのみの結果





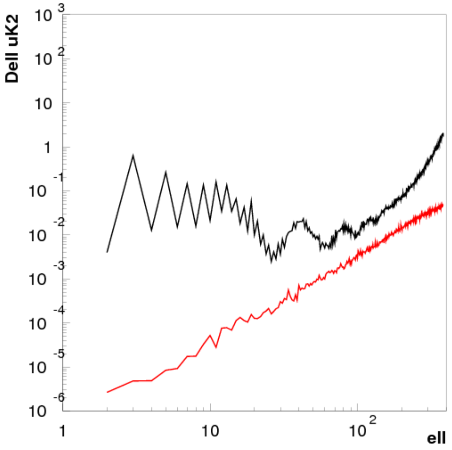
ホワイトノイズのみによる全天マップ

Healpixでnside=128

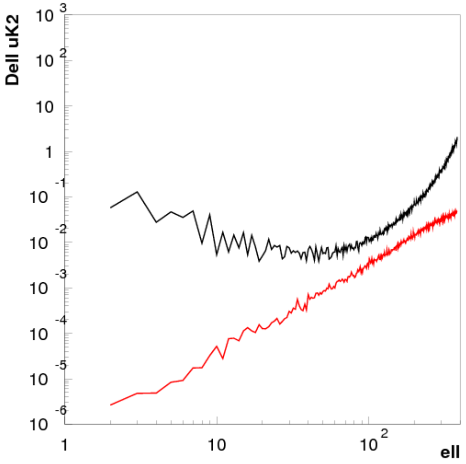
1/f ノイズの場合

fknee=0.01Hz, sigma=50uK rts, spin=0.3rpm, w/o HWP,
basic method, 0.75 years.

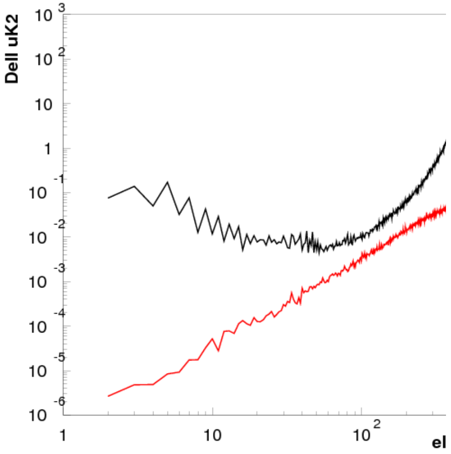
black: LB simulation
red: lensing



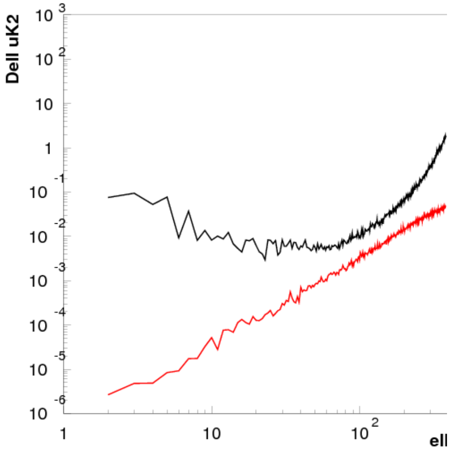
alpha=5, beta=90



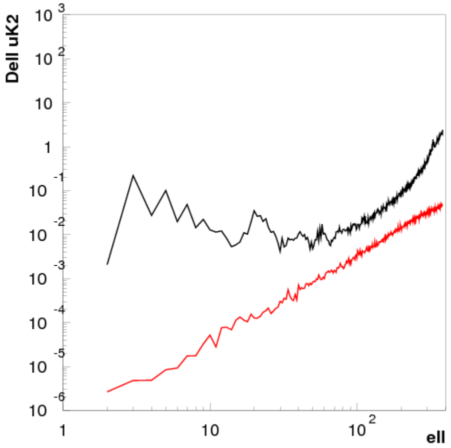
alpha=25, beta=70



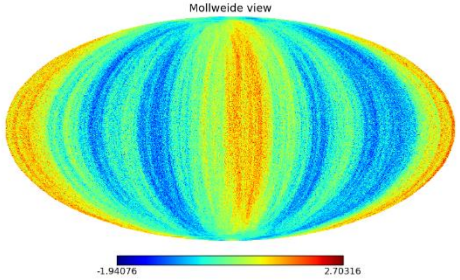
alpha=45, beta=50

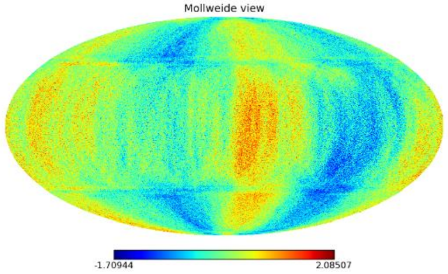


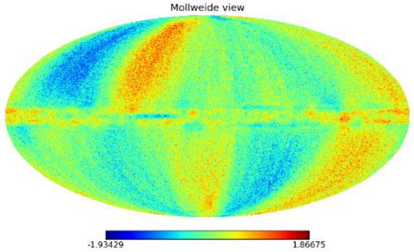
alpha=65, beta=30

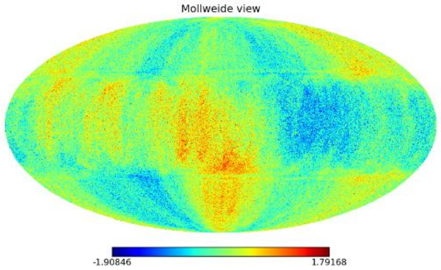


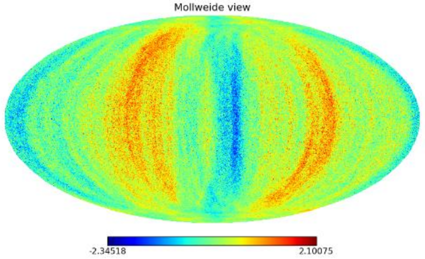
alpha=85, beta=10











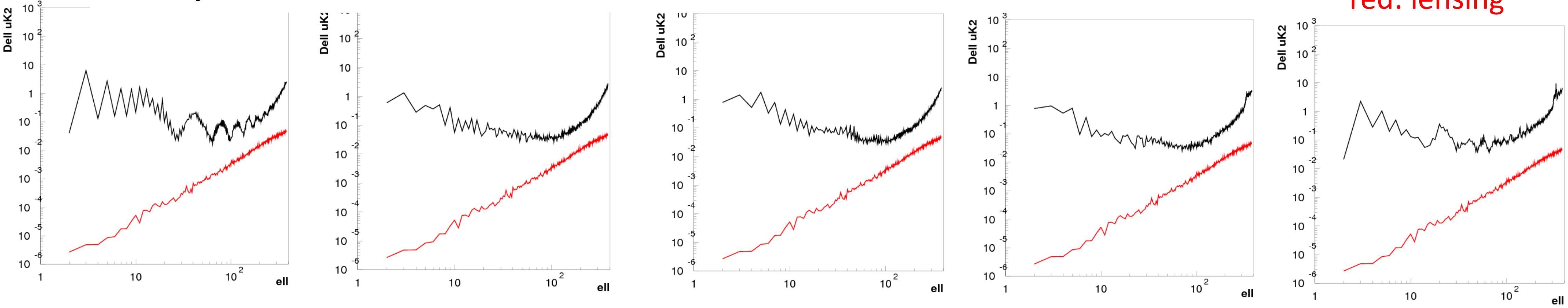
Q map

fknee=0.01Hzにおいても影響は大きい。スキャン方法にあまり依存しない。

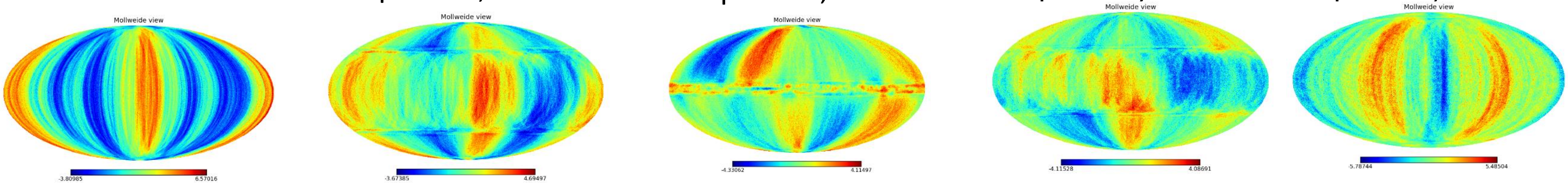
1/f ノイズの場合

fknee=0.1Hz, sigma=50uK rts, spin=0.3rpm, w/o HWP, basic method
0.75 years.

black: LB simulation
red: lensing



alpha=5, beta=90 | alpha=25, beta=70 | alpha=45, beta=50 | alpha=65, beta=30 | alpha=85, beta=10



fknee=0.1Hzでは、さらに影響は大きい（ただし、時系列データを用いたより適切な解析を行えば別）。

シミュレーション時系列データの解析方法(2) HWP(半波長板)を用いる場合

- 半波長板:
  - 偏光に変調を与えることができる。
  - 詳細は、25aSK-2の松村さんの講演

$$p_i = \boldsymbol{w}_i \cdot \boldsymbol{H}_i \boldsymbol{s} + n_i = \boldsymbol{d}_i \cdot \boldsymbol{s} + n_i,$$

HはHWPの透過行列

$$\boldsymbol{d} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(4\phi - 2\psi) \\ \sin(4\phi - 2\psi) \end{pmatrix}$$

理想的なHWPの場合、ベクトルd=Hwは左のように与えられる。ϕは、HWPの回転角に相当する角度、ψは、検出器の偏光の空に対する角度。

シミュレーション時系列データの解析方法(2) HWP(半波長板)を用いる場合

- HWPを用いた解析
  - 2連続の時系列データの差を取ることにより、1/fノイズを減らすことができる。

$\langle n(t+\tau)n(t)\rangle = R(\tau)$ のとき

$$
\begin{aligned}
&\langle (n(t+\Delta t)-n(t))(n(t+\Delta t+\tau)-n(t+\tau))\rangle \\
&= \langle n(t+\Delta t)n(t+\Delta t+\tau)\rangle - \langle n(t+\Delta t)n(t+\tau)\rangle \\
&\qquad - \langle n(t)n(t+\Delta t+\tau)\rangle + \langle n(t)n(t+\tau)\rangle \\
&= R(\tau) - R(\tau-\Delta t) - R(\tau+\Delta t) + R(\tau) \\
&\simeq R(\tau) - R(\tau) + \frac{dR}{d\tau}\Delta t - R(\tau) - \frac{dR}{d\tau}\Delta t + R(\tau) \\
&= 0,
\end{aligned}
$$

シミュレーション時系列データの解析方法(2) HWP(半波長板)を用いる場合

$$\chi^2 = \sum_i \frac{1}{2\sigma_i^2}(\Delta p_i - \Delta \boldsymbol{d}_i \cdot \boldsymbol{s})^2 + \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}(p_i - \boldsymbol{d}_i \cdot \boldsymbol{s})^2$$

$$\hat{\boldsymbol{s}} = \left(\frac{1}{2}\sum_i \boldsymbol{\mathcal{D}}_i + \sum_i \boldsymbol{D}_i\right)^{-1}\left(\sum_i \frac{1}{2}\Delta p_i \Delta \boldsymbol{d}_i + \sum_i p_i \boldsymbol{d}_i\right)$$

$$\boldsymbol{\mathcal{D}}_i = \sin^2 2\Delta\phi \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2 2\Psi & \sin 2\Psi \cos 2\Psi \\ 0 & \sin 2\Psi \cos 2\Psi & \cos^2 2\Psi \end{pmatrix}$$

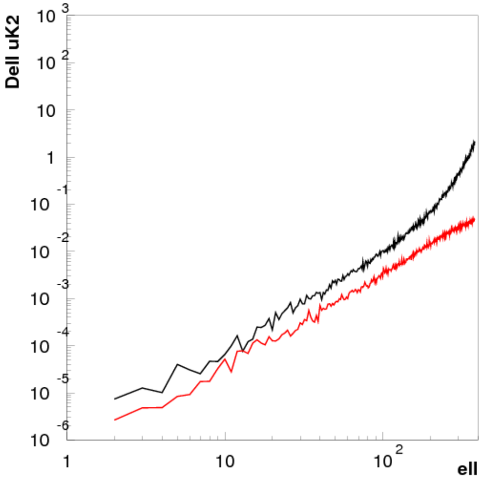
$$\Delta\phi = \phi_i - \phi_j$$

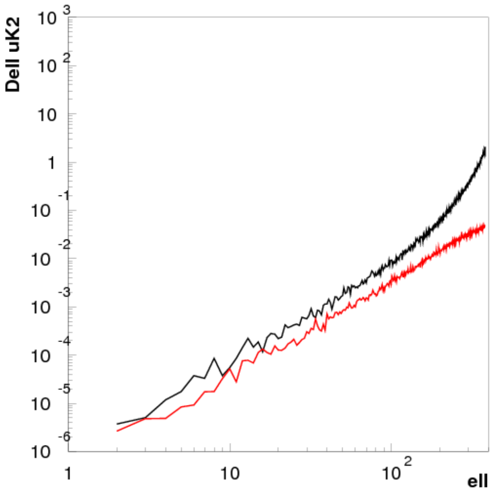
$$\Psi = \psi - \phi_i - \phi_j.$$

$$\boldsymbol{D}_i = \boldsymbol{d}_i \boldsymbol{d}_i^t = \boldsymbol{H}_i \boldsymbol{W}_i \boldsymbol{H}_i^t$$

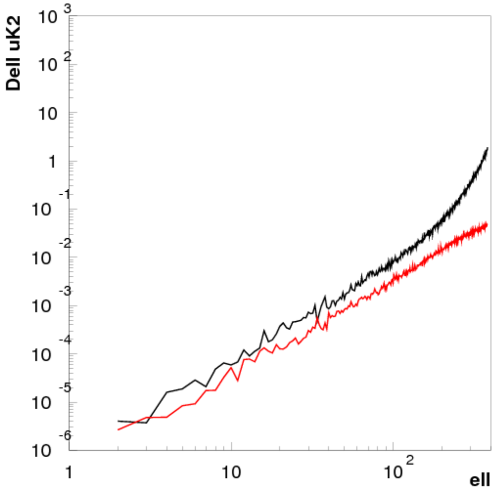
fknee=0.1Hz, sigma=50uK rts, spin=0.1rpm, w/ HWP, hybrid method 0.75 years.

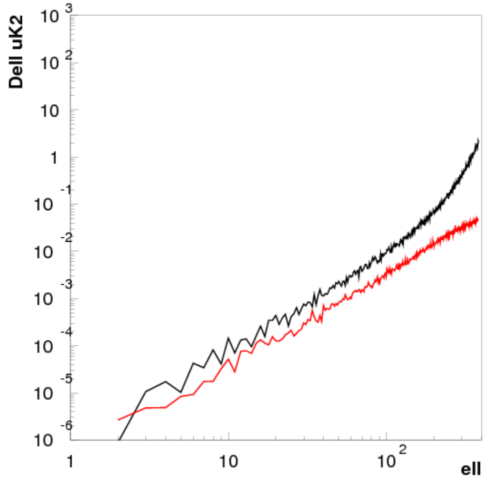
black: LB simulation
red: lensing





N.A.





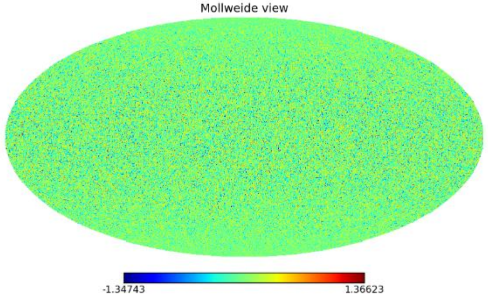
alpha=5, beta=90

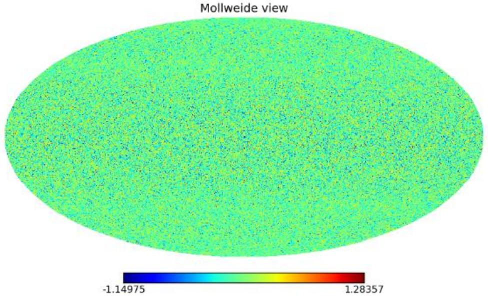
alpha=25, beta=70

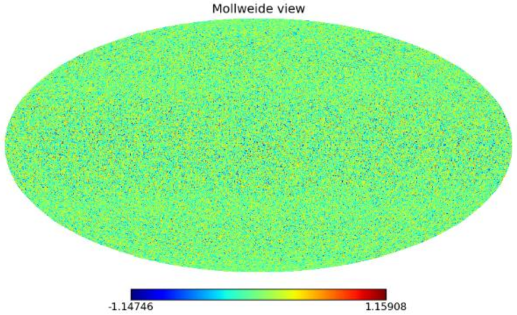
alpha=45, beta=50

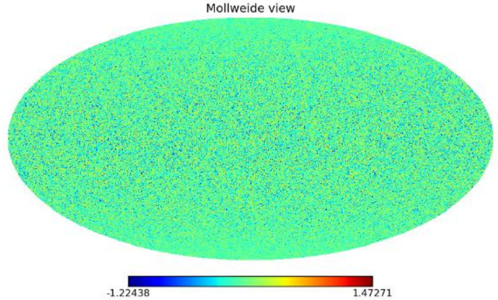
alpha=65, beta=30

alpha=85, beta=10









HWPによって、劇的に1/fノイズの影響が減少。

まとめ

- LiteBIRDのシミュレーションコードを開発した
  - 焦点面検出器の検出器のビームの天球上での位置を偏光方向も考慮して計算。衛星の回転に伴い、掃引する
- 1/fノイズによる影響を調べた
  - 歳差角度α、スピン角度βへの依存性は見られなかった。
  - 解析方法(1)では、fknee = 0.01Hzでも大きな影響が見られる。
  - HWPを導入することにより、1/fノイズの影響を劇的に和らげることができた。
- 今後：
  - HWP自身から生じる系統誤差を調べる。
    - 二つの複屈折軸の透過率の測定誤差による不定性など。
  - 擾乱による影響
  - 較正精度の評価
  - α、βの最適化

バックアップスライド

Basic method w/o HWP

$$\langle(\hat{\boldsymbol{s}} - \boldsymbol{s})(\hat{\boldsymbol{s}} - \boldsymbol{s})^t\rangle = \sigma^2 \left(\sum_i W_i\right)^{-1}$$

$$\langle\sum_i W_i\rangle \simeq \frac{1}{4}\begin{pmatrix} N & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N}{2} \end{pmatrix},$$

$$\sqrt{\langle(\hat{I} - I)^2\rangle} = 2\sigma/\sqrt{N}$$

$$\sqrt{\langle(\hat{Q} - Q)^2\rangle} = \sqrt{\langle(\hat{U} - U)^2\rangle} = 2\sqrt{2}\sigma/\sqrt{N}$$

Hybrid method w/ HWP

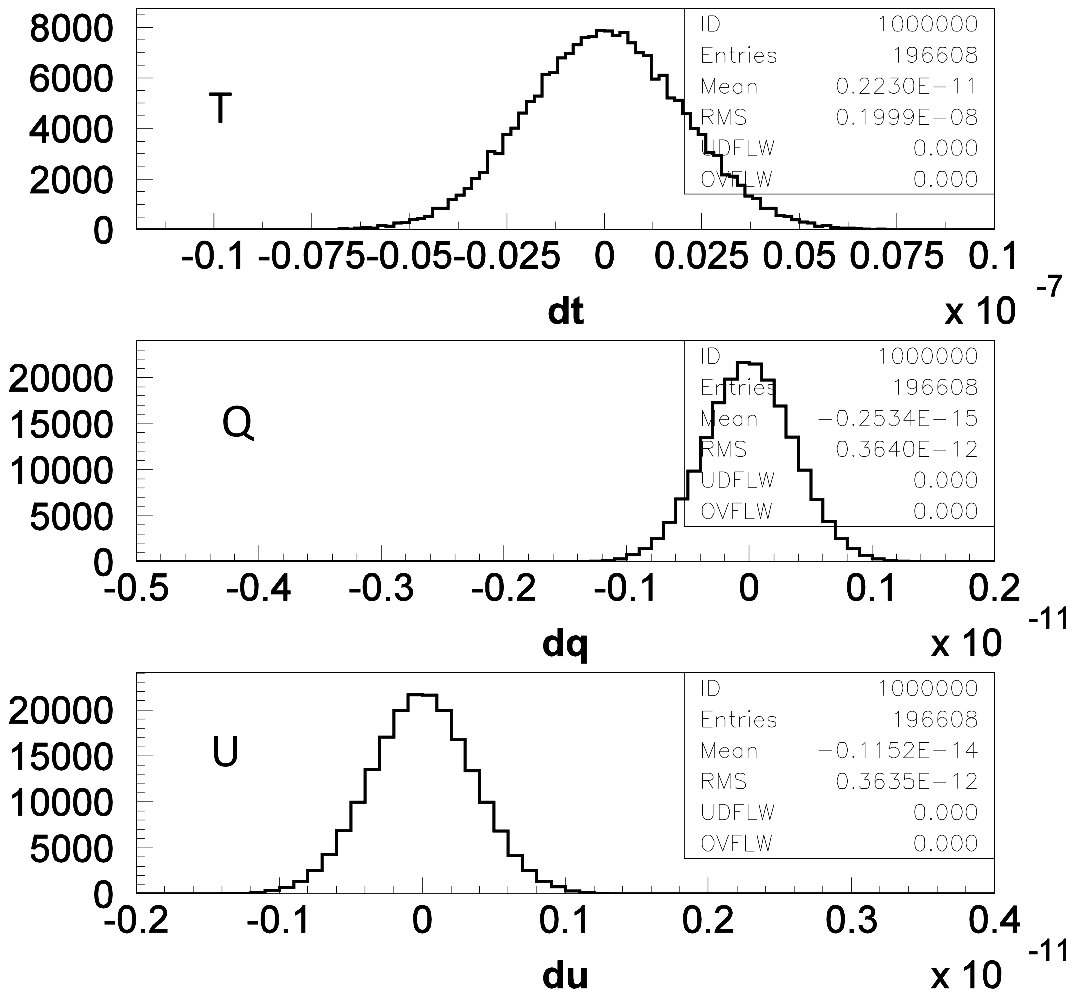
$$\langle \frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{M}\mathcal{D}_i\right)+\sum_{i=1}^{N}D_i\rangle \simeq \begin{pmatrix} \frac{N}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M}{4}\sin^2 2\Delta\phi+\frac{N}{8} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M}{4}\sin^2 2\Delta\phi+\frac{N}{8} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\langle(\hat{I}-I)^2\rangle} &= \sigma\frac{2}{\sqrt{N}} \\ \sqrt{\langle(\hat{Q}-Q)^2\rangle}=\sqrt{\langle(\hat{U}-U)^2\rangle} &= \sigma\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2M\sin^2 2\Delta\phi+N}} \end{aligned}$$

When we set $\Delta\phi=\pi/4$, we would obtain maximal sensitivity on the polarization measurements. Since the number M is the number of pairs to differentiate, the total number of measurements is $2M+N$, consistent with the error estimation in the basic method (method 1). The factor $\sin^2 2\Delta\phi$ is understood if we consider no rotation of the HWP that generates no polarization modulation and therefore gives no measurements on Q and U.

Hybrid method w/ HWP

reproducibility of the CMB signal in uK



calculated - generated.

$$\begin{pmatrix} I_{\mathrm{out}} \\ Q_{\mathrm{out}} \\ U_{\mathrm{out}} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} T_{II} & T_{IQ} & T_{IU} \\ T_{QI} & T_{QQ} & T_{QU} \\ T_{UI} & T_{UQ} & T_{UU} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{\mathrm{in}} \\ Q_{\mathrm{in}} \\ U_{\mathrm{in}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} T_{II} &= 1 + t^2 \\ T_{IQ} &= 2t\cos 2\phi \\ T_{IU} &= 2t\sin 2\phi \\ T_{QI} &= 2t\cos 2\phi \\ T_{QQ} &= (1+t^2)\cos^2 2\phi + (1-t^2)\sin^2 2\phi\cos(\Delta\varphi) \\ T_{QU} &= \cos 2\phi\sin 2\phi[1+t^2-(1-t^2)\cos(\Delta\varphi) \\ T_{UI} &= 2t\sin 2\phi \\ T_{UQ} &= \cos 2\phi\sin 2\phi[1+t^2-(1-t^2)\cos(\Delta\varphi) \\ T_{UU} &= (1+t^2)\sin^2 2\phi + (1-t^2)\cos^2 2\phi\cos(\Delta\varphi), \end{aligned}$$