

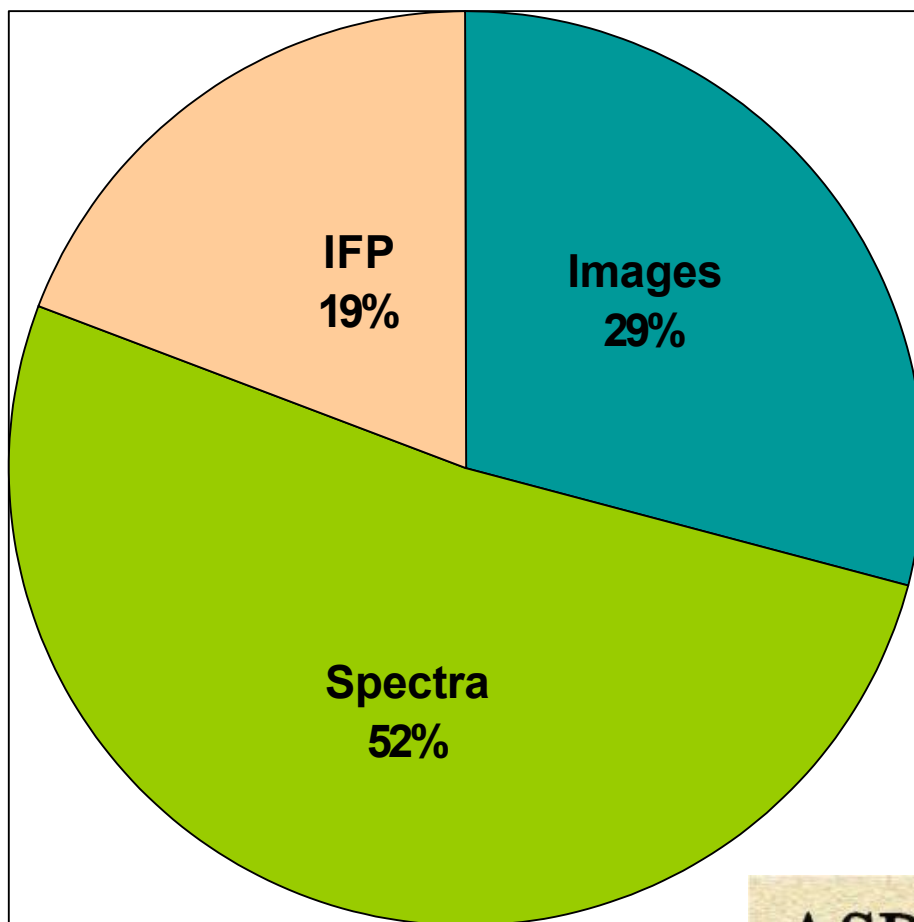
Многорезжимный фокальный редуктор телескопа БТА

Лекция II.

Теория дифракционной решетки и астрономического спектрографа. Согласование оптики телескопа и спектрографа. Объемно-фазовые голографические решетки.

Соотношение спектров и изображений на SCORPIO

**Суммарная длительность
экспозиций за период 2000-2007 гг**



Теория решетки “из учебника”

Разрешающая сила прибора, основанного на принципах интерференции света (дифракционные решетки всех видов, интерферометры):

$$R = \lambda / \delta\lambda = mN$$

Для решетки: $R = m \rho W$

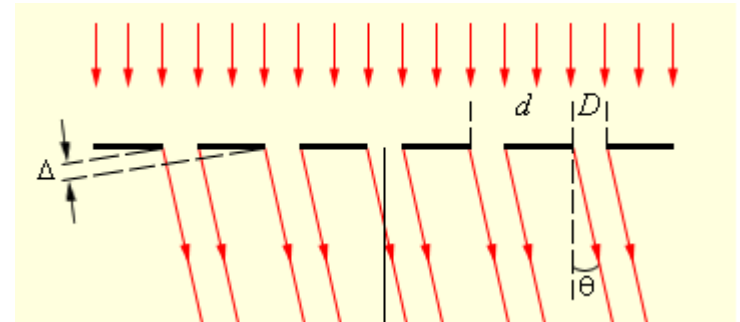
$\delta\lambda$ - FWHM инструментального контура

m – порядок интерференции

N – число интерферирующих лучей

ρ - плотность штрихов на единицу площади

W – засвеченная площадь



Но тогда достигнутое на SCORPIO разрешение $R=2600$ можно было бы получить с решеткой 600 шт/мм в пучке диаметром всего 4 мм!

В реальности же это только с VPHG1800 в пучке диаметром ~ 35 мм.

Теория решетки в астроспектроскопии

Одной решетки мало!

Есть щель, а оптика спектрографа строит ее монохроматические изображения.

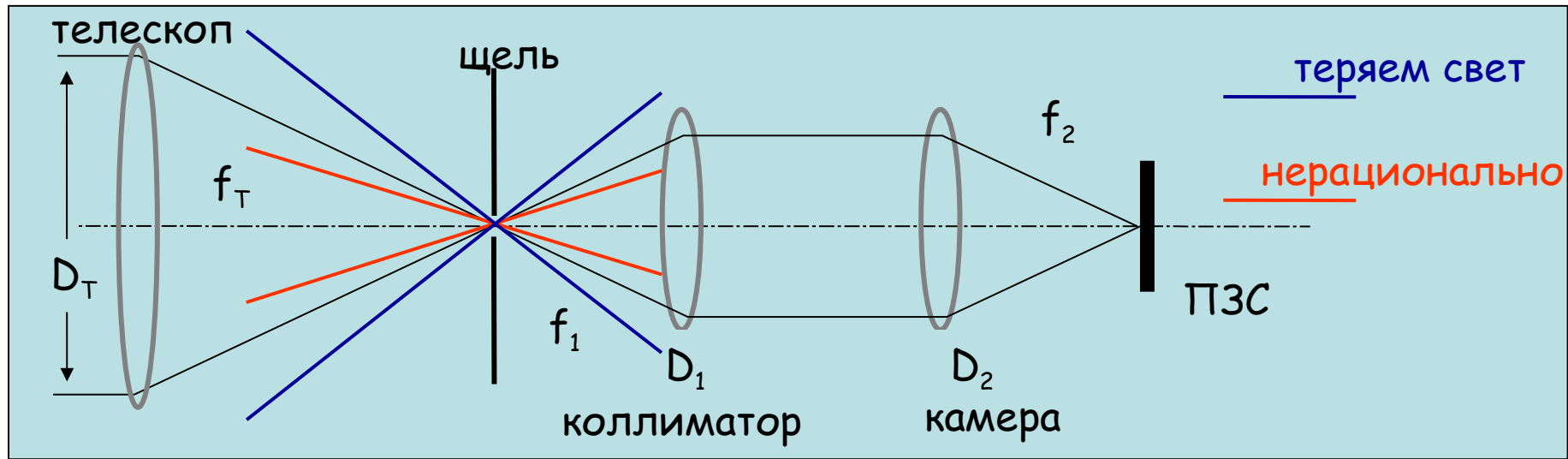
Надо:

- выделить требуемую область в наблюдаемом объекте
- создать параллельный пучок и построить спектр на детекторе!

Имеется:

- спектрограф (как оптическая система)
- щель
- телескоп, определяющий параметры оптики спектрографа

Согласование оптики спектрографа и телескопа



Согласование светосилы: $D_T/f_T = D_1/f_1$

Чтобы прибор работал как редуктор, необходимо: $f_2 < f_1$

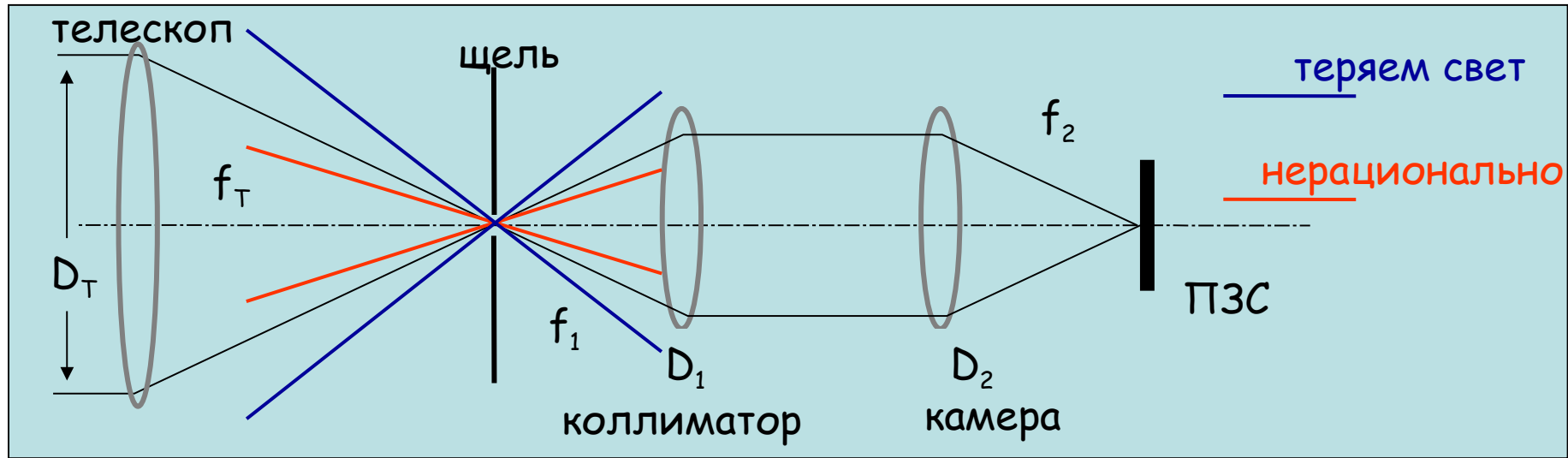
Т.е. **светосила камеры должна быть больше чем светосила телескопа**

Почему в ПФ на БТА нужна светосильная камера :

Телескоп большой – велик масштаб изображения ($1'' = 116 \mu$),
т.е. 8-10 пикселей типичной ПЗС.

Хочется уменьшить масштаб раза в 2, значит $(D_2/f_2) < (1/2)$

Согласование оптики спектрографа и телескопа



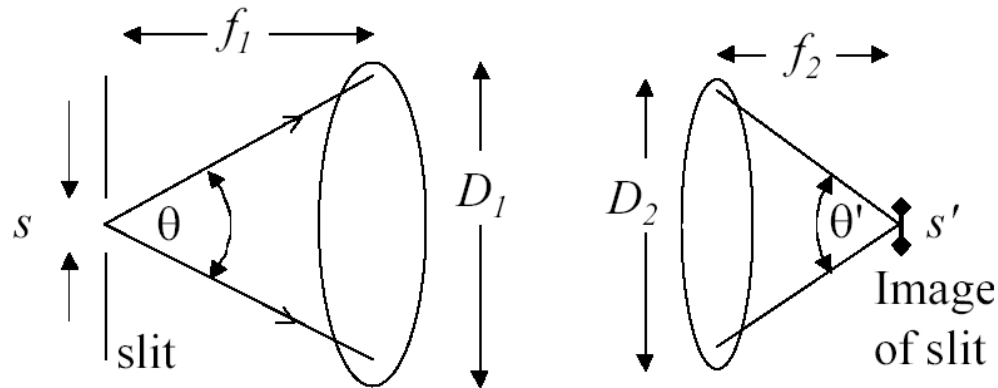
Проблемы светосильной оптики:

Аберрации растут как $(D/f)^{2-3}$

Требуется малый рабочий отрезок (от ПЗС до первой линзы камеры)

А сильно уменьшать его нельзя из конструктивных соображений (термоэмиссия от стекла к чипу ПЗС).

Спектрограф как телескопическая система



$$s' = s \frac{(f_2/D_2)}{(f_1/D_1)}$$

Спектрограф строит серию монохроматических изображений входной щели, поэтому для нас важно только то, что решетка разводит лучи с разными длинами волн, т.е. обладает дисперсией:

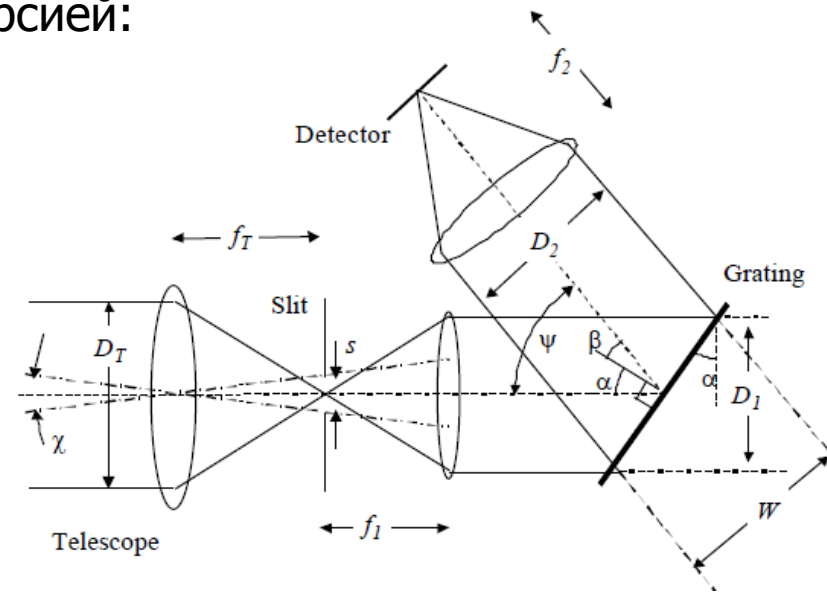
Теория решетки: $m\rho\lambda = \sin\alpha + \sin\beta$

Угловая дисперсия: $\frac{d\lambda}{d\beta} = \frac{\cos\beta}{m\rho}$

Линейная дисперсия: $\frac{d\lambda}{dx} = \frac{d\lambda}{d\beta} \frac{d\beta}{dx} = \frac{\cos\beta}{m\rho f_2}$

Реальное разрешение спектрографа (в длинах волн):

$$\Delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{dx}\right) s'$$



Спектрограф как телескопическая система

$$\Delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{dx}\right) s' = \frac{\cos\beta}{m\rho f_2} s \left(\frac{F_2}{F_1}\right) = \frac{s D_1 \cos\beta}{m\rho D_2 f_1} \stackrel{=W}{=} \frac{s}{m\rho F_1 W}$$

тогда спектральное разрешение:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{m\rho W \lambda f_1}{s D_1}$$

Удобнее ширину щели выразить в угловой мере :

$$\chi = \frac{s}{f_T}$$

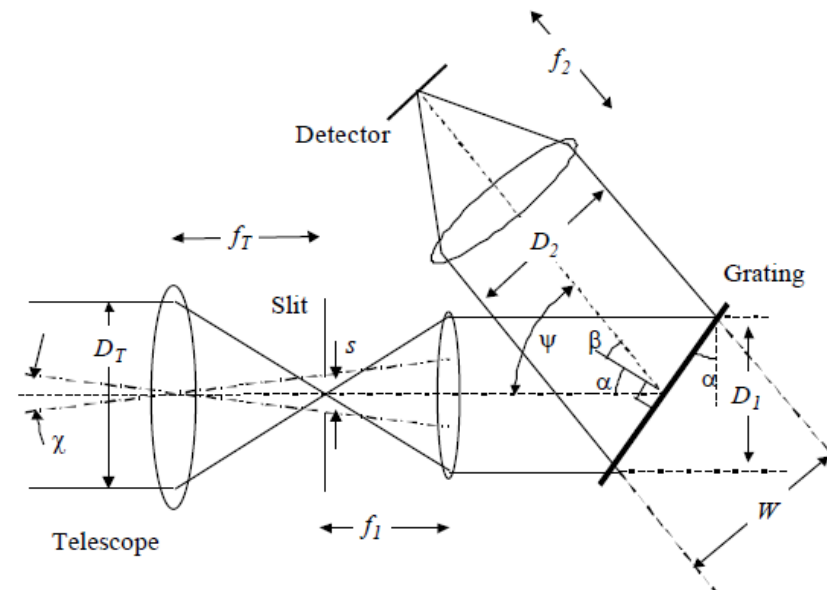
Вспомнив про согласование:

$$\frac{D_1}{f_1} = \frac{D_T}{f_T}$$

получаем:

$$R = \frac{m\rho W \lambda}{\chi D_T} = R_{theor} \frac{\lambda}{\chi D_T}$$

Реально разрешение спектрографа зависит еще и от шириной щели и от диаметра телескопа!



Различие между теоретическим и реальным разрешением

$$R = R_{theor} \frac{\lambda}{\chi D_T} \longrightarrow R(BTA, \lambda = 6000\text{\AA}) \approx R_{theor} \frac{1}{48 \chi('')}$$

То, что дифракционная решетка сама обладает спектральным разрешением для астрономического спектрографа значения не имеет! Нам важно только то, что она обладает дисперсией.

А спектральное разрешение задается шириной щели.

Теоретический предел достигается только при бесконечно узкой щели. В реальном же спектрографе разрешение может быть в десятки раз меньше, причем чем больше диаметр телескопа, тем больше проблем с достижением одного и того же спектрального разрешения.

SCORPIO в Бюракане (2.6 м телескоп) с теми же решетками дает в два раза лучшее разрешение чем на БТА (с той же щелью)

Выбор ширины щели (I)

Итак, чем уже щель, тем лучше спектральное разрешение. Но почему мы не можем сильно сужать щель?

Предельная ширина щели определяется характеристиками нашего детектора. Самая узкая щель, при которой мы еще не теряем спектральную информацию называется нормальной.

Теорема Котельникова (Найквиста) в вольном изложении применительно к нашему случаю:

Оптимальная дискретизация составляет $n_0=2$ элемента детектора на ширину (FWHM) инструментального контура спектрографа.

теорема Котельникова (частота Найквиста)

Справочник по математике
для научных работников и
инженеров. Корн Г., Корн Т.

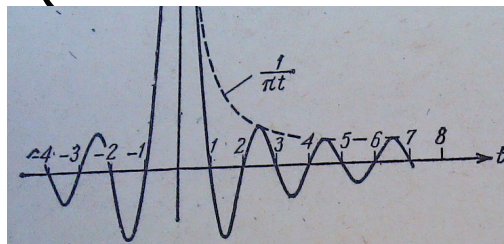


Рис. 18.11-2. График функции
 $\text{sinc } t = \frac{\sin \pi t}{\pi t}$.

18.11-2. Процесс с ограниченным спектром. Теорема Котельникова.

(а) Процесс $x(t)$ имеет ограниченный спектр или ограниченную полосу частот, если его преобразование Фурье $X_F(i\omega)$ (п. 4.11-3) равно нулю при $|\omega| > 2\pi B$; число B называется шириной спектра процесса $x(t)$ и измеряется в герцах, если t измеряется в секундах.

Теорема В. А. Котельникова. Каждый процесс $x(t)$

с ограниченным спектром может быть представлен в виде

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t_k) \frac{\sin 2\pi B(t-t_k)}{2\pi B(t-t_k)}, \quad (t_k = k/(2B), k=0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

(18.11-11)

В оригинальной статье
(Котельников, 1933) было 7
связанных теорем!

Функции, состоящие из частот от 0 до f_1

Теорема I. Любую функцию $F(t)$, состоящую из частот от 0 до f_1 периодов в секунду, можно представить рядом

$$F(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} D_k \frac{\sin \omega_1 [t - k/(2f_1)]}{t - k/(2f_1)}, \quad (1)$$

где k — целое число; $\omega_1 = 2\pi f_1$; D_k — постоянные, зависящие от $F(t)$.

И наоборот, любая функция $F(t)$, представленная рядом (1), состоит лишь из частот от 0 до f_1 периодов в секунду.

В нашем случае формулируем так:

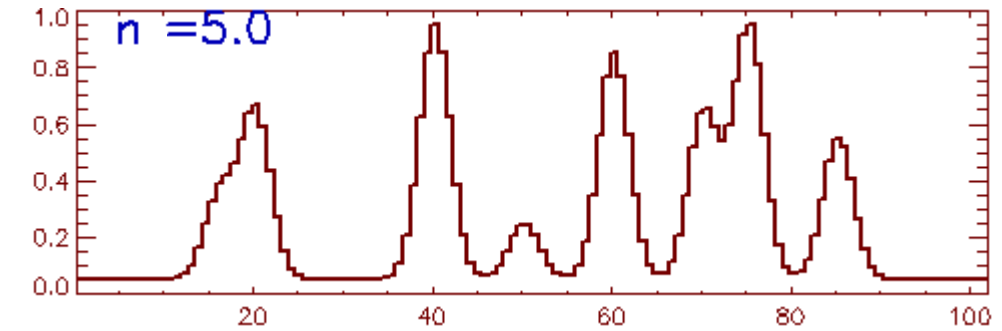
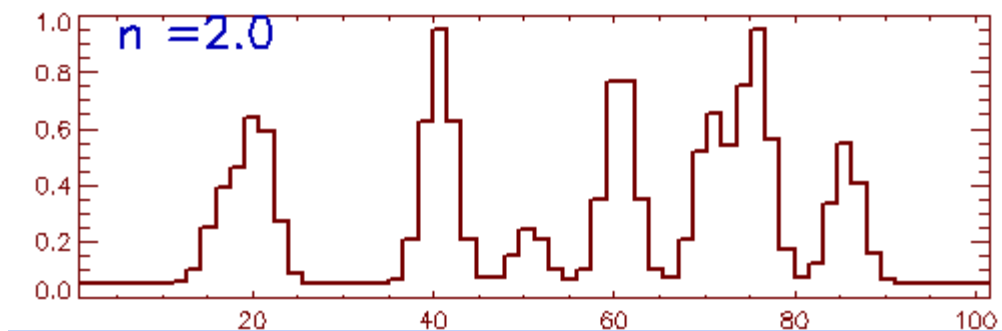
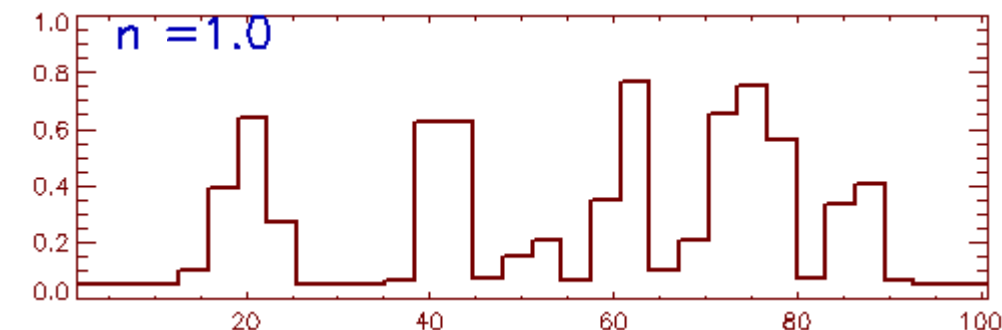
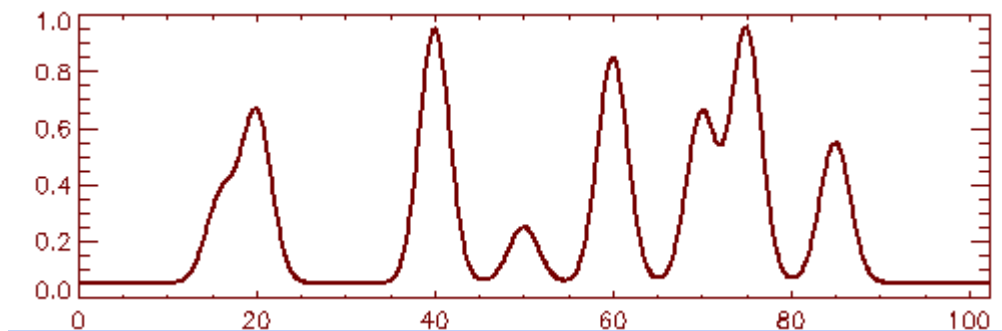
Оптимальная дискретизация составляет $n_0=2$ элемента детектора на ширину (FWHM) инструментального контура спектрографа.

Дискретизация

$n < n_0$ – теряем спектральную информацию
(можем измерить скорости, но не FWHM)

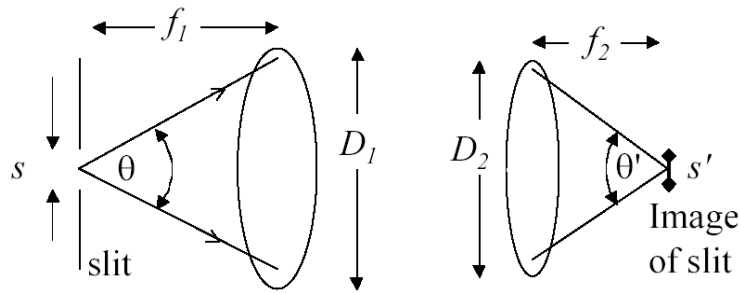
$n = n_0$ – оптимально
(на практике $n_0 = 2.5-3$)

$n > n_0$ – избыточная дискретизация. Иногда полезно, но жалко неэффективно использовать детектор



Выбор ширины щели (II)

На практике, "нормальная щель" – это щель, FWHM которой (в проекции на детектор) равняется 2.5-3 пикселя



$$s = s' \frac{(D_2/f_2)}{(D_1/f_1)} = (2.5 \div 3) \frac{(D_2/f_2)}{(D_T/f_T)} [px]$$

Ширина "нормальной щели" – пропорциональна светосиле камеры, а чем светосильнее камера – тем больше с ней проблем.

С другой стороны, чем шире щель (в угловой мере), тем лучше у **спектрографа широкощельность**.

Оптимальная широкощельность – когда ширина нормальной щели равняется пространственному разрешению на телескопе (в наших условиях это размер звездных изображений – seeing)

Нормальная щель на SCORPIO

У камеры SCORPIO: $D_2/f_2 = F/1.8$, тогда ширина нормальной щели составляет всего $75-90\mu = 0.65-0.75$ угловой секунды, что в два раза меньше характерных размеров звездных изображений.

Один из главных недостатков SCORPIO – плохая широкощельность. Вызвано это как техническими сложностями с изготовлением светосильной камеры, так и необходимостью найти компромисс для работы в нескольких режимах наблюдений.

Первопричина – относительно большая светосила при наблюдениях в первичном фокусе БТА ($f/4$).

Реальная щель на SCORPIO

SCORPIO укомплектован набором щелей: 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2"

SCORPIO-2: щель переменной ширины: 0.5-10"

В большинстве наблюдений мы устанавливаем щель шириной 1", что заметно шире нормальной, но жалко терять свет.

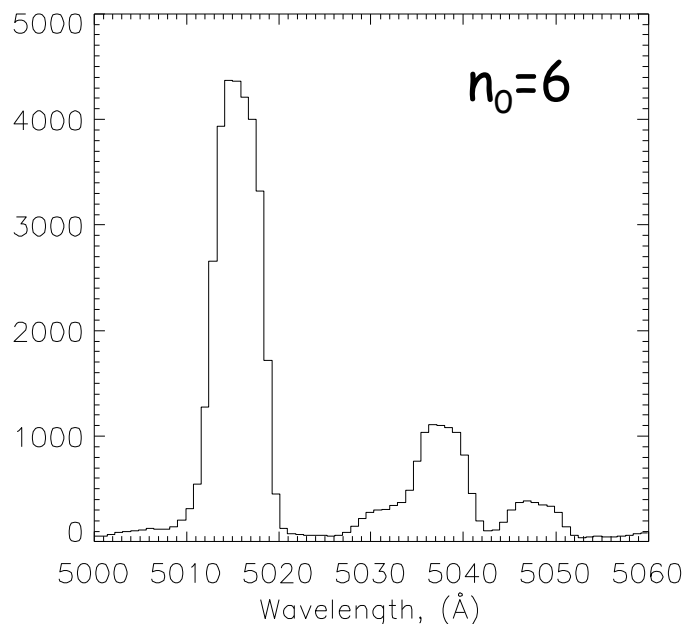
Так как в среднем $\text{seeing} > 1.5''$, то и эта щель оказывается узкой!

Проблемы столь узкой щели:

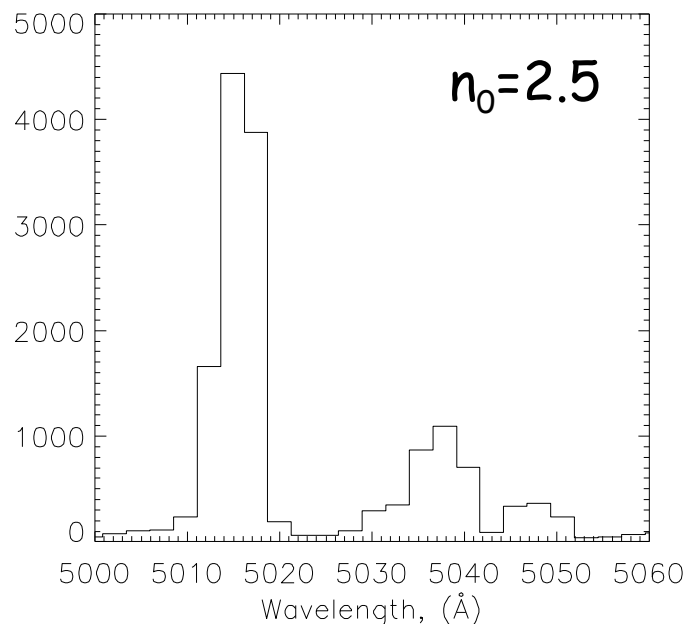
- Теряем свет от объекта (ухудшаем S/N)
- Сложно заниматься спектрофотометрией (потери света)
- Высокие требования к точности установки объектов на щель.

Еще раз о дискретизации

SCORPIO



«Обычный спектрограф»



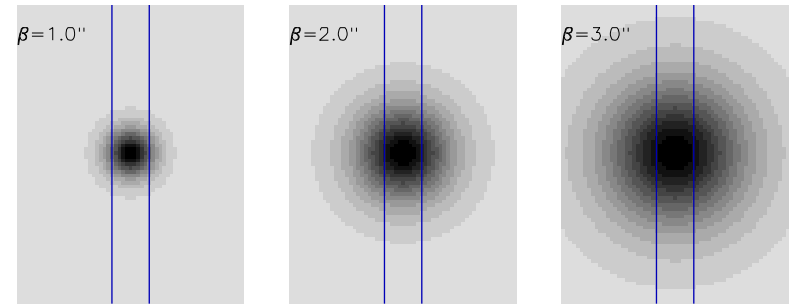
Избыточная дискретизация (oversampling) со SCORPIO (щель 1''):

Помогает при изучении формы профилей линий, и измерении дисперсии скоростей методом кросс-корреляций.

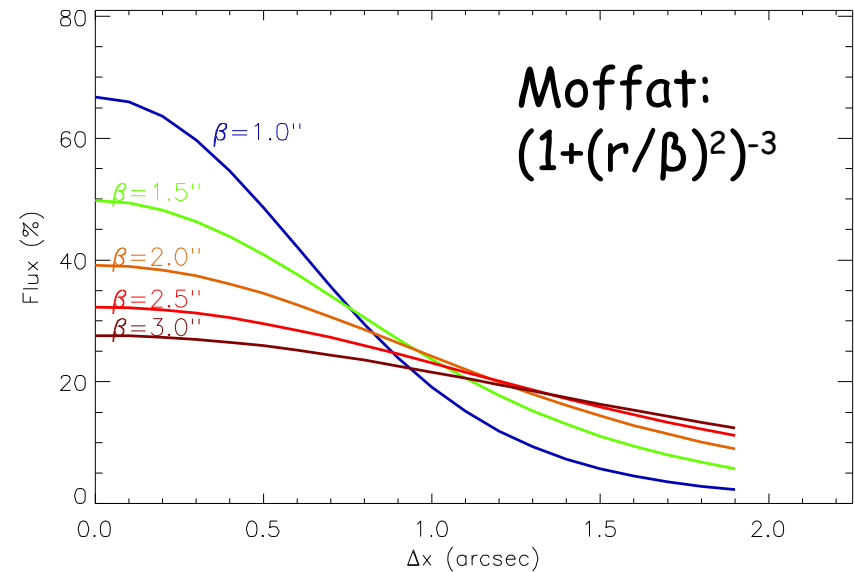
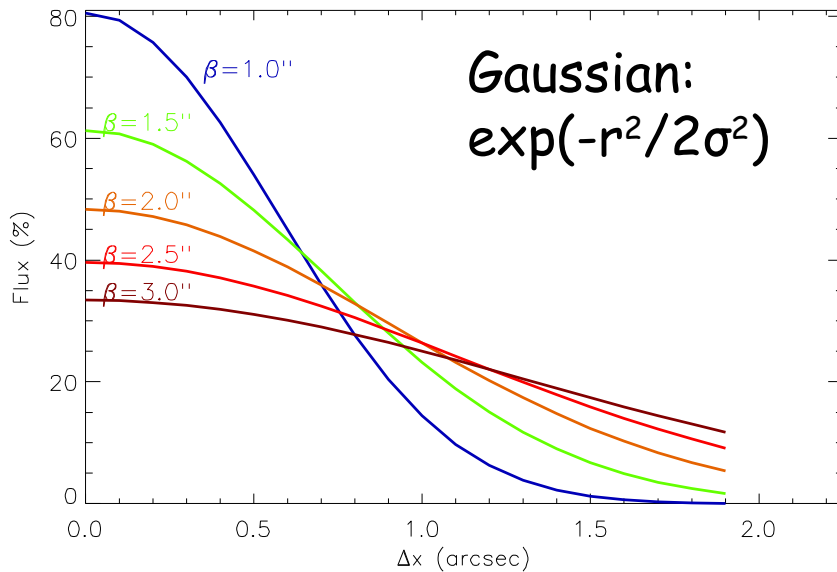
Но неэффективно используются возможности детектора, на первый взгляд линии выглядят «расфокусированными»

Потери света на щели

Поправка за щель зависит не только от качества изображений, но и от точности наведения

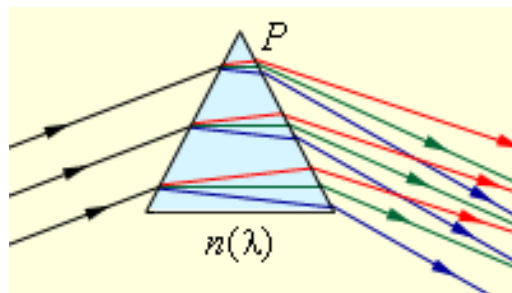


Расчет потерь света на 1'' щели для двух вариантов функций распределения:



Возможно, что лучший вариант - рассчитывать поправку интегрируя поток в наблюдаемых изображениях!

Атмосферная дисперсия

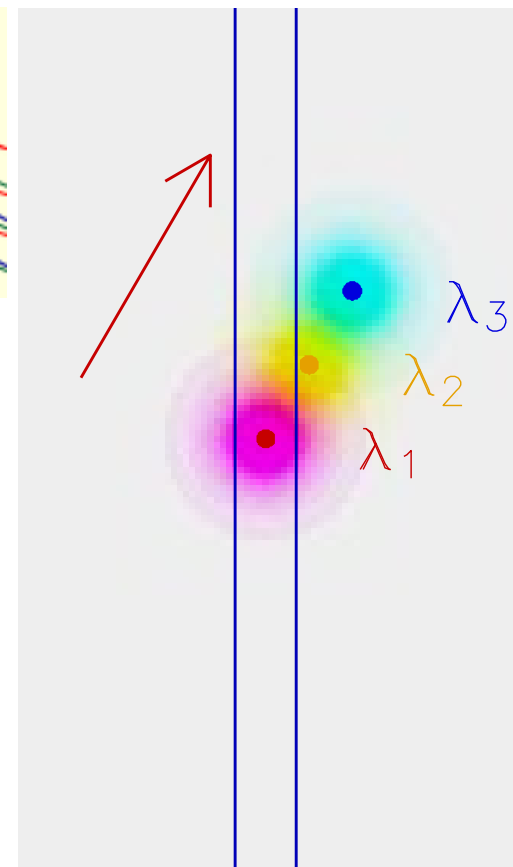


Она же дифференциальная рефракция атмосферы: изменение угла рефракции светового луча от его длины волны.

Атмосферная дисперсия и САО:

Можно непосредственно измерить с мультизрачковым спектрографом MPFS (поскольку у него нет щели).

Спекл-интерферометр БТА имеет компенсатор атмосферной дисперсии



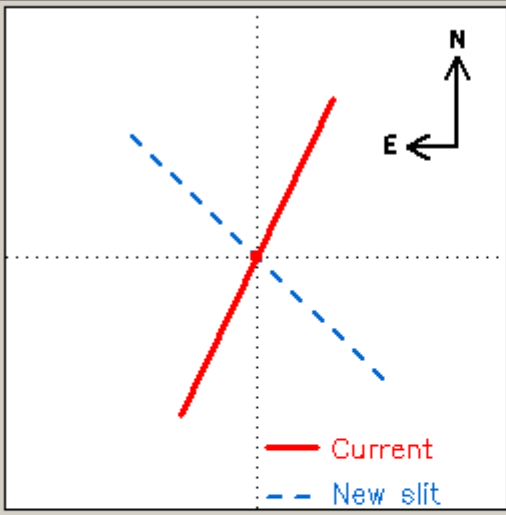
Надо стараться, чтобы щель спектрографа совпадала с направлением атмосферной дисперсии, т.е. была вертикальна.

Для SCORPIO/SCORPIO-2 это означает, что $PA(\text{table})=132^\circ$

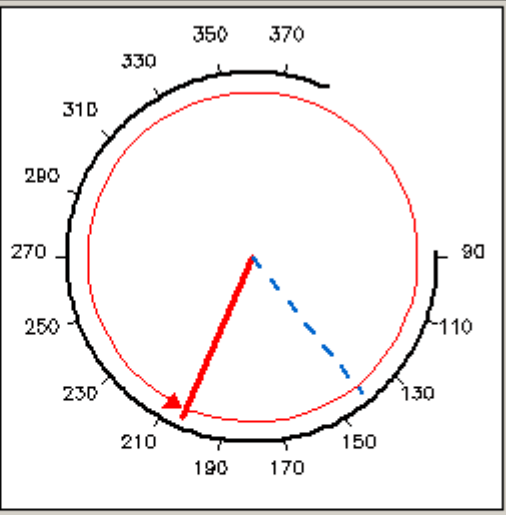
РА щели

POSITION ANGLE of the SLIT

Slit position



PF table rotation



— Current
- - - New slit

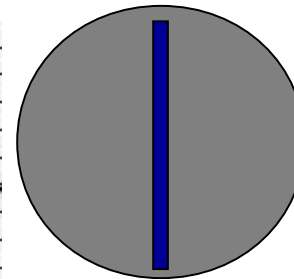
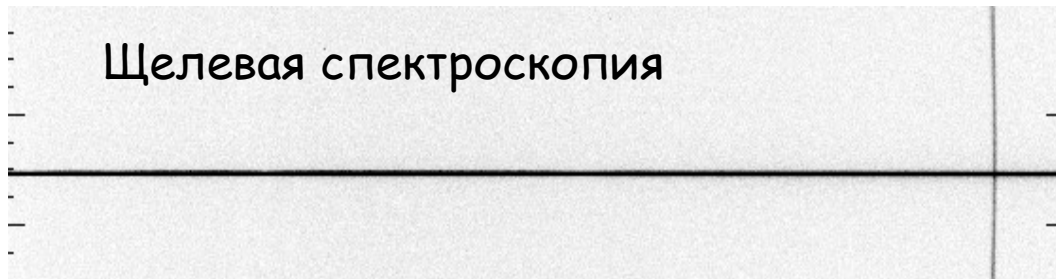
	Current	New
PA(table)	203.40	132.00
PA(slit)	154.59	225.99
Texp	>12 h	06:36

PA+180 Atm. dispersion

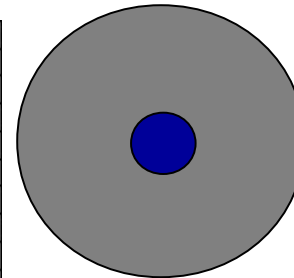
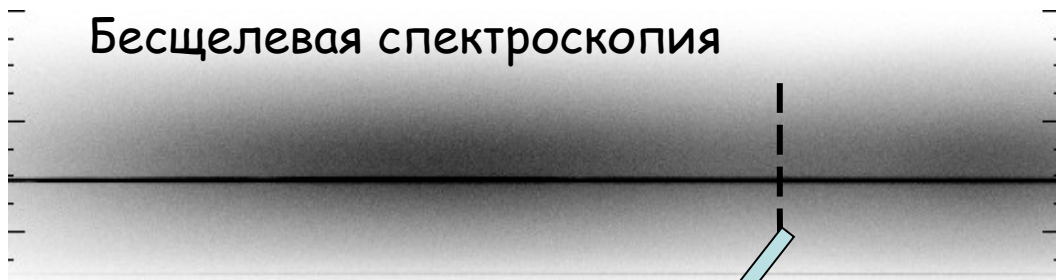
Rotation

QUIT

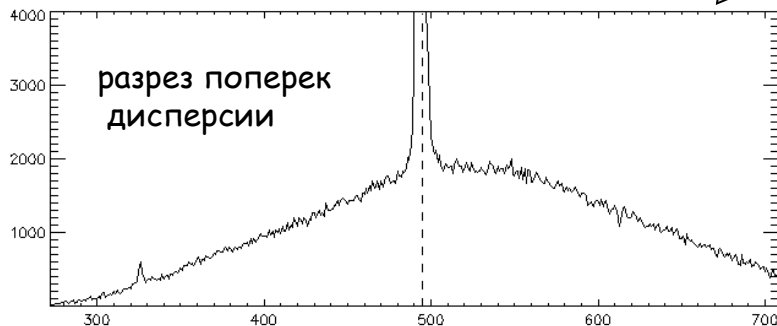
Потери на щели II: наблюдения стандартов



потери света на щели
искажения формы
спектра из-за
атмосферной дисперсии



проблема фона
ошибка калибровки по
длинам волн, изменение
спектрального
разрешения

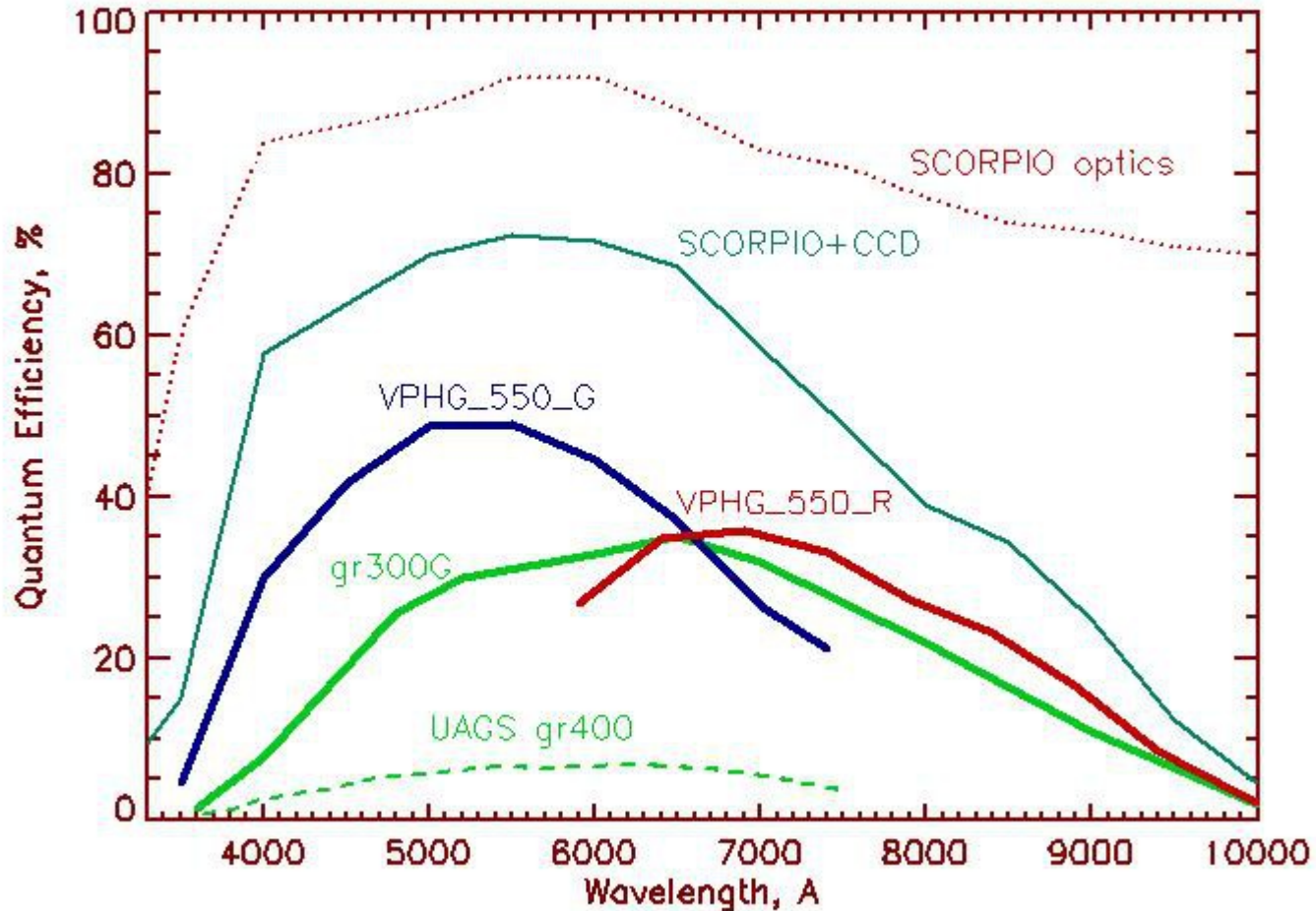


- сдвиг шкалы λ не принципиален
- проблема фона и близких объектов решается подбором «удобных» звезд (10-13^m)
- Но исправить спектр за полосы атмосферного поглощения можно только по щелевым спектрам!

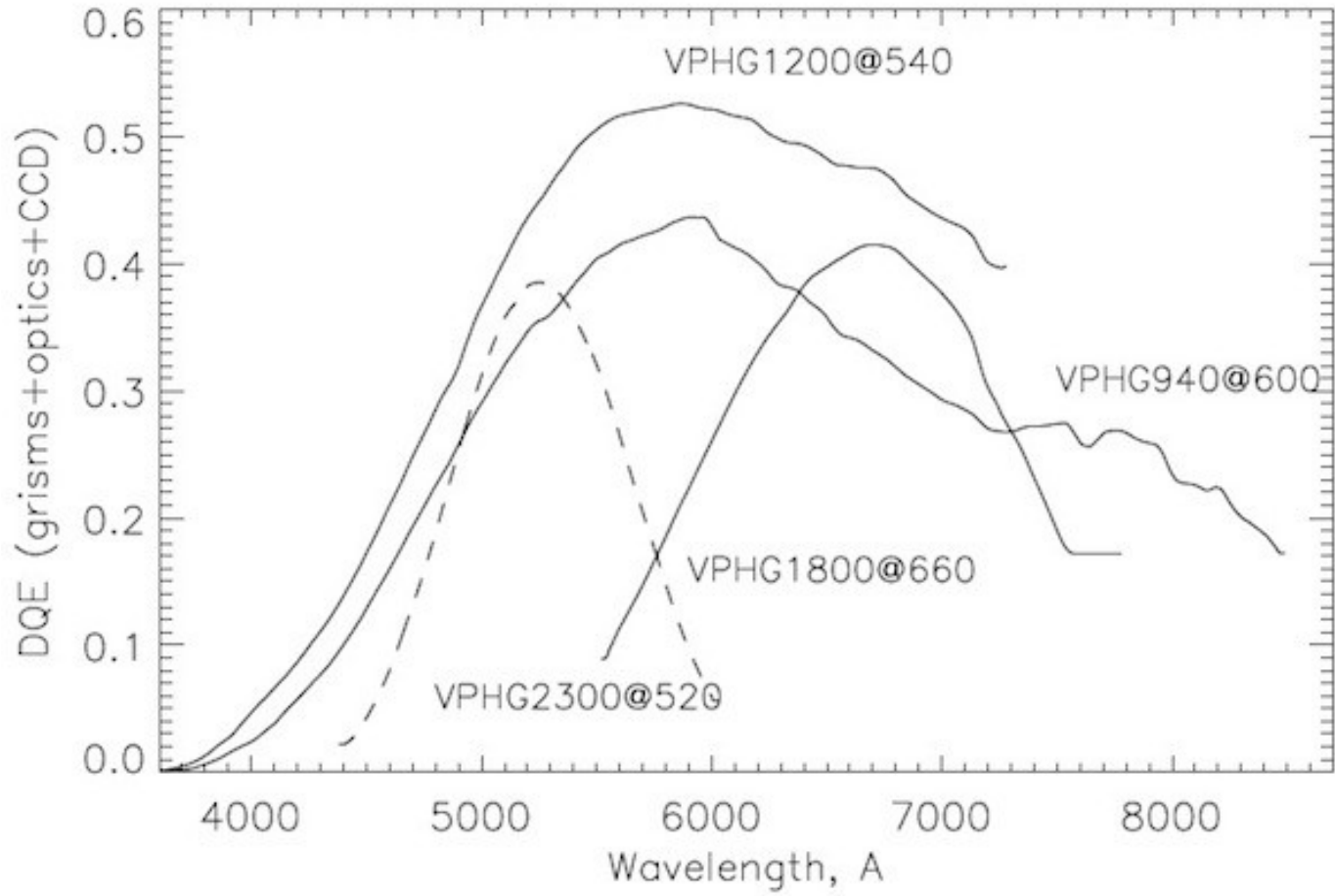
Старайтесь снимать максимум возможных калибровок во всех доступных режимах - сэкономите массу времени при анализе

Квантовая эффективность SCORPIO в спектральном режиме

Идеальный случай - бесщелевая спектроскопия



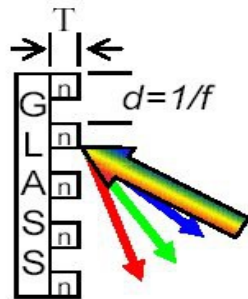
Квантовая эффективность SCORPIO-2 в спектральном режиме



Объемные фазовые голографические решетки (VPHG)

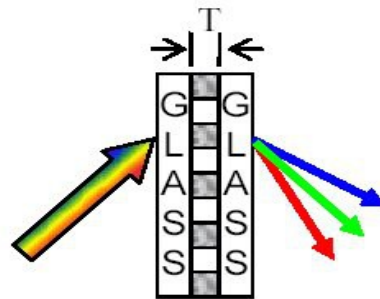
Вместо нарезки поверхностного рельефа - создание объемной структуры с периодическими изменениями коэффициента пропускания.

Surface Relief Grating: Reflection



Cross section of photoresist or epoxy cast grating. Periodic variation of thickness (T) with a constant refractive index (n).

Volume Phase Holographic Grating (VPHG): Transmission



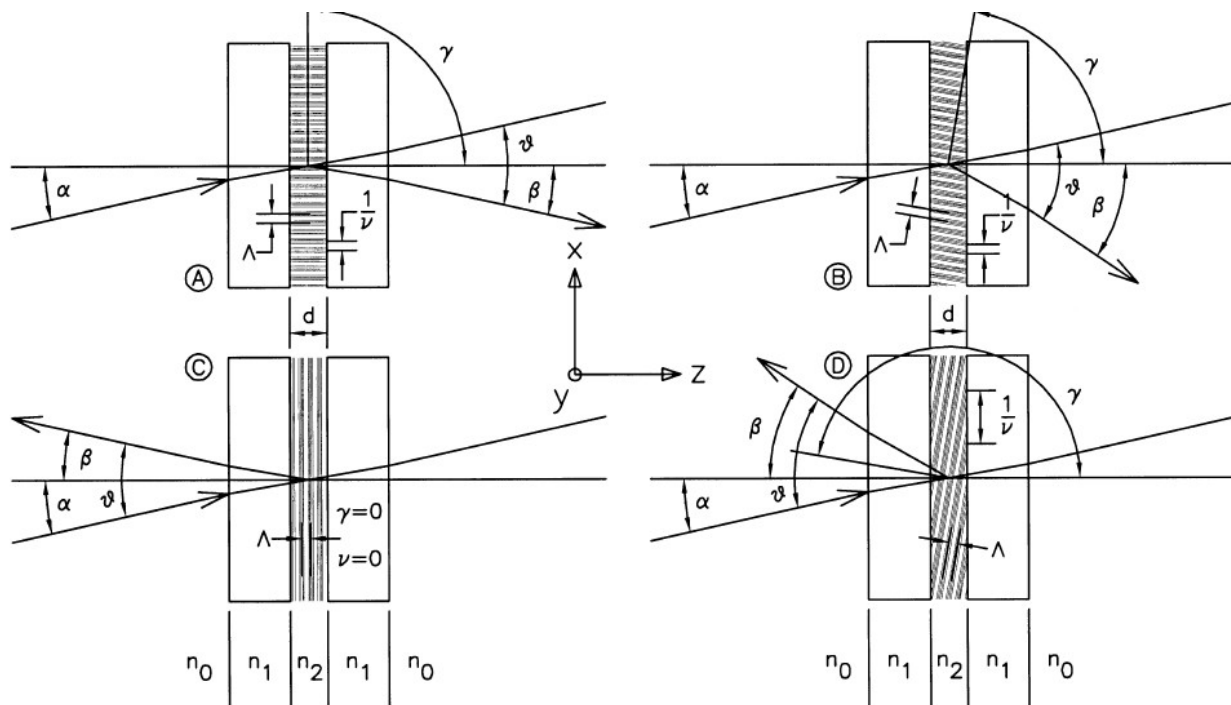
Cross section of dichromated gelatin (DCG) grating. Periodic variation of refractive index (n) with a constant thickness (T).

VPHG= Volume Phase Holographic Grating

В классической нарезной решетке угол блеска задавался формой штрихов. У VPHG - он определяется углом падения света на решетку (более гибкие возможности применения)

Угол — задаем призмой!

Объемные фазовые голографические решетки (VPHG)



Barden et al (2000)

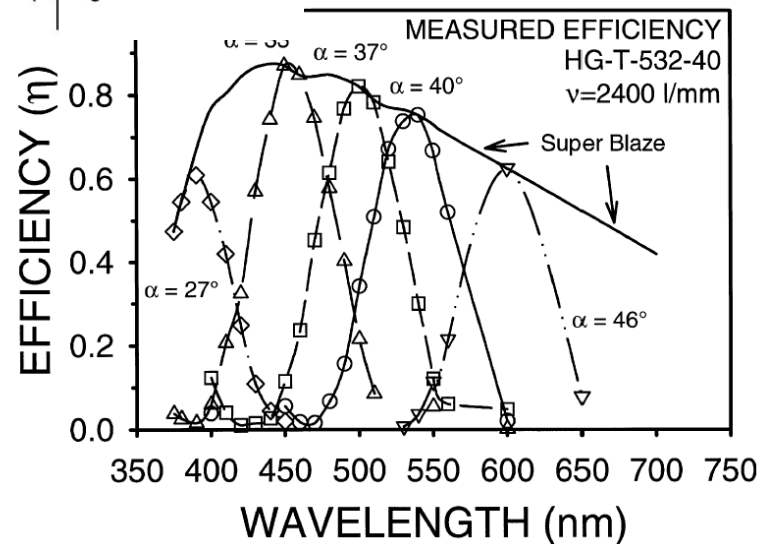
Преимущества VPHG

высокая (до 98%) дифракционная эффективность

Низкий уровень рассеянного света (< 0.01%)

Отсутствие дефектов

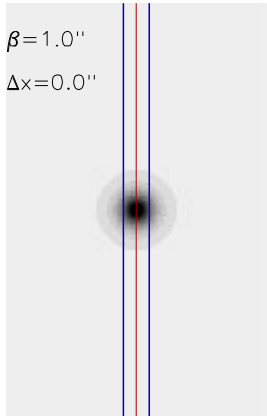
возможно создание высокой плотности штрихов



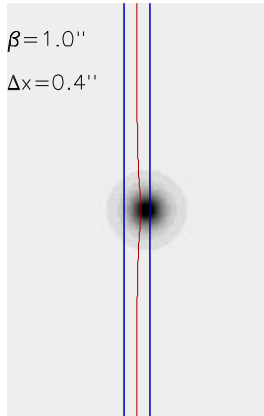
Неравномерная засветка щели

Случай VPHG1200G, щель 1"

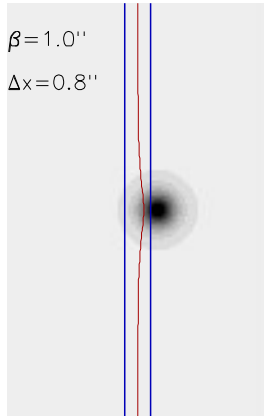
$\Delta V = 0$ km/s
Flux = 66%



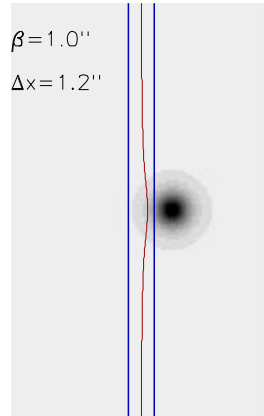
$\Delta V = 47$ km/s
Flux = 54%



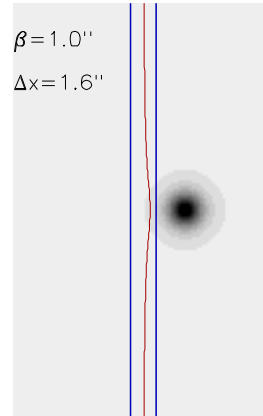
$\Delta V = 73$ km/s
Flux = 29%



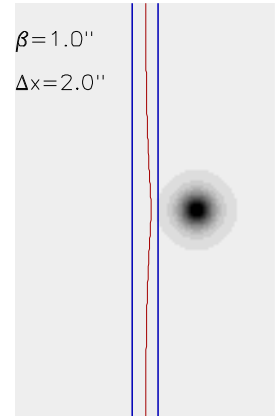
$\Delta V = 79$ km/s
Flux = 11%



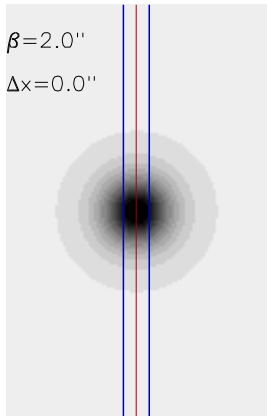
$\Delta V = 75$ km/s
Flux = 4%



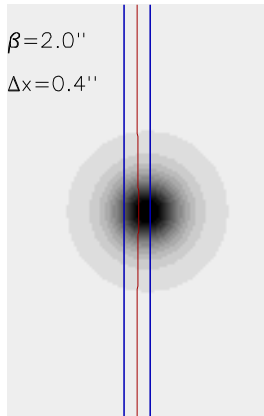
$\Delta V = 69$ km/s
Flux = 1%



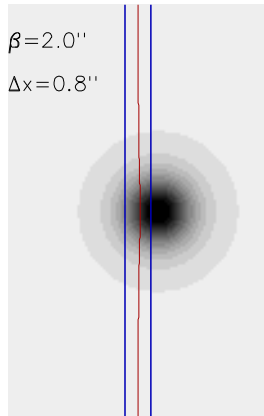
$\Delta V = 0$ km/s
Flux = 39%



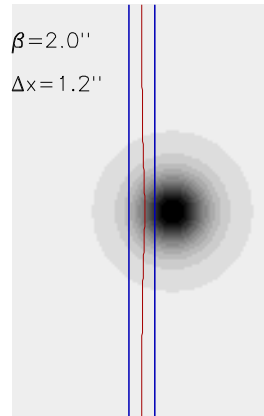
$\Delta V = 16$ km/s
Flux = 36%



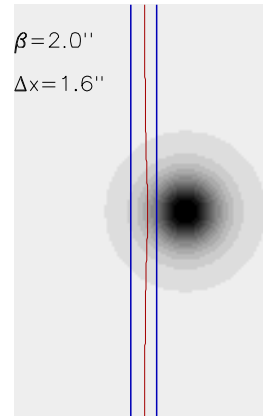
$\Delta V = 29$ km/s
Flux = 28%



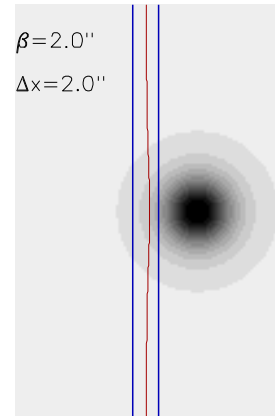
$\Delta V = 38$ km/s
Flux = 19%



$\Delta V = 43$ km/s
Flux = 12%



$\Delta V = 44$ km/s
Flux = 7%

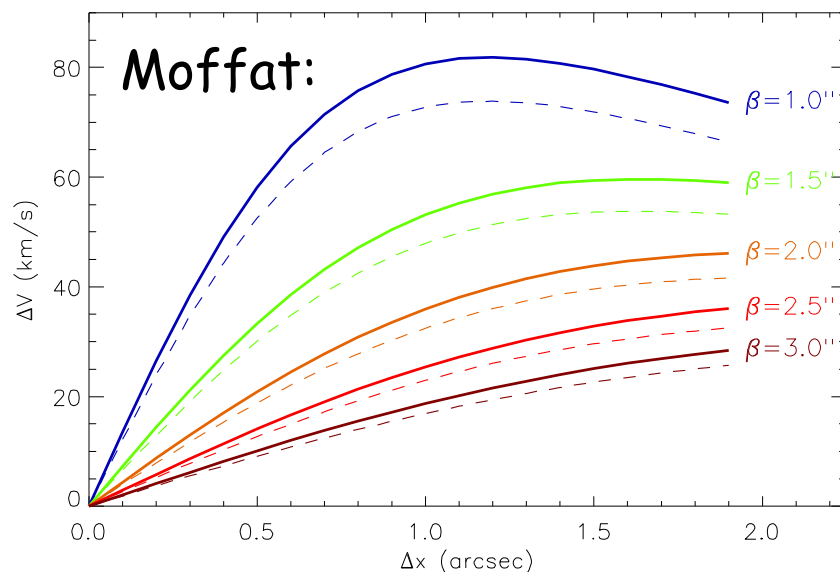
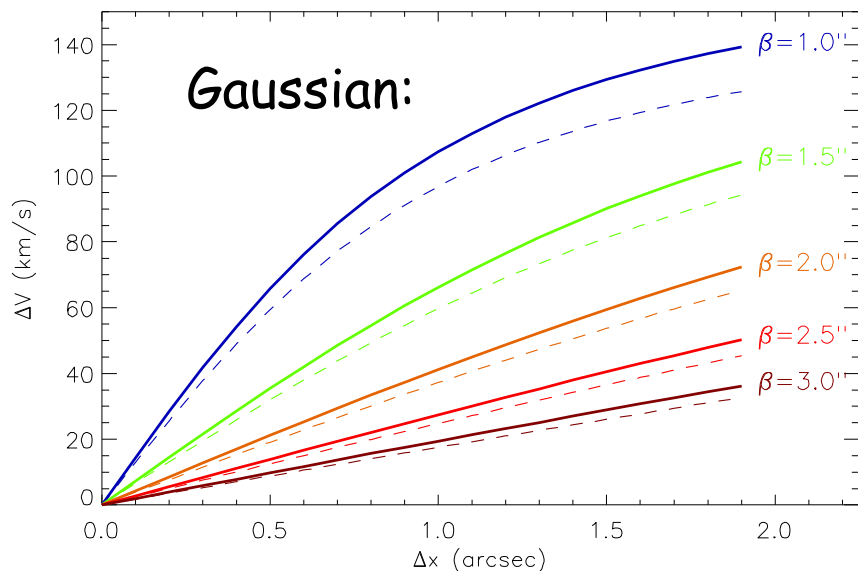


Ошибки измерения лучевых скоростей звезд

Случай VPHG1200G, щель 1"

(см. Моисеев, 2008, Абюл, 63, 74)

Расчет ошибок скоростей для двух вариантов функций распределения:

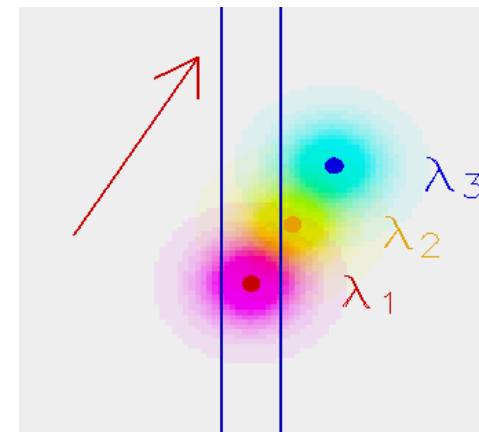
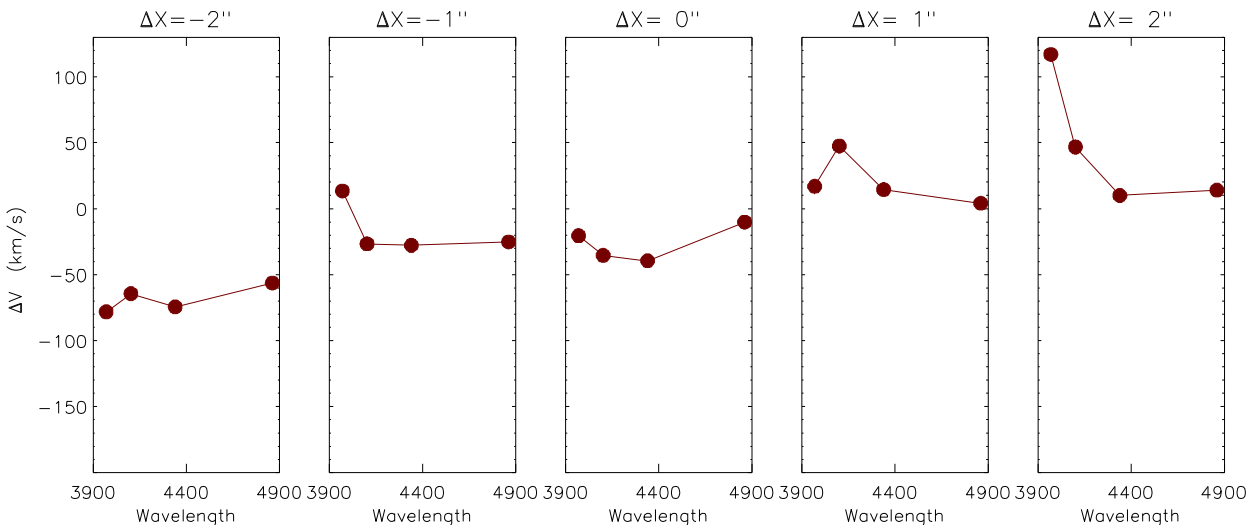


В отличие от измерений потока, при измерениях лучевых скоростей звезд - чем хуже качество изображений, тем меньше ошибка!

Для протяженных объектов - эффект несущественен.

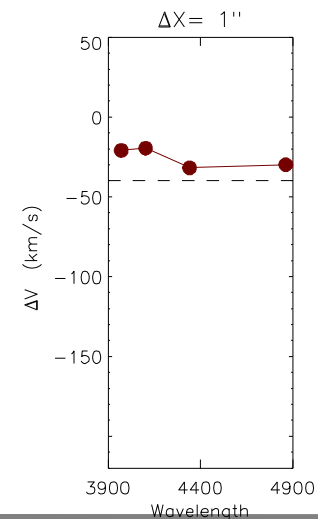
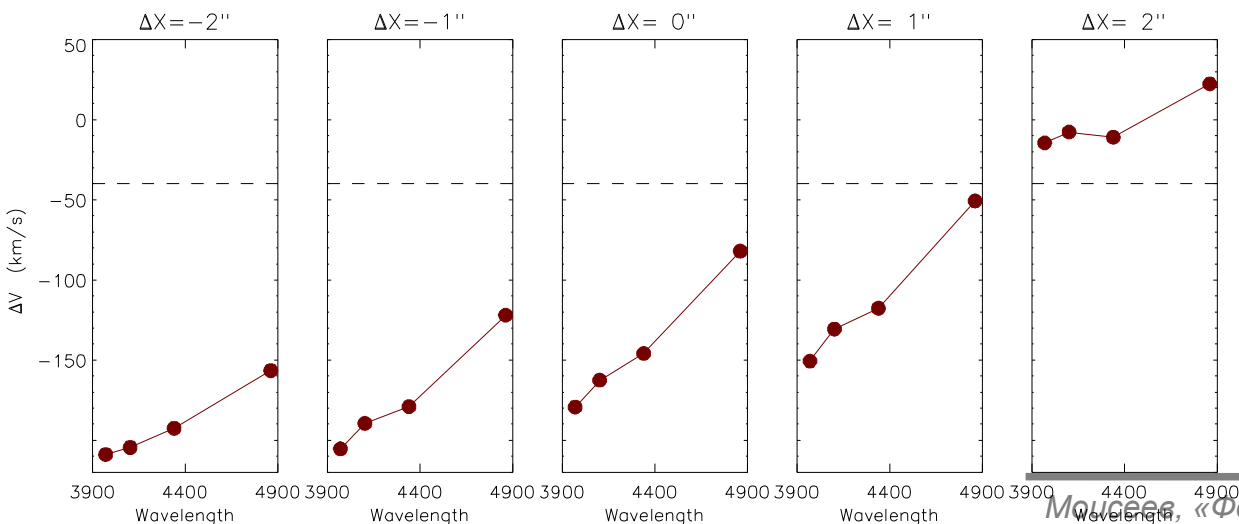
Эффект «градиента лучевой скорости»

GRW+70d5824 - щель вдоль атмосферной дисперсии



Расфокусированный телескоп (+3 мм):

HD120874 - щель поперек атмосферной дисперсии



Как избежать проблем с ошибками скоростей?

При наблюдениях щель надо выставлять **вдоль направления атмосферной дисперсии.**

Объект надо точно выставлять на щель,
ом необходимо снимать с экспозициями не менее 10 секунд, при работающем автогиде. Чем лучше качество изображений - тем выше требования к установке звезды на щель.

В качестве шаблонов на БТА не следует использовать звезды ярче 11-12^m. Если же приходится наблюдать более яркие звезды, то телескоп следует **расфокусировать, что бы добиться более равномерной засветки щели спектрографа.**

Если наблюдения проводились без соблюдения корректной методики, то эффекта неравномерной засветки щели исправить уже нельзя.

Заключение

Одна из основных проблем спектроскопии на SCORPIO – необходимость проводить наблюдения с относительно узкой щелью. Более всего это создает проблемы в задачах:

- Спектрофотометрии
- Измерения лучевых скоростей звездообразных объектов

Проблем можно избежать только понимая и четко соблюдая методику наблюдений, а это (к сожалению) зависит от опыта и квалификации наблюдателя

Alexei Moiseev homepage

Hello everybody! I'm contact astronomer for observations with [SCORPIO-2](#) in our [Laboratory](#) . Look my scientific interests [here](#). And [here](#) you can read more information about me.
Also I'm a head of our observatory [seminar](#)

[Astronomy](#)

[Publications](#)

[Homepages](#)

[Galleries](#)



E-mail: moisav@gmail.com

Links for
everyday:



<http://www.sao.ru/hq/moisav/>

Back to [Laboratory Home Page](#)

[Лекции для аспирантов CAO РАН](#)

Лекции для аспирантов CAO РАН. (2016 г.)

"Многорежимный фокальный редуктор телескопа БТА"

1. Введение. Основные понятия. Редуктор светосилы на большом телескопе. Семейство многорежимных "камер слабых объектов". Спектроскопия низкого разрешения на 6-м телескопе. SCORPIO и SCORPIO-2. [PDF](#)
2. Теория дифракционной решетки и астрономического спектрографа. Согласование оптики телескопа и спектрографа. Объемно-фазовые голографические решетки. [PDF](#)

Литература

1. Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., 2005, ПАЖ, т. 31, с. 214 [PDF](#)
2. Afanasiev V.L., Gazhur E.B., Zhelenkov S.R., Moiseev A.V., 2005, Bull.SAO, v. 58, p. 90 [PDF](#)
3. Allington-Smith J., "Basic equations for astronomical spectroscopy with a diffraction gratings" [PDF](#)
4. "SCORPIO: руководство пользователя", на его [веб-страничке](#)
5. Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2011, Baltic Astronomy, 20, 363 [PDF](#)
6. Щеглов П.В. «Проблемы оптической астрономии», Москва, «Наука», 1980