Проблемы SCORPIO.
Лекция II.
Спектроскопия: печали и радости.

Моисеев А.В.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Соотношение спектров и изображений на SCORPIO

ASPID Archive of Spectral, Photometric and Interferometric Data

Сегодня – только печали

(или грустный рассказ о широкощельности)

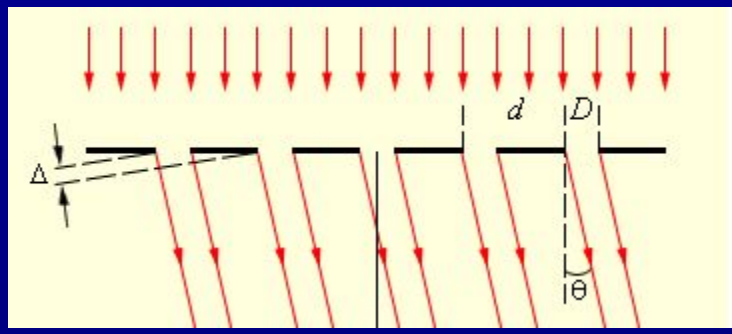
Теория решетки “из учебника”:

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

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

Для решетки:

$$R = m\,\rho\,W$$



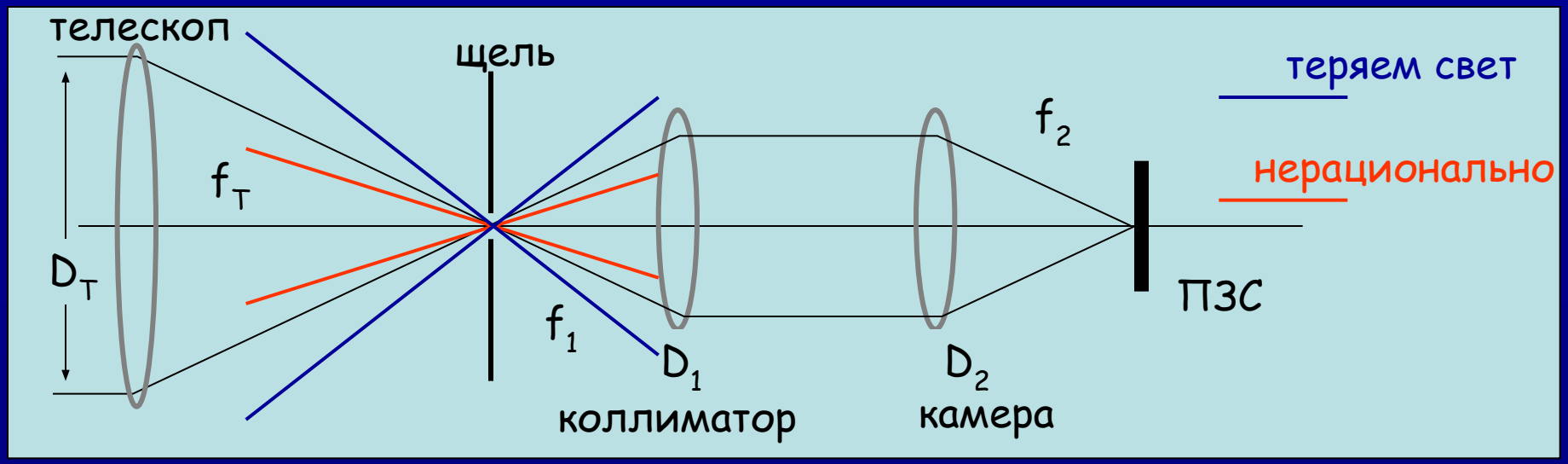
$\delta\lambda$ - FWHM инструментального контура
m – порядок интерференции
N – число интерферирующих лучей
ρ - плотность штрихов на единицу площади
W – засвеченная площадь

Но тогда достигнутое на SCORPIO разрешение Rmax=2600 можно было бы получить с решеткой 600 шт/мм в пучке диаметром всего 2.5 мм!
Но в реальности: VPHG1800 в пучке диаметром 35 мм.

Одной решетки мало! Надо выделить область в наблюдаемом объекте, создать параллельный пучок и построить спектр на детекторе!

1. Есть спектрограф (как оптическая система)
2. Есть щель
3. Есть 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 (f/D) камеры должна быть больше чем светосила телескопа

Почему в ПФ на БТА нужна светосильная камера :

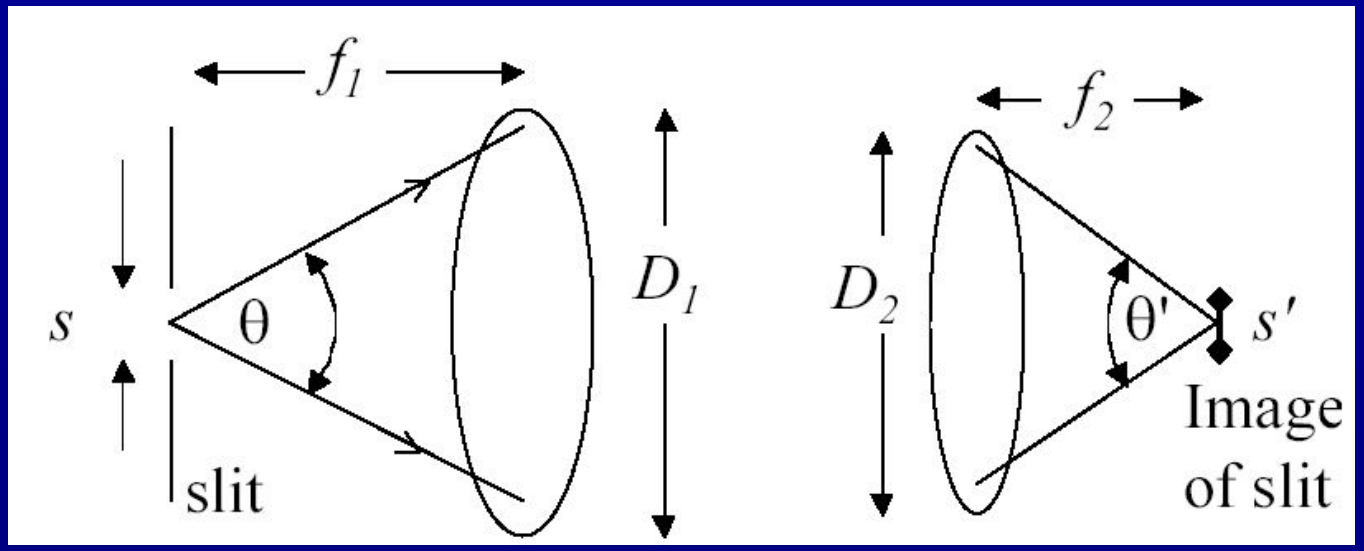
Телескоп большой – велик масштаб изображения (1″=116 μ), т.е. 8-10 пикселей ПЗС. Хочется уменьшить масштаб раза в 2-3, значит $(D_2/f_2) < (1/2)$

Проблемы светосильной оптики:

1. Аберрации растут как $(D/f)^{2-3}$
2. Требуется малый рабочий отрезок (от ПЗС до первой линзы камеры)

Спектрограф как телескопическая система

Излагается по Allington-Smith (2000)



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

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: $\left(\frac{d\lambda}{dx}\right)$

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

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:

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

Различие между теоретическим и реальным разрешением

$$R = R_{theor}\frac{\lambda}{\chi\, D_T}$$

$$R(BTA,\ \lambda = 6000\mathring{A}) \approx R_{theor}\frac{1}{4848\,\chi('')}$$

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 тысячи 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)

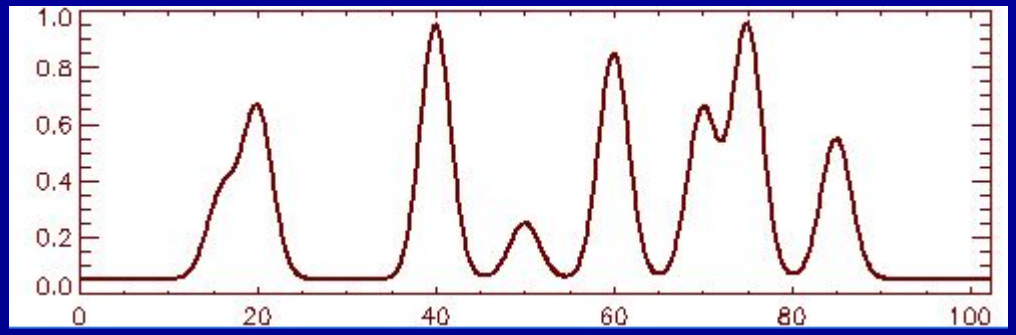
Итак, чем уже щель, тем лучше спектральное разрешение.
Но почему мы не можем сильно сужать щель?

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

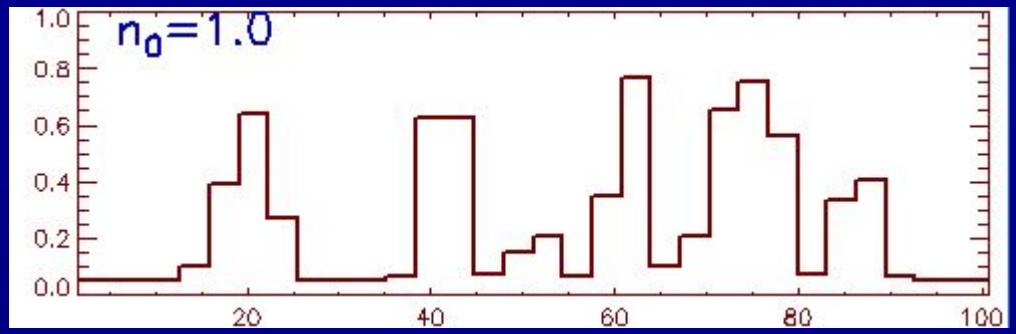
Теорема Котельникова (Найквиста) в вольном изложении применительно к нашему случаю:

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

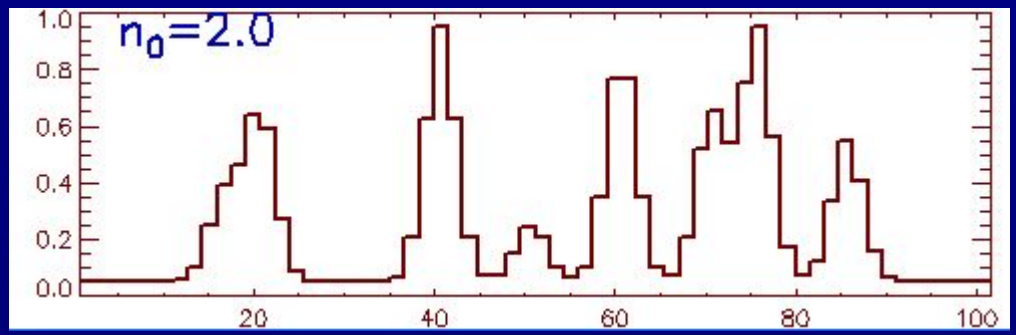
Дискретизация



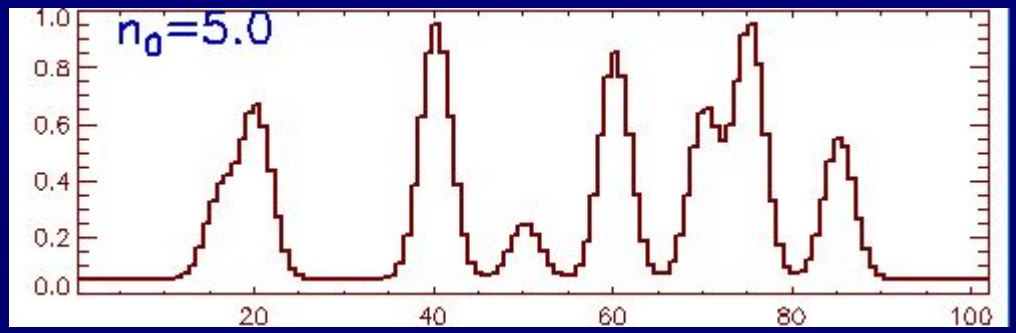
$n<n_o$ – теряем спектральную информацию (можем измерить скорости, но не FWHM)



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

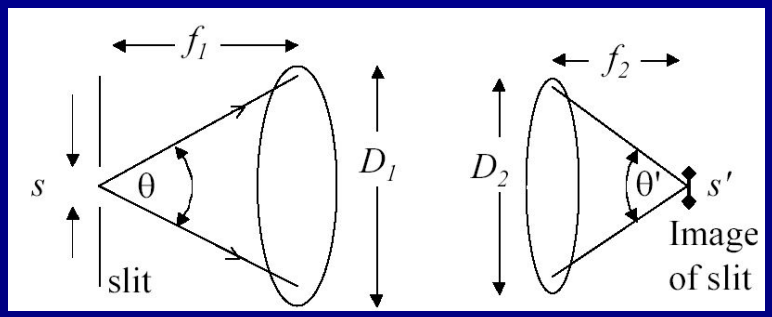


$n>n_o$ – избыточная дискретизация. Иногда полезно, но жалко неэффективно использовать детектор



Выбор ширины щели (II)

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



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

$$s(BTA) = (10 \div 12)\left(\frac{D_2}{f_2}\right)\,[px]$$

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 нормальнойщели равняется пространственному разрешению на телескопе (в наших условиях это размер звездных изображений – seeing)

Нормальная щели на SCORPIO

У камеры SCORPIO: D_2/f_2= F/1.8, тогда ширина нормальной щели составляет всего 75-90μ =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 укомлектован набором щелей: 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2″

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

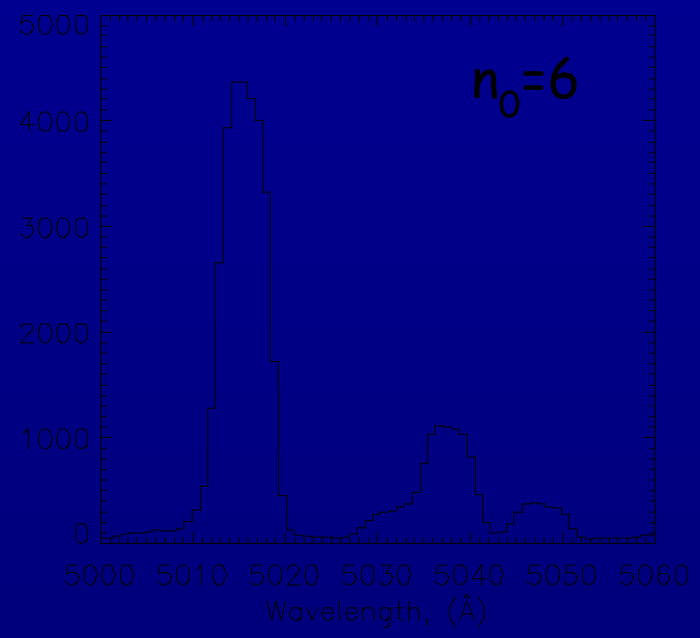
Так как в среднем seeing>1.5″, то и эта щель оказывается узкой!

Проблемы столь узкой щели:

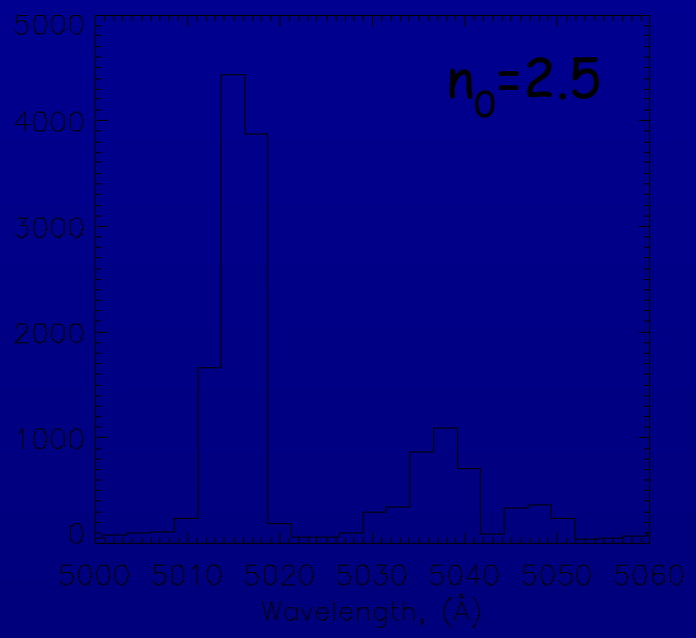
1. Теряем свет от объекта (ухудшаем S/N)
2. Сложно заниматься спектрофотометрией
3. Высокие требования к точности установки объектов на щель.

Еще раз о дискретизации

SCOPRIO



«Обычный спектрограф»

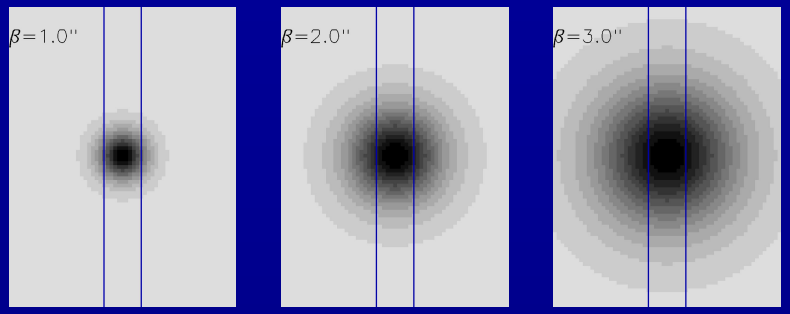


Избыточная дискретизация (oversampling) со SCORPIO (щель 1"):

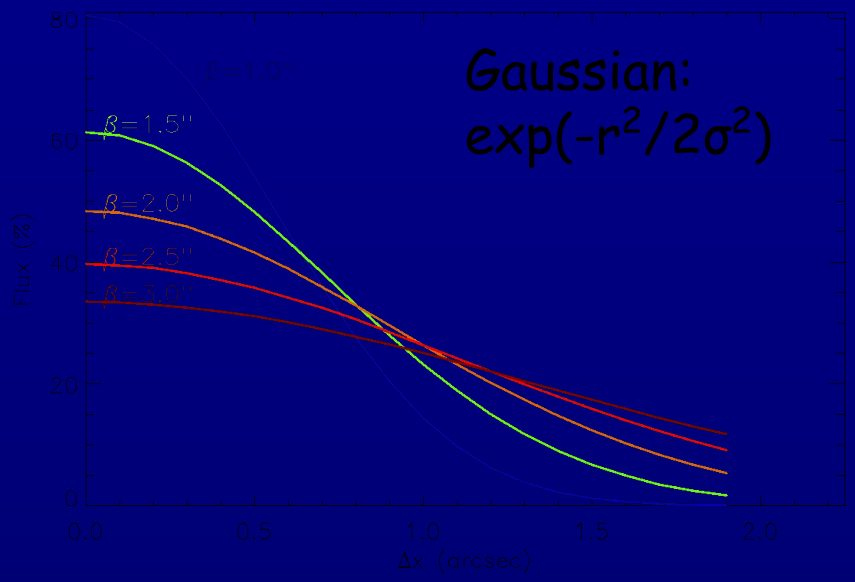
- Помогает при изучении формы профилей линий, и измерении диспресии скоростей методом кросс-корреляций.
- Но неэффективно используются возможности детектора, на первый взгляд линии выглядят «расфокусированными»

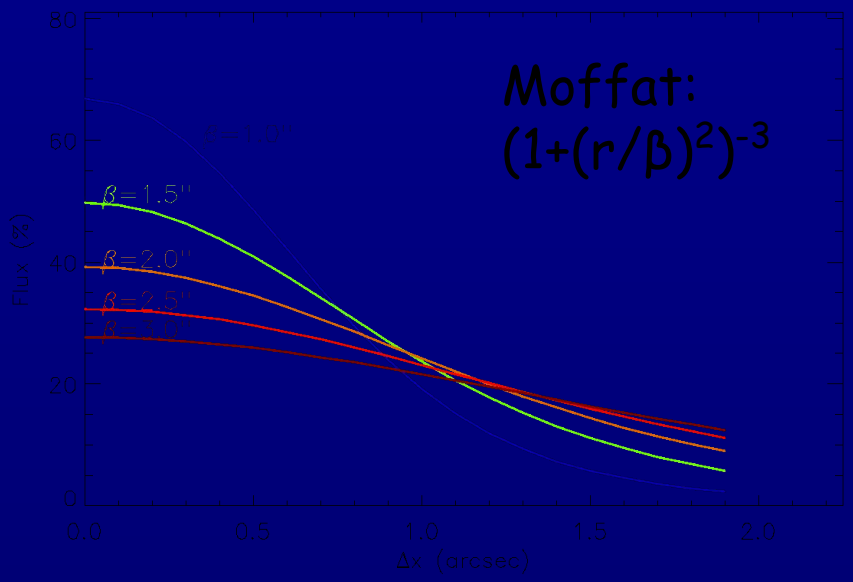
Потери света на щели

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



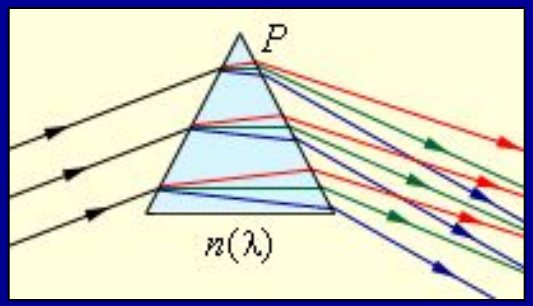
Расчет потерь света на 1″ щели для двух вариантов функций распределения:

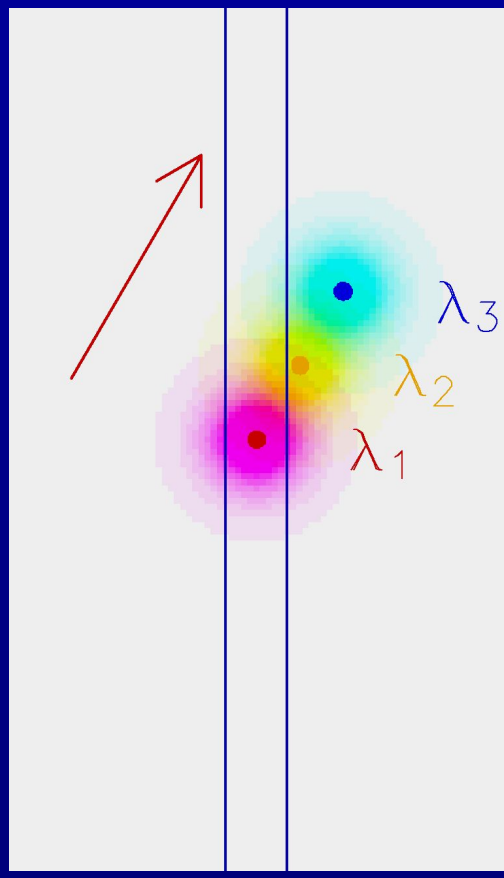




Возможно, что лучший вариант – рассчитывать поправку интегрируя поток в наблюдаемых изображениях!

Атмосферная дисперсия





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

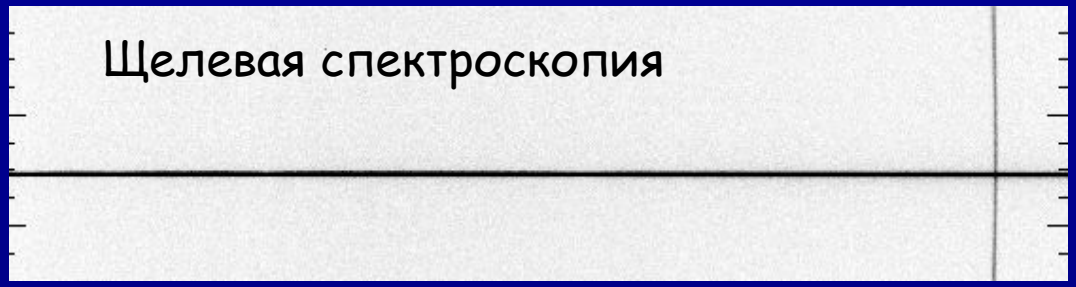
Атромосферная дисперсия и САО:

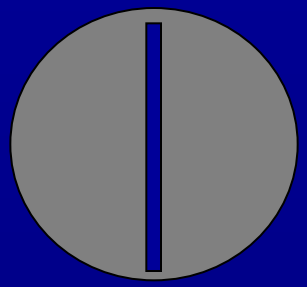
- Можно непосредственно измерить с мультизрачковым спектрографом MPFS (поскольку у него нет щели).
- Спекл-интерферометр БТА имеет компенсатор атмосферной дисперсии

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

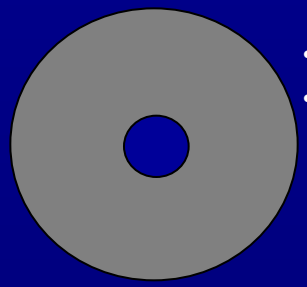
Для SCORPIO это означает, что P(real)=132.5 ^{o} (до 2006 г. =131°)

Потери на щели II: наблюдения стандартов

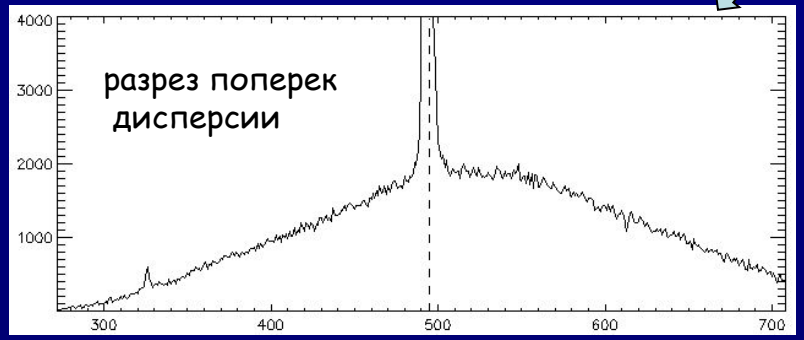




- потери света на щели
- искажения формы спектра из-за атмосферной дисперсии



- проблема фона
- ошибка калибровки по длинам волн, изменение спектрального разрешения

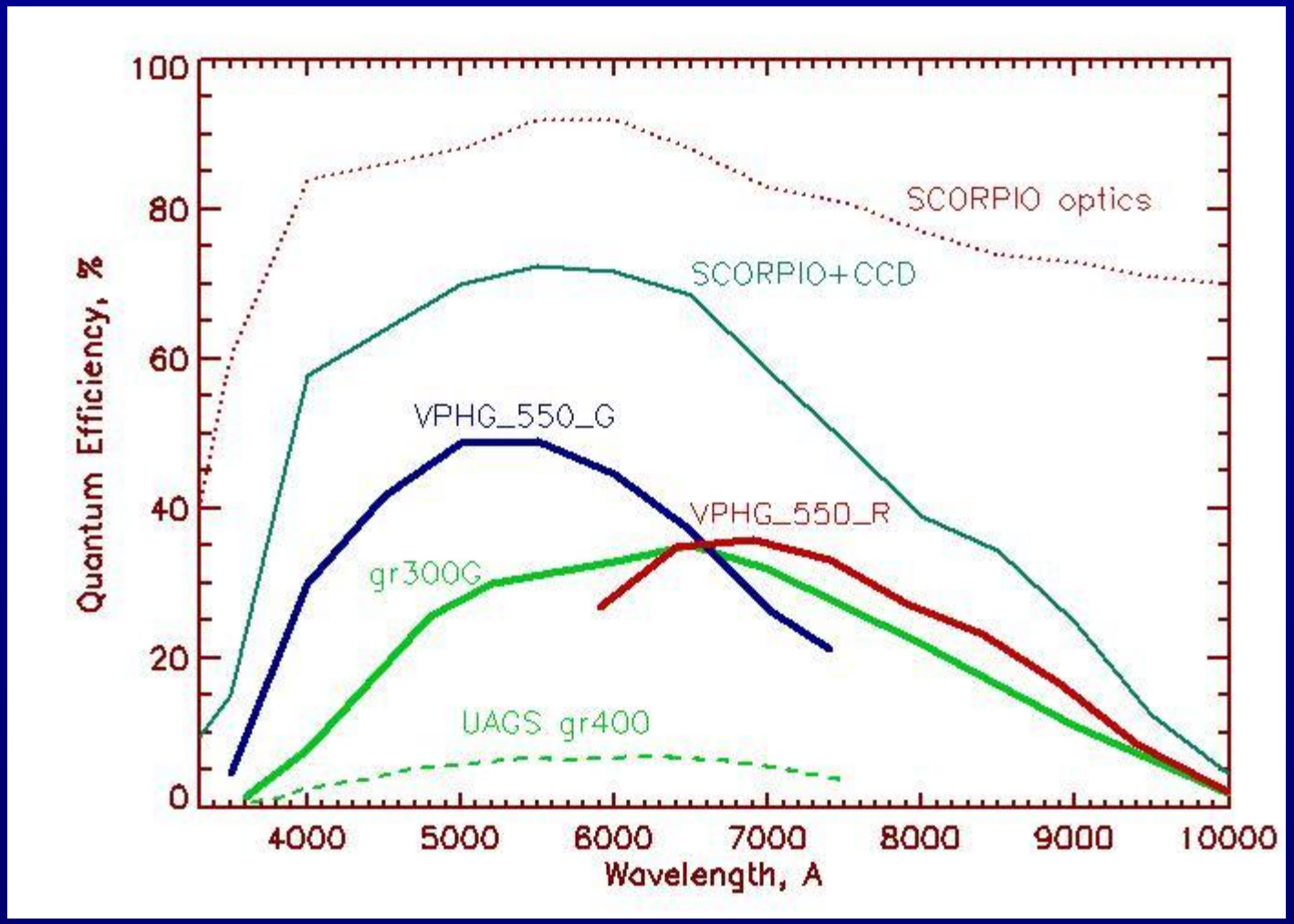


- сдвиг шкалы λ не принципиален
- проблема фона и близких объектов решается подбором «удобных» звезд ($10\text{-}13^m$)
- Но исправить спектр за полосы атмосферного поглощения можно только по щелевым спектрам!

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

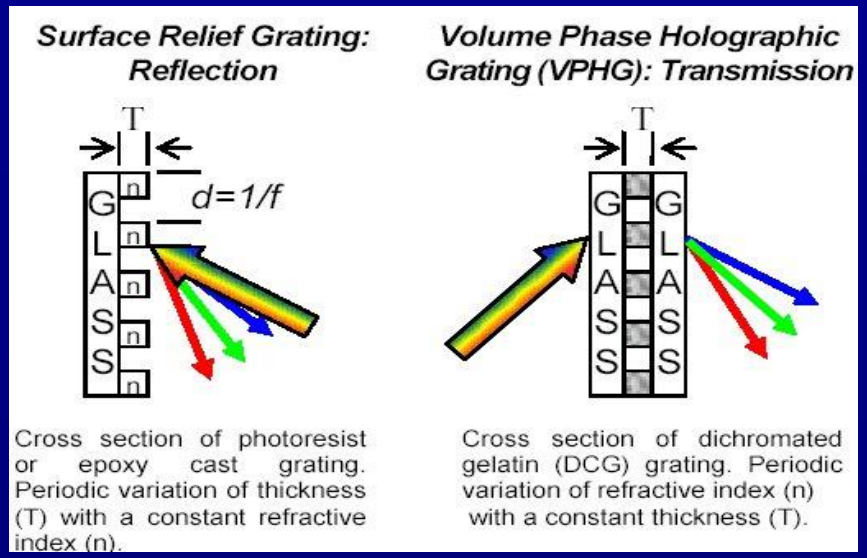
Квантовая эффективность SCORPIO в спектральном режиме

Идеальный случай – бесщелевая спектроскопия

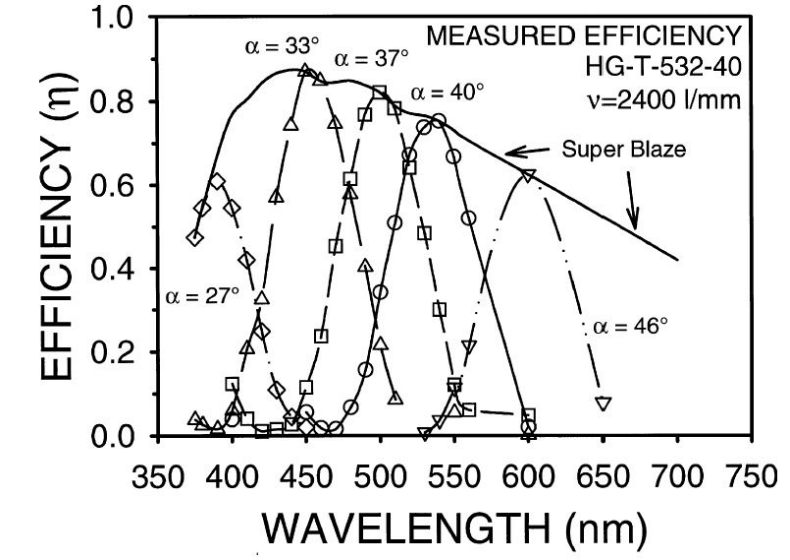


Объемные фазовые голографические решетки (VPHG)

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



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

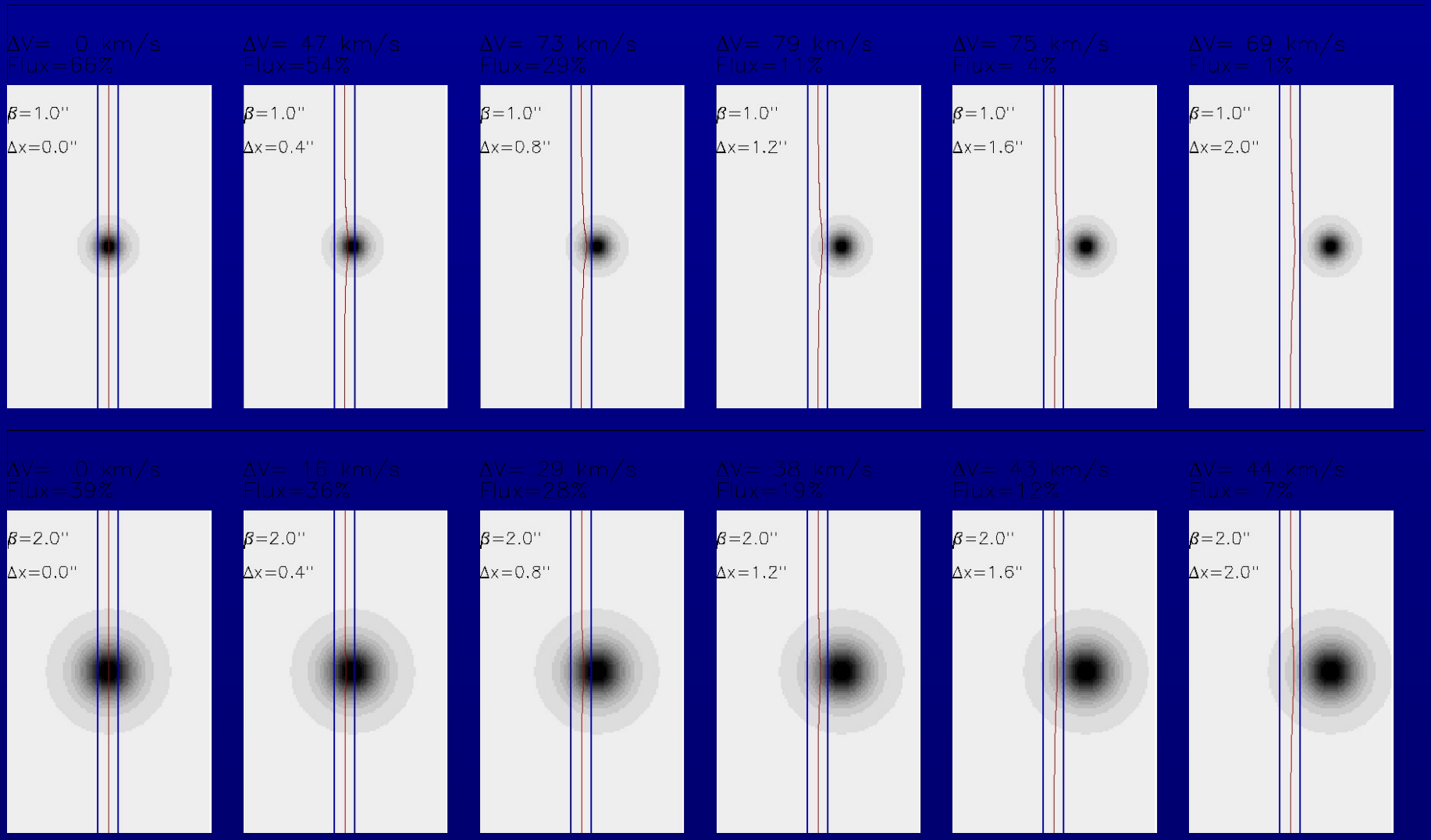


Преимущества VPHG

- *высокая (до 98%) дифракционная эффективность*
- *Низкий уровень рассеянного света (< 0.01%)*
- *Отсутствие дефектов*
- *возможно создание высокой плотности штрихов*

Неравномерная засветка щели

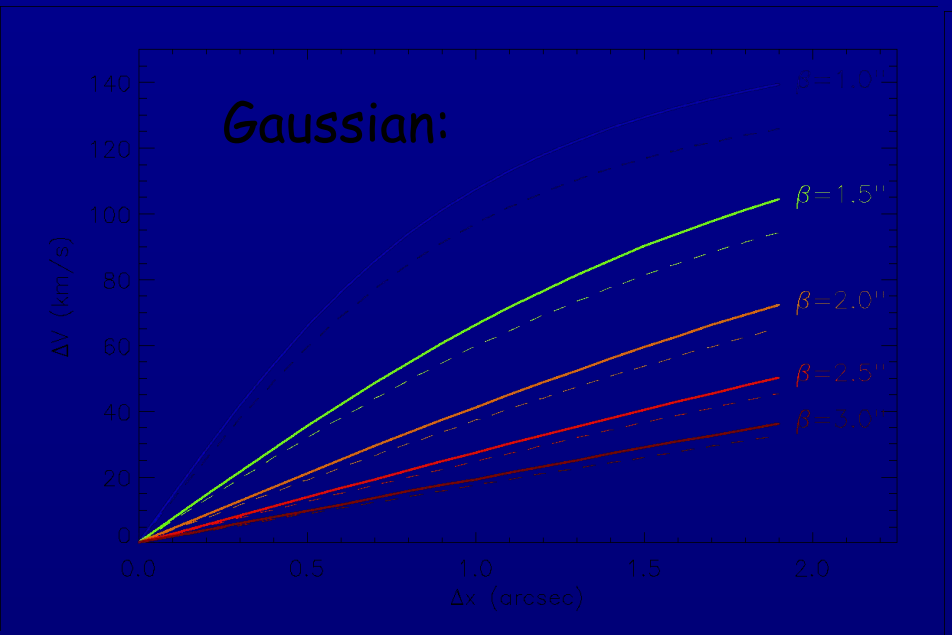
Случай VPHG1200G, щель 1"

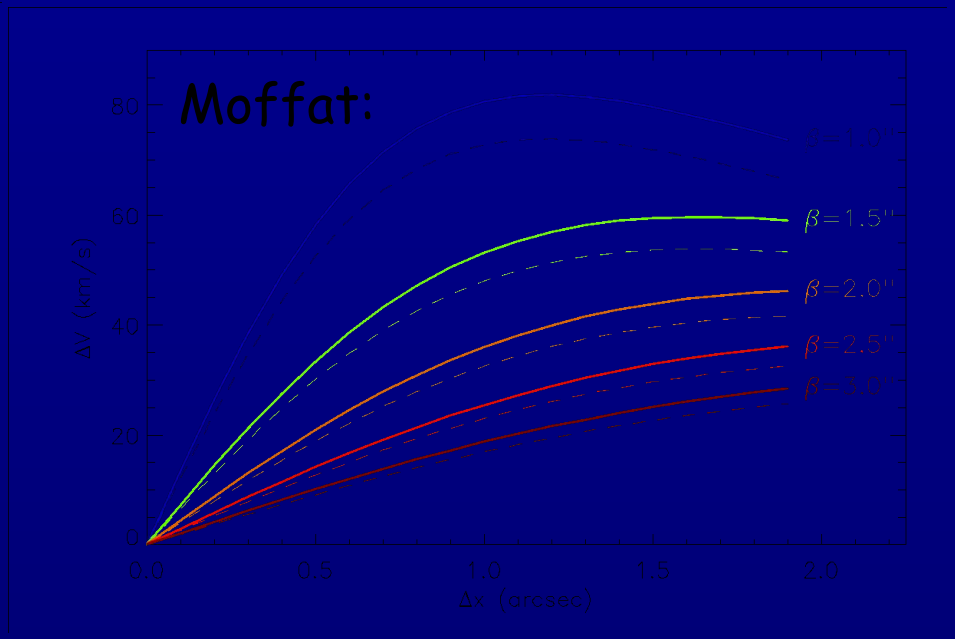


Ошибки измерения лучевых скоростей звезд

Случай VPHG1200G, щель 1"

Расчет ошибок скоростей для двух вариантов функций распределения:



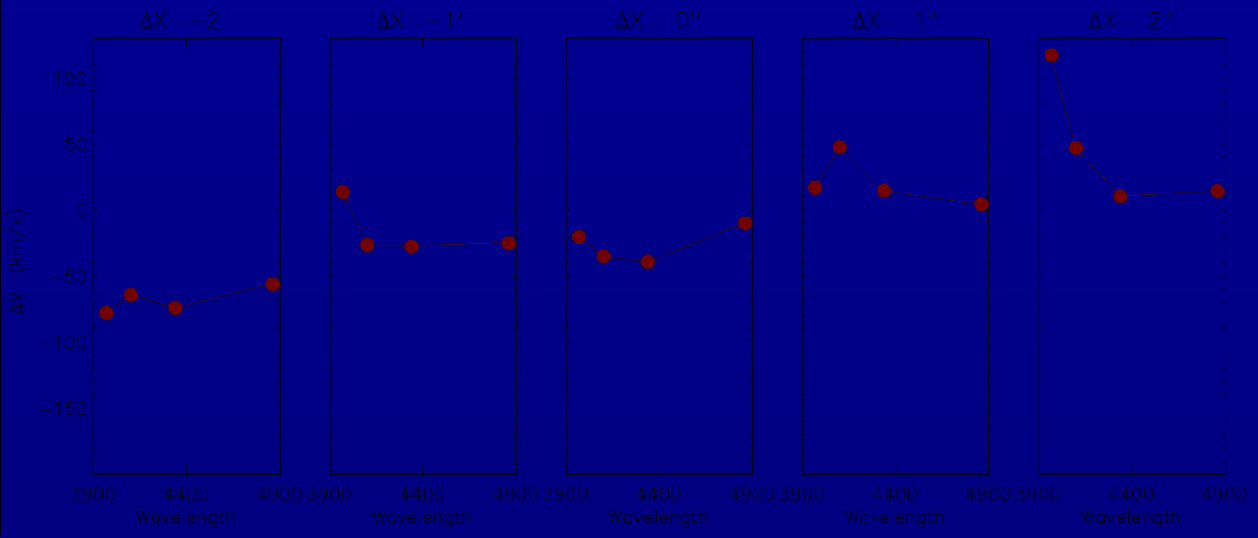


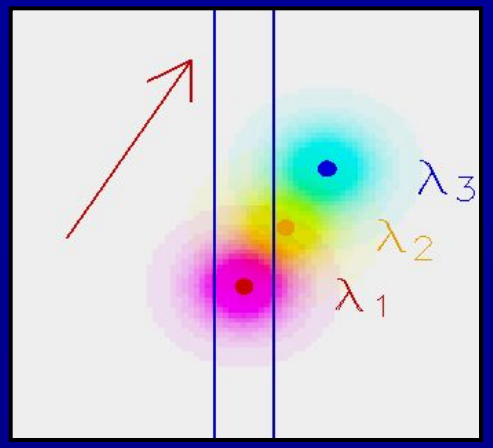
В отличии от измерений потока, при измерениях лучевых скоростей звезд – чем хуже качество изображений, тем меньше ошибка!

Для протяженных объектов – эффект несущественен.

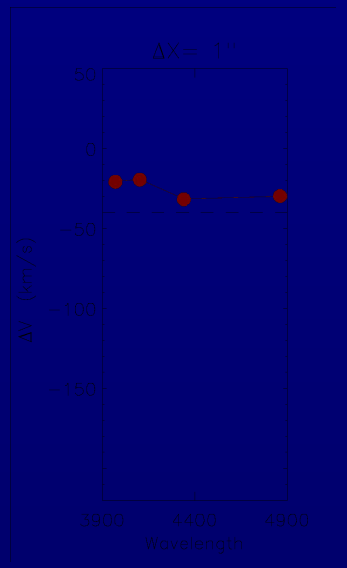
Эффект «градиента лучевой скорости»

GRW+70d5824 – щель вдоль атмосферной дисперсии

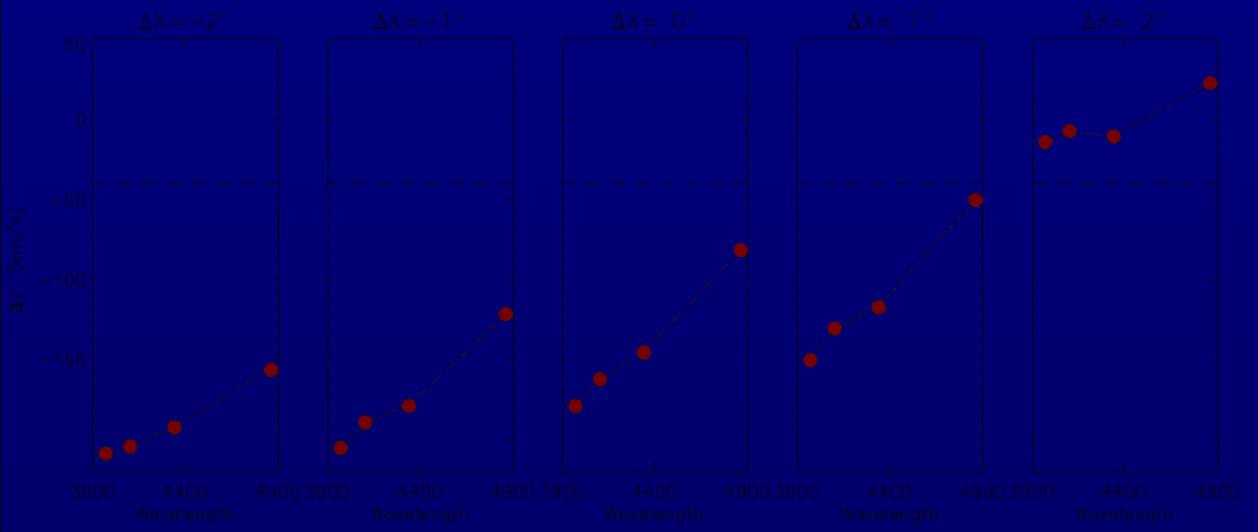




Расфокусированный телескоп (+3 мм):



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, тестовые изображения при этом 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 не следует использовать звезды ярче 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:

1. Спектрофотометрии
2. 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

Заключение II.

Материалы этой и предыдущей лекции выложены на страничке SCORPIO (раздел “Manuals”)

Наиболее кратко емко и понятно теория астрономического спектрографа изложена в статье:

Allington-Smith J., “Basic equations for astronomical spectroscopy with a diffraction gratings” (там же)