

文章编号: 1000-8349(2010)03-243-12



# 变光天体回光测距之现状

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 恒星周围的星际尘埃云能反射星光而为观测者所窥见, 这一现象称为回光, 而对变星回光的观测研究可用于变星距离的绝对测定, 包括尺度距离和速度距离。对此类方法的基本原理、迄今所得到的若干测距结果, 以及有关问题做了简要的介绍和讨论。

**关键词:** 造父变星; 星际云; 回光; 距离测定

**中图分类号:** P156      **文献标识码:** A

## 1 引 言

天体距离测定是天文学中最重要的工作之一, 包括探究银河系结构和运动学以及宇宙大尺度结构在内的一些重要天体物理研究领域, 都离不开对恒星、星系和星系团距离的尽可能准确测定。为此, 长期以来天文学家始终为多途径测定各类天体的距离而不懈努力。

测定天体的距离可有两途径, 即绝对测定和相对测定。所谓“绝对测定”, 是指无需借助其他方法就能直接测定天体的距离, 如利用周年视差位移测定恒星的几何距离便是一种最基本的绝对测定方法。与绝对测定不同, 相对测定必须借助对标距天体或标距关系的“绝对定标”才能推算出天体的距离, 如利用周光关系测定变星及其寄主星系的距离便是一种具有代表性的相对测定方法, 但周光关系中的参数必须通过定标加以确定。天文学家总是力求通过多种不同的方法来独立测定同一天体的距离并加以比较, 以提高测距结果的准确度, 印证各种方法的可靠程度, 分析误差的可能来源, 并进而对方法本身加以可能的改进或完善。

对于同一类标距天体, 有时还可通过不同的途径来测定其距离, 如 Ia 型超新星便是一个典型的例子。研究表明, 该类超新星爆发达到极大光度时的 B 波段绝对星等为  $M_B = (-19.48 \pm 0.07) \text{ mag}$ , 与理论值  $M_B^* = (-19.48 \pm 0.07) \text{ mag}$  符合得很好, 可作为标准烛光来确定超新星寄主星系或星系团的光度距离<sup>[1]</sup>, 这一结果属于距离的相对测定。巴特—威塞林克方法为测

收稿日期: 2009-12-18; 修回日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (10773020); 国家自然科学基金重点资助项目 (10778003, 10833055)

定超新星的光度距离提供了又一条途径, 如 1987 年有人利用大麦云中超新星 1987A 爆发的机会, 由该方法测得大麦云的距离为  $(55 \pm 5)$  kpc<sup>[2]</sup>, 这一结果属于距离的绝对测定。

超新星事件还可以提供另一种绝对测距方法, 即利用“时间延迟”效应<sup>[1]</sup>, 这里所谓“时间延迟”是指目标天体不同位置特征结构发出辐射到达观测者的时间差。这种方法的基本原理是, 由时间延迟量推算出天体的线直径  $d$ , 又通过成像观测取得天体的角直径  $\theta$ , 于是就不难得出天体的距离  $D = d/\theta$ , 由此测得的距离称为尺度距离或角径距离。由于天体角直径和线直径的精确测定都十分困难, 对于遥远的天体来说, 此类方法仅在能取得特定观测资料的少数情况下具有实用价值<sup>[1]</sup>。例如, 人们曾利用超新星 1987A 的空间紫外和成像观测资料, 通过这条途径得出大麦云的尺度距离为  $(52 \pm 3)$  kpc<sup>[1]</sup>, 与其他方法得出的结果符合得非常好。

造父变星除了可由周光关系 (或周光色关系) 来确定其光度距离外, 还可以利用巴特 — 威塞林克方法的原理来对变星距离作绝对测定<sup>[1]</sup>, 不过前者的应用远比后者来得广泛。本文将简要介绍另一种变星距离的绝对测定方法及目前取得的若干结果, 该方法的基础乃是上面提到的时间延迟效应。

## 2 基本原理

银河系 (以及河外星系) 内除大量恒星外, 还广泛分布有星际介质, 在密度相对较高 (星际气体和尘埃的质点数密度应大于  $10^1 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ) 的地方构成气体尘埃云, 即星云, 而星云和星云之间的星际物质质点平均密度仅约为  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ 。如果星云内部或附近有一个或若干个温度并不太高 (光谱型通常晚于 B1 型) 的明亮恒星, 则星云会因反射恒星的星光而发光, 这就是反射星云。与发射星云相比, 反射星云中的尘埃含量通常比较高。

星云的反射光亦称恒星回光 (light echo), 与造成回光的原始星光相比, 观测者看到回光的时间必然有所延迟。对于变星来说, 其回光现象的时间延迟是可以设法测定的, 并可用来确定变星及其寄主星系的距离。

### 2.1 造父变星的尺度距离

如果一个造父变星深埋于气体尘埃云之内, 且云块的光深较大, 观测上表现为反射星云, 那么随着变星光度的周期性变化, 星云的反射光 (回光) 强度也会发生相应的规则变化, 但时间上则有所延迟。利用变星星周反射星云这种回光现象的时间延迟效应, 可以直接测定造父变星的距离<sup>[3]</sup>。

星云回光强度的这种变化会从最靠近变星的区域, 朝着远离变星的区域以光速渐而向外传递。经过一段时间后, 在恒星周围的一定范围内便可观测到若干个亮度为极大的“特征结构”。需要注意的是, 由于云块内物质密度的分布并不均匀, 能看到的特征结构通常仅表现为一些亮斑点或短光弧, 因为那儿的物质密度高, 回光较强而易于观测到。

根据上述物理图像不难得出以下等式<sup>[3]</sup>:

$$(N_i + \Delta\varphi_i)P = kD\theta_i, \quad (1)$$

式中  $P$  是变星的光变周期, 以 d 为单位, 这是可观测量;  $D$  是变星距离, 这是需加以确定的未知量。式 (1) 左端是由变星向外第  $i$  个特征斑点到变星的线距离, 以“光日”为单位,

$(N_i + \Delta\varphi_i)$  是第  $i$  斑点与变星之光变曲线的总相位延迟, 其中  $N_i$  为整周期数,  $\Delta\varphi_i$  为不足一个周期的相位延迟量。式 (1) 右端中的  $\theta_i$  是第  $i$  个斑点与变星间的角距离, 以角秒 (") 为单位, 其值可通过成像观测予以确定; 式中  $k = 5.775 5$  是单位转换因子, 目的是使所确定的距离  $D$  以 kpc 为单位。

显然, 对于每一个特征斑点  $i$ , 可以列出一个相应的式 (1)。不过, 尽管  $\Delta\varphi_i$  可以确定, 但整数  $N_i$  却是未知的, 且因  $i$  而异。说得更具体一点, 一些斑点到变星的角距离  $\theta_i$  是可以测定的, 但其所对应的  $i$  值却并不唯一确定, 原因是对应于每个  $i$ , 并非都能观测到相应的特征光斑, 具体情况取决于恒星周围发射星云内的物质密度分布。尽管如此, 只要能观测到 2 个或 2 个以上特征光斑, 通过某种迭代过程, 仍然有可能由式 (1) 确定变星的距离<sup>[3]</sup>。这一测距方法的基本思路, 与 Panagia 等人<sup>[4]</sup> 利用超新星 1987A 的两种空间观测资料确定大麦云尺度距离的原理本质上是一样的, 因而属于天体距离的绝对测定。

## 2.2 爆发变星的尺度距离

事实上, 除造父变星外, 回光现象也可能出现在爆发变星 (如新星和超新星等) 的星周云中<sup>[5]</sup>, 前提是这些变星能变得非常明亮, 而且星云中的尘埃密度要足够高, 以使回光在地球上能观测到。不过, 实际情况中回光的观测表象与造父变星有所不同, 它们并不表现为在变星周围一定尺度范围内, 有规则地呈现若干个回光亮度最大的特征亮斑。

相对来说, 爆发变星光度的增亮时段是短暂的, 因而可看作为某种光脉冲, 它们会因尘埃的散射作用在星周云中形成一个亮环。随着时间的推移, 变星发出的光脉冲便以光速  $c$  由内向外传播, 而亮环的尺度则不断扩展。如从此类变星出现爆发事件 (指变星光度达到极大) 之时起, 到观测历元所经历的时间段为  $t$ , 则观测之时亮环的线直径为  $2ct$ 。如设此时亮环的角半径为  $\theta$ , 即角直径为  $2\theta$ , 则不难得出变星的距离  $D$  为<sup>[6]</sup>

$$D = ct/\theta, \quad (2)$$

这里的  $t$  仍可理解为某种时间延迟。显然, 这是一种天体距离的绝对测定法。

如  $D$  以 Mpc 为单位,  $t$  以 a 为单位, 而  $\theta$  以 (") 为单位, 则式 (2) 可改写为以下实用形式<sup>[7]</sup>:

$$D = 0.126t/\theta. \quad (3)$$

上述方法需要进行偏振观测<sup>[6]</sup>, 因为具有最高偏振度的光辐射构成的亮环所对应的散射角为  $90^\circ$ , 即只有当该亮环位于变星位置处的天球切平面上时, 式 (2) 或 (3) 才能严格得以成立。另一方面, 研究表明超新星邻域内回光的亮度比超新星的亮度约低  $5\sim 10$  mag, 因而现有技术是能够观测到的。

显然, 为通过这条途径测定变星的距离, 前提是必须知道变星的爆发时间, 否则便无法确认时间段  $t$ , 而这一条件无疑会使该方法用于测定变星及其寄主星系距离的对象受到一定限制。

## 2.3 爆发变星的速度距离

对于历史上曾出现过的超新星事件, 有一些并未记录下爆发的时间, 这种情况下即使观测到相应的回光现象, 也无法利用式 (2) 或 (3) 来确定它们的尺度距离。为此, Sparks<sup>[7]</sup> 于 1996 年提出了利用 2 个不同历元所观测到的回光自行来确定超新星距离的设想。

式 (2) 可写成

$$\theta = ct/D,$$

上式两边对时间求导, 即可得

$$\dot{\theta} = c/D ,$$

式中  $\dot{\theta}$  即为回光的年自行。如果自行以  $\text{mas} \cdot \text{a}^{-1}$  为单位, 而  $D$  仍以 Mpc 为单位, 则上式可改写为

$$\dot{\theta} = 126/D . \quad (4)$$

只要能通过一段时间的观测得到回光斑的年自行  $\dot{\theta}$ , 便可按式 (4) 确定超新星 (以及其他爆发变星) 的距离, 而无须知道超新星的爆发时间。现在的距离  $D$  是由回光的线速度与角速度之比确定的, 可称为速度距离, 也属于天体距离的绝对测定。

这一方法能付诸实用的前提是, 回光强度随时间的推移不会有太大的衰减, 否则时间一长回光就观测不到。Sparks 认为, 回光强度与  $r^2$  成反比, 这里  $r$  是回光区到变星的距离, 可称为星心距; 另一方面, 发出回光的面积与  $r^2$  成正比。于是, 只要相对而言光深不是太大, 即介质的消光作用不很严重, 那么对于物质均匀分布的云块来说总的回光强度大体上保持为常数, 而与星心距  $r$  的关系不大<sup>[7]</sup>。

顺便指出, 有关作者往往把上述几类回光测距法得出的变星距离称为几何距离。不过, 笔者认为严格说只有通过三角视差所确定的距离才称得上是真正的几何距离。众所周知, 由天体视星等和绝对星等 (光度) 得出的距离称为光度距离, 故根据式 (2) 由天体 (或其特征结构) 之角直径和线直径导出的距离不妨称为尺度距离或角径距离<sup>[1]</sup>, 而根据式 (4) 由角速度和线速度确定的距离应称为速度距离, 后者如移动星团视差<sup>[1]</sup>。由变星回光现象测得的尺度距离和速度距离, 都可归类为天体距离的绝对测定。

### 3 若干应用

鉴于回光现象较为罕见, 而回光测距对观测资料有着特定的要求, 近期更需涉及空间观测和偏振观测, 且必须有足够高的观测精度 (高空间分辨率), 迄今为止尚未取得广泛的应用。

#### 3.1 造父变星船尾 RS

1972 年, Havlen<sup>[3]</sup> 首次通过 2.1 节中的方法确定了变星船尾 RS (RS Puppis, HD68860, SAO198944) 的距离。这是一颗非常明亮的经典造父变星, 光变周期为 41.384 d。如此长光变周期的造父变星, 对于确定该类变星周光关系的零点, 探讨周光关系在高光度 (长周期) 端的斜率、Ia 型超新星的光度定标, 以及对确定河外星系距离尺度和哈勃常数都有着重要意义。

早在 1897 年已有人注意到船尾 RS 的光变现象<sup>[8]</sup>。Havlen 之前一些作者对该变星的光变和色变 (color variations) 性质做了讨论<sup>[9-13]</sup>, 其中 Westerlund<sup>[13]</sup> 确认, 至少就当时而言, 该变星的星周云提供了造父变星和星际介质间直接相关联的唯一证据。这一点很重要, 因为不然的话, 反射星云的距离并非必然等同于变星的距离。例如, 造父变星仙后 SU (SU Cas) 尽管看上去与某一反射星云靠得很近, 但人们并未确认两者之间有着物理上的联系<sup>[14,15]</sup>。Westerlund<sup>[13]</sup> 同时还注意到, 船尾 RS 星周云的范围比较大, 有可能探测到因恒星光变引起的云块内光度分布的变化。

在 Havlen<sup>[3]</sup> 采用的简单模型中, 星周云是高度球对称的, 它由一系列均匀分布的同心球壳组成, 而变星即位于球心处。考虑到船尾 RS 的距离约为 1.5 kpc 或更远些, 而观测资料涉及的星周云尺度约为  $1'$ , 故理想情况下在这一范围内亮度为极大的特征结构最多可超过 12 个<sup>[3]</sup>。实际

上, Havlen 从 Stromlo 天文台 74 英寸望远镜所拍摄的 20 张 103a-O 照相底片上, 仅仅证认出该变星周围反射星云中的 4 个特征结构 (参见图 1), 并用其中 3 个结构的有关观测资料得出船尾 RS 的距离为  $(1.78 \pm 0.20)$  kpc<sup>[3]</sup>。

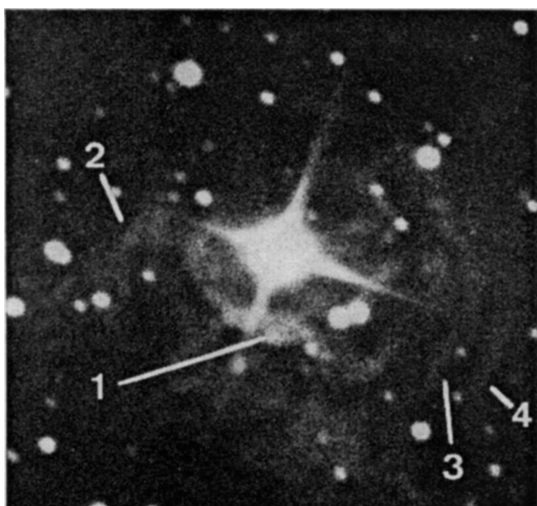


图 1 船尾 RS 及其周围反射星云中的 4 个回光亮斑<sup>[3]</sup>

最近, Kervella 等人<sup>[16]</sup>(参见图 2) 遵循 Havlen 的思路, 对船尾 RS 的距离再次做了测定, 资料取自 2006—2007 年间智利 La Silla 天文台上 3.6 m 新技术望远镜 (NTT) 的 CCD 测光观测结果, 计有 10 个相位延迟测定值最为精确的回光特征斑点。在分析过程中他们又剔除了其中 4 个拟合偏差最大的特征斑点, 并由其余 6 个斑点得出变星船尾 RS 的距离为  $D = (1\,992 \pm 20 \pm 20)$  pc, 这里分别给出了距离测定值的统计误差 (前一项  $\pm 20$  pc) 和系统误差 (后一项  $\pm 20$  pc), 总相对误差仅为 1.4%; 相应的周年视差  $\pi = 0.502 \pm 0.007$ , 而距离模数  $m - M = (11.50 \pm 0.03)$  mag。

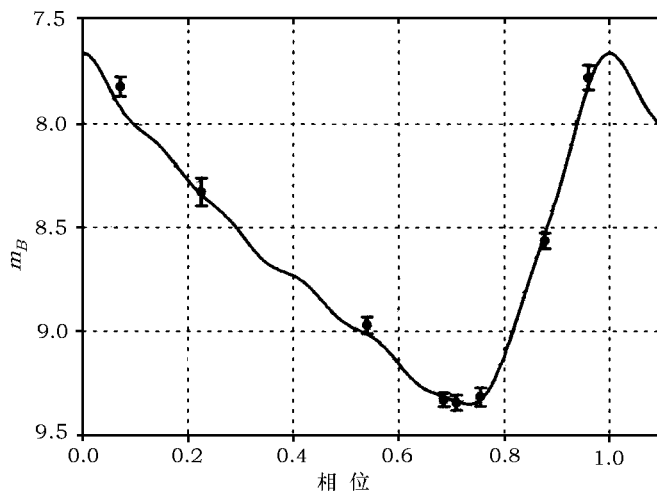


图 2 船尾 RS 观测光变曲线<sup>[16]</sup>

纵坐标为 B 波段视星等

表 1 给出造父变星船尾 RS 距离的若干测定结果, 取自文献 [16]。表中 IRSB 是指红外波段的面亮度测距法, 该方法系从巴特—威塞林克方法变化而来。表中序号 1、2、7、9 为距离的绝对测定, 其余为相对测定。由表列数字来看, Kervella 等由回光测距法所得结果 9 的内符精度最高, Havlen 的早期回光测距结果 1 精度较低, 除 7 外其他距离测定值之间的符合程度还是相当好的。顺便指出, 依巴谷卫星对船尾 RS 这样远恒星 (距离约 2 kpc) 的视差测定实际上是无效的。

表 1 船尾 RS 的若干测距结果<sup>[16]</sup>

序号	距离测定值 /pc	方法	参考文献
1	1 780 ± 200	回光测距	[4]
2	2 040	依巴谷视差	[17]
3	2 111 <sup>+75</sup> <sub>-73</sub>	IRSB	[18]
4	2 052 <sup>+61</sup> <sub>-59</sub>	IRSB	[19]
5	2 004 ± 59	IRSB-1	[20]
6	1 984 ± 122	IRSB-2	[20]
7	694 <sup>+381</sup> <sub>-181</sub>	依巴谷视差重新归算	[21]
8	1 830 <sup>+109</sup> <sub>-94</sub>	IRSB	[22]
9	1 992 ± 28	回光测距	[16]

### 3.2 爆发变星麒麟 V838

特殊变星麒麟 V838 (V838 Mon.) 的光变现象最早由 Brown 于 2002 年 1 月 6 日发现<sup>[23]</sup>, 而 Hender 等人估计该变星的爆发应始于该年 1 月 1 日前后<sup>[24]</sup>。麒麟 V838 被认为是最难以理解的爆发变星之一, 能谱分布表明它的前身星可能是一个  $V = 15.6$  mag 的低光度 F 型主序星, 爆发后的极大光度达到  $V = 6.7$  mag, 光变曲线颇为复杂, 且表现为由多次爆发造成的多重极大光度。尽管已有多人对其爆发机制进行探索, 但迄今未有明确定论<sup>[25-27]</sup>。

在麒麟 V838 爆发后不久, Hender 等人<sup>[24]</sup>即于 2 月 17 日探测到了因星周尘埃散射中央恒星光而造成的回光; 他们的报道称, 回光的角直径以  $0''.54/d$  的速率线性增大, 到 3 月 23 日已达到  $27''$ 。根据 2.2 节中所述方法的原理, Hender 等人推算出麒麟 V838 的尺度距离约为 700 pc。到 4 月初, 回光角直径已达到  $30''$ , 而 Munari 等人<sup>[28]</sup>利用历元差为 39 d 的 15 d 观测资料, 得到变星回光直径之膨胀速率为  $(0''.44 \pm 0''.017)/d$ , 由此得出该变星的距离为  $(790 \pm 30)$  pc, 而极大光度为  $M_V = -4.35$  mag。同年 8 月, Kimeswenger 等人<sup>[25]</sup>进一步利用历元差为 89 d 的 34 d 观测资料, 估计麒麟 V838 的距离范围为 640~680 pc, 尽管这一数值比上面 2 项结果都来得小, 但差异显然不大。以上 3 项早期工作的观测资料都取自地面望远镜, 其中口径最大的是 USNO 位于 Flagstaff 的 1 m 镜<sup>[24,25,28]</sup>。

麒麟 V838 距离测定值发生显著变化出现于翌年 Bond 等人的工作<sup>[29]</sup>(参见图 3)。Bond 等人取得了 4 个历元 (最大历元差为 182 d) 的 HST 高分辨率成像和偏振观测资料, 他们首先假设回光的类环状结构由同心壳层产生, 并从两次成像观测判定变星的距离必大于 2 kpc。然后, 作者又进一步利用回光结构的偏振观测资料, 得出该变星距离的下限约为 6 kpc。这一数值与 2002 年的几项距离测定结果差异很大, 但显然应该较为可靠, 其原因在于 HST 有很高的分辨率, 观测历元差的增大, 以及偏振资料的应用。Bond 等人还预期, 随着历元差的增

大, 距离测定结果的精度将会进一步提高。根据这一距离估值, 麒麟 V838 极大光度时的绝对星等应亮于  $M_V = -9.6 \text{ mag}$ 。

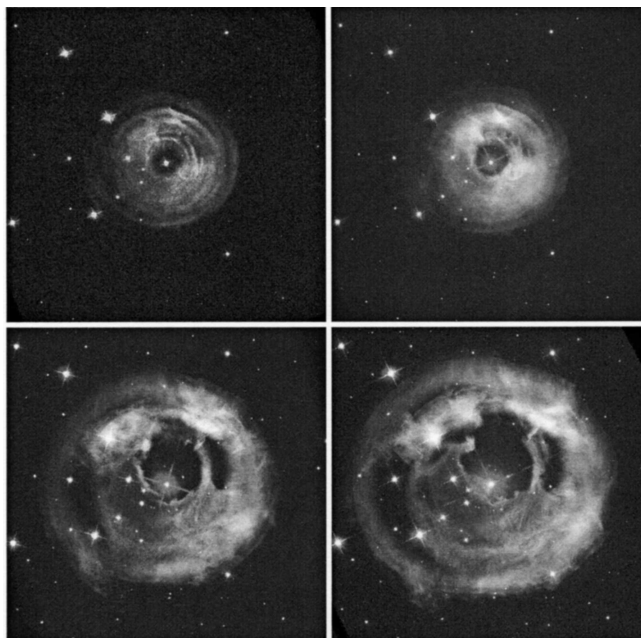


图3 麒麟 V838 在 4 个观测历元间的结构变化<sup>[29]</sup>

2004 年 Tylanda 指出<sup>[30]</sup>, Bond 等人关于同心壳层的假设是不成立的。他从理论和实测两个方面讨论了观测回光结构及其对测距结果的影响, 认定麒麟 V838 的距离必大于 5 kpc, 并通过对回光结构中内侧亮环的分析估计该变星的距离为  $(8.0 \pm 2.0) \text{ kpc}$ 。2008 年, Sparks 等人<sup>[31]</sup>进一步利用 2002—2005 年间 HST 对麒麟 V838 的偏振观测资料, 得出该变星的距离为  $(6.1 \pm 0.6) \text{ kpc}$ 。显然, 随着观测历元差的增大, 测距结果的精度必然会有所提高。

### 3.3 超新星

早在 1975 年, van den Bergh<sup>[32]</sup> 就已探讨了观测银河系超新星回光的可能性。1986 年, Chevalier<sup>[33]</sup> 较为详细地讨论了有关回光的几何结构和物理性质。1994 年 Sparks<sup>[6]</sup> 指出, 可以利用历史上超新星的回光观测来直接估算河外星系的尺度距离 (2.2 节方法); 他的方法需要对超新星回光进行偏振观测, 但不要求与极大偏振度回光相应的散射角必然为  $90^\circ$ , 并认为借助 HST 的观测可以用这一方法取得 Virgo 星系团以远星系距离的合理估值。不过, 在这项工作发表之时, 唯一已观测到河外星系超新星回光现象的是大麦云中的 SN 1987A。不久, Sparks<sup>[7]</sup> 又提出可以通过回光偏振观测来确定不同类别河外变光天体的速度距离 (2.3 节方法), 包括超新星、新星, 甚至还有 AGN。

随着探测技术的改进, 以及对回光观测之天体物理意义认识的提高<sup>[34]</sup>, 人们陆续在一些河外星系探测到了超新星的回光, 如室女团旋涡星系 NGC 4572 中的超新星 1991T<sup>[35]</sup>, 旋涡星系 M81 中的超新星 1993J<sup>[34]</sup>, 以及 SN1987A 附近 2 个新的回光源<sup>[36]</sup>, 等等。为了发现更多的回光, Boffi 等人<sup>[37]</sup> 曾对历史上的一批超新星做了普查式的搜索, 结果发现在 64 个点位上, 约有 25% 为候选回光源。迄今为止, 利用超新星回光推算河外星系距离的工作仅见

于 NGC 4572 中的超新星 1991T<sup>[35]</sup>。

Waagen 等人<sup>[38]</sup> 首先于 1991 年 4 月 13 日在 NGC 4572 中发现了超新星 1991T, 16 d 后其亮度达到极大, 最亮时视星等为  $V = 11.7 \text{ mag}$ <sup>[39,40]</sup>。1994 年 Schmidt 等人<sup>[41]</sup> 通过对目标的测光和光谱分析后指出, SN 1991T 的后期可见光发射起因于该超新星星周尘埃的回光; 对于此项工作, Schmidt 等用的是地面望远镜资料。1999 年, Sparks 等人<sup>[35]</sup> 利用 HST 的测光和偏振观测资料对上述结论做了进一步的确认, 并通过对回光结构的分析估算了 NGC 4572 的尺度距离。

鉴于超新星爆发后经历的时间不算太长, 而寄主星系的距离又相当远, 尽管利用现有的 HST 资料确实发现了回光的偏振发射, 但仍无法明确识别出极大偏振度的点位, 因而不可能直接由 2.2 节中的方法来确定超新星 (及其寄主星系) 的距离。为此, Sparks 等人<sup>[35]</sup> 采用了一种模型拟合的“间接”途径。首先, 在他们的回光模型中设定一种简单的理想状态, 回光物质密度取  $n = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ , 且为均匀分布, 并根据实测回光的尺度取回光深度为 50 pc。然后, 在一定的范围内改变模型回光的距离以使计算流量与实测回光流量尽可能相符, 并通过统计检验找出模型中超新星的“最优”距离, 而这一距离即可作为超新星 1991T 的距离估值。Sparks 等人的最终结论是, SN 1991T 的距离不会超过约 15 Mpc。作为比较, Sparks 等人<sup>[35]</sup> 还指出 SN 1991T 的寄主星系 NGC 4572 有 2 个近邻星系, 即 NGC 4496 和 NGC 4536, 它们的光度距离均为  $(16.4 \pm 1.0) \text{ Mpc}$ <sup>[42,43]</sup>, 而在更早些时候 Tully 给出的近星系表<sup>[44]</sup> 中, 这 3 个星系的距离都是 13.0 Mpc。

除 SN 1991T 外, Liu 等人<sup>[34]</sup> 在对 M81 中超新星 1973J 回光结构的讨论中提及, 通过获得更多的观测资料以测得回光的膨胀速率, 有望确定 M81 的距离, 但迄今未见有相关工作发表。

## 4 讨 论

100 多年前已经有人注意到银河系变星的回光现象<sup>[45]</sup>, 而直到 20 世纪 80 年代才真正探测到河外星系中的超新星回光<sup>[46-48]</sup>。回光来自视线方向的星际尘埃或气体, 或者来自变星的星周物质。长期以来各类变星回光研究的主要天体物理意义在于探索星际尘埃的三维密度分布<sup>[36]</sup>, 以及星周物质的形状、分布和成分等 (如文献 [49]), 而在确认存在星周物质的回光后, 有人便用以测定变星及其寄主星系的距离。

就目前来看, 鉴于受观测资料所限, 回光测距的实例并不多, 而且还存在一些争议。

### 4.1 对造父变星船尾 RS 测定结果之疑义

变星船尾 RS 是目前唯一观测到星周物质回光, 并用以测得变星尺度距离的银河系造父变星<sup>[3,16]</sup>。实际上, 在 Kervella 等<sup>[16]</sup> (以及 Havlen<sup>[3]</sup>) 的工作中隐含了一个假设: 变星星周云的回光斑点大体上 (或者说平均而言) 位于天球切平面上或其附近, 即观测者的视线方向与变星和斑点的连线近乎正交, 他们的理由是此类斑点最容易观测到。如果这一假设不成立, 那么就不能利用 2.1 节中的方法测定变星的尺度距离, 或者会给测距结果带来较大的不确定性。

考虑到上述可能性, Feast<sup>[50]</sup> 把式 (1) 修正为以下形式:

$$(N_i + \Delta\varphi_i)P \cos \alpha_i = kD\theta_i(1 + \sin \alpha_i), \quad (5)$$

其中  $\alpha_i$  便是变星-第  $i$  斑点连线与天球切平面之间的交角, 而在 Kervella 等人的工作中则假



设  $\alpha_i \equiv 0$ 。这里, Feast 实际上假设星周尘埃具有盘结构, 而盘的中面与视线方向斜交, 且  $\alpha_i \equiv \alpha$ 。从这一模型出发, 以及取造父变星船尾 RS 的光度距离为  $D = 1\,728\text{ pc}$ , Feast<sup>[50]</sup> 得到  $\alpha = 8^\circ.1 \pm 0^\circ.6$ , 并给出了该模型可能的天体物理意义。

最近, Bond 和 Sparks<sup>[51]</sup> 对上述假设进一步提出了强烈质疑。他们通过详细的分析后指出, 一般情况下由于前向散射的效率比较高, 最容易观测到的回光斑点不会位于天球切平面上, 它们很可能位于天球切平面的前方。据此, Bond 和 Sparks 断认 Kervella 等人的结论是无效的。不仅如此, 他们还认为 Feast 的扁平盘模型也是不能成立的, 因为星周云更可能具有双极形态, 且极向轴与天球切平面斜交, 交角可能在  $40^\circ$  左右。

尽管如此, Bond 和 Sparks<sup>[51]</sup> 认为偏振观测可望克服上述不确定性。他们指出偏振度  $p$  主要取决于散射角, 根据经典的 Rayleigh 函数,  $p$  可由下式计算:

$$p = p_{\max}(1 - \cos^2 \xi)/(1 + \cos^2 \xi), \quad (6)$$

其中,  $p_{\max}$  为散射角  $\xi = 90^\circ$  时的极大线偏振度。因此, 如能取得船尾 RS 回光的高分辨率偏振成像观测资料, 且星周云中有足够多的亮斑, 并能确认其中某些亮斑具有极大线偏振度, 从而证实这些亮斑的空间位置非常接近天球切平面, 那么仍然有可能得出该变星的尺度距离。

但是不管怎么说, 表 1 的数字表明 Kervella 等人的工作的确给出了相当好的变星距离测定值。这是否因为船尾 RS 的回光结构只是恰好满足 Havlen<sup>[3]</sup> 和 Kervella 等人<sup>[16]</sup> 所采用的简单假设, 抑或该假设确实反映了回光的普适性结构, 在目前仅有一个观测样本的情况下, 显然无法对之作出明确的判断。

#### 4.2 关于麒麟 V838 的测距结果

较早时期变星麒麟 V838 的测距资料均取自地面望远镜<sup>[24,25,28]</sup>, 且口径都不很大, 最长观测历元差不到 90 d, 所得到的变星距离测定值范围为  $0.6 \sim 0.8\text{ kpc}$ 。随着 HST 高分辨率空间观测资料的应用, 以及观测历元差的增长, 该变星的距离测定值出现了数量级上的变化<sup>[29-31]</sup>, 最新结果为  $(6.1 \pm 0.6)\text{ kpc}$ , 而观测资料的最长历元差已超过 1400 d。

由上述变化可见, 从实测方面来说, 除了必须取得偏振观测资料这一前提外, 制约回光测距精度的主要因素应该是成像观测的分辨率和观测资料的历元差。看来, 取得高分辨率空间观测资料对回光测距乃是必不可少的。

麒麟 V838 的回光测距结果  $(6.1 \pm 0.6)\text{ kpc}$ , 与 Afsar 和 Bond<sup>[52]</sup> 近期由主序重叠法得到的结果  $(6.2 \pm 1.2)\text{ kpc}$  符合得很好, 且有较高的内符精度。从这一点上来看, 回光效应确实可以用来对爆发变星的距离进行绝对测定, 而无须介入任何光度定标。当然, 迄今仅有麒麟 V838 一个样本, 对方法可靠性的明确认定还需未来更多的观测实例。

麒麟 V838 在爆发之际最亮视星等达到  $V = 6.77\text{ mag}$ , 相应的绝对星等为  $M_V = -9.8\text{ mag}$ , 光度非常大。但是, 这样大光度的天体在河外星系中仍然相当暗弱。如 1988 年在仙女星系中出现了一颗非常明亮的红变星 M31 RV, 最明亮时绝对星等约为  $M_V = -9.4\text{ mag}$ , 与麒麟 V838 差不多, 但相应的视星等仅为  $V = 15.4\text{ mag}$ <sup>[31,53,54]</sup>, 至少就目前来看利用这样一颗变星来实现回光测距显然是不现实的。

#### 4.3 AGN 回光测距的可能性

AGN 也是一类变光天体, 其光度远远大于超新星, 且会出现剧烈, 甚至爆发式的变化; 如能用于回光测距, 适用范围必比变星大得多。与变星一样, AGN 的光变特征会以

光速由内向外传播,如能取得 AGN 回光的偏振观测资料,便有可能用来估计它的速度距离<sup>[7]</sup>。另一方面,AGN 的辐射为高度各向异性,而且其周围散射物质的分布很不均匀,这与变星回光迥然不同。因此,由反射形成的回光并不呈圆对称特性,而很可能表现为某种偏振辐射“碎片”。

对于来自 AGN 的散射偏振发射人们已有相当的认识,在许多情况中它们是一些展源,而这正是回光的特征。例如,近距塞弗特星系 NGC1068 反射光的形态大体上呈圆锥形,且表现为中心对称<sup>[55]</sup>。对包括高红移射电星系在内的其他一些 AGN 的偏振观测,也表明了确实存在因散射造成的辐射<sup>[56-58]</sup>。

Sparks<sup>[7]</sup>对 AGN 回光特征的复杂性做了一定深度的讨论。他在与变星回光加以比较后指出,有可能通过偏振观测取得 AGN 回光的自行,并用以估计辐射源的速度距离。但是,10 多年过去了,迄今仍未见有相关工作发表,其原因很可能与 AGN 回光结构的复杂性,因而对观测资料和理论模型提出更高的要求有关。

利用变光天体的回光效应,对辐射源及其寄主天体距离进行绝对测定的思想,至今已有 30 多年的历史,并已就个别银河系和近距河外星系中的变星测距取得了较好的结果。回光测距的基本原理颇为简单,它为天体距离的绝对测定提供了一条独立的途径;但至少就目前来看具体实现尚有一定的难度,对已取得的结果也还存在某些争议。除理论模型外,在观测资料方面高分辨率空间偏振观测看来是必不可少的。因此,也许可以预期,随着下一代空间望远镜的发射成功,回光测距的潜在能力有望得以对更多的变光天体付诸实现。

#### 参考文献:

- [1] Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics. Ostriker J P, ed. Princeton: Princeton University Press, 1987
- [2] Branch D. ApJ, 1987, 320: L23
- [3] Havlen R J. A&A, 1972, 16: 252
- [4] Panagia N, Gilmozzi R, Macchetto F, et al. ApJ, 1991, 380: L23
- [5] Sugerman B E K. AJ, 2003, 126: 1939
- [6] Sparks W B. ApJ, 1994, 433: 19
- [7] Sparks W B. ApJ, 1996, 470: 195
- [8] Innes R T A. Astron. Nachr. 1897, 144: 143
- [9] Eggen O J, Gascoigne S C B, Burr E J. MNRAS, 1957, 117: 406
- [10] Irwin J B. ApJS, 1961, 6: 253
- [11] Westerlund B E. MNRAS, 1963, 127: 71
- [12] Eggen O J. ApJ, 1971, 163: 313
- [13] Westerlund B E. PASP, 1961, 73: 72
- [14] Turner D G, Evans N R. ApJ, 1984, 283: 254
- [15] Milone E F, Wilson W J F, Volk K. AJ, 1999, 118: 3016
- [16] Kervella P, Mérand A, Szabados L, et al. A&A, 2008, 480: 167
- [17] ESA. The Hipparcos Catalogue. ESA SP-1200, Noordwijk: ESA, 1997
- [18] Fouqué P, Storm J, Gieren W. Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale, Alloin D, Gieren W, eds. Berlin: Springer, 2003: 21
- [19] Storm J, Carney B W, Gieren W P, et al. A&A, 2004, 531: 547
- [20] Barnes T G, Storm J, Jefferys W H, et al. ApJ, 2005, 631: 572
- [21] van Leeuwen F, Feast M W, Whitelock P A, et al. MNRAS, 2007, 379: 723
- [22] Fouqué P, Arriagada P, Storm J. A&A, 2007, 476: 73

- [23] Brown N J, Waagen E O, Scovil, C. IAUC. 2002, 7785: 1B
- [24] Henden A, Munari U, Schwartz M B. IAU Circ. 2002, 7859: 1H
- [25] Kimeswenger S, Lederle C, Schmeja S, et al. MNRAS, 2002, 336: L43
- [26] Soker N, Tylenda R. ApJ, 2003, 582: L105
- [27] Retter A, Marom A. MNRAS, 2003, 345: L25
- [28] Munari U, Henden A, Kiyota S, et al. A&A, 2002, 389: L51
- [29] Bond H E, Henden A, Levay Z G, et al. Nature, 2003, 422: 405
- [30] Tylenda R. A&A, 2004, 414: 223
- [31] Sparks W B, Bond H E, Cracraft M, et al. AJ, 2008, 135: 605
- [32] Van den Bergh S. ApSS, 1975, 38: 447
- [33] Chevalier R A. ApJ, 1986, 308: 225
- [34] Liu J F, Bregman J N, Seitzer P. ApJ, 2003, 582: 919
- [35] Sparks W B, Macchetto F, Panagia N, et al. ApJ, 1999, 523: 585
- [36] Xu J, Crotts A P S. ApJ, 1994, 435: 274
- [37] Boffi F R, Sparks W B, Macchetto F. A&AS, 1999, 138: 253
- [38] Waagen E, Evans R O, Villi M, et al. IAUC, 1991, 5239
- [39] Phillips M M, Wells L A, Suntzeff N B, et al. AJ, 1992, 103: 1632
- [40] Ford C H, Herbst W, Richmond M W, et al. AJ, 1993, 106: 1101
- [41] Schmidt B P, Kirshner R P, Leibundgut B, et al. ApJ, 1994, 434: L19
- [42] Saha A, Sandage A, Labhardt L, et al. ApJ, 1996, 466: 55
- [43] Saha A, Sandage A, Labhardt L, et al. ApJS, 1996, 109: 693
- [44] Tully R B. Nearby Galaxies Catalogue, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1988
- [45] Ritchey G W, ApJ, 1902, 15: 129
- [46] Suntzeff N B, Headcote E, Weller W G, et al. Nature, 1988, 334: 135
- [47] Crotts A P S. ApJ, 1988, 333: L51
- [48] Gouiffes C, Melnick J, Remy M, et al. A&A, 1988, 198: 19
- [49] Lundqvist P, Fransson C. ApJ, 1991, 217: 425
- [50] Feast M W. MNRAS, 2008, 387: L33
- [51] Bond H E, Sparks W B. A&A, 2009, 495: 371
- [52] Afsar M, Bond H E. AJ, 2007, 133: 387
- [53] Bond H E, Siegel M H. AJ, 2006, 131: 984
- [54] Boschi F, Munari U. A&A, 2004, 418: 869
- [55] Capetti A, Macchetto F, Axon D J, et al. ApJ, 1995, 452: l87
- [56] di Serego A S, Fosbury R A E, Quinn P J, et al. Nature, 1989, 341: 307
- [57] Scarrott S M, Rolph C D, Tadhunter C N. MNRAS, 1990, 243: 5P
- [58] Antonucci R. ARA&A, 1993, 31: 473

## Distance Determination to Variable Stars from Their Light Echoes

ZHAO Jun-liang

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Scattered-light echoes from variable objects, such as cepheids, eruptive variables, and supernovae, may be used for absolute distance determination to variable stars and their host galaxies. This method of distance determination does not depend on other indicators or detailed theoretical models.

There are three different techniques for distance determination to variables: (1) If a cepheid variable star is embedded in a circumstellar nebula, the nebula will be observable due to reflect light, light echoes, from the star. The intensity of the light echoes from the nebula would regularly change when the luminosity of the cepheid varies, but with a time delay. Based on the time delay effect of the light echoes, the distance of the cepheid can be directly determined. (2) Assuming that the light echoes are coming from circumstellar scattering medium of an eruptive variable star such as supernova, a circle of highly polarized light would be observable at a metric radius of  $ct$ , where  $t$  is the time since the eruptive event and  $c$  is the speed of light. Measurement of the angular size of this ring yields the distance to the star without any intermediate or secondary calibrators. (3) If one can measure the proper motion of polarized light echoes at more than one epoch from a transient or highly variable source of illumination, such as historical supernova, the distance to the supernova follows immediately. Although this approach is technically more difficult than (2), in principle, it is far more applicable, because it is not necessary to know the time when the outburst event happened.

In 1972, the distance to the Galactic cepheid RS Puppis with long period of light variation was determined from the technique (1) and observational data of ground-based telescopes, which is  $(1.78 \pm 0.20)$  kpc. Recently, the distance to RS Puppis has been modified to be  $(1.992 \pm 0.028)$  kpc on the basis of HST data, which is in good agreement with results gained from the IRSB method, a relative distance estimator.

V838 Mon, a highly peculiar variable star, was discovered in outburst on 2002 January 6, and the light echo from the star was observed very soon. In the same year the distance to the variable star was estimated to be  $(0.6-0.8)$  kpc by the technique (2) and data obtained from ground-based telescopes. In following years, with HST polarized data becoming available and the observational time baseline being longer, the distance to V838 Mon was updated to be  $(6.1 \pm 0.6)$  kpc, which is in very good agreement with  $(6.2 \pm 1.2)$  kpc determined by the main sequence fitting.

SN 1991T was discovered in the Virgo spiral NGC 4527 on 1991 April 13, and reached a maximum brightness of  $m_V = 11.5$  mag 16 days later. In 1994, the light echo from circumstellar material was noted, which was confirmed by HST polarized data in 1999. Based on the HST data, an upper limit of distance to SN 1991T was estimated to be 15 Mpc, which is in fairly agreement with distances of two galaxies near NGC 4527.

Besides what mentioned above, some issues on absolute distance determination to variable objects including AGNs from their light echoes are briefly discussed.

**Key words:** cepheid variable star; interstellar cloud; light echo; distance determination