

浙江大学



关于标准烛光中造父变星与Ia型超新星测量天体距离的探究

《天文学导论》课程论文

题 目	:	关于标准烛光中造父变星与Ia型 超新星测量天体距离的探究
姓名学号	:	
日 期	:	2023年6月20日

目录

目录

1 标准烛光

- 1.1 概述
- 1.2 光度测距法
- 1.3 分类

2 造父变星

- 2.1 概述与分类
 - 2.1.1 造父变星的发现与发展
 - 2.1.2 造父变星的分类
- 2.2 距离测量
 - 2.2.1 三角视差
 - 2.2.2 BW方法（脉动视差）
 - 2.2.3 多种方法综合利用

3 Ia型超新星

- 3.1 概述
- 3.2 前身星系统
 - 3.2.1 单简并模型(Single Degenerate,SD)
 - 3.2.2 双简并模型(Double Degenerate,DD)
- 3.3 爆炸机制
 - 3.3.1 钱德拉塞卡质量爆发模型
 - 3.3.2 亚钱德拉塞卡质量爆发^①

4 总结

1 标准烛光

1.1 概述

标准烛光(standard candles)泛指一类已知其光度的天体，显著特点为光度高且基本恒定，峰值光度弥散较小。通过其所具有的某些相同特征，可间接得出对应距离的绝对光度。因此将其作为标准烛光，通过比较绝对光度和其观测亮度，计算天体距离。标准烛光法是宇宙学和星系天文学距离测量方法中极其重要的一种方法，也是最为精确的距离指示器之一。

1.2 光度测距法

由于天体所发出的光是辐射性分布，只有部分光子能到达地球并被接收。根据球体的表面积 $A = 4\pi r^2$ ，观测者每单位面积所接收到的光子为天体总亮度与表面积的比值，若已知目标天体的绝对光度，根据绝对星等与视星等的关系

$$5 \lg \frac{D}{kpc} = m - M - 10$$

即可推算出天体距离 D 。

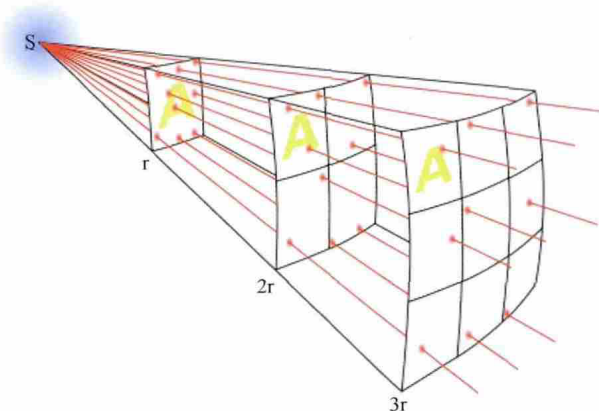


图1 天体辐射的平方反比律

所有标准烛光都有两个问题。其一是如何校准，即如何确定标准烛光的绝对星等，包括相关标准烛光的类别要有足够多的可识别成员天体以及相对较高的距离和光度精确度。其二是同类天体成员的辨识，错误的使用不属于该类天体的标准烛光会导致极大的误差。尤其是在此类标准烛光测量距离的极限中。

1.3 分类

目前天文学中常见的标准烛光天体有如下几种类型：

- 天琴座RR变星：属于红巨星，主要用于测量河内与球状星团距离。
- 造父变星：主要用于测量 $10Mpc$ 以外的天体距离。
- Ia型超新星：主要用于测量 $100Mpc$ 以外的天体距离。
- 食双星：食双星提供了一种直接测量距离的方法，可将距离在 $3Mpc$ 附近的星系测量精确度提升至5%以内。
- 红巨星分支技术(TRGB)：利用星系中光度最明亮的红巨星分支中的恒星来量测目标星系的距离。

在本文中，我们将主要介绍造父变星以及 Ia型超新星的形成、特性以及如何充分利用其特性更加精确的得出距离测量结果。

2 造父变星

2.1 概述与分类

2.1.1 造父变星的发现与发展

造父变星是一类非常明亮的变星，其变光的光度和脉动周期有着非常强的关联性。造父变星是建立银河和河外星系距离标尺的可靠且重要的标准烛光。造父变星的名称源自在仙王座的仙王座 δ 星，在 1784 年被 *John Goodricke* 发现是一颗变星。由于是这种类型变星中被确认的第一颗，而它的中文名称是造父一，因此得名造父变星。同时，造父一也是验证周光关系时极为重要的一颗变星，由于其成员均在星团当中，因此是造父变星中最精确的。

造父变星可分成几个子类，表现出截然不同的质量、年龄、和演化历史。1908 年美国天文学家 *Leavitt* 首次观测到在 *SMC* 中造父变星光变周期和其对应的亮度，并给出造父变星的 *PL* 关系

$$\langle M_V \rangle = -2.1 \lg P - 0.6$$

式中 $\langle M_V \rangle$ 为变星的平均绝对星等， P 为光变周期，通常认为对经典造父变星有

$$-2 > \langle M_V \rangle > -6 \text{ mag}, 2 < P < 100d$$

1944 年 *Baade* 指出，恒星可根据其观测特征和物理性质区分为星族 I 和星族 II。1956 年 *Baade* 确认造父变星应分为星族 I 造父变星（经典造父变星）和星族 II 造父变星两类，两者性质各有不同

自 1955 年 *Irwin* 确认了疏散星团中的造父变星后，人们开始利用主序拟合法取得星团（即团内造父变星）的距离，并由星团、星协中的造父变星来对 *PL* 关系进行定标。由高精度多色测光资料，可确定星团和团内造父变星的红化和距离。*Sandage* 是由银河系疏散星团造父变星对 *PL* 关系进行定标的第一人，得出

$$\langle M_V \rangle = -2.5 \lg P - 1.77$$

直到现在，星团造父变星用于 *PL* 关系的定标仍占有重要的地位。2010 年 *Turner* 由 19 个银河系疏散星团造父变星得出

$$\langle M_V \rangle = (-2.78 \pm 0.12) \lg P - (1.29 \pm 0.10)$$

其光变周期在 $1.9 < P < 45.1d$ 之间，精度极高。

2.1.2 造父变星的分类

• 经典造父变星（第一型造父变星）

属于星族 I，年龄较小，富含金属，质量为 $4 - 20 M_{\odot}$ ，光度为 $10^5 L_{\odot}$ ，周期在 $1.5 - 50d$ 之间，但武仙座 *BP* 星达到了 $83.1d$ 。其中造父一是一颗光谱类型为 *F6 - K2* 的黄巨星，其胀缩半径差可达 $10^6 km$ 。经典造父变星在可见光波段的光变幅度为 $0.1 - 2$ 星等间。

通常情况下，经典造父变星被用来银河外、本星系群内的天体距离，并广泛用于测量哈勃常数。同时经典造父变星也用于太阳在银河系中的位置以及银河系的结构测量。在银河系内已知的造父变星超过 700 颗，河外已逾 1000 颗。

• 第二型造父变星

属于星族 II，年龄较大，贫金属，质量为 $0.5 M_{\odot}$ ，周期在 $1 - 50d$ 之间，其中周期在 $1 - 4d$ 的为 *BL Her* 子群， $10 - 20d$ 的为 *W Vir* 子群，超过 $20d$ 的为 *RV Tau* 子群，其光度相较于同周期的经典造父变星低 1.5 等。

通常情况下，第二型造父变星被用于测量银河中心、球状星团与星系的距离。

• 其他造父变星

除以上两种常见造父变星外，造父变星包括以下类型

①矮造父变星：即盾牌座 δ 变星、狮子座 β 、仙后座 β 以及尚未证实的织女星。

②异常造父变星：包括在不稳定带上，周期少于2天的脉动变星，类似天琴座RR变星，但是光度较高的牧夫座 BL 型变星(BLBOO, BL Boötis variable)，以及通常有 $2 - 7d$ 主周期、 0.8 倍于主周期的副周期的双模式造父变星(Double-mode Cepheids variable)

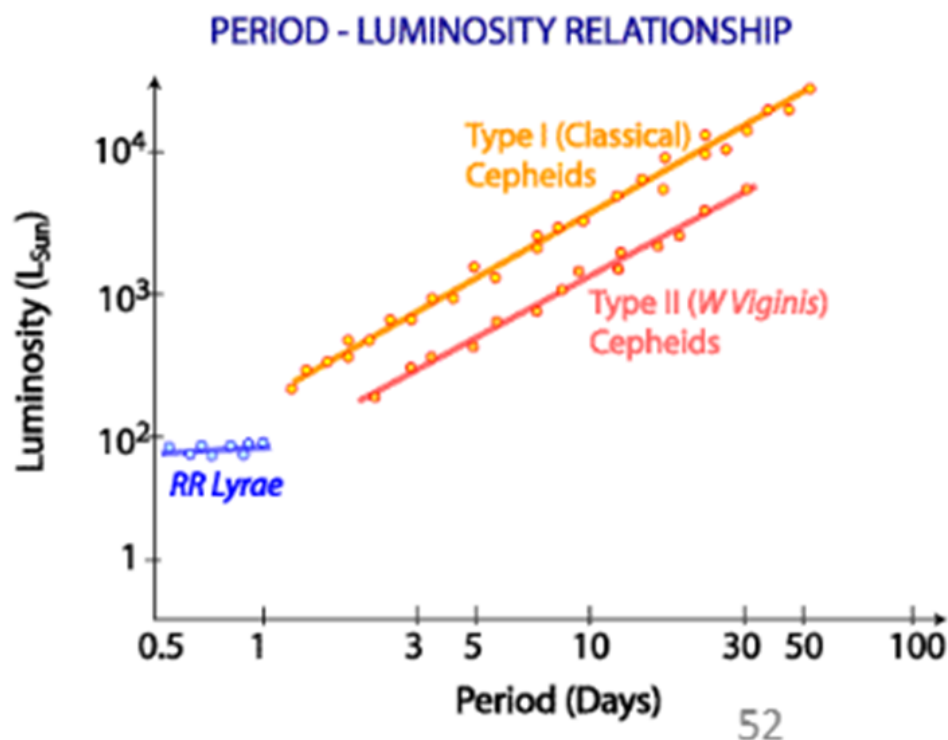


图2 不同类型造父变星 PL关系

2.2 距离测量

2.2.1 三角视差

由于银河系内造父变星的距离均大于 $100pc$ ，无法通过三角视差以确定其距离。但随着1989年8月依巴谷卫星的发射改变了这一状况，它可以测定亮于 $10mag$ 恒星的三角视差，包括200余颗经典造父变星，其中约半数有较高的视差测定精度。1997年，*Feast*和 *Catchpole*利用此类造父变星确定了 PL 关系零点的问题，并由26颗视差测定精度最高的变星得出

$$\langle M_V \rangle = -2.81 \lg P - 1.43$$

其中斜率取自 LMC 中造父变星。在依巴谷资料中，有10颗经典造父变星通过 HST 观测取得了更高精度的三角视差值，其变周期的范围为 $3.728 - 35.551d$ 。2010年，*Turner*利用有 HST 视差的造父变星样本对 PL 关系进行定标，所得结果与式

$$\langle M_V \rangle = (-2.78 \pm 0.12) \lg P - (1.29 \pm 0.10)$$

极为吻合。

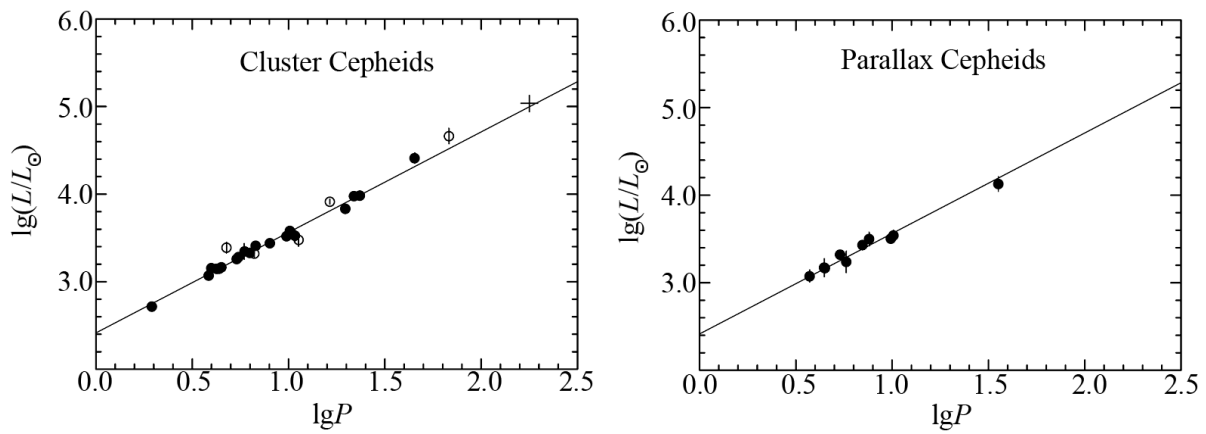


图3 由疏散星团造父变星（左）和HST视差造父变星（右）所确定的 PL关系

2.2.2 BW方法（脉动视差）

这一方法的基本原理是根据造父变星的观测视向速度会因变星大气的脉动而呈现周期性变化，只要对其作较长时间的监测，即可推出变星的线半径 R ，便可根据公式

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

确定变星的光度 L 。

1998 年, *Gieren*等人由 28 颗银河系造父变星的观测资料, 按使用 *BW* 方法得出

$$\langle M_V \rangle = (-3.04 \pm 0.14) \lg P - (1.02 \pm 0.14)$$

2003 年, *Tammann*通过讨论和比较后认为, 由 *BW* 方法和星团造父变星得出的 *PL* 关系斜率吻合较好, 零点差小于 0.12 mag 。

2.2.3 多种方法综合利用

除以上两种较为常见的方法外, 测定造父变星距离的途径还包括移动星团视差和角直径干涉测量法等。同时, 在具体测量中往往会综合利用以上若干种方法对 *PL* 关系进行定标。

3 Ia型超新星

3.1 概述

Ia型超新星在宇宙学研究中起到非常重要的作用。超新星是恒星演化到末期时产生的极为壮丽的高能爆发事件, 其光度可猛然增至 $10^9 - 10^{10} L_{\odot}$, 与整个星系相当, 且峰值光度弥散较小, 因此被当作标准烛光。同时也被用来测量其他宇宙学参数如哈勃常数 H_0 、宇宙密度参数 Ω_M 、 Ω_{Λ} 。

根据目前的观测结果, 可以确定的是, 大多数 Ia型超新星是由接近钱德拉塞卡极限的碳-氧白矮星通过剧变中心的碳氧元素所引发的热核爆炸所产生。对于 Ia型超新星有以下集中主要的观测性质:

- 光谱中氢元素较少, 在光极大附近表现为高速的中等质量元素(Ca 、 Si 、 S 以及少量的 O), 晚期星云主要是 Fe 的禁线。
- 光变曲线峰持续若干天, 在晚期呈指数型下降。
- 在所有哈勃型星系中均可探测到 Ia型超新星爆发。
- 大多 Ia超新星爆发具有相对均匀的光谱和光变曲线, 但已观测到明显偏离正常爆发的 Ia超新星。

3.2 前身星系统

前身星系统即 Ia 型超新星爆发前的星体及其演化方式和爆发成因。由于前身星的性质及其随红移的演化将直接影响当前由其得到的雨后学结果的可信度，因此前身星的研究是 Ia 型超新星的重要工作任务。有关其前身星的问题主要有两个：白矮星发生爆炸的阈值质量是钱德拉塞卡极限还是亚钱德拉塞卡极限以及其伴星的类型。对于前者，主要涉及到白矮星爆炸机制（见 3.3 节），对于后者如今主要有单简并和双简并两种模型。

3.2.1 单简并模型(Single Degenerate,SD)

SD 模型是目前认可度较高的一种模型。其主要内容为：非简并伴星的物质 (H 、 He) 通过洛希瓣转移到白矮星表面进行燃烧，当白矮星的质量增长至钱德拉塞卡极限，在 $C - O$ 核上形成氦层点火，形成燃烧波前进入 $C - O$ 核内，发生爆炸。

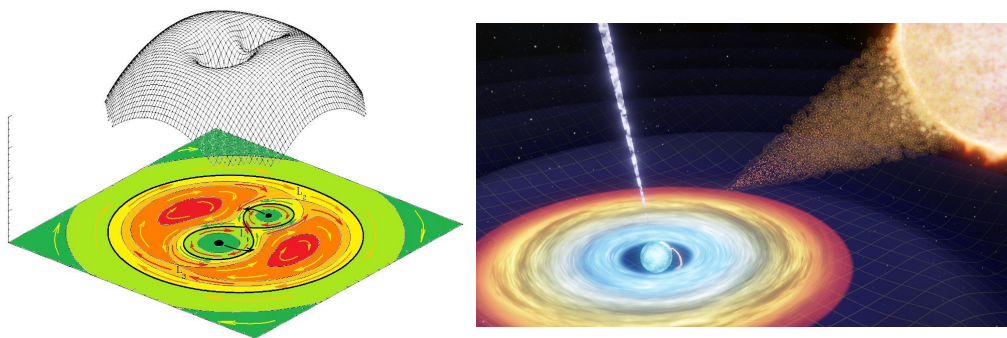


图4 洛希瓣（左） 吸积模型（右）

由吸积白矮星的质量增加到爆发质量 M_{Ia} 的简并前身星系统可分为两种：

- $WD + MS$ 系统：由吸积物质的 $C - O$ 白矮星和充满洛希瓣的质量较大的主序星或亚巨星构成，爆发前以类似 $U Sco$ 的再发新星以及亮的超软 X - 射线源形式出现
- $WD + RG$ 系统：由碳氧白矮星和充满洛希瓣的低质量红巨星组成，爆发前可能以共生星、亮的超软 X 射线或类似于 $TCrB$ 、 $RS Oph$ 的再生新星形式出现。

单简并演化模型的主要问题在于典型碳氧白矮星以任何一种吸积率从半星获得氢元素，质量都难以达到钱德拉塞卡极限，如果吸积率极低，如 $10^{-9} M_{\odot}/yr < \dot{M} < 10^{-8} M_{\odot}/yr$ ，碳氧白矮星氢包层的聚变反应是间歇性的，而每次新星爆发丢失的质量要大于吸积的质量，因此其净质量不会增加；对于中等吸积率，如 $10^{-8} M_{\odot}/yr < \dot{M} < 10^{-7} M_{\odot}/yr$ ，其燃烧积累的氢会形成一个简并的氦层，从而出现氦闪并引起亚钱德拉塞卡极限质量的爆发；当吸积率达到临界吸积率

$$\dot{M} = \dot{M}_b = 0.75 \times 10^{-6} \left(\frac{M_{WD}}{M_{\odot}} \right) M_{\odot}/yr$$

吸积的氢将稳定的聚变成氦，引力能的快速释放将使白矮星变得异常明亮，其前身星系统易被探测，若吸积率再高，如 $\dot{M} > \dot{M}_b$ ，则白矮星表面氢包层的燃烧率将小于吸积率，从而形成一个富含氢的延展包层，从而违背了 Ia 型超新星光谱中没有氢的观测事实。

综上可见白矮星通过吸积伴星物质而达到 M_{ch} 的概率较小。

3.2.2 双简并模型(Double Degenerate,DD)

Iben 与 *Tutukov* 最早提出了 Ia 型超新星前身星的双简并模型。如果两颗白矮星的总质量大于 M_{ch} 时其合并将产生 Ia 型超新星爆发。双白矮星系统是双星演化的预期结局之一，若该系统绕转周期足够短，则两颗白矮星会由于引力波辐射(GWR)而损失角动量，在时间 t_{GWR} 内完成合并，即

$$t_{GWR} = \frac{1.5 \times 10^8 A_{ff}^4}{M_{1R} M_{2R} (M_{1R} + M_{2R})} yr \approx \frac{8 \times 10^7 P^{\frac{8}{3}} (M_{1R} + M_{2R})^{\frac{1}{3}}}{M_{1R} M_{2R}} yr$$

其中 A_{ff} 为轨道分离距离, P 为周期, 易得 t_{GWR} 小于哈勃膨胀的年龄, 为在一个哈勃时间内 ($\approx 1.5 \times 10^{10} \text{ yr}$) 完成合并, 两白矮星的环绕轨道周期需要小于 $0.5d$ 。根据白矮星半径 $r \propto M^{-\frac{1}{3}}$, 若主星与伴星的质量比足够大, 则一旦质量较小的白矮星充满洛希瓣就会发生动力学物质转移, 快速物质转移的结果是形成一个围绕主星的大质量厚盘, 从而吸积盘中至少有一部分物质将最终落到主白矮星表面完成合并过程。

3.3 爆炸机制

根据目前天文学界公认的 Ia 型超新星爆炸的模型: 双星系统中碳氧白矮星的质量接近或达到钱德拉塞卡质量上限时, 发生剧烈热核爆炸, 瞬间释放的能量将炸碎整个白矮星。此种爆炸可分为两种情况:

- 单颗白矮星从另一个伴星 (主序星、亚巨星、红巨星或氦星) 吸积物质, 被吸积的物质在碳氧白矮星表面燃烧并增加白矮星的质量, 当质量达到钱德拉塞卡极限 ($1.44 M_{\odot}$) 时, 中心碳被点燃, 发生 Ia 型超新星爆发。
- 两颗邻近的白矮星由于引力辐射导致轨道能量损失, 最终发生白矮星合并爆炸, 称为双兼并模型。



图5 G299 Ia超新星残骸

3.3.1 钱德拉塞卡质量爆发模型

当吸积碳氧白矮星的质量接近 M_{ch} 时, 内部的电子简并压不足以抵抗引力, 导致星体收缩, 引起中心密度、温度迅速升高。由于白矮星核心的能量平衡由中微子损失以及压缩加热两者共同决定, 而中微子损失率随中心密度的增加至 $2 \times 10^9 \text{ g/cm}^{-3}$, 此时聚变反应的能量转化率超过中微子造成的能量损失率, 导致中心区域的碳点火开始, 在电子简并条件下, 核反应产能率 ϵ 对温度 T 极为敏感 ($\epsilon \propto T^{12}$), 核心温度的上升必然造成核心聚变反应产能率迅速下降, 因此在发生碳燃烧时将产生失控的热核聚变反应。

对于钱德拉塞卡质量爆发模型目前有如下几种解释:

- 纯爆燃波模型
- 延迟爆轰波模型
- 瞬时爆轰波模型
- 脉动延迟爆轰波模型

3.3.2 亚钱德拉塞卡质量爆发[⊙]

质量在 M_{ch} 以下的碳氧白矮星，其中心密度和温度若无法通过吸积达到爆炸性碳燃烧所需的条件，那么他们的爆发就需要外部触发点火，吸积氦层的爆轰波产生足够强的激波进入碳氧核触发碳点火产生第二次爆轰，即双氦爆轰(*IDO*)。第一次核点火在碳氧白矮星顶层堆积的 $0.15 - 0.20 M_{\odot}$ 氦元素包层底部，随后爆轰波经过氦层向外传播，内向的非燃烧压力波压缩碳氧核并点燃中心的碳元素，引起第二次爆轰并通过碳氧层向外传播。

由于爆发前需要的吸积质量较少，且对白矮星质量要求不高，因此亚钱德拉塞卡质量模型能较为容易的解释 Ia 型超新星的产生率及其外企的光谱特征（著名的 4700\AA 二次电离铁线）。

4 总结

确定宇宙中天体距离是宇宙学和天体物理学中的核心问题之一。而标准烛光对于宇宙中天体的距离测量起到了关键作用，如何利用这些标准烛光的特性来更加精确地确定距离一直是天文学所研究的前沿问题。

最新的研究通过使用更大样本量和改进的分析方法，综合考虑红移演化的宇宙学模型对 Ia 型超新星光度距离关系的修正等影响，不断提高各种 Ia 型超新星演化模型的置信度与约束条件，进一步提升了 Ia 型超新星的距离测量精度。对于造父变星，通过改进统计方法和建立更准确的光度-周期关系模型，可以提高造父变星距离测量的精度。此外，通过综合利用多种标准烛光通过比较它们的亮度和特征，可以减小系统误差，进一步提高距离测量的精度，提供更可靠的距离估计。

通过对相关研究结果的探究与总结，本文讨论了利用各类标准烛光特性来更加精确地确定距离的方法。Ia 型超新星和造父变星作为标准烛光，在距离测量中扮演着重要角色。通过改进分析方法、建立更准确的模型以及综合利用多种标准烛光，研究人员极大地提升了距离测量精度。这对于宇宙学和天体物理学领域的研究具有重要意义，并为进一步研究宇宙的演化和性质提供了更可靠的基础。