高频次观测脉冲星J1909−3744限制连续引力波的应变振幅

汇报人：邹靓 中国科学院新疆天文台

指导教师：袁建平 研究员 中国科学院新疆天文台

王晶波 教 授 丽水学院

汇报日期：2025年7月5日

目录

1 研究背景
2 研究方法
3 数据
4 研究结果

研究背景

- 2023年6月，CPTA等PTA团队宣布了纳赫兹引力波背景存在的有力证据，取得**关键进展**
- 引力波背景由宇宙中无数SMBHBs 的引力波信号叠加而成
- SMBHBs 预计数量众多，但难以直接观测
- 理解SMBHBs 的演化、物理性质

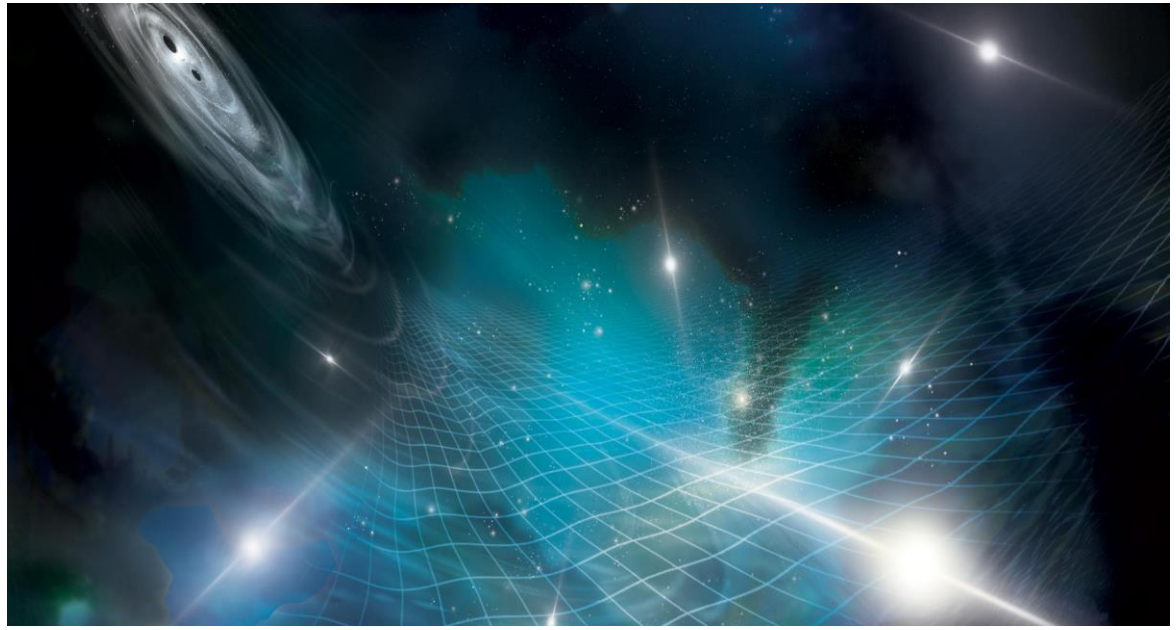


Fig1 Image credit : Aurore Simonnet for the NANOGrav Collaboration

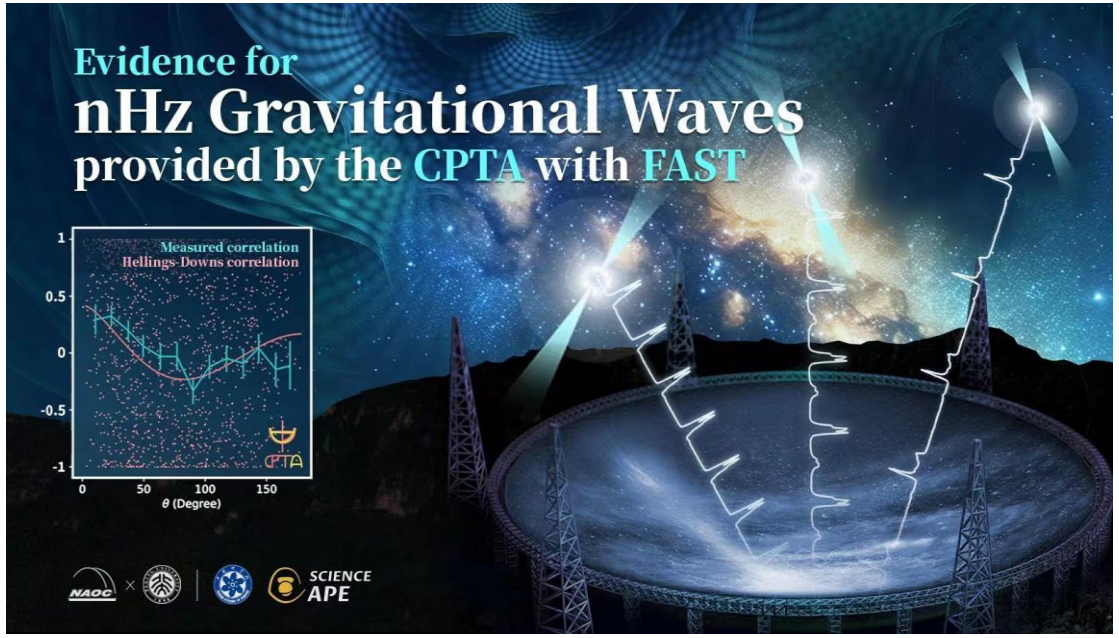


Fig2 Image credit : PKU/Kejia Lee
https://www.phy.pku.edu.cn/info/1031/9377.htm

研究背景

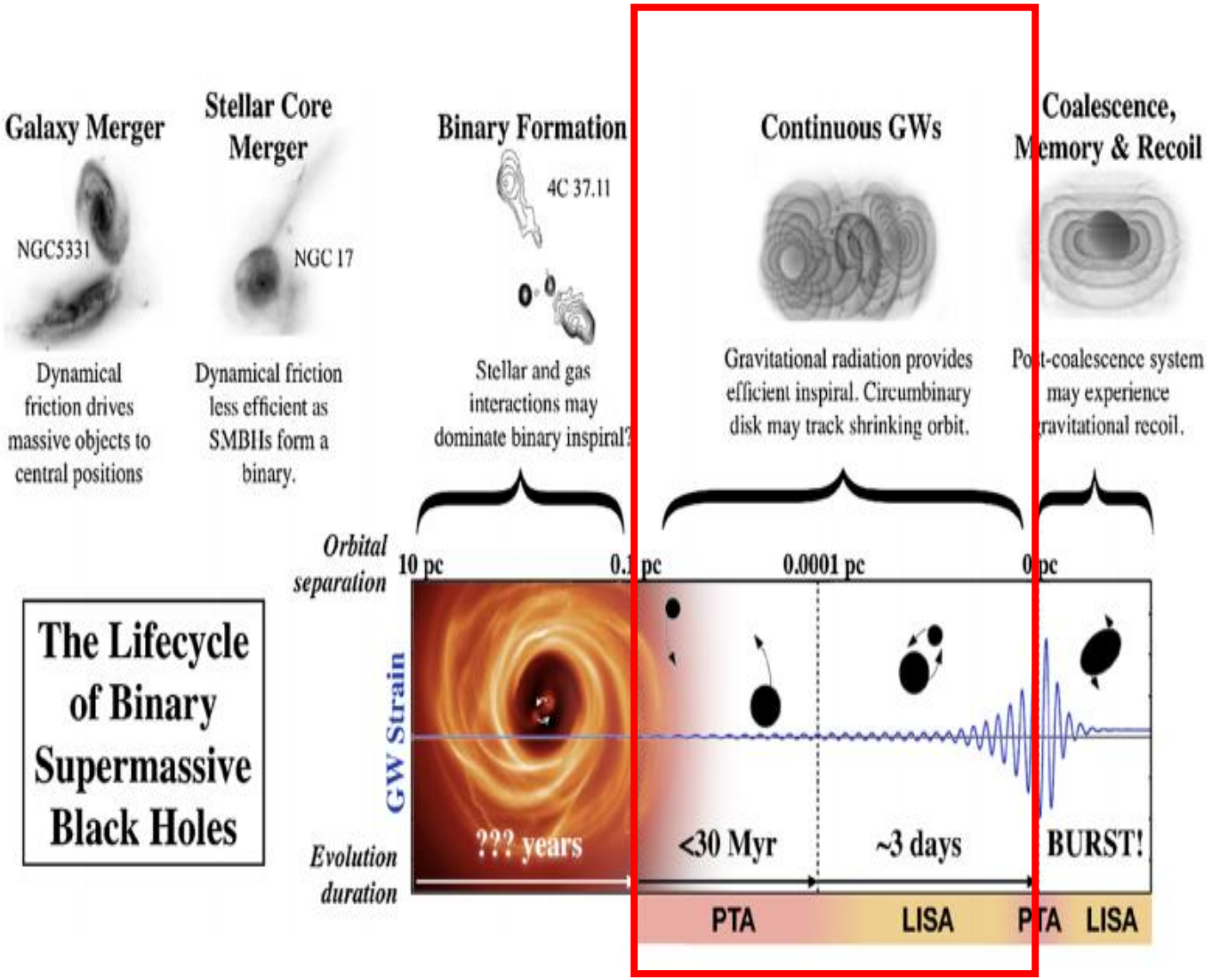


Figure 1 星系并合形成超大质量双黑洞系统

- 波源：单个超大质量双黑洞系统(SMBHBs)
  - ■星系合并期间形成超大质量双黑洞系统
  - ■黑洞距离缩小到亚秒差距时发射引力波，轨道周期逐渐缩短，频率增大。
- 连续引力波(**CW**)：波源的轨道频率在**PTA观测时间内**几乎恒定，信号呈周期性。
- 引力波引起时空扰动，影响脉冲星信号到达时间(**TOA**)，长期监测脉冲星计时阵列可探测引力波。

Burke-Spolaor, S., Taylor, S. R., Charisi, M., et al. 2019,the Astrophysical Journal, 27

研究背景

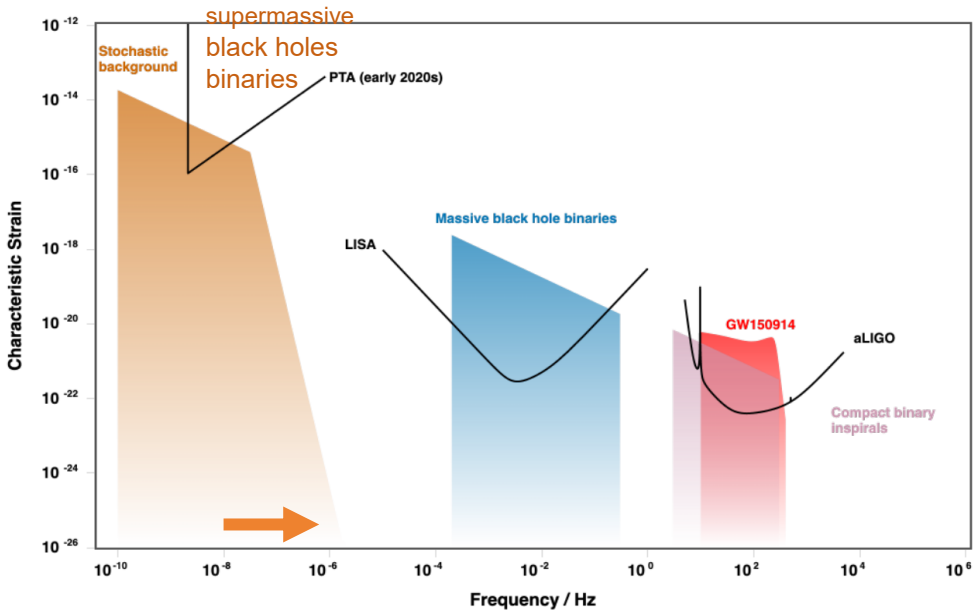


Figure 4 引力波探测器频率范围

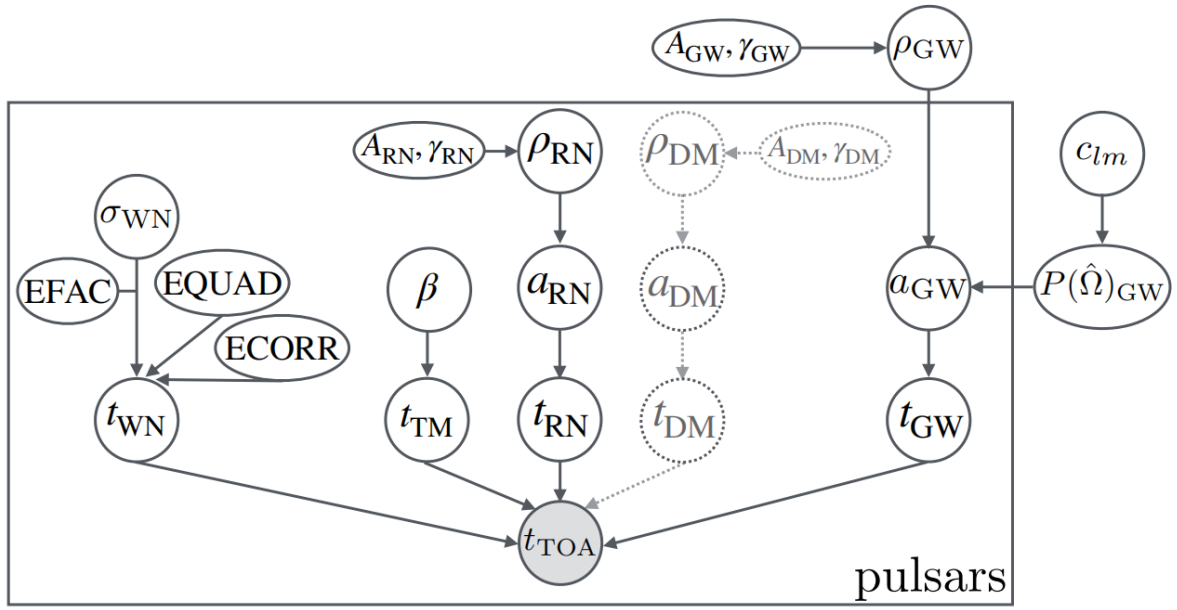


Figure 2 用脉冲星计时阵搜索引力波信号模型

- 单颗脉冲星限制引力波
  - 提高引力波搜索灵敏度
  - 观测频带从PTA观测的最灵敏频率 nHz扩展到 μHz

Stephen R. Taylor. 2021
Yardley， et al. 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 407,669
Yi, S., et al. 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 445, 1245

研究方法

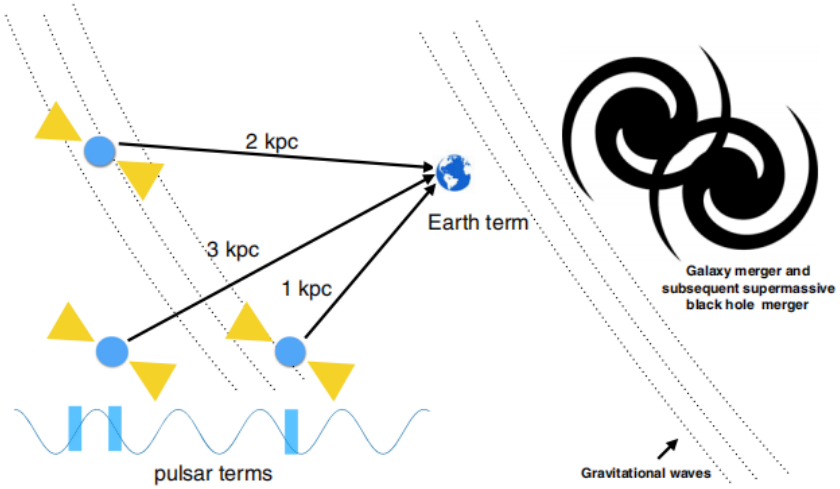


Figure 3 用脉冲星项探测超大质量双黑洞系统发射的连续引力波

- 地球项：不同脉冲星信号高度相关，提高信噪比
- 脉冲星项：时间上的等效天线合成
- **地球项+脉冲星项**：时间上的孔径合成，增强信噪比、提高参数估计精度，改善天空定位。

- 假设一个SMBHB具有圆形轨道，一个连续的GW信号可以用以下9个参数来表征：

$$\{\theta, \phi, f_{GW}, \Phi_0, \psi, i, M, d_L, h_0\}$$

应变幅度由啁啾质量M、引力波频率f_{GW}和光度距离d_L决定，由下式表示，

$$h_0 = \frac{2M^{\frac{5}{3}}(\pi f_{GW})^{\frac{2}{3}}}{d_L}$$

Stephen R. Taylor. 2021， Burke-Spolaor, S., Taylor, S. R., Charisi, M., et al. 2019

数据-IPTA DR2 J1909−3744

Table 1. Details of observations used in the analysis. The observation length varies and typical values for data sets are given. In total, 11461 observation epochs were include in complete dataset and 5675 observation epochs were included in subset. The average cadence of observations is 3.11 days across the data span between July 2010 and November 2012.

Data set	Centre Freq(MHz)	Backend	Data span(MJD)		No. of TOAs	
			complete dataset	subset	complete dataset	subset
NRT	1400	BON	53368-55843	55390-55843	156	26
	1600	BON	55469-56794	55469-56264	219	123
	2000	BON	53431-55796	55391-55796	29	12
PKS	700	40CM_PDFB3	55055-55618	55404-55618	25	9
		50CM_CPSR2	54396-54989	-	106	-
	1400	20CM_PDFB1	53548-54459	-	77	-
		20CM_PDFB2	54277-55276	-	67	-
		20CM_PDFB3	54754-55582	55388-55582	41	11
		20CM_PDFB4	54752-55619	55385-55619	36	9
		20CM_CPSR2n	53431-54814	-	63	-
		20CM_CPSR2m	53687-54224	-	62	-
		20CM_WBCORR	53449-53530	-	4	-
	3100	10CM_PDFB1	53605-54465	-	54	-
		10CM_PDFB2	54294-55327	-	41	-
		10CM_PDFB4	54753-56992	55387-56249	173	63
		10CM_WBCORR	53041-53819	-	50	-
GBT	800	GUPPI	55278-56586	55396-56249	4344	2850
		GASP	53293-55278	-	991	-
	1200	GUPPI	55275-56598	55430-56250	787	472
	1400	GASP	53292-55492	55390-55492	698	21
		GUPPI	55275-56598	55430-56250	1246	741
	1600	GUPPI	55275-56598	55430-56250	1057	645
	1800	GUPPI	55275-56598	55430-56250	1135	693

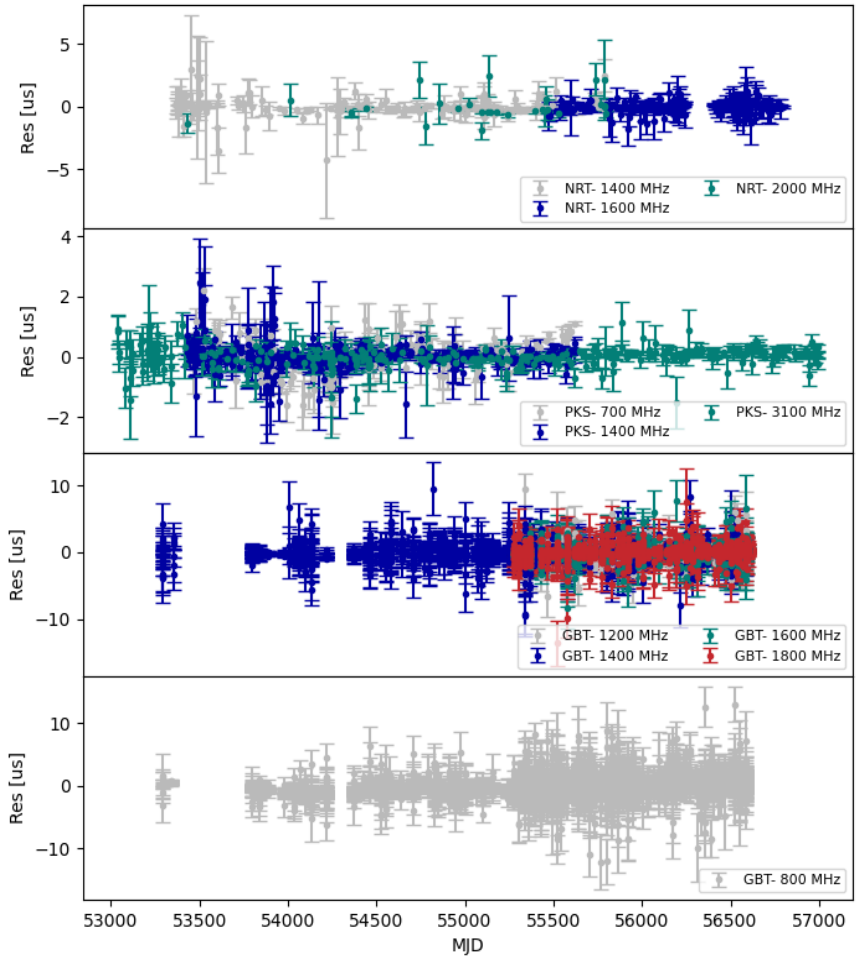


Figure 4 PSR J1909−3744残差图

共873天，5675个TOA,平均每3.11天观测一次

数据

Table 2. The timing model parameters of PSR J1909−3744 constrained using our data set given in Table 1. The binary parameters were measured using the T2 binary model given in TEMPO2. The position, spin frequency, and DM are given for the reference epoch of MJD 55820.

Timing parameter	
Data span (MJD)	55384-56257
Number of TOAs	5675
Weighted rms timing residual (μs)	0.340
Right ascension (RA) (J2000)	19:09:47.43178(9)
Declination (DEC) (J2000)	−37:44:14.596(5)
Proper motion in RA (mas/yr)	-9.4(2)
Proper motion in DEC (mas/yr)	-35.7(4)
Spin frequency, f (s^{-1})	339.3156871040759(2)
Spin frequency 1^{st} time derivative, $\dot{f}(s^{-2})$	-1.614774(6)×10^{15}
Reference epoch (MJD)	55820
Parallax, π(mas)	0.89(2)
Dispersion measure, DM $cm^{-3}pc$	10.39167(3)
Dispersion measure 1^{st} time derivative, $\dot{DM}$ (cm^{-3}) $pc\ yr^{-1}$	-0.0001(2)
Dispersion measure 2^{nd} time derivative, $\ddot{DM}$ (cm^{-3}) $pc\ yr^{-2}$	3.6530(1)
Orbital period, P_b (d)	1.5334494753(1)
Epoch of periastron, T_0 (MJD)	55015.4280907(1)
Projected semi-major axis, x $(lt\text{-}s)$	1.8979909(6)
Orbital inclination, i (deg)	86.4(1)
Companion mass, m_c $(M_\odot)$	0.208(2)
Clock correction procedure	TT(BIPM2015)
Solar system ephemeris model	DE436
Units	TCB

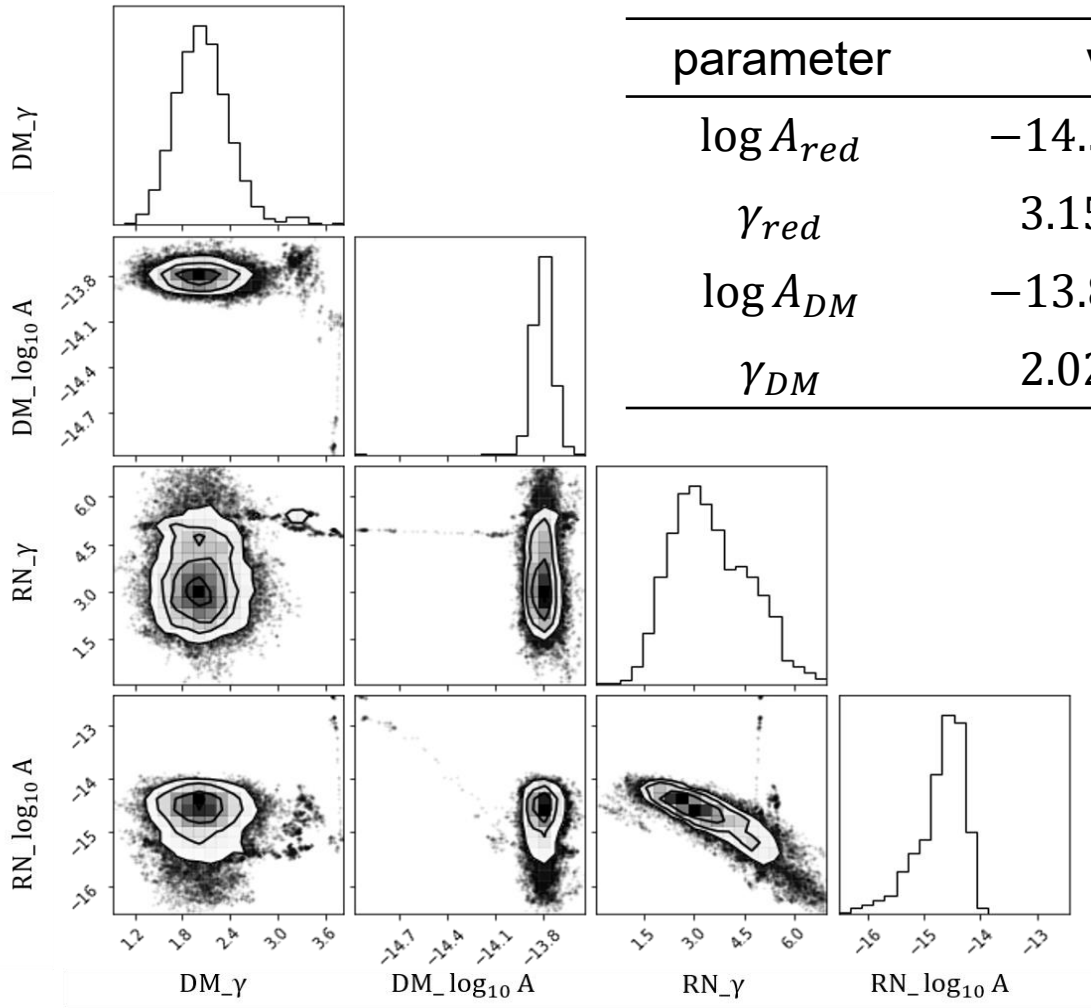


Table 3 噪声估计值

parameter	value
$\log A_{red}$	-14.57 ± 0.97
γ_{red}	3.15 ± 0.86
$\log A_{DM}$	-13.80 ± 0.73
γ_{DM}	2.02 ± 0.16

Figure 5 噪声分析corner图

研究结果

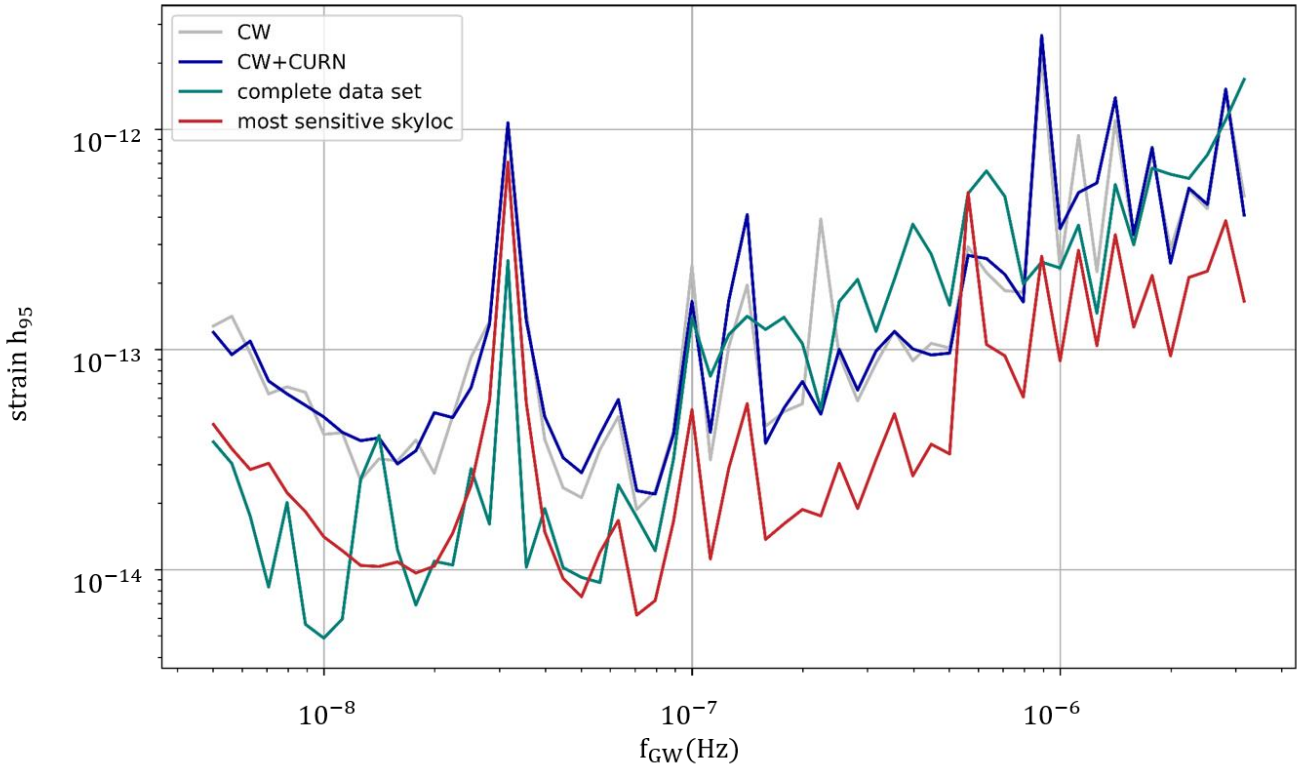


Figure 6 95%置信区间应变振幅上限灵敏度曲线

Table 4 应变振幅上限最优统计

	h_{95}	f_{GW}
CW	1.874×10^{-14}	7.079×10^{-8}
	2.295×10^{-13}	1.0×10^{-6}
most sensitive skyloc	6.211×10^{-15}	7.079×10^{-8}
	8.891×10^{-14}	1.0×10^{-6}

研究结果

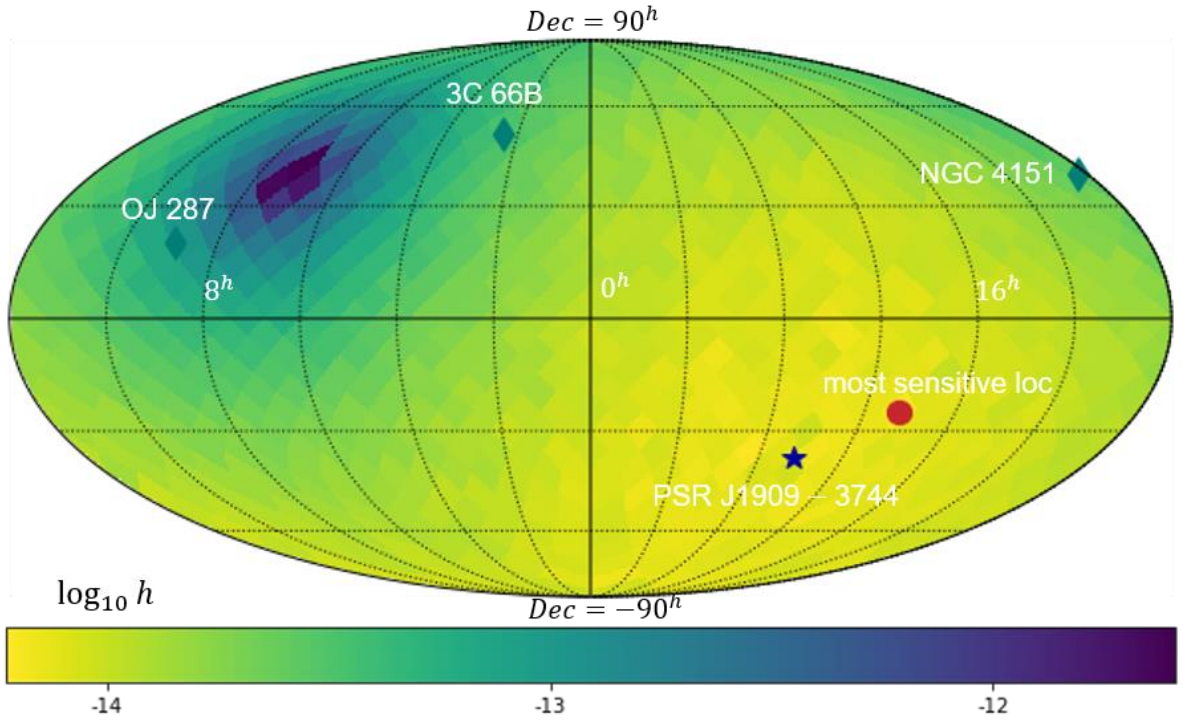


Figure 7 95%置信区间应变振幅上限 sky-map
(f_{GW}=70 nHz)

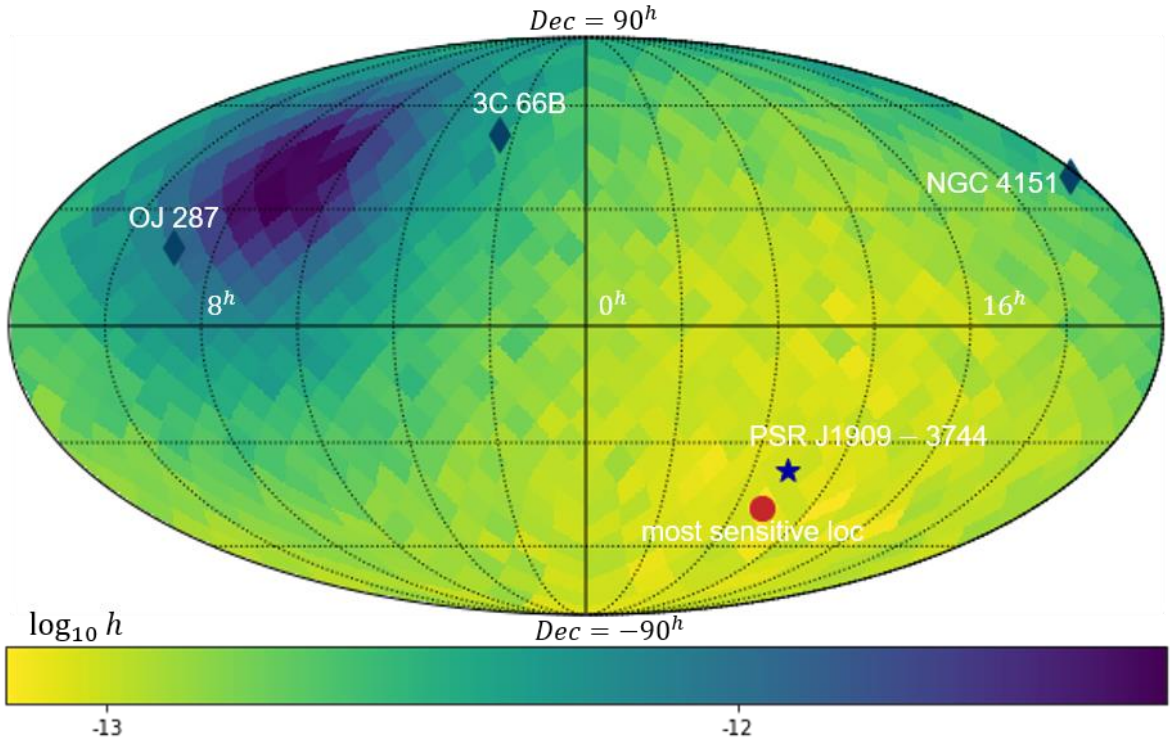


Figure 8 95%置信区间应变振幅上限 sky-map
(f_{GW}=1 μHz)

未来展望

□利用脉冲星计时阵限制μHz连续引力波

■提高搜索灵敏度

■完善sky-map敏感位置

□交错采样 (Wang, Mohanty, & Cao. APJ, 2021,907:L43 (5pp))

■极大提升采样频率

$$f_{PTA} = N_p f_{SP}$$

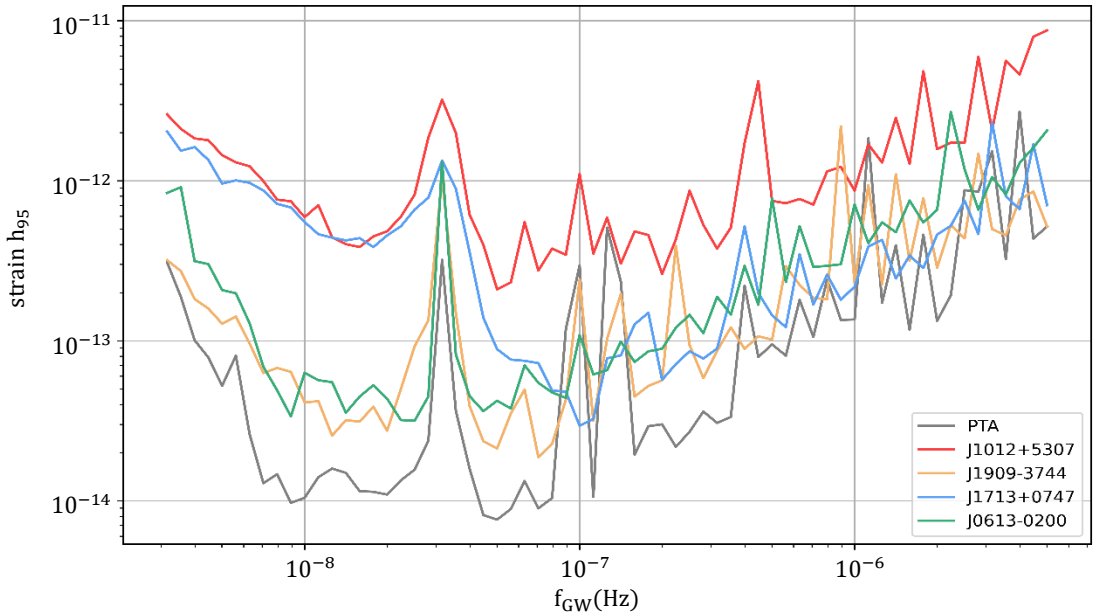


Figure 9 95%置信区间应变振幅上限灵敏度曲线

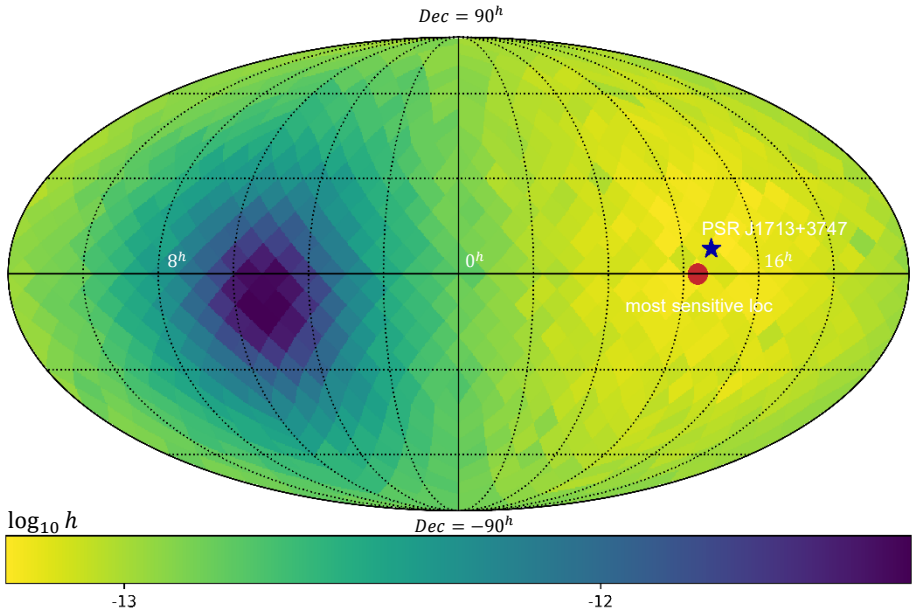


Figure 10 **PSR J1713+3747** 95%置信区间应变振幅上限 sky-map (f_{GW}=1 μHz)

中国科学院新疆天文台 XINJIANG ASTRONOMICAL OBSERVATORY, CAS

中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences

谢谢大家！

汇报人：邹靓 中国科学院新疆天文台

指导教师：袁建平 研究员 中国科学院新疆天文台

王晶波 教 授 丽水学院

汇报日期：2025年7月5日