

FAST的“初光”和科学规划

李 菡

(中国科学院国家天文台 100101)

天文学是最古老的科学。这种表述容易引发联想,需要商榷。“古”未必好,“老”易我执。伽利略同时开创了现代物理学和现代天文学。开创必须反动,反古老天文的认识、手段和审美。1633年,伽利略因支持日心说而被软禁。教廷对伽利略进行了逐级递进的宗教审判(inquisition),督促其悔过。这种颇有仪式感的审判方式,据说一共是13层。世人尚不知道伽利略坚持到了第几层,公开的结果是其宣布认错,并留下了那句(地球)“就在动啊(Eppur Si Muove)”。1992年10月,梵蒂冈教皇保罗二世正式宣布359年前的宗教审判初心是好的,但是结论是错误的。这种歉意总是为了成全做错事的一方吧。伽利略、天文学、当然还有我们生活的星球只是Eppur Si Mouve。

1609年伽利略首次使用光学望远镜,开启了现代天文学。而光学观测直到现在依然是天文学的绝对主流。射电天文学是二战以后现代天文学重大发现最为丰硕(没有之一)的前沿领域,其相对规模一直是天文的非主流。第一个建造抛物面天线的工程师雷柏(Reber),在二十世纪三四十年代寻求职业天文学者和机构合作推进射电天文研究的时候,响应全无。实际上,20世纪30年代的通讯工程师、第一位射电天文学家扬斯基(Jansky)已经发现了来自银河系的无线电辐射,20世纪40年代雷柏发现了空间同步辐射。回望历史,很难想象这样革命性的宇宙发现会被同时期的天文学界整体忽略,这表现出经典天文学对于无线电技术的无知和对于传统宇宙观的极度依赖。直到1951年,哈佛大学物理学家欧文(Ewen)和珀塞尔(Purcell)利用无线电技术首次探测到星际物质的主要成分——中性氢^①

(HI),促成了哈佛大学设立专门的射电天文学位,并得到了其他天文单位的跟进,才真正开启了射电天文领域。20世纪50年代雷柏获得民间基金会的支持,搬去澳大利亚南部岛屿塔斯马尼亚继续他的研究。20世纪60年代射电天文观测促成了20世纪4大天文发现:类星体、脉冲星、宇宙微波背景辐射和星际分子。

一、非主流的巨型望远镜

在从来都是非主流的射电天文学领域,出现了雄踞观测深度巅峰超过半世纪的完全非主流概念的阿雷西博望远镜。扬斯基的探测器是偶极天线,雷柏的探测器是抛物面天线,欧文的探测器是喇叭天线,虽然多样但都常见。阿雷西博望远镜是球面天线加线状馈源的非主流设计。非主流的设计来自其非天文的出身。阿雷西博望远镜是美苏冷战的直接产物,其设计目标是大气雷达,却彪炳天文史册。

20世纪60年代以来,成功的开放射电天文台很多。在常规的科学产出统计量纲里面,例如文章数量、引用、博士生培养等,阿雷西博远逊于美国甚大天文阵列(JVLA)、澳大利亚帕克斯望远镜(Parkes)这类同样知名的射电天文台。部分原因在于其技术概念的非主流,使得操作和精通阿雷西博所需投入的增加。哪个博士生不急着毕业呢?更为本质的是,阿雷西博不是源自天文的设计,其观测模式和数据处理带有更为彻底的探索和原创属性。这也说明基于行业共识、同行评议的学术评价体系 and 科学与工程,善于遴选优秀的成果而难以激励前瞻性的突破。类似于好学生和创业家的区别。

阿雷西博望远镜自1963年底获得“初光”(first

light)起,就不停取得前瞻性的突破,书写射电天文的历史。1965年阿雷西博望远镜测量水星自转,推翻了此前100多年间的错误认知。1973年发现双中子星,20年后获得诺贝尔物理学奖。1982年发现毫秒脉冲星^②,揭示了中子星演化的新路径,并为银河系尺度的物理测量提供了精确时钟。做出这一发现的卡尔卡尼(Kulkarni)多次跟笔者聊起过发现毫秒脉冲星的经历。熟悉卡尔卡尼跳脱直率话风的朋友可以自行脑补,他为了适应特定谈话场景而针对故事某个侧面的强调或者略带艺术效果的夸张。无论如何变化,核心要义前后统一、有史书为证:1)伯克利的博士导师海勒斯(Heiles)教授没钱了,发配他去阿雷西博望远镜做观测助手勤工俭学。2)天文学家普遍对无线电系统缺乏了解。他负责了帮助外来天文学家插拔缆线,进行接收机系统切换。通过这项“挖掘”技术熟能生巧,产生了用雷达终端跨界天文观测的灵感,从而实现了当时世界上最快的天文信号采样。这样的非主流突破是不能由战略委员会规划,也不会提前得到基金评审委员会的资助。

叔本华说过对待真理的人类三部曲,嘲讽、网暴和想当然。类似地,对于革命性的想法,阿瑟-克拉克总结了人类三联:1)不可能 2)不值得 3)我早就说过这是个好主意。

二、初光

2016年时阿雷西博53岁了,年过半百却依然

倔强。在发现快速射电暴这一自身并不占优的全新领域攫取了第一例重复快速射电暴:FRB 121102。快速射电暴是2007年才在无线电波段发现的神秘暴发现象,在千分之一秒释放太阳一整年的辐射能量,超过了全世界1万亿年用电量。人类对于快速射电暴知之甚少。“神秘”一词常常出现在重要学术文章的首句。阿雷西博的发现直接促成了这一领域的重要里程碑:2017年定位FRB121102来自于遥远的矮星系,确定了其宇宙学起源,被美国天文学会称作“自LIGO引力波之后天文学最重大的发现”。

射电天文领域的日新月异给FAST团队带来了全新的挑战和巨大的压力。快速射电暴这样的新前沿不可能出现在FAST的立项建议书中。对于科学工程师或工程科学家来讲这都不是事。真正的挑战是钱。

FAST的建设经费中没有一分钱是支持天文科学研究的,翻译一下就是没有一分钱可拿来买电脑和硬盘,更遑论跟进新前沿。科学工程没有钱做科学,这在工程管理体系内逻辑自洽:修港珠澳大桥还要研制特斯拉吗?这种主流逻辑与科学创新的历史规律背道而驰:大科学工程的最终评判是科学的质量,原创的突破不是达成既定指标可以体现的。雷柏寻求资助的时候,天文界对银河系是否存在非热辐射毫无所知,甚至都没有表现出合格的好奇心。卡尔卡尼发现毫秒脉冲星的时候,天文界对于这种极端相对论天体的存在一无所知,连做出这



图1 (a) 1982年的阿雷西博望远镜控制室中卡尔卡尼(左)与海勒斯(右)分析第一颗毫秒脉冲星的探测结果;
(b) 2013年阿雷西博终端控制室中国国家天文台博士岳楠楠更换信号电缆

个发现利用的关键设备都不是天文终端。革命性的突破是难以规划、更难以由委员会打分产生的。

幸运的是,FAST早期科学准备得到了着眼未来的合作单位的大力支持。2014年,贵州师范大学跟国家天文台签订了建设FAST早期科学数据中心的合作协议。2015年我们与加州大学伯克利分校射电天文实验室开始讨论针对快速射电暴的FAST观测模式和计划。2016年曙光集团生产的两个集装箱计算中心在现场启用,及时支撑了系统调试所需的数据处理。2016年初用于测试的临时鱼骨天线馈源开始接收信号。

2016年9月19日,装备了正式馈源仓平台和创新的超宽带接收机的FAST整体系统,成功探测到在1967年由贝尔先生发现的第一颗脉冲星,信噪比高达5000,实现了天眼的“初光”。

三、早期科学

要搞清楚卡尔卡尼写过多少篇《自然》《科学》论文也是个小课题。维基百科上是70篇,显然过时了。在美国公众广播网2015年的采访文章中提到了79篇,其中还提到卡尔卡尼的名言“Given a sufficiently large telescope, a sufficiently idiotic astronomer can always make a discovery.”(大意为:只要望远镜足够大,傻子天文家也能做出发现)。

2011年,FAST工程建设刚刚开始。对于如何做到这两个“sufficient”我是没有“sufficient”的信心。2012年,在得到科技部973专项支持后,我们提出了在FAST工程任务书之外增加一套基于新技术的超宽带接收机(UWB)。这是一个典型的所谓“快而脏”的小项目,设计采用加州理工大学魏因雷布(Weinreb)教授发展的四脊波导,利用连续变化的波导尺寸覆盖较宽的频率范围^③。魏因雷布是射电探测技术的行家,发展了早期的数字相关机,直接帮助他发现了第一个射电波段的星际分子^④。

2017年的调试艰难且惊心动魄。FAST望远镜还不能跟踪目标,只能漂移扫描:依靠地球自转扫

过天空不同坐标。唯一配备的接收机是不制冷UWB,其在FAST科学最主要频段的噪声本底是未来正式接收机的3倍,也就是要达到类似的信噪比,观测时间需要10倍,而依赖地球自转漂过特定目标的时间固定在了12秒。即使如此,UWB产生的数据通过光纤传输到了位于贵州师范大学的FAST早期科学数据中心进行系统处理。从2017年8月开始,批量的新脉冲星的候选体被发现。但是当我们再次设置FAST指向同一个赤纬,等待其漂过候选体位置以重复验证新发现的时候,却总是不能重复探测到同样的信号。到9月初,我才醒悟到自己忽略了一个很初级的天文规律。由于地球自转的进动,地球北极在星空中的位置每73年移动一度。目前天文界相互沟通的天空投影坐标基准时间是J2000。我们处理漂移扫描的数据估算出脉冲星候选体的位置,自然地使用了J2000坐标系。而地球的自转过程中保持恒定的赤纬线不是J2000,而是当前时间。两者的差别在0~14角分之间变化。矫正这个影响之后,才能得到正确的坐标。

作为一个新兴设备,很可能还存在其他潜在的问题。新设备的新发现总是需要独立证据才踏实。2017年9月15日,在南非和澳大利亚合作者的配合之下,我们获得了曾经电视直播阿波罗登月的帕克斯(Parkes)望远镜一小时的机动时间来证实FAST的发现。当时环境电磁干扰非常严重,经过反复尝试,在9月17日成功确认了FAST首颗脉冲星新发现FAST-pulsar C1。当天,我给南仁东老师及调试组主要同事姜鹏研究员、钱磊副研究员等汇报了这一结果。2017年10月10日国家天文台正式对外公布FAST首批科学发现^⑤,届时得到验证的脉冲星已达到6颗。在《新闻联播》等媒体报道和科学院提交的《要闻专报》中称其标志着“FAST开启了中国射电天文原创发现的新时代”。

很不幸,由于南老师的身体状况,我们没有收到答复。但我们相信“天眼之父”对于天眼的前景有坚定的信心。

四、科学规划

FAST项目于2007年得到发改委批复立项。2008年提交了项目任务书。2011年南仁东老师领衔在《国际现代物理刊物D》发表了项目综述^⑥。在这些关键文档中,规划了5项关键科学目标1)中性氢 2)脉冲星 3)分子谱线 4)甚长基线干涉 5)寻找地外文明。

在科技部的支持下,FAST科学团队自2012年起连续组织了“973”计划项目“射电波段的前沿天体物理课题及FAST早期科学研究”和国家重点研发计划项目“基于FAST漂移扫描巡天的脉冲星、中性氢星系和银河系结构研究”,联合国内主要的天文研究机构,系统性地开展了预先研究和FAST早期科学研究,在脉冲星搜索、星际介质和分子谱线、实时宇宙学等方面开展了大量观测,取得了一批重要成果。2018年在调试工作取得重要进展的前提下,FAST科学团队组织撰写了《FAST早期科学计划书》,将FAST核心科学目标细化成45个可执行项目。通过执行这些系列项目,我们实现了中国天文学家脉冲星发现零的突破,快速射电暴发现零的突破,星际磁场塞曼效应测量零的突破等等。更为重要的是,项目的执行培养了超过100名研究生、博士生和博士后,在这一天文的非主流方向积

蓄了宝贵的青年人才。其中很多现活跃在FAST科学研究工作一线。

2022年1月,FAST通过国家验收进入正式运行。同时,FAST科学委员会批准了5个优先重大项目1) FAST 漂移扫描多科学目标同时巡天(CRAFTS);2) 快速射电暴的搜寻和多波段观测;3) 银道面脉冲星巡天;4) M31中性氢成像与脉冲星搜寻;5) 脉冲星测时。这些项目占据约50%的总观测时长,系统覆盖FAST核心科学目标及快速射电暴这样的新兴前沿领域。

五、突破

在2013年快速射电暴被确认并被命名以后,定位这一神秘的宇宙爆炸现象成为领域共识的突破方向。2016年,在准备CRAFTS巡天的关键技术过程中,我们提出了用19波束接收机尝试定位的方案。但是19波束接收机直到2018年才开始安装,而阿雷西博望远镜的发现在2017年就已经促成了快速射电暴定位这一本领域的里程碑(见上)。

2019年8月30号,FAST快速射电暴终端调试观测捕捉到来自FRB121102的明亮脉冲。我们通过天文电报公布这一结果,促成了一系列的国际多波段设备跟进观测,而FAST自己的连续监测成果

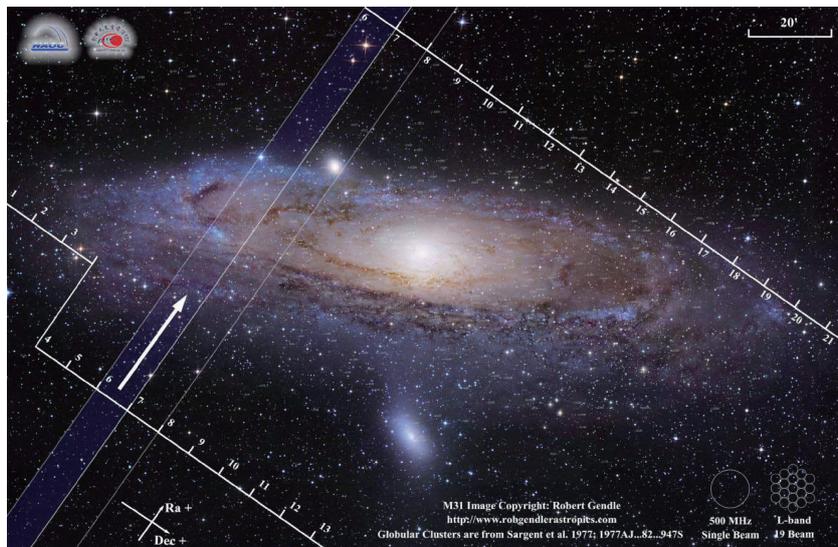


图2 《FAST早期科学项目书》之项目4:“M31脉冲星巡天”示意图

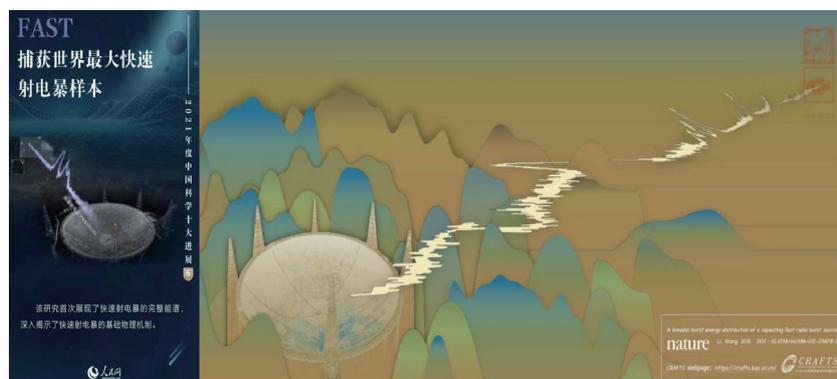


图3 FAST观测快速射电暴FRB121102。上图中的FAST观测到的真实脉冲发自星系‘印章’，如溪涧潺潺，穿越爆发率起伏而成的叠嶂，流进天眼。宇宙变换与仰望之目共成千里江山

最为丰硕。在其后一个半月的FRB121102活跃期内，仅观测59.5小时就探测到1652次爆发，这一数量超过了快速射电暴领域至此发表的来自所有源的所有爆发量的总和，推动快速射电暴爆发性质的研究进入高统计性的时代。

分析这一爆发事件集合，揭示了：

1) 快速射电暴爆发率存在特征能量(4.8×10^{37} erg)，并具有双峰结构；

2) 在为期47天的活跃期中，等效的爆发总能量为 6.4×10^{46} erg，占单一磁陀星总能量的约38%；

3) 1652次爆发之间的时间间隔呈现出有两个峰值的正则对数分布，很可能对应了随机过程。多种算法的时域分析也在1毫秒到1小时之间排除了周期/准周期性。

综合起来，FAST观测排除了这一快速射电暴来自孤立磁陀星的可能，揭示了其基础物理性质。这一结果发表在2021年10月14日的《自然》杂志^⑦，也入选了2021年度“中国科学十大进展”。

六、承继与前程

分子有丰富的微波辐射路径，是星际介质中重要的冷却剂，这和微波炉加热食品的原理一样。星际介质分为原子和分子两大类主要成分。新一代的太阳、地球甚至生命在星际分子云中诞生。星际介质由原子向分子转化是宇宙物质循环中最为关键的一环，也是物质演化由物理机制主导转向化学

主导的标志。2003年，我们利用阿雷西博望远镜观测到由分子氢碰撞制冷的低温冷原子氢，其特征温度仅为10K，代表了银河系中最低的原子热温度。在银河系普遍存在100K的原子氢气(HI)形成的背景辐射下，近邻分子云会在中性氢超精细结构谱线中造成自吸收。我们根据这种观测特征命名这类与分子混合的冷原子氢为氢的窄线自吸收(HI Narrow Self-Absorption: HINSA)。

HINSA发表后成为研究星际分子云形成的化学时钟。而其物理探测的潜力也马上被意识到：通过HINSA塞曼效应测量恒星形成区的磁场。法拉第的线圈实验奠定了场论的实验基础。由于人类尚不能发送线圈到几百光年之外，磁场的遥测一直是难题。1902年就获得诺贝尔物理学奖的塞曼效应至今依然是在星际尺度直接测量磁场强度的唯一方法。2001年，在美国的绿岸天文台(Greenbank)举行了纪念中性氢发现50周年的学术研讨会。有幸见到中性氢发现人欧文博士的同时，我也报告了尚未发表的HINSA探测结果。同时参会的还有伯克利大学海勒斯教授，他也是星际塞曼效应测量的专家。我们的讨论产生了其后20年间在阿雷西博望远镜、绿岸望远镜、甚大天文阵列等大型射电天文设备进行HINSA塞曼效应测量的各种尝试，无一成功。

2012年，海勒斯第一次到达FAST现场，深度体验了彼时FAST建设工地的乐趣：临时板房、室内无

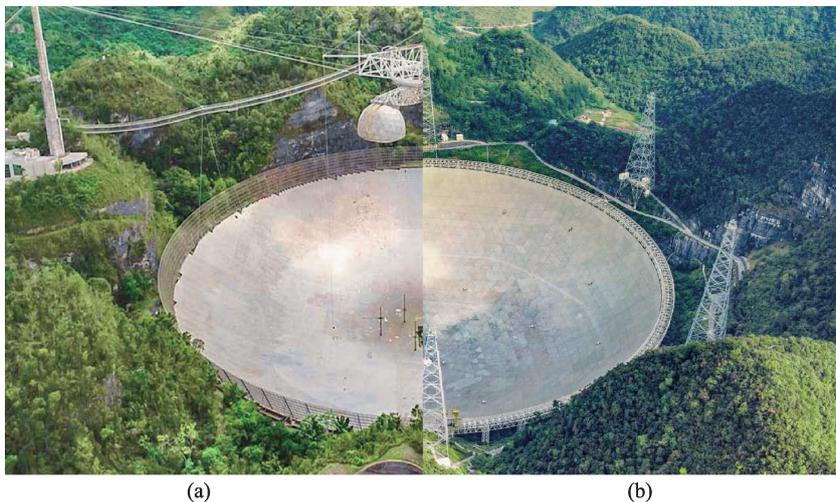


图4 阿雷西博望远镜(a)和天眼FAST(b)

热水、公共厕所、与狗狗一起排队领饭等等。从此乐此不疲,每年都来,直到被疫情阻隔。在他的指导下,科学院资助的博士后学者庆道冲博士完成了FAST谱线偏振测量的校准。2021年,我们首次在金牛座分子云L1544测量到HINSA的塞曼效应。分析得到其对应了约4微高斯的磁场,约为地球磁场强度的10万分之一。这样微弱的磁场说明星际分子云团比经典理论更早地进入了磁超临界状态,将很快形成新一代恒星和行星。我们也因此提出在传统的两极耗散机制之外,可能需要磁重联、湍流等其他更有效的磁场耗散机制。这一结果2022年1月以封面文章的形式发表于《自然》杂志[®]。杂志同期刊载了资深编辑和特邀独立专家的评述。他们都强调这一工作所展示的新方法的重要性。

庆道冲博士及数个其他研究团队正在针对不同的天区开展HINSA塞曼效应的测量。我们也在探讨利用FAST优先重大项目CRAFTS系统获得银河系三维磁场强度分布的可行性。如果成功,将开辟一个新的领域,有可能帮助回答银河系磁场起源这样的基本却至今无解的天体物理问题。

2020年12月1日,位于加勒比海波多黎各岛的阿雷西博望远镜于当地时间清晨坍塌。这一美苏

冷战的直接产物、傲视射电天文半个世纪的非主流巨型天线悲壮落幕。阿雷西博对于天文科学、大气雷达、宇宙生命认知等等领域的贡献和影响,将继续在教科书、学术领域、新设备等等得到体现。

同时,坚韧、发现、非主流,中国天眼的时代刚刚开始。

参考文献

- ① Ewen, H.I. & Purcell, E.M. 1951, *Nature*, 168, 356. doi:10.1038/168356a0
- ② Backer, D.C., Kulkarni, S.R., Heiles, C. et al. 1982, *Nature*, 300, 615. doi:10.1038/300615a0
- ③ Akgiray A, Weinreb S, Imbriale WA et al. 2012, *IEEE Transactions On Antennas and Propagation*. 61: 1099- 1108. DOI: 10.1109/Tap.2012.2229953
- ④ Weinreb, S., Barrett, A.H., Meeks, M.L., et al. 1963, *Nature*, 200, 829. doi:10.1038/200829a0
- ⑤ 李葭,王培 and 张永坤 2021, *科学通报*, 66, 1272. doi:10.1360/TB-2020-1629
- ⑥ Nan R, Li D, Jin C, et al. *Int J Mod Phys D*, 2011, 20: 989 - 1024
- ⑦ Li, D., Wang, P., Zhu, W.W., et al. 2021, *Nature*, 598, 267. doi: 10.1038/s41586-021-03878-5
- ⑧ Ching, T.-C., Li, D., Heiles, C., et al. 2022, *Nature*, 601, 49. doi: 10.1038/s41586-021-04159-x