

Регистрация излучения и информация, в нем содержащаяся

Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
Лаборатория физики оптических транзиентов

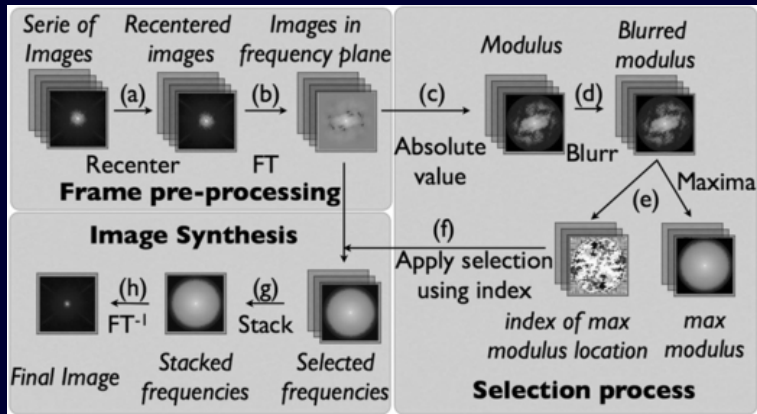
8 апреля 2022 года



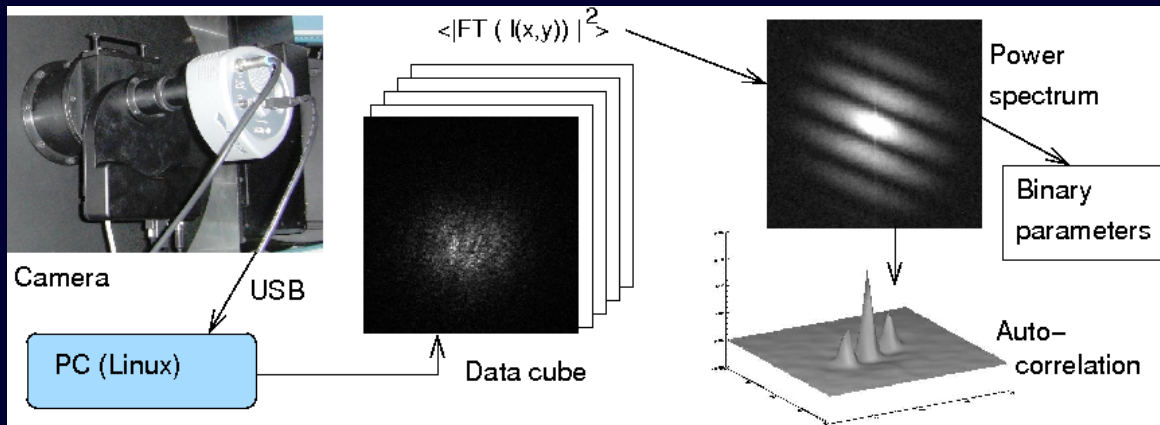
- 1 «Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные
- 2 Диспергирующие системы
- 3 Поляризация и анализаторы поляризации
- 4 Методы астрофизики
- 5 Фотометрия
- 6 Спектроскопия
- 7 Учет шумов детекторов
- 8 Кодирование и хранение информации

«Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные

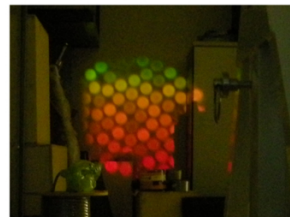
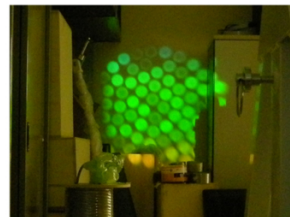
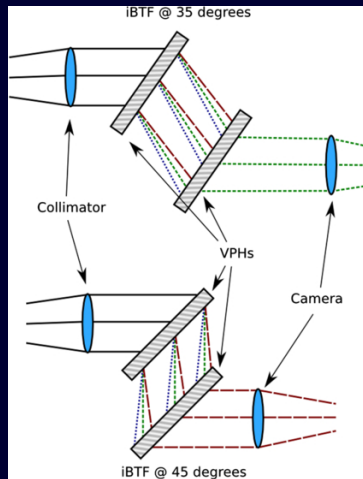
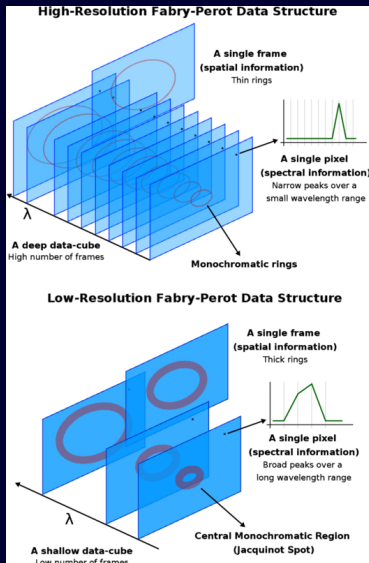
Излучение: 4 степени свободы (координаты на изображении, частота, время). 3D data cubes (FITS-files): слайсы по времени (быстропеременные объекты, lucky images, speckle...) или по частоте (VPHG, IFP, средне- и широкополосные фильтры).



«Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные



«Декомпозиция» излучения: 3D, 4D данные



Диспергирующие системы: призмы

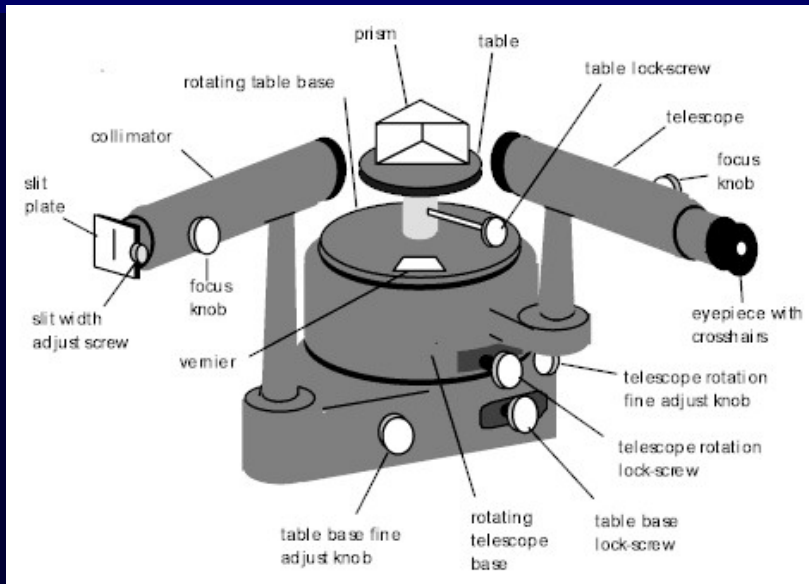


1814, спектроскоп Йозефа фон Фраунгофера

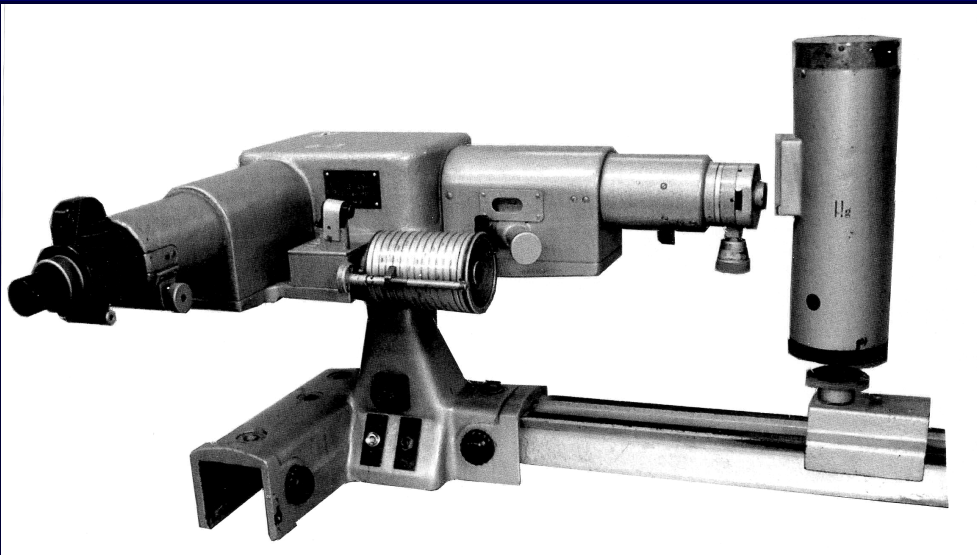
Диспергирующие системы: призмы



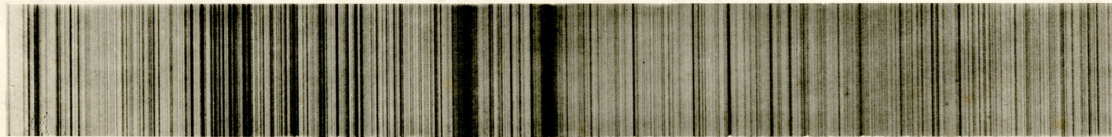
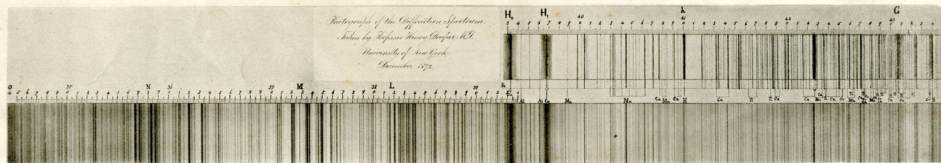
Диспергирующие системы: призмы



Диспергирующие системы: призмы

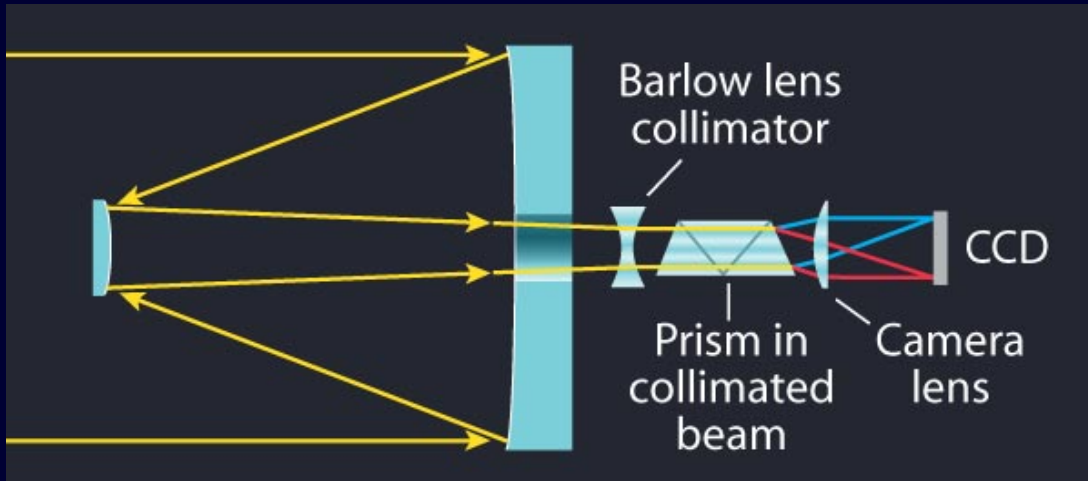


1872, первый спектр Веги на фотопластинке. С 1918 по 1924 г. вышел каталог HD в честь Дрэпера (изначально 225300 звезд, Эдвард Пикеринг сотоварищи, наблюдения в гарвардской обсерватории с объективной призмой).

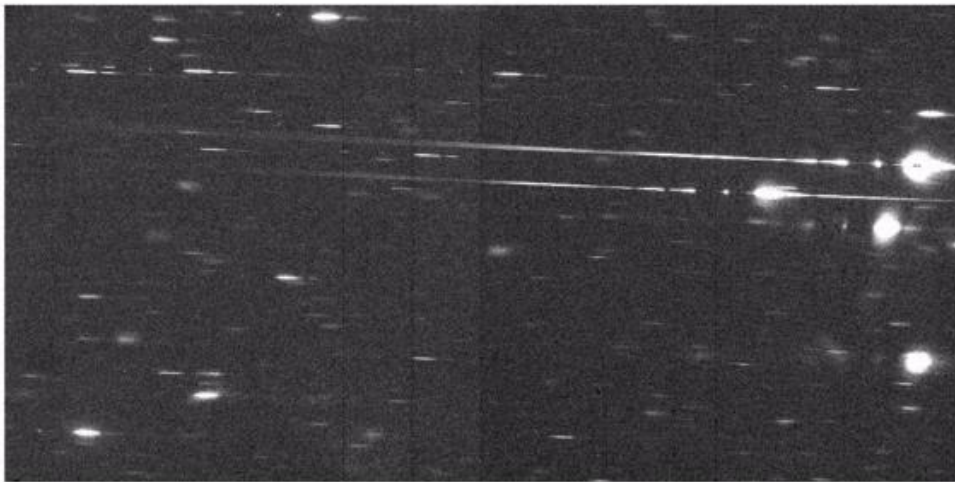


Бесщелевые спектры

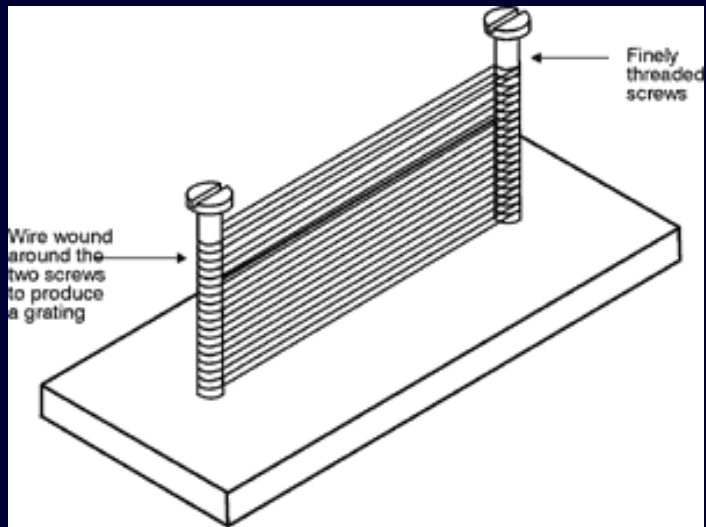
Николас Мейол, 1930-е.



Бесщелевые спектры

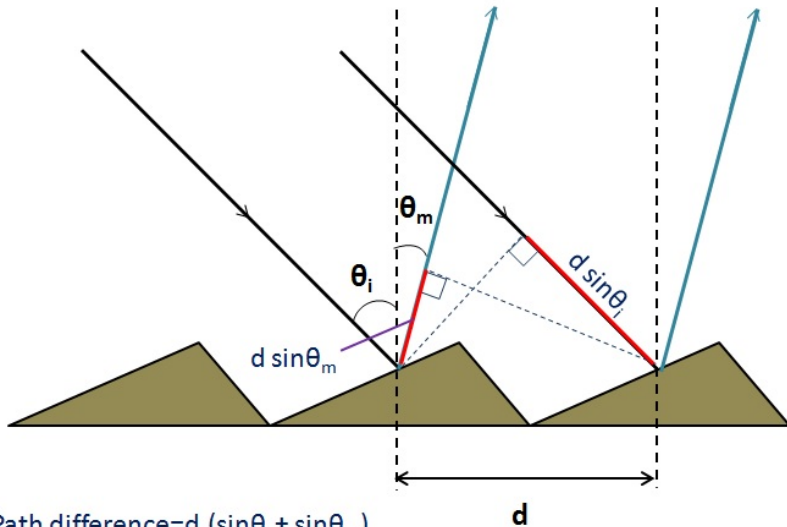


Дифракционная решетка



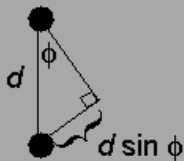
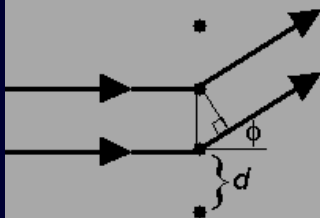
Нитяная решетка Фраунгофера

Дифракционная решетка



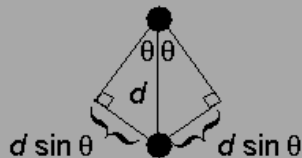
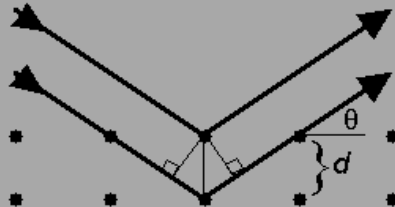
Дифракционная решетка

Fraunhofer diffraction



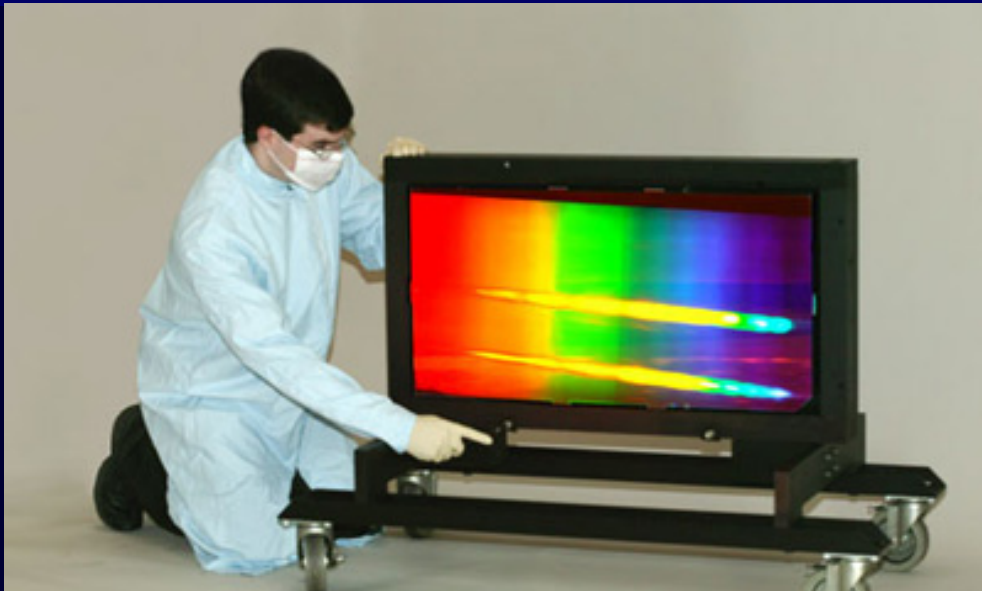
For constructive interference,
 $d \sin \phi = n \lambda$

Bragg diffraction

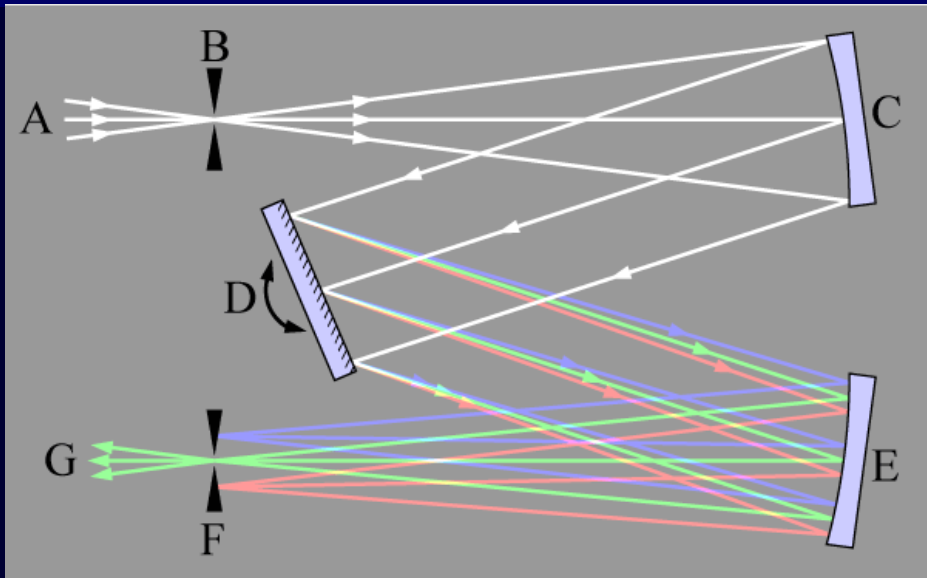


For constructive interference,
 $2(d \sin \theta) = n \lambda$

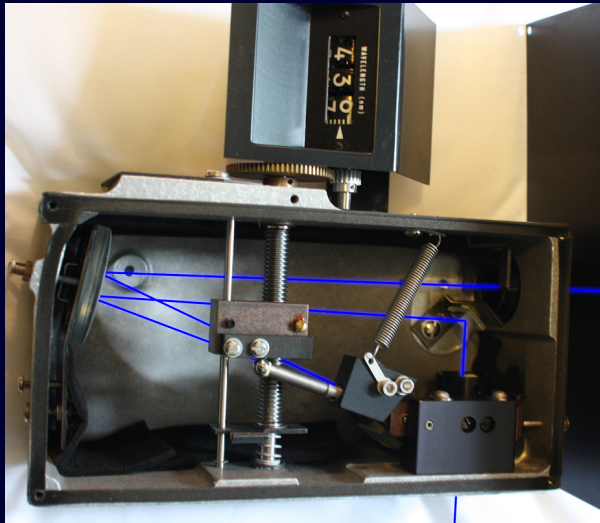
Дифракционная решетка



Дифракционная решетка

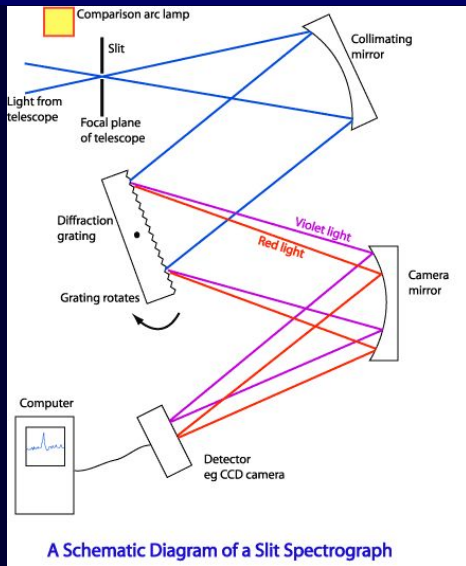


Дифракционная решетка

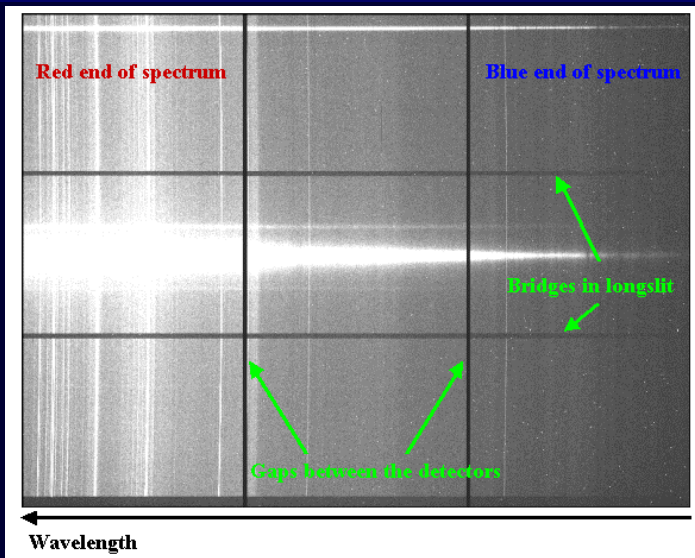


Монохроматор Фасти–Эберта

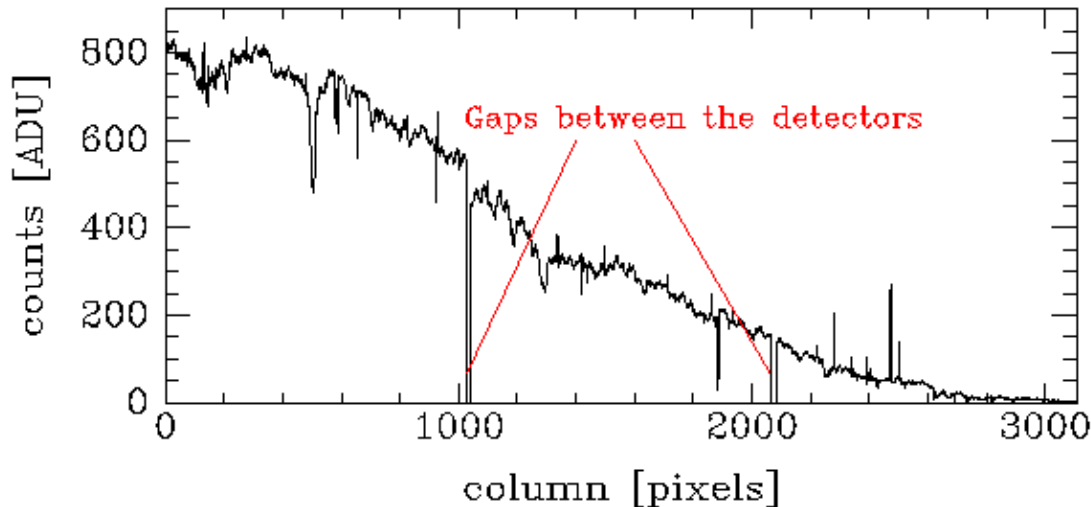
Длиннощелевые спектры



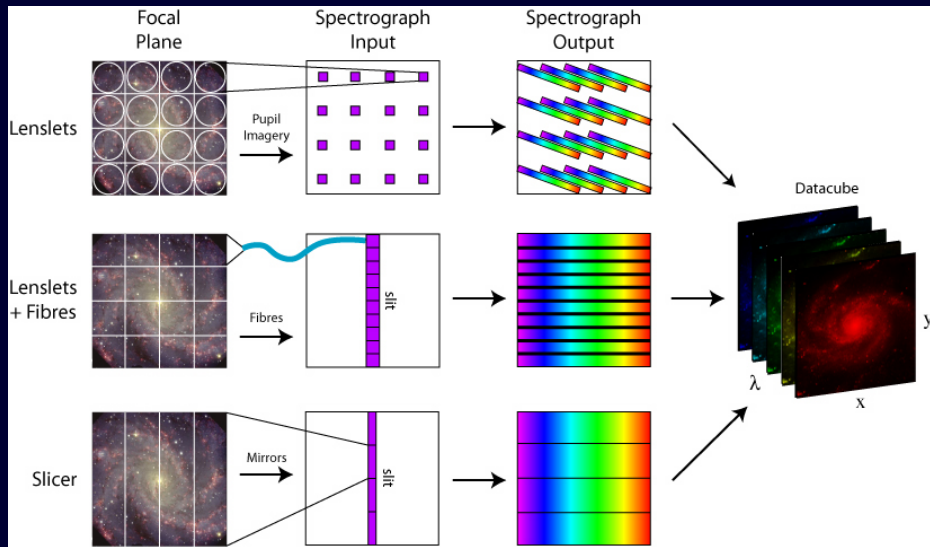
Длиннощелевые спектры



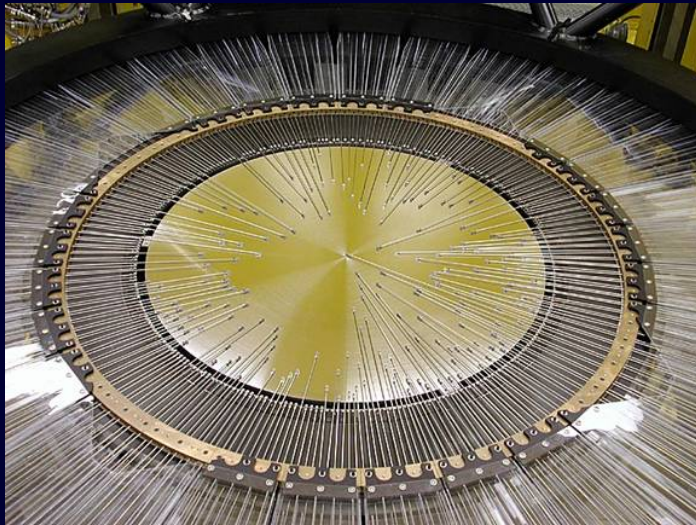
Длиннощелевые спектры



Integral field spectrograph

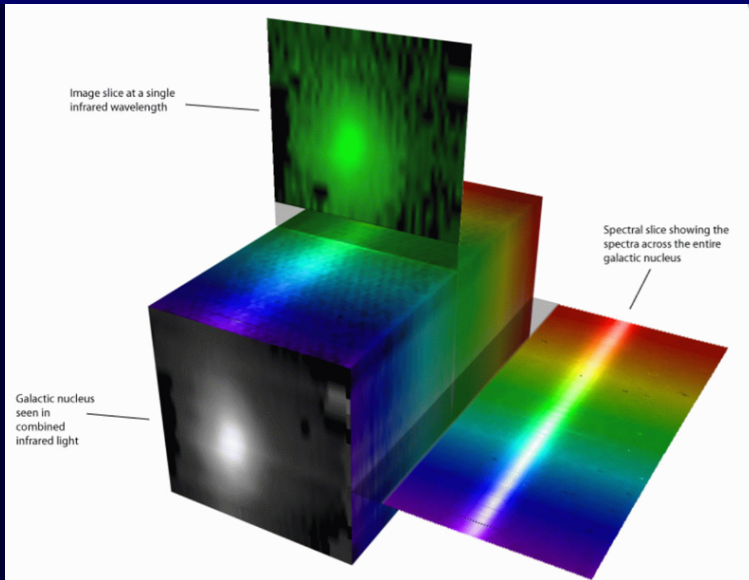


Integral field spectrograph



Нectospec — сложный спектрограф 6.5-м телескопа ММТ

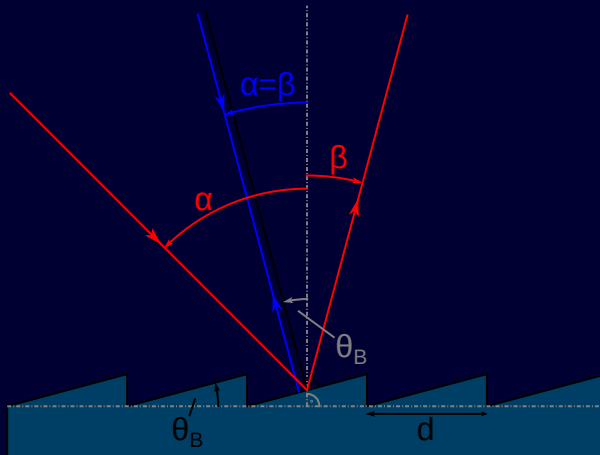
Integral field spectrograph



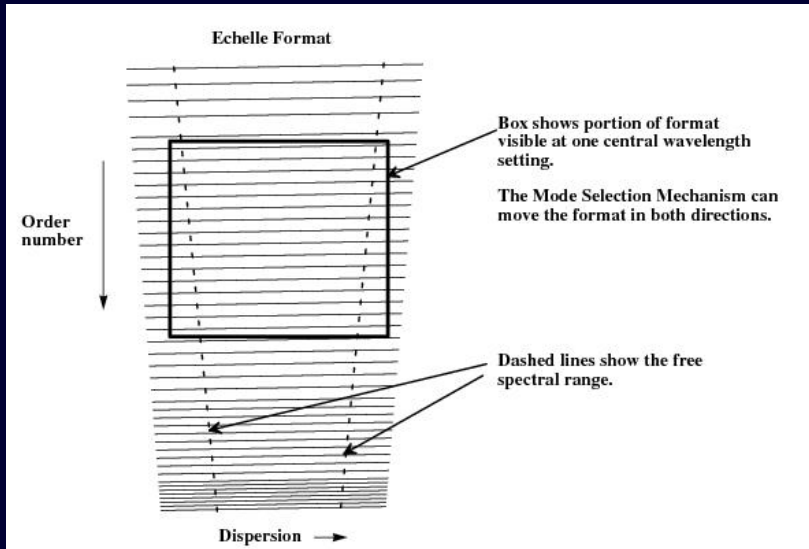
Эшелле–спектрограф

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

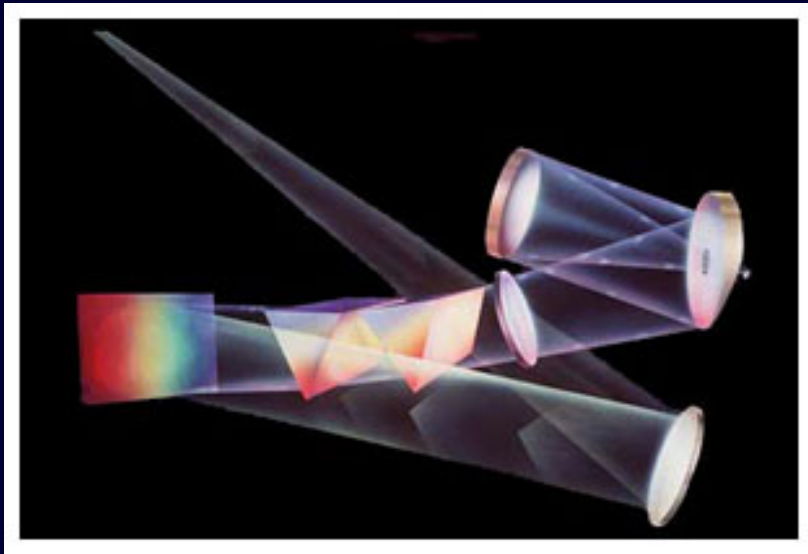
$$\theta_B = \arcsin \frac{m\lambda}{2d}.$$



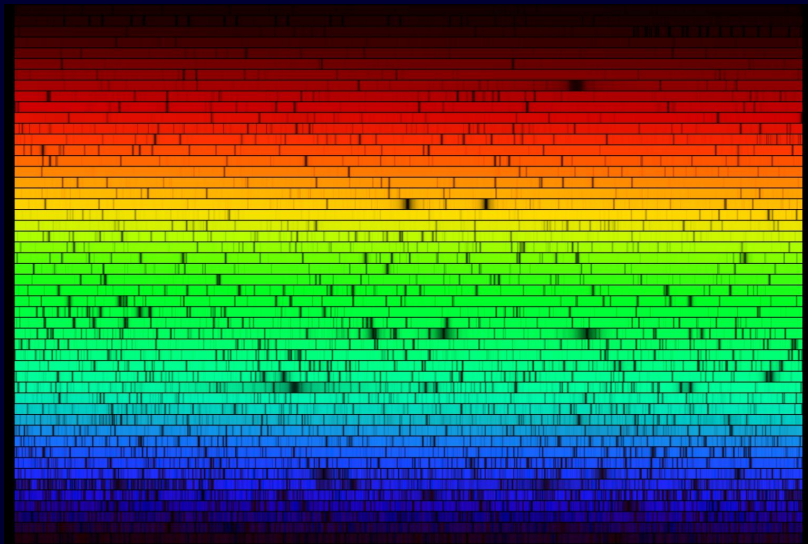
Эшелле-спектрограф

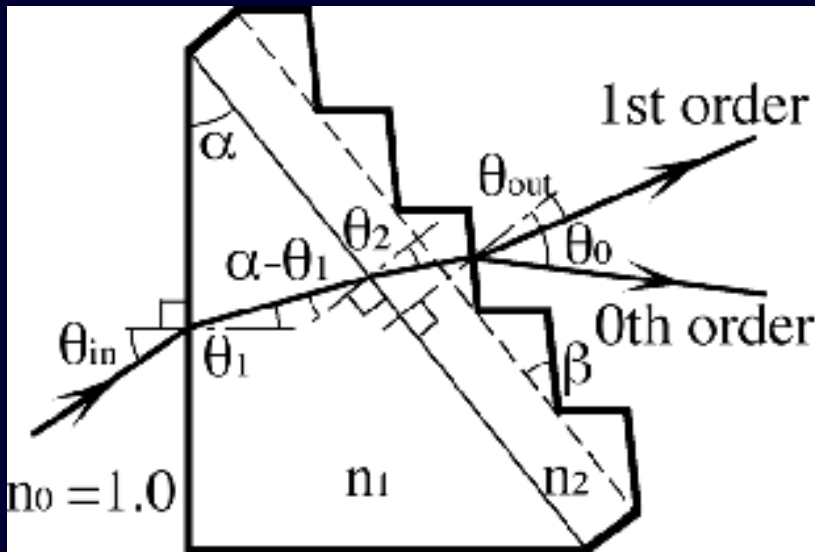


Эшелле-спектрограф

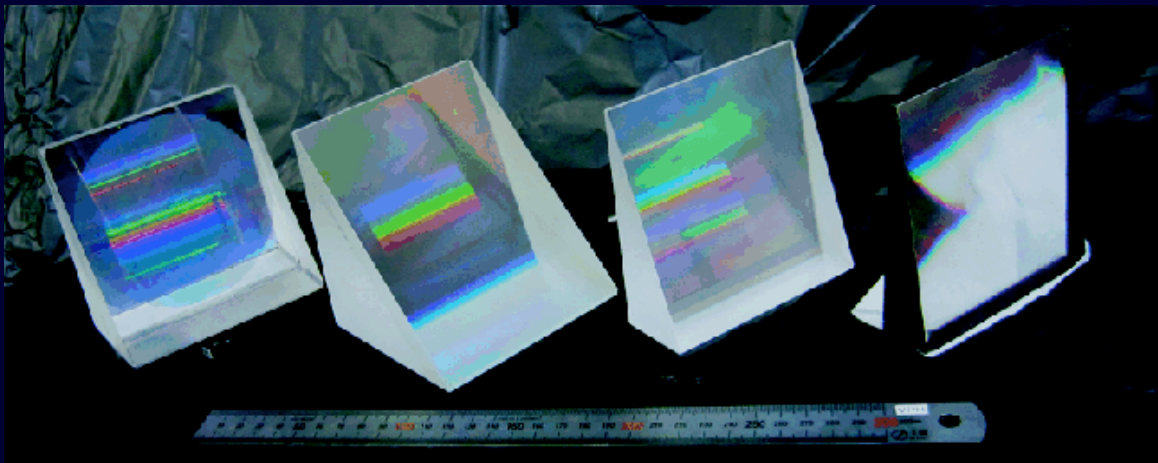


Эшелле–спектрограф

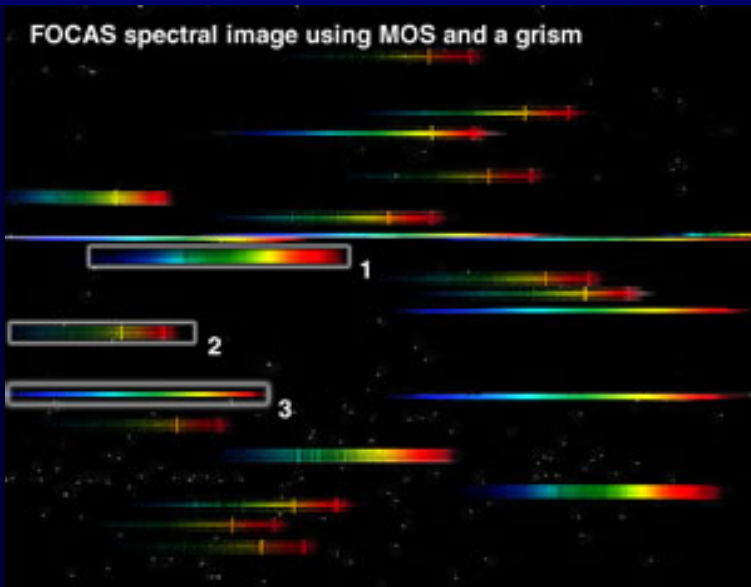


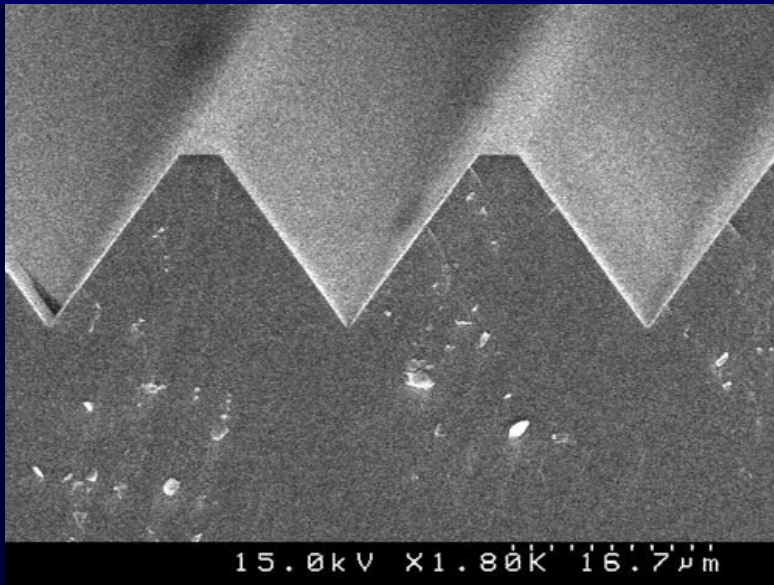


Гризма

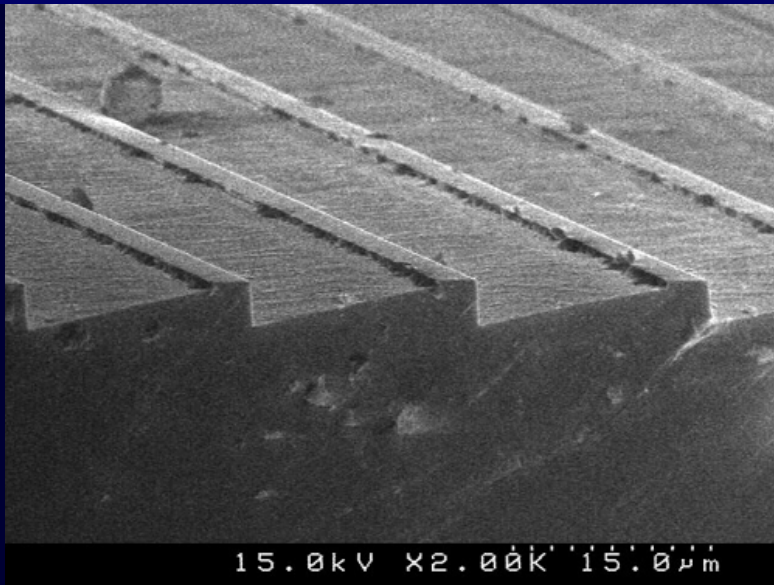


Набор гризм The Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS Subaru).





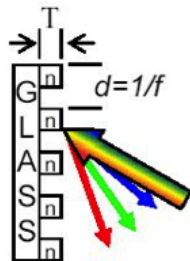
Гризма



Diffraction Gratings

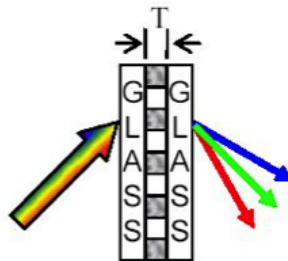
$$\lambda f = \sin \theta_i + \sin \theta_d$$

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*

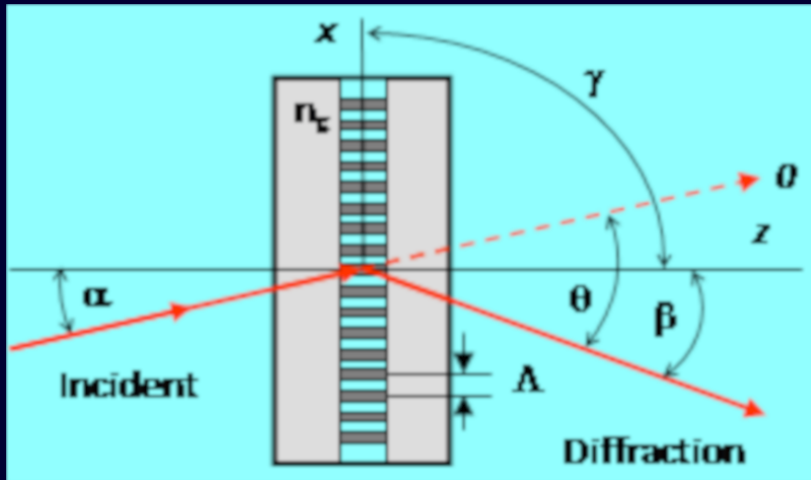


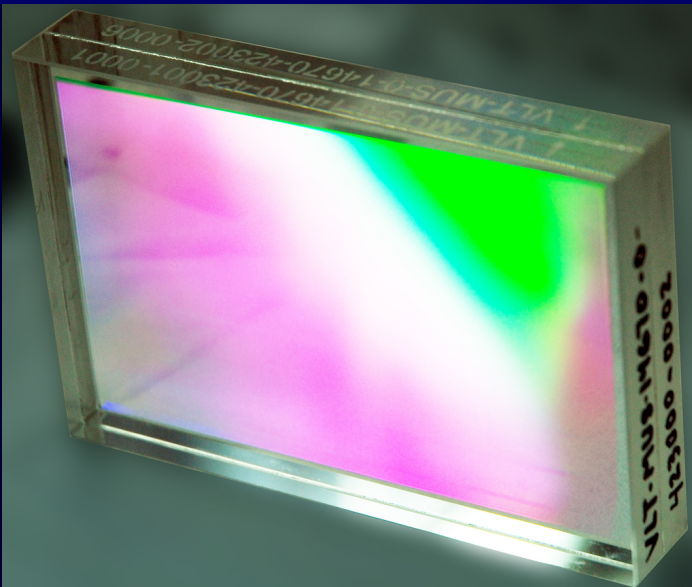
Cross section of dichromated gelatin (DCG) grating. Periodic variation of refractive index (n) with a constant thickness (T).

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

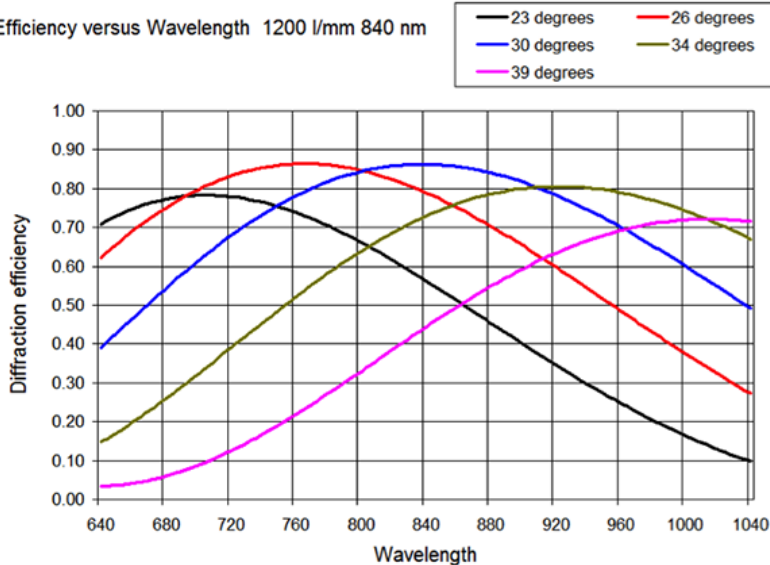
$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{\Lambda \cos \theta}.$$

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

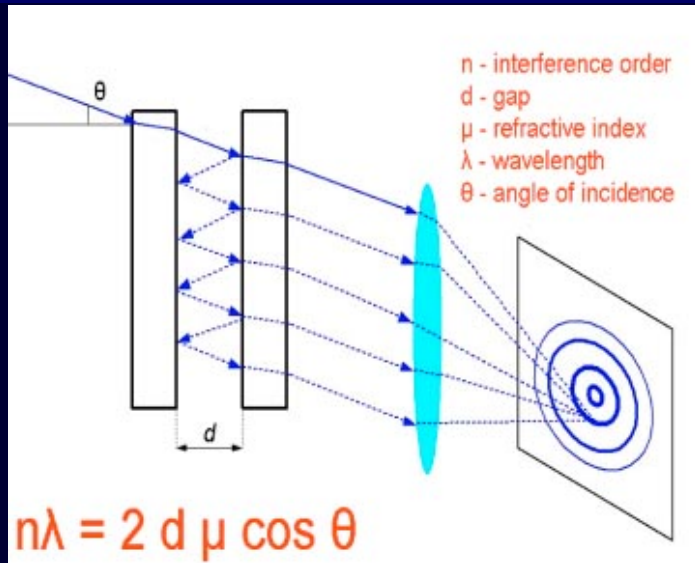




Efficiency versus Wavelength 1200 l/mm 840 nm



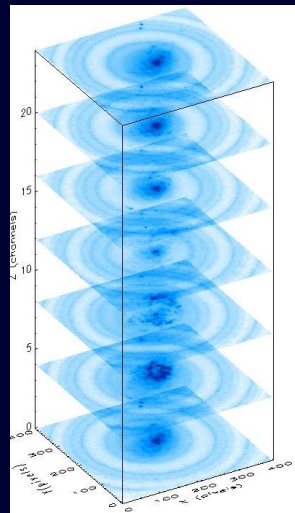
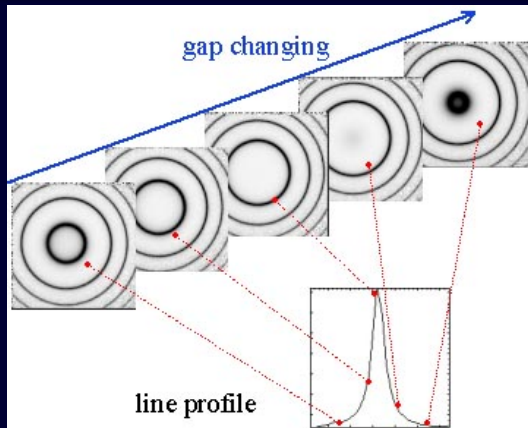
Интерферометр Фабри–Перо



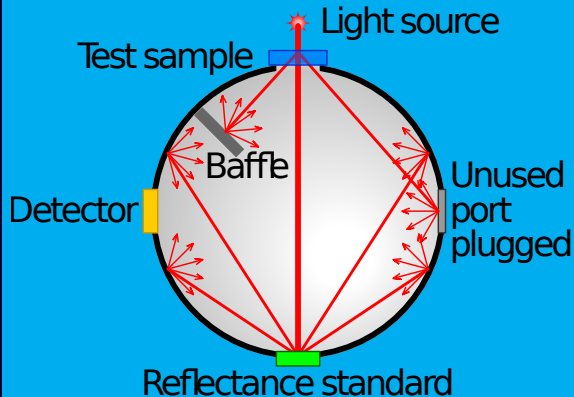
Интерферометр Фабри–Перо

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

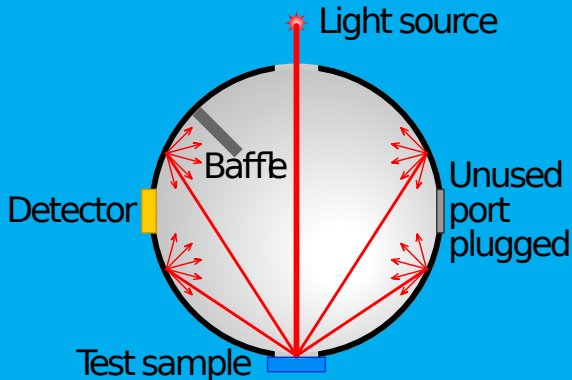
^а<https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>



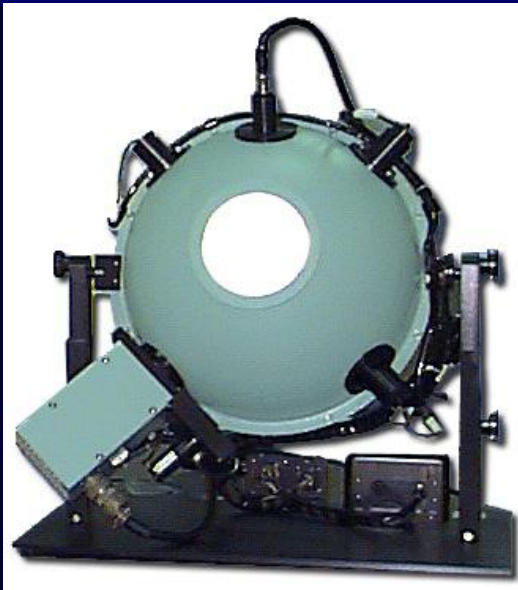
1. Measuring transmittance



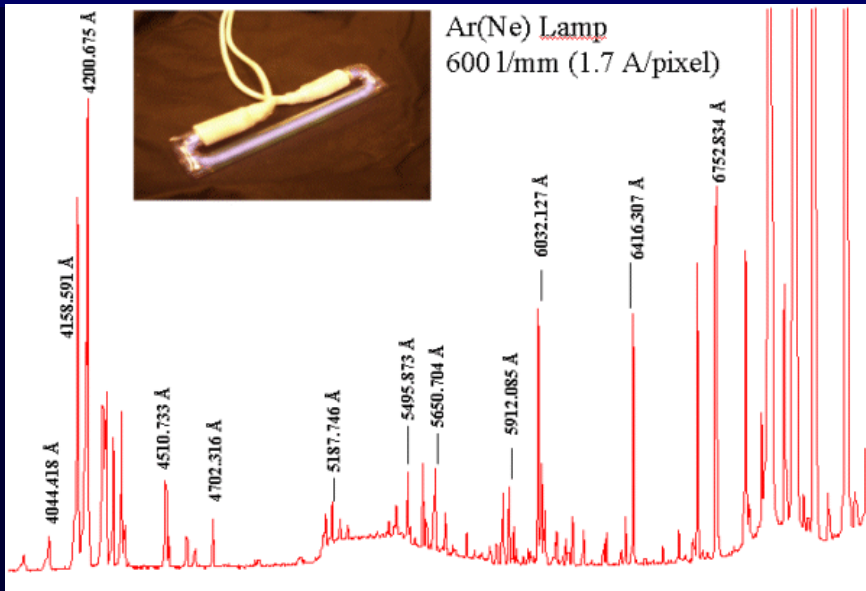
2. Measuring reflectance



Калибровки



Калибровки



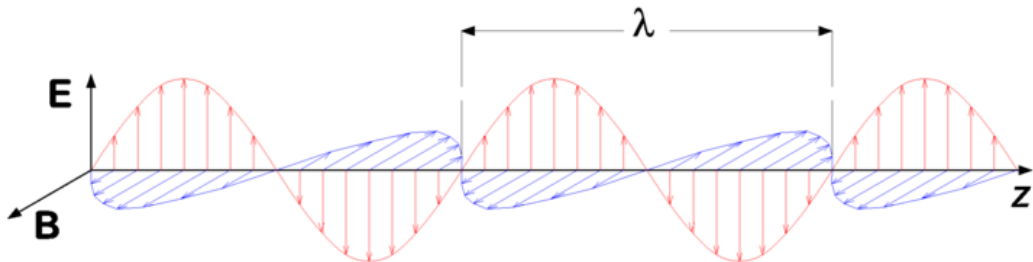
Калибровки

Th/Ar



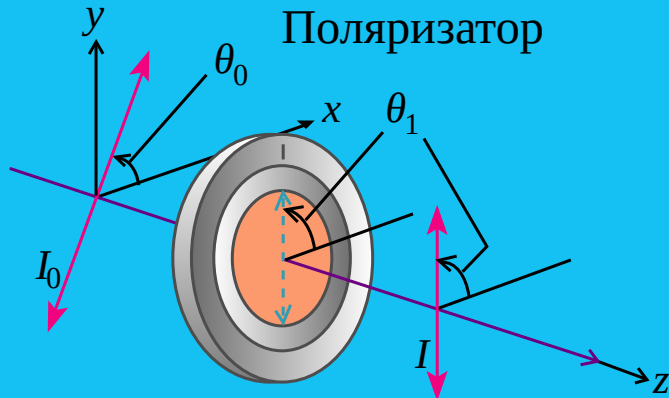
Поляризация

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

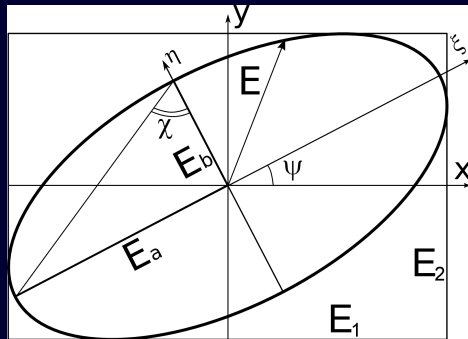
Три независимых параметра: $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$. Пусть E_1 и E_2 – ортогональные проекции \vec{E} , δ – разность фаз в проекциях. Тогда:

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

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

$$S_2 = U = 2E_1E_2 \cos \delta$$

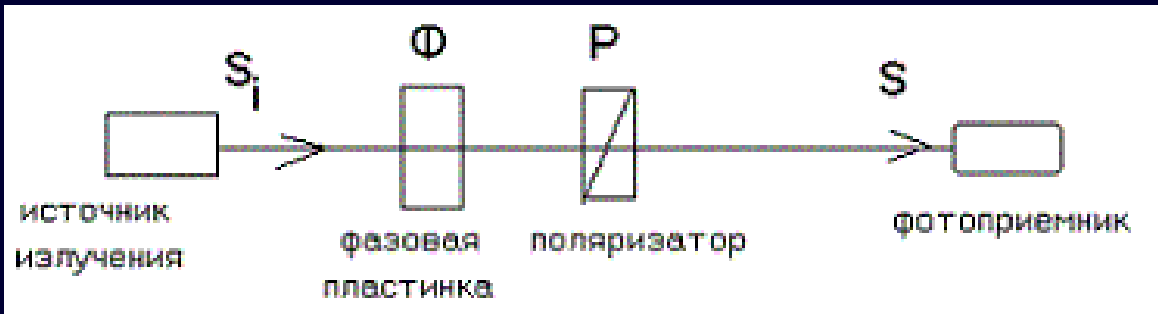
$$S_3 = V = 2E_1E_2 \sin \delta$$



Параметры Стокса

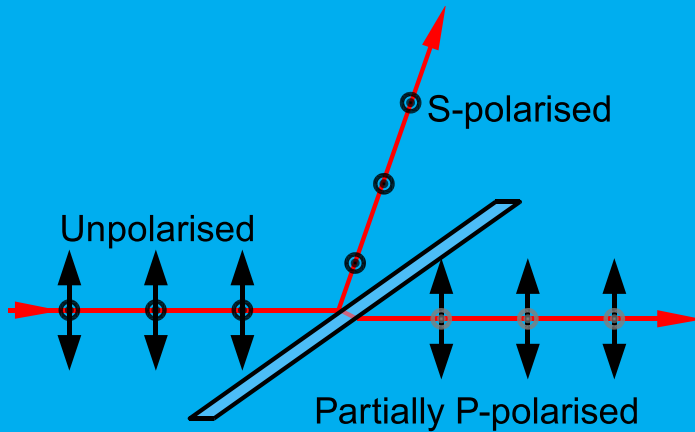
Вращаем поляризатор на 0, 60 и 120 градусов, вычисляем параметры Стокса.

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

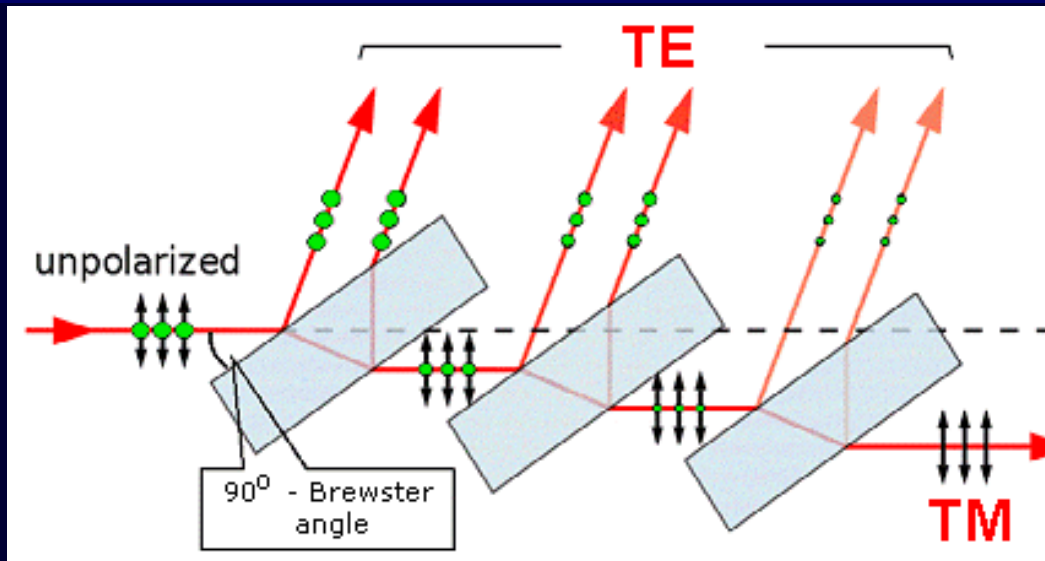


Угол Брюстера

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

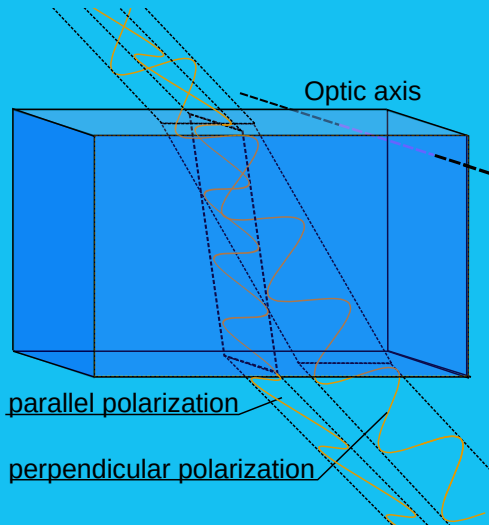


Угол Брюстера

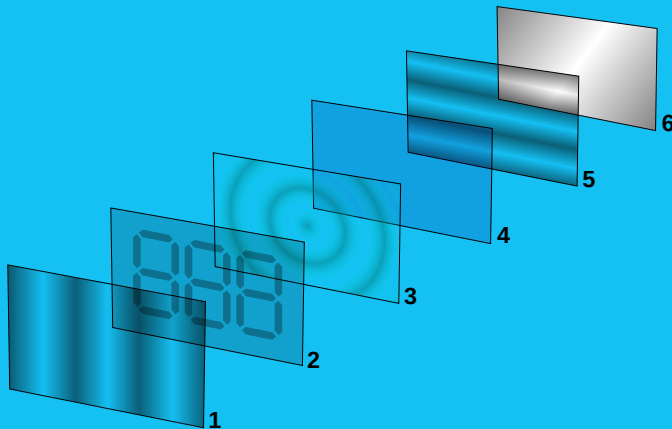


Двойное лучепреломление

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

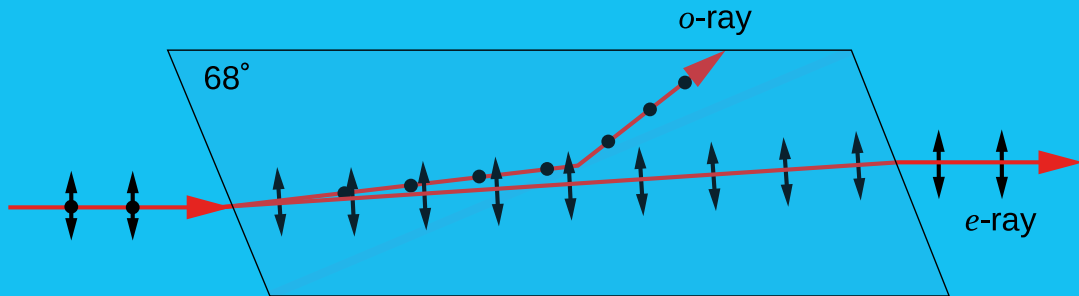


Двойное лучепреломление



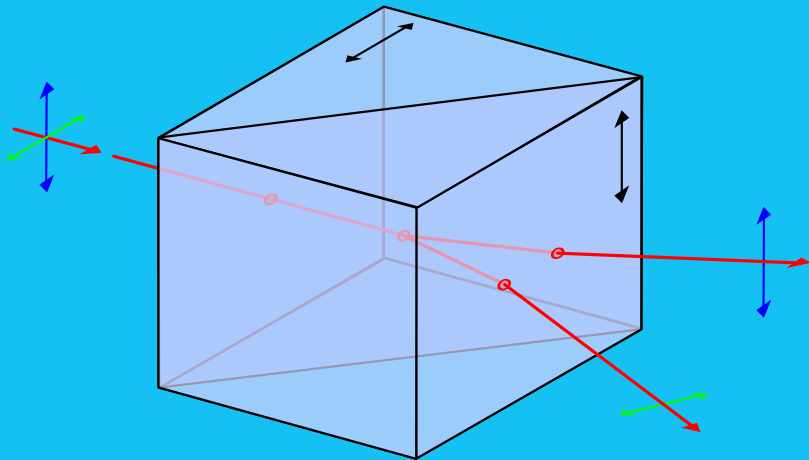
1,5 – поляризаторы,
2,4 – прозрачные электроды,
3 – ЖК (оптически активное
вещество),
6 – отражатель или
подсветка.

Двойное лучепреломление



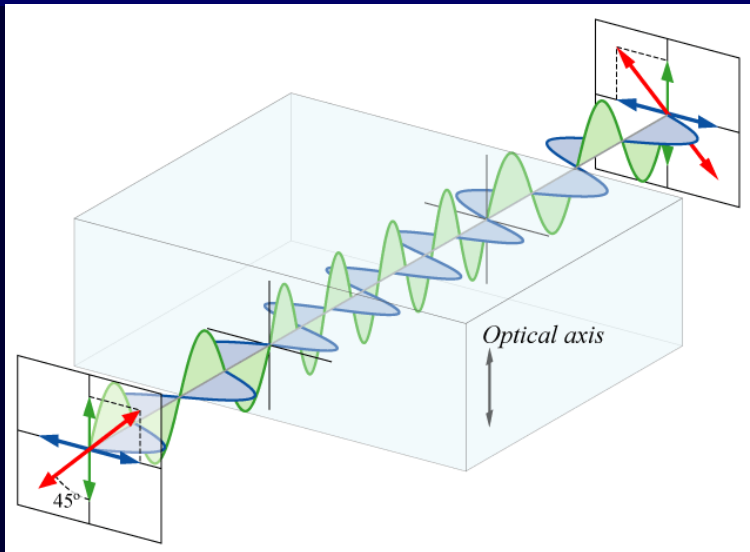
Призма Николя

Двойное лучепреломление



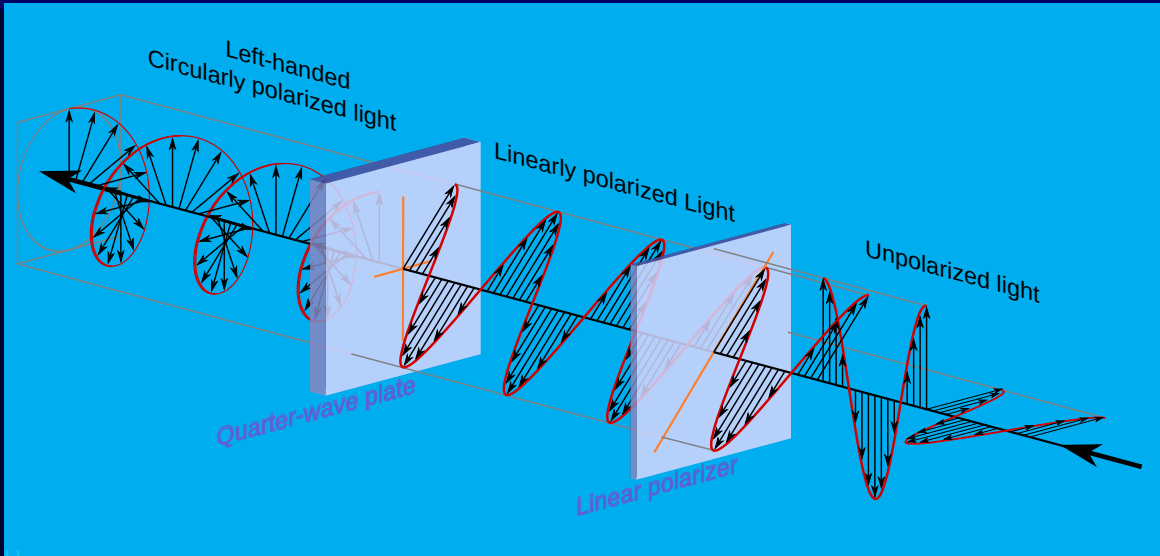
Призма Волластона

Волновые пластинки



Полуволновая пластинка

Волновые пластинки



Четвертьволновая пластинка

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 — 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.

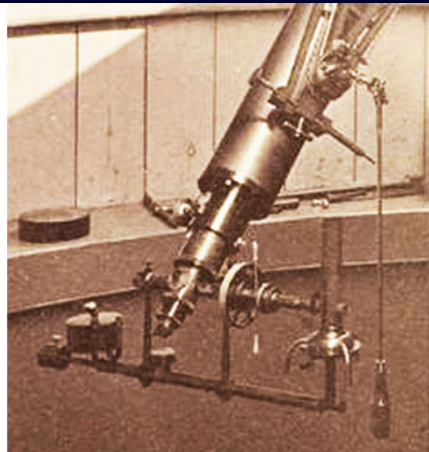
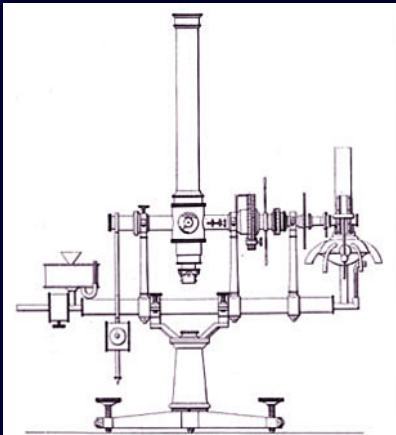
Сам термин «астрофизика» предложен Иоганном Карлом Фридрихом Цёлльнером (известен по точной фотометрии) в 1865 г.

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

Фотометрия

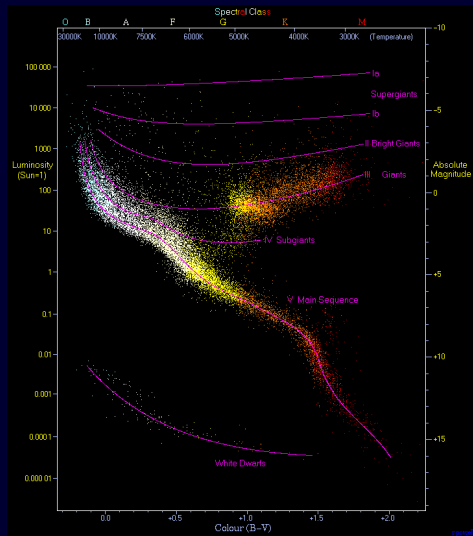
Фотометр Цёлльнера

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

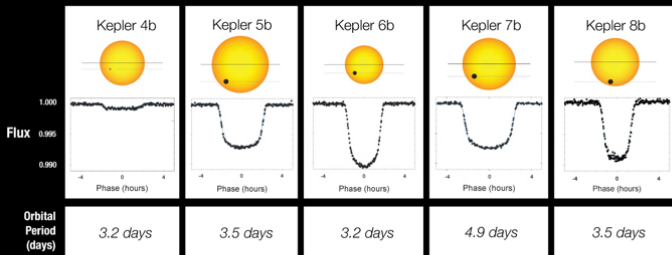
- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.



Область применения фотометрии

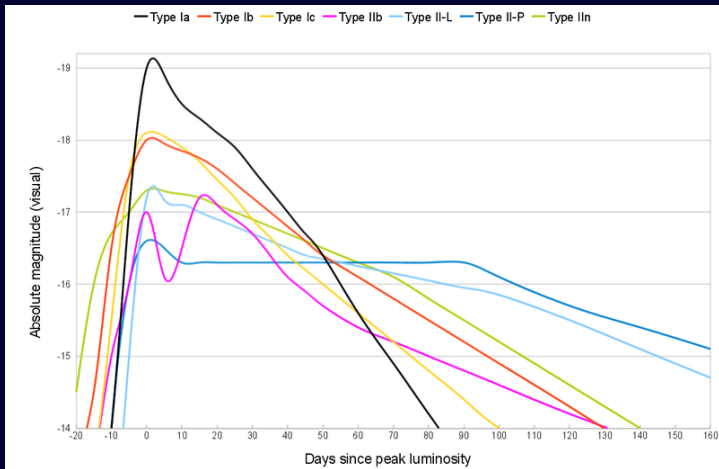
- Определение светимости объекта или расстояния до него.
- Астрометрические задачи.
- Классификация объекта (и предположение о его свойствах).
- Космология: массы и движения галактик.
- Определение параметров переменных объектов.
- Поиск крупных экзопланет.
- Изучение сверхновых.

Transit Light Curves

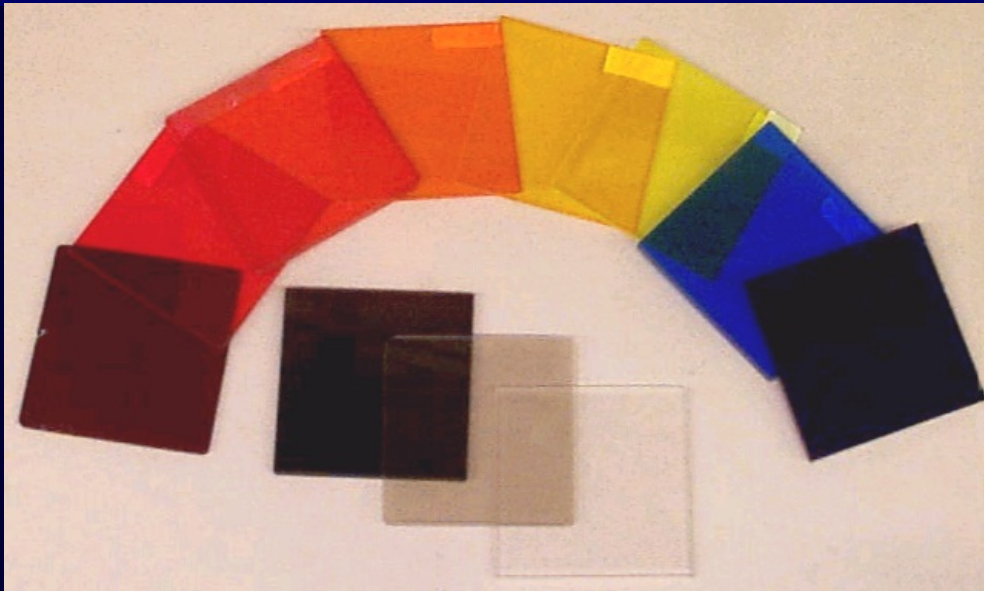


Область применения фотометрии

- 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.

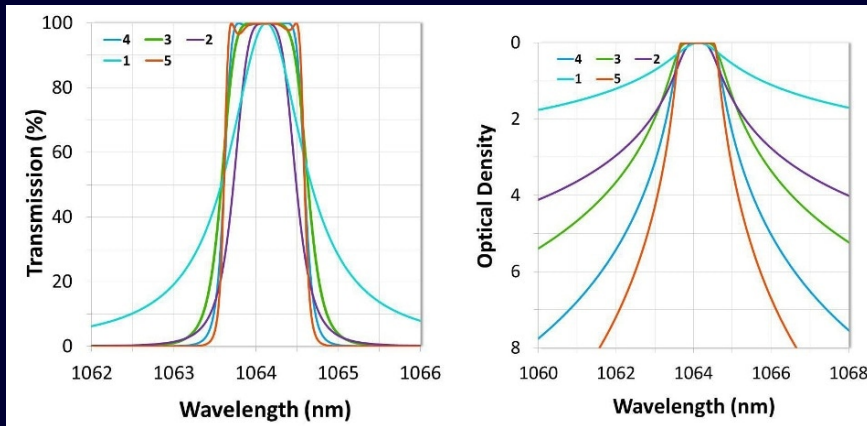


Фотометрические диапазоны

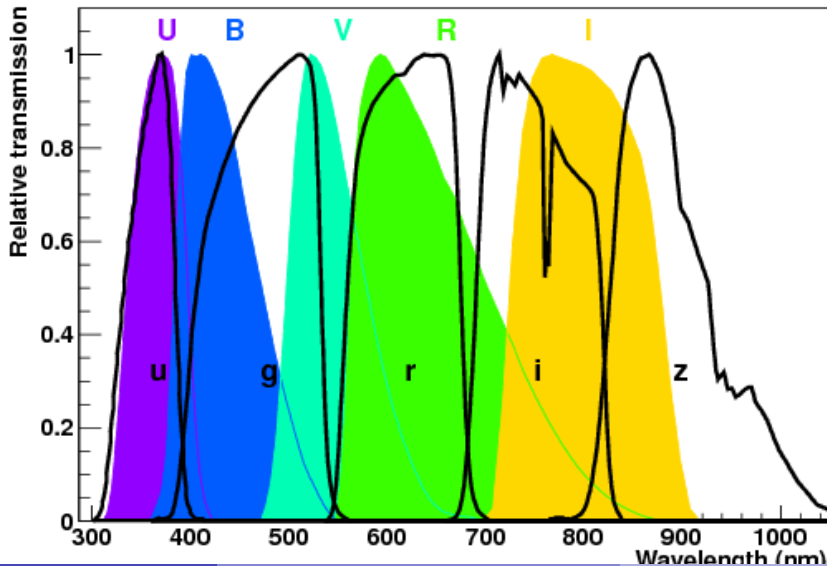


Фотометрические диапазоны

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

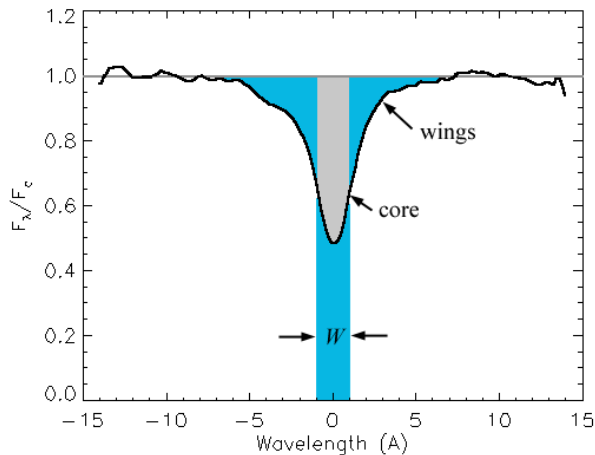


Фотометрические диапазоны



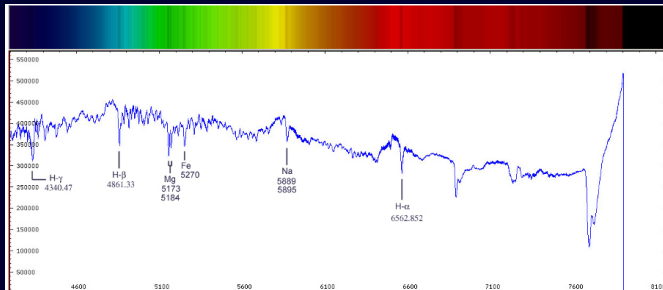
Область применения спектроскопии

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



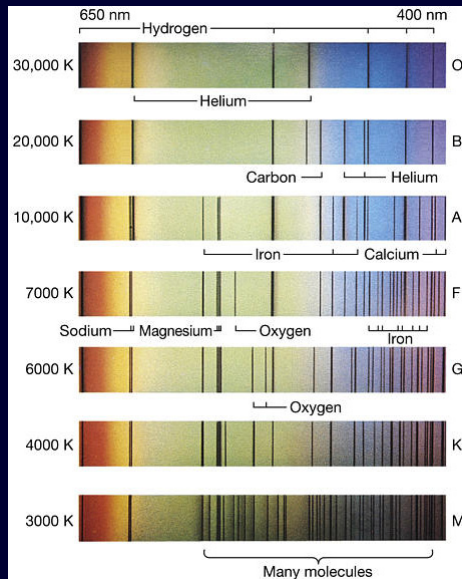
Область применения спектроскопии

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



Область применения спектроскопии

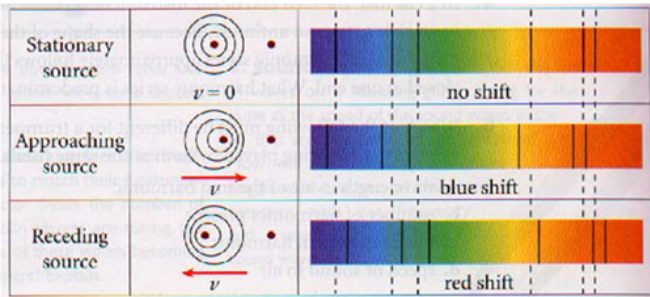
- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери масс и многие другие параметры.
- Спектрополяриметрия.
- Определение химического состава звезд.
- Строгая спектральная классификация.
- Определение скорости движения объектов.
- Космология.



Область применения спектроскопии

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

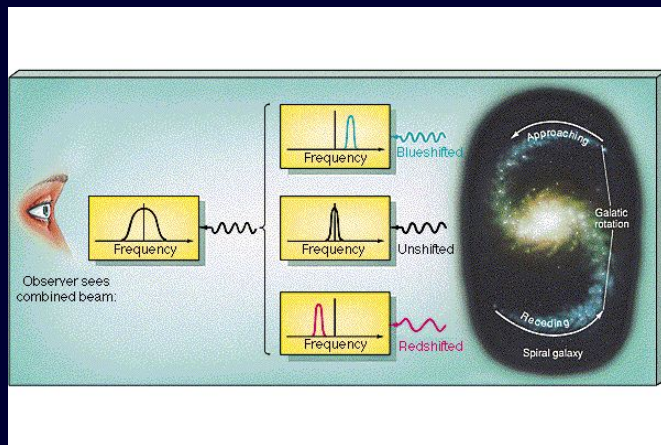
Doppler Effect



Measuring the relative velocities of stars
by the Doppler shift.

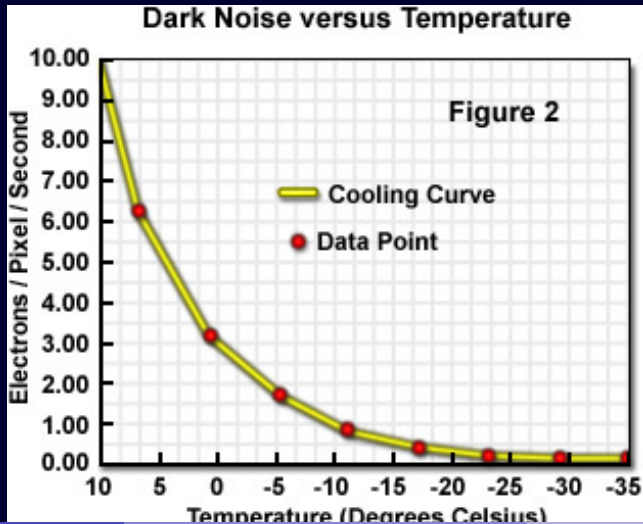
Область применения спектроскопии

- Эквивалентные ширины: расстояние до звезд, их возраст, скорость потери масс 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

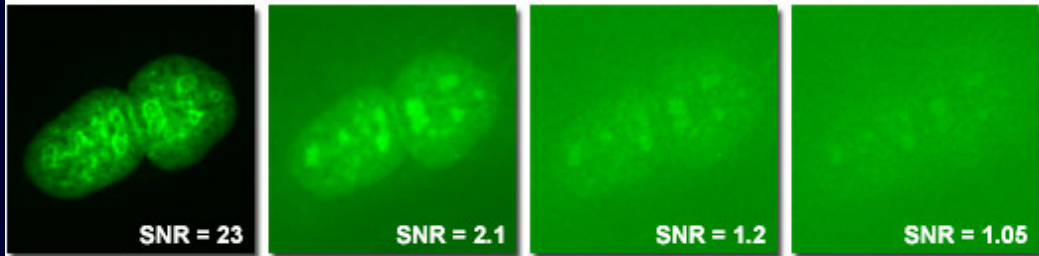
Попиксельная неоднородность, виньетирование, пыль — калибровка на «плоское поле».

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.

Signal-to-Noise Ratios in Fluorescence Microscopy



Учет шумов детекторов

Шум сброса $N_{reset} = \sqrt{kTC}/q$, T – температура (К), C – емкость ячейки (Ф), 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 (см²), I_d – измеренный на 300 К темновой ток (нА/см²), E_g – ширина запрещенной зоны (эВ).

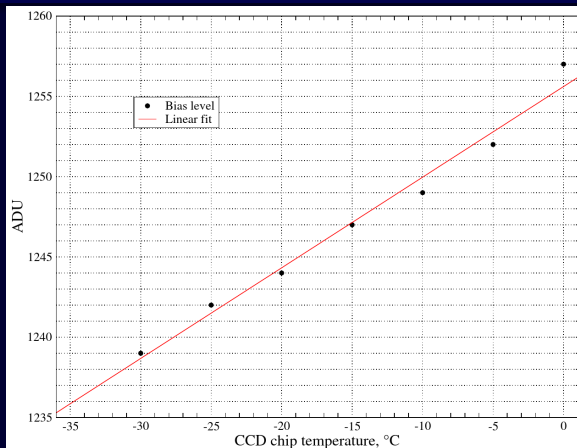
Конвейер обработки данных

- 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 спектrophотометрии после экстракции спектра необходимо также выполнить нормировку на «плоский спектр».

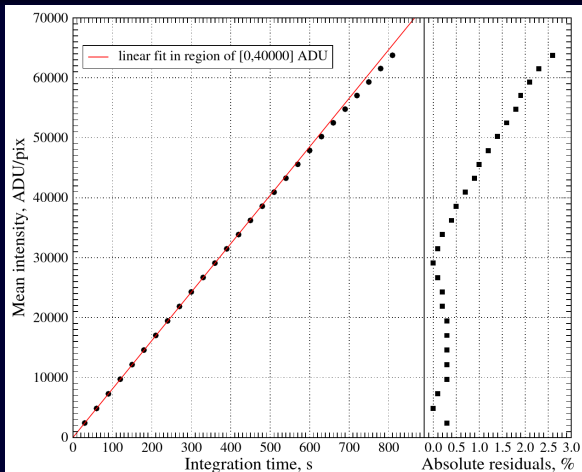
Определение характеристик новой ПЗС

Электронный ноль (bias). Снимки bias позволяют определить уровень шума считывания (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 считывания, дробового (фотонного) шума и неоднородность чувствительности пикселей ПЗС. Тогда общий шум:

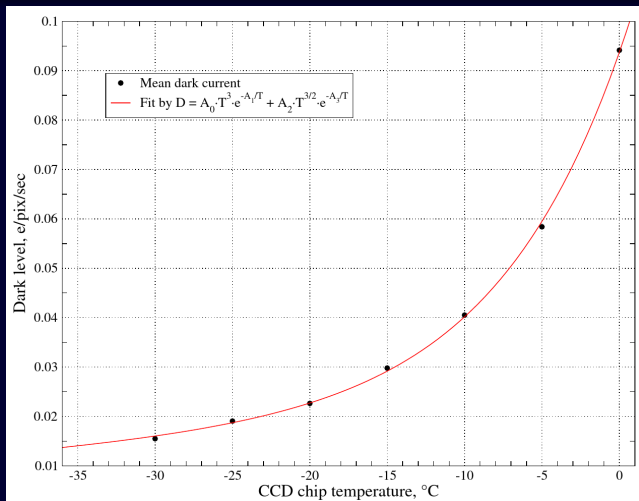
$$\sigma^2 = R^2 + \sigma_{ph}^2 + \sigma_{ff}^2 = R^2 + I + k^2 I^2.$$

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

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 .

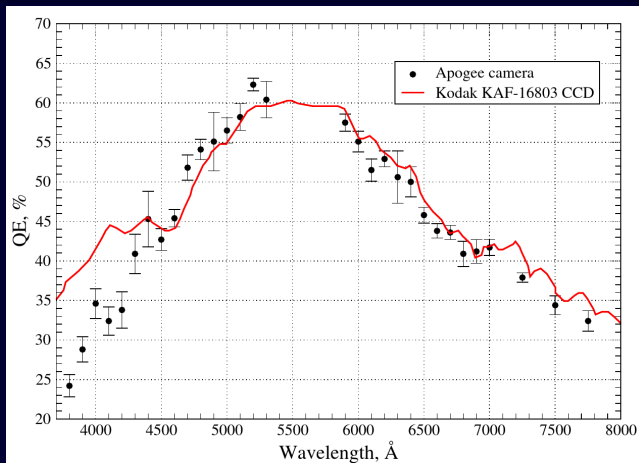
Определение характеристик новой ПЗС

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



Определение характеристик новой ПЗС

Квантовая эффективность определяется в лабораторных условиях: монохроматор и калиброванный 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 удобочитаемой 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)	CROTAn	EQUINOX	NAXISn	TBCOLn	TUNITn
AUTHOR	CRPIXn	EXTEND	OBJECT	TDIMn	TZEROn
BITPIX	CRVALn	EXTLEVEL	OBSERVER	TDISPn	XTENSION
BLANK	CTYPEn	EXTNAME	ORIGIN	TELESCOP	
BLOCKED	DATAMAX	EXTVER	PCOUNT	TFIELDS	
BSCALE	DATAMIN	GCOUNT	PSCALn	TFORMn	
BUNIT	DATE	GROUPS	PTYPEn	THEAP	
BZERO	DATE-OBS	HISTORY	PZEROn	TNULLn	
CDELTn	END	INSTRUME	REFERENC	TSCALn	
COMMENT	EPOCH	NAXIS	SIMPLE	TTYPEn	

WCS-привязка

Параметры WCS

CRVAL_i значение мировых координат опорного пикселя

CRPIX_i координаты опорного пикселя на изображении

CDEL_{T_i} инкремент координат

CTYPE_i тип матрицы преобразования

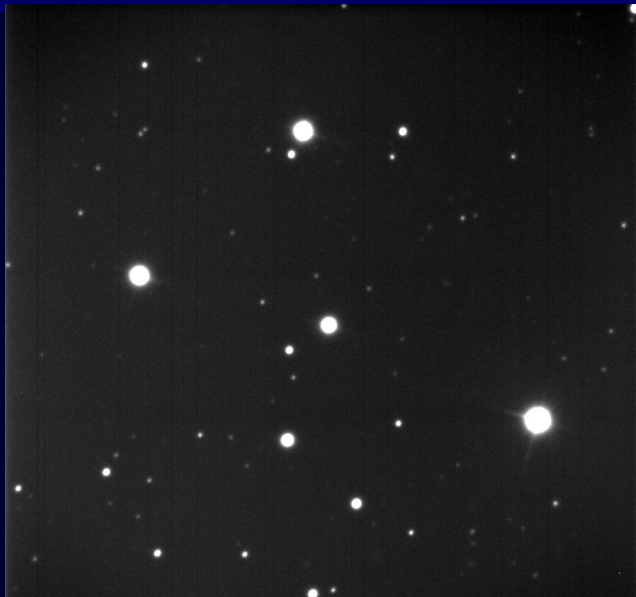
CROTA_i угол поворота систем координат

PC_{ij} немасштабированная матрица преобразований

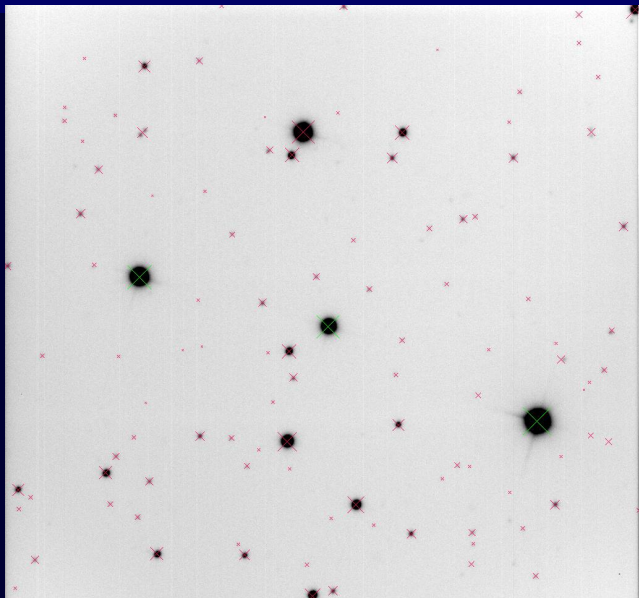
CD_{ij} PC с масштабом

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

WCS-привязка



WCS-привязка



Спасибо за внимание!

mailto

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com