

МГУ им. М. В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра астрофизики и звездной астрономии
Кафедра экспериментальной астрономии

Методическое пособие к задаче специального астрономического практикума для студентов 3 курса физического факультета МГУ, обучающихся по программе «МС Астрономия» (специальность 03.05.01 «Астрономия»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО СОБСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ШАРОВОГО СКОПЛЕНИЯ

Л. Н. Яляшева, Е.В. Глушкова

МОСКВА, 2023

1. ВВЕДЕНИЕ

Собственное движение звезды - это её угловое перемещение за год на небесной сфере. Оно измеряется в $''/\text{год}$ по склонению (μ_δ) и в $s/\text{год}$ по прямому восхождению (μ_α). Как правило, в большинстве каталогов собственные движения и по склонению, и по прямому восхождению приводятся в единицах $10^{-3}''/\text{год}$, причём для перевода величины μ_α в угловые единицы используется коэффициент $15\cos(\delta)$. Если собственное движение звезды определяется относительно какой-нибудь опорной группы звёзд (которые имеют одинаковые движения, например, члены рассеянного скопления, или очень маленькие движения, так что считаются в первом приближении неподвижными), то такое движение называется относительным собственным движением.

Массовое определение собственных движений звезд стало возможным благодаря полету спутнику Hipparcos, результатом работы которого стали вышедшие в 1997 году два каталога: одноименный каталог с более точными данными для 118200 звезд (точность собственных движений порядка $10^{-3}''/\text{год}$) и каталог Tycho, насчитывающий более миллиона звезд. Расширенная версия каталога — Tycho-2 (Hog et al., 2000) — вышла в 2000 году с данными для двух с половиной миллиона звезд. Новым этапом в астрометрии стал проект Gaia. Первый релиз данных Gaia DR1 (GAIA collaboration et al. 2016) увидел свет в 2016 году и улучшил данные по собственным движениям для двух миллионов звезд каталога Tycho-2 (TGAS – Tycho-Gaia Solution). В перечисленных каталогах собственное движение не было определено для звезд, расположенных в полях повышенной плотности, таких как шаровые звездные скопления. Лишь в 2018 году, с выходом второго релиза данных проекта Gaia DR2 (Gaia Collaboration et al., 2018), был получен каталог для более чем 10^9 звезд, включающий данные и для объектов плотных полей. Точность составляла несколько сотых - десятые доли миллисекунд в год. Впоследствии точность была улучшена в Gaia EDR3 (Gaia Collaboration et al., 2021), вышедшем в 2020 году, и в Gaia DR3, опубликованном в июне 2022.

В задаче практикума рассматривается алгоритм нахождения собственного движения звезд по набору их положений (экваatoriальных координат), полученных в разные эпохи. Координаты предлагается взять из различных фотометрических каталогов, полученных в разные эпохи. В последние десятилетия заметно увеличилось число больших обзоров неба, в которых приводятся различные данные о характеристиках огромного числа звёзд. Однако при использовании фотометрических каталогов большинство исследователей извлекает из них только данные о величинах звёзд в различных полосах пропускания. Между тем во всех фотометрических каталогах помимо звёздных величин содержатся экваatoriальные координаты объектов, которые можно использовать для вычисления абсолютных собственных движений звёзд по большому временному интервалу, что особенно важно для двойных систем, которые, например, составляют не менее половины членов звёздных скоплений.

В распоряжении учёных есть средства для работы с большими массивами астрономических данных, такие как интерактивный атлас неба Aladin (Bonnarel et al. 2000), пакеты STILTS (Taylor 2006), TOPCAT (Taylor 2005), C3 (Riccio et al. 2017). Они позволяют проводить парную или даже множественную кросс-идентификацию каталогов, но при регулярной работе не очень удобны в использовании, так как пользователю приходится каждый раз выполнять практически одну и ту же последовательность операций (задавать набор используемых каталогов, условия кросс-идентификации, форматы выходных файлов и т.п.). Для упрощения этой процедуры мы разработали программу Crossmatch (Klinichev et al. 2018), которая осуществляет взаимное отождествление звёзд по произвольному числу каталогов в поле произвольного размера вокруг центра с заданными координатами, и которую отличает простота и гибкость в использовании.

В настоящей задаче предполагается с помощью программы Crossmatch построить таблицу, содержащую суммарные данные по каждому из объектов в заданной площадке неба, а именно в поле шарового скопления. А затем самостоятельно вывести абсолютные собственные движения звезд в поле этого ШЗС по изменению положений объектов в каталогах USNO-B1 (Monet et al. 2003), IPHAS (Barentsen et al. 2014, Drew et al. 2005), VPHAS (Drew et al. 2014), 2MASS (Skrutskie et al. 2006), ALLWISE (Wright et al. 2010), UCAC5 (Zacharias et al. 2017), URAT1 (Zacharias et al. 2015), GAIA (GAIA collaboration et al. 2016), с использованием GAIA DR1 в качестве опорного каталога. После этого по наиболее ярким членам скопления - звездам горизонтальной ветви и красным гигантам, выводится среднее собственное движение скопления.

2. ПРОГРАММА КРОСС-ИДЕНТИФИКАЦИИ CROSSMATCH

Программа Crossmatch написана на языке Java, распространяется в виде jar-дистрибутива и запускается из командной строки. Значительная часть операций над таблицами, описанная в алгоритме Crossmatch, осуществляется с использованием возможностей STILTS (Taylor 2006). STILTS (Starlink Tables Infrastructure Library Tool Set) - это инструмент для работы с таблицами, разработанный Марком Тэйлором из Бристольского университета, прежде всего, для обработки астрономических данных. Программа также распространяется в виде jar-дистрибутива и запускается из командной строки.

Основные этапы работы программы Crossmatch следующие:

1. Программа осуществляет кросс-идентификацию между каталогом APASS (Henden et al. 2015) и опорным каталогом (по умолчанию опорным является каталог IPHAS, так как первоначально программа разрабатывалась для исследования рассеянных скоплений с помощью этого обзора). Кросс-идентификация проводится с помощью команды `tmatch2` из STILTS. Полученная таблица делится на три части:

- table1.xml: объекты, присутствующие и в APASS, и в опорном каталоге,
- table2.xml: объекты, присутствующие только в опорном каталоге,
- table3.xml: объекты, присутствующие только в APASS.

2. С помощью команды `tripe` из STILTS загружаются данные из остальных каталогов. Если какая-нибудь из таблиц оказывается пустой, выдаётся соответствующее сообщение, однако работа программы не прекращается.

На первом и втором этапе все данные загружаются из базы данных Vizier и/или с диска компьютера.

3. С помощью команды `tmatchn` из STILTS осуществляется кросс-идентификация каждой из таблиц, полученных на первом этапе, с таблицами, полученными на втором этапе. Все строки из table1.xml включаются в итоговую таблицу; строки из table2.xml и table3.xml попадают в неё только в том случае, когда им найдено соответствие хотя бы в одной из таблиц, полученных на втором этапе. При кросс-идентификации с несколькими таблицами опорной считается таблица, полученная на первом этапе, при этом в table1.xml опорными считаются координаты из опорного каталога, а не из обзора APASS. В итоге получаются три новые таблицы: table1t.xml, table2f.xml, table3t.xml (в имени второй таблицы стоит буква f, так как она уже не будет подвергаться никаким изменениям до конкатенации ("склеивания")).

4. В таблице table3t.xml происходит трансформация r_{APASS} и i_{APASS} , которые даны в фотометрической системе AB, в систему VEGA по следующим формулам (Varentsen et al. 2014):

$$\begin{aligned} r_{APASS} &= r_{APASS} - 0.121 + 0.032(r_{APASS} - i_{APASS}), \\ i_{APASS} &= i_{APASS} - 0.364 + 0.006(r_{APASS} - i_{APASS}). \end{aligned}$$

Результат записывается в таблицу table3f.xml.

Кроме того, если в качестве опорного каталога был выбран IPHAS, то проводится следующая операция над таблицей table1t.xml: когда значения r_{IPHAS} и i_{IPHAS} оказываются меньше 13^m , они заменяются на трансформированные значения r_{APASS} и i_{APASS} . Если значение $N_{\alpha_{IPHAS}}$ оказывается меньше 13^m , то соответствующая ячейка таблицы опустошается. Эти операции необходимы, так как звёзды, которые в фильтрах r или i ярче 13^m в каталоге IPHAS, перенасыщены в этом каталоге, и в этом случае фотометрические данные из APASS оказываются заметно точнее. Результат записывается в таблицу table1f.xml. Все операции замены значений в ячейках таблицы осуществляются с помощью команды `replacescol` из STILTS.

5. Выполняется последовательная конкатенация таблиц table1f.xml (или table1t.xml, если IPHAS не является опорным каталогом), table2f.xml и

table3f.xml. Затем с помощью команды `tripe` из STILTS итоговый файл переводится в выбранный пользователем формат (ASCII или CSV). Наконец, если опция `magic_value` не была отключена пользователем, осуществляется заполнение пустых ячеек значением 9999.99. После этого происходит удаление временных файлов, и программа завершает работу.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗВЁЗД В ПОЛЕ СКОПЛЕНИЯ

Для определения собственных движений в поле шарового скопления используется таблица, полученная после работы программы Crossmatch. Как правило, поля ШЗС отсутствуют в каталогах IPHAS и VPHAS, поэтому берутся положения звезд в следующих каталогах: GAIA, 2MASS, WISE, URAT1, UCAC5, USNO-B1.0 (отдельно на снимках в каждом из 5 фильтров – B1, B2, R1, R2, I). Сначала выбираются звезды, чьи положения определены в каталоге GAIA и еще не менее, чем в 3 каталогах. Затем производится поиск опорных или "неподвижных" звезд. Для этого координаты звёзд из опорного каталога GAIA проецируются на прямоугольную систему координат (x_0, y_0) . Для перевода экваториальных координат в прямоугольные и наоборот используются следующие формулы:

$$x = \frac{\cos \delta \cdot \sin(\alpha - \bar{\alpha})}{\cos \bar{\delta} \cdot \cos \delta \cdot \cos(\alpha - \bar{\alpha}) + \sin \delta \cdot \sin \bar{\delta}}$$

$$y = \frac{\cos \bar{\delta} \cdot \sin \delta - \cos \delta \cdot \sin \bar{\delta} \cdot \cos(\alpha - \bar{\alpha})}{\sin \bar{\delta} \cdot \sin \delta + \cos \bar{\delta} \cdot \cos \delta \cdot \cos(\alpha - \bar{\alpha})}$$

$$\alpha = \bar{\alpha} + \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{\cos \bar{\delta} - y \cdot \sin \bar{\delta}} \right)$$

$$\delta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \bar{\delta} + y \cdot \cos \bar{\delta}}{\sqrt{(\cos \bar{\delta} - y \cdot \sin \bar{\delta})^2 + x^2}} \right)$$

где $(\bar{\alpha}, \bar{\delta})$ - это координаты центра поля.

Координаты из выбранного каталога также проецируются на прямоугольную систему координат (x, y) , а затем переводятся на опорную плоскость (x', y') . Коэффициенты перевода находят в первом приближении по всем звёздам методом наименьших квадратов по двум системам уравнений:

$$x_0 = a_1x + b_1y + c_1x^2 + d_1xy + e_1y^2 + f_1$$

$$y_0 = a_2x + b_2y + c_2x^2 + d_2xy + e_2y^2 + f_2$$

Таким образом вычисляются (x',y') – прямоугольные координаты выбранного каталога в системе прямоугольных координат каталога GAIA. После этого по всем звёздам находится распределение разностей (x_0-x') и (y_0-y') , которое аппроксимируется нормальным распределением. Объекты, оказывающиеся за пределами 3σ , где σ – дисперсия распределения, исключаются. К оставшимся объектам снова применяется процедура МНК, и определяются новые координаты (x',y') . Эта процедура повторяется четыре раза. Работая таким образом со всеми каталогами, выделяем набор звёзд, оставшихся внутри 3σ -интервала в каждом из каталогов. Эти звёзды в первом приближении считаются "неподвижными".

Затем все прямоугольные координаты переводятся обратно в экваториальные. Относительные собственные движения находятся с помощью весового МНК (в качестве веса каталога используется значение $1/\sigma^2$), причем координаты из каталога GAIA считаются точно известными.

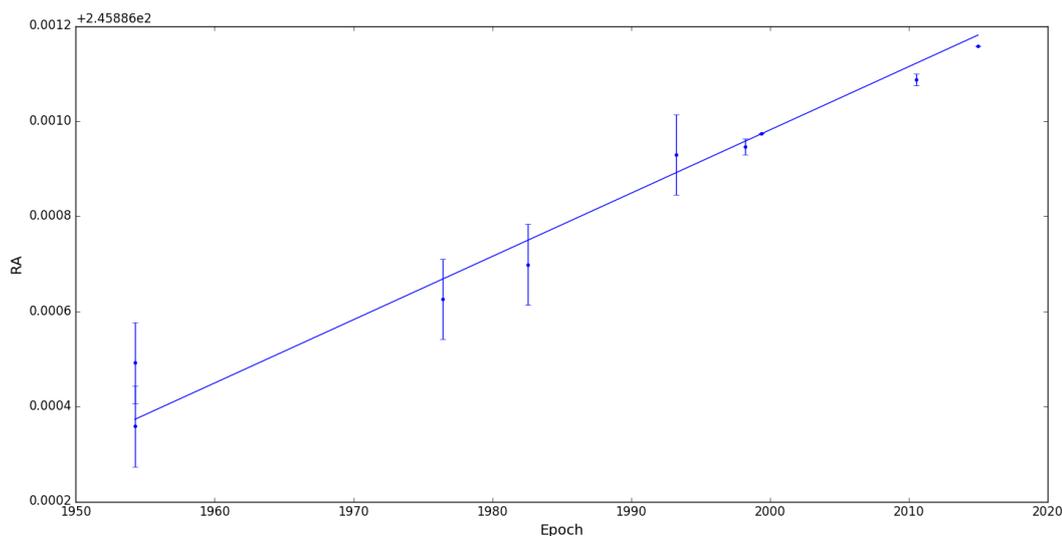


Рис.1а. Изменение со временем прямого восхождения звезды в поле М4

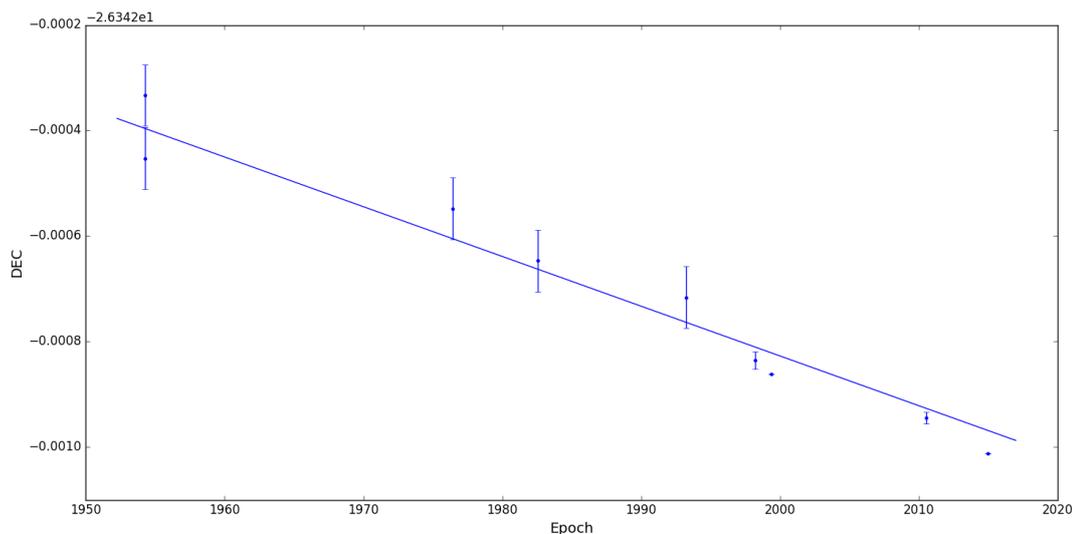


Рис. 16. Изменение со временем склонения звезды в поле M4

На Рис.1 (а,б) приведены изменения координат со временем для одной из звёзд в поле шарового скопления M4 и её собственное движение по каждой из координат, которое равно тангенсу угла наклона прямой, проведённой с помощью весового МНК ($\mu_\alpha = 24.59 \text{ mas}/''$, $\mu_\delta = -26.34 \text{ mas}/''$). Ниже указаны столбцы (согласно файлу, полученному программой Crossmatch) и эпохи, используемые для вычисления собственных движений. В некоторых случаях требуются дополнительные вычисления.

GAIA

Координаты: столбцы RA_ICRS_GAIA, DE_ICRS_GAIA

Эпоха: 2015.0

URAT1

Координаты: столбцы RAJ2000_URAT1, DEJ2000_URAT1

Эпоха: столбец Epoch_URAT1

WISE

Координаты: столбцы RA_pm_ALLWISE, DE_pm_ALLWISE

Эпоха: 2010.5589

2MASS

Координаты: столбцы RAJ2000_2MASS, DEJ2000_2MASS

Эпоха: $2000.0 + (\text{JD_2MASS} - 2451545.0) / 365.25$

UCAC5

Координаты: столбцы RAJ2000_UCAC5, DEJ2000_UCAC5

Эпоха: столбец Epoch_UCAC5

USNO-B1.0

Координаты: координаты RAJ2000_USNOB1 и DEJ2000_USNOB1, приведены на эпоху 2000.0. Для приведения на эпоху пластинки следует сдвинуть на эффект собственного движения, используя столбцы собственного движения pmRA_USNOB1 и pmDE_USNOB1 (обратите внимание, что они приведены в $10^{-3} \text{ ''}/\text{год}$) и прибавить соответственно B1xi_USNOB1 и B1eta_USNOB1 (приведены в $''$) для первой голубой

пластинки, $R1xi_USNOB1$ и $R1eta_USNOB1$ соответственно для первой красной пластинки и т.д. При этом $B1xi_USNOB1$ прибавляется к координатам по прямому восхождению как $B1xi_USNOB1 / 3600 / \cos(DEC)$, а $B1eta_USNOB1$ прибавляется к координатам по склонению как $B1eta_USNOB1 / 3600$. Аналогично для других пластинок.

Эпоха: эпохи пластинок USNO-B1.0 определяются по комбинации обзор/поле (например, столбец $B1S_USNOB1$ и $B1f_USNOB1$ для первой голубой пластинки, $R1S_USNOB1$ и $R1f_USNOB1$ для первой красной пластинки и т.д.) в соответствии с файлом `surv.dat` (в нем обзору соответствует первый столбец, полю – второй, а эпохе – третий).

Во втором приближении в качестве опорной системы координат для каждого каталога определяются координаты на эпоху каталога с учетом найденного собственного движения и координат GAIA – т.е. из координат GAIA вычитается собственное движение, помноженное на разность эпох. Затем, применяя вышеописанную процедуру, снова находятся "неподвижные" звезды и относительные собственные движения исследуемых звезд. Как правило, достаточно выполнить 3-4 итерации.

После вычисления относительных собственных движений звезд в поле ШЗС проводится их "абсолютизация" с помощью собственных движений из каталога UCAC5, который приведен в систему GAIA. Поправка определяется как средневзвешенная разность между полученными относительными собственными движениями и абсолютными движениями из UCAC5. Вес для каждой звезды берётся как величина, обратная сумме квадратов погрешностей относительного и абсолютного движения.

4. ВЫДЕЛЕНИЕ ЧЛЕНОВ СКОПЛЕНИЯ ПО ДИАГРАММЕ ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА

Члены скопления выделяются с помощью фотометрического критерия. Для этой цели удобно использовать пакет TOPCAT (Taylor 2005). TOPCAT предназначен для работы с астрономическими данными и обладает удобным графическим интерфейсом. Свободно скачивается по ссылке: <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>.

С помощью TOPCAT строится диаграмма «цвет-величина» ($J, J-H$) по данным из каталога 2MASS. Используя опцию *SUBSET* на диаграмме выделяются звезды, лежащие на горизонтальной ветви и/или на ветви красных гигантов (см. Рис. 2).

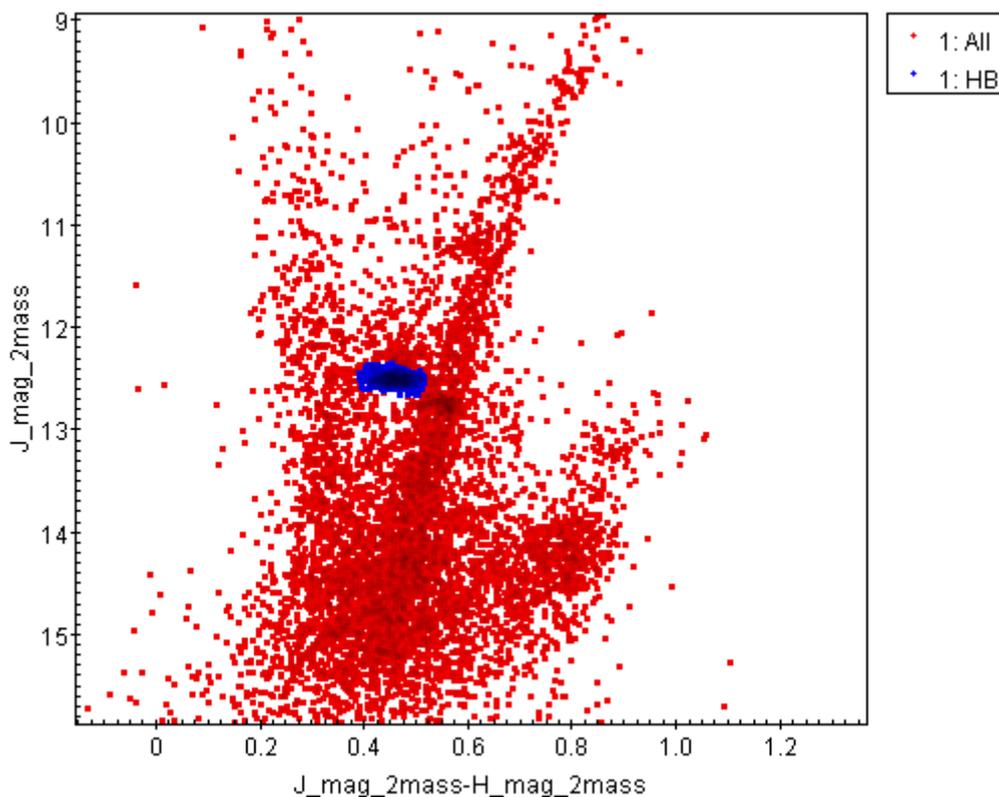


Рис. 2. Диаграмма "цвет-величина" ШЗС 47Тус. Синим цветом выделены звёзды, лежащие на горизонтальной ветви.

По этим звёздам определяется среднее собственное движение скопления. Для этого, в первом приближении, используется опция *Statistics*, которая выдает средние значения собственных движений по каждой из координат. Затем распределение собственных движений звёзд горизонтальной ветви, показанное на Рис. 3 синим цветом, аппроксимируется функцией Гаусса (Рис. 4). В качестве начального значения координаты максимума функции берётся среднее арифметическое.

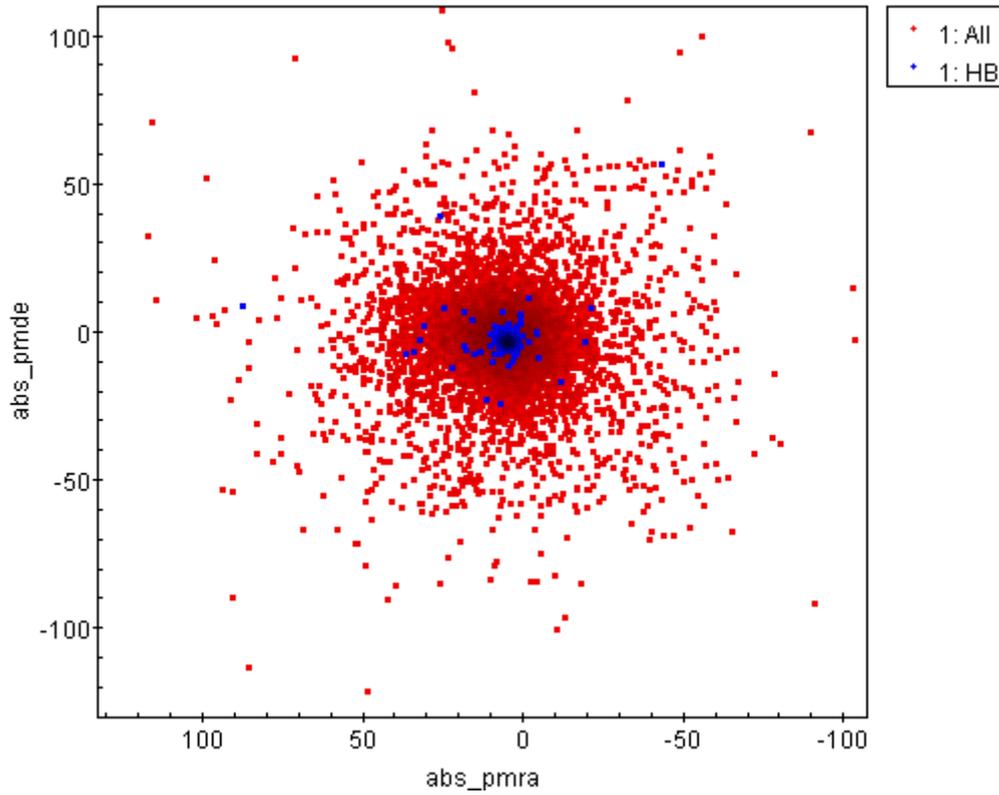


Рис. 3. Распределение абсолютных собственных движений звёзд в поле скопления 47Тус. Синим цветом показаны звёзды горизонтальной ветви.

Ошибки среднего движения вычисляются по формуле $\varepsilon = 2\sigma/n^{0.5}$, где σ - стандартное отклонение аппроксимирующей функции Гаусса, n - число звёзд, находящихся в пределах 1σ от среднего значения.

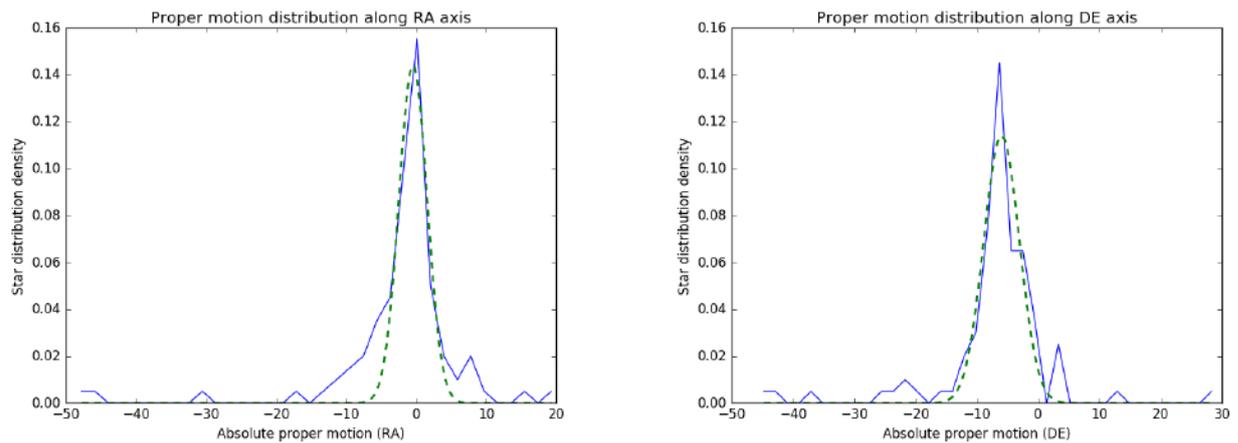


Рис. 4. Распределение собственных движений звёзд горизонтальной ветви и их аппроксимация функцией Гаусса.

5. ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАДАЧИ

1. С помощью программы CROSSMATCH построить таблицу с данными в области радиусом $10'$ и с центром, совпадающим с центром указанного скопления. Координаты центра скопления можно найти в компилятивном каталоге Харриса (Harris 1996, <http://physwww.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>)
2. Найти абсолютные собственные движения звёзд в выбранной площадке, используя координаты из каталогов USNO-B1.0, 2MASS, UCAC5, GAIA (для упрощения исключаются каталоги WISE и URAT1, но желающие могут их использовать) с помощью самостоятельно написанной программы и файл surv.dat. Следует обратить внимание, что в качестве основного каталога программе Crossmatch следует установить каталог GAIA.
3. Построить диаграмму "цвет-величина" и выделить члены скопления с помощью пакета TOPCAT.
4. Найти среднее собственное движение скопления и оценить ошибки собственного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barentsen, G., Farnhill, H.J., Drew, J.E. et al. 2014, MNRAS, 444, 3230
2. Bonnarel, F., Fernique, P., Bienaymé, O. et al. 2000, A&ApS, 143, 33
3. Drew, J.E., Gonzalez-Solares, E., Greimel, R. et al. 2014, MNRAS, 440, 2036
4. Drew, J.E., Greimel, R., Irwin, I.M. et al. 2005, MNRAS, 362, 753
5. Gaia Collaboration, Brown, A.G.A., Vallenari, A. et al. 2016, A&Ap, 595, 2
6. Gaia Collaboration, Brown A.G.A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J.H.J., Babusiaux C., Bailer-Jones C.A.L., et al., 2018, A&A, 616, A1.
7. Gaia Collaboration, Brown A.G.A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J.H.J., Babusiaux C., Biermann M., et al., 2021, A&A, 649, A1.
8. Harris, W.E. 1996 (2010 edition), AJ, 112, 1487
9. Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., et al., 2000, A&A, 355, L27
10. Henden, A.A., Levine, S., Terrell, D. et al. 2015, AAS Meeting, no 225, 336
11. Klinichev A. D., Dambis A.K, Glushkova E.V., Yalyalieva L.N., 2018, Astronomy Reports, 62, 986
12. Monet, D.G., Levine, S.E., Canzian, B. et al. 2003, AJ, 125, 984
13. Riccio, G., Brescia, M., Cavuoti, S. et al. 2017, PASP, 129, 024005
14. Skrutskie, M.F., Cutri, R.M., Stiening, R. et al. 2006, AJ, 131, 1163
15. Taylor, M.B. 2006, ASPC, 351, 666
16. Taylor, M.B. 2005, ASPC, 347, 29
17. Wright, E.L., Eisenhardt, P.R.M., Mainzer, A.K. et al. 2010, AJ, 140, 1868

18. Zacharias, N., Finch, C. and Flouard, J. 2017, AJ, 153, 166
19. Zacharias, N., Finch, C., Subasavage, J. et al. 2015, AJ, 150, 101