Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим Интерферометром Фабри-Перо

А.В. Моисеев

Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, Nizhnij Arkhyz 369167, Russia

Аннотация. Описываются алгоритмы применяемые, для обработки наблюдений, получаемых с новым редуктором светосилы 6-м телескопа SCORPIO в режиме сканирующего Интерферометра Фабри-Перо. Основное внимание уделяется процедуре фотометрической коррекции каналов и вычитанию линий ночного неба, что особенно важно для ПЗС-наблюдений (по сравнению со счетчиком фотонов). Исследуется влияние различных источников ошибок на оценки лучевых скоростей в кубе данных. Приводятся примеры построения полей лучевых скоростей по эмиссионным и абсорбционным линиям в галактике NGC 6951 и шаровом скоплении M 71 соответственно.

Reduction of the CCD-observations with scanning interferometer Fabry-Perot. (by A.V. Moiseev) The algorithms used for reduction of data obtaining in a Fabry-Perot mode of the new focal reducer of the 6m telescope SCORPIO are described. The main attention is given to the procedures of a photometry correction of channels and night sky emission subtraction, that are especially important for observations with CCD in a comparison with the photon counter. The influence of various sources of errors on measurements of radial velocities in a data cube is investigated. The examples of velocity field construction by using emission and absorption lines in the galaxy NGC 6951 and globular cluster M 71 accordingly are presented.

Key words: Instrumentation: interferometers – Scanning Fabry-Perot, Instrumentation:data reduction

1 Введение

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП) является высокоэффективным прибором для исследования кинематики протяженных объектов методом двумерной спектроскопии. Наблюдения с ИФП состоят из последовательного получения нескольких десятков изображений интерференционных колец от изучаемого объекта (или калибровочной лампы) при различных значениях оптического пути между плоскопараллельными пластинками Фабри-Перо. Радиус колец является функцией длины волны и расстояния между пластинами интерферометра. Полный набор таких изображений, заполняющий свободный спектральный диапазон интерферометра, называют циклом сканирования. После специальной обработки эти изображения могут быть представлены как "куб данных". В этом кубе X и Y ("пространственные координаты") соответствуют координатам в картинной плоскости, а длины волн (или доплеровские скорости в определенной спектральной линии) являются третьей "спектральной координатой Z (см рис. 1). Для наблюдения галактик впервые подобная техника была применена Талли (1974) при изучении H_α кинематики ионизованного газа в M 51 с использованием фотопластинки в качестве детектора. В последующие два десятилетия системы со сканирующим ИФП применялись для наблюдений на многих крупных телескопах (прибор TAURUS-2 на 4.2-м телескопе WHT (Испания), PUMA на

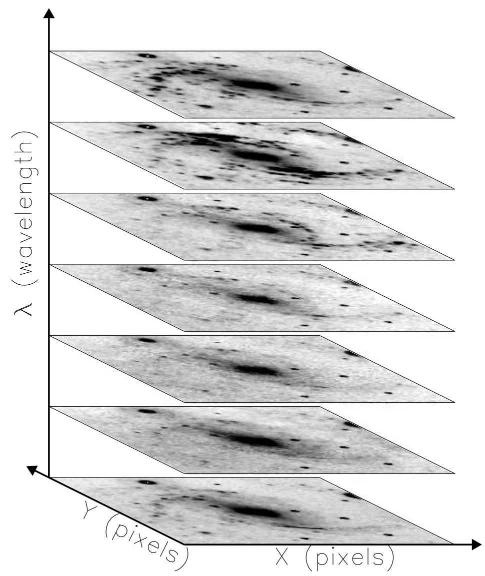

Рис. 1: Пример "куба данных", полученного с ИФП. Показан только каждый четвертый канал вдоль длины волны λ.

2.1-м телескопе OAN (Мексика), CIGALE на 3.6-м телескопе (ESO), проект KTS для японского 8.2-м телескопа SUBARY и т.д.)

На 6-м телескопе САО РАН изучение двумерной кинематики галактик со сканирующим ИФП было начато в первой половине 80-х годов группой из Марсельской обсерватории в соавторстве с коллегами из САО (Булестекс и др., 1982; Амрам и др., 1992; Додонов и др., 1995). Наблюдения проводились с помощью системы CIGALE, представляющей собой редуктор фокуса с Фабри-Перо и двумерным счетчиком фотонов IPCS в качестве детектора. С 1997 г. IPCS был заменен ПЗС-матрицей с низким шумом считывания, а осенью 2000 г. первый свет увидел новый многорежимный редуктор светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometrical and Interferometrical Observations). В сравнении со старым редуктором SCORPIO полностью автоматизирован, имеет в несколько раз большее пропускание и оптику для точной калибровки.

В данной работе описывается методика, принятая для обработки Фабри-Перо наблюдений со SCORPIO. В настоящее время существуют несколько распространенных программ обработки такого рода данных, прежде всего это пакет ADHOC, разработанный Булестексом (2000) и пакеты программ работающие в системе IRAF (см. Гордон и др., 2000). Однако в перечисленных программах недостаточен, на наш взгляд, учет специфики наблюдений с ПЗС-матрицей, при которых вклад атмосферы в кубе данных различен от кадра к кадру. Это приводит к появлению систематических ошибок (артефактов) при построении полей лучевых скоростей. Заметим, что такой проблемы нет при наблюдениях со счетчиком фотонов, который позволяет делать короткие экспозиции и этим усреднять влияние атмосферы. В то же время используемая нами методика обработки ПЗС-изображений также позволяет решить проблему учета атмосферы и этим увеличить точность измерения лучевых скоростей.

Основные сведения из теории интерферометра приводятся в главе 2.1. Современная аппаратура, используемая для ИФП наблюдений в САО, и проблемы, возникающие при использования ПЗС обсуждаются в главах 2.2 и 2.3. Первичная обработка наблюдений и перевод куба в шкалу длин волн описывается в главах 3 и 4. В главе 5 исследуются источники ошибок, влияющие но точность измерения лучевых скоростей, а в заключительной главе 6 приводятся результаты обработки двух объектов.

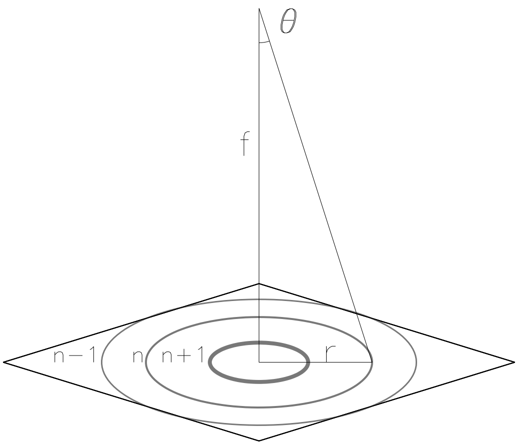

Рис. 2: Интерференционная картина от монохроматического света. Разные кольца соответствуют различным порядкам интерференции (n-1, n, n+1).

2 Фабри-Перо интерферометр в САО РАН

2.1 Основные соотношения

Теория интерферометра Фабри-Перо в приложении к астрономическим исследованиям подробно изложена в ряде работ (Куртес, 1960; Блэнд и Талли, 1989; Гордон и др., 2000). Ниже мы приведем только некоторые необходимые соотношения. Если на интерферометр под углом ϑ к оптической оси падает параллельный монохроматический пучок света с длиной волны λ, то условие максимума интерференционной картины записывается в виде,

$$n\lambda = 2l\mu\cos\vartheta = \frac{2l\mu}{\sqrt{1+\left(\frac{r}{f}\right)^2}}. \tag{1}$$

Здесь n – порядок интерференции, l – расстояние между пластинами интерферометра, а μ – показатель преломления среды между ними. Оптическая система (камера с фокусным расстоянием f) строит изображение интерференционных колец на двумерном приемнике (рис. 2). Дифференцируя (1), получаем выражение для угловой дисперсии:

$$\frac{d\lambda}{d\vartheta} = -\frac{2l\mu}{n}\sin\vartheta = -\frac{2l\mu}{n}\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{r}\right)^2}}. \tag{2}$$

Из (2) следует, что, во-первых, длина волны растет в направлении к центру колец, а во-вторых, ширина колец уменьшается с радиусом r. Расстояние между соседними порядками интерференции определяет свободный спектральный диапазон ИФП:

$$\Delta\lambda = \lambda/n \tag{3}$$

Важной характеристикой Фабри-Перо является его добротность (Finesse):

$$F = \Delta\lambda/\delta\lambda, \tag{4}$$

где $\delta\lambda$ – полуширина аппаратного контура, которая определяет спектральное разрешение и в первую очередь зависит от характеристик отражающих покрытий ИФП.

Для сканирующего интерферометра $2\mu l = A + Bz$, где z-номер спектрального канала, а A и B – некоторые константы (Гордон и др., 2000). Легко получить, что

$$B = \frac{A}{n\,n_z}, \tag{5}$$

где n_z – количество каналов в цикле сканирования.

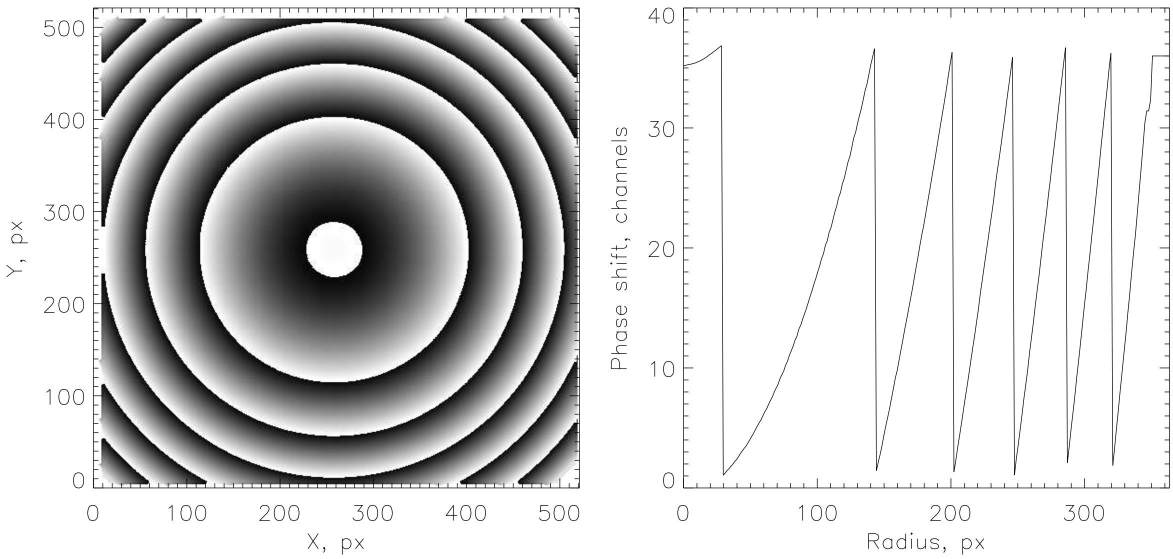

Рис. 3: Слева – карта фазовых смещений для FP501. Справа – радиальное изменение фазового смещения в единицах спектрального канала

На изображении протяженного объекта в канале z будут видны только те области, для которых выполняется условие (1). Таким образом, в каждом кадре смешаны пространственная и спектральная информация, так что точке (x, y) в плоскости изображения соответствует некоторая длина волны λ. Из (1) с учетом того, что $r \ll f$ и, согласно (5) $A \gg B$, получаем выражение для номера канала, в котором на данном радиусе наблюдается интерференционный максимум:

$$z(r) \cong \frac{n}{B}\lambda + \frac{A}{2Bf^2}r^2 - \frac{A}{B}. \tag{6}$$

Распределение величины $z(x, y)$ в плоскости изображения для линии калибровочной лампы называют обычно *картой фазового сдвига*, а процедуру перехода от z к λ – *фазовой коррекцией*. Пример такой карты приведен на рис. 3. Выражение (6) показывает, что фазовый сдвиг в первом приближении квадратичен с радиусом.

2.2 ИФП режим со SCORPIO

Новый многорежимный редуктор светосилы SCORPIO был изготовлен в САО в 2000 г. (Афанасьев и др.,2002). Здесь мы кратко опишем возможности SCOPRIO в интерферометрических наблюдениях. Основными оптическими элементами SCORPIO являются коллиматор $F/2.2$ и камера $F/1.8$, общая светосила системы в первичном фокусе 6-м телескопа составляет $F/2.9$. Оптика редуктора компенсирует аберрации главного зеркала телескопа, все оптические поверхности снабжены просветляющими покрытиями в диапазоне $0.35 - 0.9\,\mu$. Сканирующий пьезоэлектрический ИФП ET-50 производства фирмы Queensgate устанавливается между коллиматором и камерой, там где, располагается выходной зрачок системы. Параметры используемых интерферометров приведены в Табл. 1. В 2000-2001 гг. для наблюдений использовалась ПЗС Tecktronix 1K×1K с шумом считывания $3\bar{e}$. Этот приемник обеспечивал поле зрения около $5'$ при масштабе $0.28''$/пиксель. В 2002 г. планируется установить новую ПЗС размером 2K×2K. SCORPIO содержит две турели со светофильтрами, узкие интерференционные фильтры для наблюдений с ИФП располагаются в первой турели вблизи фокальной плоскости. Имеется набор фильтров полушириной $10 \div 15$Å, с максимальным пропусканием $60 - 80\%$ для наблюдений линии H_α в галактиках с системными скоростями от -200 до $+10000\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$. Изготавливается такой же набор для наблюдений в линии [OIII]λ5007. Общая квантовая эффективность SCORPIO при наблюдениях с Фабри-Перо (телескоп+фильтр+ИФП+ПЗС) составляет около 20% в области H_α.

Редуктор светосилы устанавливается на универсальной платформе первичного фокуса, которая содержит два перемещаемых жгута световодов для внеосевого гидирования, лампы для калибровки шка-

Таблица 1: Параметры SCORPIO в режиме ИФП

	Queensgate IFP	
	FP260	FP500
диапазон	$5000 \div 7000$Å	$5000 \div 8000$Å
n^a	235	501
$\delta\lambda^a$	2.5Å	0.7Å
$\Delta\lambda^a$	29Å	13Å
F^a	11	17
n_z	$24 \div 32$	$32 \div 40$

[a] значения даны для длины волны 6563Å

лы длин волн (He-Ne-Ar лампа) и плоского поля (лампа непрерывного спектра). Лампы установлены в интегрирующей сфере, создающей однородную засветку поля. Оптика переброса формирует на входе редуктора пучок светосилой $F/4$ эквивалентный светосиле телескопа. Такая схема засветки, при которой совпадают положения выходного зрачка при наблюдениях и калибровке обеспечивает отсутствие системного сдвига при измерении абсолютных значений лучевых скоростей. Это подтвердили реальные наблюдения с Фабри-Перо на 6-м телескопе (см главы 5.1 и 6.2).

2.3 Сравнение счетчика фотонов и ПЗС

При наблюдениях со счетчиком фотонов делают несколько десятков циклов сканирования с очень малой экспозицией (10-20 сек) в каждом канале ИФП. Таким образом удается усреднить влияние атмосферной экстинкции на различных зенитных расстояниях и нестабильности качества изображений при длительных суммарных экспозициях. ПЗС-матрица обладает значительно большей квантовой эффективностью по сравнению со счетчиком фотонов. Однако наличие шума считывания не позволяет делать очень короткие накопления, а конечное время считывания уменьшает эффективное время экспозиции. Применение малошумящих ПЗС позволяет несколько улучшить ситуацию. Используя соотношение (3) из статьи Блэнда и Талли (1989) мы сравнили возможности SCORPIO по достижению максимального отношения сигнал/шум при использовании нашей "тонкой"ПЗС ТК 1024 (шум считывания $3\bar{e}$, максимальная квантовая эффективность на λ6500Å$\sim$ 80%) и при использовании современного счетчика фотонов с GaAs-катодом и максимальной квантовая эффективностью $\sim$ 25% (Хернандес и др., 2001). Расчеты проводились для наблюдений в прямом фокусе 6-м телескопа с системой SCORPIO. В широком диапазоне интенсивностей объектов ПЗС позволяет достичь большего отношения S/N, только если время накопления равно или превышает время считывания ($T_{exp} \geq T_{readout}$). Однако если $T_{exp} \simeq T_{readout}$, то наблюдательное время тратится неэффективно, поскольку половину всего времени наблюдения мы будем заниматься считыванием сигнала с ПЗС. Сейчас $T_{readout} = 20$ сек в режиме биннинга 2×2, и 90 сек – без биннинга. Поэтому с ПЗС приходится делать экспозиции длительностью несколько минут в каждом канале ИФП. Но здесь возникает проблема фотометрической коррекции вариаций пропускания атмосферы и качества изображений на отдельных ПЗС-кадрах, поскольку реально удается сделать только 1-2 цикла сканирования. Поэтому с появлением новых высокочувствительных счетчиков фотонов, превосходящих ПЗС на коротких экспозициях, их начинают активно использовать для наблюдения со сканирующим Фабри-Перо (Хенандес и др., 2001). В то же время модификация последовательности фотометрической коррекции ПЗС-накоплений (глава 3.4) позволяет использовать преимущества ПЗС на больших экспозициях.

3 Предварительная обработка и фотометрическая коррекция

3.1 Исходные данные

Исходными для обработки являются следующие наборы ПЗС-кадров (смотри блок-схему на рис. 4).

- **OBJECT** - интерферограммы исследуемого объекта. Рекомендуется вначале наблюдать изображения в нечетных каналах интерферометра (1,3,5..), затем – во всех четные (2,4,6...). Это делается для того, чтобы избежать систематических ошибок при оценке величин вариаций атмосферной прозрачности и качества изображений.

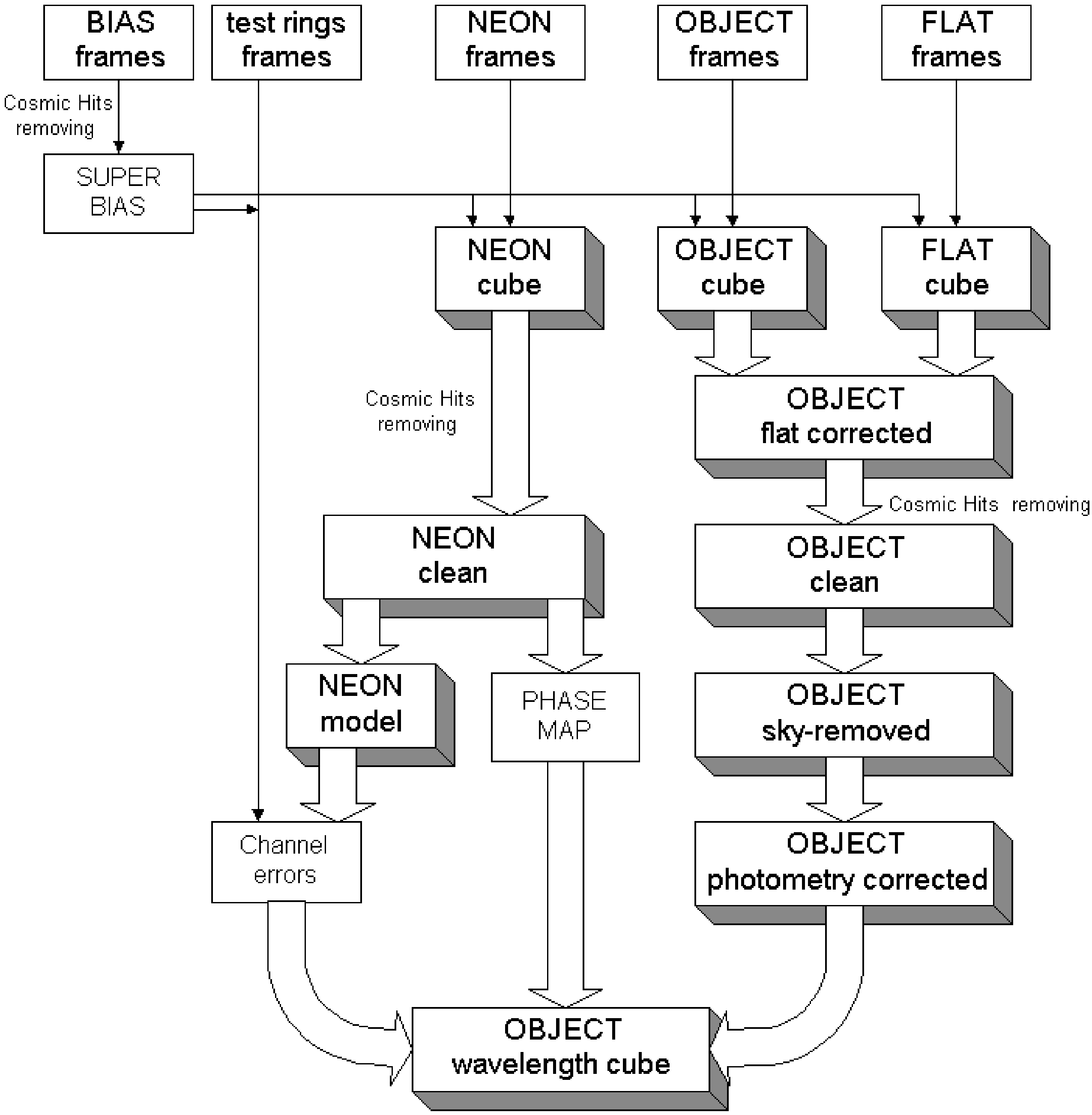

Рис. 4: Блок-схема обработки данных.

- **NEON** – изображения интерференционных колец от эмиссионной линии, выделяемой узким интерференционным фильтром из спектра встроенной He-Ne-Ar лампы. Обычно эта калибровка производится до и после наблюдательной ночи.

- **FLAT** – интерферограммы равномерной засветки "плоского поля"от встроенной лампы с континуальным спектром, полученные с тем же узкополосным фильтром, что и при наблюдениях объекта.

- **TEST** – изображения колец от лампы длинноволновой калибровки в отдельных каналах ИФП, получаемые каждые 30-60 минут в течении экспозиции объекта. Используются для мониторинга точности сканирования Фабри-Перо (характеристики которого, вообще говоря, зависят от времени) и для контроля смещений положения центра колец интерференционной картины, возникающих из-за гнутий прибора. В случае SCORPIO смещение центра колец из-за гнутий системы редуктор-ПЗС не превышает 0.5 пикселя во всем диапазоне изменений зенитных расстояний.

Также необходимы "стандартные"для ПЗС-наблюдений кадры тока смещения (**BIAS**) и темнового тока (**DARK**)[1].

3.2 Формирование кубов данных и учет плоского поля

Как при обычной ПЗС-обработке усредняются кадры **BIAS**, полученный кадр SUPERBIAS вычитается из всех накоплений объекта и калибровок. Дефектные колонки в кадрах маскируются. Дальнейшая обработка производится уже не над двумерными кадрами, а над трехмерными кубами (поканально собранными интерферограммами объекта и калибровок). Чистка следов космических частиц в кубах осуществляется простым σ-фильтром: отчеты в индивидуальных спектрах, отличающиеся от среднего на некоторое пороговое значение (в масштабе стандартных отклонений), заменяются полусуммой соседних. Предварительно куб **OBJECT** нормируется на куб **FLAT**. Эта процедура позволяет учесть сразу два эффекта. Во-первых, это вариации чувствительности элементов ПЗС-матрицы (фотометрическое "плоское поле"). Во-вторых – спектральная модуляция, вносимая узкополосным фильтром, которая, вообще говоря, меняется по полю детектора, так как центральная длина волны интерференционного фильтра зависит от угла падения лучей. Поэтому важно, чтобы угол сходимости пучка лучей от калибровочной лампы был близок к углу сходимости пучка лучей от телескопа. Другими словами, положение выходного зрачка для объекта и калибровки должны совпадать. В SCORPIO это условие (условие телецентризма) выполняется за счет использования специальной оптики в тракте калибровки. Нарушение условия эквивалентности зрачков прежде всего приводит к сдвигу спектров в кубе **FLAT** по длине волны. Корректная обработка таких данных (полученных со старой версией редуктора светосилы) возможна, если в поле зрения есть достаточно яркие звезды, спектр которых можно считать "плоским"в диапазоне $10-20$ Å. В таком случае величина сдвига по λ определяется из кросс-корреляции спектров звезд и плоского поля (предварительно исправленных за фазовый сдвиг). Затем в кубе **FLAT** производится сдвиг спектров на требуемое количество спектральных каналов и полученный куб используется для нормировки **OBJECT**. Подчеркнем, что и в этом случае нормировку на **FLAT** необходимо делать до процедур фотометрической и фазовой коррекции. Остаточная модуляция исправляется уже после перевода куба в шкалу длин волн.

3.3 Вычитание линий ночного неба

После вышеописанной предварительной редукции наблюдаемый поток в каждом канале может быть представлен в виде:

$$I_{obs}(x,y) = (I_{obj}(x,y) \otimes PSF) * Ext + I_{sky}(r), \tag{7}$$

здесь I_{obj} – заатмосферное изображение объекта в данном канале, Ext – атмосферная экстинкция, I_{sky} – поток от ночного неба, промодулированный интерферометром, PSF – функция рассеяния точки расстояние. Основную проблему представляют зависящие от времени наблюдения яркость ночного неба (эмиссионный спектр, засветка от Луны и т.д.), качество изображений PSF и атмосферная экстинкция Ext. Причем, кроме плавных постоянных изменений, связанных с изменением зенитного расстояния,

[1] В дальнейшем мы не будем говорить об учете темнового тока, поскольку в используемой нами ПЗС он составляет около $0.1\bar{e}$/мин, т.е. незначителен на коротких экспозициях

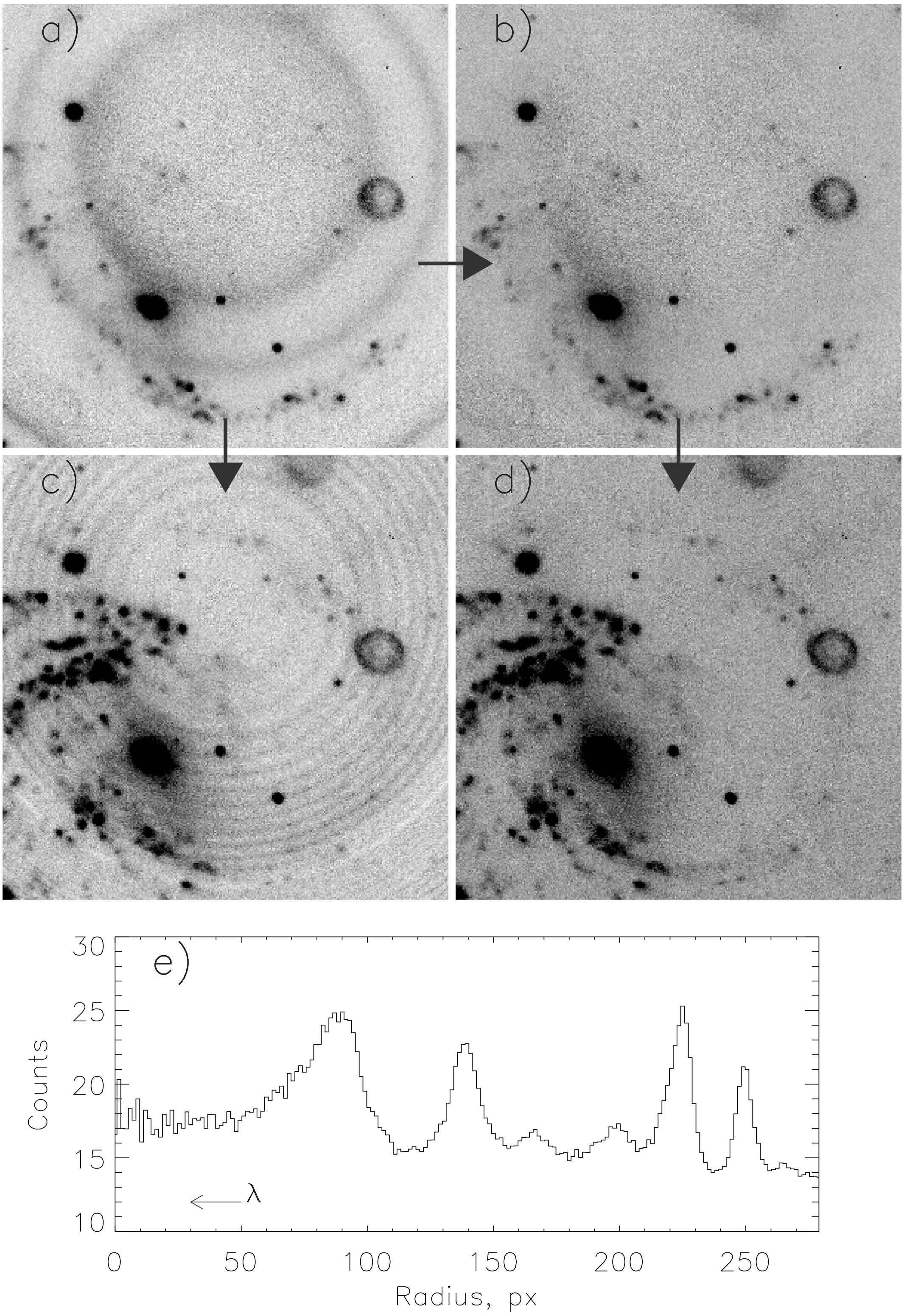

Рис. 5: Наблюдения галактики NGC 6951 в линии H_α со SCORPIO (a) – фрагмент спектрального канала с кольцами от линий неба, (b) – этот же кадр после вычитания неба, (c) – спектральный канал в пространстве длин волн, полученный после фазовой коррекции куба с небом (Метод I), (d) – аналогичный канал после фазовой коррекции куба с вычтенным небом (Метод II). Стрелками показана последовательность обработки в каждом из методов. (e) – радиальный профиль спектра ночного неба, стрелка указывает направление дисперсии.

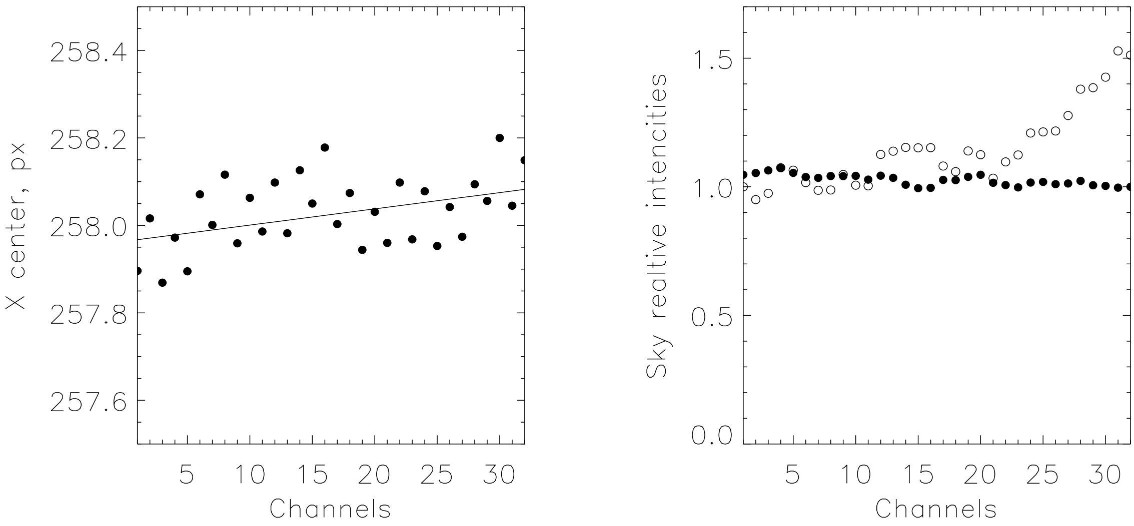

Рис. 6: Слева – измерения положения центра колец от неба в кубе объекта. Справа – изменения относительной яркости линий ночного неба при наблюдениях остатка сверхновой CTB80 (черные точки) и галактик NGC 6951 (кружки).

существенны и случайные вариации всех этих величин. В общепринятой схеме обработки (Блэнд и Талли, 1989; Булестекс, 2000; Гордон и др., 2000) вначале делается поканальное исправление качества изображений и изменений атмосферной прозрачности, затем – фазовая коррекция, а вычитание линий неба производится уже в шкале длин волн. Далее этот метод будем обозначать как Метод I. Подобная схема идеальна при работе со счетчиком фотонов, когда влияние атмосферы в каждом канале усредняется за счет многократных экспозиций. При наблюдениях с ПЗС такая методика применима только при работе в спектральном диапазоне, свободном от эмиссий ночного неба. Однако часто вариации интенсивности линий неба, к тому же искусственно искаженные в результате фотометрической коррекции, приводят к тому, что в шкале длин волн профиль эмиссионных линий неба меняется с радиусом r. Другими словами, в пространстве длин волн, в каналах **OBJECT** появляются артефакты – контрастные кольца. Это ограничивает точность измерения скоростей от слабых эмиссий и приводит к систематическим ошибкам в их оценке (глава 5.2).

Поэтому мы предложили метод вычитания неба в каждом изображении до фазовой коррекции (далее – Метод II). В областях детектора, свободных от эмиссии объекта, линии ночного неба усредняются по азимутальному углу в узких кольцах шириной $0.5-1$ пиксель с центром на оптической оси ИФП (рис. 5). Полученный радиальный профиль (рис 5e) вычитается из изображения (рис. 5b). Повторяя эту процедуру во всех каналах, удается корректно избавиться от влияния второго члена в (7), не внося искажений в пространстве длин волн[2]. Рис. 5 наглядно демонстрирует преимущество принятой нами методики (последовательность $a \to b \to d$) в сравнении с Методом I (последовательность $a \to c$).

Разумеется, процедура вычитания неба чувствительна к точности определения центра колец (см главу 5.2), который может смещаться от кадра к кадру. Мы используем простую итерационную процедуру для автоматического поиска оптимального положения центра колец от неба. В основе ее лежит минимизация квадратов отклонений отсчетов в пикселях от среднего профиля в областях детектора, свободных от эмиссий объекта. На рис. 6 показано изменение положения центра колец в течении двухчасовой экспозиции, зенитное расстояние при этом изменялось от $z = 15°$ до $z = 45°$. Разброс точек относительно среднего тренда, скорее всего, обусловлен ошибками нахождения центра. Обычно они не превышают $0.05 - 0.2$ пикселя (в зависимости от яркости линий неба), что достаточно для аккуратного вычитания неба. Также на рис. 6 показаны относительные изменения яркости линий неба при наблюдениях различных объектов.

[2] Когда эта статья сдавалась в печать вышла работа Джонс и др. (2002), в которой авторы используют аналогичную методику для вычитания неба при работе с настраиваемыми фильтрами – разновидностью ИФП, работающего в малых порядках интерференции.

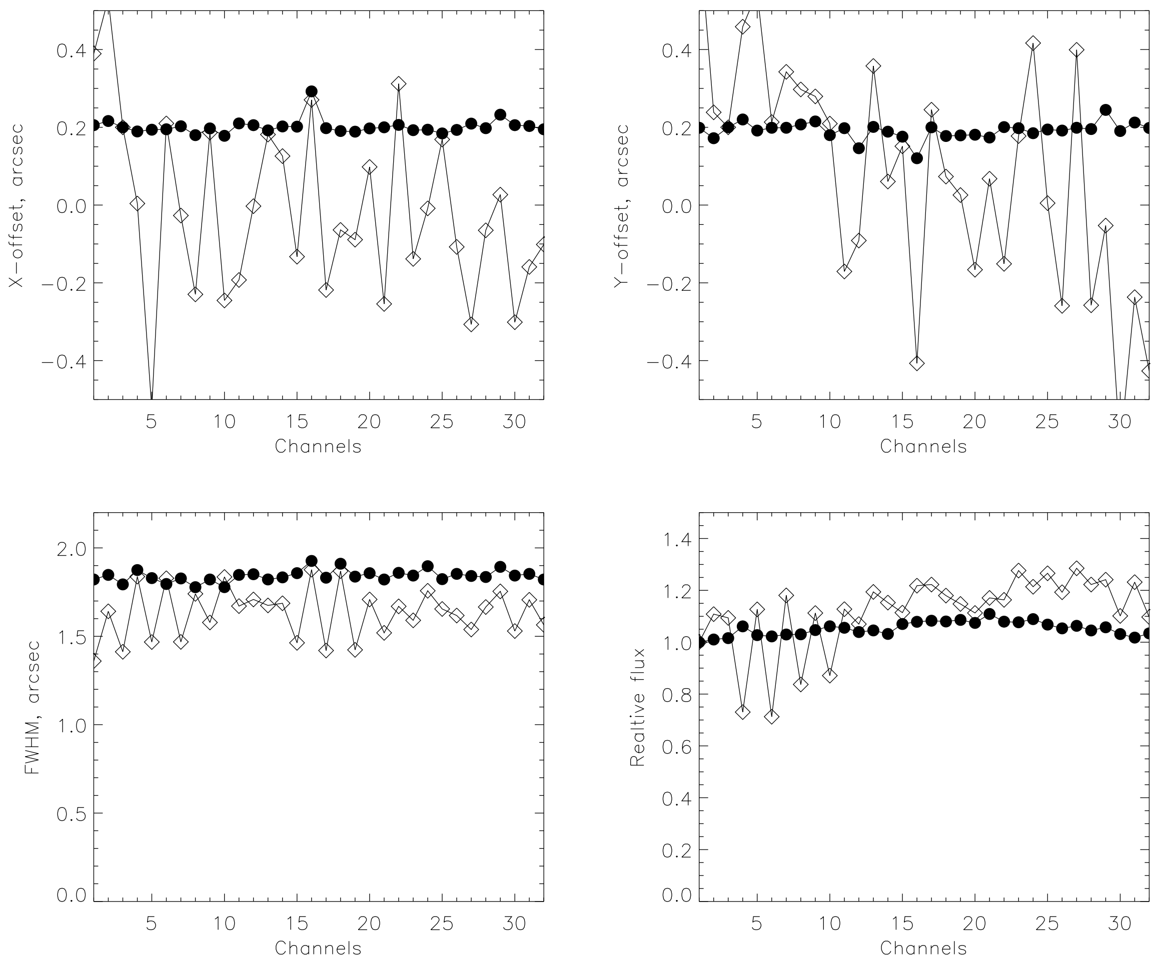

Рис. 7: Вариации средних параметров звезд поля: относительные смещения барицентров по X и Y, качество изображений, интегральный поток в относительных единицах. Открытые и закрашенные символы соответствуют наблюдениям NGC 6951 до и после фотометрической коррекции.

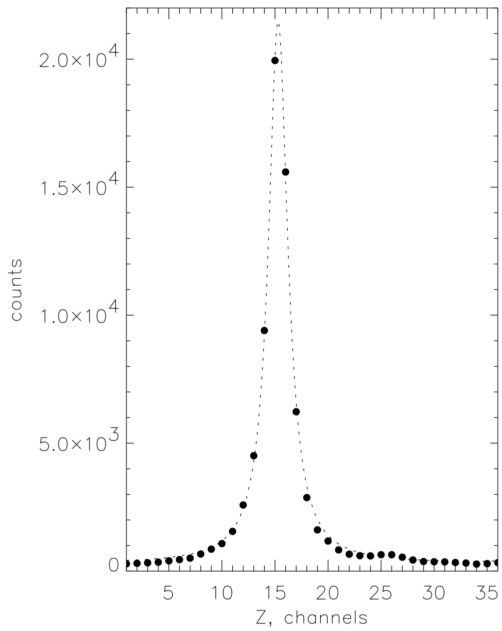

Рис. 8: Пример спектра калибровочной линии HeIλ6678, просканированной с интерферометром FP500 (точки), и его аппроксимация профилем Лоренца.

3.4 Фотометрическая коррекция

Фотометрия звезд в поле позволяет оценить вклад нестабильности атмосферы и ошибок гидирования в каждом канале **OBJECT**. С помощью аппроксимации двумерными гауссианами для каждой звезды определяются относительные смещения центра изображения, вариации FWHM и интегрального потока. Зависимости этих параметров от номера канала в наблюдениях с ИФП со SCORPIO, определенные по 12 звездам, приведены на рис. 7. Смещения кадров относительно друг друга, связанные с ошибками медленного гидирования телескопа, обычно не превышают $0.2'' - 0.5''$ и исправляются соответствующим смещением кадров (см рис.7). Для коррекции качества изображений кадры сворачиваются с двумерными гауссианами чтобы получить результирующее FWHM такое же, как в кадре с наихудшими изображениями. Таким образом, вариации FWHM в несколько десятков процентов уменьшаются до $1-5\%$, хотя в целом, пространственное разрешение в кубе ухудшается (рис. 7). Вариации атмосферной прозрачности учитываются в предположении, что внутри полосы узкополосного фильтра континуум в звездах плоский. Вообще, это не всегда так (особенно в области абсорбции H_α), однако если используется $8-10$ звезд, расположенных на разных радиусах r, то среднее значение вариаций потока, как правило, соответствует вариациям экстинкции и не зависит от спектральных особенностей в звездах.

4 Калибровка шкалы длин волн

4.1 Фазовая карта

Согласно (6), все спектры в наблюдаемом кубе линейно (с точностью до фактора $(r/f)^4$) сдвинуты на величину фазового смещения относительно некоторой начальной длины волны. Для определения величины фазового смещения в спектр калибровочной линии в каждой точке (x,y) куба **NEON** вписывается профиль Лоренца (рис. 8):

$$I(x,y,z) = \frac{I_o(x,y)}{1+\left(\frac{2(z-p(x,y))}{w(x,y)}\right)^2}, \tag{8}$$

который, согласно Бленд-Хэсону (1995), является значительно лучшей аппроксимацией аппаратного контура Фабри-Перо в сравнении с гауссовским. Здесь $w(x,y)$ – ширина контура, а $p(x,y)$ – искомое фазовое смещение. Пример распределения p по полю показан на рисунке 3.

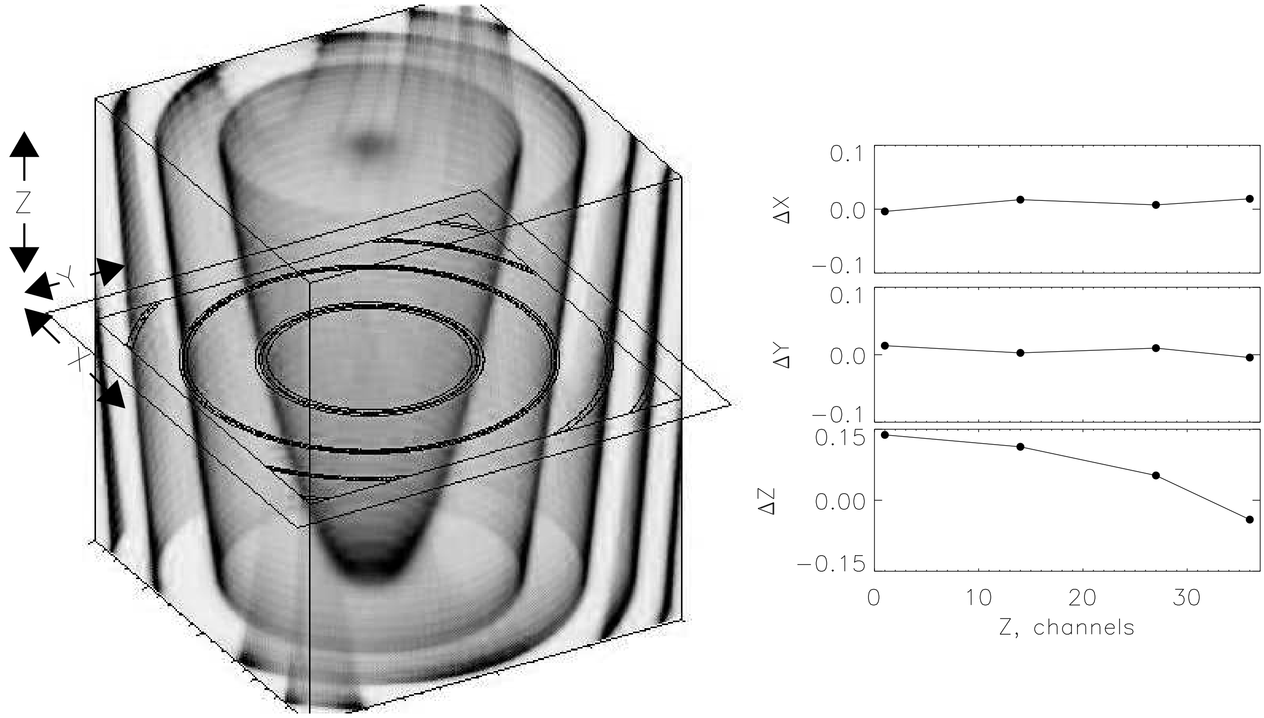

Рис. 9: Слева – схема, иллюстрирующая поиск оптимального положения изображения калибровочных колец внутри модельного куба калибровки. Градациями серого показаны изменения интенсивности модельного профиля в кубе. Справа – относительные смещения тестовых накоплений относительно куба калибровки в течение 2-х часовой экспозиции.

4.2 Поканальная коррекция

Вышеописанным способом определяется фазовый сдвиг в предположении, что величины A и B, связывающие номер канала z с физическим зазором между пластинами (см. главу 2.1), постоянны в течение сканирования. Однако на стабильность сканирования влияет целый ряд факторов, таких как температурные изменения, ошибки и сбои в электронике управления. Для контроля взаимных смещений калибровочных каналов для каждого кадра в кубе **NEON** методом МНК ищется лучшее положение с учетом смещений по всем трем координатам внутри модельного куба $I(x, y, z)$, построенного согласно (8). Для стабильно работающего ИФП измеренный разброс ошибок сканирования по z внутри одного куба не превышает $1 - 3\%$ и не сказывается на качестве данных. В течение последних 2-х лет наблюдений только 2 раза в кубе калибровки присутствовали каналы с ошибкой сканирования $10 - 20\%$, видимо, связанные с помехами в электронике. Вышеописанная методика позволила выявить и после соответствующей коррекции устранить систематические отличия шага сканирования на $\simeq 10\%$ от правильного значения, вызванные неточным подбором констант A и B в наблюдениях 2000 г.

Аналогично производится поиск относительных смещений тестовых накоплений калибровочных колец **TEST**. На рис. 9 показано изменение положения центра колец калибровки в течение 2-х часов наблюдений. Смещение центра колец незначительно, видно плавное изменение шага сканирования более чем на 15% относительно калибровочного куба. Поэтому перед исправлением за фазовую карту в куб объекта вносится соответствующая поправка по координате z.

5 Оценки точности измерения скоростей

Здесь для удобства изложения некоторые оценки будут приводиться в единицах спектрального канала, который составляет $15 - 18\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ при наблюдениях в линии H_α с FP501 и $35 - 40\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ для FP235. Ошибка измерения скорости по эмиссионной линии в длинноволновом кубе может быть представлена в виде

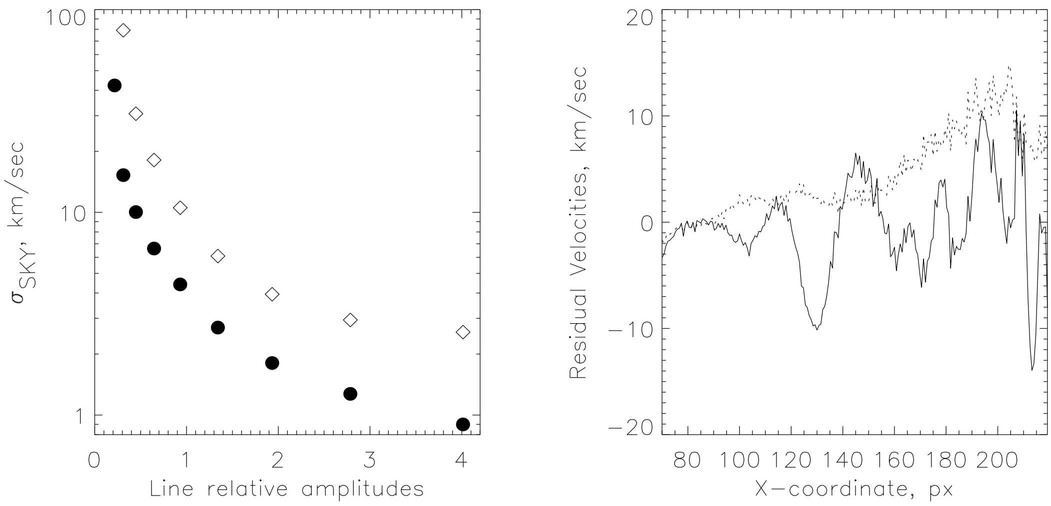

Рис. 10: Моделирование ошибок. Слева – зависимость ошибок измерения скоростей от интенсивности эмиссионных линий (в единицах интенсивности сильнейшей из линии неба) в случае плавного изменения яркости линий неба и атмосферной экстинкции на 20% в течение экспозиции. Заполненные и открытые кружки соответствуют вычитанию неба до и после фазовой коррекции. Справа – пример остаточных скоростей (измерения минус модель) вдоль разреза через поле скоростей. Сплошная линия – для случайных смещений центра колец с $\sigma = 0.5''$, пунктир – для плавного смещения центра на $\sigma = 1''$ за время экспозиции.

$$\sigma_{Vel} = \sqrt{\sigma_{gaus}^2 + \sigma_{\lambda}^2 + \sigma_{reduct}^2}, \tag{9}$$

где σ_{gaus} – ошибка определения центра линии методом гаусс-аппроксимации, определяемая отношением сигнал/шум в линии; σ_{λ} – точность приведения к шкале длин волн; σ_{reduct} – ошибки, появляющиеся на этапе обработки и связанные прежде всего с учетом атмосферной нестабильности.

Вклад σ_{gaus} мал. Мы промоделировали ее зависимости от отношения S/N методом Монте-Карло. Для типичных ширин линий ($FWHM = 4-10$ каналов) и пуассоновских случайных шумов получается, что ошибка определения центра $\sigma_{gaus} < 0.05 - 0.08$ канала уже при $S/N > 4 - 5$.

5.1 Ошибки фазовой коррекции

Независимая оценка точности исправления фазового смещения была проведена при измерении скоростей эмиссионных линий ночного неба в кубе данных, полученном с FP501 при наблюдениях M71 (глава 6.2). Линии $H_{\alpha}\lambda 6562.82$Å и OH$\lambda 6568.779$Å (из соседнего порядка) аппроксимировались гауссианами с фиксированным расстоянием между ними[3]. Среднее значение скорости составило $2.2\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$, при дисперсии скоростей от точки к точке $2.0\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$, т.е. точность построения абсолютной шкалы длин волн составляет около 0.1 канала, или $\simeq 2\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ для FP501 и $\simeq 4\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ для FP501.

5.2 Систематические ошибки

В изображении в спектральном канале для фиксированной λ на каждом радиусе r присутствуют участки изображений из различных кадров z. Поэтому любая неоднородность от кадра к кадру (изменение яркости линий неба, качество изображений и т.д.) приводит к появлению систематических искажений в длинноволновом кубе, зависящих от радиуса. В свою очередь это приводит к систематическим ошибкам (артефактам) на получаемых монохроматических изображениях и в полях скоростей. Мы представляем эти ошибки состоящими из нескольких независимых компонент:

[3] Длины волн взяты из статьи Остерброка и др. (1996)

$$\sigma^2_{reduct} = \sigma^2_{SKY} + \sigma^2_{SHIFT} + \sigma^2_{FLAT}. \qquad (10)$$

Здесь σ_{SKY} – ошибка, вносимая переменностью фона и линий ночного неба, σ_{SHIFT} – ошибка гидирования и σ_{FLAT} – ошибка деления на $FLAT$.

Вклад различных составляющих в (10) оценивался с помощью моделирования процесса обработки. В картинной плоскости задавались распределение лучевой скорости и яркости (диск + ядро + HII-области) с параметрами, типичными для наблюдаемых галактик. По этим данным строился куб в пространстве λ, а сделав преобразование, обратное (6) мы получили "наблюдаемый куб"в пространстве z. Аналогично конструировался куб с кольцами от линий неба. Комбинируя оба куба и внося в них требуемые искажения (относительные смещения каналов, вариации пропускания, добавочные шумы и т.д.) мы строили "наблюдаемые"поля скоростей, которые сравнивали с начальными скоростями. Моделирование проводилось для варианта наблюдений с FP235. Были получены следующие результаты:

- Мы оценивали σ_{SKY} для различных вариаций экстинкции и яркости линий неба в двух методах вычитания неба (глава 3.3) – Метод I (в пространстве λ) и Метод II (в пространстве z). Характерная зависимость ошибки определения скорости от интенсивности линии (в единицах самой яркой линий неба A_{sky}) показана на рис. 10. Уже при 10-20% изменениях яркости линий неба и экстинкции Метод II дает в 2-5 раз меньшую ошибку измерения скоростей в сравнении с Методом I, что более существенно для слабых (относительно неба) линий объекта. Можно считать, что $\sigma_{SKY} < 10\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ (0.2 канала) уже для линий с амплитудой большей чем $(0.3 - 0.5)A_{sky}$. Ошибка становится незначительной (менее $2\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$) для линий амплитудой с $(1.5 - 2)A_{sky}$. Разумеется, σ_{SKY} зависит от относительного расположения линий неба и объекта в спектре, но вышеприведенные точности можно считать типичными. рис. 10 наглядно показывает, преимущество Метода II при обработке ПЗС-наблюдений объектов на фоне ярких линий неба. Если яркость линий неба незначительна, то оба метода вычитания неба дают сходные результаты.

  При использовании Метода II важно точно определять положение центра колец. Моделирование показало, что заметный рост σ_{SKY} начинается только, если ошибка определения положения центра колец $\sigma_{CENTER} > 0.3 - 0.5$ пискеля (т.е. $0.05 - 0.08$ от минимальной полуширины кольца от неба на изображении). Как уже отмечалось в главе 3.3, такая точность обеспечивается автоматической процедурой определения центра колец.

- Ошибки гидирования и гнутия аппаратуры приводят к взаимным смещениям между изображениями в кубе z (см. рис. 7). Исправление этого эффекта по положению изображений звезд в поле приводит к взаимному смещению каналов в пространстве длин волн. В результате возникает ошибка в определении скоростей σ_{SHIFT}. В отличие от σ_{SKY} она слабо зависит от интенсивности линий и в основном определяется расстоянием от центра колец r. На рис. 10 показаны вариации изменения скорости в разрезе через изображение модельной галактики для двух типов смещений каналов – случайных от канала к каналу (ошибки гидирования) и систематически нарастающих (результат гнутия аппаратуры). В первом случае возникают паразитные кольца, во втором – постоянный градиент скорости. В Табл. 2 приводятся средние амплитуды паразитных скоростей в зависимости от величины смещений обоих типов. У SCORPIO систематические гнутия не превышают $0.2 - 0.3''$ во всем диапазоне зенитных расстояний, а типичные ошибки гидирования порядка $0.1 - 0.2''$.

- Спектральная кривая пропускания интерференционного фильтра зависит от угла падения лучей. Поэтому если пучки света от телескопа и калибровочного тракта не совпадают, то кривые пропускания фильтра в кубе **FLAT** и **OBJECT** будут различаться как по ширине, так и по центральной длине волны. Используя фотометрию звезд в кубе **OBJECT** этот эффект можно определить и исправить. Деление на неисправленный куб **FLAT** будет приводить к появлению систематический вариаций в континуальном спектре. Возможные ошибки определяются соотношением между полушириной узкополосного фильтра $12 - 18\,\text{Å}$ и свободным спектральным диапазоном $\Delta\lambda$. Легко показать, что если спектр в кубе **FLAT** смещен по спектру на 2-3 канала или его FWHM отличается на 20% от **OBJECT**, то возникают возмущения с дисперсией $0.15 - 0.2$ и $0.05 - 0.08$ от интенсивности континуума для FP235 и FP501 соответственно (на $\lambda = 6563\,\text{Å}$ при полуширине фильтра $15\,\text{Å}$). При наблюдениях эмиссионных объектов это приведет к появлению незначительной ошибки измерения скорости σ_{FLAT}, однако для объектов с сильным континуумом

Таблица 2: Амплитуды паразитных скоростей (в $км\,с^{-1}$) для различных смещений каналов

Смещение $''$	Тип смещений	
	случайные	систематические
0.05	3.0	2.1
0.10	5.5	2.2
0.25	22	7.0
0.50	25	16
0.75	32	23
1.00	47	30

несовпадение пучков от объекта и калибровки может привести к появлению паразитных линий на фоне яркого континуума.

6 Результаты обработки наблюдений

6.1 Эмиссионный объект

Галактика NGC 6951 наблюдалась 23/24.IX.2000 во время первых испытаний прибора SCORPIO в режиме Фабри-Перо. Использовался интерферометр FP235, цикл сканирования состоял из 32 кадров с экспозицией по 120 сек, для увеличения скорости считывания применялся биннинг 2×2, результирующий размер пикселя $\sim 0.56''$. Фильтр, центрированный на $\lambda_c = 6596\,Å$ полушириной $16\,Å$ выделял область вокруг линии H_α. Вариации качества изображений и атмосферной прозрачности до и после фотометрической коррекции показаны на рис. 7, изменение интенсивности линий неба на рис. 5 и 6. После приведения к шкале длин волн проводилась оптимальная фильтрация данных – сглаживание по z-координате гауссианой с $FWHM = 1.5$ канала и в плоскости (x, y) – двумерной гауссианой $FWHM = 2 \times 2$ пикселя. Для этого мы использовали средства пакета ADHOC[4]. После сглаживания пространственное разрешение составило около $2.7''$.

Кроме линии H_α, в околоядерной области присутствует линия [NII]λ6582 Å из соседнего порядка интерференции. Используя гаусс-анализ профилей эмиссионных линий мы построили поле скоростей ионизованного газа и монохроматические изображение галактики в каждой линии. Пример поля скоростей в линии H_α приведен на рис. 11. Здесь же показаны примеры разложения профилей эмиссионных линий в LINER-ядре и околоядерном кольце звездообразования. Измеренные нами скорости полностью согласуются с данными Перез и др. (2000), полученными ими для этой галактики при трех положениях щели спектрографа.

6.2 Абсорбционный объект

Центральная часть шарового звездного скопления M 71 наблюдалась 12/13.IX.2001 с прибором SCORPIO и интерферометром FP501 в линии H_α по заявке Н.Н. Самуся и А.С. Расторгуева. Цикл сканирования состоял из 36 кадров, с экспозицией по 120 сек, как и в предыдущем случае использовался биннинг 2×2. Качество изображений в течение наблюдений менялось от $1.0''$ до $1.7''$. В каждом кадре присутствуют монохроматические изображения звезд на длинах волн, определяемых их координатами на ПЗС, согласно (1) (если пренебречь изменениями фазового сдвига на масштабе размера изображений). После предварительной обработки и поканального вычитания линий ночного неба мы проводили автоматическую фотометрию отдельных звезд. Для этого в каждом кадре по ярким изолированным звездам строилась средняя двумерная функция рассеяния точки (PSF). Методом кросс-корреляции PSF совмещалась с барицентром звезды, интегральный поток определялся методом МНК. Этот простой способ оказался достаточно устойчивым для работы в тесных звездных полях и позволил осуществлять относительную фотометрию соседних звезд с разделением, большим чем $2.5 - 3''$. Для измерения скоростей мы использовали два различных метода. В первом варианте фотометрия звезд проводилась в каждом канале до коррекции куба за фазовый сдвиг, полученные таким образом спектры $F_\lambda(z)$ переводились в

[4] Пакет ADHOC написан Булестексом (2000) в Марсельской обсерватории и свободно доступен в INTERNET.

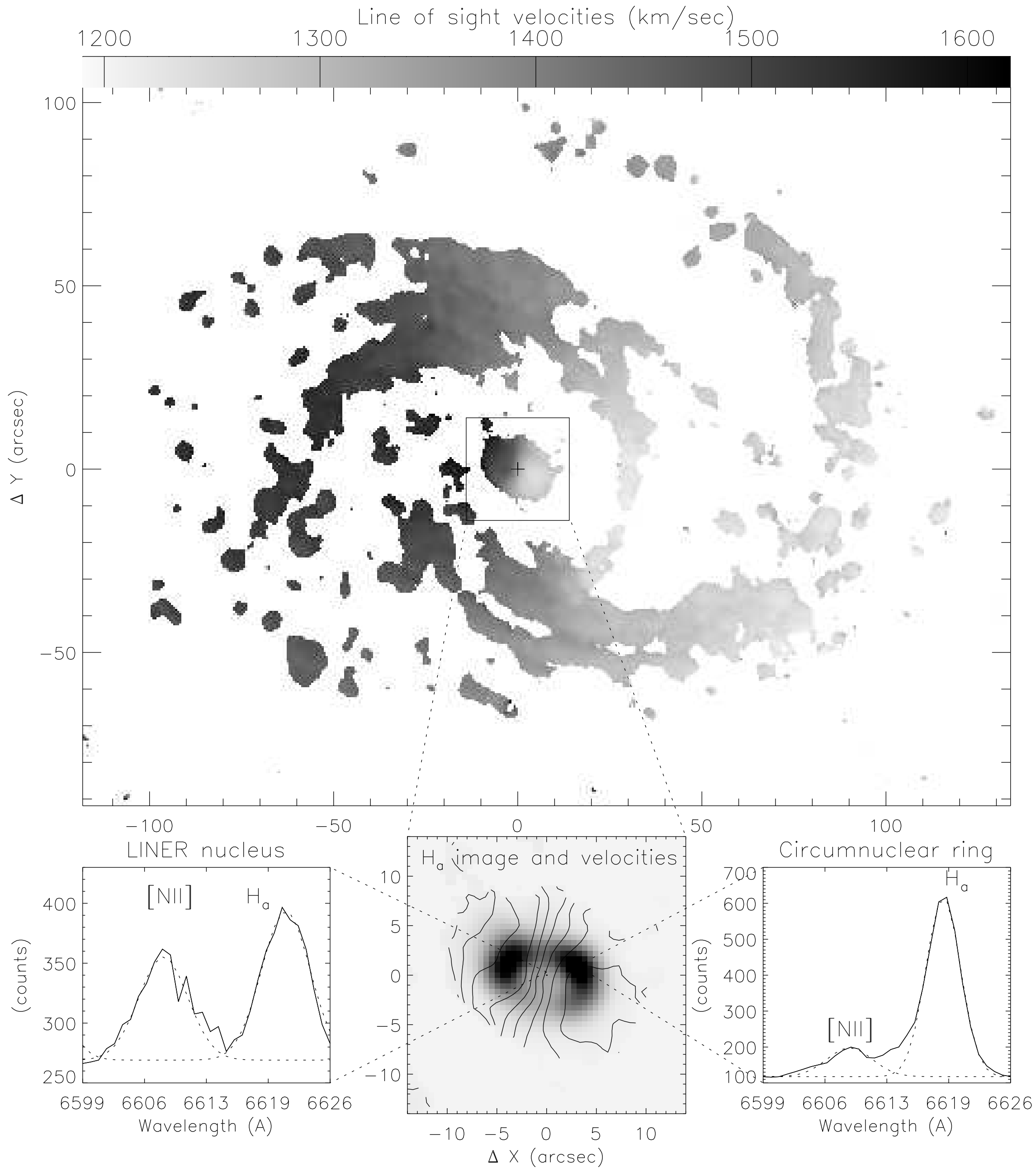

Рис. 11: Ионизованный газ в галактике NGC 6951. Вверху – поле скоростей в линии H_α. Квадратом выделена область, для которой на нижнем рисунке приведено изображение околоядерного кольца звездообразования в H_α, с наложенными контурами линий равных лучевых скоростей. Справа и слева показаны примеры гаусс-аппроксимации профилей эмиссионных линий H_α и [NII]λ6583 в ядре и околоядерном кольце.

шкалу длин волн с использованием значения фазового сдвига, соответствующего положению барицентра звезды на фазовой карте. Во втором случае каналы в кубе объекта сглаживались для приведения к одному значению качества изображений, как это описано в 3.4, так что средний размер изображений в кубе составил $FWHM = 1.75 \pm 0.03''$. Далее весь куб исправлялся за фазовый сдвиг и только потом проводилась поканальная фотометрия, результатом которой является спектр звезды $F_\lambda(\lambda)$. Профиль абсорбции H_α в спектрах аппроксимировался гауссианой. Таким образом были измерены скорости более чем 700 звезд в наблюдаемом поле, вплоть до 18 звездной величины в полосе V (см. рис.12) . Оба метода выделения спектров звезд дали близкие результаты, без заметного систематического различия. Общая дисперсия скоростей скопления во втором методе оказалась несколько меньше, что, видимо, говорит о его более высокой надежности. Сравнение с опубликованными данными по измерению лучевых скоростей звезд в этом скоплении показало отсутствие систематического сдвига при наблюдениях с ИФП. Ошибка индивидуальных измерений скоростей звезд до $V \sim 17.^m5$, оцененная из сравнения измеренной дисперсии скоростей звезд с литературными данными, составила $2-4\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$.

7 Заключение

В работе представлены алгоритмы обработки наблюдений протяженных объектов со сканирующим интерферометром Фабри-Перо, ориентированные на использование ПЗС в качестве детектора. Особенностью таких наблюдений является то, что точность измерения лучевых скоростей часто определяется не формальным значением отношения сигнал/шум, а присутствием паразитных колец в пространстве длин волн. Исследуются как причины их возникновения, так и методы борьбы с ними на этапе редукции данных. Все вышеописанные алгоритмы успешно применяются для обработки наблюдений, полученных с редуктором светосилы первичного фокуса 6-м телескопа SCORPIO.

Acknowledgements. Автор благодарит В.Л. Афанасьева и Т.А. Мовсесяна за полезные замечания, а также Н.Н. Самуся и А.С. Расторгуева за разрешение использовать данные по M 71 до их основной публикации. Работа поддержана грантами РФФФИ 01-02-16118, РФФИ 01-02-17597 и федеральной программой "Астрономия"(Проект 1.2.3.1).

Список литературы

Амрам и др. (Amram P., Marcelin M., Bonnarel F., Boulesteix J., et al.), A&A,263, 69

Афанасьев В.Л. и др., 2001, готовитьс к печати

Булестекс и др. (Boulesteix J., Georgelin Y., Marcelin M., Fort J.A.), 1982, in "Instrumentation for astronomy with large optical telescopes", 223

Булестекс (Boulesteix J.), 2000, ADHOC manual, `http://www-obs.cnrs-mrs.fr/ADHOC/adhoc.html`

Блэнд и Талли (Bland J. & Tully R.B.), 1989, AJ, 98, 723

Бленд-Хэсон (Bland-Hawthorn J.), 1995, ASP Conf.Ser., 71, 72

Гордон и др. (Gordon S., Koribalski B., Houghton S., Jones K.), 2000, Mon. Not. R. Astron. Soc., 315, 248

Джонс и др. (Jones D.H., Shopbell P.L., Bland-Hawthorn J.), 2002, Mon. Not. R. Astron. Soc., 329, 759

Додонов С.Н., Власюк В.В., Драбек С.В., 1995, "Интерферометр Фабри-Перо. Руководство пользователя", Нижний Архыз

Куртес (Courtes G.), 1960, Ann. d'Astrophys., 23, 115

Остерброк и др. (Osterbrock D.E., Fulbright J.P., Martel A.R., et al.), 1996, Publ. Astr. Soc. Pacific, 108, 277

Перез и дрю (Pérez, E., Márquez, I., Durret, F. et al.) 2000, Astron. Astrophys., 353, 893

Талли (Tully B.R.), 1974, ApJS, 27, 415

Хернандес и др. (Hernandez O., Gach J.-L., Boulesteix, J., Amram P., et al.), 2001, in "Galaxies: the Third Dimension ", eds Rosado M., Binette L., & Arias L., to be published in ASP Conf. Series

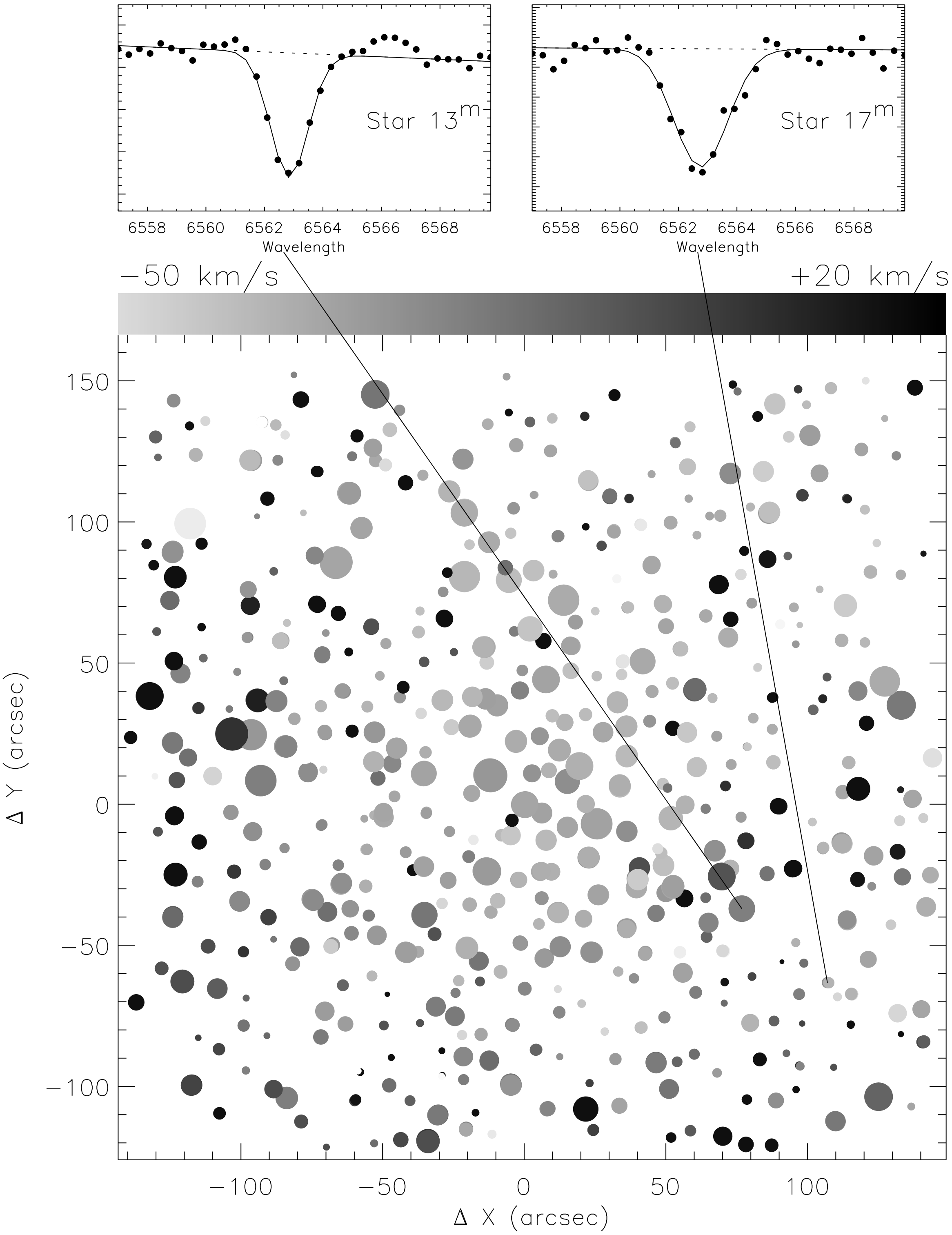

Рис. 12: Скорости отдельных звезд в шаровом скоплении M 71. Диаметры кружков пропорциональны звездной величине, цвет – лучевой скорости, согласно шкале вверху. Показаны примеры абсорбции H_α в спектрах звезд $V = 13^m$ и $V = 17^m$ и их гаусс-аппроксимация.