

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.03.04

# 巡天项目中的白矮星搜寻

孔 啸<sup>1,2</sup>, 罗阿理<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台 光学天文重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 首先, 描述了白矮星的颜色特点和光谱型分类。白矮星是大多数恒星的终极状态, 它会随着时间的推移而逐渐冷却。根据表面大气成分, 它被划分成 DA 和 DB 等不同的光谱型。对某一颗白矮星来说, 其光谱型分类可能会随着时间的推移而发生变化, 这主要是由于其大气包层中的元素含量被对流过程改变引起的。为了对各类光谱型有更深入的研究, 样本的完备性不可或缺。得益于近十几年来大型巡天项目的开展 (如斯隆数字巡天、郭守敬望远镜的光谱巡天等), 目前通过光谱认证的白矮星已超过  $4 \times 10^4$  颗, 其中绝大多数是 H 主导的 DA 型白矮星, 另外还包含 2 000 多颗 He 主导的 DB 白矮星。此外, GALEX 项目和 GAIA 卫星分别提供了有价值的白矮星紫外数据、空间位置和速度等信息。这些数据和信息对于白矮星的研究工作起到了非常大的促进作用。随后, 对白矮星的大气参数、质量和运动学等内容作了简单的总结。人们利用模板匹配测量了绝大多数已知白矮星的大气参数, 并获得了 DB 型白矮星的有效温度与紫外颜色间的线性关系。基于斯隆数字巡天的光谱数据, 白矮星的质量分布和质量-半径关系也得到了较深入的研究。小质量白矮星具有较大的速度弥散, 而大质量的则相反。最后, 讨论了白矮星的形成和演化机制, 这些机制都是基于现有的理论模型得到的。随着巡天项目中白矮星样本的增加, 现有的模型会逐渐被修正和完善, 新的模型也将随之建立。

**关键词:** 白矮星; 星表; 巡天

**中图分类号:** P145.5      **文献标识码:** A

## 1 引 言

当恒星内部的核反应因燃料不足而停止后, 主序星一般会坍缩成白矮星。这些奇特的天体比黯淡的红色矮星更暗, 但它们的颜色更蓝, 所以才被称为白矮星。白矮星的初始质量为  $8.5M_{\odot} \sim 10.6M_{\odot}$ <sup>[1]</sup>, 现阶段观测到的样本质量大多为  $0.5M_{\odot} \sim 0.8M_{\odot}$ , 而半径却与地球半径的数量级相同。理论上讲, 白矮星的最小质量约为  $0.30M_{\odot} \sim 0.45M_{\odot}$ <sup>[2]</sup>。此外, 如果一颗恒星能够演化成质量更小的白矮星, 那么, 它的主序阶段演化所需的时间就会比

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2018-12-20

资助项目: 国家自然科学基金 (11390371/4); 973 项目 (2014CB845700)

通讯作者: 罗阿理, lal@nao.cas.cn

当前宇宙的年龄还要长。最初,理论学家称白矮星为简并星 (degenerate star) 或简并矮星 (degenerate dwarf)。现在,白矮星才是最常用的称呼。

根据观测数据和理论计算,人们相信在银河系中超过 97% 的恒星最终会演化成白矮星<sup>[3]</sup>。由于没有核聚变,白矮星仅仅依靠残留的引力收缩辐射来提供能量,所以,白矮星的冷却时间一般都非常长。

人类观测到的白矮星保留了关于银河系形成早期的大量信息,如光度函数或年老成员的温度等。因为白矮星的前身星在渐近巨星支 (AGB) 顶部失去了 C, N, O, 所以它们是银河系化学演化的重要贡献者,甚至有可能是维持生命的化学物质的重要来源。尽管人们对白矮星有着非常浓厚的兴趣,但由于白矮星通常都极其黯淡,以至于上百年来,天文学家们对白矮星的观测和研究都进展缓慢。直到 20 世纪末 21 世纪初,随着斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 和郭守敬望远镜 (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST) 的光谱巡天等大天区尺度项目的开展,我们才得到较多白矮星样本,可用来研究分析。

本文简述了白矮星的光谱分类、颜色判据、巡天观测和物理参数等信息。

## 2 光谱型和颜色特征

### 2.1 白矮星的光谱型分类

如果一颗白矮星的表面大气主要由 H 构成,那么它就是 DA 型白矮星。DA 型白矮星的数量占全部白矮星的约 80%, 另外约 20% 主要为大气成分由 He 主导的白矮星,它们包括 DB 型和 DO 型白矮星。全部白矮星的分类如下。

- (1) DA 型, 其表面大气主要由 H 构成, 光谱表现为巴尔末线系 (Balmer lines);
- (2) DB 型, 其表面大气主要由中性 He (即 He I) 组成;
- (3) DO 型, 其表面大气主要由一次电离的 He (即 He II) 组成;
- (4) DQ 型, 其光谱表现为 C<sub>2</sub> 斯旺谱带 (C<sub>2</sub> Swan band) 或中性 C (即 C I) 线;
- (5) DZ 型, 其光谱中金属线 (如 Ca II H 和 Ca II K) 占主导位置;
- (6) DC 型, 其光谱中无明显谱线, 表现为较平滑的连续谱。

在这些类型的白矮星中, DO 型白矮星的温度相对较高, 有效温度大约为 45 000 K; DB 型白矮星的温度较低, 大部分在 30 000 K 以下; 当有效温度降到 10 000 K 以下时, He 在其光谱中几乎不可见, 如 DC, DQ, DZ 型白矮星<sup>[4]</sup>。

由于 H 包层的 DA 型白矮星数量众多, 因此, 对 DA 型白矮星的研究成果也最多。直到近期的大型巡天望远镜上线后, 人们针对非 DA 型白矮星 (如 DB 型) 的专门研究才丰富起来。由于 DB 型白矮星的大气层由近乎纯净的中性 He 构成, 因此, 它可以作为宇宙中 H 缺失恒星的最典型样本。许多 H 主导的 DA 型白矮星会逐渐转变成 DB 型白矮星。随着白矮星的逐渐冷却, DA 型和非 DA 型白矮星的数量会发生变化, 其比例为有效温度的函数<sup>[3]</sup>。如今, DB 型白矮星样本的扩充, 给人们提供了研究白矮星演化的可能。

Cukanovaite 等人<sup>[5]</sup>为 He 主导的 DB 型白矮星建立了第一个 3D 模拟网格。这个模拟是使用 CO<sup>5</sup>BOLD 辐射流体力学软件<sup>[6]</sup>来进行计算的, 覆盖的有效温度范围为 12 000 ~ 34 000 K, 表面重力范围为 7.5 ~ 9.0 dex。他们对比了从三维模拟计算得到的合成光谱与差分方法下一维模型光谱之间的区别, 发现这种区别源于不同的对流模型。

关于 DB 型白矮星, 最让人熟知的就是所谓的 DB 缺失 (DB-gap): 在有效温度  $T_{\text{eff}}$  为 30 000 ~ 45 000 K 时, 几乎只有 DA 型白矮星。同时, He 白矮星的温度或高于这个温度区间, 如 DO 型白矮星; 或低于这个温度区间, 如 DB 型白矮星。其实, DB 缺失并不是绝对的, 近些年的巡天项目都曾捕捉到有效温度在 DB 缺失范围内的 DB 型白矮星, 只是数量稍微少一些。因此, 有人认为, 把 DB 缺失改为 DB 缺少 (DB-deficiency) 更恰当一些<sup>[7]</sup>。

在已知的白矮星光谱样本中, 约有 3% 的光谱存在金属线 (DZ 型), 这很可能是由于星体周边星际尘埃的增加引起的<sup>[8-11]</sup>。总体上来说, DZ 型白矮星光谱中 Ca 和 Mg 谱线是最强的。

以上的分类以及对恒星的参数测量都是基于恒星表面大气的物理性状。通过研究恒星自身存在的震荡现象, 我们可以研究它们的内部结构, 完善恒星结构和演化模型。如果一颗白矮星存在星震, 人们通常会在它的分类后加一个 V 的标识<sup>[12]</sup>, 比如 Landolt<sup>[13]</sup>, Winget 等人<sup>[14]</sup> 和 McGraw 等人<sup>[15]</sup> 分别第一次发现了 DAV, DBV 和 DOV 型变星。

由于重力扩散会导致最轻的元素逐渐上浮到星体表面, 因此, 正常的白矮星大气都是被轻元素覆盖着。以上对白矮星的主流光谱学分类正是根据表面大气组成来进行的。但也有个别白矮星, 其表面大气组成以重元素为主, 如 SDSS J124043.01+671034.68<sup>[16]</sup> 的大气层几乎完全由 O 组成, 其数量为其他元素的 25 倍以上。它的大气中还有少量的 Ne 和 Mg, 但人们没有观测到 H 或 He 的谱线。根据目前有关白矮星的理论, 这种情况比较特殊。O, Ne 和 Mg 都是大质量白矮星的前身星形成阶段后期 C 燃烧的产物。这类白矮星也被称为 Dox, 它对研究白矮星的形成有非常大的帮助。

## 2.2 类型之间的转换

Fontaine 和 Wesemael<sup>[17]</sup> 曾经提出一种模型, 在 DB 缺失的高温端是 H 缺失的热白矮前身星 (PG 1159 或者 DO 型白矮星)。在恒星大气层中只有很少量的 H 元素。当温度下降后, H 会逐渐对流到恒星大气层表层, 形成一种富 H 的大气层。正因为当白矮星的温度达到  $T_{\text{eff}} \approx 45 000$  K 时, 该白矮星会转变成 DA 型, 所以在热的前身星中 H 的总量有上限  $M_{\text{H}} \approx 10^{-16} M_{\odot}$ 。如果白矮星大气中 H 层较薄, 那么, 该 H 层会在 He 气包层顶部漂浮, 以达到扩散平衡。此时, 星体将呈现为 DAO 型白矮星, 它具有化学分层大气的特征<sup>[18]</sup>。在 DB 缺失的下边缘 ( $T_{\text{eff}} \leq 30 000$  K), 由于少量的 H 与厚重的 He 包层的对流, 大量白矮星表现为 He 白矮星 (DB 型白矮星)。

DB 型白矮星的有效温度不在 30 000 ~ 45 000 K 范围内, 说明白矮星由富 H (DA 型) 到富 He (DB 型) 的转换只在有效温度 30 000 K 以下才会发生。导致这种转换过程发生的唯一可能的物理机制是: 在此温度下, DA 型白矮星的大气层中较稀薄的 H 层与深处浓厚的 He 包层发生辐射对流。然而, Bergeron 等人<sup>[19]</sup> 曾指出, DB 型白矮星数量显著增加的情

况只会发生在  $T_{\text{eff}} \approx 20\,000\text{ K}$  以下，而不是所谓的  $30\,000\text{ K}$ 。

严格来说，一半以上已知 DB 型白矮星都是具有较弱 H 线的 DB 型白矮星，即 DBA 型白矮星<sup>[7, 20]</sup>。如果只考虑有效温度在  $20\,000\text{ K}$  以下的样本，这个比例还会更高。其实在这个温度下，在光学波段仍然会有很多纯 He ( $\text{H}/\text{He} \leq 10^{-6}$ ) 白矮星。

对于有效温度在  $30\,000 \sim 45\,000\text{ K}$  的 DB 型白矮星，显然，在大气包层中并没有足够的 H 能使它们成为 DA 型白矮星，并且它们很可能在其整个生命周期中演变为富 He 白矮星， $T_{\text{eff}} \geq 25\,000\text{ K}$  的样本中最热的 DB 型白矮星可能是这样的情况。另外，如果 DA 型白矮星大气中的 H 较薄，含量较少 ( $M_{\text{H}} \approx 10^{-15} M_{\odot}$ )，在温度达到  $T_{\text{eff}} \approx 24\,000\text{ K}$  时，DA 型白矮星会由于大气层对流而变成 DBA 型白矮星。当恒星中存在的少量 H 在较低的有效温度下被 He 对流区进一步稀释，DBA 型白矮星可能会很快地转变成纯净的 DB 型白矮星。正如 Bergeron 等人<sup>[19]</sup>所指出的，因为目前已知最热的 DQ 型白矮星的温度接近  $18\,000\text{ K}$ ，有一部分必定在较低的有效温度下以某种方式转变成 DB 型白矮星。这一过程的机制目前尚不清楚。但是，由于已知热 DQ 型白矮星数量很少，因此，从整体的角度来看，这个过程可忽略不计。

在 SDSS 的白矮星光谱样本中，较冷的 He 白矮星 ( $T_{\text{eff}} \leq 12\,000\text{ K}$ ) 存在 H 的痕迹是很普遍的现象。有些白矮星 (如 DZA 型白矮星) 的光谱中带有金属线，这可能是由于彗星、宇宙尘埃或小行星等物质的污染引起的。这些冷星的数量特点也可能是由于选择效应导致的：温度较低时探测  $\text{H}\alpha$  谱线会比较困难。

当有效温度降到约  $12\,000\text{ K}$  以下时，白矮星中 H 的丰度会下降到可探测范围的下限，所以这种情况下 DBA 型白矮星不会转变成冷的富 He 的 DA 型白矮星，而是会直接变成没有谱线信息的 DC 型白矮星<sup>[7]</sup>。相反，薄 H 层与更深的 He 对流区的对流混合模型最有可能解释冷的富 He 的 DA 或 DZA 型白矮星中 H 的存在。混合后，这些恒星将以几乎恒定的 H 丰度演化；当  $\text{H}\alpha$  的谱线强度低于探测阈值时，它们最终变成 DC 或 DZ 型白矮星。在温度低于约  $10\,000\text{ K}$  的白矮星中，如果 DA 型白矮星大约占一半的比例，那么大约有 20% 的白矮星是 DB 类型<sup>[19]</sup>，约 40% 的冷 DA 型白矮星最终会发生对流混合。

在大型巡天项目诞生之前，已知的白矮星寥寥无几，因此，对各类白矮星的研究很大程度上建立在理论模型的基础之上。究竟 DA 型和 DB 型白矮星的占比各多少？DBA 型和 DAB 型等过渡形态白矮星的物理性质有无特别之处？各种类型的白矮星在银河系内的空间分布和运动状态怎样？……或许随着巡天项目的不断开展，这些问题的答案将会逐渐清晰。

### 2.3 白矮星的颜色特征

在巡天望远镜拍摄的光谱中，温度约  $8\,000\text{ K}$  以上的白矮星与大量星系和主序星的颜色是有区别的。少量例外的情况是，拥有晚型星伴星的白矮星双星系统，它们的伴星仍然会在颜色上保留主序星的特点。

图 1 展示的是 SDSS 巡天项目数据中富 H 白矮星 (DA 型) 和富 He 白矮星 (DB/DO 型) 的  $u' - g'$  与  $g' - r'$  颜色分布，分别用红色三角形和蓝色十字标识；小黑点代表普通主序星

分布在右上方。白矮星的颜色分布与主序星有一定的区别, 可用一些判据对其进行初步筛选<sup>[21]</sup>。

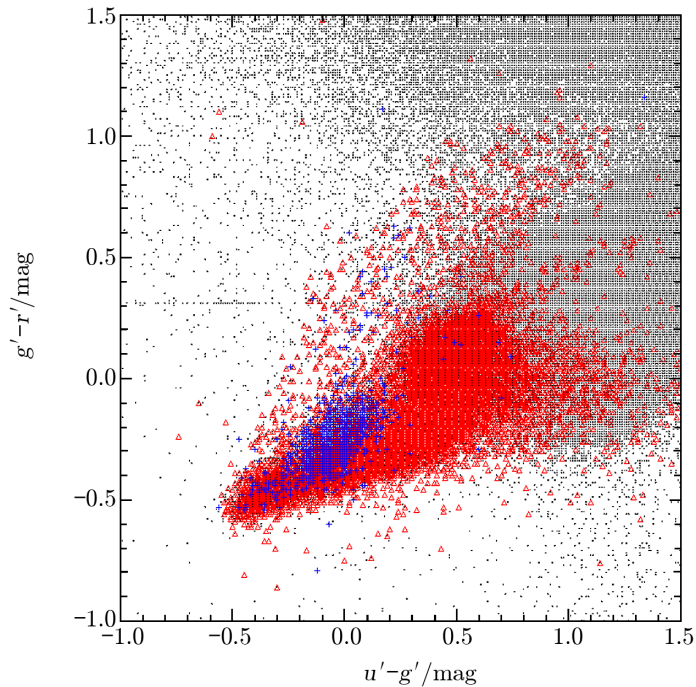


图 1 通过 SDSS 巡天的蓝色波段星等画出的白矮星颜色分布图

对于较冷的白矮星 ( $T_{\text{eff}} < 8\,000\text{ K}$ ), 巴尔末跳变和 H 线变得很弱, 以至于 He 白矮星难以表现出激发态的 He I 线。这时白矮星与主序星的颜色可能会混杂在一起, 使挑选特征较弱的白矮星变得更加困难。然而, 对于很多较冷的非 DA 型白矮星, 如果信噪比较高, 也会显示出一些较弱的特征, 它们可能是 C 分子带 (通常是  $\text{C}_2$ ) 或原子谱线 (DQ 型), 也可能是重元素的谱线 (Ca II H 和 Ca II K 等)。之所以会有 C 元素, 是由于当 He 包层下的对流区域变得足够深时, 星体内一部分富 C 的核被翻转到表面。而当白矮星偶然间穿过一片云或高密度气体的区域时, 星体表面的重元素含量可能会升高; 经过一段时间, 这些重元素也可能因重力对流而不可见。

当 DQ 或 DZ 型白矮星的特征变得明显, 它们的颜色也可能会偏离正常范围。在图 1 中,  $g'$  的  $\text{C}_2$  吸收带可能会把较明显的 DQ 型白矮星移到左上角; 一条在  $u'$  波段的流量较小的典型 DZ 光谱, 其颜色可能会朝着其他方向移动。类似这样的白矮星非常稀少, 其原因是, 它们温度太低, 以至于无法展示出大气中 He 的成分。但是, 它们是冷白矮星样本不可或缺的组成成分。

然而, 当有效温度降低至  $5\,000\text{ K}$  以下后, 几乎所有的明显特征似乎都消失了, 这样的星体几乎都变成了 DC 型白矮星。它们的颜色与星族 II 主序亚矮星非常相似, 但是它们在巡天项目的海量数据中更加难以搜寻到。

### 3 观测及获取

#### 3.1 早期观测

在 20 世纪 80 年代以前, 白矮星的观测数据主要通过以下几种途径来获取: 自行星表中的暗星, 尤其是蓝颜色的目标星体; 总体上在高银纬的区域对蓝色暗星的巡天观测数据; 有自行或者视差的亮星, 其伴星更暗。

由于早期没有大口径天文望远镜和高精度观测仪器, 人们所知的白矮星屈指可数。Luyten<sup>[22, 23]</sup> 在 20 世纪 70 年代通过早期的自行巡天 (如 Luyten Palomar) 观测, 发布了疑似白矮星的星表。随后, Green 等人<sup>[24]</sup> 对偏蓝色天体的巡天观测结果, 使得被证认的简并星数量翻倍。McCook 和 Sion<sup>[25]</sup> 在 1977 年发布了一个光谱证认的白矮星星表。

限于当时的设备和技术, 已知的白矮星样本不可避免地偏向于热星、运动速度较快的星、有较大半径和较小质量的星<sup>[26]</sup> 等, 而且其数量屈指可数。

#### 3.2 近期观测

近十几年, 涌现出很多个高精度大尺度的巡天项目, 每个巡天项目都会持续拍摄很多天体, 其中就包含数量巨大的白矮星。于是, 随着已知的白矮星数量近乎成指数级增长, 相关的工作也不断地深入。SDSS, GALEX (Galaxy Evolution Explorer), LAMOST, GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 这几个巡天项目在白矮星的观测和研究上作出了较大的贡献。

##### 3.2.1 SDSS

正在进行的 SDSS 始于 2000 年, 到目前为止, 它提供的白矮星光谱数量最多。该项目旨在通过获取海量测光和光谱数据, 来研究宇宙的大尺度结构、星系的形成和演化等天体物理学领域的重大前沿课题。SDSS 所使用的望远镜口径为 2.5 m, 位于美国新墨西哥州阿帕奇天文台 (Apache Point Observatory)。对 SDSS 的每个观测天区约  $7 \text{ deg}^2$  的面积, 人们采用一个打了 640 个孔 (对应观测目标及定标星) 的焦面金属板, 因此, 一次曝光可以拍摄 640 条光谱, 光谱的波长覆盖范围大约是  $3\,800 \sim 9\,200 \text{ \AA}$ , 分辨率  $R \approx 1\,900$ 。SDSS 光谱巡天的主要目标是获取超过  $10^6$  个亮星系<sup>[27]</sup>、 $10^5$  个亮类星体和数量可观的恒星光谱。另外一小部分光纤还会被用于其他研究项目, 例如激变变星或白矮星等。

从 2000 年至今, SDSS 先后完成了 4 期巡天<sup>[28]</sup>: SDSS I, II<sup>[29, 30]</sup>, III<sup>[31, 32]</sup>, IV<sup>[33]</sup>。每期巡天都包含了数个巡天计划。

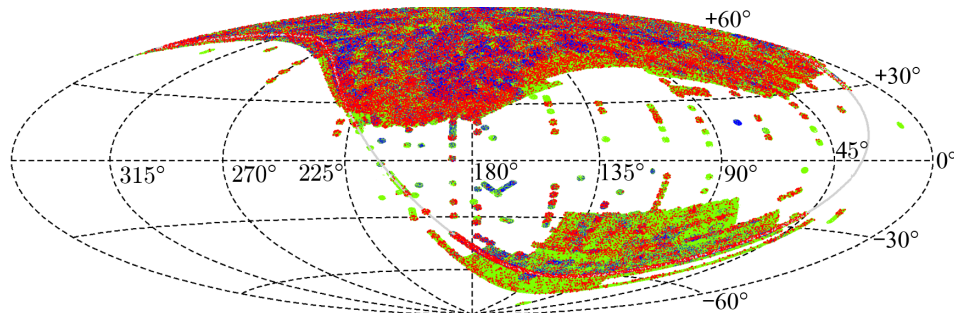
Kleinman 等人<sup>[34]</sup> 在 SDSS DR1 (data release 1) 中搜寻到了 2 551 条白矮星光谱, 这些数据覆盖了  $1\,360 \text{ deg}^2$  的范围; 从 DR4<sup>[35]</sup> 的发布数据中, Eisenstein 等人<sup>[36]</sup> 将光谱证认的白矮星数量增加到 9 316 颗。借助于 Koester<sup>[37]</sup> 计算得到的大气模型, 他们对全部的 DA 和 DB 型白矮星进行全谱拟合, 得到了大气参数, 其中, 重力加速度 ( $\lg g$ ) 可达 9.0。

DR7<sup>[38]</sup> 的光谱中包含 14 120 条 DA 型白矮星和 1 011 条 DB 型白矮星光谱<sup>[21]</sup>; DR10<sup>[32]</sup> 新增了 6 687 个 DA 型白矮星、450 个 DB 型白矮星和若干其他类型的白矮星光谱数据<sup>[39]</sup>; 到了 DR12<sup>[40]</sup>, 光谱数据总量超过  $4.35 \times 10^6$  条, 其中包含了 6 576 颗新证认的白矮星<sup>[41]</sup>。

Koester 和 Kepler<sup>[42]</sup> 选取了其中信噪比大于 10 的 He 主导的 1 107 颗 DB 型白矮星, 测量并分析了它们的大气参数、质量和空间分布等信息。

截至目前, 通过巡天望远镜 16 年的观测数据和科研人员对数据的分析处理, SDSS 发布了 4 851 200 条光谱数据 (SDSS DR14<sup>[43]</sup>)。在最新发布的 DR14 数据集中, DB 型白矮星的数量增加到了 1 999 颗<sup>[20]</sup>。

图 2 展示的是在银道坐标系下 SDSS 的所有光谱数据, 可以看出, 白矮星的数量不在少数。



注: 浅灰色的带是赤纬为零的位置, 蓝点代表与 LAMOST DR5 同源的天体, 红点是白矮星。

图 2 银道坐标系下 SDSS 光谱数据的全天脚印图 (绿色点)

### 3.2.2 GALEX

GALEX<sup>[44-46]</sup> 项目的主要目的是利用轨道空间望远镜来观测紫外波段的天体。它于 2003 年 4 月 28 日美国东部时间上午 8:00 被火箭发射到轨道上。

通过 GALEX 得到的数据可用来分析星系是如何发展和变化的, 亦可用于研究恒星形成的原因。在加利福尼亚理工学院研究团队的带领下, 人们利用 GALEX 进行了数项天空测量, 包括银河系以外的紫外全天测量。在任务期间, 人们将制作出星系宇宙的第一张综合地图, 以便进一步了解像我们银河系这样的星系是如何形成的。由于白矮星的特征主要集中在蓝端, 所以 GALEX 的紫外数据对于研究白矮星有着举足轻重的作用。

到目前为止, GALEX 已发布了 7 次数据<sup>[47]</sup>, 分别是 GR1 (GALEX Release 1) 到 GR7<sup>[48]</sup>。2013 年 2 月 27 日, GALEX 发布了最新的 GR6/GR7 数据, 包括 34 285 个 AIS (All Sky Imaging Survey) 天区、720 个 DIS (Deep Imaging Survey) 天区、6 964 个 MIS (Medium Imaging Survey) 天区、716 个 NGS (Nearby Galaxy Survey) 天区、2 112 个 GII (Guest Investigator) 天区、87 个 CAI (Calibration Imaging Survey) 天区和 311 个光谱 (SPECTRA) 天区。

在 SDSS 探测到的 40 000 个白矮星中, 约 32 000 个有 GALEX 紫外线观测值, 6 000 个有 SST (Spitzer Space Telescope) 或 WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) 红外观测值<sup>[49]</sup>。

### 3.2.3 LAMOST

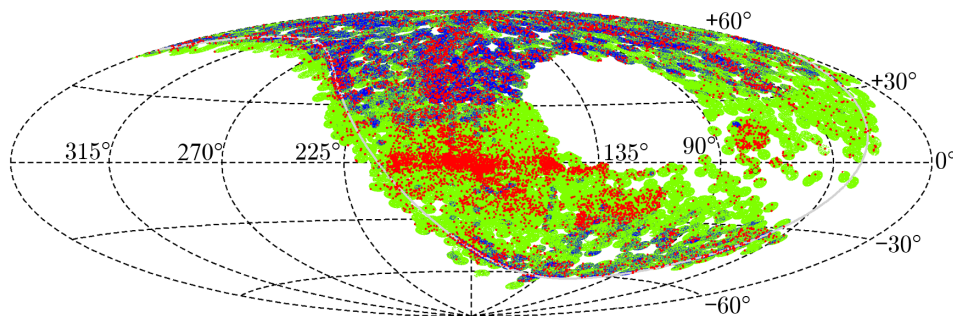
大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜<sup>[50]</sup> (LAMOST) 又称为郭守敬望远镜, 是一架中星仪式反射施密特望远镜, 坐落于河北省承德市兴隆县的兴隆观测基地<sup>[51]</sup>。由于同时拥有大视场 ( $5^\circ$ ) 和大口径 (有效口径达  $3.6 \sim 4.9 \text{ m}$ ), LAMOST 可以在 1 次的曝光中拍摄 4 000 个天体, 并通过焦面上的 4 000 根光纤在 CCD 上成像。作为后起之秀, LAMOST 望远镜是目前世界上光谱获取率最高的天文望远镜。

LAMOST 拥有 16 台光谱仪, 每台都连接 250 根光纤。当观测夜降临后, 每台光谱仪通过 2 个 CCD 相机, 分别观测红端 ( $3\,700 \sim 5\,900 \text{ \AA}$ ) 和蓝端 ( $5\,700 \sim 9\,000 \text{ \AA}$ ) 的数据流量。直接拍摄到的是星光经过色散后的图像, 通过 LAMOST 2D Pipeline 软件<sup>[52]</sup> 的抽谱<sup>[53]</sup>、定标、减天光<sup>[54]</sup>、红蓝端数据合并等一系列的操作后, 才能生成一维光谱。经过 LAMOST 1D Pipeline 软件对光谱数据的分析和制作后, 光谱和星表等就会被发布在网站上<sup>[55]</sup>。

从 2011 年到如今, LAMOST 总共发布了 6 个完整的数据, 最新的 DR6 包含 14 种光谱型的 9 919 106 条光谱数据。DR1 到 DR6 的发布数据情况见表 1 和图 3。

表 1 LAMOST 数据发布情况

类型	DR1	DR2	DR3	DR4	DR5	DR6
恒星	1 944 329	3 784 461	5 268 687	6 856 896	8 171 443	8 966 416
星系	12 082	37 206	61 815	118 657	153 090	172 866
类星体	5 017	8 630	16 351	36 374	51 133	60 173
未知类型	243 268	306 185	408 273	652 146	642 178	719 651
总数	2 204 696	4 136 482	5 755 126	7 664 073	9 017 844	9 919 106



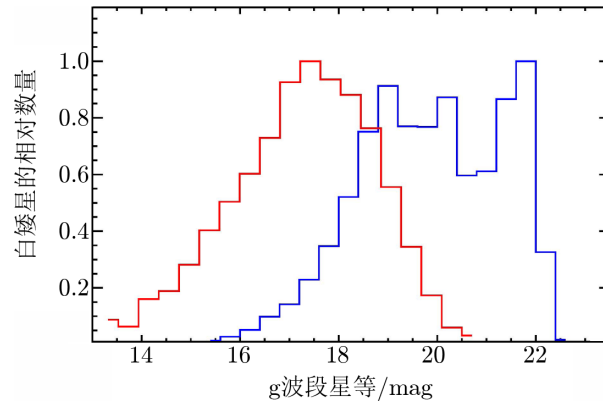
注: 浅灰色的带是赤纬为零的位置, 蓝点是 LAMOST DR5 与 SDSS DR14 同源的天体, 红点是白矮星。

图 3 银道坐标系下 LAMOST DR5 发布数据的脚印图 (绿色点)

图 3 展示的是 LAMOST 的巡天足迹。与图 2 类似, 蓝色的点为 SDSS DR14 和 LAMOST DR5 都发布过的同源光谱数据。虽然 LAMOST DR5 数据总量是 SDSS DR14 的 2 倍左右, 但是 LAMOST DR5 中的白矮星 (红点) 数量却少很多, 其主要原因是两个巡天项目的选源策略和极限星等不同。



LAMOST 在 1 次曝光的过程中可以捕捉 4 000 条光谱, 但它捕获暗星的能力却不如 SDSS。图 4 展示的是 SDSS DR14 和 LAMOST DR5 的发布数据中白矮星 g 波段的星等分布, 其中, 两个分布直方图均作了归一化处理, SDSS DR14 (蓝色) 中白矮星的真实数量需要乘以因子 4 217, LAMOST DR5 (红色) 的因子是 536。由于白矮星的表面亮度较低, 因此, SDSS 可以比 LAMOST 获取更多白矮星光谱。



注: 纵轴表示归一化之后的白矮星数量。

图 4 SDSS DR14 和 LAMOST DR5 数据中白矮星的 g 波段星等分布

巡天项目的选源策略决定其获取何种类型的光谱。采用何种策略, 不仅要根据仪器自身的能力, 也要根据巡天目标的性质。SDSS 在选源上的白矮星数量就比 LAMOST 多很多 (如表 2 所示), 由两个巡天项目发布的星表中选源类型和目标类型的数量可以看出, SDSS DR12 的光谱数据中, 白矮星或矮星的选源数量有近  $3.9 \times 10^4$  个, 而 LAMOST DR5 中只有几百个。

表 2 SDSS DR12 和 LAMOST DR5 的选源

选源	SDSS DR12		LAMOST DR5	
	数量	比例/(%)	数量	比例/(%)
类星体	718 810	17.8	3 082	0.03
星系	2 345 709	58.0	112 031	1.2
恒星	260 198	0.6	8 623 151	95.6
矮星	27 508	0.7	282	0.003
白矮星	11 182	0.3	282	0.003

虽然白矮星的比例较低, 但在 LAMOST 海量的光谱数据中, 仍然会有数量可观的白矮星光谱供搜寻和研究。LAMOST 的先导巡天 (Pilot) 发布数据包含有 28 颗白矮主序双星<sup>[56]</sup>和 230 颗 DA 型白矮星<sup>[57, 58]</sup>; DR1<sup>[59]</sup>中的白矮主序双星数量上升至 121 颗<sup>[60]</sup>; DR2 发布的近  $1.59 \times 10^6$  条光谱数据中包含 1 056 颗 DA 型白矮星、34 颗 DB 型白矮星和 276 颗白矮主序双星<sup>[61]</sup>; 最新的 DR5 发布数据中, 白矮主序双星的数量为 876 颗<sup>[62]</sup>, DB 型白

矮星的数量则为 287 颗<sup>[63]</sup>。

### 3.2.4 GAIA

GAIA<sup>[64, 65]</sup> 依赖于欧洲航天局的依巴谷卫星来帮助解决现代天文学中最困难, 也是最根本的挑战之一: 在整个银河系邻域内构造一个精确的恒星三维地图。这次大规模的恒星普查将会提供基本的观测数据, 以解决与银河系的起源、结构和进化历史相关的大量重要问题。GAIA 卫星于 2013 年 12 月 19 日升空, 在 L2 拉格朗日点观测, 并提供了不管是从数量上, 还是在准确性和完整性上都前所未有的数据档案。

截至目前, GAIA 已进行了 2 次数据发布, 其中 GAIA DR2<sup>[66, 67]</sup> 的一部分数据覆盖了 G 波段 (3 300 ~ 11 000 Å), 另外的数据分别覆盖 G<sub>BP</sub> (3 300 ~ 6 700 Å) 和 G<sub>RP</sub> (6 100 ~ 10 500 Å) 2 个波段<sup>[68]</sup>。它所发布的星表中包含源的位置坐标<sup>[69]</sup>、星等、视差<sup>[70]</sup>、自行和视向速度等参数, 具体如下。

(1) 有超过  $10^9$  个源拥有赤经 (RA)、赤纬 (DEC)、视差、赤经自行和赤纬自行这 5 个参数, 这些源的极限星等为  $G_{\text{mag}} = 21$  mag。对于  $G_{\text{mag}} < 15$  mag 的亮源, 视差的误差只有 0.04 mas; 对于  $G_{\text{mag}} = 17$  mag 的源, 误差大约是 0.1 mas; 对于  $G_{\text{mag}} = 20$  mag 的源, 误差约为 0.7 mas。对应的自行误差分别是  $0.06 \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$  ( $G_{\text{mag}} < 15$  mag),  $0.2 \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$  ( $G_{\text{mag}} = 17$  mag) 和  $1.2 \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$  ( $G_{\text{mag}} = 20$  mag)。

(2) 超过  $7.2 \times 10^6$  颗恒星拥有平均视向速度<sup>[71, 72]</sup>, 它们的 G 波段星等在 4 ~ 13 mag 范围, 有效温度  $T_{\text{eff}}$  为 3 550 ~ 6 900 K。包括上述 5 个参数, 这些星就拥有了全部的 6 个参数。对于亮星, 视向速度的精度在  $200 \sim 300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  量级; 对于较暗的星, 当有效温度在 4 750 K 和 6 500 K 时, 视向速度的精度可以分别达到  $1.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $2.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 超过  $3 \times 10^8$  个源拥有 2 个参数: 天球上的赤经和赤纬坐标。这些源在  $G_{\text{mag}} = 20$  mag 时的坐标误差大约为 2 mas。

(4) 超过  $1.69 \times 10^9$  个源拥有 G 波段的星等, 亮星 ( $G_{\text{mag}} < 13$  mag) 的星等精度可达 0.001 mag; 暗星 ( $G_{\text{mag}} = 20$  mag) 的星等精度大约为 0.02 mag。

(5) 超过  $1.38 \times 10^9$  个源拥有 G<sub>BP</sub> 和 G<sub>RP</sub> 波段的星等  $G_{\text{BPmag}}$  和  $G_{\text{RPmag}}$ , 亮星和暗星的精度分别是  $10^{-3}$  mag 量级和大约 0.2 mag。

GAIA DR1 和 GAIA DR2 的发布数量如表 3 所示。

Jiménez-Esteban 等人<sup>[73]</sup> 借助于最新的星族合成模型, 通过 GAIA 的赫罗图从 GAIA DR2 的天体测量和测光数据中, 找出了 73 221 颗白矮星候选体。研究表明, GAIA 已经证认了 100 pc 的太阳邻域内所有的白矮星候选体。在这个距离尺度和  $-0.52 < G_{\text{BPmag}} - G_{\text{RPmag}} < 0.80$  颜色范围内, 他们的白矮星星表是目前为止最全面的。他们证认了 8 343 颗 C/O 核和 212 颗 O/Ne 核的白矮星候选体, 并且得到了白矮星的空间密度 ( $4.9 \pm 0.4 \times 10^{-3} \text{ pc}^{-3}$ )。通过拟合由虚拟天文台得到的紫外到近红外测光数据的光谱能量分布 (spectral energy distribution), 他们使用虚拟天文台的 SED 分析仪测量了样本的有效温度和光度, 进而得到了白矮星样本的半径。对 DA 型白矮星冷却序列的半径和有效温度进行插值拟合, 可以获得表面重力和质量。GAIA 的数据中, 半径为 100 pc 范围内的白矮星星族成员显然

表 3 GAIA 星表概览

	GAIA DR2 中的数量	GAIA DR1 中的数量
有 5 个参数的源	1 331 909 727	2 057 050
有 2 个参数的源	361 009 408	1 140 622 719
有视向速度的源	7 224 631	...
变源	550 737	3 194
有有效温度的源	161 497 595	...
有消光 and 红化的源	87 733 672	...
有半径和光度的源	76 956 778	...
总数量	1 692 919 135	1 142 679 769

注: “...” 表示在 GAIA DR1 中不包含此类数据。

主要由冷星 (约 8 000 K) 组成, 绝大多数的质量都在  $0.8 M_{\odot}$ , 其中非 DA 类型白矮星所占比例不超过 30% ~ 40%, 其原因未知。

根据 GAIA 的视差和测光, Hollands 等人<sup>[74]</sup>对 GAIA DR2 的白矮星进行了大气参数测量。对于提供了精确参数的源, 他们重新定义了半径为 20 pc 范围内所有的白矮星双星。

### 3.3 巡天项目中的白矮星搜寻

在巡天项目释放的海量 (光谱) 数据中, 官方提供的星表已包括了大量白矮星数据, 如 SDSS DR14 和 LAMOST DR5 中共有上千万光谱数据, 其中包含了数万条白矮星光谱 (见表 4)。这些分类结果都是使用 Pipeline 软件<sup>[59, 75]</sup>对光谱进行模板匹配得到的, 这种分类法可以在统计意义上保证分类的准确性。但是对于信噪比较低的光谱数据, 模板匹配可能会出现匹配错误的情况。所以有很多科研工作者对白矮星的分类结果进行了完善, 并积累了丰富的研究成果。

表 4 SDSS DR14 和 LAMOST DR5 发布星表中的白矮星数量

分类	SDSS DR14	LAMOST DR5
恒星	4 851 200	8 171 443
白矮星	38 575	9 211

首先, 如同第 2.3 节所述, 人们对白矮星的初步筛选方法是采用颜色判据。针对 SDSS 和 LAMOST 的光谱数据, Kleinman 等人<sup>[21]</sup>、Kepler 等人<sup>[39, 41]</sup>和 Guo 等人<sup>[61]</sup>筛选白矮星时, 都使用了先根据颜色的分布<sup>[36]</sup>来筛选出白矮星候选体, 然后利用白矮星大气模型<sup>[37]</sup>来拟合, 或者用其他方法来证认白矮星。

除了传统的颜色判据, 也有一些筛选工作是通过机器学习的方法来自动挖掘白矮星。Kong 等人<sup>[20]</sup>利用 LASSO 方法<sup>[76]</sup>提取出了 DB 型白矮星光谱区别于其他类型光谱的典型特征, 然后在特征空间中, 使用支持向量基<sup>[77]</sup>对数千万已发布数据进行分类, 从而把混杂在各种光谱类型中的 DB 型白矮星光谱挑选出来。这种方法充分利用了机器学习的优势, 尤其对于信噪比较低, 肉眼难辨的数据, 用该方法可以将显示出 He I 谱线的光谱数据快速挑

出。这种方法也可用于其他稀有类型光谱数据的搜寻中。

## 4 物理参数

### 4.1 大气参数

Kepler 等人<sup>[39]</sup>在 SDSS DR12 光谱数据中搜寻白矮星的同时,也利用修正的三维对流模型<sup>[78]</sup>测量了高信噪比 DA, DQ, DZ 型白矮星的大气参数  $T_{\text{eff}}$  和  $\lg g$ 。这些白矮星的  $T_{\text{eff}}$  范围为 5 000 ~ 100 000 K。随后, Koester<sup>[37]</sup>利用其提出的大气模型,对 SDSS 数据中 DB 型白矮星的大气参数也进行了测量和分析<sup>[20, 42]</sup>。借助于 GAIA 的紫外数据, Kong 等人<sup>[20]</sup>验证了 DB 型白矮星的有效温度与紫外波段颜色的线性关系,确定其斜率约为  $10^{-4}$ 。

### 4.2 质量

白矮星的前身星质量最大约为  $9M_{\odot}$ ,其空间分布包含着恒星形成历史及其在银河系中演化的信息。由于任何白矮星都没有足够的时间演化,以致冷却到不可探测的程度,所以人们可从它们的观测数据获取其各自独立的关于银河系年龄的信息。通过始末质量关系(initial-final mass relation, IFMR),我们也可以研究星体演化过程中的质量损失情况。现今的大规模光谱巡天项目给我们提供了一个能够充分研究白矮星质量分布的全新视角。此外,了解白矮星的质量分布,也对研究恒星演化中的质量损失过程、IFMR 或紧致双星演化有重要帮助。

最常见的 DA 型白矮星的质量分布已得到了广泛的研究,特别是对于  $T_{\text{eff}} \geq 10\,000$  K 的 DA 型白矮星,其质量可以通过光谱中巴尔末线的拟合得出<sup>[79, 80]</sup>。通过对 SDSS DR4 的白矮星样本数据的质量分布进行分析, Kepler 等人<sup>[80]</sup>得出,表面温度较低的 DA 型白矮星( $T_{\text{eff}} \leq 12\,000$  K)和 DB 型白矮星( $T_{\text{eff}} \leq 16\,000$  K)的质量较大。这个结论依赖于现有的样本,到目前为止仍然无法推翻,除非现有的模型是不准确的。另外, DA 型白矮星和 DB 型白矮星的质量分布是不相同的, DB 型白矮星质量的峰值更偏向于大质量星。这个结论与以往的普遍认知相悖,人们曾经认为这两种类型的白矮星质量接近。最有可能的原因还是由于样本的不足导致结果有偏差。以往可供研究的 DB 型白矮星样本不足 50 个,到 SDSS DR4 时也只有 150 个,而目前的数量已达上千个<sup>[20]</sup>。未来可能会有更准确的结论。

白矮星的质量-半径关系经常受限于距离的不确定性。大多数研究都以巴尔末线为主,因为这些波段的光谱可以通过地基望远镜的观测得到,而莱曼线系光谱则只能通过空间紫外望远镜的观测来获取。Joyce 等人<sup>[81]</sup>利用来自 GAIA DR2 的自行和哈勃空间望远镜的数据进行研究,他们的样本支持理论的质量-半径关系,虽然仍有至少一颗星的情况与理论并不一致。巴尔末和莱曼线系光谱的研究结果表明理论与观测是一致的。

Kepler<sup>[85]</sup>通过质量-半径关系<sup>[82-84]</sup>,使用拟合得到的  $T_{\text{eff}}$  和  $\lg g$ ,估算了 SDSS 中所有高信噪比( $S/N \geq 15$ )白矮星的质量,并通过蒙特卡罗模拟推算出了理论上的质量分布。DA 和 DB 型白矮星的质量分布形状不同,DA 型白矮星的质量分布在大质量处有一个较长的拖尾,然而 DB 型白矮星的质量分布则在小质量处有一个较长的拖尾。这种现象可能反映

了前身星经历热力学脉冲进而演化成 DB 型白矮星的一些限制。通过计算得出, 所有诞生于  $1.2 \times 10^{10}$  a 之前的白矮星的有效温度  $T_{\text{eff}} < 10\,000$  K, 且大多数的温度都在 4 500 K 左右。对于  $T_{\text{eff}} \geq 13\,000$  K 的白矮星, 平均质量若在  $0.64M_{\odot}$  左右, 则它的前身星在  $2 \times 10^9$  a 前一般会爆发, 进而形成白矮星, 因为其前身星质量只有约  $2.5M_{\odot}$ , 并且寿命较短。这些结果表明, 大多数白矮星比我们现在观测到的样本更冷, 我们必须想办法将它们与红矮星区分开。这种 He 白矮星在光谱中没有显示出谱线, 而 DA 型仅显示出弱的  $H\alpha$  线。因此, 自行和视差是关键, 因为在近似的温度下, 冷白矮星比红矮星更暗。因此, GAIA 的数据对于它们的识别至关重要。

### 4.3 运动学

白矮星的运动学研究可以为银河系暗物质研究提供非常大的帮助<sup>[86, 87]</sup>。通过对年轻的 DA 型白矮星进行分析, Wegg 和 Phinney<sup>[88]</sup> 发现小质量的 DA 型白矮星 (小于  $0.75 M_{\odot}$ ) 拥有较高的速度弥散 (约  $46 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和非对称星流, 大质量的 DA 型白矮星 (大于  $0.75 M_{\odot}$ ) 速度弥散仅为约  $19 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这应该是由较大质量的前身星, 其寿命较短导致的。通过对比 SDSS DR14 与 LAMOST DR5 中 DB 型白矮星的质量和空间速度, Kong 等人<sup>[63]</sup> 也发现了其与 DA 型白矮星相似的规律。

另外, 根据样本计算白矮星的形成率时, 白矮星距离银盘的高度及其随年龄和质量的变化是至关重要的。

## 5 形成和演化

白矮星是小质量 (不大于  $8M_{\odot}$ ) 恒星的核心残留物, 由其前身星经历后主序演化之后形成<sup>[89]</sup>。根据理论模型<sup>[90]</sup> 计算, 最小质量白矮星是通过一颗质量为  $0.50M_{\odot} \sim 0.52M_{\odot}$  的恒星演化而来, 因为质量更小的恒星, 其寿命要比宇宙年龄更长。根据模型预言, 这种白矮星应该为 C/O 白矮星。然而, 通过对 SDSS 发布数据中的白矮-主序双星的研究, Rebassa-Mansergas 等人<sup>[91]</sup> 发现双星演化可以改变这种结果, 产生不同类型的白矮星。

当核心的 H 和 He 在演化早期燃烧殆尽后, 质量介于  $0.4M_{\odot} \sim 1.05M_{\odot}$  的白矮星会拥有 C/O 的核球<sup>[92]</sup>。质量大于  $1.05M_{\odot}$ <sup>[93]</sup> 的白矮星的前身星则具有足够高的温度来点燃 C 核, 进而形成 O/Ne 或 Ne/O/Mg 核。具体燃烧到何种程度取决于 C 燃烧是否在星体的中央。当 C 燃烧在偏离星核中心的地方开始后, “火焰” 虽然会向中心传播, 但最终并不一定会到达中心。如果这种 “C 火” 没有达到星体核心, 那么, C/O 和 O/Ne 混合的白矮星就诞生了<sup>[94, 95]</sup>, 这种情况下核质量的下限是  $1.04M_{\odot}$ ; 如果抵达了中心, 则会产生一颗 Ne/O/Mg 白矮星, 其最小的核质量则是  $1.154M_{\odot}$ <sup>[96]</sup>。这些结论都是依赖于演化模型得出的<sup>[93]</sup>。不论何种核的白矮星, 质量的确定对于我们理解白矮星的形成和演化都是至关重要的前提条件。

已有人提出了中小质量 C/O 核白矮星的演化模型<sup>[97, 98]</sup>, 也有很多人对极端小质量白矮星的演化模型进行了研究<sup>[99-101]</sup>。但是, 目前仍然缺少完善的大质量白矮星演化模型。

随着巡天项目的开展, 光谱证认的白矮星数量已超过  $4 \times 10^4$  颗。基于这些数据,

Kleinman 等人<sup>[34]</sup>已对它们的质量分布作了较为细致的研究和分析。随着观测样本的不断完善, 现有的模型可能会得到进一步的修正和完善, 所缺少的模型也会逐渐被建立起来。

## 6 总结与展望

白矮星作为银河系演化的示踪体, 一直以来都备受天文学家的青睐。它是超过 97% 的恒星演化的最终阶段。由于星体中没有了核聚变, 仅仅依靠引力收缩辐射来提供能量, 所以其亮度非常暗, 以致其较难被观测到。

根据大气层中元素的含量, 白矮星可分为 DA, DB, DO 等多种光谱型。由于星体内部物质与表层的对流, 星体表面的元素含量会发生变化, 从而使得白矮星的类型也会相互转化。DB 型白矮星的  $T_{\text{eff}}$  在 30 000 ~ 45 000 K 范围内的 DB 缺失并不是绝对的, 而只是其数量较少。

现有 H 和 He 白矮星样本的质量分布并不完全相同, 它们的平均质量都在  $0.5M_{\odot}$  左右, 但有一部分 DA 型白矮星的质量较大, 而 DB 型白矮星却在较小质量处有拖尾。另外, 温度较低的白矮星通常具有较大的质量, 而且小质量白矮星的空间运动速度弥散比大质量的大。

得益于近十几年来的大型巡天望远镜观测项目, 获取大量白矮星光谱数据成为可能。比较有代表性的是 SDSS 巡天项目: 从 2000 年至今的 14 次发布数据中, 已经有超过  $4 \times 10^4$  颗白矮星的光谱。Kepler, Kleinman, Koester 等人利用这些数据对白矮星进行了大量系统性的搜寻和研究工作, 获得了关于其质量分布、光度函数、元素丰度等一系列研究成果。他们在海量光谱数据中搜寻白矮星的通用做法就是限制  $u' - g'$  和  $g' - r'$  的颜色范围, 因为白矮星的颜色覆盖范围与主序星有着较明显的区别。另外, Kong 等人使用机器学习的方法在 SDSS DR14 和 LAMOST DR5 的海量光谱中把 DB 型白矮星的数量增加到了 2 000 多颗。

LAMOST DR5 和 SDSS DR14 的数据足迹基本上涵盖了北天球的绝大多数区域, 两者同源的数据也有很多。所不同的是, SDSS 数据中白矮星的数量比 LAMOST 的要多一些, 这主要是望远镜的极限星等和选源策略不同导致的。GALEX 巡天也发布了很多白矮星的紫外数据, 这对白矮星的研究工作也有很大的帮助。

随着各巡天项目的不断开展, 人们可以获得海量的白矮星数据。充分利用好机器学习优势, 可以把搜寻 DB 型白矮星的方法应用到搜寻其他类型的白矮星上。

随着观测设备的升级和观测精度的提高, 人类有望观测到越来越多的白矮星。研究白矮星对于理解银河系中的恒星形成和演化有着非常重要的意义。

### 参考文献:

- [1] Woosley S E, Heger A. ApJ, 2015, 810: 34
- [2] Kilic M, Stanek K Z, Pinsonneault M H. ApJ, 2007, 671: 761
- [3] Fontaine G, Brassard P, Bergeron P. PASP, 2001, 113: 409

- 
- [4] Voss B, Koester D, Napiwotzki R, et al. *A&A*, 2007, 470: 1079
- [5] Cukanovaite E, Tremblay P E, Freytag B, et al. *MNRAS*, 2018, 481: 1522
- [6] Freytag B, Steffen M, Ludwig H G, et al. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231: 919
- [7] Rolland B, Bergeron P, Fontaine G. *ApJ*, 2018, 857: 56
- [8] Graham J R, Matthews K, Neugebauer G, et al. *ApJ*, 1990, 357: 216
- [9] Jura M. *ApJ*, 2003, 584: L91
- [10] Koester D, Gänsicke B T, Farihi J. *A&A*, 2014, 566: A34
- [11] Farihi J. *New Astronomy Reviews*, 2016, 71: 9
- [12] Kilkenny D. *MNRAS*, 2016, 457: 575
- [13] Landolt A U. *ApJ*, 1968, 153: 151
- [14] Winget D E, Robinson E L, Nather R D, et al. *ApJ*, 1982, 262: L11
- [15] McGraw J T, Starrfield S G, Angel J R P, et al. *The MMT and the Future of Ground-Based Astronomy*, 1979, 385: 125
- [16] Kepler S O, Koester D, Ourique G. *Science*, 2016, 352: 67
- [17] Fontaine G, Wesemael F. *IAU Colloq 95: Second Conference on Faint Blue Stars*, 1987, 95: 319
- [18] Manseau P M, Bergeron P, Green E M. *ApJ*, 2016, 833: 127
- [19] Bergeron P, Wesemael F, Dufour P, et al. *ApJ*, 2011, 737: 28
- [20] Kong X, Luo A L, Li X R, et al. *PASP*, 2018, 130(8): 084203
- [21] Kleinman S J, Kepler S O, Koester D, et al. *ApJS*, 2013, 204: 5
- [22] Luyten W J. *White Dwarfs*. Minneapolis: University of Minnesota, 1970
- [23] Luyten W J. *White Dwarfs II*. Minneapolis: University of Minnesota, 1977: 103
- [24] Green R F, Pier J R, Schmidt M, et al. *ApJ*, 1980, 239: 483
- [25] McCook G P, Sion E M. *Villanova University Observatory Contributions*. Villanova, Penn.: Villanova Press, 1977
- [26] Shipman H L. *ApJ*, 1979, 228: 240
- [27] Strauss M A, Weinberg D H, Lupton R H, et al. *AJ*, 2002, 124: 1810
- [28] <https://www.sdss.org/surveys/>
- [29] <https://classic.sdss.org/>
- [30] York D G, Adelman J, Anderson J E JR, et al. *AJ*, 2000, 120: 1579
- [31] <https://sdss3.org/>
- [32] Eisenstein D J, Weinberg D H, Agol E, et al. *AJ*, 2011, 142: 72
- [33] Blanton M R, Bershadsky M A, Abolfathi B, et al. *AJ*, 2017, 154: 28
- [34] Kleinman S J, Harris H C, Eisenstein D J, et al. *ApJ*, 2004, 607: 426
- [35] Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, Allam S S, et al. *ApJS*, 2006, 162: 38
- [36] Eisenstein D J, Liebert J, Harris H C, et al. *ApJS*, 2006, 167: 40
- [37] Koester D. *Mem Soc Astron Italiana*, 2010, 81: 921
- [38] Abazajian K N, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. *ApJS*, 2009, 182: 543
- [39] Kepler S O, Pelisoli I, Koester D, et al. *MNRAS*, 2015, 446: 4078
- [40] Alam S, Albareti F D, Allende Prieto C, et al. *ApJS*, 2015, 219: 12
- [41] Kepler S O, Pelisoli I, Koester D, et al. *MNRAS*, 2016, 455: 3413
- [42] Koester D, Kepler S O. *A&A*, 2015, 583: A86
- [43] Abolfathi B, Aguado D S, Aguilar G, et al. *ApJS*, 2018, 235: 42
- [44] <http://galex.caltech.edu/index.html>
- [45] Bianchi L, GALEX Team. *Mem Soc Astron Italiana*, 1999, 70: 365
- [46] Martin C, Barlow T, Barnhart W, et al. *Future EUV/UV and Visible Space Astrophysics Missions and Instrumentation*, 2003, 4854: 336
- [47] Bianchi L, GALEX Team. *Mem Soc Astron Italiana*, 2000, 71: 1123
- [48] <http://galex.stsci.edu/GR6/>
- [49] Kilic M. *NASA ADAP Proposal*. Washington, DC: NASA, 2013: 7

- [50] <http://www.lamost.org/>
- [51] Yao S, Liu C, Zhang H T, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 772
- [52] Zhongrui B. *The Intriguing Life of Massive Galaxies*, 2013, 295: 189
- [53] Bai Z, Zhang H, Yuan H, et al. *PASP*, 2017, 129(2): 024004
- [54] Bai Z R, Zhang H T, Yuan H L, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, 17: 091
- [55] <http://dr6.lamost.org/>
- [56] Ren J, Luo A, Li Y, et al. *AJ*, 2013, 146: 82
- [57] Zhao J K, Luo A L, Oswalt T D, et al. *AJ*, 2013, 145: 169
- [58] Zhang Y Y, Deng L C, Liu C, et al. *AJ*, 2013, 146: 34
- [59] Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15: 1095
- [60] Ren J J, Rebassa-Mansergas A, Luo A L, et al. *A&A*, 2014, 570: A107
- [61] Guo J, Zhao J, Tziamtzis A, et al. *MNRAS*, 2015, 454: 2787
- [62] Ren J J, Rebassa-Mansergas A, Parsons S G, et al. *MNRAS*, 2018, 477(4): 4641
- [63] Kong X, Luo A L, Li X R. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(6): 088
- [64] <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/home>
- [65] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. *A&A*, 2016, 595: A1
- [66] <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- [67] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 616: A1
- [68] Evans D W, Riello M, De Angeli F, et al. *A&A*, 2018, 616: A4
- [69] Gaia Collaboration, Mignard F, Klioner S A, et al. *A&A*, 2018, 616: A14
- [70] Luri X, Brown A G A, Sarro L M, et al. *A&A*, 2018, 616: A9
- [71] Katz D, Sartoretti P, Cropper M, et al. *A&A*, 2019, 622: A205
- [72] Soubiran C, Jasniewicz G, Chemin L, et al. *A&A*, 2018, 616: A7
- [73] Jiménez-Esteban F M, Torres S, Rebassa-Mansergas A, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 4505
- [74] Hollands M A, Tremblay P E, Gänsicke B T, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 3942
- [75] Lee Y S, Beers T C, Sivarani T, et al. *AJ*, 2008, 136: 2022
- [76] Tibshirani R. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1996, 1: 267
- [77] Chang C C, Lin C J. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2011, 2: 27
- [78] Tremblay P E, Ludwig H G, Steffen M, et al. *A&A*, 2013, 559: A104
- [79] Liebert J, Bergeron P, Holberg J B. *ApJS*, 2005, 156: 47
- [80] Kepler S O, Kleinman S J, Nitta A, et al. *MNRAS*, 2007, 375: 1315
- [81] Joyce S R G, Barstow M A, Casewell S L, et al. *MNRAS*, 2018, 479: 1612
- [82] Romero A D, Campos F, Kepler S O. *MNRAS*, 2015, 450: 3708
- [83] Althaus L G, García-Berro E, Isern J, et al. *A&A*, 2005, 441: 689
- [84] Renedo I, Althaus L G, Miller Bertolami M M, et al. *ApJ*, 2010, 717: 183
- [85] Kepler S O. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, 2014, 44: 156
- [86] Oppenheimer B R, Hambly N C, Digby A P, et al. *Science*, 2001, 292: 698
- [87] Reid I N. *ARA&A*, 2005, 43: 247
- [88] Wegg C, Phinney E S. *MNRAS*, 2012, 426: 427
- [89] Zenati Y, Toonen S, Perets H B. *MNRAS*, 2019, 482: 1135
- [90] Toonen S, Nelemans G, Portegies Zwart S. *A&A*, 2012, 546: A70
- [91] Rebassa-Mansergas A, Nebot Gómez-Morán A, Schreiber M R, et al. *MNRAS*, 2011, 413: 1121
- [92] Lauffer G R, Romero A D, Kepler S O. *MNRAS*, 2018, 480: 1547
- [93] Siess L. *A&A*, 2007, 476: 893
- [94] Denissenkov P A, Herwig F, Truran J W, et al. *ApJ*, 2013, 772: 37
- [95] Farmer R, Fields C E, Timmes F X. *ApJ*, 2015, 807: 184
- [96] Doherty C L, Gil-Pons P, Siess L, et al. *MNRAS*, 2015, 446: 2599
- [97] Romero A D, Kepler S O, Córscico A H, et al. *ApJ*, 2013, 779: 58
- [98] Romero A D, Córscico A H, Althaus L G, et al. *MNRAS*, 2012, 420: 1462



- [99] Istrate A G, Marchant P, Tauris T M, et al. *A&A*, 2016, 595: A35  
[100] Istrate A G, Tauris T M, Langer N, et al. *A&A*, 2014, 571: L3  
[101] Istrate A G, Fontaine G, Heuser C. *ApJ*, 2017, 847: 130

## The Searches of White Dwarfs in the Sky Survey Projects

KONG Xiao<sup>1,2</sup>, LUO A-li<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** This review first describes the color characteristics and spectral classifications of white dwarfs (WD), which are the end product of evolution of 97% stars. According to the composition of atmosphere, they are divided into different spectral types including hydrogen-dominated (DA), helium-dominated (DB or DO) WDs, etc. In order to conduct an in-depth research of WDs, e.g. their formation and evolution process, physical properties, kinematics and atmospheric models, the completeness of the samples becomes indispensable. Benefit from the development of large-scale sky-survey projects in the past decades, such as the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and the spectral survey of the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST), the number of spectroscopically confirmed WDs has reached more than 40 000. The majority are DA WDs, while the others include more than 2 000 DBs. In addition, valuable ultraviolet and astrometric (parallax, proper motion, spatial position, etc.) data are available now, which are provided by the Galaxy Evolution Explorer (GALEX) project, and the Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (GAIA) satellite, respectively. These data have greatly deepened the understandings of WDs. Subsequently, the latest researches of atmospheric parameters, mass and kinematics of WDs are briefly summarized. Finally, this review discusses the formation and evolution of WDs, which are based on the existing theoretical models. With the increasing number of WD samples, the existing models would be continuously revised and improved, and new models may also be established.

**Key words:** white dwarf; catalogs; survey