

Annual Review of Astronomy and Astrophysics

Pulsar Magnetospheres and Their Radiation

A. Philippov^{1,2} and M. Kramer³

¹Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, New York, NY, USA

²Department of Physics, University of Maryland, College Park, Maryland, USA;
email: sashaph@umd.edu

³Max-Planck Institut für Radioastronomie, Bonn, Germany; email: michael@mpifr-bonn.mpg.de

Chapter 1 – 4 (Magnetospheric theories & simulations)



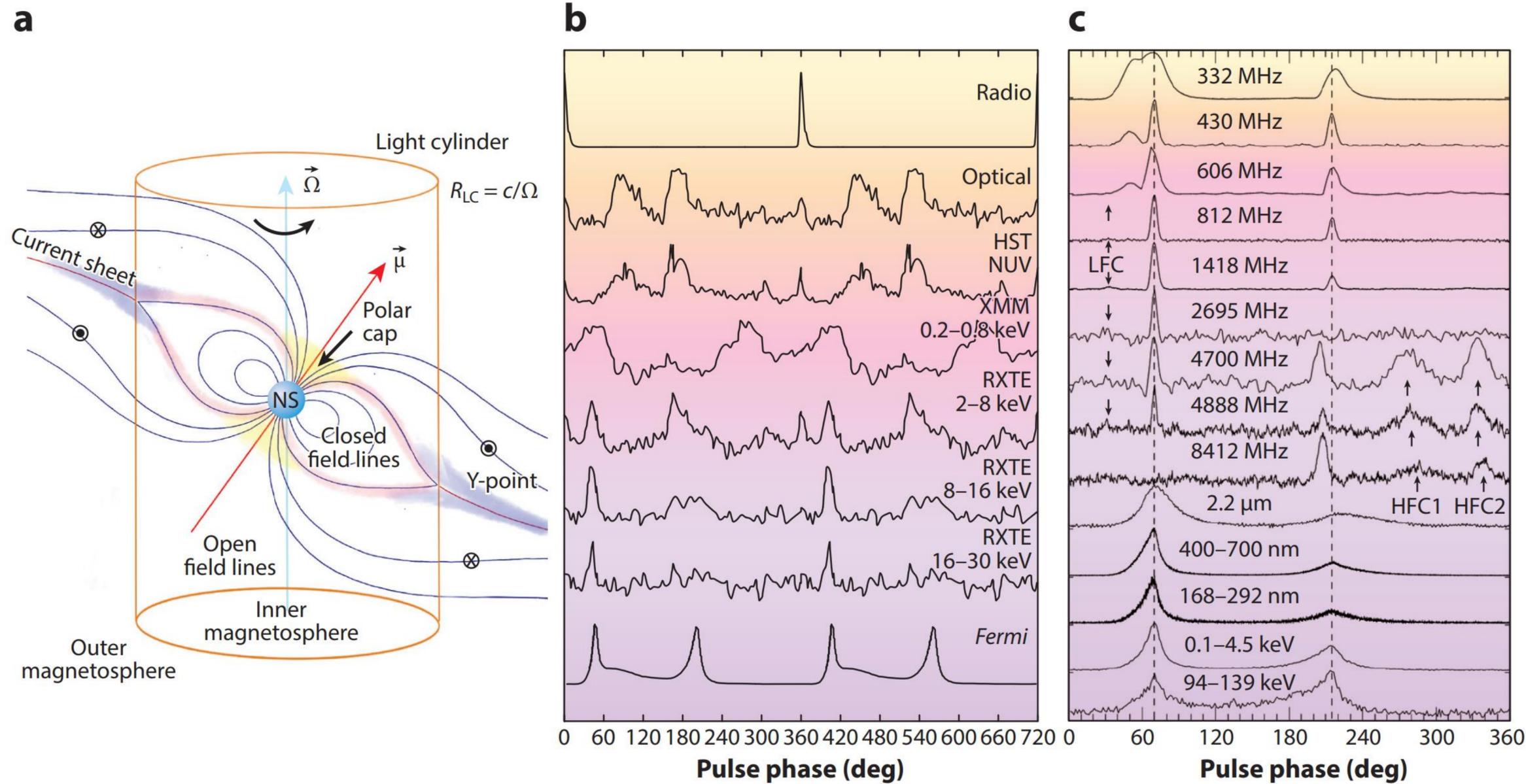
查看我的组会ppt合集
或网页搜索Shunshun
Cao homepage.

曹顺顺
北京大学
物理学院
天文学系
博士研究生

2026.3

共34页 →

1. 介绍 (1/1)



截止该文章发表:
 3000+脉冲星
 ~300毫秒脉冲星
 200+伽马射线脉冲星
 ~100自转供能X射线脉冲星
 ~30磁陀星
 5个磁层辐射光学脉冲星

特点:
 自转周期跨四个量级
 表面磁场跨七个量级

相关的天体源:
 快速射电暴
 其他暂现源

2. 脉冲星磁层理论发展史简要回顾 (1/3)

·最初几年：真空中的旋转磁化球 $L = (2/3)(\mu^2 \Omega^4 / c^3) \sin^2 \chi$

·Goldreich & Julian 1969之后：处处 $E \cdot B = 0$ (Force-Free) 的共转磁层

$$\rho_{\text{GJ}} = \nabla \cdot \mathbf{E}_{\text{cor}} / 4\pi \approx -\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B} / 2\pi c \quad \text{引入磁层电流: } I = j_{\text{GJ}}(\pi R_{\text{PC}}^2) \sim \mu \Omega^2 / c$$
$$j_{\text{GJ}} \approx \rho_{\text{GJ}} c$$

磁层电流激发出磁场的环向分量: $B_\phi \approx 2I / c R_{\text{LC}}$ (光速圆柱附近)

对应的Force-Free电场: $E_{\text{cor}} \approx 2I / c R_{\text{LC}}$

脉冲星外流粒子 (星风) 携带大量电磁场能, 其对应能损率

$$L_0 \approx c R_{\text{LC}}^2 E_{\text{cor}} B_\phi \approx \mu^2 \Omega^4 / c^3$$

这与单纯的磁偶极辐射能损同量级.

2. 脉冲星磁层理论发展史简要回顾 (2/3)

·Sturrock 1971之后：考虑pair production, 偏离 $E \cdot B = 0$, 加速过程

出发点：脉冲星极冠区巨大电势差能加速电子到很高能量吗？

$$\gamma_{PC} = e\Phi_{PC}/m_e c^2 \sim 10^9 (B_*/10^{12} \text{ G})(P/0.1 \text{ s})^{-2}$$

但实际上到不了，因为电子辐射光子---光子转化电子对---电子对屏蔽电场→电势差不能这么大

几个典型参数： $\gamma_{th} \sim 10^6 - 10^7$ Threshold energy for primary particles

$\gamma_{sec} \sim 10 - 10^3$ Secondary particles

$\lambda = n_e/n_{GJ} \sim 10^3 - 10^5$ Cascade multiplicity

·紧随其后：Ruderman & Sutherland 1975

Arons, Scharlemann, Fawley的一系列文章 (~1977~1980)

相关问题：致密星表面是否束缚离子？主流观点：中子星表面有大气

2. 脉冲星磁层理论发展史简要回顾 (3/3)

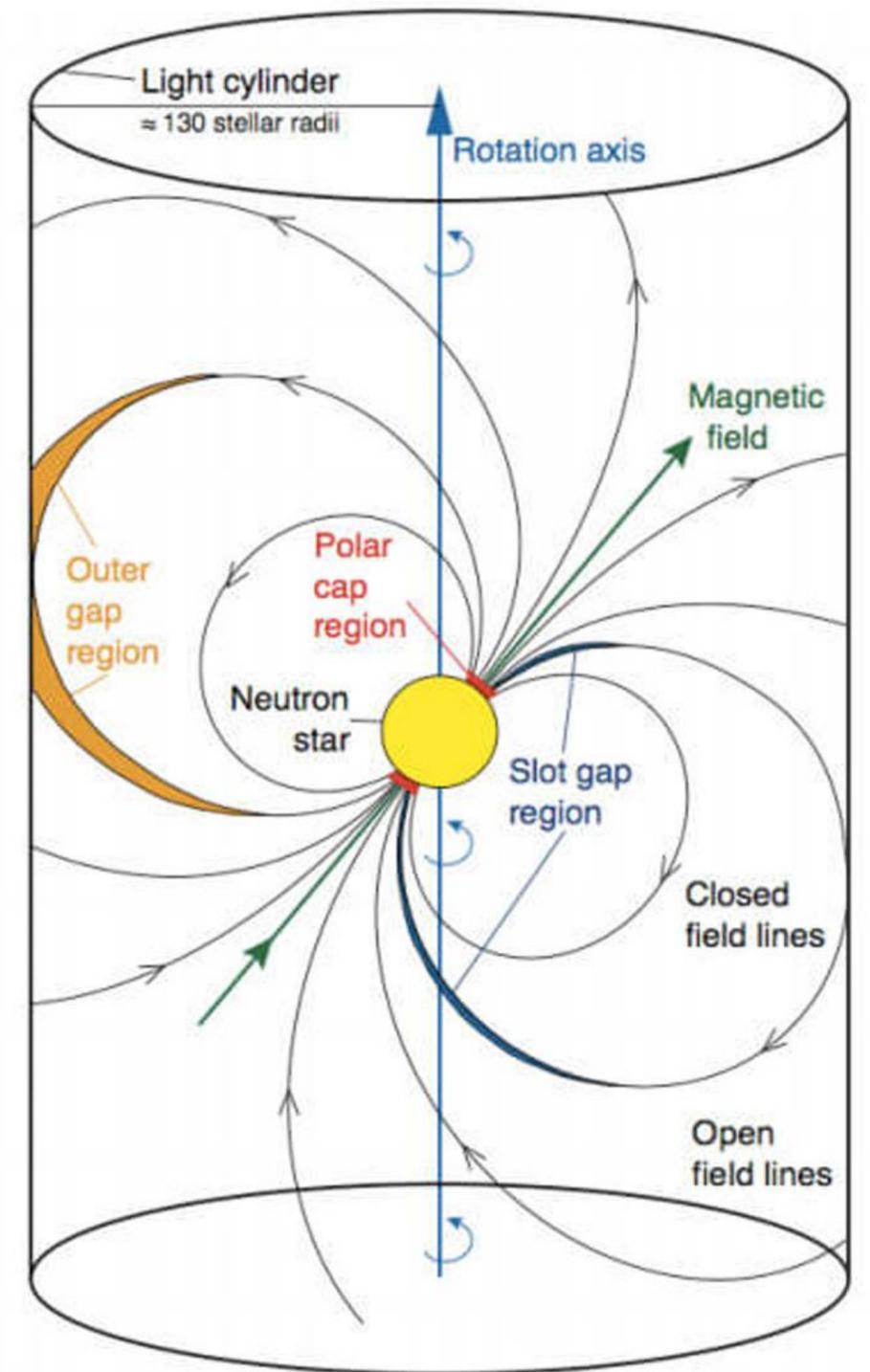
·与此同时以及之后：追求磁层的整体解（磁场、电流分布）

各种唯象gap模型.....

问题：解析模型过度简化。

当代（~2000年之后）脉冲星磁层研究：借助数值计算方法

→追求一个定量的、自治的脉冲星磁层结构，在这个框架下研究其中的局部物理过程。



3. 脉冲星磁层理论基础 (1/11)

· Force-Free Electrodynamics (FFE)

粒子动能是否重要？考虑偶极磁场下电子能量和磁场能量的比值：

$$\epsilon_{\text{kin}}/\epsilon_B \sim (\rho_{\text{GJ}}/e)(\lambda m_e c^2 \gamma_{\text{sec}})/(B^2/8\pi) \sim 10^{-11} P^{-1} (\lambda/10^5)(\gamma_{\text{sec}}/10^2)(B_0/10^{12} \text{ G})^{-1} (r/R_*)^3$$

对于普通脉冲星， r 哪怕接近光速圆柱，这个值也很小。

因此忽略电子惯性和电子系统压强（理想MHD的强磁化极限→FFE）

$$\rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}/c = 0,$$

满足这个条件的电流可以写为：

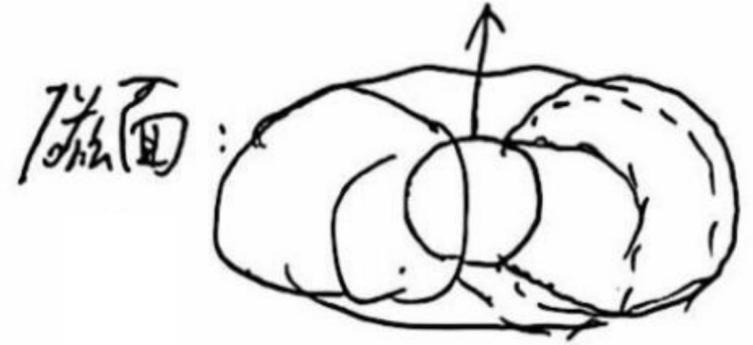
$$\mathbf{j} = c\rho \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + j_{\parallel} \frac{\mathbf{B}}{B}. \quad \rho = \text{div} \mathbf{E}/4\pi$$

第一项：电荷的 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移

第二项：沿 \mathbf{B} 方向的移动

3. 脉冲星磁层理论基础 (2/11)

·轴对称FFE磁层



轴对称磁场一般形式: $\mathbf{B} = \nabla \Psi \times \mathbf{e}_\phi / 2\pi R + 2(I/cR)\mathbf{e}_\phi$

共转轴对称FFE磁层满足的一般方程: 脉冲星方程 (Michel 1973...)

$$\left(1 - \frac{R^2}{R_{LC}^2}\right) \nabla^2 \Psi - \frac{2}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{16\pi^2}{c^2} I(\Psi) \frac{\partial I}{\partial \Psi} = 0, \quad \text{与Tokamak的Grad-Shafranov方程同构}$$

两个未知数, 受制于边界条件。

早期解析解: Michel 1973 split-monopole solution

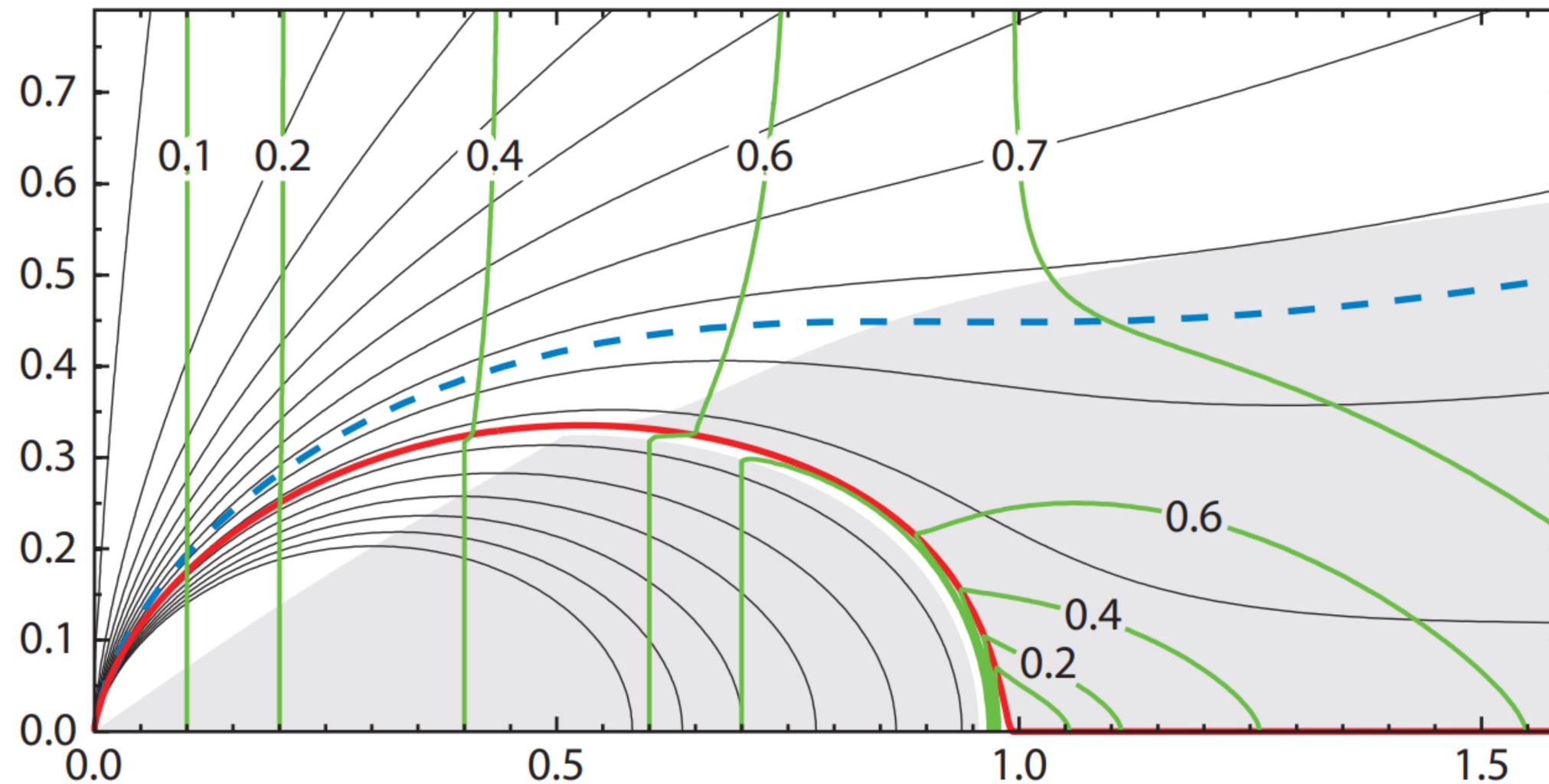
$$B_r = B_* (R_*/r)^2 \text{sign}(\pi/2 - \theta), \quad E_\theta = B_\phi = -(\Omega r/c) B_r$$

在r远大于光速圆柱半径时适用。

3. 脉冲星磁层理论基础 (3/11)

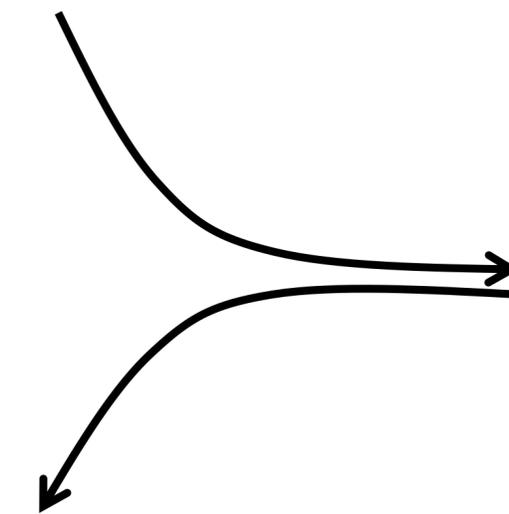
·轴对称FFE磁层

脉冲星方程的完整数值解（假设表面附近磁场纯偶极）：Contopoulos et al. 1999
Gruzinov 2005, Timokhin 2006（下图出处）



红线: separatrix; 绿线: drift velocity; 灰区: $\rho GJ > 0$

光速圆柱附近（略靠内）
存在磁场Y-point如下



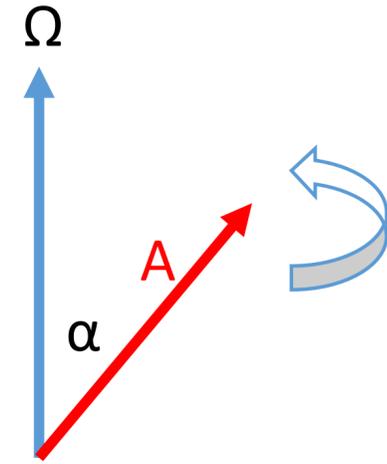
容易发生磁重联。

3. 脉冲星磁层理论基础 (4/11)

·斜转子FFE磁层

斜转子不得不引入时间依赖，因此难处理得多。

例如右边图中绕一个轴转的**A**矢量，如果它作为一个矢量场，则在t时刻， $\mathbf{A}(r, \theta, \phi, t) = (A, \alpha, 0) * \delta(\phi - \Omega t) = (A, \alpha, 0) * \delta(\phi')$



这种矢量场对时间t和 ϕ 角的依赖都仅有 $\phi - \Omega t$ 的形式，我们称它是quasi-stationary的。它满足关系：

$$(1/c)d\mathbf{A}/dt = -(\boldsymbol{\beta}_R \cdot \nabla)\mathbf{A} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{A}/c = \nabla \times (\boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{A}) - (\nabla \cdot \mathbf{A})\boldsymbol{\beta}_R$$

在quasi-stationary假设下，麦克斯韦方程组可以重新整理为：

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{B}) = 0$$

法拉第定律

$$\nabla \times (\mathbf{B} - \boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{E}) = (4\pi/c)(\mathbf{j} - c\rho\boldsymbol{\beta}_R)$$

安培环路定律

3. 脉冲星磁层理论基础 (5/11)

·斜转子FFE磁层

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{B}) = 0 \quad \text{考虑边界 } \mathbf{E} = -\boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{B} \rightarrow \text{处处 } \mathbf{E} = -\boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{B}$$

$$\text{记电流表达式 } \mathbf{j} = \rho c \boldsymbol{\beta}_R + \Lambda \mathbf{B} \quad \Lambda = (\mathbf{j} - \rho c \boldsymbol{\beta}_R) \cdot \mathbf{B} / B^2$$

代入 $\nabla \times (\mathbf{B} - \boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{E}) = (4\pi/c)(\mathbf{j} - c\rho\boldsymbol{\beta}_R)$ 得到斜转子的脉冲星方程 (Mestel 1973)

$$\nabla \times (\mathbf{B} + \boldsymbol{\beta}_R \times (\boldsymbol{\beta}_R \times \mathbf{B})) = \Lambda \mathbf{B}.$$

该式两边求散度, 可得

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \Lambda = 0$$

上述形式的脉冲星方程没有被直接求解过, 但 Λ 这个守恒量在分析三维磁层电流时有用。

3. 脉冲星磁层理论基础 (6/11)

·含时FFE磁层一般解

Gruzinov 1999 和 Blandford 2002发现, 就算不假设quasi-stationary, FFE电流也可以解析地用电磁场表示出来: 利用 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ 和 $\partial_t(\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}) = (c\nabla \times \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{j}) \cdot \mathbf{B} - (c\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E} = 0$

$$\mathbf{j} = c \frac{\nabla \cdot \mathbf{E}}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{c}{4\pi} \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{B} - (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E}}{B^2} \mathbf{B}.$$

将这个方程结合安培环路定律和法拉第定律, 给定初态和脉冲星表面边界条件, 可数值地求解脉冲星磁层中的电流和电磁场分布。

这套工作由Spitkovsky 2006, Kalapotharakos & Contopoulos 2009, Petri 2012等人完成。

3. 脉冲星磁层理论基础 (7/11)

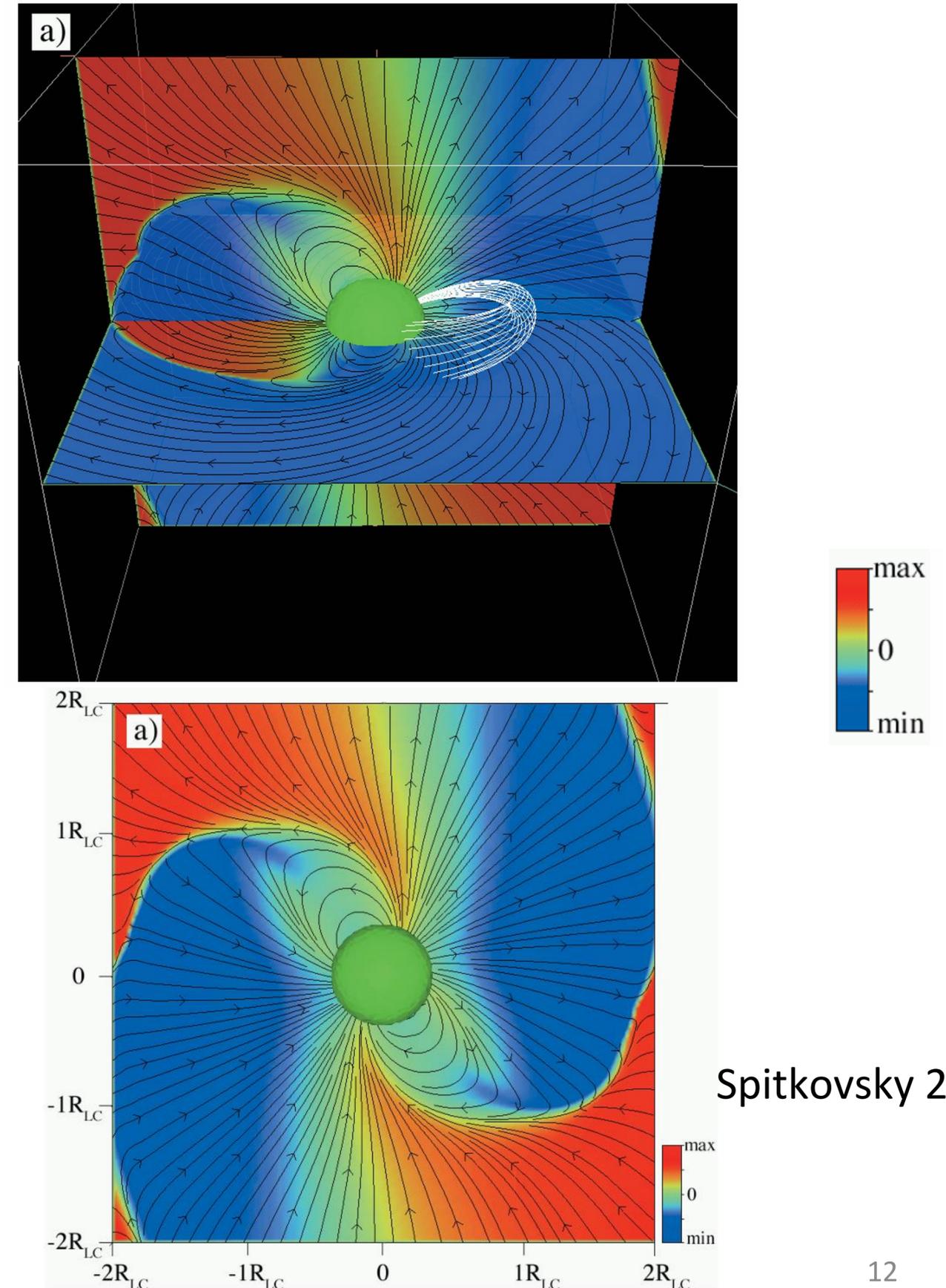
·含时FFE磁层一般解

开放和闭合磁力线的交汇Y点在光速圆柱附近。

$$L \approx L_0(1 + \sin^2 \chi)$$

Phenomenologically, for a pulsar with a total magnetic momentum $\mu = \mu_{\perp} + \mu_{\parallel}$ ($\mu_{\perp} = \mu \sin \alpha$, $\mu_{\parallel} = \mu \cos \alpha$), we could write the total energy loss in the form $\dot{E} = c_{\perp} \dot{E}_d + c_{\parallel} \dot{E}_u$, where c_{\perp} and c_{\parallel} are generally two functions of α indicating the contributions of those two energy-loss mechanisms, respectively. Certainly, $c_{\perp}(\alpha = \pi/2) = 1$ and $c_{\parallel}(\alpha = 0) = 1$. An essential and simple assumption employed in this Letter is that $c_{\perp} = c_{\parallel} = 1$ since $\dot{E} = \dot{E}_d + \dot{E}_u$ if μ_{\perp} and if μ_{\parallel} result *independently* in spin-downs of \dot{E}_d and \dot{E}_u , respectively. Therefore, we have $\dot{E} = -2\mu^2 / (3c^3) \Omega^4 \eta$, with $\eta \equiv \sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha [\Delta\phi / (\Delta\Phi)] \approx \sin^2 \alpha + (5.4 \times 10^{-9}) R_6^{-3} B_{12}^{-1} \cos^2 \alpha \times \Omega^{-2} \Delta\phi$.

Xu & Qiao 2001



3. 脉冲星磁层理论基础 (8/11)

·磁层电流分布

与磁场平行的电流分量控制粒子加速和pair production过程

$$\alpha = j_{\parallel} / (\rho_{\text{GJ}} c)$$

假设脉冲星表面附近能持续提供电荷:

$0 \leq \alpha < 1$: 粒子流能以小于光速的速度持续流动, 不会出现“续不上”
→ 不需要pair production.

$\alpha \geq 1$ or $\alpha < 0$: 大于1时, GJ电荷密度显得不够; 小于0时, 高处的电荷补充不上
→ 出现偏离GJ电荷密度, Force-Free被破坏 → 粒子加速&pair production.

3. 脉冲星磁层理论基础 (9/11)

·磁层电流分布

在脉冲星表面附近 $r \lesssim R_{pc}$, GJ电荷密度计算需考虑广义相对论修正 (Beskin 1990)

$$\rho_{GJ} = - \frac{[\Omega - \omega(r)] B_z}{2\pi c g_{00}^{1/2}} \quad \omega_{LT} = (2/5)\Omega(r_s/R_*)$$

电流分布由更靠外的环向磁场位形决定, 所以计算polar cap之上的 $\alpha = j_{\parallel}/(\rho_{GJ}c)$ 时,

→ 电荷密度用广义相对论修正后的GJ电荷密度解析式

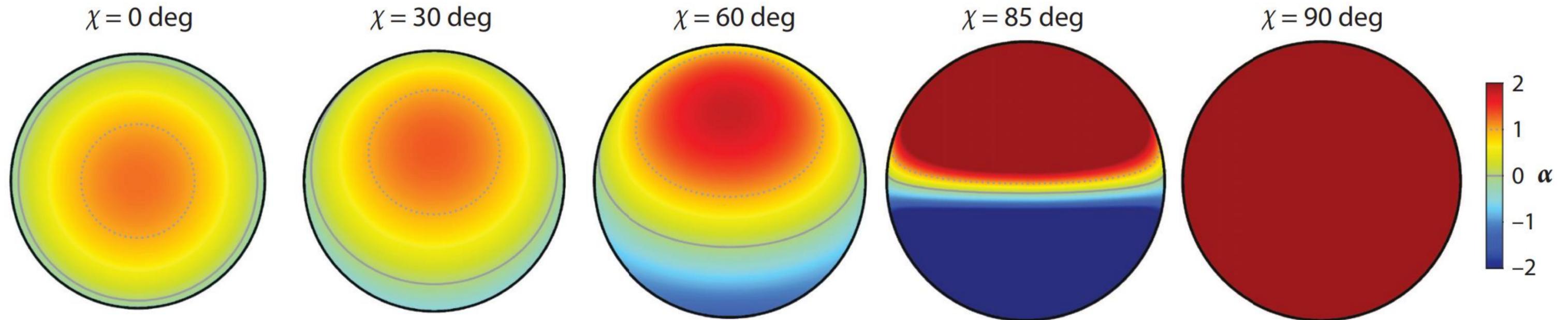
→ 电流密度用FFE磁层 (非广相) 计算的结果
(常用Gralla et al. 2017拟合的解析表达式)

$$\frac{j_{\text{mag}}^{3D}}{\rho_{GJ}c}(\theta, \phi) \approx \frac{1}{(1 - \Omega_Z/\Omega)} [J_0(\arcsin(\theta/\sqrt{\alpha_0})) - J_1(\arcsin(\theta/\sqrt{\alpha_0})) \tan i \cos \phi].$$

3. 脉冲星磁层理论基础 (10/11)

·磁层电流分布

不同磁倾角下 $\alpha = j_{\parallel}/(\rho_{\text{GJ}}c)$ 的分布:



磁倾角 $>40^\circ$ 时, $\alpha < 0$ 回流电流的区域占了不少比重;
磁倾角 $\sim 90^\circ$ 时, GJ电荷密度 ($\Omega \cdot B$) 很小, $\alpha > 1$ 的区域很多。

这些结果对热x射线辐射和射电辐射束形状有显著影响。

3. 脉冲星磁层理论基础 (11/11)

·FFE的局限性

(1) 无法完整描述辐射过程;

(2) 等离子体压强和粒子惯性在分析加速区, 比如磁重联时, 必须得考虑;

(3) 磁层很多区域等离子体密度没那么高, 属于无碰撞等离子体, 流体描述不一定适用。

更现代的研究方式:

Kinetic models/等离子体粒子模拟

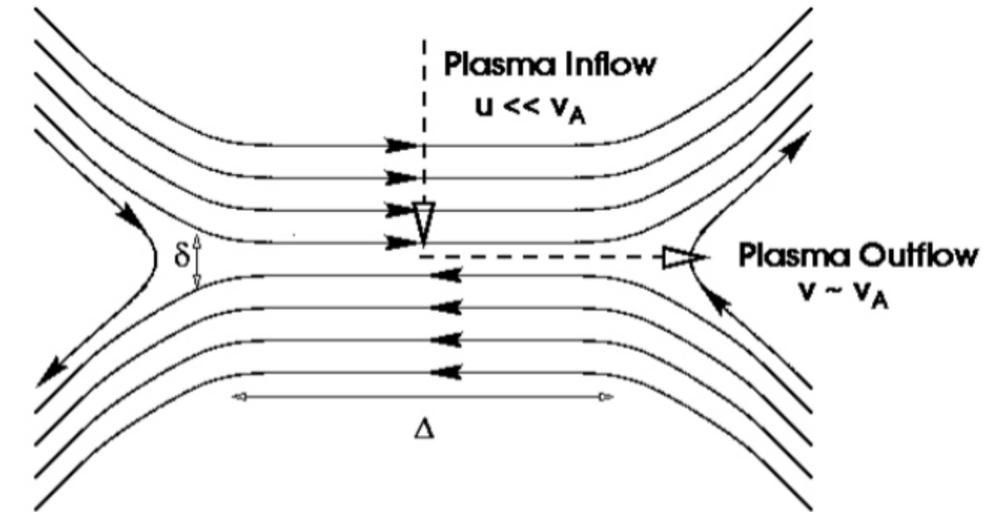


图 1: 磁重联的图示, 摘自<https://mrx.pppl.gov/Physics/physics.html>

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (1/17)

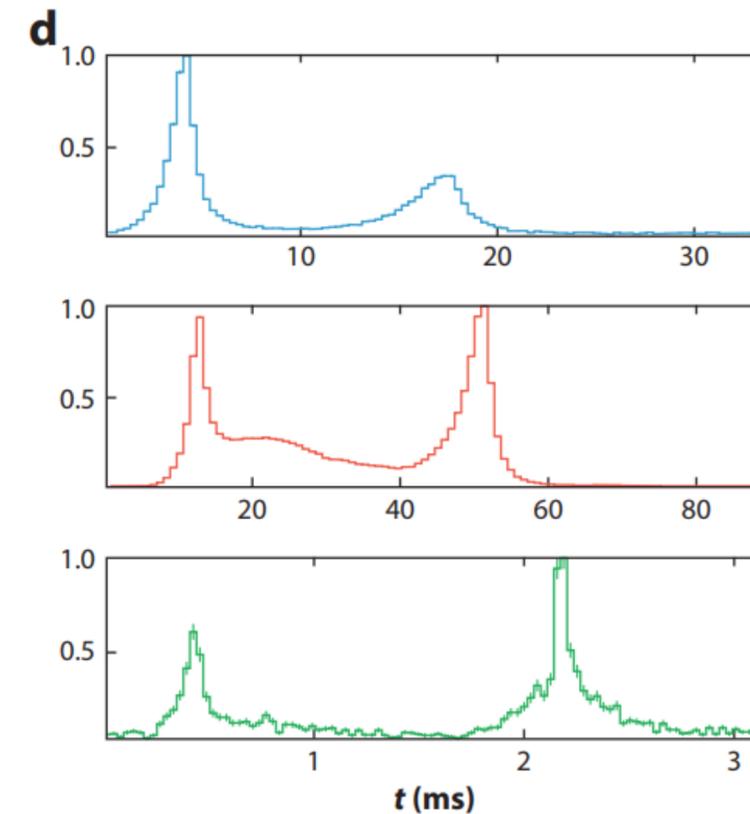
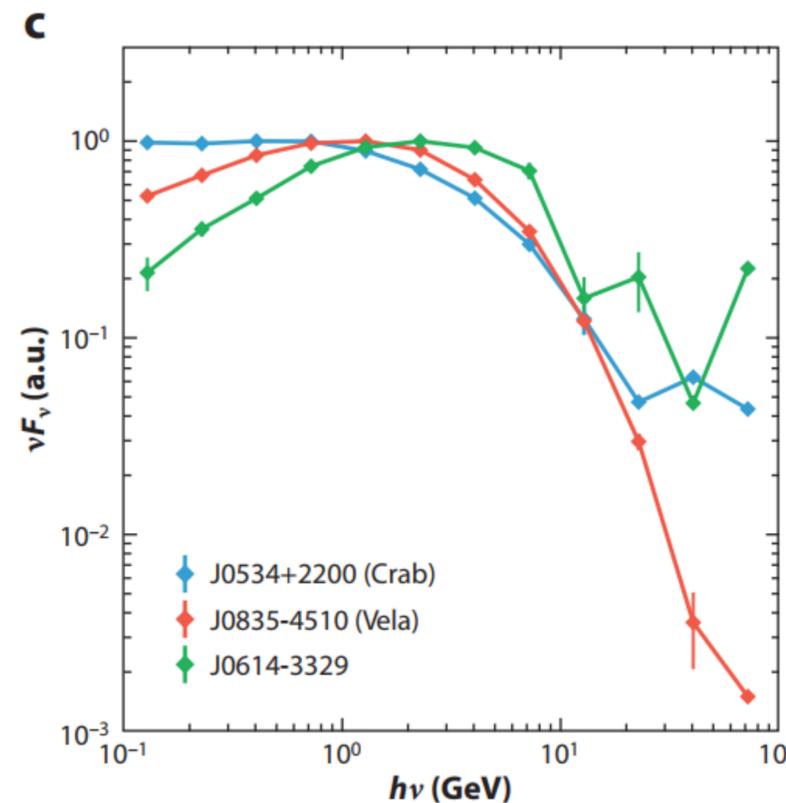
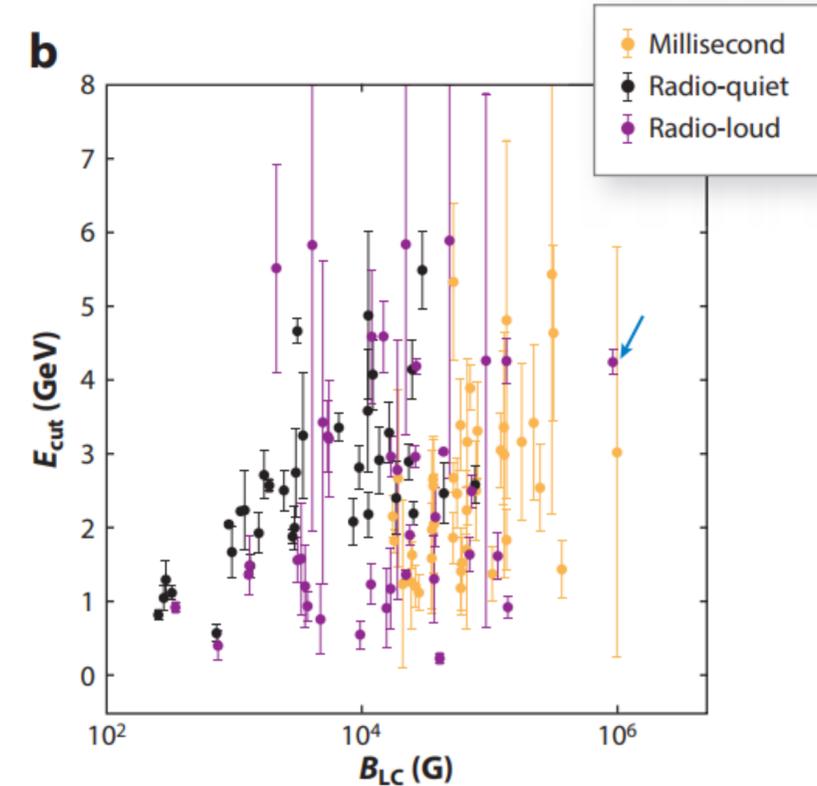
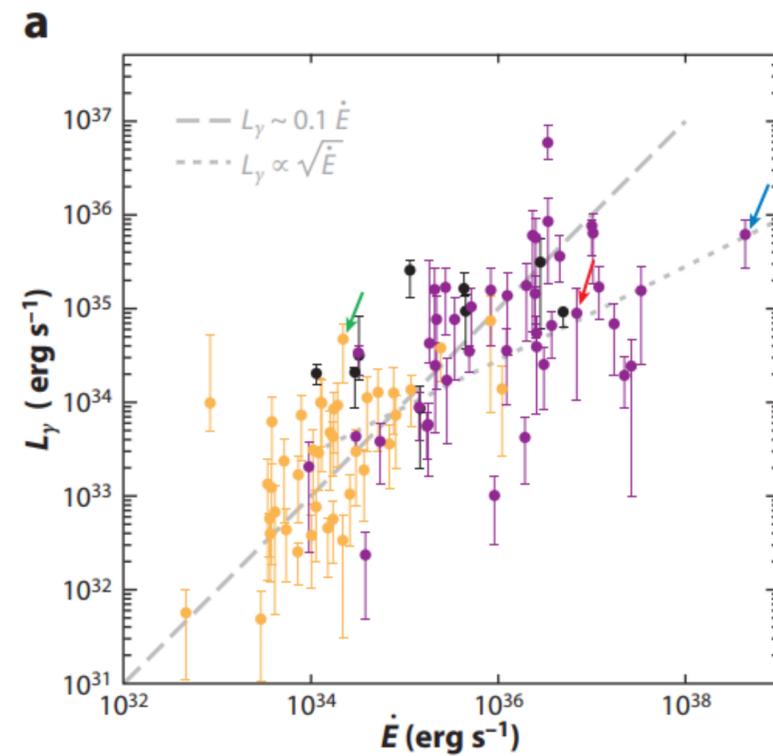
动机: gamma射线观测

费米卫星将γ射线脉冲星的数目从 6 提升到 >200.

γ射线脉冲星能谱的截断能量与光速圆柱附近磁场大小正相关。

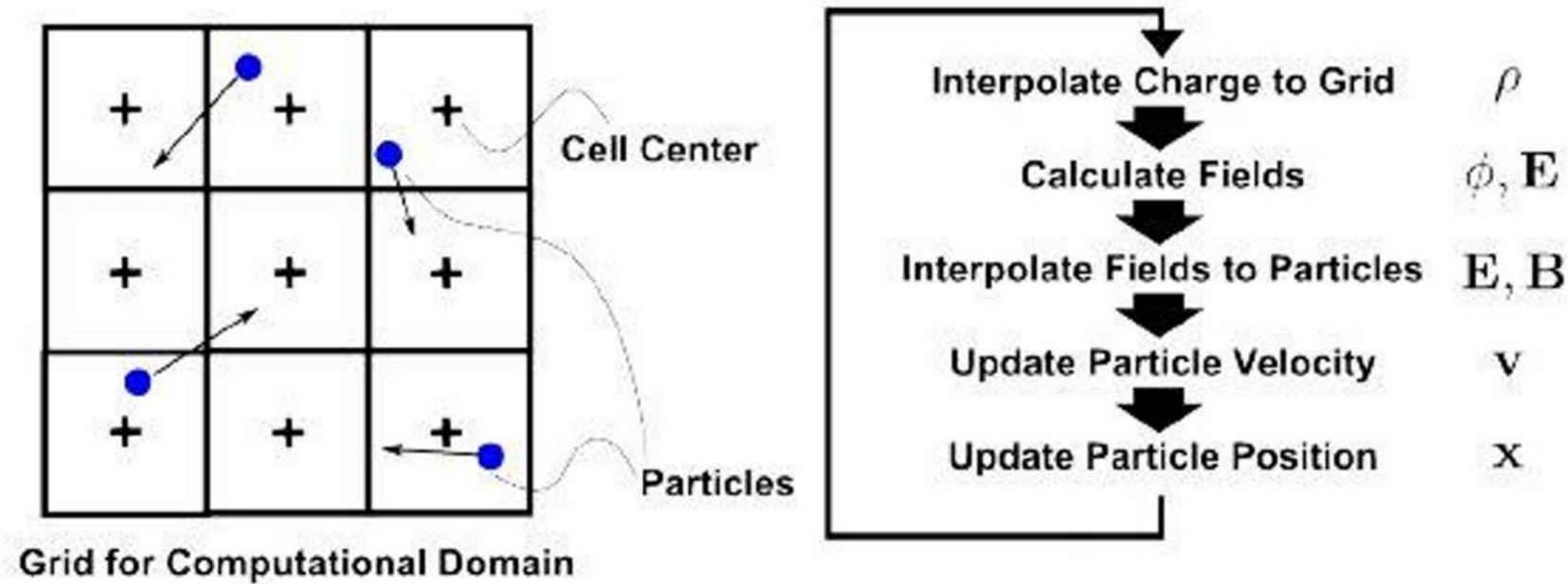
- 截断不是super-exponential
- 射电轮廓与γ轮廓峰值离得远
- 各种对轮廓的几何建模

→ 推测γ射线脉冲来自光速圆柱附近 (Lyubarskii 1996b)
→ 磁重联过程



4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (2/17)

介绍: PIC模拟 (等离子体粒子模拟)



Ebersohn et al. 2014

粒子模拟的好处:
能研究物理过程细节,
尤其是很多非线性、非平衡问题。

粒子模拟的坏处:
一般来说不能研究尺度太大的系统。

粒子模拟基本思路: particles $(\vec{x}_i, \vec{v}_i) \rightarrow$ 统计平均 $\rightarrow \rho(\vec{x}), \vec{j}(\vec{x})$
 \uparrow
 \downarrow Maxwell eqs.
 更新 $(\vec{x}_i, \vec{v}_i) \leftarrow \frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}/c) \leftarrow \vec{E}(\vec{x}), \vec{B}(\vec{x})$
 \searrow 最后统计平均得宏观物理量。

早期历史:

Buneman 1959; Dawson 1962
Birdsall, Langdon, Okuda ~1970

国内研究:

于敏 ~1975.....

(参考邵福球《等离子体粒子模拟》)

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (3/17)

介绍: PIC模拟 (等离子体粒子模拟)

具体在脉冲星磁层方面, PIC实际上难以模拟整个磁层 (太大了)

全局模拟关注三个特征长度:

1. 致密星半径 $R_* \sim 12 \text{ km}$
2. GJ密度对应的粒子数密度对应的趋肤深度 $d_e = c/\sqrt{2\Omega\omega_B} \sim 1 \text{ cm} (B_*/10^{12} \text{ G})^{-1/2} (P/0.1 \text{ s})^{1/2}$
(等离子体振荡波长)
3. 光速圆柱半径 $R_{\text{LC}} = c/\Omega \approx 4,774 \text{ km} (P/0.1 \text{ s})$

还有三个特征能量:

1. 极冠区电势差对应电子洛伦兹因子 $\gamma_{\text{PC}} \sim (1/4)(R_*/R_{\text{LC}})(R_*/d_e)^2 \sim 10^{10} (B_*/10^{12} \text{ G})(P/0.1 \text{ s})^{-2}$
2. 级联过程中的初级粒子洛伦兹因子 $\gamma_{\text{th}} \sim 10^7$
3. 级联过程中的次级粒子洛伦兹因子 $\gamma_{\text{sec}} \sim 10^2$

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (4/17)

目前的模拟至少确保三个特征长度之间满足 $d_e \ll R_* \ll R_{LC}$

对于3D模拟, 一般取 $(R_{LC}/d_e) \lesssim 500$ and $(R_{LC}/R_*) \lesssim \text{few}$ (实践中, 模拟结果对 R_{LC}/R_* 不敏感)

这一般会导导致 $\gamma_{PC} \sim 10^3$, $\gamma_{th} \sim \text{few} \times 10$, and $\gamma_{sec} \sim \text{few}$

进而三个特征能量之间也满足 $\gamma_{sec} \ll \gamma_{th} \ll \gamma_{PC}$

→ 脉冲星磁层模拟通过遵从尺度关系, 来试图探索相应的全局物理过程

→→ 若要直接与观测作比较, 需要一个非平庸的外插 (还存疑)

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (5/17)

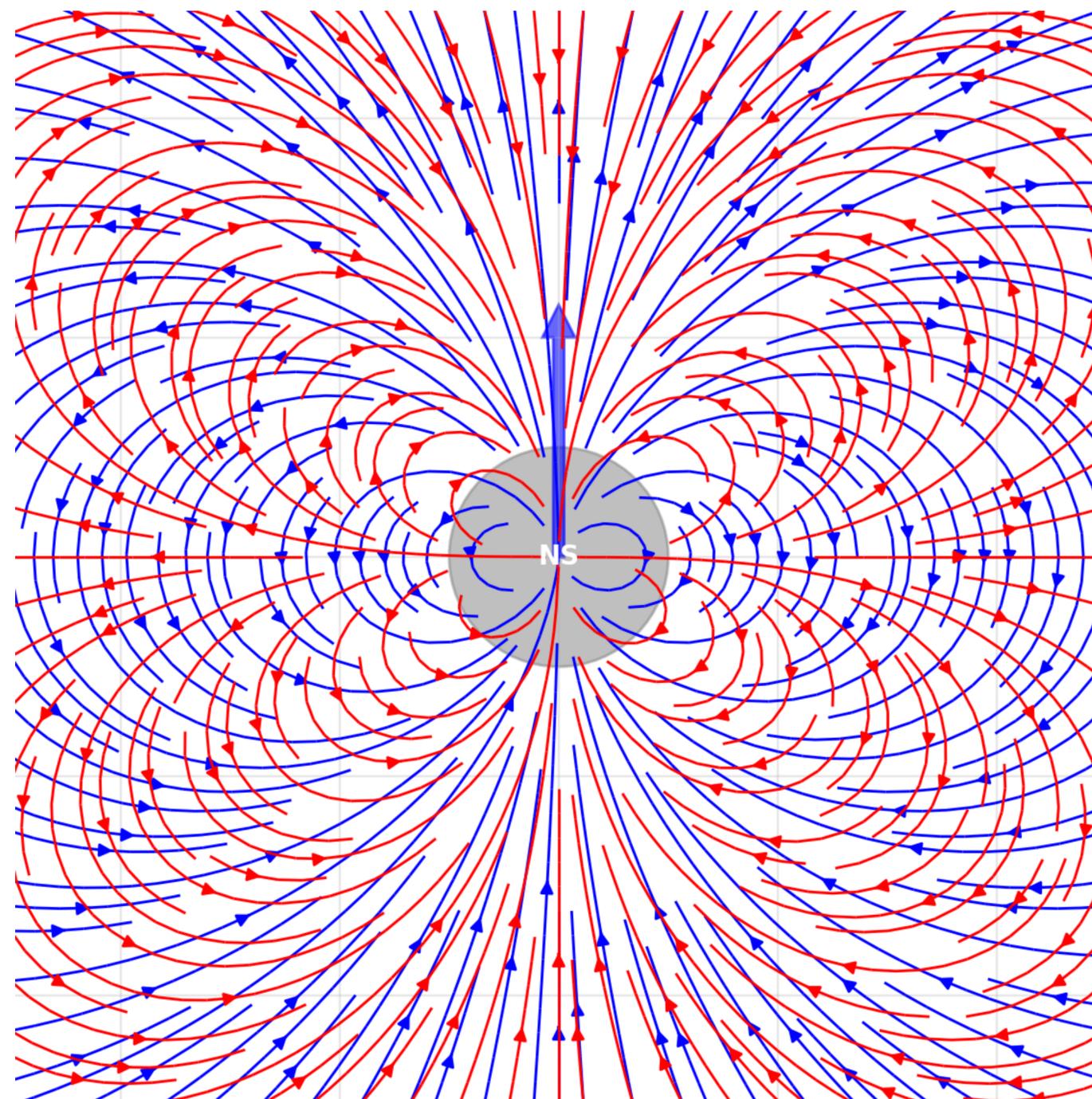
Disk & Dome解：一个特殊的磁层构型，一个ghost
(Krause-Polstorff & Michel 1985, “electrosphere”)



“Goldreich & Julian Pulsar”

考虑一个真空中旋转的致密星，它原本带关于旋转轴对称的偶极磁场，电荷可自由运动/出入

- (1) 单极感应→有四极电场
- (2) 极冠区附近 $E_{//}$ 向内→拉出电子
赤道区附近 $E_{//}$ 向外→拉出离子
- (3) 电子和离子重新分布，最终屏蔽掉 $E_{//}$ ，达到Force-free.



Drawn by
deepseek

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (5/17)

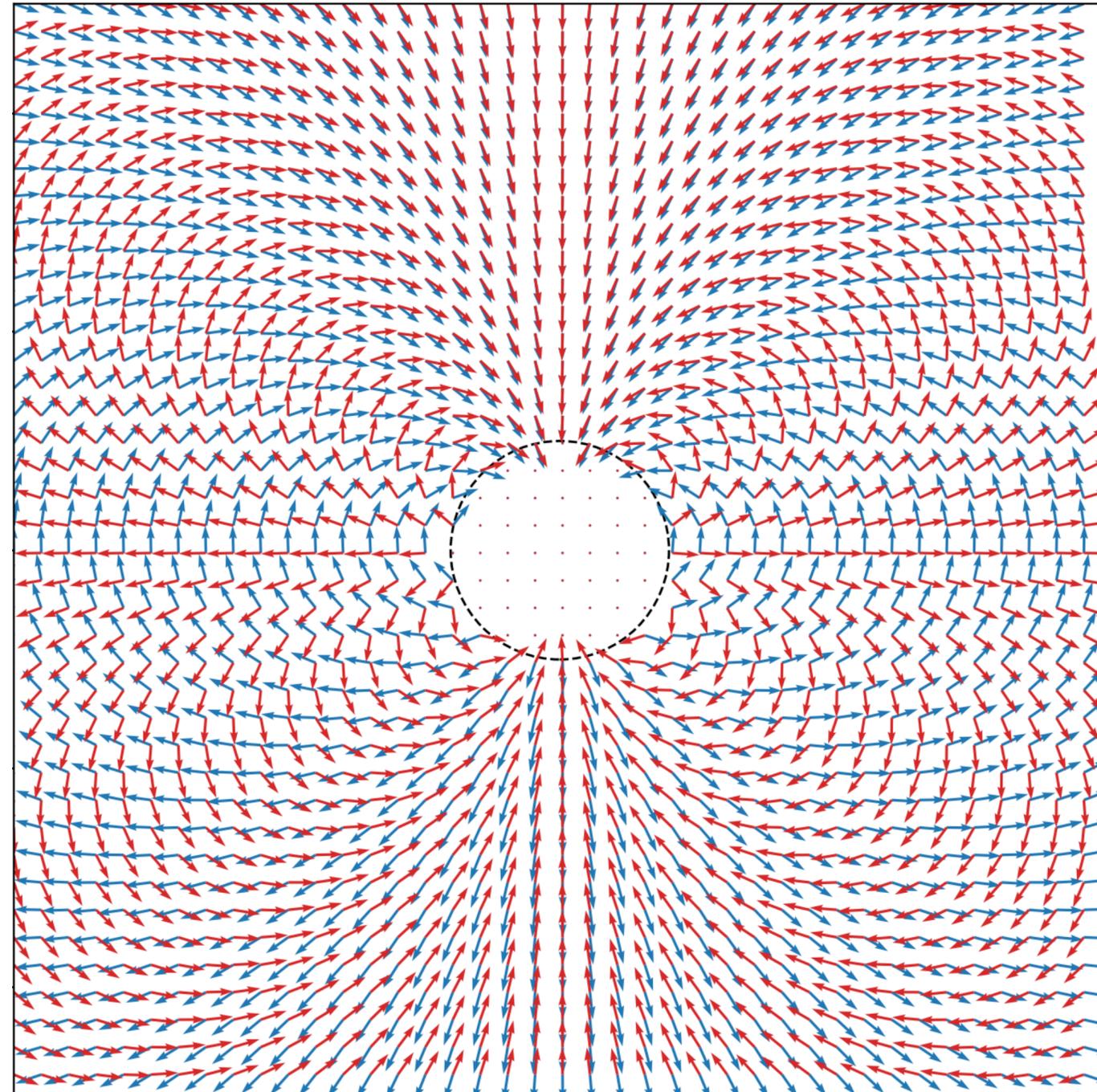
Disk & Dome解：一个特殊的磁层构型，一个ghost
(Krause-Polstorff & Michel 1985, “electrosphere”)



“Goldreich & Julian Pulsar”

考虑一个真空中旋转的致密星，它原本带关于旋转轴对称的偶极磁场，电荷可自由运动/出入

- (1) 单极感应→有四极电场
- (2) 极冠区附近 $E_{//}$ 向内→拉出电子
赤道区附近 $E_{//}$ 向外→拉出离子
- (3) 电子和离子重新分布，最终屏蔽掉 $E_{//}$ ，达到Force-free.



Drawn by
cursor

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (6/17)

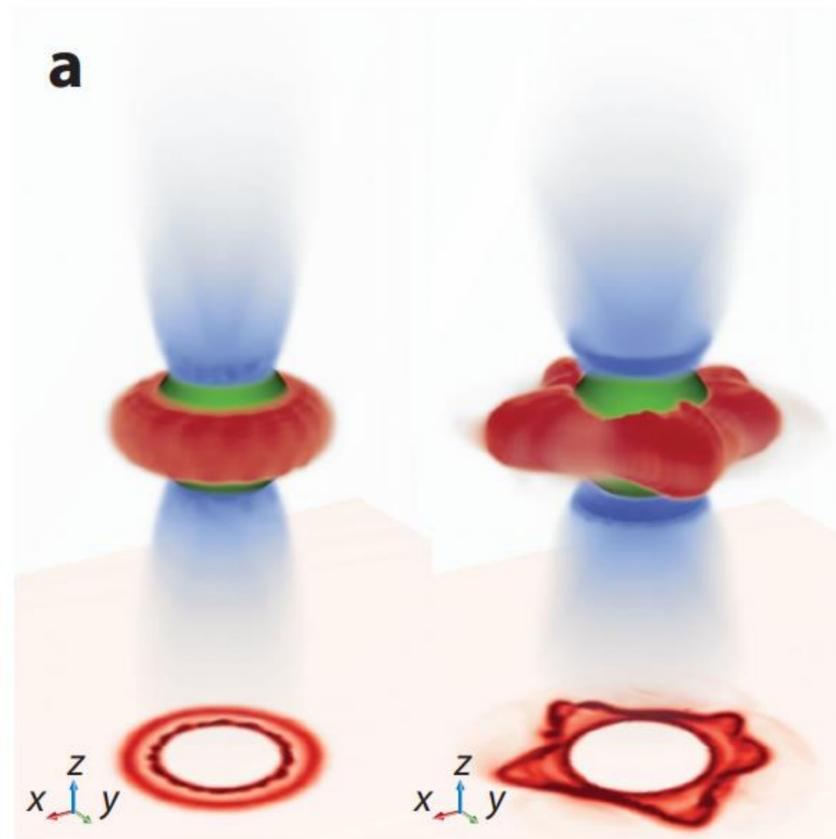
Disk & Dome解：一个特殊的磁层构型，一个ghost (Krause-Polstorff & Michel 1985, “electrosphere”)



形成的这一构型，既不遵循GJ电荷密度，又无法提取粒子流能量。

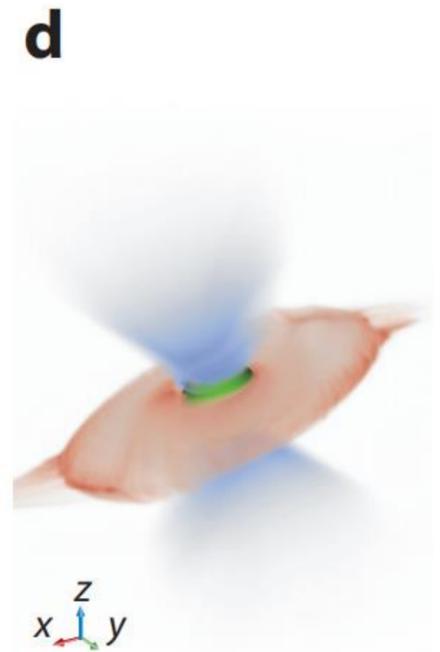
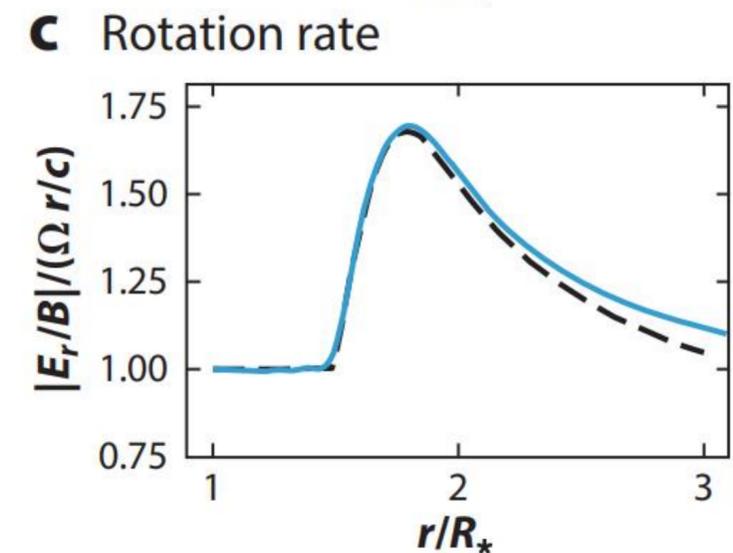
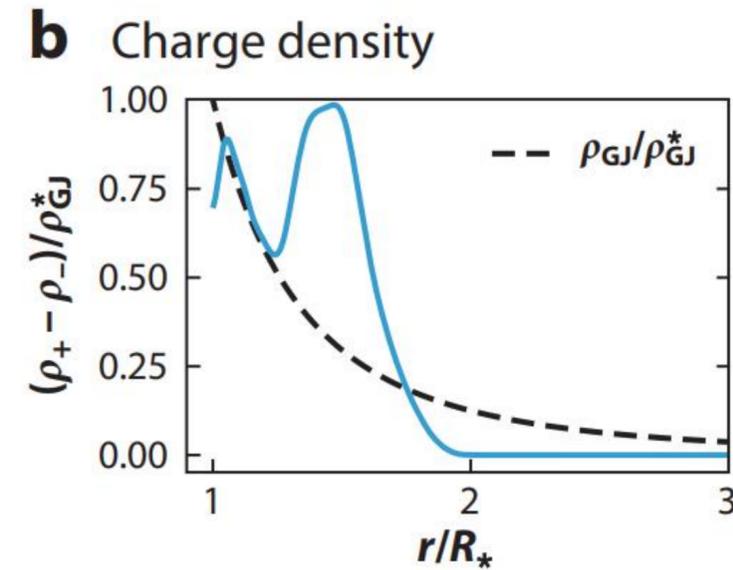
但其实这种构型是旋转不稳定的。其不同位置的 $E \times B$ 漂移速度与 $\Omega \cdot r$ 不同，这会导致较差转动，进而引发不稳定性，出现一些调制。

无法进行对产生的“dead pulsars”可能会处于Disk-Dome构型。



不稳定性发展了。

“Goldreich & Julian Pulsar”



斜转子情形

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (7/17)

下面来看一些模拟得到的活跃脉冲星特性：

(a) 模拟得到的**年轻活跃脉冲星**特征：极冠区和光速圆柱附近都有对产生过程。

光速圆柱附近：

磁重联有效地加速粒子 $\gamma \sim \sigma_{\text{LC}} = B_{\text{LC}}^2 / 4\pi n m_e c^2 \sim \gamma_{\text{PC}} / \lambda$

极冠区之上：

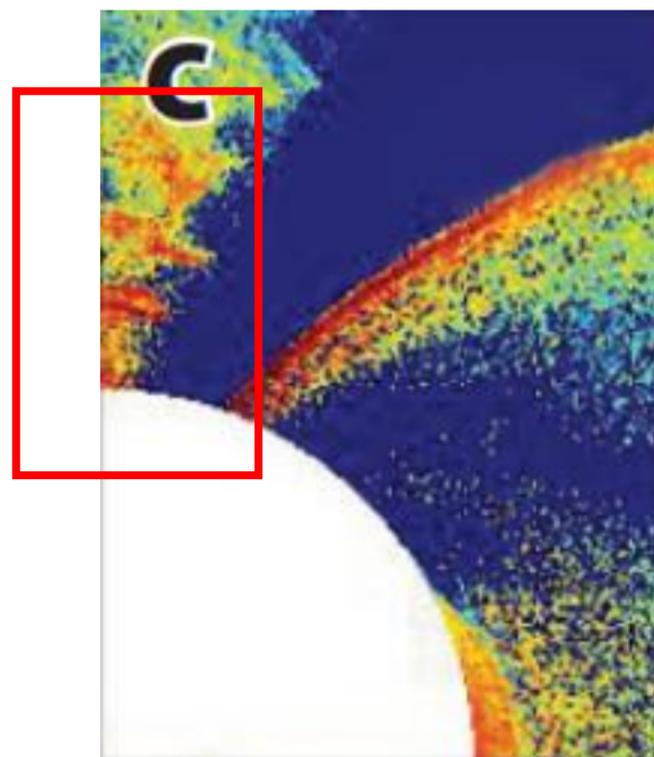
Philippov 2015a 发现，引入GR修正后，模拟的极冠区之上才能有效发生对产生。

$$\rho_{\text{GJ}} = - \frac{[\Omega - \omega(r)] B_z}{2\pi c g_{00}^{1/2}}$$

GJ电荷密度变小，等效为 $\alpha = j_{\parallel} / (\rho_{\text{GJ}} c)$ 变大。原本 $0 < \alpha < 1$ 的地方，会出现 $\alpha > 1$ 。

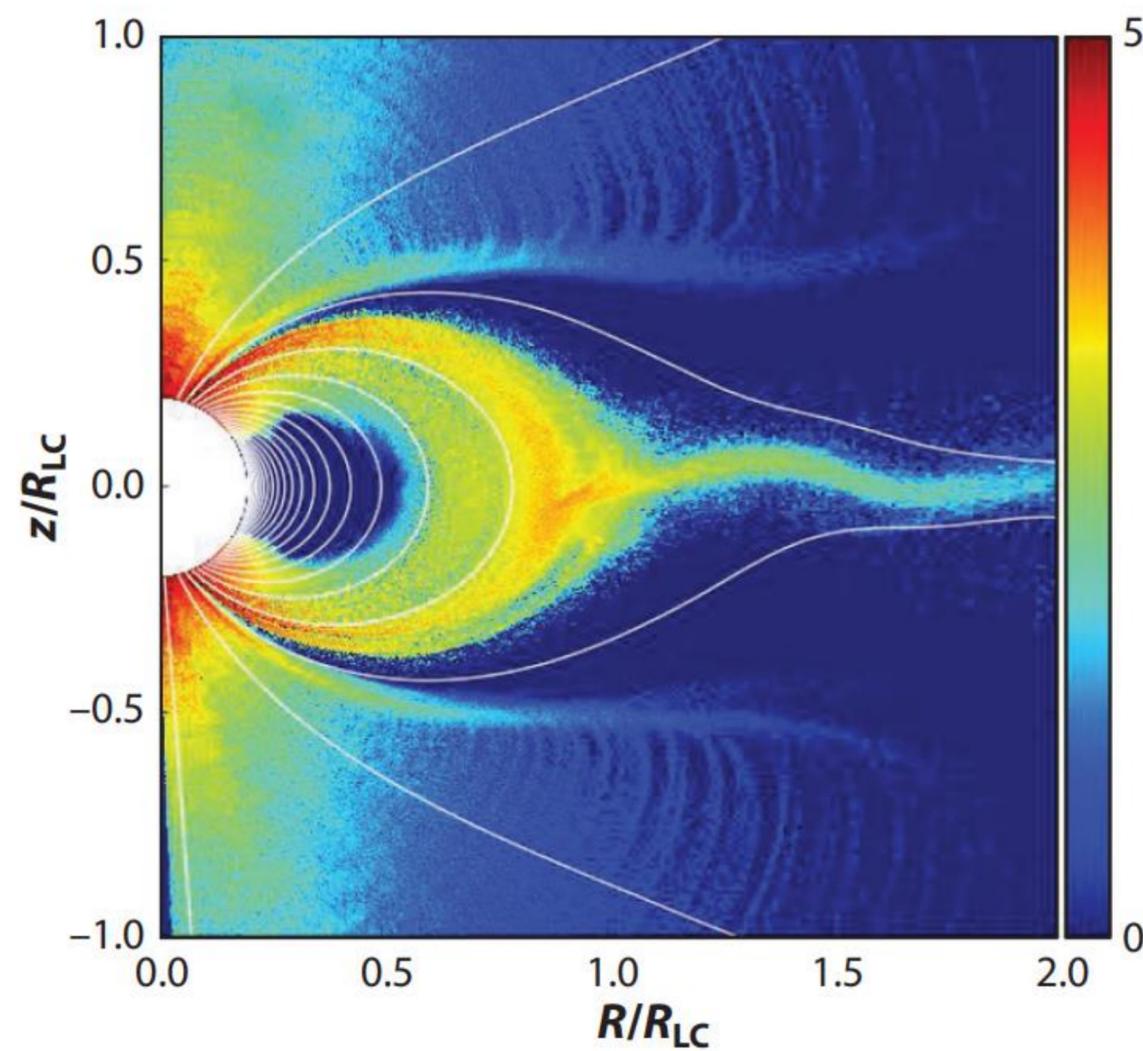
4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (8/17)

模拟得到的**年轻活跃脉冲星**特征：极冠区和光速圆柱附近都有对产生过程。

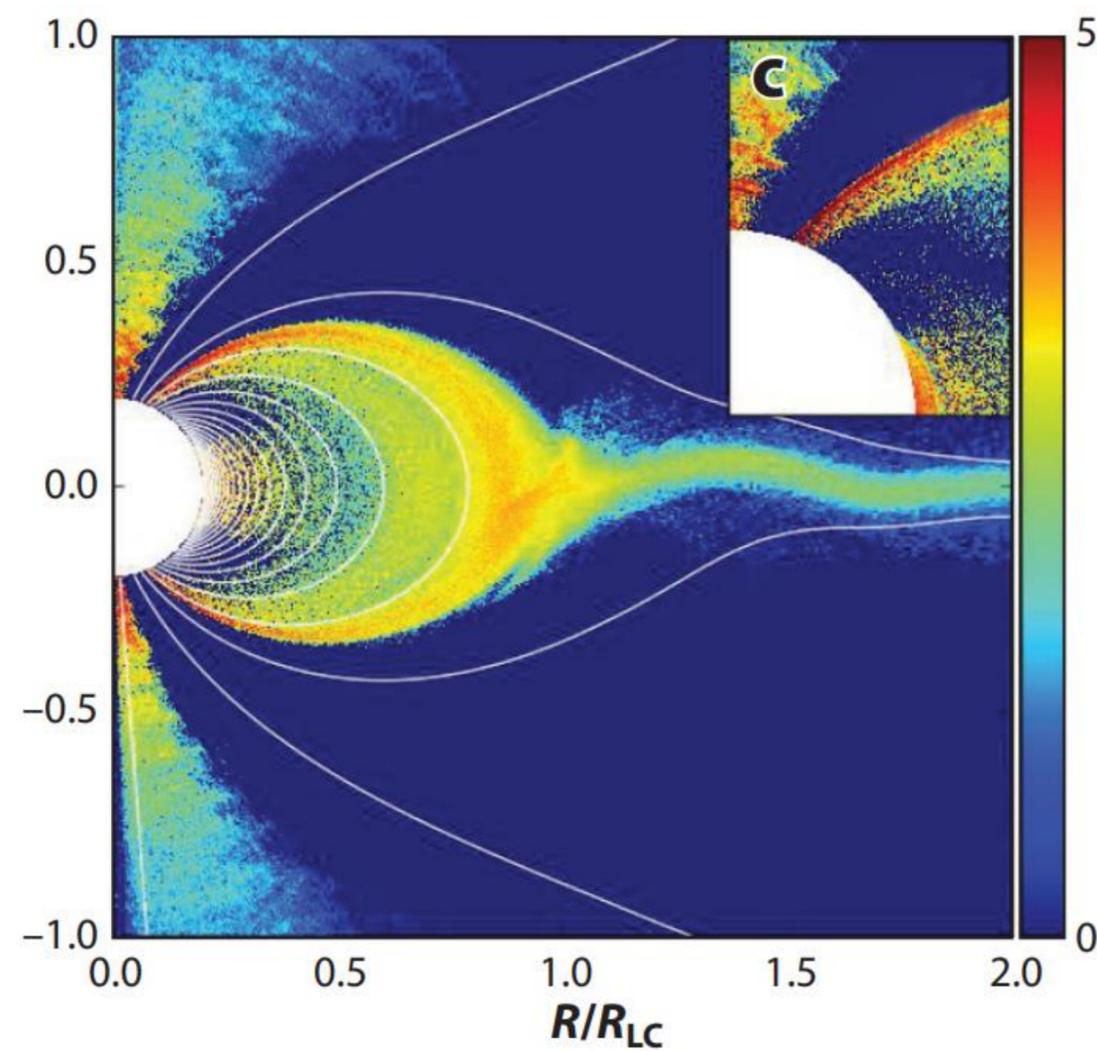


星体表面附近：
Non-stationary 对产生
时标 l_{gap}/c 与微结构关联？

a Electron density 与GJ密度相比



b Positron density logarithmic scale



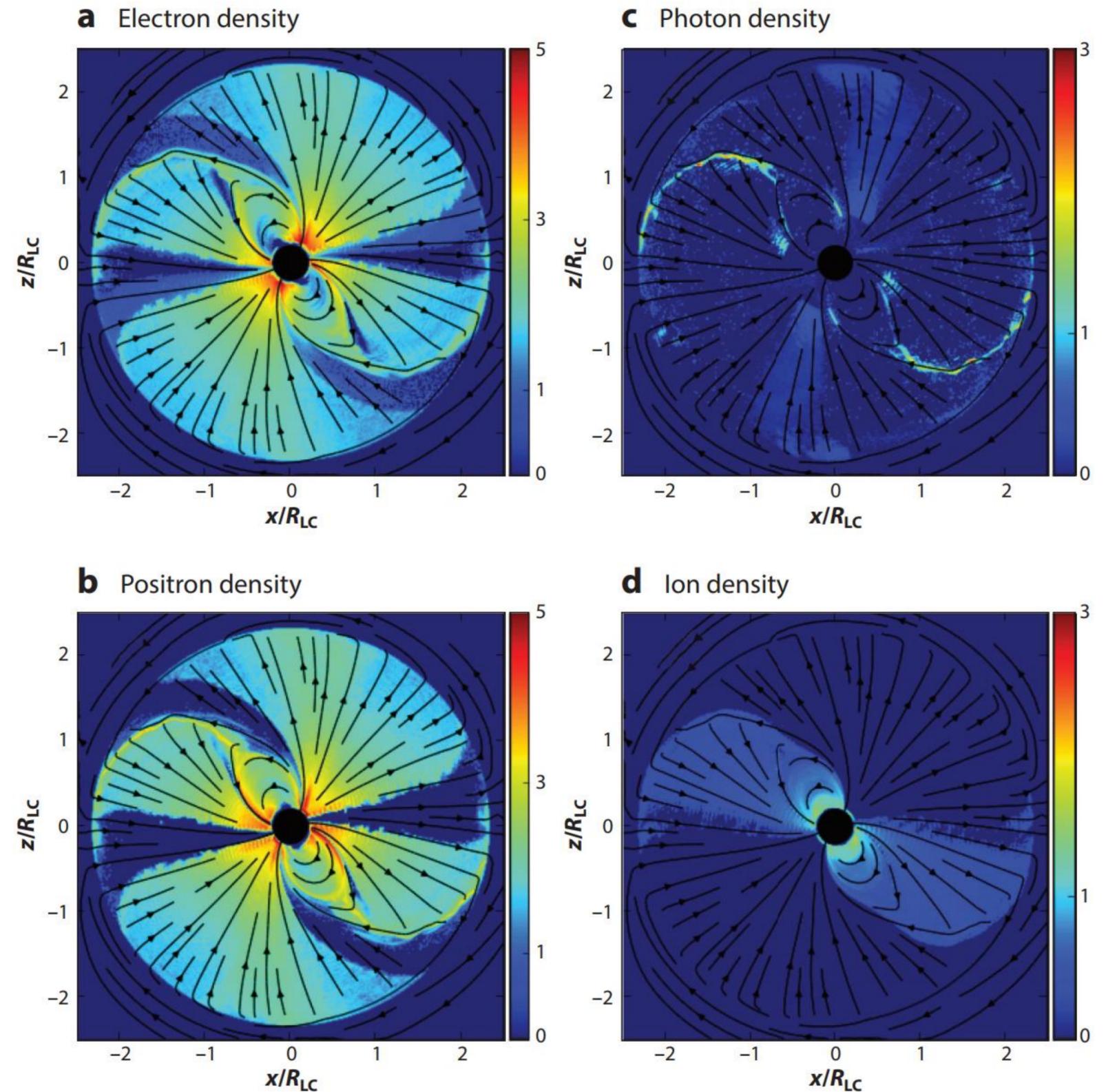
Philippov 2015a
平行转子情形

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (9/17)

右图的工作还引入了离子，此“模拟离子”质量和电荷都与正电子相同，只不过它不辐射也不参与对产生。

离子多出现在赤道面附近的闭合磁力线区。

有一些闭合磁力线区中也有电子对等离子体分布，它们来自Y点附近电流片中辐射光子的对产生过程（来自靠外的磁层）。



Philippov & Spitkovsky 2018
磁倾角60度斜转子情形

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (10/17)

电流片是 γ 光子的主要起源地。

$1R_{LC} < r < 2R_{LC}$ 范围内的坡印廷流, 占总坡印廷流的2%~15%, 垂直转子情形下最小。
(γ 射线脉冲星观测中, 这个比例大概是1%~10%)

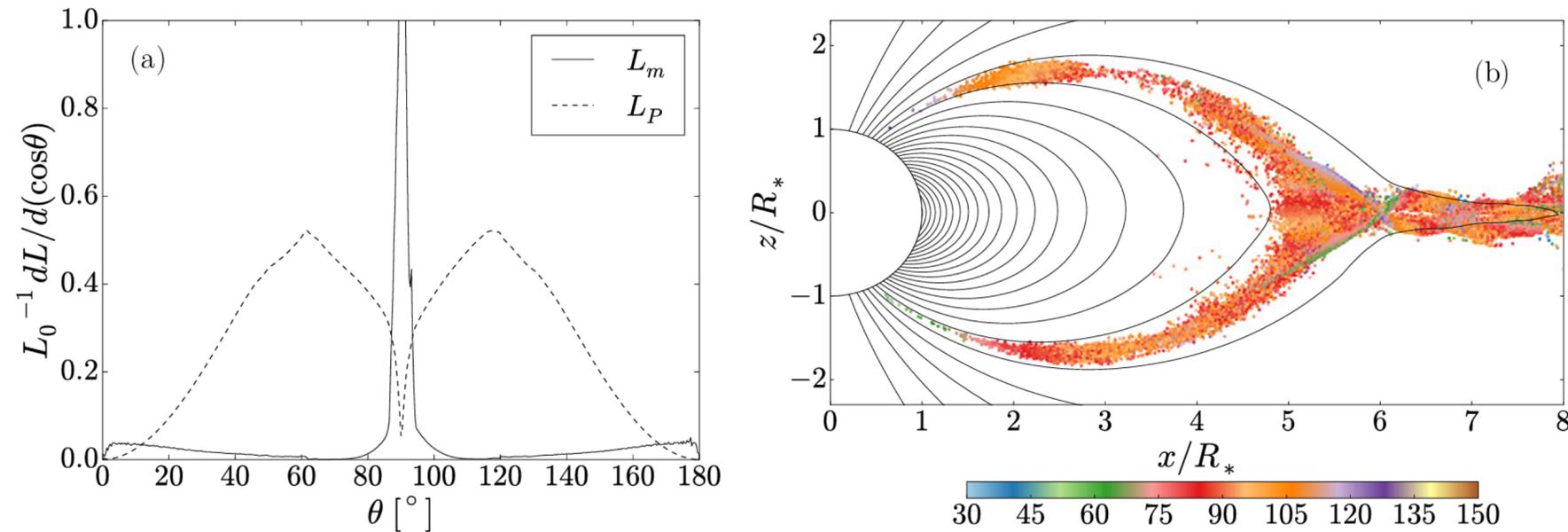
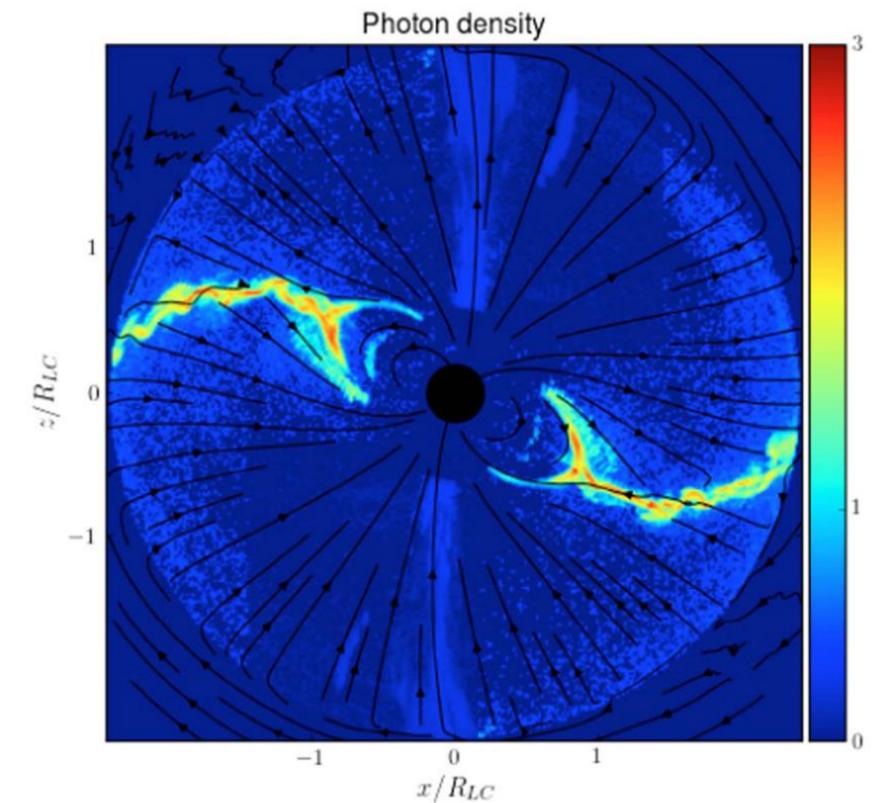


Figure 4. (a) Angular distribution of Poynting flux L_P and kinetic energy flux L_m at radius $2R_{LC}$, normalized to $L_0 = \mu^2\Omega^4/c^3$. (b) Locations of gamma-ray emission events. Color shows the angle of the photon direction with respect to \hat{z} .

Chen & Beloborodov 2014



Philippov & Spitkovsky 2018

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (11/17)

(b) 模拟得到的**年老脉冲星**特征：仅极冠区附近能活跃，且取决于模拟参数

由前述特征电子能量可导出两个比值：

$\eta = \gamma_{\text{PC}}/\gamma_{\text{th}}$ 决定了脉冲星自转维持的电势能最多供给多少等离子体

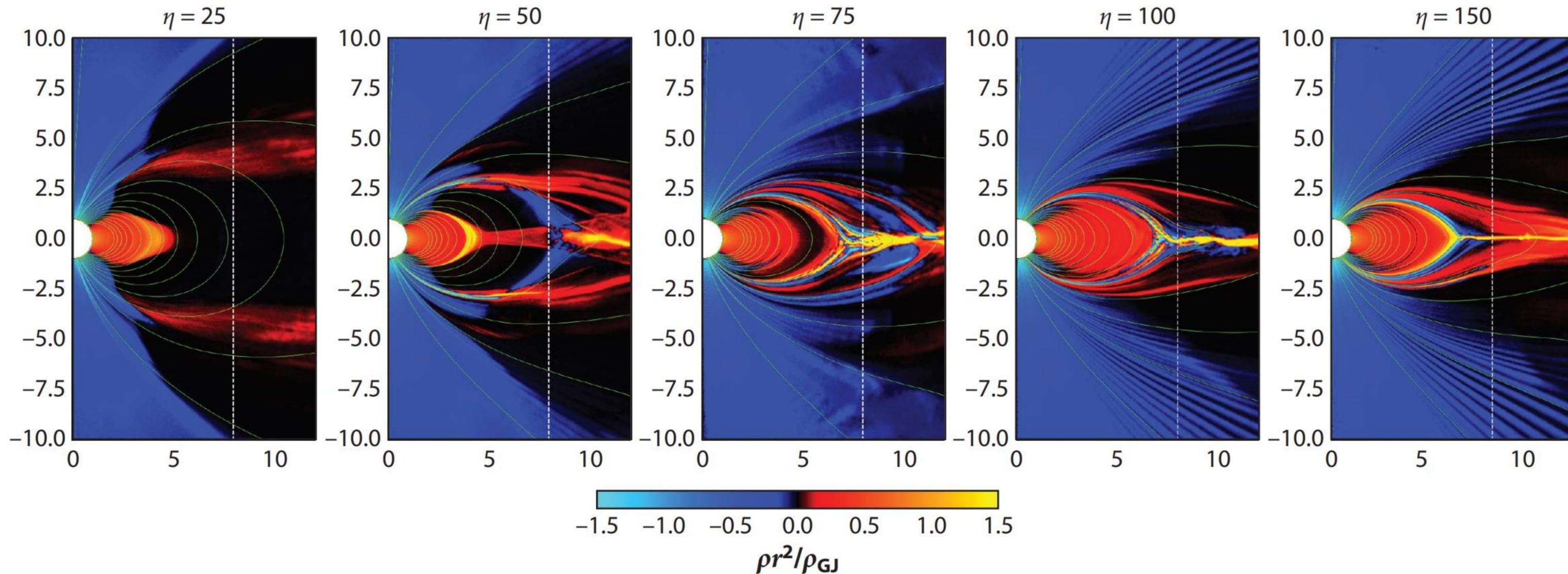
$\zeta = \gamma_{\text{th}}/\gamma_{\text{sec}}$ 决定了等离子体的实际数密度（电子对数目、multiplicity）

Chen et al. 2020尝试调整 η 从25到150，发现 $\eta \gtrsim 100$ 时，仅极冠区附近对产生，也能达到FFE.

Chen et al. 2020以及Philippov & Spitkovsky 2018发现， $\eta \lesssim 100$ 时，模拟出的脉冲星会在对产生活跃和不活跃之间转变 → 可能对应了nulling现象？

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (12/17)

(b) 模拟得到的**年老脉冲星**特征：仅极冠区附近能活跃，且取决于模拟参数



Chen et al. 2020

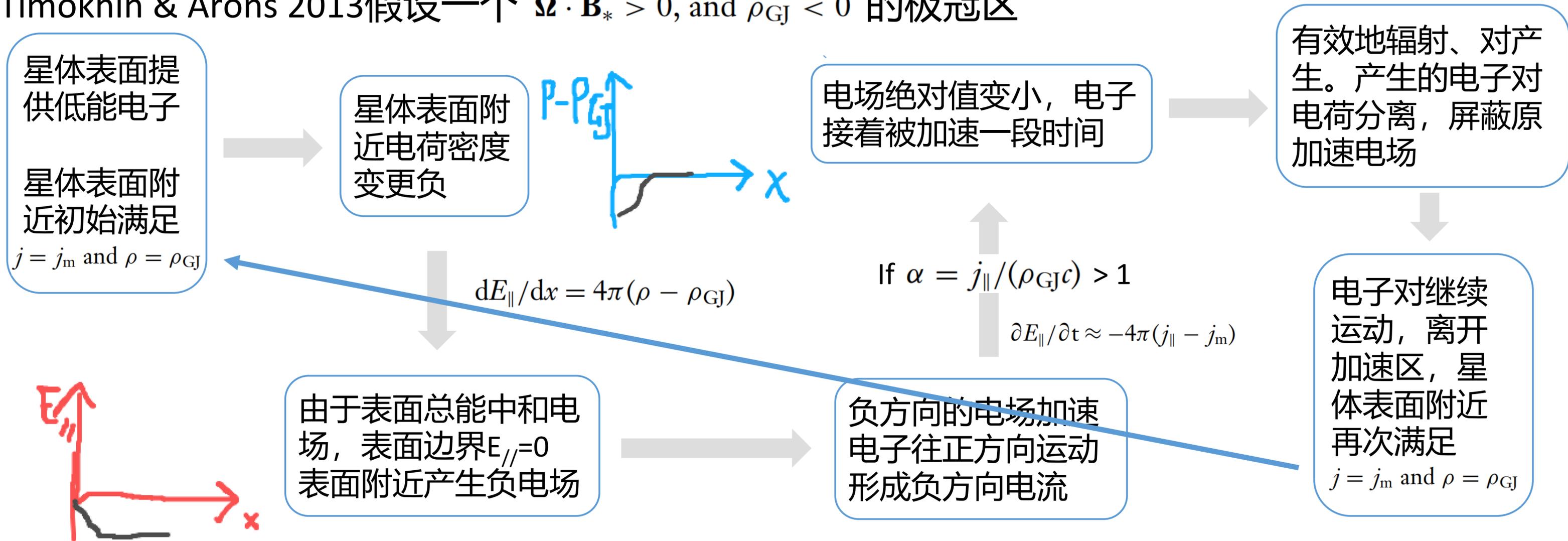
4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (13/17)

(c) 磁层中的含时过程

(c.1) 间歇性的极冠区放电——可以作为1D问题研究

$$\partial E_{\parallel} / \partial t \approx -4\pi(j_{\parallel} - j_m) \quad dE_{\parallel} / dx = 4\pi(\rho - \rho_{GJ})$$

Timokhin & Arons 2013假设一个 $\Omega \cdot \mathbf{B}_* > 0$, and $\rho_{GJ} < 0$ 的极冠区



4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (14/17)

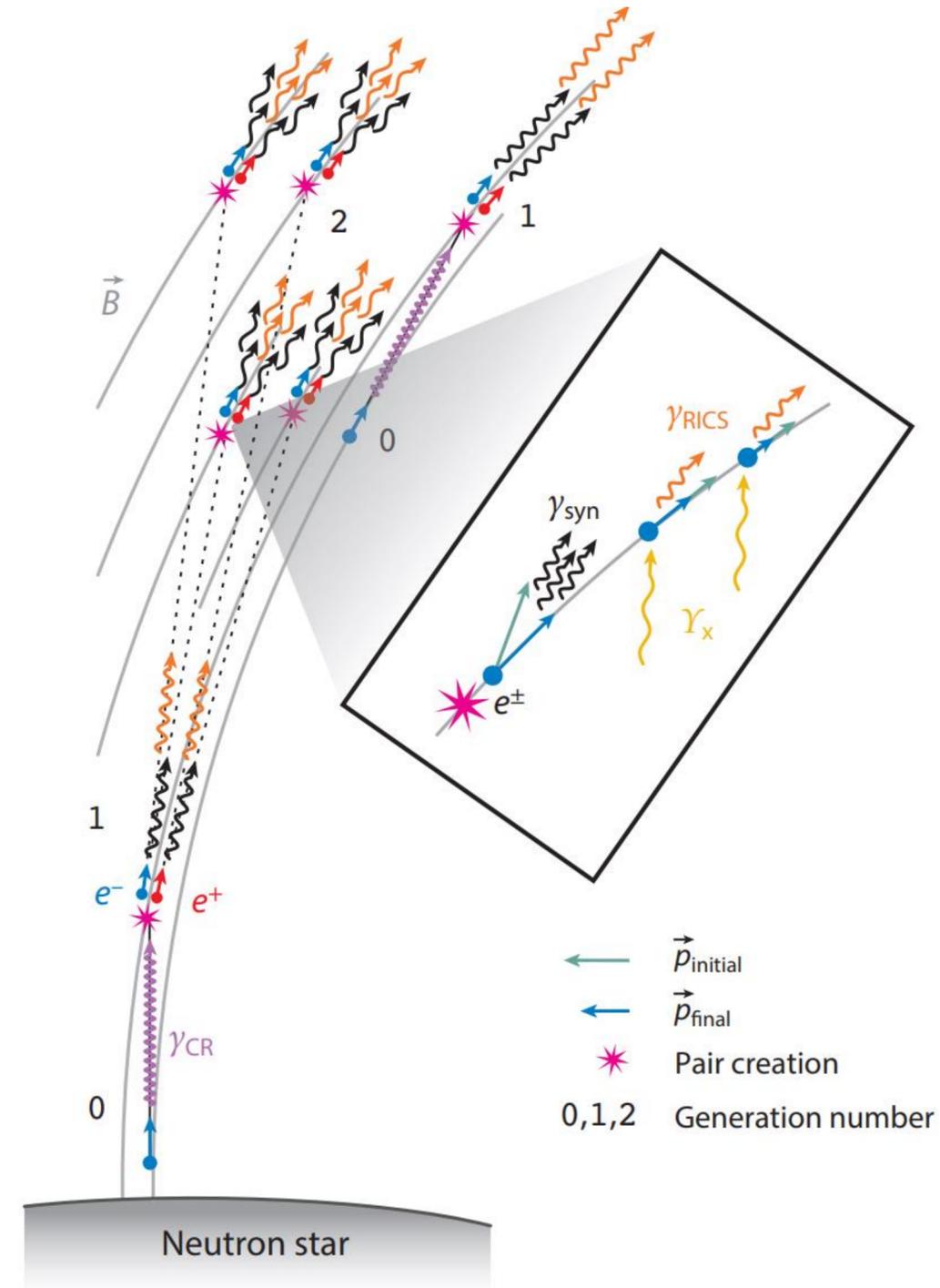
上述过程与Ruderman & Sutherland 1975的初条件完全不同，但结果有相似之处，且存在平行电场的间隙高度也相近。

模拟的对产生过程一般共4~6轮级联，其中粒子主要产生于第1~3轮。

Timokhin & Harding 2015, 2019模拟发现，

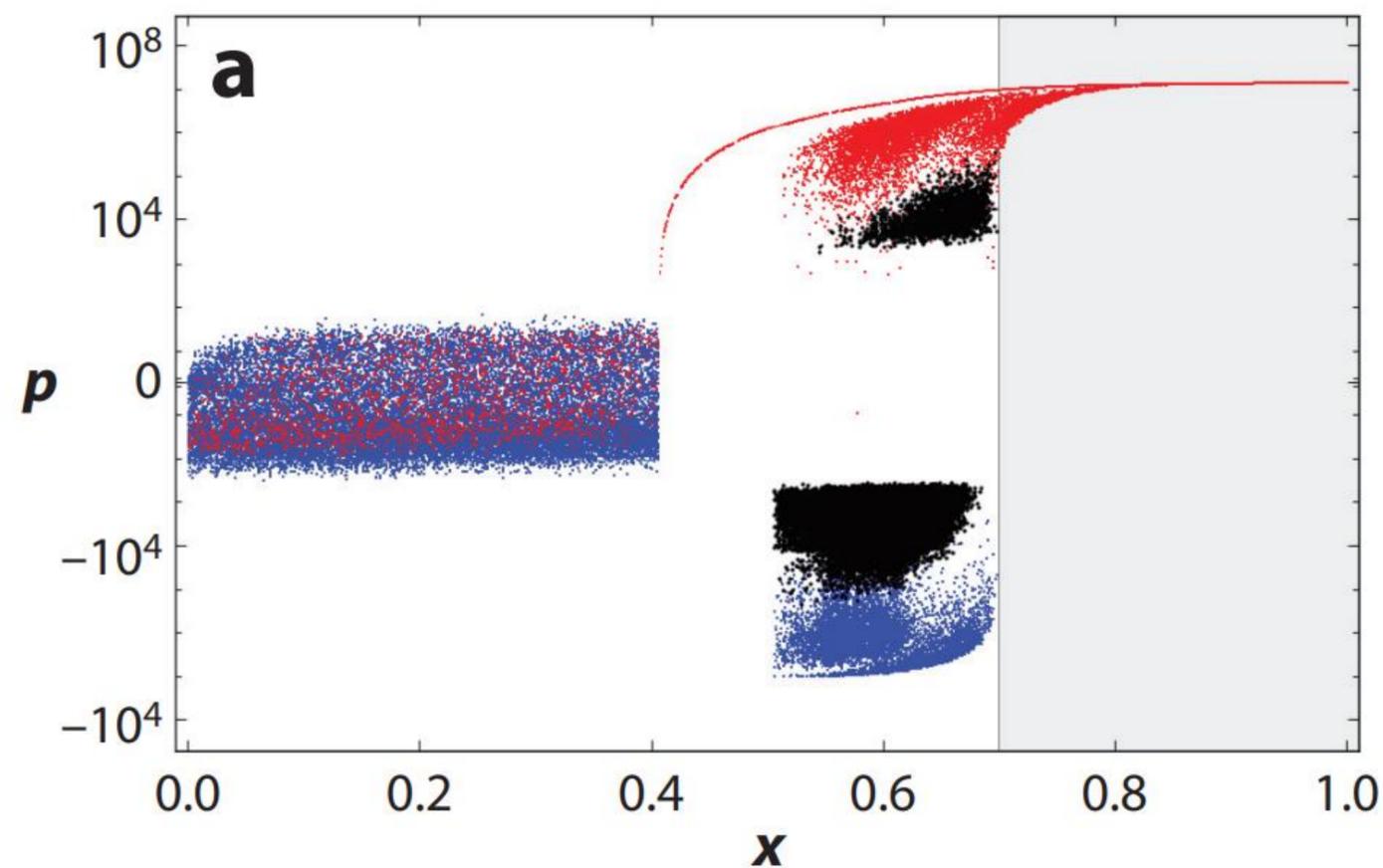
(1) 最大的multiplicity在 10^3 到 10^5 ，对于表面磁场在 3×10^{12} – 10^{13} G 范围的脉冲星而言；

(2) 次级粒子的洛伦兹因子 $\gamma \sim \text{few}$ up to $\gamma \sim 10^4$ 且分布峰值在 $\sim \text{few} \times 10$.

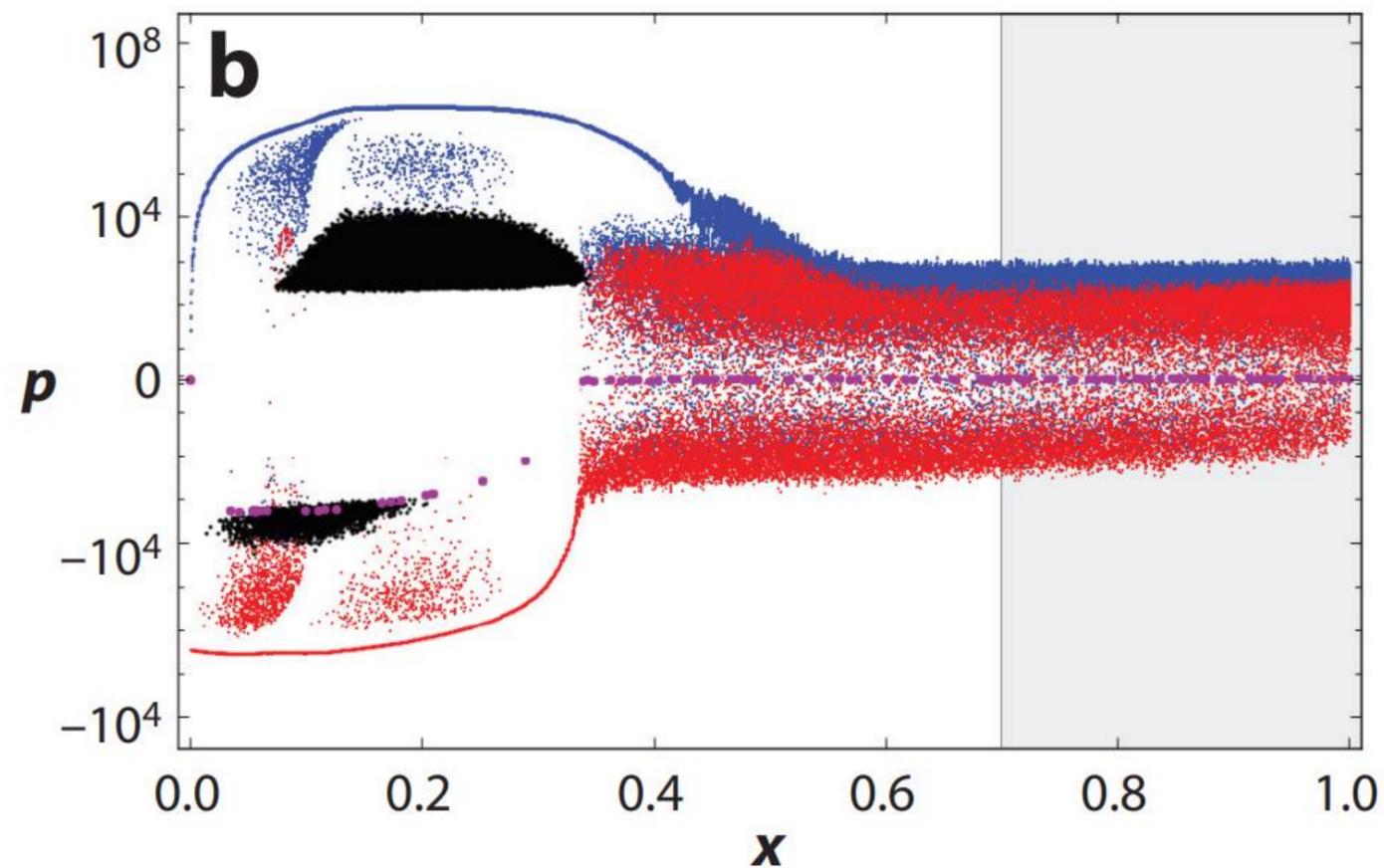


4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (15/17)

除了 $\alpha > 1$ 的区域, $\alpha < 0$ 的区域也能维持对产生过程。



$\alpha < 0$



$\alpha > 1$

蓝色: 电子 红色: 正电子 黑色: 光子

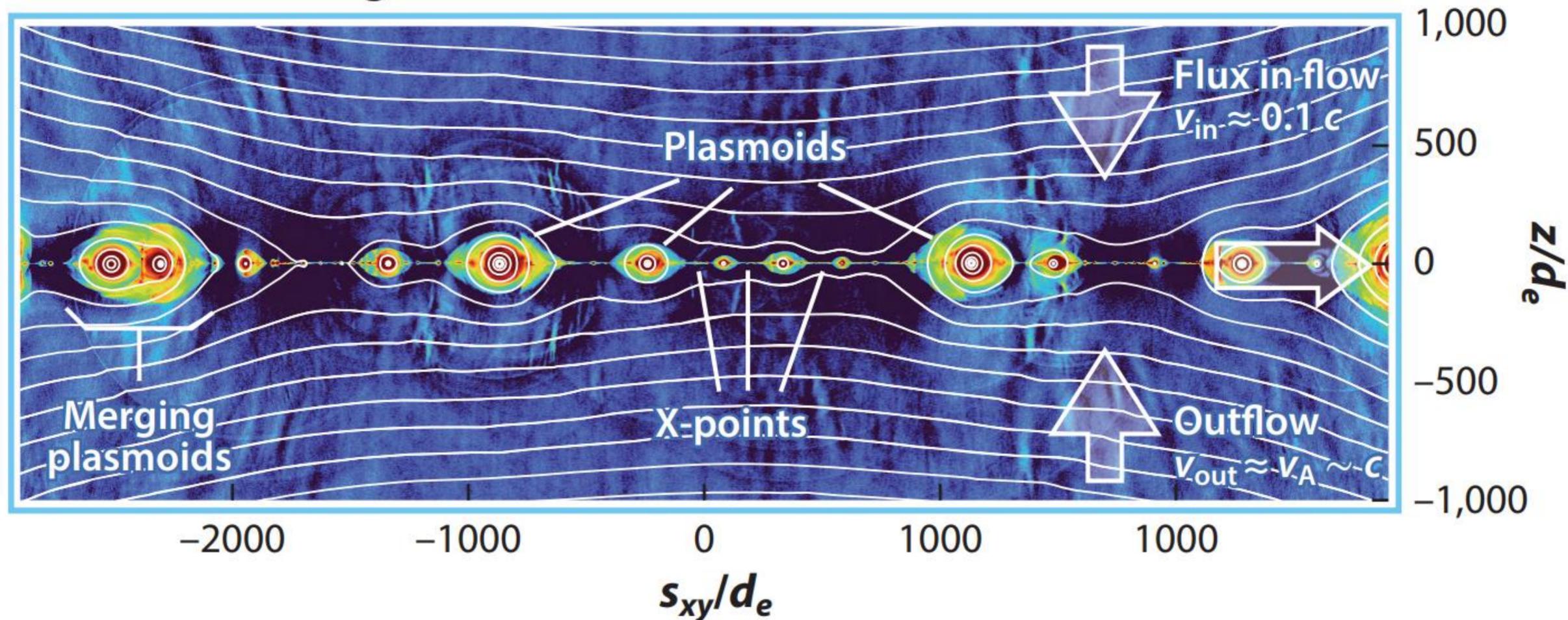
年老脉冲星的对产生过程还有待进一步研究。
对产生模拟跟x射线观测的结合也有必要。

4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (16/17)

(c.2) 电流片/重联区

随着时间演化，电流片会分化出一些plasmoid结构，这些结构彼此之间还会并合。粒子在plasmoids之间的X点被电场加速，又被plasmoids散射（类似费米加速）。由于plasmoids区域磁场强，粒子会显著地通过同步辐射损失能量→可用于生成光变曲线。

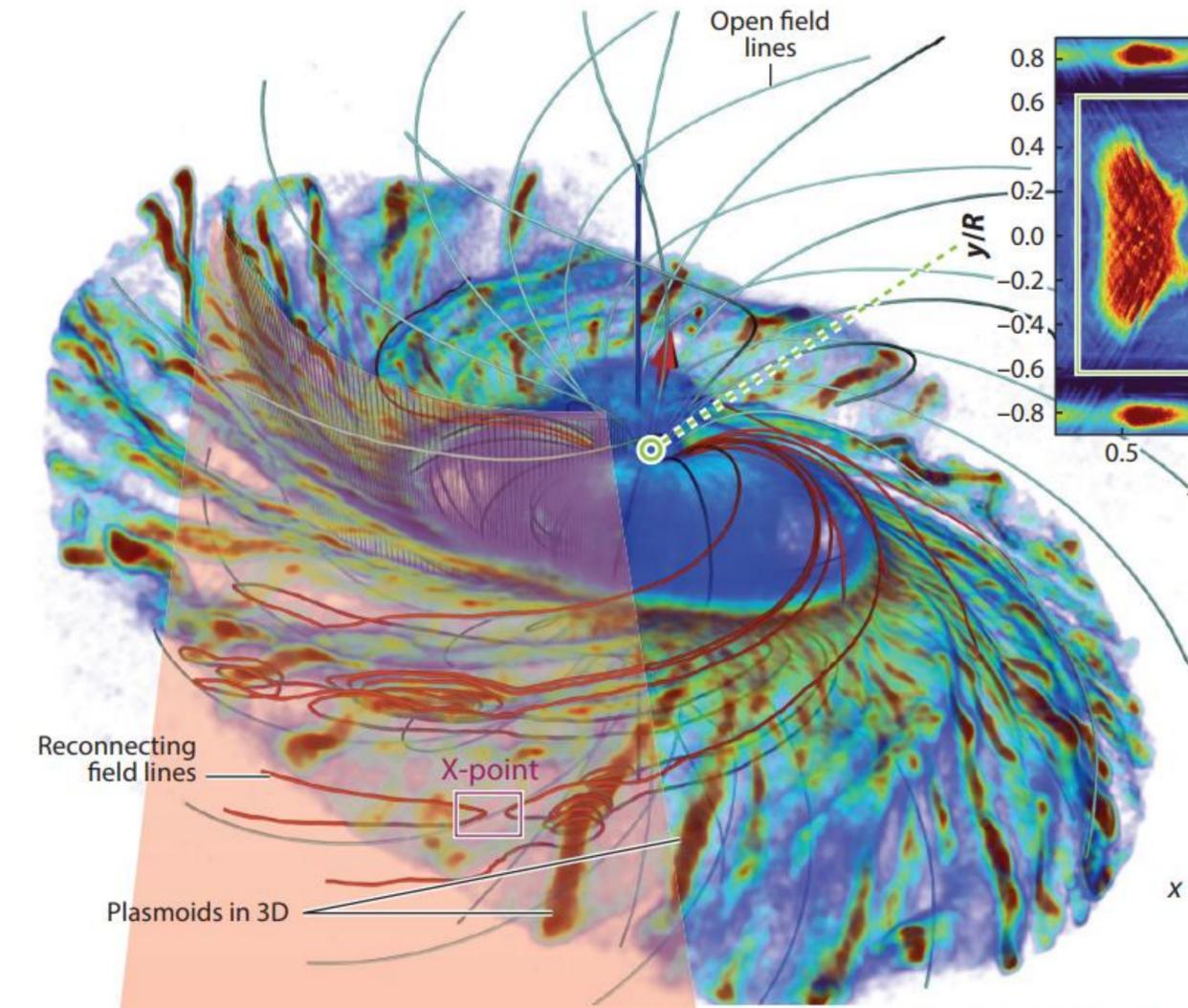
C Reconnecting current sheet (2D PIC)



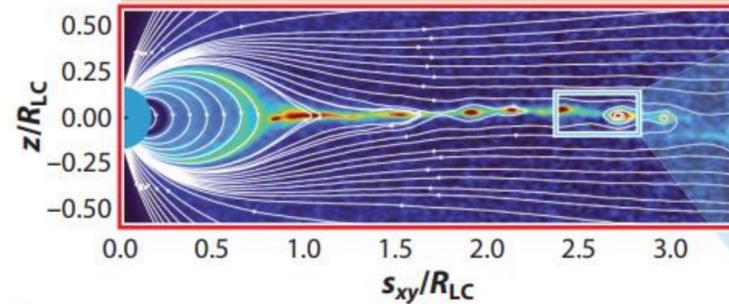
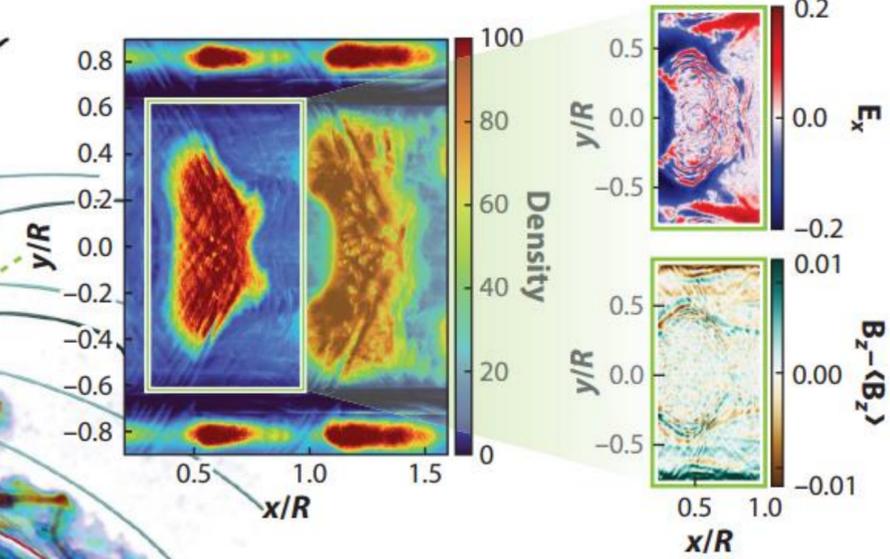
4. 脉冲星磁层现代动理学研究 (17/17)

总结一张图:

a 3D PIC simulation of the global pulsar magnetosphere

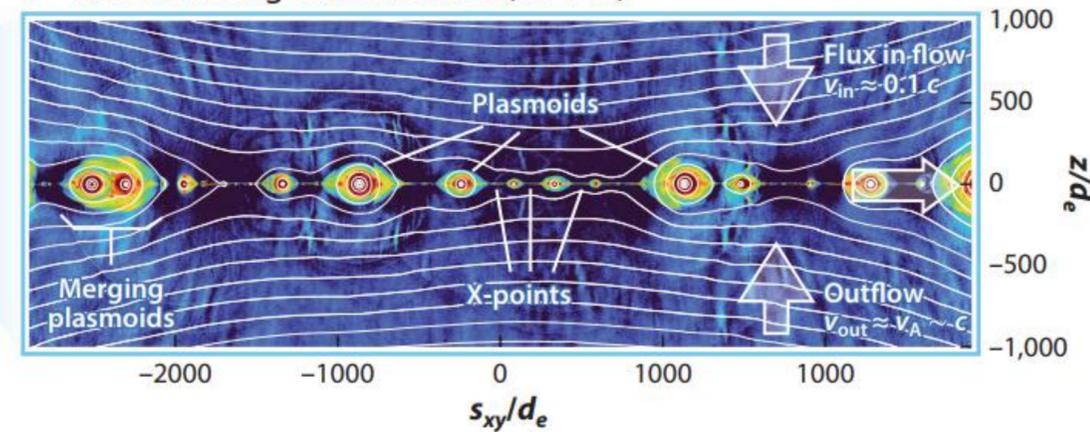


d Intermittent polar cap discharge (2D PIC)



b Magnetic reconnection in the plasmoid unstable current sheet (slice from global 3D PIC)

c Reconnecting current sheet (2D PIC)



谢谢大家