

О СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СТАНДАРТАХ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В.М. Терещенко

ДТОО «Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова», Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

В работе обсуждаются вопросы стандартизации наблюдений космических объектов в ультрафиолетовой области спектра. Предлагается расширить список первичных спектрофотометрических стандартов в данной области 7 В-А-звездами главной последовательности.

Астрономы Казахстана принимают участие в международном космическом проекте «Всемирная космическая обсерватория – ультрафиолет» («ВКО-УФ»), запуск которой намечен на 2013 г. В качестве приемников излучения в спектрографах ВКО-УФ предполагается использовать микроканальные пластины (МКП) [1]. Прежде чем приступить к научному анализу полученных на ВКО-УФ данных, необходимо преобразовать поступающие из МКП импульсы в физические единицы или, другими словами, выполнить калибровку аппаратуры (наблюдений). Этот первичный этап обработки обязателен как для наземных, так и для космических наблюдений. Если величина сигнала (число импульсов) находится в пределах динамического диапазона приемно-регистрирующей аппаратуры, то в общем случае он будет пропорционален следующим факторам и параметрам:

- а) потоку (интегральному или монохроматическому) от источника излучения;
- б) размеру и отражающей способности зеркал телескопа;
- в) пропусканию оптических деталей используемой аппаратуры;
- г) ширине полосы пропускания для фильтровых наблюдений или выходной щели - при спектральных;
- д) квантовой эффективности приемника излучения;
- е) длительности экспозиции (времени интегрирования).

Калибровка учитывает все эти факторы. Общие вопросы калибровок, в том числе и в ультрафиолетовой области спектра, мы рассмотрели в работе [2]. Здесь остановимся только на некоторых моментах.

Первичным стандартом для любых фотометрических измерений должен быть источник, интенсивность излучения которого можно рассчитать по каким-то физическим параметрам, измерение которых не представляет трудностей. Прежде всего, это модель абсолютно черного тела (а.ч.т.). Излучаемый моделью а.ч.т. поток можно вычислить по формуле Планка, если известны ее температура и размеры отверстия. Отметим, что модель а.ч.т. для видимой области спектра – довольно сложная установка. Косвенным подтверждением этому является тот факт, что в СССР таких установок было всего две: во ВНИИМ (Ленинград) и ВНИОФИ (Москва). На первый взгляд кажется, что процедура сравнения излучения звезды с излучением модели а.ч.т. достаточно проста, но это далеко не так. Не случайно за всю историю астрономии было всего чуть более десятка таких сравнений, большинство из которых - косвенные. Из-за сложности работы модели а.ч.т. в полевых условиях звезды «привязывались» к промежуточным стандартам – ленточным лампам. Лампы же предварительно калибровались в лаборатории по модели а.ч.т. Калиброванные по а.ч.т. или по ленточной лампе звезды становятся первичными стандартами, если удовлетворяют некоторым требованиям, главное из которых – их постоянство. Желательно также, чтобы стандарты удобно располагались на небе, имели подходящую интенсивность и относительно гладкий вид спектра. Последнему требованию удовлетворяют звезды ранних спектральных классов. Исторически сложилось так, что основным спектрофотометрическим стандартом в астрономии является яркая звезда Вега (0.^m03, A0V). В 1984 г. Д. Хейсс [3] на основании

собственных и выполненных другими исследователями калибровок Веги получил для нее компилятивную калибровку, которой астрономы пользуются уже четверть века. Точность выведенной Хейессом калибровки по его оценкам составляет в видимой области спектра - 1-2 %, а в ультрафиолетовой области $\lambda\lambda$ 320 - 400 нм - от 2 до 4%.

В рабочей области ВКО-УФ ($\lambda\lambda$ 100-320 нм) калибровка спектров сильно усложняется из-за принципиальных трудностей создания модели а.ч.т., работающей при высоких температурах. Не существует ни моделей а.ч.т., ни ламп с температурой выше 3000°С. Чтобы а.ч.т. излучало в области 100 нм хотя бы тысячную долю от его максимального значения, необходима температура порядка 8000К [4]. Естественно, что таких моделей а.ч.т. создать невозможно. Альтернативой им могут служить ускорители элементарных частиц. Движущиеся в них с ускорением электрические заряды порождают свечение, спектр которого можно рассчитать. Естественно, что процесс калибровки спектрографов по источнику синхротронного излучения – достаточно сложная процедура. Здесь возникают проблемы с сепарацией зарядов с одинаковой энергией (скоростью), учетом поляризации излучения и т.д. По-видимому, можно калиброваться также по черенковскому свечению, но нам такие калибровки не известны. Наконец, существует еще один вид источников, которые можно использовать в качестве эталона. Это радиолюминесцентные излучатели с яркостью, вычисляемой из фотохимических эффектов. С ними работать гораздо легче, но точность калибровки намного ниже.

Отмеченные выше трудности вынуждают астрономов искать принципиально другие способы калибровки спектрофотометрических наблюдений в ультрафиолетовой области спектра. С самого начала ультрафиолетовых наблюдений в космосе для этих целей использовался метод моделей звездных атмосфер. Распределение энергии в спектрах выбранных в качестве стандартов звезд вычислялось из имевшихся на то время моделей атмосфер. На сегодня имеется несколько вариантов достаточно адекватных моделей атмосфер звезд, например, [5]. Естественно, что перед выбором подходящей модели для звезды, «претендующей на роль» спектрофотометрического стандарта, саму звезду необходимо предварительно всесторонне исследовать. Выбор соответствующей модели осуществляется путем сравнения наблюдаемых параметров с вычисленными из моделей в видимой области спектра. Таким способом можно осуществить относительную калибровку, т.е. получить ход кривой излучения звезды в зависимости от длины волны. Для абсолютизации данных о распределении энергии необходимо знать размеры звезды, расстояние до нее и межзвездное поглощение, либо звездную величину в какой-то из фотометрических полос и кривую реакции этой полосы. В последнем случае абсолютизацию можно осуществить через соотношение звездных величин Веги и звезды в заданной фотометрической системе по формуле:

$$E^*(\lambda) = E_0(\lambda_e) \times 10^{-0.4\Delta m} \times e(\lambda), \quad (1)$$

где $E^*(\lambda)$ и $E_0(\lambda_e)$ – соответственно внеатмосферные освещенности, создаваемые звездой - кандидатом в стандарты в длине волны λ и первичным стандартом – Вегой в эффективной длине волны в используемой фотометрической системе, $e(\lambda)$ – относительное распределение энергии в спектре подходящей модели, $10^{-0.4\Delta m}$ – абсолютизирующий множитель, Δm – разность звездных величин Веги и звезды в полосе с эффективной длиной волны λ_e . Так как точность модельного распределения энергии в ультрафиолетовой области для ранних звезд главной последовательности менее 5%, то результирующая точность полученного таким образом абсолютного распределения энергии (а.р.э.) оказывается порядка 5-10%. Для решения многих задач астрофизики такой точности уже недостаточно.

Следующий метод создания звезд-стандартов можно назвать «методом солнечных аналогов». Распределение энергии в спектре Солнца $E(\lambda)$ изучено намного полнее, чем

звезд, в том числе и в ультрафиолетовой области. Если мы найдем среди звезд фотометрический и спектральный аналог Солнца в видимой области, то с большой вероятностью и в других областях спектра распределение энергии для этой звезды будет подобно солнечному. Данный метод калибровки более подходит для ближней ИК-области спектра, так как дальний ультрафиолет у солнечных аналогов практически отсутствует. К сожалению, аналогов Солнца среди звезд до 8^m всего несколько.

Пожалуй, самым удачным методом калибровки наблюдений в ультрафиолетовой области спектра оказался метод моделей атмосфер, но не «обычных» звезд, а белых карликов, которые имеют чисто водородную атмосферу. Водород – самый простой элемент и для него относительно легко можно рассчитать необходимые для вычисления моделей атмосфер константы и параметры. Очевидно, что для чисто водородной атмосферы ее модель можно рассчитать более точно, чем для звезд главной последовательности. Методика вычисления моделей атмосфер белых карликов изложена в работе Д. Костэра [6], в которой приведены основные физические принципы, заложенные в модели атмосфер, и дано описание методов вычислений. К сожалению, численных значений потоков для белых карликов в данной работе не приводится. Так как белые карлики 14^m - 15^m находятся на расстояниях ближе 75 пк, то распределение энергии в их спектрах не отягощено межзвездным поглощением. [7]. Вместе с тем, следует иметь в виду, что многие из белых карликов являются переменными, пусть и с небольшой амплитудой. Периоды их переменностей - порядка нескольких десятков секунд. Процедура поиска среди них стационарных, которые могли бы служить стандартами, сводится к фотометрическому патрулированию каждого кандидата на протяжении нескольких часов и последующему Фурье-анализу результатов наблюдений.

Требования к спектрофотометрическим стандартам сильно возросли в связи с запуском космического телескопа им. Хаббла. Как известно, на телескопе Хаббла выполняются наблюдения в широком диапазоне длин волн – от дальнего ультрафиолета (100 нм) до ближнего ИК (1000 - 2500 нм). Для калибровки наблюдений на телескопе им. Хаббла в Институте Космического телескопа (США) была специально создана система первичных спектрофотометрических стандартов [8]. Энергетическая шкала этой системы определяется основным спектрофотометрическим стандартом в астрономии – Вегой. В ультрафиолетовой области первичными стандартами являются три белых карлика 14 - 16^m , для которых относительное распределение энергии было получено с помощью моделей атмосфер. Абсолютизация калибровки осуществлена с помощью прецизионных фотометрических измерений в видимой области спектра. Точность калибровки трех белых карликов в видимой области спектра ее автор оценивает в 1%, в ультрафиолете – 2 - 4 % [8]. На наш взгляд приводимая точность несколько завышена. Впоследствии, уже с помощью наблюдений на спектрографе STIS, работающем на Хаббле, было создано около 30 вторичных спектрофотометрических стандарта 10^m - 14^m [9]. Среди ультрафиолетовых стандартов отсутствуют звезды промежуточного блеска 6^m - 8^m . В целом спектрофотометрических стандартов в ультрафиолетовой области спектра слишком мало, поэтому увеличение их числа крайне желательно.

В работе [10] мы предложили список из 32 звезд ранних спектральных классов – кандидатов на роль спектрофотометрических стандартов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. В список были включены звезды из Алма-Атинского спектрофотометрического каталога звезд [11], для которых вычисленные (синтетические) фотометрические величины V_T и V_T с точностью до $0.^m02$ совпадают с аналогичными данными космического каталога «ТИХО». Напомним, что точность фотометрических данных каталога «ТИХО» почти на порядок выше точности данных каталога [11]. Идея создания общих для видимой и ультрафиолетовой областей спектра спектрофотометрических стандартов основана на предположении, что совпадение

наблюдаемых кривых распределения энергии с модельными в видимой области спектра будет наблюдаться и в ультрафиолетовой. В первоначальный список вошло несколько звезд с эмиссионными и пекулярными спектрами, модели атмосфер для которых еще довольно грубы. Кроме того, большинство звезд-кандидатов в стандарты из предложенного списка оказались расположенными в направлении плоскости Млечного пути, т.е. их спектральное распределение энергии может быть искажено межзвездным поглощением. В результате более тщательного и строгого подхода к критериям характеристик звезд – кандидатов в стандарты первоначальный список сократился более чем втрое. Из него были исключены все звезды с пекулярными спектрами, а также те, которые расположены в низких галактических широтах. Список оставшихся звезд слабее 4^m приведен в таблице 1.

Таблица 1. Список звезд, рекомендуемых в качестве спектрофотометрических стандартов для видимой и ультрафиолетовой областей спектра и их основные характеристики

№ п/п	HD	Название Звезды	α_{2000}	δ_{2000}	V	B-V	Sp
1	002913	51 Psc	00 ^h 32 ^m 24 ^s	06°57'20"	5.67 ^m	-0.014 ^m	B9.5V
2	006972	32 Cas	01 11 41	65 01 08	5.57	-0.072	B9 IV
3	010982	4 Ari	01 48 11	16 57 20	5.84	-0.039	B9.5V
4	023338	19 Tau	03 45 12	24 28 02	4.30	-0.110	B6IV
5	026356	BS1289	04 28 13	83 48 28	5.57	-0.106	B5V
6	199095	76 Dra	20 42 35	82 31 52	5.75	0.009	A0V
7	220599	67 Peg	23 24 51	32 23 06	5.57	-0.014	B9.5V

Отобранные нами звезды принадлежат главной последовательности и последовательности субгигантов. Пять из семи звезд принадлежат спектральным классам B9-A0. Такие звезды считаются одними из самых стабильных, однако и для них нельзя полностью исключить переменность с характерными временами от нескольких минут до нескольких часов и амплитудой от нескольких тысячных до нескольких сотых звездной величины. С целью проверки отсутствия у рекомендуемых в качестве стандартов звезд указанных переменностей мы провели патрульные фотометрические наблюдения каждой из них. Результаты наблюдений будут представлены в отдельной работе.

Литература

1. Боярчук. А.А., Шустов Б.М. Возможности ультрафиолетовой обсерватории «Спектр-УФ» и принципы организации наблюдений / В сб. Ультрафиолетовая Вселенная. - М. «ГЕОС», 2001, 220 с.
2. Терещенко В.М. Проблемы стандартизации наблюдений небесных тел в ультрафиолетовой области спектра. / Труды конференции молодых физиков «Ядра, космос, наука и нанотехнологии», Алматы, 8-10 апреля 2009. КазНПУ им. Абая. - С. 30-33.
3. Hayes D.S. Stellar absolute fluxes and energy distribution. / In book "Calibration of fundamental stellar quantities" Ed. D.S. Hayes, L.E. Pasinetti, and A.G.Davis Philip. Dordrecht. D. Reidel Publ. Comp. 1984. 644p.
4. Аллен К. У./ Астрофизические величины. М. «Мир», 1977, 446 с.
5. Kurucz R., 1993, CD-ROM 13, ATLAS9 Stellar atmosphere programs and 2 km/s grid (Cambridge: SAO)
6. Koester D. White dwarf spectra and atmosphere models // Mem. Soc. Astr. Ital., 2008. v. 75. p. 282-292.

7. Vergely J.-L., Ferrero R. Freire, Egret D., and Koppen J. The interstellar extinction in the solar neighbourhood. I. // *Astron. Astrophys.*, 1998, v. 340, p. 543-555.

8. Bohlin R.C., Dickinson M.E., and Callzetti D. Spectrophotometric standards from the far-ultraviolet to the near-infrared: STIS and NICMOS fluxes. *Astron. J.*, 2001, v. 122, p. 1218-2128.

9. Bohlin R.C. HST stellar standards with 1% accuracy in absolute flux / In book „The future of photometric, spectrophotometric and polarimetric standardization”/ Ed. C. Sterken, 2007, ASP Conf.Series, v. 364, p.313-324.

10. Терещенко В. М. Результаты сравнения Алма-Атинского спектрофотометрического каталога звезд с фотометрическим каталогом «ТИХО». // *Изв. НАН РК, сер. физ.-мат.*, т. 4, 2004, с. 60-64.

11. Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.Н. / *Спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата. «Наука» Каз. ССР, 1988. 478 с.*

СПЕКТРДІҢ УЛЬТРАКҮЛГІН АУМАҒЫНДА СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯЛЫҚ СТАНДАРТТАР ТУРАЛЫ

В.М. Терещенко

Жұмыста спектрдің ультракүлгін аумағында ғарыштық объектілер бақылауының стандарттау сұрақтары талқыланған. 7 В-А аумағындағы алғашқы спектрофотометриялық стандарттардың тізбегін бас тізбектің жұлдыздарымен кеңейтуін ұсынылған

ABOUT THE SPECTROPHOTOMETRICAL STANDARDS IN THE ULTRVIOLET REGION OF SPECTRA

V.M. Tereschenko

The problems of the standardization of observations of celestial bodies in ultraviolet region are discussed. We propose extension the list of the prime spectrophotometrical standards in far UV-region by the 7 В-А-stars of main sequence.