# 太陽の理解に重要な役割を果たすフォトニクス

ゲイル・オーバートン

**多数の太陽観測衛星に搭載された撮像装置、分光器、光センサなどからのデータは、太陽フレア、コロナ質量放出源など、人工衛星、無線通信、電力網、地球上のわれわれの気候などに影響を及ぼすさまざまな太陽イベントを理解するために使用されている。**

太陽はわれわれの日々の生活に中心的な役割を果たしている。そして、近年、その放出と黒点活動を監視する宇宙探査機が多数打ち上げられた。その一つが1995年に打ち上げられた太陽・太陽圏観測衛星、いわゆるSOHOであり、その目的は深い核から外側のコロナにいたる太陽と太陽風の研究である。SOHOからのデータは、最近では、これまで太陽フレアの出力の多くを占めると考えられてきたX線が、実は放出される放射線の1%に過ぎないことを示すために利用された。SOHO探査機は地球磁気圏の100万マイル外側のハロー軌道（地球から太陽までの距離の約1%）にあって一定の太陽光を浴びているが、太陽フレアが太陽表面に物理的地震を引き起こしていることも確認した。この探査機は、潜在的に地球上の天候と気候に関係している黒点活動が（2年間の極小期の後）、増加に転じている様子の監視を続けている。

## 撮像

極端紫外線撮像望遠鏡（EIT）はSOHOの主力機器と称され（http://bit.ly/gvzsVk）、太陽画像を12分ごとに送り返しており、この頻度で、機器を組立てた時には予想すらしなかった太陽コロナの定常的に変化するダイナミクスを明らかにしてきた。EIT主任研究員を努める仏天体物理宇宙研究所（Institut d'Astrophysique Spatiale）の天文学者、フレデリック・オーシェレ氏（Frédéric Auchère）は、「EITは太陽活動の最も興味ある兆候の一つを発見した。それはコロナの全体構造に影響を与える噴出イベントであり、現在、“EIT波”と呼ばれている」と語っている。彼は「SOHOの並外れた寿命によって、われわれはEIT波を観測できるため、これとコロナ質量放出などの他の太陽活動との関係の解明を試みることが可能だ」と付け加えている（**図1**）。

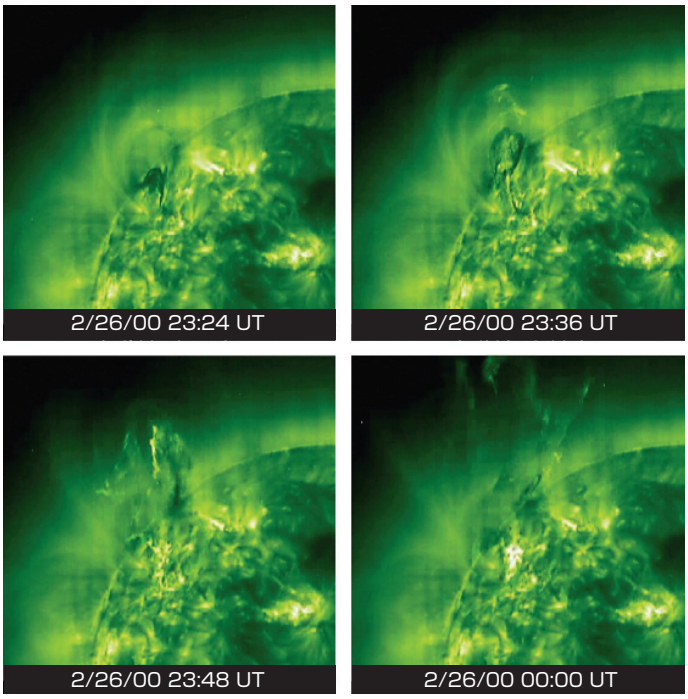



**図1**　EITは2000年2月26～27日に1時間のコロナ質量放出を19.5nmにおいて記録した。（資料提供：SOHO）

EITは多層垂直入射EUV光学を備えた完全太陽ディスク撮像望遠鏡（リッチー・クレティアン設計）であり、空間解像度は5.2arcsecである。望遠鏡ミラーは、モリブデンとシリコンの交互層がカスタムコーティングされた四分円でできており、17.1、19.5、28.4、30.4nmに中心波長をもつ四つの波長領域における狭い温度範囲からの放射を分離する（常に一つの四分円だけが曝されている）。これらの波長域は特定の温度での放出源からの光に対応する。例えば、30.4nm波長域は温度約$8\times10^4$K

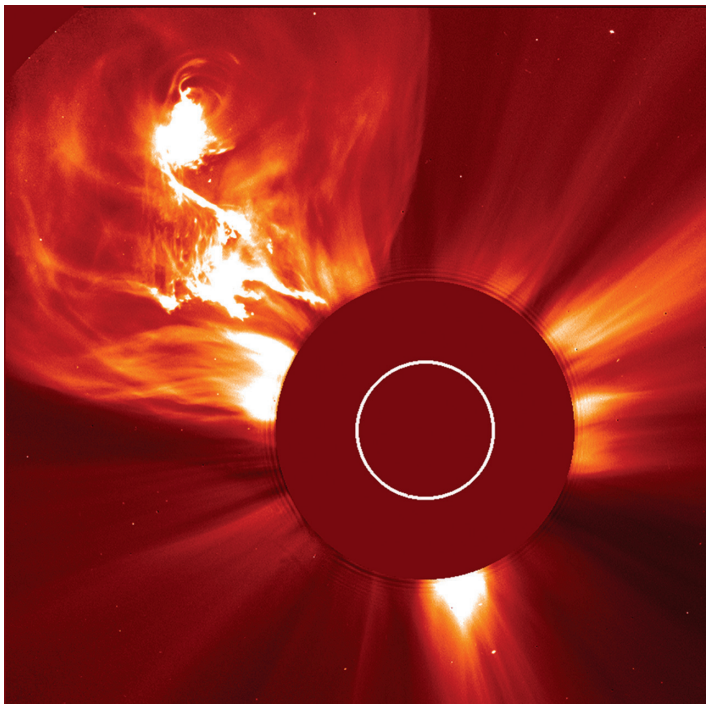


**図2**　2002年1月4日にLASCO C2によって取得されたこの美しく複雑なコロナ質量放出（CME）画像は噴出された物質の見事な詳細を示している。コロナグラフ像では、太陽の直射光が遮光器で阻止され、周辺のかすかなコロナが顕にされている。太陽の近似サイズは白の円で表されている。

のプラズマ中のヘリウムII放射と一致し、高速太陽風ストリームによって発生するコロナループや「ホール」（磁場が開いている位置）を画像化する。完全ディスク画像は他のSOHO機器から収集された狭い視野データに対する背景を提供する。

今や、1日にたった2枚しか太陽画像を伝送しない半ばリタイア状態のSOHOのEITは、2010年に打ち上げられたソーラ・ダイナミクス・オブザーバトリー（SDO）に搭載されたAIAからの画像に取って代られている。AIAの解像度は1.2arcsecであり、EITに比べて4.3倍優れている。AIAは、EITの1メガピクセルに対して、16メガピクセルセンサを使ってデータを収集し、EITの2倍に相当する8透過帯域の画像を形成する。

## コロナグラフ

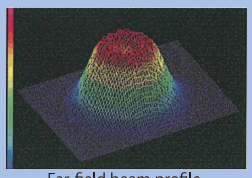
SOHOに搭載された米海軍研究所（NRL）製の広角分光コロナグラフ（LASCO）は、太陽からの中心照明を遮断して外側コロナの特徴を顕わにするための連続的に拡大する遮光ディスクを備えた3台の望遠鏡で構成されている（**図2**）。LASCO主任研究者を務めるNRL天体物理学者のラッセル・ハワード氏（Russell Howard）は、「われわれは、1998年のSOHOの回転事故で機器温度が−80℃以下に下がった際に、1.2〜3太陽半径を撮像するための最も小さな遮光ディスクを備えたファブリペロー干渉測定コロナグラフC1を喪失した。この温度はC1に使用されている光学部品のいくつかの許容温度である−20℃に比べてかなり低かった。しかし、衛星制御を再開したとき、それぞれ2〜6と3.7〜32太陽半径を撮像する白色光コロナグラフ、C2とC3が見事に動作した」と語っている。彼は、「実のところ、光学系と1024×1024画素CCDの間に等


PRINCETON OPTRONICS

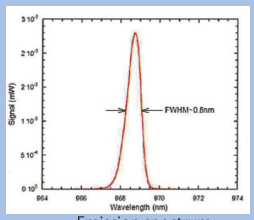
これが
高出力 VCSEL
です

この高出力半導体レーザーは
エッジエミッター方式に比べ
数々の特徴があります！

◆ビームの質がよい

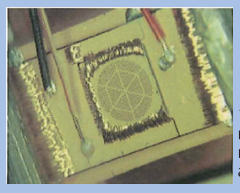


Far-field beam profile

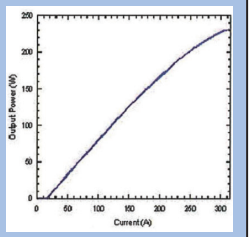



Emission spectrum
5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケーラビリティ



100W CW single
mode VCSEL array
mounted on
a micro cooler




その他の特徴
◆温度依存が低い
◆製品間のばらつきが小さい
◆バックトークが少ない
◆波長の安定度が高い
◆FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
URL http://www.autex-inc.co.jp
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp
東京本社　〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル
TEL. 03(3226)6321 FAX. 03(3226)6290
大阪支社　〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06(6344)6328 FAX. 06(6344)6342

間隔で置かれ、キャリブレーションも容易なこれらのシステムで観測された劣化は、1年にたった0.5%であった。これは1995年の打ち上げ以来、初期撮像能力の90%以上をいまだに保持していることを意味する」と付け加えている。

ハワード氏は、SOHO以前のコロナグラフの視野は6～10太陽半径であったと指摘する。彼は、「LASCOの30太陽半径以上の撮像能力によって明らかにされたストリームやコロナ質量放出（CME）の詳細は莫大な量にのぼる。純粋な質量放出は最大で90%の陽子、10%のヘリウム、その他の微量元素から成り、それらは数日かけて地球に到達するが、衛星通信を混乱させ、われわれの気候や電気網に影響を及ぼす可能性がある。LASCOの大きな視野と改善されたCCD感度によって、われわれは太陽自体に比べて10～14桁も暗い物体を見ることができる。CMEの空間軌跡と速度のマッピングを可能にする微かな放出を観測することによって、それらが地球に衝突するか否か、衝突するとすればいつかをより正確に予測することもできる」と語っている。

CME活動の監視に加えて、LASCOはプラズマ流も観測している。そして、なぜ弱磁場をもつ高輝度放出に関係する最低速度の太陽風（一般には300～400km/s）だけが近年250km/sレベルにまで達したのか、10分以内にわれわれの電離層に達する太陽フレアのX線、γ線、UVエネルギーの放出に対して磁気の不安定さがどのように寄与しているのかを理解しようと試みている。

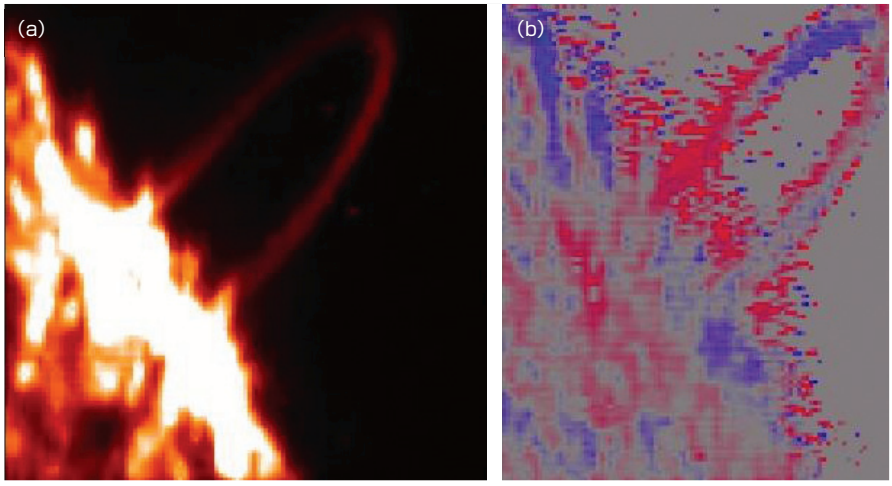



**図3**　質量放出が開始した途端に、薄く、短寿命の磁気ループが活動領域上の視野内に閃いた（a）。ループに沿ったドップラー速度（b;赤と青）は両方向の物質の流れを示し（青：われわれに向かう流れ）、対向流による捩れた流束チューブ配置を示唆していた。

## 分光測定

SOHOに搭載されたコロナ診断分光器（CDS）は、1970年代と1980年代に打ち上げられた初期の分光器を上回る、0.03nmのスペクトル分解能と数秒台の時間分解能で15～80nmの極端紫外線（EUV）領域のスペクトル発光線を解析することによる太陽雰囲気の探査を目的として設計されている[1]。このCDSは、EUV波長（地球大気が太陽からのUV放射を吸収するため人工衛星機器が利用できる唯一の波長）でコロナ放出と放出物を理解することによって、太陽コロナの最も熱いプラズマ中に形成された微量元素イオン（ヘリウム、酸素、マグネシウム、シリコン、硫黄、鉄を含む）の密度、温度、流速、存在量を解析し、太陽コロナがいかに熱せられるか、太陽風がいかに加速されるかを明らかにすることを目指している。

英STFCラザフォード・アップルトン研究所（STFC Rutherford Appleton Laboratory）のCDS主任研究員を務める太陽物理学者のアンジェイ・フルードラ氏（Andrzej Fludra）は、「将来のすべての太陽ミッションでは分光器を搭載すべきだ」と語っている。彼は、「CDSスペクトルは、爆発中のコロナループ、フレア、高速ジェット内の流速測定に不可欠である（**図3**）。螺旋運動

## 彗星の発見

LASCOの興味深い成果は、2010年12月のマイケル・クシャク氏（Michal Kusiak）による2000番目の彗星発見だ。彼は、ポーランドのヤギェウォ大学（Jagiellonian University）所属のアマチュア天文学者であり、公的に入手可能なLASCO画像を詳細に調べる市民科学者である。LASCOは最初の1000個の彗星位置を見つけるのに10年かかったが、一般参加者の増加、彗星観測画像の最適化、ならびに最近の彗星嵐と見られるもののおかげで、次の1000個の発見には5年とかからなかった。ハワード氏は、「幸運にも、これらの彗星の85%はわれわれの太陽系の黄道に高傾斜角で突入するサングレーザであり、かなり前に分解した大形彗星のクロイツ群の一部であると考えられる。それらの多くはおそらく太陽によって気化されるだろうが、彗星96P MachholzはLASCOによって3回観測されている」と語っている。

するジェットと“トルネード”と呼ばれる回転する巨大スピキュールはCDSなしには発見されなかったであろう」と付け加えた。黒点上の大気のスペクトル解析から、線強度と速度がそれらの位置で振動していることが明らかになった。これは磁場に沿って上方へ伝搬する磁気音響波の兆候である[2]。時折、CDSは各種波長で完全な太陽モザイクを取得した。これは放射波長に相当するプラズマ温度が上昇するにつれて規則的になった(**図4**)。

このCDS機器は11.3kbpsに設定されたテレメトリを内蔵している。そのNIS分光器からの完全なCDSスペクトルは350万ビットを要するため、一つの完全なスペクトルの送信に6分かかる。しかし、CDSオペレータは、CDSを次の露光に曝しながら10～60sの高速伝送を達成するために、最高輝度の線または温度や密度の有益な測定を与える他の線のいずれかを含むいくつかの有用なスペクトルバンドを選択することが多い。

CDSに加えて、SOHOは、放出される放射線の太陽紫外測定またはSUMER機器、UV望遠鏡、1arcsecの分解能(太陽表面の715kmに相当)をもつ高分解能分光器を内蔵している。この分光器は宇宙で最も豊富に存在する元素である水素のライマン系列などの50～160nm波長域での冷プラズマ発光線の測定用に設計されている。SUMERの主任研究員を務める独マックスプランク太陽系研究所(MPS)のシニア科学者、ワーナー・クルド氏(Werner Curdt)は、「CDSと対比すると、SUMERは、主に、比較的低温の太陽表面と熱いコロナとの間の彩層と遷移領域の観測用に設計されている」と言う。彼はまた、「SUMERは、50nm以下の波長を反射する全炭化ケイ素でできた光学系を使って設計されているが、CCDがこの波長領域に対して低応答のため、低信号用途に理想的な光子計数装置に取付けたマルチチャネルプレート陰極を利用する」と付け加えた(**図5**)。

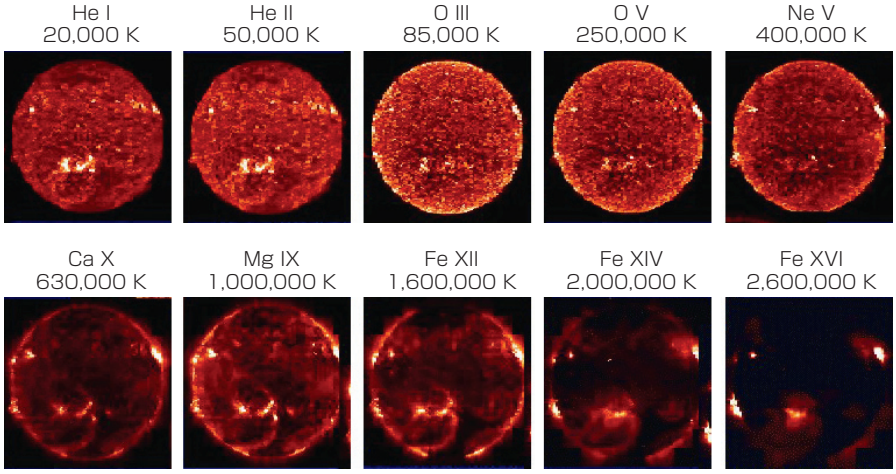



**図4**　全太陽をカバーするには64CDSラスタのモザイクが必要であった。温度が上昇するとともに、放射が太陽大気の高層からやって来るようになり、太陽活動との関係が強まった。非常に高い温度では、活動領域上のホットループだけが観測された。

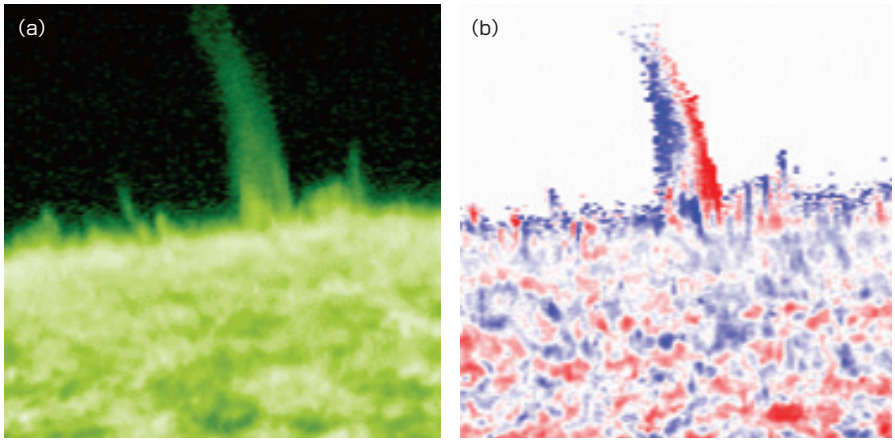



**図5**　SUMER機器は太陽の冷たい表面と熱い外側コロナとの間の遷移領域の特徴を測定している。ここでは、磁力線に沿った太陽周辺のかすかなプラズマ噴射である一つのスペキュールが23万Kに相当する62.9nmで撮像されている。擬似色は放射輝度(a)とドップラー運動(b)を表している。半分はわれわれに向かって移動し、残りの半分はわれわれから遠ざかる方向に移動している。このスペキュールはあたかも5万km/hで回転している地球サイズの直径を持つトルネードのように渦巻いている。

クルド氏によると、SUMERによる発見は、論文審査のある学術専門誌を中心に、過去15年間で1000を超える科学論文として報告されたと言う。彼は、「SUMERは、そのスペクトル範囲と異常に高いスペクトル分解能によって、1～2km/sの低速視線バルク運動に相当するスペクトル線のドップラーシフトを検出することも可能だ。これは現在そして近い将来においても、他に類をみない機器である」と語っている。

**参考文献**
(1) R.A. Harrison et al., Solar Phys., 162, 233-290(1995).
(2) A. Fludra, Astron. & Astrophys., 368, 639-651(2001).

LFWJ