



论文

重复快速射电暴FRB 121102白矮星和中子星双星模型的再研究

林一清^{1,2*}, 程再军^{1,2}, 甘亮勤^{1,2}

1. 厦门理工学院, 通信网络与信息处理福建省高校重点实验室, 厦门 361024;

2. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 厦门 361024

*联系人, E-mail: yqlin@xmut.edu.cn

收稿日期: 2017-06-26; 接受日期: 2017-09-14; 网络出版日期: 2017-12-13

国家自然科学基金(编号: 61504113)资助项目

摘要 快速射电暴(FRB)是宇宙中忽然出现的短暂而明亮的射电爆发现象, 它的物理起源至今还是一个谜. 重复快速射电暴可能源于一个具有强偶极磁场的中子星和磁化的白矮星组成的致密双星系统. 当白矮星充满它的洛希瓣时, 物质将会通过拉格朗日点从白矮星转移到中子星. 一次爆发之后, 白矮星可能被踢开. 对于唯一已知的重复暴源FRB 121102, 总共探测到41次重复爆发. 用已知的红移数据, 根据41次重复爆发的数据, 我们再次研究了白矮星-中子星的双星模型, 肯定了这样一个间歇的洛希瓣外流机制可能可以解释FRB 121102的重复爆发行为, 并且相邻爆发的时间间隔和其后的暴的流量之间不存在相关性, 这也与我们的洛希瓣外流机制相符.

关键词 吸积, 吸积盘, 引力辐射, 磁重联, 白矮星**PACS:** 97.10.GZ, 95.85.Sz, 96.86.Iv, 97.20.Rp

1 引言

快速射电暴(Fast Radio Bursts, FRBs)是近几年探测到的一种在射电波段短暂出现的天体物理爆发现象. 它们的持续时间通常只有几毫秒, 流量密度可以达到央斯基(Jy)量级. 目前探测的FRB色散量比较高说明了FRB有可能是河外起源, 甚至是宇宙学起源^[1]. 从2007年第一个快速射电暴被发现至今, 已经有17个非重复快速射电暴和一个重复快速射电暴(FRB 121102)被探测到^[2-14]. 对于非重复快速射电暴, 除了FRB 110523被

美国绿岸望远镜(Green Bank Telescope, GBT)探测到之外^[15], 其他非重复暴均被澳大利亚帕克斯射电望远镜(Parkes Radio Telescope, Parkes)探测到^[1-3]. 对于重复快速射电暴, FRB 121102是目前唯一一个被探测到有重复爆发现象的快速射电暴^[5].

2012年, 重复射电暴FRB 121102第一次被美国阿雷西博射电望远镜(Arecibo Radio Telescope, Arecibo)探测到^[5]. Spitler等人^[13]在FRB 121102第一次被探测到约2.5年后, 探测到11次快速射电暴脉冲, 它们与2012年探测到的快速射电脉冲具有同样的色散量和空间

引用格式: 林一清, 程再军, 甘亮勤. 重复快速射电暴FRB 121102白矮星和中子星双星模型的再研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 029501
Lin Y Q, Cheng Z J, Gan L Q. Revisiting the neutron star-white dwarf binary model of FRB 121102 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 029501, doi: [10.1360/SSPMA2017-00176](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00176)

位置,因而被认为是来自FRB 121102的天体源的重复爆发. 随后又先后被探测到29次重复爆发^[12,14,16,17]. 这样对于重复射电暴FRB 121102, 总共探测到41次重复爆发. Tendulkar等人^[18]根据对FRB 121102的对应体的光学探测证认出了FRB 121102的宿主星系, 并测定其红移为 $z=0.19273\pm0.00008$, 确立了FRB 121102的宇宙学起源. 这是人们首次直接测出快速射电暴的红移和距离, 是这一领域的重大进展.

目前快速射电暴的物理起源尚不清楚, 根据FRB 121102的河外起源和重复爆发行为, 人们认为重复快速射电暴可能起源于软伽玛重复暴^[19], 脉冲星穿过小行星带^[20], 或者年轻脉冲星的巨型脉冲^[21,22]等. Gu等人^[23]提出包含一个磁化的白矮星和具有强偶极磁场的中子星的双星系统. 他们选取红移 $z=0.1$, 根据2015年的16次重复爆发数据, 用间歇的洛希瓣外流机制来解释FRB 121102的重复爆发行为. 本文用已知的红移数据, 根据目前探测到FRB 121102的41次重复爆发的数据, 考虑连续观测期间两次相邻爆发, 通过对它们之间的时间间隔 Δt 和相邻爆发的前暴的流量 F 的关系在理论分析和观测数据上的比较, 再次研究了白矮星和中子星的双星系统在解释FRB 121102重复爆发行为的可行性. 同时研究了相邻爆发的时间间隔和其后的暴的流量之间的关系.

2 理论模型分析

双星系统包含一个磁化的白矮星和一个具有强偶极磁场的中子星, 当白矮星充满洛希瓣的时候, 系统成为半独立的系统, 这个时候物质将会从白矮星通过内拉格朗日点被中子星吸积. 当吸积的磁化物质到达中子星表面时, 会发生磁重联, 电子可能瞬时被加速到极端相对论速度^[24]. 相应地, 当电子沿着南北磁力线移动的时候, 可能放出很强的电磁辐射. 另外, 根据角动量守恒, 当 $q>2/3$ 时, 物质转移将变成一个连续的行为(q 为白矮星和中子星的质量比值)^[25]. 反之, 如果 $q<2/3$, 那么白矮星可能被踢开, 经过一次洛希瓣外流过程之后系统重新变成分离的. 在引力辐射的作用下, 系统可能再次变成半独立的状态, 那么第二次的转移过程和相应的磁重联过程就会再次开始. 因此, 对于 $q<2/3$ 的双星系统, 洛希瓣外流可能是一个间歇的行为. 我们知道, 中子星的质量通常大于 $1.4M_{\odot}$, 而目

前观测到的白矮星质量分布的峰值为 $0.6M_{\odot}$, 因此洛希瓣外流的间歇性行为可能是中子星-白矮星系统的通常现象.

对中子星和白矮星组成的双星系统, 当转移一定质量后, 白矮星被踢开, 双星由于引力波辐射导致轨道衰减进入第二次转移. Gu等人^[23]2016年推导了两次相邻爆发的时间间隔 Δt 与首次爆发转移的质量 ΔM_2 之间的关系式:

$$\Delta t = \frac{5(1+q)c^5 a^4}{32qG^3 M^3} \left\{ \lambda [0.5(1-q) - 0.227(1+q)\log q]^2 - (1+q) \left(\frac{2}{3} - q \right) \right\} \frac{\Delta M_2}{M_{\odot}}, \quad (1)$$

其中 G 为引力常数, M 为中子星和白矮星的总质量, a 为双星的距离, c 为光速, λ 是一个在范围 $0 \leq \lambda \leq 1$ 内的参数. 当质量取典型值(中子星的质量为 $1.4M_{\odot}$, 白矮星的质量为 $0.6M_{\odot}$)时, 相应的两星之间的距离 $a = 3.41 \times 10^9$ cm. 对于参数 λ , 有两种极限情况: 吸积物质没有携带轨道角动量($\lambda = 0$)和物质在拉格朗日点携带着开普勒角动量($\lambda = 1$). 对于激变变星的研究表明 λ 接近于1, 因此我们的分析中选取 $\lambda = 1$, 这样式(1)就可以简化成

$$\Delta t = -2.68 \times 10^{10} \frac{\Delta M_2}{M_{\odot}} s. \quad (2)$$

在这个模型中, 很难具体估算有多少电子被加速到极端相对论速度. 只能通过吸积物质携带的磁能量来估算释放的能量, 得到暴的流量 F 和转移的质量 ΔM_2 之间的关系:

$$F \Delta \nu D_L^2 \Delta \theta = -\eta_1 \eta_2 \Delta M_2 c^2. \quad (3)$$

我们选取白矮星的磁场 $B_{\text{wd}} \approx 3 \times 10^8$ G (在超过100个白矮星中发现, 磁场范围在 10^3 G到 10^9 G之间); 大气的平均质量密度 $\bar{\rho} = 10^3$ g cm⁻³, 根据FRB 121102的红移 $z=0.19273$, 选取宇宙学参数 $H_0 = 69.6$, $\Omega_M = 0.286$, $\Omega_{\text{vac}} = 0.714$ 可以得到光度距离 $D_L = 947.7$ Mpc, $\Delta \nu$ 为射电频率的宽度, $\Delta \theta$ 为FRB的立体角, η_1 为曲率辐射与吸积物质携带的总磁能的比值, 表示释放能量的效率, $\eta_2 = \frac{B_{\text{wd}}^2}{8\pi \bar{\rho} c^2}$ 为磁场能量密度和物质密度的比值, 表示磁重联的效率. 我们在计算中选取 $\Delta \nu = 1$ GHz, $\Delta \theta = 0.04\pi$ (相当于总空间的1%).

3 观测数据和结论

根据引言中提到的, 目前为止对唯一已知的重复暴FRB 121102共有41次探测到重复爆发, 而我们的焦点是连续观测期间两次相邻爆发之间的时间间隔 Δt 和相邻爆发的前暴的流量 F 之间的关系. 考虑到2016年9月16日的两次爆发时间间隔只有0.037 s, 我们把这两个暴并做一个考虑, 这样可以从这41次爆发数据中推导出总共19个时间间隔, 见表1. 由于VLA的时间分辨率是5 ms, 但是2016年9月20日的4次爆发的脉冲宽度都小于5 ms, 并不能够给出精确的脉冲宽度, 所以只能得出4次爆发的脉冲宽度都在2–3 ms范围内, 我们得到的流量也只有一个范围^[16].

根据上面的理论公式和观测数据, 可以得到时间间隔 Δt 和相邻爆发的前暴的流量 F 之间理论分析和探测的比较, 如图1所示, 其中 Δt 是在静止框架下的时间间隔. 3条实线分别表示根据式(3)选取释放能量的效率 η_1 为0.002, 0.02和0.2时的理论分析图, 星星代表19个观测结果, 数据见表1. 从图中可以看出, 大部分的暴

都落在3条理论线的范围内, 这可能意味着理论分析和观测是相符的. 也就是说中子星-白矮星模型可能

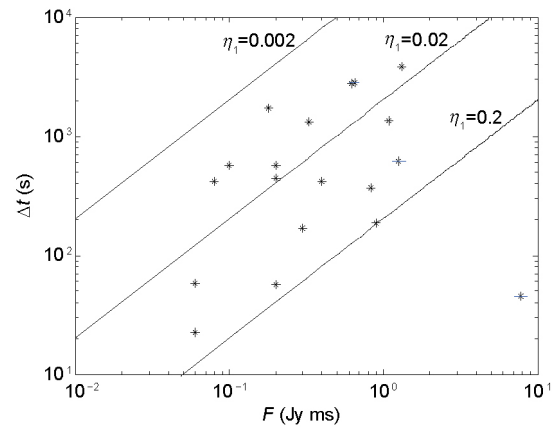


图1 理论和观测上相邻两次爆发的时间间隔和相邻爆发的前暴的流量关系图(Δt - F)的比较. 3条实线分别表示不一样参数下理论分析的图, 星星代表19个观测结果(表1)

Figure 1 Comparison of analyses with observations in the Δt - F diagram. The three solid lines represent the analytic relation of the different parameters. The stars denote the observational results shown in Table 1.

表1 FRB 121102连续探测的19个间隔
Table 1 Nineteen intervals in continuous observation of FRB 121102

Interval number	Date	Fluence (Jy ms)	Time interval (s)	Fluence after interval (Jy ms)
1	2015-5-17	0.1	572.2	0.1
2	2015-06-02a	0.2	568.9	0.09
3	2015-06-02b	0.06	22.7	0.06
4	2015-06-02b	0.06	58.0	0.9
5	2015-06-02b	0.9	186.2	0.3
6	2015-06-02b	0.3	169.3	0.2
7	2015-06-02b	0.2	57.2	1.0
8	2015-11-19	0.4	414.4	0.2
9	2015-11-19	0.2	441.3	0.08
10	2015-11-19	0.08	416.3	0.6
11	2016-09-20	1.13–1.39 ^{a)}	613.8	7.07–8.66 ^{a)}
12	2016-09-20	7.07–8.66 ^{a)}	44.9	0.6–0.7 ^{a)}
13	2016-09-20	0.6–0.7 ^{a)}	2848.1	0.28–0.35 ^{a)}
14	2016-09-18	1.32	3836	0.34
15	2017-01-11	0.33	1319	0.83
16	2017-01-11	0.83	367.5	0.62
17	2017-01-11	0.62	2745	0.18
18	2017-01-11	0.18	1723	1.08
19	2017-01-11	1.08	1358	0.22

a) 这4次连续爆发由于脉冲宽度小于仪器的分辨率, 没办法给出具体的脉冲宽度, 流量只能给出一个范围

可以解释FRB 121102的重复爆发行为.

在图2中画出相邻爆发的时间间隔和相邻爆发的后暴流量的关系图(数据见表1), 从图中可以看出, 分布比较发散, 不具有相关性. 对图2线性拟合得到的方差是-0.05, 也说明了这两者之间不存在比较好的相关性, 即时间间隔和相邻爆发的后暴流量不具有很好的相关性. 我们也对图1的点进行线性拟合, 得到的方差是0.19, 说明图1具有比图2更好的相关性.

4 讨论

对于包含一个磁化的白矮星和一个具有强偶极磁场的中子星的双星系统, 当白矮星充满洛希瓣的时候物质将会通过拉格朗日点转移. 但是, 由于角动量守恒的向外运动可能支配着由于引力辐射的向内运动, 因此白矮星在一次爆发之后可能被踢开, 当系统由于引力辐射重新变成半独立结构的时候才会出现下一次爆发. 而我们的焦点是研究两次相邻爆发之间的时间间隔 Δt 与相邻爆发的前暴流量 F 之间的关系. 按照该模型, 在红移已知的情况下, 可以得到它们之间的关系式(2)和(3), 即如果一次爆发过程所对应的物质转移越多, 则这次的爆发流量就越大, 相应的白矮星就被弹开得越远, 等待的时间就越长(见图1理论线). 观测上, 我们根据FRB 121102 41次重复爆发的数据推导出19个持续观测期间两次相邻爆发的时间间隔 Δt 和相邻爆发的前暴流量 F 的数据(见图1的星星). 我们发现, 除了2016年9月20日的两次相邻爆发外, 其他所有观测结果都处于3条理论线之间, 即观测和理论数据

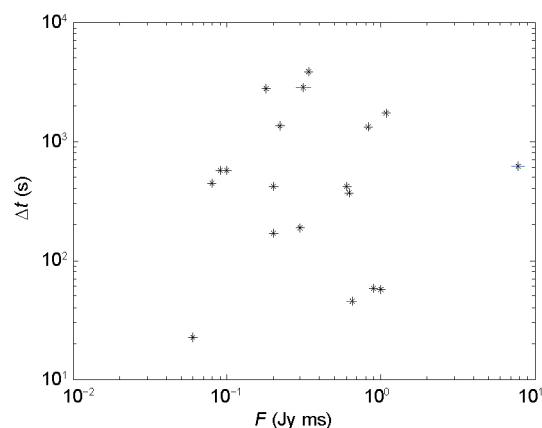


图2 相邻两次爆发的时间间隔和相邻爆发的后暴流量关系图

Figure 2 Relation between time interval of two adjacent bursts and the fluence of the burst after interval.

基本上是相符的, 这个结果意味着这样一个间歇式的洛希瓣外流机制可能可以解释FRB 121102的重复爆发行为. 而2016年9月20日的两次相邻爆发虽然不在理论线之内, 但是对比其他的18个流量数据, 发现这个暴流量明显比其他暴流量多一个数量级, 而且观测上, 这两次爆发的脉冲宽度都小于VLA的时间分辨率, 不能给出这两次爆发精确的脉冲宽度. 所以有理由怀疑这个点流量数据的准确性.

图2表示的是相邻爆发的时间间隔和相邻爆发的后暴流量之间的关系图, 发现这个分布很弥散, 不存在相关性. 根据这个模型的外流机制, 充满洛希瓣时吸积物质的量是一个随机的行为, 因此两次相邻爆发的时间间隔与相邻爆发的后暴流量之间不存在相关性是符合我们模型预期的.

参考文献

- 1 Thornton D, Stappers B, Bailes M, et al. A population of fast radio bursts at cosmological distances. *Science*, 2013, 341: 53–56, arXiv: 1307.1628
- 2 Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin. *Science*, 2007, 318: 777–780, arXiv: 0709.4301
- 3 Keane E F, Stappers B W, Kramer M, et al. On the origin of a highly dispersed coherent radio burst. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2012, 425: L71–L75, arXiv: 1206.4135
- 4 Burke-Spolaor S, Bannister K W. The galactic position dependence of fast radio bursts and the discovery of FRB011025. *Astrophys J*, 2014, 792: 19, arXiv: 1407.0400
- 5 Spitler L G, Cordes J M, Hessels J W T, et al. Fast radio burst discovered in the arecibo pulsar alpha survey. *Astrophys J*, 2014, 790: 101, arXiv: 1404.2934
- 6 Petroff E, Barr E D, Jameson A, et al. FRBCAT: The fast radio burst catalogue. *Publ Astron Soc Aust*, 2016, 33: e045, arXiv: 1601.03547
- 7 Petroff E, Bailes M, Barr E D, et al. A real-time fast radio burst: Polarization detection and multiwavelength follow-up. *Mon Not R Astron Soc*,

- 2015, 447: 246–255, arXiv: [1412.0342](#)
- 8 Ravi V, Shannon R M, Jameson A. A fast radio burst in the direction of the carina dwarf spheroidal galaxy. *Astrophys J*, 2015, 799: L5, arXiv: [1412.1599](#)
- 9 Champion D J, Petroff E, Kramer M, et al. Five new fast radio bursts from the HTRU high-latitude survey at Parkes: First evidence for two-component bursts. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2016, 460: L30–L34, arXiv: [1511.07746](#)
- 10 Keane E F, Johnston S, Bhandari S, et al. The host galaxy of a fast radio burst. *Nature*, 2016, 530: 453–456, arXiv: [1602.07477](#)
- 11 Ravi V, Shannon R M, Bailes M, et al. The magnetic field and turbulence of the cosmic web measured using a brilliant fast radio burst. *Science*, 2016, 354: 1249–1252, arXiv: [1611.05758](#)
- 12 Scholz P, Spitler L G, Hessels J W T, et al. The repeating fast radio burst FRB 121102: Multi-wavelength observations and additional bursts. *Astrophys J*, 2016, 833: 177, arXiv: [1603.08880](#)
- 13 Spitler L G, Scholz P, Hessels J W T, et al. A repeating fast radio burst. *Nature*, 2016, 531: 202–205, arXiv: [1603.00581](#)
- 14 Chatterjee S, Law C J, Wharton R S, et al. A direct localization of a fast radio burst and its host. *Nature*, 2017, 541: 58–61, arXiv: [1701.01098](#)
- 15 Masui K, Lin H H, Sievers J, et al. Dense magnetized plasma associated with a fast radio burst. *Nature*, 2015, 528: 523–525, arXiv: [1512.00529](#)
- 16 Marcote B, Paragi Z, Hessels J W T, et al. The repeating fast radio burst FRB 121102 as seen on milliarcsecond angular scales. *Astrophys J*, 2017, 834: L8, arXiv: [1701.01099](#)
- 17 Scholz P, Bogdanov S, Hessels J W T, et al. Simultaneous X-ray, gamma-ray, and radio observations of the repeating fast radio burst FRB 121102. *Astrophys J*, 2017, 846: 80
- 18 Tendulkar S P, Bassa C G, Cordes J M, et al. The host galaxy and redshift of the repeating fast radio burst FRB 121102. *Astrophys J*, 2017, 834: L7, arXiv: [1701.01100](#)
- 19 Kulkarni S R, Ofek E O, Neill J D, et al. Giant sparks at cosmological distances? *Astrophys J*, 2014, 797: 70, arXiv: [1402.4766](#)
- 20 Dai Z G, Wang J S, Wu X F, et al. Repeating fast radio bursts from highly magnetized pulsars traveling through asteroid belts. *Astrophys J*, 2016, 829: 27, arXiv: [1603.08207](#)
- 21 Connor L, Sievers J, Pen U L. Non-cosmological FRBs from young supernova remnant pulsars. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2016, 458: L19–L23, arXiv: [1505.05535](#)
- 22 Cordes J M, Wasserman I. Supergiant pulses from extragalactic neutron stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 457: 232–257, arXiv: [1501.00753](#)
- 23 Gu W M, Dong Y Z, Liu T, et al. A neutron star-white dwarf binary model for repeating fast radio burst 121102. *Astrophys J*, 2016, 823: L28, arXiv: [1604.05336](#)
- 24 Zhang B, Yan H. The internal-collision-induced magnetic reconnection and turbulence (ICMART) model of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2011, 726: 90, arXiv: [1011.1197](#)
- 25 King A. Gamma-ray burst models. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2007, 365: 1277–1280

Revisiting the neutron star-white dwarf binary model of FRB 121102

LIN YiQing^{1,2*}, CHENG ZaiJun^{1,2} & GAN LiangQin^{1,2}

¹ *Fujian Key Laboratory of Communication Network and Information Processing, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;*

² *School of Optoelectronic & Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China*

Fast radio bursts (FRBs) are intense radio pulses with millisecond-duration from the sky, the physical origin of which remains a mystery. A compact binary model consisting of a magnetic white dwarf and a neutron star with strong bipolar magnetic field may be responsible for the central engine of repeating FRBs. The scenario is that, when the white dwarf fills its Roche lobe, mass transfer will occur through the inner Lagrange point, and the white dwarf may be kicked away after a mass transfer process. For the only known repeating burst source, i.e., FRB 121102, 41 repeating events have been detected. With the known redshift and the 41 repeating bursts, we revisit the neutron star-white dwarf binary model and confirm that such an intermittent Roche-lobe overflow mechanism can be responsible for the observed repeating behavior of FRB 121102. In addition, no correlation exists between the time interval of two adjacent bursts and the fluence of the subsequent burst, which agrees with the Roche-lobe overflow mechanism.

accretion, accretion disks, gravitational radiation, magnetic reconnection, white dwarf

PACS: 97.10.GZ, 95.85.Sz, 96.86.Iv, 97.20.Rp

doi: [10.1360/SSPMA2017-00176](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00176)