

黑洞的搜寻和证认 (II): 脉冲星 - 黑洞 (PSR-BH) 双星系统的研究和搜寻

张 冰^{1,2} 乔国俊^{1,2,3} 韩金林⁴

- (1. 北京大学地球物理系 北京 100871)
- (2. 中国科学院 - 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)
- (3. 中国科学院高能物理所宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)
- (4. 中国科学院北京天文台 北京 100080)

摘 要

综述了脉冲星 - 黑洞 (PSR-BH) 系统的诞生率理论并指出近期发现该系统的可能性。

通过综述和分析脉冲星 - 中子星 (PSR-NS) 系统的观测特性, 特别是脉冲星精确守时性对精确确定双星轨道参量和验证引力理论的重要意义, 推测了 PSR-BH 系统的可能性质, 指出发现 PSR-BH 系统对黑洞的搜寻和最终证认的重要意义。最后简介目前搜寻 PSR-BH 系统的现状和我们搜寻短轨道周期脉冲双星的计划。

关键词 恒星: 脉冲星 - 黑洞双星系统 — 恒星: 脉冲星 - 中子星双星系统 — 恒星: 短轨道周期脉冲双星

分类号: P145.8

搜寻和证认黑洞是当今天体物理的前沿领域之一^[1], 而待发现的中子星 - 黑洞脉冲双星系统, 即脉冲星 - 黑洞 (PSR-BH) 双星系统可能是确凿证认黑洞的场所。

1 PSR-BH 系统诞生率理论

尽管在物理学理论和计算机模拟的基础上, 人们已建立了相当成熟的单个恒星演化理论, 但作为普遍存在的双星系统的演化, 很多细节尚不很清楚。这是因为在双星演化过程中,

通常会经历物质交流的阶段, 有的还经历共同包层的阶段, 这使得演化过程变得非常复杂。不过, 根据现有理论并借助计算机模拟, 人们还是得到了具有不同子星初始质量的双星系统的大致演化图像。另一方面, 通过观测已发现许多种类的双星系统, 如两正常恒星构成的双星系统、密近双星系统、激变变星 (CV)、大小质量 X 射线双星系统 (HMXB、LMXB)、大小质量脉冲双星系统 (HMBP、LMBP, 特别: 脉冲星与 B 型放射线星, 即 PSR-Be 系统)、类 SS433 系统、双白矮星系统 (WD-WD)、LMBP 中的双中子星脉冲双星系统 (PSR-NS)、脉冲星-白矮星系统 (PSR-WD) 等; 同时也发现了一些有明显有双星系统演化经历的天体, 如在双星系统中或作为单星的毫秒脉冲星 (msPSR)。这些天体可理解为具有各种不同初始状态的双星系统不同演化阶段的产物, 它们的发现及其样本的逐渐增多将有助于完善双星演化理论。根据现有理论、观测资料及计算机模拟, 人们还预言了某些尚未被发现的系统, 如中子星-黑洞双星系统 (NS-BH)、双黑洞系统 (BH-BH) 等。如果前者的中子星表现为脉冲星, 则该系统成为一个有观测意义的脉冲星-黑洞系统 (PSR-BH), 这正是本文讨论的对象。

1.1 PSR-BH 系统的统计学研究

最早仔细研究 PSR-BH 诞生率理论的是 Narayan 等人 [2]。利用处理银盘中射电脉冲单星和小质量脉冲双星的统计方法 [3,4] 以及当时所有的脉冲星巡天资料, 他们讨论了给定脉冲周期 P 和光度 L 的 PSR-NS 系统和 PSR-BH 系统在银河系中可能的数目及其诞生率。

对于当时已发现的三个 PSR-NS 系统, Narayan 等人 [2] 估计了在银河系中存在的具有相同 P 、 L 的类似系统的数目 $S(P, L)$, 由轨道参数可得到 PSR-NS 系统由于引力辐射而合并的时标, 由 P 和 \dot{P} 可给出动力学时标, 二者之和即为系统的大致寿命; 而系统的诞生率可表示为 $S(P, L)$ 与寿命之比。以上分析所用的量都是观测量。进一步考虑到恒星演化理论及各种系统可能的演化细节, 可得以下结论 [2]:

(1) 银河系中 (主要是银盘中) PSR-NS 系统共有 $10^{4.5} z_0$ 个, 诞生率约为 $10^{-5} z_0 \text{yr}^{-1}$, 其中 z_0 是银盘厚度的特征尺度 (以 kpc 为单位)。与脉冲单星的相对比值为: PSR-NS 系统数 $N_{\text{PSR-NS}} \approx 10^{-1} z_0 N_{\text{PSR}}$, 诞生率 $R_{\text{PSR-NS}} \approx 10^{-3} z_0 R_{\text{PSR}}$, 其中 $N_{\text{PSR}} \approx 10^{5.5}$ 、 $R_{\text{PSR}} \approx 10^{-2} \text{yr}^{-1}$ [5] 分别是银河系中脉冲单星的数目和诞生率。考虑到双星中的 PSR 一般经历了“再加速” (recycled) 阶段, 且平均说来 P 和 L 较正常 PSR 小一些, 因此可探测到的 PSR-NS 系统的数目会比以上估计值再低一个量级, 即 $N_{\text{PSR-NS(obs)}} \approx 10^{-2} z_0 N_{\text{PSR(obs)}}$ 。这个结论在现在看来也是正确的, 目前 $N_{\text{PSR(obs)}} \approx 750$, $N_{\text{PSR-NS(obs)}}$ 则应为几个, 而观测确实只发现了 5 个 PSR-NS 系统 [6]。

(2) 比较已观测到的 HMXBs 和 PSR-NS 系统的数目, 可推测双星系统中第二次超新星爆发后系统未解体而形成 NS-NS 系统的几率 $\phi_s \approx 10^{-2} z_0$ 。于是对于每一个在双星系统中发现的再加速 PSR, 应对应于 $10^2/z_0$ 个有再加速经历的脉冲单星。由观测值 $\phi_s \approx 10^{-1.5}$ 可以限定银盘厚度尺度因子 z_0 至少为 3kpc。

(3) 观测表明, HMXBs 中黑洞候选者占全部 HMXBs 的比例为 $\phi_{\text{BH}} \approx 10^{-1.5}$, 由 Salpeter 初始质量函数 [7] ($dN/dM \propto M^{-\alpha}$) 可以反推恒星演化理论中的一个非常重要但很不确定的参量, 即形成黑洞的前身星的临界质量 M_{BH}^* 约为 $50M_{\odot}$ 。假设含 BH 的 HMXBs 与含 NS 的 HMXBs 的寿命差不多, 则在银河系中含 BH 的 HMXBs 诞生率约为 $10^{-4.5} \text{yr}^{-1}$ 。

(4) 假设含 BH 的 HMXBs 中的黑洞质量约为 $10M_{\odot}$, 则第二次超新星爆发时系统会由于黑洞的大质量而不解体。又假设 BH-BH 系统诞生的可能性较小, 于是可得到 PSR-BH 的诞生率也约是 $10^{-4.5} \text{yr}^{-1}$ 。这个值与 PSR-NS 系统的诞生率是相当的。但这种 PSR-BH 系统中

的脉冲星是第二次超新星爆发形成的,因而不是再加速脉冲星,而已发现的 PSR-NS 系统中的脉冲星大多是有再加速经历的。再加速脉冲星的特征年龄 $\tau_{\text{rec}} \approx 10^{9.5} \text{yr}$, 而普通脉冲星的特征年龄只有 $\tau_p \approx 10^{7.5} \text{yr}$, 所以前者有更大的几率被观测到。不过, Narayan 等人认为, PSR2303+46(一个 PSR-NS 系统中的脉冲星)是一颗未经再加速的脉冲星,它的发现预示,至少 1 个 PSR-BH 系统也应在近期被发现。另外,还有一种可能性形成 PSR-BH: 即第一颗星演化为 NS, 而将大量质量流向第二颗星,使之质量超过 M_{BH}^* , 以致最终演化为 BH。在这种系统中,脉冲星应是经历再加速的。目前未观测到这样的系统,表明形成这种系统的几率 $\phi_{\text{BH}} \leq 10^{-3}$ 。

Narayan 等人 [2] 的工作首次提出发现 PSR-BH 系统的现实可能性,开辟了研究 PSR-BH 的新领域。需要指出的是,他们的工作完全建立在已有的观测统计和一些简单的假设基础上,并未涉及恒星演化细节的模拟。然而,这些预见性的结论得到了后来计算机模拟结果的支持(见 1.2 节)。Phinney [8] 独立地得出类似的结论。

1.2 PSR-BH 系统的计算机模拟研究

建立在恒星演化理论上的计算机模拟技术,是研究具有不同初始状态的双星系统演化的有力手段。模拟中重要的输入量是“初始双星”的某些参量和双星演化的细节。尽管存在某些不确定性,在适当的假定下还是可以作出较成功的模拟。下面介绍两种方法。

Tutukov 和 Yungelson [9] 假设了具有特定主星质量 M_1 、两子星质量比 q 和轨道半长轴 A 的双星诞生率的形式,和双星中 q 的初始分布 $f(q) = Cq^\alpha$ (其中 $\int_0^1 f(q) dq = 1$, α 是自由参量), 并假设恒星诞生率在银河系演化过程中保持常数,对给定任意初始值 $(M_{1,0}, A_0, q_0)$ 的系统进行了系统模拟。作者把演化分为若干阶段(最多 12 个阶段),给出每相邻两个阶段之间 (M_1, A, q) 的变换,然后在 $0.8 \leq M_1/M_\odot \leq 100$, $10 \leq A/R_\odot \leq 10^6$ 和 $0 < q < 1$ 的大范围内对许多可能的双星系统进行了模拟 [9]。假设 $M_{\text{BH}}^* \approx 40M_\odot$ 为形成黑洞的前身星的临界质量(注意与 1.1 节取值不同), Tutukov 和 Yungelson 给出 NS-NS、BH-NS 及 BH-BH 系统的诞生率和数目随轨道周期的分布图(见图 1) [9]。结论如下:

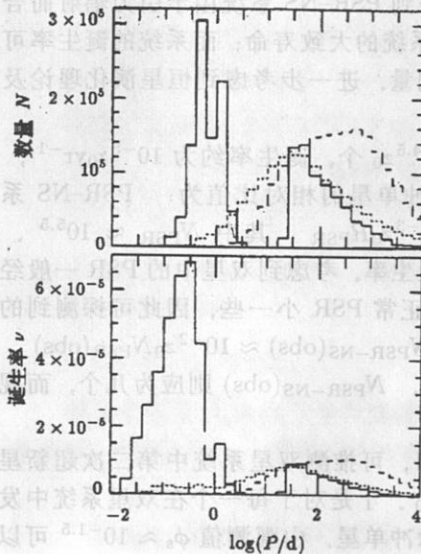


图 1 三种致密天体双星系统的诞生率与数目 [9]

实线表示 NS-NS 系统; 点线表示 BH-NS 系统; 虚线表示 BH-BH 系统。

(2) NS-BH 系统的数目和诞生率都是 NS-NS 系统的几分之一,但这一结论依赖于所假设的 M_{BH}^* 值。

(3) 由于引力辐射的作用,轨道周期小于 1d 的三种系统的数目都迅速减少,而诞生率则可能仍然很高。对于 NS-NS 系统,大部分由于寿命太短而很难被观测到,因此由统计学得到

(1) NS-NS 系统的轨道周期峰值 $< 1 \text{d}$, NS-BH 系统的峰值轨道周期在 10—100d 之间, BH-BH 系统轨道周期更长。这是可以理解的,形成黑洞的前身星具有更大的质量,因此超新星爆发时会产生更大的能量,使得最后的致密星双星系统具有更长的轨道半长轴和轨道周期及更大的轨道偏心率。

的 NS-NS 系统诞生率值^[2,8]可能大大偏小。

Lipunov 等人^[10-12]所采用的 Monte Carlo 模拟方法是一种计算量大、结果可信度较高的模拟方法。文献 [12] 利用所谓“方案机器”的计算机程序按照双星演化的现代方案进行模拟。作者模拟了初始质量在 10—120 M_{\odot} 范围内的 500,000 个双星样本的演化过程,并根据最终的演化结果进行了统计。主要结论如下:

(1) 演化最终各种系统的分布依赖于两个重要参量: 坍缩为黑洞的前身星最小质量 M_{BH}^* 和最终黑洞质量与前身星质量的比值 $k_{\text{BH}} = M_{\text{BH}}/M_*$ 。根据各种模拟结果与现有观测作比较,可对上述两个参量作出限制。结果表明, $M_{\text{BH}}^* \approx 35M_{\odot}$, $k_{\text{BH}} \approx 0.3$ 是较合适的。

(2) 形成黑洞有两种途径: 一是大质量星的直接坍缩, 二是中子星不断吸积物质而诱发的坍缩(称吸积诱发坍缩黑洞, AICBH)。后者只能在双星系统中发生, 且黑洞质量较小(刚刚大于中子星质量上限), 而前者则可以发生在单星或双星系统中, 且黑洞质量可能较大。Lipunov 等人^[12]指出, PSR-AICBH 系统的发生几率是很小的, 根据能产生 AICBH 的双星和脉冲单星的比例, 可以估计出在每 1000 个 PSR 单星中应 ≤ 0.1 个。不过这种系统与双星系统通过第一种途径形成的 PSR-BH 系统相比有很大不同, 其轨道周期很短(类似于 PSR-NS 系统), 一般只有几 h 或几 d。

(3) 对于由第一种途径形成的黑洞, 最后形成 PSR-BH 双星也有两种方式: 第一类是: 先演化的星(第一颗星)形成黑洞, 后演化的星(第二颗星)形成中子星, 因而脉冲星没有经过再加速过程; 第二类正好相反, 第一颗星形成中子星, 同时大量物质流向第二颗星使之最终演化为黑洞, 这种情况下脉冲星是经过再加速的(见文献 [2])。模拟表明, 这两种过程的发生几率是基本相当的, 不同的参数使每类过程占全部过程比率为 30%—70%。

(4) 形成黑洞的超新星爆发可能是各向异性的, 使得中子星具有一个额外的“踢出”(kick)的速度。Lipunov 等人模拟了两种情形(各向同性和各向异性爆发)的演化, 得到最终形成 PSR-BH 系统的轨道周期和椭率分布(见图 2)^[12]。结果表明, 形成的 PSR-BH 系统轨道周期

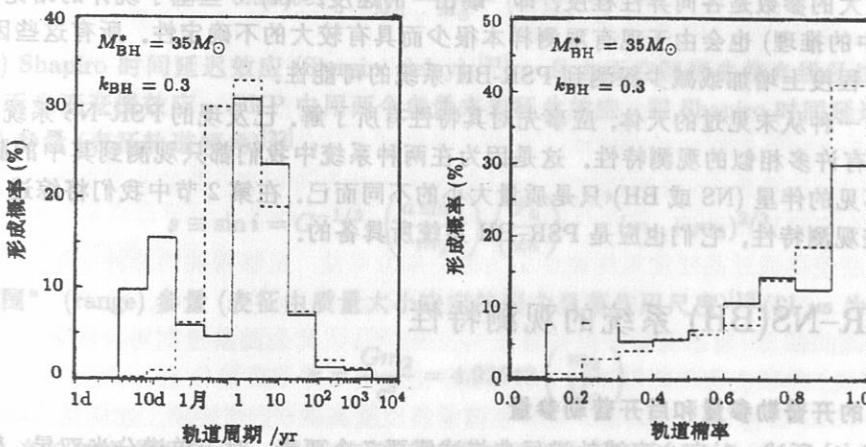


图 2 PSR-BH 系统可能的轨道周期和椭率^[12]

实线表示无各向异性的 BH 成因; 而虚线表示有各向异性的 BH 成因

都很长(几 d 到几十 yr), 而轨道椭率也较大(椭率 > 0.5 的占 90%)。对于各向异性的爆发, 轨道周期分布有两个峰值, 除 1yr 附近的一个峰值外, 还有 10d 附近的一个峰。

1.3 球状星团中的恒星级黑洞

以上讨论实际上主要是针对银盘而言的。然而,虽然球状星团对银河系恒星总数贡献很小,但由于其中星的密度极高,使得在其中探测黑洞有许多新的特点^[13,14],例如:因为缺乏星际气体,黑洞旁边不会形成吸积盘;潮汐作用和频繁碰撞使得捕获作用大大增强等。1993年7月, Nature 杂志上同时刊出两篇文章讨论球状星团中的恒星级黑洞,得到了基本相同的结论^[13,14]:在球状星团形成早期会伴随诞生约100个“原初”恒星级黑洞($M_{\text{BH}} \approx 10M_{\odot}$),在以后的演化过程中,由于动力学不稳定性,绝大多数黑洞被射出星团。对于中等密度的球状星团,中心可能残留零到几个恒星级黑洞。当束缚能超过动能的时候,就有可能产生BH-BH系统,并不断“变硬”(即轨道变小,束缚能增大)。这样的系统最多只产生一两个。由于潮汐作用的影响,这些BH-BH系统会破坏星团中其它的双星系统,有时还会与它们交换子星。另外星团中的黑洞也会有很大机会捕获场星形成双星系统。Kulkarni等人^[13]认为,球状星团中的X射线爆发现象就来源于星团中黑洞捕获一小质量星而形成的LMXB系统。虽然没有涉及细节,他们指出星团中的黑洞有可能捕获一颗毫秒脉冲星(msPSR),从而形成msPSR-BH系统。这样的系统与前两节所讨论的银盘中的PSR-BH系统有着很大的不同,可能会是短轨道周期的,这在盘族恒星中是不太可能形成的。

1.4 几点讨论

根据前几节讨论,可以有以下印象:作为一种很有研究意义的天体,PSR-BH系统虽然诞生率不高,但以现有的观测技术,人类仍有可能在近期发现至少一个这样的系统。然而由于演化过程本身的复杂性,这个结论的推理过程中尚存在许多不确定性:(1)形成黑洞的前身星质量下限 M_{BH}^* 和Salpeter初始质量分布指数 α 有很大的不确定性;(2)双星演化过程中有些阶段非常复杂,例如可能会经历“共同包层”的演化阶段而形成所谓“Thorne-Zytkow天体”^[15],在此期间会有大量的物质流失,许多演化细节不清楚,只能对此作一些假定;(3)超新星爆发过程也不很清楚,即使用计算机模拟,也需输入一些自由参数,其中一个对结果影响较大的参数是各向异性程度,即“踢出”的速度;(4)一些基于统计的结论(如文献[2]、[12]中的推理)也会由于现有观测样本很少而具有较大的不确定性。所有这些因素都可能会在某种程度上增加或减少探测到PSR-BH系统的可能性。

要搜寻一种从未见过的天体,应事先对其特性有所了解。已发现的PSR-NS系统与PSR-BH系统应有许多相似的观测特性。这是因为在两种系统中我们都只观测到其中的脉冲星,另一颗看不见的伴星(NS或BH)只是质量大小的不同而已。在第2节中我们将综述PSR-NS系统的一些观测特性,它们也应是PSR-BH系统所具备的。

2 PSR-NS(BH)系统的观测特性

2.1 轨道的开普勒参量和后开普勒参量

如文献[1]所述,对有心束缚轨道经典描述需要7个要素。对于单谱分光双星,轨道面和天球切面交线的位置角 Ω 原则上是无法确定的,而半长轴 a 和轨道倾角 i 也一般不能分别确定。观测所能给出的只有5个量,即轨道半长轴视向投影 $a \sin i$, 偏心率 e , 双星轨道周期 P_b , 近星点“黄”经 ω_0 和经过近星点的时刻 T_0 。这5个经典轨道参量称为开普勒参量KP (Keplerian Parameters)。

以广义相对论为代表的后牛顿引力理论预言了许多引力效应。根据这些效应, 双星轨道会偏离开普勒轨道发生变化。这些变化可用一系列所谓后开普勒参量 PKP(Post-Keplerian Parameters) 来表示。最重要的几个 PKP 包括:

(1) 近星点的进动 (precession of periastron, advance of the line of apsides) $\dot{\omega}$ ^[16], 表示为^[17]

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= 3G^{2/3}c^{-2}(P_b/2\pi)^{-5/3}(1-e^2)^{-1}(m_1+m_2)^{2/3} \\ &= 0.19882 \left(\frac{m_1+m_2}{M_\odot}\right)^{2/3} (1-e^2)^{-1}P_b^{-5/3}\end{aligned}\quad (1)$$

其中 m_1 是 PSR 质量, m_2 是伴星质量, e 为椭率, P_b 以 d 为单位, (下同), c 、 G 分别为光速和引力常数, $\dot{\omega}$ 的单位为 $(^\circ)\cdot\text{yr}^{-1}$ 。由 (1) 式可以看出, $\dot{\omega}$ 随 P_b 的减小而显著增加, 而对 e 不太敏感, 只在 $e \rightarrow 1$ 时显著增加。

(2) 引力辐射效应 (gravitational radiation)^[18] 引起的轨道周期变短, \dot{P}_b 可表示为^[19]

$$\begin{aligned}\dot{P}_b &= -\frac{192\pi}{5c^5} \left(\frac{2\pi G}{P_b}\right)^{5/3} f(e)m_1M_2(m_1+m_2)^{-1/3} \\ &= -2.17942 \times 10^{-14} f(e)P_b^{-5/3} \frac{m_1}{M_\odot} \frac{m_2}{M_\odot} \left(\frac{m_1+m_2}{M_\odot}\right)^{-1/3}\end{aligned}\quad (2)$$

其中

$$f(e) = \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) (1-e^2)^{-7/2}$$

\dot{P}_b 随 P_b 减小而显著增大, 在 $e \rightarrow 1$ 的时候, \dot{P}_b 也显著增大。

(3) 相对论时间相对变慢 (time dilation) γ (单位为 ms), 又叫 Einstein 时间延迟效应, 是二级多普勒效应与引力红移效应的合效应^[20], 可表示为^[17]

$$\begin{aligned}\gamma &= G^{2/3}c^{-2}e(P_b/2\pi)^{1/3}m_2(m_1+2m_2)(m_1+m_2)^{-4/3} \\ &= 6.9355eP_b^{1/3} \frac{m_2}{M_\odot} \frac{m_1+2m_2}{M_\odot} \left(\frac{m_1+m_2}{M_\odot}\right)^{-4/3}\end{aligned}\quad (3)$$

(4) Shapiro 时间延迟效应 (Shapiro delay)^[21], 是由于空间弯曲使光线经过更长的距离而等效于光速变慢效应。PKP 中用两个参量来表征此效应, 即 Shapiro 时间延迟的“形状” (shape) 参量 (表征轨道倾角)^[22]:

$$s \equiv \sin i = G^{-1/3}c \left(\frac{a \sin i}{m_2}\right) \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-2/3} (m_1+m_2)^{2/3}\quad (4)$$

和“范围” (range) 参量 (表征由质量大小决定的引力显著作用尺度)^[19](以 μs 为单位):

$$r = \frac{Gm_2}{c^3} = 4.92549 \left(\frac{m_2}{M_\odot}\right)\quad (5)$$

(5) 半长轴视向投影 $x = a \sin i$ 和椭率 e 的时间变化率 \dot{x} 和 \dot{e} 。

(6) 从某种意义上讲, $m_1, m_2, M = m_1 + m_2$ 也是 PKP^[19,23]。

2.2 视向速度曲线确定轨道参数

研究双星系统的最终目的是确定上述轨道参数, 并与理论预言相对比, 以期验证理论的正确性。这些参数中, 人们最关心两颗子星的精确质量大小, 以便判断天体的类型。

经典牛顿理论中(见文献[1]中的详细讨论), 7个参数: $a, i, e, P_b, \omega_0, T_0, m_1$ (或 m_2)可给出轨道除 Ω 外(人们对此参数并不感兴趣)的完备描述。对于单谱双星, 由视向速度曲线可给出 $a \sin i, e, P_b, \omega_0$ 和 T_0 五个参量, 从而能给出作为可测光谱子星的伴星的质量下限的所谓质量函数 $f(m_2) = m_2^3 \sin^3 i / (m_1 + m_2)^2$ 。而对于双谱双星系统(即两颗子星的视向速度曲线都能测出), 则又增加一个确定参量 m_1/m_2 , 但 $a \sin i$ 始终不能解耦, 故两子星质量不易分别确定。如果系统是交食双星, 则轨道倾角 i 可以独立得出, 从而可以分别定出 m_1 和 m_2 。

脉冲双星系统(如PSR-NS(BH)系统)实际上可以看作是一个单谱双星系统。这儿的“谱线频率”就是脉冲星精确的脉冲频率, 即中子星的自转频率。对于一个脉冲双星系统, 经过一段时间记录脉冲周期的周期性变化, 利用多普勒公式, 可以得到脉冲星的视向速度曲线, 从而直接给出五个经典轨道参量及伴星的质量函数。Hulse和Taylor发现的著名的PSR1913+16, 在一开始, 就是用这种方法获得基本轨道参数的^[24,25], 图3即该星的视向速度曲线。

2.3 由脉冲到达时刻精确测量轨道参数

脉冲星具有精确的脉冲周期, 其守时的稳定性超过地球上任何计时系统。这一独特的性质使得在脉冲星与其它天体构成的引力系统中精确测量一些微小而重要的效应成为可能。1993年, Hulse和Taylor因发现第一颗脉冲双星而获Nobel物理奖, 其原因之一就是利用脉冲星脉冲到达时刻TOA(time of arrival)的精确测量, 以相当高的精度检验了强引力场中广义相对论的正确性。另一个例子是, Wolszczan和Frail在1992年通过精确的脉冲守时测量(timing)发现了第一个太阳系外行星系统:

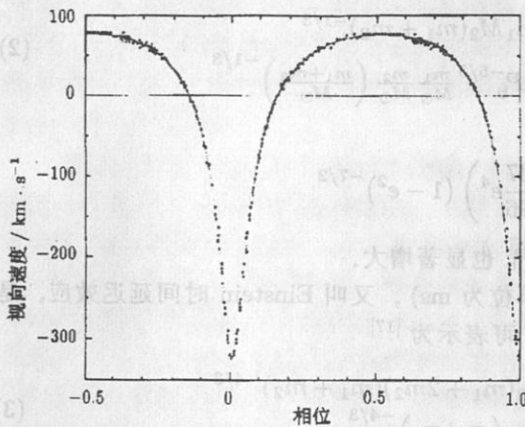


图3 PSR1913+16的视向速度曲线^[24]。

至少有两颗行星级天体正环绕着脉冲星PSR1257+12运转^[26](现已确认有三颗行星)。

利用守时测量确定轨道参数的基本原理和方法是: 根据预言脉冲到达时刻的理论模型, 利用最小二乘法拟合实际的观测资料, 使得残差随机而尽量不携带天体的信息, 从而定出模型中所包含的轨道参量(特别是PKP)。由于脉冲星精确的守时性, 足够长时间的观测可以反映出许多微小但重要的效应。

这种方法使得通过高精度观测验证引力理论成为可能: 足够精确的脉冲守时模型除5个经典的KP外, 还包括 $\dot{\omega}$ 、 \dot{P}_b 、 γ 、 s 、 r 甚至 $\dot{x}(x = a \sin i)$ 、 \dot{e} 等, 而7个参量就足以完全确定轨道的信息(包括两颗子星的质量 m_1, m_2 等), 其余的参量则可以用来与某一理论(如广义相对论)的预言值相比较以验证该理论。通常用5个KP加 $\dot{\omega}$ 和 γ 来决定轨道参量, 再用其它的PKP来检验引力理论。通常用测量精度较高的 \dot{P}_b 作检验, 这就是所谓 $\dot{\omega}-\gamma-\dot{P}_b$ 检验($\dot{\omega}-\gamma-\dot{P}_b$ test)^[27,28]。轨道倾角较大时, 对两个Shapiro时间延迟参量 s 和 r 也可有较高精度的测量, 从而又可给出两个独立的检验^[28]。

脉冲到达时刻的理论模型(守时模型)是利用理论预言地球上接收到脉冲的时刻 t 与脉冲星附近惯性参照系中脉冲辐射时刻 T 之间的关系。在某个特定时刻脉冲星的脉冲相位实际上包含了以下几方面因素的影响^[19]: (1) 脉冲星的自转; (2) 辐射从脉冲星传播到地球过程中

星际介质的色散延迟; (3) 地球在太阳系中的运动; (4) 脉冲星自身的轨道运动; (5) 可能的仪器系统延迟。一个“正确的”守时模型应能用来很好地拟合脉冲星长时间守时观测资料。即应全面且精确地反映以上各因素, 特别是轨道运动中 PKP 对脉冲到达时刻的影响。

守时模型是随着观测资料的不断积累而日趋精确的。对于脉冲单星, 脉冲的到达时刻实际上包含了以上除上述第 (4) 点以外的全部因素的影响。这样的守时模型在脉冲星发现不久就建立起来了^[29-31]。此模型先将地球上观测到的脉冲到达时刻 t 与太阳系质心参考系 (SSB) 中坐标时间 t_b 相联系:

$$t_b = t - D/f^2 + (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n})/c + \Delta E_{\odot} - \Delta S_{\odot} \quad (6)$$

其中 $D = DM/(2.41 \times 10^{-16})$ 是反映脉冲色散量 DM 的一个参量, 称为色散常数, 单位为 Hz; f 为频率; \mathbf{r} 是观测时刻 SSB 到望远镜相位中心的矢径, \mathbf{n} 为指向脉冲星的单位矢量, $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n})/c$ 项表征由地球轨道运动引进的改正因子。 ΔE_{\odot} 和 ΔS_{\odot} 分别表示太阳系中的 Einstein 延迟 (即 γ 效应) 和 Shapiro 延迟效应。对单星来说, T 和 t_b 的关系比较简单, 只差一个几乎是常数的因子, 即 $T = t_b - t_0$ 。这样, 脉冲星辐射时刻 T 和接收器接收脉冲时刻 t 就联系起来。

对于脉冲双星系统, 轨道效应使得 T 和 t_b 的关系变得复杂。在发现 PSR1913+16^[24] 后不久, Blandford 和 Teukolsky^[32] 就很快推导出第一个实用的分析脉冲到达时刻数据以研究双星轨道参量的公式 (BT 模型)。该公式并未事先假定哪个引力理论是正确的, 因而可以通过观测来检验理论。除经典的脉冲单星参量和 5 个 KP 以外, BT 模型中包含了 $\dot{\omega}, \gamma, \dot{P}_b, \dot{x}$, 及 \dot{e} 等 5 个 PKP, 因此可以进行 $\dot{\omega}-\gamma-\dot{P}_b$ 检验 (足够长时间观测后还可以用 \dot{x}, \dot{e} 来检验)。

守时理论模型随着对 PSR1913+16 观测精度的日益增高而不断发展。Epstein^[33,34] 首先在 BT 模型中加入 Shapiro 时间延迟的“形状”因子 $s = \sin i$ (即可通过脉冲在引力场中传播变慢的程度来确定轨道倾角), 使得模型对观测的拟合更加精确。然而, 到 1984 年, 对 PSR1913+16 的观测精度达到 $20\mu\text{s}$, Epstein 模型的拟合结果中出现了非随机的残差。Haugan^[35] 仔细考察发现了 Epstein 模型的缺点, 即椭圆轨道中 $\dot{\omega}$ 并非常数, 而依赖于轨道相位。用改进的方法, Weisberg 和 Taylor 第一次给出了 PSR1913+16 轨道倾角的取值^[22]。这种由 Epstein 提出、Haugan 发展的包含 $\sin i$ 项的守时模型称为 EH 模型。

1986 年, Damour 和 Deruelle^[36] 指出 EH 模型存在的缺点: $\sin i$ 清晰的物理意义是建立在“广义相对论是正确的引力理论”的假设条件下的。如果广义相对论不正确, 则 $\sin i$ 的含义很模糊, 因为它实际上是很多效应的合效应。两位作者进一步提出了新的守时模型, 将 T 与 t_b 的关系最终写作

$$t_b - t_0 = T + \Delta_R + \Delta_E + \Delta_S + \Delta_A \quad (7)$$

其中 Δ_R 为 Roemer 时间延迟, 表示由于双星轨道运动引进的改正因子, 相对于 (6) 式中的 $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n})/c$ 项; Δ_E 、 Δ_S 分别表示双星轨道中的 Einstein 时间延迟和 Shapiro 时间延迟; 而 Δ_A 是与脉冲星自转光行差相关的时间延迟。这个模型称为 DD 模型, 它包括了 BT、EH 模型中原有的效应, 并给予扩充: Δ_S 中包括两个可测量: 除“形状”量 $s = \sin i$ 外, 还加入“范围”量 r 。此模型对研究类 PSR1913+16 的 PSR-NS 系统是一个成功的模型。

Taylor 和 Weisberg^[23,19] 在 DD 模型的基础上发展了另一种实用性较强的模型, 即假设广义相对论是正确的, 并选定五个 KP 和 $M = m_1 + m_2$ (总质量) 与 m_2 (伴星质量) 两个 PKP 作为基本参量, 而把 $\dot{\omega}, \gamma, \dot{P}_b, s, r$ 等作为导出参量。此模型称为 DDGR 模型。

作为小结,表1列出各种守时模型中所包含的参量^[19]。其中 α 、 δ 分别表示系统的赤经和赤纬, μ_α 、 μ_δ 分别表示赤经、赤纬方向的自行^[25],其余量表示意义同前。Y表示模型中包含该参量。

表1 守时模型的参量^[19]

参量	脉冲单星	BT 模型	EH 模型	DD 模型	DDGR 模型
α	Y	Y	Y	Y	Y
δ	Y	Y	Y	Y	Y
μ_α	Y	Y	Y	Y	Y
μ_δ	Y	Y	Y	Y	Y
t_0	Y	Y	Y	Y	Y
$\nu = 1/P$	Y	Y	Y	Y	Y
$d\nu/dt$	Y	Y	Y	Y	Y
$d^2\nu/dt^2$	Y	Y	Y	Y	Y
$x = (a_1 \sin i)/c$	...	Y	Y	Y	Y
e	...	Y	Y	Y	Y
T_0	...	Y	Y	Y	Y
P_b	Y	Y	Y	Y	Y
ω_0	...	Y	Y	Y	Y
$\dot{\omega} = 2\pi k/P_b$	...	Y	Y	Y	...
γ	...	Y	Y	Y	...
\dot{P}_b	...	Y	Y	Y	...
$s = \sin i$	...	...	Y	Y	...
r	...	...	...	Y	...
$M = m_1 + m_2$	...	...	...	...	Y
m_2	...	...	...	...	Y
\dot{z}	...	Y	Y	Y	...
\dot{e}	...	Y	Y	Y	...

值得指出的是,守时模型有最新进展。Doroshenko 和 Kopeikin^[37]于1995年指出,除 Shapiro 时间延迟以外,另一广义相对论效应,即光线弯曲效应(或引力透镜效应)引起的脉冲到达时间延迟也应加入守时模型中去。此效应在双星轨道倾角接近 90° 时比较显著:脉冲星的辐射束在引力场中发生了偏离,从而影响了脉冲星的到达时刻。两位作者在(7)式的右端又加了一项 Δ_B 来表示这一效应,并给出了详细的解析表达式。

2.4 PSR-BH 系统的观测特性

前三小节所描述的 PSR-NS 系统的观测特征实际上都是 PSR-BH 系统所具备的,而且很多效应可能更显著。利用公式(1—5),对于一个与 PSR1913+16 有类似轨道参数的 PSR-BH 系统,几个 PKP 的值都会有明显的增加^[38]。如果证实发现了 PSR-BH 系统,就有可能在更强引力场中以更高的精度验证引力理论。

3 发现 PSR-BH 系统的意义

发现 PSR-BH 系统对天体物理学和物理学的研究,特别是对搜寻和最终证认黑洞的存在,有着其它系统无法取代的意义。

首先,发现 PSR-BH 系统使我们可以精确地确定“黑洞”的质量。到目前为止,已知的黑洞候选者都只能得到质量下限,或在估算轨道倾角的基础上给出质量范围^[1]。随着观测技

术的进步和 PSR-BH 样本数目增加, 可进一步做恒星级黑洞质量的分布统计, 从而对恒星演化理论和黑洞物理学提供检验依据或给出约束。

其次, PSR-BH 系统可能给出表征黑洞视界存在的确凿证据。搜寻和证认黑洞的现状是^[1]: 人们已分别在星系级和恒星级找到了一些黑洞候选者。但是, 所有对黑洞进行判断的过程中都利用了某个或某几个理论的结论, 即人们并未找到黑洞存在的直接判据。所谓“直接判据”, 就是要独立地完全由观测确定某一天体的质量和所“看到”的最小尺度。当此最小尺度很接近所测质量的 Schwarzschild 半径时, 我们就可以说, 这个黑暗天体就是黑洞。这就是黑洞的“大质量, 小尺度”判据。PSR-BH 系统使得这样的直接测量成为可能, 因为一些精细的引力效应 (亦即时空弯曲效应) 中可能会包含尺度的信息。例如, 在轨道面与视线方向接近平行的情况下, 当黑洞处在脉冲星和观测者之间时, 黑洞的引力场会对脉冲星的辐射发生“自引力透镜”效应^[2,39], 并在脉冲到达时刻中表现出来^[37]。利用这样的守时模型并对该系统进行长期观测, 有可能给出作为“透镜源”黑洞的尺度信息。考虑到黑洞视界附近的强引力场, 甚至对轨道倾角的要求不必那么苛刻, 以上效应都可能发生。这是任何其它天体 (如中子星) 所不能替代的。这将可能使我们最终找到“黑洞存在于自然中”的判据。

第三, PSR-BH 系统可以使我们确凿地研究黑洞的旋转特性。在 X 射线双星中, 已经找到一些迹象表明黑洞的旋转特性, 如在黑洞双星 (BHB) 中观测到的高频准周期振荡 (QPO)^[40] 和 X 射线谱的双态现象^[41]。但是, 这种解释并不是唯一的^[42,43]。然而, 在 PSR-BH 系统中却可以找到确凿的黑洞旋转证据。最近, 两个小组独立地研究了 PSR 与一个 Kerr 黑洞构成的双星系统的守时模型^[44,45], 指出在特殊的位形下 (如轨道倾角 $> 89^\circ$, BH 质量大于 $10M_\odot$)^[44], 黑洞的旋转信息可以在脉冲到达时刻中表现出来。如果能幸运地发现这样的系统, 长时间的观测研究可以确凿地得到黑洞除质量以外的第二个信息: 角动量。

第四, PSR-BH 系统可以使我们在更强的引力场中验证物理学理论, 正如 PSR-NS 系统做到的那样。不过, 这种情况下各种引力效应会更加显著^[38]。

4 搜寻短轨道周期脉冲双星和 PSR-BH 系统

总结前文, 搜寻 PSR-BH 系统有着深远意义, 且具有一定的可行性。目前, PSR-NS 系统已发现了 5 个^[6], 其中 PSR2303+46 可能是一颗未经再加速的 PSR^[2], 这使得发现一个具有大致相同诞生率的 PSR-BH 系统 (其中 PSR 一般也是第二次超新星爆发后诞生的未经再加速的中子星) 成为可能。

国际上已有英、澳、美的几个小组投入搜寻 PSR-BH 系统的热潮中。值得指出的是, 1994 年, Kaspi 等人^[46] 在小麦云 (SMC) 中发现了一颗处于偏心率较大的轨道 ($e = 0.8, P_b = 51d$) 上的脉冲星 PSRB0042-73=PSRJ0045-7319, Lipunov 等人^[47] 指出这很可能是一个 PSR-BH 系统, 但此观点后来被否定了, 该系统中的伴星实际上是一颗 Be 星^[48]。目前, PSR-BH 系统尚未被发现。

最近, 我们与澳大利亚国家天文台 Manchester 教授及北京大学信息系合作提出一个研究计划: 在球状星团中进行短轨道周期脉冲双星 SOPBP (short orbital-period binary pulsars) 的搜寻。这个计划的科学目标之一就是试图找到一个 PSR-BH 系统。如前文所述, 这种系统虽然可能存在, 但存在几率很小。我们的方案基于如下考虑:

(1) 虽然 PSR-BH 系统在诞生时轨道周期较长 (见图 1、2), 但在球状星团中可能由于捕获过程形成短轨道周期的系统^[13]。每个球状星团可能包含零到几个黑洞^[13,14], 这些黑洞捕获脉冲星形成一个 PSR-BH 系统的可能性虽然不很大, 但依然存在。搜寻目标是球状星团, 其中 BH 与 PSR 形成双星的机会可能会大一些。

(2) 目前脉冲星巡天的资料处理算法很适合于搜寻脉冲单星。对轨道周期较长且较亮的脉冲双星的搜寻, 也有一些可行的办法。然而对于 SOPBP, 现行的 P (脉冲周期)- DM (色散量) 搜寻是失败的。轨道快速运动附加的 $\dot{P}(\text{orb})$ 耦合在脉冲到达时刻中, 使各转动周期内的个别脉冲不能得到有效的叠加, 从而难以得出明显的脉冲轮廓。我们把视点投向 SOPBP, 目标是改进现有的搜寻算法, 使得程序适于处理 SOPBP 的数据。进一步用来处理观测数据, 以期找到一个或几个 SOPBP。如果足够幸运的话, 希望能找到一个 PSR-BH 系统。

(3) 反映引力效应的后开普勒参数 (PKP) 随轨道周期 P_b 的减小而显著增大。因此, SOPBP 是验证引力理论的理想场所。

关于改进搜寻算法, 已有一些小组作出努力^[49-52]。搜寻脉冲单星的标准方法是所谓 $P-DM$ 搜寻: 先假定一定的色散量 DM , 将接收到的信号消色散, 然后作 Fourier 分析, 看有无明显的谐振峰, 这样不断改变 DM , 直到找到明显的频谱信息后将脉冲周期 P 确定下来。这种搜寻是二维的。对于脉冲双星系统, 实际上引进了由轨道运动决定的参量, 即轨道运动引起的脉冲周期变化率 $\dot{P}(\text{orb})$, 它是依赖于 P_b 、 $x = a \sin i$ 、 e 等轨道参量的。逐个变换这些参量来进行搜寻会指数式增加计算量。尽量减少搜寻的参量而又能有效地进行搜寻是改进搜寻算法的关键。一些作者^[49-51] 在假设常数加速 (即 $\dot{P}(\text{orb}) = \text{const.}$) 的前提下进行搜寻, 相当于只增加了一个自由参量, 而对于已知 DM 的球状星团, DM 参量固定了, 搜寻实际上还是二维的。用这种方法的确在 M15 中成功地找到一个 8 小时脉冲双星系统 PSR2127+11C^[51]。但这种方法对处理轨道周期更短的系统会失败。脉冲单星是单频信号 (频率与脉冲周期相对应)。脉冲双星系统除脉冲周期外, 还有轨道运动对频率的影响。为处理更广泛的系统, Johnston 和 Kulkarni^[52] 引进了一个效率因子 γ 来表征在未消除双星中轨道运动的影响时, 双星中的脉冲信号因轨道运动引起的脉冲信号 Fourier 振幅减小的程度, 并讨论在守时测量中引进加速效应 (即轨道运动的影响) 后此因子能多大程度地恢复。进一步, 他们把 γ 作为 P 、 P_b 、 m_c (伴星质量) 和 i 的函数进行了数值计算, 指出这种方法可用来搜寻 SOPBP。另外, 通过简单的分析我们发现, 如果 SOPBP 的轨道是近圆的 (即 $e \approx 0$), 即可引进正弦形式的 $\dot{P}(\text{orb})$, 其中只包含轨道周期 (由 P_b 决定) 和振幅 (由 $x = a \sin i$ 决定) 两个参量, 再加上 P 一个参量 (球状星团中 DM 一定), 这样的三维搜寻也还是可能的。以上讨论实际上假设了在短轨道周期的时间内, 脉冲星自身的 \dot{P} 引起的 P 值改变可以忽略。

除在球状星团中搜寻 SOPBP 外, 另一种可能是在巡天资料中进行大规模搜寻。例如, Manchester、Lyne 等人利用澳 Parkes 64m 望远镜对南天进行了 70cm 大规模巡天^[53,54]。此次巡天探测到 298 颗脉冲星, 其中 101 颗是新发现的, 且有 17 颗是 msPSR。但由于缺少适当的算法, 还没有对更多的双星系统, 特别是 SOPBP 系统进行细致的搜寻。近来, 一个对 70cm 巡天资料进行重新“加速”搜寻的项目正在进行, 本文作者之一参加了该项目的算法改进工作^[55]。项目完成约需要 1.5yr。另外, 最近在 Parkes 进行的多束大型巡天计划将把脉冲星数目增加一倍, 可能导致 PSR-BH 系统的发现^[56]。

总之, 搜寻 PSR-BH 系统是一项艰巨的、带风险的、却是富有挑战性的工作。人们是以一种乐观的态度来对待它的。已知脉冲双星中轨道周期最短的为 2h, 已发现轨道周期短于

1h 的 LMXB 也有数颗。随着观测技术的进步和资料处理方法的改进, 相信很快会发现轨道周期更短的射电脉冲双星。如果有关黑洞的理论正确, 它是宇宙中实实在在存在的天体的话, 基于上述分析, 有理由相信, 在不远的将来, 人们终究会发现期待已久的 PSR-BH 系统, 从而确认黑洞的存在。

致谢 作者感谢 Manchester 教授、卢炬甫教授、李惕碛研究员、吴学兵、朱宗宏、徐仁新博士及洪碧海、刘继峰、郑政、王洪光等同学的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 张冰, 乔国俊, 韩金林. 天文学进展. 1998, 本期: 260
- 2 Narayan R, Piran T, Shemi A. *Ap. J.*, 1991, 379: L17
- 3 Narayan R. *Ap. J.* 1987, 319: 162
- 4 Kulkarni S R, Narayan R. *Ap. J.*, 1988, 335: 755
- 5 Narayan R, Ostriker J P. *Ap. J.*, 1990, 352: 222
- 6 Nice D J, Sayer R W, Taylor J H. *Ap. J.*, 1996, 466: L87
- 7 Salpeter E E. *Ap. J.*, 1955, 121: 161
- 8 Phinney E S. *Ap. J.*, 1991, 380: L17
- 9 Tutukov A V, Yungelson L R. *M.N.R.A.S.*, 1993, 260: 675
- 10 Kornilov V G, Lipunov V M. *Astronomicheskij Zhurnal*, 1983, 60: 574
- 11 Lipunov V G. *Astrophysics of Neutron Stars*, Berlin: Springer-Verlag, 1992, 280-303
- 12 Lipunov V G, Postnov K A, Prokhorov M E et al. *Ap. J.*, 1994, 423: L121
- 13 Kulkarni S R, Hut P, McMillans S. *Nature*, 1993, 364: 421
- 14 Sigurdsson S, Hernquist L. *Nature*, 1993, 364: 423
- 15 Thorne K S, Zetckow A N. *Ap. J.*, 1977, 212: 823
- 16 Will C M. *Ap. J.*, 1975, 196: L3
- 17 Taylor J H, Weisberg J M. *Ap. J.*, 1982, 253: 908
- 18 Wagoner R V. *Ap. J.* 1975, 196: L63
- 19 Taylor J H, Weisberg J M. *Ap. J.*, 1989, 345: 434
- 20 Esposito L W, Harrison E R. *Ap. J.*, 1975, 196: L1
- 21 Shapiro I I. *Phys. Rev. Lett.* 1964, 13: 789
- 22 Weisberg J M, Taylor J H. *Phys. Rev. Lett.* 1984, 52: 1348
- 23 Taylor J H. In: MacCallum M A H ed. *General Relativity and Gravitation*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 209
- 24 Hulse R A, Taylor J H. *Ap. J.*, 1975, 195: L51
- 25 Taylor J H, Hulse R A, Fowler L A et al. *Ap. J.*, 1976, 206: L53
- 26 Wolszczan A, Frail D A. *Nature*, 1992, 355: 145
- 27 Taylor J H, Wolszczan A, Damour T et al. *Nature*, 1992, 355: 132
- 28 Will C M. *Nature*, 1992, 355: 111
- 29 Hunt G C. *M.N.R.A.S.*, 1971, 153: 119
- 30 Manchester R N, Peters W. *Ap. J.*, 1972, 173: 221
- 31 Manchester R N, Taylor J H, Van Y Y. *Ap. J.*, 1974, 189: L119
- 32 Blandford R, Teukolsky S A. *Ap. J.*, 1976, 205: 580
- 33 Epstein R. *Ap. J.*, 1977, 216: 92
- 34 Epstein R. *Ap. J.*, 1979, 231: 644
- 35 Haugan M P. *Ap. J.*, 1985, 296: 1
- 36 Damour T, Deruelle N. *Ann. Inst. Henri. Poincaré, Phys. Théor.*, 1986, 44: 263
- 37 Doroshenko O V, Kopeikin S M. *M.N.R.A.S.*, 1995, 274: 1029
- 38 Qiao G J, Han J L, Zhang B. In: Cheng K S, Chan K L eds. *Proc. of the 21st Century Chinese Astronomy Conference*, 1996, Hong Kong, Singapore: World Scientific Publishing, 1997: 305

- 39 Gould A. Ap. J., 1995, 446: 541
 40 Morgan E H, Remillard R A, Greiner J. Ap. J., 1997, 482: 993
 41 Zhang S N, Cui W, Chen W. Ap. J., 1997, 482: L155
 42 Ebisawa K, Titarchuk L, Chakrabarti S K. Publ. Astron. Soc. Jpn., 1996, 48: 59
 43 Mineshige S, Kusunose M, Matsumoto R. Ap. J., 1995, 445: L43
 44 Laguna P, Wolszczan A. Ap. J., 1997, 486: L27
 45 Oscoz A, Goicoechea L J, Mediavilla E et al. M.N.R.A.S., 1997, 285: 413
 46 Kaspi V M et al. Ap. J., 1994, 423: L43
 47 Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E. Ap. J., 1995, 441: 776
 48 Kaspi V M, Tauris T M, Manchester R N. Ap. J., 1996, 459: 717
 49 Middleditch J, Priedhorsky W C. Ap. J., 1986, 306: 230
 50 Hertz P, Norris J P, Wood K S et al. Ap. J., 1990, 354: 267
 51 Anderson S B, Gorham P M, Kulkarni S R et al. Nature, 1990, 346: 42
 52 Johnston H M, Kulkarni S R. Ap. J., 1991, 368: 504
 53 Manchester R N, Lyne A G, D'Amico N et al. M.N.R.A.S., 1996, 279: 1235
 54 Lyne A G, Manchester R N, Lorimer D R et al. M.N.R.A.S., 1998, 295: 743
 55 张冰. 博士后出站报告, 北京: 北京大学, 1998, 53
 56 Lyne A G. 北京天文台特邀报告. 1998年10月

Detection and Confirmation of Black Holes (II): Studying and Searching for Pulsar-Black Hole (PSR-BH) Binary Systems

Zhang Bing^{1,2} Qiao Guojun^{1,2,3} Han Jinlin⁴

(1. Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

(2. CAS-PKU Joint Beijing Astrophysics Center 100871)

(3. LCRHEA, IHEP, CAS, Beijing 100039)

(4. Beijing Astronomical Observatory, CAS, Beijing 100080)

Abstract

Theories of the birthrate of the pulsar-black hole (PSR-BH) systems are reviewed. It is pointed out that at least one of such kind of systems is likely to be discovered recently. The observational characteristics of the pulsar - neutron star (PSR-NS) systems, especially the important impact of their accurate timing properties on the determination of orbital parameters of binary systems and the test of gravitational theories, are reviewed and analysed, which sheds light to the study of the unknown PSR-BH systems. It is argued that the discovery of the PSR-BH system is of great significance in the field of searching for and confirming the existence of black holes. Finally, current status of searching for PSR-BH systems and our plan on searching for short orbital-period binary pulsars are briefly introduced.

Key words stars: PSR-BH binary—stars: PSR-NS binary—stars: short orbital-period binary pulsar