

А. В. Миронов, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

МНОГОЦВЕТНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

Кратко рассмотрена история многоцветных фотометрических систем и их современное состояние. Показаны возможности современных фотометрических систем по определению спектральных типов звезд (классификация), количественных значений физических параметров звезд (квантификация) и величин межзвездной экстинкции.

The history and modern condition of multicolor photometric systems are briefly considered. Capabilities of photometric systems for classification (determination of stellar spectral types), quantification (determinations of stellar physical parameters) and interstellar extinction measurements are shown.

Введение

Основными физическими характеристиками звезды являются ее светимость L , масса M , радиус R и эффективная температура T_e . Связь между этими величинами (выраженных в солнечных единицах) задается известной формулой

$$\lg L/L_{\odot} = 2 \lg R/R_{\odot} + 4 \lg T_e/T_{e\odot}, \quad (1)$$

следующей из закона Стефана—Больцмана. Именно с этой формулы начинается изложение вопросов многоцветной астрофотометрии в монографии Витаутаса Страйжиса «Многоцветная фотометрия звезд» [1, глава 1, §1.1]. Отметим, что многие сведения, приведенные во введении и четырех первых разделах настоящей лекции, основаны на материалах этой знаменитой книги.

Учитывая выражение для ускорения силы тяжести на поверхности звезды

$$g = GM/R^2, \quad (2)$$

получаем формулу связи основных физических параметров звезд

$$\lg L/L_{\odot} = \lg M/M_{\odot} - \lg g/g_{\odot} + 4 \lg T_e/T_{e \odot}. \quad (3)$$

В процессе равновесной эволюции звезды в каждый момент должны выполняться условия формулы (3), определяющая положение звезды на так называемой теоретической диаграмме Герцшпрунга—Рессела $\lg L/L_{\odot}, \lg T_e$.

Однако положение звезды на диаграмме HR зависит еще и от начального химического состава, выражаемого относительным содержанием водорода X , гелия Y и всех более тяжелых элементов Z . Звезды имеющие одинаковую массу, но отличающиеся по химическому составу, имеют разные радиусы, а, следовательно, различные $\lg g$.

Определение перечисленных физических свойств поверхностных слоев звезд является одной из основных задач астрофизики. Это трудная задача из-за многочисленности типов звезд. Кроме того, дополнительные трудности вносит наличие межзвездной экстинкции, искажающей распределение энергии в спектре звезд и вносящих дополнительное неизвестное.

В принципе, если получить высокоточный и высокодисперсный спектр звезды, то можно определить все основные параметры, включая межзвездную экстинкцию, но такие измерения либо требуют дорогостоящего времени очень больших телескопов, либо заставляют ограничиваться лишь наиболее яркими объектами. Поэтому астрофизика вынуждена использовать методы многоцветной фотометрии звезд. Завершим наше введение цитатой из книги Страйжиса [1, глава 5].

«Информация о температурах, ускорениях силы тяжести, химических составах, эволюционных стадиях и других физических свойствах звезд, а также об их межзвездном покраснении может быть получена или с помощью анализа спектров звезд, или путем фотометрии их света в определенных интервалах длин волн. Набор участков спектра, описываемых определенными кривыми реакции, в которых проводится измерение интенсивности излучения небесного объекта с какой-то конкретной целью, носит название фотометрической системы. Фотометрическая система может содержать от одной до нескольких десятков полос.»

Эпоха до UBV

Применение в астрономии фотографического метода наблюдений с использованием несенсибилизированных фотопластинок привело к появлению в начале XX в. первых двухцветных фотометрических систем. Фотографические величины m_{pg} в сочетании с визуальными m_v или фотовизуальными m_{pv} составили двухцветную систему, в которой можно было получить один показатель цвета (колор-индекс). Дальнейшие работы в Гарвардской и Маунт-Вильсоновской обсерваториях привели к созданию Северного Полярного Ряда (NPS) — фотометрического стандарта вокруг северного полюса мира, содержащего около 100 звезд от 2 до 20 звездной величины. Фотографические (IPg) и фотовизуальные (IPv) величины этих звезд были утверждены на I-м съезде Международного Астрономического Союза в 1922 г. и составили первичный стандарт интернациональной системы величин IPg, IPv .

Положение кривых реакции интернациональной системы было выбрано не по каким-либо соображениям, связанным с физикой звезд, а почти случайно. Полоса IPv приблизительно соответствует кривой чувствительности человеческого глаза, а положение полосы IPg определилось как сочетание спектральной чувствительности несенсибилизированных фотопластинок со спектральной кривой пропускания оптики 60-дюймового Маунт-Вильсоновского рефлектора, в систему которого было переведено большинство наблюдений.

В разных обсерваториях для определения инструментальных величин звезд NPS применялись самые различные рефракторы и рефлекторы, что приводило к тому, что в кривую реакции величин m_{pg} попадало различное количество ультрафиолетового излучения. Следствием этого оказались сложные и нелинейные связи между величинами m_{pg} у разных авторов. Мы вернемся к этому вопросу в следующем разделе.

Первые фотоэлектрические наблюдения звезд были выполнены на рубеже первого и второго десятилетий XX в. До середины 1950-х гг. большое количество наблюдений было выполнено в разных реализациях двухцветных систем. К сожалению, эти работы выполнялись в своих собственных системах, не придерживаясь каких-либо стандартных кривых реакции. Эти результаты имеют сейчас лишь исторический интерес. Из важных достижений того времени следует назвать разработанный В. Б. Никоновым оригинальный метод учета ослабления света в земной атмосфере [2, 3].

Первой действительно многоцветной системой явилась система, реализованная в 1940-е гг. Стеббинсом и Уитфордом [4]. Она осно-

Таблица 1. Фотометрические полосы шестичцветной системы Стеббинса—Уитфорда

	<i>U</i>	<i>V</i>	<i>B</i>	<i>G</i>	<i>R</i>	<i>I</i>
$\lambda_c, \text{Å}$	3 530	4 220	4 880	5 700	7 190	10 300
$\Delta\lambda, \text{Å}$	400	840	1 200	1 100	1 700	1 800

вывалась на фотоэлектрических наблюдениях и состояла из шести фотометрических полос, имеющих обозначения, средние длины волн и полуширины, приведенные в табл. 1. Всего в системе *UVBGR I* наблюдалось около 1 400 звезд. На основе этих наблюдений впервые был получен ряд важных результатов. Назовем только три из них. Во-первых, впервые были исследованы вариации закона межзвездного покраснения в разных областях Млечного Пути. Во-вторых, было показано, что на двухцветной диаграмме (*U–B*)–(*B–I*) звезды главной последовательности образуют изгиб, вызванный бальмеровским скачком (см. следующий раздел). В-третьих, было доказано, что на основе двухцветных диаграмм можно определять величину межзвездного покраснения для звезд ранних спектральных классов главной последовательности.

Триумф *UBV*

С конца 1930-х и до начала 1950-х гг. выдающиеся астрофотометристы этого времени Стеббинс, Уитфорд, Эгген и молодой Гарольд Джонсон активно пытались реализовать интернациональную систему фотоэлектрическими методами. Эта реализация, названная системой *P, V*, состояла из двух полос со средними длинами волн 4 215 и 5 240 Å. Основными стандартами были приняты 9 звезд из числа объектов NPS. Внутренняя точность измерений была весьма высокой, однако оказалось, что показатели цвета *P–V*, определенные по наблюдениям различных авторов, связаны нелинейными и неоднозначными соотношениями. Причину этого понял в конце 1940-х гг. сотрудник обсерватории Макдональд Гарольд Джонсон. Он обнаружил, что причиной расхождений является неодинаковое включение ультрафиолетового излучения в области бальмеровского скачка в сильную фотометрическую полосу. Джонсон понял, что наиболее про-

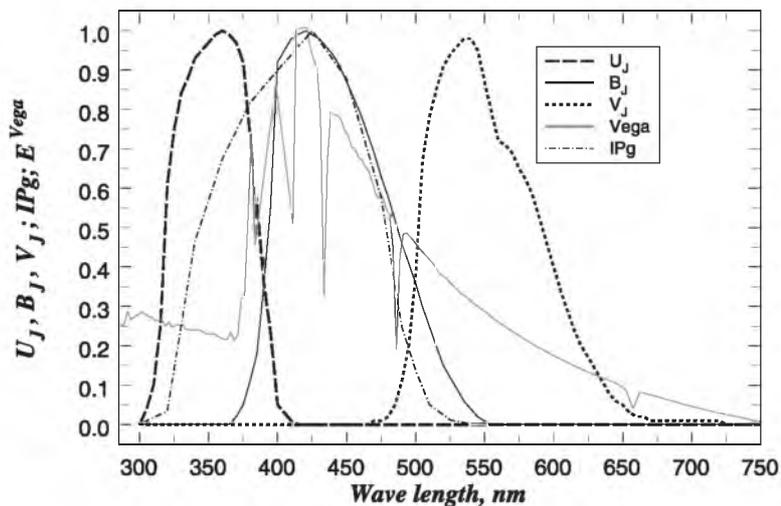


Рис. 1. Кривые реакции системы UBV , положение полосы IPg интернациональной системы и относительное распределение энергии в спектре звезды спектрального типа $A0 V$

стой способ справиться с проблемой — это добавить в состав синей кривой реакции светофильтр, обрезающий ультрафиолетовое излучение бальмеровского скачка.

Заслуга Джонсона состояла еще и в том, что он по возможности строго определил и опубликовал кривые реакции системы UBV . Они показаны на рис. 1.

В 1951 и 1953 гг. в *Astrophysical Journal* были опубликованы две статьи Джонсона и Моргана [5, 6], которые положили начало новой эпохе звездной фотометрии: эпохе системы UBV .

Со свойственными ему энергией, старанием и усердием Джонсон с различными соавторами выполнил с системе UBV многочисленные наблюдения большого количества звезд. Среди них были яркие звезды, звезды в различных участках неба, звезды рассеянных и шаровых звездных скоплений и др.

Нуль-пункт величин V системы UBV , был перенесен из интернациональной системы с помощью девяти звезд Северного Полярного Ряда. Опираясь на этот нуль-пункт, были определены величины десяти первичных стандартов системы UBV , разнесенных вокруг

всего неба. Нуль-пункты показателей цвета $U-B$ и $B-V$ были определены как среднее значение инструментальных показателей цвета для шести избранных звезд спектрального типа A0 V. Таким образом, в системе UBV

$$U-B = B-V = 0 \quad (4)$$

для звезд спектрального типа A0 V.

Система UBV благодаря строгому определению, точности и обилию стандартов получила широкое распространение и полностью вытеснила из употребления интернациональную систему IPg, IPv . Жан-Клод Мермийо из Лозаннской обсерватории регулярно публикует сводку измерений в системе UBV [7–11]. В настоящее время она содержит измерения более чем для 100 000 звезд.

В период с 1959 по 1966 г. Джонсон постепенно прибавил к полосам U , B и V целую последовательность фотометрических полос в красной и инфракрасной спектральных областях: появились полосы R , I , J , K , L , M , N и Q . Мендоза в 1967 г. дополнил эту последовательность еще одной полосой H . Средние длины волн и полуширины всех этих полос приведены в табл. 2. Положения инфракрасных полос подобраны так, чтобы они совпадали с окнами атмосферной прозрачности. Величины U , B и V измерялись фотоумножителем с сурьмяно-цезиевым фотокатодом, величины R и I — фотоумножителем с серебряно-кислородно-цезиевым катодом, величины J , K , L — фотосопротивлением PbS, охлаждаемым жидким азотом, величины M , N и Q — германиевым болометром, охлаждаемым жидким гелием. После появления системы $UBVR IJHKL MN$ система Стеббинса и Уитфорда $UVBGR I$ потеряла прежнее значение.

Таблица 2. Многоцветная фотометрическая система Джонсона

Величина	λ_0 , мкм	$\Delta\lambda$, мкм	Величина	λ_0 , мкм	$\Delta\lambda$, мкм
U	0.36	0.04	H	1.62	0.2
B	0.44	0.10	K	2.2	0.6
V	0.55	0.08	L	3.5	0.9
R	0.70	0.21	M	5.0	1.1
I	0.88	0.22	N	10.4	6.0
J	1.25	0.30	Q	20.0	5.5

Несколько слов о среднеполосных системах

Система UBV является широкополосной фотометрической системой. Такие системы, безусловно, обладают тем преимуществом, что в широкие полосы поступает много света, что позволяет на телескопах умеренного размера наблюдать слабые звезды и применять достаточно простую аппаратуру. Широкополосные системы можно успешно использовать для решения задач идентификации небесных объектов и изучения переменности их блеска. Но в задаче о проведении многомерной спектральной классификации широкополосные системы менее эффективны. Чтобы проводить спектральную классификацию на основе широкополосной фотометрии нужно быть уверенным в том, что соблюдается целый ряд дополнительных требований, таких, например, как знание класса светимости или отсутствие межзвездного покраснения. Поэтому, естественно, возникла задача создать фотометрические системы, с помощью которых можно было бы оценивать физические параметры звезд. Такие системы должны иметь большее количество полос, размещенных в характерных участках спектра звезды.

В визуальном окне прозрачности атмосферы нельзя разместить более пяти неперекрывающихся полос с шириной порядка $1\,000\text{ \AA}$. Такие полосы в любом случае будут аналогичны полосам U , B , V , R и I . Чтобы расставить большее число полос, они должны быть более узкими. С такой задачей могут справиться среднеполосные фотометрические системы с полушириной полос $100\text{--}300\text{ \AA}$.

Одной из наиболее популярных среднеполосных систем является система $uvby\beta$, созданная Б. Стремгеном [12, 13] для трехмерной (!) классификации непокрасневших звезд ранних спектральных классов по спектральным классам, классам светимости и металличности. В системе шесть полос. Из них пять — среднеполосные, и одна узкополосная. Их средние длины волн и полуширины приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры полос фотометрической системы Стремгена

Полоса	u	v	b	y	β_1	β_2
$\lambda_0, \text{ \AA}$	3 500	4 110	4 670	5 470	4 860(H_β)	4 860(H_β)
$\Delta\lambda, \text{ \AA}$	300	190	180	230	150	15 или 30

Из величин, получаемых в системе $uvby\beta$, составляются четыре индекса:

$$b-y, c_1 = (u-v) - (v-b), \\ m_1 = (v-b) - (b-y) \text{ и } \beta = m(15 \text{ \AA}) - m(150 \text{ \AA}).$$

Индекс $b-y$ является температурным индексом и по своим свойствам аналогичен показателю цвета $B-V$ системы UBV . Индекс c_1 измеряет высоту бальмеровского скачка. Индекс m_1 является мерой интенсивности спектральных линий поглощения, расположенных вокруг H_δ , поэтому он является индексом металличности.

Для непокрашенных звезд система Стремгрена позволяет отделить сверхгиганты спектрального класса В от В-звезд главной последовательности, а для звезд спектральных классов А–F проводить классификацию по светимости. Однако с помощью полос u , v , b и y невозможно отделить покрасневшие звезды V класса светимости от непокрашенных звезд III класса светимости. Для того чтобы провести такое разделение пришлось дополнить систему еще двумя полосами β_1 и β_2 , предложенными Д. Крауфордом. Обе они центрированы на линию поглощения H_β , но имеют разную ширину. Полуширина полосы β_1 составляет 150 \AA , а полуширина полосы $\beta_2 - 15 \text{ \AA}$ (в позднейших работах фильтр 15 \AA был заменен фильтром 30 \AA). Индекс $\beta = -2.5 \lg (\beta_2/\beta_1)$ измеряет интенсивность линии $H\beta$ по отношению к непрерывному спектру вокруг нее и обладает тем важным свойством, что не зависит от межзвездного покраснения. Для звезд В и ранних А он сильно зависит от светимости, и поэтому диаграммы $(\beta, b-y)$ или (β, c_1) для этих звезд (после учета межзвездного покраснения) дают хорошую двумерную классификацию. Для двумерной классификации звезд поздних подклассов А и класса F очень хорошо подходит диаграмма (β, c_1) , но для этих звезд уже c_1 измеряет светимость, а $\beta -$ температуру. Стремгрен и Крауфорд разработали последовательность действий, с помощью которой возможна трехмерная классификация.

Система $uvby\beta$ представляет собой пример системы, для которой достаточно подробно рассчитаны калибровки для определения температур, абсолютных звездных величин и факторов содержания металлов. Система неплохо работает при классификации ранних звезд. Однако для звезд классов G–K–M она не приспособлена. Задача фотометрической классификации звезд в широком диапазоне спектров была поставлена в Вильнюсе.

Вильнюсская система и проблема определения межзвездной экстинкции

Сначала на примере данных, полученных в системе UBV , рассмотрим один из самых важных видов представления фотометрической информации. Это двухцветные, или двухиндексные, диаграммы. Если в фотометрической системе более двух полос, то можно составить более одного показателя цвета и представить на диаграмме зависимость одного показателя от другого.

На рис. 2. показана диаграмма $(U-B)-(B-V)$ для звезд, входящих в Каталог ярких звезд (Bright Star Catalogue) [14]. Видно, что подавляющее большинство звезд образуют на диаграмме плавную, но немонотонную последовательность, волнистую полосу. Линия, соединяющая положения на двухцветной диаграмме непокрашенных звезд различных спектральных классов одного класса светимости, называется линией нормальных показателей цвета (часто говорят «линия нормальных цветов»).

На графике, особенно в области наиболее горячих звезд, выделяется группа точек, явно отклоняющихся от линии нормальных цветов. Излучение этих звезд подверглось влиянию межзвездного поглощения света. Если бы мы, нанося на двухцветную диаграмму наблюдательные данные, сразу умели отбирать только точки, соответствующие звездам одного определенного класса светимости, то для не слишком далеких от Солнца звезд, не испытавших существенного поглощения межзвездным веществом, мы могли бы сразу производить спектральную классификацию. На линии нормальных показателей цвета, т. е. на последовательности непокрашенных звезд одного класса светимости, каждый спектральный подкласс занимает определенное место. Для звезд с нормальным химическим составом спектральная классификация по фотометрическим данным может производиться с погрешностью $\pm 2-3$ спектральных подкласса. Но на эту принципиальную возможность решения задачи накладывается масса осложнений. Во-первых, линии нормальных показателей цвета для разных классов светимости на плоскости двухцветной диаграммы $(U-B)-(B-V)$ в некоторых точках пересекаются или идут близко друг к другу. Например, в области В-звезд нельзя отличить главную последовательность от гигантов. Несмотря на различную светимость, распределения энергии в их спектрах дают в системе UBV практически одинаковые показатели цвета. А вот сверхгиганты в диапазоне спектральных классов от О до ранних А отделить от

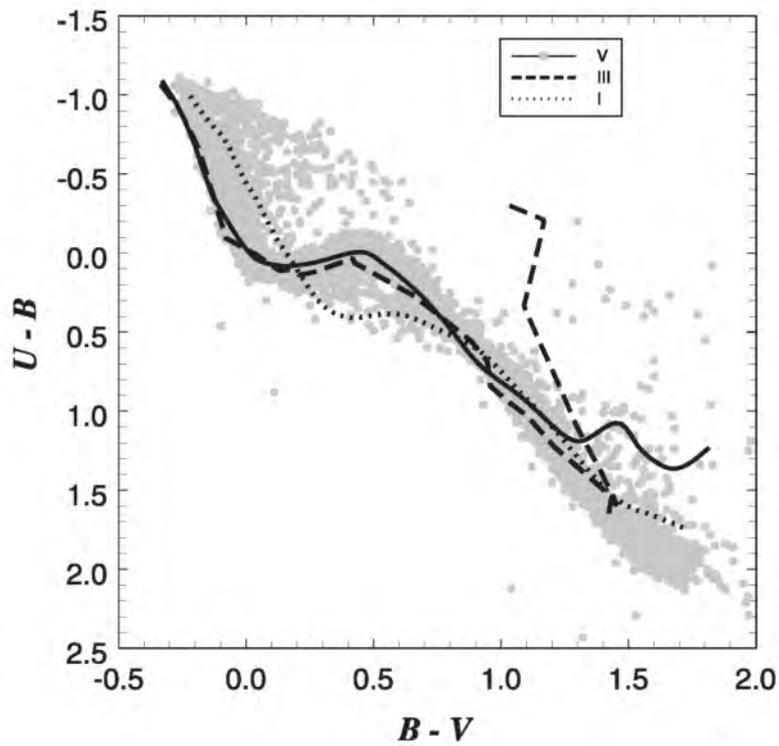


Рис. 2. Двухцветная диаграмма для показателей цвета системы UBV . Серые заполненные кружки соответствуют объектам из Каталога ярких звезд. Сплошной, штриховой и пунктирной линиями, соответственно, показаны средние линии нормальных показателей цвета для главной последовательности, гигантов и сверхгигантов

главной последовательности можно! Они имеют более красные показатели цвета $B - V$. Кроме этого, в области бальмеровского скачка сверхгиганты имеют более голубые, чем главная последовательность, показатели цвета $U - B$, из-за чего в области А-звезд линия сверхгигантов идет ниже главной последовательности; у сверхгигантов в системе UBV нет нарушения монотонности зависимости $U - B$ от $B - V$. Далее, в районе К-звезд все три последовательности идут очень тесно, но сильно расходятся в области спектрального класса М.

В этой зоне главная последовательность и сверхгиганты сохраняют свойство увеличения показателей цвета с понижением температуры, хотя количественно эти зависимости различаются. А вот линия гигантов резко загибается вверх и даже уходит несколько влево. Для гигантов ни $U-B$, ни $B-V$ не являются функциями температуры. Для красных гигантов величина показателей цвета определяется не температурой, а интенсивностью полос поглощения металлов (прежде всего титана и магния) и их окислов. Итак, если известен класс светимости, а излучение звезды не искажено покраснением, то можно везде, за исключением области красных гигантов, определить спектральный класс звезды по значению показателя цвета $B-V$. Не так обстоит дело при наличии межзвездного поглощения. При прохождении света через межзвездное вещество распределение энергии в спектре искажается, показатели цвета увеличиваются. Звезда со своего места на линии нормальных показателей цвета смещается по обеим координатам в сторону увеличения показателей цвета. Линии, по которым происходит это смещение, называют линиями покраснения, или линиями нарастающего поглощения. Они показаны на рис. 3.

К сожалению, на диаграмме $(U-B)-(B-V)$ линии нарастающего поглощения могут проходить так, чтобы пересекать линию нормальных показателей цвета несколько раз. Это мешает однозначной спектральной классификации, и для определения спектрального класса по фотометрическим данным требуются другие приемы.

Представим себе, что звезда по прямой линии покраснения переместилась из точки с координатами $(U-B)_0, (B-V)_0$ на последовательности нормальных показателей цвета в новую точку с координатами $(U-B), (B-V)$. Разности

$$E(U-B) = (U-B) - (U-B)_0 \quad \text{и} \quad E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0 \quad (5)$$

называются избытками цвета. Перепишем первое из равенств (5) в виде

$$(U-B)_0 = (U-B) - E(U-B) = (U-B) - E(B-V) \frac{E(U-B)}{E(B-V)} \quad (6)$$

с учетом второго уравнения (5) имеем

$$(U-B)_0 = (U-B) - [(B-V) - (B-V)_0] \frac{E(U-B)}{E(B-V)} \quad (7)$$

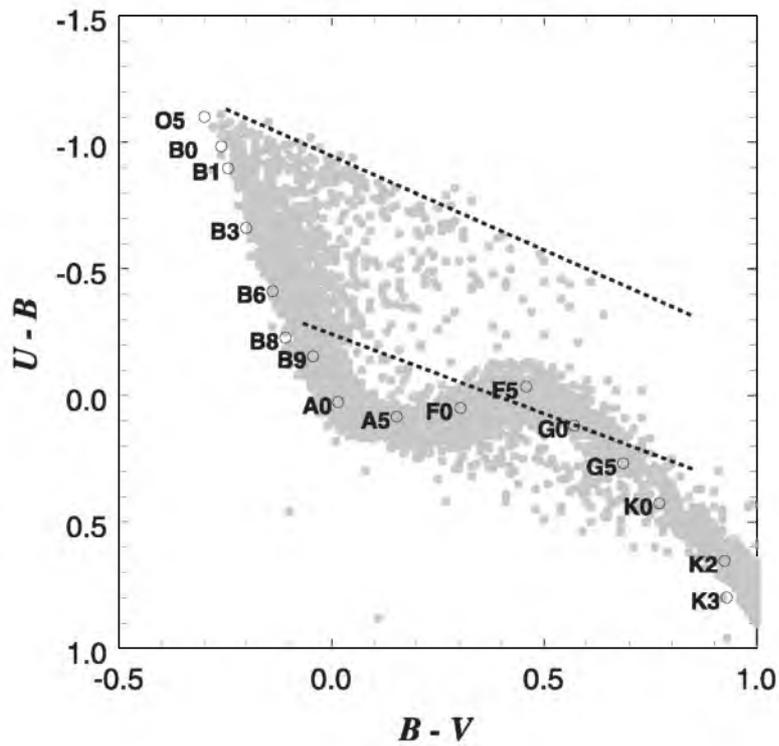


Рис. 3. Линии нарастающего поглощения на двухцветной диаграмме $(U-B)-(B-V)$

Раскрывая в (7) квадратные скобки и перегруппируя члены, получаем

$$(U-B)_0 - \frac{E(U-B)_0}{E(B-V)_0}(B-V) = (U-B) - \frac{E(U-B)}{E(B-V)}(B-V) = Q_{UBV}. \quad (8)$$

Величина, обозначенная Q , замечательна тем, что не зависит от межзвездного поглощения. С величинами Q также можно строить двухиндексные диаграммы $Q-Q$ — показатель цвета или $Q-Q$. Методы спектральной классификации, основанные на использовании величины Q , принято называть Q -методами. В случае четырехполосной системы такой, например, как $UBVR$, можно составить несколько

Q -индексов, а именно: Q_{UBV} , Q_{BVR} , Q_{UBVR} и др. К сожалению, двумерные зависимости Q — спектральный класс, Q — показатель цвета и $Q-Q$ обычно имеют сложный, нелинейный вид. Более того, линия может оказаться самопересекающейся. Могут тесно сближаться и пересекаться линии для звезд разных классов светимости. Однако на них можно выделять определенные области, в которых можно проводить спектральную классификацию фотометрическими методами в условиях наличия межзвездного поглощения.

Подчеркнем, что если придерживаться абсолютно строгих позиций, то, не зная ни спектрального типа, ни межзвездного покраснения, т. е. не имея хотя бы грубого представления о распределении энергии во внеатмосферном спектре звезды, невозможно правильно определить поправку выноса за атмосферу и перевести звездные величины из одной фотометрической системы в другую. Сила методов многоцветной фотометрии в том, что она дает нам представление о распределении энергии в спектре.

К настоящему времени создано несколько десятков среднеполосных фотометрических систем. Они создавались для решения фотометрическим путем задачи двумерной или трехмерной спектральной классификации (нахождения спектрального класса, класса светимости и степени металличности).

Однако, вот что писал В. Страйжис в 1977 г.:

«Ни одна из созданных ранее фотометрических систем не давала возможности проводить многомерную спектральную классификацию звезд при наличии межзвездного покраснения во всем интервале температур — от самых горячих до самых холодных. Все они ограничиваются или звездами какого-либо сравнительно узкого интервала спектральных классов, или обеспечивают классификацию только при отсутствии межзвездного покраснения».

Задача создания фотометрической системы, обеспечивающей эффективную классификацию по спектральным классам и классам светимости в полном интервале спектральных классов для покрасненных звезд с различным содержанием металлов была поставлена и решена в Вильнюсе. Понятно, что для этого нужно было выбрать расположение и полуширину фотометрических полос среднеполосной системы самым оптимальным образом. Основой выбора служили детальные данные о распределении энергии в спектрах звезд разнообразных спектральных типов и о законе межзвездного покраснения. Окончательное положение и ширина полос выбирались путем чис-

ленных экспериментов. Вычисляя свертки функций распределения энергии в спектрах звезд разных типов с предполагаемыми кривыми реакции полос и функциями межзвездной и атмосферной экстинкции, рассчитывались различные варианты двухцветных диаграмм, диаграмм (колер-индекс — Q) и ($Q-Q$). Варьируя расположение, полуширину и форму полос пропускания, вильнюсским исследователям удалось найти решение, наиболее близко соответствующее поставленной задаче.

Средние длины волн и полуширины полос Вильнюсской системы приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры полос Вильнюсской фотометрической системы

полоса	U	P	X	Y	Z	V	S
$\lambda_0, \text{Å}$	3 450	3 740	4 050	4 660	5 160	5 440	6 550
$\Delta\lambda, \text{Å}$	400	260	220	260	210	260	200

В Вильнюсской системе все колор-индексы нормированы по условию равенства нулю всех показателей цвета для непокрашенных звезд спектрального класса O. В этой системе проведены измерения более чем 15 000 звезд.

Покажем, как проводится классификация звезд по температурам и светимостям на примере разделения по светимостям звезд спектрального класса G с помощью индексов Вильнюсской фотометрической системы. Поскольку классификацию нужно производить при наличии межзвездного поглощения, основным инструментом должны быть двухиндексные (Q, Q) диаграммы.

Будем считать, что нам уже удалось выделить из общей массы звезды спектральных классов O, B, A и F, а среди них выделить сверхгиганты. В Вильнюсской системе для этого используются диаграммы Q_{UPY}, Q_{PYV} и Q_{UPY}, Q_{XYV} .

Классификация G-звезд проводится по диаграмме Q_{UPY}, Q_{XZS} . Она показана на рис. 4. Хорошо видно, как разделение звезд по светимостям увеличивается по мере перехода к более поздним спектральным классам.

Отметим, что наиболее поздние звезды разделяются по светимостям на диаграмме Q_{XZS}, Q_{XYZ} .

Вспомним, что из величин в четырех фотометрических полосах m_1, m_2, m_3 и m_4 , можно составить индекс Q , который, по определе-

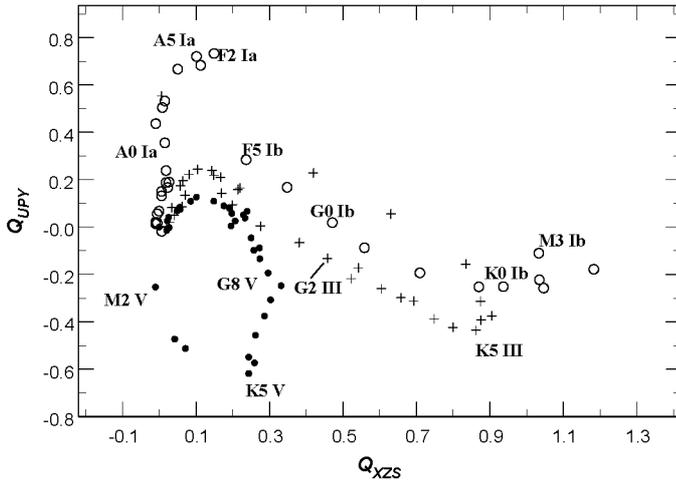


Рис. 4. Диаграмма $Q_{UFУ}, Q_{XZS}$ для классификации звезд G. Заполненные кружки — звезды главной последовательности, прямые крестики — нормальные гиганты, пустые кружки — сверхгиганты

нию, равен

$$Q_{m_1, m_2, m_3, m_4} = (m_1 - m_2) - \frac{E(m_1 - m_2)}{E(m_3 - m_4)}(m_3 - m_4). \quad (9)$$

Предположим, что случайная среднеквадратичная ошибка определения звездных величин во всех четырех полосах одинакова и равна $\sigma_m = \pm 0.01^m$. Это типичная ошибка для наземной фотоэлектрической фотометрии. Отношение избытков цвета $E(m_1 - m_2)/E(m_3 - m_4)$ по порядку величины равно единице. Отсюда следует, что случайная среднеквадратичная ошибка определения параметра Q составит $\sigma_Q = \pm \sqrt{4\sigma_m^2} = \pm 0.02^m$. Значит, в пределах $\pm 2\sigma_Q$, т. е. с вероятностью около 95 %, точное значение индекса Q будет находиться в квадрате ошибок со стороной 0.08^m . А это уже совсем не маленькая ошибка!

Вывод: чтобы Q -метод давал хорошие результаты, нужно иметь весьма точные фотометрические измерения, так что даже погрешность $\pm 0.01^m$ может оказаться недопустимо большой.

Вильнюсская система обладает также некоторыми возможностями классифицировать звезды по металличности и другим особенностям химического состава атмосфер, выделять белые карлики, обнаруживать двойные звезды, звезды с быстрым осевым вращением и пр. Эти вопросы обсуждаются в другой монографии В. Страйжиса: «Звезды с дефицитом металлов» [15].

Впоследствии обе книги Страйжиса были объединены в единый том на английском языке [16].

Гиппаркос и Тихо

В конце XX в. Европейским космическим агентством был выполнен грандиозный проект. На космическом аппарате Hipparcos был выполнен обзор всего неба [17–19]. В результате для 118 тыс. звезд были получены высокоточные положения, собственные движения и звездные величины в одной фотометрической полосе H_r (собственно эксперимент Hipparcos). Дополнительно координаты и звездные величины в двух фотометрических полосах B_T и V_T были определены для двух с половиной миллионов звезд (эксперимент Tycho). Ошибка индивидуального измерения величины H_r для звезд не слабее 9^m не превышает 0.0035^m . Ошибка индивидуального измерения величин B_T и V_T равна примерно 0.1^m . Каждый объект в обзорах Hipparcos и Tycho измерялся за время эксперимента примерно 100 раз. Считая, что фотометрические ошибки величин непостоянных звезд имеют нормальное распределение, получаем, что типичная среднеквадратичная ошибка среднего значения звездной величины в эксперименте Hipparcos составляет примерно 0.0004^m , а в эксперименте Tycho — 0.01^m .

В совокупности три фотометрические полосы H_r , B_T и V_T составляют трехцветную фотометрическую систему, обладающую некоторыми классификационными возможностями. Между тем, анализ этих трех кривых реакции, выполненный Майклом Бесселем [20], показал, что реальные кривые реакции детекторов на спутнике Hipparcos, отличаются от опубликованных. Данные о фотометрических полосах проекта Hipparcos приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры полос фотометрической системы эксперимента Hipparcos

полоса	по данным ESA [17]			по Бесселю [20]		
	$\lambda_{max}, \text{\AA}$	$\lambda_{mean}, \text{\AA}$	$\Delta\lambda, \text{\AA}$	$\lambda_{max}, \text{\AA}$	$\lambda_{mean}, \text{\AA}$	$\Delta\lambda, \text{\AA}$
<i>H_p</i>	4 525	5 200	2 500	4 800	5 420	2 290
<i>B_T</i>	4 350	4 200	800	4 350	4 210	690
<i>V_T</i>	5 050	5 400	900	5 100	5 270	1 040

GAIA и «Лира»

В настоящее время есть практическая возможность организовать многоцветный обзор неба с борта космического аппарата. Это означает, что можно будет строить фотометрическую систему опираясь только на особенности распределений энергии в спектре звезд, а не на расположение окон прозрачности атмосферы Земли. При этом встает задача рассчитать такую фотометрическую систему, которая справлялась бы с многомерной классификацией звезд лучше, чем Вильнюсская система. Поскольку полосы можно будет располагать в значительно более широком интервале длин волн, есть уверенность, что эта задача имеет решение.

Главная цель проекта GAIA, подготавливаемого Европейским космическим агентством, — сделать количественную оценку процессов, описывающих формирование и последующую динамическую и химическую эволюцию Млечного Пути и процессов звездообразования. Предполагается уточнить происхождение и историю нашей Галактики путем проверки различных теорий ее формирования и происхождения и эволюции звезд.

GAIA является совместным проектом, к которому участвуют около 200 ученых из примерно 50 институтов. Основной задачей эксперимента GAIA является измерение координат небесных объектов с беспрецедентной точностью. Предполагается получить координаты с погрешностью, не превышающей $7 \mu\text{as}$ при $V < 10^m$, $12\text{--}25 \mu\text{as}$ при $V = 15^m$ и $100\text{--}300 \mu\text{as}$ при $V = 20^m$. Общее количество измеряемых объектов должно быть около 1 000 000 000. Кроме астрометрических задач GAIA предполагает получить лучевые скорости с погрешностью $\sigma = 1 \text{ км/с}$ для звезд с $V = 13^m$ и $\sigma = 15 \text{ км/с}$ для звезд с $V = 17^m$. Важной частью проекта являются фотометрические измерения. Фотометрия является совершенно необходимой для учета хроматических aberrаций в фокальной плоскости, без чего невозможно

достигнуть микроарксекундной точности. Научные цели GAIA требуют получения совместных данных об астрометрии, фотометрии и лучевых скоростях, причем главной целью фотометрии является определение астрофизических параметров наблюдаемых объектов.

В рамках настоящей лекции нет возможности привести описание всей аппаратуры, которая будет установлена на космическом аппарате GAIA. Остановимся только на фотометрической аппаратуре. Предполагается проводить измерения в «белом» свете, а также получить многоцветную фотометрию.

Измерения в «белом» свете будут проводиться в основной части фокальной плоскости в сверхширокой фотометрической полосе G , охватывающей спектральный диапазон от 300 до 1 000 нм. За одно прохождение через поле зрения (через 11 ПЗС матриц) ожидается иметь погрешность измерения величины G примерно 0.2^m для $V = 23^m$, 0.01^m для $V = 19^m$ и менее 0.001^m для $V < 14^m$. За все время миссии, рассчитанной на 5 лет для каждого объекта в среднем будет произведено 82 наблюдения и ожидаемая погрешность фотометрии в «белом» свете составит примерно 0.03^m для $V = 23^m$, менее чем 0.001^m для $V < 18^m$ и менее 0.0001^m для $V < 14^m$.

Многоцветная фотометрия будет проводиться следующим образом. Свет звезды дважды будет разложен в спектр с помощью двух бесщелевых спектрографов, один из которых рассчитан на спектральную область 330–630 нм (blue photometer), а другой (red photometer) — на спектральную область 630–1 050 нм. Далее, накопленный сигнал будет просуммирован по пикселям, относящимся к различным группам длин волн, чтобы сформировать фотометрические полосы. Всего предполагается сформировать 14 полос (8 на blue photometer и 6 на red photometer) со средними длинами волн: 344, 379, 395, 410, 467, 506, 515, 549, 656, 716, 747, 825, 861 и 965 нм.

О российском проекте «Лира» уже был доклад на конференции «Физика космоса» в 2008 г. [21]. Предполагаемые фотометрические полосы 10-цветной фотометрической системы «Лира» перечислены в табл. 6. Для измерений наиболее ярких объектов будет применяться специальный режим.

В последнее время нами было показано, что предложенная фотометрическая система весьма эффективна для определения величины межзвездной экстинкции, а также может использоваться для измерения металличности. Мы рассчитали несколько диаграмм, используя атласы распределений энергии в спектрах методом синтетической фотометрии. В качестве исходных данных использовались атлас

Таблица 6. Фотометрические полосы российского эксперимента «Ли́ра» и ожидаемые предельные величины для уровней среднеквадратической погрешности 0.01 и 0.1^m

λ_0 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Ярчайшие (mag)	Слабейшие (mag)		
			за 1 наблюдение $\sigma = 0.01$	$\sigma = 0.1$	за все время $\sigma = 0.01$
195	20	6,0	9,0	13,6	13,7
218	20	6,0	8,9	13,6	13,6
270	25	6,2	9,2	13,8	13,9
350	50	7,6	10,5	15,1	15,2
440	100	8,8	12,5	16,9	17,0
550	80	8,0	11,7	16,1	16,2
700	80	6,6	10,7	15,0	15,1
825	80	5,6	9,7	14,0	14,1
930	80	4,3	8,7	12,9	12,9
1 000	100	3,3	7,7	11,9	12,0

средних эмпирических распределений энергии, составленный Пиклсом [22] и два атласа теоретических распределений энергии [23, 24].

На традиционной диаграмме $(U-B)-(B-V)$ покраснение может быть определено только для интервала спектральных классов O—V3 (см. рис. 3). Лишь для этих спектров нет множественных пересечений линии нормальных цветов и линии покраснения. Однако звезды ранних спектральных классов редки, кроме того они обычно располагаются около областей звездообразования, где межзвездное вещество находится в особенных условиях. Звездные величины в ультрафиолетовых полосах фотометрической системы «Ли́ра» m_{195} , m_{218} и m_{270} и образуемые ими показатели цвета $(m_{195}-m_{218})$ и $(m_{218}-m_{270})$ дают возможность получить надежные значения покраснения для звезд O—F. Это показано на рис. 5. На этой диаграмме не только нет множественных пересечений линии нормальных цветов с линиями покраснения, но, более того, с увеличением количества межзвездного вещества индекс $(m_{218}-m_{270})$ возрастает, а индекс $(m_{195}-m_{218})$ уменьшается! Это связано с тем, что в соответствии с нормальным законом межзвездного поглощения $A(1/\lambda)$ в области около $\lambda = 218$ нм поглощающая способность межзвездного вещества резко увеличивается.

Используя двухцветную диаграмму $(m_{350}-m_{700})-(m_{700}-m_{930})$, можно определять покраснение по G—K звездам. Но самое эффектное — это обнаружившаяся возможность находить покраснение по M гигантам. Обычно наклон линии нормальных

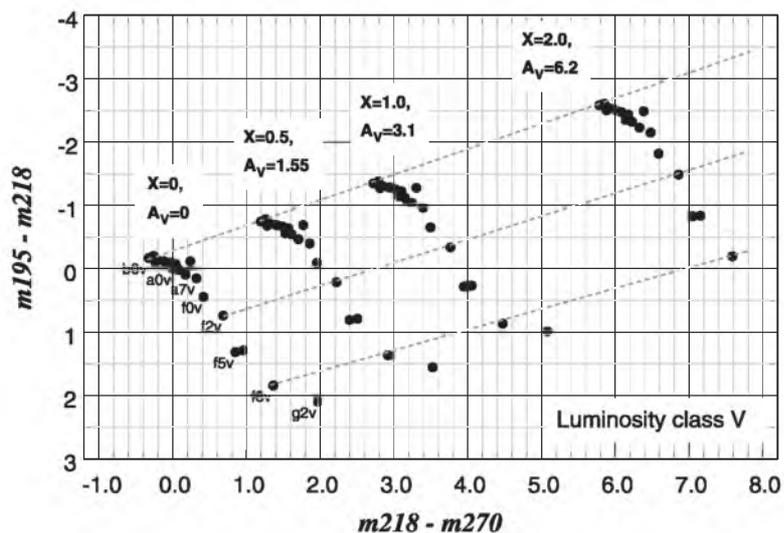


Рис. 5. Определение межзвездной экстинкции по O—F звездам

цветов, определяемый изменениями температуры, и наклон линии нарастающего поглощения близки друг к другу. Но диаграмма на рис. 6 показывает, что для наиболее красных звезд угол между этими линиями весьма не мал. Двухцветная диаграмма ($m_{440} - m_{550}$), ($m_{550} - m_{700}$) позволяет определять покраснение по звездам спектральных классов M4 и более поздних.

В заключение покажем диаграмму (рис. 7), позволяющую оценивать металличность звезд спектральных классов F—G—K—M. Для G-звезд эффект достигает 0.5 величины при изменении $[m/H]$ на одну единицу.

Мы продолжаем исследовать классификационные свойства фотометрической системы «Лира».

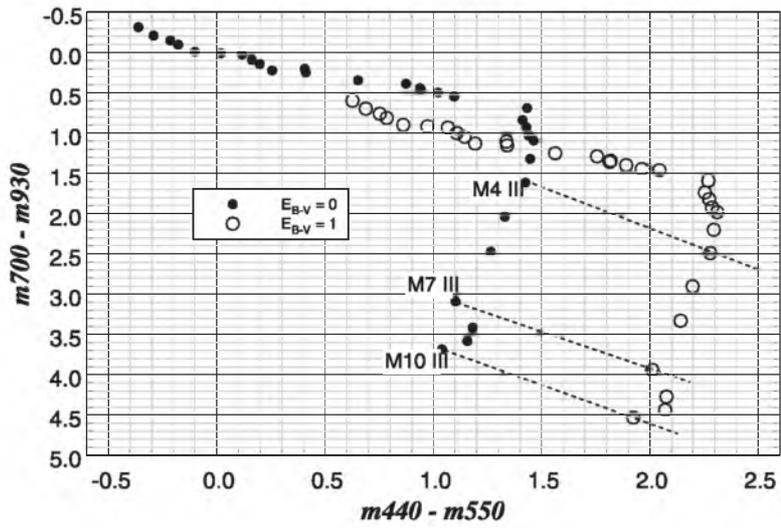


Рис. 6. Определение покраснения по красным гигантам

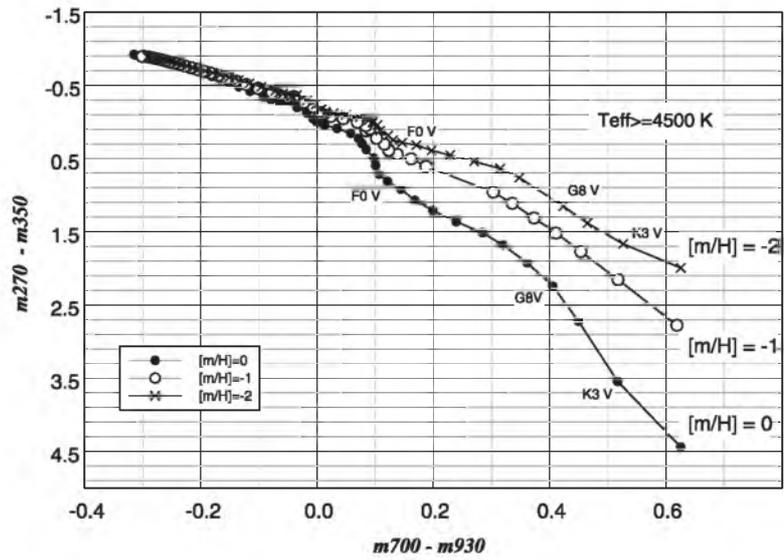


Рис. 7. Определение металличности в фотометрической системе «Лиры»

Список литературы

1. *Страйжис В. Л.* Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы. — Вильнюс: Мокслас, 1977.
2. *Никонов В. Б.* // Доклады АН СССР. — 1944. — Т. 45. — С. 151.
3. *Никонов В. Б.* // Известия Крымской астроном. общ. — 1976. — Т. 54. — С. 3.
4. *Stebbins J., Whitford A. E.* Six-color photometry of stars. I. The law of space reddening from the colors of O and B stars // *Astrophys. J.* — 1943. — Vol. 98. — P. 20.
5. *Johnson H. L., Morgan W. W.* On the Color-Magnitude Diagram of the Pleiades. // *Astrophys. J.* — 1951. — Vol. 114. — P. 522.
6. *Johnson H. L., Morgan W. W.* Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas // *Astrophys. J.* — 1953. — Vol. 117. — P. 313.
7. *Mermilliod J.* UBV photoelectric photometry catalogue (1986). I - The original data (magnetic tape) // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1987. — Vol. 71. — P. 413–420.
8. *Mermilliod J. C.* UBV Photoelectric Catalog: data 1953-1985 (Mermilliod 1987) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2006. — Vol. 2122. — P. 0.
9. *Mermilliod J.* UBV Photoelectric Cat: Data 1986-1992 (Mermilliod 1994) // *VizieR Online Data Catalog.* — 1994. — Vol. 2193. — P. 0.
10. *Mermilliod J.* UBV photoelectric catalogue: 1986-1992 data // *Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires.* — 1994. — Vol. 45. — P. 3.
11. *Nicolet B.* Photoelectric photometric Catalogue of homogeneous measurements in the UBV System, Ed. by Nicolet, B. — 1978.
12. *Strömgren B.* Quantitative Classification Methods // *Basic Astronomical Data: Stars and stellar systems*, edited by K. A. Strand. Published by the University of Chicago Press, Chicago, IL USA, 1968, p.123 / Ed. by Strand, K. A. — the University of Chicago Press, 1963. — P. 123.
13. *Hauck B., Mermilliod M.* Uvbybeta photoelectric photometric catalogue // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 129. — P. 431–433.

14. *Hoffleit D., Jaschek C.* . The Bright star catalogue, Ed. by Hoffleit, D. & Jaschek, C. |. — 1991.
15. *Страйжис В. Л.* Звезды с дефицитом металлов. — Вильнюс: Моклас, 1982.
16. *Straizhis V.* Multicolor stellar photometry, Ed. by Straizhis, V. — 1992.
17. *ESA.* The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997) // VizieR Online Data Catalog. — 1997. — Vol. 1239. — P. 0.
18. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission / Ed. by M. A. C. Perryman, ESA. — Vol. 1200 of ESA Special Publication, 1997.
19. *Høg E., Fabricius C., Makarov V. V. et al.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 355. — P. L27–L30.
20. *Bessell M. S.* The Hipparcos and Tycho Photometric System Passbands // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2000. — Vol. 112. — P. 961–965.
21. *Прохоров М. Е., Миронов А. В., Захаров А. И.* Российский космический фотометрический эксперимент «Ли́ра-Б» // *Физика космоса: Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2008 г.* — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 141–163.
22. *Pickles A. J.* A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1998. — Vol. 110. — P. 863–878.
23. *Lejeune T., Cuisinier F., Buser R.* Standard stellar library for evolutionary synthesis. I. Calibration of theoretical spectra // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1997. — Vol. 125. — P. 229–246. arXiv:astro-ph/9701019.
24. *Lejeune T., Cuisinier F., Buser R.* A standard stellar library for evolutionary synthesis. II. The M dwarf extension // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 130. — P. 65–75. arXiv:astro-ph/9710350.