

とやまと自然

第24巻 秋の号 2001

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡での太陽観測
太陽の11年周期

／上野 悟 2

／秋山 幸子 4



富山市科学文化センター

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡での太陽観測

上 野 悟

富山市から車で2時間弱、岐阜県吉城郡上宝村の西の端、標高約1300 mの山頂近くに京都大学飛騨天文台は位置しています。この天文台は1968年に、惑星や彗星を主な観測対象として設立されましたが、1979年になって「ドームレス太陽望遠鏡」(写真1)が建設されてからは、地上からの可視光線での太陽観測分野において、国内を代表する天文台として国際的に活躍をしてきています。今回は、この望遠鏡ではどのような太陽観測が行なわれて来ているのかを簡単に御紹介したいと思います。



写真1. 乗鞍岳を背景にしたドームレス太陽望遠鏡

ドームレス太陽望遠鏡には、主に次の3種の観測装置が取り付けられており、現在までに各々の特色を生かした様々な観測が行われて来ています。

- ・彩層イメージ撮影装置
- ・光球イメージ撮影装置
- ・スペクトル撮影用高分解能分光器(2式)

ここで、「彩層」とは太陽表面から2000 km程の高さを中心とする、大部分が水素ガスで占められている太陽大気上層部の事です。「光球」とは、我々が濃いサングラスなどをした時に見る事のできる、いわゆる太陽表面の事を言います。「スペクトル」とは光を虹の様に波長別の強さ分布に分解したものの事です。これら3種の装置の代表的な観測例をお話します。

◆彩層イメージ撮影装置

近年、ハッブル宇宙望遠鏡などの活躍により、宇宙の様々な場所に大規模なジェット現象、特にらせん構造を持った、ねじれたジェットが存在する事が発見されてきました。しかし、実はこれらと非常に良く似たジェット現象が、すでにこの装置によって、太陽表面ではたくさん観測されていたのです(写真2)。



写真2. ねじれがほどける様な運動を見せながら噴出するジェット(1982年2月撮影)

しかもこの装置では、地球に近付いて来る彩層ガスと、地球から遠ざかっている彩層ガスを別々に分けて撮影することができるようになっているため、これらのジェットが大体どのくらいの速さで回転しながら飛んで行っているのかという、詳しい構造まで観測する事ができるのです。この装置による観測などによって、この様な太陽面でのジェット現象は、太陽内部でねじれた磁力線が表面に出て来てそのねじれのエネルギーを解放する一つの側面として発生しているのであろう事が分かって来ました。そしてその成果は、上で述べた遠い宇宙に存在するねじれたジェット現象にもそのまま応用する事ができるのではないかと期待されています。

◆光球イメージ撮影装置

太陽は、半径の30%程度の深さまでは大気が実際に循環運動をすることによって熱を外に運んでいる「対流層」と呼ばれる状態になっていると考えられています。その内部構造の詳細はまだ研究されている途中です。1980年代に入るまでは、対流の構造としては、実際に写真などで撮影する事のできる「粒状斑(光球表面近傍に分布している直径約1000 km程の対流)」と「超粒状斑(対流層の上10分の1程度の層中に分布している直径約25000 km程の対流)」の2つしか、確実な存在の証拠は得られていませんでした。しかし研究者達は、対流層中にはもっと様々な対流構造が存在しているだろうと考えています。実際80年代に入ると、粒状斑と超粒状斑の中間くらいの大きさの対流構造が有りそうだ、という観測を行なった研究者も出て来ました。

飛騨天文台の光球イメージ撮影装置では、光球

大気の温度が高い所は明るく、低い所は暗く写りやすい仕組みになっていて、光球の粒状斑を大変コントラスト良く撮影することができます。そこで、私達はこの装置を使って長時間に渡って粒状斑を撮影し続け、そのひとつひとつの対流がどの様に動いて行くかを高速コンピュータによって解析し、光球面が実際にどんな形状で運動し変化して行くのかを研究しました。

その結果、上で述べた中間的な大きさの対流構造が実際確かに存在し(図1)、その大きさは直径約11000 kmであり、約1時間余りで生まれたり消えたりを繰り返しているものである事まで発見する事ができたのです。対流層中でのガス運動は、太陽の磁場の分布が約11年周期で繰り返し変化して行く重要な原動力となっており、この様に対流層中の運動構造を解明して行く事は、太陽の活動を解明する基盤的な情報となっていくのです。

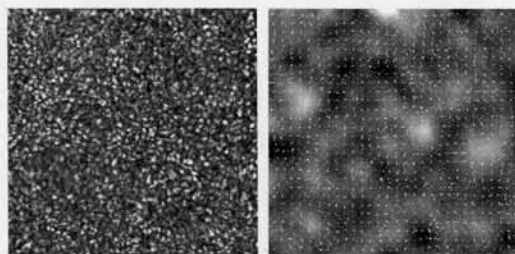


図1. 粒状斑の分布の様子(左)と、計算の結果見つかった中間粒状斑の分布の様子(右)

このほかにもこの装置によって、黒点ができる時やジェット状現象が起きる時には、その場所に向かって周辺の光球ガスが集中して来る事が発見されるなど、太陽の活動現象のメカニズムを解明する上でも、この装置は大きな貢献を果たして来ています。

◆高分解能分光器

例えば太陽のフレア(大爆発現象)をとっても詳しく、どれくらいの温度になっているのか、爆発して光っている所がみかけは止まっても実際は上下方向に運動していないのか、フレアのエネルギーの源となっていると考えられている磁力線は一体どの様に分布しているのか、と言う事まで調べようとすると、上で紹介した様な、イメージを撮影するだけの観測では情報が足りません。特に、90年代に入って日本がX線で太陽を観測する事のできる人工衛星をあげてからは、X線で見られる太陽のもっと上空の「コロナ」と呼ばれる領域で発生しているフレアと、地上から見える彩層中でのフレアとの関係が、解明すべき興味深い謎としてピックアップされて来ました。この謎を解く

には、今述べた様な、大気の下層から上層までに至る、様々な物理状態を知る必要が出て来ます。

それには、太陽からの光をスペクトルに分散してみるのが大変役に立ちます。太陽スペクトルの中には、太陽大気中に含まれている原子、分子、イオンそれぞれに対応する、暗い線や明るい線がたくさん見られます。実はこれらの線には、太陽大気の運動速度や温度、磁場の強さや方向など、物理的な情報がたくさん含まれているのです。

ドームレス太陽望遠鏡には、そう言うスペクトル線を非常に細かく見たり、たくさんのスペクトルを同時に撮影したりする事が可能な装置が付いています。これによってフレアが起きた時にその部分の様々なスペクトルの線がどの様に変化しているのかが詳細に観測されて来ました。図2は、その内の水素ガスの線の様子を示しています。

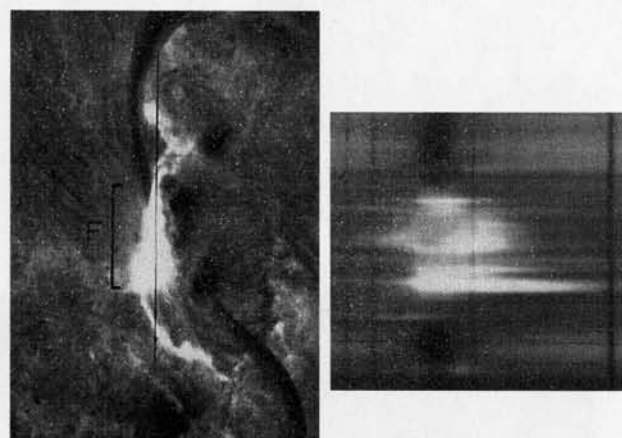


図2. フレアの彩層でのイメージ(左)と、その部分の水素ガスのスペクトル(右)。右側が長波長。

これらの観測の結果、フレアの時には彩層で高温になって光っているガスのスペクトル線は、赤い色の側に大きくずれており、それは毎秒約100kmもの高速でそのガスが下向きに落ちて行っている事を意味しているという事が分かりました。これによって、フレアが起きた時には上空のコロナ中での爆発で発生した高温ガスや高速粒子が太陽表面にたたき付けられる様に降り注ぎ、それが、彩層ガスに影響を与えているのではないかと考えられる様になってきたのです。

さて、今回はページ数の都合で御紹介できなかったこれらの装置や望遠鏡自体の詳しい仕組みや、その他の観測例、太陽の画像などは、以下のURLにてインターネット上でも見て頂く事ができます。興味を持たれた方は是非ご参照下さい。

URL:<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/Hida/>
(京都大学飛騨天文台 うえの さとる)

太陽の11年周期

秋 山 幸 子

1. 11年周期で変化する太陽の活動

2000年から2001年にかけて、太陽は11年ごとに訪れる極大期の真最中でした。極大期というのは、太陽の活動が盛んになり、黒点という太陽面の暗部がたくさん出現したり、フレアと呼ばれる爆発現象が頻繁に発生したりする時期を言います。例年よりも太陽の活動が激しいと聞いて、「だから今年の夏は暑いのかー」なんて考えた人はいませんか？ 残念、太陽の11年周期によって、私達を感じるような気候変動はほとんどないのです。地球には大気があるために、太陽から放射された有害な紫外線やX線は大部分カットされています。結果として地球の気温は太陽の11年周期にはあまり影響を受けないと考えられているのです。では、活動がさかんな状態とは、どういうことでしょうか。目に見えないX線などの光で太陽を見てみましょう。図1は太陽に現れた黒点の総数を1988年から表したものです。

黒点の数が年によってかなり変化していることが解ると思います。ところで図中の画像は、▽で記された時期の太陽の姿です。普段、わたし達が見ている太陽とはかけ離れた姿をしているので、信じられない人もいるかもしれませんね。これは観測衛星「ようこう」が特殊なX線を使って宇宙から太陽のコロナを観測したものです。コロナは非常に高温であるためX線を放射していますが、黒点の数が多い1992年前後はエネルギーが強く明るい場所が多く存在していることが解ります。一方黒点数がわずかな1996年前後のコロナ像は明るい場所がほとんどなく、わずかな輝点が見られるだけです。今回はこの様に11年ごとの活動度の変化によって、太陽ではどんなことが起こっているのか紹介したいと思います。(ただし図1での太陽像は解りやすいようにわざとおおきさを変えて表示してあります。)

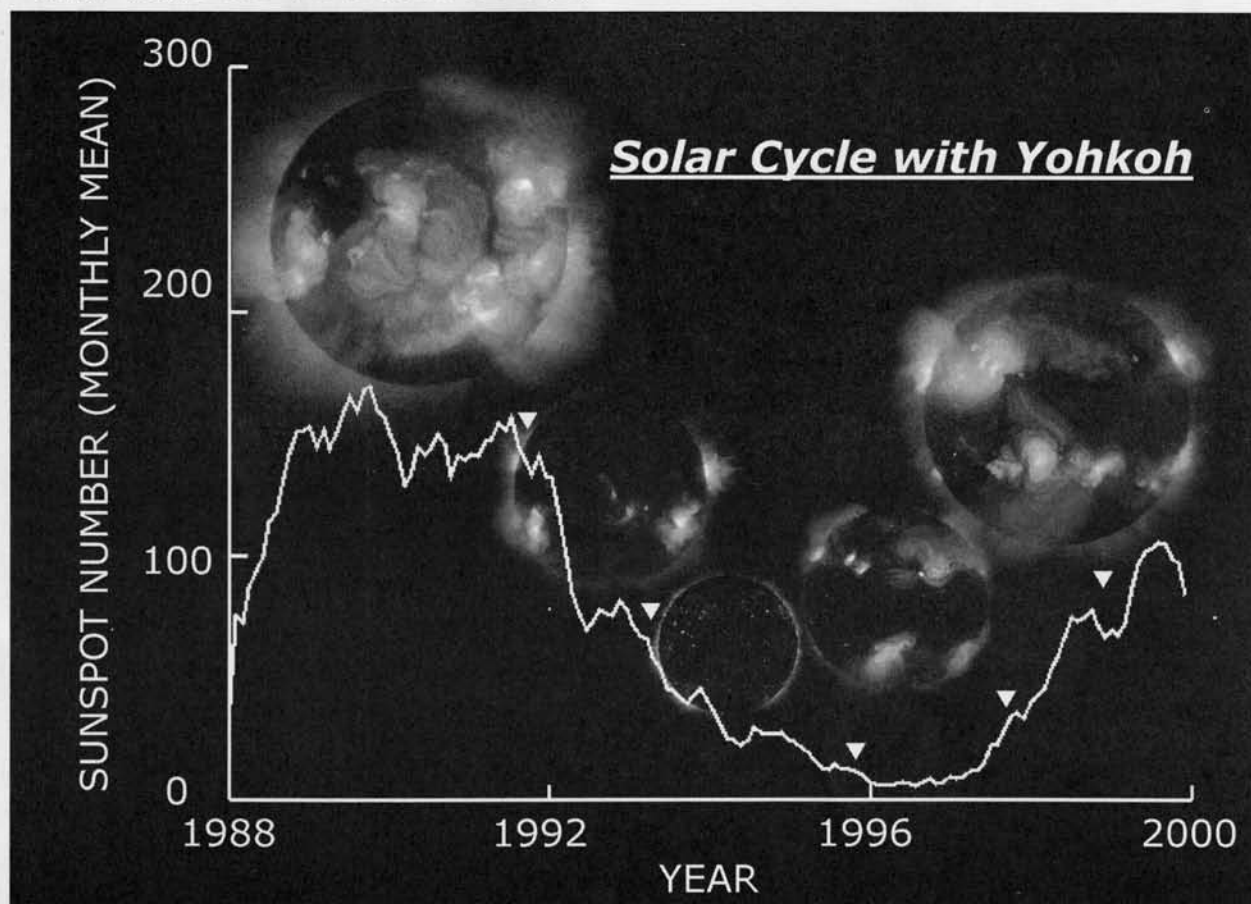
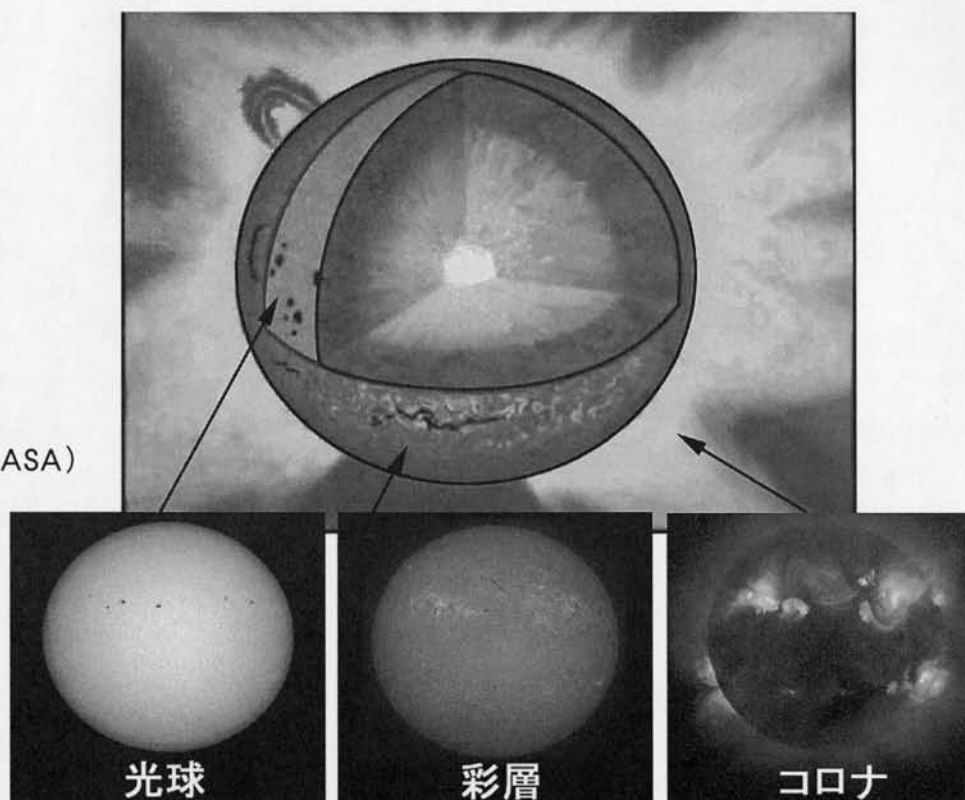


図1 黒点数および太陽コロナの変化（提供：宇宙科学研究所）

図2 太陽の大気（提供：NASA）



2. 太陽大気の構造と現象

変化の様子をより解ってもらうために、まずは基本的な太陽のお話から始めたいと思います。実は太陽にも地球と同じように大気の層があるのです。図2は太陽の模式図と各大気の画像を示したものです。

太陽大気は中心に近い方から「光球（こうきゅう）」、「彩層（さいそう）」、そして「コロナ」と大まかに分けられており、各層はそれぞれ特徴をもった姿をしています。まずわたし達が目で見ることができる「光球」は、平均して6000度の温度をしています。富山県でも夏は35度を越えることがあります。なんと光球はその170倍の温度をしているのです。暑すぎて想像できませんね。この光球をよく見ると黒い点が幾つも存在していることが解ります。これを「黒点（こくてん）」と呼びます。周囲の大気より温度が低い（約4500度）暗く見えています。この黒点は図3のように磁石と同じような働きをしており、磁場が非常に強い場所であることが知られています。

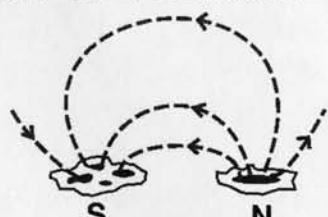


図3 黒点の様子

従って典型的な黒点はそれぞれN極とS極の磁極をもったペアで発生することが知られています。次の層である「彩層」は光球よりさらに高温の1万度の大気であり、H α 線という赤い光で見ることができます。このH α 線で彩層を見てみると、幾つも黒い筋のようなものを見ることができます。これは「プロミネンス」です。プロミネンスと聞くと、大きなアーチが太陽から出ている姿が有名ですが、このアーチを真上から見ると、このような筋模様として見ることもできるのです。プロミネンスは彩層を見ることができるH α 線で観測されますが、実は彩層に存在しているわけではありません。この次に紹介するコロナ中に雲のように浮かんでいる物体、それがプロミネンスなのです。コロナの中に存在していても、彩層と同じ物質で構成されているので、H α 線で観測することができます。最後に紹介する「コロナ」は、最初に述べたように100万度と、彩層よりもさらに100倍も高温になり、その結果大気はプラズマという状態になっています。このプラズマ状態ではエネルギーの強いX線が発生するので、コロナの様子はX線を用いて観測されます。このコロナではしばしば「フレア」という1000万度の超高温プラズマを生成する爆発現象が観測されます。平均的なフレアのエネルギーは阪神大震災を発生さ

せた地震のエネルギーよりもさらに100万倍も大きなエネルギーをもった非常に激しい現象なので、実は太陽のどの層においてもフレアによる影響を見ることができます。しかしフレアはX線や高エネルギーの粒子を多量に作り出すので、コロナにおける活動は特に激しい現象となっています。

3. 極大期の太陽活動

さて、太陽の構造や現象が分かったところで、やっとお待ちかねの極大期に観測された活動現象の紹介をしたいと思います。特に今年になってからはめずらしいイベントが幾つも発生していますので、その中でもとっておきのハイライトをお見せしましょう。

3. 1. 地球約13個分の巨大黒点群

あまり知られていないことですが、太陽自身も自転運動をしていますので、地球から見える太陽の構造は約26日かけて一周します。今年の3月23日に東の縁に現れた黒点は非常に大きいもので、幾つもの黒点が密集した黒点群を形成していました。そして3月29日には過去10年間で最も大きな黒点群に発達し、その様子は観測装置を使わなくても見ることもできるほどでした。もっとも太陽はとても眩しいので、明け方や夕方といった太陽光が弱い時間帯に見られるものでしたが、裸眼での太陽黒点の観測はとてもめずらしいことです。図4は3月29日に観測された太陽の光球像で、右下に巨大黒点群を拡大してみました。比較のために地球の大きさを●で示しましたが、これを見る

とこの黒点群がいかに大きい構造であるか解ると思います。なんとこの黒点群の中に地球を13個も並べることができるくらい大きいものですから、驚いてしまいますね。また前章でも述べたように黒点は強い磁石のような力をもっています。これはなぜなのでしょう？ 実は太陽の内部は巨大な磁石と同じであると考えられており、この磁石が光球に出てきたものが黒点として見えているのです。磁石の力で内部からの熱が妨げられるため、黒点は周りよりも温度が低いのです。そしてこの磁石の力は光球だけでなく、彩層にもコロナにも満ちていると考えられています。

3. 2. プロミネンスの噴出

昨年から今年にかけてフレアも非常にたくさん発生しましたが、中でもフレアと同時にプロミネンスの噴出が観測されるイベントはダイナミックで面白いものでした。4月10日に太陽面の中心付近で発生したフレアでは、フレアとともに側にあった大きなプロミネンスを吹き飛ばす様子が観測されました。図5は黒点の間にあったプロミネンスがたった10分間で飛ばされ消えてしまった様子を示したものです。

時間をおって画像を見ていくとアーチの形をした物体が画面左下へ動いていくのが解りますね。また図6はフレアが発生した場所に2つの白い線が現れ、だんだんと離れていく様子を示したものです。

このように2つの白い線が観測されるフレアをダブルリボンフレアと呼んでいます。さて、フレアの画像を見ていて気づいたことはありませんか？ フレアの両側に黒点がありますね。フレアと黒点は何か関係があるのでしょうか？ 前章でお話ししたように、黒点は磁石と同じような働きをします。実はフレアのエネルギーの基とはこの磁石の力なのです。フレアは黒点付近にたまった磁気エネルギーを解放して、その結果、高温プラズマが生成されたり、周りの構造が吹き飛ばされたりすることが解っています。

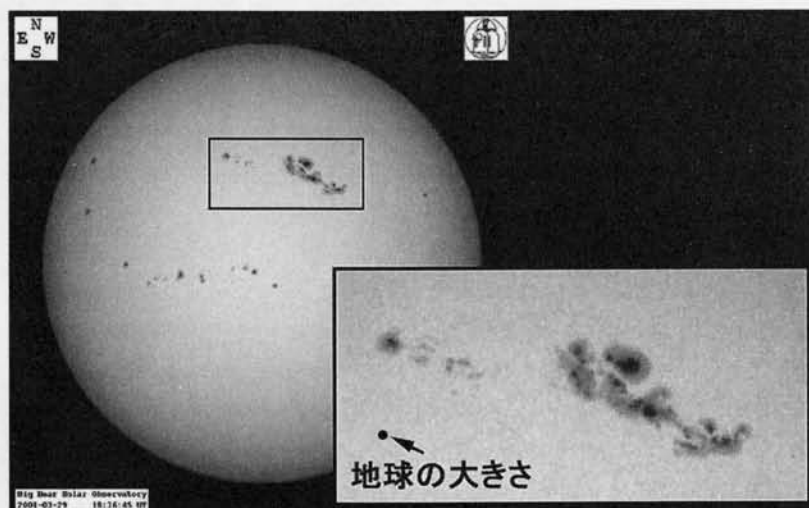


図4 肉眼黒点眼（提供：ビッグベア天文台）

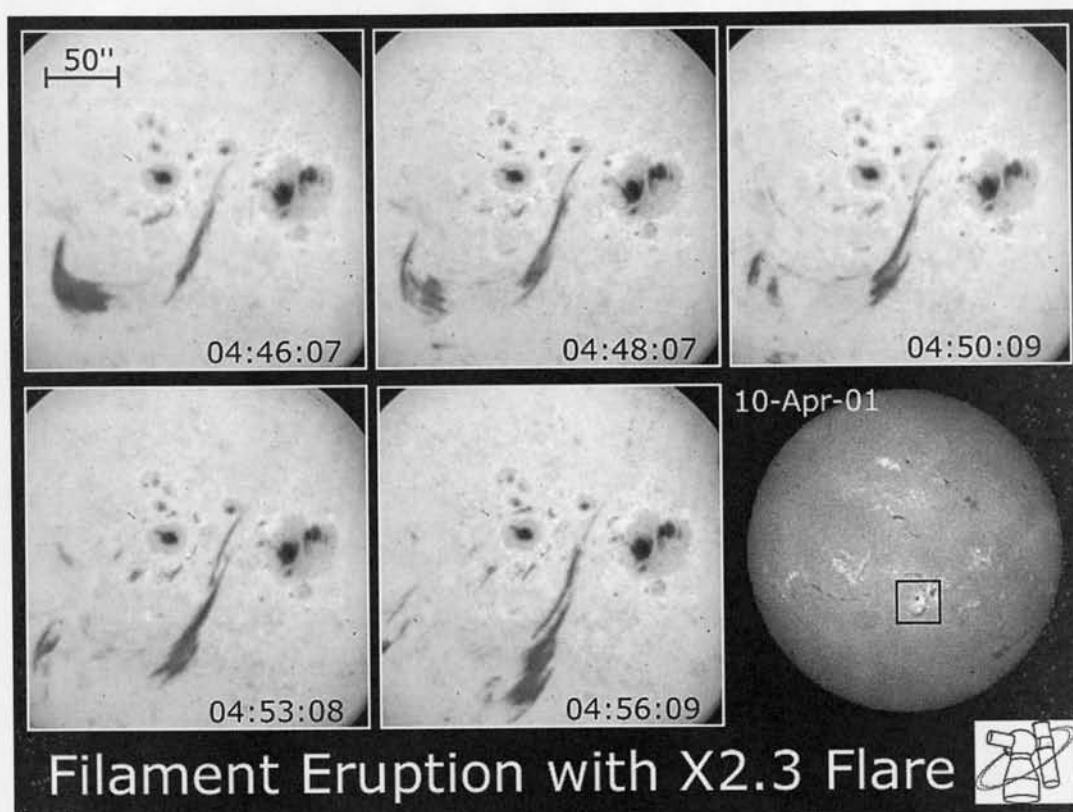


図5 プロミネンス噴出（提供：京都大学飛騨天文台）

3. 3. 12年ぶりのX20フレア

極大期における太陽フレアの特徴として発生頻度の増加がありましたが、頻度のみならず、極大付近では非常にエネルギーの強いフレアが発生することが知られています。現在最もよく用いられているフレアのエネルギー比較方法はGOES衛星が観測したX線の総量の比較です。弱い方から、A、B、C、M、Xと5段階に分けられており、AクラスとXクラスのフレアはエネルギーで約1000倍の差があります。

こんな膨大なエネルギーをもったXクラスフレアはめったに発生しません。しかし今回Xクラスフレアのさらに20倍のエネルギーをもったフレア

が2001年4月2日に発生しました。これほどのエネルギーをもったフレアが観測されたのは1989年8月16日以来、12年ぶりのことです。図7はSOHO衛星が極紫外線で観測した太陽の様子です。

上の3つの画像では、非常に高エネルギーであったためフレアが発生した領域が白くなってしまっています。下の2つは上の隣あったそれぞれの画像を引き算した像を示しています。遅い時間から早い時間を引いているので、時間がたつにつれて明るくなった場所は白く表示されることになります。下の2つの図により、フレアが発生した場所から外側に向かって明るい構造が生成されたことが見てとれますね。これらの構造はフレアのエネルギーによって吹き飛

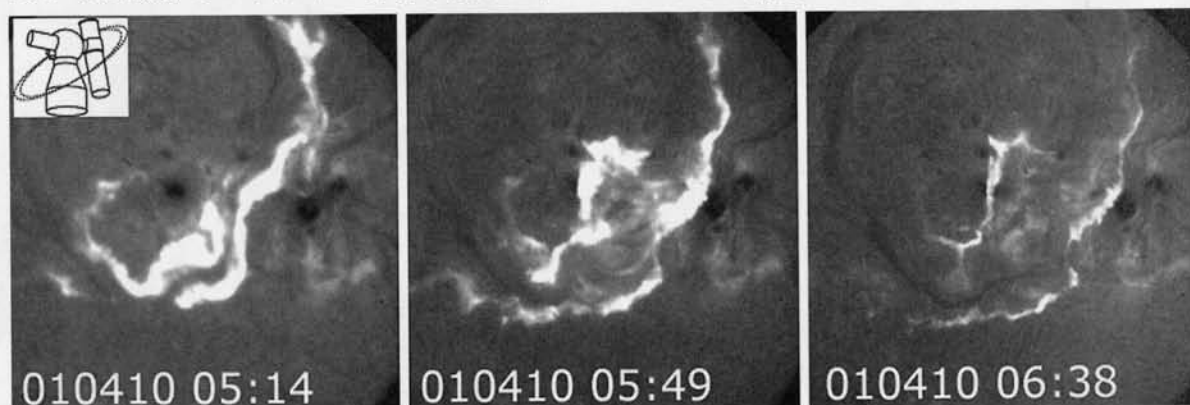


図6 ダブルリボンフレア（提供：京都大学飛騨天文台）

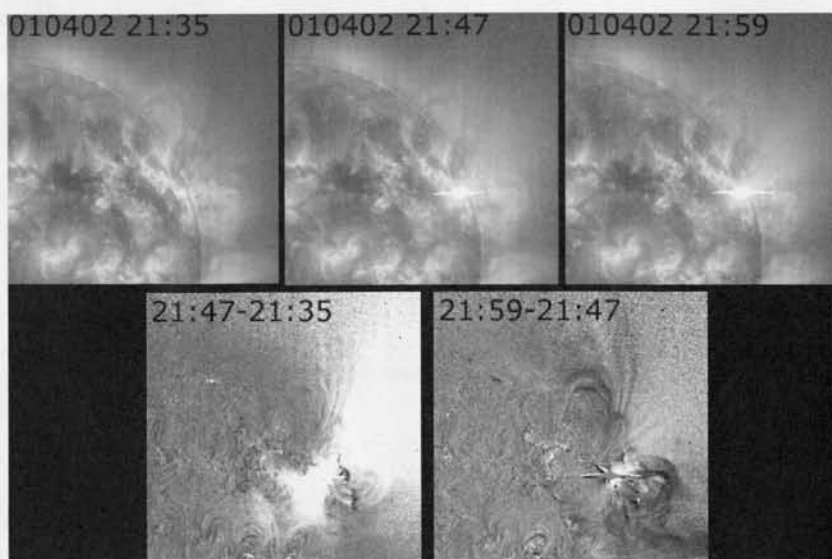


図7 X20フレアによって吹き飛ばされるコロナ（提供：NASA）

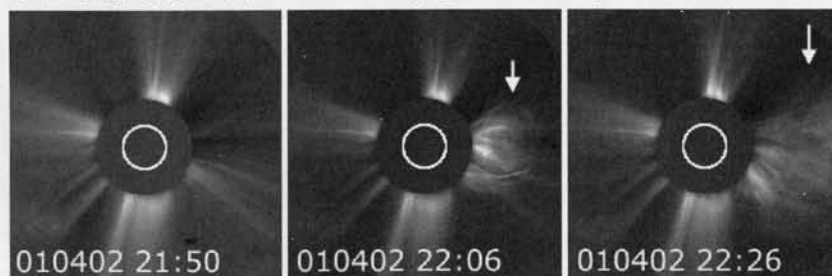


図8 X20フレアによるコロナの質量放出現象提供：NASA

ばされたコロナの物質で、コロナ質量放出現象と呼ばれています。コロナ質量放出現象は図8のように太陽を隠して周りの大気だけを見る望遠鏡で観測することができますが、高速で移動しているので、その前方に放射線や衝撃波を形成して地球にも大きな影響を及ぼすことが知られています。幸いこのフレアは太陽の縁で発生したため、地球とは別の方向に飛んでいったことで、地球への影響はほとんどありませんでした。ほっと一安心ですね。でももしコロナの物質が地球の方向に向かってきた場合はどうなるのでしょうか？

4. 太陽活動による影響

X20フレアによるコロナ放出物は地球の方向へ飛んできませんでしたが、実は3.2章で紹介したフレアは太陽表面の中心付近で発生したために、コロナの物質が地球の方向へ飛んできたのです。その時地球では各地でオーロラが観測されました。

フレアやコロナ質量放出は放射線や高エネルギーの粒子を運んでくるので、それらと地球大気が反応して高緯度地方ではオーロラが観測されるのです。でもフレアによる影響はオーロラだけではありません。例えば、オーロラを発生させた粒子がよりたくさん地球大気に突入したら、電気を帯びた粒子によって高緯度地方の送電線が影響を受け、多くの場所で停電などの被害が出るということが知られています。そして地球の外に存在して大気のバリアを持っていない人工衛星などは、実際に高エネルギー粒子を直接受けてしまい壊れてしまった例が報告されています。将来、人々はその活動の場を大気圏外に拡大していくと考えられているので、太陽活動の影響はますます深刻なものになると思われます。もしかしたら何十年か先の未来では、テレビで地球の天気予報といっしょに宇宙の天気予報を伝えるようになるかもしれませんね。太陽の11年周期やフレアについてはまだまだ解らないことがたくさんあります。みなさんの中で興味をもたれた人は、将来の宇宙天気予報士をめざして太陽の活動に関心をもってほしいと思います。

京都大学附属飛騨天文台 あきやまさちこ