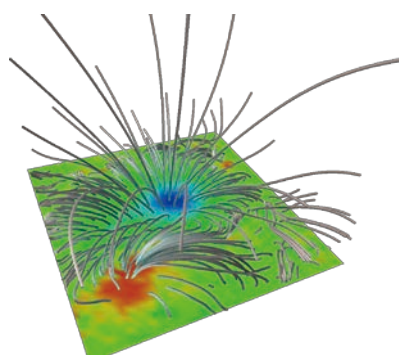
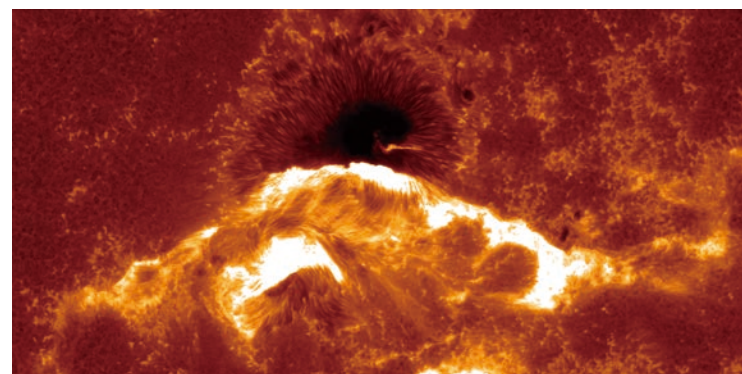


巨大フレアの起源

大規模な磁気嵐を引き起こす巨大フレアの発生を予測するためには、どのように莫大な磁気エネルギーが太陽コロナに蓄積され、なぜ突発的に解放されるのかを理解することが必要です。「ひので」可視光・磁場望遠鏡(SOT)がもたらした太陽表面の精密な磁場データを使い、フレアとその結果として生じたコロナ質量放出を再現することに成功しました。「ひので」は宇宙天気予報の改善・深化を目指した研究でも重要な役割を担っています。



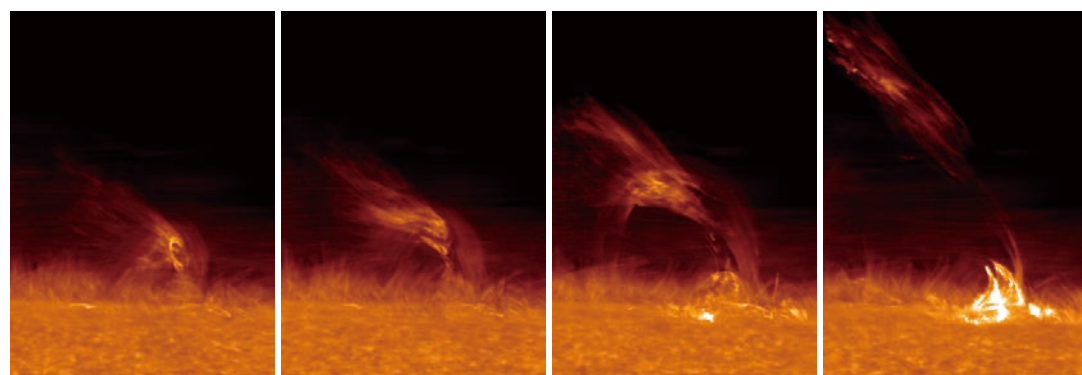
観測で得られた太陽表面の磁場境界条件としてモデル化した黒点上空の磁力線構造 (©名古屋大学宇宙地球環境研究所)



高エネルギー粒子が彩層に突入することで発生するフレアリボン。(カルシウムH線で観測) (©国立天文台/JAXA)

彩層におけるプラズマ噴出

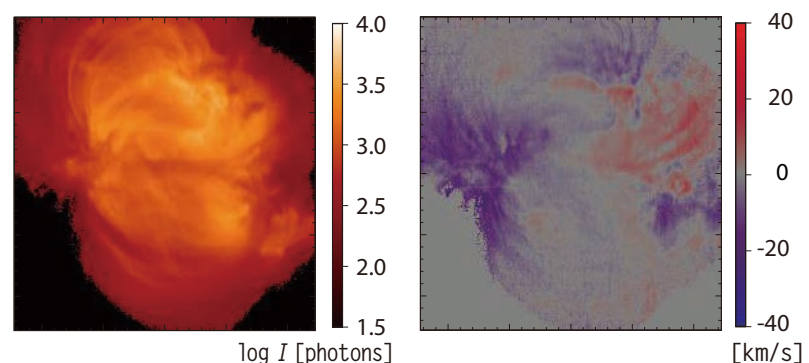
彩層は光球とコロナの中間に位置する大気層です。様々な空間スケール・時間スケールにわたり、プラズマ噴出現象が彩層で活発に発生している様子を「ひので」可視光・磁場望遠鏡(SOT)はとらえました。彩層で磁気リコネクションによりエネルギーが解放されている証拠です。



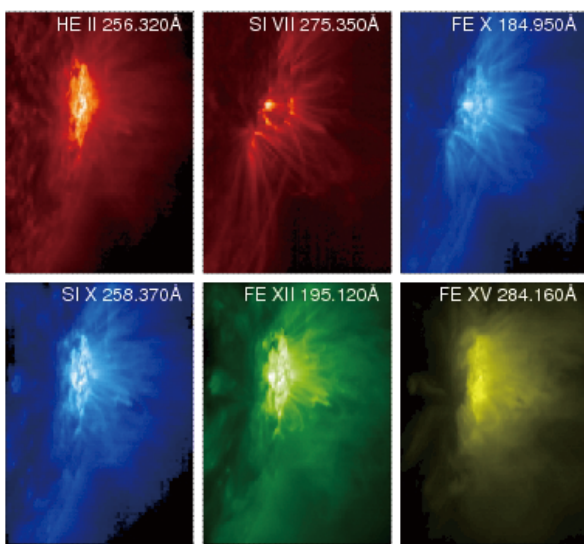
©国立天文台/JAXA

コロナの構造とプラズマ流

コロナ加熱や太陽風加速の物理機構を理解するためには、コロナから放射される輝線を分光観測し、温度・密度・速度といった物理量を測定することが重要です。「ひので」極端紫外線撮像分光装置(EIS)は、高解像度・高感度でコロナの分光観測を実現し、コロナループの根元付近でプラズマの上昇流を初めてとらえました。これはコロナ下部に加熱源・加速源が存在することを示しています。



活動領域コロナの輝線強度(左)とドップラー速度(右) (©国立天文台/JAXA)

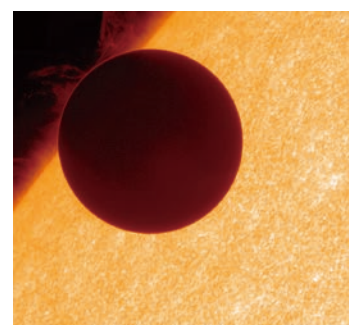


様々な極端紫外線(EUV)輝線で観測したコロナ (©国立天文台/JAXA)

「ひので」の3つの望遠鏡

SOT：可視光・磁場望遠鏡

可視光・磁場望遠鏡(SOT)は口径50cmの反射望遠鏡で、可視光領域において高い空間分解能で連続して太陽を観測することができます。太陽表面の小さな構造を判別できるだけでなく、その付近の磁場構造を詳しく調べたり、プラズマの運動の関係を調べたりすることが可能な観測装置です。SOTの観測により、太陽

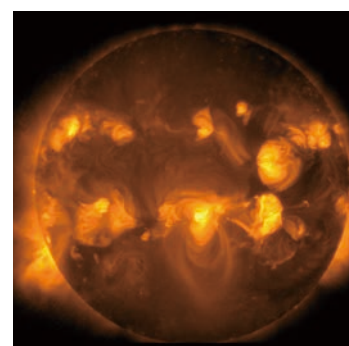


で起きるさまざまな現象の解明に不可欠な情報を得ることができます。

2012年6月6日に「ひので」SOTで観測された金星の太陽面通過。金星大気が見えています。(©国立天文台/JAXA)

XRT：X線望遠鏡

X線望遠鏡(XRT)は、X線領域において太陽コロナを高い空間分解能で観測する装置です。コロナは数百万度の高温プラズマでX線を放射します。ですが、X線は地球の大気で吸収されてしまうため、望遠鏡を宇宙に持っていかないと観測できません。XRTは日本のこれまでの太陽観測衛星「ひのとり」、「ようこう」に搭載

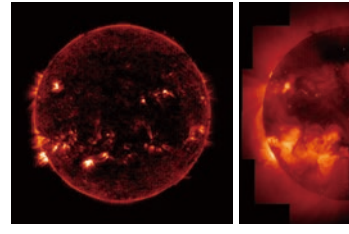


されたX線望遠鏡をさらに発展させたもので、これまでになく高い空間分解能を達成することで、太陽コロナの様子をより詳しく調べることができます。

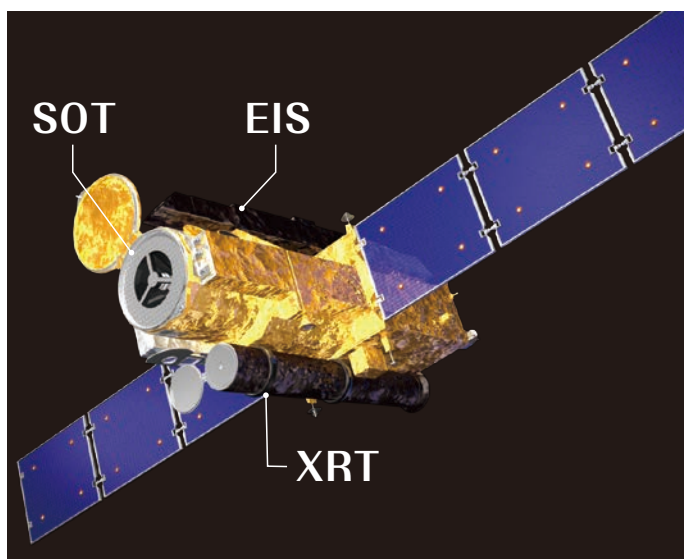
2014年4月18日にXRTで観測された太陽コロナ。(©国立天文台/JAXA)

EIS：極端紫外線撮像分光装置

極端紫外線撮像分光装置(EIS)は、極端紫外線(EUV)領域の分光観測を行います。太陽の大気は太陽表面付近で約6000度なのに対し、コロナでは数百万度です。しかし、どうやって上空の大気を加熱するのは良く分かっておらず、大きな謎となっています。EISはコロナや光球とコロナをつなぐ遷移層を分光観測し、プラズマの性質を詳しく調べることで、どのように磁場などのエネルギーが伝わるのかなどを解明します。



EISのスリットスキャンで観測した2012年4月20日の太陽全面像。左はSi VII 27.5nmで60万度、右はFe XV 28.4nmで250万度の大気層を見えています。(©国立天文台/JAXA/NASA)



太陽観測衛星「ひので」概要

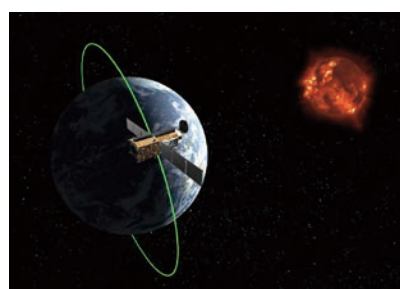
打ち上げ：2006年9月23日06時36分(日本時間)

軌道：高度約680km 太陽同期極軌道

大きさ：本体 約1.6m×1.6m×4m

太陽電池パドル間 約10m

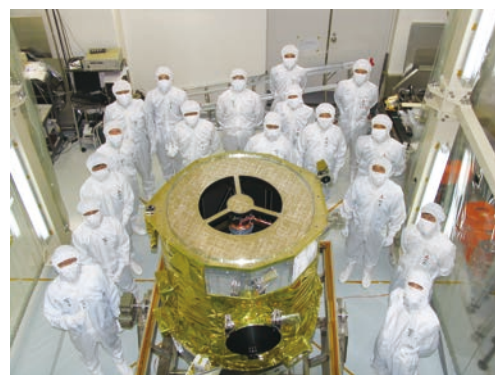
重量：約900kg



「ひので」は、地球の昼と夜の境目の上空の地上約680kmを、北極と南極を通過する「極軌道」で周回することにより、長時間の太陽観測を可能としています。(©JAXA)

ひのでチーム

国立天文台ひのでチームは宇宙航空研究開発機構(JAXA)と協力して「ひので」(SOLAR-B)衛星の観測機器設計・開発・運用とデータ解析において主導的な役割を担うと同時に、NASA・イギリス・ESA・ノルウェーとの国際協力体制を構築し推進してきました。国立天文台はデータ解析のための計算機資源を提供し、データ解析手法の議論や最新の科学成果の交流の場として、国内外の研究者、教育関係者に広く活用されています。また、広報の拠点として「ひので」の最新成果をリリースしています。「ひので」の成果は、次の太陽観測ミッションの検討、開発にも重要な役割を果たしています。

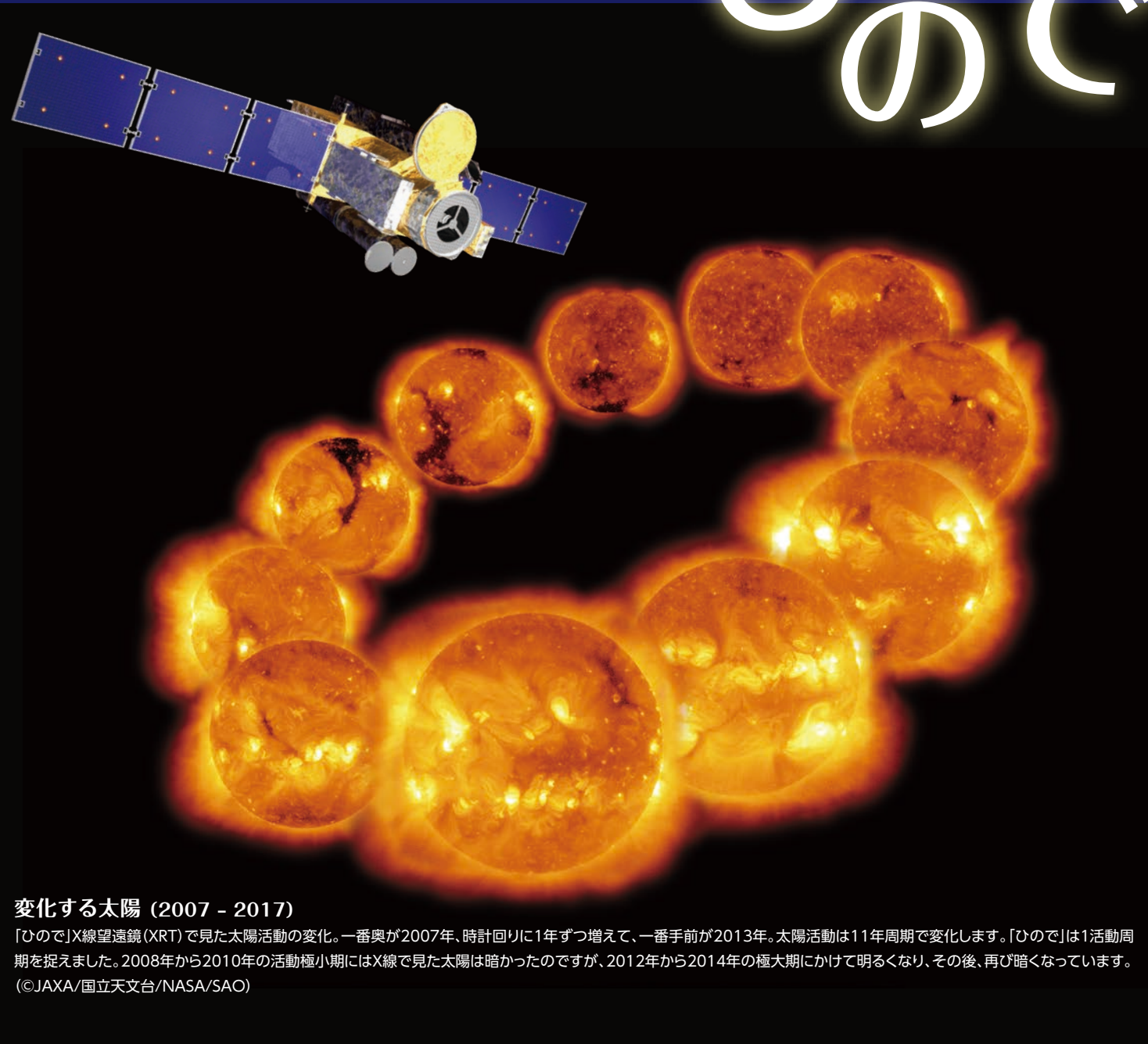


「ひので」SOT望遠鏡部分完成(2005年4月27日)。SOT望遠鏡部分とXRTカメラ部分は国立天文台が開発しました。(©国立天文台/JAXA)



太陽観測衛星 ひので SOLAR-B

ひので



変化する太陽(2007 - 2017)

「ひので」X線望遠鏡(XRT)で見た太陽活動の変化。一番奥が2007年、時計回りに1年ずつ増えて、一番手前が2013年。太陽活動は11年周期で変化します。「ひので」は1活動周期を捉えました。2008年から2010年の活動極小期にはX線で見た太陽は暗かったのですが、2012年から2014年の極大期にかけて明るくなり、その後、再び暗くなっています。(©JAXA/国立天文台/NASA/SAO)

太陽観測衛星「ひので」

「ひので」(開発名[SOLAR-B])は2006年9月23日に打ち上げられた日本で3番目の太陽観測衛星です。太陽コロナ・フレア・コロナ質量放出などの現象を観測し、天体プラズマで普遍的に起こる磁場を起源とするさまざまな現象の物理機構の解明を目指しています。高解像度に加え、太陽同期極軌道からの連続観測を実現し、太陽研究を大きく進展させる成果をもたらしています。

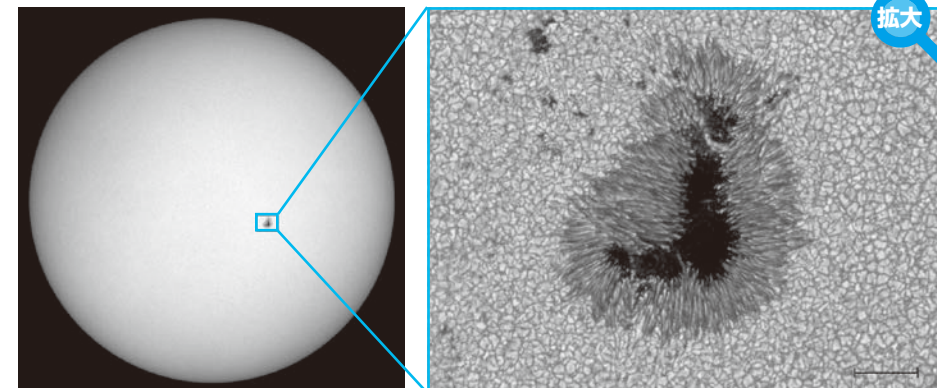
「ひので」は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所が国立天文台と協力して開発しました。3つの搭載望遠鏡の開発はアメリカ(NASA)、イギリス(STFC)との国際協力のもとで進められました。「ひので」の科学運用は、これらの研究機関およびヨーロッパ(ESA)とノルウェー(NSC)の協力のもと行われています。



「ひので」の打ち上げ。M-Vロケットに搭載された「ひので」衛星は、2006年9月23日に、鹿児島県にあるJAXA内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。(©JAXA)

太陽の顕微鏡観測

「ひので」に搭載された可視光・磁場望遠鏡(SOT)は、地球大気の影響を受けない宇宙空間から、これまでになく高い解像度で太陽表面を連続して観測することができます。これによって、太陽内部から磁場がどのように出現し、黒点がどのように形成されるかを調べることができます。

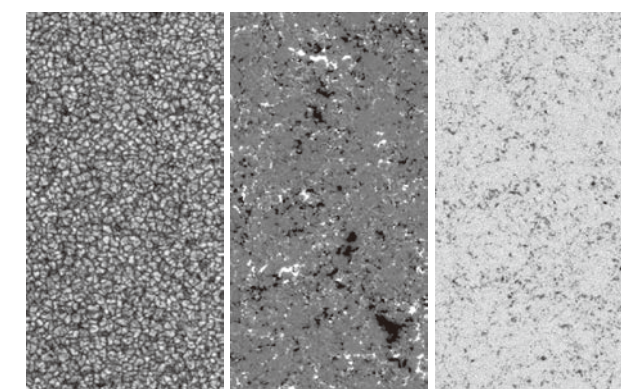


©SOHO(ESA&NASA)

「日本列島」黒点(©国立天文台/JAXA)

太陽全面をおおう水平磁場

「ひので」可視光・磁場望遠鏡(SOT)の高い偏光測定精度によって、これまで知られていたものと全く異なる性質を持つ磁場が発見されました。黒点よりずっと小さく寿命が短いという特徴があります。また、太陽面に対して水平方向を向いているため、短寿命水平磁場と呼ばれます。太陽全面をおおい尽くすように存在するため、そのエネルギーは膨大であり、コロナの加熱や太陽風の加速のエネルギー源となっている可能性があります。

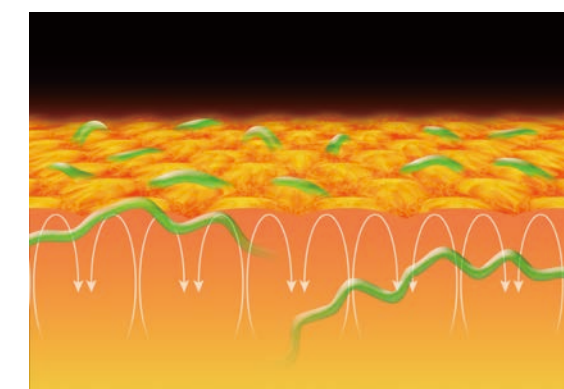


連続光

垂直磁場

水平磁場

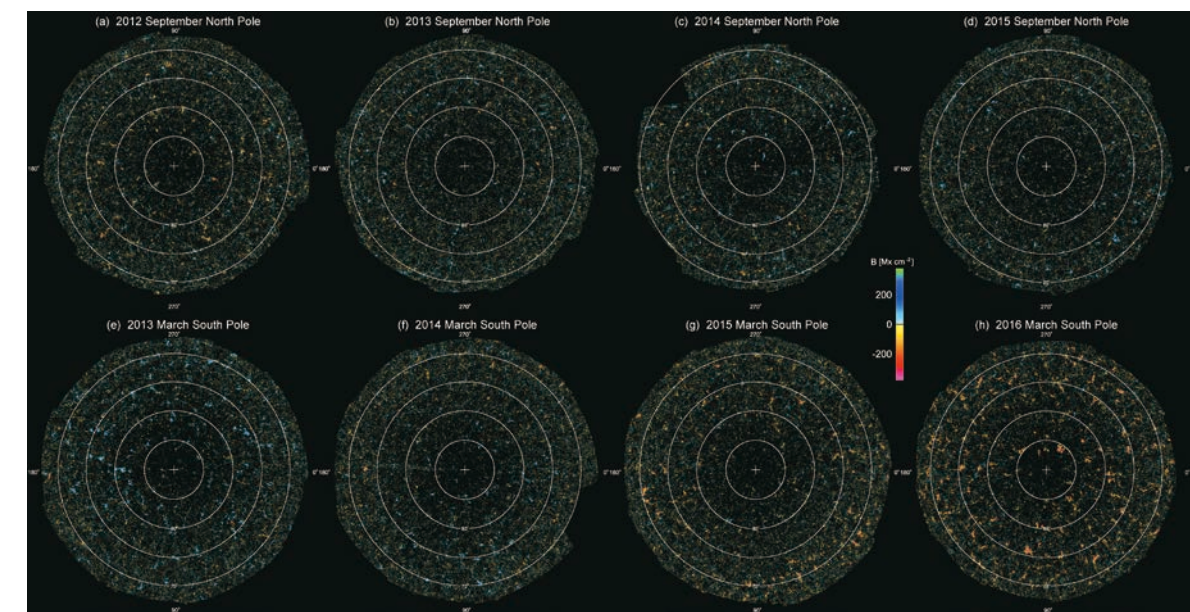
(©国立天文台/JAXA)



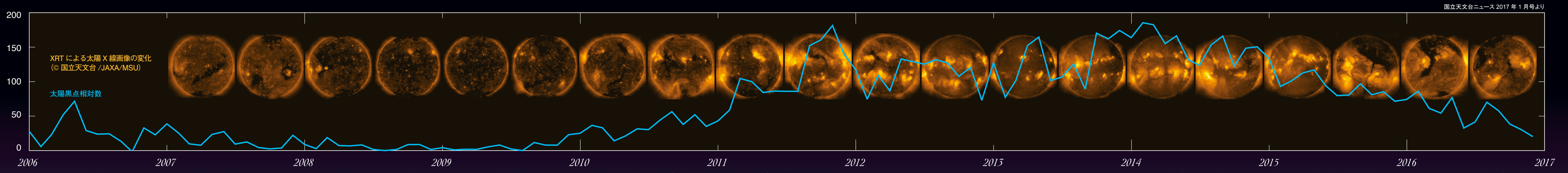
太陽表面の粒状斑と短寿命水平磁場の想像図

太陽極域の磁場

「ひので」の高解像能によって、極付近に黒点と同等の磁場強度を持つ小さなパッチがあること、その長期変動が明らかになりました。地球と違い、太陽の北・南極の磁場の極性は約11年毎に反転します。この極性反転が、「ひので」により初めて見えたパッチの極性が変化する(青⇄橙)ことで起きていることがわかりました。



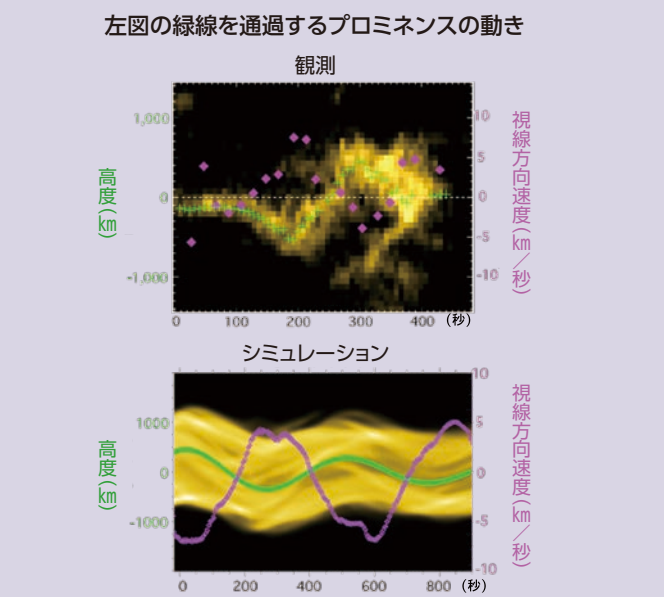
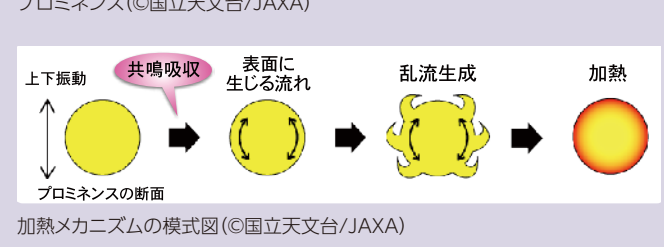
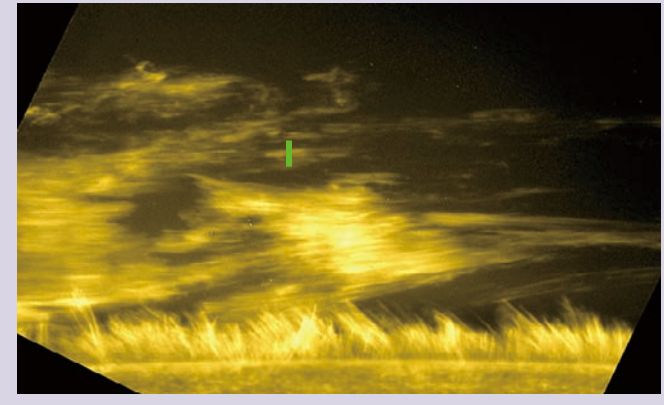
2012年9月～2015年9月の太陽の北極磁場のノルママップ(上段)と、2013年3月～2016年3月の太陽の南極磁場のノルママップ(下段)。青・緑の点は磁場のN極、黄・赤の点はS極を示します。(©国立天文台/JAXA/名古屋大学)



磁場を伝う波がコロナを加熱する過程を示した

「ひので」最大の成果の1つ、それは太陽大気中を伝播する波動の発見です。可視光・磁場望遠鏡(SOT)の高い解像能力は、太陽コロナ中に浮かぶプロミネンスが細長い筋状構造の集合体であることを示したばかりか、その微細構造の1つ1つが小さく振動していることを明らかにしました。そして、この振動はコロナ中の磁場を伝う波動(アルヴェン波)によって引き起こされていることがわかりました。アルヴェン波は太陽表面から上空のコロナにエネルギーを運び、高温コロナの生成に関わっているのではないかと長年考えられてきました。そのため、「ひので」による発見以降、コロナ加熱問題における波動の果たす役割に大きな関心が集まっています。そのような中、「ひので」及び米

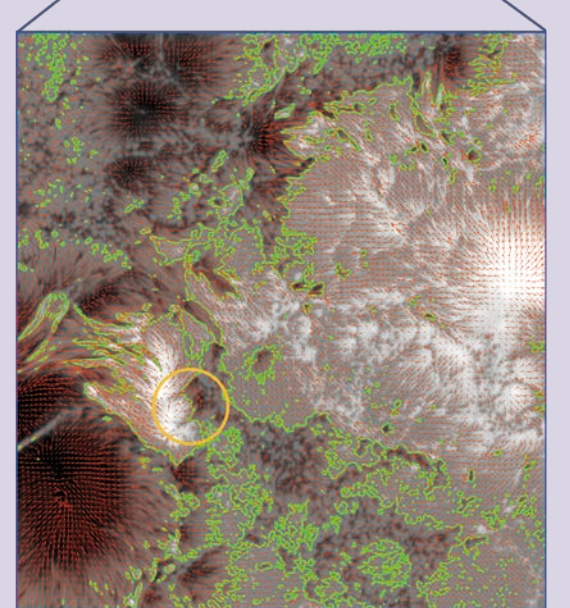
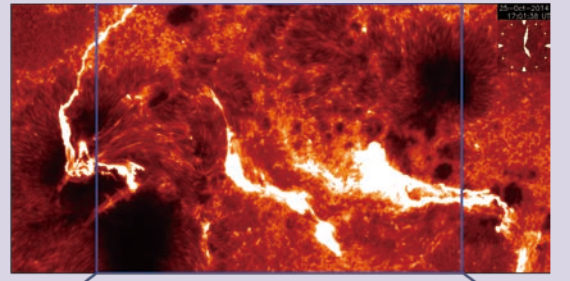
国の太陽観測衛星「IRIS」との共同観測から、プロミネンスの振動の中にこれまでに知られていない特異な運動を見い出しました。両衛星の観測による振動の3次元的運動に加え、スーパーコンピュータによる数値シミュレーションも駆使して調べたところ、コロナ加熱を引き起こすとされる波動の熱化に伴う現象であることがわかりました。この現象には共鳴吸収という物理過程が関わっており、観測で捉えられたのは初めてです。観測的研究が極めて難しいとされるこの過程を実証的に調べた意義は大きく、今後、波動によるコロナ加熱問題解明へ弾みが付くと期待されます。



大規模フレア発生の原因となる特徴的な磁場構造を世界で初めて特定

大規模な太陽フレアやコロナ質量放出(CME)が起こると、地球周辺の宇宙環境の擾乱や大きな磁気嵐などが起こることがあり、人工衛星や通信システムへの影響が懸念されます。したがって、高い精度でフレアやCMEの発生を予測することが重要と考えられており、そのためには、フレアやCMEの発生メカニズムを解明することが必要です。「ひので」衛星は、フレア・CME発生メカニズムについて、これまでに多くの新しい発見をしてきました。特に、可視光・磁場望遠鏡(SOT)による、高い時間分解能と空間分解能を活かした彩層の撮像観測と精密な光球面磁場観測により、大規模なフレア発生の原因となる特徴的な磁場構造(トリガ磁場)を世界で初めて特定しました。右図(上)は、2014年10月25日に、太陽活動周期24で最大の黒点群で発生したXクラスフレアにともなう、彩層における発光の様子です。東西に分布する大きな黒点の間に、白い筋状の3つの発光(フレアリボン)がみられます。右図(下)では同領域の光球面における磁場(白/黒=N極/S極、赤矢印は水平磁場の向きと大きさ)を示しています。黄色の丸で示したように、N極とS極の大きな黒点の間に、より小規模なN極/S極のペア(トリガ磁場)があることがわかります。この領域では、黒点領域の大規模な磁場に対して逆方向のねじれを持つ磁場が局所的に存在しており、このような磁場構造がフレアを引き起こす原因となること、が、「ひので」衛星の観測と数値シミュレーションとの比較から明らかになりました。こうしたトリガ磁場は、これまでに「ひので」衛星が観測した複数の大規模フレアで発見されており、太陽物理学最大の謎の1つである、フレア発生条件の解明に大きく貢献しました。今後は極端紫外線撮像分光装置(EIS)やX線望遠鏡(XRT)による観測とあわせて、

さらには他の衛星との共同観測により、さらに詳細なフレア・CMEの発生条件の解明を目指しています。

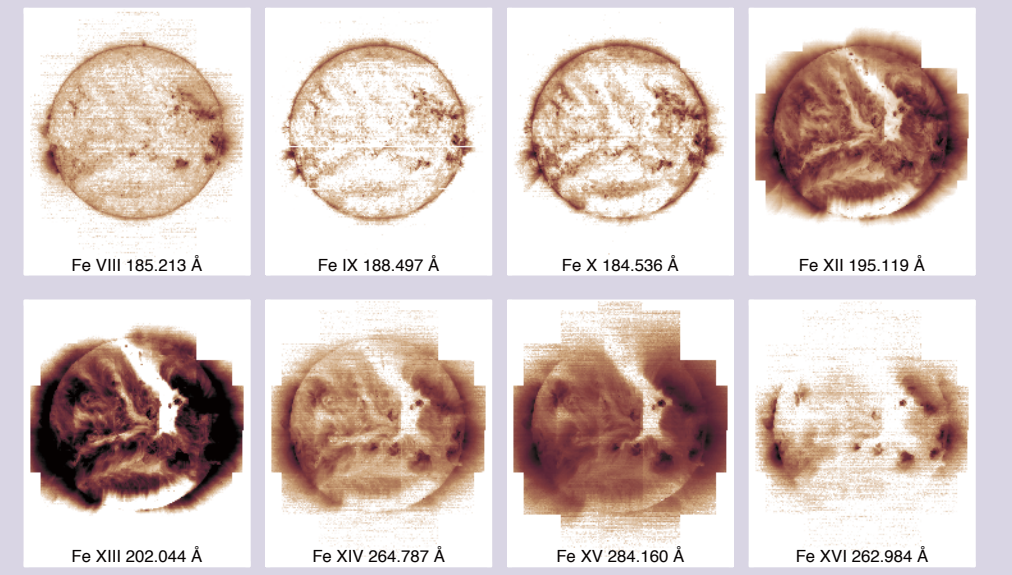


(上)2014年10月25日に、太陽活動周期24で最大の黒点群で発生したXクラスフレアにともなう、彩層における発光の様子。
(下)同領域の光球面における磁場(白/黒=N極/S極、赤矢印は水平磁場の向きと大きさ)。黄色丸印で示したのが、トリガ磁場。(©国立天文台/JAXA)

「ひので」極端紫外線撮像分光装置(EIS)の太陽全面観測による低速太陽風の源の特定

「ひので」極端紫外線撮像分光装置(EIS)は、視線方向の速度を観測して、太陽活動領域の端に高速(50 km/s以上)の上昇流を発見しました。コロナ磁場のモデルと比較してみると、この上昇流は開いた磁力線に沿っていることが多いので、コロナのプラズマが低速太陽風として流れ出す吹き出し口と考えられます。低速太陽風は特有の元素組成比を示します。太陽表面の元素組成と比べると、ケイ素、マグネシウム、鉄などの元素が比較的豊富に存在するのです。EISは上昇流中の元素組成比を測定することができ、上昇流の元素組成比が低速太陽風の特徴を持っていることを発見しました。しかし、残念ながら、個々の領域から推測される質量流束だけでは、地球近傍の環境で観測される太陽風の質量流束を説明するには足らなかったのです。また、EISの視野は狭いので、同時期の太陽面上、他に低速太陽風源があるかどうか探すのが困難でした。

さらに他の衛星との共同観測により、さらに詳細なフレア・CMEの発生条件の解明を目指しています。

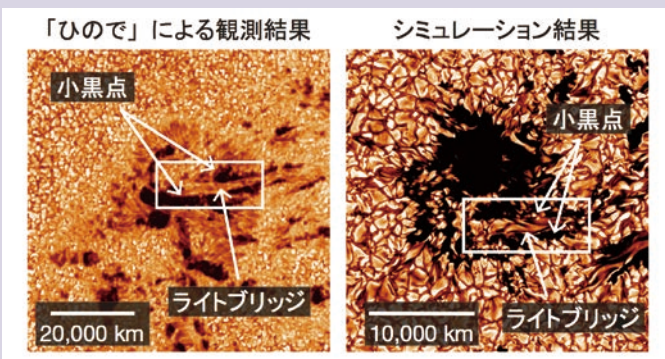


2015年4月に「ひので」EISが観測した、40万度~300万度の温度範囲の鉄(Fe)のスペクトル線による太陽コロナ(©国立天文台/JAXA/NASA)

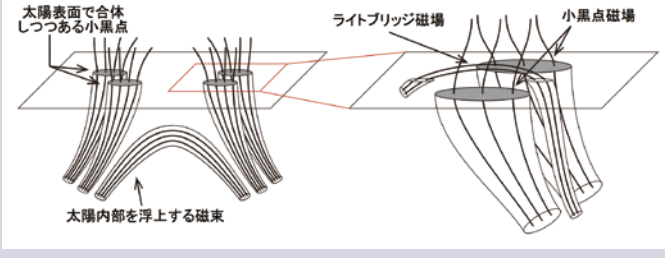
黒点形成時に発生する爆発・ジェット現象の仕組み

太陽黒点が形成される際には「ライトブリッジ」と呼ばれる磁場構造が出現し、そこではしばしば活発な爆発現象やジェット噴出が観測されます。ここでは「ひので」IRIS衛星の同時観測と数値シミュレーションを組み合わせた研究を行い、これらの爆発・ジェット現象が発生する仕組みを解明しました。はじめに、「ひので」衛星の取得した高精度の太陽表面磁場データを解析し、ライトブリッジ内部と周囲の黒点では向きや強度の異なる磁場が存在することを明らかにしました。次に、「IRIS」衛星による彩層や遷移層の分光観測からは、ライトブリッジ上空で見られる爆発・ジェット現象が、「磁気リコネクション」と呼ばれる磁力線のつなぎ替えによって繰り返し発生していることを示しまし

た。また、観測を行うことのできない太陽表面下の磁場構造を探るため、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションを実施し、黒点やライトブリッジを再現しました。その結果、ライトブリッジの内部には対流が発生しており、磁場が太陽深部から表面へと繰り返し持ち上げられていることが明らかになりました。はじめに、「ひので」衛星の取得した高精度の太陽表面磁場データを解析し、ライトブリッジ内部と周囲の黒点では向きや強度の異なる磁場が存在することを明らかにしました。次に、「IRIS」衛星による彩層や遷移層の分光観測からは、ライトブリッジ上空で見られる爆発・ジェット現象が、「磁気リコネクション」と呼ばれる磁力線のつなぎ替えによって繰り返し発生していることを示しまし



(左)「ひので」による形成中の黒点の観測。合体しつつある小黒点(白い部分)の間に「ライトブリッジ」と呼ばれる明るく細長い構造が現れています。
(右)黒点形成シミュレーションの結果。観測とよく似たライトブリッジが小黒点の間に形成されています。(©国立天文台/JAXA/LMSAL/NASA)



黒点形成時に発生する爆発・ジェット現象の仕組み。太線が磁力線を表します。
(左)太陽の内部から磁束が浮上し、表面を突破すると小黒点として現れます。小黒点は、ひとつの大きな黒点を形成するために、互いに接近します。
(右)合体しつつある小黒点の間には弱い水平な磁場が挟み込まれ、ライトブリッジが形成されます。ライトブリッジの水平磁場は小黒点の強い垂直磁場と繰り返し磁気リコネクションを起こし、その結果、ライトブリッジの上空で爆発現象やジェット噴出が発生します。