

文章编号:2095-6134(2016)02-0150-05

SCUSS 测光金属丰度定标及南银冠人马座星流的金属丰度估计^{*}

顾加银, 杜翠花[†]

(中国科学院大学物理学院, 北京 101408)

(2015 年 5 月 11 日收稿; 2015 年 5 月 27 日收修改稿)

Gu J Y, Du C H. Photometric metallicity calibration based on SCUSS and the metallicity estimates of Sagittarius stream in south Galactic cap[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016,33(2):150-154.

摘 要 基于 SDSS g , SDSS r 和 SCUSS u 测光数据, 利用 F/G 型主序星的光谱, 从 $u - g$ 和 $g - r$ 色指数中进行测光金属丰度定标. 定标过程中, 当 $g - r < 0.4$ 时, 测光金属丰度与基于光谱的金属丰度之间的方均根误差为 0.14, 当 $g - r > 0.4$ 时为 0.16. 由于 SCUSS u 更深更精确的星等, 能够将测光金属丰度估计的应用范围设置在 $g < 21$ 内. 选择南银冠人马座星流来研究金属丰度分布, 发现大约在以银心为中心的柱坐标 $R \sim 19$ kpc 和 $|Z| \sim 14$ kpc 处的人马座星流呈现出比背景晕星更富的金属丰度分布.

关键词 金属丰度; 子结构; 恒星成分

中图分类号: P156.5 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2016.02.002

Photometric metallicity calibration based on SCUSS and metallicity estimates of Sagittarius stream in south Galactic cap

GU Jiayin, DU Cuihua

(School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract Based on SDSS g , SDSS r , and SCUSS u photometry, we develop a photometric calibration for estimating the stellar metallicity from $u - g$ and $g - r$ colors by using the spectra of F- and G-type main-sequence stars. The rms scatter of the photometric metallicity residuals relative to spectrum-based metallicity is 0.14 dex when $g - r < 0.4$, and 0.16 dex when $g - r > 0.4$. Due to the deeper and more accurate magnitude of SCUSS u , we set the application of photometric metallicity estimation in the range of $g < 21$. We select the Sagittarius (Sgr) stream stars in south Galactic cap to study metallicity distribution. We find that the Sgr stream at the cylindrical Galactocentric coordinates of $R \sim 19$ kpc and $|Z| \sim 14$ kpc exhibits a more metal-rich distribution than the halo.

Key words metallicity; substructure; stellar content

^{*} 国家自然科学基金委员会 - 中国科学院天文联合基金 (U1231113) 资助

[†] 通信作者, E-mail: ducuihua@ucas.ac.cn

在关于银河系形成的层级模型中,银河系是通过不断与外来矮星系并合形成的,这样的并合过程使得银晕中存在许多星流、子结构^[1]. 2MASS 和 SDSS 为天文学家提供了很好的机会去探究银河系晕中的子结构. 在这些子结构中,最显著的是人马座矮椭圆星系留下来的星流. 其他的还包括 Monoceros Ring、Hercules-Aquila Cloud 和 Virgo 方向上的超密,等等.

SDSS 的子项目 SEGUE (Sloan extension for galactic understanding and exploration) 获得了大约 240 000 颗恒星 ($14.0 < g < 20.0$) 的低分辨率光谱. 然而这些数目有限的光谱对于研究银河系大范围区域内恒星的金属丰度分布是远远不够的. 利用测光金属丰度的优势可以获得更多恒星的金属丰度. Ivezić et al.^[2] 利用 F/G 型主序星获得了测光金属丰度关于 $u-g$ 和 $g-r$ 的函数关系式,并利用这个关系式研究了银河系恒星的金属丰度分布. 然而,SDSS 的 u 波段星等极限大约为 22. 另外,由于 u 波段星等在暗端相对大的误差,测光金属丰度估计的应用被限制在 $g < 19.5$ 范围内,这样的星等深度是不够用来探究遥远的子结构的金属丰度分布的.

本文中,我们结合 SDSS 和更深的测光巡天 SCUSS (south galactic cap of u -band survey) 给出对测光金属丰度的定标. 由于 SCUSS 的 u 波段星等比 SDSS 的 u 波段星等精确,且深 1.5 个星等,所以通过所获得的测光金属丰度估计能够用来研究银晕中遥远子结构的金属丰度分布.

1 SDSS 和 SCUSS 简介

斯隆数字化巡天 (Sloan digital sky survey) 是多波段的测光与光谱巡天. 这项科学计划开始于 2000 年,由美国费米国家实验室等 8 个研究机构共同实施. 它利用位于美国新墨西哥州阿帕奇天文台 (Apache point observatory) 的一架 2.5 m 口径望远镜. 该巡天范围已经覆盖了北银冠超过 $1/3$ 的天区,同时还覆盖了南半球小部分 ($\sim 300 \text{ deg}^2$) 但是深得多的天区. 同时在 5 个波段 (u, g, r, i 和 z) 上测量被探测天体的流量密度. 这 5 个波段的有效波长分别为 3 551、4 686、6 165、7 481 和 8 931 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$). 它们的极限星等 (对于点源达到 95% 的完备性) 分别为 22. 0、22. 2、22. 2、21. 3 和 20. 5. 它们的测光定标精度分别为 2%、1%、

1%、1% 和 1%. 这些测光数据使得能够通过测光视差 (photometric parallax) 来估计数百万颗恒星的距离. 还可以通过这些测光数据对恒星作测光金属丰度估计 (photometric metallicity estimates).

南银冠 u 波段巡天 (SCUSS) 是一个国际合作项目,由中国科学院国家天文台和美国亚利桑那大学 (University of Arizona) 联合实施. 该项目在南银极冠天区利用 2.3 m 博克望远镜 (The Bok telescope) 在 u 波段 (3 508 Å) 进行了巡天观测,观测天区大小为 3 700 平方度. 该项目同时也会为 LAMOST (large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope) 项目提供输入星表. SCUSS 用的 u 波段和 SDSS 的 u 波段相似,但是稍微蓝一些,这从透过率曲线可以明显看出 (图 1). 观测时曝光时间为 5 min,可以获得比 SDSS 的 u 深 1.5 mag 的极限星等,大约 23.5 mag^[3]. SCUSS u 和 SDSS u 之间的转换关系可参考文献 [9].

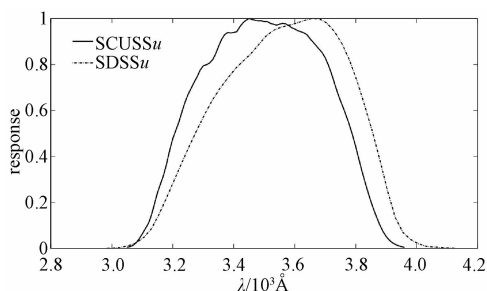


图 1 SCUSS u 波段和 SDSS u 波段的透过率曲线

Fig. 1 Response curves of SCUSS u band and SDSS u band

2 测光金属丰度定标

恒星参数如有效温度、表面重力和金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) 能够较精确地从恒星光谱中获得. 考虑到观测能谱中恒星大气的金属谱线对辐射流量的吸收效应^[4], 尤其是在蓝紫端, 通过光谱数据和测光数据的联合能够给出对恒星金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的估计. Ivezić et al.^[2] 利用 F/G 型主序星获得了测光金属丰度与色指数 $u-g, g-r$ 之间的关系, 并用这种关系式研究了银河系的金属丰度分布. 在这项研究中, 我们对较深的南银冠 u 波段巡天进行了恒星金属丰度的测光定标. SCUSS u 比 SDSS u 深 1.5 个星等. 这样深的 SCUSS u 波段能够探测更大范围的晕以至于使我们能研究遥远子结构的金属丰度分布.

我们大致采用文献 [2] 的方法,但用的 SCUSS 的 u 星等. 首先,从 SDSS 网站 (<http://www.sdss3.org/>) 的 sppParams 表中获取通过光谱巡天得到的恒星参数 (通过 SEGUE Stellar Parameter Pipeline [SSPP] 估计获得^[10]),通过匹配共有的 ID 从 SCUSS 数据库中找到相同的恒星. 再去除那些有重复观测的源多次观测的结果,只保留数据质量最好的一次观测. 最终获得了 74 133 颗星,这些星的信息有 SCUSS 的 u 星等, SDSS 的 g, r, i, z 星等,以及 SEGUE 恒星参数.

为了得到测光金属丰度估计,我们选择亮的 F/G 型主序星来做金属丰度定标. 对恒星采用和文献 [2] 相同的筛选标准. 现将这些选择标准及其意义列出:

- r 波段的星际消光小于 0.3;
- $14 < g < 19.5$, 选择亮星;
- $0.2 < g - r < 0.6$, F/G 型星颜色区间;
- $0.7 < u - g < 2.0$ 和 $-0.25 < (g - r) - 0.5(u - g) < 0.05$, 通过 $g - r$ vs. $u - g$ 双色图选择主序星;
- $-0.2 < 0.35(g - r) - (r - i) < 0.10$, 进一步通过 $g - r$ vs. $r - i$ 双色图选择主序星;
- $\lg g > 3$, 这里的 g 代表恒星表面重力,此参数从光谱中推断得出.

经过这些筛选标准,我们得到了用于测光金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) 定标的 32 542 颗 F/G 型主序星. 筛选出的样本星的金属丰度呈现出关于色指数 $u - g$ 和 $g - r$ 的较复杂的函数形式,这和文献 [2] 保持一致. 为了精确估计恒星的金属丰度,将这些星在 $u - g$ vs. $g - r$ 平面上以 $g - r = 0.4$ 为界分成 2 部分,这样定标可以避免大的系统误差. 然后,通过 3 次多项式拟金属丰度关于色指数 $u - g$ 和 $g - r$ 的关系式. 拟合的结果如下:

当 $y < 0.4$ 时,

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 17.68 - 91.34x + 60.55y + 110.7x^2 - 65.02xy - 71.72y^2 - 41.54x^3 + 33.42x^2y - 3.734xy^2 + 58.92y^3,$$

当 $y > 0.4$ 时,

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 12.89 - 6.322x - 79.79y + 17.06x^2 - 38.62xy + 199.1y^2 - 18.85x^3 + 102.8x^2y - 212.8xy^2 + 38.17y^3,$$

其中, $x = u - g, y = g - r$.

通过这些关系式,每颗恒星的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 可以计

算出来,并且可以和通过光谱得到的金属丰度比较. 当 $g - r < 0.4$ 时,测光金属丰度相对于光谱金属丰度的差值的方均根误差为 0.14 dex; 当 $g - r > 0.4$ 时,方均根误差为 0.16 dex. 而文献 [2] 中同样的方均根误差在整个颜色范围内 ($0.2 < g - r < 0.6$) 为 0.24 dex. 所以,测光金属估计能够为大量的测光巡天的恒星提供金属丰度估计. 测光金属丰度的随机误差主要来自于 u 星等的测光误差. 由于 SCUSS 相对深且较精确的 u 星等,我们期望测光金属丰度估计式能有更广的应用范围. 我们在以上测光数据的筛选条件下 (除了 $\lg g > 3$, 因为 SCUSS 中没有光谱,从而无法得出表面重力),从 SCUSS 数据库中获取了大量亮的 F/G 型主序星,并通过误差传递的方法计算了它们的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 由 u 星等测光误差引入的方均根统计误差. 具体的计算公式如下:

$$\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n \left(\frac{\partial[\text{Fe}/\text{H}]}{\partial u} \Delta u \right)^2}.$$

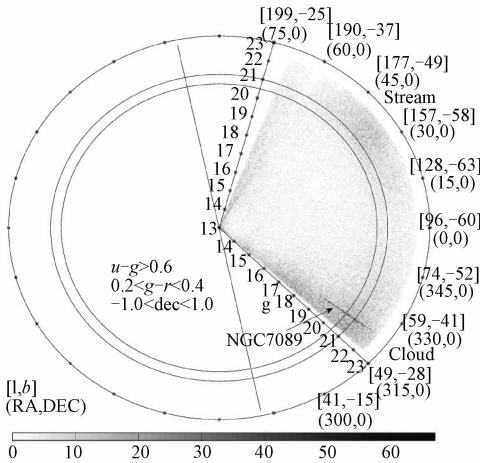
金属丰度方均根误差随 u 星等增加而增加,从 $g < 17$ 时的 0.014 dex 到 $g = 18.5$ 时的 0.070 dex, $g = 20.5$ 时的 0.379 dex, $g = 21$ 时的 0.445 dex 和 $g = 21.3$ 时的 0.750 dex. 而文献 [2] 中当 $g = 19.5$ 时测光金属丰度的误差就已经达到 0.45 dex. 文献 [2] 中将测光金属丰度估计的应用范围限制在 $g < 19.5$ 内. 所以,相应地我们将测光金属丰度估计式的应用范围限制在 $g < 21$ 内,在这范围内测光金属丰度的最大误差为 0.445 dex. 测光金属丰度估计式的应用,使得所有筛选范围内的 SCUSS 恒星的金属丰度能够被确定. 所以我们获得了大量的遥远的恒星的测光金属丰度.

3 南银冠超密

SCUSS 巡天覆盖了南银冠 ($30^\circ < l < 210^\circ, -80^\circ < b < -20^\circ$). 我们选择 F/G 型星 ($0.2 < g - r < 0.4$) 作为样本星来对银河系子结构进行示踪. 我们还利用条件 $u - g > 0.6$ 去除了类星体. 另一方面,由于 SCUSS 的 u 的极限星等为 23.5,而 SDSS u 的极限星等为 22.1,我们期望能够从 SCUSS 数据中挑选出更多的样本星. 我们从 SCUSS 数据中的 50 000 颗星中挑选 F/G 型星,发现当使用 SCUSS 的 u 在条件 $u < 23.5$ 下筛选时有 4 566 颗 F/G 型星,但是当利用 SDSS u 在

条件 $u < 22.1$ 下筛选时, 只有 3 572 颗 F/G 型星.

由于 SCUSS 巡天在赤道上延伸相当广的范围, 我们采用沿着赤道的二维楔形图来探寻南银冠的超密 (如图 2 所示). 从图 2 中可以看到 2 大超密: 人马座星流 (Sagittarius stream) 和 Hercules-Aquila cloud, 它们都是之前已被发现的超密区^[5-6]. 另外, 图 2 中黑色浓密的线性区域被证实是球状星团 NGC7089. 下文中, 我们主要研究人马座星流的金属丰度分布. 从图 2 中可以看出, 当 $g < 20.5$ 时, 几乎难以探测到人马座星流. 而在可以允许的误差范围内, 我们将上文中获得的测光金属丰度估计的应用范围限制在 $g < 21$ 内, 这恰好使得我们能够在 $20.5 < g < 21$ 星等范围内探究人马座星流的金属丰度分布.



每一像素的灰度表示落在其中的恒星数目, 恒星密集区域已标在图中. 中间粗的黑线表示赤道面与银道面的交线, 内部的 2 个圆分别对应 g 星等 20.5 和 21.

图 2 F/G 型主序星 ($u - g > 0.6$, $0.2 < g - r < 0.4$) 沿着赤道分布的楔形图

Fig. 2 Wedge diagram of distribution of F/G main-sequence ($u - g > 0.6, 0.2 < g - r < 0.4$) stars around the Celestial equator

我们通过距离区间进一步筛选人马座星流的恒星. 这涉及以下步骤: 通过去除距离主序星分布线超过 0.15 mag 的星来筛选出主序星. 主序星分布线^[7]由以下公式描述:

$$(g - r)_0 = 1.39[1 - \exp[-4.9(r - i)_0^3 - 2.45(r - i)_0^2 - 1.68(r - i)_0 - 0.05]]],$$

然后计算每一颗恒星的绝对星等和距离^[7]:

$$M_r = 3.2 + 13.30(r - i)_0 - 11.50(r - i)_0^2 + 5.4(r - i)_0^3 - 0.70(r - i)_0^4$$

$$D = 10^{(r - M_r)/5 + 1}.$$

同时转换到以银心为中心的柱坐标系 (R, ϕ, z)^[8]:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$\phi = \arctan(y/x),$$

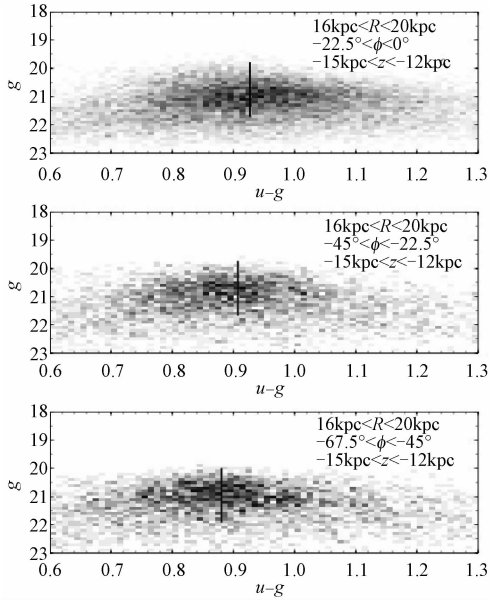
$$Z = D \sin(b).$$

通过以上过程, 人马座星流处在 $20.5 < g < 21$ 星等范围内 F/G 型主序星, 已经能够从空间位置上被挑选出来.

4 南银冠人马座星流的测光金属丰度估计

我们选择人马座星流处区域内的星 ($16\text{kpc} < R < 20\text{kpc}$, $-22.5^\circ < \phi < 0^\circ$, $-15\text{kpc} < Z < -12\text{kpc}$) 来研究它们的金属丰度分布. 从方位角可知, 这些恒星主要分布在第八卦限内, 而在这一角区间之外几乎不存在人马座星流的成员星, 这从空间区域恒星的密集程度可以判断出来. 为了获得对比, 相比于原先空间区域旋转了 $\Delta\phi = 22.5^\circ$ 的区域内的星, 也被选取出来作金属丰度分布分析. 我们画了人马座星流处 1 个区域, 以及对应旋转后 2 个区域的 F/G 星的颜色星等图 ($u - g$ vs. g), 如图 3 所示. 图 3 中, 上面的子图呈现的是人马座星流区域内所有星的颜色星等图, 而中间和下面 2 个子图呈现的是其附近区域内恒星的颜色星等图. 从图 3 可以看出, 人马座星流处恒星的色指数 $u - g$ 的分布中心 (图 3 中竖直线所示) 偏深. 从文献[2]关于测光金属丰度的附录可知, 当忽略色指数 $g - r$ 的贡献时, 恒星的测光金属丰度与 $u - g$ 大致呈线性关系. 根据所给出的关系式, 我们发现人马座星流处恒星的色指数 $u - g$ 的分布暗示了偏富的金属丰度分布.

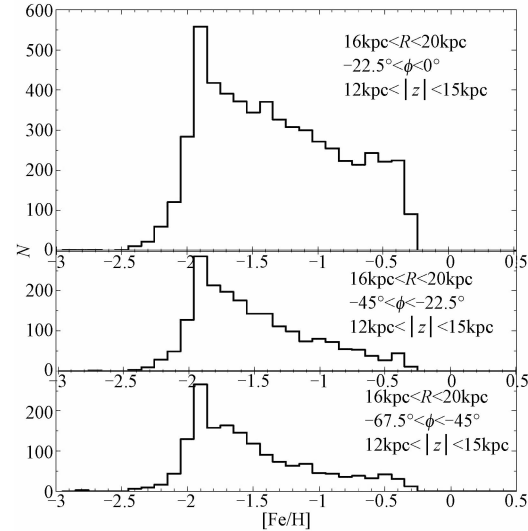
图 4 为用上文所得到的测光金属丰度估计研究人马座星流处恒星及其附近区域内恒星的金属丰度分布的直方图. 上面子图对应人马座区域的星. 中间和下面 2 个子图对应的是附近区域内的恒星. 很明显人马座星流呈现比较宽的金属丰度分布, 并且在 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.5$ 处比邻近区域多出很多星. 另外, 人马座星流的邻近分别旋转 22.5° 和 45° 的区域包含了大致相同数量的 F/G 型主序星, 这也表明临近区域只含有极少量的人



上面的子图对应人马座星流区域的星. 中间和下面 2 幅子图对应人马座星流附近区域的星.

图 3 不同空间区域内在星等区间 $20.5 < g < 21$ 内 F/G 型 ($0.2 < g-r < 0.4$) 主序星的颜色星等图

Fig. 3 Color-magnitude diagrams of stars in different space volumes (the stars used are F/G ($0.2 < g-r < 0.4$) main-sequence stars and in the magnitude interval of $20.5 < g < 21$)



上面直方图对应人马座星流区域的星. 中间和下面的直方图对应人马座星流附近区域的星.

图 4 不同空间区域且在星等区间 $20.5 < g < 21$ 内 F/G 型 ($0.2 < g-r < 0.4$) 主序星的金属丰度分布图

Fig. 4 Distributions of the metallicity of stars in different space volumes (the stars used are F/G ($0.2 < g-r < 0.4$) main-sequence stars and in the magnitude interval of $20.5 < g < 21$)

马座星流的恒星, 其中恒星的金属丰度分布可以代表晕的背景星的分布. 因此, 人马座星流处恒星和背景晕星相比有偏富的金属丰度分布.

5 总结

基于 SDSS g, r 和 SCUSS u 测光数据, 我们通过 32 542 颗 F/G 型主序星的光谱, 从 $u-g$ 和 $g-r$ 色指数中进行测光金属丰度定标. 这些用于定标的恒星在南银冠覆盖面积将近 3 700 平方度. 定标过程中金属丰度方均根误差随着 g 星等增加而增加, 从 $g < 17$ 时的 0.014 dex 到 $g = 18.5$ 时的 0.070 dex, $g = 20.5$ 时的 0.379 dex, $g = 21$ 时的 0.445 dex 和 $g = 21.3$ 时的 0.750 dex. 所以, 我们将测光金属丰度估计式的应用范围限制在 $g < 21$ 内. 我们选择南银冠人马座星流及其临近区域来研究所在其中恒星的金属丰度分布. 我们发现大约在以银心为中心的柱坐标 $R \sim 19$ kpc, $|Z| \sim 14$ kpc 处的人马座星流呈现出比背景晕星偏富的金属丰度分布.

参考文献

[1] Searle L, Zinn R. Compositions of halo cluster and the formation of the galactic halo[J]. ApJ, 1978, 225: 357-379.

[2] Ivezić Ž, Sesar B, Jurić M, et al. The Milky May tomography with SDSS II stellar metallicity[J]. ApJ, 2008, 684: 287-325.

[3] Jia Y, Du C, Wu Z, et al. Estimation of absolute magnitude-dependent Galactic model parameters in intermediate latitude with SDSS and SCUSS[J]. MNRAS, 2014, 441: 503-512.

[4] Schwarzschild M, Searle L, Howard R. On the colors of subdwarfs[J]. ApJ, 1955, 122: 353-356.

[5] Ibata R A, Gilmore G, Irwin, M J, et al. A dwarf satellite galaxy[J]. Nature, 1994, 370: 194-196.

[6] Newberg H, Yanny B, Rocko C, et al. The ghost of Sagittarius and lumps in the halo of the milky may[J]. ApJ, 2002, 569: 245-274.

[7] Jurić M, Ivezić Ž, Brooks A, et al. The Milky May tomography with SDSS I stellar number density distribution[J]. ApJ, 2008, 673: 864-914.

[8] Bond N A, Ivezić Ž, Sesar B, et al. The Milky May tomography with SDSS III stellar kinematics[J]. ApJ, 2010, 716: 1-29.

[9] Zou H, Wu X B, et al. Capability of quasar selection by combining SCUSS and SDSS observations[J]. PASP, 2015, 127: 94-101.

[10] Beers T C, Lee Y, Sivarani T, et al. The SDSS-I value-added catalog of stellar parameters and the SEGUE pipeline[J]. Mem, Soc Astro Italiana, 2006, 77: 1 171.