



# 天琴座RR型变星的测距应用

陈孝钿<sup>1,2\*</sup>, 张健星<sup>1</sup>, 王舒<sup>1</sup>, 郜心怡<sup>1</sup>, 邓李才<sup>1</sup>

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206

\* 联系人, E-mail: [chenxiaodian@nao.cas.cn](mailto:chenxiaodian@nao.cas.cn)

2024-02-28 收稿, 2024-05-13 修回, 2024-05-22 接受, 2024-05-23 网络版发表

国家自然科学基金(12322306)资助

**摘要** 从2000年至今,随着大天区时域巡天设备的发展,天琴座RR型变星的数目已由千余颗增加至30万颗.其测距方法也得到了优化,从依赖可见光金属丰度光度关系逐渐转变为红外的周期金属丰度光度关系.得益于大麦哲伦云的几何距离和Gaia视差,天琴座RR型变星的周期金属丰度光度关系的零点得到显著优化.在大样本天琴座RR型变星的基础上,银河系晕、核球、麦哲伦云的结构得到了细化,球状星团和矮星系的距离也得到了准确测量.更重要的是,研究发现了双周期的天琴座RR型变星,这把唯一不受金属丰度影响的量天尺为批量高精度星系测距开辟了道路.鉴于我国在未来5年有多项投入使用的时域巡天设备,例如司天工程、中国空间站巡天望远镜等,本文将总结过去20年中天琴座RR型变星测距应用的进展.

**关键词** 天琴座RR型变星, 脉动变星, 距离测量, 时域天文, 标准烛光

天琴座RR型变星是一类小质量的(当前质量约 $0.5\sim 0.8 M_{\odot}$ <sup>[1]</sup>)、贫金属的([Fe/H]通常小于-1)恒星.它们位于脉动不稳定带和水平分支的交叠区域,在脉动不稳定带中位于造父变星下方和盾牌座delta型星上方.天琴座RR型变星的脉动周期通常在0.2~1 d之间<sup>[2]</sup>,该周期也介于造父变星(>1 d)和盾牌座delta型星(<0.2 d)之间.天琴座RR型变星温度在7000 K左右,介于造父变星(6000 K)和盾牌座delta型星(8000 K)之间.天琴座RR型变星的年龄超过百亿年,远老于造父变星(千万年)和盾牌座delta型星(10亿年).作为年老星族,它们分布在星系的球状星团、晕和核球中,目前全天约有30万颗天琴座RR型变星<sup>[3]</sup>.

19世纪初, Bailey<sup>[4]</sup>在球状星团中发现了数百颗变星,并提出了天琴座RR型变星的3种类型,即a、b和c型.根据脉动模式, a型和b型都是径向基频脉动,因此合并成RRab来表示径向基频脉动的天琴座RR型变星,

另外用RRc来表示以径向一阶谐频(泛音)模式脉动的天琴座RR型变星.如果天琴座RR型变星同时以基频和一阶谐频模式脉动,即两种模式相互调制,那么这类星被称为RRd.约1/3的RRab具有长周期的调制,它们被称为Blazhko天琴座RR型变星.天琴座RR型变星径向脉动机制是不透明度机制,主要发生于氦的一次电离区,过程中热能和电离能相互转化.脉动不稳定性发生后可以长时间稳定维持,当恒星膨胀时,温度降低,二次电离氦复合成一次电离氦,释放热能,接着恒星开始收缩,温度升高,一次电离氦重新被二次电离,并吸收热能<sup>[5]</sup>,这个过程周而复始,进而形成了周期温度的脉动变星.

由于观测上存在光学金属丰度光度关系和红外周期金属丰度光度关系,天琴座RR型变星是广泛使用的标准烛光,被用于测量球状星团、矮星系、大麦哲伦云的距离、银心距离,也被用于揭示核球结构、银河

引用格式: 陈孝钿, 张健星, 王舒, 等. 天琴座RR型变星的测距应用. 科学通报, 2024, 69: 3099–3109

Chen X D, Zhang J X, Wang S, et al. Distance measurement based on RR Lyrae variable stars (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 3099–3109, doi: [10.1360/TB-2024-0228](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0228)

系晕结构、星流结构和麦哲伦云结构。与造父变星这类标准烛光相比,天琴座RR型变星的优势在于它是一个独立的、最好的老年烛光,而且受消光和双星的影响更小。不过,由于它的光度比造父变星暗约2~6等,因此它在星系宇宙学方面应用还很少。天琴座RR型变星的V波段星等为0等,除了哈勃空间望远镜观测到的少数样本外,它们大多位于100 kpc以内。未来5年,随着中国空间站巡天望远镜等大口径巡天望远镜的运行,天琴座RR型变星的星系宇宙学应用之门将被打开。

本文总结天琴座RR型变星的性质和测距优势,为基于它们的星系宇宙学应用做准备。首先,介绍天琴座RR型变星的演化状态和光变曲线;其次,介绍天琴座RR型变星这把量天尺是如何打磨的;然后,介绍天琴座RR型变星在球状星团、矮星系和结构中的测距应用;接着,着重介绍最近提出的基于双周期天琴座RR型变星的测距方法;最后,对天琴座RR型变星测距进行总结和展望。

## 1 天琴座RR型变星演化状态和光变曲线

天琴座RR型变星位于水平分支,它的内部结构由氢燃烧的核心和表面的氢包层组成。天琴座RR型变星和红团簇星、蓝水平分支星一样,都是由小质量恒星在演化后通过攀升红巨星支,然后在顶端氦闪回落到水平分支形成<sup>[5]</sup>。它们与处于核心氢燃烧阶段的造父变星不同,后者为中等或大质量恒星演化穿过脉动不稳定带时形成。按照包层厚度的减少排序,分别是红团簇星、天琴座RR型变星、蓝水平分支星,与之对应的是温度的升高和质量的下降。由于初值质量和年龄的不同,红团簇星整体金属丰度最高,天琴座RR型变星次之。它们的演化性质主要来自球状星团颜色星等图的限制,其中天琴座RR型变星位于水平分支的缺块处(该区域也是脉动不稳定带与水平分支的交叠区域,图1)。造成这种缺块现象的原因是,天琴座RR型变星显著的光变导致它在光度和颜色上存在明显弥散,从而展宽了水平分支。由于这3类水平分支星都经历过氢核简并阶段和氦闪,它们的核心质量一致,约为0.46个太阳质量;而质光关系的弥散决定了水平分支的光度弥散,因此它们都可以作为距离示踪天体。水平分支的热光度主要受金属丰度的影响,即存在金属丰度光度关系。其中,天琴座RR型变星由于有光变特征和周期特性,能被更好地筛选和解除质量和演化的影响,因此它是很好的标准烛光。

天琴座RR型变星的光变曲线有非常显著的特征,首先是存在精准的周期,误差通常只有几十秒。其次,光变曲线形状为不对称状或称锯齿状,其特点是光度上升的阶段很快,耗时大概是下降阶段的一半。这一特性使它有别于绝大多数掩食双星和自转双星,后者的光度上升和下降阶段耗时基本一致。正是这两项特性使得利用哈勃空间望远镜观测河外星系中的天琴座RR型变星变得相对容易,只需要10次观测就能找到天琴座RR型变星,并能完成周期计算和子类分析。这无疑是天琴座RR型变星测距应用的优势条件。

不同模式子类天琴座RR型变星的光变曲线也大不相同。如图2所示,RRc的光变曲线相比RRab的光变曲线更加对称,同时变幅也更小,RRc的V波段的变幅基本小于0.6等,而RRab可达1.2个星等。此外,RRc和RRab的周期存在0.4 d的分界线。综合利用这两项判据能使RRab和RRc之间达到99%的分类正确率<sup>[2]</sup>。但如果考虑食双星和自转变星的混入,RRc的分类正确率通常在90%左右。需要注意的是,各类天琴座RR型变星的变幅都会随着观测波长的增加逐渐下降,例如在红外W1波段(波长3.4  $\mu\text{m}$ ),变幅只有光学V波段的0.1(RRab)~0.3倍(RRc)<sup>[6]</sup>。这意味着利用红外设备(例如詹姆斯韦布望远镜)得到的光变曲线进行分类,正确率会显著下降。这就限制了利用天琴座RR型变星研究高消光区域的距离和结构的应用。

RRd的光变则有明显的区别,但仔细对比可以发现它是RRab和RRc光变曲线的合成版,它的上包络线像RRab的光变曲线,而下包络线像RRc的光变曲线。RRd的光变曲线说明了它是在两个脉动周期的相互调制下形成的,两个脉动周期约为0.745倍的关系。相比RRab和RRc,RRd的分类需要有更多次的观测(20~40次)。另外,天琴座RR型变星还会存在Blazhko效应,它会对光变曲线产生周期性的调制,也会对振幅和相位产生调制。不同于RRd的光变曲线,Blazhko周期通常是脉动周期的几十倍,因此长时标的观测才能探测到Blazhko效应。除了Blazhko效应,天琴座RR型变星还存在非径向的脉动模式,它们的变幅通常为毫星等或更小,需要利用Kepler或TESS望远镜探测<sup>[7]</sup>。在赫罗图或者星团、星系的颜色星等图上,RRab比RRc温度低约500 K,也就是RRab的脉动不稳定带在RRc的红端(图1)。RRd同时存在两种周期,因此它存在于RRab和RRc脉动不稳定带的重叠区域,即水平分支上RRab和RRc颜色分布区间的重叠部分。

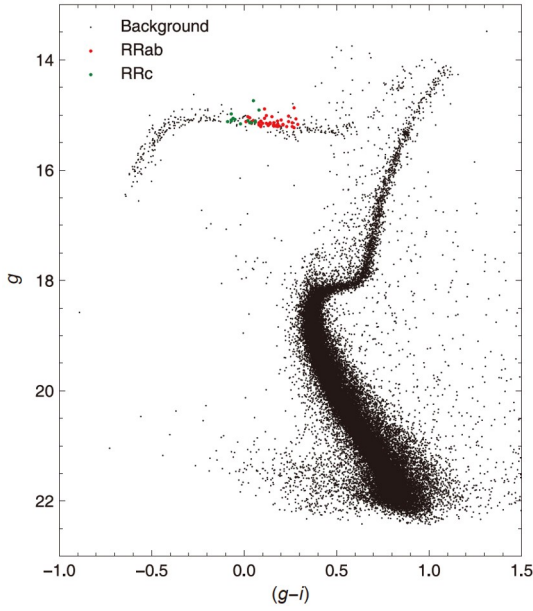


图 1 球状星团M5的颜色星等图, 红色点(RRab)和绿色点(RRc)为天琴座RR型变星在水平分支上的位置

Figure 1 Color magnitude diagram of globular cluster M5, with red points (RRab) and green points (RRc) for the locations of RR Lyrae variable stars on the horizontal branch

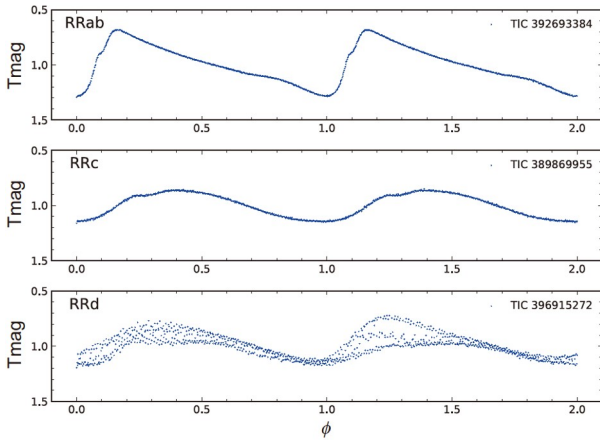


图 2 三种主要天琴座RR型变星子类(RRab, RRc, RRd)的光变曲线  
Figure 2 Light curves of the three main subtypes (RRab, RRc, RRd) of RR Lyrae variable stars

## 2 天琴座RR型变星量天尺

从光变曲线分析中正确地获得了天琴座RR型变星后, 就可以利用已知距离的子集建立量天尺, 并应用于未知距离的更遥远的天琴座RR型变星. 天琴座RR型变星在可见光满足金属丰度光度关系, 在红外满足周期金属丰度光度关系. 前者由质光关系主导, 后者由质光

关系和热改正(主要是有效温度的函数)共同主导. 由于不同天琴座RR型变星质量和光度差距很小, 在脉动方程中周期差距主要由温度差异引起. 温度差异会导致热改正差异, 最终影响绝对星等, 使得金属丰度光度变成周期金属丰度光度关系. 热改正在长波和短波更显著, 在波长长于R(约600 nm)的波段, 需要使用周期金属丰度光度关系. 历史上, 为了优化这些关系, 天文学家尝试了很多观测和理论研究. 为了保证清晰度, 本节以RRab的金属丰度光度和周期金属丰度光度关系为例, 对RRc的金属丰度光度和周期金属丰度光度关系的研究进程和思路是一致的, 只是相关参数略有区别. 读者可以查询本节所介绍的RRab文献找到RRc相对应的分析.

### 2.1 金属丰度光度关系

Sandage<sup>[8,9]</sup>首先发现贫金属的天琴座RR型变星的光度比富金属天琴座RR型变星更亮. 他在1990年得到了V波段绝对星等与金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 之间的线性关系<sup>[10]</sup>. 其表达式为 $M_V(\text{RRab}) = \alpha[\text{Fe}/\text{H}] + \beta$ , Sandage得到的 $\alpha$ 在0.19~0.39之间. 随后, 大量理论和观测工作对该关系进行了优化. Caputo等人<sup>[11]</sup>利用球状星团的距离得到了RRab观测金属丰度光度关系, 发现 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$ 的贫金属RRab有不同的斜率, 斜率更平. 同样, Bono等人<sup>[12]</sup>利用脉动模型计算了理论金属丰度光度关系, 发现 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.6$ 的RRab有不同的斜率, 斜率更平. RRab截断的金属丰度光度关系也可以用统一的二次多项式表示. Catelan等人<sup>[13]</sup>利用脉动模型得到了二次多项式的金属丰度光度关系 $M_V(\text{RRab}) = \alpha[\text{Fe}/\text{H}]^2 + \beta[\text{Fe}/\text{H}] + \gamma$ . 不同于银河系, Clementini等人<sup>[14]</sup>研究大麦哲伦云中RRab的金属丰度光度关系时并没有发现截断. 利用Gaia DR2的数据, Muraveva等人<sup>[15]</sup>分析了线性和二次多项式的金属丰度光度关系(式(1), (2)), 发现二次项系数并不足够显著, 线性和二次多项式的金属丰度光度的零点差距可以忽略, 也就是线性关系是合理的.

$$M_V(\text{RRab}) = (0.34 \pm 0.03)[\text{Fe}/\text{H}] + (1.17 \pm 0.04), \quad (1)$$

$$M_V(\text{RRab}) = (0.02 \pm 0.04)[\text{Fe}/\text{H}]^2 + (0.39 \pm 0.10)[\text{Fe}/\text{H}] + (1.19 \pm 0.06). \quad (2)$$

需要注意的是, RRab的金属丰度大多是基于低分辨率光谱, 误差较大. 另外, Gaia视差也存在零点差, 对相对较远的RRab会产生明显的距离系统差. 由于这两项限制, RRab样本的选择效应仍然很明显, 尤其是贫

金属和较富金属RRab的完备性,会对金属丰度光度关系有显著的影响.未来大型光谱巡天和更好的Gaia视差会对RRab金属丰度光度关系优化带来很大的帮助.然而,真正限制金属丰度光度关系应用的是消光处理问题,如果假设消光改正有10%的误差,即使V波段消光只有0.2等,也会带来1%的距离误差.为了降低测距误差,天文学家将关注点转到了红外波段.

## 2.2 周光关系的金属丰度效应

在红外波段,消光约是V波段的1/3到1/10<sup>[16]</sup>,考虑到RRab通常处于消光很小的年老环境,使用RRab的红外周光关系来测量距离基本可以避免消光的影响.然而,红外周光关系的零点可能会受到金属丰度的影响.天文学家已经比较清楚造父变星的红外周光关系会受金属丰度的增加而变亮,但RRab比造父变星暗约2~6个星等,其金属丰度效应的研究难度更大. Sollima等人<sup>[17]</sup>利用几个球状星团中的RRab获得了Ks波段周光关系的金属丰度依赖关系,获得了较小且不显著的依赖关系 $0.08 \pm 0.11$  g/dex. 利用50颗大麦哲伦云的RRab, Borissova等人<sup>[18]</sup>也发现Ks波段周光关系的金属性依赖性非常微弱. 同样, Muraveva等人<sup>[19]</sup>利用VMC巡天中70颗RRab的Ks波段测光和低分辨率光谱,得到了可忽略的金属丰度效应( $0.03 \pm 0.07$  mag/dex). 近些年, Neeley等人<sup>[20]</sup>使用Gaia视差研究了55颗RRab的周期金属丰度光度关系,发现了显著的金属丰度效应,其中在Ks波段为 $0.17 \pm 0.03$  mag/dex. Zgirski等人<sup>[21]</sup>利用更好的Gaia EDR3数据得到了显著但稍小的金属丰度效应 $0.08 \pm 0.03$  mag/dex. 这些值说明,在同一周期,金属丰度越大的RRab在红外波段越暗,这与造父变星相反. 脉动变星标准烛光的金属丰度效应主要由脉动模型和演化模型共同主导,此外在不同波段也会受热改正影响<sup>[1]</sup>,通常温度低(6500 K以下)的脉动变星在近红外波段,在同一个周期上,光度会随着金属丰度增加而变亮. 图3为基于Gaia EDR3视差的RRab红外K波段的周期金属丰度光度关系,可以看到金属丰度越贫的RRab相对平均周光关系越亮. 为了更好打造RRab量天尺,RRab周光关系的金属丰度效应值得进一步研究,这需要有更好的Gaia视差,或者在大麦哲伦云中有更大样本的光谱观测的RRab.

在金属丰度效应分析的理论工作上, Marconi等人<sup>[1]</sup>结合脉动模型和水平分支演化模型,计算了不同金属丰度下天琴座RR型变星的周期和光度,进而得到

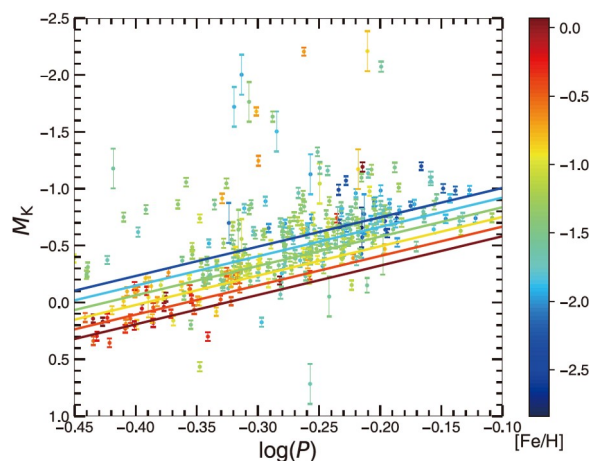


图3 RRab的K波段的周期金属丰度光度关系  
Figure 3 Period-metallicity-luminosity relation of RRab in the K-band

了周期金属丰度光度关系(式(3)~(5)):

$$M_J(\text{RRab}) = -1.98 \log P + 0.17 [\text{Fe}/\text{H}] - 0.51, \quad (3)$$

$$M_H(\text{RRab}) = -2.24 \log P + 0.19 [\text{Fe}/\text{H}] - 0.76, \quad (4)$$

$$M_K(\text{RRab}) = -2.27 \log P + 0.18 [\text{Fe}/\text{H}] - 0.82. \quad (5)$$

该关系显示在红外波段,周光关系同样有非常强的金属丰度依赖性.另外,星系和矮星系中RRab红外周期关系的弥散(0.08 mag以上)通常大于球状星团的弥散(约0.05 mag),这也意味着金属丰度是另外一个参数. Chen等人<sup>[22]</sup>利用RRab的理论红外周期金属丰度关系和RRd的周期金属丰度关系推导出了RRd的周光关系,该结果与观测周光关系非常一致,同样说明RRab的红外周光关系有较强金属丰度依赖,金属丰度效应的系数在0.10~0.20 mag/dex之间.

金属丰度效应是光度测距中的主要误差项,若没有办法测量金属丰度来限制该误差,星系测距和哈勃常数测量误差将在2%以上,达不到高精度宇宙测距的要求.因此,如何解决天琴座RR型变星金属丰度效应问题是其测距应用的关键.

## 3 天琴座RR型变星的测距应用

### 3.1 球状星团

利用天琴座RR型变星对球状星团测距可以追溯到百年之前, Shapley<sup>[23]</sup>利用“造父变星”测量了69个银河系球状星团的距离,并以此确定银心约为十几kpc. 这些“造父变星”后来被发现大多是天琴座RR型变星. 此后,一代又一代望远镜对球状星团进行了时域测光,以

获得更完备的天琴座RR型变星. 这里, 我们以天琴座RR型变星最多的几个球状星团为例, 介绍最新的测光和样本. Corwin等人<sup>[24]</sup>利用2米望远镜获得了M15的BVI测光, 获得了89颗天琴座RR型变星. Ferro等人<sup>[25]</sup>利用2米望远镜获得了M53的VI测光, 获得了64颗天琴座RR型变星. Braga等人<sup>[26]</sup>整理了二十多年1米以上望远镜对 $\omega$  Cen的UVBRI测光, 获得了179颗天琴座RR型变星. Stetson等人<sup>[27]</sup>整理了十多年1米以上望远镜对M4的UVBRI测光, 获得了44颗天琴座RR型变星. Jurcsik等人<sup>[28]</sup>利用60/90厘米施密特望远镜获得了M3的BVIc测光, 获得了148颗天琴座RR型变星. Kains等人<sup>[29]</sup>利用1米望远镜获得了M68的VI测光, 获得了44颗天琴座RR型变星. 近些年, 为了研究红外周光关系, 天文学家开展了一系列工作对这些星团进行红外JHKs波段时域测光<sup>[30~33]</sup>.

虽然众多工作都利用天琴座RR型变星测量了球状星团的距离, 但对高精度测距最有用的是基于均匀的数据、统一的望远镜和波段、同样的周光关系几何零点的距离测量工作. 对于球状星团距离, 相比天琴座RR型变星方法, 主序拟合方法适用性更广, 视差方法在近处精度最高. 利用Gaia EDR3视差、运动学数据、哈勃空间望远镜自行和文献距离, Baumgardt和Vasiliev<sup>[34]</sup>得到了162个球状星团的距离, 误差约为2%. 其中距离最近的20个球状星团, 距离误差约为1%.

### 3.2 矮星系

过去20年, 得益于大天区的测光巡天, 银河系矮星系的数量增加了好几倍, 天文学家也开始关注矮星系中的变星, 其中最丰富最容易发现的变星就是天琴座RR型变星. 表1列出了49个矮星系中发现的天琴座RR型变星, 它们包括了银河系矮星系、M31矮星系以及孤立的矮星系. 对于M31矮星系以及孤立的矮星系, 天文学家主要是利用10~30次哈勃空间望远镜2个波段测距数据发现的天琴座RR型变星. 对于银河系矮星系, 天琴座RR型变星的研究主要是基于地面望远镜更频繁采样的观测数据. 近几年, 基于4米的暗能量望远镜DECam, Vivas等人<sup>[42,49,50]</sup>获得了多个矮星系的天琴座RR型变星, 效率大大提升.

关于矮星系的距离, Nagarajan等人<sup>[71]</sup>利用Gaia视差校准的RRab的周期金属丰度光度关系, 均匀地测量了39个矮星系的距离, 误差在1%~7%之间. 需要指出的是, Gaia视差的零点误差和矮星系金属丰度的系统

表 1 矮星系中RRab和RRcd的数目

Table 1 Number of RRab and RRcd in dwarf galaxies

| 矮星系              | RRab数目 | RRcd数目 | 文献   |
|------------------|--------|--------|------|
| Ursa Major I     | 5      | 2      | [35] |
| Bootes I         | 7      | 8      | [36] |
| Hercules         | 6      | 3      | [37] |
| Canes Venatici I | 18     | 5      | [38] |
| Draco            | 211    | 56     | [39] |
| Ursa Minor       | 47     | 35     | [40] |
| Carina           | 71     | 12     | [41] |
| Sextans          | 125    | 43     | [42] |
| Leo II           | 106    | 34     | [43] |
| Sculptor         | 289    | 247    | [44] |
| Leo I            | 136    | 28     | [45] |
| Fornax           | 998    | 445    | [46] |
| Sagittarius      | 1636   | 409    | [47] |
| SMC              | 4961   | 1407   | [48] |
| LMC              | 27620  | 11461  | [48] |
| Crater II        | 84     | 14     | [49] |
| Antlia 2         | 211    | 136    | [50] |
| And XIII         | 8      | 1      | [51] |
| And XI           | 10     | 5      | [51] |
| And XXVIII       | 35     | 50     | [52] |
| And XVI          | 3      | 5      | [52] |
| And XIX          | 23     | 8      | [53] |
| And XV           | 80     | 37     | [52] |
| And XXV          | 45     | 11     | [54] |
| And XXI          | 37     | 4      | [55] |
| And III          | 84     | 27     | [52] |
| And VI           | 91     | 20     | [56] |
| And I            | 229    | 67     | [52] |
| And II           | 187    | 64     | [52] |
| And VII          | 386    | 187    | [57] |
| NGC 147          | 118    | 59     | [57] |
| NGC 185          | 544    | 276    | [57] |
| M32              | 314    | 102    | [58] |
| Tucana           | 216    | 142    | [59] |
| Phoenix          | 95     | 26     | [60] |
| LGS3             | 48     | 8      | [61] |
| DDO 210          | 24     | 8      | [62] |
| Cetus            | 506    | 124    | [63] |
| Leo A            | 7      | 3      | [64] |
| IC1613           | 61     | 29     | [65] |
| NGC 6822         | 24     | 2      | [66] |
| IC1613           | 61     | 29     | [65] |
| NGC 6822         | 24     | 2      | [66] |
| ESO410-G005      | 224    | 44     | [67] |
| ESO294-G010      | 219    | 13     | [67] |
| Eridanus II      | 44     | 20     | [68] |
| WLM              | 76     | 14     | [69] |
| VV 124           | 532    | 146    | [70] |
| KKr 25           | 39     | 7      | [70] |

误差并没有考虑在其中. 值得关注的是, 天文学家已经开始考虑利用RRab优化宇宙距离阶梯. Tran等人<sup>[72]</sup>对比了Sculptor矮星系中基于RRab和红巨星顶点恒星(TRGB)的距离, 在2%的误差上确定了它们的一致性. Oakes等人<sup>[73]</sup>对比了Fornax矮星系中基于RRab和TRGB的距离, 初步确定了它们的一致性, 但相比Sculptor矮星系距离误差更大. 当前RRab测距的研究重点已经转向利用大口径望远镜测量300 kpc甚至更远的矮星系或星系距离.

### 3.3 银河系结构

相比于红巨星和蓝水平分支星, 天琴座RR型变星因为有特征光变曲线和周光关系, 所以纯度更高(至少90%以上), 距离更准(通常5%). 因此, 它们在细化银河系银晕整体形态、子结构、星流上有着重要作用. 随着时域巡天的发展, 每一项新设备都会有大量天琴座RR型变星被发现, 它们被用于更新银河系结构. Drake等人<sup>[74,75]</sup>利用Catalina巡天中的1万多颗天琴座RR型变星展示了20~100 kpc的人马座星流结构, 限制了星流模型. Hernitschek等人<sup>[76,77]</sup>利用Pan-STARRS1发现的4万颗天琴座RR型变星展示了远到120 kpc的人马座星流的前臂和后臂的形态, 并限制了银晕三轴形态. Iorio和Belokurov<sup>[78]</sup>利用Gaia DR2中的10万颗天琴座RR型变星得到银晕在约30 kpc内是三轴的, 最长轴相对于银河系X轴方向错位约70°, 另外确定了两个在银半轴方向的过密区: Hercules-Aquila云和Virgo过密区.

基于南半球的OGLE巡天, 天琴座RR型变星也被用于研究银河系核球以及麦哲伦云. 利用OGLE在核球位置发现的近3万颗RRab, Pietrukowicz等人<sup>[79]</sup>得到了银心的距离为8.27 kpc, 误差约为5%, 也得到了核球椭圆形态的轴比以及最长轴相对银心太阳方向的偏角. Jacyszyn-Dobrzeniecka等人<sup>[80]</sup>利用OGLE在麦哲伦云发现的2万多颗RRab, 得到了大小麦哲伦云的三轴椭圆结构的轴比, 并且限制了麦哲伦云桥的结构. 当前基于1米口径望远镜巡天得到的天琴座RR型变星样本已经接近完备, 未来基于更大口径望远镜巡天, 如墨子巡天望远镜<sup>[81]</sup>, 将能在50 kpc以外区域发现更多的天琴座RR型变星.

## 4 双周期天琴座RR型变星

### 4.1 双周期天琴座RR型变星性质

在功率谱分析中, 同时存在径向基频和一阶谐频

两个脉动频率的天琴座RR型变星是RRd. RRd数量稀少, 在天琴座RR型变星中的比例取决于不同星系环境, 比例为1%~10%不等<sup>[82]</sup>. 不过, 得益于近些年天琴座RR型变星数量的快速增长, RRd的数量将比较可观.

对于多周期的脉动变星, Petersen图<sup>[83]</sup>(周期-周期比图)是一种常用的研究工具, 它既可以用于脉动模式的判断, 又可以用来计算脉动变星的质量和金属丰度. 图4是部分已知金属丰度的RRd的Petersen图, RRd在图中的位置相比其他多周期变星非常固定, 一阶谐频和基频周期的比在0.740~0.748之间. 周期比与周期也存在一个整体的序列分布(如图4中灰色点). 这个序列虽然不是标准线性的, 但假设线性或多项式关系时, 得到的经验公式相差非常小(最大的偏差只有0.001大小).

图4中的彩色实心圆代表金属丰度, 来自SDSS和LAMOST, 从黄色到蓝色, 金属丰度变得更贫; 彩色实线是利用观测数据拟合得到的等金属丰度线. 黑色三条线为Marconi等人<sup>[1]</sup>理论计算的等金属丰度线, 可以看到, 对于 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.8 \sim -1.5$  dex的中等金属的等金属丰度线, 观测与理论计算非常契合. 而在富金属和贫金属两端, 理论模型需要基于观测进行优化, 优化点在于脉动模型中周期计算的准确性. 另外, 从图4可以看到, RRd的金属丰度与周期比和周期有明显的关系, 例如周期越长, 周期比越大的RRd金属丰度越贫.

Chen等人<sup>[22]</sup>收集了Gaia DR3的RRd并补充了基于ZTF(Zwicky Transient Facility)的RRd, 然后与LAMOST和SDSS进行交叉, 得到了300多颗RRd的低分辨率光谱金属丰度、周期和周期比, 并且拟合得到了线性的金

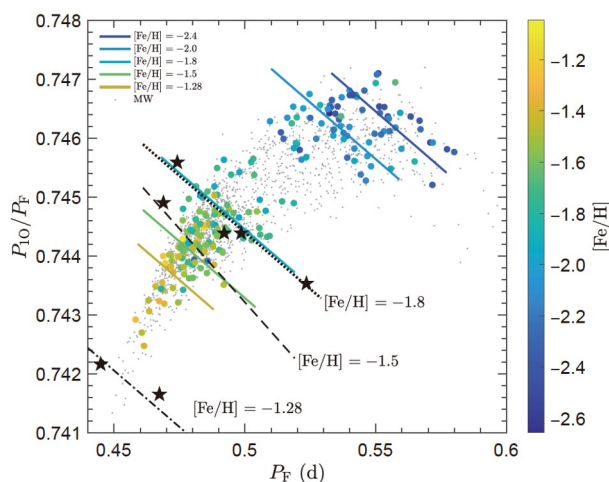


图4 RRd在Petersen图上的金属丰度分布<sup>[22]</sup>  
Figure 4 Metallicity distribution of RRd on Petersen diagram<sup>[22]</sup>

属丰度和周期(或周期比)关系:

$$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{SDSS}} = (-10.33 \pm 0.47) \log P_F + (-4.87 \pm 0.14). \quad (6)$$

一方面, 这个新的关系可以用于计算没有光谱观测RRd的金属丰度. 另一方面, 如果将周期金属丰度光度关系中的金属丰度项用该关系代替, 整合后就可以消去金属丰度项. 换言之, RRd的周光关系是与金属丰度无关的, 说明双周期天琴座RR型变星是非常独特的标准烛光.

## 4.2 双周期天琴座RR型变星测距

如前文所述, RRd存在与金属丰度无关的周光关系. Chen等人<sup>[22]</sup>利用大麦哲伦云内部的上千颗RRd星得到了周光关系:

$$M_{\text{WVI}} = (-4.523 \pm 0.156) \log P_F + (16.620 \pm 0.048) - \text{DM}_{\text{LMC}} \quad (7)$$

其中,  $M_{\text{WVI}}$ 绝对星等是用V和I波段合成的Wesenheit星等减去大麦哲伦云距离计算出来的, 周期 $P_F$ 是基频周期. 大麦哲伦云的距离来自Pietrzyński等人<sup>[84]</sup>通过分离食双星几何距离得到的距离, 误差约为1.2%. 若结合大麦哲伦云几何距离以及GAIA视差的校准, 周光关系的零点误差将降至1.0%

利用周光关系来测量某一天体的距离, 遇到的统计误差主要包括不同RRd距离的弥散、周光关系本身的离散. 当RRd数目增加时, 统计误差会逐渐降低, 系统误差开始显著. 对于量天尺, 系统误差通常包括周光关系零点偏差、消光改正误差、金属丰度效应的误差、双星和混淆误差、测光系统误差. 对于系统误差的部分, RRd的优势非常明显, 首当其冲的就是没有金属丰度误差; 其次, 年老的RRd有低双星比例<sup>[85]</sup>和远离星系盘的分布, 能在一定程度上减少双星、混淆、消光的系统误差. 因此, RRd测距主要误差来自周光关系零点偏差, 也就是锚定星系的几何距离误差. 当RRd数量达到10颗时, 测量天体距离的误差在2%左右. 当RRd更多时, 距离误差将趋近1%(表2). 表2展示了利用RRd测量的4个球状星团和1个矮星系的距离和金属丰度. 对于球状星团, 总距离误差为2%~3%; 对于矮星系, 由于RRd数量更多, 总距离误差为1%~2%. 周光关系零点误差和金属丰度误差的大小代表了这些标准烛光的能力, 在这两项误差上, RRd的误差是1.0%, 造父变星为0.7%<sup>[86]</sup>, RRab为2.1%<sup>[72]</sup>, TRGB为1.1%<sup>[72]</sup>. 可见, RRd相比RRab和TRGB非常有优势. 未来基于更广泛更系

表 2 5个星团、矮星系的金属丰度和距离的测量结果

Table 2 Metallicity and distance measurements of five clusters and dwarf galaxies

|          | 距离模数                      | [Fe/H] | 数目 |
|----------|---------------------------|--------|----|
| Sculptor | $19.51 \pm 0.03 \pm 0.02$ | -1.67  | 40 |
| IC 4499  | $16.36 \pm 0.05 \pm 0.03$ | -1.60  | 11 |
| M15      | $15.04 \pm 0.06 \pm 0.02$ | -2.10  | 6  |
| M3       | $15.00 \pm 0.08 \pm 0.02$ | -1.53  | 7  |
| M68      | $15.04 \pm 0.04 \pm 0.02$ | -2.06  | 9  |

统的研究, RRd的系统误差一定会小于造父变星. RRd除了能测量星系距离, 还能测量矮星系的金属丰度, 该优势在标准烛光中是独一无二的, 该金属丰度可以用于优化基于RRab的测距.

目前RRd测距方法的应用目标主要是球状星团和本星系群的矮星系, 未来几年全天RRd的数量将会快速增加, 届时RRd将被用于更精准地限制银河系结构. 另一方面, 利用哈勃望远镜的数据, 可以基于RRd测量本星系群M31的矮星系和孤立矮星系的高精度距离. 未来5~10年, 基于视场更大、极限星等更深的时域巡天项目, 比如大口径全景巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST)、中国巡天空间望远镜(China Space Station Telescope, CSST)等, RRd的数量将会有巨大的提升. 如果假设RRd在天琴座RR型变星中的平均比例为3%, 银河系的RRd数量将达到约1万颗, LSST和CSST能观测本星系群近百个星系和矮星系; 如果假设这些星系的总质量是银河系的20倍, RRd数量将有约20万颗. 如果考虑20%的完备性, 将会有约4万RRd星被发现. 这一数目比当前近邻星系造父变星的数目(约3000颗)要大10多倍, 基于如此大的数量和准确的周光关系, RRd将成为5 Mpc内最好的量天尺, 与TRGB、Ia型超新星结合后能在星系宇宙学高精度测距上大放异彩.

## 5 总结与展望

本文总结了近20年天琴座RR型变星在距离测量上的应用. 随着ASASSN、OGLE、ZTF、GAIA等时域巡天的发展, 当前基于1米级望远镜得到的天琴座RR型变星样本已基本完备, 数量约为30万. 基频脉动的RRab和一阶谐频的RRc可以利用红外或者多波段组合的周期金属丰度光度关系测量距离, 单颗星精度在5%左右, 而多颗星精度可达2%. 过去几十年, RRab一直是最佳的

年老示踪天体, 被广泛用于精细研究银河系晕、核球、麦哲伦云的结构, 以及测量球状星团、矮星系距离。

2023年, 双周期的RRd被发现存在不依赖于金属丰度的周光关系, 基于多颗RRd的测距精度可达1%。它是标准烛光中唯一不受金属丰度影响的宝贵天体, 能突

破光度测距中金属丰度缺失的瓶颈, 开启批量高精度星系测距的道路。与此同时, 它还能给出天体的金属丰度, 帮助优化基于RRab的测距精度。待CSST上天, RRd将能给出上百个星系矮星系的超高精度距离, 误差约为1%, 将该样本增加20倍, 届时将能从多手段优化哈勃常数, 尝试解决哈勃常数的危机。

## 参考文献

- 1 Marconi M, Coppola G, Bono G, et al. On a new theoretical framework for RR Lyrae stars. I. The metallicity dependence. *Astrophys J*, 2015, 808: 50
- 2 Chen X, Wang S, Deng L, et al. The Zwicky Transient Facility catalog of periodic variable stars. *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 249: 18
- 3 Clementini G, Ripepi V, Garofalo A, et al. Gaia Data Release 3. *Astron Astrophys*, 2023, 674: A18
- 4 Bailey S. A discussion of variable stars in the cluster  $\omega$  Centauri. *Annals of Harvard College Observatory*, 1902, 38: 1
- 5 Catelan M. Horizontal branch stars: The interplay between observations and theory, and insights into the formation of the Galaxy. *Astrophys Space Sci*, 2009, 320: 261–309
- 6 Chen X, Wang S, Deng L, et al. Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) catalog of periodic variable stars. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 237: 28
- 7 Nemec J M, Moskalik P. Four ‘Peculiar’ RRd stars observed by K2. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2021, 507: 781–802
- 8 Sandage A. Evidence for a period / luminosity / amplitude relation for Rr-Lyrae stars. *Astrophys J*, 1981, 244: L23
- 9 Sandage A. The Oosterhoff period groups and the age of globular clusters. II - Properties of RR Lyrae stars in six clusters - The P-L-A relation. *Astrophys J*, 1981, 248: 161–176
- 10 Sandage A. The Oosterhoff period effect - Luminosities of globular cluster zero-age horizontal branches and field RR Lyrae stars as a function of metallicity. *Astrophys J*, 1990, 350: 631
- 11 Caputo F, Castellani V, Marconi M, et al. Pulsational MV versus [Fe/H] relation(s) for globular cluster RR Lyrae variables. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2000, 316: 819–826
- 12 Bono G, Caputo F, Castellani V, et al. A pulsational approach to near-infrared and visual magnitudes of RR Lyr stars. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2003, 344: 1097–1106
- 13 Catelan M, Pritzl B J, Smith H A. The RR Lyrae period-luminosity relation. I. Theoretical calibration. *Astrophys J Suppl Ser*, 2004, 154: 633–649
- 14 Clementini G, Gratton R, Bragaglia A, et al. Distance to the Large Magellanic Cloud: The RR Lyrae stars. *Astron J*, 2003, 125: 1309–1329
- 15 Muraveva T, Delgado H E, Clementini G, et al. RR Lyrae stars as standard candles in the Gaia Data Release 2 Era. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 481: 1195–1211
- 16 Wang S, Chen X. The optical to mid-infrared extinction law based on the APOGEE, Gaia DR2, Pan-STARRS1, SDSS, APASS, 2MASS, and WISE surveys. *Astrophys J*, 2019, 877: 116
- 17 Sollima A, Cacciari C, Valenti E. The RR Lyrae period-K-luminosity relation for globular clusters: An observational approach. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2006, 372: 1675–1680
- 18 Borissova J, Rejkuba M, Minniti D, et al. Properties of RR Lyrae stars in the inner regions of the Large Magellanic Cloud. *Astron Astrophys*, 2009, 502: 505–514
- 19 Muraveva T, Palmer M, Clementini G, et al. New near-infrared period–luminosity–metallicity relations for RR Lyrae stars and the outlook for Gaia. *Astrophys J*, 2015, 807: 127
- 20 Neeley J R, Marengo M, Freedman W L, et al. Standard Galactic field RR Lyrae II: A Gaia DR2 calibration of the period–Wesenheit–metallicity relation. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 490: 4254–4270
- 21 Zgirski B, Pietrzyński G, Górski M, et al. New near-infrared period–luminosity–metallicity relations for Galactic RR Lyrae stars based on Gaia EDR3 parallaxes. *Astrophys J*, 2023, 951: 114
- 22 Chen X, Zhang J, Wang S, et al. The use of double-mode RR Lyrae stars as robust distance and metallicity indicators. *Nat Astron*, 2023, 7: 1081–1089
- 23 Shapley H. Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VII. The distances, distribution in space, and dimensions of 69 globular clusters. *Astrophys J*, 1918, 48: 154–181
- 24 Corwin T M, Borissova J, Stetson P B, et al. The globular cluster M15. I. Identification, discovery, and period determination of variable stars. *Astron J*, 2008, 135: 1459–1473

- 25 Ferro A A, Figuera Jaimes R, Giridhar S, et al. Exploring the variable stars in the globular cluster NGC 5024 (M53): New RR Lyrae and SX Phoenicis stars. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2011, 416: 2265–2284
- 26 Braga V F, Stetson P B, Bono G, et al. On the RR Lyrae stars in globulars. IV.  $\omega$  centauri optical UBVRI photometry. [Astron J](#), 2016, 152: 170
- 27 Stetson P B, Braga V F, Dall’Ora M, et al. Optical and near-infrared *UBVR<sub>I</sub>IJK* photometry for the RR Lyrae stars in the nearby globular cluster M4 (NGC 6121). [Publ Astron Soc Pac](#), 2014, 126: 521–543
- 28 Jurcsik J, Smitola P, Hajdu G, et al. Overtone and multi-mode RR Lyrae stars in the globular cluster M3. [Astrophys J Suppl Ser](#), 2015, 219: 25
- 29 Kains N, Ferro A A, Jaimes R F, et al. A census of variability in globular cluster M 68 (NGC 4590). [Astron Astrophys](#), 2015, 578: A128
- 30 Braga V F, Stetson P B, Bono G, et al. On the RR Lyrae stars in globulars. V. The complete near-infrared (JHK<sub>s</sub>) census of  $\omega$  centauri RR Lyrae variables. [Astron J](#), 2018, 155: 137
- 31 Bhardwaj A, Rejkuba M, Grijs R, et al. Near-infrared census of RR Lyrae variables in the Messier 3 globular cluster and the period–luminosity relations. [Astron J](#), 2020, 160: 220
- 32 Bhardwaj A, Rejkuba M, Sloan G C, et al. Optical and near-infrared pulsation properties of RR Lyrae and Population II Cepheid variables in the Messier 15 globular cluster. [Astrophys J](#), 2021, 922: 20
- 33 Bhardwaj A, Rejkuba M, de Grijs R, et al. RR Lyrae variables in Messier 53: Near-infrared period–luminosity relations and the calibration using Gaia Early Data Release 3. [Astrophys J](#), 2021, 909: 200
- 34 Baumgardt H, Vasiliev E. Accurate distances to Galactic globular clusters through a combination of Gaia EDR3, HST, and literature data. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2021, 505: 5957–5977
- 35 Garofalo A, Cusano F, Clementini G, et al. Variable stars in the ultra-faint dwarf spheroidal galaxy Ursa Major I. [Astrophys J](#), 2013, 767: 62
- 36 Siegel M H. RR Lyrae Stars in the Boötes Dwarf Spheroidal Galaxy. [Astrophys J](#), 2006, 649: L83–L86
- 37 Musella I, Ripepi V, Marconi M, et al. Stellar archeology in the Galactic halo with ultra-faint dwarfs. VII. Hercules. [Astrophys J](#), 2012, 756: 121
- 38 Kuehn C, Kinemuchi K, Ripepi V, et al. Variable stars in the newly discovered milky way dwarf spheroidal satellite canes venatici I. [Astrophys J](#), 2008, 674: L81–L84
- 39 Kinemuchi K, Harris H C, Smith H A, et al. The variable stars of the draco dwarf spheroidal galaxy: Revisited. [Astron J](#), 2008, 136: 1921–1939
- 40 Nemec J M, Wehlau A, Mendes de Oliveira C. Variable stars in the Ursa Minor dwarf galaxy. [Astron J](#), 1988, 96: 528
- 41 Coppola G, Marconi M, Stetson P B, et al. The Carina project. IX. On hydrogen and helium burning variables. [Astrophys J](#), 2015, 814: 71
- 42 Vivas A K, Alonso-García J, Mateo M, et al. The population of pulsating variable stars in the Sextans dwarf spheroidal galaxy. [Astron J](#), 2019, 157: 35
- 43 Siegel M H, Majewski S R. Exploring the Leo II dwarf spheroidal galaxy. I. The variable star content. [Astron J](#), 2000, 120: 284–297
- 44 Martínez-Vázquez C E, Stetson P B, Monelli M, et al. Variable stars in local group galaxies – II. Sculptor dSph. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2016, 462: 4349–4370
- 45 Stetson P, Fiorentino G, Bono G, et al. Homogeneous photometry VI: Variable stars in the Leo I dwarf spheroidal galaxy. [Publ Astron Soc Pac](#), 2014, 126: 616–641
- 46 Fiorentino G, Monelli M, Stetson P B, et al. Weak Galactic halo-Fornax dSph connection from RR Lyrae stars. [Astron Astrophys](#), 2017, 599: A125
- 47 Soszynski I, Udalski A, Szymanski M, et al. Over 38000 RR Lyrae stars in the OGLE Galactic bulge fields. [Acta Astron](#), 2014, 64: 177–196
- 48 Soszynski I, Udalski A, Szymanski M, et al. The OGLE collection of variable stars. Over 45000 RR Lyrae stars in the magellanic system. [Acta Astron](#), 2016, 66: 131–147
- 49 Vivas A K, Walker A R, Martínez-Vázquez C E, et al. A DECam view of the diffuse dwarf galaxy Crater II – Variable stars. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2020, 492: 1061–1077
- 50 Vivas A K, Martínez-Vázquez C E, Walker A R, et al. Variable stars in the giant satellite Galaxy Antlia 2. [Astrophys J](#), 2020, 926: 78
- 51 Yang S C, Sarajedini A. HST/WFPC2 imaging of the dwarf satellites And XI and And XIII: Horizontal branch morphology and RR Lyraes. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2012, 419: 1362–1375
- 52 Martínez-Vázquez C E, Monelli M, Bernard E J, et al. The ISLANDS Project. III. Variable stars in six andromeda dwarf spheroidal galaxies. [Astrophys J](#), 2017, 850: 137
- 53 Cusano F, Clementini G, Garofalo A, et al. Dwarf spheroidal satellites of M31. I. Variable stars and stellar populations in andromeda XIX. [Astrophys J](#), 2013, 779: 7
- 54 Cusano F, Garofalo A, Clementini G, et al. Variable stars and stellar populations in Andromeda XXV. III. A central cluster or the galaxy NUCLEUS? [Astrophys J](#), 2016, 829: 26
- 55 Cusano F, Garofalo A, Clementini G, et al. Variable stars and stellar populations in Andromeda XXI. II. Another merged galaxy satellite of M31? [Astrophys J](#), 2015, 806: 200
- 56 Pritzl B J, Armandroff T E, Jacoby G H, et al. The dwarf spheroidal companions to M31: Variable stars in Andromeda VI. [Astron J](#), 2002, 124: 1464–1485

- 57 Monelli M, Fiorentino G, Bernard E J, et al. Variable stars in local group galaxies. III. And VII, NGC 147, and NGC 185: Insight into the building blocks of the M31 Halo. *Astrophys J*, 2017, 842: 60
- 58 Fiorentino G, Contreras Ramos R, Tolstoy E, et al. The ancient stellar population of M 32: RR Lyrae variable stars confirmed. *Astron Astrophys*, 2012, 539: A138
- 59 Bernard E J, Monelli M, Gallart C, et al. The ACS LCID Project. I. Short-period variables in the isolated dwarf spheroidal galaxies Cetus and Tucana. *Astrophys J*, 2009, 699: 1742–1764
- 60 Ordoñez A J, Yang S C, Sarajedini A. The RR Lyrae variable population in the phoenix dwarf galaxy. *Astrophys J*, 2014, 786: 147
- 61 Sarajedini A. The properties of RR Lyrae variable stars in the Local Group dwarf galaxy LGS-3. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2024, 527: 11751–11755
- 62 Ordoñez A J, Sarajedini A. The pulsating variable star population in DDO210. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2016, 455: 2163–2177
- 63 Monelli M, Bernard E J, Gallart C, et al. Variable stars in the Cetus dwarf spheroidal galaxy: Population gradients and connections with the star formation history. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 422: 89–105
- 64 Bernard E J, Monelli M, Gallart C, et al. The ACS LCID Project – VIII. The short-period Cepheids of Leo A. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 432: 3047–3061
- 65 Bernard E, Monelli M, Gallart C. The ACS LCID Project. II. Faint variable stars in the isolated dwarf irregular galaxy IC 1613. *Astrophys J*, 2010, 712: 1259–1276
- 66 Baldacci L, Rizzi L, Clementini G, et al. Variable stars in the dwarf irregular galaxy NGC 6822: The photometric catalogue. *Astron Astrophys*, 2005, 431: 1189–1201
- 67 Yang S C, Wagner-Kaiser R, Sarajedini A, et al. The early chemical enrichment histories of two sculptor group dwarf galaxies as revealed by RR Lyrae variables. *Astrophys J*, 2014, 784: 76
- 68 Martínez-Vázquez C E, Cerny W, Vivas A K, et al. RR Lyrae stars in the newly discovered ultra-faint dwarf galaxy centaurus I. *Astron J*, 2021, 162: 253
- 69 Sarajedini A. The properties of RR Lyrae variable stars in the isolated Local Group dwarf galaxy WLM. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2023, 521: 3847–3860
- 70 Neeley J R, Monelli M, Marengo M, et al. Variable stars in local group galaxies. VI. The isolated dwarfs VV 124 and KKr 25. *Astrophys J*, 2021, 920: 152
- 71 Nagarajan P, Weisz D R, El-Badry K. RR Lyrae-based distances for 39 nearby dwarf galaxies calibrated to Gaia eDR3. *Astrophys J*, 2022, 932: 19
- 72 Tran Q H, Hoyt T J, Freedman W L, et al. Distances to local group galaxies via Population II, stellar distance indicators. I. The Sculptor Dwarf Spheroidal. *Astrophys J*, 2022, 935: 34
- 73 Oakes E K, Hoyt T J, Freedman W L, et al. Distances to local group galaxies via Population II, stellar distance indicators. II. The Fornax Dwarf Spheroidal. *Astrophys J*, 2022, 929: 116
- 74 Drake A J, Catelan M, Djorgovski S G, et al. Probing the outer galactic halo with RR Lyrae from the Catalina Surveys. *Astrophys J*, 2013, 763: 32
- 75 Drake A J, Catelan M, Djorgovski S G, et al. Evidence for a milky way tidal stream reaching beyond 100 kpc. *Astrophys J*, 2013, 765: 154
- 76 Hernitschek N, Sesar B, Rix H W, et al. The geometry of the Sagittarius stream from Pan-STARRS1  $3\pi$  RR Lyrae. *Astrophys J*, 2017, 850: 96
- 77 Hernitschek N, Cohen J G, Rix H W, et al. The profile of the galactic halo from Pan-STARRS1  $3\pi$  RR Lyrae. *Astrophys J*, 2018, 859: 31
- 78 Iorio G, Belokurov V. The shape of the Galactic halo with Gaia DR2 RR Lyrae. Anatomy of an ancient major merger. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 482: 3868–3879
- 79 Pietrukowicz P, Kozłowski S, Skowron J, et al. Deciphering the 3D structure of the old galactic bulge from the OGLE RR Lyrae stars. *Astrophys J*, 2015, 811: 113
- 80 Jacyszyn-Dobrzeńska A, Skowron D, Mroz P, et al. OGLE-ing the Magellanic System: Three-dimensional structure of the clouds and the bridge using RR Lyrae stars. *Acta Astron*, 2017, 67: 1–35
- 81 Wang T, Liu G, Cai Z, et al. Science with the 2.5-meter Wide Field Survey Telescope (WFST). *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 109512
- 82 Braga V F, Fiorentino G, Bono G, et al. On the use of field RR Lyrae as galactic probes – VI. Mixed mode RR Lyrae variables in Fornax and in nearby dwarf galaxies. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2022, 517: 5368–5381
- 83 Petersen J. Masses of double mode Cepheid variables determined by analysis of period ratios. *Astron Astrophys*, 1973, 27: 89–93
- 84 Pietrzyński G, Graczyk D, Gallenne A, et al. A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent. *Nature*, 2019, 567: 200–203
- 85 Kervella P, Gallenne A, Remage Evans N, et al. Multiplicity of Galactic Cepheids and RR Lyrae stars from Gaia DR2. *Astron Astrophys*, 2019, 623: A116
- 86 Riess A G, Yuan W, Macri L M, et al. A comprehensive measurement of the local value of the Hubble constant with  $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. *Astrophys J Lett*, 2022, 934: L7

Summary for “天琴座RR型变星的测距应用”

## Distance measurement based on RR Lyrae variable stars

Xiaodian Chen<sup>1,2\*</sup>, Jianxing Zhang<sup>1</sup>, Shu Wang<sup>1</sup>, Xinyi Gao<sup>1</sup> & Licai Deng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>2</sup> Institute for Frontiers in Astronomy and Astrophysics, Beijing Normal University, Beijing 102206, China

\* Corresponding author, E-mail: [chenxiaodian@nao.cas.cn](mailto:chenxiaodian@nao.cas.cn)

This paper summarizes the applications of RR Lyrae variable stars for distance measurements in the last 20 years. RR Lyrae stars are low-mass, metal-poor stars located in the overlap region of the pulsation instability strip and the horizontal branch. Due to the presence of radial pulsations, there are periodic brightness variations in RR Lyrae stars. RR Lyrae stars can be easily identified because of their sawtooth-shaped light curves. Based on the shape of the light curve, RR Lyrae stars can be mainly classified into fundamental mode (RRab), first-overtone mode (RRc) and double-mode (RRd) sub-types. With the development of large-scale time-domain telescopes, the current sample of RR Lyrae stars based on 1-meter-class telescopes is almost complete, with a number of about 300000 stars. RR Lyrae stars are good standard candles due to the tight relationship between luminosity and period and metallicity. The distance measurements based on RR Lyrae stars have also been optimized, gradually shifting from relying on visible metallicity-luminosity relations to infrared period-metallicity-luminosity relations. The zero points of the period-metallicity-luminosity relations for the RR Lyrae stars have been significantly optimized thanks to the improvement of the geometric distance of the Large Magellanic Cloud and the Gaia parallax. RRab stars and RRc stars were used to measure distances with an accuracy of about 5% for a single object and up to 2% for multiple objects. RRab stars have been the best distance tracer of old population for the last decades. On the basis of a large sample of RRab stars, the structure of the Galactic halo, bulge, and the Magellanic Clouds is refined, and the distances to globular clusters and dwarf galaxies are more accurately measured. In 2023, based on LAMOST and SDSS low resolution spectra, RRd stars were found to have period-luminosity relations that do not depend on metallicities. It is the only valuable object in standard candles that is independent of metallicities, and can break the bottleneck of the lack of metallicity in photometry-based distance measurements. RRd stars open the way to bulk measurements of high-precision distances to galaxies. Based on multiple RRd stars, the distance accuracy can be up to 1% which is better than distance accuracy based on RRab stars or tip of red giant branch stars. At the same time, RRd stars can also provide the metallicity of the objects to help optimize the accuracy of RRab star-based distances. With the future Chinese Space Station Telescope and other instruments, the number of RRd stars will increase to tens of thousands. RRd stars will be used to determine high-precision distances to hundreds of galaxies or dwarf galaxies with an error of about 1%, increasing that sample by a factor of 20, and will then be able to optimize the Hubble constant from multiple distance ladders.

**RR Lyrae variable stars, pulsating variable stars, distance measurement, time domain astronomy, standard candles**

doi: [10.1360/TB-2024-0228](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0228)