arXiv:2611.32865v1 [astro-ph.HE] 24 Nov 2026

超爱丁顿中子星吸积柱：比较广义相对论辐射磁流体动力学模拟与谱模型

Fatemeh Kayanikhoo, [1] Marios Kouzis, [2]

[1]奥帕瓦西里西亚大学物理研究所计算物理与数据处理研究中心[2]波兰科学院尼古拉·哥白尼天文中心

摘要

中子星吸积柱的几何形态与结构会影响超爱丁顿吸积系统中的X射线辐射。我们对磁化中子星上的超爱丁顿吸积进行了四组轴对称广义相对论辐射磁流体动力学模拟，表面磁场最大值范围为 3×10^{10} 至 1×10^{11} G。我们测量了柱宽度，并根据流速及速度梯度估算了特征辐射激波高度。在四个模型中，角宽度从约0.14 rad减小至0.07 rad，而估算的激波高度则从1.95 km增至3.89 km。随后，我们将所得结果与超爱丁顿Be/X射线双星爆发谱建模得出的最佳拟合值进行比较。我们计算得到的面积等效柱半径在5.2至3.2 km之间变化，其中三个落在使用bwcycl模型从谱结果推断出的范围上部。

关键词： 中子星 – 吸积柱 – 辐射磁流体动力学– 广义相对论 – 超亮X射线源 – 辐射激波

1 引言

在 M82 X-2 中探测到与中子星（NS）自转周期一致的相干脉动，这一发现确立了吸积中子星能够驱动超亮X射线源（ULXs），其各向同性光度比爱丁顿极限高出 100–1000 倍（Bachetti等人，2014年）。超亮X射线源的临界光度由 King等人（2001）提出的束射机制加以解释，并在 KLK模型中得到进一步研究（King等人，2017；King 和 Lasota，2019 年；King 和 Lasota，2020 ）。数值模拟进一步表明，磁化中子星上的超爱丁顿吸积能够

产生与超亮X射线源观测结果一致的束射辐射（Abarca等人，2021；Kayanikhoo 等人，2025b，a）。

足够强的磁场会将物质导向磁极，在那里，辐射压力能够使恒星表面上方的流入物质减速，并支撑起一个致密的沉降区域，即所谓的辐射介导激波。该区域的几何结构会影响辐射从吸积流中逃逸的方式。经典图景认为，在亚临界吸积时，X射线辐射优先沿磁轴方向发射，形成“铅笔束”；而在超临界吸积时，X射线辐射主要通过延展吸积柱的侧壁逃逸，形成“扇束”（Baskoand Sunyaev，1976）。人们将 *Swift J0243.6+6124* 脉冲轮廓随光度发生的变化解释为这些辐射几何结构的变化（Wilson-Hodge 等人，2018；Liu 等人，2022）。

吸积柱的结构也会影响其X射线光谱。速度和密度分布会影响体康普顿化和热康普顿化，而吸积柱几何结构则会影响光子逃逸的路径（Becker 和 Wolff，2022）。利用辐射流体力学吸积柱模型，West 等人(2024) 重现了 *RX J0209.6−7427* 在两种光度状态下的光谱，得到的外部极帽半径约为 0.64km ，辐射声速点高度为 4.9–5.3km ，位于中子星表面上方。

回旋共振散射特征为吸积流几何结构提供了另一项观测约束。在 *V 0332+53* 中，回旋线能量会随 X 射线光度的增加而降低（Tsygankov 等人，2006）。一种解释是，随着光度增加，成线区域会移动到恒星表面上方更远处，此处的局部磁场较弱。这类观测表明，吸积柱的垂直结构会随光度发生变化。这些观测促使人们开展有关吸积柱几何结构和辐射激波结构的数值研究。

已发表的数值研究采用不同的几何结构和物理假设，对超临界吸积柱进行了探讨。Kawashima 等人 （2016）开展了二维辐射流体力学模拟，表明辐射压力能够支撑恒星表面上方的高密度沉降区，从而使光子得以向侧方逸出。在显著更高的吸积率下，Kawashima 和 Ohsuga （2020）开展的类似计算产生了空心锥吸积结构。近期的相对论辐射磁流体力学（磁流体力学）模拟考察了分裂单极磁场构型和散射不透明度对吸积柱结构及其变异性的影响（Sheng 等人，2023）。随后开展的参数扫描将这些计算扩展到了不同的吸积率、磁场和流体几何结构（Zhang等人，2025）。

我们展示了四组关于吸积至具有表面偶极磁场的中子星的广义相对论辐射磁流体力学（GRRMHD）模拟，其中磁场强度范围为 3×10^{10} 至 1×10^{11} G。我们测量了吸积柱几何结构并估计激波高度。随后，我们将等效参数与观测模型中的相应参数进行了比较。

本文结构如下：第2 节介绍数值方法和模拟细节。第3 节计算吸积柱的几何形态。

第4节计算辐射激波高度，第5 节将模型参数与观测模型的参数进行比较，并总结主要结论。

2 数值方法与模拟设置

模拟使用广义相对论辐射磁流体动力学代码 KORAL，该代码由Sądowski等人 (2013)开发，并采用了 Abarca等人 (2021)提出的中子星实现。该代码通过求解质量守恒方程和能动量守恒方程，在固定时空中演化气体与辐射，

$$\nabla_\mu(\rho u^\mu) = 0, \quad \nabla_\mu T^\mu{}_\nu = G_\nu, \quad \nabla_\mu R^\mu{}_\nu = -G_\nu, \tag{1}$$

其中， ρ 表示静质量密度， u^μ 表示流体四速度， $T^\mu{}_\nu$ 和 $R^\mu{}_\nu$ 分别表示磁流体力学与辐射的应力-能量张量，而 G_ν 表示辐射四力，用于描述物质与辐射之间的能量和动量交换。

辐射采用M1闭合方案处理。辐射与物质之间的相互作用包括电子散射、自由-自由发射与吸收以及康普顿化。磁层内低密度、强磁化的区域趋近于由 Abarca等人 (2021)提出的无力状态。恒星磁场通过相对论偶极势初始化（ WassermanandShapiro，1983）。随后，使用约束输运方法，通过磁流体力学感应方程演化磁场。

模拟设置

我们采用的中子星质量为 $M_\star = 1.4\,M_\odot$，恒星半径为 $R_\star = 5\,r_{\rm g} \simeq 10.34$ 千米，其中 $r_{\rm g} = GM_\star/c^2$。模拟以带有单环磁场的平衡环作为初始条件，径向范围从 $34\,r_{\rm g}$ 延伸至 $500\,r_{\rm g}$（见 Kayanikhoo 等人，2025a 及其中的参考文献）。我们在史瓦西时空中使用轴对称（2.5D）网格进行模拟，分辨率为 $N_r \times N_\theta = 512 \times 510$。径向网格按对数间隔分布，而极角在 0.002 至 $(\pi - 0.002)$[1]范围内均匀分布。每个半球中延伸至恒星表面上方 $5\,r_{\rm g}$的区域约包含 67×255 个网格单元。我们设定这一分辨率，以充分解析吸积柱、内边界附近的磁场结构以及相关流动特征，同时尽量减少数值误差。

在恒星表面，我们对吸积物质施加吸收边界条件，遵循Parfrey和 Tchekhovskoy(2017）所述。我们采用 Abarca等人(2021）所描述的辐射反射边界表面，并设定表面反照率为 0.75。

[1] 我们排除了靠近两极的一小段角区域，以避免数值问题。

本文展示了标记为 B03、B05、B07 和 B10 的模拟，每个编号表示最大表面磁场强度 $B_\star$，单位为 10^{10} G。每次模拟运行了 50，$000\,t_g$（其中引力时间为 $t_g = GM/c^3$），相当于约 0.35 秒的物理时间。报告的结果取自约 35，$000\,t_g$ 时间间隔内的时间平均数据。我们仅展示北半球。不过，在计算柱参数时，我们采用北侧和南侧吸积漏斗的平均值。

3 吸积柱的角几何

为刻画吸积柱的结构，我们考察共动辐射能量密度 E 和气体静质量密度 ρ，如图1所示。对于每个模拟，我们定位恒星表面附近的气体密度最大值，并沿极向磁场向外追踪一条路径。追踪路径在色彩图面板中以线条形式显示。随后，我们沿这些路径对 ρ 和 E 进行插值，以获得中间面板中所示的剖面。这里，s_r 是累积路径坐标，从恒星表面向外测量。

两者向都随中子星表面方向增大。在恒星表面上方的每个半径处，它们的数值都会随中子星表面磁场强度的增加而增大。我们注意到，尽管所有模拟都具有相似的初始条件，并且目标吸积率为约爱丁顿极限的20倍，但所得吸积率会随磁场强度增加而增大吸积率 $\dot{M}$（见 [2] 表 $\dot{M}$ 中的1）。ρ 和 E的梯度沿追踪路径变化；然而，这两个量都没有表现出能够直接根据这些剖面确定辐射激波高度的明显不连续性。在 ρ 和 E 向恒星表面方向增大这一现象，在激波后沉降区内的既有辐射磁流体力学模拟中也曾被报道（Zhang等人，2023，2025）。因此，我们使用径向速度及其梯度来估计激波高度，具体方法将在下一节中介绍。

为考察吸积柱的角结构，我们沿着恒星表面上方、固定半径的圆弧提取 $\rho(r_0, s_\theta)$ 和 $E(r_0, s_\theta)$，其中 $r_0 \simeq R_\star$ 和 $0 \lesssim s_\theta \leq \pi/2$。图 1 右侧面板展示了这些量随 s_θ 变化的角分布。我们根据 E 的角分布确定吸积柱的位置和宽度。首先，我们利用分布两端附近的数值估算并扣除背景辐射水平。我们将背景扣除后的分布中最强峰的位置定义为柱位置 θ_c。角宽度 w_θ 定义为该峰的半高全宽（FWHM）。

测得的柱参数汇总于表1中。随着中子星表面磁场强度从模型B03 增至B10，w_θ 从0.14 降至0.07rad。峰值位置 θ_c 在0.46 至0.37 rad之间变化，其中磁场最强的模型与磁轴的角距离更小。

[2] 吸积率是在磁层外、吸积盘已达到准稳态的位置测量的，数值约为 $20\,r_g$（更多细节见 Kayanikhoo 等人，2025a ）。

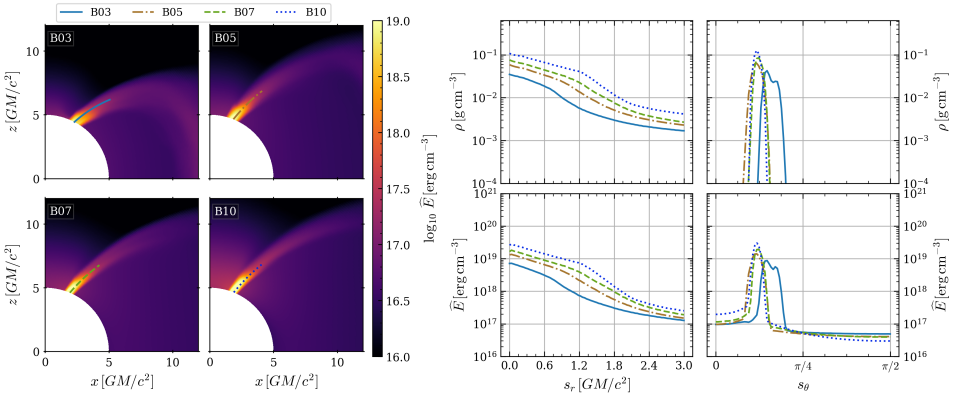

图1。 左： 色彩图显示辐射能量密度的对数值 E；每个面板中的曲线表示穿过单极吸积漏斗的追踪路径。右： 静质量密度 ρ（上方面板）和 $\widehat{E}$（下方面板）的径向和角分布。中间面板显示沿追踪路径的各项量随 s_r 的变化，初始点位于中子星表面。右侧面板显示紧邻恒星表面上方、固定半径处各项量随 s_θ 变化的角分布。

表1。吸积率 $\dot{M}$、从磁轴测量的柱位置 $\theta_{\rm c}$，以及辐射能量剖面的角宽度 w_θ。$r_{0,\ \rm eq}$ 为等面积圆柱半径。

模型	$B_\star$ $(10^{10}\,G)$	$\dot{M}$ $(10^{19}\,\mathrm{g\,s^{-1}})$	$\theta_{\rm c}$ （弧度）	w_θ （弧度）	$r_{0,\rm eq}$ (km)
B03	3	6.72	0.462	0.141	5.18
B05	5	6.91	0.370	0.099	3.91
B07	7	8.37	0.388	0.078	3.55
B10	10	9.54	0.370	0.067	3.22

我们还计算了吸积柱在中子星表面上的等面积圆柱半径$r_{0,\ \rm eq}$ 以便与观测模型进行比较。结果列于表1 中，并在第5节讨论。

4 辐射激波

我们根据沿每条追踪的吸积柱的向内径向速度剖面 $v_{\rm r}$估算辐射激波高度。向内速度计算如下：

$$v_{\rm r} = -\frac{u^r}{u^t}\sqrt{\frac{g_{rr}}{-g_{tt}}}, \tag{2}$$

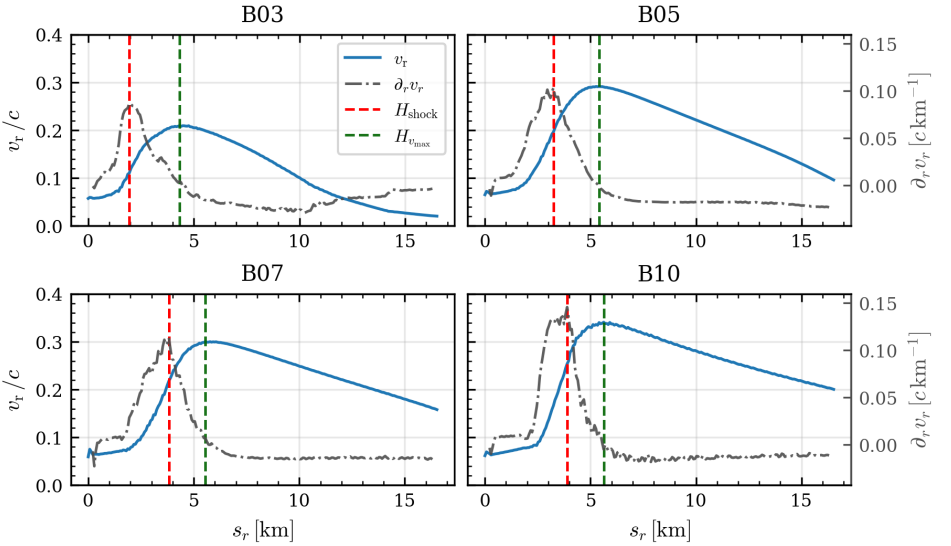

图 2. 沿追踪的吸积柱绘制的向内径向速度剖面 $v_{\rm r}$（蓝色实线）和径向速度梯度 $\partial_r v_r$（灰色点划线）。梯度根据速度剖面计算。红色虚线表示估算的辐射激波高度 $H_{\rm shock}$，由最大正 $\partial_r v_r$ 确定。绿色虚线标出最大向内速度的高度 $H_{v_{\rm max}}$。

其中，u^μ 为气体四维速度，$g_{\mu\nu}$ 为史瓦西度规。我们沿每条追踪路径对速度进行插值，并将其绘制为 s_r 的函数，单位为 km。

向内径向速度剖面经过五点移动平均平滑处理，其梯度 $partial_r v_r$ 根据沿追踪路径的径向坐标计算。激波高度 $H_{\rm shock}$ 根据恒星表面上方最大正速度梯度所在的位置估算，该位置对应减速最强的区域。我们还确定了沿每条追踪路径的最大向内速度高度 $H_{v_{\rm max}}$（见图 2）。

我们根据辐射马赫数达到 1 的位置估算声速点高度 $H_{\mathcal{M}}$。密度加权平均径向马赫数$\langle \mathcal{M}_r \rangle_\rho$ 计算如下

$$\langle \mathcal{M}_r \rangle_\rho(r) = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho\, \mathcal{M}_r \sin\theta\, d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho \sin\theta\, d\theta}, \tag{3}$$

其中，$\mathcal{M}_r = |v_r|/a_{\rm rad}$，辐射声速为 $a_{\rm rad} = 2/3\hat{(}E/\rho)^{1/2}$。角向积分仅限于吸积柱的高密度区域。

估计的激波高度 $H_{\rm shock}$ 和 $H_{v_{\rm max}}$ 及其径向间距 ΔH、最大向内速度 $v_{\rm max}$ 以及 $H_{\mathcal{M}}$ 均汇总于表2中。

表2。 估计的辐射激波高度 $H_{\rm shock}$、速度最大值的高度 $H_{v_{\rm max}}$、径向间距 $\Delta H = H_{v_{\rm max}} - H_{\rm shock}$、最大向内速度 $v_{\rm max}$、声速点高度 $H_{\mathcal{M}}$ 以及各模型的平均侧向光度 $L_{\rm side}$。

模型	$H_{\rm shock}$ (km)	$H_{v_{\rm max}}$ (km)	ΔH (km)	$v_{\rm max}$ (c)	$H_{\mathcal{M}}$ (km)	$\overline{L_{\rm side}}$ (10^{38} erg s^{-1})
B03	1.95	4.32	2.37	0.21	3.25	4.46
B05	3.25	5.41	2.16	0.29	3.26	3.89
B07	3.82	5.55	1.73	0.30	3.72	3.17
B10	3.89	5.63	1.74	0.34	3.91	2.01

我们的结果表明，从模型 B03 到 B10，估计高度 $H_{\rm shock}$ 和 $H_{v_{\rm max}}$ 以及声速点高度 $H_{\mathcal{M}}$ 均有所增加。在全部四个模型中，估计的 $H_{\rm shock}$小于 $H_{v_{\rm max}}$，但与声速点高度 $H_{\mathcal{M}}$几乎相等，B03 模型除外。最大向内速度也随之增加，其相对变化幅度大于高度的变化。与此同时， ΔH 的间距从 2.37 km 减小至 1.74 km。这些结果表明，在磁场更强的模型中，流入物质在远高于恒星表面处达到更高速度，而最强减速区域则向上移动，并且更靠近速度最大值。

我们测量了从光球逸出的光度（见Kayanikhoo 等人，2025a的公式18），该光球位于吸积柱侧面的邻近区域。北部和南部区域的光度 $L_{\rm N}$ 和 $L_{\rm S}$分别在中子星表面以上 10km 范围内计算。我们将平均侧向光度定义为 $L_{\rm side} = (L_{\rm N} + L_{\rm S})/2$。在四个模型中，平均侧向辐射光度随着恒星磁场强度的增加而降低，尽管质量吸积率也在增加（见表2）。这可能表明，在密度更高、磁化程度更强的吸积柱内，辐射平流作用更强。我们注意到，$L_{\rm side}$ 既不是各向同性光度，也不是源的总 bolometric 光度。这些模拟的光度将在Kayanikhoo 等人 （2025a）中详细讨论。

5 讨论与结论

超亮X射线脉冲星的一个近似观测类比，可能是Be/X射线双星（BeXRBs）的巨型II型爆发。在这些罕见事件中，这类系统的总辐射X射线光度可超过典型中子星（$\sim 2 \times 10^{38}$ erg s^{-1}）爱丁顿极限的10倍甚至更多；在最极端的情况下，光度可达到超亮X射线源的水平。银河系BeXRB*Swift J0243.6+6124* 在2017—2018年的巨型爆发期间被确认为银河系首个超亮X射线脉冲星（Wilson-Hodge 等人，2018年），*SMC X-3* 在 $\sim 2.5\times10^{39}$ erg s^{-1}，于2016—2017年达到这一水平（Tsygankov 等人，2017年）；*RX J0209.6-7427* 在 $\sim 2\times10^{39}$ ergs^{-1}，于2019年达到这一水平（Vasilopoulos 等，2020年）。麦哲伦云中的源尤其有价值，因为其距离已被精确确定，且前景吸收较弱，因此其光度相比银河系系统能够测量得可靠得多；此外，其中数次超爱丁顿

爆发得到了*NuSTAR*的观测。因此，主要的BeXRB爆发是通过应用谱模型研究超爱丁顿吸积的理想候选对象。

Becker 和 Wolff（2007，以下称 BW07）的解析模型计算了圆柱形辐射主导吸积柱中黑体、回旋和韧致辐射种子光子的热康普顿化与整体康普顿化。该吸积柱的半径为 r_0，磁场恒定。此模型以 bwcycl 的形式集成于 xspec 中（Ferrigno 等，2009）。Vasilopoulos 等（2025）将该模型应用于麦哲伦云中的超爱丁顿爆发；Kouzis 等（准备中）则将分析扩展至对五个 BeXRB（RX J0520.5-6932、SMC X-2、RX J0209.6-7427、SXP 31、SXP 4.78）的 13 次 NuSTAR 观测，这些天体的爆发峰值达到 $L_{\rm X} \approx$（1.8–20）$\times 10^{38}\,\mathrm{erg\ s^{-1}}$。最佳谱拟合要求 $\dot{M} \approx$（0.9–4.3）$\times 10^{18}\,\mathrm{g\ s^{-1}}$、$B \approx$（3–10）$\times 10^{12}\,\mathrm{G}$ 和 $kT_{\rm e} \approx 3$–7 keV，并且需要有康普顿化韧致辐射光子发射。模型还要求吸积柱半径为 $r_0 \approx 0.8$–4.9 km，约为亚爱丁顿脉冲星通常所得数值的十倍。在 BW07 中，吸积柱顶端$z_{\rm max}$是指模型速度剖面等于局部自由落体速度的高度，也就是流入开始减速的位置。对于拟合的源，$z_{\rm max}$ 范围为$\approx$ 2–15 $R_\star$，且随 $L_{\rm X}/L_{\rm Edd}$增大。

在 BW07 中，吸积物质被引导通过一个半径为 r_0 的圆柱。为将模拟中的几何形状与最佳拟合结果推断出的几何形状进行比较，我们定义了一个等效圆柱，其密度和速度与模拟相同，且承载相同的质量吸积率。由于我们的模拟具有轴对称性，吸积柱可视为一个空心锥，它通过一个以 $\theta_{\rm c}$为中心、角宽度为 w_θ 的圆环与恒星表面相交。因此，对该圆环上的面积元 $dA = R_\star^2 \sin\theta d\theta d\phi$ 进行积分可得

$$A_{\rm ring} = 2\pi R_\star^2 \left[\cos(\theta_{\rm c} - w_\theta/2) - \cos(\theta_{\rm c} + w_\theta/2)\right] \tag{4}$$

BW07 解假设单个圆柱，而在模拟中，M 由两个磁极共享。因此，等效圆柱的面积必须等于两个圆环面积之和，即 $\pi r_{0,\ \rm eq}^2 = 2A_{\rm ring}$，由此可得

$$r_{0,\rm eq} = \sqrt{\frac{2A_{\rm ring}}{\pi}} = 2R_\star \left[\cos(\theta_{\rm c} - w_\theta/2) - \cos(\theta_{\rm c} + w_\theta/2)\right]^{1/2} \tag{5}$$

对于我们的四个模型，$r_{0,\ \rm eq} \approx 5.2$，分别为 3.9、3.6 和 3.2 km（见表1）。这些数值与`bwcycl` 拟合所得到范围的上段（$r_0 \approx 0.8$– 4.9 km）重叠。因此，光谱推断出的较大半径，可能部分源于用实心圆柱描述的两个薄环形吸积柱。

由我们的模拟估算出的柱高与`bwcycl`的结果吻合得较差。为了与最佳拟合 $z_{\rm max}$ 进行直接比较，我们采用 $H_{v_{\rm max}}$，即流入开始减速的高度。我们的模拟结果为 0.42–0。$54\,R_\star$，明显低于`bwcycl` 给出的 $z_{\rm max} \gtrsim 2\,R_\star$（图 3）。模拟柱高与拟合柱高之间的部分差异可能与上方的

BW07 边界条件有关。在我们的模拟中，流入速度从未达到自由落体速度。在 BW07 中，速度仅在恒星表面上方按 $z^{1/2}$ 增长，因此要求其与自由落体速度匹配，会使柱顶位于很高的高度。另一方面，我们的流入变为亚声速的高度 ≈ 3.2–3.9 km（见$H_{\mathcal{M}}$ 表 2），与采用$RX\ J0209.6\text{-}7427$ 的自洽辐射流体动力学模型所得到的辐射声速点高度相当，该模型来自Westetal.（2024）。

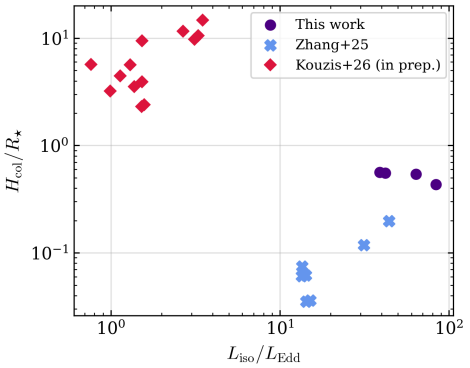

图3。 以中子星半径为单位的吸积柱高度与以爱丁顿单位表示的表观光度之间的关系。红色菱形：$z_{\max}$ 来自 `bwcycl` 对麦哲伦云中五个 BeXRB 在超爱丁顿爆发期间的 13 次 $NuSTAR$ 观测所作的拟合（Kouzis等，准备中）。紫色圆点：我们模拟中流入速度达到最大值时的高度，$H_{v_{\max}}$。蓝色叉号：来自 Zhang等人（2025）的辐射磁流体力学模拟所得激波高度。

这些比较尚属初步，因为模拟系统和观测系统处于参数空间的不同区域。我们的模拟采用了 $M \approx (6.7\text{–}9.5) \times 10^{19}$ g s^{-1} 和 $B_\star \approx (3\text{–}10) \times 10^{10}$ G，而 bwcycl 拟合给出的数值为 $\dot{M} \sim 10^{18}$ g s^{-1} 和 $B \sim 10^{12}$–10^{13} G。

我们模拟得到的平均侧向光度 $L_{\rm side} \approx (2.0\text{–}4.5)\times\overline{10^{38}}$ erg s^{-1}与观测到的爆发光度相当，然而 $L_{\rm side}$ 并非可观测参数。在 $L_{\rm iso}$ 处评估的各向同性（表观）光度 $d = 500\, r_{\rm g}$已在 Kayanikhoo 等人的图12中报告，Kayanikhoo et al. (2025b)，范围约为 39 至 84 $L_{\rm Edd}$。这些数值与 Zhang等人 (2025)的数值一样，均处于超亮X射线源范围内，比观测到的爆发的各向同性等效$L_{\rm X}$ 高出一至两个数量级，如图3所示。

这些模型在几何结构上也存在差异。BW07假设一个具有预设速度剖面的一维圆柱形吸积柱。Zhang等人(2025)的辐射磁流体力学模拟采用分裂单极磁场，并进行磁不透明度计算。相比之下，我们的模拟描述了物质从吸积盘经由偶极磁场吸积到中子星上的过程，使吸积柱几何结构能够自洽地形成。此外，这些模型对辐射过程的处理方式也不同。

总之，我们的广义相对论辐射磁流体动力学模拟表明，在四种模型中，尽管恒星磁场越强，吸积柱越窄，

吸积率也在增加。尽管各模型的吸积率、磁场和几何形状各不相同，但面积等效柱半径与谱模型 BW07 推断值的上限范围重叠。然而，特征柱高仍远小于谱模型给出的数值。模拟在 40–80 $L_{\rm Edd}$ 范围内的表观光度明显高于谱模型推断的表观光度。

我们将采用不同的吸积率和初始条件进行模拟；具体而言，采用较低的 $\dot{M}$ 和较高的 $B_\star$ 进行模拟，以检验柱体半径是否仍然一致，以及柱体高度的差异能否缩小。在磁场更强的模拟中，我们将引入磁不透明度。

致谢

我们感谢 Koral 开发团队的 Olek Sądowski 和 David Abarca。FK 感谢摩拉维亚-西里西亚地区大学代金券计划（注册号 CZ.10.03.01/00/23_042/0000390），该计划隶属于“吸积磁化中子星”项目。本研究通过 e-INFRA CZ（ID:90254）获得捷克共和国教育、青年和体育部的支持。我们衷心感谢波兰高性能计算基础设施 PLGrid ACC Cyfronet AGH 提供计算设施和支持，相关计算资助编号为 PLG/2025/018773。MK 感谢欧盟 HORIZON-MSCA-2023-DN 项目 101168906“TALES：时域分析——研究超大质量黑洞的生命周期与演化”提供的全额资助。

参考文献

Abarca, D., Parfrey, K. 和 Kluźniak, W.（2021），广义相对论辐射磁流体力学模拟中中子星超亮X射线源的束射辐射，《天体物理学杂志快报》，**917**(2), L31，arXiv：2107.01149。Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J. 等（2014），由吸积中子星供能的超亮X射线源，《自然》，**514**(7521), 第 202–204 页。Basko, M. M. 和 Sunyaev, R. A.（1976），具有磁场的吸积中子星的极限光度，《皇家天文学会月刊》，**175**(2), 第 395–417 页。Becker, P. A. 和 Wolff, M. T.（2007），吸积供能X射线脉冲星中的热康普顿化与整体康普顿化，《天体物理学杂志》，**654**(1), 第 435–457 页，arXiv：astro-ph/0609035。Becker, P. A. 和 Wolff, M. T.（2022），吸积供能X射线脉冲星热康普顿化与整体康普顿化的广义解析模型，《天体物理学杂志》，**939**，第 67 页，arXiv：2211.13894。Ferrigno, C., Becker, P. A., Segreto, A., Mineo, T. 和 Santangelo, A.（2009），采用整体与热康普顿化模型研究吸积脉冲星 4U 0115+63，《天文学与天体物理学》，**498**(3), 第 825–836 页，arXiv：0902.4392。

Kawashima, T., Mineshige, S., Ohsuga, K. 和 Ogawa, T.（2016），超高光度X射线脉冲星吸积柱的辐射流体动力学模型，《日本天文学会刊》，68(5), 第 83 页，arXiv: 1608.04211。Kawashima, T. 和 Ohsuga, K.（2020），超亮X射线脉冲星中强磁化中子星的超临界柱状吸积，《日本天文学会刊》，72(1), 第 15 页。Kayanikhoo, F., Kluźniak, W., Abarca, D. 和 Čemeljić, M.（2025a），中子星超高光度X射线源辐射广义相对论磁流体动力学模拟中的能量流与辐射效率，《天体物理学杂志》，995(1), 10，arXiv: 2508.02563。Kayanikhoo, F., Kluźniak, W. 和 Čemeljić, M.（2025b），中等磁化中子星外流造成的超高光度X射线源准直，《天体物理学杂志》，982(2), 95，arXiv: 2502.12282。King, A. 和 Lasota, J.-P.（2019），超亮X射线源中没有磁星，《皇家天文学会月刊》，485(3), 第 3588–3594 页，arXiv：1903.03624。King, A. 和 Lasota, J.-P.（2020），脉动与非脉动超亮X射线源：冰山浮现，《皇家天文学会月刊》，494(3), 第 3611–3615 页，ISSN 0035-8711，arXiv：2003.14019。King, A., Lasota, J.-P. 和 Kluźniak, W.（2017），脉动超高光度X射线源：冰山一角？，《皇家天文学会月刊》，468(1), 第 L59–L62 页，arXiv：1702.00808。King, A. R., Davies, M. B., Ward, M. J., Fabbiano, G. 和 Elvis, M.（2001），外部星系中的超亮X射线源，《天体物理学杂志快报》，552(2), 第 L109–L112 页，arXiv：astro-ph/0104333。Liu, J., Jenke, P. A., Ji, L., Zhang, S.-N., Zhang, S., Ge, M., Liao, J., Li, X. 和 Song, L.（2022），首个银河系超高光度X射线脉冲星 Swift J0243.6+6124 的超爱丁顿吸积，《皇家天文学会月刊》，512(4), 第 5686–5692 页。Parfrey, K. 和 Tchekhovskoy, A.（2017），毫秒脉冲星四种吸积状态的广义相对论模拟，《天体物理学杂志快报》，851(2), 第 L34 页，arXiv：1708.06362。Sądowski, A., Narayan, R., Tchekhovskoy, A. 和 Zhu, Y.（2013），用于广义相对论守恒流体动力学代码中M1闭合辐射处理的半隐式方案，《皇家天文学会月刊》，429(4), 第 3533–3550 页，arXiv：1212.5050。Sheng, X., Zhang, L., Blaes, O. 和 Jiang, Y.-F.（2023），磁不透明度对中子星吸积柱的动力学影响，《皇家天文学会月刊》，524(2), 第 2431–2445 页，arXiv: 2307.02410。Tsygankov, S. S., Doroshenko, V., Lutovinov, A. A., Mushtukov, A. A. 和 Poutanen, J.（2017），SMC X-3：由具有非偶极磁场的中子星供能、距离最近的超亮X射线源，《天文学与天体物理学》，605, A39，arXiv：1702.00966。Tsygankov, S. S., Lutovinov, A. A., Churazov, E. M. 和 Sunyaev, R. A.（2006），2004–2005 年爆发期间的 V0332+53：回旋线与脉冲轮廓的光度依赖性，《皇家天文学会月刊》，371(1), 第 19–28 页。Vasilopoulos, G., Kouzis, M., West, B. F. 和 Becker, P. A.（2025），麦哲伦云中超爱丁顿吸积中子星的光谱研究，《天文学报》，346(1), e20240114。Vasilopoulos, G., Ray, P. S., Gendreau, K. C., Jenke, P. A., Jaisawal, G. K., Wilson-Hodge, C. A., Strohmayer, T. E., Altamirano, D., Iwakiri, W. B., Wolff, M. T., Guillot, S., Malacaria, C. 和 Stevens, A. L.（2020），RX J0209.6-7427 在 2019 年的超爱丁顿爆发：脉动探测及对磁场强度的限制，

《皇家天文学会月刊》，**494**（4），第5350–5359页，arXiv：2004.03022。Wasserman, I. 和 Shapiro, S. L.（1983），脉动X射线源的质量、半径和磁场：“标准”模型是否自洽？，《天体物理学杂志》，**265**，第1036–1046页。West, B. F.、Becker, P. A. 和 Vasilopoulos, G.（2024），RX J0209 的理论分析。6−7427 巨型爆发期间的X射线光谱，《天体物理学杂志快报》，**966**（1），L5，arXiv：2404.16202。Wilson-Hodge, C. A.、Malacaria, C.、Jenke, P. A. 等（2018），中子星内部组成探测器和费米伽马射线暴监视器对首个银河系超亮X射线脉冲星 Swift J0243 的观测。6+6124，《天体物理学杂志》，**863**（1），第9页，arXiv：1806.10094。Zhang, L.、Blaes, O. 和 Jiang, Y.-F.（2023），分裂单极磁场中的中子星吸积柱动力学，《皇家天文学会月刊》，**520**（1），第1421–1438页。Zhang, L.、Blaes, O. 和 Jiang, Y.-F.（2025），中子星吸积柱模拟的参数扫描，《皇家天文学会月刊》，**540**（4），第3934–3946页，arXiv：2506.02288。