

УДК 524.3-324.4:520.353

## К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД С ПРИБОРОМ SCORPIO

© 2008 А. В. Моисеев

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 26 октября 2007 г.; принята в печать 19 ноября 2007 г.

Рассматриваются факторы, влияющие на точность измерения лучевых скоростей звезд по спектрам, получаемым с прибором SCORPIO на 6-м телескопе САО РАН. Показано, что неравномерная засветка щели спектрографа в комбинации с влиянием дифференциальной атмосферной рефракции может привести к значительным систематическим ошибкам в оценках лучевой скорости. Формулируются рекомендации по методике проведения наблюдений, позволяющие минимизировать ошибку измерения лучевых скоростей.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение лучевых скоростей по доплеровским смещениям спектральных линий — одна из старейших задач наблюдательной астрономии. Поэтому неудивительно, что уже в одном из первых курсов практической астрофизики [1] заметное место уделялось описанию источников ошибок, влияющих на точность таких измерений. Традиционно считается, что борьба за высокую точность измерения лучевых скоростей — это удел спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения ( $\lambda/\Delta\lambda > 50000$ ). Здесь ошибка измерений может составлять менее 10 м/с, и важную роль начинают играть тепловая и позиционная нестабильность как самого спектрографа, так и отдельных его элементов, в частности ПЗС-детектора. Обзор работ, посвященных этой теме, можно найти в [2]. Однако и при наблюдениях со спектрографами низкого разрешения ( $\lambda/\Delta\lambda < 3000$ ) задача повышения точности измерения лучевых скоростей остается весьма актуальной. Использование светосильных короткофокусных камер приводит к тому, что даже небольшие погрешности, связанные с нестабильностью прибора или с неправильной методикой наблюдений, могут привести к значительным (до сотен км/с) ошибкам измерений. Данная статья как раз и посвящается проблеме измерения лучевых скоростей со спектрографом низкого разрешения 6-м телескопа САО РАН.

Многорежимный редуктор светосилы SCORPIO используется в первичном фокусе (ПФ) 6-м телескопа, начиная с 2000 г. Для выполнения спектральных наблюдений прибор укомплектован набором гризм с объемными фазовыми голографическими решетками (VRHG). Плотность штрихов вышеупомянутых решеток составляет от 400 до

3000 штр/мм, которой соответствует полуширина (FWHM) инструментального профиля от 13 до 1.5 Å при ширине щели 1" (подробнее см. [3]).

Ошибка измерения относительных лучевых скоростей внутри протяженного объекта (т.е. ошибка измерения скоростей от точки к точке вдоль щели) на SCORPIO с гризмами высокого разрешения составляет 5–10 км/с при измерениях по отдельным линиям с достаточно высоким отношением сигнал/шум и в основном определяется шириной инструментального профиля. В идеальном случае ошибка измерения лучевых скоростей относительно наблюдателя должна иметь ту же величину. Однако, как показала практика наблюдений, это не всегда так. В табл. 1 приведены примеры наблюдательных программ с указанием ошибки измерения лучевых скоростей, полученной, как правило, из сравнения результатов наблюдений на SCORPIO с опубликованными данными.

Эта таблица не претендует на полноту, но иллюстрирует имеющую место тенденцию. А именно, в большинстве наблюдательных программ ошибки измерения скоростей не превышают ожидаемых 10 км/с, прежде всего это относится к наблюдениям протяженных объектов. В то же время при наблюдениях звезд ситуация иная — разные команды наблюдателей с одной и той же гризмой получают принципиально разную точность. Ошибка в сотню км/с при наблюдениях со спектральным разрешением 5–6 Å (наблюдения по программам В. П. Горанского и А. М. Черепашука) явно превышает все допустимые пределы. Даже если здесь и влияет какой-либо личный фактор, необходимо понять, в чем причина столь большого различия.

**Таблица 1.** Ошибки измерения лучевых скоростей в различных наблюдательных программах

Название программы (заявитель)	Диспергирующий элемент	Метод измерения	Ошибка (км/с)
Близкие галактики (Макаров)	Гризма VPHG1720	По эмиссионной линии H $\alpha$	10 – 15
Тесные двойные звезды (Сахибуллин)	Гризма VPHG1200G	Кросс-корреляция абсорбционных спектров	5 – 7
Галактика VII Zw403 (Лозинская)	Гризма VPHG1720 Гризма VPHG2300	По эмиссионным линиям H $\alpha$ , [NII] По эмиссионным линиям H $\beta$ , [OIII]	5 – 10 10
Линзовидные галактики (Засов)	Гризма VPHG2300	Кросс-корреляция абсорбционных спектров	5 – 10
Шаровые скопления (Самусь)	Интерферометр IFP501	По абсорбционной линии H $\alpha$	3 – 5
Джеты из молодых звезд (Мовсесян)	Интерферометр IFP501	По эмиссионным линиям H $\alpha$ , [SII]	5 – 8
Спектроскопия SS433 (Черепашук)	Гризма VPHG1200G	По абсорбционным линиям	50 – 200
Спектры новых звезд (Горанский)	Гризма VPHG1200G	По абсорбционным линиям	20 – 200

В данной статье рассматриваются различные факторы, влияющие на точность измерения лучевых скоростей при наблюдениях со SCORPIO. Достаточно условно они разделены на связанные с самим спектрографом (раздел 2) и с методикой проведения наблюдений (раздел 3). Далее в разделе 4 приведены рекомендации, которых следует придерживаться для обеспечения необходимой точности измерения лучевых скоростей.

Автор отдает себе отчет в том, что рассматриваемые в статье эффекты хорошо известны многим специалистам, непосредственно имеющим дело с астрономическими спектрографами, и были уже описаны достаточно детально. Однако эти описания содержатся, как правило, в специальных отчетах, изданиях отдельных обсерваторий, руководствах по пользованию приборов и т.д. и поэтому не известны широкому кругу читателей. В то же время общение с коллегами показало, что далеко не всем, даже специалистам по звездной спектроскопии, очевидно то обстоятельство, что кроме спектрального разрешения на точность измерения лучевых скоростей влияет множество обстоятельств. Вообще говоря, все изложенное ниже применимо к случаю измерения лучевых скоростей звезд не

только со SCORPIO, но и с помощью любого аналогичного светосильного спектрографа с длинной щелью и относительно низким спектральным разрешением.

## 2. ИСТОЧНИКИ ОШИБОК ВНУТРИ СПЕКТРОГРАФА

### 2.1. Дискретизация спектров

Астрономические спектрографы обычно конструируются так, чтобы на полуширину инструментального профиля приходилось 2–3 пикселя на ПЗС-приемнике (минимально необходимая дискретизация согласно теореме Котельникова). По сравнению с этим, спектры получаемые со SCORPIO, обычно имеют избыточную дискретизацию (oversampling), так что при наблюдениях со щелью шириной 1'' инструментальный профиль имеет FWHM = 5 – 6 пикселей (рис. 1). Избыточная дискретизация дает некоторые преимущества при изучении формы профилей линий и при измерении лучевых скоростей методом кросс-корреляций в широких спектральных интервалах. Однако при измерениях лучевых скоростей по отдельным линиям избыточная дискретизация оказывается

излишней, более того, в этом случае многие наблюдатели склонны переоценивать точность таких измерений, что может приводить к разного рода казусам, если сравнивать SCORPIO с другим спектрографом, обладающим той же обратной линейной дисперсией. Обычно предполагается, что точность измерения положения линии составляет около  $1/10$  пикселя. Поскольку для SCORPIO с решеткой VPHG1200G обратная дисперсия составляет  $\sim 0.85 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ , то, казалось бы, ожидаемая точность должна быть около  $0.09 \text{ \AA}$  ( $5 \text{ км/с}$ ), но в реальных наблюдениях при ширине щели  $1''$  точность будет в два раза хуже, так как в случае избыточной дискретизации надо отсчитывать доли не от размера элемента приемника, а от ширины инструментального профиля. Ошибка измерений в этом случае обычно составляет  $1/20 - 1/30$  от величины FWHM.

### 2.2. Заполнение зрачка

При калибровке шкалы длин волн с помощью лампы линейчатого спектра важно чтобы угол сходимости пучка лучей от калибровочного источника был близок к углу сходимости пучка лучей от телескопа (условие телецентризма). Другими словами, положение выходного зрачка для объекта и калибровки должны совпадать. Иначе можно получить различные шкалы длин волн на кадрах со спектрами объекта и калибровочной лампы. Следует отметить, что при проектировании и изготовлении SCORPIO была предпринята попытка обеспечить правильное заполнение зрачка, в чем состоит его отличие от предыдущих вариантов светосильных спектрографов ПФ. Здесь условие телецентризма выполняется за счет использования специальной оптики в тракте калибровки, формирующей перед щелью прибора сходящийся пучок со светосилой, эквивалентной светосиле телескопа ( $F/4$ ). Такая схема тракта калибровки должна формировать зрачок системы калибровки в том же положении, где находится изображение зеркала телескопа. Разумеется, ход лучей от калибровочной лампы не абсолютно точно совпадает с ходом лучей от главного зеркала (не учитывается вклад от растяжек-спайдеров ПФ и т. п.), однако пока нам не удалось обнаружить значимого отклонения от телецентризма при спектральных наблюдениях. А именно, в тех случаях, когда другие источники ошибок (точность фокусировки, гнутая спектрографа, построение дисперсионной зависимости и т. д.) сведены к минимуму, скорости, определяемые по линиям ночного неба, не показывают значимого систематического отклонения от нуля, превышающего точность измерения по отдельным линиям (т. е.  $\sim 1/20$  от ширины аппаратного профиля, см.

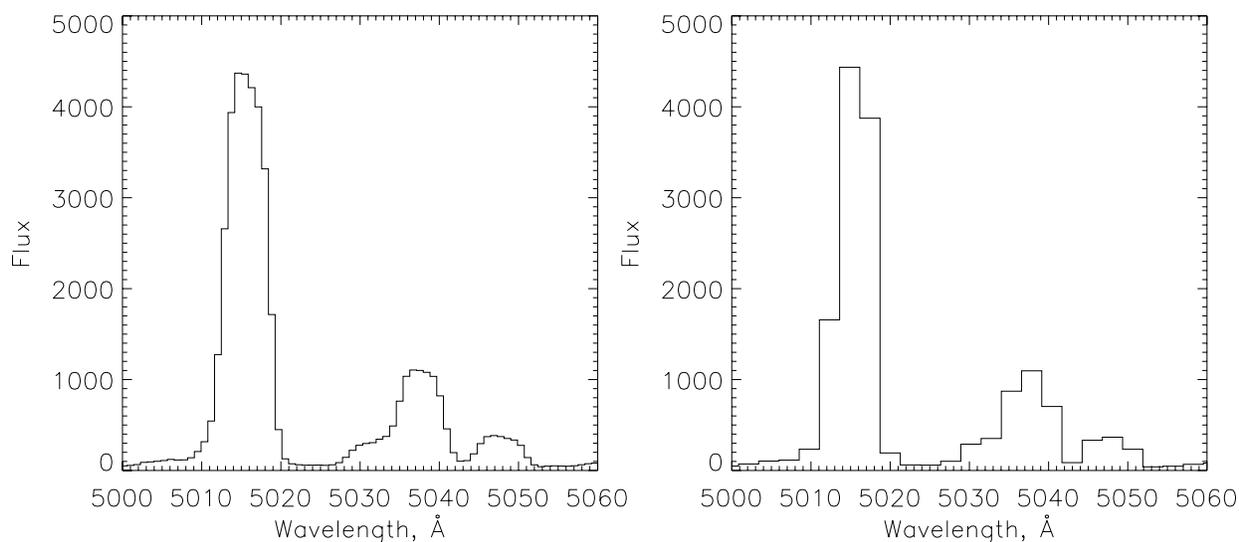
предыдущий раздел). В лучших измерениях со сканирующим интерферометром Фабри-Перо удается достичь точности измерения лучевых скоростей  $3 - 5 \text{ км/с}$  (табл. 1), что, видимо, и является верхним пределом для величины ошибок, обусловленных невыполнением условия телецентризма при калибровке по встроеной лампе с линейчатым спектром.

### 2.3. Калибровка по спектру сравнения

В процессе спектральных наблюдений со SCORPIO часто нужно переходить от одного режима наблюдений к другому. Как минимум, при смене объекта наблюдений необходимо переключаться из режима “длинная щель” в режим “прямые снимки”. При возвращении в спектральный режим элементы схемы спектрографа (турель со щелью, каретка диспергирующего элемента, фокусирующий механизм коллиматора) устанавливаются на прежние места с определенной точностью, которая прежде всего ограничена чисто механическими причинами: точностью срабатывания концевых выключателей и механических фиксаторов. Поэтому даже при наблюдениях в одном и том же положении телескопа (т.е. при неизменных гнутых спектрографа) взаимные смещения щели относительно гризмы могут составлять десятки микрон, что является значительной величиной (размер одного пикселя ПЗС EEV42-40 составляет  $13.5 \mu\text{m}$ ). Образно говоря, каждый раз спектрограф приходится разбирать и собирать заново. Поэтому абсолютно необходимо получать калибровочный спектр сравнения при каждом переходе в спектральный режим. Однако оказалось, что не все наблюдатели понимают необходимость столь частой калибровки, к примеру 07/08 сентября 2004 г. последовательно наблюдалось 9 звезд на разных зенитных расстояниях, но при этом был снят всего один спектр сравнения! Понятно, что построенная шкала длин волн имела систематические сдвиги, разные для разных объектов.

К недостаткам используемой для калибровки лампы с He-Ne-Ar-наполнением следует отнести то, что ее спектр на длинах волн короче  $5000 \text{ \AA}$  содержит только слабые линии, а для  $\lambda < 3888 \text{ \AA}$  линий просто нет. Поэтому при наблюдениях в этом спектральном диапазоне необходимо следить за тем, чтобы экспозиция спектра сравнения была достаточна для обнаружения слабых линий. Рекомендованные времена экспозиций спектра сравнения приводятся в “Руководстве по эксплуатации” [4] и сокращать их крайне нежелательно.

На точность получаемых лучевых скоростей влияет также алгоритм построения дисперсионной зависимости, с помощью которой осуществляется переход от координат пикселей на ПЗС к длинам



**Рис. 1.** Фрагмент спектра сравнения лампы с He-Ne-Ag-наполнением, полученный со SCORPIO с решеткой VPHG1200G в случае избыточной (FWHM= 6 px, слева) и нормальной (FWHM= 2.5 px, справа) дискретизации. Спектральное разрешение одно и то же, хотя на первый взгляд может показаться, что линии на правом рисунке более узкие.

волн. Здесь в разных системах обработки открывается достаточно широкая свобода действий: выбор метода определения положения центра линий, вида аппроксимирующих полиномов и т. п. Однако сравнение результатов обработки одних и тех же спектров, проведенной Е. А. Барсуковой в системе MIDAS и А. В. Моисеевым в пакете программ, работающих под IDL, показало отсутствие значимых систематических отличий между ними. Таким образом, если процедура обработки проводится корректно и грамотно, то для задачи спектроскопии низкого разрешения со SCORPIO не так важно, в какой системе и по каким алгоритмам выполнялся анализ данных.

#### 2.4. Гнутия спектрографа

SCORPIO устанавливается в первичном фокусе 6-м телескопа, поэтому здесь неизбежно влияние изгибных деформаций (гнутий), величина которых меняется при наблюдениях на разных зенитных расстояниях ( $z$ ) и при различных углах установки поворотного стола ПФ. По сравнению с предшествующими спектрографами ПФ, SCORPIO обладает относительно более высокой жесткостью корпуса. Несмотря на это, измерения показывают, что смещения переднего фланца относительно ПЗС при изменениях  $z$  от  $10^\circ$  до  $70^\circ$  составляют около  $10 \mu m$ , что близко к размеру пикселя в детекторе. Реальные смещения изображения спектра на ПЗС, вызванные гнутиями, могут возрастать из-за ограниченной жесткости каретки с гризмой. Понятно, что при длительных временах суммарных экспозиций (1 час и более) гнутия могут приводить к

взаимным смещениям между спектрами объекта и калибровочной лампы. Конкретно этот вопрос исследовался нами при обработке наблюдений по заявкам А. В. Засова и М. Ваес, в которых необходимо было получать спектры галактик ранних типов с длительными экспозициями. Измерения по 12-ти сериям экспозиций показывают, что взаимные смещения спектров при изменении  $z$  на  $10^\circ$  составляют от 0 до 1.5 пикселей, при среднем значении  $0.5 \pm 0.1$  пикселя. Это соответствует 20 – 30 км/с при наблюдениях с гризмой VPHG1200G. Разумеется, гнутия приводят к систематическим ошибкам в измерении лучевых скоростей, но учесть их сравнительно просто. Достаточно измерить взаимные смещения между накоплениями спектра объекта (например методом кросс-корреляции линий спектра свечения ночного неба) и сдвинуть все кадры к тому кадру, который был получен в момент времени, максимально близкий к времени проведения съемки спектра сравнения. Лучше, конечно, снимать спектр сравнения несколько раз внутри серии экспозиций объекта (как минимум — до и после), чтобы иметь дополнительный контроль за величиной возникающих сдвигов.

#### 2.5. Аберрации

Расчетная картина аберраций SCORPIO в спектральном режиме приводится в статье [3]. Как и для любого другого спектрографа, здесь имеют место вариации формы и ширины инструментального профиля по полю. При измерении лучевых скоростей по линиям в различных спектральных интервалах для нас прежде всего важны вариации

профиля вдоль направления дисперсии. Типичная картина изменения FWHM инструментального профиля показана на рис. 2. Вариации ширины профиля по полю невелики, однако на самом краю спектрального диапазона FWHM увеличивается на 10–20% относительно среднего значения. Амплитуда этих вариаций зависит от точности фокусировки коллиматора и камеры прибора, обычно наблюдатели стараются сфокусировать коллиматор SCORPIO так, чтобы изменения ширины профиля по полю были минимальны. Вообще говоря, отмеченные вариации профиля не должны оказывать заметного влияния на точность измерения лучевых скоростей, но в случаях объектов со сложным профилем спектральных линий ошибка измерения может возрасти. В качестве примера можно привести наблюдения Новой V723Cas, спектр которой содержит мощные эмиссионные линии с очень сложной формой профиля (рис. 3). Наблюдения выполнялись с относительно низким спектральным разрешением ( $FWHM \approx 6 \text{ \AA}$ ). Поскольку наблюдаемый спектр является сверткой спектра объекта с инструментальным профилем, то заметно искажение формы наиболее синих линий на самом краю наблюдаемого диапазона (где максимально влияние аббераций на вид инструментального профиля). А именно, асимметрия бальмеровских линий (реально присутствующая в спектре Новой) наиболее заметна в линиях  $H\beta$ ,  $H\gamma$  и уменьшается в линии  $H\epsilon$ . В результате измеряемая величина лучевой скорости зависит от принятого алгоритма определения положения центра линий. В описываемом случае по одним и тем же спектрам можно получить результаты, различающиеся на десятки км/с!

### 3. ВНЕШНИЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

Результатом действия большинства факторов, перечисленных в разделе 2, является сдвиг между шкалой длин волн ( $\lambda$ ), определяемой по спектру сравнения, и реальной шкалой длин волн в спектрах объекта. Проконтролировать и скорректировать этот сдвиг, как правило, весьма просто, достаточно измерить длины волн эмиссионных линий ночного неба и по ним уточнить шкалу длин волн спектров объекта. Однако, к примеру, в наблюдениях по программе В. П. Горанского (см. табл. 1) контроль по линиям неба не обнаружил сильного искажения шкалы  $\lambda$ , в то время как отличия измеренных лучевых скоростей от опубликованных в литературе значений превышали сотню км/с, причем это рассогласование зависит от длины волны: скорости, измеренные по различным бальмеровским линиям, отличаются на десятки км/с. Представляется, что основной вклад в возникшие здесь ошибки вносят описанные ниже учет континуума и

неравномерность засветки щели. Специально для проверки этого утверждения автор в марте 2007 г. наблюдал со SCORPIO (гризма VPHG1200G, щель шириной  $1''$ ) две звезды: известный спектрофотометрический стандарт GRW+70d5824 (тип DA3) и звезду класса AIII HD120874, аналогичную стандартам лучевых скоростей, наблюдавшихся по программе А. М. Черепашука (см. табл. 1).

#### 3.1. Алгоритмы определения скорости линий: учет континуума

Если лучевые скорости измеряются по отдельным спектральным линиям, то важно, на каком “пьедестале” находится каждая линия. Действительно, градиент яркости подложки, обусловленный как изменением уровня континуума, так и вариациями квантовой эффективности спектрографа, вносит дополнительную асимметрию в наблюдаемую форму профиля линии, что может привести к сдвигу ее барицентра. Практически все знают о необходимости правильного проведения континуума в спектрах, однако далеко не так очевидно, что к сходному искажению формы широких линий может приводить и неучет кривой чувствительности прибора. В качестве иллюстрации на рис. 4 и 5 приводятся примеры фрагментов спектров и измерения лучевых скоростей по абсорбционным линиям  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$  и  $H\epsilon$ . Скорости измерялись по ядру линии, профиль которой аппроксимировался гауссианой. Измерения проводились следующими способами:

- с учетом кривой чувствительности прибора, в абсолютных единицах потока (в  $\text{эрг/с/см}^2/\text{\AA}$ ) с вычтенным континуумом;
- с учетом кривой чувствительности, в абсолютных единицах потока без вычитания континуума;
- в инструментальных отсчетах (без учета спектральной чувствительности прибора) с вычтенным континуумом;
- в инструментальных отсчетах без вычитания континуума.

Планки погрешностей, приведенные на графиках измерений, сделанных первым способом, показывают максимальные величины ошибок определения лучевых скоростей с помощью спектра сравнения (т. е. точность построения дисперсионной зависимости). Видно, что лучевые скорости, измеряемые по линиям в синей части спектра, сильно зависят от метода учета наклона континуума, и

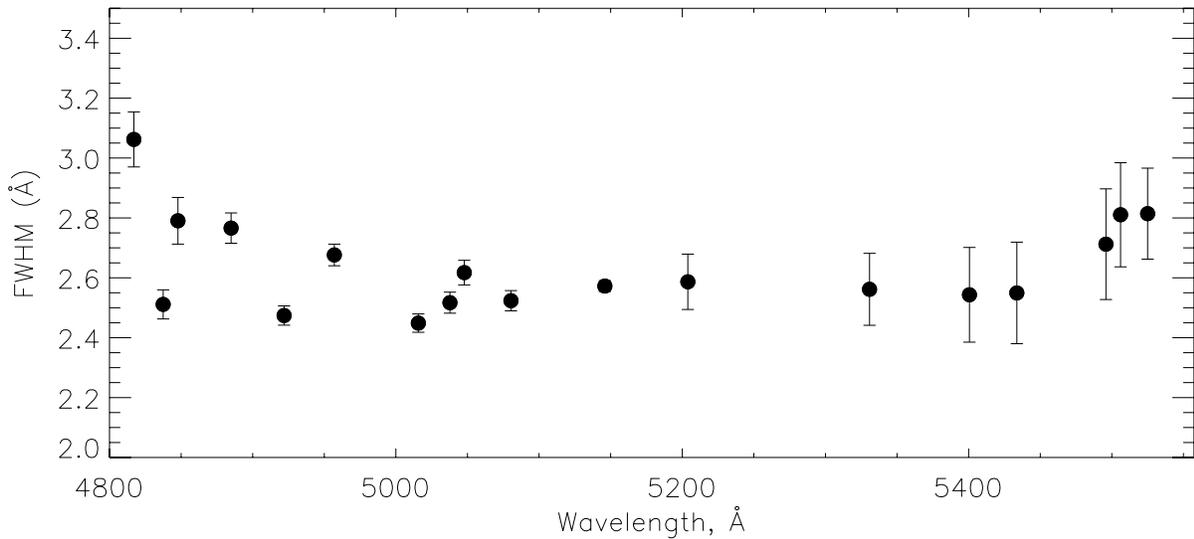


Рис. 2. Измерения FWHM-линий калибровочной лампы вдоль направления дисперсии (гризма VPHG2300G, наблюдения 26/27 ноября 2005 г.)

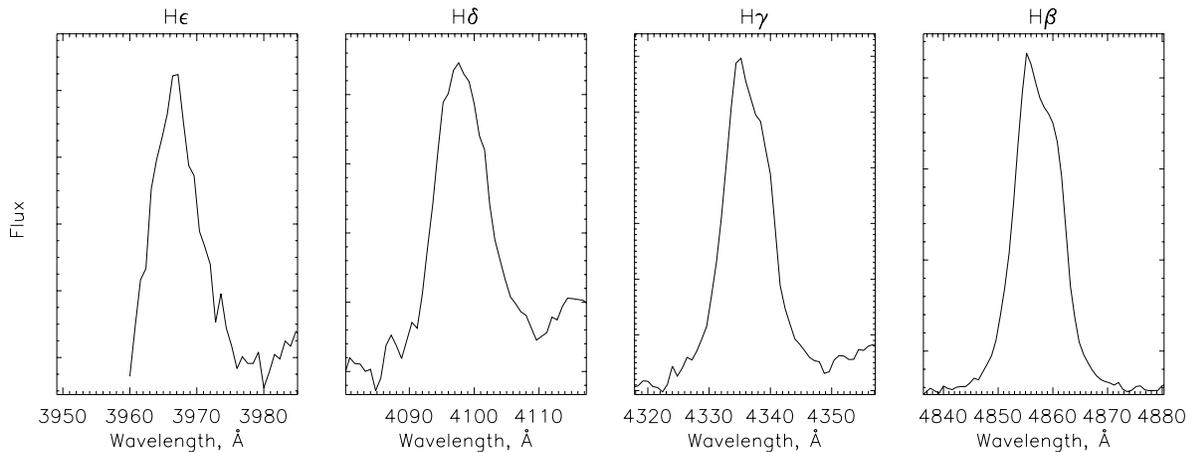
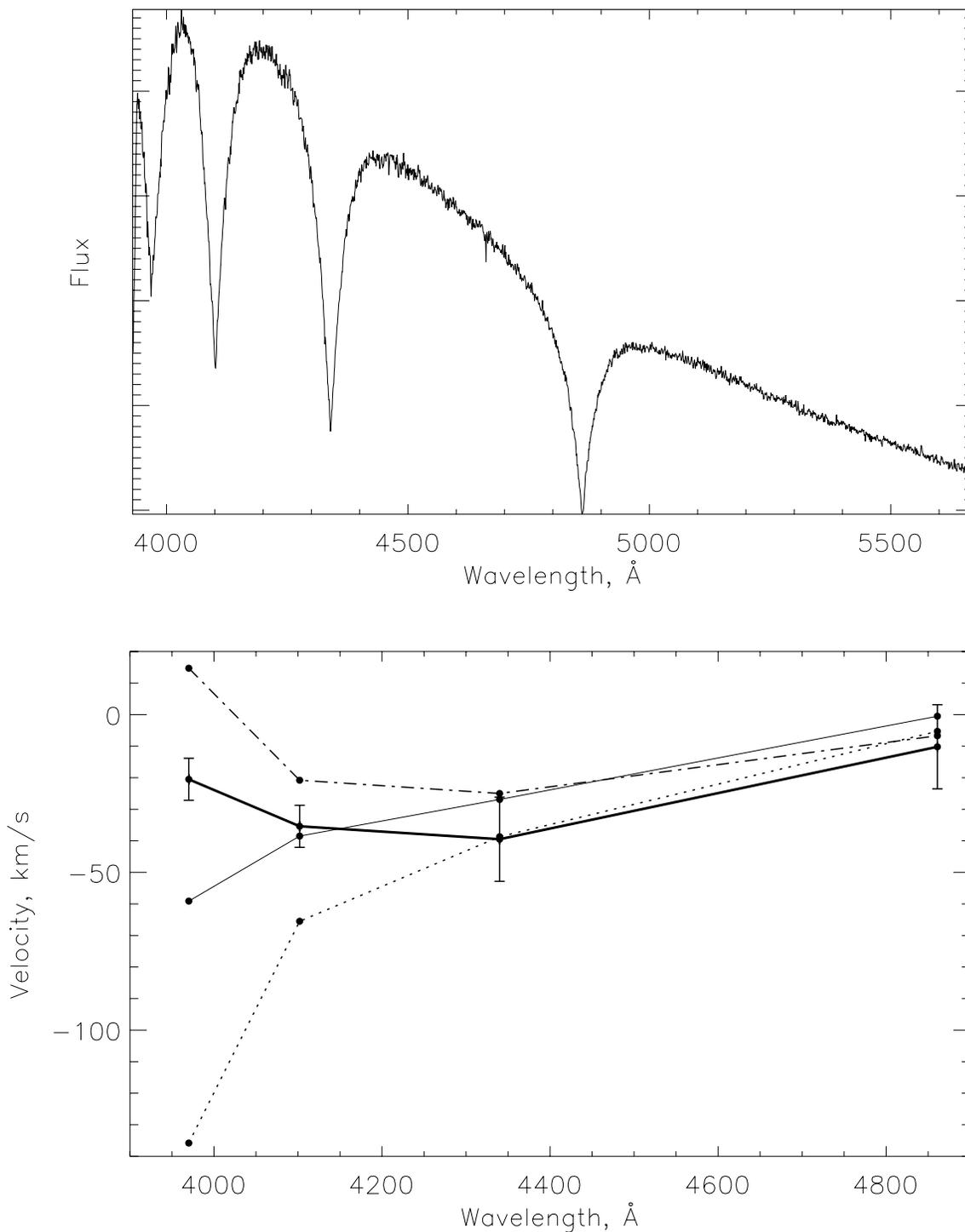


Рис. 3. Профили эмиссионных линий в спектре Новой V723Cas (гризма VPHG1200G, наблюдения 08/09.08.2005).

возникающая систематическая ошибка превышает формальную точность построения шкалы длин волн. Особенно хорошо это заметно для результатов, полученных при анализе спектров широкими бальмеровскими линиями звезды GRW+70d5824. Заметим, что большая ошибка измерения лучевых скоростей по  $H\epsilon$  может быть частично обусловлена блендированием другими линиями.

Важно отметить следующий момент. Из общих соображений ясно, что наиболее корректным из вышеописанных способов измерения является переход к абсолютным единицам потока с последующим вычитанием континуума. К близкому результату также приводит деление исходного спектра на континуум. При этом мы должны получить корректные лучевые скорости с почти нулевым трендом по длинам волн. Для GRW+70d5824 (рис. 4)

так и получается, но в случае HD120874 (рис. 5) остается градиент скорости вдоль  $\lambda$ . Причина в том, что в первом случае щель была ориентирована вдоль направления атмосферной дисперсии (см. далее раздел 3.2.2) а во втором случае — поперек, т. е. наблюдаемый спектр оказывается дополнительно искажен и не удастся корректно перейти от наблюдаемых к абсолютным потокам. Из этого следует, что даже если целью наблюдений является только измерение лучевых скоростей (а не спектрофотометрия), все равно надо стараться располагать щель спектрографа вдоль направления атмосферной дисперсии.



**Рис. 4.** Вверху — спектр звезды GRW+70d5824, полученный с гризмой VPHG1200G. Внизу — результаты измерения лучевых скоростей по бальмеровским линиям. Отмечены характерные внутренние ошибки измерений (точность калибровки шкалы длин волн). Сплошной толстой линией показаны измерения по спектру в абсолютных единицах потока с вычтенным континуумом. Штрихпунктирной — по спектру в инструментальных отсчетах с вычтенным континуумом. Сплошной тонкой линией — по спектру в абсолютных единицах потока без учета континуума. Пунктиром показаны измерения по спектру в инструментальных единицах без учета континуума.

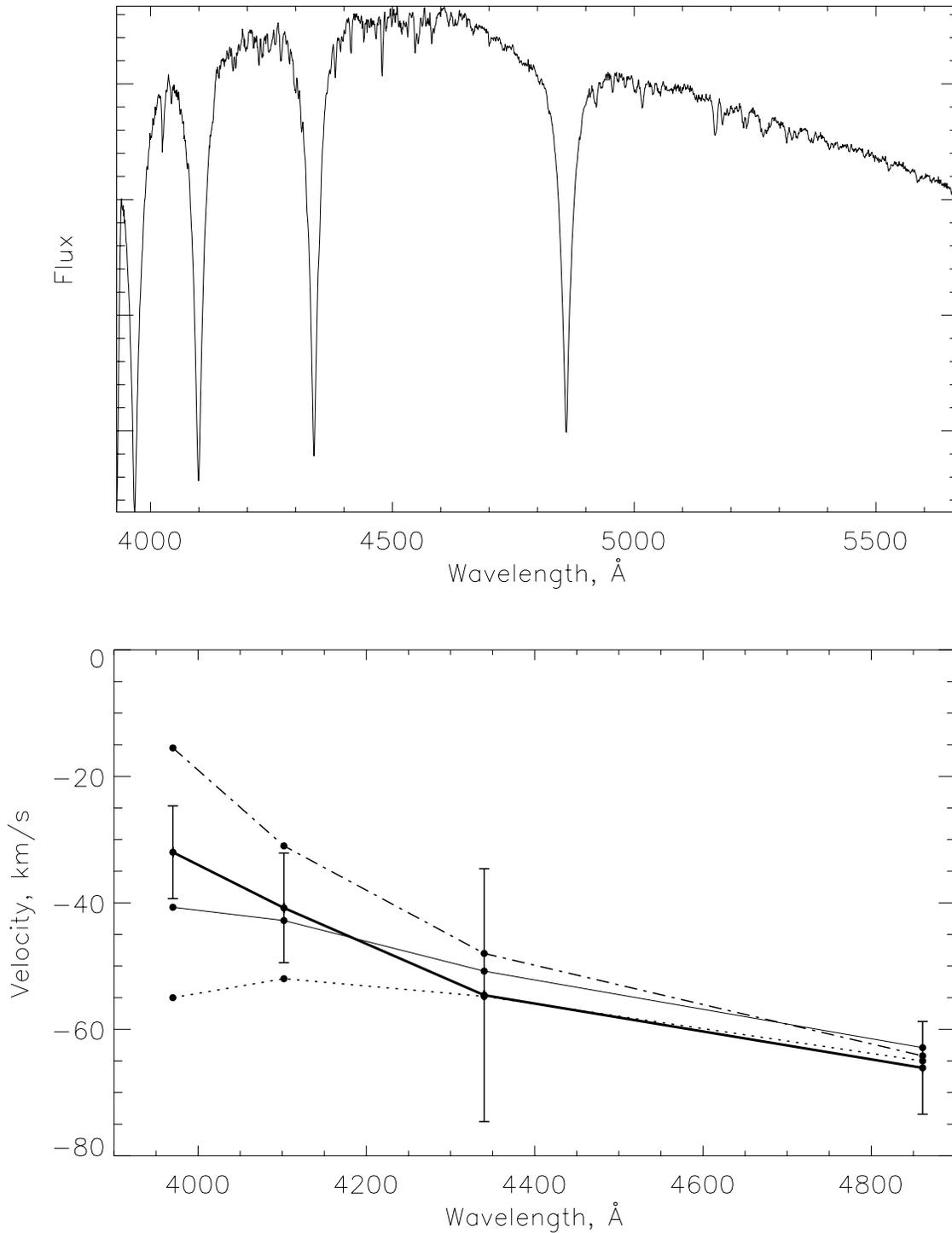


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для звезды HD120874.

### 3.2. Неравномерность засветки щели

#### 3.2.1. Общие замечания

На выходе спектрограф строит серию монохроматических изображений щели, свернутых с рас-

пределением яркости в объекте. Если центр изображения объекта не совпадает с щелью, то она засвечивается неравномерно, при этом барицентр в распределении яркости сдвигается в сторону от геометрического центра щели. Это эквивалент-

но сдвигу щели как целого, при том что шкала длин волн по спектрам калибровочной лампы или эмиссионным линиям ночного неба будет соответствовать равномерно засвеченной (“не сдвинутой”) щели. На рис. 6 показано моделирование этого эффекта для случая наблюдений с гризмой VPHG1200G при разной полуширине звездных изображений ( $\beta$ ). Чем больше на рисунке отклонения пунктирной линии от центра щели, тем больше будет сдвиг шкалы длин волн в спектре объекта, а следовательно, и систематическая ошибка измеряемых лучевых скоростей.

Результат такого моделирования — изменения скорости ( $\Delta V$ ) в зависимости от смещения звезды относительно щели ( $\Delta X$ ) — показан на рис. 7. Видно, что ошибка измерения растет с уменьшением  $\beta$ . Расчет проводился для двух видов функций, описывающих распределение яркости в изображении звезды: распределения Гаусса (правый рисунок) и функции Моффата с показателем степеней  $\alpha = 3$  (левый рисунок). Предварительный анализ архивных изображений, полученных со SCORPIO, показал, что распределение яркости в изображениях звезд лучше описывается функцией Моффата с несколько меньшими крыльями ( $\alpha = 1.5 - 3$ ). Таким образом, приведенные графики иллюстрируют крайние случаи, реальные ошибки будут находиться между значениями, показанными на правом и левом рисунках.

Итак, при качестве изображений  $\beta = 1.5''$  и смещении звезды в пределах  $1''$  от центра щели ошибка измерения скоростей с гризмой VPHG1200G может достигать 50–60 км/с. Но возникает закономерный вопрос: откуда взяться таким большим смещениям? Действительно, декларируемая разработчиками прибора точность наведения щели при том же качестве изображений составляет около  $0.1 - 0.2''$ , т. е. в 10 раз лучше, так что ошибка лучевых скоростей из-за эффекта неравномерности засветки щели не должна превышать 10 км/с. Все это верно, но такая точность наведения обеспечивается лишь при тщательном соблюдении методики наблюдений, описанной в “Руководстве пользователя” [4]. Она включает в себя поиск гидировочных звезд, запуск автогидирования, измерение положения изображения объекта на ПЗС-кадрах и выполнение корректирующих смещений телескопа по обеим координатам. При этом необходимо, чтобы пробная экспозиция, по которой измеряется положение объекта, была не слишком короткой (не менее 10–20 секунд). На более коротких временах гид, а вместе с ним и телескоп, не успевает отслеживать смещения изображения звезды, обусловленные атмосферной турбулентностью, и поэтому получаемое на ПЗС изображение будет соответствовать мгновенному (а не среднему) положению звезды.

Точно навести щель можно только на центр относительно слабых звезд (обычно слабее  $11 - 12^m$ ). Именно такие звезды и наблюдались по заявке Н. А. Сахибуллина (см. табл. 1), значимых ошибок в измерении лучевых скоростей здесь обнаружено не было. По заявке же А. М. Черепашука наблюдались такие звезды-шаблоны, как  $\alpha$ Cyg и  $\alpha$ Per. Для автора остается непостижимым, как наблюдатели смогли точно навести щель спектрографа на объекты, столь яркие, что для них невозможно делать пробные кадры с экспозициями не то что 10, но и 0.1 с. А смещение при наведении на звезды привело в дальнейшем к ошибке в измерении скоростей.

Здесь автору кажется уместным процитировать уже упоминавшийся во Введении классический учебник [1]: “При более широкой щели положение звезды может быть не совсем симметричным по отношению к ее краям, что вызовет систематическую ошибку, в особенности, если экспозиция коротка”. Далее, там же говорилось о том, что “...в связи с атмосферной дисперсией могут возникать систематические и случайные ошибки...” Этот вопрос рассмотрен нами в следующем разделе.

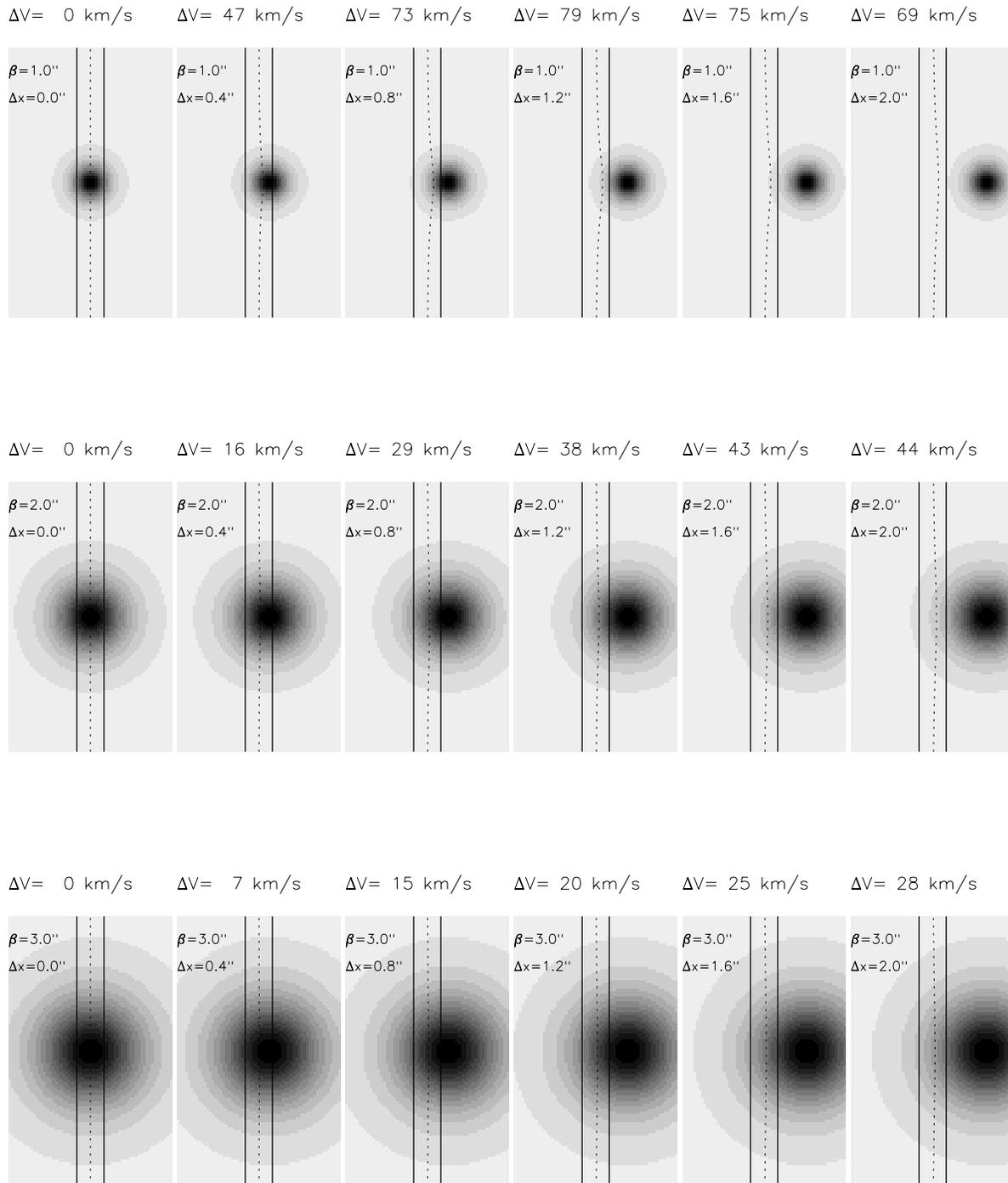
### 3.2.2. Атмосферная дисперсия

При обработке спектров вышеупомянутых звезд обнаруживается изменение лучевой скорости вдоль  $\lambda$ , так что ошибка измерения по линиям в синей части спектра больше, чем в красной. Одна из причин этого явления уже рассматривалась в разделе 3.1. Но возможно, что заметное влияние оказала и атмосферная дисперсия.

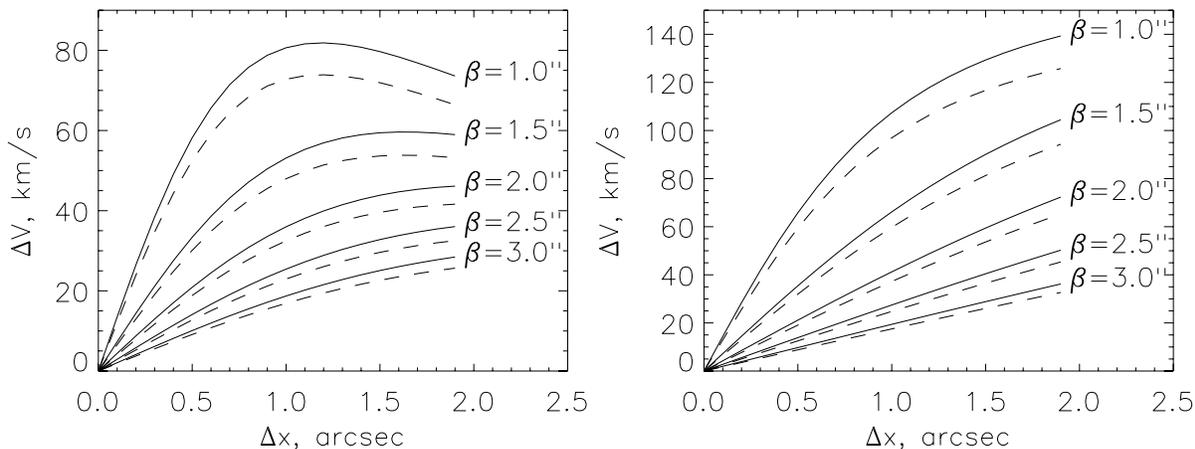
Это явление, называемое также дифференциальной рефракцией атмосферы, заключается в изменении угла рефракции светового луча с длиной волны. В результате изображение звезды вытягивается в маленький спектр: барицентр изображения в синих лучах смещен относительно изображения в красных (см. рис. 8). Специалистам по спектрофотометрии хорошо известно, что для изучения формы распределения энергии в спектре щель спектрографа надо располагать вдоль направления атмосферной дисперсии, т. е. в меридиане — только тогда можно гарантировать, что вклад в суммарный спектр от “синего” и “красного” изображений звезд будет примерно одинаков.

Из рис. 8 наглядно видно, что если направления щели и атмосферной дисперсии не совпадают, то и сдвиг барицентра изображения звезды на разных длинах волн будет различен, а это, в соответствии с рис. 7, приведет к зависимости ошибки измерения скорости  $\Delta V$  от  $\lambda$ .

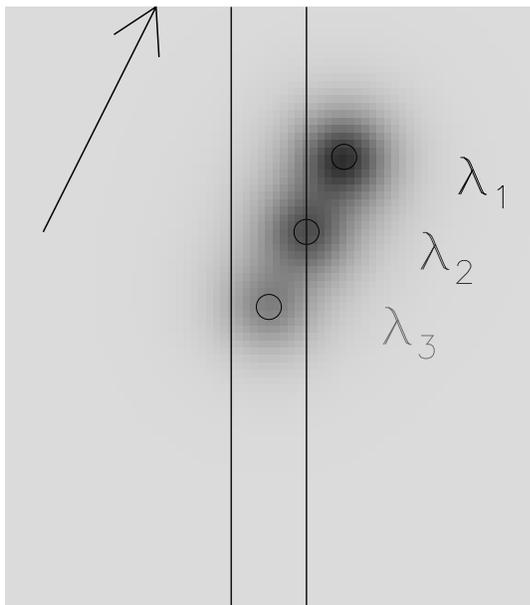
Стоит отметить, что полностью избавиться от влияния атмосферной дисперсии при наблюдениях с щелевым спектрографом очень сложно, во всяком случае на крупных телескопах, когда ширина



**Рис. 6.** Ошибки измерения лучевой скорости ( $\Delta V$ ) при различных смещениях ( $\Delta X$ ) звезды относительно щели. Щель шириной  $1''$  показана сплошными линиями. Пунктирная линия отмечает центр в распределении яркости вдоль щели. Верхний, средний и нижний блоки рисунков соответствуют размеру звездных изображений  $\beta=1''$ ,  $2''$  и  $3''$  соответственно.



**Рис. 7.** Ошибка измерения лучевой скорости ( $\Delta V$ ) как функция смещения ( $\Delta X$ ) звезды относительно щели. Расчет проводился для щели шириной  $1''$  с гризмой VPHG1200G. Рядом с расчетными кривыми указаны соответствующие значения  $\beta$ . Сплошные линии — расчет для  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ , пунктир — для  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ . Левая картинка соответствует распределению яркости в изображении звезды, описываемому функцией Момфата, правая — то же для функции Гаусса.



**Рис. 8.** Схема, иллюстрирующая явление дифференциальной атмосферной рефракции. Стрелочка направлена в зенит, показано положение относительно щели монохроматических изображений звезд на разных длинах волн:  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ .

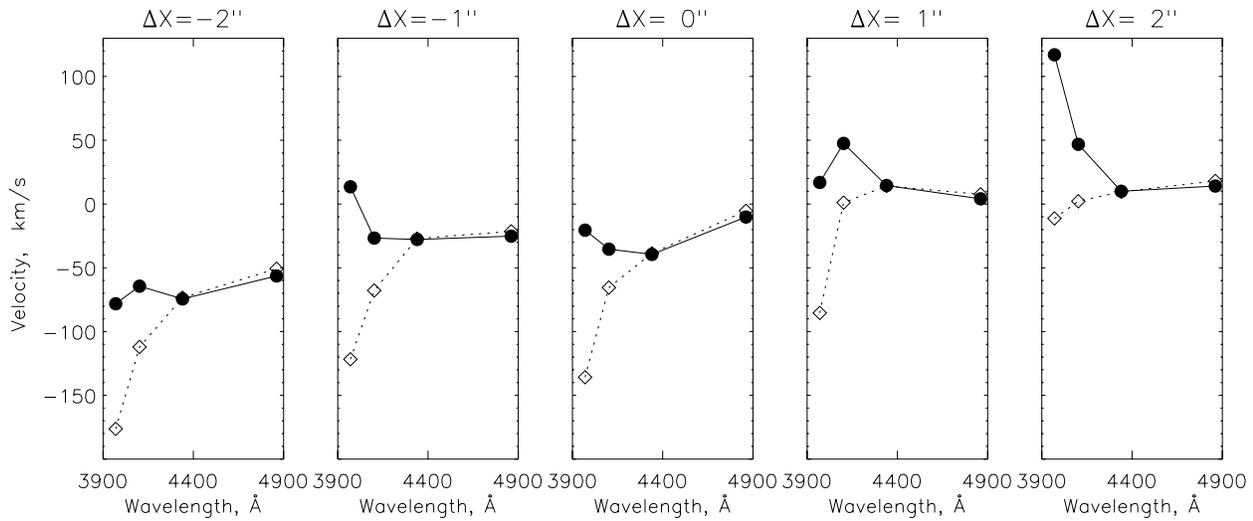
нормальной щели сравнима с размером звездных изображений. В то же время применение панорамных (integral-field) спектрографов часто позволяет корректно учесть влияние этого эффекта на форму наблюдаемого спектра (см., например, [5]).

### 3.2.3. Наблюдательная проверка

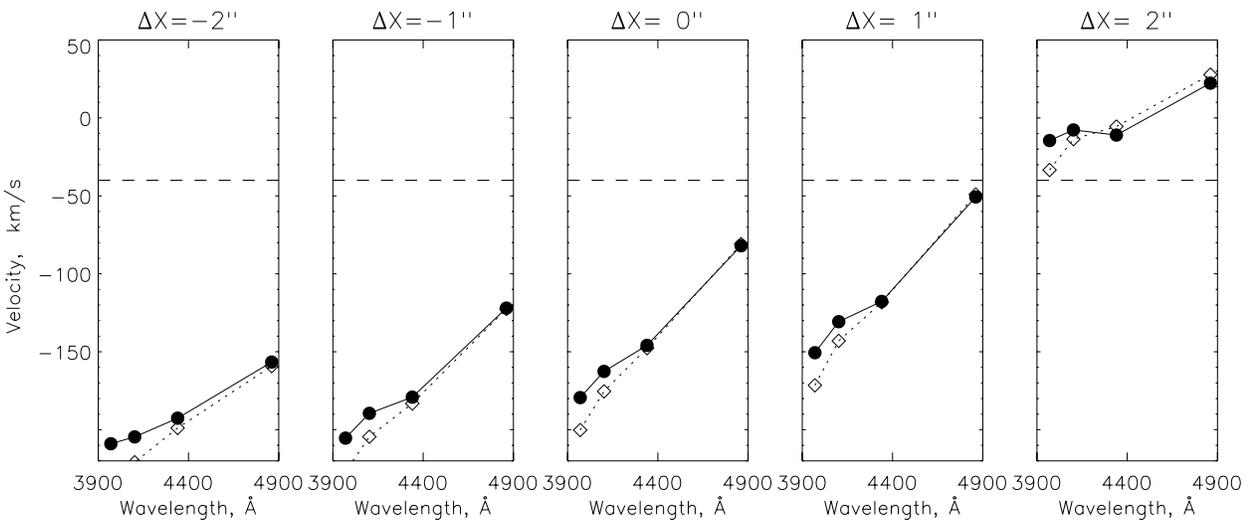
С целью проверки высказанных выше предположений были проведены наблюдения со SCORPIO звезд GRW+70d5824 ( $12.8^m$ ) и HD120874 ( $6.4^m$ ).

В первом случае щель располагалась вдоль направления атмосферной дисперсии (угол поворота стола ПФ  $P_{table} = 132^\circ$ ), а во втором — перпендикулярно к нему. Следует отметить, что вторая звезда была специально выбрана настолько яркой, что ее невозможно точно установить на щель, следуя стандартной методике наблюдений (см. комментарии в разделе 3.2.1). Были получены серии экспозиций с разными смещениями звезд относительно щели. Смещения выполнялись только передвижением телескопа (без привлечения автогида), что ограничивает точность наведения — т. е. воспроизводилась ситуация наблюдений по заявке А. М. Черепашука. Результат — измерения значений лучевой скорости по бальмеровским линиям показан на рис. 9 и 10. Для наглядности здесь приведены результаты измерений двух типов — по спектру в энергетических единицах с вычтенным континуумом и по спектру в инструментальных единицах без учета континуума. Выше было показано, что только первый из перечисленных подходов является корректным.

На рисунках видно, как величины измеренных лучевых скоростей меняются при смещении звезды относительно щели в полном соответствии с вышеописанными рассуждениями. В то же время примерно нулевой градиент скорости вдоль  $\lambda$  наблюдается только для GRW+70d5824 при близких к нулю смещениях звезды  $\Delta X$ . При наблюдениях же HD120874 из-за эффекта атмосферной дисперсии скорости, измеренные по  $H\beta$  и  $H\epsilon$ , различаются на 80 – 100 км/с при любом смещении звезды относительно щели. Следует подчеркнуть, что наблюдения проводились достаточно высоко над горизонтом ( $z = 32^\circ$ ), с увеличением зенитного



**Рис. 9.** Измерения лучевых скоростей по бальмеровским линиям в спектре GRW+70d5824. Сплошными линиями показаны измерения по спектру, приведенному к абсолютным единицам потока с вычтенным континуумом, пунктиром — по спектру в инструментальных единицах без учета континуума. Качество изображений  $\beta = 1''$ , величина смещения звезды относительно щели ( $\Delta X$ ) указана над графиками. Щель спектрографа установлена вдоль направления атмосферной дисперсии.



**Рис. 10.** Измерения лучевых скоростей по бальмеровским линиям в спектре HD120874, обозначения те же, что и на рис. 9. Горизонтальный пунктир — лучевая скорость звезды из каталога. Щель спектрографа установлена перпендикулярно направлению атмосферной дисперсии.

расстояния влияние дифференциальной рефракции будет возрастать.

Можно ли бороться с эффектом неравномерности засветки щели, если необходимо получить спектр яркой звезды? Для этого следует сделать засветку более равномерной, например, расфокусировать изображение звезды. Рис. 11 показывает результат анализа спектра звезды HD120874, полученного с щелью, стоящей поперек направления атмосферной дисперсии, и со смещением фокуса

телескопа на 3 мм. Действительно, теперь при  $\Delta X \approx 1''$  градиент лучевой скорости практически исчезает, а сама скорость становится близкой к значению из каталога. Отметим, что поскольку в этих наблюдениях смещения телескопа выполнялись “вслепую”, без получения контрольных изображений на ПЗС, то возможна некоторая ошибка определения нуля-пункта смещений, так что формальное значение  $\Delta X = 1''$  в реальности соответствует нулевому смещению относительно щели.

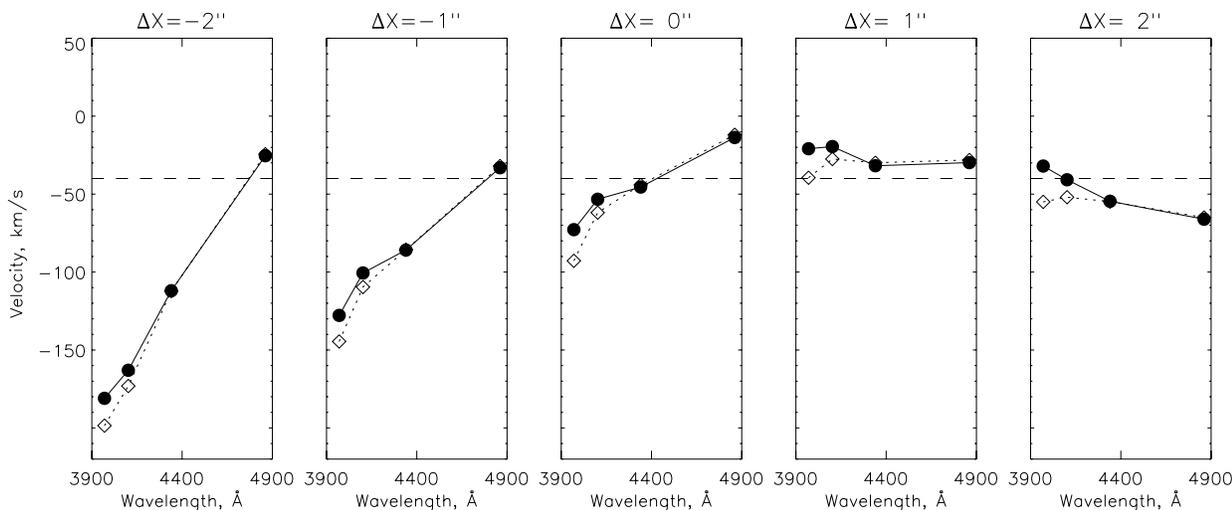


Рис. 11. То же, что на рис. 10, но для расфокусированного изображения звезды.

#### 4. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании вышеизложенного можно дать следующие методические рекомендации для наблюдателей, желающих измерять лучевые скорости звезд со спектрографом SCORPIO:

1. Необходимо тщательно фокусировать спектрограф перед началом каждой наблюдательной ночи.
2. При каждом вводе-выводе диспергирующего элемента необходимо регистрировать спектр сравнения.
3. Длительность экспозиций спектра сравнения должна быть не короче указанных в “Руководстве пользователя” [4]. При длительных сериях экспозиций объекта желательно каждый час наблюдать спектр калибровочной лампы.
4. Измерения лучевых скоростей лучше проводить по спектрам, исправленным за кривую пропускания прибора. Таким образом, не следует пренебрегать наблюдениями спектрофотометрических стандартов.
5. При наблюдениях щель надо выставлять вдоль направления атмосферной дисперсии.
6. Объект надо точно выставлять на щель, тестовые изображения необходимо снимать с экспозициями длительностью не менее 10

секунд при включенной системе автогидирования. С целью уменьшения влияния атмосферной дисперсии желательно, чтобы центральная длина волны фильтра, через который получают тестовые изображения, была близка к середине спектрального диапазона используемой призмы (т. е. фильтр В для призмы VPHG1200B, фильтр R для VPHG1200R и т. д.). Чем лучше качество изображений, тем выше требования к установке звезды на щель.

7. В качестве стандартов не следует использовать звезды ярче  $11 - 12^m$ . Если же приходится наблюдать более яркие звезды, то телескоп следует расфокусировать, чтобы добиться более равномерной засветки щели спектрографа. Щель при этом следует наводить на середину расфокусированного изображения.

Следует еще раз отметить, что большинство “внутренних” эффектов спектрографа, описанных в разделе 2 (гнутия, телецентризм и т. п.), можно учесть после наблюдений, выполняя коррекцию по линиям спектра ночного неба. В то же время, если наблюдения проводились без соблюдения правильной методики, то практически очень сложно, а часто и вовсе невозможно корректно учесть влияние эффектов неравномерной засветки щели и дифференциальной атмосферной рефракции.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор считает необходимым поблагодарить В. Е. Панчука за многочисленные критические

замечания, высказанные при прочтении чернового варианта статьи, и А. А. Смирнову за помощь в работе над текстом статьи. Работа основана на наблюдательном материале, полученном на 6-м телескопе САО РАН, финансируемом Миннауки РФ (регистрационный номер 01-43) и поддержана грантом РФФИ 06-02-16825, а также грантом Президента Российской Федерации МК1310.2007.2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Г. Шайн, *Курс астрофизики и звездной астрономии. Часть первая* (ОНТИ, государственное технико-теоретическое издательство, 1934), с. 111.
2. В. Е. Панчук, А. Н. Алиев, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, Препринт No.192 (Нижний Архыз, САО РАН, 2003).
3. V. L. Afanasiev, E. B. Gazhur, S. R. Zhelenkov, and A. V. Moiseev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 90 (2005).
4. В. Л. Афанасьев, А. В. Моисеев, Научный отчет No.303 (Нижний Архыз, САО РАН, 2005).
5. S. Arribas, E. Mediavilla, B. Garcia-Lorenzo, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **136**, 189 (1999).

## MEASURING STELLAR RADIAL VELOCITIES WITH THE SCORPIO INSTRUMENT

**A. V. Moiseev**

We analyze factors that affect the accuracy of stellar line-of-sight velocities measured from the spectra obtained with the SCORPIO instrument attached to the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. We show that nonuniform illumination of the spectrograph slit combined with the effect of differential atmospheric refraction may result in substantial systematic errors in the inferred line-of-sight velocities, and formulate recommendations concerning the methodology of observations, which allow the errors of line-of-sight-velocity measurements to be minimized.