

## 对一颗快速脉动射电源的观测

A. 休伊什, S. J. 贝尔, J. D. H. 皮尔金顿, P. F. 司科特, R. A. 科林斯  
(剑桥大学卡文迪什实验室缪拉德射电天文台)

徐仁新 译

缪拉德射电天文台记录到了来自某种脉动射电源的不平常信号。这种辐射似乎起源于银河系内天体, 可能与白矮星或中子星的震荡有关。

在 1967 年 7 月, 一台工作频率为 81.5 MHz 的大型射电望远镜在缪拉德射电天文台交付使用。设计这一仪器是为了通过观测由行星际介质不均匀分布和不规则运动导致的闪烁<sup>1)</sup>, 来研究致密射电源的角结构<sup>2)</sup>。开始巡天天区的赤纬  $\delta$  在  $-08^\circ$  和  $44^\circ$  之间, 该天区每周扫描一次。因而, 这个常规的巡天覆盖了大部分天区。此设备工作不久就记录到一种信号, 它们起先很弱且零星地出现, 随后能够在固定的赤经和赤纬重复观测到。这些结果意味着, 这种辐射起源于地外。

系统的研究开始于当年 11 月。高速记录显示, 出现的信号由一系列的脉冲组成; 脉冲持续时间约 0.3 s, 以大约 1.337 s 为周期重复出现且维持非常精确的周期。进一步的观测表明, 尽管存在因地球轨道运动导致观测周期的系统变化, 真实周期的精度优于  $10^{-7}$ 。另外, 被记录的周期性脉冲信号具有在接收机 1 MHz 带宽内随频率递减的特征<sup>3)</sup>。

起先认为这种信号的非凡特征起源于某种人为的传输过程, 可能与深空探测器、行星雷达或与地面信号被月球的反射有关。然而, 即使那些源位于太阳系的边缘也应该存在视差; 而实际上并未观测到视差, 因此这些解释均不成立。对脉动源进一步搜寻的初步结果又发现另外 3 个性质非常类似的源; 这就意味着此类低流量密度源可能普遍存在。本文提出了一个会试性的解释, 认为这些异常源与白矮星或中子星稳定的震荡有关。

### 位置和流量密度

天线由 2 048 个全波偶极振子组成, 成垂直阵列分布; 包括 16 行, 每行 128 个单元。每行长

1) 射电观测的质量体现为两个指标: 仪器灵敏度和角分辨率。对于特定的望远镜, 受到接收面积的限制, 一般通过增加积分时间提高灵敏度。然而, 望远镜最小分辨角是观测波长与口径之比, 所以如何提高射电望远镜的角分辨率一直是个困难。当时, 由于计算技术的限制, 射电相干成像技术尚未成熟, 利用闪电来分辨源和致密源成了人们一个努力的方向。但是, 在研究行星际闪烁时, 必须降低接收机的积分时间常数, 以提高观测时间分辨率。这些为脉冲星发现奠定了技术基础——译者注。

2) 即高频脉冲比低频脉冲早到达——译者注。

470 m, 沿东西走向; 天线阵南北延伸 45 m。使用位相扫描确定赤纬的接收模式; 运用 4 个接收机在 4 个赤纬方向同时观测。使用了位相转换接收机, 将天线的东西两部分干涉叠加。每行的偶极子单元由倾斜的反射屏支持, 以在赤纬约  $+30^\circ$  处获得最高灵敏度; 当扫描束位于赤纬  $+90^\circ$  以上或  $-5^\circ$  以下时, 总灵敏度要降至一半以下。阵列的半功率束宽约为赤经  $\pm 0.5^\circ$  赤纬  $\pm 3^\circ$ ; 设计的相位匹配给出扫描束经度间隔约  $3^\circ$ 。接收机带宽 1 MHz, 中心频率 81.5 MHz, 常规记录的时间常数 0.1 s; 与均方根噪声起伏相应的流量密度为  $0.5 \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 。在详细研究脉冲源时往往采用 0.05 s 的时间常数; 信号显示在多通道“快图”记录仪上时所用的时间常数为 0.05 s。通过第二次记录从 MSF Rugby<sup>1)</sup> 传送的时间信号, 获得射电电源脉冲的守时性。

图 1a 显示了脉动源非常强时获得的一个记录。明显地看出规则的周期, 还有脉冲幅度的不规则变化特征。尽管在这一分钟内的平均流量密度只有约  $1.0 \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ , 我们还是有机会看到了峰值流量密度(在 1 MHz 带宽内的平均值)接近  $20 \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  的脉冲。一般地, 典型平均流量密度要比  $1.0 \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  小好几倍。因而过去未探测到这个源就不足为怪了, 因为该源平均流量密度远低于先前米波巡天极限。

若脉冲信号在通过干涉图“交叉”点时正好很强, 源的赤经位置  $\alpha$  就易于通过精确测量这个点而得。类似地测量 52 min 后穿过的 3C 409 附近的一个源, 就能确定仪器的指向误差。第一次揭示这个源存在时所采用的常规记录读取精度只有  $\pm 10$  s; 适合位置测量的最早记录是在 1967 年 8 月 13 日获得的。这次及以后的测量在误差范围内相互吻合。赤纬  $\delta$  的位置就不如赤经那么好定; 确定赤纬值与接收模式位于赤经  $20^\circ, 23^\circ$  和  $26^\circ$  时所获得信号的相对幅度有关。结合所有测量结果得到源位置的赤经、赤纬分别为

$$\alpha_{2000} = 19 \text{ h } 19 \text{ m } 38 \text{ s} \pm 3 \text{ s},$$

$$\delta_{2000} = 22^\circ 00' \pm 30'.$$

这里我们指出, 另一种估计赤纬的方法是测量脉冲的观测频率因地球公转导致的多普勒位移。经过 1 年的观测将得到  $\pm 1'$  的精度。在 12 月到 1 月间的观测给出的赤纬值为  $\delta = 21^\circ 58' \pm 30'$ 。

1) MSF 射电时间服务在名为 Rugby 的地方向英国国内播放标准时间——译者注。

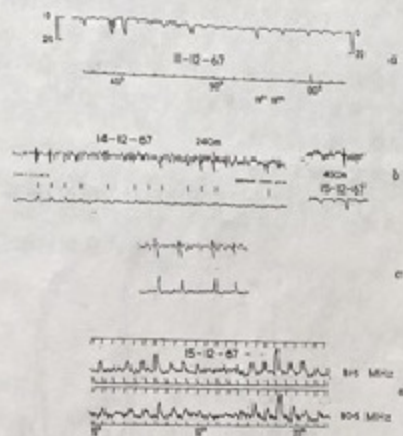


图 1 a) 脉动射电源在强信号状态下的一个记录(接收机时间常数 0.1 s)。纵坐标的满尺度相当于流量密度  $20 \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 。b) 上迹线: 用其他途径在干涉仪的一半获得的记录(电缆长度  $l = 240 \text{ m}$  和  $450 \text{ m}$ )。下迹线: 正常干涉仪记录。 $l = 240 \text{ m}$  的脉冲较小, 这是因为脉冲出现于无效干涉模式附近; 此时改变了位相, 但不改变上迹线中的振荡响应幅度。c) 用一个信号发生器获得的模拟脉冲。d) 用同样的接收机调至不同的频率同时接收到的脉冲。较低频率的脉冲大约延迟了约 0.2 s。

大体上与前面的测量结果一致。

时变

我们已经提及信号的强度逐日有显著变化;一般地,在接收模式所允许的 4 min 内,脉冲信号只随机地出现 1 min。另外,如图 1a 所示,在几秒的时标内脉冲幅度也可能显著变化。可能用行星际闪烁<sup>[1]</sup>来解释一个脉冲与另一脉冲幅度间的变化,但这不能理解几分钟内平均脉冲的幅度变化。通过使用东西相位阵 470 m × 20 m 反射镜(一般用于月食观测计划)对源进行跟踪,我们对该源连续观测了 30 min。连续 10 个峰值脉冲幅度的平均值在这 30 min 期间的变化情况示于图 2a。这张图显示可能存在几分钟间隔的周期,但相关分析并未给出有意义的结果。如果信号是线偏振的,电离层中法拉第旋转可能导致随机起伏;但曲线形状似乎与这一机制不一致。自从这个源首次探测以来,逐日的起伏示于图 2b。图中给出的每天值是当天最大脉冲的峰值流量密度。同样,逐日起伏也是不规则的;尽管好像在 10 月到 11 月期间源很弱,但没有明显证据显示有系统的变化。总而言之,尽管脉冲规则地出现,但信号功率的大小显示出长期或短期的变化。

瞬时带宽和频率漂移

两个不同的实验过程得出同样的结论:脉冲是由若干扫过 1 MHz 带宽接收机随频率漂移

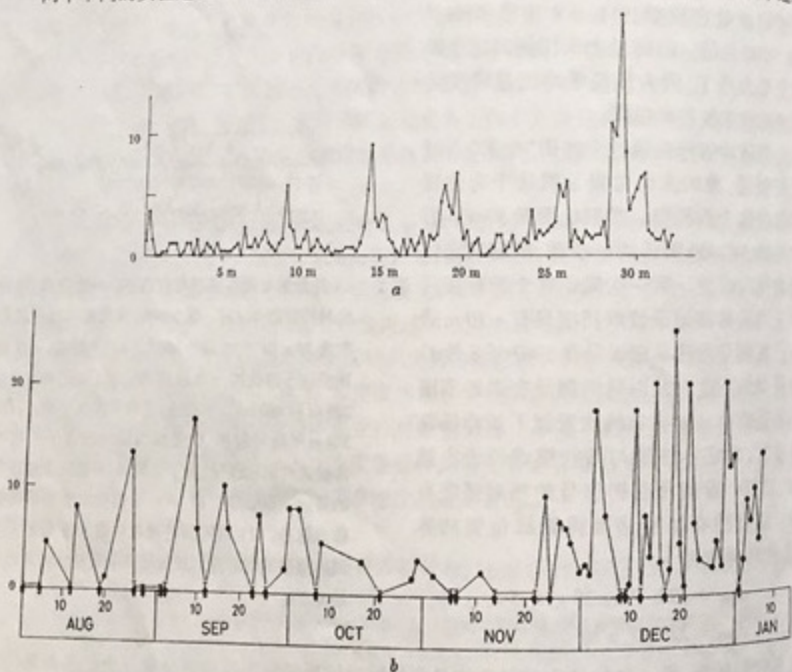


图 2 a) 脉冲幅度平滑(10 个脉冲)后的时变。b) 峰值脉冲幅度每天的变化。

(纵坐标单位:  $W m^{-2} Hz^{-1} \times 10^{-26}$ 。)

的信号组成的。一种方法是将两个同样的接收机调至 80.5 MHz 和 81.5 MHz 两个频率。图 1d 是这个系统记录的一个例子,显示低频脉冲延迟大约 0.2 s。这相当于约 -5 MHz/s 的频率漂移。在另一种方法中,从一半天线来的信号,经过一个长度  $l$  的精密电缆得到时间延迟后,再接入接收机。这个电缆引入的相位移动正比于频率。因此,对于相干长度超过  $l$  的信号,接收机的输出将具有周期为

$$t_0 = \frac{c}{l} \left( \frac{dv}{dt} \right)^{-1}$$

的振荡,其中  $dv/dt$  为信号频率的变化率。图 1b 给出了用  $l = 240$  m 和 450 m 所获得的记录;其中也绘出脉冲同时记录,它是通过一个独立的位相转换接收机用同样的电缆工作在常规方式下而得到的。图 1c 是用完全相同的装置所获得的模拟信号;输入信号来源于信号发生器而不是那颗源。对于  $l > 450$  m 的观测,为了防止输出信号因接收机时间常数所致严重衰减,通过一个额外相位移动装置使振荡周期降至低频。从需要的额外相位移动可以推算出信号频率变化率,为  $dv/dt = -4.9 \pm 0.5$  MHz/s。频率漂移的方向能够由记录到的振荡位相而定;结果显示出从高频到低频的漂移,与第一种方法得到的结论一致。

信号的瞬时带宽也可以从图 1b 这样的记录获得,因为振荡响应作为时延的函数实际上就是测量了辐射功率谱的自相关函数,相当于做了傅里叶变换。测量结果示于图 3;假设为高斯能谱,从图中可估计降至  $\exp(-1)$  处的信号瞬时带宽为  $80 \pm 20$  kHz。

脉冲重现频率和多普勒移动

将脉冲和 MSF Rugby 时间信号表示在同一记录上,对于一般脉冲上升沿到达时间的测量可精确到 0.1 s。由前面提到的追踪系统进行的 6 h 观测给出的脉冲周期为

$$P_{obs} = 1.33733 \pm 0.00001 \text{ s.}$$

这是在世界时 1967 年 12 月 18 日 14 时 18 分时的平均值。通过每天测量标准时间和后继脉冲到达时间之间的差  $T$ ,就能够研究脉冲的系统频移,见图 4。

标准时间选择在世界时 11 月 11 日 14 h 01 m 00 s(对应于接收模式的中心),随后标准时间之间的间隔为 23 h 56 m 04 s(约一个恒星日)。图 4 绘制了  $T$  的逐日变化。

注意必要时可以增加或减少一个周期;若脉冲重现频率为常数,  $T$  将表现为线性增长或减少。然而观测显示,  $T$  曲线显著弯曲;表明频率有规则地增加。如果假定只有因地球公转所致多普勒移动,那么每天接收到的脉冲数目为

$$N = N_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \varphi \sin \frac{2\pi n}{366.25} \right),$$

其中  $N_0$  为源每天发射的脉冲数目,  $v$  为公转速度,  $\varphi$  为源的黄纬,  $n$  为天数;1968 年 1 月 17 日当地球运动速度在视线方向的投影为零时,取  $n = 0$ 。这个关系式是近似的,原因为:(1) 假定

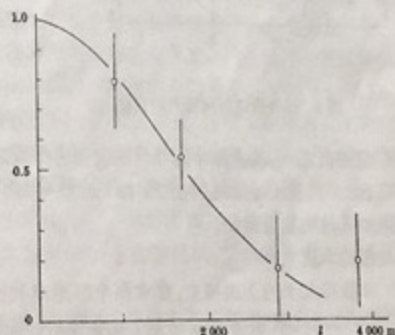


图 3 振荡响应是在干涉仪一边所增加信号路程的函数。

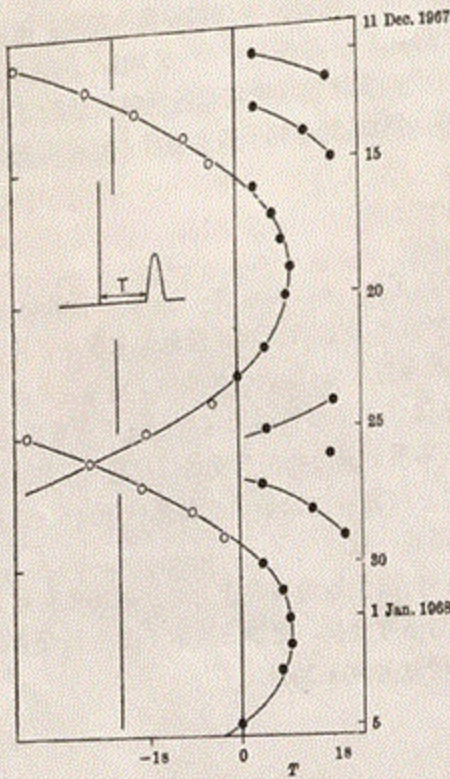


图 4 脉冲到达时间每天的变化

了地球公转轨道是圆的; (2) 计算天数的起点  $n = 0$  不很精确。不过在可得到的精度内, 这个式子显示, 只用地球的运动就能够解释观测到  $N$  的增加。因此, 可以方便地估计满足  $\delta T / \delta n = 0$  的  $n$  值; 相应地, 得到一个精确的整数  $N$  值。合适的  $n$  出现在  $n_1 = 15.8 \pm 0.1$  和  $n_2 = 28.7 \pm 0.1$ 。因为这两天之间  $N$  只精确增加一个脉冲, 故有

$$1 = \frac{N_0 v}{c} \cos \varphi \left[ \sin \frac{2\pi n_2}{366.25} - \sin \frac{2\pi n_1}{366.25} \right]$$

上式给出  $\varphi = 43^\circ 36' \pm 30'$ , 相当于赤纬  $21^\circ 58' \pm 30'$ ; 此值与直接获得的赤纬一致。考虑到多普勒移动, 并且用整数条件改善计算结果后, 我们得到源的真正周期

$$P_0 = 1.3372795 \pm 0.0000020 \text{ s.}$$

连续 1 年观测脉冲再现时间后, 有可能将  $N_0$  精确至  $3 \times 10^8$  分之一。若  $N_0$  的确为常数, 那么源的赤纬估计精度就能达到  $\pm 1'$ ; 这一结果将不受电离层折射的影响。

有趣的是, 应该注意到有可能探测因源自身运动所导致的可变多普勒移动。如果这个源

是双星成员之一, 或者脉冲信号与围绕主星作轨道运动的行星有关, 就会出现这个效应。就目前而言,  $N$  的系统增加限制在  $2 \times 10^7$  分之一以内; 所以没有证据显示, 除地球运动以外, 还需要附加其他的轨道运动。

射电源的本质

未测得大于约  $2'$  的视差, 要求那个源距离我们超过  $10^3$  天文单位。若辐射源是各向同性的, 它在中心频率  $81.5 \text{ MHz}$  带宽  $1 \text{ MHz}$  发射的能量超过  $10^{17} \text{ erg}^1$ 。另外, 还有可能得到辐射源物理尺度的上限。信号小的瞬时带宽 ( $80 \text{ kHz}$ ) 和漂移率 ( $-4.9 \text{ MHz/s}$ ) 显示, 在任一给定频率, 辐射的持续时间不超过  $0.016 \text{ s}$ 。因此源的大小不超过  $4.8 \times 10^3 \text{ km}$ 。

脉冲辐射, 不管起源如何, 在经过恒星际空间的电离氢时都将产生色散; 因此我们可以得出源距离的一个上限。对于均匀等离子体, 色散导致的频率漂移为

$$\frac{d\nu}{dt} = -\frac{c}{L} \frac{\nu^3}{\nu_p^3}$$

其中  $L$  为路径长度,  $\nu_p$  为等离子体频率。假设平均密度为每  $\text{cm}^3$  有  $0.2$  个电子, 观测到的频率漂移相当于  $L \sim 65$  秒差距。当然, 部分频率色散可能是源自身所引起的; 在这种情况下恒星际介质的色散将小一些, 因此  $L$  值是个上限。尽管在太阳附近的恒星际电子密度还不甚清

楚, 但这个结果还是很重要的; 它显示至今探测到的这些脉冲源必定是银河系距离尺度上的邻近天体。

所获得的位置精度还不足以做认真的光学认证。搜寻区位于银道面附近, 我们发现两颗  $12$  星等的恒星以及大量较暗的天体。在缺乏进一步观测数据的情况下, 这里只能给出非常尝试性的方案来说明这些不平常的天体。

要解释的一个最重要特征是脉冲极端的规则性。这意味着脉动起源于一种星体整体的振荡, 而不是分布于恒星大气中的一种局部振动。关于这一方面, 有趣的是已经有作者<sup>[2,3]</sup>提出, 在超新星爆发和超新星遗迹演化史上中子星径向振荡起重要作用。

最近梅尔策 (Meltzer) 和索恩 (Thorne)<sup>[4]</sup> 讨论了致密星径向振荡模式, 他们计算了中心密度在  $10^7$  和  $10^9 \text{ g cm}^{-3}$  范围内恒星振荡的周期。在该文的图 4 预言了解释观测到  $1 \text{ s}$  量级周期的两种可能性。当密度为  $10^7 \text{ g cm}^{-3}$  时, 相当于白矮星情形, 最小的基模振荡周期可达到  $8 \text{ s}$ ; 更高密度时, 因系统存在引力塌缩为中子星的趋势, 振荡周期又将增加。尽管基模振荡周期太大, 不能解释观测结果, 但高阶模具有相当数量级的周期。如果使用这种模型, 那么就很难理解为何基模振荡周期不重要; 在目前的观测中应该能够轻易地探测到了这种周期, 并且现在未观测到它们也不能归结于观测的选择效应。当密度为  $10^9 \text{ g cm}^{-3}$  时出现另一种可能性, 相当于中子星情形; 在该密度下, 基模振荡周期约为  $1 \text{ s}$ 。在密度超过  $10^9 \text{ g cm}^{-3}$  时, 周期迅速降为  $10^{-3} \text{ s}$  左右。

如果辐射与白矮星或中子星的径向振荡相关, 似乎有不少机制能够解释射电辐射。已经提出径向脉动可以在恒星表面产生激波波前, 并伴随 X 射线和高能电子的爆发过程<sup>[2,3]</sup>。整个恒星在震荡过程中发生的辐射就类似于太阳耀斑导致的射电爆发。这个模型与源尺度的上限  $\sim 5 \times 10^3 \text{ km}$  很吻合; 此上限与格林斯坦 (Greenstein)<sup>[5]</sup> 给出的白矮星平均半径  $9 \times 10^3 \text{ km}$  相当。该模型需要的能量可如下估计: 如果该源距离  $\sim 10^3$  天文单位, III 型太阳耀斑在  $1 \text{ MHz}$  带宽释放的总能量与观测流量密度等量级。如果假设射电能量与总耀斑能量 ( $\sim 10^{22} \text{ erg}$ )<sup>[6]</sup> 间的关系类似于太阳耀斑情形, 并且认为每次脉冲相当于一次耀斑, 那么所需总能量  $\sim 10^{20} \text{ erg yr}^{-1}$ ; 若源位于  $\sim 65$  秒差距, 相应值为  $\sim 10^{27} \text{ erg yr}^{-1}$ 。尽管考虑到在源演化史上可能还存在其他重要的阻尼机制<sup>[4]</sup>, 但据估计中子星含有  $\sim 10^{51} \text{ erg}$  的振荡能, 故所需能量并不是明显地不合理。

辐射的频率漂移特征使人想起 II 型和 III 型太阳爆发, 但似乎不可能是以同样的方式导致的。白矮星或中子星的大气标高很小; 可见扰动在其中传播时所产生的频率漂移速度要比观测值高得多。如前所述, 更为可能的原因是脉冲辐射在穿过恒星际介质时经受了色散。

为了更好地理解这种奇怪的、新的一类射电源, 很明显需要更多的观测证据。如果本文提出的辐射起源机制今后被证实, 我们期望进一步的研究能够弄清致密星的行为和高密度物质的性质。

我们感谢 Martin Ryle 爵士教授、J. E. Baldwin 博士、P. A. G. Schenuer 博士和 J. R. Shakeshaft 博士的有益讨论和科学研究委员会对本工作的经费支持。作者之一 (S. J. 贝尔) 感谢北爱尔兰教育部; 另一位 (R. A. 科林斯) 感谢 SRC 的生活费奖励。J. D. H. 皮尔金顿感谢 ICI 提供的研究奖学金。

1) erg (尔格) 为非 SI 能量单位, 相应的 SI 单位为 J (焦耳)。1 erg =  $10^{-7} \text{ J}$ , 下同——编者注。

1) yr (年) 不是 SI 时间单位, 相应的与 SI 并用的单位为 a, 1 yr = 1 a, 下同——编者注。

- 1 Hewish, A., Scott, P. F., and Wills, D., *Nature*, **203**, 1214 (1964).
- 2 Cameron, A. G. W., *Nature*, **205**, 787 (1965).
- 3 Finzi, A., *Phys. Rev. Lett.*, **15**, 599 (1965).
- 4 Meltzer, D. W., and Thorne, K. S., *Ap. J.*, **145**, 514 (1966).
- 5 Groenestein, J. L., in *Handbuch der Physik*, **L.**, 161 (1958).
- 6 Fichtel, C. E., and McDonald, F. B., in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **5**, 351 (1967).

*Nature* **217**, 709—713; 1968

## 评 述

徐仁新

查德威克 1932 年发现中子(见本增刊 32 页)至少有两点重要意义:(1) 使人们明白了原子核的组成;(2) 朗道对高温、高密物态中电子和质子行为的冷静思考使他意识到可能存在“中子星”。尽管朗道以及其他物理学家曾经严肃地研究过中子星引力平衡与结构,但终究因这种天体太超出一般人的想象以及它非常微弱的观测效应使得相关研究几乎被搁置。

本文的出现使得中子星研究别开生面。应该说,脉冲星的发现是非常偶然的,不过,这一切是以成熟的技术设备和行星际闪烁研究作为前提的。然而这种偶然性却令物理学家们措手不及:脉冲星本质是什么?首先提出的就是本文所述白矮星或中子星的径向振荡图像,但很快就被 Gold 更新为磁化中子星的自转。这一基本看法直到目前还是被普遍接收。

射电脉冲星的发现开辟了许多重要研究领域。包括:(1) 利用双脉冲星体系的强引力场和脉冲精确周期性检验了强引力场广义相对论,间接证实引力波的存在(休斯(Hulse)和泰勒(Taylor)因相关研究荣获 1993 年度诺贝尔物理学奖);(2) 利用脉冲守时测量第一次探测到太阳系外行星(见本增刊 82 页);(3) 脉冲轮廓的观测、脉冲星磁层电动力学和射电辐射机制的研究;(4) 高密物性和中子星结构的研究;(5) 发现更多的脉冲星类天体(即中子星的其他表现形式,如 X 射线脉冲星、X 射线爆、反常 X 射线脉冲星、软  $\gamma$  射线重复爆、孤立中子星,等),并发展相关模型;(6) 脉冲星定时;(7) 寻找更强引力体系(如脉冲星-黑洞)和早期宇宙残留的引力波。

在忙于上述研究的同时,自 20 世纪 80 年代以来,部分研究者又开始冷静地思考一个似乎已经回答了的问题:脉冲星果真是中子星吗?看来人们的思维是有惰性的。最早,白矮星的发现曾经被当作新鲜事物而兴奋过,有关白矮星的理论也曾是一种时髦;但观测到越来越多的白矮星使得人们习以为常,相信它们的存在就如主序星一样实在。因此,一发现脉冲星,优先考虑它们是不是白矮星,后来才不得不“让位”于中子星。但六七十年代发展起来的强子结构理论使人们意识到,在高密状态下,核物质有可能转变为更为基本的自由夸克组成的物质。一种稳定的夸克物质可能是奇异夸克物质;由这种物质为主构成的恒星级天体就是奇异夸克星,简称奇异星。奇异星和中子星既有相似又有不同的性质,至今还没有很强的观测证据显示脉冲星是中子星还是奇异星。不过,最近几年有若干观测暗示至少部分脉冲星类天体可能是奇异星。

奇异星的观测认证具有重要意义,因为它涉及人们对强作用的基本认识。今后会不会再一次“让步”,将“中子星”让位于“奇异星”?我们拭目以待。