DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2022.05.018

用FAST研究脉冲星

徐仁新

（北京大学物理学院 100871）

Twinkle, twinkle, little star,
How I wonder what you are.
Up above the world so high,
Like a diamond in the sky!

这是一首英文儿歌*，却形象而生动地诠释了“脉冲星”。脉冲星确实算是“小”天体，半径仅约十公里。虽然跟北京“四环”差不多大(图1)，但多数脉冲星的质量却比太阳还大(要知道整个地球的质量不足太阳的十万分之一)。可见，构成脉冲星物质的密度奇高。

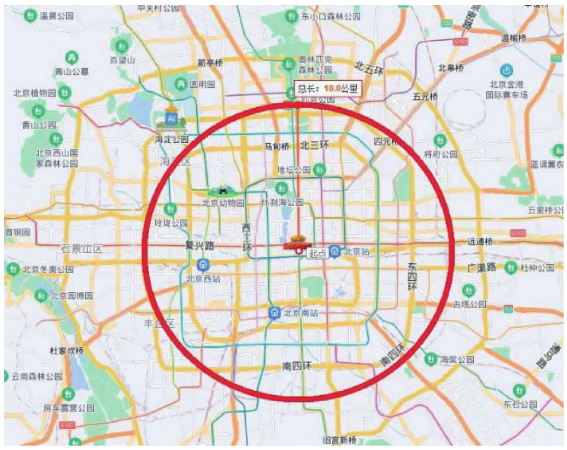

图1　脉冲星大小跟北京市区的“四环”相当

那么，我们如何了解遥远的脉冲星呢？众所周知，天文学家通过接收和分析发生在宇宙深处的物理过程中泄漏的“信使”来研究包括恒星、星系在内的天体。这些信使以电磁辐射为主，但也包括中微子、引力波、宇宙线等。作为周围存在强磁场的致密星体，脉冲星磁极区往往能够产生大量的高能电子对，它们沿着磁力线加速运动时产生电磁辐射束(图2)。脉冲星的自转轴和磁轴一般并不重合。随着脉冲星自身的旋转，我们就可以观测到周期性的“脉冲”信号，恰如“一闪一闪亮晶晶”！天文学家利用地面或太空的望远镜观测并分析这些脉冲信号，进而研究与脉冲星相关的极端环境下的物理规律，涉及万有引力和电磁力这两种长程相互作用以及强、弱两种短程力。

那么，夜空中闪烁的脉冲星是“钻石”吗？很遗憾，这种星体的组分至今尚无定论，但肯定不是钻石。简单的估算会发现，脉冲星的平均密度跟原子核相当，因此可以形象地称作“巨原子核”。我们知道，普通原子核由几乎等量的质子和中子组成。20世纪30年代初，苏联物理学家朗道提出这种巨原子核应该主要由中子组成，即后来逐渐流行的观点：脉冲星就是“中子星”。不过，质子和中子并非基本粒子；特别地，20世纪60年代以来逐渐建立并完善了所谓的“粒子物理标准模型”，认为包括质子和中子在内的参与强相互作用的粒子是由更基本的夸

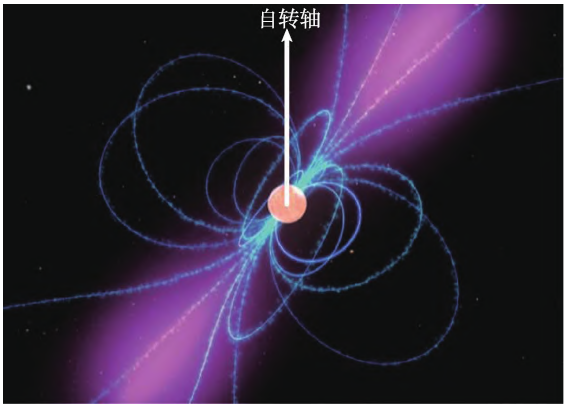

图2　脉冲星辐射示意图。接近光速运动的电子对沿着脉冲星周围的磁力线(蓝色)运动产生电磁辐射束(紫色)。随着脉冲星的自转，辐射束周期性地扫过我们的望远镜

*这首脍炙人口的童谣有不同的译本，比如：“一闪一闪小星星，好奇何物现此景。遥悬尘世烟云外，判若钻石夜空明”。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

克组成的。鉴于此,不少学者开始怀疑起了流行的观点,推测脉冲星其实由我们还不很熟悉的某种奇特物质所构成。

脉冲星就是这样一种神奇而又极端的客体,而它却诞生于“凤凰涅槃”。一颗星体要稳定存在,其自身万有引力和内部的压力应该平衡。夜空中绝大多数点点繁星通过内部核聚变放出的能量而维持的热压力来抵抗自引力。当恒星的核能耗尽,自引力将不能够被有效抗衡。最终,恒星的中心塌缩,形成致密天体(即脉冲星)并释放大量引力能,表现为超新星爆发。可见,于一般恒星核燃烧的灰烬之中,脉冲星获得了新生!

一、研究脉冲星有什么用

自然界存在四种基本相互作用;除了较早认识的长程万有引力和电磁力,还有跟夸克有关的短程弱力、强力(前者可导致夸克的味转变,后者能将若干夸克局域于特定单元之内)。如前所述,这些基本“力”在脉冲星涉及的物理过程中都极端地体现出来。可见,脉冲星可被看作珍贵的“天体实验室”。

例如,通过观测脉冲星可以检验不同的万有引力理论。爱因斯坦的广义相对论(GR)认为质能的存在导致时空弯曲,在弯曲时空中的物质运动表现为引力相互作用。然而GR是关于时空的经典理论,至今尚未成功地建立起量子引力理论。因此,在越来越高的精度上检验包括GR在内的引力理论就是有趣而必要的。脉冲星本身就具有强引力场,且其发射的周期性脉冲信号便于观测上反演受引力控制的物质运动轨迹,是故通过观测脉冲星检验引力理论就受到学者们的关注并已经取得很好的进展。此外,多颗毫秒脉冲星(自转周期低于几十毫秒且周期变化率较低)组成的“脉冲星计时阵”(PTA)有望打开纳赫兹的引力波窗口;若能成功,通过体现引力波偏振属性的计时观测也能在“辐射场范畴”检验各类引力理论。

再如,通过观测脉冲星可以拓展和深化人们关于强相互作用在低能标情形的认识。脉冲星的质量、半径等观测量跟构成它的致密物质的成分和状态有关,由强力和弱力共同决定。弱电统一理论可以高精度地刻画弱相互作用;不过,当用描述强力的量子色动力学(QCD)处理低能标问题时则遇到了挑战,而脉冲星内部致密物态之谜却属于低能QCD范畴内的问题。QCD具有渐近自由特征。虽然在高能极限下相互作用趋弱以至能成功地进行微扰论处理,但是在低能标下夸克之间耦合太强导致微扰计算往往失效。某种意义上而言,脉冲星观测所反演的致密物态信息将开拓我们的眼界:又一种低能强力主导的物理实在!值得一提的是,不同的脉冲星结构模型所预言的极限质量是不一样的;发现更大质量的脉冲星将支持某些理论推测的硬物态。

除了科学意义外,脉冲星还肩负工程应用责任,体现在时间标准和空间定位这两个主要方面。

现代生活离不开时频系统。最早的时间度量是依赖于天体周期运动的,如地球的自转和公转,也是天文历法的主要话题。然而,这些运动周期是动力学演化的、不够精确的。原子钟改进了计时系统;虽然时频信号只依赖基本物理常数,但是时间精度会受制于实验条件。有些毫秒脉冲星的自转周期随时间演化非常稳定,堪比原子钟的精度。一些研究表明,由若干稳定自转演化的毫秒脉冲星组成的PTA可给出新的时间标准,其稳定性在较长时间尺度上可优于原子钟。当然,目前离“脉冲星钟”的实际应用还比较遥远,但值得努力。

此外,类似于全球定位系统GPS,脉冲星稳定的周期性信号也可以应用于地面物体或航天器的定位。依赖若干脉冲星定位,地面望远镜或给出地球动力学方面的信息,度量地壳的板块运动;而X射线观测脉冲星有望定位空间飞行器。不过,这些方面的研究都有待进一步深入。

二、基于FAST的脉冲星研究有什么优势

脉冲星的辐射遍及全电磁波段。虽然覆盖射电、光学、X射线甚至伽马射线,但最早用射电望远

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

镜于1967年发现脉冲星。时至今日，因如下两个因素，在射电波段研究脉冲星仍然具有优势。

其一是“价廉”：射电天文根植于通用电子技术，经济成本低。众所周知，信息化和智能化是人类文明开启第三次、第四次工业革命的标志，而便捷的无线电通讯不可或缺。从某种意义上来说，天文学可以广义地看作“星际通讯”：通过探测所感兴趣的天体事件释放的信使来反演物理过程。如此看来，依靠射电通讯技术而发展起射电天文学就不奇怪了。因波长较长，收集辐射的反射镜面的建造精度要求不是特别高，便于建设大的射电望远镜。例如，位于贵州黔南的全球最大的射电望远镜FAST(五百米口径球面射电望远镜)，建设经费才不到12亿人民币。较长的波长也使得干涉阵技术能普遍应用于射电天文，从而有效增加望远镜的总接收面积。我国正式参加了国际SKA(Square Kilometre Array，平方千米阵)项目，它通过上千面天线构成的干涉阵来进行天文观测。

其二是“物美”：射电信号探测往往具有高灵敏度，能提供更丰富的信息。光子的能量$E = h\nu$，其中h为Planck常数；随着频率ν的降低，光子的波动性逐趋显现。这直接导致两个后果。1. 即便某天体物理过程释放的能量中很少一部分落入射电波段(至今地球上射电望远镜接收的总能量甚至不足以翻动一张A4纸)，这些低频光子的数目也是可观的。不同于高能X/γ射线的观测，射电测量的统计误差低；若望远镜接收面积足够大，系统误差也可大大降低。成熟的电子学还能有效地放大接收到的电信号，进一步提升射电观测的灵敏度。2. 射电波显著地体现出了光子的波动性，而电磁波的偏振测量除了得到总强度外，还能给出线偏振强度和偏振位置角、圆偏振强度等；如此获取的信息量是非偏振测量的四倍！

射电望远镜的这两大特点使得高灵敏度的精确测量成为可能，成为探究极端天体物理过程的利器。作为射电望远镜的代表，FAST的优势在脉冲星研究中表现得淋漓尽致。受益于高灵敏度，用FAST发现的脉冲星数目目前就已经超过五百(数目还在显著增加)，包括一些特别暗弱的脉冲星。对于小望远镜而言，一般只能通过周期叠加给出积分脉冲轮廓但往往不能测得单个脉冲，而FAST可普遍地用于单脉冲研究，甚至测量单脉冲的偏振轮廓。这便于研究脉冲星相干射电辐射的物理机制。关于脉冲星研究的“好科学”往往跟计时有关。相对于其他电磁波段的观测而言，通过射电观测获得的脉冲星计时精度最高。FAST是最大的单口径望远镜，显著地提升了计时精度，有助于探测纳赫兹引力波、更高精度检验引力理论、发现更大质量脉冲星等核心科学目标的尽早实现。

三、结论与展望

半个世纪之前发现的脉冲星一直以来都是学术研究的热点，涉及深化万有引力和强力的认识、打开纳赫兹引力波窗口等重要科学目标，以及时间标准、空间定位等应用价值。相比于国际潮流，我国的脉冲星研究起步约晚了十年，却也在几代人的共同努力下奋起直追。随着经济实力的提升，我国建设的若干天文大科学装置为学术研究和人才培养提供了独特的平台。如今，包括FAST在内的一流设施已经开始取得好的科学成果、抢夺了学术话语权。今后，更多地面射电和光学、空间X/γ射线以及空间站等天文望远镜的建设和运行，预示着我国年轻一代“脉冲星人”将会面临空前的时代机遇。

中国脉冲星研究的未来值得期待！

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net