

# Регистрация излучения и информация, в нем содержащаяся

Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
Лаборатория физики оптических транзиентов

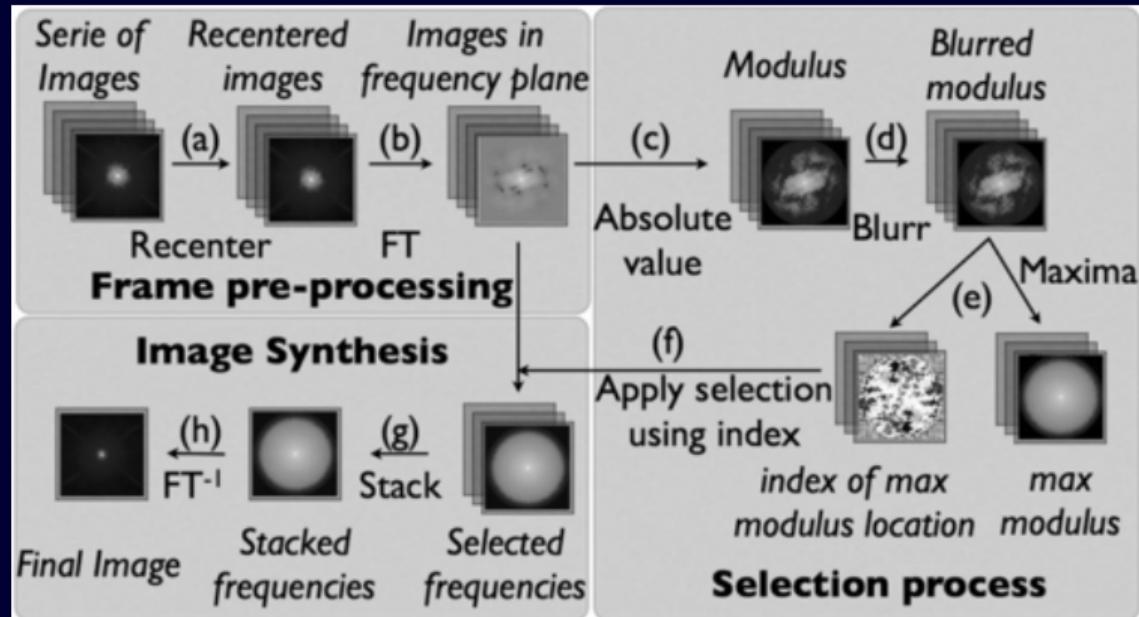
8 апреля 2022 года



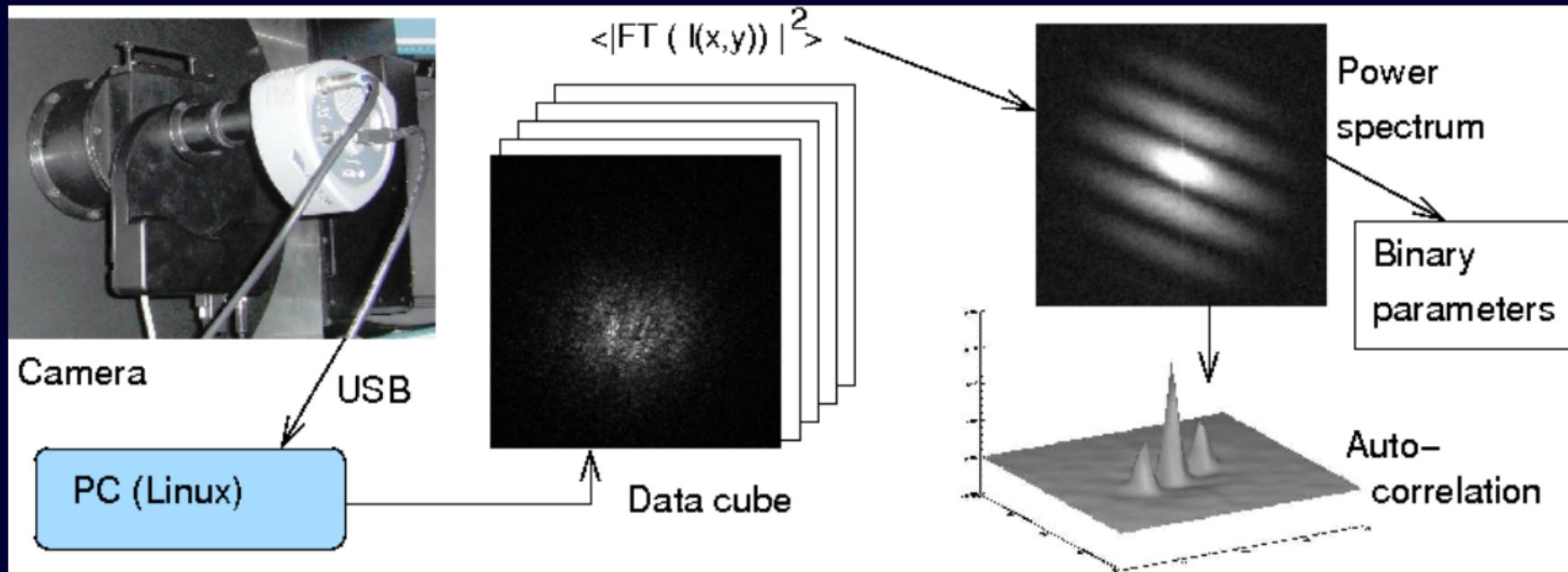
- 1 «Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные
- 2 Диспергирующие системы
- 3 Поляризация и анализаторы поляризации
- 4 Методы астрофизики
- 5 Фотометрия
- 6 Спектроскопия
- 7 Учет шумов детекторов
- 8 Кодирование и хранение информации

# «Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные

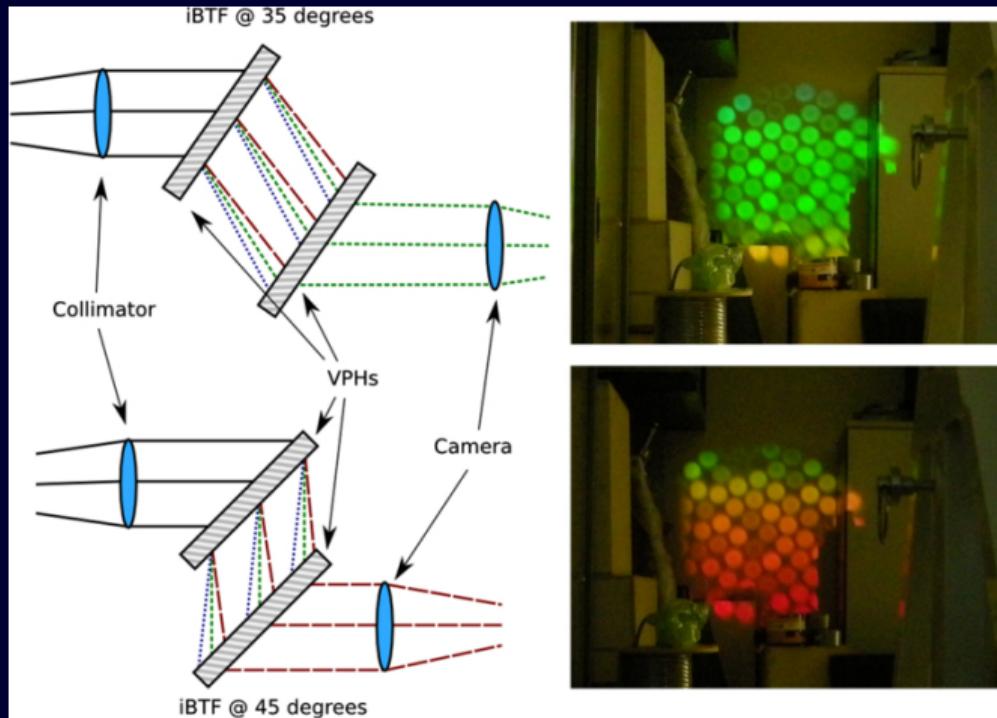
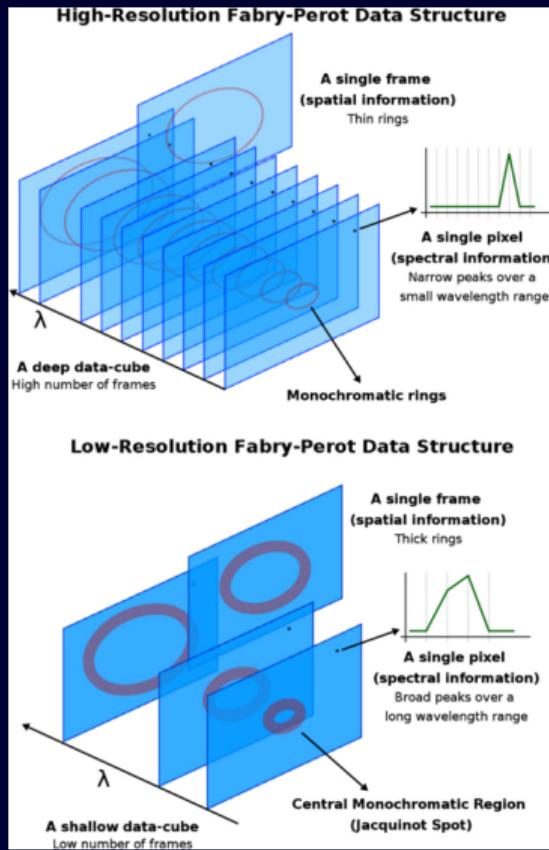
Излучение: 4 степени свободы (координаты на изображении, частота, время). 3D data cubes (FITS-files): слайсы по времени (быстропеременные объекты, lucky images, speckle...) или по частоте (VPHG, IFP, средне- и широкополосные фильтры).



# «Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные



# «Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные



# Диспергирующие системы: призмы

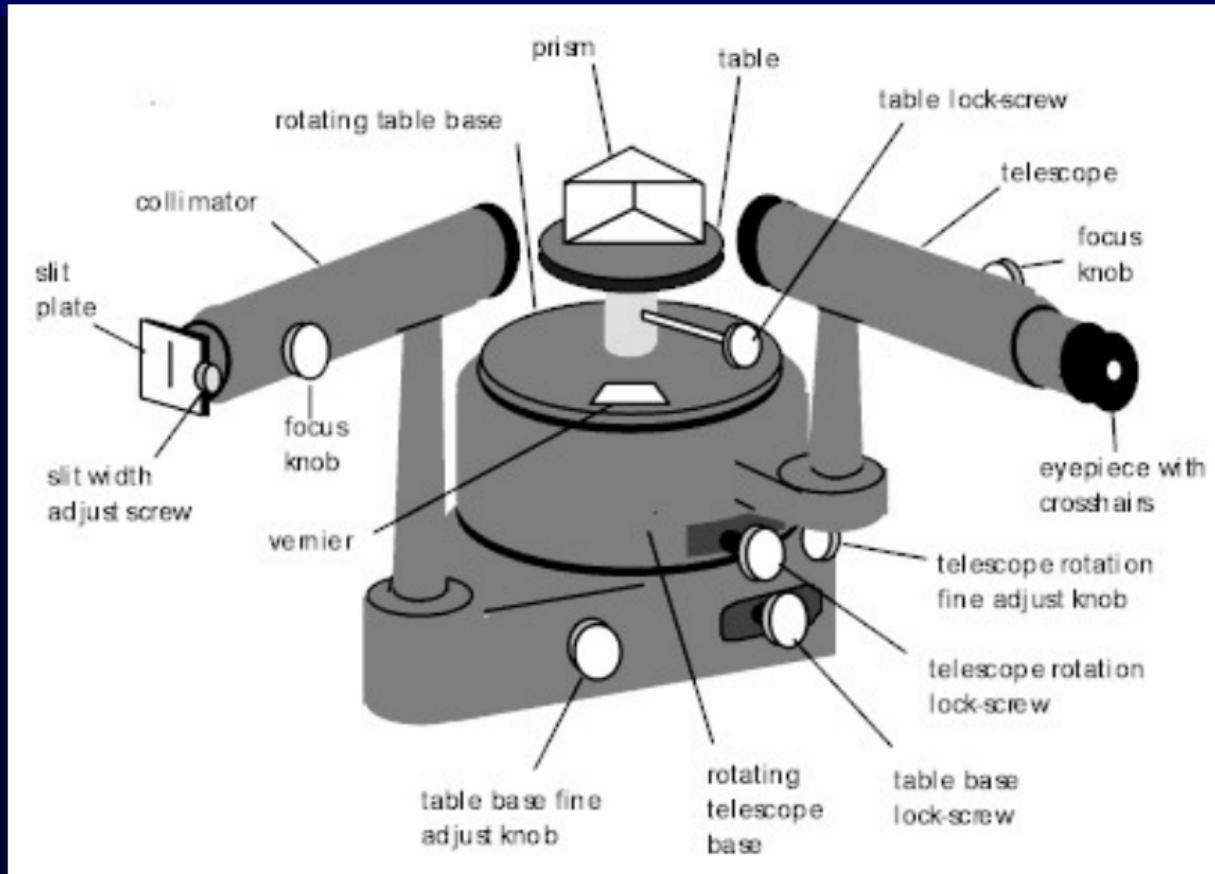


1814, спектроскоп Йозефа фон Фраунгофера

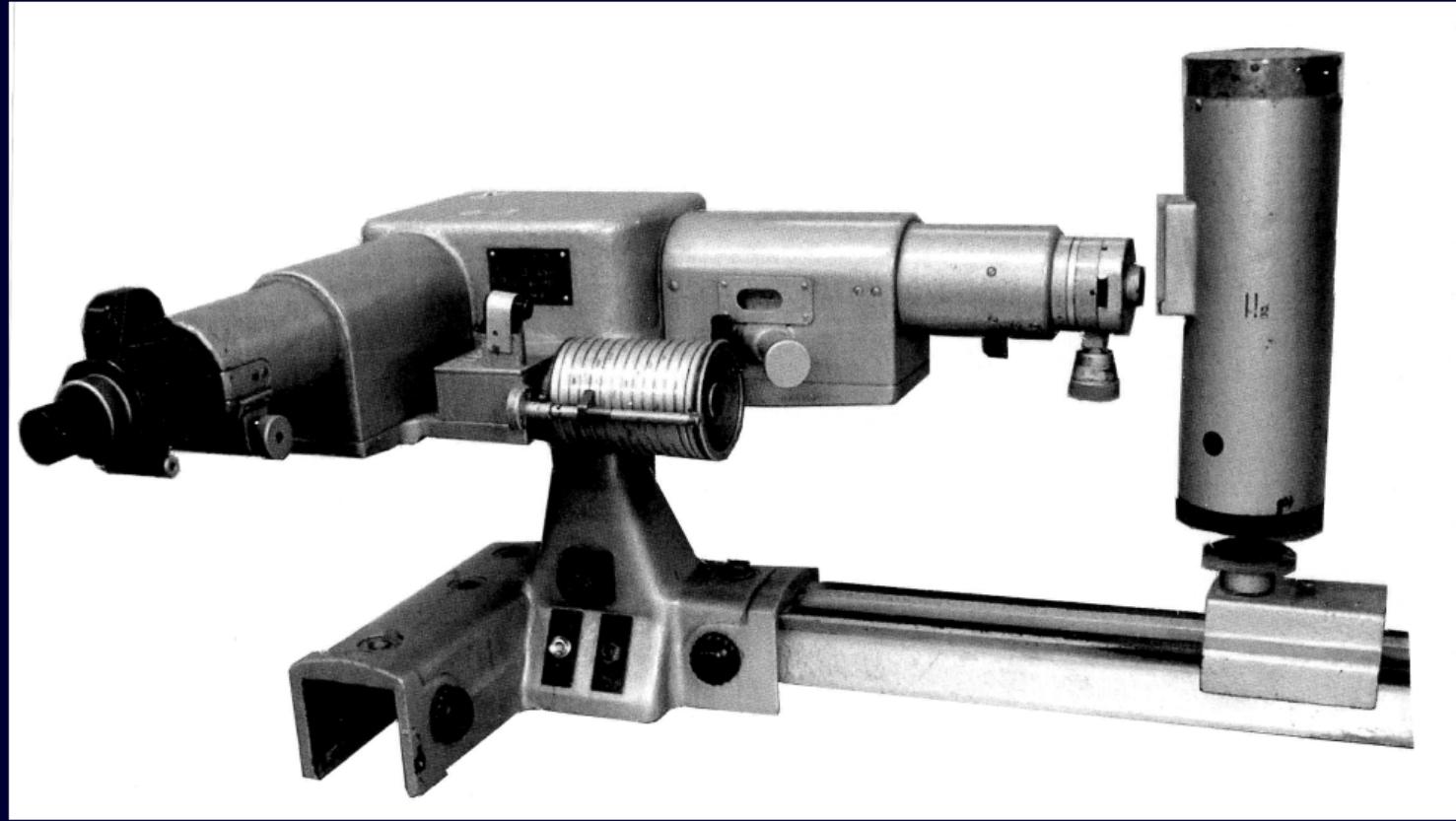
## Диспергирующие системы: призмы



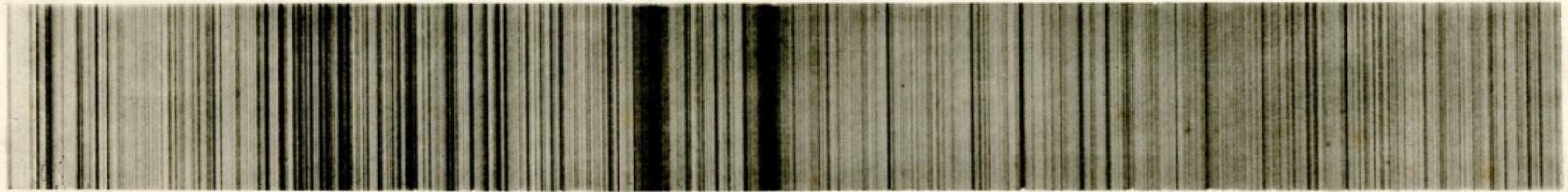
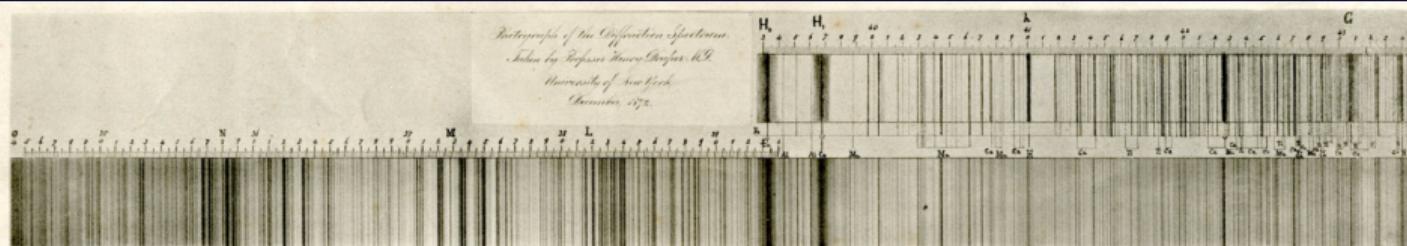
# Диспергирующие системы: призмы



## Диспергирующие системы: призмы

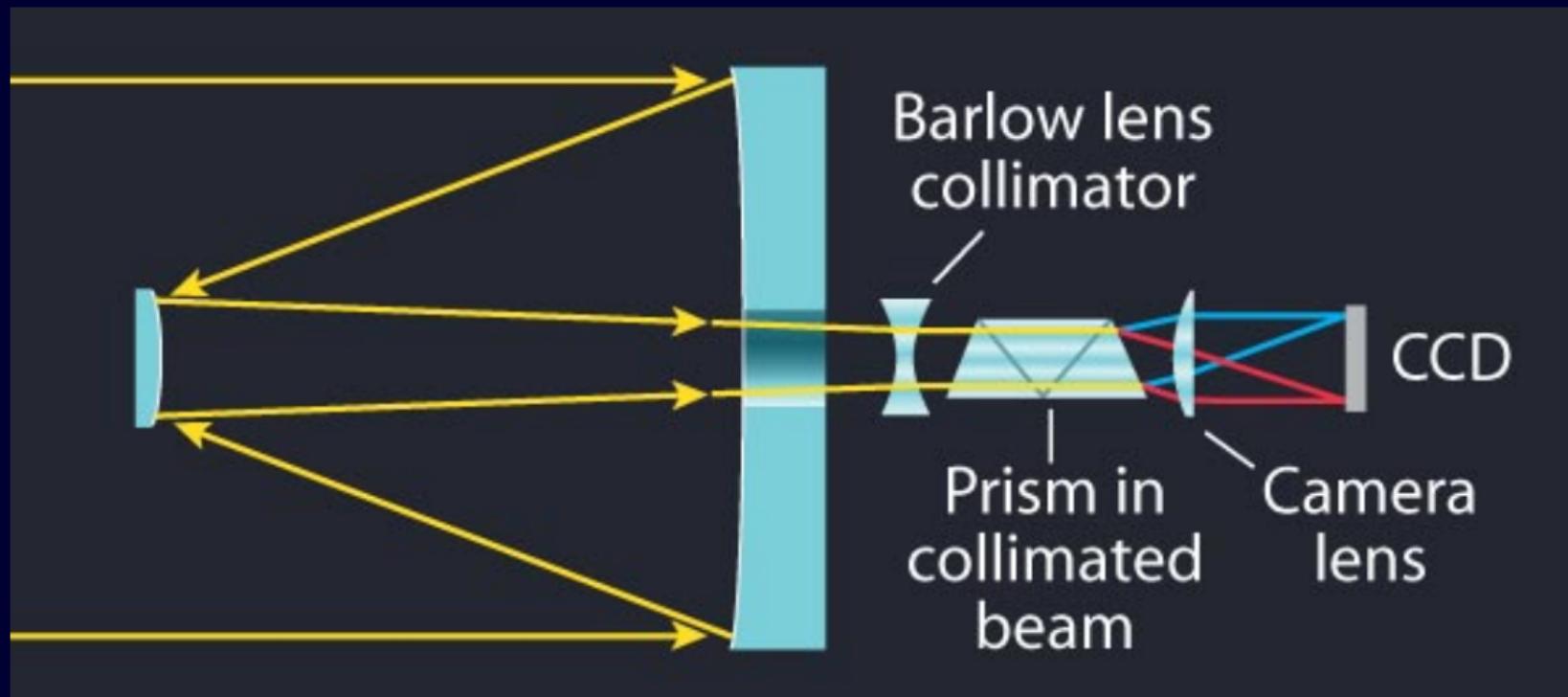


1872, первый спектр Веги на фотопластинке. С 1918 по 1924 г. вышел каталог HD в честь Дрэпера (изначально 225300 звезд, Эдвард Пикеринг сотоварищи, наблюдения в гарвардской обсерватории с объективной призмой).

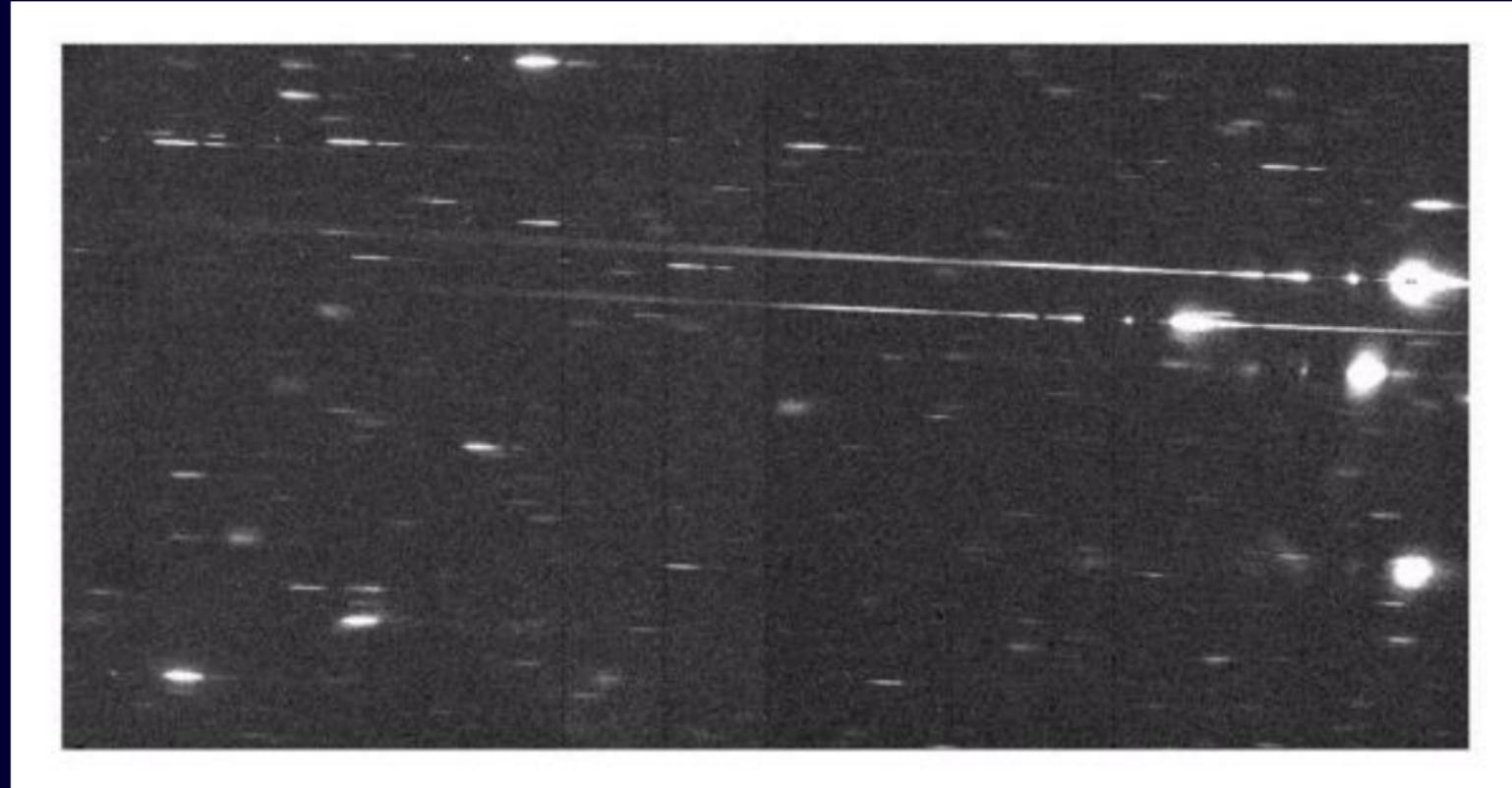


## Бесщелевые спектры

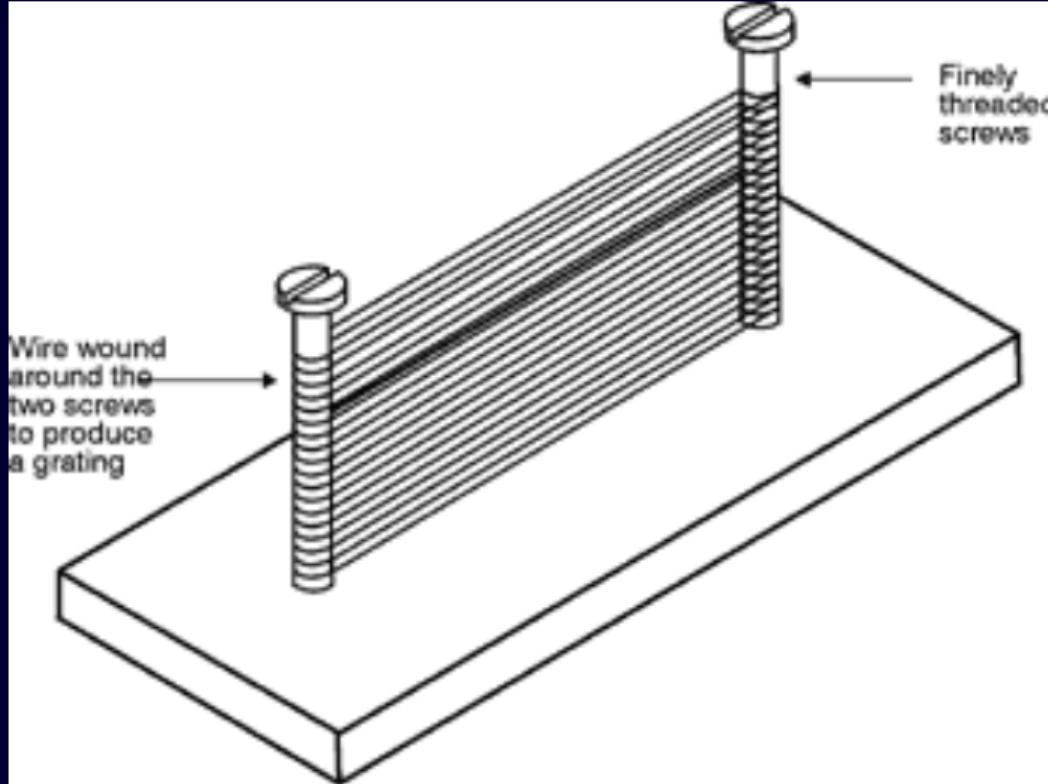
Николас Мейол, 1930-е.



# Бесщелевые спектры

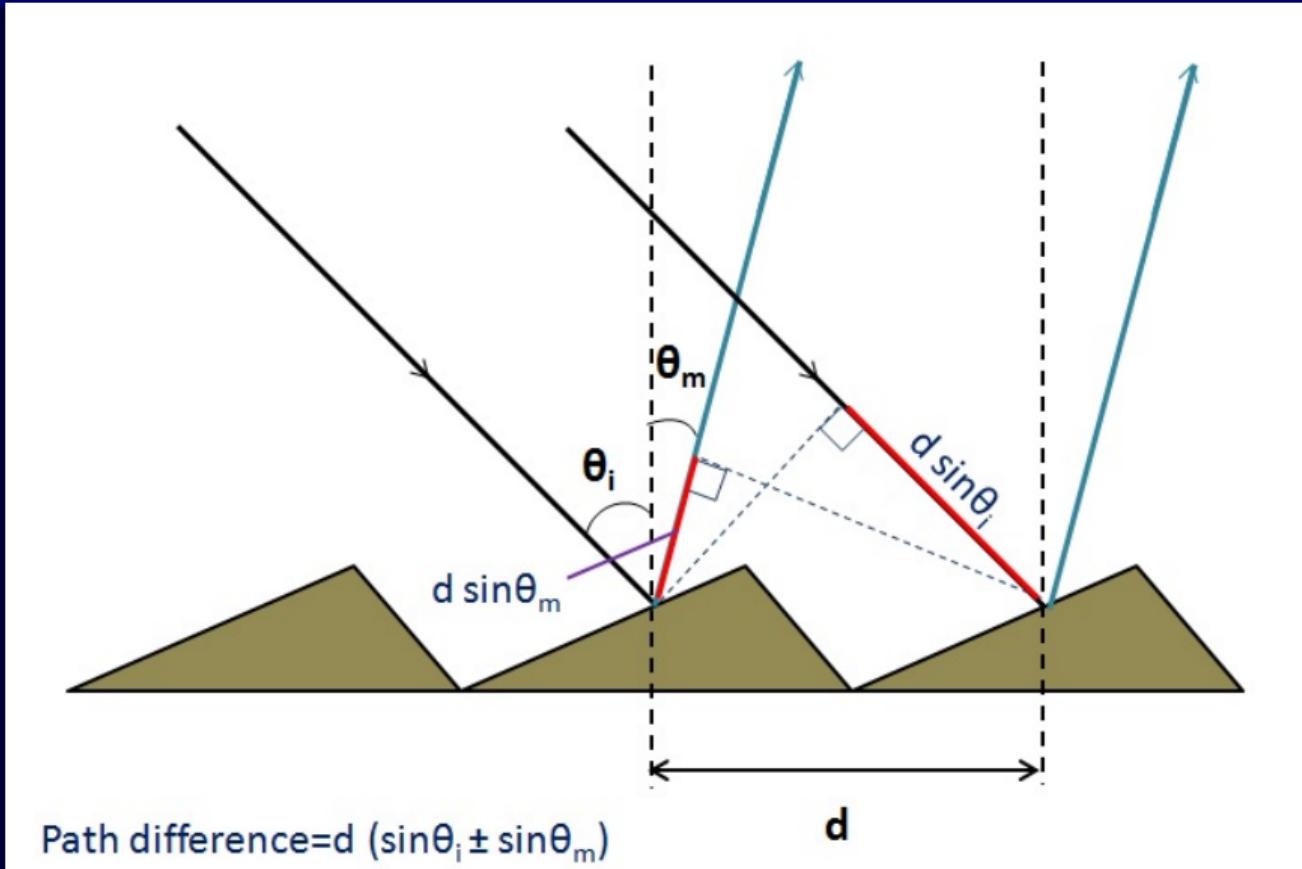


# Дифракционная решетка

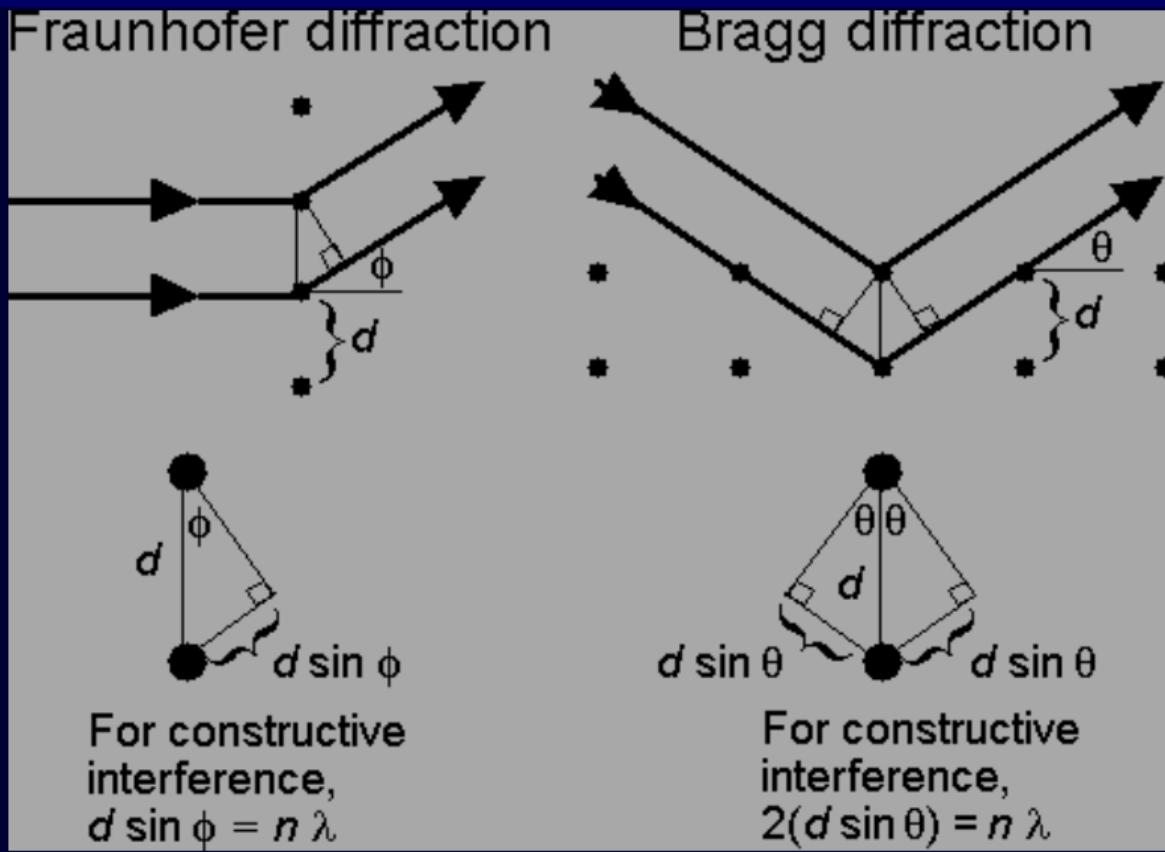


Нитяная решетка Фраунгофера

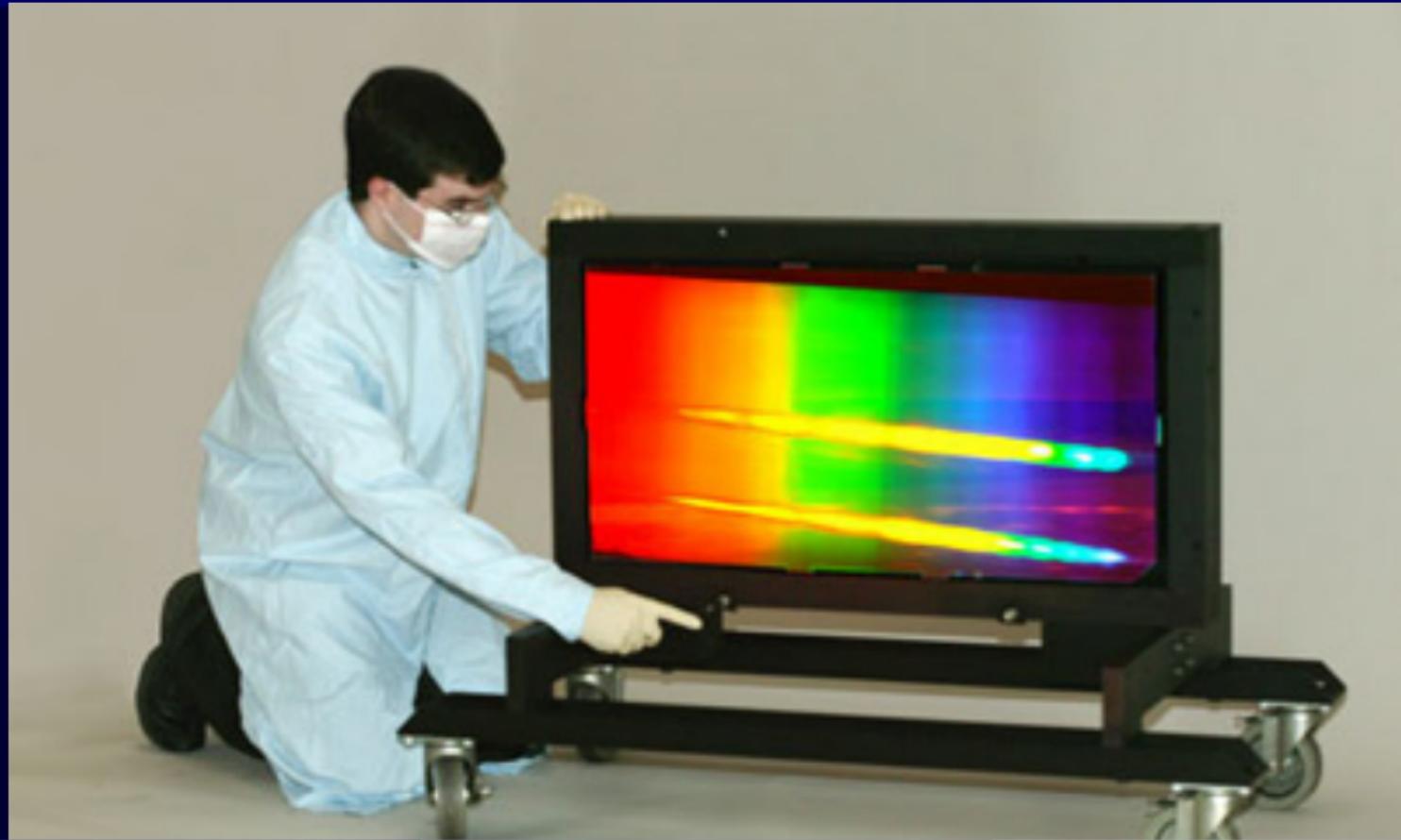
# Дифракционная решетка



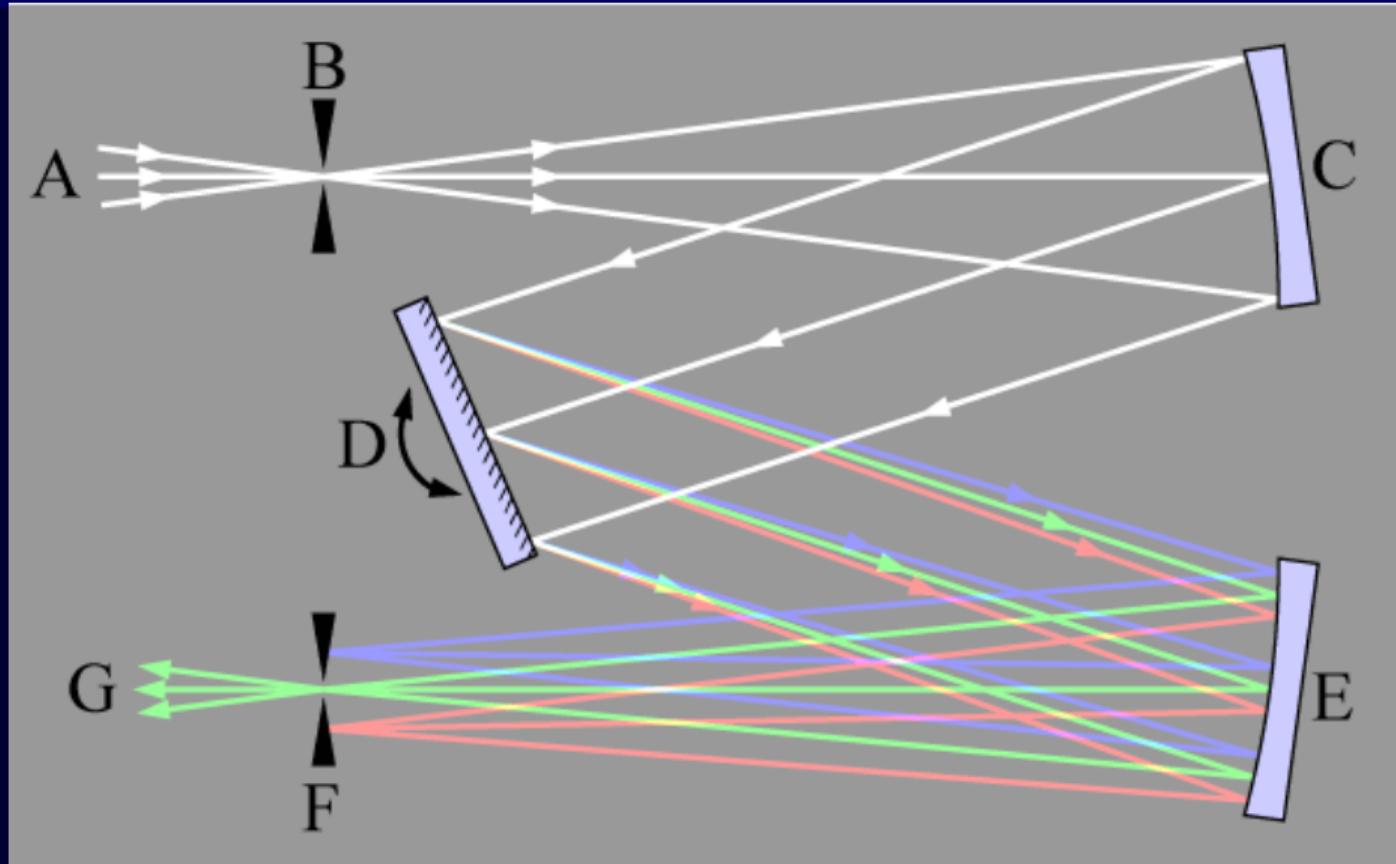
# Дифракционная решетка



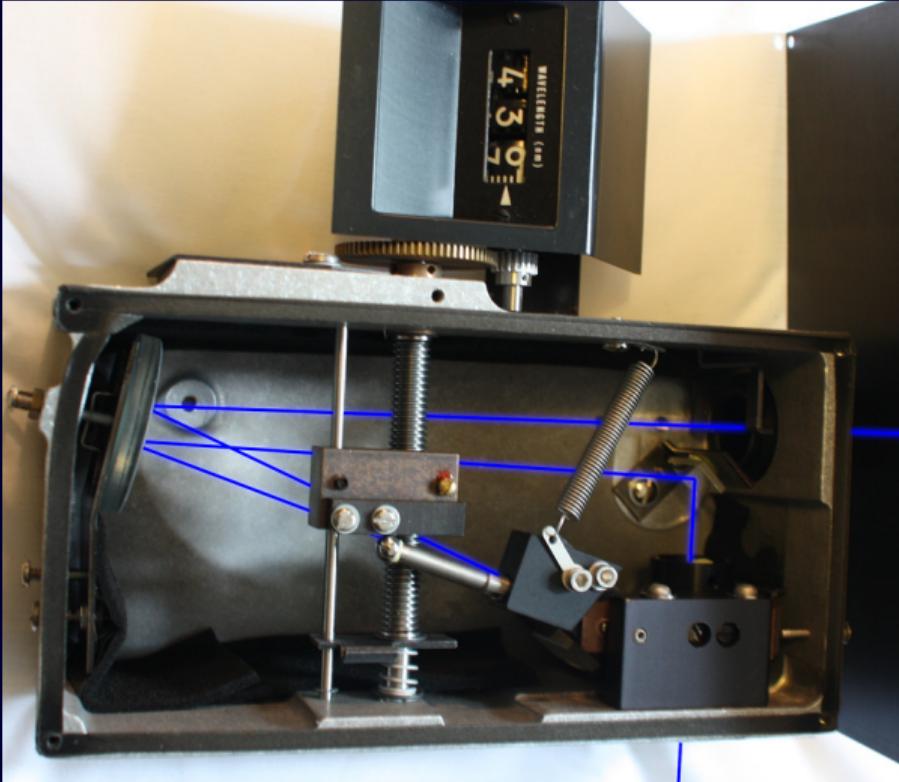
## Дифракционная решетка



# Дифракционная решетка

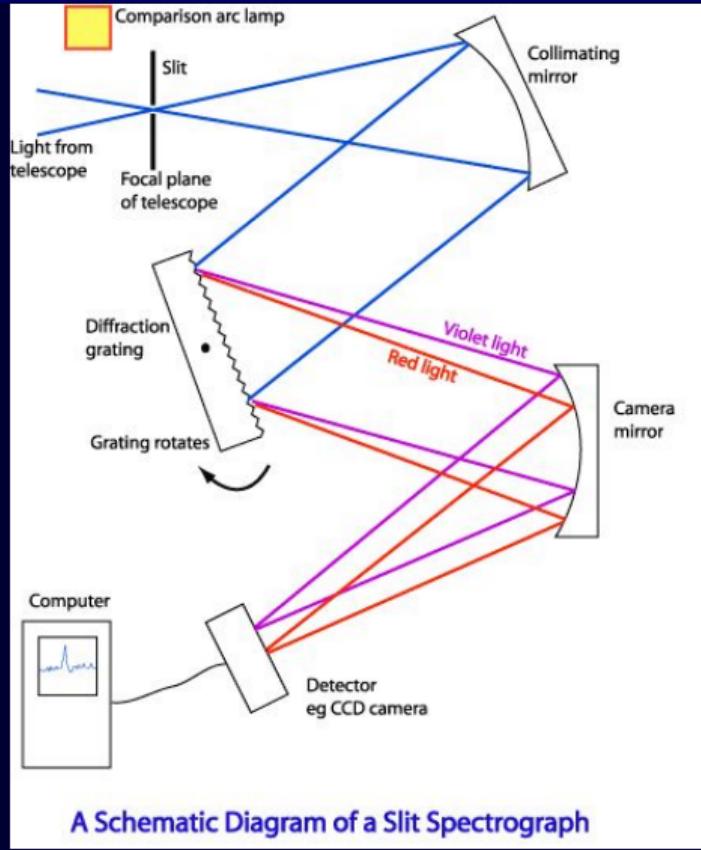


# Дифракционная решетка

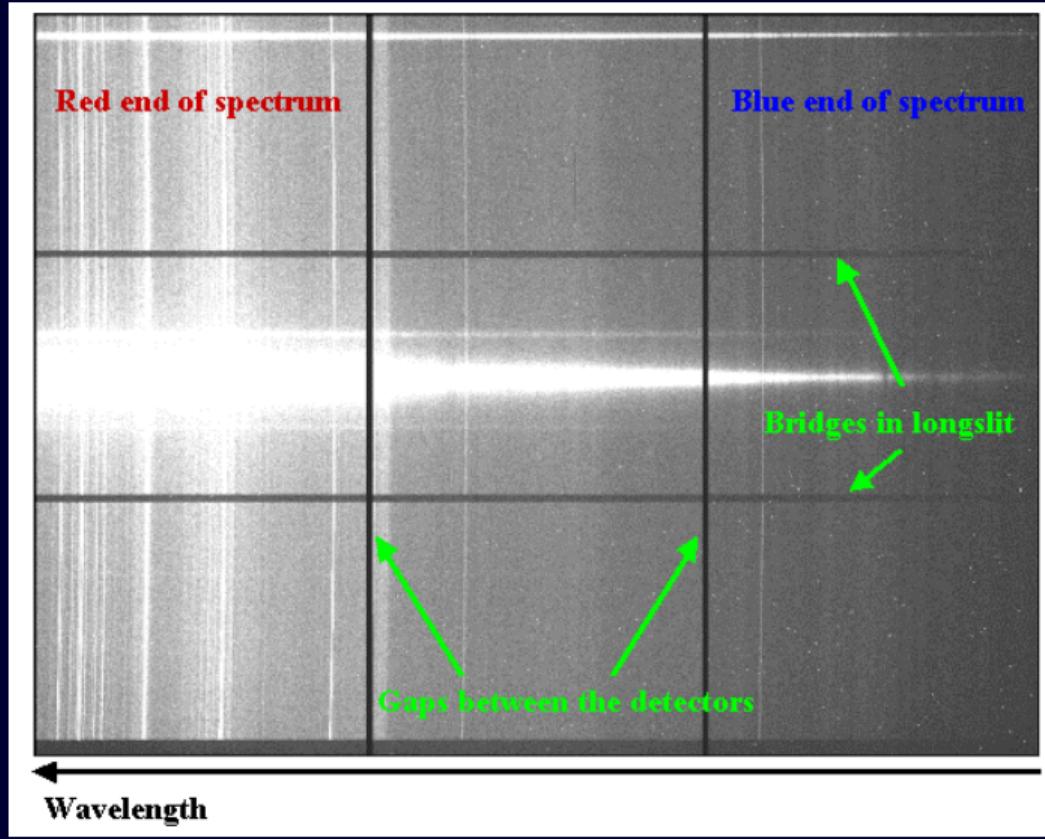


## Монохроматор Фасти-Эберта

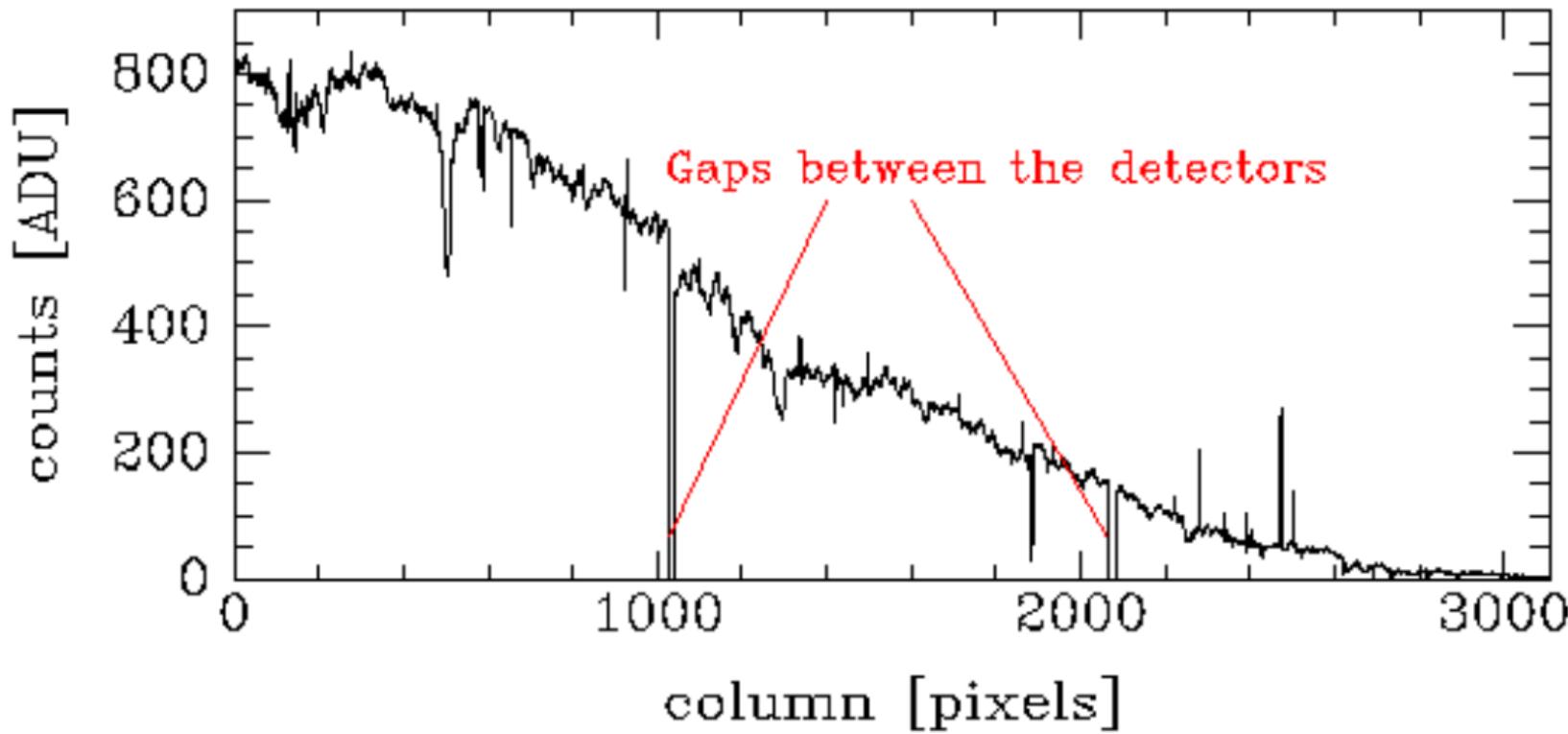
# Длиннощелевые спектры



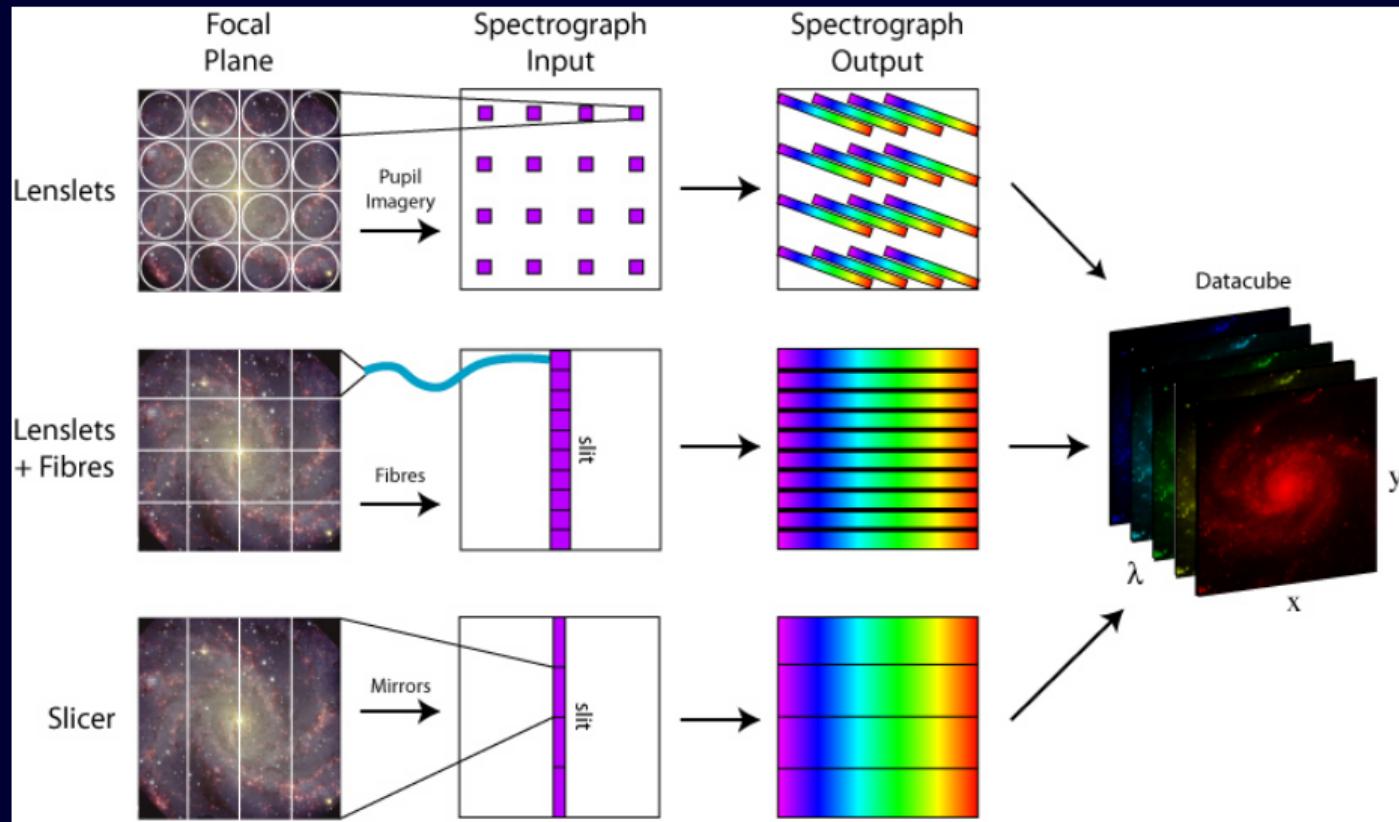
# Длиннощелевые спектры



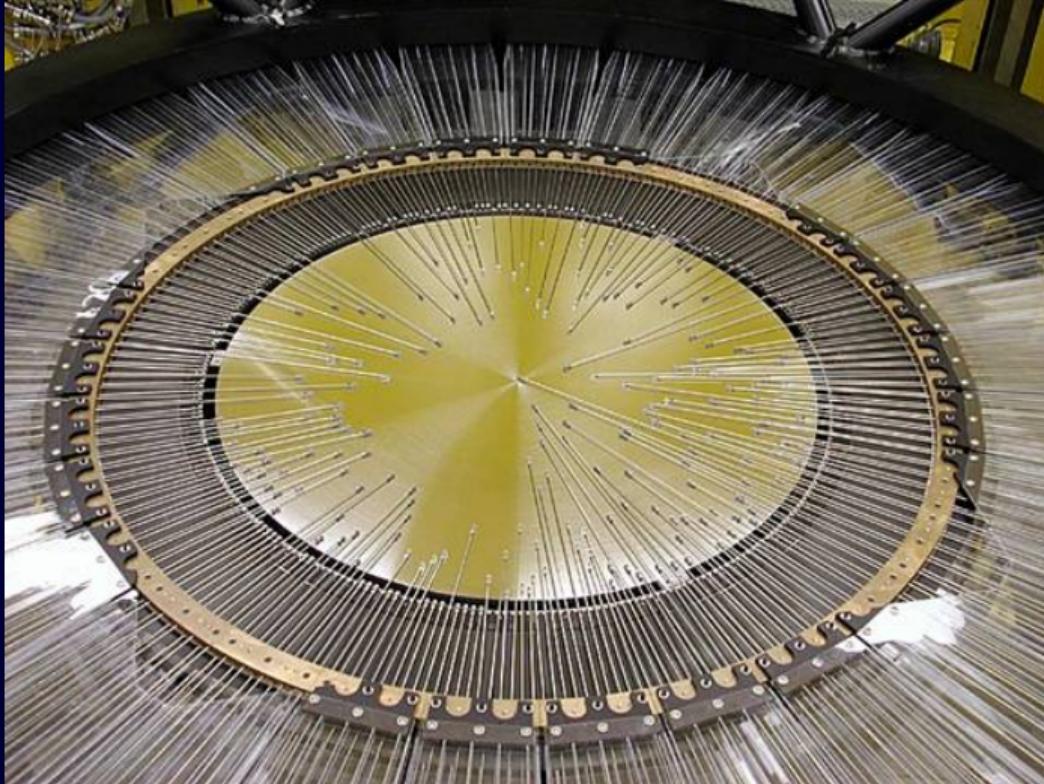
## Длиннощелевые спектры



# Integral field spectrograph

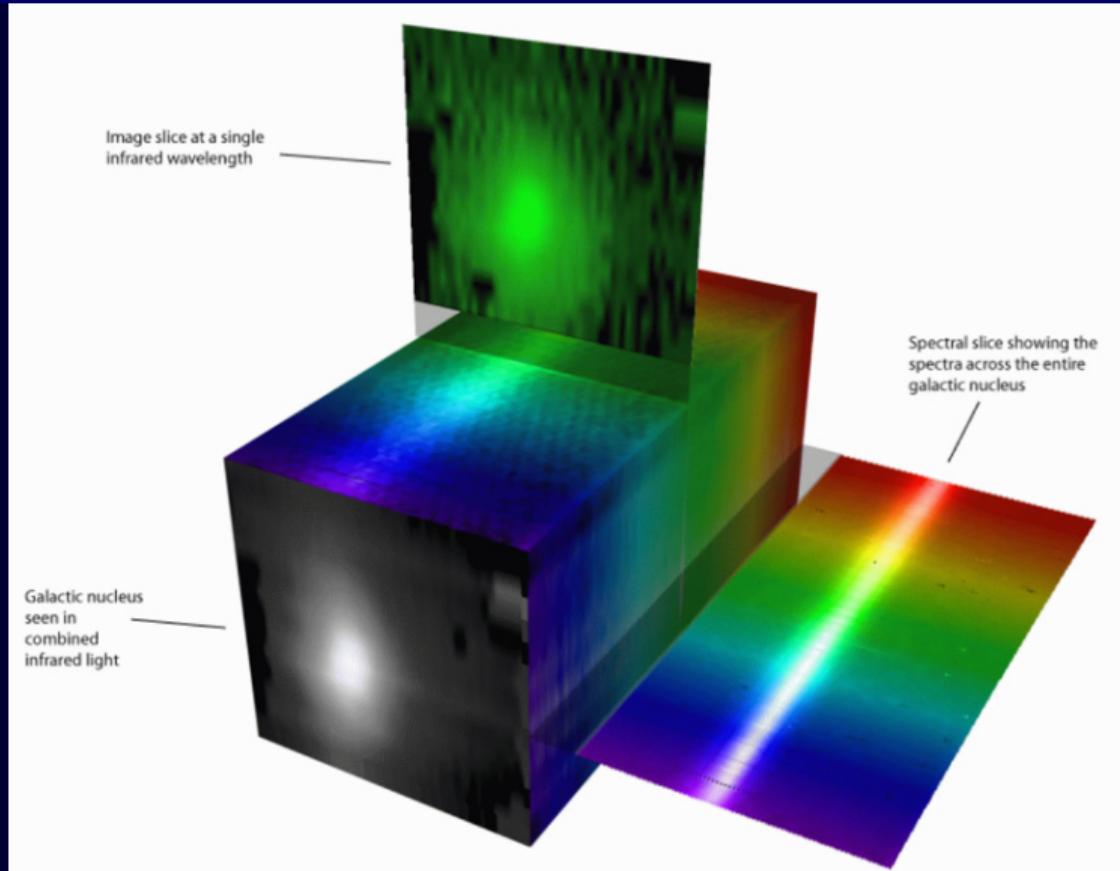


# Integral field spectrograph



Нектоспек — сложный спектрограф 6.5-м телескопа ММТ

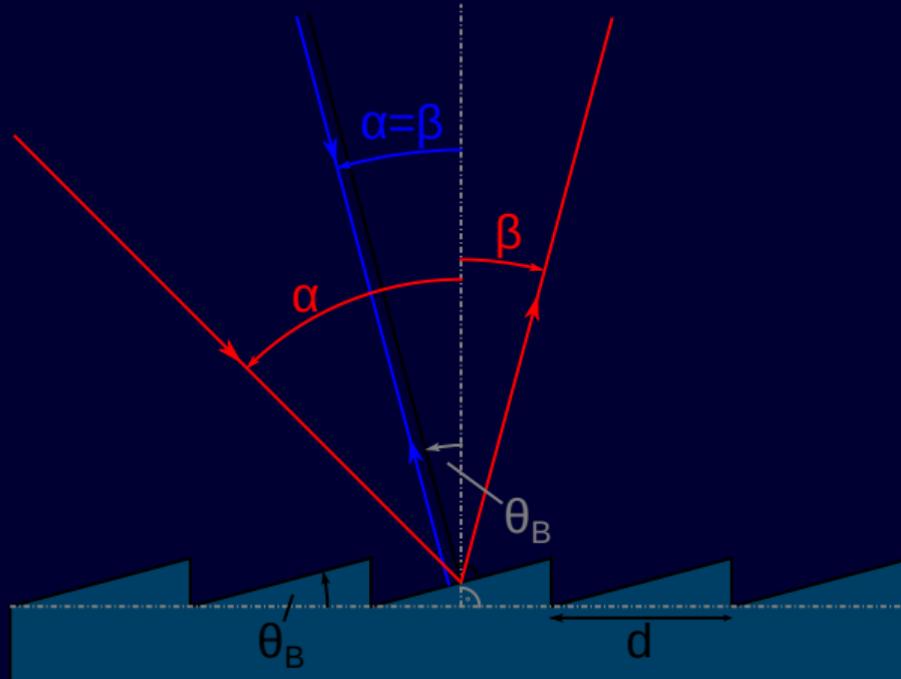
# Integral field spectrograph



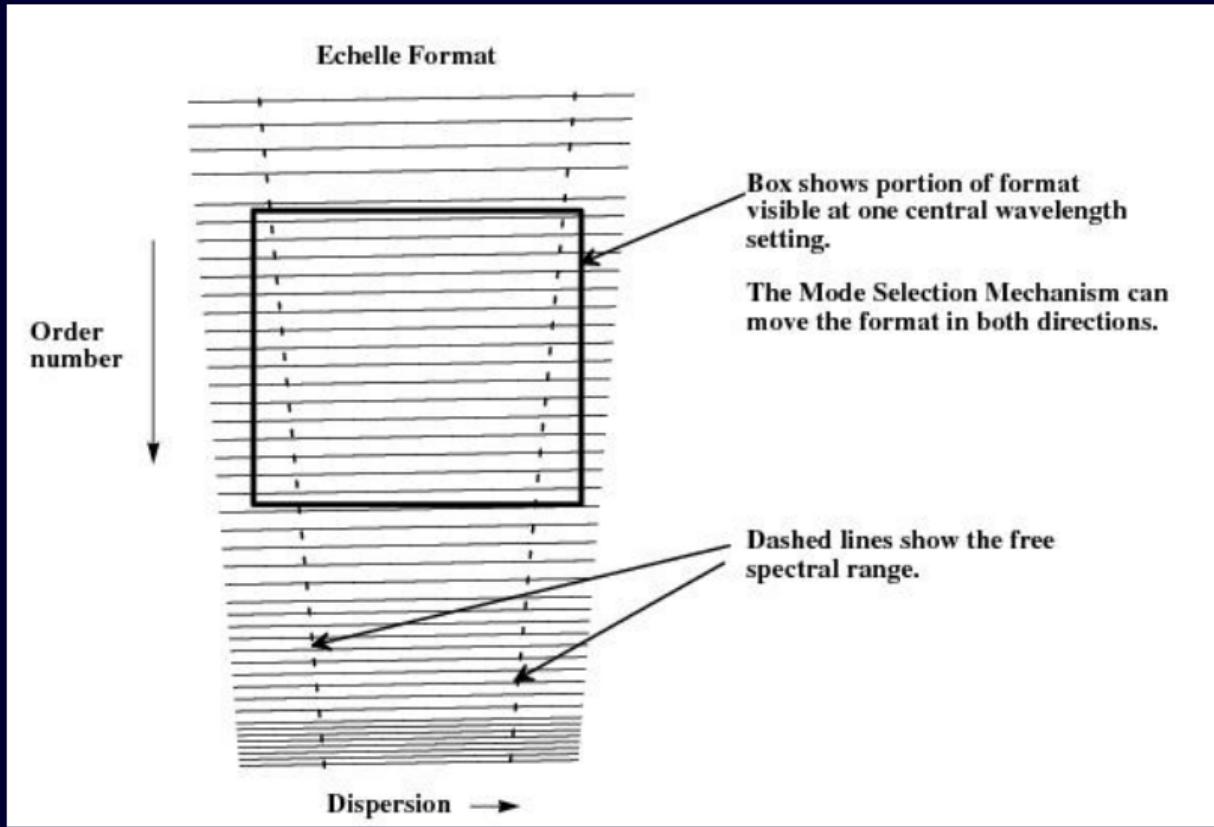
# Эшелье–спектрограф

Конфигурация Литтрова синим.  
Угол блеска  $\theta_B > 45^\circ$ .

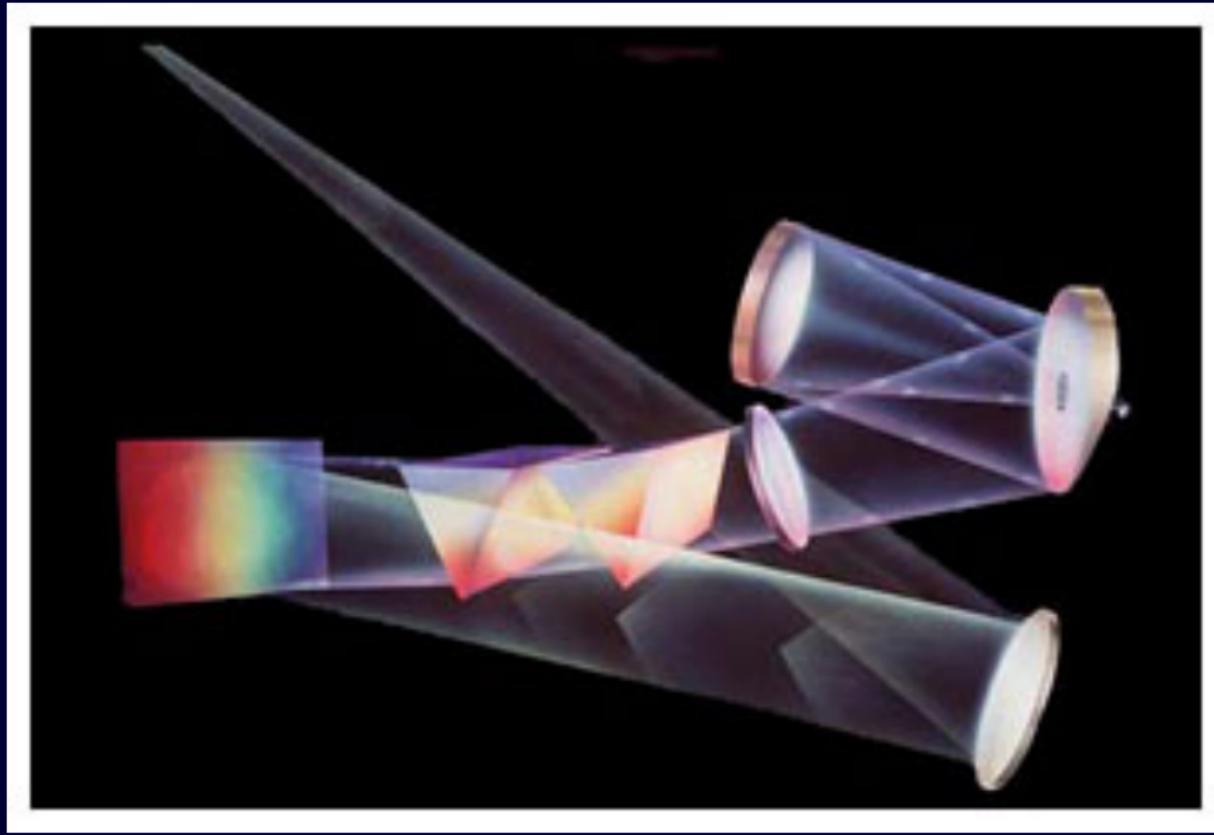
$$\theta_B = \arcsin \frac{m\lambda}{2d}.$$



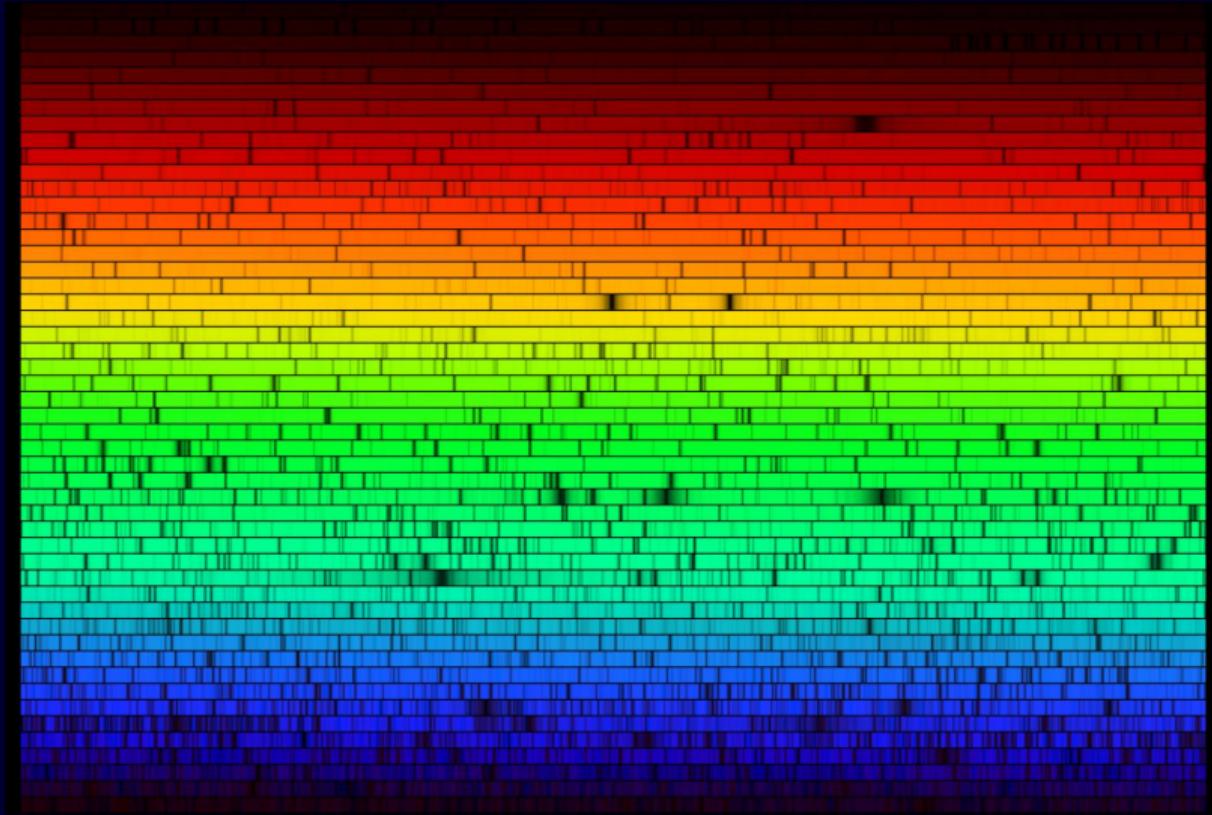
# Эшелье-спектрограф



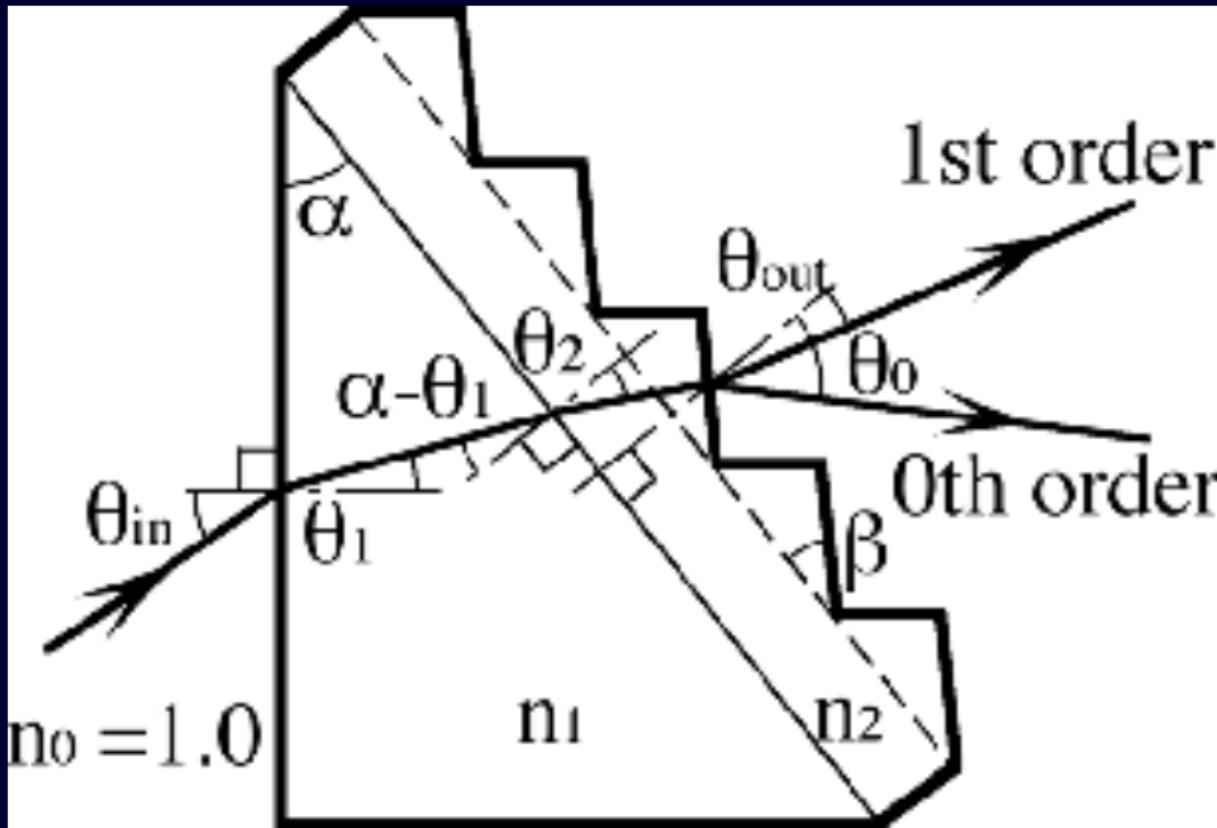
# Эшелье–спектрограф



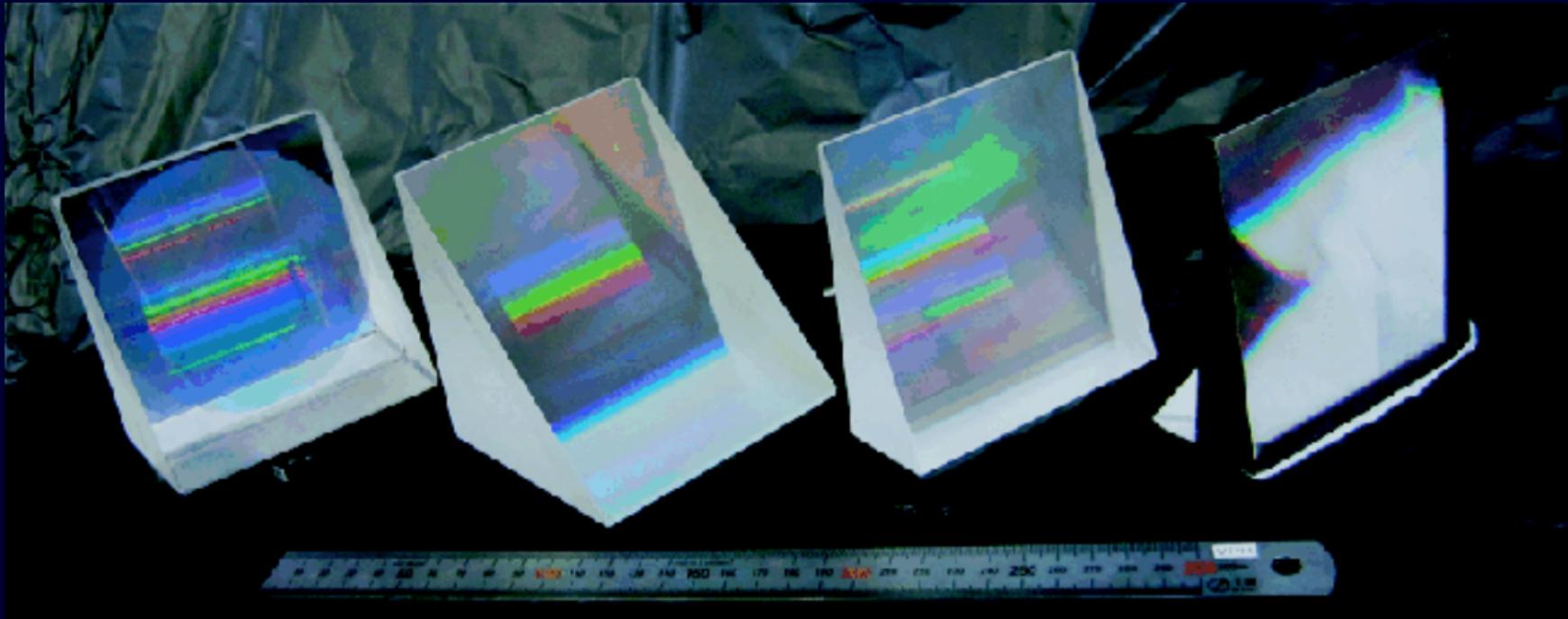
# Эшелье–спектрограф



# Гризма

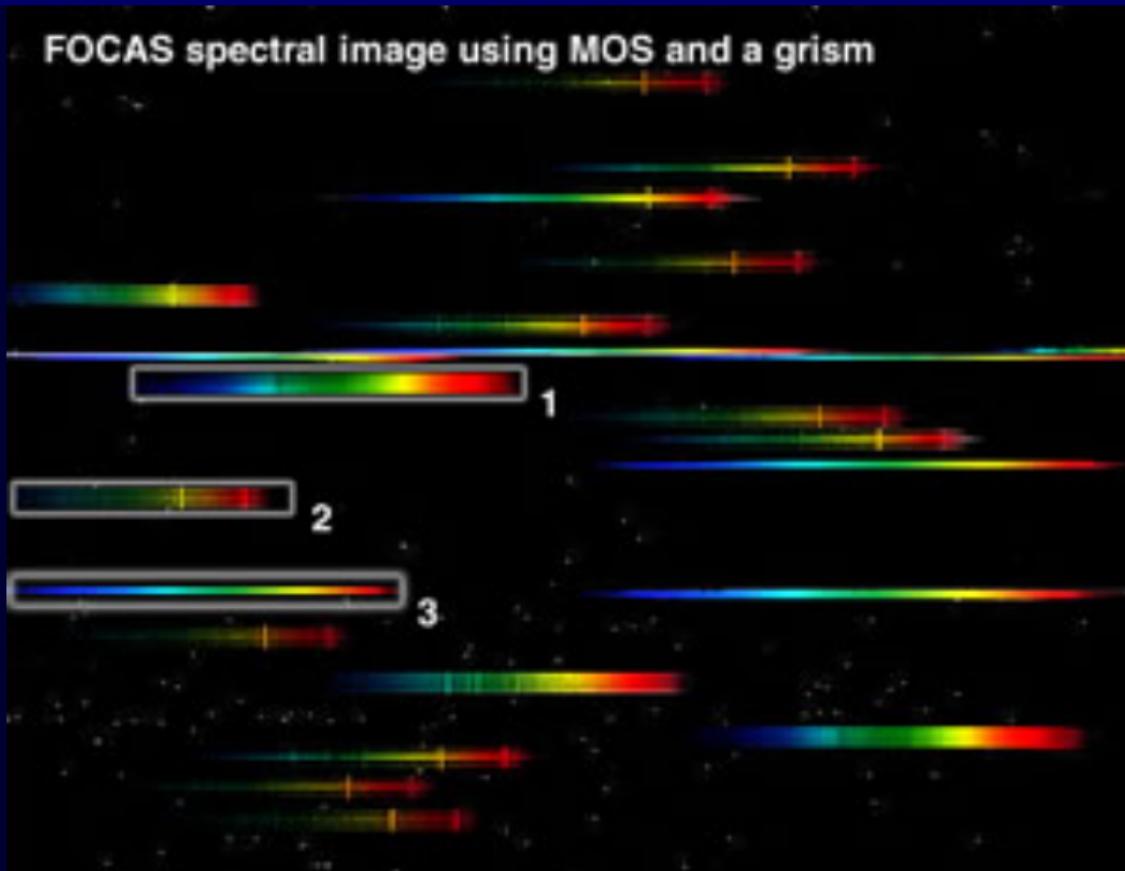


# Гризма

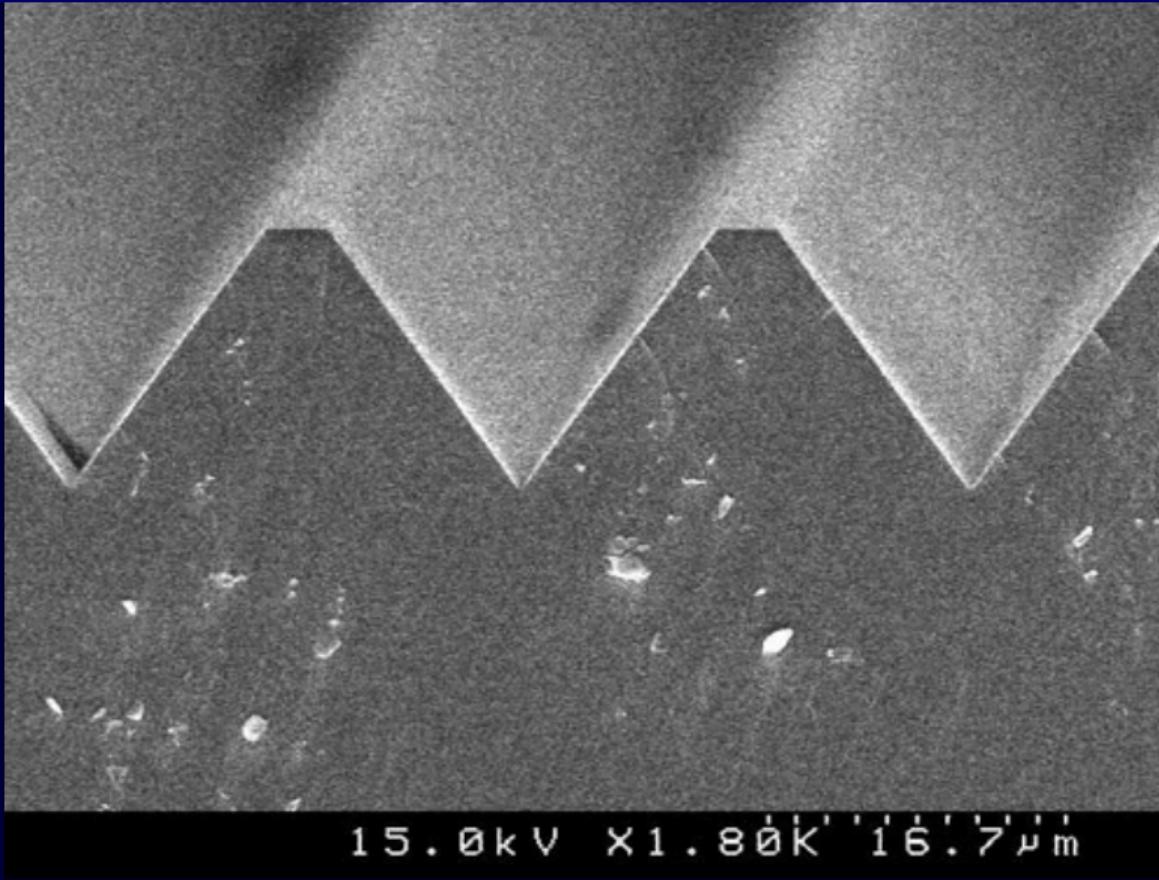


Набор гризм The Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS Subaru).

# Гризма

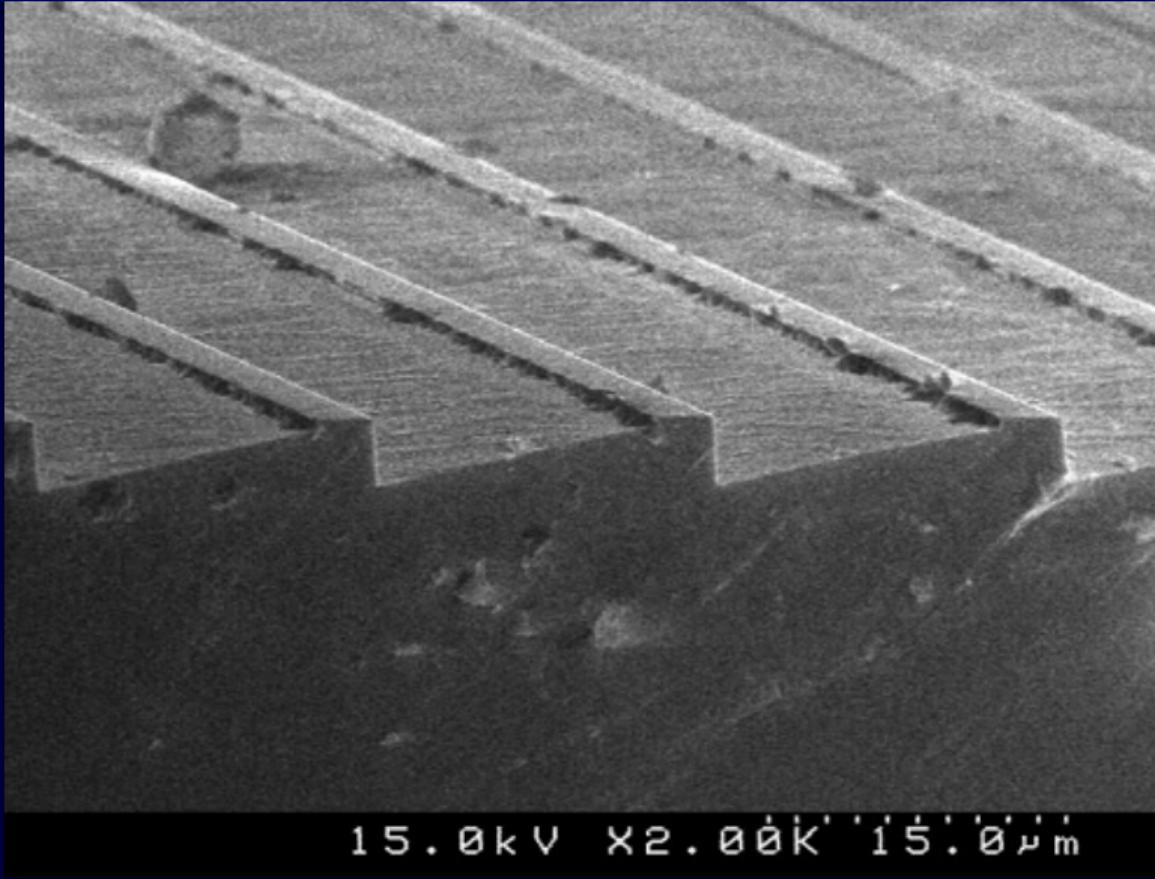


# Гризма



15.0 kV  $\times 1.80 k$  '16.7  $\mu$ m

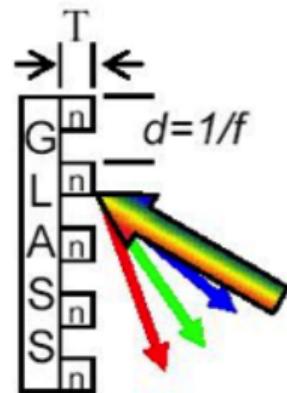
# Гризма



## Diffraction Gratings

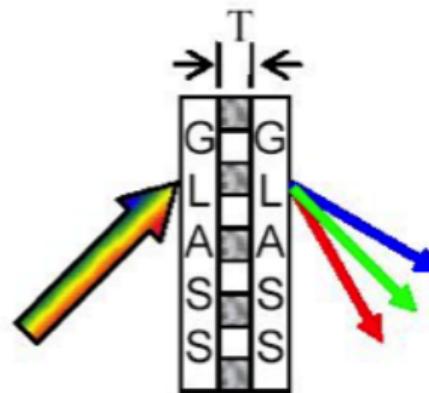
$$\lambda f = \sin \theta_i + \sin \theta_d$$

*Surface Relief Grating:  
Reflection*



Cross section of photoresist or epoxy cast grating. Periodic variation of thickness (T) with a constant refractive index (n).

*Volume Phase Holographic Grating (VPHG): Transmission*

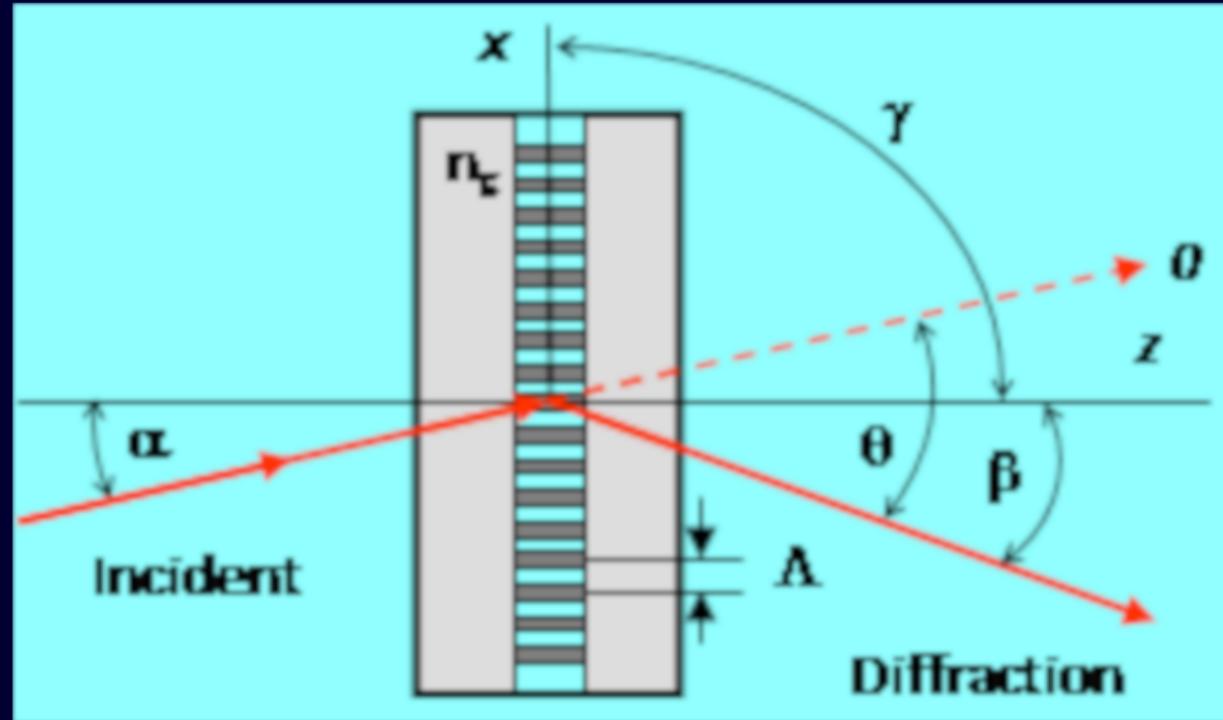


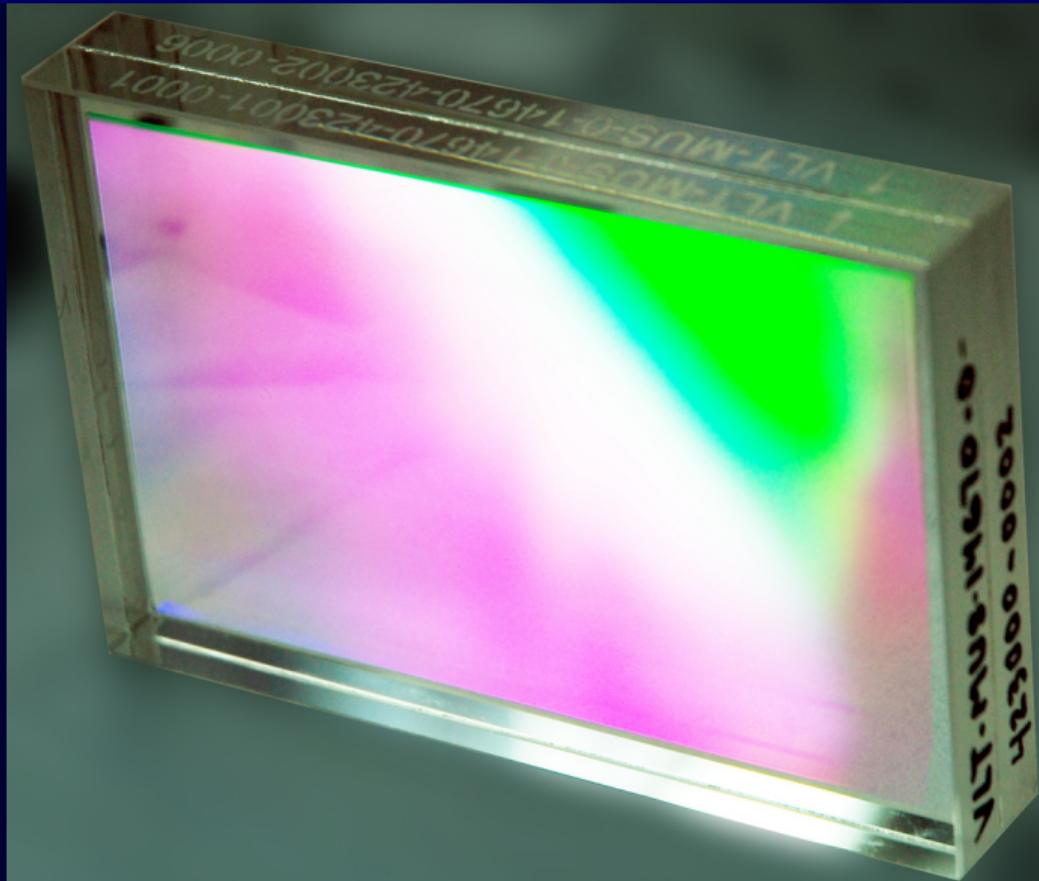
Cross section of dichromated gelatin (DCG) grating. Periodic variation of refractive index (n) with a constant thickness (T).

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n_g \Lambda^2 \cos \alpha}.$$

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{\Lambda \cos \theta}.$$

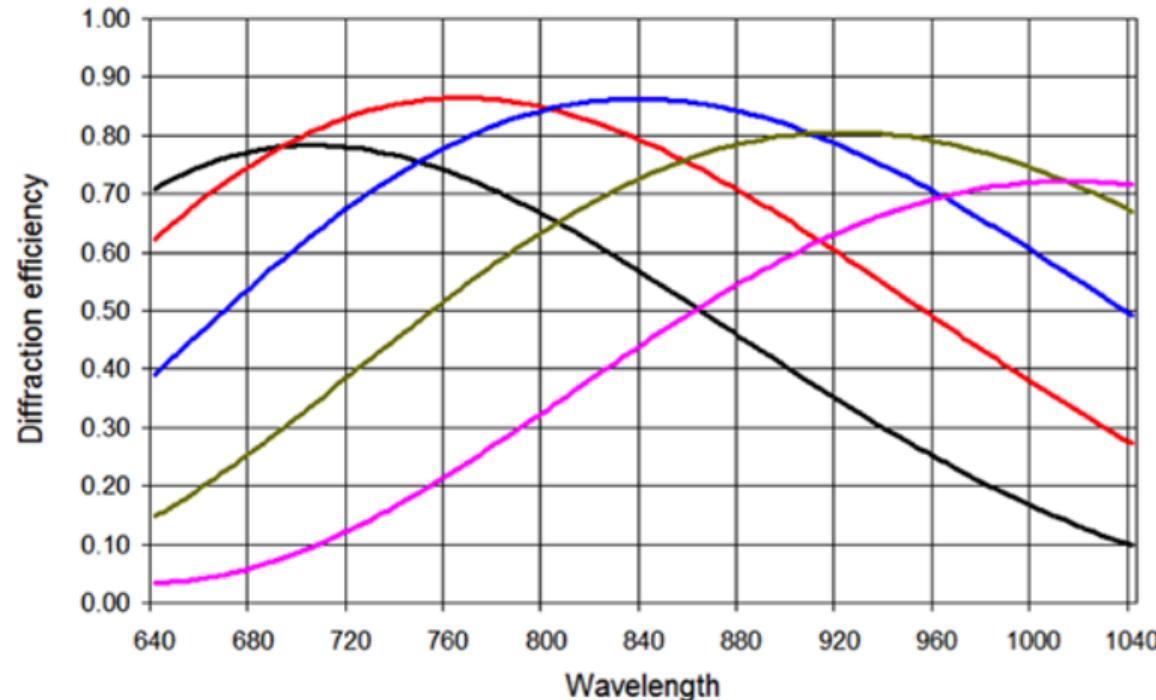
The phase grating is called "thin" for  $Q < 1$  and "thick" for  $Q > 10$ .



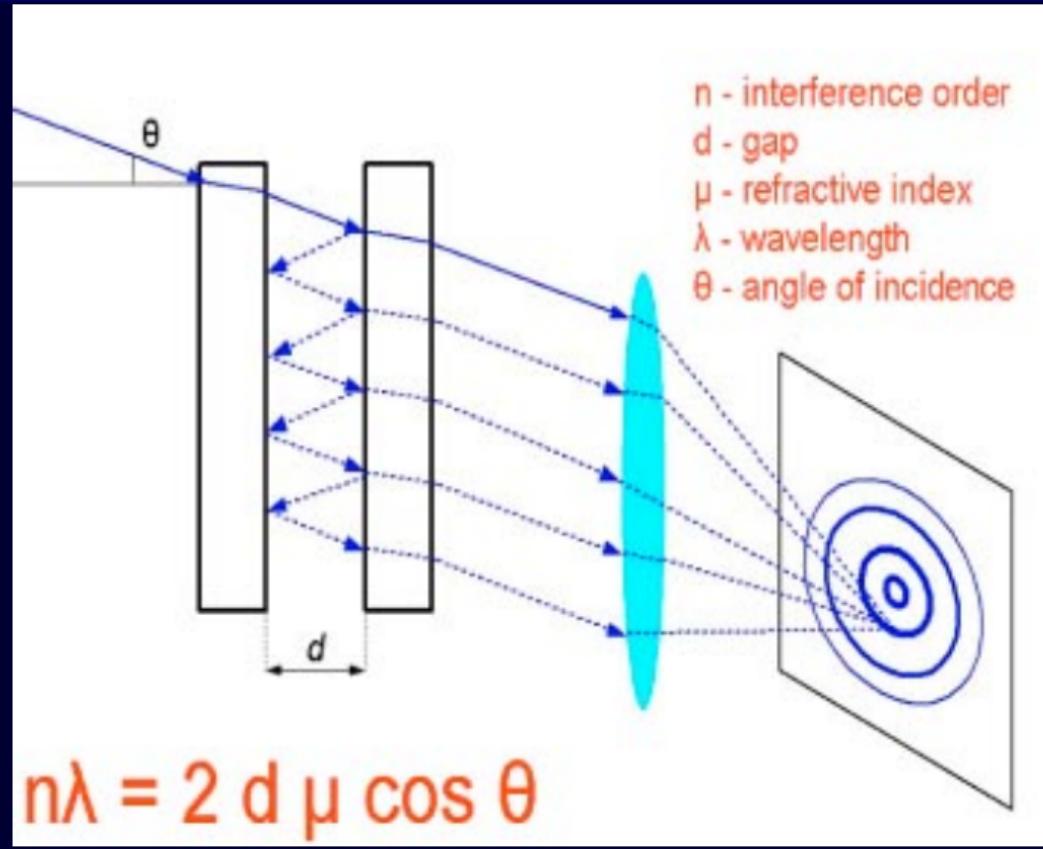


Efficiency versus Wavelength 1200 l/mm 840 nm

— 23 degrees   — 26 degrees  
— 30 degrees   — 34 degrees  
— 39 degrees



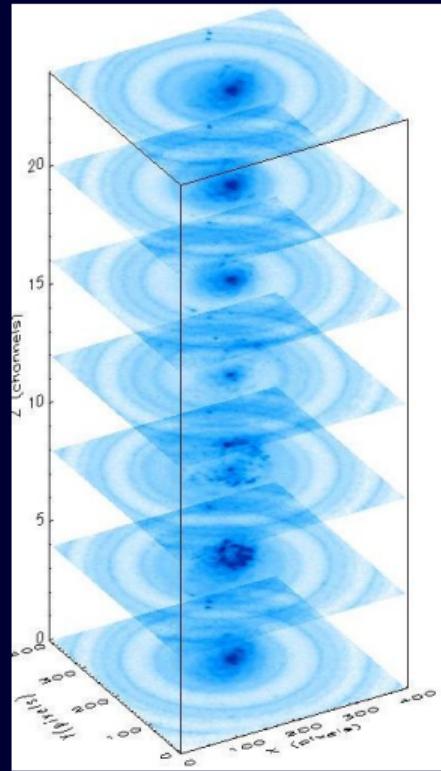
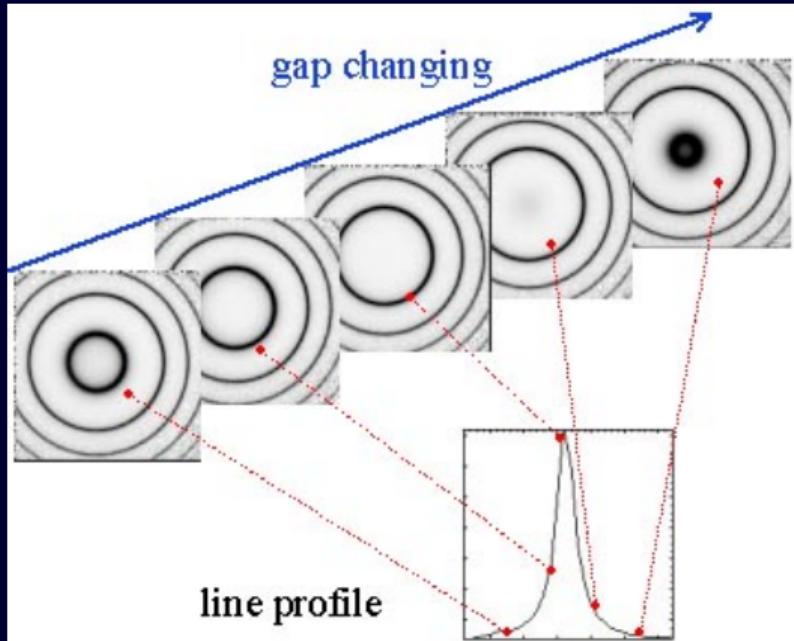
# Интерферометр Фабри–Перо



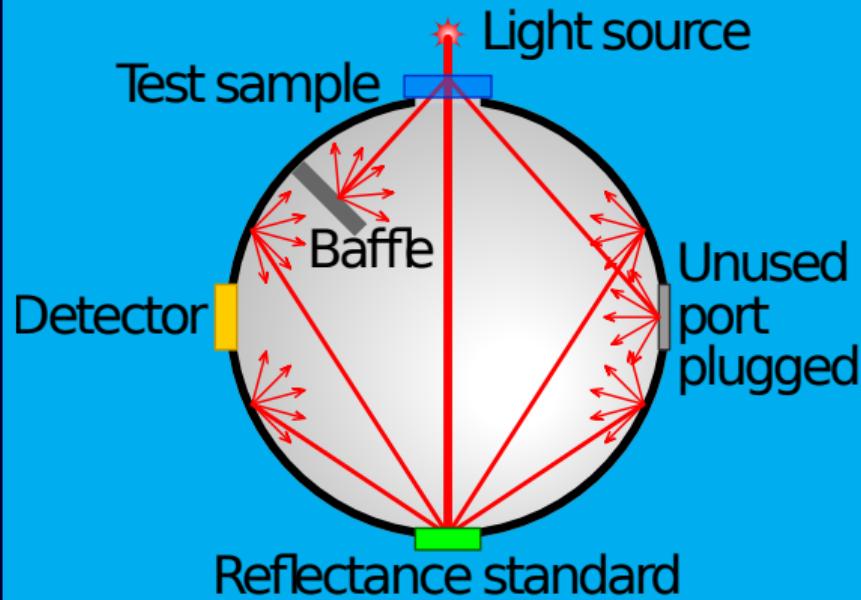
# Интерферометр Фабри–Перо

Кубы данных при сканировании ИФП. А.В. Моисеев<sup>a</sup>.

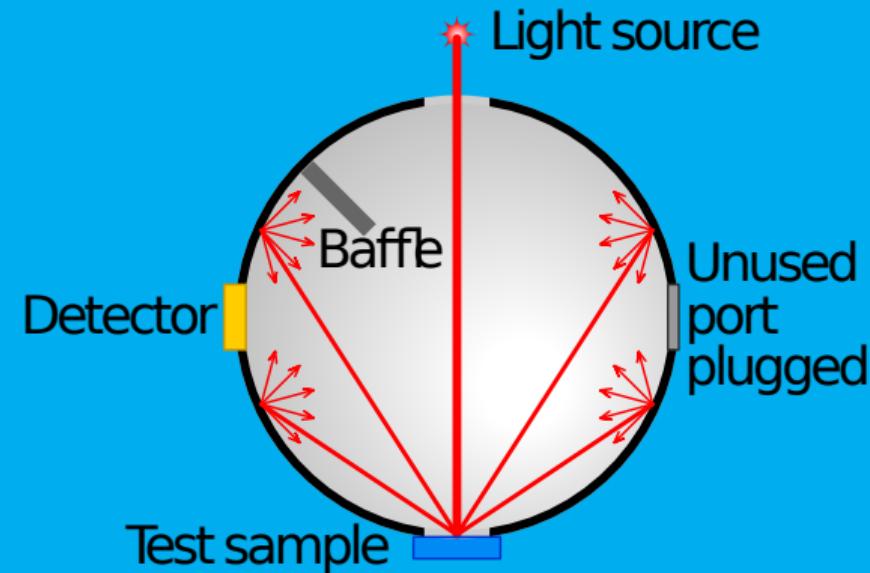
<sup>a</sup><https://www.sao.ru/hq/lsvfvo/devices/scorpio/scorpio.html>



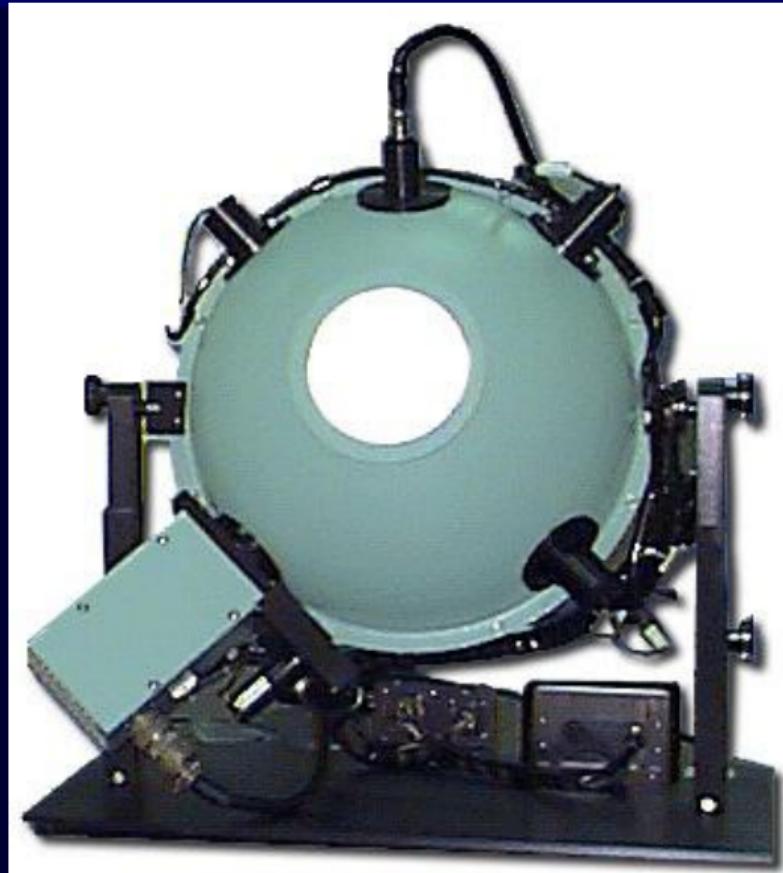
## 1. Measuring transmittance



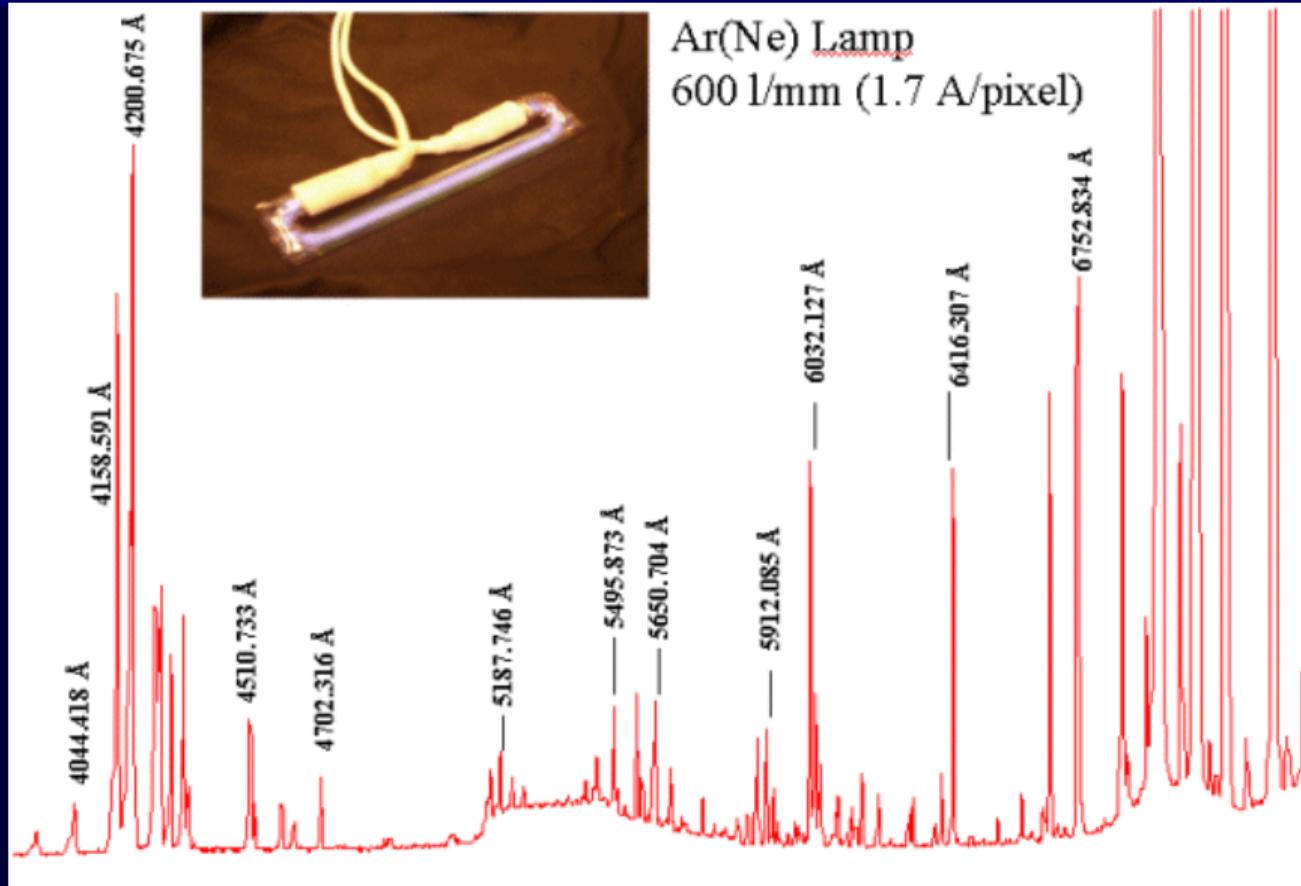
## 2. Measuring reflectance



# Калибровки



# Калибровки



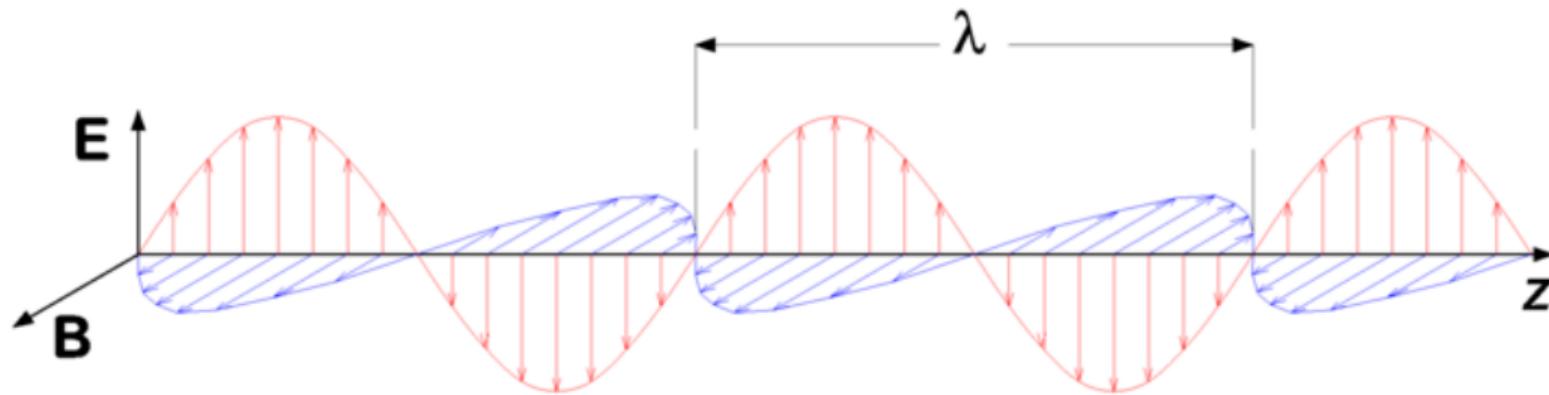
# Калибровки

Th/Ar



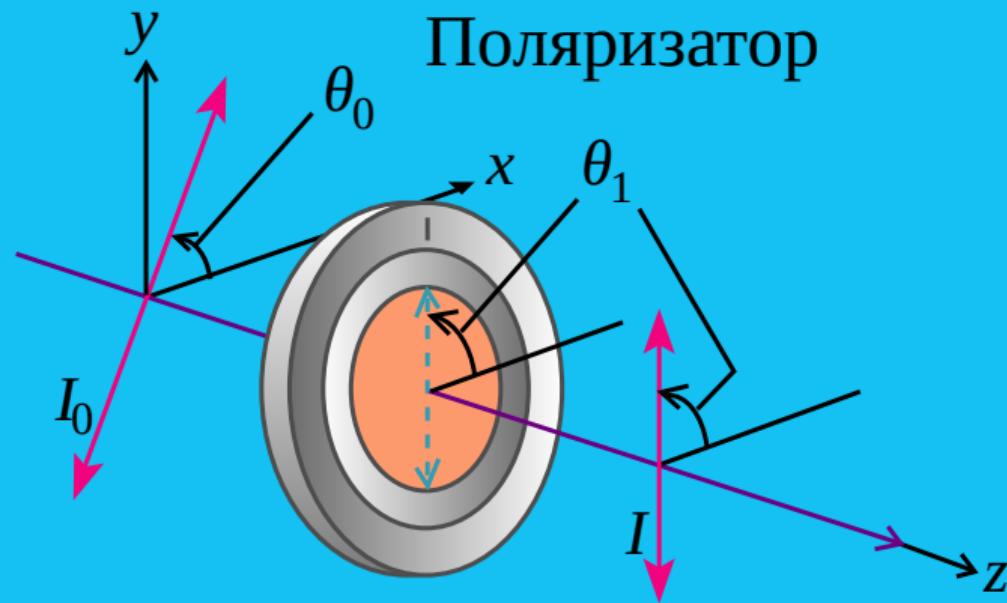
# Поляризация

$I = k_a I_0 \cos^2 \varphi$ . 1810, Этьен Луи Малюс — количественная корпускулярная теория поляризации света. 1821, Френель — волновая теория поляризации.



## Поляризация

$I = k_a I_0 \cos^2 \varphi$ . 1810, Этьен Луи Малюс — количественная корпускулярная теория поляризации света. 1821, Френель — волновая теория поляризации.



# Параметры Стокса

$$S_0 = I = E_a^2 + E_b^2$$

$$S_1 = Q = I \cos 2\psi \cos 2\chi$$

$$S_2 = U = I \sin 2\psi \cos 2\chi$$

$$S_3 = V = I \sin 2\chi$$

$E_a, E_b$  – большая и малая полуоси поляризационного эллипса,  $\psi$  – угол поворота поляризационного эллипса относительно произвольной лабораторной системы координат,  $\chi$  – вспомогательный угол, определяемый из условия  $\operatorname{tg} \chi = E_a/E_b$ .

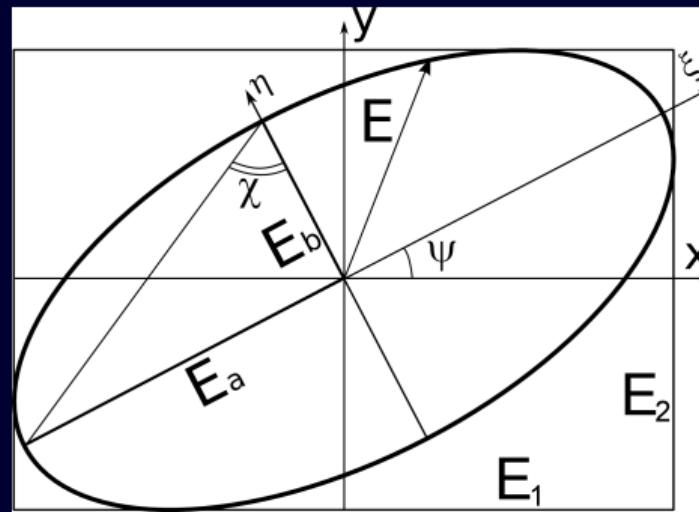
Три независимых параметра:  $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ .  
Пусть  $E_1$  и  $E_2$  – ортогональные проекции  $\vec{E}$ ,  $\delta$  – разность фаз в проекциях. Тогда:

$$S_0 = I = E_1^2 + E_2^2$$

$$S_1 = Q = E_1^2 - E_2^2$$

$$S_2 = U = 2E_1 E_2 \cos \delta$$

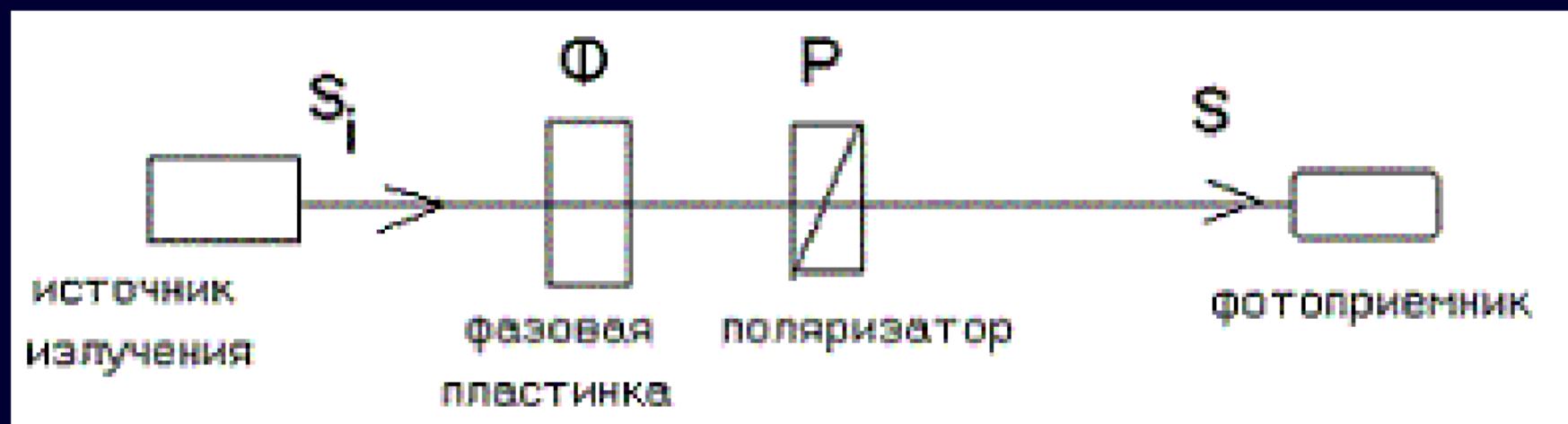
$$S_3 = V = 2E_1 E_2 \sin \delta$$



# Параметры Стокса

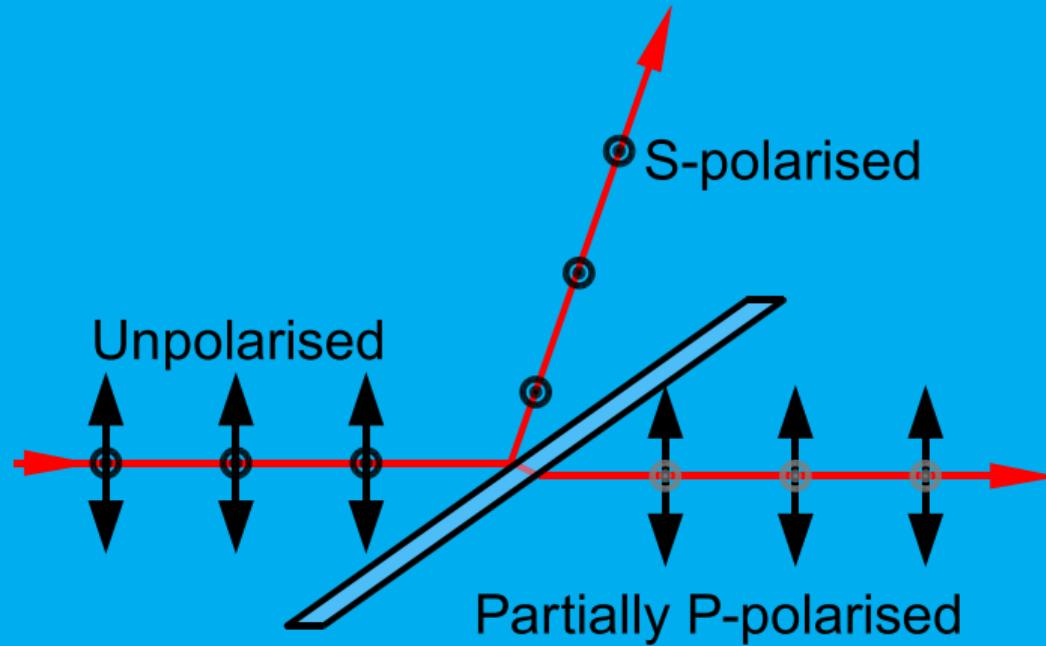
Вращаем поляризатор на 0, 60 и 120 градусов, вычисляем параметры Стокса.

Две волны, линейно поляризованные под прямым углом друг к другу, не интерферируют!

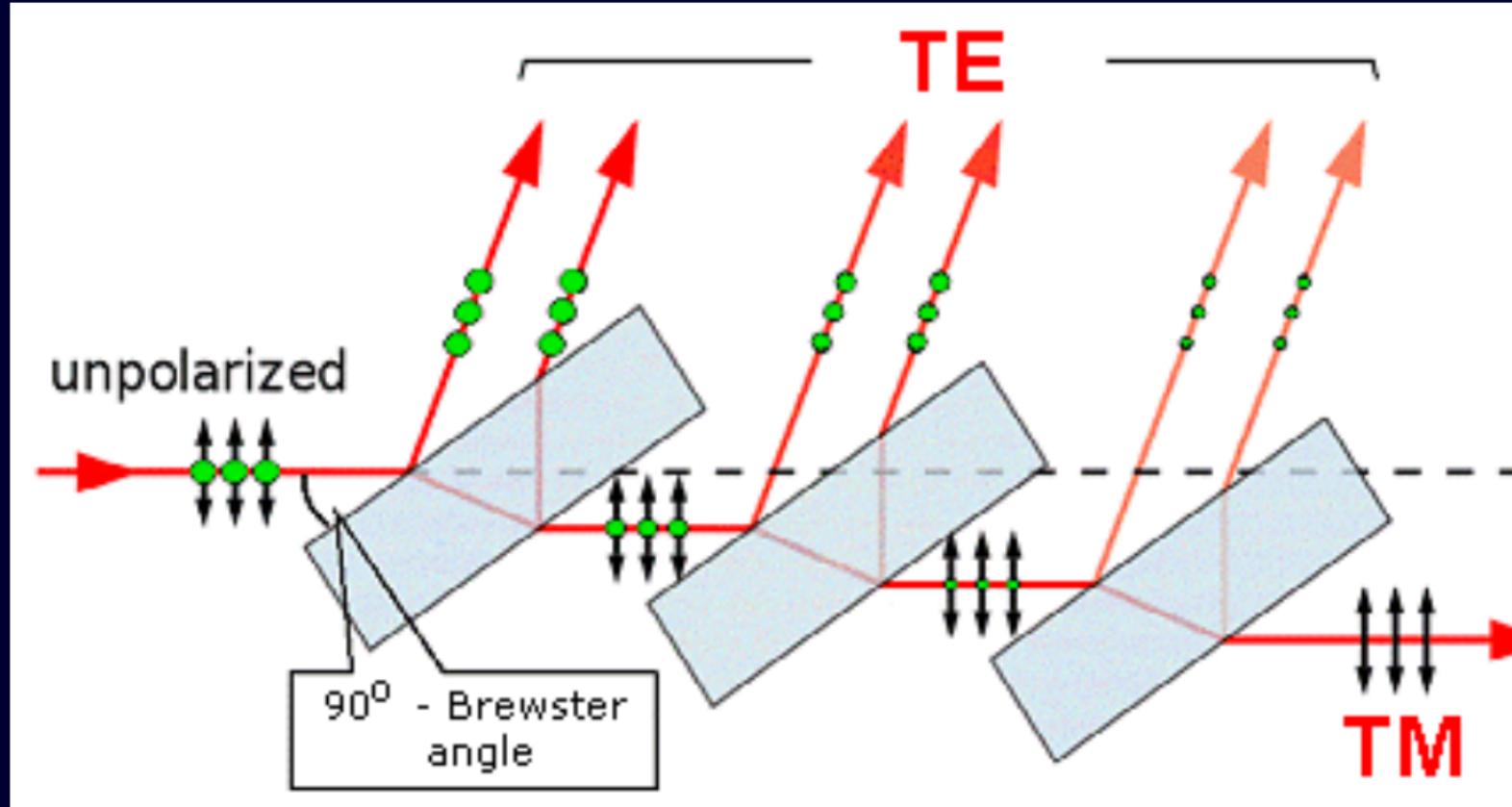


# Угол Брюстера

$$\operatorname{tg} \theta_B = n, \quad \text{угол падения } \theta_B$$

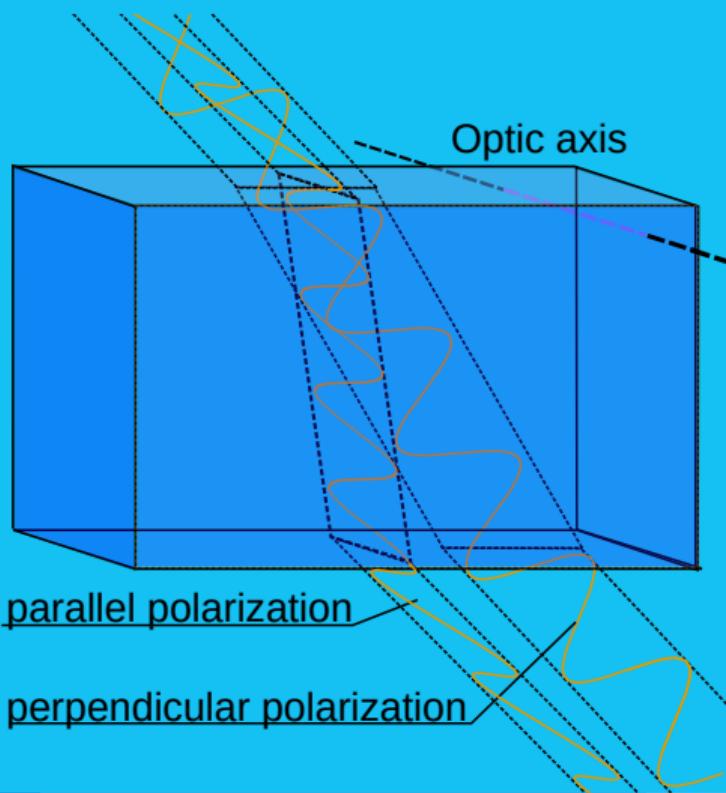


## Угол Брюстера

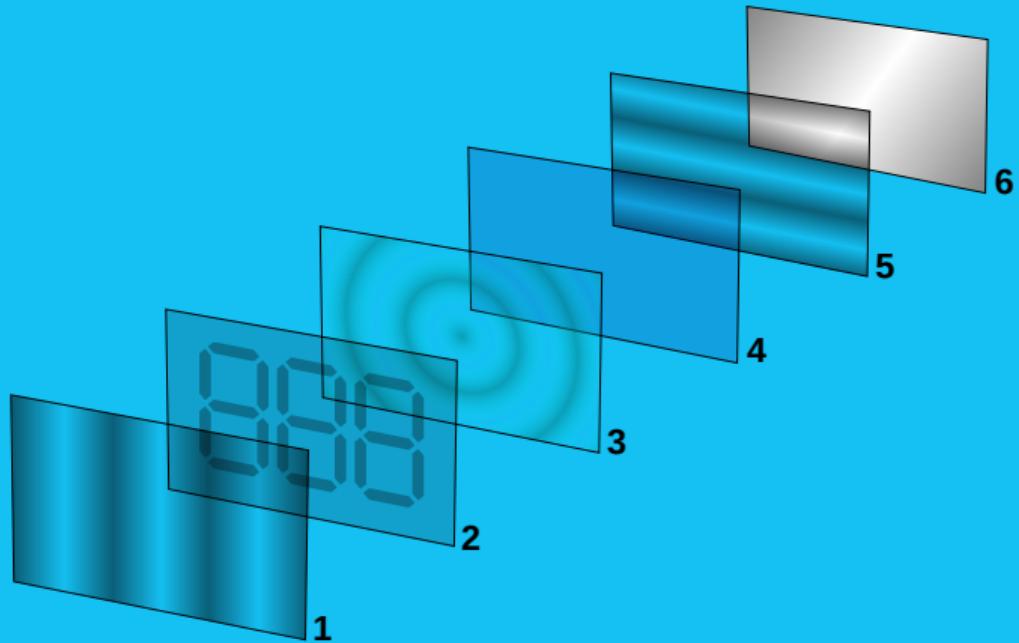


# Двойное лучепреломление

1969, Расмус Бартолин, кристалл исландского шпата.  $\Delta n = n_e - n_o$ .

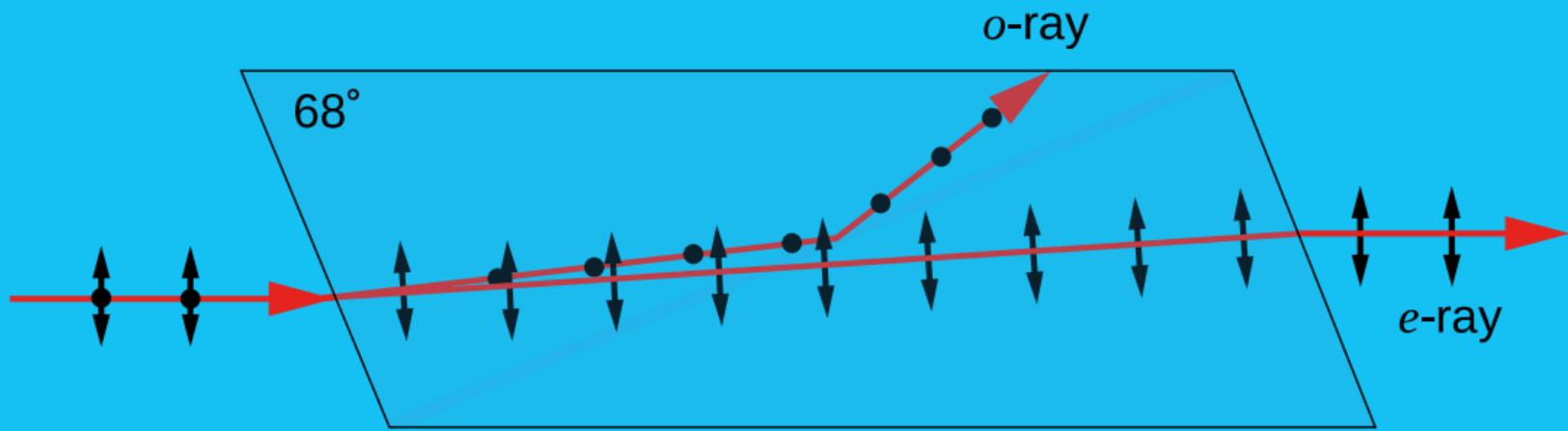


## Двойное лучепреломление



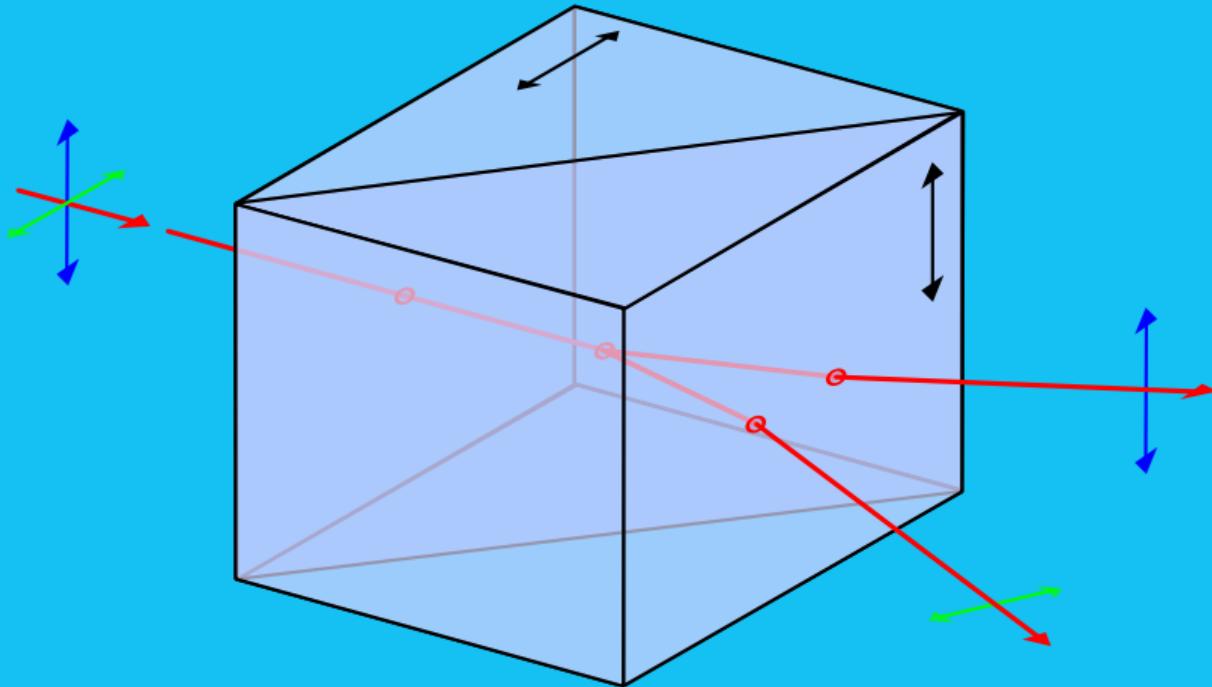
- 1,5 – поляризаторы,
- 2,4 – прозрачные электроды,
- 3 – ЖК (оптически активное вещество),
- 6 – отражатель или подсветка.

# Двойное лучепреломление



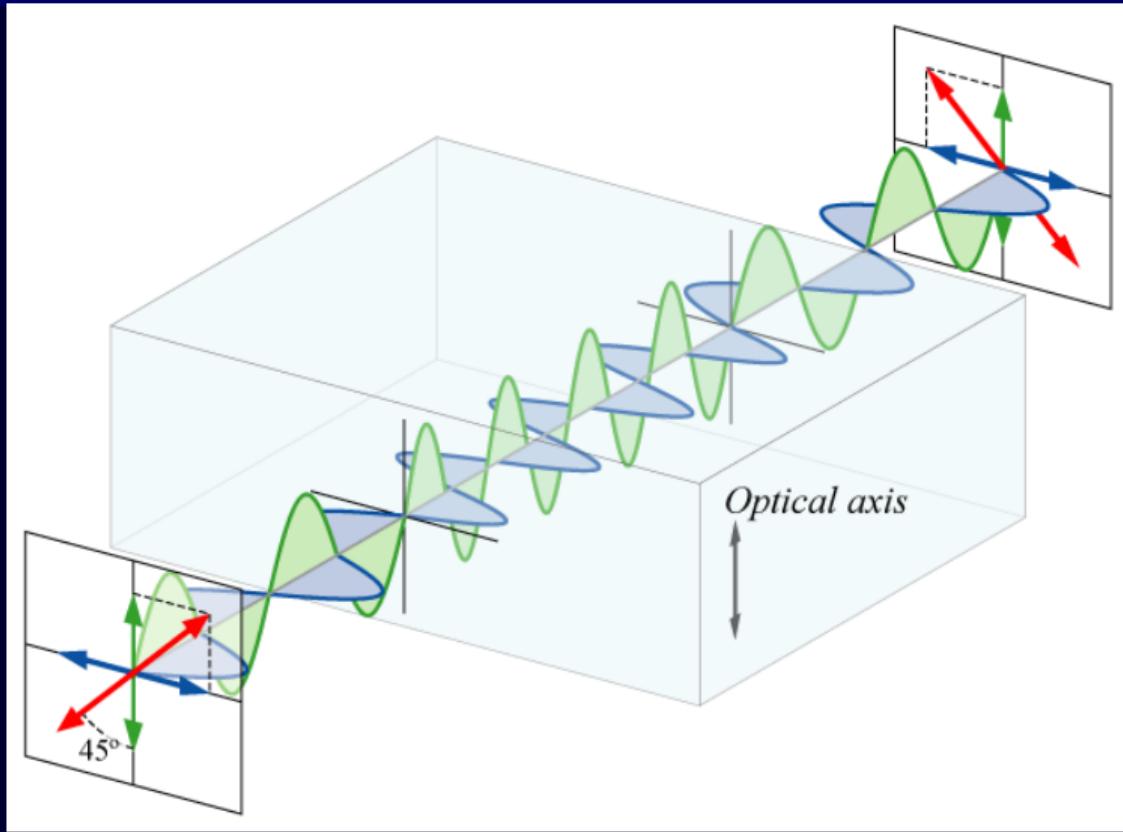
Призма Николя

# Двойное лучепреломление



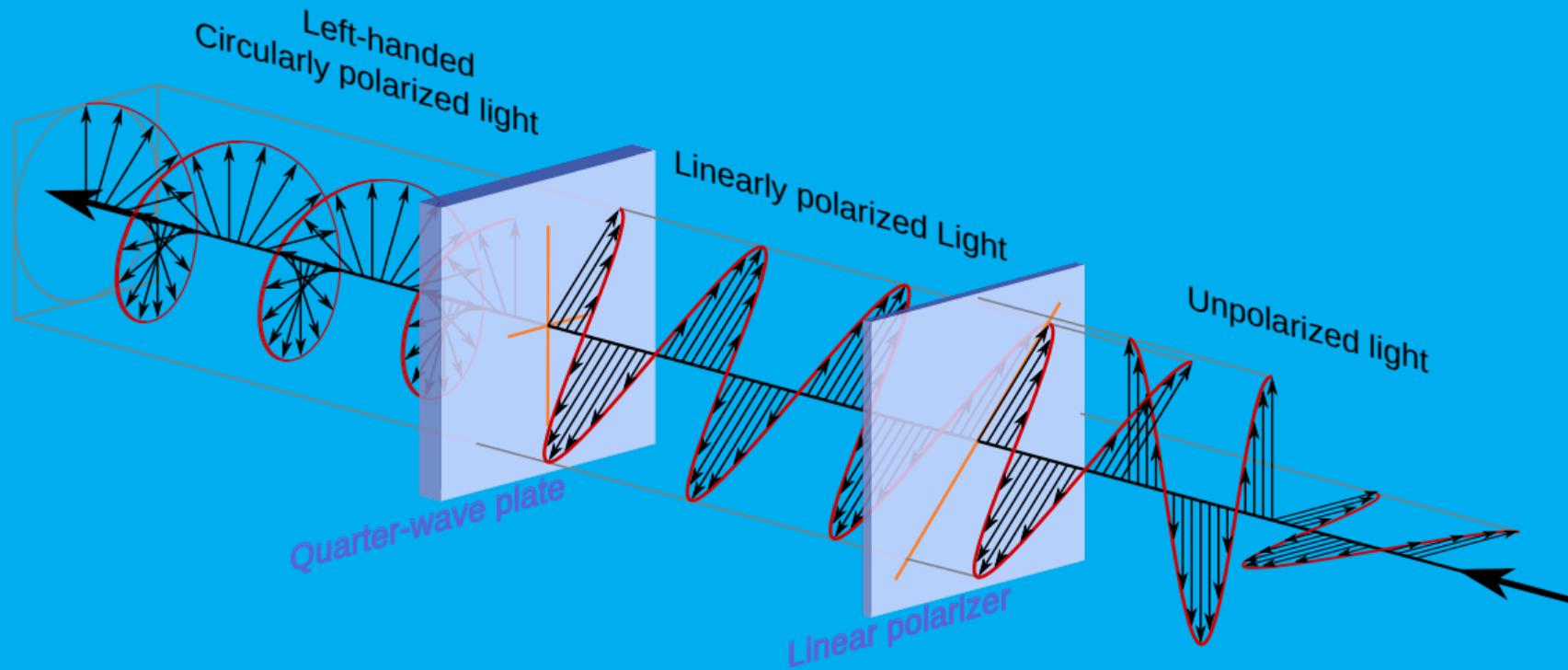
Призма Волластона

# Волновые пластиинки



Половиновая пластиинка

# Волновые пластиинки



Четвертьволновая пластиинка

# Поляризация в астрофизике

Когерентные источники (гидроксильные или метаноловые мазеры).

Рассеяние на межзвездной пыли.

Вращение плоскости поляризации в магнитных полях (эффект Фарадея).

Поляризация СМВ — изучение физики ранней Вселенной.

Поляризация синхротронного излучения.

Возможно, астрономические источники повлияли на селекцию хиральности белков и прочих органических молекул на Земле.

# Астрофизика

**Астрофизика** — раздел астрономии, тесно переплетенный с химией и физикой. «It seeks to ascertain the nature of the heavenly bodies, rather than their positions or motions in space — what they are, rather than where they are» (1897, Джеймс Килер).

Основоположники — Вильям Хайд Волластон и Йозеф фон Фраунгофер.

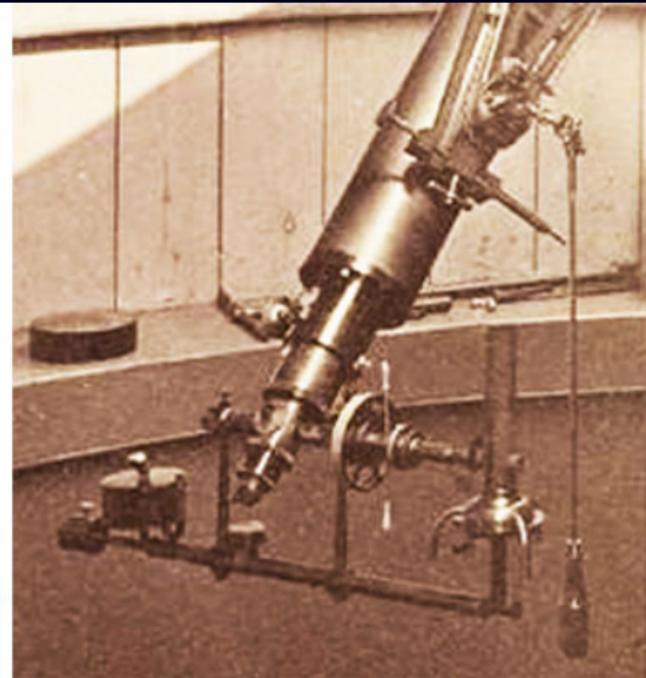
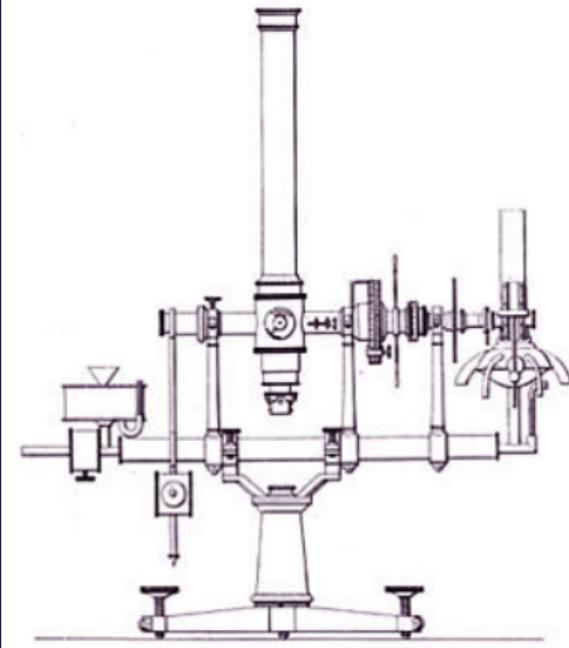
Сам термин «астрофизика» предложен Иоганном Карлом Фридрихом Цёлльнером (известен по точной фотометрии) в 1865 г.

Астрофизика делится на наблюдательную и теоретическую, находящиеся в тесной взаимосвязи.

# Фотометрия

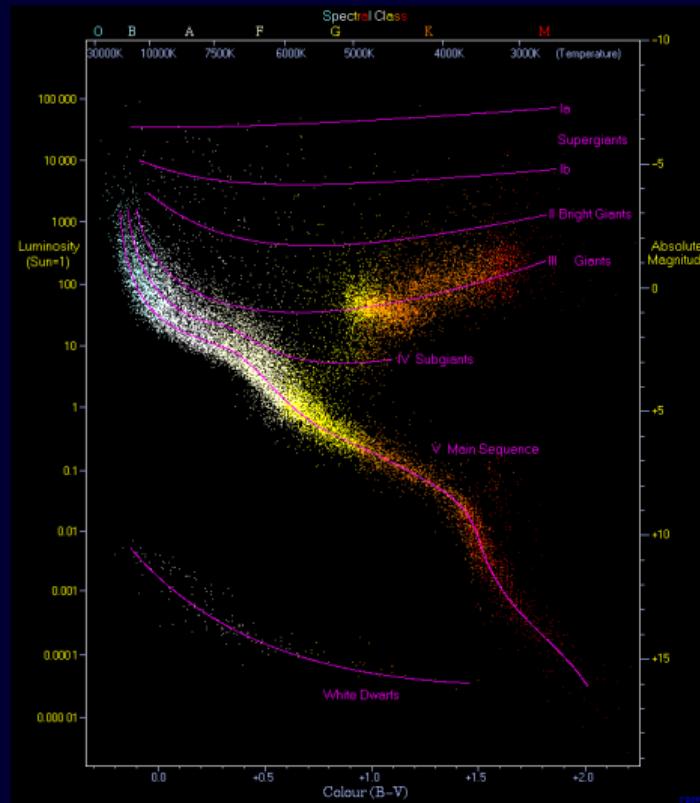
## Фотометр Цёлльнера

1861 г. — первый фотометр с эталонным источником. Газовая горелка, призмы Волластона, плоскопараллельная пластинка.



# Область применения фотометрии

- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.



# Область применения фотометрии

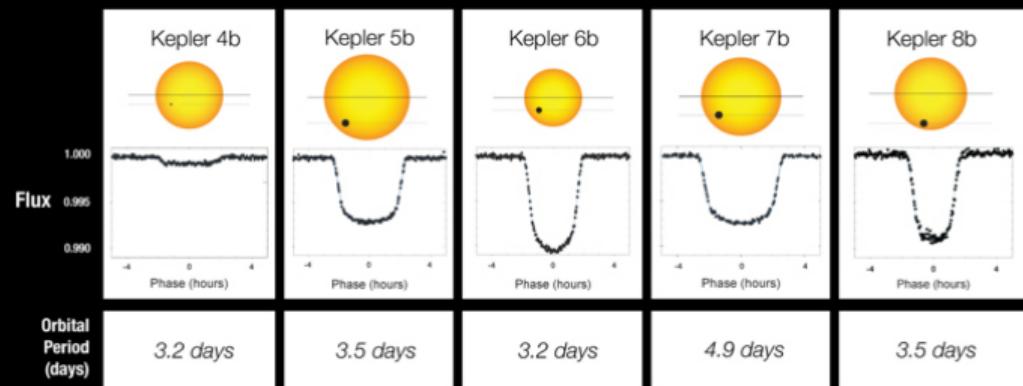
- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.



# Область применения фотометрии

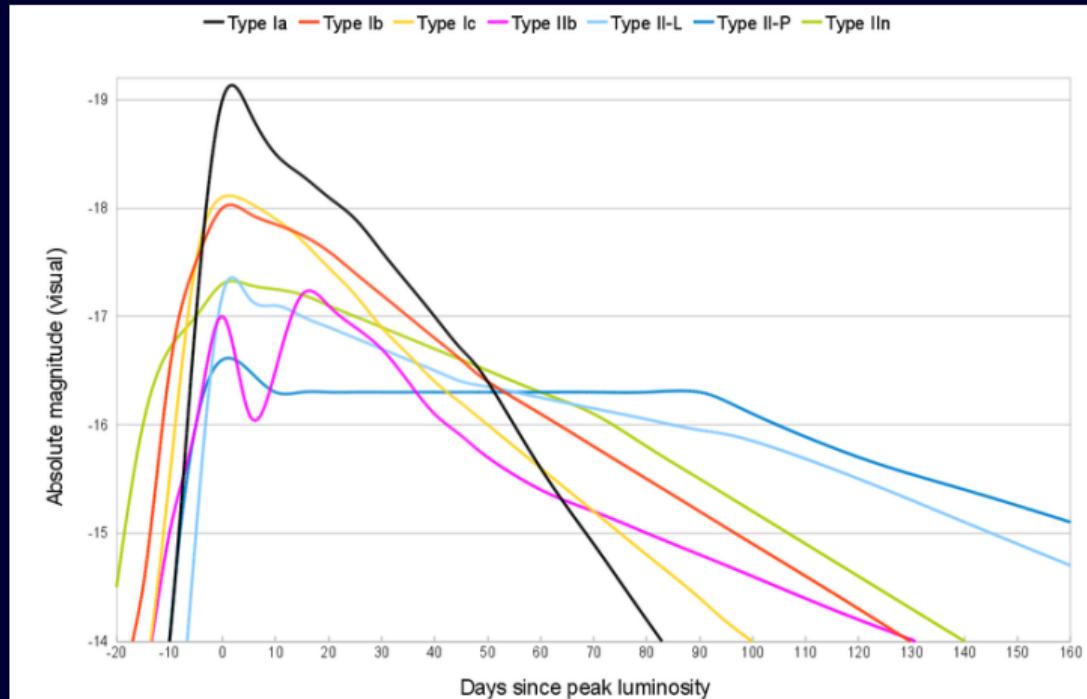
- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.

## Transit Light Curves

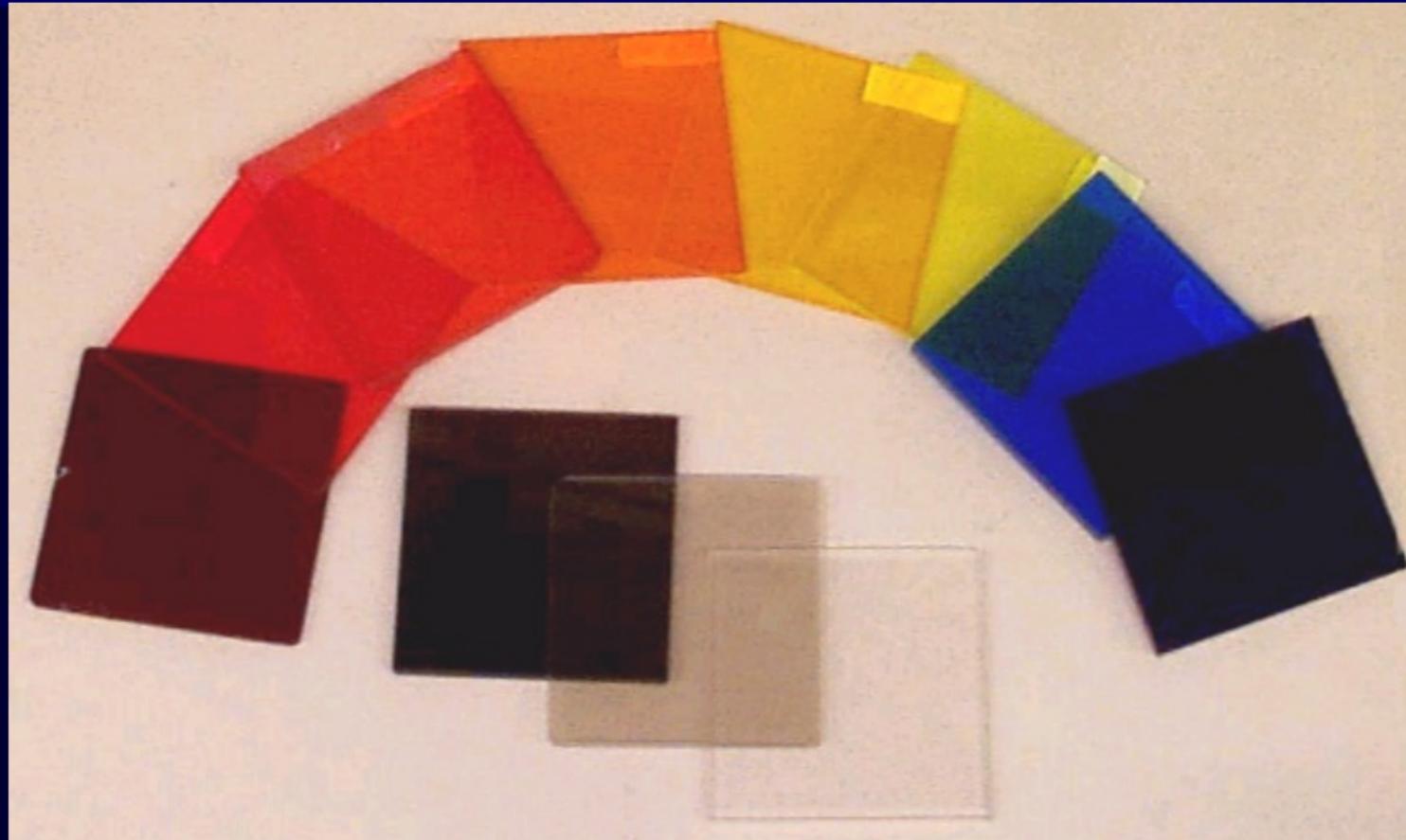


# Область применения фотометрии

- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.

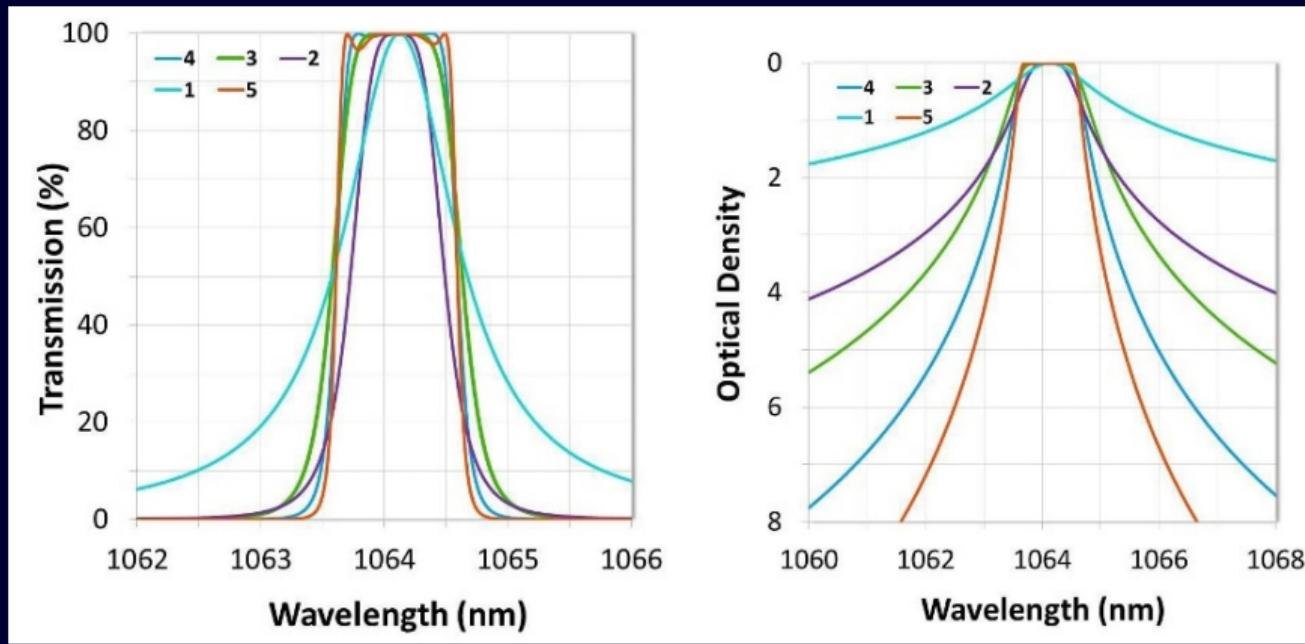


## Фотометрические диапазоны

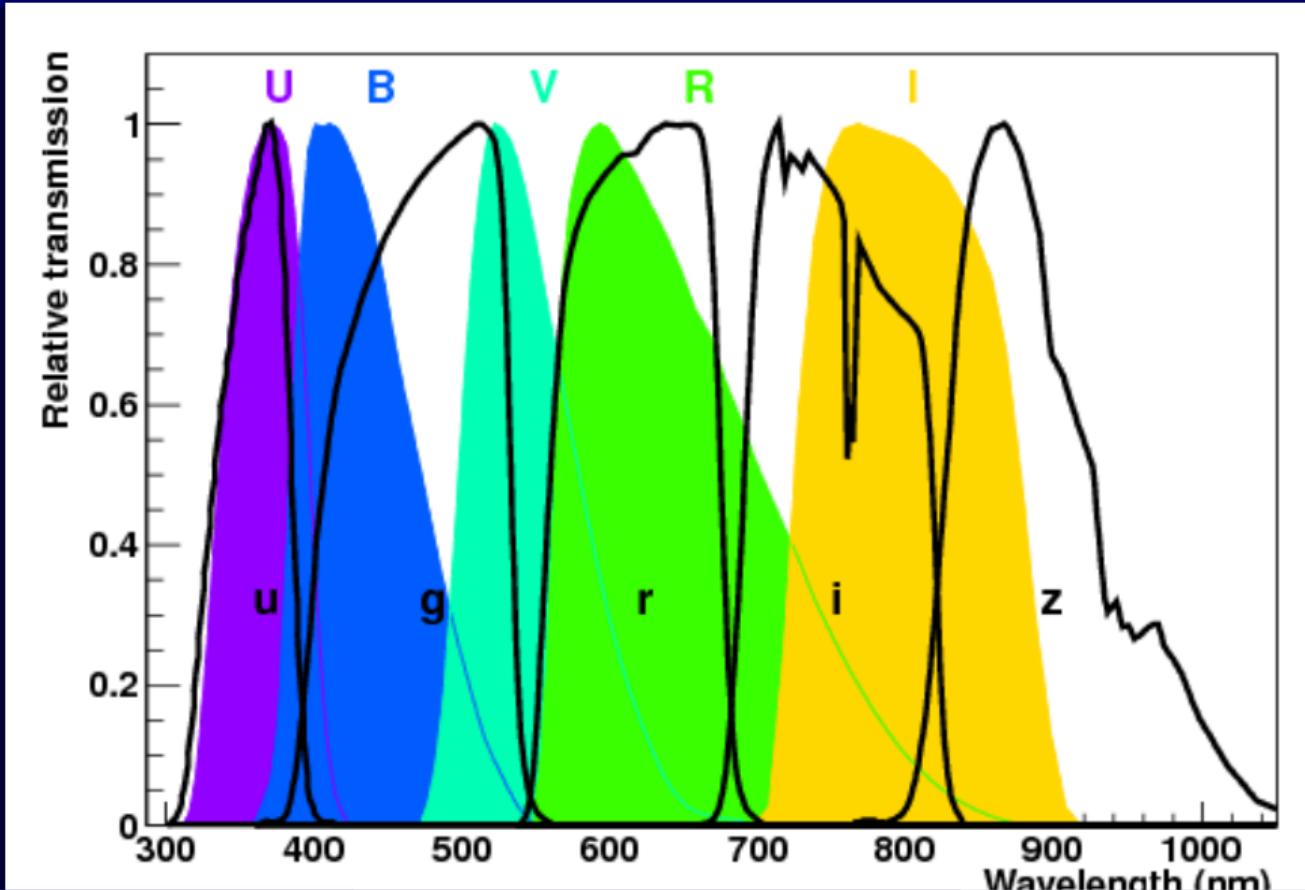


# Фотометрические диапазоны

Стрёмгрен, 1960-е гг.: широкополосные; среднеполосные и узкополосные фотометрические системы. Критерий — полуширина: широкополосные  $> 300\text{\AA}$ , узкополосные  $< 100\text{\AA}$ .

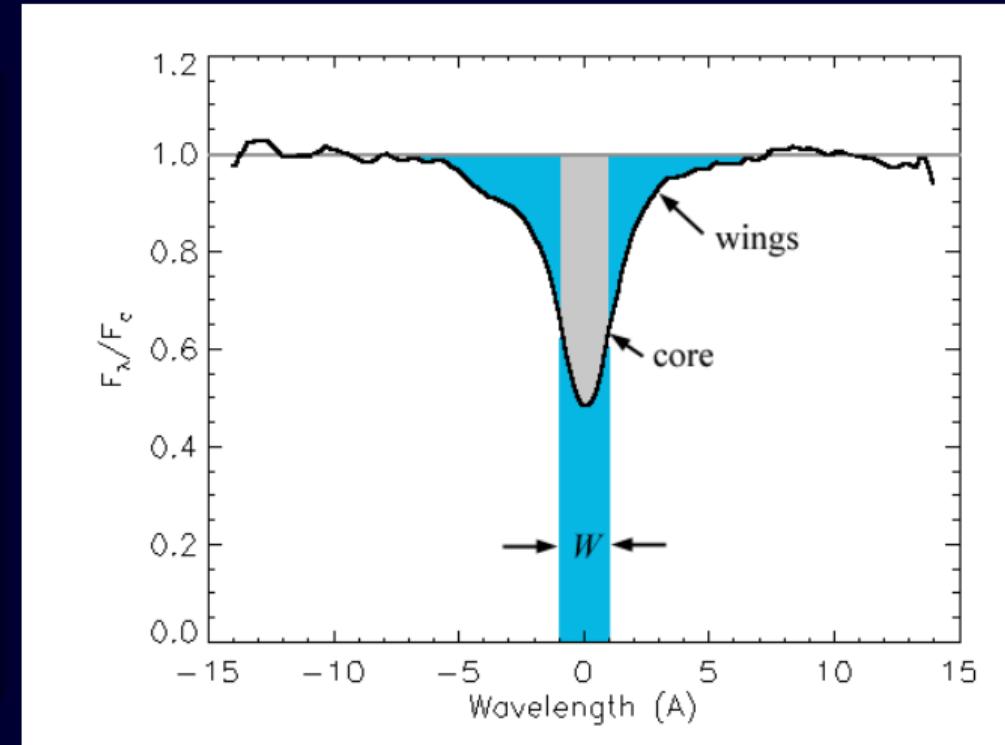


# Фотометрические диапазоны



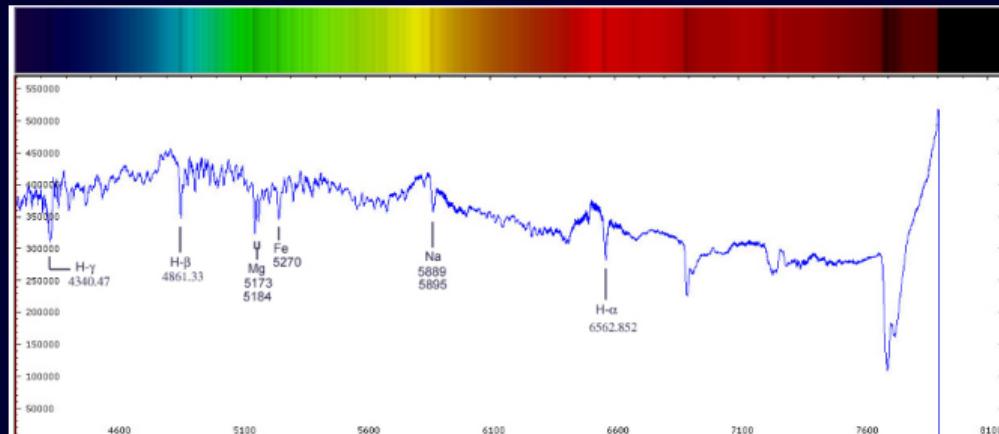
# Область применения спектроскопии

- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери массы и многие другие параметры.
- Спектрополяриметрия.
- Определение химического состава звезд.
- Строгая спектральная классификация.
- Определение скорости движения объектов.
- Космология.



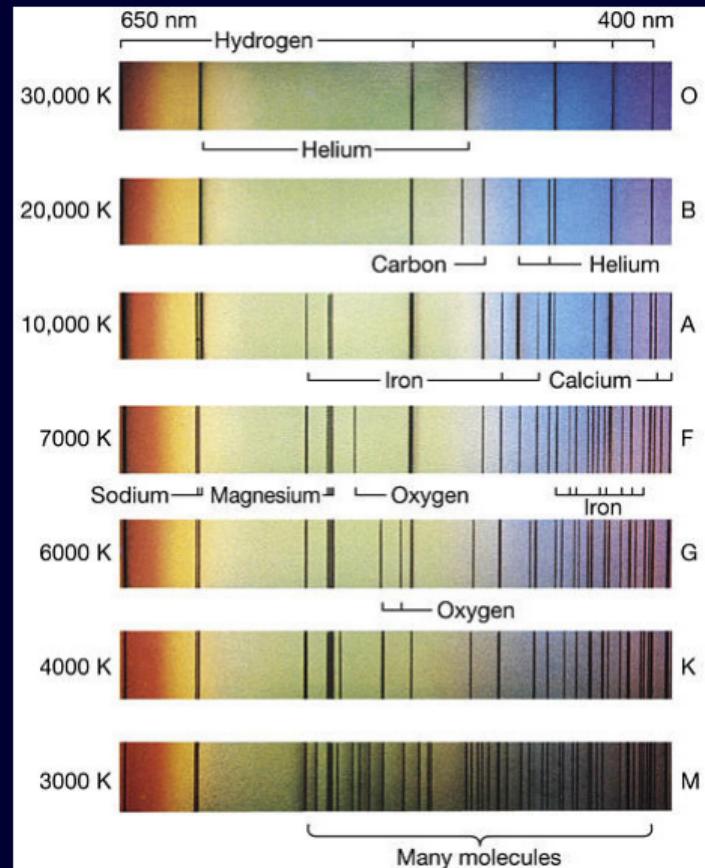
## Область применения спектроскопии

- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери масс и многие другие параметры.
  - Спектрополяриметрия.
  - Определение химического состава звезд.
  - Строгая спектральная классификация.
  - Определение скорости движения объектов.
  - Космология.



# Область применения спектроскопии

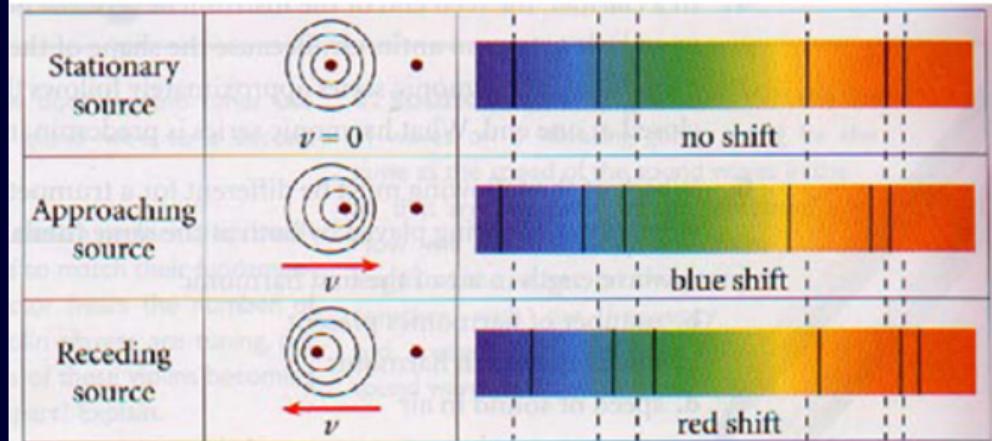
- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери массы и многие другие параметры.
- Спектрополяриметрия.
- Определение химического состава звезд.
- Строгая спектральная классификация.
- Определение скорости движения объектов.
- Космология.



# Область применения спектроскопии

- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери массы и многие другие параметры.
- Спектрополяриметрия.
- Определение химического состава звезд.
- Строгая спектральная классификация.
- Определение скорости движения объектов.
- Космология.

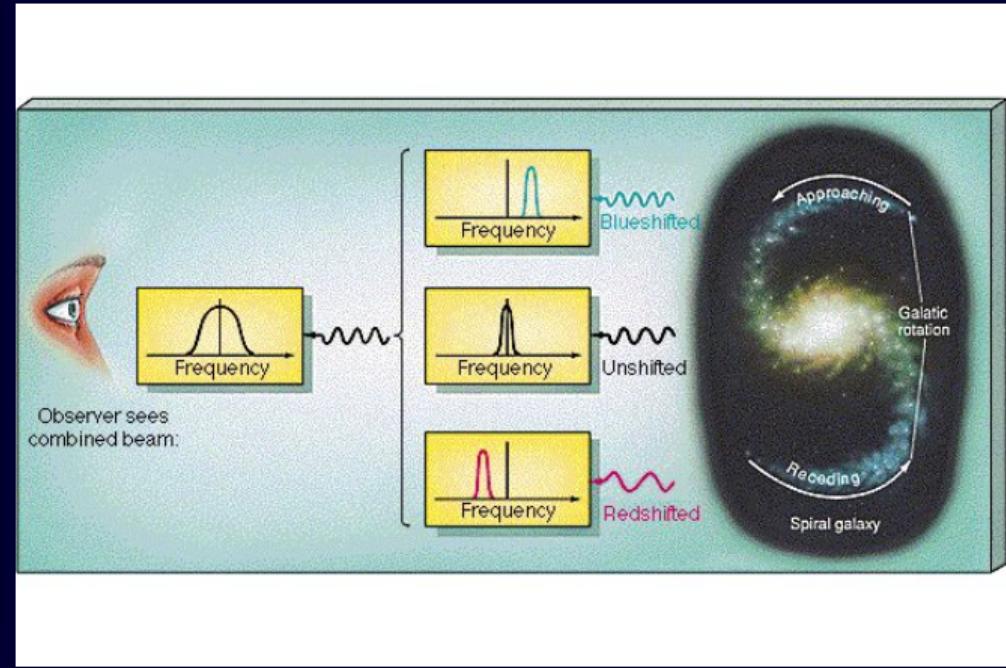
## Doppler Effect



Measuring the relative velocities of stars by the Doppler shift.

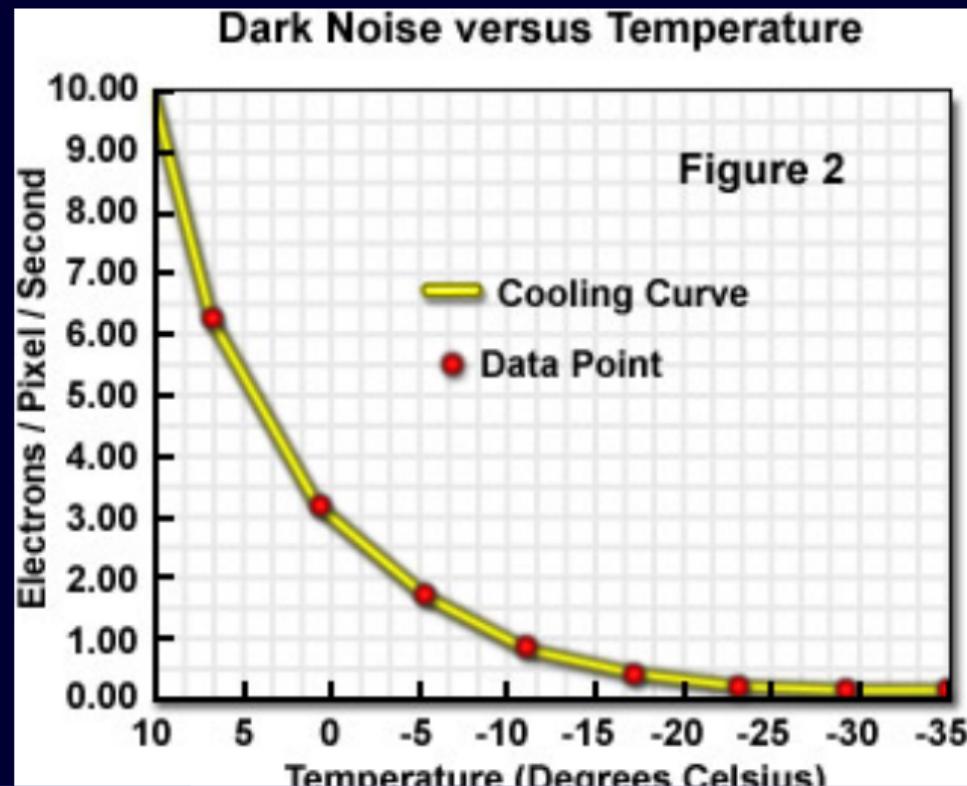
# Область применения спектроскопии

- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери массы и многие другие параметры.
- Спектрополяриметрия.
- Определение химического состава звезд.
- Строгая спектральная классификация.
- Определение скорости движения объектов.
- Космология.



# Учет шумов детекторов

Глубокое охлаждение для снижения темнового тока.



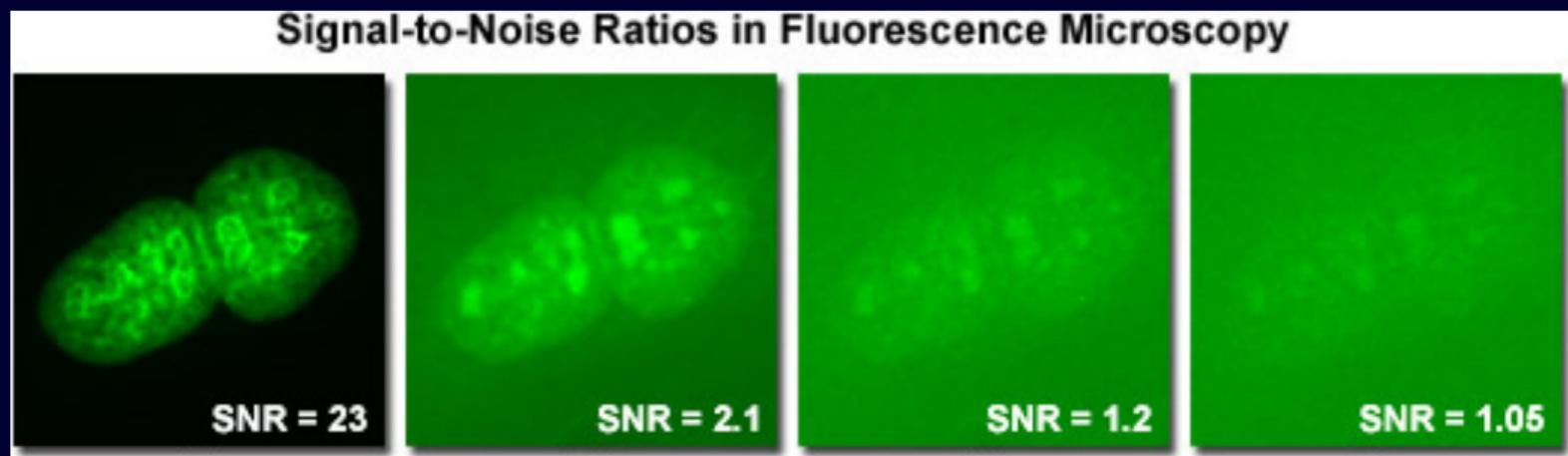
# Учет шумов детекторов

Попиксельная неоднородность, виньетирование, пыль — калибровка на «плоское поле».

**Дробовой шум**  $N_s = \sqrt{S}$  наиболее существенен при малых интенсивностях, либо увеличить экспозицию, либо суммировать кадры. Шум считывания (суммировать кадры).

$$SNR = PQ_e t / \sqrt{(P + B)Q_e t + Dt + N_R^2}$$

$P$  — поток (фотонов на пиксель в секунду),  $Q_e$  — квантовая эффективность,  $t$  — время экспозиции,  $B$  — фон,  $D$  — темновой ток,  $N_r$  — шум считывания.



# Учет шумов детекторов

Шум сброса  $N_{reset} = \sqrt{kTC}/q$ ,  $T$  – температура (К),  $C$  – емкость ячейки ( $\Phi$ ),  $q$  – накопленный заряд (Кл).

Белый шум  $N_{white} = \sqrt{4kT\nu R_{out}} \cdot A_{amp}/S_{amp}$ ,  $\nu$  – частота считывания (Гц),  $R_{out}$  – выходное сопротивление усилителя (Ом),  $S$  – чувствительность усилителя (В/электрон),  $A$  – коэффициент усиления.

Темновой ток:  $D = 2.5 \cdot 10^{15} S I_d T^{1.5} \exp -E_g/(2kT)$ ,  $S$  – площадь пикселя ( $\text{см}^2$ ),  $I_d$  – измеренный на 300 К темновой ток ( $\text{nA}/\text{см}^2$ ),  $E_g$  – ширина запрещенной зоны (эВ).

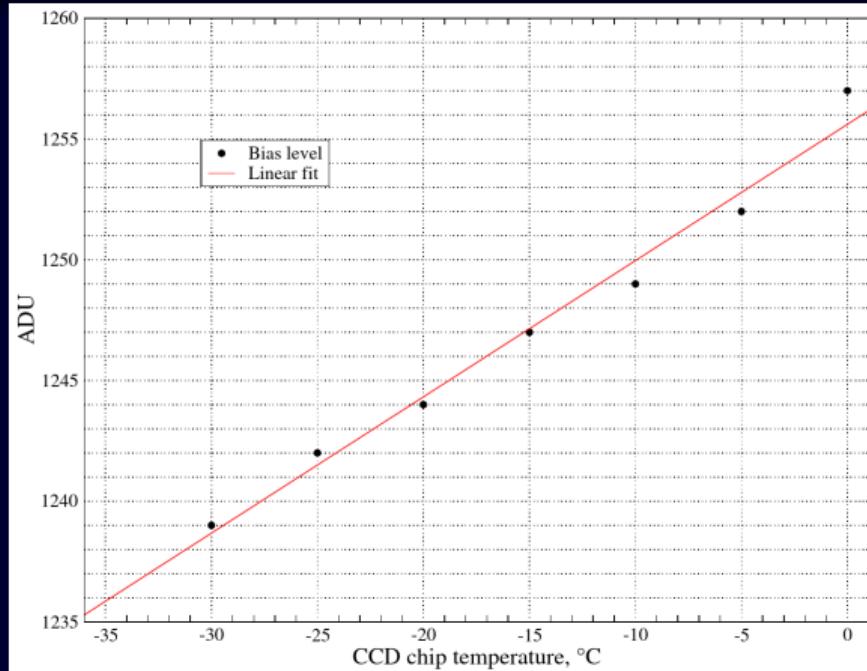
# Конвейер обработки данных

- 1 Получение снимка объекта ( $O$ ) и нескольких bias, dark и flat ( $b_i, d_i, f_i$ ).
- 2 Медианное усреднение:  $X = \text{med}(x) \Rightarrow B, D, F$ .
- 3 Если экспозиции  $D$  и  $O$  различаются, получаем «master dark»:  $D_m = (D - B)/t_{exp}$ .
- 4 Удаление шумов:  $O_{clean} = O - D$ ,  $F_{clean} = F - D$  (или  $X - B - D_m \cdot t_{exp}$ ).
- 5 Нормирование  $F_{clean}$ :  $F_{norm} = F_{clean}/F_{clean,max}$ .
- 6 Коррекция на «плоское поле»:  $O_{corr} = O_{clean}/F_{clean}$ .

Для спектрофотометрии после экстракции спектра необходимо также выполнить нормировку на «плоский спектр».

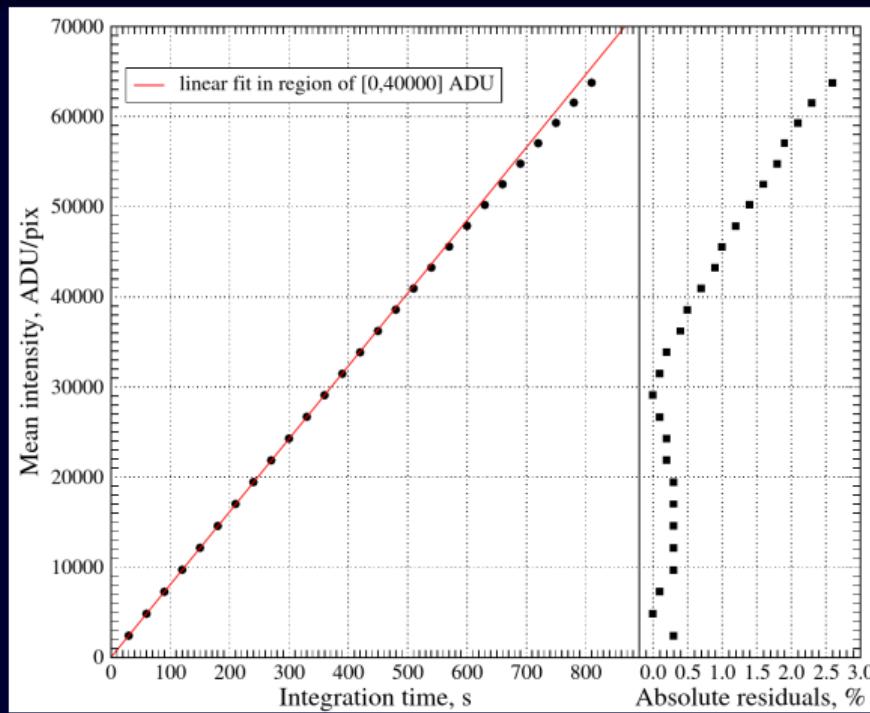
# Определение характеристик новой ПЗС

**Электронный ноль (bias).** Снимки bias позволяют определить уровень шума считываания (RON). Для уменьшения влияния дефектов, используем разности:  $I_{diff} = I_1 - I_2$ . Тогда  $\sigma RON = \sigma I / \sqrt{2}$ .



# Определение характеристик новой ПЗС

Линейность получается из линейной аппроксимации зависимости  $I = \alpha t$  при получении «плоских» снимков с разной экспозицией.



# Определение характеристик новой ПЗС

Коэффициент усиления (gain) определяет, сколько ADU будет получено на один фотоэлектрон. Строим зависимость  $\sigma_I^2(\bar{I})$  (дисперсия интенсивности в кадре от ее среднего значения). Однако, дефекты ПЗС внесут неточность, надежней вычислять разности изображений.

Пусть  $I$  и  $\sigma^2$  – средний сигнал в пикселе (после вычитания «темновых») и его дисперсия,  $R^2$ ,  $\sigma_{ph}^2$  и  $\sigma_{ff}^2 = kI$  – дисперсии шумов считываания, дробового (фотонного) шума и неоднородность чувствительности пикселей ПЗС. Тогда общий шум:

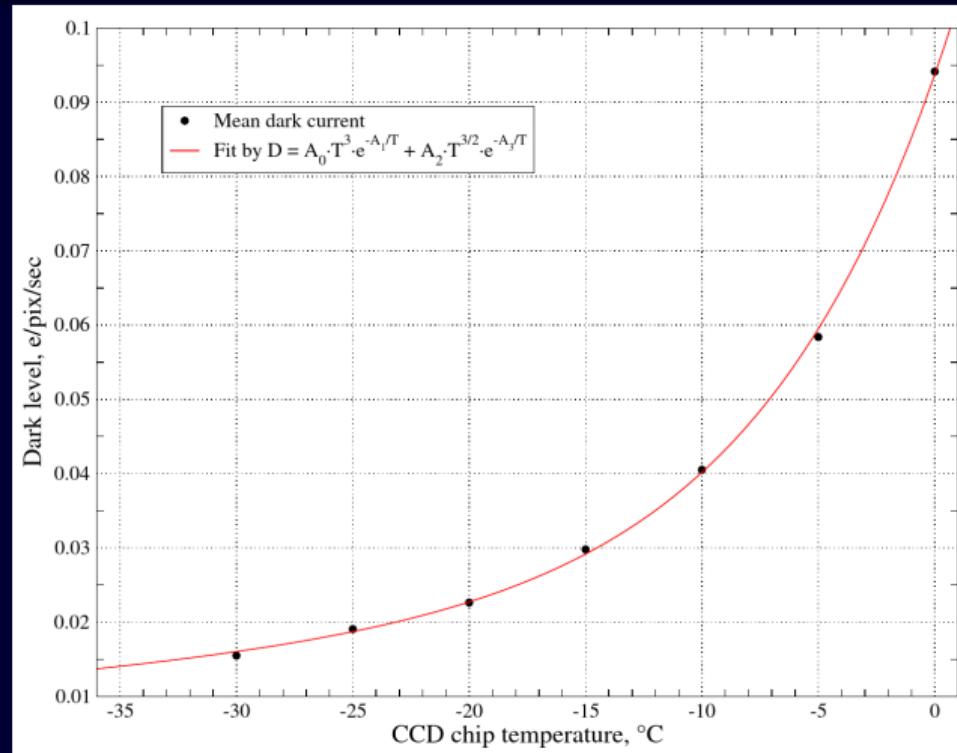
$$\sigma^2 = R^2 + \sigma_{ph}^2 + \sigma_{ff}^2 = R^2 + I + k^2 I^2.$$

$$\sigma^2/g^2 = R^2/g^2 + I/g + k^2 I^2/g^2 \quad \text{или} \quad \sigma^2 = R^2 + gI + k^2 I^2.$$

Для разности изображений «исправленный шум»  $\sigma^2 = \frac{\sum I_{diff}^2}{2(N-1)}$ . Все вычисления проводим в нескольких участках изображения (не по всему кадру) для усреднения результатов. Линейная интерполяция зависимости интенсивности от шума дает результирующий  $g$ .

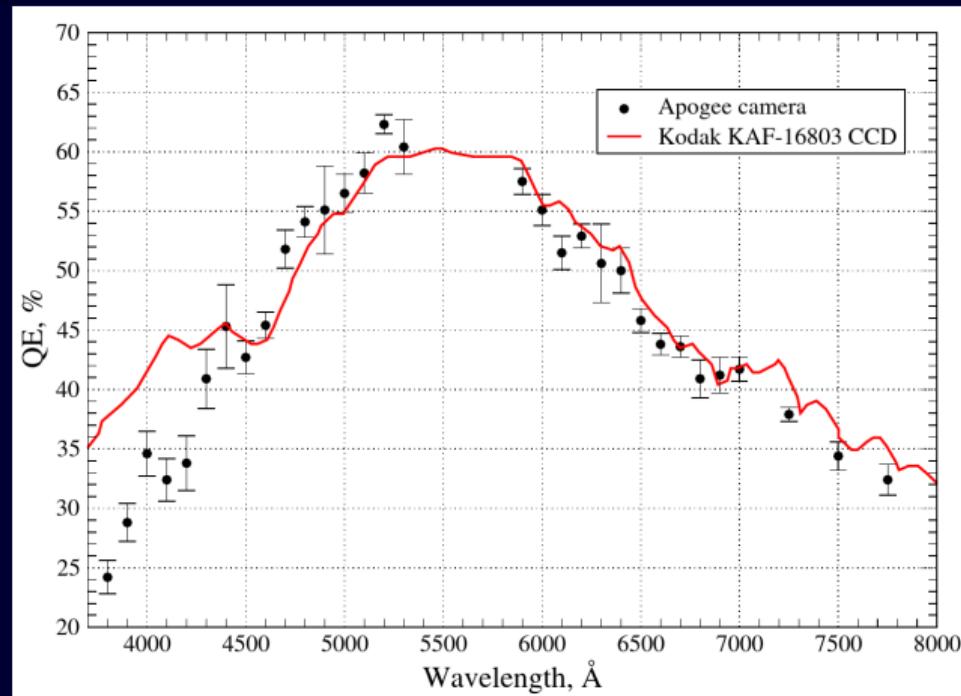
# Определение характеристик новой ПЗС

Темновой ток необходимо исследовать на зависимость от времени экспозиции и температуры.



# Определение характеристик новой ПЗС

**Квантовая эффективность** определяется в лабораторных условиях: монохроматор и калибранный светоприемник.



# Кодирование и хранение информации

## FITS-формат

FITS (англ. Flexible Image Transport System) — цифровой формат файлов, используемый в науке для хранения, передачи и редактирования изображений и их метаданных (электронных таблиц). Метаданные изображения хранятся в удобочитаемом заголовке формата ASCII.

Каждый файл FITS имеет один или несколько заголовков, содержащих ASCII-строки (фиксированной длины в 80 символов) из пар ключ/значение, перемежающихся между блоками данных.

(blank)	CROTA <sub>n</sub>	EQUINOX	NAXIS <sub>n</sub>	TBCOL <sub>n</sub>	TUNIT <sub>n</sub>
AUTHOR	CRPIX <sub>n</sub>	EXTEND	OBJECT	TDIM <sub>n</sub>	TZERO <sub>n</sub>
BITPIX	CRVAL <sub>n</sub>	EXTLEVEL	OBSERVER	TDISP <sub>n</sub>	XTENSION
BLANK	CTYPE <sub>n</sub>	EXTNAME	ORIGIN	TELESCOP	
BLOCKED	DATAMAX	EXTVER	PCOUNT	TFIELDS	
BSCALE	DATAMIN	GCOUNT	PSCAL <sub>n</sub>	TFORM <sub>n</sub>	
BUNIT	DATE	GROUPS	PTYPE <sub>n</sub>	THEAP	
BZERO	DATE-OBS	HISTORY	PZERO <sub>n</sub>	TNULL <sub>n</sub>	
CDELT <sub>n</sub>	END	INSTRUME	REFERENC	TSCAL <sub>n</sub>	
COMMENT	EPOCH	NAXIS	SIMPLE	TTYPE <sub>n</sub>	

# WCS-привязка

## Параметры WCS

**CRVALi** значение мировых координат опорного пикселя

**CRPIXi** координаты опорного пикселя на изображении

**CDELTi** инкремент координат

**CTYPEi** тип матрицы преобразования

**CROTAi** угол поворота систем координат

**PCij** немасштабированная матрица преобразований

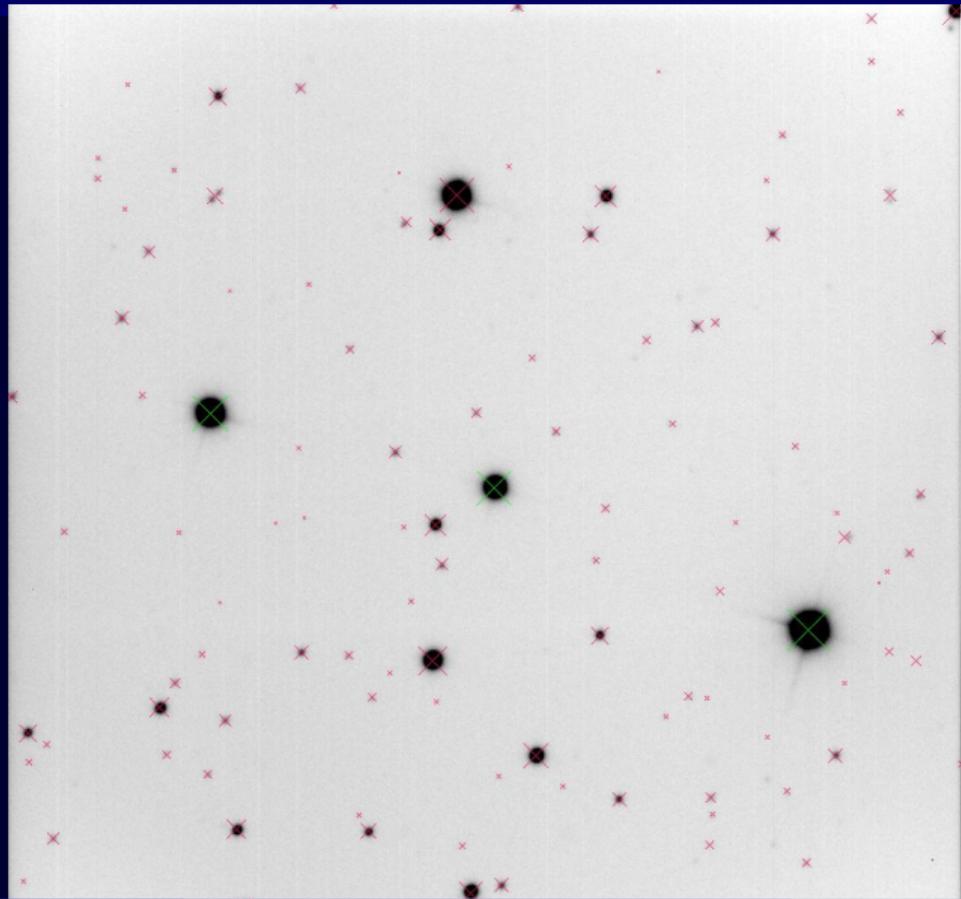
**CDij** PC с масштабом

$$Qi = \sum_{j=1}^N CD_{ij}(x_j - CRPIX_j) = \sum_{j=1}^N CDELT_j \cdot PC_{ij}(x_j - CRPIX_j).$$

## WCS-привязка



# WCS-привязка



# Спасибо за внимание!

mailto

[eddy@sao.ru](mailto:eddy@sao.ru)

[edward.emelianoff@gmail.com](mailto:edward.emelianoff@gmail.com)