

# Компьютерная обработка астрономических изображений

Получение изображений на ПЗС, базовые манипуляции. Фотометрия. Астрометрия.

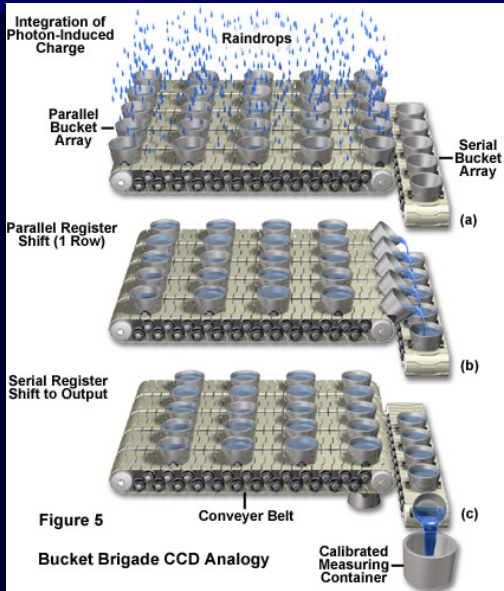
Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
Лаборатория физики оптических транзиентов



- 1 ПЗС светоприемники
- 2 Характеристики детекторов
- 3 Шумы
- 4 Первичная обработка снимков
- 5 Получение характеристик ПЗС
- 6 Фотометрия
- 7 Астрометрия

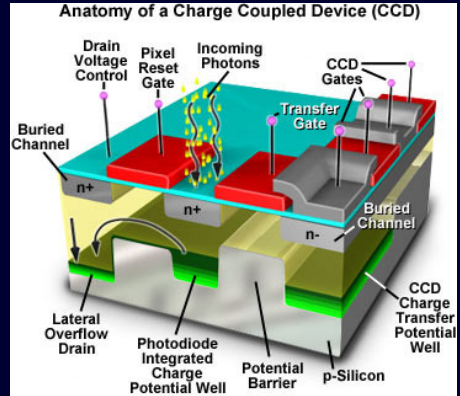


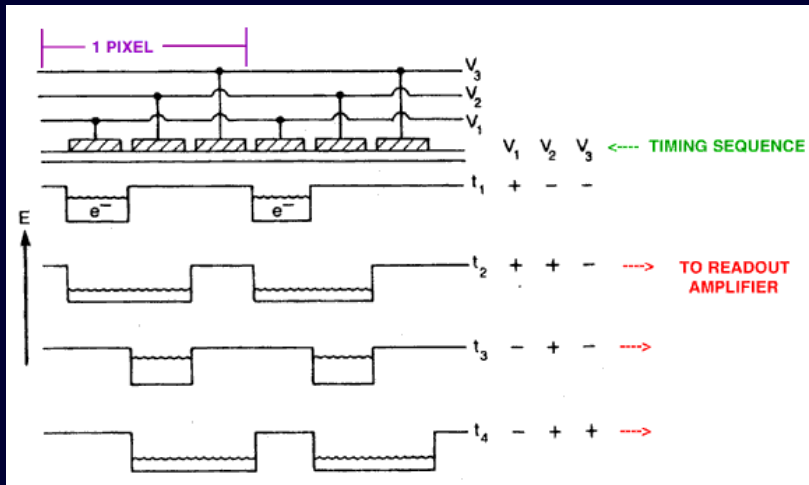


1969, Уиллард Бойл и Джордж Смит, лаборатории Белла.

1975 — первая ПЗС 100x100 (Steven Sasson, Kodak).

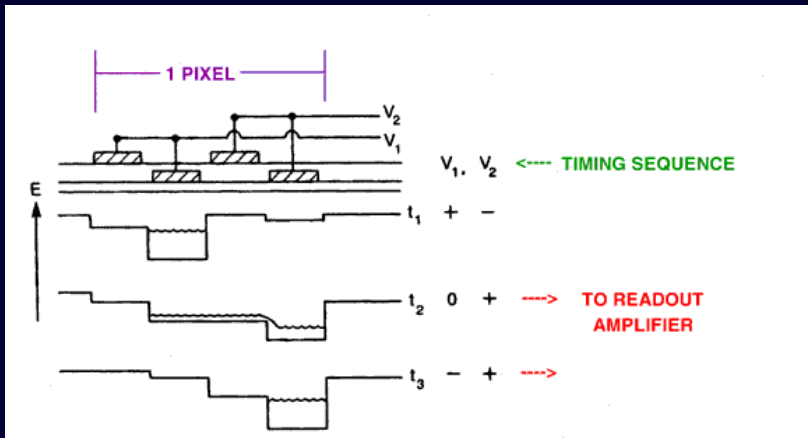
1976 — запуск спутника-шпиона с ПЗС 800x800.





# Тактирование ПЗС

## Двухфазное



# Характеристики детекторов

Размер, количество пикселей (каналов), чувствительность в зависимости от длины волны (квантовая эффективность) и доступный спектральный диапазон, глубина потенциальной ямы, динамический диапазон, линейность, временное разрешение, возможность работы в режиме счета фотонов, шумовые характеристики (темновой, считывания), стабильность, цена.

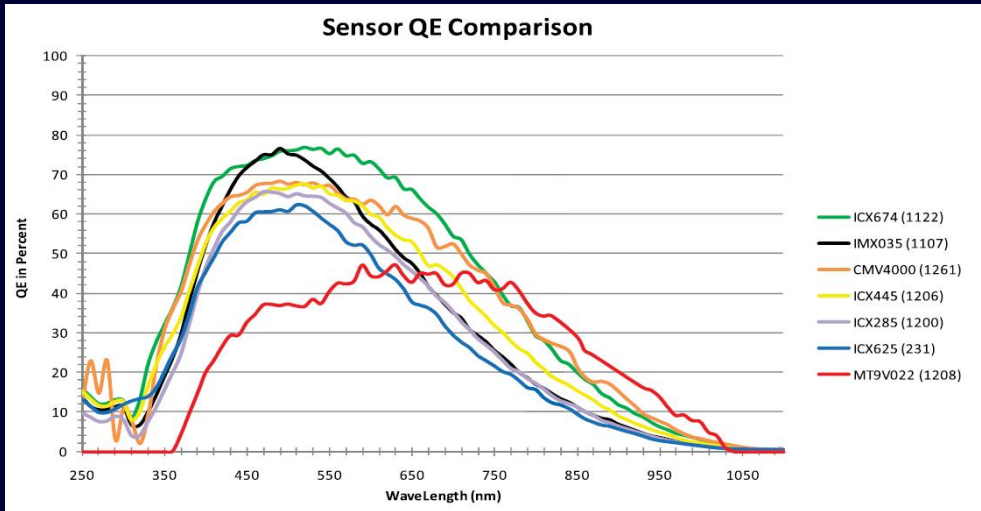
## Эволюция детекторов

Историческая эволюция: глаз  $\Rightarrow$  фотопластинка  $\Rightarrow$  одноканальные фотоэлектрические приемники  $\Rightarrow$  сканеры фотопластинок  $\Rightarrow$  телевизионные сканеры  $\Rightarrow$  полупроводниковые устройства (фотодиоды, ПЗС, композитные ИК приемники, болометры, лавинные фотодиоды, КМОП)  $\Rightarrow$  устройства, измеряющие энергию фотона (STJ — на сверхпроводящих туннельных переходах, transition-edge sensor — повышение сопротивления сверхпроводящего перехода).

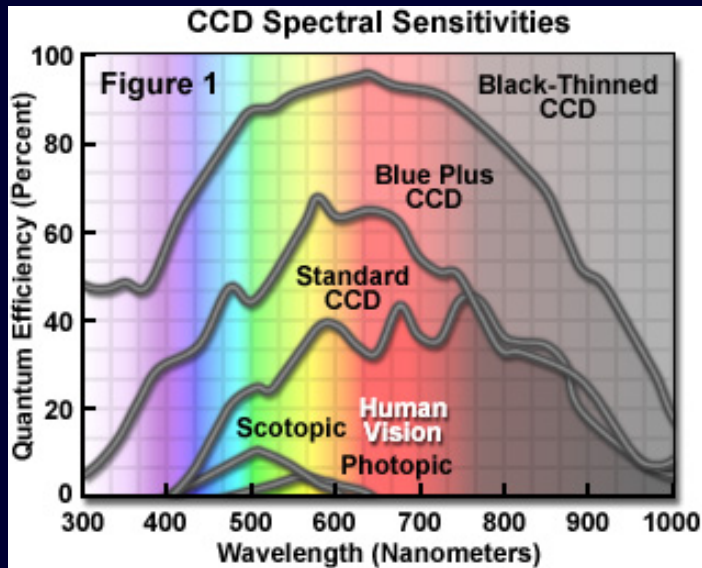


# Квантовая эффективность ПЗС

QE — отношение количества падающих фотонов к детектируемым.



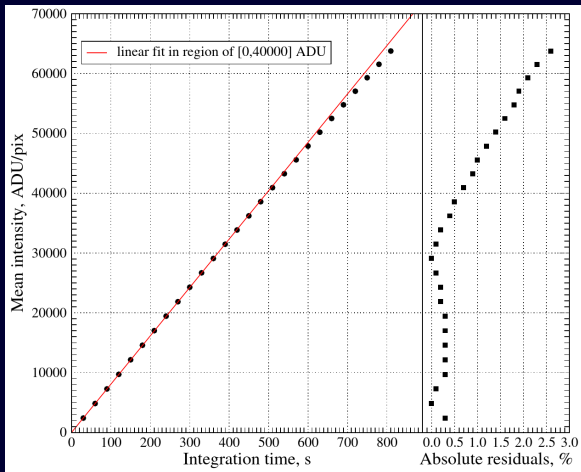
# Квантовая эффективность ПЗС





# Линейность

Линейность ПЗС-камеры Apogee Alta 16M-NC (Kodak KAF-16803).

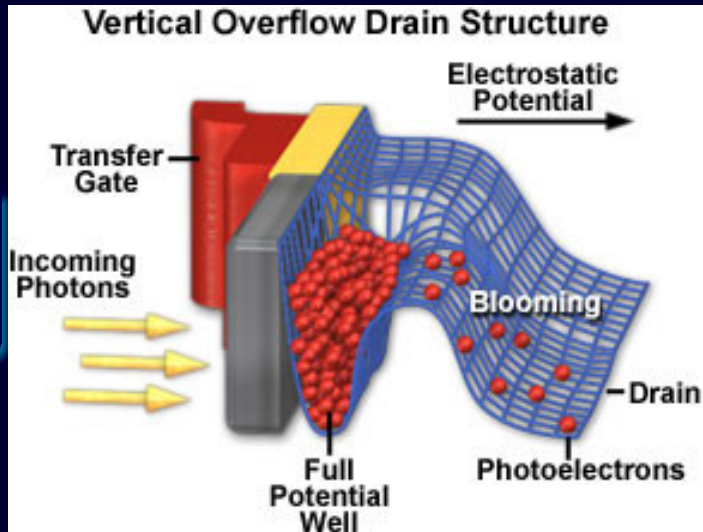


$\pm 0.5\%$  (2000 ÷ 40000 ADU);  $\pm 1.0\%$  (0 ÷ 45000 ADU).



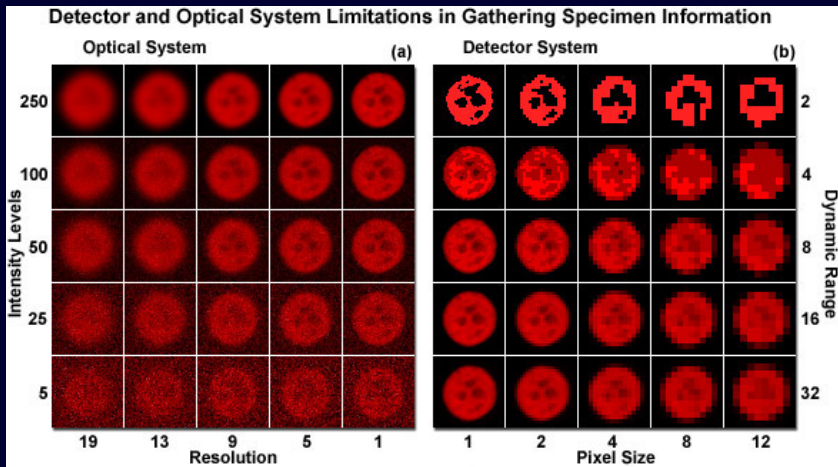
# Динамический диапазон

Максимальный размах уровней сигнала, при котором он регистрируется без потерь. Идеал — бесконечный динамический диапазон.



# Пространственное разрешение

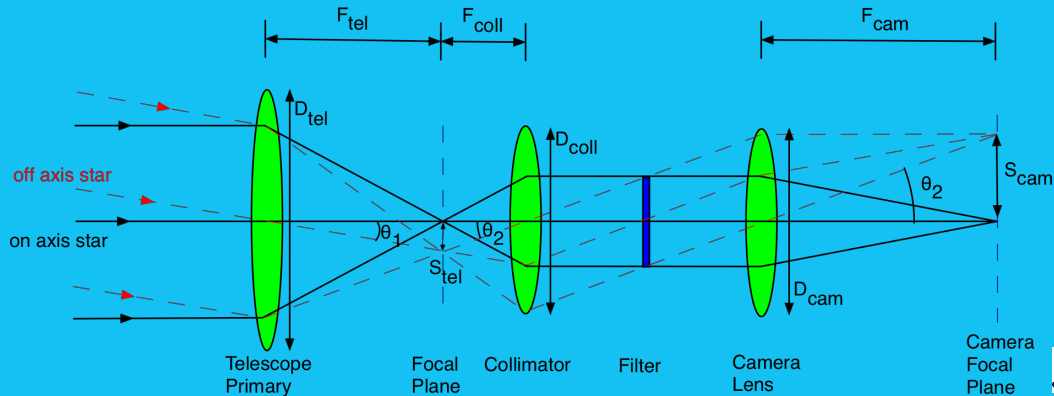
Степень детализации изображения зависит от условий наблюдения, оптики телескопа и прибора, размера пикселя.

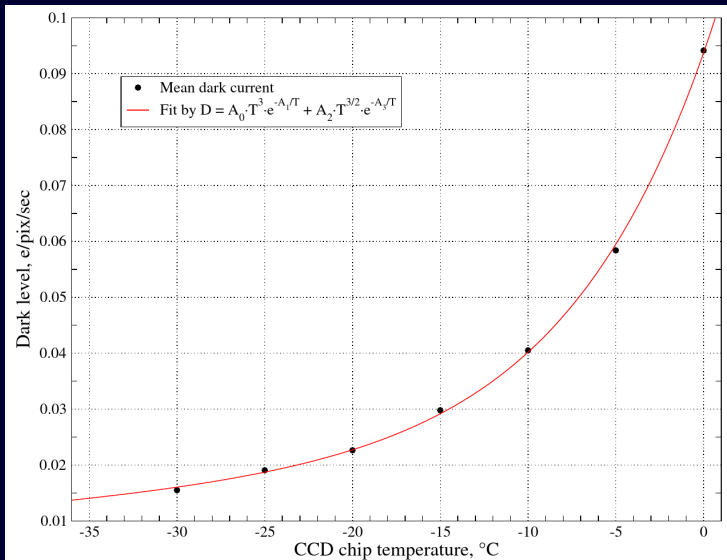


# Выбор светоприемника под масштаб

$$5a \geq \Delta x \geq 2a, S_{tel} = \frac{F_{tel}}{206265} \quad . \text{ БТА: } 1/S = 8.6''/\text{мм}, \Delta x_{1''} = 116.36 \text{ мкм}$$

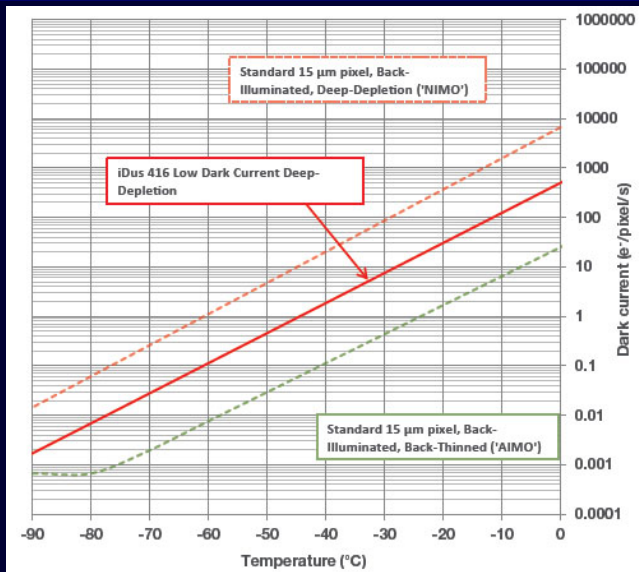
$$a_{opt} = 23.3 \text{ мкм. Нужен редуктор } \sim 2.5 \text{ раза! } m = \frac{S_{cam}}{S_{tel}} = \frac{F_{cam}}{F_{coll}} < 1$$





Выходной сигнал всегда отличается от входного: пуассонова статистика фотонов, фон неба, тепловой (темновой) шум, космические частицы, шум считывания и т.п. Темновой шум сильно зависит от температуры.





# Шумы

Если пуассонов шум фотонов плоского поля превышает шум считывания, гистограмма имеет почти гауссову форму.

$$\sigma_{\text{ADU}} = \frac{\sqrt{\bar{F} \cdot G}}{G}$$

$\sigma_{\text{ADU}}$  – полуширина гистограммы плоского поля,  $\bar{F}$  – средний уровень плоского,  $G$  – gain (коэффициент преобразования фотоэлектронов в ADU).

Два кадра bias ( $B$ ) и плоского ( $F$ ):

$$G = \frac{(\bar{F}_1 + \bar{F}_2) - (\bar{B}_1 + \bar{B}_2)}{\sigma_{F_1 - F_2}^2 - \sigma_{B_1 - B_2}^2}$$

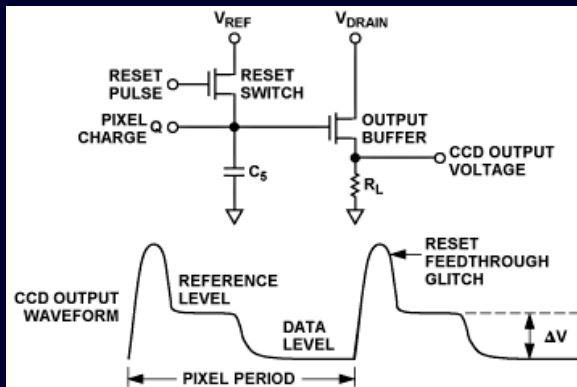
Шум считывания:

$$RN = \frac{G \cdot \sigma_{B_1 - B_2}}{\sqrt{2}}$$



## Коррелированная двойная выборка

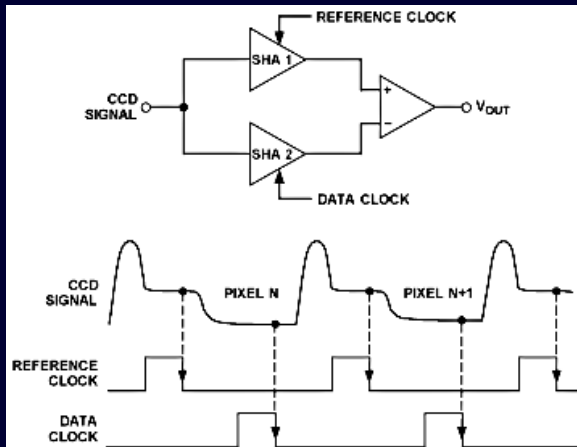
Накопленный каждым пикселем заряд по линии зарядовой связи перемещается в выходной тракт, где преобразуется в напряжение. Перед считыванием очередного заряда тракт сбрасывается, что увеличивает шум считывания.





## Коррелированная двойная выборка

ДКВ вычисляет уровень полезного сигнала относительно смещения. Первая выборка снимается сразу после сброса выходного тракта ПЗС. Вторая — по окончании переноса очередного заряда. Реализуется при помощи усилителей «выборка-удержание», sample-and-hold amplifier. Значительно снижает уровень коррелированных шумов.



## Вкратце о ПЗС

- Для повышения эффективности толщина рабочего слоя ПЗС должна быть не больше подложки n-типа, back-illuminated. Усложнение техпроцесса, удорожание.
- Глубокое охлаждение чипа: при  $-80^{\circ}\text{C}$  с ростом температуры на  $\sim 7^{\circ}\text{C}$  темновой шум увеличивается в два раза.
- Кремниевая подложка имеет красную границу на  $\sim 1.1$  мкм, в ИК светоприемники с кремниевыми подложками не будут работать.
- Утончение чипа приводит к росту прозрачности для больших длин волн и появлению фрингов.
- Большой проблемой является растекание заряда с переэкспонированных пикселей.
- ПЗС невозможно оснастить «электронным» затвором, их затвор механический.
- Дефекты подложки приводят к появлению «горячих» и «плохих» пикселей.
- Постоянное воздействие космических частиц вызывает необратимую деградацию.



# Первичная обработка снимков

**Квантовая эффективность:**  $QE = N_{\bar{e}}/N_{\gamma}$ . **Выходной сигнал:**  $S$  (ADU). Коэффициент усиления ( **gain**):  $gain = N_{\bar{e}}/S$ . Уровень смещения ( **bias**) — инжектируемый заряд для вывода кривой чувствительности на линейный участок  $\Rightarrow N_{\bar{e}} = N_{\bar{e}bias} + N_{\bar{e}object}$ ,  $S = S_{bias} + S_{object}$ . Т.е.  $N_{\gamma} = gain \cdot S_{object}/QE$ .

**Шум считывания** складывается из шумов переноса заряда и шума усилителя.

Кадр смещения, **bias**, получается для коррекции сигнала на инжектируемый нулевой заряд, позволяет определить шум считывания. Для снижения шумов рекомендуется получать медиану как можно большего количества кадров.

Темновой кадр, **dark**, (с закрытой диафрагмой) содержит информацию о темновых шумах.

Плоское поле, **flat**, необходимо для коррекции виньетирования и неоднородностей оптических систем. Отражает попиксельную неоднородность чувствительности.

**Биннинг**. Сложение происходит до АЦП, поэтому увеличивается полезный сигнал в  $N$  раз при том же уровне шума, т.е. влияние шума считывания снижается. Увеличение скорости считывания и уровня сигнала (но уменьшение разрешения).

**Overscan** — служебная (не засвечиваемая) область ПЗС, позволяет грубо оценивать **bias** без получения отдельного кадра.

## Сигнал-шум

В общем случае

$$\text{SNR} = N_* \cdot \left[ N_* + n_{pix} \left( 1 + \frac{n_{pix}}{n_B} \right) (N_S + N_D + N_R^2 + G^2 \sigma_f^2) \right]^{-1/2},$$

$N_*$  – количество фотонов от объекта;  $n_{pix}$  – количество пикселей для вычисления SNR;  $n_B$  – количество пикселей для оценки фона;  $N_S$  – количество фоновых фотонов на пиксель;  $N_D$  – количество темновых фотонов на пиксель;  $N_R^2$  – количество электронов на пиксель вследствие шума считывания;  $G$  – gain;  $\sigma_f \approx 0.289$  – ошибка квантования, вносимая АЦП. Если  $G$  невелик,  $n_B$  велико, часть членов можно опустить. По времени экспозиции:

$$\text{SNR} = Nt \cdot [Nt + n_{pix}(N_S t + N_D t + N_R^2)]^{-1/2},$$

т.е.  $\text{SNR} \propto \sqrt{t}$ . Для ярких источников  $\text{SNR} \propto \sqrt{Nt}$ .



## Первичная редукция

Итак, чтобы в нулевом приближении избавиться от влияния на сигнал оптической системы и ПЗС, необходимо выполнить следующее:

$$S_0 = \frac{S - D}{(F - D)_{norm}},$$

где  $S$  – object,  $D$  – dark,  $F$  – flat,  $norm$  – нормировка на единицу. В случае очень больших экспозиций object (час и выше), невозможно получить хотя бы пару десятков кадров dark в тех же условиях и до следующей ночи наблюдений. В этом случае используют т.н. superdark,  $SD$  – экстраполяцию линейризованной МНК зависимости  $\{D(t) - B\}$ , где  $B$  – bias:

$$S_0 = \frac{S - B - SD \cdot t_S}{(F - D_F)_{norm}},$$

здесь, т.к. flat обычно имеет небольшую экспозицию, несложно накопить для них «честные» темновые.



## Первичная редукция

Для каждой ночи наблюдений при коротких экспозициях «научных кадров» необходимо:

- 1 30 ÷ 100 dark frames;
- 2 30 ÷ 100 flatfields.

В случае слишком длинных экспозиций, необходимо:

- 1 10 ÷ 20 bias frames;
- 2 не меньше 10 dark frames на каждую из минимум 10 экспозиций;
- 3 около 30 dark frames с экспозицией flatfield;
- 4 30 ÷ 100 flatfields.



# Получение характеристик ПЗС

Обозначим gain как  $G$ .  $N_e = G \cdot S$ . Выраженную в электронах, дисперсию полного шума «плоского поля», полученного в лаборатории на условно идеальном источнике освещения можно записать как

$$\sigma^2 = \sigma_\gamma^2 + R^2 + \sigma_{CCD}^2,$$

где  $\sigma_\gamma$  – фотонный шум,  $R$  – шум считывания,  $\sigma_{CCD}$  – прочие шумы ПЗС (неоднородность чувствительности пикселей и т.п.). Избавиться от последнего члена мы можем, используя разность двух изображений с одинаковыми экспозициями, но в этом случае полученную дисперсию следует разделить на два. Данная операция поможет также избавиться от аддитивной добавки к  $S$ , вызванной bias и темновым током.

Т.к. фотонный шум пропорционален корню из сигнала, в ADU получим:  $\sigma^2 = S/G + R_{ADU}^2$ . Выделим область в несколько десятков тысяч квадратных пикселей на изображении в зоне, где уровень освещенности можно аппроксимировать горизонтальной плоскостью с высокой точностью.



# Получение характеристик ПЗС

Получим:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (S_1(x, y) - S_x(x, y))^2}{2(N - 1)},$$

где  $N$  – количество пикселей. Средний уровень обозначим как  $S = (S_1 + S_2)/2$ .  
Определение  $\sigma^2$  и  $\langle S \rangle$  необходимо провести для как можно большего значения разных времен экспозиции. Далее можно построить зависимость

$$\sigma^2 = S/G + R_{ADU}^2,$$

линейно ее аппроксимировать к виду  $\sigma^2 = a \cdot S + b$  и получить значения  $G = 1/a$ ,  $R = G \cdot \sqrt{b}$ .





## Принципы фотометрии

Распределение света от звезды между пикселями неоднородное, зашумленное.

Для измерения полного потока от звезды, необходимо:

- определить положение звезды на изображении;
- при помощи маски выбрать те пиксели, которые принадлежат изображению именно этой звезды;
- просуммировать сигнал за вычетом фона.

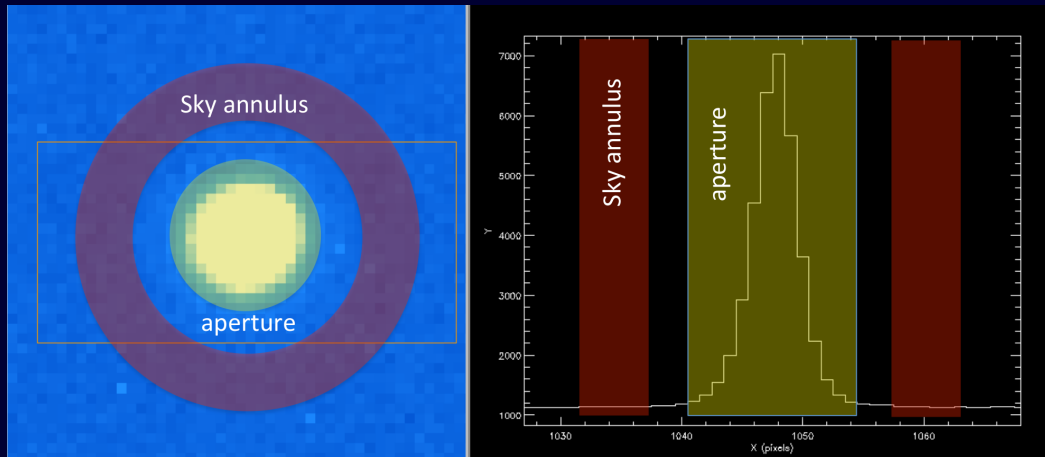
## Центроид

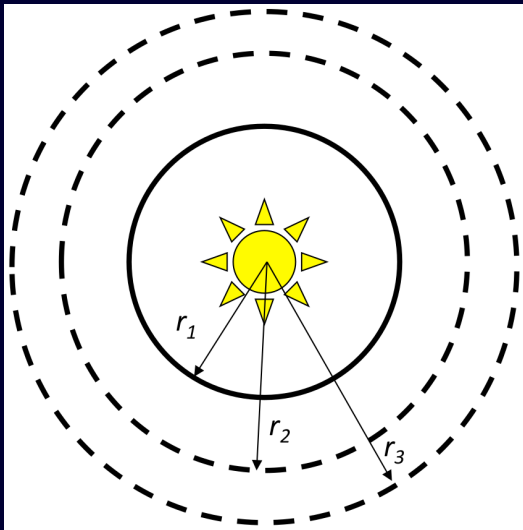
$$\bar{x} = \frac{\sum x_i I_i}{\sum I_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i I_i}{\sum I_i}, \quad I_i = S_i - B.$$



## Апертурная фотометрия

Проблема: определить радиусы апертур (звезды и фона).





### Модель апертурной фотометрии

Параметры звезды: уровень сигнала, координаты центра, полуширина.

Параметры фона: средний уровень сигнала,  $B$ .

Параметры светоприемника: квантовая эффективность, шумы.

Радиусы апертур:  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ .



## Основные выражения

$S = F + B + Q + E$ , где  $S$  – накопленный сигнал,  $F$  – сигнал от звезды,  $B$  – фон,  $Q$  – темновой ток,  $E$  – bias.

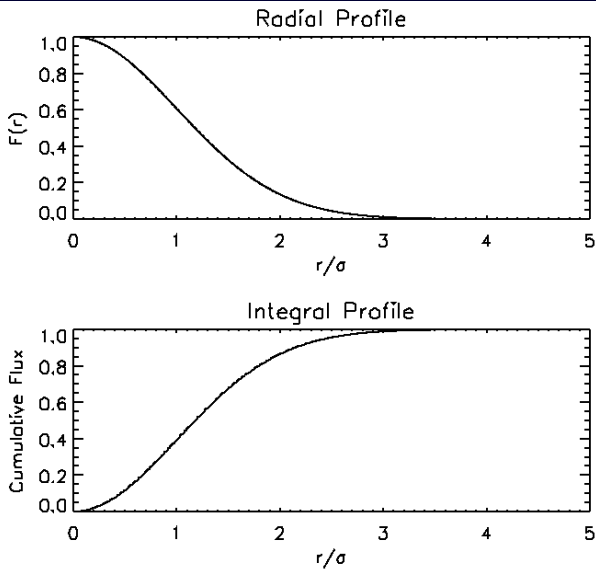
Суммарный сигнал от звезды:  $F_{\Sigma} = \sum F_i = \sum (S_i - [B_i + Q_i + E_i])$ .

Шум:  $\sigma^2 = F_{\Sigma} + N(\overline{B} + \overline{Q} + \sigma_{RO}^2) + \sigma_{sky}^2$ ,  $N$  – количество пикселей маски звезды,  $\sigma_{RO}^2$  – шум считывания. Первый член отражает зависимость пуассоновского шума от уровня сигнала.

$\sigma_{sky}^2 = N(\overline{B} + \overline{Q} + \sigma_{RO}^2)/N_{sky}$ ,  $N_{sky}$  – количество пикселей в маске фона.

$SNR = F_{\Sigma}/\sigma$ . Чем слабее звезда, чем больше уровень фона, чем больше  $N$  и меньше  $N_{sky}$ , тем худшим будет SNR.



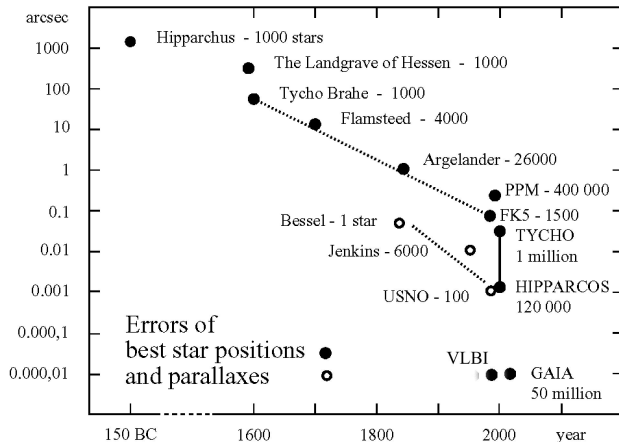


## Профили звезд

Средний по изображению профиль позволяет оценить радиусы апертур. Также поможет при апертурной коррекции.

Ошибка определения звездной величины:  $\sigma_m = 1.0857/\text{SNR}$ .





Астрометрия позволяет измерить точные координаты звезд на небе, а также определить их параллаксы и собственные движения. Первый каталог — Гиппарх, точность не выше  $1^\circ$ . Микросекундной точности достиг запущенный в 1989 г. космический телескоп HIPPARCOS. Точность GAIA —  $0.00002''$  ( $20\mu as$ ) — толщина человеческого волоса с расстояния в 1000 км!



## Каталоги

- 1 **HIPPARCOS** — звезды до  $m_V = 7.3^m$ , точность астрометрии до  $1 \div 3$  mas.
- 2 **TYCHO-2** — до  $m_V = 11^m$ , точность  $10 \div 100$  mas.
- 3 **USNO B 1.0** — до  $m_V = 21^m$ , фотометрический каталог с точностью до  $0^m.3$ .
- 4 **2MASS** — 470 миллионов объектов, точность до 70 mas.
- 5 **SDSS** — фотометрический каталог четверти неба в пяти фильтрах, 287 миллионов объектов.



```

WCSAXES =                2 / no comment
CTYPE1  = 'RA--TAN-SIP' / TAN (gnomic) projection + SIP distortions
CTYPE2  = 'DEC--TAN-SIP' / TAN (gnomic) projection + SIP distortions
EQUINOX =                2000.0 / Equatorial coordinates definition (yr)
LONPOLE =                 180.0 / no comment
LATPOLE =                 0.0 / no comment
CRVAL1  =                108.774262346 / RA of reference point
CRVAL2  =                1.00291905897 / DEC of reference point
CRPIX1  =                1913.62332153 / X reference pixel
CRPIX2  =                2259.99996948 / Y reference pixel
CUNIT1  = 'deg'          / X pixel scale units
CUNIT2  = 'deg'          / Y pixel scale units
CD1_1   =    1.93656168178E-05 / Transformation matrix
CD1_2   =    0.000375521234425 / no comment
CD2_1   =    0.000374992628831 / no comment
CD2_2   =   -1.99221412252E-05 / no comment
IMAGEW  =                4152 / Image width, in pixels.
IMAGEH  =                4128 / Image height, in pixels.
A_ORDER =                 2 / Polynomial order, axis 1
A_0_0   =                 0 / no comment
A_0_1   =                 0 / no comment
A_0_2   =    2.23413532844E-07 / no comment
A_1_0   =                 0 / no comment
A_1_1   =    7.05215731575E-07 / no comment
A_2_0   =   -8.60578324599E-07 / no comment
B_ORDER =                 2 / Polynomial order, axis 2
B_0_0   =                 0 / no comment
B_0_1   =                 0 / no comment
B_0_2   =    1.80616011802E-06 / no comment
B_1_0   =                 0 / no comment
B_1_1   =   -1.41943171715E-06 / no comment
B_2_0   =    1.0330722919E-06 / no comment
AP_ORDER=                 2 / Inv polynomial order, axis 1
AP_0_0   =   -0.00132844758312 / no comment
AP_0_1   =   -9.98719770897E-07 / no comment
AP_0_2   =   -2.23862742222E-07 / no comment
AP_1_0   =    6.90285387795E-06 / no comment
AP_1_1   =   -7.06270593524E-07 / no comment
AP_2_0   =    8.62112722212E-07 / no comment
BP_ORDER=                 2 / Inv polynomial order, axis 2
BP_0_0   =    0.0089967131973 / no comment

```

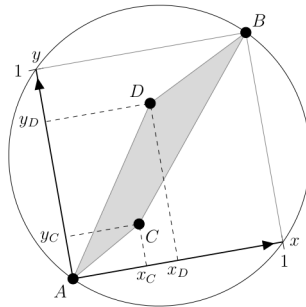
## WCS

WCS — World Coordinate System. ICRS — International Celestial Reference System (привязка к барицентру Солнечной системы).

Ключевые слова WCS в FITS-шапке позволяют осуществить однозначную привязку пиксельных координат к мировым (и обратно). Для линейных преобразований: **CTYPE<sub>i</sub>** – тип оси, **CRPIX<sub>i</sub>** – опорный пиксель (в пиксельных координатах), **CRVAL<sub>i</sub>** – значение мировых координат в этом пикселе ( $1 - \alpha$ ,  $2 - \delta$ ), **CD<sub>i\_j</sub>** – матрица коэффициентов, описывающих поворот осей и масштаб, **CUNIT<sub>i</sub>** – единицы измерения по данной оси.







(Dustin Lung, PhD thesis)

Figure 2.1: The geometric hash code for a “quad” of stars,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , and  $D$ . Stars  $A$  and  $B$  define the origin and  $(1,1)$ , respectively, of a local coordinate system, in which the positions of stars  $C$  and  $D$  are computed. The coordinates  $(x_C, y_C, x_D, y_D)$  become our geometric hash code that describes the relative positions of the four stars. The hash code is invariant under translation, scaling, and rotation of the four stars.



# Спасибо за внимание!

**mailto**

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com

