

УДК 524.3-13

Перспективы спектрофотометрии звезд на 50-дюймовом телескопе КрАО

Б.Е. Жилиев¹, О.А. Святогоров¹, В.Н. Решетник²

¹ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев

² Национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

Поступила в редакцию 20 декабря 2012 г.

1 Введение

50-дюймовый телескоп КрАО был оснащен бесщелевым UBVR-спектрографом низкого разрешения. Тестовые наблюдения в КрАО и на пике Терскол показали, что спектрограф является эффективным инструментом для изучения быстропротекающих процессов в переменных звездах с высоким временным разрешением (Жилиев и др., 2010, 2012). Наблюдения вспыхивающей звезды YZ CMi в спокойном состоянии ($U \sim 12.9$) показали, что можно получать качественные спектры с временным разрешением около 10 сек на телескопе с 60-см апертурой. UBVR-кривые блеска YZ CMi, полученные из спектральных данных путем свертки спектров с кривыми реакции фильтров демонстрируют фотометрические ошибки ± 0.009 , ± 0.007 , ± 0.007 , ± 0.008 зв. вел. в UBVR соответственно. Измерения проникающей способности показали, что суммирование спектров объектов (shift-and-add technique) с $U \sim 15$, $R \sim 16$ с общим временем экспозиции 480 секунд обеспечивает отношение сигнал/шум ~ 15 со спектральным разрешением 50.87 \AA на пиксель в окрестности 4800 \AA . Специальное программное обеспечение, основанное на теории статистики квантов, позволяет обнаруживать вариации интенсивностей линий $\sim 1\%$ по отношению к непрерывному спектру. Наблюдения, полученные с помощью спектрографа, позволили, в частности, обнаружить вариации эмиссий в Бальмеровских линиях и линиях CaII H, K у вспыхивающей звезды EV Lac в субсекундном диапазоне (Жилиев и др., 2012).

Ниже приведены несколько примеров практического применения спектрографа для оценки перспективы его использования на 50-дюймовом телескопе.

2 Бесщелевой спектрограф для 50-дюймового телескопа

Одними из первых призм-спектрограф с прозрачной дифракционной решеткой использовали в конце 1960-х Хог и Шрёдер (1970). Спектрограф с дифракционной решеткой 150 линий/мм, с 1-м рефлектором $f/7.5$ обсерватории Китт Пик обеспечивал дисперсию $1260 \text{ \AA}/\text{мм}$. Испытания показали, что за 60-мин экспозицию квазар PKS 0922+14 ($B = 18^m.0$) демонстрирует UV эксцесс и эмиссию $\lambda 3650$ (C III $\lambda 1909$; $z = 0.912$). Авторы отметили, что их спектрограф оказался очень эффективным прибором, легко приспособляемым к различным телескопам и пригодным для решения широкого круга задач. Они также отметили, что спектрограф оказался намного более

Перспективы спектрофотометрии звезд...

эффективным средством при наблюдениях объектов различных классов, чем фотометры, использующие метод измерений с последовательной сменой фильтров.

В Крымской астрофизической обсерватории бесщелевой гризм-спектрограф установлен на полуметровом менисковом телескопе МТМ-500 (Проник, Шарипова, 1993; Бусарев и др., 2009). Спектрограф используется для исследования распределения энергии в спектрах галактик и астероидов.

Бесщелевой спектрограф с прозрачной решеткой установлен на 60-см телескопе в обсерватории на пике Терскол (Жиляев и др., 2010). Рабочая копия спектрографа установлена также и на 50-дюймовом телескопе КрАО. В этом приборе решетка имеет 100 штрихов на миллиметр, диаметр – 25 миллиметров. Ее эффективность в 0 и +1 порядках дифракции составляет 22.5 % и 67.6 % соответственно. Спектрограф позволяет регистрировать непрерывный спектр в области 3500–9000 Å и неблендированные спектральные линии с эквивалентной шириной ~ 1 Å. Для слабых объектов из записи спектра можно получать оценки UBVR звездных величин, выполняя математическую свертку спектра с кривой пропускания фильтра. В таком режиме работы спектрограф становится спектрофотометром.

Спектрограф будет оснащен CMOS камерой. Характеристики камеры:

- CMOS матрица размером 3048 x 4560 пикселей (8 мкм), 24 x 36 мм;
- пельтье-охлаждение;
- механический затвор, электронный затвор;
- интерфейс данных Fast Ethernet (100 Мбит/с);
- встроенный процессор Tuon270 (820 МГц, 128 Мбит памяти).

С редуктором, обеспечивающим фокусное расстояние 13.3 м, поле зрения камеры составляет 9.4 x 6.3 угловых минуты.

Калибровка CMOS камеры была выполнена на телескопе Celestron 14" ГАО НАНУ в Киеве. Эффективный квантовый выход системы атмосфера-телескоп-камера QE = 2.5 %. За время экспозиции 60 сек отношение сигнал/шум в белом свете S/N ~ 5 было достигнуто для звезд V ~ 16.

По результатам калибровки был выполнен энергетический расчет для камеры с 50-дюймовым телескопом КрАО с квантовой эффективностью 2.5 %, с редуктором, обеспечивающим фокусное расстояние 13.3 м, при качестве изображения 2 угловые секунды. Получены следующие оценки проникающей способности:

1. Звезда 18 зв. вел. по прогнозу дает 64 отсчета (ADU) за время экспозиции около 60 секунд, что соответствует S/N ≈ 8. Фотометрическая точность при этом составляет 0.13 зв. вел.
2. Увеличение времени экспозиции до получаса увеличивает проникающую силу примерно на +1.9 зв. вел., а до часа – примерно на 2.3 зв. вел.
3. При малом темновом токе ~ 1 е-/сек и низком фоне неба фотоприемник будет работать в фотонном режиме и можно сделать следующую оценку проникающей силы:
4. За получасовую экспозицию можно получить звезду 19.9 зв. вел., а за часовую – 20.3 зв. вел. с соотношением сигнал/шум S/N ≈ 8 и точностью 0.13 зв. вел.

3 Дифференциальная спектрометрия

Авторами разработаны дифференциальные методы обработки больших массивов спектров. Дифференциальные методы эффективно устраняют помехи, вызванные вариациями атмосферной прозрачности, ошибками часового ведения телескопа и преобразования сигналов в аналого-цифровых устройствах.

Эффективным средством для устранения низкочастотных шумов является операция дифференцирования спектров по длине волны. Дифференцирующий фильтр устраняет общие компоненты шумов в данных наблюдений и сохраняет временные компоненты, присущие данной длине волны в спектре. При этом дополнительно происходит визуализация тонкой структуры спектров. Дифференциальный фильтр устраняет также и непрерывный спектр.

Дифференциальный спектр, изображенный на рис. 1, позволяет находить в спектре объекта линии поглощения/эмиссии, оценивать их эквивалентную ширину, спектральное разрешение (FWHM). Так, у астероида Электра и звезды сравнения солнечного типа ($V = 13.2$) на рис. 1 видны линии поглощения H_α , H_γ , Fe I, Ca II H, K, Mg I, атмосферные полосы поглощения кислорода O_2 (6800, 7650 Å), воды H_2O (7200 Å). По этим линиям и полосам может быть произведена калибровка спектров, определена точность оценивания длин волн в спектре, которая составила ~ 30 Å.

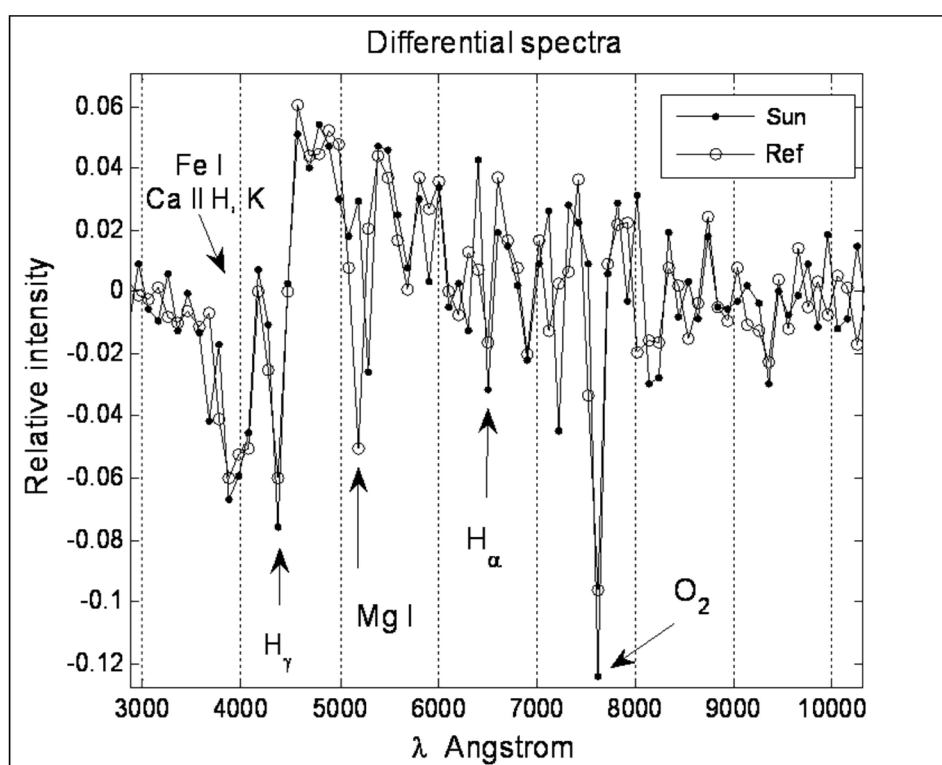


Рис. 1. Спектры астероида Электра и звезды сравнения солнечного типа ($V \sim 13.2$). Телескоп Цейс-600, Терскол, время экспозиции = 1 мин

Дифференциальные спектры, полученные по нашей методике, показывают практически идентичные данные, касающиеся эквивалентных ширин сильных фраунгоферовых линий на Солнце (табл. 1). Мы учитываем, что астероид практически полностью демонстрирует линейчатый спектр Солнца. Спектральное разрешение FWHM составляет около 100 Å, для бесщелевых спектрограмм оно определяется качеством изображения в момент наблюдений. Техника дифференциальных спектров позволяет детектировать линии поглощения/излучения с эквивалентной шириной больше примерно 1 Å при подходящем значении отношения сигнал/шум. Это значение в данном случае обусловлено точностью определения относительной интенсивности в спектре порядка 1%. Так, оценка эквивалентной ширины линии H_α в

Перспективы спектрофотометрии звезд...

дифференциальном спектре на рис. 1 $EW \approx 5 \pm 1 \text{ \AA}$ дает величину, сравнимую с эквивалентной шириной линии на Солнце, равную 4.1 \AA (табл. 1).

Табл. 1. Сильные фраунгоферовы линии на Солнце

Линия	$\lambda \text{ \AA}$	$EW \text{ \AA}^1$
Fe I M	3735	3.1
Fe I L	3820	1.8
Ca II K	3934	19.2
Ca II H	3968	14.2
H-gamma	4340	2.5
Mg I b4	5167	0.9
Mg I b2	5173	1.3
Mg I b1	5184	1.6
H-alpha	6563	4.1

¹ К.У. Аллен, *Астрофизические величины*, М.: Мир, 1977 (с. 240).

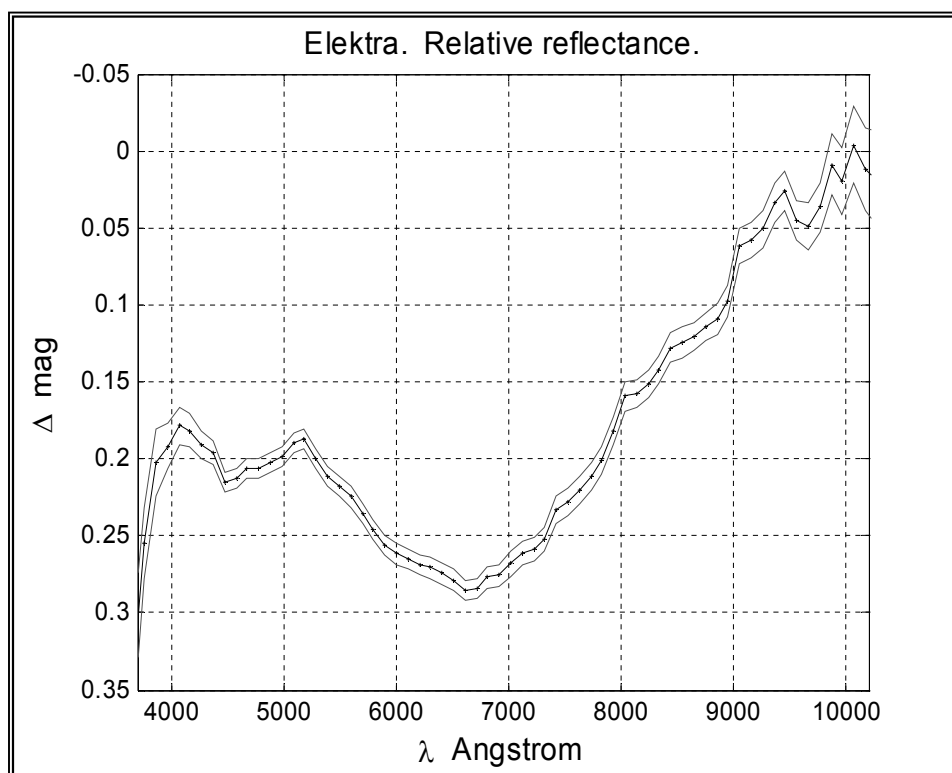


Рис. 2. Спектр отражения астероида Elektra

Наблюдения астероида 130 Электра со спектрографом низкого разрешения, $R \sim 100$, позволили вычислить величину спектрального отражения в диапазоне $3700\text{--}1000 \text{ \AA}$ (рис. 2). Вариации отражательной способности во всем спектральном диапазоне составляют примерно 32%. Точность измерения отражательной способности составляет $\sim 1\%$. Отмечены

абсорбционные особенности глубиной до 5–10 % относительно окружающего непрерывного спектра. Широкая полоса поглощения на 9500 \AA наблюдается также на астероидах Vesta, Juno, Athamantis. Широкая полоса поглощения на 6700 \AA наблюдается также на астероидах Ceres, Bamberga, Pallas.

Отметим, что спектры отражения астероида Электра на рис. 2 имеют много совпадающих особенностей, приведенных в нормализованном виде в спектрах отражения астероида 21 Lutetia в работе (Бусарев, 2010, рис. 3). Это минимумы в области $4300\text{--}4500 \text{ \AA}$, максимумы в области 5500 \AA и 7500 \AA и др.

4 Быстрая переменность звезды типа Т Тельца RV Tau

Звезда типа Т Тельца RV Tau (спектр F8Ve-K1IV-Ve(T)), максимальная звездная величина 9.3, минимальная 13.0, отчетливо демонстрирует эмиссионные линии в спектре. С учетом спектрального разрешения ($\text{FWHM} \sim 100 \text{ \AA}$), определяемого качеством изображения, и ошибки оценивания интенсивности спектра ($\sim 0.5\%$), ошибка в оценке эквивалентной ширины неблендированной спектральной линии составит около 0.5 \AA . Из рис. 3 следует, что эквивалентные ширины эмиссионных линий H_α , H_β , H_δ , CaII H, K составляют примерно 2.0, 4.2, 12.5 \AA , а атмосферной линии поглощения кислорода O_2 7650 \AA около 30 \AA . Отметим, что дифференцирующий фильтр создает боковые лепестки в окрестности сильных линий поглощения/эмиссии. Их следует учитывать при оценке эквивалентных ширин линий.

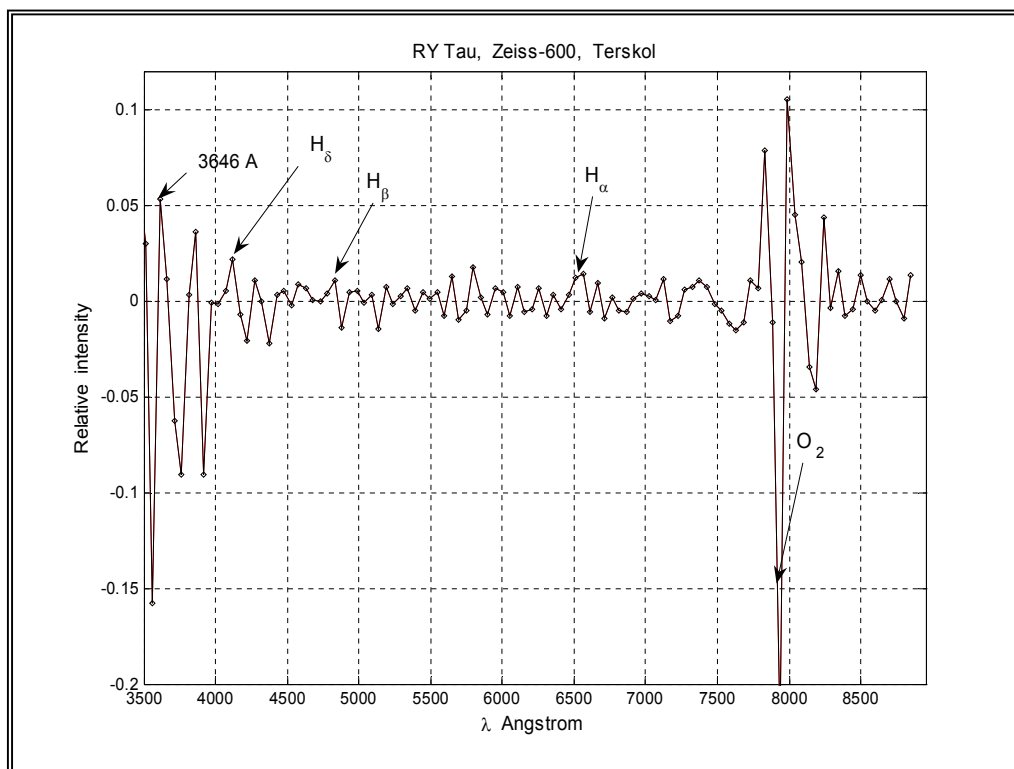


Рис. 3. Дифференциальный спектр RV Tau

Массив из 178 спектров RV Tau с временным разрешением 3.95 сек позволяет обнаружить и временные вариации в спектре переменной звезды. Реальность временных вариаций в спектре звезды типа Т Тельца RV Tau доказывает рис. 4, где приведены спектры мощности вариаций в линиях для RV Tau и контрольной звезды HD 283570.

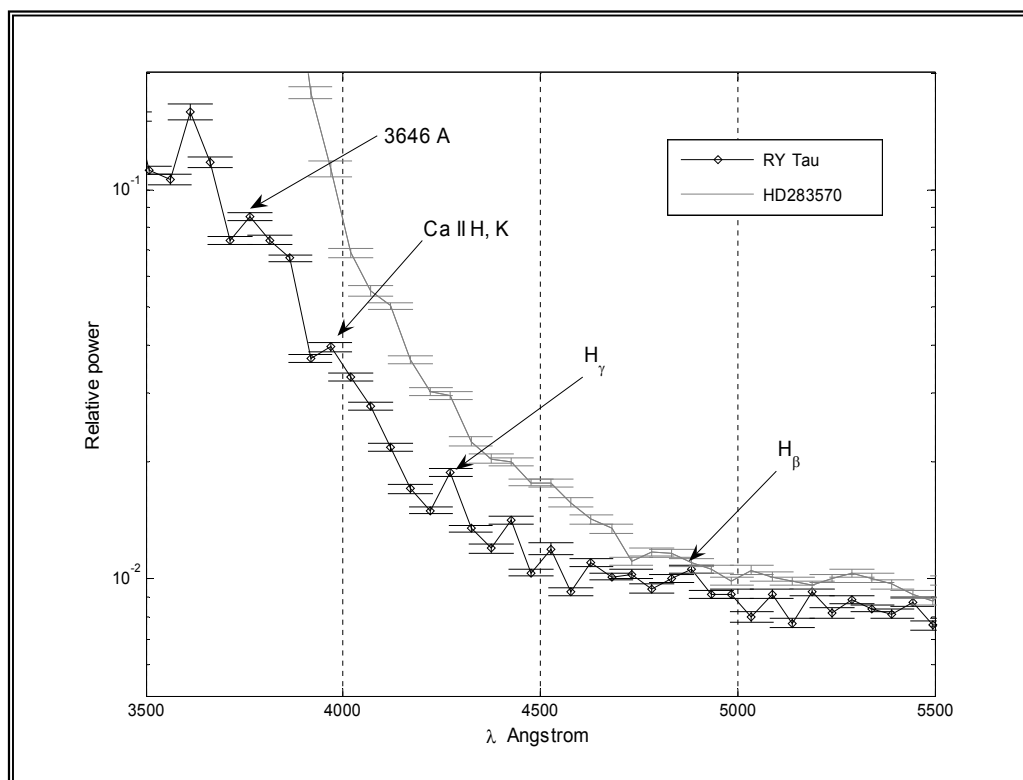


Рис. 4. Вариации в спектре RV Tau

Вариации интенсивностей линий $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ составляют от 0.5 до 1 % интенсивностей линий по отношению к непрерывному спектру. Можно отметить также значительные вариации интенсивности в Бальмеровском континууме 3646 Å, линиях Ca II H, K. Временная шкала вариаций составляет 144 секунды.

5 Заключение

Приведенные выше результаты показывают, что бесщелевой спектрограф низкого разрешения может быть эффективно использован для исследования временных вариаций в спектрах переменных звезд, для спектроскопического мониторинга оптического послесвечения гамма-всплесков, для спектрофотометрии транзитного сигнала от экзопланет, астероидов и т. д.

Литература

- Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н. // Известия Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. № 6. С. 95.
 Бусарев (Busarev V.V.) // Solar System Research. 2010. V. 44. No. 6. P. 507.

Жилиев Б.Е., Стеценко К.О., Сергеев А.В., Андреев М.В., Иванов Ю.С., Святогоров О.А. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2010. Приложение № 6. С. 422.

Жилиев и др. (Zhilyaev B.E., Sergeev O.V., Andreev M.V., Godunova V.G., Reshetnyk V.M., Tarady V.K.) // Proc. of SPIE. 2012. V. 8446. 844681-1-10.

Проник В.И., Шарипова Л.М. // Афокальный дифракционный спектрограф прямого зрения. Авторское свидетельство № 1822932. 23.06.1993. Бюллетень № 23.

Хог, Шрёдер (Hoag A.A., Schroeder D.J.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1970. V. 82. P. 1141.