

銀河宇宙線がつくる“太陽の影”と太陽活動

湯 田 利 典

〈名古屋大学太陽地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: yuda@stelab.nagoya-u.ac.jp

チベットの4300 mの高地で稼働している空気シャワーアレイで高エネルギー宇宙線による太陽の影が観測されている。観測は1990年から現在まで続けられている。この実験により、太陽活動の変動に伴って太陽の影の位置が大きく変動することが見いだされた。太陽の影の観測を継続することにより、太陽近傍の大局的な磁場構造の変動を解明するための新たな手法を見いだすことが出来るかもしれない。この解説では、太陽の影に関する観測の現状を紹介する。

1. はじめに

光が物体に当たるとその後ろに影をつくる。銀河内にはいろいろなエネルギーの宇宙線がほぼ一様に分布しているが、太陽方向から来る高エネルギー宇宙線を地上で観測すると、その方向から来る宇宙線の数には太陽による吸収のため減少しているはずである。すなわち、“太陽の影”が見えるはずである。地上から見る太陽の視直径は約0.5度であるため、影を検出するためには宇宙線の到来方向を少なくとも1度程度の精度で決めなくてはならない。カメラと同じで角度分解能が悪いと影はピンぼけになって見えなくなる。また、太陽には磁場があり、宇宙線の殆どはプロトンやヘリウム原子核であることはよく知られている。このため、適当なエネルギーの宇宙線は太陽磁場によって曲げられ、太陽の影は太陽方向からズレて見えるかも知れない。実は、太陽の影による太陽磁場の観測の可能性は1957年にアメリカのG.W. Clarkによって指摘されていた¹⁾。

高エネルギーの宇宙線が大気に入射すると、大気中の窒素や酸素原子核と核及び電磁相互作用を繰り返して鼠算的に数多くの子供粒子（主に電子、陽電子）を作る。粒子の数は最初のうちは深さとともに増大していくが、やがて最大値に達してエネ

ルギーを使い果たし、その後は急速に減少していく。大気の深さに沿って見ていくと、数多くの粒子はほぼ平面状に広がって（中心近傍の厚みはメートルのオーダー）、殆んど光の速度でシャワーのように大気中を一瞬のうちに通過していく。この現象は空気シャワーと呼ばれ、地上に沢山のシンチレーション検出器を広範囲に亘って並べて置くことにより、容易に検出できる。これら検出器を通過する粒子の時間差から空気シャワーの到来方向を、検出器を通過する粒子数の総和からそのエネルギーを決めることが出来る。この種の装置は空気シャワーアレイと呼ばれ、高エネルギー宇宙線の観測に昔から使用されている。

10 TeV（1 TeVは10の12乗電子ボルト）領域のエネルギーの宇宙線がつくる空気シャワーの最大粒子数は高々数千個であるため、このような低いエネルギーの空気シャワーは、粒子数の減衰が少ない4000mを超えるような標高の高い場所でしか観測できない。また、到来方向を1度以下の分解能で決めるには、1ナノ秒以下の高精度で粒子の到来時間を計測する必要がある。

10数年前までは、こんなエネルギーの低い宇宙線を空気シャワーアレイで、しかも1度以下の角度精度で観測することは無謀と思われていた。しかし、1989年から中国チベット自治区ヤンパーチ

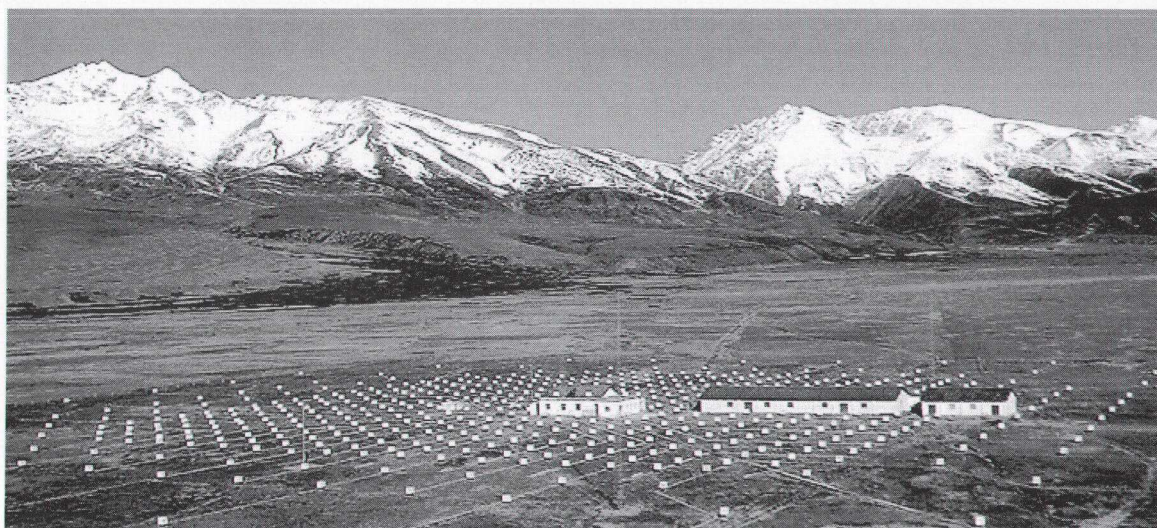


写真1：99年11月に完成したチベットの空気シャワーアレイ。300m×300mの面積に白いビニールで覆われたシンチレーション検出器545台が7.5m間隔の基盤目状に配置されている。

ン高原（標高4300m）に中国と共同で建設された空気シャワーアレイは、世界で初めてこれを可能とした²⁾。また、観測される空気シャワーの頻度も毎秒20イベントと当時では驚異的な頻度であった。この時建設された空気シャワーアレイは、各面積が0.5平方メートルのシンチレーション検出器49台を15m間隔の基盤目状に配置したもので（Tibet-Iアレイ）、1990年から93年夏まで稼働し多くの成果を得た。この実験の副産物として太陽の影が世界で初めて観測され、しかもこの時期は太陽活動の最盛期から下降期に向かう時期であり、影も太陽の真の方向から大きくズレて観測され話題となった^{3), 4)}。このアレイは1994年から次第に拡張され、95年秋にはアレイの面積はTibet-Iの4倍となった（Tibet-IIアレイ）。1999年からは検出器間隔が7.5mの高密度アレイが稼働し、シャワーの検出最小エネルギーも3TeVまで下げられた。現在、ハイテクを駆使したこの高密度アレイの面積は22,000平方メートル、観測されるシャワーの数は毎秒約700イベントと膨大なデータ量とな

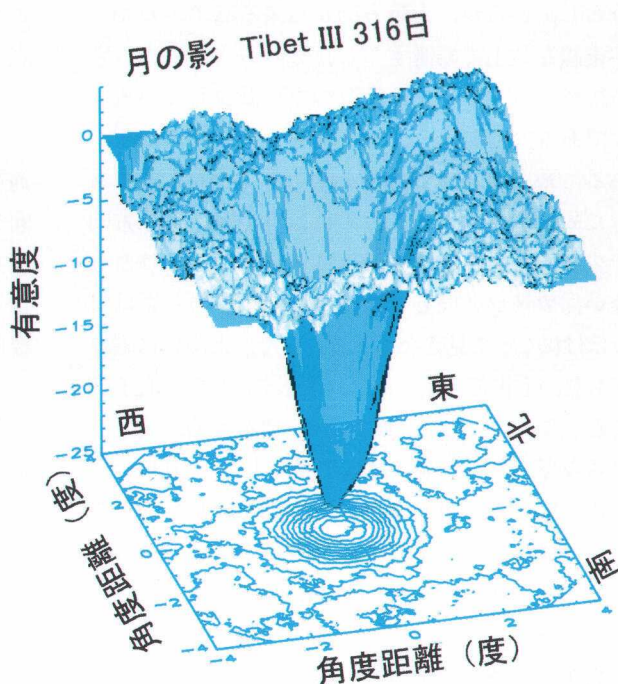


図1：写真1のアレイによる316日間の観測で得られた月の影。月による宇宙線の欠損数をバックグラウンドに対する有意さで表示してある。座標の原点が月の中心である。影の中心が月の中心から西側に有意にズレていることが分かる。

っている (Tibet-III アレイ, 写真 1)。観測頻度の増大に伴い影の精度も格段に良くなった。この解説では、チベットの空気シャワーアレイで 1991 年から 2001 年にかけて観測された太陽の影の観測結果をまとめて紹介しよう。

2. 月の影と地磁気効果

良く知られているように、地球から見る月の視直径も太陽とはほぼ同じ 0.5 度である。従って、太陽の影が見えるなら月の影も同じように観測されるはずであり、磁場のない月は重要な基準天体となる。図 1 は Tibet-III アレイで 316 日間観測して得た 3 TeV 以上の宇宙線が作る月の影である。縦軸はバックグラウンドに対する宇宙線の欠損数を、その有意さの等高線で表したものである。影の一番濃い中心部の深さの統計的有意さは、約 21 シグマである。この影の深さから観測装置の角度分解能が評価でき、3 TeV 以上のシャワーにたいしては約 0.8 度となる。勿論、宇宙線のエネルギーが高くなるほど分解能は良くなる。

図 1 を見ると、月の影の位置は西側に僅かにズレていることが分かる。これは観測している宇宙線が正電荷をもっているために、その軌道が地磁気によって曲げられ地上で観測される月の影が西側へ移動するためである。宇宙線が地磁気によって西側に曲げられる角度は、例えば、10 TeV のプロトンに対してヤンパーチンの地磁気緯度で約 0.16 度となる。観測される東西方向の影のズレは地磁気効果で完全に説明できる。他方、地磁気はほぼ南北方向に向いているので月の影の南北方向へのズレは無視できる。従って、この方向へのズレの大きさから装置の方向決定に対しての系統誤差の評価ができ、これからアレイのポインティングの誤差は数 TeV 近傍では 0.1 度以下と推定されている。チベットの空気シャワーアレイが極めて高性能であることが分かる。月の影は現在ではほぼ一週間単位で観測できるので、この影により装置の安定性がモニターできる。装置の安定性は太陽磁場の変

動に伴って移動する太陽の影を長期間に亘って観測するためには極めて重要である。

3. 太陽磁場と太陽の影

太陽活動は約 11 年の周期で変動している。Tibet-I アレイは前の太陽活動サイクル 22 のほぼ最盛期であった 90 年夏にスタートし、下降期の 93 年夏までの約 3 年間稼働した。Tibet-II アレイは 95 年から 99 年夏までの約 4 年間稼働し、99 年秋からは Tibet-III アレイが稼働している。従って、チベットアレイは前のサイクル 22 の最盛期から下降期^{3)~5)}、96~97 年の静穏期⁶⁾、サイクル 23 の活動上昇期にあたる 98 年から現在までの太陽の影の変化を追うことができた⁷⁾。観測された太陽の影の変動を見る前に、まず太陽磁場について簡単に纏めておこう^{4), 8)}。

太陽磁場の大まかな形は、極方向に伸びるダイポール型磁場と中低緯度帯の黒点磁場から構成されている。極近傍の磁場の強さは 1 ガウス程度であるが、黒点磁場は 100–1000 ガウスの乱れた磁場となっている。しかし、黒点磁場は本質的には外向きの成分をもたないトロイダル場なのでその影響は太陽表面近くに限られるため、大局的にみれば太陽磁場はダイポール型 (ポロイダル場) に近いものになっている。惑星間空間の大規模磁場構造は、コロナから吹き出す太陽風に強く影響される。太陽風は図 2 から分かるように、極域から低緯度まで延びた温度も密度も異常に低いコロナホールから秒速約 750km、赤道近辺から秒速約 400km で吹き出すプラズマ流であり、これが磁場を凍結して遠方まで運び出し、惑星間磁場 (IMF) のもとを作っている。

プラズマ流は太陽面からほぼ垂直な方向 (動径方向) に吹き出すが、太陽の自転 (地球から見た周期は約 27 日) のために磁力線は芝生の回転散水器から出る水のようにスパイラル状 (Archimedean spiral) にカーブしている⁹⁾。遠方での磁場の強さは、基本的には太陽風の速度と太陽の回転角速度

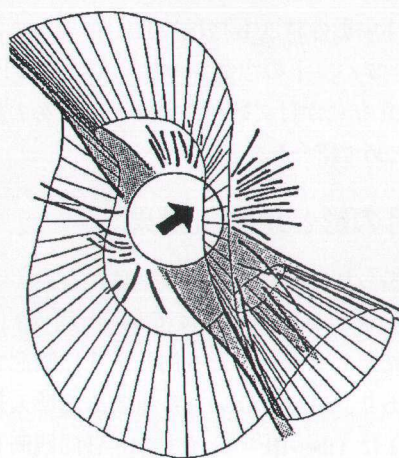
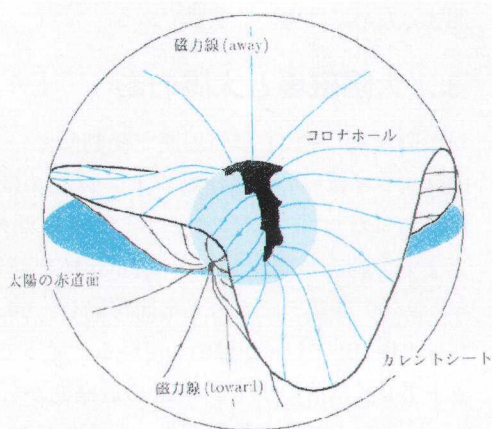


図2：太陽風磁場とバレーナ・スカートモデル。

で決まり、太陽からの距離に反比例して緩やかに減少する。地球付近の磁場の向きは地球の公転軌道に対して約45度の傾きをもち、その大きさは約50マイクロガウスである。

図2から分かるように、極域から出る磁力線は外に開いているが、中低緯度から出る磁力線は太陽の磁気赤道面にそって遠方まで伸び、北半球側と南半球側ではその向きが互いに反対になっている。この平行な薄い境界層は、その境界に電流が流れているため、カレントシート、或は磁気中性面と呼ばれている。この境界層は完全な平面ではなくバレーナのスカートのようにひらひらと波打つため、太陽の赤道を含む面内に磁力線の向きが太陽方向（内向き）と反太陽方向（外向き）の磁場が交互に現れるセクター構造を作る。地球は磁場の向きが交互に変わるセクターの中を公転していることになる。IMFのセクター構造は1965年、WilcoxとNessにより発見された¹⁰⁾。静穏期のIMFはほぼ4セクターになっているが、太陽活動が活発になるとセクターの数も変わり、その境界も乱れてくる。加えて、太陽磁場の南北の極性は約11年毎に反転することは良く知られている。

これらの太陽磁場の大局的な時間空間変動は、

図2のように太陽中心に回転する仮想的な双極子（ダイポール）を考えることにより概略説明できる。静穏期には、ダイポールの方向は自転軸にほぼ平行であるが、活動期になるとその方向は激しく変動し、極大期から下降期にかけて自転軸から大きく傾き、何回もグラグラしたりして、遂に反転する。このモデルは、斎藤尚生等¹¹⁾により提唱され、通称バレーナ・スカートモデルと呼ばれている。

宇宙線は正の電荷を帯びているので、太陽のダイポール磁場のS極が北にあるときは地磁気と同じように西側に動く。この場合は、観測される太陽の影のズレは、地磁気によるものが加算されるため、見かけ上は大きく見える。太陽のダイポール磁場の向きが地磁気と反対のときは、太陽の影は東側に動き、地磁気は西側に動かすので太陽の影のズレは小さく見える。それに対して、IMFは太陽近傍を除けば、太陽赤道面にほぼ平行であるため、太陽の影は外向きセクターを通るときは北側、内向きセクターでは南側にズレることになる。

4. 太陽活動の静穏期及び活動期の太陽の影

では、観測された太陽の影の変動は上記のよう

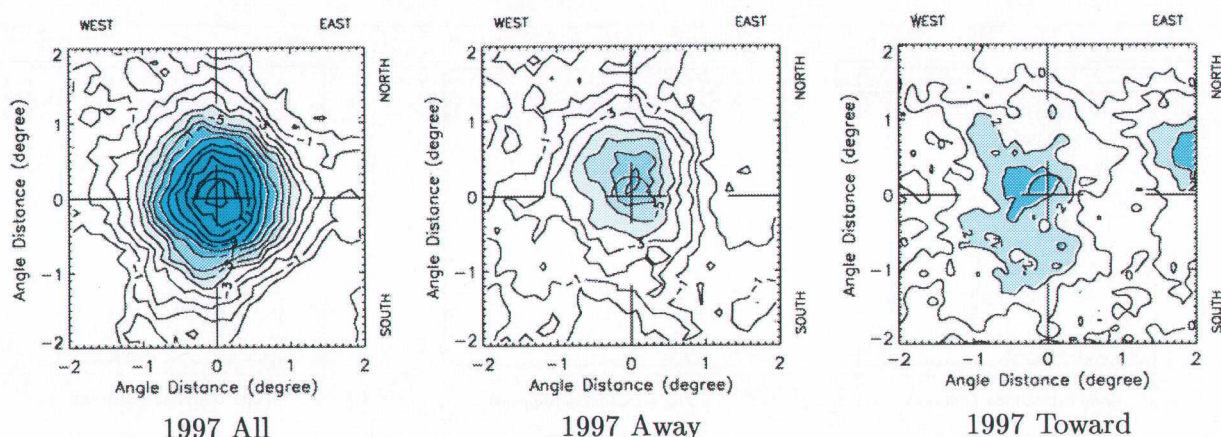


図3：10 TeV 領域の宇宙線が作る静穏期の太陽の影。影の濃さはバックグラウンドに対する欠損数の有意さを等高線で描いている。等高線はバックグラウンドを0にとり1シグマ毎のステップで書いてある。全セクター (all), 外向き (away) 及び内向き (toward) セクターに分けて示してある。データは3月から7月の太陽の南中高度が高い時期のものである。観測される太陽の影のズレには、地磁気による西側へのズレ (約0.15度) が加わっているため、太陽磁場による実際のズレはこの分だけ東側にずらした値である。図4、図5についても、影の観測時期、及び地磁気によるズレの効果は同じ。

な描像で説明できるのだろうか？ まず、比較的単純な静穏期の太陽の影を見てみよう。

図3は、静穏期である97年の春から夏にかけて観測された太陽の影である。96年も97年と殆ど同じである。この時期の太陽磁場は、カレントシートの傾きも小さく、極域の磁場も1 Gauss程度とほぼ一定であり、ダイポールに非常に近かった。まず、この時期の太陽のダイポールのS極は南半球にあり、地磁気のダイポールと反対向きになっていたことに注意しておこう。影の動きを定量的に調べるため、太陽及び地磁気ダイポール磁場(地磁気に対しては非常に良い近似である)を仮定してシミュレーションによる影の計算をおこなった。詳細は論文⁶⁾に譲るが、得られた太陽の影はほぼ太陽方向にあり、ダイポール磁場が実験結果を概ね再現できることを確かめた。すなわち、太陽のダイポール磁場により東側に移動した影が地磁気により西側に押し戻されてほぼ太陽の真の方向に見えたということである。しかし、解決すべき重要な問題点も残っている。まず、外向き、内向きセクターでの影は南北対称に反対方向に動くが、その絶対値

は観測に比べて少し大きいようだ。また、97年の外向き、内向きセクター領域の影の観測日数は殆ど同じなのに、図3から明らかなように観測された影は内向きセクターの方がかなり濃い(96年も同じ傾向)。この影の濃さの違いは、静穏期でも太陽磁場は南北で完全に対称になっていないことを示唆している。

次の静穏期(2007年頃)には、太陽磁場の向きが地磁気と同方向になるので、今度は地磁気効果が加算されて西側に大きく移動するはずであり、この考えの正しさが確認できるはずである。このように、太陽の影の観測は太陽近傍の磁場構造について直接的な情報を与えるという大きな特徴をもっている。

静穏期に比べて活動期の太陽の影はかなり複雑になる。まず、サイクル22の最盛期から下降期にかけてTibet-Iアレイで観測された影の変動を図4に示す。91年は最盛期の終り近く、92～93年は下降期にほぼ対応している。バレリーナ・スコートモデルを信ずると、91年ころはカレントシートが大きく傾き、遂には軌道面にほとんど垂直にな

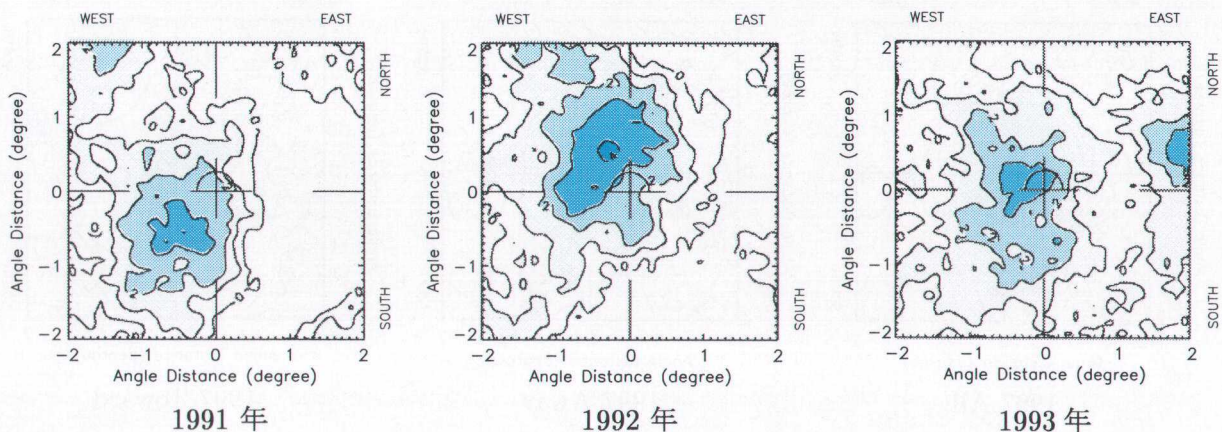


図4：Tibet-I アレイで観測された、サイクル22の太陽活動最盛期から下降期にかけての、10 TeV 領域の銀河宇宙線による、太陽の影の年変化。

ってから裏返り、セクター磁場の外向きセクター半球と内向きセクター半球が南北で入れ替わるなど激しい運動をしていた。実際、91年と92年の影の動きはかなり大きい。91年、92年で影の方向が、南から北に移っているのは、91年は外向き、92年は内向きセクターの影の方が濃いためである。この時期のIMFはほぼ2セクターであり、各々のセクターでの影の観測日数も同じであるのに影の濃さが同じになっていない。この影の非対称性は、静穏期の影の場合と同じである。下降期から静穏期にかけてはカレントシートの傾きも小さくなるがダイポールはまだ安定せず、何度もグラグラしながら最後に完全に反転するというかなり複雑な動きがあったと思われる。93年の影が複雑なのはこの反映かも知れない。因に、93年のIMFはほとんど4セクターになっていた。

活動期のセクター磁場は一見単純そうに見えるが、太陽近傍の磁場変動が影の動きをかなり複雑にしているようである。図5は現在のサイクル23における太陽活動の上昇期、最盛期、下降期にかけての影である。まず、注目すべきは、この時期の影は、静穏期の97年に比べて小さく見えにくくなっていることである（宇宙線の観測日数、イベン

ト数は97～01年の各年はほぼ同じである。ただし、図3はアレイのサイズが4分の1なので観測している宇宙線の数約4分の1であることに注意）。影の大きさは、最盛期の00年に最小になっているようである。また、98年頃からエネルギーの低い3 TeV 領域では影は殆ど見えなくなっている（静穏期の96年には3 TeV のエネルギー領域でも影はクッキリと見えていた！）。すなわち、太陽が活動期に入るとともに、低エネルギー宇宙線は大きく散乱されてしまい、影は高エネルギー成分だけで作られているようである。事実、約30 TeV 以上の高エネルギー領域では殆んど年変化をせず同じ濃さの影になっている。このサイクルでも前のサイクルと同じで、98年は外向き、00及び01年は内向きセクターの影の方が濃く、それぞれ反対のセクターでは影はほとんど見えていない（両セクターの観測日数はほぼ同じ）。但し、カレントシートが最も傾いていた99年には、両セクターで影が見えている。違いは、南北への影のずれは92年に比べて小さいことである。太陽活動は前回の方が激しかったので、それが原因かも知れない。今回のサイクルでは磁場の極性は00年から反転期に入り、01年には殆んど反転している。これに伴い、

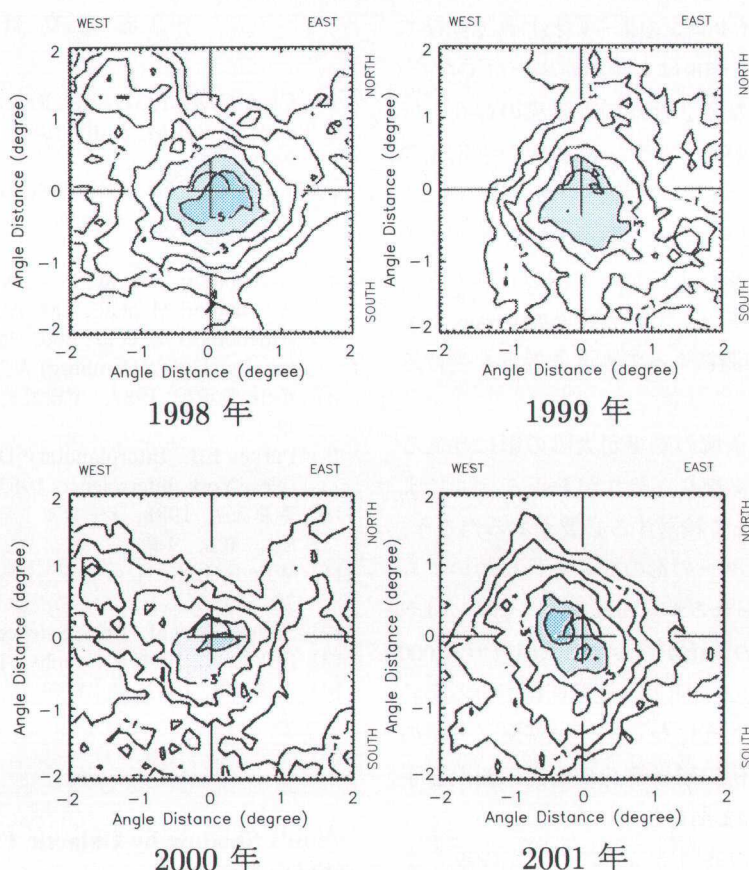


図5：サイクル23の太陽活動期における太陽の影の年変化。

ダイポール成分も次第に強くなり、その方向も地磁気と同じ向きになっている。01年の影が少し西側に移動して見えるのは、この理由によるものと思われ、静穏期に近づくにつれて、そのズレも次第に大きくなるものと期待される。

以上、現時点では活動期の太陽の影についての議論はまだ定性的であるが、規則性も見えつつあり、今後の詳しい解析に期待が持てそうである。

5. 今後

宇宙探査衛星 Ulysses は、太陽活動の静穏期に近い94年から96年にかけて太陽の南北極域の磁場を2.3AU離れた距離で測定し（IAUは地球軌道

の長半径）、太陽圏磁場は上述のダイポール磁場に基づく Parker モデルから期待されるものと大きく異なっていることを明らかにし、衝撃を与えた¹²⁾。磁場の動径成分はグローバル398な太陽磁場に関係し、ダイポール型の場合には動径成分は緯度に依存し、高緯度になるほどその強度を増すはずである。ところが、Ulysses の結果は緯度には殆ど関係せず、太陽のダイポール磁場構造は太陽圏に何ら反映されていないというのである。

これを説明するために、Fisk は太陽内部に回転軸から少し傾いたダイポールを仮定し、それと光球の差動回転を旨く組み合わせた新たな太陽磁場モデルを提唱した¹³⁾。このモデルによると、極域か

らの磁力線は、芝生の回転散水器ではなく、激しいトルネードやサイクロンのようにねじれて延びているという。Fisk モデルは太陽圏磁場だけでなく、組成及び速度が異なる 2 種類の太陽風の存在、低エネルギー宇宙線が入りやすい高緯度の宇宙線のフラックスが低緯度に比べてそれ程増えていない、など Ulysses で観測された他の結果も良く説明できるようなのである。40 年以上に亘って信じられてきたダイポール磁場に基づく太陽圏磁場の Parker モデルは、Ulysses の観測によって大きく変形を受けることとなった。

活動期になると極域の磁場が太陽の影に与える影響は無視できなくなり、それが Fisk モデルによりどう変わるか詳しく検討する必要があるだろう。外向き、内向きセクターの影の非対称性についても何かのヒントが得られるかも知れない。今秋には空気のシャワーアレイの面積がさらに拡大され (37,000 平方メートル)、約 2 週間毎の短期間における影の変動も検出できるようになる。近い将来、太陽の影の観測が太陽近傍の磁場構造の研究に新たな手がかりを与えるものと期待している。

本研究は中国との共同研究であり¹⁴⁾、1999 年度からは科学研究費特定領域研究(B)「領域名: チベットにおける高エネルギー宇宙線放射天体の研究」の研究課題として行なわれている。

参考文献

- 1) Clark G.W., 1957, Phys. Rev. 108, 450
- 2) Amenomori M. et al., 1992, Phys. Rev. Lett. 69, 2468
- 3) Amenomori M. et al., 1993, ApJ 415, L147
- 4) 西沢正己, 湯田利典, 1993, パリティ, 8 巻, 10 号, 55 頁
- 5) Amenomori M. et al., 1996, ApJ 464, 954
- 6) Amenomori M. et al., 2000 ApJ 541, 1051
- 7) Amenomori M. et al., 2001, Proc. of 27th Int. Cosmic Ray Conf. (Hamburg) 7, 2661
- 8) 小田 稔監訳, 1987, 宇宙天文大事典 (丸善), 第 3 章
- 9) Parker E.J., Interplanetary Dynamical Processes (New York, Interscience, 1963)
- 10) 斎藤尚生, 1988, オーロラ・彗星・磁気嵐 (共立出版), 第 8, 9 章
- 11) Wilcox J.M., Ness N.F., 1965, J. Geophys. Res. 70, 5793
- 12) Smith E.J. et al., 1995, Science 268, 1005
- 13) Fisk L.A., 1996, J. Geophys. Res. 101, 15, 547
- 14) 湯田利典, 2002, 日本物理学会誌, 57 巻, 7 号, 印刷中

Sun's Shadow by Galactic Cosmic Rays and Solar Activity

Toshinori YUDA

Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: The Sun's shadow has been detected in the high-energy cosmic ray flux with the Tibet air shower array operating at an altitude of 4300 m above sea level. The observation covers the period from 1990 through 2001. We examined a yearly variation of the Sun's shadow, and found for the first time that the position of the shadow changed considerably every year with the phase of solar activity. In this article, we introduce the current status of this observation.