

## 太陽

太陽は質量が  $1.99 \times 10^{30}$  kg、半径が 69600 km、光度が  $3.9 \times 10^{26}$  W の恒星であり、主に、水素とヘリウムで組成されている。太陽の中心部は中心核と呼ばれており、非常に高温で 1600 万 K に達する。中心核では水素が結合しヘリウムに変化する核融合反応が起り、エネルギーが放出されている。中心核のすぐ外側ではエネルギーは放射によって運搬される。そのため、この領域は放射層と呼ばれる。放射層の外側にはエネルギーが対流によって運搬される対流層がある。太陽表面には対流によって大小の細胞状模様が現れる。小規模のものは大きさが約 1000 km、寿命が約 10 分であり、粒状斑と呼ばれる。大規模のものは大きさが約 3 万 km、寿命が約 24 時間であり、超粒状斑と呼ばれる。

太陽の外側には 10 太陽半径にまで広がる大気圏がある。大気圏は内側から光球、彩層、コロナの 3 領域に分類される。光球は非常に狭く、可視光を放出している領域である。光球では温度は内側から 6000 K から 4500 K まで減少する。彩層も狭く、この領域で温度は内側から 4500 K から 25000 K まで急激に増加する。コロナは数太陽半径の広い領域であり、この領域の温度は非常に高く、約  $10^6$  K に達する。

太陽の磁場は太陽に近いところではほぼ双極子とみなせる。ただし、自転軸と双極子軸はずれている（図 2.1 参照）。太陽付近で磁場は強いいためプラズマは閉じ込められる。太陽から離れたところでは磁場が弱くなるためプラズマは惑星間空間へ飛び出すことができる。このプラズマの流れは太陽風と呼ばれる。太陽風は太陽磁場を惑星間空間へ運び出す。コロナにおいて太陽磁場の構造は複雑である（図 2.2 参照）。強く閉じた磁場のところではプラズマは閉じ込められ、強い X 線を放出する。磁場の強さによっ

てはゆっくりとした太陽風が起る。磁場が開いたところでは高速の太陽風が起る。この領域ではプラズマ密度は非常に薄くなり、ほとんど電磁波は放出されない。このような領域はコロナホールと呼ばれる。

太陽は自転している。ただし、太陽表面は剛体ではないので緯度により自転周期は異なり、赤道では 25 日、極では 31 日である。太陽の自転により内部ではプラズマの対流が起り、電流と磁場が発生する。これはダイナモ作用と呼ばれる。ただし、太陽磁場はこれだけでは説明できない変化をする。太陽磁場の極性は 22 年周期で逆転する。ところで、太陽黒点数は太陽活動度を表すのに適している。黒点の寿命は数時間から数ヶ月である。黒点は光球に位置し、下方からのエネルギーの流れをせき止めている。そのため、周囲より低温であり、電磁波もほとんど放出しない。図 2.3 は 1610 年から 1985 年までの太陽黒点数の年平均値を示している。この図から太陽黒点数は 11 年周期で変化していることがわかる。

太陽の爆発現象にはフレア、プロミネンスの爆発、CME（コロナ質量放出）がある。フレアは黒点上空の大気で起る非常に強力な爆発であり、数分から数時間にわたり光を放出する。また、高エネルギーの粒子を宇宙空間へ放出する。プロミネンスは黒点に根付いた閉じた磁力線管であり、高層にまで突き出ている。プロミネンスには高温プラズマが蓄えられており、温度は 2000 万度から 3000 万度に達する。磁力線管がプラズマを蓄えておくことに耐えきれなくなり付け根がちぎれると、高エネルギー粒子が宇宙空間へ放出される（図 2.4 参照）。CME は 1000 km/s 程度の速度で太陽から遠ざかるとき爆発を起す。大規模 CME では  $10^{16}$  g 程度のプラズマが含まれている（図 2.5 参照）。

太陽の単位時間あたりの電磁波放射エネルギーの総和はほぼ一定であり、地球では単位面積あたり

1370 W/m<sup>2</sup> である。この値は太陽定数と呼ばれる。このうち、赤外線が 52%、可視光線が 41%、紫外線が 7%をしめており、これらの波長帯の放射エネルギーは安定している。電波と X 線の放射は大きな変動を与えるけれど、それらの放射エネルギーは電磁波放射エネルギーの総和と比較すると非常に小さい。太陽風と CME によって太陽が失なう単位時間あたりのエネルギーは、それぞれ、 $4.1 \times 10^{20}$  W、 $7.0 \times 10^{18}$  W である。これらの値は単位時間あたりの電磁波放射エネルギーの総和である  $3.8 \times 10^{26}$  W と比較すると非常に小さい。しかし、太陽風と CME は惑星の電離圏や大気圏に対して非常に大きな影響力を持っている。同様に、極短紫外線の放射エネルギーは電磁波放射エネルギーの総和のわずか 0.1% にすぎないにもかかわらず、惑星電離圏の主要なプラズマ生成源である。

## 惑星間空間物質

1950 年頃まで、フレアによって高エネルギー粒子が放出される場合を除いて、惑星間空間は真空であると信じられていた。しかし、衛星観測によって太陽風が常にプラズマを惑星間空間に運び出していることがわかった。太陽風はコロナ低層から流れ出し、太陽から遠ざかるにつれて速度を増加させ、数太陽半径地点で超音速となる。これとほぼ同じ地点で太陽風プラズマは無衝突になる場合がある。無衝突プラズマではほとんど抵抗なく電流が流れるため太陽磁場は太陽磁場に凍結され、惑星間空間へ運び出される。これを惑星間空間磁場 (IMF) と呼ぶ。

太陽磁場は太陽風によって外へ引き延されている。太陽が自転しているため、太陽磁場は図 2.6 のように渦巻状になる。地球の公転軌道上では太陽磁場は地球と太陽を結ぶ直線と約 43° をなす。この渦巻を 3 次元で描くとバレリーナのスカートのようになり、波動状の構造が現れる (図 2.7 参照)。

図 2.8 は衝撃波発生を説明するための模式図であり、黄道面における自転する太陽、太陽半径方向へ流れ出る太陽風、渦巻状の太陽磁場を示している。

太陽風が遅いほど太陽磁場は大きく曲がるため、速い太陽風は遅い太陽風に追いついてしまう。そのとき、速い太陽風の前方で圧縮、後方で希薄化が起る。速い太陽風と遅い太陽風の速度差が、その場所での音速を超えると前進衝撃波と後進衝撃波が発生する。

CME のなかには磁氣的に太陽から孤立できるものがある。その CME はプラズモイド、または、磁気雲となる。プラズモイドが高速で地球にむかうときプラズモイドの前に衝撃波が生じる。

太陽風のパラメータは時々刻々と変化する。さらに、衝撃波、CME、フレアなどの現象のため太陽風のパラメータの変化は複雑である。そこで、以下では平均値を使って地球付近の惑星間空間物質について議論する。地球の公転軌道は太陽から約 217 太陽半径、つまり、1 億 5000 万 km にある。太陽風プラズマが地球に到達するには 2、3 日かかる。地球付近で、その速度は 200 ~ 900 km/s であり、密度は  $1 \sim 80 \text{ cm}^{-3}$  である。電子温度はコロナで約 100 万 K であるけれど、地球付近では 100000 K まで減少する。惑星間空間磁場は太陽表面で 1 ガウスであるけれど、地球付近では  $3 \times 10^{-5}$  ガウスまで減少する。

地球の公転軌道より外側での太陽風は宇宙探査機によって調査されている。図 2.9 は Voyager 2 と Voyager 1 によって観測された太陽風の速度、密度、温度と惑星間空間磁場の太陽からの距離に対する変化を示している。太陽風のパラメータは 25 日の時間窓で移動平均している。磁場は年平均値である。太陽風の速度は太陽からの距離とは関係なく 400 ~ 500 km/s の範囲におさまっている。密度は距離に対して減少しつつある。1 AU ~ 10 AU の距離では密度は急激に減少しているものの、10 AU を超えるとゆるやかに減少している。温度は 25 日平均しているにもかかわらず、あらゆる地点で大きく変化している。ただし、1 AU ~ 20 AU の距離では減少傾向を示している。磁場は距離にほぼ反比例している。反比例から多少ずれるものの、観測が 18 年にわたって行われたため、太陽活動の変化、太陽風の変化、探査機の黄緯の変化などが原因と思われる。