



SUNRISE-3大気球太陽観測実験：高精度偏光観測のための回転波長板システムの検討

川畑佑典^{1,2}, 久保雅仁³, 一本潔⁴, 勝川行雄³, 清水敏文^{2,1}, 石川真之介², 阿南徹⁴, Carlos Quintero Noda²
 1 東京大学, 2 ISAS/JAXA, 3 国立天文台, 4 京都大学

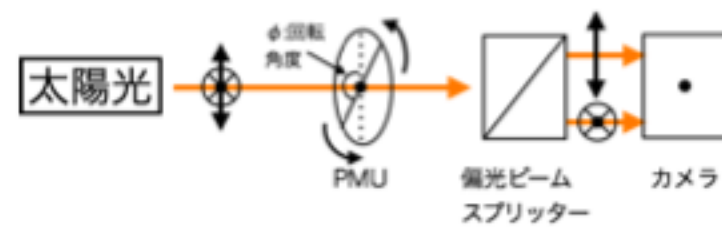
① 概要

大気球太陽観測実験SUNRISE-3

- 太陽大気での磁気エネルギー輸送・散逸プロセスの定量的理解を目指す
- 彩層での微弱な磁気波動やジェットを駆動する磁場構造が観測対象
- 日本を主体とした近赤外線偏光分光装置(Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter, SCIP)の開発
- 0.03%(1σ)という、これまでにない高い精度の偏光観測が必要

SCIPの偏光観測システム

- 回転駆動機構(Polarization Modulator Unit, PMU)を用いて波長板を回転
- 直交2偏光の同時取得
- カメラはPMUと同期して撮像を行う



回転波長板

- 実績のあるロケット実験CLASP(Kano et al. 2012)の回転波長板システムをベースとして開発

波長板の試作品の開発・試験

水晶・サファイアの組み合わせで、遅延量の波長・温度依存性が小さい波長板を実現(第17回宇宙科学シンポP-083)

必要な観測、想定される誤差

- 彩層の小スケール(0.2''), 短時間(~15s、彩層での音速10km/sで0.2''を通過する時間)の現象をとらえるには、高時間、高空間分解能の観測が必要
- > SCIP/PMUでは0.5s/rotの高速回転に(CLASP: 4.8s/rot)

PMUの回転非一様性は偏光信号への誤差となり高精度偏光観測への障害となりうる

CLASPにおける波長板の回転一様性誤差測定(Ishikawa et al. 2015)

-> SCIPが目指す偏光精度では、非一様性誤差がどの程度許されるのか?

研究目的

目標とする偏光精度達成に必要な回転一様性の精度を見積もる

② SCIPによる偏光観測の原理 (modulation/demodulation)

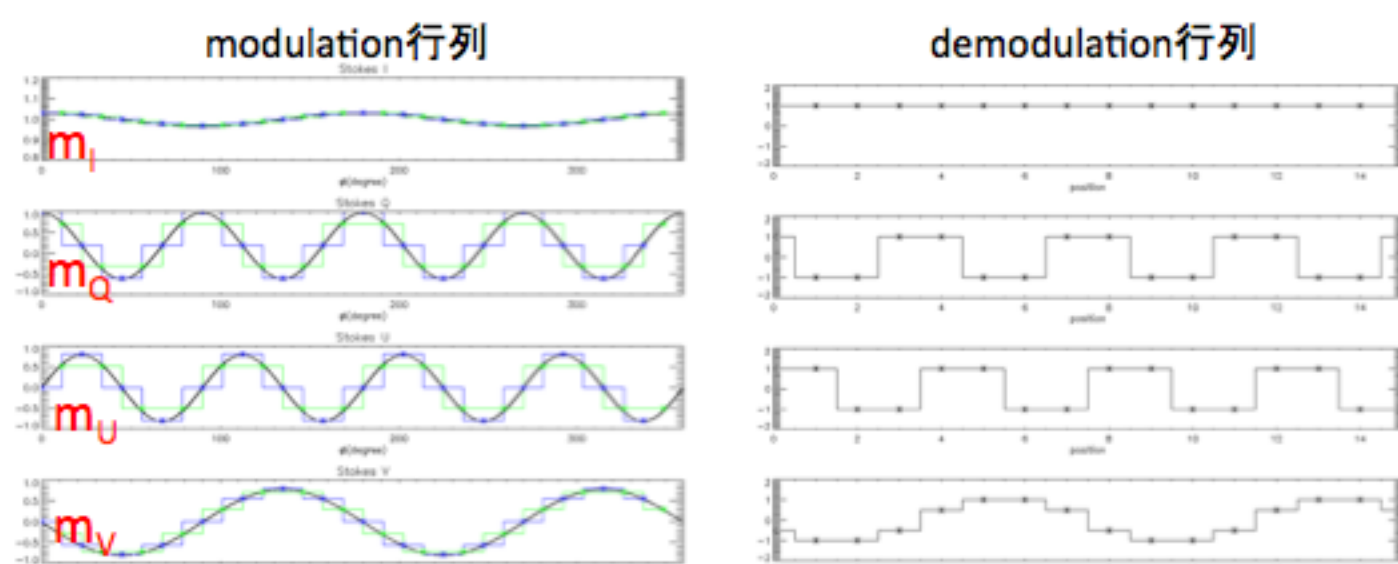
- 回転波長板の各角度φで光の強度I'を測定
- 観測量I'はIQUVの線形結合で表される<-(1)式 (modulation行列; m_I, m_Q, m_U, m_V)

$$I' = \left\{ 1 + 2R \sin\left(\frac{4\pi dn_r}{\lambda}\right) \sin\delta \cos 2\phi \right\} I + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos\delta + (1 - \cos\delta) \cos 4\phi \right\} Q + \frac{1}{2} (1 - \cos\delta) \sin 4\phi U - \sin\delta \sin 2\phi V \quad \dots (1)$$

I': 観測量(光の強度), IQUV: Stokes parameter, φ: 波長板の回転角度, δ: 波長板の遅延量 (=127°), R: 反射率, d: 波長板の厚さ, n_r: 屈折率, λ: 光の波長

観測量I'にmodulation行列の逆行列(demodulation行列)をかけることで観測量からIQUVを導出することができる

SUNRISE-3では波長板が1回転する間に16点でsampling



青: サンプリング点, 緑: サンプリング点から次のサンプリング点までの積分値(露光時間を考慮)

③ 回転一様性許容誤差の見積もり

手順1:

②の(1)式のφ(t)に回転非一様性を模した右の誤差Δφ(t)を加える
 Δφ(t)は周期的に時間変化

$$\phi'(t) = \phi(t) + \Delta\phi(t)$$

$$\phi(t) = \omega t$$

$$\Delta\phi(t) = A \sin(n\omega t) \text{ or } \Delta\phi(t) = B \cos(n\omega t)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, 32$$

手順2:

モジュレーション行列(W)とデモジュレーション行列(D)を計算し、以下のレスポンス行列(X)を導出

$$X' = DW' \quad (\text{回転誤差あり})$$

$$X = DW \quad (\text{回転誤差なし})$$

$$|\Delta X| = |X' - X|$$

手順3:

|\Delta X|が右のtolerance行列の要素より小さくしなければならぬ(Ichimoto et al. 2008)

$$\begin{pmatrix} -a/p_I & a/p_I & a/p_Q & a/p_U \\ \epsilon & a & \epsilon/p_I & \epsilon/p_Q \\ \epsilon & \epsilon/p_I & a & \epsilon/p_U \\ \epsilon & \epsilon/p_I & \epsilon/p_I & a \end{pmatrix}$$

tolerance行列

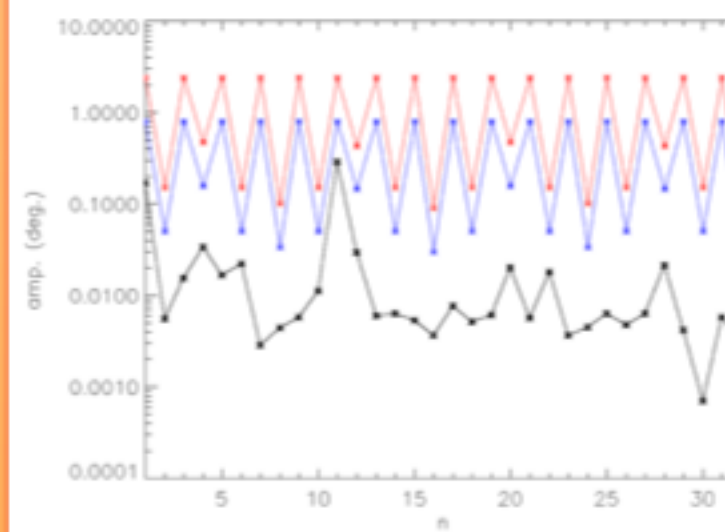
SUNRISE-3で目指す精度

$\epsilon = 3 \times 10^{-4}$	photon noise
$a = 0.05$	scale error
$p_I = 0.01$	max linear pol
$p_C = 0.1$	max circular pol

誤差の振幅(A or B)を大きくしていき、|\Delta X|の要素がtolerance行列の要素を超えた時点の値を許容誤差とする

④ 結果

ある周波数nの周期誤差を加えた場合の振幅の許容値



赤: 回転非一様性の許容誤差
 青: SUNRISE-3での要求値(許容誤差の1/3)
 黒: CLASPロケット実験の際の測定値

許容誤差はnが偶数の時厳しく、奇数の時に緩い

n	主要誤差成分	許容誤差(deg)
偶数	V->Q, V->U	0.1~0.5
奇数	Q->V, U->V	2.4

最も厳しい許容誤差はn=8, 16, 24で~0.1度(要求値~0.03度)

:Q, Uのmodulationの変化は4φで、位相が互いにπ/2ずれている。nが8の倍数の時は、誤差のピークがQ, U両方のピークと一致し、誤差がdemodulationでキャンセルされ難いため。

偏光誤差要因は他にも存在するため、計算された許容誤差の1/3を回転一様性の要求値として設定

CLASPロケット用の回転波長板システムではn=11で回転誤差最大

-> DCモータを11個の電磁石で制御する際のトルクリプル起因

高速回転にしつつ、CLASPの回転精度の維持が必要

-> SCIPの回転速度では、回転一様性が最大でCLASPより10倍悪くなる可能性があり、波長板ホルダの慣性モーメントの増加やソフトウェアの最適化で対応する(H28年度戦略経費での検討)

⑤ 開発状況と今後の展望

<開発状況>

回転モータ(PMU-ROT): SOLAR-Cに向けて開発した試作品を使用

ドライブ回路(PMU-DRV): ハードウェアの開発が完了し、太陽小規模プログラムの予算で制御ソフトウェアを開発中



<今後の展望>

ソフトウェア完成後に以下の単体試験を実施して、来年度中に完成させる予定。

- 回転一様性試験
- 擾乱試験
- 波長板の遅延量・温度依存性確認
- 熱・真空試験

