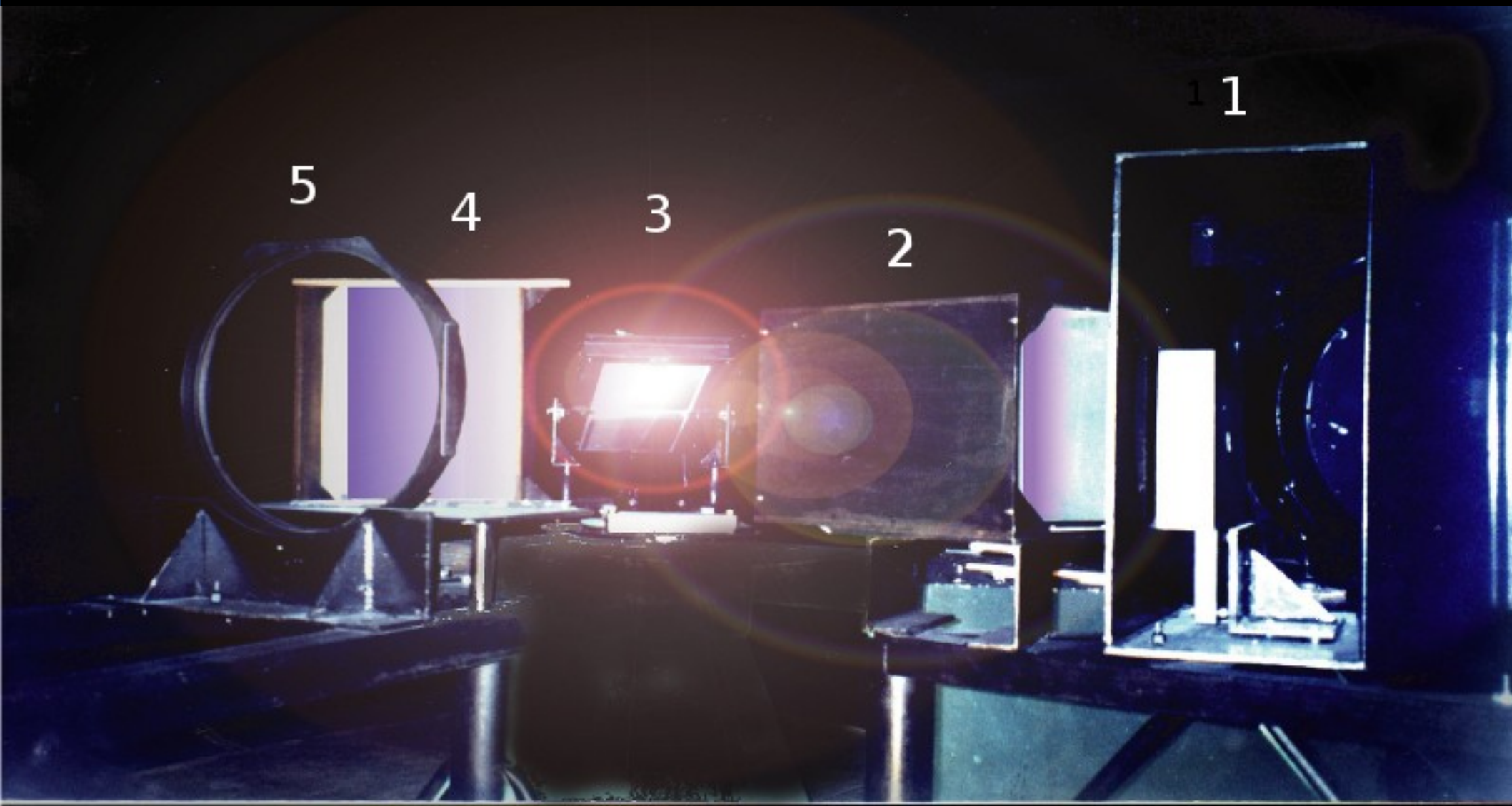


Спектральные приборы и приемники излучения



Основа спектрографа — элемент дисперсии

$$f(x) \rightarrow f(\lambda)$$

Дисперсия

Призма - зависимость коэффициента преломления от длины волны. Спектрографы низкого разрешения.

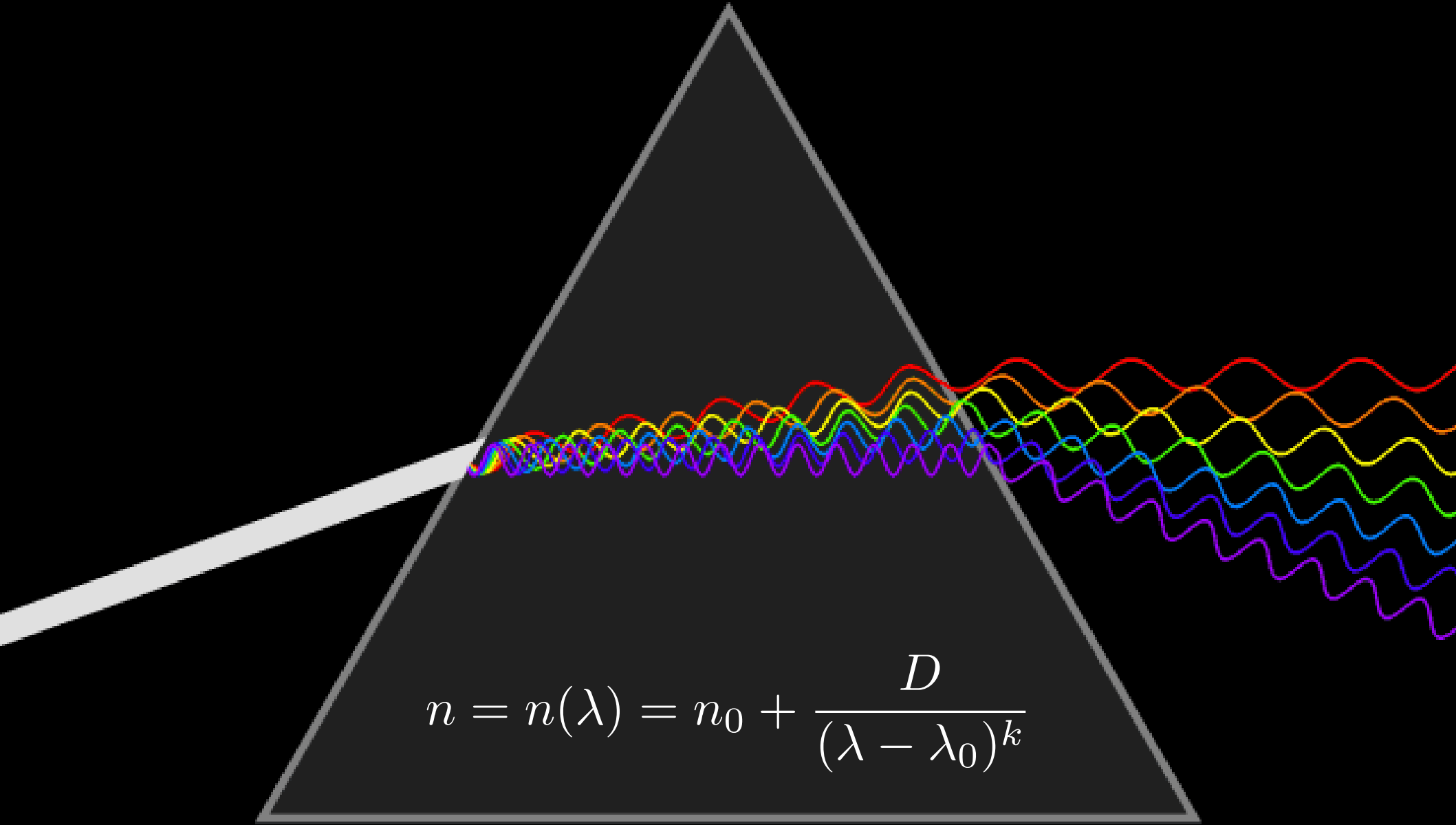
Дифракция

Дифракционная решетка и ее модификации — зависимость угла отклонения луча от длины волны. Либо спектрографы низкого разрешения, либо небольшой участок спектра высокого разрешения. Составные спектрографы высокого разрешения.

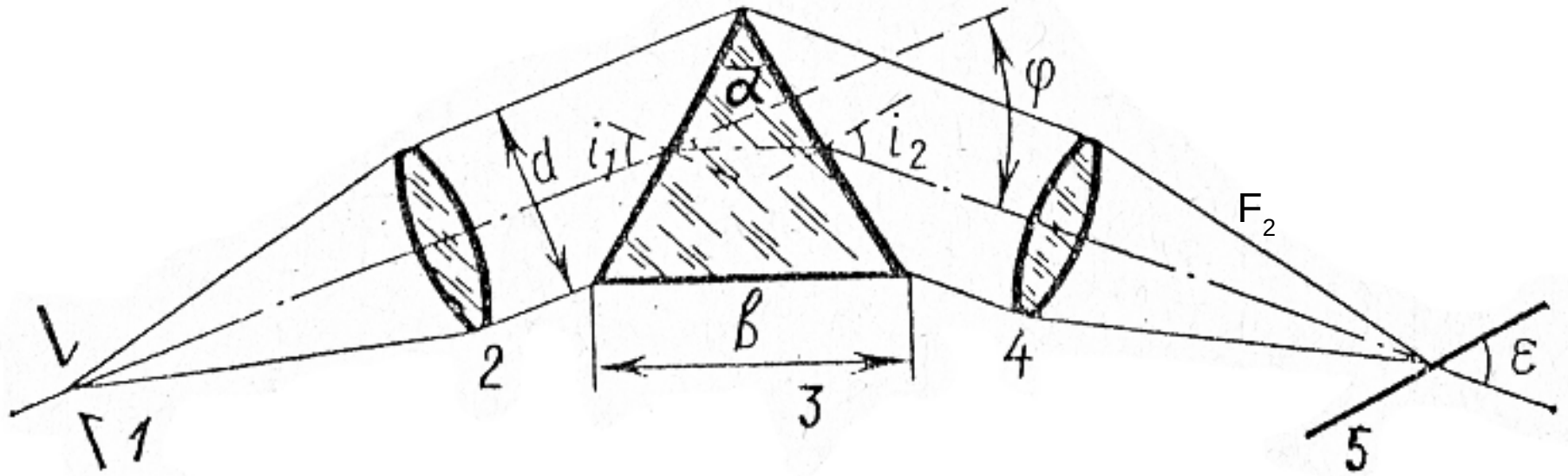
Интерференция

Эталон Фабри-Перо — зависимость положений максимумов интерференционных полос от длины волны. Спектрографы «изображений» высокого разрешения небольшого участка спектра.

Призма



$$n = n(\lambda) = n_0 + \frac{D}{(\lambda - \lambda_0)^k}$$



$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2\sin^2\frac{\alpha}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}$$

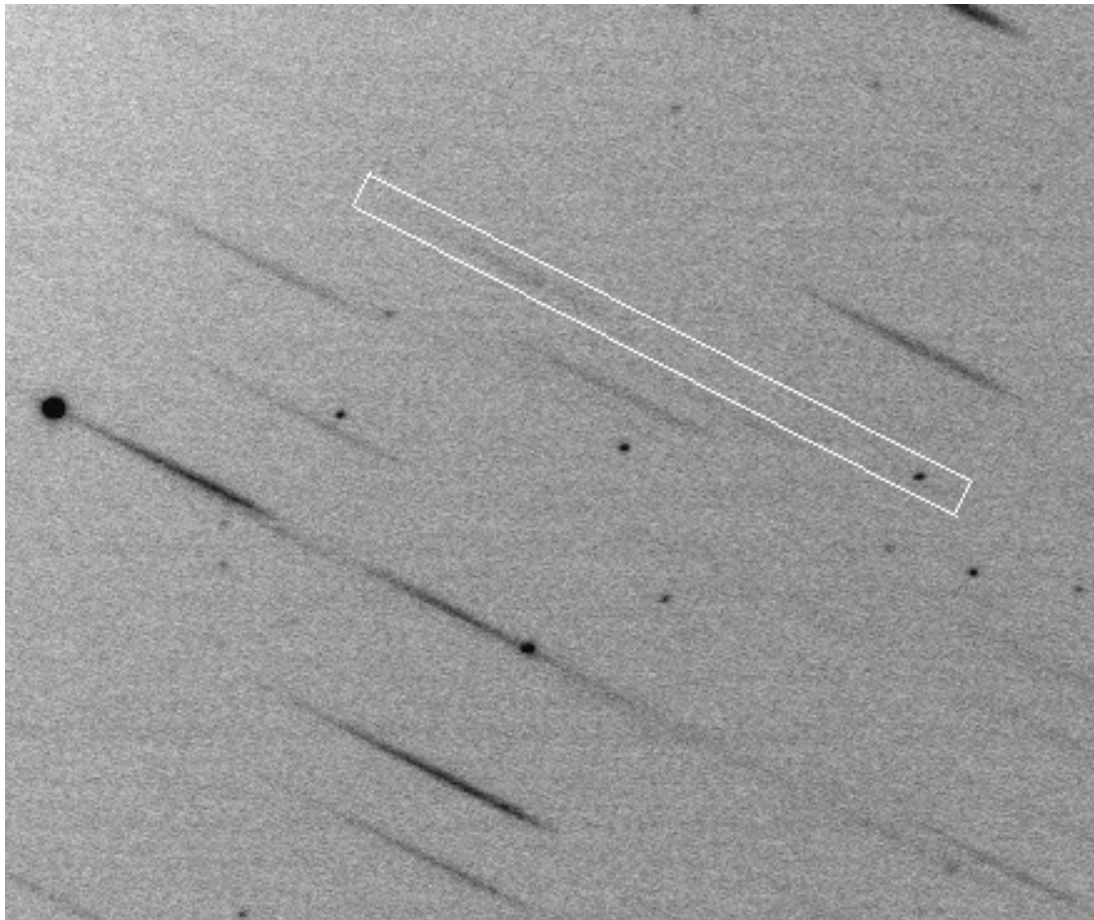
$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\phi}{d\lambda} \frac{F_2}{\sin\epsilon}$$

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{D}{(\lambda - \lambda_0)^{2k}} k(\lambda - \lambda_0)^{k-1}$$

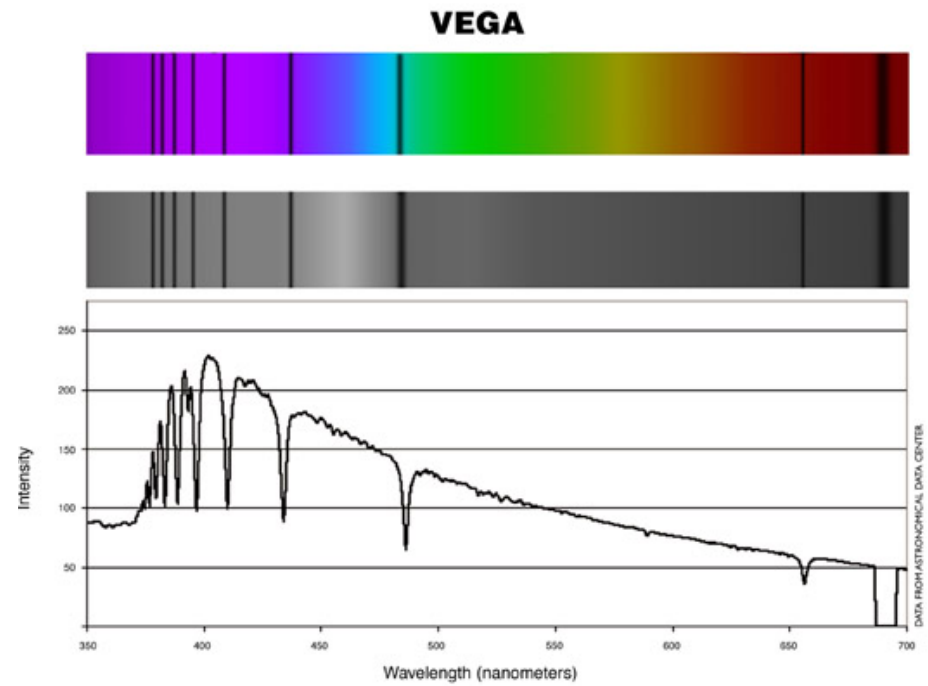
Объективная призма



- +++ спектры всех объектов в поле зрения
- спектры низкого разрешения
- спектры соседних объектов сливаются
- нелинейная шкала длин волн
- сложность калибровки по длинам волн



Снимок с использованием объективной призмы

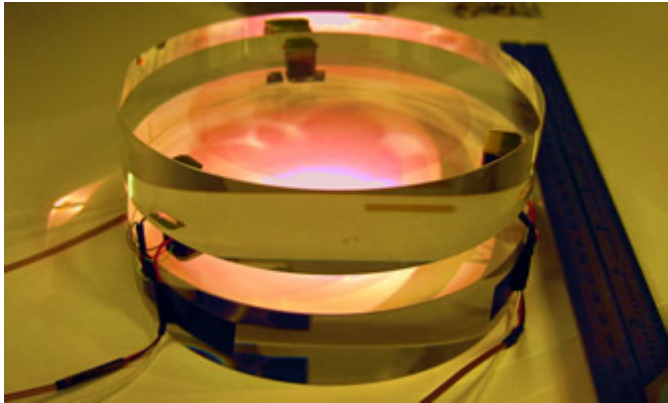


Спектр Веги

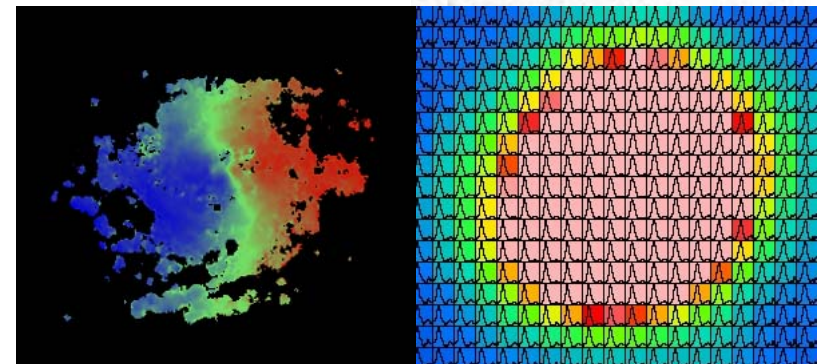
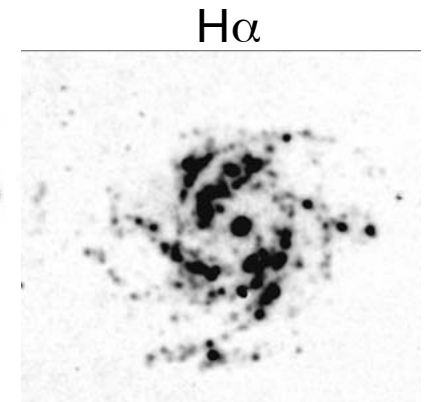
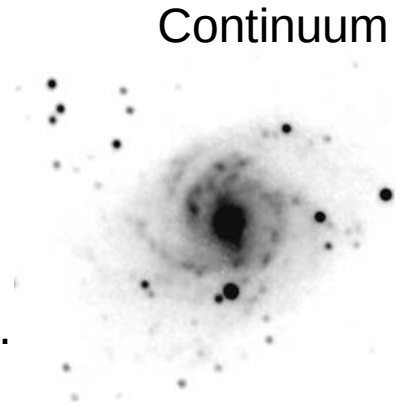
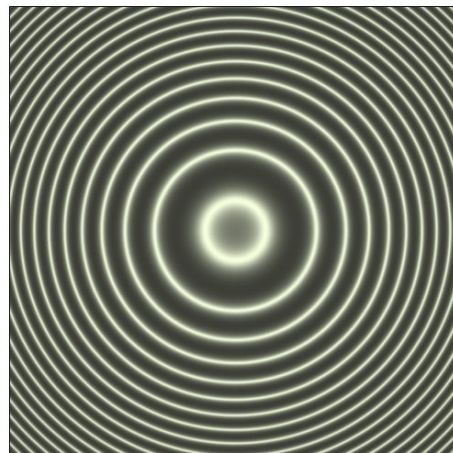
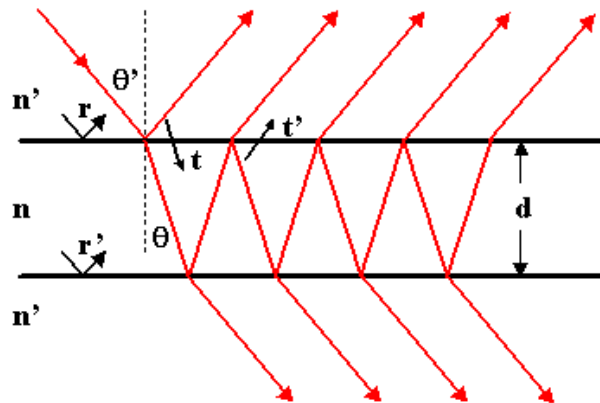
АЗТ-5 Южная станция МГУ



Эталон Фабри-Перо



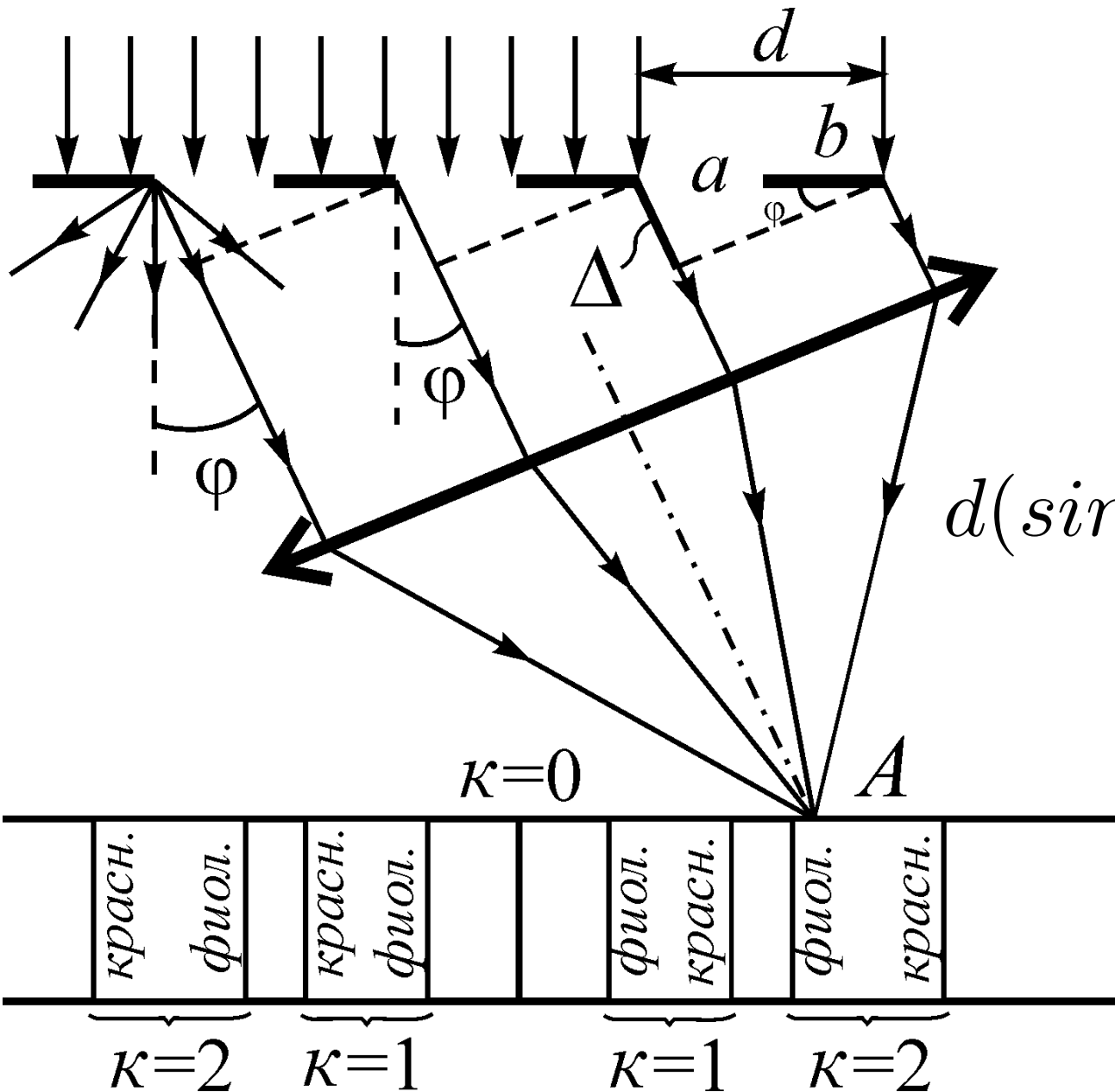
Каждое кольцо соответствует одной длине волны. Положение колец зависит от расстояния d .



Поле скоростей

H α

Дифракционная решетка



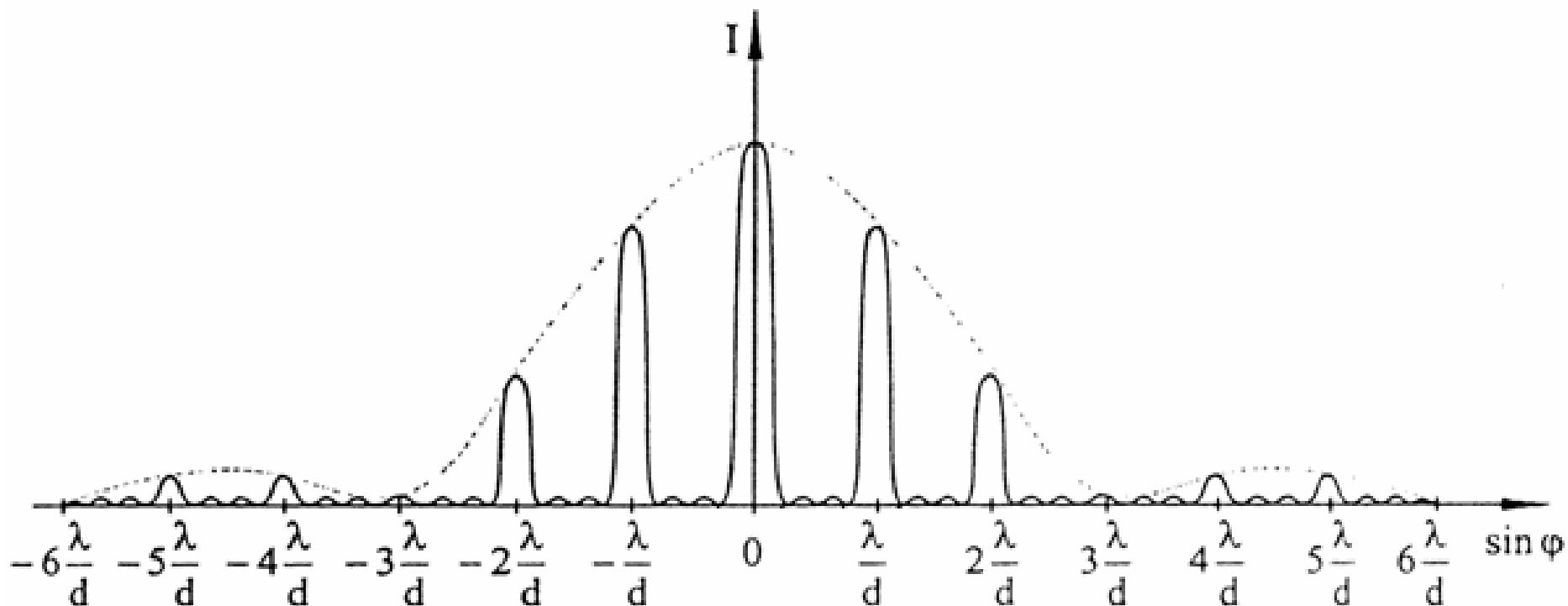
$$d = \frac{L}{N}$$

$$d \sin \phi = k \lambda$$

$$d(\sin \phi + \sin \psi) = k \lambda$$

- L — длина решетки
- N — количество штрихов
- d — постоянная решетки
- ϕ — угол дисперсии
- ψ — угол падения
- k — порядок спектра

Распределение интенсивности



$$u = \frac{\pi a(\sin\phi + \sin\psi)}{\lambda}, v = \frac{\pi d(\sin\phi + \sin\psi)}{\lambda}$$

$$I = \frac{I_0}{N^2} \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v}$$

Угловая дисперсия:

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos\phi} = \frac{kN}{L\cos\phi} \approx \text{const}$$

Дисперсия увеличивается с увеличением порядка и количества штрихов решетки

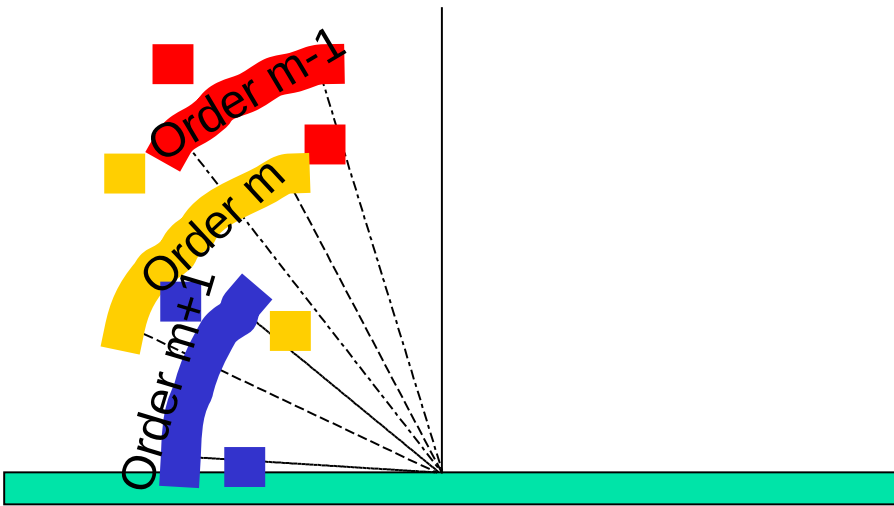
Дисперсия в одном порядке почти постоянна

Линейная дисперсия: $\frac{dx}{d\lambda} = \frac{d\phi}{d\lambda} F$

Свободный спектральный интервал между соседними порядками (φ ψ постоянны):

$$\lambda \Delta k = k \Delta \lambda$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{k}$$

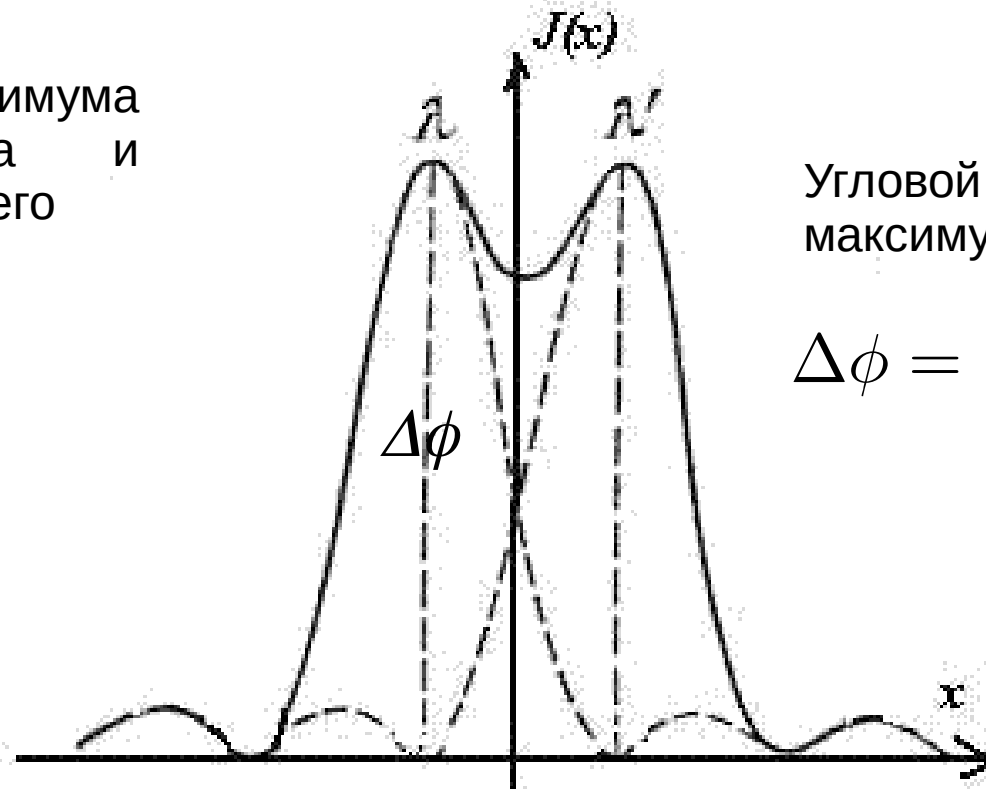


Разрешающая способность

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

Критерий Рэля:

совпадение максимума
одного порядка и
минимума соседнего



Угловой размер главного
максимума:

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{N d \cos\phi} = \frac{\lambda}{L \cos\phi}$$

$$\Delta\lambda = \Delta\phi \frac{d \cos\phi}{k} = \frac{\lambda}{N d \cos\phi} \frac{d \cos\phi}{k} = \frac{\lambda}{N k}$$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = N k$$

Разрешающая способность зависит от
количества штрихов и порядка спектра

Дифракционная решетка

+++ линейность шкалы длин волн

+++ достижимость высокого разрешения путем увеличения количества штрихов

+++ достижимость высокого разрешения путем увеличения порядка k

--- большая часть света идет в 0-ой порядок и малое количество в порядки $k > 1$

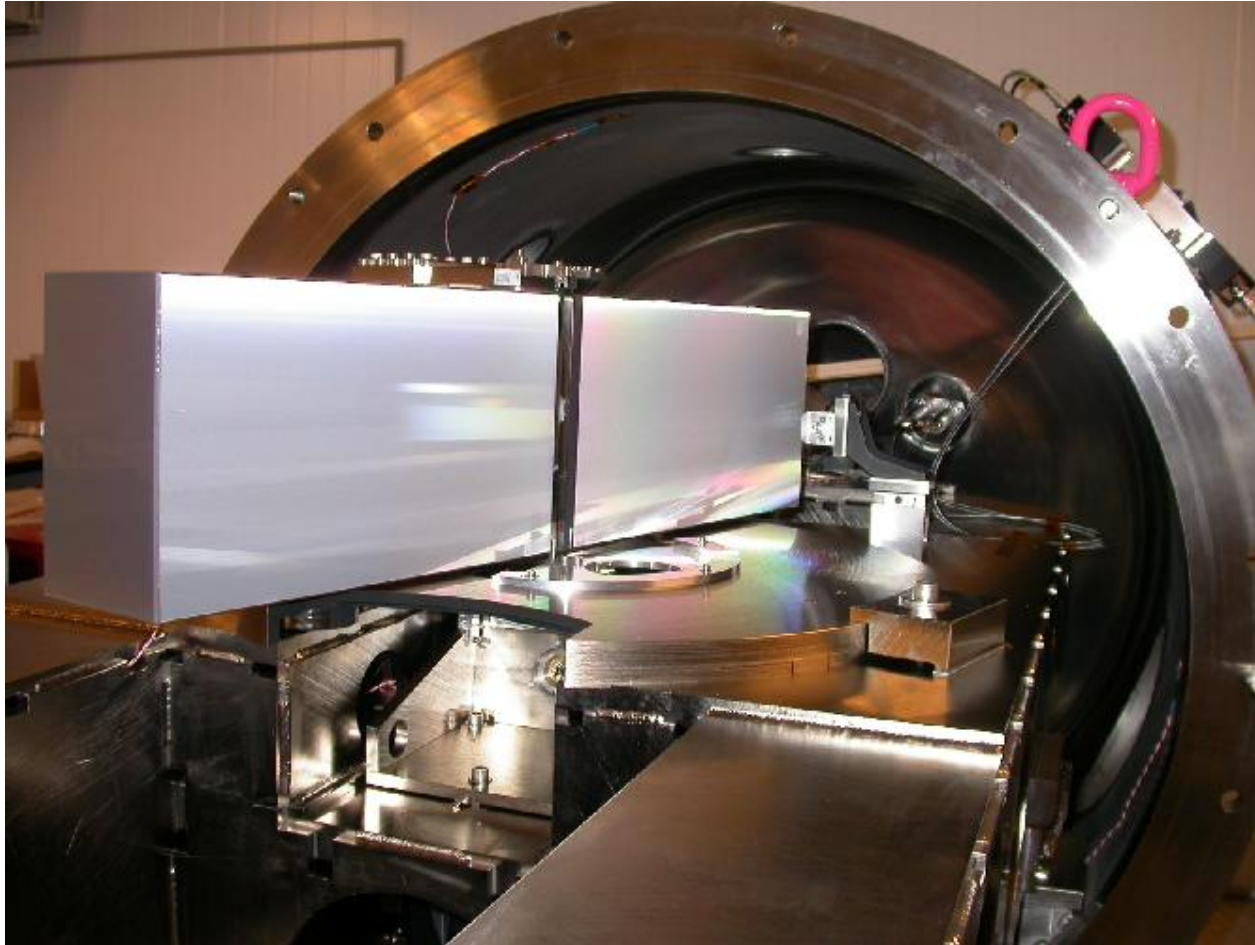
--- существование предельного порядка k

Задача:

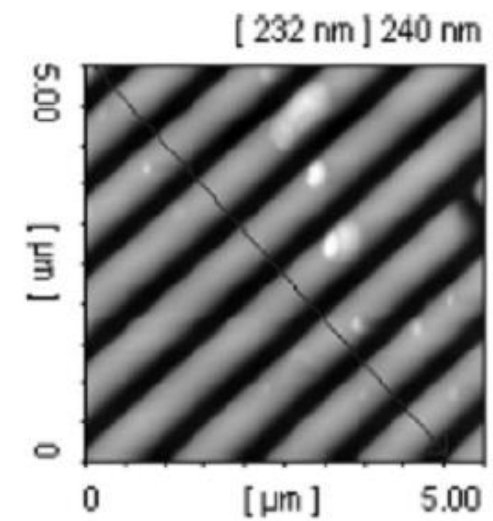
пустить максимальное количество света в высокие порядки

Решение:

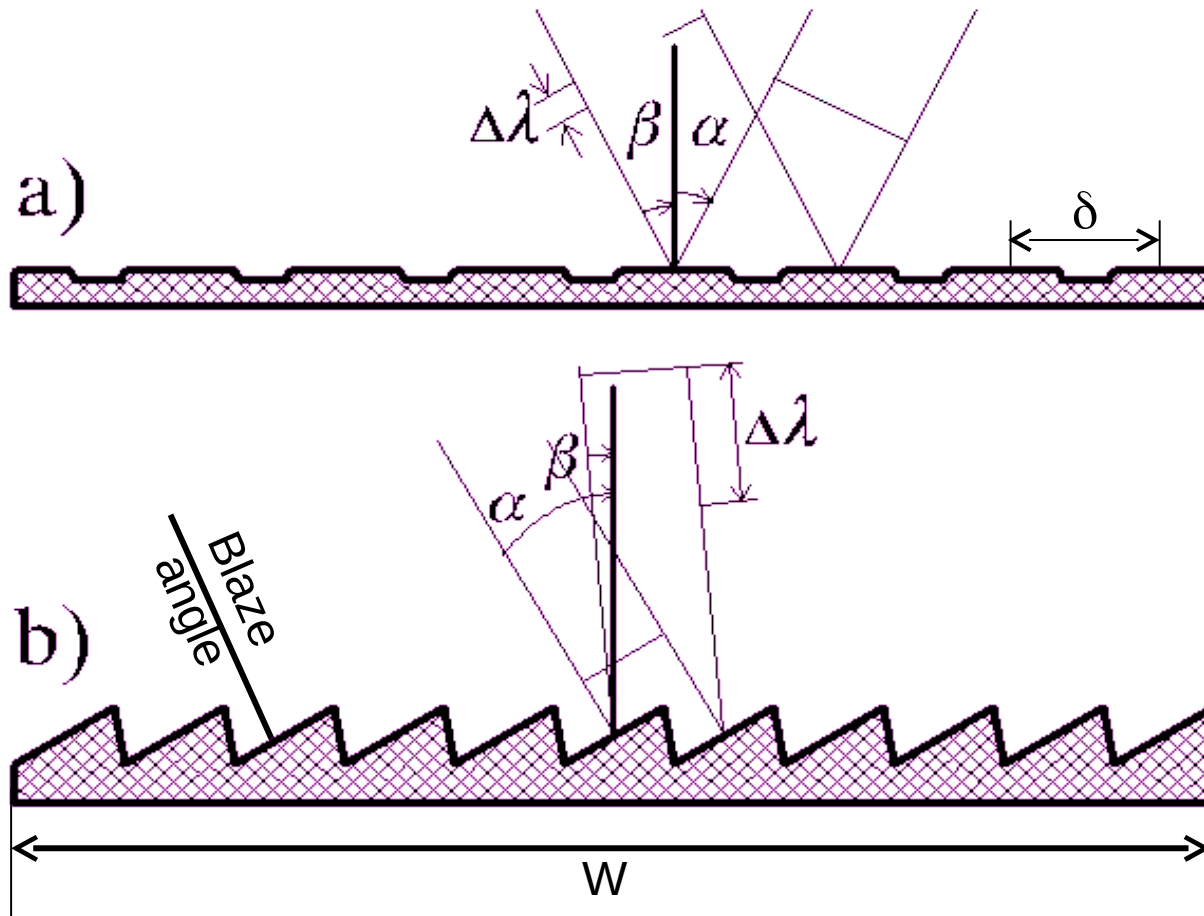
ввести дополнительную разность хода - использование отражательной дифракционной решетки с наклонным штрихом — эшелле или ступенчатая решетка



ESO HARPS спектрограф
использует две эшелле-
решетки, выравненные с
точностью нескольких
нанометров

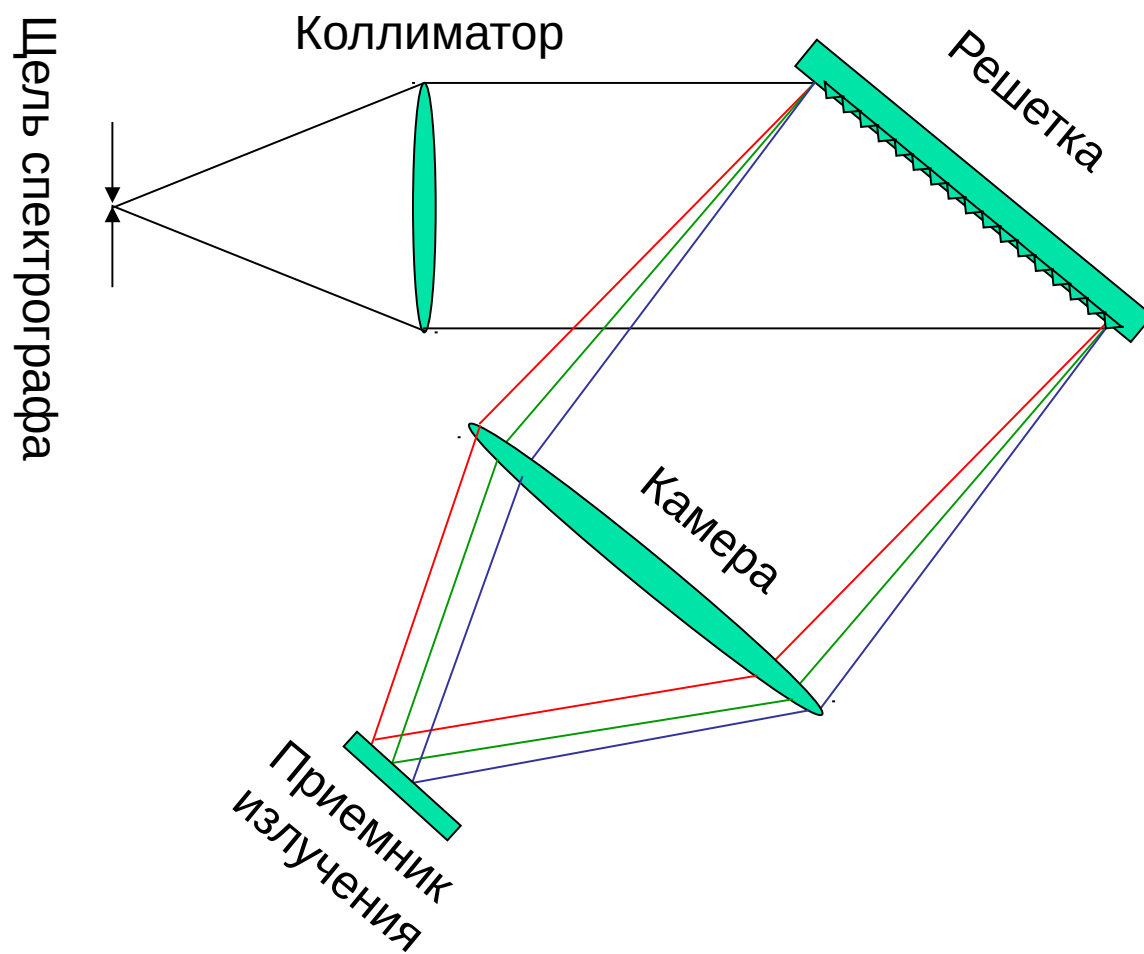


Отражательные решетки



Угол блеска — угол, в котором решетка обеспечивает максимальную интенсивность спектра

Схема типичного дисперсионного спектрографа

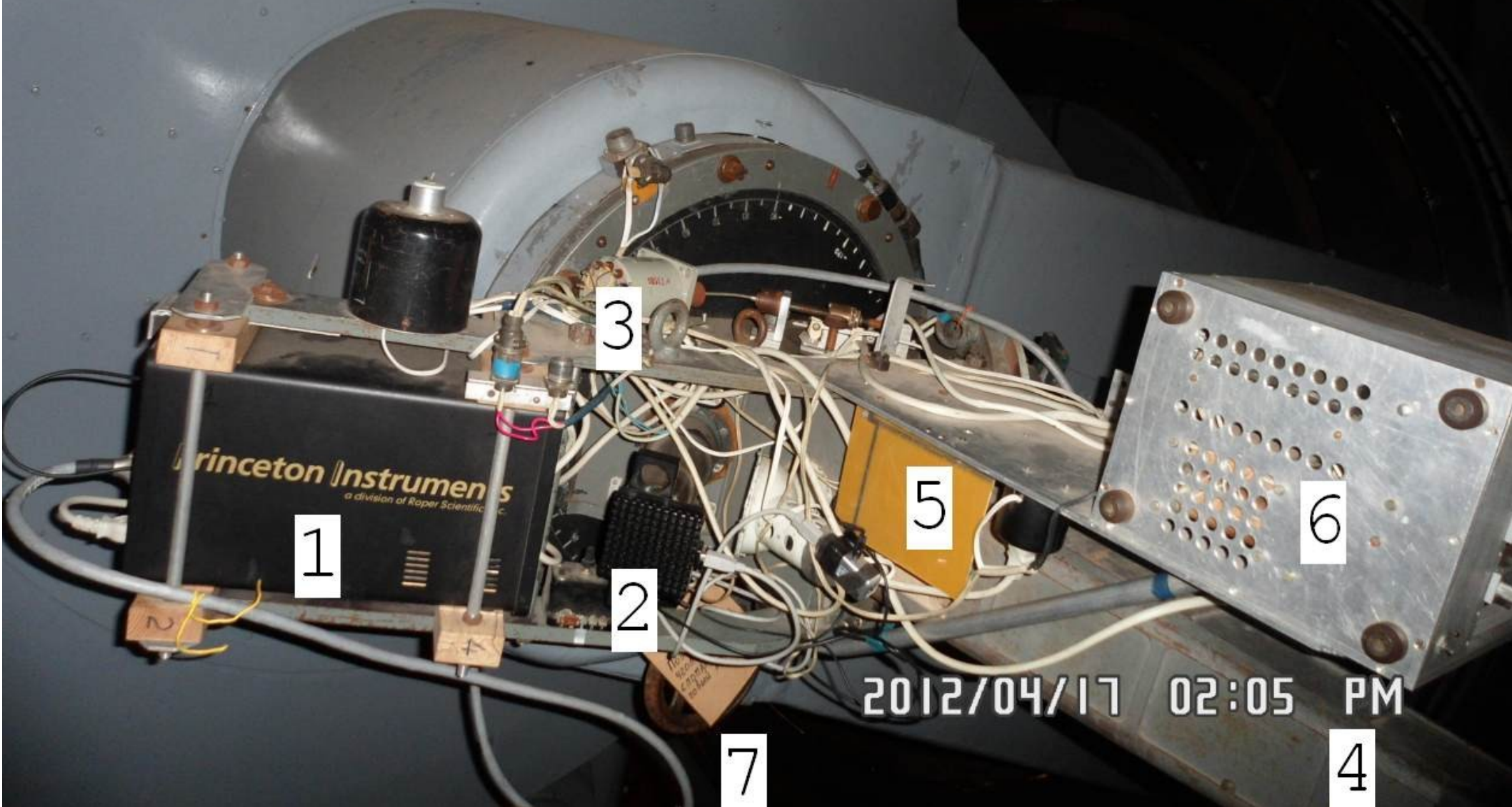




Спектрограф
1) АСП-14
2) SPEM



"SPEM" spectrograph mounted in the Nasmyth focus of the 2.6-m Shajn Telescope. Digits denote: 1 - Controller of the SPEC-10 CCD camera; 2 - Meade CCD camera to view and to track targets; 3 - Unit to set title of the grating dispersion unit by stepper engine; 4 - Collimator; 5 - 12V Power supply; 6 - Unit to control the spectrograph; 7 - Wheel to change a position angle;



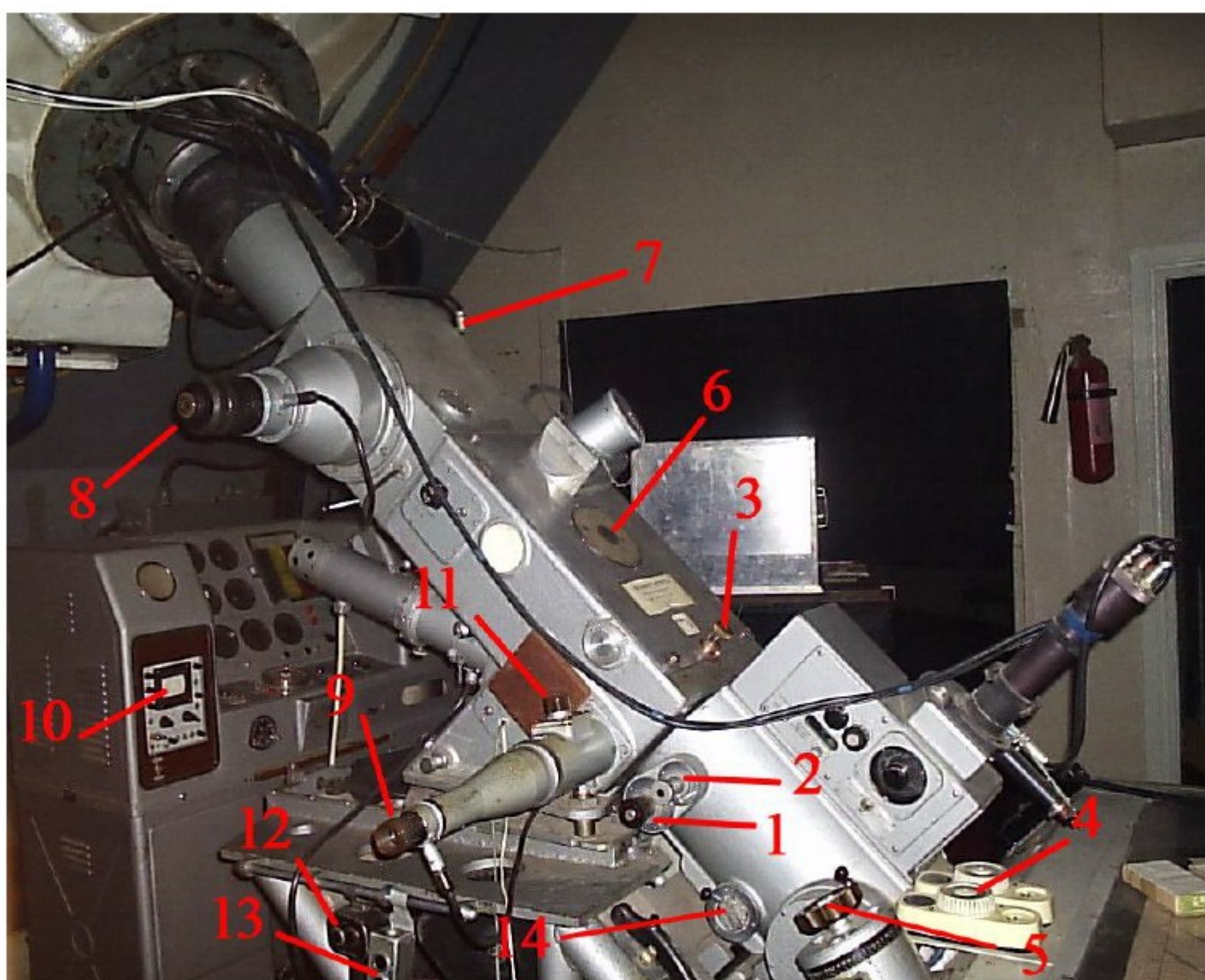
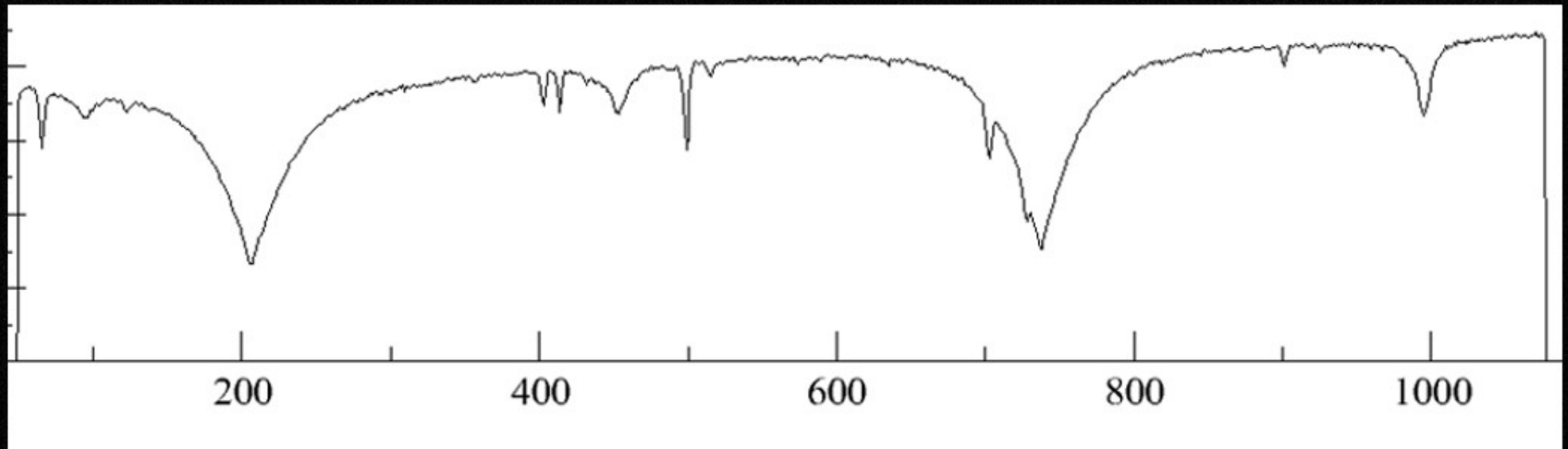
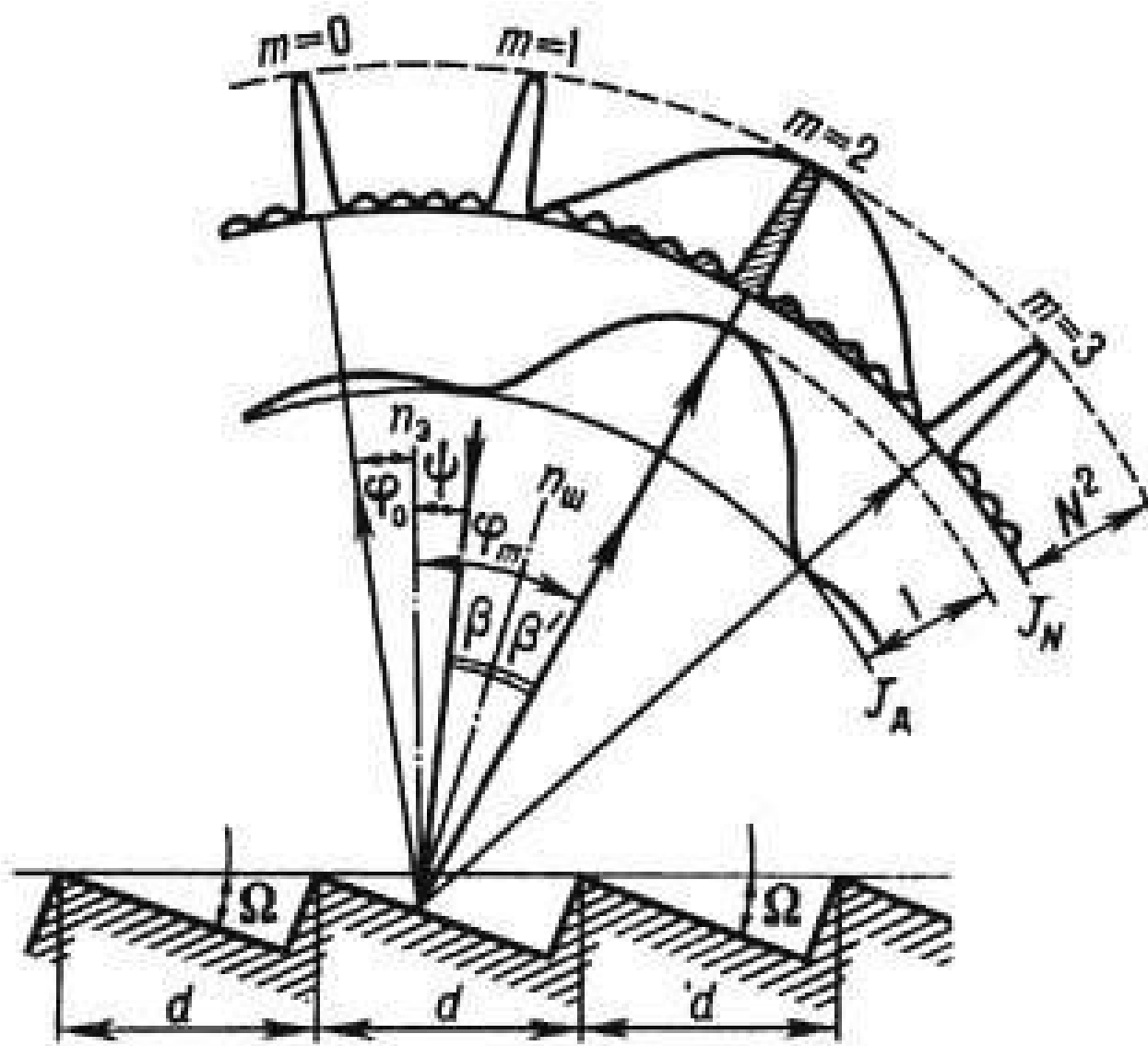


Рис. 8. 1 – ограничители спектра сравнения; 2 – щель; 3 – для снятия плоского поля необходимо повернуть ручку стрелкой на себя, стрелка вниз – звезда; 4 – включаем лампу спектра сравнения; 5 – установка угла наклона решетки; 6 – отверстие для установки стоксметра; 7 – провод связи стоксметра с блоком управления; 8 – гид; 9 – подсмотр; 10 – датчик работы фотогида; 11 – переключатель подсмотр-фотогид; 12 – пульт фокусировки; 13 – пульт управления и фокусировки; 14 – фильтры (ручка оттягивается и аккуратно переводится в нужное положение).

NTT
EMMI spectrograph
BLMD mode



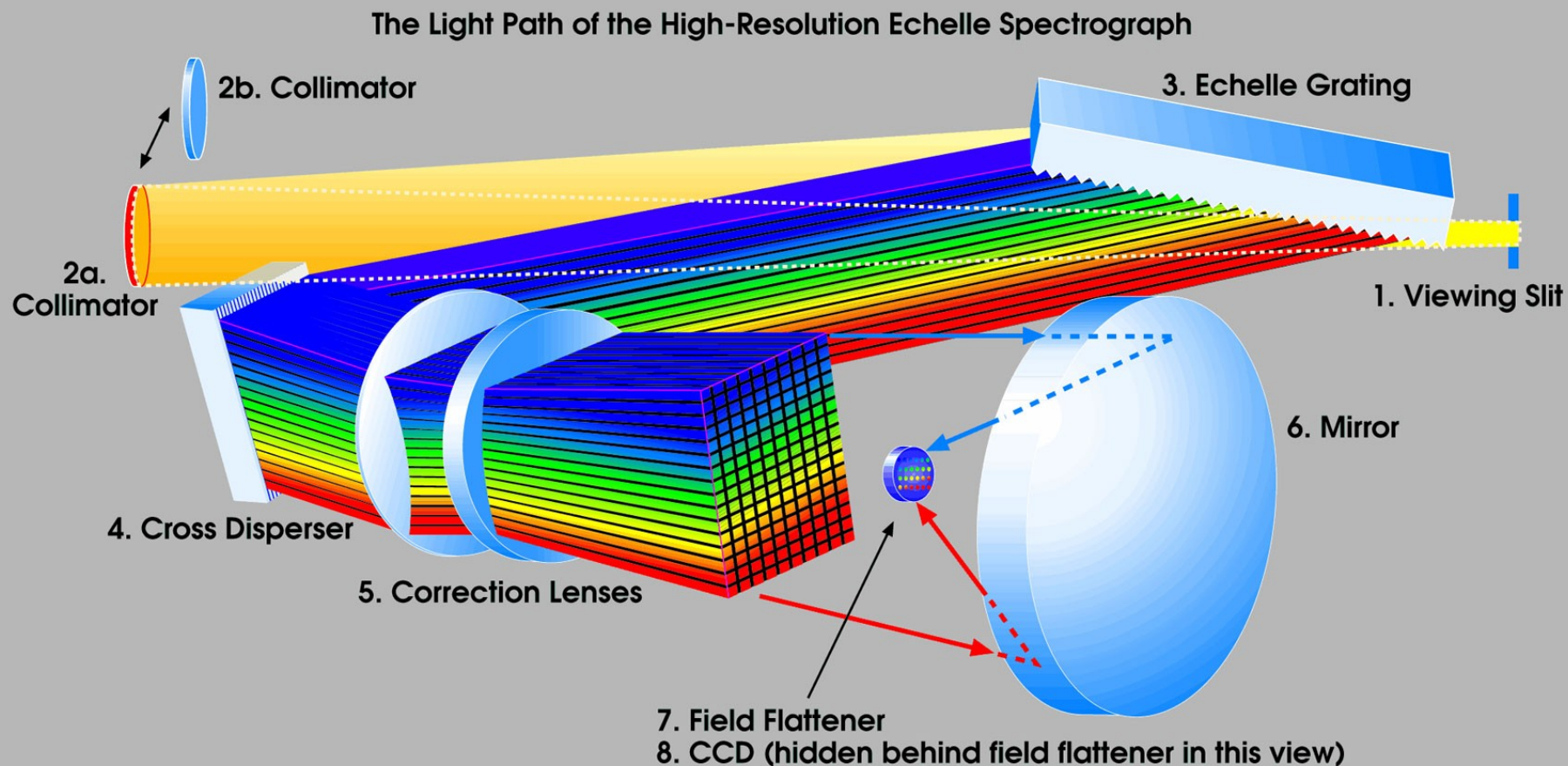


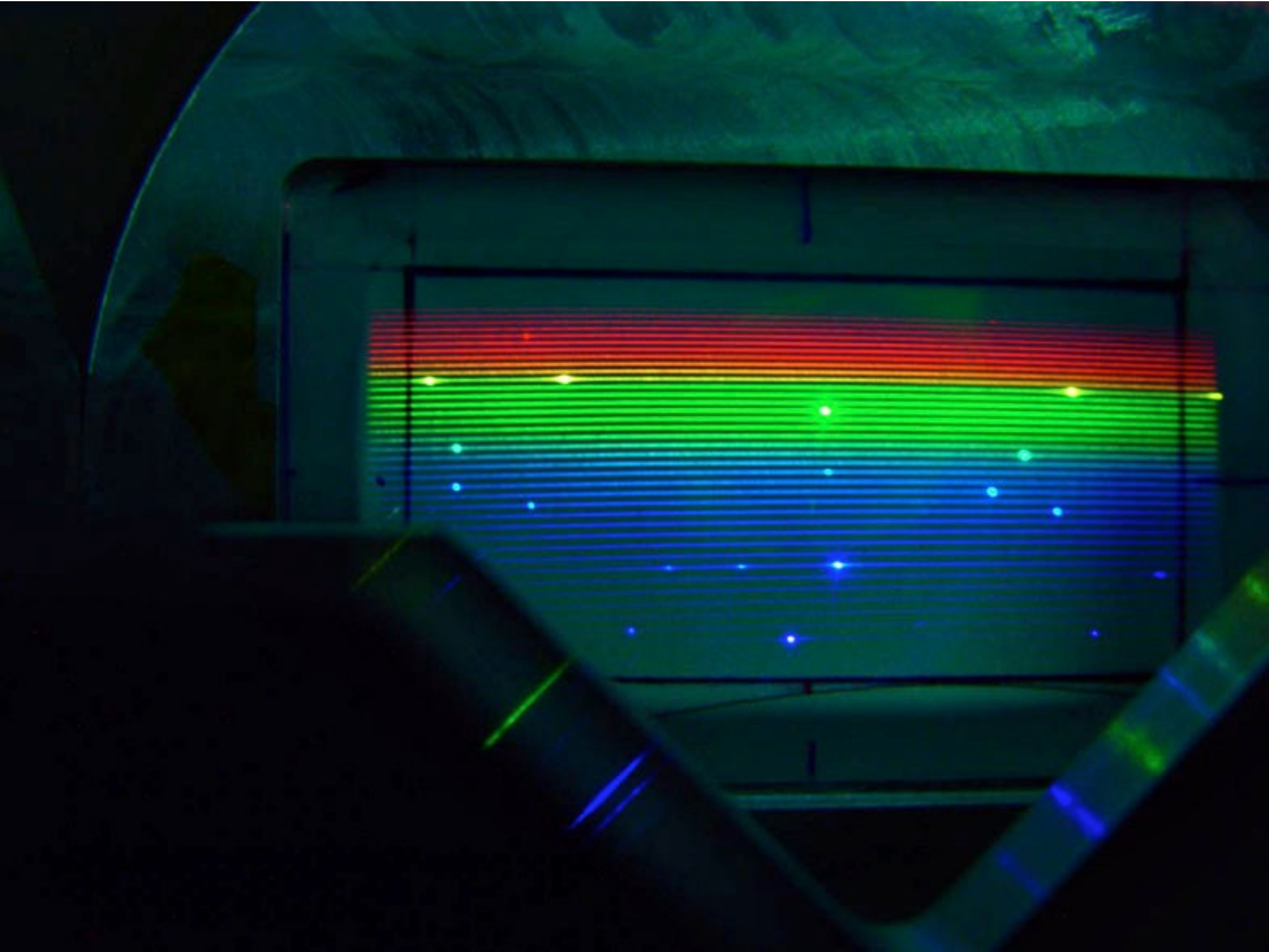
+++ использование высоких порядков = высокое разрешение

--- с повышением порядка увеличивается угол блеска и уменьшается эффективная рабочая длина решетки $L' = L \cos \Omega$ — необходимы более длинные решетки — сложность изготовления

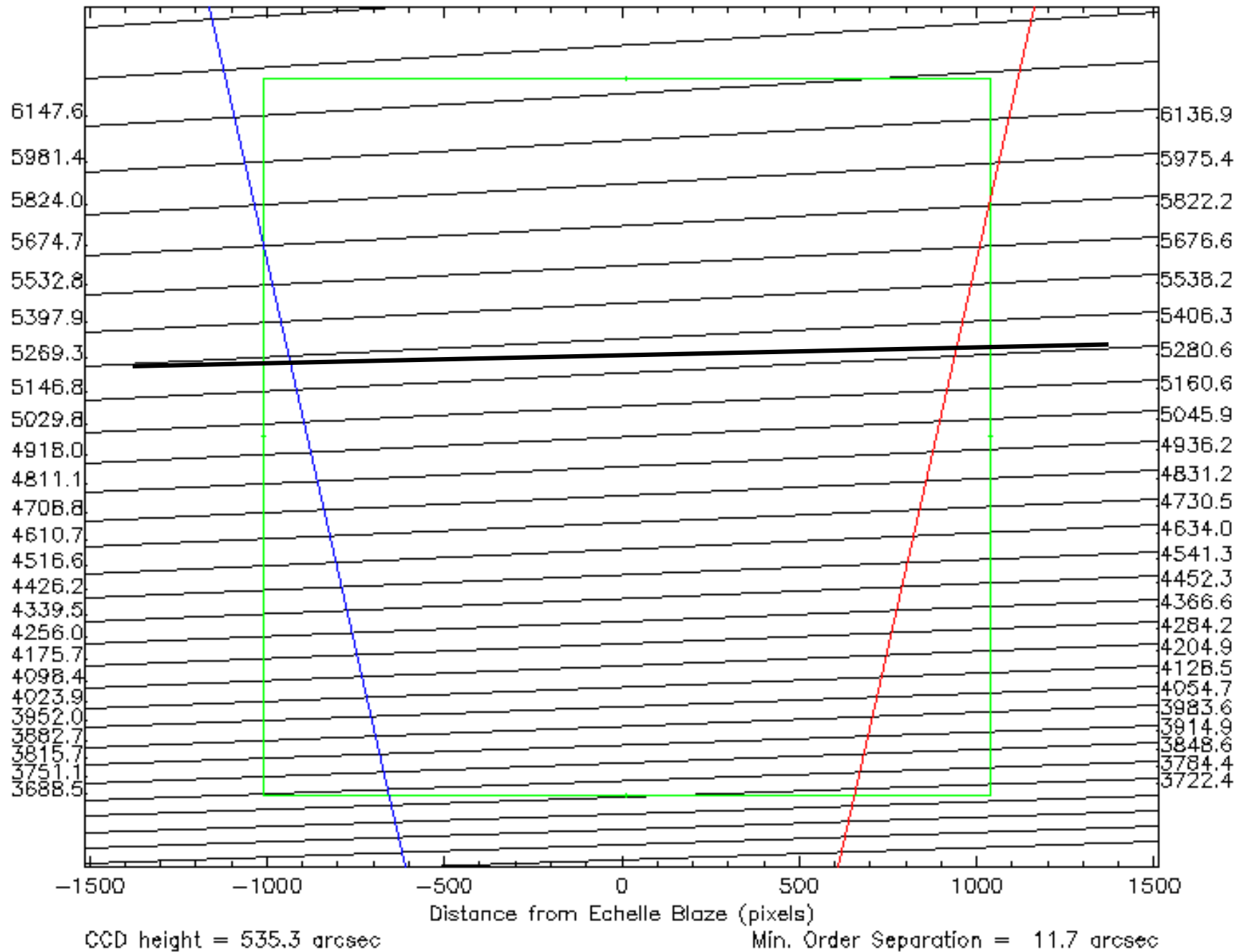
--- на высоких порядках уменьшается свободный спектральный интервал и соседние порядки начинают накладываться друг на друга

Системы со скрещенной дисперсией





LONG CAMERA, LEFT PORT, CCD format: 2048. 2048. 0.024 0.024
X-DISP: 316 l/mm, order 1 central λ =4982.0, tilt= 808.7
ECHELLE: 79.0 l/mm, central λ =4982.0 (ord 45), tilt= 565.6



Основные уравнения эшелле-спектрографа

$$d(\sin\phi + \sin\psi) = k\lambda$$

1. Для центров всех порядков $\lambda = \lambda_{\text{centre}}$, углы ϕ ψ — постоянны (в автоколлимационной решетке они равны между собой и равны углу блеска)

$$k\lambda_{\text{center}} = 2d\sin\theta_{\text{blaze}} = \text{const} = \text{постоянная эшелле}$$

2. Угловая и линейная дисперсия вдоль одного порядка практически постоянна

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos\phi} = \frac{kN}{L\cos\phi} \approx \text{const}$$

3. Отношение дисперсий двух порядков равно отношению их порядков

$$\frac{\frac{d\phi_i}{d\lambda}}{\frac{d\phi_j}{d\lambda}} = \frac{k_i}{k_j}$$

Определение номера порядка на эшелле-кадре

$$6562,79 \quad k\lambda_{center} = 2d\sin\theta_{blaze}$$

$$\begin{array}{cc} 5889,95 & 5895,92 \end{array} \quad \begin{array}{l} k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2 \\ k_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \Delta k \end{array}$$

$$\lambda_2 = 6558,3 \quad \lambda_1 = 5903,0$$

$$\Delta k = 4$$

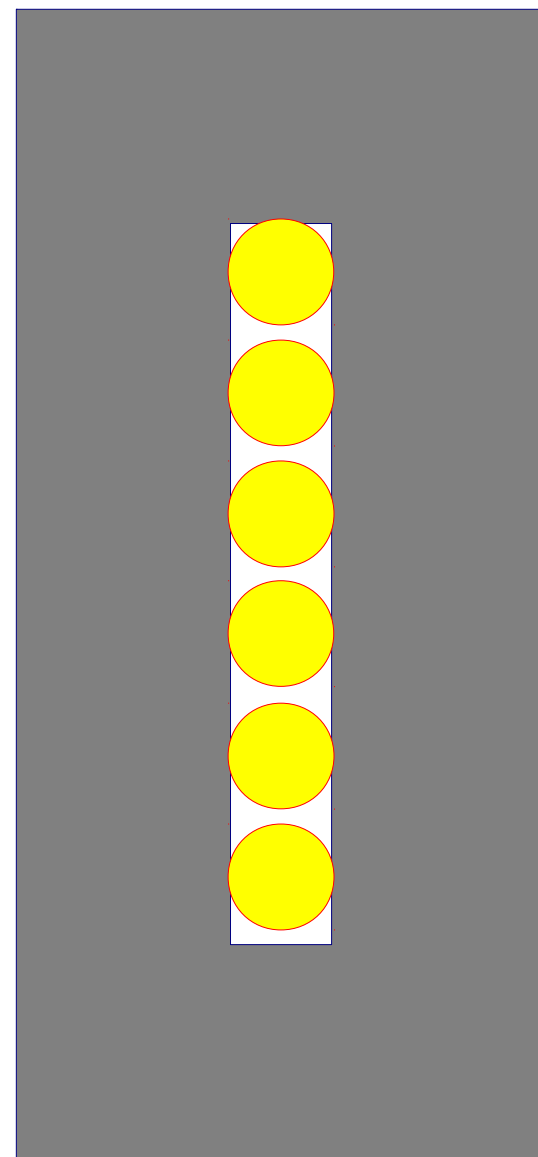
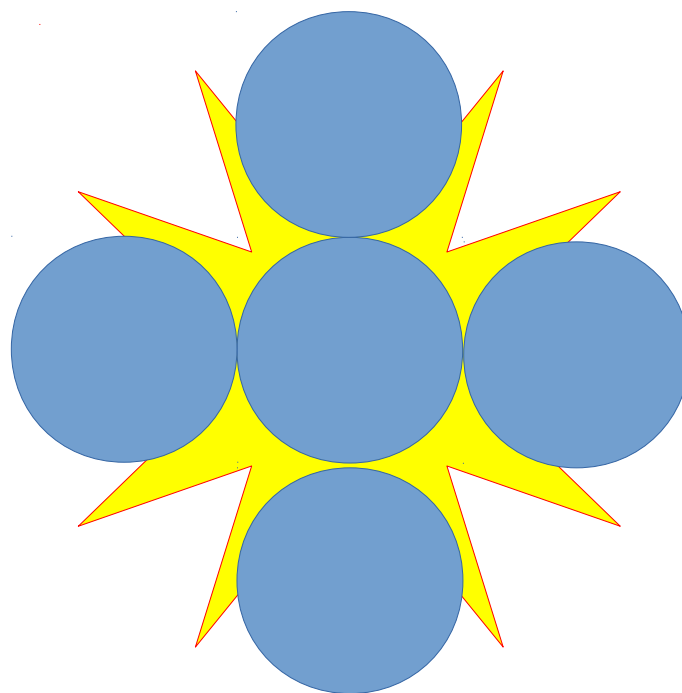
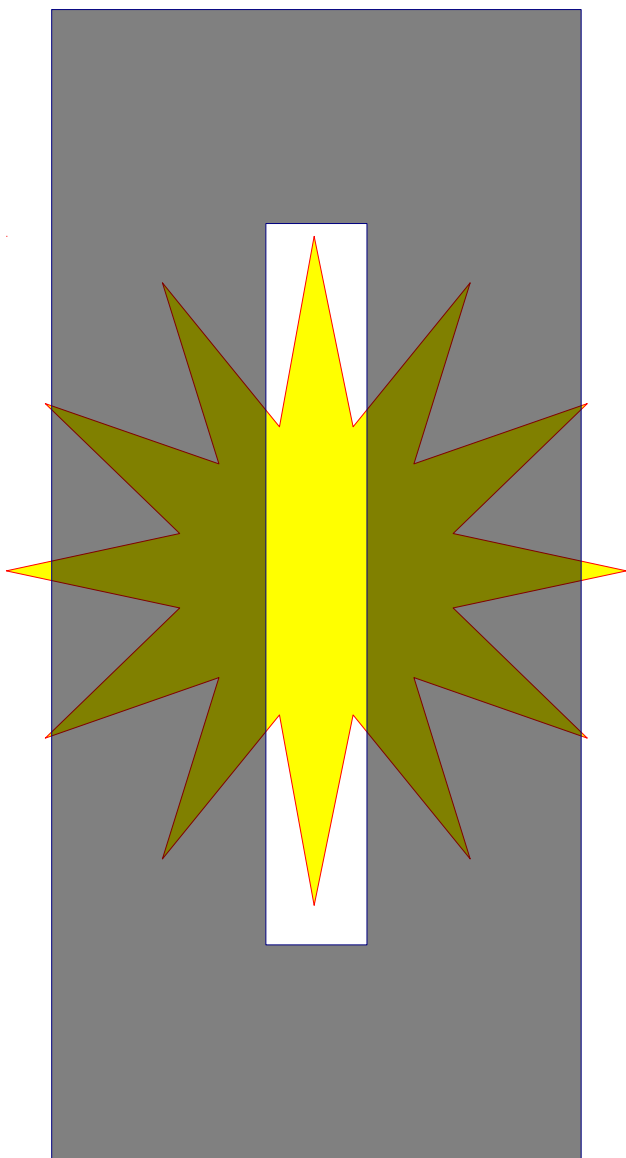
$$k_2 = 36 \quad k_1 = 40$$

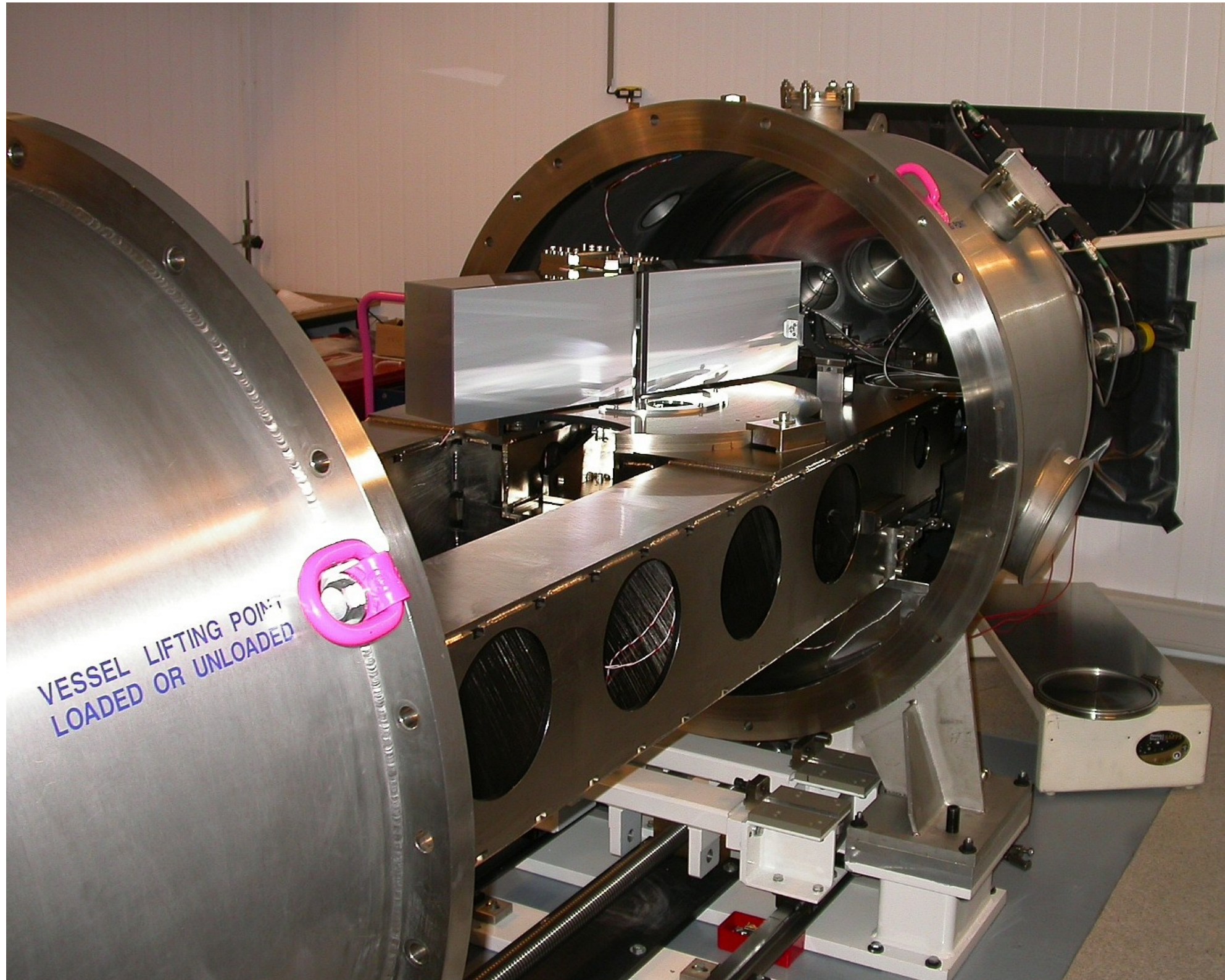
$$k\lambda = 236100$$

+++ высокое разрешение

+++ большой участок спектра

--- в щель спектрографа может попадать не все изображение звезды





VESSEL LIFTING POINT
LOADED OR UNLOADED

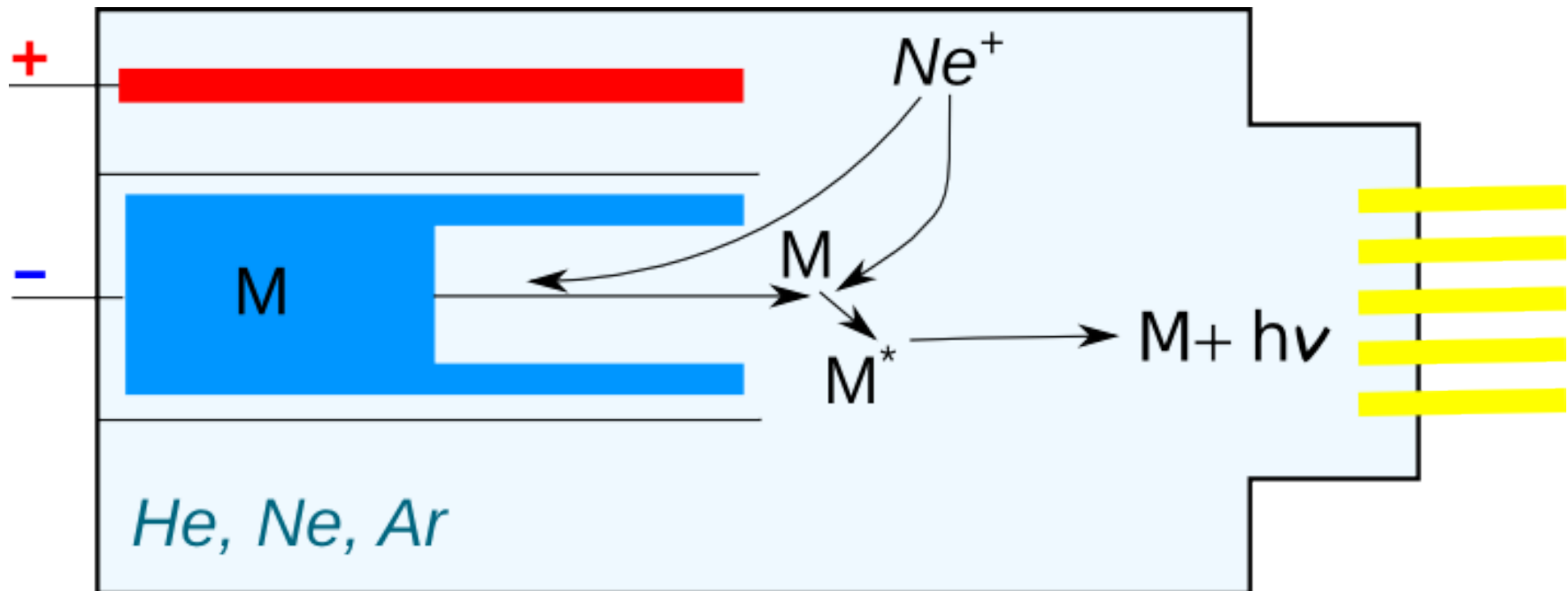
Калибровка по длинам волн

Необходим калибровочный стандартный спектр

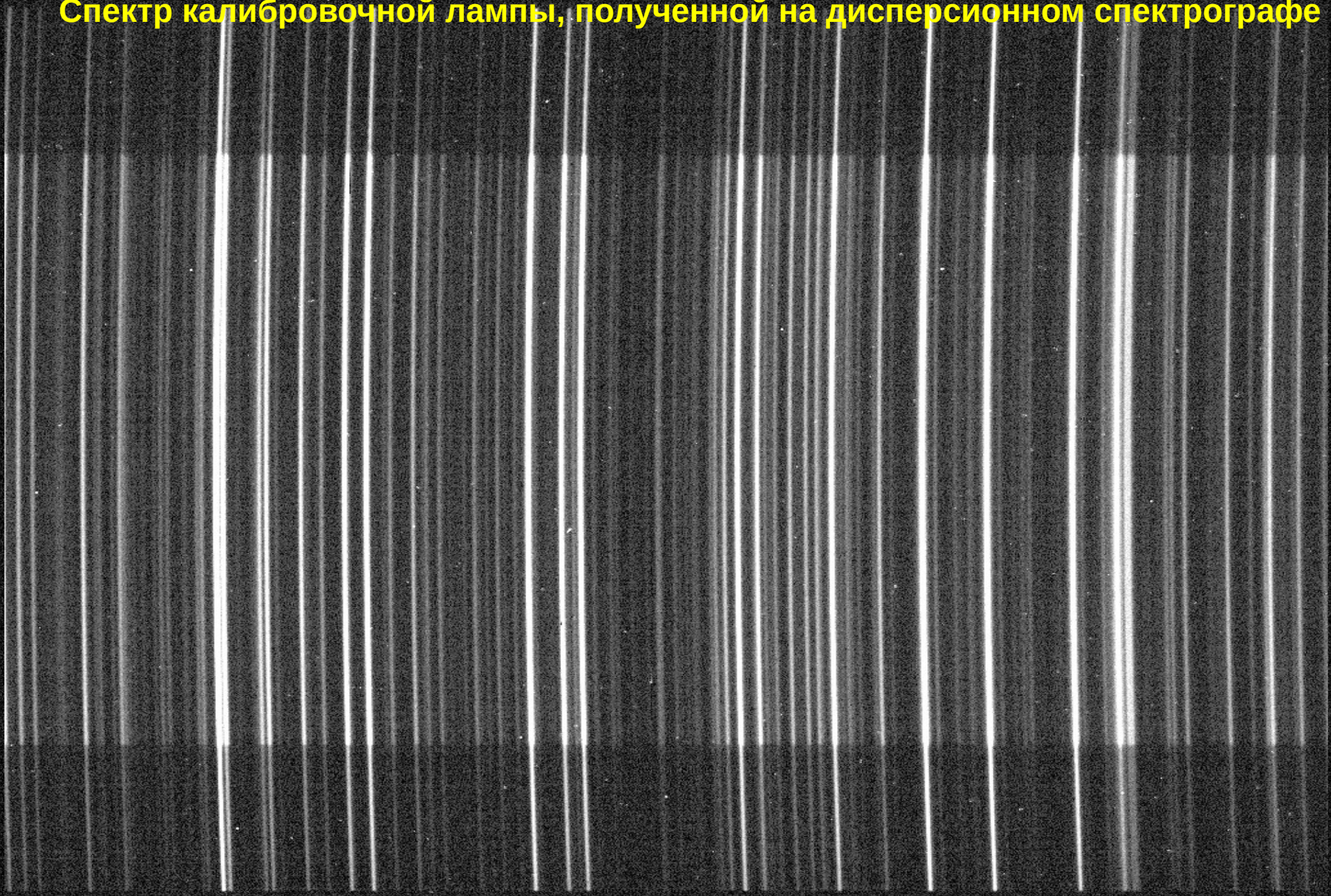
Лампы с полым катодом

- катод из металла, атомы которого дают обильное количество эмиссионных линий в видимой части спектра (Fe, Th)

- лампы заполнены инертным газом (He, Ne, Ar)



Спектр калибровочной лампы, полученной на дисперсионном спектрографе



Эшелле-спектр ThAr лампы

ThAr01

Для качественной калибровки необходимо:

- знать длины волн спектральных линий с точностью не менее $0.1\Delta\lambda=0.1\lambda/R$
- иметь не менее 4-5 линий в каждом порядке
- правильно идентифицировать спектральные линии на кадре

Сравнительные характеристики типичных звездных спектрографов

	Призмennyй	Дифракционный	Эшелле
Поле зрения	1) соответствует полю зрения телескопа 2) щель	щель	щель
Одновременно регистрируемый диапазон длин волн	1) тысячи Ангстрем 2) сотни и тысячи Ангстрем	1) десятки Ангстрем 2) сотни Ангстрем 3) тысячи Ангстрем	тысячи Ангстрем
Разрешение	1) 100 2) 1 000	1) 50 000 2) 5 000 3) 1 000	1 000 — 1 000 000
Пример телескопа ГАИШ	АЗТ-6, АЗТ-5	АЗТ-2, ЗТЭ, Цейсс-2	Кисловодская станция

Возможности спектроскопии высокого разрешения

СПЕКТРОГРАФ	СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ	ТЕЛЕСКОП, обсерватория	ДИАМЕТР ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА
HIRES (3000 - 10000A)	25 000-85 000	Keck	2x9.8 m
HRS (3900 -11000A)	15 000-120000	Hobby-Eberly (HET)	9.2 m (eff)
CRIRES (10000 - 50000A)	100 000	ESO VLT (UT1)	8.2 m
UVES (3000 - 5000A, 4200 -11000A)	до 110 000	ESO VLT (UT2)	8.2 m
HDS (3000 - 10000A)	до 160 000	Subaru	8.2 m
NES (3000 – 8000 A, 1500A одновременно)	45 000	БТА	6 m
HARPS (3780-5300A, 5330-6910A)	115 000	ESO	3.6 m
SARG (3700 -10000A)	<144 000 (slicers)	TNG	3.6 m
ESPaDOnS (спектрополяриметр, 3690 -10480A)	68 000-81 000	CFHT	3.6 m
FIES (3700 - 7300A одновременно)	< 67 000	NOT	2.5 m
NARVAL (4500 -6600A)	65 000	Pic du Midi Observatory	2 m
MAESTRO (3500-10 000A)	45 000 – 190 000	Терскол	2 m
SOPHIE (3870 - 6490A)	<70 000	Haute Provence	1.9 m