

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.03

低频河外射电点源样本综述

林锦扬¹, 朱正浩², 马任意¹

(1. 厦门大学 物理科学与技术学院, 厦门 361005; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 低频射电点源在天文学研究具有重要意义, 它既对研究星系演化历史起重要作用, 又是再电离时期信号探测的主要前景干扰源。低频观测对研究和理解射电点源的性质至关重要。介绍了射电点源的辐射机制以及当前低频射电点源观测目录, 这些目录对射电点源的分类、红移分布、流量分布、光度函数及光谱指数等研究具有重要作用。此外, 还详细介绍了主要的射电点源模拟软件、其模拟方法及其生成的射电点源目录。这些软件和数据对于深入了解射电点源的统计性质和宇宙学意义具有重要价值。

关键词: 射电星系; 活动星系核; 样本

中图分类号: P161.4 **文献标识码:** A

1 引 言

射电天文学作为天文学的重要分支, 主要通过观测宇宙中射电波段的辐射来研究天体和宇宙现象。受到大气窗口的限制, 我们观测的频率范围为 10 MHz~1 THz。尽管大气窗口允许观测的频率低至 10 MHz, 然而受技术和条件的限制, 曾经主要的射电研究和观测集中在高于 1 GHz 的波段^[1-4]。相比中高频波段, 低频波段在一些方面更具优势, 如探测来自再电离时期 (Epoch of Reionization, EoR) 的中性氢 21 cm 辐射, 该信号经显著红移后出现在 50~200 MHz 的低频射电波段。在此波段开展 EoR 信号的探测实验具有重要的意义^[5-8]。此外, 较低频率下的辐射波长更长, 由于其受尘埃影响小, 所以更容易观测到星系核心区域。低频波段的辐射由同步辐射主导, 即高能带电粒子在磁场中加速运动而产生的辐射。而同步辐射在低频波段更明亮且寿命更长, 因此在低频下更利于星系团、超星系团及大尺度纤维结构的弥散射电辐射的探测和研究^[9-11]。此外, 由于多种等离子体效应 (如散射、色散和 Faraday 旋转) 的强度随频率 ν^{-2} 变化, 因此低频波段更适合研究星际磁场分布、电子密度

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-05-23

资助项目: 平方公里阵 (2020SKA0110102); 国家自然科学基金 (U2038108, 12133008, 12203085)

通讯作者: 朱正浩, zhenghao@shao.ac.cn; 马任意, ryma@xmu.edu.cn

等^[12-14]。低频射电望远镜通常具有更大的视场,可较大提升巡天的速度,更有利于脉冲星、暂现源的寻找^[15, 16]。

在低频射电观测和研究中,河外射电点源的观测和研究是极为重要的组成部分。要了解星系形成和演化的过程,我们需要理解重子对恒星形成的驱动和抑制机制。在这方面,射电观测提供了一个重要窗口,因为它直接展示了三种重要的天体群体:恒星形成星系 (star-forming galaxy, SFG)、射电强活动星系核 (radio-loud active galactic nucleus, RLAGN) 和射电宁静活动星系核 (radio-quiet active galactic nuclei, RQ-AGN)^[17]。这些射电点源同时也是再电离信号探测时重要的前景干扰源,其在 150 MHz 处贡献了总前景干扰的 27%^[18]。在功率谱的小角尺度区域,河外点源更是成为最强、最难处理的前景成分^[19-21]。射电点源在干涉阵观测的校准中也十分重要,流量校准通常是通过观测一个已知流量密度的亮点源,并将天线的增益解传递到目标源的数据中来实现。校准源是从具有已知精确流量密度的源中选择的,并且这些源的流量密度随时间变化缓慢。在北半球,3C48、3C138、3C147 和 3C286 通常被用作校准源^[22]。而对于相位校准,如受到电离层的影响,则需要通过频繁地切换附近的校准源进行校准,而目标源与校准源的距离上限受到相干时间和同位相面大小的影响^[22]。

随着观测技术的发展和望远镜技术的进步,我们观测到的射电点源越来越多。目前低频射电点源样本主要有:MWA (Murchison Widefield Array) 射电望远镜的银河和河外星系全天巡天 (Galactic and Extragalactic All-sky MWA Survey, GLEAM) 的低频射电点源目录^[23-25],北天低频阵列 LOFAR (LOW Frequency ARray) 2 m 全天巡天项目 (LOFAR Two-metre Sky Survey, LoTSS) 的低频射电点源目录^[26-31], 21CMA 观测的河外点源目录,以及一部分通过与光学红外星系目录进行交叉匹配得到的低频射电点源目录^[32-39]。这些点源目录为我们研究射电点源的各类性质 (如河外射电点源的射电谱、红移分布、光度函数等) 提供了重要支撑。

在河外点源的研究中,射电点源天空模拟是一种有用的工具,如用来评估射电调查的完整性,或者预测未来的巡天中将观测到的射电源的数量。而目前主要的模拟工具有 SKADS (Square Kilometre Array Design Study)^[40, 41] 和 T-RECS (Tiered Radio Extragalactic Continuum Simulation)^[42, 43]。为了保证生成的射电点源天空与真实观测一致,射电点源模拟程序在设计时会根据大量的射电点源观测目录提供的信息进行建模。

本文系统介绍了射电点源及其目录,为射电点源的研究提供支撑。第 2 章主要介绍射电点源的辐射机制;第 3 章对低频射电点源观测目录进行介绍;第 4 章介绍射电点源的模拟软件以及它们生成的射电点源目录;第 5 章对本文进行了总结,以及对未来射电点源观测和模拟进行展望。

2 射电点源辐射机制

在低频射电波段,河外点源主要的辐射机制是同步辐射,而超新星遗迹和与超大质量黑洞相关的过程是星系中同步辐射的主要来源^[44]。同步辐射是带电粒子以相对论速度在磁场中旋转时产生的辐射,对于相对论电子,由于多普勒效应的影响,其辐射具有显著的方向

性。辐射集中以电子螺旋运动轨迹切向速度方向为轴线, 半张角为 $\theta \approx \gamma^{-1}$ 的狭小锥角中, 其中 γ 为洛伦兹因子, 代表粒子能量与该粒子静能之比。在这里我们直接给出单个相对论电子的同步辐射的谱分布^[22, 45], 具体推导可参考文献 [22] 中 2.7 节的内容。

$$P(\nu)d\nu = \frac{\sqrt{3}e^3 B \sin \alpha}{mc^2} F(x)d\nu, \quad (1)$$

其中, ν 为对应频率, B 为对应磁场强度, α 为电子螺旋运动的俯仰角。函数 $F(x)$ 包含了频谱的形状, 其中涉及到修正阶数为 $\frac{5}{3}$ 的贝塞尔函数的积分: $F(x) \equiv x \int_x^\infty K_{5/3}(\xi) d\xi$ 。考虑到同步辐射的偏振特性, 将辐射分解为垂直和平行于磁场的分量, 则涉及函数 $G(x) \equiv x \int_x^\infty K_{2/3}(\xi) d\xi$, 两个偏振分量的功率谱为:

$$P_{\perp, \parallel}(\nu) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{e^3 B \sin \alpha}{mc^2} \begin{cases} F(x) + G(x) & (\perp B) \\ F(x) - G(x) & (\parallel B) \end{cases}, \quad (2)$$

同步辐射的线偏振度为:

$$\Pi(\nu) = \left(\frac{P_{\perp}(\nu) - P_{\parallel}(\nu)}{P_{\perp}(\nu) + P_{\parallel}(\nu)} \right) = \frac{G(x)}{F(x)}. \quad (3)$$

对于大多数情况, 同步辐射的线偏振度在 0.70~0.75 之间, 因此强烈的线偏振是同步辐射的特点^[22]。

我们考虑相对论性气体, 其能量数密度分布为 N_E , 并假设该气体具有各向同性的俯仰角分布: $dN_E = CE^{-p}dE$, 其中, p 为谱指数, C 为常数。宇宙射线的能量分布, 以及许多其他同步辐射源中辐射电子的能量分布都是幂律形式。将电子能量分布与单个电子的同步辐射谱进行卷积。采用幂律分布和各向同性的俯仰角分布的谱发射率(单位体积、单位立体角、单位频率间隔的辐射功率)可以写成闭合形式^[46]。通常使用函数 $a(p)$ (详见表 1) 来简化谱发射率对幂律谱指数的依赖关系。对于射电天文学中常遇到的典型情况, $a(p)$ 的数量级一般为 10^{-1} 。则对于谱指数为 p 、具有各向同性俯仰角分布、幂律分布电子的谱发射率为^[22]:

$$j_{\nu} = \frac{e^3}{mc^2} \left(\frac{3e}{4\pi m^3 c^5} \right)^{(p-1)/2} CB^{(p+1)/2} \nu^{-(p-1)/2} a(p). \quad (4)$$

表 1 对应能量谱指数 p 的 $a(p)$ 函数值^[46]

p	1	1.5	2	2.5	3
$a(p)$	0.283	0.147	0.103	0.085 2	0.074 2

对于光学薄的源, 辐射强度可由谱发射率沿视线方向积分得到。对于密度均匀和视线方向路径长度为 L 的源, 进行积分可得到辐射强度为^[22]:

$$I_{\nu} = 1.35 \times 10^{-25} CB^{(p+1)/2} \left(\frac{6.26 \times 10^{18}}{\nu} \right)^{(p-1)/2} a(p)L, \quad (5)$$

其中, I_ν 的单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。

可以明显看到, 能量呈幂律分布的相对论电子产生的同步辐射光谱也是幂律分布: $dN_E \propto E^{-p}$, $I_\nu \propto \nu^{-(p-1)/2}$ 。对于绝大部分的河外射电点源, 因其辐射主要由同步辐射主导, 所以其流量密度 S_ν 也遵循幂律谱, $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, $\alpha = (p-1)/2$ 是光谱指数, 大部分射电星系或者类星体的光谱指数在 $-2 \sim 0$ 的范围内。这种幂律光谱并不会无限延伸至更低的频率区间, 在某些物理条件下, 辐射源对自己的同步辐射变得不透明, 谱线发生弯曲, 我们称之为同步辐射的自吸收^[22]。

当相对论电子气体被均匀磁场包围, 所有能量范围的电子都将产生线偏振辐射。能量谱指数为 p 的能量幂律分布电子气体的线偏振度, 可以通过对单个电子的偏振分析 (式 (3)) 沿着所有能量和俯仰角进行积分得到:

$$\Pi = \frac{p+1}{p+\frac{7}{3}}. \quad (6)$$

对于典型的能量谱指数 $p = 2.5$, 得到的线偏振度约为 0.72, 接近单个电子的值。在实践中, 实际观测到的辐射是在非均匀磁场不同区域上的总和, 而在观测波束中沿着视线和垂直于视线方向的叠加效应可以显著减小极化度。

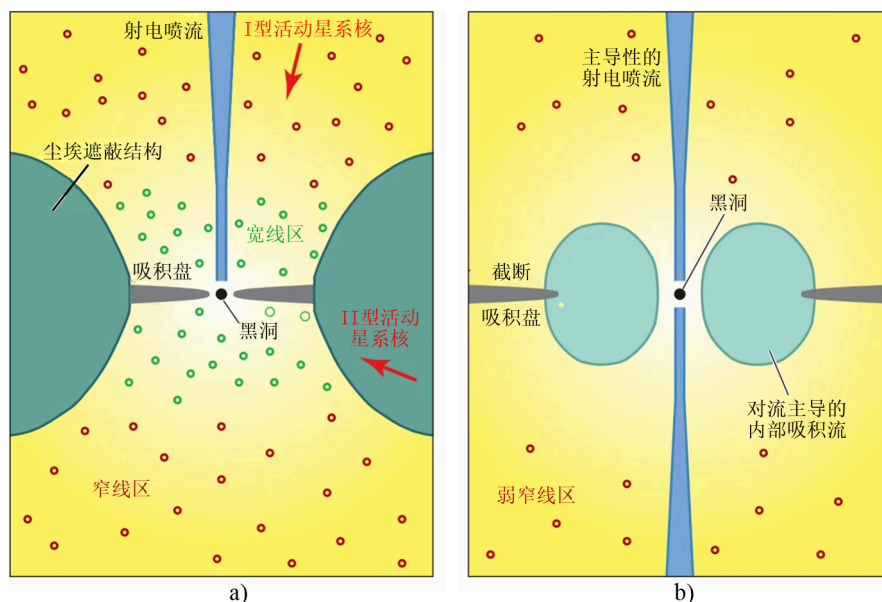
河外点源的辐射机制主要包括同步辐射、自由-自由辐射和热辐射, 在低频范围主要以同步辐射主导^[22]; 而在频率 $\nu \gtrsim 30 \text{ GHz}$ 时, 自由-自由辐射占主导地位^[45]。此外, 因为不同种类河外点源的辐射模式不尽相同, 所以河外点源的分类也十分重要。在目前的河外射电调查中大多认为, 河外点源主要由恒星形成星系和活动星系核组成^[45, 47, 48]。

恒星形成星系是较弱的射电源, 通常在较低的射电流量密度区间占主导地位^[40, 49], 如在 150 MHz 频率时, 其主导性体现在流量密度低于 1 mJy 的范围内^[31]。恒星形成星系中的同步辐射由与大质量 ($M \gtrsim 8M_\odot$) 恒星形成相关的超新星遗迹中被加速的相对论等离子体产生^[45]; 因此, 通过射电观测可以探测到近期的恒星形成活动, 并在一定程度上追踪其位置, 这使得射电-红外关联 (FIR-radio correlation) 被证实。在恒星形成星系中, 红外辐射和射电辐射展现出强烈的线性相关^[50]。目前恒星形成活动主要有两种模式: 一种是星暴 (starburst) 模式, 即可能由星系合并或者高密度恒星形成区域触发; 另一种是更为正常的与长期恒星形成过程相关的模式。观测发现大多数恒星形成星系都处于第二种模式^[51]。对于第二种模式的恒星形成星系, 其恒星形成率 (star formation rate, SFR) 与恒星质量 M_* 强相关^[52-54], 此关系可以使用幂律形式进行描述: $\text{SFR} \propto M_*^\beta$ ($\beta = 0.4 \sim 1$), 这样的恒星形成星系一般被认为是恒星形成星系的主序列。

活动星系核的基本特征是, 其能量来源于星系中心的超大质量黑洞的相对论深势阱^[55]。活动星系核存在多种复杂分类, 不同分类方法的子类之间常常存在重叠。接下来我们将介绍活动星系核主要的分类。

根据能量输出的主要方式不同, 可分为辐射模式 (radiative-mode) 活动星系核和喷流模式 (jet-mode) 活动星系核^[55, 56], 两种模式的活动星系核结构如图 1 所示。辐射模式活动星系核主要以电磁辐射为主要的能量输出方式; 而喷流模式活动星系核产生相对较少的电磁辐

射, 主要通过两侧集中的喷流传输大量动能的形式存在。这些喷流可能是由超大质量黑洞气体吸积或其自旋能量驱动。在过去, 喷流模式一般被归类为低激发射电星系。



注: a) 展示了辐射模式活动星系核的基本结构。其拥有一个几何薄、光学厚的吸积盘, 延伸到围绕中央超大质量黑洞的最内稳定轨道的半径; 具有较高的辐射功率, 将宽线区和窄线区的气体云团全部电离; 此外其还有一层含尘埃的气体遮蔽结构, 阻止了从某些方向直接观察吸积盘和宽线区域。b) 展示了喷流模式活动星系核的基本结构。其薄吸积盘在内部区域被几何厚的气体吸积所替代, 在较大半径处可能会过渡为外部截断的薄盘; 其辐射功率较低, 只能电离窄线区域的气体云团。

图 1 辐射模式和喷流模式活动星系核^[55]

第一种辐射模式活动星系核的基本结构为, 其中心超大质量黑洞被一个几何薄、光学厚的吸积盘所环绕, 并通过该吸积盘吸积气体。该吸积盘有径向的温度梯度, 因此会产生从极紫外波段到可见光波段的连续热辐射; 同时吸积盘还被热冕所环绕, 它将来自吸积盘辐射的软光子经逆康普顿散射到 X 射线范围, 当 X 射线作用于吸积盘时, 它们的光谱能量分布又因吸积盘的反射而改变。此外, 来自吸积盘的电离辐射和冕的加热作用, 电离了距离超大质量黑洞光日至数光年范围的致密气体云团, 产生了紫外、光学和近红外波段允许的发射线; 这些云团的速度离散一般几千千米每秒, 根据其产生的发射谱线, 这个区域被指定为宽线区。而在更大的尺度上, 超大质量黑洞和吸积盘周围还被一层含有尘埃的分子气体包围 (尘埃遮蔽结构), 在这个区域, 来自吸积盘的紫外、可见光和软 X 射线都会被尘埃吸收, 并以红外辐射的形式发射出来。当电离辐射沿着遮蔽结构的极轴逃逸时, 将电离几百到几千秒差距尺度的气体, 使这种更加安静和密度较低的气体云团产生了紫外、可见光和红外禁止与允许的发射线; 这些云团的速度离散在几百千米每秒, 因此该区域被指定为窄线区^[55]。

从尘埃遮蔽结构的极轴方向附近观测活动星系核, 可以清晰地看到超大质量黑洞、吸

积盘、冕和宽线区, 这些活动星系核一般被称为 I 型活动星系核。而如果从靠近尘埃遮蔽结构的赤道面方向观测活动星系核, 则无法观测到活动星系核的中心区域, 这些被称为 II 型活动星系核。这是辐射模式活动星系核的标准统一模型, 标准模型认为 I 型活动星系核与 II 型活动星系核的区别仅是由观测 AGN 视角的不同导致。II 型活动星系核的存在仍然可以通过遮蔽结构的热红外辐射, 以及在遮蔽结构中传播的硬 X 射线或来自窄线区的特征发射线的比值推断出来^[55]。

而喷流模式活动星系核则存在一种独特的超大质量黑洞吸积模式, 该吸积模式显示出较低的辐射率和吸积率。其几何薄盘可能不存在, 或者被几何厚的结构截断, 而几何厚结构气体流入时间比辐射冷却时间更短^[57-61], 这被称为对流主导 (advection-dominated) 或低辐射效率吸积流。这些吸积流的一个典型特征是能够发射两侧喷流^[55]。对于喷流模式活动星系核, 其吸积率通常低于爱丁顿吸积率的 1%; 而对于辐射模式活动星系核, 其典型吸积率通常为爱丁顿吸积率的 1%~10%。

根据射电图像的形狀, 即根据中心星系最低表面亮度等值线的轮廓范围和中心星系两侧最高亮度区域之间的距离之比, 可将活动星系核分为 FRI (比值小于 0.5) 和 FRII (比值大于 0.5) 两类^[62]。FRII 具有明显的热点和明亮的外缘, 而 FRI 的射电发射则更为弥漫。一般低吸积率的射电源产生的喷流较弱, 主要表现出 FRI 的结构; 而较高吸积率的星系则会产生较强的喷流, 表现为 FRII 的结构^[55]。此外, 射电源的射电图像还可能受到环境影响, 因为在射电源聚集地区的射电源更有可能表现出 FRI 的形状, 而这可能是由于在射电源密集的区域喷流更容易受到破坏^[63]。最近还提出了第三类 FR0^[64], 其具有 FRI 的特征却缺乏明显广泛的射电辐射^[47]。

正如之前所述, 在射电波段, 主导射电点源的辐射是同步辐射, 因此大部分活动星系核的辐射谱遵循幂律形式。根据光谱指数 α , 可将射电点源分为平谱源 ($\alpha < 0.5$) 和陡谱源 ($\alpha \geq 0.5$)^[65-68], 此外光谱指数 $\alpha = 0.5$ 也可作为拓展源与点源的大致分界线^[69]。平谱射电源还有两个子类, 分别为平谱射电类星体 (flat-spectrum radio quasar, FSRQ) 和 BL Lac 天体 (BL Lacertae object)。在光学光谱上, 平谱射电类星体会有强烈、宽泛的发射线, 就像标准类星体一样; 而 BL Lac 天体则最多显示弱发射线, 有时显示吸收线, 但在许多情况下没有任何特征^[47]。

此外, 活动星系核最常用的分类是将它们分为射电噪活动星系和射电宁静活动星系核^[70-73]。两种活动星系核之间的主要物理差异为是否存在强相对论性喷流^[47]。目前其划分标准有两种: 第一种是根据射电源的射电流量密度或者射电光度划分^[74], 在 1.4 GHz 下划分两种射电源的光度标准为 $L_{1.4\text{GHz}} = 10^{23} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ^[22], 也有人认为 $L_{1.4\text{GHz}} = 7 \times 10^{24} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ^[75], 而划分标准的不同可能与选择样本的红移范围有关^[17]; 还有一种是根据射电流量密度或光度与光学的流量密度或者光度的比值划分^[76]。这两类活动星系核本质上是不同的天体, 射电噪活动星系核以非热方式 (同步辐射) 释放大部分能量, 并与强大的相对论喷流相关; 而射电宁静活动星系核的多波段辐射由热辐射主导, 并直接或间接地与吸积盘相关^[17, 47, 77]。对于射电宁静活动星系核, 它们可能也拥有活跃核, 而这个活跃核对其射电辐射有一部分贡献^[78, 79]。射电宁静活动星系核在非射电波段, 如 X 射线、中红外线和光学波段上显示出明显

的星系核活动迹象, 但没有大尺度无线电喷流的迹象, 而且其无线电辐射远远弱于射电噪声活动星系核^[17, 70]。所以目前对于射电宁静活动星系核仍存在争议, 我们仍未清楚其射电辐射的形成机制。目前有观测迹象表明, 射电宁静活动星系核的射电辐射可能有活跃核和恒星形成两个来源。一方面, 射电宁静活动星系核具有与恒星形成系统相似的红外-射电流量比、演化的光度函数、宿主星系颜色、光学形态和恒星质量^[49, 51], 这说明在射电宁静活动星系核中, 射电辐射通常由恒星形成主导^[70, 80, 81]; 另一方面, 也有研究发现, 射电宁静活动星系核显示出与质量相近的恒星形成星系相比更高的射电亮度^[73, 82]。然而这些不同的发现可能是因为相关研究所探测到的样本处于不同亮度和红移范围^[72]。目前提出的关于射电宁静活动星系核的射电辐射模型有与恒星形成星系一样的恒星形成活动^[83]、微小喷流^[84]、日冕^[85]、盘风^[86]等。

最后, 根据活动星系核的光学光谱特征, 可将活动星系核分为高激发射电星系和低激发射电星系。高激发射电星系的光谱包含强发射线, 如 $[\text{OII}]\lambda 3727 \text{ \AA}$ 、 $[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$ 、 $[\text{NeII}]\lambda 3867 \text{ \AA}$, 而低激发射电星系的光谱则表现出吸收线或较弱的 $[\text{OII}]\lambda 3727 \text{ \AA}$ 发射线^[87]。而后该划分标准经扩展, 还可将强发射线 $[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$ 的等价宽度^[88]或高(低)激发或者电离发射线作为划分标准^[89, 90, 90-92]。一般而言, 光学光谱中存在高级发射线的活动星系核被称为高激发射电星系, 反之被称为低激发射电星系。高激发射电星系主要由冷气体高效吸积至几何薄且光学厚的吸积盘驱动^[93, 94], 其吸积率通常为爱丁顿率的 1%~10%^[95], 这样的吸积模式会使星系光谱中出现高度激发的发射线。而对于低激发射电星系, 其更多是由星系际介质吸积暖气体到几何厚的吸积盘上, 吸积率一般低于爱丁顿率的 1%^[95]; 低激发射电星系通常不会显示与吸积过程相关的 X 射线辐射^[96], 也不产生来自活动星系核核环的红外辐射^[94, 97]。

上文描述的不同活动星系核的分类存在一定的重叠。例如, 辐射模式活动星系核包括高激发射电星系, 喷流模式活动星系核则被称为低激发射电星系^[55]。并且, 几乎所有的 FRI 都是低激发射电星系, 而大部分有强发射线的 FRII 而被归类为高激发射电星系。但是 FRI 和 FRII 与低激发射电星系和高激发射电星系不是完全对应的, 因为一部分 (20%) FRII 已经被证明是低激发射电星系^[63]。并且相比 FRII 或高激发射电星系, FRI 或低激发射电星系对核心区域的遮蔽更少, 这说明 FRI 或低激发射电星系可能不存在粉尘遮蔽结构, 也可能存在但不是标准的几何厚环^[47, 98, 99]。

3 低频射电点源观测星表

随着低频射电点源的观测量越来越多, 观测射电点源目录在红移、流量、观测天区等方面越来越完善, 射电点源亮度的完备性分析也取得显著进展。通过对射电点源样本的研究可以使我们对射电点源的性质^[100]、空间分布(成团效应)^[101]、光度函数^[33]、尺寸模型^[102]等有更清晰的认识, 同时对再电离信号探测中射电点源前景干扰的研究也有所助益。

本章是对低频射电点源目录的介绍。表 2 包含了之后要介绍的低频射电观测河外点源

目录的主要信息：河外点源目录的名称、频率、天区面积、红移信息、射电源分类信息 (如活动星系核与恒星形成星系) 和完备性信息。

表 2 河外点源目录信息概要

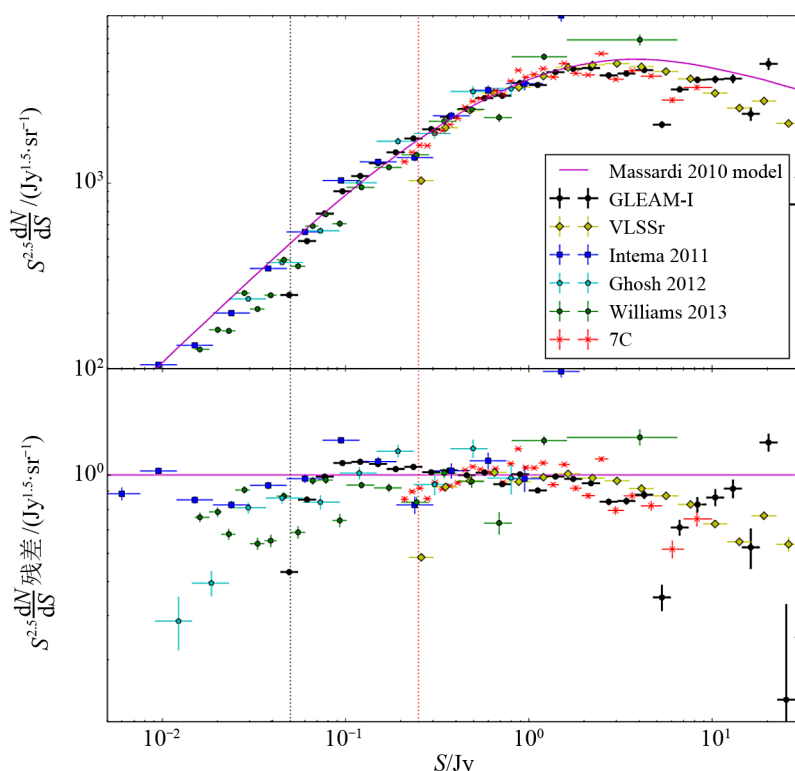
河外点源目录	频率范围 /MHz	天区面积 /平方度	射电源数量	红移 信息	源分类 统计	完备性 统计
GLEAM-I	72~231	24 831	307 455	×	×	√
GLEAM-II	72~231	2 860	22 037	×	×	√
GLEAM-III	72~231	5 113	108 851	×	×	√
LoLSS	42~66	740	25 247	×	×	√
LoTSS-DR1	120~168	424	325 694	√	×	√
LoTSS-DR2	120~168	5 635	4 396 228	√	×	√
LoTSS-DP-DR1	150	25.6	81 951	√	√	√
3CRR	178	13 886	178	√	×	√
7CRS	151	72	130	√	×	√
21CMA-NCP	75~175	14	624	×	×	√
VLSSr	74	30 530	92 964	×	×	×
T-RaMiSu	153	30	1 289	×	×	√
GLEAM-6dFGS	72~231	16 700	1 590	√	√	√

3.1 GLEAM

GLEAM-I 低频河外点源目录是使用 MWA 望远镜巡天第一年 (2013—2014) 的观测数据校准得到的点源目录^[23]。该目录覆盖了赤纬 $+30^\circ$ 以南、银道面 $\pm 10^\circ$ 以外的 24 831 平方度天空区域, 包含了 307 455 个射电源。该目录观测的流量密度的频率范围覆盖了 72~231 MHz, 频率带宽为 8 MHz。该目录向观测图像中放入 25 000 个流量密度为 25 mJy~1 Jy 的模拟源, 并采用相同的方法识别模拟源, 以研究不同流量下源的完备性。在 200 MHz 下, 样本的流量密度在 170 mJy 处有 90% 的完备性, 在 55 mJy 处的完备性仍有 50%。此外该目录还对其可信度进行了评估, 通过对负流量源 (位于亮源附近, 且由校准和反卷积错误引起的图像伪影) 进行识别, 并结合负流量源与总源数的比值确定该目录可信度为 99.97%。

此星表还对所有在每个频率子带都有正值流量密度的 245 470 个源的光谱指数 ($S \propto \nu^\alpha$) 进行了拟合, 并统计光谱指数在不同流量范围的分布。在 200 MHz 下, 流量密度小于 0.16 Jy 的 122 959 个射电点源的光谱指数中位数为 0.78 ± 0.20 ; 流量密度在 0.16~0.5 Jy 的 86 548 个射电点源的光谱指数中位数为 0.79 ± 0.15 ; 流量密度在 0.5~1.0 Jy 的 20 606 个射电点源的光谱指数中位数为 0.83 ± 0.12 ; 流量密度大于 1.0 Jy 的 12 723 个射电点源的光谱指数中位数为 0.83 ± 0.11 。这些为我们提供了丰富的低频射电点源光谱指数分布信息^[23]。该星表除了光谱指数, 还统计了低噪声区域 ($0 \text{ h} < RA < 3 \text{ h}$ 且 $-60^\circ < Dec < -10^\circ$; $10 \text{ h} < RA < 12 \text{ h}$ 且 $-40^\circ < Dec < -15^\circ$, 平均噪声为 $6.8 \pm 1.3 \text{ mJy}$) 射电点源的流量分布, 并将其与其他观测的结果进行比较, 详见图 2。

作为 GLEAM-I 观测目录的补充, GLEAM-II 低频射电点源目录覆盖了银纬 $|b| \leq 10^\circ$,



注: 黑色点为 GLEAM-I 星表的统计值, 其他颜色的数据点为其他观测目录的统计值^[103-106], 红色虚线为 GLEAM-I 目录完备性为 90% 的 50 mJy 界限, 紫色实线为活动星系核红移演化光度函数模型计算得到的源数目统计^[107]。顶部子图显示各个观测目录统计的源计数值, 底部子图显示减去模型后的源计数残差。

图 2 150 MHz 处总流量差分源计数^[23]

银经为 $345^\circ \sim 67^\circ$ 和 $180^\circ \sim 240^\circ$ 的 2860 平方度的天空^[24]。相比之前的 GLEAM-I, GLEAM-II 使用了 WSCLEAN^[108] 的 multi-scale CLEAN 功能, 来更好地去卷积大尺度的银河结构。此补充目录包含了 22 037 个射电点源, 且目录使用与 GLEAM-I 相同的方法进行研究后得到: 在 200 MHz 的 120 mJy 处源的完备性达到了 50%, 目录可靠性为 99.86%。该目录也对该区域的射电点源的光谱指数进行了拟合, 并统计了其分布, 发现其中有 17 244 个源的功率谱能量分布符合幂律形式。在 200 MHz 下, 流量密度小于 0.16 Jy 的射电点源的光谱指数中位数为 -0.89 ; 流量密度在 0.16~0.5 Jy 的射电点源的光谱指数中位数为 -0.86 ; 流量密度在 0.5~1.0 Jy 的射电点源的光谱指数中位数为 -0.88 ; 流量密度大于 1.0 Jy 的射电点源的光谱指数中位数为 -0.87 ^[24]。最后, 此目录源中有 5 749 个源被解析 (积分流量密度与峰值流量密度的比值大于 1.1), 有 168 个源有明显的扩展 (积分流量密度与峰值流量密度的比值大于 2)。

GLEAM-III 使用 MWA 望远镜巡天前两年 (2013—2015 年) 的观测数据。此低频射电点源目录以银河南极 (south galactic pole, SGP) 为中心, 覆盖了赤纬 $-48^\circ \sim -2^\circ$ 且赤经 20h40min ~ 05h04min 范围的 5 113 平方度, 总计 108 851 个射电点源。相比 GLEAM-I 的观

测, GLEAM-III 积分时间更长, uv 覆盖更好, 以及有更好的处理方式, GLEAM-III 观测区域的天空 RMS 噪声比 GLEAM-I 降低了 40%。GLEAM-III 目录不使用校准源观测来校准数据, 而是使用 GLEAM-I 作为天空模型进行校准。此目录亦对其中 77% 的源拟合了光谱, 测得其中 83 328 个射电点源的光谱指数均值和中位值分别为 -0.81 和 -0.82 。此目录还通过建立积分流量密度与峰值流量密度的比值与信噪比的关系模型, 将射电源分成了点源和拓展源, 发现有 8.4% 的源是拓展源。此外, GLEAM-III 目录采用与 GLEAM-I 相同的方法对射电源的完备性和目录的可靠性进行了评估, 结果为: 射电源在 25 mJy 处达到 50% 的完备性, 在 50 mJy 处达到 90% 的完备性, 目录的可靠性达到了 99.994%^[25]。

GLEAM 巡天项目的观测天区覆盖了南天的大部分区域, 包含了许多深场多波段观测的区域, 如 Galaxy and Mass Assembly (GAMA)、Chandra Deep Field South (CDFS)、European Large Area ISO Survey-South 1 (ELAIS-S1), 还有 MWA 专门用于探测再电离全球信号的两个区域 EoR0 (中心位置为 00h, 27°) 和 EoR1 (04h, 30°)。GLEAM 项目发布的目录不仅包含大量用于研究南天河外射电源的信息, 如流量密度分布信息、光谱指数分布信息、完备性、拓展源分布等, 还可作为其他低频南天观测研究进行可靠流量校准的目录, 如 MWA、PAPER 以及将建成的 SKA 望远镜进行的再电离时期研究。

3.2 LoLSS

LoLSS 是使用 LOFAR 望远镜的低带天线在 42~66 MHz 的频率范围进行的北天调查项目。其目标是以 15" 的分辨率和 1 mJy 的灵敏度覆盖整个北天空。LoLSS-DR1 是 LoLSS 项目第一次发布的目录。LoLSS-DR1 目录覆盖天区大小为 740 平方度^[109], 包含了 25 247 个射电点源。此目录使用软件 Python Blob Detection and Source Finder (PyBDSF)^[110] 从干涉图像中提取源, 并且目录提供了 PyBDSF 软件拟合的源类型结果。“S”代表独立的点源, “C”代表大型的复杂源, “M”代表有多个射电发射组件的源。同时此目录还通过加入 6 000 个模拟源, 并在模拟源上加上电离层的影响后, 使用 PyBDSF 软件对模拟源进行检测, 并重复 50 次以评估不同流量密度源的完备性。最终完备性模拟结果在 17 mJy 时达到 50%, 在 40 mJy 时达到 90%。此外还通过反转拼接图像 (mosaic image) 的像素值 (由于噪声和伪影导致的负像素变为正像素, 而源的正像素变为负像素), 然后采用同样的方法在反转的图像上使用 PyBDSF 软件提取源。最后检测到 1 055 个射电源, 因此认为 LoLSS-DR1 目录中存在 4% 人为造成的假源。

LoLSS-DR1 或者将来完整的 LoLSS 目录, 其高角度分辨率和灵敏度的独特组合可用于研究“化石”陡谱源, 对于理解同步辐射主导的射电源的性质、演化和生命周期至关重要。同时, LoLSS 目录还可用来研究在极低频率下 (42~66 MHz) 射电源改变同步辐射的幂律光谱的过程, 从而为某些过程提供新的信息, 例如电离气体的吸收和同步辐射自吸收。此外, LoLSS 与 LoTSS 的组合将产生一系列独特的数据, 将会有助于低频射电源研究。最后, 在极低频率下开展长期电离层观测, 将有助于约束和改进未来电离层模型。

3.3 LoTSS

LoTSS-DR1 目录是 LOFAR 望远镜的 LoTSS 项目第一次发布的低频射电点源巡天观测目录, 此目录的观测天区包含了赤经 10h45min00s ~ 15h30min00s 且赤纬 45°00'00" ~ 57°00'00" 的 424 平方度天空, 总计探测到 325 694 个射电点源^[27], 包含的频率范围为 120~168 MHz。LoTSS-DR1 目录也做了完备性模拟 (放入模拟源后使用 PyBDSF 软件提取模拟源以评估完备性), 结果表明, 目录的射电点源在 0.18 mJy 处的完备性为 65%, 在 0.35 mJy 处的完备性为 90%, 在 0.45 mJy 处的完备性为 95%^[27]。此外该目录还与光学数据 Pan-STARRS^[111, 112]、来自广域红外巡天探测器项目^[113] (Wide-field Infrared Survey Explorer mission, WISE) 的中红外光度观测数据进行交叉匹配, 其中 73% 的射电点源在 Pan-STARRS 和 WISE 中具有相匹配的源^[114]; 并采用一种新型混合光度红移方法估算每个射电点源的红移^[115], 使得此目录大部分射电点源都拥有了相应的红移信息。

LoTSS-DR2 目录是 LoTSS 项目发布的第二批低频射电点源巡天观测目录^[116], 该目录观测天区分为两个区域, 中心分别在 (12h45min, +44°30') 和 (1h00min, +28°00'), 覆盖面积分别为 4 178 平方度和 1 457 平方度, 总计 5 635 平方度。共观测到 4 396 228 个射电点源, 其中大部分源都未在此前的射电观测中被发现。该目录仍是通过加入模拟源的方式对目录的射电点源做了完备性模拟, 结果表明, 在 0.34 mJy、0.8 mJy 和 1.1 mJy 时射电点源的完备性分别达到了 50%、90% 和 95%。LoTSS-DR2 目录也提供了 PyBDSF 软件拟合的源类型结果。

LoTSS 项目发布的目录包含大量射电点源低频处的流量密度分布信息、光谱指数分布信息、源计数信息等, 其高角分辨率、大范围的观测目录还可作为其他北天低频观测研究进行可靠流量校准的参考。

LoTSS-DP-DR1 河外点源目录则由 LoFAR 的深场观测发布, 该目录的观测天区面积覆盖 25.6 平方度, 由三个小天区组成, 分别为 ELAIS-N1、Boötes 和 Lockman Hole。探测到的射电晕红移最高达到 7, 流量下限为 0.003 mJy。目录中包含了 81 951 个射电点源的 150 MHz 的流量密度、红移、点源分类、恒星形成速率、恒星质量等信息, 是目前为止观测天区最大的包含射电点源分类的深场观测^[31]。

此目录是通过对 LoTSS 深场观测初始目录的 7.2×10^6 个射电点源与光学、中红外、远红外的观测数据进行交叉匹配获得^[29], 并采用四种能量谱拟合软件 (MAGPHYS^[117]、BAGPIPES^[118, 119]、CIGALE^[120-122]、AGNFITTER^[123]) 对射电点源进行拟合, 以此确定源的辐射模式是否为 AGN 模式, 同时通过这四种能量谱拟合软件对射电点源的恒星质量和恒星形成率进行拟合估计。

关于射电点源的分类, 考虑到恒星形成星系的射电亮度与恒星形成率紧密相关, 而射电亮度显著偏离恒星形成率预测的射电点源则为活动星系核^[78, 124, 125]。因此, 根据观测数据提出恒星形成率与射电光度的预测关系为:

$$\lg(L_{150\text{MHz}}) = 22.24 + 1.08 \lg(SFR) \quad , \quad (7)$$

其中, $L_{150\text{MHz}}$ (单位为 $\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1}$) 是根据恒星形成率预测的河外点源射电光度, SFR (单位为 $M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$) 为射电点源的恒星形成率。若实际观测射电光度比由恒星形成率预测的射电光度

大 0.7 个数量级, 则认为射电点源是射电过剩 (radio excess)。然而, 因为 Boötes 天区的射电点源被发现恒星形成率与实际射电光度的离散度随着红移的增大而增大, 因此为了保证射电源分类的一致性, 将此天区的射电点源的射电过剩标准改为 $(0.7+0.1z)^{[31]}$ 。最后, 将辐射模式为活动星系核模式且射电过剩的射电点源归类为高激发射电星系, 将辐射模式为非活动星系核模式且射电过剩的射电点源归类为低激发射电星系, 将辐射模式为活动星系核模式且非射电过剩的射电点源归类为射电宁静活动星系核, 将辐射模式为非活动星系核模式且非射电过剩的射电点源归类为恒星形成星系^[31]。不同种类射电点的数量分布情况如表 3 所示, 其中大部分 (67.9%) 的射电点源是恒星形成星系, 最少的高激发射电星系只占 2.1%。

表 3 LoTSS-DP-DR1 河外点源目录中不同类型射电点的数量分布

源分类	射电点源数量			总源数	占比/(%)
	ELAIS-N1 区域	Lockman Hole 区域	Boötes 区域		
恒星形成星系	22 720	21 044	11 916	55 680	67.9
射电宁静活动星系核	2 779	2 633	2 030	7 442	9.1
低激发射电星系	4 287	5 304	3 158	12 799	15.6
高激发射电星系	510	710	524	1 744	2.1
无法分类的源	1 314	1 471	1 551	4 336	5.3
总数	31 610	31 162	19 179	81 951	100

由于此目录拥有射电点源分类、红移、流量密度、恒星形成率、恒星质量等信息, 其在不同种类源的红移分布、流量分布、恒星形成率分布、光度函数^[31, 126, 127]等方面的研究都具有重要意义。此外该目录的不同种类射电点的完备性已经通过精确的模拟获取, 对于所有种类射电点的 50% 的完备性大约在 0.2 mJy^[126, 127]; 对于高激发射电星系和低激发射电星系, 流量密度在 1.6 mJy 以上的有 90% 以上的完备性^[126]; 而对于 RQ-AGN 和恒星形成星系, 流量密度在 0.63 mJy 以上的就有 90% 以上的完备性^[127]。

3.4 3CRR

3CRR 低频射电点源 (Revised Revised Third Cambridge (3C) Catalogue of Radio Sources) 目录是一组亮射电点源样本, 频率为 178 MHz, 观测天区面积为 13 886 平方度, 总计有 178 个射电点源, 其流量下限为 10.9 Jy, 总体样本的完备性超过 96%^[34]。有 96% 的射电点源有相匹配的光学源, 并且, 根据光学光谱信息将射电点源分成射电星系和类星体, 其中有 71% 是星系, 25% 是类星体。3CRR 目录还根据光学光谱信息对所有源的红移进行估算, 使得射电点源拥有红移信息。此外, 该目录还根据射电点的形态将这批亮源分成 FRI 和 FR II。射电辐射主要集中在光学识别中心周围的射电点源被归类为 FRI, 射电点的辐射在远离光学识别中心的射电泡端最大, 若在频率 $\nu > 1 \text{ GHz}$ 时发现其亮度分布由无法识别的成分主导则归类为 “C”。3CRR 目录还拟合了所有射电点源 178~750 MHz 的光谱指数。另外, 目录还包含了蓝 (B)、可视 (V)、红 (R) 三个波段的星等信息。

3CRR 目录里包含了大量的亮源, 同时包含光学光谱、射电点的分类、红移、不同波段的星等信息, 对于亮源的研究有较大的作用。同时, 3CRR 目录中一些亮源的流量密度随时

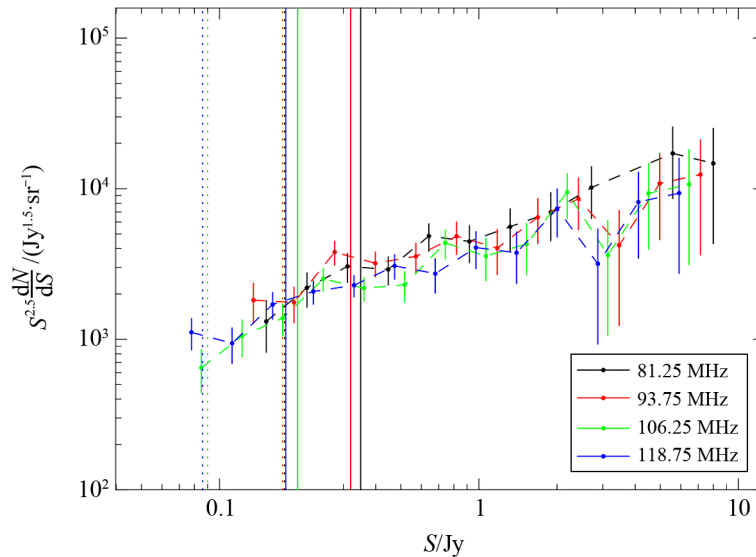
间变化很小, 所以经常被用作观测校准的校准源, 如 3C48、3C138、3C147 和 3C286。

3.5 7CRS

7CRS (Seventh Cambridge Redshift Survey) 目录是由 CLFST (Cambridge Low Frequency Synthesis Telescope) 望远镜观测得到, 其中根据天区不同分为 7C-I、7C-II 和 7C-III, 观测天区总大小为 0.022 球面度 (steradian), 观测频率为 151 MHz, 观测流量下限为 0.5 Jy (3CRR 目录的 1/20)^[128, 129]。此目录通过广泛的光学和近红外的观测匹配, 对 130 个源进行了识别, 并为其中 90% 的源提供了红移信息, 最高红移可至 3.6。同时, 该目录还提供了 K 波段的星等信息, 此目录已被用于 K 波段星等与红移 z 相关的研究, 并且发现 M_K - z 关系可以很好地用 $M_K = 17.37 + 4.53 \lg z - 0.31(\lg z)^2$ 表示。在所有红移下, 3CRR 目录的射电点源与更弱的 7CRS 射电源的 K 波段绝对星等之间有显著差异, 这是因为两者的关系可能受到黑洞质量的影响^[130]。

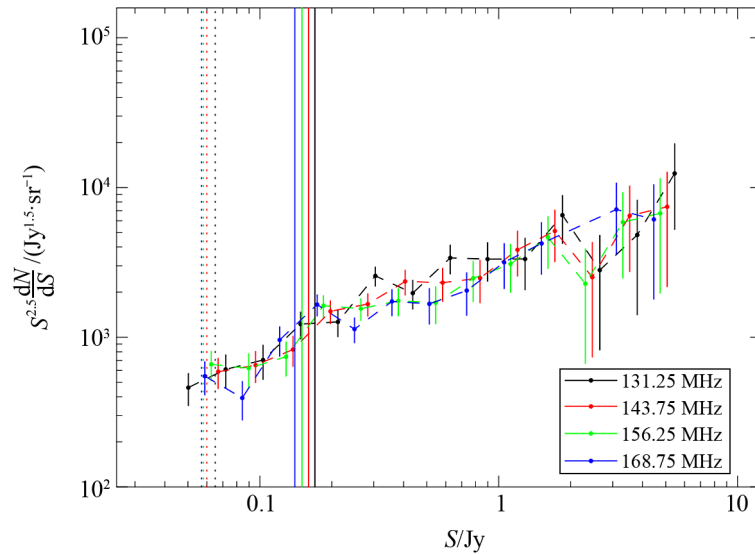
3.6 21CMA-NCP

21CMA-NCP (21 CentiMeter Array North Celestial Pole) 低频射电点源目录是由位于中国新疆天山上的射电干涉阵列 21CMA 观测北天极得到的, 频率范围为 75~175 MHz, 频率带宽为 12.5 MHz, 总共探测到 624 个射电点源。此目录对光谱指数的分布进行了统计, 其峰值对应 -0.8, 与预期一致, 该目录还发现在更高频率范围会出现更陡的射电源。该目录对所有频率段做了源计数统计, 详见图 3 和图 4。此外, 该目录还对不同频率段的射电点源做了相关完备性模拟, 发现在流量低于 0.1 Jy 后, 其完备性会快速下降至 0%, 完备性在 0.2 Jy 达到 50%, 而在 1 Jy 以上且较高频率的区间完备性为 100%^[32]。



注: 竖直虚线位置对应该频率 20% 的完备性的流量密度, 竖直实线对应该频率下的 50% 完备性的流量密度。

图 3 21CMA-NCP 目录对不同频率范围统计的源计数^[32]



注：竖直虚线位置对应该频率 20% 的完备性的流量密度，竖直实线对应该频率下的 50% 完备性的流量密度。

图 4 21CMA-NCP 目录对不同频率范围统计的源计数^[32]

3.7 VLSSr

VLSSr (VLA Low-frequency Sky Survey Redux) 低频河外点源目录是由甚大天线 (Very Large Array, VLA) 的低频巡天获得^[106]。其观测面积约为 30 530 平方度，频率为 74 MHz，流量下限为 0.39 Jy，总计有 92 964 个源。为了判断射电源的真实性，该目录与 1.4 GHz 的 NVSS 点源目录^[131]进行匹配。为了排除射电源是大射电源的组件，其将 120'' 内没有第二个组件的源定义为孤立源，并将 90 000 多个孤立源与 NVSS 目录进行匹配，发现其中有 2.2% 的孤立源没有匹配源，这些源被认为是错误检测的假源。此目录还对每个射电源拟合得到的 74~1 400 MHz 的光谱指数分布进行了统计，中位值为 -0.82；同时该目录还做了相应的源计数统计，但未做相关的射电源完备性调查。

该目录几乎覆盖了赤纬 -30° 以北的天空，是目前低频河外点源研究中覆盖范围较大的目录。尽管它仍存在一定的局限性，但作为对河外射电源进行多波段研究的重要低频参考点^[132-134]，为其他巡天提供了低频对比点^[135]，也为其他低频仪器以及低频阵列的初步校准提供了全球天空模型^[136, 137]。

3.8 T-RaMiSu

T-RaMiSu (Two-meter Radio Mini Survey) 低频河外点源目录是由巨米波射电望远镜 (Giant Metrewave Radio Telescope, GMRT) 对 Boötes 区域进行观测获得^[105]。其频率为 153 MHz，覆盖观测面积为 30 平方度，流量下限为 4.1 mJy，总计 1 289 个源。目录采用蒙特卡洛模拟进行拟合，获得积分流量密度与峰值流量密度的比值与信噪比的关系模型，同时通过该模型将源分为拓展源和点源，并给出了拓展源的半长轴和方向角。此外，目录也是通过加入不同流量密度的模拟假源并采用 PyBDSF 软件进行搜寻源，以此判断不同流量密度射电源的

完备性; 同时通过对错误检测的源数量进行统计, 以获得目录的可靠性。射电点源的完备性和可靠性都随着流量密度的增加而增加, 在 14 mJy 时完备性和可靠性分别为 95% 和 92%。该目录还提供了源计数统计和光谱指数统计。源计数统计的流量密度范围为 15 mJy~7 Jy; 而其光谱指数只统计了大于 0.1 Jy 的射电源, 其 153~1 400 MHz 和 153~327 MHz 的光谱指数均值分别为 -0.25 和 -0.2。

3.9 GLEAM-6dFGS

GLEAM-6dFGS 低频河外点源目录是由前面所述的 GLEAM-III 目录与 6dFGS 项目 (Six-degree Field Galaxy Survey) 的观测数据交叉匹配所得^[33], 覆盖观测面积约 16 700 平方度, 频率范围为 72~231 MHz, 总计 1 590 个射电点源。样本的中位红移为 0.064, 最大红移为 0.283。根据光学光谱, 该目录将射电点源分成了活动星系核和恒星形成星系, 前者占 73%, 后者占 27%。该目录对射电点源的 76~227 MHz 和 843~1 400 MHz 两个频率区间的光谱指数分布进行了研究, 对于活动星系核, 两个频率区间的中位光谱指数分别为 0.704 ± 0.011 和 0.600 ± 0.010 ; 对于恒星形成星系, 两个频率区间的中位光谱指数分别为 0.596 ± 0.015 和 0.650 ± 0.010 。该目录的整体完备性有 95%。

该目录已经被用于局域光度函数的拟合计算, 其对 $21.8\sim 27.2 \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 范围的射电点源的光度函数进行了拟合^[33], 活动星系核的光度函数模型为:

$$\Phi_{\text{AGN}}(L) = \frac{C}{(L/L_{\star})^{\alpha} + (L/L_{\star})^{\beta}}, \quad (8)$$

其中, 特征光度 $L_{\star} = 10^{25.76} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1}$, $\alpha = 1.76$, $\beta = 0.49$, $C = 10^{-6.13} \text{ mag}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-3}$ ^[33]。

恒星形成星系的光度函数模型为:

$$\Phi_{\text{SFG}}(L) = C \left(\frac{L}{L_{\star}} \right)^{1-\alpha} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\lg(1 + L/L_{\star})}{\sigma} \right]^2 \right\}, \quad (9)$$

其中, $C = 10^{-2.84} \text{ mag}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-3}$, $L_{\star} = 10^{21.06} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1}$, $\alpha = 0.68$, $\sigma = 0.66$ 。

该目录通过对 GLEAM-III 目录和 6dFGS 目录的匹配信息划分射电源的种类, 同时对两种射电点源的光度函数进行拟合, 分别得到低频下 (200 MHz) 活动星系核和恒星形成星系的光度函数模型。该模型对研究射电源的光度函数、红移分布、光谱指数分布等都有重要作用。

4 射电点源模拟星表

目前, 射电点源的模拟软件主要有 T-RECS 和 SKADS。与观测相比, 由模拟生成的射电点源目录可以覆盖更大的天区, 达到更高的红移并突破更低的流量下限。它可以用来评估射电巡天的完整性, 或者预测未来观测到的射电源的数量。同时, 模拟的射电点源目录为研究 EoR 信号的河外点源前景提供了一种方法。

河外点源模拟软件可用在多个研究领域。在近期的相关工作中,河外射电点源模拟被用于评估宇宙方差^[138];评估 SKA-VLBI 干涉阵在特定波束内及不同通量密度水平下可以检测到的源数量,结果表明在 L 波段找到多个波束内校准源是可行的^[139];生成点源目录,既作为深度学习星系搜寻软件 YOLO-CIANNA 的训练数据集,也用于确定源数密度与流量密度关系的机器学习代码的训练集^[140, 141];研究河外点源成团效应^[101];研究谱峰河外点源对前景扣除与 EoR 信号提取的影响^[142],以及评估河外点源观测目录的完备性^[143]等。以下将分别介绍两款软件的模拟方法,以及模拟生成的射电点源目录。

4.1 SKADS

SKADS 是一款半经验射电点源模拟软件^[40, 41]。所谓半经验,指模拟源是由观测到的射电点源光度函数进行外推得到^[67, 144, 145],主要针对射电源的大尺度宇宙分布进行建模。SKADS 提供的射电点源目录具有的特性为:天区覆盖 $20^\circ \times 20^\circ$,红移上限至 20,包含 3.2 亿个源;其流量下限在 151 MHz、610 MHz、1.4 GHz、4.86 GHz 和 18 GHz 频率下都为 10 nJy。

对于射电点源的分类,SKADS 将模拟源分成射电宁静活动星系核、射电噪活动星系核、恒星形成星系。其中,射电噪活动星系核又根据形态组件的不同分为 FRI 和 FR II,而恒星形成星系再分为正常星系和更亮更小的星暴星系。不同类别的射电点源的数量、红移分布、流量分布都由相应的光度函数计算得到。表 4 展示了不同类型的射电源数目^[40]。

表 4 SKADS 模拟的 $20^\circ \times 20^\circ$ 连续射电天空各子类源的数量

源类型	星系的数量 (10^6)	组件数量 (10^6)
射电宁静活动星系核	36.1	36.1
FRI	23.8	71.4
FR II	0.00 235	0.012
正常星系	207.8	207.8
星暴星系	7.26	7.26

关于射电点源的形状,对于射电噪活动星系核,SKADS 根据 FRI 的流量分布,建模为一个点源核心和两个表面亮度均匀的同轴椭圆形瓣;根据 FR II 的流量分布,建模为一个点源核心、两个椭圆形瓣和两个热点。相应的组件流量分布由参数核瓣比和喷流洛伦兹因子决定,射电喷流朝向的角度设置为随机分布。而其他射电点源和 FRI 与 FR II 的点源核心都被建模为椭圆^[146, 147],相关参数由长轴和短轴构成,单位为角秒。

关于射电点源的大尺度宇宙分布的建模,射电点源的成团效应必不可少,因为河外点源的成团效应会改变其功率谱。SKADS 采用将射电点源与一个大尺度成团效应的基础暗物质密度场结合,同时,对不同类型的射电点源采用不同的匹配模式,以获取射电点源的成团效应^[148-151]。

SKADS 的河外点源目录不仅包含射电点源的成团效应,而且其在各个频率区间的源计数结果与观测结果较为相符。尽管已有观测表明,SKADS 模拟射电点源目录中大于 0.15 mJy 的亮源的数量在红移大于 2 时存在低估的情况^[127],但是其在流量分布、不同类型的射电源数量、完备性研究等方面,对未来观测的预测性以及射电点源相关研究仍有着重大的意义。

4.2 T-RECS

T-RECS 是一款较新的射电点源模拟软件, 主要对活动星系核和恒星形成星系进行模拟^[42, 43]。相比于 SKADS, T-RECS 最大的创新在于, 其对射电点源的偏振辐射进行了建模。T-RECS 模拟的频率范围覆盖 150 MHz~20 GHz, 红移上限为 10, 流量下限为 10 nJy, 同时其提供了具有成团效应的 $5^\circ \times 5^\circ$ 的射电点源天空目录。

T-RECS 将所有活动星系核的光谱设置为幂律谱形式 ($S \propto \nu^\alpha$), 并根据光谱指数分为平谱射电源和陡谱射电源, 而平谱射电源再细分为平谱射电类星体与耀变体 (blazar)。其中陡谱射电源的光谱指数设置为 $-0.73^{[43]}$, 而平谱源设为 $-0.1^{[42]}$ 。然后通过结合相关观测数据对红移依赖的光度函数模型进行拟合和外推^[107], 获得流量下限为 10 nJy 的模拟射电点源。并根据线偏振率 (偏振流量与射电流量的比值) 模型的相关研究^[152-154], 使用偏振流量模型来计算每个射电点源的偏振流量。

对于恒星形成星系, 由于其射电辐射与恒星形成率密切相关, 因此 T-RECS 采用红移演化的恒星形成率函数来推导出恒星形成星系的红移依赖光度函数^[155-157], 并通过对红移依赖光度函数的外推, 获得模拟源流量下限至 10 nJy 和红移上限为 10 的射电点源的数量。恒星形成星系的偏振模型则是根据射电源倾角和射电线偏振率的关系模型^[40], 为所有的恒星形成星系分配线偏振率。

关于射电点源的尺寸, 活动星系核的固有尺寸模型对射电点源的视角分布采用纯几何定义分布 $N(\theta) = \sin \theta$ (恒星形成星系采用同样的视角分布)^[102], 然后, 通过 3 组河外点源目录的视角尺寸信息, 模拟射电点源的固有尺寸, 并重复 1000 次, 获得射电点源的固有尺寸分布^[158-160]。T-RECS 将其拟合得到的固有尺寸分布模型用于活动星系核的固有尺寸分配, 最后, 根据源的红移计算得到活动星系核的视角尺寸。而对于恒星形成星系, 通过恒星形成率与恒星质量的关系^[156], 再结合固有尺寸与恒星质量的关系^[161], 可以获得恒星形成率与固有尺寸的关系, 然后可根据恒星形成率分配恒星形成星系的固有尺寸。最后, 再根据恒星形成星系的红移, 可计算得到相应的视角尺寸。

获得射电点源的尺寸后, T-RECS 对射电点源的形状也进行了相关建模, 对于陡谱活动星系核的形状, T-RECS 为射电点源核心以及两个热点建模, 并通过射电瓣的热点与核心距离模型, 给出每个射电点源热点与核心之间的角尺寸距离^[162], 但是 T-RECS 并未给出相关核心与热点的流量分布模型。对于恒星形成星系, T-RECS 根据星系椭圆率分布模型, 对每个恒星形成星系的椭圆率进行分配^[163], 并通过椭圆率、红移、固有尺寸大小计算得到相应的长轴角尺度和短轴角尺度。

T-RECS 同样对射电点源的成团效应进行了建模, 其采用的暗物质晕模拟是 P 千禧模拟 (P-Millennium simulation), 生成的暗物质晕特征为: 覆盖天区 $5^\circ \times 5^\circ$, 红移为 0~8。最后通过将暗物质晕与射电点源进行质量匹配的方式获得射电点源的成团效应^[157, 164]。

T-RECS 的射电点源模拟目录除了有模拟源不同频率的流量信息, 还包含了射电点源的偏振辐射、尺寸大小、形状、视角等信息, 可以通过 galsim^[32]等软件生成射电点源天空的视场图像。在不同频率区间, T-RECS 射电点源模拟目录的总流量差分源计数和偏振源计数

与真实的观测结果几乎一致。但是目前也有观测指出, T-RECS 的模拟射电点源目录中大于 0.15 mJy 的亮源在红移大于 4 的时候出现了数量被低估的情况^[127]。

5 总结与展望

对低频河外射电点源的研究, 有助于了解重子对恒星形成的驱动和抑制过程, 并深化对星系的形成和演化过程的理解。同时, 由于低频射电点源是再电离信号探测重要的前景污染源, 对其研究有助于我们对射电点源前景污染的去除和抑制。目前低频射电点源的观测越发完善, 特别是 LoFAR 的深场观测给我们带来了高红移的低频射电点源的流量和红移分布信息。本文介绍了当前低频射电点源观测目录主要参数, 包括天区覆盖范围、红移范围、频率范围、源分类方法与分类结果和光谱指数等; 同时我们也对目前主要的射电点源模拟软件 SKADS 和 T-RECS 进行了介绍, 包括其模拟时采用的模型方法, 以及其生成的射电点源目录包含的信息。

一份完备的河外点源目录可应用于当前的天文学研究中的多个领域。例如, 它们可用于研究星系的成团效应^[101]; 同时还可将河外点源目录与来自宇宙微波背景的引力透镜地图相结合, 以对射电星系的偏差演化和物质扰动的幅度进行约束^[165]; 还可用于研究宇宙学方差, 以及星系的大样本性质及随时间的演化^[100]; 也可用作研究河外点源的尺寸分布^[102]; 还可通过河外点源深场观测获得高红移的亮射电源的相关信息, 并以此来研究早期宇宙条件^[166]; 此外, 通过大范围的射电点源调查目录还可以用来寻找具有特殊属性的射电源^[167]。河外点源模拟软件及其生成的模拟点源目录, 也对成团效应、干涉阵校准等都有较大帮助^[138, 139], 且有观测目录无法比拟的优点, 如完备性、更低的流量密度、更高的红移。河外点源模拟软件及模拟生成目录可作为与点源相关的机器学习和深度学习的训练集, 使其获得更为全面的训练^[140, 141]; 此外, 河外点源模拟还可用来评估河外点源对 EoR 信号的污染程度^[142]。

在目前低频射电观测中, 仍缺少射电点源的偏振强度的观测。因为射电点源频谱的光滑性会受到偏振泄漏的影响, 获得相关的偏振泄漏模型对扣除射电点源前景也大有益处。目前, 世界上最大的综合孔径射电望远镜 SKA 正在积极建设中, 其拥有极高灵敏度和角分辨率, 一旦建设完成, 其观测结果将会进一步检验目前已有的模型。

参考文献:

- [1] Miller N A, Bonzini M, Fomalont E B, et al. *ApJS*, 2013, 205: 13
- [2] Barrett P E, Dieck C, Beasley A J, et al. *AJ*, 2017, 154: 252
- [3] Malefahlo E, Santos M G, Jarvis M J, et al. *MNRAS*, 2020, 492: 5297
- [4] Somalwar J J, Ravi V, Dong D, et al. *ApJ*, 2022, 929: 184
- [5] Morales M F, Wyithe J S B. *ARA&A*, 2010, 48: 127
- [6] Koopmans L, Pritchard J, Mellema G, et al. *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array(AASKA14)*. Italy: Sissa Medialab, 2015: 1
- [7] Mellema G, Koopmans L V E, Abdalla F A, et al. *Experimental Astronomy*, 2013, 36: 235
- [8] Mellema G, Koopmans L, Shukla H, et al. *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*. Italy: Sissa

- Medialab, 2015: 10
- [9] Cassano R, Bernardi G, Brunetti G, et al. Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Italy: Sissa Medialab, 2015: 73
- [10] Vazza F, Ferrari C, Bonafede A, et al. Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Italy: Sissa Medialab, 2015: 97
- [11] Kale R, Dwarakanath K S, Vir Lal D, et al. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2016, 37: 31
- [12] Johnston-Hollitt M, Govoni F, Beck R, et al. Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Italy: Sissa Medialab, 2015: 92
- [13] Roy S, Sur S, Subramanian K, et al. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2016, 37: 42
- [14] Van Eck C L, Haverkorn M, Alves M I R, et al. A&A, 2017, 597: A98
- [15] Stappers B W, Hessels J W T, Alexov A, et al. A&A, 2011, 530: A80
- [16] Fender R, Stewart A, Macquart J P, et al. Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Italy: Sissa Medialab, 2015: 51
- [17] Padovani P. A&A Rev, 2016, 24: 13
- [18] Shaver P A, Windhorst R A, Madau P, et al. A&A, 1999, 345: 380
- [19] Murray S G, Trott C M, Jordan C H. ApJ, 2017, 845: 7
- [20] Procopio P, Wayth R B, Line J, et al. PASA, 2017, 34: e033
- [21] Bowman J D, Morales M F, Hewitt J N. ApJ, 2009, 695: 183
- [22] Burke B F, Graham, Wilkinson P N. An introduction to radio astronomy, 4th edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2019
- [23] Hurley-Walker N, Callingham J R, Hancock P J, et al. MNRAS, 2017, 464: 1146
- [24] Hurley-Walker N, Hancock P J, Franzen T M O, et al. PASA, 2019, 36: e047
- [25] Franzen T M O, Hurley-Walker N, White S V, et al. PASA, 2021, 38: e014
- [26] Shimwell T W, Röttgering H J A, Best P N, et al. A&A, 2017, 598: A104
- [27] Shimwell T W, Tasse C, Hardcastle M J, et al. A&A, 2019, 622: A1
- [28] Sabater J, Best P N, Tasse C, et al. A&A, 2021, 648: A2
- [29] Kondapally R, Best P N, Hardcastle M J, et al. A&A, 2021, 648: A3
- [30] Duncan K J, Kondapally R, Brown M J I, et al. A&A, 2021, 648: A4
- [31] Best P N, Kondapally R, Williams W L, et al. MNRAS, 2023, 523: 1729
- [32] Zheng Q, Wu X P, Johnston-Hollitt M, et al. ApJ, 2016, 832: 190
- [33] Franzen T M O, Seymour N, Sadler E M, et al. PASA, 2021, 38: e041
- [34] Laing R A, Riley J M, Longair M S. MNRAS, 1983, 204: 151
- [35] Rawlings S, Eales S, Lacy M. MNRAS, 2001, 322: 523
- [36] Lacy M, Riley J M, Waldram E M, et al. MNRAS, 1995, 276: 614
- [37] Willott C J, Rawlings S, Blundell K M, et al. MNRAS, 1998, 300: 625
- [38] Lacy M, Rawlings S, Hill G J, et al. MNRAS, 1999, 308: 1096
- [39] Jarvis M J, Rawlings S, Eales S, et al. MNRAS, 2001, 326: 1585
- [40] Wilman R J, Miller L, Jarvis M J, et al. MNRAS, 2008, 388: 1335
- [41] Wilman R J, Jarvis M J, Mauch T, et al. MNRAS, 2010, 405: 447
- [42] Bonaldi A, Bonato M, Galluzzi V, et al. MNRAS, 2019, 482: 2
- [43] Bonaldi A, Hartley P, Ronconi T, et al. MNRAS, 2023, 524: 993
- [44] Soderberg A M, Chevalier R A, Kulkarni S R, et al. ApJ, 2006, 651: 1005
- [45] Condon J J. ARA&A, 1992, 30: 575
- [46] Ginzburg V L, Syrovatskii S I. ARA&A, 1969, 7: 375
- [47] Padovani P, Alexander D M, Assef R J, et al. A&A Rev, 2017, 25: 2
- [48] Miley G. ARA&A, 1980, 18: 165
- [49] Padovani P, Bonzini M, Kellermann K I, et al. MNRAS, 2015, 452: 1263
- [50] Sargent M T, Schinnerer E, Murphy E, et al. ApJS, 2010, 186: 341
- [51] Bonzini M, Mainieri V, Padovani P, et al. MNRAS, 2015, 453: 1079
- [52] Noeske K G, Weiner B J, Faber S M, et al. ApJL, 2007, 660: L43

- [53] Elbaz D, Daddi E, Le Borgne D, et al. *A&A*, 2007, 468: 33
- [54] Daddi E, Dickinson M, Morrison G, et al. *ApJ*, 2007, 670: 156
- [55] Heckman T M, Best P N. *ARA&A*, 2014, 52: 589
- [56] Antonucci R. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2012, 27: 557
- [57] Narayan R, Yi I. *ApJL*, 1994, 428: L13
- [58] Narayan R, Yi I. *ApJ*, 1995, 452: 710
- [59] Narayan R. *Ap&SS*, 2005, 300: 177
- [60] Quataert E. *Probing the Physics of Active Galactic Nuclei: Vol. 224. San Francisco: ASP*, 2001: 71
- [61] Ho L C. *ARA&A*, 2008, 46: 475
- [62] Fanaroff B L, Riley J M. *MNRAS*, 1974, 167: 31P
- [63] Gendre M A, Best P N, Wall J V, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 3086
- [64] Baldi R D, Capetti A, Giovannini G. *A&A*, 2015, 576: A38
- [65] Wall J V. *The Observatory*, 1975, 95: 196
- [66] Peacock J A, Gull S F. *MNRAS*, 1981, 196: 611
- [67] Willott C J, Rawlings S, Blundell K M, et al. *MNRAS*, 2001, 322: 536
- [68] Kimball A E, Ivezić Ž. *AJ*, 2008, 136: 684
- [69] Massardi M, Ekers R D, Murphy T, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 318
- [70] Kellermann K I, Condon J J, Kimball A E, et al. *ApJ*, 2016, 831: 168
- [71] Padovani P, Petropoulou M, Giommi P, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 1877
- [72] Mancuso C, Lapi A, Prandoni I, et al. *ApJ*, 2017, 842: 95
- [73] White S V, Jarvis M J, Kalfountzou E, et al. *MNRAS*, 2017, 468: 217
- [74] Peacock J A, Miller L, Longair M S. *MNRAS*, 1986, 218: 265
- [75] Zakamska N L, Lampayan K, Petric A, et al. *MNRAS*, 2016, 455: 4191
- [76] Schmidt M. *ApJ*, 1970, 162: 371
- [77] Padovani P. *Nature Astronomy*, 2017, 1: 0194
- [78] Delvecchio I, Smolčić V, Zamorani G, et al. *A&A*, 2017, 602: A3
- [79] Ceraj L, Smolčić V, Delvecchio I, et al. *A&A*, 2018, 620: A192
- [80] Kimball A E, Ivezić Ž, Wiita P J, et al. *AJ*, 2011, 141: 182
- [81] Condon J J, Kellermann K I, Kimball A E, et al. *ApJ*, 2013, 768: 37
- [82] White S V, Jarvis M J, Häußler B, et al. *MNRAS*, 2015, 448: 2665
- [83] Sopp H M, Alexander P. *MNRAS*, 1991, 251: 14P
- [84] Ho L C, Ulvestad J S. *ApJS*, 2001, 133: 77
- [85] Laor A, Behar E. *MNRAS*, 2008, 390: 847
- [86] Wang J M. *ApJL*, 2008, 682: L81
- [87] Hine R G, Longair M S. *MNRAS*, 1979, 188: 111
- [88] Tadhunter C N, Morganti R, Robinson A, et al. *MNRAS*, 1998, 298: 1035
- [89] Laing R A, Jenkins C R, Wall J V, et al. *The Physics of Active Galaxies: Vol. 54. San Francisco: ASP*, 1994: 201
- [90] Kewley L J, Groves B, Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2006, 372: 961
- [91] Buttiglione S, Capetti A, Celotti A, et al. *A&A*, 2009, 495: 1033
- [92] Buttiglione S, Capetti A, Celotti A, et al. *A&A*, 2010, 509: A6
- [93] Shakura N I, Sunyaev R A. *A&A*, 1973, 24: 337
- [94] McAlpine K, Jarvis M J, Bonfield D G. *MNRAS*, 2013, 436: 1084
- [95] Best P N, Heckman T M. *MNRAS*, 2012, 421: 1569
- [96] Hardcastle M J, Evans D A, Croston J H. *MNRAS*, 2006, 370: 1893
- [97] Ogle P, Whysong D, Antonucci R. *ApJ*, 2006, 647: 161
- [98] Chiaberge M, Macchetto F D, Sparks W B, et al. *ApJ*, 2002, 571: 247
- [99] Evans D A, Worrall D M, Hardcastle M J, et al. *ApJ*, 2006, 642: 96
- [100] Kochanek C S, Eisenstein D J, Cool R J, et al. *ApJS*, 2012, 200: 8
- [101] Hale C L, Schwarz D J, Best P N, et al. *MNRAS*, 2024, 527: 6540

- [102] DiPompeo M A, Runnoe J C, Myers A D, et al. *ApJ*, 2013, 774: 24
- [103] Intema H T, van Weeren R J, Röttgering H J A, et al. *A&A*, 2011, 535: A38
- [104] Ghosh A, Prasad J, Bharadwaj S, et al. *MNRAS*, 2012, 426: 3295
- [105] Williams W L, Intema H T, Röttgering H J A. *A&A*, 2013, 549: A55
- [106] Lane W M, Cotton W D, van Velzen S, et al. *MNRAS*, 2014, 440: 327
- [107] Massardi M, Bonaldi A, Negrello M, et al. *MNRAS*, 2010, 404: 532
- [108] Offringa A R, McKinley B, Hurley-Walker N, et al. *MNRAS*, 2014, 444: 606
- [109] de Gasperin F, Williams W L, Best P, et al. *A&A*, 2021, 648: A104
- [110] Mohan N, Rafferty D. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ascl.soft02007M>, 2015
- [111] Kaiser N, Aussel H, Burke B E, et al. *SPIE*, 2002, 4836: 154
- [112] Kaiser N, Burgett W, Chambers K, et al. *SPIE*, 2010, 7733: 77330E
- [113] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. *AJ*, 2010, 140: 1868
- [114] Williams W L, Hardcastle M J, Best P N, et al. *A&A*, 2019, 622: A2
- [115] Duncan K J, Sabater J, Röttgering H J A, et al. *A&A*, 2019, 622: A3
- [116] Shimwell T W, Hardcastle M J, Tasse C, et al. *A&A*, 2022, 659: A1
- [117] da Cunha E, Charlot S, Elbaz D. *MNRAS*, 2008, 388: 1595
- [118] Carnall A C, McLure R J, Dunlop J S, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 4379
- [119] Carnall A C, Leja J, Johnson B D, et al. *ApJ*, 2019, 873: 44
- [120] Burgarella D, Buat V, Iglesias-Páramo J. *MNRAS*, 2005, 360: 1413
- [121] Noll S, Burgarella D, Giovannoli E, et al. *A&A*, 2009, 507: 1793
- [122] Boquien M, Burgarella D, Roehlly Y, et al. *A&A*, 2019, 622: A103
- [123] Calistro Rivera G, Lusso E, Hennawi J F, et al. *ApJ*, 2016, 833: 98
- [124] Williams W L, Calistro Rivera G, Best P N, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 3429
- [125] Whittam I H, Jarvis M J, Hale C L, et al. *MNRAS*, 2022, 516: 245
- [126] Kondapally R, Best P N, Cochrane R K, et al. *MNRAS*, 2022, 513: 3742
- [127] Cochrane R K, Kondapally R, Best P N, et al. *MNRAS*, 2023, 523: 6082
- [128] Willott C J, Rawlings S, Blundell K M, et al. *MNRAS*, 2002, 335: 1120
- [129] Lacy M, Bunker A J, Ridgway S E. *AJ*, 2000, 120: 68
- [130] Willott C J, Rawlings S, Jarvis M J, et al. *MNRAS*, 2003, 339: 173
- [131] Condon J J, Cotton W D, Greisen E W, et al. *AJ*, 1998, 115: 1693
- [132] Brunetti G, Giacintucci S, Cassano R, et al. *Nature*, 2008, 455: 944
- [133] Kothes R, Landecker T L, Reich W, et al. *ApJ*, 2008, 687: 516
- [134] Argo M K, Paragi Z, Röttgering H, et al. *MNRAS*, 2013, 431: L58
- [135] Bernardi G, Greenhill L J, Mitchell D A, et al. *ApJ*, 2013, 771: 105
- [136] van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. *A&A*, 2013, 556: A2
- [137] Taylor G B, Ellingson S W, Kassim N E, et al. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2012, 1: 1250004
- [138] Matthews A M, Kelson D D, Newman A B, et al. *ApJ*, 2024, 966: 194
- [139] Li Y, Xu Y, Li J, et al. *arXiv e-prints*, 2024: arXiv:2404.14663
- [140] Cornu D, Salomé P, Semelin B, et al. *A&A*, 2024, 690: A211
- [141] Todarello E, Scaffidi A, Regis M, et al. *JCAP*, 2024, 2024: 062
- [142] He M, Zheng Q, Guo Q, et al. *MNRAS*, 2024, 529: 3140
- [143] Duchesne S W, Grundy J A, Heald G H, et al. *PASA*, 2024, 41: e003
- [144] Ueda Y, Akiyama M, Ohta K, et al. *ApJ*, 2003, 598: 886
- [145] Yun M S, Reddy N A, Condon J J. *ApJ*, 2001, 554: 803
- [146] Blundell K M, Rawlings S, Willott C J. *AJ*, 1999, 117: 677
- [147] Broeils A H, Rhee M H. *A&A*, 1997, 324: 877
- [148] Croom S M, Boyle B J, Shanks T, et al. *MNRAS*, 2005, 356: 415
- [149] Overzier R A, Röttgering H J A, Rengelink R B, et al. *A&A*, 2003, 405: 53
- [150] Farrah D, Lonsdale C J, Borys C, et al. *ApJL*, 2006, 641: L17

- [151] Swinbank A M, Chapman S C, Smail I, et al. MNRAS, 2006, 371: 465
- [152] Hales C A, Norris R P, Gaensler B M, et al. MNRAS, 2014, 440: 3113
- [153] Galluzzi V, Massardi M, Bonaldi A, et al. MNRAS, 2018, 475: 1306
- [154] Murphy T, Sadler E M, Ekers R D, et al. MNRAS, 2010, 402: 2403
- [155] Cai Z Y, Lapi A, Xia J Q, et al. ApJ, 2013, 768: 21
- [156] Mancuso C, Lapi A, Cai Z Y, et al. ApJ, 2015, 810: 72
- [157] Aversa R, Lapi A, de Zotti G, et al. ApJ, 2015, 810: 74
- [158] Barthel P D. ApJ, 1989, 336: 606
- [159] Singal A K, Laxmi Singh R. ApJ, 2013, 766: 37
- [160] Boroson T A. American Astronomical Society Meeting Abstracts: Vol. 217. America: AAS, 2011: 142.22
- [161] Shen S, Mo H J, White S D M, et al. MNRAS, 2003, 343: 978
- [162] Lin Y T, Shen Y, Strauss M A, et al. ApJ, 2010, 723: 1119
- [163] Tunbridge B, Harrison I, Brown M L. MNRAS, 2016, 463: 3339
- [164] Janssen R M J, Röttgering H J A, Best P N, et al. A&A, 2012, 541: A62
- [165] Nakoneczny S J, Alonso D, Bilicki M, et al. A&A, 2024, 681: A105
- [166] Miley G, De Breuck C. A&A Rev, 2008, 15: 67
- [167] Fan X, SDSS Collaboration. Next Generation Wide-Field Multi-Object Spectroscopy: Vol. 280. San Francisco: ASP, 2002: 43

Review of Low-Frequency Radio Point Source Catalogues

LIN Jinyang¹, ZHU Zhenghao², MA Renyi¹

(1. College of Physical Sciences and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Low-frequency radio point sources play a crucial role in astronomical research. Besides helping to understand the evolutionary history of galaxies, they also serve as a major foreground contamination in the detection of the 21 cm signal from the Epoch of Reionization (EoR signal). Observations at low frequencies are essential for studying and comprehending the properties of radio point sources. This paper describes the radiation mechanisms of radio point sources and presents catalogues from current low-frequency radio point source observations. These catalogues significantly aid in the study of radio point source classification, redshift distribution, flux distribution, luminosity function, and spectral indices. Additionally, detailed descriptions are provided for the simulation methods of major existing radio point source simulation software and the resulting radio point source catalogues. These simulation tools and data are of paramount importance for a profound understanding of the statistical properties and cosmological significance of radio point sources.

Key words: radio galaxy; active galactic nucleus; catalogue