

共同利用研究ハイライト

5分間にかかる世界初の太陽観測： 放射光は理想的な光源

成影 典之 国立天文台 SOLAR-C準備室 助教

1. はじめに

我々は観測ロケットを用いて世界初の太陽観測にチャレンジしていますが、観測ロケット実験は僅か5分間強の観測時間のために全力投球する実験です。観測装置の開発には信頼できる良質な光源が必要で、それを提供して下さっているのが分子科学研究所のUVSORです。

太陽は、様々な状態のプラズマと磁場で満ちている、ダイナミックな世界です。最も温度の低い太陽表面（光球）でも6000度あり、コロナでは100万度を越えます。そして、太陽フレアと呼ばれる爆発現象においては、温度は1000万度を越え、粒子は光速近くまで加速されます。我々はこの様な太陽の活動を理解するために、またプラズマの物理を理解するために、太陽から放たれる光（電波～X線・ガンマ線）を精密に測定しています。

観測する波長帯によっては（真空紫外線～X線）、地球大気によって吸収されてしまうため、宇宙からの観測が必須となります。理想的なのは衛星を用いた定常的な観測ですが、新しい観測技術や観測手法を試すには、衛星より安価で簡便に宇宙にアクセスする機会を提供してくれる観測ロケットを用います。観測ロケットは衛星に準じる高度300km程度まで到達できますが、観測時間は5分間～十数分間に限られます。

2. 観測ロケット実験CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter)

2007年頃、国立天文台の常田教授(当

時；現宇宙科学研究所所長)から一通のメールが研究室のメンバーに流れました。太陽の大気層である彩層・遷移層の磁場を直接測定するための観測ロケット実験をやろうというメールです。文末の「これをやる人はいませんか？」に反応した若手が集まってこのロケット実験の検討が始まりました。このロケット実験の目標は、次の4つのステップからなります。1. ライマンα輝線(波長122 nm)の高精度偏光分光観測装置(0.1%の偏光測定精度)の実現、2. 太陽ライマンα輝線の直線偏光の検出(「放射場の非等方性によって生じる散乱偏光」と「磁場によるハンレ効果によって生じた偏光」の足し合わせ)、3. ハンレ効果によって生じた偏光の検出、4. ハンレ効果による偏光から磁場情報を獲得する。これらはどれも、まだ誰も達成したことのない世界初の試みで

した^[1]。

真空紫外線であるライマンα線は、その波長特性から限られた材質しか透過せず、酸素を含む多くの物質に簡単に吸収されてしまいます。そこで我々は、0.1%の偏光測定精度を達成するために、互いに直行する2つの直線偏光を同時に計測でき、必要最低限の数の反射型光学素子(波長板以外)しか使わない新機軸の光学系を考案しました^[2]。この光学系を実現するための装置開発においては、強い強度、安定した強度、高い波長純度、高い偏光度を持つライマンα線光源が求められます。これらの条件を満たす光源として、分子科学研究所・極端紫外光研究施設(UVSOR)のBL-7Bは最適でした。我々は延べ40週以上のマシンタイムを使わせて頂き、試作した波長板^[3]やコーティング^[4]など、CLASPに用いる全ての光

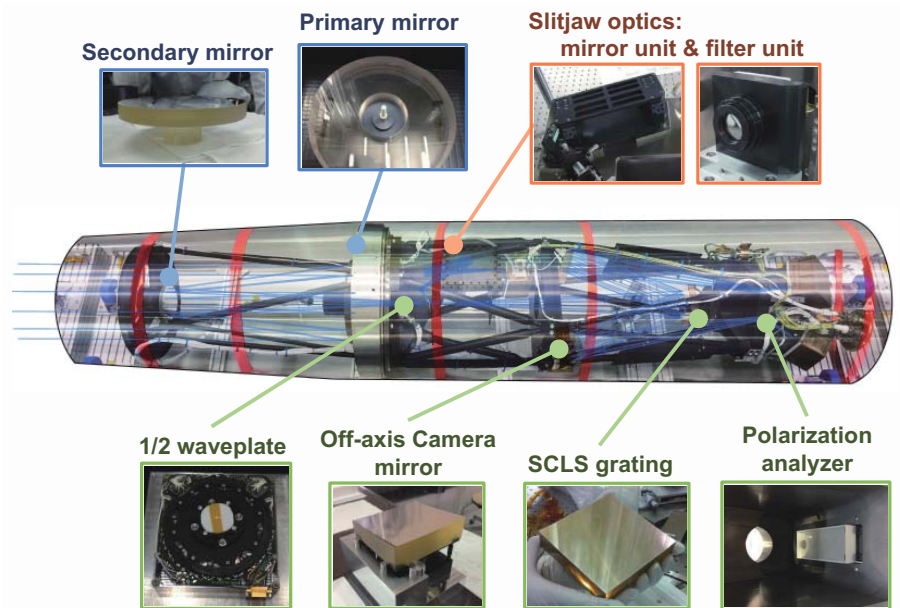


図1 観測ロケットCLASPの観測装置部。左側が望遠鏡で右側が偏光分光装置。(©NAOJ, ISAS/JAXA, NASA/MSFC, IAS)

学素子をBL-7Bで評価しました。こうして開発したCLASPは、0.1%の偏光測定精度を達成する装置として完成しました(図1:[5][6])。

2015年9月3日、CLASPは米国ニューメキシコ州にあるホワイトサンズのロケット実験場で打ち上げられました。打ち上げ後約100秒が経過した時、ライマンα線の太陽像がディスプレイに映し出されました。とても感激しましたが、この段階ではまだ目的の精度の偏光データが取れたかは分かりません。5分間の観測データを全て使って解析して初めて結果が分かります。射場からホテルに戻る車の中で早速データの解析を行い、結果が出ると車を路肩に止めて皆でデータを確認しました。後続車に乗っていた米国のメンバーも車を止め、道端でのデータ鑑賞会となりました。このデータから、CLASPの段階的目標であるステップ2(世界初となる0.1%の精度でのライマンα線直線偏光の検出;図2:[7])とステップ3(世界初となる紫外線域でのハンレ効果の検

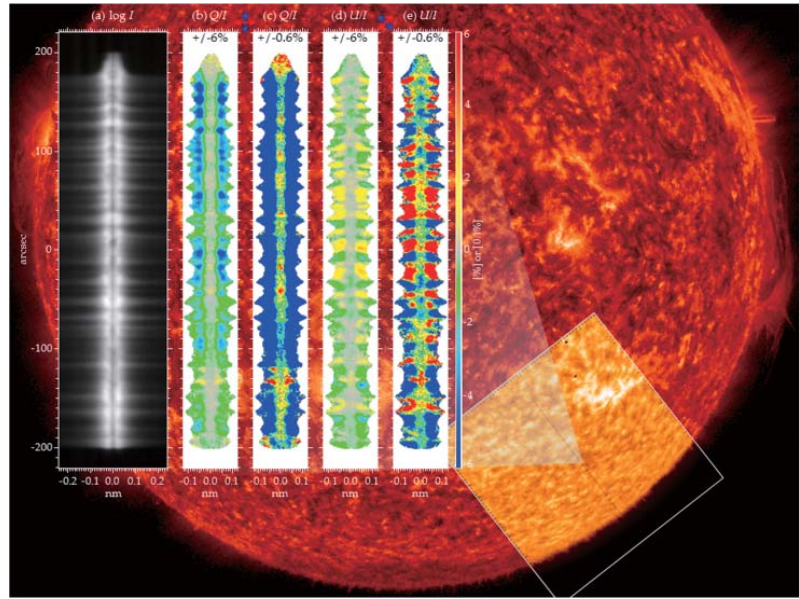


図2 CLASP が世界で初めて測定した0.1%の高精度直線偏光データ。(©NAOJ, JAXA, NASA/MSFC. 背景太陽像: NASA/SDO.)

出:[8])に成功しました。現在、ステップ4(磁場情報の獲得)を達成するために、損傷なく回収されたCLASPの観測装置を改良し、観測波長をマグネシウム線(280 nm;ゼーマン効果とハンレ効果の両方に感度があるライン)へと変更する作業と開発を行っています[9]。もちろん、この開発にもBL-7Bを使わ

せて頂いています。CLASP2の打ち上げは、2019年の予定です。

3. 観測ロケット実験FOXSI-3 (Focusing Optics X-ray Solar Imager)

一方、我々は世界初となる太陽軟X線の光子計測による2次元撮像分光観

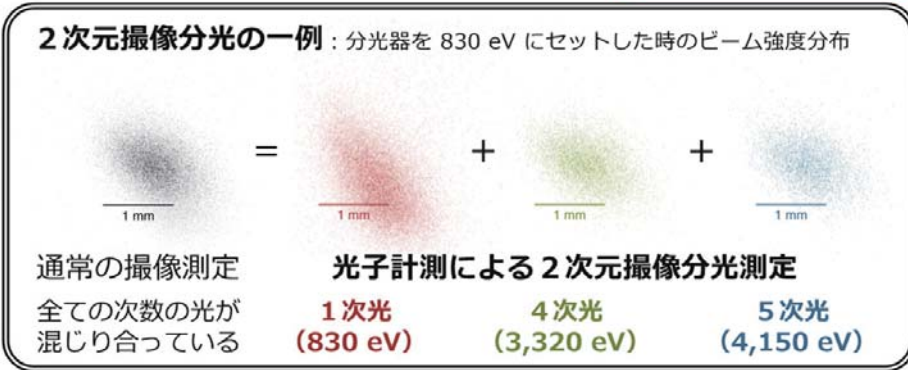
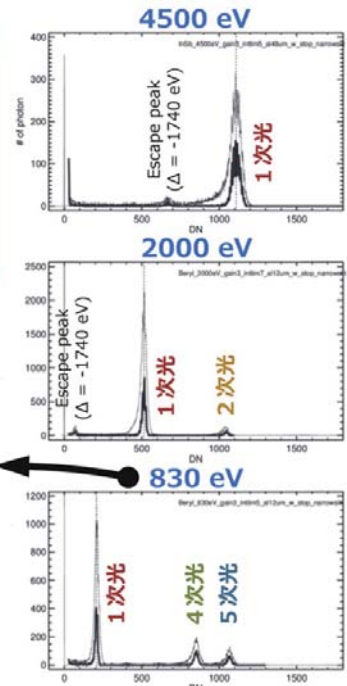
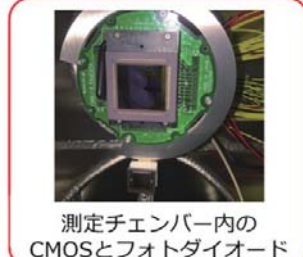


図3 BL-2Aを用いた裏面照射型CMOSセンサーを用いた高速度X線カメラの評価。830 eVから4500 eVまでの感度を評価した。830 eVのビーム照射では、本カメラの2次元撮像分光能力が確認できた(1次光、4次光、5次光を分離できた)。

測の実現も目指しています。光子計測とは、入射したX線のエネルギーに比例する信号を出力するピクセル化された検出器を用い、X線光子が1ピクセルに複数個入射するよりも十分に短い露光時間で撮像することで、X線光子のもつエネルギー情報を、空間情報、時間情報とともに記録するというものです。高エネルギー天体ではCCD検出器などを用いて古くから行われてきている観測手法ですが、太陽の観測ではまだ実現できていません。なぜなら、CCDは露光と読み出しに1秒程度を要するので、十分な数のX線光子をサンプリングし、スペクトルを作るには数時間～数十時間が必要となります。一方、太陽フレアの寿命は数十分間～数時間で、特にエネルギーの解放が顕著なフレア初期の現象は数分間程度で終わってしまいます。つまり、CCDでは太陽フレアの光子計測は出来ないので、この様な状況を打開するために、我々のグループは、高速連続撮像が可能なCMOS技術に着目してきました^[10]。そして、ついにX線に感度がある裏面照射型CMOS検出器を用いた高速度カメラの開発に成功しました^[11]。

撮像速度は1秒間に1,000回を達成でき、見積りでは太陽フレアのスペクトルを約10秒毎に取得することが可能です。この原稿を執筆している今日現在、UVSORに共同利用で訪問させて頂いており、軟X線用ビームライン BL-2Aを使ってこのカメラのエネルギー感度の評価を行っています(図3)。我々はこのカメラを2018年夏に打ち上げ予定の日米国際共同の観測ロケット実験FOXSI-3に搭載し、世界初の太陽軟X線2次元撮像分光観測を実施します。このロケット実験の結果は、また別の機会にご紹介できればと思います。

4. 最後に

BL-7Bの利用では田中先生、蓮本さん、木村先生(大阪大学)、福井先生(福井大学)に、BL-2Aでは繁政先生、近藤さん、中村さんに大変お世話になっております。いつもありがとうございます。また、我々が開発しているCMOS検出器を用いた軟X線高速度カメラの放射光での活用については、加藤先生、大東先生との議論が始まったところです。



なるかげ・のりゆき
2006年、京都大学大学院理学研究科博士課程修了。2006年～2016年まで、JAXA宇宙科学研究所と国立天文台でプロジェクト研究員を務める。2016年7月から現職。日米欧の国際共同観測ロケット実験CLASPではInstrument Scientist(観測装置の統括)を務め、日米の国際共同観測ロケット実験FOXSI-3では軟X線装置のPrincipal Investigator(PI; 研究代表者)を務める。また、磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにすることを旨とした分野横断型衛星計画PhoENiXの主査も務める。

参考文献

- [1] Kano et al., Proceedings of the SPIE, 8443, article id. 84434F (2012)
- [2] Narukage et al., Applied Optics, 54, 2080 (2014)
- [3] shikawa et al., Applied Optics, 52, 8205 (2013)
- [4] Narukage et al., Solar Physics, 292, article id.40 (2017)
- [5] Giono et al., Solar Physics, 291, pp.3831 (2016)
- [6] Giono et al., Solar Physics, 292, article id.57 (2017)
- [7] Kano et al., Astrophysical Journal Letters, 839, article id. L10 (2017)
- [8] Ishikawa et al., Astrophysical Journal, 841, article id. 31 (2017)
- [9] Narukage et al., Proceedings of the SPIE, 9905, id. 990508 (2016)
- [10] Narukage et al., eprint arXiv: 1706.04536 (2017)
- [11] Ishikawa et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (in press), eprint arXiv:1711.04372 (2017)