

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

Методическое пособие к задаче
специального астрономического практикума

**«Определение физических параметров рассеянного звездного
скопления»**

Составитель:

Чемель Александр Алексеевич

Москва
2019

Цель Работы

Получение физических параметров (возраст, расстояние, избыток цвета) для одного из рассеянных звездных скоплений Галактики и получение практических навыков применения метода наложения изохрон.

Теоретическое введение

Основные понятия:

- Звездная величина, m - безразмерная численная характеристика яркости небесного светила. Звездные величины являются мерой относительного потока излучения астрономических объектов и выражаются логарифмической шкалой, что соответствует особенности восприятия наших органов чувств, в частности глаз (так называемых закон Вебера-Фехнера: «интенсивность ощущения чего-либо прямо пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя»). Математическое выражение для определения звездных величин принадлежит английскому астроному Норману Роберту Погсону. Формула Погсона имеет следующий вид: $m = a + b \lg F$, где a - нуль-пункт шкалы звездных величин, $b = -2.5$ - коэффициент шкалы, F - световой поток от исследуемого объекта (количество световой энергии, проходящей в единицу времени через площадку единичной площади). Для разности звездных величин двух объектов получим: $\Delta m = m_1 - m_2 = -2.5 \lg F_1/F_2$.
- Абсолютная звездная величина, M - звездная величина, которую имел бы рассматриваемый объект, если его поместить на расстояние в 10 парсек. В соответствии с формулой Погсона: $m - M = -2.5 \lg F(r)/F(10 \text{ пк})$. Т.к. $F(r) = L/4\pi r^2 \sim r^{-2}$, где L - светимость объекта, а r - расстояние до него, то $m - M = -2.5 \lg(10 \text{ пк}/r [\text{пк}])^2 = 5 \lg r [\text{пк}] - 5$.
- Модуль расстояния - разница видимой и абсолютной звездной величины объекта. Модуль расстояния является безразмерной характеристикой расстояния до объекта. Например, в полосе V модуль расстояния равен $V - M_V$. Различают истинный и видимый модуль расстояния (истинный модуль расстояния мы будем обозначать $(m - M)_0$). Разница между ними обусловлена наличием межзвездного поглощения света. Оно приводит к тому, что свет, идущий от небесных объектов, тускнеет на пути к наблюдателю, и эти объекты кажутся нам дальше, чем это есть на самом деле, т.е. видимый модуль расстояния оказывается больше истинного. Пусть $A_j > 0$ - величина межзвездного поглощения в некоторой полосе j . Тогда можно записать: $(m - M)_0 =$

$j - M_j - A_j$, где j и M_j – видимая и абсолютная звездная величина объекта в полосе j соответственно. Т.к. величина межзвездного поглощения меняется с длиной волны, то видимый модуль расстояния имеет разную величину в разных полосах, но истинный модуль расстояния от полосы не зависит, т.к. он отражает реальное физическое расстояние до объекта. Используя формулу Погсона можно выразить расстояние до объекта через его (видимый) модуль расстояния: $(m - M)_0 = j - M_j - A_j = 5 \lg r[\text{пк}] - 5 \Rightarrow r[\text{пк}] = 10^{0.2(j - M_j - A_j) + 1}$.

Расстояние очень чувствительно к изменению модуля расстояния в силу степенной зависимости. Легко показать, что $\sigma_r/r = 0.2 \ln 10 \sigma_{(m-M)_0} \approx 0.46 \sigma_{(m-M)_0}$, то есть ошибка в 1^m в модуле расстояния приводит к ошибке в расстоянии почти в 1.5 раза!

- Показатель цвета – разность звездных величин объекта в двух разных спектральных полосах (как правило, из более коротковолновой полосы вычитают более длинноволновую, например $B - V$). В общем виде показатель цвета в двух полосах i и j , где $\lambda_i < \lambda_j$ выражается следующим образом: $CI_{ij} = m_i - m_j$ ($CI = Colour Index$). Показатели цвета характеризуют распределение энергии в спектре объекта, т.е. его цвет. Таким образом, они являются также и показателями эффективной температуры, т.к. для абсолютно черного тела (а спектр излучения звезд можно в первом приближении считать чернотельным в некоторых диапазонах длин волн) распределение энергии в спектре излучения определяется единственным его параметром – температурой. При смещении максимума спектрального распределения энергии в сторону более длинных волн (более красные и, следовательно, более холодные звезды), показатели цвета объекта растут, т.к. он слабеет в коротковолновых полосах и становится ярче в более длинноволновых.
- Избыток цвета – разность между видимым показателем цвета объекта и его, так называемым, нормальным цветом (нормальные цвета мы будем обозначать индексом 0). Нормальные цвета – показатели истинного распределения энергии в спектре объекта, не искаженного влиянием межзвездного поглощения. Разница между нормальным и видимым цветом вызвана зависимостью межзвездного поглощения от длины волны. Поглощение в синей области спектра заметно сильнее, чем в красной. В связи с этим, чем дальше находится звезда, тем более красной она нам кажется, т.е. ее показатели цвета растут по сравнению с их нормальными величинами. Например, избыток цвета в полосах B и V равен $E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0 > 0$.
- Изохрона – линия равного возраста на диаграмме цвет-звездная величина (диаграмма Герцшпрунга – Рассела). Построение изохрон происходит при помощи численного расчета эволюционных треков звезд

различных масс, т.е. изохроны являются чисто теоретическими. Стоит заметить, что точность вычисления эволюционных треков звезд сильно падает по поздних эволюционных стадиях, в первую очередь из-за отсутствия полноценной теории конвекции, поэтому теоретические изохроны, как правило, обрезаются после ветви гигантов. На Рис. 1 приведены некоторые изохроны, посчитанные в координатах J,J-H 2MASS. По осям X и Y отложены нормальные цвета J-H и абсолютные величины в полосе J соответственно.

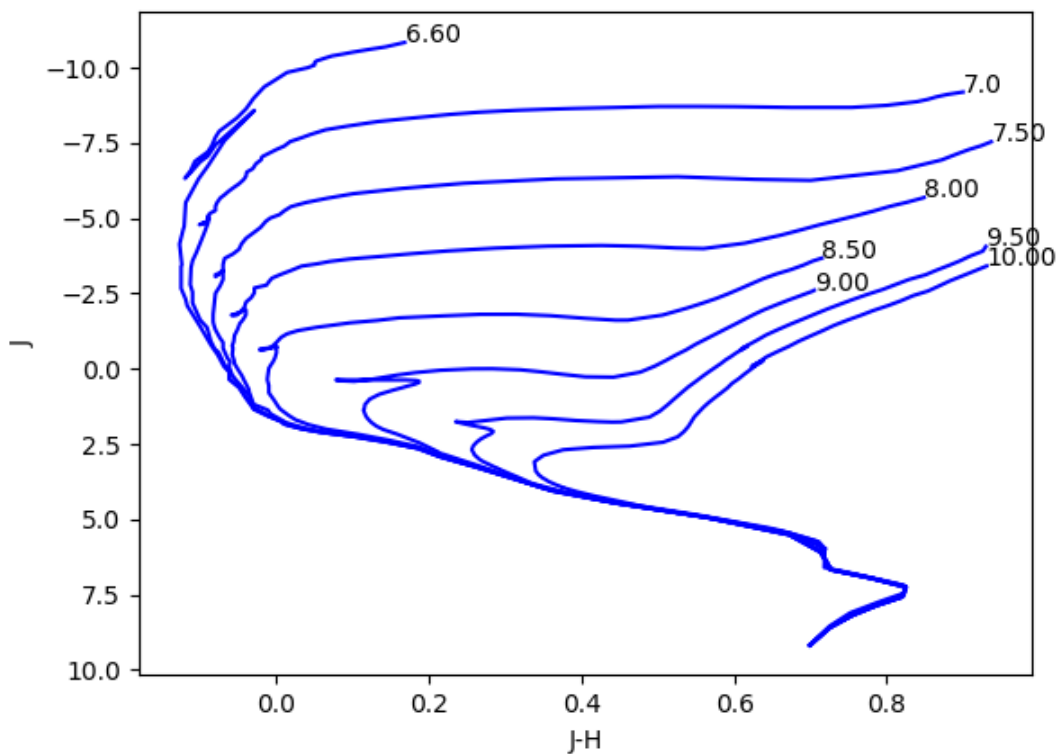


Рис. 1 – изохроны J,J-H 2MASS. Рядом с каждой изохроной указан логарифм ее возраста. По оси Y – абсолютные звездные величины в полосе J, по оси X – нормальные цвета $(J - H)_0$

Рассеянные звездные скопления (РЗС) представляют собой гравитационно связанные скопления большого числа звезд, рожденных из одного молекулярного облака и имеющих поэтому одинаковый возраст и металличность (вернее время, за которое произошло рождение звезд скопления пренебрежимо мало по сравнению с его возрастом). В настоящее время число открытых РЗС и кандидатов в этот класс объектов составляет порядка 3000. РЗС являются представителями относительно молодого населения дисковой подсистемы Галактики, их характерный возраст составляет порядка 10^8 лет. Типичные рассеянные скопления содержат несколько сотен – несколько тысяч звезд и имеют размеры 1 – 10 парсек.

На Рис. 2 и 3 приведены типичные представители РЗС: скопления Плеяды ($t \approx 130 \text{ Myr}, d \approx 150 \text{ пк}$) и Ясли ($t \approx 730 \text{ Myr}, d \approx 190 \text{ пк}$) соответственно (данные взяты с портала WEBDA <https://webda.physics.muni.cz/>).



Рис. 2 – рассеянное звездное скопление Плеяды (M45)



Рис. 3 - рассеянное звездное скопление Ясли (M44)

Звездные скопления (в том числе и РЗС) являются важными для изучения объектами Галактики, играющими ключевую роль в исследовании процессов звездообразования и звездной эволюции, кинематики галактических подсистем, уточнении шкал расстояний и т.д. Важной особенностью этих объектов является то, что они представляют собой гравитационно связанные скопления звезд, которые: **(1)** находятся от нас на практически одинаковом расстоянии (с точностью до размера скопления, который, как правило, не превышает 10 пк, что пренебрежимо мало по сравнению с расстояниями до самих скоплений, составляющих сотни, а в большинстве случаев тысячи парсек), **(2)** одинаково подвержены эффектам межзвездного поглощения и покраснения света (за исключением случаев так называемых *embedded clusters*, представляющих собой очень молодые РЗС, которые еще не избавились от газовой оболочки, являющейся остатком того облака, из которого они были рождены. В этом случае поглощение света для разных членов скопления будет заметно отличаться. Это так называемое дифференциальное поглощение), **(3)** имеют почти одинаковый возраст, **(4)** имеют

практически идентичный химический состав и, как следствие, металличность. Различия между наблюдаемыми характеристиками отдельных членов скопления связаны таким образом лишь с различием их масс и стадий эволюции.

В связи с вышеперечисленными причинами, многие параметры скоплений, такие как, например, расстояние до них, определяются с намного большей точностью, чем аналогичные величины для одиночных звезд. Более того, исследование звездных скоплений предоставляет нам практически уникальную возможность определения возраста звезд. Определение возраста одиночной звезды представляет собой практически невыполнимую задачу, т.к. почти всю свою жизнь (около 90%) звезды проводят на стадии главной последовательности (ГП), где их параметры практически не меняются (горение водородного топлива очень стабильный и долгий процесс).

Задачу определения параметров звездных скоплений можно решать различными методами, например, путем наложения начальной главной последовательности или изохроны на диаграмму цвет - звездная величина, построенную для звезд в поле исследуемого скопления. Целью данного практикума является ознакомление со вторым из перечисленных выше методов.

Метод наложения изохрон

Индивидуальная многополосная фотометрия отдельных звезд в поле звездного скопления позволяет построить для них диаграмму цвет - звездная величина. На Рис. 4 приведен пример подобной диаграммы в координатах J,J-H (2MASS) для звезд в поле рассеянного скопления (приведены все звезды в круге радиусом 15 угловых минут вокруг центра скопления). Все присутствующие на этой диаграмме звезды можно разделить на две группы: члены скопления и звезды фона. Члены скопления, будучи скоплением звезд одного возраста, образуют на диаграмме цвет – звездная величина последовательности, соответствующие различным эволюционным стадиям звезд различных масс, такие как главная последовательность, ветвь гигантов и т.д. Звезды фона, в свою очередь, обладают различным возрастом, металличностью, массой и находятся на разном расстоянии от наблюдателя. В связи с этим, они не образуют четких последовательностей и распределены на диаграмме более или менее хаотично. По мере увеличения звездной величины (при приближении к нижней части диаграммы), относительная доля звезд фона растет, образуя характерное расширяющееся к низу «облако» (это отлично видно на Рис. 4).

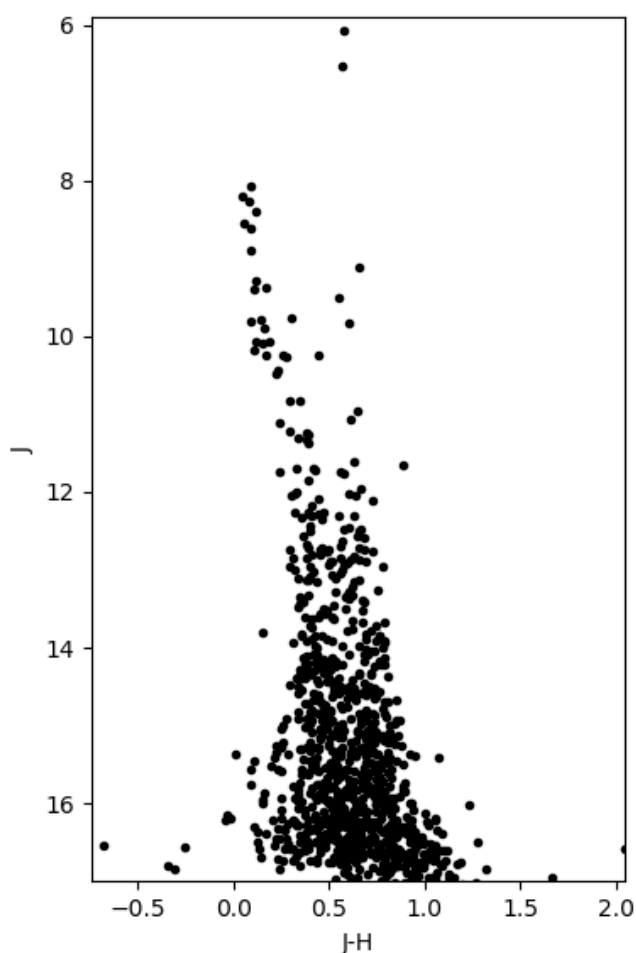


Рис. 4 – диаграмма цвет – звездная величина в координатах J,J-H для звезд в круге радиусом 15 угловых минут вокруг центра скопления NGC 1662

Метод наложения изохрон заключается в совмещении теоретических изохрон с последовательностями, образуемыми звездами-членами скопления на диаграмме цвет - звездная величина. В основе этого метода лежит упомянутое выше равенство возрастов всех звезд скопления, из которого следует, что диаграмма скопления должна повторять форму линии равного возраста (изохроны), образуемой звездами разных масс. Фитирование диаграммы звездного скопления теоретической изохроной является задачей с 3-мя степенями свободы, т.е. позволяет найти 3 параметра исследуемого скопления: видимый модуль расстояния в соответствующей полосе (в зависимости от того, в каких координатах построена диаграмма цвет – звездная величина), избыток соответствующего цвета и возраст скопления. При этом все три параметра определяются одновременно: возраст является внутренней характеристикой самой изохроны, а модуль расстояния и избыток цвета находятся путем нахождения сдвига изохроны

относительно диаграммы скопления вдоль осей ординат и абсцисс (звездных величин и цветов) соответственно. Схематично суть метода наложения изохрон представлена на Рис. 5. Итоговый результат этой процедуры (диаграмма скопления с уже наложенной изохроной) для скопления NGC 1662 приведен на Рис. 6. Полученные для этого скопления параметры составляют: возраст $\lg t = 8.7$, видимый модуль расстояния в полосе J $(m - M)_J = 8.30$, избыток цвета $E(J - H) = 0.064$. Более подробно методика наложения изохроны на диаграмму цвет – звездная величина описана далее, в разделе «Ход работы».

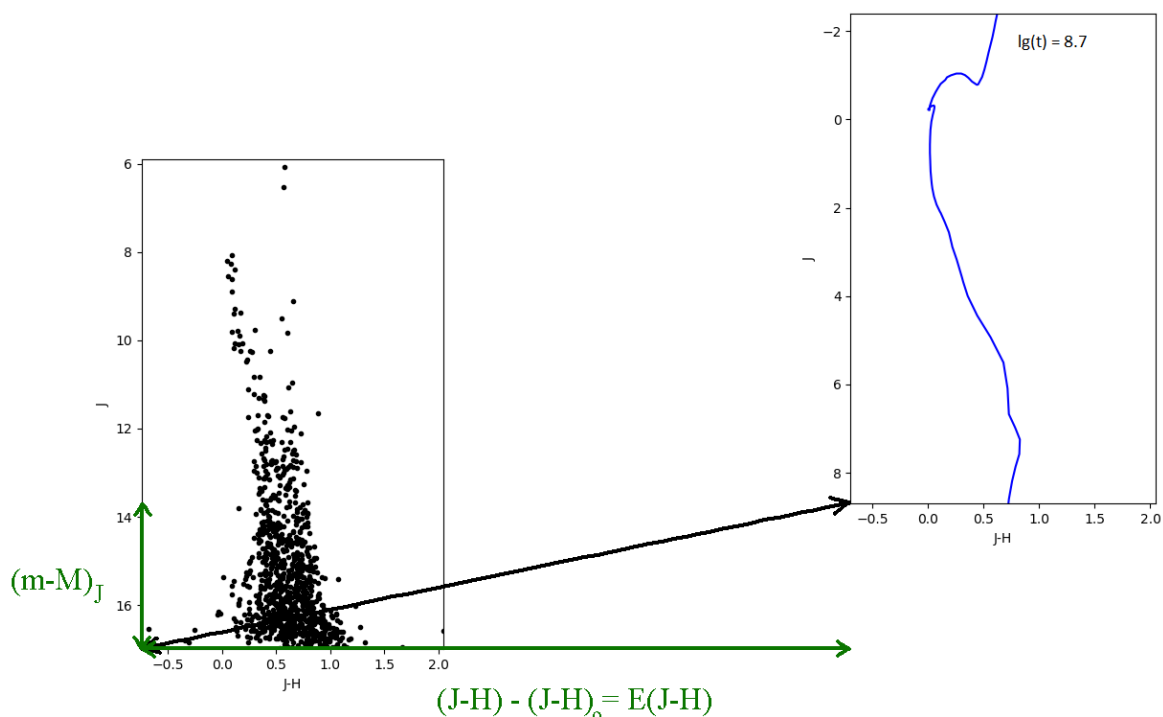


Рис. 5 – схематичное изображение метода наложения изохрон. Возраст является характеристикой самой изохроны (в данном случае $\lg(t)=8.7$). Нахождение сдвига изохроны относительно диаграммы цвет – звездная величина для скопления вдоль оси ординат дает разницу видимой и абсолютной (т.к. изохрона построена в абсолютных величинах) звездной величины, т.е. $(m - M)_J$. Нахождение аналогичного сдвига вдоль оси абсцисс дает разницу видимого и нормального цвета, т.е. избыток цвета $E(J - H) = (J - H) - (J - H)_0$.

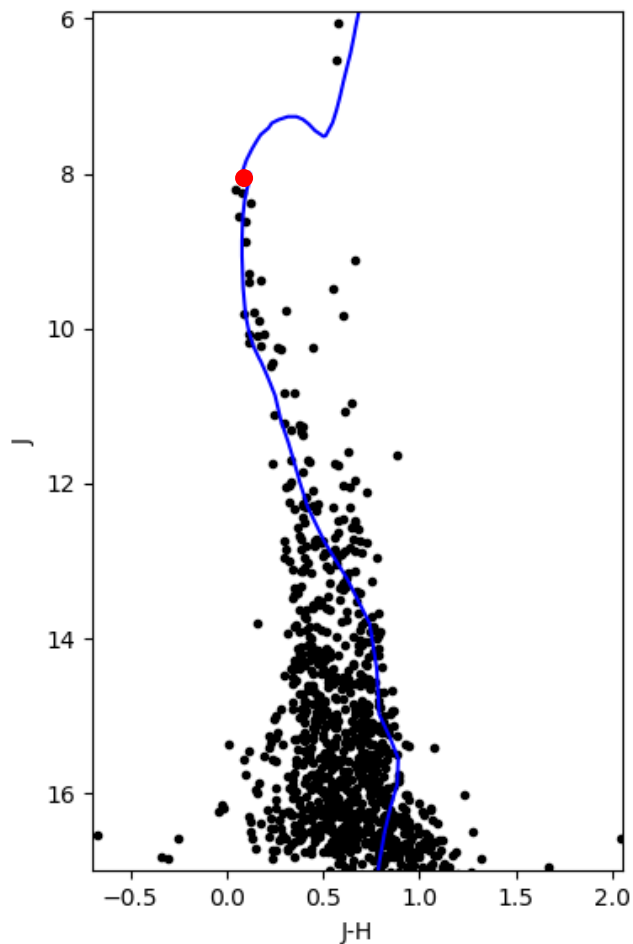


Рис. 6 – результат наложения изохроны для скопления NGC 1662. Изохрона повторяет форму основных звездных последовательностей, образуемых членами скопления на диаграмме цвет – звездная величина, а именно главной последовательности и ветви гигантов. Точка, где звезды сходят с главной последовательности после выгорания водородного топлива, называется точкой поворота (отмечена красной точкой). Положение этой точки характеризует значение массы звезд, переходящих на поздние стадии эволюции, а значит и возраст скопления (равно как и всех его членов), т.к. чем больше масса звезды на главной последовательности, тем больше у этой звезды светимость (она расположена выше на диаграмме) и тем короче будет ее жизнь на ГП.

Стоит упомянуть и про модифицированный метод наложения изохрон с использованием так называемых h -индексов, разработанный А.К. Дамбисом и др. (2017). Этот метод позволяет заменить задачу одновременного нахождения 3-х параметров скопления по одной диаграмме на определение этих же параметров последовательно по 3-м разным диаграммам (по одному за раз), что существенно облегчает задачу и, к тому же, увеличивает точность метода. H -индекс представляет собой комбинацию звездных величин объекта в фильтрах r и i системы $ugriz$, а также узкополосном фильтре, отцентрированном на водородную линию H_α серии Бальмера (6563 \AA). Математически он выражается следующим образом: $h_{index} = 0.755 \cdot r + 0.245 \cdot i - H_\alpha$. Первые два слагаемых представляют собой имитацию широкополосного фильтра H_α (коэффициенты подобраны так,

чтобы центр такой полосы совпадал с длиной волны линии Бальмер-альфа), поэтому, вычитая из нее звездную величину в узкополосном фильтре, центрированном на ту же длину волны, мы получаем величину, не зависящую (в первом порядке малости) от межзвездного покраснения. Наиболее примечательной особенностью h -индексов является то, что изохроны, построенные на диаграмме $(h_{index}, r - i)$, имеют минимум при одном и том же показателе цвета $(r - i)$ вне зависимости от возраста. Это связано с тем, что линия поглощения достигает максимальной интенсивности у звезд спектрального класса A0 - A2. Эта особенность изохрон наглядно продемонстрирована на Рис. 7.

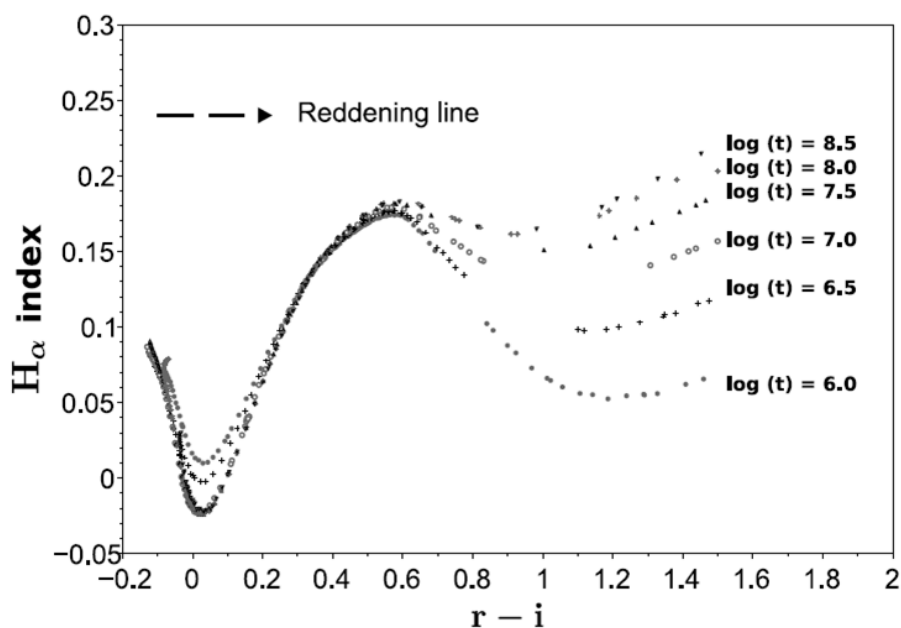


Рис. 7 – набор теоретических изохрон, построенных в координатах $(h_{index}, r - i)$. Наглядно видно, что изохроны имеют минимум при одном и том же показателе цвета $(r - i)$ вне зависимости от возраста.

Таким образом, мы можем использовать эту особенность, чтобы найти избыток цвета $E(r - i)$, сопоставляя минимум на изохроне и самой диаграмме скопления, построенной в тех же координатах, сдвигом вдоль оси абсцисс. Как было сказано ранее, мы находим лишь один параметр, не задаваясь на этом этапе вопросом оценки возраста и модуля расстояния. Следующим шагом является использование диаграммы (r, h_{index}) . Изохроны, построенные в этих координатах имеют аналогичную особенность, а именно минимум при одном и том же значении r . Это позволяет нам, сдвигая изохрону только вдоль оси ординат, найти видимый модуль расстояния $(m - M)_r$. Теперь, уже имея оценки модуля расстояния и избытка цвета, мы можем обратиться к стандартной диаграмме цвет – звездная

величина $(r, r - i)$, сдвинуть изохрону по обеим осям в соответствии с этими значениями и находить только один оставшийся параметр – возраст. Но зачастую качество диаграммы (r, h_{index}) не является удовлетворительным для точной оценки видимого модуля расстояния (характерный изгиб диаграммы, содержащий минимум, слабо выражен), поэтому после нахождения избытка цвета по диаграмме $(h_{index}, r - i)$ сразу переходят к диаграмме $(r, r - i)$ и находят два оставшихся параметра (уменьшение количества степеней свободы с 3-х до 2-х уже является существенным плюсом). Однако данный метод имеет и серьезный недостаток. Как уже было сказано, участок с характерной «впадиной», содержащей минимум на диаграммах $(h_{index}, r - i)$ и (r, h_{index}) , образован звездами спектральных классов A0 – A2, время жизни которых на главной последовательности составляет около $\lg(T) \approx 8.6 \div 8.7$. В связи с этим, у скоплений, возраст которых превышает $\lg(t) = 8.7$ данная структура отсутствует (звезды закончили свою жизнь на ГП и ушли из этой области диаграммы). Для таких относительно старых РЗС метод h-индексов оказывается не применим. На Рис. 8, 9 и 10 представлены диаграммы $(h_{index}, r - i)$, (r, h_{index}) и $(r, r - i)$ вместе с наложенными на них изохронами для скопления NGC 7790 соответственно. Полученные при применении этого метода параметры скопления NGC 7790 составляют: $E(r - i) = 0.38, (m - M)_r = 13.865 \Rightarrow d = 2955$ пк, $\lg t = 7.8$.

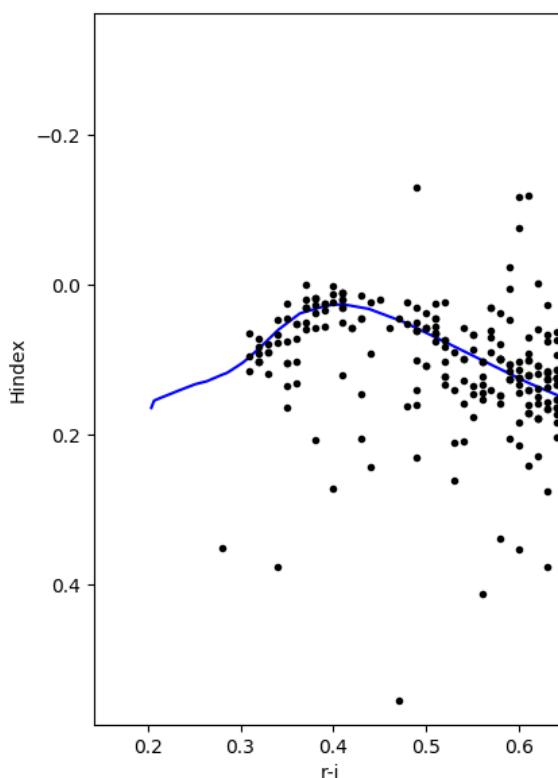


Рис. 8 – диаграмма $(h_{index}, r - i)$ для скопления NGC 7790 с наложенной на нее изохроной

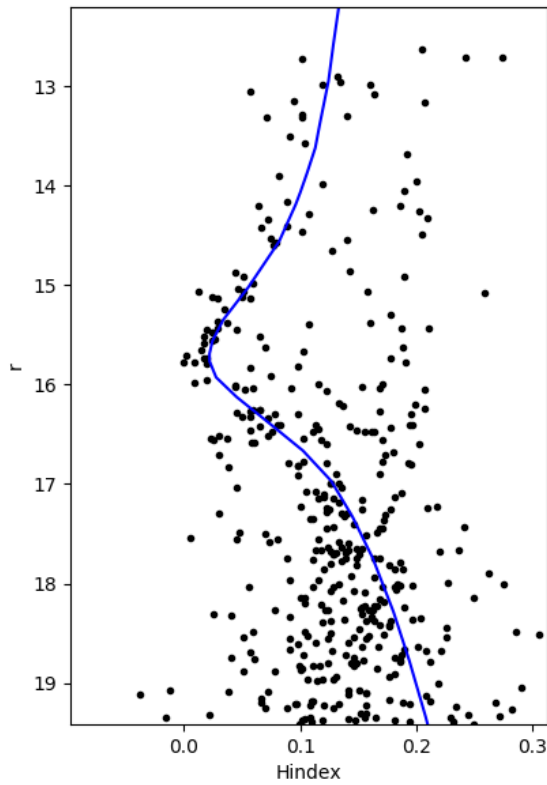


Рис. 9 - диаграмма (r, h_{index}) для скопления NGC 7790 с наложенной на нее изохроной

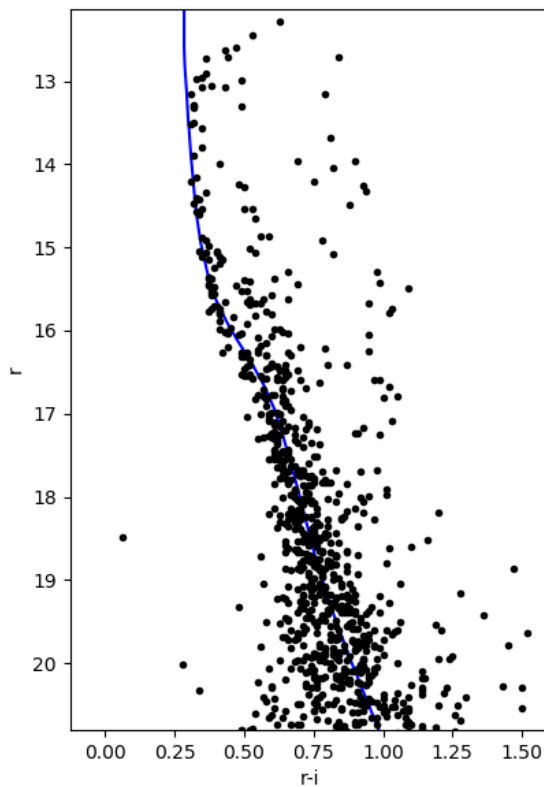


Рис. 10 - диаграмма $(r, r - i)$ для скопления NGC 7790 с наложенной на нее изохроной

Описание программы

На Рис. 11 представлено основное окно программы, используемой для данной работы. Она позволяет загружать данные для построения диаграмм скопления в различных координатных осях, загружать различные наборы теоретических изохрон и накладывать их на соответствующие диаграммы, определяя возраст, видимый модуль расстояния и избыток цвета.

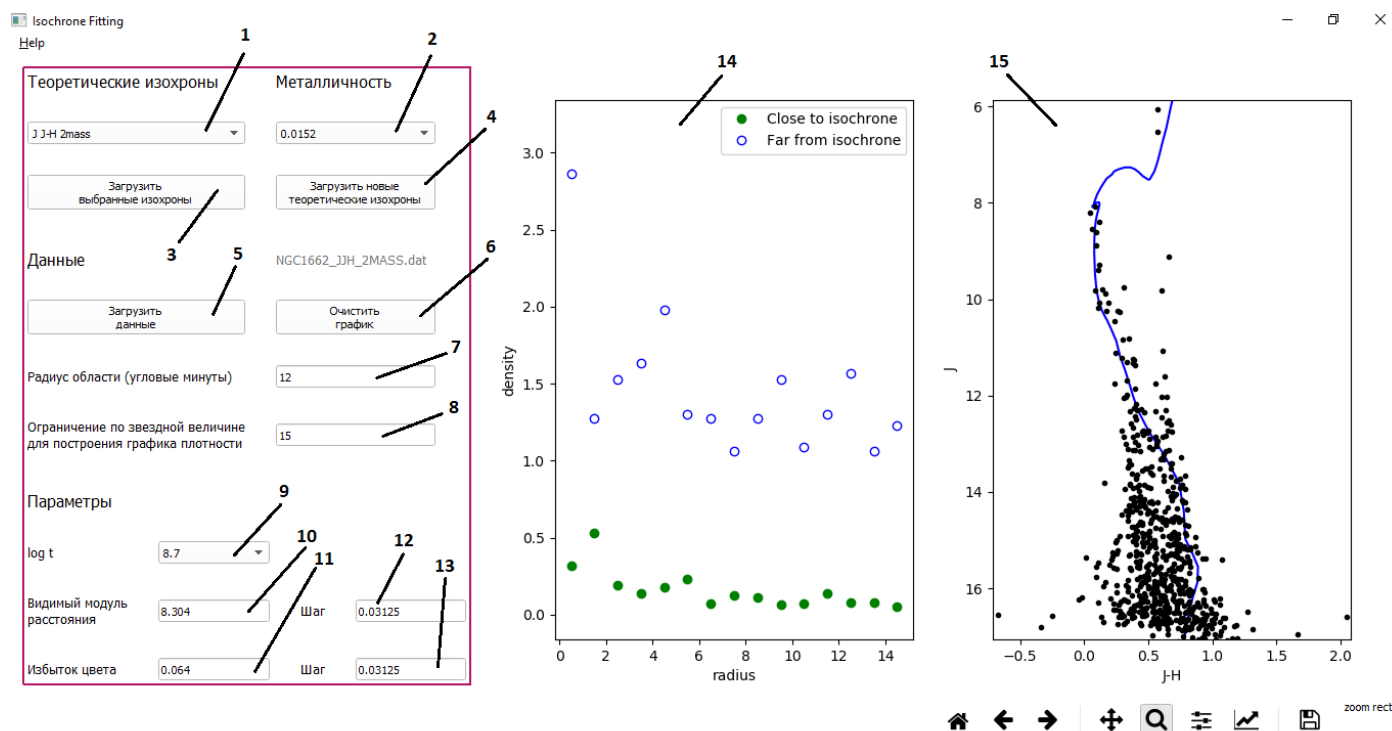


Рис. 11 – основное окно программы, используемой для наложения теоретических изохрон в рамках данной практической работы. Объяснения к цифровым обозначениям см. в тексте далее.

Обозначения на Рис. 11:

1. Выбор набора теоретических изохрон из списка загруженных.
2. Выбор металличности изохрон (используется в случае, если выбранного набора теоретических изохрон имеет несколько вариантов металличностей).
3. «Загрузить выбранные изохроны» - кнопка загрузки системы изохрон, выбранной в выпадающем меню 1, для последующей работы с ними.
4. «Загрузить новые теоретические изохроны» - загрузить новый файл с изохронами из файловой системы компьютера. После нажатия на кнопку, появляется отдельное диалоговое окно, в котором вы можете выбрать файл с изохронами и ввести дополнительную информацию о выбранных изохронах. Подробнее о процедуре загрузки изохрон см. в разделе Help

описываемой программы. В рамках данной работы эта функция не используется, все необходимые изохроны уже загружены по умолчанию.

5. «Загрузить данные» - позволяет загрузить из файловой системы компьютера файл с данными о звездах в поле скопления для построения диаграммы цвет – звездная величина (или любой другой необходимой для работы диаграммы). О структуре данного файла и его подготовке см. в разделе «Ход работы».
6. «Очистить график» - очищает графики 14 и 15.
7. Поле «радиус области» - позволяет выбрать радиус круга вокруг центра скопления (в угловых минутах). На диаграмму 15 будут выведены только звезды в пределах выбранного круга. Эта функция используется для того, чтобы убрать большое количество звезд фона, находящихся на периферии области, и сделать последовательности членов скопления на диаграмме более явными (члены скопления концентрируются к центру области, в то время как звезды фона распределены относительно равномерно. В связи с этим относительная доля членов скопления среди всех звезд уменьшается с увеличением радиуса области)
8. Поле, позволяющее ограничить число звезд, участвующих в построении графика 14 (о самом графике см. далее). Звезды со звездной величиной больше указанной (т.е. более слабые) не будут использованы. Эта функция используется для отсекающего большого «облака» тусклых звезд фона в нижней части диаграммы.
9. Выбор изохроны из набора загруженных. После нажатия, появляется список, позволяющий указать логарифм возраста изохроны из списка имеющихся. Альтернативой является использование клавиш «N» (следующая, более старая, изохрона из списка) и «P» (предыдущая, более молодая изохрона из списка).
10. Видимый модуль расстояния, вычисленный для текущего положения изохроны (сдвиг по оси ординат). Значение обновляется после каждого изменения положения изохроны.
11. Избыток цвета, вычисленный для текущего положения изохроны (сдвиг по оси абсцисс). Значение обновляется после каждого изменения положения изохроны.
12. Текущий шаг сдвига изохроны по оси ординат. Значение может быть увеличено или уменьшено клавишами «]» и «[» соответственно (каждое нажатие изменяет значение шага в 2 раза).

13. Текущий шаг сдвига изохроны по оси абсцисс. Значение может быть увеличено или уменьшено клавишами «'» и «;» соответственно (каждое нажатие изменяет значение шага в 2 раза).
14. График поверхностной плотности звезд в проекции на небесную сферу в зависимости от радиуса до центра (в звездах на квадратную угловую минуту). Построение графика осуществляется следующим образом. Мы считаем, что последовательность звезд на диаграмме скопления должна повторять форму изохроны соответствующего возраста. Поэтому все звезды, находящиеся рядом с изохроной (+/- 0.05 по оси цвета) объявляются членами скопления, и их плотность строится на графике 14 зелеными точками. Все звезды, не попавшие в эту полосу, объявляются звездами фона. Их плотность строится синими пустыми кружками. При этом звезды тусклее звездной величины, выбранной в поле 8, не участвуют в построении графика. Ожидается, что члены скопления будут концентрироваться к центру (зеленый график будет показывать падение с радиусом), а звезды фона будут распределены по всей области практически равномерно (их график будет представлять собой константу). График 14 дает нам еще один механизм проверки правильности наложения изохроны, однако в первую очередь, следует руководствоваться самим положением изохроны на диаграмме 15, т.к. члены скопления могут выпадать из полосы вблизи изохроны и попадать на график звезд фона, а звезды фона могут показывать концентрацию, вызванную случайной проекцией большого количества звезд на определенное место небесной сферы (распределение звезд на масштабах нескольких минут дуги может быть заметно отличным от однородного).
15. Окно с построенной диаграммой скопления (отдельные звезды в поле скопления обозначены черными точками) и накладываемой изохроной (синяя линия). Обозначения координатных осей соответствуют данным о звездной величине и цвете загруженной системы теоретических изохрон.

Элементы управления:

- «A» и «Z» - сдвиг изохроны по оси ординат вверх и вниз соответственно
- «,» и «.» - сдвиг изохроны по оси абсцисс влево вправо соответственно

- «N» и «P» - изменение возраста изохроны в сторону большего или меньшего возраста соответственно
- «[» и «]» - изменение шага по оси ординат в меньшую или большую сторону соответственно (каждое нажатие изменяет шаг в 2 раза)
- «;» и «'» - изменение шага по оси абсцисс в меньшую или большую сторону соответственно (каждое нажатие изменяет шаг в 2 раза)
- «(» и «)» - изменение количества точек на графике плотности (увеличение или уменьшение расстояния между отображаемыми точками соответственно)

Загрузка новых изохрон:

1. Нажмите кнопку "Загрузить новые теоретические изохроны".

2. В появившемся диалоговом окне с помощью кнопки "Загрузка" выберете файл. Структура файла: первый столбец – $\lg(t)$, второй - звездная величина, третий - цвет. В файле не должно быть названий столбцов, либо они должны быть закомментированы знаком «#». Разделитель – пробел.

3. Заполните данные об изохронах.

Пример: требуется загрузить изохроны (J,J-H) с металличностью 0.02, соответствующие фильтрам обзора 2MASS. Следует заполнить поля в диалоговом окне следующим образом: фильтр – «J», цвет – «J-H», система фильтров (или обзор) – «2MASS», металличность - «0.02».

Ход работы

Подготовка данных

Целью данной работы является использование метода наложения изохрон для нахождения трех параметров рассеянного звездного скопления: расстояния, избытка цвета и возраста. Параметры находятся по двум различным (построенным в различных координатах цвет – звездная величина) диаграммам указанного преподавателем РЗС (в качестве одной из них может выступать набор диаграмм с данными из каталога IPHAS, используемыми для применения метода h-индексов (см. теоретическое введение)). Затем полученные по двум диаграммам результаты сравниваются. Первым шагом является подготовка данных о звездах в поле

скопления с помощью программы TOPCAT (сказать ее можно по следующей ссылке <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/#standalone>. Программа запускается с помощью виртуальной машины Java и не требует установки). Главное окно программы TOPCAT изображено на Рис. 12.

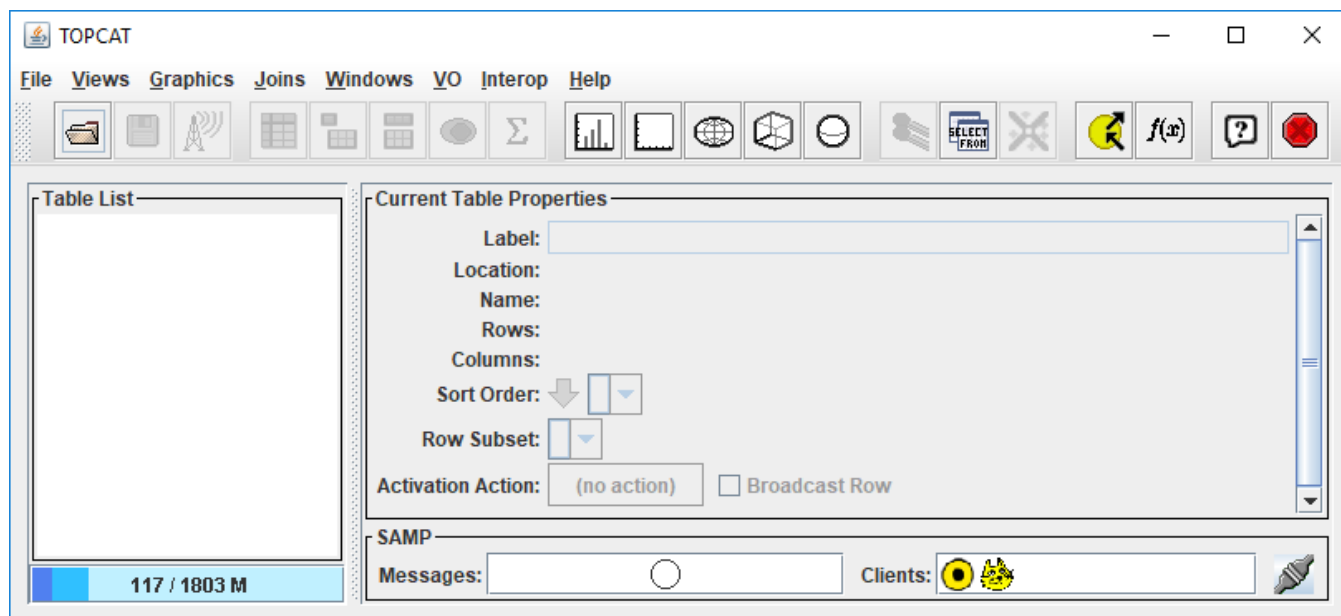


Рис. 12 – главное окно программы TOPCAT.

Рассмотрим подготовку данных для построения диаграммы (J, J-H) для скопления NGC 1662 на основе данных обзора 2MASS.

1. Нажимаем пункт меню «VO» и выбираем пункт «VizieR Catalogue Service». Появившееся диалоговое окно изображено на Рис. 13.
2. В блоке «Row Selection» выбираем пункт «Cone Selection» и в поле «Object Name» вводим название интересующего нас скопления (NGC 1662) и нажимаем кнопку «Resolve», чтобы убедиться, что объект распознан (в двух нижних полях «RA» и «Dec» появятся координаты центра скопления).
3. В поле «Radius» вводим радиус области вокруг центра скопления, в пределах которой будут выбраны звезды. Рекомендуемое значение – 15 угловых минут (не забудьте выбрать единицу измерения в меню справа от поля)
4. В блоке «Catalogue Selection» (внизу окна) выбираем раздел «By Keyword». В поле «Keywords» вводим название желаемого каталога (2MASS) и нажимаем кнопку «Search Catalogues».
5. В появившемся внизу списке каталогов выбираем «2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003)», нажав на него дважды.

6. Произойдет загрузка данных из каталога 2MASS обо всех звездах в пределах указанного радиуса вокруг центра скопления. Посмотреть структуру полученной таблицы можно, нажав кнопку «Display table cell data» в основном окне программы.

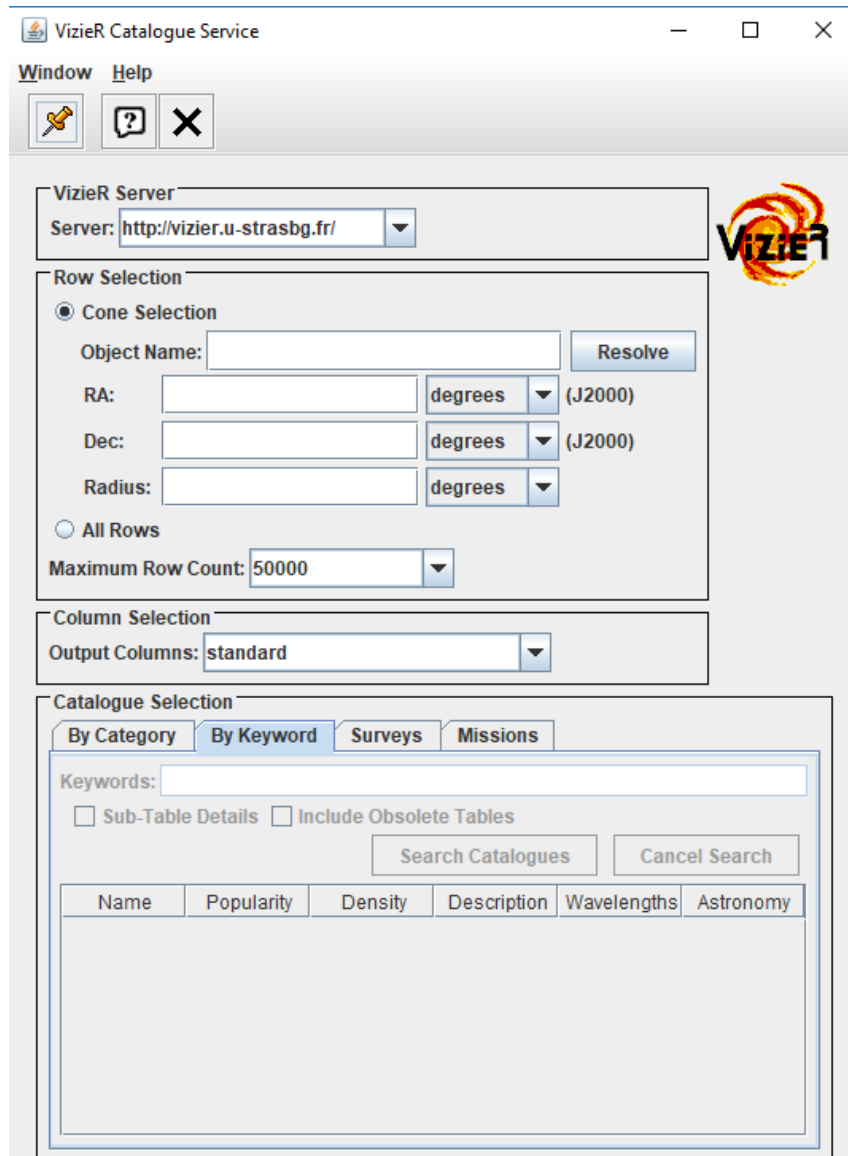


Рис. 13 – диалоговое окно «VizieR Catalogue Service» программы TOPCAT.

7. Теперь следует поработать со столбцами полученного подкаталога. Требуемый для дальнейшей файл с данными должен иметь следующую структуру: первый столбец – расстояние звезды от центра скопления в угловых минутах, второй – звездная величина, третий – цвет. Но скачанный нами подкаталог содержит все столбцы исходного каталога (18 столбцов). Для работы со столбцами нажимаем кнопку «Display column metadata» в главном окне программы. Вид открывающегося диалогового окна приведен на Рис. 14. Нас интересуют только столбцы

«_r» (автоматически сгенерированный столбец с расстояниями от центра скопления в долях градуса), «Jmag» и «Hmag». Для начала, надо преобразовать столбец «_r», переведя значения из долей градуса в угловые минуты. Для этого нажимаем на строку с информацией об этом столбце и нажимаем кнопку «Replace the selected column with a new one based on it» (зеленая стрелка). В появившемся окне вводим название нового столбца (можно оставить старое название, тогда старый столбец будет переименован в «_r_old») и вводим выражение для вычисления его значений « $3*60$ » (т.е. столбец номер 3 умножить на 60). Меняем единицы измерения с «deg» на «arcmin» и нажимаем «ОК». В нашей таблице появится новый столбец с необходимыми данными. Второй интересующий нас столбец, а именно «Jmag», уже присутствует в таблице, однако в ней нет необходимого нам показателя цвета J-H. Его требуется вычислить самостоятельно. Для этого нажимаем кнопку «Add a new column defined algebraically from existing ones» (первая кнопка с зеленым плюсом). В появившемся окне вводим название новой колонки (например «J-H»), выражение для ее вычисления (Jmag-Hmag) и нажимаем «ОК». В таблице появится новый столбец с необходимым показателем цвета. Теперь следует выбрать только интересующие нас три столбца с расстоянием от центра, звездной величиной и цветом. Для этого нажимаем кнопку «Make all table columns invisible» и ставим галочки только напротив интересующих нас колонок. Важно, чтобы эти колонки стояли именно в указанном порядке (r, J, J-H). Для того чтобы поменять порядок колонок, их можно перетаскивать мышью, зажимая левое поле с номером колонки. После этого окно с настройкой столбцов таблицы можно закрыть.

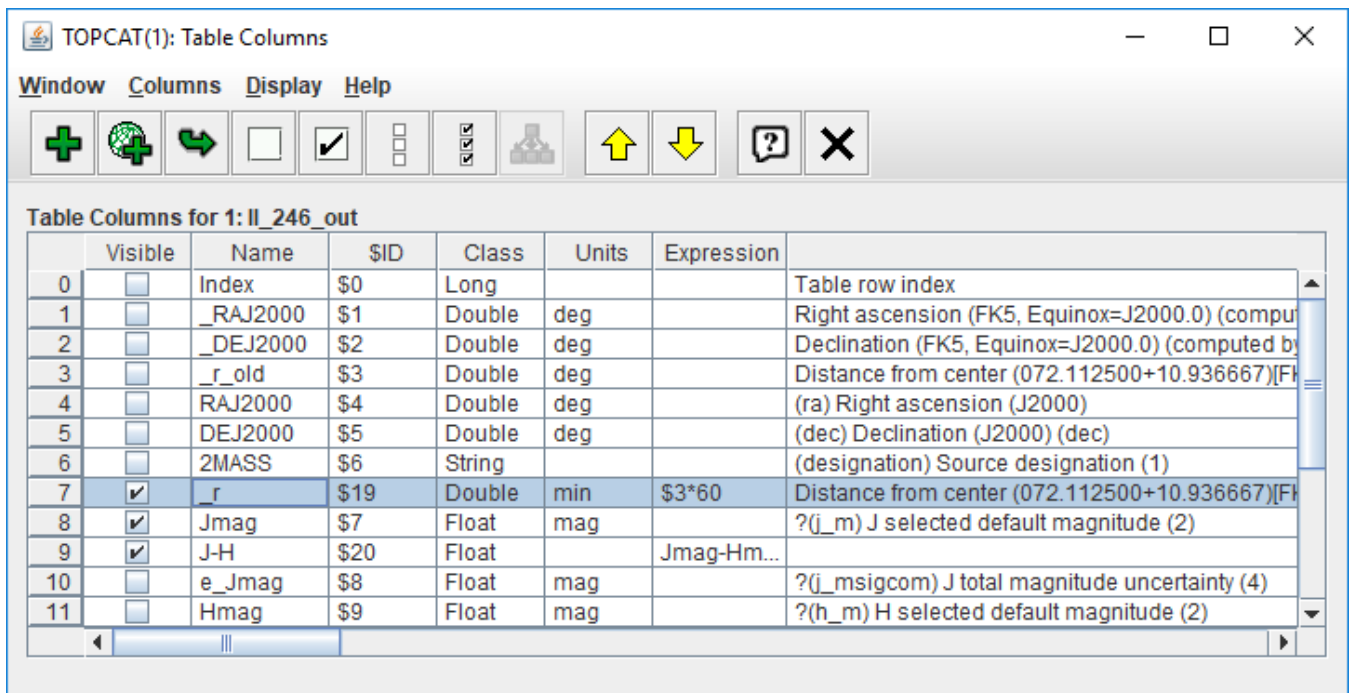


Рис. 14 – диалоговое окно для работы со столбцами в программе TOPCAT

- Вернувшись в основное окно программы, мы должны сохранить полученную таблицу. Для этого нажимаем кнопку «Save one or more tables or the TOPCAT session». В открывшемся окне выбираем вкладку «Current Table», выбираем тип данных CSV (поле «Output Format») и сохраняем файл, нажав кнопку «Filestore Browser» и введя имя файла. Далее полученный файл с данными следует открыть в любом текстовом редакторе (очень удобен Notepad++) и удалить первую строку с названиями столбцов (альтернативный вариант – закомментировать ее символом «#»). Важно: строчки полученной таблицы, в которых отсутствует какая-то часть данных, должны быть удалены, иначе программа будет работать некорректно. Это может быть сделано в любом текстовом редакторе, позволяющем использовать регулярные выражения (например, Notepad++).

Наложение теоретических изохрон

После того, как были созданы два файла с данными, отобранными из двух указанных преподавателем каталогов, можно приступить к наложению изохрон. Для начала следует запустить программу IsochronFitting.py через командную строку (командой `python IsochronFitting.py`). Для этого на компьютере должен быть установлен пакет Anaconda Python 3.x (<https://www.anaconda.com/distribution/>). Рассмотрим порядок действий при работе с программой на примере наложения изохроны на диаграмму J,J-H 2MASS для скопления NGC 1662.

1. После запуска программы, нажимаем кнопку «Загрузить данные» и выбираем подготовленный нами файл с данными из каталога 2MASS. В правом окне появится диаграмма цвет – звездная величина. Для регулировки масштаба можно использовать кнопку «Zoom to rectangle» в правой нижней части основного окна (с изображением лупы).
2. Нажимаем элемент 1 (см. Рис. 11) и выбираем из списка подходящие нам изохроны (J J-H 2mass), после чего нажимаем кнопку «Загрузить выбранные изохроны».
3. После этого в окне 15 появится изохрона с самым маленьким из выбранного набора возрастом (синяя линия), а в окне 14 появится график поверхностной плотности звезд в проекции на небесную сферу.
4. Далее следует выбрать значение радиуса области (рекомендуемое значение 4-7 угловых минут. Подбор подходящего значения радиуса позволяет сделать последовательности, образуемые на диаграмме членами скопления, более явными и облегчить процедуру наложения изохроны.) и ограничение по звездной величине для построения графика плотности (значение выбирается таким образом, чтобы отрезать расширяющееся в сторону больших звездных величин облако звезд фона). В нашем случае, оптимальными значениями являются радиус 6 минут и ограничение по 15 звездной величине. Диаграмма скопления для звезд в радиусе 6 минут показана на Рис. 15.
5. Теперь, пользуясь элементами управления программой, описанными в разделе «Описание программы», требуется совместить теоретическую изохрону с последовательностями на диаграмме скопления. При этом стоит ориентироваться на ветвь гигантов и красное сгущение (плотная область звезд у основания ветви гигантов или сгущение, расположенное в сторону больших температур), соответствующее эволюционной стадии горения гелия после гелиевой вспышки, т.к. мало-массивная часть главной последовательности остается практически неизменной при переходе к изохронам большего возраста (последовательности, соответствующие поздним стадиям эволюции звезд позволяют более точно определить положение точки поворота). В рассматриваемом случае, красное сгущение на диаграмме не прослеживается, но две ярчайшие звезды принадлежат, вероятно, ветви гигантов скопления, что и позволяет наложить изохрону более точно и определить возраст. Результат наложения изохроны на диаграмму скопления NGC 1662 представлен на Рис. 6.

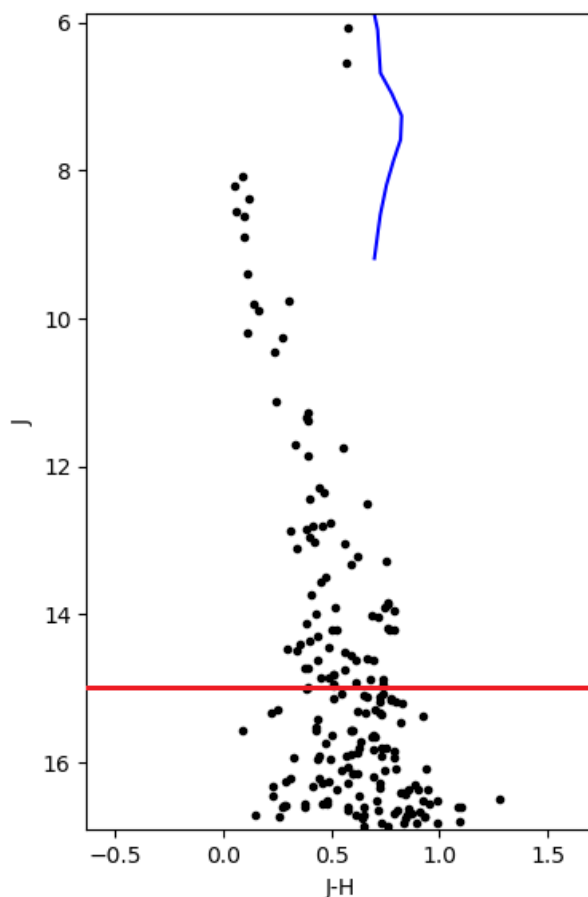


Рис. 15 - Диаграмма скопления NGC 1662 для звезд в радиусе 6 минут вокруг центра. Синяя линия – нижняя часть загруженной изохроны (находится в положении «по-умолчанию»). Красная горизонтальная линия – ограничение по звездной величине для построения графика плотности (в самой программе не показано).

Следует также сказать о еще одном моменте, который необходимо учитывать при наложении изохроны. Последовательности звезд скопления на диаграмме цвет – звездная величина не представляют собой, как сама изохрона, линию нулевой толщины. Одной из основных причин уширения являются неразрешенные двойные и кратные звезды (как физические, так и визуальные двойные). Расширение ГП звезд из-за упомянутого эффекта происходит вверх и вправо (в сторону больших светимостей и меньших температур). Это связано с тем, что цвет неразрешенной двойной будет представлять собой взвешенное (в соответствии с индивидуальными вкладами звезд в общий спектр, т.е. ближе к цвету более яркой звезды) среднее цветов двух звезд, а светимость – сумму их светимостей. Видимое положение неразрешенной двойной звезды, состоящей из звезд главной последовательности, качественно продемонстрировано на Рис. 16. Наибольшее смещение будет иметь место в случае двух одинаковых звезд. В связи с этим,

изохрону следует накладывать ближе к левой нижней кромке главной последовательности, а не по центру.

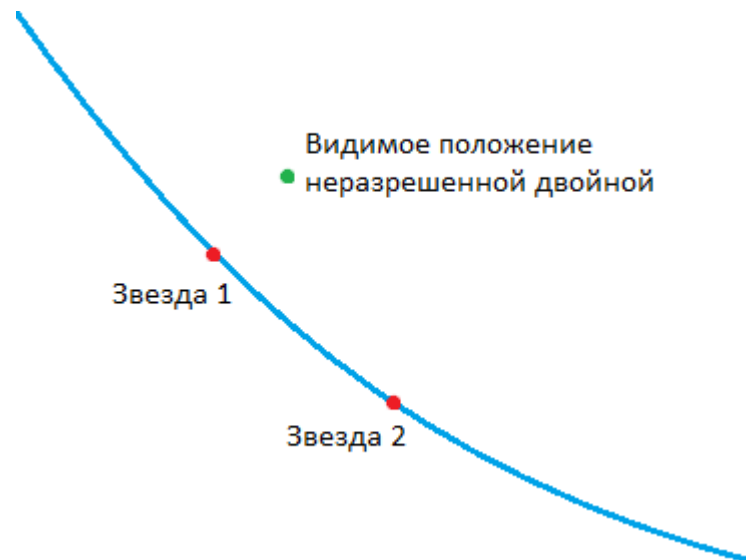


Рис. 16 – качественная схема уширения главной последовательности из-за неразрешенных двойных звезд. В качестве примера показано примерное видимое положение неразрешенной двойной звезды (физической или визуальной), состоящей из 2-х звезд главной последовательности.

6. После завершения процедуры наложения изохроны следует записать полученные значения возраста, видимого модуля расстояния и избытка цвета, не забыв указать, в каких фильтрах и цветах они были получены.
7. Аналогичную процедуру (пункты 1-6) необходимо провести для второй диаграммы.

Обработка результатов

Полученные данные являются в некотором смысле «сырыми», т.к. найденный видимый модуль расстояния не позволяет напрямую вычислить реальное физическое расстояние до скопления, а полученный избыток цвета требует перевода в более часто используемые величины, например в избыток $E(B - V)$. Для этого необходимо учесть межзвездное поглощение света.

1. Переведем полученные нами избытки цвета в избыток $E(B - V)$, используя «средний» закон межзвездного поглощения (СЗМП). Для этого следует воспользоваться следующими линейными эмпирическими соотношениями между избытками различных цветов:

$$E(B - V) = 3.846 \cdot E(J - H)$$

$$E(B - V) = 1.832 \cdot E(J - K)$$

$$E(B - V) = 1.503 \cdot E(R - I)$$

$$E(B - V) = 1.493 \cdot E(r - i)$$

Избытки цвета, полученные по разным диаграммам должны, очевидно, совпасть.

- Следующим шагом является исправление видимых модулей расстояния за межзвездное поглощение и получение истинного модуля расстояния (очевидно, что по двум диаграммам должно быть получено одинаковое значение истинного модуля расстояния, т.к. оно отражает реальное физическое расстояние до объекта). В соответствии со СЗМП, величина межзвездного поглощения и избыток цвета связаны линейной зависимостью:

$$A_J = 2.77 \cdot E(J - H)$$

$$A_K = 0.6757 \cdot E(J - K)$$

$$A_R = 3.801 \cdot E(R - I)$$

$$A_r = 3.98 \cdot E(r - i)$$

Для произвольной спектральной полосы n значение истинного модуля расстояния может быть получено следующим образом (см. теоретическое введение):

$$(m - M)_0 = (m - M)_n - A_n$$

- После этого, расстояние до объекта может быть вычислено с использованием следующего соотношения (см. теоретическое введение):

$$d[\text{пк}] = 10^{0.2(m-M)_0+1}$$

Основные итоги работы

При помощи классического и/или модернизированного (метода h -индексов) метода наложения теоретических изохрон на диаграмму цвет – звездная величина (или ее альтернативы для метода h -индексов) рассеянного звездного скопления должны быть оценены его возраст, избыток цвета и видимый модуль

расстояния в соответствующих полосах. Затем, на основании «среднего» закона межзвездного поглощения, должен быть произведен пересчет полученных избытков цвета в избыток $E(B-V)$, а видимых модулей расстояния в истинный. На основании истинного модуля расстояния должно быть вычислено реальное физическое расстояние до РЗС.

Контрольные вопросы

1. Что такое абсолютная звездная величина? Запишите формулу Погсона для разницы звездных величин двух звезд, создаваемых на приемнике световые потоки F_1 и F_2 соответственно.
2. Что такое показатель цвета и избыток цвета?
3. Что такое модуль расстояния? Как он связан с физическим расстоянием до объекта (записать формулу)?
4. С чем связано отличие (1) видимого цвета от нормального? (2) видимого модуля расстояния от истинного?
5. Что такое изохрона? Опишите основную суть метода наложения изохрон. Какие три параметра скопления могут быть найдены с помощью этого метода?
6. Опишите кратко суть модернизированного метода наложения изохрон (метода h -индексов). С чем связано основное ограничение этого метода?
7. С чем связано уширение главной последовательности скопления на диаграмме цвет – звездная величина (назовите основной эффект). Посчитайте на сколько звездных величин (т.е. по оси ординат) может расширяться главная последовательность из-за этого эффекта.
8. Что такое точка поворота? О какой характеристике скопления говорит ее положение?

Рекомендуемая литература

1. Засов А.В., Постнов К.А. - Общая астрофизика – М.: Фрязино, 2011
2. Расторгуев А.С. - Курс лекций по галактической астрономии - <http://Infm1.sai.msu.ru/~milkyway/GA.HTM>
3. Dambis A.K, Glushkova E.V. et al. Investigation of open clusters based on IPHAS and APASS survey data, MNRAS, Volume 465, Issue 2, p.1505-1517 (2017)