

国立天文台野辺山電波ヘリオグラフによる 超高速伝播現象の観測

太陽最外層大気中の爆発現象フレアにおいて、ほぼ光の速度を持つ伝播現象が、国立天文台野辺山電波ヘリオグラフの高速マイクロ波観測によって世界で初めて撮像されました。

この資料では、この現象の実際の画像を紹介するとともに、その重要性や背景となる知識を解説します。

目次

- 野辺山電波ヘリオグラフによる超高速伝播現象の発見
 - 今回の発表画像
 - 何が重要なのか？
 - 野辺山電波ヘリオグラフとは
 - はじめに
 - これまでの主な成果
 - よくある質問
 - 太陽フレアとは
 - 太陽フレアとは
 - 太陽フレアのエネルギー源—磁場
 - 太陽フレアと地球
-

横山 央明

〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村

国立天文台野辺山

Fax: 0267-98-2506

e-mail: yokoyama.t@nao.ac.jp

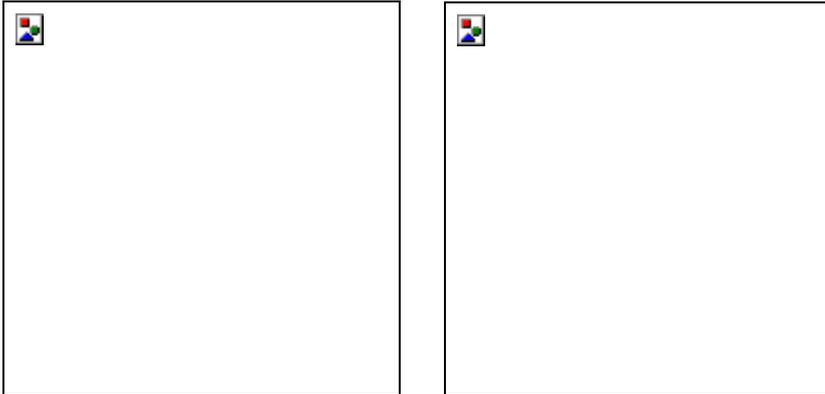
この資料の著作権は国立天文台にあります。

最終更新: 2002-09-20

超高速伝播現象の観測

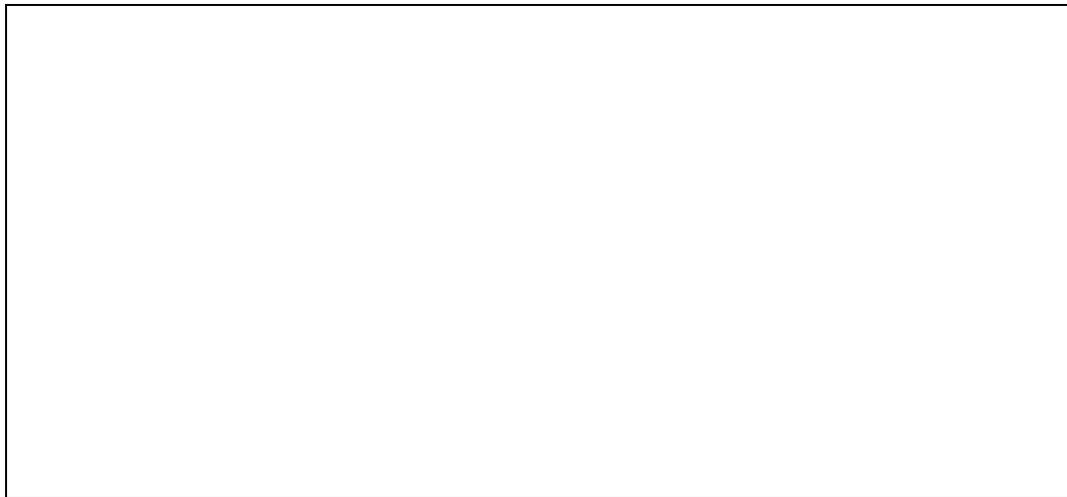
この節では、今回の観測の結果を紹介します。学术论文は *Astrophysical Journal* (天体物理学雑誌) に発表されました。

今回あらたな発見があったフレアは、1999年8月28日に太陽面の中心少し下よりで発生しました(下図の四角い枠で囲ったもの)。右の図はその拡大図です。

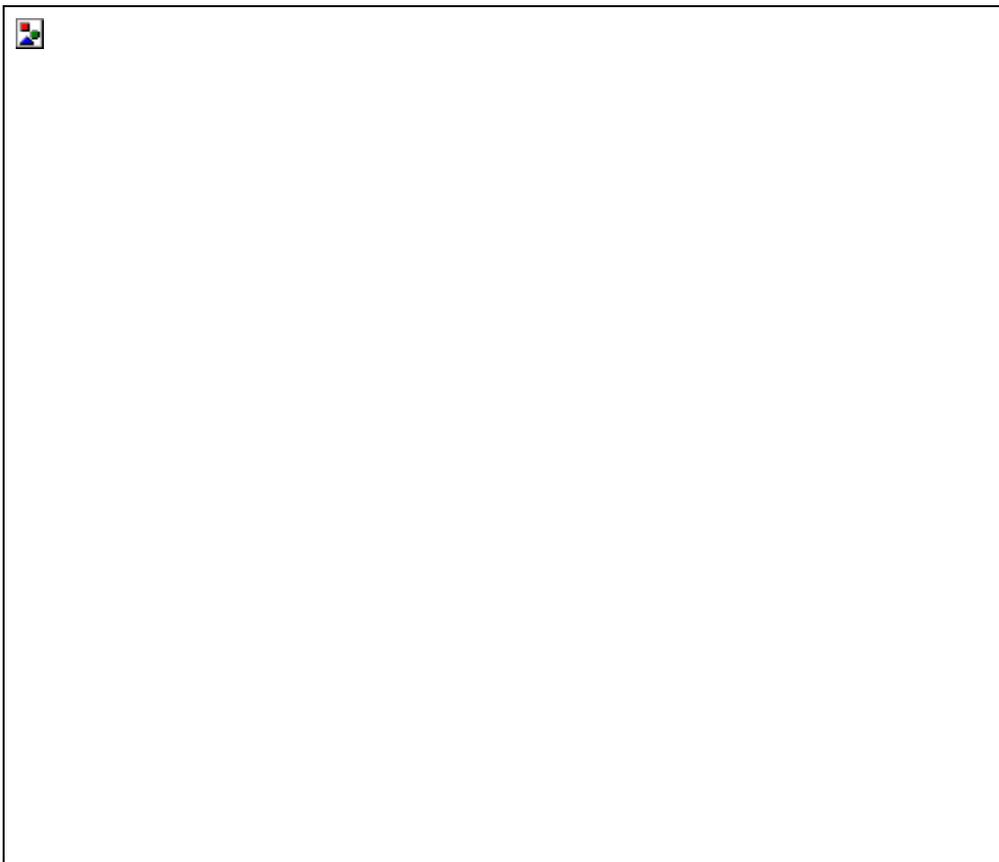


フレアの強さとしては中規模のものでそれほど珍しいものではなかったのですが、その最大の特徴は、空間的に比較的大きくて、しかも長細い構造がとらえられたことだったのです。

野辺山電波ヘリオグラフはこのフレアを1秒間に10枚という高速度で撮像した結果長細い構造の左下から右上に向かって、非常に速い速度で伝わる現象をとらえたのです。発表の席でお見せするムービーではフレーム間の間隔ががわずか0.1秒しかない高速撮影です。その数フレームにわたって伝わる現象がとらえられているのがわかると思います。太陽面上でこの伝わる距離は45000km(地球の半径は6000km)もあり、かかっている時間はわずか0.5秒でした。まばたきを2回するぐらいの時間です。実際伝わる速度を計測してみると90000km毎秒でこれは光の速度の約3分の1です。相対性理論によると、光の速度より速くものは進めませんから、これは究極の速度まであと一歩というほどのスピードなのです。



この現象をわれわれは以下のように解釈しています(下のマンガ参照)。太陽フレアのエネルギー源は磁場なのですが、このフレアでは下のようにふたつの磁力線(ループ状の形をしているので磁気ループと呼ばれます)が接触したことでエネルギー解放が起きたと考えられます。磁力線はN極からS極に向かうという向きを持っていますが、ふたつのループが接触する箇所では互いの向きが完全には平行ではありません。そういう箇所では磁力線のエネルギーが解放されます。そのうちの何割かのエネルギーが電子の加速に使われて、光の速度にまでなったものと考えられます。電子は電気を帯びていて、磁力線に沿った方向に運動する性質をもっているので観測されたように細長い構造すなわち磁気ループに沿って伝わっていくのがみえたのだと考えられます。



この観測からわかったこと

この観測は、高エネルギー電子がほぼ光の速度で伝わっているさまを映像化することに、世界ではじめて成功したものです。したがって、その意味するもっとも重要な点は、「電子はほんとうに加速されている」ことの直接証拠をとらえたことにあります。これまでの観測は、基本的には状況証拠だったからです。

それ以外にはやや専門的になりますが、以下のような点が新しくわかったところです。ひとつめは、電子が加速される位置が特定できたことです。このフレアでは、ふたつの磁力線が相互作用する箇所が、今回の伝播現象の出発点であることはすでに述べましたが、これは加速機構の解明のためには実は重要なことを示唆しているのです。研究者によっては、

「磁気ループ全体で加速するのである」という説をとなえる人もいますが、今回のフレアに関する限りその説があてはまらないことは明らかです。ふたつめは、やや逆説的なのですが、「伝播速度が思ったよりも遅かった」ことです。少し複雑になるので詳しくは述べませんが、電波放射から予測されている電子のエネルギーからすると、その速度はほぼ光速（99%以上）とおもわれるのです。しかし今回の観測では30%ぐらいしかありません。これをわれわれは以下のように解釈しています。つまり、電子は磁気ループにそってまっすぐ伝わっているのではなく、実はぐるぐると螺旋状に巻くように回転しながら飛んでいるのである。したがって本来の速度は光速の99%あっても、みかけ上は遅くみえるのである。これも、加速機構の解明のためには非常に重要な情報で今後理論による解明がまたれるところです。

超高速伝播現象の観測

--- 何が重要なのか？

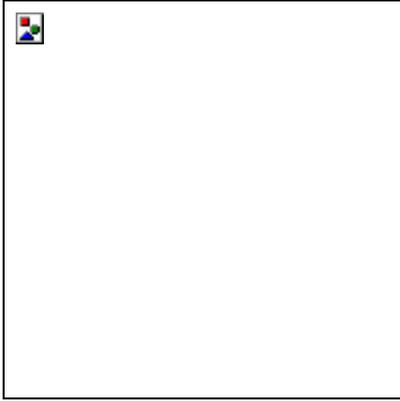
この節では、今回の観測がなぜ重要なのかを説明します。

太陽フレアにおいて高エネルギー電子の観測がどうして重要なのか？

太陽フレアは、わが太陽系でみられる最大級の爆発現象です。そのエネルギー源は、太陽表面に現れた磁場であることはすでにわかっています。磁場エネルギーが爆発的に消費されるのがフレアという現象なのですが、そのエネルギーはおおざっぱに言って、半分がプラズマの加熱（もともと数百万度のものが数千万度から数億度）に、残りが粒子（電子や陽子）の加速（平均的には静止していたものが、光の速度近くまで）へと一気に消費されます。加熱へのエネルギー消費過程については、かなりの部分が最近の宇宙飛翔体観測（たとえば宇宙科学研究所の「ようこう」衛星など）によって解明されてきました。いっぽう、粒子加速についてはまだじゅうぶんな解明にはいたっていません。これを解明しなければ、わたしたちは、太陽系最大級の爆発現象を理解したとはいえないのです。

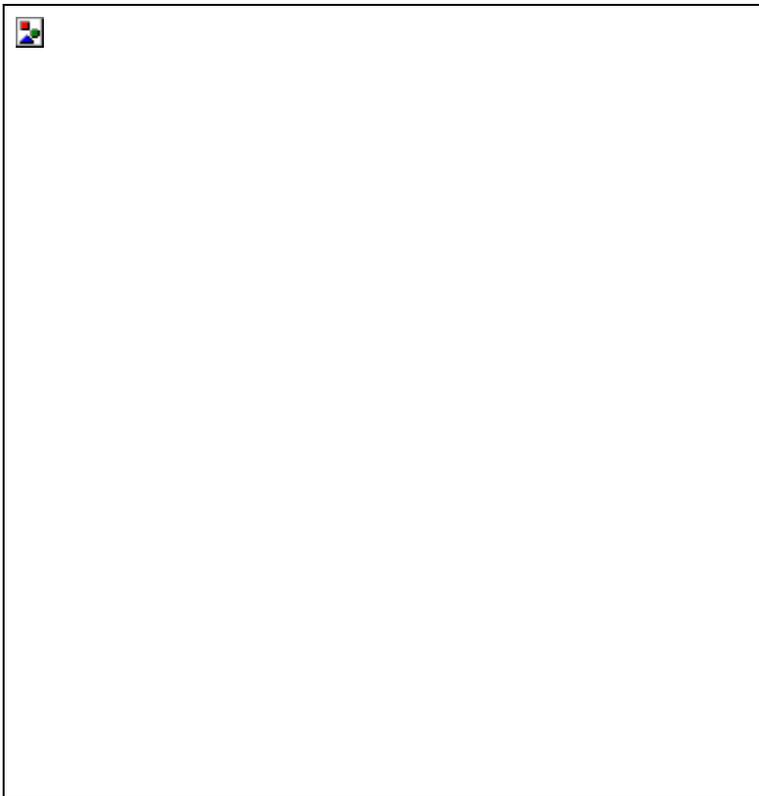
太陽フレアの高エネルギー電子については、これまでどういうことが観測されているのか？

光の速さ近くまで加速された高エネルギー電子が存在するであろうことはこれまで、間接的な証拠が数多くあげられていました。太陽フレアに際して、電波放射の強度が急に明るくなることはそのひとつです。また硬 X 線 --- X 線の中でも波長が短い光でもほぼ同様に明るくなりますが、それも高エネルギー電子の証拠とされてきました。ここ 20 年ほどになって宇宙飛翔体があげられるようになると、実際の画像のようすがとらえられるようになってきました。下に示した画像はその一例です。この画像は宇宙科学研究所があげた「ようこう」衛星が撮ったもので、半円状に見えるのが軟 X 線（波長の長い X 線）で撮像したもので、その上に硬 X 線で観測した図を等高線で重ね合わせてあります。半円状のものが磁力線でできており、その両端は太陽の表面より下に埋まっているためにループ上に見えています。硬 X 線の光源は、そのループの両端にそれぞれと上空とにみられています。このように硬 X 線光源は、いくつかの箇所に離ればなれにポツポツと光ることがわかっています。これは、フレアに際して「どこか」で加速された電子が、密度の高い太陽の表面に、衝突した結果であると考えられています。



(増田ら 1994)

上のような画像では、残念ながら高エネルギー電子が実際に(高速で)走っているさまをとらえることができません。なぜなら「衝突してはじめて」光るからです。しかし中には例外もあります。それが下の図です。



(花岡 1999)

このフレアでも、光源はポツポツと離れた箇所なのですが、光るタイミングにほんの少しだけなのですが時間差がありました。この時間差を詳細に調べた結果どうやらいっぽうの端からもういっぽうの端に電子が走った「らしい」ということがわかりました。

というわけでここまでが高エネルギー電子の観測の現状だったわけです。今回われわれが野辺山電波ヘリオグラフで観測した現象では、このような「ポツポツ」という光源ではなくて、実際に端から端まで電子が走っているさまそのものを直接に撮像することに成功したのが新しい点なのです。

どうして野辺山電波ヘリオグラフで観測することができたのか？

野辺山電波ヘリオグラフの最大の「売り」は、その高い時間分解能にあります。1秒間に10枚もの撮像ができる装置は、太陽の観測装置としては電波ヘリオグラフだけです。高エネルギーの電子は、およそ光の速度で伝わることが予想されていましたが、そのような現象を撮像するためには、電波ヘリオグラフ級の時間分解能が必要だったのです。また高エネルギー電子は硬X線も放射しますが、上の項目でも述べたように、硬X線放射は「ポツポツ」という空間分布を示します(将来観測装置の感度が上がると変わるかもしれませんが)ので伝播しているようすを直接とらえるのにはあまり向いていません。

野辺山電波ヘリオグラフ

この節では野辺山電波ヘリオグラフがどんな装置なのかを説明します。



野辺山電波ヘリオグラフ(NoRH)は、**太陽観測専用の電波望遠鏡**です。ヘリオは太陽を、グラフは撮像装置を意味します。望遠鏡とはいっても実際には、直径 80cm のパラボラアンテナ 84 基が東西 490m、南北 220m の T 字型の線上に配置されたものです。1990 年度から 2 年間で、総工費 18 億円をかけて建設し、1992 年 4 月に最初の太陽電波画像の撮影に成功し、同年 6 月末より毎日 8 時間の連続観測を行っています。

観測周波数 17GHz(左右両円偏波)34GHz(強度のみ)

観測視野 太陽全面

空間分解能 10 秒角(17GHz)5 秒角(34GHz)[注:太陽半径は約 1000 秒角]

時間分解能 0.1 秒(活動時)1 秒(静穏時)

野辺山電波ヘリオグラフは干渉計なので、取得したばかりの生データはアンテナ組みごとの相関値のあつまりです。これは太陽の明るさの空間分布を Fourier 分解したものにあたります。したがって解析するにはこのデータから画像を合成する必要があります。しかし実際は、科学的成果を効率よくあげるために画像・データベースなどを自動的に毎日作成しウェブにて公開しています。また画像合成や解析用のソフトウェアも同時に公開して研究を支援しています。またウェブで公開している画像などは学校・大学・社会人教育機関での教育にも使って頂ければさいわいです。

太陽は我々の生活のエネルギー源であり、一方、天文学にとってはその表面の活動が詳細に観測できる唯一の恒星です。活動時間は 1 秒以下のものから 10 年以上にわたるものまでさまざまです。電波ヘリオグラフは太陽表面の電波の明るさを写真として捉えることが

できます。連続して高速に撮影することができるので、ビデオ装置といった方が適切かもしれません。光や X 線による観測と協力して、太陽の表面で発生するさまざまな現象の観測を行っています。太陽活動は 11 年の周期で大きく変動し、西暦 2000 年ごろにその極大に達します。黒点の数が増え、その周りで発生する爆発現象(太陽フレア)の頻度も極大になります。爆発の際にエネルギーの高い粒子が作られ、それが黒点磁場に巻き付いて非常に強い電波を発生します。この電波を捉えて、高エネルギー粒子の発生機構をつきとめることを目的に電波ヘリオグラフは建設されました。

参考文献

- 花岡庸一郎「太陽フレアを電波で解明する」, 天文月報, 88 巻 5 号, 193-198, (1995)
Nakajima et al. "The Nobeyama Radioheliograph", Proc. of the IEEE, 82, 705, (1994)
Takano et al., "An Upgrade of Nobeyama Radioheliograph to a Dual-Frequency (17 and 34 GHz) System" in "Coronal Physics from Radio and Space Observations, Lect. Notes Phys.", (Berlin: Springer-Verlag) 183 (1997)
"The Nobeyama Radioheliograph -- A Collection of Papers on Initial Results and Instrumentation", NRO Report 357 (1994)
"New Look at the Sun with Emphasis on Advanced Observations of Coronal Dynamics and Flares", Proc. of Kofu Symp. NRO Report 360 (1994)

野辺山電波ヘリオグラフの主な成果その1： 毎日の観測

電波ヘリオグラフでは、毎日 8 時間(日本時間 8:00 ごろから 16:00 ごろまで)、17GHz 強度・17GHz 円偏波・34GHz 強度の観測を行っています。0.1 秒に1枚の割合で観測しています。可視光観測と異なり天候の影響をほとんど受けません。

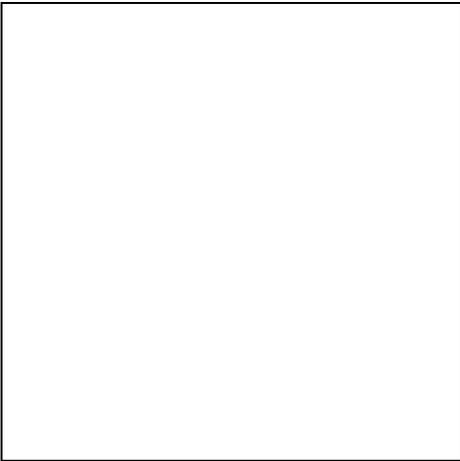


図1 17GHz 強度画像

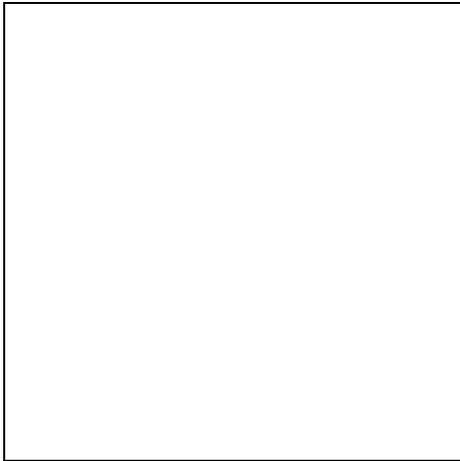


図2 17GHz 円偏波画像

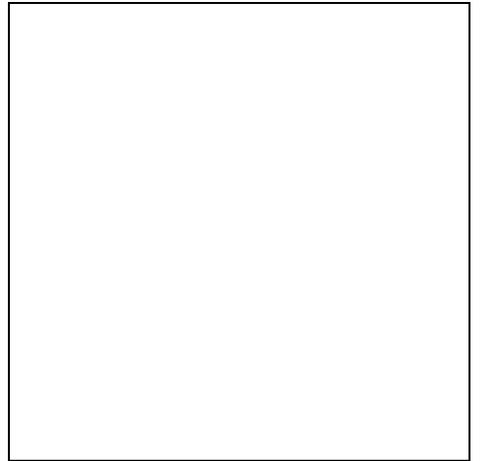
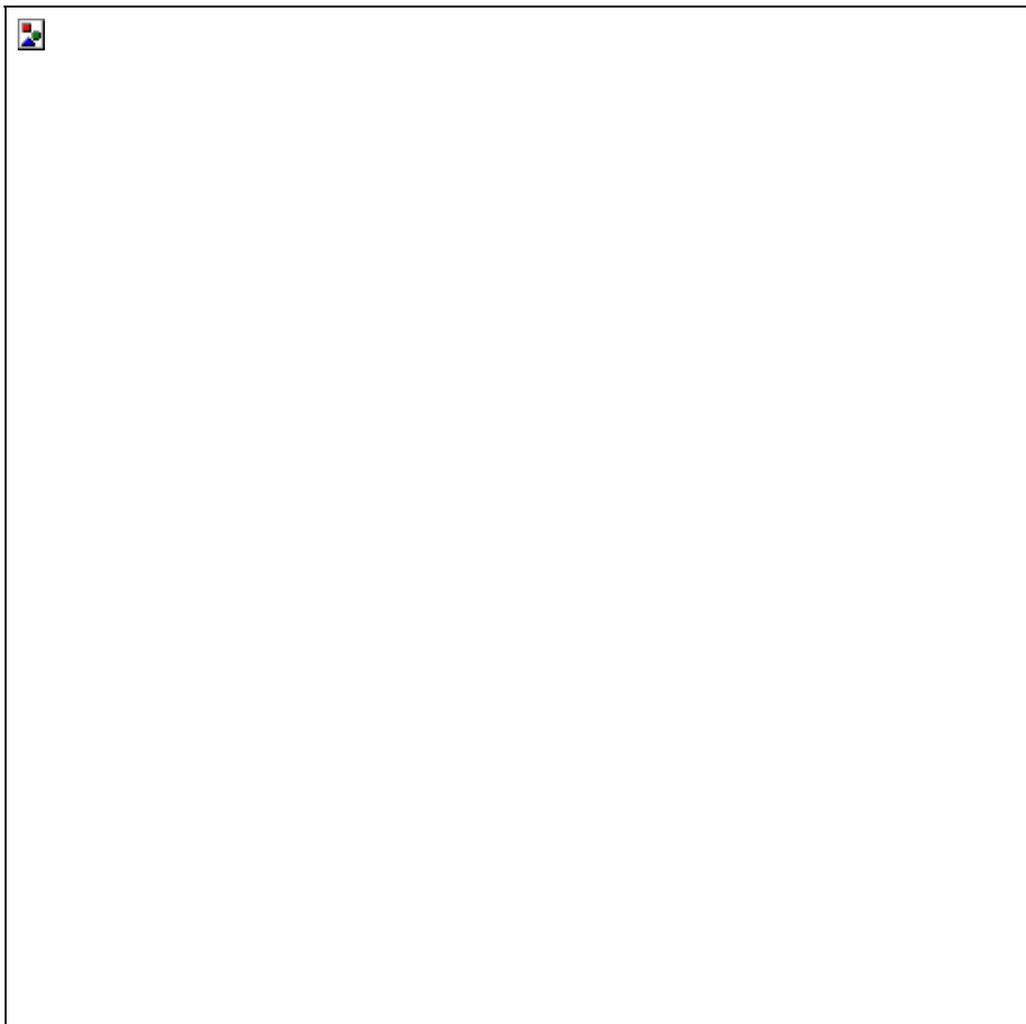


図3 34GHz 強度画像

野辺山電波ヘリオグラフの主な成果その2: フィラメント放出現象

電波ヘリオグラフの広い視野と小さいノイズによって、およそ1万度という、太陽の中では低温の現象であるプロミネンスも観測することができます。この絵は1992年7月31日に観測されたプロミネンスの噴出で、太陽の外側に見えているのがプロミネンスが飛び出していく様子を示す電波画像を3枚重ねたもの、内側が後で起こったアーケード型のフレアを示す軟X線画像(ネガ像)です。(Reference: Hanaoka, Y. et al., 1994, PASJ 46, 205)



野辺山電波ヘリオグラフの主な成果その3: フレアの磁場配位

爆発現象フレアのエネルギー源は、太陽表面の磁場です。磁場は太陽表面ではループ状の構造をしています。これは本来チューブ状(磁束管といいます)の構造が太陽表面から一部だけ姿をのぞかせているようすです。われわれが可視光でみる太陽大気はほぼ球体に近いのですが、X線などを使って観測すると、磁力線のループがいっぱい生えているのがみえます(図1)。

このような磁束管どうしがぶつかるとその境目に強い電流が流れてエネルギーを解放します。それが突発的に起こるのがフレアという現象です。その磁束管の配置として「ダブルループ配位」が電波ヘリオグラフの観測から提唱されました(図2)。その根拠になっている観測例が図3です。X線やH α 線像で明るい個所がフレアなのですが、詳しく調べるとちょうどそこで二つの磁束管が接触していると考えるとうまくつじつまの合う解釈が可能なのです。たくさんのフレアについても調べてみた結果他の多くのフレアもこの配位でうまく説明できることがわかりました(図4)。

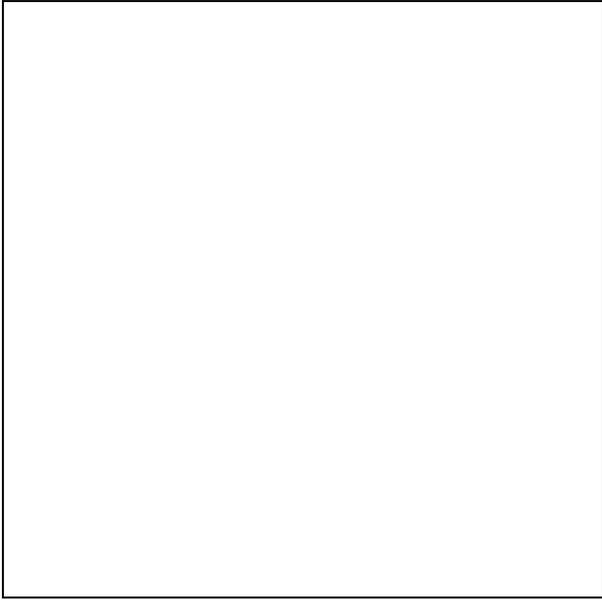


図1 X線で観測した太陽。太陽観測衛星「ようこう」による観測。(宇宙科学研究所提供)

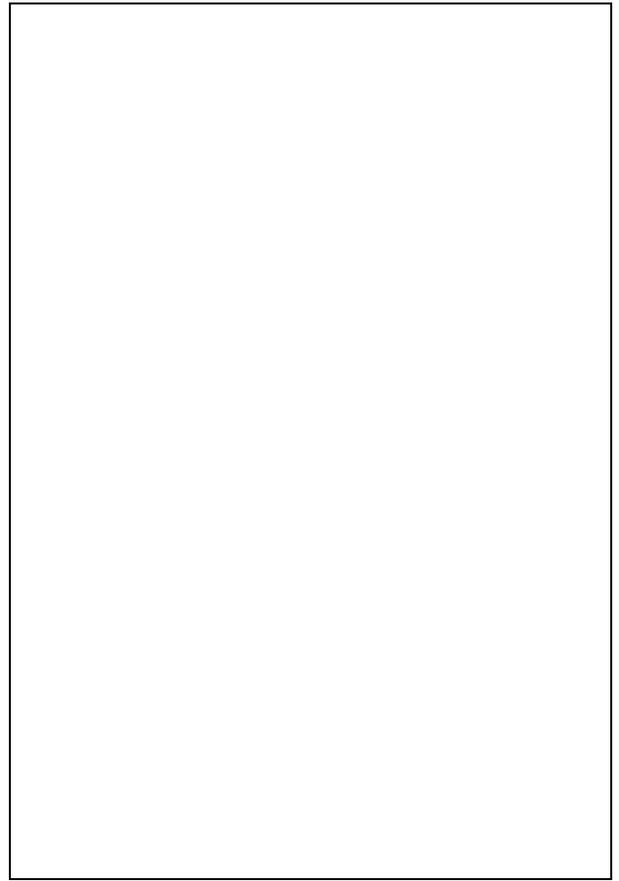


図2 フレアの磁気「ダブルループ配位」モデル (Nishio et al. 1997 より)。



図3 さまざまな波長で観測したフレア(1993年6月7日、Hanaoka et al. 1997より)。(a) 電波強度 (b) 電波円偏波、以上電波ヘリオグラフ (c,d) X線 (ようこう) (e) 表面磁場分布 (米国 Mees 天文台) (f) モデルスケッチ (g,h) 水素 $H\alpha$ 線 (京都大学飛騨天文台)

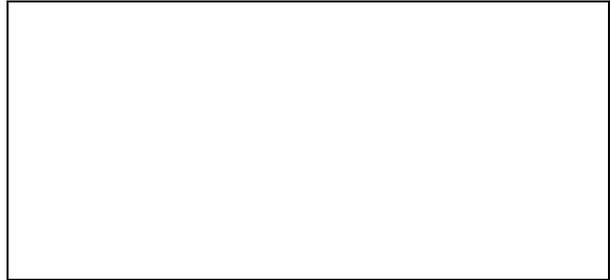


図4 フレアの際の画像を調べるとここで示したような配位になった(Nishio et al. 1997)。

野辺山電波ヘリオグラフ よくある質問集

1. [電波ヘリオグラフと同等あるいはそれを凌駕する性能をもつ太陽観測用の電波望遠鏡が国外で稼働しているか](#)
2. [電波ヘリオグラフのセールスポイント――この装置でなくてはできない観測](#)
3. [既設の観測装置では太陽電波の先端的研究ができないか](#)
4. [電波ヘリオグラフはどの程度共同利用されるか](#)
5. [電波ヘリオグラフの学問的寿命は](#)
6. [干渉計の原理――干渉を使って電波の到来方向を測る](#)
7. [なぜ多数\(84 基\)のアンテナを必要とするか](#)
8. [アンテナ配列をなぜT字型とするか](#)
9. [東西 550m, 南北 220m にわたってアンテナをならべる必要性は](#)

1. 電波ヘリオグラフと同等あるいはそれを凌駕する性能をもつ太陽観測用の電波望遠鏡が国外で稼働しているか。

太陽大気の爆発現象(フレア)の研究には、解像力のよい電波望遠鏡が不可欠であることは、すでに10年以上前から言われてきており、いくつかのグループでそのような計画が考えられてきたが、まだ実現には至っていない。

(例)

・ヨーロッパのcm波ヘリオグラフ

フランス、ドイツ等を中心に、数秒角の解像力をもつ装置の検討が1970代中頃からおこなわれてきた。

・オーストラリアのmm波ヘリオグラフ

国立理工学電波物理研究所で、回転型ヘリオグラフが計画された。

実現に至らなかった理由

前者はアンテナ数を減らす良いアイデアが出されなかった、後者はアイデアは面白かったが回転に伴う振動の影響等技術的問題を解決できなかった。

稼働中または建設中の装置

・VLA(Very Large Array)米国国立電波天文台

宇宙電波観測用の巨大干渉計。一辺約21kmのY字型基線上に27基の大型アンテナ(直径25m)を配置。銀河の観測などでは、地球回転を利用した超合成法を駆使することにより実質的にアンテナ数を増やしたことと同じ効果を得る。このことにより、高画質の電波像を得て、素晴らしい成果をあげているが、太陽フレアのようにはやい変動現象の観測にはこの方法が使えず、アンテナ数が不足しているために画質が著しく劣っている。この結果、観測した電波像には大きな構造が無視され、細

かい明暗がことさら強調されることになる。結果の解釈には曖昧さが常に伴い、明解な結論は出せない。

・シベリア太陽電波望遠鏡

256基のアンテナからなる大型望遠鏡。アンテナ配列法に無駄が多過ぎるため解像力は約30秒角で電波ヘリオグラフの7ないし8秒角より4から5倍悪い。

2. 電波ヘリオグラフのセールスポイント ———— この装置でなくてはできない観測

a. 活動する太陽の姿を1秒に10コマの超高速撮影ができる。

== 爆発で作られるエネルギーの高い電子の流れを追跡でき、それによって今まで全く判らなかつた粒子の加速領域を特定できる。

b. 爆発を起こす黒点の上の磁力線の形状を観測できる。

== 野辺山太陽電波観測所で開発した自己較正法を採用することによって、従来より1桁以上すぐれた画質でフレアの電波像を撮影でき、これから磁力線の全貌をつかむことができる。

c. 太陽面のどこで爆発が起こっても100%撮影できる。

望遠鏡の広い視野と高い解像力を同時に達成。前記のVLAでは素子アンテナの口径が25mあり、アンテナ口径と視野の広さは反比例するため、太陽のごく限られた領域しか一度にみることができない。

3. 既設の観測装置では太陽電波の先端的研究ができないか

・8cm、3cm電波写真儀(豊川)

太陽全面にわたる大きな大気構造を観測するのに適しており、その分野の研究で成果を上げてきた。しかし、2次元像の解像力は120秒角であるためフレアの像はボヤケて写る。フレアの研究で要求される解像力には1桁以上たらない。

・17GHz多相関型干渉計(野辺山)

0.8秒に1枚の高速撮影でフレアの研究に活躍してきたが、アンテナが東西方向にしかないため一次元情報に限られており、南北方向に重なった黒点群を分離・識別できない。

・160MHz太陽中層大気干渉計(野辺山)

コロナ中層の衝撃波、磁気プラズム雲を観測してきたが、建設以来約20年経過しており、老朽化が著しく、先端的研究は望めない。

・宇宙電波用45m鏡

単一の指向性をもっているため、太陽全面を走査するのに約2.5時間要し、フレアのようにはやい(<1秒)変動現象の観測は行うことには不向きである。

・宇宙電波用5素子干渉計

地球回転を利用した超合成法の適用を目的に設計された電波干渉計であるから、極めて短い時間に発生する太陽フレアの観測はできない。

4. 電波ヘリオグラフはどの程度共同利用されるか

国内

太陽の研究は、電波、光、X線と広い波長域で観測されたデータを総合する段階にきており、光やX線観測を主体とする研究者も当然電波観測データを必要としている。国立天文台のほか、東大理学部、京大理学部などの研究者が利用する。

また、惑星間空間・地球磁気圏の研究者からも、太陽の影響を調べるためにヘリオグラフデータ利用の要望がだされている。さらに、太陽観測が終了した夜間には宇宙の変動性電波源の観測にも活用される。

国外

米国、オーストラリア、ヨーロッパ、中国、ブラジル等の太陽電波研究者からもヘリオグラフ利用の要望がだされている(国際会議で紹介している)。とくにようこう衛星との共同観測が有効である。

5. 電波ヘリオグラフの学問的寿命は

当面する太陽活動極大期には、フレア高エネルギー現象の解明を主要な研究目的とする。特にようこう衛星によるX線との共同観測は、最も重要かつ緊急である。

電波ヘリオグラフの観測対象は、フレアのほか、活動領域の消長・活動領域間の相互作用、静穏時の太陽大気構造(コロナホール、フィラメント等)等である。特に後者は、フレアの頻発する極大期を避けて活動の低い時期に行う方が都合がよい。

画期的な装置の学問的ライフは、太陽の場合1ないし2サイクル、15年程度である。

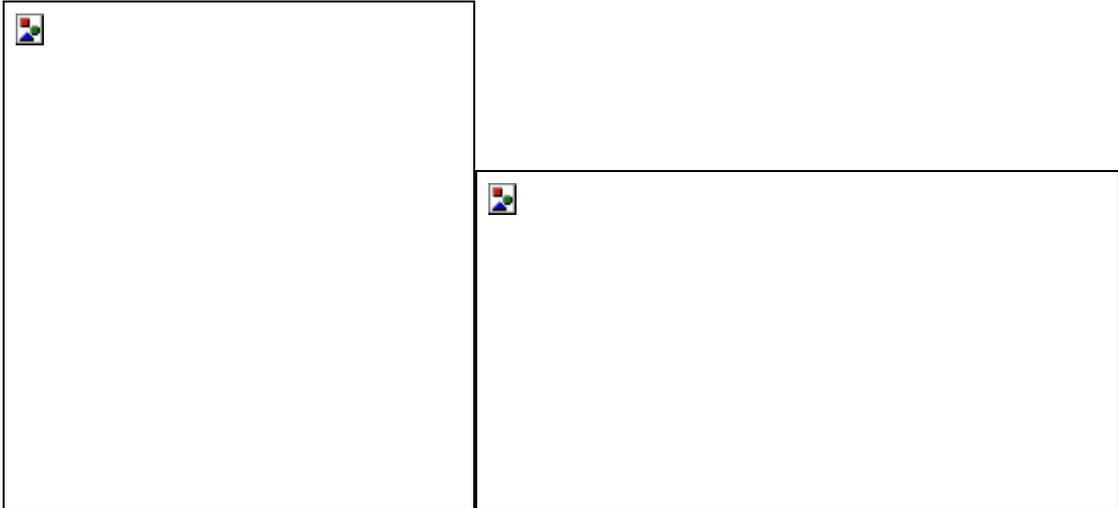
6. 干渉計の原理――干渉を使って電波の到来方向を測る

東西方向に距離 d だけ離して並べた2つのアンテナ(A_1, A_2)で天体からの電波を受ける場合を考える。2つのアンテナの出力は、同じ長さのケーブルで受信機につなぐ。

アンテナ基線に直角な方向($\theta = 0$)から入ってくる電波に対しては、 A_1 と A_2 の出力は、波の山と山、谷と谷とが重なるので、相強め合って最大となる。電波の到来方向が垂直から少しずれると A_1 と A_2 に入る電波の経路に x の差ができるので、山と山とは一致せず出力は低下してくる。さらに到来方向が大きくなって、経路差 x が波の波長の半分に等しくなると、 A_1 と A_2 との出力は、山と谷、谷と山とが重なるので相打ち消し合って受信機出力は0となる。そうして到来方向が大きくなって x が1波長となると再び出力は最大となる。

このように波と波が重なって強めあったり、打ち消す現象を波の干渉という。

受信機の出力が電波の到来方向に対してどう変化するかを図に示す。アンテナの出力を干渉させることによって、電波の到来方向を測ることができる。つまり、発生位置を分解(解像)して測ることができる。



7. なぜ 多数(84基)のアンテナを必要とするか

フレア像を写真のような高画質の二次元像として得るためにはアンテナ数を多くする必要があり、数秒角の解像力を得るためには基線長を長くすることが必要である。それでは性能を落とすことなくどこまでアンテナ数を減らすことができるか？

答え

: 思考実験、計算機による数値実験をくり返して到達した結論。

- ・T字型基線上に、内側ほど密に外側ほど疎にアンテナを並べる多重T型配列が最も効率的である。
- ・これ以上アンテナを減らすと、性能が急激に低下する限界がフレア観測では76基である。活動域の高画質の画像を得るためにはアンテナ数をこれより約5割増やす必要がある。
- ・更に、コロナホール、フィラメント等の低コントラストの大規模構造を観測するためには84基の2倍程度の数のアンテナが必要である。

電波ヘリオグラフに取り入れた創意

- ・上の多重T型配列を考案したこと。
- ・電波干渉計に最も重要な波の位相較正法として、「実時間自己較正法」<用語説明集参照>を導入したこと(野辺山で開発)。

8. アンテナ配列をなぜT字型とするか

二次元像を得るためであるが、天体の二次元像を得る電波干渉計のアンテナ配列としては、T字型のほか、十字型、Y字型、円形、ランダム配列等がある。T字型: 相関値が $x-y$ 値交座標で得られる。十字型: 十字型の1/4を省略したのがT

字型であり、解像力の点では、十字とT字は同等であり、T字型が経済的。(シベリア太陽電波望遠鏡(ロシア)は、256基のアンテナを十字型に並べているが、T字型にすれば192基でよい) Y字型:相関値が直交座標系では得られないので補間が必要である。地球回転を利用した超合成に適している。円形型:上に同じ。限られた土地を有効利用できる。 T字型を選んだ理由 ・外側ほどアンテナ間隔を広くして、全アンテナ数を大幅に減らす「多重配列」としやすい。円形配列では、規則的な多重配列が困難。・ランダム配列は、アンテナ数を最も少なくし得るが、天体像を合成する計算処理がきわめて繁雑となり、太陽のように複雑な画像を出力するには適していない。・Y字型などに較べT字型は縦横に直交しているので、天体像を合成する計算式が格段に簡単になる。

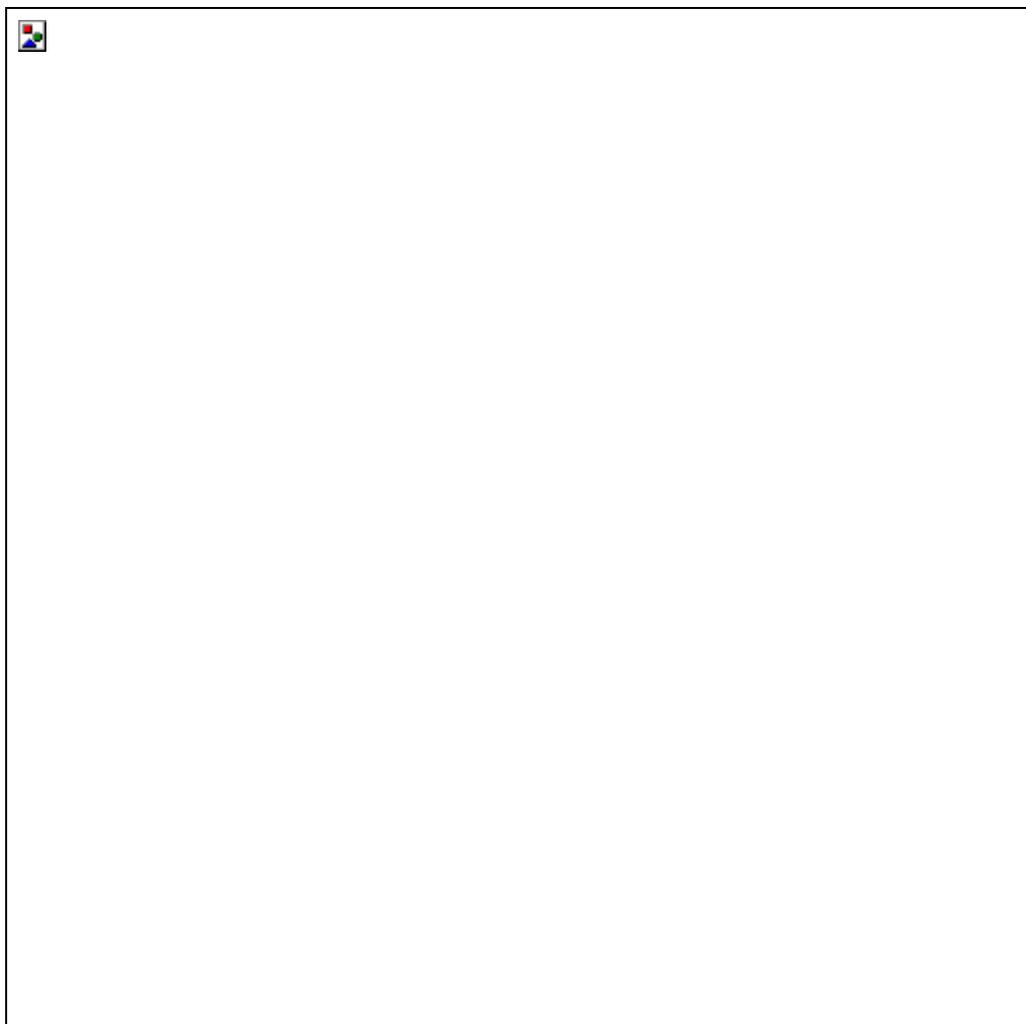
9. 東西 490m, 南北 220m にわたってアンテナをならべる必要性は。

前述のように、二次元像を得るためには東西南北のT字型配列が最良である。電波干渉計は多数のアンテナを並べそれぞれの受信信号の相関をとることにより、アンテナを並べた範囲の大きさに相当する1つの巨大なアンテナと同等の分解能を発揮することができる。フレアの発生機構を解明するために必要な、空間分解能数秒角、高画質の性能を達成するためには 490m x 220m にわたって必要最小限の数のアンテナを並べることが最も効率がよい。

太陽フレア

常に地球上に恵みをもたらしてくれている太陽。我々の目で直接見える光(可視光といいます)ではあまり変化していないように見えますが、実はさまざまな活動現象を起こしています。太陽フレアもその一つで、太陽大気中に蓄えられた磁場のエネルギーを使って、数億度にも達する超高温プラズマや光速近くまで加速された粒子を爆発的に生成する、太陽活動でもっともパワフルな現象です。

軟 X 線でみたフレア



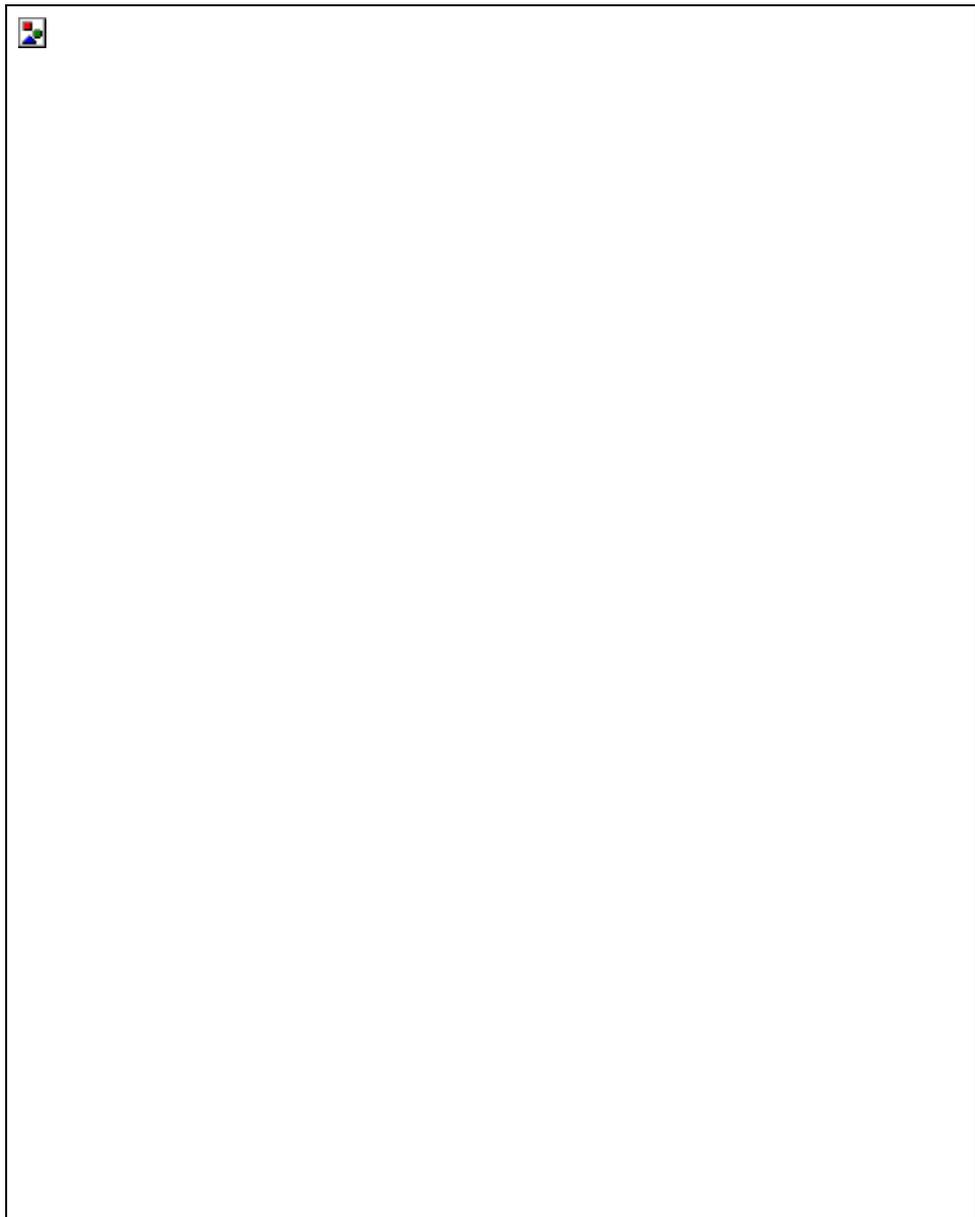
2000年6月7日 14:49 UT ようこう軟 X 線望遠鏡(宇宙科学研究所提供)

上の図は、太陽観測衛星「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡が撮影した太陽のX線画像です。X線では百万度以上のコロナと呼ばれる大気層を見ることができます。この図の中で、

太陽の北半球にあるとんがり帽子のような構造が、太陽フレアによって生成された高温のプラズマ(数百万～一千万度)です。

H α 線でみたフレア

次の白黒の絵は、H α 線と呼ばれる光で観測した太陽の部分像です。この画像のなかで白く光っている2本のすじが太陽フレアです。H α 線では彩層と呼ばれるコロナより下層で、数万度の大気層を見ることができます。この白く光る筋の上空に軟X線でみえるとんがり帽子の構造が並んでいます。



1972年8月7日(米ビッグベア太陽天文台提供)

電波でみたフレア

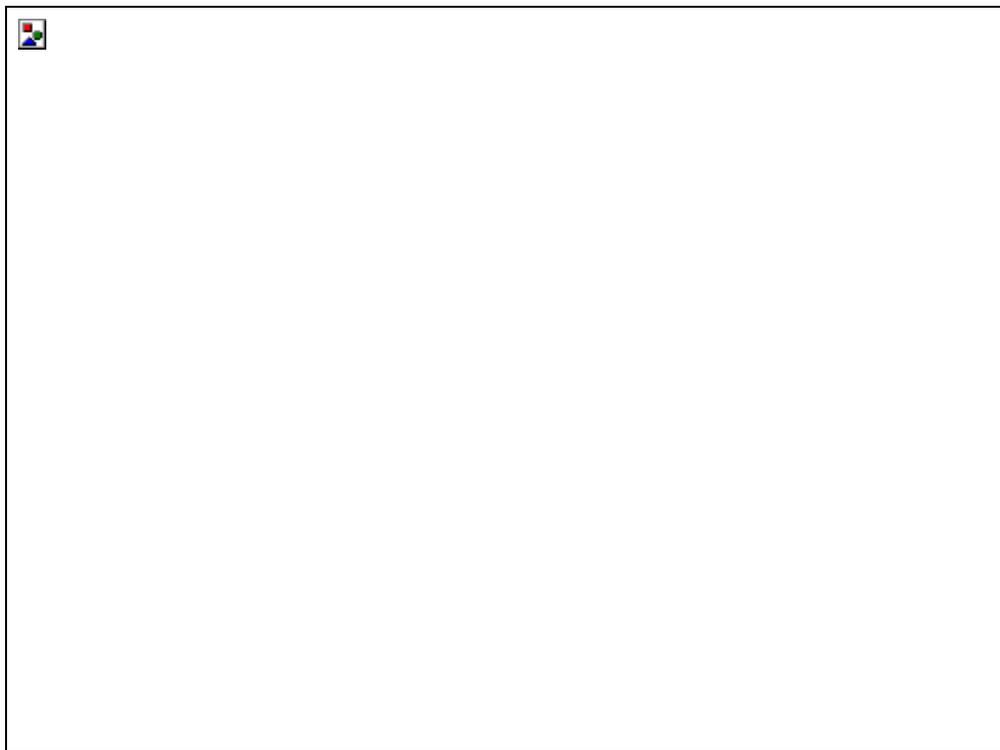


1999年2月16日 2:57 UT 野辺山電波ヘリオグラフ(国立天文台)

上のカラーの図が、ここ野辺山の電波ヘリオグラフで撮影した、電波で見た太陽フレアです。電波では、高温のプラズマと光速近くまで加速された電子の両方を見ることができます。電波の画像によって、軟X線画像で見ることができるとんがり帽子の構造やループの中に、高温のプラズマや光速近くまで加速された電子が閉じ込められていることがわかります。このように、いろいろな波長を使って観測すると、太陽フレアの違った側面を見ることができます。これらの観測データを基に、どうして太陽フレアが起きるのか？、どうしたら太陽フレアの発生を予測できるのか？、等の研究が世界各国でさかんに行われています。

太陽活動のエネルギー源 -- 磁場

太陽大気での活動現象の源は磁場です。下の図はそれを模式的に説明したものです。わたしたちの身近にある磁場というと、棒磁石のそれがあります。棒磁石に砂鉄をまくとその周囲にスジ模様があらわれて、棒磁石の N 極と S 極とを結んでいます(上段左図と中図)。これらのスジが磁力線を示しており、太陽の表面もちょうど似たような状況になっています(上段右図)。太陽面上では、黒点が、この棒磁石の N 極や S 極なのです。下段の 2 枚は実際の太陽の観測なのですが、そのうち左図は、太陽の表面での磁極のようすを特殊な方法で画像化したものです。黒が S 極、白が N 極でそれぞれが黒点に対応しています。その上空のようすを紫外線で撮像すると右図のようにふたつの磁極を結ぶ磁力線のようすがよくわかります。



(画像提供: 米国 NASA・Montana 州立大学 "Yokoh Public Outreach Project"・T. Metcalf 博士)

この磁力線自身実はエネルギーをもっています。棒磁石ぐらいの磁場のエネルギーを熱に変えることがもしてきたならば(普通は無理ですが)水 1cc の温度を千分の 1 度ぐらいは上昇することができます。これではたいしたことがないように思えますが、太陽表面での黒点のサイズは約 10000km ほどもあり地球がすっぽりおさまってしまうぐらい大きく、そのエネルギー量も莫大なものになります。実際、フレアの際に消費される磁場のエネルギーは、最大級のものになると 10 メガトン水爆 1 億個分にもなります。

太陽フレアと地球

この節では太陽フレアが地球に及ぼす影響について説明します。

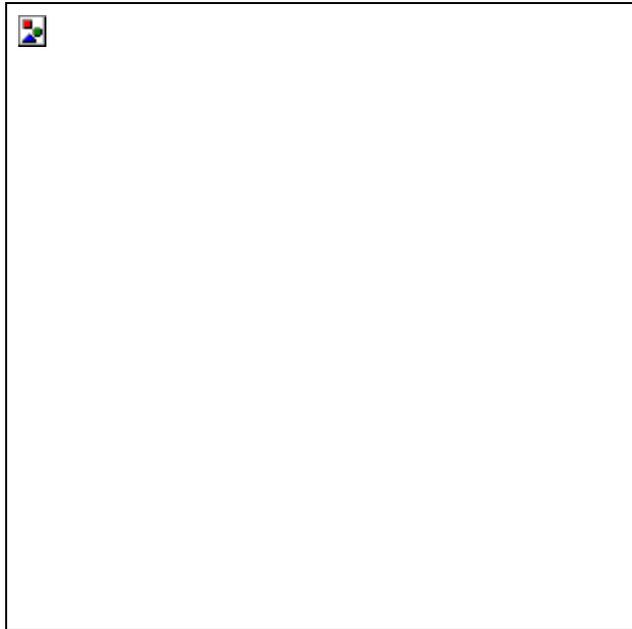
太陽風と地球磁気圏



(NASA 提供)

太陽でプラズマ爆発現象(**フレア・CME**)がおきると地球ではどのような影響がでるのでしょうか? --- 太陽と地球との間の惑星間空間は真空ではなく **プラズマ** (電離したガス) で満たされています。そして太陽からは「 **太陽風** 」とよばれるプラズマの流れが常に存在しています。その流れは普段は、私たちが住む地球表面には直接やってくることはなく、 **地球磁気圏** とよばれる磁力線のまゆによってわきにそらされているのです。

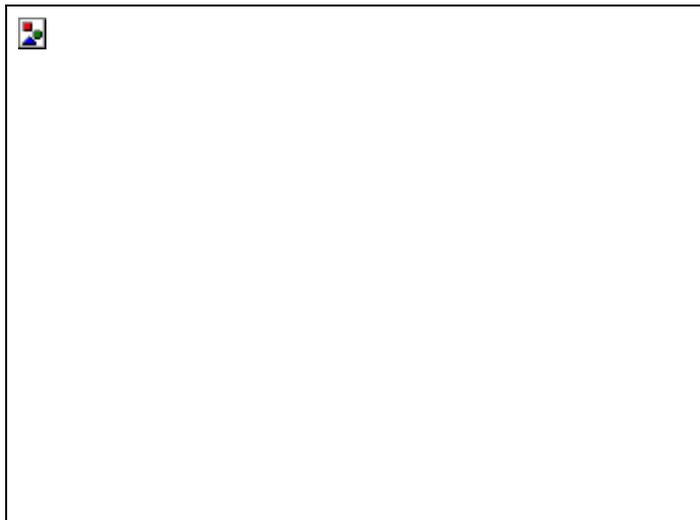
太陽フレア・CME



(NASA 提供)

ところがフレアや CME などの爆発現象が太陽大気上でおこると太陽風の突風が吹き、この地球磁気圏をゆさぶったり変形したりします。その際に、爆発で発生した **高エネルギーの粒子** が磁気圏の「壁」をすりぬけて地球の高層大気に侵入してしまいます。

宇宙から観たオーロラ



(NASA 提供)

これらの粒子が、北極や南極で **オーロラ** をおこしたり、**通信電波に乱れ** を与えたりするのです。

太陽フレアによって引き起こされた電波障害を報じる CNN ニュース



場合によっては **発電・送電設備に致命的な故障** をひきおこすこともありますし、宇宙空間で作業する **宇宙飛行士** たちにとっても非常な危険な影響をおよぼします。