

# 500 米口径球面射电望远镜 (FAST)

## 优先和重大项目任务书

项目名称：脉冲星测时：1. 中国脉冲星测时阵列

项目 PI：李柯伽

项目周期：2020 年 1 月 – 2025 年 12 月

2020 年 1 月 6 日填

## 一、简 表

项目负责人信息	姓 名	李柯伽	单 位	北京大学
	职 称	研究员	电子邮件	kjlee@pku.edu.cn
项目简介	<p><b>(限 400 字):</b></p> <p>为了长期探测引力波源以研究引力波物理特性，并探索宇宙学距离上的天体物理过程，我们迫切期待探测超大质量双黑洞绕转和并合产生的引力波。在这个频段内唯一的引力波探测手段是脉冲星测时阵列 (PTA)。PTA 是引力波天文学整个图景上缺失但又无比重要的一块拼图，开展基于 FAST 的 PTA 观测对于引力波天文学学科发展必不可少。如果 FAST 系统地开展脉冲星测时观测则有望在短期于国际上首先取得纳赫兹引力波探测的突破。围绕 FAST 形成中国脉冲星测时阵列 (CPTA) 参与国际脉冲星测时阵列 (IPTA) 的竞争性合作则有望“以我为主”地领导 IPTA 的科学发现和探索。利用 FAST 开展长期的脉冲星测时观测，形成中国脉冲星测时阵列基本数据，以支持中国在引力波探测、基本物理探索、精密测量三个科学领域的突破。</p> <p>本观测计划从观测现有已知的国际脉冲星测时阵列脉冲星入手 (46 颗，参见文后所附列表)。着眼于：1. 通过积累的数据，获得国际上最佳的引力波幅度上限，以研究不同物理过程的限制。2. 脉冲星的相位和红噪声分析及噪声起源研究，形成基于 FAST 的脉冲星时间标准并对国际原子时进行比对和校准。3. 精密测量脉冲星质量能够提供强相互作用在零温度条件下的观测资料。4. FAST 观测资料可以对太阳系动力学的行星轨道给予米级的测量还可对太阳系相对银河系的局域加速度进行测量。</p>			

## 二、主要成员

序号	姓名	单位	职称	工作量（人月）	承担的主要任务
1	王娜	新疆天文台	研究员	1	观测、数据分析、协调
2	王晶波	新疆天文台	副研究员	2	数据分析
3	袁建平	新疆天文台	副研究员	2	数据分析
4	沈志强	上海天文台	研究员	2	数据分析、协调
5	闫振	上海天文台	副研究员	2	数据分析
6	郭丽	上海天文台	副研究员	2	数据分析、脉冲星时间
7	汪敏	云南天文台	研究员	2	数据分析、协调
8	郝龙飞	云南天文台	副研究员	2	数据分析
9	徐永华	云南天文台	助理研究员	2	数据分析、星际闪烁
10	李志玄	云南天文台	助理研究员	2	数据分析、太阳系动力学
11	黄玉祥	云南天文台	助理研究员	2	数据分析、太阳系动力学
12	童明雷	国家授时中心	副研究员	2	数据分析、脉冲星时间
13	罗近涛	国家授时中心	研究员	2	数据分析、脉冲星时间

14	赵成仕	国家授时中心	副研究员	2	数据分析、脉冲星时间
15	赵文	中国科技大学	教授	2	引力波理论
16	袁业飞	中国科技大学	教授	2	引力波理论
17	路友俊	中国科学院大学	研究员	2	引力波天文学
18	游霄鹏	西南大学	教授	2	数据分析
19	龚碧平	华中科技大学	教授	2	数据分析、双星
20	王洪光	广州大学	教授	2	数据分析、辐射机制、理论研究
21	岳友岭	国家天文台	副研究员	2	观测、数据分析、协调
22	钱磊	国家天文台	副研究员	2	观测、数据分析、协调
23	彭勃	国家天文台	研究员	2	观测、协调
24	王鹏飞	国家天文台	副研究员	1	数据分析
25	王陈	国家天文台	副研究员	1	数据分析
26	顾俊骅	国家天文台	副研究员	2	低频观测、数据分析
27	李柯伽	北京大学	研究员	8	数据分析、协调
28	徐仁新	北京大学	教授	2	理论研究

29	邵立晶	北京大学	研究员	2	理论研究
30	于清娟	北京大学	研究员	2	引力波天文学

### 三、任务书正文（简明扼要阐述）

#### （一）科学目标和项目内容

##### 科学目标：

恒星级双黑洞并合产生的引力波造成的时空微弱变化已经被 LIGO 探测到，这开启引力波探测宇宙的新纪元。然而为了长期探测引力波源以研究引力波物理特性，并探索宇宙学距离上的天体物理过程，我们迫切期待探测超大质量双黑洞绕转和并合产生的引力波。在这个频段内唯一的引力波探测手段是脉冲星测时阵列（PTA）。它一方面提供宇宙大尺度结构形成的信息，还能提供在辐射区域检验引力理论的手段，通过和微波背景 B 模式观测的数据结合能进一步了解宇宙早期的相变过程并获取理论物理皇冠“普朗克尺度物理”的观测信息。可以说 PTA 是引力波天文学整个图景上缺失但又无比重要的一块拼图，开展基于 FAST 的 PTA 观测对于引力波天文学学科发展必不可少。

除了天文学意义，PTA 观测对于基础测量学至关重要。PTA 时间标准比目前的国际原子钟组具有更高的长期稳定性。PTA 能独立地形成太阳系动力学星历表并对太阳系动力学给予精密测量。因此基于 FAST 的 PTA 数据对于形成长期稳定的时间标准和高精度深空参考框架是不可缺少的重要观测资料，开展基于 FAST 的 PTA 观测对于支撑国家发展战略是必要的。

目前三个国际脉冲星测时引力波探测合作项目（EPTA、PPTA 和 NANOGRV）已经实施十年有余，虽然探测灵敏度几乎接近了“发现”的水平，但距离理论预言还差 2-3 倍。500 米 FAST 望远镜具有灵敏度高的巨大优势，是全世界开展脉冲星测时探测引力波的最佳设备。如果 FAST 系统地开展脉冲星测时观测则有望在短期于国际上首先取得纳赫兹引力波探测的突破。围绕 FAST 形成中国脉冲星测时阵列（CPTA）参与国际脉冲星测时阵列（IPTA）的竞争性合作则有望“以我为主”地领导 IPTA 的科学发现和探索。因此开展基于 FAST 的 PTA 观测对于提高中国脉冲星研究在国际上的学术地位是非常紧迫的。

##### 研究内容：

基于上述几点重要原因，我们建议利用 FAST 开展长期的脉冲星测时观测，形成中国脉冲星测时阵列基本数据，以支持中国在引力波探测、基本物理探索、精密测量三个科学领域的突破。

从观测现有已知的国际脉冲星测时阵列脉冲星入手（46 颗，参见文后所附列表）。可以实现的具体科学目标包括，

1. 通过积累的数据，获得国际上最佳的引力波幅度上限，以研究不同物理过程的限制。如双黑洞并合率、双黑洞质量函数、宇宙弦密度和张力，宇宙早期相变参数、非广义相对论的额外场强和耦合常数等。5-7 年的数据积累则可实现纳赫兹引力波的直接探测。
2. 脉冲星的相位和红噪声分析及噪声起源研究。基于相位噪声和红噪声的测量，

我们可以形成基于 FAST 的脉冲星时间标准并对国际原子时进行比对和校准。

3. 精密测量脉冲星质量能够提供强相互作用在零温度条件下的观测资料。零温条件下强相互作用具有非微扰特性，第一性原理计算困难。精密测量脉冲星的质量对于理解强相互作用这一基本物理具有极其重要的参考价值。

4. 太阳系动力学探索及太阳系加速度测量。利用 FAST 观测资料可以对太阳系动力学的行星轨道给予米级的测量还可对太阳系相对银河系的局域加速度进行测量。FAST 的高精度测时观测可以实现对太阳系第九行星这一悬而未决的猜想给予肯定或者否定，并对其轨道开展直接测量。

## （二）观测计划及观测时间需求

PTA 观测需要分阶段进行不同的优化。总体来说，我们需要开展全偏振定标的脉冲星测时观测。

考虑 2020 年由于 FAST 全部开放的重点任务时间仅为 1400 小时，我们只能先压缩脉冲星观测数量和时间来保持前期观测阶段获取的数据能够继续保持测时的连续性。我们计划：每颗脉冲星每次观测 30 分钟，其中 2 分钟进行偏振定标。10 分钟进行必要的换源。平均每周进行一次观测。这样形成 20 颗脉冲星，100ns 观测精度，120 个有效数据段每年的观测数据集（参见第四部分已有工作基础）。最低的仅仅保证测时连续性的需求为 20 颗 X0.5 小时 X52 周/年=520 小时/年。

实际需求：首先 30 分钟积分对于积分轮廓的相位抖动是不足的，实际的高精度测时，每颗星应当每次进行 45 分钟以上观测。为了防止定标改正降低数据精度，定标观测需要足够高的信噪比和稳定性，我们实际实验后 5 分钟定标可以达到合理的指标。因此实际需求为 42 颗 X1 小时 X52 周/年=2184 小时/年。

我们建议的脉冲星源表如下，后期根据新发现的脉冲星进行相应调整。

	脉冲星名	坐标 (RA 和 DEC)		周期	色散
1	J0023+0923	00:23:16.8	+09:23:23.8	3.05	14.33
2	J0030+0451	00:30:27.4	+04:51:39.7	4.865	4.34
3	J0034-0534	00:34:21.8	-05:34:36.7	1.877	13.77
4	J0218+4232	02:18:06.3	+42:32:17.3	2.323	61.25
5	J0340+4130	03:40:23.2	+41:30:45.2	3.299	49.59
6	J0613-0200	06:13:43.9	-02:00:47.2	3.062	38.78
7	J0621+1002	06:21:22.1	+10:02:38.7	28.854	36.47

8	J0636+5129	06:36:04.8	+51:28:59.9	2.869	11.11
9	J0645+5158	06:45:59.0	+51:58:14.9	8.853	18.25
10	J0751+1807	07:51:09.1	+18:07:38.4	3.479	30.25
11	J1012+5307	10:12:33.4	+53:07:02.2	5.256	9.02
12	J1022+1001	10:22:57.9	+10:01:52.7	16.453	10.25
13	J1024-0719	10:24:38.6	-07:19:19.5	5.162	6.48
14	J1453+1902	14:53:45.7	+19:02:12.1	5.792	14.06
15	J1640+2224	16:40:16.7	+22:24:08.8	3.163	18.46
16	J1643-1224	16:43:38.1	-12:24:58.6	4.622	62.41
17	J1713+0747	17:13:49.5	+07:47:37.4	4.57	15.92
18	J1738+0333	17:38:53.9	+03:33:10.8	5.85	33.77
19	J1741+1351	17:41:31.1	+13:51:44.1	3.747	24.2
20	J1744-1134	17:44:29.4	-11:34:54.6	4.075	3.14
21	J1832-0836	18:32:27.5	-08:36:55.0	2.719	28.19
22	J1843-1113	18:43:41.2	-11:13:31.0	1.846	59.96
23	J1853+1303	18:53:57.3	+13:03:44.0	4.092	30.57
24	J1857+0943	18:57:36.3	+09:43:17.1	5.362	13.31
25	J1903+0327	19:03:05.7	+03:27:19.2	2.15	297.52
26	J1910+1256	19:10:09.7	+12:56:25.4	4.984	30.07
27	J1911-1114	19:11:49.2	-11:14:22.4	3.626	31.02
28	J1911+1347	19:11:55.2	+13:47:34.3	4.626	30.99
29	J1918-0642	19:18:48.0	-06:42:34.9	7.646	26.46
30	J1923+2515	19:23:22.4	+25:15:40.5	3.788	18.86
31	J1939+2134	19:39:38.5	+21:34:59.1	1.558	71.02
32	J1944+0907	19:44:09.3	+09:07:23.0	5.185	24.36
33	J1955+2908	19:55:27.8	+29:08:43.4	6.133	104.52
34	J2010-1323	20:10:45.9	-13:23:56.0	5.223	22.18
35	J2017+0603	20:17:22.7	+06:03:05.5	2.896	23.92
36	J2019+2425	20:19:31.9	+24:25:15.3	3.935	17.2
37	J2033+1734	20:33:27.5	+17:34:58.4	5.949	25.08
38	J2043+1711	20:43:20.8	+17:11:28.9	2.38	20.76
39	J2145-0750	21:45:50.4	-07:50:18.5	16.052	9
40	J2214+3000	22:14:38.8	+30:00:38.1	3.119	22.55
41	J2229+2643	22:29:50.8	+26:43:57.6	2.978	22.73
42	J2234+0611	22:34:23.0	+06:11:28.6	3.577	10.76
43	J2234+0944	22:34:46.8	+09:44:30.2	3.627	17.83
44	J2302+4442	23:02:46.9	+44:42:22.0	5.192	13.73
45	J2317+1439	23:17:09.2	+14:39:31.2	3.445	21.88
46	J2322+2057	23:22:22.3	+20:57:02.6	4.808	13.36



### （三）观测团队、数据处理队伍及分工情况

观测、数据、理论分析团队为中国脉冲星测时阵列合作团队（CPTA）。根据合作团队达成的意见，工作分工和数据共享规定如下。CPTA 组织机构由执行委员会(Executive Committee)、顾问委员会(Consultant Committee)、以及各工作组组成。CPTA 成员组织有两个层次，核心成员（Tier 1 member,简称 T1）和普通成员(Tier 2 member, 简称 T2)。核心成员是对 CPTA 具有长期不可或缺贡献的人员。普通成员则是短期对 CPTA 工作具有积极意义的成员。以 CPTA 名义获取的数据属于 CPTA 内部数据，其他渠道获取的数据不属于 CPTA 内部数据。CPTA 内部数据在执行委员会同意公布之前，仅限于 CPTA 内部使用，不应擅自交付第三方合作者。退出 CPTA 的成员，使用 CPTA 内部数据视为违规行为。

CPTA 成员针对某一科学目标使用 CPTA 内部数据需要得到执行委员会同意，并且仅限于该科学目标。如果出现相似的科学诉求，在得到执行委员会 2/3 以上成员同意的情况下，可以对其他成员赋予该科学目标的数据使用权力。

CPTA 其他数据原则上由数据获取者决定使用。如果科学成果使用了 CPTA 内部数据或未发表衍生信息，即属于 CPTA 成果。我们鼓励在 CPTA 内开展横向合作。

### （四）各阶段性预期成果等

1. 如果获得观测时间支持，实现整体 46 颗脉冲星的长期观测，并达到优于 100ns 的测时精度。
2. 观测的第 3 年，即利用 FAST 观测数据让中国脉冲星测时阵列变成世界上最灵敏的纳赫兹引力波探测器。
3. 观测的第 5 年，将有在 95%的置信度下测到引力波的迹象。
4. 形成基于 FAST 的数据的脉冲星时间标准，其长期稳定度（频率在 1<sup>yr</sup> 处）优于  $10^{-15}$ 。
5. 5 年数据对太阳系动力学进行米级的精密测量。
6. 对一批脉冲星实现质量测量，或者提高精度。

**请说明如 2020 年仅提供所申请的 20%观测时间，预期取得的阶段性实施成果。**

仅仅能够对 4 颗脉冲星实现 200ns 精度水平的有效数据集。获得引力波背景幅度上限优于  $3E-14$ （10 倍于 IPTA 上限）。

#### 四、观测源表（格式）

序号	源	坐标	周期
1	J0023+0923	00:23:16.8 +09:23:23.8	3.05
2	J0030+0451	00:30:27.4 +04:51:39.7	4.865
3	J0034-0534	00:34:21.8 -05:34:36.7	1.877
4	J0218+4232	02:18:06.3 +42:32:17.3	2.323
5	J0340+4130	03:40:23.2 +41:30:45.2	3.299
6	J0613-0200	06:13:43.9 -02:00:47.2	3.062
7	J0621+1002	06:21:22.1 +10:02:38.7	28.854
8	J0636+5129	06:36:04.8 +51:28:59.9	2.869
9	J0645+5158	06:45:59.0 +51:58:14.9	8.853
10	J0751+1807	07:51:09.1 +18:07:38.4	3.479
11	J1012+5307	10:12:33.4 +53:07:02.2	5.256
12	J1022+1001	10:22:57.9 +10:01:52.7	16.453
13	J1024-0719	10:24:38.6 -07:19:19.5	5.162
14	J1453+1902	14:53:45.7 +19:02:12.1	5.792
15	J1640+2224	16:40:16.7 +22:24:08.8	3.163
16	J1643-1224	16:43:38.1 -12:24:58.6	4.622
17	J1713+0747	17:13:49.5 +07:47:37.4	4.57
18	J1738+0333	17:38:53.9 +03:33:10.8	5.85
19	J1741+1351	17:41:31.1 +13:51:44.1	3.747
20	J1744-1134	17:44:29.4 -11:34:54.6	4.075
21	J1832-0836	18:32:27.5 -08:36:55.0	2.719
22	J1843-1113	18:43:41.2 -11:13:31.0	1.846
23	J1853+1303	18:53:57.3 +13:03:44.0	4.092
24	J1857+0943	18:57:36.3 +09:43:17.1	5.362
25	J1903+0327	19:03:05.7 +03:27:19.2	2.15
26	J1910+1256	19:10:09.7 +12:56:25.4	4.984
27	J1911-1114	19:11:49.2 -11:14:22.4	3.626
28	J1911+1347	19:11:55.2 +13:47:34.3	4.626
29	J1918-0642	19:18:48.0 -06:42:34.9	7.646
30	J1923+2515	19:23:22.4 +25:15:40.5	3.788
31	J1939+2134	19:39:38.5 +21:34:59.1	1.558
32	J1944+0907	19:44:09.3 +09:07:23.0	5.185
33	J1955+2908	19:55:27.8 +29:08:43.4	6.133
34	J2010-1323	20:10:45.9 -13:23:56.0	5.223
35	J2017+0603	20:17:22.7 +06:03:05.5	2.896
36	J2019+2425	20:19:31.9 +24:25:15.3	3.935
37	J2033+1734	20:33:27.5 +17:34:58.4	5.949
38	J2043+1711	20:43:20.8 +17:11:28.9	2.38
39	J2145-0750	21:45:50.4 -07:50:18.5	16.052
40	J2214+3000	22:14:38.8 +30:00:38.1	3.119

41	J2229+2643	22:29:50.8 +26:43:57.6	2.978
42	J2234+0611	22:34:23.0 +06:11:28.6	3.577
43	J2234+0944	22:34:46.8 +09:44:30.2	3.627
44	J2302+4442	23:02:46.9 +44:42:22.0	5.192
45	J2317+1439	23:17:09.2 +14:39:31.2	3.445
46	J2322+2057	23:22:22.3 +20:57:02.6	4.808