

太陽を旅立ったプラズマが一人前のオーロラになるまで

1 磁気圏

太陽が放出したプラズマ (荷電粒子でできた流体) が地球にやってくると、大気分子を励起して発光します。これがオーロラです (諸説あり)。そこで、プラズマがどのようにして地球にやってくるのか解説します。

プラズマはローレンツ力など、磁場の影響を受けます。太陽から放出されたプラズマも同様で、地球の周りに形成された磁気圏によって押し返されるため、まっすぐに地球にやってくるわけではありません。まずは地球の周りにどんな磁場が発生しているか見ておくと良いでしょう。

磁場を \vec{B} とすると、地球の周りにプラズマがないときには次の式が成立します。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \vec{0} \end{cases} \quad (1)$$

磁気ポテンシャルを導入して一般解を求め、測定結果と整合する解を見つけると図1のような双極子磁場になります。これは地球が大きな棒磁石と同じ磁場を持つことを意味します。北極にS極、南極にN極を持っています。

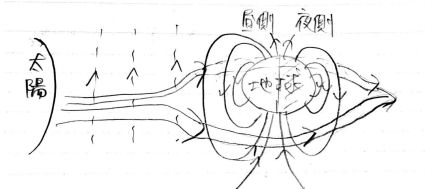


図1：地磁気と太陽磁場の磁力線。実線が地磁気で点線が太陽磁場。太い矢印でプラズマが磁気圏に押し返されて曲がる様子を表している。

プラズマは南北方向の磁場の影響を受けて、磁力線方向に大きくゆっくり

とした振動をしながら磁場と垂直な方向にドリフト運動します。磁力線方向の運動はミラー磁場 (磁場の $\nabla|\vec{B}|$ 方向の成分) によるもので、垂直方向の運動は $\nabla|\vec{B}| \times \vec{B}$ ドリフトと呼ばれる、磁場勾配に垂直な方向の磁場によるものです。

東西方向の運動に注目します。流体力学によると、磁場 \vec{B} を持ったプラズマは圧力 $\vec{B}^2/2\mu_0$ を持ち、密度 ρ 及び速度 \vec{v} を持った流体は圧力 $\rho v^2/2$ を持ちます。地球の法線方向において、プラズマ及び地球の磁場による圧力、プラズマの動圧、大気圧 $nk_B T$ (n は大気分子の個数密度、 k_B はボルツマン定数、 T は大気温度) がつりあう曲面があります。この曲面は磁気圏と呼ばれ、プラズマは磁気圏を超えて大気圏へと侵入することはできません。

厳密には、プラズマは昼側から磁気圏に侵入することはできませんが、夜側から大気圏へ侵入することができます。夜側では太陽磁場と地球磁場が結合して磁場が開いているためです。これを磁気リコネクションと言います。(実際には昼側でもリコネクションが起こっていますが、昼側のリコネクションの影響はそれほど大きくありません。)

2 磁気リコネクション

夜側では地球磁場と太陽磁場は逆向きで、図2のようになっています。磁力線が打ち消しあって新しい磁力線の接続、リコネクションを生じます。天気予報の等圧線がつながる様子をイメージすると良いでしょう。リコネク

ションが起こった領域に上下からプラズマが流れ込み、流れ込んだ分だけ横から漏れ出ていきます。流入してくる面は広く、流出していく面は狭くなっています。ホースの先を指で押さえると水の勢いが増すように、プラズマの流出する幅が小さい分スピードも速いです。スピードが速いので地磁気が押し返しきれず、大気圏へ到達することができます。

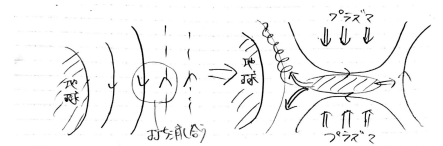


図2：磁気リコネクションが生じる様子とプラズマの加速。最終的にプラズマは磁力線に巻き付いて運動する。

3 大気分子の励起

物質は特定のエネルギー単位において安定することが量子論で予言されています。安定する準位は複数あり、丁度よいエネルギーを受け取ると異なる準位へと遷移します。大気分子の場合、大気圏に侵入したプラズマによって高いエネルギーの状態になります。これを励起と言います。励起された大気は様々な相互作用により元の低エネルギー状態に戻ろうとします。この時失われるエネルギーが光として我々の目に届きます。この光こそがオーロラであると考えられています。

参考文献

- [1] 國分征. "太陽地球系物理学-変動するジオスペース" 名古屋大学出版会 (2010)