

Регистрация излучения и информация, в нем содержащаяся

Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
Лаборатория физики оптических транзиентов

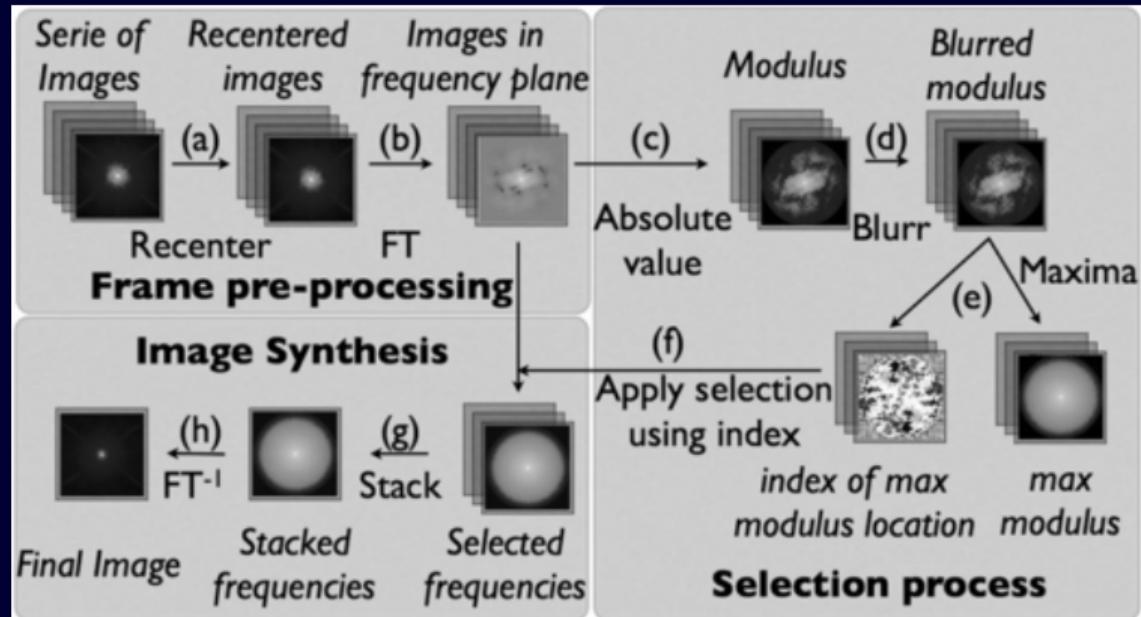
8 апреля 2022 года



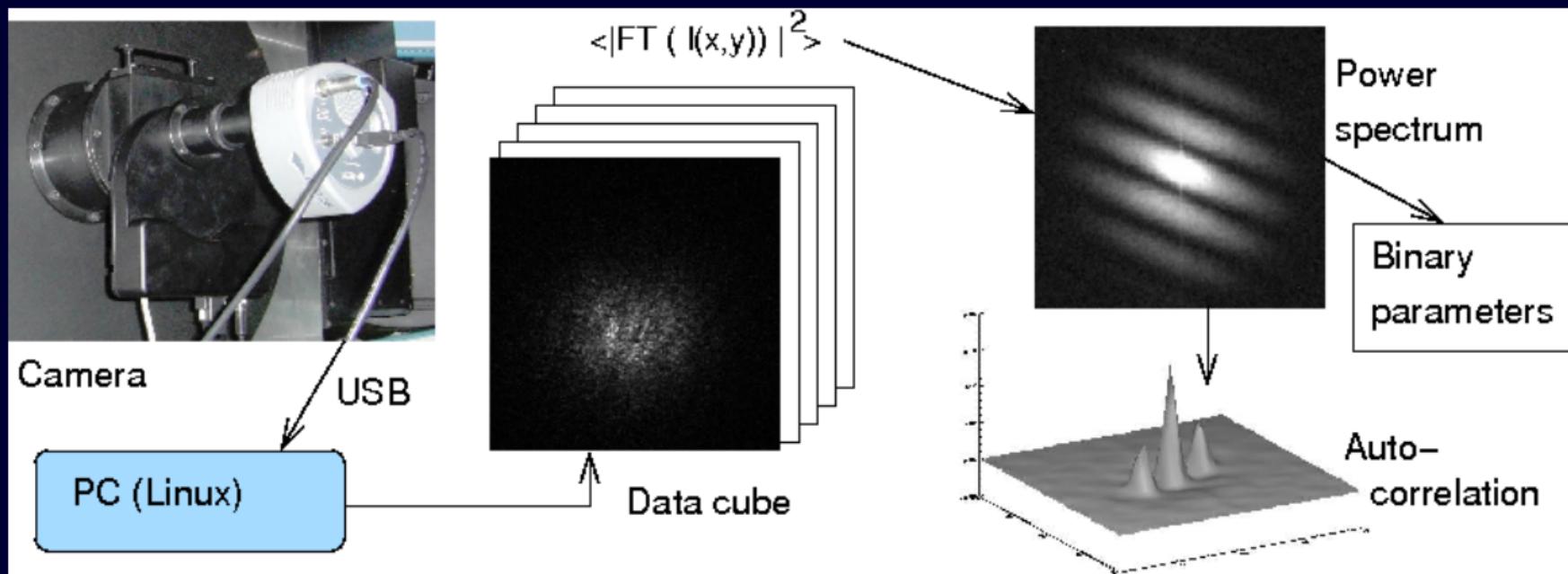
- 1 «Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные
- 2 Диспергирующие системы
- 3 Поляризация и анализаторы поляризации
- 4 Методы астрофизики
- 5 Фотометрия
- 6 Спектроскопия
- 7 Учет шумов детекторов
- 8 Кодирование и хранение информации

«Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные

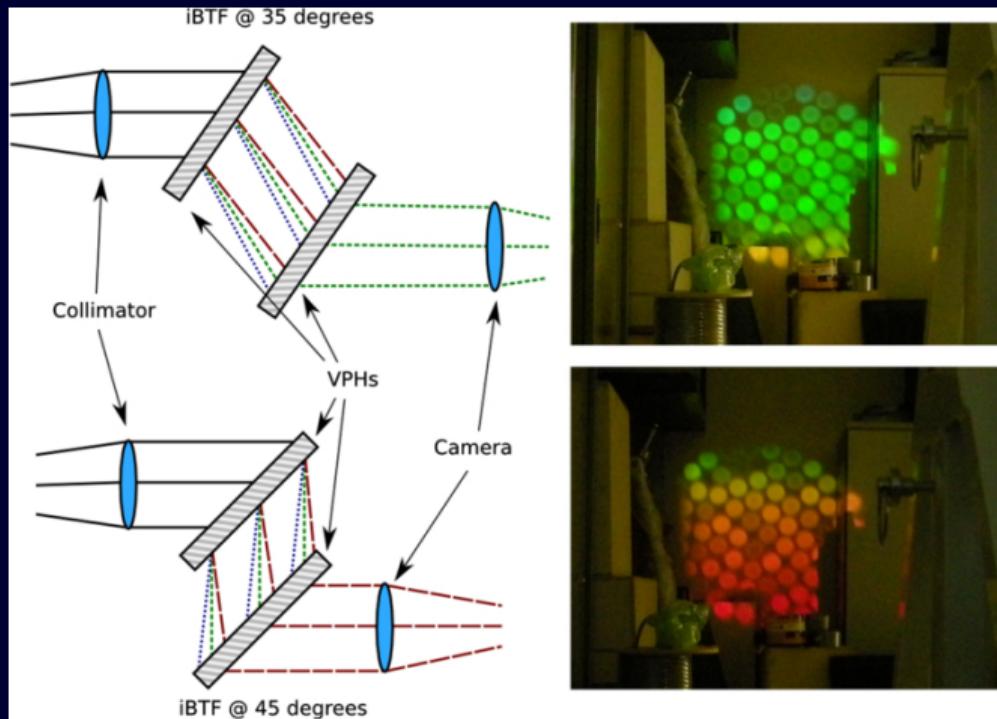
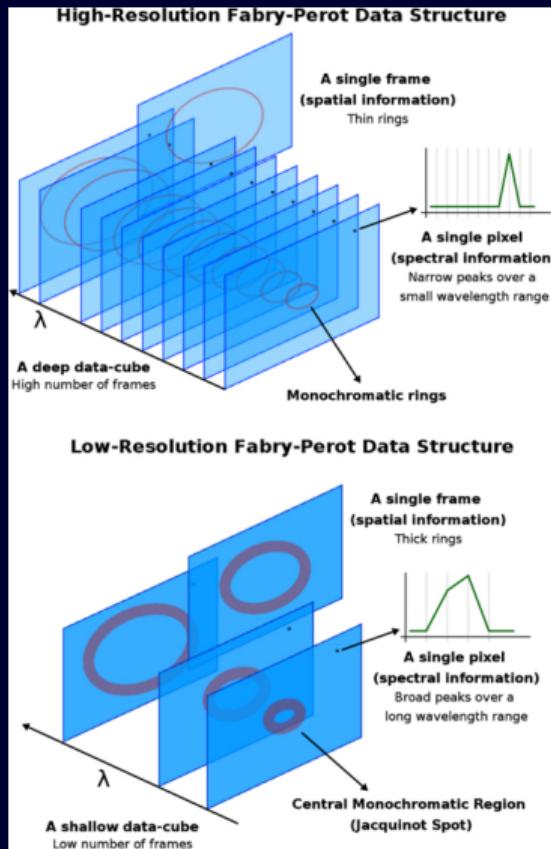
Излучение: 4 степени свободы (координаты на изображении, частота, время). 3D data cubes (FITS-files): слайсы по времени (быстропеременные объекты, lucky images, speckle...) или по частоте (VPHG, IFP, средне- и широкополосные фильтры).



«Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные



«Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные



Диспергирующие системы: призмы

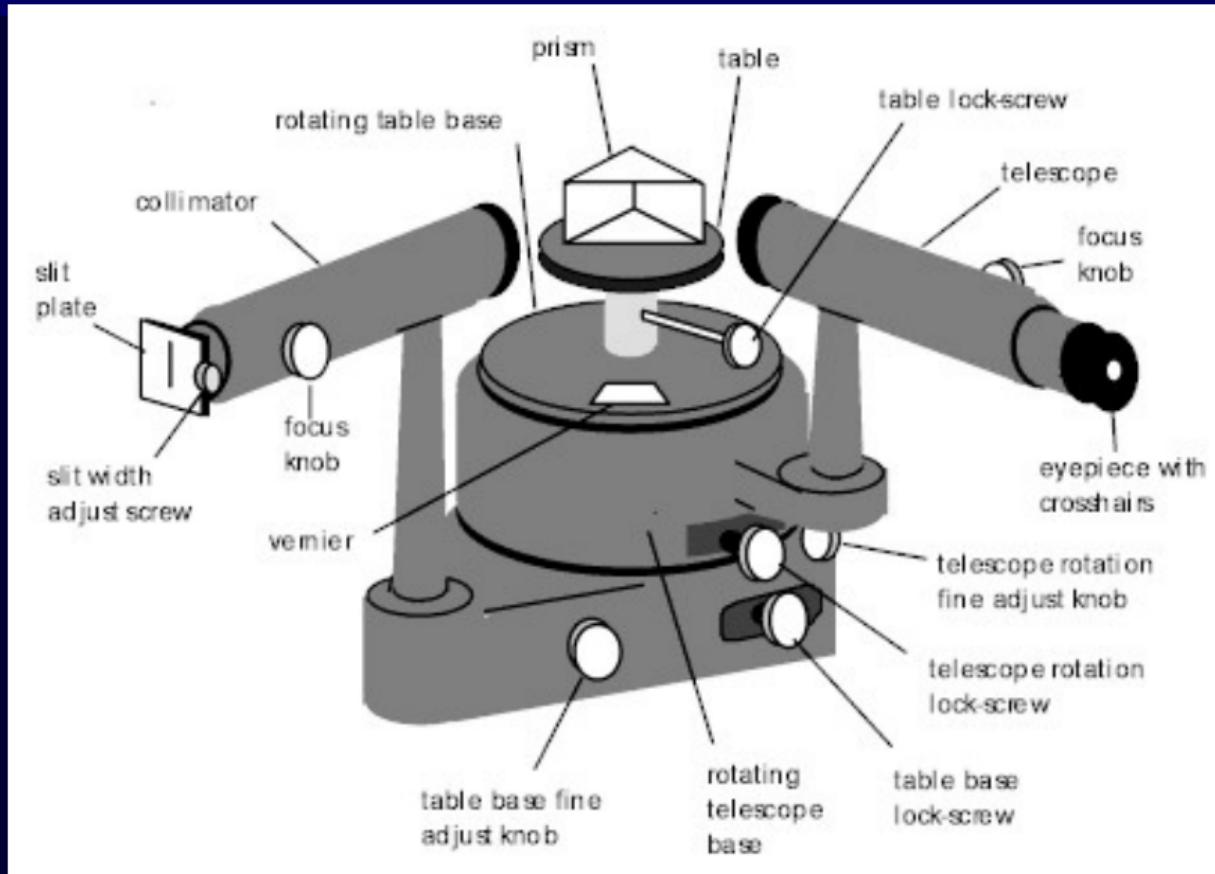


1814, спектроскоп Йозефа фон Фраунгофера

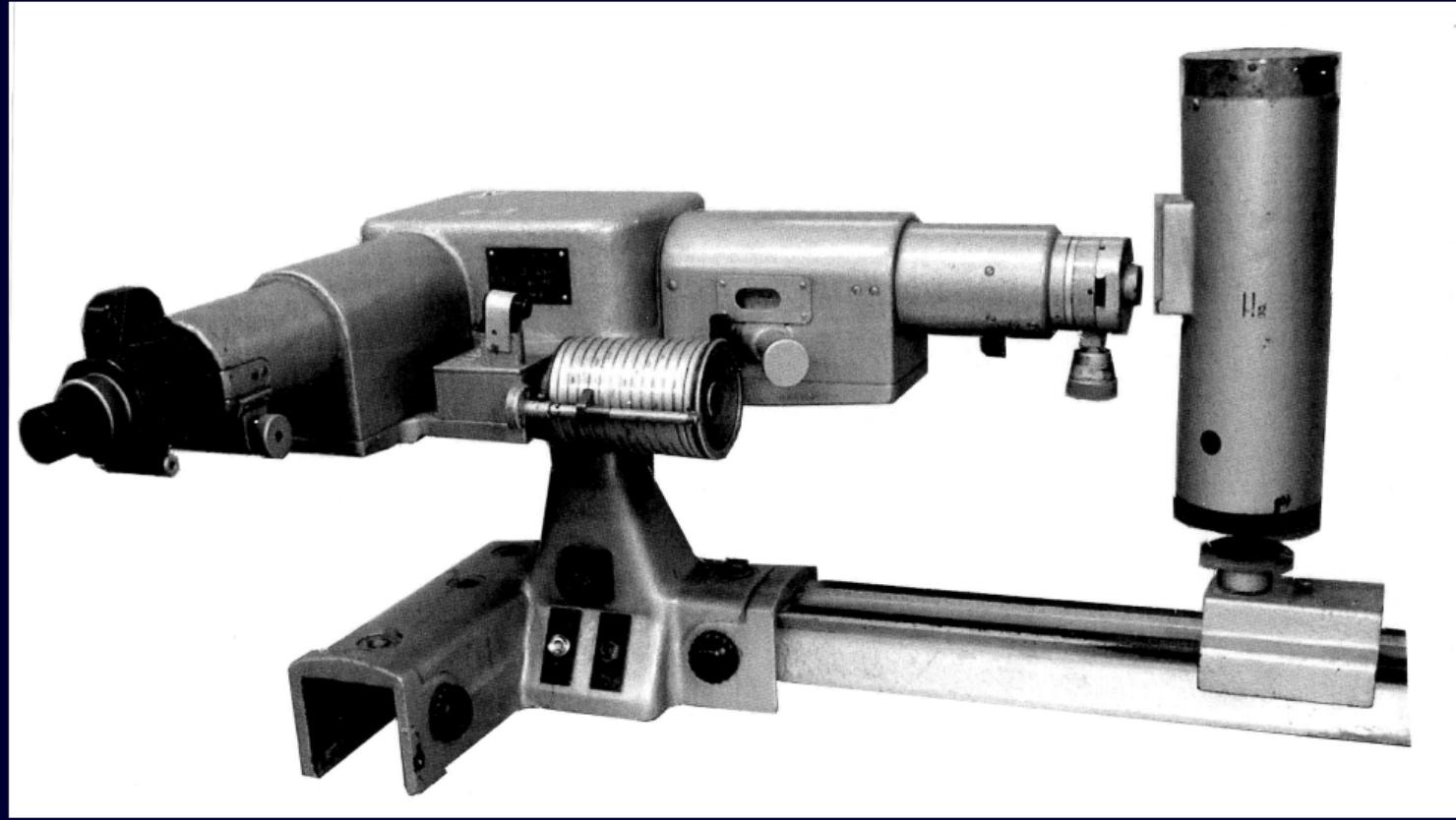
Диспергирующие системы: призмы



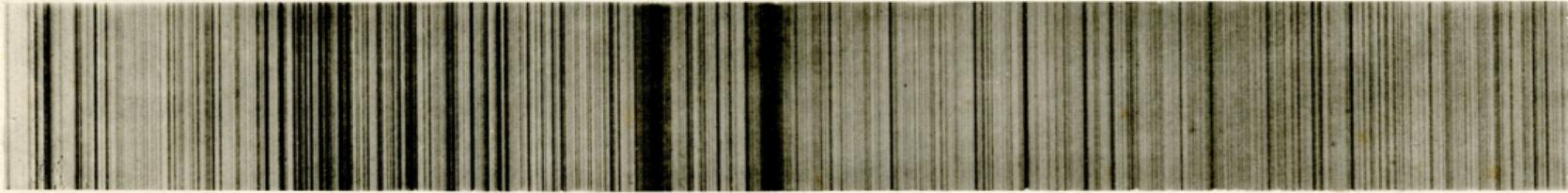
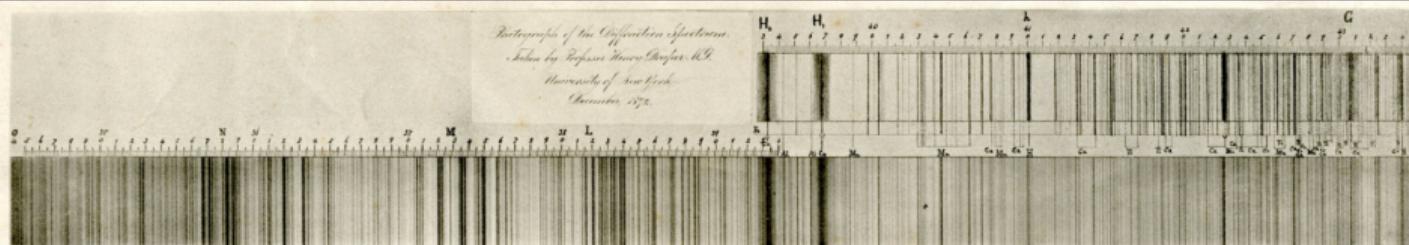
Диспергирующие системы: призмы



Диспергирующие системы: призмы

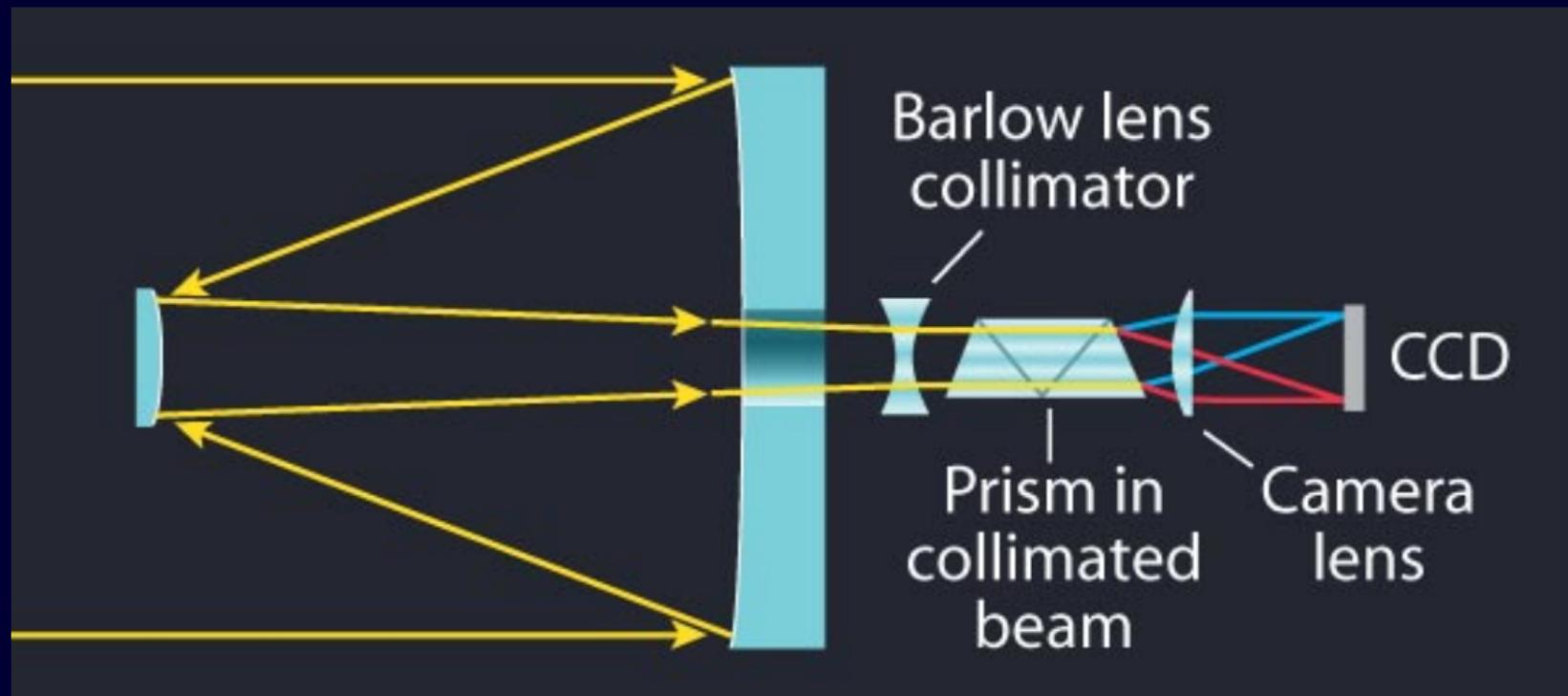


1872, первый спектр Веги на фотопластинке. С 1918 по 1924 г. вышел каталог HD в честь Дрэпера (изначально 225300 звезд, Эдвард Пикеринг сотоварищи, наблюдения в гарвардской обсерватории с объективной призмой).

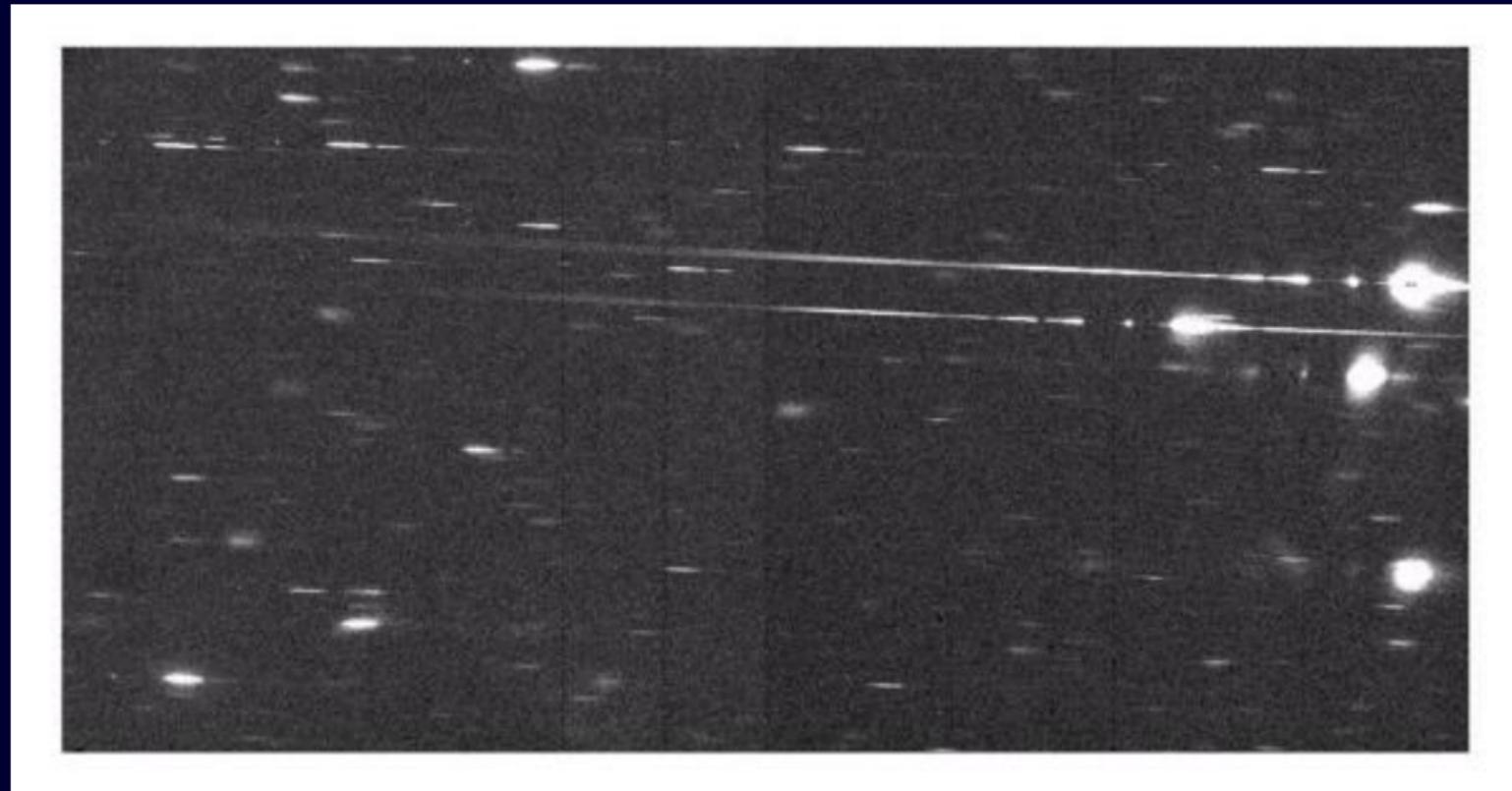


Бесщелевые спектры

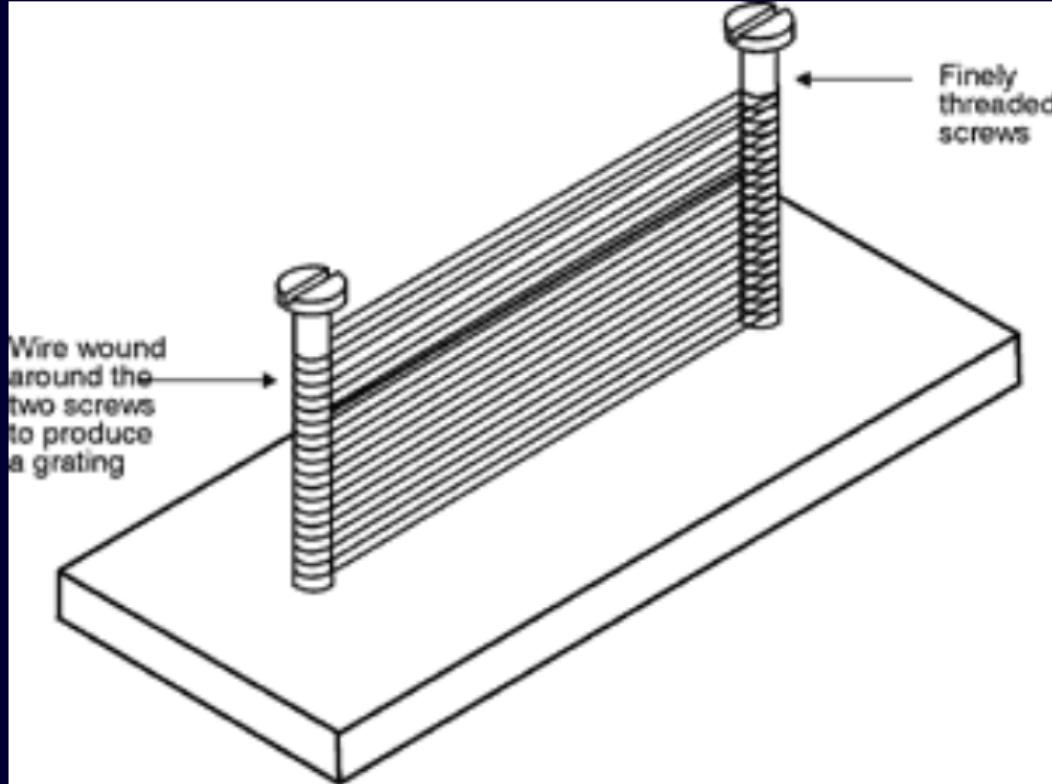
Николас Мейол, 1930-е.



Бесщелевые спектры

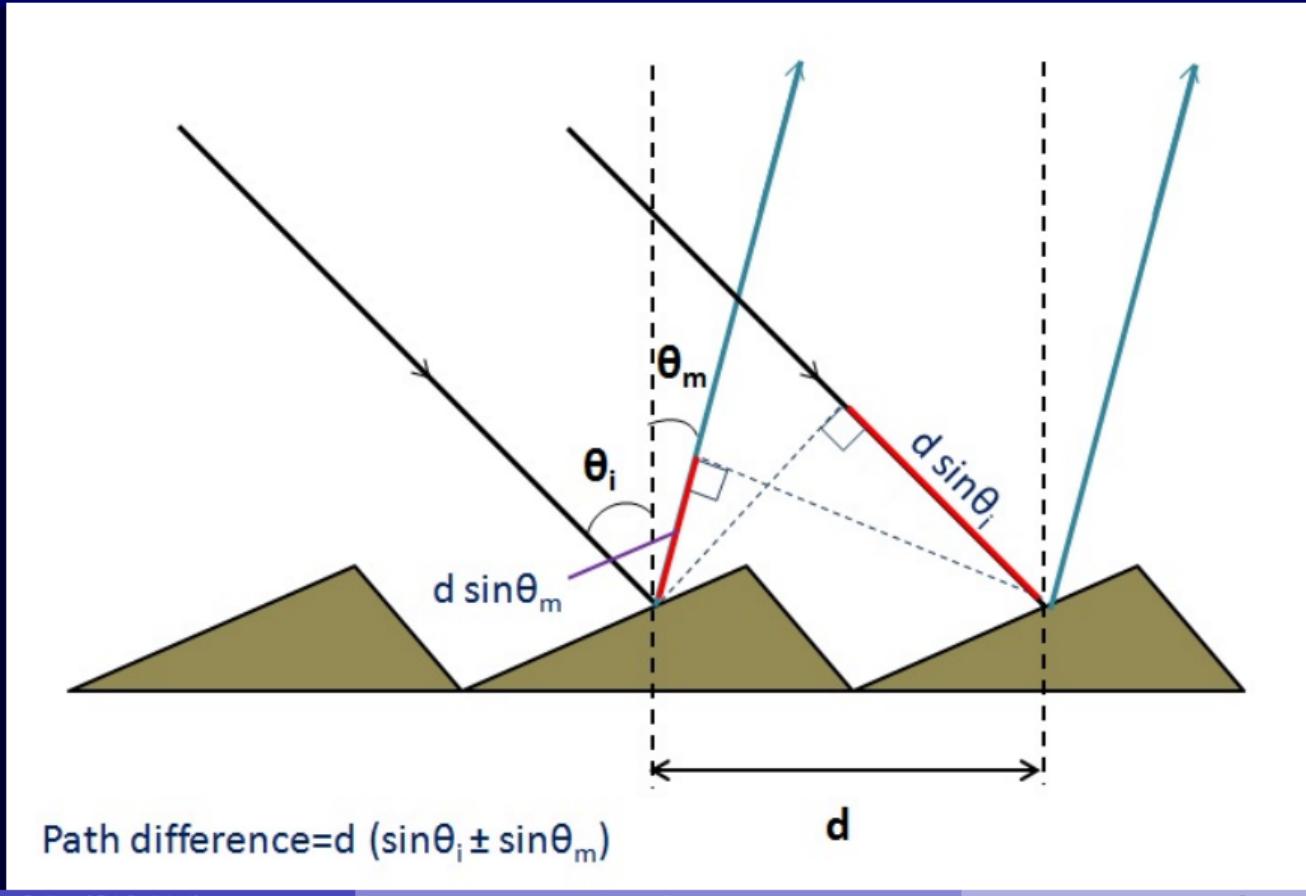


Дифракционная решетка



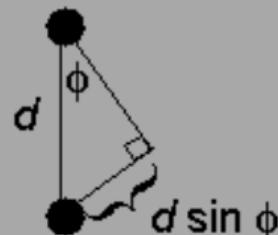
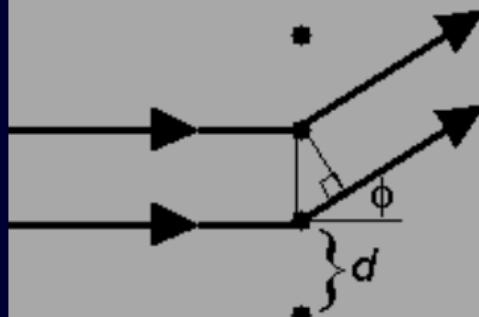
Нитяная решетка Фраунгофера

Дифракционная решетка



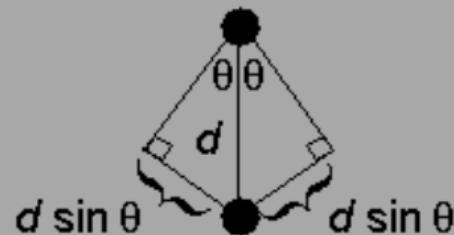
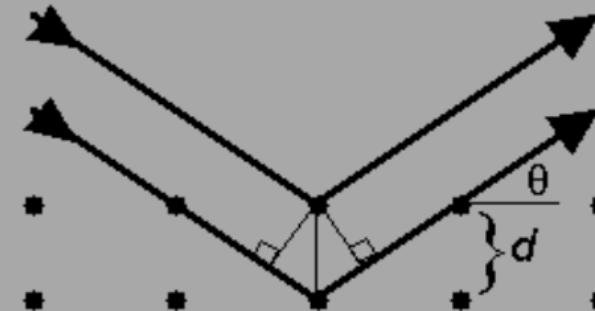
Дифракционная решетка

Fraunhofer diffraction



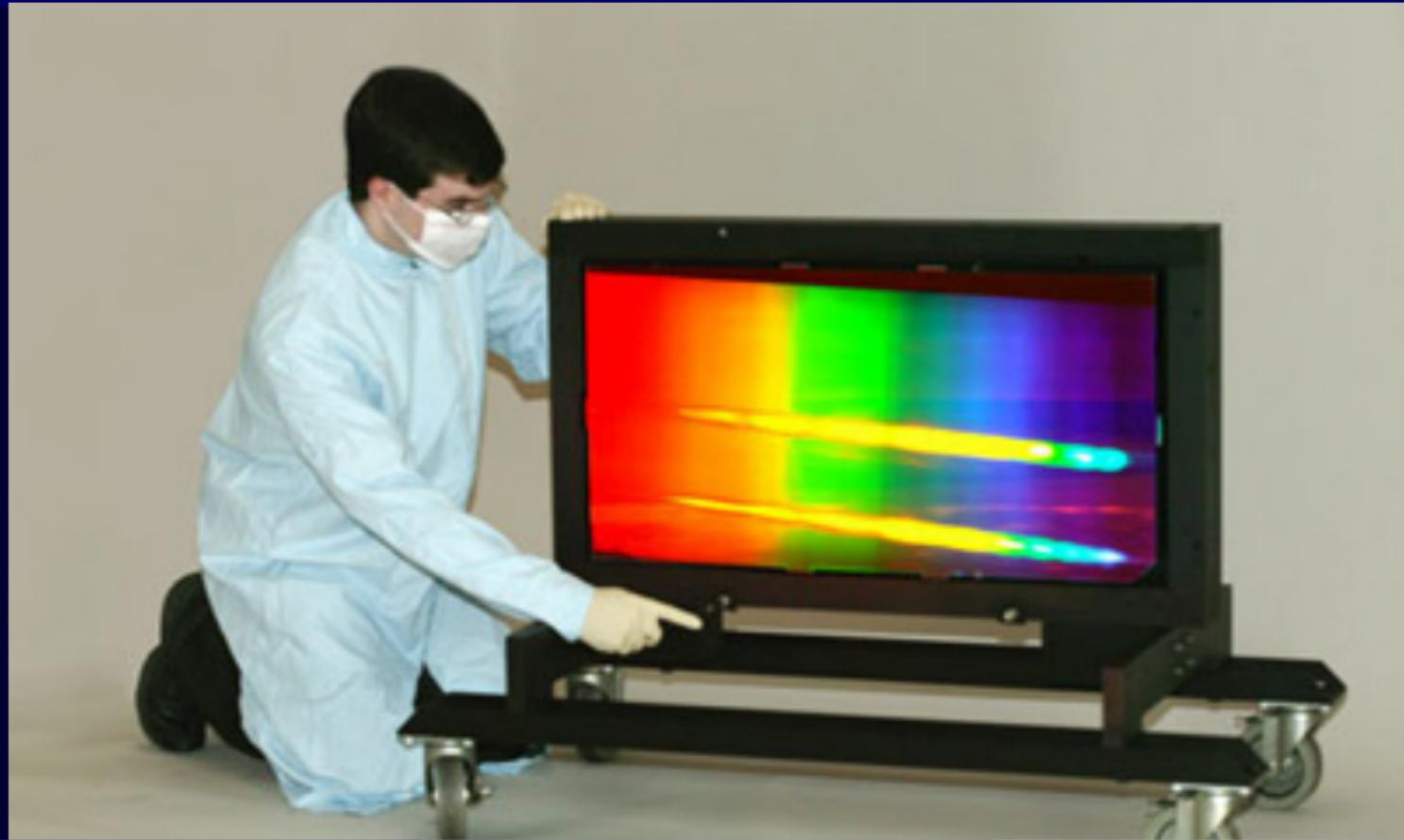
For constructive interference,
 $d \sin \phi = n \lambda$

Bragg diffraction

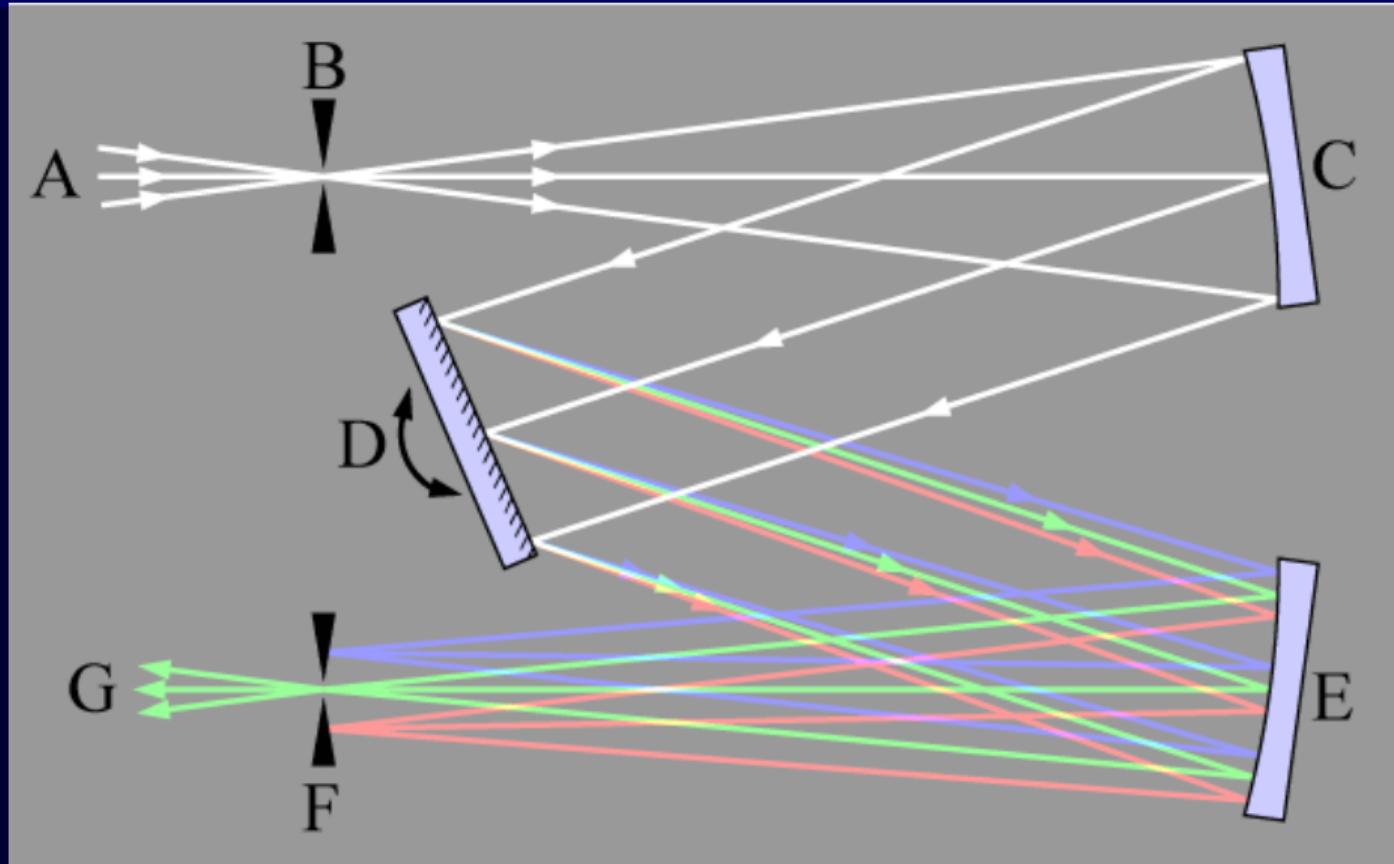


For constructive interference,
 $2(d \sin \theta) = n \lambda$

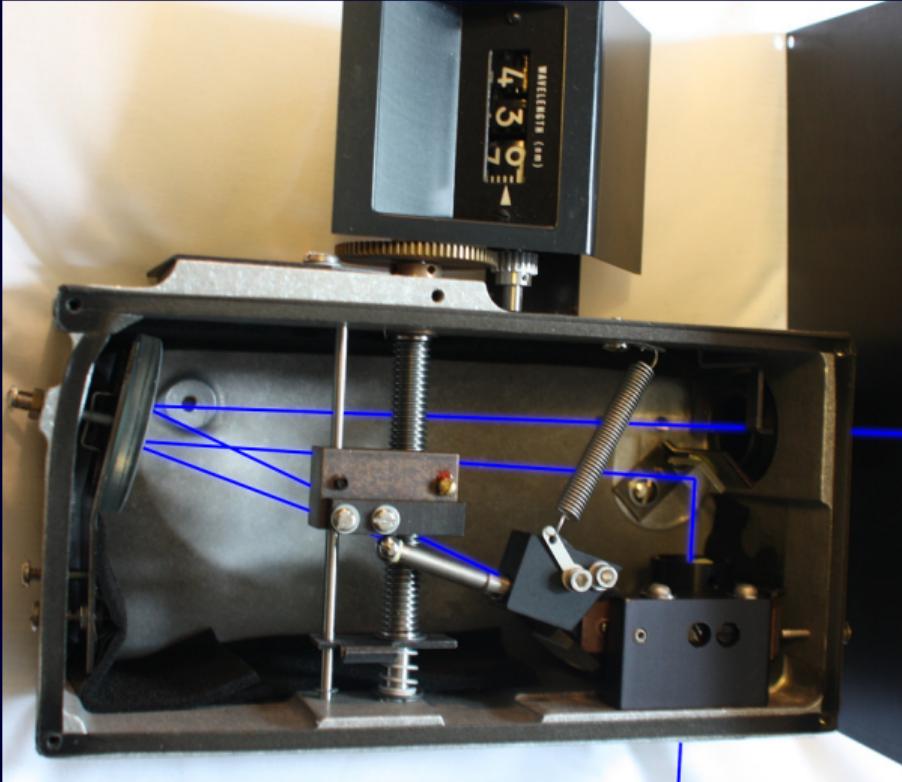
Дифракционная решетка



Дифракционная решетка

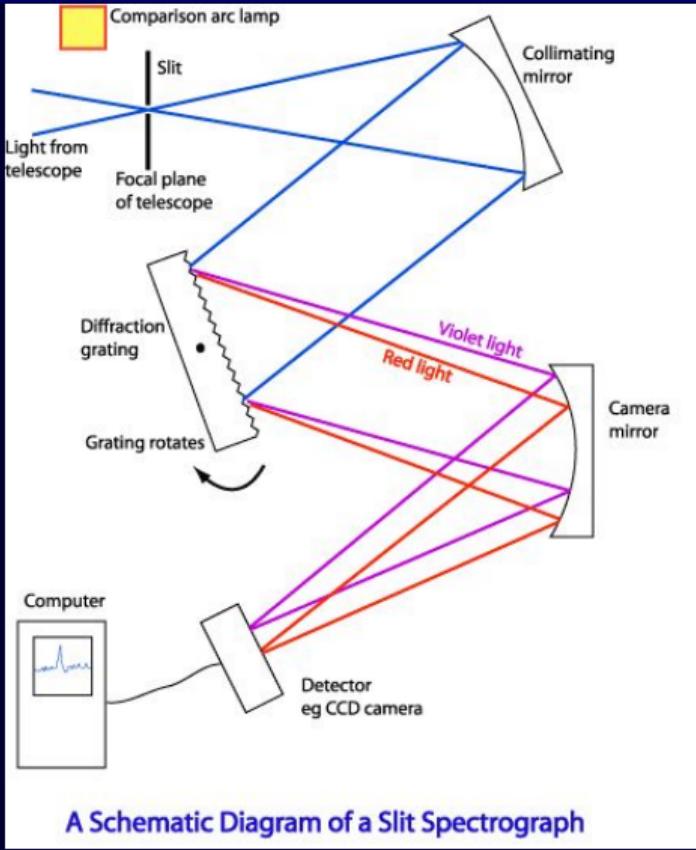


Дифракционная решетка

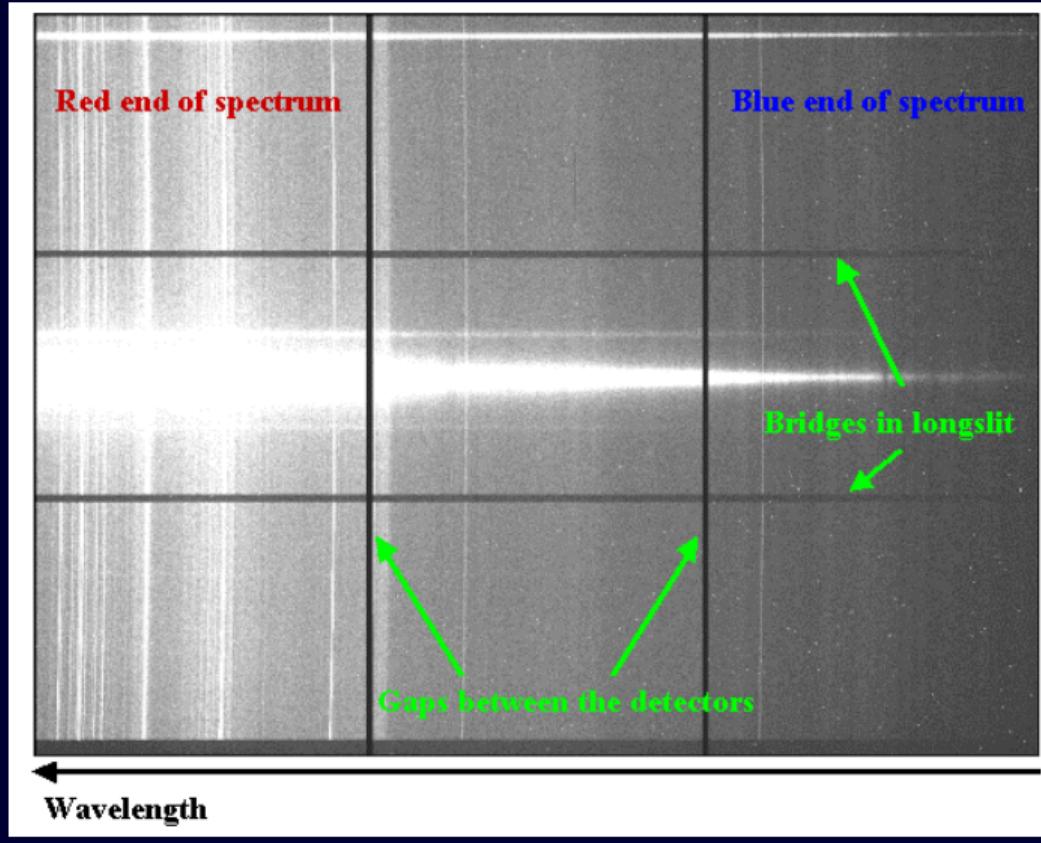


Монохроматор Фасти–Эберта

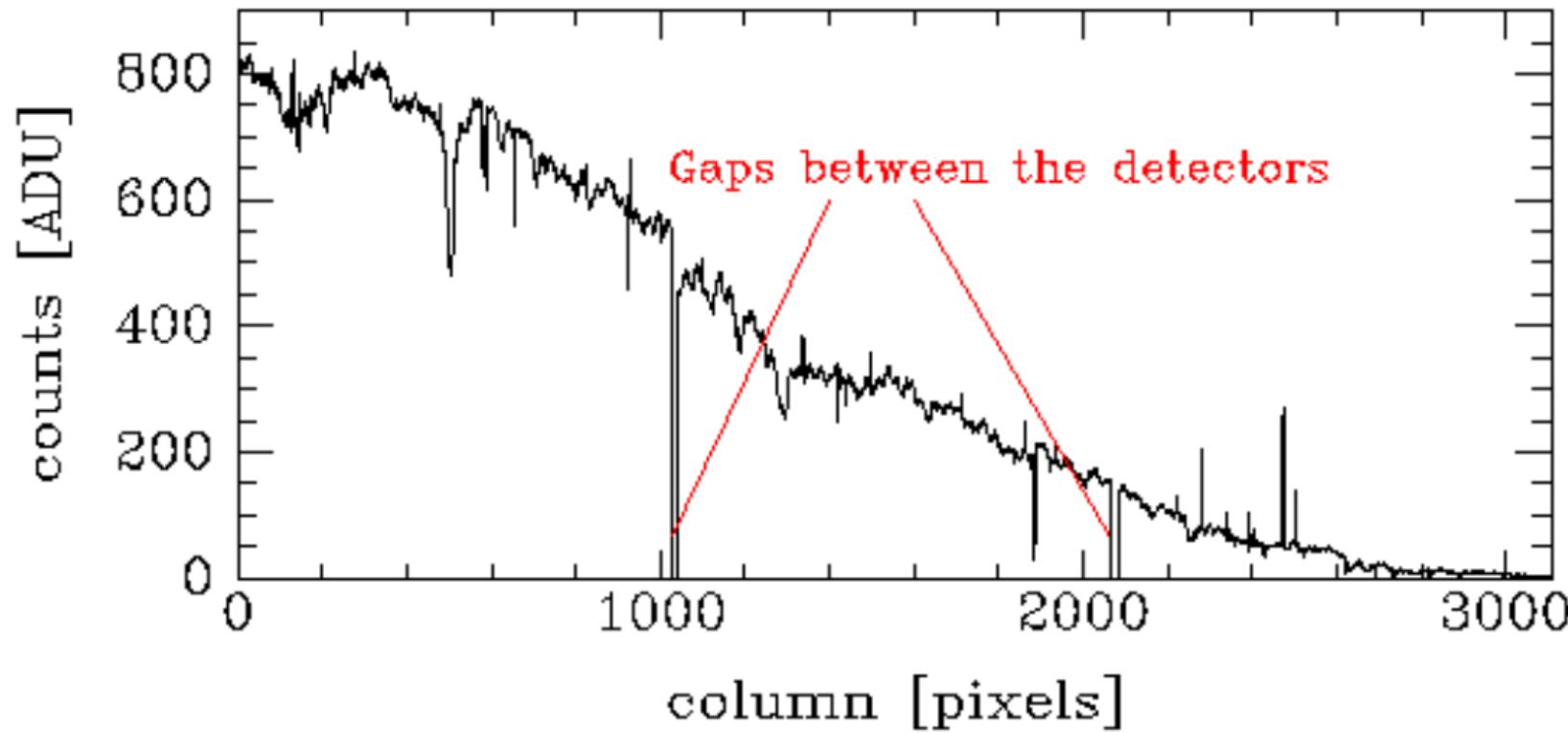
Длиннощелевые спектры



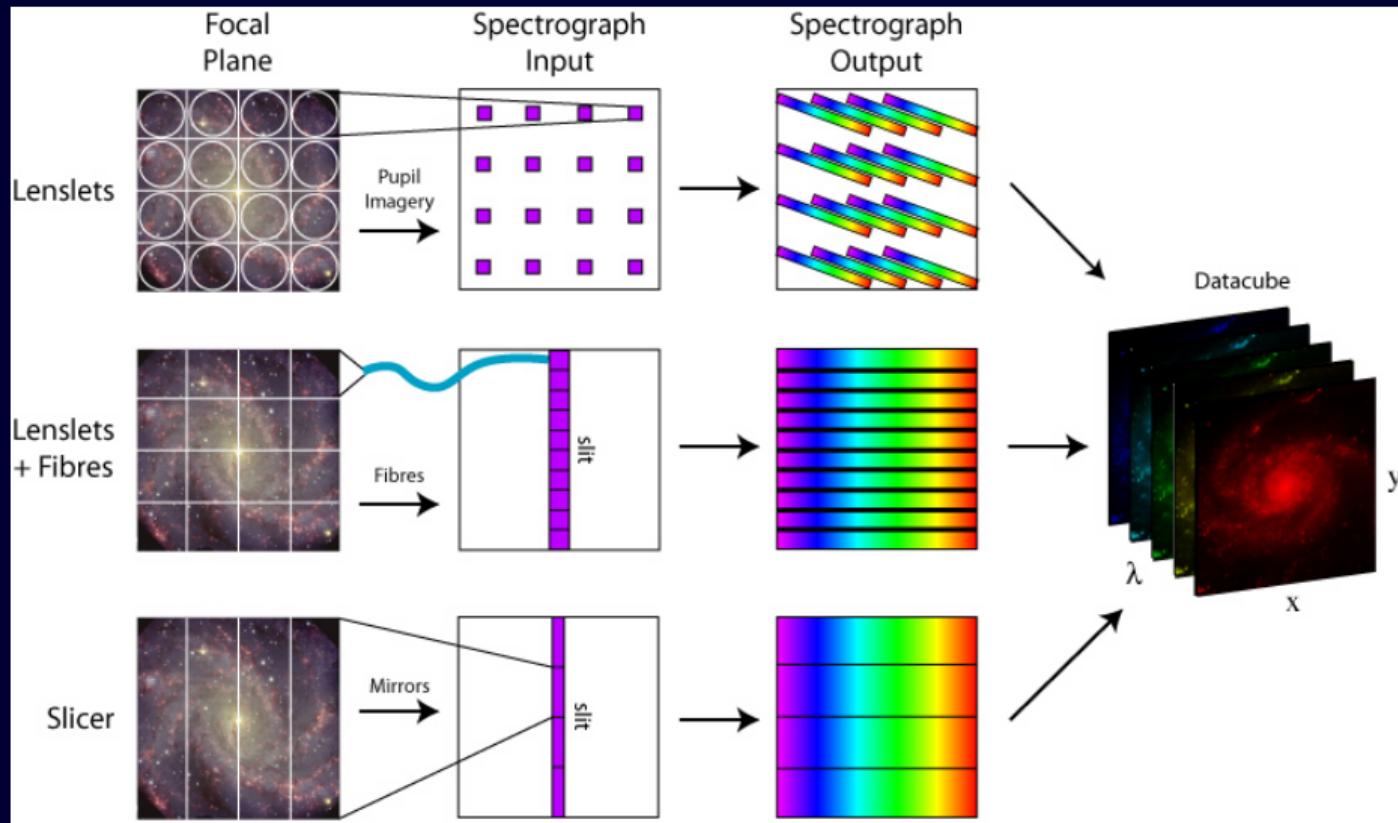
Длиннощелевые спектры



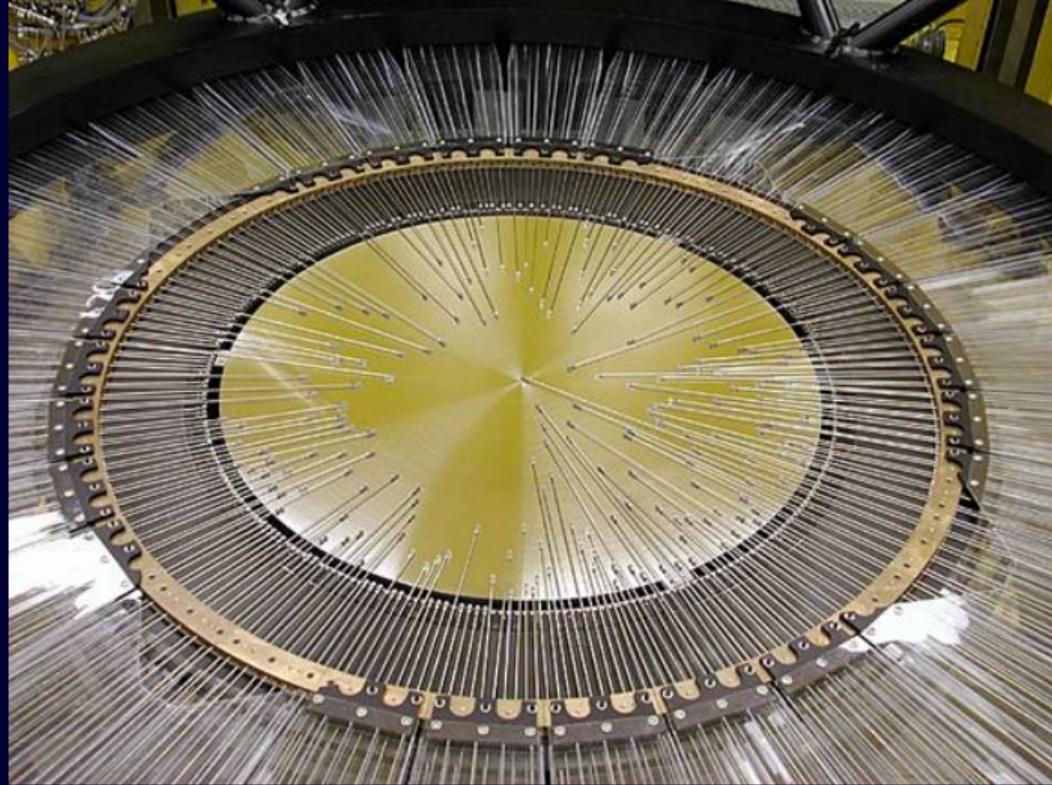
Длиннощелевые спектры



Integral field spectrograph

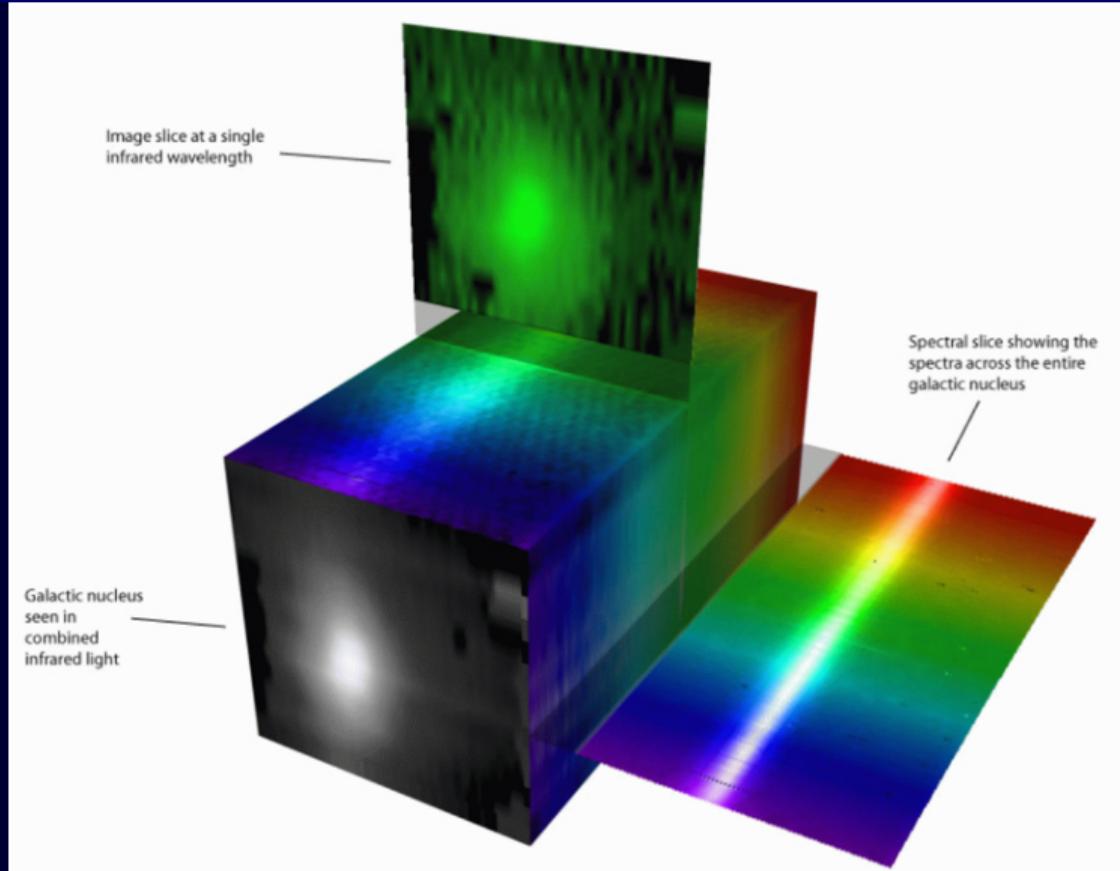


Integral field spectrograph



Hectospec — сложный спектрограф 6.5-м телескопа ММТ

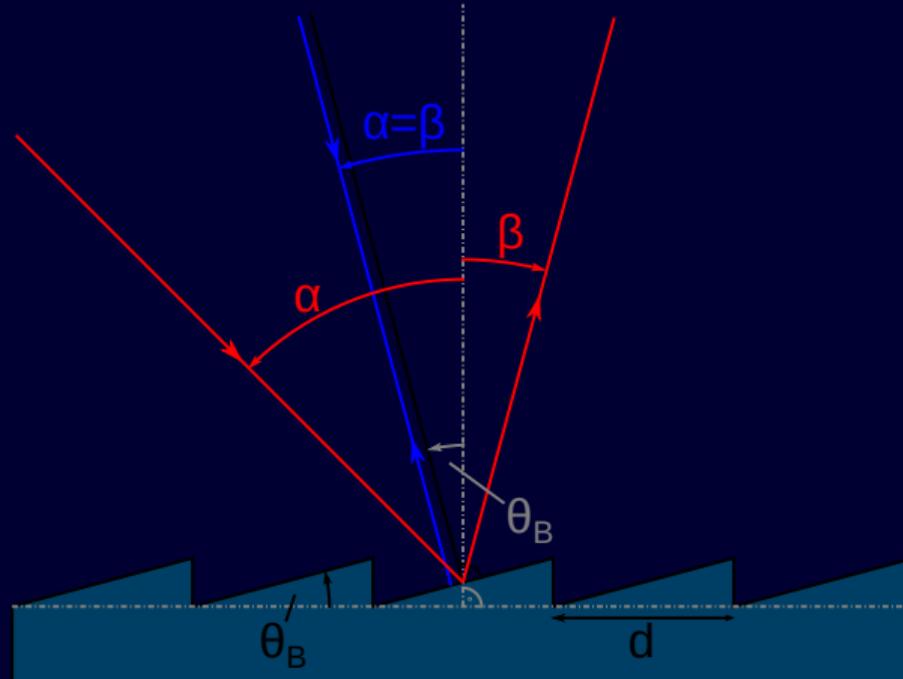
Integral field spectrograph



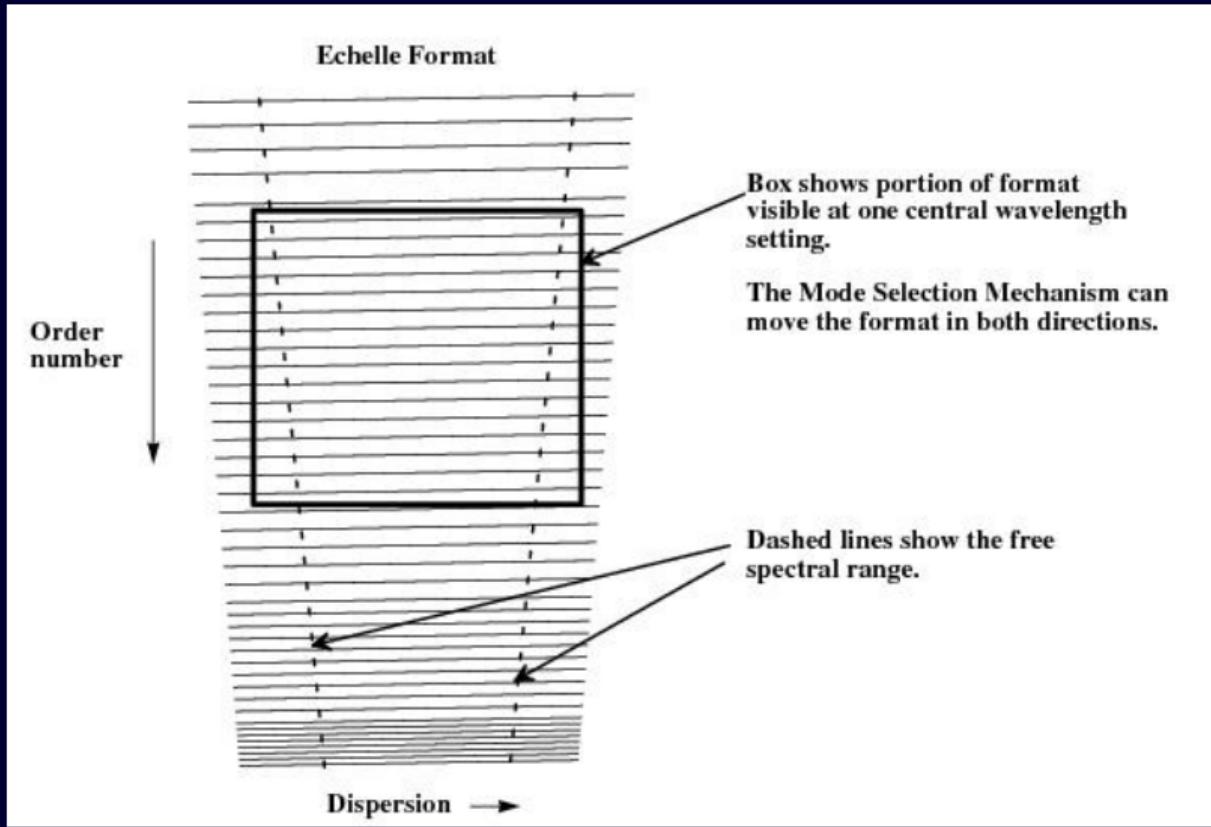
Эшелье–спектрограф

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

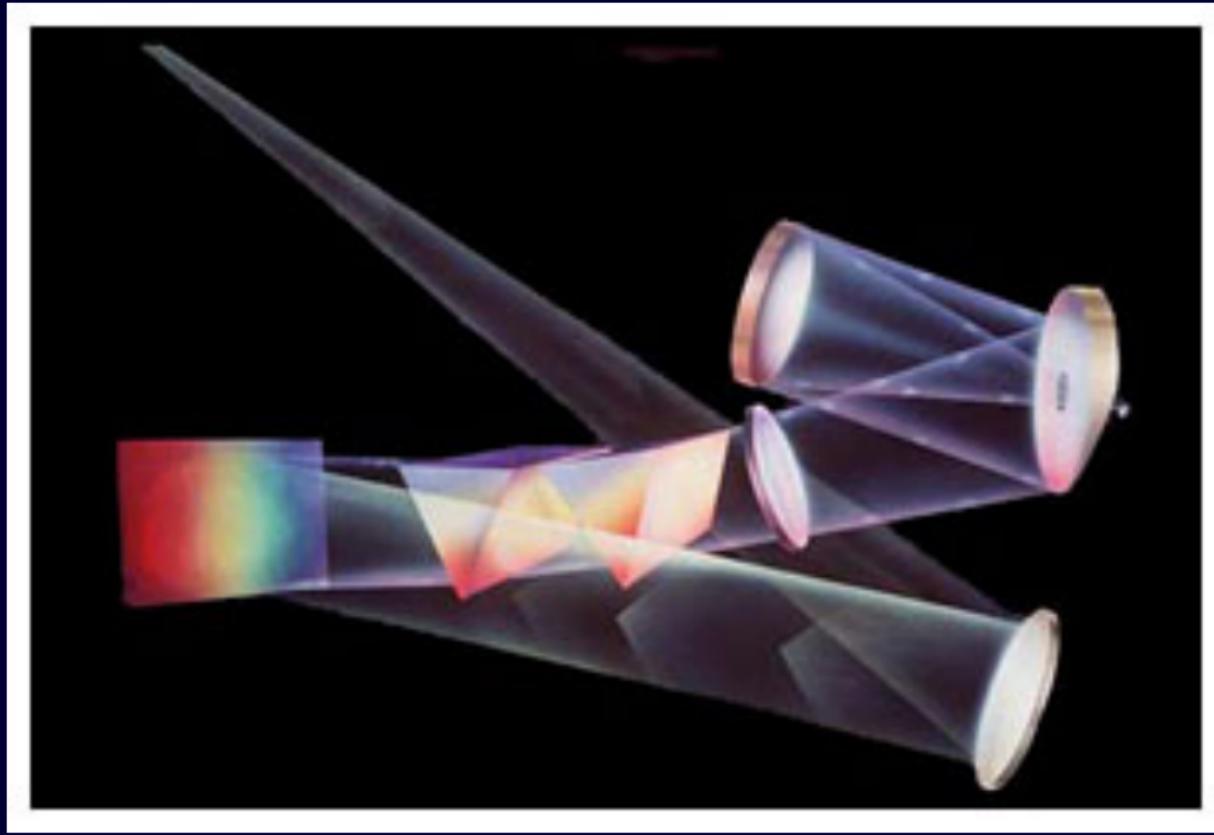
$$\theta_B = \arcsin \frac{m\lambda}{2d}.$$



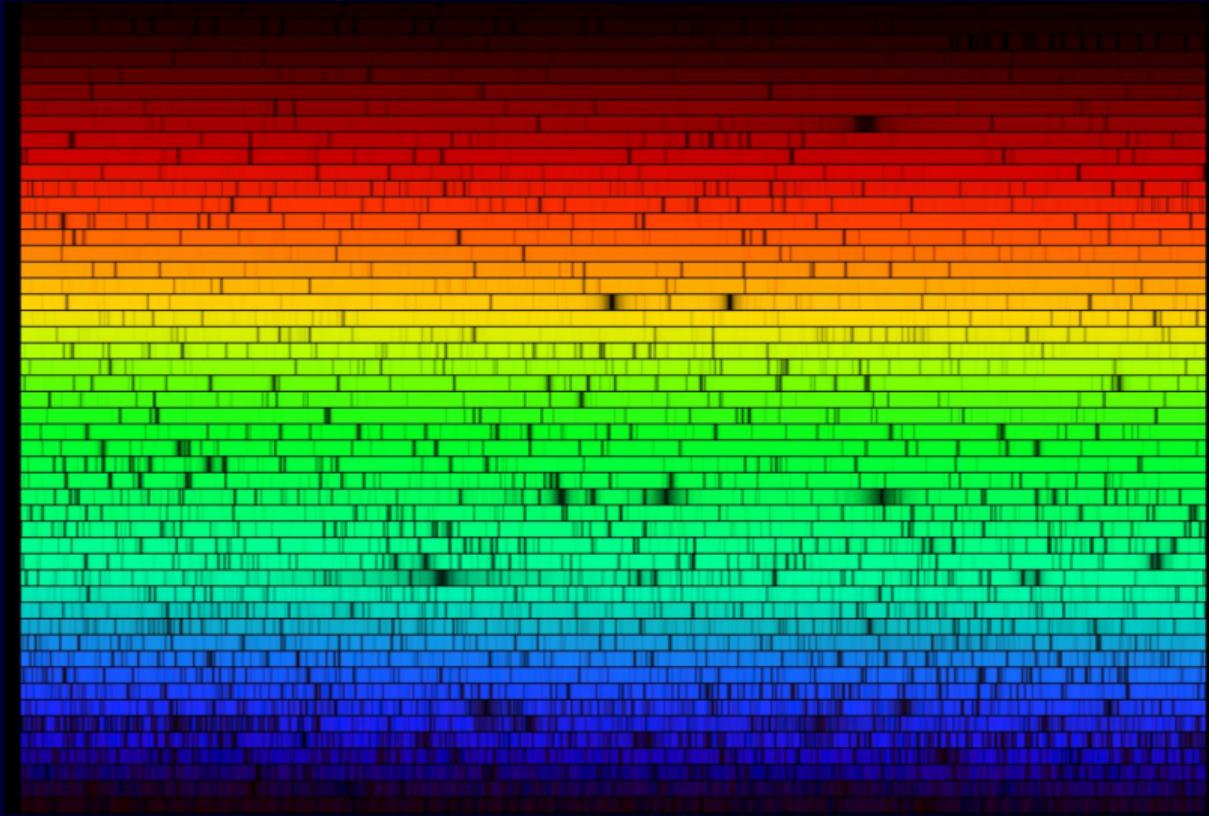
Эшелье–спектрограф



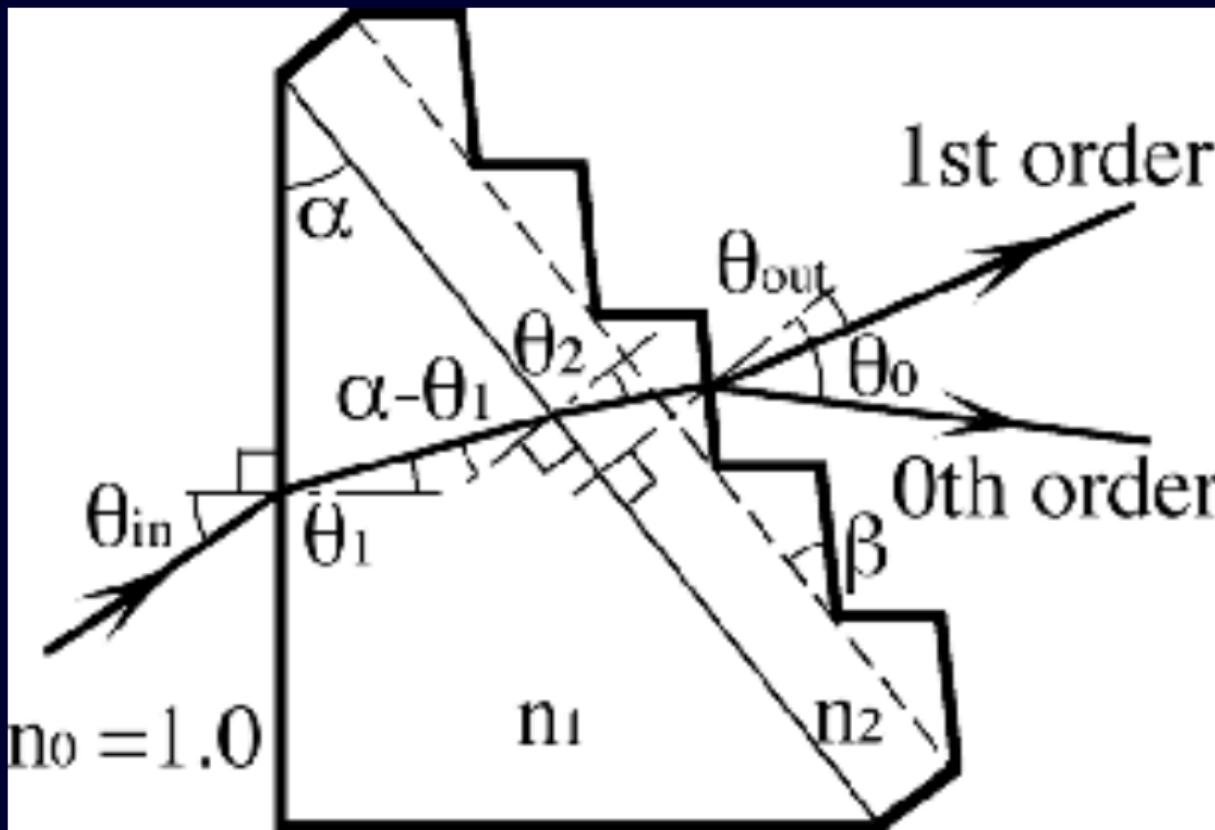
Эшелье–спектрограф



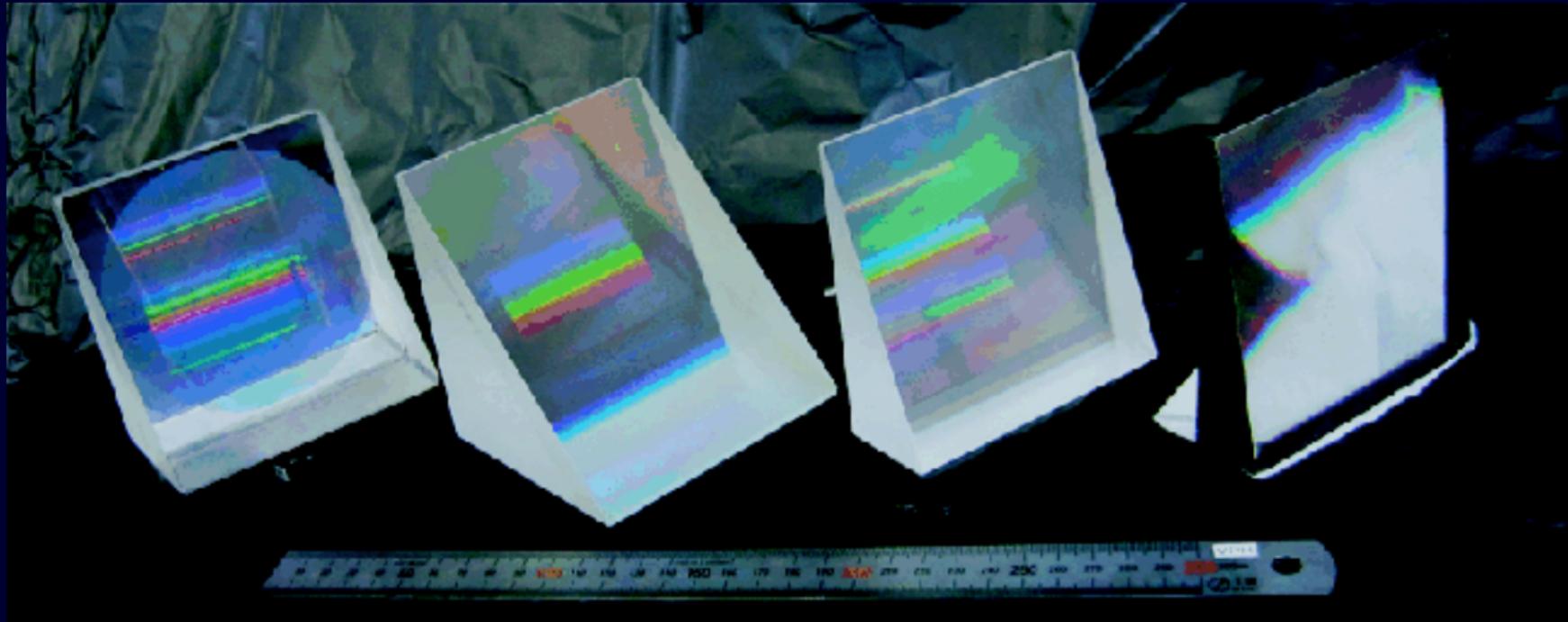
Эшелле–спектрограф



Гризма

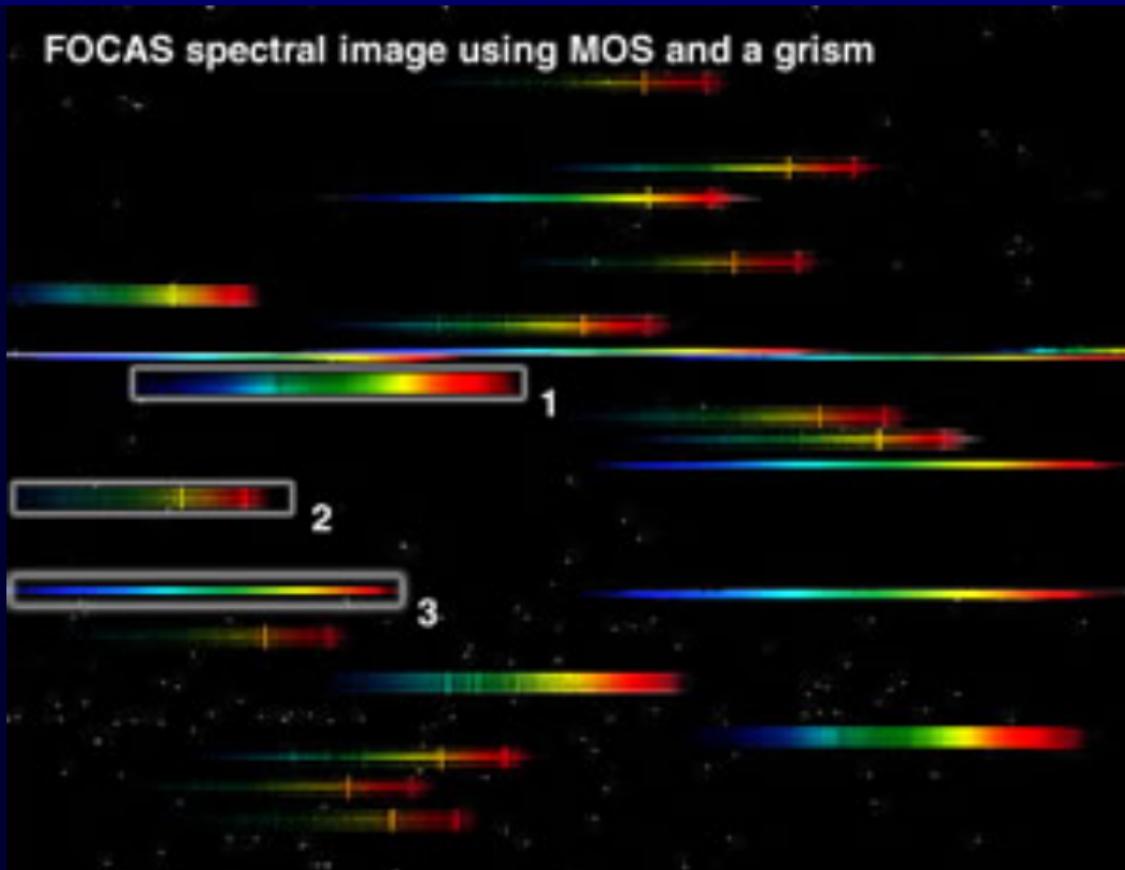


Гризма

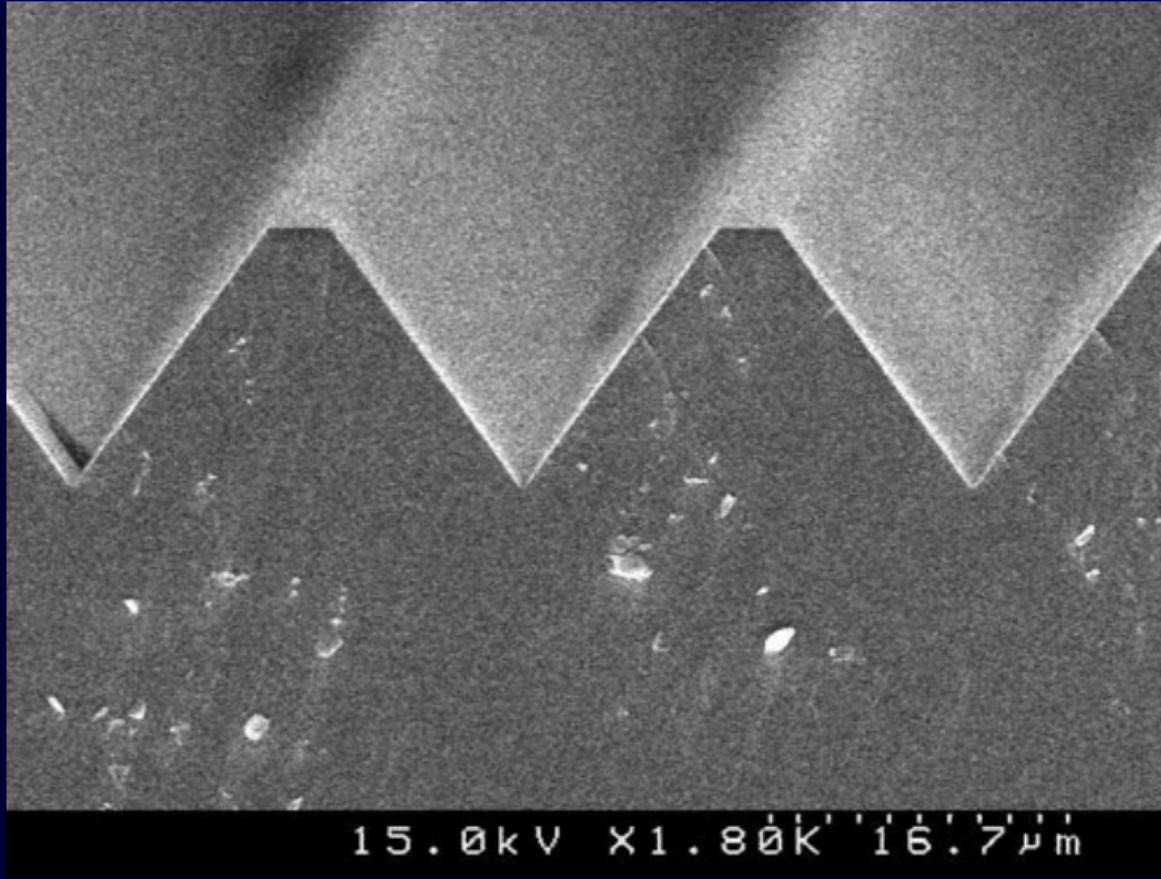


Набор гризм The Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS Subaru).

Гризма

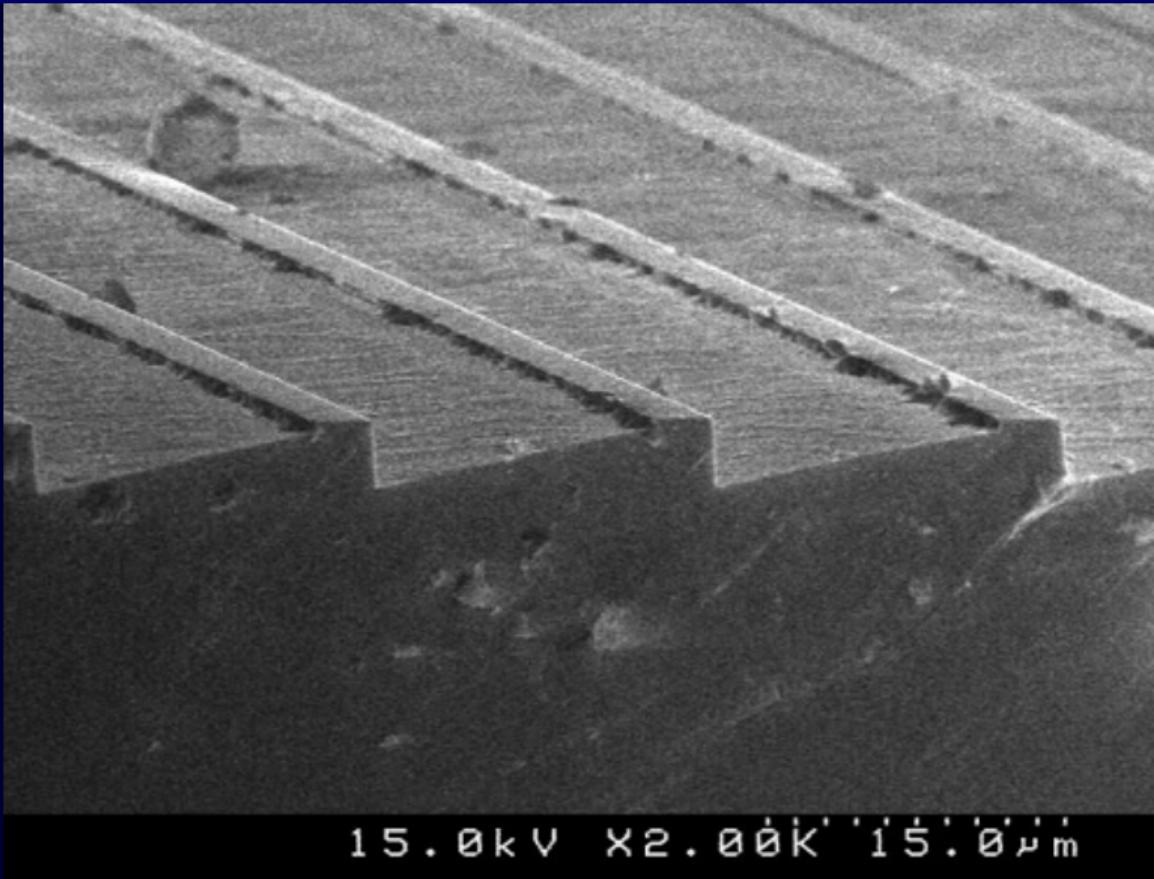


Гризма



15.0 kV ×1.80k' 16.7 μm

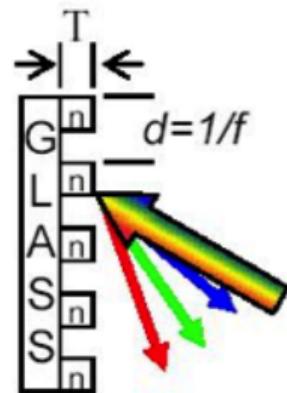
Гризма



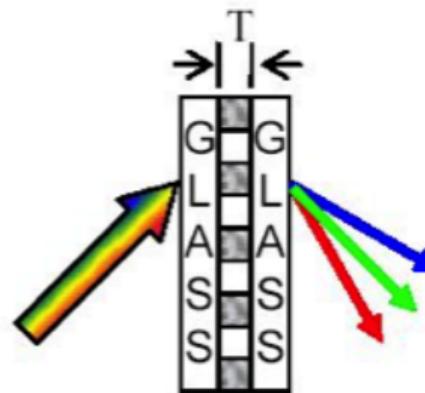
Diffraction Gratings

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

*Surface Relief Grating:
Reflection*



*Volume Phase Holographic
Grating (VPHG): Transmission*



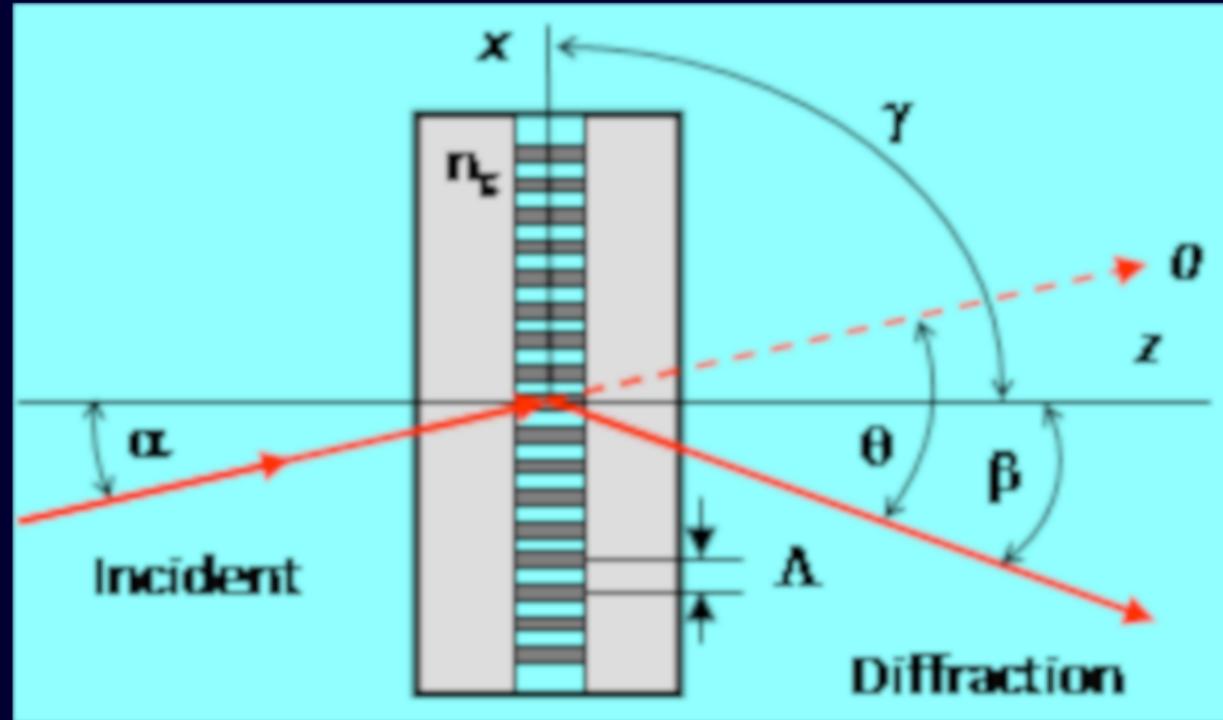
Cross section of photoresist or epoxy cast grating. Periodic variation of thickness (T) with a constant refractive index (n).

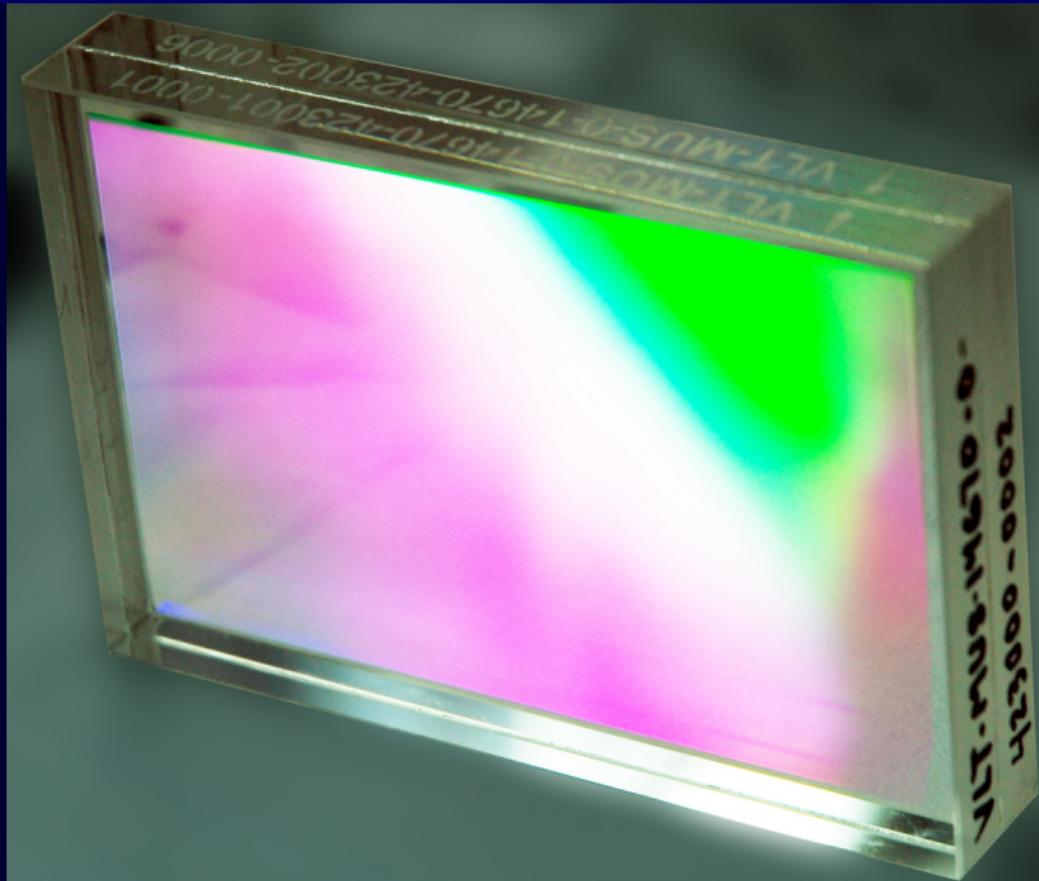
Cross section of dichromated gelatin (DCG) grating. Periodic variation of refractive index (n) with a constant thickness (T).

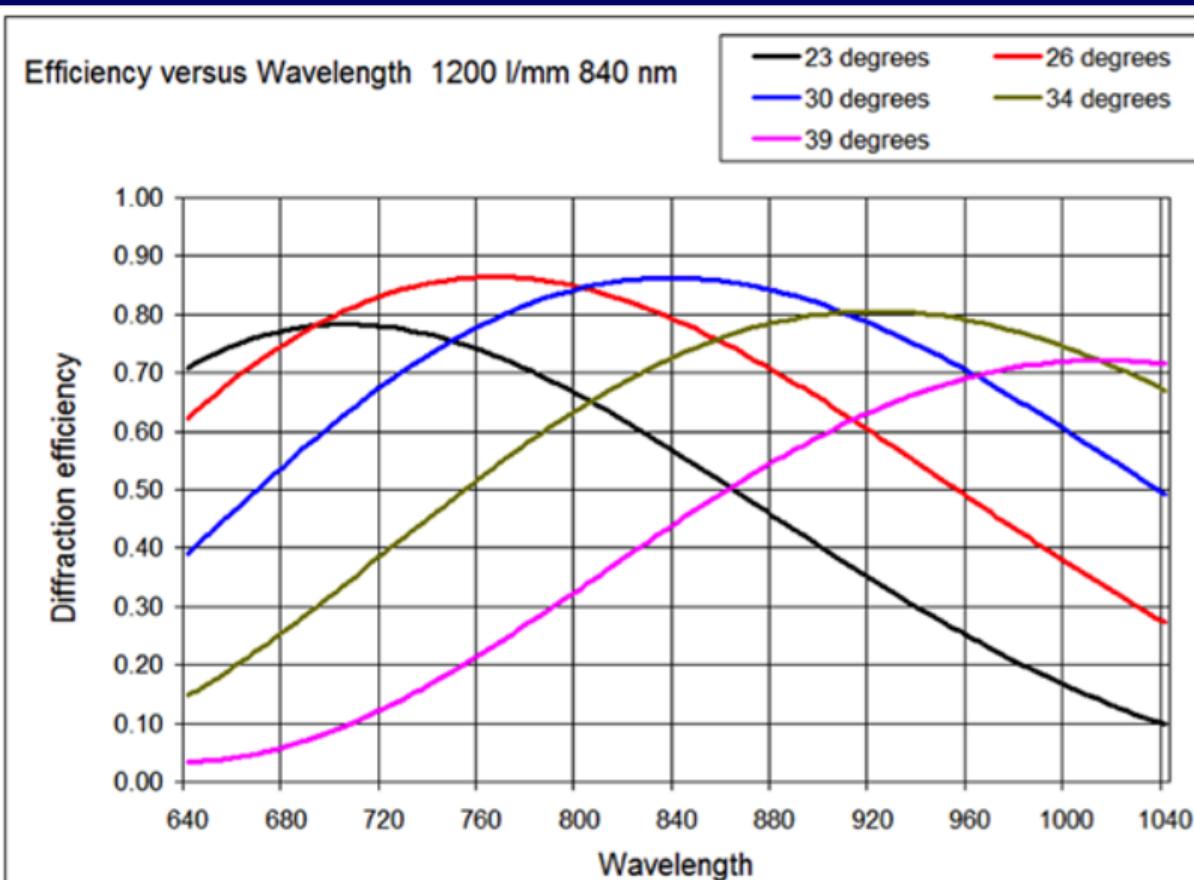
$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n_g \Lambda^2 \cos \alpha}.$$

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

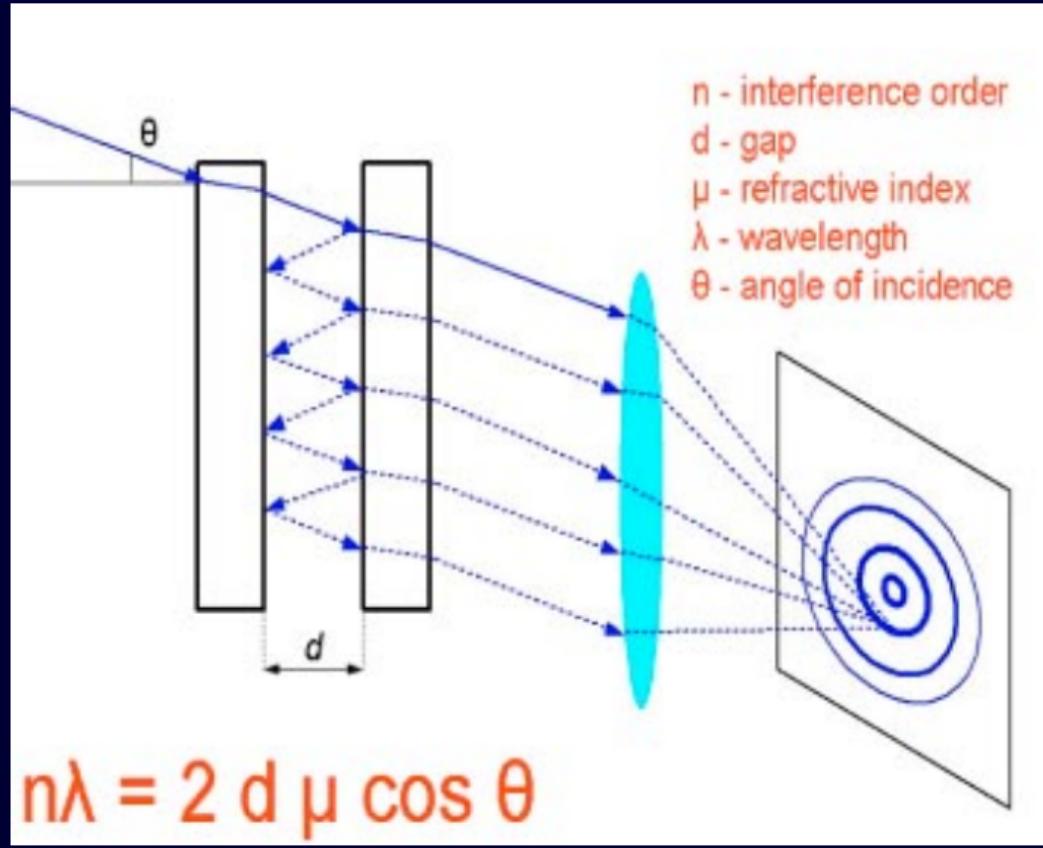
The phase grating is called "thin" for $Q < 1$ and "thick" for $Q > 10$.







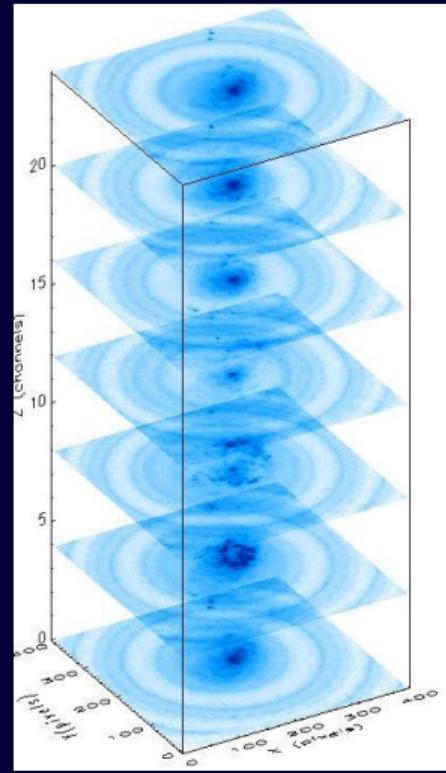
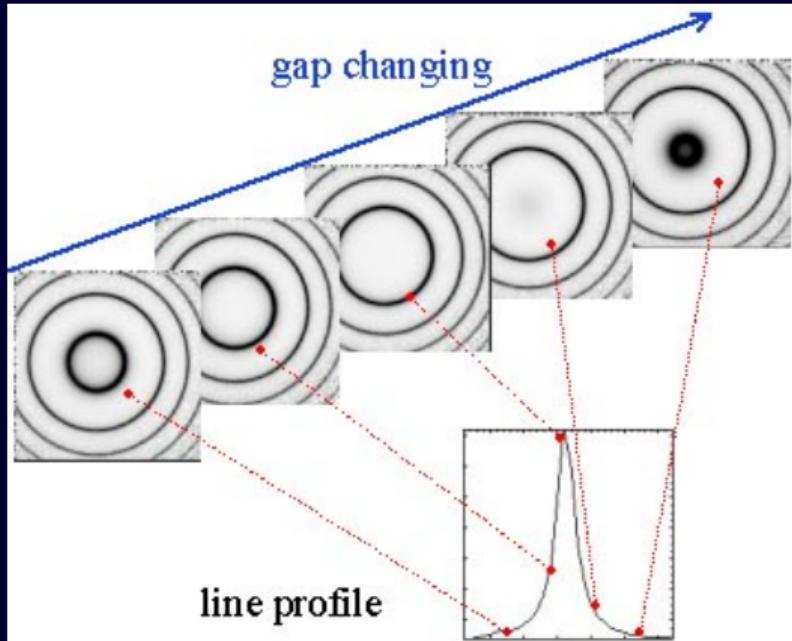
Интерферометр Фабри–Перо



Интерферометр Фабри–Перо

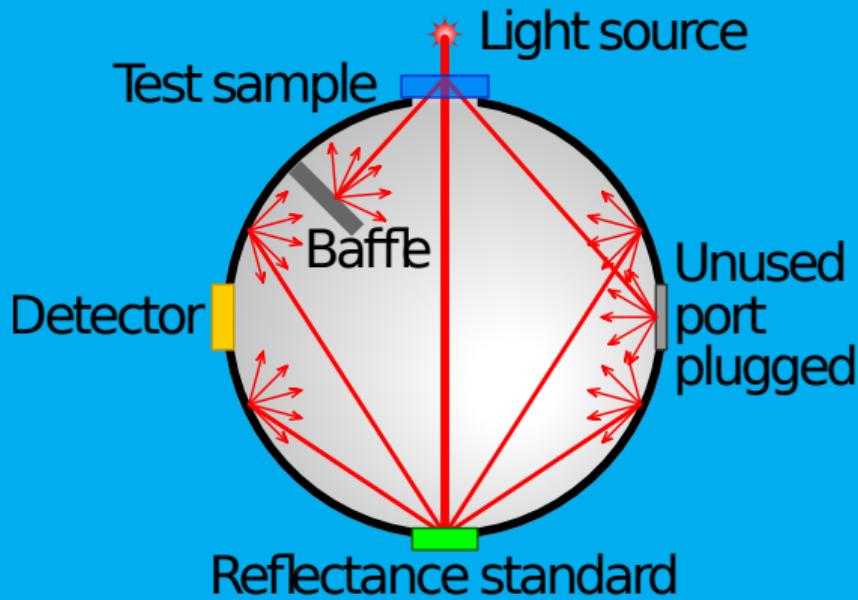
Кубы данных при сканировании ИФП. А.В. Моисеев^a.

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

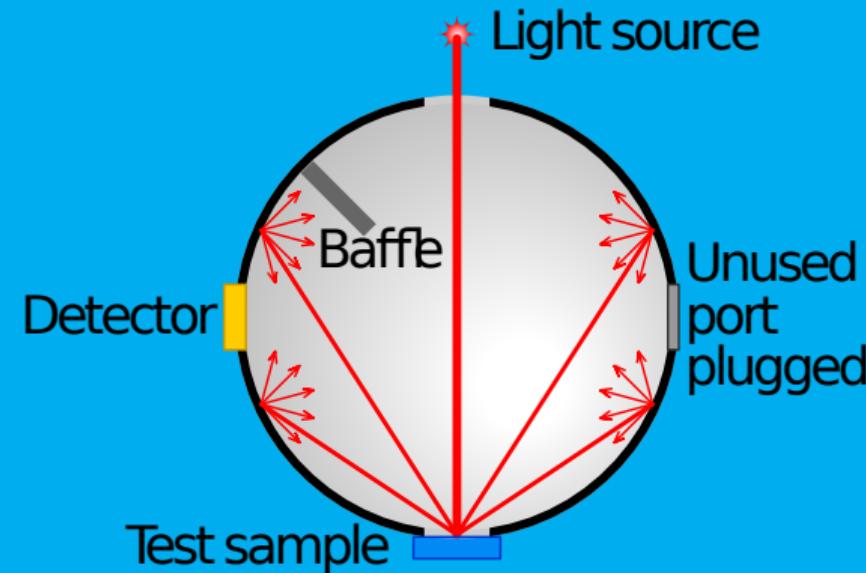


Калибровки

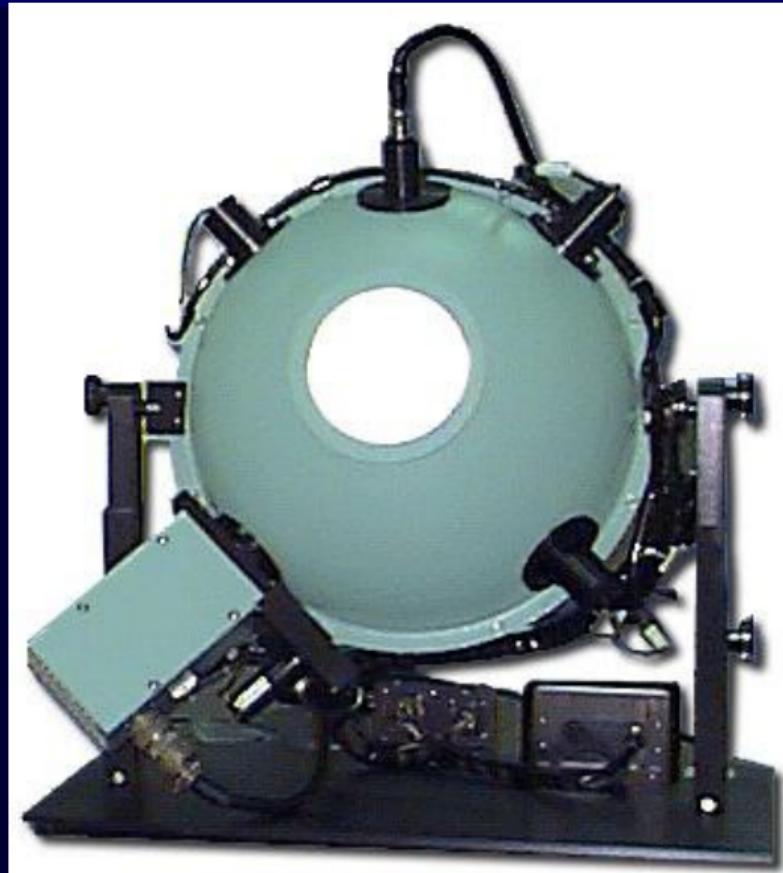
1. Measuring transmittance



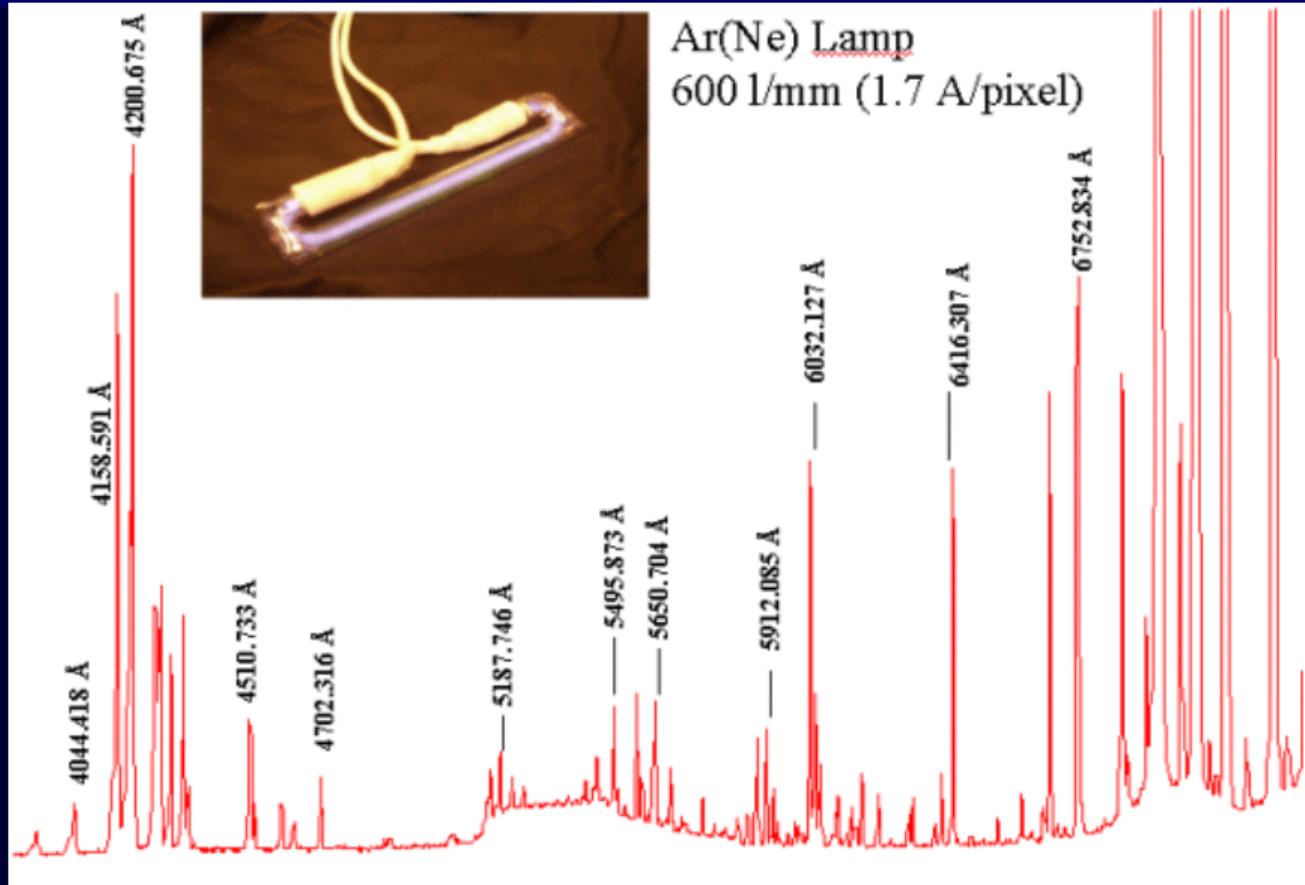
2. Measuring reflectance



Калибровки



Калибровки



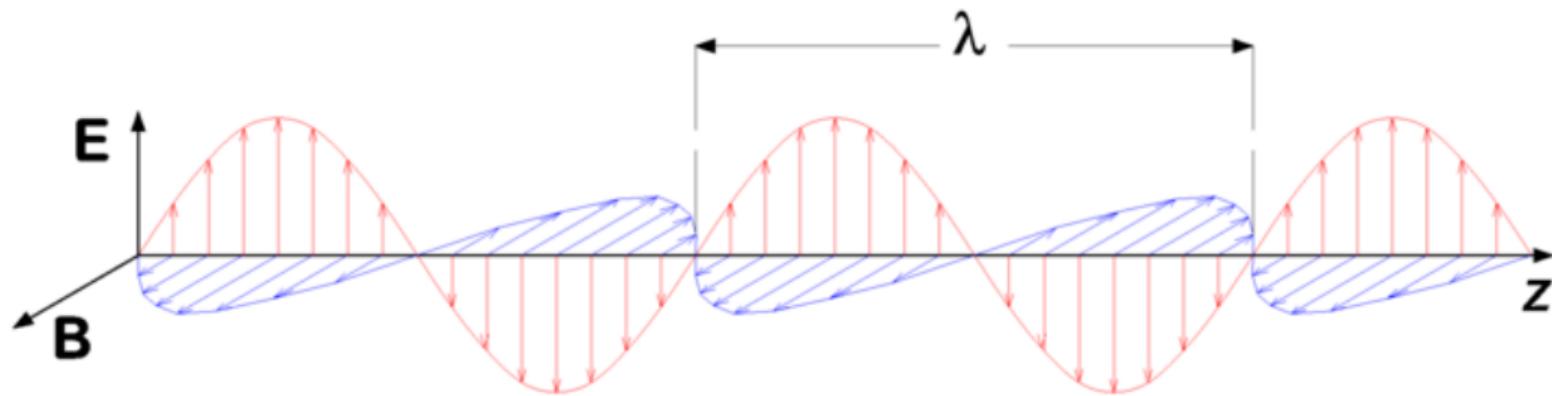
Калибровки

Th/Ar



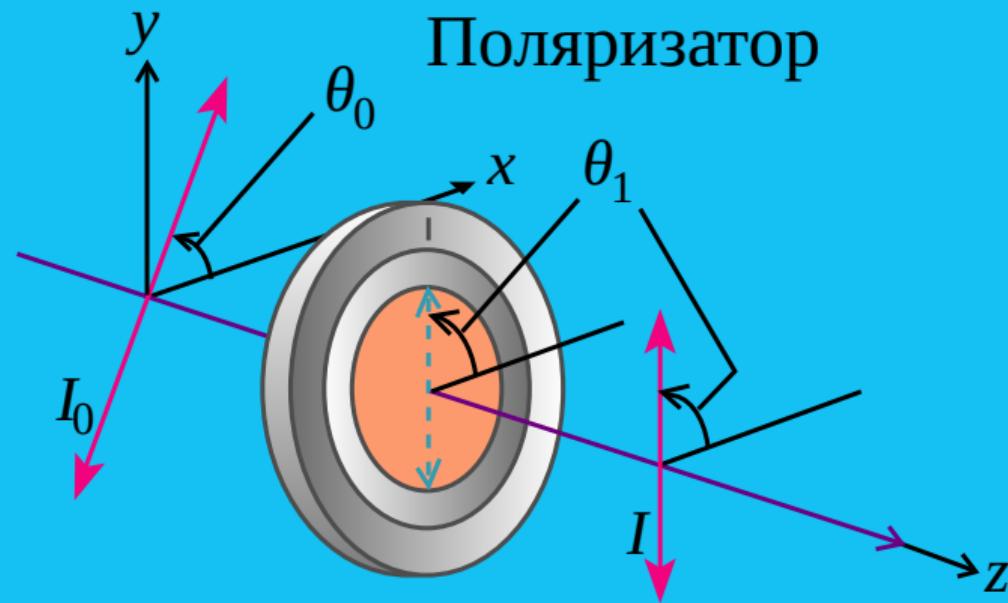
Поляризация

$I = k_a I_0 \cos^2 \varphi$. 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,
 ψ – угол поворота поляризационного эллипса относительно
произвольной лабораторной системы координат, χ –
вспомогательный угол, определяемый из условия $\operatorname{tg} \chi = E_a/E_b$.

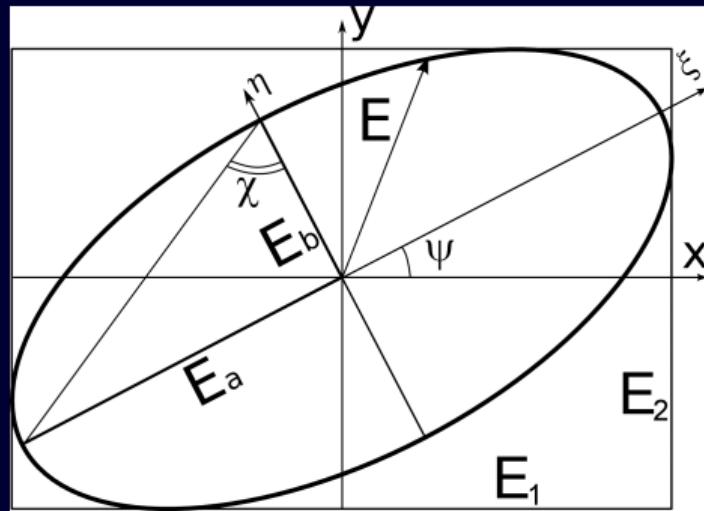
Три независимых параметра: $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$.
Пусть E_1 и E_2 – ортогональные проекции \vec{E} , δ –
разность фаз в проекциях. Тогда:

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

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

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

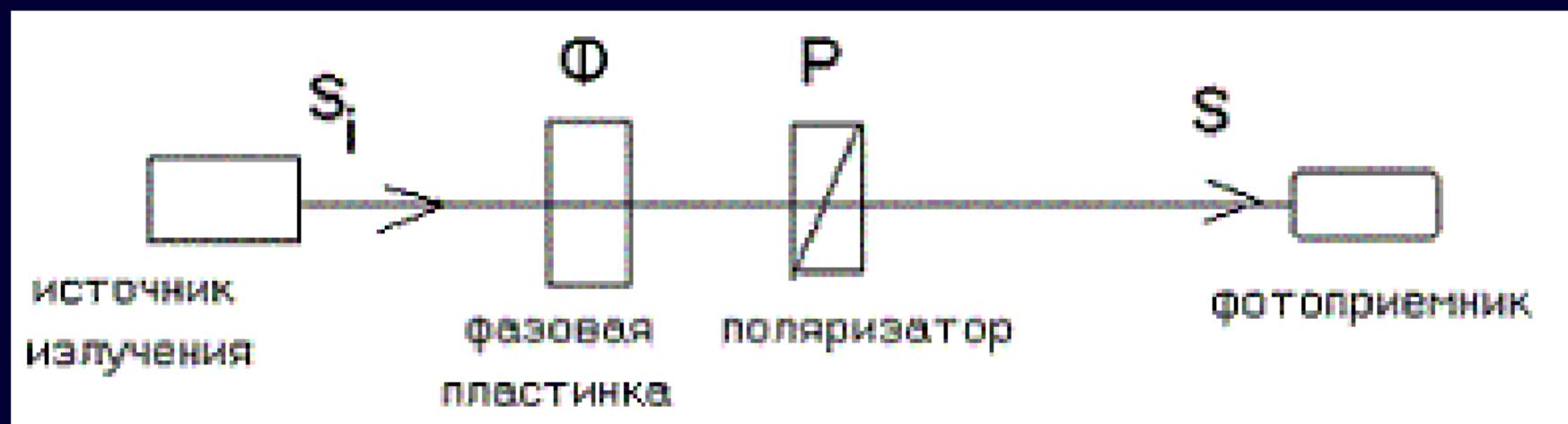
$$S_3 = V = 2E_1 E_2 \sin \delta$$



Параметры Стокса

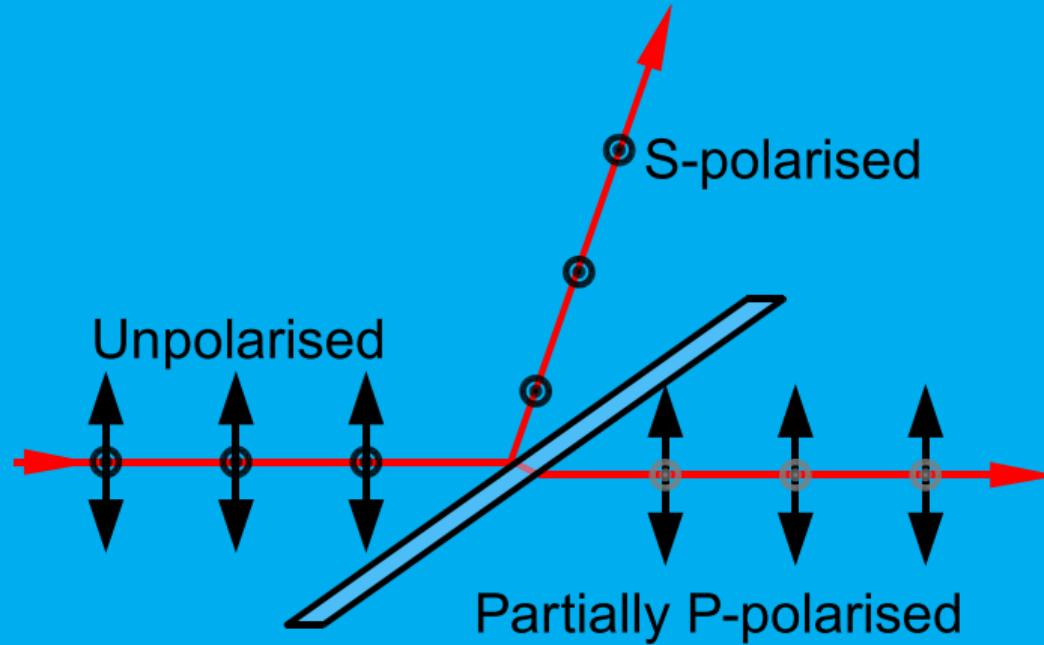
Вращаем поляризатор на 0, 60 и 120 градусов, вычисляем параметры Стокса.

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

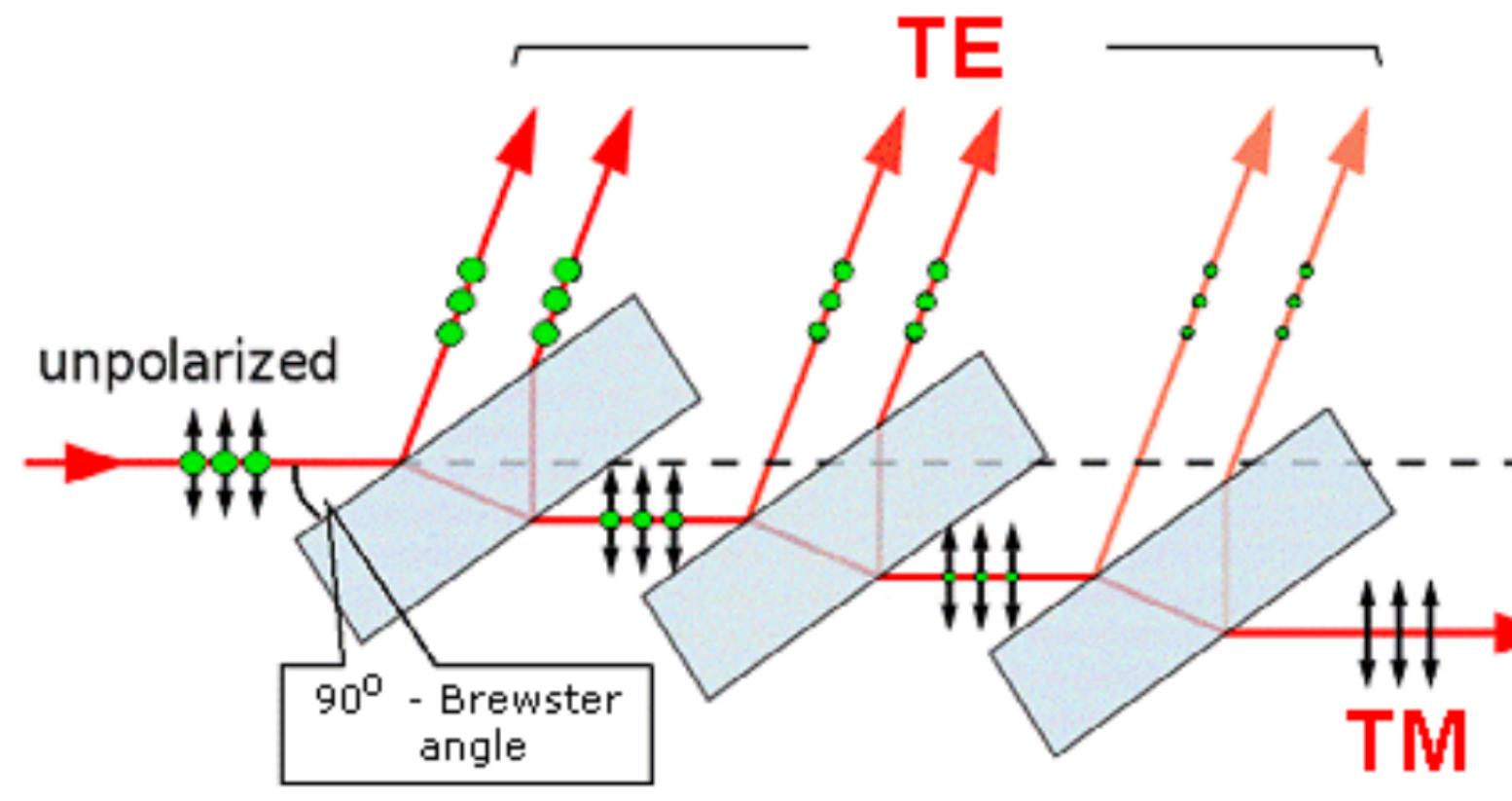


Угол Брюстера

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

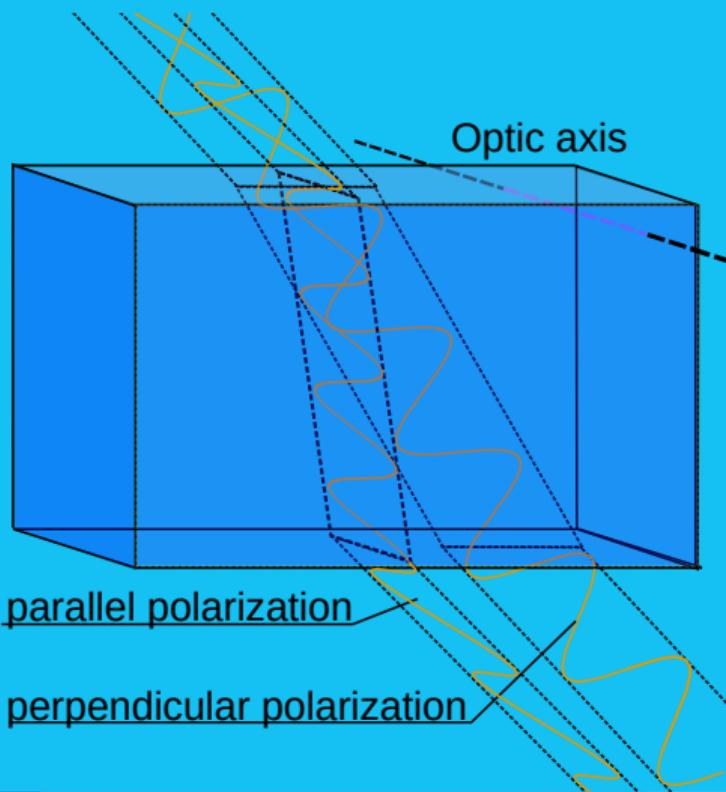


Угол Брюстера

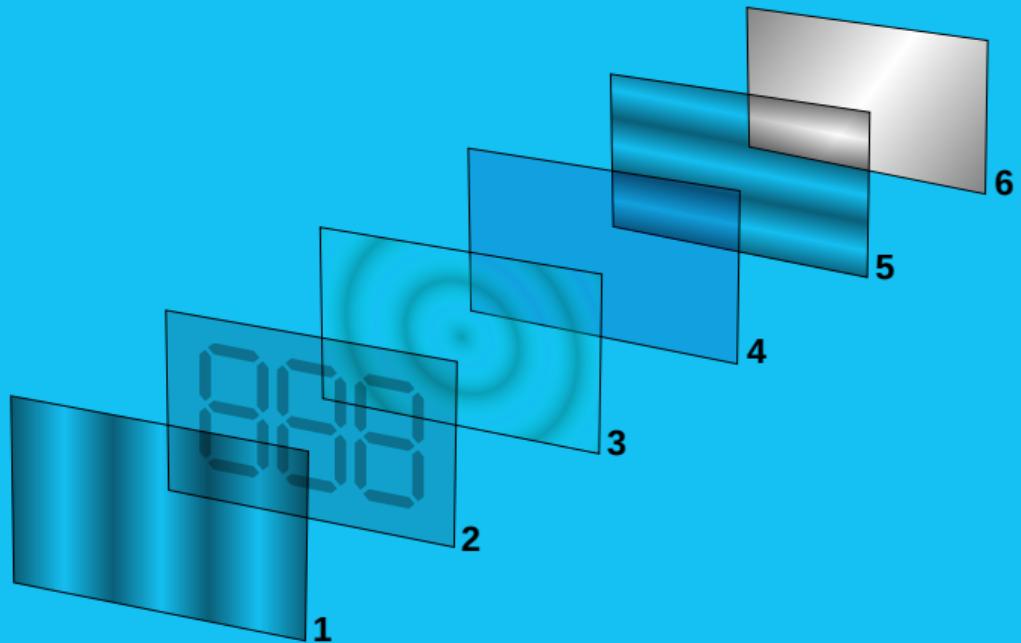


Двойное лучепреломление

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

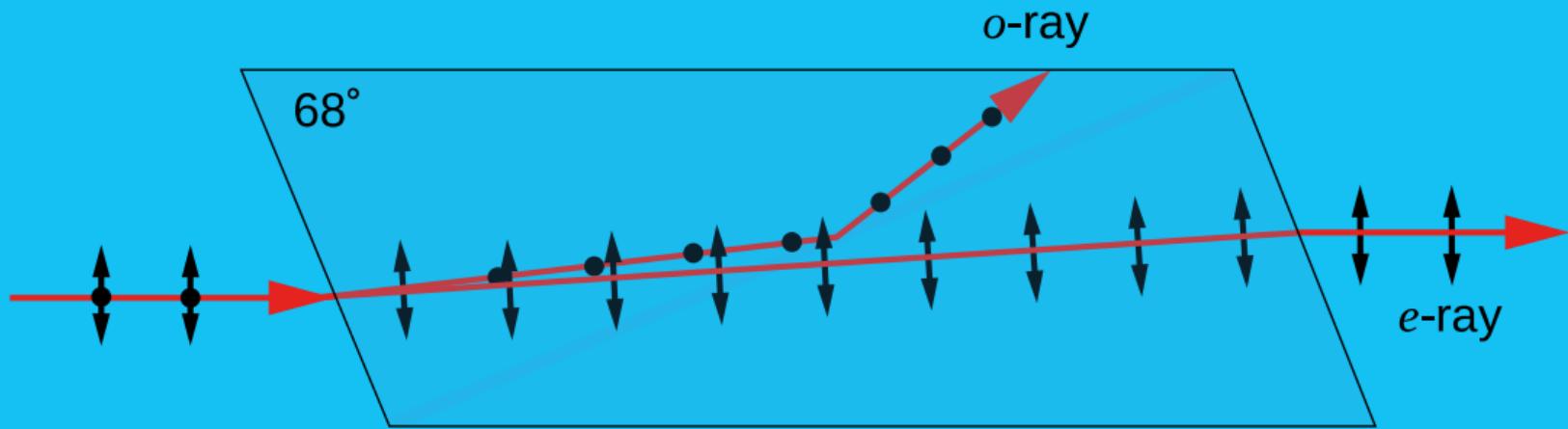


Двойное лучепреломление



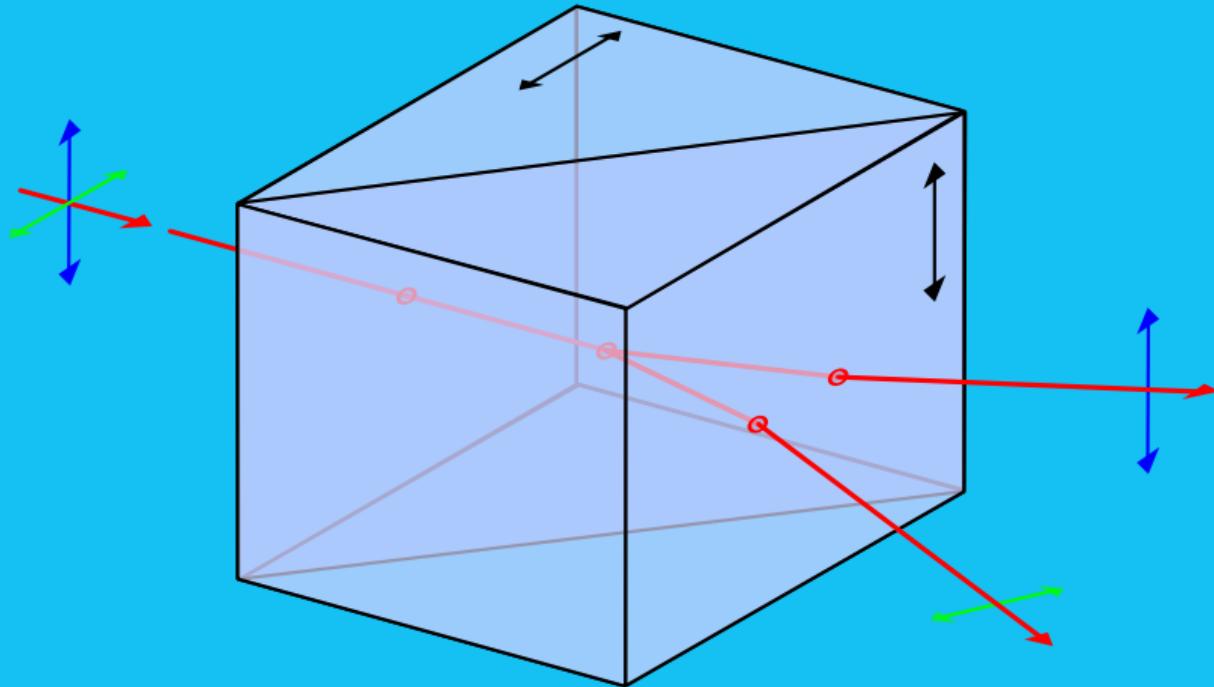
- 1,5 – поляризаторы,
- 2,4 – прозрачные электроды,
- 3 – ЖКК (оптически активное вещество),
- 6 – отражатель или подсветка.

Двойное лучепреломление



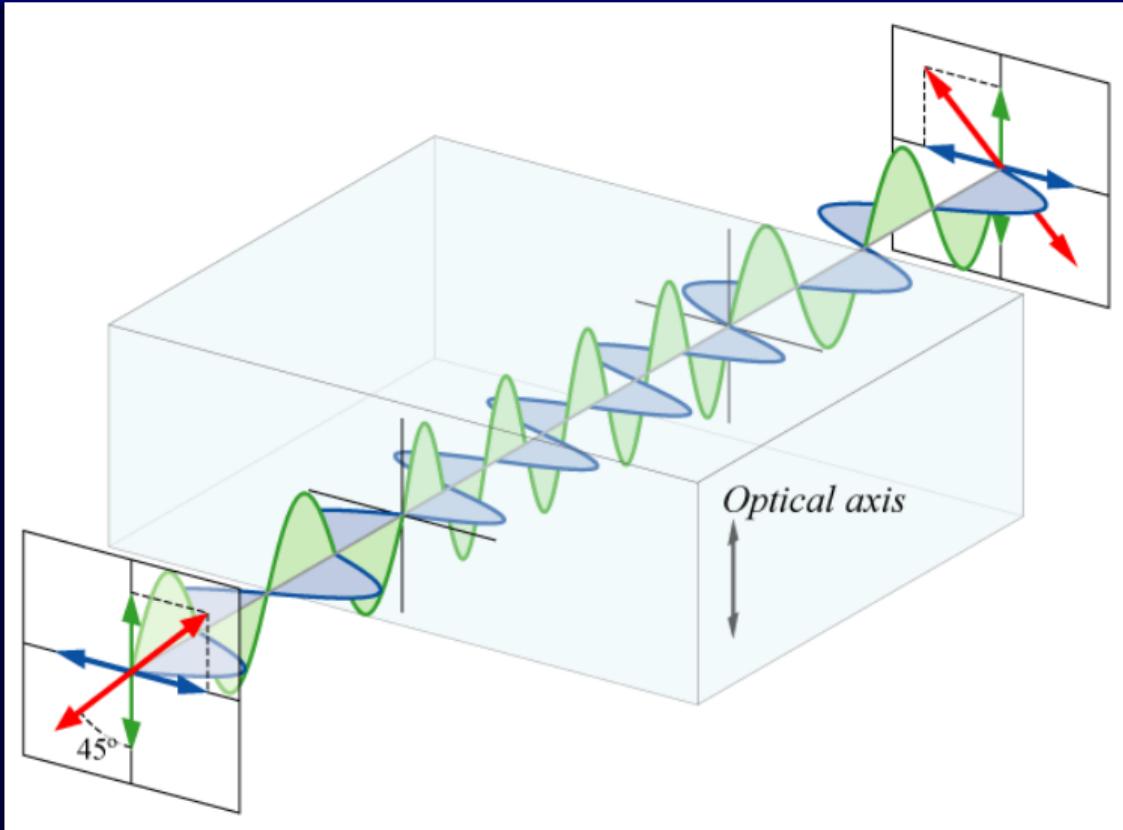
Призма Николя

Двойное лучепреломление



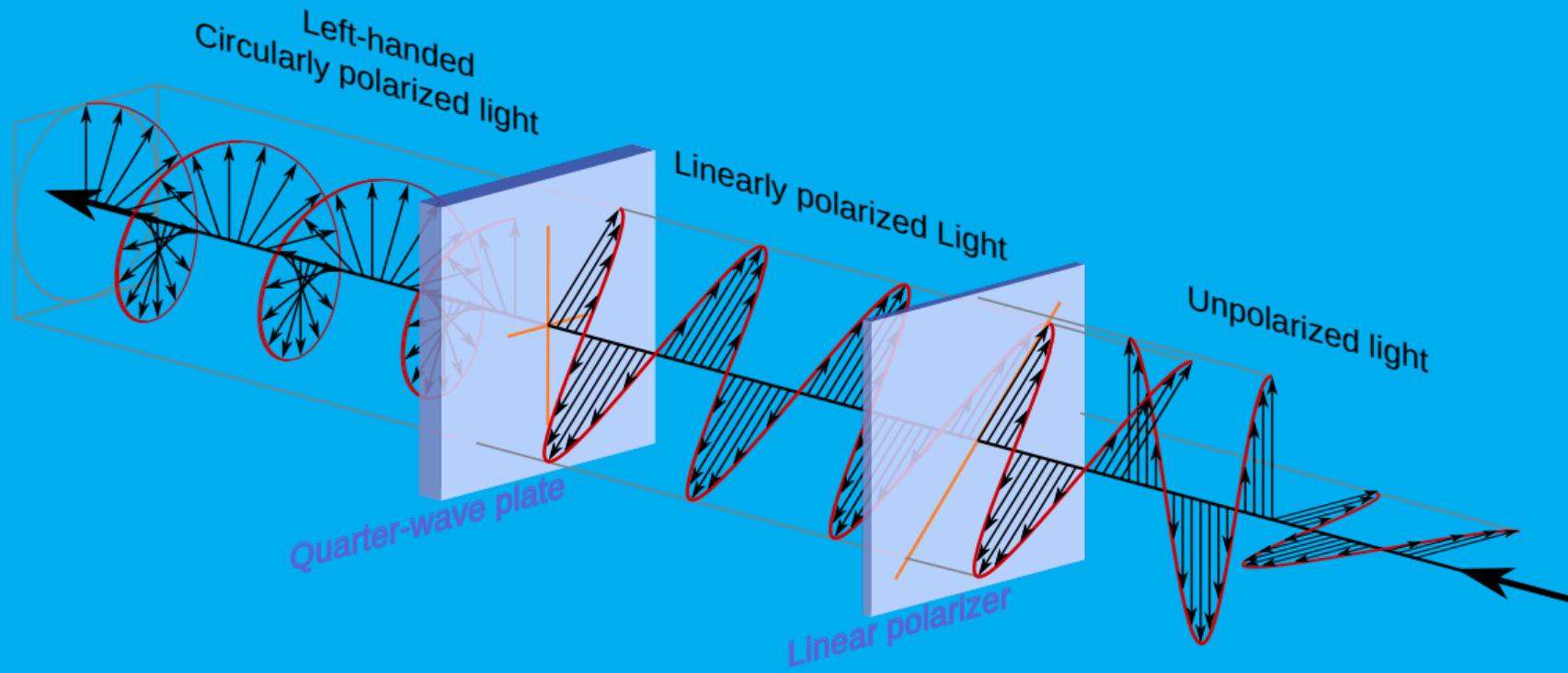
Призма Волластона

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.

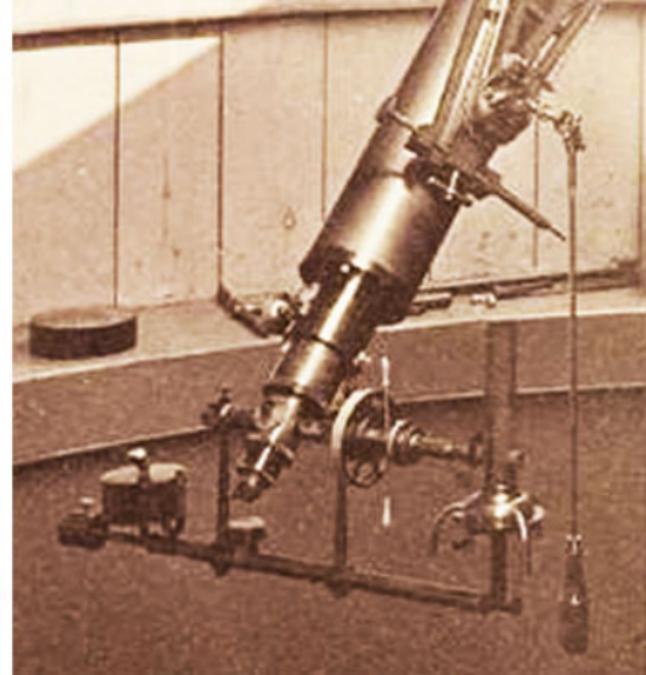
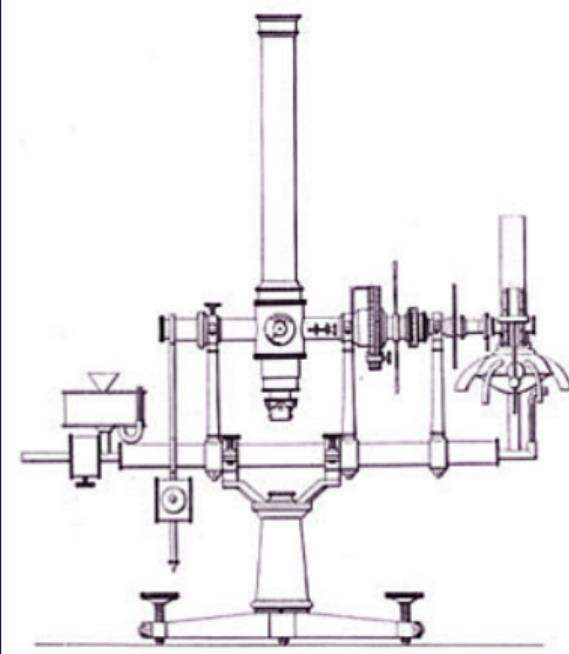
Сам термин «астрофизика» предложен Иоганном Карлом Фридрихом Цёлльнером (известен по точной фотометрии) в 1865 г.

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

Фотометрия

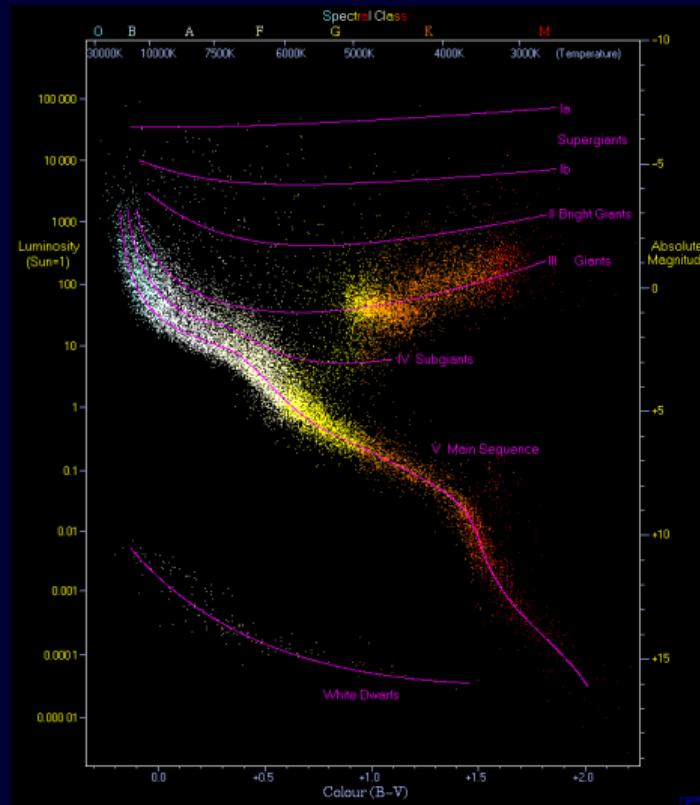
Фотометр Цёлльнера

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

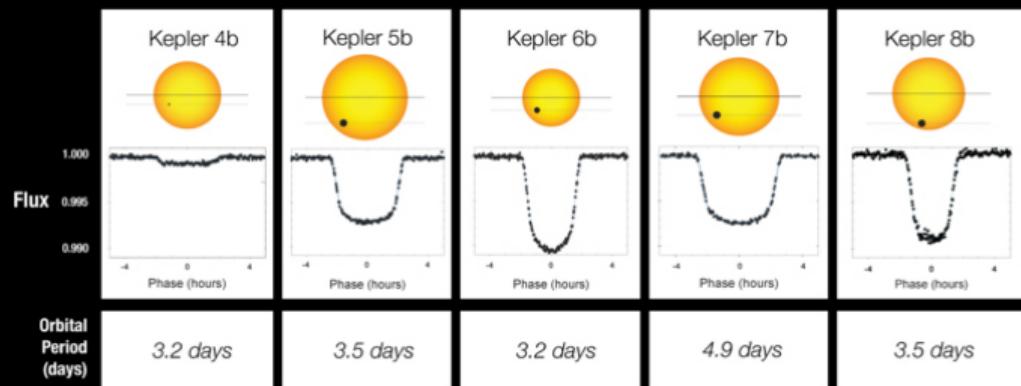
- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.



Область применения фотометрии

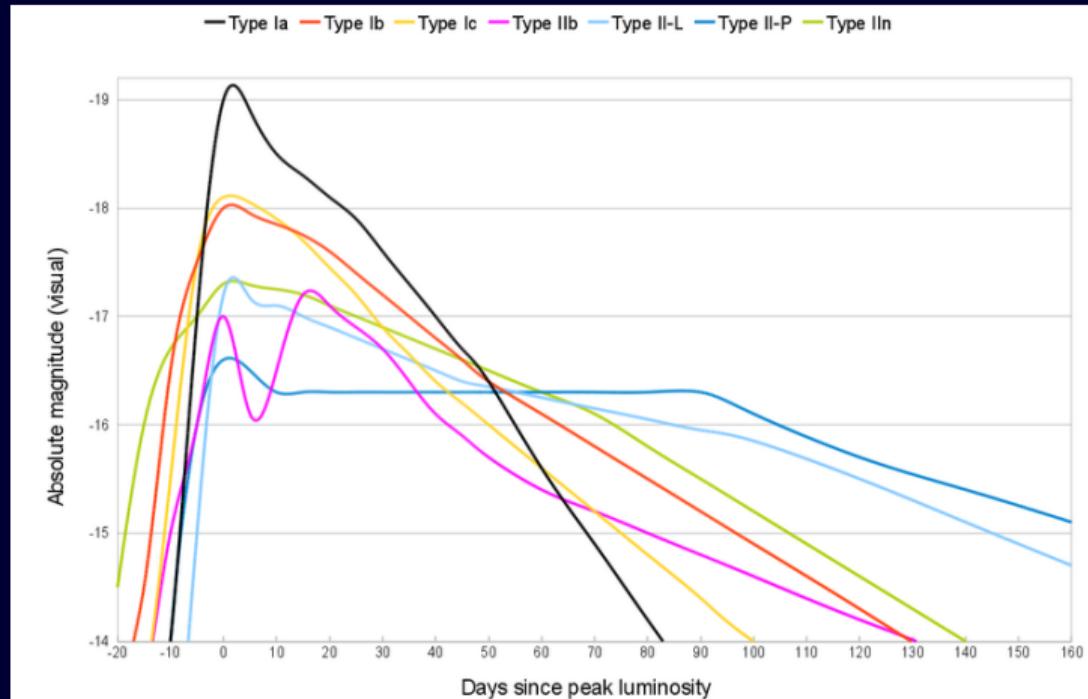
- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.

Transit Light Curves

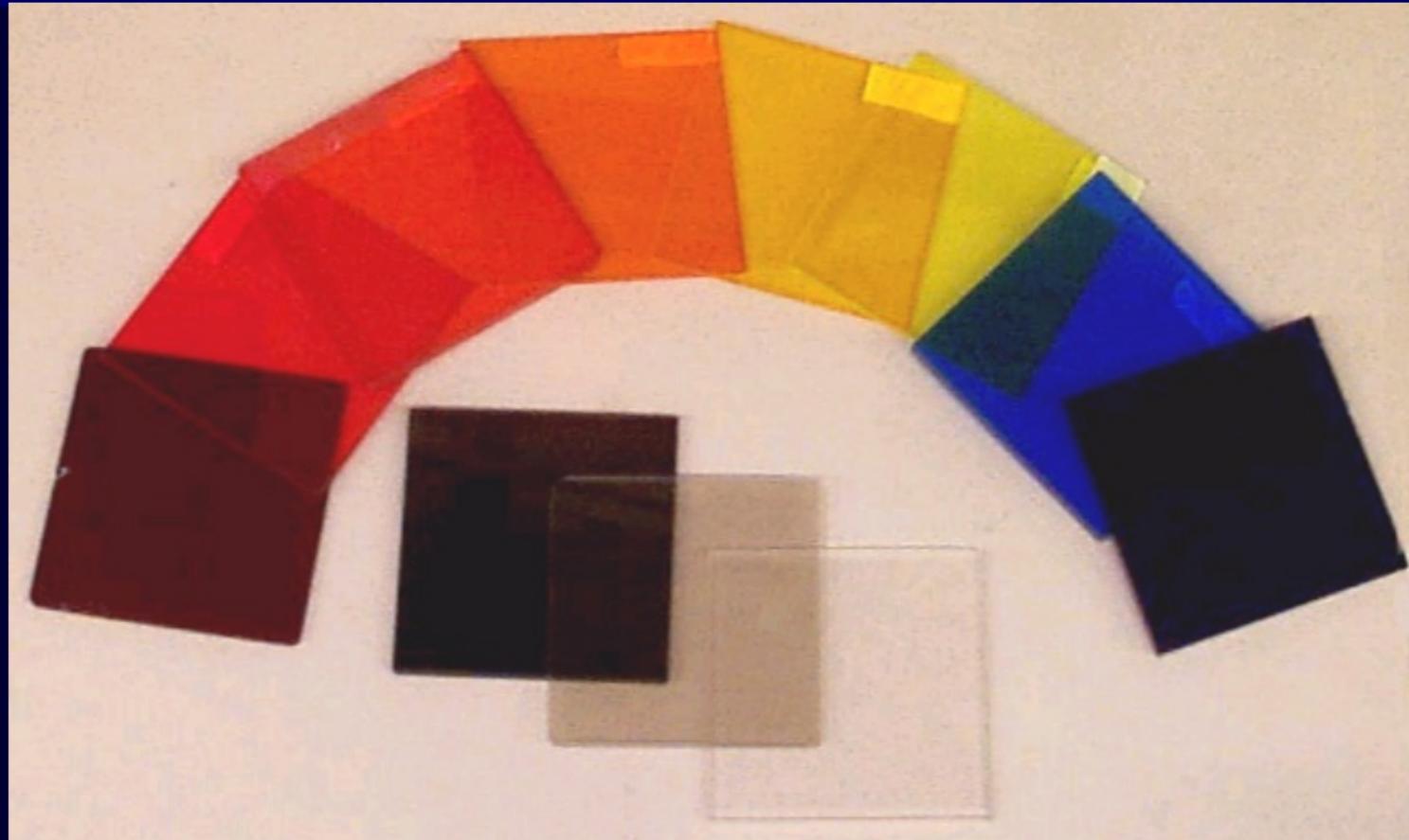


Область применения фотометрии

- 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.

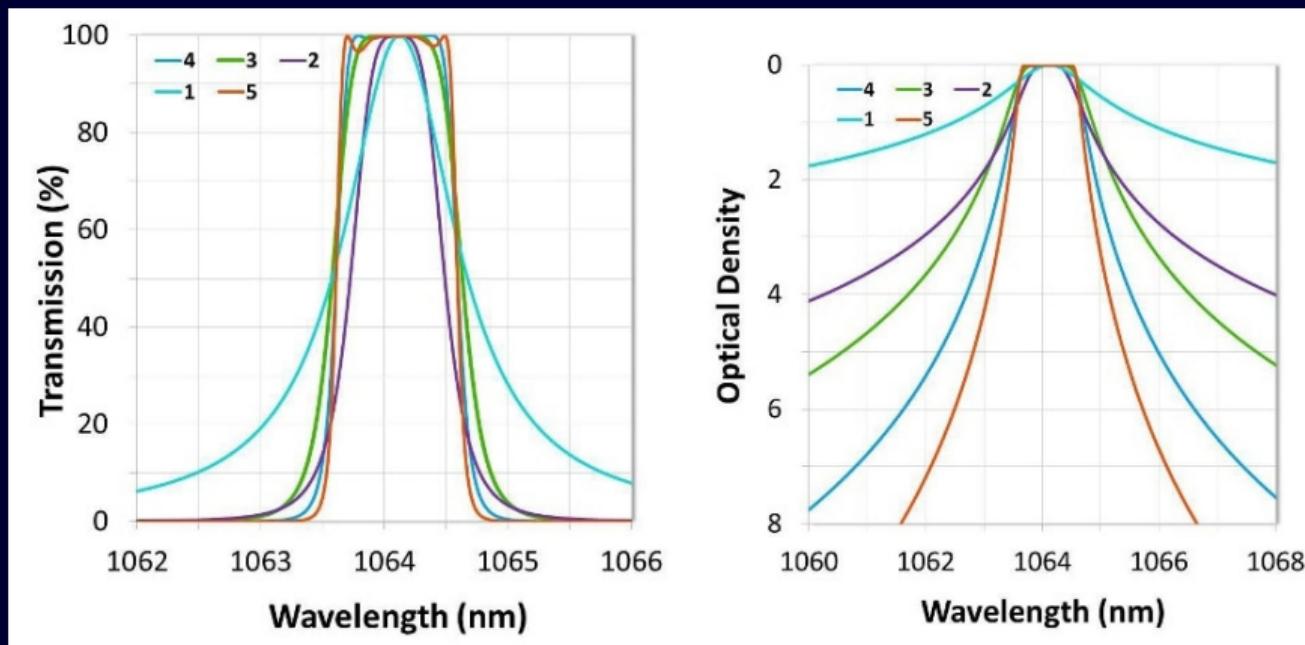


Фотометрические диапазоны

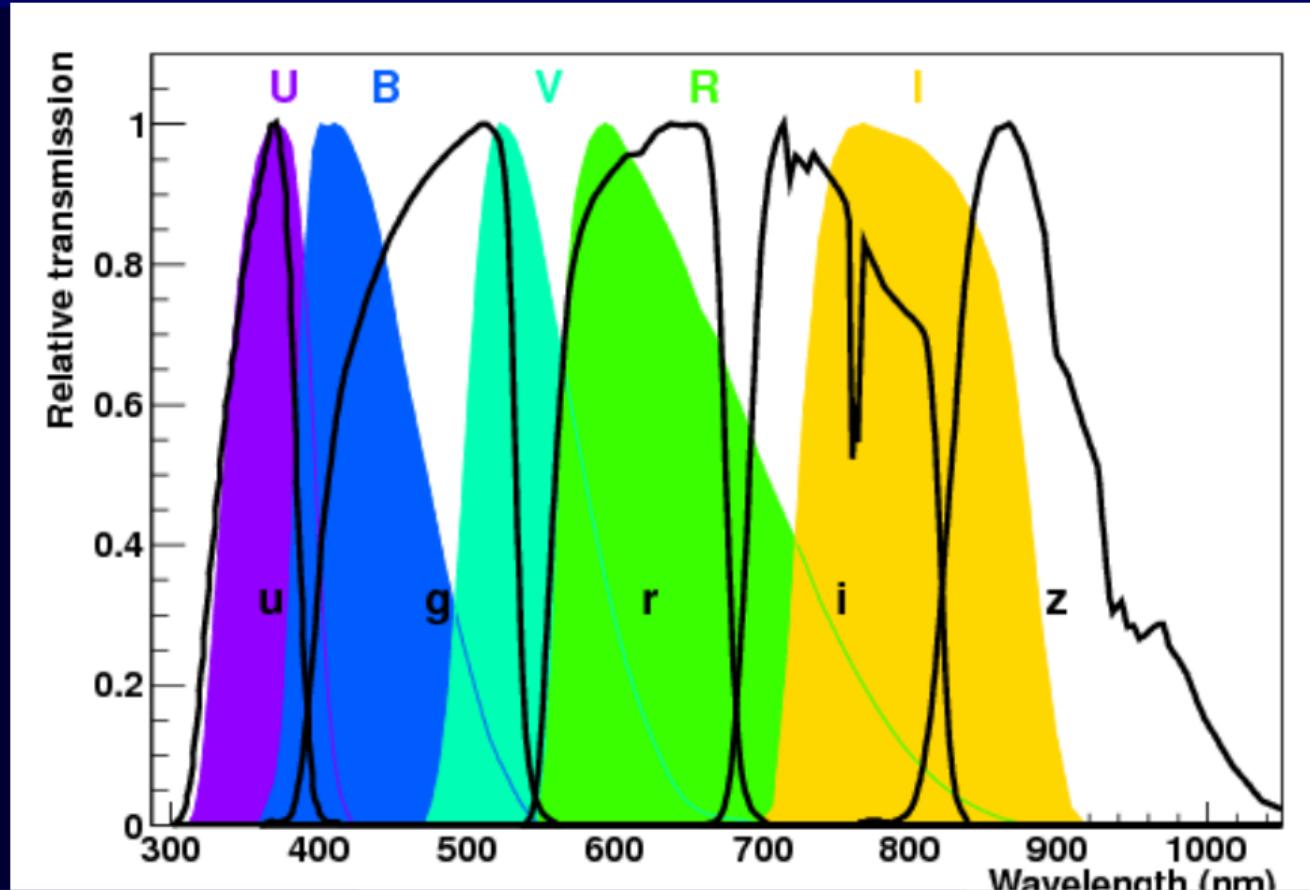


Фотометрические диапазоны

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

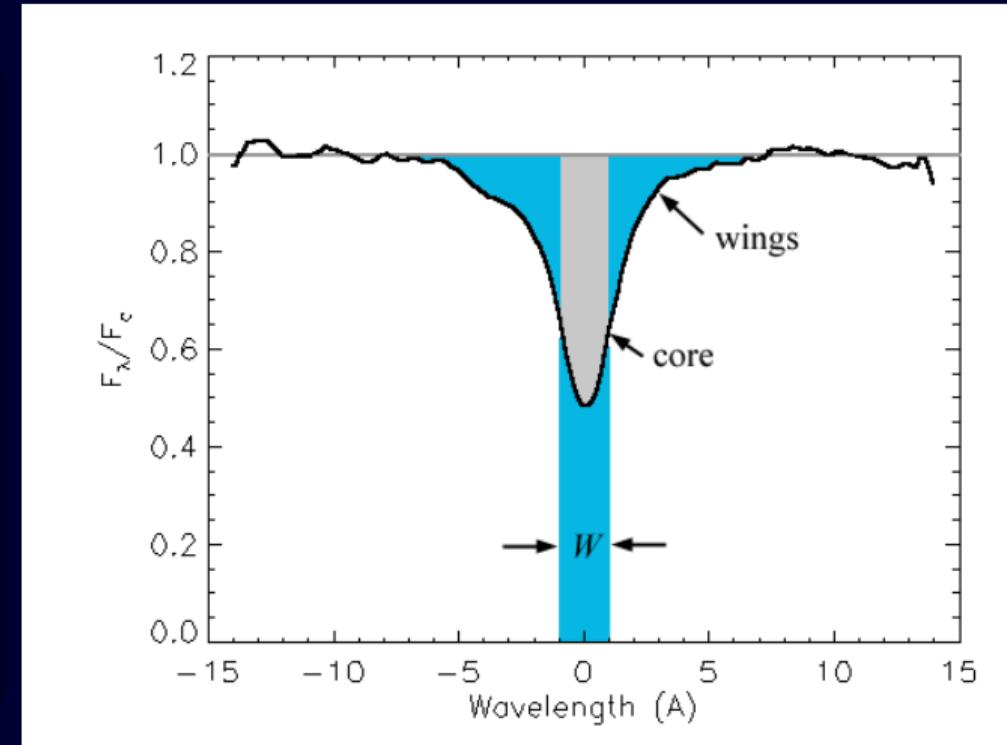


Фотометрические диапазоны



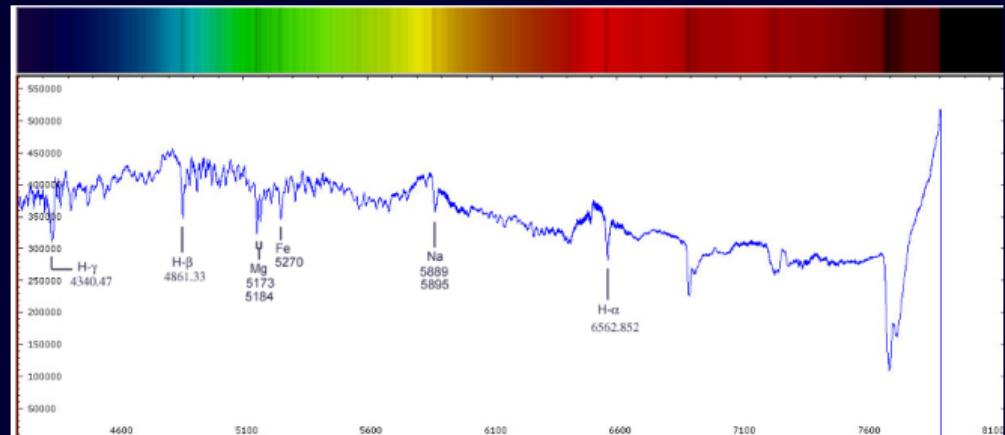
Область применения спектроскопии

- 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.



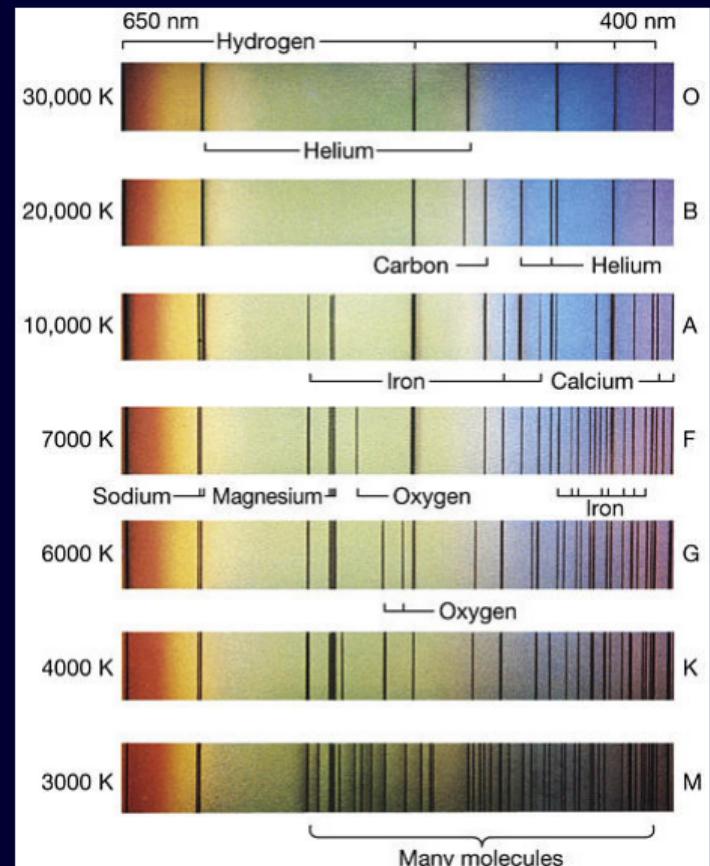
Область применения спектроскопии

- 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

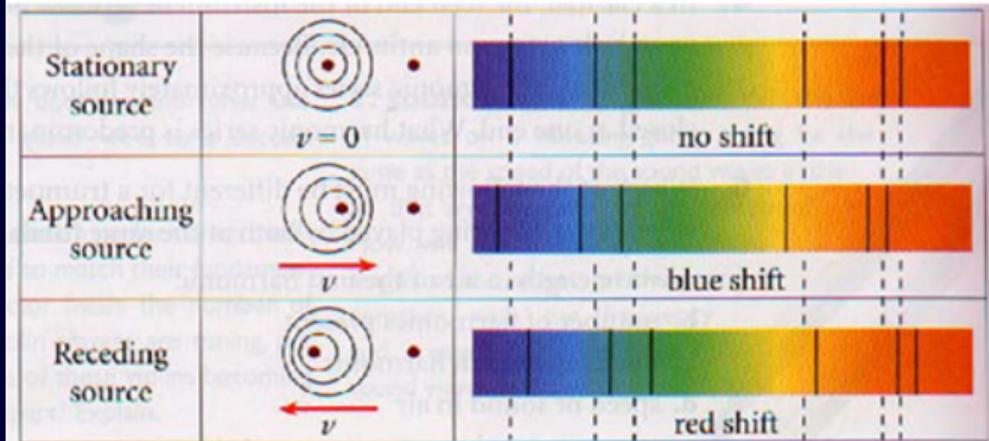
- Эквивалентные ширины:
расстояние до звезд, их возраст,
скорость потери массы и многие
другие параметры.
- Спектрополяриметрия.
- Определение химического состава
звезд.
- Строгая спектральная
классификация.
- Определение скорости движения
объектов.
- Космология.



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.

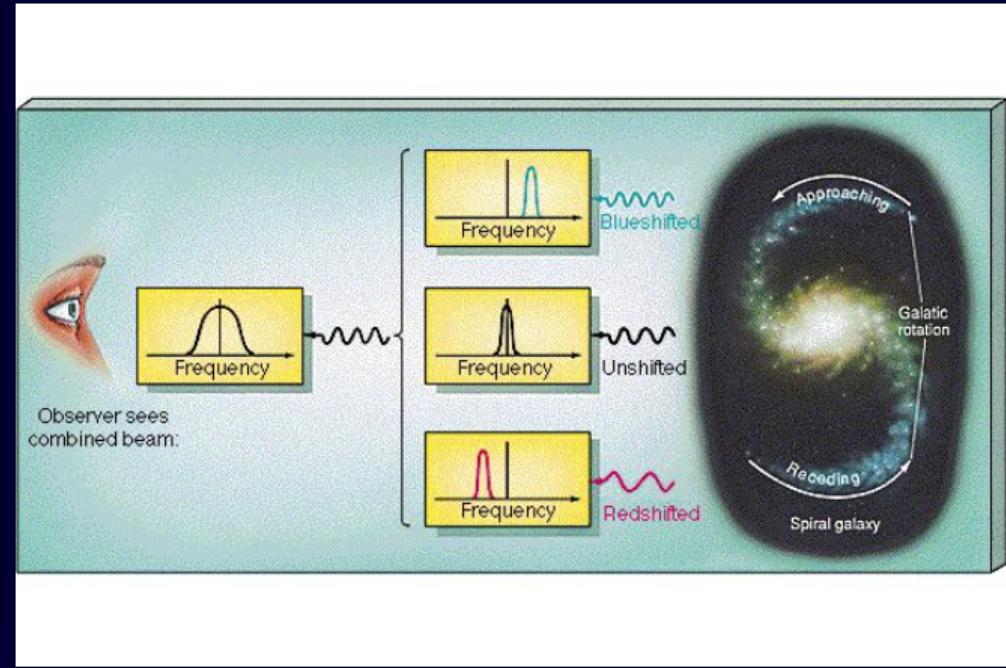
Doppler Effect



Measuring the relative velocities of stars
by the Doppler shift.

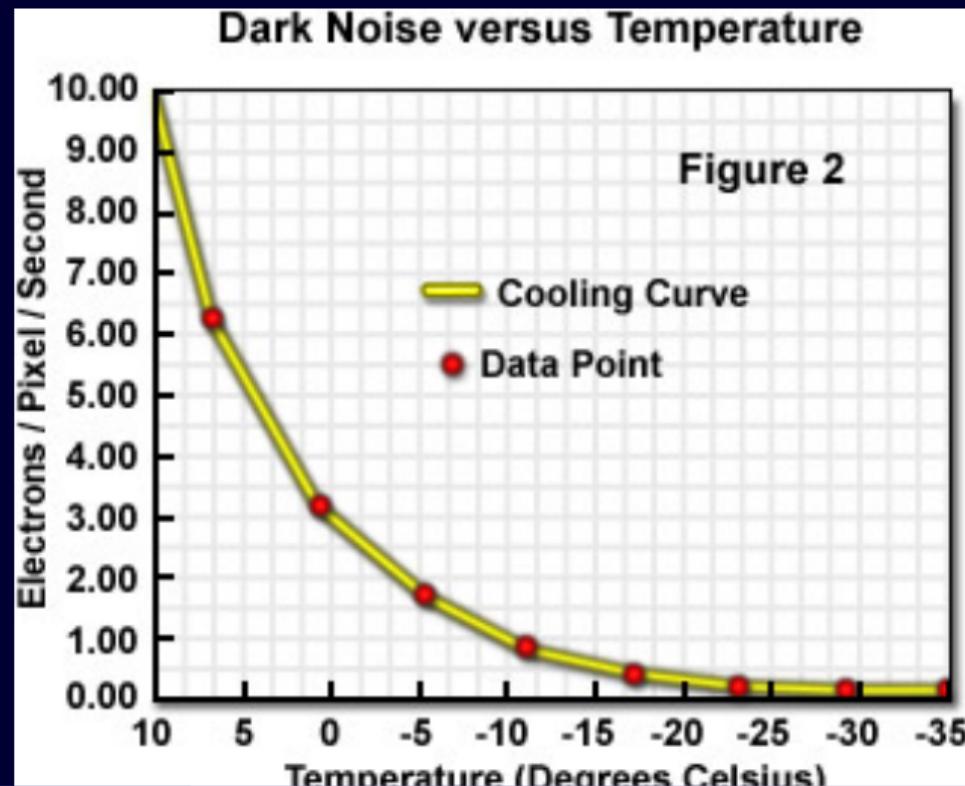
Область применения спектроскопии

- 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.



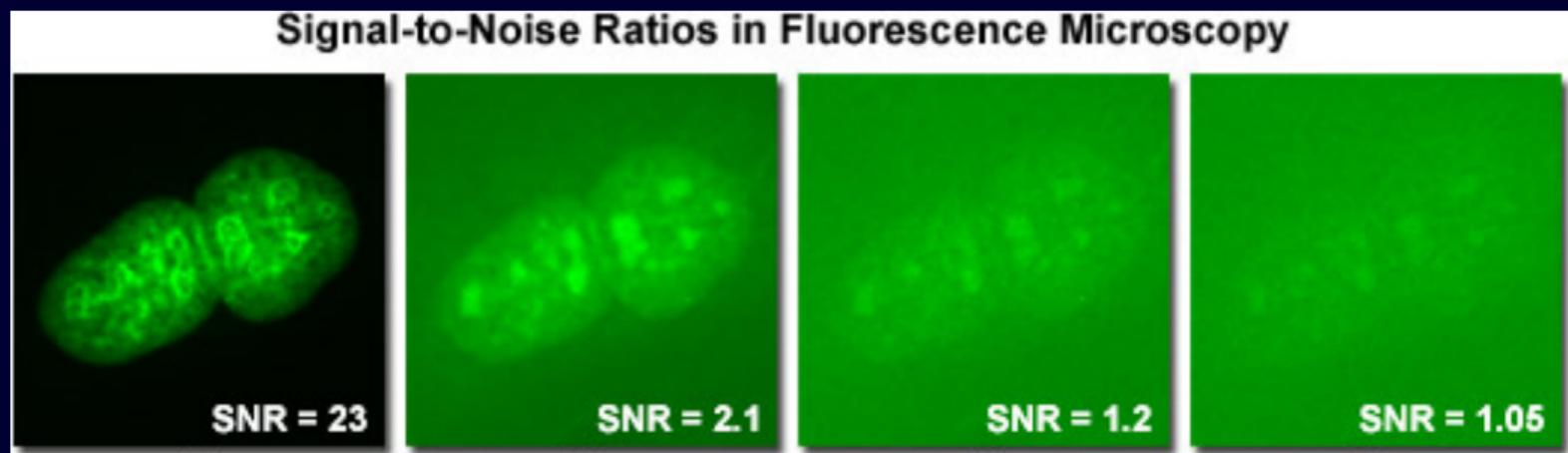
Учет шумов детекторов

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 считываания (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 считываания.



Учет шумов детекторов

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

Белый шум $N_{white} = \sqrt{4kT\nu R_{out}} \cdot A_{amp}/S_{amp}$, ν – 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 (см^2), I_d – измеренный на 300 К темновой ток ($\text{nA}/\text{см}^2$), E_g – ширина запрещенной зоны (эВ).

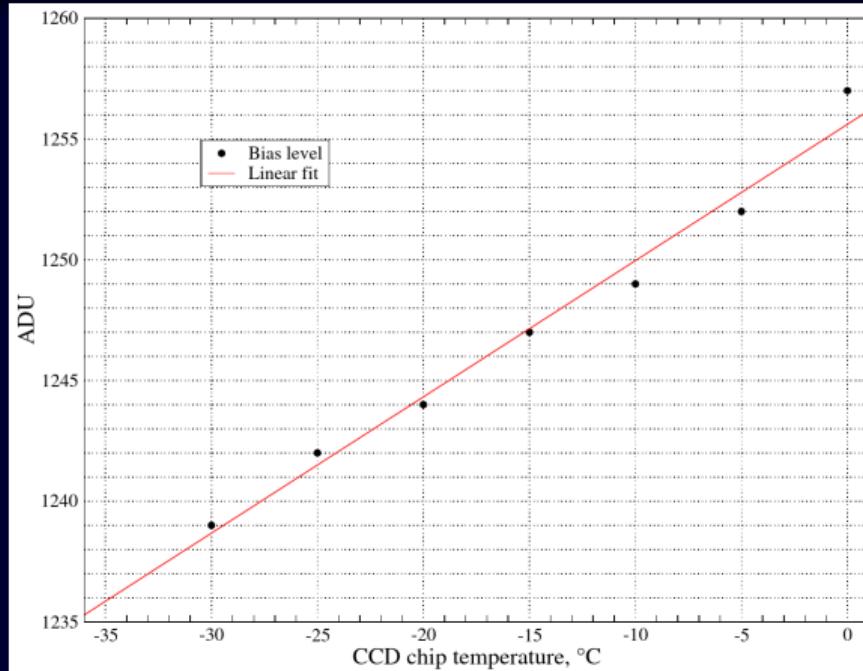
Конвейер обработки данных

- 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».

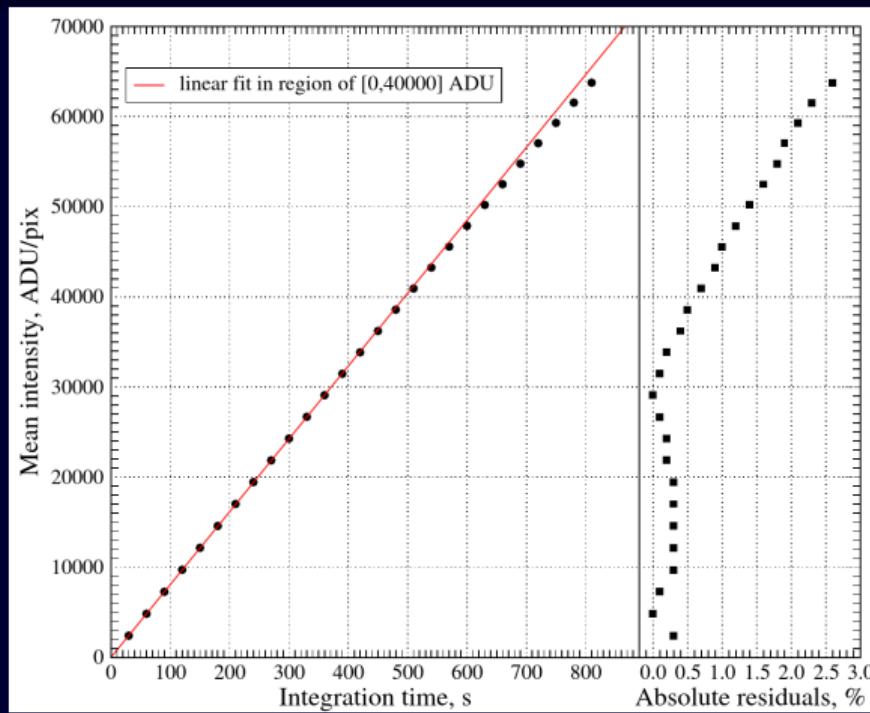
Определение характеристик новой ПЗС

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

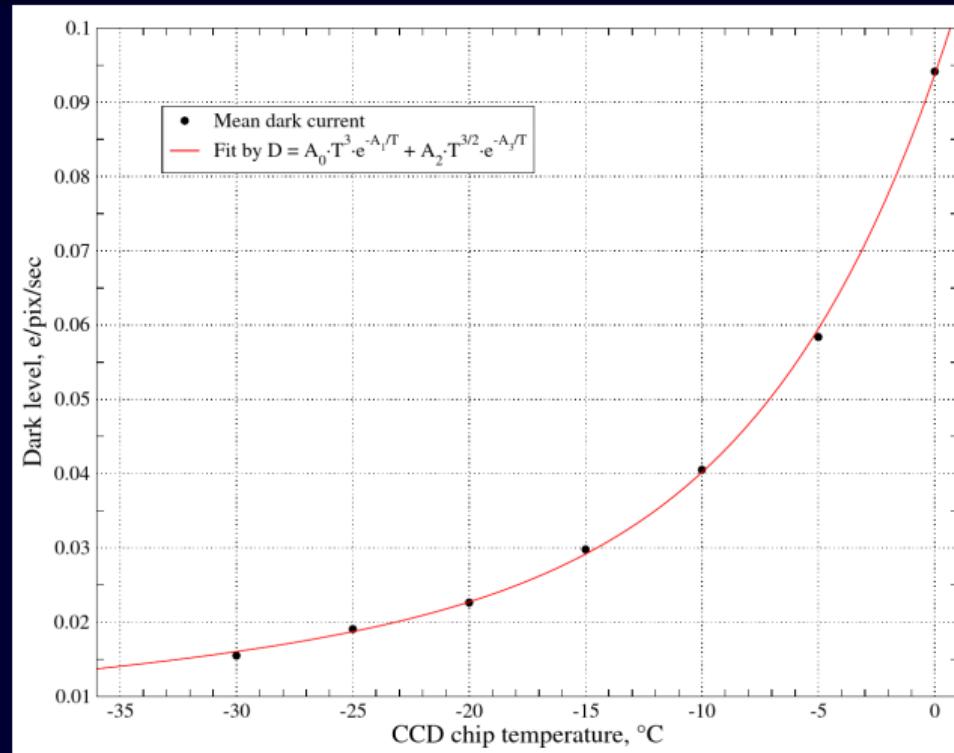
$$\sigma^2 = R^2 + \sigma_{ph}^2 + \sigma_{ff}^2 = R^2 + I + k^2 I^2.$$

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

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 .

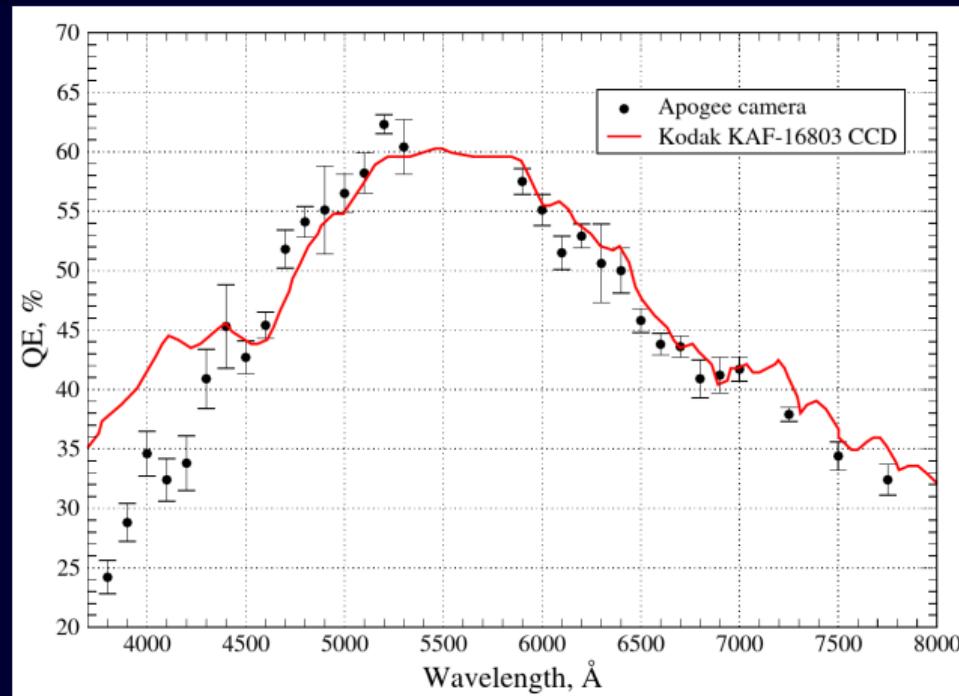
Определение характеристик новой ПЗС

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

WCS-привязка

Параметры WCS

CRVAL_i значение мировых координат опорного пикселя

CRPIX_i координаты опорного пикселя на изображении

CDELT_i инкремент координат

CTYPE_i тип матрицы преобразования

CROTA_i угол поворота систем координат

PC_{ij} немасштабированная матрица преобразований

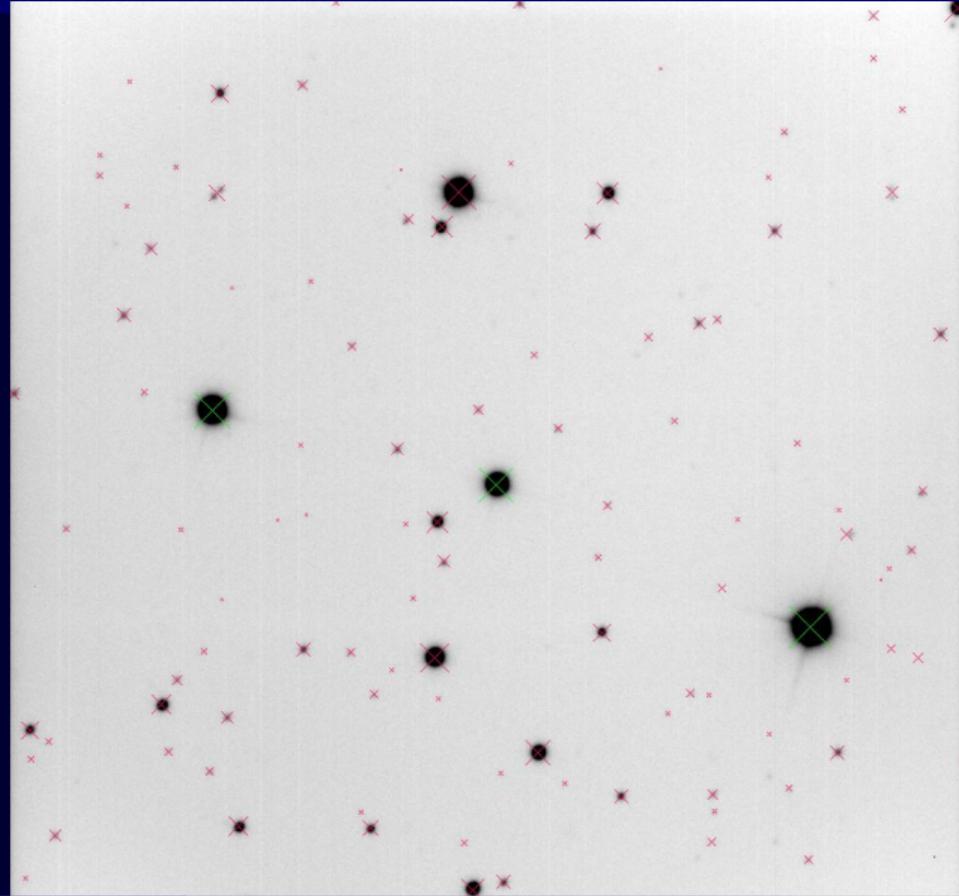
CD_{ij} PC с масштабом

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

WCS-привязка



WCS-привязка



Спасибо за внимание!

mailto

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com