

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.01

褐矮星的观测特征和搜寻

王有芬^{1,2}, 邵正义^{1,3}

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 上海市天体物理重点实验室, 上海 200234)

摘要: 褐矮星是亚恒星天体, 内核没有稳定的氢燃烧, 其质量一般在 13 至 75 倍木星质量之间。本质上, 褐矮星的内核物理演化过程不同于行星和恒星, 观测上我们根据褐矮星不同于行星和恒星的测光和光谱特征来区别认证它们。由于质量小、温度低, 在光学波段, 它们测光特征表现为光度暗, 颜色红; 在近红外波段, 受大气尘埃、金属丰度等影响, 它们有不同寻常的星等、颜色。根据褐矮星的光谱形态与特征谱线, 它们可以被分为 M、L、T 和 Y 矮星。现在已发现的全部 T 与 Y 矮星都是褐矮星, 但不是所有的 M 与 L 矮星都是褐矮星。介绍了 L、T 和 Y 矮星的特征吸收线和光谱分类方法, 回顾了早期在星团和双星系统中褐矮星的搜寻, 以及现阶段用大视场、长波段深度巡天数据在近邻场区中褐矮星的搜寻。对目前已发现的晚型 M 和 L、T、Y 矮星的总数目、温度范围、距离及测量其年龄的方法等做了小结。最后讨论了如何判断 L 矮星是否为褐矮星, 重力、金属丰度和大气尘埃对近红外波段光谱形状的影响, 光谱型-J 波段绝对星等图上 L、T 交接处“大鼓包”的形成原因等热点问题。

关 键 词: L、T、Y 矮星; 褐矮星; 极冷矮星; 谱指数

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

褐矮星的质量小于恒星的质量下限而大于行星质量上限, 其内核没有稳定的氢燃烧。褐矮星的概念首次由 Kumar 于 1963 年提出^[1]。他对低质量星体的数值模拟表明, 若质量小于某一阈值, 其内核的温度将不能达到维持稳定氢聚变反应需要的温度, 因此不会像恒星一样进入主序阶段。这类天体和恒星有相似的形成过程但又不是恒星, 当时 Kumar 称其为“黑矮星”, 现在我们称之为褐矮星。

褐矮星和气态巨行星的区别在于: 行星中没有任何核聚变反应, 其内部能量完全是由引

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-11-29

资 助 项 目: 国家自然科学基金 (10973028, 10833005, 10878003); 创新群体项目 (10821302); 973 项目 (2007CB815402/403)

通讯作者: 王有芬, xx@xxx

力坍缩提供的,而褐矮星内部在某些阶段会发生核聚变。因此,理论上可以计算出褐矮星的质量下限为 13 倍的木星质量。质量高于这个下限,就可以点燃氘,由此产生的能量暂时可以用来抵御星体进一步坍缩;但是氘很快就会消耗完。如果星体的质量超过了 60 倍的木星质量,则坍缩后的中心温度可以使天体内核发生锂核和质子聚变生成氦核的反应(锂燃烧);同样,星体中原本少量的锂很快耗尽。质量最大的那些褐矮星可能会在内核点燃氢,但是由于自引力仍然不够强大,氢燃烧产生的能量被“喷溅”散发,使内核温度下降,氢燃烧很快会熄灭。具有太阳金属丰度的星体,为了束缚住氢燃烧产生的能量从而维持稳定的氢燃烧,其质量至少为木星的 75 倍。而对于零金属丰度的褐矮星,这个质量上限将提高至 90 倍的木星质量^[7]。在氘和可能的锂聚变反应完成之后,褐矮星在引力作用下继续坍缩,当它的密度达到一定程度后气体开始简并,直至形成一个靠气体的电子简并压维持引力平衡的暗冷天体,它的表面温度逐渐下降。

褐矮星普遍存在于薄盘、厚盘和晕中,其空间数密度超过了恒星,能用于探索其所在星团最低质量恒星的形成。大量的褐矮星数据还有助于改进低质量端的质量函数^[7]。褐矮星的存活时间长,自“出生”起稳定地变冷、变暗,也是理想的天然计时器^[7]。此外,褐矮星是连接最小质量的恒星和最大质量行星的桥梁,它们和气态巨行星的质量、大小、大气性质和形成方式等方面都有相似之处^[7]。而且,褐矮星比系外行星更容易被观测到,它们可以为大气模型的透明度、动力学等提供限制,有助于研究热行星大气性质^[7]。

2 L、T、Y 矮星的光谱特征和光谱分类

褐矮星之所以作为新的不同于恒星的概念被提出,是因为它的质量介于最大质量的行星和最小质量的恒星之间,其内部物理演化过程不同于恒星,而我们根据其观测特征来区分出这类不同于行星和恒星的天体。为了更好地了解褐矮星的观测特征,从而帮助理解第三章中介绍的搜寻和证认褐矮星的过程,我们简要介绍 L、T、Y 矮星的分类方案。L、T 和 Y 矮星是比 M 矮星温度更低的矮星,对它们的定义、分类源于对褐矮星的搜寻,第一次被正式定义与分类是在第一颗褐矮星被发现后第四年^[21]。1988 年在一次寻找褐矮星的近红外观测中发现了一颗距离约为 32 pc 的白矮星的伴星 GD 165B,其光谱特征与正常的 M 矮星不符^[7]。几年之后发现的 Gl 229B^[7],其光谱的 H、K 波段出现了清晰的甲烷分子吸收线,与行星的光谱十分类似。随后几年,天文学家发现了更多天体其特征谱线与 M 矮星不同。为描述这类矮星,天文学家增补了新的光谱型序列: L、T、Y。GD 165B 和 Gl 229B 分别是第一颗被发现的 L 矮星和 T 矮星,而第一批 Y 矮星(6 颗)则于 2011 年在 WISE(大视场红外巡天探测器)巡天数据中被发现^[7]。

2.1 MK 恒星光谱分类系统及其低温端拓展

恒星的光谱分类沿用的是 1943 年 Morgan 等人^[7]建立的二维 MK 光谱分类系统。从 O 型到 M 型恒星,其质量和表面温度单调减小,这种单调变化也反映在各光谱型的特征吸收线上。从 O 到 F 型星,其光谱特征由离子吸收线变为中性原子吸收线;G 型星以后至

M 型星, 光谱中出现了分子线。M 型星的特征吸收线为 TiO 和 VO。GD 165B 和 G1 229B 以及一批类似矮星没有 TiO 和 VO 吸收线, 不同于 O-M 中的任何谱型, 这表明它们是比 M 矮星更冷的天体, 需要建立新的光谱型序列来描述它们。Kirkpatrick 等人^[7]经过充分考虑, 选取了 L、T、Y 这三个字母作为新光谱型的名字。这三个字母并没有特定的物理意义, 只是因为它们没有和其它已知的光谱型名字重合, 也没有跟天体物理领域的其他字意相混淆^[7]。这种命名已经被天文界广泛接受和使用。

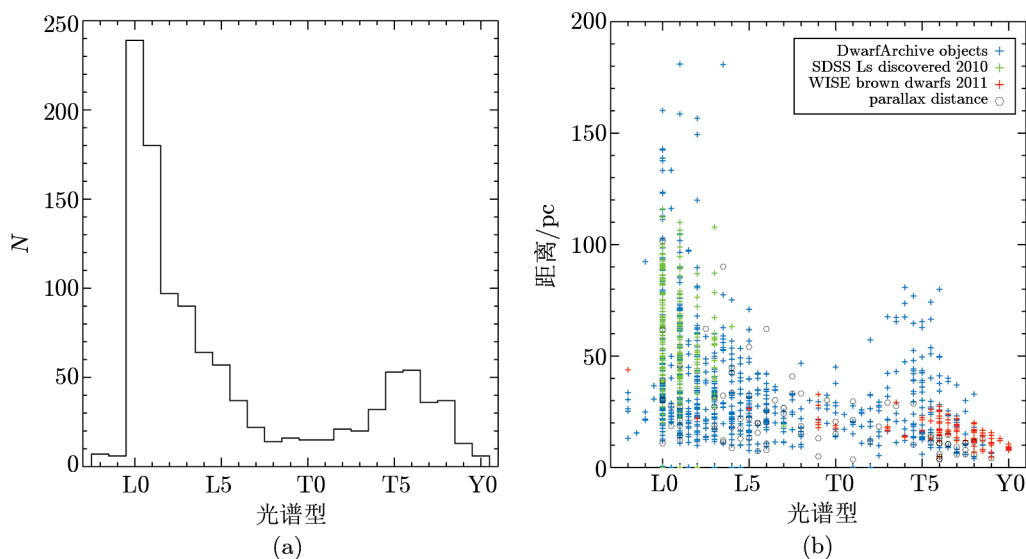
新光谱型 L、T、Y 沿用了 MK 光谱分类系统的准则: 1) 仅用可观测的光谱特征确定恒星光谱型, 没有先验地加入物理特性; 2) 在为标准星进行分类时, 使用合适分辨率 (低分辨率 $R < 5000$ 、中分辨率 $5000 < R < 20\,000$) 的光谱, 既使得决定光谱型的谱线清晰可辨, 又适用于暗星的观测; 3) 标准星确定好以后, 将目标星的光谱与之比较, 从而确定其光谱型。基于拓展的 MK 光谱分类系统, GD 165B 和 G1 229B 根据近红外光谱分别被划分为 L3^[7] (光学波段为 L4^[7]) 和 T7p^[7] (p 表示异常)。

2.2 L、T 矮星的光学波段光谱特征与分类

与 M 矮星相比, L 矮星的光学波段光谱中的 VO 线较弱, TiO 线消失。其特征谱线为中性碱金属原子吸收线, 如: KI、NaI、RuI 和 CsI 线; 金属氢化物吸收线, 如: FeH、CrH 和 CaH 线。一定质量和年龄范围内的 L 矮星会有 LiI 线, 晚型 L 矮星中还有水分子线。T 矮星光学光谱的显著特征是强水分子 (H_2O) 线, 可能的弱甲烷分子 (CH_4) 线, 压力致宽的 KI、NaI 双线, 窄 RuI、CsI 线, 以及弱 FeH、CrH 和 CaH 线。图??展示早型 L 到晚型 T 的光学波段光谱: M 矮星中特别显著的 VO 和 TiO 吸收线到中型 L 开始减弱消失, 而中性的 NaI 和 KI 吸收线变得非常强, 金属氢化物 MgH、CaOH、CrH 和 FeH 的吸收线相比早型 L 矮星也有所增强; 到了晚型 L 和早型 T 矮星, 水分子的吸收线增强, 中性碱金属的吸收线依然很强, 金属氢化物的吸收线则大大地减弱; 对于晚型 T 矮星, KI 和 NaI 的吸收线因达到饱和而变得非常宽, 水分子线也很强, 是主要的吸收体, 这些吸收线使得 7000 Å 处光谱的流量很低。根据 Kirkpatrick 等人 2005 年的工作^[7], 我们将早型 L 到晚型 T 矮星在光学波段的特征吸收线总结在表 1 中。

表 1 4 个天区和空源的观测日期和天区

观测时间	观测天区	观测时间	观测天区
1995.07.07	Blank *	2003.04.26 -04.30	F.Leo F.Coma
1996.01.23—01.25	F.Leo F.1002 F.Coma Blank	2004.04.23—04.26	F.Leo F.Coma
1996.02.07—02.09	F.Leo F.1002 F.Coma Blank *	2004.11.16—11.18	F.836 Blank
1996.07.05—07.07	Blank *	2005.03.11—03.14	F.Leo F.Coma



注：红色为侦测到的信号强度，黑色线为热噪音与银河盘面噪音的预期值。250 ~ 270 MHz 的连续区段为海事通讯用的射电频段。

图 1 TAROGE 射电背景^[7]

3 总结与展望

褐矮星是近 50 年来兴起的研究领域，自从 1963 年 Kumar 第一次在理论上预言褐矮星的存在，该领域在观测和理论上都得到了很大发展。褐矮星质量小、星等暗、颜色红 (是指光学波段，并不能简单地说质量越小颜色越红。其近红外波段颜色受大气尘埃、金属丰度等影响，具有独特的星等、颜色，如 T 矮星 J-K 颜色较 L 矮星的偏蓝)，这对褐矮星的观测造成了困难。早期，为了提高效率，对它们的搜寻多集中在近邻的星团和双星系统。1995 年，Rebolo 和 Nakajima 分别第一次发现了近邻星团中和双星中的褐矮星，Kumar 对褐矮星的预言被证明为正确无疑。之后更多褐矮星陆续被发现，天文学家得以根据一定数量的褐矮星样本，总结其测光和光谱上的观测特征。因为大部分褐矮星具有不同于先前已建立的 O-M 光谱型的光谱形态与特征吸收线，在光谱学上，这些褐矮星又被区分为 L、T、Y 矮星，而 M 型褐矮星数目很小。随着大视场、长波段深度巡天的兴起，根据它们的这些观测特征，科学家开始搜寻近邻场中的褐矮星，所发现的褐矮星数目快速增长。L、T、Y 型矮星比 M 矮星温度更低，其光谱分类遵从 MK 分类系统的原则。L 矮星的特征线不同于 M 矮星，其特征线为强中性碱金属和金属氢化物吸收线，近红外波段强甲烷分子和水分子吸收线是 T 矮星的标志，Y 矮星近红外波段出现氨分子吸收线。部分晚型 M (一般晚于 M7)、大部分 L、全部的 T 以及已发现的全部 Y 矮星都是褐矮星。6 颗 Y 矮星是在 WISE 巡天数据中被发现的，由于 Y 矮星还很少，还不便于为其进行亚类分类。未来将会发现更多 Y 矮星，其温度下限以及物理本质 (是否会包括大质量气态行星) 还有待探索。根据 DwarfArchive 的

统计, 目前所发现的晚型 M 矮星与 L、T、Y 矮星共有 1200 多 (不到 1300) 颗, 其中除了小部分 (主要是早-中型 L) 可能是低质量恒星, 它们绝大部分都是褐矮星。

观测知识的积累必将推动理论工作的发展。更多基于双星系统、星团、三角视差测量的基准矮星的观测将有效地改进目前并不成熟的褐矮星理论模型。反之, 更成熟、完善的褐矮星的模型能准确预言各参数对观测现象的影响, 有助于解决第四章所提到的各种观测问题。

另外, 褐矮星的模型、形成过程、磁场等具体内容在本文的讨论范围之外, 需要另做专门的讨论。

参考文献:

- [1] Kumar S S. ApJ, 1963, 137: 1121
- [2] Saumon D, Hubbard W B, Burrows A, et al. ApJ, 1996, 460: 993
- [3] McCarthy D W, Probst R C, Low F J. ApJ, 1985, 290: 9
- [4] Becklin E E, Zuckerman B. Nature, 1988, 336: 656
- [5] Kirkpatrick J D, Allard F, Bida T, et al. APJ, 1999, 519: 834
- [6] Latham D W, Mazeh F, Stefanik R P, et al. Nature, 1989, 339: 38
- [7] Stauffer J R, Herter T, Hamilton D, et al. ApJ, 1991, 367: 23
- [8] Williams D M, Comeron F, Rieke G H, et al. ApJ, 1995, 454: 144
- [9] Hambly N C, Hawkins M R S, Jameson R F. A& AS, 1993, 100: 607
- [10] Stauffer J R, Hamilton D, Probst R. AJ, 1994, 108: 155
- [11] Rebolo R, Zapatero-Osorio M R, Martin E L. Nature, 1995, 377: 129

The Searches and Observational Characteristics of Brown Dwarfs

WANG You-fen^{1,2}, SHAO Zheng-yi^{1,3}

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for Astrophysics, Shanghai 200234, China)

Abstract: Brown dwarfs are substellar objects which have masses in between the most massive planets and the least massive stars. There are no stable hydrogen fusion in their interiors, although large mass brown dwarf might have instant hydrogen fusion in their core. All brown dwarfs have deuterium burning in their interiors. The L, T and Y dwarfs are cooler than M dwarfs. A small part of late M, most of the L, all of the T and all of the up to date discovered Y dwarfs are brown dwarfs.

The hallmarks of L dwarfs in optical band are prominent absorption lines from neutral alkali atoms and alkali hydrides like KI, NaI, FeH etc. In near infrared band, the hallmarks of T dwarfs are strong H₂O, CH₄ absorption lines. The Y dwarfs have NH₃ absorption lines in near infrared H band. The spectral type classification of these ultracool dwarfs are based on MK spectral classification system referring to the spectral indexes of the characteristic lines and the flux ratio that measuring the reddening. Given very low masses, brown dwarfs are faint and red in optical band, therefore not easy to be detected. In early days, scientists hunted for brown dwarfs in star clusters and binary systems where very few candidates were found. Thanks to the launch of deep sky surveys in optical and in NIR, recent years have seen a lot of discoveries of brown dwarfs. The L, T and Y dwarf candidates are selected according to their characteristic color. Briefly, L dwarfs have red(J-K \sim 0.5–2.5) near infrared color, T dwarfs have blue(J-K \sim 0.0–1.5) near infrared color, while the newly discovered Y dwarfs have WISE W1–W2 color exceeding \sim 4. Among these candidates, quite a lot were confirmed through the photometry and spectroscopy follow up.

Currently, more than 1200 ultracool dwarfs have been discovered. Methods for measuring their distances, temperatures, ages are summarized in this paper. Several related questions, e.g., how to judge whether a late-M or early-mid L dwarf is a brown dwarf or not, the origin of the J-band bump on the spectral type - absolute magnitude diagram etc, are briefly discussed.

Key words: brown dwarf; L, T, Y dwarf; ultracool dwarf; spectral index