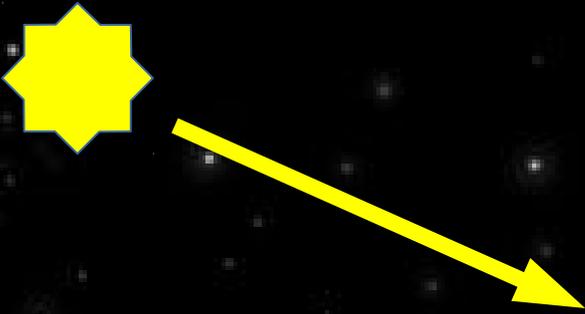


# Фотометрия

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. Two faint, thin white lines, possibly meteor trails or artifacts, are visible in the upper and right portions of the sky.

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

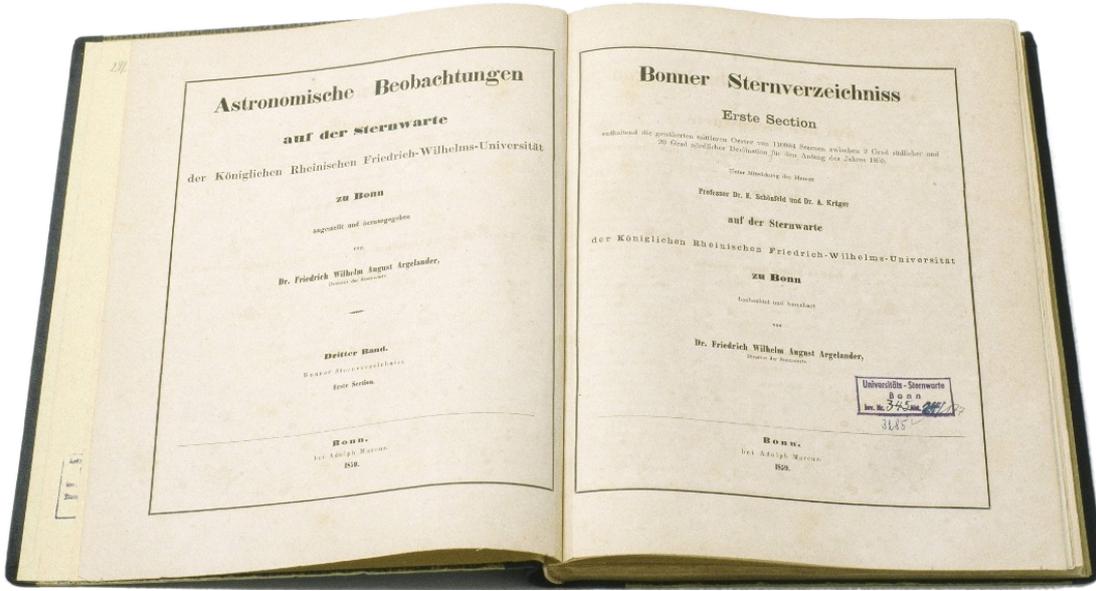


- Поток излучения от небесного объекта
- Поток излучения в разных фильтрах
- Поверхностное распределение яркости
- Переменность потока

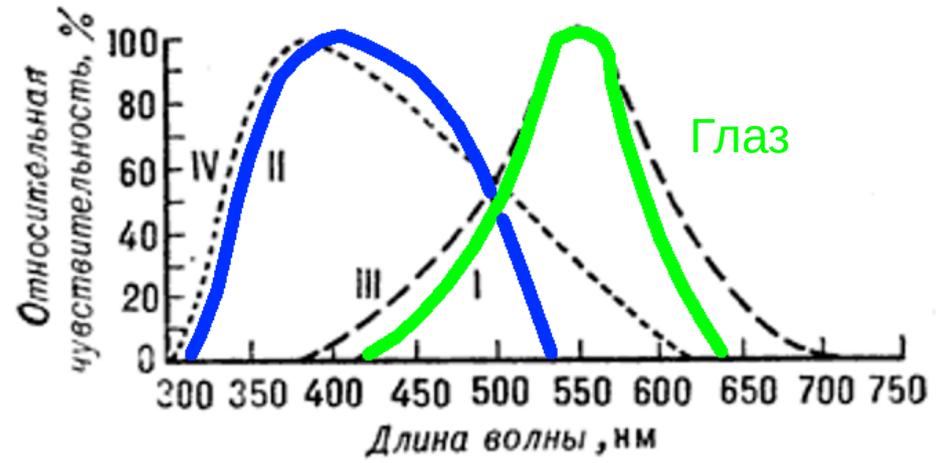


Физика объекта

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



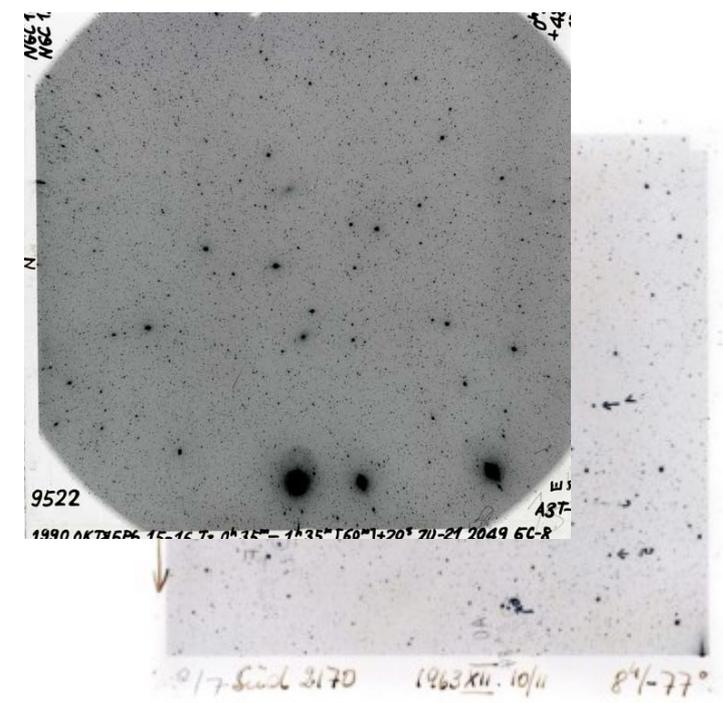
**Фотопластинка**



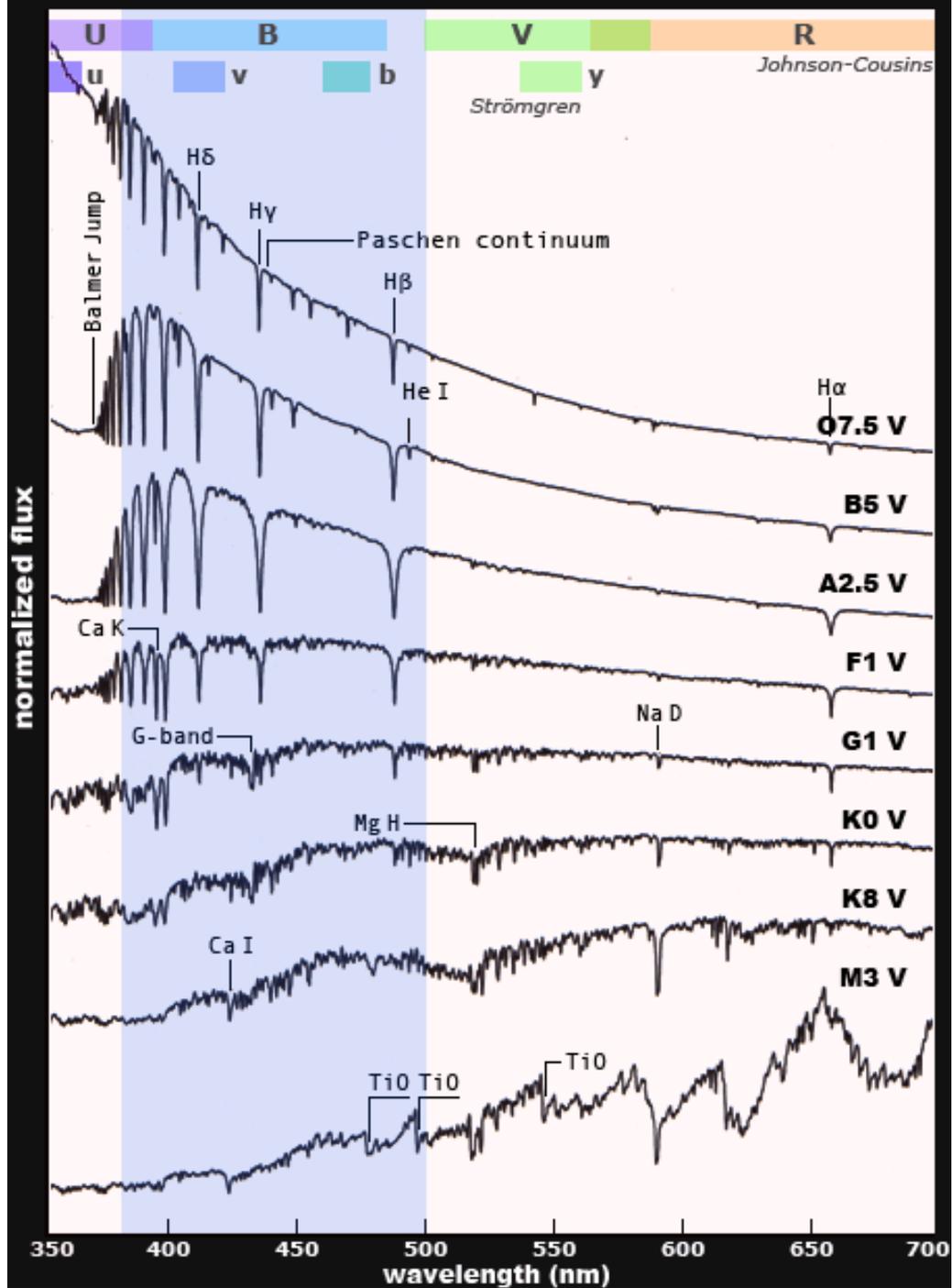
Многочисленные измерения  
 фотографических звездных  
 величин

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

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



a sequence of stellar flux profiles



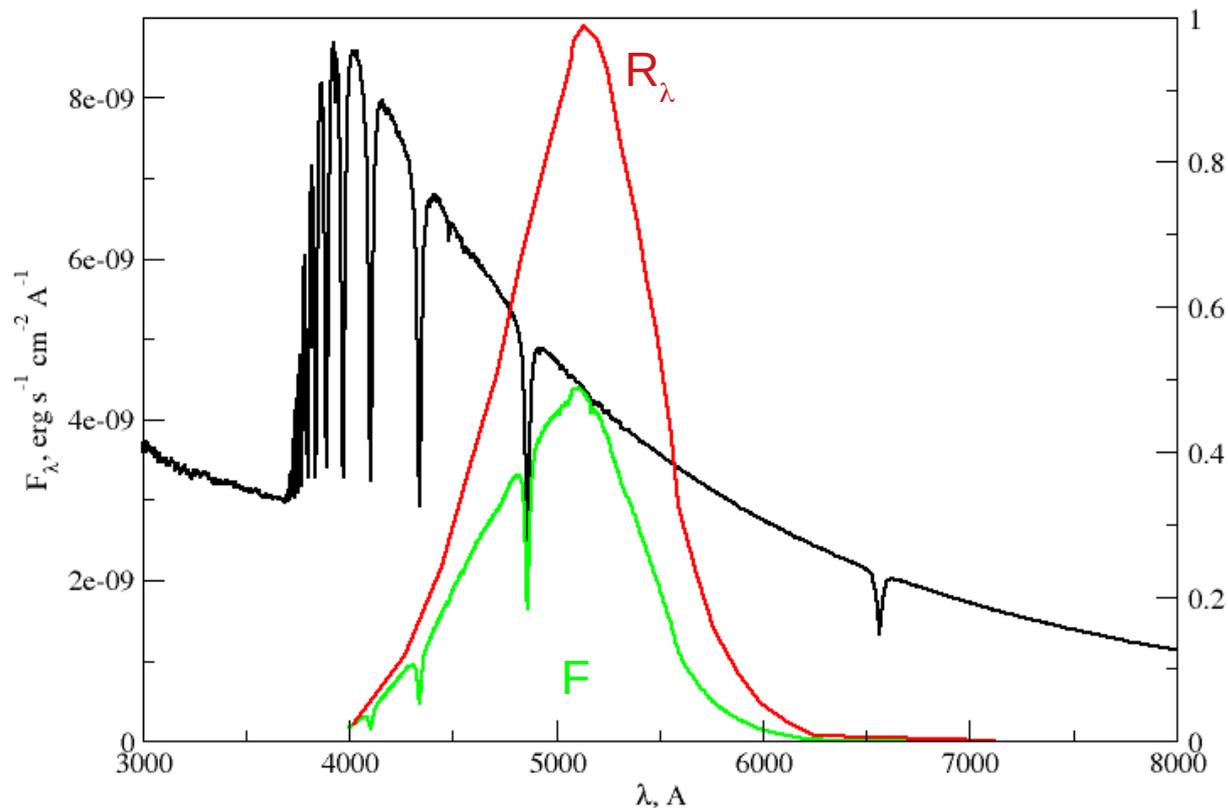
## Звездная величина

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

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

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

$R_\lambda \Rightarrow$  функция пропускания фильтра



# Монохроматическая звездная величина

STMAG

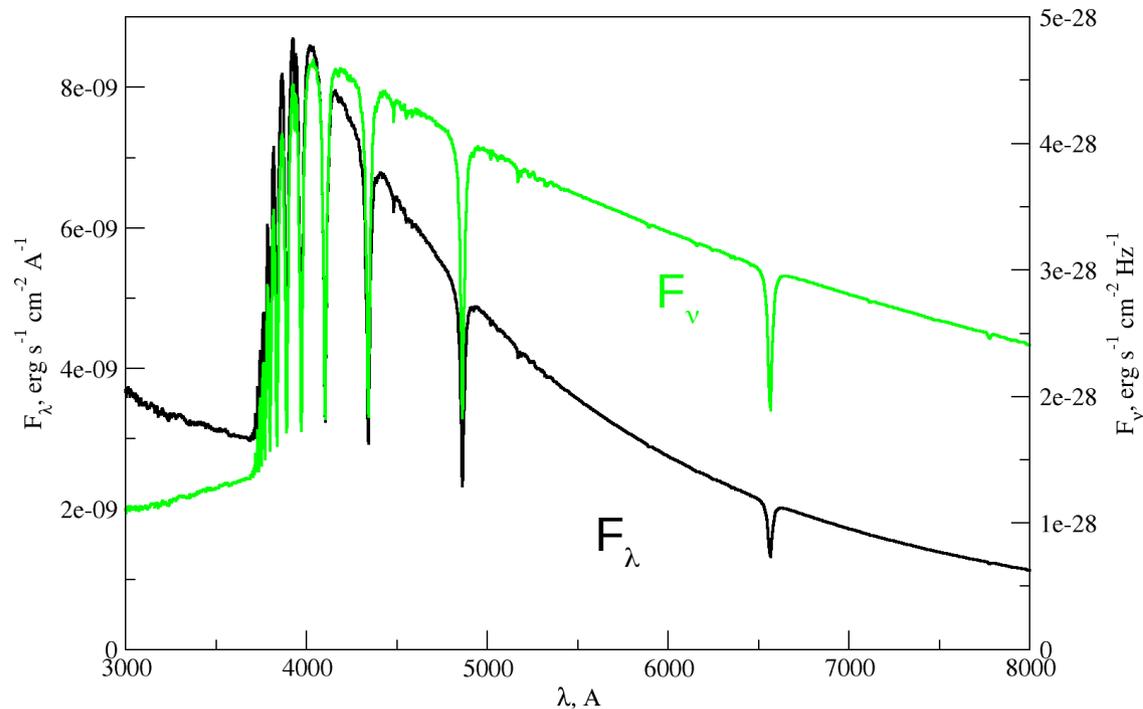
$$m_{\lambda} = -2.5 \lg F_{\lambda} + 21.100$$

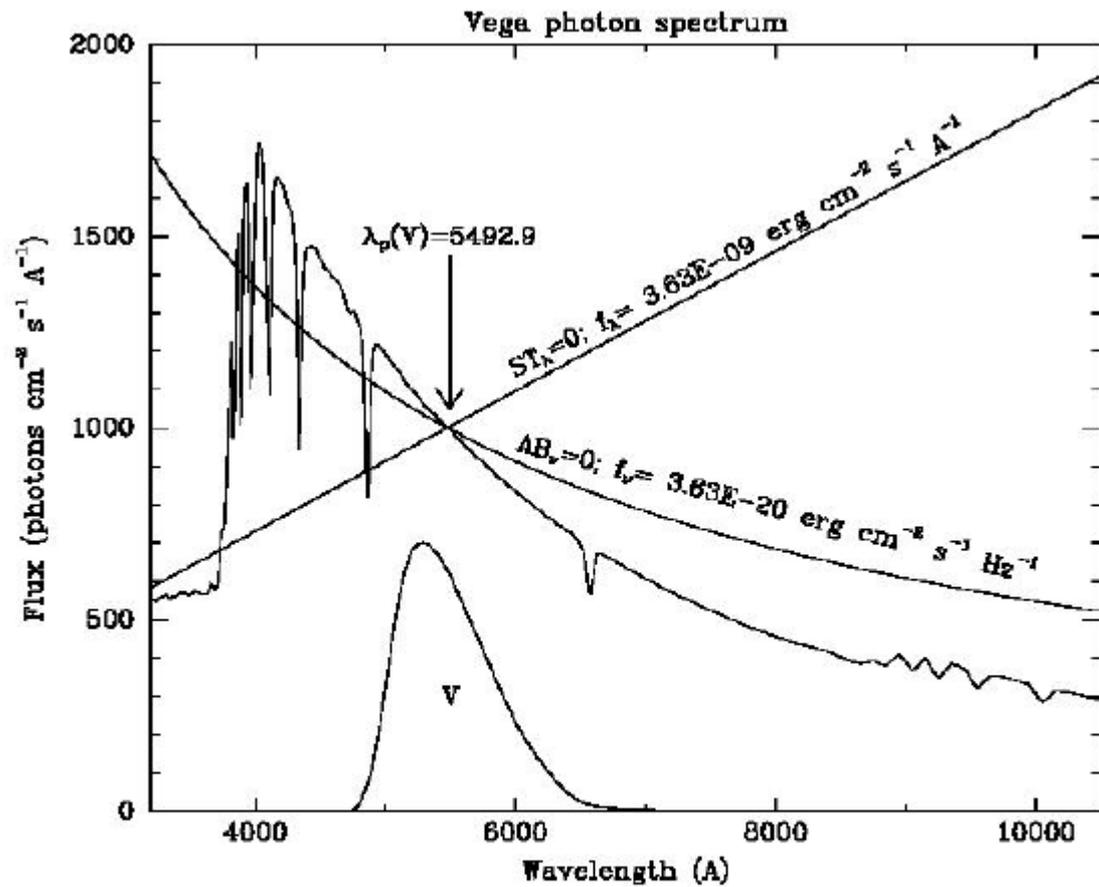
$$[F] = \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ \AA}}$$

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

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

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

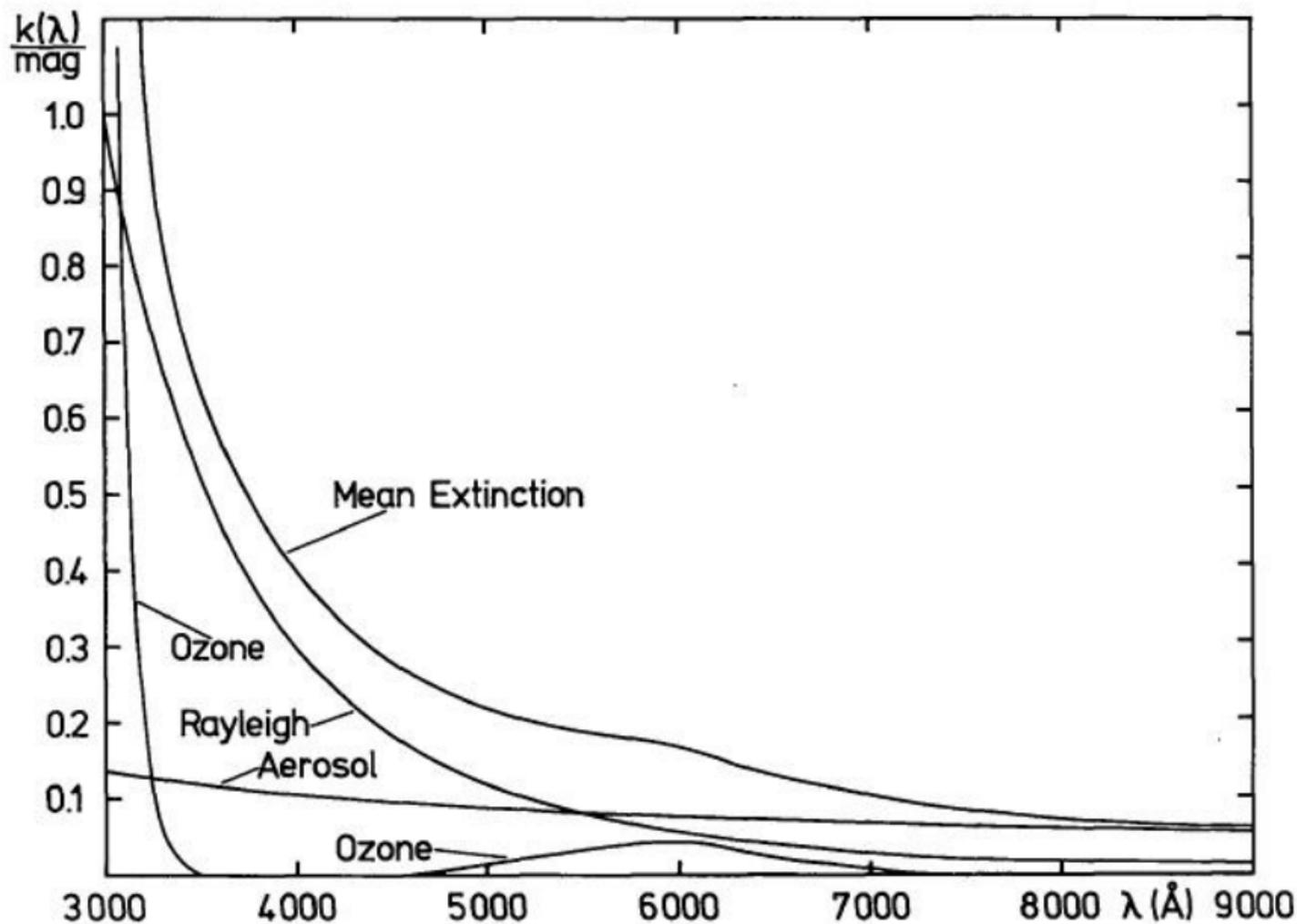
Из шкалы звездных величин следует, что для звезд A0V

$$C_{ij} = 0$$

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

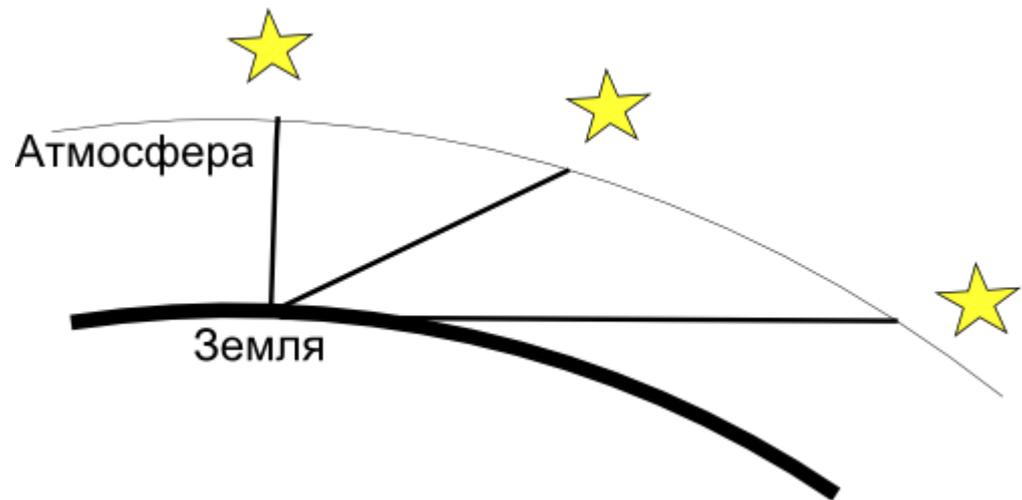
$$m_{obs} = m_{true} + k(\lambda) M$$

$k$  — 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

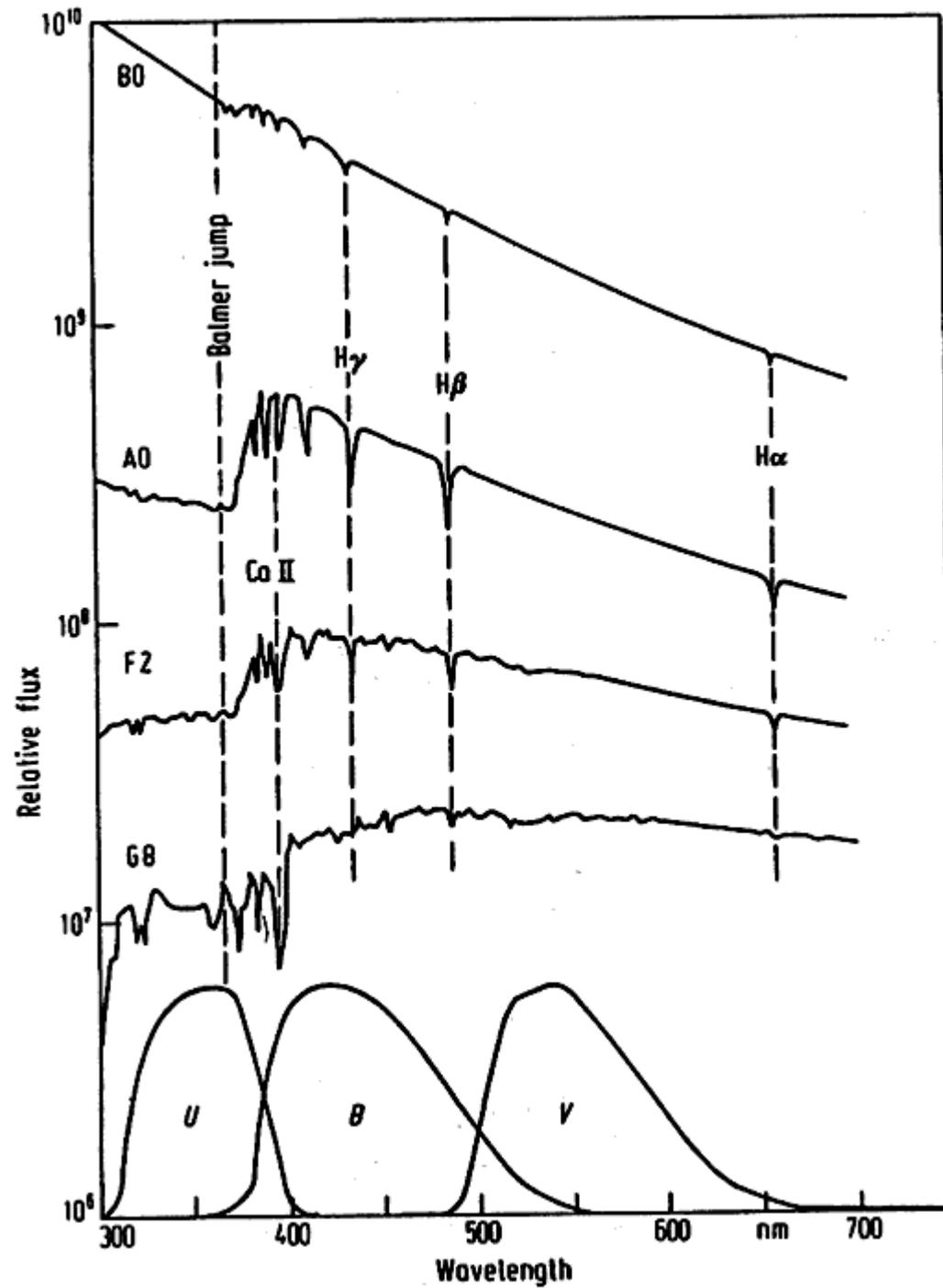
- Характеризует небольшие участки спектра
- Хорошо выбранные положения полос слабо подвержены влиянию особенностей спектра
- Лучше отражают физические свойства объекта

Система Джонсона UBV

Система Стремгрена uvby

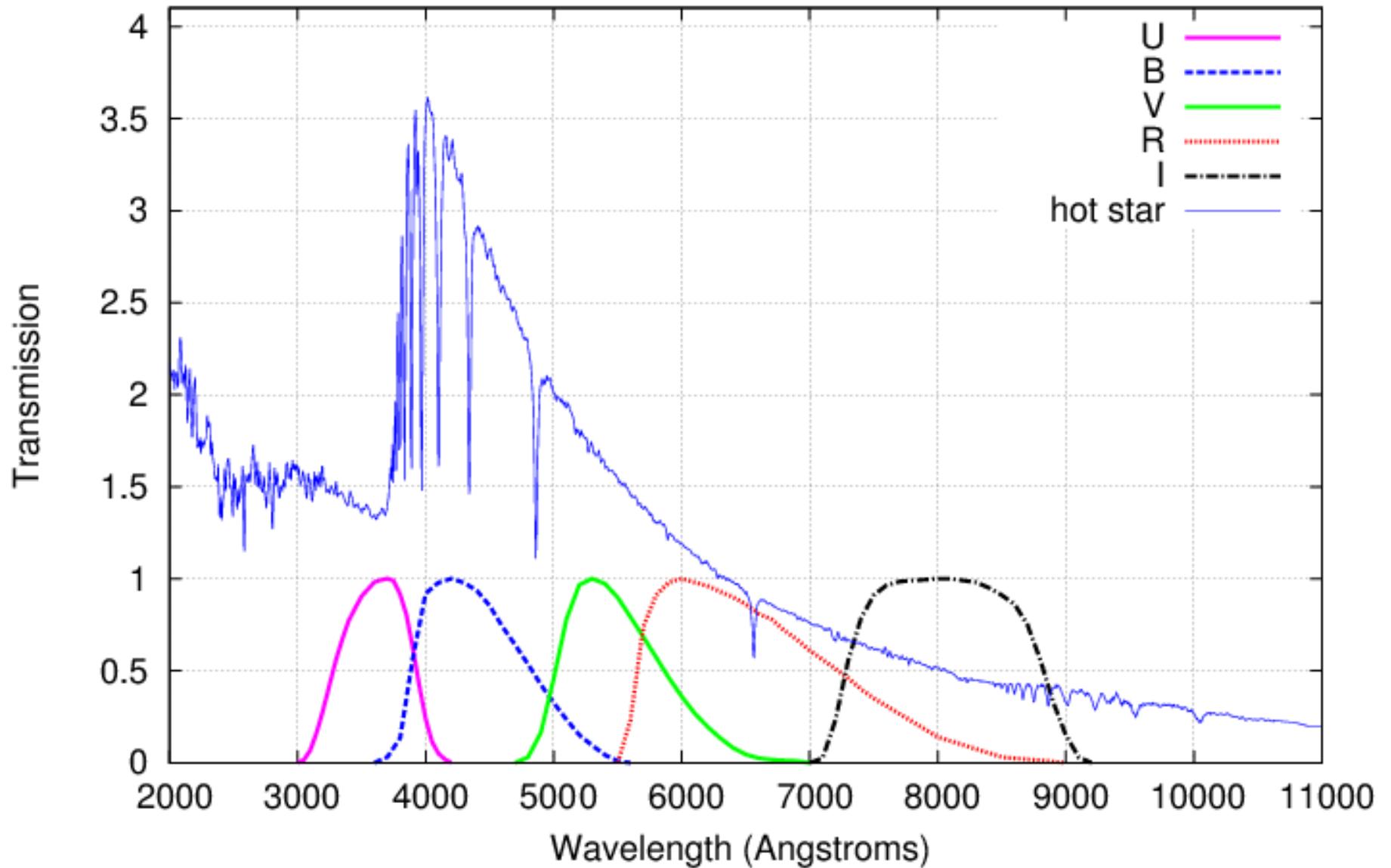
Спектрофотометрия

# Система Джонсона

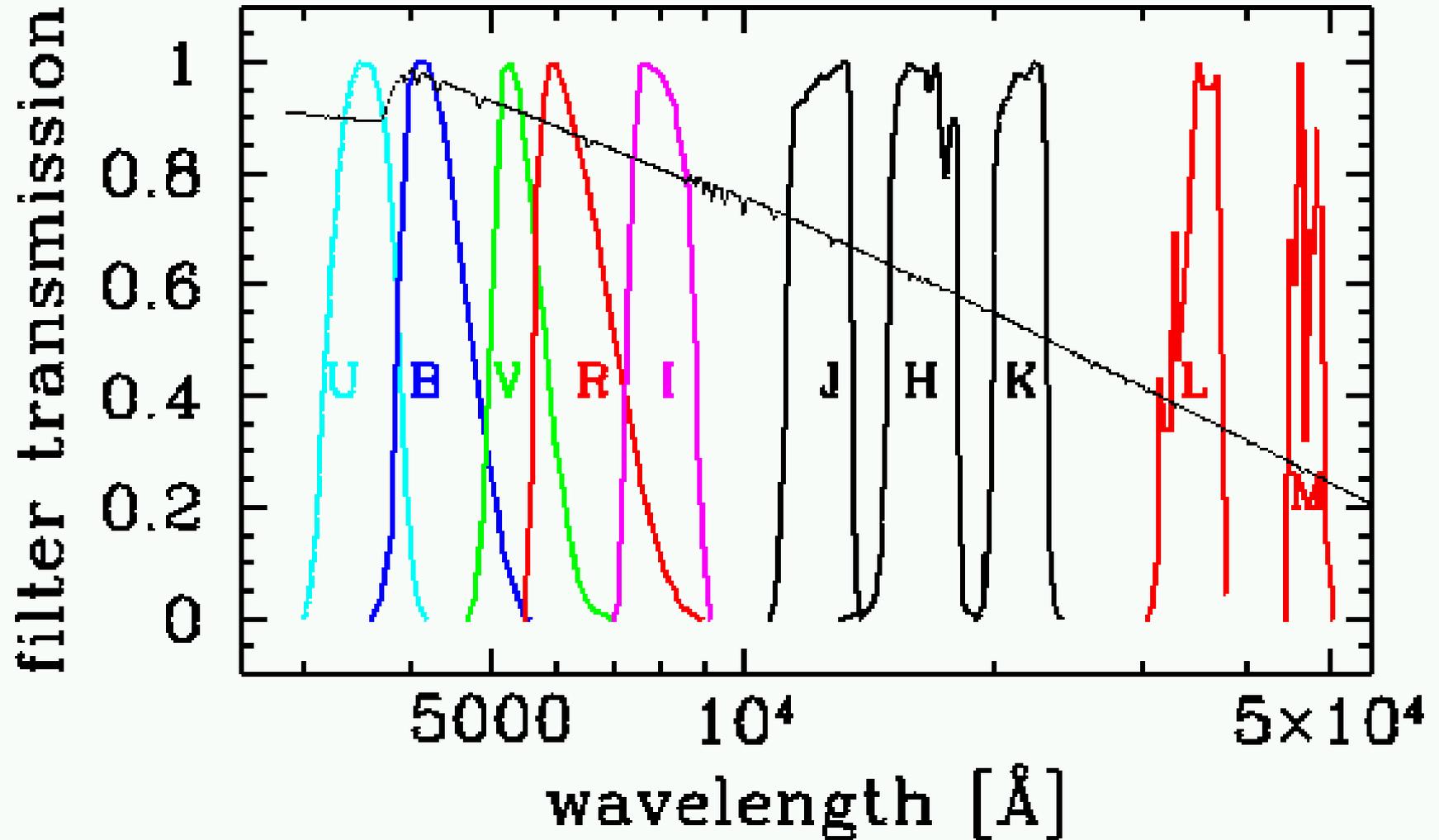


# Система Джонсона-Казинса

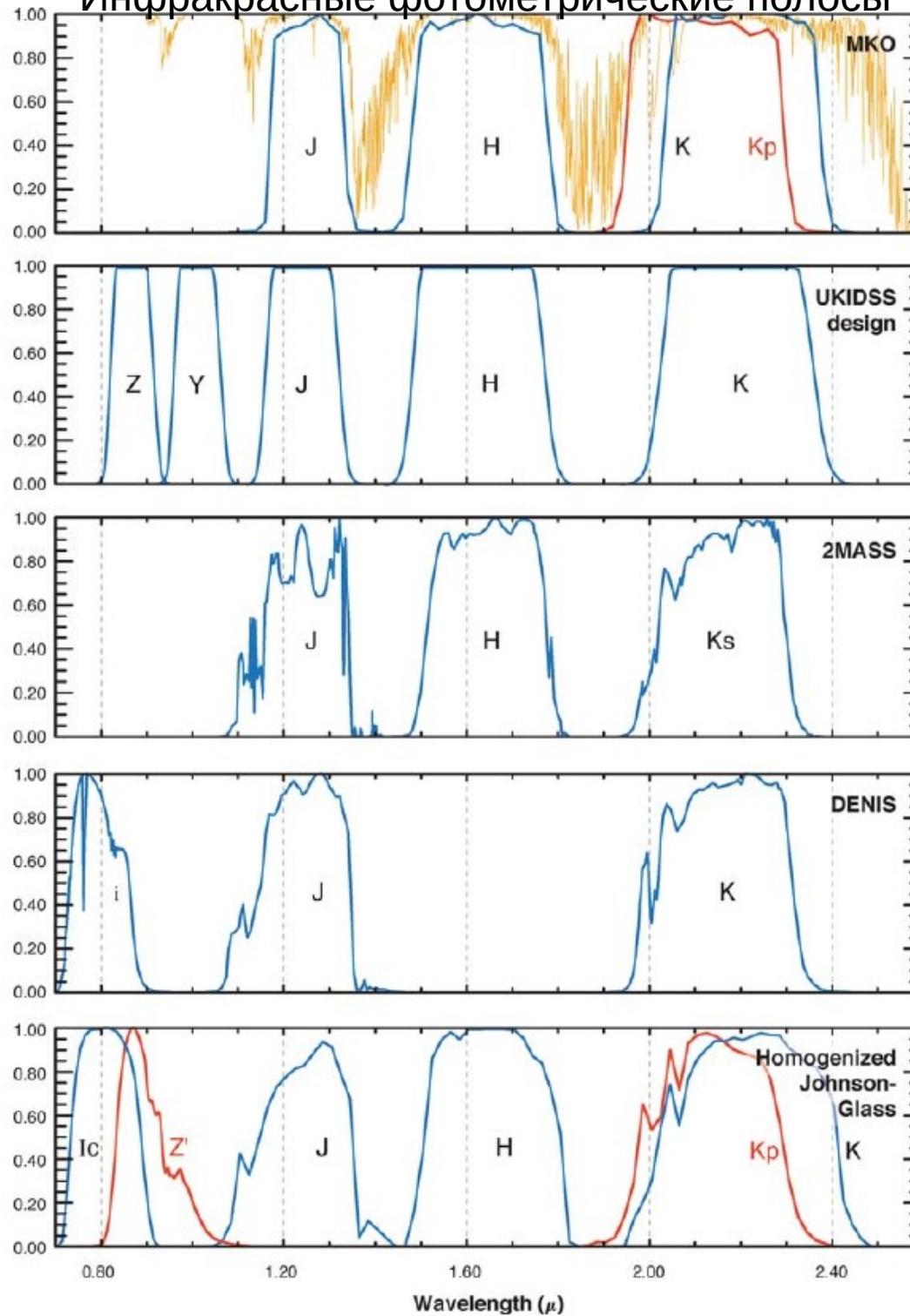
Standard Astronomical Filters: Johnson-Cousins

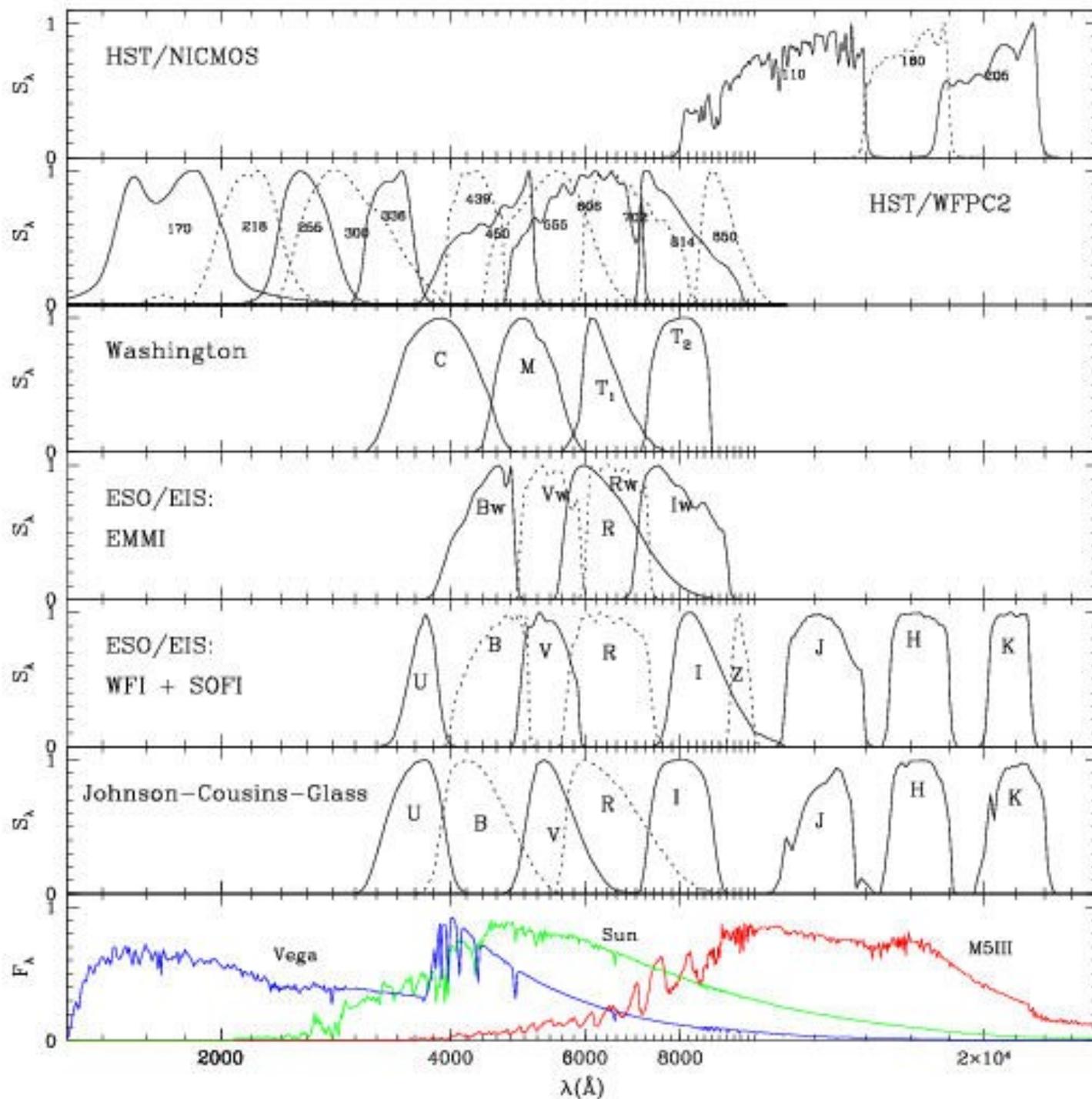


# Расширенная система Джонсона

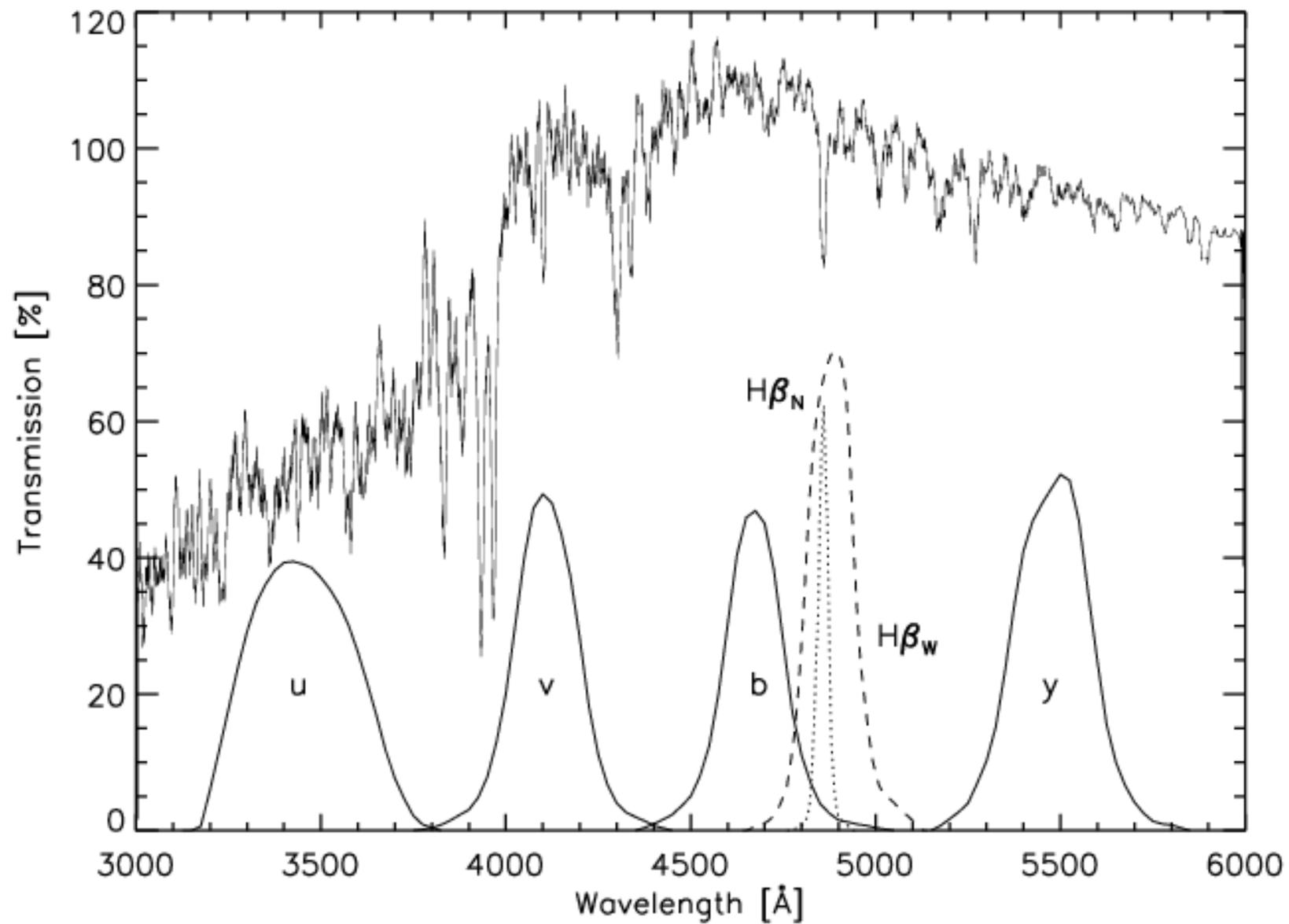


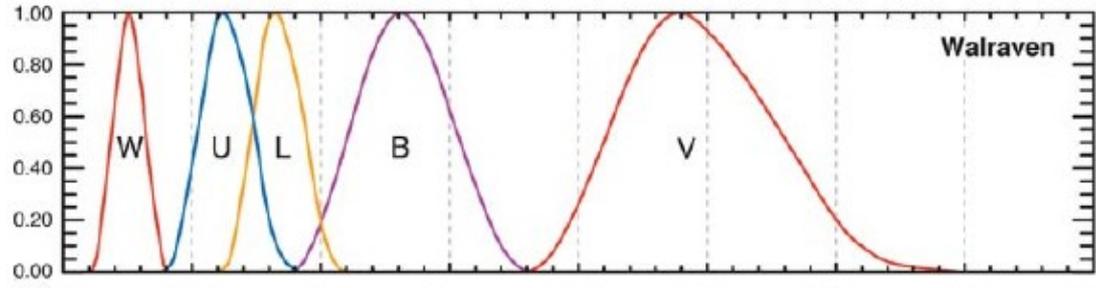
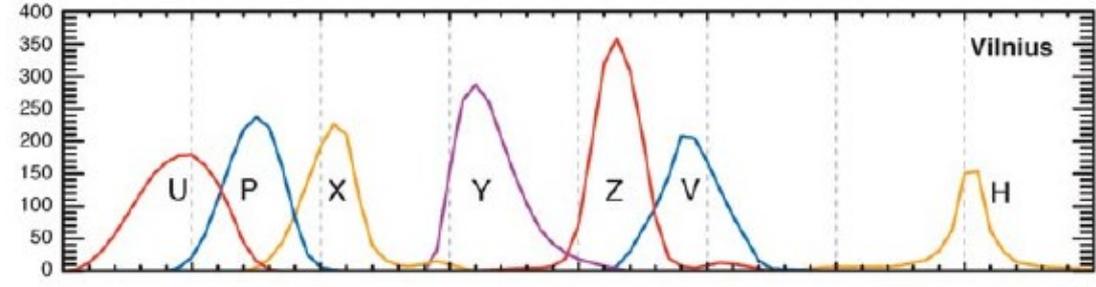
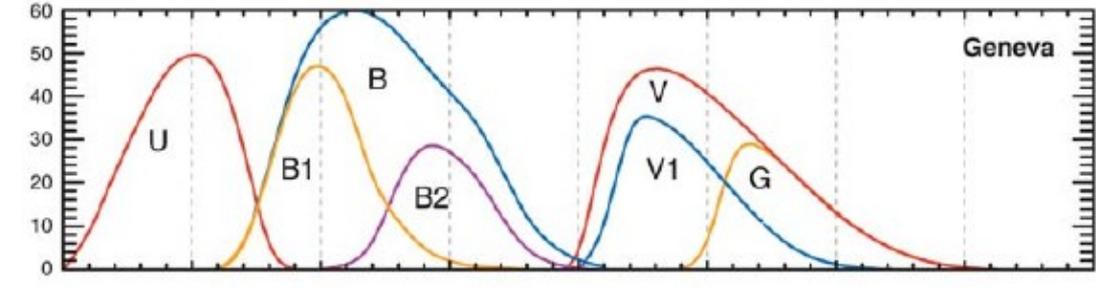
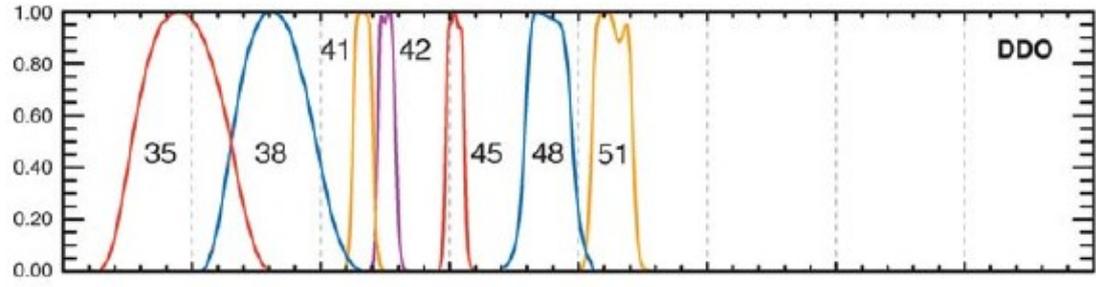
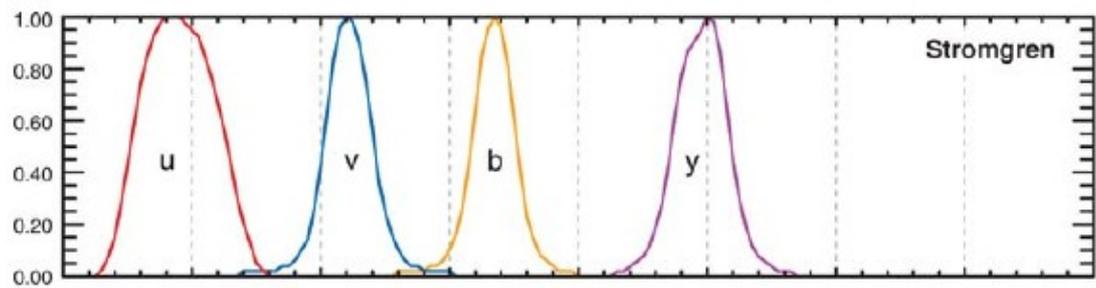
# Инфракрасные фотометрические полосы



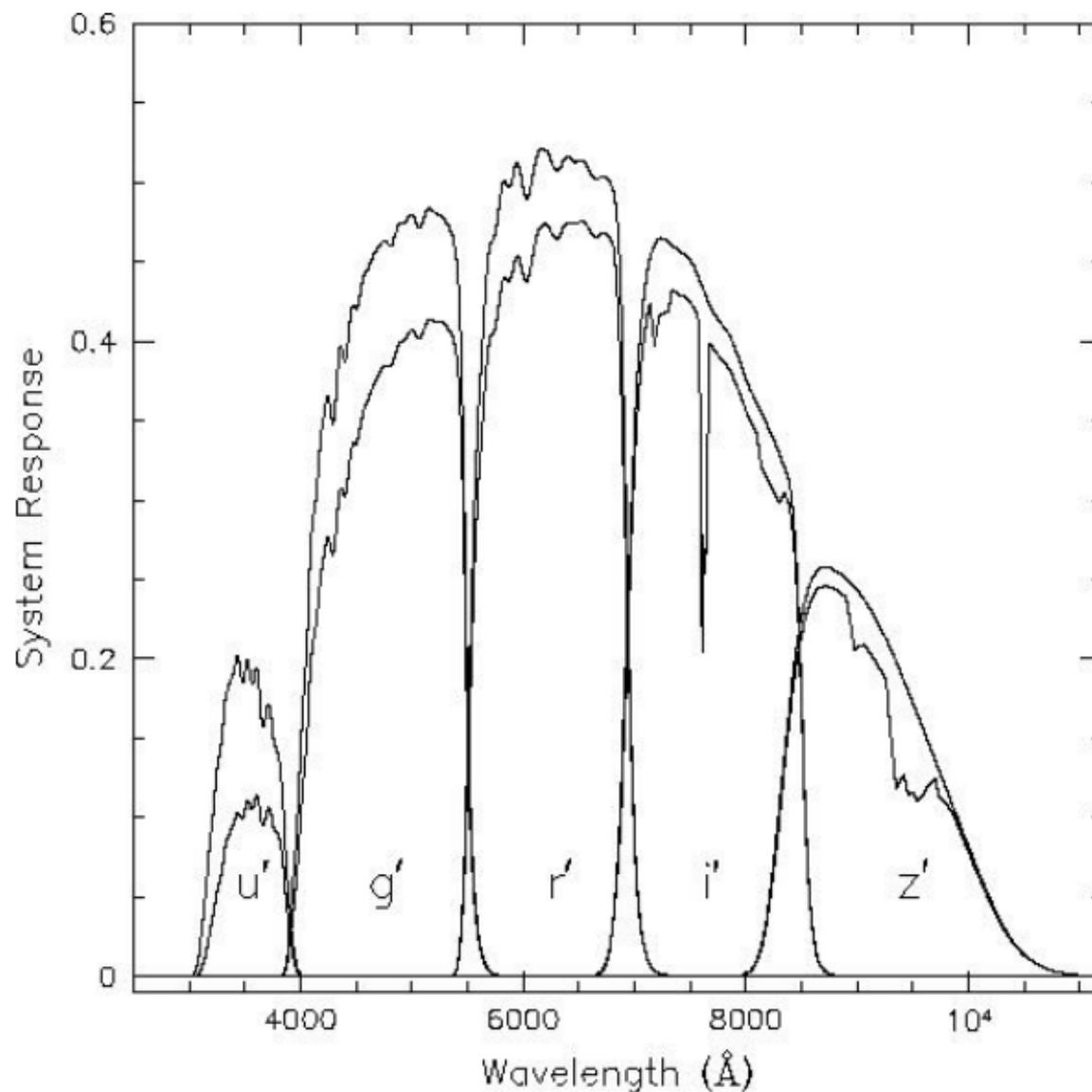


## Система Стремгрена



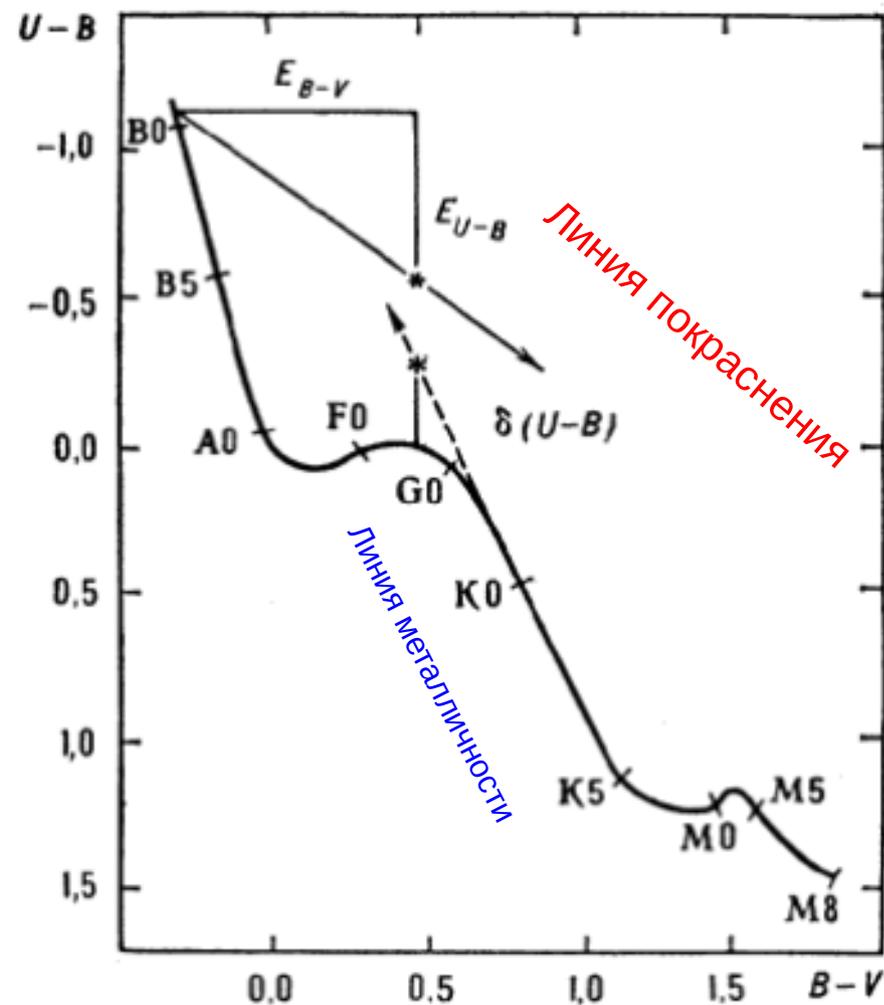
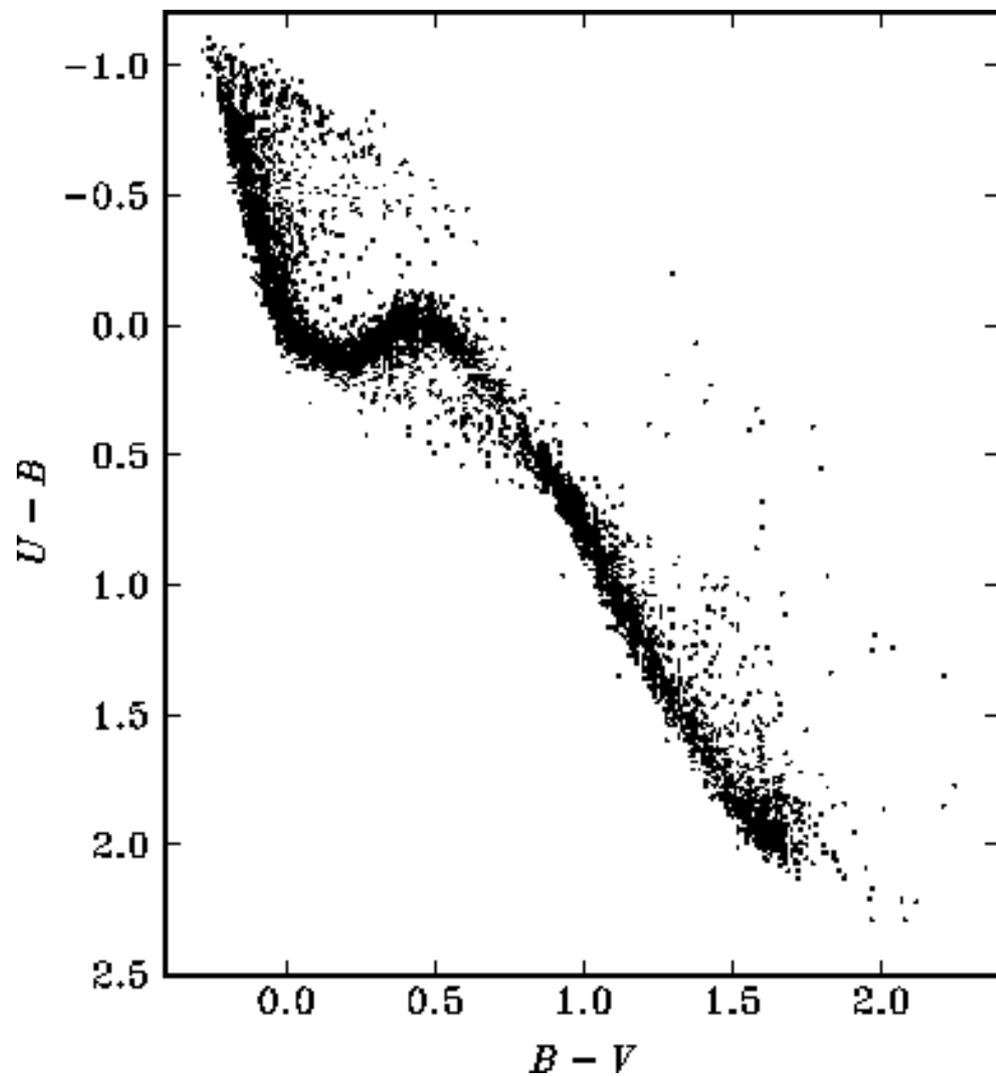


Wavelength (Å)



**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.**

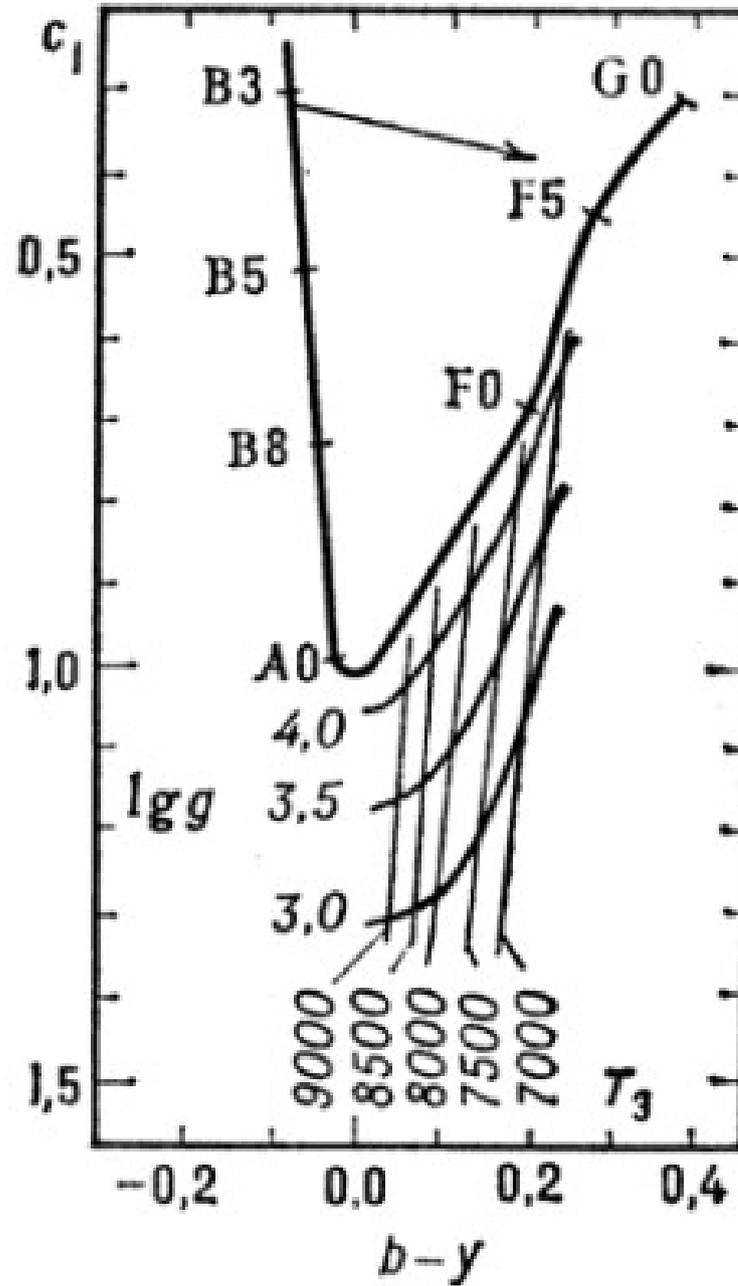
# Двухцветные диаграммы



Мера температуры

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

Мера ускорения свободного падения

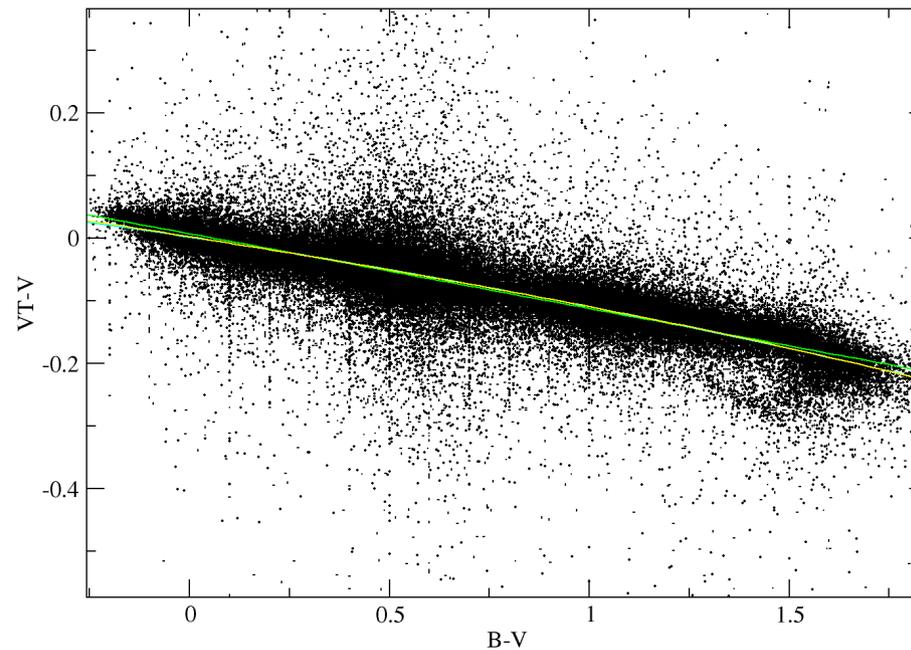


Мера температуры

## 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

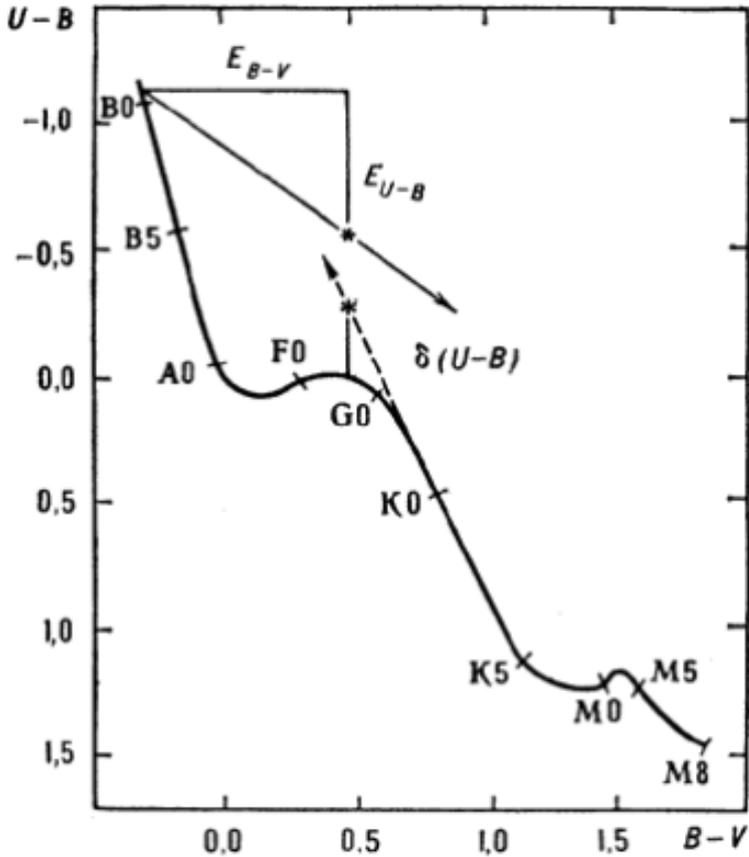
Эффективная температура:  $B-V$ ,  $b-y$ ,  $\beta = H_{\beta w} - H_{\beta n}$

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



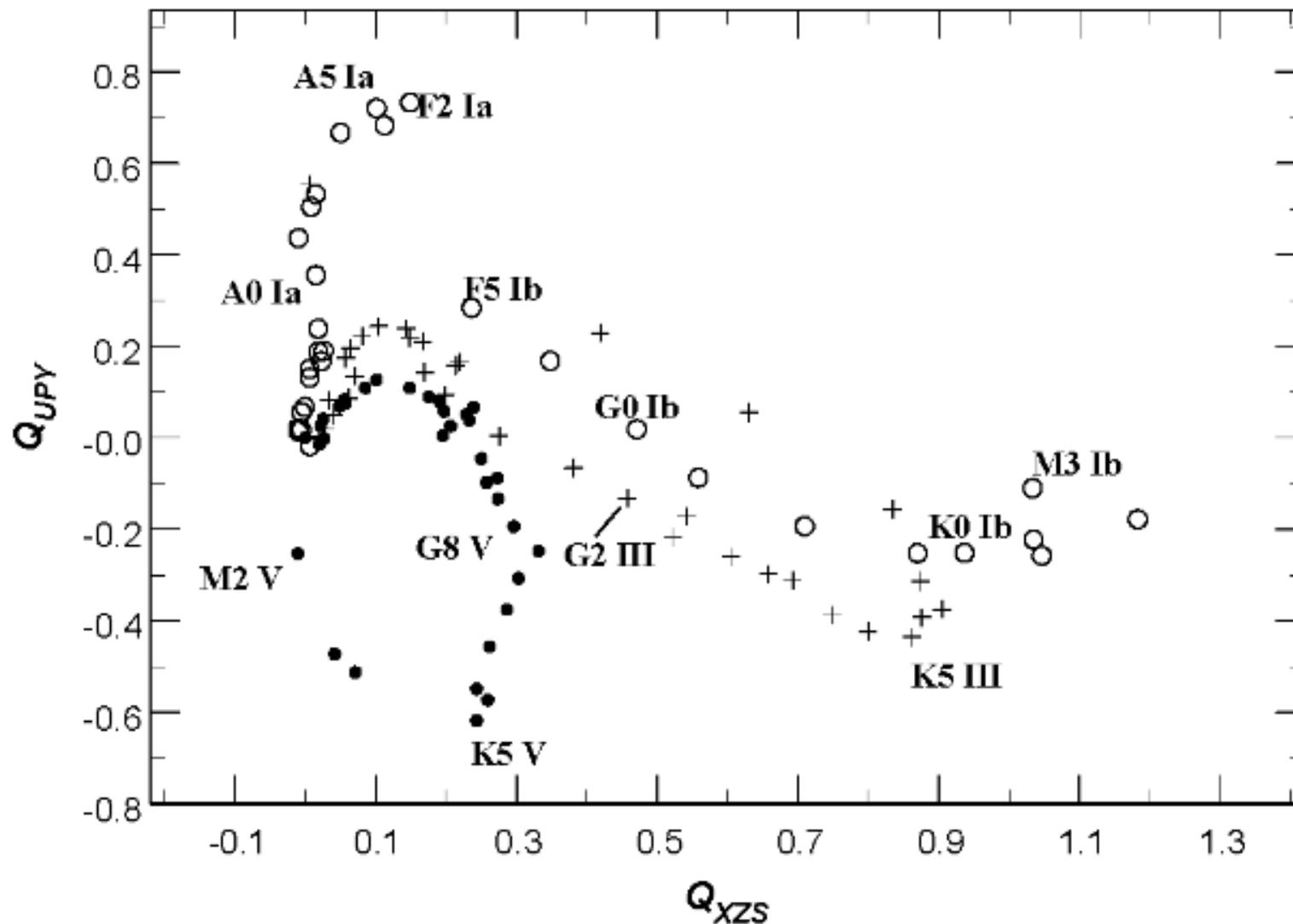
$$E(U - B) = (U - B) - (U - B)_0$$

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

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

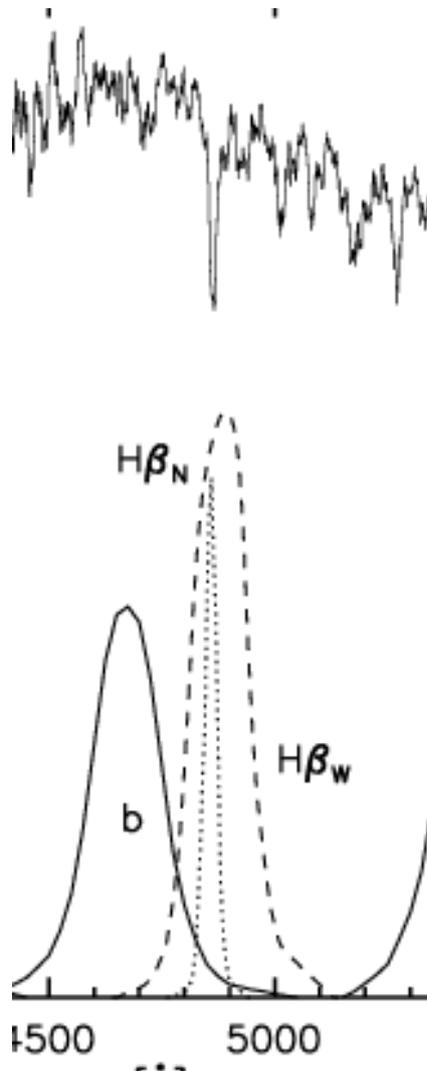
$$(U - B)_0 - (B - V)_0 \frac{E(U - B)}{E(B - V)} = (U - B) - (B - V) \frac{E(U - B)}{E(B - V)} = Q_{UBV}$$

## Фотометрические индексы, независящие от межзвездного покраснения



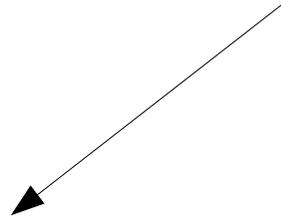
## Фотометрические индексы, независящие от межзвездного покраснения

$$\beta = H_{\beta w} - H_{\beta n}$$



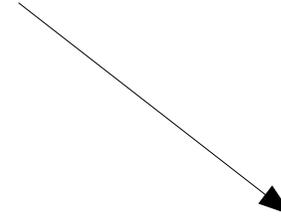
- Оба фильтра центрированы примерно на одну область → межзвездное поглощение одинаково
- Отношение потоков или разница звездных величин не будет зависеть от покраснения!
- Индекс чувствителен к температуре O-F звезд
- Для звезд главной последовательности — индикатор светимости

# Современные методы ПЗС фотометрии



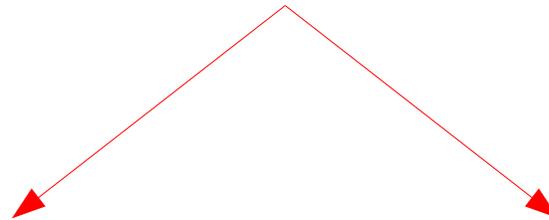
## Апертурная

Измерение света в некоторой апертуре или диафрагме



## PSF - профильная

Построение аналитического или численного профиля точечного изображения



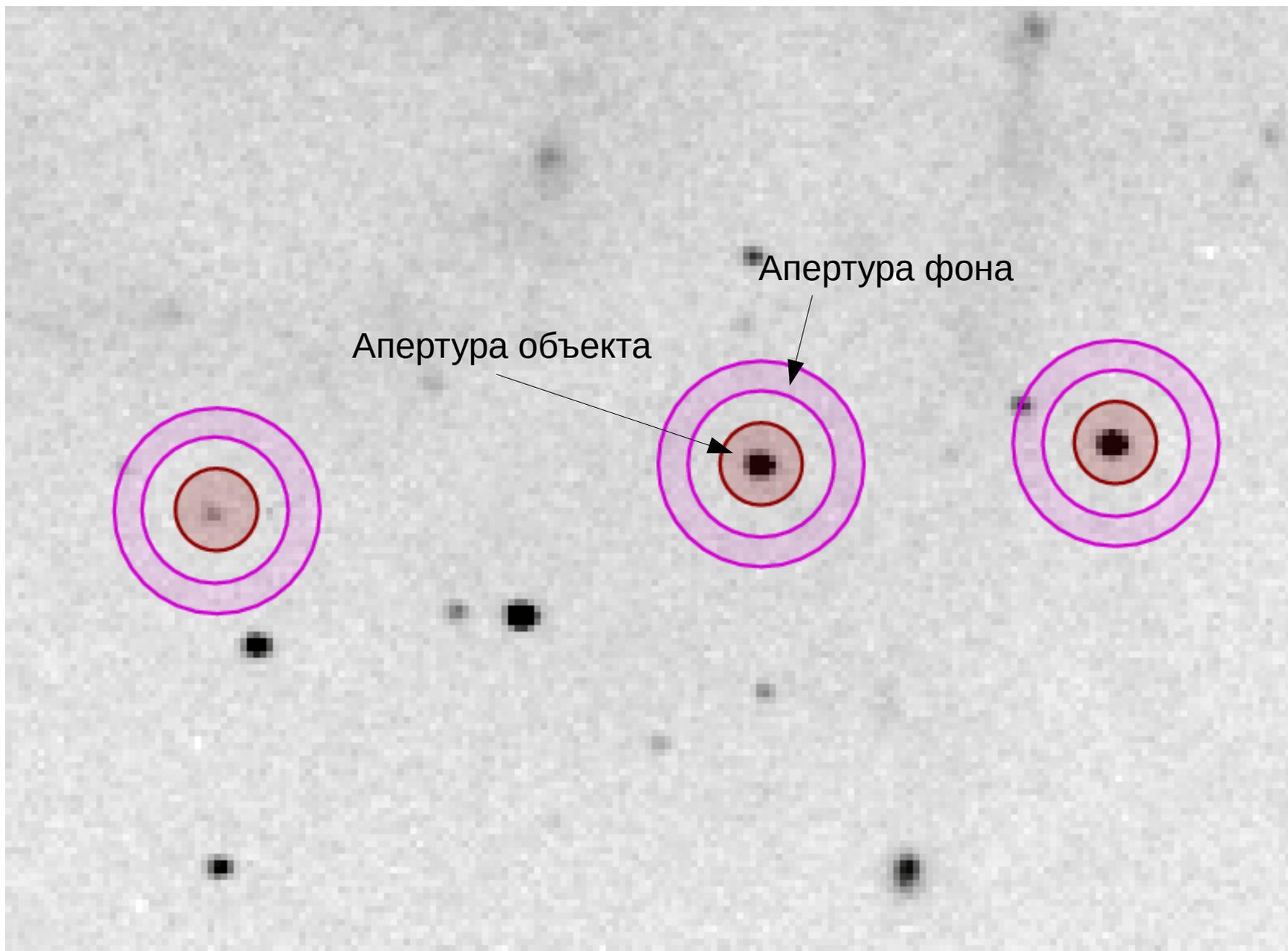
## Дифференциальная

- 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

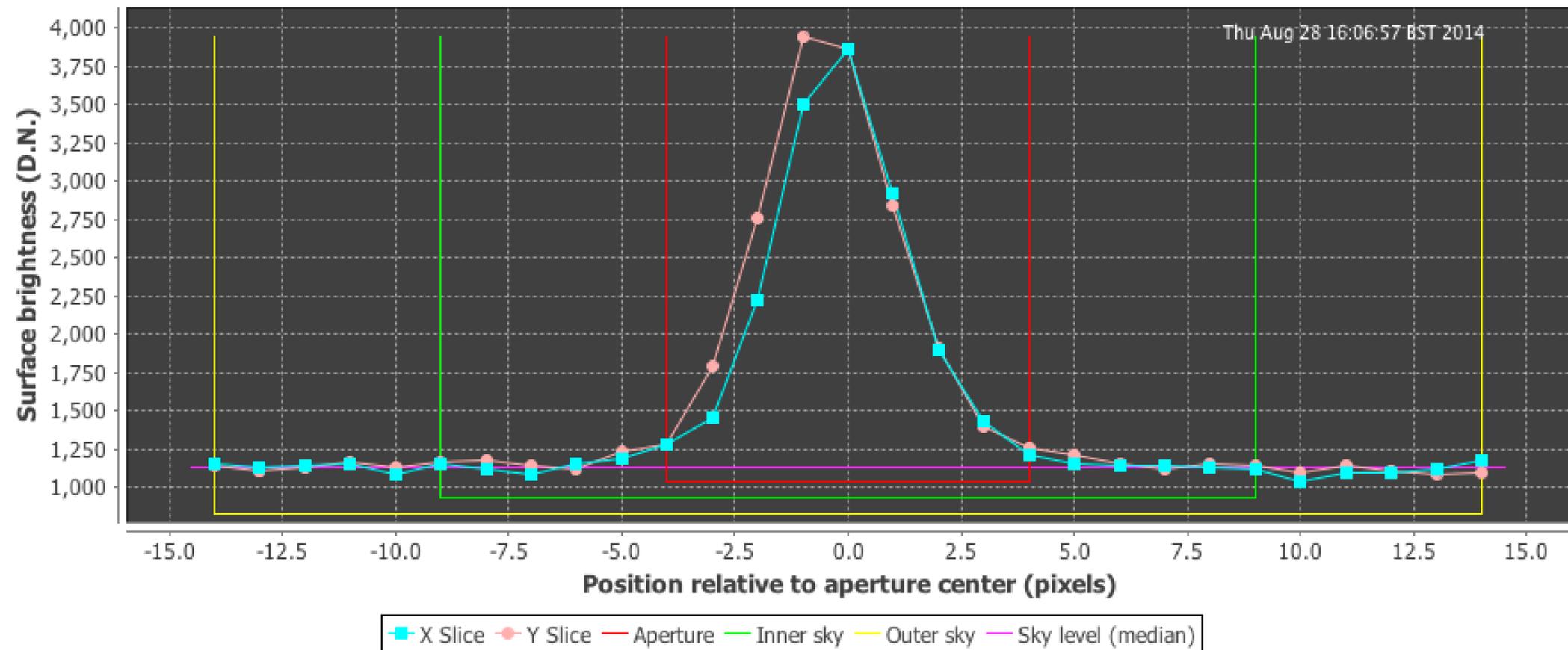


# Апертурная фотометрия

Апертура объекта

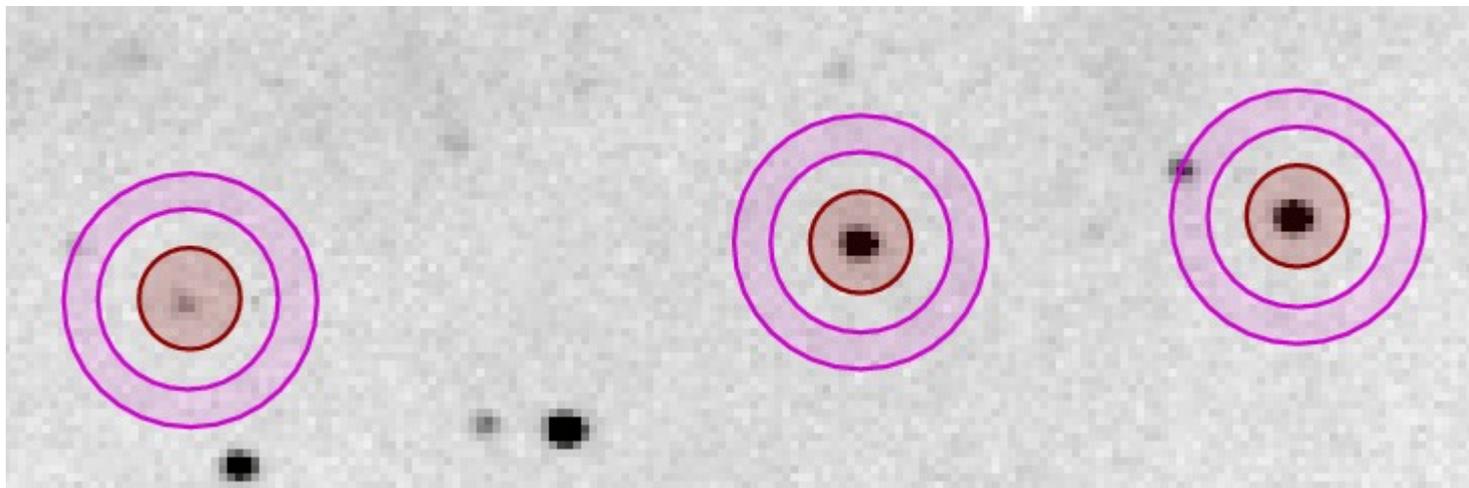
Апертура фона

Aperture Slice



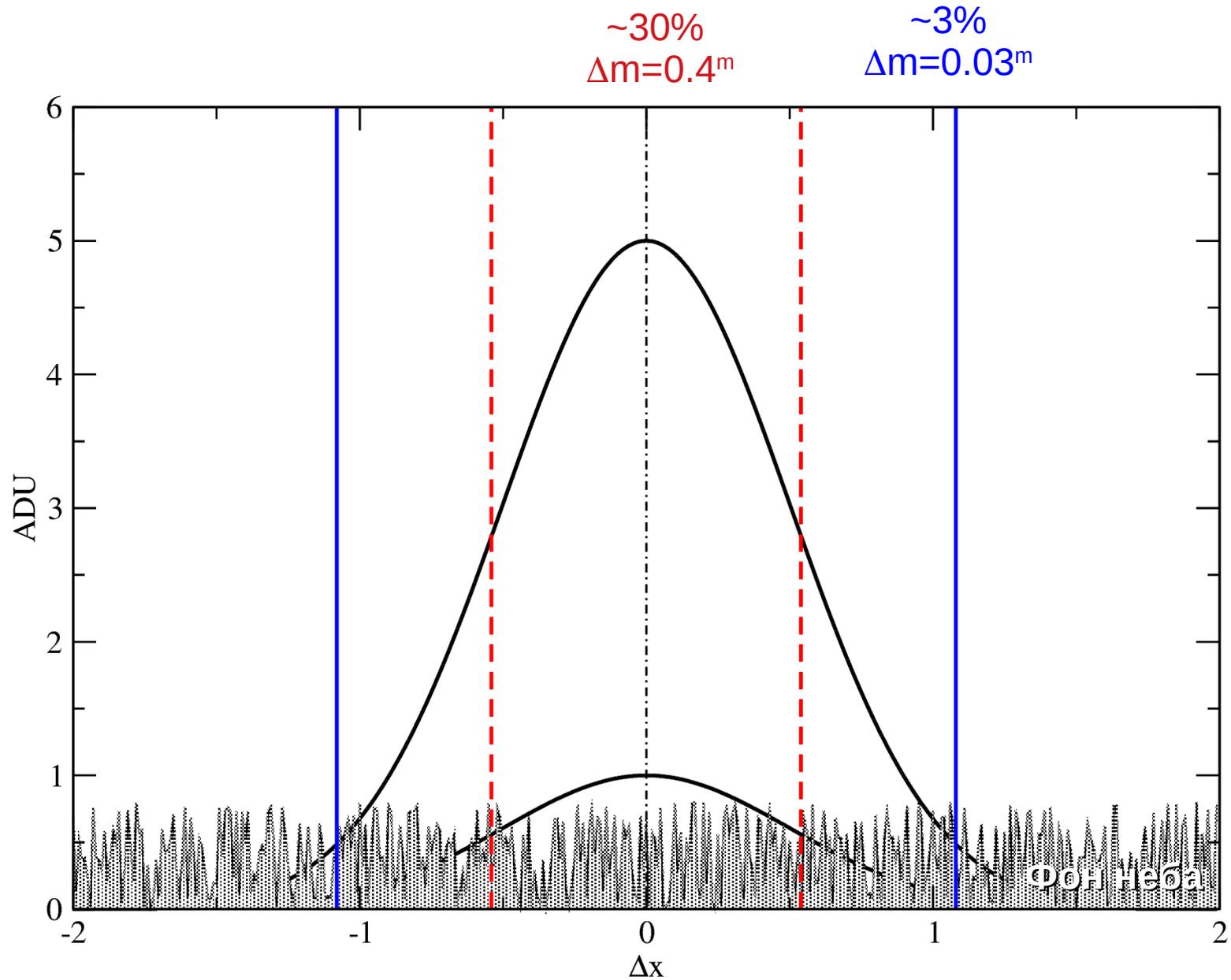
# Апертурная фотометрия

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

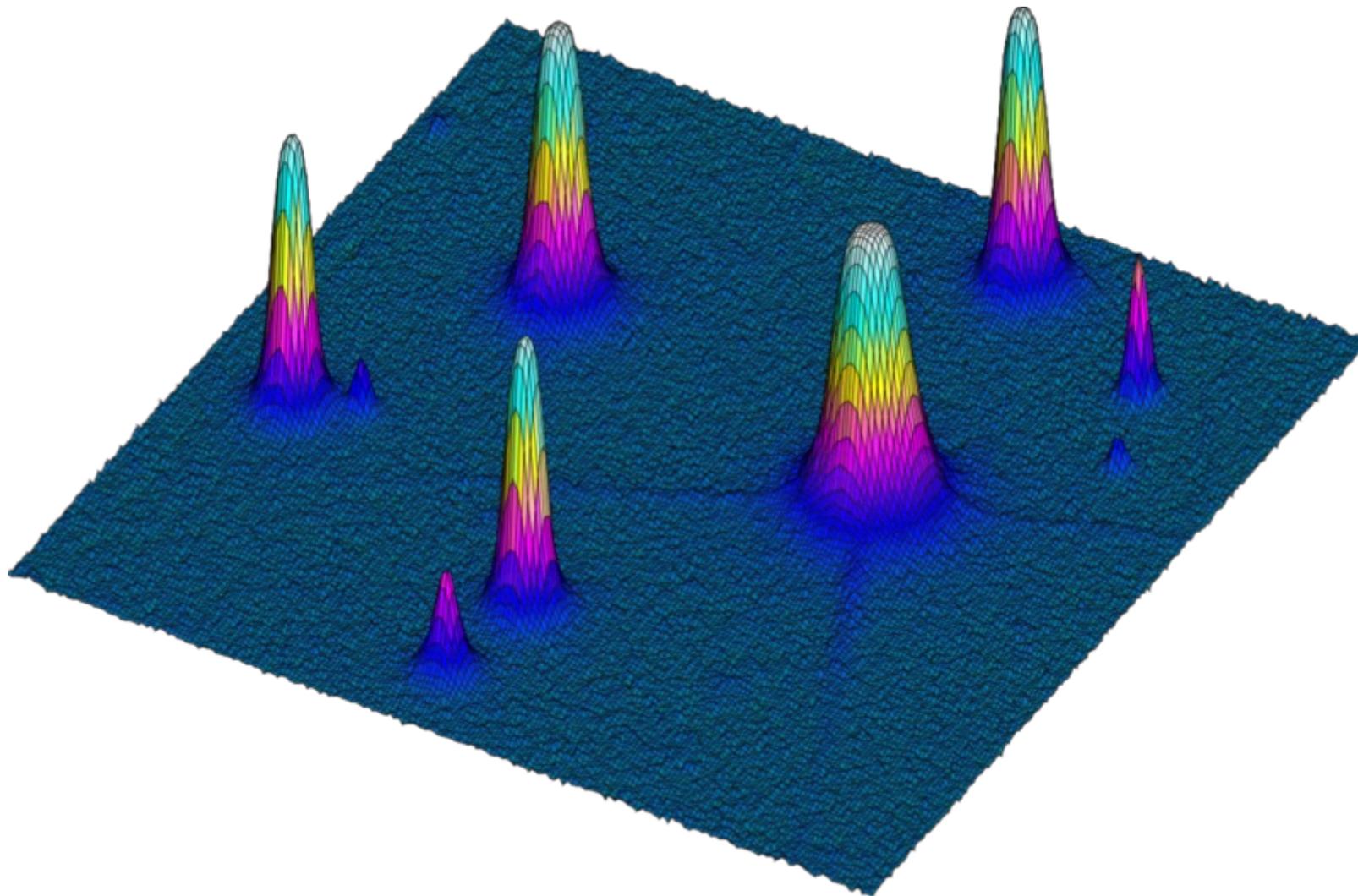
Ошибки:  $\sigma S_{obj} = \sqrt{S_{obj} \times gain}$      $\sigma S_{sky} = gain \times N \times \sigma I_{sky}$

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

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

# 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

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

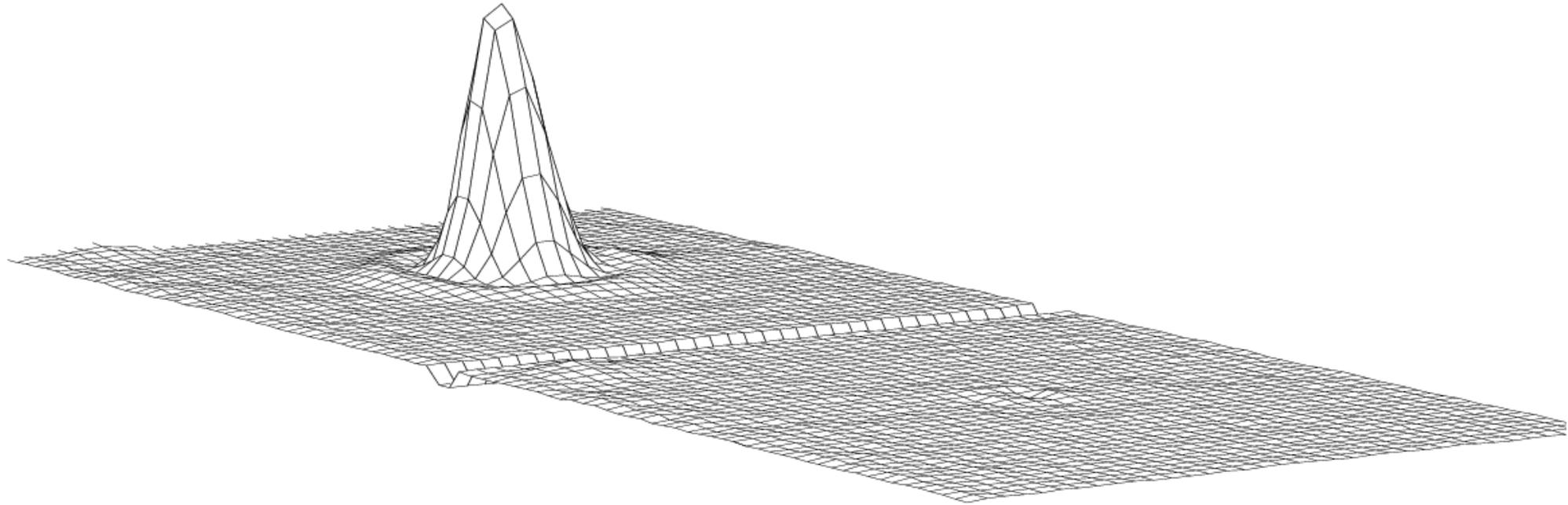
Если принять фон неба  $25^m$

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

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

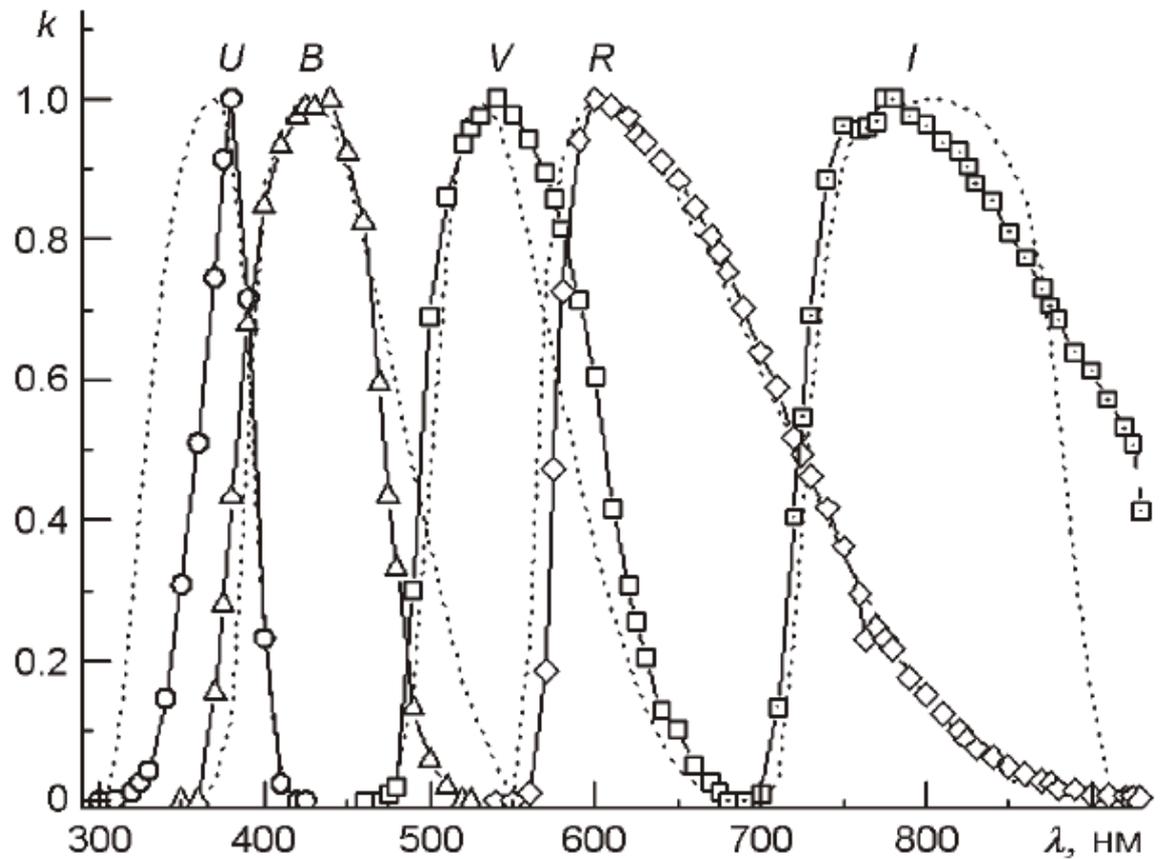
$$A \times \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

**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

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

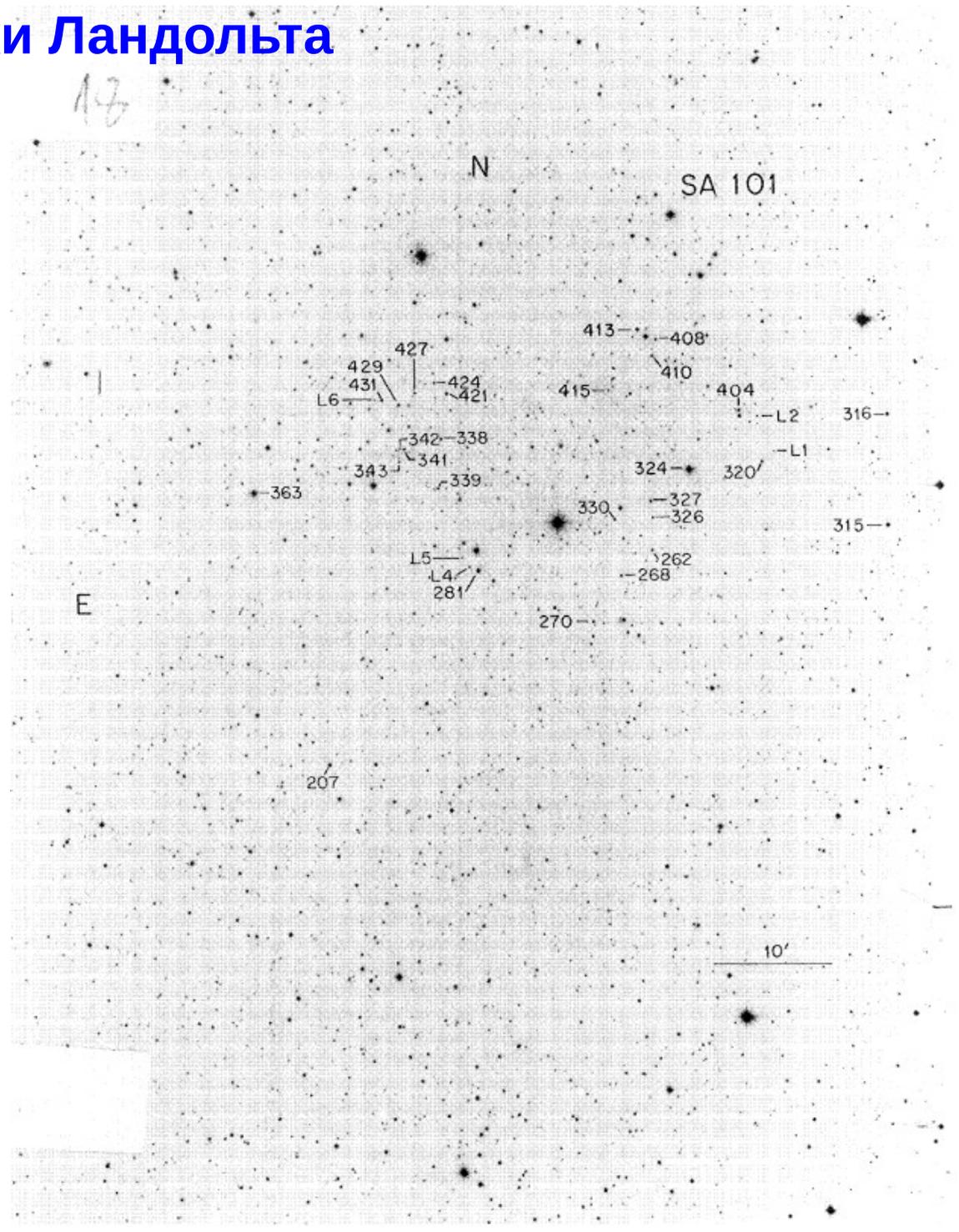
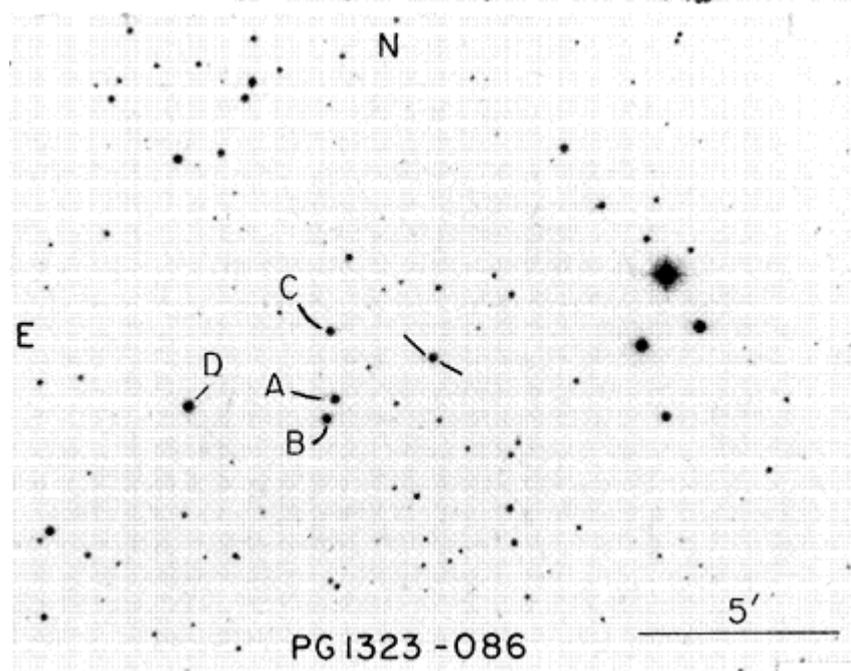
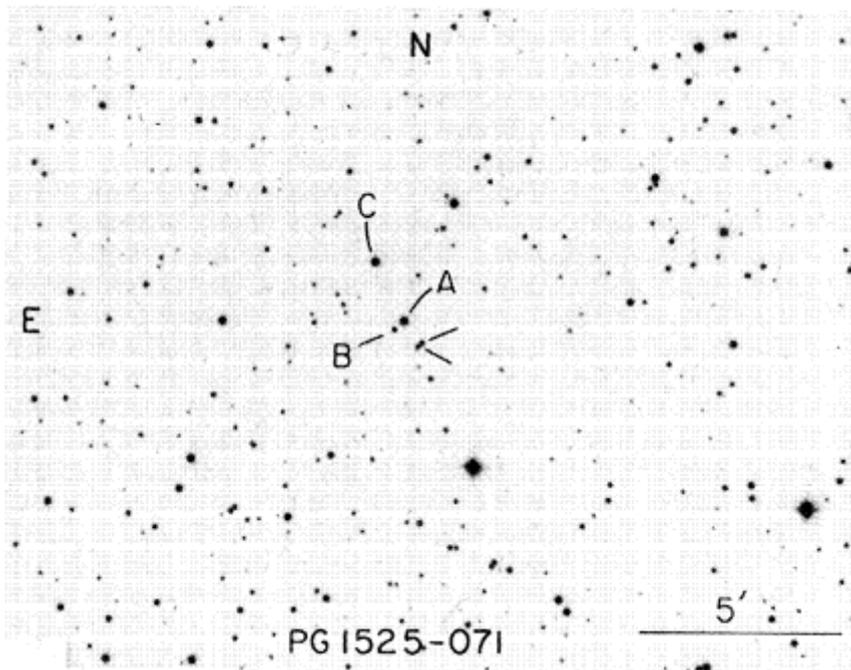
$$C^i = ZP_c + k'_C c_0^i + k'_M M$$

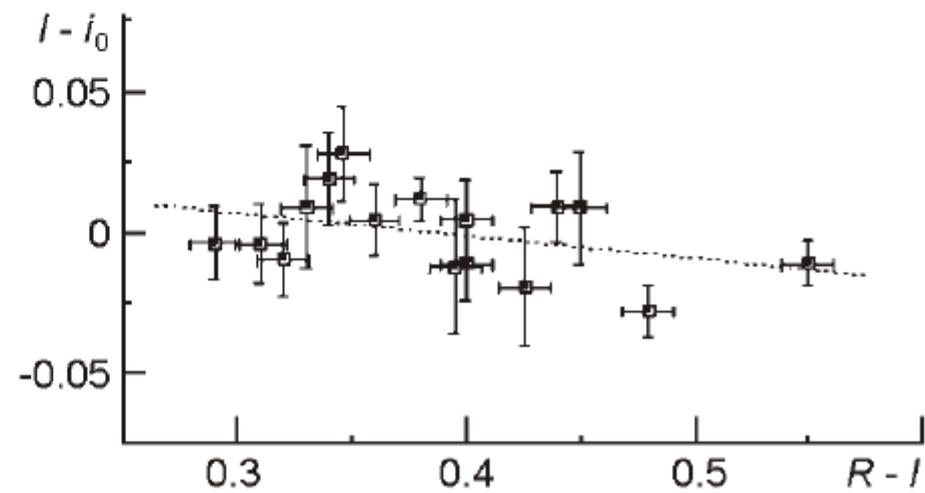
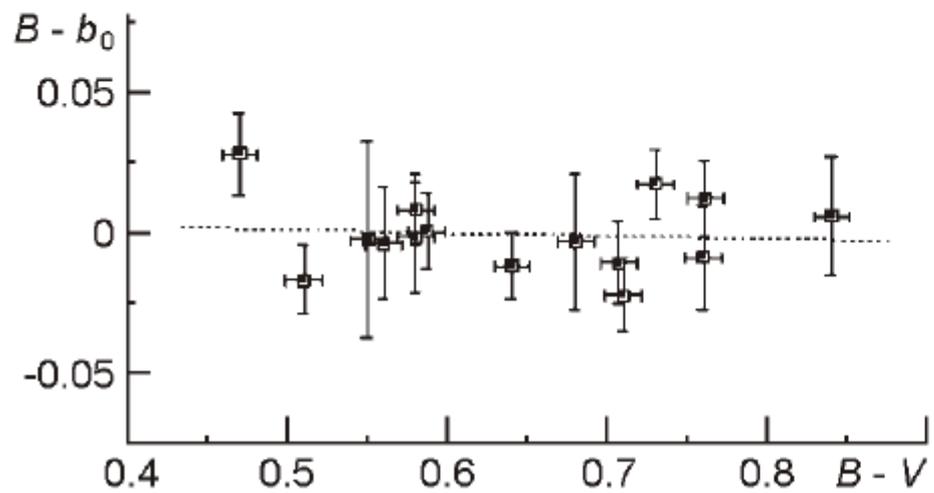
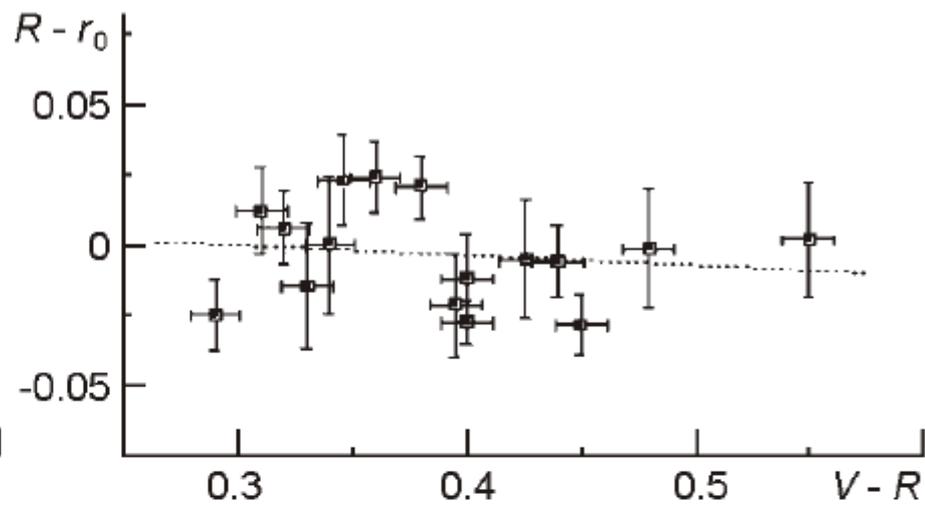
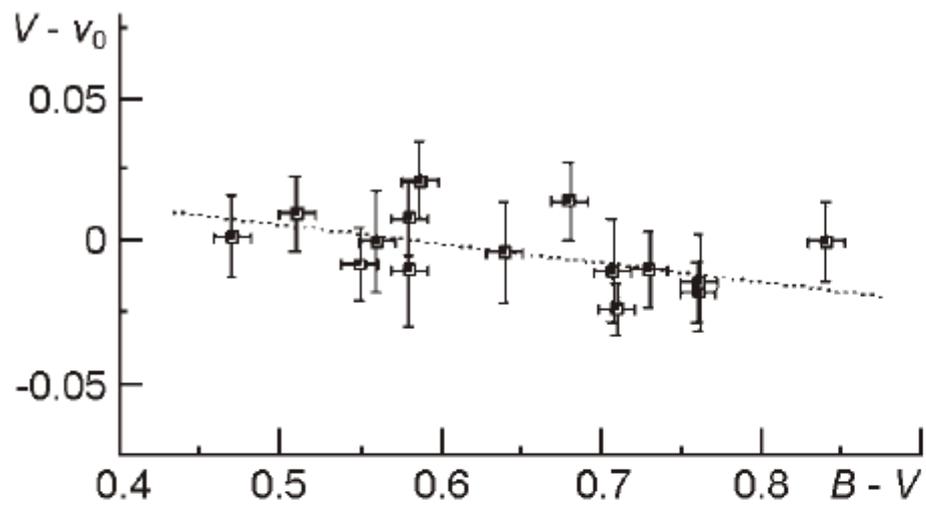
$k_M$  — коэффициент экстинкции звездной величины

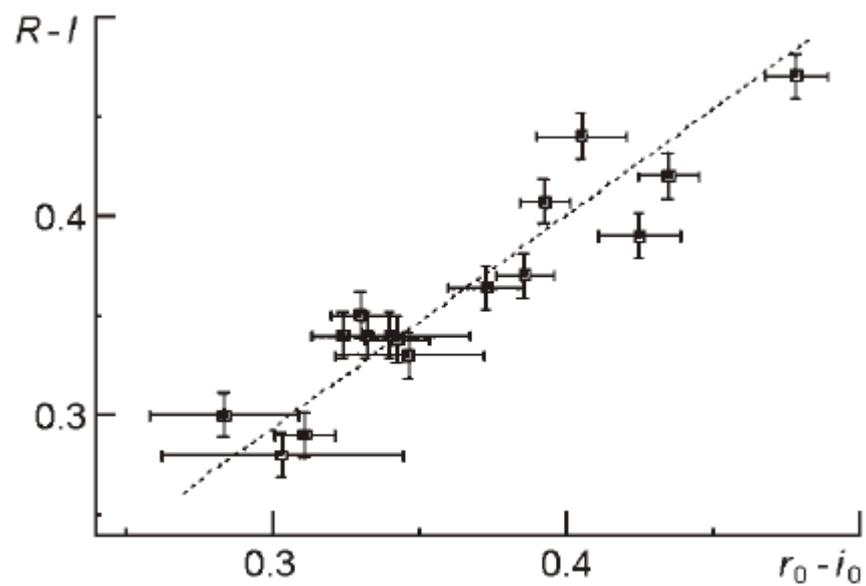
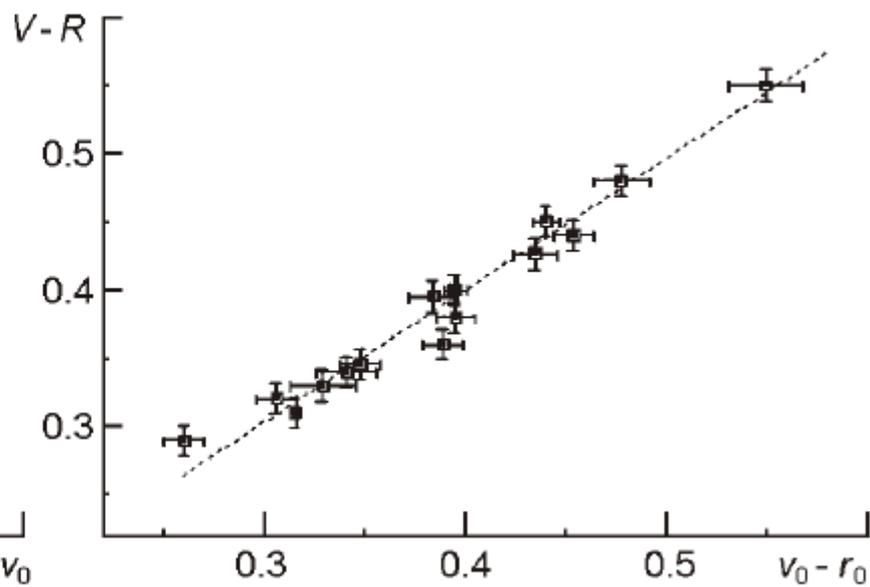
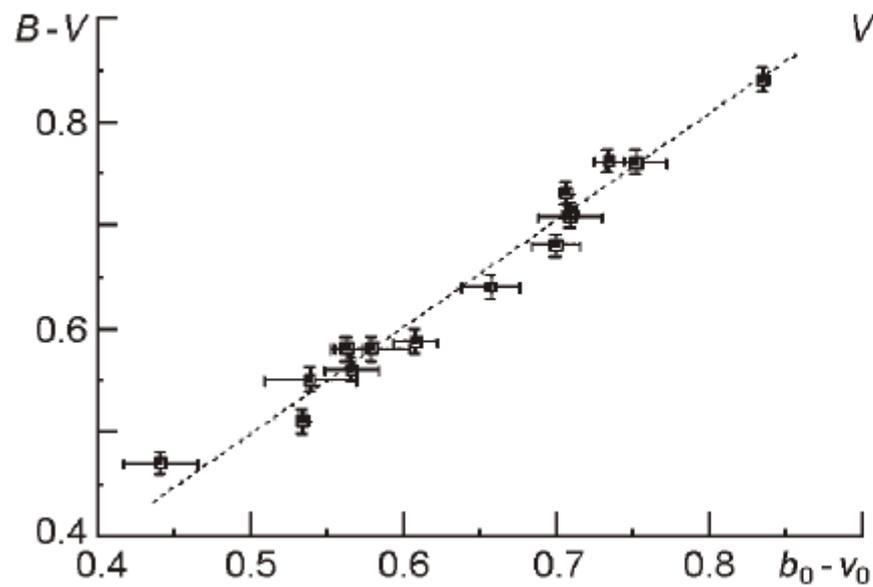
$k'_M$  — коэффициент экстинкции показателя цвета

$M$  — воздушная масса

# Площадки Ландольта





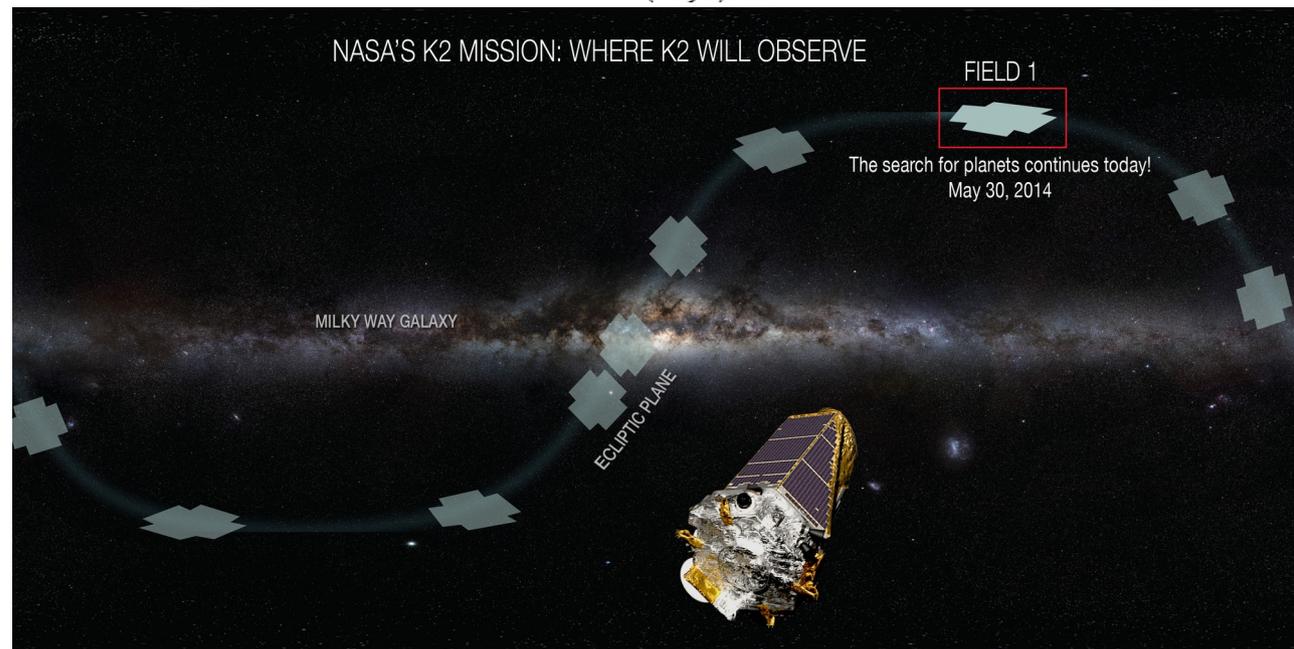
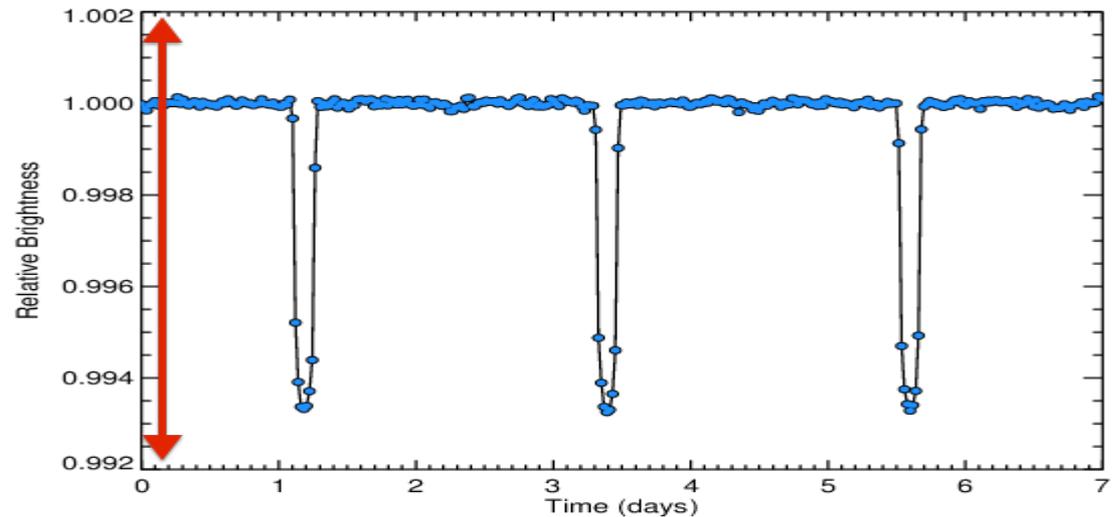
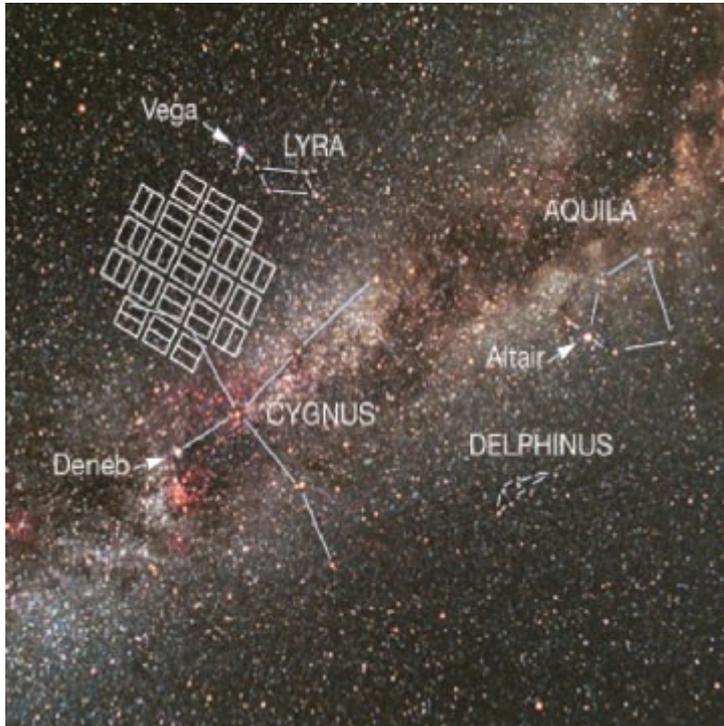


# Космические фотометры



# Kepler (D=0.95 м)

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



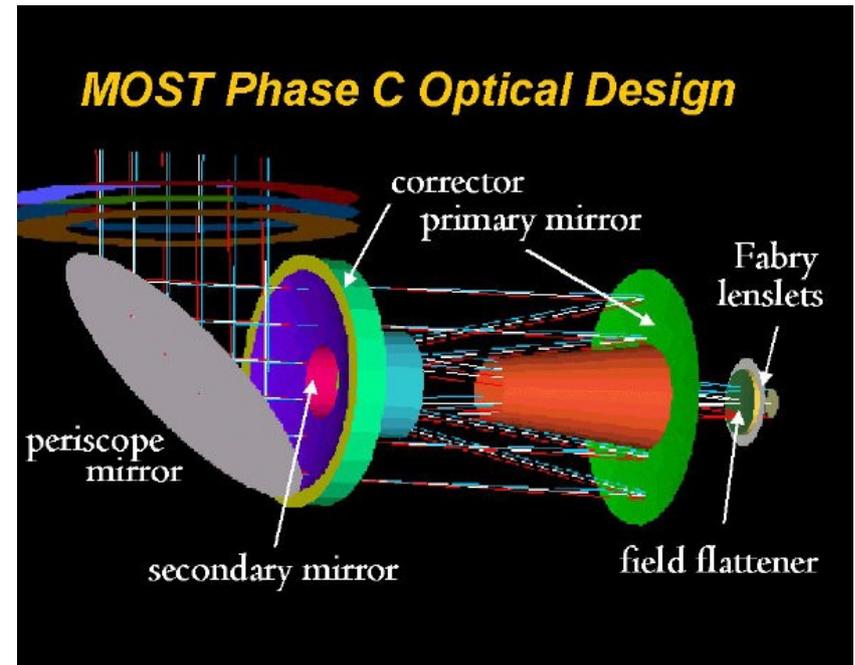
Результат: открыто более 1000 планет, около 4700 кандидатов

# 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

