

脉冲星星际闪烁的研究进展

艾力·伊沙木丁^{1,2,3} 吴鑫基^{2,3}

(1. 中国科学院国家天文台乌鲁木齐南山基地 乌鲁木齐 830011)

(2. 北京大学天文系 北京 100871)

(3. 中国科学院 — 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)

摘 要

综述了脉冲星星际闪烁观测研究的进展。对脉冲星星际闪烁现象、星际介质中电子密度涨落谱、散射等离子体在银河系中的分布等方面的最新研究结果作了介绍。星际闪烁现象和星际介质的深入理解,使脉冲星星际闪烁已成为研究诸如脉冲星辐射区结构和脉冲星速度等脉冲星本身性质的重要工具。

关键词 脉冲星 — 星际介质 — 散射

分类号 P145.6

1 引 言

1967 年,通过对行星际闪烁现象的观测研究,发现了流量呈周期性快变的致密射电源脉冲星。由于独特的辐射特性,脉冲星很快成为研究星际介质的重要工具^[1]。脉冲星发出的射电信号受到星际介质稀薄等离子体传输效应的强烈影响,这些影响主要包括三个方面:(1)脉冲星信号的星际色散现象,产生于星际介质自由电子对无线电波的色散作用;由观测得到的色散量(DM)所量度。(2)星际磁场对穿过它的脉冲星射电信号的法拉第旋转效应;观测量是法拉第旋转量(RM)。(3)星际介质电离相中电子密度的随机涨落对射电波的散射作用而产生的星际闪烁现象;表征散射强度大小的观测量是散射量(SM)。上述三个观测量反映了沿视线方向上星际介质三个不同方面的性质。在对星际介质的观测研究方面,脉冲星具有其它致密射电源无法比拟的优势。

射电波段脉冲星流量的变化分为脉冲星内秉变化和星际闪烁引起的变化。宽频带大幅度的单个脉冲之间的流量变化被认为是脉冲星辐射机制引起的内秉变化。将许多单个脉冲折叠得到平均轮廓,平滑了单个脉冲之间的强度变化后,脉冲星的流量还表现出时间尺度从几

分钟、几天甚至到几个月的变化。脉冲星在不同时间尺度上的流量变化,起因于不规则分布的星际等离子体对穿过其内的射电波的散射作用^[2~4]。星际介质对脉冲星信号的散射作用所产生的观测效应包括脉冲星的视角径的致宽和射电强度在时域和频域上的起伏。

脉冲星星际闪烁的研究是一个非常活跃的领域。最近的星际闪烁研究工作,主要致力于更好更全面地认识星际闪烁现象的观测特征;加深对星际介质电子密度涨落谱的理解;了解等离子体在银河系内的分布细节,充实对星际介质电离态的知识。另外,随着对星际闪烁现象的深入认识,脉冲星星际闪烁现象已经成为研究脉冲星本身某些重要性质的工具。这个领域最近比较活跃的研究方面包括:用脉冲星星际闪烁现象区分脉冲星内秉和闪烁引起的流量起伏,确定脉冲星的距离和横向速度大小;用脉冲星一些特殊的星际闪烁现象推断脉冲星辐射区的大小和位置等。

2 脉冲星星际闪烁现象

脉冲星发出的射电波的球面波前通过星际介质散射等离子体时,等离子体内电子密度的随机涨落引起介质对无线电波折射的折射指数的起伏,从而导致射电波振面相位的随机扰动。这个过程可由相位的结构函数来描述:

$$D_{\phi}(s) = \langle [\phi(r+s) - \phi(r)]^2 \rangle.$$

可以导出电场的有限消相关尺度

$$C_f(s) = \exp \left[-\frac{1}{2} D_{\phi}(s) \right], \quad D_{\phi}(s_0) = 1.$$

式中 s_0 是空间相干尺度。电场的这样一种分布等同于一个平面波方向上半宽(散射角)为 $\theta_d = 1/(k \cdot s_0)$ 的角分布谱 $B(\theta)$ (散射屏),这里 $k (= 2\pi/\lambda)$ 是辐射波数。射电波穿过散射介质传播到观测者的过程中,波的角度谱的各成份之间相互干涉,在观测平面上的空间和频率域上产生射电信号强度的随机起伏。这类起伏,一方面反映了星际介质中的随机湍流,该湍流导致观测平面上的闪烁图案不稳定;另一方面又反映了观测者、星际介质、脉冲星三者之间的相对速度,该速度使得由星际介质随机湍流引起变化的闪烁图案相对观测者又有移动。由于闪烁图案和观测者之间的相对运动,射电强度在空间上的变化反映为强度随时间的变化。闪烁图案和观测者之间的相对运动速度,称为脉冲星的闪烁速度(V_{iss})。多数脉冲星闪烁的主要原因是闪烁图案的运动而不是介质湍流引起的图案的不稳定性。

根据散射介质造成的射电波前相位扰动的大小,可区分两种类型的散射:弱散射($\phi_{rms} \ll 1$)和强散射($\phi_{rms} \gg 1$)。散射的强度随波长增长和观测者离开散射介质距离的增加而增强。许多已观测的脉冲星的距离均大于 100pc,观测频率低于 1GHz,它们从距离和观测频率上都落入强散射区域。在这样的空间和频率区域中,脉冲星星际闪烁主要分为两种类型,即衍射式闪烁(DISS)和折射式闪烁(RISS)^[5]。

2.1 衍射式闪烁

脉冲星发现后不久,人们就认识到脉冲星的流量在几分钟到几小时的时标上有变化^[1]。1969年,Rickett首先将这种流量起伏认定为产生于星际介质小空间尺度($\approx 10^7 \sim 10^9$ m)上的

电子密度涨落的衍射式闪烁^[2]。星际介质等离子体对射电波的散射作用致宽了脉冲星像,形成散射角度谱。从本质上说这种闪烁是散射角度谱的不同成份之间相互干涉而产生的衍射图案的变化。衍射式闪烁的强度用衍射闪烁指数 m_d 表征,从观测来看, $m_d \approx 1$ 。衍射式闪烁在时域和频域上的消相关尺度分别用 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 表示,它们的表达式如下:

$$\tau_d = \frac{s_d}{V_{iss}}, \quad s_d = s_0 = \frac{1}{k\theta_d} \quad \text{以及} \quad \Delta\nu_d = \frac{c}{\pi D\theta_d^2}.$$

其中, θ_d 是散射角; V_{iss} 是闪烁速度; k 是射电波数; c 是光速; D 是脉冲星距离。

对于邻近太阳的脉冲星,在米波波段上衍射式闪烁的闪烁时标 τ_d 和相干频率 $\Delta\nu_d$ 的典型值分别大约为 100s 和 100KHz。衍射式闪烁是星际介质电子密度不均匀性引起的脉冲星流量的一种短时标变化,这种快速变化是窄频带的。衍射式闪烁的一个相关效应是脉冲星脉冲轮廓的闪烁致宽现象^[6~8],这种致宽产生于散射效应造成的射电信号到达时间的延迟。脉冲致宽时间 τ_p 和相干频率 $\Delta\nu_d$ 成反比,它们之间有关系 $2\pi\Delta\nu_d\tau_p = C$, 其中 C 是依赖于星际散射介质性质的一个常数。

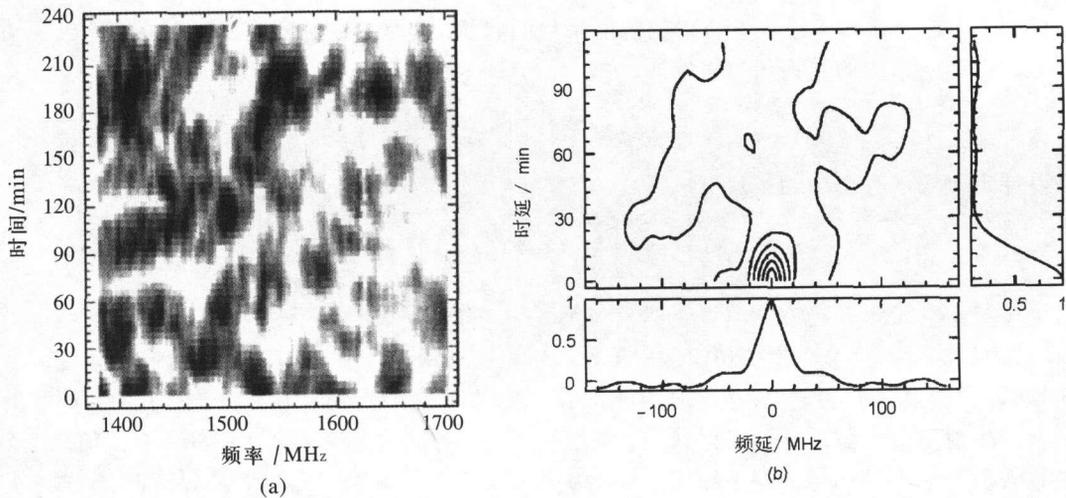


图1 国家天文台乌鲁木齐南山基地 25m 天线 18cm 波段观测的脉冲星 PSR J0329+5434 的二维动态谱和自相关函数^[9]

(a) 二维动态谱; (b) 二维动态谱做的自相关分析结果, 右边和底部的小框分别是时间和频率的一维自相关函数。

对脉冲星二维动态谱的观测是研究脉冲星衍射式星际闪烁最有效、最便利的观测方法。图1是国家天文台乌鲁木齐南山基地对脉冲星 PSR J0329+5434 观测的二维动态谱以及经处理得到的二维自相关函数^[9]。二维动态谱同时记录脉冲星射电强度在时间和频率上的变化,给出衍射式闪烁的重要观测参数 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 。目前国际上已观测得到 200 多颗脉冲星的衍射式闪烁参数^[10~12]。在理论方面,对脉冲星的衍射式闪烁现象已经作了大量细致的研究,对它的机制有了很好的了解,理论模型和观测符合得很好^[13~15]。以成功的理论模型作为基础,脉冲星衍射式闪烁的测量已经被大量用于对星际介质的分布和对脉冲星本身性质的研究中,使之成为确定脉冲星的距离、脉冲星辐射区尺度和脉冲星闪烁速度等的重要工具^[16~18]。

2.2 折射式闪烁及其存在的问题

1982年, Sieber^[3]首先发现脉冲星流量在几天至几个月时标上的长期变化与脉冲星的色散量有关, 从而表明这是一种星际介质的传输效应。1984年, Rickett等人^[4]对这一现象做了解释。这种脉冲星长时标的流量变化现象被称为折射式星际闪烁现象。对折射式闪烁的理论解释一直是这个领域的研究热点^[19~21]。折射式闪烁是由星际介质中大空间尺度($\approx 10^9 \sim 10^{11} \text{m}$)上的电子密度的不均匀性产生的, 它造成的脉冲星流量起伏产生于大于菲涅耳尺度的电子密度涨落对传输中射电波的聚焦和散焦作用。脉冲星的这类强度起伏在频率上是相当宽频带的, 在时间上是长时标的。和衍射式闪烁相比, 折射式闪烁引起的脉冲星观测流量变化的幅度较小。典型的折射式闪烁的闪烁指数 $m_r \approx 0.3$ 。在米波段, 近距脉冲星的观测显示折射式闪烁的闪烁时标 τ_r 的范围从几天到数月, 甚至到年。

折射式闪烁的观测主要是通过通过对脉冲星流量的长期监测来进行的, 观测得到脉冲星流量时变的结构函数。通过结构函数分析得到表征折射式闪烁的重要参数: 闪烁时标 τ_r 、闪烁指数 m_r 和结构函数的结构区幂指数 p 。图2是利用国家天文台乌鲁木齐南山基地25m天线在92cm波段监测的脉冲星 PSR B1508+55 的长期流量变化图, 以及其流量变化的结构函数。1990年, Rickett等人给出了Crab脉冲星为期300d的流量监测结果, 并建立了较完善的长期监测资料的分析研究方法^[22]。这些方法被延用至今。同年, Stinebring等人发表了25颗脉冲星在三个频段上43d的观测结果, 首次得出脉冲星厘米波段的内秉射电流量几乎不变化的结论^[23]。1993年, Gupta等人发表了9颗邻近脉冲星在74MHz上的长期监测结果^[24]。一年后, LaBrecque等人发表了20颗脉冲星在430MHz上时间跨度达4yr的长期监测结果^[25], 但他们的观测结果受到衍射式闪烁效应的污染。

1999年, Bhat等人研究了18颗脉冲星在327MHz上为期2yr的长期监测结果^[26], 深入讨论了折射式闪烁现象。2000年, Stinebring等人发表了对21颗脉冲星在610MHz上进行的为期5yr的监测结果^[27], 他们发现部分脉冲星的结构函数的结构部分有折断的现象, 折断点对应的空间尺度为 10^{11}m 。近年来, 我国也利用国内的设备进行脉冲星折射式闪烁的监测研究工作。从1999年3月开始, 乌鲁木齐天文台对由18颗脉冲星组成的一个监测样本, 用其25m射电望远镜在327MHz频段上开展了对流量长期监测的研究课题。综上所述, 至今只有

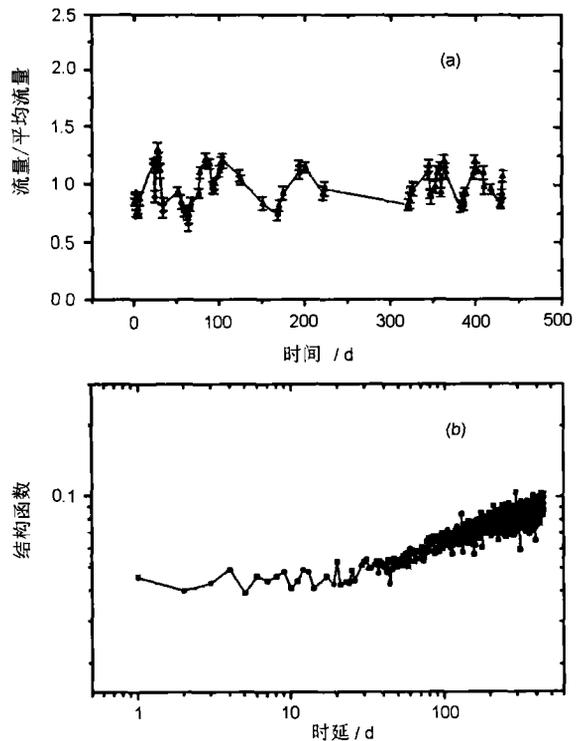


图2 国家天文台乌鲁木齐南山基地25m天线92cm波段观测的脉冲星 PSR B1508+55 的长期流量变化图 (a) 及其流量变化的结构函数图 (b)

70 颗左右的脉冲星被长期监测过, 许多观测的时间跨度远不够折射式闪烁研究的要求。这项监测工作是非常耗时的, 而且要求观测系统要有很好的长期稳定性。

除了造成脉冲星流量长时间尺度的起伏外, 由折射式闪烁引起的观测效应还包括: (1) 脉冲星散射像的角度游移 (由 VLBI 观测)^[28]; (2) 衍射式闪烁参数 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 的长期起伏^[26]; (3) 脉冲星二维动态谱中强度随时间 - 频率的慢漂移现象^[20]; (4) 相对罕见的由星际介质增强散射造成的脉冲星多重像事件^[29,30]。多重像事件在二维动态谱中表现为射电强度在时间和频率上的周期性条纹的出现和持续。

不同于衍射式闪烁, 折射式闪烁的理论解释仍然存在许多问题。观测表明, 折射式闪烁的闪烁时标和闪烁指数的观测值与其理论预测值之间存在明显的差异。在标准 Kolmogorov 谱模型下, 通过脉冲星衍射式闪烁的测量参数, 可以得到其折射式闪烁的时标和闪烁指数的理论预期值。研究显示, 有相当一部分脉冲星的折射闪烁指数的观测值大于理论预期值, 而闪烁时标的观测值小于理论预期值^[19,23,24]。这种差异对于邻近脉冲星更加明显。其中部分差异可通过引入电子密度湍流谱内截止空间尺度 ($\approx 10^7 \sim 10^8$ m) 给出解释^[24], 但还有许多实测的折射闪烁参数无法在 Kolmogorov 谱模型框架下得到说明^[27]。另外, 对于邻近脉冲星, 由折射式闪烁引起的衍射式闪烁参数 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 的起伏, 也出现与理论预期值的偏离; 在起伏的某些阶段, 衍射式闪烁指数的观测值明显大于在星际介质电子密度涨落符合 Kolmogorov 谱的情况下得到的理论预测值^[15]。

折射式闪烁的理论模型预言了脉冲星衍射式闪烁参数 τ_d 、 $\Delta\nu_d$ 和流量之间的相关性^[19]。最初对脉冲星 PSR B0329+54 观测研究证实这种相关是存在的^[31]。最近, 对一个由 20 颗脉冲星组成的更广泛的样本进行观测显示, 观测结果和折射式闪烁的理论预期值符合得不好。虽然一些观测发现 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 的变化存在着很好的相关性, 但是对于许多脉冲星来说, 流量和 τ_d 及 $\Delta\nu_d$ 之间并不存在折射闪烁理论所预言的相关性^[26], 这进一步显示出了现有理论存在的问题。

需要对折射式闪烁现象的观测特征有更全面的了解。现有理论模型也有待进一步改进和完善, 使之能够解释观测到的各种复杂的折射式闪烁现象。造成上述理论和观测之间存在诸多差异的原因中, 缺乏对星际介质电子密度涨落空间功率谱形状细节上的准确认识显得尤为主要。一些较大的闪烁指数很可能是由比 Kolmogorov 湍流谱更陡的电子密度涨落谱产生的。

3 星际散射介质性质方面的研究热点

3.1 对电子密度涨落谱的认识

3.1.1 电子密度涨落谱

对脉冲星星际闪烁现象的观测研究可揭示星际散射介质的性质, 其中最重要的性质包括星际介质电子密度起伏空间功率谱的形状和银河系中散射等离子体的强度分布。

目前认为, 星际介质电子密度涨落谱符合一个幂率谱形式:

$$P(k) = C_n^2(z)k^{-\alpha},$$

其中 $k_{\text{out}} \ll k \ll k_{\text{inn}}$; α 是幂率谱指数; $C_n^2(z)$ 是表征沿视线方向上星际介质自由电子散

射强度的一个量, $C_n^2(z) \propto \langle \Delta n_e^2 \rangle$ ($\langle \Delta n_e^2 \rangle$ 为电子密度涨落的统计平均值), 是银河系中位置 z 的函数; k 是电子密度涨落的空间波数; k_{inn} 和 k_{out} 分别是星际介质电子密度涨落幂率谱的内、外截止波数。

不同的幂率谱指数 α 值所反映的星际介质的物理性质有很大的差别。例如, 对于一个 Kolmogorov 湍流谱 ($\alpha = 11/3$), 意味着介质的湍动能从大尺度向小尺度级联传递并最终耗散成热量; 而较陡的幂率谱 ($\alpha \approx 4$), 可以由星际分子云集团非连续的相互重叠产生 (如激波堆积), 并不一定要求存在物理意义上的湍流^[5,32]。较陡的电子密度空间涨落谱描述了等离子体空间分布的不规则性。对电子密度谱形式的准确认识, 是建立正确的星际闪烁理论模型和理解星际介质等离子体物理性质的重要基础。

3.1.2 观测对电子密度涨落谱的限制

多数情况下电子密度涨落谱的谱指数接近 Kolmogorov 值 ($\alpha = 11/3$)^[33]。但是近年来在幂率谱谱指数的确切值和幂率谱成立的波数范围 (谱的截断性质) 等方面, 出现了很多观测上的矛盾和理论上的争论。

有相当一部分观测结果支持电子密度涨落谱为纯 Kolmogorov 湍流谱。它们是 (1) 脉冲星衍射式闪烁的相干频率和闪烁时标的观测结果与 $\alpha = 11/3$ 的 Kolmogorov 湍流谱符合得非常好, 谱成立的电子密度涨落的空间尺度范围 $\approx 10^6 \sim 10^8 \text{ m}$ ^[34,35]。(2) Smith 等人^[36] 和 Bhat 等人^[15] 对脉冲星衍射式闪烁和折射式闪烁的观测结果进行研究给出谱指数 $\alpha \approx 11/3$ (但是对于近距离脉冲星得到的观测研究结果显示 $\alpha > 11/3$), 涨落谱的空间尺度范围 $\approx 10^7 \sim 10^{11} \text{ m}$ 。(3) 对脉冲星 PSR B1933+16 散射屏的 VLBI 观测给出 $\alpha = 3.52 \pm 0.13$, 满足谱的空间尺度范围 $\approx 10^6 \sim 10^7 \text{ m}$ ^[37]。(4) W49 和 SgrB2 的水脉泽的 VLBI 观测结果得到 $\alpha = 3.67$, 满足该谱指数的电子密度涨落空间尺度上限达到 10^{11} m ^[38]。

也有很多观测证据显示星际介质电子密度涨落谱不符合纯 Kolmogorov 湍流谱。它们是 (1) 脉冲星流量的增强性折射式闪烁变化^[24] 和衍射式闪烁参数 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 的较强起伏^[15,25], 要求 $\alpha > 11/3$ 或涨落谱具有大的内截止空间尺度 ($\approx 10^7 \sim 10^8 \text{ m}$)。(2) 脉冲星色散量 (DM) 的长期监测结果显示 (α) = 3.84 ± 0.02 , 涨落的空间尺度 $\approx 10^{11} \sim 10^{13} \text{ m}$ ^[39]。(3) 脉冲星二维动态谱中观测到的强度斜纹持续漂移现象的解释^[15,20] (该现象持续时间大于折射式闪烁时标) 要求 $\alpha > 11/3$, 或者电子密度分布存在离散的结构, 这些结构的空间尺度 $\approx 10^{12} \sim 10^{13} \text{ m}$ 。(4) 由极端散射引起的脉冲星多重像事件^[29,30] (二维动态谱上出现的周期性条纹), 以及从脉冲到达时间的观测中发现的极端散射事件 (ESEs) 等^[40], 均显示散射结构空间尺度 $\approx 10^{12} \text{ m}$, 不符合 Kolmogorov 湍流谱。

虽然上述观测研究证据都不是结论性的, 但不难发现所有支持较陡的谱的证据都对应于大的电子密度涨落空间尺度。满足 Kolmogorov 谱的情况适用于小的空间尺度 (空间尺度上限达 10^{11} m); 在较大空间尺度上 ($10^{11} \sim 10^{14} \text{ m}$), 若要满足 Kolmogorov 谱需要有更多的附加能量, 否则需用更陡的谱来描述 (谱指数 $\alpha \approx 4$)。目前的模型认为^[32,41], 在一个普遍的电子密度湍动背景上, 随机散布着诸如激波或 H II 区那样的离散的等离子体结构, 造成电子密度涨落谱在较高的空间波数上符合 Kolmogorov 谱, 在较低的空间波数 (对应于典型的离散等离子体的空间尺度) 上变得更陡。这个模型能够解释罕见的极端散射事件 (ESEs)。但是, 在低银纬普遍存在的电子增强散射区方向的观测发现, 这些方向的电子密度涨落谱在很宽的波数范

围内严格地符合 Kolmogorov 湍流谱, 在低波数处涨落谱并没有变得较陡。电子密度涨落谱上述细节问题的解决在今后的研究工作中将显得非常重要。

3.2 太阳邻近区散射等离子体的分布

研究大量不同方向、不同距离处的脉冲星的散射量 ($SM \equiv \int C_n^2(z) dz$), 可以对散射等离子体在银河系中的分布模型给出限制。早期的银河系散射等离子体分布模型, 是由增强散射物质簇分布于由均匀散射物质组成的轴对称盘构成^[42]。Taylor 和 Cordes (1993) 对这一模型做了重要改进^[43], 他们的模型包含了诸如银河系旋臂那样的非连续散射增强结构。这个模型仍是目前确定脉冲星距离的重要理论基础。

然而, 上述模型对解释离太阳 1kpc 内的邻近区域的星际介质的散射效应还是显得过于简单。这种局域星际介质散射异常的第一个观测证据来自对 PSR B0950+08 的观测^[44], 观测发现该脉冲星的 C_n^2 比其它邻近脉冲星小 5~10 倍。另外, 对极端散射事件的观测进一步揭示了星际散射介质具有异常的分布。目前认为极端散射事件是由尺度为天文单位量级的高密度电离气体区横穿视线方向对射电波强烈散射形成的, 是高密散射介质对穿过它的射电波的透镜效应。研究表明这个区域的电子密度必须非常高 (密度约为 10^3 cm^{-3})。在温度为 10^4 K 时, 它的气体内部压力是典型星际介质压力的 10^3 倍。这样的区域如何长期稳定存在是个问题^[45,46]。Taylor 和 Cordes 的模型有待进一步改进。

几年来, 对太阳系附近几百秒差距内星际介质分布的研究有很大的进展。X 射线、紫外和光学波段的观测都证实, 太阳系处于一个尺度约为 100pc 的低介质密度的 X 射线发射腔体内^[47,48]。这个腔体被称为局域泡 (Local Bubble), 目前普遍认为它是大约 10^7 yr 前超新星爆发的遗迹。最近 Bhat 等人仔细研究了 20 颗邻近太阳的脉冲星的散射性质, 发现了太阳局域星际介质散射等离子体的非均匀分布的明确观测证据^[49]。他们发现脉冲星闪烁带宽随距离的减少而增加, 进而推断出增强散射物质分布在一个大的椭球壳层上, 壳层上电子密度起伏的幅度比壳内和壳外大得多, 且壳层在形态、大小、位置上非常类似于太阳附近星际介质构成的低密度局域泡的边界。上述工作提出太阳附近大尺度电离介质分布不均匀性的结论, 在邻近区星际介质分布的研究方面迈出了重要的一步。随后对 PSR B1133+16 的多重像事件的观测研究结果^[57] 以及对 PSR B0950+08 和 PSR B0919+06 的 VLBI 观测结果^[50,58] 都支持了局域泡边界增强散射介质模型。

但是还有一些脉冲星闪烁所显示的星际介质的强散射水平超过了局域泡模型可以给出的解释。Bhat 提出在射电环型泡 I (Loop I Bubble)^[51] 的边界壳层存在增强散射介质的分布, 这样一来这些脉冲星的散射异常行为就可以得到解释^[52]。环型泡 I 被认为是约 10^6 yr 前恒星形成所激发的一个膨胀着的超级星际介质泡, 是太阳邻近区射电观测发现的 4 个大尺度圆形分布的射电连续发射区中最大和最亮的一个。但是, Britton 等人认为造成局域脉冲星异常闪烁行为的增强散射物质分布在脉冲星附近, 可能是弓激波或者是脉冲星附近的某种介质壳层^[53]。最近 Minter 通过进一步研究提出 Bhat 的局域星际介质分布模型存在问题, 同时也指出弓激波不可能产生观测到的增强闪烁效应^[54]。

显然, 这个领域的研究工作最近已成为一个热点。对邻近太阳局域星际介质散射性质的进一步研究, 将有助于解决诸如脉冲星异常折射闪烁现象、电子密度涨落谱确切形状以及脉冲星距离确定等方面存在的许多悬而未决的问题。

4 星际闪烁观测已成为研究脉冲星的重要工具

4.1 利用星际闪烁现象分辨脉冲星射电发射区

利用脉冲星星际闪烁现象可以确定脉冲星辐射区的尺度和高度以及脉冲星辐射区结构随脉冲经度的变化。1983年, Cordes 等人尝试利用脉冲星星际闪烁潜在的极高的空间分辨率去分辨脉冲星射电发射区^[55]。他们通过仔细比较脉冲星脉冲不同相位上的衍射闪烁图样的移动, 给出了脉冲星辐射区尺度的上限。另一种后来被采用的分辨脉冲星辐射区的方法是利用罕见的星际介质强散射引起的多重像事件。多重像事件发生时, 强折射效应将脉冲星像分离为两个或多个很好的次级像, 分离角远大于散射角度谱的半宽(散射角) θ_d 。由这几个分开的像产生的干涉图样在二维动态谱上形成周期性的条纹。二维动态谱由各次级像分列的图案和次级像间干涉产生的交叉振荡项结合重叠生成, 其中振荡项相当于一个极长基线(几个天文单位)干涉仪上获得的条纹。这样多重像事件就成为基线长度足够分辨脉冲星致密发射区的空间干涉仪, 被称为星际闪烁干涉仪^[56]。多重像事件方法要比最初采用的衍射式闪烁方法具有更高的空间分辨率。

最早是对脉冲星 PSR B1133+16 和 PSR B1237+25 的发射区尺度用强折射效应进行了确定, 给出了脉冲星射电发射区横向延伸尺度 $\Delta_s \approx 10^6 \sim 10^7 \text{m}$, 再用极冠几何模型得到了脉冲星辐射区高度大约相当于该星光速圆柱半径(R_{LC})的结论^[56]。早期测量结果比应用诸如脉冲星周期脉冲宽度关系以及多频到达时间观测等其它技术取得的辐射区高度的估计值大了 1~2 个数量级。

近几年, 通过对星际闪烁效应的观测, 已对脉冲星发射区的尺度和高度做了修正。最近得到了脉冲星 PSR B1133+16 高质量的多重像事件的观测资料^[57], 给出该星射电发射区横向尺度的测量值 $\Delta_s > 3 \times 10^5 \text{m}$, 在极冠几何模型下的辐射区高度 $\geq 0.05 R_{LC}$ 。所得到的结果和 1989 年 Smirnova 等人在 102MHz 得到的结果($\Delta_s \approx 10^5 \text{m}$)^[59] 相吻合。特别值得注意的是, 这些由脉冲星射电辐射区结构的星际闪烁观测获得的结论, 得到了脉冲星闪烁图案的 VLBI 观测的支持。最近, 对 VELA 脉冲星的 VLBI 观测显示该星的发射区尺度大约是 440km^[60]。

星际闪烁观测已成为研究脉冲星发射区结构非常重要的方法。随着对闪烁模型的进一步改进和脉冲星多重像事件监测资料的累计, 这项观测技术将对脉冲星辐射区的尺度和高度给出更强的限制。

4.2 星际闪烁现象和脉冲星速度

脉冲星是银河系中已知的速度弥散最大的天体, 自行速度从每秒几十公里到几千公里, 平均速度达 450km/s。大样本脉冲星速度的确定对研究脉冲星的诞生、运动学演化以及脉冲星在银河系中的分布等方面的性质是非常重要的。由观测获得脉冲星速度的方法主要有三种: (1) 达到时间测量法^[61]; (2) 射电干涉测量法^[50,62,63]; (3) 星际闪烁测量法^[9,20]。达到时间测量法是先确定脉冲星位置, 然后与过去的位置进行比较得到脉冲星的自行, 再结合距离来确定脉冲星的自行速度。这种方法至少需要一年时间的观测才能精确地得到脉冲星的位置, 它比射电干涉测量法所需要的设备简单得多, 但要求脉冲星守时性噪声不能太大。射电干涉测量法是用长基线观测确定脉冲星的当前位置, 与过去的位置进行比较并结合距离得到脉冲星的自行速度。这种方法观测设备复杂, 相对其它方法来说, 只能确定较近、较强、大自行脉

冲星的速度。星际闪烁测量法是先确定脉冲星的闪烁速度,进而得到脉冲星的自行速度。这种方法具有观测设备简单、观测所需时间短的优势,可在短时间内确定大量脉冲星的横向速度大小,对确定远距离脉冲星的速度尤为有效。但目前,星际闪烁测量法只能给出脉冲星横向速度的数值大小,而不能方便地确定其方向。

闪烁速度 (V_{iss}) 是闪烁图案和观测者之间的相对速度,可通过测量脉冲星衍射式闪烁参数得到。这个速度实际上是脉冲星、观测者以及星际介质中散射物质运动的一个合成速度。按照星际闪烁理论,脉冲星闪烁速度 V_{iss} 与衍射式闪烁参数 τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 的关系如下^[14]:

$$V_{\text{iss}} = A_{\text{iss}} \frac{\sqrt{D\Delta\nu_d}}{\nu\tau_d}, \quad A_{\text{iss}} = \left(\frac{c}{4\pi C_1} \right)^{\frac{1}{2}} W_i.$$

其中 D 是脉冲星距离,单位 kpc; ν 是观测频率,单位 GHz; c 是光速; τ_d 和 $\Delta\nu_d$ 分别为闪烁时间和相干频率; A_{iss} 决定于与视线方向上散射介质分布有关的参量 C_1 和 W_i 。对于符合 Kolmogorov 谱的均匀分布的湍动介质, Guopta 等人给出 $A_{\text{iss}} = 3.85 \times 10^4$ ^[20]。

至今已经观测了 100 多颗脉冲星的闪烁速度,其中有 17 颗毫秒脉冲星^[10,12,18,64]。观测证实脉冲星本身的大自行速度 (V_{pm}) 对其闪烁速度有决定性的影响^[65]。许多观测研究的结果显示, V_{iss} 和 V_{pm} 之间存在很好的相关性,大部分脉冲星的这两个速度值相差不大,所以利用闪烁速度能很好地估计脉冲星的自行速度大小^[9,18,64]。Johnston 等人^[12] 以及 Gothoskar 等人^[65] 分别通过对脉冲星闪烁速度的测量得出毫秒脉冲星速度明显小于正常脉冲星速度的重要结论。

但观测发现,有些脉冲星 V_{iss} 和 V_{pm} 值之间存在大的差异,目前认为这是由于沿某些脉冲星视线方向存在不连续的增强散射星际介质结构造成的^[18,64]。对脉冲星 V_{iss} 和 V_{pm} 之间数值差异的研究将成为研究散射介质在银河系中分布的一个重要方法。对在视线方向上散射介质的任意分布情况, Cordes 等人^[14] 以及 Deshpande 等人^[66] 已经初步建立了脉冲星闪烁速度和自行速度之间的关系。通过对 V_{iss} 和 V_{pm} 之间关系的进一步了解,脉冲星闪烁速度的观测研究将成为研究脉冲星自行和银河系散射物质分布的重要方法之一。

参 考 文 献

- 1 Scheuer P A G. Nature, 1968, 218: 920
- 2 Rickett B J. Nature, 1969, 221: 158
- 3 Sieber W. Astron. Astrophys., 1982, 113: 331
- 4 Rickett B J, Coles W A, Bourgois G. Astron. Astrophys., 1984, 134: 390
- 5 Rickett B J. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1990, 28: 561
- 6 Britton M C, Gwinn C R, Ojeda M J. Ap. J., 1998, 501: 101
- 7 Lambert H C, Rickett B J. Ap. J., 1999, 517: 299
- 8 Löhmer O, Kramer M, Mitra D et al. Ap. J., 2001, 562: 157
- 9 Wang N, Wu X J, Manchester R N et al. CJAA, 2001, 1: 421
- 10 Cordes J M. Ap. J., 1986, 311: 183
- 11 Taylor J H, Manchester R N, Lyne A G. Ap. J. Suppl. Ser., 1993, 88: 529
- 12 Johnston S, Nicastro L, Koribalski B. M.N.R.A.S., 1998, 297: 108
- 13 Malodeev V M, Shishov V I, Siber W et al. Astron. Astrophys., 1996, 308: 180
- 14 Cordes J M, Rickett B J. Ap. J., 1998, 507: 846

- 15 Bhat N D R, Rao A P, Gupta Y. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1999, 121: 483
- 16 Smirnova T V, Shishov V I. *Astrophys. Space Sci.*, 2001, 278: 71
- 17 Lyutikov M. *Astrophys. Space Sci.*, 2001, 278: 81
- 18 Nicastro L, Nigro F, D'Amico N *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2001, 368: 1055
- 19 Romani R W, Narayan R, Blandford R G. *M.N.R.A.S.*, 1986, 220: 739
- 20 Gupta Y, Rickett B J, Lyne A G. *M.N.R.A.S.*, 1994, 269: 1035
- 21 钱善璿, 张喜镇. *天文学报*, 1996, 37: 421
- 22 Rickett B J, Lyne A G. *M.N.R.A.S.*, 1990, 244: 68
- 23 Stinebring D R, Condon J J. *Ap. J.*, 1990, 352: 207
- 24 Gupta Y, Rickett B J, Coles W A. *Ap. J.*, 1993, 403: 183
- 25 Labrecque D R, Rankin J M, Cordes J M. *A. J.*, 1994, 108: 1854
- 26 Bhat N D R, Rao A P, Gupta Y. *Ap. J.*, 1999, 514: 272
- 27 Stinebring D R, Smirnova T V, Hankins T H *et al.* *Ap. J.*, 2000, 539: 300
- 28 Lazio T, Joseph W, Fey A L. *Ap. J.*, 2001, 560: 698
- 29 Rickett B J, Lyne A G, Gupta Y. *M.N.R.A.S.*, 1997, 287: 739
- 30 Stinebring D R, McLaughlin M A, Cordes J M *et al.* *Ap. J.*, 2001, 549: 97
- 31 Stinebring D R, Faison M D, McKinnon M M. *Ap. J.*, 1996, 460: 460
- 32 Lambert H C, Rickett B J. *Ap. J.*, 2000, 531: 883
- 33 Armstrong J W, Rickett B J, Spangler S R. *Ap. J.*, 1995, 443: 209
- 34 Cordes J M, Weisberg J M, Boriakoff V. *Ap. J.*, 1985, 288: 221
- 35 Cordes J M, Wolszczan A, Dewey R J *et al.* *Ap. J.*, 1990, 329: 245
- 36 Smith F G, Wright N C. *M.N.R.A.S.*, 1985, 214: 97
- 37 Gwinn C R, Bartel N, Cordes J M *et al.* *Ap. J.*, 1988, 334: 13
- 38 Gwinn C R, Moran J M, Reid M J. In: Cordes J M, Rickett B J, Backer D C eds. *Proc. of the AIP Conf.*, New York: American Institute of Physics, 1988: 129
- 39 Philips J A, Wolszczan A. *Ap. J.*, 1991, 382: 27
- 40 Lestrade J, Rickett B J, Cognard I. *Astron. Astrophys.*, 1998, 334: 1068
- 41 Cordes J M, Lazio T, Joseph W. *Ap. J.*, 2001, 549: 997
- 42 Cordes J M, Weisberg J M, Frail D A *et al.* *Nature*, 1991, 359: 121
- 43 Taylor J H, Cordes J M. *Ap. J.*, 1993, 411: 674
- 44 Philips J A, Clegg A W. *Nature*, 1992, 360: 137
- 45 Walker M A, Wardle M. *Ap. J.*, 1998, 498: 125
- 46 Walker M A. *ASP Conf. Ser.*, 2000, 202: 561
- 47 Cox D P, Reynolds R J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1987, 25: 303
- 48 McCammon D, Sanders W T. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1990, 28: 657
- 49 Bhat N D R, Gupta Y, Rao A P. *Ap. J.*, 1998, 500: 262
- 50 Brisken W F, Benson J M, Beasley A J *et al.* *Ap. J.*, 2000, 541: 959
- 51 Haslam C G, Khan F D, Meaburn J. *Astron. Astrophys.*, 1971, 12: 388
- 52 Bhat N D R, Gupta Y. 2001, preprint (astro-ph/0111034)
- 53 Britton M C, Gwinn C R, Ojeda M J. *Ap. J.*, 1998, 501: 101
- 54 Minter A. *ASP Conf. Ser.*, 2000, 202: 549
- 55 Cordes J M, Weisberg J M, Boriakoff V. *Ap. J.*, 1983, 268: 370
- 56 Wolszczan A, Cordes J M. *Ap. J.*, 1987, 320: 35
- 57 Gupta Y, Bhat N D R, Rao A P. *Ap. J.*, 1999, 520: 180
- 58 Chatterjee S, Cordes J M, Lazio T J W *et al.* *Ap. J.*, 2001, 550: 287
- 59 Smirnova T V, Shishov V I. *Soviet Ast.*, 1989, 15: 191
- 60 Gwinn C R, Britton M C, Reynolds J E *et al.* *Ap. J.*, 2000, 531: 902
- 61 Wang N, Manchester R N, Zhang J *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2001, 328: 855

- 62 Fomalont E B, Goss W M, Manchester R N et al. M.N.R.A.S., 1997, 286: 81
63 Toscano M, Sandhu J S, Bailes M et al. M.N.R.A.S., 1999, 307: 925
64 Gothoskar P B, Gupta Y. Ap. J., 2000, 531: 345
65 Gupta Y. Ap. J., 1995, 451: 717
66 Deshpande A A, Ramachandran R. M.N.R.A.S., 1998, 300: 577

Progress in the Studies of Interstellar Scintillation of Pulsars

Esamdin Ali^{1,2,3} Wu Xinji^{2,3}

(1. Urumqi Astronomical Observatory, NAO-CAS, Urumqi 830011)

(2. Department of Astronomy, Peking University, Beijing 100871)

(3. CAS-PKU Joint Beijing Astrophysics Center, Beijing 100871)

Abstract

Current understanding of interstellar scintillation of pulsars is reviewed in this paper. At the beginning, the basic concepts are described and the main observational features are summarized. Some new results related to the understanding of refractive scintillation effects and the nature of the spectrum of electron density fluctuations in the interstellar medium are presented. The progress on determining distribution of scattering plasma in the galaxy, resolving pulsar emission region and measuring pulsar velocities based on interstellar scintillation are also described.

Key words pulsar—interstellar medium—scattering