

Многорезжимный фокальный редуктор телескопа БТА

Лекция IV.

Коррекция геометрии и плоское поле (продолжение).
Спектроперфекционизм. Учет фона неба, проблема
аппаратного контура. Калибровка потоков.

Геометрические искажения

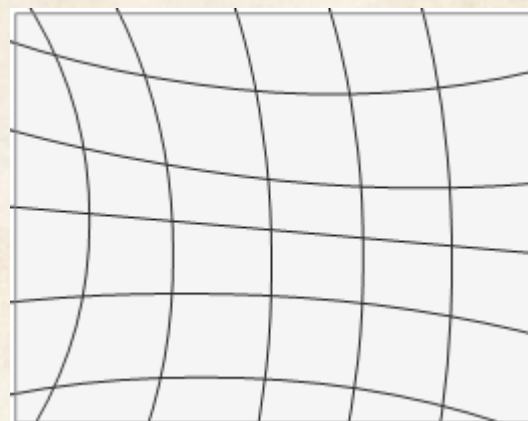
$$(x', y') = G(x, y)$$

Форма линий линейчатого спектра



$$x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} x^i y^j, y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} x^i y^j$$

$$(m, n = 2 - 4)$$

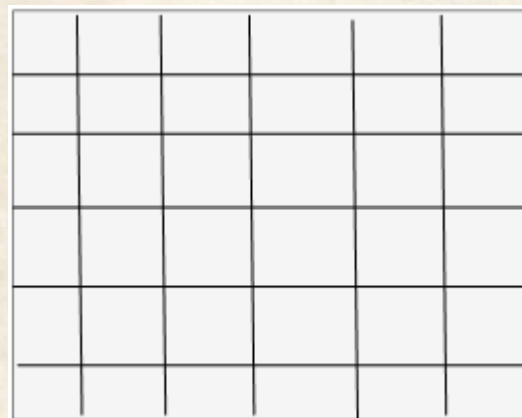
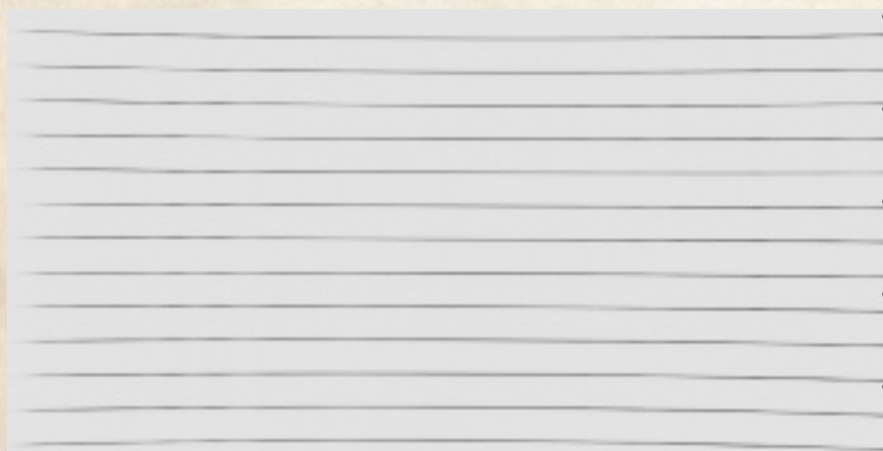


(x, y)

Направление дисперсии:

SCORPIO-1: “пунктирная щель”

SCORPIO-2: по 13-точечному тесту



(x', y')

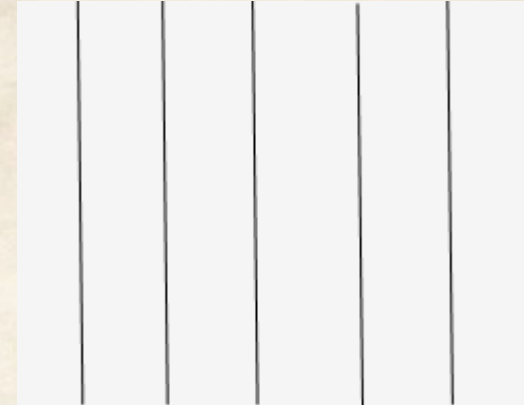
На практике – бывает удобно разделить переменные

$$(x', y') = G(x, y)$$

1) warp_x:

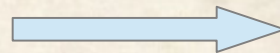


$$\begin{aligned}x' &= G_x(x, y) \\ y' &= y\end{aligned}$$

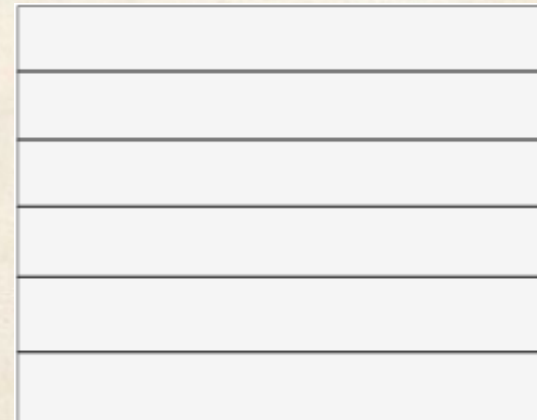


2) Нормировка на flat

3) warp_y:



$$\begin{aligned}x'' &= x \\ y'' &= G_y(x', y')\end{aligned}$$

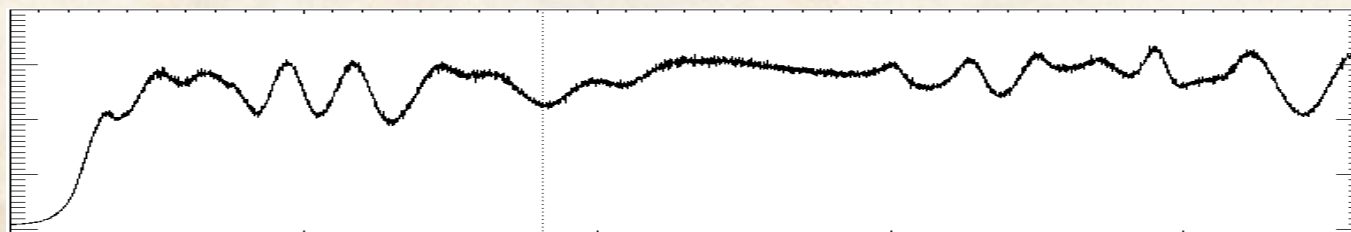


Нормированный flat field без коррекции

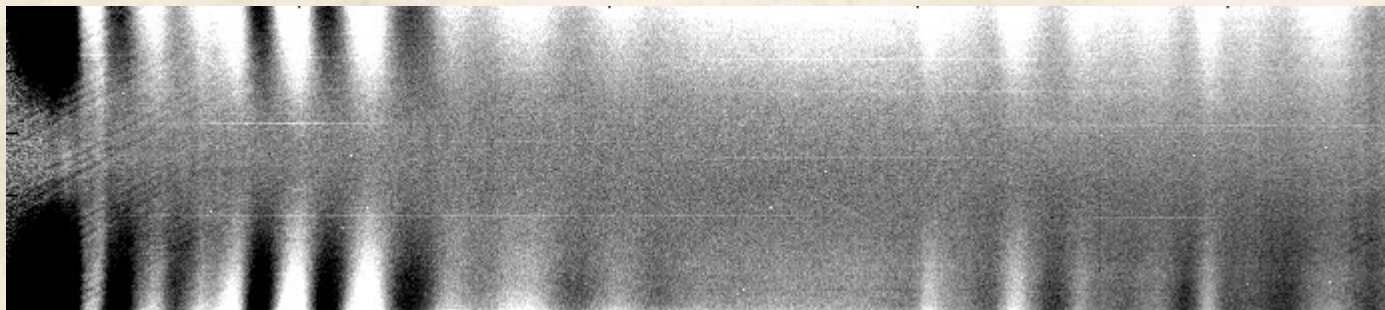
Исходный (flat LEDs, VPHG1200@540)



Разрез через центр:



Нормировка (0.9/1.1):

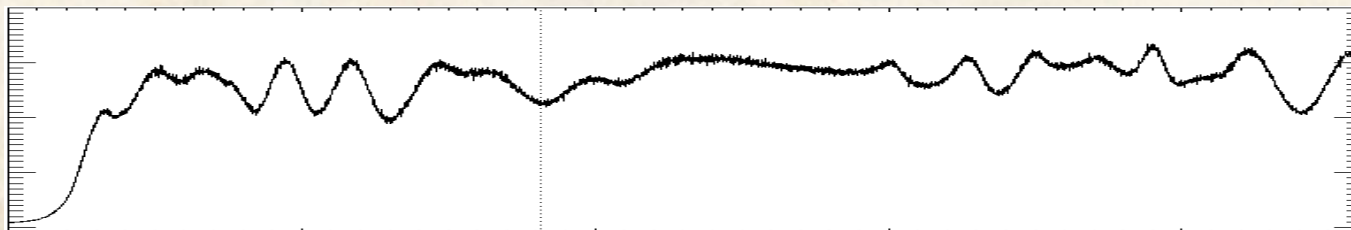


Нормированный flat field после геометрической коррекции

Исправление по форме линий неон:



Разрез через центр:



Нормировка (0.9/1.1):

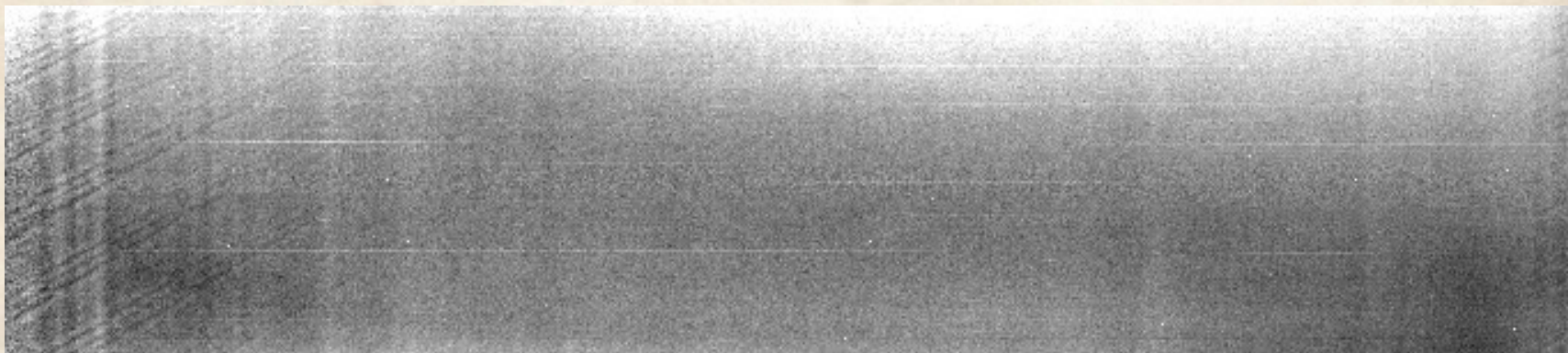


Проблема выбора оптимальной методики

В спектральном плоском поле смешаны:

- **мелкомасштабные неоднородности**, которые следуют геометрии ПЗС-детектора (x,y) : попиксельные вариации чувствительности, плохие столбцы, пыль на оптике.

- **крупномасштабные неоднородности**, связаны с геометрией спектров (x',y') : пыль на щели, клиновидность щели, виньетирование, неоднородность спектра вдоль дисперсии



Проблема выбора оптимальной методики

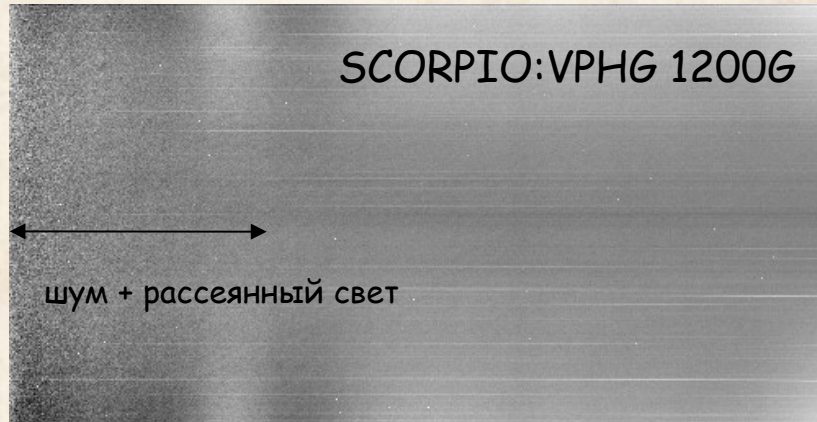
В отличие от фотометрического «плоского поля» (рассветное небо, superflat и т. п.), мы не можем равномерно засветить все пиксели, так как есть эффективность решетки и спектральное распределение яркости лампы.

Приходится выбирать различные способы нормировки:

- деление на сглаженный спектр центральных строк
- нормировка на сглаженное изображение (медиана с широким окном и т. п.) для учета мелкомасштабных вариаций + отдельно исправление виньетирования вдоль щели (усреднение сглаженного спектра лампы или неба...).

Нужно ли вообще деление на flat?

Важно проверить — не вносит ли деление дополнительных шумов

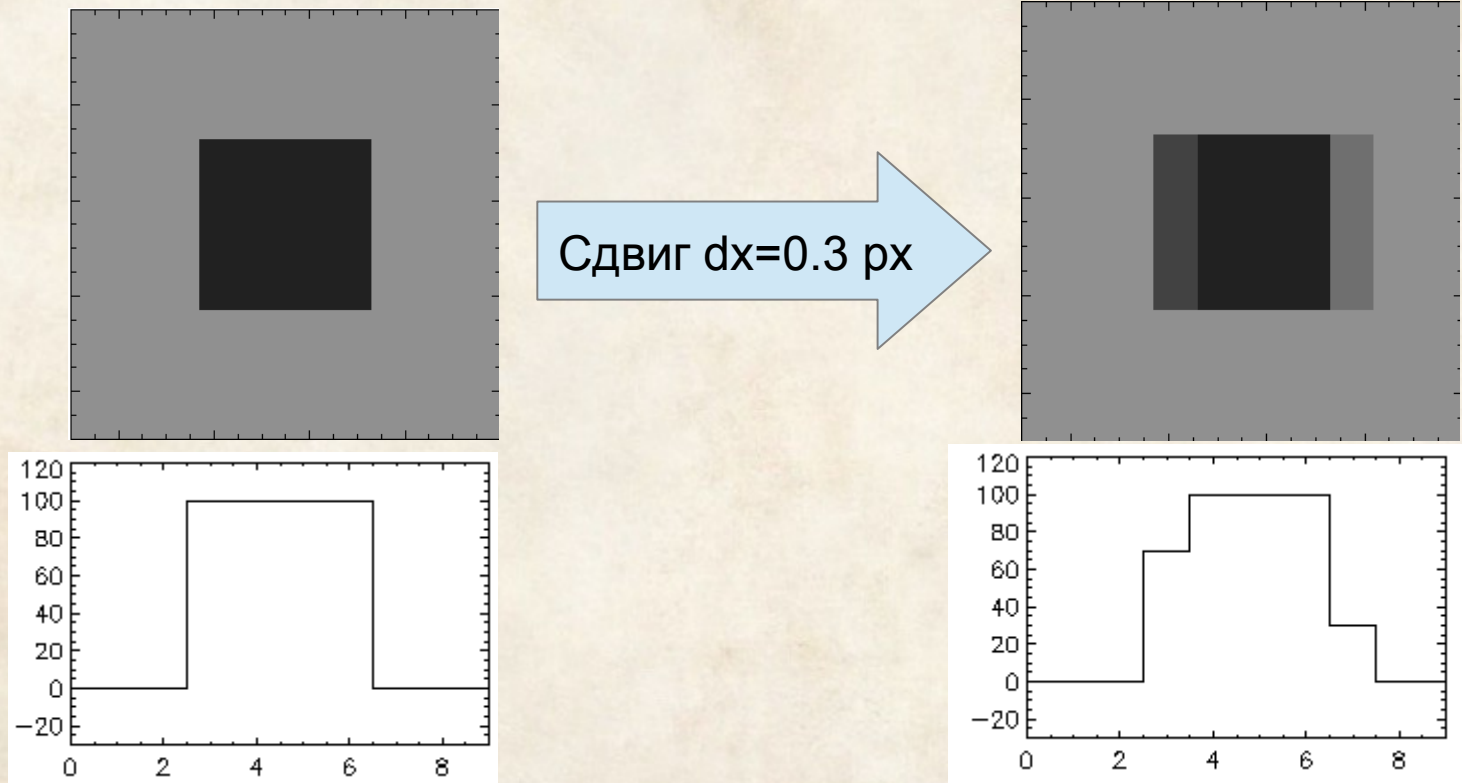


← нормированное плоское поле от галогенной лампы вносит излишние шумы в синей части спектра (Лекция 3)

Часто речь идет об исправлении локальных неоднородностей на уровне $<10\%$. Несущественно при спектроскопии ярких звезд, но может оказаться критически важным при вычитании фона неба для слабых и/или протяженных объектов

Проблема интерполяции

Геометрические преобразования — портят исходное изображение, так как выполняется интерполяция на фиксированную координатную сетку

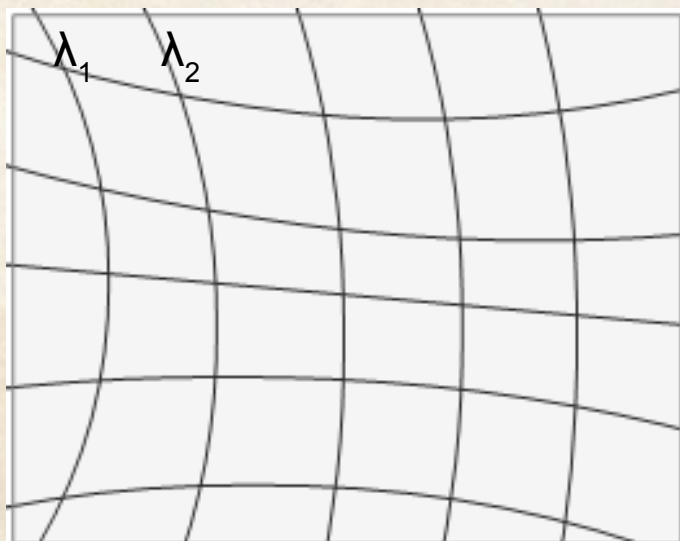


Искусственное разбиение на более мелкие пиксели — лишь частично решает проблему, сильно загружая вычислительные ресурсы

Не объект к калибровкам, а калибровки к объекту!

Обработка современных IFU (MUSE/VLT, CALIFA и т. д.) - идея сохранения первоначальной дискретизации

Т.е. вместо 2D FITS-изображения (запись I в каждом пикселе) — переход к таблицам, где кроме I , в каждом пикселе еще записаны преобразованные координаты (x', y')



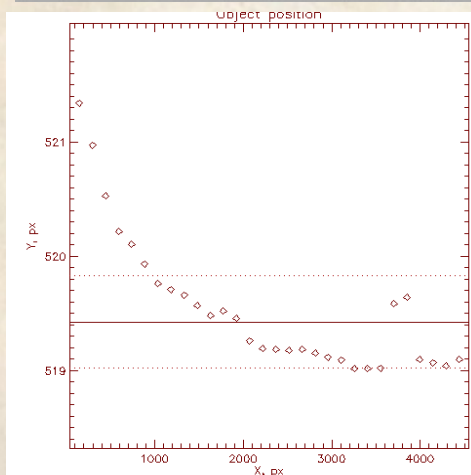
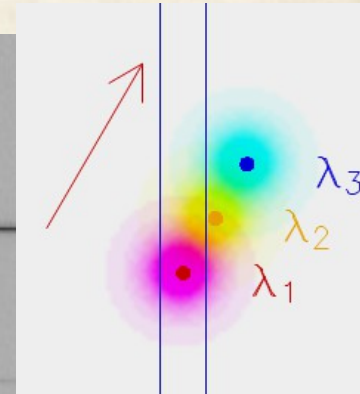
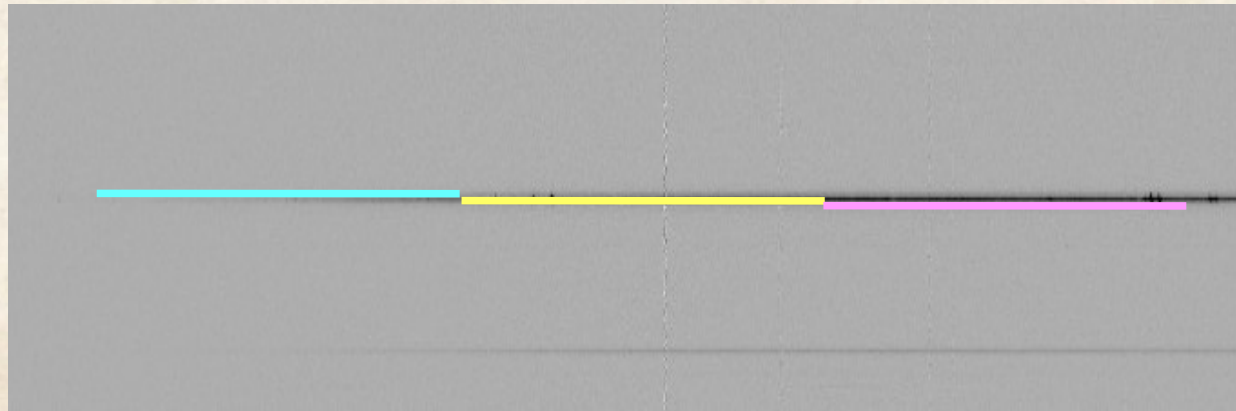
Остаётся лишь одно преобразование — экстракция линейаризованного спектра, после вычитания неба и исправления за кривые пропускания

Но требуется специализированный софт, в том числе и для визуализации на разных этапах обработки + возрастает объем хранимой информации $(I+x+y)$

“Спектроперфекционизм” (Bolton & Schlegel, 2010)

И еще о направлении спектров

Даже после исправления геометрических искажений по 13 dots, спектр может быть направлен не точно вдоль X, так как есть атмосферная дисперсия (Лекция 2)

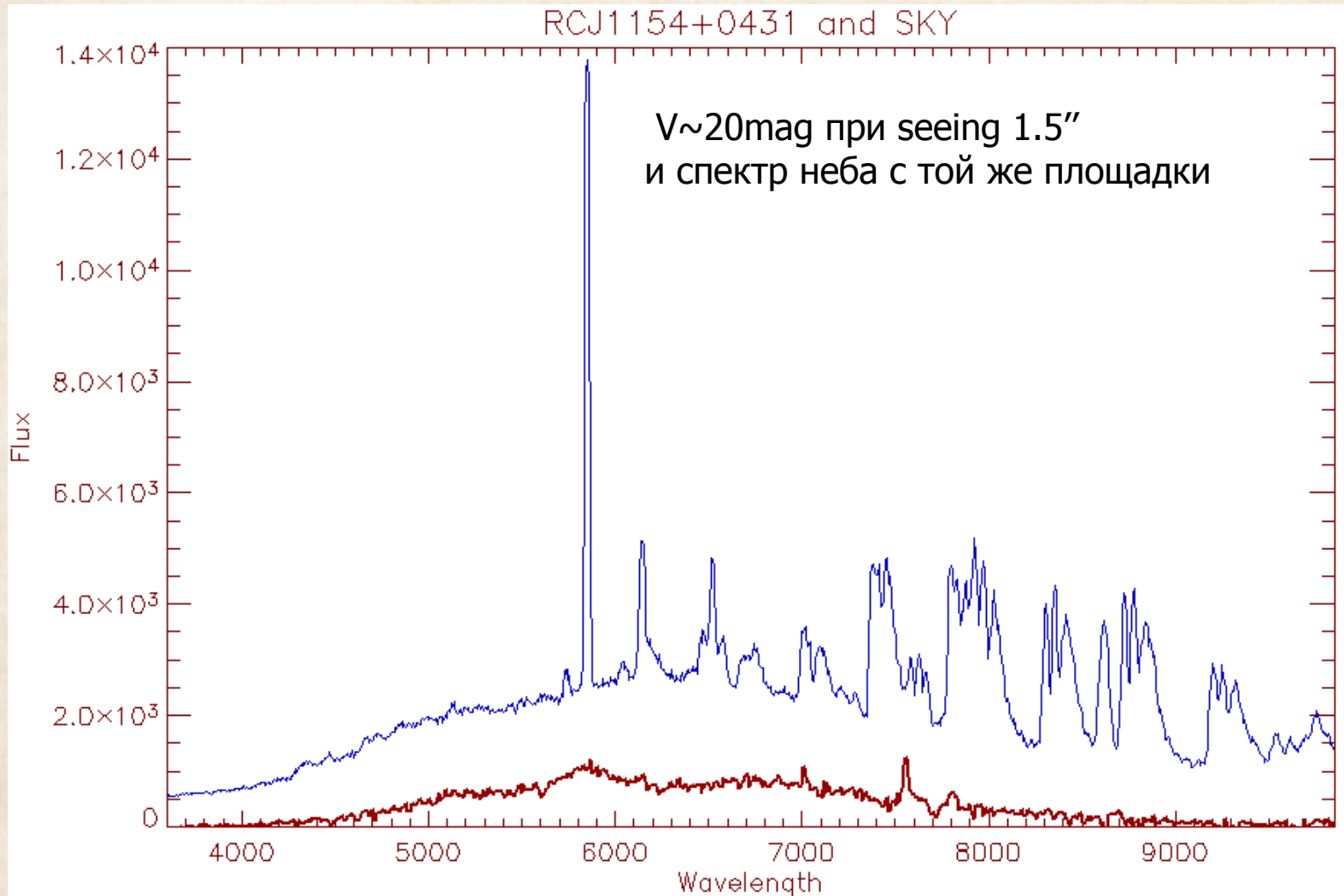


← пример измерения положения ядра галактики NGC4710 для $z=41$, dPA=10.

В некоторых задачах этот сдвиг может быть существенен (измерение отношения далеко отстоящих линий и т.д.),

Тогда выполняем еще коррекцию по направлению спектра, благо она линейная (Δy зависит только от x).

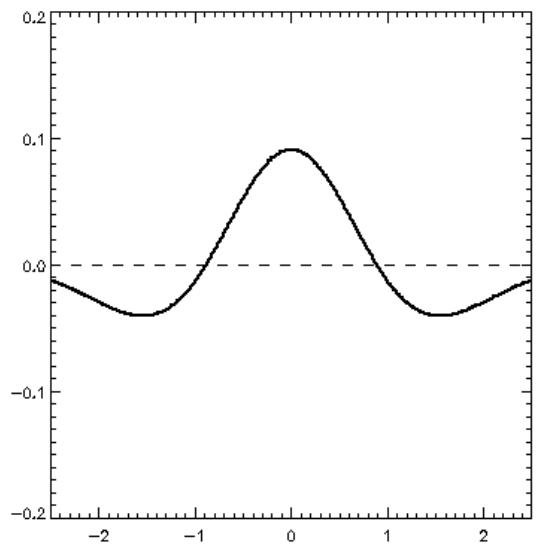
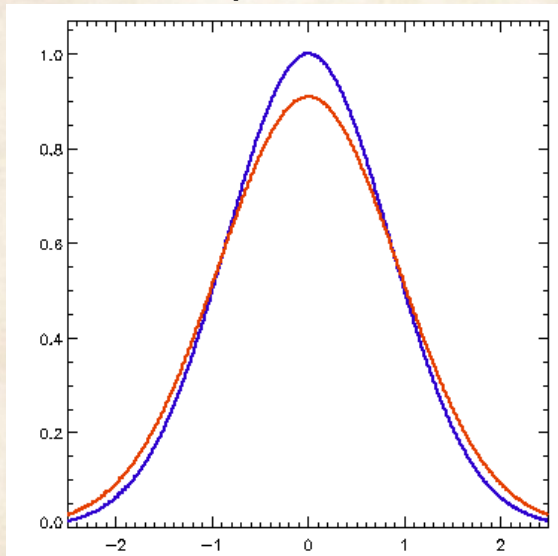
Вычитание фона неба



Для слабых объектов «морфологический шум» при вычитании фона неба может оказаться более существенным, нежели формальный шум из статистики фотонов

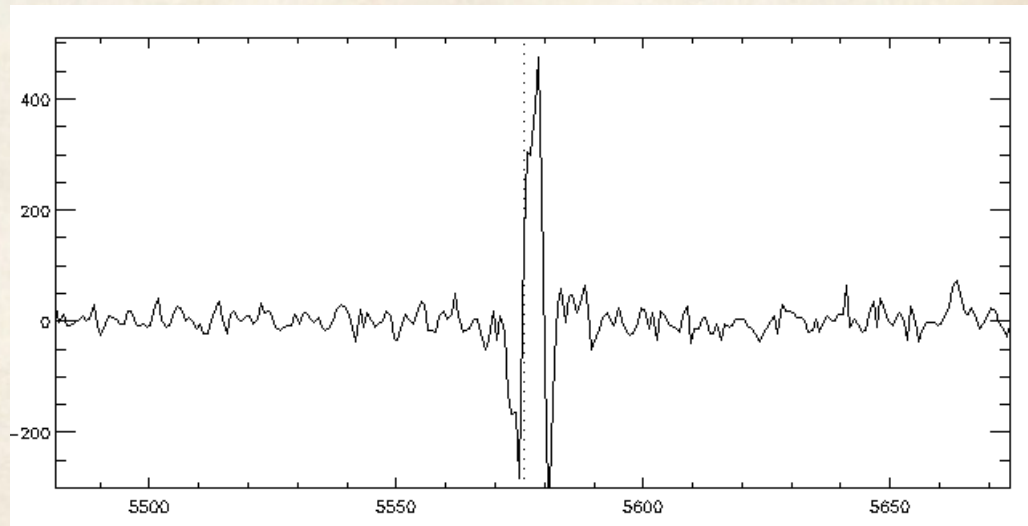
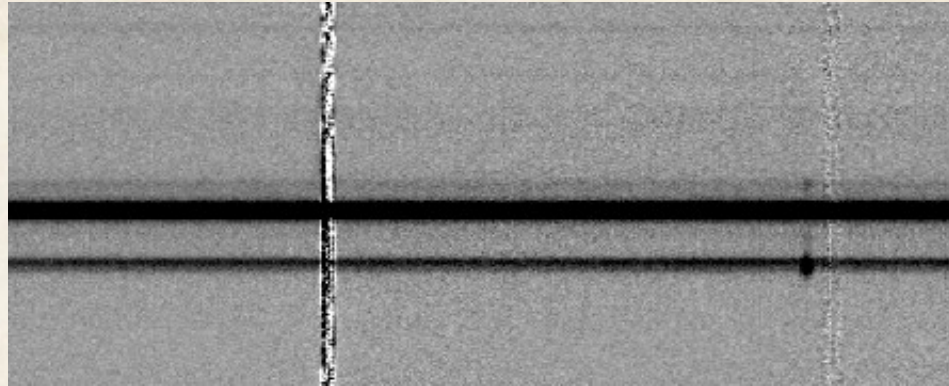
Вариации аппаратного контура вдоль щели

10% разница



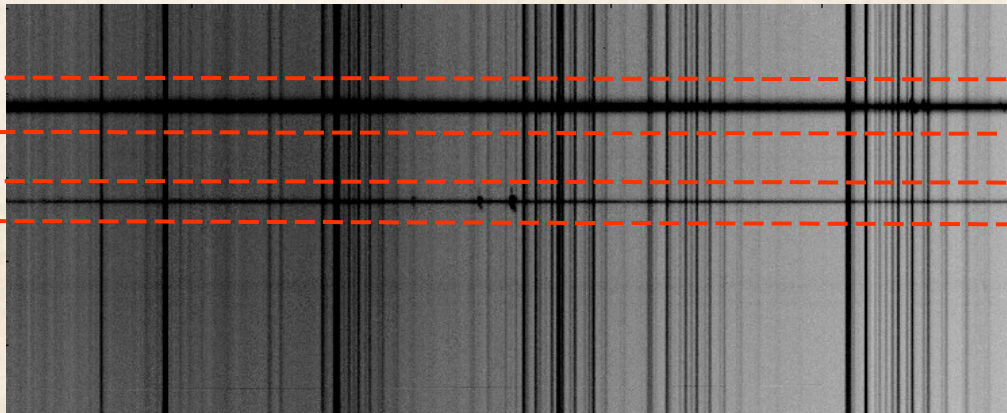
[O I]5577

NaD

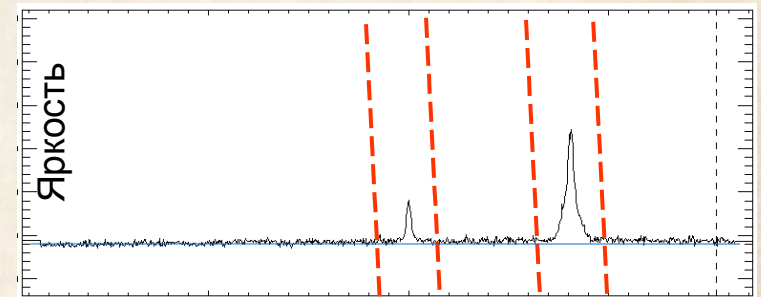


Причина «морфологического шума» - несовпадение инструментальных контуров на объекте и на небе

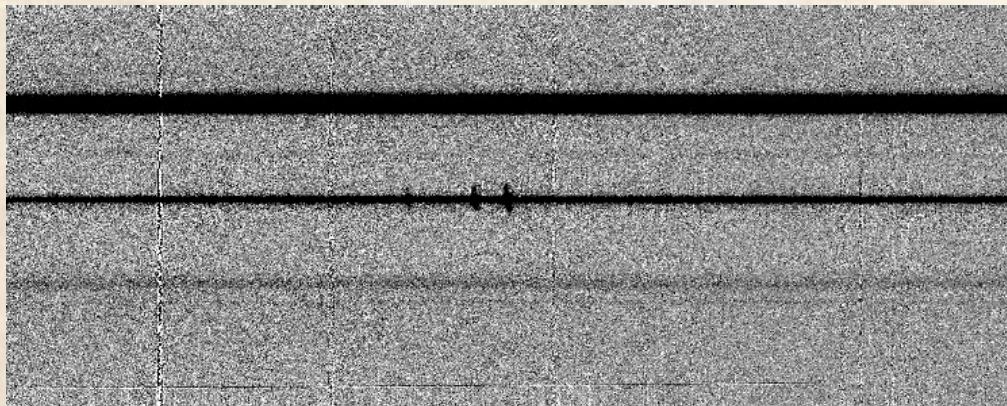
Вычитание фона неба: протяженные объекты



Аппроксимация спектра неба
вдоль щели полиномом

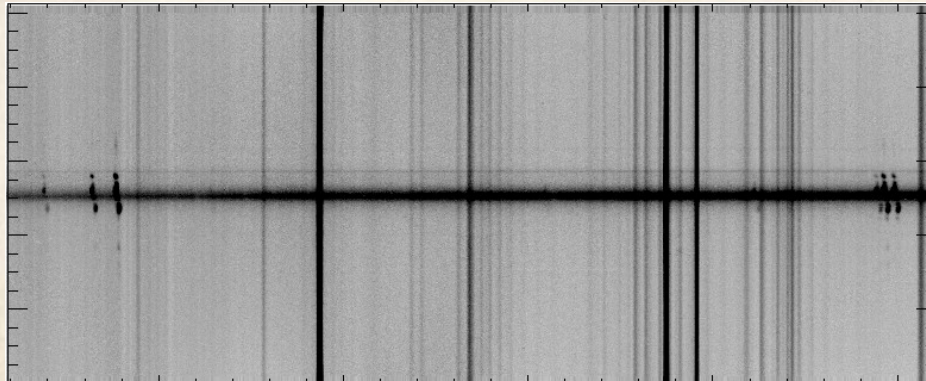


Результат вычитания:

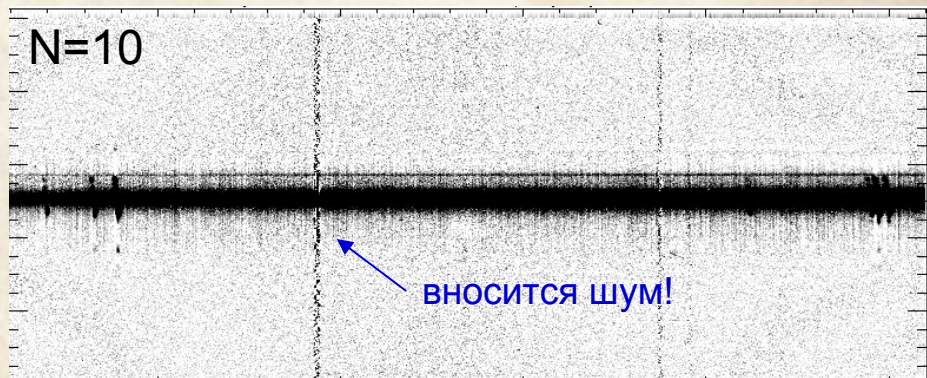
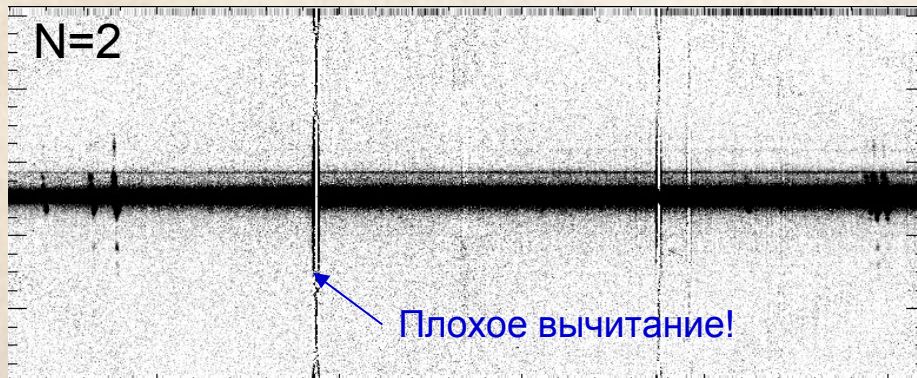
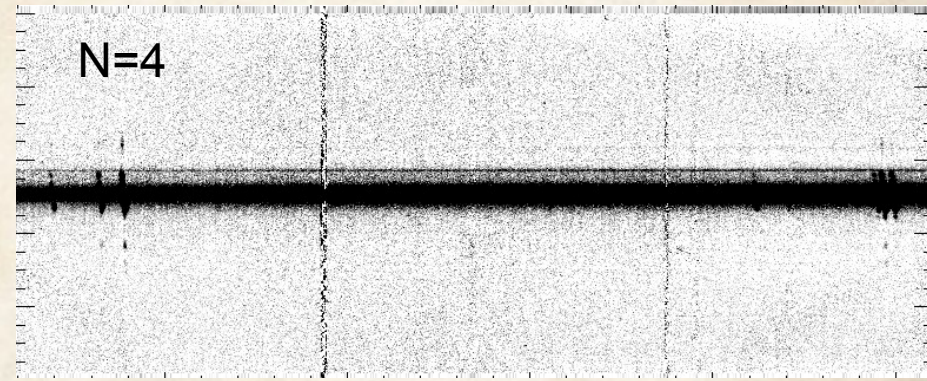
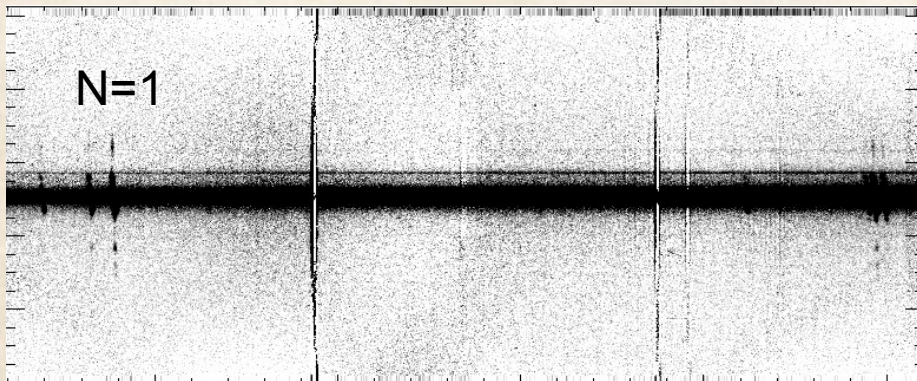


Области вокруг ярких объектов
исключаются из расчета

Вычитание фона неба: выбор режима



Оптимальная степень
полинома $N=3-4$



Вычитание фона неба: сложная форма LSF

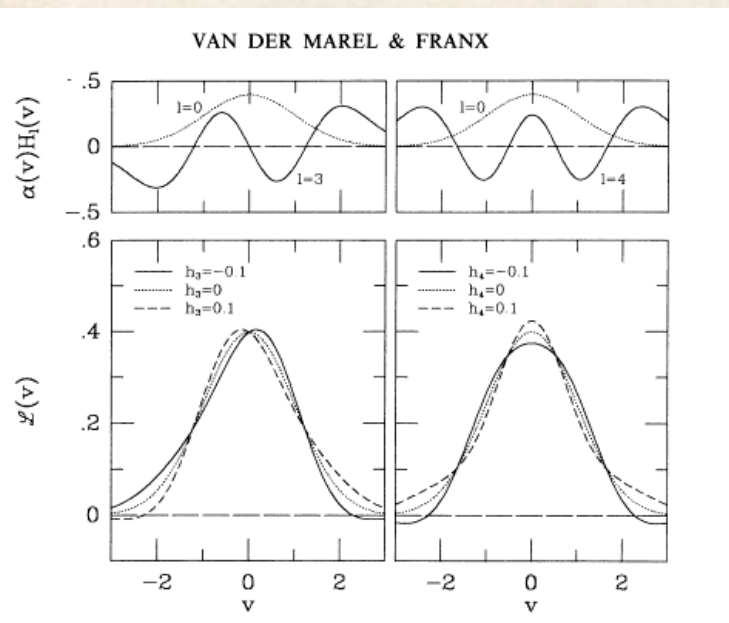
Отличие степени полинома от 0 — попытка учесть изменения аппаратного контура вдоль щели (LSF(λ, y)= line spread function). Для спектроскопии слабых протяженных (>2-3') объектов эти вариации особенно существенны и требуется их более строгий учет.

and quite good parametrization of the velocity distribution profile is the truncated Gauss-Hermite (GH) expansion (Gerhard, 1993; van der Marel & Franx, 1993):

$$GH(v; \gamma, V, \sigma, h_m) = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{v-V}{\sigma}\right)^2 \sum_{m=0}^{N_{GH}} h_m H_m\left(\frac{v-V}{\sigma}\right)\right], \quad (2.10)$$

where H_m are the physicists Hermite polynomials, h_m are the Hermite coefficients and N_{GH} is the order of the truncation corresponding to the total number of mo-

Функция Гаусса-Эрмита



Обычно органичиваются $N=4$,
при этом $h_0=1, h_1=0, h_2=0$

h_3 - асимметрия
 h_4 - негауссовость

Вычитание фона неба: «продвинутые методы»

Chilingarian (2009), Katkov & Chilingarian (2011):

- $LSF(\lambda, y)$ — измеряется по рассветному небу (подгонка солнечным спектром высокого разрешения)
- параметризация LSF (Гаусс-Эрмит)

At every position along the slit, we change the LSF shape inside this night sky spectrum using a Fourier-based technique into the LSF at that slit position. The observed sky spectrum is a convolution of a true spectrum with the LSF :

$$R(\lambda, y) = R_0(\lambda) * LSF(\lambda, y); \quad S(\lambda, y) = S_0(\lambda) * LSF(\lambda, y), \quad (1)$$

where \bar{y} — position at the sky definition region. The night sky spectrum at current position along slit can be expressed as follows:

$$S(y, \lambda) = FFT^{-1} \left(\frac{FFT(S(\bar{y}, \lambda))}{FFT(R(\bar{y}, \lambda))} \cdot FFT(R(y, \lambda)) \right). \quad (3)$$

Вычитание фона неба: «продвинутые методы»

144

Katkov and Chilingarian

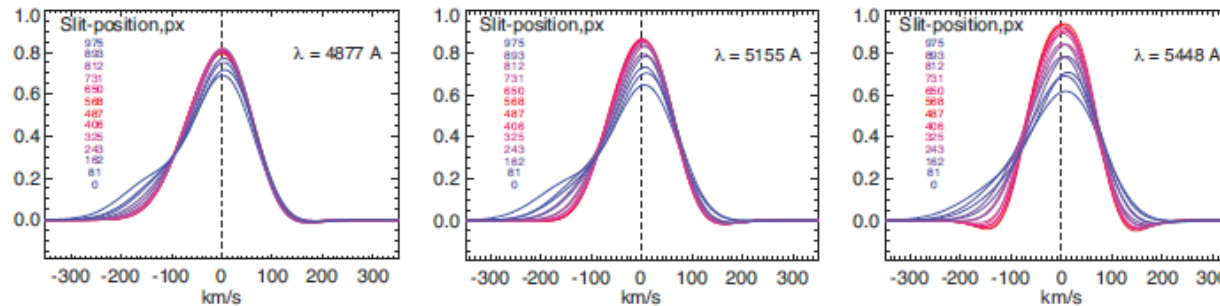


Figure 1. An example of the LSF shape of the SCORPIO reconstructed from the twilight frame at different wavelength and slit positions. We used the Gauss-Hermite LSF representation. One can see that the profile asymmetry increases towards the

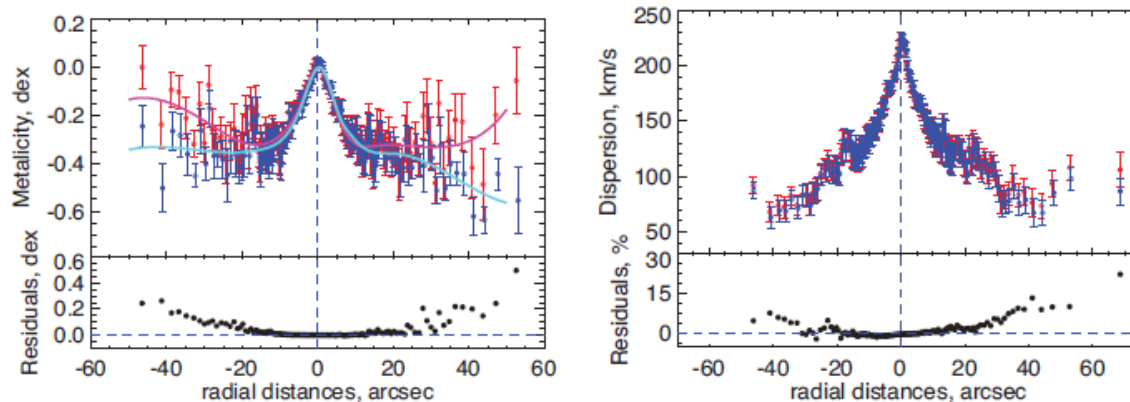
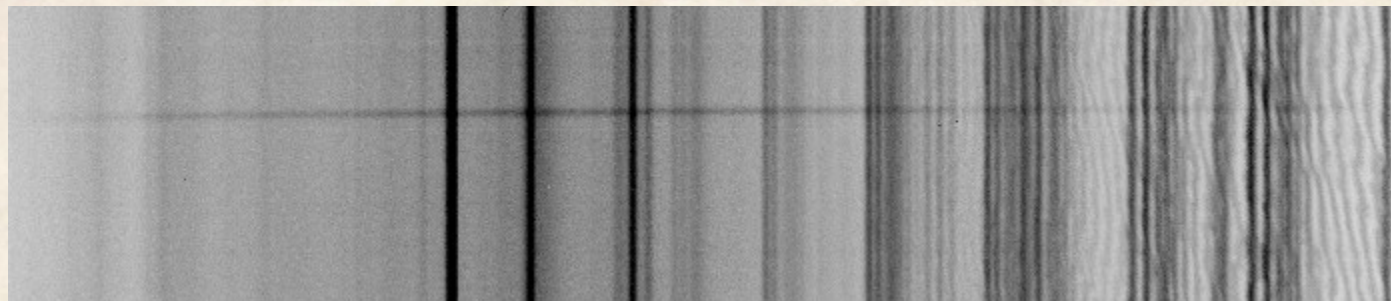
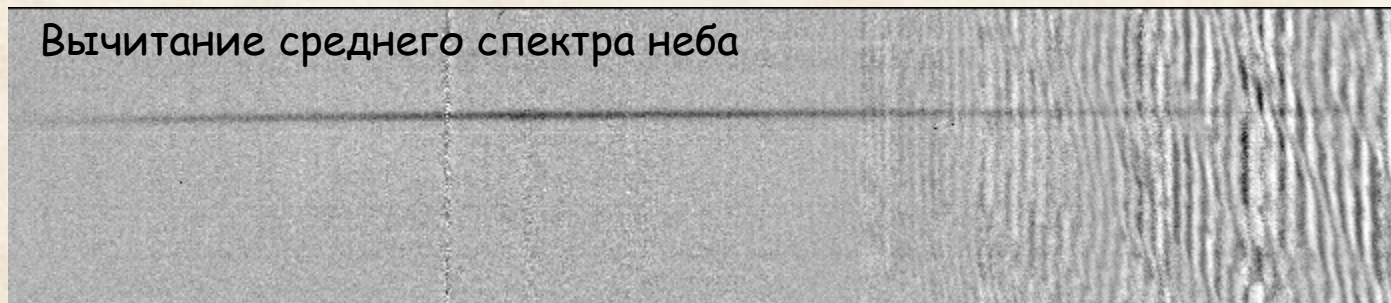


Figure 3. Comparison between traditional technique and our deconvolution. The two panels on the left display the internal velocity dispersion profiles of NGC 5440. Blue data points are for the new technique, while red ones are for the “classical approach”. Differences between the two approaches are displayed in the bottom panel. The two panels on the right hand side display the stellar metallicity profiles of NGC 5440 using the same symbols and colors as on the left hand side panels.

Сдвиги вдоль щели.



Вычитание среднего спектра неба




Вычитание сдвинутого объекта



- Значительно лучше вычитаются фринги
- Но меняется относительная интенсивность линий неба – нужны короткие экспозиции (5-10 мин)
- Проблемы с протяженными объектами

Сдвиги вдоль щели: всегда ли необходимы?

V723 Cas (VPHG1200G)



Вычитание «среднего» неба вдоль щели - для «синих» спектров и так хорошо



- Точность сдвигов вдоль щели ограничена точностью механических подвижек микроскопов платформы-адаптера, возможны смещения объекта относительно центра щели (до 0.5"), что приводит к заметной потере света.

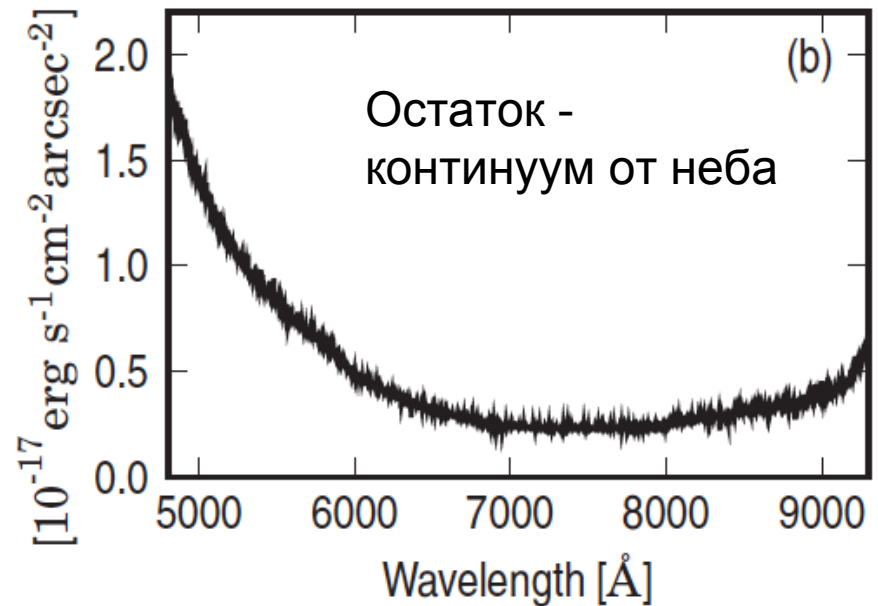
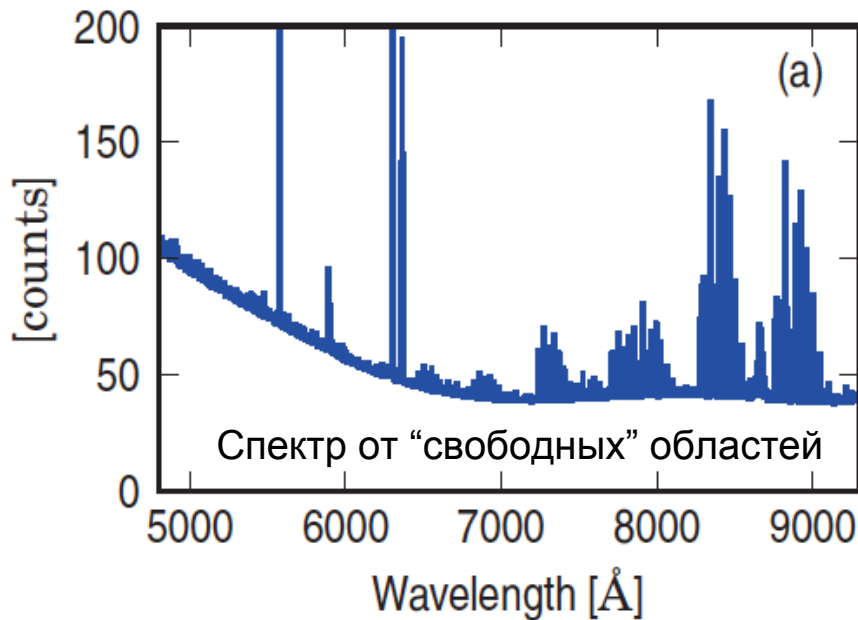
- Вносятся дополнительные шумы:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{obj+sky}^2 + \sigma_{sky}^2} \approx \sigma_{obj+sky} \sqrt{2}$$

а при вычитании среднего вдоль щели:
(без учета вариаций аппаратного контура!)

$$\sigma \approx \sigma_{obj+sky} \sqrt{1 + \frac{1}{N_y}}$$

Вычитание фона неба: моделирование спектра



- знаем LSF, построена адекватная численная модель спектрографа
- подгонка потоков в группах линий:

For the determination of the emission line fluxes, the known atmospheric emission lines (van der Loo & Groenenboom 2007; Osterbrock et al. 1996) are grouped by the originating molecules (OH, [O I], Na I, O₂) and the upper transitional level into twelve groups. Within each group, the emission flux ratio is fixed. The line fluxes for each group are then taken into a fit routine, minimizing the error of the differences between neighboring bins:

$$s^2(p) = \sum_{\lambda} \left(\frac{\Delta I(\lambda, p)}{\Delta \lambda} - \frac{\Delta I_0(\lambda)}{\Delta \lambda} \right)^2.$$

Вычитание фона неба: моделирование спектра

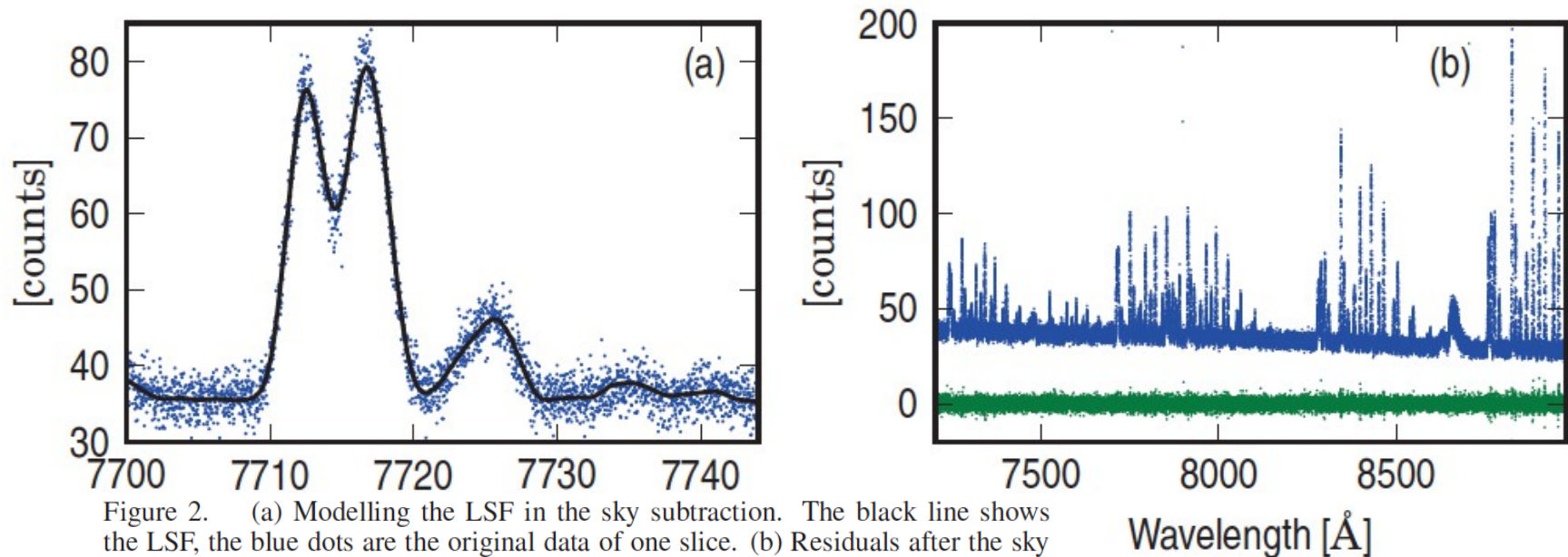


Figure 2. (a) Modelling the LSF in the sky subtraction. The black line shows the LSF, the blue dots are the original data of one slice. (b) Residuals after the sky subtraction for one slice. The blue dots show the original simulated data from the Instrument Numerical Model, the green dots the residual flux after subtraction.



ДО

ПОСЛЕ

Выбор оптимальной экспозиции по фону неба

$$k(t) = \frac{D_I(t)}{I(t)}$$

$$N_{\text{obj+sky}} = (F_{\text{obj}} + F_{\text{sky}}) \text{flat}(x, y) + \text{bias}_{\text{obj+sky}},$$

$$N_{\text{sky}} = F_{\text{sky}} \text{flat}(x, y) + \text{bias}_{\text{sky}},$$

$$N_{\text{obj}} = N_{\text{obj+sky}} - N_{\text{sky}}.$$

“передаточная функция $\text{flat}(x, y)$ определяется в каждом сете наблюдений с некоторой ошибкой, то есть тоже является случайной величиной”

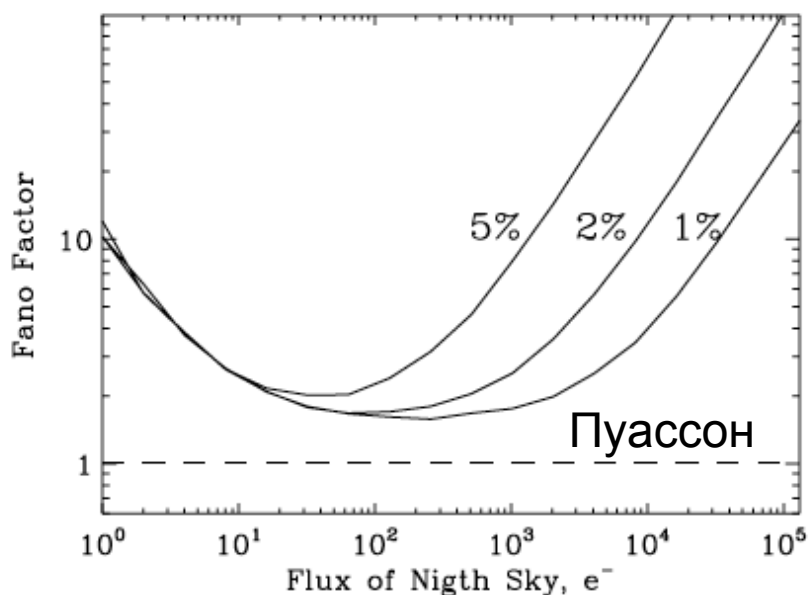


Рис. 3. Зависимость фактора Фано от уровня фона неба для различных значений ошибок определения плоского поля — 1%, 2% и 5%. Штриховой линией

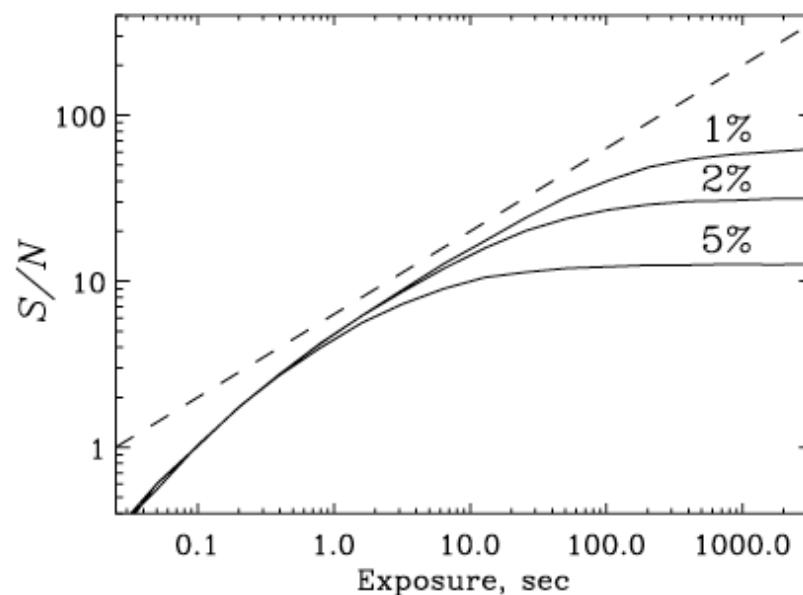


Рис. 4. Отношение сигнал/шум в объекте в зависимости от экспозиции для различных значений ошибок определения плоского поля — 1%, 2% и 5%. Штрихо-

Выбор оптимальной экспозиции по фону неба

На безлунном небе отчет в 100е достигается за 10 сек (V), 5 сек (R)
=> минимальные искажения статистики и максимальное S/N достигается
За ~100 сек (поток >1000 e)

Для увеличения предела обнаружения наиболее правильная стратегия — не увеличение длительности экспозиций а получение большого числа коротких экспозиций

После независимой обработки каждого изображения их можно сложить, и отношение сигнал/шум вырастет в $\sqrt{N_{\text{exp}}}$ раз. Необходимо, чтобы плоские поля каждой из экспозиций не совпадали — что соответствует получению кадров со смещением объекта, либо наблюдениям в различные ночи. В противном случае величина неоднородности перестает быть случайной величиной, и ее вклад не падает при сложении кадров. Следует заметить, что такой

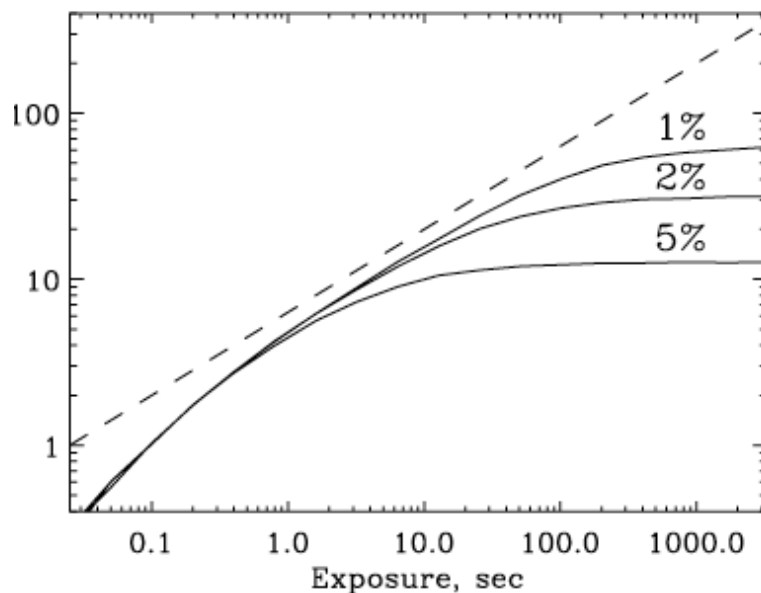
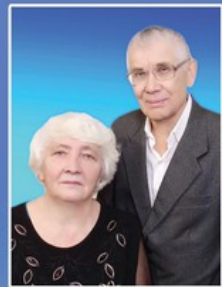
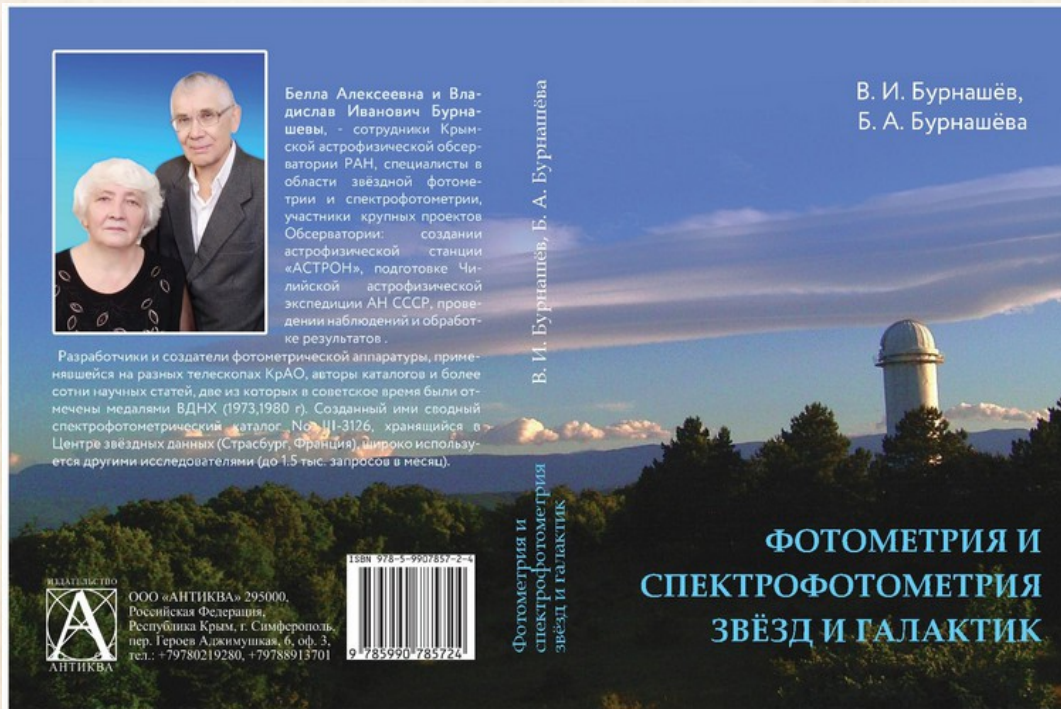


Рис. 4. Отношение сигнал/шум в объекте в зависимости от экспозиции для различных значений ошибок определения плоского поля — 1%, 2% и 5%. Штрихо-

Спектрофотометрия: “вынос за атмосферу”



Белла Алексеевна и Владимир Иванович Бурнашевы, - сотрудники Крымской астрофизической обсерватории РАН, специалисты в области звездной фотометрии и спектрофотометрии, участники крупных проектов Обсерватории: создании астрофизической станции «АСТРОН», подготовке Чилийской астрофизической экспедиции АН СССР, проведении наблюдений и обработке результатов.

Разработчики и создатели фотометрической аппаратуры, применявшейся на разных телескопах КрАО, авторы каталогов и более сотни научных статей, две из которых в советское время были отмечены медалями ВДНХ (1973,1980 г). Созданный ими сводный спектрофотометрический каталог, № III-3126, хранящийся в Центре звездных данных (Страсбург, Франция), широко используется другими исследователями (до 1,5 тыс. запросов в месяц).

В. И. Бурнашёв, Б. А. Бурнашёва

Фотометрия и спектрофотометрия звёзд и галактик

В. И. Бурнашёв,
Б. А. Бурнашёва

ФОТОМЕТРИЯ И СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ ЗВЁЗД И ГАЛАКТИК



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ООО «АНТИКВА» 295000,
Российская Федерация,
Республика Крым, г. Симферополь,
пер. Героев Аджимушкая, 6, оф. 3,
тел.: +79780219280, +79788913701

[А.В.Миронов](#)

ПРЕЦИЗИОННАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд

Данное учебное пособие отражает содержание спецкурса по практическим основам прецизионной звездной фотометрии, читаемого автором на астрономическом отделении физического факультета МГУ для студентов 4-го и 5-го курсов. Основное внимание уделяется методике и технике современной фотоэлектрической фотометрии и спектрофотометрии звезд и вопросам применения в наблюдательной практике знаний о распределении энергии в спектре изучаемой звезды, о кривых реакции инструментальной и стандартной фотометрических систем и о кривой прозрачности земной атмосферы.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов астрономических специальностей вузов. Оно также может быть полезным лицам, готовящимся самостоятельно проводить астрофотометрические наблюдения.

Данный текст основан на издании 1997 г.

<http://www.sai.msu.ru/>

<http://www.astronet.ru/>

“Воздушная масса”

Плоскопараллельная и сферически-симметричная модели атмосферы:

3.2. Воздушная масса

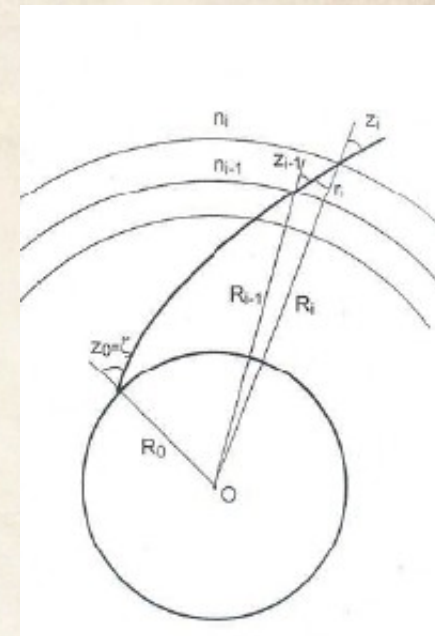
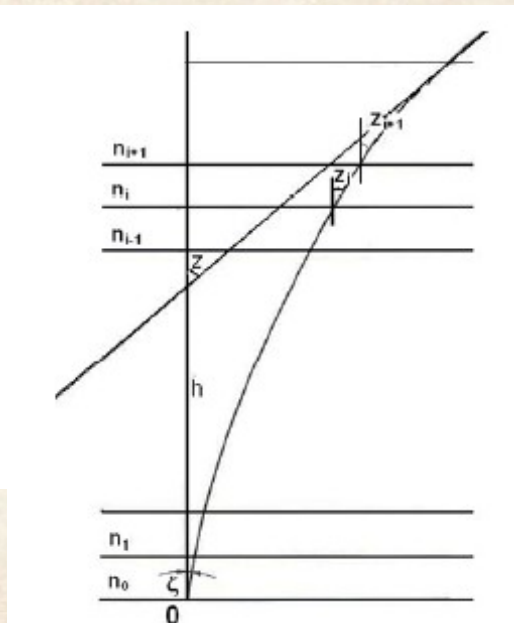
Монохроматический поток лучистой энергии от светила при его прохождении через атмосферу может быть записан в виде:

$$S_\lambda = S_{0\lambda} \cdot e^{-\int_0^\infty k_\lambda \cdot \rho \cdot ds}$$

Здесь $S_{0\lambda}$ - поток за пределами атмосферы, k_λ - массовый коэффициент ослабления радиации, ρ - плотность воздуха, ds - элемент пути луча. Величину

$$\int_0^\infty k_\lambda \cdot \rho \cdot ds$$

обычно называют **оптической массой атмосферы** для луча с длиной волны λ . В актинометрии и в астрономии массу атмосферы



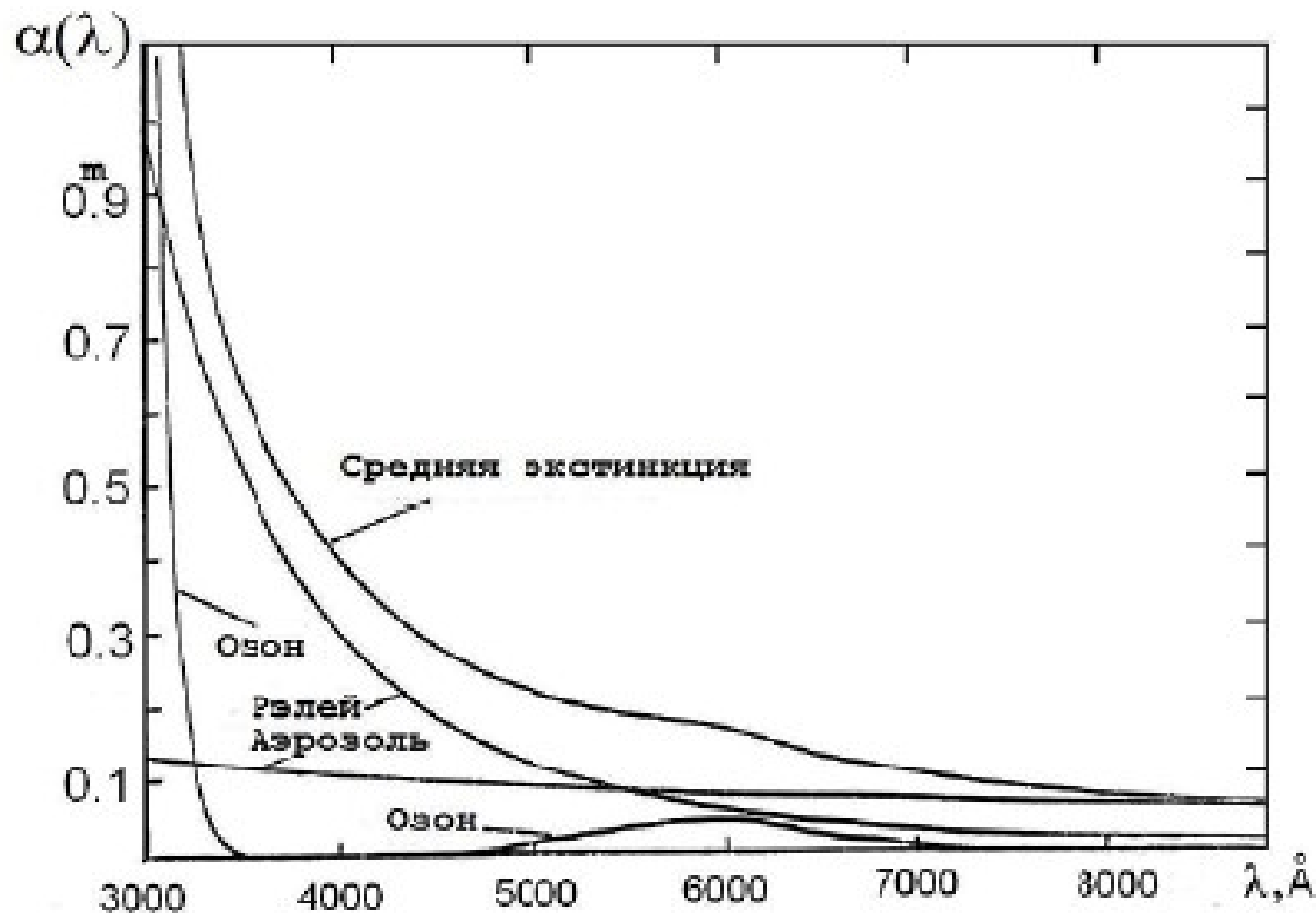
в астрономии массу атмосферы понимают как безразмерную величину, представляющую отношение оптической массы в направлении на светило к оптической массе в направлении вертикали....

В первом приближении, принимая атмосферу плоскопараллельной и пренебрегая рефракцией: $F(z) = \sec z$

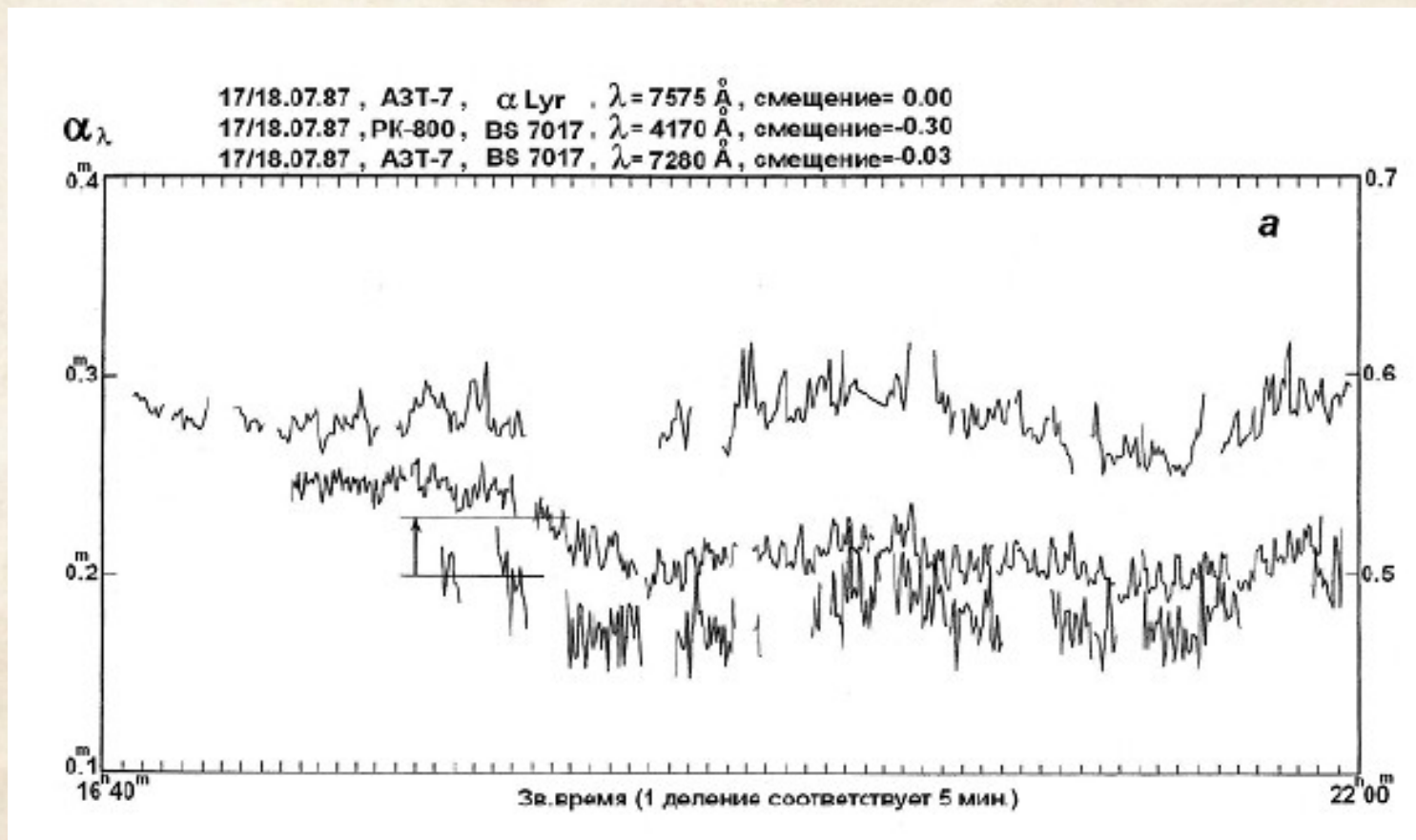
Бурнашев и, Бурнашева (2016)

Кривая пропускания атмосферы

$$(m_\lambda)_{obs} = m_\lambda + \frac{a(\lambda)}{\cos z}$$



Изменения в течение ночи



Часто можем положить, что форма кривой $a(\lambda)$ не меняется

$$(m_{\lambda})_{obs} = m_{\lambda} + \frac{a(\lambda)}{\cos z}$$

Имея минимум два стандарта на разных z - можем получить требуемую кривую

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ В САО АН СССР В 1974—1976 гг.

Т. А. Карташева, Н. М. Чунакова

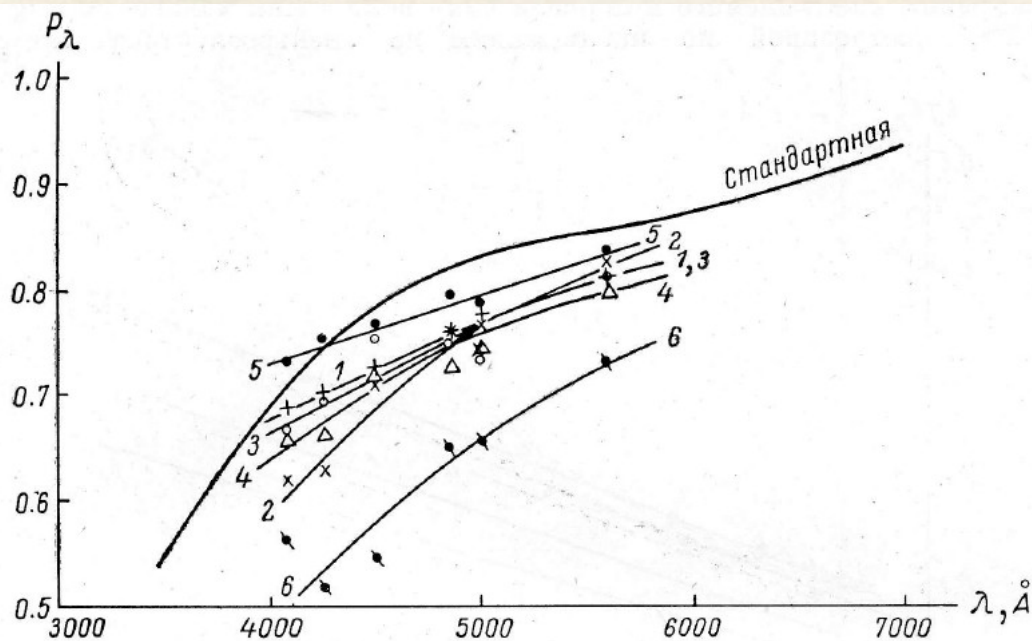


Рис. 3. Изменение коэффициента прозрачности с длиной волны для различных сезонов 1974—1976 гг. (интерференционные фильтры).

1 — зима; 2 — весна; 3 — лето; 4 — осень; 5 — 15—16 II 1976; 6 — 12—13 IX 1976.

Карташева, Чунакова, 1978
Астрофиз. ис- след. (Известия
САО) 10, 44

Сезонные вариации в САО

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ В САО АН СССР В 1974—1976 гг.

Т. А. Карташева, Н. М. Чунакова

$$(m_\lambda)_{obs} = m_\lambda + \frac{a(\lambda)}{\cos z}$$

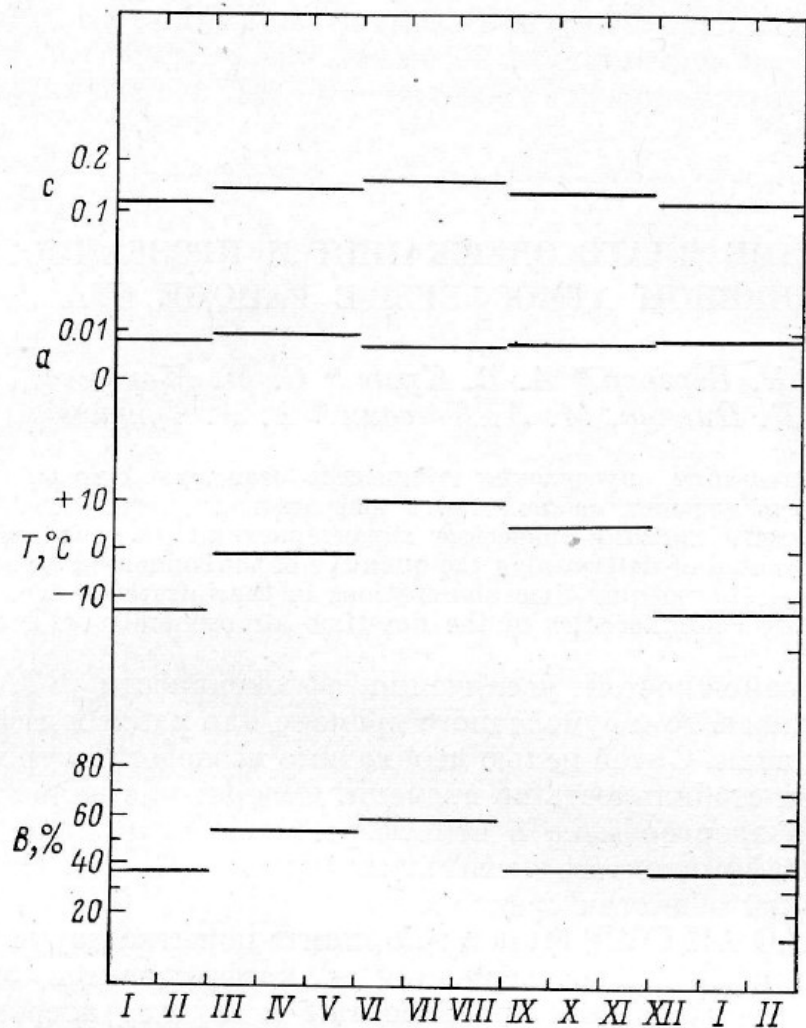



Рис. 5. Сезонные изменения коэффициентов a , c , температуры и влажности воздуха.

$$\tau(\lambda) = a\lambda^{-4} + c.$$

Сезонные вариации в САО

ESO: RA Ordered List of Spectrophotometric Standards



European Southern Observatory

Public Science User Portal

Observing Tools and Services > Standard Stars Catalogues > Optical and UV Spectrophotometric Standard Stars > RA Ordered List of Spectrophotometric Standards

Science Users Information

- Observing Facilities
- Future Facilities and Development
- Observing with ESO Telescopes
- Policies and Procedures
- Telescope Time Allocation
- Phase 1 Proposals
- Phase 2 Preparation
- Phase 3
- Public Surveys
- Observing Tools and Services**
- ESO ETC's
- Archives and Catalogues
- Calendars and Calculators
- Weather Images
- Astroclimatology

RA Ordered List of Spectrophotometric Standards

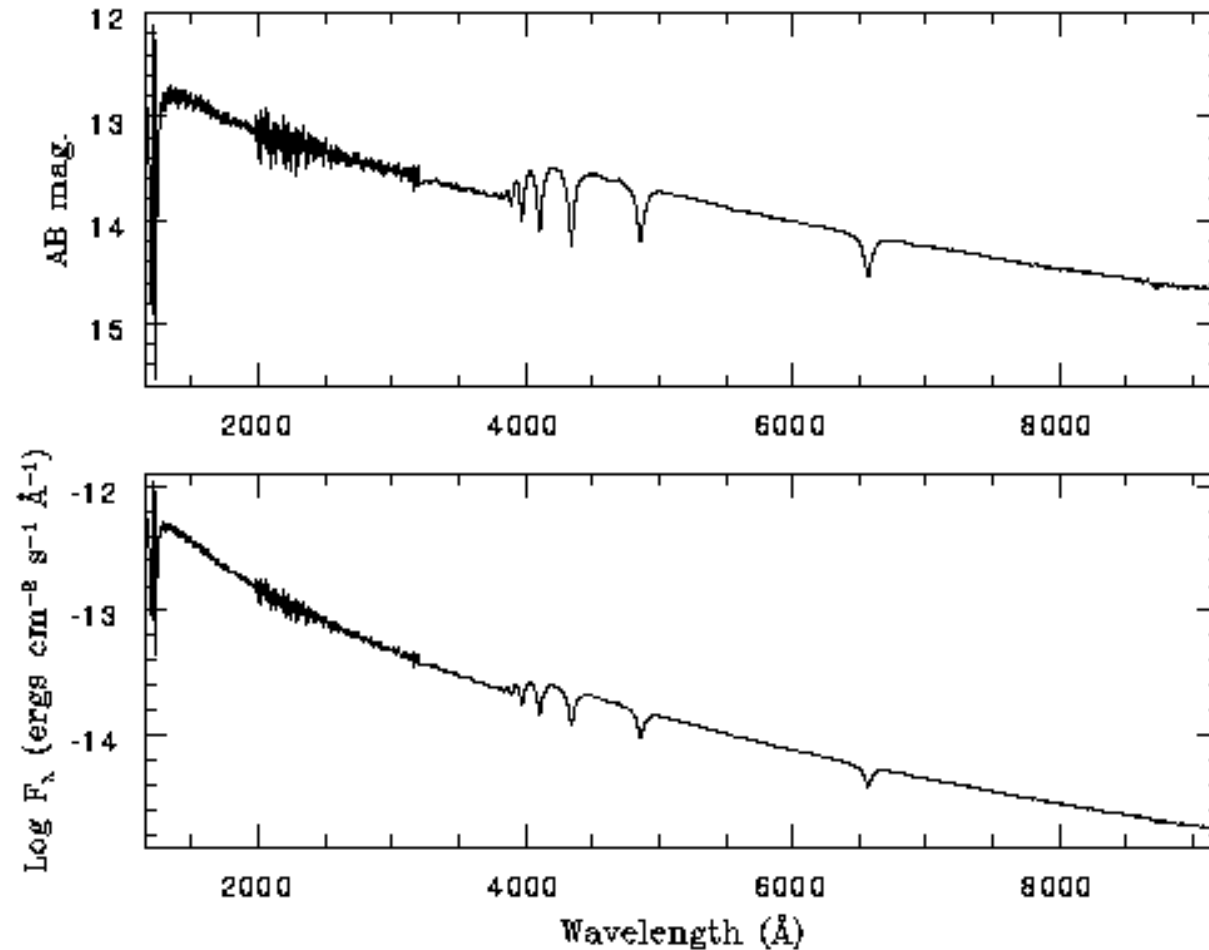
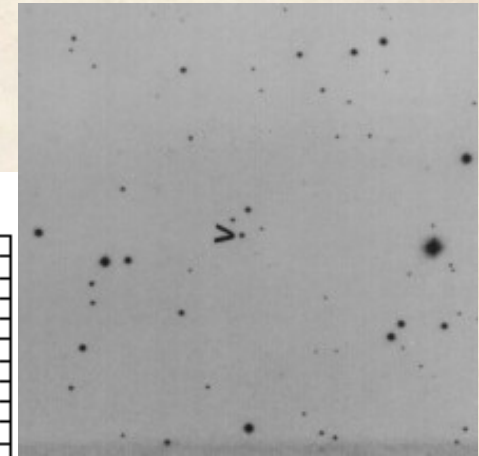
Star Name	RA (2000)	Dec	V mag.	Spec type	Note
	h m s	d ' ''			
HR9087	00 01 49.42	-03 01 39.0	5.12	B7III	
G158-100	00 33 54.32	-12 07 57.1	14.89	dG-K	
HR153	00 36 58.30	+53 53 48.9	3.66	B2IV	
CD-34d241	00 41 46.92	-33 39 08.5	11.23	F	†
BPM16274	00 50 03.18	-52 08 17.4	14.20	DA2	Mod.
HR1000	01 54 40.60	07 00 00.0	11.50	G	

ESO: RA Ordered List of Spectrophotometric Standards

Hz 2

$\alpha(2000) = 04\text{h } 12\text{m } 43.51\text{s}$, $\delta(2000) = +11\text{d } 51' 50.4''$

$V = 13.88$, $B-V = -0.09$, Spectral type: DA3

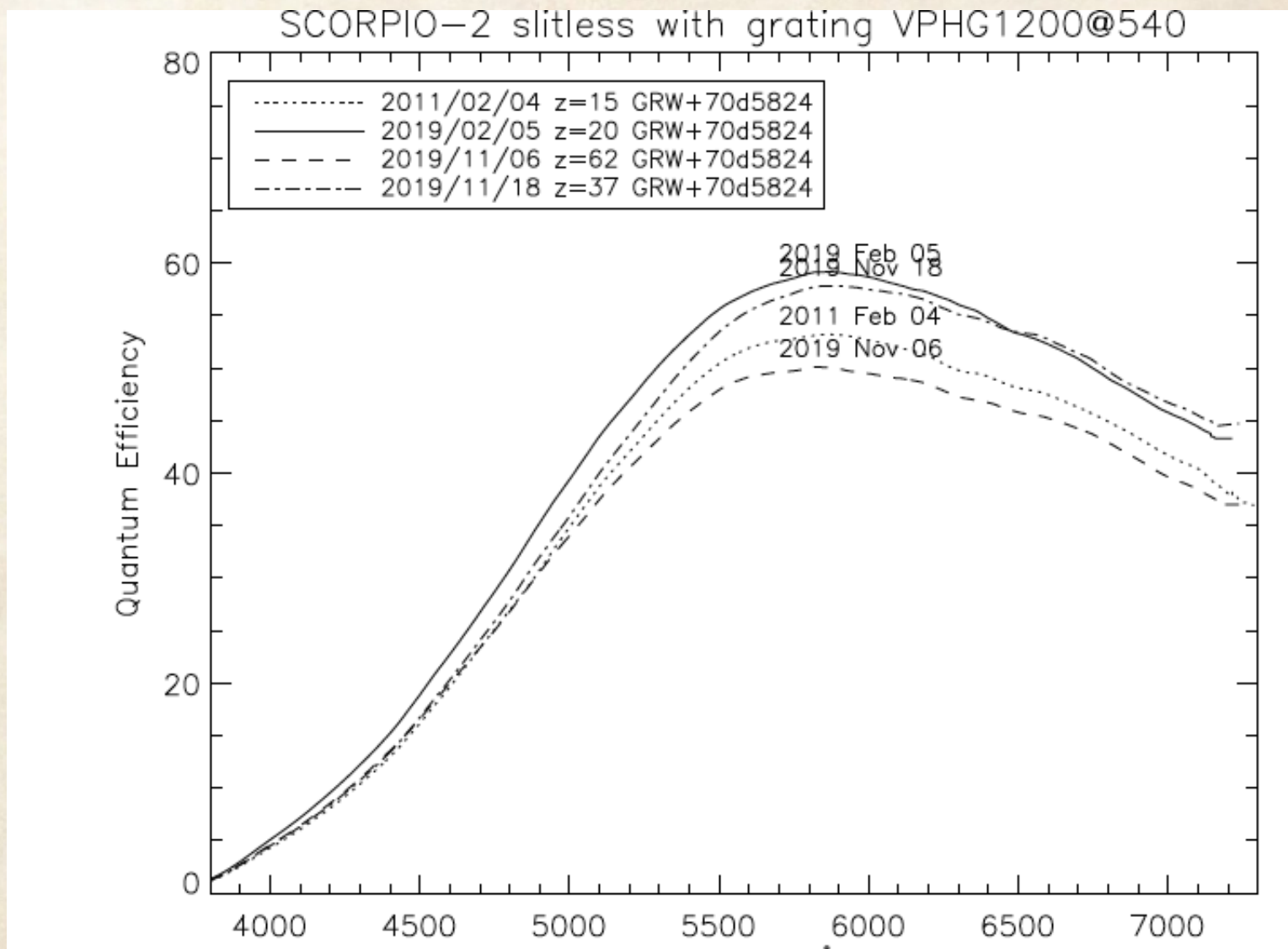


Проблема ширины щели

Slit = 7"

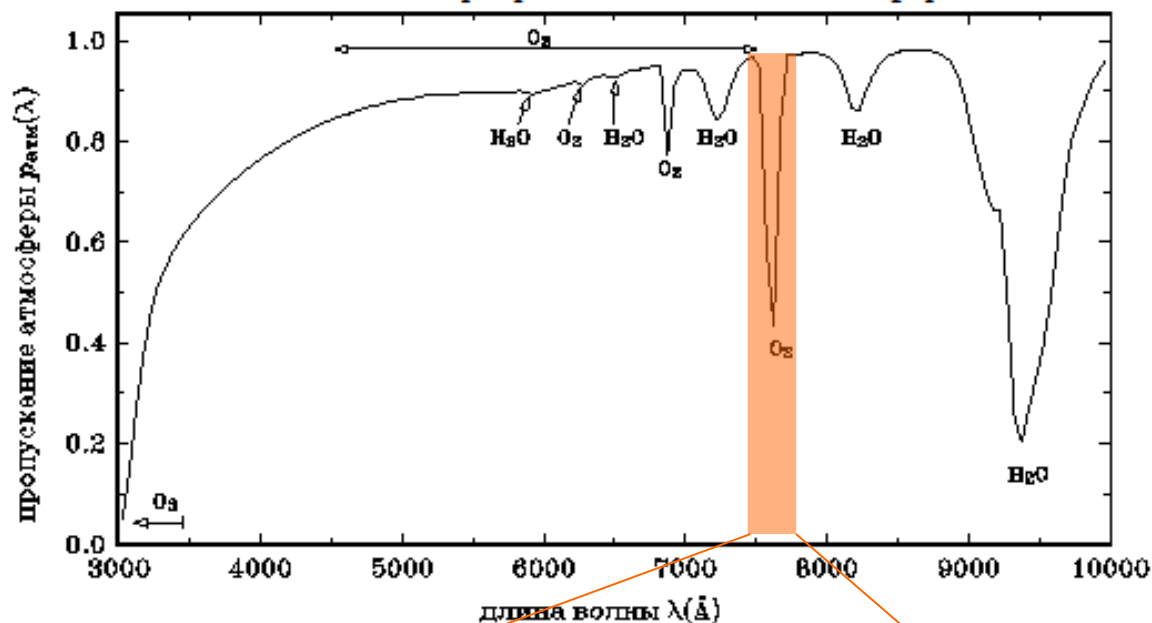
Slit = 1"

Спектральный отклик прибора в терминах QE



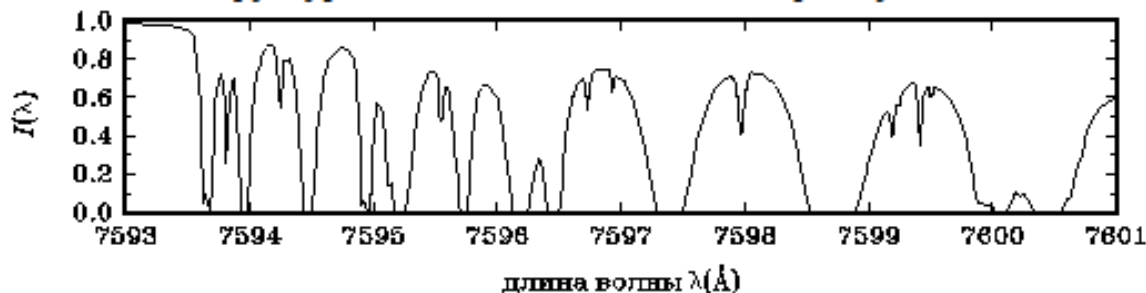
Атмосферные полосы поглощения.

Рис. 4.13: Сводная зависимость прозрачности чистой атмосферы от длины волны

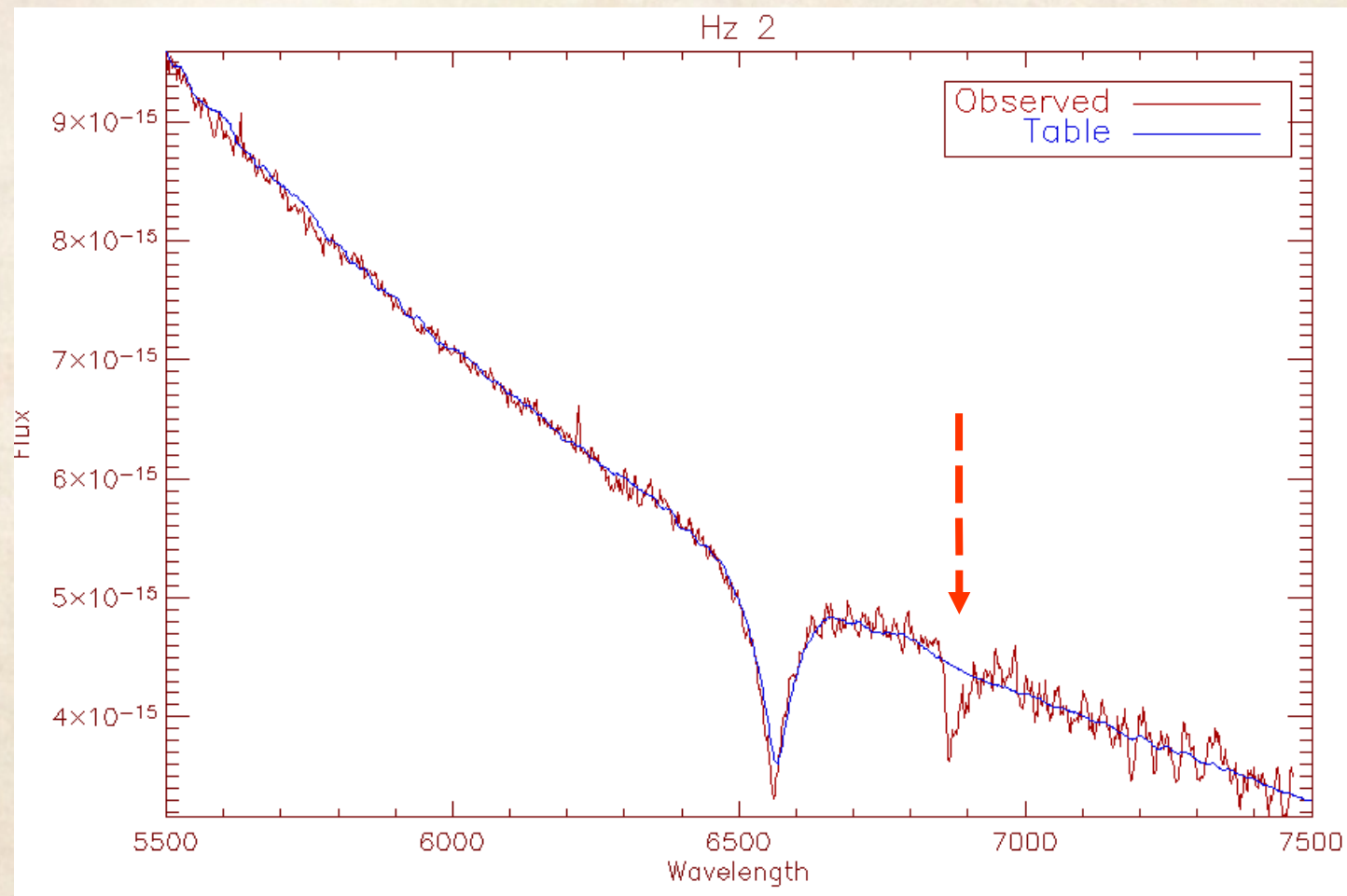


Полосы поглощения молекулярного кислорода и воды могут создать проблему для спектрофотометрии в красной части спектра

Рис.: Структура полосы поглощения кислорода у $\lambda 7600\text{Å}$



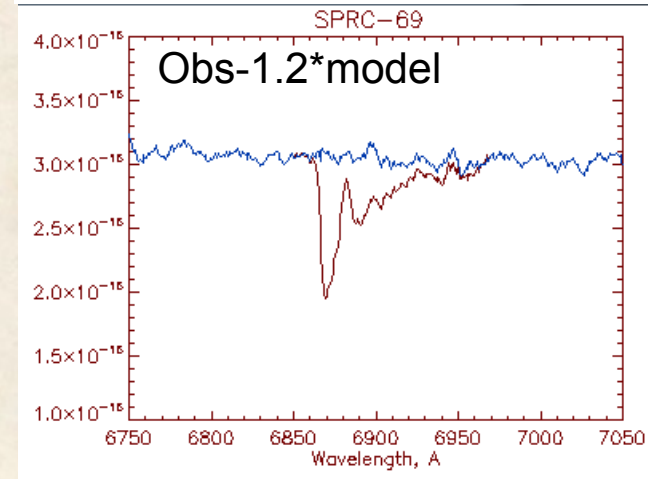
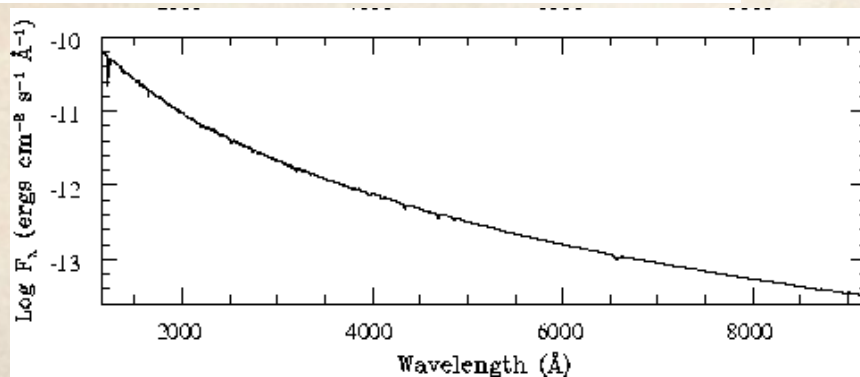
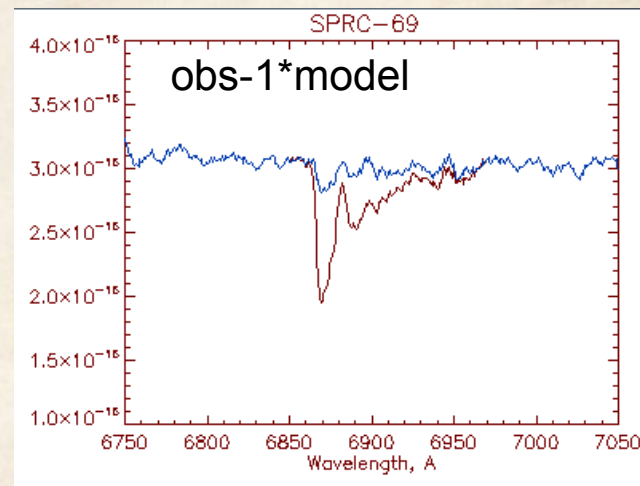
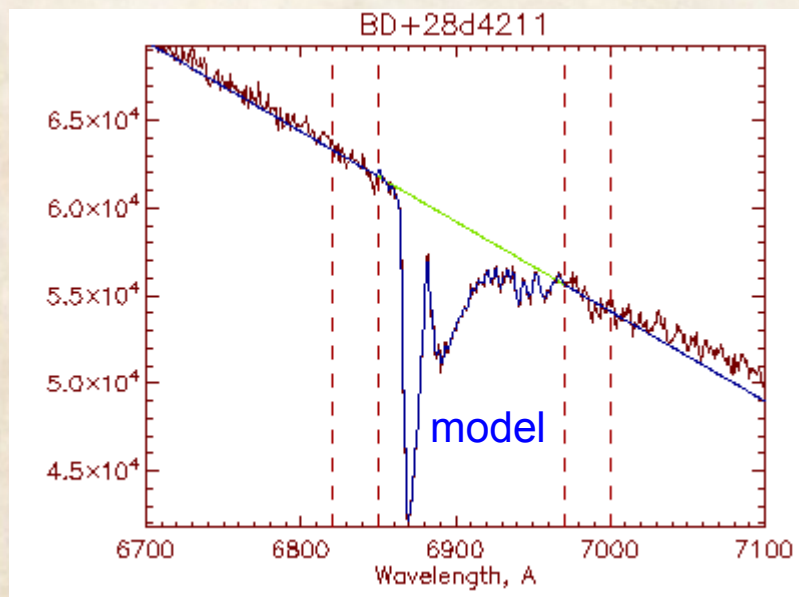
Атмосферные полосы поглощения.



Полосы поглощения нельзя убрать вычитанием неба – надо строить модель по звездам (желательно снятым на том же зенитном расстоянии) и делить на нее
➤ Теллурические стандарты (особенно важны в ближнем ИК)

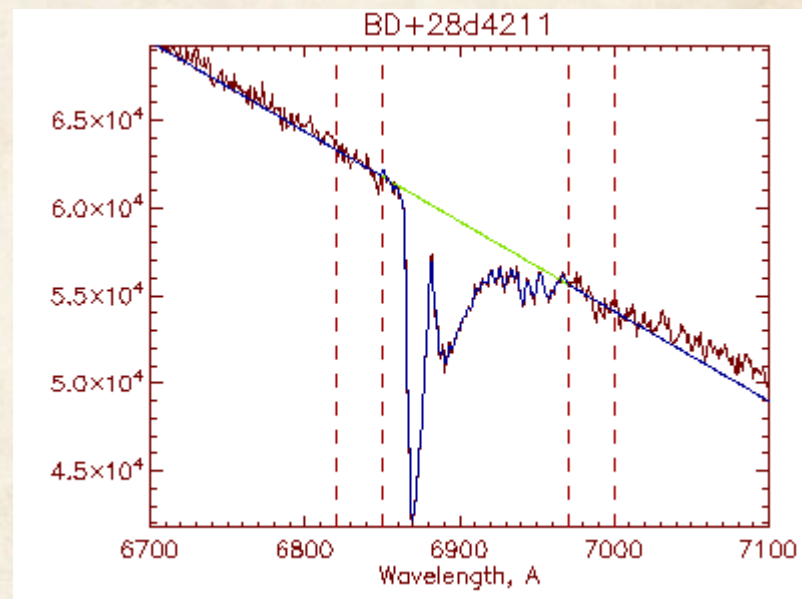
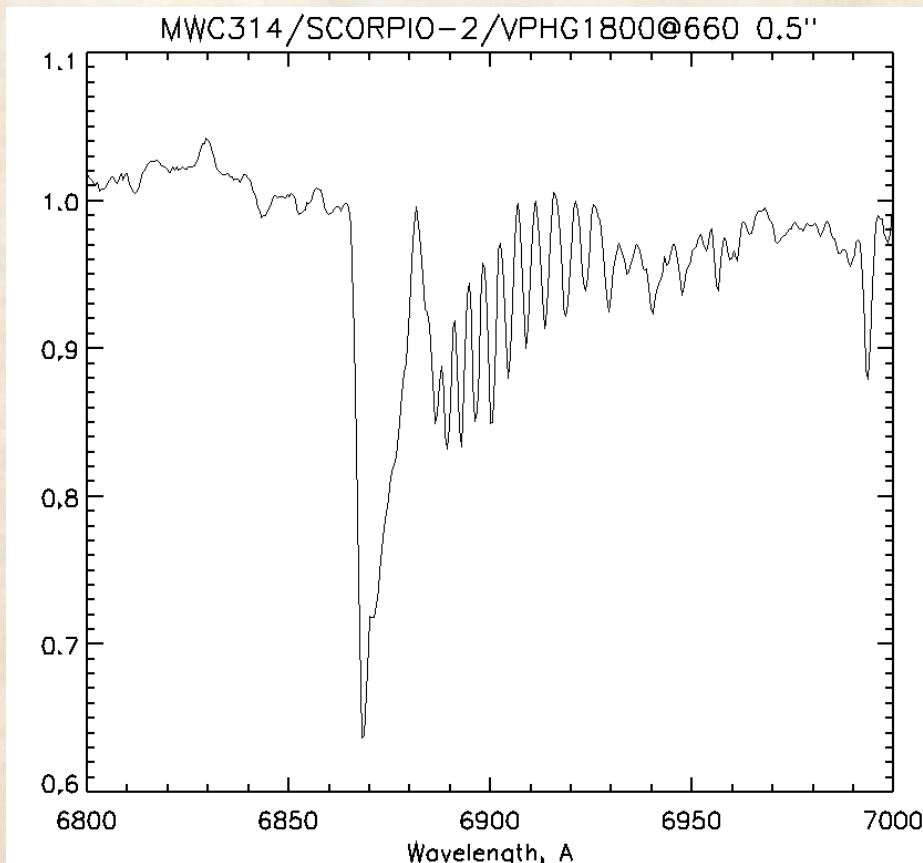
Атмосферные полосы поглощения.

На практике, часто достаточно использовать спектрофотометрический стандарт, если в нем нет линий в рассматриваемой области. Требуется лишь подобрать коэффициент для вычитания, учитывающий разницу воздушных масс



Атмосферные полосы поглощения.

Эта же полоса молекулярного кислорода с чуть более высоким разрешением ($R \sim 6000$)



Заключение

Важно, чтобы стандарт был снят с той же шириной щели, что и основной объект, а не только в бесщелевом режиме (SCORPIO) или с широкой щелью (SCORPIO-2).

НЕ НАДО ЭКОНОМИТЬ НА КАЛИБРОВКАХ!

В рассветное время надо стараться получить максимум возможных калибровочных данных: спектры рассветного неба, стандарт с различной шириной щели...

Даже если это формально не требуется заявителем сейчас, это может понадобиться при обработке архивных данных (восстановить форму LSF, вычесть атмосферные полосы, учесть потери света на щели и т.п.)