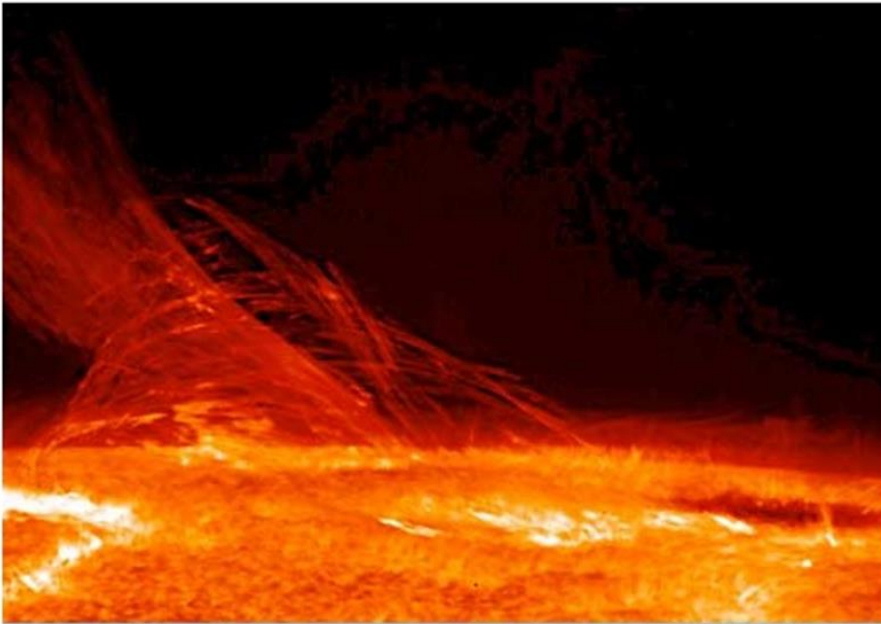


# 太陽風の高速荷電粒子群の磁氣的結合による現象



[https://www.nasa.gov/images/content/171877main\\_LimbFlareJan12\\_516.jpg](https://www.nasa.gov/images/content/171877main_LimbFlareJan12_516.jpg)

太陽の表層のプラズマでは、プロトン ( $H^+$ ) の質量が電子の1836倍も大きいので荷電粒子運動は $H^+$ の運動に依存します。

高速荷電粒子は磁気を伴っており、同じ荷電粒子が平行して運動する粒子間では引き合う磁気作用があります。他方、電子と $H^+$ が平行して運動すると粒子間では反発する磁気作用となります。

太陽から放出された $H^+$ の大部分は強力な重力によって太陽に引き戻されます。しかし、太陽の脱出速度617.5 km/sec 以上の速度を持つ荷電粒子は太陽風として太陽から脱出します。

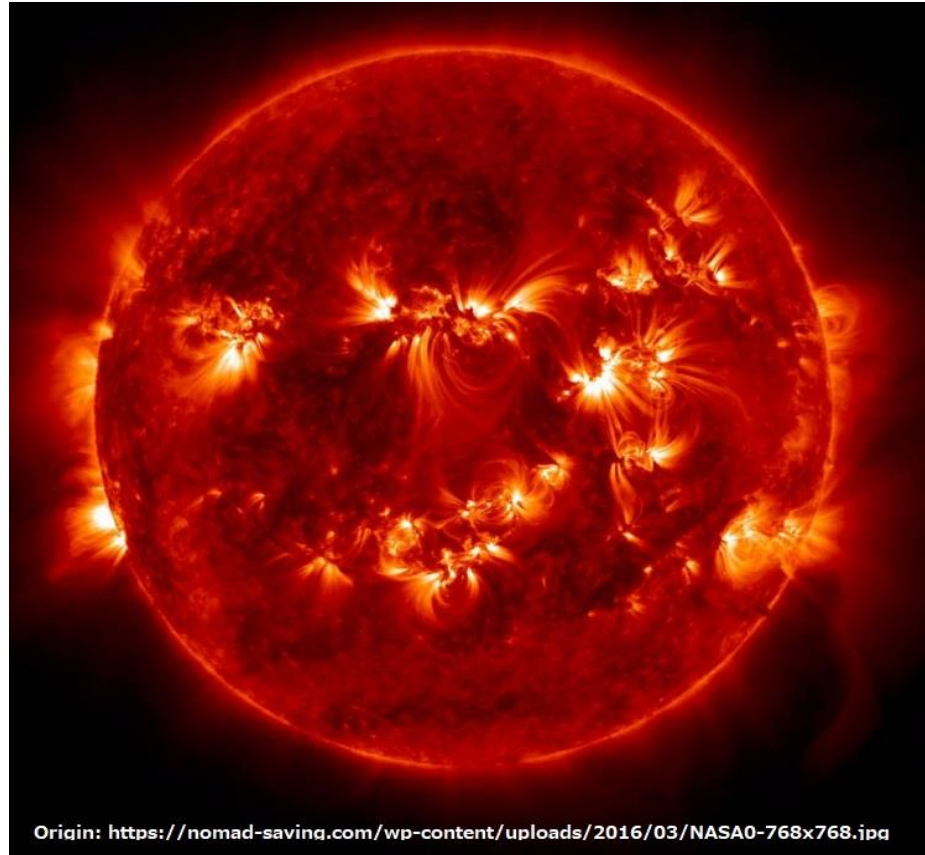
太陽風の高速荷電粒子群は衝突を繰り返えし、磁氣的結合により平行に束になって運動します。太陽は自転しているため、太陽の自転軸に垂直な平面に磁氣的結合で多く集まって大きな運動量を持つプロトンが円盤状に放出されます。こうして、太陽風は荷電粒子がイオン状態を保って太陽系の端にまで到達します。

唐澤 信司

(元) 宮城工業高等専門学校・名誉教授  
(2009 より, 仙台高等専門学校)

# 磁気を担って運動する荷電粒子の相互作用

太陽の表層で観測される荷電粒子は磁界に沿って運動していると考えられていますが、運動する荷電粒子が磁気を担って運動すると考えて、運動する荷電粒子が磁氣的な相互作用をすることを考えます。



Origin: <https://nomad-saving.com/wp-content/uploads/2016/03/NASA0-768x768.jpg>

太陽の彩層までの内部では荷電粒子が高密度であり、遷移層で密度が低くなると、平均自由行程が長くなります。平均自由行程が長くなった荷電粒子が、平行に運動する荷電粒子間の磁気エネルギーは磁氣的に低くなります。そこで、荷電粒子群が束になります。この効果は速度が速くなるほど増します。こうして、遷移層においてプラズマの温度が急激に急上昇します。

太陽の表面から磁気を担った荷電粒子群は沸き上がりますが太陽の重力によって引き戻されます。磁氣的結合によって大きな集団になるほど大きな運動エネルギーを持って放出されます。大きな荷電粒子の集団は高い位置まで達するループを描きます。そして、大きな荷電粒子の集団は宇宙空間に放出されます。

太陽の低緯度の方が高緯度側より周回速度が速いので、太陽の赤道平面に多くの荷電粒子群が放出されます。

Fig. 1 太陽表面で脱出速度(617.5km/s)以上の速度を持った荷電粒子の放出

# 太陽から太陽風が放出されるメカニズム



移動する荷電粒子が静止した荷電子の近くを通過すると一瞬に接近して、離脱するので微々たる作用で終わります。荷電粒子と他の荷電粒子が平行し移動すると移動する磁場が平行電流の様に結合します。

太陽表面から放出される太陽風は運動する荷電粒子群が連鎖した磁気結合によ束になって運動します。

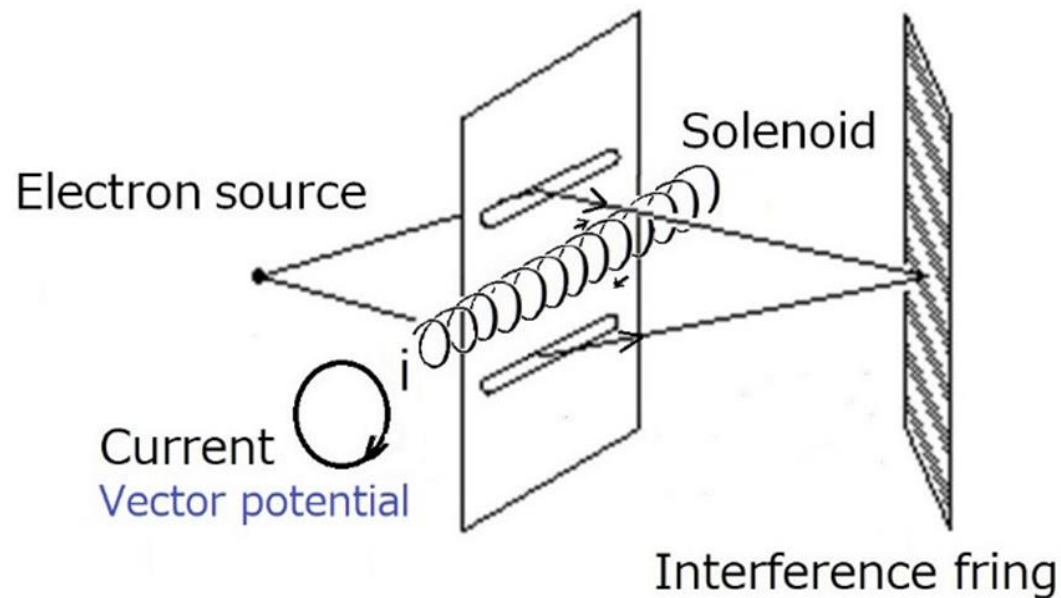
従来の理解では観測される太陽の表層の荷電粒子の運動を磁束の由来を説明せず磁束のループに沿ってしているとしています。しかし、次に説明するアハロノフ・ボーム効果によって、運動する荷電粒子間の磁気的な相互作用を磁場を先に考えることは否定されています。

Fig.2 運動する荷電粒子で磁気を持ち、磁気結合によって束になって放出される太陽風

アハロノフ・ボーム効果：運動する荷電粒子間の磁氣的相互作用はベクトルポテンシャルによって考える必要がある。

コイル内を流れる電流の方向がソレノイドコイルの軸の上下の上下で逆転しますが、上を通過する電子ビームと下を通過する電子ビームが干渉縞を生成することでアハロノフ・ボーム効果が証明されています。

### Aharonov-Bohm effect



Reproduced from <http://dolphin.phys.s.u-tokyo.ac.jp/research/sc2des/ws/ab.gif>

ソレノイドコイルの外側には磁界はありませんが、コイル内を運動する荷電粒子の場とコイルの外部で運動する荷電粒子の場が直接的に作用します。

ベクトルポテンシャル  $A$  ( $B = \text{rot } A$ ) は、単位電流に対する場所のエネルギーであり、移動する荷電粒子に対する場所のエネルギーです。

電界と磁界は場所のポテンシャルエネルギーの差によって発生する力の場です。場が持つポテンシャルエネルギーが等しい空間では電界も磁界もゼロになりますが、積分定数項にあたるポテンシャルはゼロではありません。

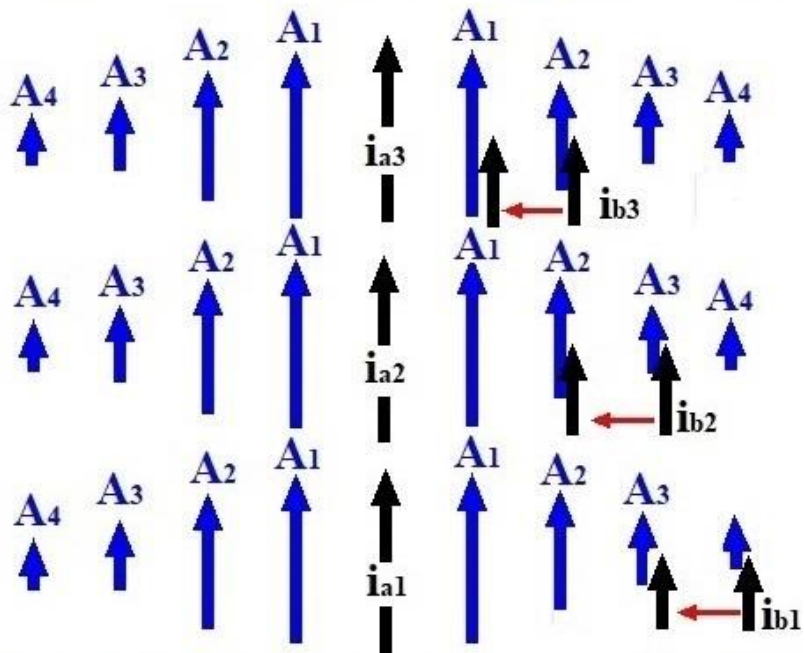
運動する荷電粒子は通過する磁場のエネルギーの作用を受けます。

Fig. 3 アハロノフ・ボーム効果

# 高速荷電粒子間の磁氣的ポテンシャルの距離間隔の依存性

点光源から照射された光は距離の二乗に反比例して減少します。磁気を担う運動する荷電粒子群が磁氣的結合を連鎖しているので磁気圏が広い領域に及んでいると考えます。

Magnetic coupling energy [ $E_m = -i_b \cdot A_a$ ]



Magnetic coupling force works between  $i_a$  and  $i_b$  through vector potential  $A$

ベクトルポテンシャル $A$ は電流が受ける場の性質です。静磁場は閉円の電流の線分の結果であり、コイル内では個々の電子が絶えず方向を変え、それらの重畳磁気作用が $H$ である。アンペアの法則は、 $H$ の線積分が $i$ の面積であるということです。

$A$ と $\phi$ のポテンシャルは、原因となる電流や電荷から離れると減少します。

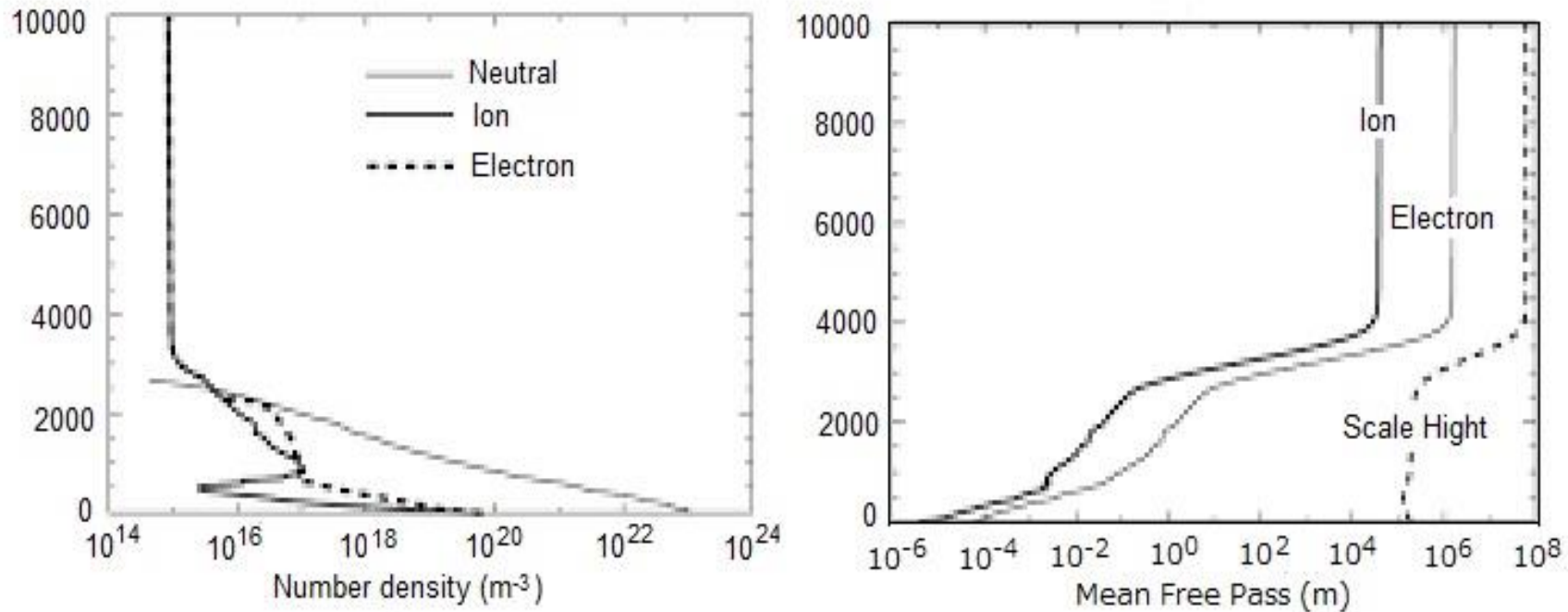
$$A(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}'$$

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Omega} \frac{\rho(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}'$$

Fig. 4 電流に対するベクトルポテンシャルエネルギーは $[E_m = -i \cdot A]$ で表されます。

# 太陽の表層における運動する荷電粒子間の磁気結合効果

彩層の平均自由行程は約1mであり、コロナ領域の電子の平均自由行程は数千kmになります。長い平均自由行程で運動する荷電粒子群は磁気結合により平行に運動するようになります。



Origin Fig.3 and Fig.5, <https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~isobe/nwork/presen/taikikensymp-12mar01.pdf>

## Fig. 5 太陽のコロナ領域におけるイオンの平均自由行程

出典：磯部洋明, "彩層と電離圏のパラメータ比較と物理アナロジー整理", 京都大学宇宙研究所

太陽風と衝突して電離した大気分子は荷電粒子間の磁気結合によって同じ方向に運動します。

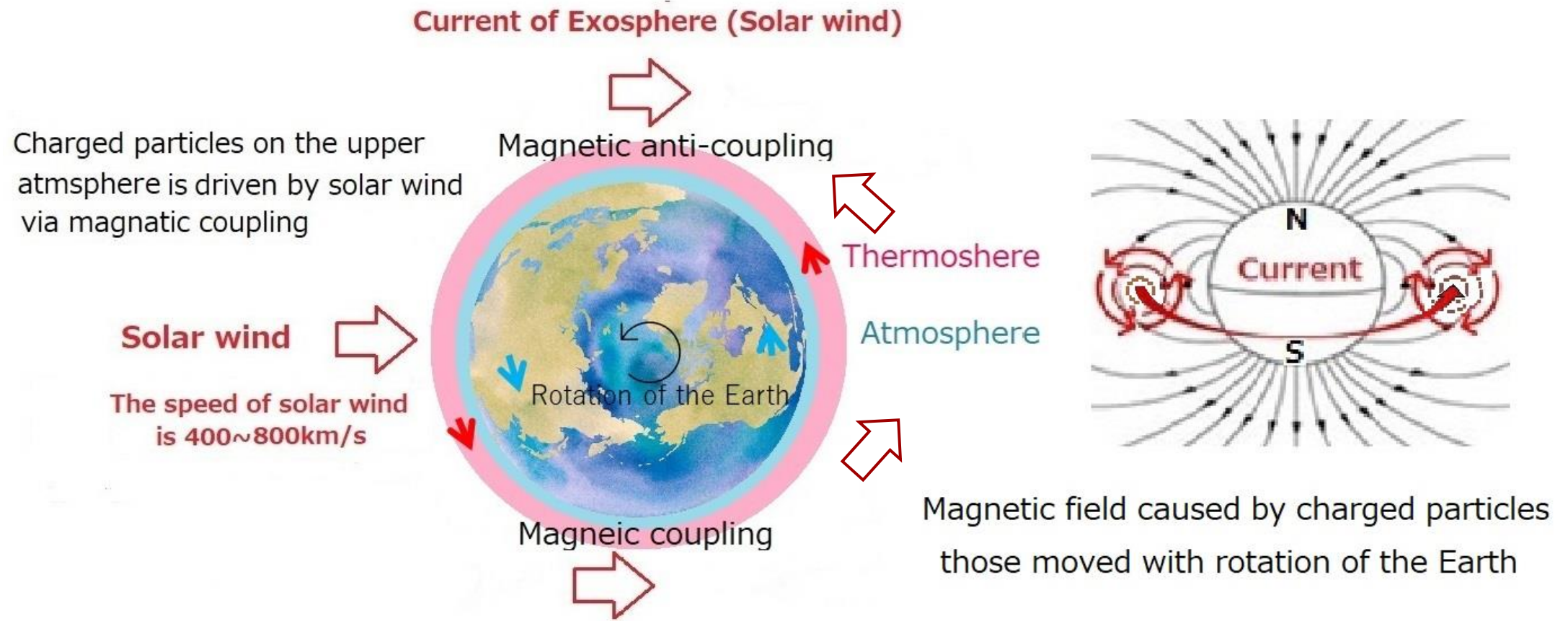
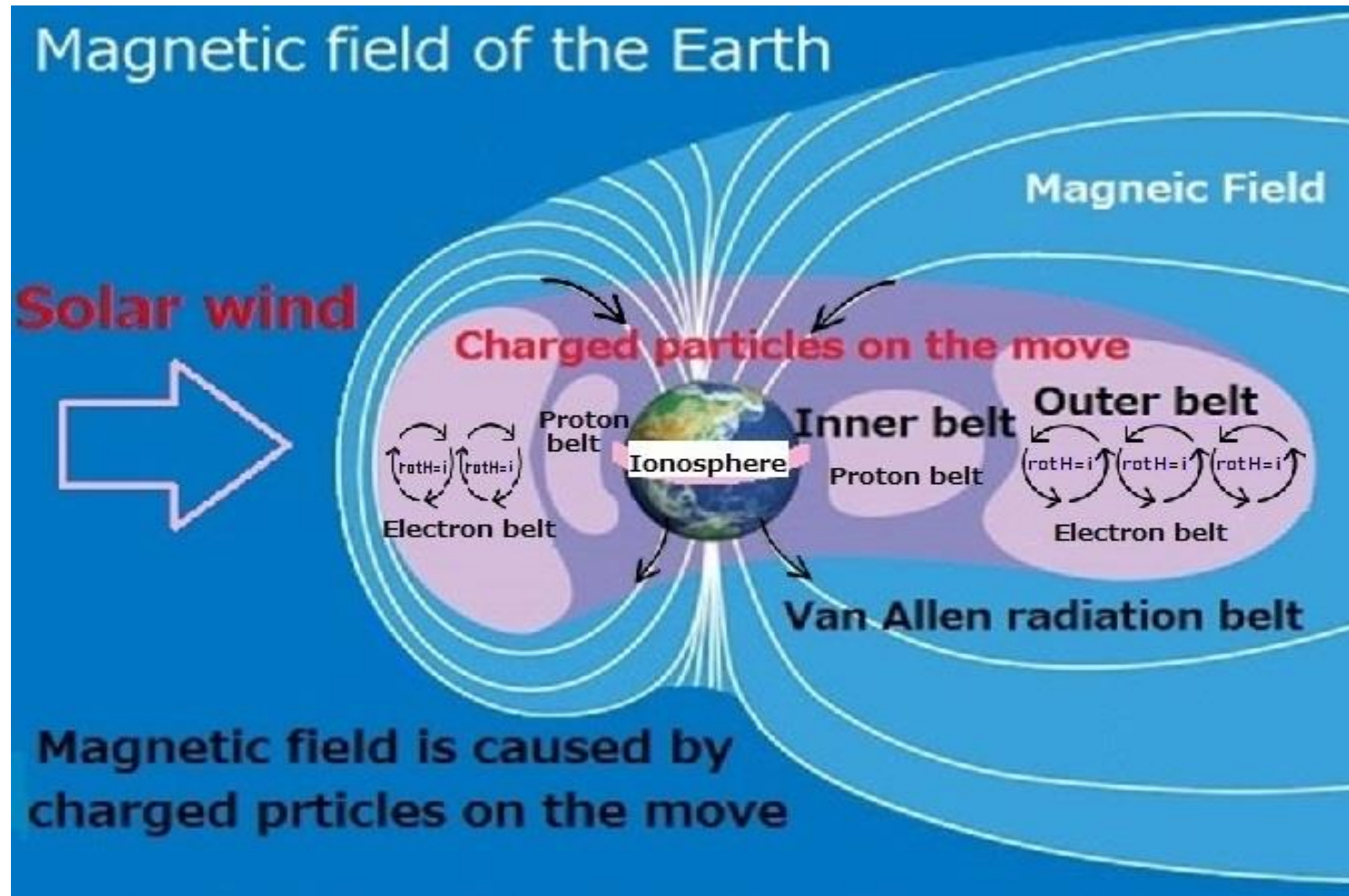


Fig.7 太陽風が衝突して地球を周回する大気分子の運動とその運動による磁気

地球の磁気圏は太陽風によって飛来する荷電粒子群の磁気作用の連鎖によって太陽の反対側に広がっている。



太陽を背にした地磁気は尾を引く様に変形します。

地磁気の原因となる地球のコアの荷電粒子の運動による磁気は、地球を取り巻いて運動する荷電粒子と磁氣的結合を連鎖して、地磁気に加えられて磁気圏を広げます。

こうして、太陽風のH<sup>+</sup>を含む移動荷電粒子の磁気結合の連鎖が磁気圏を変形させる。

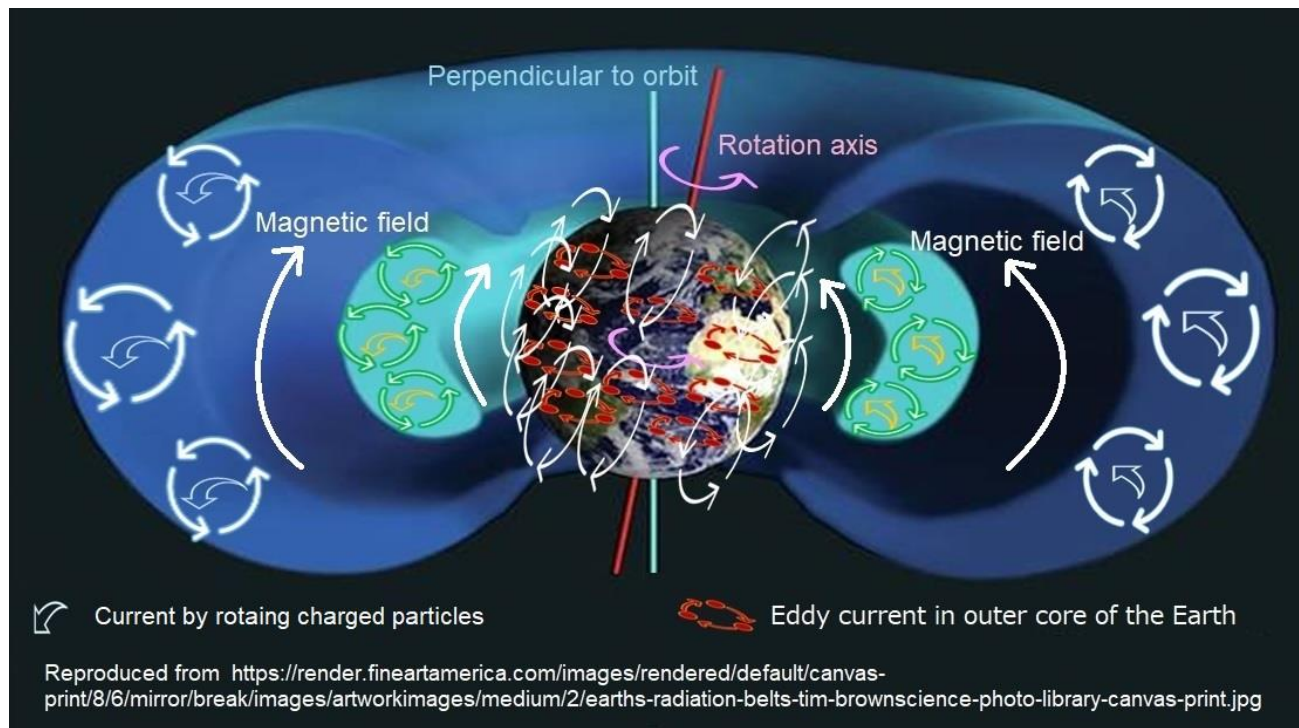
$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}'$$

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Omega} \frac{\rho(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}'$$

Fig.6 高速荷電粒子によって引き起こされる地球の地磁気の変形



# 飛来した荷電粒子群の磁気結合の連鎖による ドーナツ型のヴァンアレン帯の形成

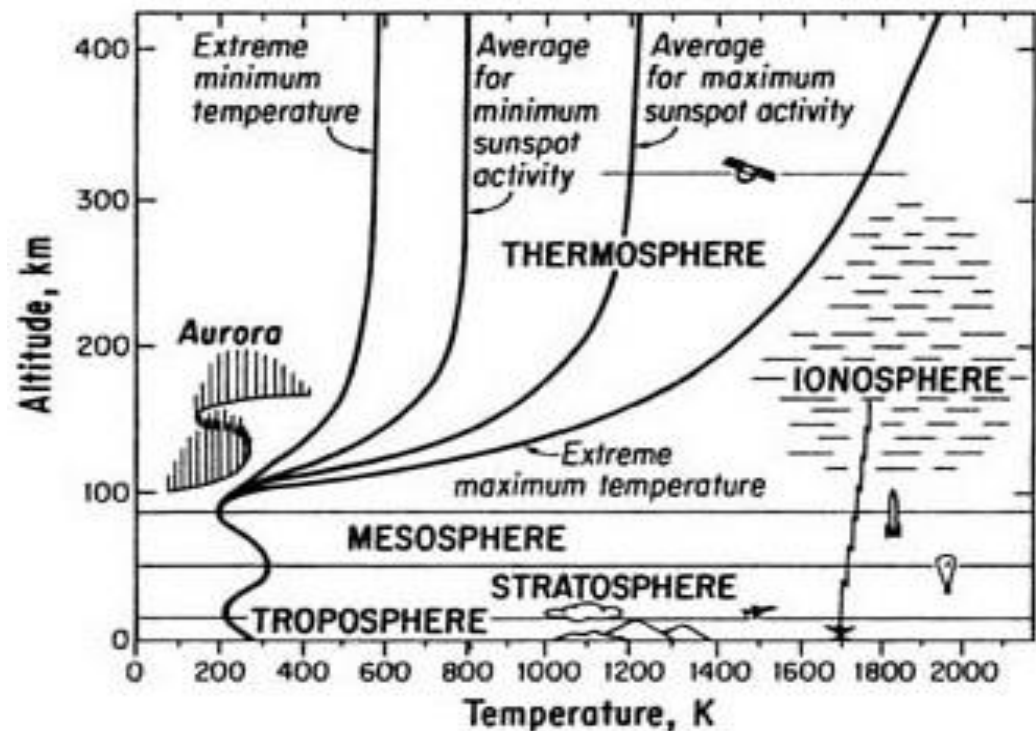


ヴァンアレンベルトの内側のベルトは、地球上空2,000~5,000 kmに位置しています。他方、外側のベルトは10,000 - 20,000 kmに位置しています。この空間領域には大気分子は殆ど存在しません。

地球の地磁気は、運動している荷電粒子の磁気結合の連鎖によって赤道の周りに膨張します。そこで、飛来して荷電粒子が赤道上空を中心にドーナツ状に地球を周回するヴァンアレンベルトが形成されました。

Fig.8 飛来した高速の荷電粒子の磁気結合による地球の磁気圏の拡大

# 電離層の電子密度群に及ぼす太陽風の影響



Origin; [https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/prt%3A978-1-4020-4520-2%2F19/MediaObjects/978-1-4020-4520-2\\_19\\_Part\\_Fig15\\_HTML.jpg](https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/prt%3A978-1-4020-4520-2%2F19/MediaObjects/978-1-4020-4520-2_19_Part_Fig15_HTML.jpg)

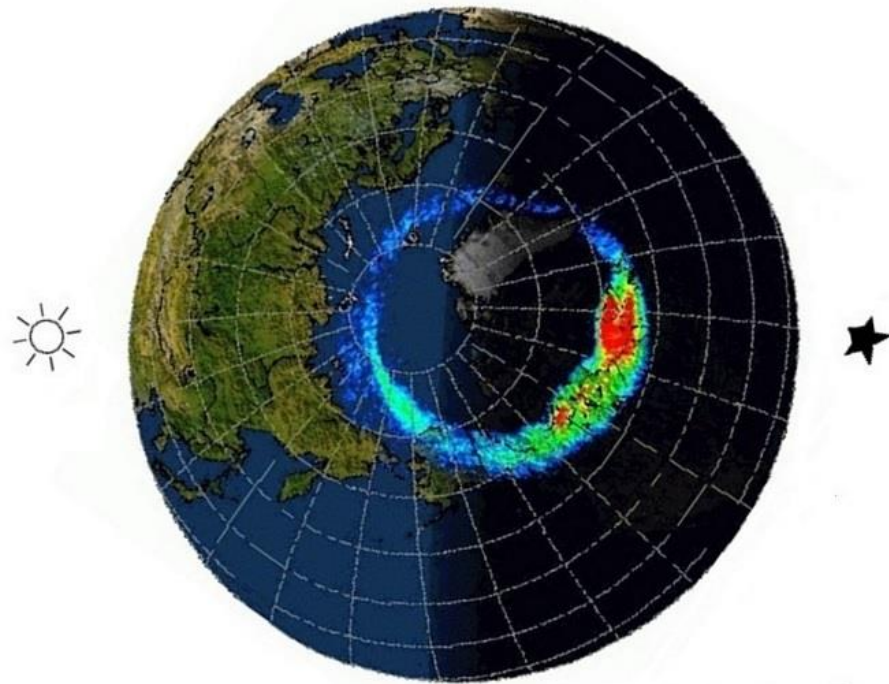
電離層は熱圏と中間域(高度約60km~500km)に位置し、電子密度の高い領域です。電離層の電子群は太陽の紫外線の照射や太陽風の衝突によって発生しています。

熱圏では、90 kmから500 kmの範囲であり、高度とともに大気の色度が上昇します。この気色上昇は図.9に示すように太陽の活動に依存しています。地球の大気の色度に太陽の紫外線や太陽風の衝突によっていると考えられます。

水素原子は地球の重力では保つことができませんが、水素原子の色度分布のピークは80kmほど上空にあることが、太陽風が大気に衝突している証拠です。

Fig.9 地球の熱圏に衝突する太陽風に対する荷電粒子の影響

オーロラの発光が揺らぐのは太陽風の影響です。昼夜で変化するのは太陽光で発生した電子の影響です。



Origin: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/147514main\\_oval\\_in\\_dark.gif](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/147514main_oval_in_dark.gif)

太陽風のH<sup>+</sup>イオンが地球の上空100kmから500km上空で原子やイオンに衝突して発光するものです。

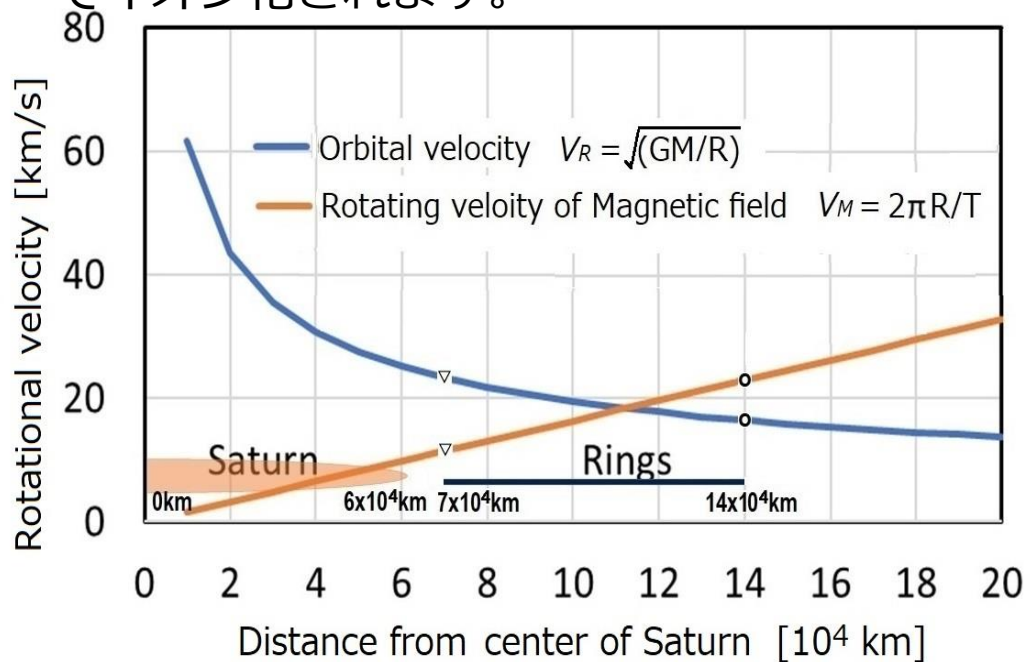
オーロラは昼側に較べて夜側では低緯度側に移動している。夜側のオーロラが濃くなる領域が少し西側にシフトしていて、昼側のオーロラが希薄になる領域も西側にシフトしてその影響が夜側にも影響をおよぼしています。

これは昼側で太陽光の照射により発生した自由電子が、オーロラの発生を中和する効果であると説明できます。

Fig.10 昼半球と夜半球のオーロラの相違

# 荷電体に磁気圏の回転の加速効果により周回を永続する 外惑星のリングの形成

太陽風で飛来した荷電粒子群と惑星内部の荷電粒子群が磁気的な作用によって地磁気が形成されます。惑星の静止軌道の周辺を周回する星間物質は惑星を周回する太陽風のプロトンが衝突することによってイオン化されます。



惑星を周回する荷電物質群が惑星内部の荷電移動粒子と磁気結合により同期して回転するのでその回転速度は車輪の様に惑星の中心からの距離に比例して速くなります。

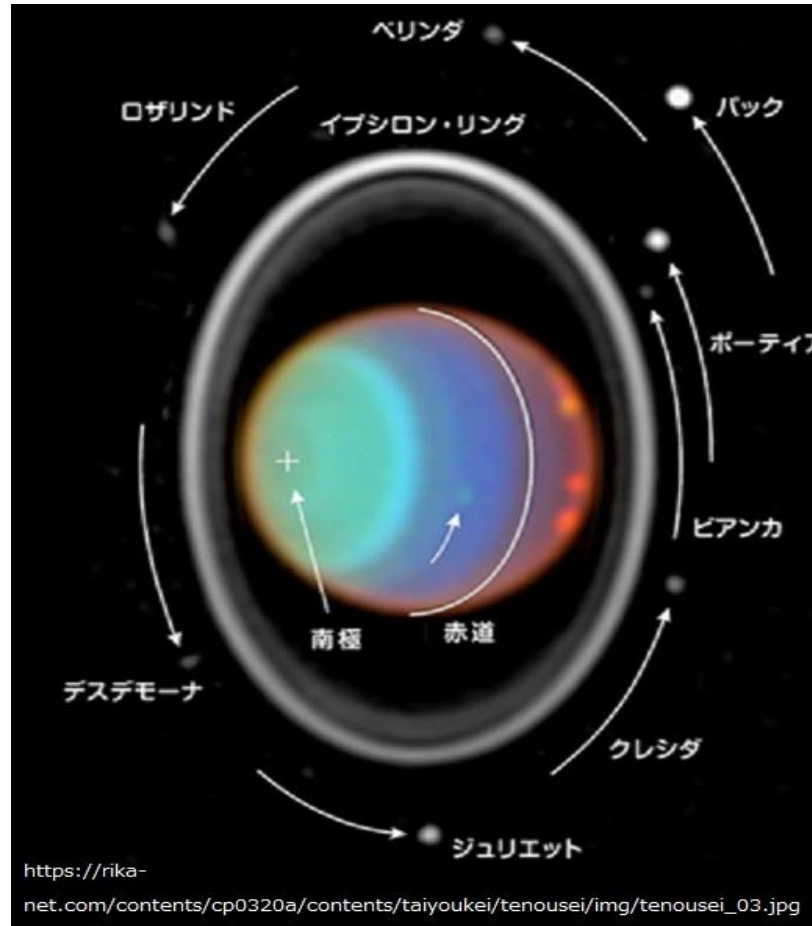
他方、ケプラーの第3法則( $m v^2/r = G M m / r^2$ )による速度は中心からの距離に反比例します。つまり、中心からの距離が離れると遅くなります。

そこで、静止軌道の距離  $R_0 = [G M_{\text{planet}} (T_{\text{orbit}} / 2\pi)^2]^{1/3}$  付近において、車軸回転速度と公転回転速度の変化は相殺するので、重力中心の惑星に落下せず荷電物質が周回を続けています。

S. Karasawa, "How rings of outer planets formed and why the rotating axis of icy planets tilted", Academia Letters, 2022 Article 4996. <https://doi.org/10.20935/AL4996> ISSN: 2771-9359

**Fig.11 土星の公転軌道に及ぼす重力の運動エネルギーと地磁気の回転力による相殺によるリングの形成**

# 天王星で横に向いた自転軸と一致するリングの軌道の傾きが示す連結した磁気作用の証拠



天王星の自転は0.7183 日で公転は84.25年の周期です。太陽は同じ緯度の地域を照射し続けるので天王星に太陽に向く成分を持つ歳差運動が発生します。

他方、イオン水の運動による磁気作用の連鎖作用により荷電粒子群が天王星の歳差運動と連動して天王星を周回しています。

S. Karasawa, "How rings of outer planets formed and why the rotating axis of icy planets tilted", Academia Letters, 2022 Article 4996. <https://doi.org/10.20935/AL4996> ISSN: 2771-9359

Fig.12 土星の公転軌道に及ぼす重力の運動エネルギーと地磁気の回転力による相殺によるリングの形成

# まとめ

ベクトルポテンシャルを介して他の荷電粒子と作用する電荷を帯びて運動する粒子間の磁気エネルギーの効果について検討しました。

今後、ベクトル電位を考慮した磁場に関する理論を調べることにより様々な分野で理解が深まることが期待できます。