

パルサー磁気圏理論の再検討 (I)

柴田 晋平*

2022年7月18日

* (しばたしんぺい) 山形大学名誉教授 Email: shibata.shimpei@gmail.com URL:
<https://www.shibatashinpei.jp/>

1 A review

date of revision
2017.Dec–2018.Jan
2022.May–

Preamble: 大規模なパルサー磁気圏の PIC simulation に取り掛かる前にこれまでの磁気圏モデルの問題点を概観することにした。

1.1 Pulsar model: Introduction

(**回転駆動型パルサー**) 磁場を持った中性子星が自転していることによる発電(単極誘導)とそれに続く粒子加速 + 電磁波放射がパルサーのエネルギー放射の起源であり、その反作用として自転は減衰 (spin-down) する。実際にパルスの観測から回転周期 $P = 2\pi/\Omega$ とその時間微分 $\dot{P} = -2\pi\dot{\Omega}/\Omega^2$ がわかるので回転エネルギーの損失 $\mathfrak{S}\Omega\dot{\Omega}$ が知られる。ここで、 $\mathfrak{S} \approx 10^{45} \text{g cm}^2$ は中性子星の慣性モーメントで、その値は中性子星の内部構造論により割合よく決まっている。磁気モーメント μ の回転体が放出する電磁エネルギーを order estimation して、回転エネルギー損失と等しいとおくと、

$$L_{\text{rot}} = \mathfrak{S}\Omega\dot{\Omega} \approx \frac{\mu^2\Omega^4}{c^3} \quad (1.1)$$

となる。これから、中性子星の磁気モーメントが

$$\mu = \sqrt{c^3\mathfrak{S}\dot{\Omega}/\Omega^3} = 0.83 \times 10^{30} \text{Gcm}^3 \sqrt{\mathfrak{S}_{45}P\dot{P}_{-15}} \quad (1.2)$$

と推定できる。(note: $B = 10^{12} \text{G}$ 、 $R = 10^6 \text{cm}$ で $\mu = BR^3/2 = 0.5 \times 10^{30}$ になる。)

(**磁気圏における粒子加速**) パルサー磁気圏における粒子加速は、電場の磁場方向成分 E_{\parallel} によるものと、磁場に垂直方向成分 E_{\perp} によるものに大きく分けられる。磁気圏プラズマの単位体積に働く力のバランスは

$$(\text{inertia}) = \rho_e \mathbf{E} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{c} + (\text{other forces}) \quad (1.3)$$

と現わせるだろう。電磁力が圧倒しているので、

$$\rho_e \mathbf{E} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{c} = 0 \quad \text{force-free approximation} \quad (1.4)$$

従って、 $\mathbf{E}_{\parallel} \approx 0$ 、 $\mathbf{E} \approx \mathbf{E}_{\perp}$ が第0近似であり、磁力線は等電位になる。宇宙物理に出てくるほとんどの場面ではこの近似はよく成り立っている。この近似が崩れるのは非常に特殊な局所的領域のみである(たとえば、磁気リコネクションサイト)。しかし、パルサーではこの事情が正しくない。運動方程式だけを見て $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\perp}$ を信じたが、このとき、

$$\rho_e = \frac{\nabla \cdot \mathbf{E}_{\perp}}{4\pi} \quad (1.5)$$

の空間電荷密度が存在することが暗黙に仮定されている。パルサー磁気圏では典型的には $|\nabla \cdot \mathbf{E}_\perp|/4\pi e \sim 10^{12} \text{cm}^{-3}$ であり、パルサー磁気圏でこの程度のプラズマの存在を暗黙の内に仮定することは難しく、**プラズマの供給について真剣に検討しなければならない**。一旦、粒子が加速され、大量の電子・陽電子対が発生すれば、そのサイト及びそこから磁場で繋がった空間ではこの問題は解消に向かう。(粒子が加速されると $h\nu > 2m_e c^2$ の光子が放射されてそれが電子陽電子対になる。)

この事情をわかりやすくするために次のような定式化がしばしば使われる：磁気圏磁場は中性子星 (角速度 Ω) に起源を持つことを仮定し、この磁場に垂直な回転による誘導電場を $\mathbf{E}_c \equiv -(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}/c$ (共回転電場と呼ぶ) とおいて、実際の電場 \mathbf{E} を、共回転電場からのズレ $\mathbf{E}' = \mathbf{E} - \mathbf{E}_c$ で表現する。このズレ \mathbf{E}' は、一般に沿磁力線電場 E_\parallel を含んでいて、非共回転電場とよばれる。共回転電場 \mathbf{E}_c 対応する空間電荷密度 (Goldreich-Julina charge density) を $\rho_{gj} = \nabla \cdot \mathbf{E}_c/4\pi$ と書くと、Poisson equation は

$$\nabla \cdot \mathbf{E}' = 4\pi(\rho_e - \rho_{gj}) \quad (1.6)$$

と書き換えられる。上の式は、「電荷密度 ρ_e が GJ 密度 ρ_{gj} からずれると、沿磁力線電場が発生する」と読める。この E_\parallel による粒子加速が磁気圏で起こっていると考えられる。

一方、 $\mathbf{E}' = 0$ であれば、プラズマは

$$\mathbf{v}_D = c \frac{\mathbf{E}_c \times \mathbf{B}}{B^2} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} = \Omega r \sin \theta \quad (1.7)$$

で共回転しようとする。この傾向が強いと、

$$r \sin \theta = c/\Omega \equiv R_L \quad (1.8)$$

で光速に達する。この限界面を light cylinder (lc) とよび、ここで $v \rightarrow c$ ならローレンツ因子が非常に大きくなり、プラズマ慣性 γm が増大して、電磁力優勢の仮定は崩壊する。このように、 \mathbf{E}_\perp が共回転を通して非電磁力 (遠心力) 加速を誘導するような加速を「 \mathbf{E}_\perp 加速」と呼ぶことがある。別の表現をすると、**強い起電力により共回転が lc に達したために起こる強い加速**とも言え、「遠心力加速」と呼ばれることもある。

この後議論されるが、force-free 近似の研究において $E > B$ が現れることがあり、これも強い電磁誘導による force-free の崩壊 = 慣性の増大の現象と考えられる。

1.2 Vacuum model & Electrosphere

プラズマ供給が星表面からのみに限定される場合 (対生成がなく、質量降着もない)、Electrosphere が形成されることが知られている (図 1.1)。

Electrosphere については以下のことが知られている：

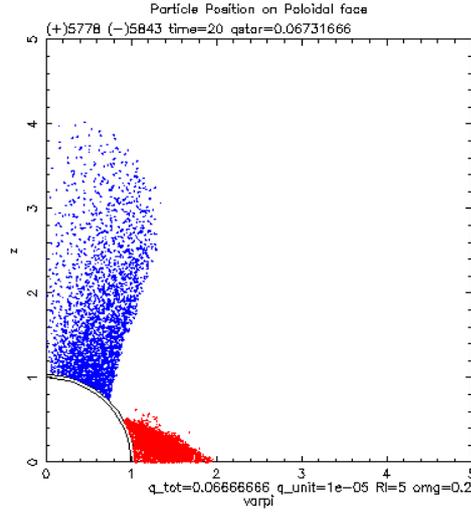


図 1.1: Electrosphere with particles extracted from the star surface.

1. Electrosphere は完全に電荷分離したプラズマの雲で、pole 上の domes と equator belt よりなっている
2. 雲の中は $E_{\parallel} = 0$ で、間 (中緯度) は真空のギャップでそこでは $E_{\parallel} \neq 0$ である
3. プラズマ雲と周りの真空との境界面は安定である。
4. 系の全電荷はフリーパラメーであり、これがゼロに近くなるとドームの大きさは lc まで伸びるほど大きくなる。
5. disc sheare のために diocotron instability が equatorical disc に発生し、非常に弱い outflow を生じる。ただし、 lc 近くでは相対論的効果で diocotron instability は抑制される。[Cerutti & Philippov(2017)]
6. gap は pair creation に対して不安定である。pair creation が始まると outger gap が形成されることが particle simulation で示された。[Wada & Shibata(2007)]

パルサーとして観測される中性子星程度の磁場強度と回転があれば、electrosphere は、ペア (電子陽電子対) 生成に対して不安定なので、ペアプラズマの outflow を伴う active な磁気圏に移行すると考えられる。磁場が弱く、回転が遅い場合でペア生成がないときには Electrosphere を持つ中性子星になり放射はなく死んだパルサーになるだろう。

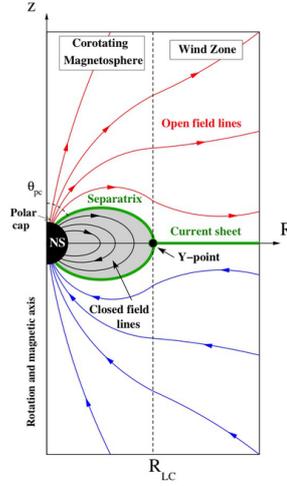


図 1.2: 軸対象 force-free 磁気圏の概念図。

1.3 The force-free model (steady state)

第 0 近似として force-free の仮定での磁気圏構造の研究が行われた。「ペア生成が盛んに起こり磁気圏は十分に密度の高い plasma で満たされている」との暗黙の仮定があることは、先に指摘した通りである。force-free approximation は

$$\rho_e \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0 \quad (1.9)$$

と表せる。

1.3.1 Axisymmetric steady model with a dipole source field

force-free equation は多くの研究者によって数値的に解かれた。特に、[Timokhin (2006)] に詳しい解析がある。

図 1.2 のように、open-close の磁場構造を持つ。全領域で force-free になる解はないと思われている。無限に薄い赤道の current sheet と閉じた磁場と開いた磁場の境界層 (separatrix) は解かれていない。人為的に設定された境界である。また、force-free eq. はプラズマ慣性が入っていないので加速については言えない。

(以下、電位の極性は電流の方向は磁化軸と回転軸が平行な場合で書いている。反平行の時が極性は逆になる。)

axisymmetric force-free 解のその他の特徴と問題点:

- 無限に薄い面電流が仮定されている；その場所は、open-magnetic-flux region と close-magnetic-flux region の境界面 (separatrix) と赤道面である。separatrix と赤道面の currentsheet の接続部分を Y-point と呼ぶ。これら面電流が流れる領域の物理は明確でない。
- 「プラズマの慣性がないのになぜ磁場が開けるか」については、磁場による effective mass があるという人もいる。(個人的には納得していない。current sheet (force-free が破れている領域) が原因を握っていると思う。(つまり、人為的に入れた境界条件によるもので解には境界条件依存性がある)
- それ以外の境界条件は、中心で自転するダイポール磁場をもった電気伝導性の高い星があること、遠方で開いた磁場、lc で解は regular であることである。

lc で non-singular にするために、poloidal current function

$$I(\Psi) = B_\phi / \varpi \quad (1.10)$$

の自由度を使っている (開いた磁束の量と分布を調整する)。開いた磁場領域に流れる電流は内向きが優勢で、外向きの電流が足りなくなる (電気的中性を保つために)。この問題を避けるために、外向きの調整電流を導入し、無限に薄い current sheet に (人為的に) 流す結果となっている。

- force-balance を満たすためには、separatrix は負に、赤道の current sheet は正にの面電荷を持たなければならない。この領域の粒子加速・加熱 (圧力) を考えれば面電荷は消失するかもしれない。(試みは後述)。
- Y-point の位置 $\varpi_Y (< R_L)$ が異なる解の family が得られる。Y-point の位置は $\sim R_L$ と思われるが、 $\varpi_Y = R_L$ だとそこで磁場が発散し物理的に受け入れられない。
- force-free 解では (一応) 開いた磁気フラックスがいくらかが求められる。開いた磁束にある電位差が利用可能な電圧になる。Polar Cap のサイズも決められる。磁場に沿った磁気圏で循環する電流も求められる。これらの値は Y-point の位置や境界条件の設定により色々な値が求められているが、おおむね次元解析からわかる値になる。

$$V_{\text{eff}} = f_V \frac{\mu\Omega^2}{c^2} \quad (1.11)$$

$$R_{pc} = f_{pc} \left(\frac{R_*}{R_L} \right)^{1/2} R_* \quad (1.12)$$

$$I_{\text{eff}} = f_I \frac{\mu\Omega^2}{c} \quad (1.13)$$

$$L = f_L \frac{\mu^2\Omega^4}{c^3} \quad (1.14)$$

概して、force-free にした皺寄せ (矛盾) を解いていない境界面に押し込めた感じ。

1.4 Time-dependent force-free simulation

定常解の確認と斜め回転の議論は Time-dependent force-free simulation によって行われた。force-free の式を \mathbf{j} について解いて

$$\mathbf{j} = c\rho_e \left(\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right) + \frac{c}{4\pi} \frac{\mathbf{B} \cdot \nabla \times \mathbf{B} - \mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{E}}{B^2} \mathbf{B} \quad (1.15)$$

が得られ、 $\rho_e = \nabla \cdot \mathbf{E}/4\pi$ があるので、これらを Maxwell eq. に代入すると、発展方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{B} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad (1.16)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (1.17)$$

を数値的に解くことができる。[Spitkovsky(2006)] 結果、force-free model の光度として

$$L \approx \frac{\mu^2 \Omega^4}{c^3} (1 + \sin^2 \alpha) \quad (1.18)$$

が得られた。ここで、 α は磁化軸の回転軸との傾き。

磁気圏全体で force-free ではなく、一部で force-free が破れて全体として self-consistent な構造になる性質があるので、force-free が破れる部分をどう扱うかが問題となる。そしていろいろな方法が試されてきた。(1.15) の第二項をどう扱うかが問題。[Spitkovsky(2006)] では、元々この項は perfect conductivity の拘束 ($\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}/c = 0$) から出てきたので、この項をダイレクトに採用するのではなく、time step ごとに、 $\mathbf{E}_{\parallel} = 0$ とすることで置き換えた。次に、解いていくと $E > B$ になり force-free が破綻する部分が現れた時の対応が必要になる。[Spitkovsky(2006)] では、 $E > B$ が現れたら $E = B$ と置き、電場方向に粒子加速が起こって電流が流れる状況であると考えられるので $j_{\perp} = \sigma_{\perp} E$ の電流を流すことにする。(通常の領域では、 $j_{\perp} = 0$)。これによって磁場がひっくり返る current sheet を再現できるらしい。軸対象の結果は図 1.3

(若干の補足) simulation 開始後、 $0.6R_L$ あたりに current sheet が最初形成され、時間をかけて l.c. に向かって移動して Y-point の位置はほぼ R_L に定まる。定期的に plasmoid を出しながら振動する。図の b) はスナップショットで、実際は振動をする。Y-point が lc の内側に入ったり出たりを繰り返す。plasmoid (O-type or magnetic island) が出る。c) は、Y-point が移動中の磁場強度図。磁場強度は Y-point に向かっていったん減少し、次に増加して、それが頭打ちになり、下がって neutral sheet につながっている。

同様の計算手法は斜め回転でもうまくいった。回転パワーについては、(1.18) 得られた。non-force-free 領域 (Y-point & current sheet) は粒子加速の現場であり、時間変動する場所であると解釈する。観測される多くの現象がこの activity と関係していそうである。

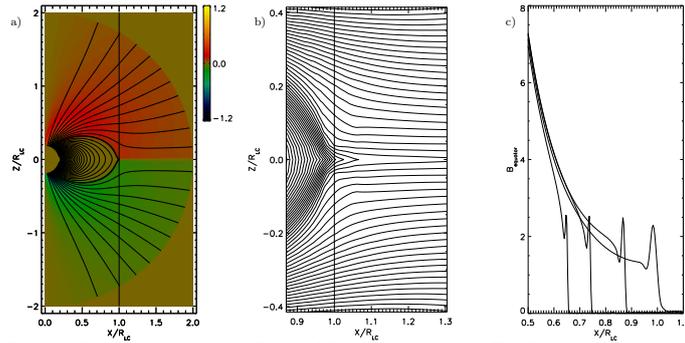


FIG. 1.— Aligned dipole magnetosphere: a) Poloidal fieldlines of steady state solution. Thick line is the fieldline that touches the light cylinder, which is marked by a vertical line. Color represents toroidal magnetic field, normalized by $\mu/(R_{LC}R_g)^{3/2}$; b) Zoom in near the Y-point. Closed lines beyond the light cylinder are periodically thrown open by plasmoid emission; c) Magnitude of the magnetic field on the equator (in units of μ/R_{LC}^2) during the evolution of the closed zone to the light cylinder.

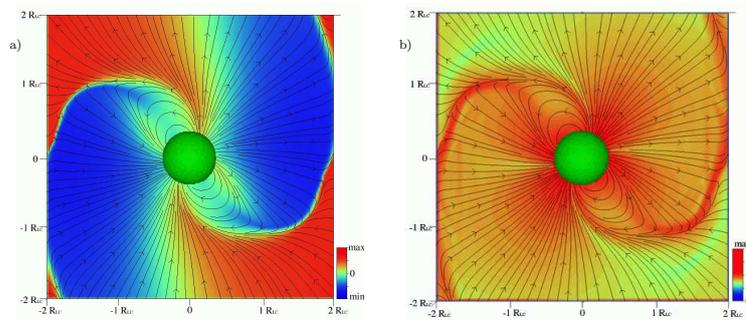


図 1.3: time-dependent force-free simulation での定常状態。(current sheet での人為的な dissipation 処理をしている。[Spitkovsky(2006)])

[Contopoulos(2016)] は $E > B$ の場合の取り扱いについて検討した。(1.15) の磁力線に沿った電流の項を別の書き方をすると

$$\mathbf{j} = \rho_e c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{\partial(\mathbf{E} \cdot \mathbf{B})}{\partial t} \frac{\mathbf{B}}{B^2} + (\mathbf{j} \cdot \mathbf{B}) \frac{\mathbf{B}}{B} \quad (1.19)$$

force-free のアプローチだと $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ を課すので、第二項は消える。また、第三項は(私は納得できないが)条件 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ を満たすために流れる電流だから、「この項は入れないで」電流は第一項のみを採用し、その代わり追加の条件で毎計算ステップで E_{\parallel} を消す方法がとられた。以前は $E > B$ にならない上限が課せられた。しかし、 $E > B$ でも良いではないか! というスキームを考えた。 $(E < B)$ なら粒子は電場に垂直なドリフト運動するが、 $E > B$ なら電場方向に動き出す; 加速される)。粒子の運動は光速で saturate して、放射の反作用と加速が釣り合っている状況であるとした。これを Aristotelian electrodynamics (AE) とよび、電流は

$$\mathbf{j}_{AE} = \frac{\rho_e c \mathbf{E} \times \mathbf{B} + \rho_0 (E_0 \mathbf{E} + B_0 \mathbf{B})}{B^2 + E_0^2} \quad (1.20)$$

になる。こおで B_0, E_0 は電場と磁場が平行になる系での強度で、反平行に進む電荷のそれぞれの密度の和が $\rho_0 = \rho_+ + |\rho_-|$ である。電流を決めるにはこの条件は十分でなく、電荷の供給についての条件が必要である。Gruzinov (2013) はこの点に関して詳しく検討していて、電荷が星表面のみから供給される場合には Poyinting energy の 30–50% が粒子加速に行き、プラズマが至る所十分に供給される場合は 20% 以下になることを示している。Gruzinov (2014) はさらに $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ という条件が FF 領域だけでなく、FF が破れた領域においても成り立つケースを見出した。以上の経緯から [Contopoulos(2016)] では以下のように計算した:

(1) まず、電流は

$$\mathbf{j} = \frac{\rho_e c \mathbf{E} \times \mathbf{B} + |\rho_e| c E_0 \mathbf{E}}{B^2 + E_0^2} \quad (1.21)$$

ここで、 $E < B$ なら $E_0 = 0$ 、 $E > B$ なら $E_0 = (E^2 - B^2)^{1/2}$ とする。

(2) Maxwell's eq. で時間発展を追う、

(3) E_{\parallel} が発生したらゼロにする。

以上の設定での計算結果は、current sheet での dissipation で非常に大きな部分 say 50%, が Poyinting energy から dissipate した。そして、薄い current sheet や separatrix current は消滅した (図 1.4)。

(まとめ) force-free の数値解では force-free が破れるところが現れた。non-zero E_{\parallel} が現れたり、 $E > B$ になったり。この領域を著者によって色々の処方で回避する計算コードで答えを求めている。図 1.5 では処方によって separatrix current sheet が出たり消えたりする様子が比較されている。

磁気圏全体を force-free で表現することはできない。どこでどのような物理過程で force-free が破れるかは未解決問題として残った。

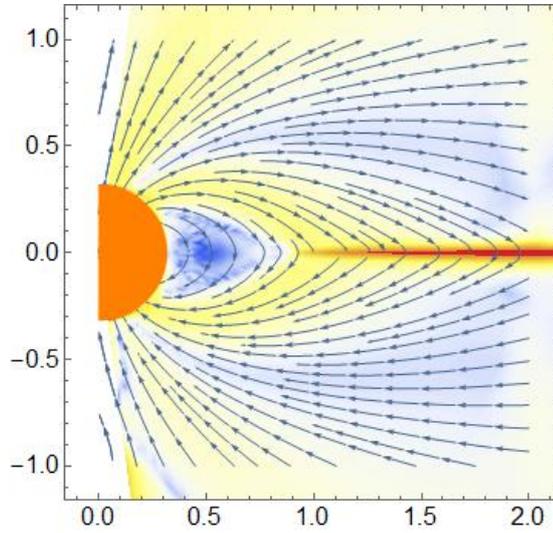


図 1.4: $E > B$ の領域で dissipation を入れて、かつ、 $E_{\parallel} = 0$ としたモデル。[Contopoulos(2016)]

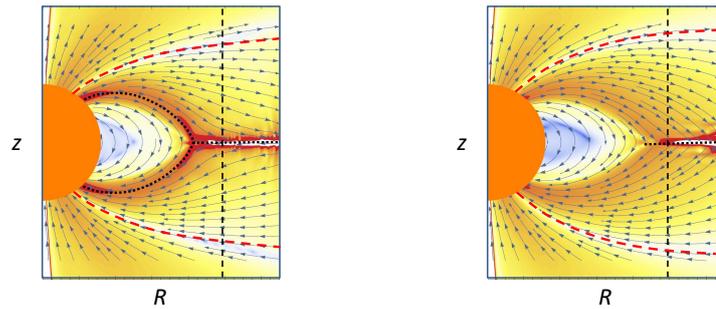


図 1.5: force-free コードにおいて $E > B$ を禁止するコード (左) としないコード (右) の比較。separatrix current sheet が現れたり消えたりする。[Contopoulos(2016)]

2 Non fore-free model; toward a realistic magnetosphere

2.1 E_{\parallel} accelerator: local modeling

E_{\parallel} による加速が起こりやすい領域と起こらない領域がある。

- $E_{\parallel} = 0$ の領域 十分な準中性プラズマが供給されている場所。
 - $n_{\pm} \gg |\rho_e|/e$ では、 $\rho_e - \rho_{gj} = 0$ と容易になるので、 $E_{\parallel} = 0$ が実現するだろう。ペア生成領域と繋がった磁束が候補。
 - ちょうど $\rho_e = \rho_{gj}$ になるように完全電荷分離したプラズマがある場所。以下で述べる sub-GJ current 領域。
 - 電流の方向が入れ替わるところ; current neutral zone も候補。(Yuki & Shibata 2017)
- $E_{\parallel} \neq 0$ の領域 プラズマが希薄、 $n_{\pm} \lesssim |\rho_e|/e$ な場所では沿磁力線電場が非常に発生しやすい。

この状況では、その場所の局所的な GJ 電荷密度 $\rho_{gj} = \nabla \cdot \mathbf{E}/4\pi$ と大局的に決まる電流密度の関係で電場の発生が決まる。(電流は遠いところから流れてくるので局所的でなく大局的。) GJ 電流密度を $j_{gj} = \rho_{gj}c$ で定義し、

$$j > j_{gj} \quad \text{super-GJ current} \quad (2.1)$$

$$j < j_{gj} \quad \text{sub-GJ current} \quad (2.2)$$

で場合分けすると、super-GJ の時に E_{\parallel} が発生する (Shibata 1997)。(与えられた電流密度が作る電荷密度が、電場をスクリーンするために必要な電荷密度を超えてしまう、 $\rho_e = \rho_{gj}$ にできない。) また、 ρ_{gj} と逆符号の電荷が電流を運んでいるときも E_{\parallel} が発生する。逆に、sub-GJ current なら $E_{\parallel} = 0$ になる。

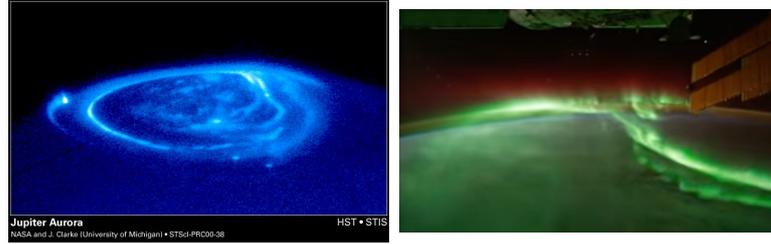
E_{\parallel} の発生、粒子加速はペア生成を起こして、 E_{\parallel} を抑制し、 E_{\parallel} を抑制するとペア生成が停止して、再び E_{\parallel} が発生するので、領域は間欠的で時間変動するものになる可能性が高い。(see e.g., Timokhin 2010) し、あるいは、マージナルなマイルドな状態で定常状態が実現するかもしれない。

具体的な E_{\parallel} の発生の候補地

Polar cap core 電流は内向き ($j < 0$) で、これは、わずかな駆動電場で星表面から電子流でまかなうことが可能である。電子流の outflow が電流が磁気圏電流を作る。これが Super-GJ だと E_{\parallel} 加速が起こる。オーロラのような円環領域で起こる。場所は大局的電流系で決まり、まさに auroral oval とそっくりな構造が期待される。

2 NON FORE-FREE MODEL; TOWARD A REALISTIC

2.2 Magnetohydrodynamics (MHD): global modeling MAGNETOSPHERE



木星のオーロラと ISS から見た地球のオーロラ

Polar cap outer annulus この領域で要請される電流が外向き (Polar cap core と逆) なので、イオンの外向きの流れか、電子の内向きの流れになる。前者の場合は空間電荷が正、GJ 電荷が負なので (1.6) の左辺はゼロになりえず、加速電場が発生する。後者の場合は sub-GJ であれば加速は無く、super-GJ であれば Polar cap core と同様に加速が起こる。

外部磁気圏から加速された粒子が降ってくるのが考えられる。後述する Outer gap で加速された粒子、Y-point 近傍で起こるリコネクションで加速された粒子が候補となる。

Outer gap は $\rho_{gj} = 0$ の面近傍で考えるので磁気圏電流があるかぎりどんな場合も super-GJ で電場加速が起こると考えられる。Outer gap の発生する位置は、ギャップに星側から入っていく電流と外部から振り込んでくる電流の大きさの差引でどこにくるかに不定性がある。(Takata et al. 2006)

Separatrix の面電荷(負)があるとすれば、電荷密度が非常に大きくなりえて、Y-point から電子の供給が少なければ、電場が発生するだろう。次節の Separatrix gap。

2.2 Magnetohydrodynamics (MHD): global modeling

force-free model の延長上にあるのは、特殊相対論での電磁流体近似 (sRMHD) になる。プラズマの慣性が入って加速を扱える。例えば、パルサー風はどこまで加速されるかを調べられる。プラズマの供給があることを暗黙の了解にするのは force-free と同じ。通常は ideal-MHD 近似 $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}/c = 0$ を使うので $E > B$ なら破綻する。

2.2.1 Open field region with inertia: Split monopole model

Radial field を仮定すると解析解がある (Michel's solution)。遠心力加速は有効ではない: Poynting energy dominant になる。

Radial とは限らない一般の Open field lines に対する MHD 近似では split monopole とした場合の数値解がある: (1) 加速は弱くて Poynting energy dominant $\sigma_\infty \gg 1$ になる (遠心力加速は有効でない)、(2) relativistic wind だと collimation は起きない。

split monopole solution は 斜め回転でもあんまり変わらない。[Bogovalov(1999)]

2.2.2 Resistive MHD with dipole seed field

sRMHD の取り扱いで ideal-MHD condition に対しては否定的な見解が出された。

- 等エントロピー流が自動的に衝撃波 (エントロピー生成) を生むように、ideal-MHD で回転磁気圏の解を構築しようとするとき非 Ideal-MHD を導くことが示された：つまり、必然的に ideal-MHD が破れて Dissipation が発生する。(Mestel & Shibata, 1994)
- Contopoulos et al. (1999) によって至る所 force-free の軸対称グローバル解が得られたが、結果として、equatorial current sheet, Y-point, separatrix current sheet に force-free が成立しない境界層を導入せざるを得なくなった。
- [Uzdensky (2003)] によって force-free 近似が Y-Point で破綻することが示された。
- など

その他、多くの研究から、徐々に dissipation の必要性が認識されて来た。

[Komissarov(2006)] は time-dependent sRMHD with axisymmetry and dipole seed magnetic field で定常解を求めた。ideal-MHD だが、数値的な resistivity が入っていることで事実上 resistive MHD (非物理的な散逸あり) であると理解される。数値的な安定のために細工を色々しているのでその辺りには問題を残す計算になった。結果の要点:

1. open-close と Y-point の構造が再現した。
2. open magnetic flux の上では force-free で Poynting energy dominant wind. **open field region はプラズマを入れても効かない (force-free は良い矜持になっている)**
3. numerical dissipation のために一部の磁場は current sheet で閉じる (物理過程は不明)
4. separatrix current sheet ができた。(なぜかは不明)
5. Y-point は lc にできる (force-free model では free parameter だった) (なぜかは不明)
6. どういう物理的な機構で Y-point で磁場の発散が止まるかわからない
7. equatorial current sheet の力学は不明：例、上下からの磁気圧を何で支えているか。
8. どれくらいの Poynting energy がプラズマに行くかは不明。

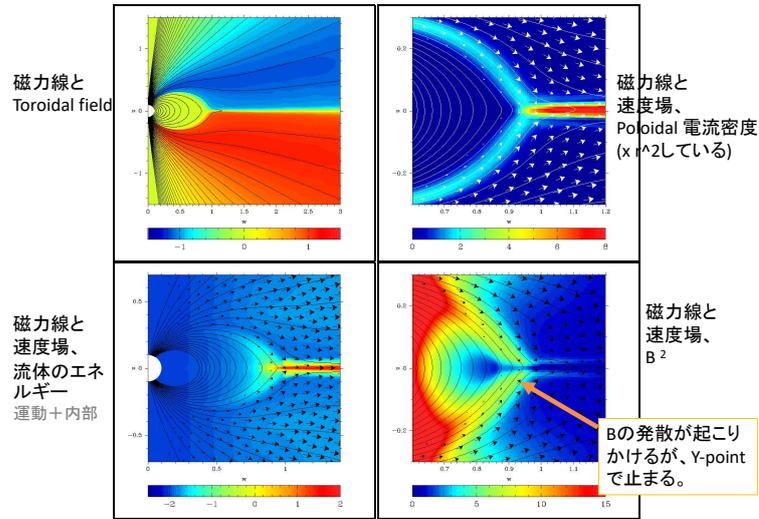


図 2.1: 軸対象磁気圏に対する MHD simulation で得られた定常解の例 [Komissarov(2006)]

参考文献

[Andaç et al.(2022)] Andaç, I. C., Cerutti, B., Dubus, G., et al. 2022, *Astron. Astrophys.*, 661, A130. doi:10.1051/0004-6361/202243152 "Intra-pulse variability induced by plasmoid formation in pulsar magnetospheres"

直交回転 PIC 2D simulaton で current sheet のリコネクションの時間変動が観測される時間変動に対応しているとの意見。Crab の可視光での検証。

[Ardavan(2021)] Ardavan, H. 2021, *MNRAS*, 507, 4530. doi:10.1093/mnras/stab2354 "Radiation by the superluminally moving current sheet in the magnetosphere of a neutron star"

theory: 要チェック : current sheet etc

[Belyaev(2015)] Belyaev, M. A. 2015, *MNRAS*, 449, 2759 "Dissipation, Energy Transfer, and Spindown Luminosity in 2.5D PIC Simulations of the Pulsar Magnetosphere"

PIC: 重要 2.5D PIC 電子陽電子は表面の電場とギャップ電場に比例して入れる。polar cap, separatrix の current sheet, Y-Point で電場発生、他は force-free 的で Yamagata モデルと似ている。

[Belyaev(2015)] Belyaev, M. A. 2015, *Nature Astronomy*, 36, 37 "A 2.5D axisymmetric, relativistic, electromagnetic, Particle in Cell code with a radiation absorbing boundary"

PIC code 放射を吸収する境界

[Benáček et al.(2021)] Benáček, J., Muñoz, P. A., & Büchner, J. 2021, arXiv:2111.05262
”Pulsar Coherent Radiation by Linear Acceleration Emission Mechanism”

PIC(1D): Polar cap で beam 不安定とバンチの比較して、後者が優勢で、電波放射機構の説明になると思われる。

[Bogovalov(1999)] Bogovalov, S. V. 1999, Astron. Astrophys., 349, 1017 ”On the physics of cold MHD winds from oblique rotators”

MHD: 重要 : split-monopole model で oblique も調査。align でも oblique でもほとんど構造は変わらず、Poynting dominant wind になる。

[Brambilla et al.(2017)] Brambilla, G., Kalapotharakos, C., Timokhin, A., Harding, A., & Kazanas, D. 2017, arXiv:1710.03536 ”Electron positron pair flow and current composition in the pulsar magnetosphere”

[Brambilla et al.(2018)] Brambilla, G., Kalapotharakos, C., Timokhin, A. N., et al. 2018, ApJ., 858, 81. doi:10.3847/1538-4357/aab3e1 ”key global PIC”

PIC: 要チェック PIC particle source を星近傍に限定した計算。3D PIC 電子陽電子については星表面近くで手で入れる。Y-Point の外で陽電子加速を指摘

[Bucciantini et al.(2015)] Bucciantini, N., Pili, A. G., & Del Zanna, L. 2015, arXiv:1511.02719 ”Modeling the structure of magnetic fields in Neutron Stars: from the interior to the magnetosphere”

MHD: 星の内部磁場と外の磁場を合わせて解く試み

[Cerutti & Beloborodov(2016)] Cerutti, B., & Beloborodov, A. 2016, arXiv:1611.04331
”Electrodynamics of pulsar magnetospheres”

review よくまとまった Review paper ここでの Global PIC simulation に関するまとめ : (1)light cylinder の内側でしかペアが作られないとすると、electrosphere model に近いものになって inactive になる。一方、light cylinder 近傍でのペア生成を許すと active な磁気圏になる。(Chen and Beloborodov 2014)

[Cerutti et al.(2015)] Cerutti, B., Philippov, A., Parfrey, K., & Spitkovsky, A. 2015, MNRAS, 448, 606 ”Particle acceleration in axisymmetric pulsar current sheets”

PIC: 重要 赤道面 Y-point 近傍での PICsimulation プラズマ密度がパラメータになる。密度が高いケースで 30%の磁気圏エネルギーが加速に行った。加速は Y-Point から 1-2 lc の間で起こる。Y-Point 近傍で positron は外向きに、electron は内向き(星に向かって)加速。

- [Cerutti & Philippov(2017)] Cerutti, B. & Philippov, A. A. 2017, *Astron. Astrophys.*, 607, A134. doi:10.1051/0004-6361/201731680 "Dissipation of the striped pulsar wind"
Pulsar wind:
- [Cerutti et al.(2020)] Cerutti, B., Philippov, A. A., & Dubus, G. 2020, *Astron. Astrophys.*, 642, A204. doi:10.1051/0004-6361/202038618 "Dissipation of the striped pulsar wind and non-thermal particle acceleration: 3D PIC simulations"
PIC: current sheet でのシミュレーション。wind 内の current sheet を想定しているように見える。精度的にはあまり信用できない？
- [Chen & Beloborodov(2014)] Chen, A. Y., & Beloborodov, A. M. 2014, *Astrophys. J. Letter*, 795, LL22 "Electrodynamics of Axisymmetric Pulsar Magnetosphere with Electron-Positron Discharge: A Numerical Experiment"
PIC: 重要 : PIC global separatrix gap の主張
- [Chen & Beloborodov(2017)] Chen, A. Y. & Beloborodov, A. M. 2017, *ApJ.*, 844, 133. doi:10.3847/1538-4357/aa7a57 "Particle-in-Cell Simulations of the Twisted Magnetospheres of Magnetars. I."
PIC simulation magnetar マグネターのモデル。マグネターの PICsimulation. ダイポール磁場をある適当なタイムスケールで捻ると誘導電場で対生成できる。プラズマの発展を解く。
- [Contopoulos(2016)] Contopoulos, I. 2016, *MNRAS*, 463, L94 "Are there two types of pulsars?"
MHD resistive: global プラズマの供給が制限された場合は rotation power は粒子に行く (50%)、outger gap や Y-point で大量のプラズマが作られれば force-free に近くて粒子にはあまりいかない。
- [Contopoulos(2016)] Contopoulos, I. 2016, *Journal of Plasma Physics*, 82, 635820303 "The Equatorial Current Sheet and other interesting features of the Pulsar Magnetosphere"
Ioannis Contopoulos
- [Contopoulos(2019)] Contopoulos, I. 2019, *MNRAS*, 482, L50. doi:10.1093/mnrasl/sly183 "Current closure in the pulsar magnetosphere"
theory: 再読 global model での電流の起源と同循環しているかの考察。参考とすべきか？

- [Cruz et al.(2022)] Cruz, F., Grismayer, T., Iteanu, S., et al. 2022, *Physics of Plasmas*, 29, 052902. doi:10.1063/5.0085847 "Model of pulsar pair cascades in non-uniform electric fields: Growth rate, density profile, and screening time"
解析解 Timokhin の振動解を解析的に表現したのかな？
- [Contopoulos et al.(2020)] Contopoulos, I., Pétri, J., & Stefanou, P. 2020, *MNRAS*, 491, 5579. doi:10.1093/mnras/stz3242 "Hybrid numerical simulations of pulsar magnetospheres"
theory: 要チェック polar cap と Y-Point のリンク
- [Gourgouliatos & Lynden-Bell(2019)] Gourgouliatos, K. N., & Lynden-Bell, D. 2019, *MNRAS*, 482, 1942 "Coupled axisymmetric pulsar magnetospheres"
force-free: 一様じばの中に置かれたダイポール磁場のパルサー (軸対象) 連星パルサーの片方のパルサーの状況に応用できる。current sheet が途中で終わって、磁気圏がある領域に閉じ込められる感じになるかもしれない。
- [Gralla et al.(2017)] Gralla, S. E., Lupsasca, A., & Philippov, A. 2017, *ApJ*, 851, 137. doi:10.3847/1538-4357/aa978d "Inclined Pulsar Magnetospheres in General Relativity: Polar Caps for the Dipole, Quadrupole, and Beyond"
MHD: or just modeling 一般相対論を入れた電磁場決定。ただし、その物理的意味は不明。表面が多重極も OK とする。なぜか、グローバルな磁場を決めていて、そこから電流を計算して polar cap を決めている。物理的意義は感じられない。
- [Hakobyan et al.(2018)] Hakobyan, H., Philippov, A., & Spitkovsky, A. 2018, arXiv:1809.10772 "Effects of synchrotron cooling and pair production on collisionless relativistic reconnection"
PIC: 磁気リコネクションに対する PIC simulation (2 Dimensional)。加速された粒子によるシンクロトロン放射が two-photon pair creation することを入れている。multiplicity $\sim 10^2$ で加速を抑制することによって、リコネクション領域のスペクトルのカットオフを下げる効果があると指摘。パルサーに限らず一般的なリコネクション。
- [Hirotani(2015)] Hirotani, K. 2015, *Astrophys. J. Letter*, 798, LL40 "Three-dimensional non-vacuum pulsar outer-gap model: Localized acceleration electric field in the higher altitudes"
Outer Gap model: null-surface の周りの discharge の計算。Poisson eq. と粒子の分布は Boltzman eq. を積分。電場の分布やペアの生成を計算。電流が自己完結的に決められたのか？(外部電流なし?) 不明。

[Hu(2021)] Hu, R. 2021, Ph.D. Thesis "Pulsar, PIC and Pigeon"

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021PhDT.....4H/abstract> PIC: global simulation 参考になるかも。The dissertation PIC and its applications in studying the magnetospheres of neutron stars Pigeon, an open-source PIC simulator written by the author in modern C++, algorithms and engineering difficulties of the PIC technique an axisymmetric dipolar rotator with self-consistent gamma ray photon emission and pair creation, the study of which could reveal valuable information of the mechanism of the pulsars. we are able to perform the simulation with a 4096×4096 high resolution grid. a Lorentz factor of 10000 of the polar cap potential drop, which in turn enables good separations of energy levels and hence makes the simulation closer to representing the real-life pulsars. With the high resolution, we are also able to study the Y point more closely, where we find that the angular momentum conservation dictates the process of magnetic flux surface crossing that is responsible for the release of electromagnetic energies into the plasma.

[Hoshino(2020)] Hoshino, M. 2020, ApJ., 900, 66. doi:10.3847/1538-4357/aba59d "Stabilization of Magnetic Reconnection in the Relativistic Current Sheet"

PIC reconnection PIC それほど早くない reconnection rate について

[Kalapotharakos et al.(2018)] Kalapotharakos, C., Brambilla, G., Timokhin, A., et al. 2018, ApJ., 857, 44. doi:10.3847/1538-4357/aab550 "Three-dimensional Kinetic Pulsar Magnetosphere Models: Connecting to Gamma-Ray Observations"

key global PIC 3D PIC 電子用電子対は距離の関数で一様に注入 (非物理的)、注入量がパラメーター加速電場の発生場所は理論と生合成がなかった。密度の高いときは磁気中性面でできると主張。

[Komissarov(2006)] Komissarov, S. S. 2006, MNRAS, 367, 19 "Simulations of Axisymmetric Magnetospheres of Neutron Stars"

MHD: resistive MHD による time-dependent simulation (aligned rotator). 時間を追っていくと Y-point は lc に漸近する。force-free model だと Y-point の位置はフリーパラメータになるが、実際は Y-point が内側になるのは不安定で、 lc に漸近するのが答えだろう。解き方の概略: 軸対象で (r, θ) 座標。時間発展を追う。中心は dipole 磁場、外側は radiative boundary で反射が戻ってこないようにする。

当初は Maxwell eq. と Ohms law (流体はない)。current sheet 以外では force-free 近似、内部では電流は $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_d$ の形で、最初の項は Ohm's law で $E > B$ になったら、抵抗をすごく大きくする、二つ目の項は $c\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$ だと光速を超えるので調整を入れている (詳しくは論文)。current sheet で磁場が開くかどうかは numerical dissipation の入れ方 drift current の入れ方で変わってくる。彼らの最初の計算例で

は、current sheet で磁場は開かず、閉じた。resistive EM approach は dissipation の入れ方によって解が変わるので信用できないと判断した

次のステップ：彼らは MHD (慣性と圧力を入れて) に方針を変えた。今度は Ohm's law でなく ideal-MHD とする。それでも計算は難しく：(1) 人為的に慣性を大きくする、(2) dead zone で流体を動かないようにする、など手を加えて定常解を得ようとしている。詳しくは論文にあるが実際に計算していないものから見るとなかなか理解が難しい。

open-close と Y-point の構造が再現した。ただし、numerical dissipation のために current sheet 内部で磁場は閉じている。return current は current sheet だけでなく低緯度の厚みを持った層にある。遠心力加速は開いた磁場上では見られなかった (図, 左下)。

force-free が破れるのは一点, Y-Point 近傍。force-free で予言された B^2 の発散が起こりかけるが、Y-Point 近傍で止まる。Y の角度は 50 度で、圧力を入れた Y-Point の Goodwin et al. (2004) の 56.6 度に近い。Y-Point で実際どういう効果で force-free が崩壊するかは今後の課題として残る。

Open magnetic flux は $c\Psi/\mu\Omega = 1.26 - 1.27$ を得ている。1.23 (Contopoulos, 2005; Timokhin 2005), 1.27 (Gruzinov, 2005), 1.36 (Contopoulos, 1999) と比較すべき。回転パワーは $L_{\text{rot}} = 1.1(\mu^2\Omega^4/c^3)$ だった。

磁力線の角速のグラフ (fig.6) について、彼らは numerical effect 出ないか? としている。グリッドを小さくすると角速度が揺らぐ領域は薄くなるが、振幅は同じと言っている。これは沿磁力線加速がある時のパターンのように思われるがどうだろう。彼らは述べていない。

current sheet を支えるために圧力の効果がどう寄与するか、完成の寄与は? いずれも open question

[Mahlmann & Aloy(2022)] Mahlmann, J. F. & Aloy, M. A. 2022, MNRAS, 509, 1504. doi:10.1093/mnras/stab2830 "Diffusivity in force-free simulations of global magnetospheres"

key force-free MHD force-free 数値拡散を調整して物理的 dissipation が global な構造にどういふ変化を与えるかを調査。要チェック。

[Mestel & Shibata(1994)] Mestel, L., & Shibata, S. 1994, MNRAS, 271, 621 "The Axisymmetric Pulsar Magnetosphere - a New Model"

[Nishikawa et al.(2021)] Nishikawa, K., DuÅlan, I., Köhn, C., et al. 2021, Living Reviews in Computational Astrophysics, 7, 1. doi:10.1007/s41115-021-00012-0 "PIC methods in astrophysics: simulations of relativistic jets and kinetic physics in astrophysical systems"

PIC code open source の紹介

[Philippov & Spitkovsky(2014)] Philippov, A. A., & Spitkovsky, A. 2014, *Astrophys. J. Letter*, 785, L33 "Ab-initio pulsar magnetosphere: three-dimensional particle-in-cell simulations of oblique pulsars"

PIC global simulation の初期の論文

[Philippov & Spitkovsky(2018)] Philippov, A. A. & Spitkovsky, A. 2018, *ApJ.*, 855, 94. doi:10.3847/1538-4357/aaabbc "Ab-Initio Pulsar Magnetosphere: Particle acceleration in Oblique Rotators and High-energy Emission Modeling"

PIC 3D: magnetosphere 重要これはやばい。かなり総合的な pic simulation 色々入れている。詳しく読む必要がある。

[Philippov et al.(2014)] Philippov, A., Tchekhovskoy, A., & Li, J. G. 2014, *MNRAS*, 441, 1879. doi:10.1093/mnras/stu591 "Time evolution of pulsar obliquity angle from 3D simulations of magnetospheres"

theory: NS braking torque alignment 磁気圏電流による NS へのトルクから spin axis vs magnetic axis alignment を計算している。磁気圏の構造 vacuum model と force-free model では alignment のスピードが後者の方が遅くなる。

[Philippov et al.(2015)] Philippov, A. A., Spitkovsky, A., & Cerutti, B. 2015, *Astrophys. J. Letter*, 801, L19 "Ab Initio Pulsar Magnetosphere: Three-dimensional Particle-in-cell Simulations of Oblique Pulsars"

PIC: 内容の再チェック必要電子陽電子の入れ方が空間一様で非物理的。精度不足。current sheet で dissipation

[Pétri(2016)] Pétri, J. 2016, *MNRAS*, "General-relativistic force-free pulsar magnetospheres"

455, 3779 <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.455.3779P>
force-free: 一般相対論的 frame dragging を入れた場合の force-free 磁気圏の構造を調べてその効果を調査した。最大で、factor 2 程度の光度増加がある。Poynting flux の角度分布は軸対象では $\sin^2 \theta$ 、斜め回転では、 $\sin^4 \theta$ の依存性があった。

[Pétri(2016)] Pétri, J. 2016, arXiv:1608.04895 "Theory of pulsar magnetosphere and wind"

Review: 基本原理に詳しい Review。特に、ligh-cylinder からのパルス放射の考察がしてある。

[Pétri(2022)] Pétri, J. 2022, *MNRAS*. doi:10.1093/mnras/stac572 "Radiative pulsar magnetospheres: oblique rotators"

- <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022MNRAS.tmp..633P/abstract> MHD: resistive: radiation-reaction limit に粒子の運動方程式を近似して global magnetosphere を調査。パラメータは pair-multiplicity のみ。詳しく読まないといけないが放射減衰が効いた部分と force-free の部分のブレンドで global model を作れるみたい。メインの dissipation は current sheet で起こる。
- [Spitkovsky(2006)] Spitkovsky, A. 2006, *Astrophys. J. Letter*, 648, L51 "Time-dependent force-free pulsar magnetospheres: axisymmetric and oblique rotators"
- Anatoly Spitkovsky (KIPAC, Stanford University)
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ...648L..51S>
- [Takata et al.(2006)] Takata, J., Shibata, S., Hirovani, K., & Chang, H.-K. 2006, *MNRAS*, 366, 1310 "A two-dimensional electrodynamic outer gap model for γ -ray pulsars: γ -ray spectrum"
- Outer Gap: outer gap の 2D モデル、電流分布がパラメータ particle simulation とモンテカルロ cascade simulation のカップル。
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2006MNRAS.366.1310T>
- [Timokhin (2006)] Timokhin A. N., 2006, *MNRAS*, 368, 1055. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.10192.x "On the force-free magnetosphere of an aligned rotator"
- 重要: force-free 磁気圏 (aligned) の基本的な性質が詳しく調べられている。
- [Timokhin & Arons(2013)] Timokhin, A. N., & Arons, J. 2013, *MNRAS*, 429, 20 "Current flow and pair creation at low altitude in rotation-powered pulsars' force-free magnetospheres: space charge limited flow"
- PIC: Polar Cap : ポーラーキャップの電流を force-free model から推定した上で、super-GJ current の時の加速とそれに続くペア生成の PIC simulation (1-Dim)。間欠的になる。
- [Uzdensky (2003)] Uzdensky D. A., 2003, *ApJ*, 598, 446. doi:10.1086/378849 "On the axisymmetric force-free pulsar magnetosphere"
- theory: Y-Point で force-free が破れることの証明。
- [Venter(2017)] Venter, C. 2017, arXiv:1702.00732 "New Advances in Pulsar Magnetosphere Modelling"
- review: 後で、こちらの論文調査に抜けがないかのチェックに使おう。
- [Wada & Shibata(2007)] Wada, T. & Shibata, S. 2007, *MNRAS*, 376, 1460. doi:10.1111/j.1365-2966.2007.11440.x

-
- [Wada & Shibata(2011)] Wada, T., & Shibata, S. 2011, MNRAS, 418, 612 "A particle simulation for the global pulsar magnetosphere - II. The case of dipole field"
Particle: key magnetosphere review2015
- [Zhang(2021)] Zhang, F. 2021, Universe, 7, 455. doi:10.3390/universe7120455 "A Magnetospheric Dichotomy for Pulsars with Extreme Inclinations"
theory: intermittent の出る物理的理由について