

Теоретические диаграммы цвет—светимость рассеянных звездных скоплений

М. Попова, З. Крайчева

Введение

Теория звездной эволюции основывается в наибольшей степени на наблюдательных данных о звездных скоплениях. Сопоставление теоретических диаграмм Герцшпрунга—Ресселя с наблюдательными данными скоплений, члены которых различаются практически только одним параметром — их масса, имеет важное значение для проверки теории звездной эволюции. Установленные несоответствия дают указание для развития теории, для необходимых изменений параметров и начальных условий, принятых для вычисления теоретических эволюционных последовательностей звездных моделей, и указывают пути, ведущие к уточнению методики теоретических расчетов.

Из сравнения наблюдательных диаграмм цвет—светимость с теоретическими изохронами можно определить возраст скопления, оценить интервал времени, в течение которого протекал процесс звездообразования данного комплекса, сделать выводы относительно возможной потери массы на данной стадии эволюции.

Моделирование теоретических изохрон базируется на эволюционных последовательностях звездных моделей для звезд с различными массами. Геометрическое подобие эволюционных треков дает возможность получить из них теоретические изохроны, используя данные о темпе эволюции в различных эволюционных фазах. Введение быстродействующих ЭИМ для трудоемких вычислений стимулировало развитие эволюционных исследований к более поздним стадиям эволюции. Были вычислены серии эволюционных треков для звезд с различными массами, для различных начальных химических составов, при различных предположениях о физических параметрах, входящих в вычисления.

С другой стороны, увеличилось число скоплений, для которых построены диаграммы цвет—величина, были уточнены диаграммы ряда скоплений, главным образом на основе использования электрофотометрических наблю-

дений. Сделана ревизия расстояний до скоплений, получены новые данные для избытков цвета. Увеличиваются, правда медленнее, определения собственных движений и радиальных скоростей звезд для уточнения принадлежности отдельных звезд к данному скоплению.

Все это дало импульс для моделирования теоретических изохрон и их сравнения с наблюдениями. Начало подобных исследований было поставлено Митчелом и Джонсоном (1957), которые, используя изохрон, определяют возраст Плеяд. Не останавливаясь на работах, относящихся к периоду, когда эволюционные последовательности звездных моделей ограничивались только в области главной последовательности, упомянем поздние работы Айзенмана, Демарка, Миллера (1969), Сэндейджа, Эгена (1969), Барбаро, Делпорта, Фабриса (1969), Длужневской, Музилева, Родионовой (1972), Маедера (1974) и др.

Несмотря на то, что в общих линиях получается согласие между наблюдательными и теоретическими результатами, в ряде случаев находят некоторые несоответствия. Для их выяснения, а также для более точного определения возраста скоплений необходимо использовать изохроны, полученные на основе гомогенных систем эволюционных треков для возможно большего набора звездных масс, вычисленных по единой методике и для одинакового начального химического состава, возможно ближе к химическому составу звездных скоплений, с которыми проводится сравнение. Существенное значение при сравнении теоретических и наблюдательных результатов имеют калибровочные зависимости, которые используются для трансформации наблюдательных координат в теоретические, и наоборот. В последнее время, благодаря развитию внеатмосферной астрономии, были получены новые калибровочные зависимости, которые позволяют улучшить точности этих трансформаций.

Имея в виду все эти обстоятельства, мы поставили себе цель получить теоретические диаграммы цвет—светимость рассеянных звездных скоплений, используя однородную систему эволюционных треков для начального химического состава, наиболее близкого к химическому составу рассеянных скоплений, применяя новые калибровки для перехода от теоретических к наблюдательным координатам.

Моделирование теоретических изохрон

Для сравнения теоретических изохрон с наблюдательными диаграммами скоплений можно идти двумя путями:

1. Получить изохроны в теоретических координатах L (соответственно M_b) — $\log T_{\text{eff}}$ и трансформировать наблюдательные данные для скоплений к этим координатам.

2. Трансформировать теоретические изохроны в наблюдательные координаты M_b — $(B-V)$ и сопоставлять данные наблюдений с ними.

Мы выбрали второй путь, который до сих пор меньше применялся, но, учитывая все большее количество скоплений, для которых построены диаграммы цвет—звездная величина, можно считать, что рациональнее перейти к моделированию изохрон в наблюдательных координатах для облегчения сравнения с наблюдениями.

Для получения изохрон мы использовали однородный ансамбль эволюционных треков для звезд с массами 1, 5, 3, 5, 7, 10 и 15 M_{\odot} , вычисленные Пачинским (1970а, б) для I типа населения. Эволюционные рас-

четы начинают с гомогенных моделей с химическим составом $x=0,70$, $y=0,27$, $z=0,03$ и достигают для $1,5 M_{\odot}$ до гелиевой вспышки в ядре, а для остальных масс — до зажигания углерода. Расчеты проводились при помощи программы, составленной для метода Хениея. Вращение звезд и по

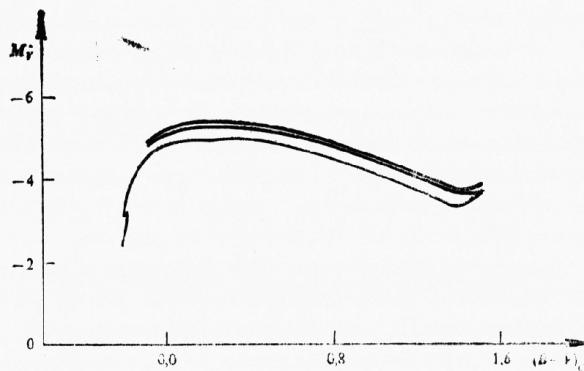


Рис. 1. Эволюционный трек для $10 M_{\odot}$ (П а ч и н с к и, 1970) представлен в координатах $M_v - (B - V)_0$

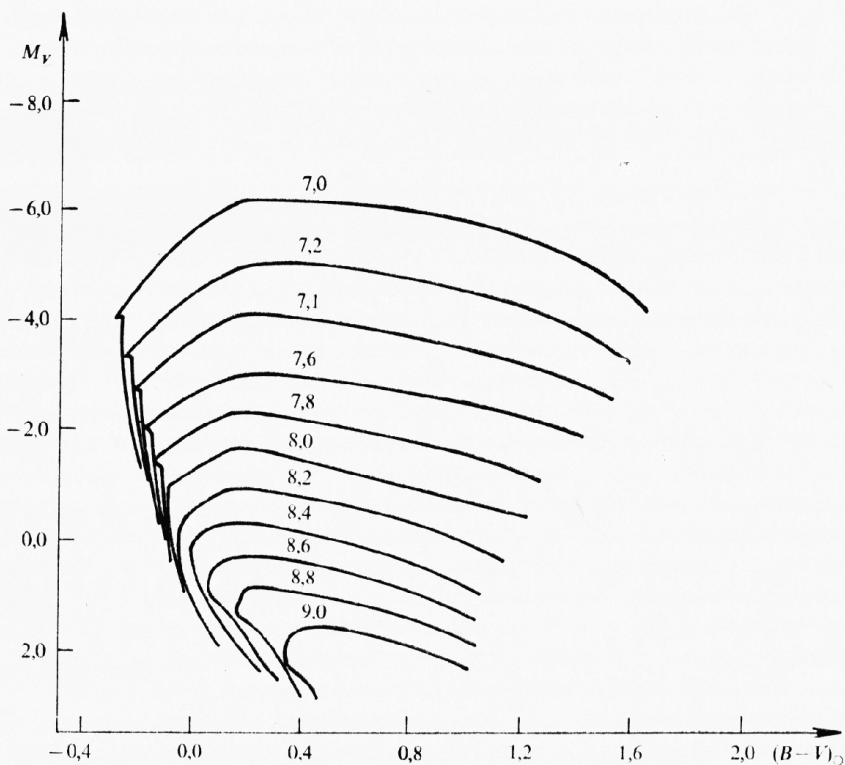


Рис. 2. Теоретические изохроны

тери массы не учитывались. Использовались улучшенные величины непрозрачности Кокса и Стюарта (1969).

Как известно, „петли“, которые получаются на эволюционных треках для 5 , 7 и $10 M_{\odot}$, проявляют значительную чувствительность к применяе-

мым программам вычислений и к изменениям ряда параметров, участвующих в эволюционных расчетах. Это ведет к значительной неуверенности эволюционных расчетов для „петель“. Поэтому мы ограничились использованием эволюционных последовательностей моделей до достижения области красных гигантов.

Мы хотели бы обратить внимание на тот факт, что после трансформации треков в координатах M_v — $(B-V)$ при увеличении массы звезды петли удлиняются и приближаются к главной последовательности.

На рис. 1 представлен эволюционный трек Пачинского для $10 M_{\odot}$, трансформированный в координатную плоскость M_v — $(B-V)_0$. Видно, что для некоторых масс или при изменении некоторых параметров может получиться еще большее удлинение. Этим, возможно, объясняется несоответствие с теорией, обнаруженное Робертсоном (1973) у некоторых из молодых скоплений, выражающееся в наличии звезд выше главной последовательности.

Из серии эволюционных треков и табулированных данных для эволюционных временных шкал для достижения звездами данной массы определенной точки эволюционного трека через двойную интерполяцию были получены изохроны, соответствующие различным возрастам. Программа для ЭВМ включала интерполяцию по массе с шагом $0,04 M_{\odot}$ и по времени с шагом $0,1 \log T$.

На рис. 2 представлена моделированная серия изохрон для возрастов от 10^7 до 10^9 лет, трансформированных в координатной плоскости M_v — $(B-V)_0$ в соответствии с последними калибровками, основанными на внеатмосферных наблюдениях.

Калибровки, использованные для трансформации изохрон в координатах M_v — $(B-V)$

При трансформации от светимостей L (соответственно M_b) теоретических моделей к абсолютной визуальной величине M_v и от эффективной температуры T_{eff} эволюционных моделей к показателям цвета $(B-V)$ используется зависимость между эффективной температурой, цветом и болометрической поправкой BC . Калибровка этих зависимостей претерпела изменения и уточнения, некоторые из которых являются существенными. В течение последних 20 лет опубликовано несколько таких калибровок, например, Харрисом (1963), Джонсоном (1966), для звезд главной последовательности, гигантов и сверхгигантов, Мортон и Адамсом (1969) для звезд спектральных типов позднее, чем O , Мортон (1969) для O -звезд, Кодом, Дейвисом, Блессом, Брауном (1974) для горячих звезд с эффективной температурой свыше 6000°K , Лийем (1970) и Флауером (1975) для сверхгигантов, Паррадисом (1973) зависимость T_{eff} — $(B-V)$ для G - и K -сверхгигантов.

Эффективную температуру звезды можно найти из измерений ее угловых размеров и интегрированного по всему спектру полного абсолютного потока излучения.

До недавнего времени, однако, и T_{eff} , и BC для звезд, за исключением Солнца, выводились только теоретически, поскольку большая часть излучаемого потока горячих звезд находится в ультрафиолетовой области, которая поглощается атмосферой.

Мортон и Адамс (1969) пересматривают использованные ранее зависимости между T_{eff} , BC и $B-V$ для звезд главной последовательности.

сти и выводят уточненные зависимости на базе новейших теоретических моделей звездных атмосфер с учетом покровного эффекта от Бальмеровских линий. Для спектральных типов между В8 и А5 были получены значительно более низкие эффективные температуры. Например, для $(B-V)_O=0,00$,

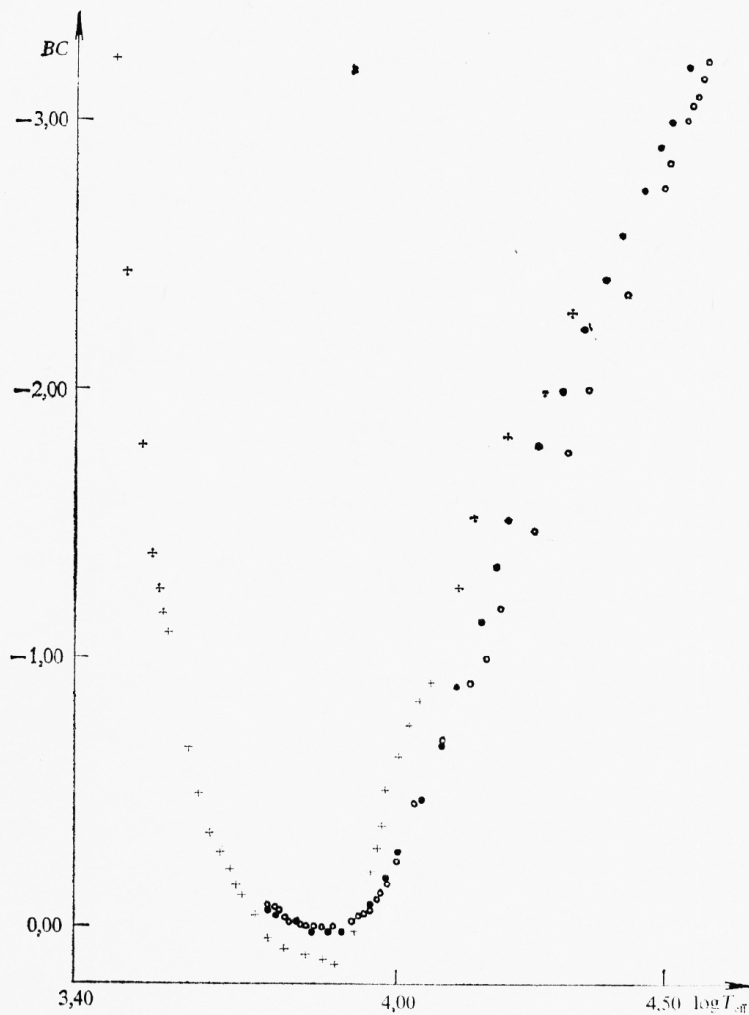


Рис. 3. Зависимости $\log T_{\text{eff}} - BC$ для звезд главной последовательности, полученные различными авторами: точки — Код и др. (1974); кружки — Мортон, Адамс (1969); крестики — Джонсон (1966)

T_{eff} , вместо 10 700 К по калибровке Харриса (1963), получено 9600 К. Различия с Джонсоном (1966) не очень велики. При отсутствии эмпирических данных эти калибровки были использованы как наиболее хорошие.

В последнее время, однако, появилась возможность эффективные температуры и болометрические поправки выводить из наблюдательных данных, благодаря орбитальным астрономическим обсерваториям и интерферометрам интенсивностей. Код, Дейвис, Блесс, Браун (1974) имели возможность получить новую шкалу на базе новых, существенным образом дополненных эм-

пирических данных для распределения энергии звезд, слабо зависящей от моделей звездных атмосфер. Они определили эффективные температуры, показатели цвета и болометрические поправки для 32 звезд, включительно для 9 сверхгигантов, спектральных типов в интервале от O5 до F8, исполь-

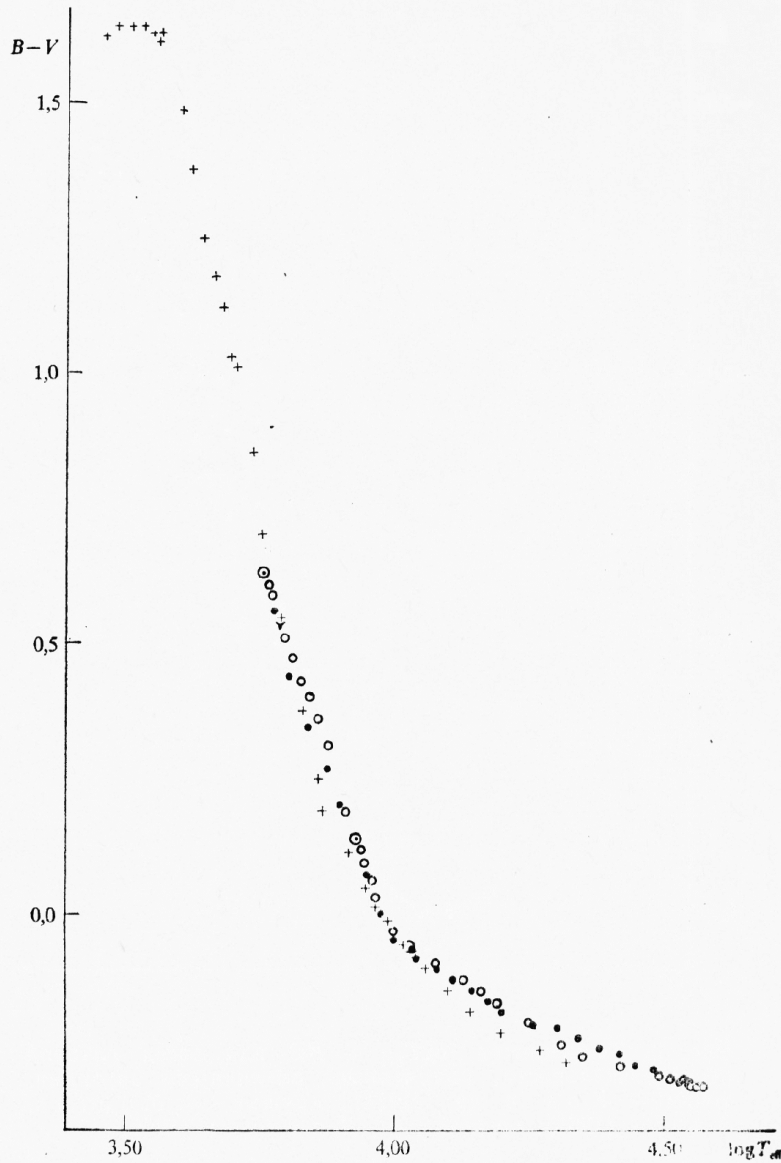


Рис. 4. Зависимости $\log T_{\text{eff}}$ — $(B-V)_0$ для звезд главной последовательности, полученные различными авторами. Обозначения, как на рис. 3

зуя эмпирическое распределение спектральной энергии, полученное из измеренных ультрафиолетовых потоков в интервале $\lambda\lambda 1100-3300 \text{ \AA}$ с орбитальной астрономической обсерватории ОАО—2 в комбинации с данными о потоках из конвенциональной спектрофотометрии для $\lambda\lambda 3000-8080 \text{ \AA}$, а для длин волн свыше 8080 \AA — из широкополосной фотометрии.

Угловые диаметры звезд были измерены интерферометром Хенбэри, Брауном, Дейвисом, Алленом (1974) и скорректированы на потемнение к краю диска на базе теории звездных атмосфер.

На рис. 3 и 4 представлены для сравнения зависимости $\log T_{\text{eff}} - BC$ и $\log T_{\text{eff}} - (B-V)_{\odot}$ по данным различных авторов.

Следует иметь в виду, что новые калибровки относятся только к объектам I типа населения, поскольку выведены из наблюдений такого типа объектов. Для звезд шаровых скоплений, например, они неприменимы.

Сравнения с наблюдениями. Определение возраста скоплений

Полученная нами серия теоретических изохрон представлена в плоскости $M_v - (B-V)$, что дает возможность для удобного и быстрого сопоставления с наблюдательными диаграммами цвет — светимость рассеянных скоплений и для определения возраста скоплений. Особенно подходящим для этой цели является каталог Хагена (1970), содержащий в одинаковом масштабе диаграммы $M_v - (B-V)_{\odot}$ для 188 рассеянных скоплений.

Сопоставление показало принципиальное согласие теоретических и наблюдательных результатов и некоторые различия в деталях, которые нуждаются в более подробном рассмотрении:

1. Наличие в ряде скоплений ниже ветви гигантов звезд, принадлежащих к скоплениям по критерию собственного движения.
2. Различие в положении и виде провала на диаграммах цвет — светимость, соответствующего эволюционной стадии истощения водорода в ядре.
3. Несоответствие между ожидаемой и наблюдаемой ширинами диаграмм.

Из сопоставления теоретических изохрон с наблюдательными диаграммами был определен возраст 40 рассеянных скоплений. Результаты представлены в табл. 1. В первом столбце дано название скопления, во втором — его возраст.

Таблица 1

Скопление	$\log t$	Скопление	$\log t$
NGC 225	8,05	NGC 2437	7,9
457	7,1	2548	8,4
581	7,4	2632	8,8
Tr 2	7,8	3532	8,15
1027	8,0	3766	7,2
Per	7,4	4755	7,4
1342	8,4	6087	7,55
Pleades	7,45	6405	7,55
1528	8,3	IC 4665	7,8
1545	8,25	6475	8,0
Huades	8,8	6494	8,2
1662	8,02	6633	8,5
1664	8,05	IC 4725	7,5
1912	8,15	6705	8,1
1960	7,5	6709	7,75
2168	7,7	7063	8,1
2281	8,45	7092	8,3
2287	8,05	7209	7,1
2323	7,62	7380	7,0
NGC 2422	7,7	7790	7,45

Анализ влияния ротации, наличия двойных звезд, различия в химическом составе, ошибок в определении модулей расстояния и других факторов на точность сравнения теоретических диаграмм с наблюдательными, будет рассмотрен отдельно.

Авторы выражают благодарность Малиновой Л. за ценную помощь при подготовке статьи к печати.

Л и т е р а т у р а

- Айзенман, Демарк, Миллер (Aizenman, M. I., P. Demarque, R. Miller). 1969. *Astrophys. J.*, **155**, 973.
- Барбаро, Деллапорта, Фабрис (Barbaro G., N. Delaporta, G. Fabris). 1969. *Astrophys. Sp. Sci.*, **3**, 123.
- Джонсон (Johnson, A. I.). 1966. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **4**, 19.
- Длужневская, О. Б., В. В. Музилев, Г. Г. Родионова. 1972. Научные информации Астросовета АН СССР, **21**, 68.
- Код, Дейвис, Блес, Хенбъри, Браун (Code, A. D., J. Davis, R. C. Bless, R. Hanbury, Brown). 1974. *Wisconsin Astrophysics*, Number 2.
- Кокс, Стюарт (Cox, A. N., J. N. Stewart). 1969. *Astron. Council, Acad. of Sciences, USSR, Scientific Informations*, **15**.
- Лий (Lee, T. A.). 1970. *Astrophys. J.*, **162**, 217.
- Маедер (Maeder, A.). 1974. *Astron. Astrophys.*, **32**, 177.
- Митчелл, Джонсон (Mitchell, R. I., H. L. Johnson). 1957. *Astrophys. J.*, **125**, 414.
- Мортон (Morton, D.). 1969. *Astrophys. J.*, **158**, 629.
- Мортон, Адамс (Morton, D., T. F. Adams). 1969. *Astrophys. J.*, **151**, 611.
- Парадийс (Paradijs, J. van). 1973. *Astron. Astrophys.*, **23**, 369.
- Пачински (Paczynski, B.). 1970. *Acta Astron.*, **20**, 47.
- Пачински (Paczynski, B.). 1970. *Acta Astron.*, **20**, 195.
- Робертсон (Robertson, J. W.). 1973. *Astrophys. J.*, **180**, 425.
- Сендейдж, Эген (Sandage, A., O. J. Eggen). 1969. *Astrophys. J.*, **158**, 685.
- Флауер (Flower, P. J.). 1975. *Astron. Astrophys.*, **41**, 391.
- Хаген (Hagen, G. L.). 1970. *Publ. of David Dunlap Obs.*, **4**.
- Хенбэри, Браун, Дейвис, Аллен (Hanbury, Brown, P., J. Davis, L. R. Allen). 1974. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **167**, 121.
- Харрис (Harris, D. L.). 1963. *Basic Astr. Data*, Ed. K. A. Strand chap. XIV.

Theoretical C-M diagrams of open clusters

M. Popova, Z. Kraicheva

(Summary)

Theoretical isochrones for clusters with ages from 10^7 to 10^9 yrs are constructed and transformed to coordinates M_v -(B-V). The ages for 40 open clusters are obtained on the basis of these isochrones.

*Самостоятельный сектор астрономии
с Национальной астрономической обсерваторией
Болгарской академии наук*

Поступила 3. 11. 1977 г.