

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.03.02

# 行星状星云测距的研究现状

杨媛媛<sup>1,2</sup>, 朱 辉<sup>1,2</sup>, 田文武<sup>1</sup>, 吴 丹<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875; 4. 北京市文化遗产数字化保护与虚拟现实重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 行星状星云是研究恒星演化、星际介质与星系化学形成历史与演化等问题的重要探针。距离是行星状星云的基本物理参数, 对研究其大小、光度、电离质量、形成率、空间密度和在银河系内的分布等性质至关重要。河内行星状星云距离的研究已有几十年历史, 但其测距结果的准确性普遍偏低, 仅有 31 颗距离的不确定度在 20% 内。概述了行星状星云测距的 9 种主要方法, 即: 三角视差法、星团成员法、膨胀视差法、分光视差法、红化方法、Na D 线吸收法、中心重力法、统计方法、运动学方法。着重介绍运动学测距法, 用于测量受银道面上消光严重或没有可观测中心星但射电较明亮的行星状星云距离, 为将来进一步的测距工作提供参考。

**关键词:** 行星状星云; 测距方法; 运动学距离; 中性氢

**中图分类号:** P155.1<sup>+2</sup>      **文献标识码:** A

## 1 背 景

中小质量恒星 ( $0.8 \sim 8 M_{\odot}$ ) 演化到渐近巨星分支 (AGB) 的晚期会通过热脉冲的方式抛出壳层的大部分物质, 其中心的致密核则形成炽热的白矮星。白矮星发出的光子会使抛出的壳层物质逐步电离, 形成电离星云。在早期观测中, 电离星云的形态与天王星相似, 由此而得名“行星状星云”(PNe)。从夏尔·梅西耶于 1764 年首次观测到 PNe 至今, 银河系内发现的 PNe 数目已达到约 3500 颗<sup>[1]</sup>。这些 PNe 典型直径约为 1 光年, 由粒子密度为  $10^2 \sim 10^4 / \text{cm}^3$  的稀薄气体组成<sup>[2]</sup>。它们处于复杂的星际环境中, 温度从边缘冷区的  $10^2 \text{ K}$  到中心热区的  $10^6 \text{ K}$ , 辐射波段覆盖了从射电到 X 射线<sup>[2]</sup>。银河系内的 PNe 主要分布在银道面上, 主要集中在银心周围<sup>[3]</sup>。PNe 的形态多种多样, 一般表现为恒星状、盘状、环状、螺旋状、双极、四极和不规则形态<sup>[2]</sup>, 其中约有 20% 具有球对称结构<sup>[4]</sup>。Peimbert<sup>[5]</sup> 根据 PNe 的起源和性质将其分为四类: (1) 具有最大质量前身星的 PNe, 氦和氮元素丰度高; (2)

收稿日期: 2015-01-13; 修回日期: 2015-04-08

资助项目: 国家自然科学基金 (211381001, 11473038); 973 项目 (2012CB821800, 2013CB837901)

通讯作者: 田文武, tww@bao.ac.cn

位于银盘的 PNe, 分为富氮与贫氮; (3) 具有较老前身星的 PNe, 距银盘较远, 重金属丰度低; (4) 银晕中的 PNe。后续学者又增加了第五类: 位于银心的 PNe, 且质量与化学成分变化大<sup>[6-8]</sup>。在 PNe 阶段, 恒星不断通过核聚变产生更重的元素, 并通过向外抛射大量物质的过程完成了自身对星际介质的反馈, 同时有效地增加了星际介质中金属元素的丰度。因此, PNe 是研究恒星质量损失物理过程与演化时标的有效手段<sup>[9]</sup>, 对研究恒星演化, 星际介质与星系化学的形成历史与演化具有重要意义<sup>[10]</sup>。PNe 的形态多样, 大约有 80% 的 PNe 形态是非球形对称的<sup>[4]</sup>, 对 PNe 多种形态成因的研究可以检验恒星演化的双星理论<sup>[11]</sup>和探究磁场在 PNe 形成中所起的作用<sup>[12]</sup>。由于 PNe 的诞生率与其前身星的诞生率相同<sup>[13]</sup>, 因此研究 PNe 在星系尺度上的分布特征可以给出恒星形成历史。河外 PNe 光度函数是得到广泛认可的测距指针<sup>[14]</sup>, 测距精度在 10% 以内。精确测距对旋涡与椭圆星系以及星系团介质的动力学研究非常重要。此外, 研究 PNe 的动力学性质, 根据其视线速度分布的各向异性, 可以作为存在星系中暗物质分布的指示<sup>[15, 16]</sup>, 也能限制巨椭圆星系的暗物质晕的质量<sup>[17]</sup>。

针对 PNe 本身的研究情况, 仍然存在很多问题悬而未决。这些问题大多被 PNe 距离的低测量准确度所限制。精确的距离测量值可以更为准确地定出 PNe 的基本物理参数, 如: 电离质量、大小、光度等, 进一步研究其空间分布、密度、形成率、银河系分布、中心星的演化状态以及对星际化学演化的贡献等问题。但迄今为止, 我们对其距离知之甚少。下面介绍目前 PNe 的测距方法。

## 2 行星状星云测距方法

根据测距过程中是否依赖 PNe 本身的观测性质, PNe 测距方法可分为直接测距法与间接测距方法。直接测距法包括: 三角视差法、膨胀视差法、红化方法、Na D 线吸收法、中心星重力法等; 间接测距法包括: 星团成员法、分光视差法、统计方法、运动学方法。这些方法要么基于 PNe 和 PNe 中心星 (CSPN) 本身性质, 要么依赖于物理假设。实际上, 对近 3500 颗银河系内的 PNe 来说, 仅有 31 颗所测距离比较可靠, 距离的不确定度在 20% 内 (见附录)。总得来说, 银河系内 PNe 距离的不确定度大多高于 20%。测距结果的不确定性促使我们进一步研究测距方法, 从而改进并提高 PNe 测距的可靠性。下面将从测距原理、测距研究现状、测距存在问题等方面介绍 PNe 测距。

### 2.1 三角视差法

该测距法是测 CSPNs 的视差并估算出距离, 如图 1 所示, 利用简单的距离与视差几何关系得到距离公式:

$$d = \frac{1}{\pi''} \text{ (pc)} , \quad (1)$$

只需求出绝对视差  $\pi''$ , 即可估算距离  $d$ 。可进一步分为光学三角视差法和射电三角视差法。

测量 CSPN 光学三角视差主要分为两个步骤: (1) 直接测出 CSPNs 和视场星的视差; (2) 根据参考星定出视差误差, 即根据它们光谱型与光度型推出相应的绝对星等  $M_V$ 、视星等  $V$ 、消光系数  $A_V^*$ , 得到距离从而导出绝对视差:  $\pi'' = 10^{\frac{-(V-M_V+5-A_V^*)}{5}}$ , 得到视差误差  $\sigma_\pi$ ,

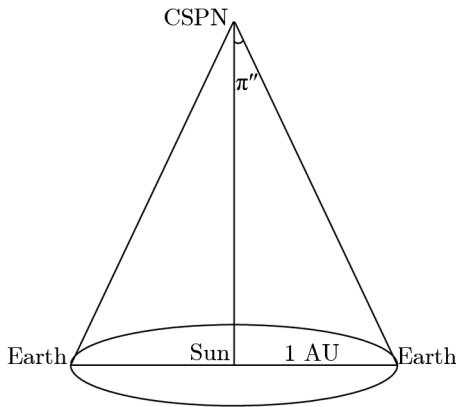


图 1 三角视差测距法示意图

再结合第一步的结果可求得 CSPN 的绝对视差<sup>[22]</sup>。此外,用光学三角视差法测距的 PNe 往往需要满足一些条件<sup>[18]</sup>:(1)所测 PNe 距离一般小于 1 kpc;(2) CSPN 光度达到一定亮度;(3)视场里的参考星足够亮。这些条件降低了光学三角视差法适用范围。另外,还可以在射电波段利用甚长基线(VLBI)测 PNe 中脉泽的视差,估算 PNe 距离。射电三角视差的固有误差很小,但是局限性在于有脉泽的 PNe 非常少。Tafayo 等人首次通过测 PNe 中水脉泽的视差来估计 K3-35 的距离,其结果的不确定度为 18%<sup>[19]</sup>。

目前已测出约 30 颗 PNe 的视差,仅有 16 颗距离的不确定度  $\sigma_\pi/\pi$  小于 20%,较为可靠<sup>[18-21]</sup>。受到探测器性能影响,早期对 PNe 三角视差的测量,一般都伴有很大的误差。Van Altena 等人测出 24 颗 CSPNs 的视差,只有 1 颗(NGC 7293)视差误差小于 8 mas<sup>[22]</sup>。Acker 等人<sup>[23]</sup>和 Pottasch 等人<sup>[24]</sup>测出 19 颗 CSPNs 的视差,只有 4 颗视差不确定度在 50% 内。随着具有高信噪比、高电子动态范围、高量子效率的 CCD 应用到三角视差测量上,大大降低了其测距的不确定度。Harris 等人利用依巴谷卫星(Hipparcos)测出 16 颗 CSPNs 的视差,平均误差为 0.42 mas<sup>[18]</sup>。最近,Benedict 等人测得 4 颗 CSPNs 的视差,其结果的不确定度小于 8%,平均不确定度为 5%<sup>[21]</sup>。

依巴谷卫星后继者——盖亚空间望远镜(Gaia)将是未来三角视差法测距的重要工具。Gaia 计划测量 10 亿颗恒星的位置、距离及自行,测距误差可达  $10 \mu\text{as}$ <sup>[25]</sup>,直观上理解,相当于可以测量在 1000 km 以外 1 根头发的直径。比如 1 颗视星等为 15 mag 的 CSPN,当位于 1、5 和 10 kpc 处,用盖亚望远镜测距的不确定度分别为 3%、13% 和 26%<sup>[26]</sup>。当 CSPN 的视星等为 16 mag 时,用盖亚望远镜测距的预计数目约为 50 ~ 70<sup>[27]</sup>。

## 2.2 膨胀视差法

膨胀视差法测距是利用膨胀速度、角度膨胀率与距离之间的关系:

$$D = \frac{V_m}{\dot{\theta}} = 211 \frac{V_m}{\dot{\theta}} (\text{pc}), \quad (2)$$

其中  $D$  为距离,  $V_m$  为膨胀速度,  $\dot{\theta}$  为角膨胀率。膨胀速度由谱线决定(一般是 [O III] 或者  $\text{H}\alpha$  线),而估算角度膨胀率的方法有两种:放大法和梯度法。放大法假定 PNe 是球形对称且具有共同膨胀率,引入放大因子  $M$ ,用第一时期的观测图片乘以放大因子  $M$  减去第二时期的图片,使残差最小化,确定放大因子;再结合两个时期的时间差  $t$ ,得到角度膨胀率  $\dot{\theta} = \frac{(M-1)\theta}{t}$ 。梯度法根据 PNe 在两个时间内流量差幅度值与流量的梯度之比来求出角度膨胀差  $\Delta\theta = \frac{\Delta F}{\nabla F}$ ,其中  $\Delta F$  为流量变化幅度值,  $\nabla F$  为流量的梯度<sup>[28]</sup>。这两种方法计算角度变化互为补充,放大法可快速直接给出两个时期图片膨胀差值,算出角度变化。当两个时期图片角度膨胀差别非常小,并且流量较强,那么用梯度法来计算角度膨胀率就更加准确<sup>[28]</sup>,如图 2 所示。

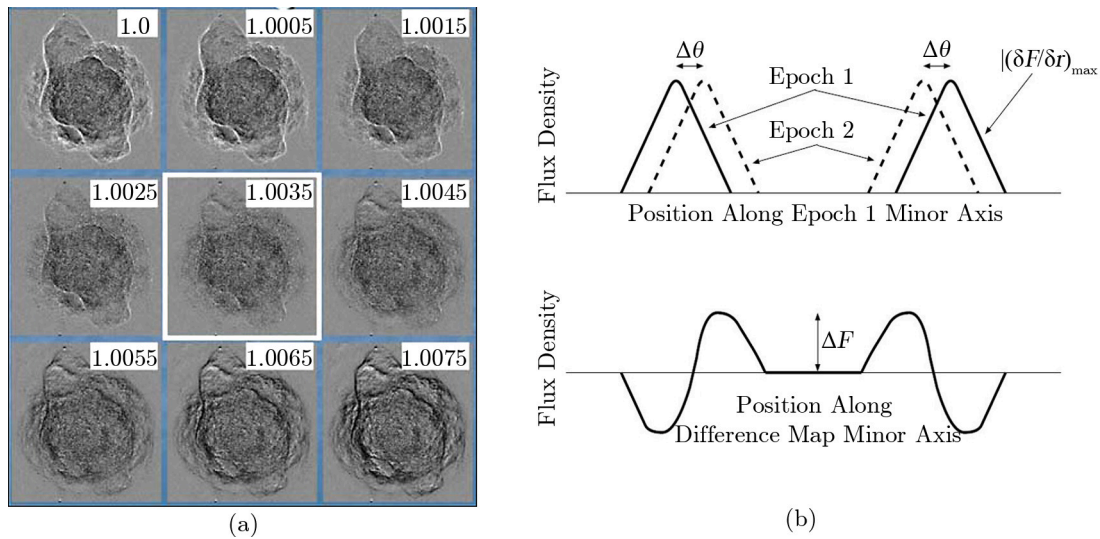


图 2 放大法和梯度法计算 PNe 角度膨胀率的示意图<sup>[27]</sup>

(a) 对应放大法, 以 NGC 3918 为例, 右上角为放大因子  $M$  值, 不同的放大因子  $M$  值对应不同的由两个观测时期相减得到的残差图, 图中显示当放大因子  $M = 1.0035$  时残差最小。(b) 对应梯度法, 图中上半部分表示在两个观测时期的不同角半径  $r$  处的流量梯度  $\nabla F = (\delta F / \delta r)_{\max}$ , 下半部分表示两个观测时期相同位置处流量差值  $\Delta F$ 。

由于 PNe 的典型膨胀速度为  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在  $1 \text{ kpc}$  处一年时间内视差膨胀  $2 \text{ mas}$ , 因而膨胀视差法一般用于  $3 \text{ kpc}$  内的 PNe。如此小的膨胀速度, 为了测得精确膨胀视差, 往往需要观测时间差长达几十年, 并且不同时期观测仪器、感光系统、消光系统的不同导致系统误差比较大, 结果并不理想<sup>[29]</sup>。Latypov 在 1957 年首次对 NGC 6720 在  $50 \text{ a}$  的时标里进行膨胀视差测距, Cudovicera 在 1965 年对 NGC 6853、NGC 7662 在时标为  $22 \text{ a}$  和  $26 \text{ a}$  间隔内测视差, Liller 在 1965 年对 NGC 7009 在  $50 \text{ a}$  的时间里测视差<sup>[30]</sup>。随后 1966 年, Liller 首次系统地对 14 颗 PNe 进行膨胀视差测距, 观测时标为  $44 \sim 62 \text{ a}$ <sup>[31]</sup>。

射电综合孔径阵成像的兴起不但缩短了观测时标, 并且具有更高的信噪比和更低的系统误差。Terzian 于 1980 年首次用甚大射电望远镜阵 (VLA) 测膨胀视差, 将观测时间缩短到  $10 \text{ a}$  内<sup>[32]</sup>。Hajian 等人用  $5.5 \text{ a}$  的时间数据得到膨胀视差并估计了 2 颗 PNe 的距离<sup>[33]</sup>。随后, Hajian 等人用 VLA 对 12 颗 PNe 进行膨胀视差测距<sup>[29]</sup>。

目前用膨胀视差法算出约 30 颗 PNe 距离<sup>[29-31]</sup>, 射电图像的膨胀视差法的不确定性已小至 25%, 但是可测数目少。Terzian<sup>[30]</sup> 总结不同时期、不同研究者对同一个目标源用射电和光学方法测量的膨胀视差, 得到了大致相同的结果, 认为膨胀视差是测 PNe 距离的有效方法。但是其也有一定的局限性: 首先, 膨胀速度利用谱线速度 (一般是  $[\text{O III}]$  或者  $\text{H}\alpha$  线) 对于不同形状和倾斜度的 PNe 存在误差; 其次, 计算角度膨胀率时假定 PNe 是球形对称且各个方向具有相同的膨胀率, 而实际上膨胀往往不均匀而存在误差。此外, Marten<sup>[34]</sup> 等人和 Steffen<sup>[35]</sup> 等人认为由谱线决定的膨胀速度与膨胀的激波速度不一致, 而 Mellema<sup>[36]</sup> 通过计算给出膨胀速度比谱线速度大  $20\% \sim 30\%$ , 认为以往的膨胀视差测距结果可能偏小了

20% ~ 30%。

### 2.3 红化方法

红化方法(或消光方法)测距的前提是假定沿着视线方向的消光是均匀的,通过测量周围的恒星光谱和光度得到它们的距离和红化来估计 PNe 视线方向的红化距离关系,再结合 PNe 的红化估算 PNe 距离。红化方法测距的优势在于不必依赖 PNe 的任何理论模型,并可以对近银盘的所有 PNe 适用<sup>[40]</sup>。红化方法测距要求已知: PNe 的红化、PNe 视线方向上恒星的距离与红化关系<sup>[41]</sup>。首先, PNe 的红化  $E_{B-V}$  可以通过测 PNe 的射电流量与 H $\beta$  强度的比值, H I 的巴尔末线强度比值, He II 线的强度比,  $\lambda 2200$  波长的吸收等方法估计<sup>[41]</sup>;其次,观测 PNe 周围恒星,定出它们的距离和红化以导出它们的距离红化关系,进而用来估算 PNe 距离。

Lutz<sup>[42]</sup> 利用每颗 PNe 周围约 10 颗场星的红化距离关系算出 6 颗 PNe 距离。Acker<sup>[43]</sup> 利用红化距离关系得到 11 颗 PNe 距离。Gathier 和 Pottasch<sup>[41]</sup> 利用每颗 PNe 周围约 50 颗场星定出 13 颗 PNe 距离。Lucke<sup>[44]</sup> 根据平均的红化与距离关系得到 34 颗银盘上的 PNe 距离。Kaler 等人<sup>[45]</sup> 放弃了前人对色余的线性拟合,而是拟合色余的带状结构,恒星的平均距离落在带中,估算出 8 颗 PNe 距离。Giammanco 等人<sup>[46]</sup> 利用消光与距离的关系对 137 颗样本进行估算,得到较为可靠的 70 颗 PNe 距离。目前约有 90 颗 PNe 通过红化方法得出距离<sup>[41-44, 46]</sup>, 此方法测距的不确定度主要由红化测量的不确定度决定,并受红化距离关系拟合误差影响。误差根源主要来自:(1)假定星际尘埃在银河系分布均匀,由于星际介质中尘埃在小尺度( $1^\circ$  内)存在结构,那么周围恒星得到的红化距离关系代替 PNe 的红化距离关系会不够准确;(2)系统误差影响恒星的绝对星等校准,影响红化距离关系。

银河系平均消光随着纬度变化,低纬度消光大,高纬度消光小,但是随距离的变化不大。对于那些消光不能很好估计的 PNe,红化方法测距就不适用,可以用 Na D 线吸收来估计距离。Na D 线吸收( $5890 \text{ \AA} / 5896 \text{ \AA}$ )方法与红化方法类似,主要通过测量 PNe 附近已知距离的数颗恒星 Na D 线消光,通过对比得出距离。Na D 线吸收法还通过<sup>[47]</sup>构建银河系银盘的 Na D 线强度分布图,与测量结果比较,估计距离。Napiwotzki 等人<sup>[48]</sup>用此方法得到 21 颗 PNe 距离。此方法要求 PNe 的银纬  $|b| < 20^\circ$  和银盘高度为  $|z| < 200 \text{ pc}$ ,并且利用平均的星际谱线消光以降低其测距结果的可靠性。

### 2.4 中心星重力方法

中心重力法是依赖 PNe 中心星的性质来测距,利用中心星的谱线轮廓,或元素丰度(O,N),或运动学性质,或形态特征,给出中心星的重力加速度  $g$ ,有效温度  $T_{\text{eff}}$  和质量  $M$ ,通过理论模型估算 PNe 距离。测量精度主要受到  $g$ ,  $T_{\text{eff}}$ ,  $M$  测量精度影响。

利用中心星测距主要是通过观测其谱线,再根据大气模型得到中心星的大气参数,如有效温度  $T_{\text{eff}}$ ,重力加速度  $g$ 。Mendez 等人<sup>[49]</sup>给出非局部热平衡(NLTE)模型,距离与 PNe 中心星参数关系:  $d^2 \propto M_\odot F_* g^{-1} 10^{0.4V_0} (\text{kpc})$ ,其中  $d$  是距离,  $F_*$  是波长  $5480 \text{ \AA}$  的单色流量,  $g$  是表面重力加速度。消光后的视星等  $V_0 = V - 2.175c$ ,  $c$  是 H $\beta$  的对数消光指数。估算距离需要知道 CSPN 的质量、重力加速度  $g$  以及有效温度  $T_{\text{eff}}$ ,进行质量估计,方法包括:

(1) 利用  $\lg T_{\text{eff}} - \lg g$  图表与恒星渐进巨星支时演化轨迹对比得出质量<sup>[50]</sup>; (2) 利用质量与 N/O 丰度比的经验关系确定质量<sup>[51]</sup>。根据 Santolaya-Rey 等人<sup>[52]</sup> 首创的非局部热平衡球形对称的大气模型, 利用 H $\beta$  或 H $\gamma$  观测吸收的线轮廓拟合得出重力加速度  $g$ , 再利用 He I 与 He II 的强度比得出有效温度  $T_{\text{eff}}$ , 具体步骤如下: 先根据光谱分析, 得到几个初始有效温度  $T_{\text{eff}}$ ; 然后根据有效温度结合 H $\gamma$  或者 H $\beta$  强度得到  $\lg g$ , 拟合  $\lg g$  与  $T_{\text{eff}}$  在  $\lg T_{\text{eff}} - \lg g$  的分布, 限定最终值; 再利用 He I 与 He II 的吸收线给出初始 He I 与 He 丰度, 在此基础上导出更准确的  $T_{\text{eff}}$ , 重复以上步骤; 最后, 通过反复地拟合 H 和 He 的吸收线轮廓给出所有参数的最佳数值<sup>[49]</sup>。此方法不确定度由 PNe 观测得到的初始参数决定, 初始参数越多, 得到的距离越精准。目前约 300 颗 PNe 利用中心星重力法进行计算, 得到距离<sup>[49, 53, 55]</sup>。

## 2.5 星团成员法

该测距方法利用 PNe 所在星团的距离来估计 PNe 距离。根据 PNe 和星团的坐标、角分离度、视线速度、红化、色余等性质的相关性, 可以判定他们是否成协。星团测距取决于其颜色星等关系, 可靠性比较高, 因此星团成员法可以把部分与星团成协的 PNe 距离定得很准。PNe 与星团成协划分为两类: PNe 与疏散星团成协以及 PNe 与球状星团成协。成协的 CSPN 需要满足以下条件<sup>[56]</sup>: (1) 由于 PNe 是被中心星电离产生辐射的, 那么 CSPN 的质量需大于  $0.55 M_{\odot}$ , 使 PNe 在消散之前能够被电离; (2) 我们一般通过 [O III] 发射线观测 PNe, 那么 CSPN 的温度不得低于电离 [O III] 的临界温度 40000 K。此外, PNe 与疏散星团的成协几率还受其本身因素的影响: (1) PNe 多数集中在银核周围, 而疏散星团是随机分布的, 从而降低了成协几率; (2) PNe 的寿命短暂 ( $10^4$  a), 疏散星团的年龄长很多 ( $10^8$  a), 部分原本与疏散星团成协的 PNe 很可能早已消散<sup>[3]</sup>。PNe 与球状星团成协的发现<sup>[56]</sup>, 扩大了样本, 但确定 PNe 与星团物理成协仍非常困难。Jacoby 等人在 130 个球状星团中找到最可能成协的 4 颗 PNe 候选体<sup>[56]</sup>, 在 M31 的 467 个星团中找到 5 颗成协可能性最大的 PNe<sup>[57]</sup>。最近, Bonatto 等人确定两颗 PNe 与疏散星团物理成协<sup>[58]</sup>。

目前用星团成员法确定距离的 PNe 约 15 颗<sup>[56-59]</sup>, 其中位于疏散星团 Andrews-Lindsay 1 中的 PNe PHR 1315-6555 得到的距离不确定性小至 4%, 是迄今为止 PNe 测距精度最高的<sup>[59]</sup>。星团中的 PNe 可能远比我们发现的多, 由于其距离远以及其寿命短, 阻碍了我们的观测, 因而用星团成员法确定距离的 PNe 数目非常有限。

## 2.6 分光视差法

分光视差法测 PNe 距离是利用 CSPN 伴星的性质估算双星系统距离, 从而给出 PNe 距离。该方法的关键是判定 PNe 是否处于双星系统中。搜寻 PNe 双星系统方法包括: (1) 直接从 CCD 图中寻找 CSPN 伴星; (2) 根据掩食作用引起的光谱亮度变化寻找 CSPN 伴星; (3) 根据双星中视线速度变化寻找 CSPN 伴星等<sup>[63]</sup>。Ciardullo 等人<sup>[64]</sup> 提出, 可根据视场的观测面积与恒星数目估计 PNe 处于双星系统的泊松概率  $P = 1 - (1 - \pi\rho^2/A)^N$ , 其中  $A$  为每次观测总面积,  $N$  为不暗于伴星的恒星数,  $\rho$  双星之间的角距离。 $P$  越小则存在成对伴星的可能性越大。其次, 估算伴星的距离还需要知道消光: 利用 PNe 的 H $\alpha$  与 H $\beta$  流量强度比与理论值对比可以求出消光后的 H $\beta$  值。通过修正消光, 然后把伴星对应于主序线上或白矮星冷

却曲线上的恒星, 估计距离<sup>[64]</sup>。或根据伴星的光谱类型定伴星的物理参数, 利用伴星类型以及相应的经验关系(颜色星等关系, 有效温度)得出视星等, 结合绝对星等关系<sup>[65]</sup>估计距离。此外, 当 CSPN 处于目视双星系统中, 且轨道参数可以很好地确定时, 双星系统的距离还可以通过光学视差  $\pi'' = \frac{a''}{P^{2/3}(m_1 + m_2)^{1/3}}$  得到。其中  $P$  为双星系统的周期,  $a''$  为轨道半长角径,  $m_1$  和  $m_2$  为双星系统中两个子星的质量。 $P$  和  $a''$  可以在决定轨道时得到; 当  $m_1$  和  $m_2$  不能被很好地确定时, 需要假定一个初始质量估计(如  $m_1 + m_2 = 2M_{\odot}$ ), 给出  $\pi''$  的第一级近似值并由这个近似值计算两子星的绝对星等, 然后利用质光关系得到质量  $m_1$  和  $m_2$ ; 反复迭代, 就可以求出准确的  $\pi''$ 。

大约有 80% 的 PNe 形态是非球形不对称的, 可能存在伴星与其相互作用<sup>[66]</sup>。Bond<sup>[69]</sup> 通过光谱变化分析得到, 约 10% 的 PNe 处于短周期双星系统。Marco 等人<sup>[67]</sup> 对 11 颗 PNe 的视线速度分析得到, 10 颗可能处于双星系统, 并统计了已经发现的 23 颗 PNe 的双星系统<sup>[68]</sup>, 认为双星在 PNe 的演化中起着比较基本的作用。

目前已知约有 30 颗在双星系统中的 PNe 通过分光视差估算了距离<sup>[64, 67-69]</sup>, 这些测距结果受消光的影响较大。当处于双星系统的伴星光谱足够准确时, 分光视差测距能定出较准的 PNe 距离, 可以作为统计方法的检验。但发现并确认处于双星系统的 PNe 既难又少, 所以此方法适用范围小。

## 2.7 统计方法

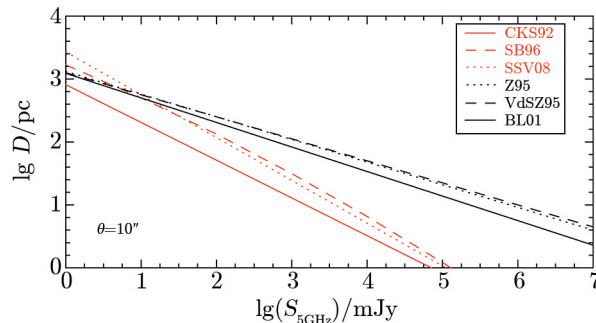
统计方法由 Shklovsky 于 1956 年提出<sup>[70]</sup>, 其前提是假定所有 PNe 形态球对称并且具有相同的电离质量和单一的密度。在此假设上, 距离可以表示为流量与 PNe 半径的函数:  $D \propto F_{\lambda}^{\alpha} \theta^{\beta}$ <sup>[71]</sup>, 光学波段的流量需要进行消光修正, 射电流量不受消光影响从而更准确。为了避免假定所有 PNe 质量相同所带来的误差, 改进的统计方法尝试寻找质量、射电流量密度、光深、半径等 CSPN 参数之间的关系, 主要工作见表 1, 包括: Daub<sup>[72]</sup>、Cahn 等人 (CKS92)<sup>[73]</sup> 和 Stanghellini 等人<sup>[74]</sup> (SSV08) 利用校准的电离质量 ( $M$ ) 和光深关系, Schneider 和 Buckley (SB96)<sup>[75]</sup> 利用校准的射电流量密度 ( $I$ ) 与半径 ( $R$ ) 关系, Vandesteene 和 Zijlstra (VdSZ95)<sup>[76]</sup> 以及 Zhang<sup>[77]</sup> 利用校准的射电亮温度 ( $T_B$ ) 和半径 ( $R$ ) 关系, Bensby 和 Lundstron (BL01)<sup>[78]</sup> 以及 Zhang<sup>[77]</sup> 利用校准的电离质量 ( $M$ ) 和半径 ( $R$ ) 关系等估算距离。这些两两间的关系都可以转化为 5 GHz 射电流量与 PNe 角直径关系。图 3 给出了在 PNe 角距离为  $10''$  时 5 GHz 射电流量与角直径关系对比图。由于 CKS92 文中提出光厚情况下结果不可靠, 而 SSV08 文中指出与 CKS92 的结果更为接近, 所以图 3 是两者在光薄情况下对应的模型。总之, 导出这些校准关系主要包括三个基本步骤: (1) 以已知的某种理论或经验关系为基础; (2) 用已知距离较好的校准 PNe 来拟合这些理论或经验关系; (3) 将第二步拟合好的校准关系应用到大样本 PNe 中。表 1 列举了几个主要的统计方法改进模型, 包括其理论或经验关系、模型的拟合结果、已用的校准 PNe 数目, 以及估算出距离的 PNe 数目。

迄今为止, 利用统计方法估计了约 1000 颗 PNe 的距离<sup>[72-74, 76, 77, 79, 80]</sup>, 是所有估计 PNe 距离方法中最多的。但是用统计方法测量 PNe 距离存在一定问题。首先, 其前提假定与实际情况并不完全相符。PNe 物理性质(质量、形态、填充因子、电离状态等)各不相同, 其



表 1 改进的 Shklovsky 统计模型

Model	Physical or		calibrated	Results
Author	Empirical	Model Fitting Result	PNe	Number
	Relation		Number	
CKS92 <sup>[73]</sup>	$M - \tau$	$\lg D = 2.71 + 0.2 \lg \theta - 0.6 \lg S_{5 \text{ GHz}} (\tau < 3.13)$ $\lg D = 3.96 - 0.6 \lg \theta - 0.2 \lg S_{5 \text{ GHz}} (\tau > 3.13)$	19	778
VdSZ95 <sup>[76]</sup>	$\lg T_B - \lg R$	$\lg D = 3.4 - 0.3 \lg \theta - 0.35 \lg S_{5 \text{ GHz}}$	23	约 778
Z95 <sup>[77]</sup>	$\lg M - \lg R$ $\lg B - \lg R$	$\lg D = 3.39 - 0.27 \lg \theta - 0.36 \lg S_{5 \text{ GHz}}$	132	647
SB96 <sup>[75]</sup>	$\lg I - \lg R$	$\lg D = 3.37 - \lg \theta - 0.026(\lg I)^2 - 0.46 \lg I$	119	未知
BL01 <sup>[78]</sup>	$\lg M - \lg R$	$\lg D = 3.31 - 0.22 \lg \theta - 0.39 \lg S_{5 \text{ GHz}}$	73	109
SSV08 <sup>[74]</sup>	$M - \tau$	$\lg D = 3.06 + 0.37 \lg \theta - 0.68 \lg S_{5 \text{ GHz}} (\tau < 2.1)$ $\lg D = 3.79 - 0.6 \lg \theta - 0.2 \lg S_{5 \text{ GHz}} (\tau > 2.1)$	70	645

图 3 PNe 角直径为  $10''$  时 PNe 的射电 5 GHz 流量 (横坐标) 与距离 (纵坐标) 的关系图

前身星质量在  $0.8 \sim 8 M_{\odot}$  之间, 质量损失不可能一致, 处于电离阶段的年轻 PNe 的电离质量也不尽相同。其次, 由于所用于校准 PNe 的数目、数据质量、所选模型的不同, 统计方法测距结果有差异, 如图 3 中典型远距离模型 (VdSZ95, Z95, BL01)<sup>[76-78]</sup> 与典型近距离模型 (CKS92, SB96, SSV08)<sup>[73-75]</sup>, 在 PNe 的角直径假定为  $10''$  时, 显示出不同的射电 5 GHz 流量与距离的关系。图 3 可以明显看出对于同一射电流量对应的距离有远近之分。改进 Shklovsky 方法得到的不同计算距离模型详情见表 1, 其中 CKS92 和 SSV08 都是对应光薄的模型。Phillips 总结出这两类模型典型差距约为 2 倍<sup>[79]</sup>, 比如 Abell 8 (*PN G167.0 - 00.9*) 距离从近距离的  $1.78 \text{ kpc}$ <sup>[81]</sup>、 $1.67 \text{ kpc}$ <sup>[82]</sup> 到远距离的  $3.23 \text{ kpc}$ <sup>[77]</sup>、 $5.5 \text{ kpc}$ <sup>[46]</sup>。Tuener 等人用星团成员法估算 Abell 8 在疏散星团 Bica 6 中的距离为  $(1.6 \pm 0.11) \text{ kpc}$ , 与近距离值更为接近<sup>[60]</sup>。无论如何, 目前并不清楚哪一种距离值更准确。

统计方法固有误差不少于 30%, 有些误差甚至会达到测量值的 2 倍<sup>[74]</sup>。尽管这一方法有很大的局限性, 但却是 PNe 测距的里程碑, 相对于其他方法, 统计方法能获得大量 PNe 的距离信息, 有助于研究 PNe 的整体性质。未来利用 Gaia 数据得到精确测距结果可以用来修正与限定统计方法中的模型, 将会大幅提高统计方法的可靠性。



## 2.8 运动学方法

运动学测距法包括两种途径：(1) 利用直接测量 PNe 的视向速度结合银河系旋转曲线得到运动学距离。由于 PNe 自身的运动速度与旋转曲线偏离很大 (约  $40 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )<sup>[83]</sup>，该方法误差较大。(2) 利用 PNe 的视线方向上中性氢 (H I) 云团的氢原子 21 cm 吸收和发射谱线，如图 4 所示，位于连续辐射源 (PNe) 背景的 H I 云团产生发射谱线，位于连续辐射源 (PNe) 前景的 H I 云团会产生吸收谱线，尽量使背景与前景云团靠近源区，结合银河系旋转曲线模型给出 PNe 的距离或距离限制。相对于前一方法，首先，H I 自身的运动速度 (平均约  $6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )<sup>[94]</sup> 产生的误差要小于 PNe 自身的运动速度导致的误差；其次，此方法产生的误差主要来源于 PNe 是位于 H I 云团的远端还是近端，是否能够给出清晰的距离或距离限制。此方法的原理是，根据辐射转移得到速度  $v$  处源区 ( $T_{\text{on}}(v)$ ) 和背景区 ( $T_{\text{off}}(v)$ ) 的 H I 亮温度：

$$T_{\text{on}}(v) = T_{\text{B}}(v)(1 - e^{-\tau_{\text{t}}(v)}) + T_{\text{S}}^{\text{C}}(e^{-\tau_{\text{t}}(v)} - 1) , \quad (3)$$

$$T_{\text{off}}(v) = T_{\text{B}}(v)(1 - e^{-\tau_{\text{t}}(v)}) + T_{\text{bg}}^{\text{C}}(e^{-\tau_{\text{t}}(v)} - 1) , \quad (4)$$

两式相减得到 H I 21cm 的吸收谱：

$$e^{-\tau_{\text{t}}(v)} = 1 - \frac{T_{\text{off}}(v) - T_{\text{on}}(v)}{T_{\text{S}}^{\text{C}} - T_{\text{bg}}^{\text{C}}} , \quad (5)$$

其中， $T_{\text{B}}(v)$  是速度  $v$  处 H I 云团的自旋温度， $T_{\text{S}}^{\text{C}}$ 、 $T_{\text{bg}}^{\text{C}}$  分别是速度  $v$  处源区和背景区的连续辐射亮温度， $\tau_{\text{t}}(v)$  是对应的光深<sup>[85]</sup>。在传统获取 H I 吸收谱的方法中，选择的源区与背景区是分离的，由于在源区和背景区两个视线方向上 H I 分布的不均匀性，这样选取背景将会产生假的 H I 吸收谱。

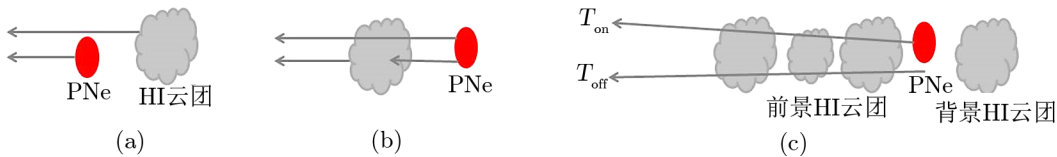


图 4 H I 发射吸收谱测距原理图

(a) H I 云团位于 PNe 的背景，没有吸收；(b) H I 云团位于 PNe 的前景，产生吸收；(c) 更真实的情况，PNe 的周围及视线方向不同位置处有 H I 云团，就会产生 H I 吸收谱。

Tian 等人<sup>[86]</sup>在此基础上发展了一种改进的测距法，即 H I+CO 谱线分析法。首先，采用直接围绕源区选取背景的方法得到 H I 的发射吸收谱；这一选取的优势是不会损失光深，并且背景直接与源区相连，最大程度避免了由于中性氢在银河系分布不均匀性导致的假 H I 吸收线，给出较为可靠距离。然后，分析同一天体方向上 H I 吸收谱线和 CO 发射谱线，由于 CO 发射线是与氢分子碰撞产生，反映了光学薄的冷氢分子云，因而可以找到产生主要吸收的氢分子云，更准确地给出距离限制。并且，还同时选择多个背景区域的 H I 吸收发射谱线以及分析周围射电亮点源的 H I 发射吸收谱，并与源区的对比。这一方法比较全面地考虑了影响精度的因素，很大程度地提高了距离的准确度，已经被用于 PNe<sup>[88]</sup> 和超新星遗迹的

距离测量<sup>[89, 90]</sup>。如图 5 所示的超新星遗迹 Kes 75, (a) 是用 H I+CO 谱线分析法给出的 H I 吸收发射谱线, (b) 给出的是 CO 发射谱。由图 5 中分析可知, 速度为  $102 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  时 (a) H I 无吸收, (b) 存在 CO 发射谱线, 可以断定此处的 H I 云团位于源 Kes 75 的背景; 在速度为  $95 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  处同时存在 H I 的吸收谱和 CO 的发射谱, 表明此处的 H I 云团位于源 Kes 75 前景; 结合银河系旋转曲线模型可以定出 Kes 的距离范围为  $5.1\sim 7.5 \text{ kpc}$ <sup>[87]</sup>。

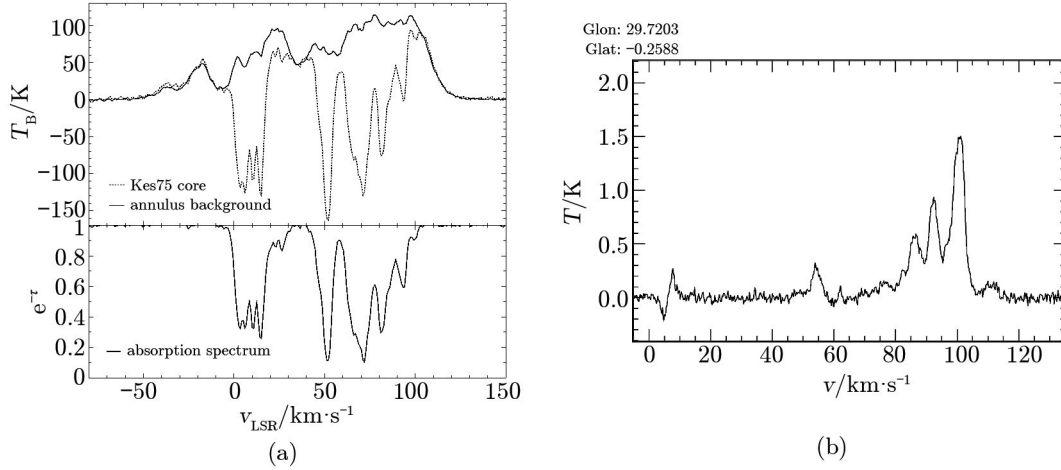


图 5 超新星遗迹 Kes 75 的 H I 发射吸收谱和 CO 发射谱<sup>[87]</sup>

(a) 用改进方法中国绕源区选背景法得到的 H I 的发射吸收谱; (b) 选取与源区相同区域得到的 CO 发射线。

运动学方法依赖于银河系旋转曲线模型。银河系的旋转曲线模型假定云团绕银心做圆周运动。位于距太阳  $D$  处, 银经  $l$ 、银纬  $b$  的云团距银心距离为:

$$R^2 = R_0^2 + D^2 \cos^2 b - 2R_0 D \cos b \cos l, \quad (6)$$

云团的旋转速度:

$$V_R = \frac{R}{R_0} \left( \frac{V_r}{\cos b \sin l} + V_0 \right), \quad (7)$$

其中  $R_0=8.5 \text{ kpc}$ ,  $V_0=220 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  是太阳距银心的距离与旋转速度 (此处采用 1985 IAU 标准), 最近, BeSSeL 计划利用 VLBI 天体物理测量方法得到新的银河系参数  $R_0 = (8.3 \pm 0.23) \text{ kpc}$ ,  $V_0 = (239/246 \pm 7) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[93]</sup>。  $V_r$  是云团相对太阳系运动的视线速度。根据银河系旋转曲线模型  $V_R=V_0$ , 因而得到云团的距离:

$$D = \frac{R_0 \left( \cos l \pm \sqrt{(R/R_0)^2 - \sin^2 l} \right)}{\cos b}. \quad (8)$$

由此可知, 对位于太阳圈内 ( $R/R_0 < 1$ ) 的云团,  $D$  的两个根都为正, 一个视线速度对应远近两个距离  $D$ ; 对位于太阳圈外 ( $R/R_0 > 1$ ) 云团,  $D$  只有一个根为正, 一个视线速度对应一个距离  $D$ , 如图 6 所示。

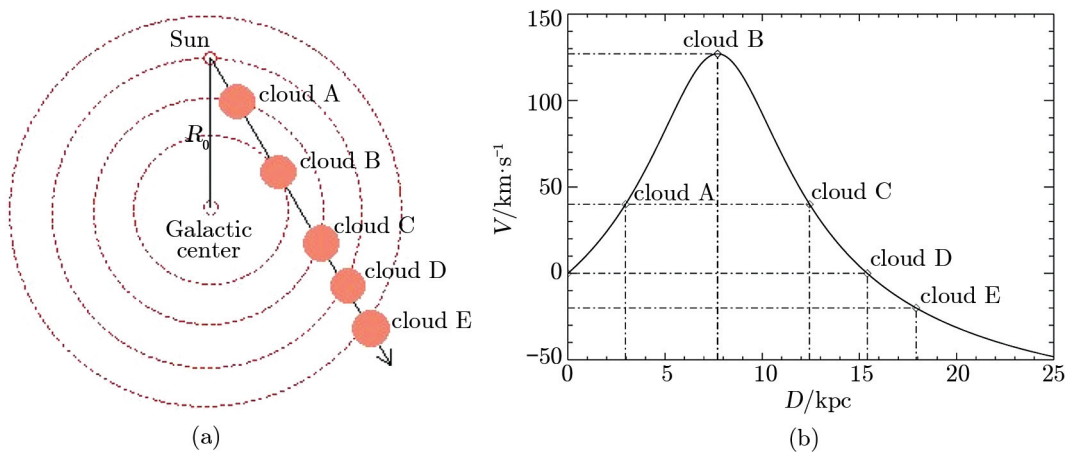


图 6 在某一方向处云团视线速度与距离关系示意图<sup>[91]</sup>

(a) 表示坐标为  $l = 25^\circ, b = 0^\circ$  的云团在视线方向上不同距离处示意图; (b) 表示坐标为  $l = 25^\circ, b = 0^\circ$  的云团视线速度与距离的关系。其中, A 和 C 表示太阳圈内一个视线速度对应远、近两个距离, E 表示太阳圈外一个视线速度对应一个距离。

Gathier<sup>[92]</sup> 得到 24 H I 发射吸收谱线估算出 12 颗 PNe 的距离。Zhu 等人<sup>[88]</sup> 用改进的 H I 发射吸收谱测距法<sup>[86]</sup> 给出两个视线重叠的 PNe (PN G035.5-00.4 与 IRAS 18551+0159) 的运动学距离。此方法受以下方面限制: (1) 银河系旋转曲线局部存在偏离, 影响结果; (2) 同一个视向速度在太阳圈 (以银心为中心, 太阳距银心距离为半径的圆圈) 内对应远、近两个距离, 很难区分; (3) H I 云团本身的随机运动速度平均约为  $6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[94]</sup>, 产生误差; (4) H I 的吸收线一般只给出距离的下限, 由于 H I 分布的不均匀, 远端的 H I 发射线给出的上限不一定最佳。这些问题或多或少地影响测距准确度, 我们需要改进方法来减小可控误差。Tian 等人<sup>[86]</sup> 对方法进行改进, 有效避免了 H I 分布不均匀产生的假吸收谱; 此外, 可以用已知距离的天体构建局部的旋转曲线来修正旋转速度, 减小误差, 可以通过观测是否存在 H I 自吸收 (因自吸收较弱, 如果存在自吸收一般说明在近端距离), 或者根据远、近距离对应的银盘高度与气体云标高对比来判断处于远端还是近端。目前约有十几颗 PNe 用 H I 发射吸收谱测距法估算了距离<sup>[88, 92]</sup>。

### 3 总结与展望

本文概述了行星状星云测距的研究意义, 并详细介绍了现有银河系内行星状星云测距方法的原理、研究现状, 而且进一步讨论了每种方法的可靠性与局限性 (详见表 2)。在近 10 种 PNe 的测距法中, 可靠性较高的有: 三角视差法、膨胀视差法、分光视差法、星团成员法。但是, 这几种方法只能适用于距离比较近 (三角视差法、膨胀视差法) 或者数目比较少 (分光视差法、星团成员法) 的 PNe。利用三角视差测量距离一般在 1 kpc 以内, 目前测得约 30 颗 PNe 的三角视差, 测距不确定度好于 20% 的有 16 颗, 未来利用 Gaia 能够使近距离的 PNe

三角视差测距不确定度好于 5%。膨胀视差的测量范围一般在 3 kpc 以内, 目前测得约 30 颗 PNe 的膨胀视差, 其中测量不确定度好于 25% 的有 8 颗, 但由于谱线速度与激波速度不一致, 带来的误差使其可靠性有所降低。红化方法测得约 90 颗 PNe 的距离, 其结果不确定性受很多因素影响, 目前好于 20% 的有 5 颗。Na D 吸收法主要针对银盘附近的 PNe, 目前测得约 21 颗。中心星重力法测距依赖大气模型, 其不确定性受  $g$ ,  $T_{\text{eff}}$ ,  $M$  测量精度影响, 目前测出的 PNe 约 300 颗。测 PNe 所在星团的距离, 可以由很小的不确定度 (最好 4%) 给出 PNe 的距离限制, 但可测样本少, 目前已知的位于星团内的 PNe 约 15 颗。分光视差主要根据双星系统测距, 目前测得约 30 颗 PNe 的距离, 但是要确定 PNe 是否处于双星系统, 则既难又少。虽然统计方法可以对大量 PNe 测距, 目前测得约 1000 颗 PNe 的距离, 并且在光学、射电、红外波段都适用, 但其固有不确定度大于 30%, 甚至最高可达测量值的 2 倍, 测距结果整体可靠性低, 并且不同作者的测距结果差异大, 我们总结并对比了统计方法中不同模型的测距结果差异。运动学测距法和其他测距方法的很好补充, 其中 H I+CO 谱线运动学法测距的运用, 改进了 PNe 的可靠测距主要通过光学波段观测这个传统, 可以给出部分光学辐射弱而射电辐射强 PNe 较为可靠的距离; 用此方法对 PNe 测距将是我们下一步工作内容。

表 2 PNe 测距法的研究现状

测距方法	测得 PNe 的数目	概况总结
三角视差法	约 30	基本测距法, PNe 距离在 1 kpc 内, 最好的不准确度小于 8%。
膨胀视差法	约 30	要求 PNe 距离在 3 kpc 内, 分为放大法和梯度法, 射电膨胀视差法不准确度已小至 25%。
红化方法	约 90	根据 PNe 周围已知距离恒星的消光或红化, 红化与距离的关系得出 PNe 的距离。
Na D 线吸收法	约 21	PNe 附近恒星的 Na D 线的消光或构建银河系的 Na D 线强度分布图求出距离, 针对银盘附近 PNe。
中心星重力法	约 300	利用 PNe 的 CSPN 性质给出 $g$ , $T_{\text{eff}}$ , $M$ 并与理论模型比较给出 PNe 的距离。误差主要来自 $g$ , $T_{\text{eff}}$ , $M$ 求值过程。
分光视差法	约 40	根据 PNe 的 CSPN 所在双星系统的伴星性质估计距离, 可测样本少。
星团成员法	约 15	依赖 PNe 所在星团距离, 能测较远距离, 准确度高, 可测样本少, 目前最好精度达 4%。
统计方法	约 1000	根据已知距离的 PNe 拟合 PNe 参数的经验关系得出距离。可测样本大, 误差最大可达测量值的 2 倍。
运动学方法	约 40	两类: PNe 自身的运动速度或 PNe 前后 H I 云团的速度结合旋转曲线给出距离限制。直接用误差大, 需要改进。

对于银河系内约 3500 颗 PNe 来说, 目前已有约 1/3 的距离得到测量, 对比分析这些方

法的测距结果 (见表 3), 我们发现同一颗 PNe 用不同方法测距结果可以相差 3 倍多 (如表 3 中 NGC 7009), 甚至更高, 如 NGC 7027 的距离从  $0.18 \text{ kpc}^{[72]}$  到  $1.1 \text{ kpc}^{[97]}$ , NGC 6572 的距离从  $0.41 \text{ kpc}^{[97]}$  到  $2.9 \text{ kpc}^{[53]}$ 。即使是用相同方法, 在不同时期、不同作者之间差距也会很大, 如 NGC 3242 用统计方法得到距离从  $0.52 \text{ kpc}^{[96]}$  到  $1.1 \text{ kpc}^{[73]}$ , BD+30 3639 用膨胀视差测距从  $1.3 \text{ kpc}^{[36]}$  到  $2.68 \text{ kpc}^{[33]}$ 。因此, 这些方法的测距结果可靠性普遍低, 不确定性相差甚大, 最低为 4%, 最高可达观测值的 2 倍。我们总结了目前所有 PNe 测距中不确定度在 20% 内的河内 31 颗 PNe (见附录), 不包括测距结果争议较大的统计方法结果。

表 3 不同测距法的 PNe 测距结果对比

NGC 3242	NGC 6572	NGC 6720	NGC 7009	NGC 7027	NGC 7662	Method
/kpc	/kpc	/kpc	/kpc	/kpc	/kpc	
$1.7^{(1)}$	$0.9^{(1)}$	$0.704^{(13)}$	$1.9^{(1)}$	$0.51^{(1)}$	$1.5^{(1)}$	Parallax
$0.73^{(2)}$	$0.47^{(2)}$	$0.79^{(2)}$	$0.76^{(2)}$	$0.18^{(2)}$	$0.84^{(2)}$	Shklovsky (Mass-radius)
$0.52^{(3)}$	$0.43^{(3)}$	$0.64^{(3)}$	$0.59^{(3)}$	$0.82^{(3)}$	$0.67^{(3)}$	Shklovsky (Brightness-radius)
$0.50^{(4)}$	$0.41^{(4)}$	$0.65^{(4)}$	$0.58^{(4)}$	$1.1^{(4)}$	$0.98^{(4)}$	General Extinction
$1.1^{(5)}$	$0.66^{(5)}$	$0.87^{(5)}$	$1.2^{(5)}$	$0.27^{(5)}$	$1.2^{(5)}$	Shklovsky (Recalib H $\beta$ )
$1.1^{(7)}$	$2.9^{(7)}$	$0.47^{(7)}$	$0.95^{(7)}$	—	$1.6^{(7)}$	CSPN Grav- ity
—	—	$< 2.1^{(6)}$	$1.6^{(8)}$	—	—	Kinematic distance
$0.42^{(11)}$	$1.49^{(11)}$	$0.72^{(14)}$	—	$0.703^{(9)}$	$0.79^{(10)}$	Expansion Parallax
—	—	$1.1^{(12)}$	—	—	—	Spectroscopic Parallax
—	—	$0.99^{(12)}$	—	—	—	Na D

注: 表中上标对应的参考文献为: (1)→[95]; (2)→[72]; (3)→[96]; (4)→[97]; (5)→[73]; (6)→[41]; (7)→[53]; (8)→[84]; (9)→[33]; (10)→[29]; (11)→[39]; (12)→[54]; (13)→[18]; (14)→[98]。

行星状星云测距的研究还面临诸多挑战: 如何减少理论模型对测距结果可靠性的影响; 如何提高统计方法的准确性, 对大量 PNe 进行更准确的测距; 如何更好地确定 PNe 与星团物理成协、PNe 处于双星系统, 来定准距离等。与此同时, PNe 测距也存在许多机遇, 未来的 Gaia 将为 PNe 测距精度带来数量级的提高, 如此精准的距离可以用来作为其他测距方法的有效校准。此外, 已经统计银纬范围  $|b| < 5^\circ$  且观测到的 1.4 GHz 或 5 GHz 射电流量密度大于  $50 \text{ mJy}$  的 PNe 的数目约为 110 颗, 结合目前的 H I 和 CO 巡天数据约可限制十几颗 PNe 的距离。随着未来更高精度、更大天区范围的 H I (如 GASKAP<sup>[100]</sup>) 巡天和 CO (如银河画卷计划<sup>[101]</sup>) 巡天的开展, 将使 H I+CO 谱线运动学法更广泛地应用到 PNe 测距上。

## 参考文献:

- [1] Kwitter K B, Méndez R H, Pena M, et al. RMxAA, 2014, 50: 203
- [2] Osterbrock D E, Ferland G J, eds. CA: University Science Books, 2006, 461
- [3] Majaess D J, Turner D G, Lane D J. PASP, 2007, 119 : 1349
- [4] Jacoby G H, Ferland G J, Korista K T. ApJ, 2001, 560: 272
- [5] Peimbert M. IAUS, 1978, 76: 215
- [6] Maciel W J. IAUS, 1989, 131: 73
- [7] Cuisinier F, Acker A, Maciel W J, et al. A& A, 2000, 353: 543
- [8] Escudero A V, Costa R D D, Maciel W J. A& A, 2004, 414: 211
- [9] Iben Jr I. Phys. Reports, 1995, 250: 2
- [10] Dopita M A, Vassiliadis E, Wood P R, et al. ApJ, 1997, 474: 188
- [11] Bond H E. ASP Conf. Ser., 2000, 199: 115
- [12] Jordan S, Werner K, O'Toole S J. A& A, 2005, 432: 273
- [13] Parker Q A, Frew D J. Asymmetric Planetary Nebulae 5 conference, U.K., Poster Session, 2011: 1
- [14] Jacoby G H, Branch D, Ciardullo R, et al. ASP, 1992, 104: 599
- [15] Méndez R H, Riffeser A, Kudritzki R P, et al. ApJ, 2001, 563: 135
- [16] Dekel A, Stoehr F, Mamon G A, et al. Nature, 2005, 437: 707
- [17] Teodorescu A M, Méndez R H, Bernardi F, et al. ApJ, 2011, 736: 65
- [18] Harris H C, Dahn C C, Canzian B, et al. AJ, 2007, 133: 631
- [19] Tafoya D, Imai H, Gomez Y, et al. PASJ, 2011, 63: 71
- [20] Imai H, Tafoya D, Honma M, et al. PASJ, 2011, 63: 81
- [21] Benedict G F, McArthur B E, Napiwotzki R, et al. AJ, 2009, 138: 1969
- [22] van Altena W F, Lee J T, Hoffleit E D. New Haven, CT: Yale University Observatory, 1995: 634
- [23] Acker A, Fresneau A, Pottasch S R, Jasniewicz G. A& A, 1998, 337: 253
- [24] Pottasch S R, Acker A. A& A, 1998,329: L5
- [25] Gaia mission: <http://www.astronomytoday.com/exploration/gaia.html>
- [26] Manteiga M, Arcay B, Ulla A, et al. IAUS, 2012, 283: 428
- [27] Hajian A R. IAUS, Cambridge University Press, 2006, 234: 41
- [28] Palen S, Balick B, Hajian A R, et al. AJ, 2002, 123: 2666
- [29] Hajian A R, Terzian Y. PASP, 1996, 108: 258
- [30] Terzian Y. IAUS, 1997, 180: 29
- [31] Liller M H, Welther B L, Liller W. ApJ, 1966, 144: 280
- [32] Terzian Y. QJRAS, 1980, 21: 82
- [33] Hajian A R, Terzian Y, Bignell C. AJ, 1993, 106: 1965
- [34] Marten H, Gesicki K, Szczerba R. IAUS, 1993, 155: 315
- [35] Steffen M, Schonberner D, Kifonidis K, Stahlberg J. IAUS, 1997,180: 368
- [36] G Mellema A& A, 2004, 416: 623
- [37] Liller M H, Liller W. IAUS, 1968, 34: 38
- [38] Santander-Garcia M, Corradi R L M, Whitelock P A, et al. A&A, 2007, 465: 481
- [39] Hajian A R, Terzian Y, Bignell C. AJ, 1995, 109: 2600
- [40] Pirzkal N, Kerber F, Roth M. Bulletin of the American Astronomical Society, 2000, 197: 610
- [41] Gathier R, Pottasch S R, Pel J W A& A, 1986, 157: 171
- [42] Lutz J H. ApJ, 1973, 181: 135
- [43] Acker A. A& AS, 1978, 33: 367
- [44] Lucke P B. A& A, 1978, 64: 367
- [45] Kaler J B, Lutz J H. PASP, 1985, 97: 700
- [46] Giammanco C, Sale S E, Corradi R L M, et al. A& A, 2011, 525: A58
- [47] Binnendijk L. ApJ, 1952, 115: 428

- [48] Napiwotzki R, Schoenberner D. *A& A*, 1995, 301: 545
- [49] Mendez R H, Kudritzki R P, Herrero A, et al. *A& A*, 1988, 190: 113
- [50] Hultzsch P J N, Puls J, Méndez R H, et al. *A& A*, 2007, 467: 1253
- [51] Cazetta J O, Maciel W J. *RMxAA*, 2000, 36: 3
- [52] Santolaya-Rey A E, Puls J, Herrero A. *A& A*, 1997, 323: 488
- [53] Zhang, C Y. *ApJ*, 1993, 410: 239
- [54] Napiwotzki R. *A&A*, 2001, 367: 973
- [55] Cazetta J O, Maciel, W J. *Ap&SS*, 2001, 277: 393
- [56] Jacoby G H, Morse J A, Fullton L K, et al. *AJ*, 1997, 144: 2611
- [57] Jacoby G H, Ciardullo R, DeMarco O, et al. *ApJ*, 2013, 769: 10
- [58] Bonatto C, Bica E, Santos J F C. *MNRAS*, 2008, 386: 324
- [59] Majaess D, Carraro G, Moni B C, et al. *A& A*, 2014, 567: A1
- [60] Turner D G, Rosvick J M, Balam D D, et al. *PASP*, 2011, 123: 1249
- [61] Chen L, Hou J L, Wang J J. *AJ*, 2003, 125: 1397
- [62] Alves D R, Bond H E, Livio M. *AJ*, 2000, 120: 2044
- [63] Zijlstra A A. *Baltic Astronomy*, 2007, 16: 79
- [64] Ciardullo R, Bond H E, Sipior M S, et al. *ApJ*, 1999, 118: 488
- [65] Bergeron P, Wesemael F, Beauchamp A. *PASP*, 1995, 107: 1047
- [66] De Marco O, Farihi J, Nordhaus J. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 172: 1
- [67] De Marco O, Bond E, Harmer D, et al. *ApJ*, 2004, 602: L93
- [68] De Marco O. *IAUS*, Cambridge University Press, 2006, 234: 111
- [69] Bond H E. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 804: 165
- [70] Shklovsky I S. *Astron. Zh.*, 1956, 33: 222
- [71] Ortiz R, Copetti M V F, Lorenz-Martins S. *MNRAS*, 2011, 418: 2004
- [72] Daub C T. *ApJ*, 1982, 260: 612
- [73] Cahn J H, Kaler J B, Stanghellini L. *A& AS*, 1992, 94: 399
- [74] Letizia S, Shaw R A. *ApJ*, 2008, 689: 194
- [75] Schneider S E, Buckley D. *ApJ*, 1996, 459: 606
- [76] Van de Steene G C, Zijlstra A A. *A& A*, 1995, 293: 541
- [77] Zhang C Y. *ApJS*, 1995, 98: 659
- [78] Bensby T, Lundstrom I. *A& A*, 2001, 374: 599
- [79] Phillips J P. *ApJS*, 2002, 139: 199
- [80] Phillips J P. *New Astronomy*, 2004, 9: 391
- [81] Cahn J H, Kaler J B. *ApJS*, 1971, 22: 319
- [82] Kaler J B, Shaw R A, Kwitter K B. *ApJ*, 1990, 359: 392
- [83] Maciel W J, Dutra C M. *A& A*, 1992, 262: 271
- [84] Maciel W J. *Ap&SS*, 1995, 229: 203
- [85] Leahy D A, Tian W W. *ASPC*, 2010, 438: 365
- [86] Tian W W, Leahy D A, Wang Q D. *A& A*, 2007, 474: 541
- [87] Leahy D A, Tian W W. *A& A*, 2008, 482: L25
- [88] Zhu H, Tian W W, Torres D F, et al. *ApJ*, 2013, 775: 95
- [89] Tian W W, Leahy D A. *ApJ*, 2008, 667: 292
- [90] Tian W W, Leahy D A. *ApJL*, 2014, 783: L2
- [91] Zhu H, Tian W W, Su H Q, et al. *IAUS*, 2014, 297: 232
- [92] Gathier R, Pottasch S R, Goss W M. *A& A*, 1986, 157: 191
- [93] Brunthaler A, Reid M J, Menten K M, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2011, 332: 461
- [94] Crovisier J. *A& A*, 1978, 70: 43
- [95] Cudworth K M. *AJ*, 1974, 79: 1384
- [96] Amnuel P R, Guseinov O Kh, Novruzova Kh I, et al. *Ap&SS*, 1984, 107: 19



- [97] Gathier R. ApJS, 1987, 71: 245  
 [98] O'Dell C R, Ferland G J, Henney W J. AJ, 2013, 145: 170  
 [99] Meaburn J, Lloyd M, Vaytet N M H, et al. MNRAS, 2008, 385: 269  
 [100] Dickey J M, McClure-Griffiths N, Gibson S J, et al. PASP, 2013, 30  
 [101] <http://www.radioast.nsd.c.cn/yhhjindex.php>

## 附录 A 测距结果不确定度在 20% 内的河内 PNe

PNe 名字	测距结果 $D/\text{pc}$	距离误差 $\sigma_D / \text{pc}$	测距方法	参考文献
K3-35	3900	+700 -500	P	[19]
IRAS 19312+1950	3800	+830 -580	P	[20]
RE 1738+665	169	+13 -11	P	[18]
DeHt 5	300	+60 -44	P	[18]
PHL 932	298	+67 -47	P	[18]
HDW 4	209	+19 -16	P	[18]
Sh 2-216	129	+6 -5	P	[18]
PuWe 1	365	+47 -37	P	[18]
Ton 320	532	+113 -80	P	[18]
A24	521	+112 -79	P	[18]
A31	568	+131 -90	P	[18]
PG 1034+001b	211	+26 -22	P	[18]
DeHt 5	345	+19 -17	P	[21]
NGC 6853	405	+28 -25	P	[21]
NGC 7293	216	+14 -12	P	[21]
A 31	621	+91 -70	P	[21]
NGC 2393	1600	+130 -130	EP	[59]
NGC 6572	703	+95 -95	EP	[33]
NGC Hen 2-147	2900	+400 -400	EP	[38]
NGC 7027	703	+95 -95	EP	[33]
BD+30 3639	1300	+200 -200	EP	[36]
NGC 6320	1170	+140 -140	EP	[99]
A 8	16000	+110 -110	CM	[60]
PHR1315-6555	10000	+400 -400	CM	[59]
NGC 2818	1855	+200 -200	CM	[61]
PS 1	12300	+600 -600	CM	[62]
NGC 2452	3750	+560 -560	R	[41]
NGC 2792	1910	+220 -220	R	[41]
NGC 6567	1680	+170 -170	R	[41]
NGC 2440	2190	+390 -390	R	[41]
NGC 6894	1090	+110 -110	R	[45]

注: 测距方法中 P 表示三角视差法, EP 表示膨胀视差法, CM 表示星团成员法, R 表示红化方法。

## The Current Research of Planetary Nebulae Distance Measurement

YANG Ai-yuan<sup>1,2</sup>, ZHU Hui<sup>1,2</sup>, TIAN Wen-wu<sup>1</sup>, WU Dan<sup>1,3,4</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Beijing Key Laboratory of Digital Preservation and Virtual Reality for Cultural Heritage, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Planetary Nebula is an important tracer of Galactic chemical history and evolution, star and interstellar evolution. Distance as a basic physical parameter of planetary nebula, is crucial to study its size, luminosity, ionized mass, formation rate, space density and Galactic distribution. Distance of planetary nebula has been studied for several decades, but most of their distances are not well determined, e.g. only thirty-one planetary nebulae have distance measurement with uncertainty within 20%. We summarize major distance measurement methods of planetary nebulae, i.e., trigonometric parallax, cluster member, expansion parallax, spectroscopic parallax, reddening, Na D absorption, determinations of central star gravities, Shklovsky method, kinematics method, and then discuss the limitations and applications scope of each method in detail. Actually, applying different methods to the same planetary nebulae can have a huge difference in distance, and even the same method can lead to great difference for the same planetary nebula. We focus on the kinematics method applied to planetary nebulae either seriously effected by Galactic extinction or having no observable centra star but being radio bright. The kinematics distance has been used in our on-going project of radio planetary nebulae distance measurement.

**Key words:** planetary nebula; distance measurement methods; kinematic distance; H I absorption