

# FAST 及其科学目标

南仁东 张博 岳友岭 钱磊 朱明

(中国科学院国家天文台 100012)

## 1 引言

射电<sup>①</sup>波段是除光学外另一个对大气透明的波段, 为人类了解宇宙提供了重要的观测窗口。自 20 世纪 30 年代央斯基 (K. Jansky) 第一次接收到来自地球之外天体的射电辐射以来, 射电天文技术取得了长足进步。20 世纪 60 年代的四大天文发现——脉冲星、类星体、宇宙微波背景辐射、星际有机分子都与射电天文学紧密相关。

已于 2016 年 9 月 25 日落成的我国自主建设的世界上最大的单天线射电望远镜——500 m 口径球面射电望远镜 (FAST) 是射电天文技术发展史上又一里程碑。FAST 覆盖 70 MHz~3000 MHz 频段, 配备脉冲星、谱线和甚长基线干涉 (VLBI) 数字终端, 可以开展脉冲星搜索、脉冲星测时、谱线成图、VLBI 联测。而这些方面的科学研究, 正是设计和建造 FAST 的驱动力。

脉冲星由于其良好的守时特性, 成为了研究极



图 1 FAST 全貌 (图片版权: FAST 工程)

端物态、银河系结构、检验引力理论以及探测引力波的重要工具。这种致密天体最早在射电波段发现, 当前已知的两千多颗脉冲星大部分通过射电观测发现。而作为星际介质主要成分的中性原子氢 (HI), 最重要的观测手段也是其静止波长为 21 cm (频率为 1.4204057517667 GHz) 的超精细结构谱线。其他一些重要的星际分子谱线频率也都位于 FAST 覆盖的射电波段, 例如羟基 (OH) 在 L 波段的一系列谱线。此外, VLBI 作为空间分辨率最高的天文观测方法, 其空间分辨率取决于天线间距, 其灵敏度则依赖于联网望远镜的总接收面积。后一方面性能的提升有赖于更多大型射电望远镜的参与。

FAST 的落成将使上述领域的相关观测得到很大发展。FAST 团队通过创新的选址方法, 找到了适合建造大口径射电望远镜的喀斯特洼地; 通过主动反射面技术实现了将球面实时变形为抛物面以实现跟踪; 通过索驱动和并联机器人技术实现了馈源在主焦面的精确定位, 让单天线射电望远镜的口径和综合性能更上一层楼。本文将介绍 FAST 望远镜及其主要科学目标, 让读者详细了解这台大型望远镜的潜力。

## 2 FAST 的基本性能

FAST 最大的创举在于主动反射面的使用。以美国在波多黎各建造的 Arecibo 望远镜为代表的传统固定式射电望远镜一般采用球形反射面的设计。但球形反射面聚焦到一条线上 (焦线), 因而只能通过长长的馈线采集焦线上汇聚的信号, 或是利用复杂的次级、三级反射面组来使射电波聚集到焦点, 给观测带来了限制。FAST 的反射面是 500m 的球面, 有效照明口径为 300m。在观测期间, 口径 300m 球冠区域通过索网下方的促动器拉伸变形为焦比为 0.4611 的抛物面; 需

① 来自天体的无线电称为射电。

要调整的球冠位置则由被测目标的方位决定，球冠的实时变形让跟踪成为了可能。这一举措不仅解决了固定式反射面的聚焦问题，还大大扩展了 FAST 可观测天区的范围。传统结构的固定反射面望远镜只能观测天顶附近的标，视野受限。以 Arecibo 望远镜为例，其可观测目标的最大天顶角只有  $19^\circ$ ，考虑望远镜的地理位置，它基本无法顾及天赤道以南的天体。相比之下，FAST 借助主动反射面技术，能够观测天顶角  $40^\circ$  范围内的天区。FAST 位于大约北纬  $25.6^\circ$ ，故可以观测赤纬  $-14.4^\circ$  到  $65.6^\circ$  范围内的目标。

FAST 的基本参数如表 1 所示。这里的波束宽度等同于射电望远镜的角分辨率。根据衍射原理，望远镜所能解析出的最小细节角尺度  $\theta$  由观测的波长  $\lambda$  和口径  $D$  决定：

$$\theta = 1.22\lambda/D$$

按照中性氢 21cm 谱线静止波长计算，FAST 的有效照明口径在 L 波段 (1~2 GHz) 的波束宽度为  $2.9^\circ$ 。而射电望远镜的灵敏度  $S$  由口径  $D$  (或有效面积  $A$ )、

系统温度  $T$ 、带宽  $\Delta\nu$  和积分时间  $\Delta t$  决定

$$S = \frac{kT}{A} \frac{1}{\sqrt{\Delta\nu\Delta t}}$$

其中  $k$  是玻耳兹曼常数。上式中和望远镜本身性质相关的部分是有效面积和系统温度，通常将  $A/T$  称为射电望远镜的绝对灵敏度 (raw sensitivity)，用以表征望远镜性能。

表 1 FAST 总体技术指标

参数	
口径	500m
有效照明口径	300m
焦比	0.4611
天顶角	$40^\circ$
频率范围	70 MHz~3000 MHz
绝对灵敏度 (L 波段)	$A/T=2000 \text{ m}^2/\text{K}$
波束宽度、分辨率 (L 波段)	2.9
指向精度	8"

FAST 设计有 7 套接收机，用以实现对 70 MHz~3000 MHz 频段的完整覆盖。其中包括一套与澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 合作研制的 19 波束接收机 (相当于一台拥有 19 个像素的射电波段照相机)，工作频率为 1.05 GHz~1.45 GHz。这台多波束接收机与澳大利亚 Parkes 望远镜以及美国 Arecibo 望远镜的多波束系统类似，但波束较后二者更多。这是因为 FAST 的抛物面焦比较大，可以更好地抑制系统的指波束在偏离焦面中心的情况下会有变形，通常是彗星状的，让更多的波束之间不致于相互干扰。这样 FAST 就可以同时观测更多的目标，效率更高。另外 FAST 还设计了一台单波束接收机，用于脉冲星以及 VLBI 联测。FAST 各套接收机的基本技术指标如表 2 所示。

表 2 FAST 接收机的技术指标

序号	频段 /GHz	波束数目	是否制冷
1	0.07~0.14	1	否
2	0.14~0.28	1	否
3	0.27~1.62	1	是
4	0.56~1.02	1	是
5	1.15~1.72	1	是
6	1.05~1.45	19	是
7	2.00~3.00	1	是

### 3 FAST 的科学目标

如前文所述，FAST 的科学目标主要包括脉冲星相关研究、快速射电暴探测、中性氢以及其他谱线观



图 2 FAST 反射面背后的索网以及连接其上的促动器钢索

测和 VLBI 联测，以下分别简述之。

### 脉冲星与快速射电暴

整整半个世纪前发现的脉冲星称得上是射电天文学最伟大的成就之一。这类辐射源有着规律变化的脉冲信号，周期从 1ms 多到数秒不等。它们中的绝大部分都是大质量恒星作为超新星爆发了结一生之时坍缩形成的致密中子星，尺度只及十数千米，质量却与太阳同数量级。在诞生之初，由于中子星保留了前身恒星的大部分角动量，而尺度要较后者小很多，所以它们通常具有较快的自转，短暂的脉冲周期就直接反映了星体的自转周期。

不过中子星要成为脉冲星，必须满足的条件是星体的辐射束会周期性地扫过地球。按照通行的理论，这种辐射束从中子星的磁极发出，由星体的转动提供能量。中子星的磁轴相对自转轴一般存在一定的夹角，这导致辐射束随着星体的转动而转动，产生了我们接收到的脉冲轮廓。目前已知的脉冲星数量已经超过 2500 颗，其中大多为射电脉冲星，也有少量会发出光线、X 射线乃至伽马射线脉冲信号。搜索更多的脉冲星，并对已知脉冲星进行长时间监测，都属于 FAST 全面

启用后的重要科学目标。

研究脉冲星具有多方面的意义。首先，这类天体密度极高，为研究者提供了探讨极端物态极佳的宇宙实验室。在目前已经发现的脉冲星中，自转周期最短为 1.39ms。理论预言，如果脉冲星主要由中子组成，那么其自转周期的下限为 1ms，更快的自转将导致脉冲星解体。但特殊物态的理论指出，如果脉冲星由夸克物质而非传统的中子物质组成，那么星体表面物质可以由强相互作用力束缚，其自转周期可以短于 1ms (亚毫秒脉冲星)。如果能够找到亚毫秒脉冲星，将对脉冲星由夸克物质组成的理论给出强有力的支持。而如果找不到亚毫秒脉冲星，却发现了更多自转周期在 1ms 之上的脉冲星，通过这些脉冲星周期的分布规律，也可以对理论给出限制。

脉冲星的形成和演化也是饶有兴致的话题，这方面的深入研究也离不开对脉冲周期的长时间监测。由于脉冲星转动惯量较大，自转比较稳定，周期变化较为规律，因此具有较好的守时特性。总的来说，脉冲周期在长时间内的演化是以周期变长为主，一般认为是源于脉冲星自转能量随星体辐射的消耗。脉冲周期的变化速率 (周期导数) 是脉冲星的重要特性，可以为脉冲辐射机制、辐射区结构等关键问题带来线索。已知脉冲星在周期 ( $P$ )- 周期导数 ( $\dot{P}$ ) 图上主要分为两类，一类是周期较长的普通脉冲星，另一类是周期较短的毫秒脉冲星 (如 Manchester *et al.* 2005)。目前我们对这两类脉冲星的演化关系尚不十分清楚，更多脉冲星的发现有望揭示出位于周期 - 周期导数图中其他区域的样本，它们可能处于两类脉冲星的过渡阶段，

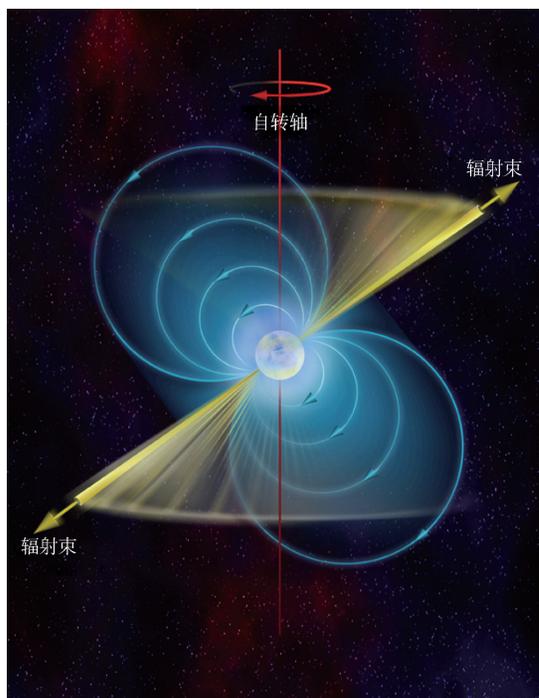


图 3 脉冲星的结构示意，图中蓝色部分表示磁力线，黄色表示辐射束，红色表示星体自转轴 (图片来源: Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF)

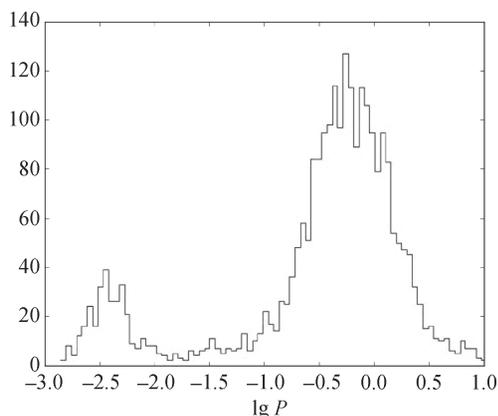


图 4 脉冲星周期分布图 (数据来源于 ATNF.)

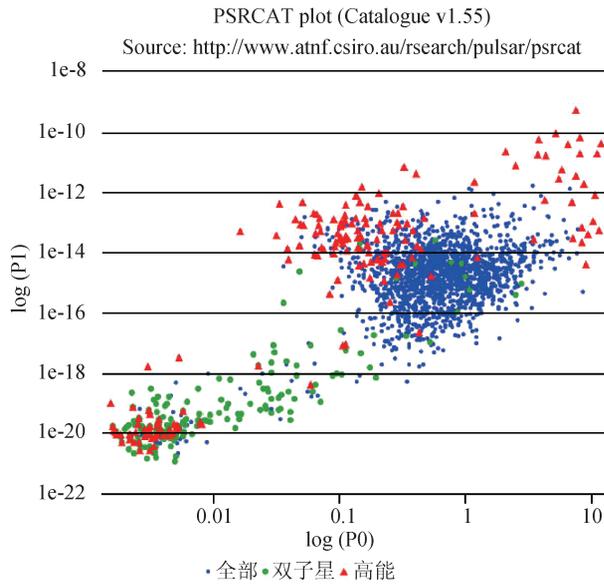


图5 脉冲星周期-周期导数图 (数据来源于 ATNF。使用 ATNF 的 PSRCAT 绘制, Manchester *et al.* 2005)

这将有助于了解脉冲星的演化规律。此外, 2016 年公布的白矮星脉冲星——天蝎 AR 为脉冲星的研究开启了新的可能性 (Marsh *et al.* 2016)。如果日后能够发现更多的同类天体, 人们对星体脉冲的形成机理也会了解得更为深入。

而脉冲星自转还可以充当精准的时钟, 用于测量时空的变化, 比如探测引力波。引力波可以由宇宙原初扰动、超大质量双黑洞相互绕转、双中子星或恒星级黑洞的并合、超新星爆发等过程产生, 其对应的引力波频率和强度各不相同。当前的 aLIGO、VIRGO 等

引力波探测器只适合探测来自近距离双致密星并合的高频引力波, 而对大质量双黑洞相互绕转等过程产生的低频信号则无能为力, 脉冲星计时阵 (pulsar timing array) 为引力波探测打开了一个新窗口 (Hobbs 2010)。脉冲星计时阵的主要原理是, 引力波对时空的扰动会影响脉冲星的脉冲到达时间, 考虑当前的脉冲星观测策略, 这种影响又以  $10^{-9}$  到  $10^{-6}$  Hz 的引力波尤为明显, 对应超大质量黑洞的相关过程 (Sazhin 1978; Detweiler 1979)。话虽如此, 低频引力波引起的脉冲到达时间变化也只有数十纳秒, 为了搜寻如此微小的变化, 在脉冲星计时观测中, 最关键的是了解各种效应对计时残差的影响, 其中最重要的效应之一就是要充分了解脉冲星自身的不稳定性。理论估计表明, 由于 FAST 能够用更短的积分时间获取脉冲星的脉冲轮廓, 它可以观测脉冲星的脉冲周期在短时标上的变化, 这将帮助研究者了解脉冲星本身性质造成的计时残差, 从而深入理解未来用脉冲星计时阵探测引力波的系统误差。预计通过 10 年的观测, FAST 对 20 颗脉冲星进行计时观测的灵敏度可以达到  $10^{-16}$ , 这将给出目前此波段最好的限制。当然, 搜索更多的脉冲双星, 并凭借双星系统的脉冲探讨引力波辐射对双星轨道演化的影响 (如 Hulse & Taylor 1975) 也是引力波天文学的又一个重要内容, 而这同样离不开高精度的计时测量。

此外, 脉冲星发出的射电辐射在星际冷等离子体介质中传播时, 还会发生色散和散射, 这些效应可以

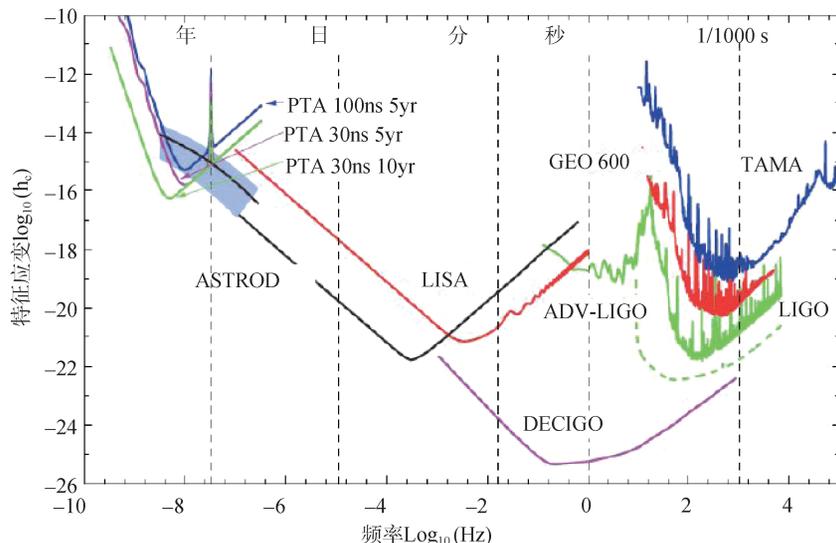


图6 引力波探测的灵敏度极限。左上三条线为 FAST 对 20 颗毫秒脉冲星进行计时观测的灵敏度极限 (图片来源: Nan *et al.* 2011)。

用于探测银河系中的自由电子分布，了解电离介质的性质。所以大样本脉冲星多波段监测的开展对星际介质的深入研究大有裨益。而脉冲星本身未解决的问题仍有很多，比如少数脉冲星不仅会发出通常的周期性脉冲信号，偶尔还会发出巨脉冲（如 Kuzmin 2006），这些巨脉冲是在某个周期内发出的，其出现没有周期性；除了常规的脉冲周期增长，脉冲星还会偶发自转突变（glitch），表现为周期突然略有减小（Espinoza *et al.* 2011）。现在试图解释巨脉冲或自转突变的理论不少，但是都没有得到广泛接受。如果能够全面解决这些问题，我们对脉冲星的认识将更上层楼。

除了脉冲星，近几年还发现了一种爆发式的射电脉冲现象——快速射电暴（简称 FRB，Lorimer *et al.* 2007），相关研究方兴未艾。这些射电暴每次持续时间只有数毫秒，估测发生频率可达每日数千乃至上万次，峰值流量高达数十央斯基（Jy,  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ），色散量远远超出银河系电离介质所能够导致的数值。根据快速射电暴的高色散性质，当前的主流理论指出，这类现象很可能起源于河外星系中，而且 FRB 121102 的宿主星系也已经确定（Chatterjee *et al.* 2017）；又由于近来发现了 FRB 121102 的重复爆发（Spitler *et al.* 2016），研究者倾向认为这种现象很可能与河外中子星的行为相关，如巨脉冲、强磁场中子星（磁星）的星风云，或是中子星与邻近小天体相互作用的过程。如果这样的理论最终能够得到证实，那么快速射电暴就可以用于研究星系之间的星际介质，以至河外星系内部在暴源周边区域的星际介质的性质。目前人们已经发现了 21 个快速射电暴（截止 2017 年 4 月），但还

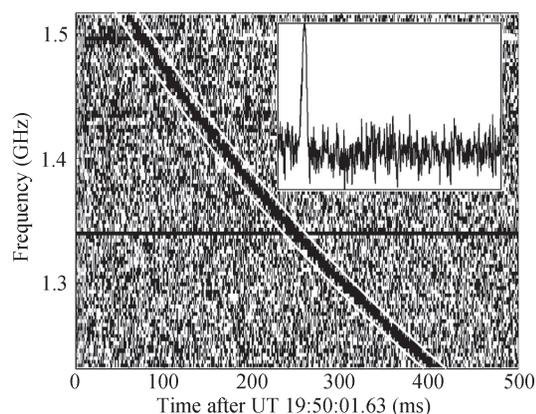


图 7 快速射电暴 FRB010724 的脉冲轮廓图 (右上) 与频率 - 色散图，其低频脉冲的到达时间晚于高频，一般认为这是信号在星际介质中的传播过程所致（图片来源：Lorimer *et al.* 2007）

是不能敲定这种现象的起源，也并不知晓 FRB 的复发究竟是普遍现象，还是个例。所有 FRB 相关疑难的解答唯有等待更多事例的积累。

依靠巨大的接收面积以及 FAST 团队开发的新程序，FAST 可以在脉冲星研究领域大显身手。一方面，高灵敏度使得 FAST 可以探测更暗弱、之前的望远镜无法发现的脉冲星，而且新的程序也使得 FAST 可以在不同的参数空间搜寻脉冲星，填补周期 - 周期导数图中的空白；另一方面，FAST 的高灵敏度也将为已知脉冲星的监测助力，凭借其超高灵敏度，在数年的观测中取得其他望远镜数十年的效果。而在关注脉冲星的同时，FAST 还会发现更多快速射电暴，最终帮助确定出这种瞬变现象在天空中的分布，为其起源提供线索——如果快速射电暴确实来自银河系之外，那么其分布应该是接近各向同性的。而且通过快速射电暴强度在多波束馈源中的分布，FAST 也能将快速射

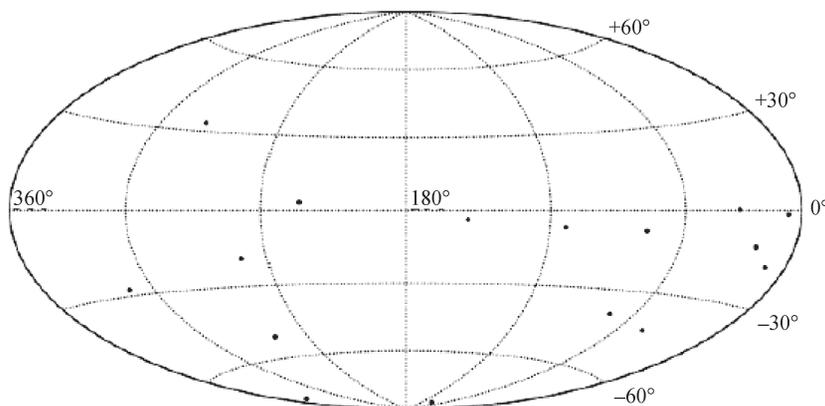


图 8 已发现的快速射电暴在赤道坐标系中的分布

电暴的位置精度提高到角分量级，较现有 FRB 的探测主力——澳大利亚的 Parkes 望远镜十余角分的分辨率大为改善。

### 中性氢与其他谱线观测

氢是宇宙中丰度最高的元素。宇宙中弥漫分布的氢原子主要由两种形态组成，中性氢（又称 HI）以及电离氢（HII），除此以外还有由两个氢原子组成的氢分子。当中性氢原子中的电子和质子因碰撞等原因而在自旋平行和反平行状态之间发生跃迁时，就会产生频率为 1.4204057517667 GHz（波长约合 21cm）的超精细结构跃迁谱线。鉴于氢元素的普遍性，再加上弥漫星际介质对 21cm 辐射的透明性，这条超精细结构跃迁线也成了射电天文学最重要的谱线。

在宇宙中，成分以中性氢为主的星际云团被称作 HI 区。HI 区的分布并不均匀，它们主要集中在旋涡星系、不规则星系等类型的晚型星系的星系盘上，而在晚型星系的核球、星系晕区域，以及年老的椭圆星

系中数量甚少。因此中性氢的 21cm 谱线辐射是示踪星系结构、运动和动力学演化的有力工具，也是勾勒银河系旋臂走向的重要途径。比如存在相互作用的互扰星系可能在光学波段平淡无奇，但使用 21cm 谱线观测，就不难发现其在潮汐力影响下拖出的中性氢长尾，尾迹的指向和辐射强度就指明了相互作用的历史；而银河系的旋转曲线也主要是根据对 HI 区的测量绘制而成的。

对于 FAST 这样的大型单天线射电望远镜而言，由于分辨率受限，进行中性氢观测的最佳手段是大天区巡天，而非关注单个 HI 区的细节。HI 巡天的历史可以一路追溯到 21cm 氢线被探测到之后不久，而 20 世纪 90 年代多波束接收机的发明大大提升了巡天工作的效率。现在由其他望远镜业已完成的中性氢巡天又可以分为河内与河外两类。先谈河内。河内 HI 巡天的主旨在于普查河内中性氢的分布，并由此了解星际介质的密度、温度等特性在银河系不同区域的分布。



图9 猎犬座旋涡星系 M51 及其伴星系的多波段合成图。图中红色和白色表示可见光辐射，主要来自星系中的恒星；蓝色表示 21 cm 氢线辐射，可见两个星系之间的相互作用拖出了一道光学不可见的中性氢长尾

（图片来源：B. Saxton, NRAO/AUI/NSF from data provided by J. Hibbard）

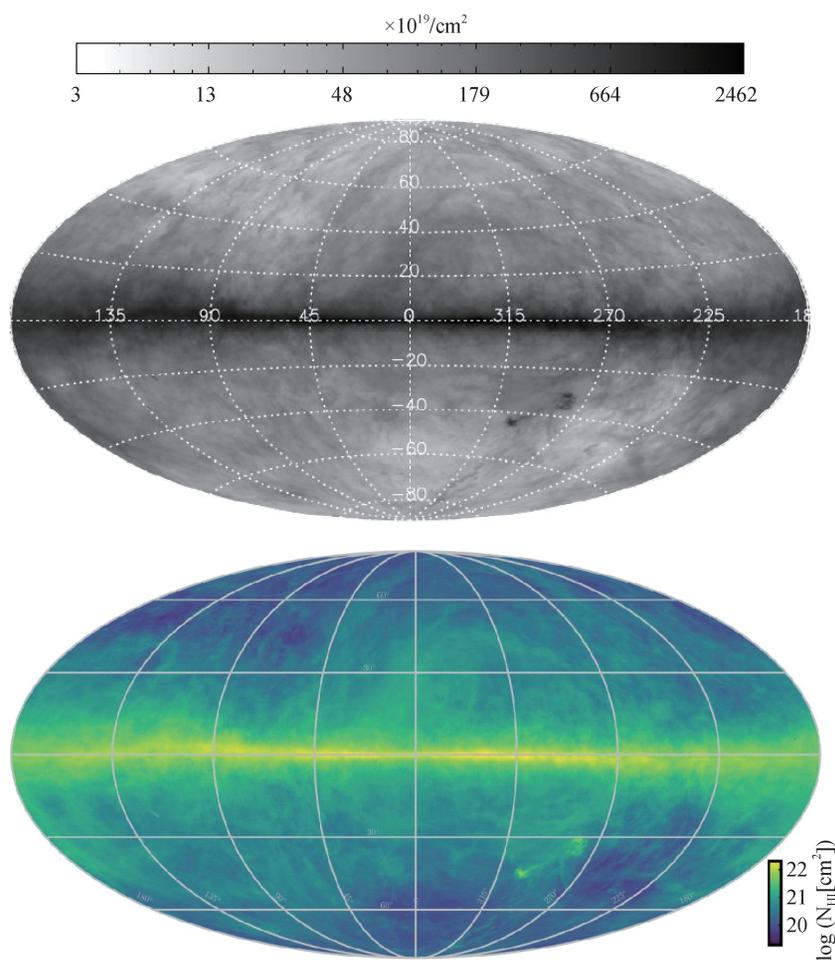


图 10 LAB 中性氢巡天 (上, 数据来源于 LAB 巡天, 作图: 本文作者) 与 HI4PI 中性氢巡天 (下, 图片来源: Ben Bekhti *et al.* 2016) 全天空图的比较

同时, 因为氢原子在密度、温度条件合适的情况下可以两两结合成氢分子, 而氢分子富集分子云又是新一代恒星诞生的温床, 对河内分子云的普查还可以用于研究分子云中冷的中性氢成分, 帮助人们了解氢分子形成过程, 估计分子云中云核的年龄, 了解分子云的演化过程, 为研究原恒星的形成提供信息。此外, 速度明显高于银河系自转速度的高速氢云也能够勾勒出银河系与周边矮星系的动力学作用史, 以及河内的其他动力学过程。

在过去的 20 年里, 河内 HI 巡天的标杆一直是莱顿 - 阿根廷 - 伯恩巡天 (LAB, Kalberla *et al.* 2015), 它率先对银河系中的 21cm 线进行了全天成图, 奠定了河内中性氢研究的基础。LAB 巡天使用的是 25m 级的望远镜, 角分辨率只有  $36'$ , 不足以解析星际介质中

通常的结构。进入 21 世纪后, 口径 305m 的 Arecibo 望远镜开展了 GALFA 巡天 (Peek *et al.* 2011), 对银河系中一些重要的分子云 (例如金牛座分子云) 及其周围天区进行了谱线成图, 观测了其中的湍流; 探讨了太阳周围的低温中性氢气体; 还考察了银晕中的高速云以及球状星团的外流气体。GALFA 巡天的角分辨率达到了  $4'$ , 但是它的缺点在于受制于 Arecibo 望远镜的视野, 关注天区较为受限, 包括猎户分子云在内的大量产星区都未能涉及; 对南天更是几无覆盖。而去年刚刚公布结果的 HI4PI 巡天 (Ben Bekhti *et al.* 2016) 角分辨率虽然达到了 10 余角分, 较 LAB 大大提升, 但与 GALFA 相比仍有很大的差别。

河外中性氢巡天与河内中性氢巡天最大的不同是关注的频段更宽, 原因是河外星系发出的 HI 辐射,

其频率会因宇宙学红移而大大变低。这样的巡天是了解星系质量函数、帮助我们了解星系的形成和演化过程、勾勒出宇宙大尺度氢云分布和星系相互作用，甚至藉由中性氢的数量来限制宇宙学理论的重要方法。目前最好的河外 HI 巡天当属 Arecibo 望远镜完成的 ALFALFA(Giovanelli *et al.* 2005)，其目标是对近域宇宙中的 HI 进行系统普查。ALFALFA 巡天辨认出了数以万计的河外 HI 源，其中不乏被先前的巡天遗漏的小质量 HI 发射天体，对宇宙中性氢的数量给出了更为可靠的估计。又因为定位精度优于  $20''$ ，角分辨率也达到了  $3.5'$  左右，这就使得结合光学等多波段数据的星系交叉认证成为了可能。但 ALFALFA 的受限之处既在于只能顾及中银纬天区，也包括观测频段——对于红移大于 0.06 的星系无能为力，而根据宇宙学理论，只有当红移超过 0.3 之后，星系的演化效应才变得显著起来。

在 FAST 观测的 3 GHz 以下频段中，除了 HI 的 21cm 线，还存在频率为 1612/1665/1667/1720 MHz 等一系列的羟基 (OH) 脉泽线，也就是微波受激辐射线。OH 脉泽的分布也相当广泛，从年老恒星周边到恒星形成区，从超新星遗迹与分子云的作用边界再到太阳系中的彗星，都可以找到它们的身影。在银河系中，OH 脉泽是探测激波的重要工具，往往与剧烈的恒星级过程相关；在河外星系中，OH 超脉泽也是恒星诞生的重要探针。而甲醇 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )、甲醛 ( $\text{HCHO}$ ) 等有

机分子的脉泽也落在了 FAST 的观测频段中，它们照样是恒星形成活动的示踪物。在谱线之外的连续谱，一般源于同步加速辐射或韧致辐射等非热过程，背后反映了源区的粒子加速和磁场分布，也是射电天文学不容忽视的内容。

与现有望远镜相比，FAST 的分辨率是单天线望远镜中最高的，它能够观测的范围也较 Arecibo 更大。因此 FAST 在开展巡天后，还是可以在相当大的天区内改进现有的结果，也可以与南半球的望远镜结合，增大天区覆盖。比如预期 FAST 发现的河外中性氢星系数量将是 Arecibo 发现的十倍，这将帮助我们更好地了解河外星系中性氢质量函数以及邻近星系中的中性氢成分。同时，FAST 对猎户座等天区的高精度观测还可以同河外数据作比较，以说明银河系与河外星系中类似区域的异同。FAST 还有望凭借其高灵敏度，探测到更多的 OH 脉泽线，并率先在河外星系中发现甲醇等分子脉泽。结合新型高分辨率频谱仪，FAST 更可以精细地解析出谱线的速度特征，并将氢线和一系列分子谱线所能覆盖的红移范围拓展到 0.3 以上，这将使星系动力学、星系演化等方面的研究获得长足进步。

#### VLBI 联测

如上文所述，根据衍射理论，望远镜的分辨率取决于集光口径和观测波段，口径越大，波长越短，则分辨率越高。与可见光相比，射电波的波长要长得多，因此哪怕像 FAST 这样口径数百米的望远镜，也只能

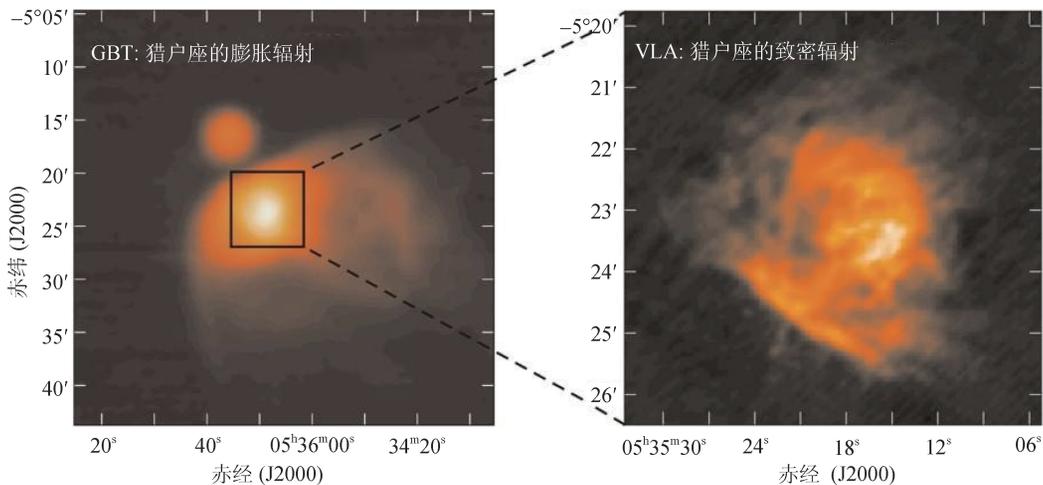


图 11 单天线观测与干涉阵观测的效果对比。左图为 110 m 绿堤望远镜在 8.46 GHz 的连续谱上观测到的猎户星云 (M42) 全貌，角分辨率只有  $1.46'$ ，只能看到星云大致的轮廓。右图为甚大天线阵 (VLA) 获取的星云内部复杂的结构图，角分辨率达到了角秒级 (图片来源：

Debra Shepherd, Ron Maddalena, and Joe McMullin)

达到数角分的分辨率，所能解析的细节远不及口径区数米甚至更小的光学望远镜。干涉技术就可以在很大程度上克服这种不足。它借助天体辐射在多架天线之间的程差导致各接收信号之间出现的相位差，将不同天线获取的信号进行相加或是相关。由此得到的输出信号当程差为波长整数倍时会增强，半波长奇数倍时减弱，于是就形成了干涉条纹。干涉仪的等效口径相当于天线之间的距离，也就是基线长度；而其灵敏度则由各天线的总面积决定。如果是像 VLBI 这样以整个地球为基线，甚至借助卫星天线将基线进一步延伸到太空，那么就可以在射电波段实现毫角秒级以至更高的角分辨率。

现有 VLBI 网络的主力天线大多只有数十米的口径，总接收面积受限，所以只能观测少数强源。比如遍布全美各地的甚长基线阵 (VLBA) 的单波束灵敏度只有 80 微央斯基；而美国的甚大天线阵 (VLA)、305m Arecibo 望远镜，以及绿堤望远镜 (Green Bank Telescope, GBT) 和德国 Effelsberg 望远镜两架百米级天线加入其中，组成高灵敏阵列 (HSA) 之后，其灵敏度可以提高到单波束 5.5 微央斯基。而如果用 FAST

代替 Arecibo，灵敏度可以进一步提升到 3.1 微央斯基 (Nan *et al.* 2011)。可以预期，凭借 300 m 的照明反射面，FAST 将成为东亚地区 VLBI 网络的主导力量，将现有干涉观测的灵敏度提升数倍，让可供精细成像的辐射源数量增加 3 个数量级，增进人们对更多天体细节的了解 (Nan 2006)。

## 4 展望

本文简述了 FAST 望远镜的基本特性及其主要科学目标。在不久的将来，随着 FAST 望远镜调试的完成，正式观测将逐步开展。我们预期在此期间将发现更多脉冲星，其中包括一些特殊种类的脉冲星；积累更多的快速射电暴样本；完成 FAST 可观测天区的河内中性氢成图和河外中性氢星系巡天。这些工作不仅是验证 FAST 及其接收机性能的必需，还必然会深化我们对宇宙的认识。

## 致谢

本文使用了 ATNF 的脉冲星星表数据及绘图工具 (Manchester *et al.* 2005)。



## 科苑快讯

### 人类何时开始烹制植物

在大约 1.5 万年前，人类开始使用耐热烹饪容器，新品种食物的引入，导致饮食和营养上发生重大变化。研究表明，这类容器通常用于加工动物产品，迄今为止还未发现早期植物烹饪的证据。英国布里斯



托大学 (University of Bristol) 的埃弗谢德 (R. Evershed) 和同事最近报告，他们在利比亚沙漠的两处古迹发现了最早的直接证据，两处古迹的历史可追溯至公元前

8200 ~ 公元前 6200 年。

通过气相色谱分析技术和质谱分析技术分析 110 块破碎陶瓷碎片，揭示了动物脂肪和植物来源位置的典型特点。一些样本二者兼有，表明植物和动物产品曾放在一起加工或者这些容器具有多种用途。来自容器的独特油脂则证明被加工的植物种类非常广泛，包括种子、多叶的陆生植物和水生植物。植物烹饪时代的到来对人类的营养、健康和体力有着重大影响，将食物烹制得足够软糯有助于婴儿的摄取，可以更早断奶，从而增强了生育能力。

(高凌云编译自 2017 年 2 月 15 日《欧洲核子中心快报》)