

利用 RM-PRS 光度相关性的宇宙学 FRB 研究

RAN GAO ^{1,2} HE GAO ^{1,2} ZHENGXIANG LI ^{1,2} AND YUAN-PEI YANG ^{3,4}

¹*Institute for Frontiers in Astronomy and Astrophysics, Beijing Normal University, Beijing 102206, China*

²*School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

³*South-Western Institute for Astronomy Research, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650504, China*

⁴*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210023, China*

摘要

快速射电暴 (FRBs) 已成为宇宙学研究的强大工具, 特别是通过色散测度 - 红移 ($DM-z$) 关系。本工作提出了一种使用杨-李-张 (YLZ) 经验关系对 FRBs 进行新型校准的方法, 该方法将 FRBs 的旋转测度 (RM) 与其相关联的持久射电源 (PRS) 的亮度联系起来。我们证明了这种方法为宇宙学参数提供了独立约束, 绕过了传统 $DM-z$ 方法固有限制。利用目前包含四个 YLZ 校准 FRBs 样本, 我们得出哈勃常数测量值为 $H_0 = 86.18^{+18.03}_{-14.99} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (68% 置信水平)。蒙特卡洛模拟表明, 未来包含 400 个 FRB-PRS 系统的目录可以将 H_0 的相对不确定性降低到 4.5%。结合 YLZ 校准的 FRBs 与 $DM-z$ 样本揭示了关键的协同效应: 对等化样本 (两种方法均为 $N = 100$) 进行联合分析将 H_0 的相对不确定性降低到 2.9%, 主要是因为 PRS 观测的纳入大大减轻了诸如 IGM 重子质量分数 (f_{IGM}) 和其他与 $DM-z$ 关系固有的宇宙学参数之间的简并性。

1. 介绍

快速射电暴 (FRBs) 是一种高能的天体物理现象, 特征是持续时间仅为毫秒的无线电瞬变 (Lorimer et al. 2007; Thornton et al. 2013; Cordes & Chatterjee 2019; Xiao et al. 2021; Petroff et al. 2022; Zhang 2023)。它们来自银河系外 (Tendulkar et al. 2017a) 且全天空事件率高 (Champion et al. 2016), 以及一些独特的观测特性确保了它们具有成为强大的天体物理和宇宙学探测器的潜力 (Bhandari & Flynn 2021; Wu & Wang 2024)。

弥散度量 (DM) 可以通过测量爆发式无线电信号, 例如 FRB 的到达时间对频率的依赖性来精确获

得, 并且从理论上定义为沿视线方向自由电子柱密度 (n_e) 积分, $DM = \int n_e dl \text{ (pc cm}^{-3}\text{)}$ 。显然, 这个量值的大小取决于沿视线方向的电子分布和源的距离。因此, FRB DM 观测被广泛提议作为一种稳健的方法来调查介入环境, 如在宇宙中普查重子 (McQuinn 2014; Deng & Zhang 2014; Zheng et al. 2014; Macquart et al. 2020) 和探索氢氦再电离时期 (Caleb et al. 2019; Beniamini et al. 2021)。同时, 类似于距离指标, FRB 的 DM 也被广泛用于研究宇宙膨胀率和探测暗能量的本质 (Gao et al. 2014; Zhou et al. 2014; Walters et al. 2018; Kumar & Linder 2019; Hagstotz et al. 2022; James et al. 2022; Kalita et al. 2025; Gao et al. 2024; Wu et al. 2022; Wang et al. 2025)。然而, 几乎所有从观测到的 FRB DM 中推断出的可用宇宙学意义都受到计算星际物质预算参数内在退化以及宿主星系 DM 贡献的大不确定性所显著限制。

gaohe@bnu.edu.cn

zxli918@bnu.edu.cn

ypyang@ynu.edu.cn

arxiv:2504.15119v1 中译本

旋转测量 (RM)，量化由磁化等离子体引起的法拉第旋转，定义为 $\text{RM} = -0.81 \int n_e [B_{\parallel}/\mu\text{G}] dl$ (rad m^{-2})，其中 $B_{\parallel}$ 是沿视线方向的磁场强度。目前，四个重复快速射电暴源—FRB 20121102A (Chatterjee et al. 2017; Marcote et al. 2017)、FRB 20190520B (Niu et al. 2022)、FRB 20201124A (Bruni et al. 2024) 和 FRB 20240114A (Bruni et al. 2024)—已与持续射电源 (PRS) 相关联，且两个 PRS 候选者 (20181030A-S1 和 20190417A-S) 由 Ibik et al. (2024) 报告。这些 PRS 与 FRB 源在空间上重合，它们具有特定的光度 $10^{27} - 10^{29} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ ，并且在 $\sim (1-100) \text{ GHz}$ 处有非热辐射谱。相关的 PRS 揭示了 FRB 源附近存在一个密集和磁化的环境，由构成该环境显著部分的相对论电子产生同步辐射 (Yang et al. 2016; Murase et al. 2016; Dai et al. 2017; Metzger et al. 2017; Margalit & Metzger 2018; Bhattacharya et al. 2024; Minhajur Rahman et al. 2025)。

这些与 PRS 相关的 FRB 源表现出异常高的 RM 值 (请参见表 1 中的观测参数)。Yang et al. (2020, 2022) 推测所有重复暴可能都有一个与其关联的同步辐射 PRS，但只有那些处于密集且高度磁化的环境 (因此具有较大的 RM) 中的重复暴才能被探测到。这种环境依赖性表明 PRS 光度 $L_{\nu, \text{max}}$ 和 $|\text{RM}|$ 之间可能存在相关性 (此后称为 YLZ 关系)，这可能使 FRB-PRS 系统成为类似于 Ia 型超新星的标准烛光。

YLZ 关系式为 (Yang et al. 2020, 2022)

$$L_{\nu, \text{max}} = \frac{64\pi^3}{27} \zeta_e \gamma_{\text{th}}^2 m_e c^2 R^2 |\text{RM}| \simeq 5.7 \times 10^{28} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \times \zeta_e \gamma_{\text{th}}^2 \left(\frac{|\text{RM}|}{10^4 \text{ rad m}^{-2}} \right) \left(\frac{R}{10^{-2} \text{ pc}} \right)^2, \quad (1)$$

其中 γ_{th} 是由 $\gamma_{\text{th}}^2 \equiv \int n_e(\gamma) d\gamma / \int [n_e(\gamma)/\gamma^2] d\gamma$ 定义的典型洛伦兹因子， $n_e(\gamma)$ 为电子的微分分布， $n_{e,0}$ 为总电子数密度 (Bruni et al. 2024)， $\zeta_e \sim \gamma_{\text{obs}} n_e(\gamma_{\text{obs}})/n_{e,0}$ 是在 GHz 频段产生同步辐射的电子分数， $\gamma_{\text{obs}} \sim (2\pi m_e c \nu_{\text{obs}}/eB)^{1/2}$ 是对应于观测频率 $\nu_{\text{obs}} \sim 1 \text{ GHz}$ 的电子洛伦兹因子， B 是 PRS-RM 区域中的磁场强度， R 是对 PRS 和 RM 有贡献的区域半径。

本工作系统地研究了 FRB-PRS 系统对宇宙学参数的约束能力。在第 2 节中，我们利用观测数据和蒙特

卡罗模拟定量评估了 FRB-PRS 系统的独立参数估计能力。第 3 节评估了通过 FRB-PRS 观测与 $\text{DM}_{\text{IGM}}-z$ 方法的协同作用所实现的增强宇宙学约束。一个全面的总结和讨论在第 4 节中给出。

2. PRS-RM 宇宙学

在实践中，可以通过公式 1 从 FRB-PRS 系统中获得观测到的光度距离，

$$D_{\text{L, obs}} = \left(\frac{L_{\nu, \text{max}}}{4\pi F_{\nu, \text{max}}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{16\pi^2}{27} m_e c^2 \zeta_e \gamma_{\text{th}}^2 \frac{R^2}{F_{\nu, \text{max}}} |\text{RM}| \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中模型参数 $\zeta_e \gamma_{\text{th}}^2 (R/10^{-2} \text{ pc})^2$ 假定遵循对数正态分布，其均值为 0 和 $\sigma = \frac{1}{3} \ln(10)$ (参见 Bruni et al. (2024) 中的图 3)。

在理论上，对于平坦的弗里德曼-罗伯特森-沃克 (FRW) 宇宙学，光度距离 D_{L} 由以下公式给出：

$$D_{\text{L, theo}}(z, H_0; \theta) = c H_0^{-1} (1+z) \int_0^z \left(\frac{dz'}{E(z'; \theta)} \right), \quad (3)$$

其中 z 是红移， θ 分别是宇宙学模型参数。

通过在距离模数-红移关系图上将观测数据与理论预测拟合，可以有效约束宇宙学模型参数。这里采用高斯似然函数作为¹

$$\mathcal{L}_{\text{RM}, i}(\mu | H_0, \theta, \sigma_{\mu}, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\mu}^2}} \exp \left(-\frac{(\mu_{\text{obs}, i}(F_{\nu, \text{max}}, \text{RM}) - \mu_{\text{theo}, i}(z, H_0, \theta))^2}{2\sigma_{\mu}^2} \right), \quad (4)$$

其中 $\mu_{\text{obs}} = 5 \log(\frac{D_{\text{L, obs}}}{10 \text{ pc}})$, $\mu_{\text{theo}} = 5 \log(\frac{D_{\text{L, theo}}}{10 \text{ pc}})$ 和最终

$$\mathcal{L}_{\text{RM}} = \prod \mathcal{L}_{\text{RM}, i}. \quad (5)$$

目前，有四个 FRBs 被确认具有 PRS 关联，即 FRB20121102A、FRB20190520B、FRB20201124A 和 FRB20240114A。这四个来源的具体观测参数如表 1 所示。

¹ 距离模数的总误差为 $\sigma_{\mu}^2 = \sigma_{\text{model}}^2 + \sigma_{\mu, \text{obs}}^2$ ，其中观测距离模数的误差可以估计为 $\sigma_{\mu, \text{obs}} = 1.0857 \left[\left(\frac{\sigma_F}{F} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{RM}}}{\text{RM}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ 。考虑到一般情况下 $\frac{\sigma_F}{F}$ 和 $\frac{\sigma_{\text{RM}}}{\text{RM}}$ 很小，容易得出 $\sigma_{\text{model}}^2 \gg \sigma_{\mu, \text{obs}}^2$ ，因此我们在工作中取 $\sigma_{\mu}^2 = \sigma_{\text{model}}^2$ 。

表 1. 确认 PRS 关联的 FRB 样本

FRB	$F_{\nu, \max}$ (μJy)	RM (rad m^{-2})	z	References
FRB20121102A	180	1.4×10^5	0.19273	1,2,3,4
FRB20190520B	202	-3.6×10^4	0.241	5,6
FRB20201124A	20	-889.5	0.0978	7,8
FRB20240114A	46	338.1	0.13	9,10

参考文献: (1)Spitler et al. (2014)(2)Tendulkar et al. (2017b)(3)Marcote et al. (2017)(4)Michilli et al. (2018)(5)Niu et al. (2022)(6)Anna-Thomas et al. (2023)(7)Xu et al. (2022)(8)Bruni et al. (2024)(9)Tian et al. (2024)(10) Bruni et al. (2024)

我们在这张图 1 中展示了这四个距离模数-红移关系的来源。由于这四个来源都处于低红移，这里我们仅使用它们来对哈勃常数进行约束，通过采用一个平坦的 ΛCDM 并设 $\Omega_m = 0.315$ (Aghanim et al. 2020)。约束结果如图 2 所示，具体中位值和误差为 $H_0 = 86.18^{+18.03}_{-14.99}$ 。这一结果与来自宇宙微波背景辐射 (CMB) (Aghanim et al. 2020) 和 SH0ES 团队的本地距离阶梯方法 (Riess et al. 2022) 在 $2-\sigma$ 置信水平下的约束一致。我们证明了即使只有四个来源，通过 YLZ 关系校准的 FRBs 已经可以对哈勃常数提供有意义的限制，尽管目前的限制存在相对较大的不确定性。

具有相关持久射电源的快速射电暴群体预计会显著增加。为了严格评估此类系统在未来调查中的宇宙学限制能力，我们通过受控模拟生成了一个包含 400 个虚拟源的样本。考虑到 PRS 的观测极限，模拟中的参数设置如下： $z \sim U(0.1, 0.5)$ ， $\ln(\zeta_e \gamma_{\text{th}}^2 (R/10^{-2}\text{pc})^2) \sim N(0, 1/3)$ 以及宇宙学参数是平坦的 ΛCDM ，带有 $H_0 = 67.36$ 和 $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ $\Omega_m = 0.315$ (Aghanim et al. 2020)。我们在图 3 的距离模数-红移关系图上展示了 400 个模拟源。这里我们使用这些模拟数据来对 H_0 和 Ω_m 进行约束。

我们的结果显示，对于足够大的样本，通过 YLZ 关系校准的 FRBs 可以对哈勃常数施加严格的限制，达到推导不确定性的 $\Delta H_0/H_0 \sim 4.5\%$ 精度。然而，

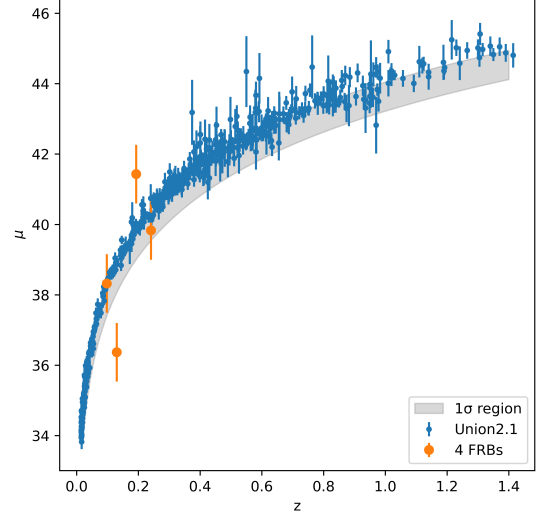


图 1. 红移距离模数图，橙色是上述四个 FRB 计算的结果，其中阴影带表示它们的约束 1σ 置信区域，作为参考，蓝色是 union2.1 Suzuki et al. (2012) 的结果。

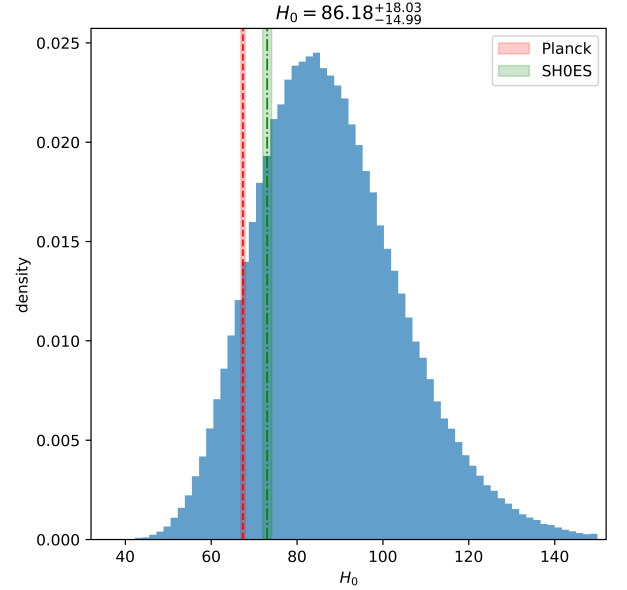


图 2. 哈勃常数的概率密度函数，源自四个快速射电暴源。来自普朗克 (Aghanim et al. 2020) 和 SH0ES (Riess et al. 2022) 的参考约束分别用红色和绿色阴影区域表示。

如果未来的 FRB 样本仍然局限于假设的低红移区域 (例如, $z < 0.5$)，它们约束 Ω_m 的能力将保持次优状态，不确定性在当前观测先验下可能超过 50%。

3. PRS-RM-DM 宇宙学

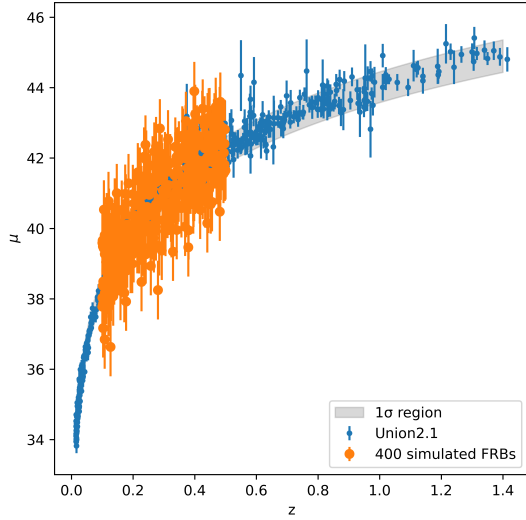


图 3. 红移距离模数图，橙色表示 400 个模拟的快速射电暴，其中阴影带指示它们的约束 1σ 置信区域，作为参考蓝色表示 union2.1 (Suzuki et al. (2012)) 的结果。

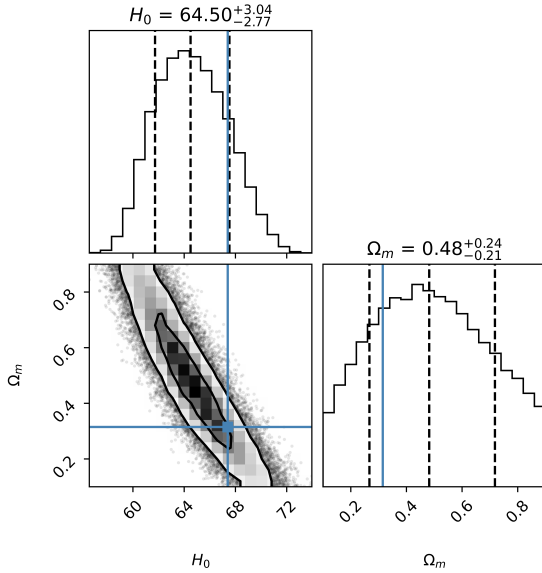


图 4. 预期的哈勃常数 H_0 和物质密度 Ω_m 联合约束，来自文中描述的 400 个模拟 FRB。

我们还考虑了通过结合 $DM-z$ 关系和 YLZ 关系来约束宇宙学参数。总观测到的 $DM(DM_{\text{obs}})$ 包含多个组成部分：银河系成分 DM_{MW} ，银晕成分 DM_{halo} ，主星系成分 DM_{host} 和星际介质成分 DM_{IGM} ，

$$DM_{\text{obs}} = DM_{\text{MW}} + DM_{\text{halo}} + DM_{\text{IGM}} + \frac{DM_{\text{host}}}{1+z}, \quad (6)$$

其中 z 是红移， DM 的单位是 pc cm^{-3} 。对于平坦的 ΛCDM 宇宙， $\overline{DM}_{\text{IGM}}$ 被描述如下 (Gao et al. 2014):

$$\overline{DM}_{\text{IGM}}(z) = \frac{3\Omega_b c H_0 f_{\text{IGM}}(Y_H + \frac{1}{2}Y_P)}{8\pi G m_p} \int_0^z \frac{1+z'}{E(z')} dz', \quad (7)$$

其中质子质量是 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，重子密度是 $\Omega_b = 0.0486$ ，存在于 IGM 中的重子分数是 $f_{\text{IGM}} = 0.85$ (Koch Ocker et al. 2022)，而 $Y_H = \frac{3}{4} Y_P = \frac{1}{4}$ 是氢和氦的质量分数。

对于 DM_{IGM} ，我们采用广泛使用的似然函数进行估计 (Macquart et al. 2020)

$$p_{\text{cosmic}}(\Delta) = A \Delta^{-\beta} \exp \left[-\frac{(\Delta^{-\alpha} - C_0)^2}{2\alpha^2 \sigma_{\text{DM}}^2} \right], \Delta > 0, \quad (8)$$

其中， $\Delta = DM_{\text{IGM}}/\overline{DM}_{\text{IGM}}$ ， $\alpha = \beta = 3$ 与在 Macquart et al. (2020) 中使用的值相同， σ_{DM} 是有效标准差。在这里我们使用了由 Zhang et al. (2021) 所用的 IllustrisTNG 宇宙学模拟给出的 $A, C_0, \sigma_{\text{DM}}$ 的最佳拟合参数。

对于 DM_{host} 的概率密度函数，我们使用对数正态分布：

$$p_{\text{host}}(DM_{\text{host}}|\mu_{\text{host}}, \sigma_{\text{host}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} DM_{\text{host}} \sigma_{\text{host}}} \exp \left(-\frac{(\ln DM_{\text{host}} - \mu_{\text{host}})^2}{2\sigma_{\text{host}}^2} \right). \quad (9)$$

其中，根据 Macquart et al. (2020) 的结果，参数采用 $e^{\mu_{\text{host}}} = 0.66$ ， $\sigma_{\text{host}} = 0.42$ ，并且已修正 $DM_{\text{host}} \rightarrow DM_{\text{host}}/(1+z)$ 。因此给出一般的似然函数：

$$\mathcal{L}_{\text{DM}} = \prod_i^N \int_0^{DM_{\text{E}, i}} p_{\text{host}, i}(DM_{\text{host}}) p_{\text{cosmic}, i} dDM_{\text{host}}, \quad (10)$$

其中 $DM_{\text{E}, i} = DM_{\text{obs}, i} - DM_{\text{MW}, i} - DM_{\text{halo}, i}$

当联合纳入 $DM_{\text{IGM}}-z$ 关系和 YLZ 关系时，我们通过统计独立性构建组合似然函数：

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = \mathcal{L}_{\text{RM}} \times \mathcal{L}_{\text{DM}}. \quad (11)$$

这里我们使用了由 Wang et al. (2025) 收集的 FRB-DM 数据，采用了一个参考晕贡献 $DM_{\text{halo}} = 55 \text{ pc cm}^{-3}$ 。我们首先单独使用 DM 数据在不同的

银河电子密度模型下计算宇宙学限制, 即 YMW16 模型 (Yao et al. 2017) 和 NE2001 模型 (Cordes & Lazio 2002)。在对银河晕电子含量 ($DM_{\text{halo}} \in [30, 80] \text{ pc cm}^{-3}$) (Zhang 2023) 进行约束后, 我们应用了一个保守的选择标准 $DM_{\text{obs}} - DM_{\text{MW}} \geq 80 \text{ pc cm}^{-3}$ 以确保星际介质 (IGM) 贡献的稳健分离。此过滤排除了初始样本中 Wang et al. (2025) 的 6 个 FRB 在 NE2001 银河电子密度模型中的情况, 以及在 YMW16 模型中的 4 个 FRB。

这里我们仅约束哈勃常数, 采用一个平坦的 Λ CDM, 其中 $\Omega_m = 0.315$ (Aghanim et al. 2020)。得出的 H_0 值为 $67.55^{+2.72}_{-2.81} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 和 $71.16^{+2.76}_{-2.80} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。结果与 Wang et al. (2025) 中所示的情况很好地一致, 这表明仅利用 $DM_{\text{IGM}} - z$ 关系以及大约 100 个快速射电暴的当前样本可以将哈勃常数约束到约 4% 的相对不确定性。在此基础上, 我们首先通过添加通过 YLZ 关系校准的 4 个快速射电暴来纳入联合宇宙学参数估计。然而, 由于 YLZ-快速射电暴样本量有限且统计上贡献不足, 仅导致约束精度略有提高。

为了探索未来前景, 我们在假设更大的 YLZ-FRB 样本的情况下进行了模拟。为确保两个探测器之间的统计一致性, 我们生成了一个虚拟的 YLZ-FRB 目录, 其规模与现有的 $DM_{\text{IGM}} - z$ 样本相匹配。关键的是, 模拟的 H_0 值是从根据 $DM_{\text{IGM}} - z$ 约束得出的后验分布中抽取的。这种方法最大限度地减少了先验诱导的偏差, 使联合约束精度的评估更加稳健。

我们的研究表明, 通过结合两个数据集对 H_0 的联合约束显著优于任一单独样本的结果, 实现了相对不确定性为 $\Delta H_0 / H_0 \sim 2.9\%$ 的效果, 合并后的样本量为 200 (100 $DM_{\text{IGM}} - z$ 和 100 YLZ-calibrated FRBs)。这种改进与理论预期一致, 因为引入持续射电源观测显著缓解了诸如 IGM 重子质量分数 (f_{IGM}) 和其他固有存在于 $DM_{\text{IGM}} - z$ 关系中的宇宙学参数之间的简并性。

所有约束结果均示于图 5 和表 2 中。

4. 结论与讨论

快速射电暴代表了限制宇宙学参数的一种有前景的探测手段。虽然先前的研究主要集中在利用色散

表 2. 约束结果在 H_0 上带有 1 个 σ 不确定性

Method	Electron Density Model	
	YMW16	NE2001
DM only	$67.55^{+2.72}_{-2.81}$	$71.16^{+2.76}_{-2.80}$
DM + 4 RM	$68.15^{+2.67}_{-2.68}$	$71.63^{+2.72}_{-2.72}$
DM + RM_{sim}	$67.26^{+1.96}_{-1.92}$	$70.52^{+2.02}_{-2.03}$

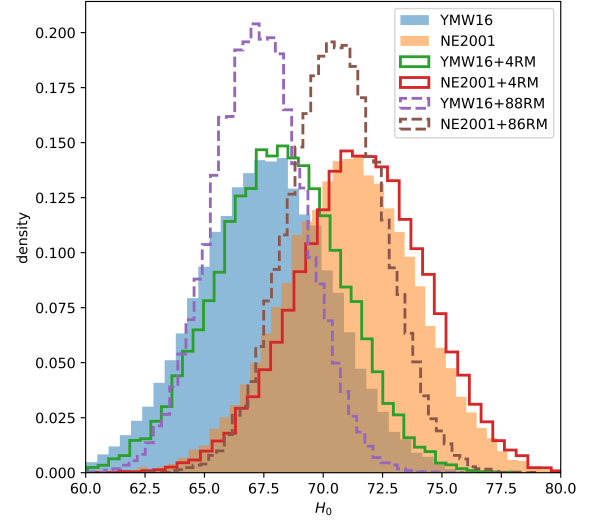


图 5. 该图说明了从 FRB 数据的多探针分析中得出的 H_0 约束条件。阴影区域代表仅来自弥散度量 (DM) 约束的 PDF: 蓝色对应 YMW16 银河电子密度模型, 橙色对应 NE2001。实线表示来自观测到的 DM 和 RM 数据的联合约束, 绿色对应 YMW16, 红色对应 NE2001。虚线 (紫色: YMW16, 棕色: NE2001) 显示了将观测到的 DM 与模拟的 RM 数据结合后的预期约束。

测量-红移 ($DM_{\text{IGM}} - z$) 关系, 本工作引入了一种新的方法, 即利用杨-李-张经验关系来校准快速射电暴用于宇宙学参数估计。这种经验关系是 FRB 的 RM 与其相关联的持续射电源在 FRB-脉冲星共存系统中亮度之间的关联性。

我们的分析表明, 当前的四个 YLZ 校准 FRBs 样本已经为哈勃常数 H_0 提供了有意义的限制, 得出 $H_0 = 86.18^{+18.03}_{-14.99} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。基于模拟目录的预测显示, 未来的 400 个 FRB-PSR 系统样本可以实现对 H_0 约束的相对精度为 4.5%。

令人惊讶的是,将现有的 $\text{DM}_{\text{IGM}}-z$ 样本 ($N \sim 100$) 与当前的 YLZ-FRB 数据相结合产生的精度与仅使用 $\text{DM}_{\text{IGM}}-z$ 分析 ($\Delta H_0/H_0 \sim 4.0\%$) 相当,因为有限的 YLZ 样本量阻碍了显著的协同效应。然而,模拟匹配样本大小 (100 个 $\text{DM}_{\text{IGM}}-z$ 和 100 个 YLZ 校准 FRBs),这是下一代仪器如平方公里阵列 (SKA) 可实现的目标,预测将显著改善 $\Delta H_0/H_0 \sim 2.9\%$ 。这一改进源于 PRS 派生的参数先验,如 IGM 重子质量分数 (f_{IGM}) 和其他固有与 $\text{DM}_{\text{IGM}}-z$ 关系的宇宙学参数。此外,联合分析预计将收紧对 f_{IGM} 的约束,这突显了多探针协同作用在下一代 FRB 宇宙学中的关键角色。

至关重要的是,来自 YLZ 关系的宇宙学约束本质上取决于参数组合 $\zeta_e \gamma_{\text{th}}^2 (R/10^{-2} \text{ pc})^2$, 其中这些天

体物理先验中的系统偏差可能会在 H_0 的确定中引入不可忽略的偏差。此外,尽管在这种初步分析中忽略了 RM 测量中的观测不确定性,但未来实现必须严格考虑极化校准误差以确保宇宙学推断的无偏性。

最后,我们想指出,在完成我们的手稿后,我们了解到有独立的工作提出了密切相关的想法 (Zhang & Zhang 2025)。尽管方法不同,两项研究都得出了相同的结论,即 YLZ 关系可能作为 FRB 宇宙学的新探测手段。

确认

此项工作得到了中国国家 SKA 计划 (2022SKA0130100)、国家自然科学基金 (项目 12373040, 12473047, 12322301, 12275021) 和中国国家重点研发计划 (2024YFA1611603, 2023YFC2206702, 2021YFC2203001) 的支持。

REFERENCES

- Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., et al. 2020, *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6, doi: [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910)
- Anna-Thomas, R., Connor, L., Dai, S., et al. 2023, *Science*, 380, 599 – 603, doi: [10.1126/science.abo6526](https://doi.org/10.1126/science.abo6526)
- Beniamini, P., Kumar, P., Ma, X., & Quataert, E. 2021, *MNRAS*, 502, 5134, doi: [10.1093/mnras/stab309](https://doi.org/10.1093/mnras/stab309)
- Bhandari, S., & Flynn, C. 2021, *Universe*, 7, 85, doi: [10.3390/universe7040085](https://doi.org/10.3390/universe7040085)
- Bhattacharya, M., Murase, K., & Kashiyama, K. 2024, arXiv e-prints, arXiv:2412.19358, doi: [10.48550/arXiv.2412.19358](https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19358)
- Bruni, G., Piro, L., Yang, Y.-P., et al. 2024, *Nature*, 632, 1014, doi: [10.1038/s41586-024-07782-6](https://doi.org/10.1038/s41586-024-07782-6)
- Bruni, G., Piro, L., Yang, Y. P., et al. 2024, *Discovery of a PRS associated with FRB 20240114A*. <https://arxiv.org/abs/2412.01478>
- Caleb, M., Flynn, C., & Stappers, B. W. 2019, *MNRAS*, 485, 2281, doi: [10.1093/mnras/stz571](https://doi.org/10.1093/mnras/stz571)
- Champion, D. J., Petroff, E., Kramer, M., et al. 2016, *MNRAS*, 460, L30, doi: [10.1093/mnrasl/slw069](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slw069)
- Chatterjee, S., Law, C. J., Wharton, R. S., et al. 2017, *Nature*, 541, 58, doi: [10.1038/nature20797](https://doi.org/10.1038/nature20797)
- Cordes, J. M., & Chatterjee, S. 2019, *ARA&A*, 57, 417, doi: [10.1146/annurev-astro-091918-104501](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091918-104501)
- Cordes, J. M., & Lazio, T. J. W. 2002, arXiv e-prints, astro, doi: [10.48550/arXiv.astro-ph/0207156](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0207156)
- Dai, Z. G., Wang, J. S., & Yu, Y. W. 2017, *ApJL*, 838, L7, doi: [10.3847/2041-8213/aa6745](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa6745)
- Deng, W., & Zhang, B. 2014, *ApJL*, 783, L35, doi: [10.1088/2041-8205/783/2/L35](https://doi.org/10.1088/2041-8205/783/2/L35)
- Gao, D. H., Wu, Q., Hu, J. P., et al. 2024, *Measuring Hubble Constant Using Localized and Unlocalized Fast Radio Bursts*, arXiv, doi: [10.48550/arXiv.2410.03994](https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.03994)
- Gao, H., Li, Z., & Zhang, B. 2014, *The Astrophysical Journal*, 788, 189, doi: [10.1088/0004-637x/788/2/189](https://doi.org/10.1088/0004-637x/788/2/189)
- Hagstotz, S., Reischke, R., & Lilow, R. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511, 662, doi: [10.1093/mnras/stac077](https://doi.org/10.1093/mnras/stac077)
- Ibik, A. L., Drout, M. R., Gaensler, B. M., et al. 2024, *ApJ*, 961, 99, doi: [10.3847/1538-4357/ad0893](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad0893)
- James, C. W., Ghosh, E. M., Prochaska, J. X., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516, 4862, doi: [10.1093/mnras/stac2524](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2524)
- Kalita, S., Bhatporia, S., & Weltman, A. 2025, *Fast Radio Bursts as Probes of the Late-Time Universe: A New Insight on the Hubble Tension*, arXiv, doi: [10.48550/arXiv.2410.01974](https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.01974)
- Koch Ocker, S., Cordes, J. M., Chatterjee, S., et al. 2022, *The Astrophysical Journal*, 931, 87, doi: [10.3847/1538-4357/ac6504](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6504)
- Kumar, P., & Linder, E. V. 2019, *Physical Review D*, 100, 83533, doi: [10.1103/PhysRevD.100.083533](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.083533)

- Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., Narkevic, D. J., & Crawford, F. 2007, *Science*, 318, 777, doi: [10.1126/science.1147532](https://doi.org/10.1126/science.1147532)
- Macquart, J. P., Prochaska, J. X., McQuinn, M., et al. 2020, *Nature*, 581, 391, doi: [10.1038/s41586-020-2300-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2300-2)
- Macquart, J.-P., Prochaska, J. X., McQuinn, M., et al. 2020, *Nature*, 581, 391, doi: [10.1038/s41586-020-2300-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2300-2)
- Marcote, B., Paragi, Z., Hessels, J. W. T., et al. 2017, *The Astrophysical Journal Letters*, 834, L8, doi: [10.3847/2041-8213/834/2/L8](https://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/L8)
- Margalit, B., & Metzger, B. D. 2018, *ApJL*, 868, L4, doi: [10.3847/2041-8213/aaedad](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaedad)
- McQuinn, M. 2014, *ApJL*, 780, L33, doi: [10.1088/2041-8205/780/2/L33](https://doi.org/10.1088/2041-8205/780/2/L33)
- Metzger, B. D., Berger, E., & Margalit, B. 2017, *ApJ*, 841, 14, doi: [10.3847/1538-4357/aa633d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa633d)
- Michilli, D., Seymour, A., Hessels, J. W. T., et al. 2018, *Nature*, 553, 182 – 185, doi: [10.1038/nature25149](https://doi.org/10.1038/nature25149)
- Minhajur Rahman, S., Acharya, S. K., Beniamini, P., & Granot, J. 2025, *arXiv e-prints*, arXiv:2504.01125, doi: [10.48550/arXiv.2504.01125](https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.01125)
- Murase, K., Kashiyama, K., & Mészáros, P. 2016, *MNRAS*, 461, 1498, doi: [10.1093/mnras/stw1328](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1328)
- Niu, C.-H., Aggarwal, K., Li, D., et al. 2022, *Nature*, 606, 873 – 877, doi: [10.1038/s41586-022-04755-5](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04755-5)
- Petroff, E., Hessels, J. W. T., & Lorimer, D. R. 2022, *A&A Rv*, 30, 2, doi: [10.1007/s00159-022-00139-w](https://doi.org/10.1007/s00159-022-00139-w)
- Riess, A. G., Yuan, W., Macri, L. M., et al. 2022, *The Astrophysical Journal Letters*, 934, L7, doi: [10.3847/2041-8213/ac5c5b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5c5b)
- Spitler, L. G., Cordes, J. M., Hessels, J. W. T., et al. 2014, *The Astrophysical Journal*, 790, 101, doi: [10.1088/0004-637x/790/2/101](https://doi.org/10.1088/0004-637x/790/2/101)
- Suzuki, N., Rubin, D., Lidman, C., et al. 2012, *The Astrophysical Journal*, 746, 85, doi: [10.1088/0004-637x/746/1/85](https://doi.org/10.1088/0004-637x/746/1/85)
- Tendulkar, S. P., Bassa, C., Cordes, J. M., et al. 2017a, *Astrophysical Journal Letters*, 834, L7, doi: [10.3847/2041-8213/834/2/L7](https://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/L7)
- Tendulkar, S. P., Bassa, C. G., Cordes, J. M., et al. 2017b, *The Astrophysical Journal Letters*, 834, L7, doi: [10.3847/2041-8213/834/2/L7](https://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/L7)
- Thornton, D., Stappers, B., Bailes, M., et al. 2013, *Science*, 341, 53, doi: [10.1126/science.1236789](https://doi.org/10.1126/science.1236789)
- Tian, J., Rajwade, K. M., Pastor-Marazuela, I., et al. 2024, *MNRAS*, 533, 3174, doi: [10.1093/mnras/stae2013](https://doi.org/10.1093/mnras/stae2013)
- Walters, A., Weltman, A., Gaensler, B. M., Ma, Y.-Z., & Witzemann, A. 2018, *Astrophysical Journal*, 856, 65, doi: [10.3847/1538-4357/aaaf6b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaaf6b)
- Wang, Y.-Y., Gao, S.-J., & Fan, Y.-Z. 2025, *Probing Cosmology with 92 Localized Fast Radio Bursts and DESI BAO*, arXiv, doi: [10.48550/arXiv.2501.09260](https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.09260)
- Wu, Q., & Wang, F.-Y. 2024, *Statistical Properties and Cosmological Applications of Fast Radio Bursts*, arXiv, doi: [10.48550/arXiv.2409.13247](https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.13247)
- Wu, Q., Zhang, G.-Q., & Wang, F.-Y. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, 515, L1, doi: [10.1093/mnrasl/slac022](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slac022)
- Xiao, D., Wang, F., & Dai, Z. 2021, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 64, 249501, doi: [10.1007/s11433-020-1661-7](https://doi.org/10.1007/s11433-020-1661-7)
- Xu, H., Niu, J. R., Chen, P., et al. 2022, *Nature*, 609, 685 – 688, doi: [10.1038/s41586-022-05071-8](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05071-8)
- Yang, Y.-P., Li, Q.-C., & Zhang, B. 2020, *ApJ*, 895, 7, doi: [10.3847/1538-4357/ab88ab](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab88ab)
- Yang, Y.-P., Lu, W., Feng, Y., Zhang, B., & Li, D. 2022, *ApJL*, 928, L16, doi: [10.3847/2041-8213/ac5f46](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5f46)
- Yang, Y.-P., Zhang, B., & Dai, Z.-G. 2016, *ApJL*, 819, L12, doi: [10.3847/2041-8205/819/1/L12](https://doi.org/10.3847/2041-8205/819/1/L12)
- Yao, J. M., Manchester, R. N., & Wang, N. 2017, *ApJ*, 835, 29, doi: [10.3847/1538-4357/835/1/29](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/1/29)
- Zhang, B. 2023, *Reviews of Modern Physics*, 95, 035005, doi: [10.1103/RevModPhys.95.035005](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.95.035005)
- Zhang, Z. J., Yan, K., Li, C. M., Zhang, G. Q., & Wang, F. Y. 2021, *Astrophysical Journal*, 906, 49, doi: [10.3847/1538-4357/abceb9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abceb9)
- Zhang, Z.-L., & Zhang, B. 2025, *Cosmological Parameters Estimate from Persistent Radio Sources of Fast Radio Bursts*, doi: [10.3847/2041-8213/adcc30](https://doi.org/10.3847/2041-8213/adcc30)
- Zheng, Z., Ofek, E. O., Kulkarni, S. R., Neill, J. D., & Juric, M. 2014, *ApJ*, 797, 71, doi: [10.1088/0004-637X/797/1/71](https://doi.org/10.1088/0004-637X/797/1/71)
- Zhou, B., Li, X., Wang, T., Fan, Y.-Z., & Wei, D.-M. 2014, *Physical Review D*, 89, 107303, doi: [10.1103/PhysRevD.89.107303](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.107303)