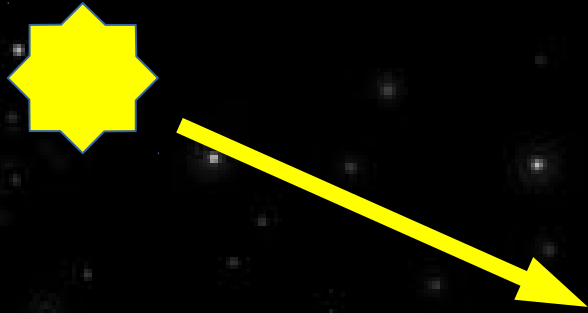


# Фотометрия

A night sky photograph featuring the Milky Way galaxy stretching across the frame. The foreground is dominated by the dark silhouettes of various trees, including a large, rounded tree on the left and several tall, thin evergreens on the right. The sky is filled with numerous stars, and the word 'Фотометрия' is overlaid in the center in a bright yellow, bold, sans-serif font.

Фотометрия = φωτός (свет) + μέτρον (мера, измеритель)

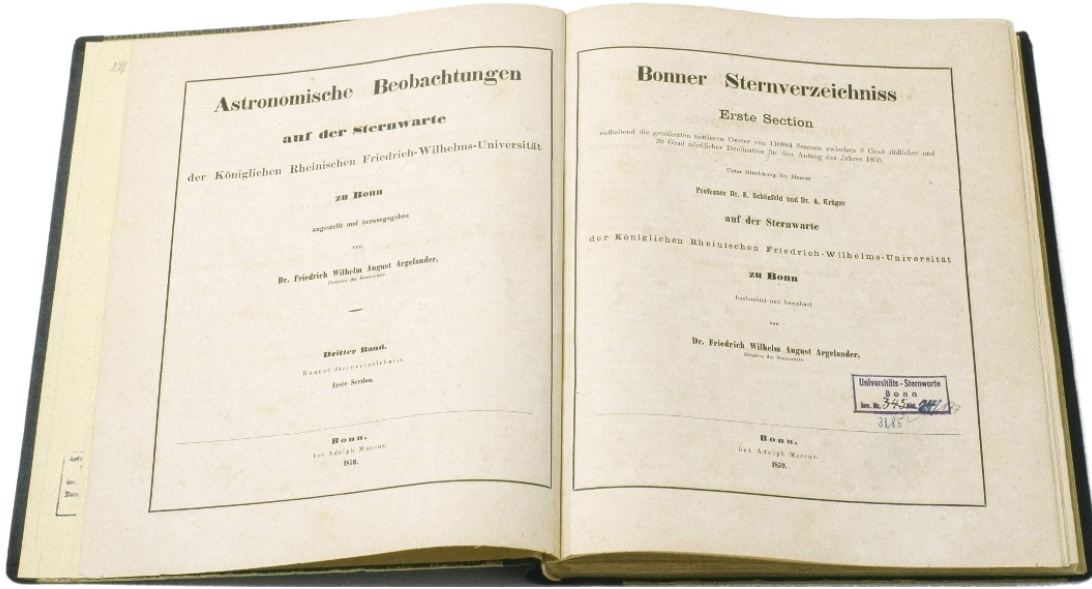


- Поток излучения от небесного объекта
- Поток излучения в разных фильтрах
- Поверхностное распределение яркости
- Переменность потока

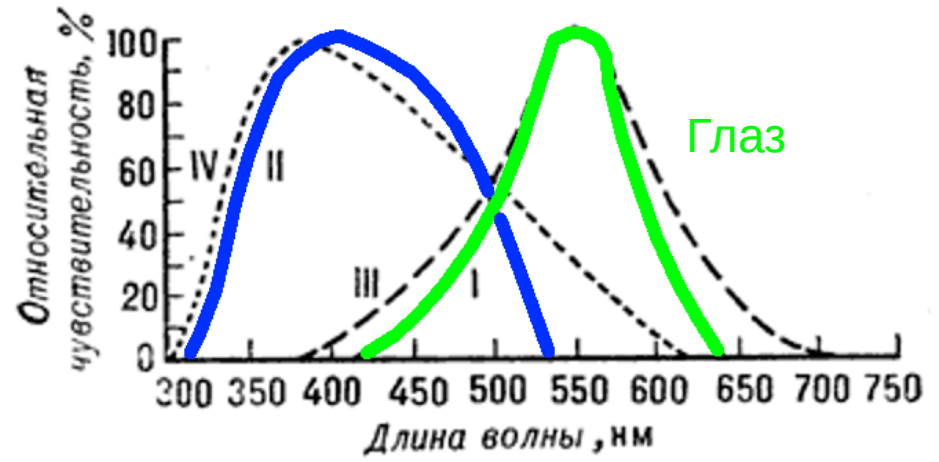


Физика объекта

Боннское обозрение  
 Визуальные звездные величины  
 около 1,5 миллионов звёзд до 10<sup>m</sup>



Фотопластинка

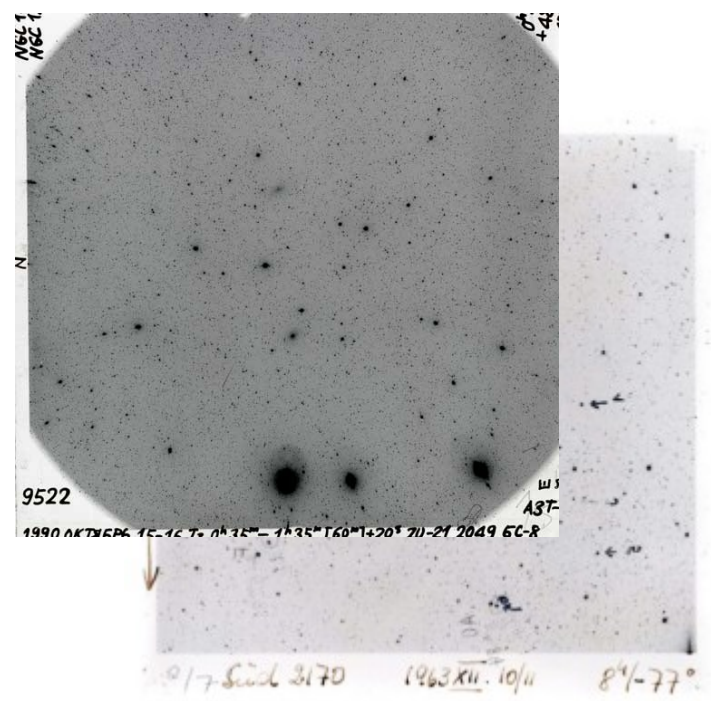


Глаз

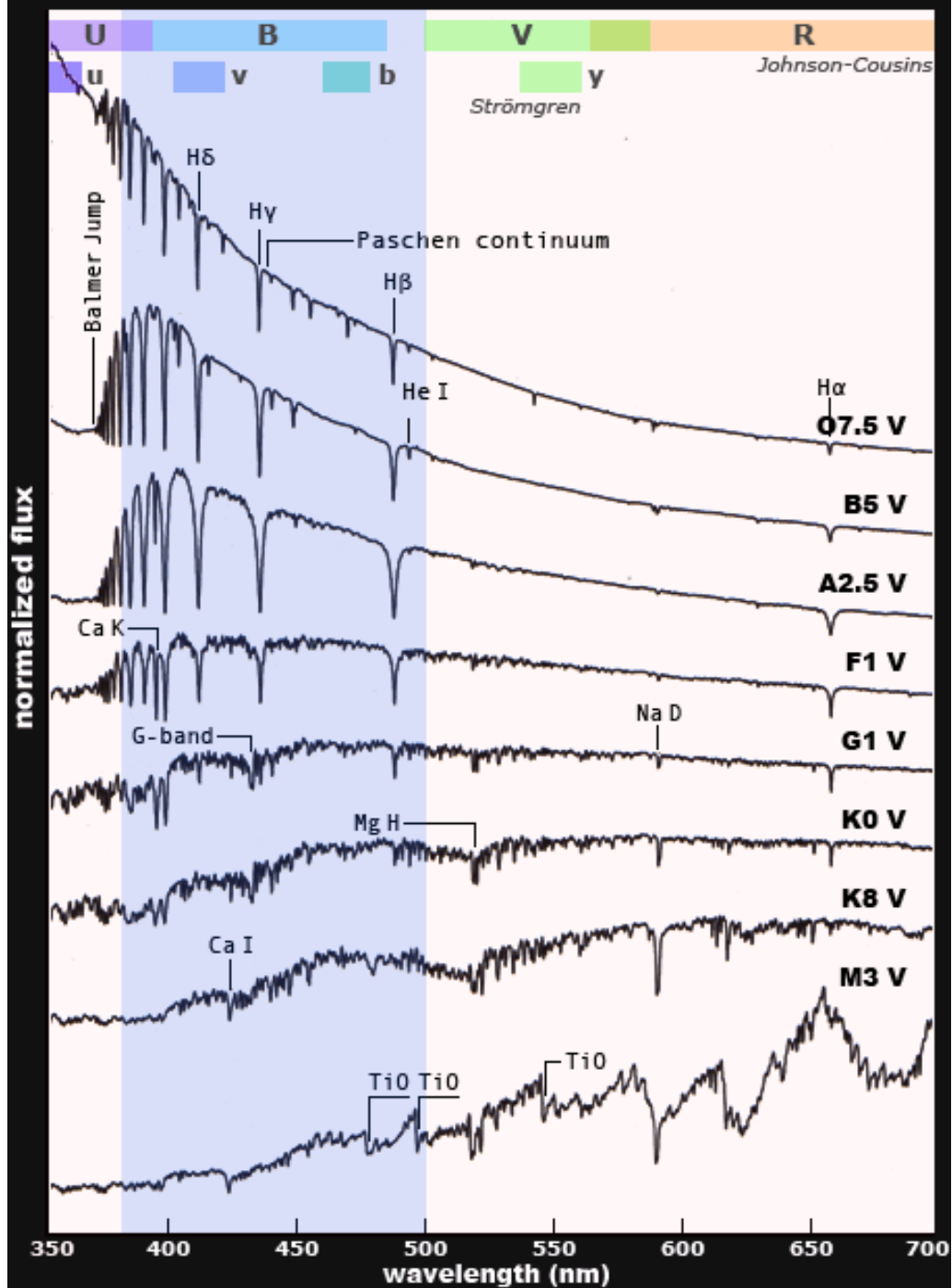
Многочисленные измерения  
 фотографических звездных  
 величин

$$m_{vis} \neq m_{ph}$$

$(m_{vis} - m_{ph})$  зависит от спектрального класса звезды  
 Названный позже показателем цвета



a sequence of stellar flux profiles



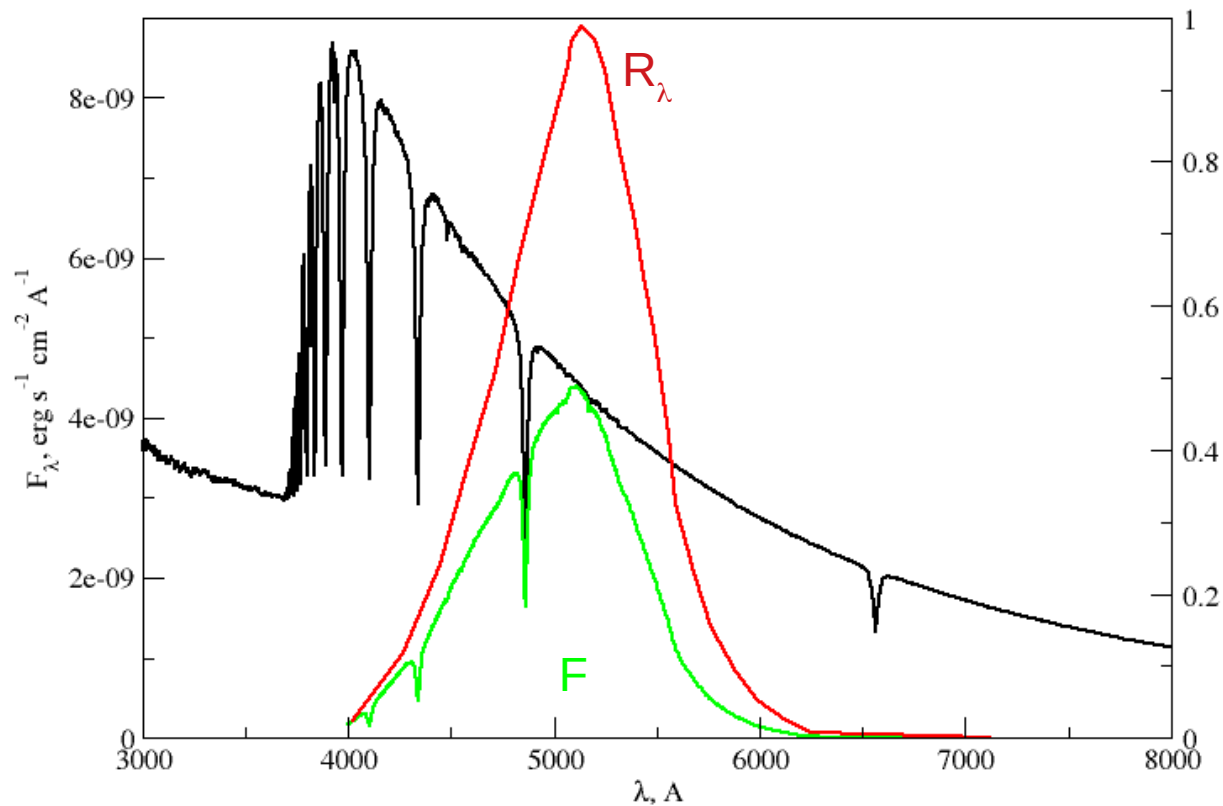
## Звездная величина

$$m = -2.5 \lg F + C$$

$$F = \int F_\lambda R_\lambda d\lambda$$

$$m = -2.5 \lg \frac{\int F_\lambda R_\lambda d\lambda}{\int R_\lambda d\lambda} + C$$

$R_\lambda \Rightarrow$  функция пропускания фильтра



# Монохроматическая звездная величина

STMAG

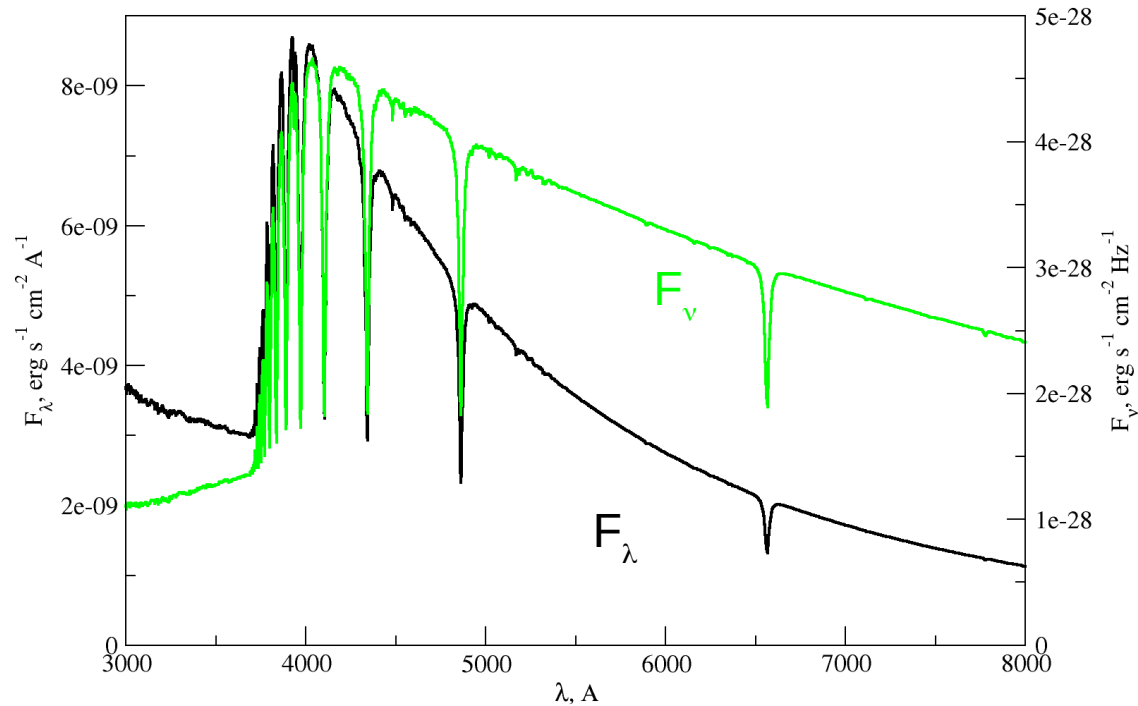
$$m_{\lambda} = -2.5 \lg F_{\lambda} + 21.100$$

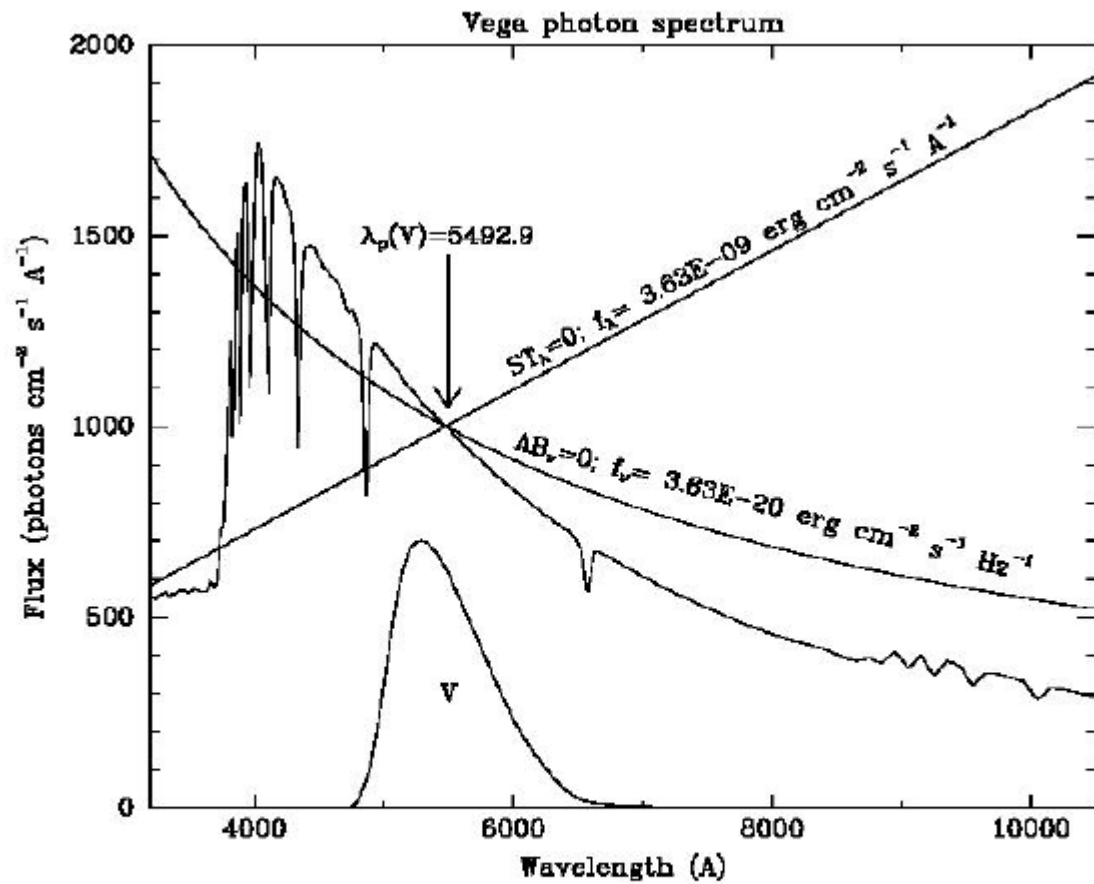
$$[F] = \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ \AA}}$$

ABMAG

$$m_{\nu} = -2.5 \lg F_{\nu} + 48.60$$

$$[F] = \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ Hz}}$$





Plot of zeropoint spectra in three different magnitude systems.  
 (Note: ordinate is photon flux, not energy flux.)

## Звездная величина в фильтре X

$$m_X = -2.5 \lg \frac{\int F_\nu R_\nu d\nu}{\int R_\nu d\nu} + 21.100 + ZP_\lambda$$

$$m_X = -2.5 \lg \frac{\int F_\lambda R_\lambda d\lambda}{\int R_\lambda d\lambda} + 48.60 + ZP_\nu$$

ZP → zero point — точка отсчета для определенного фильтра X

ZP задается из критерия: звезда A0V во всех фотометрических полосах  $m=0$

Или: Вега во всех полосах  $m=0.03^m$

**Table A2.** Effective wavelengths (for an A0 star), absolute fluxes (corresponding to zero magnitude) and zeropoint magnitudes for the UBVRI-JHKL Cousins-Glass-Johnson system

	U	B	V	R	I	J	H	K	Kp	L	L*
$\lambda_{eff}$	0.366	0.438	0.545	0.641	0.798	1.22	1.63	2.19	2.12	3.45	3.80
$f_\nu$	1.790	4.063	3.636	3.064	2.416	1.589	1.021	0.640	0.676	0.285	0.238
$f_\lambda$	417.5	632	363.1	217.7	112.6	31.47	11.38	3.961	4.479	0.708	0.489
zp( $f_\lambda$ )	0.770	-0.120	0.000	0.186	0.444	0.899	1.379	1.886	1.826	2.765	2.961
zp( $f_\nu$ )	-0.152	-0.602	0.000	0.555	1.271	2.655	3.760	4.906	4.780	6.775	7.177



# Показатели цвета

$$C_{ij} = m_i - m_j$$

$$\text{Например, } C_{BV} = m_B - m_V = B-V$$

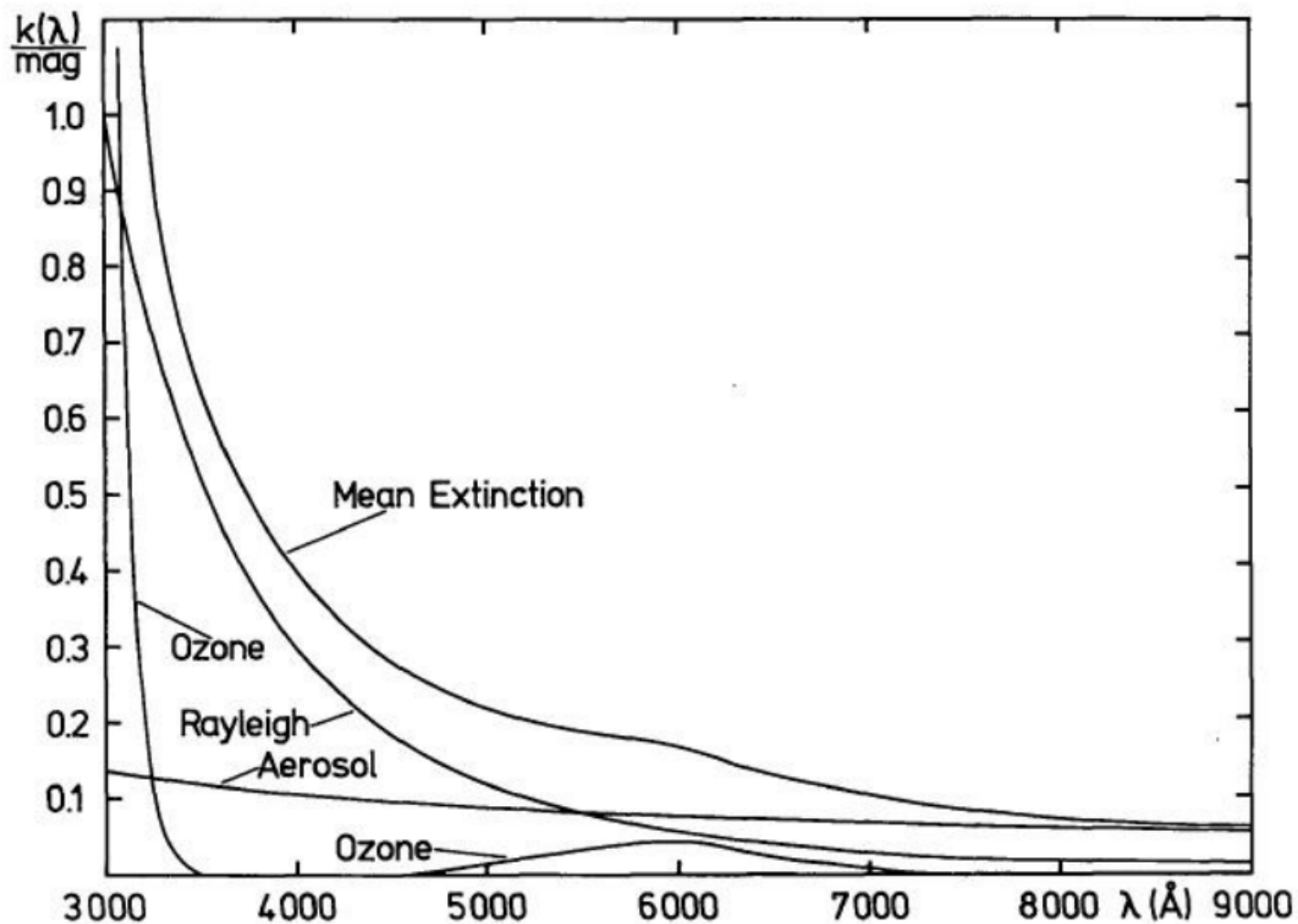
Из шкалы звездных величин следует, что для звезд A0V

$$C_{ij} = 0$$

Показатель цвета характеризует различие спектра в двух полосах:

- Разница потоков (бальмеровский скачок: u-v, U-B)
- Наклон спектра (пашеновский континуум: B-V, V-J — чувствительность к температуре звезд)
- Интенсивность в сильных линиях ( $H_{\beta w} - H_{\beta n}$ )

## Поглощение в земной атмосфере Коэффициент экстинкции



**Fig. 1.** Mean vertical extinction at Flagstaff, Arizona, in May-June 1976. The assumed ozone and Rayleigh contributions are shown separately

## Поглощение в земной атмосфере

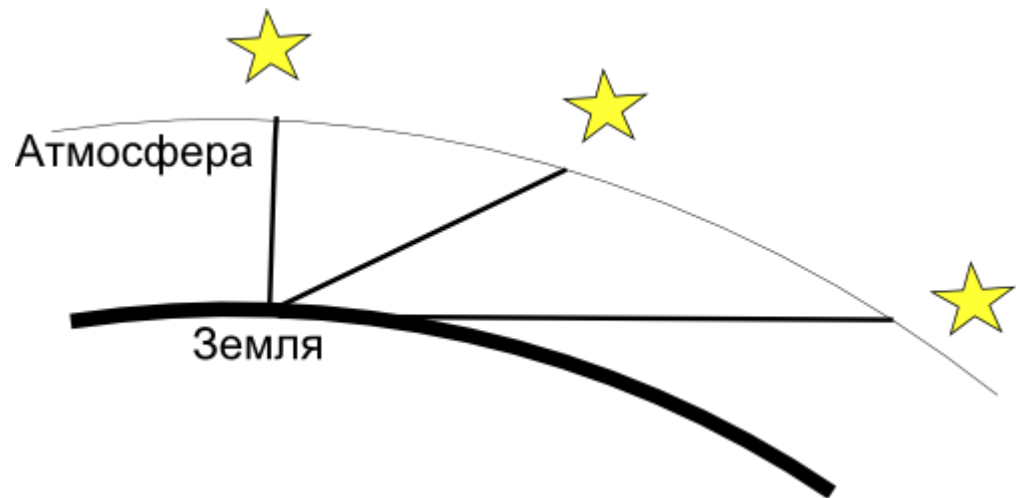
$$m_{obs} = m_{true} + k(\lambda) M$$

$k$  — коэффициент экстинкции

$M$  — воздушная масса относительно зенита ( $M=1$  в зените)

$$M = \sec Z$$

Поскольку  $k$  зависит от длины волны, то поглощение по-разному влияет на измерения в разных фотометрических полосах. То есть меняется не только звездная величина, но и показатель цвета (краснеет).



Зависимость от высоты:

$$H_0 = 8 \text{ км}$$

На высоте около 3 км поглощение в 2 раза меньше

$$k_\lambda(H) = k_\lambda(0)e^{-H/H_0}$$

# Фотометрические системы

Широкополосные

Среднеполосные

Узкополосные

*Ширина полосы пропускания*

> 300 А

100-300 А

< 100 А

- Позволяет наблюдать слабые объекты
- Характеризует большие участки спектра
- Подвержена влиянию особенностей в спектре

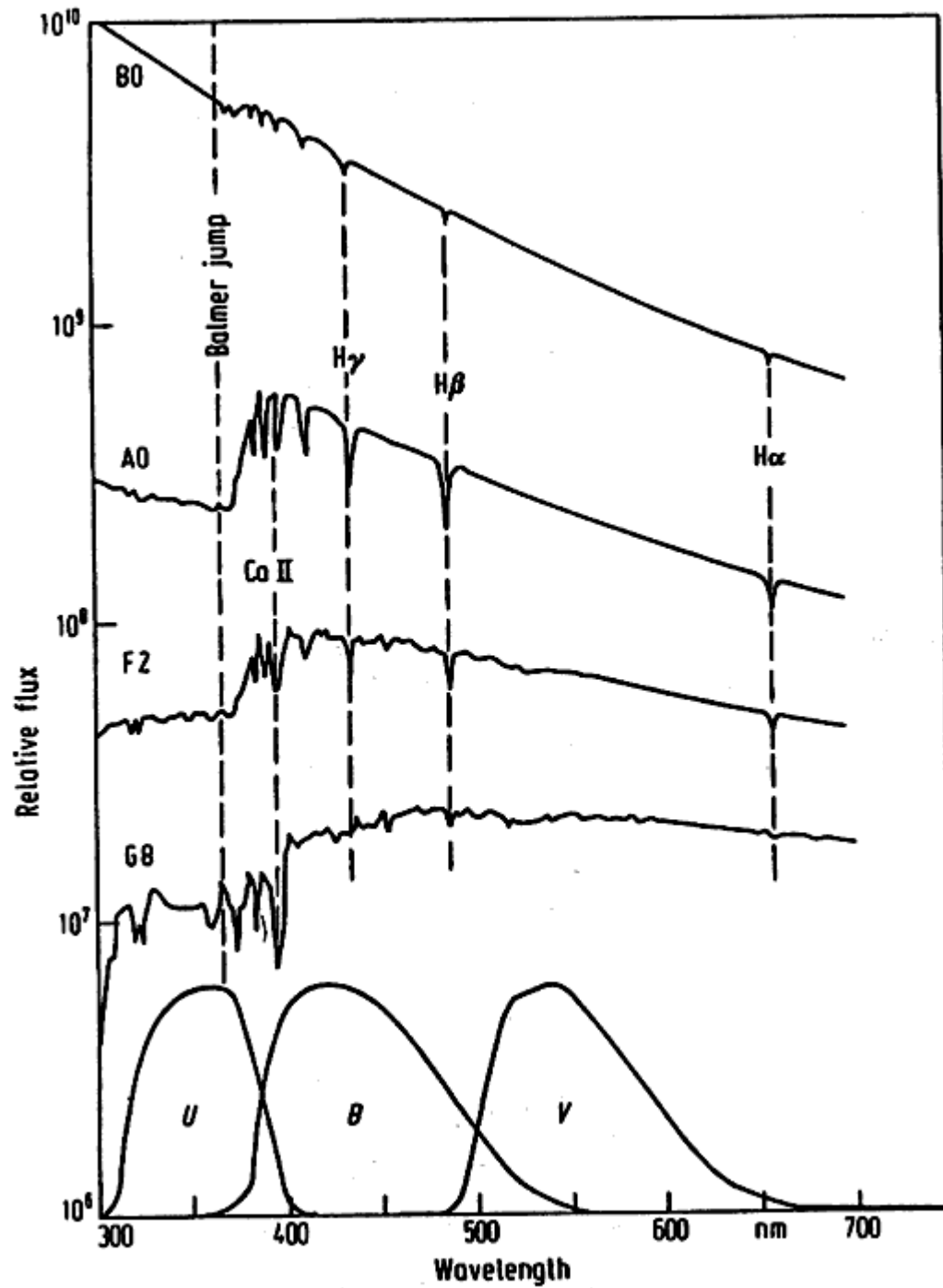
- Характеризует небольшие участки спектра
- Хорошо выбранные положения полос слабо подвержены влиянию особенностей спектра
- Лучше отражают физические свойства объекта

Система Джонсона UBV

Система Стремгрена uvby

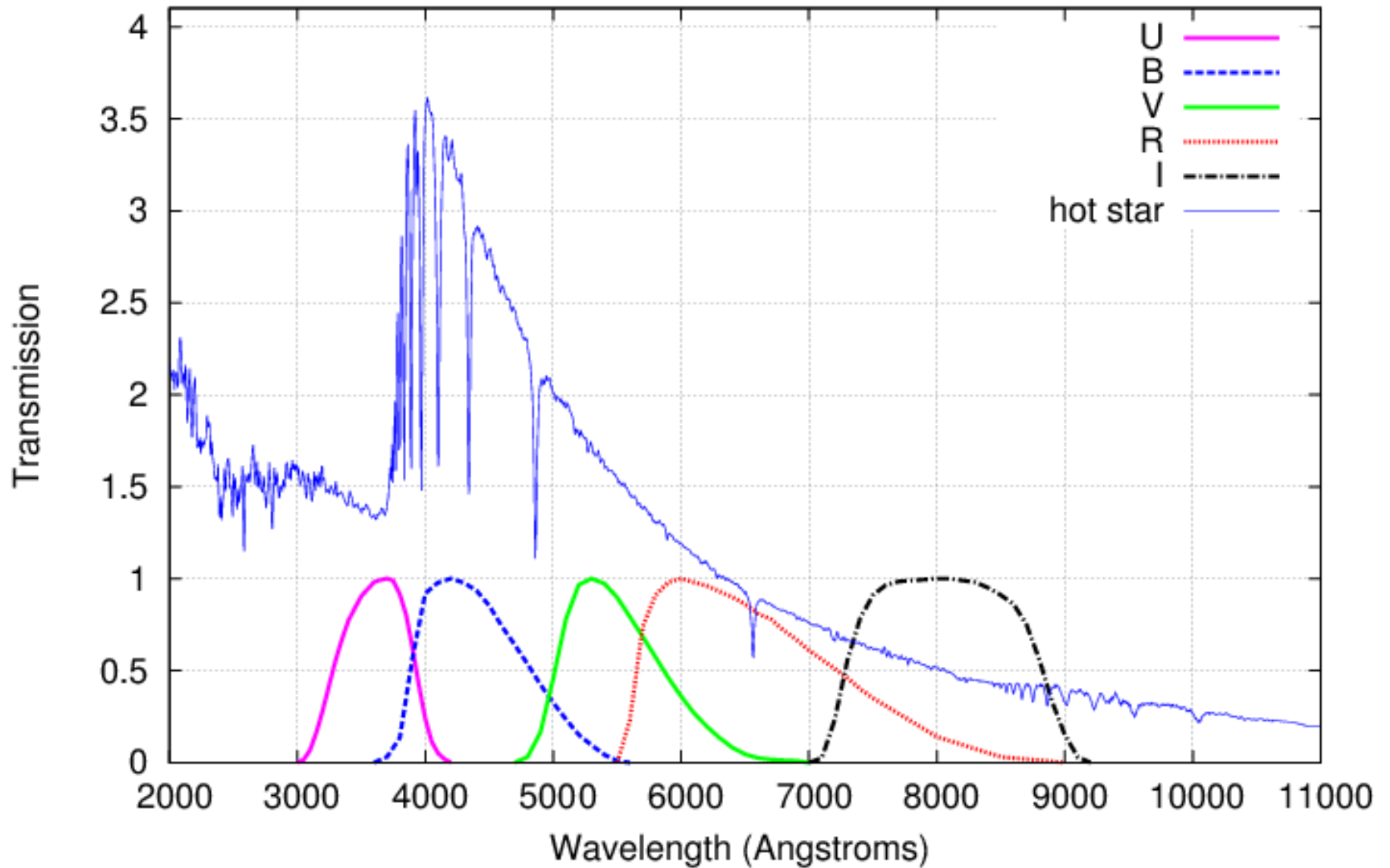
Спектрофотометрия

# Система Джонсона

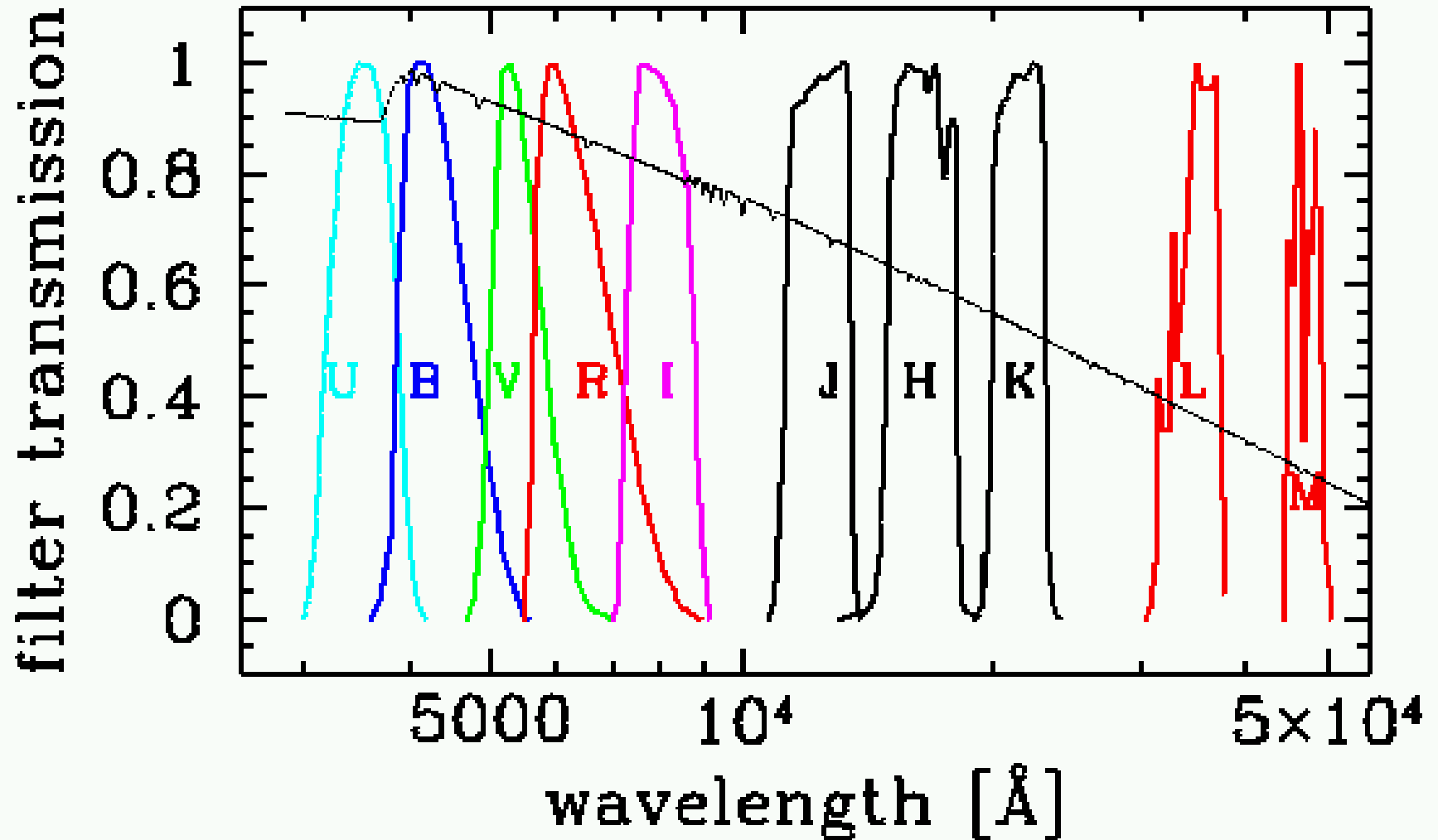


# Система Джонсона-Казинса

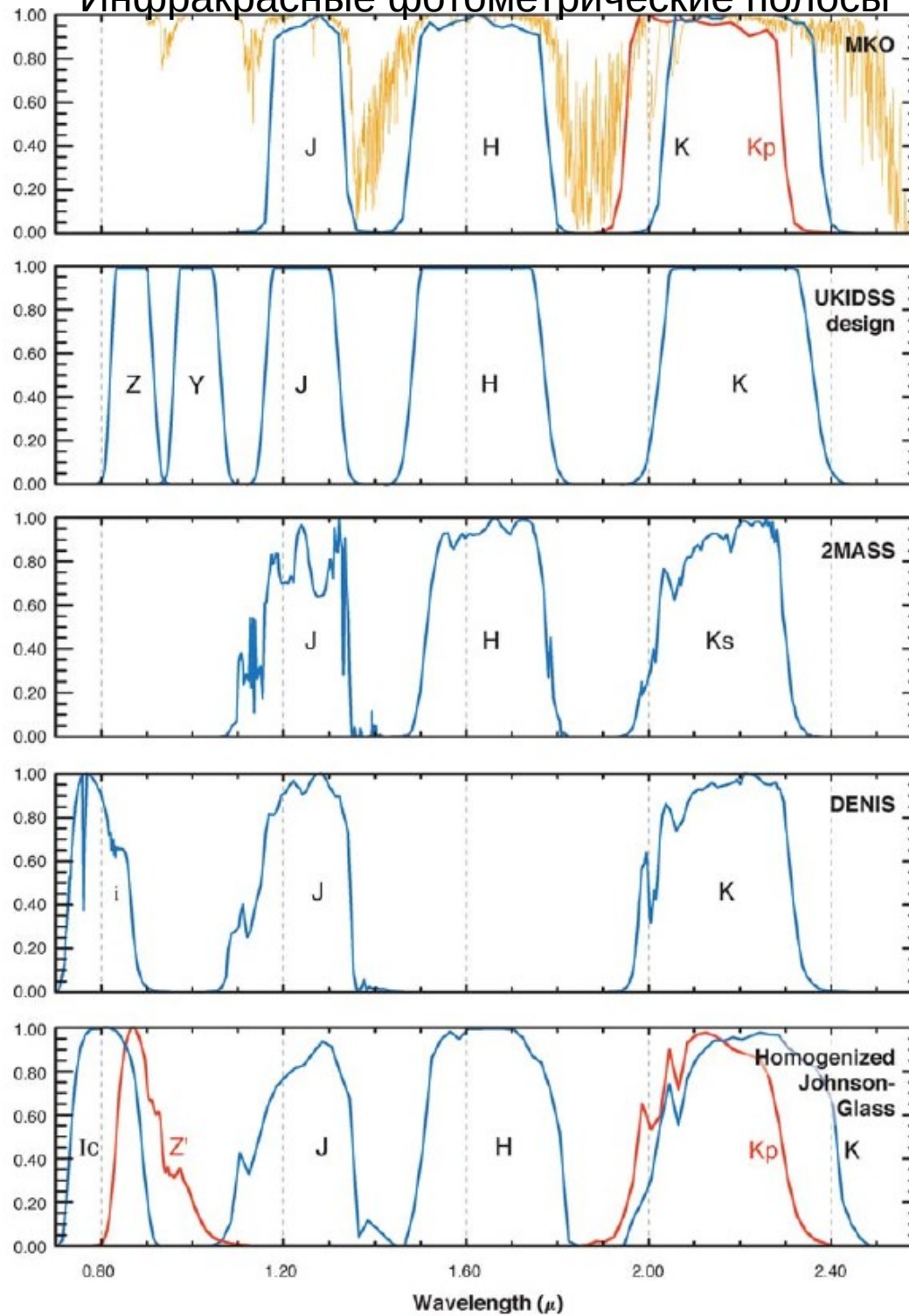
Standard Astronomical Filters: Johnson-Cousins



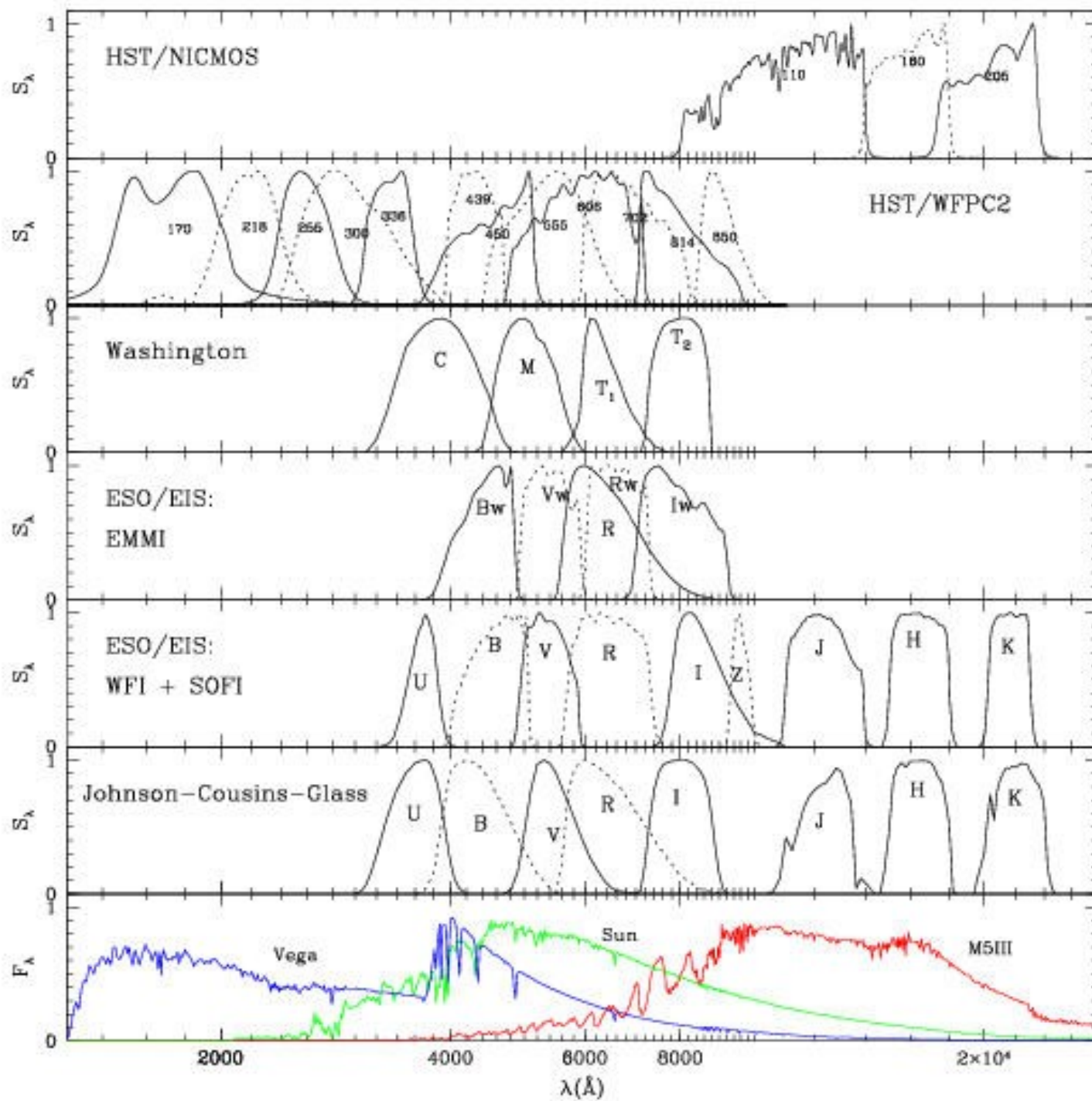
# Расширенная система Джонсона



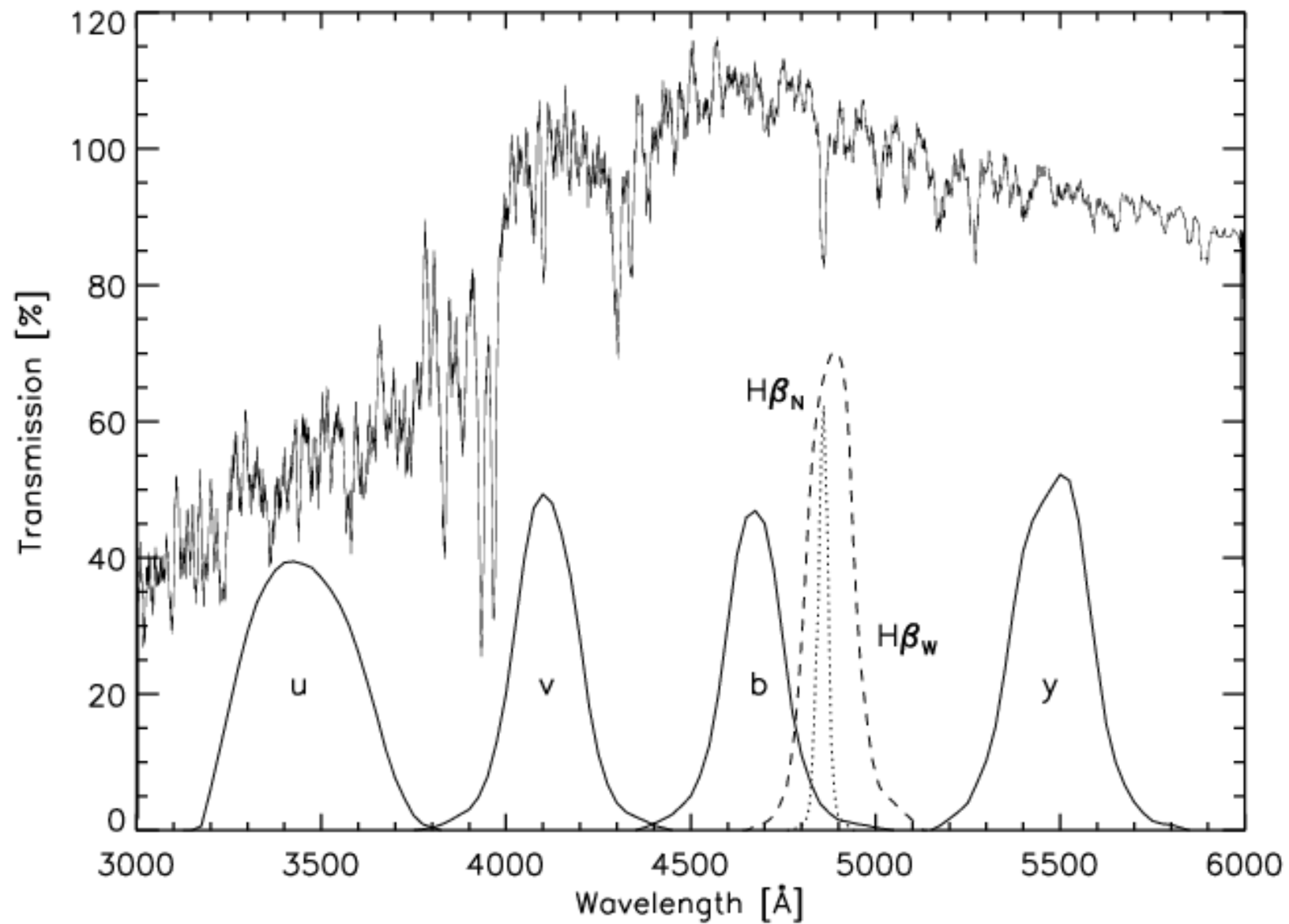
# Инфракрасные фотометрические полосы

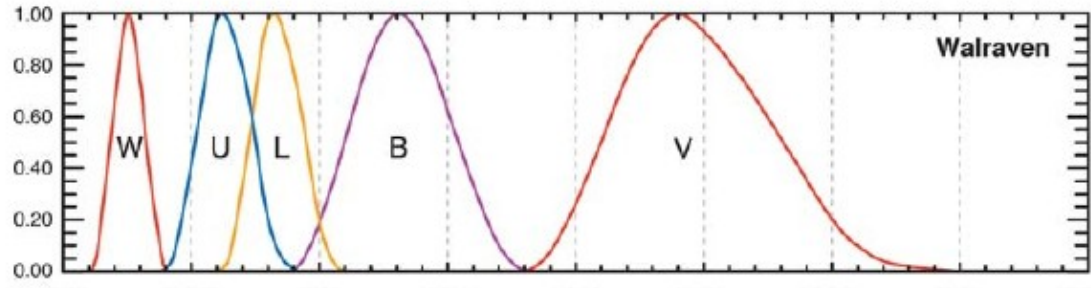
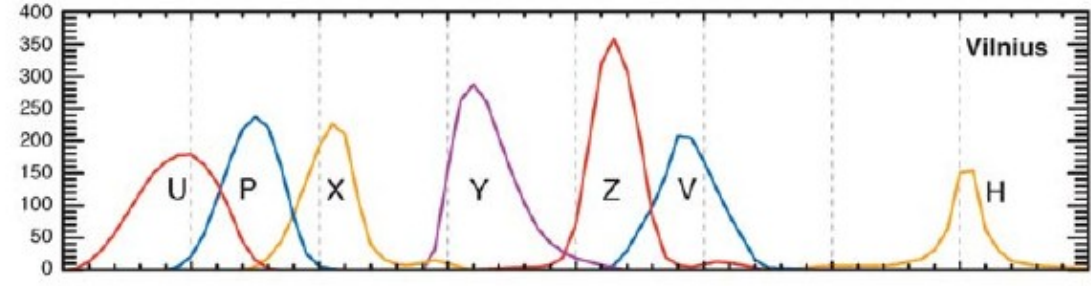
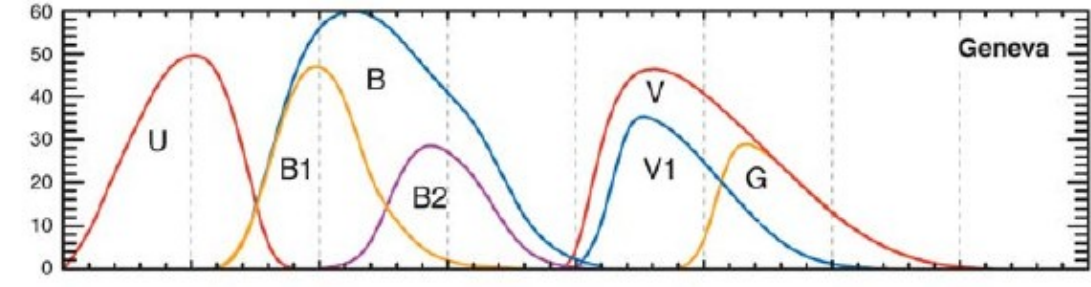
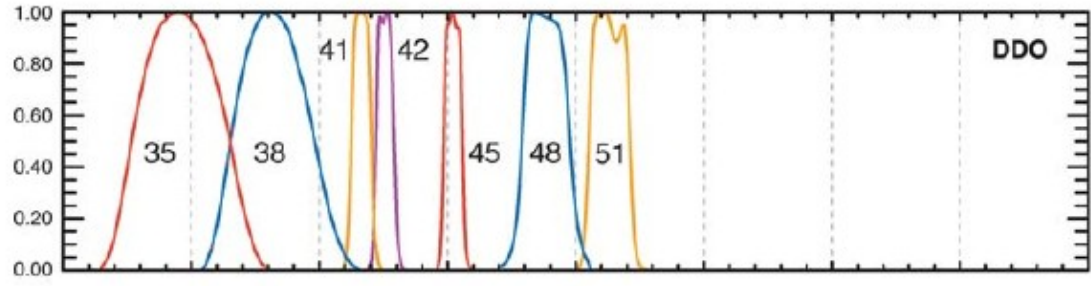
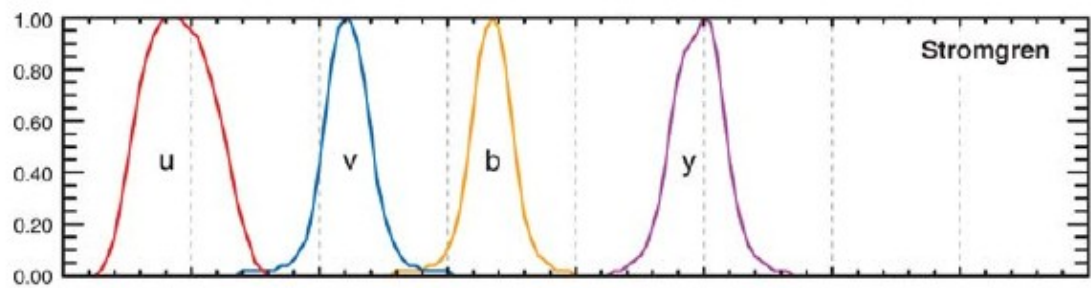




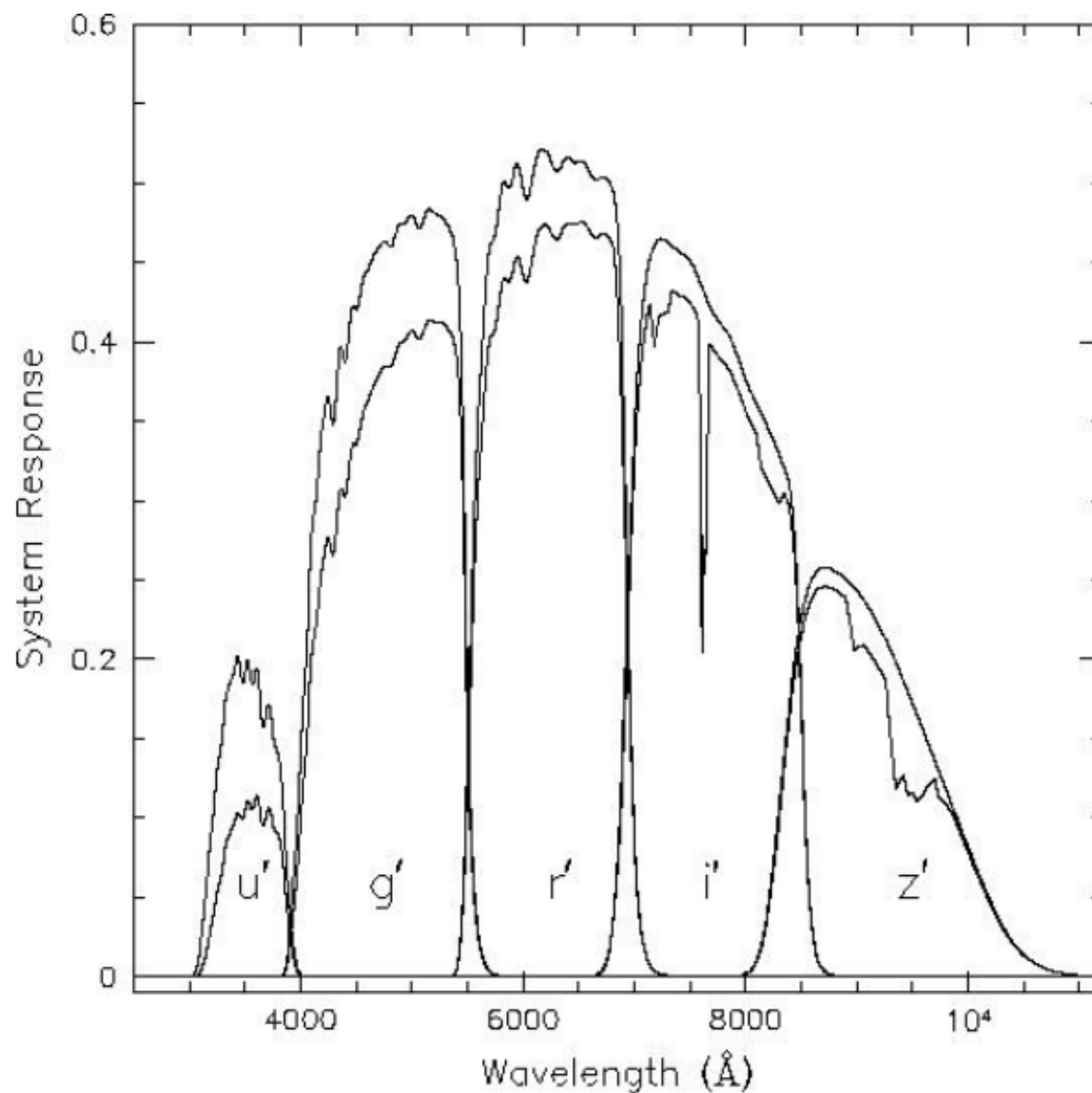


## Система Стремгрена



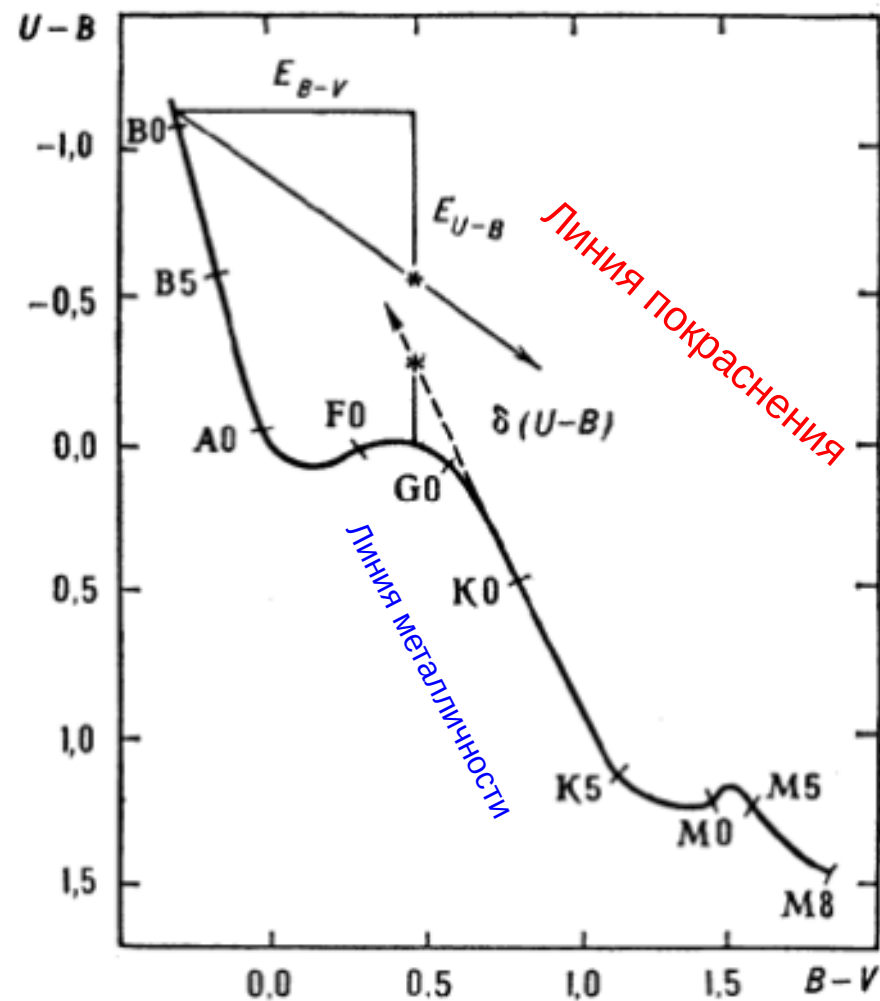
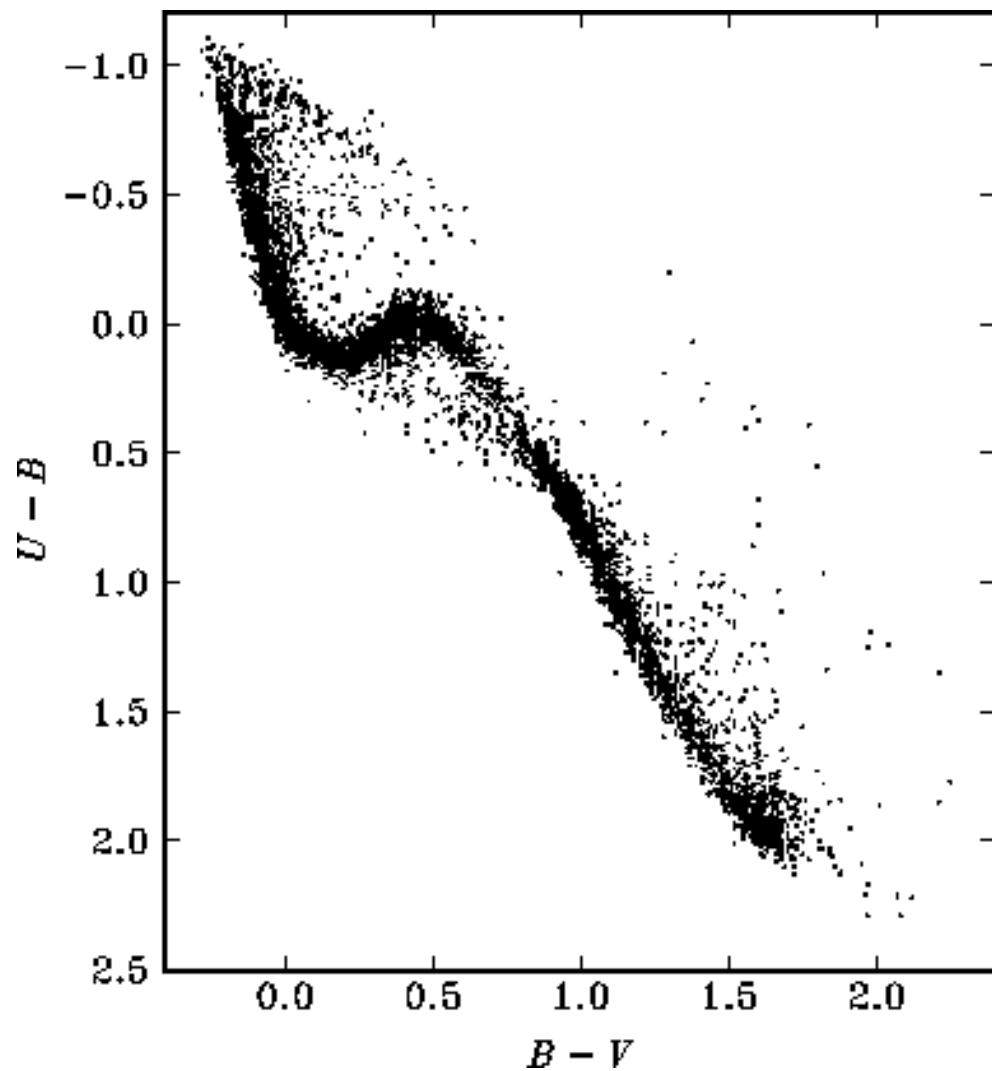


Wavelength ( $\text{\AA}$ )



**Sloan Digital Sky Survey broad-band filter responses. Filters are on the Thuan-Gunn system. Compared to standard UBVRI, these have more sharply defined band limits and avoid stronger night sky emission lines. The  $g'$  band takes the place of standard B and V and  $z'$  extends the system to the red limit of standard CCD response. Curves here include net throughput of telescope and detectors. Lower curves show effects of atmospheric absorption at 1.2 airmasses.**

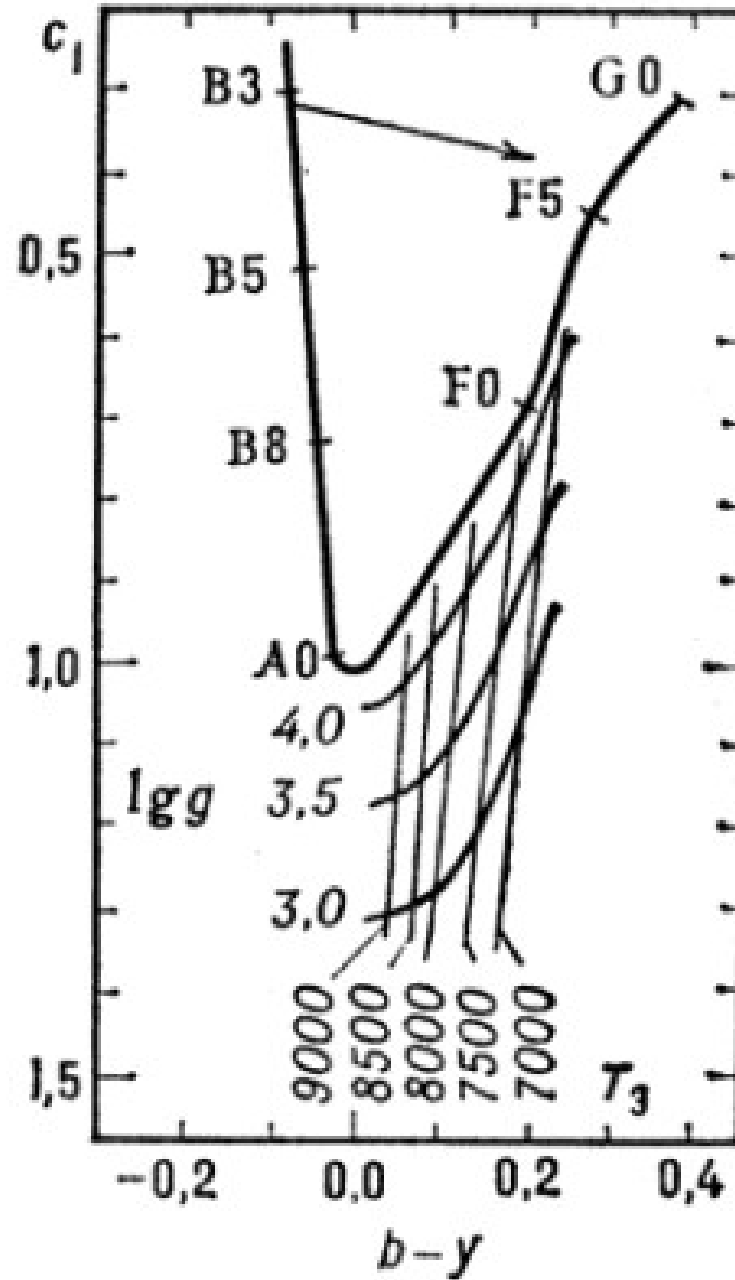
# Двухцветные диаграммы



Мера температуры

$$c_1 = (u - b) - (v - b)$$

Мера ускорения свободного падения

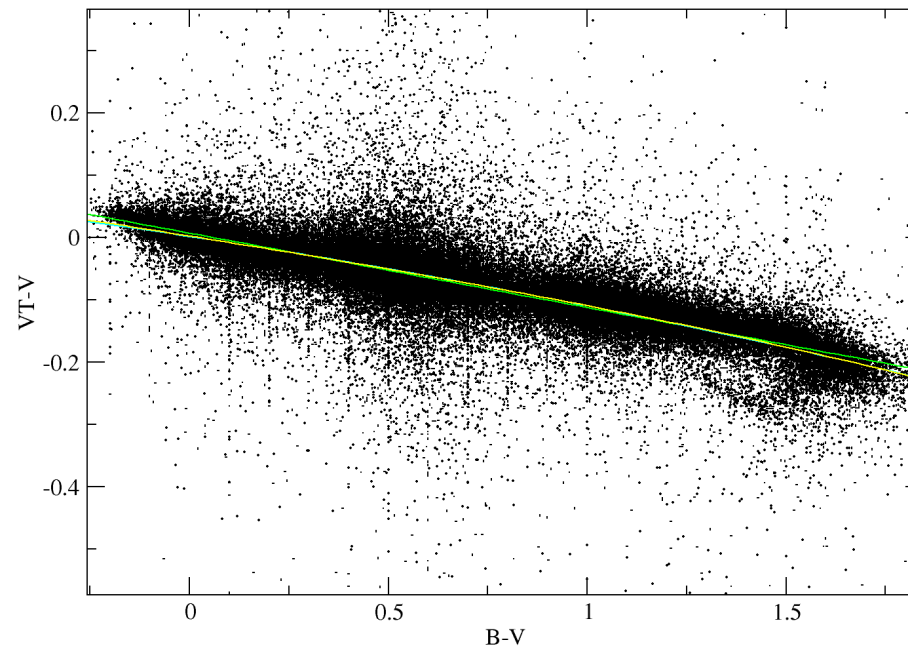


Мера температуры

## Перевод звездных величин из одной системы в другую

Строго говоря, такой универсальной зависимости не существует, так как есть зависимость от распределения энергии в спектре наблюдаемого объекта. Но для отдельных групп объектов (например, звезды карлики определенных спектральных классов) возможно, однако с потерей точности.

Jonhson → Hipparcos



$$V = 0.0156 + V_T - 0.0994(B_T - V_T), \quad (1)$$

$$R = -0.0160 + V_T - 0.5390(B_T - V_T), \quad (2)$$

$$I = -0.0468 + V_T - 0.9480(B_T - V_T). \quad (3)$$

ugriz -> UBVRcIc

=====

Quasars at  $z \leq 2.1$  (synthetic)

	Transformation	RMS residual
U-B	= $0.75*(u-g) - 0.81$	0.03
B-V	= $0.62*(g-r) + 0.15$	0.07
V-R	= $0.38*(r-i) + 0.27$	0.09
Rc-Ic	= $0.72*(r-i) + 0.27$	0.06
B	= $g + 0.17*(u-g) + 0.11$	0.03
V	= $g - 0.52*(g-r) - 0.03$	0.05

Stars with  $Rc-Ic < 1.15$  and  $U-B < 0$

	Transformation	RMS residual
U-B	= $0.77*(u-g) - 0.88$	0.04
B-V	= $0.90*(g-r) + 0.21$	0.03
V-R	= $0.96*(r-i) + 0.21$	0.02
Rc-Ic	= $1.02*(r-i) + 0.21$	0.01
B	= $g + 0.33*(g-r) + 0.20$	0.02
V	= $g - 0.58*(g-r) - 0.01$	0.02

All stars with  $Rc-Ic < 1.15$

	Transformation	RMS residual
U-B	= $0.78*(u-g) - 0.88$	0.05
B-V	= $0.98*(g-r) + 0.22$	0.04
V-R	= $1.09*(r-i) + 0.22$	0.03
Rc-Ic	= $1.00*(r-i) + 0.21$	0.01
B	= $g + 0.39*(g-r) + 0.21$	0.03
V	= $g - 0.59*(g-r) - 0.01$	0.01



# Фотометрические индексы, чувствительные к звездным параметрам

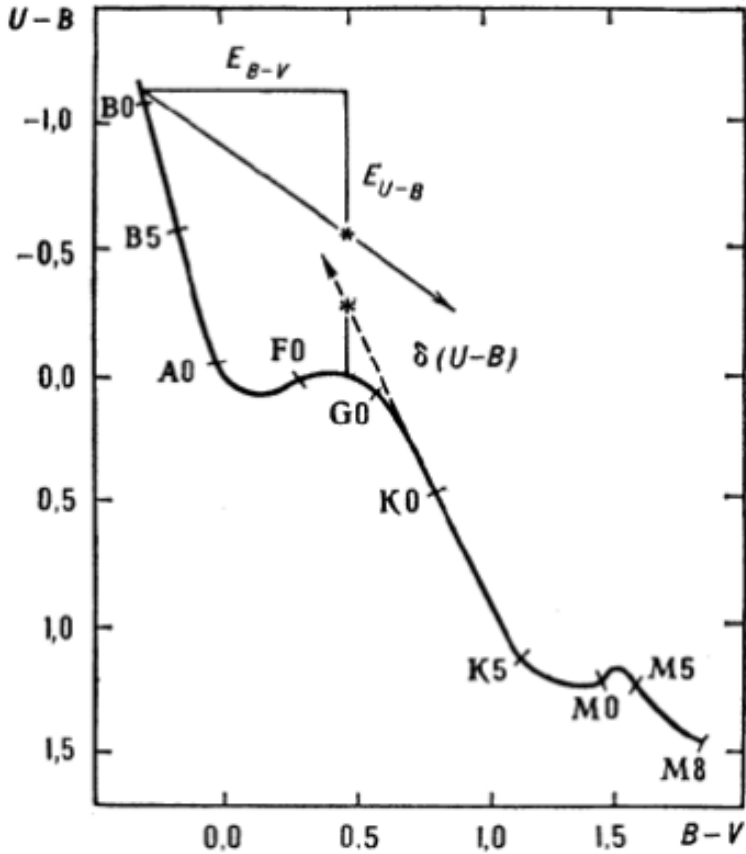
Эффективная температура:  $B-V$ ,  $b-y$ ,  $\beta = H_{\beta w} - H_{\beta n}$

Ускорение силы тяжести:  $c1 = (u - b) - (v - b)$

Металличность:  $m1 = (v-b) - (b-y)$

Светимость (O-B звезды):  $\beta = H_{\beta w} - H_{\beta n}$

## Фотометрические индексы, независящие от межзвездного покраснения



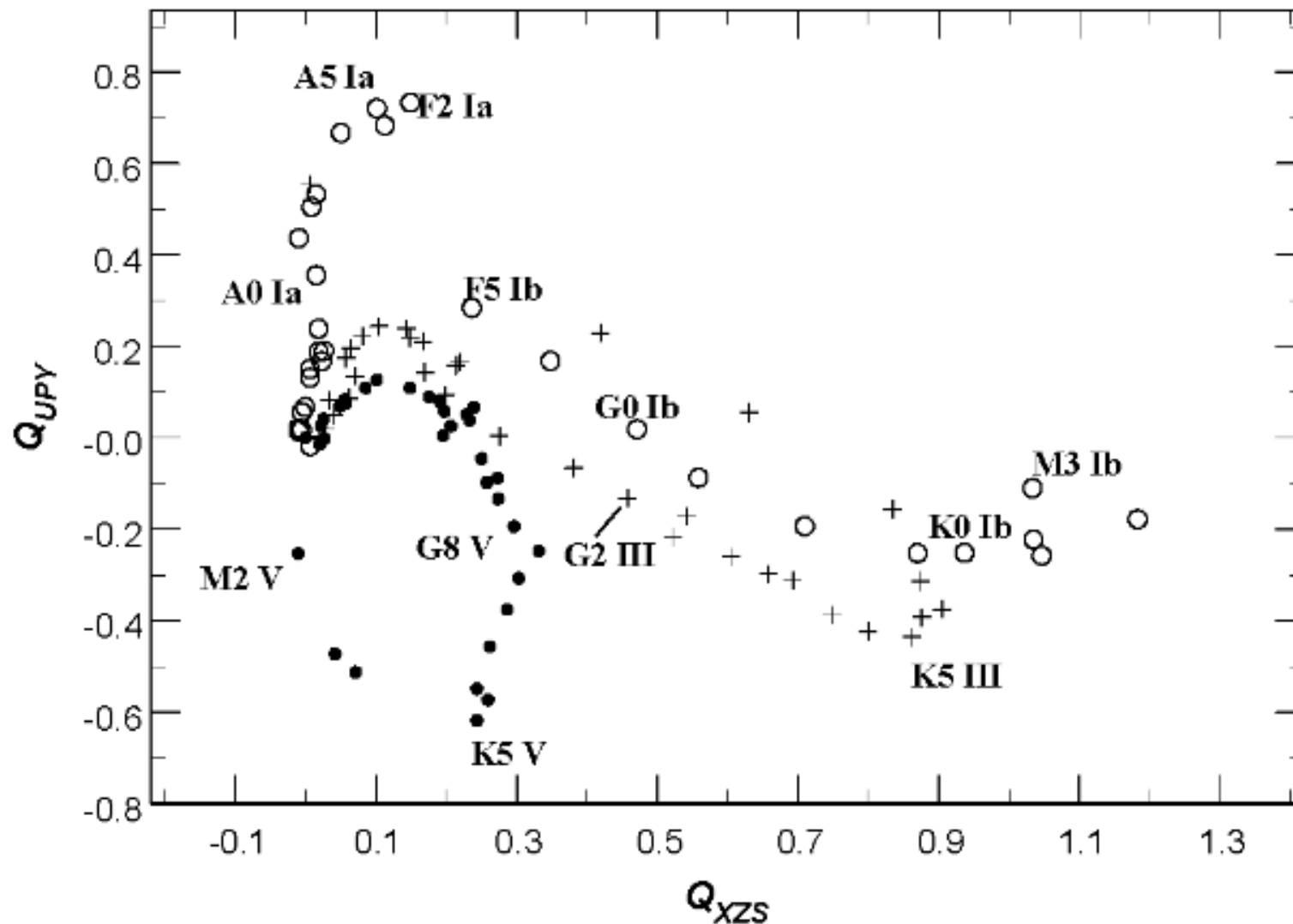
$$E(U - B) = (U - B) - (U - B)_0$$

$$E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0$$

$$\begin{aligned} (U - B)_0 &= (U - B) - E(U - B) = \\ &= (U - B) - E(B - V) \frac{E(U - B)}{E(B - V)} = \\ &= (U - B) - ((B - V) - (B - V)_0) \frac{E(U - B)}{E(B - V)} \end{aligned}$$

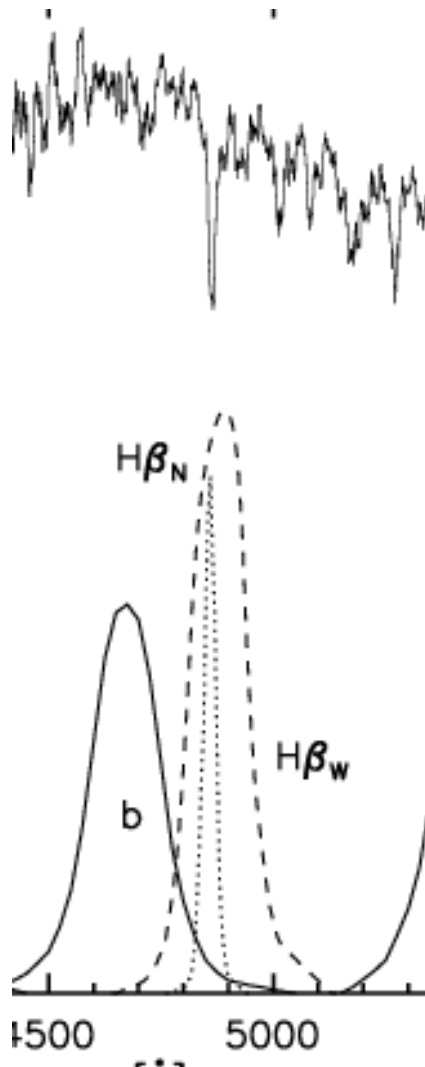
$$(U - B)_0 - (B - V)_0 \frac{E(U - B)}{E(B - V)} = (U - B) - (B - V) \frac{E(U - B)}{E(B - V)} = Q_{UBV}$$

## Фотометрические индексы, независящие от межзвездного покраснения



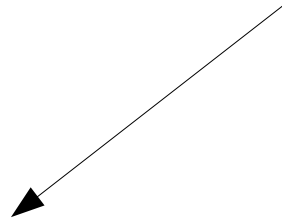
## Фотометрические индексы, независящие от межзвездного покраснения

$$\beta = H_{\beta_w} - H_{\beta_n}$$



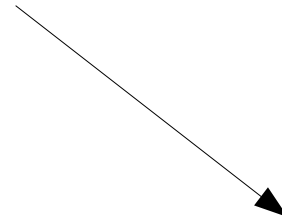
- Оба фильтра центрированы примерно на одну область → межзвездное поглощение одинаково
- Отношение потоков или разница звездных величин не будет зависеть от покраснения!
- Индекс чувствителен к температуре O-F звезд
- Для звезд главной последовательности — индикатор светимости

# Современные методы ПЗС фотометрии



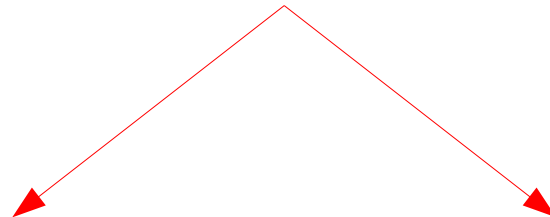
## Апертурная

Измерение света в некоторой апертуре или диафрагме



## PSF - профильная

Построение аналитического или численного профиля точечного изображения



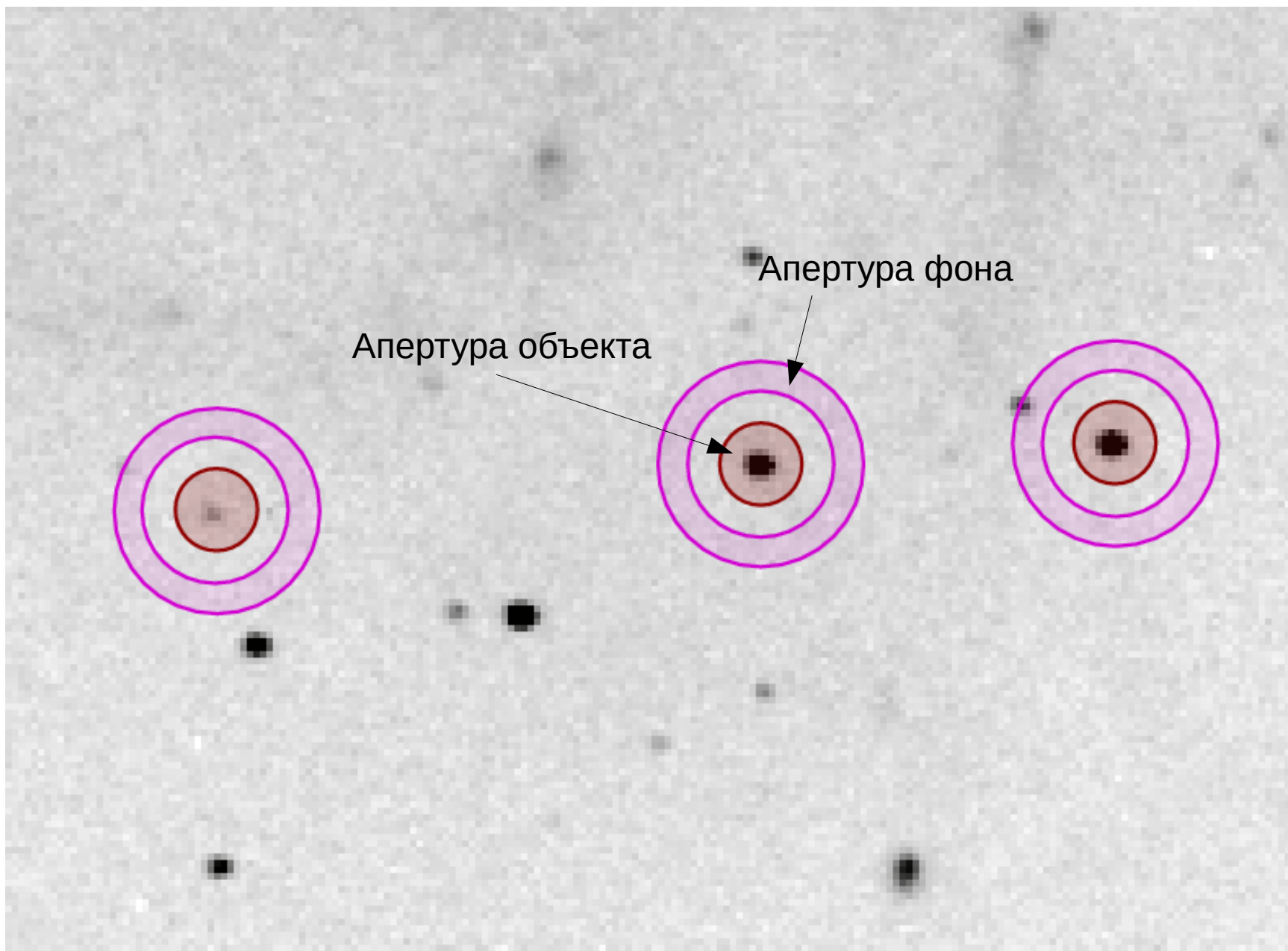
## Дифференциальная

- Измерение разницы звездных величин относительно звезд и постоянным блеском
- Высокая точность

## Абсолютная

- Измерение разницы звездных величин относительно звезд-стандартов
- Точность зависит от точности данных по стандартам

# Апертурная фотометрия

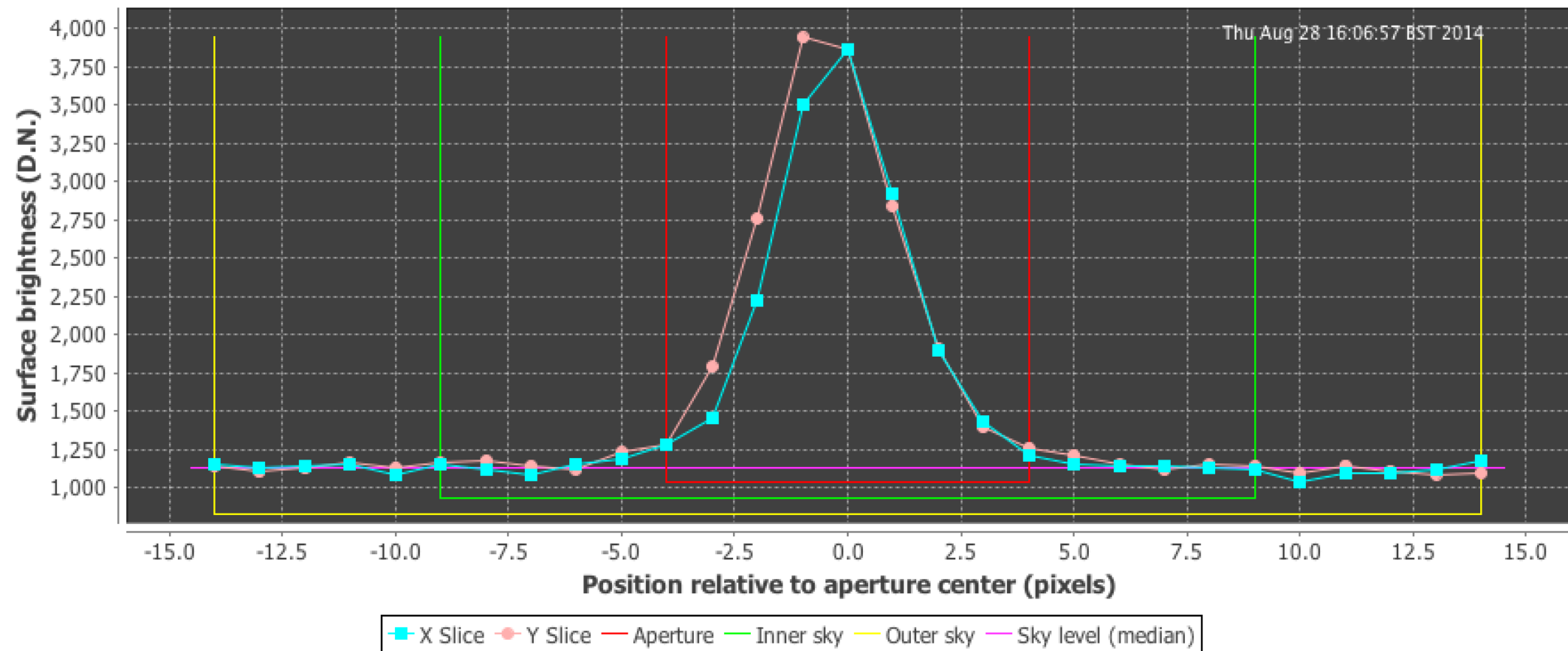


# Апертурная фотометрия

Апертура объекта

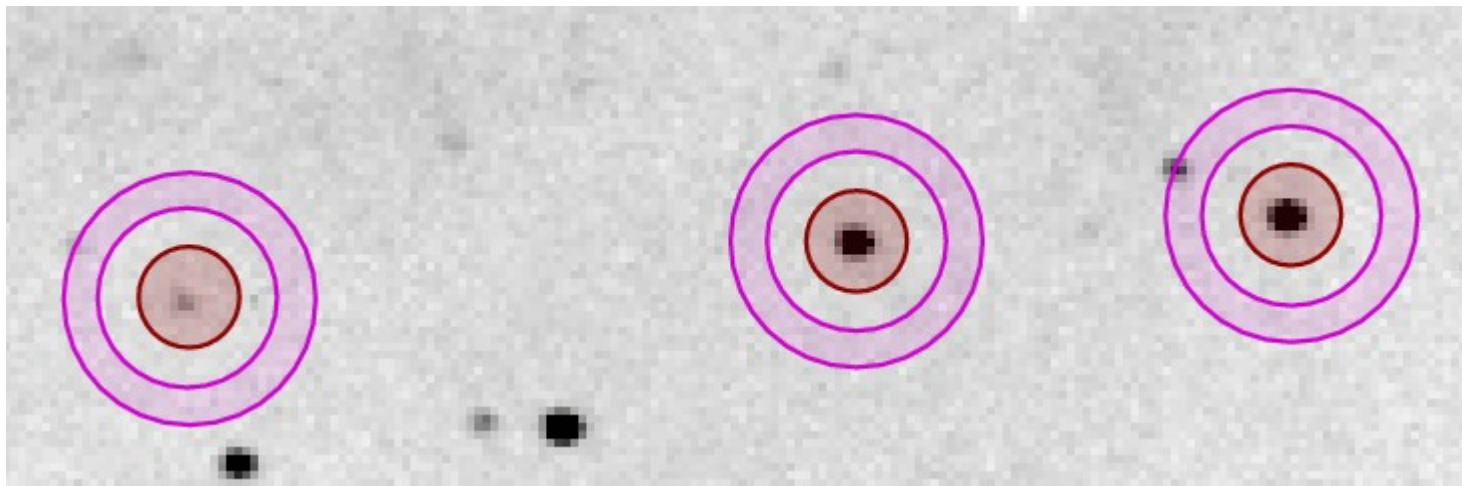
Апертура фона

Aperture Slice



# Апертурная фотометрия

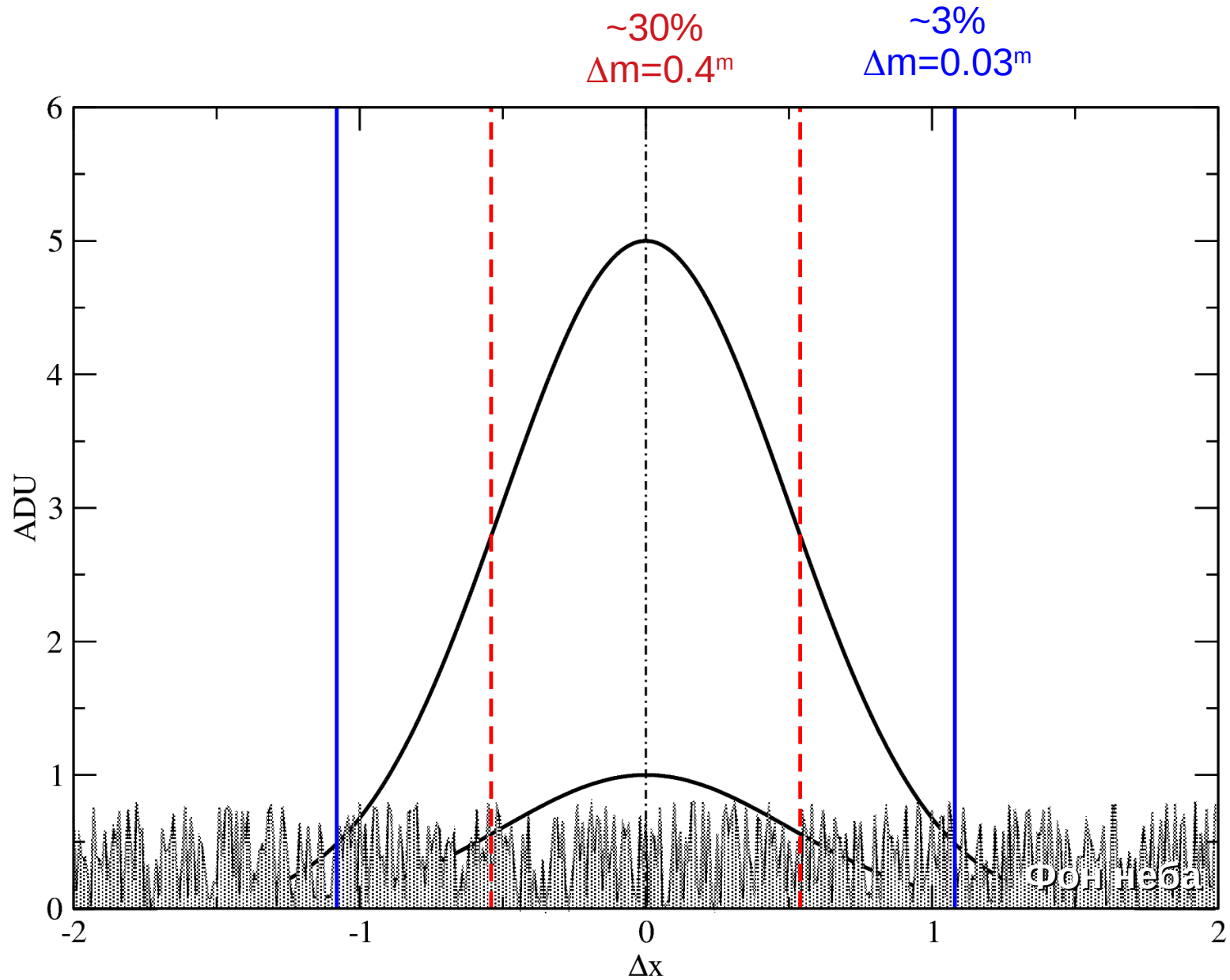
- Поиск объектов или выбор по каталогу нужных объектов
- Оценка уровня фона неба
- Подбор апертуры для объекта и фона неба
- Усреднение отсчетов фона, исключая попадание посторонних звезд
- Стандартное отклонение распределения отчетов локального фона
- Суммирование (отсчет минус фон) внутри апертуры объекта
- Оценка апертурной поправки





# Апертурная поправка

Учет потерь сигнала на апертуре



# Апертурная фотометрия

$$m_{inst} = -2.5 \lg \sum (I - I_{sky})$$

Если принять фон неба  $25^m$

$$m_{inst} = -2.5 \lg \frac{\sum (I - I_{sky})}{I_{sky}} = -2.5 \lg \sum (I - I_{sky}) + 25$$

## Оценка ошибок

Сигнал  $e$ :  $S = (S_{obj} - N \times I_{sky}) \times gain$ ,  $S_{obj} = \sum I$

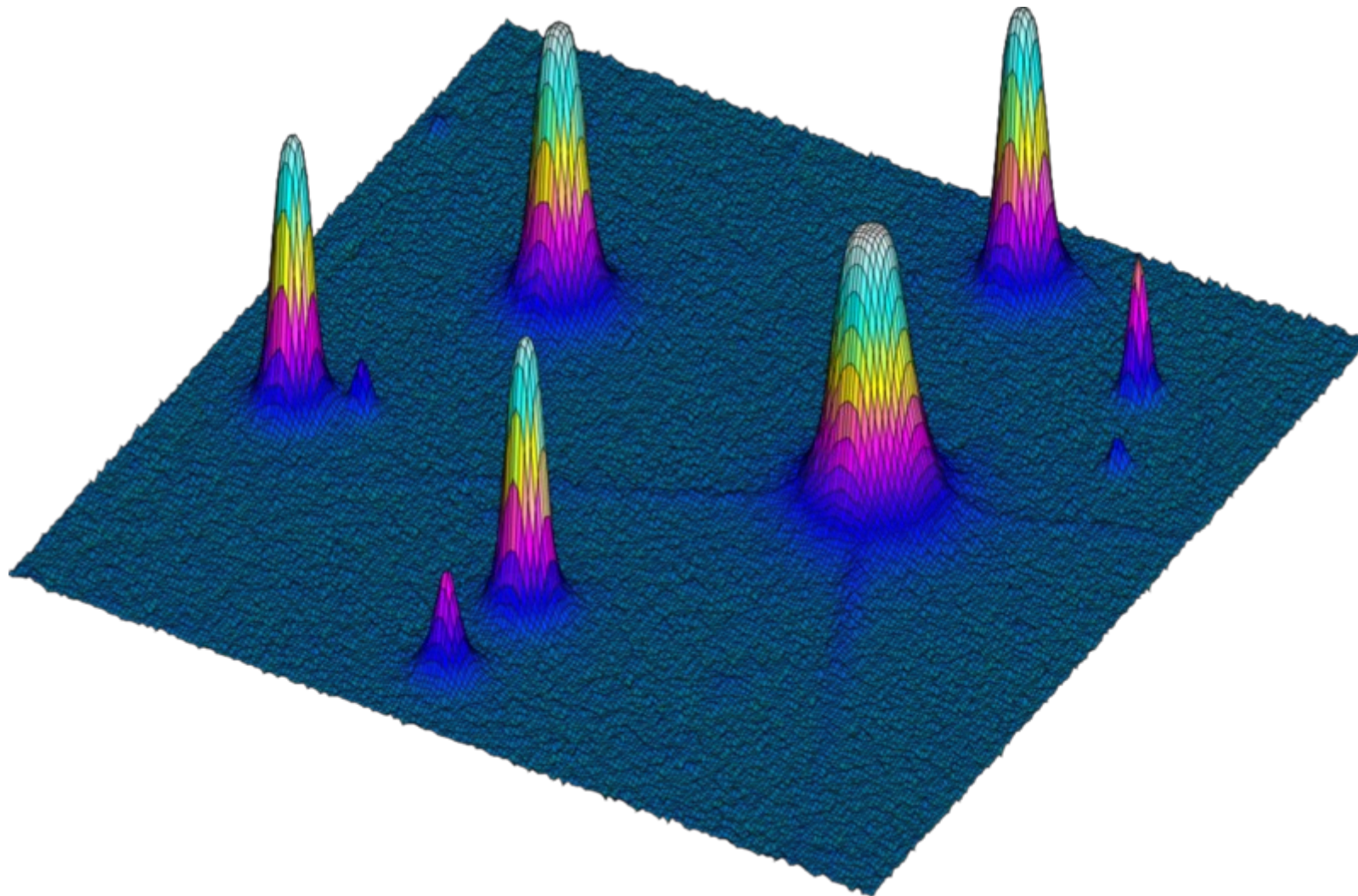
Ошибки:  $\sigma S_{obj} = \sqrt{S_{obj} \times gain}$      $\sigma S_{sky} = gain \times N \times \sigma I_{sky}$

$$\sigma S = gain \sqrt{\frac{S_{obj}}{gain} + N^2 \times \sigma I_{sky}^2}$$

$$\sigma m = 1.086 \frac{\sigma S}{S} = 1.086 \frac{\sqrt{\frac{S_{obj}}{gain} + N^2 \times \sigma I_{sky}^2}}{S_{obj} - N \times I_{sky}}$$

# PSF фотометрия (Point Spread Function)

Позволяет проводить фотометрию в тесных полях звезд



# PSF фотометрия

- Поиск звездных объектов
- Оценка уровня фона неба
- Выбор наиболее качественных звезд
- Построение нормированной функции рассеяния точки
- Аппроксимация звездного поля
- Нахождение масштабного фактора  $f$  для каждой звезды

$$m_{inst} = -2.5 \lg f$$

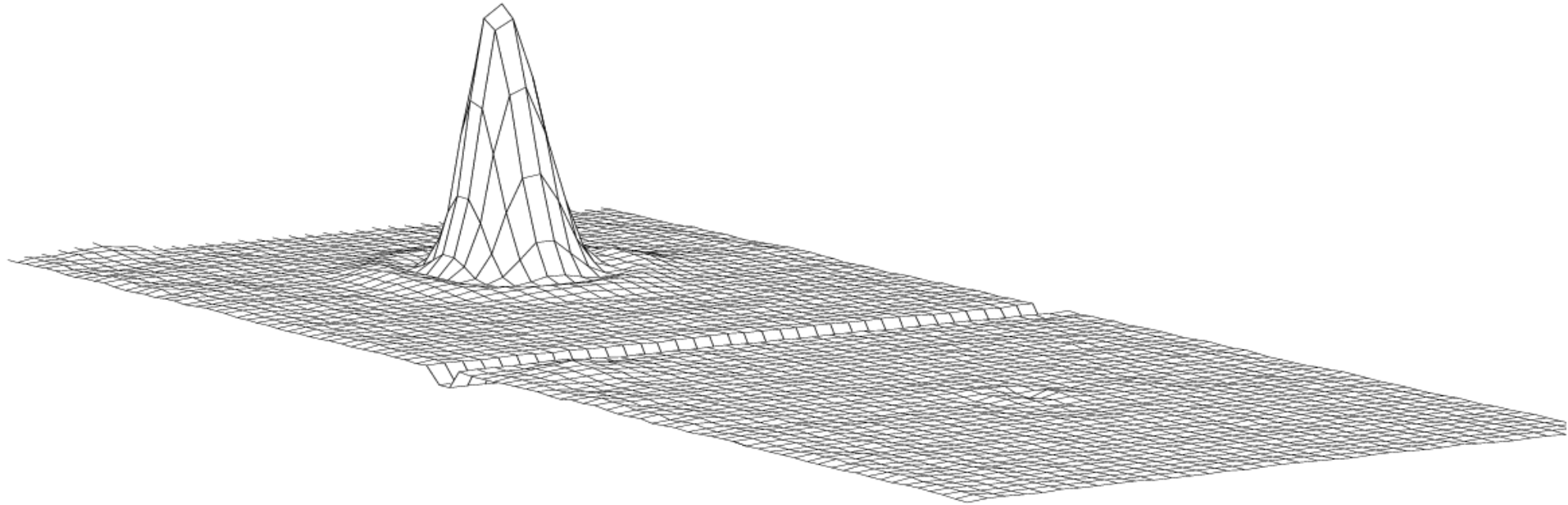
Если принять фон неба  $25^m$

$$m_{inst} = -2.5 \lg \frac{f}{f_{sky}} + 25$$

## Удаление из кадра изображений ненужных звезд

AC Her Before PSF Subtraction

After PSF Subtraction



Остаточный сигнал — источник ошибок

# Профиль PSF

**Численный**  
Табличные значения  
 $f(x-x_0, y-y_0)$

**Аналитический**

## Минусы:

- PSF зависит от оптики
  - Разная для разных длин волн
  - Разная по полю матрицы
- Зависит от фокусировки

↓  
Переменные параметры

**2D gaussian:**  $A \times \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$

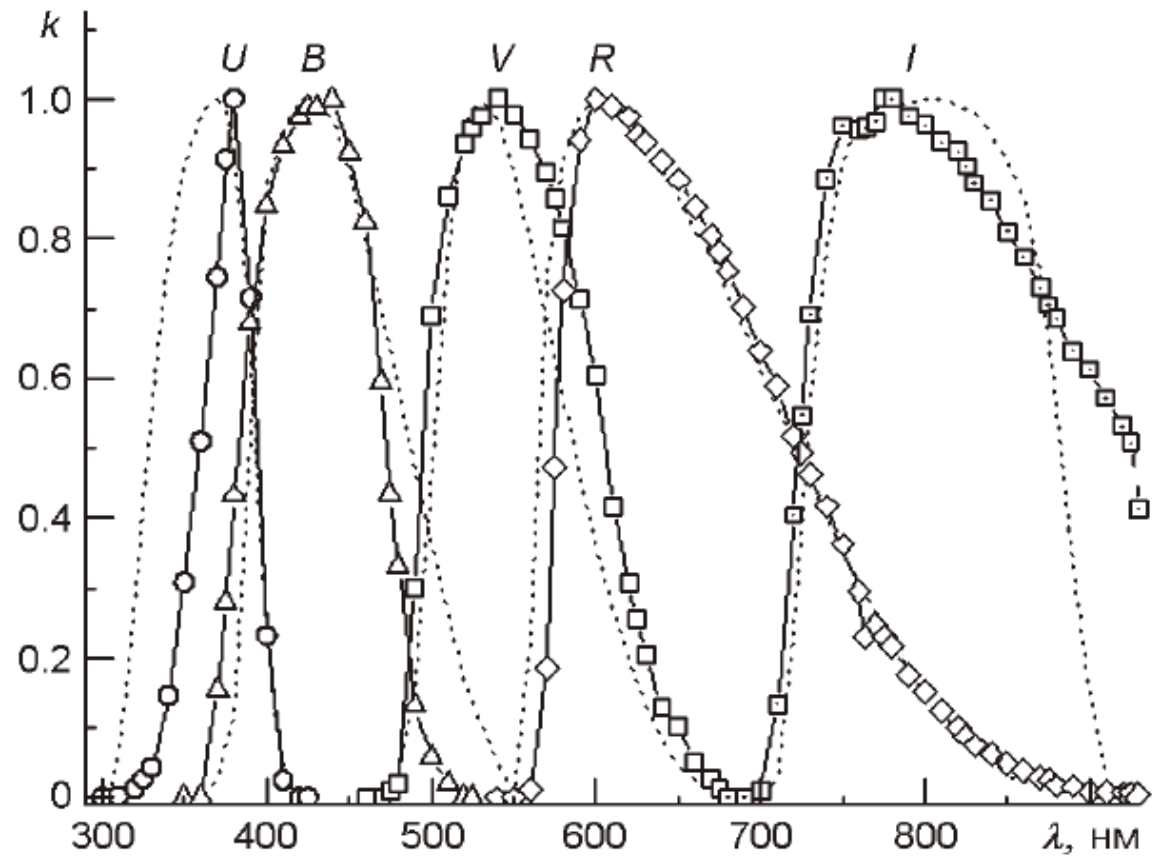
$$A \times \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

**Lorentz:**  $\frac{A}{\frac{r^2}{\sigma^2} + 1}$

**Moffat:**  $\frac{A}{\left(\frac{r^2}{\sigma^2} + 1\right)^\beta}$

# Перевод инструментальных звездных величин в стандартную

Рис. 1. Полосы пропускания использованных светофильтров (сплошные линии) и профили стандартных фотометрических полос  $UBVRI$  системы Джонсона — Козинса (пунктир)



# Перевод инструментальных звездных величин в стандартную по стандартным звездам в кадре

$$M^i = m_0^i + ZP_m + k_C C^i$$

$$C^i = ZP_c + k'_C c_0^i$$

$M^i$  — звездная величина в стандартной системе

$C^i$  — показатель цвета в стандартной системе

$m^i$  — звездная величина в инструментальной системе

$c^i$  — показатель цвета в инструментальной системе

$k_C$  — коэффициент трансформации звездной величины

$k'_C$  — коэффициент трансформации показателя цвета

$ZP_m$  — нуль-пункт звездной величины

$ZP_c$  — нуль-пункт показателя цвета



## Перевод инструментальных звездных величин в стандартную по стандартным звездам вне кадра

$$M^i = m_0^i + ZP_m + k_C C^i + k_M M$$

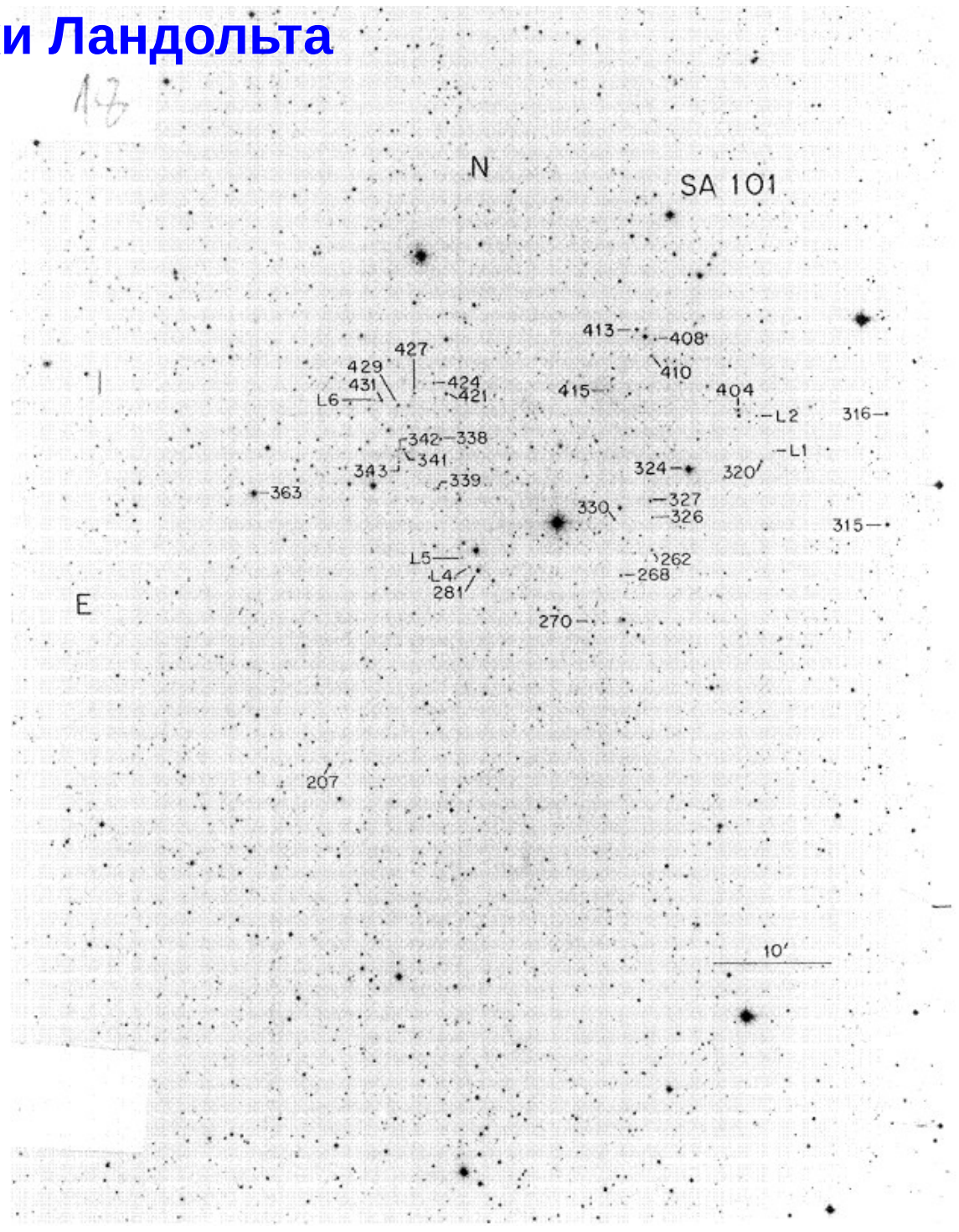
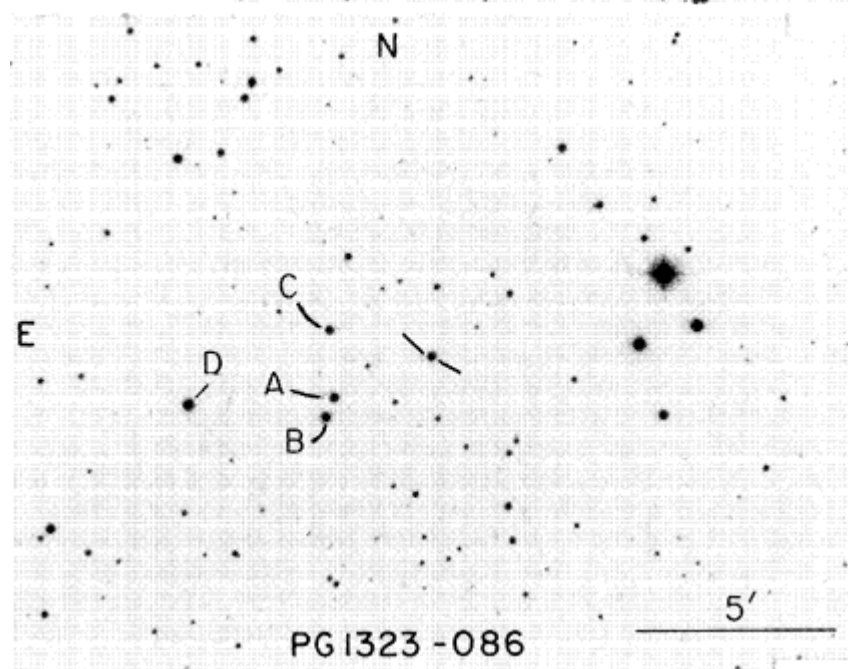
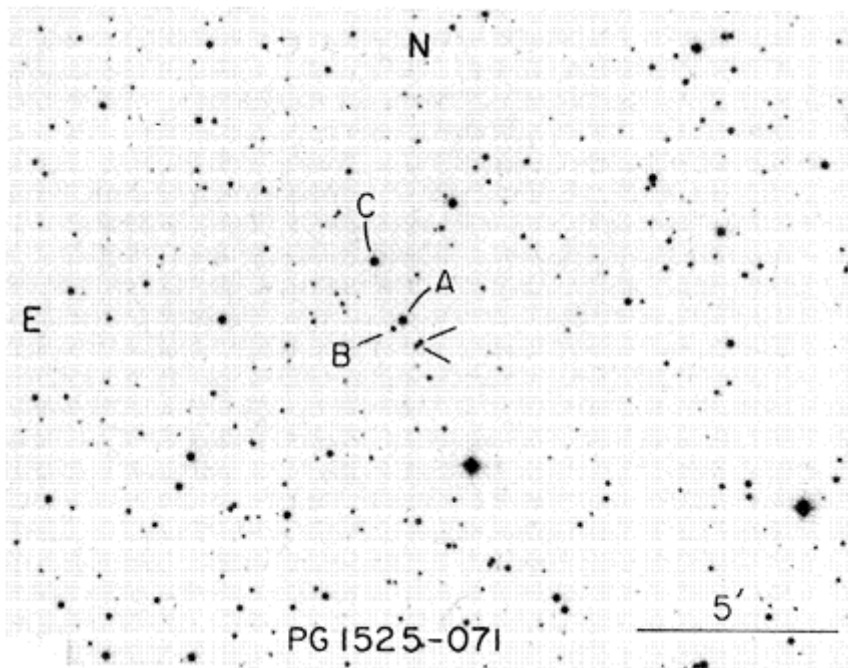
$$C^i = ZP_c + k'_C c_0^i + k'_M M$$

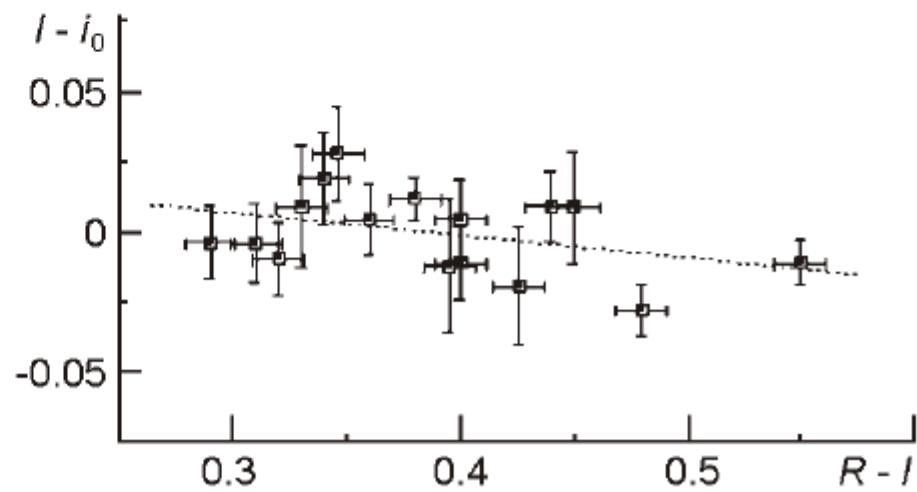
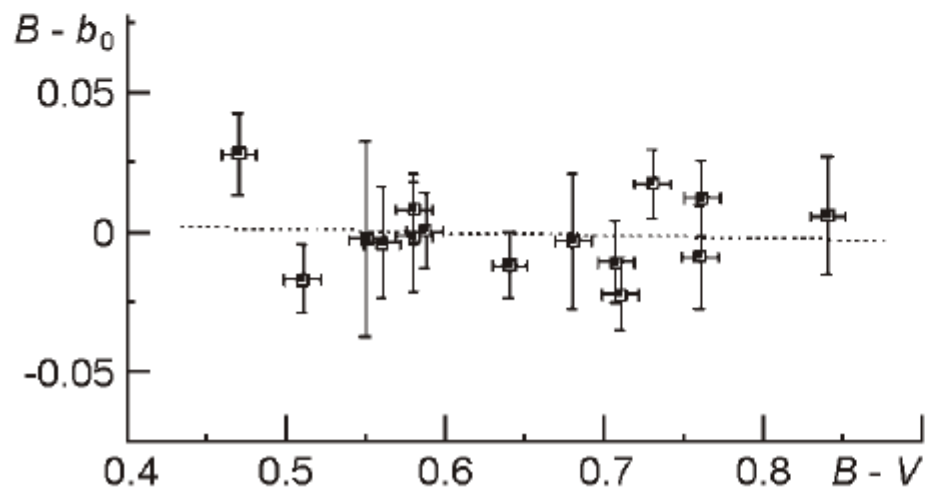
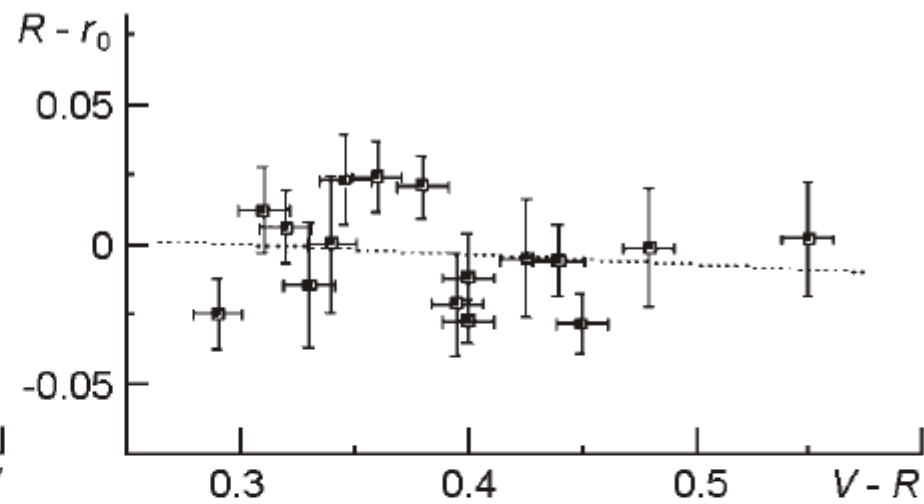
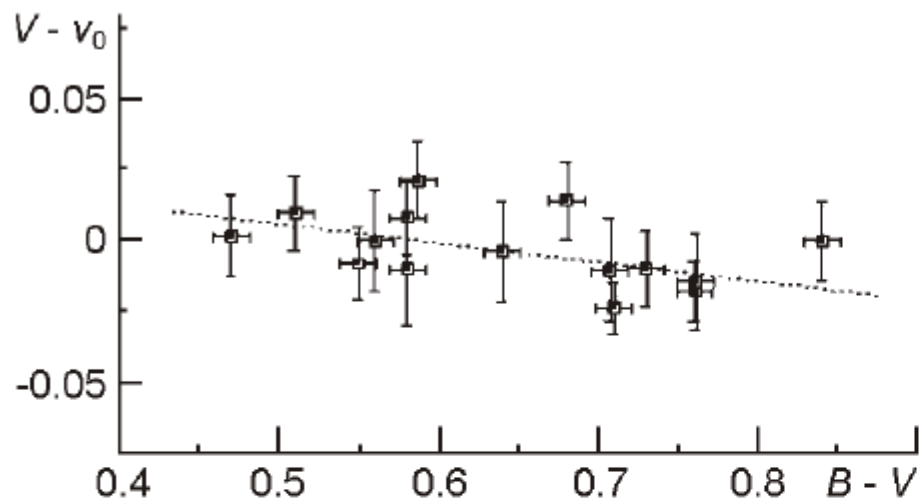
$k_M$  — коэффициент экстинкции звездной величины

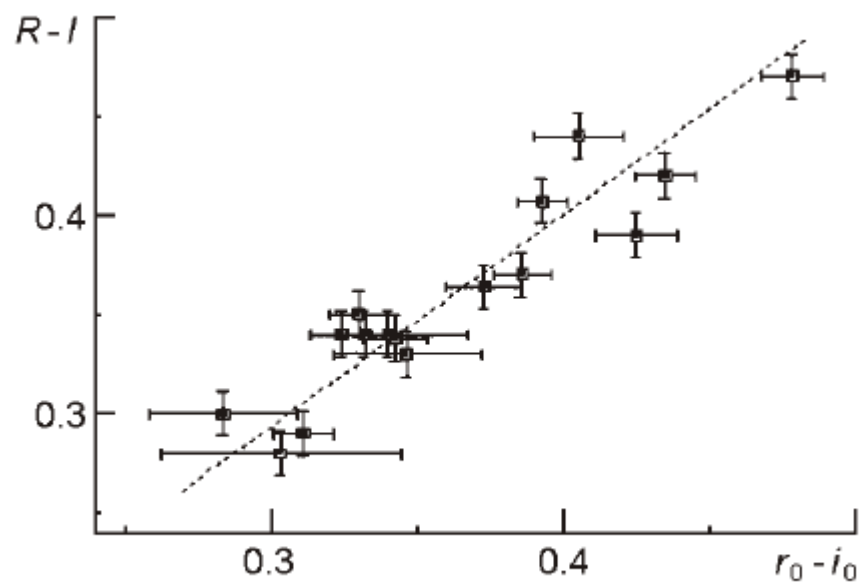
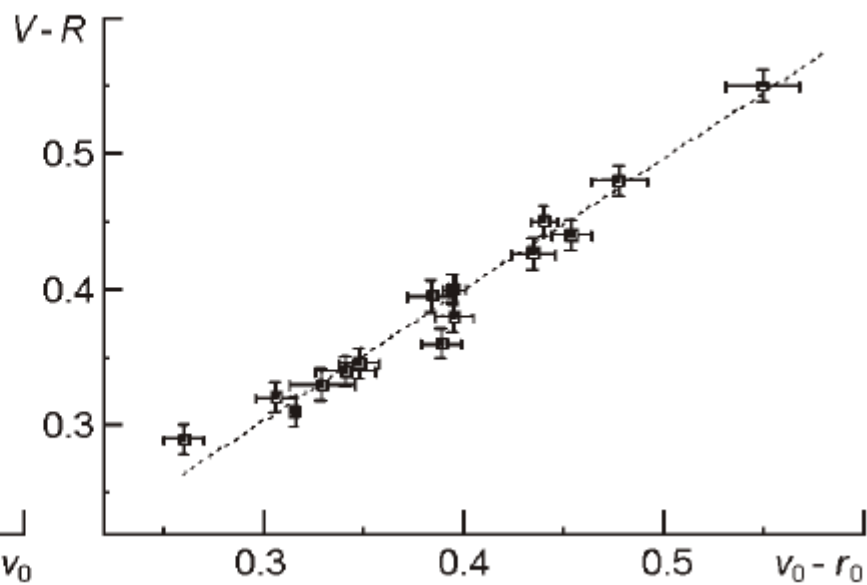
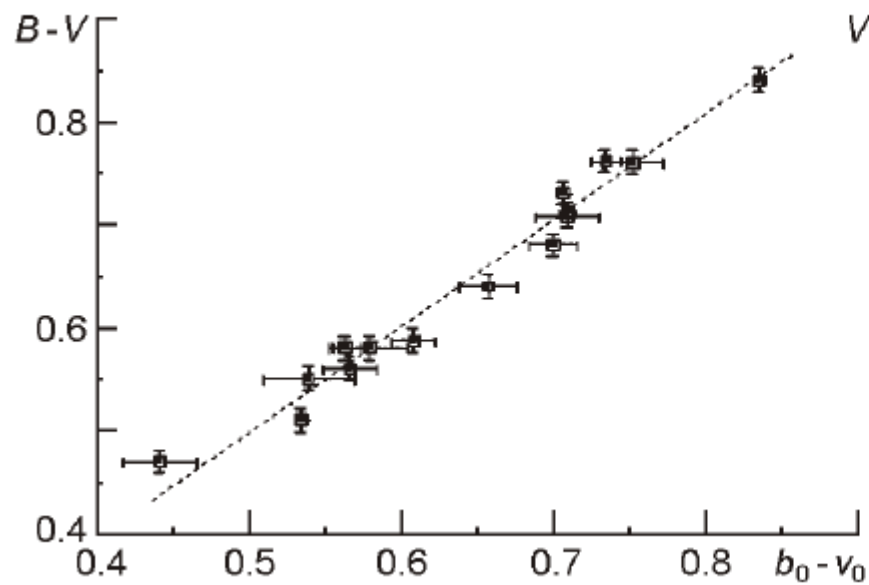
$k'_M$  — коэффициент экстинкции показателя цвета

$M$  — воздушная масса

# Площадки Ландольта





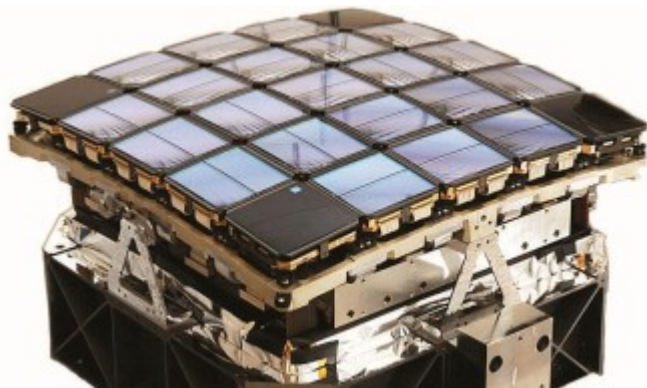
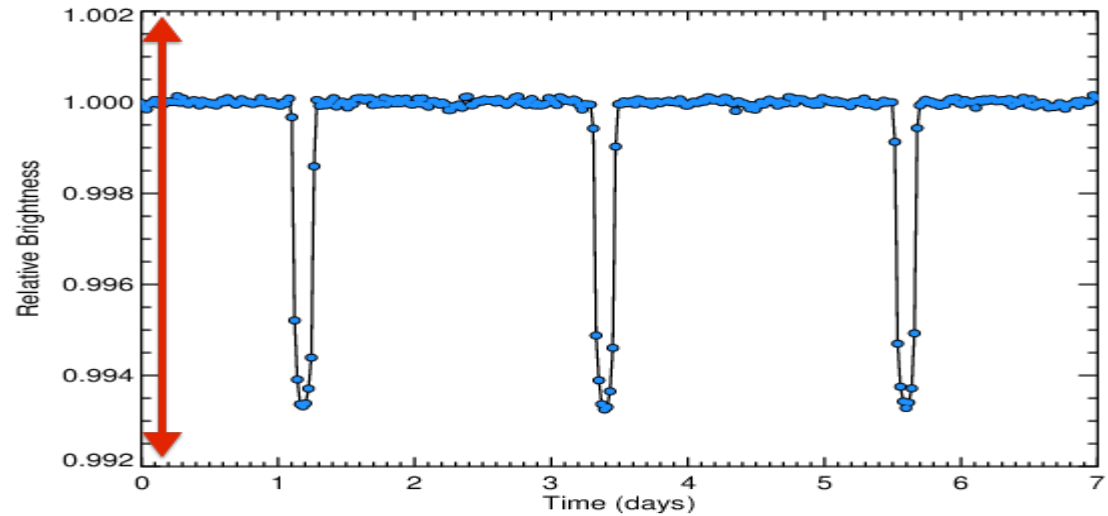


# Космические фотометры



# Kepler (D=0.95 м)

Длительная фотометрия небольшого участка неба (100000 звезд) с целью поиска экзопланет методом транзитов



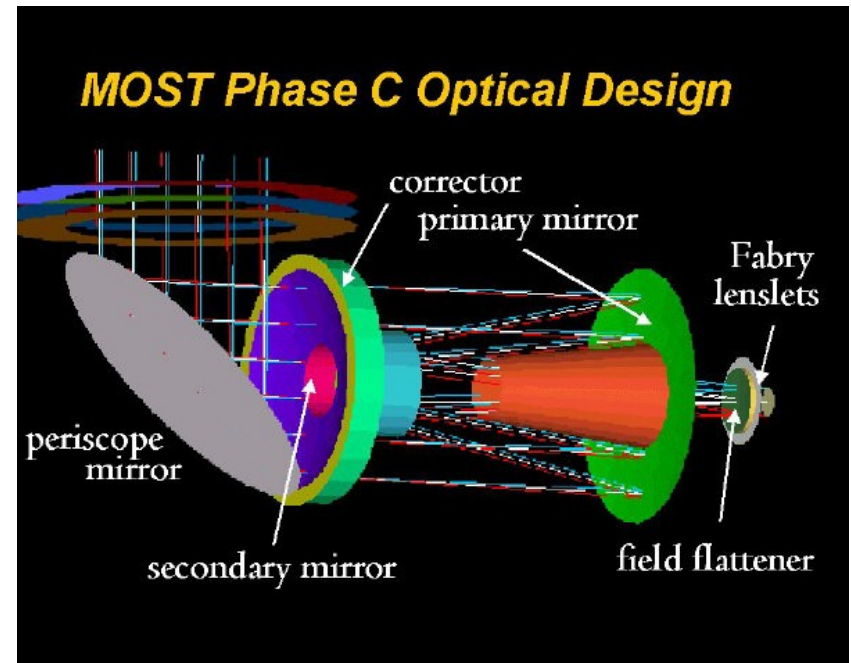
Результат: открыто более 1000 планет, около 4700 кандидатов

# MOST

(Microvariability and Oscillations of Stars)

D=0.15m

изучение акустических колебаний звёзд методами  
астросейсмологии



# CoRoT (CONvection ROTation et Transits planétaires) D=0.27 m

Пульсации звезд, астросейсмология, экзопланеты

