

УДК 523.98

## Спектрографы высокого разрешения на телескопах среднего диаметра

*В.Е. Панчук, В.Г. Клочкова*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия  
*panchuk@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10 марта 2013 г.

**Аннотация.** Рассматривается проблема спектроскопических наблюдений с высоким разрешением на телескопах диаметром  $D = 0.5 \div 1.5$  м. В историческом плане приведены примеры наиболее удачных технических решений, примеры «живучести» некоторых телескопов и методов наблюдений. Совершенствование техники спектроскопии позволяет рассматривать потенциал и тех инструментов, которые изначально не планировалось использовать для спектроскопии высокого разрешения. Обсуждаются аргументы использования телескопов среднего диаметра в современной спектроскопии высокого разрешения. Обзор подготовлен в связи со 100-летним юбилеем 122-см телескопа Крымской астрофизической обсерватории.

HIGH-RESOLUTION SPECTROGRAPHS AT THE MEDIUM-DIAMETER TELESCOPES, *by V.Ye. Panchuk, V.G. Klochkova*. The problem of high-resolution spectroscopic observations at the telescopes with the diameter  $D = 0.5 \div 1.5$  m is considered. In the context of history, the most successful examples of technical solutions, “survivability” of some telescopes and observational techniques are referred to. Improving the spectroscopy technology allows us to study the potential of instruments which were not initially planned to be used for high-resolution spectroscopy. The arguments for using medium-diameter telescopes in the modern high-resolution spectroscopy are discussed. The review was prepared to the 100th anniversary of the 122-cm telescope of the Crimean Astrophysical Observatory.

**Ключевые слова:** спектрографы, телескопы

---

### 1 Введение

По вопросу «имеет ли размер значение?» у астрономов-наблюдателей сосуществуют две шкалы ценностей. С одной стороны, размещение наблюдательной программы на телескопе большого диаметра является не только научно-организационным достижением, но и обретением определенного статуса, хотя значительная часть таких программ впоследствии оказываются незавершенными (соответствующая статистика для БТА приведена в Панчук, 1998). С другой стороны, по наукометрическим критериям (количество опубликованных работ, индекс цитирований), максимально продуктивными оказываются некоторые телескопы средних диаметров (Абт, 2012; Рингвальд и др., 2003).

## Спектрографы высокого разрешения...

Если, отвлекаясь от упомянутых критериев, перейти в практическую плоскость, остаются два момента, первый: «а сколько времени можно дополнительно получить на телескопе меньшего диаметра за счет того, что появился еще один крупный телескоп?». Здесь уместно напомнить высказывание Д. Мак-Лафлина (1960): «Если даже с помощью 200-дюймового телескопа и не сделают новых открытий, он полезен тем, что освободит 100-дюймовый телескоп для решения многих задач». (Справедливости ради отметим, что уже через 10 лет 100-дюймовый телескоп «освободился для решения многих задач» не с помощью 200-дюймового телескопа, а за счет возросшей подсветки неба от мегаполиса, затрудняющей наблюдения внегалактических объектов). Тем не менее, с ростом количества больших телескопов многие телескопы средних диаметров оказались либо телескопами с одним навесным прибором (удачным примером является телескоп-юбиляр со спектрографом АСП-11), либо телескопами одной наблюдательной программы. Научная эффективность таких перемен (осознанных или вынужденных) оказалась высокой.

Вторым практическим моментом является соотношение затрат: а) на эксплуатацию телескопа, с учетом модернизации системы управления; б) на создание нового навесного оборудования; в) на обеспечение научного выхода (т. е. на «оправдательную» часть проекта). Стоимость современного спектрографа высокого разрешения сравнима со стоимостью собственно телескопа среднего диаметра. Например, оснащенные спектрографом фокуса кудэ рефлекторы народного предприятия «Карл Цейс Йена» еще 30 лет назад обходились для обсерваторий стран СЭВ в полтора раза дороже, чем рефлекторы этого же диаметра, приобретаемые без спектрографа высокого разрешения. Поэтому, если дорогостоящий спектрограф используется на телескопе лишь небольшую часть времени, стоимость каждой спектрограммы оказывается неоправданно высокой. Выгоды от непрерывной эксплуатации дорогостоящего спектрографа высокого разрешения были очевидны еще в 70-х годах, когда для повышения эффективности спектрографов фокуса кудэ крупных телескопов на экваториальных монтировках (3.6 м ESO, 3 м Lick, 2.1 м KPNO) были разработаны дополнительные телескопы средних диаметров (1.4 м, 0.6-м, и 0.9 м соответственно), установленные к югу (CAT ESO – к северу) от башен больших телескопов. При этом пришлось мириться с высокой стоимостью эксплуатации этих дополнительных альт-азимутальных телескопов фокуса кудэ (CAT), определяемой необходимостью изменения конфигурации оптической схемы CAT в зависимости от азимутальных координат наблюдаемого объекта.

Вопросам эффективности телескопов среднего диаметра были посвящены симпозиумы «The Present and Future of the Telescope of Moderate Size» (США, Пенсильвания, 1956) и IAU Symp. No. 118 «Instrumentation and Research Programmes for Small Telescopes» (Новая Зеландия, 1985). В первом случае телескопы диаметром 30÷101 см характеризовались как инструменты «умеренного размера», основной набор сообщений определялся успехами интерференционной спектроскопии и внедрением новых (на то время) приемников излучения. На втором симпозиуме, где телескопы с  $D < 1.5$  м уже определялись как «малые», заметно возросла доля спектроскопических докладов, основное внимание уделено оптимальному выбору научных задач и соответствующих программ наблюдений. На кардинальный вопрос «модернизировать старый телескоп или заменить его на новый?» был получен ответ: «затраты на модернизацию составляют несколько процентов от расходов на создание нового телескопа» (Уайт, 1985). Эта оценка подтверждена миграцией некоторых европейских телескопов в Чили и на Канарские острова, когда, ради получения очевидного астроклиматического выигрыша, требовалось потратиться, по крайней мере, на демонтаж и доработку экваториальной установки, транспортировку и монтаж телескопа на новом месте.

Среднее время жизни телескопа измеряется многими десятилетиями. За этот срок изменяются не только типы приемников и состав навесной аппаратуры, но и научные задачи и соответствующие коллективы. Основное назначение телескопа может неоднократно

изменяться. Поэтому мы рассматриваем проблему в хронологической последовательности. В данной работе, кроме цитируемой литературы, использованы материалы составленных нами web-сайтов: <http://astrotelescope/narod.ru> и <http://astrospectra/narod.ru>.

## 2 Призменные спектрографы фокуса кудэ

С целью фотографирования спектров избранных ярких звезд в стабильных условиях, Дж.Э. Хэйл запланировал создание большого спектрографа в фокусе кудэ 1.5-м рефлектора обсерватории Mount Wilson. Линза диаметром 152 мм с фокусным расстоянием 5500 мм служила коллиматором и камерным объективом, диспергирующим элементом являлась призма двойного прохождения с размерами, позволяющими использовать только половину площади коллимированного пучка (Адамс, 1911). Диапазон обратной линейной дисперсии составлял от 1.4 Å/мм у 4300 Å до 6.2 Å/мм у 6500 Å. Спектрограф был изготовлен вскоре после сооружения телескопа, в течение года на фотопластинках длиной 430 мм были получены спектры Сириуса, Прокциона, Арктура, Бетельгейзе, Ригеля, Антареса. Основной задачей являлся поиск сдвигов линий вследствие эффектов давления в звездных атмосферах (известное красное смещение насыщенных линий в спектре края солнечного диска относительно «дуговых» линий спектра сравнения интерпретировалось в ту пору как эффект давления). По этой же автоколлимационной схеме были разработаны призменный спектрограф фокуса кудэ для 2.5-м телескопа обсерватории Mount Wilson (Меррилл, 1931), а затем и спектрограф 2.1-м телескопа обсерватории McDonald (ван Бисбрук, 1940). Призменные спектрографы фокуса кудэ являлись основными инструментами высокого разрешения вплоть до появления (в 1931 г.) первых нарезных дифракционных решеток с профилированным штрихом.

## 3 Дифракционные спектрографы фокуса кудэ

В данной работе мы не рассматриваем спектрографы больших телескопов. Отметим только, что именно на больших телескопах к середине XX века были испытаны и внедрены в практику ключевые технологические достижения: камеры спектрографов по схемам (Шмидт, 1932; Максудов, 1944), мозаичные дифракционные решетки (Боуэн, 1952), рассекатели (резатели) изображения (Боуэн, 1938). Все эти разработки использовались затем и на телескопах средних диаметров. Определим долю телескопов-рефлекторов среднего диаметра, на которых изначально предполагалось проводить наблюдения с высоким спектральным разрешением в фокусе кудэ. В верхней части табл. 1 перечислены телескопы, введенные в эксплуатацию до 1963 года (т. е. за первые полвека развития метода кудэ-спектроскопии).

Распределение телескопов диаметром от 20 до 60 дюймов, введенных в эксплуатацию до 1963 года, приведено в верхней части рис. 1. В эпоху кудэ-спектроскопии из 99 рефлекторов среднего диаметра только 13 имели фокус кудэ, из последних 9 (т. е. 9.1 %) были оснащены спектрографами высокого разрешения. В отсутствие эффективных приемников излучения, на таких инструментах можно было решать весьма ограниченные задачи (спектроскопия ярких звезд). С конца 50-х в фокусе кудэ некоторых телескопов уже выполнялись наблюдения с применением фотоэлектрических приемников излучения, например, на 91-см рефлекторе интенсивность избранных линий измерялась методом узкополосной фотоэлектрической фотометрии (Гриффин, 1961). В нижней части табл. 1 перечислены телескопы с фокусом кудэ, введенные в эксплуатацию после 1963 г. Долю этих телескопов среди всех телескопов среднего диаметра, построенных после 1963 г., мы оценили по данным сайта <http://astrotelescope/narod.ru>. Из 187 телескопов только 11 (5.9 %) были оснащены спектрографами фокуса кудэ. Итак, за вторые полвека доля телескопов с фокусом кудэ значительно уменьшилась, и в целом за столетие составляет 7 %. Это связано с появлением новых, менее затратных технических решений (см.

Спектрографы высокого разрешения...

ниже). Немонотонность гистограмм на рис. 1 определяется производственными стандартами на диаметр главного зеркала, причем в английской и метрической системах стандартные диаметры различаются.

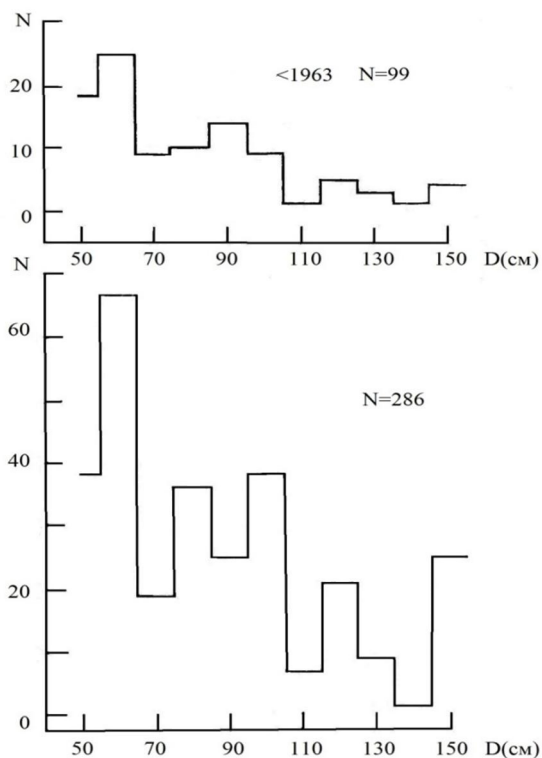
**Таблица 1.** Телескопы, оснащенные фокусом кудэ. Указан год начала наблюдений

Обсерватория	D(см)	D/ F	Год
Маунт Вилсон	152	1:36	1910
Steward, Аризона	91	1:36	1922
Агассиз, Массачусетс	155	1:9	1934
КрАО АН СССР	50	1:13	1950
ГАО АН СССР	50	1:13	1951
Кембридж	91	1:30	1955
Дублин	71		1957
Льеж	60	1:13	1957
Таутенбург	137	1:45	1960
Элизабетвиль, Конго	98		1960
ГАО АН СССР	70	1:29	1960
DAO, Канада	122	1:30	1962
Хайдарабад, Индия	122	1:30	1962
ОНР, Франция	152	1:28	1967
ESO, Чили	152	1:28	1968
СТЮ, Чили	152		1968
Лик САТ	60	1:36	1969
Fick, Айова	61	1:28	1970
Тасмания	100		1970*
Lowell	106	1:49	1971
KPNO, coude feed	90	1:31	<1975:
Тарту	150	1:35	1976
ESO, САТ	140	1:120	1981
SFASU, Техас	104	1:32	1985:
САО АН СССР	100	1:36	1990
РТТ Турция	150	1:48	2001

Примечания к табл.1: \* – в 2011 г. спектрограф перенесен на новый телескоп, D = 127 см.

В середине XX века традиционно считалось, что спектрографы фокуса кудэ являются прерогативой больших телескопов, имеющих диаметр  $D > 2$  м (Мак-Лафлин, 1960). Однако не следует недооценивать потенциал спектрографов фокуса кудэ, установленных на телескопах среднего диаметра. Работы (Ричардсон, 1968; Ричардсон и др., 1971) являются примером оптимальной комбинации технических решений, в результате которых проникающая способность кудэ-спектрографа 122-см телескопа оказалась практически равной (при одинаковых значениях обратной линейной дисперсии  $P$ ) проникающей способности спектрографа фокуса кудэ, установленного на 5-м телескопе (Боуэн, 1952). Перечислим причины четырехкратного увеличения проникающей способности 122-см телескопа по сравнению с исходной, в 1962 году. Во-первых, 122-см телескоп замышлялся как специализированный спектроскопический, т. е. все время использовалось для наблюдений в фокусе кудэ. Поэтому смена вторичных зеркал, предназначенных для наблюдений в фокусе

кудэ и фокусе Кассегрена (выполняемая на других телескопах один раз в лунный месяц), – здесь не предусматривалась. Следовательно, вторичное зеркало большого диаметра, необходимое для обеспечения относительного отверстия 1:30, можно было заменить зеркалом меньшего диаметра, что привело к снижению потерь на центральном экранировании.



**Рис. 1.** Распределение телескопов-рефлекторов по диаметру главного зеркала D. Вверху – телескопы, введенные в эксплуатацию до 1963 года, внизу – все телескопы. Для интервала  $D = 55 \div 50$  см статистика не является полной

При этом было изменено относительное отверстие фокуса кудэ (с 1:30 до 1:145), что позволило уменьшить диаметры всех последующих зеркал тракта кудэ. На входе в щелевую часть спектрографа относительное отверстие снова увеличивалось до 1:30. Во-вторых, в фокусе кудэ был реализован такой же диаметр коллимированного пучка ( $d = 30$  см), что и на 5-м телескопе, т. е. также были применены (с 1967 г.) мозаичные дифракционные решетки, составленные из четырех фрагментов. В-третьих, в отличие от спектрографа 5-м телескопа, таких мозаичных решеток было несколько, что позволяло выбирать максимальную световую эффективность для исследуемого диапазона длин волн, причем концентрация света в рабочих порядках была выше, чем на 5-метровом телескопе. В-четвертых, на входе в спектрограф применялись суперпозиционные рассекатели (резатели) изображения, позволяющие эффективно заполнять апертуру спектрографа. В-пятых, на телескопе и спектрографе были широко использованы высокоэффективные диэлектрические покрытия оптических поверхностей, причем значительная часть оптических элементов дублировалась с нанесением покрытий, оптимальных для «синего» или «красного» диапазонов. Для этого узлы зеркал тракта кудэ были реконструированы как с целью снижения центрального экранирования, так и для снижения потерь при отражении за счет выбора оптимальных для данного диапазона сменных оптических элементов. Перечислим составляющие выигрыша по потоку. Замена алюминиевых

покрытий на сменные диэлектрические дает 40 %-ный выигрыш на четырех отражениях. Применение рассекателей (резателей) изображения дает выигрыш в 2.7 раза. Выигрыш на дифракционных решетках составил, в среднем, 1.9 раза. В работе (Ричардсон и др., 1971) приведение к одинаковому значению обратной линейной дисперсии производилось умножением времени экспозиции на отношение дисперсий, тогда как необходимо умножать на квадрат этого отношения. С учетом этого обстоятельства можно утверждать, что реконструированный спектрограф 122-см телескопа существенно превосходил кудэ-спектрограф 5-м телескопа. В начале 70-х доля фотографической спектроскопии высокого разрешения на 5-м телескопе резко уменьшилась, не исключено, что это произошло и под влиянием упомянутых работ Ричардсона. Из недостатков реконструкции 122-см телескопа отметим один: заполнение коллимированного пучка при помощи различных оптических конфигураций, формируемых в рассекателе (резателе) изображения, увеличивает роль зональных ошибок при определении лучевых скоростей (подробнее о зональных ошибках см. Талл, 1969).

Если бы в 70-х годах на некоторых телескопах с фокусом кудэ астрономы пошли «по пути Ричардсона», спектроскописты получили бы несколько спектрографов, эквивалентных кудэ-спектрографу 5-м телескопа, причем без серьезных дополнительных затрат, т.к. крупногабаритные камеры спектрографов фокуса кудэ уже имелись. Но победила точка зрения «необходим и фокус Кассегрена», хотя значительное снижение потерь на центральном экранировании и на зеркалах тракта кудэ позволило бы выполнять и наблюдения со средней величиной обратной линейной дисперсии в фокусе кудэ эффективней, чем в фокусе Кассегрена. Итак, желание большинства спектроскопистов иметь универсальные телескопы среднего диаметра (и кудэ, и Кассегрен) оставило технологию Ричардсона невостребованной. Три 152-см телескопа с фокусом кудэ (ОНР, ESO и СТЮ), введенные в конце 60-х (причем в ESO и СТЮ – со статусом «работа в сменных фокусах»), по проникающей способности серьезно уступали специализированному 122-см телескопу.

**Таблица 2.** Параметры корреляционных измерителей лучевых скоростей, смонтированных на спектрографах фокуса кудэ. Обозначения: D – диаметр телескопа (см), s – ширина входной щели (угл. сек),  $F_{\text{cam}}$  – фокусное расстояние камеры (см), P – обратная линейная дисперсия на маске (Å/мм),  $\lambda\lambda$  – рабочий диапазон (Å), N – число щелей маски, \* – подвижная маска, s' – ширина проекции щели (км/с),  $\sigma V_R$  – точность измерений (км/с),  $m_B$  – предельная звездная величина в фильтре B (за час накопления). Указан год начала работы прибора

Обсерватория	D	s	$F_{\text{ca}}$ m	P	$\lambda\lambda$	N	s'	$\sigma V_R$	$m_B$	год	Примечания
RGO	91	1	262	3.2	4369-4827	234*	14	1-2	10	1966	a
Roden	60		150	5.3	5140-5460		8	1	7	1972	b
DAO	122	4.5	244	2.4	4350-4700	220*	12.6	0.4	7.8	1972	c
DAO	122	4.5	244	2.4	4332-4765	454*	12.6	1	16	1982	d
Iowa Univ	61	1	305	2.6	4400-4800		15	2	7	1976	e
Palomar	508	0.33	365	2.2	4333-4891	340	14.3	1	16	1971	f
Radcliff	188	1	122	6.8	4125-4675	200	33	3	10	1973	g
McDonald	210		800	8.5	3846-4246		6.3	2	10	1976	h

Примечания к табл. 2: a – (Гриффин, 1967), b – (Карстен, 1972), c – (Стилборн и др., 1972); d – (Флетчер и др., 1982); e – (Биверс и Эйтер, 1977), f – (Гриффин и Ганн, 1974), g – (ван Гиттерс, 1974), h – (Словак и др., 1979).

В середине 60-х были сделаны первые попытки применения новых приемников излучения в спектрографах высокого разрешения. Наиболее продуктивным оказался корреляционный метод измерения доплеровских сдвигов (Фелжетт, 1955), основанный на сочетании кодирующей маски и одноканального приемника (фотоэлектронного умножителя). В 1966 году в фокусе кудэ 91-см телескопа были начаты наблюдения на корреляционном фотометре лучевых скоростей (Гриффин, 1967), впоследствии этот метод был внедрен в фокусе кудэ других телескопов. Для сравнения точности измерения лучевых скоростей и проникающей способности в нижней части табл. 2 приводим характеристики корреляционных фотометров, которые работали на телескопах большого диаметра.

Из продолжительных наблюдательных программ, выполненных на спектрографах фокуса кудэ телескопов среднего диаметра, отметим программу мониторинга F-сверхгигантов (Смолински, 1971), выполненную фотографическим методом, и программы массового определения лучевых скоростей (Мак Клор и др., 1985), выполненные фотоэлектрическим корреляционным методом. Все эти работы опирались на уникальные технические возможности 1220-см телескопа ДАО, расположенного в районе с весьма посредственными астроклиматическими характеристиками, где среднее качество изображений составляет 3.7 угл. сек., см. стр. 9 в (Ричардсон и др., 1971).

#### 4 Спектрографы фокуса Кассегрена

К началу 60-х произошли два события, оказавшие принципиальное влияние на спектроскопию высокого разрешения. Во-первых, завершилось создание технологии изготовления нарезных дифракционных решеток с большим углом блеска  $\Theta_b$ , т. н. эшелле, начатое в середине века (Гаррисон, 1949; Герасимов и др., 1958). Напомним, что спектральное разрешение  $R$  пропорционально диаметру коллимированного пучка  $d$  и тангенсу  $\Theta_b$ . Поэтому, увеличивая  $\Theta_b$ , можно понижать  $d$ , сохраняя при этом высокое значение  $R$ . Увеличивая  $\text{tg}\Theta_b$  на порядок, можно приблизительно на порядок уменьшить габариты, и более чем на порядок – массу спектрографа. Первые спектрографы со скрещенной дисперсией (кроме эшелле, в схему вводился второй диспергирующий элемент, обеспечивающий пространственное разведение высоких порядков) использовались для спектроскопии Солнца (Северный и др., 1960) и для спектроскопии ярких звезд в фокусе кудэ 2.65-м телескопа (Копылов и Стешенко, 1965). В категорию эшелле-спектроскопии звезд на телескопах среднего диаметра можно отнести наблюдения ярких звезд (Боярчук, 1962) и планет (Прокофьев и Петрова, 1963), выполненные на солнечном телескопе.

Во-вторых, была предложена модификация (Шрёдер, 1967) классической схемы Черни-Тернера (Czerny-Turner), в которой (при определенном расположении оптических элементов и соотношении параметров последних) кома, вводимая зеркалом коллиматора, компенсируется комой, вводимой зеркалом камеры. Если фокусные расстояния зеркал коллиматора и камеры различаются, то некомпенсированная (остаточная) кома приводит к уширению монохроматического изображения щели в направлении, перпендикулярном основной дисперсии. В эпоху фотографических наблюдений такой недостаток даже позволял уменьшить влияние шумов фотоэмульсии при фотометрической записи спектрограммы. Для использования в фокусе Кассегрена были разработаны эшелле-спектрографы высокого разрешения с диаметром коллимированного пучка около 5 см, эти приборы имели небольшой вес и габариты. Обычно относительные отверстия зеркал коллиматора и камеры делались близкими, так что потери света на щели оказывались минимальными именно на телескопах среднего диаметра. Таким образом, стоимость наблюдений с высоким разрешением на телескопах среднего диаметра была понижена как за счет стоимости изготовления кассегреновского эшелле-спектрографа (которая на порядок ниже стоимости спектрографа

фокуса кудэ (Хирншоу, 1977), так и за счет стоимости телескопа, имеющего только фокус Кассегрена. Появилась возможность наблюдений с высоким спектральным разрешением на телескопах, не оснащенных фокусом кудэ. Из-за того, что уровень потерь света на многозеркальной схеме кудэ оставался (в среднем) высоким, и появился альтернативный вариант наблюдений, популярность спектрографов фокуса кудэ понизилась, и во второй половине 70-х промышленное оснащение телескопов среднего диаметра фокусом кудэ было прекращено (см. табл. 1). В таблице 3 перечислены телескопы средних диаметров, на которых использовались эшелле-спектрографы в фокусе Кассегрена. Для сравнения характеристик, в первой строке приведены параметры первого эшелле-спектрографа фокуса кудэ для телескопов среднего диаметра. В большинстве случаев спектральное разрешение  $R$  дано для ширины щели 1 угл. сек. Для каждого спектрографа указан год ввода в эксплуатацию.

**Таблица 3.** Эшелле-спектрографы фокуса Кассегрена. Обозначения:  $M$  – плотность нарезки дифракционной решетки (штр/мм),  $CD$  – тип элемента скрещенной дисперсии ( $g$  – решетка,  $p$  – призма,  $f$  – фильтр, выделяющий рабочий порядок) и последовательность расположения по ходу лучей ( $g/e$  – решетка до эшелле,  $p/e$  – призма до эшелле,  $2p$  – призма двойного прохождения). Значения  $D$ ,  $d$ , фокусных расстояний коллиматора  $F_{coll}$  и камеры  $F_{cam}$  приведены в сантиметрах

Обсерватория	$D$	$D/F$	$d$	$tg\Theta$	$M$	$CD$	$F_{coll}$	$F_{cam}$	$R$	Год	Пр им.
Agassiz, Mass.	152	1:30	12	2	73.2	2p	365	122	60000	<1970	a
Pine Bluff	90	1:13.5	5.5	2	73.2	e/g	75	75	<16000	1971	b
Mt Hopkins	150	1:9.6	5.6	2	31.6	e/g	54	75	34000	<1973	c
Oak Ridge	150	1:9.6	5.6	2	79	e/g	54	75	34000	1975	d*
Johns Hopkins	91	1:14.4	5.2	2	79	p/e	75	75	40000	1976	e
Mt John	61	1:13.5	5.6	2	79	e/g	54	75	80000	1977	f
QUBES	91		10.8	2	316	2p	162	162	117000	1977	g
Ritter, Ohio	100		5.6	2	79	e/g	54	75	52000	1978	h
Lowell	100	1:16	5.6	2	31.6	e/g	54	75	52000	1980	i
Siding Spring	100		5.6	2	79	e/g			30000	1980	j
Vienna Univ	150	1:15		2	79	e/g	116	20		1981	k
Las Campanas	61		5.6	2	31.6	e/g	54	75	~52000	1982	l
LPL, Arizona	155	1:13.5		3.2	79	f	67	67	160000	1982	m
Hyderabad	122			2	79	e/g			50000	1986	n
La Palma, JKT	100	1:11		2	316	f	901	901	135000	1991	o

Примечания к табл. 3: a – (Лиллер, 1970); b – (Шрёдер и Андерсон, 1971); c – (Чаффи, 1974);

d – (Латэм, 1985); e – (Мак Клинтон, 1979); f – (Хирншоу, 1977); g – (Мак Кэйт и др., 1978), QUBES – спектрограф Университета Белфаста, использовался также в RGO (Гринвич);

\* – конструкция спектрографа обсерватории Гарвардского колледжа (HCO) была повторена для телескопов: (f – 0.61 м Mt John Obs.), (h – 1.0 м Ritter Obs.), (i – 1.0 м Lowell Obs.), (l – 0.61 м Las Campanas); k – (Вайс и др., 1981); m – (Хантен и др., 1991); n – (Бхатиа и др., 1984); o – (Мак Кэйт и др., 1993), JKT – телескоп имени Якоба Каптейна.

Из сравнения таблиц 1 и 3 следует, что в 70-е годы лидирующие позиции занимают кассегреновские эшелле-спектрографы, доступные и университетским обсерваториям. При удачном инженерном решении, смещения спектра вследствие деформаций механической конструкции оказываются небольшими. Например, при изменении зенитного расстояния на 90 градусов смещения спектра составляли только 0.03 мм (Хирншоу, 1978), соответствующую ошибку лучевой скорости можно устранять, ориентируя направление смещений поперек основной дисперсии. Применение однокаскадных электронно-оптических преобразователей с



катодом S-20 обеспечивало выигрыш в проникающей способности до 3-х звездных величин (относительно фотографической регистрации).

Практически все корреляционные фотометры лучевых скоростей, перечисленные в табл. 2, использовались в период классической спектроскопии в фокусе кудэ, и поэтому требовали дополнительной подготовки схемы спектрографа перед наблюдениями. Существовал и второй аргумент создания специализированного подвесного измерителя лучевых скоростей: так как проникающая способность метода зависит от числа щелей маски (см. 3 и 4 строки табл. 3), то более эффективной может оказаться схема с эшелле (Вальравен и Вальравен, 1972). В 1977 году были начаты наблюдения на корреляционном фотометре CORAVEL (Баранн и др., 1979), которые продолжались 21 год. По сравнению с фотометрами из табл. 3, авторы CORAVEL применили, следуя за (Вальравен и Вальравен, 1972), два новшества: установили прибор в фокусе Кассегрена и в качестве основного диспергирующего элемента использовали эшелле. В табл. 4 приведены параметры корреляционных измерителей лучевых скоростей, смонтированных на схемах скрещенной дисперсии в фокусе Кассегрена. Указан год начала работы прибора.

**Таблица 4.** Параметры корреляционных фотометров с эшелле. Обозначения: D – диаметр телескопа (см), s – ширина входной щели (угл. сек),  $F_{\text{cam}}$  – фокусное расстояние камеры (см), P – обратная линейная дисперсия на  $\lambda = 4400 \text{ \AA}$  ( $\text{\AA}/\text{мм}$ ),  $\lambda\lambda$  – рабочий диапазон ( $\text{\AA}$ ), n – число спектральных порядков, N – число щелей маски, s' – ширина проекции щели (км/с),  $\sigma V_R$  – точность измерений (км/с),  $m_B$  – предельная звездная величина (за час накопления)

Обсерватория	D	s	$F_{\text{cam}}$	P	$\lambda\lambda$	n	N	s'	$\sigma V_R$	$m_B$	Год	При меч.
Leiden South.	91		72.4	1.4	4110-4410	1	350				1972	a
ОНР, CORAVEL	100	0.9	50	2.3	3651-5262	20	3000	9	0.5	14	1977	b
ESO, La Silla	154		50	2.3	3651-5262	20	3000		1	15	1980	c
ГАИШ, ИЛС	100	1.4	64	2.0	4000-6000			16		12	1984	d
Xinlong	85				3600-5000	20	2356				1991	e

Примечания к табл. 4: a – (Вальравен и Вальравен, 1972); b, c – (Баранн и др., 1979); d – (Токовинин, 1987); e – (Жао и др., 1994).

Механические деформации подвесного кассегреновского инструмента проявлялись при длительных экспозициях, т. е. в эпоху фотографической регистрации спектра. При регистрации спектров с усилителями яркости на первый план вышли ошибки, связанные с нестабильностями работы электронной оптики. По этим причинам времена экспозиций и, следовательно, отношение сигнал/шум (S/N) были невелики. На первый план вышли цифровые многоканальные корреляционные методы (Тонри и Дэвис, 1979; Вьетт, 1985). Наиболее эффективной оказалась программа измерения лучевых скоростей холодных звезд, выполненная на идентичных спектрографах с использованием двух 1.5-м телескопов (Латэм, 1985). Так как использовались одномерные детекторы (в виде двух счетных линеек), в эшелле-спектрографе был выделен только один порядок, длиной  $50 \text{ \AA}$ , содержащий абсорбционные линии различной насыщенности (последнее позволяло измерять лучевые скорости звезд с дефицитом металлов). На 1.5-м телескопах точность в 1 км/сек достигалась за 10 минут накопления сигнала от звезды 12-й величины и за час накопления от звезды 15-й величины, типичные значения сигнал, шум в спектрах составляли  $S/N = 5 \div 10$ . Производительность обзора лучевых скоростей звезд составила 20000 спектров за 5 лет (следует учесть, что в безлунные ночи на 1.5-м телескопе с использованием спектрографа среднего разрешения выполнялись спектроскопические обзоры внегалактических объектов).

Что касается цифровых корреляционных одноканальных методов, то здесь решающую роль, по-видимому, сыграла доступность вида наблюдений, не требующего специальной подготовки

Спектрографы высокого разрешения...

инструмента и наблюдателя. От наблюдателя требовался уровень технической подготовки, достаточный для работы на одноканальном фотометре. На измерителе лучевых скоростей (ИЛС) наблюдения продолжаются по настоящее время (о программах наблюдений см. Горыня и др., 2009), т. е. уже полтора десятка лет после того, как подобные наблюдения были прекращены на CORAVEL.

## 5 Спектрографы с оптоволоконным сочетанием

В таблице 5 приводим характеристики эшелле-спектрографов, имеющих оптоволоконное сочетание с телескопом среднего диаметра, подробнее см. в работе Панчук и др. (2011). Для сравнения, в нижней части таблицы приведены характеристики двух первых оптоволоконных спектрографов, работающих в низких порядках дифракции. Приняты следующие обозначения:  $D$  – диаметр телескопа (м),  $a$  – диаметр ядра оптоволокна (мкм),  $s$  – диаметр звездного изображения, перехватываемого оптоволоконном (угл. сек),  $l$  – длина оптического волокна (м),  $\text{tg}\theta_b$  и  $M$  (штр/мм) – параметры эшелле,  $d$  – диаметр коллимированного пучка (мм),  $L$  – длина заштрихованной области эшелле (мм), CD – тип элемента скрещенной дисперсии ( $p$  – призма,  $g$  – решетка,  $f$  – фильтрация избранного спектрального порядка),  $F_{\text{cam}}$  – фокусное расстояние камеры (мм),  $R = \lambda/\Delta\lambda$  – спектральное разрешение. Указан год начала работы прибора.

**Таблица 5.** Основные параметры оптоволоконных эшелле-спектрографов высокого разрешения на телескопах среднего диаметра

D	a	s	l	$\text{tg}\theta_b$	M	d	L	CD	$F_{\text{cam}}$	R	Год	Примечания
0.9	125		27	2	31.6	48		g		90000	1984	a
0.75	100	1		2	31.6	80	220	g	300	70000	1987	b
1.5	100		13	2		79	56	g	750		1988	c
1.06	200	4:		2	79	56	206	g	750	26000	1989	d
1.0				2	79	54	206	g	750	35000	1989:	e
0.91	100	4.2		2	79	90.	254	g	300	21000	1993	f
1.5	200	2.7		2	59	90:	200	g	690	32000	1993	g
0.9	100		15	2	31.6	80		g	300	20000	1994	h
1.5	200	3.6	15	2	31.6	150	375	g	750	15000	1995:	i
1.2	100	2	20	4	31.6	102		gp	300	50000	1998	j
1.52	100	2.7		2	79	136	306	p	410	48000	1999	k
1.52	50	2.7		2	31.6	200	408	p	1200	150000	1999	l
1.0	100	4.5	22	2	31.6	210	408	p	973	41000	2001	m
1.2	100	3.4	12	2	31.6	130	540:	p	350:	75000	2005	n
1.2	60	2.3		2.6	52.6	150	408	p	525	85000	2007	o
0.5	50			2	31.6	100	206	p	400	35000	2007	p
1.2	150	4.8	20	4	37.5	100	400	g	200	30000	2010	q
1.5	100			2	31.6	140	375	p	1005	80000	2011	r
2.14	300	2.5	10		1200		154	-	980	31000	1988	s
1.93	133		15	1.1	600	160	210	f	1000	35500	1986	t

Примечания к табл. 5: a – (Мак Миллан и др., 1988); b – (Мандель, 1988); c – (Латэм и др., 1988); d – (Моррисон, 2011); e – (Киршоу и Хирншоу, 1989); f – (Фраска, 2004); g – (Браун и др., 1994); h – (Кауфер, 2001); i – (Ингерсон, 1999); j – (Келоз и др., 2000); k – (Кауфер и др., 1998); l – (Бучи и др., 1999); m – (Хирншоу и др., 2002); n – (Штрасмайер и др., 2004), масштабированная копия SES установлена на 0.8-м робот-телескопе STELLA-II; o – (Раскин и ван Винкель, 2008); p – (Квятковски, 2002), PST является

копией MUSICOS, см. (Бодра и Бём, 1992); q – (Панчук и др., 2011); r – (Токовинин, 2011); s – (Фуренлид и Кардона, 1988); t – (Феленбок и др., 1986).

Первые эксперименты с оптоволоконным эшелле-спектрографом начаты еще в 1979 г., (Рамсей и Хенемодер, 1986). Отметим, что три спектрографа из табл. 5 ( $d = 56$  мм) являются подвесными касегреновскими спектрографами из табл. 3, модифицированными для использования в варианте оптоволоконного сочетания. Но оптоволоконное сочетание этих спектрографов не устраняет астигматизм схемы Черни-Тернера, и уширение спектра поперек основной дисперсии по-прежнему оставалось фактором, понижающим проникающую способность. В остальных случаях преимущества стационарного размещения прибора использовались шире, прежде всего, был увеличен диаметр коллимированного пучка (следовательно, и габариты спектрографа). «Свобода по габаритам» стационарной конструкции позволила обратиться к схеме белого зрачка, ранее применявшейся в фокусе кудэ 1.52-м телескопа ESO, на спектрографе скрещенной дисперсии с электронографической камерой (Баранн и Дюшес, 1972). Схема белого зрачка позволяет использовать эшелле практически в автоколлимации, следовательно, можно увеличить угол блеска эшелле до  $\text{tg}\theta_b = 4$ . Кроме того, в этой схеме диаметр камерного объектива приближается к диаметру коллимированного пучка, последнее существенно снижает стоимость оптики спектрографа. Итак, стационарное размещение спектрографа, приводящее к определенным потерям на оптоволоконном сочетании, позволяет (за счет перехода от  $\text{tg}\theta_b = 2$  к  $\text{tg}\theta_b = 4$ ), «отыграть» фактор 2 в произведении светосилы по потоку ( $L$ ) на спектральное разрешение ( $R$ ). Программы доплеровского поиска маломассивных спутников звезд являлись основным стимулом создания оптоволоконных спектрографов высокого разрешения на телескопах среднего диаметра. В этих программах фактором, определяющим научный выход, явился статус телескопа (как часто можно повторять спектроскопические наблюдения звезды, у которой заподозрено наличие маломассивного спутника?). Поэтому наиболее продуктивными инструментами являются спектрограф CORALIE (Келоз и др., 2000), установленный на специализированном телескопе Euler ( $D = 1.2$  м), а также спектрографы SES и HERMES, установленные на телескопах-роботах северного полушария.

## 6 Высокое спектральное разрешение на телескопах малых диаметров

Чтобы подчеркнуть возможности рассмотренных методов, отметим четыре системы высокого разрешения (по одной из каждого класса), использованные на телескопах с  $D < 0.5$  м.

А) Фотографические наблюдения на спектрографе фокуса кудэ (Кастли, 1972). В обсерватории Канопус Хилл (Университет Тасмания), в 1971 году вступил в строй 40-сантиметровый рефлектор, оснащенный фокусом кудэ (1:33,  $F = 13.2$  м). Характеристики спектрографа:  $F_{\text{coll}} = 330$  см,  $d = 100$  мм, дифракционные решетки с размером заштрихованной области  $152 \times 102$  мм, 600 штр/мм (использовалась в первом порядке) и 1200 штр/мм (во втором порядке), две камеры,  $F_{\text{cam}} = 122$  и 182 см, диаметр зеркал камер 76 см. (Обращаем внимание, что диаметр зеркал камер превосходит диаметр главного зеркала телескопа, это к вопросу о соотношении стоимости оптики телескопа и спектрографа!). Значения обратной линейной дисперсии составили  $R = 2.4, 3.6, 9$  и  $14 \text{ \AA}/\text{мм}$ . Результаты спектроскопии южных F-сверхгигантов можно найти в (Кастли и Ватсон, 1980).

Б) Стигматический эшелле-спектрограф с ЭОП (Галл и др., 1974), в качестве питающей оптики использовал телескоп  $D = 25$  см, фокус Ньютона,  $F = 200$  см. Характеристики спектрографа: ньютоновский коллиматор,  $d = 150$  мм; эшелле 79 штр/мм,  $\text{tg}\theta_b = 2$ , размер заштрихованной области  $150 \times 300$  мм, работает в главной плоскости ( $2\theta = 12^\circ$ ); решетка скрещенной дисперсии 300 штр/мм, заштрихованная область  $200 \times 250$  мм, концентрация на

Спектрографы высокого разрешения...

10000 Å в первом порядке; камера «ломаный Шмидт»,  $F = 300$  мм. Использовался ЭОП (катод S-25) с электростатической фокусировкой, фотографическая регистрация с люминофора на пластинках  $5 \times 5$  см<sup>2</sup>. Спектральное разрешение составляло  $R = 40000$ . На этом приборе осуществлялся поиск полос воды (область 8200 Å) в атмосфере Венеры. Для снижения вклада от тропосферного водяного пара, наблюдения выполнялись с борта самолета на высоте 14.6 км. Наблюдения выполнялись в период элонгации Венеры (апрель 1972 г.), когда разность лучевой скорости атмосферы Венеры и теллурических абсорбций была максимальной. В этом примере стоимость оптики спектрографа также превышает расходы на оптику телескопа.

В) Кассегреновский эшелле-спектрограф BACHES с матрицей ПЗС (Авила и др., 2007) представляет, по-видимому, коммерческий интерес, т. к. характеристики прибора раскрыты не полностью: коллиматор 1:10, эшелле 79 штр/мм,  $\text{tg}\theta_b = 2$ , решетка скрещенной дисперсии, линзовая камера. На матрице ПЗС форматом 1530 x 1020 элементов (9 x 9-микронных пикселей) одновременно регистрируется 29 порядков спектра в диапазоне 3900÷7500 Å. Проекция входной щели на приемнике составляет 2.4 пикселя, спектральное разрешение  $R = 19000$ . На 25-сантиметровом телескопе за 900 секунд накопления, при качестве изображений 1.7 угл. сек., регистрируется спектр звезды 5-й величины, отношение сигнал/шум составляет  $S/N = 50$  на пиксель. Пропускание спектрографа составляет 27 % на 5040 Å. Квантовая эффективность системы (атмосфера, телескоп, спектрограф, приемник) составляет 11 % (спектрограф UVES VLT в тех же условиях дает 17 %).

Г) В заключение приведем пример использования спектрографа FLASH (Мандель, 1988) с 50-сантиметровым телескопом ESO. Диаметр ядра оптоволокну (100 мкм) соответствует 2.7 угл. сек. в фокусе Кассегрена этого телескопа, при этом спектральное разрешение составляет  $R = 20000$ . На матрице ПЗС форматом 1252 x 770 пикселей, каждый размером 22 x 22 мкм, одновременно регистрировалось 57 спектральных порядков в диапазоне 4050÷6780 Å. Наблюдениям были доступны звезды ярче 7-й величины. В течение двух сетов (февраль–май 1993), каждый продолжительностью в два месяца, наблюдались спектры звезд типа LBV, изучалась фотосферная активность сверхгигантов классов O, B, A (Вольф и др., 1993). Получено свыше тысячи изображений звездных спектров, потери из-за плохой погоды составили 15 ночей.

Приведенные примеры показывают, что методы спектроскопии высокого разрешения вполне применимы и на телескопах любительского калибра, но для решения серьезных научных задач. Во всех перечисленных случаях стоимость телескопа существенно уступает стоимости спектрографа и светоприемника.

## 7 Выводы

В 1931 году начал работать дифракционный спектрограф фокуса кудэ 2.5-м телескопа обсерватории Mount Wilson. Новые возможности привели к тому, что уже в 1935 году около половины публикаций в *Astrophysical Journal* было связано с наблюдениями звездных спектров (в то время было всего три спектрографа высокого разрешения). В 1975 году доля таких публикаций в *Astrophysical Journal* составляла уже 14 %, а в 2011 году – менее 2 %. Понятно, что такое вытеснение оптической спектроскопии звезд «на обочину» связано, в основном, с появлением новых приоритетных астрофизических направлений. Учитывая данные таблиц, можно предположить, что развитие техники наблюдений с высоким спектральным разрешением на телескопах среднего диаметра не приводит к обязательному росту наукометрических показателей (число инструментов увеличилось в десятки раз, доля соответствующих публикаций систематически понижается). Выполнение крупных спектроскопических обзоров может приводить даже к снижению числа публикаций, поступающих с обзорного инструмента. Появление новых крупных телескопов переключает

внимание большинства астрономов, при этом идейная и методическая поддержка средних телескопов ослабевает. Поэтому можно понять, почему по наукометрическим (т. е. бюрократическим) соображениям значительное число телескопов среднего диаметра уже не поддерживается, см. табл. 1 в (Рингвальд и др., 2003).

Относительное число систем высокого спектрального разрешения, устанавливаемых на телескопах средних диаметров, не снижается, устойчиво составляя ~14 %. Но по информативности спектроскопические наблюдения всегда оставались на первом месте, поэтому научный вклад телескопов средних диаметров скорее определяется использованием методов спектроскопии высокого и среднего разрешения, чем фотометрических методов.

Технику спектроскопии высокого разрешения можно разбить на следующие хронологические группы: спектроскопия в неподвижном фокусе, компактные подвесные схемы скрещенной дисперсии, цифровые корреляционные методы, и, снова, спектроскопия на неподвижном инструменте, имеющем оптоволоконное сочетание с телескопом. Некоторые технические решения оказались настолько удачными, что были изготовлены небольшие серии спектрографов. В идейном плане техника спектроскопии высокого разрешения принципиально не отличается от методов, применяемых на телескопах больших диаметров ( $D = 1.5\text{--}4$  м), но на телескопах среднего диаметра высокое спектральное разрешение получить намного легче (т. к.  $R \sim 1/D$ ). Работы, выполненные на 122-см телескопе DAO (Ричардсон, 1968; Ричардсон и др., 1971; Стилборн и др., 1972; Флетчер и др., 1982), свидетельствуют о том, что резервы повышения эффективности спектроскопических наблюдений «рассеяны» по всему оптическому тракту, а не содержатся только в астроклиматической составляющей.

Мы считаем, что популярность спектроскопии высокого разрешения определяется не столько техническими возможностями (они в среднем ниже, хотя бы из-за меньшего диаметра  $D$ ), а особым статусом средних телескопов, на которых возможно выполнять спектроскопические обзоры и программы продолжительного мониторинга. Телескопы среднего диаметра, время которых размнивается на большое число коротких наблюдательных сетов, в научной литературе, как правило, незаметны (и это при повышенной стоимости эксплуатации таких инструментов из-за частой смены оборудования). В качестве одного из таких примеров упомянем 1-метровый телескоп САО РАН, оснащенный спектрографами фокусов кудэ и Кассегрена.

Следующим шагом в технике спектроскопии высокого разрешения на телескопах среднего диаметра может явиться создание недорогой оптики для специализированного спектроскопического телескопа, стоимость обслуживания которого минимальна. Напомним, что применение оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа было изначально стимулировано именно идеей многозеркального спектроскопического телескопа (Энжел и др., 1977), проверенной практически на 91-см телескопе (Хаббард и др., 1979). Собственно многозеркальный телескоп (9 зеркал, с  $D = 33$  см каждое), эквивалентный телескопу с монолитным зеркалом диаметром 1.3 м (Багнуоло и др., 1990), был создан для работы с однопорядковым спектрографом (Фуренлид и Кардона, 1988). В этом случае суммарная стоимость телескопа и спектрографа оказалась практически равной стоимости приемника. Наши оценки показывают, что на спектрографе скрещенной дисперсии, оснащенном крупноформатной матрицей ПЗС, можно использовать свет, собранный от 4-х зеркал среднего диаметра. С точки зрения согласования изображения эшелле спектра с форматом приемника, получаем задачу, эквивалентную использованию эшелле-спектрографа с резателем изображения.

В случае постановки методов спектроскопии высокого разрешения на 122-см телескопе КраО просматриваются два варианта, выбор между которыми определится объемом средств, необходимых для создания соответствующей спектроскопической аппаратуры. В качестве основного варианта можно принять одну из многочисленных схем стационарного размещения

Спектрографы высокого разрешения...

спектрографа и оптоволоконного сочетания с телескопом (см. табл. 5). Здесь основные расходы по оптике будут связаны с созданием линзовой камеры, диспергирующих узлов для  $d \sim 100$  мм, зеркал коллиматоров схемы белого зрачка. В САО РАН имеется опыт построения такого спектрографа (Панчук и др., 2011).

В качестве «бюджетной» альтернативы следует рассмотреть модификацию классической схемы Черни-Тернера, где диаметр коллимированного пучка можно уменьшить ( $d \sim 50$  мм), поэтому затраты на оптику будут значительно ниже: коллиматорное и камерное зеркала, призма (или решетка), эшелле – также имеют небольшие размеры. Астигматизм коллиматора и камеры можно компенсировать путем применения эшелле с шагом нарезки, изменяющимся по линейному закону. Эта идея, сформулированная и экспериментально проверенная отечественными оптиками (Нагулин и др., 1980), не известна, похоже, зарубежным астрономам (да и нашим тоже). Такой спектрограф, стационарно установленный в фокусе «ломаный Кассегрен» (1:20), по габаритам и массе будет значительно уступать спектрографу В.А. Альбицкого (Копылов, 1954) и спектрографу АСП-11, а по проникающей способности (при фиксированном спектральном разрешении), превзойдет любой спектрограф высокого разрешения с оптоволоконным сочетанием. Единственным минусом является ожидаемая нестабильность подвешенного спектрографа, которая не позволит ставить программы, определяемые повышенным требованием к точности определения лучевых скоростей ( $\Delta V_r < 100$  м/сек). Обеспечение высокой точности измерения доплеровских сдвигов на подвешенном инструменте потребует проведения дополнительных калибровок в процессе наблюдений. Такой подвешенный спектрограф всегда можно превратить в стационарный с оптоволоконным сочетанием, (если возникнет потребность в высокоточных доплеровских наблюдениях и появятся соответствующие средства).

В данной работе мы не рассматриваем возможности спектроскопии высокого разрешения, связанные с использованием интерферометрических средств. Это направление представляется перспективным прежде всего для телескопов большого диаметра, где возможности дифракционной спектроскопии исчерпаны, подробнее см. (Панчук и др., 2010).

## Благодарности

Авторы признательны Р.Е. Гершбергу за стимулирующие обсуждения проблемы спектроскопии высокого разрешения на телескопах среднего диаметра. Работа поддержана госконтрактом 14.740.11.0800 Министерства образования и науки Российской Федерации и подпроектом ОФН-17 Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН.

## Литература

- Абт (Abt H.A.) // *Astron. J.* 2012. V. 144. P. 91.  
 Авила и др. (Avila G., Burwitz V., Guirao C., Rodriguez J., Shida R., Baade D.) // *ESO Messenger* 2007. № 129. P. 62.  
 Адамс (Adams W.S.) // *Astrophys. J.* 1911. V. 33. P. 64.  
 Багнуоло и др. (Bagnuolo W.G., Furenlid I.K., Gies D.R., Barry D.J., Russel W.H., Dorsey J.F.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1990. V. 102. P. 604.  
 Баранн и Дюшес (Baranne A., Duchesne M.) // *In ESO-CERN Conf. «Auxiliary instrumentation for large telescopes».*/ Eds Laustsen S. and Reitz A. Geneva. May 2–5. 1972. P. 241.  
 Баранн и др. (Baranne A., Mayor M., Poncet J.L.) // *Vistas in Astronomy.* 1979. V. 23. P. 279.  
 Биверс и Эйтер (Beavers W.I., Eitter J.J.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1977. V. 89. P. 733.  
 ван Бисбрук (Van Biesbroeck G.) // *Contrib. from the McDonald Obs.* 1940. № 1. P. 103.

- Бодра и Бём (Baudrand J., Böhm T.) // *Astron. Astrophys.* 1992. V. 259. P. 711.
- Боуэн (Bowen I.S.) // *Astrophys. J.* 1938. V. 88. P. 113.
- Боуэн (Bowen I.S.) // *Astrophys. J.* 1952. V. 116. P. 1.
- Боярчук А.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1962. Т. 28. С. 123.
- Браун и др. (Brown T.M., Noyes R.W., Nisenson P., Korzennik S.G., Horner S.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1994. V. 106. P. 1285.
- Бучи и др. (Bouchy F., Connes P., Bertaux J.L.) // *IAU Colloquium 170, Precise stellar radial velocities, Victoria BC Canada/* Eds. Hearnshaw J.B. and Scarfe C.D. *ASP Conf. Ser.* 1999. V. 185. P. 22.
- Бхатиа и др. (Bhatia R.K., Swaminathan R., Vijas M.L.) // *Bull. Astron. Soc. India.* 1984. V. 12. P. 79.
- Вайс и др. (Weiss W.W., Barylak M., Hron J., Schmiedmayer J.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1981. V. 93. P. 787.
- Вальравен и Вальравен (Walraven Th., Walraven J.H.) // In «Auxiliary instrumentation for large telescopes»./ Eds. Lautsen S. and Reiz A. *ESO.* 1972. P. 175.
- Вольф и др. (Wolf B., Mandel H., Stahl O., Kaufer A., Szeifert T., Gang T., Gumberbach C.A., Kovacs J.) // *The Messenger.* 1993. № 74. P. 19.
- Вьетт (Wyatt W.F.) // In «Stellar Radial Velocities». *IAU Coll. No. 88./* Eds. Philip A.G.D. and Latham D.W. 1985. P. 123.
- Галл и др. (Gull T.R., O'Dell, Parker R.A.R.) // *Icarus.* 1974. V. 21. P. 213.
- Гаррисон (Harrison G.R.) // *JOSA* 1949. V. 39. P. 522.
- Герасимов Ф.М., Тельтевский И.А., Несмелов С.В., Сергеев В.П. // *ОМП.* 1958. Вып. 12. С. 6.
- ван Гиттерс (van Gitters G.W.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1974. V. 168. P. 469.
- Горыня Н.А., Расторгуев А.С., Самусь Н.Н., Зенькович А.Д., Николенко И.В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2009. Т. 104. № 6. С. 28.
- Гриффин (Griffin R.F.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1961. V. 122. P. 181.
- Гриффин (Griffin R.F.) // *Astrophys. J.* 1967. V. 148. P. 465.
- Гриффин и Ганн (Griffin R.F., Gunn J.E.) // *Astrophys. J.* 1974. V. 191. P. 545.
- Жао и др. (Gao L.-Z., Du B.-T., Wang X.-H., Pan Y., Jin T.-L., Xia C.-D.) // *Acta Astrophys. Sinica* 1994. V. 14. P. 93.
- Ингерсон (Ingerson T.) // 1999. <http://www.ctio.noao.edu/spectrographs/bme/bme.html>
- Карстен (Karsten L.) // In «Auxiliary instrumentation for large telescopes»./ Eds. Lautsen S. and Reiz A. *ESO.* 1972. P. 185.
- Кастли (Castley J.C.) // *Publ. Astron. Soc. Australia.* 1972. V. 2. P. 137.
- Кастли, Варсон (Castley J.C., Watson R.D.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1980. V. 41. P. 397.
- Кауфер (Kaufer A.) // 2001. <http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/instrumentation/Heros/>
- Кауфер и др. (Kaufer A., Pasquini L., et al.) // *Proc. SPIE.* 1998. V. 3355. P. 844.
- Квятковски (Kwjatkowski T.) // 2002. <http://www.astro.amu.edu.pl/PST/>
- Келоз и др. (Queloz D., Mayor M., Weber L., Blecha A., Burnet M., Confino B., Naef D., Pepe F., Santos N.C., Udry S.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 354. P. 99.
- Киршоу, Хирншоу (Kershaw G.M., Hearnshaw J.B.) // *Southern Stars.* 1989. V. 33. P. 89.
- Мак Клинтон (McClintock W.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1979. V. 91. P. 712.
- Мак Кляр и др. (McClure R.D., Fletcher J.M., Grundman W.A., Richardson E.H.) // In «Stellar Radial Velocities» *IAU Coll. № 88./* Eds. Philip A.G.D. and Latham D.W. 1985. P. 49.
- Копылов И.М. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1954. Т. 33. С. 44.
- Копылов И.М., Стешенко Н.В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1965. Т. 33. С. 308.
- Мак Кэйт и др. (McKeith C.D., Dufton P.L., Kane L.) // *Observatory.* 1978. V. 98. P. 263.
- Мак Кэйт и др. (McKeith C.D., Garcia Lopez R.J., Rebolo R., Barnett E.W., Beckman J.E., Martin E.L., Trapero J.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 273. P. 331.

Спектрографы высокого разрешения...

- Латэм (Latham D.W.) // In «Stellar Radial Velocities» IAU Coll. № 88./ Eds. Philip A.G.D., Latham D.W. 1985. P. 21.
- Латэм и др. (Latham D.W., Andersen J., Geary J.C., Stefanik R.P.) // ASP Conf. Ser. 1988. V. 3. P. 269.
- Мак-Лафлин // Настоящее и будущее телескопов умеренного размера. Сб. перев. П.В. Щеглова. ИЛ. М. 1960. С. 118.
- Лиллер (Liller W.) // Appl. Opt. 1970. V. 9. P. 2332.
- Максутов Д.Д. // Труды государственного оптического института. 1944. Т. 16. Вып. 124. С. 4.
- Мандель (Mandel H.) // In IAU Symp. № 132. «The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics». 1988. P. 9.
- Меррилл (Merrill P.W.) // Astrophys. J. 1931. V. 74. P. 188.
- Мак Миллан и др. (McMillan R., Perry M.L., Smith P.H., Merline W.J.) // ASP Conf. Ser. 1988. V. 3. P. 237.
- Моррисон (Morrison N.) // 2011. <http://astro1.panet.utoledo.edu/~wwriter/telescope.html>
- Нагулин Ю.С., Павлычева Н.К., Яковлев Э.А. // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 49. С. 987.
- Панчук (Panchuk V.E.) // Bull. SAO. 1998. V. 44. P. 65.
- Панчук В.Е., Сачков М.Е., Юшкин М.В., Якопов М.В. // Астрофиз. Бюлл. 2010. Т. 65. С. 78.
- Панчук В.Е., Юшкин М.В., Якопов М.В. // Астрофиз. Бюлл. 2011. Т. 66. С. 382.
- Прокофьев В.К., Петрова Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 29. С. 3.
- Рамсей, Хенемодер (Ramsey L.W., Huenemoerder D.P.) // Proc. SPIE. 1986. V. 627. P. 282.
- Раскин, ван Винкель (Raskin G., Van Winkel H.) // SPIE. 2008. V. 7014. P. 178.
- Рингвальд и др. (Ringwald F.A., Culver J.M., Lovell R.L., Sarah Abbey Kays, and Torres Y.V.) // Am. Astron. Soc. 2003. V. 35. P. 1063.
- Ричардсон (Richardson E.H.) // R.A.S.C. Journ. 1968. V. 62. P. 313.
- Ричардсон и др. (Richardson E.H., Brealey G.A., Dancy R.) // DAO Publ. 1971. V. 14. P. 1.
- Северный А.Б., Стешенко Н.В., Хохлова В.Л. // Астрон. журн. 1960. Т. 37. С. 23.
- Словак и др. (Slovak M.H., van Gitters G.W., Barnes III T.G.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1979. V. 91. P. 840.
- Смолински (Smolinski J.) // In «Colloquium on Supergiant stars»./ Ed. Hack V. Osservatorio Astronomico di Trieste. 1971. P. 68.
- Стилборн и др. (Stilborn J.R., Fletcher J.M., Hartwick F.D.A.) // R.A.S.C. Journ. 1972. V. 66. P. 49.
- Талл (Tull R.G.) // Appl. Opt. 1969. V. 8. P. 1635.
- Токовинин А.А. // Астрон. журн. 1987. Т. 64. С. 196.
- Токовинин (Tokovinin A.) // 2011. <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/echelle/chiron.pdf>
- Тонри и Дэвис (Tonry J., Davis M.) // Astron. J. 1979. V. 84. P. 1511.
- Уайт (White N.M.) // in «Instrumentation and research programmes for small telescopes»./ Eds. Hearnshaw J.B. and Cotrell P.L. IAU Symp. № 118. 1985. P. 117.
- Феленбок и др. (Felenbok P., Guerin J., Czarny J.) // ESO-OHP Workshop on «The Optimization of the Use of CCD Detectors in Astronomy»./ Eds. Baluteau J.-P. and S.D'Odorico. 1986.
- Фелжетт (Fellgett V.) // Optica Acta. 1955. V. 2. P. 9.
- Флетчер и др. (Fletcher J.M., Harris H.C., McClure R.D., Scarfe C.D.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1982. V. 94. P. 1017.
- Фраска (Frasca A.) // 2004. <http://w3c.ct.astro.it/sln/strumenti.html>
- Фурунлид и Кардона (Furenlid I., Cardona O.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1988. V. 100. P. 1001.
- Хаббард и др. (Hubbard E.N., Angel J.R.P., Gresham M.S.) // Astrophys. J. 1979. V. 229. P. 1074.
- Хантен и др. (Hunten D.M., Wells W.K., Brown R.A., Schneider N.M., Hilliard R.L.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1991. V. 103. P. 1187.
- Хирншоу (Hearnshaw J.B.) // Proc. ASA. 1977. V. 3. P. 102.
- Хирншоу (Hearnshaw V.) // Sky & Telescope. 1978. V. 56. P. 6.



- Хирншоу и др. (Hearnshaw J.B., Barnes S.I., Kershaw G.M., Frost N., Graham G., Ritchie R., Nankivell G.R.) // *Experimental Astron.* 2002. V. 13. P. 59.
- Чаффи (Chaffee F.H.Jr.) // *Astrophys. J.* 1974. V. 189. P. 427.
- Шмидт (Schmidt В.) // *Mitt. der Hamburger Sternwarte.* 1932. № 7. P. 15.
- Шрёдер (Schroeder D.J.) // *Appl. Opt.* 1967. V. 6. P. 1976.
- Шрёдер и Андерсон (Schroeder D.J., Anderson C.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1971. V. 83. P. 438.
- Штрассмайер и др. (Strassmeier K.G., Woche M., Andersen M.I., Fehner T., Weber M., Granzer V, Schwoppe A., Staude A., Bartus J., Washuttl A., Ritter A., Bauer S.-M., Dionies F., Popow E., Paschke J.) // «The STELLA Robotic Observatory. II. Overview of its Scientific Instrumentation». 3<sup>rd</sup> Potsdam Thinkshop. July 2004.
- Энжел и др. (Angel J.R.P., Adams M.T., Boroson T.A., Moore R.L.) // *Astrophys. J.* 1977. V. 218. P. 776.