

УДК 524.62-32

С. П. Рыбка

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

Выделение гигантов красной горизонтальной ветви по приведенным собственным движениям

Обосновывается возможность отделения гигантов красной горизонтальной ветви от звезд фона по приведенным собственным движениям. Предложенный метод разработан на основе астрометрических данных HIPPARCOS и ближней ИК-фотометрии 2MASS, взятых из каталога UCAC2 BSS. В результате анализа распределения приведенных собственных движений методом максимального правдоподобия отобрано 7029 звезд HIPPARCOS — вероятных кандидатов подсистемы гигантов красной горизонтальной ветви. Показано, что около 90 % выделенных звезд могут быть гигантами такого типа.

ВИДІЛЕННЯ ГІГАНТІВ ЧЕРВОНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВІДГАЛУЖЕННЯ ЗА ПРИВЕДЕНИМИ ВЛАСНИМИ РУХАМИ, Рыбка С. П. — Обґрунтовано можливість відокремлення гігантів червоного горизонтального відгалуження від зір фону за приведеними власними рухами. Запропонований метод розроблено на основі астрометричних даних HIPPARCOS та ближньої ІЧ-фотометрії 2MASS, взятих із каталогу UCAC2 BSS. В результаті аналізу розподілу приведених власних рухів методом максимальної вірогідності відібрано 7029 зір HIPPARCOS, ймовірних кандидатів до підсистеми гігантів червоного горизонтального відгалуження. Показано, що близько 90 % виділених кандидатів можуть бути гігантами такого типу.

THE SEPARATION OF RED HORIZONTAL BRANCH GIANTS FROM REDUCED PROPER MOTIONS, by Rybka S. P. — The possibility to use reduced proper motions for distinguishing red horizontal branch giants from foreground stars is substantiated. Our approach is developed on the basis of HIPPARCOS astrometric data and near-infrared 2MASS photometric data taken from the UCAC2 BSS catalogue. The application of maximum-likelihood technique to analyse the distribution of reduced proper motions is resulted in a sample of 7029 HIPPARCOS stars assigned as probable candidates to red clump. It is shown that about 90 % of the sample stars may be actual red horizontal branch giants.

ВВЕДЕНИЕ

Накопленный за последнее десятилетие обширный наблюдательный материал (каталоги HIPPARCOS, «Tycho-2», 2MASS и др.) позволяет пересмотреть

и уточнить кинематику Местной системы звезд. Более того, уже достигнута достаточная точность астрометрических и фотометрических данных, чтобы изучить особенности галактического вращения отдельных ее подсистем. Так, согласно современным представлениям Местная система является довольно сложным структурным образованием, а ее составляющие обладают аномалиями движения. Следовательно, возникает задача отбора звезд, принадлежащих отдельным подсистемам. Для этого необходимо воспользоваться их отличительными свойствами. Звезды-гиганты на стадии красной горизонтальной ветви (КГВ), так называемые *red clump giants*, имеют практически постоянные абсолютные величины в любой фотометрической полосе, и их довольно много в окрестности Солнца. При этом дисперсия абсолютных величин обусловлена главным образом ошибками определения, и ее нижний предел составляет $0.2\text{--}0.3^m$. Согласно теории строения и эволюции звезд гиганты КГВ находятся на стадии горения гелия в ядре, переместившись с ветви гигантов на горизонтальную ветвь. Они уверенно обнаруживаются на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, образуя очень выразительную концентрацию точек вблизи ветви гигантов со стороны высоких температур. В настоящее время при построении диаграмм «цвет — абсолютная величина» для гигантов КГВ часто применяется ближний ИК-диапазон излучения, что вполне естественно для холодных звезд. Это дает целый ряд преимуществ, среди которых основными являются меньшая дисперсия абсолютных величин и значительное ослабление влияния межзвездного поглощения света.

Кроме того, около 1000 местных гигантов КГВ имеют тригонометрические параллаксы, измеренные спутником HIPPARCOS с погрешностью менее 10 %, что позволило калибровать их абсолютную величину в ближнем ИК-диапазоне. В данной работе для отбора звезд КГВ разработан и проверен метод, основанный на анализе приведенных собственных движений, которые являются статистическим аналогом абсолютной величины. Он включает построение инфракрасной диаграммы Герцшпрунга—Рессела, а затем определение параметров распределения приведенных собственных движений звезд КГВ и фона методом максимального правдоподобия. Применяя предложенный метод, можно сформировать большую по объему выборку гигантов красной горизонтальной ветви, чтобы в дальнейшем получить уверенные значения их кинематических характеристик.

ВЫБОРКА

В качестве исходного материала использован каталог UCAC2 BSS [5], созданный на Морской обсерватории в США как дополнение к UCAC2. Он содержит астрометрические данные каталогов «Tycho-2», HIPPARCOS и *JK*-фотометрию из 2MASS для 430000 ярких звезд. Большинство звезд UCAC2 BSS находится в зоне склонения севернее $+40^\circ$, так как основной каталог UCAC2 для этой зоны еще не составлен. Однако звезды HIPPARCOS, включенные в дополнение, распределены почти равномерно на всем небе. Они и составили основу для данного исследования. Кроме того, при формировании выборки звезд учитывались следующие критерии отбора:

- относительная погрешность собственных движений менее 25 %;
- одиночные стационарные звезды (использованы признаки переменности и кратности звезд, приведенные в каталоге HIPPARCOS);
- показатели цвета $B - V$ в интервале от 0.80 до 1.20^m , поскольку здесь доминируют гиганты КГВ;
- *JK*-фотометрия 2MASS хорошего качества (точность 0.03^m).

Полученная выборка полна до звездной величины $K = 6.20^m$, что было определено путем подсчета количества звезд в зависимости от K по прекращению роста кривой. Во избежание эффекта селекции далее использовалась лишь полная выборка звезд. Она содержит около 10 000 звезд с собственными движениями и JK -величинами, а ее третья часть имеет и тригонометрические параллаксы, измеренные с относительными ошибками менее 25 %. Вычисленные для последней подвыборки абсолютные величины применялись ниже для проверки результатов выделения гигантов КГВ по приведенным собственным движениям.

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА—РЕССЕЛА

Чтобы найти предварительную локализацию гигантов КГВ на инфракрасной диаграмме Герцшпрунга—Рессела, для подвыборки звезд с параллаксами, точность которых превышает 25 %, были построены два вида диаграмм: $J - K$, H_K и $J - K$, M_K . Приведенные собственные движения H_K в полосе K и абсолютные величины M_K в этой же полосе вычислялись по формулам

$$H_K = K + 5 + 5 \lg \mu, \quad M_K = K + 5 + 5 \lg \pi,$$

где μ — собственное движение, π — тригонометрический параллакс.

Отметим, что в этих формулах нет члена, учитывающего поглощение света межзвездной средой, поскольку его значение в ближнем ИК-диапазоне для рассматриваемой выборки звезд мало. Действительно, по данным Мендеса и ван Алтены [4] значение поглощения в визуальном диапазоне составляет $A_V \leq 0.2^m$ на среднем расстоянии исследуемых звезд (~ 200 пк) даже для низких галактических широт, а в соответствии с законом поглощения, установленным Карделли и др. [2], $A_K = 0.11A_V$ и $A_J = 0.28A_V$.

Просмотр построенных диаграмм показал, что точки максимально концентрируются в интервале показателей цвета $J - K$ от 0.50^m до 0.80^m при $H_K < 6.20^m$. Это и определило значения соответствующих критериев для предварительного отбора. Как результат, число исследуемых объектов сократилось до 9191, куда входят 2578 звезд с параллаксами, относительная погрешность которых превышает 25 %. Было также очевидно, что не все эти звезды являются гигантами КГВ.

МЕТОД ОТБОРА

С целью более тщательного отделения гигантов КГВ от звезд фона проводился анализ распределения их приведенных собственных движений. Анализ основывался на предположении, что функция распределения H_K подчиняется нормальному закону и имеет два максимума, которые соответствуют указанным звездным компонентам с различными светимостями. Кроме того, гиганты КГВ с более высокими светимостями, а следовательно, меньшими значениями приведенных собственных движений, должны составлять большинство среди всех звезд. То есть функция общего распределения H_K была представлена суммой двух гауссовых функций с различными параметрами:

$$F(H_K) = F_1(H_K) + F_2(H_K).$$

Здесь индекс «1» относится к гигантам КГВ, индекс «2» — к звездам фона, а функции $F_1(H_K)$ и $F_2(H_K)$ имеют вид

$$F_1(H_K) = [N_1 / (\sigma_1 \sqrt{2\pi})] \exp[-0.5(H_K - H_{01})^2 / \sigma_1^2],$$

$$F_2(H_K) = [N_2 / (\sigma_2 \sqrt{2\pi})] \exp[-0.5(H_K - H_{02})^2 / \sigma_2^2],$$

где N_1 , N_2 — количество звезд КГВ и фона, их общее количество равно $N = N_1 + N_2$, H_{01} , H_{02} — средние значения, σ_1^2 , σ_2^2 — дисперсии приведенных собственных движений для первой и второй составляющих соответственно.

Чтобы определить параметры, которые наилучшим образом представляют функции $F_1(H_K)$ и $F_2(H_K)$, применялся метод максимального правдоподобия. Необходимую для этого систему уравнений можно получить, если приравнять нулю логарифмическую производную функции правдоподобия по искомым параметрам. Такая процедура детально изложена во многих работах, посвященных отбору членов скоплений. В нашем случае система сводится к пяти уравнениям:

$$\begin{aligned} H_{01} &= \sum q_{1i} H_{Ki} / \sum q_{1i}, \\ H_{02} &= \sum q_{2i} H_{Ki} / \sum q_{2i}, \\ \sigma_1^2 &= \sum q_{1i} (H_{Ki} - H_{01})^2 / \sum q_{1i}, \\ \sigma_2^2 &= \sum q_{2i} (H_{Ki} - H_{02})^2 / \sum q_{2i}, \\ N_1 &= N \sum q_{1i} / (\sum q_{1i} + \sum q_{2i}), \end{aligned}$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} q_{1i} &= F_{1i}(H_K) / F_i(H_K), \\ q_{2i} &= F_{2i}(H_K) / F_i(H_K), \end{aligned}$$

а суммирование ведется по $i = 1, 2, \dots, N$.

Составленная таким образом система нелинейных уравнений решалась методом последовательных приближений, причем начальные значения параметров N_1 , H_{01} , H_{02} , σ_1^2 , σ_2^2 подбирались на основе вида предварительно построенной функции распределения приведенных собственных движений. Как правило, требовалось не более пяти приближений, чтобы получить окончательные значения параметров. После этого оценивалась вероятность принадлежности каждой звезды к КГВ по формуле

$$P = F_1(H_K) / [F_1(H_K) + F_2(H_K)]. \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Применяя изложенную выше методику, были определены значения параметров распределений приведенных собственных движений звезд КГВ и фона. Все необходимые вычисления выполнялись как для основной выборки из 9191 звезды, так и для ее подвыборки из 2578 звезд (см. выше). После определения параметров распределений $F_1(H_K)$ и $F_2(H_K)$ каждая из исследуемых выборок была разделена на две части при помощи вычисленных по формуле (1) вероятностей P . При этом к КГВ отнесены те звезды, для которых $P \geq 0.5$.

Параметры распределений приведенных собственных движений гигантов красной горизонтальной ветви и звезд фона в двух выборках

| N | N_1 | H_{01} | σ_1 | N_2 | H_{02} | σ_2 |
|------|-------|-------------------|--------------|-------|-------------------|--------------|
| 9191 | 7029 | 1.87 ^m | $\pm 1.15^m$ | 2162 | 4.45 ^m | $\pm 0.63^m$ |
| 2578 | 1949 | 1.81 | ± 1.24 | 629 | 4.52 | ± 0.65 |

Примечание: индекс «1» относится к гигантам КГВ, а индекс «2» — к звездам фона.

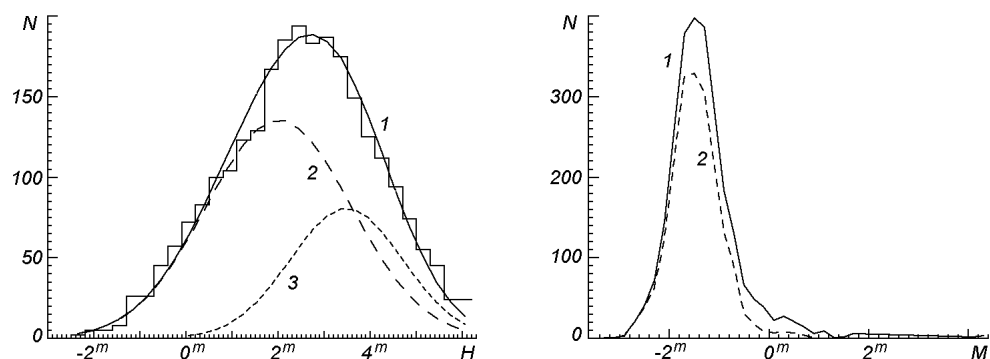


Рис. 1. Распределение приведенных собственных движений в выборке 2578 звезд и аппроксимирующая его нормальная кривая 1. Кривые 2 и 3 — нормальные кривые распределения гигантов красной горизонтальной ветви и звезд фона соответственно

Рис. 2. Распределение абсолютных величин всех 2578 звезд (1) и 1949 вероятных кандидатов КГВ (2) по величине M

В таблице представлены параметры распределений: N_1 , N_2 — количество звезд КГВ и фона, N — их общее количество; H_{01} , H_{02} — средние отклонения, σ_1 , σ_2 — средние квадратичные значения приведенных собственных движений для первой и второй составляющих. Как видно из этой таблицы, значения параметров соответствующих составляющих хорошо согласуются между собой в обеих выборках.

На основании χ^2 -теста (критерий Пирсона) выполнялось сравнение наблюдаемых распределений приведенных собственных движений рассматриваемых выборок звезд с нормальным распределением. Сравнение показало, что оба распределения можно считать нормальными при уровне значимости 0.01. Кроме того, их лучше представлять суммой двух нормальных кривых, чем одной. Например, для подвыборки 2578 звезд в первом случае $\chi^2 = 31.9$, а во втором — $\chi^2 = 38.6$. Таким образом, с большей вероятностью можно принять вывод о дискретности распределения приведенных собственных движений звезд с показателями цвета $J - K$ от 0.50^m до 0.80^m .

На рис. 1 изображена гистограмма распределения H_K с шагом 0.3^m для подвыборки 2578 звезд вместе с аппроксимирующей ее нормальной кривой. Здесь также представлены нормальные кривые, которые характеризуют распределения отдельных составных. Из рисунка видно, что большинство звезд ($\sim 75\%$) исходной выборки составляют гиганты КГВ, и что они в среднем ярче, чем звезды фона. Кроме того, распределения перекрываются при $H_K \approx 3.8^m$, что приводит к неизбежному включению звезд фона в состав выделяемых кандидатов КГВ. Но, как будет показано далее, доля такой примеси незначительна.

Оценка достоверности проведенного разделения находилась на основании анализа распределения абсолютных величин M_K в подвыборке 2578 звезд с параллаксами, определенными с погрешностью менее 25%. На рис. 2 это распределение приведено вместе с распределением выделенных по приведенным собственным движениям 1949 вероятных кандидатов КГВ. Медиана последнего распределения составляет -1.56 ± 0.05^m , и в пределах ошибок согласуется со значением -1.61 ± 0.03^m , полученным Алвесом [1]. Он выполнил калибровку M_K по 238 гигантам КГВ с параллаксами, измеренными спутником HIPPARCOS с очень высокой точностью (10%). Отметим,

что между K -величинами из 2MASS и теми, которые использовал Алвес, имеются систематические различия. Однако по данным [3] они составляют всего 0.03^m и практически не влияют на результаты указанного выше сравнения. Стандартное отклонение абсолютных величин выделенных 1949 звезд — вероятных кандидатов КГВ — равно 0.46^m , что близко к средней ошибке определения M_K : $\sigma_M \approx 2.17\sigma_{\pi}/\pi \approx 0.39^m$.

Таким образом, оба параметра распределения M_K (медиана и стандартное отклонение) для этих звезд вполне соответствуют ожидаемым для гигантов красной горизонтальной ветви. Следовательно, можно считать, что подавляющее большинство (90 %) среди отобранных звезд действительно являются гигантами такого типа. Надо иметь в виду, что при этом теряется примерно 20 % полезной информации (см. рис. 2), т. е. число отобранных звезд занижено. Однако такой недостаток компенсируется значительным увеличением объема выборки, если для отбора вместо абсолютных величин применяются приведенные собственные движения.

Среднее расстояние до 1949 кандидатов КГВ, которое было вычислено по их тригонометрическим параллаксам, составляет 202 пк. Оно хорошо согласуется со средним фотометрическим расстоянием 211 пк, найденным при помощи калибровки Алвеса. Для остальных 629 объектов, отнесенных к звездам фона, мы получили средние значения абсолютных величин (-0.91^m) и расстояний (165 пк). Таким образом этот компонент состоит в основном из более близких звезд, которые по светимости отличаются от гигантов КГВ.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты свидетельствуют о том, что выделение гигантов красной горизонтальной ветви можно проводить методом максимального правдоподобия по приведенным собственным движениям в полосе K . Более 7000 местных звезд такого типа до предельной величины $K = 6.20^m$ были отобраны этим методом из каталога UCAC2 BSS. Мы планируем выполнить аналогичный анализ данных «Tycho-2», чтобы накопить массовый кинематический материал для кандидатов КГВ. По предварительным оценкам полученная выборка будет содержать несколько десятков тысяч звезд, а это имеет определяющее значение для уверенного обнаружения и изучения особенностей их галактического вращения.

1. *Alves D. R.* K-band calibration of the red clump luminosity // *Astrophys. J.*—2000.—539, N 2.—P. 732—741.
2. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *Astrophys. J.*—1989.—345, N 1.—P. 245—246.
3. *Carpenter J. M.* Color transformation for the 2MASS second incremental data release // *Astron. J.*—2001.—121, N 5.—P. 2851—2871.
4. *Mendez R. A., van Alstena W. F.* A new optical reddening model for the Solar neighborhood. Galactic structure through low-latitude starcounts from Guide Star Catalogue // *Astron. and Astrophys.*—1998.—330, N 3.—P. 910—936.
5. *Urban S. E., Zacharias N., Wycoff G. L.* The UCAC2 Bright Star Supplement. — Washington: US Naval Obs., 2004.—(ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/1/294).

Поступила в редакцию 06.10.05