

双脉冲星系统：相对论引力与等离子体物理实验室

A. G. Lyne^{1*}, M. Burgay², M. Kramer¹, A. Possenti^{3,4},
R. N. Manchester⁵, F. Camilo⁶, M. A. McLaughlin¹, D. R. Lorimer¹,
N. D'Amico^{3,7}, B. C. Joshi⁸, J. Reynolds⁹, P. C. C. Freire¹⁰
徐仁新[†] 译

摘要 一些脉冲星处于其看不见伴星的引力场中运动；它们的时钟特性已使独特地检验广义相对论、提供引力辐射证据成为可能。这里我们报道探测到一颗自转周期 2.8s 的脉冲星 J0737-3039B，它是一颗 23ms 脉冲星 J0737-3039A 的伴星。这是一个高度相对论性的双中子星系统，将提供基本引力物理史无前例的检验。我们探测到 J0737-3039B 短暂地掩食了 J0737-3039A；并且也探测到 J0737-3039B 流量密度和脉冲形状的轨道调制，这一特征可能源于 J0737-3039A 的能流对 J0737-3039B 磁层的作用。通过这些效应，我们将能够了解脉冲星磁层中磁性离子的性质。

双中子星 (DNS) 双星是罕见的，目前只发现 6 个这样的系统。然而它们却提供了研究相对论引力和引力辐射的理想实验室^[1]。自从 29 年前发现第一个双中子星系统 (PSR B1913+16) 以来^[2]，这类系统就成为脉冲星巡天的首选目标。它们非常稀少，且发现也特别困难。难以发现的原因是：这些系统中的成员经历着明显的轨道加速，使得测得转动周期中存在显著的、变化的多普勒效应。

在南天 64m 帕克斯射电望远镜高纬度多波束巡天过程中发现了脉冲星 J0737-3039^[3]。它处于 2.4 小时的椭圆轨道中运动；从轨道参数来看，其伴星也应是另一颗中子星。短的轨道周期、双星的紧密性以及高的守时精度（此脉冲星大的流量密度和窄的脉冲特征使之成为可能）使得这一系统成为研究相对论天体物理的极好实验室。已经测量到近星点的相对论进动，几

¹Jodrell Bank Observatory, University of Manchester, Macclesfield SK11 9DL, UK. ²Dipartimento di Astronomia, Università degli Studi di Bologna, Via Ranzani 1, 40127 Bologna, Italy. ³Osservatorio Astronomico di Cagliari, Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), Località, Poggio dei Pini, Strada 54, 09012 Capoterra, Italy. ⁴Osservatorio Astronomico di Bologna, INAF, Via Ranzani 1, 40127 Bologna, Italy. ⁵Australia Telescope National Facility (ATNF), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Post Office Box 76, Epping, New South Wales 1710, Australia. ⁶Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, 550 West 120th Street, New York, NY 10027, USA. ⁷Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Cagliari, SP Monserrato-Sestu km 0.7, 09042 Monserrato, Italy. ⁸National Centre for Astrophysics, Post Office Bag 3, Ganeshkhind, Pune 411007, India. ⁹Parkes Observatory, ATNF, Post Office Box 276, Parkes, New South Wales 2870, Australia. ¹⁰National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, HC03 Box 53995, PR 00612, USA.

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: agl@jb.man.ac.uk

[†] 北京大学物理学院天文系

个月后将精确测得引力波辐射导致的轨道衰减。大约在 85 兆年 (8500 万年) 后, 这两颗星将最终绕转合并^[3]。这一发现显著地增加了引力波探测器测量双中子星绕转的探测率^[3,4]。

PSR J0737-3039B 的观测

在发现 PSR J0737-3039 的 4.5 分钟的观测中, 没有发现其他脉冲星。然而, 在对获得数据后续分析以便更详细地研究该系统时, 却发现了偶尔出现 2.8 s 周期的脉冲。这颗脉冲星 (后称为 PSR J0737-3039B, 或在本文中简称 B) 跟原先那颗脉冲星 (后称为 PSR J0737-3039A, 或在本文中简称 A) 具有系统的色散 (即沿视线方向自由电子数密度的积分)。B 星的脉冲周期中显示多普勒变化, 且表明 B 星是 A 星的伴星。

布尔盖等^[3]利用帕克斯射电望远镜在频率 1390 MHz 上为研究 A 星获得了数据。再次处理这些数据即可研究 B 星的特性。此外, 利用双偏振接收机同时在中频 680 MHz 和 3030 MHz 上, 于 2003 年 11 月有 7 天观测了这个系统^[5]。利用焦德班克 76 m 洛弗尔望远镜也在 1396 MHz 上观测了这两颗脉冲星 (也是双偏振接收机)。2003 年 11 月以来跨度 7 个月的时间里, 对这两颗脉冲星的守时性进行观测, 每次测量的时间介于 10 分钟和 5 小时之间。

图 1 显示了 B 星的主要观测特征, 给出了三个频段上 2.8 s 脉冲辐射的强度随轨道相位和脉冲相位的变化。最值得注意的接收到 B 星的流强的变化。B 星有两个阶段明显可见 (持续时间约 10 分钟, 中心轨道经度分别为 210° 和 280°)。在这爆发阶段流强很高, 此时大多数脉冲均可以单个测量。除了经常探测到的轨道相位以外, 这颗脉冲星在其他相位也显示较弱辐射, 特别是位于相位 10° 和 20° 之间 (图 1 (B))。很可能更高灵

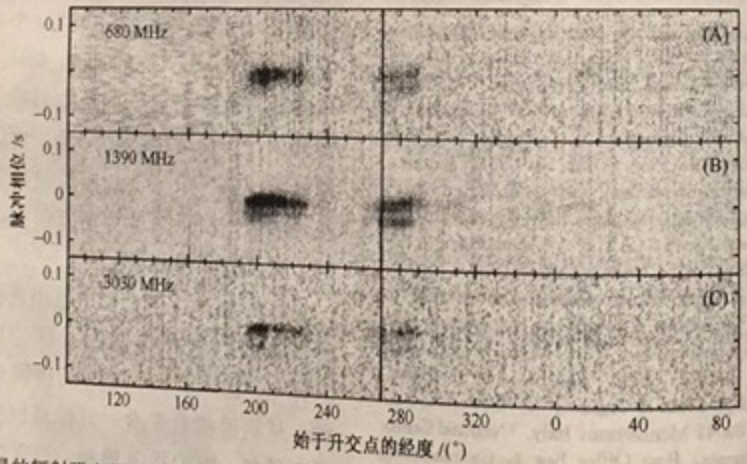


图 1 B 星的辐射强度作为轨道经度 (相对于轨道升交点) 的函数。每张灰度图显示脉冲星转动周期 0.1 相位范围内的强度, 以具有脉冲辐射的相位为中心。(A)、(B)、(C) 分别给出 680 MHz、1390 MHz、3030 MHz 的观测结果 (1390 MHz 频率叠加了六个轨道数据, 其他频率分别叠加了两个轨道), 显示在大的频率范围内类似的强度变化和脉冲形状随轨道经度的改变。本图 (以及图 2 和图 5) 中的经度严格地是近星点经度与真近点角之和。在经度 270° 处的垂线表征 B 星下合经度; 此时两颗星在天空上靠得最近, 且 B 星离地球较 A 星近

敏度的观测将会揭示分布于更宽轨道相位的辐射。流强变化图案基本上稳定, 不随不同轨道和不同频段 (在 680 MHz 和 3030 MHz 范围内) 而改变。发现 A 星时没有发现 B 星是可以理解的, 因为那次观测对应于轨道经度 146°, 那时 B 星几乎没有辐射。

B 星脉冲形状随轨道相位而明显改变 (图 1)。1390 MHz 的数据显示, 脉冲形状在爆发时 (经度约 210°) 的一个窄而强的主脉冲外加一个弱的前导脉冲, 逐渐转变成经度近 280° 时的一个几乎等强度的双成分剖面 (且峰间距也加大)。在经度 0° 附近基本上成为单成分脉冲。在爆发阶段, 脉冲形状也具有随频率演化的趋势。剖面的双成分特征在高频 (3030 MHz) 时比较明显, 而在 680 MHz 时不明显 (似乎两成分合二为一了)。

为了对 B 星作守时性测量, 通过生成三个爆发阶段的平均轮廓, 我们建立了相位依赖的脉冲模板集。这些模板的后随脉冲 (往往也是较强的) 成分置于同一脉冲相位。利用模板集中的适当的模板做数据交叉相关, 最终得到到达时间 (TOA)。然后利用 TEMPO 脉冲星守时性程序^[6], 将此 TOA 跟一个具有天体测量、转动和轨道参数的模型比较。A 星因强而窄的脉冲而具有高精度的守时性, 双星的位置和主要的轨道参数可据此而确定 (表 1)。对于 B 星, 增加了 180° 的近星点经度偏差; 需要拟合的参数 (见表 1) 只有脉冲星自转周期 P 、它的一阶导数 \dot{P} , 以及投影半长轴 $x_B = a_B(\sin i)/c$ (这里 i 为轨道倾角, c 为光速)。

表 1 PSR J0737-3039A 和 B 两颗星的观测量以及导出参数, 这里利用了 DD 守时模型^[11,12]。数值后的括号内给出一倍标准差 (以最小有效数字为单位)。在分析时, DD 模型中的 A, B, δ , 等参数均假设成零。距离由色散量和星际自由电子分布模型^[33]所估计。划线表示假设与 A 星具有同样测量值, 空白表示没有测量值。h (时), m (分), s (秒)

	PSR J0737-3039A	PSR J0737-3039B
脉冲周期/ms	22.69937855615(6)	2773.4607474(4)
周期导数 \dot{P}	$1.74 \times 10^{-18} (0.05 \times 10^{-18})$	$0.88 \times 10^{-15} (0.13 \times 10^{-15})$
纪元时(MJD)	52870.0	52870.0
赤经(J2000)	07h37m51s.247(2)	—
赤纬(J2000)	-30°39'40".74(3)	—
色散量 DM/(cm ⁻³ pc)	48.9(2)	48.7(2)
轨道周期 P_B /天	0.102251563 (1)	—
偏心率 e	0.087779 (5)	—
近星点纪元 T_0 /MJD	52870.0120589 (6)	—
近星点经度 ω /弧度	73.805(3)	73.805 + 180.0
半长轴投影 $x = a(\sin i)/c$ (s)	1.41504(2)	1.513(4)
近星点进动 $\dot{\omega}$ / (弧度/年)	16.90(1)	—
引力红移参数 γ /ms	0.38(5)	—
夏皮罗延迟参数 s	0.9995(-32,+4)	—
夏皮罗延迟参数 r/μ s	5.6(-12,+18)	—
守时残差均方根/ μ s	27	2660
1390 MHz 流密度/mJy	1.6(3)	0—1.3(3)
特征年龄 τ /My	210	50
表面磁场强度 B/Ga	6.3×10^8	1.2×10^{12}
自转减慢光度 \dot{E} /(erg/s)	6000×10^{30}	2×10^{30}
质量函数 (M_\odot)	0.29097(1)	0.356(3)
距离/kpc	—	~1.6
系统总质量 (M_\odot)	—	2.588(3)
质量比 $R = m_A/m_B$	—	1.069(6)
据夏皮罗 s 参数得轨道倾角/弧度	—	87(3)
据 $(R, \dot{\omega})$ 得轨道倾角/弧度	—	87.7(-29,+17)
据 $(R, \dot{\omega})$ 得恒星质量/ M_\odot	1.337(5)	1.250(5)

因双中子星双星的强引力场和快速运动,它们具有显著的广义相对论效应。若能精确测量相对于经典开普勒描述的若干相对论修正[即所谓的后开普勒(以下称PK)参数],广义相对论及其他引力论就能被检验。在这一框架下,对于自转效应可忽略的质量,各种理论的PK参数只是推测的未知中子星质量和经典开普勒参数的函数。以两质量作为仅有的自由参数,测得三个或更多的PK参数将超定双星系统,因而也就提供了引力论检验场所^[7]。在一个正确描述双星系统的理论中,质量-质量图上所有由PK参数确定的曲线交于一点。这种检验至今仅在两个双中子星系统中成为可能:脉冲星(PSR) B1913+16^[8]和 PSR B1534+12^[9,10]。对于 PSR B1913+16,已经测量了相对论近星点进动 $\dot{\omega}$ 、引力波阻尼导致的轨道衰减 \dot{P}_b 以及引力红移和时间膨胀参数 γ ,共三个PK参数。对于 PSR B1534+12,因轨道倾角几乎为 90° ,也测到了脉冲经过伴星的引力场而导致的夏皮罗延迟^[11]。这样又获得另外两个PK参数:夏皮罗延迟的 r (“范围”)和 s (“形态”)。然而,观测值 \dot{P}_b 需要修正运动学效应,所以 PSR B1534+12 提供了四个PK参数用于精确检验^[9]。

延拓并改进A星的守时解^[3],我们测得了A星的 $\dot{\omega}$ 和 γ ,并且探测到了因B星引力场的存在A星脉冲到达时间的夏皮罗延迟(图2)。这就提供了四个PK参数,使得在 m_A-m_B 图上(图3)可以检验广义相对论的预言^[11,13]。然而,探测到表现为脉冲星的B星展现了一个可能超越先前已知DNS双星系统的机会。第一,因 $\sin i \leq 1$,利用A星和B星各自的质量函数可以排除 m_A-m_B 图的禁区。第二,分别测得A星和B星的轨道半

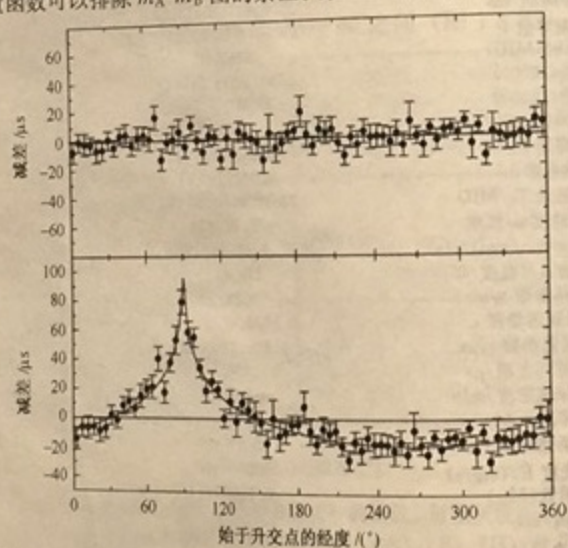


图2 B星引力势引起的夏皮罗延迟效应,观测上反映在A星的守时残差。将整个轨道经度等分成75段,对残差进行平均。(上图)从观测到的TOA中剔除夏皮罗效应(见表1给出模型)而得到的残差。(下图)同上图,但将夏皮罗延迟参数 r 和 s 置零

长轴投影,我们就精确确定了质量比 $R(m_A, m_B) \equiv m_A/m_B = x_B/x_A$ 。这提供了 m_A-m_B 图进一步限制(图3)。质量比关系对于任一引力理论均成立^[7,14]。更重要的是, R 线不依赖于强场(自场)效应,为检验引力理论提供了一个强的、新的限制^[11,13,15]。

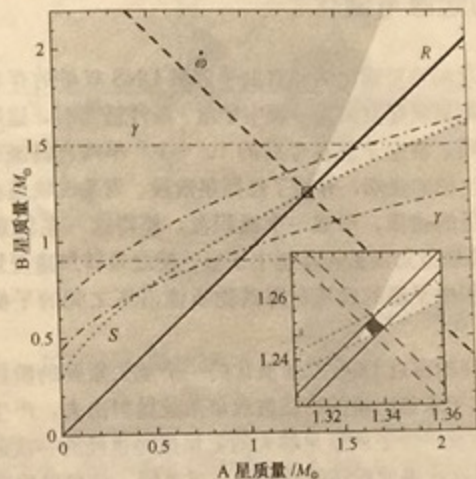


图3 观测上约束质量 m_A 和 m_B 。两颗脉冲星开普勒质量函数排除了有色区域。由每对曲线围成的、广义相对论预言允许的区域给出进一步限制:(i)测得的近星点进动 $\dot{\omega}$ 给出总质量 $m_A+m_B=2.588 \pm 0.003 M_\odot$ (虚线);(ii)测得比值 $R=m_A/m_B=x_B/x_A=1.069 \pm 0.006$ (实线);(iii)测得的引力红移和时间膨胀参数 γ (点划线);(iv)测得的夏皮罗参数 r 给出 $m_B=1.2 \pm 0.3 M_\odot$ (点线);(v)夏皮罗参数 s (点线)。插图:将三个最强约束相交出的小区域放大16倍。允许区域在三对平行线之间。我们看到,绘成蓝色处满足所有的限制

有了四个滥用检验的PK参数,这一额外的 R 线限制使得此系统成为最超定的DNS双星系统,一个真正意义上的相对论引力独特实验室。进一步地,预期今后几个月就能够显著地测量 \dot{P}_b ,这使得一个新的PK参数将成为可能。如果运动学效应可被忽略或能够被固有运动和遥远测量分离开来,就有可能提供第六个限制了。图3中允许区域的位置也确定了轨道对视线倾角。最终发现这个系统的轨道倾角 i 是 87° (表1)。

由于接近大质量星体处时空的弯曲,两颗脉冲星的自转轴都将绕总角动量矢量进动,因而改变从地球观测脉冲星的方位^[16]。基于测得的系统参数,广义相对论预言A星和B星的这种测地进动的周期分别仅为75年和71年^[17]。因此,基于该系统的几何,脉冲星自转轴相对于观测者的方向预计在较短标内改变。这将使得能测出A星和B星的剖面变化(比较文献[18]~[20]),也可能测得因A星和B星旋转而出现的偏离效应的变化。所以,我们期待能测得另外的PK参数;而对于其他双星脉冲星而言,这些参数太小、很难探测。例如,在我们采用的达墨和德维勒守时性模型(DD模型)中,偏离项包括 A, B, δ 。本文的分析时取这些项为零。

与以往广义相对论检验所不同,我们不久就可以不得不利用比 $(v/c)^2$ 高阶的项来精确描述此双脉冲星系统。对于这类系统,高阶项还是第一次显得必要。未来 $\dot{\omega}$ 的高精度测量,首次需要高阶项来将观测参数跟引力论对比^[21]。相对于广义相对论预言值的

偏差,可能是来自旋-轨道耦合的贡献。此耦合比 PSR B1913+16 强约一个数量级,这势必将让我们第一次测量中子星的转动惯量^[21, 22]。

双脉冲星系统的起源与演化

开始于两颗主序星的双星演化图像有助于理解 DNS 双星的存在^[23]。起初质量较大的恒星先演化并最终超新星爆发成一颗中子星。条件适当时,这颗中子星保留束缚于它的伴星,并作为一颗正常中子星在今后的 $10^6 \sim 10^7$ 年内自转减慢。与此同时,残存的次星也到了它主序生涯的晚期,开始了红巨星阶段。当系统轨道参数合适时,中子星的强引力场吸引红巨星的物质,形成一个吸积盘,使得这一系统观测上表现为一颗 X 射线双星。吸积物质将轨道角动量转移至中子星,使之自转加速至短周期,且其磁场显著地减弱^[24, 25]。因吸积中子星的磁压与降落物质撞击压之间的平衡,最终达到了一个极限旋转周期^[21, 26]。

像 J0737-3039 这样的密近 DNS 双星演化的一个至关重要的阶段是轨道间距的戏剧性减少。这一阶段开始于来自次星的物质被双星系统抛射出去,产生一个由氦星和中子星组成的非常致密的系统^[27, 28]。质量足够大的氦星最终也经历一次超新星爆发,形成第二颗年轻中子星。如果这次爆发后还能够维持双星束缚,结果就出现了一对处于椭圆轨道上的中子星。这两颗中子星的磁场强度非常不同,因而自转减慢的特征也不一样;这正如事实上在本双星系统中观测到的那样。A 星的质量 $m_A = 1.34M_{\odot}$, 与其他已测中子星质量相比是典型的^[10, 29]; B 星的质量 $m_B = 1.25M_{\odot}$, 明显地低于其他中子星质量。

测得的 A 星、B 星的 P 和 \dot{P} , 就能算出它们各自的特征年龄 $\tau = P/(2\dot{P})$ 。比较它们就能估计第二次超新星爆发以来的时间。如果特征年龄很好地反映脉冲星的真实年龄,我们指望 $\tau_A = \tau_B$; 但观测值却是 $\tau_A \approx 4\tau_B$ 。在用特征年龄估计真实年龄时必然引入一些假设,如忽略初始周期、磁偶极制动力矩不衰减。 τ_A 与 τ_B 之间的差异可通过怀疑一个或多个这些假设而解决。由以上吸积过程细节的讨论可知,最起码 A 星吸积后的自转周期是不能忽略的。假定常磁偶极自转减慢的一个简单模型预言, A 星吸积后的自转周期位于 10—18 ms 之间,足够解释特征年龄之间的差异了。

探究脉冲星磁层

两颗脉冲星轨道(图 4 上)间距的典型值是 $\sim 900\,000$ km 或 3 光秒(即光穿过此距离为 3 s)。大的轨道倾角意味着,处于合点时,一颗脉冲星的视线有大约 0.15 光秒路程经过另一颗星(图 4 下)。这尽管远大于 A 星的光速圆柱(该处共转速度为光速)半径 0.004 光秒,但却明显地小于 B 星的光速圆柱半径 0.45 光秒。随着脉冲星在轨道上的运动, A 星的视线经过并扫过 B 星的磁层。这提供了一个刺探 B 星磁层物理条件的机会。射电传播特性变化的确定包括色散测量和法拉第旋转测量。它们势必能够反映等离子体密度和磁场结构。此外,约 70 年周期的测地进动将引起视线轨迹扫过 B 星磁层不同部位。退一步讲,21 年的轨道进动也将引起视线轨迹的变化。

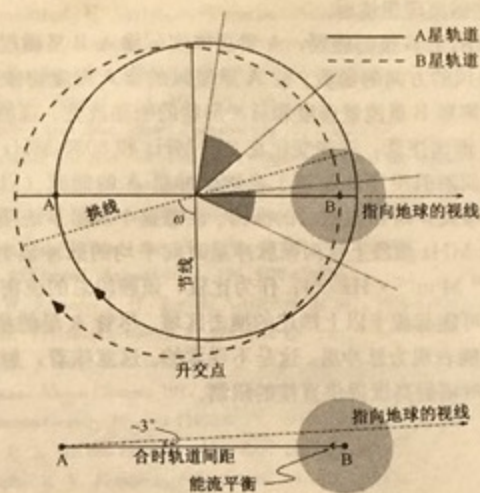


图 4 双星系统的几何位形,给出了在合(2003 年 8 月 19 日,即儒略时 MJD 52870)时两颗星轨道以及 B 星磁层的相对大小。合时两颗中子星间距约 2.8 光秒($\sim 800\,000$ km)。(上图)轨道平面上俯视图,地球在右侧。阴影段示意能明显测到 B 星时的轨道相位(见图 1)。拱线为轨道的长轴,节线为以下两面的交线:轨道平面和过系统质心且垂直于视线的平面。(下图)侧视图,显示 A 星视线经过 B 星磁层。标记了 A 星相对论星风与 B 星磁场之间压力平衡的粗略位置

仔细研究 A 星脉冲流量密度(图 5)发现,当靠近上合时存在短暂的掩星(此时视线穿过 B 星仅 0.15 光秒)。掩星持续约 20—30 s。由于存在约 660 km/s 的横向相对运动速度,掩食区域扩展约 15 000 km,或近 0.05 光秒(大约是 B 星光速圆柱半径的 10%)。就目前而言,每周轨道运动都发生掩食,其扩展在 680 MHz 和 1390 MHz 频段上基本上一样。这对各种可能的解释以限制。一条线索也许来源于以下事实: A 星自转减慢能量损失率比 B 星高 3000 倍。其实在 B 星的光速圆柱处,来源于 A 星相对论星风的能量密度大约比 B 星高两个数量级。这使得 A 星星风深深渗入 B 星的磁层。我们发现: A 星因自转减慢辐射光度(假设各向同性)的能量密度在大约离 B 星 0.2 光秒处跟 B 星的磁能密度平衡。若认为磁场可以利用标准的磁偶极公式^[30]来计算,这个距离大约是 B 星光速圆柱半径的 40%。此处以内 B 星磁能主导,以外 A 星主导。尽管这一图像大致与观测到的 A 星掩食范围相吻合,但这些计算很可能是不可靠的;其

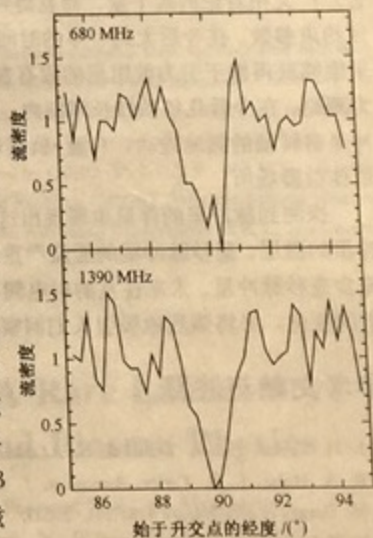


图 5 在接近上合(即经度 90°)时 680 MHz 与 1390 MHz 频段上 A 星流密度的变化(纵坐标单位任意)。给出的数据具有 5s 分辨率,可见 A 星被 B 星磁层掩食

原因是B星磁层严重偏离理想情形。因压强平衡点深陷于B星的磁层, A星星风实际渗入B星磁层的程度将是B星自转轴与磁轴相对于星风的方向的函数。故A星星风的渗入程度将依赖于B星的进动和轨道相位。这最可能解释B星流量密度和脉冲形状的明显改变。观测也发现随轨道相位的变化(图1)。提请注意:这些变化在680 MHz和3030 MHz频段之间基本上一样。如此宽频段的调制似乎可能起源于毫秒脉冲星A的能流(以粒子、伽玛射线或44 Hz的电磁辐射的形式)对B星磁层的冲击。注意这个双星系统明显倾向于发射非脉冲的射电辐射:1390 MHz频段上这两颗脉冲星时间平均的脉冲辐射流密度(表1)约 1.8 mJy ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$); 作为比较, 该频段总的流密度是 $7 \text{ mJy}^{[3]}$ 。约 5 mJy 的射电辐射可能起源于以上描述的冲击区域。尽管A星星的风吹散了大部分B星的磁层, 但B星还能表现为脉冲星。这是不寻常的。这意味着, 射电辐射可能产生于靠近中子星的地方, 对辐射高度提供直接的限制。

结论

我们探测到了毫秒脉冲星J0737-3039的伴星, 另一颗脉冲星。这个双星系统是已知的第一个双脉冲星系统。这一发现揭示了在椭圆轨道双星系统中再加速脉冲星伴星中的第一个双脉冲星系统。已使脉冲星自转加速的那颗伴星在超新星爆发子星行为, 验证了先前提出的演化序列: 已使脉冲星自转加速的那颗伴星在超新星爆发时又形成了一颗年轻的脉冲星^[1]。这一致密双星系统的高度相对论性特征提供了这样的机遇: 比先前可能的系统更为严格地检验相对论引力。我们不仅测量了源于(且符合)广义相对论的四个量, 而且得到了质量比 R , 一个不依赖于引力理论的、新的高精度约束参数。在今后大约一年的时间内, 我们预计会测出引力辐射导致的轨道衰减。如果能够获得源于引力波阻尼的固有参数, 就有可能在辐射方面检验与强场效应相关的引力理论。在今后几年的较长时间内, 我们预计会探测到另外几个相对论效应, 包括: 脉冲星自转轴的测地进动, 自旋-轨道耦合, 以及其他效应。这一双星系统成为相对论的最佳检验场所。

探测到脉冲星的伴星也展现出这样的一种可能性: 利用一颗脉冲星去研究另一颗脉冲星的磁层。毫秒脉冲星的能流严重地影响了伴星的脉冲辐射过程, 同时观测到了伴星掩食毫秒脉冲星。未来在宽的射电频率上测量脉冲星形状、幅度、偏振以及守时性等随轨道的变化, 必将强烈地吸引人们洞察脉冲星的磁层动力学过程。

参考文献与注释

1. J. H. Taylor, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* 341, 117 (1992).
2. R. A. Hulse, J. H. Taylor, *Astrophys. J.* 195, L51 (1975).
3. M. Burgay et al., *Nature* 426, 531 (2003).
4. V. Kalogera et al., *Astrophys. J.*, in press; preprint is available at <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0312101>.
5. Receiver bandwidths used were 64 MHz at 680 MHz, 256 MHz at 1390 MHz, and 576 MHz at 3030 MHz.
6. More information is available at <http://pulsar.princeton.edu/tempo/>.
7. T. Damour, J. H. Taylor, *Phys. Rev. D* 45, 1840 (1992).
8. J. H. Taylor, J. M. Weisberg, *Astrophys. J.* 345, 434 (1989).

9. I. H. Stairs, S. E. Thorsett, J. H. Taylor, A. Wolszcan, *Astrophys. J.* 581, 501 (2002).
10. M. Bailes, S. M. Ord, H. S. Knight, A. W. Hotan, *Astrophys. J.* 595, L49 (2003).
11. T. Damour, N. Deruelle, *Ann. Inst. Henri Poincaré* 44, 263 (1986).
12. T. Damour, J. H. Taylor, *Astrophys. J.* 366, 501 (1991).
13. T. Damour, N. Deruelle, *Ann. Inst. Henri Poincaré* 43, 107 (1985).
14. This is correct up to so-called first post-Newtonian [$(v/c)^2$] order (7), and any intersection of the PK-parameter lines must be located on the R line, which will only deviate from that shown in Fig. 3 by corrections of order $(v/c)^4$.
15. This is correct because of the usage of the DD timing model in our analysis and its definition of mass (11, 13).
16. T. Damour, R. Ruffini, C. R. Acad. Sci. Paris Ser. A 279, 971 (1974).
17. B. M. Barker, R. F. O'Connell, *Astrophys. J.* 199, L25 (1975).
18. J. M. Weisberg, R. W. Romani, J. H. Taylor, *Astrophys. J.* 347, 1030 (1989).
19. J. M. Weisberg, J. H. Taylor, *Astrophys. J.* 576, 942 (2002).
20. M. Kramer, *Astrophys. J.* 509, 856 (1998).
21. T. Damour, G. Schäfer, *Nuovo Cimento* 101, 127 (1988).
22. N. Wex, *Class. Quantum Gravity* 12, 983 (1995).
23. D. Bhattacharya, E. P. J. van den Heuvel, *Phys. Rep.* 203, 1 (1991).
24. G. S. Bisnovaty-Kogan, B. V. Komberg, *Sov. Astron.* 18, 217 (1974).
25. N. Shibasaki, T. Murakami, J. Shaham, K. Nomoto, *Nature* 342, 656 (1989).
26. Z. Arzoumanian, J. M. Cordes, I. Wasserman, *Astrophys. J.* 520, 696 (1999).
27. E. P. J. van den Heuvel, C. de Loore, *Astron. Astrophys.* 25, 387 (1973).
28. B. P. Flannery, E. P. J. van den Heuvel, *Astron. Astrophys.* 39, 61 (1975).
29. S. E. Thorsett, D. Chakrabarty, *Astrophys. J.* 512, 288 (1999).
30. R. N. Manchester, J. H. Taylor, *Pulsars* (Freeman, San Francisco, 1977).
31. G. Srinivasan, E. P. J. van den Heuvel, *Astron. Astrophys.* 108, 143 (1982).
32. J. H. Taylor, J. M. Cordes, *Astrophys. J.* 411, 674 (1993).
33. We would like to thank J. Sarkissian and other members of the Parkes multibeam team for their kind help with making the observations described in this paper and N. Wex and G. Schäfer for useful discussions. Extensive use was made of the PSRCHIVE pulsar analysis system developed by A. Hotan and colleagues (see <http://astronomy.swin.edu.au/pulsar/>). The Parkes radio telescope is part of the Australia Telescope, which is funded by the Commonwealth of Australia for operation as a National Facility managed by CSIRO. M. B., A. P., and N. D. acknowledge financial support from the Italian Ministry of University and Research (MIUR) under the national program Cofin 2001. F. C. is supported by NSF, NASA, and National Radio Astronomy Observatory. D. R. L. is a University Research Fellow funded by the Royal Society.

A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics

A. G. Lyne¹*, M. Burgay², M. Kramer³, A. Possenti^{3,4}, R. N. Manchester⁵, F. Camilo⁶, M. A. McLaughlin¹, D. R. Lorimer¹, N. D'Amico^{3,7}, B. C. Joshi⁸, J. Reynolds⁸, P. C. C. Freire^{3,9}

The clocklike properties of pulsars moving in the gravitational fields of their unseen neutron-star companions have allowed unique tests of general relativity and provided evidence for gravi-