

文章编号:2095-0411(2017)06-0092-05

## 球状星团 M4 的动力学质量

高新华,徐守坤,顾晓清,石 林,李 宁

(常州大学 信息科学与工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:** M4(NGC 6121)是离太阳最近的一个球状星团,是研究各种天体物理问题的重要实验室。质量是球状星团的重要物理量,对于研究星团的动力学演化历史有重要意义。由于球状星团中有大量不可见物质(白矮星、中子星、黑洞),给质量的估算带来一定麻烦,本文基于 M4 中 851 颗单星成员的高精度视向速度数据分析了星团的内禀速度弥散度,再根据位力定理计算出 M4 的动力学质量为  $8.59 \times 10^4 M_{\odot}$ ,文中的动力学质量已经包含了不可见物质的质量。

**关键词:** 球状星团; M4; 视向速度; 位力定理

中图分类号: P 154

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2017.06.013

## Dynamical Mass of the Globular Cluster M4

GAO Xinhua, XU Shoukun, GU Xiaoqing, SHI Lin, LI Ning

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** M4 (NGC 6121) is the nearest globular cluster, which is an important laboratory for studying many problems in astrophysics. Mass is an important parameter for globular clusters, which can be used to analyze the dynamical evolution of globular clusters. The mass estimation of a globular cluster usually suffers from a large amount of invisible matters such as white dwarfs, neutron stars and black holes. This paper presents an estimate for the dynamical mass of M4 based on high-precision radial velocities and the virial theorem. The cluster dynamical mass is determined to be  $8.59 \times 10^4 M_{\odot}$  based on 851 single stars, which has included the mass of invisible matters.

**Key words:** globular cluster; M4; radial velocity; the virial theorem

球状星团是形成于银河系早期的最年老的恒星系统,长期的动力学演化导致球状星团的外观呈球形,一个球状星团通常包含  $10^4 \sim 10^6$  颗恒星,典型直径约 50 pc (1 pc  $\approx$  3.26 光年),核心区的质量密度可达  $10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ <sup>[1]</sup>。在核心区这种密集环境下的天体可能发生密近物理碰撞,甚至会形成能够辐射引力波的黑洞-中子星双星系统<sup>[2]</sup>。因而,球状星团一直被看成是研究各种天体物理问题的重要实验室。质

收稿日期:2017-03-21。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11403004)。

作者简介:高新华(1979—),男,江苏常州人,博士,讲师,主要从事天体物理学研究。E-mail: xhgao@cczu.edu.cn

量是球状星团的一个重要物理量,可用于分析球状星团在银河系引力场中的动力学演化历史,还可用于分析球状星团中的低光度的小质量恒星甚至是不发光的暗物质<sup>[3]</sup>。由于球状星团的典型年龄是100亿年<sup>[1]</sup>,原先的大量恒星已经演化离开了主序星阶段,因而球状星团中包含了大量难以被光学望远镜观测到的暗弱天体如矮星、白矮星、中子星,甚至是不发光的黑洞和暗物质,这给球状星团的质量估算带来明显地误差。

在已知的约150个银河系球状星团中M4 (NGC 6121)是距离太阳最近的一个<sup>[4]</sup>,因而也是被研究得最透彻的球状星团之一(如图1所示)。球状星团可看作是由恒星组成的近似动力学平衡状态的自引力系统,原因是恒星间长期的相互作用导致了能量均分,达到动力学弛豫状态。因而星团整体的动能与势能满足非常简单的关系(位力关系),这给质量的估算带来了极大地方便。本文将使用高精度视向速度数据计算M4的动力学质量,由于动力学质量已经包含了不可见物质的质量,因而可以更准确地描述M4的质量。

## 1 研究方法

球状星团中的恒星的无规则随机运动与万有引力相抗衡,从而使得星团能保持长期的动力学平衡而不向中心坍塌或向外膨胀。动力学平衡状态下的星团的动能和引力势能满足由位力定理描述的如下关系

$$2E_k + E_p = 0 \quad (1)$$

式中: $E_k$ 是星团的动能,与恒星的随机运动速度(速度弥散度)有关; $E_p$ 是星团的引力势能,与星团质量分布有关。若假设星团是球体,根据公式(1)可进一步导出质量为 $M$ ,半径为 $R$ 的星团的动能与引力势能之间的关系<sup>[5]</sup>

$$\sigma^2 = \eta GM/R \quad (2)$$

式中: $\sigma^2$ 是恒星的空间三维速度弥散度,即恒星在三维空间的随机运动速度的大小; $\eta$ 是与质量分布相关的常数; $G$ 是万有引力常数。公式(2)清楚地表明球状星团质量越大、越致密( $R$ 越小),则恒星的随机运动速度越大。

但对于球状星团而言,大多数情况是只能通过光谱分析获得恒星的一维视向速度,若假设恒星的速度满足各向同性和能量均分,则由式(2)可得到计算质量的表达式<sup>[6]</sup>

$$M = 10 \frac{\sigma_r^2 R_{hp}}{G} \quad (3)$$

式中: $\sigma_r^2$ 是视向速度弥散度, $R_{hp}$ 是包含星团一半质量处的投影半径。通常把根据式(3)计算得到的质量称为动力学质量或位力质量,它显然已经包含了各种天体的总质量,因为暗弱的天体或不发光的天体一样有引力效应。

受观测条件的制约,恒星的视向速度的观测精度要远高于切向速度(自行)的精度,利用视向速度数据结合式(3)来计算星团的质量是可行的。假设由 $N$ 颗恒星组成的球状星团,恒星的视向速度分布为高斯分布,第 $i$ 颗恒星的视向速度及平均观测误差分别为 $V_i$ 和 $\langle V_{ei} \rangle$ ,则星团的视向速度弥散度 $\sigma_r^2$ 可由如下公式得出:

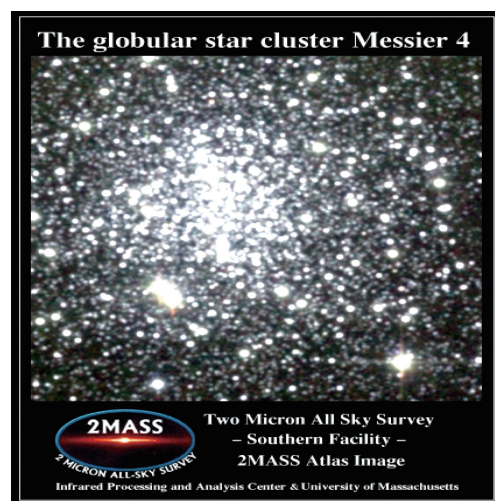


图1 M4的2MASS近红外图片 (<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/m4atlas.jpg>)

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2}{N-1} \quad (4)$$

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \times w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5)$$

$$w_i = \frac{1}{\langle V_{ei} \rangle^2} \quad (6)$$

式中:  $V_m$  是星团的加权平均视向速度;  $w_i$  是第  $i$  颗恒星的权重, 由对应的观测误差  $\langle V_{ei} \rangle$  导出。理论上根据式(3)即可计算出星团的动力学质量。

## 2 数据分析

Malavolta 等<sup>[7]</sup>获得了 M4 所在天区 2 771 颗目标恒星的 7 250 条高质量光谱, 并根据这些光谱数据得到了 2 771 颗恒星的高精度视向速度, 绝大部分恒星都被观测了 2 次以上, 约 40% 的恒星被观测 3 次以上。必须指明的是双星系统的视向速度是可能有明显变化的, 这会影响星团速度弥散度  $\sigma_{r2}$  的准确计算。为了消除这些双星的影响, 只选取观测次数为 3 次或以上的恒星作为进一步分析的样本, 图 2 给出了这 933 颗恒星样本的视向速度以及平均观测误差的概率密度分布图。图 2 中视向速度  $v$  处的概率密度  $P(v)$  可由高斯核函数获得<sup>[8]</sup>, 具体为

$$p(v) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(v-v_i)^2}{2h^2}\right\} \quad (7)$$

式中:  $N$  为恒星样本数量 ( $N=933$ );  $v_i$  是第  $i$  颗恒星样本的视向速度;  $h$  为核函数窗体宽度 ( $h=1.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )。这里使用核密度估计而不用直方图, 是为了避免直方图的箱(Bin)尺寸选取不当对统计的影响。

由于双星可能会表现出明显的视向速度变化, Malavolta 等<sup>[7]</sup>判断双星的标准是视向速度的观测误差  $V_e$  与平均误差  $\langle V_e \rangle$  之比大于 3。本文使用这个判据剔除了 933 颗样本恒星中的双星候选体 63 颗, 得到 870 颗单星。从图 2 可以看出, 星团成员星的视向速度几乎都集中分布在  $55 \sim 90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 从 870 颗单星中筛选出这一速度范围内的 851 颗星团成员。图 3 给出了参与星团质量计算的 851 单星成员的视向速度和平均观测误差的概率密度分布, 从图 3 中可以看出, 视向速度具有较高的观测精度, 观测误差小于  $0.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

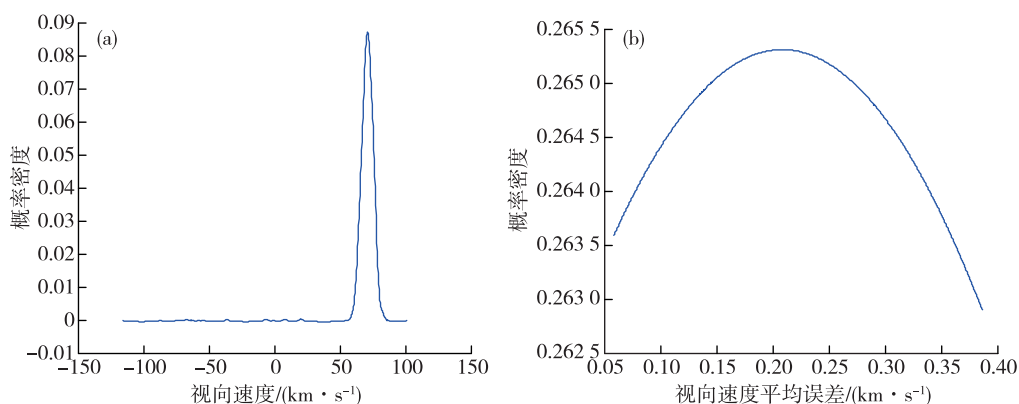


图 2 933 颗恒星样本的视向速度和平均误差概率密度分布

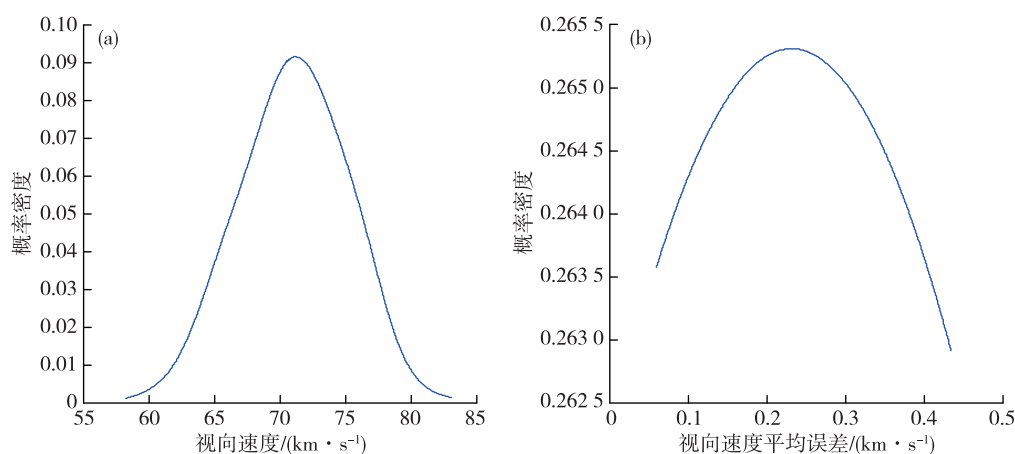


图 3 851 颗星团单星的视向速度和平均误差概率密度分布

根据式(4)~式(6)可计算出 851 颗单星成员的视向速度弥散度  $\sigma_r^2 = 16.14 \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,但其中包含的观测误差必须扣除后才能得到内禀速度弥散度。用式(8)<sup>[9]</sup>计算内禀速度弥散度:

$$\sigma_{r0}^2 = \sigma_r^2 - \frac{\sum_{i=1}^N \langle V_{ei} \rangle^2}{N} \quad (8)$$

由式(8)计算出  $\sigma_{r0}^2 = 16.07 \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。根据文献中给出 M4 的距离为  $1.8 \text{ kpc}$ <sup>[10]</sup>和半质量半径  $4.33$  角分<sup>[4]</sup>,则利用式(3)可以计算得到 M4 的动力学质量为  $1.709 \times 10^{35} \text{ kg}$ ,或表示成太阳质量为  $8.59 \times 10^4 M_\odot$ 。本文的结果与 Mandushev 等<sup>[4]</sup>基于其他方法的计算结果大致符合。

Heggie 等<sup>[11]</sup>的数值模拟结果表明,M4 当前的总质量中约有 50%是由白矮星或中子星贡献,虽然白矮星和中子星很难被观测到,但它们的质量可以通过引力效应以及其他可见恒星的随机运动而体现出来,显然本文得到的动力学质量中已经包含了这一部分质量。Heggie 等<sup>[11]</sup>在数值模拟中得到的 M4 的质量是  $4.6 \times 10^4 M_\odot$ ,与本文的结果也比较接近。作者在先前的工作中也利用位力定理计算过球状星团 NGC 1851,NGC 1904,NGC 7099 和 NGC 5964 的动力学质量<sup>[12]</sup>,但所用数据的精度和样本数量均比不上本文中的 M4。

### 3 结 论

球状星团是研究各种天体物理问题的重要实验室,质量是球状星团的重要物理量,本文计算了离太阳最近的一个球状星团 M4 的动力学质量。基于 M4 中 851 颗成员星的高精度视向速度数据,利用位力定理计算出它的动力学质量为  $8.59 \times 10^4 M_\odot$ 。根据先前 Mandushev 等<sup>[4]</sup>的计算结果,M4 的质量在银河系的 150 个球状星团中处于中间位置,本文的计算结果也证实了这一点。本工作表明数量较多的高精度视向速度数据对球状星团的质量估计很有帮助。另外需要指出的是,根据式(3)计算出的 M4 动力学质量中的不确定部分主要来源于星团距离的不确定性,因为式(3)中的  $R_{\text{hp}}$ 要根据星团距离计算得到。值得一提的是,M4 的距离在 150 个银河系球状星团中属于比较可靠的,主要原因是它离太阳最近,能够被观测到的恒星也更多。

### 参考文献:

[1]詹姆斯·宾尼,斯科特·特里梅因,宾尼,等.星系动力学[M].上海:上海科学技术出版社,2005:15.

- [2]CLAUSEN D, SIGURDSSON S, CHERNOFF D F. Black hole-neutron star mergers in globular clusters[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 428(4):3618-3629.
- [3]MANDUSHEV G, STANEVA A, SPASOVA N. Dynamical masses for galactic globular clusters[J]. Astronomy & Astrophysics, 1991, 252:94-99.
- [4]HARRIS W E. A catalog of parameters for globular clusters in the milky way[J]. Astronomical Journal, 1996, 112(4):1487-1488.
- [5]LARSEN S S, BRODIE J P, SARAJEDINI A, et al. Structural parameters and dynamical masses for globular clusters in M33[J]. Astronomical Journal, 2002, 124(5):2615-2624.
- [6]GELLER A M, LATHAM D W, MATHIEU R D. Stellar radial velocities in the old open cluster M67 (NGC 2682) I. Memberships, Binaries, and Kinematics[J]. Astronomical Journal, 2015, 150(3):97.
- [7]MALAVOLTA L, PIOTTO G, BEDIN L R, et al. The M4 core project with HST - IV internal kinematics from accurate radial velocities of 2771 cluster members[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 454(3): 2621-2635.
- [8]张学工. 模式识别[M]. 3 版.北京:清华大学出版社, 2010:56-57.
- [9]MCNAMARA B J, HARRISON T E, MCARTHUR B E, et al. The internal proper motions of stars in the open cluster M35[J]. Astronomical Journal, 2011, 142(2):53.
- [10]HENDRICKS B, STETSON P B, VANDENBERG D A, et al. A new reddening law for M4[J]. Astronomical Journal, 2012, 144(1):2966-2976.
- [11]HEGGIE D C, GIERSZ M. Monte carlo simulations of star clusters-V the globular cluster M4[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, 389(4):1858-1870.
- [12]高新华,徐守坤. 利用位力定理估算球状星团的质量[J]. 大学物理, 2017, 36(1): 33-36.

(责任编辑:李艳)

\*\*\*\*\*

【上接第 68 页】

- [10]KIM S, SEO J, CHA J. Chemical retreating for gel-typed agrogel and insulation performance of cement containing aerogel[J]. Construction and Building Materials, 2013(40): 501-505.
- [11]GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogel-incorporated concrete; an experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52(2): 130-136.
- [12]NG S, JELLE B P, ZHEN Y P, et al. Effect of storage and curing conditions at elevated temperatures on aerogel-incorporated mortar samples based on UHPC recipe[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 640-649.
- [13]NG S, SANDBERG L I C, JELLE B P. Insulating and strength properties of an aerogel-incorporated mortar based on UHPC formulations[J]. Key Engineering Materials, 2015, 629/630: 43-48.
- [14]郭金涛. 硅气凝胶/玻化微珠复合保温砂浆研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [15]范树景,王培铭. 聚丙烯纤维增强玻化微珠保温砂浆的干缩开裂性能[J]. 建筑材料学报, 2017(1):118-123.
- [16]孙铭. 面向 PC 板生产线的混凝土搅拌特性分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2014.
- [17]朋改非,杨娟,石云兴,等. 超高性能混凝土抗高温爆裂性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2):229-233, 238.
- [18]徐海珣. 硅基复合气凝胶的制备及其应用基础研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [19]朱合华,闫治国,梁利,等. 不同火灾升温曲线下隧道内温度场分布规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012(1): 1595-1600.

(责任编辑:李艳)