

解明：オーロラの謎

小原 隆博(東北大学大学院理学研究科)

寒い地域の夜空を彩るオーロラですが、どのようにして光っているのでしょうか。また、なぜ、寒い地域に出現するのでしょうか。しかも、オーロラ現象は、地球だけではなく、木星や土星にも見られます。オーロラが発生する条件とは一体何なのでしょう。近年のオーロラ研究は、地球と惑星のオーロラの原因が、太陽にあることを明らかにしてきました。講演では、オーロラ発生仕組みについて、原因である太陽の活動も一緒に、丸ごと解説します。

1. はじめに

ご覧いただいている下の写真は、国際宇宙ステーションから撮影したオーロラです。オーロラは高度100kmの高さで光っています。



カーテン状のオーロラと共に、ぼんやり光る明滅型オーロラが出現しています。次は地上(昭和基地)から撮影したオーロラです。



日本の南極観測は1957年に始まりました。初期の頃からオーロラ観測が継続的に行なわれてきました。昭和基地は緯度が高く、オーロラがよく見えます。幾重にも重なるオーロラがはっきりと映っています。日本の昭和基地は、オーロラがよく見える場所に作られました。昭和基地のある場所を丸印で、オーロラが最も良く見える場所を楕円で示しています。これをオーロラ帯と言います。オーロラ帯は地球の磁石の極である磁極を中心に行っている事



がわかりました。オーロラが輝くときには、大量のエネルギーが使われます。マグニチュード7クラスの地震に相当するくらいのエネルギーが消費されます。地球で起こる最大規模のエネルギー現象であるオーロラは、寒い地域の晴れた夜に現れます。

2. オーロラ観測の歴史

オーロラの名前とオーロラの観測の歴史について説明します。オーロラの名づけ親は、あの有名なガリレオ・ガリレイと言われています。ガリレオは、1607年11月17日イタリアでオーロラを見ました。その素晴らしさを称えて、ローマ神話の中に出てくる女神オーロラの名前をとって、オーロラと名づけたと言われています。ローマ神話の中に出てくる女神オーロラは、夜明けを告げる暁の女神です。女神オーロラのおかげで長い夜があけると考えられていました。また夜明けの光は知性と創造をもたらす光とされていました。オーロラの女神のスケッチを見ると、手につぼのようなものを持っています。この中に、知性と創造が入っていると言われています。



と、手につぼのようなものを持っています。この中に、知性と創造が入っていると言われています。

オーロラという名前が広がったのは17世紀ですが、それ以前でもこの現象は広く人々に認知

されていました。古代ギリシャの時代に、アリストテレスが「オーロラは天が裂けた光である」と記述しています。日本でも赤気・紅気と呼ばれ、書物にも記録が残っています。オーロラ発光領域の高いところでは赤い色になっていて、古くから不吉なものと思われていました。戦いが多かった中世ではオーロラの赤い色から血の色を連想し、不吉なもの、災いをもたらすものとして忌み嫌われていたようです。オーロラの研究が進んだきっかけは、探検家の活動と大きな関係があるようです。

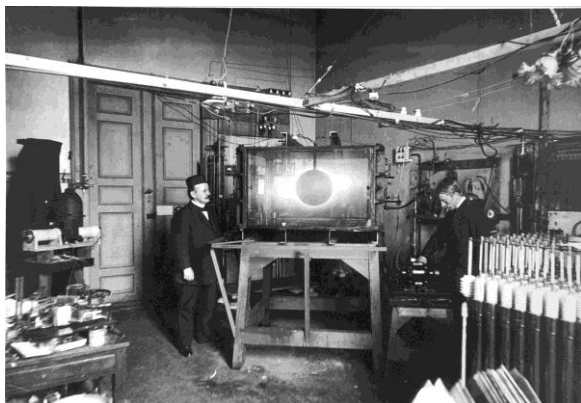
18 世紀になって、ジェームズ・クック船長は「南半球の航海の途中にオーロラを見た」と記述しています。おそらくクック船長が南半球のオーロラを初めて見た人であると思われます。一方、北極のオーロラの記述は、19 世紀なかば、北極航路を開発しようとしたジョン・フランクリンによるところが大きい



と思われます。フランクリンは途中で遭難してしまい、助けに行った多くの捜索隊の人々によってオーロラの記述が残されました。イラストはフリチョフ・ナンセンが描いたオーロラですが、特徴をととてもよくとらえています。

3. オーロラ研究の始まり

それでは、本格的なオーロラの科学研究の始まりについて解説します。オーロラの研究の歴史は電磁気学の歴史そのものであるようです。電磁気学の基本は電場と磁場、そして電流ですが、電子は電流の担い手として重要な役割を果たします。トムソンは、電子の発見者として有名です。彼は、放電管の陰極線に電場をかけることで陰極線が曲がることから、マイナスの電気を持った電子の存在を示しました。トムソンは放電管から出る光—これは蛍光の 1 つですが—この光とオーロラが発する光は同じものであると著書の中で述べています。これは非常に的を射た理解です。事実、地球のオーロラは、電子が地球大気酸素や窒素といった気体成分に衝突して出す光だったのです。その意味で、オーロラは巨大な電磁気学の実験室でもあったのです。

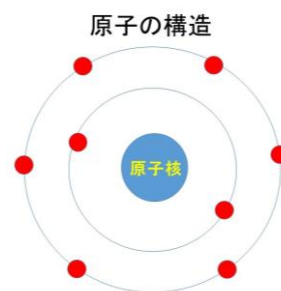


写真は、ビルケランドがテレラと呼んだ実験装置で、オーロラの模擬実験を行っているところです。ビルケランドはノルウェーのオスロ大学の教授で、オーロラ研究の始まりの頃に大きな貢献をした人です。

ビルケランドは巨大な磁石の塊に電子を打ち込み、磁石の極部分にオーロラの光ができることを確認しました。ビルケランドは、左の方向から電子を打ち込んだことになります。打ち込まれた電子は、磁力線が比較的開いていて遠くまで伸びている極の領域に入ってきました。ビルケランドは、こうして太陽の方向からやって来る電子が極域でオーロラを起こしているだろうということを、およそ 100 年前に予想していました。また、ビルケランドは野外での観測も行い、オーロラは約 100km の高さで輝く事も明らかにしました。

4. オーロラの光

これから、オーロラのしくみを解説します。最初はオーロラの光について説明します。オーロラの光の研究が始まった頃、原子の理解はとても進んでいました。原子は中心に原子核と呼ばれる部分があり、その周辺を電子が回っていると理解されていました。

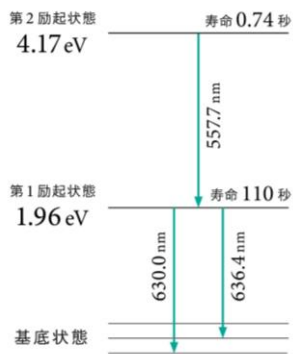


1913 年、ボーアが電子の軌道という概念を提案。これによって、特別な光—輝線スペクトル—を説明することができるようになりました。

電子の軌道は軌道毎にエネルギー準位が決まっています。同じ軌道の中にも、電子の回転（スピン）や電子の入り方で、更にエネルギーが分かれるという、とても面白い性質があります。電子が低いエネルギー準位から高いエネルギー準位に移ったとき、「励起された」といいます。励起された電子がより低い状態に戻るとき、光子 1 個を出してエネルギーを捨てます。これが光です。光子のエネルギーは振動数に比例、かつ波長に反比例します。

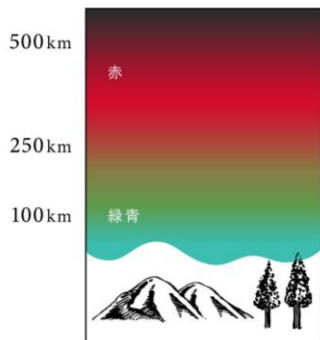
それでは、オーロラの光を出している様々な原子のうち、酸素原子を例にして説明をしてみましよう。酸素原子になんらかの方法でエネルギーを与えたとしましょう。最も外にある電子が励起されますが、励起された状態は、2 つあります。詳しい計算によると、第 1 励起状態は基底状態に対して 1.96 電子ボルト、第 2 励起状態は 4.17 電子ボルト、更に高い状態にあります。（ここで 1 電子ボルトとは、1 ボルトの電位差で電子を加速したとき、電子がもらうエネルギーを言います。）

それでは、オーロラの光を出している様々な原子のうち、酸素原子を例にして説明をしてみましよう。酸素原子になんらかの方法でエネルギーを与えたとしましょう。最も外にある電子が励起されますが、励起された状態は、2 つあります。詳しい計算によると、第 1 励起状態は基底状態に対して 1.96 電子ボルト、第 2 励起状態は 4.17 電子ボルト、更に高い状態にあります。（ここで 1 電子ボルトとは、1 ボルトの電位差で電子を加速したとき、電子がもらうエネルギーを言います。）



オーロラの緑の光は、第2励起状態から第1励起状態に戻る 0.74 秒後に、赤い光は第1励起状態から基底状態に戻る 110 秒後に発せられます。状態間を遷移するために長い時間を要する事に注意しましょう。

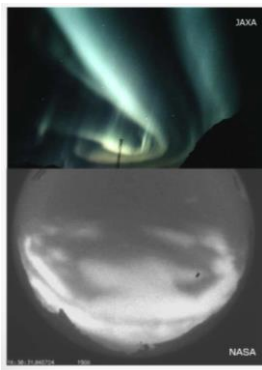
次に、実際のオーロラの光を見てみましょう。緑のオーロラは高度 100km 付近で、赤い色の光は高度 250km 付近で出ていることがわかります。この高度では、酸素分子は 2 つにわかれていて、酸素原子の状態になっています。ここで注意していただきたいのは、第 1 励起状態の電子が基底状態に遷移するま



で 110 秒の時間が必要ということです。ところが、高度 200km 以下では電子同士の密度が濃いために 110 秒以内に原子同士が衝突してしまい、エネルギー遷移ができません。そのため、

赤い光が観測されるには十分に空気が薄い必要があります。こうしたオーロラの色分布から、大気密度についての情報が得られます。

5. オーロラ概観



それではオーロラの種類について説明します。オーロラにはいくつか種類があります。代表的なオーロラはカーテン状のオーロラで、幾層にも重なってゆらめいています (図上)。そして、空のある部分が明るくなったり暗くなったりする明滅型のオーロラが、もう 1 つ

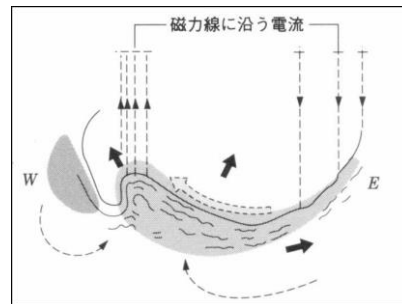
の有名なパターンです。パルセイティングオーロラとも呼ばれています (図下)。カーテン状のオーロラと明滅型のオーロラの出現時間は違います。カーテン状オーロラは午前 0 時前、明滅型オーロラは午前 0 時を過ぎてから現れます。

次に、オーロラの見える場所について説明します。

時間帯によって見えるオーロラの種類は違っていますが出現場所は緯度で 65 度から 75 度という範囲にあります。これをオーロラオーバルと呼んでいます。



真夜中前、東西に伸びた薄いオーロラの光が突如大きく形を変えて輝きだすことがあります。これをオーロラ爆発と呼びます。時間が経過するにともなう、一群の光は高緯度へ進んでいき、幅の厚いオーロラへと成長していきます。オーロラ爆発は、多いときは一晩で数回起こることがあります。また、オーロラがいつ何処で爆発を起こすかについて、大部、分かってきました。太陽から地球に向かって吹いてくる風が発見され、太陽風と名づけられました。その太陽からの風の勢いが増加して、しばらくすると



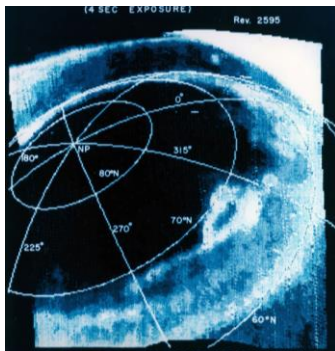
オーロラ爆発が起こります。それでは、オーロラ爆発の全体像を見てみましょう。図は夜側のオーロラ発生領域を示しています。図の上方向が北極で、右側が東、

左側が西です。急に輝きだしたオーロラは高い緯度に向かって張り出し、同時に西向きに発達していきます。これをオーロラのサージと呼んでいます。西向きに張り出していく領域の中には幾重にもオーロラのカーテンが出現しています。そして、その先端のオーロラが非常に明るく輝いています。また、私たちの観測結果からおもしろいことがわかりました。サージ領域の前面から磁力線に沿って上向きに、電流が宇宙に向かって流れ出していました。次に詳しく述べますが、オーロラは、電子が宇宙から降り注いで来て、地球大気酸素原子と衝突することで、発光していました。磁力線に沿って上向きに流れる電流は、降下して降りこんでくる電子による電流だったのです。

6. 宇宙からのオーロラ観測

これまでオーロラのあらましについて述べました。オーロラの全体像について知りたいと思いますが、それには人工衛星がとても役に立ちます。人工衛星

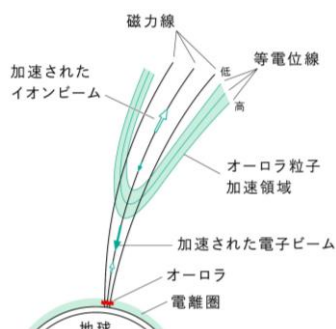
に紫外線カメラを搭載し、宇宙から紫外線のオーロラを見たのは日本が初めてでした。爆発的に明るくなるオーロラもとらえられました。人工衛星の大きな利点として、その場観測、つまり直接観測ができるということがあります。人工衛星は、オーロラ上空でオーロラを輝かす加速された電子を観測しました。大きな発見は、電子を加速する領域がオーロラ上空数千 km の場所に存在していたことです。



これは人工衛星「極光」が宇宙から紫外線で撮像したオーロラの写真です。真夜中前で明るくなるオーロラがとらえられました。人工衛星の名前はEXOS-Aで、1978年に鹿児島県内之浦町の東京大学宇宙航空研究所から打ち上げられました。日本の人工衛星は、発射され軌道に乗った後に愛称をつけます。EXOS-A衛星は「極光」と名づけられました。極光衛星は、遠地点が3500kmで、赤道面から75度の軌道面をもった準極軌道の衛星です。北極域の高いところからオーロラの写真を撮ることで、さまざまなオーロラの姿がわかるようになりました。「極光」衛星の後継機は、あけぼの衛星でした。



あけぼの衛星は、極光衛星から11年後の1989年に打ち上げられました。あけぼの衛星の遠地点は極光よりも高く、10050kmでした。非常に高いところからオーロラの写真を撮ったり、さまざまな装置でその場観測をすることで、オーロラの姿がさらにわかるようになりました。人工衛星のメリットは、さまざまな観測装置でオーロラが光っている領域の上空をその場観測できることにあります。あけぼの衛星は1989年から2014年まで、オーロラの上空を隈なく観測しました。あけ



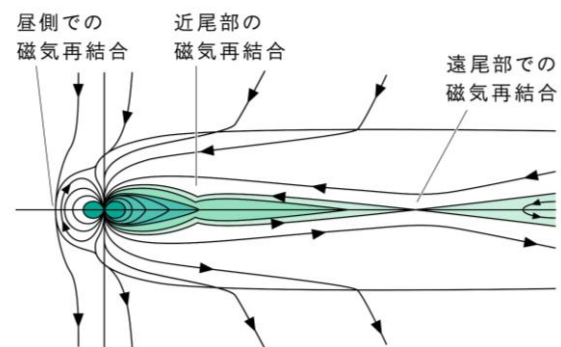
ぼの衛星は、極光衛星から11年後の1989年に打ち上げられました。あけぼの衛星の遠地点は極光よりも高く、10050kmでした。

けぼの衛星は楕円軌道でしたので、オーロラ上空に伸びている磁力線をいろいろな高さで横切りました。その結果、3000km付近の低い高度では磁力線に沿って地球に

落ちていく電子ビームを観測し、10000kmといった高い高度では反対に宇宙に向かって上に出ていくイオンビームを観測しました。沢山の観測を積み重ねていくと、電子やイオンは高度6000km付近の狭い領域で加速されていることがわかりました。これは大きな発見でした。

7. オーロラ発生の仕組み

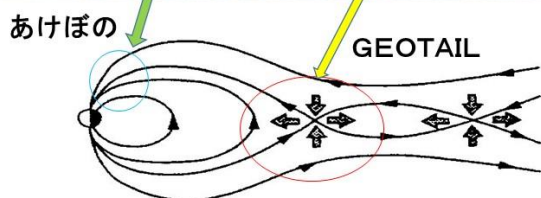
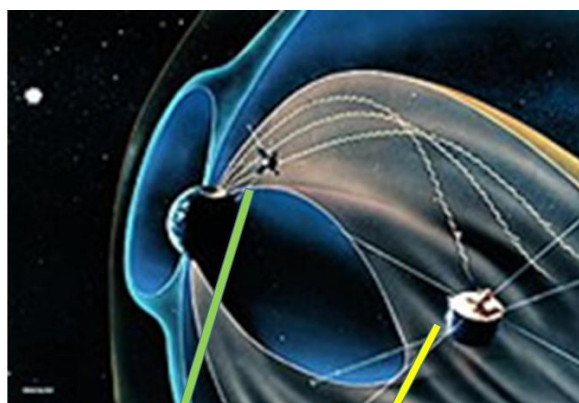
オーロラの大元の原因をたどっていくと、太陽に行きつきます。特に、太陽の大気であるコロナが宇宙空間に飛び出していくことが、すべての始まりです。飛び出してくる太陽のコロナは、太陽風と呼ばれています。この太陽風が地球に吹きつけてくると、地球の周りにある磁場が大きくゆがみ、磁気圏という領域が形成されます。太陽風粒子は磁気圏夜側の赤道領域に集まり薄いシート状に存在します。これをプラズマシートと呼んでいます。磁気圏には、赤道を挟んで上下にロープと呼ばれる領域を作ります。



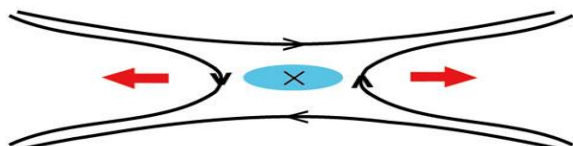
多くの人工衛星が、それぞれの場所で磁場や粒子を計測しました。その結果、ロープの磁力線は開いている事がわかり、プラズマシートの磁力線は閉じていることがわかりました。人工衛星はそれぞれの領域で磁力線の動きも計測しました。磁力線は昼側から夜側に向かって動いています。昼側では地球の磁力線が、太陽風が運んできた磁力線と結びつき、それまで閉じていた磁力線が開いた磁力線になります。そして、それらは北極と南極を通過し、夜側に移動していきます。夜側に到達した2本の磁力線は結合を起こしています。再び閉じた磁力線になって、太陽の方向に戻っていきます。ダンジャーは一連の運動を「磁気圏対流」と呼びました。

開いた磁力線のロープには、わずかながら太陽風の粒子が入ってきます。ロープにあった粒子は、磁力線が閉じることでプラズマシートと呼ばれる領域に補足され、次第に粒子の密度も大きくなっていきます。こうして、オーロラを光らせる電子がプラズマシートに沢山蓄積されていきます。

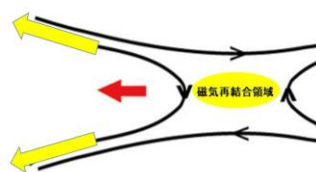
オーロラ発生のモデルを検証する目的で、日本から2つ目の人工衛星が打ち上げられました。GEOTAIL 衛星です。GEOTAIL 衛星はオーロラ爆発にともない、プラズマシートが構造変化を起こすことを確認しました。この図は、GEOTAIL 衛星が磁気圏の尾部を観測している模式図です。GEOTAIL 衛星はオーロラ



爆発にともない、プラズマシートが構造変化を起こすことを確認しました。地球に近いところで、磁力線の再結合が起こっていたのです。この時、あけぼの衛星は、オーロラ爆発を観測していました。プラズマシートがくびれてちぎれることが、オーロラ爆発にとって大事なプロセスであることが明らかになりました。



図はプラズマシートの間付近で、くびれが起り始めている場所を拡大して示しています。プラズマシートが赤道領域に形成される原因は、北側と南側にあるローブと呼ばれる領域の磁力線が赤道方向に上下から近づいて、つなぎ換えが起こることでした。太陽風の中の磁場が強い南向き成分を持つと、磁気圏の前面で太陽風の磁力線と地球の磁力線の結合が促進されます。この結果、大量の磁力線がローブに入り込み、赤道域のプラズマシートは急激に成長していきます。磁力線のつなぎ換えが 起こる場所では大量のエネルギーが解放され、そのエネルギーの一部は磁力線に沿って強い電子ビームを発生させます。そのプロセスを簡単に述べてみますと、つなぎ換えのときに強い衝撃波が形成され、このショックが電



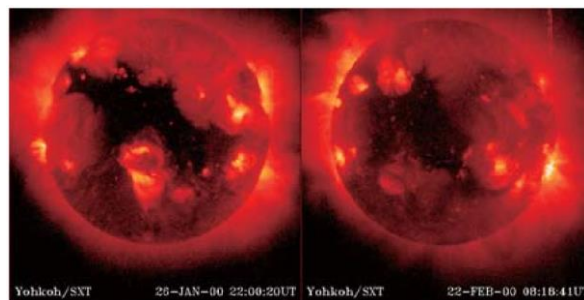
子を加速させるのです。加速される電子のスピードは瞬時に光のスピードに近づきます。高速の電子線が、

磁力線に沿って地球の極域に降りこんでいきます。ここで、5.オーロラ概観の項で見たオーロラ爆発の様子を、もう一度見てみましょう。真夜中付近のオーロラが非常に激しく輝きだしています。これは電子の降り込みが急増したことによります。また、オーロラ領域の緯度幅も大きくなり、先端は高緯度に張り出していっています。これは、磁気圏尾部のプラズマシートで磁力線のつなぎ換えが増加していることに対応しています。このように、極域での地上や衛星によるオーロラ観測と磁気圏尾部でのプラズマシートの観測をつなぎ合わせることで、オーロラ発生のシナリオが確かめられました。

8. 太陽がオーロラ発生の原因

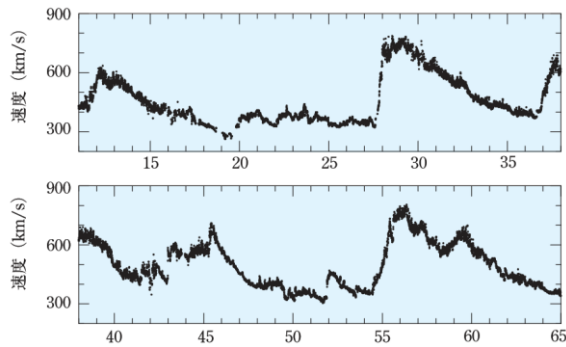
これまで、オーロラ発生のしくみについて解説しましたが、オーロラの原因は太陽です。太陽の大気は、コロナと呼ばれていますが、このコロナの温度はとても高く、太陽の重力を振り切って惑星間空間に飛び出していきます。

太陽表面の観測を X 線や紫外線で続けていますと、暗く映る部分があることが分かります。詳しい説明は別なところに譲りますが、コロナホールと呼ばれています。太陽大気であるコロナの温度が低い領域に対応しますが、そこから噴き出す太陽風のスピードが速い事が分かっています。

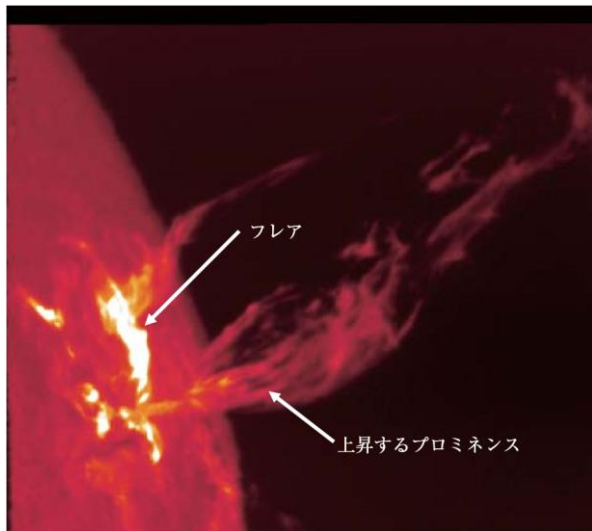


上の2枚の写真は、太陽の自転周期の27日を隔てて撮影しました。コロナホールは、1月以上の長い時間、太陽表面に存在している事が分かります。この期間、地球の前面で太陽風の観測を続けていました。次の図の横軸は日数です。2枚連続していますが、丁度27日後に、高速太陽風がやって来ました。この高速太陽風が地球に到達した時、オーロラは激

しく輝きます。コロナホールは、オーロラ発生の原因の一つです。



もう一つの原因は太陽フレア（太陽表面爆発）です。



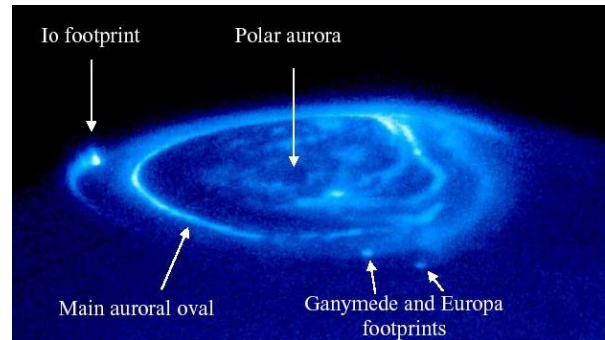
太陽の表面に黒いしみがあることが観測されています。黒点です。黒点では、しばしば激しい爆発が起こります。たくさんの X 線や紫外線、そして可視光線、電波が一斉に放出されます。太陽フレアの開始です。太陽を $H\alpha$ 線で観測していると、黒点がよく見えます。そして、しばしば黒点を挟むように黒い筋が見えます。フィラメントです。フィラメントは密度の高いガスの塊です。太陽からの光を吸収して暗く見えています。フィラメントはプロミネンスと呼ばれることがあります。太陽の淵にあるとき、太陽からの光を散乱し明るく光っています。

上の写真は、太陽フレアが発生し上空にあったプロミネンスが外に向かって噴出して行く瞬間を捉えたものです。

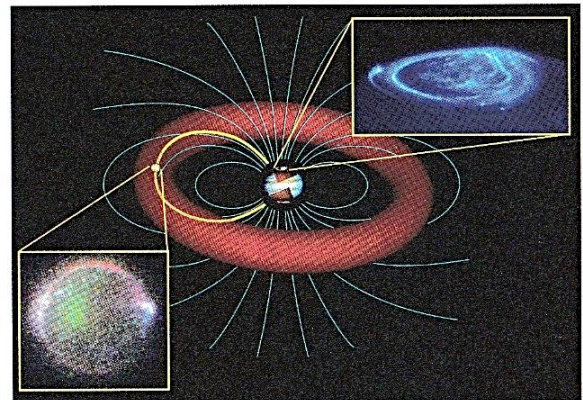
およそ2日後に、この飛び出したプロミネンスが地球に衝突する事があります。飛び出した方向に地球がある場合です。この衝突で、地球周辺に大きな嵐（磁気嵐と呼ばれています）が発生し、激しくオーロラが輝きます。オーロラ発生のもう一つの原因は、太陽フレアです。

9. 惑星のオーロラ

最後は惑星です。下の写真は NASA の宇宙望遠鏡が撮影した木星のオーロラです。日本の"極光"衛星が撮



影した地球のオーロラの様に、楕円形をしています。よく見ると楕円の中に沢山の筋状の構造があります。また、輪の外には、点状ですが少し尾を引いた光が見えます。これは木星の月（衛星）イオが作るオーロラです。



イオ衛星には、火山があります。噴煙は木星をリング状に取り巻いています。イオ衛星が木星の周りを公転している事で発電が起こり、加速された電子が木星の大気である水素原子に衝突し、水素原子を励起します。地球と同じように励起によって光を出しますが、水素が出す光は紫外線です。

10. おわりに

惑星の大気が地上や宇宙空間に向かって発する光であるオーロラですが、その仕組みは最近の科学衛星や望遠鏡の観測から、大部明らかになりました。大気の粒子が、外からエネルギーを与えられ、可視光や紫外線を放出する仕組みも分かって来ました。一步、太陽系の外に出ると宇宙には沢山の星と惑星があります。もしかしたら、酸素を出す惑星があるかもしれません。そして、そこには、植物が生育している可能性もあります。オーロラの光の研究は、宇宙に生命を探す旅に繋がっていくようです。

(了)