

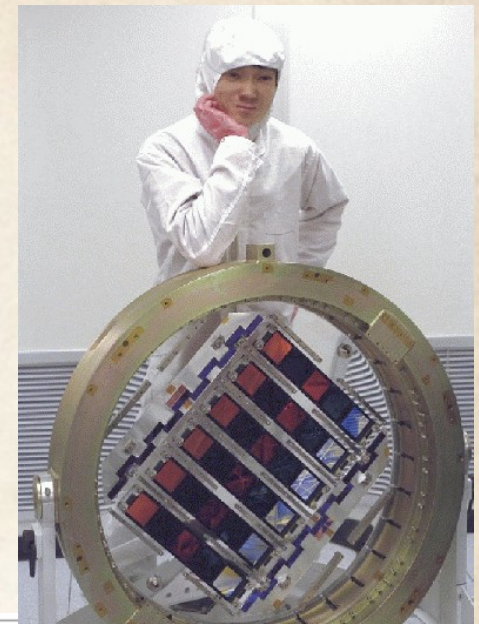
Многорезимный фокальный редуктор телескопа БТА

Лекция III.







ПЗС-детектор. Статистика отсчётов. Калибровки спектров
низкого разрешения. Плоское поле. Телецентризм.
Геометрическая коррекция.

ПЗС-матрица

ПЗС=прибор с зарядовой связью
(CCD, «charge-coupled device»)

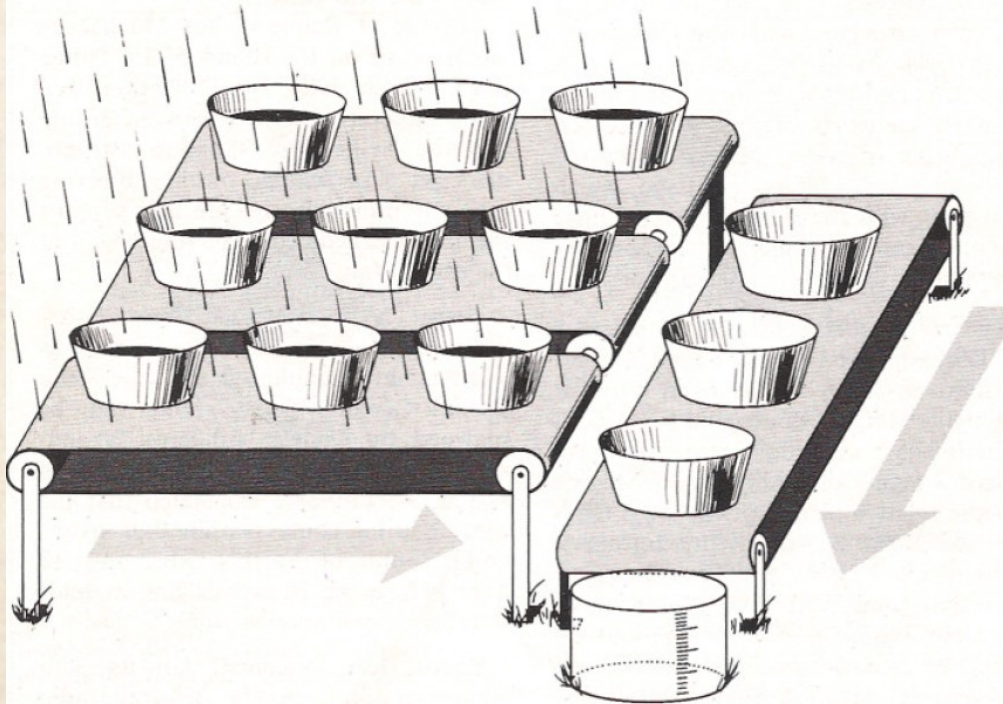


Нобелевская премия по физике - 2009

2009	 <p> Чарльз Куэн Као (1933—2018) (½ премии)</p>	<p>За революционные достижения, касающиеся передачи света в волокнах для нужд оптической связи</p> <p>Оригинальный текст (англ.) [показать]</p>
	 <p> Уиллард Бойл (1924—2011) (¼ премии)</p>	<p>За изобретение полупроводниковой схемы для регистрации изображений — ПЗС-сенсора</p> <p>Оригинальный текст (англ.) [показать]</p>
	 <p> Джордж Смит (1930) (¼ премии)</p>	

ПЗС-детектор

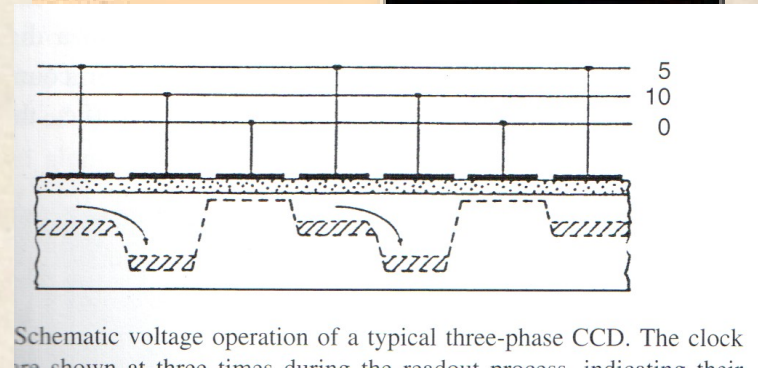
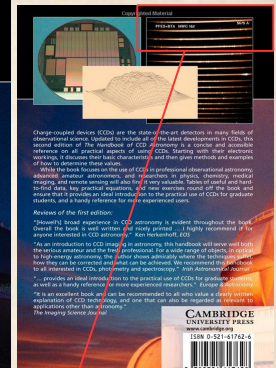
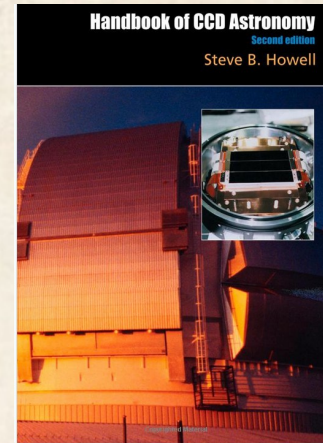
Steve B. Howell, *Handbook of CCD Astronomy*, 2nd edition, 2006



Determining the brightness distribution in a celestial object with a charge-coupled device can be likened to measuring the rainfall at different points in a field with an array of buckets. Once the rain has ceased, the buckets in each row are moved horizontally across the field on conveyor belts. As each one reaches the end of the conveyor, it is emptied into another bucket on a belt that carries it to the metering station where its contents are measured. Artwork by Steven Simpson.

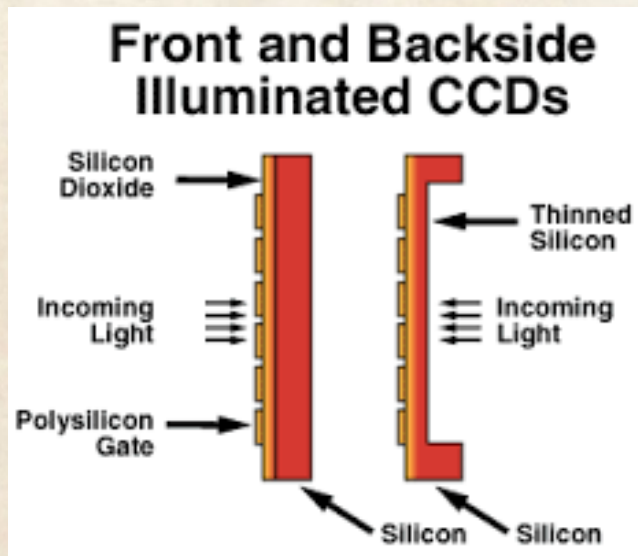
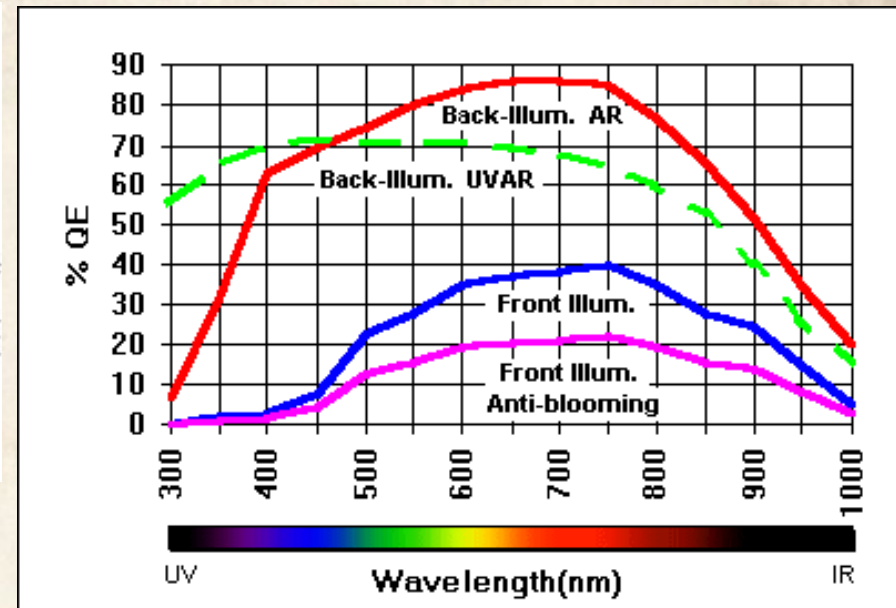
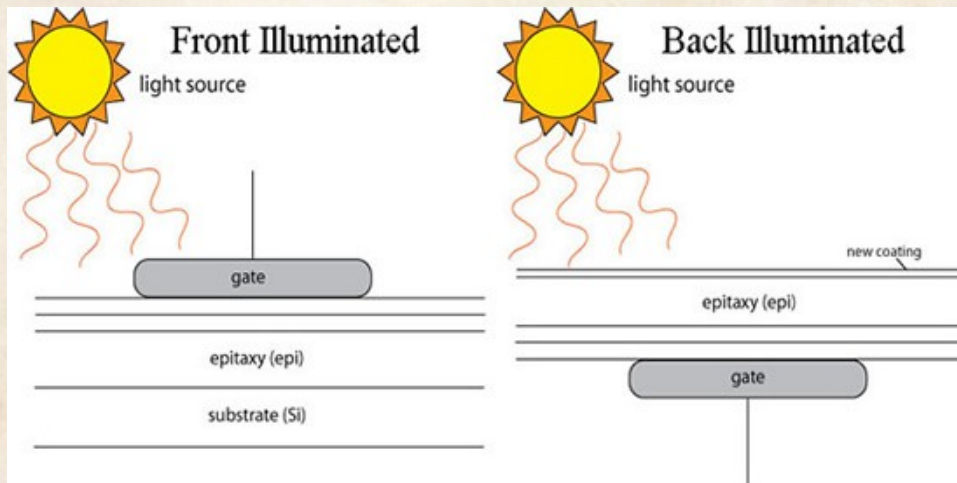
Janesick & Morley, 1987S&T, 74,238

Но в реальности вместо ленты – только переливание из тазика в тазик!



Schematic voltage operation of a typical three-phase CCD. The clock is shown at three times during the readout process, indicating their

ПЗС с прямой и обратной засветкой

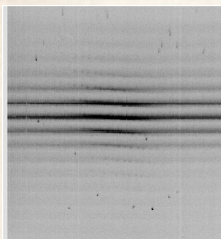


ПЗС с обратной засветкой:

+ В разы(!) выше квантовая эффективность (нет потерь света в электродах)

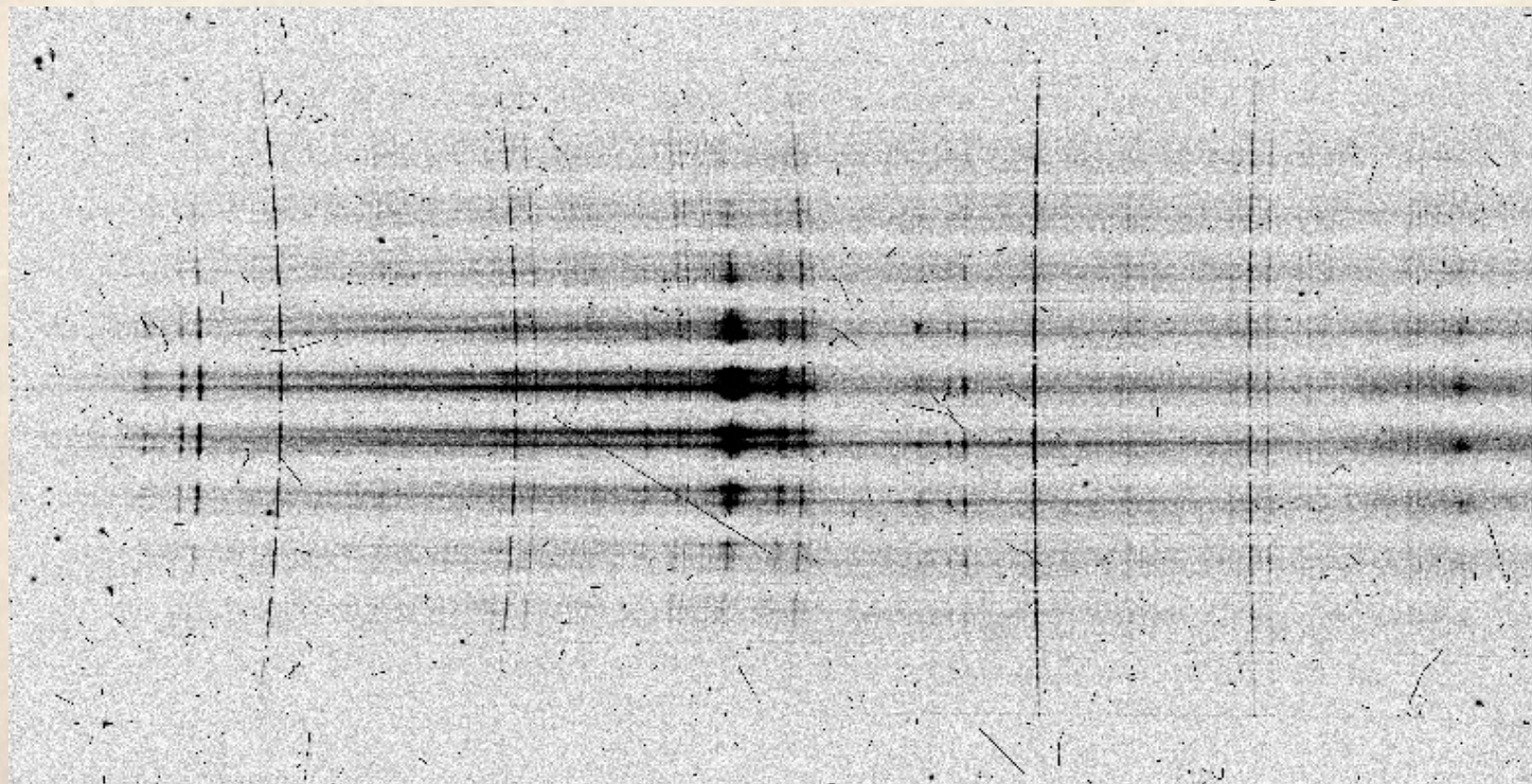
- интерференция в красной области ($>650-700$ нм)
- меньшая емкость каждого пикселя
- неоднородность толщины слоя
- высокая стоимость

Эволюция ПЗС на БТА



NGC 3516
MPFS (1994)
530x580 px

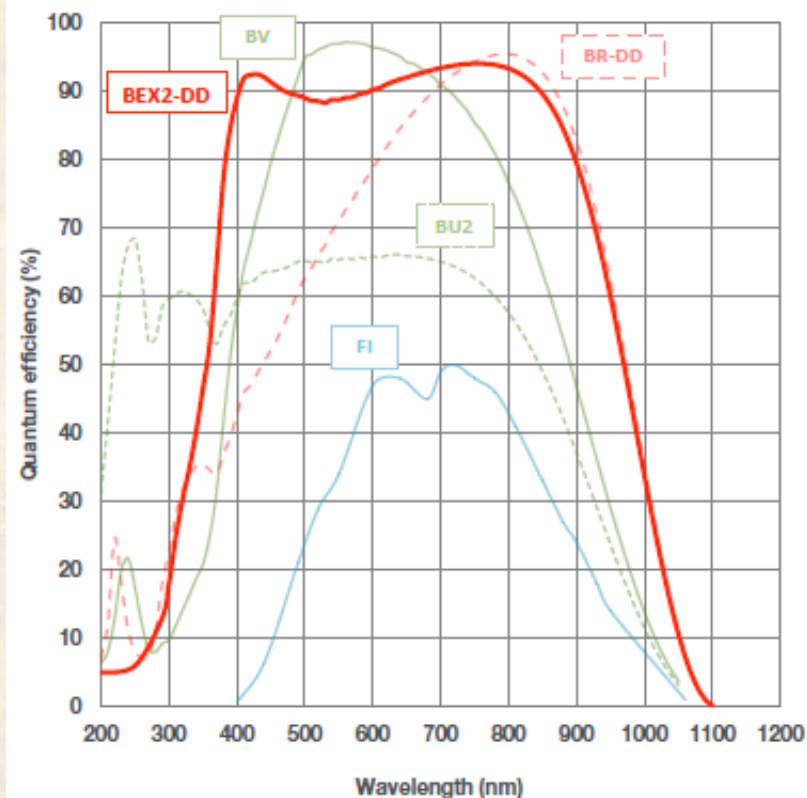
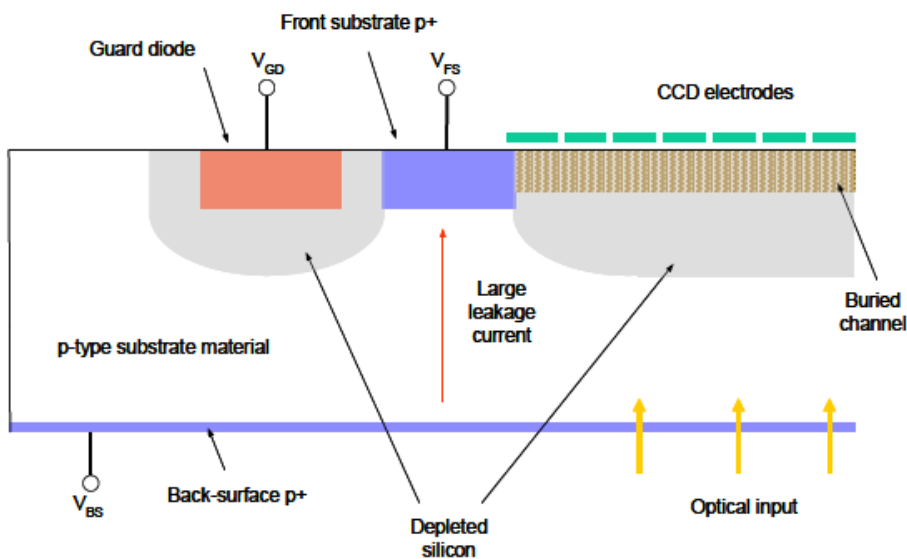
Mrk 783 (2022)
SCORPIO-2/IFU
4011x2041



“Полутолстые” ПЗС с глубоким обеднением (deep-depletion)

“Обеднение” - так как в ПЗС используется р-полупроводник, а зона под пикселем должна быть обеднена от основных носителей (дырок), чтобы накапливать фотоэлектроны

Увеличение красной чувствительности!



“Тонкие ПЗС” - 20-40 мкм

“Полутолстые” - 70-100 мкм

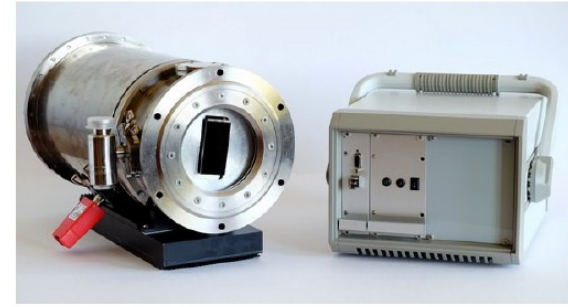


Figure 1. General view of the CCD261-84 camera system: the camera (

ПЗС-системы разработаны и изготовлены в
Лаборатории перспективных разработок САО РАН
Чипы производства EEV-> Teledyne E2V

	SCORPIO/-1	SCORPIO-2		
	TK 1024 (2000-2003.)	EEV 42-40 (с 2003 г.)	E2V 42-90 (с 2003 г.)	E2V 261-84 (с 2020 г.)
Формат	1024x1024	2048x2048	4608x2048	4096x2048
Размер пикселя, мкм	24 мкм 0.32"	13.5 мкм 0.18"		15 мкм 0.20"
MaxQE	80%	95%		
Gain, e/ADU	1.3	0.5 (high) 2 (low)		0.6 (high) 0.5 (low)
Шум считывания	3 e	1.8-4 e	1.5-5 e	2 -5 e
Темновой ток e/ мин	0.1	0.03		0.05

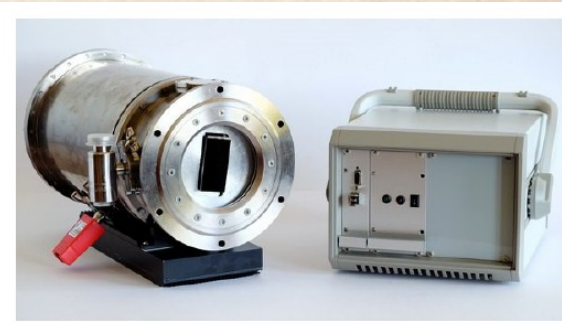


Figure 1. General view of the CCD261-84 camera system: the camera (

Система регистрации изображений на базе CCD261-84



Система регистрации изображений на базе ПЗС-матрицы CCD261-84 формата 2080 x 4112 пикселей с контроллером DINACON-V для Si

Afanasieva et al 2023, Photonics

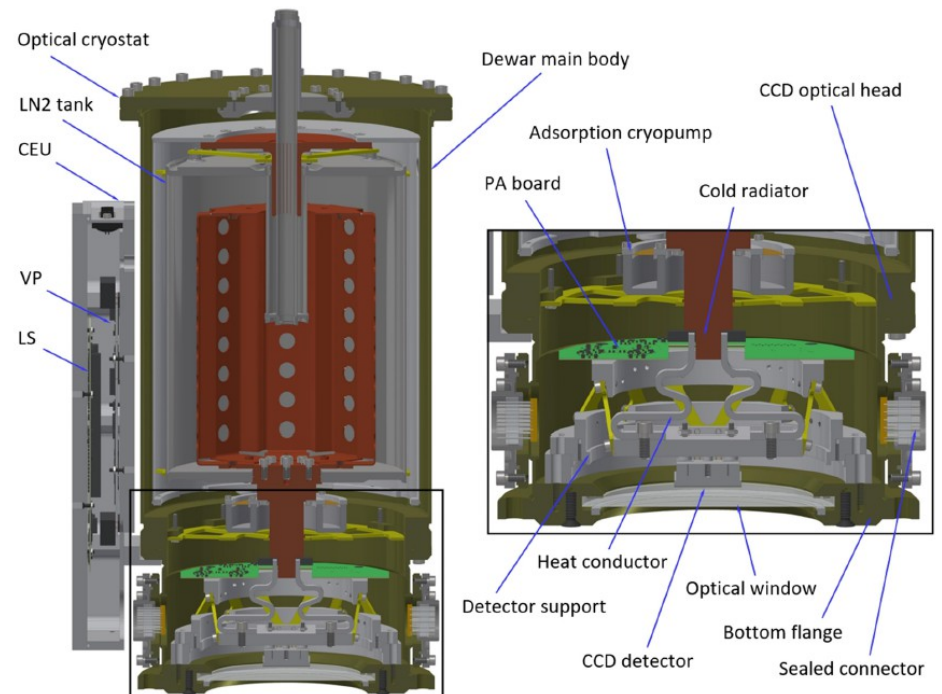


Figure 2. A 3D cut view of the CCD camera: full view of the camera (left) and zoomed view of the optical head (right).

Квантовая эффективность

«Под квантовым выходом приемника мы будем понимать пропускание такого нейтрального фильтра, который, будучи поставлен перед идеальным приемником изображения или излучения, регистрирующий каждый падающий на него фотон, **приравняет его отношение сигнал/шум** к таковому для реального приемника..»

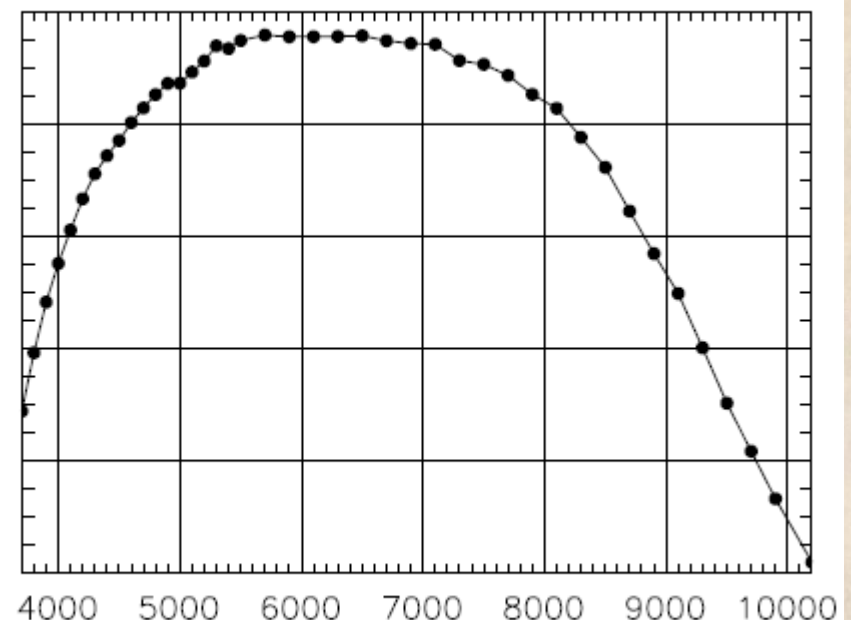
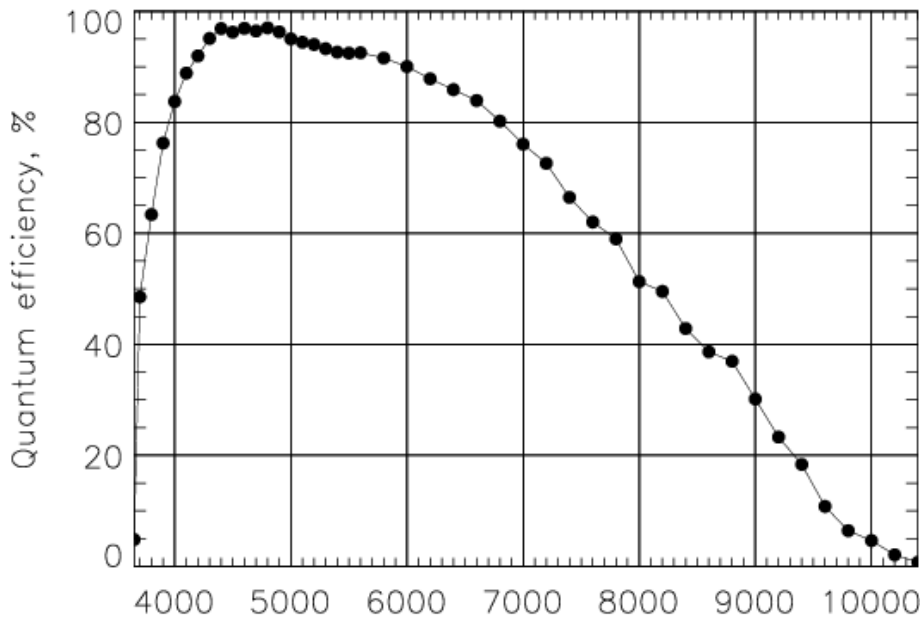
(П.В. Щеглов, «Проблемы оптической астрономии», 1980)

«Синяя» ПЗС - SCORPIO-1

«Красная» - SCORPIO-2

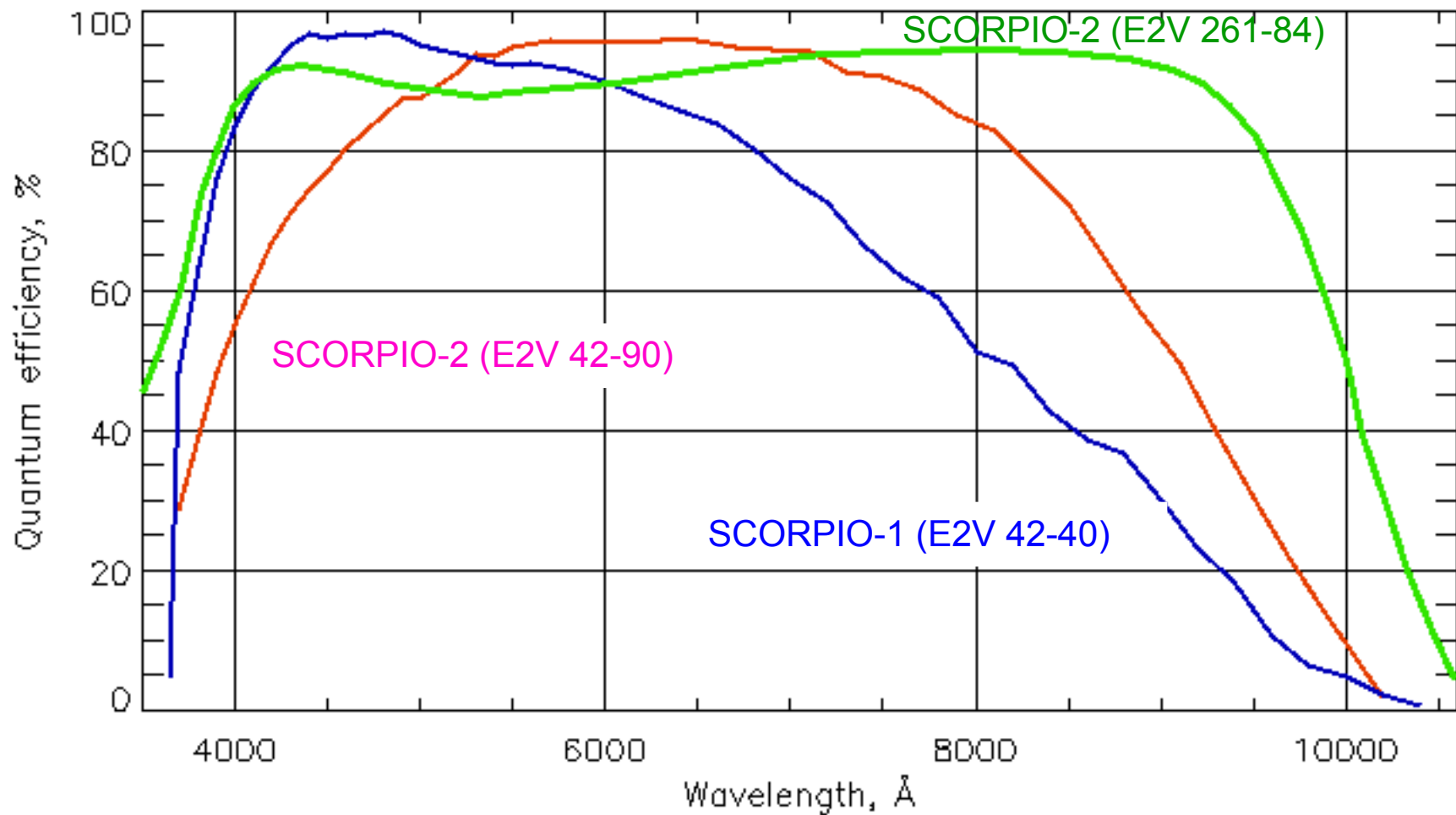
EEV CCD42-40 Node=B bin=2x2

E2V CCD42-90 red Node=A bin=1x2



Wavelength, Å
2008/27/12

Wavelength, Å
2008-12-24



Калибровочные накопления при спектральных наблюдениях со SCORPIO-1/2:

- **BIAS** – кадры «тока смещения»
- **NEON** – калибровка шкалы длин волн
- **FLAT** – спектральное «плоское поле» (учет неоднородности чувствительности, дефектов и клиновидности щели, фринги)
- **13 dots** – коррекция геометрических искажений (только SCORPIO-2)

DARK – темновой ток (здесь не актуален)

Калибровка по стандартным звездам — в следующей лекции)

Режимы считывания ПЗС

Binning:

2x2 – для изображений (map)

(на SCORPIO-2 – только центр поля 2048x2048)

1x2 – для спектров (obj, neon, flat):

дискретизация вдоль щели – $0.36''/\text{px}$ – достаточно даже для наблюдений с seeing = $1''$

4x4 — сканирующий ИФП

Скорость считывания при спектральных наблюдениях (EEV42-40)

	шум	Время считывания	Тип накоплений
SLOW	1.8 e	180 с	obj (для эстетов)
NORM	2.5 e	85 с	obj (обычно)
FAST	4 e	30 с	Neon, flat, sunsky, яркие звезды

Gain (перевод фотоэлектронов в отсчеты ПЗС):

High = 0.5 e/ADU – большинство накоплений obj

Low = 2.0 e/ADU – Neon, flat, sunsky, map, яркие звезды

«Квант преобразования» $gain=e/ADU$

Прямое измерение — по наблюдаемой статистике отчетов на разных уровнях сигнала.

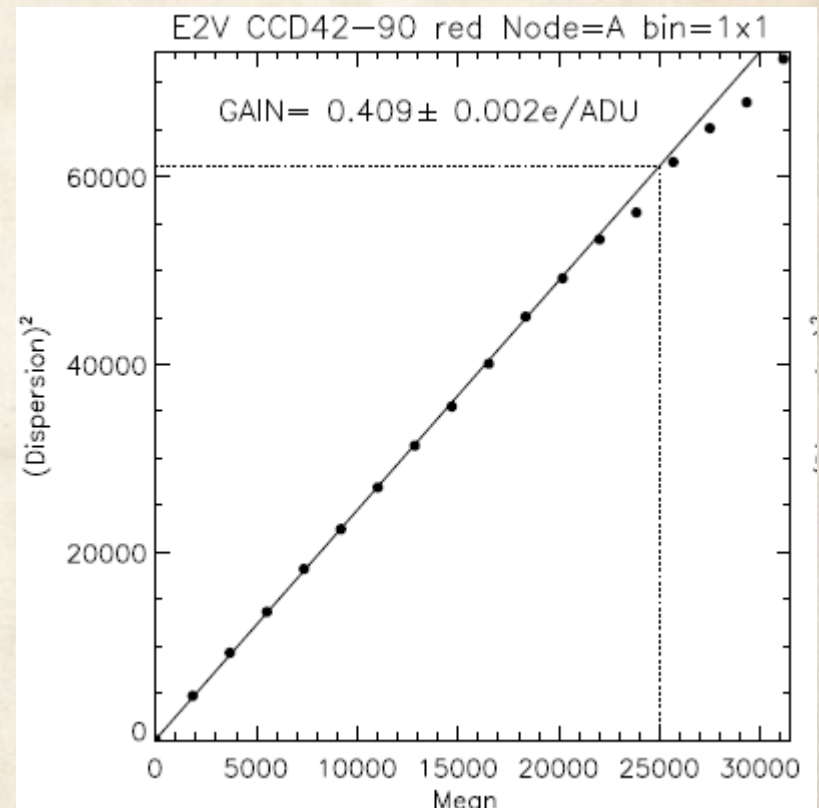
$$gain = \frac{e}{ADU}, \quad ADU = \frac{e}{gain}, \quad e = ADU \cdot gain$$

$$\sigma_{ADU} = \frac{\sigma_e}{gain} = \frac{\sqrt{e}}{gain} = \frac{\sqrt{gain \cdot ADU}}{gain} = \sqrt{\frac{ADU}{gain}}$$

$$gain = \frac{ADU}{\sigma_{ADU}^2}$$

Уход от неоднородности чувствительности - снимаем по два кадра с одной экспозицией, вычитаем один из другого, измеряем по разности дисперсию (σ^2) делим на 2.

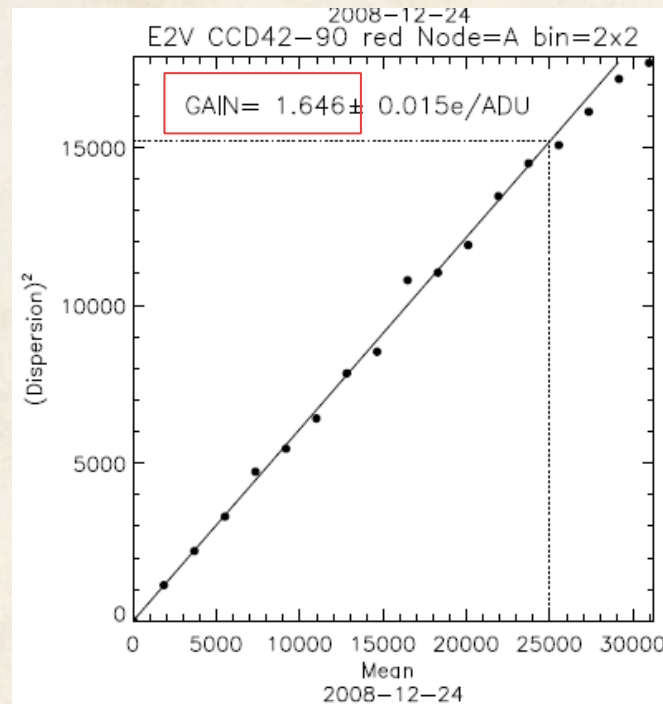
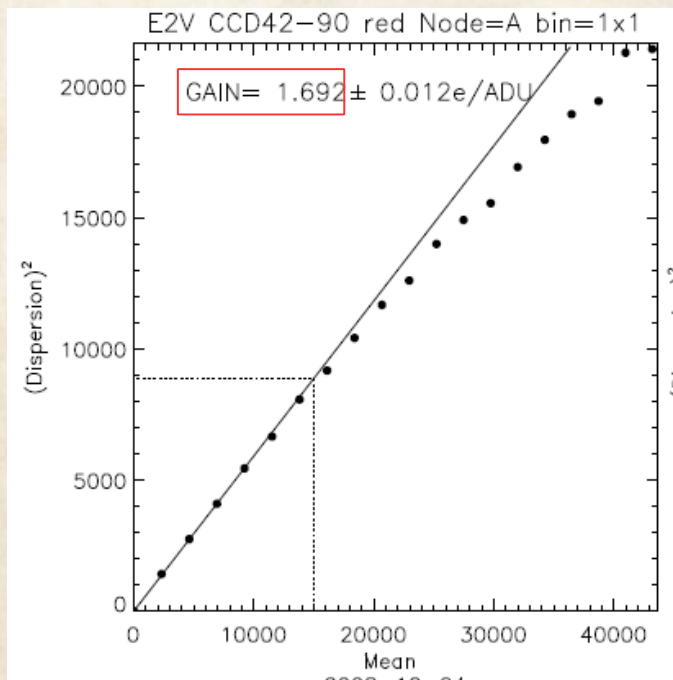
$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$



Реальное поведение gain

Имеется предел насыщения, зависимость от способа считывания (биннинг, узел)

А изготовители сказали, что GAIN=2 :)



Надо обязательно самим выполнять такие измерения — это часть «стандартного исследования приемника»

Нарушение статистики отчетов

Пуассоновская статистика – для фотонов, но не для фотоэлектронов.
Для оценки её нарушения - фактор ~~ФАНО~~ Fano (1947, PhysRev, 72, 26)

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, 2016, том 71, № 3, с. 396–400

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЯ СТАТИСТИКИ ОТСЧЕТОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ С ПЗС ПОСРЕДСТВОМ ФАКТОРА ФАНО

© 2016 И. В. Афанасьева^{1,2*}

В среде астрономов сложилось мнение, что матричные приборы с зарядовой связью являются практически идеальными светоприемниками, не искажающими входной пуассоновский сигнал, и наблюдения с ними ограничены только статистикой исходного потока.

В случае закона Пуассона дисперсия отчетов будет пропорциональна среднему значению:

$$D_I(t) = gain \times \overline{I(t)}.$$

Распределение отчетов при регистрации изображения в целом отличается от порождающего его распределения фотонов. Это обусловлено многими факторами:

- (1) шумы считывания;
- (2) неоднородность чувствительности матрицы;
- (3) нестабильность и нелинейность передаточной функции;
- (4) следы от космических частиц и эффекты интерференции на «тонких» матрицах (фринги).

Фактор Фано в реальных ПЗС

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

(read out noise, RON)

Как видно из рис. 1, отличия от пуассоновского распределения наиболее заметны на малых потоках и определяются шумом считывания и шириной полосы тракта регистрации:

$$k(t) \approx \frac{RON^2}{I(t)}$$

Область, где статистика не искажается

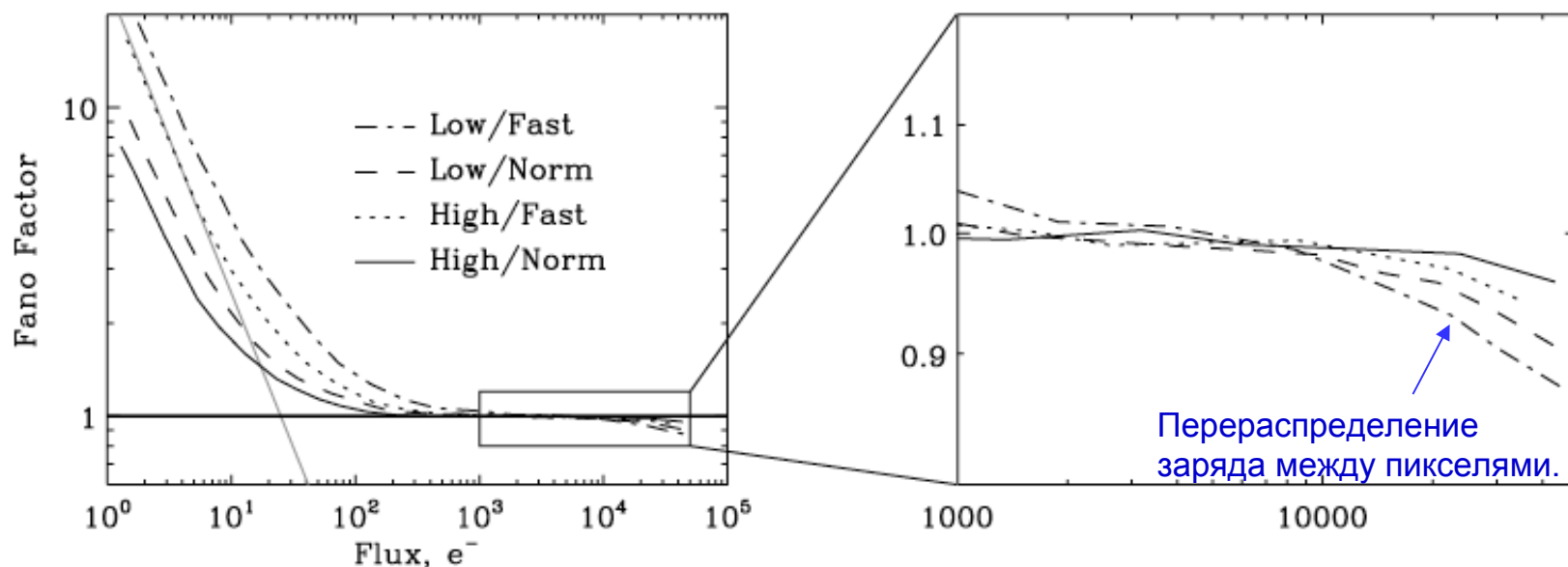
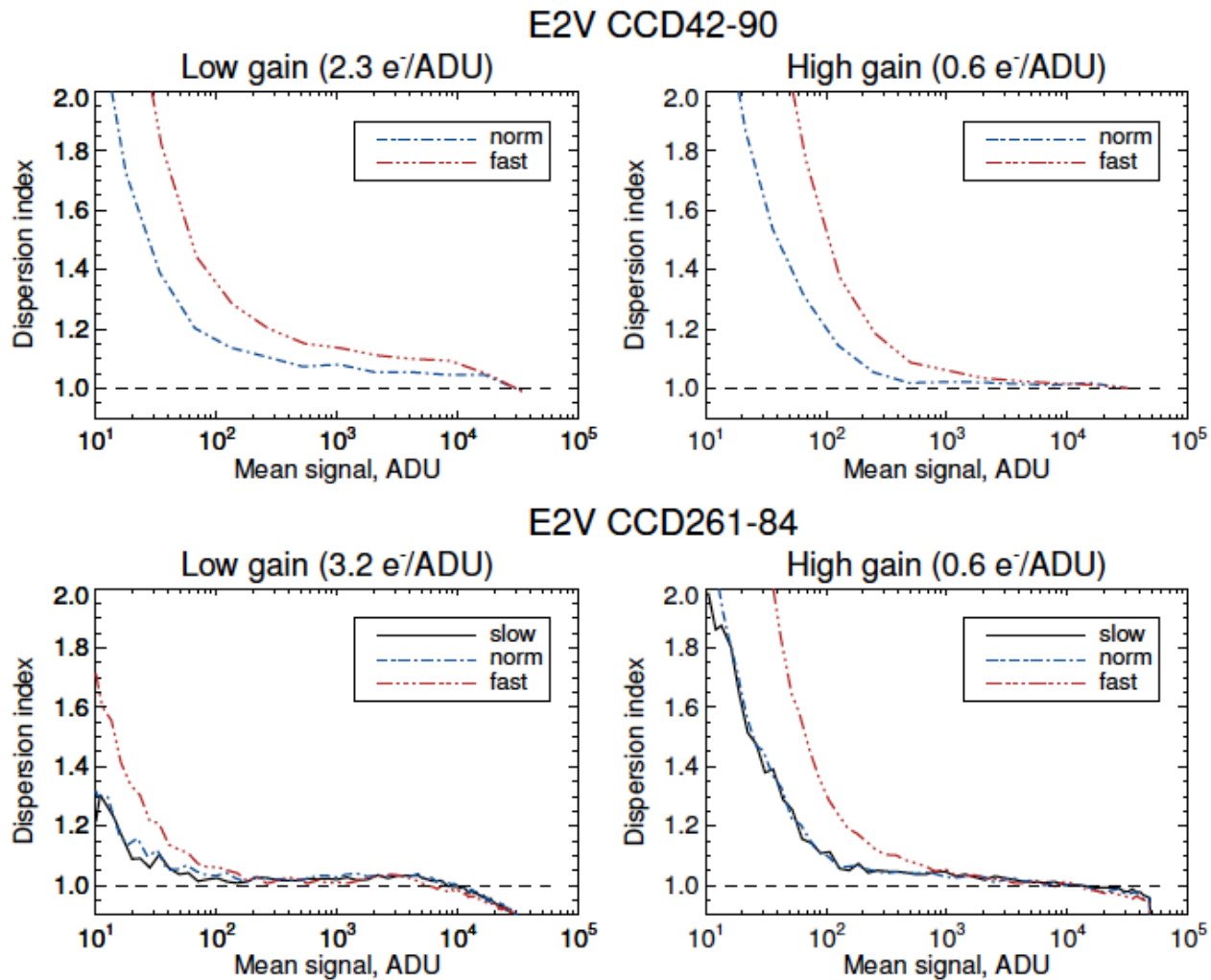


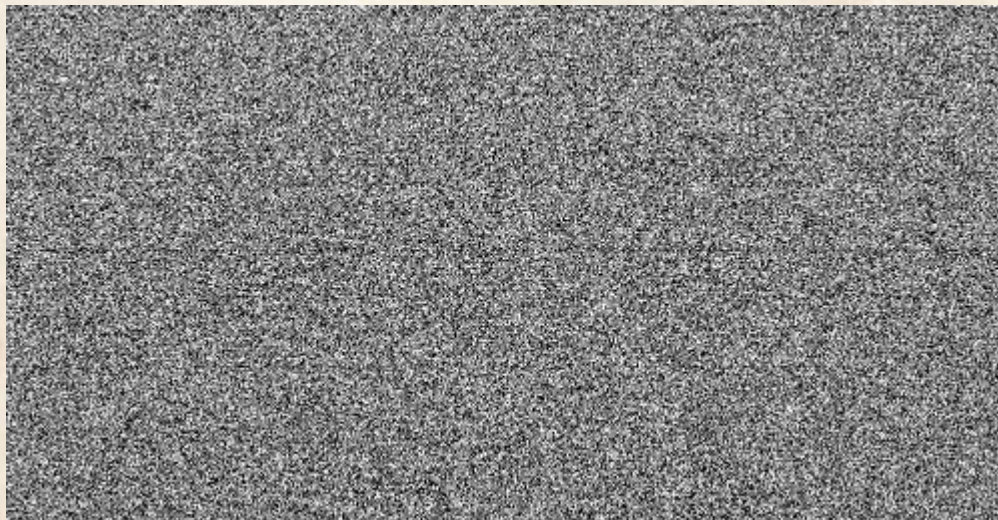
Рис. 1. Зависимость фактора Фано в изображении плоского поля от среднего потока для различных режимов работы тракта регистрации CCD42-90: *Low* и *High* — значения *gain*, равные $1.82e^-/ADU$ и $0.48e^-/ADU$ соответственно, а

Индекс дисперсии для ПЗС SCORPIO-2



Afanasieva et al 2023, Photonics

BIAS (“ток смещения”, “электронный ноль”)



Кадр с нулевой экспозицией -
постоянная добавка во всех видах
накоплений ПЗС

Уровни bias задаются аппаратно:

EEV 42-40 (SCORPIO) = 100 counts

E2V 42-90 (SCORPIO-2) = 1000 counts

98-100 counts. Если на кадрах заметна структуры амплитудой более 1-2 counts- значит что-то не так.

Уровень шума на кадрах bias равен шуму считывания

От ночи к ночи уровень bias меняется обычно в пределах $\pm 0.5 e$

Обычно усредняют десятки кадров bias (=superbias, meanbias)

Усредненный BIAS

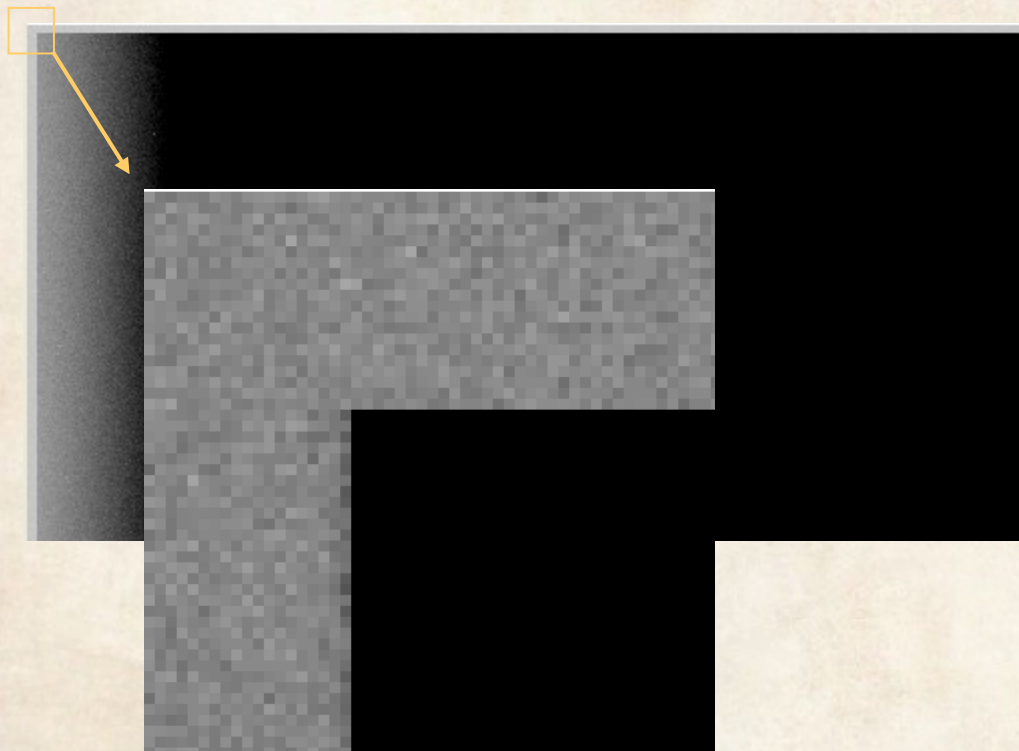
Зачем усредняем?

Чтобы не вносить в наблюдения дополнительный шум!

N	$\langle \text{bias} \rangle$
1	$2.5 e$
10	$0.79 e$
20	$0.56 e$
30	$0.46 e$

Минимальный наблюдаемый шум от фона неба в безлунную ночь с решеткой VRHG2300 за 20 минут (вместе с шумом считывания): 3-4e

OVERSCAN



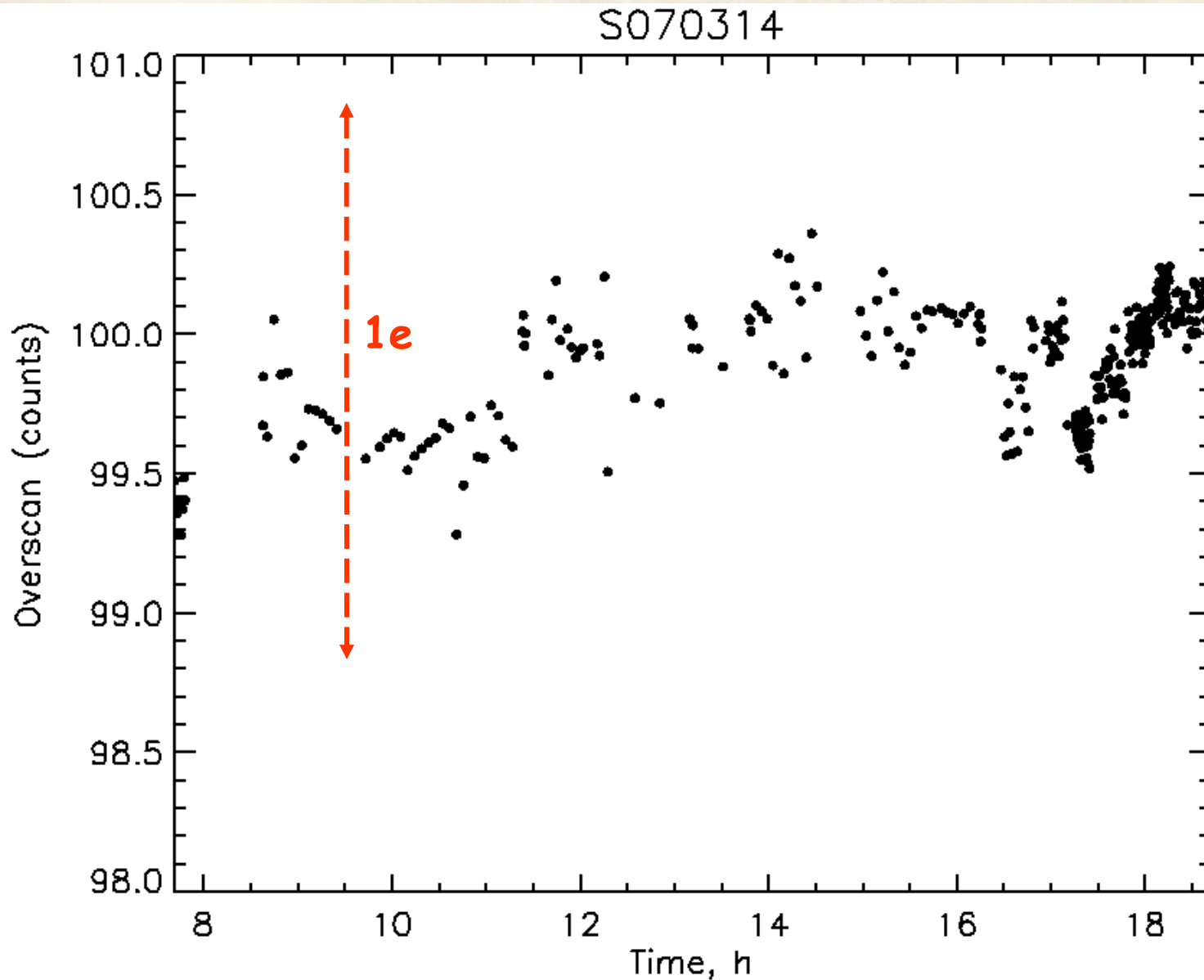
Кадры с bin 1x2 (SCORPIO):
«реальные пиксели»: 2048x1024
размер файлов: 2068x1046

У нашей ПЗС
OVERSCAN=BIAS, но в случаях
других приборов это надо
обязательно проверять!

Поскольку обычно нет вариаций уровня bias по полю, то вместо superbias можно вычитать из кадров просто средний overscan.
Но вдруг сбой контролера ПЗС? Поэтому лучше вычитать и superbias и разницу overscan:

$$(\text{Signal} + \text{Over1}) - (\text{MeanBias} + \text{Over2}) = (\text{Signal} - \text{Meanbias}) + (\text{Over1} - \text{Over2})$$

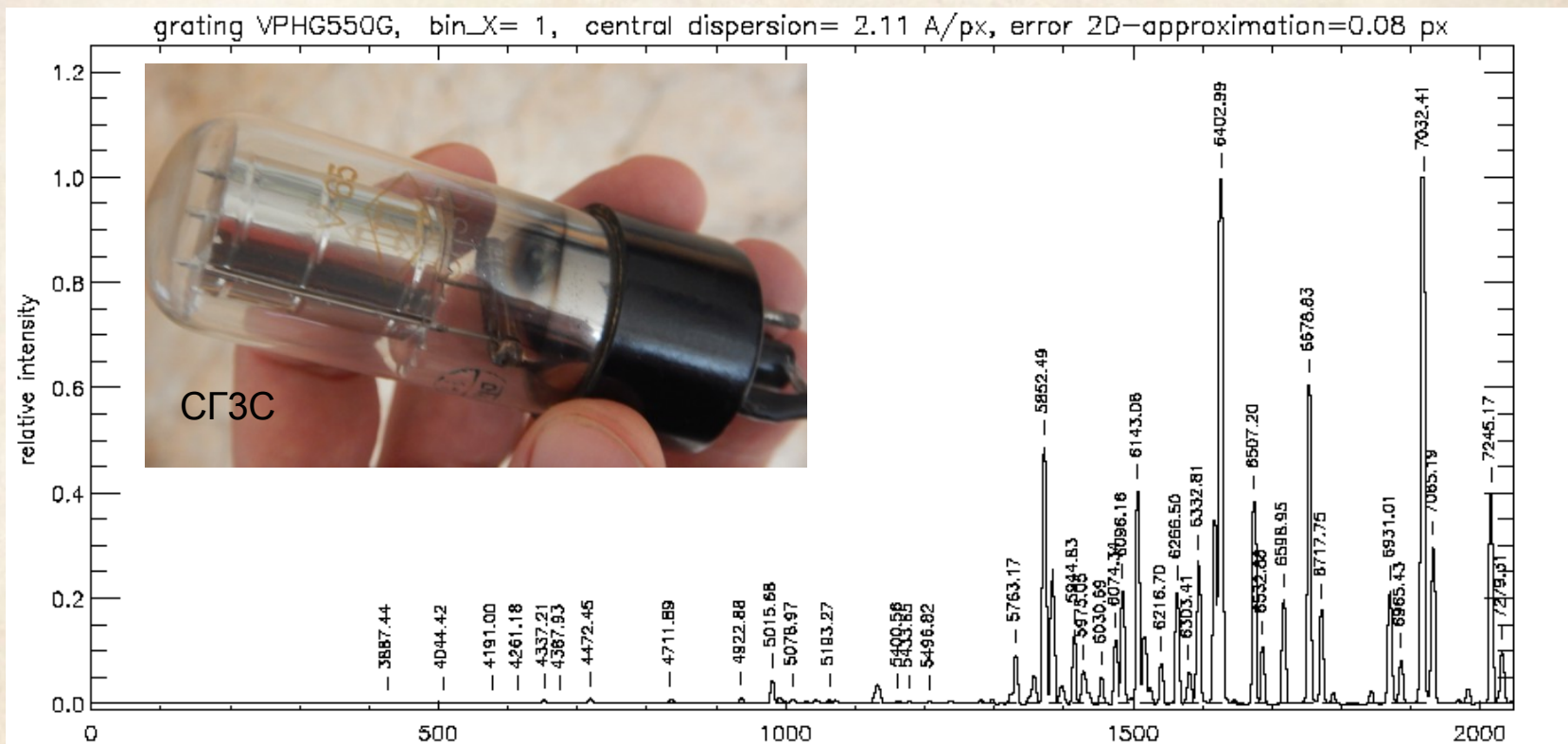
Вариации уровня BIAS в течении ночи



Темновой ток DARK

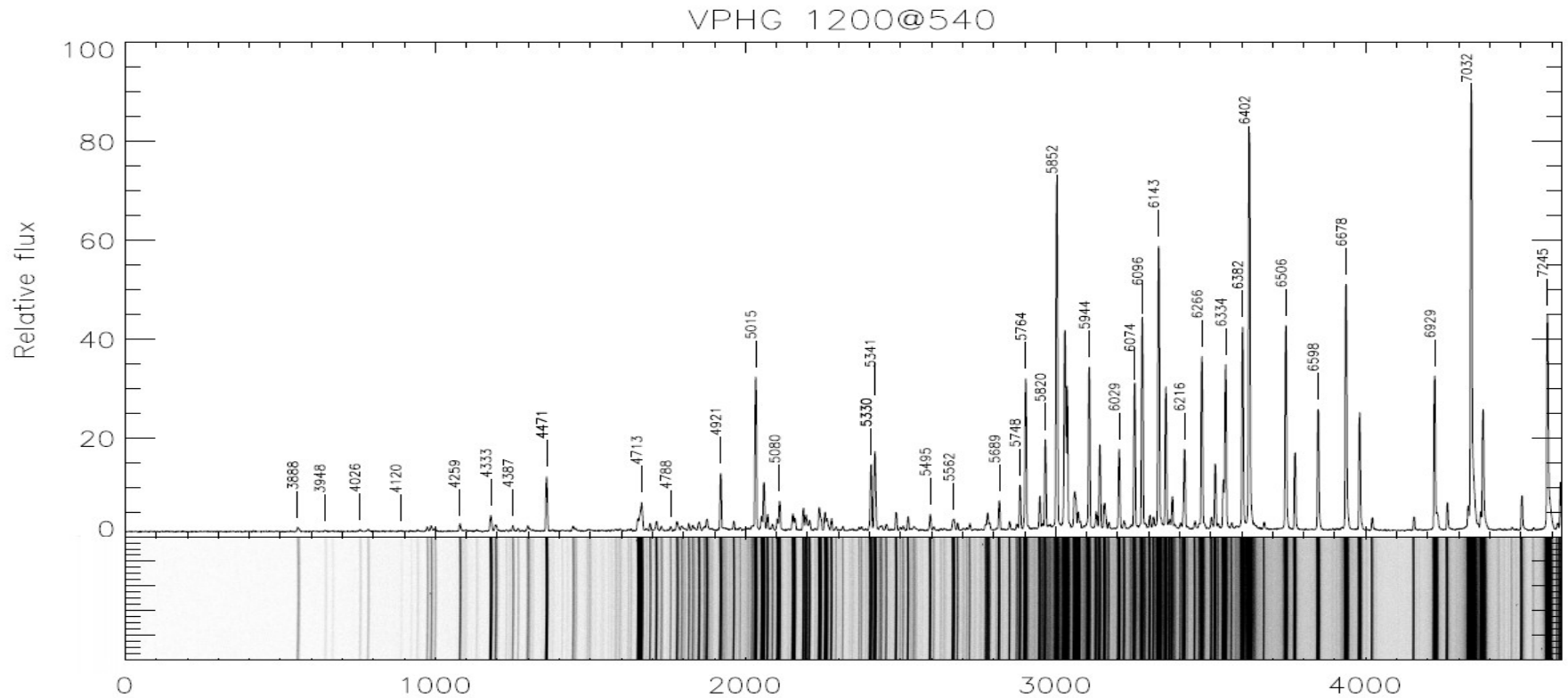
За 20 минут у ПЗС EEV 42-40 темновой ток около 0.6 е (1 ADU, gain=high), что в большинстве наблюдений несущественно, а количество «горячих пикселей» очень мало. Т.е. в большинстве наблюдений DARK не требуется. Но, если наблюдения велись с другими ПЗС (пример — старый фотометр с Цейсс-1000) — надо усреднять и вычитать из накоплений кадры DARK (с той же экспозицией) — там есть «горячие пиксели»

Калибровка шкалы длин волн



Основная проблема используемой лампы с He-Ne-Ar наполнением – слабые линии на длинах волн синее 5000Å , поэтому здесь нельзя экономить на временах экспозиций (см рекомендованные Техр в «Руководстве пользователя»)

Калибровка шкалы длин волн: SCORPIO-2



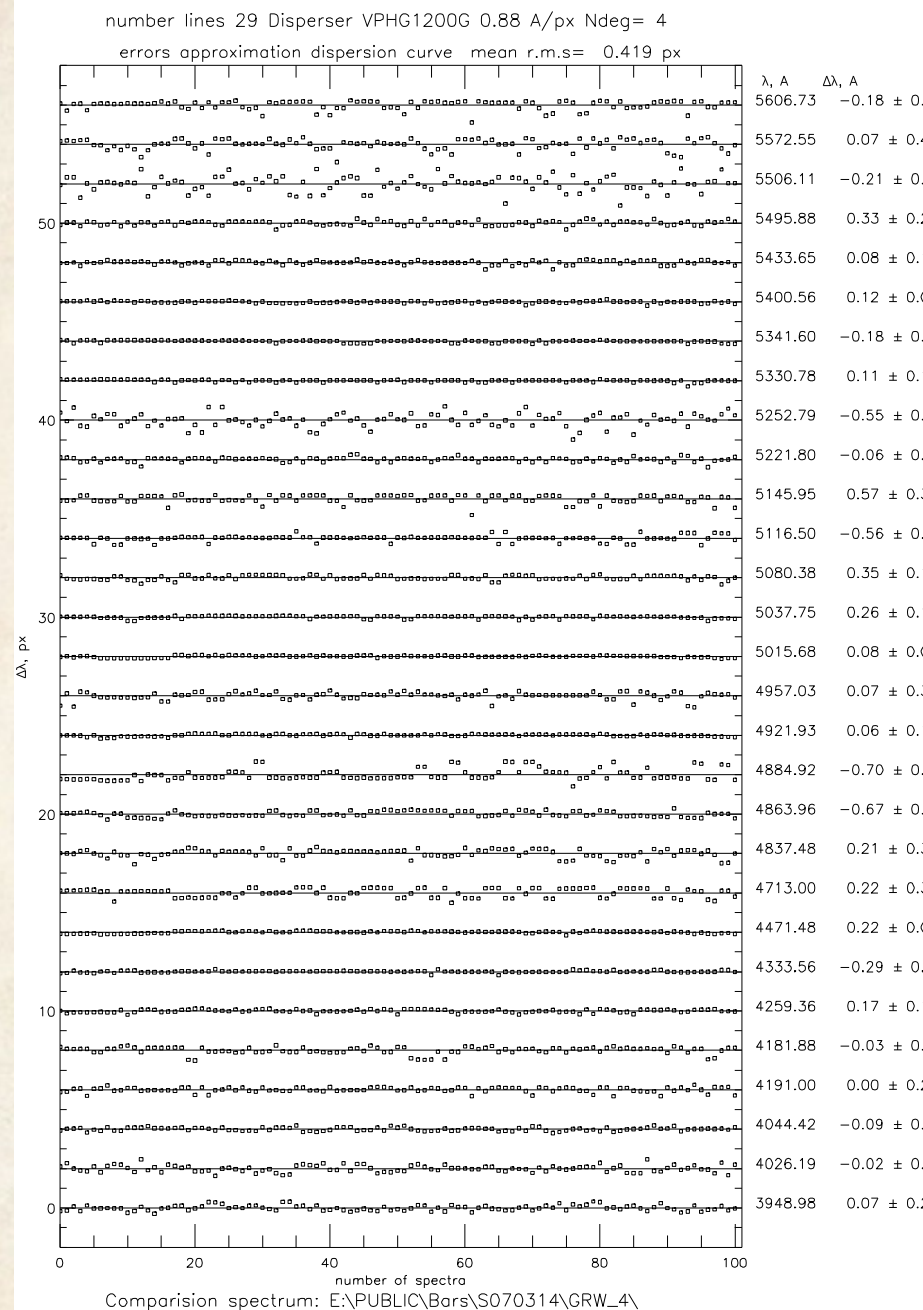
Матрица E2V CCD42-90
 ширина щели - 1"
 BinX=1
 BinY=2
 gain=low

grism	t_{exp} (counts)		
	NEON	FLAT/QUARTZ	FLAT/LEDs
VPHG 940@600	50 сек (30 000)	5 сек (40 000)	20 сек (28 000)
VPHG 1026@735	45 сек (30 000)	5 сек (37 000)	35 сек (35 000)
VPHG 1200@540	70 сек (31 000)	5 сек (23 000)	35 сек (30 000)
VPHG 1200@860	120 сек (15 000)	15 сек (28 000)	30 сек (30 000)
VPHG 1800@590	90 сек (27 000)	15 сек (30 000)	60 сек (25 000)
VPHG 1800@660	45 сек (24 000)	10 сек (32 000)	70 сек (30 000)
VPHG 2400@415	180 сек (4 000)	60 сек (29 000)	180 сек (18 000)

Дисперсионная зависимость

$$\lambda = F(x, y)$$

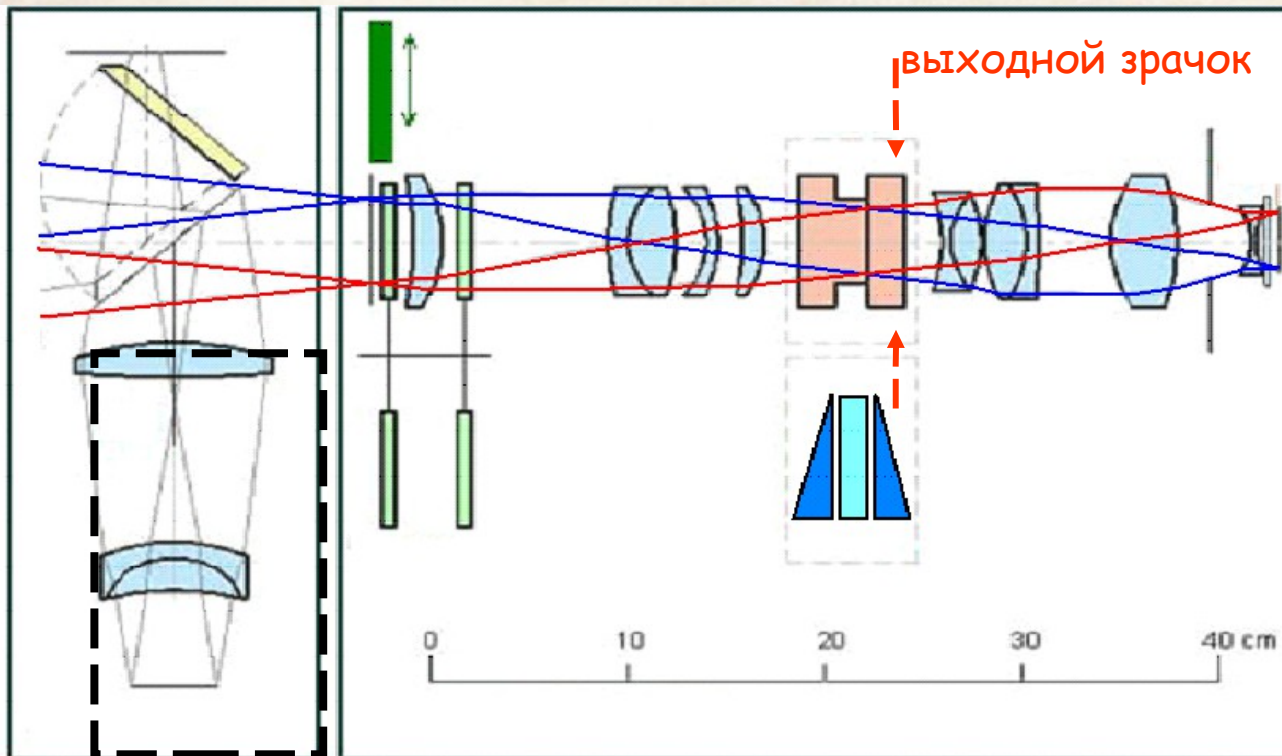
Если процедура обработки проводится корректно, с целью минимизировать остаточные отклонения измеренных положений реперных линий, то в задаче спектроскопии со SCORPIO не важно, в какой системе и по каким алгоритмам выполняется анализ данных.



Контроль шкалы длин волн – по линиям спектра ночного неба

Засветка тракта калибровки (телецентризм)

Интегрирующая сфера
(шар Ульбрихта)



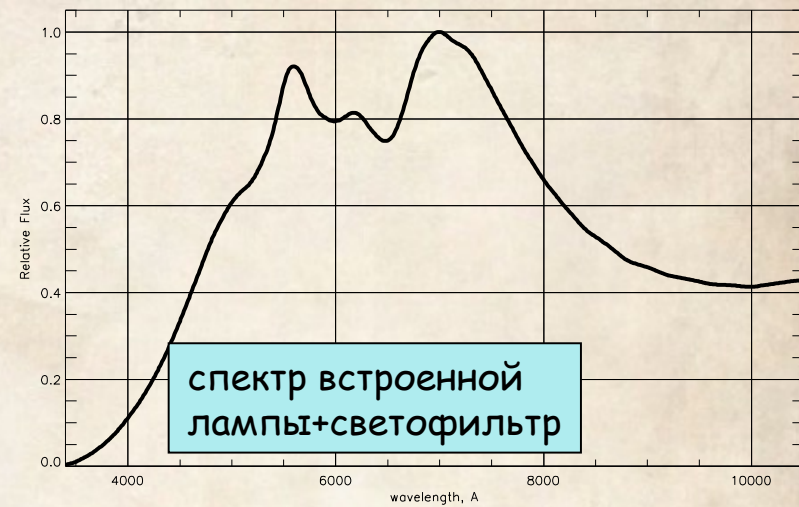
Важно, чтобы угол сходимости пучка лучей от калибровочного источника был близок к углу сходимости пучка лучей от телескопа ($F/4$). Другими словами, **положение выходного зрачка для объекта и калибровки должны совпадать**.

На SCORPIO-1/SCORPIO-2 такие усилия приложены (интегрирующая сфера + оптика переброса). Ошибка лучевых скоростей из-за нарушения телецентризма – не более 5-10 км/с

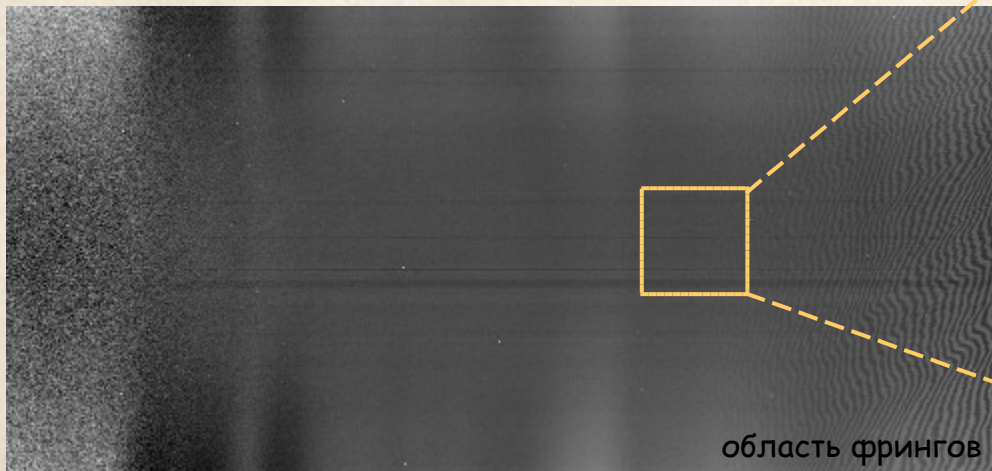
«Плоское поле» FLAT (SCORPIO)

Здесь смешаны:

- неоднородности чувствительности ПЗС
- клиновидность щели
- пропускание оптики
- форма спектра источника (лампы)



Нормировка на разрез вдоль дисперсии



- пыль вблизи ПЗС
- пыль на щели

- форма щечек щели

Проблема фрингов («муара»)

«Тонкие» ПЗС с обратной засветкой – высокая квантовая эффективность, но интерференция в слое кремния (fringes) в «красной» области спектра

Вид интерференционного узора зависит от
- спектрального распределения энергии в пикселе
- в определенной степени, от самого изображения:
свет упал в один пиксель, а интерференция — в соседнем

Поэтому, в реальности узор разный для объекта, линий неба и FLAT :(

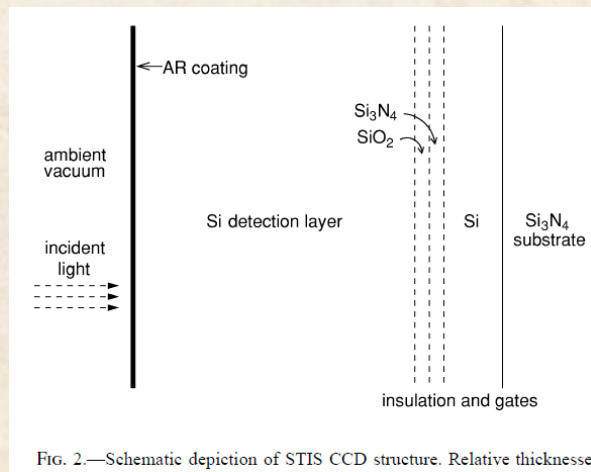
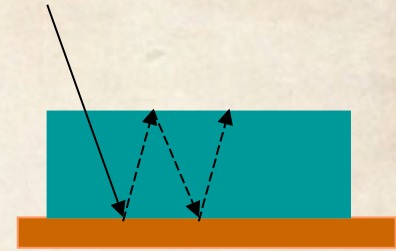
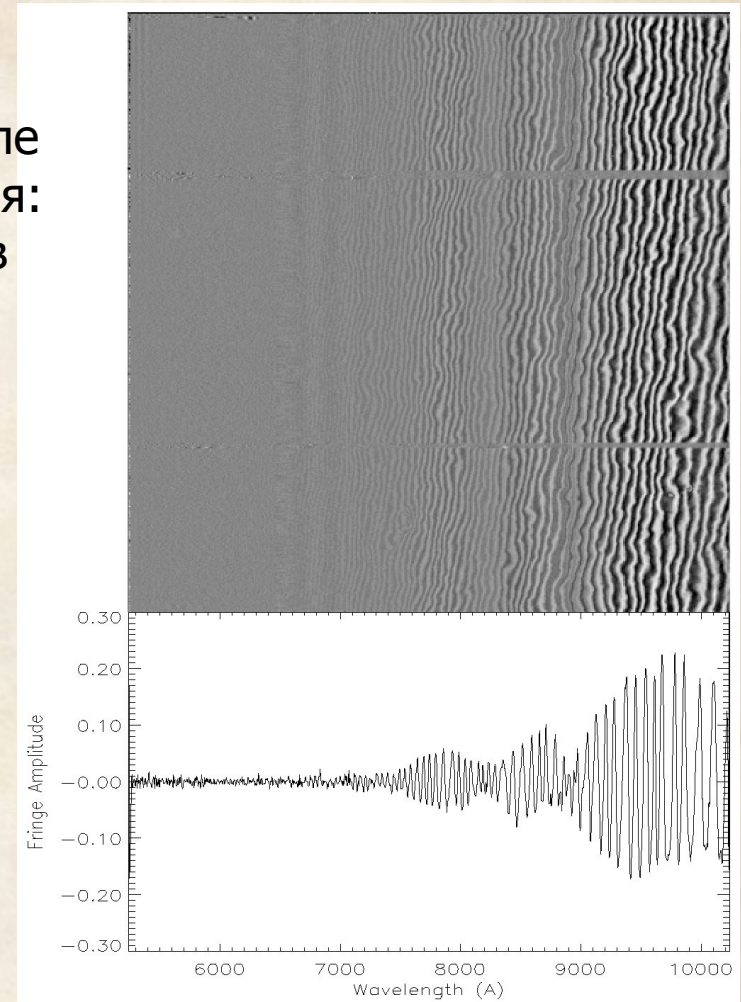
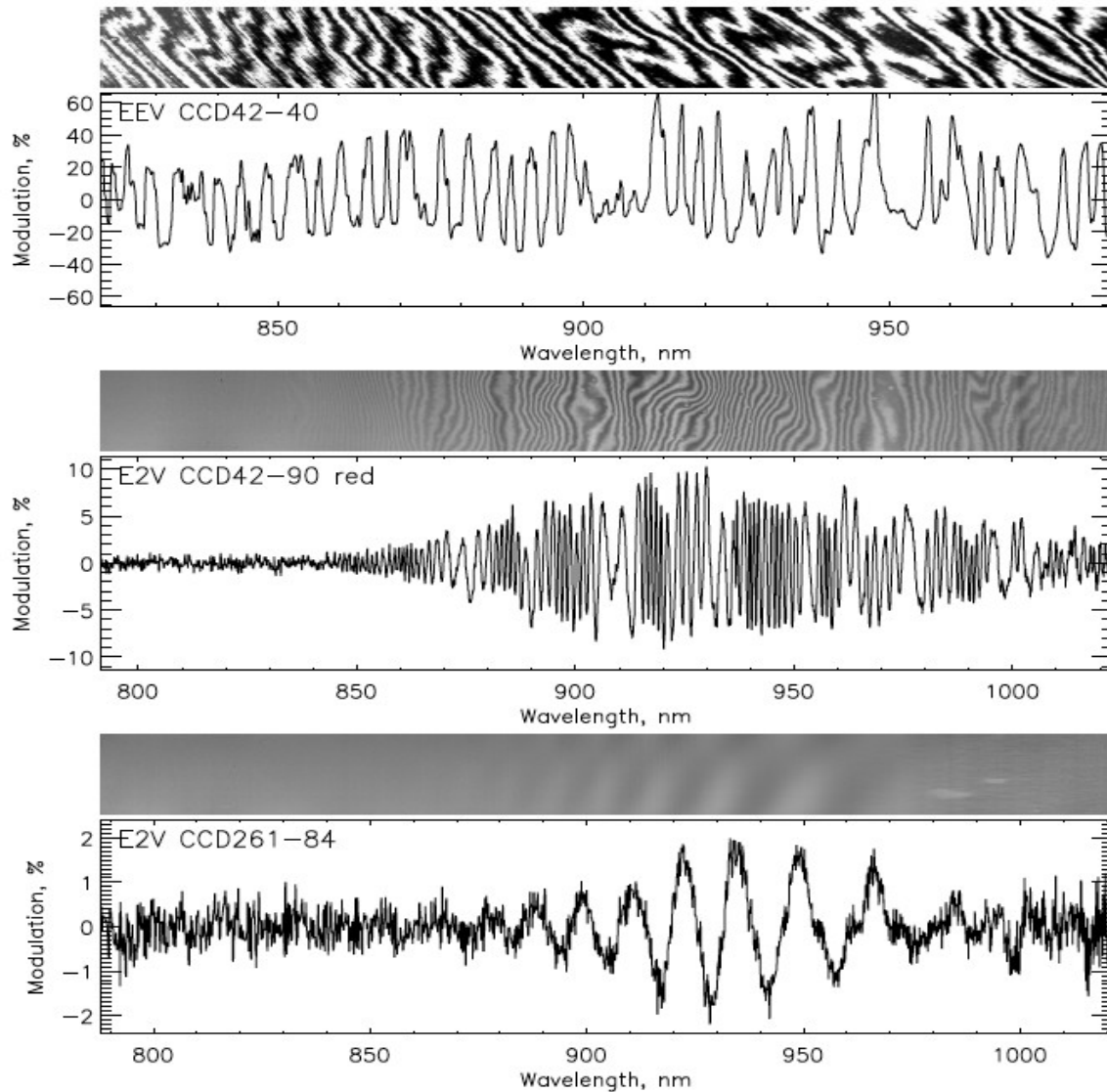


FIG. 2.—Schematic depiction of STIS CCD structure. Relative thicknesses



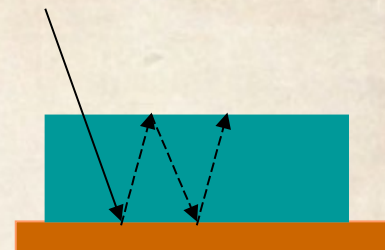
Пример тщательного моделирования этого эффекта:
Malumuth et al (2003PASP..115..218)

Эволюция фрингов в поколениях ПЗС



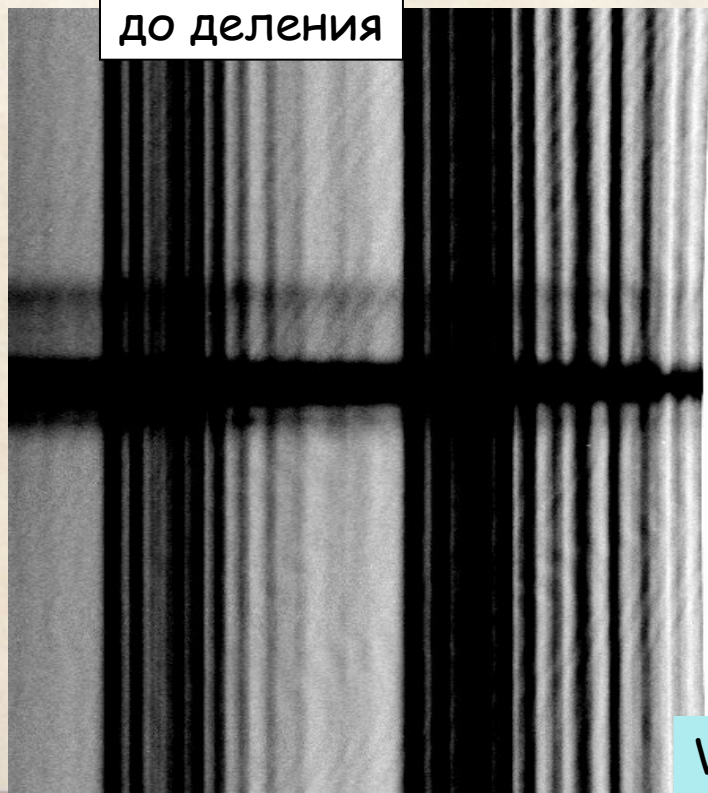
Afanasieva et al 2023, Photonics

Проблема фрингов («муара»)

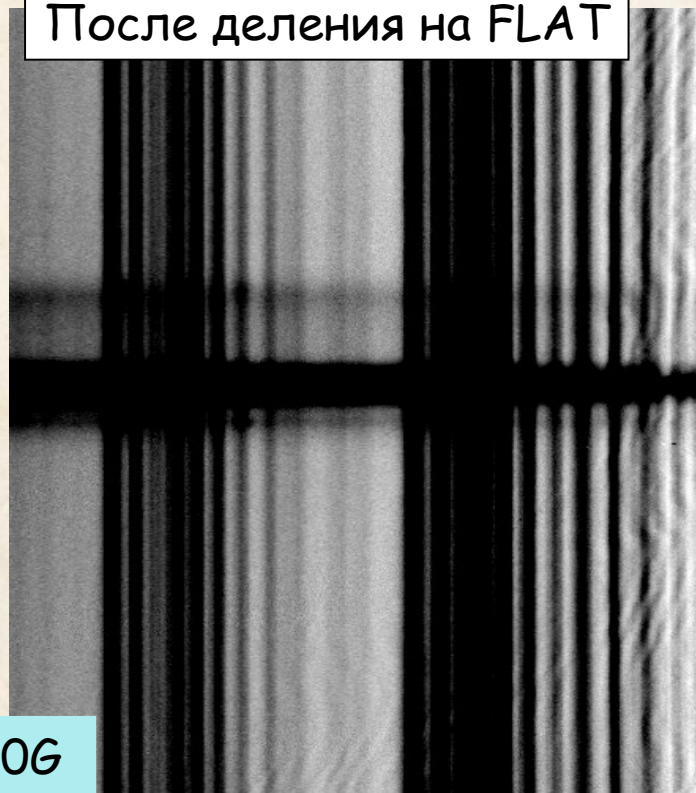


Корректнее фринги вычитать, но значительно чаще на них делят.
Это хорошо убирает фон, но может изменить поток в компактных деталях
Чем выше спектральное разрешение, тем лучше «убираются» фринги –
приближение монохроматического освещения в каждом пикселе

до деления



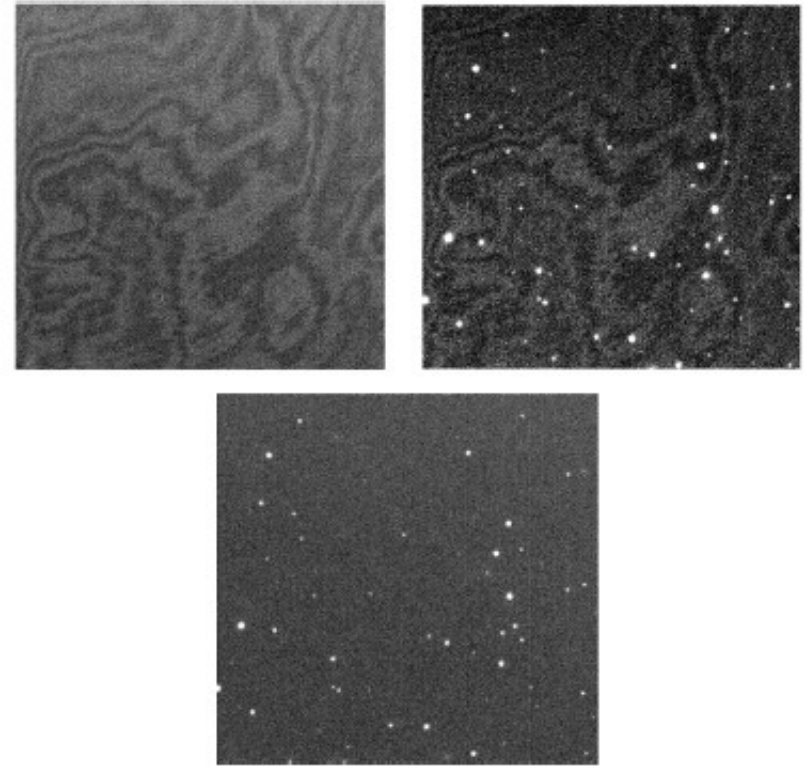
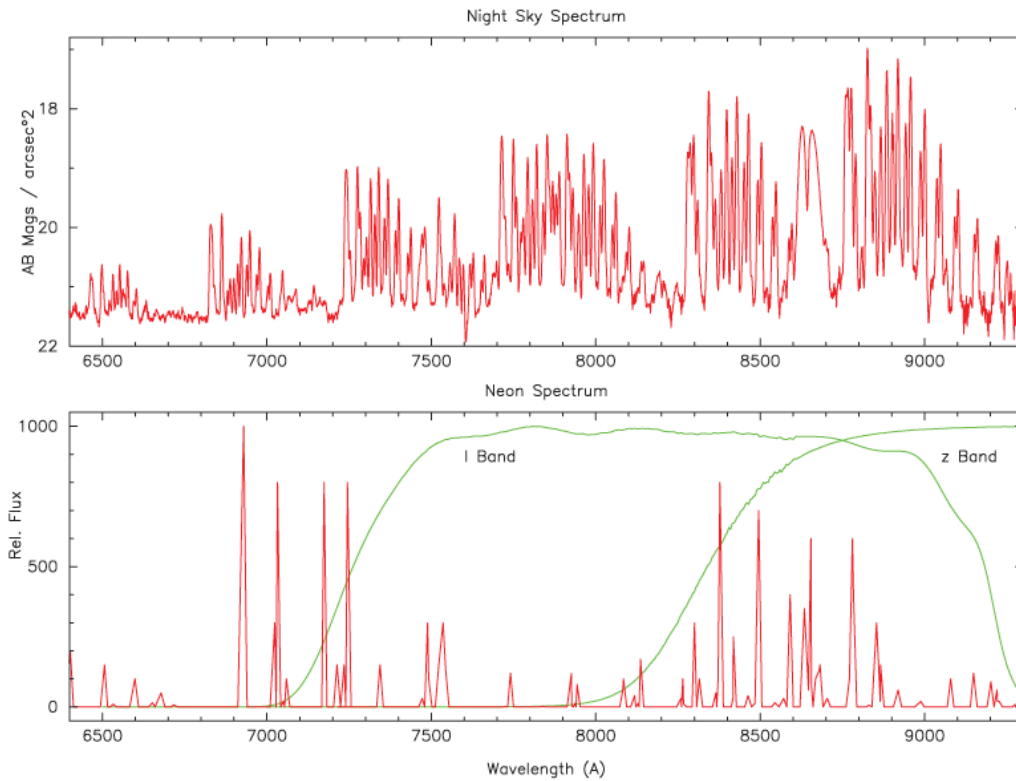
После деления на FLAT



VPHG550G

Howell 2012: neon flat-field

Спектр лампы с близким к небу спектральным составом



Фринги и фактор Фано

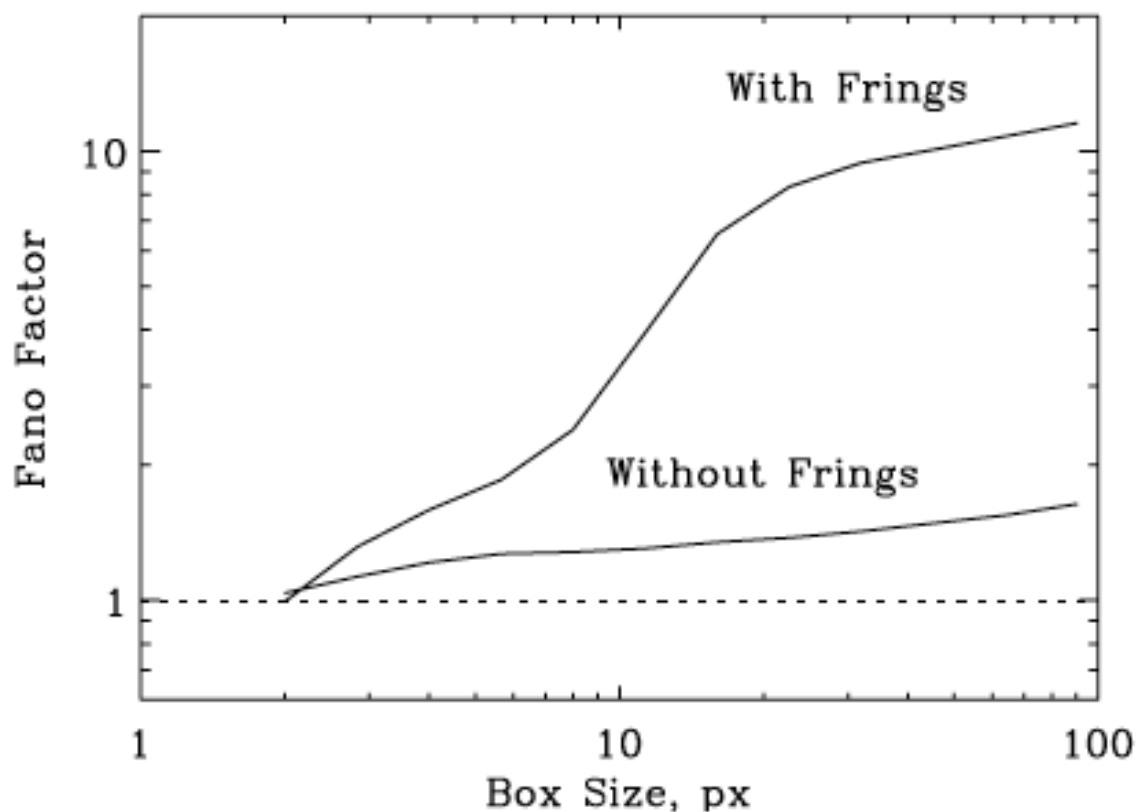
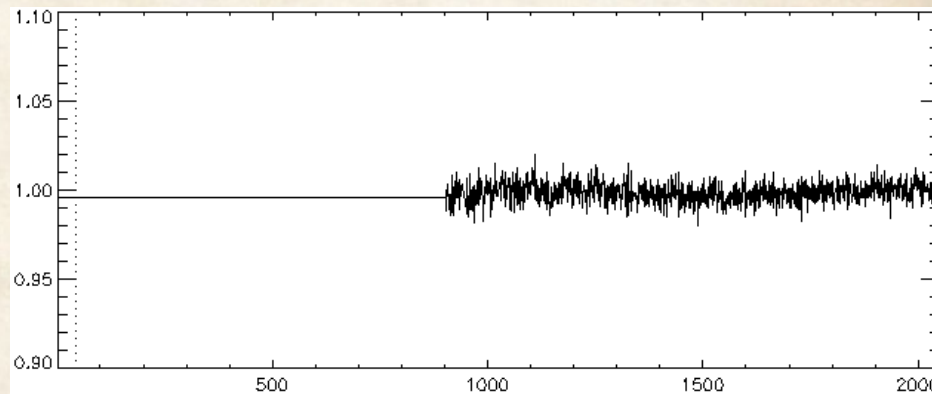
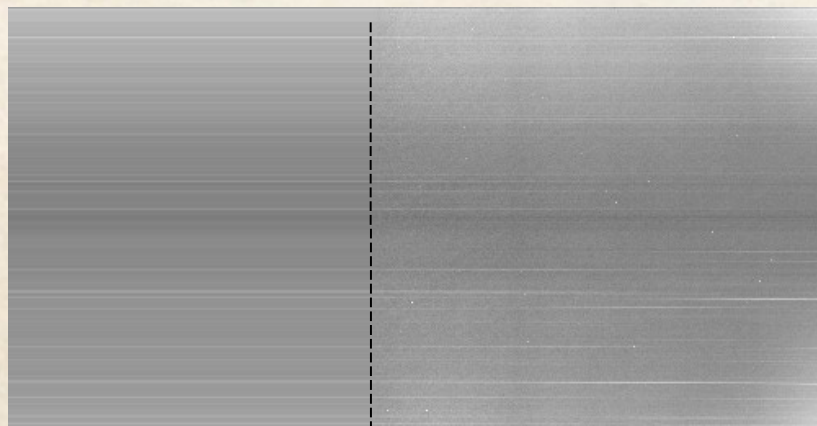
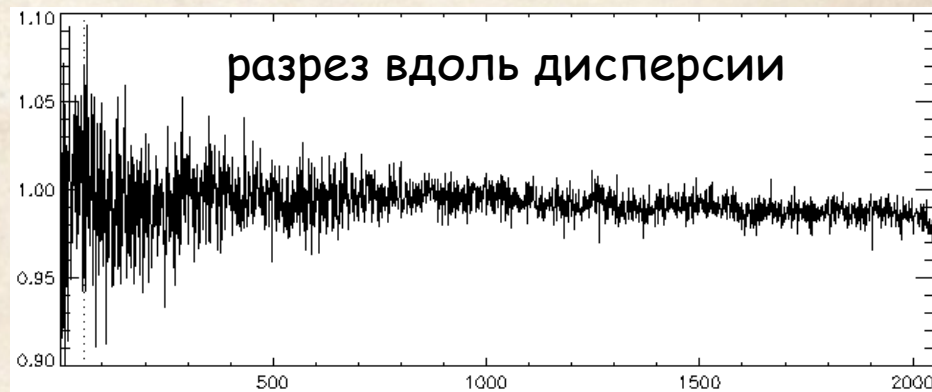
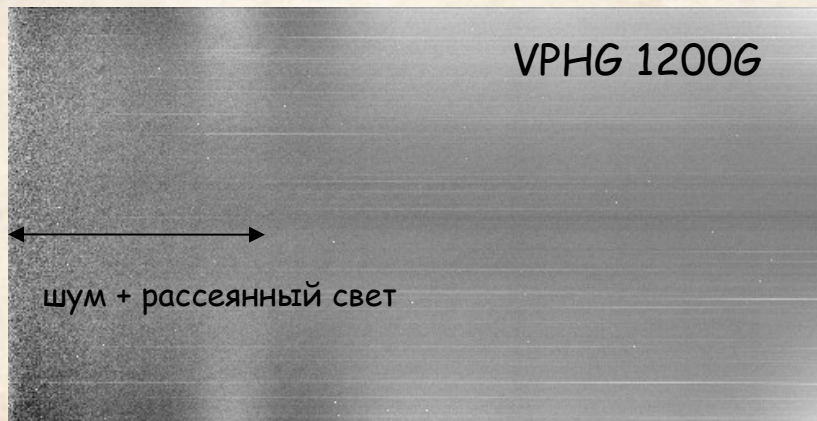


Рис. 2. Зависимость выборочного фактора Фано от размера фрагмента до и после удаления фрингов для CCD42-90. Штриховой линией показано значение, характерное для пуассоновского потока.

Афанасьева (2016)

Всегда ли надо делить на FLAT?

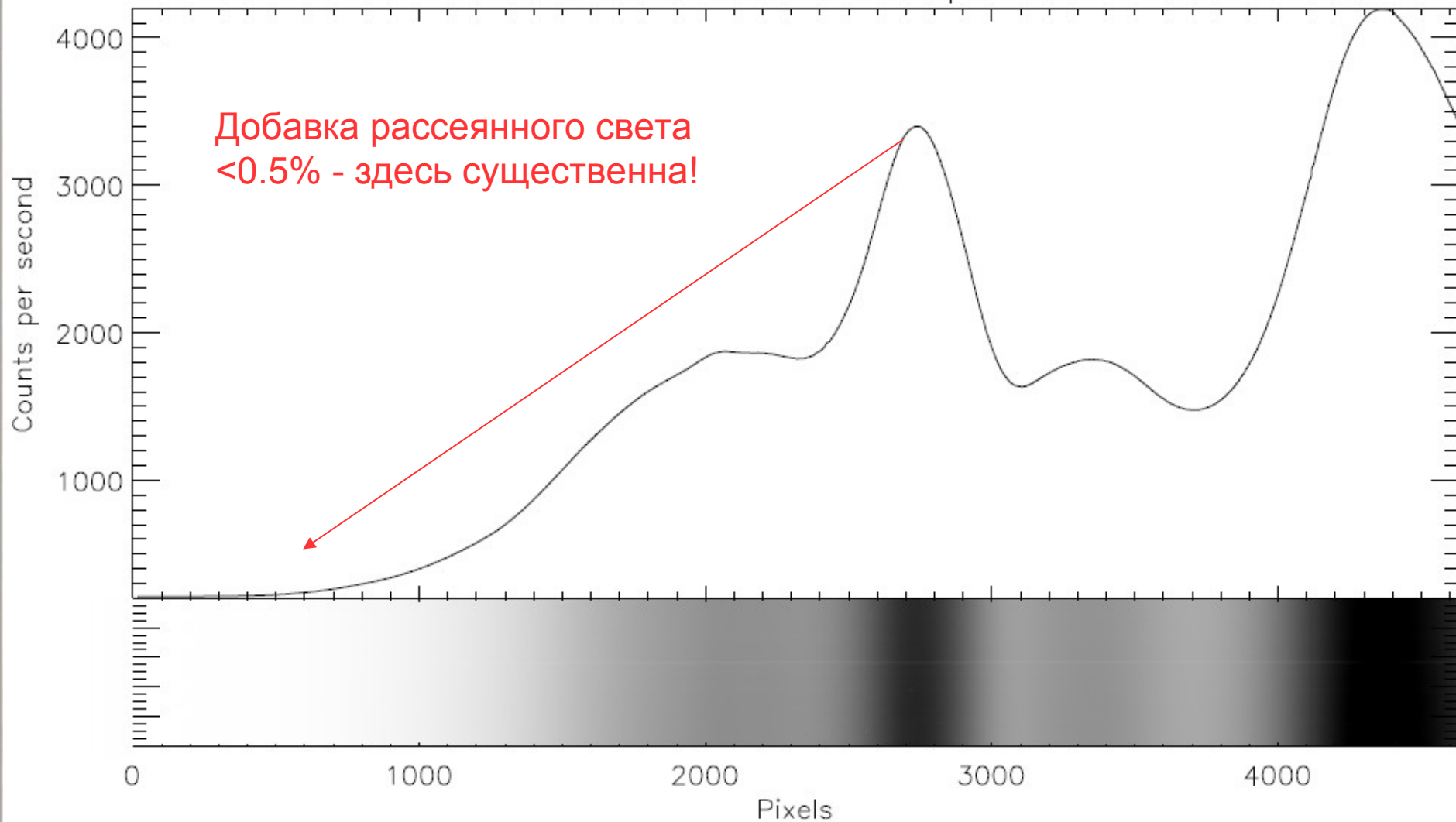


Усредняем (или экстраполируем) вдоль дисперсии в коротковолновой области (фрингов-то нет!):

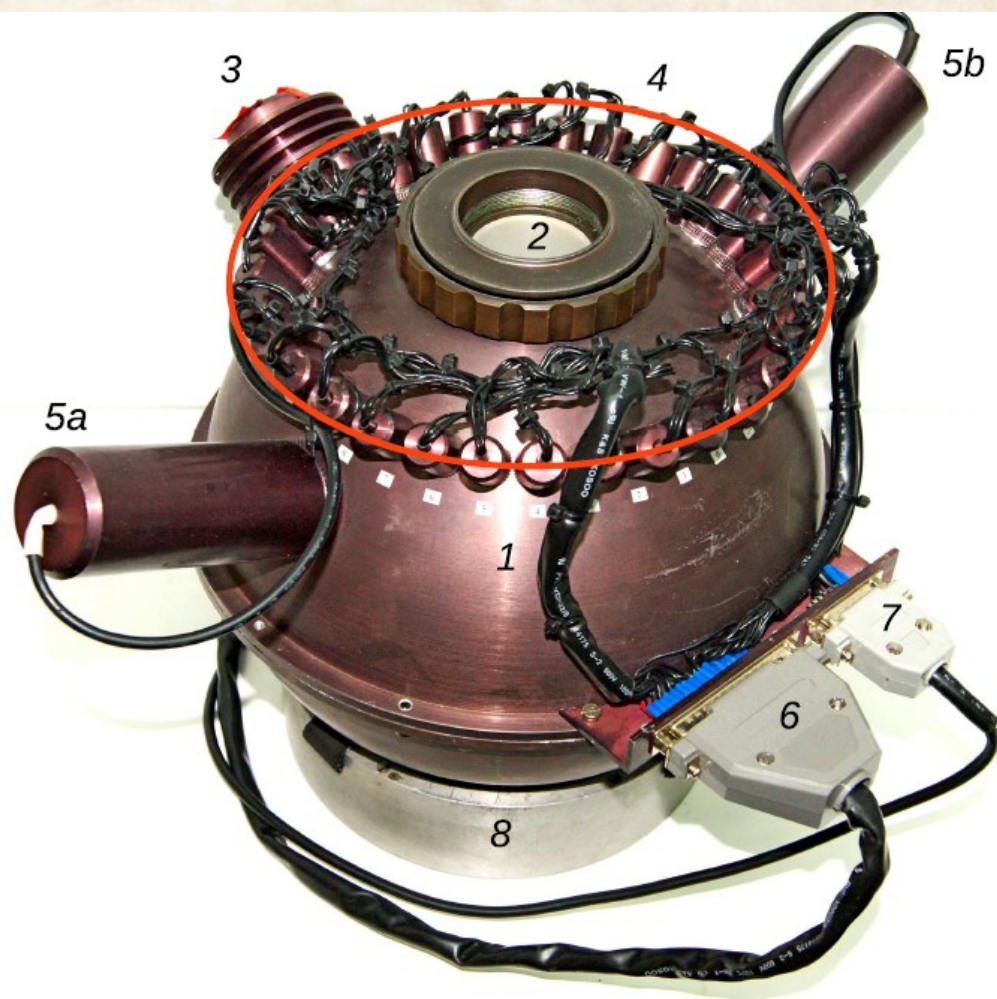
- пренебрегаем вариациями попиксельной чувствительности
- корректно учитываем вариации пропускания вдоль щели

Проблема рассеянного света в синей части

VPHG 1200@540 flat-quarts



SCORPIO-1/2: НОВЫЙ осветитель со светодиодами



Афанасьев и др, 2017, АБ

Рис. 2: Узел осветителя калибровки SCORPIO-2: 1 – интегрирующая сфера; 2 – крепление к платформе-адаптеру; 3 – кварцевая лампа; 4 – светодиодная система; 5a, 5b – He-Ne-Ag лампы; 6 – разъем управления и питания светодиодами; 7 – разъем питания He-Ne-Ag лампы; 8 – специальная подставка для транспортировки.

Свой выбор для каждой решетки

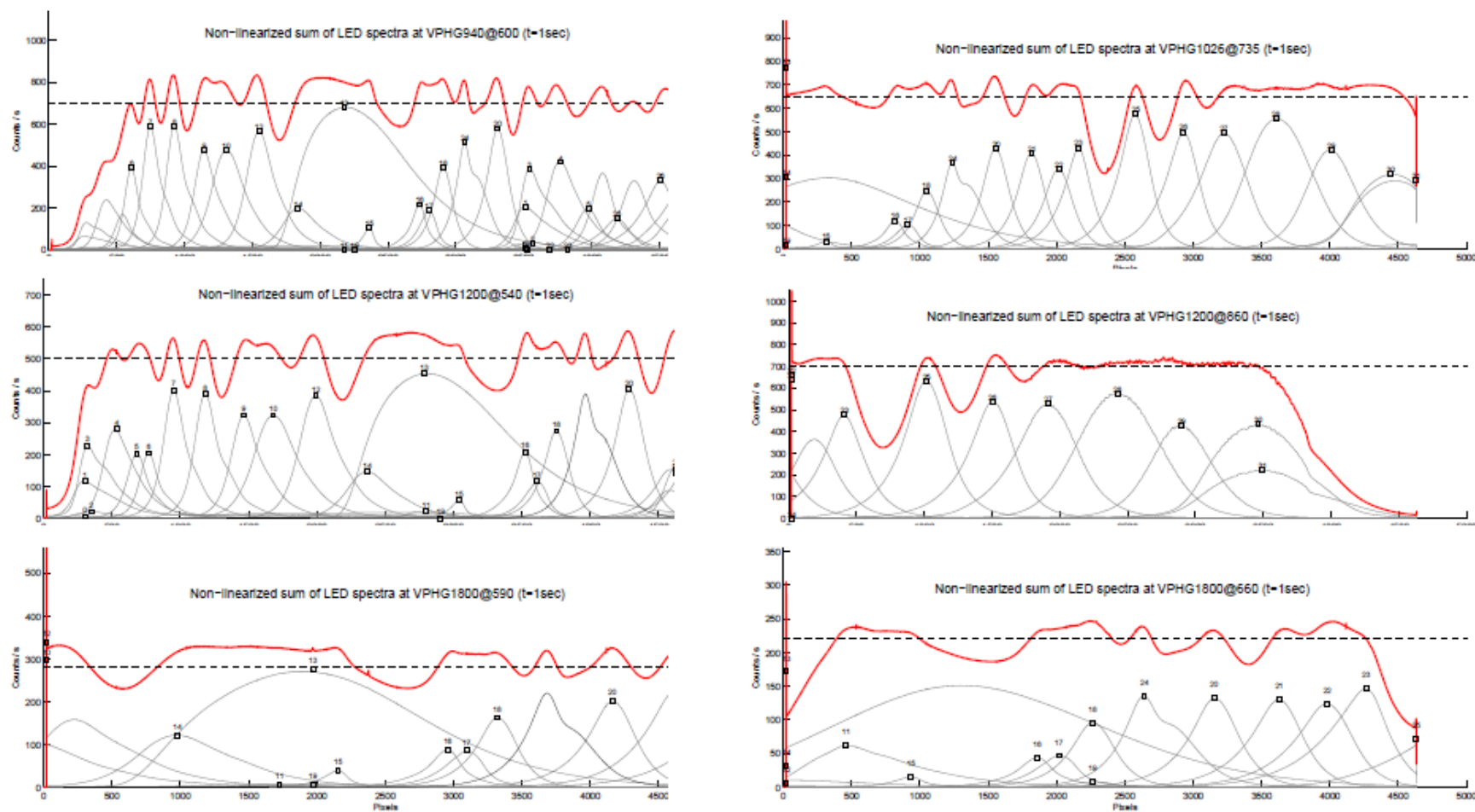
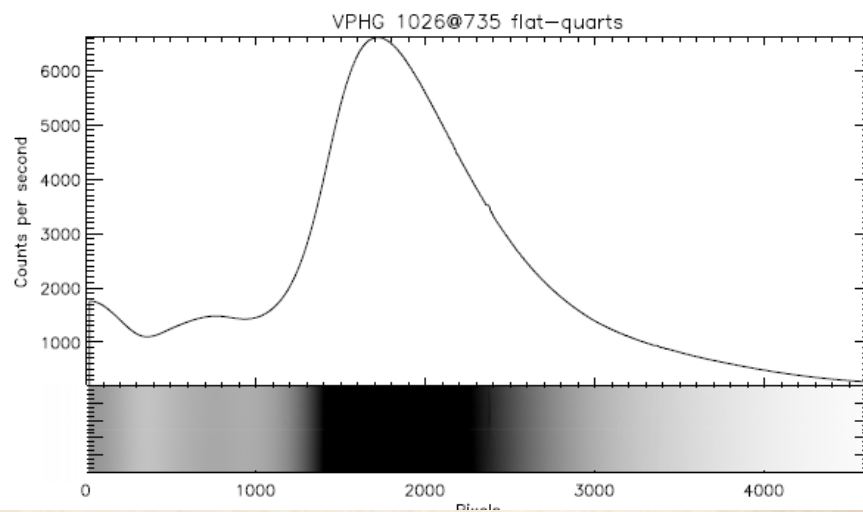
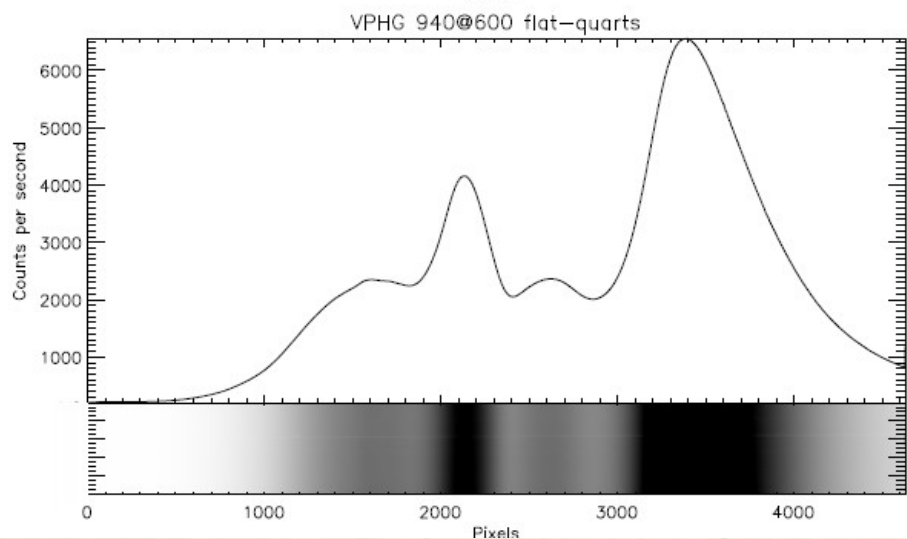
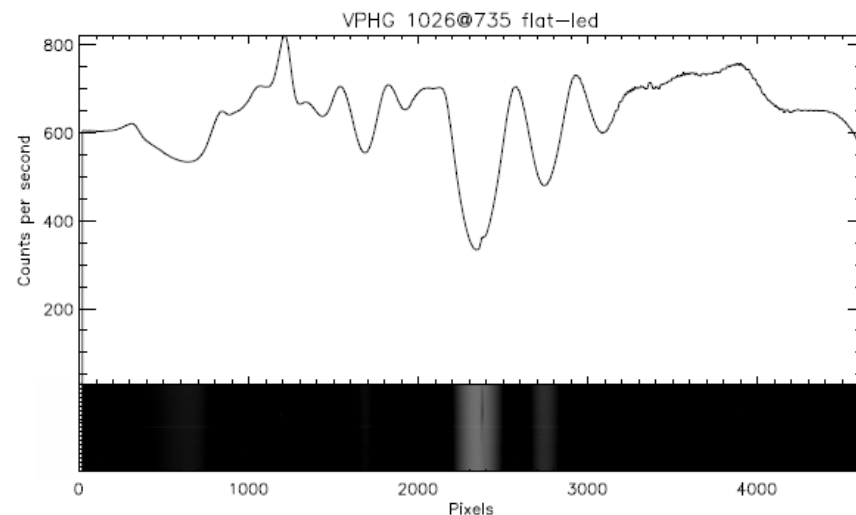
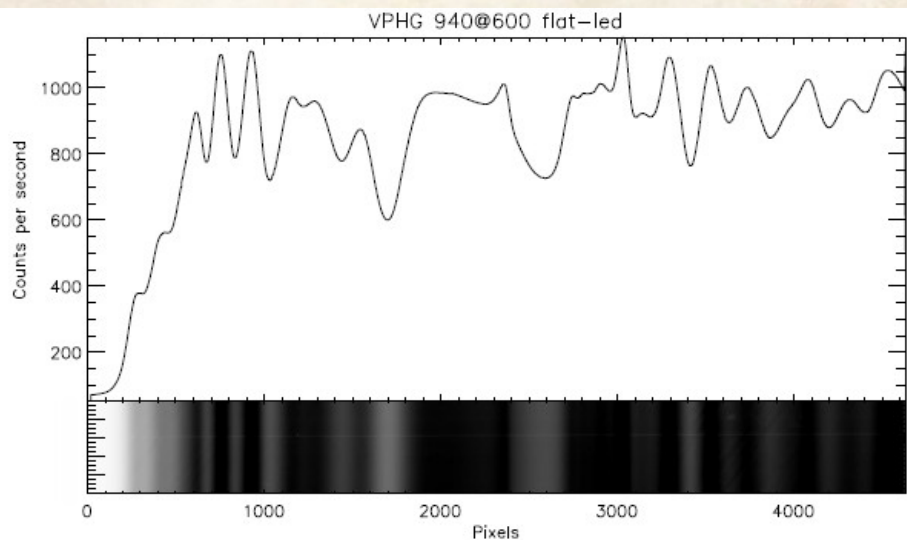
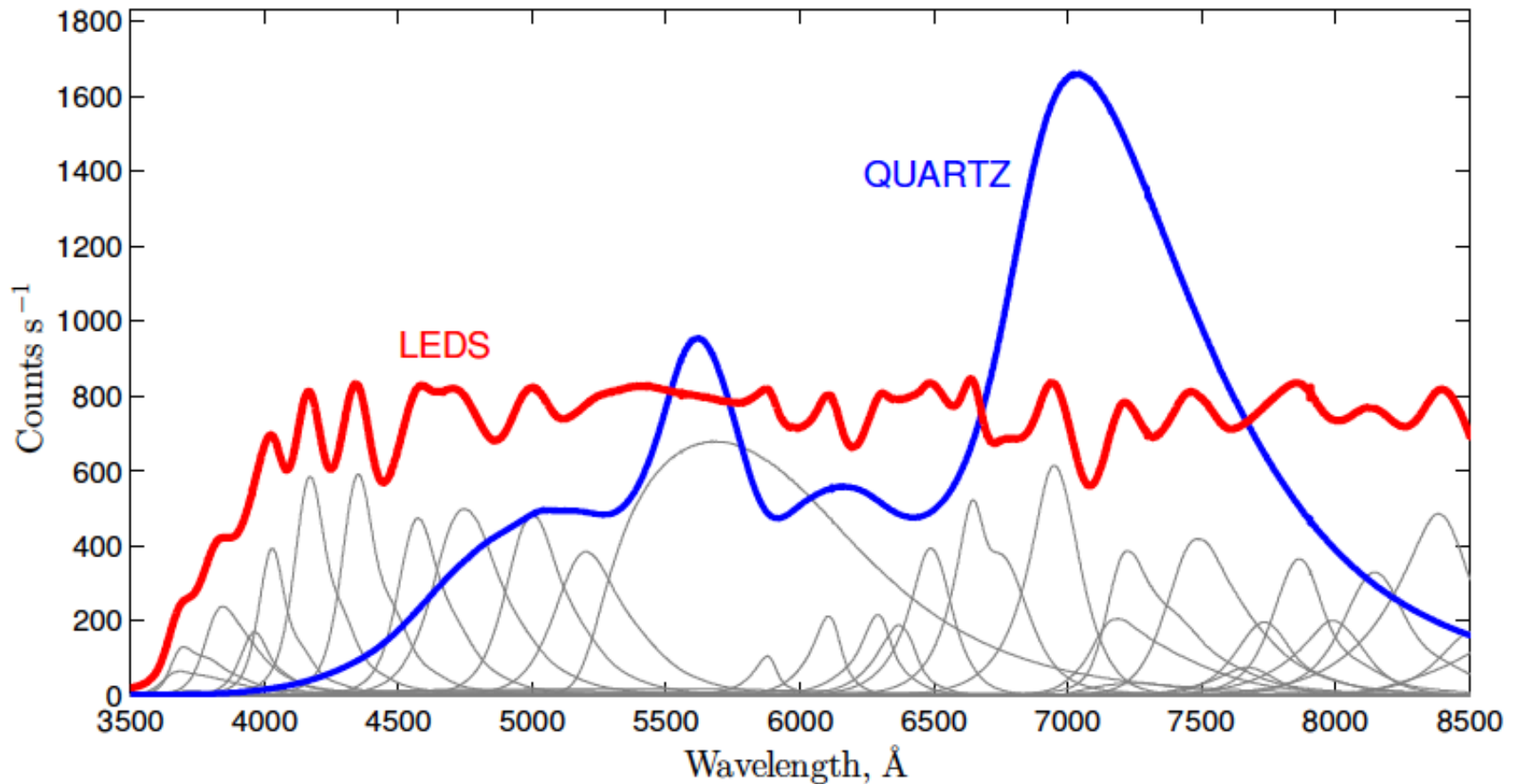


Рис. 3: Расчетные кривые яркости плоского поле для различных гризм (жирная линия). Тонкими кривыми показан вклад от пронумерованных светодиодов.

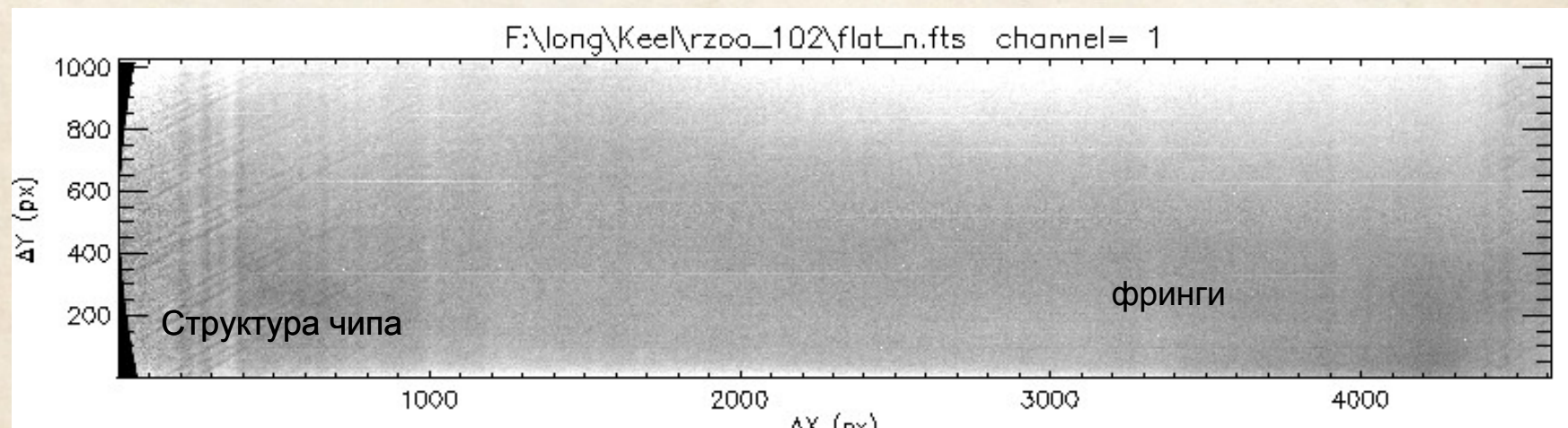
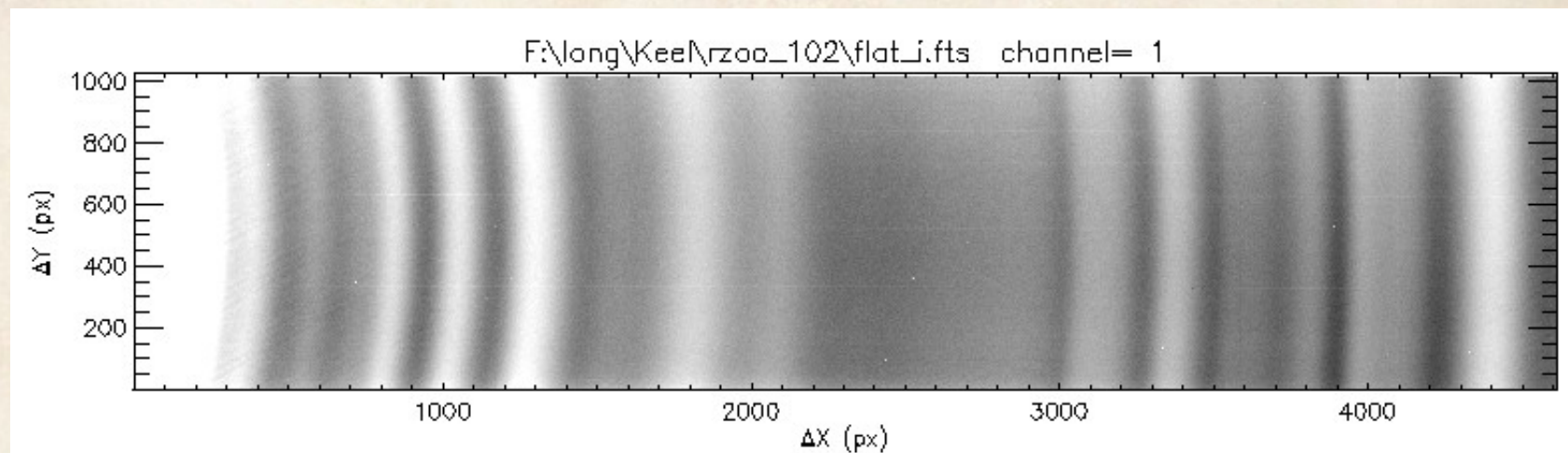
Свой выбор для каждой решетки



СИСТЕМА ГИДИРОВАНИЯ И КАЛИБРОВКИ SCORPIO-2

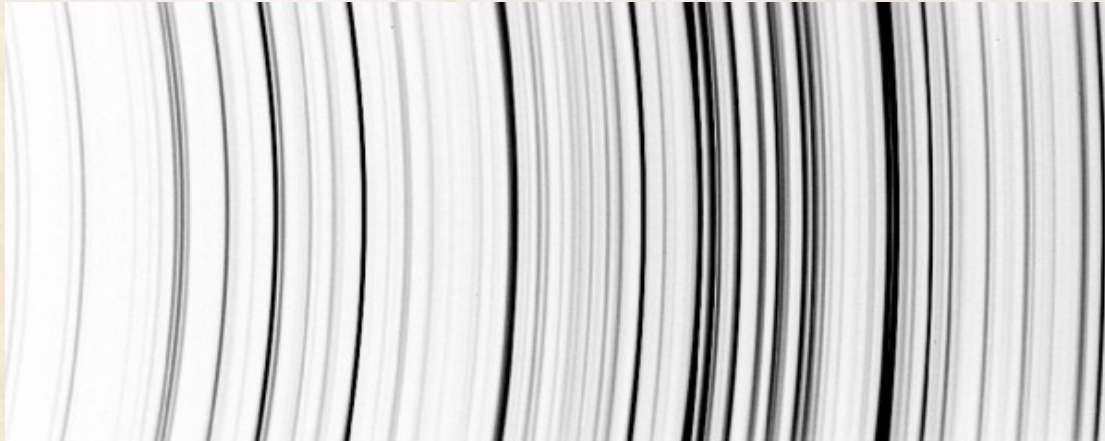


Светодиодная засветка (LEDs) и ее нормировка

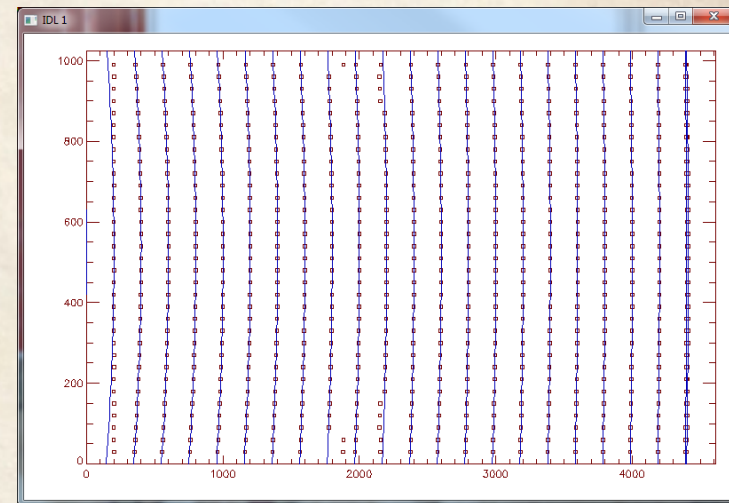


Исправление геометрических искажений

Это не линии кривые, это теория дифракционной решетки такая!



Исправление геометрической дисторсии по спектру калибровочной лампы

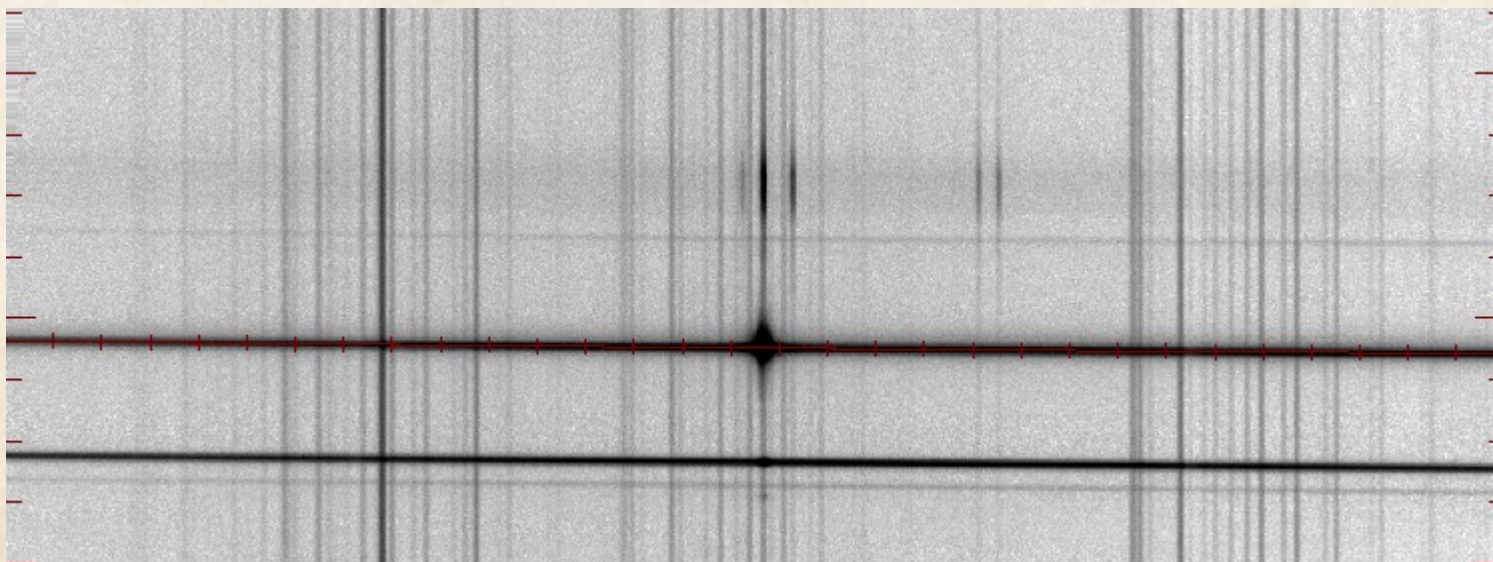


Для протяженных объектов – лучше исправлять сразу (до деления на FLAT и приведения к шкале длин волн). Но возможны и другие варианты, в зависимости от того, как строить последовательность обработки спектров.

Точное направление дисперсии

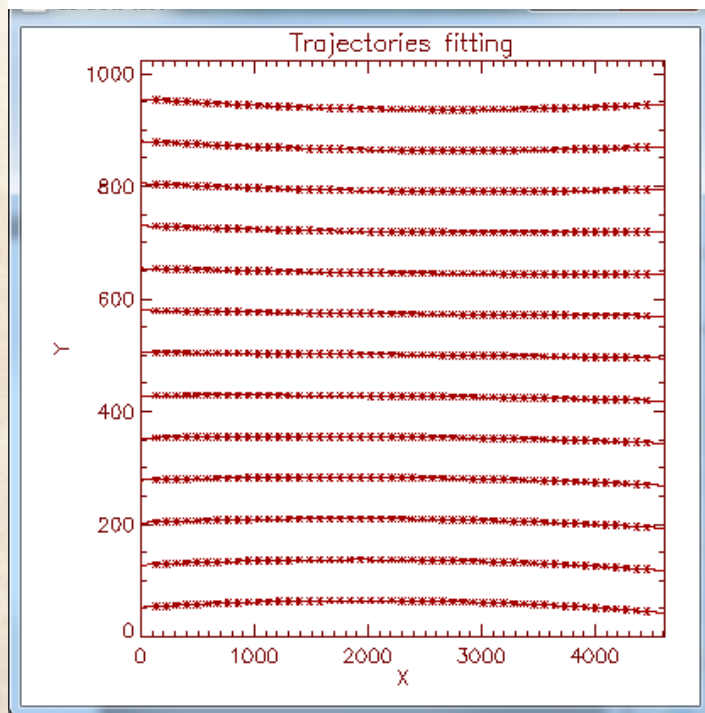
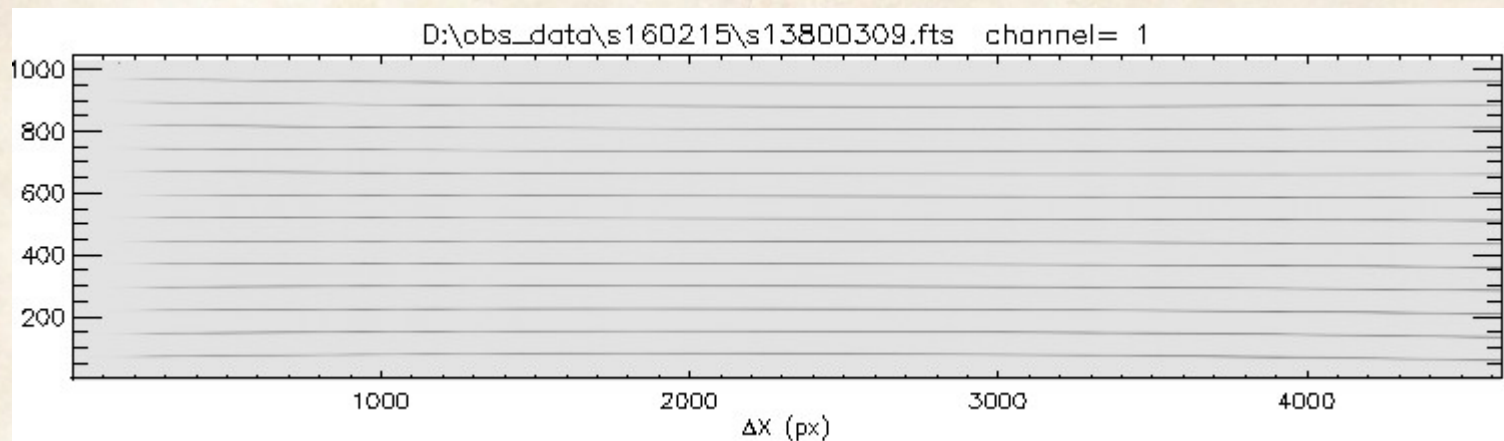
Стараемся изначально выставлять призму так, что бы перекося был не больше 1-2 рх, но это не всегда удается!

Уточнение направления дисперсии по континуальному объекту:



В случае объекта со слабым континуумом – направление дисперсии можно определить по спектрам других звезд (с точностью до сдвига вдоль щели)

SCORPIO-2: 13-точечный тест, SCORPIO-1: dashed slit



Точная геометрическая коррекция

Набор калибровок в течение ночи:

BIAS (1x2, 2x2,..)

Slitpos

MAP

NEON

OBJ

OBJ

NEON

13 dots

2xFLAT

BIAS (1x2, 2x2,..)

«Идеальный куб»
(к этому надо стремиться)



Ввод/вывод гризмы и вращение турелей – являются, по сути, сборкой-разборкой прибора. Калибровка (как минимум NEON) после перестановки механических элементов является обязательной!

Заключение

ПЗС не является идеальным детектором, хотя часто и близок к таковому.

Качество спектрального наблюдательного материала во многом определяется выбранной методикой наблюдений (количество и тип калибровок, сдвиги и т.д.).

Далеко не все проблемы можно решить на этапе редукции данных.

НЕ ЭКОНОМЬТЕ НА КАЛИБРОВКАХ!