



2. 宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報

亘 慎一

情報通信研究機構

(原稿受付：2006年7月11日)

「宇宙天気」について具体的なイメージを持っていただくために「宇宙天気」が我々の生活に与える影響について述べるとともに宇宙天気予報を行っている国際宇宙環境情報サービス (ISES, International Space Environment Service) や宇宙天気研究の現状について紹介する。

Keywords:

space weather, International Space Environment Service (ISES)

2.1 はじめに

人類が初めて宇宙に送り出した人工衛星は旧ソ連のスペースドニクで、それから約50年がたった。はるか遠くの宇宙に目を向けると米国のNASAが打ち上げた探査機ボイジャーが我々の住む太陽圏の境界に迫りつつある。一方、地球のまわりの宇宙空間に目を向けるとそこはいろいろな目的のために実用される空間となってきた。たとえば、気象予報の中にてでくる雲画像を毎日、届けてくれているのは気象衛星「ひまわり」であり、国際的に大きな事件や災害が起こったときに地球上のあらゆる場所からのニュースの中継を可能にしているのは通信衛星である。また、カーナビなど自分の位置を正確に教えてくれる測位システムにはGPS衛星が使われている。表1に示したように宇宙環境の擾乱「宇宙嵐」が、これら宇宙を利用したシステムに影響を与えることが問題となってきた[1-14]。宇宙のシステムだけでなく地上のシステムでも宇宙嵐の影響を受けるものがある。ここでは、宇宙嵐による影響を具体的に紹介するとともに、宇宙嵐を予測しようという活動について紹介する。

2.2 宇宙天気による社会システムへの影響について

宇宙環境の擾乱「宇宙嵐」には、「電磁波嵐」、「高エネルギー粒子嵐」、「放射線帯電子嵐」、「地磁気嵐」、「電離圏嵐」などがある。「電磁波嵐」はフレアと呼ばれる太陽面の爆発現象によりエックス線、紫外線、電波など強い電磁波が放射される現象である。「高エネルギー粒子嵐」というのはフレアやコロナガス大規模噴出現象 (CME) によって加速された粒子が地球に押し寄せてくる現象である。高速の太陽風の影響により放射帯の高エネルギー電子のフラック

2. *Impacts of Space Storms on Technologies and Space Weather Forecast*
WATARI Shinichi

author's e-mail: watari@nict.go.jp

一部カラーの図を本学会ホームページに載せています。ご参照下さい。

スが増加するのが「放射線帯電子嵐」で、太陽からのCMEが運んでくる強い南向きの磁場により地球の磁場が大きく乱されるのが「地磁気嵐」である。図1にESAとNASAが共同で打ち上げたSOHO衛星に搭載されたLASCOと呼ばれるコロナグラフによって観測されたCMEを示す。CMEは1,000 km/s程度の速度で2日くらいかけて地球までやってくる。「電離圏嵐」は地磁気嵐の影響で電離圏F領域の電子密度が変動するものである。これらの嵐は、宇

表1 宇宙嵐に伴う具体的な障害の例。

発生時期	影響
1989年3月13-14日	大きな地磁気嵐のためカナダで送電システムの障害による大規模な停電が発生した。
1994年1月20日	通信衛星Anik E1, E2が姿勢制御に不具合を生じた。
1994年2月22日	日本の通信衛星BS-3aに不具合が生じ、冬季オリンピックのジャンプ中継が中断された。
1997年1月11日	通信衛星Telstar 401が放電により機能を停止した。
2000年7月15日	日本のX線天文衛星「あすか」が大気抵抗により姿勢制御に不具合を生じた。
2002年4月21日	高エネルギー粒子現象により日本の火星探査機「のぞみ」の通信系と電源系のシステムに不具合が生じた。
2003年10月24日	日本の地球観測衛星「みどり2」が放電による障害のため、太陽電池から電力を得られなくなり機能停止した。
2003年10月28日	日本のデータ中継衛星「こだま」が地球センサーへのノイズの増加によりsafe modeになった。
2003年10月30日	大きな地磁気嵐のためスウェーデンで送電システムの障害による停電が発生した。

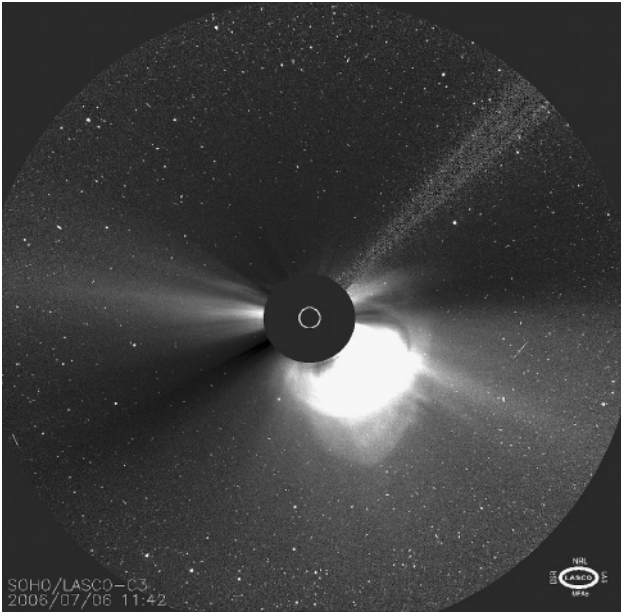


図1 ESAとNASAが打ち上げたSOHO衛星によって観測されたコロナガス大規模噴出現象(CME)。

宙を利用したシステムや地上のシステムにさまざまな影響を与える[1-14] (表2および図2参照)。

2.2.1 衛星や有人宇宙飛行への影響[9-11]

「高エネルギー粒子嵐」に伴って衛星でメモリエラーなどが起こることがある。このような高エネルギーの陽子(プロトン)や重イオンなどの荷電粒子による半導体論理回路の誤動作または故障をシングルイベントアップセット(SEU)と呼ぶ。SEUにより衛星の姿勢を制御するための地球センサーなどに異常が起こると衛星の姿勢がおかしくなってしまうこともある。また、「高エネルギー粒子嵐」は太陽電池の発生電流と電圧の減少を加速し衛星の寿命を縮める。有人宇宙飛行においては宇宙飛行士の被ばく量の増加という問題が起きる。特に船外活動を行うような場合に

表2 宇宙嵐に伴う障害。

影響を受ける対象	影響を与える現象	影響
宇宙機	高エネルギー粒子(陽子, 重イオン)	シングルイベントアップセット 太陽電池の劣化
	高エネルギー電子	帯電
	地磁気嵐	姿勢制御への影響
	超高層大気の変動	大気抵抗による軌道変動
有人宇宙活動	銀河宇宙線	被ばく
	太陽高エネルギー粒子	
旅客機	銀河宇宙線による二次放射線	被ばく PCAによる短波帯通信の途絶
	太陽高エネルギー粒子による二次放射線	
	太陽フレア	短波帯通信の途絶
通信	太陽電波バースト	携帯電話への混信
	太陽フレア	短波帯通信の途絶
	電離圏嵐	短波帯通信の品質劣化
GPS測位	電離圏嵐	測位精度の劣化
	シンチレーション	位相ロックはずれ
送電システム	地磁気嵐による誘導電流(GIC)	送電システムの障害による停電
パイプライン	地磁気嵐による誘導電流(GIC)	電気腐食
空中磁気探査	地磁気擾乱	探査精度の劣化
鳩レース	地磁気擾乱	迷子となる鳩の増加
オーロラ観光	地磁気擾乱	オーロラの発生(観光資源)

問題となる。

「放射線帯電子嵐」に伴って増加する高エネルギー電子は衛星の深部まで侵入して帯電を起こす。このような帯電を深部帯電と呼ぶ。深部帯電は衛星に流入する電子とイオンの量が異なることにより衛星の表面が帯電する表面帯電に比べて帯電を解消するのが難しいため、最近ではこの深部帯電が問題となっている。

低軌道の地球周回衛星の場合は、超高層大気による摩擦



図2 宇宙嵐による社会システムへの影響。

が衛星を減速させ軌道を低下させる。太陽からの紫外線の増加や地磁気嵐に伴う超高層大気の加熱は、衛星と超高層大気との摩擦を増加させ、軌道を維持するための燃料の消費を早めて衛星の寿命を短くする。

衛星の打ち上げなどに伴って発生した大小のごみを「デブリ」と呼ぶ。デブリを宇宙天気の影響にいかれるとどうかは議論の分かれるところであるが、高速で地球の周りを回っているデブリは、ひとたび衛星に衝突すると致命的なダメージを与える危険性を持っている。

2.2.2 通信への影響[9, 13]

「電磁波嵐」による強いエックス線や紫外線により地球の昼間側の電離圏D領域が電離され吸収により短波帯の通信が途絶することがある。このような現象を発見者の名前にちなんでデリンジャー現象と呼ぶ。この現象を短波障害(SWF, Short Wave Fadeout)あるいは突発性電離圏擾乱(SID, Sudden Ionospheric Disturbances)と呼ぶこともある。また、「高エネルギー粒子嵐」に伴って極域に侵入したエネルギーの高い陽子により極域の電離圏D領域の吸収が増加し、短波による通信ができなくなることがある。このような現象を極冠吸収(PCA, Polar Cap Absorption)と呼ぶ。

「地磁気嵐」によって熱圏大気の風や温度、大気の成分が変化し電離圏F領域の電子密度が減少することがある。この現象を「電離圏負相嵐」と呼ぶ。電離圏負相嵐は短波帯(3-30 MHz)の電波を使った通信に影響を与える。中緯度では地磁気嵐に伴う電離圏負相嵐は夏に起こりやすいという季節的依存性を持っている。これとは逆に地磁気嵐に伴って電子密度が増加することもあり「電離圏正相嵐」と呼ばれる。「電離圏正相嵐」は中緯度では冬季に起こりやすいという季節的依存性を持っている。

電離圏の不規則構造により衛星からの電波が乱されてその強度が変動する現象を「シンチレーション」と呼ぶ。シンチレーションは主にVHF帯やUHF帯の電波を使った衛星との通信に影響を与えるが、強い「地磁気嵐」に伴う異常な電場変動によりマイクロ波帯にまで及ぶ強いシンチレーションが起こることが報告されている[12]。

「電磁波嵐」に伴って太陽から強いマイクロ波帯の電波が放射されることがある。太陽の方向と地上の携帯電話のアンテナの方向が一致したとき、この強い電波が地上の携帯電話網へ影響を与えたという事例が報告されている[9]。

高度100 km程度に突発的に現れる局所的に電子密度の濃い層をスプラディックE層(Es層)と呼ぶ。日本付近では夏に発生が多く、発達したスプラディックE層は時にはVHF帯の電波まで反射し防災無線やテレビ電波に混信を与える原因となることがある。スプラディックE層は超高層大気中のダイナミクスによって生成されるものであるが、電離圏の現象であり宇宙天気の影響に入れることができると考えられる。

2.2.3 航空機への影響[9, 13]

航空機が使用する短波帯の電波を使った通信は「電磁波嵐」によるデリンジャー現象や「高エネルギー粒子嵐」による極冠吸収の影響を受ける。特に北極の近くを通る航路

では、地上にVHF帯の通信局がなく、赤道上空の静止軌道にある通信衛星も利用できないので地上と航空機との通信ができなくなるという問題が生じる。

また、航空機は約10 kmの高度を飛行するため、地上に比べて銀河宇宙線による二次放射線の影響を受けやすくなる。銀河宇宙線の影響に加えて、地球の磁力線が開いている極域では「高エネルギー粒子嵐」に伴う高いエネルギーの粒子の影響で被ばく量が増えることがある。日本では2005年12月に文部科学省の審議会により航空機の乗務員に対する年間の被ばく量の上限として5ミリシーベルトというガイドラインが示された。胃のX線撮影を1回行うと0.6ミリシーベルト程度の放射線を浴びることになる。5ミリシーベルトという値はこの約8回分の値に相当する。

2.2.4 電力設備やパイプラインへの影響[9]

地磁気変動に伴う誘導電流が送電線やパイプに流れシステムの障害を起こしたり、金属パイプの腐食を促進することがある。このような現象をGIC(Geomagnetically Induced Current)と呼ぶ。アラスカなど高緯度地方にある石油や天然ガスのパイプラインではオーロラ活動に伴って繰り返し流れる誘導電流がパイプの電気腐食の要因の一つとなる。地球の高緯度地域ではオーロラ活動に伴う強い電流がGICの主な原因であるが、CMEに伴う衝撃波の到来によるSC(Sudden Commencement)やSI(Sudden Impulse)と呼ばれる地磁気急激な変化もGICによる障害の原因になると考えられている。GICは海底ケーブルの中継器に電源を供給するケーブルや鉄道の線路を使った信号の伝送などにも影響を与えることが報告されている。

2.2.5 磁気探査への影響

磁場を使った地質や資源探査には大きくわけて二つの手法がある。一つは航空機や船舶などから精密な地磁気観測を行うことにより地下資源の探査を行うもの、もう一つは地磁気変動に対する応答を使って探査を行うMT法(Magnet-Telluric Method)と呼ばれる手法である。航空機や船舶による磁気探査では地磁気の変動が測定の妨害となるため、地磁気が静穏なときに実施する必要がある。一方、MT法では地磁気変動に対する応答を使っているため地磁気が擾乱しているときに探査を行う必要がある。磁気探査は宇宙天気静穏な期間の予報を知りたいという人たちと擾乱する期間の予報を知りたい人たちがいるという両極端の宇宙天気ユーザーである。

2.2.6 衛星測位への影響[13]

GPSによる測位は、複数の衛星からの電波の到来時間の差を使って位置を決める。衛星からの電波は電離圏を伝わるときにその中のプラズマによって少し遅れが生じるため、「地磁気嵐」などに伴って電離圏の電子密度が大きく変動すると遅延時間が変わり位置の誤差が大きくなってしまふという弱点がある。この伝搬遅延の変動による誤差を小さくするためにディファレンシャルGPS(DGPS)といって基準となる固定受信局からのデータを使って補正する方法もあるが空間的な変動が大きいと補正を行うことは難しくなってしまうという欠点がある。また、電離圏の不規則構造によるシンチレーションのためにGPS衛星からの電波が

受信できなくなって測位が行えないという現象もある。現在、米国などでGPSを使った航空機の離着陸システムの導入が検討されているが、測位誤差をいかに小さくし信頼性のあるシステムにするかということが大きな課題となっている。

2.2.7 オーロラ観光や宇宙旅行

「地磁気嵐」に伴って極域ではオーロラが見られる。我々が唯一、地上で「宇宙天気」を感じることができるのが、このオーロラ現象である。近年、日本からも北欧やアラスカへオーロラを楽しむ観光客が増えている。地上の天気が良いということも重要だが、きれいなオーロラを見るためには宇宙天気情報を活用する必要がある。最近では民間会社が宇宙旅行のツアーを売り出し始めており、我々が宇宙旅行にいけるようになる日も近いと思われる。宇宙旅行に行く場合は、「高エネルギー粒子嵐」による被ばくの危険などがあるため、宇宙天気予報を確かめてからいくことになるであろう。

2.2.8 生物への影響[14]

地球の磁場が生物に何らかの役割を果たしているのではないかということがいわれている。例えば、鳩などは地磁気を使って方向を決めている。「地磁気嵐」の時に迷子になる鳩が多くでてしまうということで、鳩レースの際には地磁気の静穏な時期が選ばれるという話がある。鳥だけでなく、我々人間についても心臓障害と地磁気活動に高い相関があるなどという報告例がある。

2.3 宇宙天気予報センターについて

宇宙天気予報を行う国際的な機関として国際宇宙環境情報サービス (ISES, International Space Environment Service) と呼ばれるものがある [15]。この ISES は、国際電波科

学連合 (URSI, International Union of Radio Science) の下部機関で、1928年に国際的なデータ交換を迅速に行うために設けられた URSI Central Committee of URSIgram と約50年前に行われた国際地球観測年 (IGY, International Geophysical Year) の際につくられた International World Days Service が統合して1962年につくられた IUWDS (International URSIgram and World Days Service) が宇宙天気予報を行う国際的な機関として1996年に改称されたものである。

現在は、米国コロラド州のボウルダーというところにある米国海洋大気庁 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Agency) の宇宙環境センター (SEC, Space Environment Center) を本部として、図3に示したカナダ、オーストラリア、日本、中国、インド、ロシア、ポーランド、チェコ、スウェーデン、ベルギーの11カ国が加盟して活動している。表3に示したように天文台や地磁気観測所など様々な機関が宇宙天気予報センターの運営機関として活動しており、日本では、独立行政法人情報通信研究機構が ISES の予報センターを運営している。毎日、日本時間の午後3時に太陽フレア、地磁気嵐、高エネルギー粒子に関する宇宙天気予報を発令するとともに大きな宇宙嵐が発生した際には随時、臨時情報を発信している。宇宙天気に関する情報は図4に示したような Web (<http://swc.nict.go.jp>)、電子メール、ファックスなどを使って提供されている。

2.4 宇宙天気研究の状況について

米国では、1995年に NOAA, NSF, NASA, など7つの省庁の共同プロジェクトとして宇宙天気研究, National Space Weather Program (NSWP) をスタートさせた [16, 17]。一方、欧州では ESA が中心となって1998年から

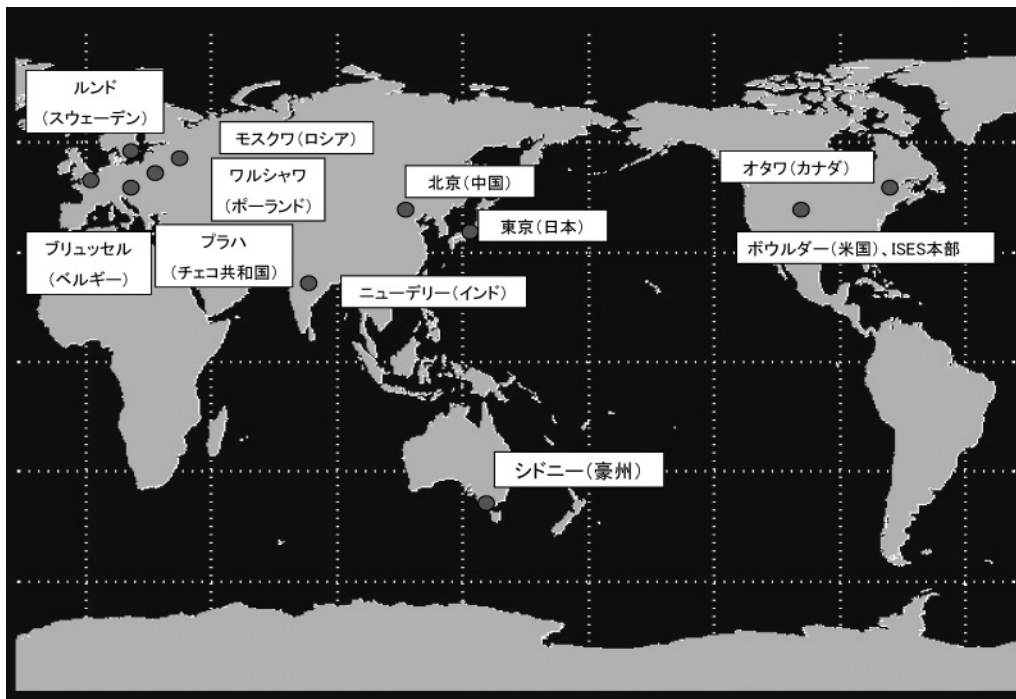


図3 国際宇宙環境情報サービス (ISES) の予報センター。

表3 国際宇宙環境情報サービス (ISES) の予報センター。

予報センター所在地	運営機関	URL アドレス
米国 (コロラド州ボルダー)	米国海洋大気庁 (NOAA)/宇宙環境センター (SEC)	http://www.sec.noaa.gov/
カナダ (オタワ)	地質調査所 Natural Resouce Canada (NRC)	http://www.spaceweather.gc.ca/index_e.php
オーストラリア (シドニー)	電離圏予報サービス (IPS)	http://www.ips.gov.au/
日本 (東京)	情報通信研究機構 (NICT)	http://swc.nict.go.jp/
中国 (北京)	北京天文台 宇宙科学応用センター 電波伝播研究所 測地・地球物理研究所	http://rwc.bao.ac.cn/
インド (ニューデリー)	国立物理学研究所	http://www.npl-cgc.ernet.in/atul/cgc/rwc/INTRUDUCTION4_BuIn.htm
ロシア (モスクワ)	水文気象サービス	http://www.geospace.ru/
ポーランド (ワルシャワ)	宇宙研究センター	http://www.cbk.waw.pl/rwc/rwc.html
チェコ共和国 (プラハ)	超高層大気研究所 天文学研究所 地球物理研究所	http://rwcprague.ufa.cas.cz/
ベルギー (ブリュッセル)	ベルギー王立天文台	http://sidc.oma.be/
スウェーデン (ルンド)	ルンド宇宙天気センター	http://www.lund.irf.se/



図4 Webによる宇宙天気情報の提供 (http://swc.nict.go.jp/).

宇宙天気に関する研究をはじめた[18]。これらの動きに先立って日本では1988年から情報通信研究機構（当時の郵政省通信総合研究所）が宇宙時代をにらんだ「宇宙天気予報」の研究に着手し、今日に至っている[19]。

2004年からは5ヶ年計画で太陽地球系の気候と天気 (CAWSES, Climate and Weather of the Sun-Earth System) という SCOSTEP (Science Committee on Solar-Terrestrial Physics) の国際的な学術研究プロジェクトが進められており[20]、そのプロジェクトの中で宇宙天気は主要な研究テーマのひとつとして位置づけられ世界中で研究が行われるようになってきている。また、1957年から1958年にかけて行われた国際地球観測年 (IGY, International Geophysical Year) と呼ばれる国際共同観測プロジェクトの50周年を記念して国際太陽系観測年 (IHY, International Heliophysical Year) [21]、国際デジタル地球年 (eGY, Electrical Geophysical Year) [22]、国際極年 (IPY, International Polar Year) [23] といった宇宙天気に関係した国際的キャンペーンが2007-2008年に計画されている。IGYの際には地磁気、電離圏、宇宙線などの地上観測網やデータセンターが整備され、バンアレンによる放射線帯の発見など多くの研究的な成果があげられた。それから50年がたち、格段に進歩した情報通信技術の活用などにより宇宙天気の分野で大きな成果が出るものと期待されている。

2.5 最後に

太陽活動は11年周期で変動しており、2006年から2007年にかけてはその極小期にあたる。次の活動サイクル24の極大は2010年あたりと予想され、その活動も大きいのではないかとこの予測もなされている[24]。宇宙嵐による障害を最小限にするため、次の極大に向けて関連分野の研究者が協力して研究を加速する必要がある。

参考文献

[1] 大林辰蔵：宇宙空間物理学（裳華房，1970年）。

- [2] 恩藤忠典：宇宙環境科学，丸橋克英編（オーム社，2000年）。
- [3] 寺沢敏夫：太陽圏の物理（岩波書店，2002年）。
- [4] S.T. Suess and B.T. Tsurutani, *From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays* (AGU Washington, DC, 1998).
- [5] J. Lilensten and J. Bornarel, *Space Weather: Environment and Societies* (Springer Dordrecht, 2006).
- [6] K. Scherer, H. Fichtner, B. Heber and U. Mall (eds.), *Space Weather: The Physics Behind a Slogan, Lec. Notes Phys. 656* (Springer, Berlin Heidelberg, 2006).
- [7] B. Poppe, *Sentinels of the Sun Forecasting Space Weather* (Johnson Books, Boulder, 2005).
- [8] J.W. Freeman, *Strom in Space* (Cambridge University Press, 2001).
- [9] I.A. Daglis (ed.), *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure* (Kluwer Academic Publishers Dordrecht / Boston / London, 2004).
- [10] 榎野文命：科学衛星と宇宙ステーション（岩波書店，2004年）。
- [11] A.C. Tribble, *The Space Environment Implications for Spacecraft Design* (Princeton University Press, 2003).
- [12] T. Tanaka, *J. Geomag. Geoelectr.* **39**, 659 (1987).
- [13] J.M. Goodman, *Space Weather & Telecommunications* (Springer, 2005).
- [14] 前田 坦：太陽惑星環境の物理学（共立出版，1982年）。
- [15] <http://ises-spaceweather.org/>
- [16] <http://www.ofcm.gov/nswp-sp/pdf/NSWP-SP-1995-scan.pdf>
- [17] <http://www.nswp.gov/images/nswpip2000.pdf>
- [18] <http://esa-spaceweather.net/index.html>
- [19] K. Marubashi, *Space Science Reviews* **51** (1-2), 197 (1989).
- [20] <http://www.bu.edu/causes/>
- [21] <http://ihy2007.org/>
- [22] <http://www.egy.org/>
- [23] <http://www.ipy.org/>
- [24] M. Dikpati, G. Toma and P.A. Gilman, *J. Geophys. Lett.* **33**, L05102, doi:10.1029/2005GL025221(2006).