

# **Физика колебаний и волн.**

## **Квантовая физика.**

# Лекция № 4

---

## Спектральное разложение света.

- 1. Понятие о разложении в спектр.*
- 2. Спектральные приборы.*
- 3. Разрешающая способность.*
- 4. Дифракционная решётка как спектральный прибор.*

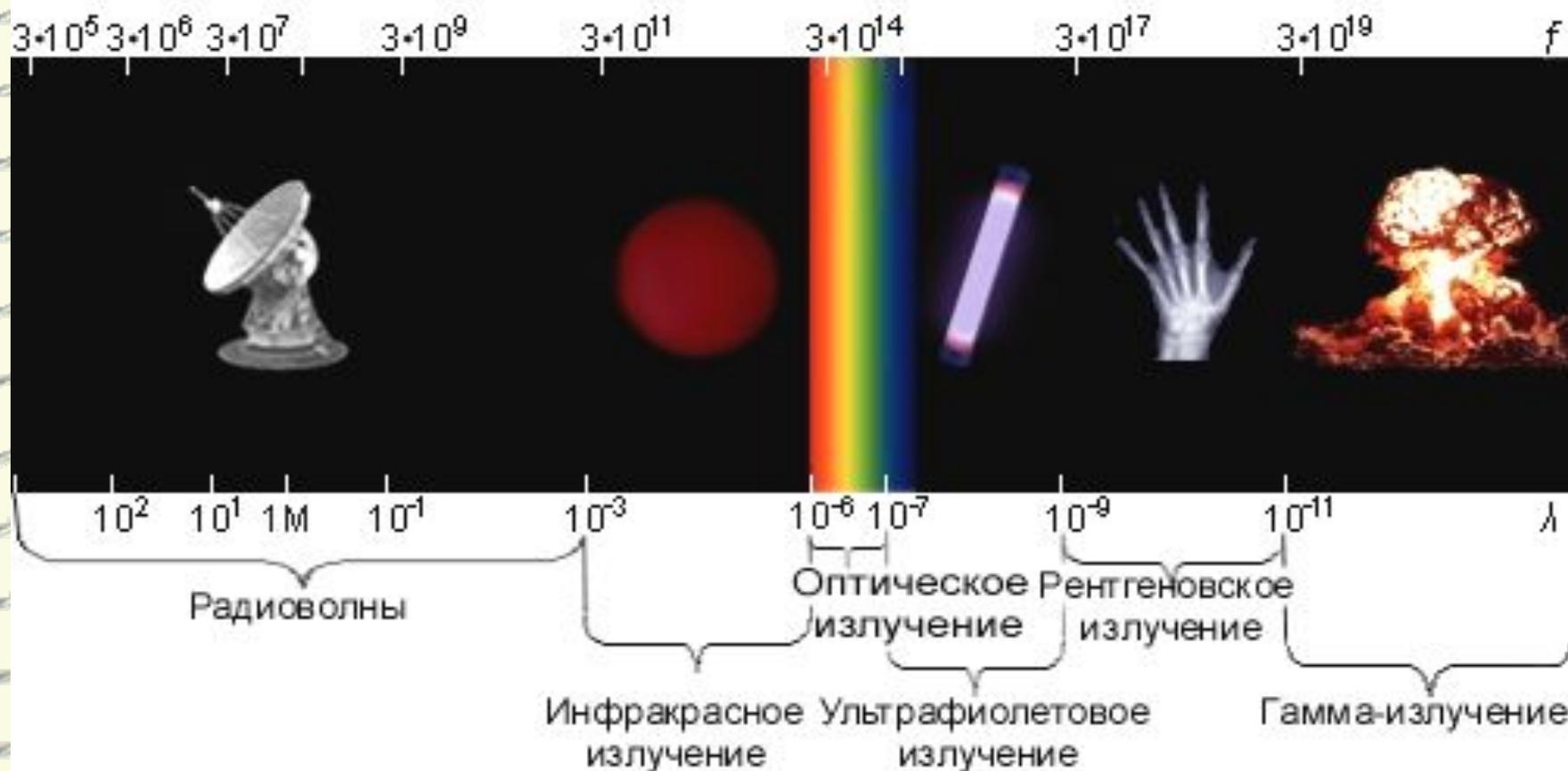
Электромагнитные волны, длины которых находятся в пределах от 1 до  $10^5$  нм, включающих ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра изучает раздел физики, называемый **оптикой**.

Длина волны видимого света заключается в пределах:  $\lambda = (380 \div 740)$  нм

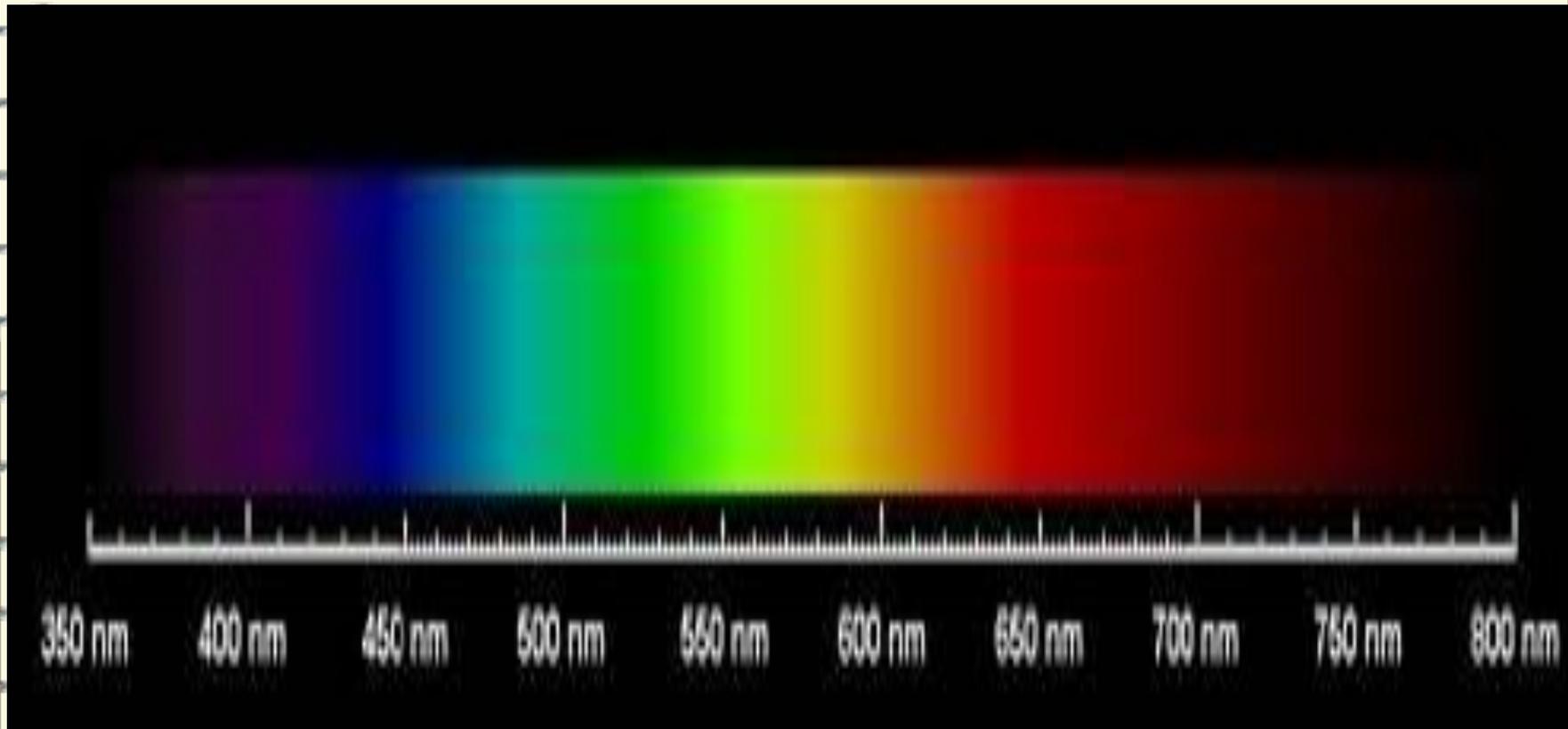
Ультрафиолетовым называется излучение с длиной волны, меньше 400 нм:  $\lambda = (1 \div 380)$  нм

Инфракрасным - излучение с длиной волны, большей 760 нм:  $\lambda = (740 \div 10^5)$  нм

**Оптический диапазон** длин волн  $\lambda$  ограничен с одной стороны рентгеновскими лучами, а с другой – микроволновым диапазоном радиоизлучения.



*Спектр, который видит человеческий  
глаз с длинами волн*

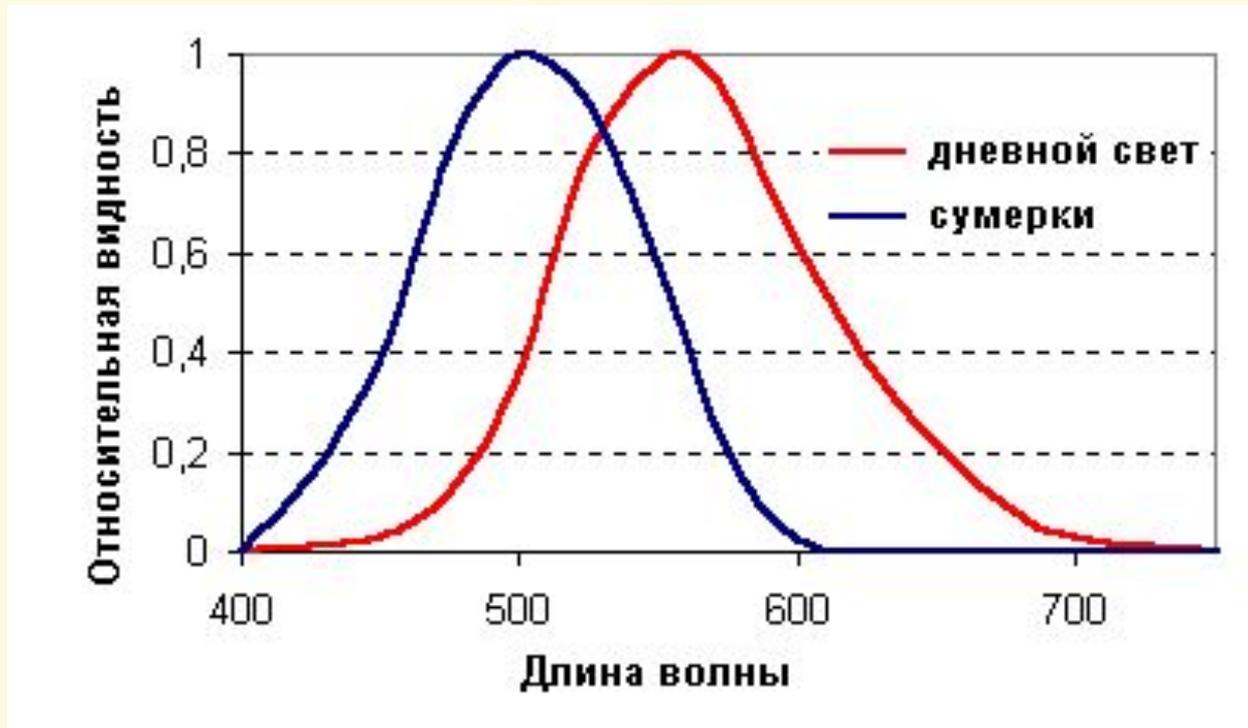




Согласно *теории цветового зрения* Юнга - Гельмгольца ощущение любого цвета можно получить смешиванием спектрально чистых излучений красного, зеленого и синего цветов

## Кривая видности -

относительная спектральная чувствительность  
глаза к излучениям различных длин волн



- максимальная чувствительность глаза при дневном свете –  
на длине волны **555 нм**,
- при сумеречном свете - на длине волны **510 нм**.

*Если источник света излучает не монохроматический свет, то в его излучении присутствует целый набор частот или длин волн.*



*Электромагнитная волна такого излучения является суммой всех присутствующих в ней волн различных частот. Чтобы узнать каковы частоты или длины волн в этой волне нужно разложить её в спектр и посмотреть её спектральный состав, т.е. присутствие той или иной частоты или длины волны.*

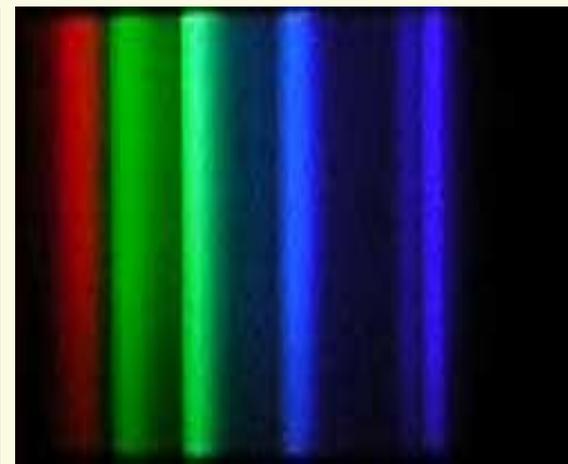
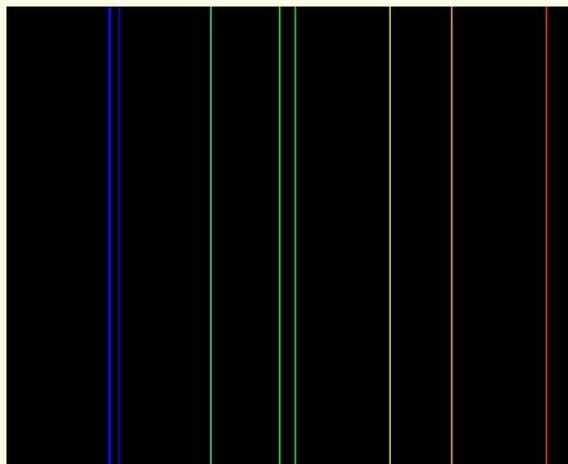
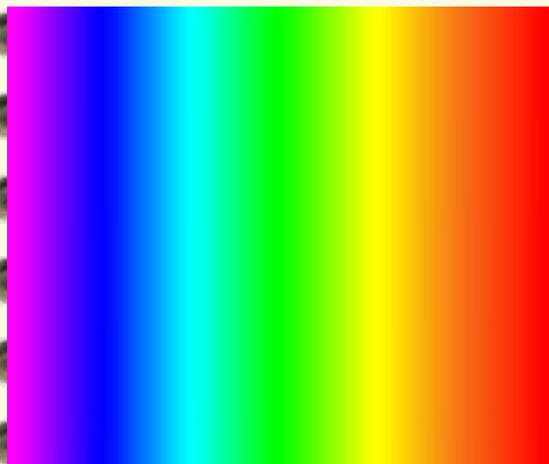
*Спектры бывают сплошные (непрерывные), линейчатые и полосатые.*

# Виды спектров

Непрерывные

Линейчатые

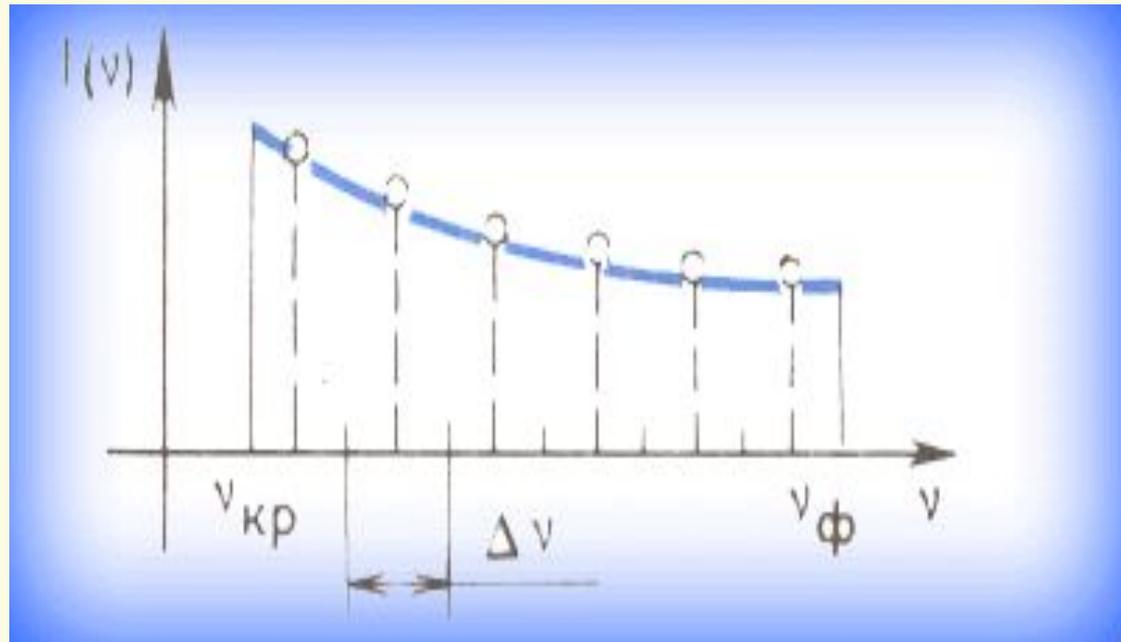
Полосатые



# Непрерывные спектры.



*Непрерывные спектры дают тела, находящиеся в твердом, жидком состоянии, а также сильно сжатые газы.*

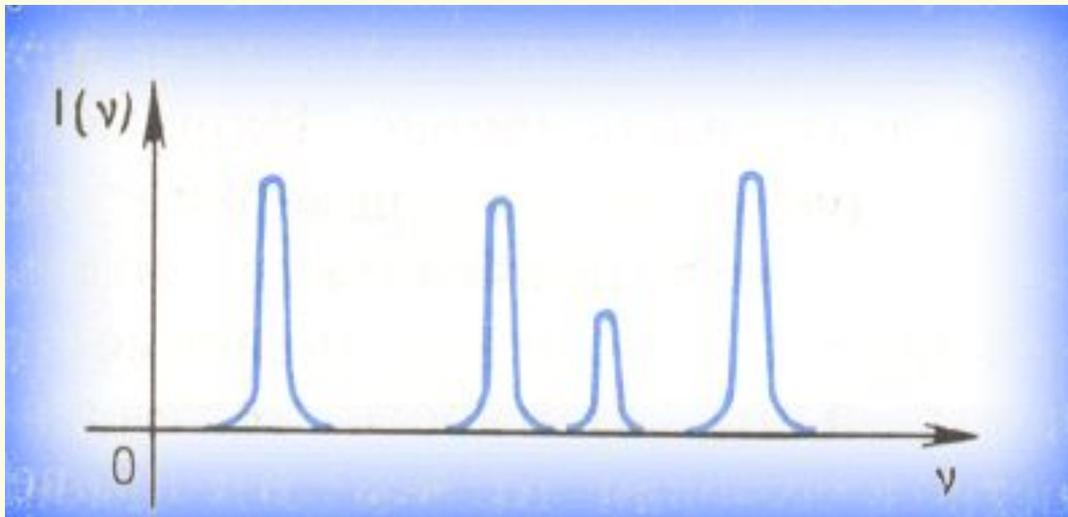
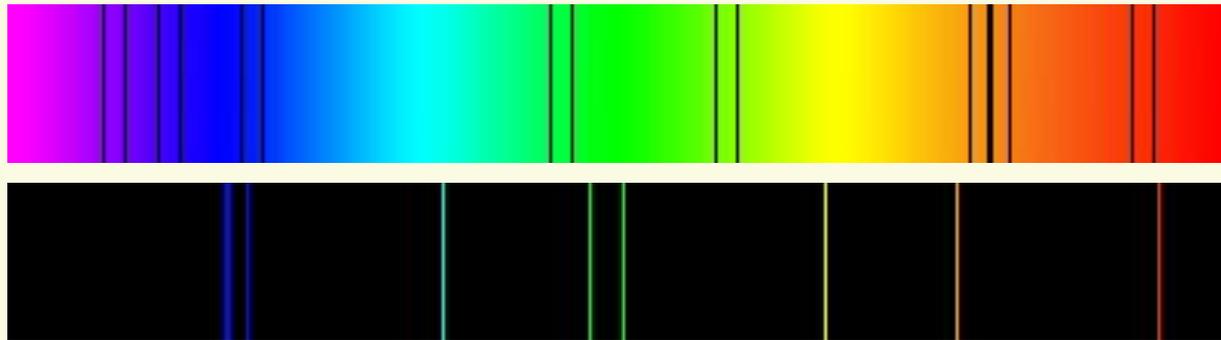


*Кривая зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты в видимой части спектра электрической дуги.*



# Линейчатые спектры

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии. Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн.

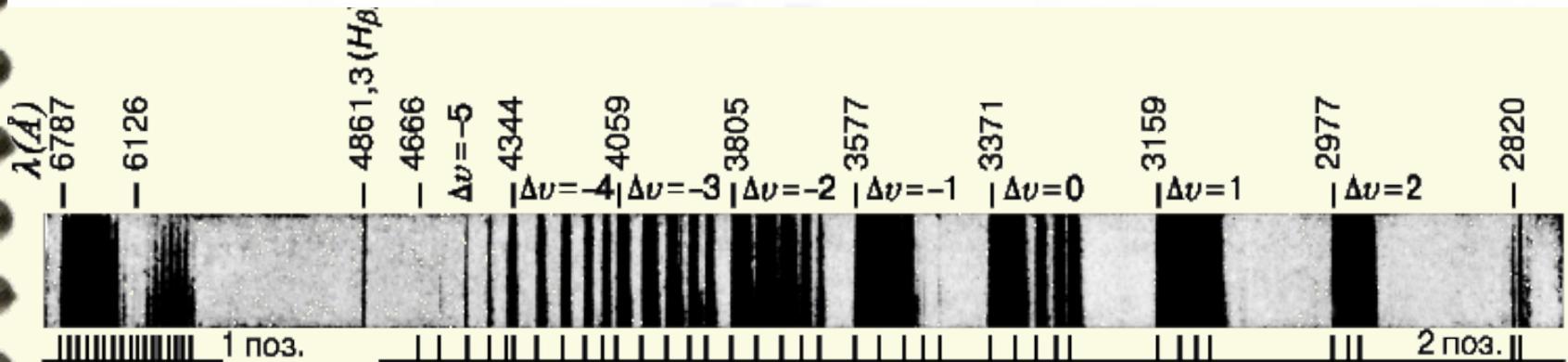
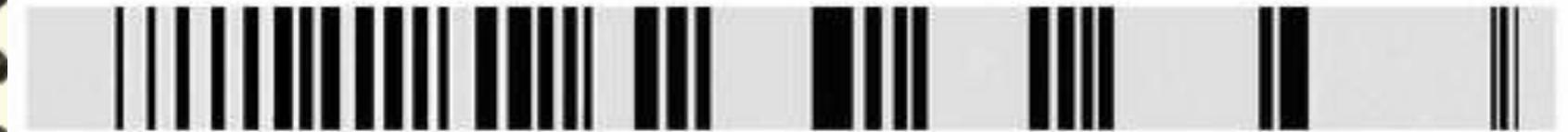


Примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре.



# Полосатый спектр

Полосатые спектры в отличие от линейчатых спектров создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

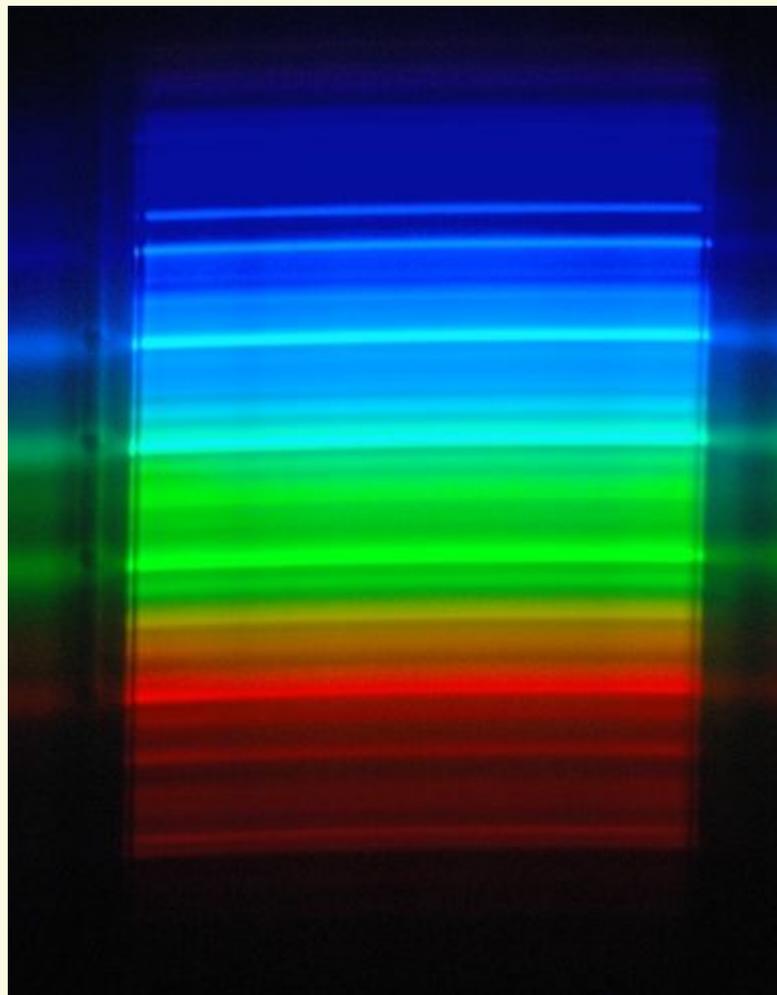


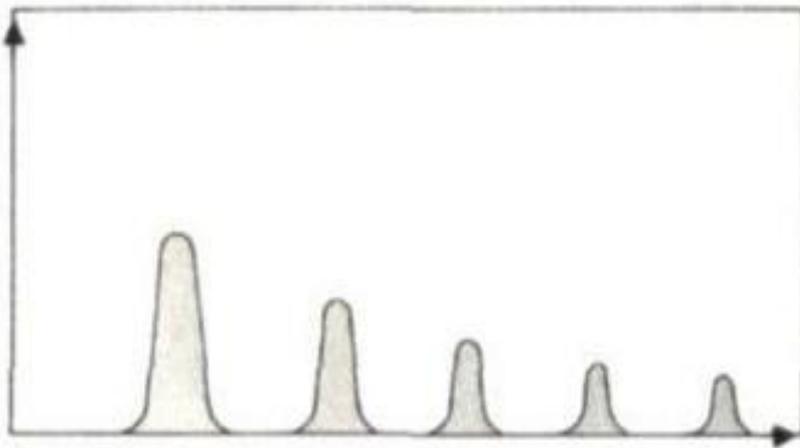
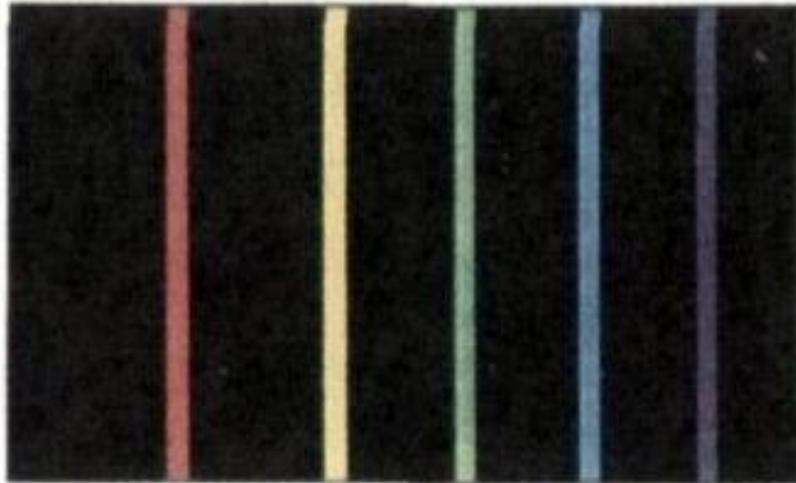
Электронный полосатый спектр азота  $\text{N}_2$

***Полосатый спектр*** излучения бутановой горелки



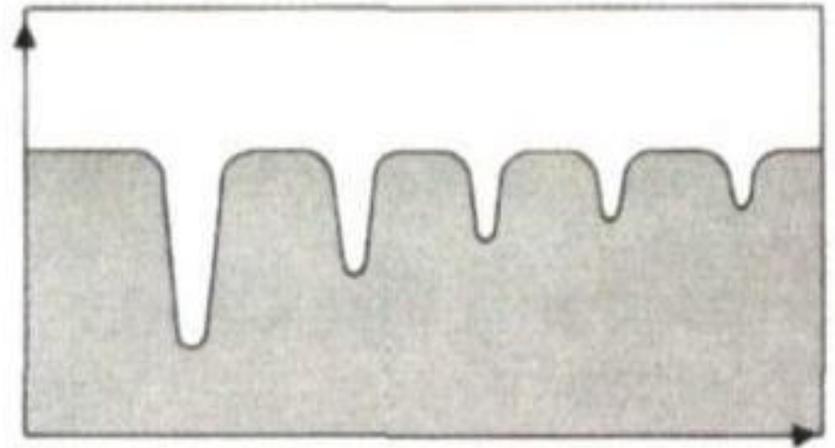
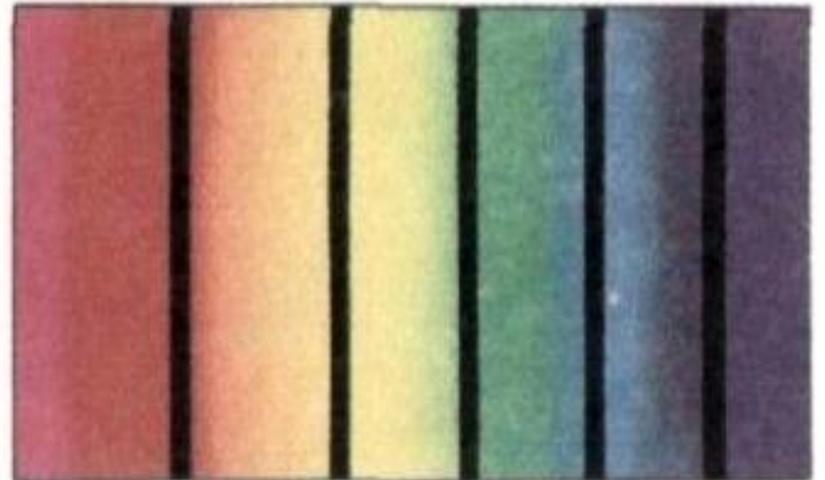
***Полосатый спектр***  
излучения  
углекислого газа ( $\text{CO}_2$ )





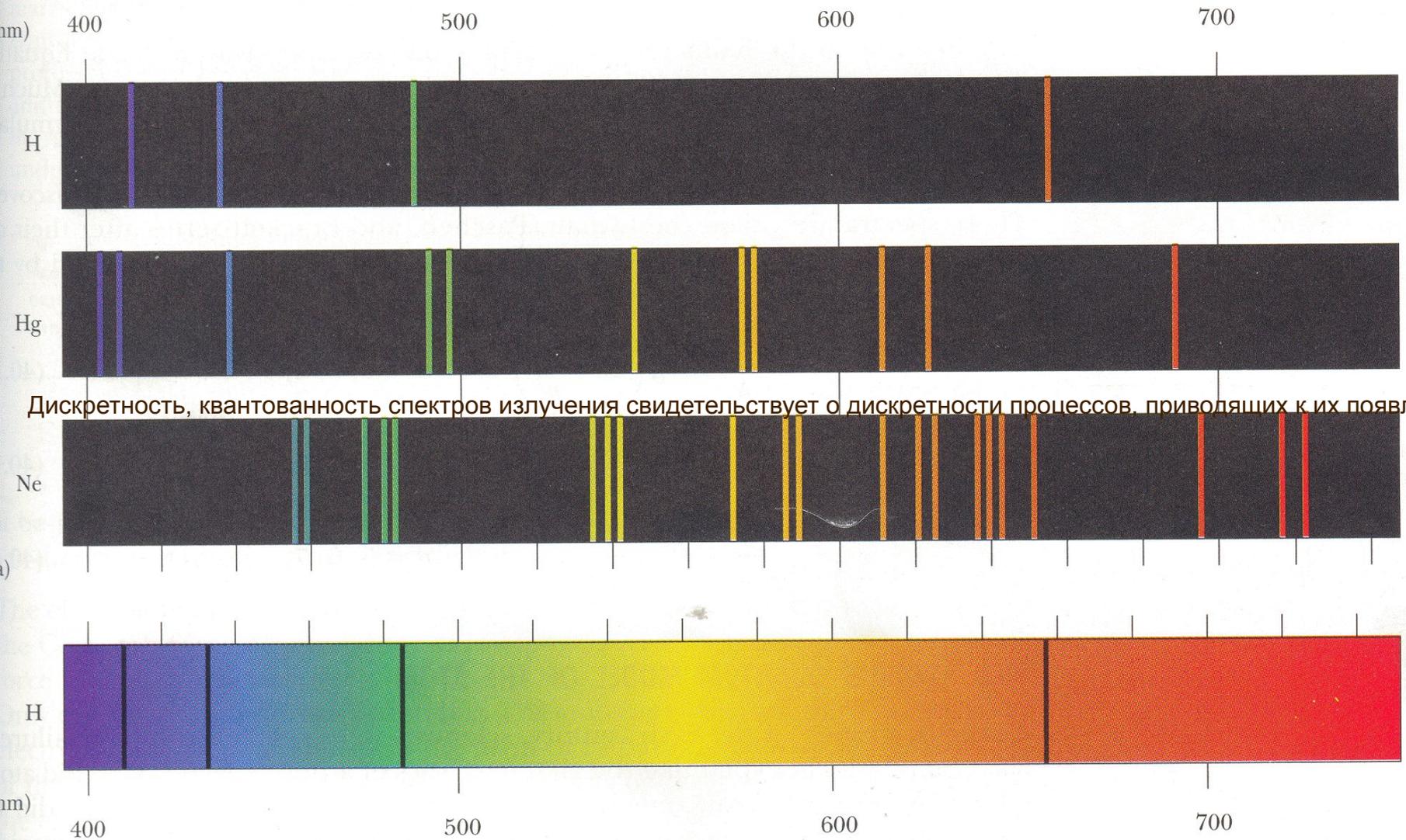
A

А) Спектр излучения



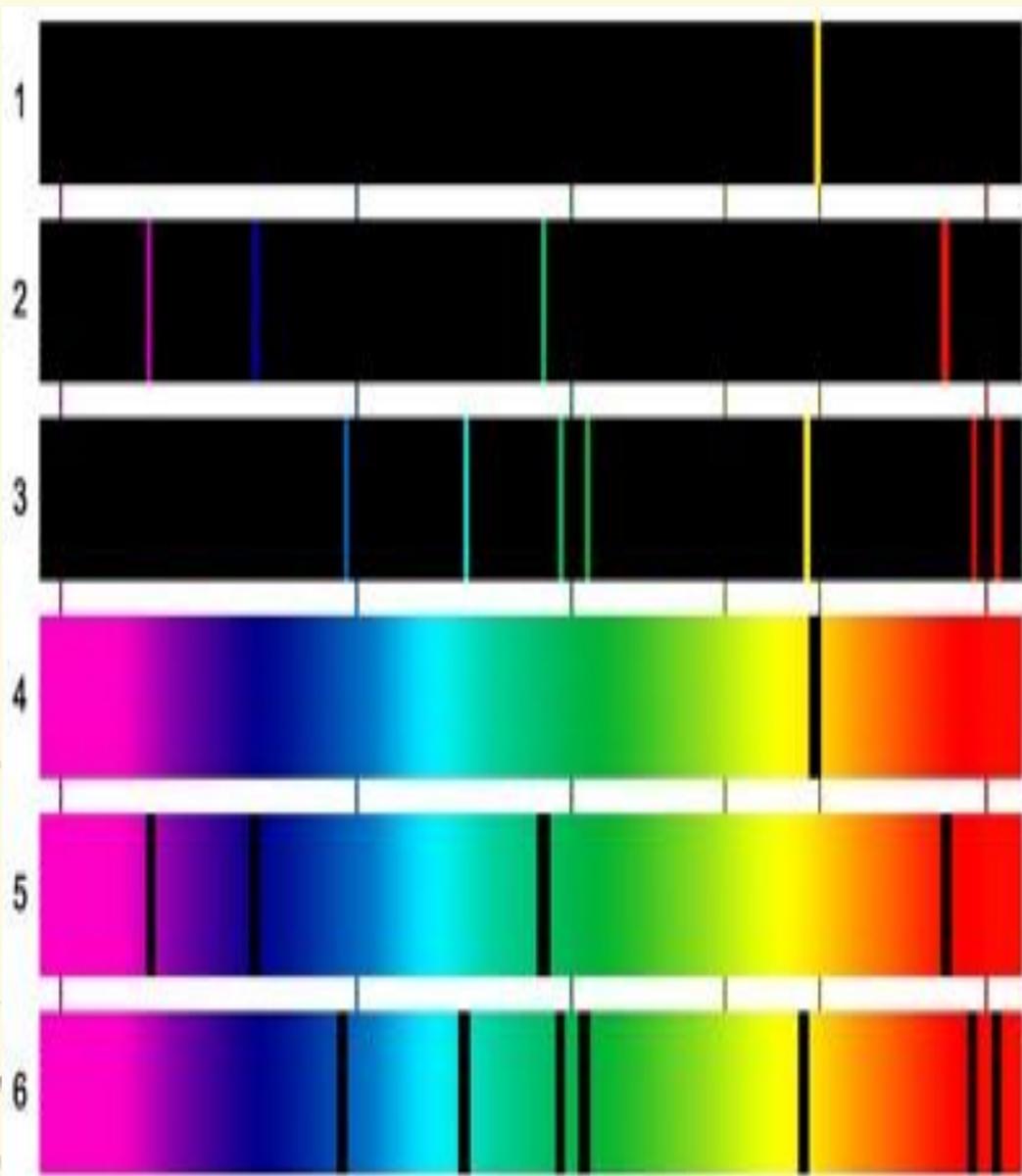
B

В) Спектр поглощения



Дискретность, квантованность спектров излучения свидетельствует о дискретности процессов, приводящих к их появлению.

Линейчатые спектры излучения в видимой области:  
 водород, ртуть, неон. Спектр поглощения водорода.



Спектры излучения:

1 - натрия,

2 - водорода,

3 - гелия.

Спектры поглощения:

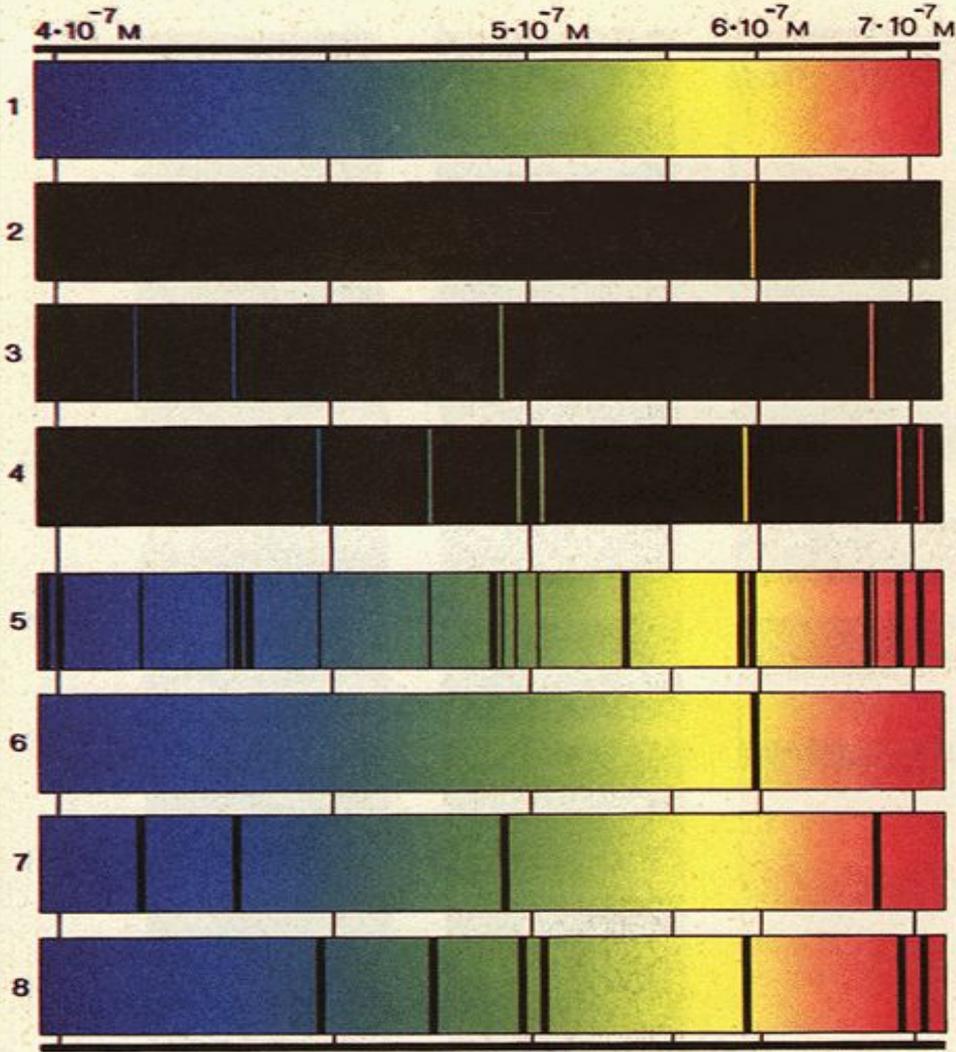
4 - натрия,

5 - водорода,

6 - гелия.



# Спектры испускания и поглощения



**Спектры  
излучения:**  
1- сплошной;  
2- натрия;  
3- водорода;  
4- гелия.

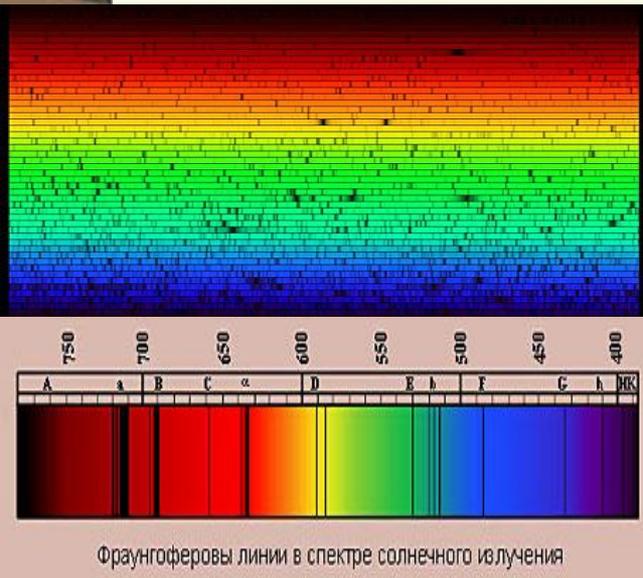
**Спектры  
поглощения:**  
5- солнечный;  
6- натрия;  
7- водорода;  
8- гелия.

# Спектральный



## Метод определения химического состава по его спектру.

Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определенный набор длин волн.

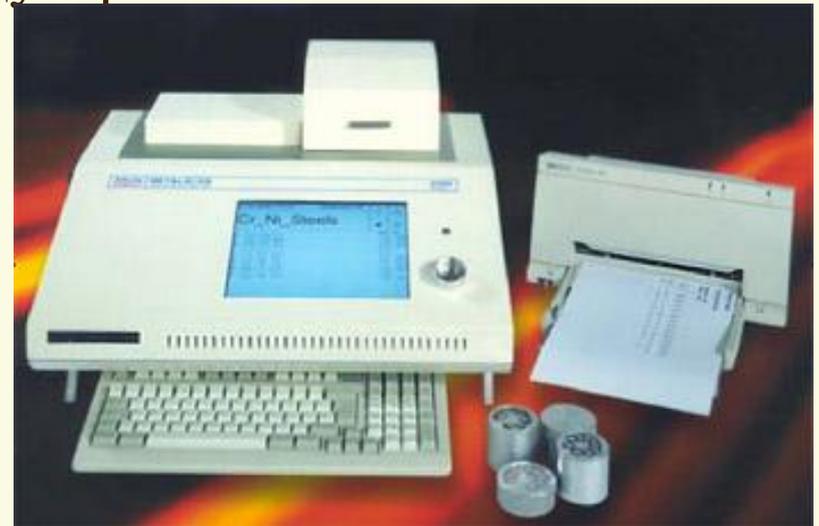


Видимая часть солнечного излучения при изучении с помощью спектроанализирующих приборов оказывается неоднородной – в спектре наблюдаются линии поглощения, впервые описанные в 1814 году И. Фраунгофером. Спектральный анализ позволяет получить информацию о составе Солнца, поскольку определенный набор спектральных линий исключительно точно характеризует химический элемент. Так, с помощью наблюдений спектра Солнца был открыт гелий. С помощью спектрального анализа узнали, что звезды состоят из тех же самых элементов, которые имеются и на Земле.

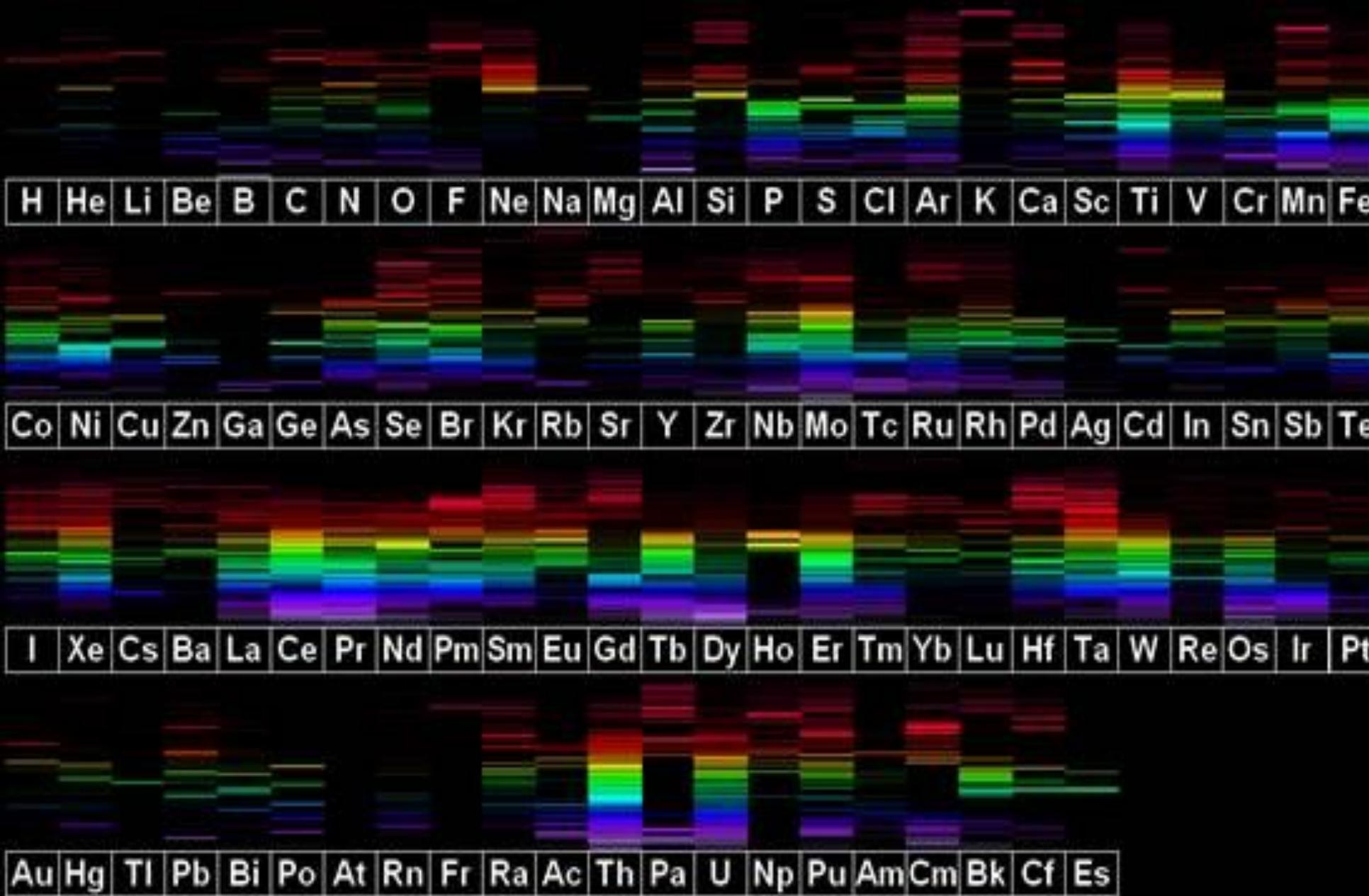
С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества. Благодаря универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии.



Лабораторная электролизная установка для анализа металлов «ЭЛАМ». Установка предназначена для проведения весового электролитического анализа меди, свинца, кобальта и др. металлов в сплавах и чистых металлах.



Стационарно – искровые оптико-эmissionные спектрометры «МЕТАЛСКАН –2500». Предназначены для точного анализа металлов и сплавов, включая цветные, сплавы черных металлов и чугуны.

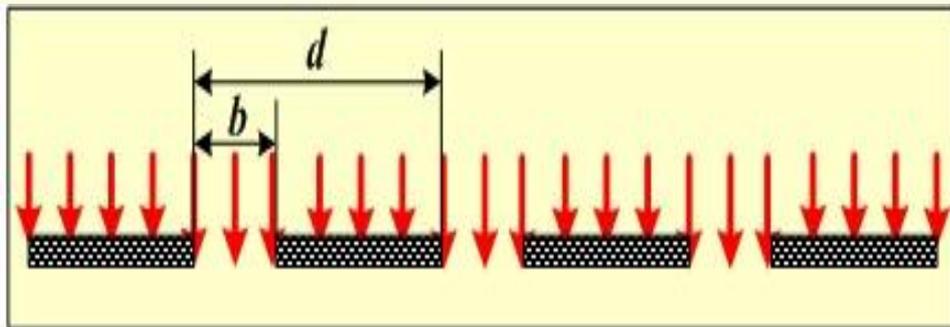
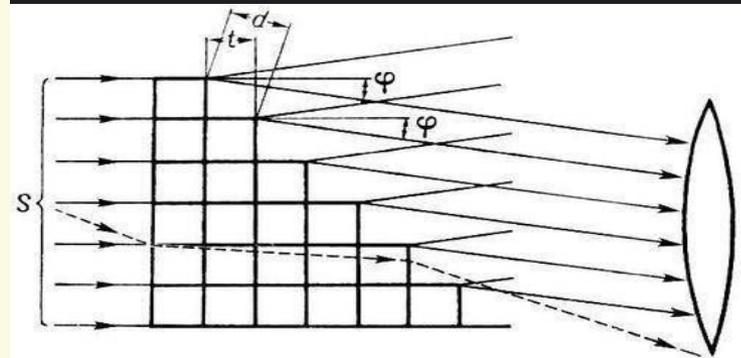


*Спектры атомов в видимом диапазоне*

# Спектральные приборы

делятся на:

- а) призмные (призма в качестве диспергирующего элемента)
- б) интерференционные (эшелон Майкельсона, эталон Фабри-Перо)
- в) дифракционные (дифракционные решётки).

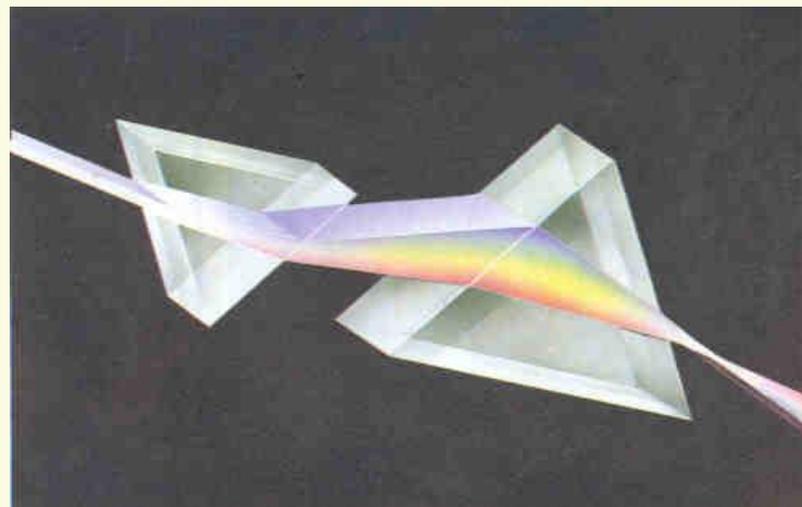


# Дисперсия

Показатель преломления света, как установил Ньютон, зависит от его цвета. Цвет же определяется частотой колебаний (или длиной световой волны). Зависимость показателя преломления света от частоты колебаний называется дисперсией. Дисперсия приводит к тому, что луч белого света, входящий в стеклянную призму, разлагается на свои составляющие цвета: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый – спектр белого света.

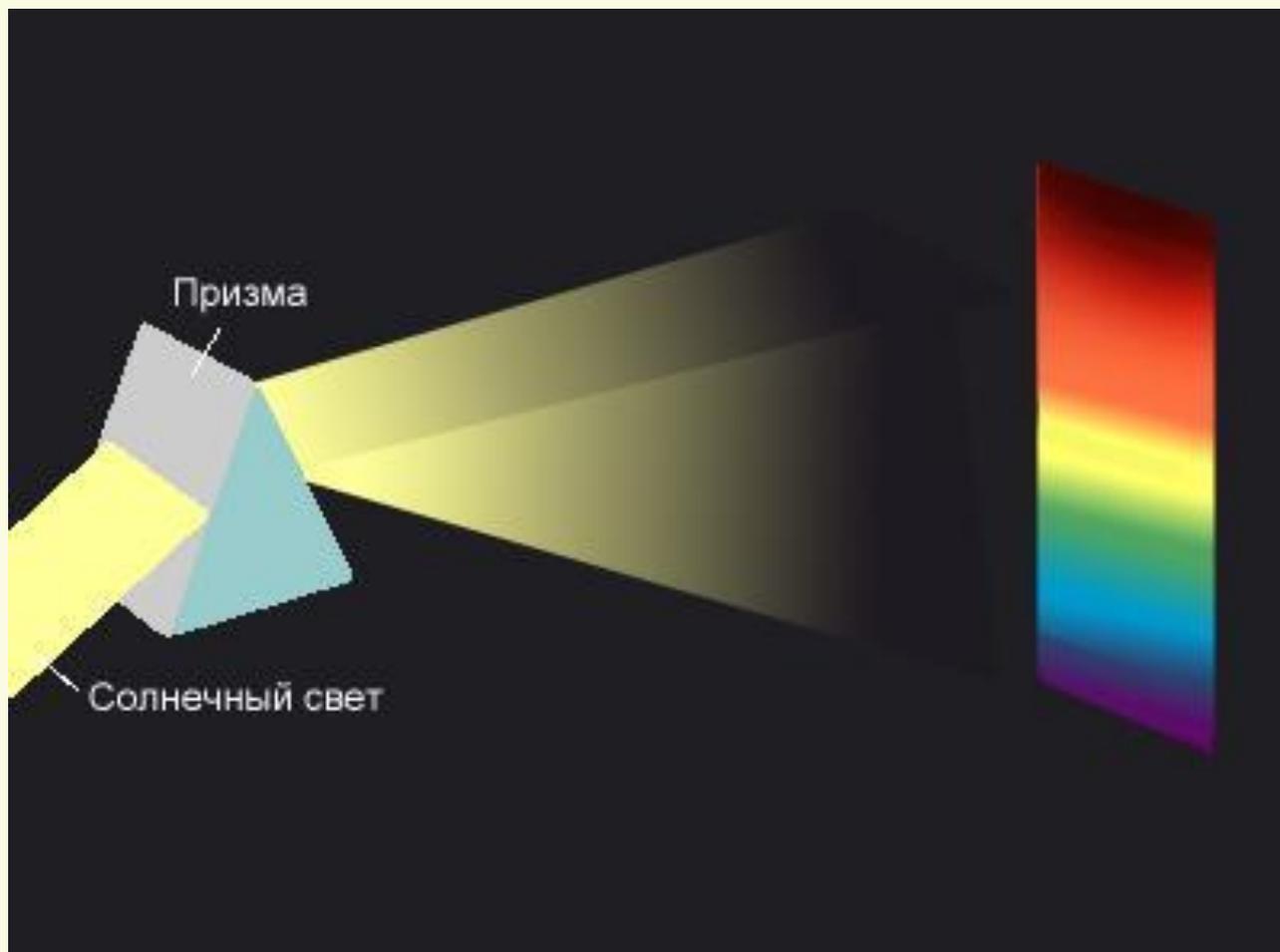


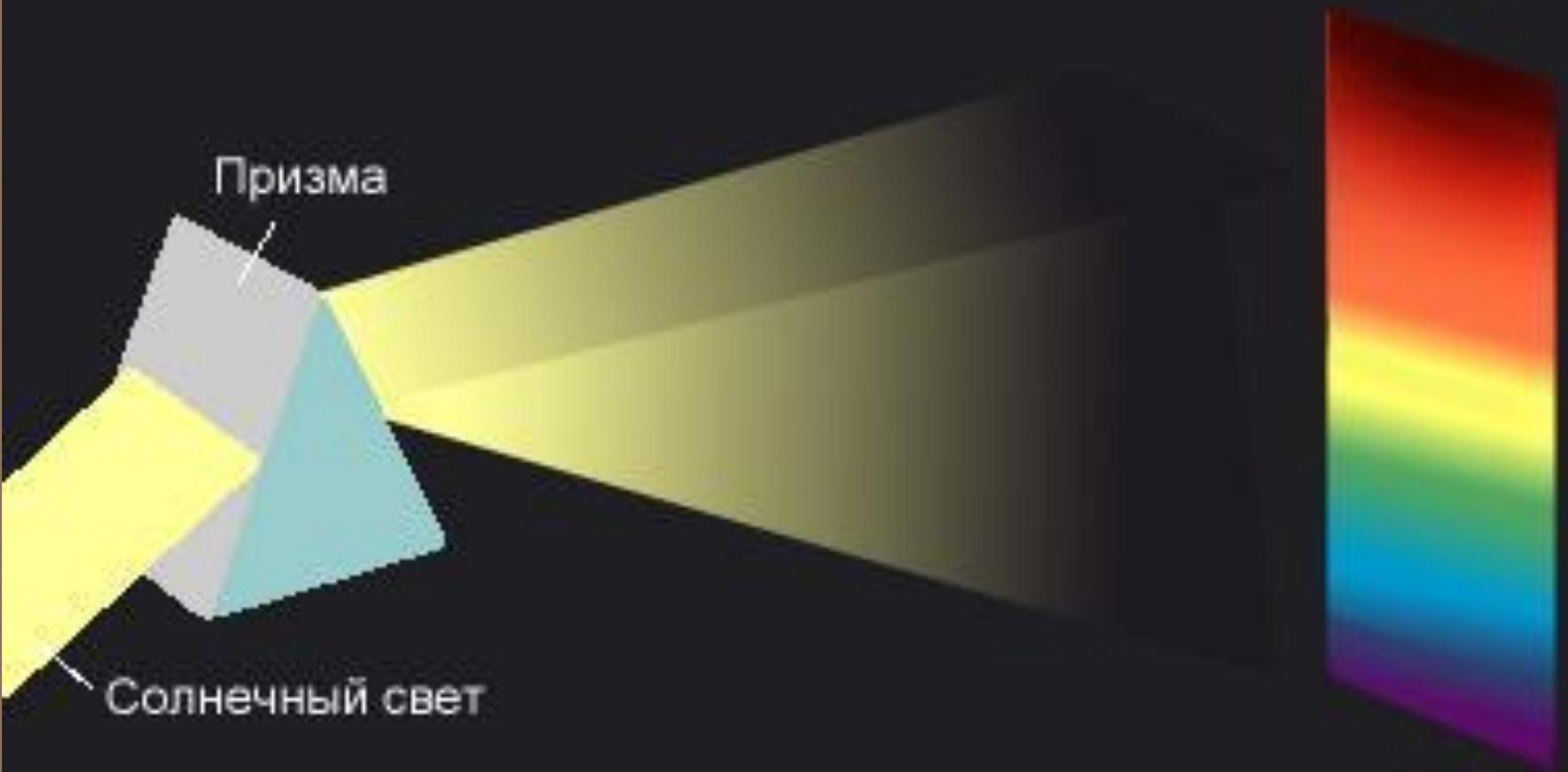
Дисперсия





# СПЕКТР





# СПЕКТР

spectrum (лат.) - видение.

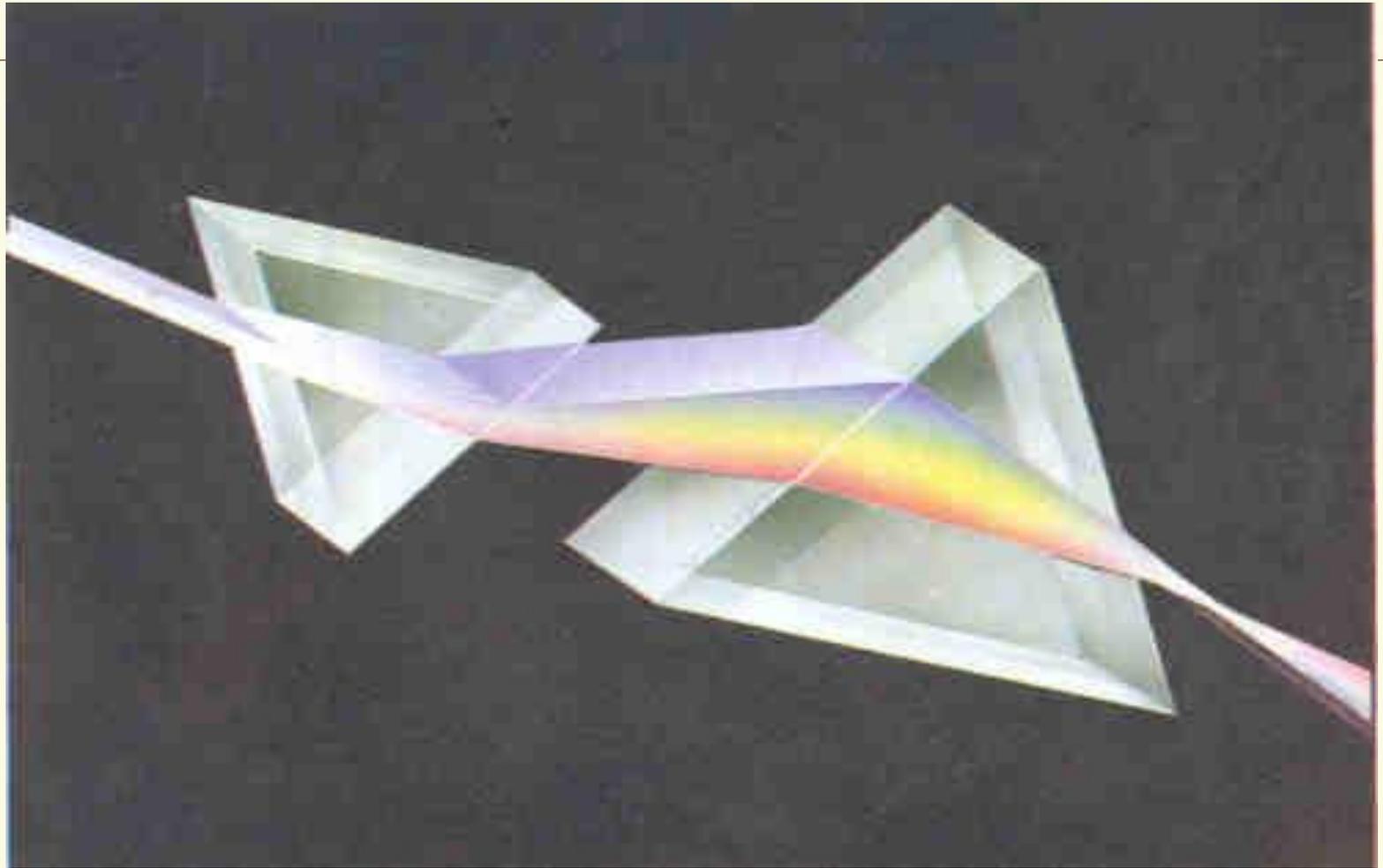
Дисперсия приводит к зависимости показателя преломления среды  $n$  от частоты или длины волны света. Дисперсия, в частности, приводит к разложению белого света в спектр стеклянной призмой.

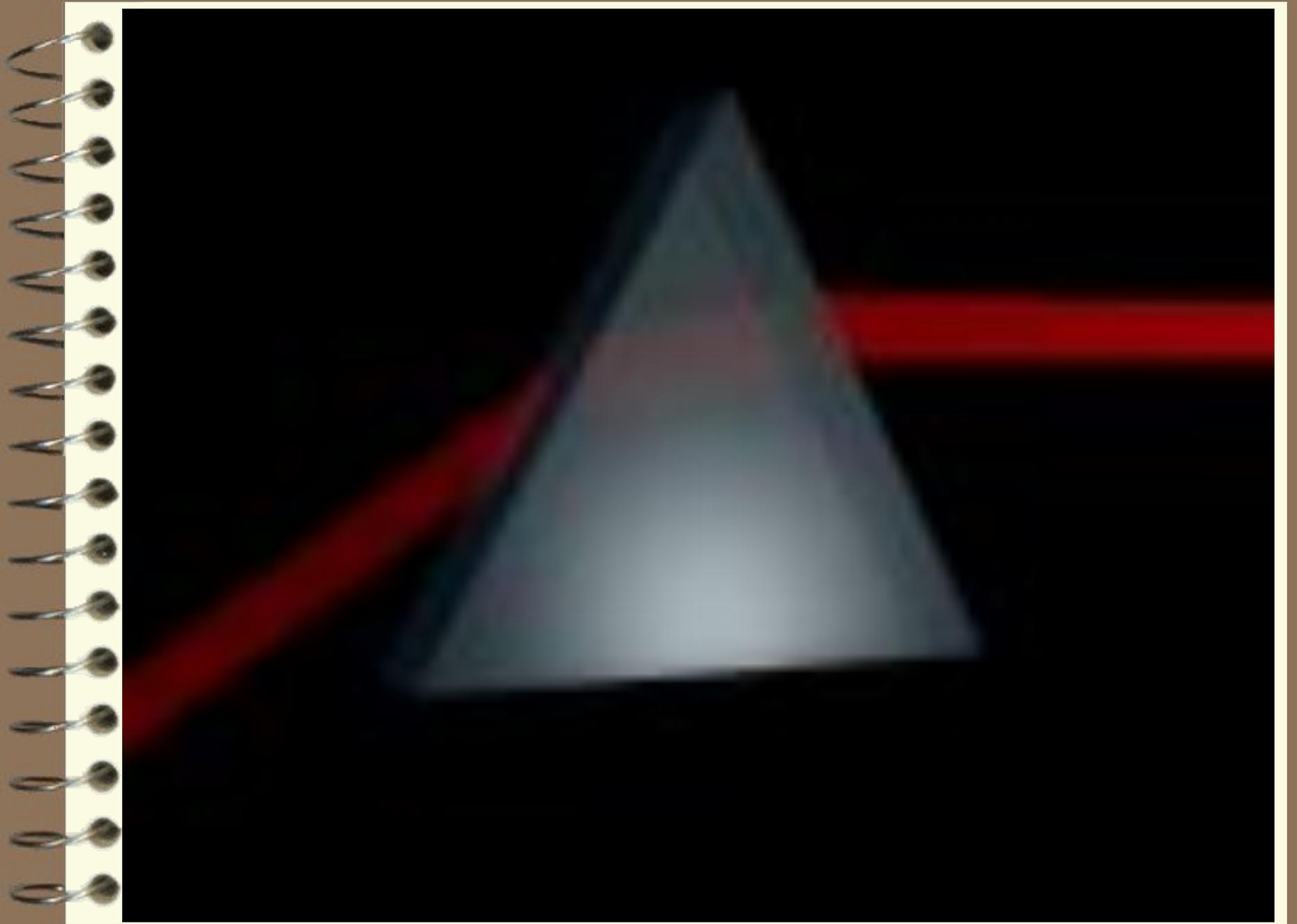


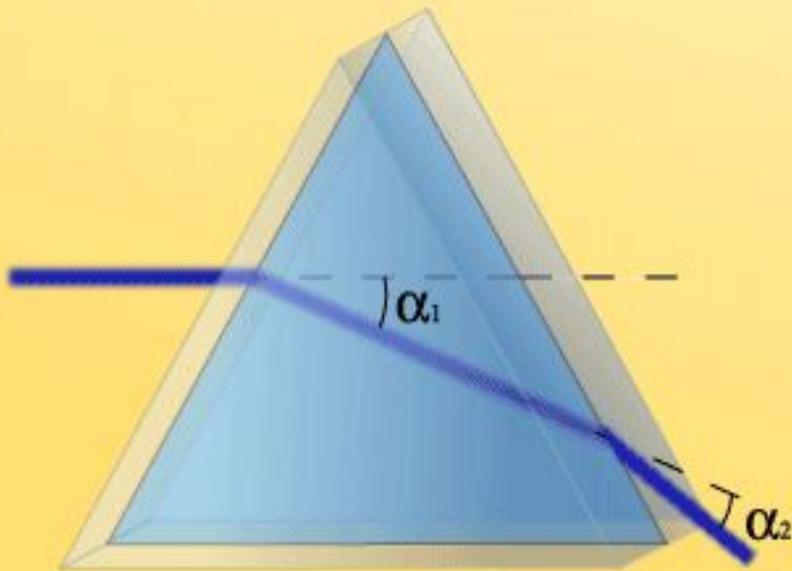
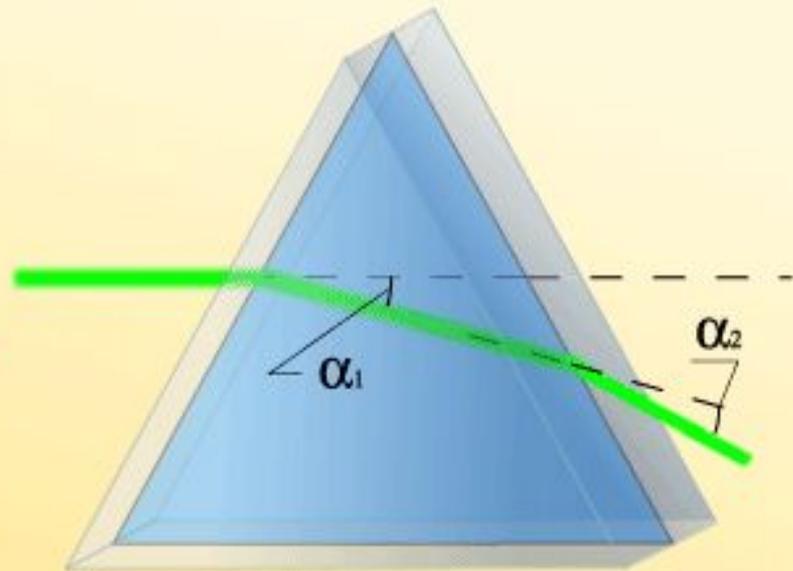
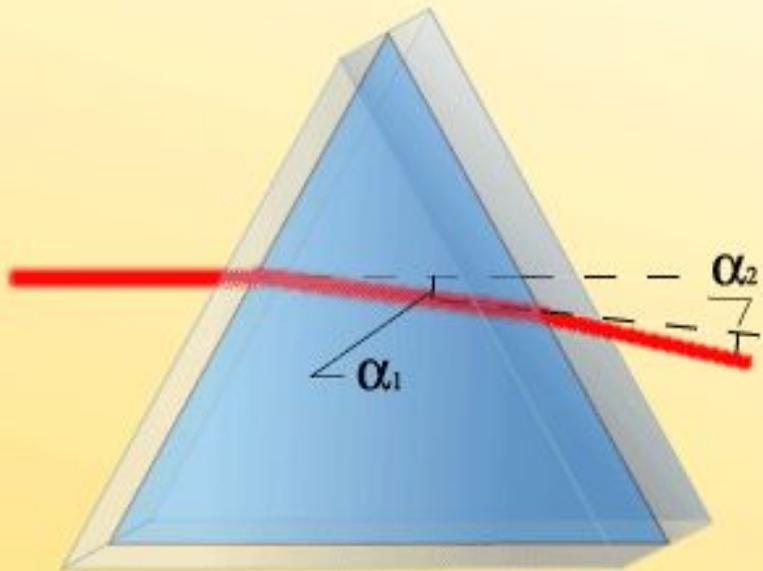


**Эксперимент И. Ньютона**

# *Опыт И. Ньютона*





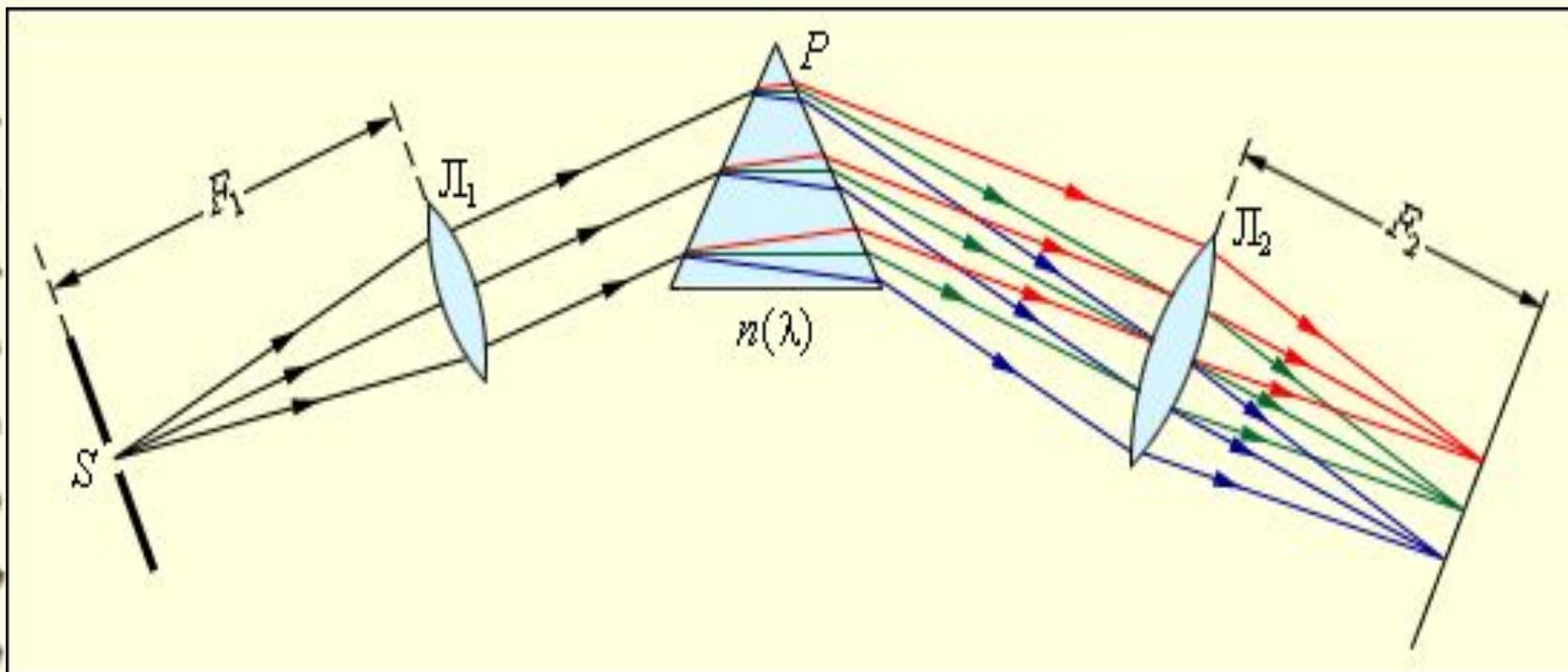


$$\alpha_{1K} < \alpha_{13} < \alpha_{1C}$$

$$\alpha_{2K} < \alpha_{23} < \alpha_{2C}$$

### *а) Призменные спектральные приборы.*

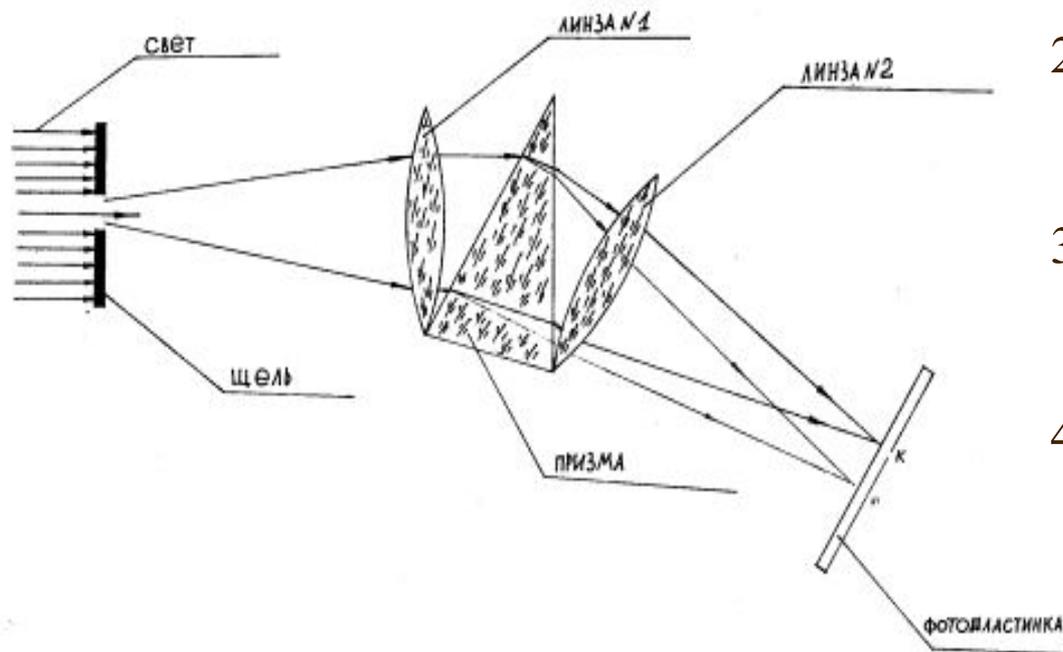
*Для разложения излучения в спектр в простейшем спектральном приборе используется **призма**. Действие призмы основано на явлении дисперсии, то есть зависимости показателя преломления  $n$  вещества от длины волны света  $\lambda$  (в прозрачных средах  $n$  растёт с уменьшением длины волны).*



# Спектральные аппараты

Призмный спектральный аппарат – спектрограф.

СХЕМА СПЕКТРОГРАФА (призменного)



Ход лучей в спектрографе

1. Через узкую щель проходит пучок света.
2. Линза №1 делает пучок света параллельным.
3. Призма раскладывает белый свет по длинам волн на спектр.
4. Линза №2 собирает разошедший пучок излучения по длинам волн в разные концы экрана.
5. Фотопластинка фиксирует спектр и получается спектограмма.

**МАЙКЕЛЬСОН,  
АЛЬБЕРТ АБРАХАМ**

*(Michelson, Albert*

*Abraham) (1852–1931),*

*американский физик,*

*удостоенный в 1907 г.*

*Нобелевской премии по*

*физике за создание*

*прецизионных инстру-*

*ментов и выполненные*

*с их помощью спектро-*

*скопические и метроло-*

*гические исследования,*

*провёл измерения*

*спектральных линий*

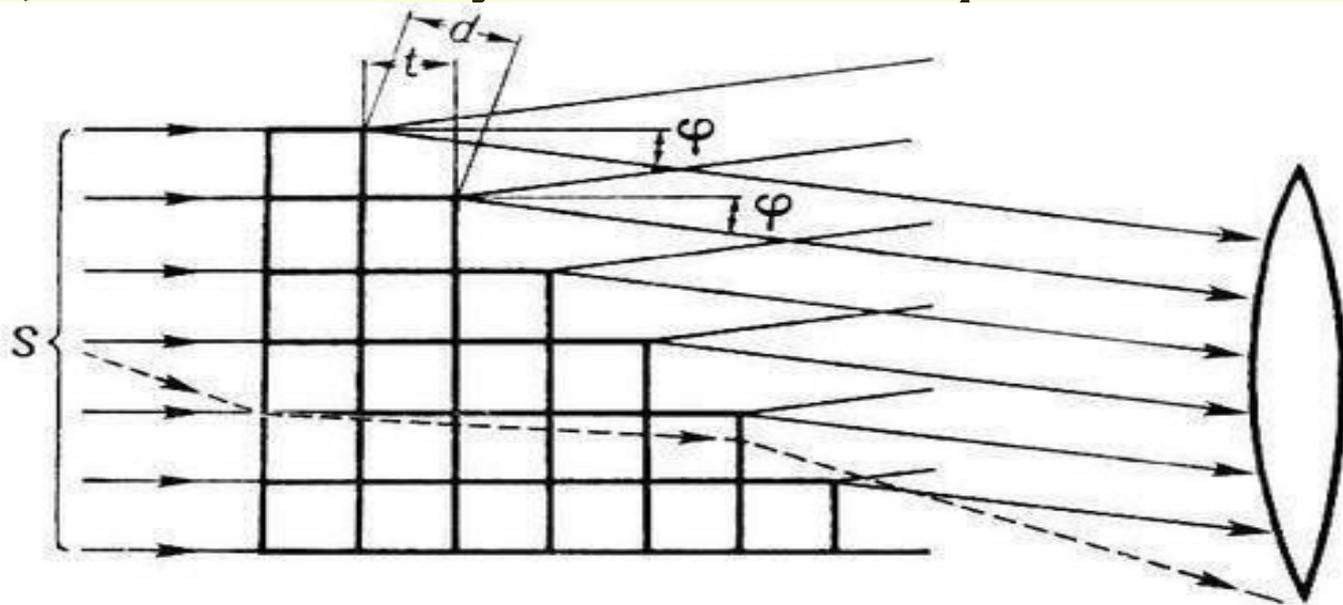
*различных элементов.*

А. Майкельсон

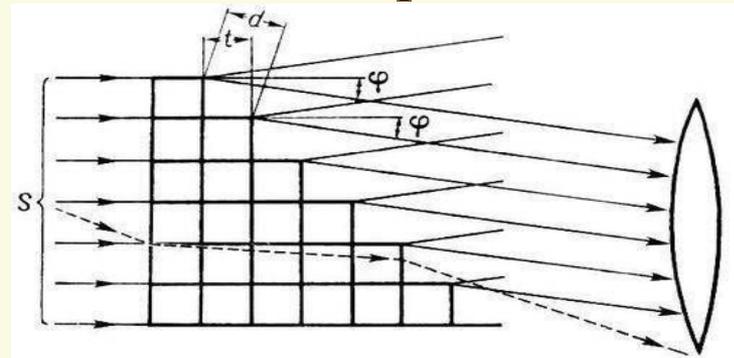


**б) интерференционные спектральные приборы.**

**Эшелон Майкельсона** - спектральный прибор, представляющий собой стопу стеклянных или кварцевых пластин одинаковой толщины, сложенных на оптический контакт так, что их концы образуют "лестницу" со ступеньками равной высоты. Впервые построен А. Майкельсоном в 1898. Разность хода двух соседних лучей в э. М. составляет десятки тысяч длин волн света, а число этих лучей обычно не превышает 30—40.



Параллельный пучок света, падая на э. М. , разделяется на несколько лучей (по числу пластин), проходящих разные пути в материале пластин ( в прозрачных э. М. ) или в воздухе ( при отражении от покрытых зеркальным слоем ступенек в отражательных э. М. ). Приобретая таким образом разность хода, лучи интерферируют между собой и разность хода двух соседних лучей в М. э. составляет десятки тысяч длин волн света, а число этих лучей обычно не превышает 30-40. Э. М. используется как спектроскоп, его разрешающая способность чрезвычайно высока, и он пригоден для анализа очень узких (порядка  $10^{-11}$  м) участков спектра. Поэтому в э. М. обычно направляют предварительно монохроматизированный свет ("вырезают" в излучении узкий спектральный интервал для анализа в эшелоне).



# Разрешающая способность

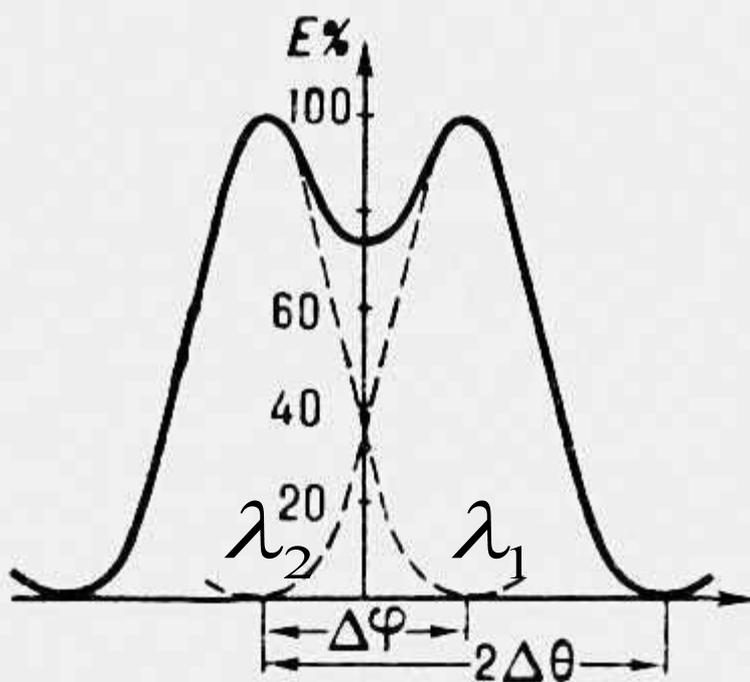
*Разрешающей способностью спектрального прибора называют величину:*

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

где  $\delta\lambda$  – минимальная разность  $\delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  в длинах волн, при которой две спектральные линии воспринимаются *раздельно*.

## **Критерий Рэля.**

По критерию Рэля разрешение считают *полным*, если максимум первой спектральной линии  $\lambda_1$  совпадает с минимумом второй спектральной линии  $\lambda_2$ .



Если два источника света удалены друг от друга на расстояние  $d$ , расстояние от них до нас равно  $L$ , длина световой волны равна  $\lambda$ , а диаметр окуляра равен  $D$ , то, согласно критерию Рэля, условием оптического разрешения двух источников в окуляре будет:

$$d/L > 1,22\lambda/D$$

Иными словами, если точечные источники света разнесены на расстояние не меньше  $d$ , наблюдатель, находясь на удалении  $L$ , сможет различить их в окуляре диаметром  $D$  как отдельные, в противном случае они сольются.

Отношение  $d/L$  представляет собой угловую меру в радианах (для перевода в градусы нужно умножить ее на 57,3) между направлениями на два источника света.

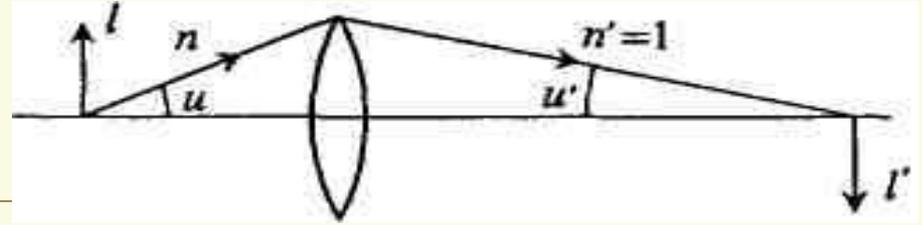
Критерий Рэля, таким образом, устанавливает границы углового разрешения для любого оптического инструмента, будь то телескоп, фотоаппарат или человеческий глаз.

# Дифракционный предел разрешения оптических инструментов

Для объектива  
телескопа

дифракционный предел  
разрешения:

$$\psi_{\min} = \Delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$



Для объектива микроскопа:

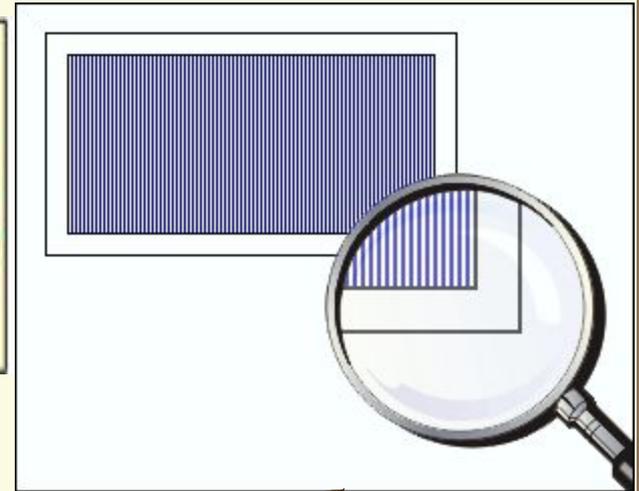
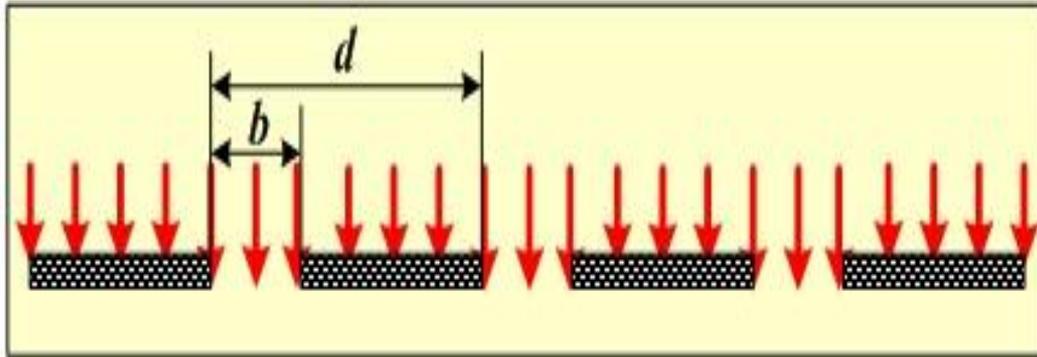
$$l_{\min} = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin u}$$

$$l_{\min} \approx 0.4\lambda$$



## в) дифракционные спектральные приборы.

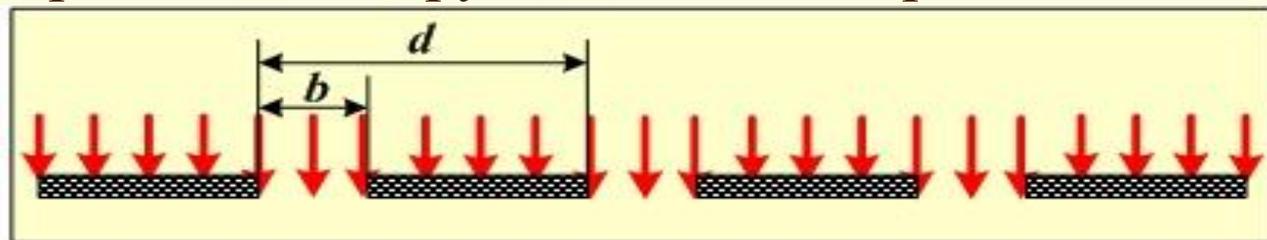
### Дифракционная решётка.



*Дифракционная решётка* – совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (канавок, щелей, выступов), нанесённых на плоскую или сферическую поверхность. На практике обычно щели - это прозрачные участки стеклянных пластинок, разделенные непрозрачными штрихами, наносимыми с помощью алмазных резцов. Современные решетки имеют свыше 1000 штрихов на длине в 1 мм.

## Дифракционная решётка.

*Период дифракционной решётки* – наименьшая часть решётки, перемещая которую, можно воспроизвести всю решётку.



Для плоской одномерной дифракционной решётки длина периода равна

$$d = b + a$$

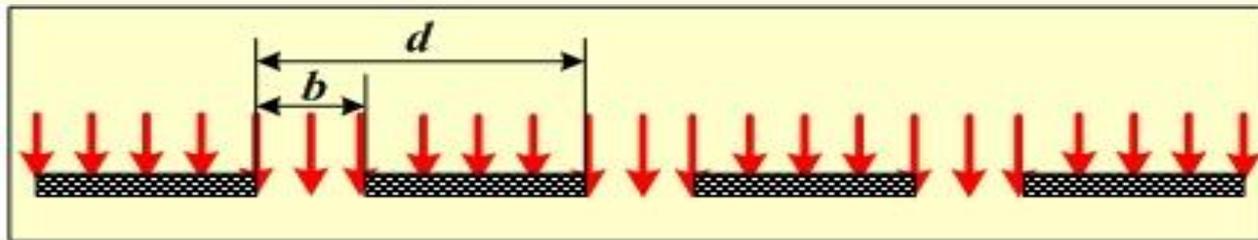
где  $b$  – ширина отверстия,  $a$  – ширина штриха.

Период дифракционной решётки связан с числом нанесённых на неё штрихов соотношением

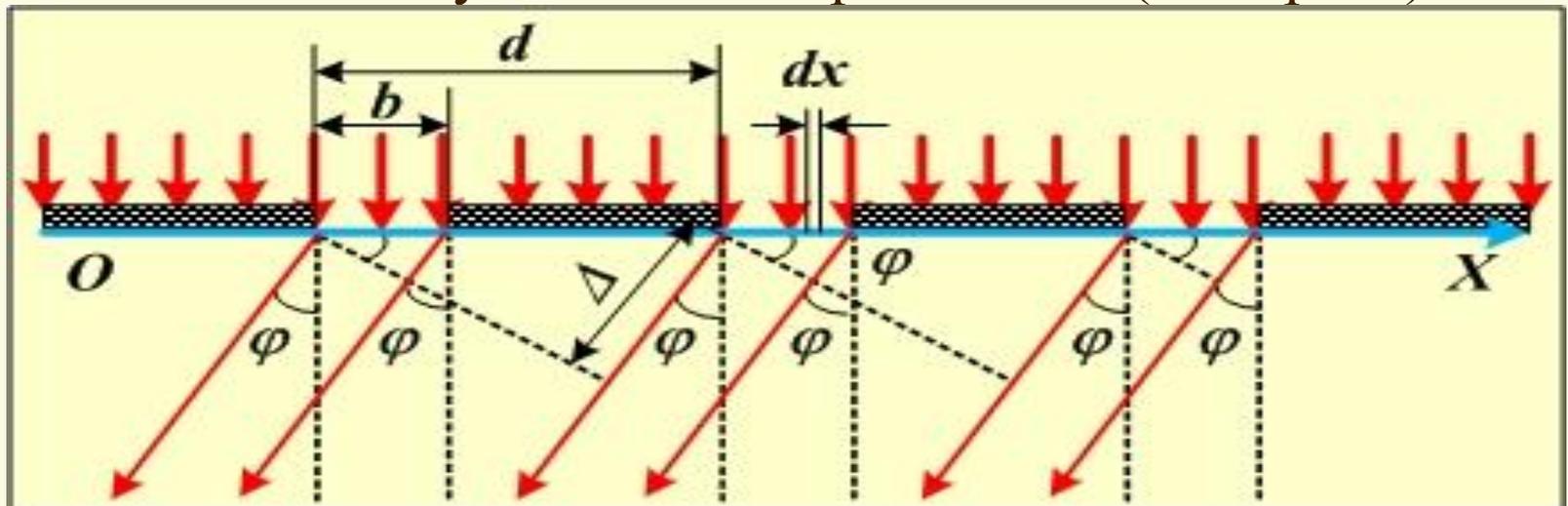
$$d = \frac{1}{N}$$

где  $N$  – число штрихов на единицу длины.

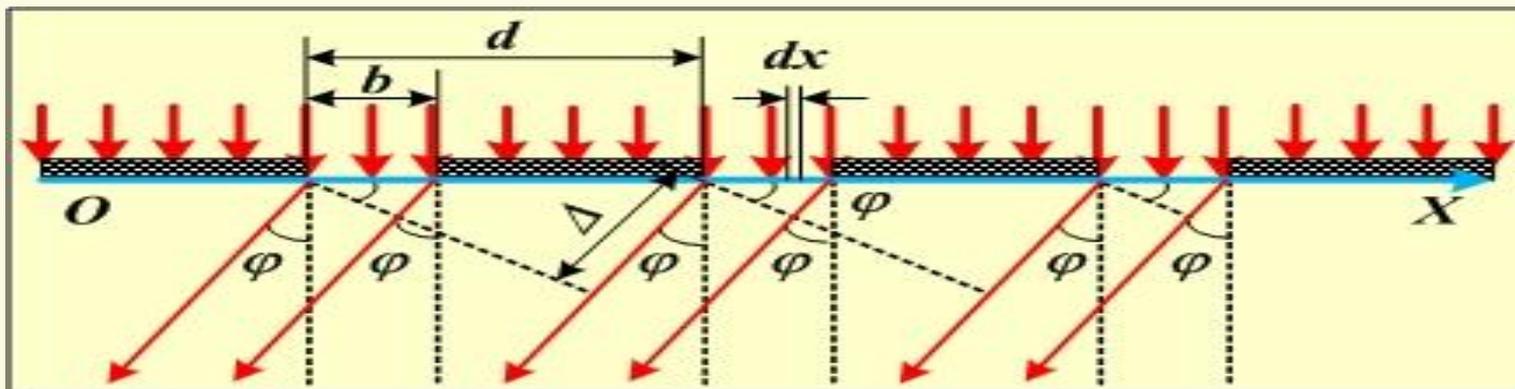
## Дифракционная решётка.



На дифракционную решётку падает плоская волна (волновой фронт – плоскость). Известна длина волны  $\lambda$ , размер отверстия  $b$ , период решётки  $d$ , расстояние до экрана  $L$ . Требуется определить, как распределена интенсивность излучения по направлениям (на экране).



## Дифракционная решётка.



Разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей, будут для данного направления  $\varphi$  одинаковы в пределах всей дифракционной решетки:

$$\Delta = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Результат интерференции этих лучей на экране зависит от разности фаз складывающихся колебаний. Если она составит  $\Delta = \pm 2m \frac{\lambda}{2}$ , ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ), т.е. лучи придут в одной фазе, то они усилят друг друга, если разность хода составит  $\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ , то лучи ослабят друг друга.

*Таким образом, условие главных максимумов для дифракционной решетки следует записать в виде:*

---

$$d \sin \varphi_{\max} = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = \pm m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

*Условие прежних минимумов при дифракции на одной щели имеет вид:*

$$b \sin \varphi_{\min} = \pm n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

*Чем больше щелей  $N$ , тем большее количество световой энергии пройдет через решетку, тем больше минимумов (дополнительных) образуется между соседними главными максимумами, тем, следовательно, более интенсивными и более острыми будут максимумы.*

# Дифракционная решётка.

## Краткие выводы.

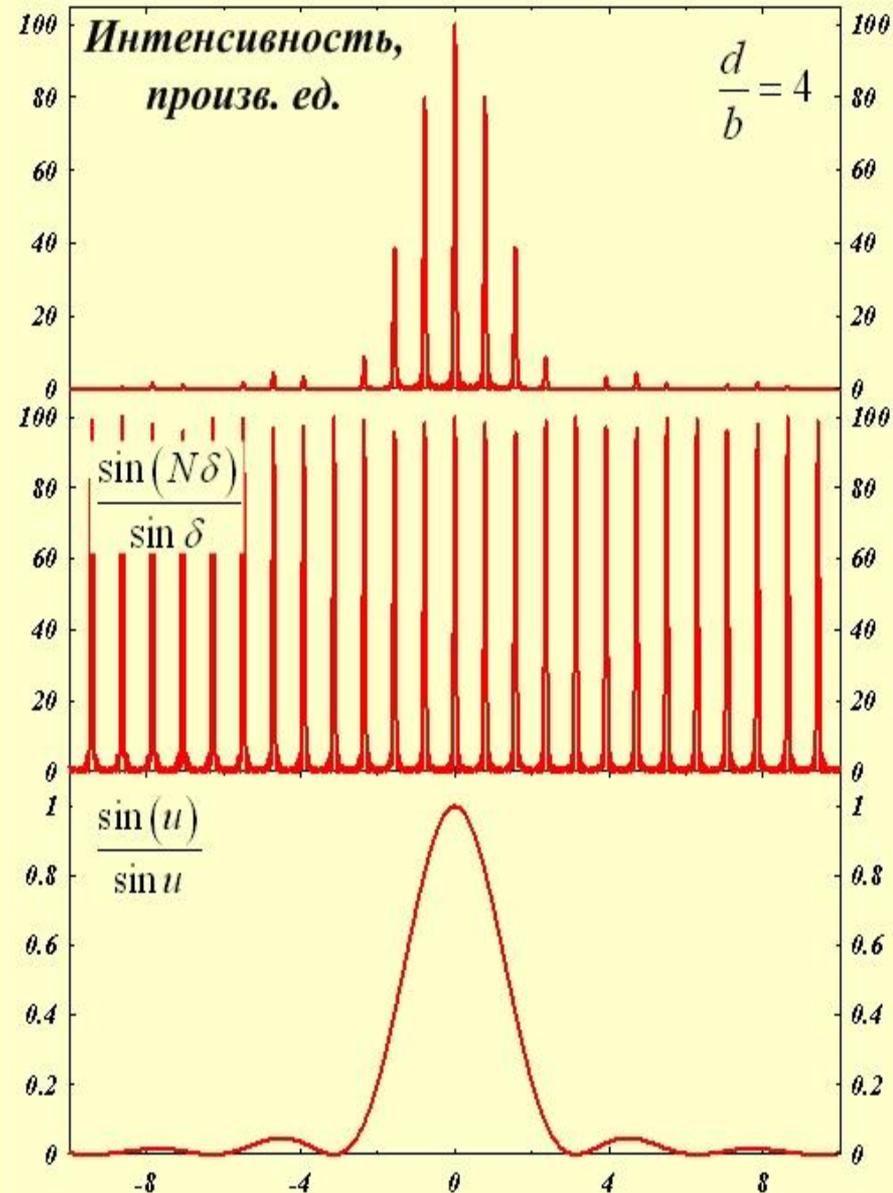
1. Распределение интенсивности излучения при дифракции монохроматической волны на периодической структуре можно представить, как результат двух процессов: 1) дифракции волны на отверстиях, 2) интерференции пучков, исходящих из всех отверстий.
2. Положение главных дифракционных максимумов определяется интерференцией пучков, исходящих из разных отверстий решётки.  
Условие наблюдения главных максимумов

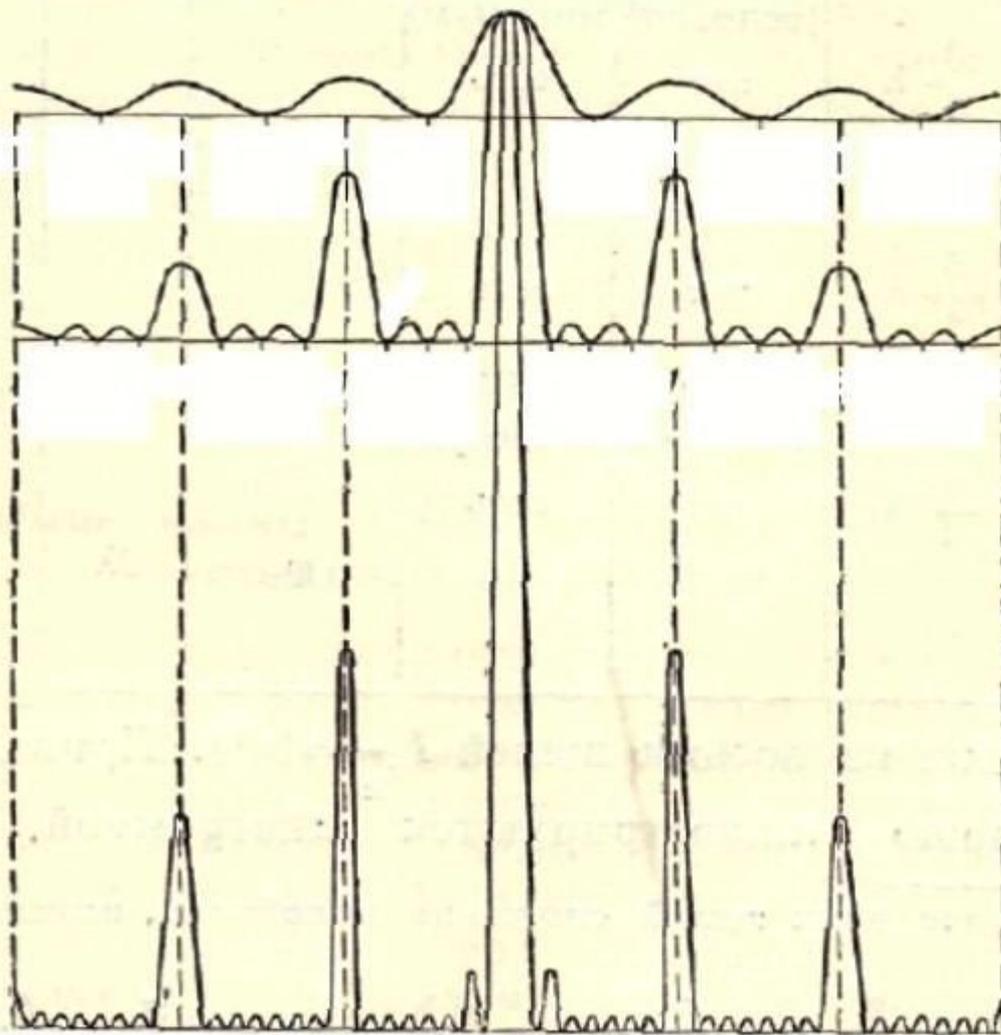
$$d \sin \varphi = m\lambda.$$

3. Интенсивность главных максимумов определяется как процессом дифракции на отдельном отверстии, так и процессом интерференции волн, исходящих из всех отверстий.

# Дифракционная решётка.

$$I = I_0 \cdot N \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N \pi d \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin \varphi}{\lambda}\right)}$$





$N = 2$

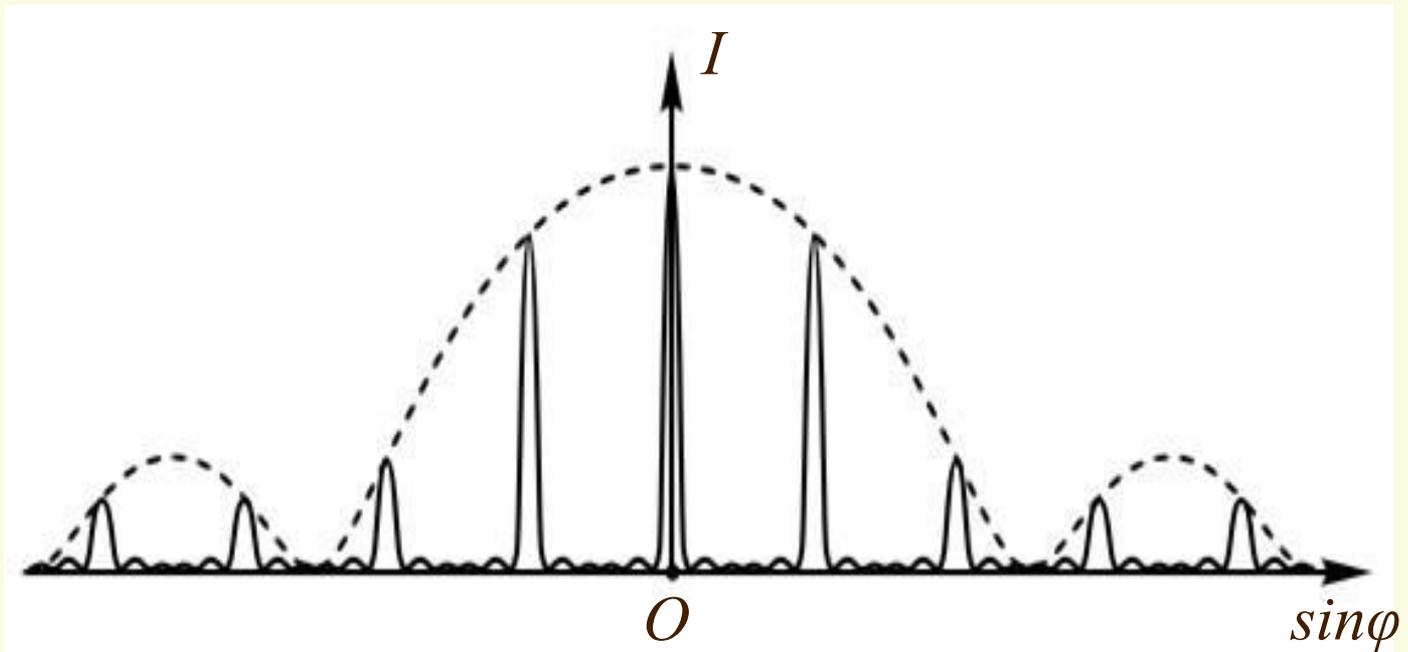
$N = 4$

$N = 8$

*Сопоставление дифракционной картины от решеток с двумя, четырьмя и восемью щелями.*

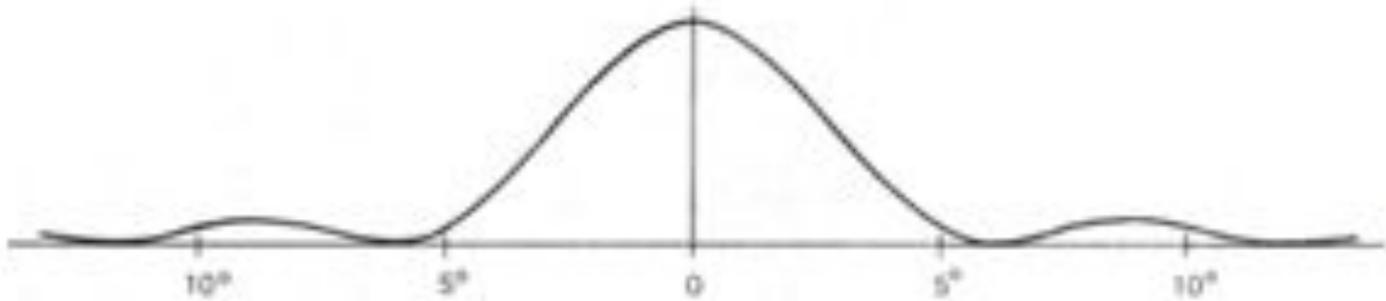
*Дифракционная картина от решётки с  
 $N = 6$  щелями.*

*$(N - 1)$  дополнительных минимумов  
между главными максимумами*



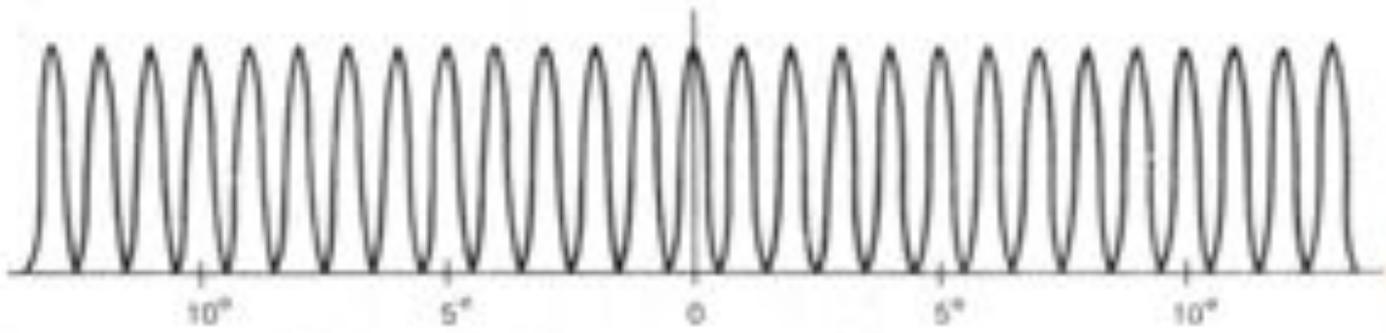
*Условие дополнительных минимумов для  
дифракционной решетки :*

$$d \sin \varphi = \frac{\lambda}{N} m$$



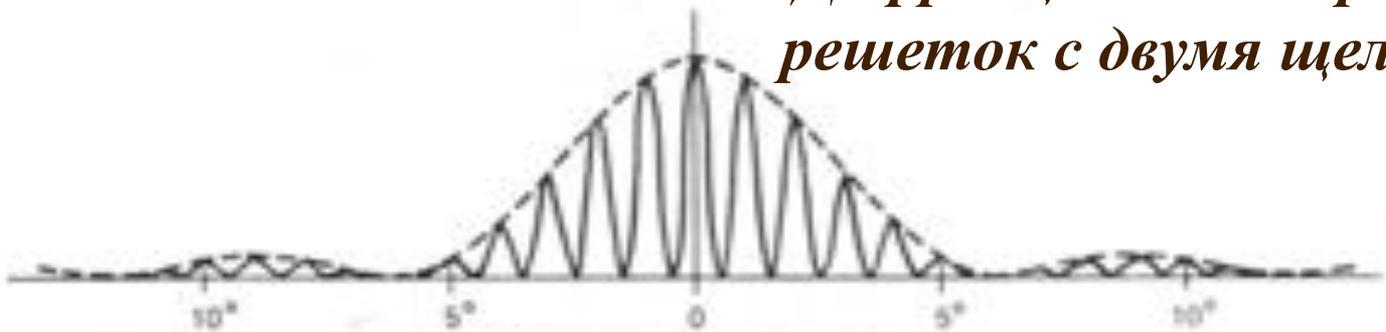
а Дифракционный максимум

$\varphi$



б Интерференционный максимум

$\varphi$



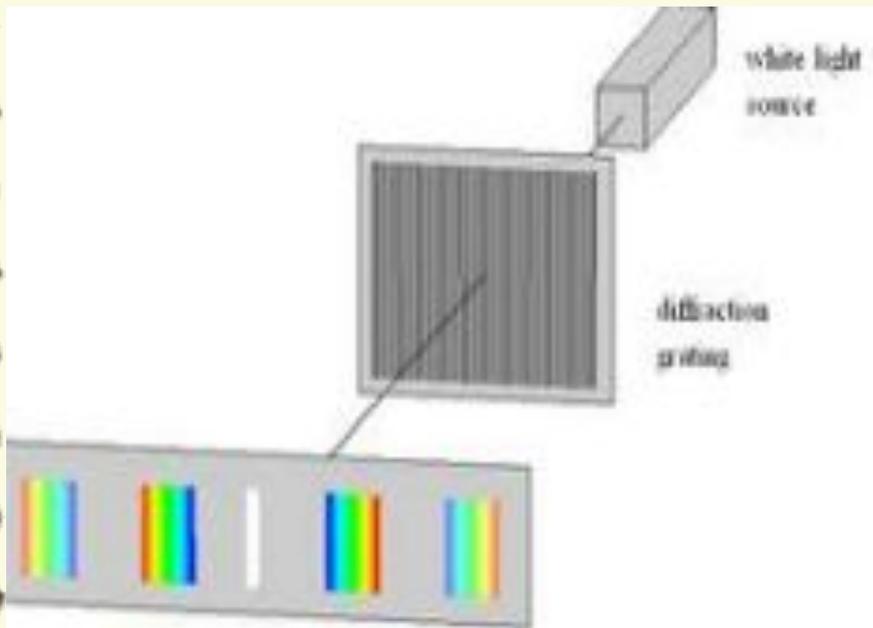
в Интенсивность

$\varphi$

*Дифракционная картина от решеток с двумя щелями.*

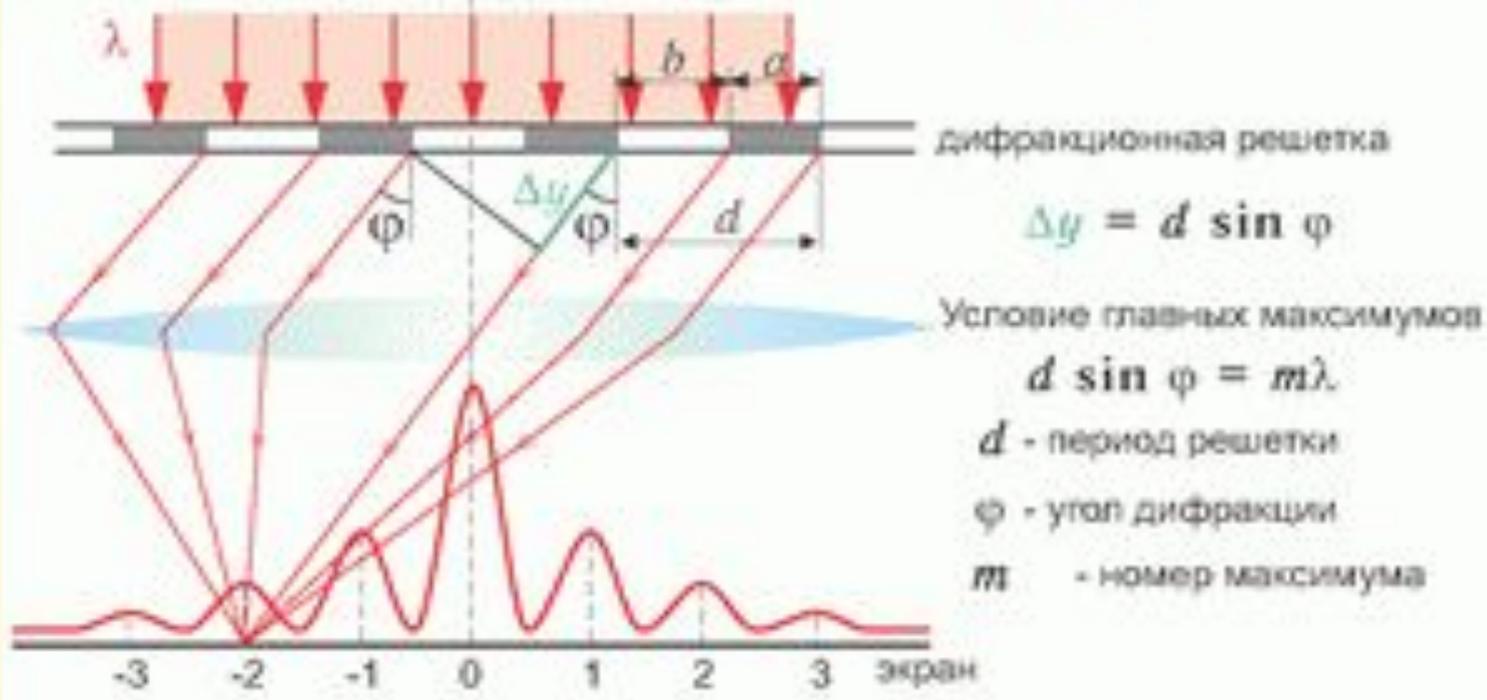
Для белого света центральный максимум ( $m = 0$ ) белый, остальные окрашены (спектр) и решетку можно использовать для определения длин волн (*спектральный анализ*).

$$d \sin \varphi_{\max} = m\lambda$$



Положение главных максимумов зависит от длины волны  $\lambda$

# ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДИФРАКЦИИ



## ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА

а) белый свет

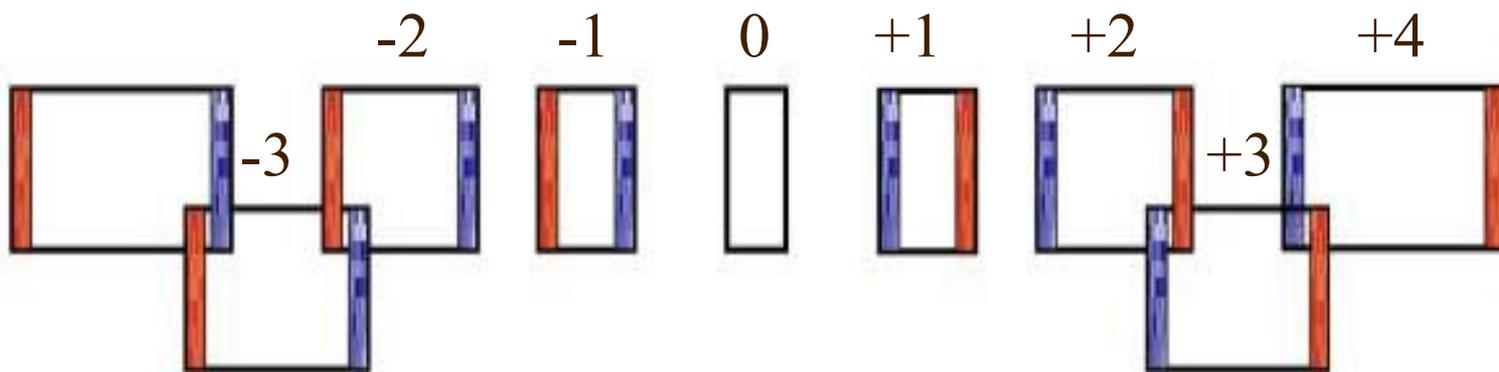
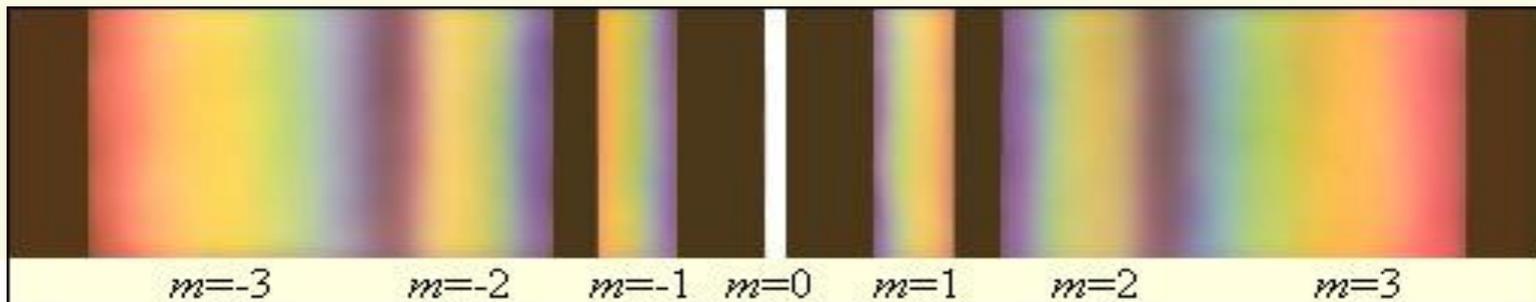


б) красный свет  $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-7}$  м



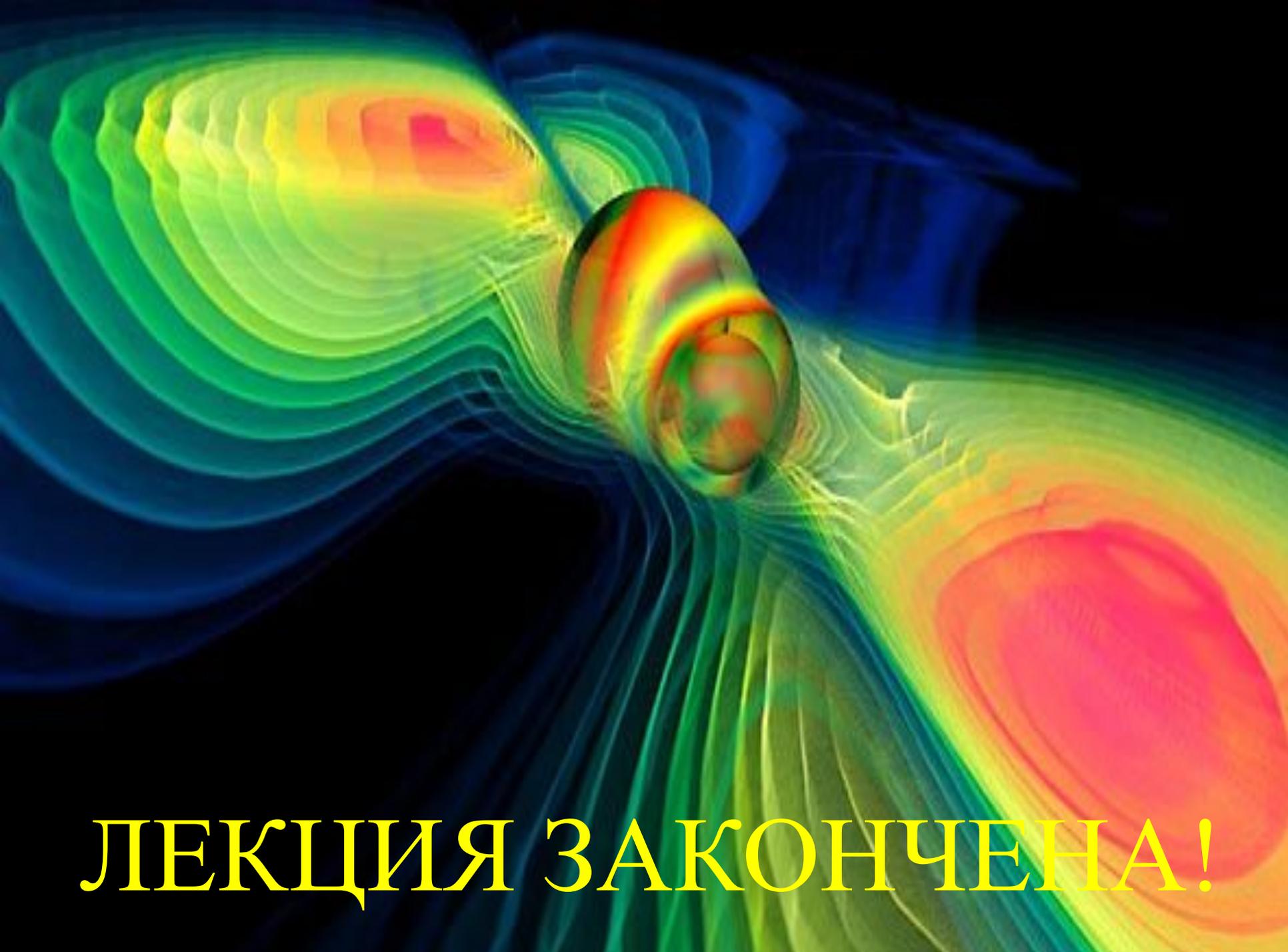
в) фиолетовый свет  $\lambda = 4,0 \cdot 10^{-7}$  м





*При пропускании через дифракционную решётку белого света все максимумы ненулевого порядка расположатся в спектр, фиолетовый конец которого обращён к центру дифракционной картины, а красный – наружу.*

***Дифракционная решётка представляет собой спектральный прибор.***



ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!