

講演4 「ひので」の先へ！～これからの太陽研究～ 一本潔

■「ひので」からわかったこと

- ・6000度の光球と100万度のコロナをつなぐ境界領域（彩層）は非常に激しく変化していて、太陽物理学の課題解明の鍵を握る。
- ・小さな要素構造で発生するプラズマ活動の連鎖によって大きな構造が形成される。

■「ひので」が問いかけるあらたななぞ

- ・太陽面近くにうごめく無数の微細な構造はどのようにして作られているのだろうか？
- ・それがどのように上空とつながり100万度のコロナや太陽風を生み出しているのだろうか？
- ・コロナの磁場はどうして突然爆発してしまうのだろうか？
- ・そもそもなぜ太陽の磁場は作られているのだろうか？



これらを解明するためには

■太陽観測の新たな挑戦

- ・もっと高い解像度を
- ・彩層磁場を測る 光球とコロナをつなぐ磁力線
- ・速い時間変化を捉える

■次期太陽観測衛星SOLAR-C計画 「ひので」からのジャンプ

- ・偏光分光能力の大幅強化 → 彩層磁場計測
- ・空間分解能の向上 約10倍（コロナ観測）、3倍（光球彩層観測）
- ・高感度（高スループット） → 時間分解能と精度の向上 約10倍
- ・観測波長の拡張による太陽大気的全階層アクセス

■SOLAR-Cの実現に向けて 観測ロケット実験CLASP

- ・水素が出すライマンアルファ線のわずかな偏光を捉えて、彩層の弱い磁場を検出！
- ・7年の歳月をかけて観測装置を開発！
- ・2015年9月 NASAのロケットに載せて打ち上げ、観測実施 → 観測データの取得に成功！



CLASPの打ち上げ ©NASA/MSFC

■太陽観測の将来計画

観測ロケット実験

CLASP-2

彩層・遷移層の磁場をCLASP以上に正確に調べ、彩層・コロナの加熱問題に取り組みます。紫外線を使った磁場計測の将来を切り開きます。

FOXSI-3

最高感度の太陽X線観測を行い、1000万度以上の高温のプラズマが、太陽のあらゆる場所にあることを確かめます。

気球搭載望遠鏡

Sunrise

近赤外線で高い精度の偏光観測を行い、光球、彩層の磁場を測定します。



発展  
発展  
協力

次期太陽観測衛星 SOLAR-C

紫外線分光望遠鏡 (EUVST)

SUVIT 焦点面装置群  
高解像度コロナ撮像装置 (HCI)

京都大学飛騨天文台 ドームレス太陽望遠鏡

SOLAR-Cで観測する候補となるスペクトル線で実際に太陽を観測して、磁場の導出方法やスペクトル線の優劣を検証します。



超大型地上望遠鏡 DKIST

©NSO/AURA/NSF



今までに見たことがない太陽の小さな構造の役割が明らかになります。

講演1 「ひので」参上～太陽研究新時代の幕開け～ 原弘久

■太陽について

皆既日食のときに見られるコロナは、太陽の上層大気で、温度は100万度。6000度の太陽表面（光球）の上はどうやって100万度のコロナがつくられるのでしょうか。高温コロナの生成は、太陽だけでなく他の多くの天体にも共通する天文学の謎の一つです。詳細な過程を観測できるのは太陽だけです。

また、太陽で起こる爆発現象であるフレアの予測ができるよう、フレアのメカニズムを研究することも重要です。

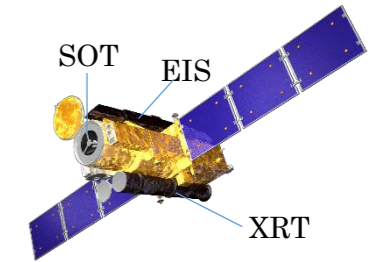
100万度のコロナや、フレアを起こすエネルギーの源は、いったい何でしょうか。答えは、**磁場**です。太陽の黒点は、磁場の強い所です。黒点周辺の上空には高温コロナのガス（もしくはプラズマ）がたくさん存在し、また、大きなフレアは通常、黒点の周辺で起こります。

天文学的な 太陽 の紹介

- ・「恒星」のひとつ。恒星とは、内部のエネルギーにより自分で輝いている天体のこと。
- ・直径140万km（地球の約109倍）のガス体
- ・中心部の核融合反応でエネルギーを生成
- ・平均密度1.4 g cm<sup>-3</sup>
- ・地球から約1億5000万km（太陽半径の215倍、地球半径の23400倍）だけ離れた最も近い恒星 → 標準的な星として宇宙の実験室の役割
- ・自転周期 赤道：約27日 極域：約32日
- ・表面活動が約11年の周期で変動
- ・総放射量が太陽11年周期とともに0.1%程度変動する変光星

■「ひので」について

- ・「ひのとり」、「ようこう」に続く日本で3番目の太陽観測衛星。
- ・地球のまわりをまわっています。高度680 km。
- ・可視光・磁場望遠鏡(SOT)、X線望遠鏡(XRT)、極端紫外線撮像分光装置(EIS)の3つの望遠鏡を備えています。



ひので衛星

■なぜ宇宙へ行って観測する必要があるのか？

【理由1】「ひので」が観測したいのは、太陽面の微細な構造や磁場・速度場の様子です。地上観測では、大気がゆらゆらと揺れるので像が揺らぎ、観測に大きな影響を与えます。

【理由2】コロナは高温なので、波長の短い電磁波であるX線や紫外線を放射します。ですから、コロナを調べるためには、X線や紫外線を観測する必要があります。しかし、それらは地球の大気に吸収され、地上まで届きません。

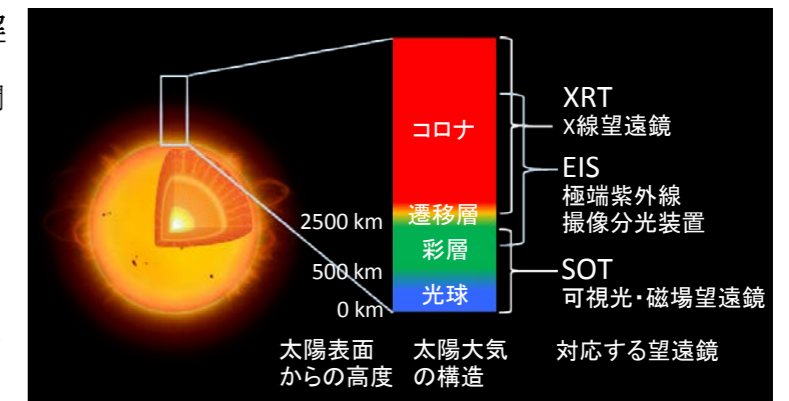
■なぜ「ひので」が必要だったのか～「ひので」に託された使命～

・3次元的な観測による太陽活動の理解

太陽活動を理解するためには、光球からコロナまでを3次元的に、高い空間分解能で観測することが必要です。太陽の大気は層をなして、光球から上の層については、各層が違った波長の光を出すので、見る光の波長を変えることで、それぞれの層を見ることができます。「ひので」は観測する波長域の異なる3つの望遠鏡で、光球からコロナまでを同時に、高い空間分解能で観測することができるのです。

・「ようこう」衛星からの飛躍

「ようこう」のX線画像観測から、フレアが磁力線のつながり替わり（講演3参照）で起こることがほぼ疑いのないものとなりました。それでは、磁場がつながり替わる領域ではどのようなことが起こっているのでしょうか。それを調べるためには撮像観測に加えて分光観測によりコロナガス（もしくはプラズマ）の物理量を測定することが必要で、EISが搭載されました。また、フレアの予測につなげるためには、どのような磁場構造がきっかけとなってフレアが起こるのかが重要です。それを調べるためには表面磁場の精密測定が不可欠で、そのためSOTが搭載されました。



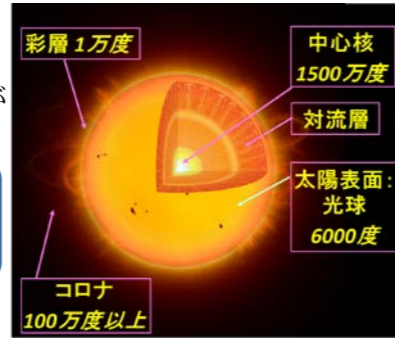


講演2 太陽表面は6000度、上空大気は100万度の謎を追え！ 清水敏文

■コロナ加熱問題

太陽エネルギーは、中心部で核融合反応により作られています。太陽表面よりも中心から離れたところにあるコロナのほうが温度が高いのは、どうしてなのでしょう？

光球で対流により踊らされる“磁束管”の運動エネルギーは、コロナ加熱量の10~1000倍。どうやってエネルギーがコロナまで運ばれ、コロナを加熱するのか？



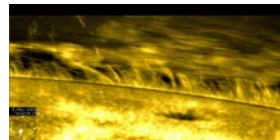
■磁場を介したコロナの加熱方法 有力な2つの考え方

- ・磁力線を伝って“波”が伝播、コロナで熱化 <波動加熱説>
- ・多数の微小フレア（マイクロフレア・ナノフレア）がコロナを加熱 <ナノフレア説>

■「ひので」による<波動加熱説>と<ナノフレア説>の検証

<波動加熱説>

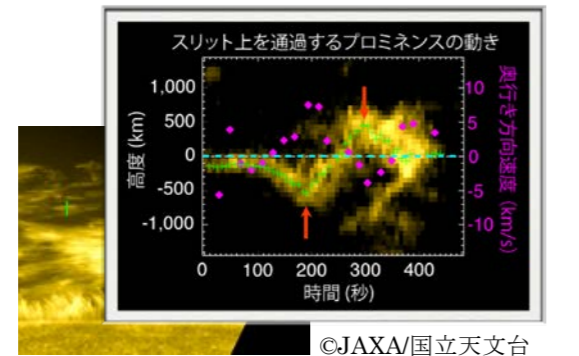
- ・磁力線を伝う“波動”の発見



©JAXA/国立天文台

ひので/SOTにより、プロミネンスの振動を発見。プロミネンスを構成するプラズマは磁力線に沿って動く性質があるので、プロミネンスの振動は磁力線を伝う波の存在を表していると考えられます。

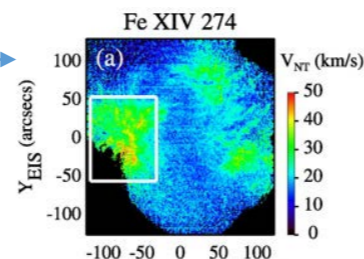
- ・波動の熱化現場を初めて捉えた



©JAXA/国立天文台

「ひので」によりプロミネンスの上下振動を、IRISによる紫外線の分光観測により奥行き方向速度を調べたところ、振動の最上点と最下点で奥行き方向速度が最大、中央位置で奥行き方向速度ゼロとなりました。これは通常の振動と異なります。シミュレーションの結果から、共鳴吸収とそれに伴う乱流（渦）の生成により加熱が起こる可能性が示されました。

H. Hara et al, Coronal Plasma Motions near Footpoints of Active Region Loops Revealed from Spectroscopic Observations with Hinode EIS, ApJ, 678: L67-L71, 2008 May 1.



<ナノフレア説>

- ・コロナループ足元で上昇流の発見

ひので/EISにより分光観測を行い、輝線の幅から乱流速度を求めると、右図のようになりました。黄色い所がコロナループの足元ですので、横から見た時の情報も加えてコロナループ足元で上昇流があることがわかりました。これより、微小フレアがコロナを加熱している可能性が考えられます。

●分光観測(1) 奥行き方向の速度を求める

光を波長（色）ごとに分けることを分光といいます。波長ごとの強度を順に並べたものをスペクトルといいます。原子やイオンは、その種類ごとに決まった波長の光を吸収したり放出したりする性質があります。そのため、太陽光のスペクトルを観測すると、ある波長だけが強い「輝線」や、逆にある波長だけが弱い「吸収線」が現れます。

撮像観測を連写すると面内の物質の動きはわかりますが、奥行き方向の動きはわかりません。奥行き方向の動き、つまり、物が私達に近づいてくるのか遠ざかっていくのかを調べるためには、どうしたらよいでしょうか？救急車のサイレンの音を思い出してください。走っている救急車のサイレンの音の高さが変化して聞こえる場合がありますね。これは、音が波で、音を出している物が近づいてくるときには波長が短くなり、遠ざかっていくときには波長が長くなるからです（ドップラー効果といいます）。光も波なので、同じように、光を出している物が近づいてくるときには波長が短くなり、遠ざかっていくときには波長が長くなります。もともとの光の波長は、その光を出す原子やイオンの種類ごとに決まっていますから、観測される波長もとの波長より短いか長いかで、光を出している物がこちらに近づいてきているのか、遠ざかっていっているのかが分かるのです。したがって、分光して光の波長のずれの様子を測定すれば、奥行き方向の速度がわかります。

講演3 太陽フレアから地球を守れ！ 草野完也

■太陽フレアとは

- ・黒点のエネルギーが爆発的に解放される現象
- ・水爆の10万個~100万個分のエネルギー
- ・電磁波（可視光、紫外線、極端紫外線、X線）およびプラズマ（電気を帯びた粒子）が放出される。

■太陽フレアが地球に及ぼす影響

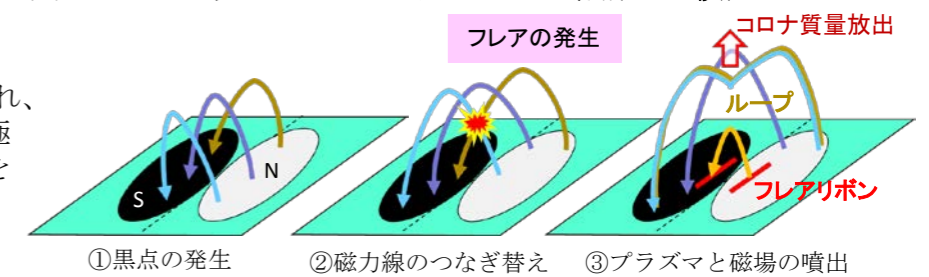
- ・宇宙放射線による宇宙飛行士・航空機乗員の被曝
- ・電離圏擾乱による測位・通信障害
- ・地磁気誘導電流による電力網障害と停電
- ・衛星障害・軌道影響

フレアが予測できれば、事前に対策がとれる。

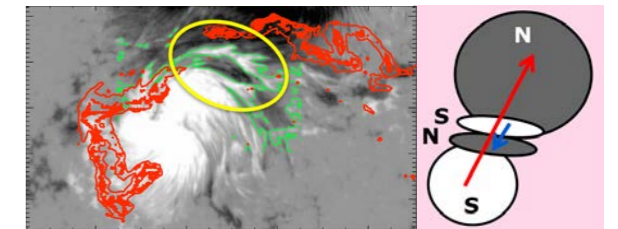
そのためには、フレア発生メカニズムの解明が必須！

■フレア発生メカニズムの研究~フレア発生のきっかけとなる磁場構造の検証~

大きなフレアは通常、黒点のある所で起こります。黒点は通常、2個ペアで現れ、片方がN極、もう片方がS極で、N極からS極へ磁力線を描くことができます（右図）。右図②のように、向きの異なる磁力線同士が接近し、つなぎ替わるのがフレアのメカニズムです。しかし、何がフレア発生のトリガ（きっかけ）になるかが分かっていません。N極とS極の境目に小規模な磁場が出現すると、それがトリガになることが考えられます。そこで、大規模磁場と小規模磁場の構造がどうなったときにフレアが発生するかを、数値シミュレーションにより調べたところ、ある特定の磁場構造のときにフレアが発生することが見出されました。



次に、実際のフレアでひので/SOTによる精密な磁場観測データと数値シミュレーションで見出された磁場構造とを比較したところ、フレア発生時には右図のように、数値シミュレーションで見出されたような磁場構造が観測されていたことがわかりました。



「ひので」が観測したフレア発生時の磁場構造（左）とシミュレーションで見出された磁場構造（右）  
K. Kusano et al., Magnetic Field Structures Triggering Solar Flares and Coronal Mass Ejections, ApJ, 760:31, 2012 November 20.

次に、実際のフレアでひので/SOTによる精密な磁場観測データと数値シミュレーションで見出された磁場構造とを比較したところ、フレア発生時には右図のように、数値シミュレーションで見出されたような磁場構造が観測されていたことがわかりました。

■太陽地球圏環境プロジェクト(PSTEP)

全国20研究機関、約100名の研究者で、太陽地球環境の新しい予測に挑戦する研究プロジェクトです。

●分光観測(2) ゼーマン効果による磁場の測定

磁場があるとゼーマン効果によりスペクトル線（輝線や吸収線のこと）が分裂し、偏光もします。磁場が強いほど分裂の波長幅が大きくなるので、分裂の幅から磁場の大きさがわかります。しかし、磁場が弱いとスペクトル線の分裂は検出できません。偏光を観測すると、スペクトル線が分裂しないような弱い磁場まで測定することができます。

偏光とは、波の振動の方向がそろったことです。偏光は、偏光した光に感度のある「偏光素子」を回転させることで測定できます。偏光素子の一つに3Dメガネなどに用いられる偏光板があります。偏光板は、ある方向に振動する偏光だけを通します（図）。そのため、回転する偏光板を通して偏光した光を見ると明るくなったり暗くなったりします。暗くなる度合いから偏光の度合い（偏光度）が分かり、どの向きに回したときに暗くなるかで偏光の向きがわかります。これが偏光測定の原理です。こうしてスペクトル線の偏光を測定すれば、偏光度から磁場の強度を、偏光の向きから磁場の向きを知ることができます。

