

太陽極端紫外線分光： いよいよ後氷期 (NachEISzeit) へ！



渡 邊 鉄 哉

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: watanabe@uvlab.mtk.nao.ac.jp

太陽の高温外層大気から放射される極端紫外域輝線—その輝線スペクトルのプロファイルを高分散分光器により、初めて長年にわたり系統的な観測を継続した「ひので」(Hinode)搭載の極端紫外線撮像分光装置 (EIS) は多くの科学的成果をもたらした。それまで凍っていた極端紫外線分光の世界に、EISはその“ひので”ともいべき画期をなした。EISが解き砕いた成果を概観し、ダイナミックな様子が明らかになってきた太陽高温外層大気の極端紫外域輝線分光観測で、EIS後(後氷期)に期待される極端紫外域輝線の高分散分光観測を紹介する。

1. 「ひので」前の冰山 (EISberg)

太陽の極端紫外域の観測はSKYLAB搭載S082A¹⁾以降、決して「よい!」といえる観測機会には恵まれず、「ひので」(Hinode)飛翔前の状況は言わば暗中模索、いまだ薄明の大海原を科学的見通しの不透明さや技術的困難という冰山を避けつつ新たな旭日を迎えようと航海をしているような状況ではなかったかと振り返っている。Hinodeに搭載された極端紫外線撮像分光装置 (Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer; EIS) の前身は、TRENDY (Transition Region ENergetics & DYnamics) と呼ばれた代物で、当時「若気の至り」による設計から、3 m (当初はさらに長い4 m) を隔てて20 cm口径の主鏡に同径の4,800本/mmという凹面回折格子を配して250–290 Åの太陽極端紫外域スペクトルの高分散観測を試みるものであった。

Hinodeのサイエンスが、①外層大気(コロナ・彩層)の加熱メカニズム、②太陽磁場の基本構造としての微細磁束管とダイナモ機構、③コロナのダイナミクスとリコネクションの詳細究明と

規定されていくに従い、それまでの観測状況とそれを踏まえて、Hinodeにおける極端紫外域分光観測の果たすべき役割を再考し、現在の仕様に変遷したことになるが、その間には、軸外し放物面鏡とトロイダル回折格子の組み合わせで、スペクトル結像に拡大率をかけることや、多層膜を用いて観測波長域の分光感度を向上させ2波長域化を図ることなどが可能になり、当初の科学要求を満たしつつ、衛星搭載の諸々制限事項をクリアできたことが大きい²⁾。それでも、Hinodeとしては、SOTにもまして長大な搭載機器となっており、打ち上げ時のローンチロックなどは卑近な例だが「ようこう」(Yohkoh)のときには考えもしなかった技術的困難さが加わっていた。

Hinode前の太陽極端紫外域の分光観測といえば、SoHO/CDS (NIS—直入射系)ならびにSUMERの独壇場であったが、いずれも非常にスローな観測装置で、撮られたスペクトルは凍りついたスチール、CDSのGIS (斜入射系)が機能しなかったことも痛手となっており、EISへの期待が非常に高かったように思われる。

EISの一番の使命は、太陽光球からコロナへ至

るエネルギー伝播を定量的に測定することであり、特に実際、コロナに注入されるフラックスを彩層-遷移層の輝線観測から明らかにすることが主たる目的と設定した。

彩層から遷移層・コロナで作られる輝線は、熱運動から期待される幅を超過する余剰の輝線幅をもつことが知られている³⁾。この輝線超過幅が、光球下からコロナに注入されコロナでプラズマの加速や加熱により消散されるエネルギー流束の彩層-遷移層-コロナと伝播していく過程を表しているものと思われるので、このEUV輝線のプロフィールを具に調べることで、そのエネルギー流束の物理的描像を明らかにすることができると期待した。

EISにとってのもう一つの大きな科学目的は、太陽フレアにおける磁気リコネクション点の物理量を診断することであった。Yohkohの観測により確立した太陽フレアのエネルギー解放機構としての磁気リコネクションではあったが、肝心の磁気リコネクション点(極近傍)の物理量は、YohkohのX線撮像観測(SXT)ではエミッションメジャーが足らず、軟X線分光(BCS)では、空間情報の欠如により得ることができておらず、形態学的な推測の域を抜けでてはいなかった。特に重要と思われたのは、これもエネルギーの注入量にかかわるリコネクションインフロー/アウトフローの直接検出とその物理量を観測的に求めることであった。

2. EISが砕氷した(EISbrechend)科学成果

2.1 極端紫外域高分散スペクトル

EISの輝かしい成果としてまず一番に挙げないといけないことは、軌道上において所期の性能を発揮して、初めて2-3秒角の空間分解能で、極端紫外線域(171-211および245-291 Å)における高分散スペクトルを継続して撮ることができたことである。ここで使う「高分散」という言葉は、

太陽の極端紫外域に現れる輝線スペクトルに強度のみならずプロフィールの解析を行えることを意味している。僅か40 Åずつの二つの波長域ではあるが、そこには、14の元素の54の電離状態から放射される輝線が500本以上同定されており、その上未同定線も数多く存在している⁴⁾。しかも時間分解能については、強い輝線では活動領域において、1回のスペクトル撮影に秒オーダーのシャッターを切ることができ、この高分散と高時間分解能の組み合わせにより、彩層より上空の広範囲の太陽大気で起こる多くのダイナミックな現象を捉えることができ始めるようになった。細かい事故や性能の劣化はいろいろあるものの、何はともあれ10年間にわたり高いレベルで同質の極端紫外域スペクトル観測を継続して提供しえたことは、太陽の極端紫外線分光観測における“ひので”すなわち、大いなる画期をなしたといっはばかることはないものと思っている。

2.2 活動領域—非熱的輝線幅と高速上昇流

太陽高温プラズマからの紫外域輝線は、その輝線形成温度の熱運動から期待される輝線幅に比べて太いのが常であり、おおよその見積もりから、それがコロナに注入されるエネルギーを担っており、コロナ加熱機構に関する情報を暗示しているのではないかと考えられてきた。

EISによる太陽活動領域の極端紫外輝線幅の観測は打ち上げ当初から精力的に行われた。図1に示すようにマイクロフレアの発生していない活動領域(AR10938)のコロナループに対して、輝線幅中の非熱速度成分と視線方向速度の青方偏移成分の間に強い相関があることが判明し⁵⁾、観測領域が太陽の縁に近づくにつれそれらがともに減少することから、磁力線に沿った複数の速度成分が観測装置の空間分解能より小さい領域内に混在して輝線のプロフィールを形成していること、上昇速度や非熱速度の立体的な構造としてコロナループの根元付近が最大になっていることなどを明らかにした⁶⁾。また輝線の主成分と高速成分の強度

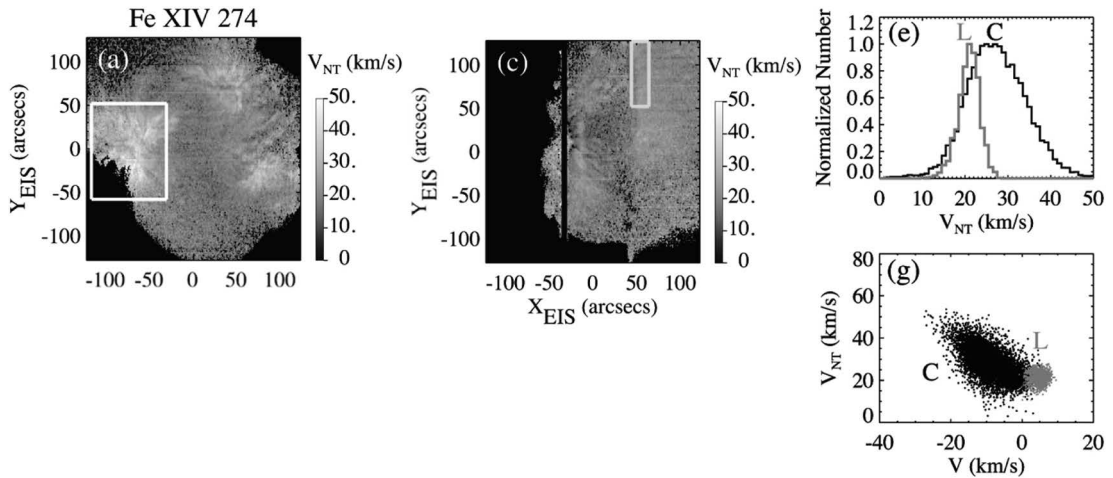


図1 Fe xiv λ 274 Å輝線によるAR10938の観測：左から順に、非熱的速度分布図。(a) 円盤中心、(c) 西縁、(e) 非熱的速度ヒストグラム、(g) ドップラー速度 vs. 非熱的速度散布図。(e, g) 図中のCとLは、それぞれ(a, c) 図のボックス内の観測値を示す⁶⁾。

比から、高速成分はEISの空間分解能以下の構造をもつと予想され、数値シミュレーション⁷⁾と比較して、このような高速成分はコロナの下部で間欠的に発生する微小フレアの集中的な加熱によるプラズマフローの特徴と一致すると結論づけた⁸⁾。さらに、コロナ輝線(Fe xiv)の青方偏移(高速)成分と彩層ジェットの相関を調べることで、コロナ加熱の重要な部分が、高さとしては彩層レベルで発生し、スピキュールのような高速流としてコロナにまで上昇してきていることが示唆された⁹⁾。

これらの観測結果を反映して、活動領域のコロナ加熱には彩層レベルでのナノフレア的な磁気リコネクション加熱機構が寄与していることが示唆されることとなったが、EISのような精密分光器というものは非常に較正の難しい装置であり、依然として観測結果の整約には十分な吟味と検証が必要である。今春、分光器の機械幅や光学的な性能を慎重に吟味し、15個のフレアを起こしていない活動領域高温コロナループの輝線超過幅を測定した結果¹⁰⁾が発表されたが、超過幅の平均は $17.6 \pm 5.3 \text{ km s}^{-1}$ と決して大きな値ではなく、また活動領域の温度や磁束量とも強い相関はないと

の結果を得ることとなった。これは、彩層起源のリコネクションジェットやコロナ起源のリコネクションによる彩層蒸発モデル、あるいはAlfvén波動乱流などのいかなるモデルとも整合しないことを意味していて、コロナループの加熱機構に関して確固たることが言える状況になるにはもう少し時間がかかりそうな様相である。

2.3 太陽プラズマのコビキタスな流れと波

EISに限らずHinodeの大きな発見の一つは、太陽大気内どこにも存在することが明らかになったプラズマの波と流れである。低速太陽風の吹き出し口として、活動領域周辺部からの高速上昇流が見つかり^{11), 12)}、SOTの高解像度を利用して、初めてプロミネンス中の磁力線が振動している様子が捉えられた¹³⁾。太陽大気中にはAlfvén(的な)波が満ちあふれていることが示された。

輝線強度と輝線の示すドップラー速度を用いてコロナプラズマのさまざまな振動が検出されている。強度変化と視線速度・横方向速度変化を組み合わせると、振動のモードが同定できる可能性があり、それから直接測定が困難なコロナ中の磁束密度の推定も可能となる。これまでEISで観測されたものには、kinkモードの振動¹⁴⁾⁻¹⁶⁾、sausageモー

ドの振動^{15), 16)}, MHD slowモード定在波^{16), 17)}, MHD slowモード進行波^{16), 18)-20)} などがある。

2.4 極域ジェットと高速太陽風の吹き出し

太陽の両極域には、局所的に微小な磁極がパッチ状に混在し、その磁場強度が1 kGにもなっていることが判明した²¹⁾。また、このようなパッチ状の領域ではXRTの観測よりジェット状の噴出活動が頻発していることが明らかになっている²²⁾。このジェット構造をEISでは、視線方向速度場の上昇流として観測することができる²³⁾。極域コロナルホール内に発生するジェット構造をドップラー速度の観測から捉え、磁力線に沿ったジェットの速度がコロナの音速程度になっていることを示した。これらのジェットは、極域コロナルホールに特徴的な開いた磁力線構造と光球下からの小さな浮上磁場のうち逆極性のものとの磁気リコネクションにより発生すると考えられている。SOTで観測される極領域の磁気構造と併せて、コロナ温度のジェット構造がkG磁場のパッチの根元から吹き出していること、また遷移層温度のジェット構造は背の低い閉じた構造の中で発生することが示されている。

このような極域にはブルームと言われる可視光でも極端紫外域でも紡錘形状の明るい構造が見られる。EISにより、準定常的なブルーム上昇流の速度場を観測し、NASAの衛星Solar Dynamics Observatory (SDO) に搭載された観測装置Atmospheric Imaging Assembly (AIA) の画像によるブルーム画像とを比較し、得られたブルームの速度場構造が一過的なものではなく太陽から遠ざかるにつれて加速を受けている定常的なプラズマの流出現象であることがわかってきたので、コロナルホール中のブルームは、太陽風プラズマの重要な供給源、すなわち吹き出し口に対応するものであるといえそう²⁴⁾。

2.5 太陽フレア—超高温プラズマの分光診断

太陽フレアがコロナ中の磁気リコネクションをトリガーにエネルギー解放が爆発的に始まること

がYohkohによって明らかにされたが⁵⁾, Yohkohの撮像・分光観測では、直接その磁気リコネクション点の物理診断を行うことができず、Hinodeにおける課題として継承されることとなった。EISは、高感度・高(波長・空間)分解能観測のメリットを生かして、磁気リコネクションが起きている現場を同定し、その周辺の物理量を把握することに成功している。

CMEを伴うB9.5の小さなフレアが光球円盤の中心近くで起こった—2007年5月19日のことである。図2に示すこのフレアは比較的継続時間の長いいわゆる long duration eventであり、何よりも幸いだったことは、ちょうどこのフレアが発生したときEISのスリットがそのフレアループの頂上付近を掃いていて、しかもそのような場合に備えてさまざまな形成温度をもつ輝線を同時に観測する準備を整えていたことである。この幸運によって、フレア初期相におけるプラズマの温度・速度構造がフレア発生から時間をおくことなく測定することができ、磁気リコネクションを起こした領域が特定され、同時観測をしていたHinode/XRT (X-Ray Telescope), RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory), TRACE (Transition Region And Coronal Explorer) からの情報も合わせて、その周辺の温度・速度・密度構造が精度をもって決定できたことである²⁵⁾。このようなBクラスの小フレアにおいても、確かに磁気リコネクションを介したフレアの発生が確認でき、磁気リコネクション点周辺の物理観測、特に分光観測を達成することができた極めて貴重な結果となっている。

磁気リコネクションに伴うリコネクションアウトフローの観測においてもEISは多大な貢献をしている²⁶⁾。一例として2012年1月27日に発生したXクラスのリムフレアを挙げる。EISはこのフレアを起こしたコロナループ構造の上空に超高温(〜30 MK)にして高速(>500 km s⁻¹)のプラ

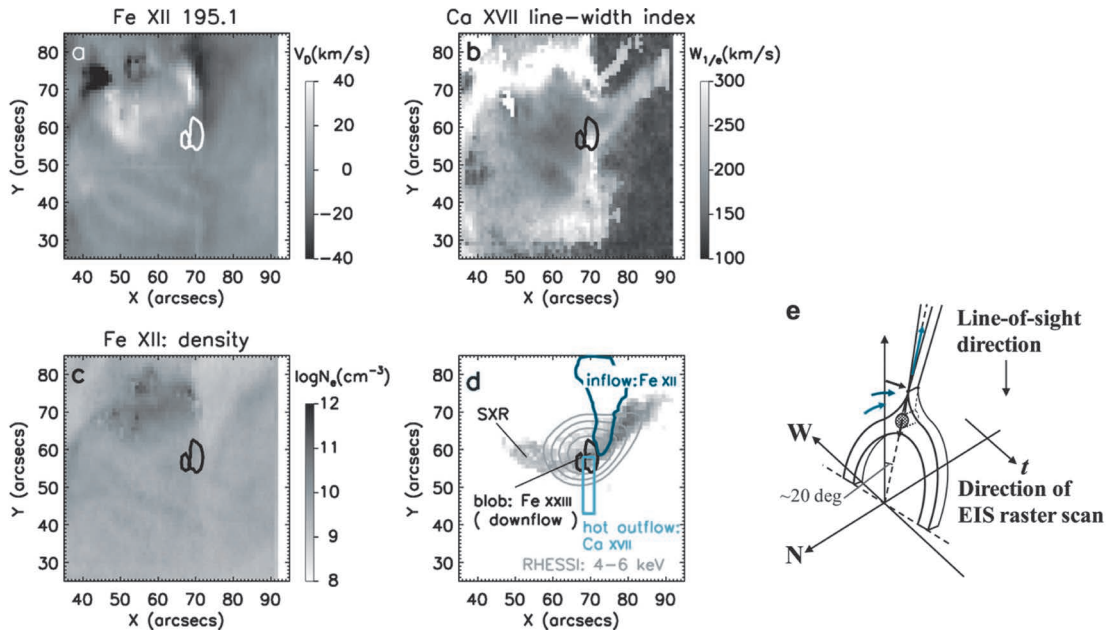


図2 2007年5月19日フレア。(a) 超高温輝線 Fe xxiii がダウンフローを示す S1 領域周辺におけるインフローを示す Fe xii 輝線の視線速度分布, (b) 高温アウトフローを示す Ca xvii の輝線超過幅, (c) Fe xii 輝線強度比から求めた電子密度分布, (d) XRT 取得のフレアループ画像上に, RHESSI (4-6 keV) 画像 (強度等高線) と EIS 観測の速度場を模式的に重ね合わせた。これらから (e) のようなループ速度場構造が推定される²⁵⁾。

ズマ流の存在を確認している。SDO/AIA や STEREO 衛星の画像を組み合わせることにより、この領域の立体構造が明らかになり、超高温・高速プラズマ流が、フレアループ上空の磁気リコネクション点からフレアループへ向かうリコネクションアウトフローが周辺のプラズマと相互作用することにより作り出された fast-mode ショックの様子を観測していると解釈できることがわかった。

また、フレアに伴って、非熱的に加速された粒子や熱伝導衝撃波面が彩層まで到達すると、低温の彩層プラズマが急激に加熱され彩層蒸発が発生する。彩層蒸発は Hinotori・SMM が活躍した 1980 年代前半に確立した現象ではあるが、その空間分布や温度・速度構造などについては、その後あまり進展がなく、EIS の登場を待たねばならなかった^{27), 28)}。図3に示されるようにインパルス・フレアの初期相において、彩層-遷移層形成輝線での赤方偏移が見事に観測され、コロナ下

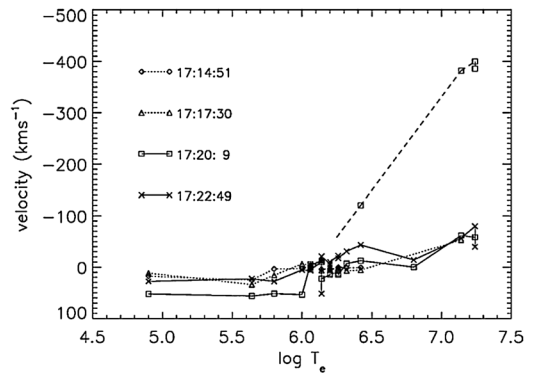


図3 2007年6月6日に発生した C9.7 フレアの初期におけるプラズマ運動の輝線形成温度依存性 (正符号が赤方偏移)。フレアループの足元が輝き始めた時間帯のみ、高温輝線 (Fe xvi, Fe xxiii, Fe xxiv) 著しい青方偏移を示し、形成温度 10^6 K 以下の輝線は、一様に $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$ 程度の赤方偏移を示していることがわかる²⁷⁾。

部におけるエネルギー堆積の結果として、彩層 vs. コロナプラズマの運動量が保存され、上部からの加圧によりフレアループ足元付近の電子密度

が 10^{10} cm^{-3} 程度に上昇した、いわゆる“爆発的な (explosive)” 彩層蒸発²⁹⁾ が起こっていることが示された。彩層蒸発起源のプラズマ上昇流の速度は著しい温度依存性を示すので、あまり大きな温度依存性を示さない磁気リコネクション起源で非熱的に加速されたプラズマ流とは観測的に区別することができると思われる。しかし、フレアを起こしたコロナループの構造が空間的によく分解できない場合には、それでも観測された高速で高温のアウトフローが、熱的に加速されたものか、非熱的な加速を受けたものなのか、あるいは、彩層蒸発流なのか、磁気リコネクションアウトフロー (ジェット) なのかの判別が難しいことも往々にしてあるというのが現実である³⁰⁾。

3. 後氷期 (NachEISzeit) の課題

活動領域中心部には、高温のコロナループに繋がるモス (moss) と呼ばれる構造が見られる。このモスの磁場構造 (SOTによる観測) とその熱変遷、輝線強度の時間変化など (EISによる観測) とを比較することにより、この構造がEISの空間分解能の10-20% (~0.3秒角) 程度の大きさをもっていることが判明した³¹⁾。すなわち、現EISの10倍程度の角分解能が確保できれば、SOTとIRISの共同観測によりプロミネンスを解析したような研究³²⁾ が、彩層から高温コロナまでの温度領域でも可能になり、波動か磁気リコネクションかという二者択一の議論ではなく、エネルギー伝播の様子を詳らかにして活動領域コロナの加熱機構の本質に迫ることができるものと考えられる。

その際重要になってくるのが、輝線形成温度のギャップ問題である。EISでは選択した僅か80 Åの波長域の中に、8万度から1.6千万度までの形成温度をもつ輝線が含まれているが、その輝線の形成温度分布は決して一様ではない。まず問題になるのが遷移層上部形成 (50-100万度) の輝線群で、その数が少なく強度も弱いことが挙げられる。彩

層からコロナへのエネルギーの伝播にとって非常に重要であるこの大気層を診断することができる救世主として、個人的にはSKYLAB以来半世紀近く観測の行われていないNe VII ($T_f \sim 5 \times 10^5$; T_f は輝線形成温度) $\lambda 465 \text{ \AA}$ 輝線の観測を推奨したい³³⁾。これまでの観測でわかっていることとしてO VI ($T_f \sim 3 \times 10^5$) とNe VIII ($T_f \sim 7 \times 10^5$) による輝線単色画像には、ネットワークからコロナループへという太陽面の大きな構造に本質的な変化が生じていることが挙げられる。この二つの輝線の間温度層に貢献度曲線の極大をもち、その温度幅が狭いNe VII輝線を用いた観測ができれば、上部遷移層の動的なプラズマ診断から彩層加熱とコロナ加熱との関係が明らかになるものと期待される。

また、活動領域の温度上限に近いプラズマの振る舞いを知ることも重要である。EIS・XRTとSUMERの共同観測³⁴⁾ により、活動領域プラズマのエミッションメジャーがFe XVIIIの形成温度; $T_f \sim 8 \times 10^6$ まで延びていることが判明したので、Fe XVIII $\lambda 975 \text{ \AA}$ 輝線を感度よく観測することができれば、活動領域に特有の高温プラズマ生成機構に新たな知見が得られるものと確信する。

これらの輝線に加えこれまで観測されている輝線を厳選し、観測装置の感度を上げ、しかもできる限り視野を広くとり、太陽外層大気プラズマの電子温度、電子密度、速度場、磁場形状、プラズマ組成³⁵⁾、そしてそれらの時間変化を捉えていくことが、EIS後の次世代極端紫外域観測における課題になっていくものと考えている。

参考文献

- 1) Tousey R., et al., 1977, *Appl. Opt.* 16, 870
- 2) Culhane J. L., et al., 2007, *SoPh* 243, 19
- 3) Teriaca L., et al., 1999, *A&A* 349, 636
- 4) Brown C. M., et al., 2008, *ApJS* 176, 511
- 5) Doschek G. A., et al., 2007, *ApJ* 67, L109
- 6) Hara H., et al., 2008, *ApJ* 678, L67
- 7) Antolin P., et al., 2008, *ApJ* 688, 669
- 8) Hara H., 2009, *ASP Conf. Ser.* 415, 252
- 9) De Pontieu B., et al., 2009, *ApJ* 701, L1
- 10) Brooks D. H., Warren H. P., 2016, *ApJ* 820, 63
- 11) Sakao T., et al., 2007, *Science* 318, 1585
- 12) Harra L. K., et al., 2008, *ApJ* 676, L147
- 13) Okamoto T. J., et al., 2007, *Science* 318, 1577
- 14) Van Doorselaere T., et al., 2008, *A&A* 487, L17
- 15) Erdelyi R., Taroyan Y., 2008, *A&A* 489, L49
- 16) Kitagawa N., et al., 2010, *ApJ* 721, 744
- 17) Mariska J. T., et al., 2008, *ApJ* 681, L41
- 18) Wang T. J., et al., 2009, *A&A* 503, L25
- 19) Wang T. J., Ofman L., Davila J. M., 2009, *ApJ* 696, 1448
- 20) Mariska J. T., Muglach K., 2010, *ApJ* 713, 573
- 21) Tsuneta S., et al., 2008, *ApJ* 688, 1374
- 22) Cirtain J. W., et al., 2007, *Science* 318, 1580
- 23) Kamio S., et al., 2009, *A&A* 502, 343.
- 24) Fu H., et al., 2014, *ApJ* 794, 109.
- 25) Hara H., et al., 2011, *ApJ* 741, 107
- 26) Imada S., et al., 2013, *ApJ* 776, L11
- 27) Watanabe T., et al., 2010, *ApJ* 719, 213
- 28) Milligan R., Dennis B. R., 2009, *ApJ* 699, 968
- 29) Fisher G. II., Canfield, R. C., McClymont, A. N., 1985, *ApJ* 289, 425
- 30) Matsui Y., et al., 2012, *ApJ* 759, 15
- 31) Brooks D. H., Warren H. P., Winebarger A. R., 2010, *ApJ* 720, 1380
- 32) Okamoto, J. T., et al., 2015, *ApJ* 809, 71.
- 33) Mariska J. T., Doudy Jr. J. F., 1992, *ApJ* 401, 754
- 34) Teriaca L., Warren H. P., Curdt W., 2012, *ApJ* 754, L40
- 35) Brooks D., Ugarte-Urra I., Warren H. P., 2015, *Nat. Commun.* 6, 6947

Solar Extreme Ultraviolet Spectroscopy: zur NachEISzeit

Tetsuya WATANABE

*Hinode Science Center, National Astronomical
Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-
8588, Japan*

Abstract: EUV emission lines originating from high-temperature solar outer atmospheres—Extreme Ultraviolet Imaging Spectrometer (EIS) on board the Hinode mission has been observing their line profiles for the first time with its high-dispersion spectrograms and for more than a decade since its launch. EIS has been [ice-] breaking difficult problems to get a plenty of important scientific results. EIS has made an epoch of “sunrise” in solar EUV spectroscopy. Scientific outputs that EIS has thawed out are briefly discussed, and key emission lines in hot and dynamic postglacial periods of solar EUV spectroscopy will be high-lighted.