

高速偏光変調との同期を実現したH2RG赤外線カメラ

花岡庸一郎, 勝川行雄, 森田諭, 鎌田有紀子, 石塚典義(国立天文台)

太陽の、特に近赤外域における偏光観測は、光球のみならず彩層の磁場の情報を得られる吸収線を利用できることなどから、先端的な磁場観測の手段として有望である。そこで我々は新学術研究「太陽地球圏環境予測(PSTEP)」の中で、テレダイン社のH2RG検出器(2048×2048画素)を用いた太陽偏光観測用赤外線カメラの開発を行ってきた。偏光観測では露出のタイミングを偏光変調装置と同期させる機能が必要になるが、同時に太陽の偏光観測では、豊富な光量を生かすと同時にシーイングの影響を減らすため、高速読み出しが必要になる。我々はこれをMACIEボード(Markury Scientific社、SIDEAR-PC間のインターフェースを担う)を導入してH2RGの高速モードで実装し、高いフレームレートでの偏光観測機能を初めて実現した。

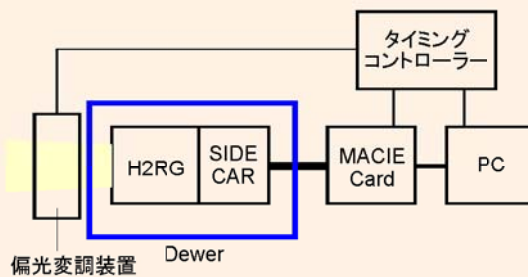
また、我々はこのカメラを京都大学飛騨天文台のドームレス望遠鏡に取り付け、垂直分光器によるスペクトルで実際に太陽表面構造の偏光を測定することで、機能実証を行った。H2RGは1辺約37mmであるので、偏光変調装置としてこれに対応する径50mmの回転波長板を用意し、30~60フレーム/秒(波長板1回転当たり16フレーム撮像)で偏光データ取り込みを行った。太陽活動の極小期であるため、黒点のように強い偏光を示す構造が無い状態であったが、白斑や静穏領域のネットワーク構造を観測することで、偏光信号をとらえることができた。画素数が多いことで、スリット方向には0".11サンプリングで3'.7の視野を確保する観測となっており、実観測において、広視野・高空間分解能を合わせて実現することが可能であることも実証している。

1. H2RG/SIDEARの高速モードとMACIE+新ファームウェアでの外部同期機能

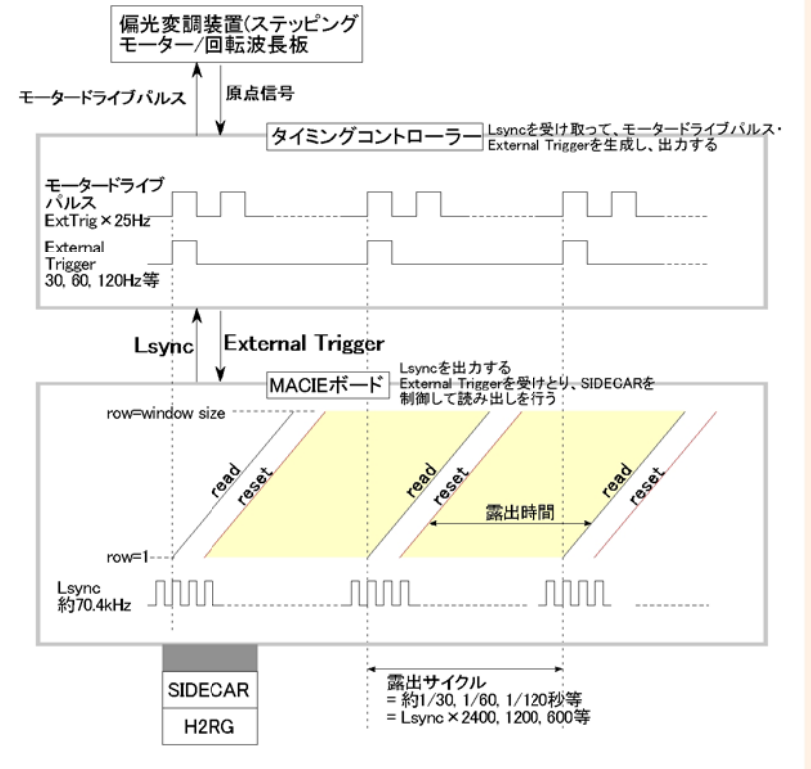
我々は太陽における近赤外線の偏光観測、特に彩層の磁場情報を得られるHe I 10830 Å 吸収線の観測で成果を挙げてきたが、これまでの観測は小フォーマットのカメラによるものであった。そこで、太陽地球系現象の解明につながる太陽面磁場のさらに高度な観測のため、新学術研究「太陽地球圏環境予測」(PSTEP)にて赤外線検出器HAWAII-2RG (HgCdTe 2048x2048, 1.7 μm カットオフ、エンジニアリングモデル)を使用した新赤外カメラを開発中である。太陽の偏光観測においては、豊富な光量を生かすと同時にシーイングの影響を減らすため、高速の偏光変調が必要であり、赤外カメラはその変調と同期して動作する必要がある。H2RGには高速モード(5MHzのクロック×32ポート同時読み出し(12bit)で約35全画面読み出し/秒)があるが、偏光変調との同期が困難であった。本研究では、SAM/JADEに代わるインターフェースボードMACIEの導入(京都大学と共同)及びSIDEAR用新ファームウェアの開発(共にMarkury Scientificによる)により、初めて同期を実現した。

本システムは以下のような機能を有している。また、カメラシステムの全体構成と、同期動作のタイミング図も示した。

- 外部トリガで読み出しを開始、露出時間の制御も可能
- 同期信号の外部出力が可能
 - これによりSIDEARのrow clock(Lsync)信号を基準として偏光変調装置の動作とH2RG露出を同期させることができる。
- ReadしながらReset可能(Line-Based Reset-Read)、duty cycle >99%、全フレーム読み出しで最高33フレーム/秒
- ウィンドウ設定により垂直方向の読み出し領域の幅を設定可能(スペクトルの特定の吸収線だけ見たい場合など)。また、この場合さらにフレームレートを上げられる



カメラシステムの全体構成。単なる撮像では無く、MACIEを介して偏光変調装置との同期動作を実現する



新規開発のH2RG高速モードファームウェア+MACIEで、外部同期を使用する時の露出・読み出し・リセットのタイミング

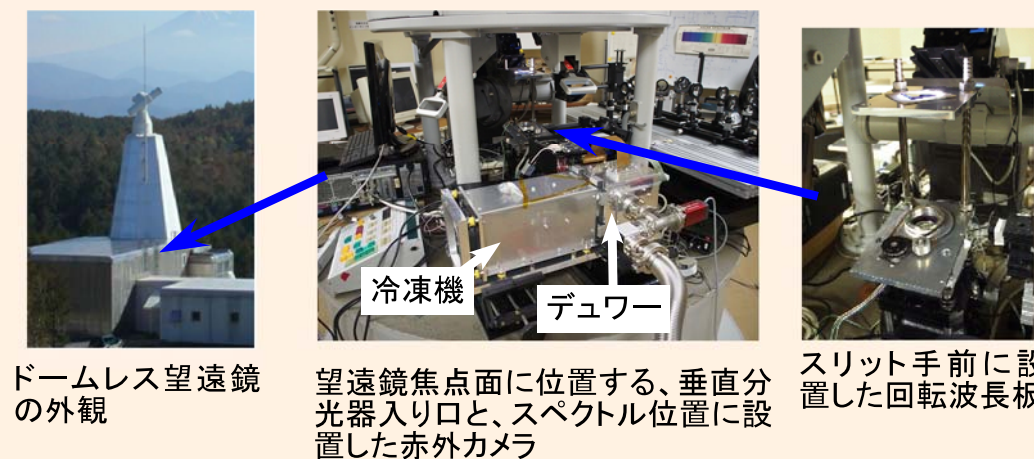
3. 偏光観測による実証:ドームレス太陽望遠鏡でのデータ取得

2018年11月に京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の共同利用にて、望遠鏡に本装置を設置し、実際に太陽の偏光を測定することで、偏光観測装置としての機能の実証を行った。

ドームレス太陽望遠鏡は口径60cm反射望遠鏡で、大型の分光器を備えている。スリットは、5°角に相当する5cm長(幅100 μmのものを使用)であるので、スペクトル像面にH2RG(37mm口)を設置すると、空間方向は3.7(0.11"/pixel)となる。分散は、10830 Å/2次では0.39 Å/mm(7mÅ/pixel)である。スリットの前に偏光変調装置である回転波長板(フレームレート約30Hzとして1.9回転/秒、16露出/回転)とアナライザーとしての偏光板を設置している。

太陽の偏光は、表面磁場による(逆)ゼーマン効果により吸収線に現れるのが、最も顕著である。現在は太陽極小期で、観測時には黒点(磁場が特に強い)は全くなかったため、ここでは、弱いプラージュ領域(NOAA12727)の周辺をスリットスキャンすることで得たデータを紹介します。スリット1カ所あたり30秒間積分し、2"毎にスリットを動かして26点、視野にして3.7×52"の偏光データを得た。

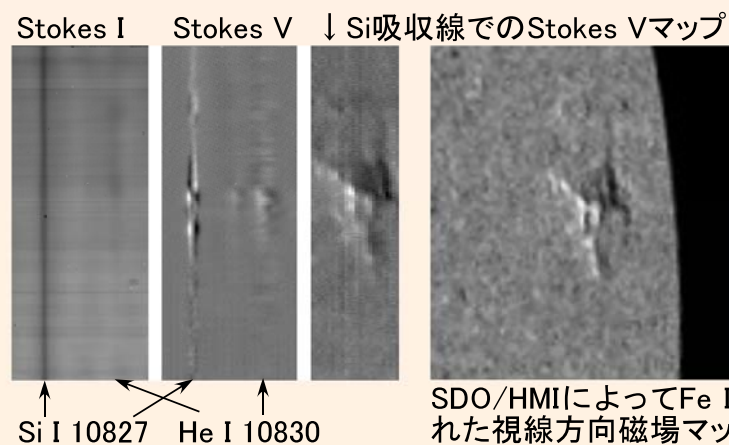
下の図はSi I 10827 Å(光球吸収線)及びHe I 10830 Å(彩層吸収線)スペクトル及びそのStokes V成分の例、及びプラージュ領域のStokes Vマップ(視線方向磁場成分に相当)を示している。弱いプラージュ領域ではあるが、ゼーマン円偏光が特にSi吸収線で顕著に見えている。可視光で磁場を測定しているSDO衛星HMI装置による視線方向磁場マップと比較すると、Stokes Vマップはよく一致しているのがわかる。



ドームレス望遠鏡の外観

望遠鏡焦点面に位置する、垂直分光器入り口と、スペクトル位置に設置した赤外カメラ

スリット手前に設置した回転波長板



2018年11月20日の観測の例。プラージュ領域NOAA12727をスリットスキャンして空間2次元の情報を得ている

SDO/HMIによってFe I 6173吸収線で得られた視線方向磁場マップ

今回の実験で、偏光観測装置としての機能実証はできた。一方、冷凍機のノイズの影響があることなど、明らかになった問題点もあるため、今後解決に着手する。また、実観測への投入を、飛騨天文台や海外太陽望遠鏡にて検討する。