

# ガンマ線放射と相対論的ウインドが共存する パルサー磁気圏の構造

柴田 晋平、 和田 智秀

山形大学・理学部

平成 17 年 12 月 24 日

## 1 パルサーの観測

パルサーのセントラルエンジンは非常に強い磁場を持った高速に自転する中性子星である。Ordinary Pulsar と分類されるパルサーでは、磁場は  $10^{11} - 10^{14}$  G 程度、自転周期は 10msec から数秒程度である。Millisecond pulsars では、磁場は  $10^8$  G 程度、自転周期は 1.6msec から 10msec 程度である。観測されるパルス周期の遅れから自転角速度  $\Omega$  の時間化率  $\dot{\Omega}$  が観測されており、自転のエネルギー  $\mathfrak{J}\Omega\dot{\Omega}$  を開放することで輝いている。ここで、 $\mathfrak{J}$  は星の慣性モーメントである。

[電波放射] 強い電波放射（輝度温度  $T_b \sim 10^{31}$  K に達する）がパルスとして観測される。放射はビーム状で自転によりパルスとして観測されていると考えられる（灯台モデル）。磁気圏内に加速された粒子ビームが作られていることを示唆する。

[ガンマ線放射] これとは別の機構で X 線からガンマ線にかけてのエネルギー領域でパルスが観測されている。磁場に沿った粒子加速がありそこからの制動放射と考えられる。そうすると、加速粒子のエネルギーは  $10^{13}$  eV に達することになる。周囲の環境から考えてこのガンマ線の一部は、電子陽電子対を作ると予想される。

[パルサー星雲] パルサーにはシンクロトロン放射で輝く星雲を伴う（典型的には 1pc サイズ）。磁化したプラズマの流れ（パルサー風）が星間空間に吹き出し、終端衝撃波の後方でシンクロトロン放射で輝いているものである。パルサー星雲は電波から可視光、X 線で観測され、さらに、逆コンプロトン放射により TeV ガンマ線でも観測されている。これらの観測からパルサー風のプラズマは bulk Lorenzt factor で  $\gamma_{wind} \sim 10^6$  まで加速されていると考えられる。また、その形状は一般にリング（あるいはディスク）と双極ジェットになる。

## 2 現象論的モデル

電波放射は現象論的には磁極付近に粒子加速/電波放射領域があるとして伝統的に解釈されている。ちょうど、惑星のオーロラ帯のようなものがあり磁場に沿って粒子加速があると考える。加速された粒子は曲率放射によりガンマ線を放出し、ガンマ線の一部は強磁場の下、電子陽電子対を形成する。電子陽電子対プラズマと粒子ビームという環境の中でなんらかの機構で電波が增幅されると考えられている。放射ビームの形は多重の中空円錐状を考える。これを

Polar Cap Model と呼んでいる。

ガンマ線ビームは、Polar Cap Model の枠内で考えることもできるが、現象論的には Outer Gap Model が成功している。そこでは、後述する null 面とよばれる磁気圏内の領域に Outer Gap と呼ばれる粒子加速領域があると考える。Outer Gap は磁力線に沿った電場を持ち、加速された粒子は曲率放射によりガンマ線 ( $\sim 100\text{GeV}$ ) を発する。ガンマ線の一部は磁気圏内の低エネルギーの光子と衝突して電子陽電子を作り、電子陽電子対のシンクロトロン放射により軟ガンマから X 線の放射ができる。このモデルによって、観測されるパルス波形、スペクトルを合わせることができる。

いずれにせよ、電子陽電子対プラズマが磁気圏内に作られると予想され、プラズマは磁気圏の回転により相対論的な遠心力風(パルサー風)ができると考えられる。

### 3 理論の課題

パルサーの発見以来 40 年になろうとしているが、根本的なエネルギー開放の機構は未解決のままである。理論的課題をあげると：

- 電子陽電子対プラズマの中でどのようにして局所的な沿磁力線電場  $E_{\parallel}$  が作られるのか。
- パルサー風の正体は何か。電磁場と(bulk の)運動エネルギーの比はいくらになるか(加速効率はいくらか)。どのような構造になるか。
- 電波はどのような機構で增幅されるか。

### 4 回転する磁気圏の構造

回転する誘導起電力：

回転するマグネットの回りにあるプラズマは電磁誘導によってマグネットと共に回転しようとする(回転の誘導)。実際には、プラズマが電荷分離を起こし、その結果によって生じた電場による  $E \times B$  ドリフトによってプラズマは回転するという過程を踏む。このとき生じる電荷密度はゴールドライク・ジュリアン(GJ)密度と呼ばれ

$$\rho_{gj} \approx \frac{\Omega \cdot B}{2\pi c} \quad (1)$$

で与えられる。よって、プラズマ数密度  $n$  が考えている磁気圏での典型的な GJ 密度に対応する値  $n_0 = \Omega B / 2\pi c e$  に比べて十分に高いときはプラズマは共回転するが、低いときは、 $\rho_{gj} = 0$  で定義される null 面に真空ギャップが形成され、有限サイズのプラズマ圏を形成する。図 1 は粒子シミュレーションによって示されたそのような磁気圏の様子をしめしている。強い電荷分離によって極と赤道に電荷の雲がつくられている。( $\Omega \cdot B > 0$  の時は、極の上に電子が赤道にイオンまたは陽電子が集まる。

$n \gg n_0$  であれば共回転領域が外にひろがって行き、共回転プラズマに働く外向きの遠心力が増加し、遠心力ドリフト電流が磁場を変形する。磁場の変形が重大になる条件は

$$\frac{\delta B}{B} \approx \frac{4\pi nm(r\Omega)^2}{B^2} \quad (2)$$

である。パルサーのように磁場がたいへん強い場合では共回転速度が光速に達する距離(光半径  $R_L = c/\Omega$ )まで共回転領域が広がって( $V_\phi \rightarrow c$ )、相対論的な慣性の増加がないと磁場を開くことができない。この条件は  $\delta B/B = 1$  と置いて、

$$\gamma_{wind}n = \frac{B^2}{4\pi mc^2} \quad (3)$$

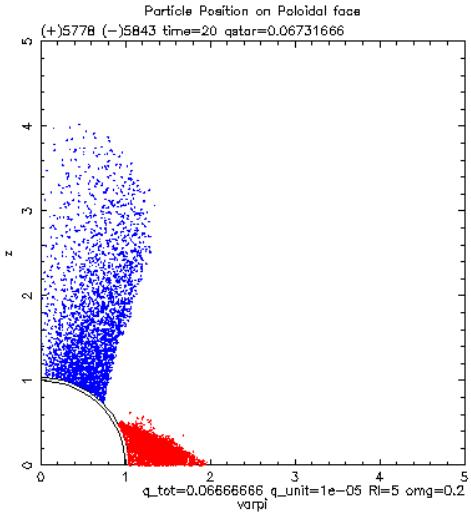


図 1: 電子陽電子対の生成がないときの軸対称で静的なパルサー磁気圏。

つまり、慣性が増加し共回転の運動エネルギー密度  $\gamma_{wind} n m c^2$  と磁場のエネルギー密度が同じ程度になれば開いた磁場構造が現れて、磁場に沿ったプラズマの流出が可能になると考えられる。このときのローレンツ因子を見積もると、磁場を光円柱磁場  $\mu/R_L^3$  とし、プラズマの密度を  $n_0$  の  $\mathcal{M}$  倍 (pair multiplication parameter) とおいて、

$$\gamma = \frac{\gamma_{max}}{2\mathcal{M}} = 1.3 \times 10^7 \mathcal{M}^{-1} \mu_{30} P^{-2} \quad (4)$$

一方、ローレンツ因子が増大すると制動放射が重要になり放射の反作用に依る磁場を横切ったドリフト運動が可能になる。このときのローレンツ因子は

$$\gamma_{rad} \approx \left( \frac{3}{2} \frac{B R_{curv}^2}{e} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$$\approx \left( \frac{3}{2} \frac{\mu \Omega}{c e} \right)^{1/4} \quad (6)$$

$$= 2.8 \times 10^7 \mu_{30}^{1/4} P^{-1/4} \quad (7)$$

である。電子陽電子対生成が盛んであれば  $\mathcal{M} \gg 1$  であるので、放射の反作用は重要である。カニパルサーでは  $\gamma_{wind} \approx \gamma_{rad}$  になる。

閉じた磁場構造で共回転速度が光速に漸近すると、ローレンツ因子が増大し、 $\gamma_{rad}$  に達すると、方位角方向回転の向きに出るガンマ線放射の反作用によって、赤道にトラップされていた粒子成分が半径方向に流出する。

## 5 数値計算の結果

粒子シミュレーションによって図 1 のギャップを持つ静的な構造をつくり出し、つぎに、ギャップ中の沿磁力線電場の強いところに電子陽電子対が発生させる。コードは 3 次元であるが今回のモデルは、軸対称で定常状態を探った。星の表面境界条件として正確に共回転をさせるために、通常の Particle-in-cell 法と異なって、電場はグリーン関数法を用いて GRAPE6 で計算する。

5–6 周期の時間で磁気圏は定常状態になる。高緯度領域から負電荷の、低緯度領域から正電荷の、中緯度領域では混合した、定常的な outflow が見られる (図 2)。

ヌル面近傍のギャップでは定常的に電子陽電子が生成されるが、ギャップの電場は完全にはスクリーンされず維持されている。この領域は、Outer gap に同定される。電子陽電子対がオンセットすると、ギャップはサイズ・電場強度ともに縮小する。星の表面近傍のギャップは埋められ、沿磁力線電場のピーク位置は  $\sim 0.2R_L$  に位置する。電場強度は 光円柱磁場強度の 6% 程度になる。

Outer gap から出た陽電子は、計算の初期の段階では赤道ディスクに蓄積しディスクを光円柱に向かって成長させる。おもしろいことにこの赤道ディスクは *super-corotation* を示し、光円柱に達する前にローレンツ因子が増大する ( $\sim 0.8R_L$ )。ローレンツ因子が増大し放射の反作用が効くような値に達

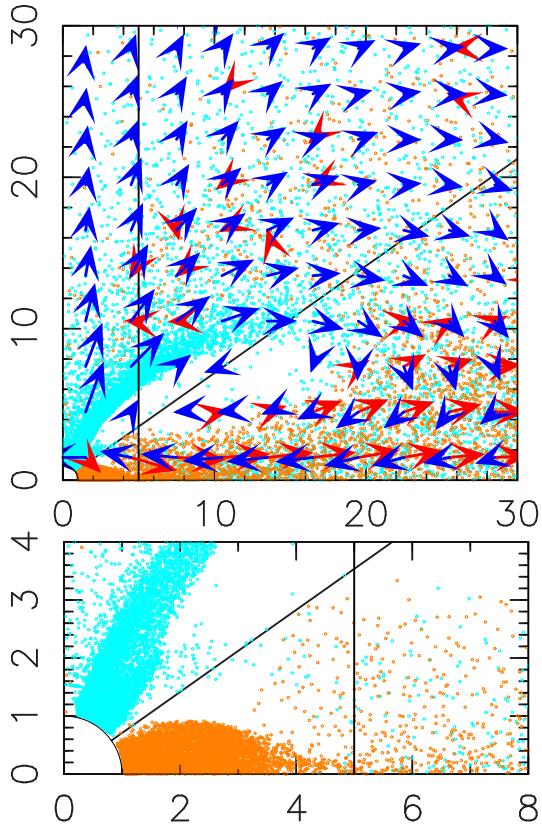


図 2: 電子陽電子対を生成する定常軸対称なパルサー磁気圏

すると方位角方向の放射反作用に対して、半径方向のドリフトがおこり、閉じた磁場を横切った outflow がおこる。

一方、Outer gap から出た電子は星に達し吸収されるが、同等の電子が polar cap 領域から放射されることになる。このため電子ドームは上方に向かって成長し、外縁部は光円柱に達する。負電荷の雲は星近傍では共回転を示すが、光円柱近傍で  $\beta_\varphi = 0.5$  程度の方位角方向の速度を持ち、 $1.5R_L$  まで広がると方位角方向の加速 ( $E_\perp$  加速) の効果でローレンツ因子が増大し、放射の反作用が重要になってくる。方位角方向の放射の反作用によるドリフトにより磁場を横切り赤道方向に向かって運動する。磁場を横切った運動によりさらにエネルギーを

獲得する。定常解に至る間、系の総電荷は減少を続け、ほぼゼロになる。

極領域の電子の内、約半分は高緯度側の磁場に沿って outflow を作り系から抜けてゆくが、残りの低緯度側の電子は赤道方向にドリフトしやがて星に戻ってゆく。

赤道領域から出た陽電子の一部は磁場を横切ったドリフトをしながら高緯度に移動し、極の負電荷のドームに侵入し星に到る。極領域では電子と陽電子の対向した流れが結果的に生じる。極軸に沿ったドーム領域の電場は、ほとんどシールドされている：極軸上の電位はドーム内でほとんどゼロである。ただし、電子が無限遠に流れてるため、極の電位はわずかに負であり、ごくわずかの内向きの電場が電子を外に押し出している。

## 6 考察

理解が出来ていないが大変面白い現象として、極のすぐ上に電位のドロップを見出した。粒子サイズの有限性から出てくる人工的なギャップについては定量的に評価でき対応する現象も確認しているが、この電位差はそれより有意に大きく、かつ、極冠 ( $\theta \sim 10^\circ$ ) だけに生じる。ポーラーギャップも発生する可能性が示唆された。

電子陽電子対の生成率を上げて行くと磁場の変形がはじまり開いた磁場構造ができる。このときは遠心力で磁場に沿って流れ出る効果が重要になる。(今回のパラメータではこれは極付近の電子のみであるが。)

今後は密度のさらに大きなケースと斜め回転のケースについて計算をすすめパルサー磁気圏の大域的な構造の問題に決着をつけたい。