



旋转偶极场近似下的环间隙模型

模拟脉冲星的伽马光变曲线



汇报人：田杰

物理与电子科学学院 · 博士 研究生



指导老师：支启军 教授

贵州师范大学



2026年7月

FPS15

1. 背景

2. 磁层几何

3. 加速电场

4. 模型建模

5. 结果

6. 讨论与总结

观测

Fermi卫星已探测到超过300颗伽马射线脉冲星，观测显示其光变曲线形态极其丰富，涵盖单峰、双峰及复杂多峰结构，其中双峰占55%，并且大部分双峰间距 >0.4 。除此之外，绝大多数高能脉冲星的伽马光变曲线的与其射电光变曲线是非对齐的。

主要理论模型

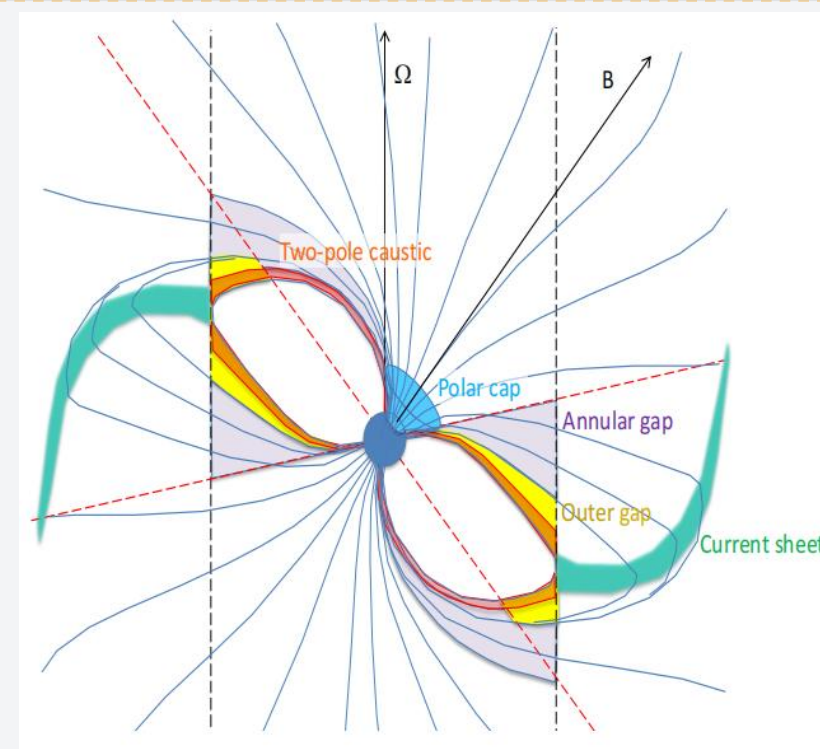


图1：不同辐射模型的示意图(Harding et al. 2022)

研究背景：环间隙模型

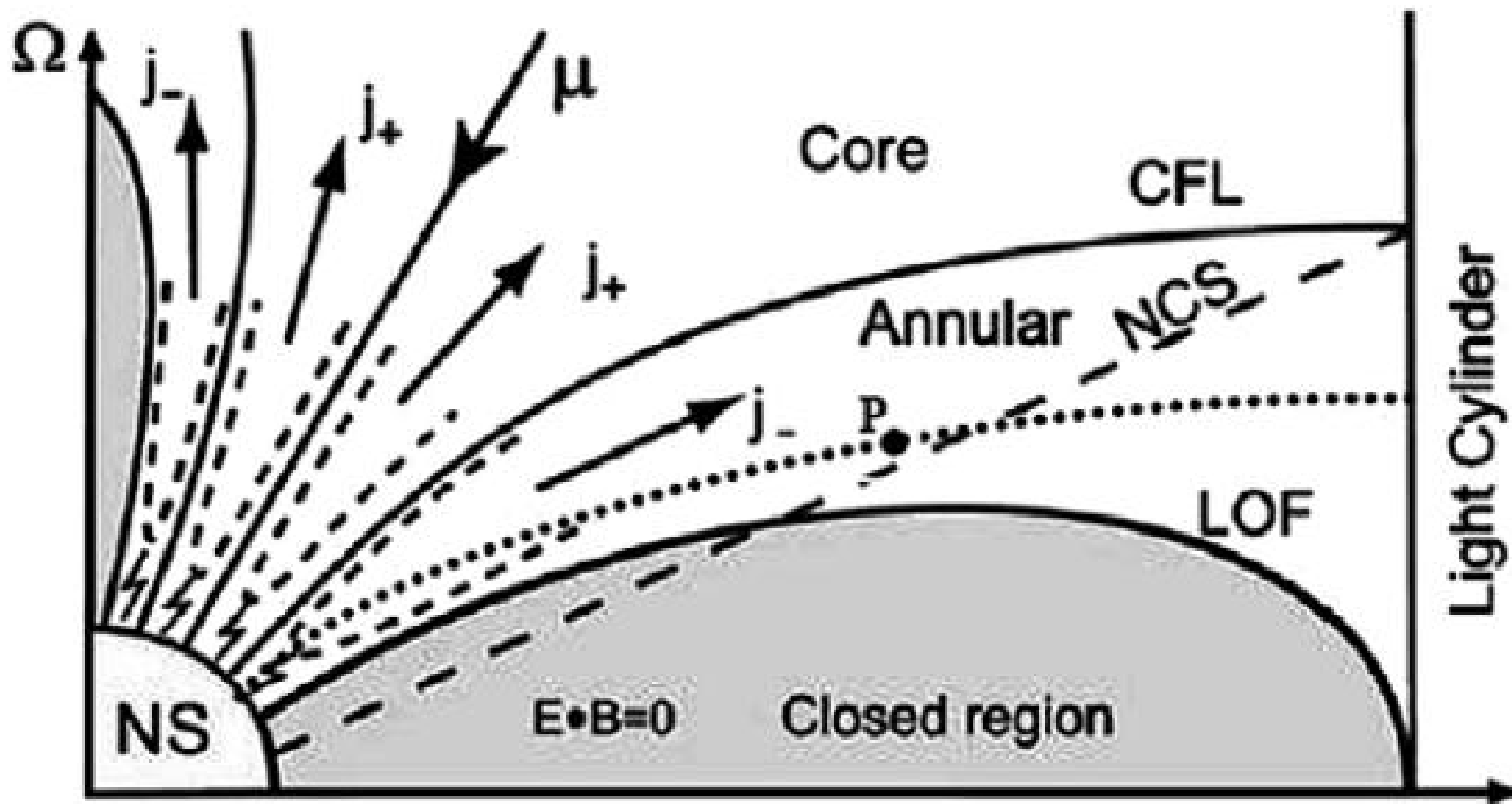


图2：环间隙模型示意图(Qiao et al. 2007)

与近态偶极场相比，旋转偶极场是更为现实的磁层近似，其表达式为：

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{r}} \left[\hat{\mathbf{r}} \cdot \left(\frac{3\mu(t)}{r^3} + \frac{3\dot{\mu}(t)}{cr^2} + \frac{\ddot{\mu}(t)}{c^2r} \right) \right] - \left[\frac{\mu(t)}{r^3} + \frac{\dot{\mu}(t)}{cr^2} + \frac{\ddot{\mu}(t)}{c^2r} \right] \quad (1)$$

$$\mu(t) = \mu(\hat{x} \sin \alpha \cos \Omega t + \hat{y} \sin \alpha \sin \Omega t + \hat{z} \cos \alpha).$$

该磁层的结构仍可以用某些特定特征来描述，例如最后开放磁力线和临界磁力线。

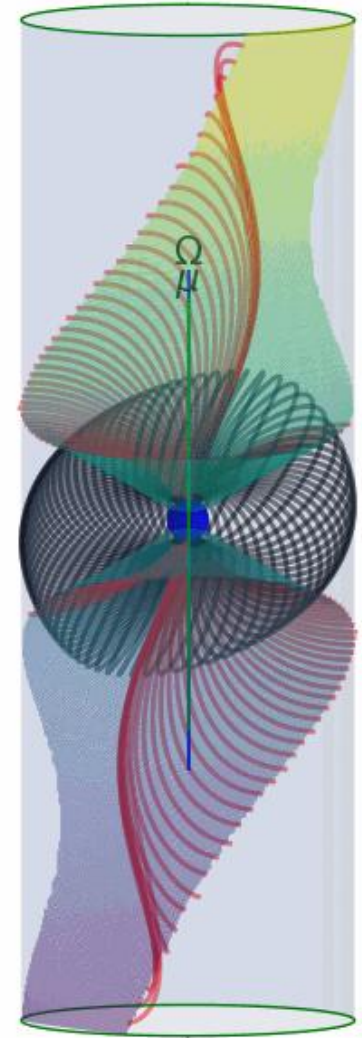


图3：旋转偶极场磁层结构

磁层几何：极帽形状

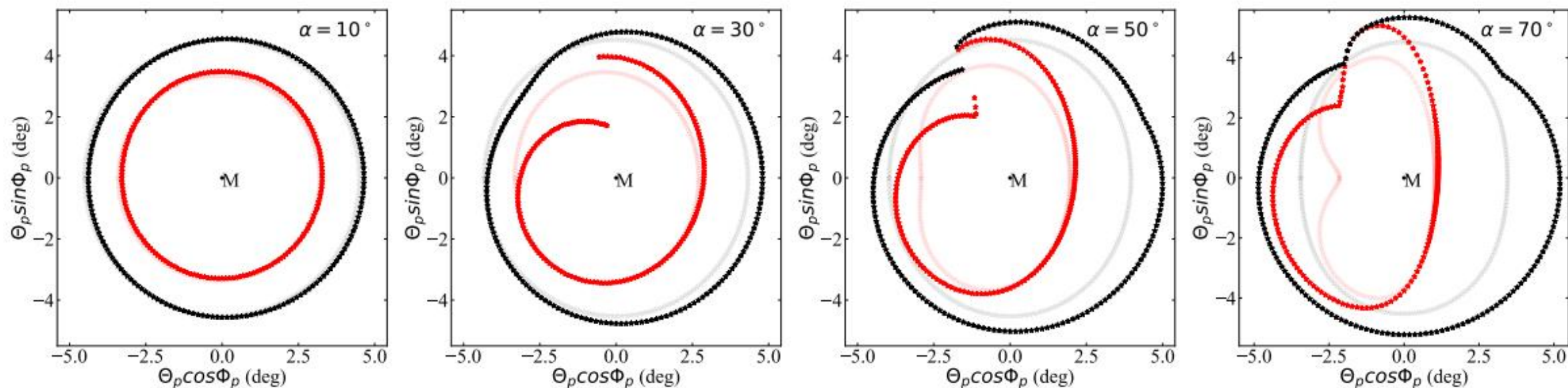


图4：最后开放场线和临界场线的足迹

在旋转偶极场情况下，最后开放磁力线和临界磁力线的足迹与静态偶极场情况下的有所不同，尤其是在较大的 α 值时更为明显。

磁层几何：零电荷面与最后开放场线交点的高度

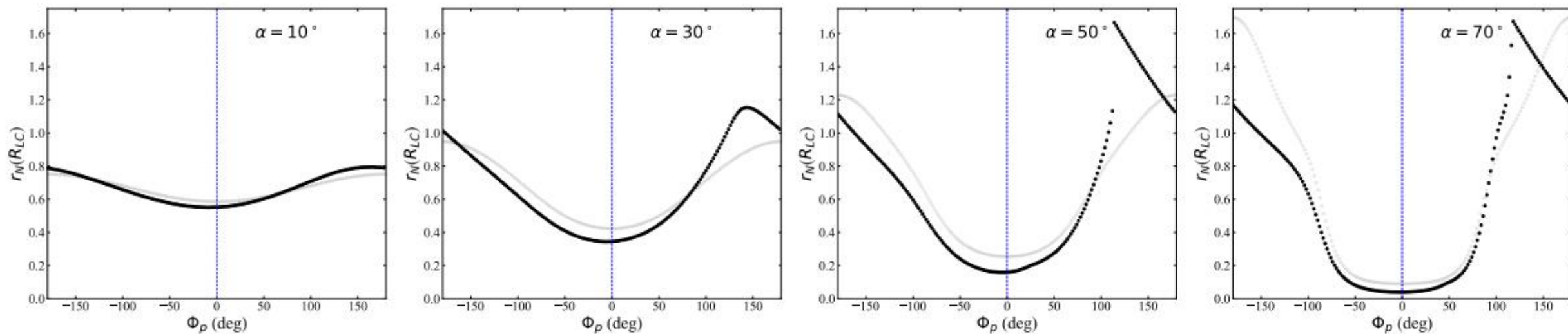


图5：从脉冲星中心到零电荷面与最后一条开放场线交点之间的高度

在旋转偶极场近似中，随着 α 值增大，相对零磁方位角的高度分布逐渐变得不对称，并两种近似下，这些高度分布的范围也存在差异。

加速电场磁力线的偏导数：

$$\frac{dE_{\parallel}}{dS} = 4\pi[\rho_b(S) - \rho_{gj}(S)], \quad (2)$$

根据磁通量和粒子数守恒，外
流电荷密度可表示为

$$\rho_b(S) = \rho_{gj}(S_{out}) \frac{B(S)}{B(S_{out})}. \quad (3)$$

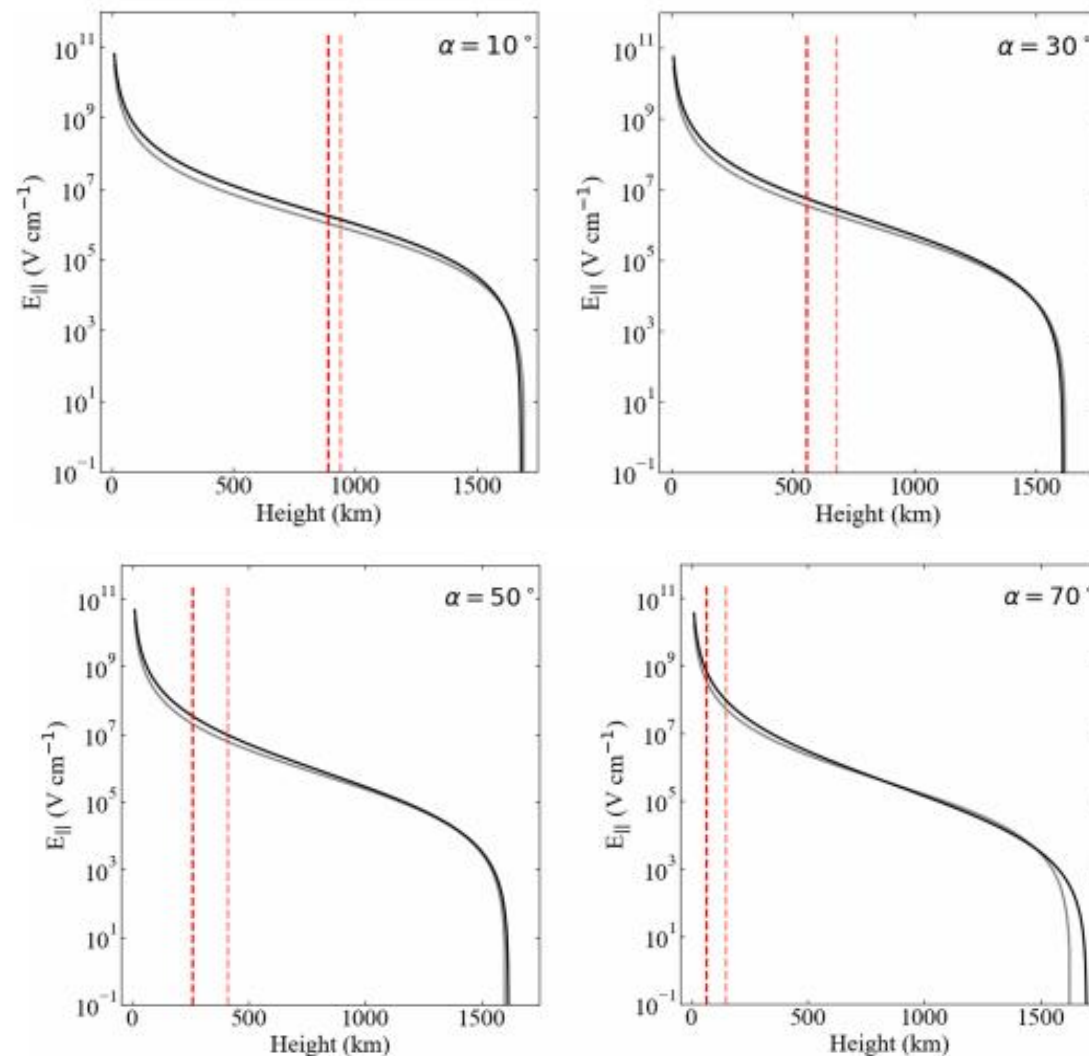


图 6：沿磁力线的加速电场

沿磁力线，辐射强度 $I(S)$ 服从高斯分布：

$$I(S) = I_{\text{peak}}(\Theta_p, \Phi_p) \exp \left\{ -\frac{(S - S_\mu)^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (4)$$

在环区和核区，与 S_μ 的高度分别为：

$$r_{p,\text{ag}} = \lambda \kappa r_N(\Phi_p) + (1 - \lambda) \kappa r_{\text{min}} \quad (5)$$

$$r_{p,\text{cg}} = \epsilon r_{p,\text{ag}} \quad (6)$$

对于足迹磁方位角 Φ_p 相同一组开放磁场线，其分布峰值服从另一个高斯分布

$$I_{\text{peak}}(\Theta_p, \Phi_p) = I_0 \exp \left\{ -\frac{[\Theta_p(\Phi_p) - \Theta_p(a, \Phi_p)]^2}{2\sigma_\theta} \right\} \quad (7)$$

核区： $a = 0$ 对应磁轴， $a = 1$ 对应临界磁力线。

环区： $a = 0$ 对应临界磁力线， $a = 1$ 对应最后开放场线。

此外，还有一个模型参数 Φ_{cut} ，它是一个特殊的磁方位角，他将磁方位角分割为两个区域， $(-180, \Phi_{\text{cut}})$ 和 $(\Phi_{\text{cut}}, 180)$ 区间，在两个区间内，通常采用不同的高斯参数。

目标源： J0631+1036（单峰） J1709-4429（双峰） J1048-5832（三峰）

1. 限制几何：

$$\tan(\psi - \psi_0) = \frac{\sin \alpha \sin(\phi - \phi_0)}{\sin \zeta \cos \alpha - \cos \zeta \sin \alpha \cos(\phi - \phi_0)}, \quad (8)$$

2. 基于限制的辐射极几何，调整其他模型参数，直至目标源的伽马光变曲线被模拟

PSR	Global and Geometric Parameters								Emission Region Scale Parameters							
	α (deg)	ζ (deg)	a_{ag}	a_{cg}	κ	λ	ϵ	Φ_{cut} (deg)	σ_A		$\sigma_{\theta,A}$		σ_C		$\sigma_{\theta,C}$	
									σ_{A1} (R_{LC})	σ_{A2} (R_{LC})	$\sigma_{\theta,A1}$ (rad)	$\sigma_{\theta,A2}$ (rad)	σ_{C1} (R_{LC})	σ_{C2} (R_{LC})	$\sigma_{\theta,C1}$ (rad)	$\sigma_{\theta,C2}$ (rad)
J0631+1036	16	18	0.05	0.88	0.60	0.00	1.30	0	0.030	0.030	0.0040	0.0040	0.010	0.010	0.0015	0.0010
J1709-4429	148	136	0.50	...	0.85	0.94	...	15	0.015	0.025	0.0013	0.0013	...	...	...	...
J1048-5832	155	150	0.01	0.87	0.60	0.90	1.20	0	0.050	0.050	0.0019	0.0019	0.020	0.020	0.0010	0.0010

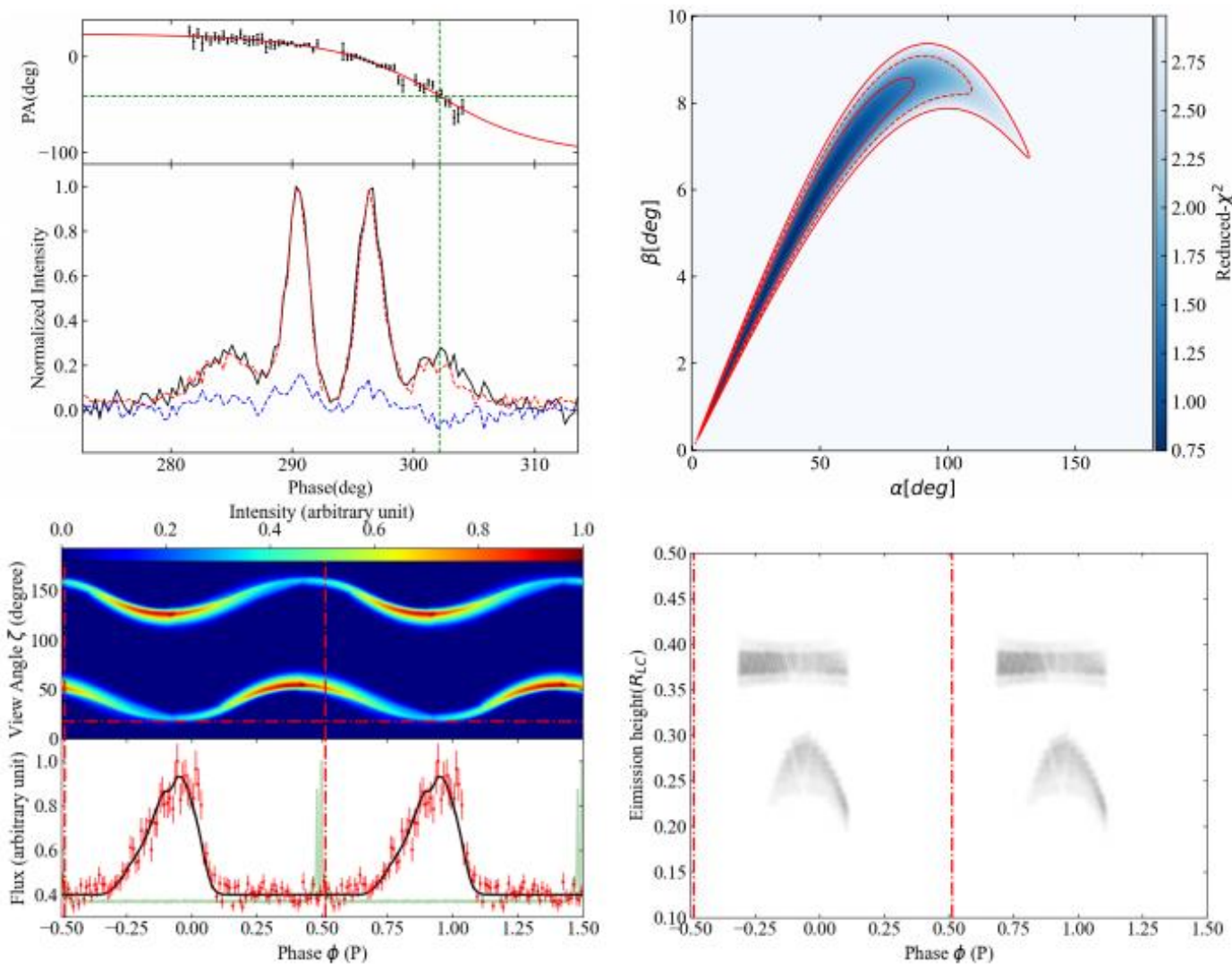
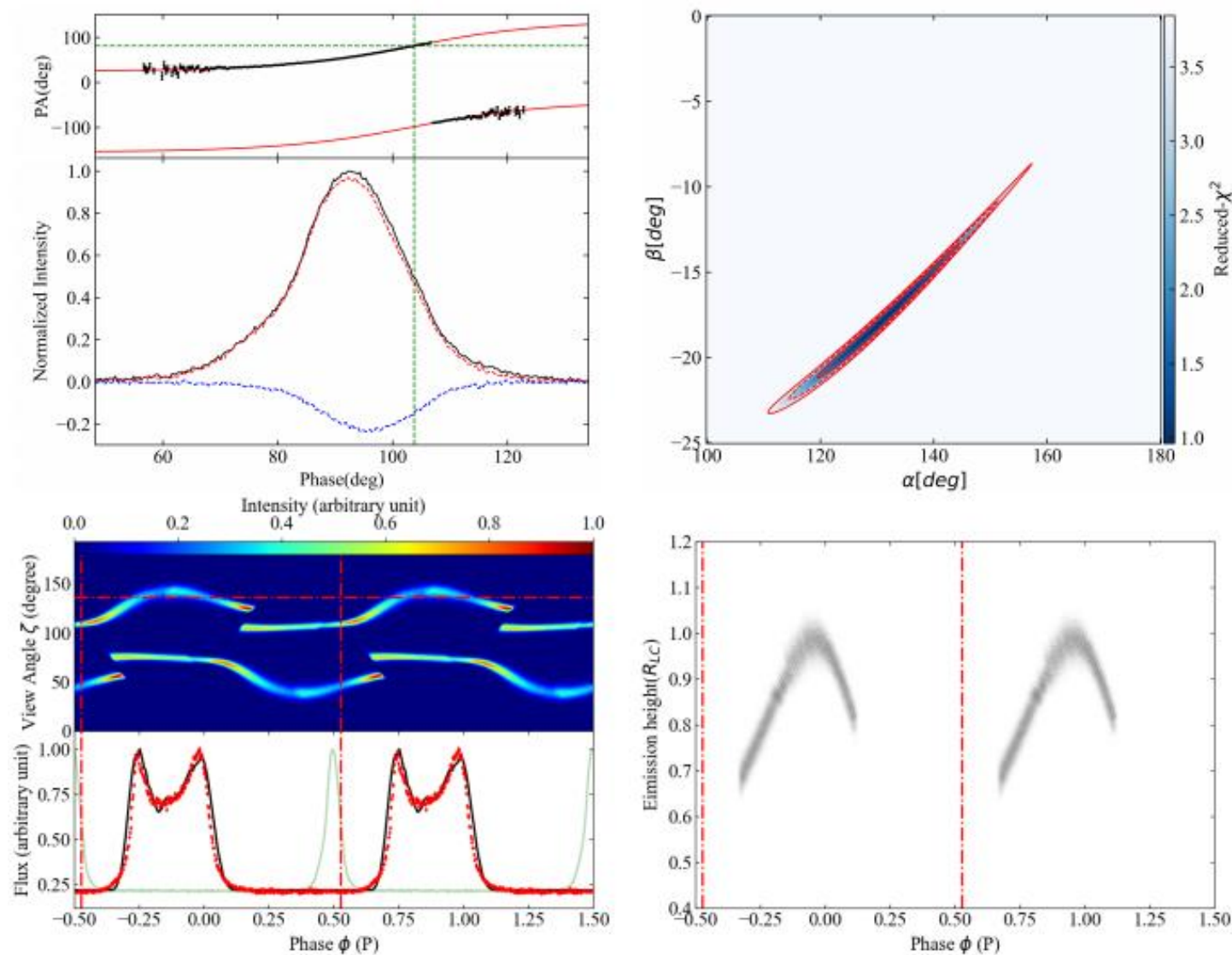


图7: PSR J0631+1036辐射模拟

单峰可能是由于视线穿过核区和环区重叠伽马射辐射束边缘导致的。

辐射高度主要集中在0.2 RLC至0.3 RLC以及0.35 RLC至0.4 RLC之间。



由于 β 角较大，视线可能不扫过核心区辐射辐射束，双峰是由于视线穿过环状区伽马辐射束所致。

伽马射线发射主要来自0.65RLC至1.05RLC之间的高度。

图8：PSR J1709-4429辐射模拟

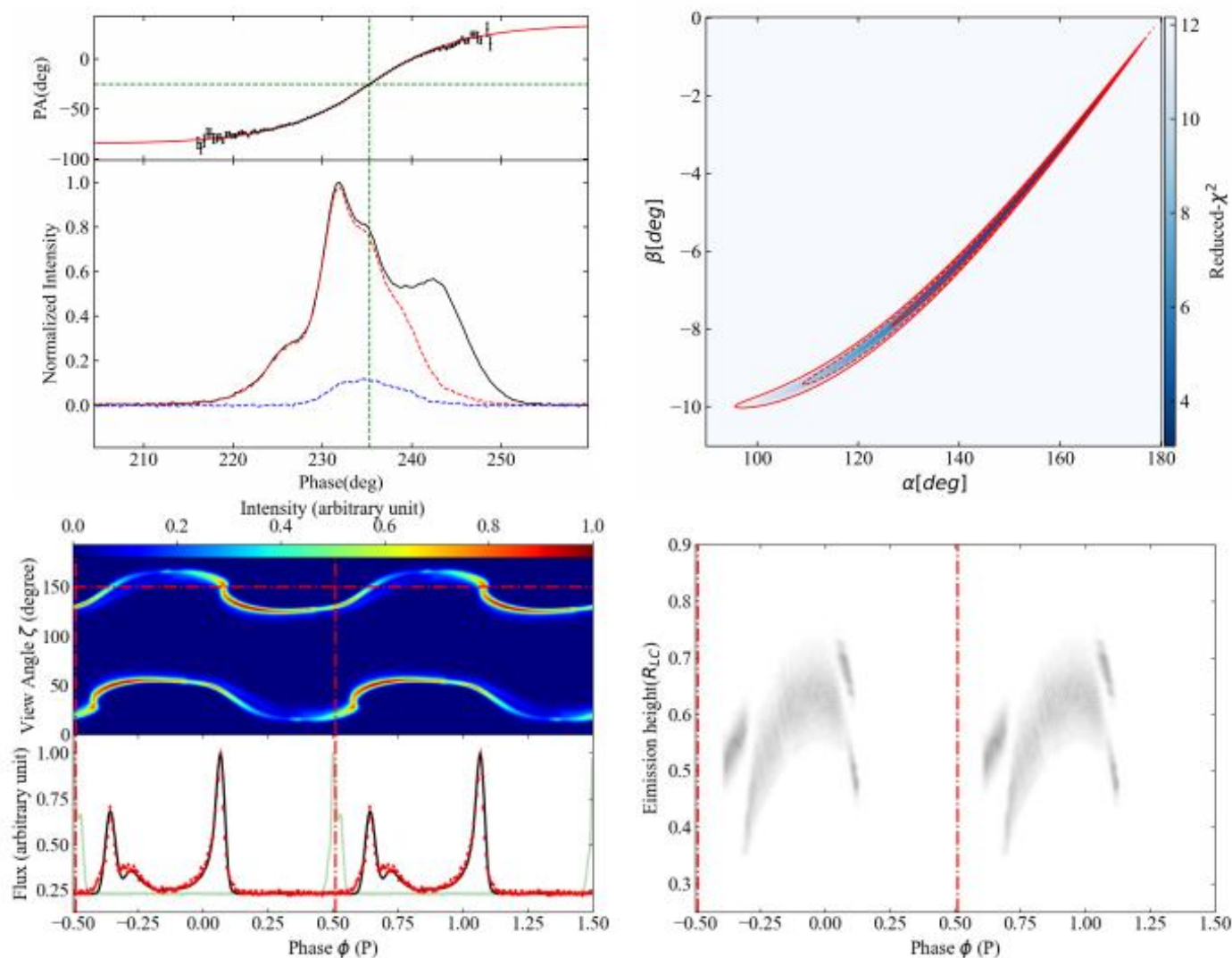


图9：PSR J1048-5832辐射模拟

核区和环区的伽马辐射束部分重叠，
视线穿过部分重叠的辐射束的产生一个
三峰结构的伽马射线光变曲线

伽马射线辐射主要来自高度在
0.35 RLC 至 0.75 RLC 之间的区域

讨论：

1. 先前研究认为环形间隙模型对磁层近似依赖较弱，但由于不同的磁层结构，最后开放场线和临界磁力线有所差异，采用更现实的旋转偶极场近似可能更准确的描述环间隙的辐射区。
2. 若仅考虑单磁极辐射，环间隙模型最多只能产生四峰光变曲线，因此无法解释少数超过四个峰值的脉冲星。这些脉冲星的伽马辐射可能不只是来环形间隙所描述的辐射区，还来自其它的区域。

总结：

1. 采用旋转偶极场近似后，脉冲星的开放场区增大，且最后开放场线、临界场线和零电荷面不再关于子午面对称，导致环区、核区不再不对称，从而产生非对称的辐射束。
2. 我们的模型可以很好的重现单峰，双峰和三峰伽马光变曲线的主要特征，可以为理解脉冲星高能辐射提供了一个几何框架。



感谢聆听

THANKS FOR YOUR ATTENTION

—— 敬请各位老师批评指正 ——