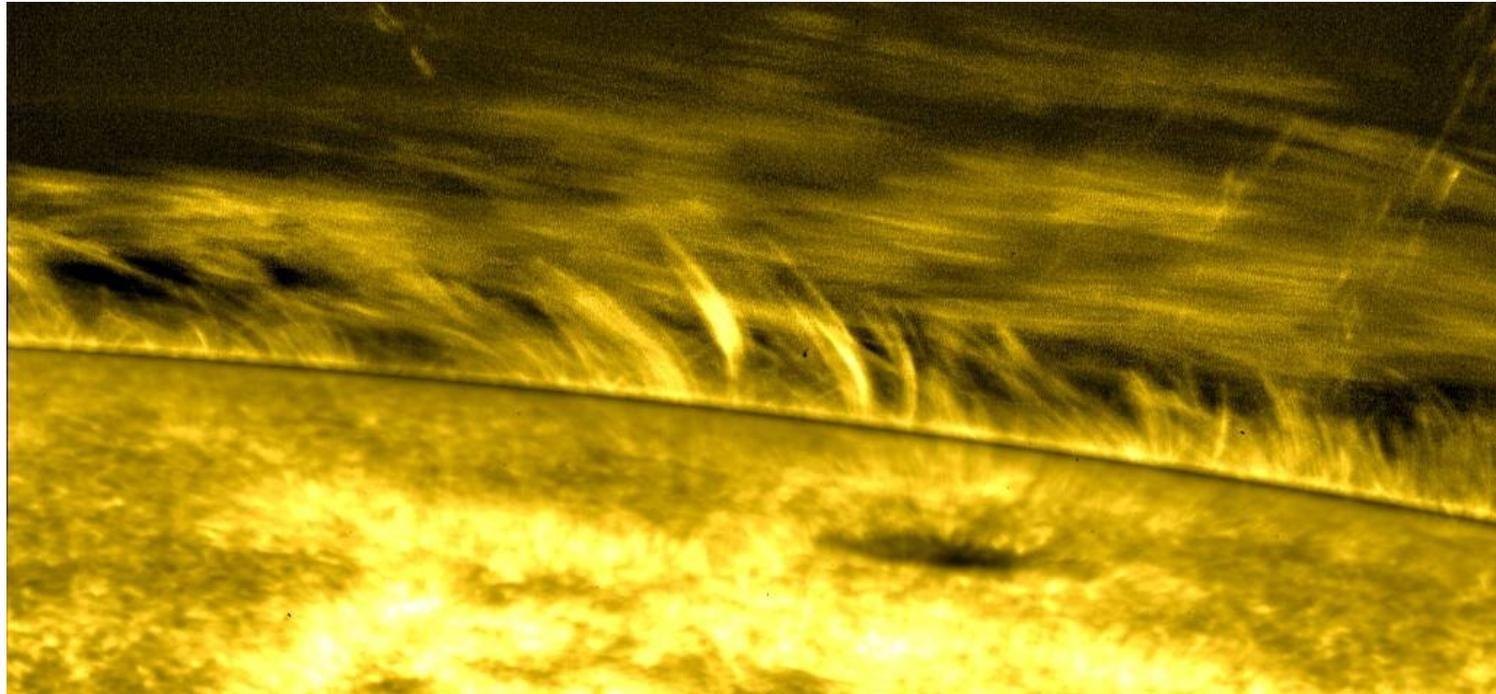


コロナの加熱に重要な役割を果たす アルベン波を「ひので」により発見



JAXA / 国立天文台 (アルファベット順)

岡本文典

国立天文台 特別共同利用研究員

京都大学大学院理学研究科附属天文台 博士3回生

日本学術振興会特別研究員

論文タイトル : 太陽コロナ中を伝播する横波(アルベン波)の検出

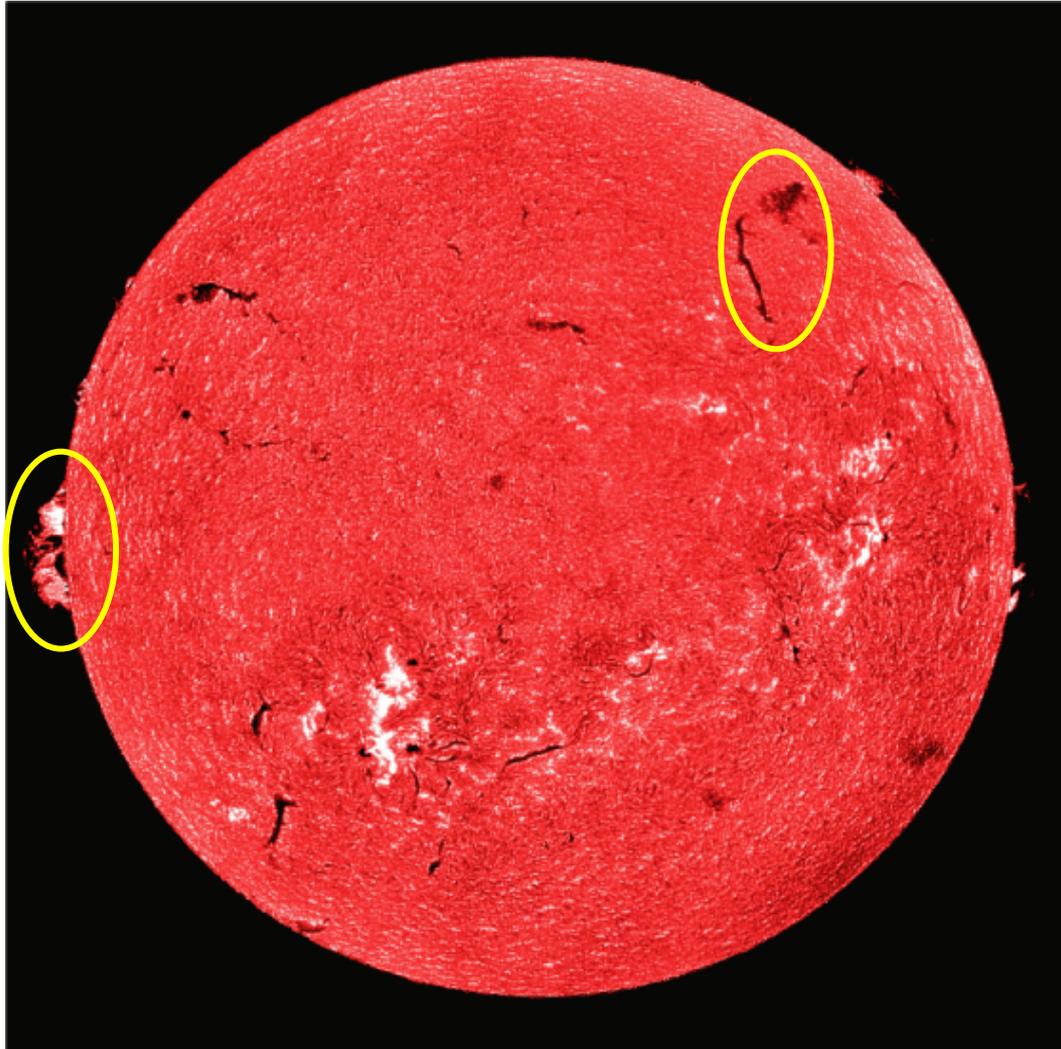
著者 : 岡本文典、常田佐久、Berger, T. E.、一本潔、勝川行雄、Lites, B. W.、永田伸一、柴田一成
清水敏文、Shine, R. A.、末松芳法、Tarbell, T. D.、Title, A. M.

Science 2007年12月7日号

発表要旨

- 「ひので」可視光望遠鏡による観測から、コロナ中を伝播する横波(アルベン波)を検出した。
- 従来より、磁場を伝わる波のエネルギーによってコロナを加熱しているとの説があったが、太陽大気中でのアルベン波の発見はひのでの観測が初めてである。
- 今回の発見は、太陽物理の大きな謎であるコロナ加熱問題(6000度の太陽が100万度のコロナを加熱維持できる理由)を解決するための鍵となると期待される。

プロミネンス



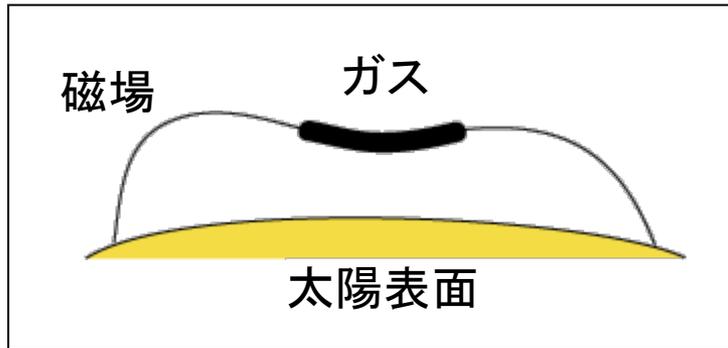
京大飛騨天文台のSMART望遠鏡で撮影した太陽全面像(H α 線)

プロミネンスとは、100万度の高温大気(コロナ)中に浮かぶ密度の濃い1万度程度の**低温ガス**のことです。太陽面上にあるときは背景が明るいために黒く、太陽縁上にあるときは背景が暗いので明るく見えます。

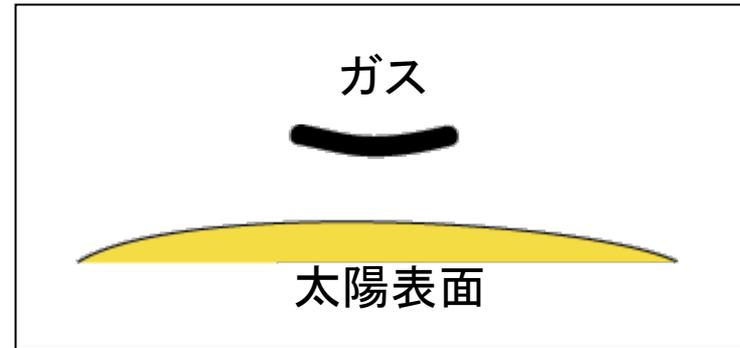


ビッグベア太陽天文台による
太陽縁上のプロミネンス画像(H α 線)

プロミネンスと磁場



ガスは磁場に支えられている

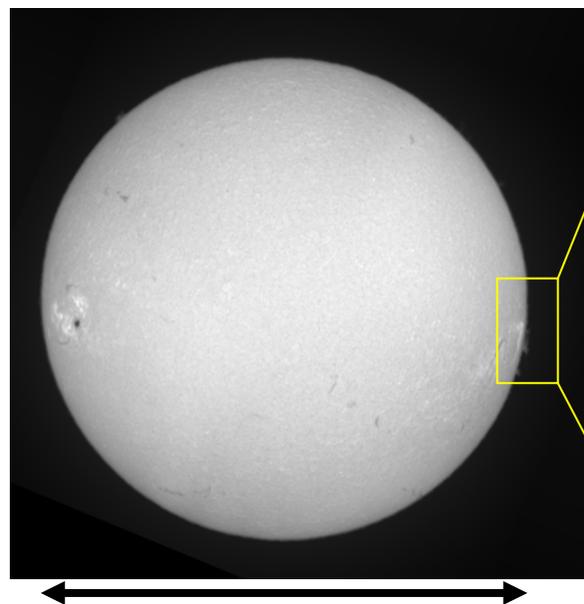


観測では浮いているように見える

プロミネンスはコロナ中に浮いているように見えますが、実際は**コロナ中にある磁場によって支えられている**と考えられています。コロナ磁場がハンモックの役割を果たし、プロミネンスガスが太陽表面に落下するのを妨げています。磁場は通常目に見えませんが、ガスが存在しているところは磁場の形状を知ることができます。つまり、**プロミネンスの微細な構造を観測することで、コロナ磁場の性質を調べることができます**。黒点の形成やフレアなどの太陽活動は磁場と密接な関係があることから、太陽を理解する上で磁場の存在・役割を解明することが重要となります。

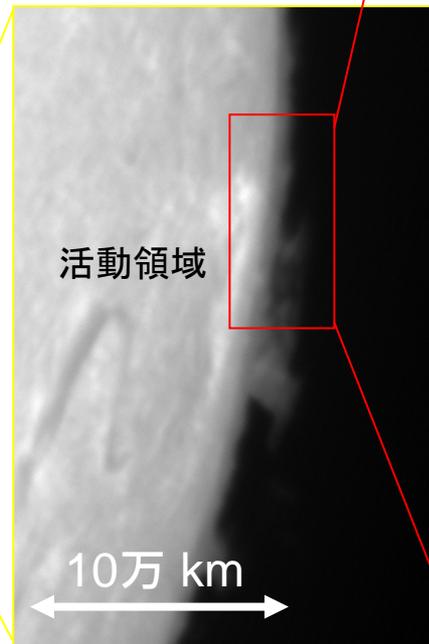
観測領域

今回、プロミネンスの微細な構造を明らかにすることを目的に、「ひので」の可視光望遠鏡で活動領域に付随するプロミネンスの観測を行いました。この観測から、プロミネンスを太陽の縁上空に**微細な筋状の集まり**として捉えることに成功しました。この筋の1つ1つがコロナ磁場の一部分を表しています。



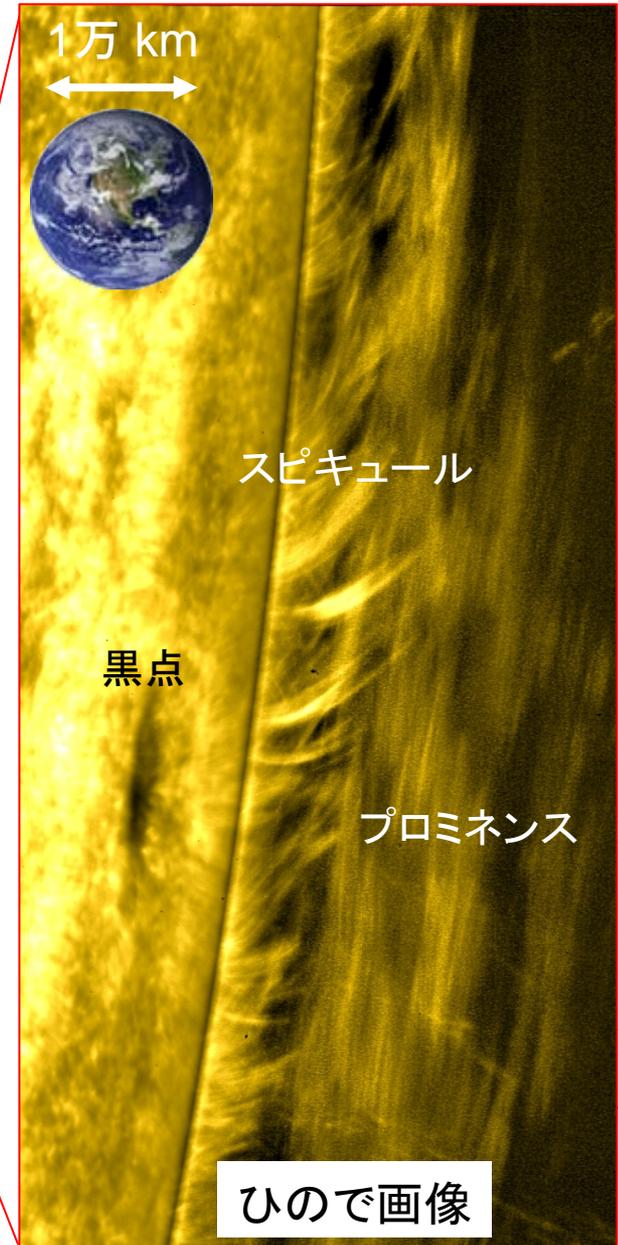
140万 km

地上望遠鏡による太陽画像



活動領域

10万 km



1万 km

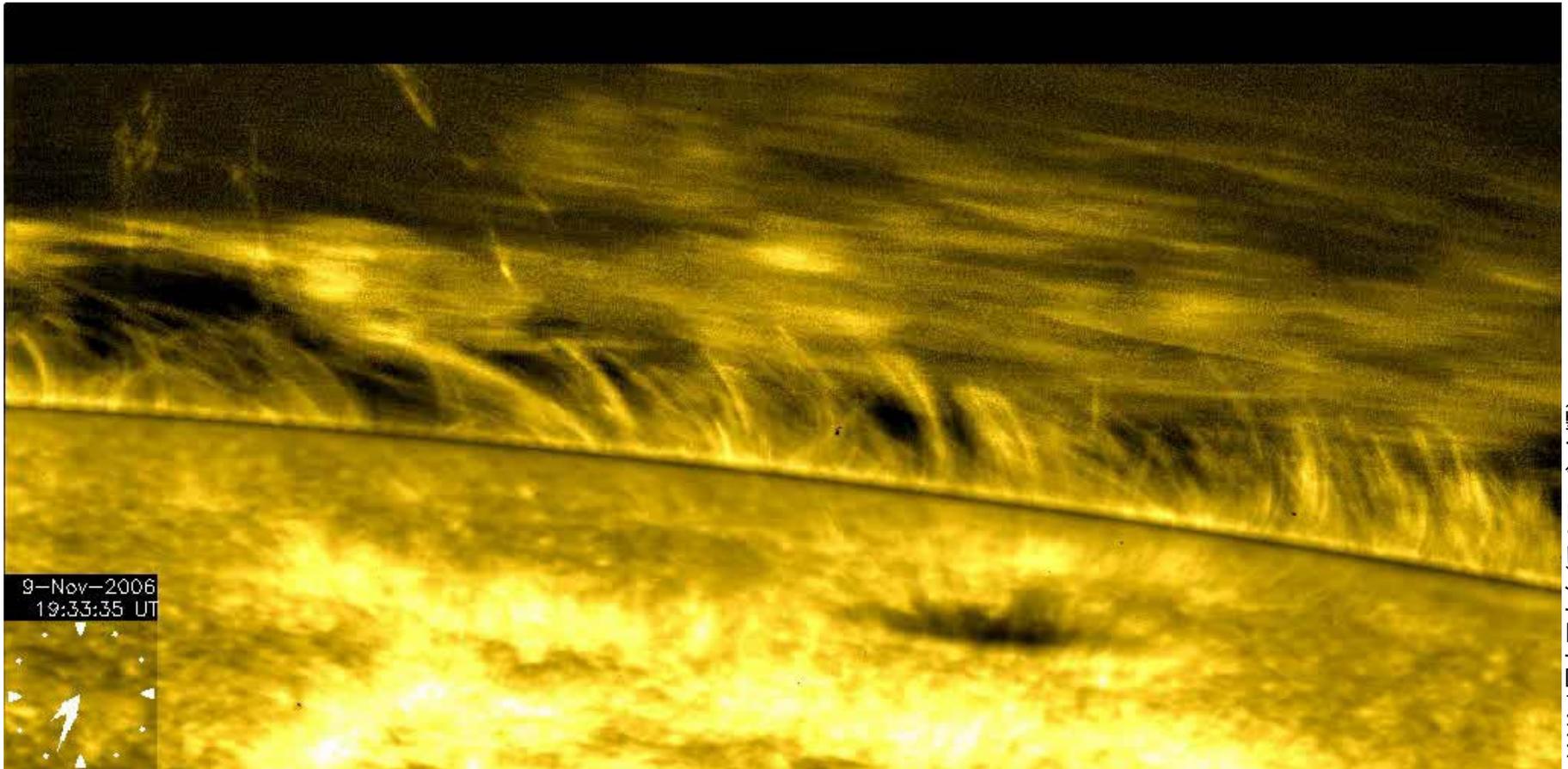
スピキュール

黒点

プロミネンス

ひので画像

プロミネンス動画



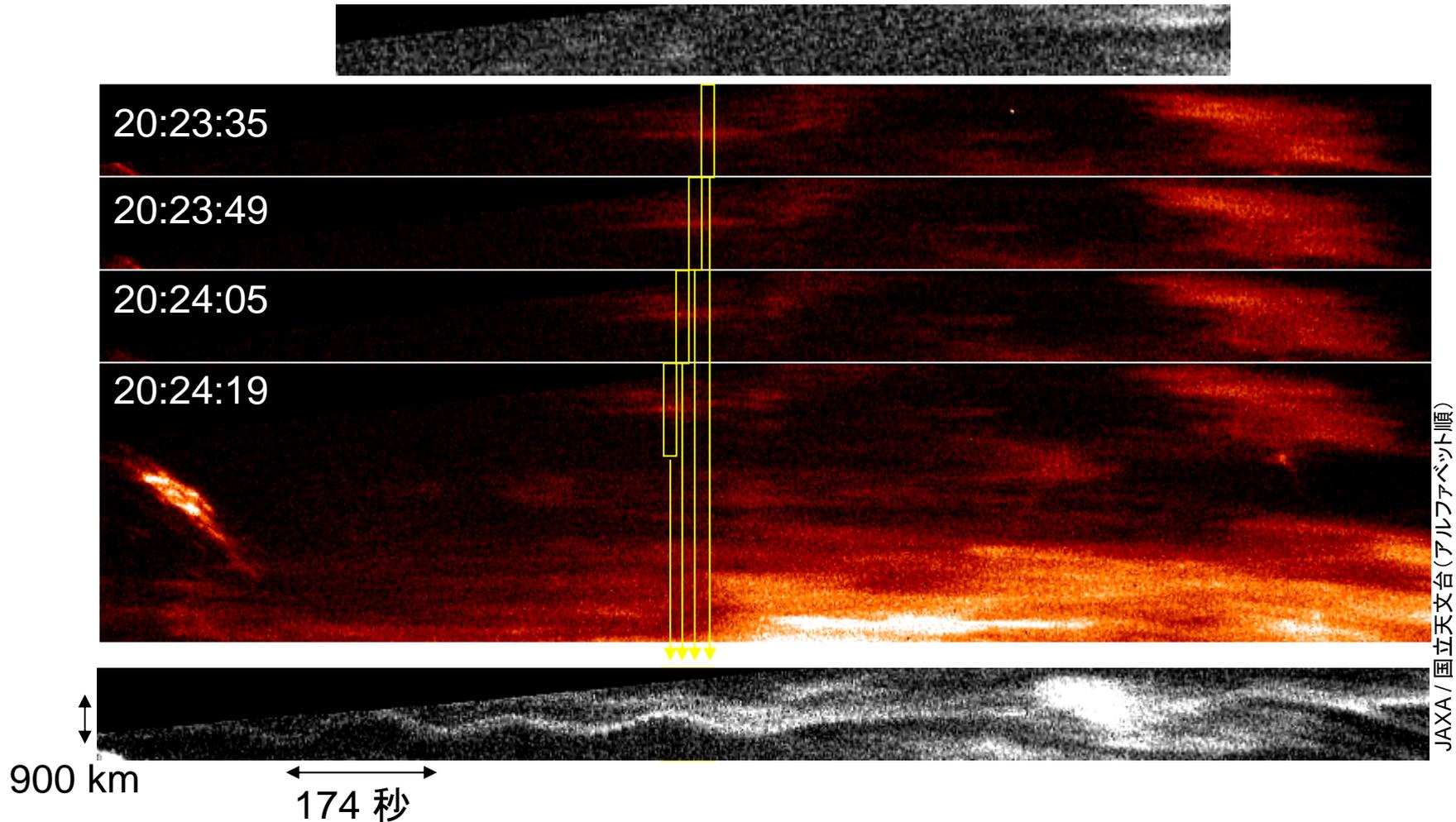
JAXA / 国立天文台 (アルファベット順)



1万 km

プロミネンスは筋状の集まりで、この筋構造(スレッド)は毎秒 40 km もの高速で水平方向に飛び回っています。それだけではなく、鉛直方向に振動しているのも多数観測されました。(動画上部参照)

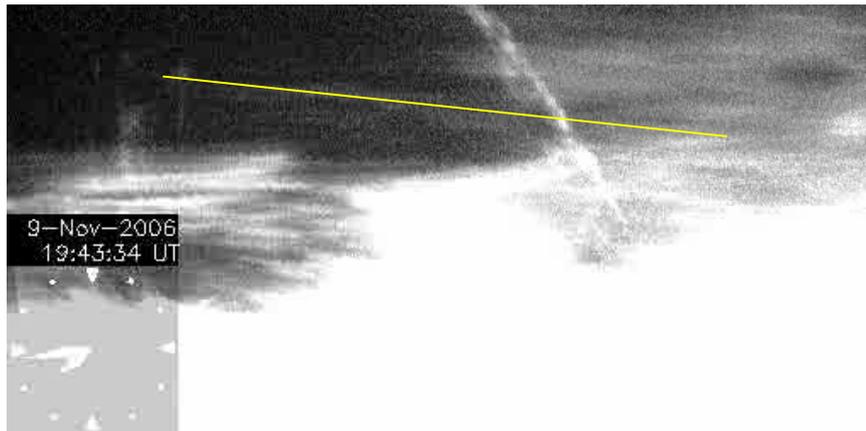
筋状構造の鉛直振動(例1)



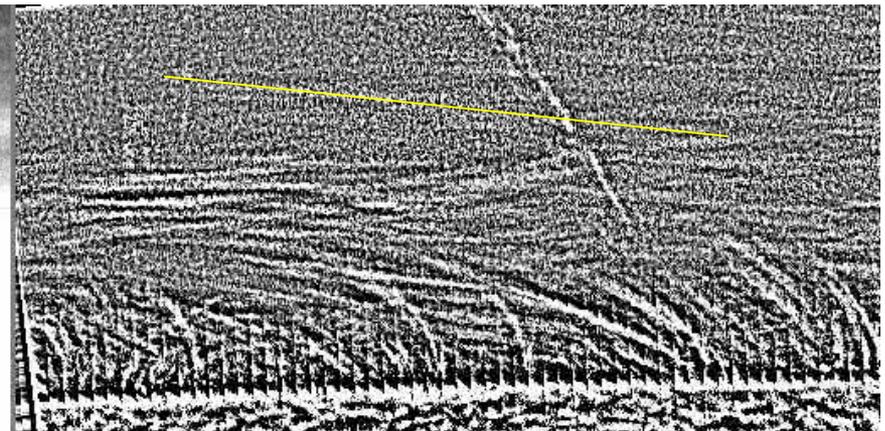
筋状構造の移動とともに一部分を切り出して並べたものです。ゆえに、横軸方向は、空間(場所)であり時刻でもある特殊な図です。振動振幅は 900 km と非常に微小で、**これほど小さな振動はこれまで観測されておらず、ひのでが初めて捉えました。**

筋状構造の鉛直振動(例2)

(クリックして再生)



生画像



補正画像(アンシャープマスク処理)

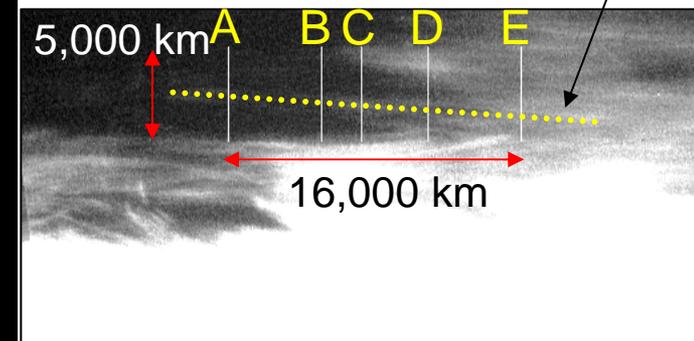
JAXA / 国立天文台 (アルファベット順)

16,000 km もの長さを持つ筋状構造全体が同期して振動しているのが観測されました。(黄色い線に沿った筋状構造が振動する)

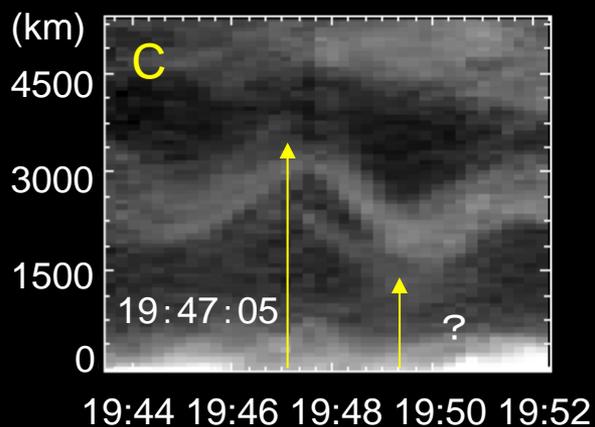
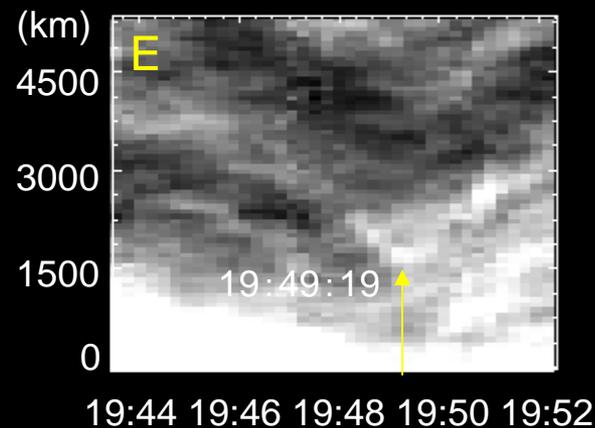
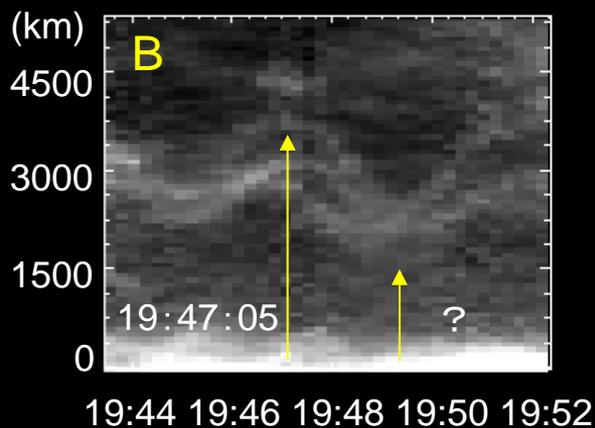
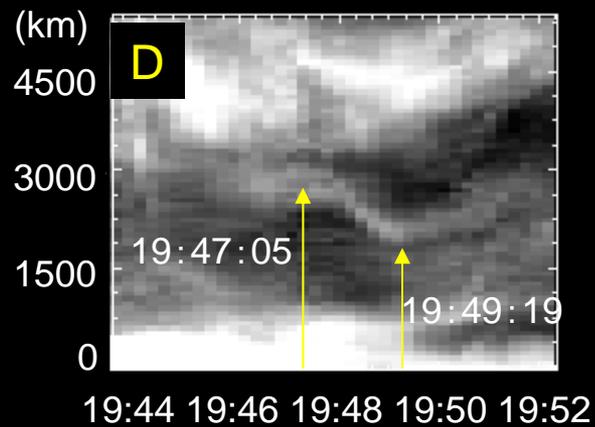
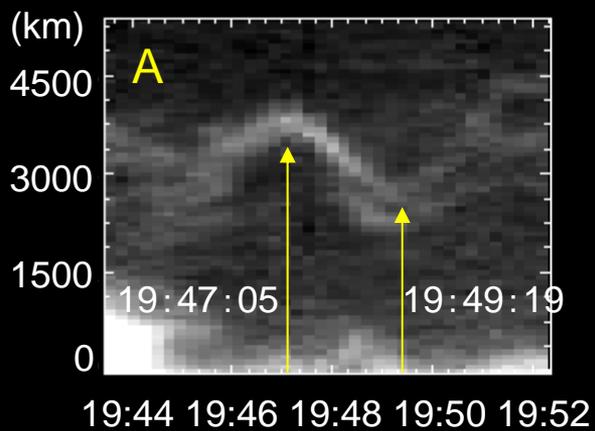
筋状構造の鉛直振動 (例2)

下図の縦線の部分(A~E)の時間変化を表示したものが左図です。筋状構造の縦方向の動きを調べることができ、同じ時刻に上下に振動しているのが確認できます。

筋構造の位置



JAXA / 国立天文台 (アルファベット順)

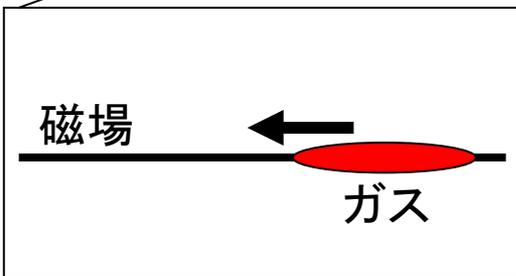
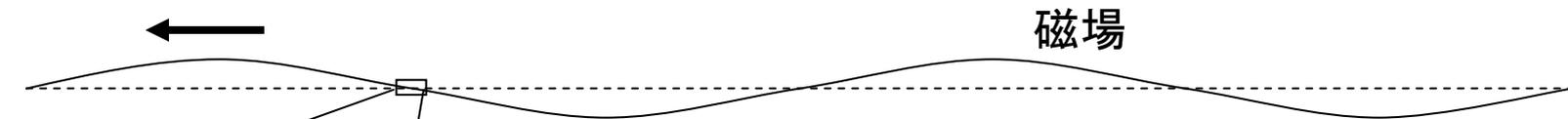


高さ (km)

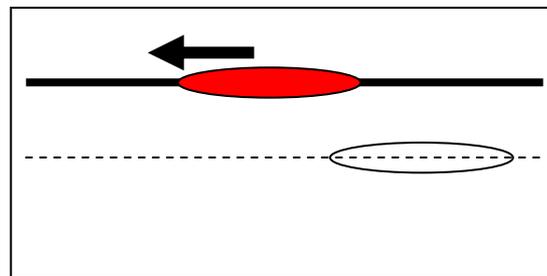
時刻

コロナ磁場を伝播するアルベン波

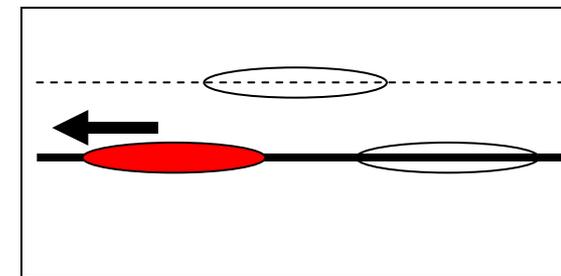
磁場に沿ってアルベン波が伝播



ガスは磁場に沿って動く



磁場自体が上下に動く

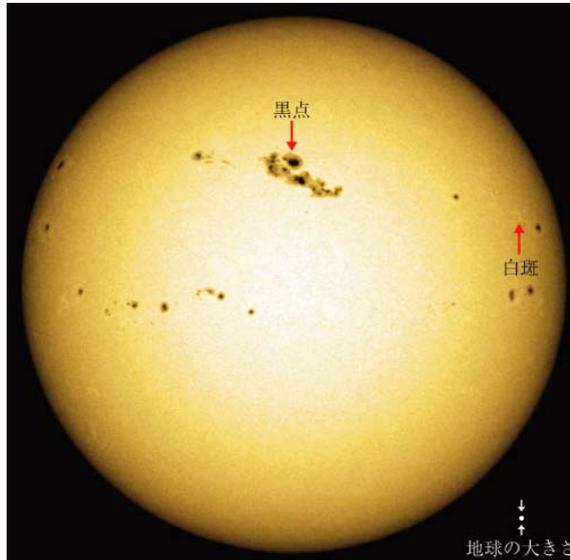


ガスは振動しているように見える

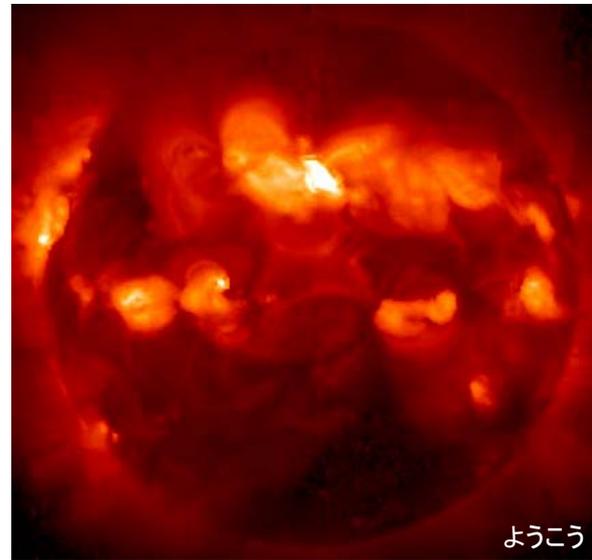
詳細な解析の結果、プロミネンス中に見られる鉛直方向の振動が、**コロナ磁場を伝播するアルベン波**(補足説明参照)によるものであると結論づけました。望遠鏡の視野サイズや筋状構造の長さ比べてアルベン波の波長が非常に長いため、波が伝播していても我々には波形としては見えず、磁場が上下運動しているようにのみ見えます。その結果、それに束縛されているガスも振動しているように見えます。**コロナ中でアルベン波を画像から検出できたのはこの観測が初めてです。**

アルベン波がなぜ重要か？

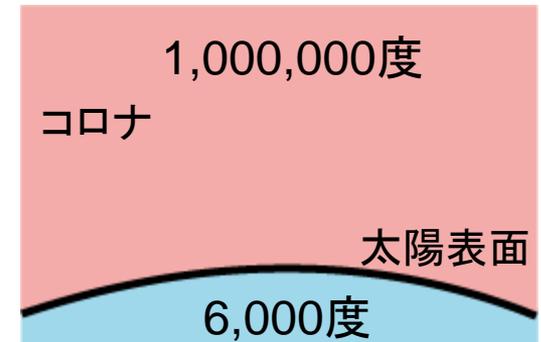
— コロナ加熱問題との関連 —



光球(6000度)
= 太陽表面



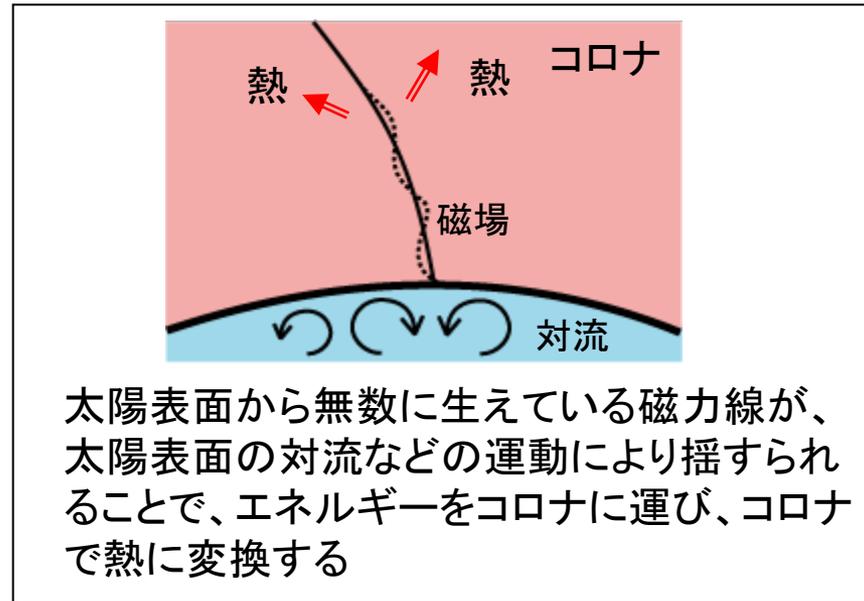
コロナ(100万度)
= 太陽大気



太陽表面は 6,000度なのに、その上空の大気(コロナ)は 100万度という高温です。通常ならコロナも 6,000度を越えることはありません。では、何がコロナを温めているのか。これが太陽物理学において長年謎とされている「**コロナ加熱問題**」です。これは他の天体にも共通する大きな問題です。

アルベン波がなぜ重要か？ — コロナ加熱問題との関連 —

波動加熱説



コロナ中の磁場を伝えるアルベン波のエネルギーによってコロナを加熱しているという説が長年考えられ続けてきました。しかし、コロナ中のアルベン波はこれまで発見されてきませんでした。今回これを初めて検出したこととなります。同時に、このアルベン波はコロナ加熱に十分なエネルギーを持っていることもわかりました。今回の結果は、**コロナ加熱メカニズムの解明に重要な進展をもたらす**ことが期待されます。

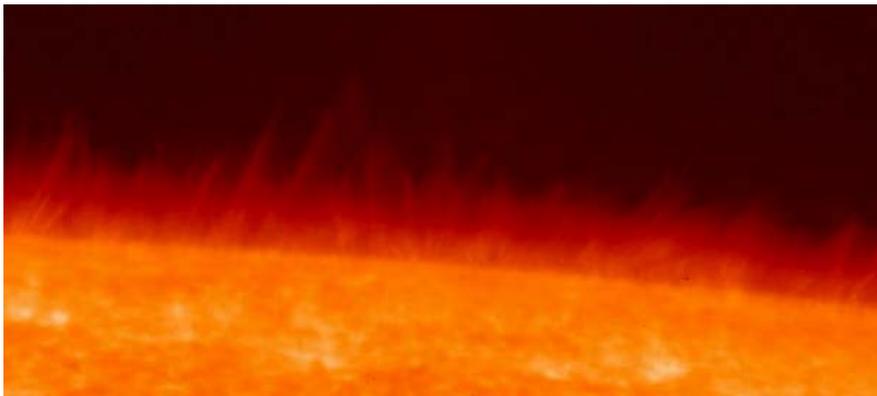
彩層でのアルベン波発見

本研究以外にもデュポンテュらにより、彩層スピキュールを伝播するアルベン波発見に関する論文がサイエンス特集号掲載されています(下記参照)。このアルベン波の解析でも、太陽風加速やコロナ加熱に十分なエネルギーを太陽表面から上空へ輸送していることが示されました。

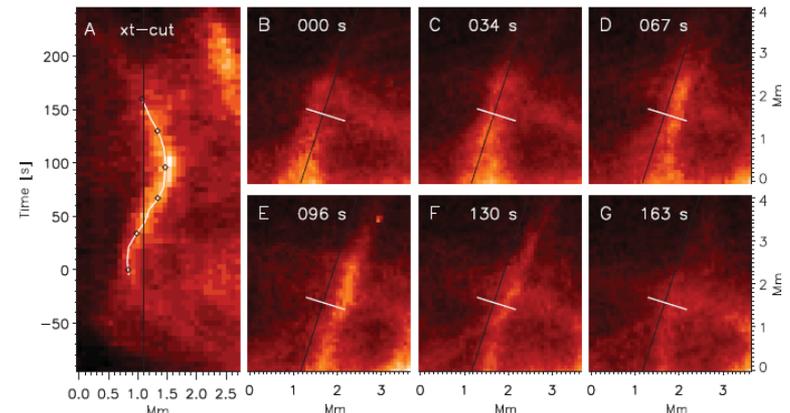
論文タイトル : 太陽風を駆動する可能性のある彩層アルベン波

著者 : De Pontieu, B., McIntosh, S. W., Carlsson, M., Hansteen, V. H., Tarbell, T. D., Schrijver, C. J., Title, A. M., Shine, R. A., 常田佐久, 勝川行雄, 一本潔, 末松芳法, 清水敏文, 永田伸一

Science 2007年12月7日号



「ひので」による太陽縁上のスピキュール画像



アルベン波によるスピキュールの振動

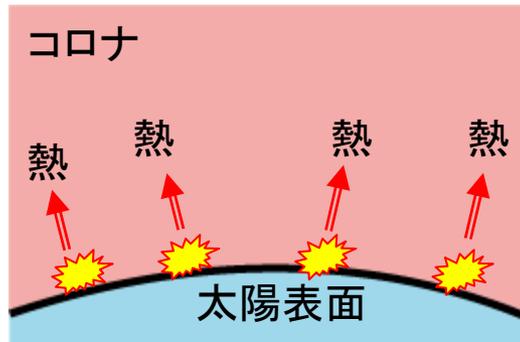
まとめ

- ひのでの可視光望遠鏡によるプロミネンスの観測から、コロナ磁場中を伝播するアルベン波を検出することに世界で初めて成功した
- コロナを伝播するアルベン波は、コロナ加熱に重要な役割を果たしていると考えられる。アルベン波はひのでのによる他の観測からも見つかっており、コロナ加熱問題解明へつながるものと期待される

補足説明

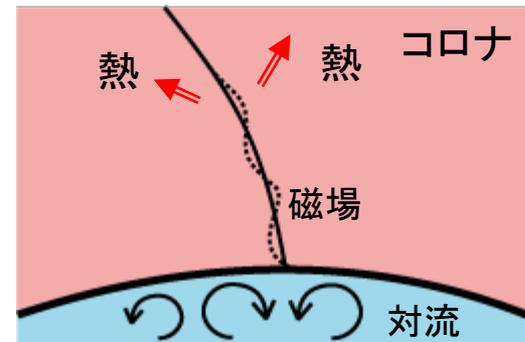
コロナ加熱問題

ナノフレア加熱説



これまでの望遠鏡では分解できなかった小さなフレア(ナノフレア)がエネルギー源となり、コロナに熱を供給している

波動加熱説



太陽表面から無数に生えている磁力線が、太陽表面の対流などの運動により揺すられることで、エネルギーをコロナに運び、コロナで熱に変換する

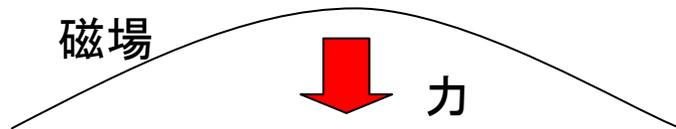
コロナ加熱理論では、現在「ナノフレア加熱説」「波動加熱説」の2つが有力視されています。しかし、どちらも観測的な証拠はこれまでありませんでしたが、今回、「**波動加熱説**」と密接に関連する、**コロナ磁場を伝播する波をひのでのプロミネンス画像より検出**しました。この波は**アルベン波**と呼ばれ、コロナで観測されたのは今回が初めてです。今後、波動加熱の統計的研究やナノフレアの観測を通じて、コロナ加熱の理解が深まるものと期待されます。

アルベン波

ハネス・アルベン (Hannes Alfvén、1908–1995、右写真) が電磁流体力学理論から発見した、磁場に沿って伝播する波動。アルベンはこの業績により、1970年ノーベル物理学賞を受賞している。

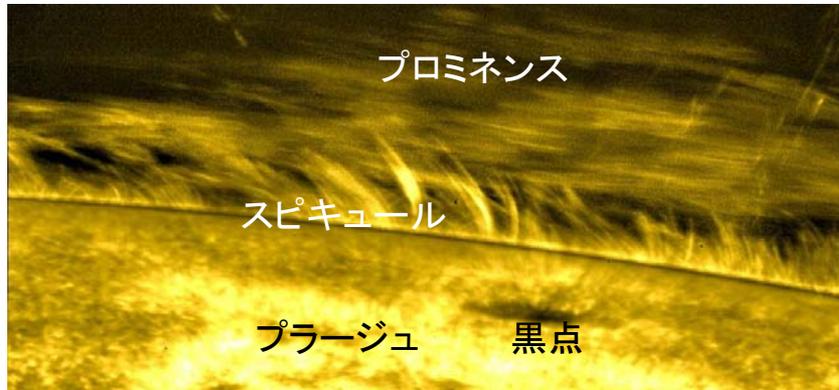


(Wikipedia より)



磁場は弾力性のあるゴム紐のようなもので、曲がると元に戻ろうとする。その曲がり紐(磁場)に沿って伝わっていくのがアルベン波である。よって、アルベン波は横波であり、音波などの縦波と違い、エネルギー散逸(波の減衰)が起こりにくい。そのため、太陽表面で発生した波動エネルギーをコロナ上部まで輸送することが可能であり、コロナ加熱に重要な役割を果たしていると考えられている。逆に、コロナ中で散逸しにくいことから、いかにして散逸しているかということも今後重要になる。

観測データに関して

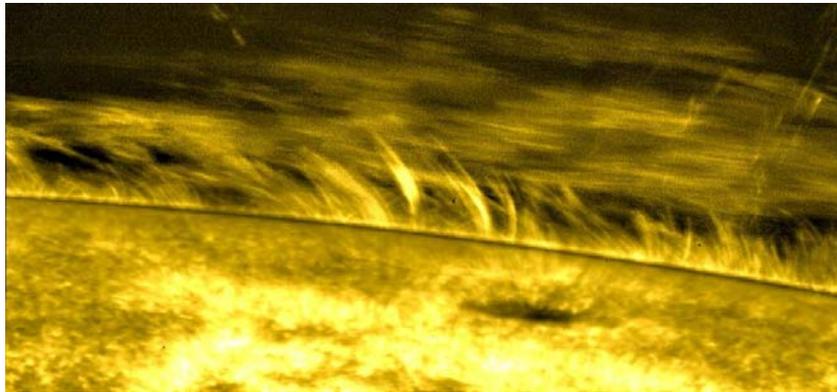


JAXA / 国立天文台(アルファベット順)



- 可視光望遠鏡(SOT)
- カルシウムフィルタを使用
 - 2万度以下のカルシウムイオンが出す光(396.8 nm)に感度がある
 - 色は擬似色
- 15秒間隔で約1時間撮像
- 観測日は2006年11月9日
- プラージュ(太陽面)とプロミネンスは明るさが100倍違う
 - 望遠鏡自身の散乱光が非常に小さいことが、希薄な(暗い)プロミネンスの詳細構造の解明に貢献
 - プロミネンスが強調されるように画像処理が施してある

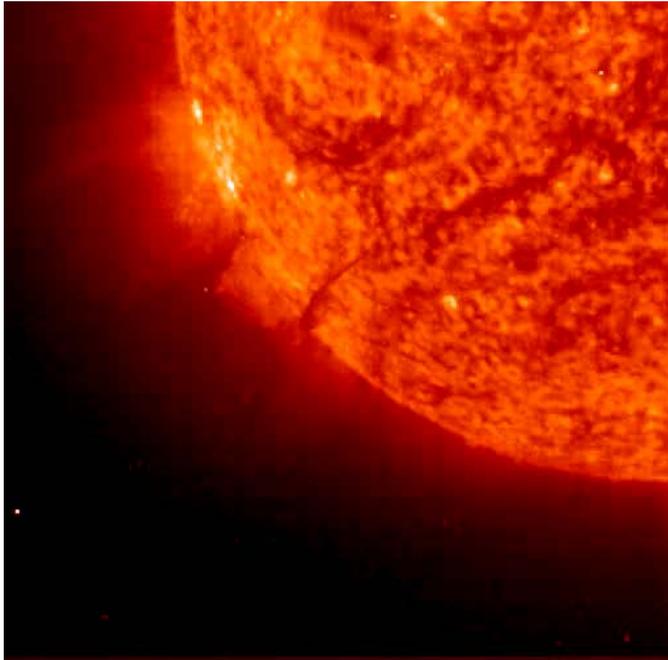
アルベン波のエネルギー等



JAXA / 国立天文台(アルファベット順)

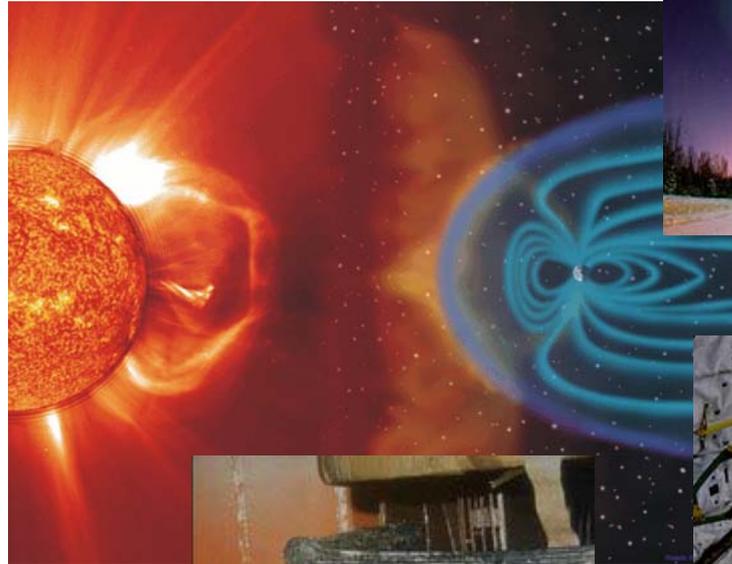
- 今回発見されたアルベン波
 - 速度 1050 km/s 以上
 - 波長 250,000 km 以上
 - 磁場強度 50 ガウス以上
 - 波動の持つエネルギー(ポインティングフラックス)
 $2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ (コロナ全体の加熱に必要なエネルギーは $2 \times 10^7 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$)

プロミネンス研究の意義



ESA/NASA

SOHO衛星画像によるプロミネンス噴出



NASA



Wikipedia より



NASA

プロミネンスはしばしば不安定化を起こし、太陽から放出されます。これはコロナ質量放出(CME)という形で観測され、宇宙空間に高エネルギー粒子を撒き散らします。これが地球に到達すると、巨大オーロラの発生や変電所の損傷、人工衛星の損傷や宇宙飛行士の被曝などを引き起こすなど、人間生活にも多大な影響を与えます(宇宙天気)。これを踏まえて、プロミネンスの構造や進化を多角的に調べるのが重要です。