

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2019 г.)



*Памятники
А.Г. Столетову и П.Н. Лебедеву
у здания
Физического факультета МГУ
(введен в эксплуатацию 1953 году)*

Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Фотоэффект. Законы Столетова.



**АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ
СТОЛЕТОВ**
(10 августа) 1839- (27 мая) 1896

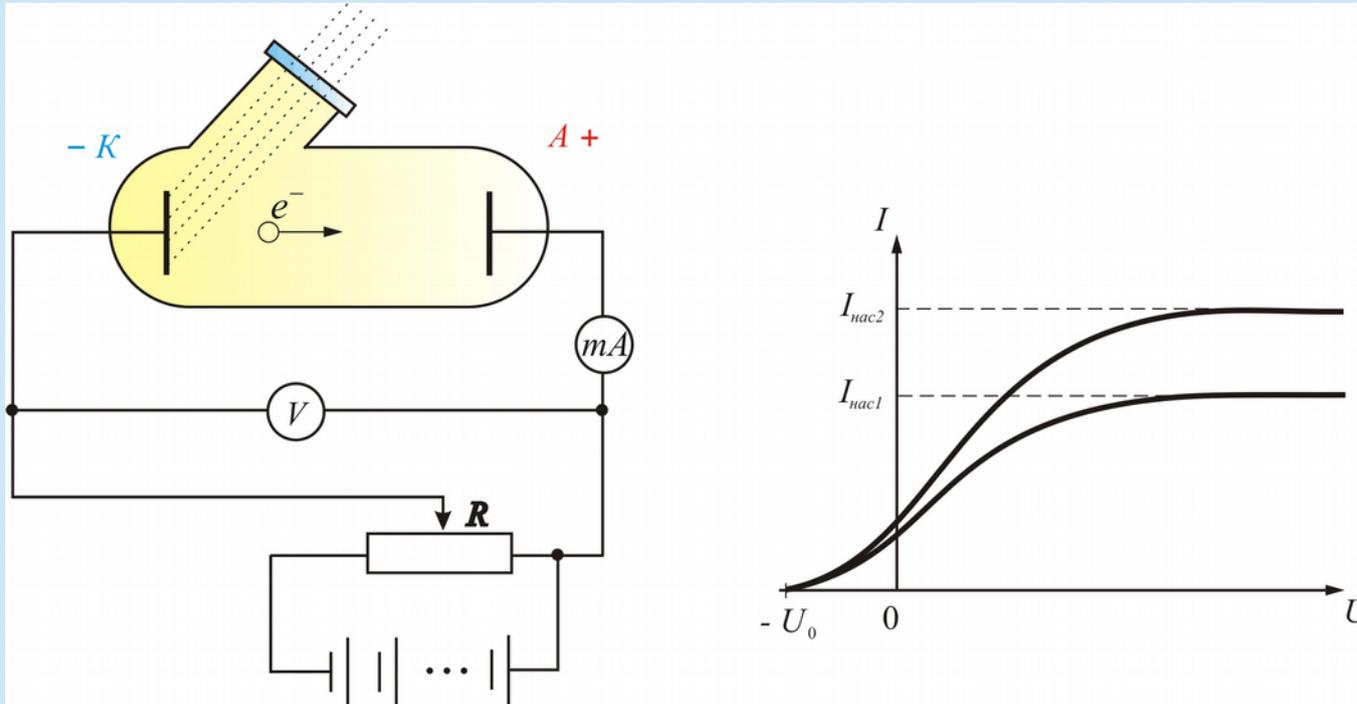
Русский физик, заслуженный профессор
Московского университета.

Создал первую в России
учебно-исследовательскую физическую
лабораторию, основал школу русских физиков.
Вакуумная установка Столетова для изучения
электрических явлений в разреженных газах
явилась прообразом электронной лампы,
которая совершила подлинную революцию в
электротехнике.

Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Фотоэффект. Законы Столетова.



Фотоэффе́кт или **фотоэлектрический эффект** — испускание электронов веществом под действием света или любого другого электромагнитного излучения.

В конденсированных веществах выделяют внешний и внутренний фотоэффект.

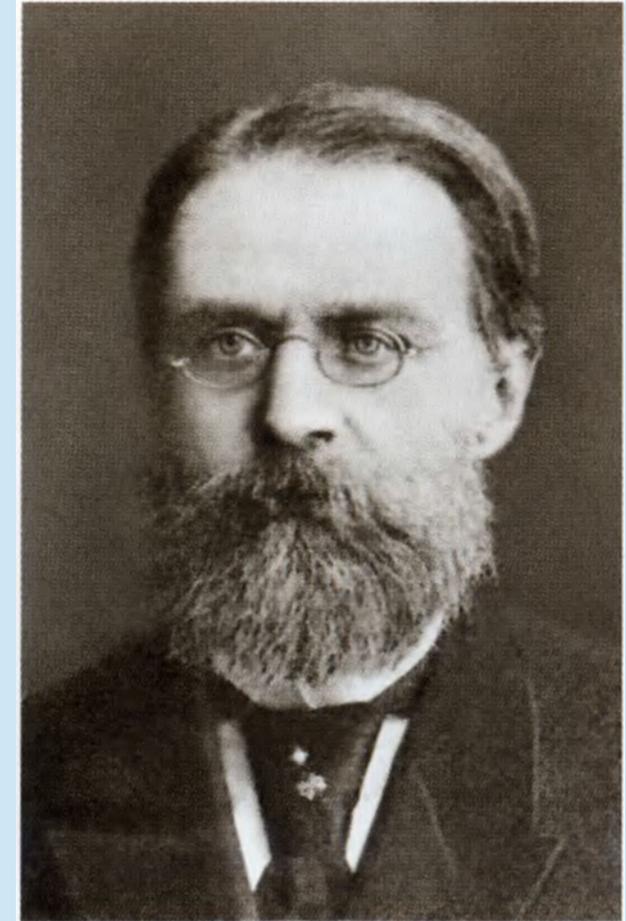
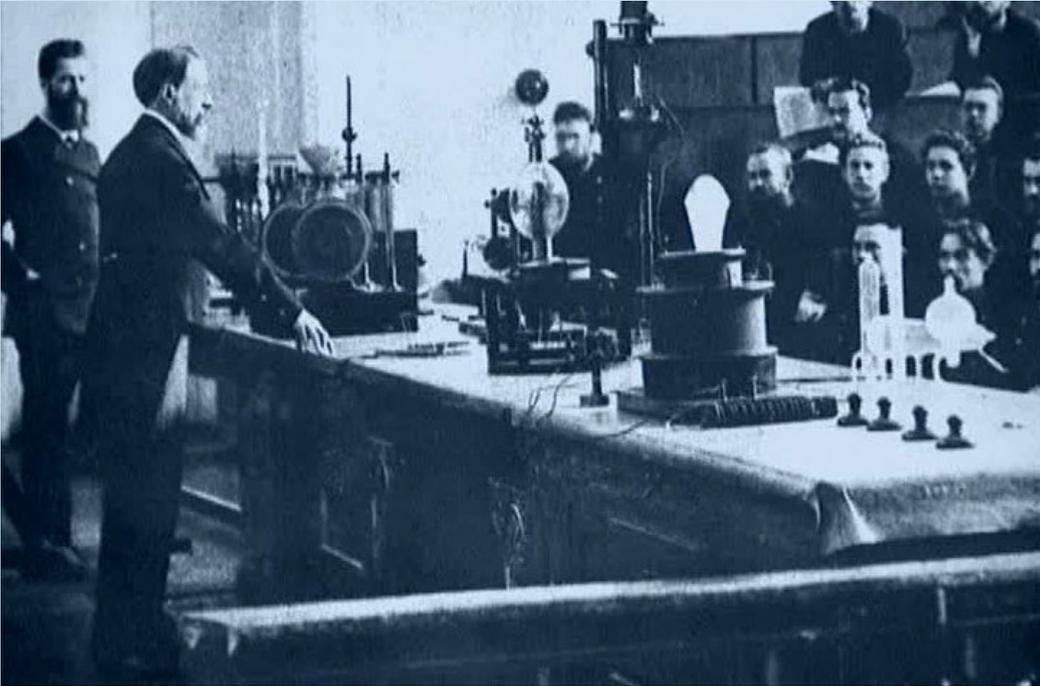


**ВИДЕО
ДЕМОНСТРАЦИЯ**

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Фотоэффект. Законы Столетова.



Столетов сновал физическую лабораторию в Московском университете. «Столетов был известен тем, что задавал всякие мудрёные вопросы, затем безучастно с каменным лицом глядел на экзаменующегося и безжалостно одного за другим проваливал. Впоследствии был назначен второй экзаменатор, который ставил свою отметку, и среднее пропорциональное двух баллов было действительно». В.Ф. Шлипе

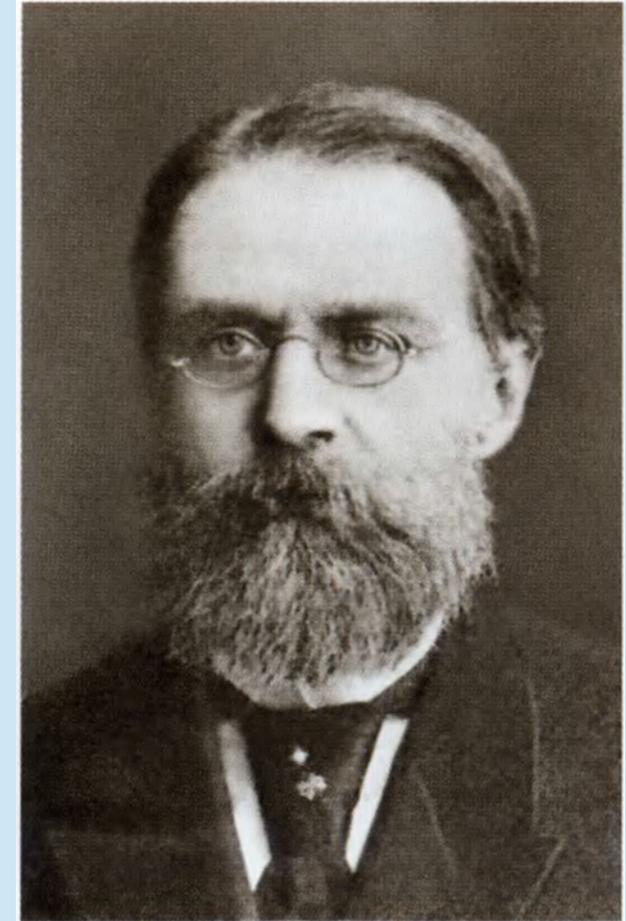
Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Фотоэффект. Законы Столетова.

Законы внешнего фотоэффекта:

- 1) **Формулировка 1-го закона фотоэффекта (закона Столетова): Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения.**
- 2) **Согласно 2-му закону фотоэффекта, максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.**
- 3) **3-й закон фотоэффекта: для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая длина волны называется красной границей фотоэффекта**



2. Излучение. Спектры.

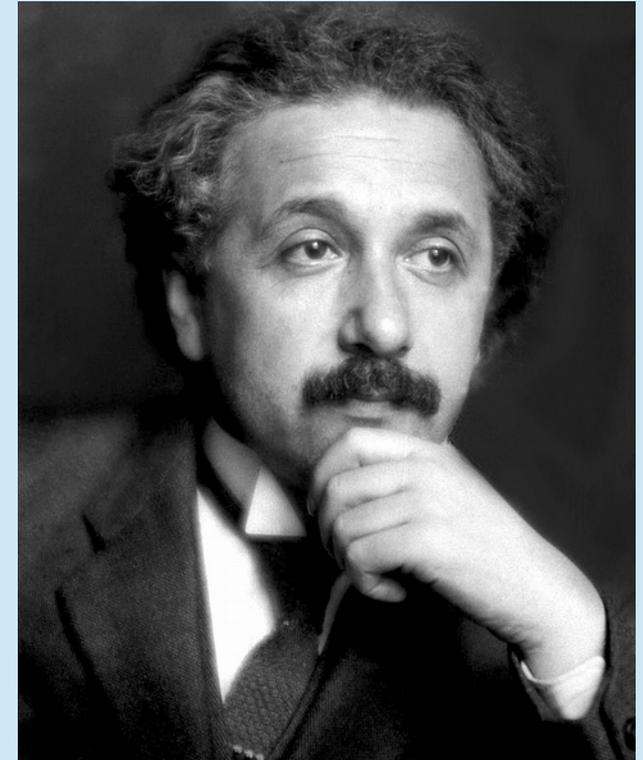
Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Фотоэффект. Законы Столетова.

Теоретическое объяснение этих законов было дано в 1905 году Эйнштейном.

Согласно ему, электромагнитное излучение представляет собой поток отдельных квантов (фотонов) с энергией $h\nu$ каждый, где h — постоянная Планка. При фотоэффекте часть падающего электромагнитного излучения от поверхности металла отражается, а часть проникает внутрь поверхностного слоя металла и там поглощается. Поглотив фотон, электрон получает от него энергию u , совершая работу выхода A , покидает металл:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$



Альберт Эйнштейн

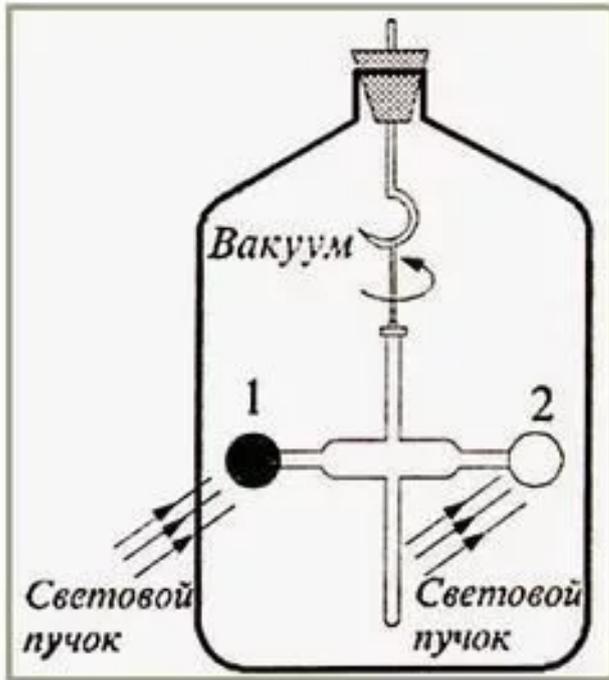
(1879-1955),

один из основателей современной теоретической физики лауреат Нобелевской премии 1921, общественный деятель- гуманист.

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Давление света. Опыты Лебедева.



Давление света зависит от коэффициента отражения поверхности:

А) при отражении от зеркальной поверхности крылышко (2) получает импульс $p_2 \approx 2p$.

Б) поверхность чёрного крылышка (1) поглощает свет и $p_1 \approx p$.

Экспериментальное измерение давления света ($\approx 10^{-6} \text{ Н/м}^2$) с точностью до 2% совпало с теоретическими расчётами Максвелла.

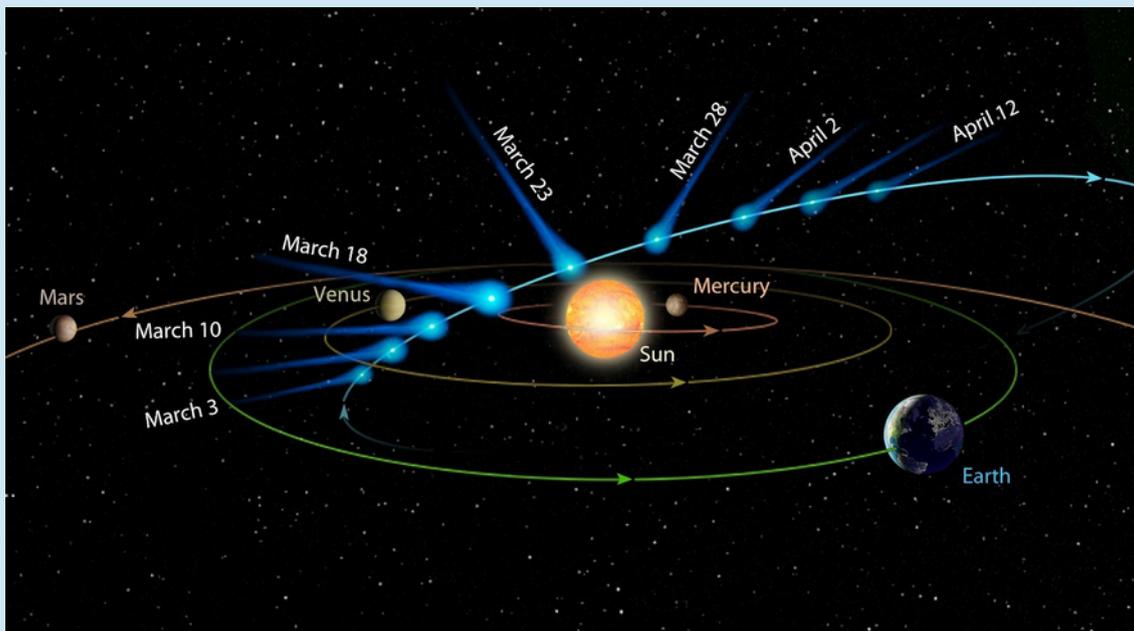
2. Излучение. Спектры.

Давление света. Опыты Лебедева.

Пётр Николаевич Лебедев 1866-1912 — русский физик-экспериментатор, первым подтвердивший на опыте (1900) вывод Максвелла о наличии давления света.

П. Н. Лебедев занимался также вопросами действия электромагнитных волн на резонаторы и выдвинул в связи с этими исследованиями глубокие соображения, касающиеся межмолекулярных взаимодействий, уделял внимание вопросам акустики, в частности гидроакустики.

Изучение давления света на газы побудило Лебедева заинтересоваться происхождением хвостов комет..



2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

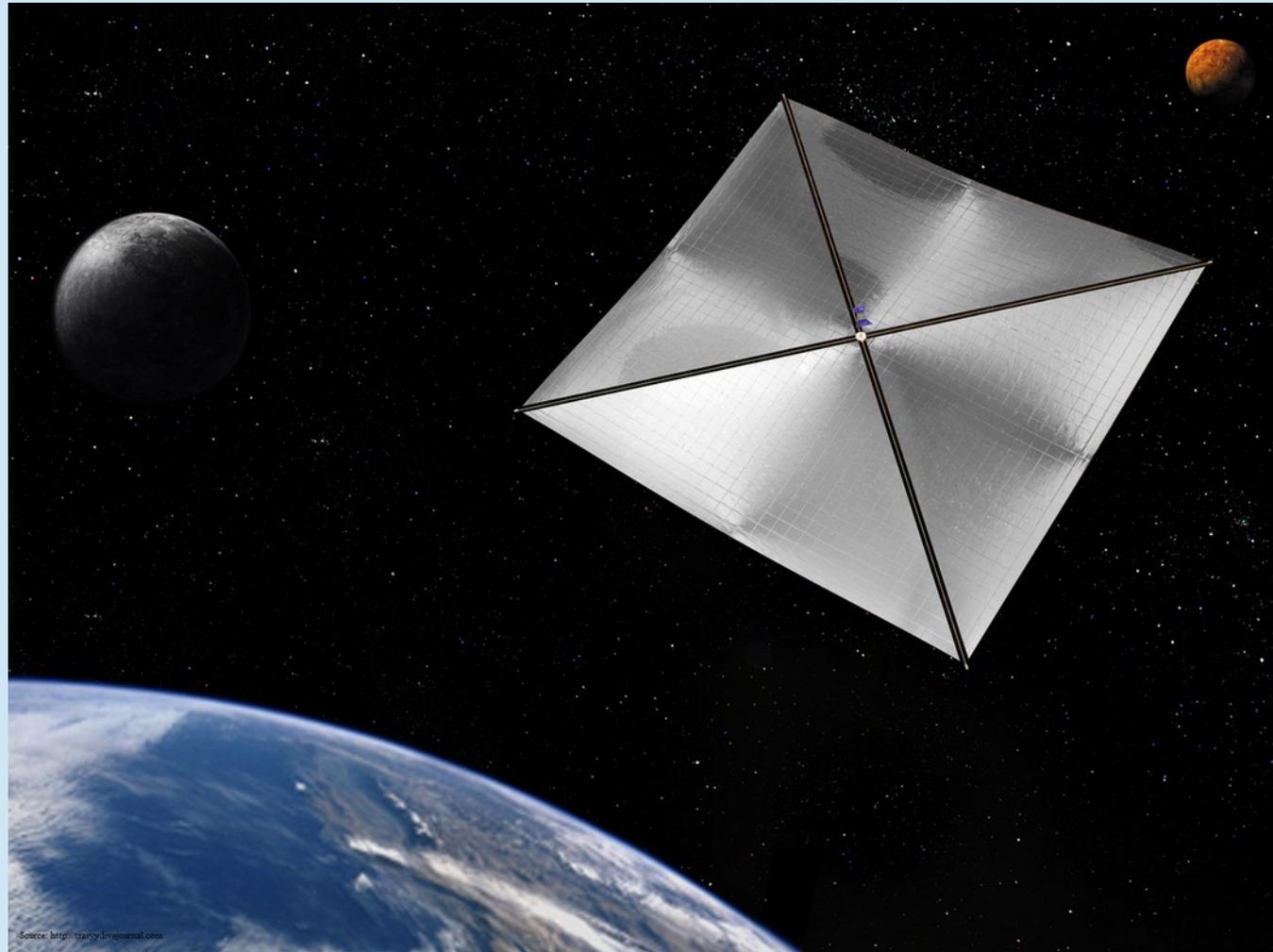
Давление света. Космический парус.

Импульс фотона

$$p_\nu = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

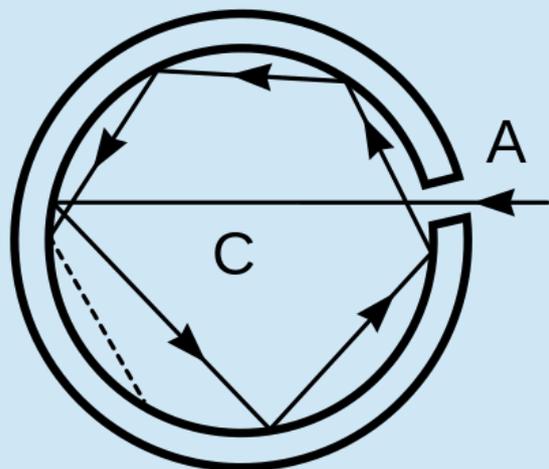
Постоянная Планка

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$



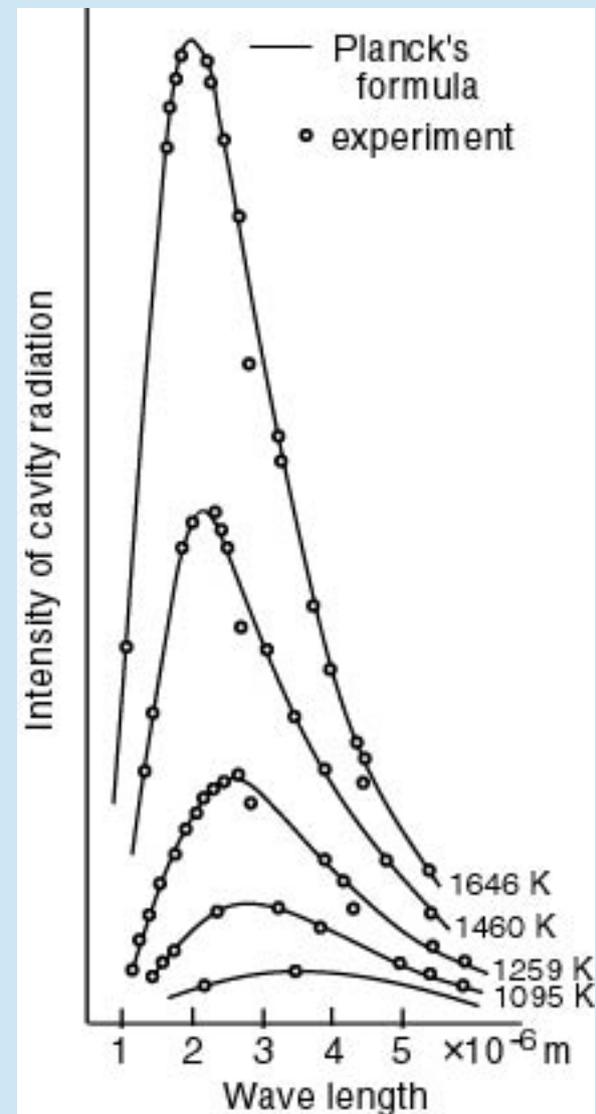
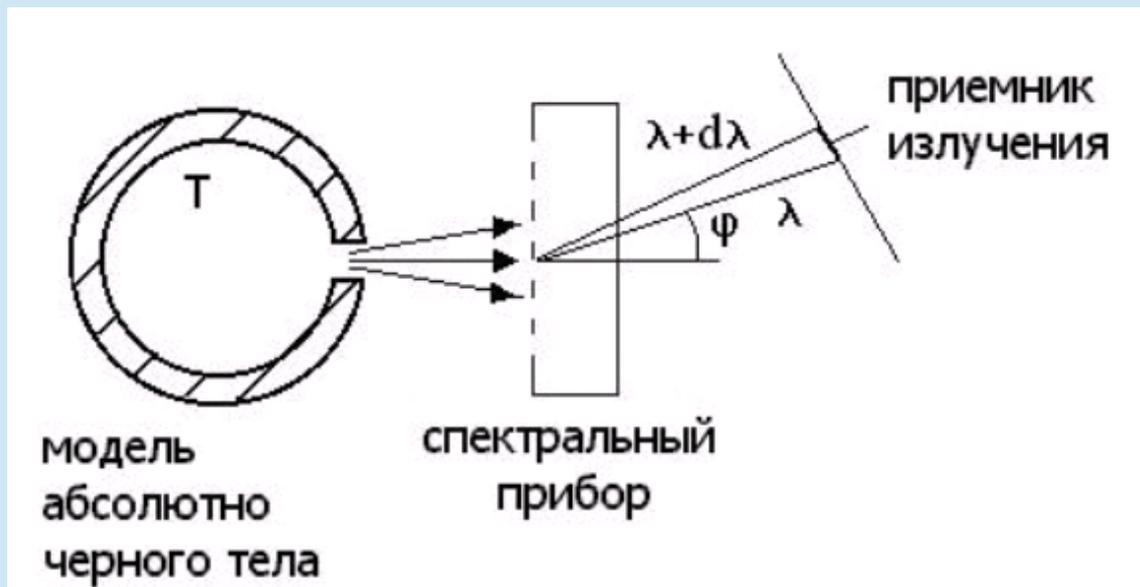
Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.



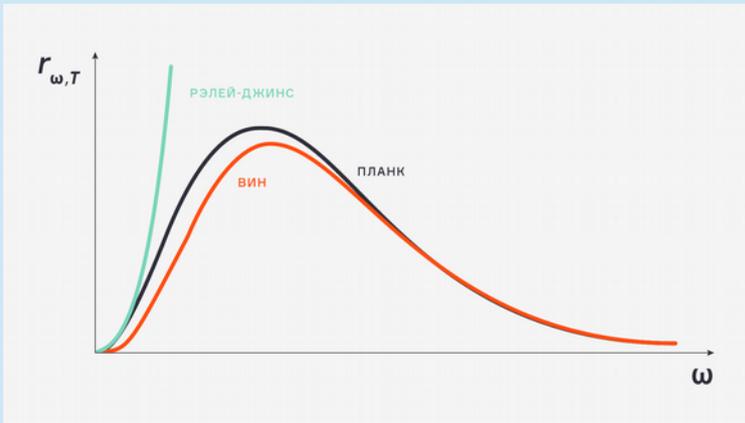
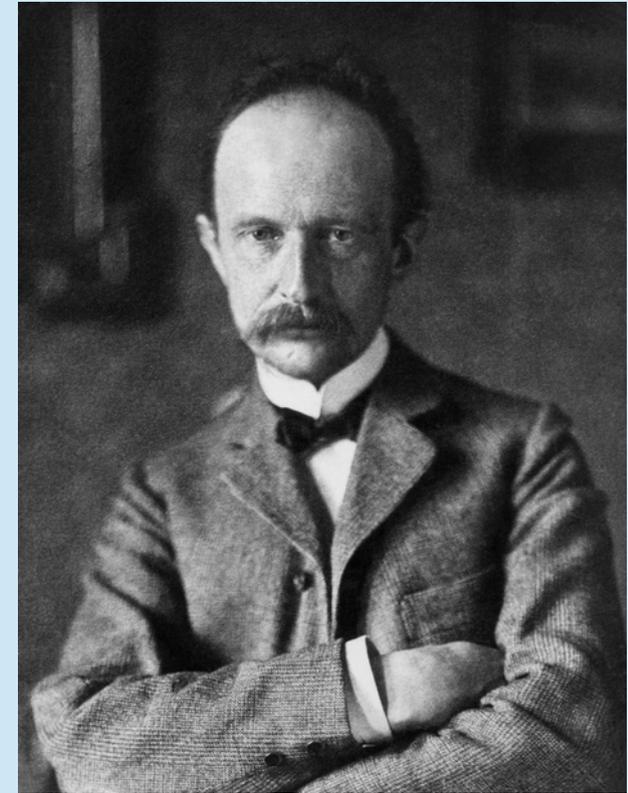
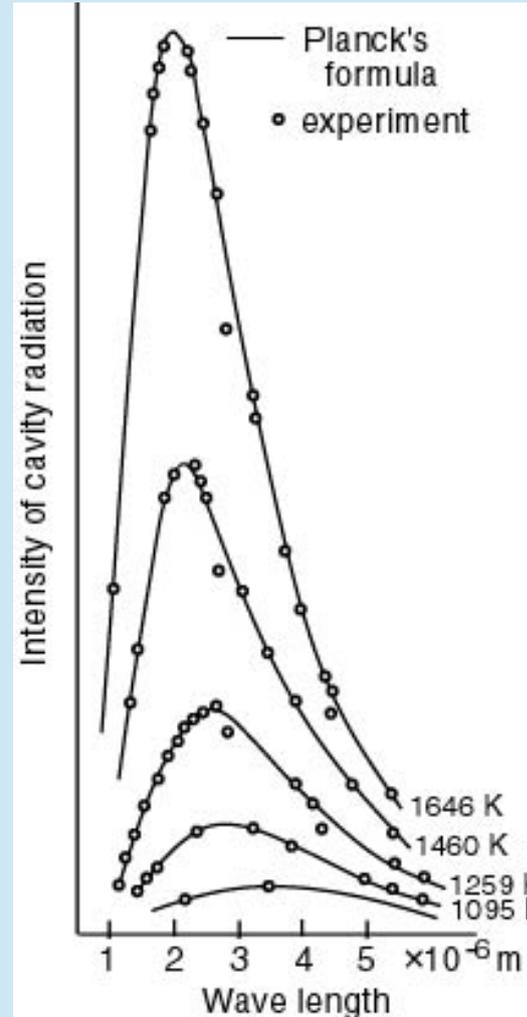
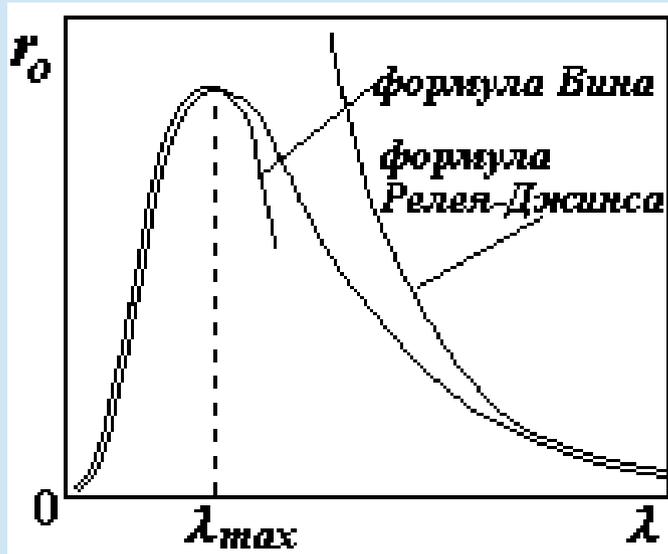
Абсолютно чёрное тело — физическое тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах.

Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой.



2. Излучение. Спектры.

Формула Планка



$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

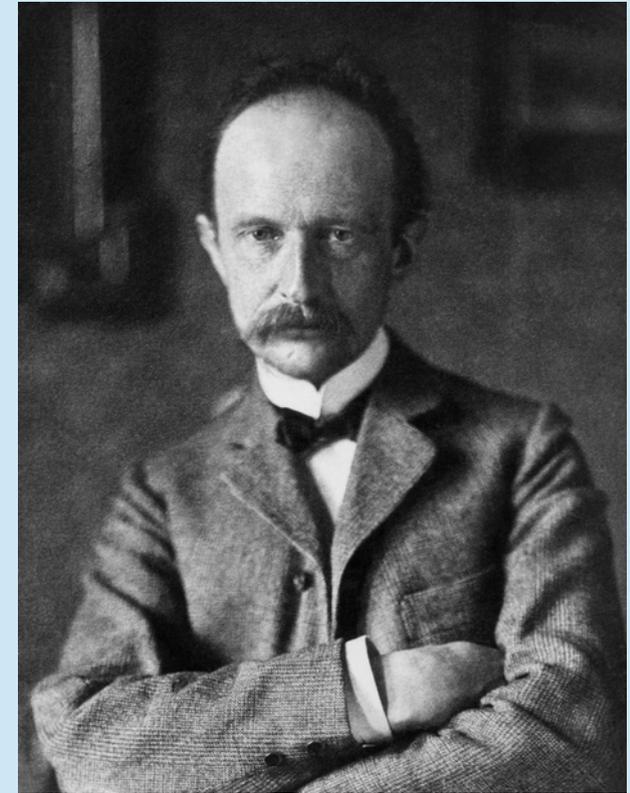
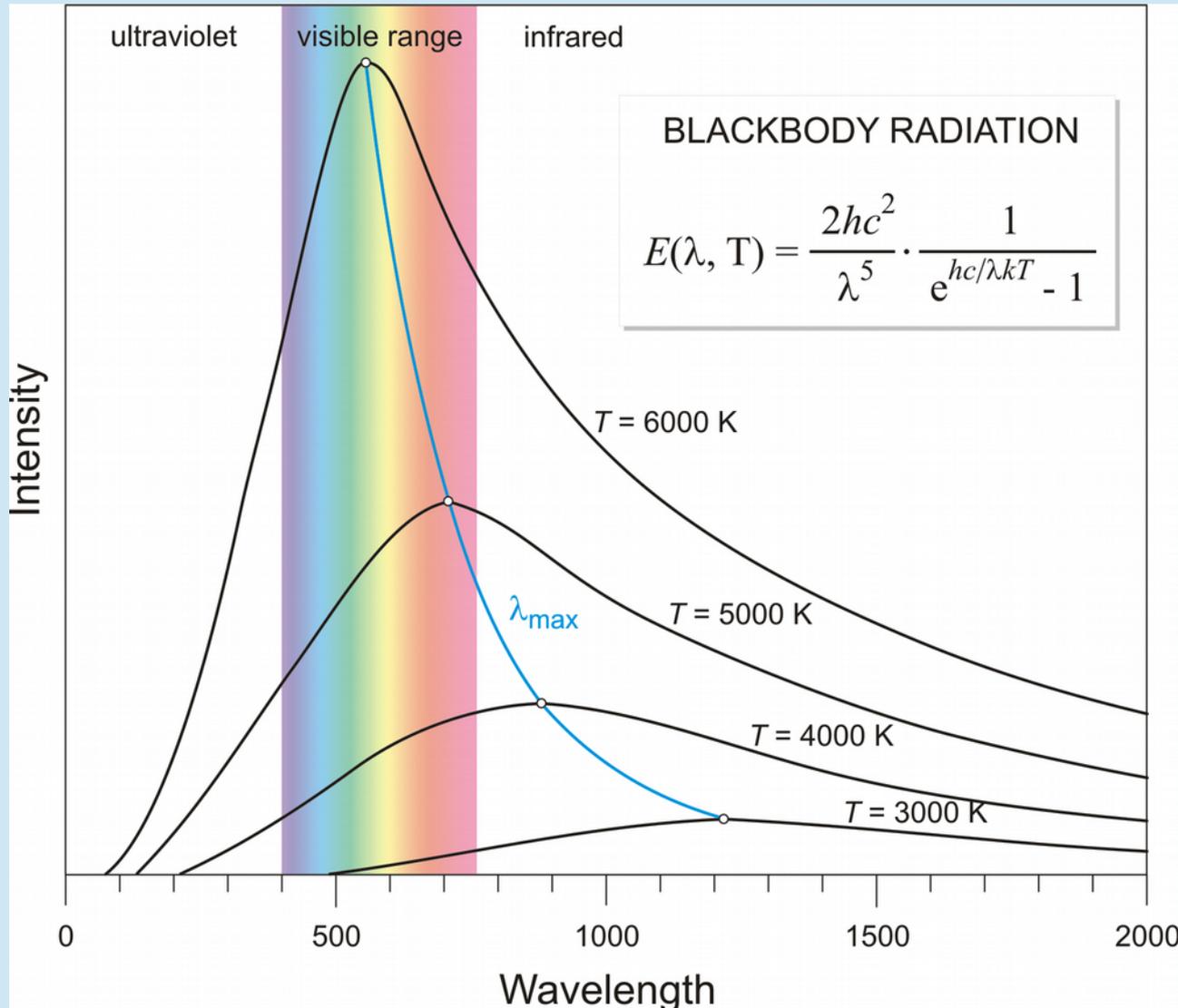
Вывод ф-лы Релея-Джинса основывается на законе о равномерном распределении энергии по степеням свободы: на каждое электромагнитное колебание приходится в среднем энергия, складываемая из двух частей. Одну половинку вносит электрическая составляющая волны, а вторую — магнитная.

2. Излучение. Спектры.

Формула Планка

Зависимость мощности излучения чёрного тела от частоты при зависимости энергии кванта света

$$E = h \nu$$



Постоянная Планка

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

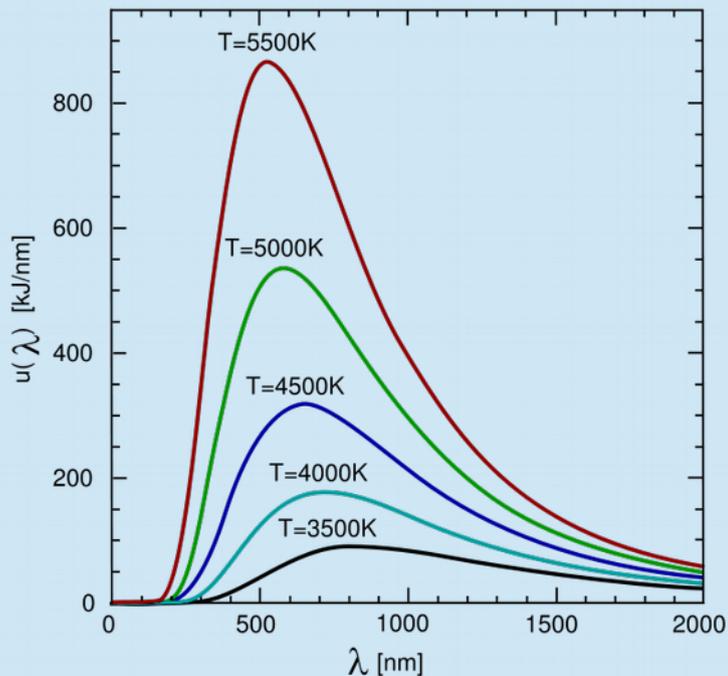
2. Излучение. Спектры.

Закон смещения Вина

Длина волны, при которой энергия излучения абсолютно чёрного тела максимальна, определяется законом смещения Вина:

$$\lambda_{max} = \frac{B}{T},$$

где постоянная Вина: $B = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$



Цветность чернотельного излучения

Температурный интервал в K	Цвет
до 1000	Красный
1000—2000	Оранжевый
2000—3000	Жёлтый
3000—4500	Бледно-жёлтый
4500—5500	Желтовато-белый
5500—6500	Чисто белый
6500—8000	Голубовато-белый
8000—15000	Бело-голубой
15000 и более	Голубой

2. Излучение. Спектры.

Закон Стефана-Больцмана.

Каждый квадратный метр поверхности тела за одну секунду излучает по всем направлениям на всех длинах волн энергию

$$S = \sigma T^4$$

Постоянная Стефана-Больцмана.

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$$

Закон открыт сначала эмпирически Й.Стефаном в 1879 году, и через пять лет выведен теоретически Л. Больцманом в предположении пропорциональности плотности энергии излучения его давлению.



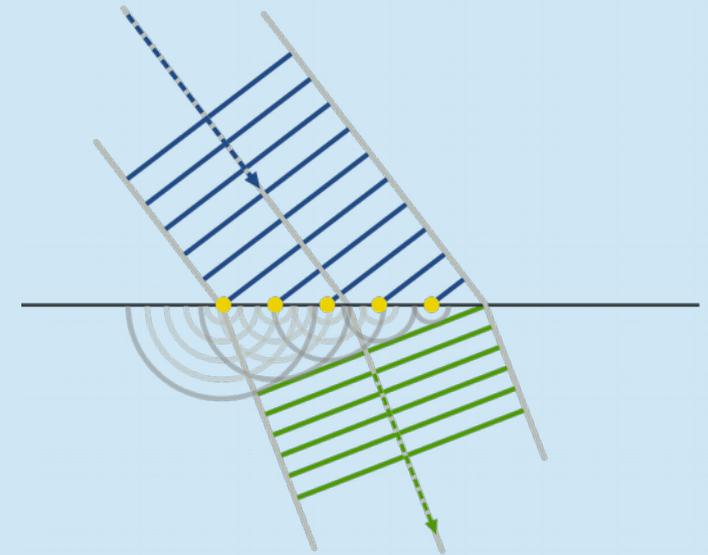
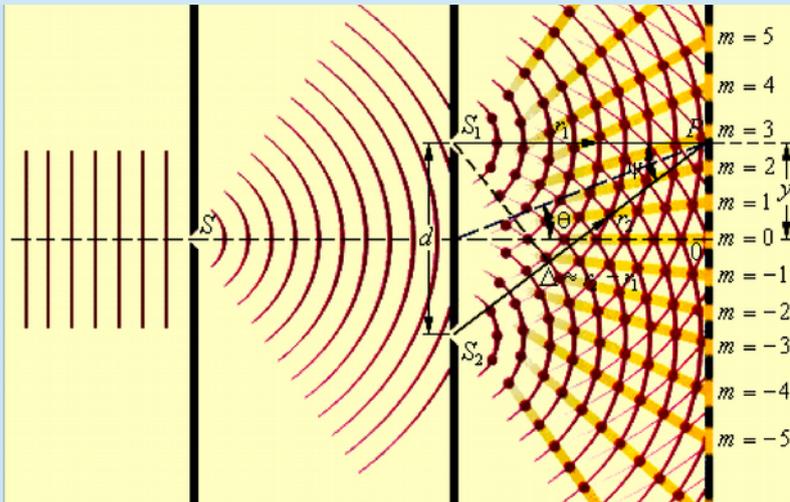
2. Излучение. Спектры.

Дифракция. Принцип Гюйгенса-Френеля.

Дифракция – это совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонением от законов геометрической оптики. Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Интерференция - перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн.

Дифракция - интерференция вторичных волн.



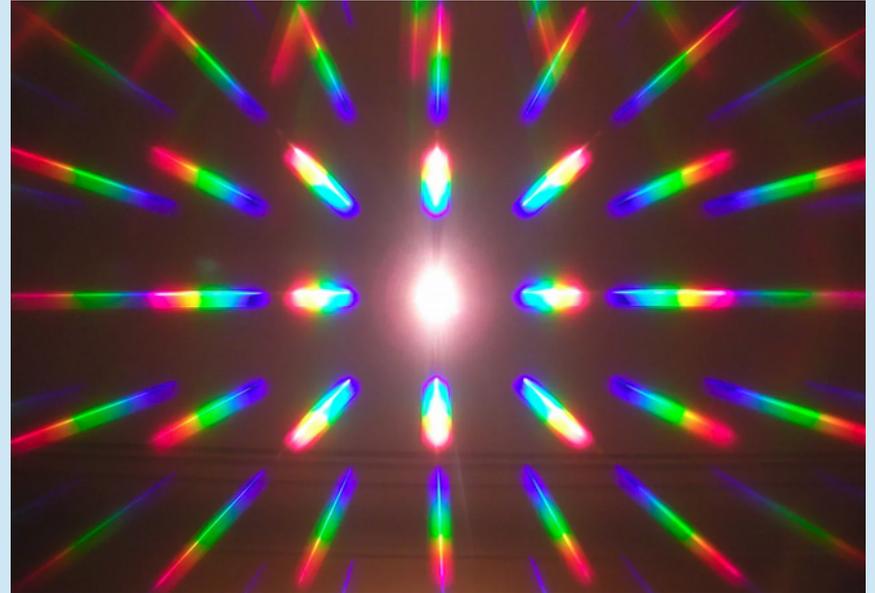
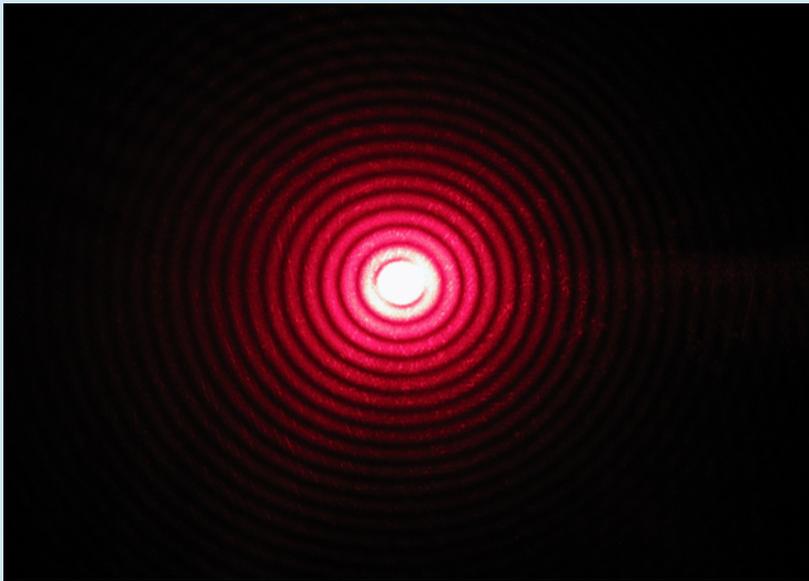
Принцип Гюйгенса-Френеля.

Каждый элемент волнового фронта можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.

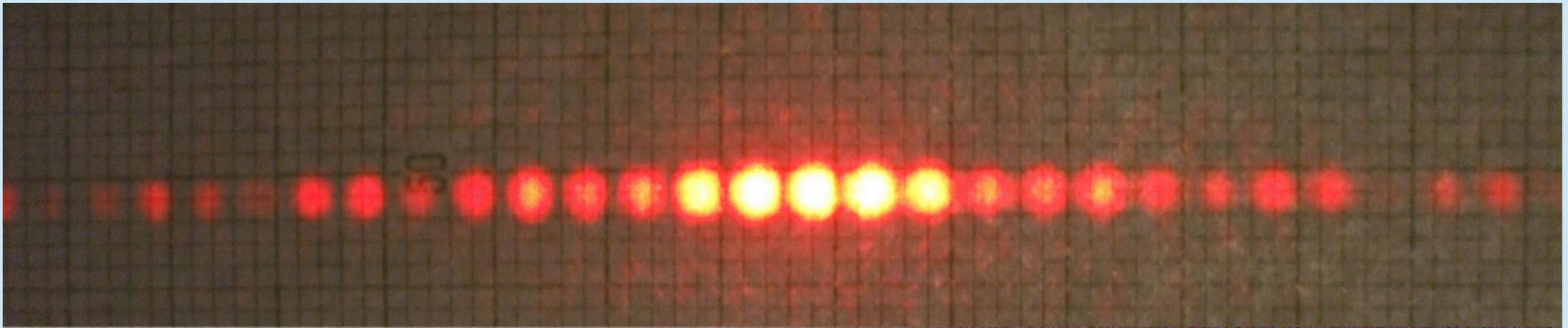
2. Излучение. Спектры.

Дифракция на различных препятствиях.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)



Дифракция на круглом отверстии, на щели на решетке



Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

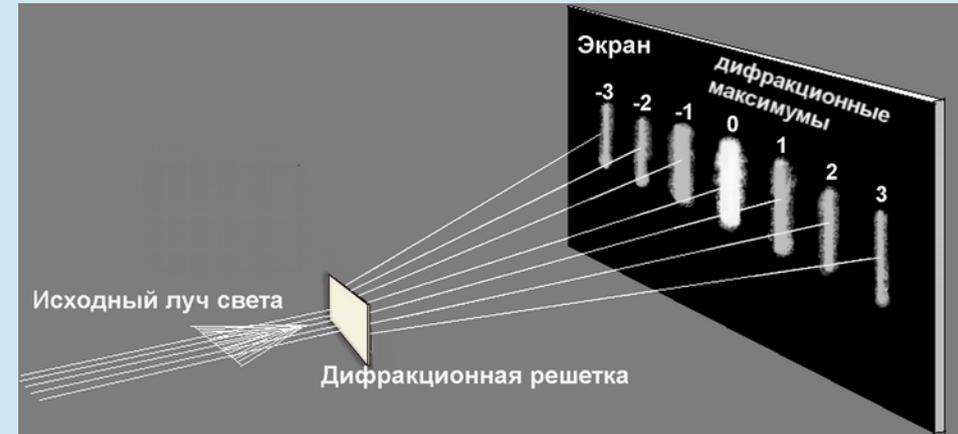
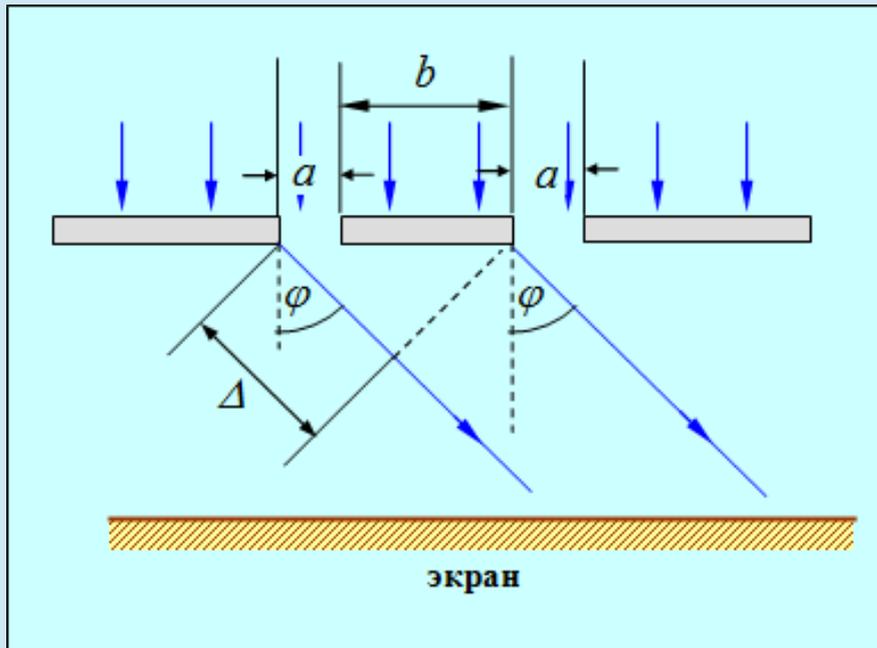
Дифракционные решетки.

Период дифракционной решетки $d=a+b$

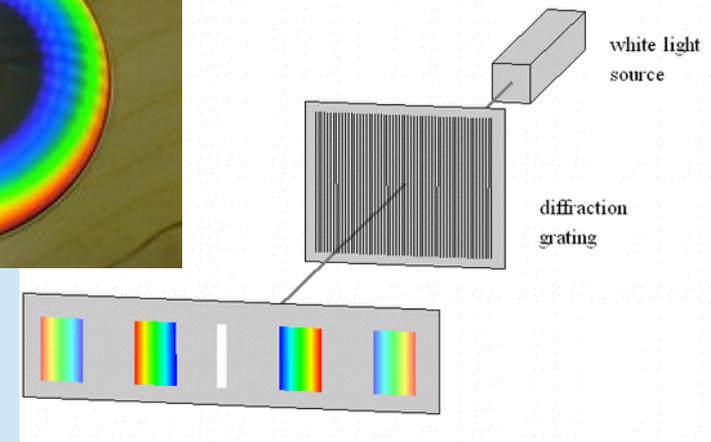
Разность хода крайних лучей $\Delta = d \sin\varphi$

Условие на угол для максимума k -ого порядка.

$$d \sin\varphi = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).$$



Дифракционная решетка - спектральный прибор

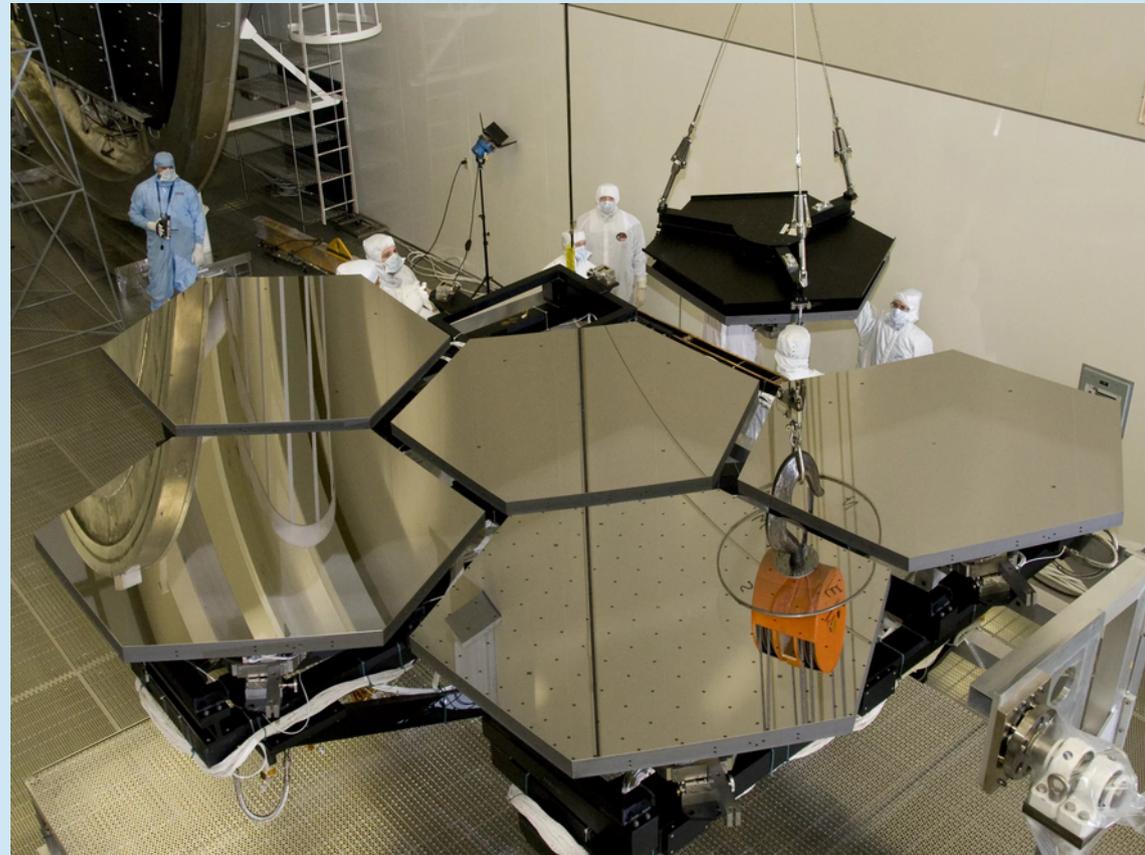


2. Излучение. Спектры.

Применение дифракции в Астрометрии.

Первый в мире телескоп, созданный Галилеем в 1609 г., имел диаметр зрачка 5 см. За четыре столетия размер зеркал телескопов достиг 10м, а в планах ученых - создание гигантов с размером зеркал до 100 м. Однако мало просто изготовить гигантское зеркало, его нужно тщательно проверить параболическая поверхность зеркала телескопа должна быть выполнена с точностью в сотые доли микрона. Другими словами, если увеличить 8-метровое зеркало до размеров Черного моря, рябь поверхности должна быть менее 1 мм.

- **Точное определение длин волн в спектральном анализе.**
- **Контроль зеркал телескопов**



2. Излучение. Спектры.

Применение дифракции в Астрометрии.



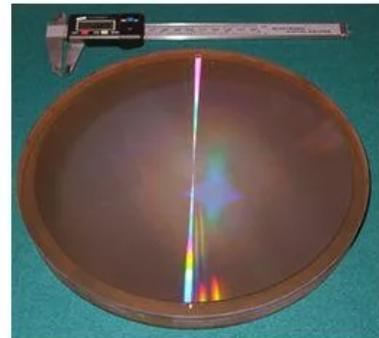
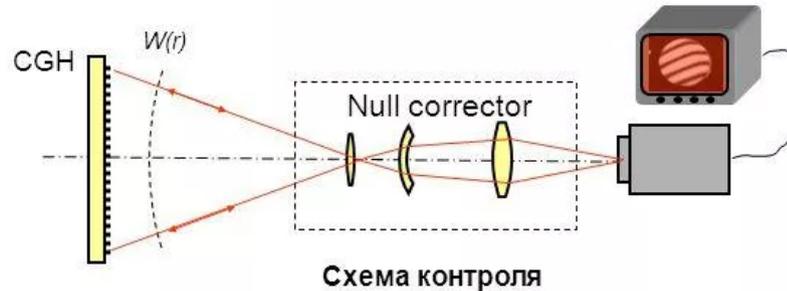
IA&E SB RAS

Контроль зеркала телескопа LBT

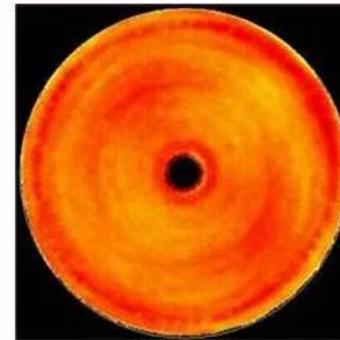
Большой бинокулярный телескоп, зеркала 2 x 8.4m (Mt. Graham, AZ, USA)



Телескоп LBT и главное зеркало после полировки



210-мм голограмма



Карта зеркала

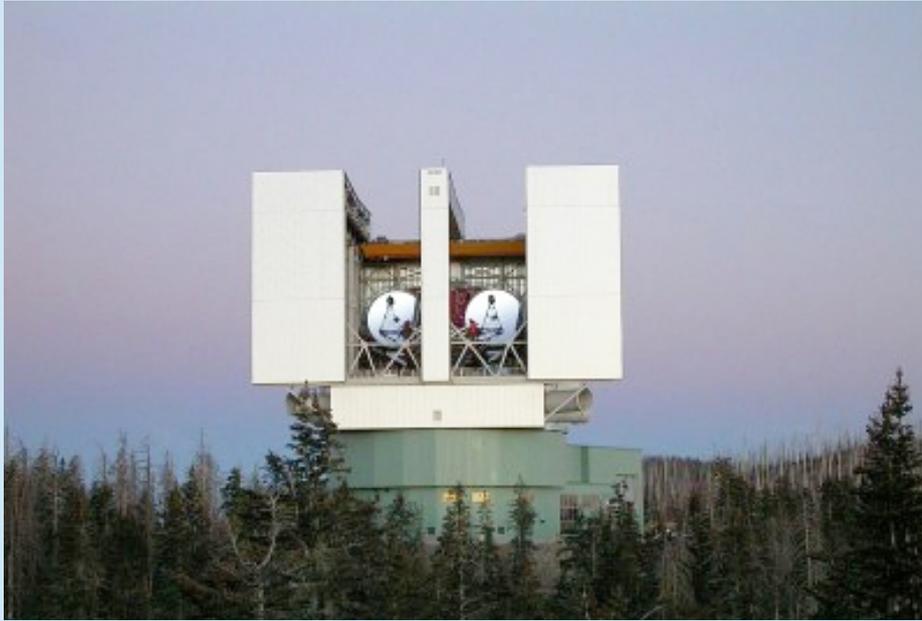
Необходим эталон, и этой цели идеально подходят дифракционные оптические элементы. Один из способов контроля больших асферических зеркал, разработанный в ИАиЭ, согласно которому дифракционный элемент выполняет роль корректора волнового фронта.

Еще один способ основан на имитации зеркала отражательным ДОЭ, чья структура отражает световой поток назад точно так, как это бы делало идеальное зеркало. В процессе работы оптики могут сравнивать форму полируемого зеркала с эталоном, которым служит имитаторы.

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Применение дифракции в Астрометрии.



Методы, разработанные в ИАиЭ СО РАН, позволили сотрудникам изготовить уникальные дифракционные оптические элементы для контроля 6,5- и 8,4-метрового зеркал Магеллановых и Большого бинокулярного телескопов.



Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Применение дифракции в Астрометрии.



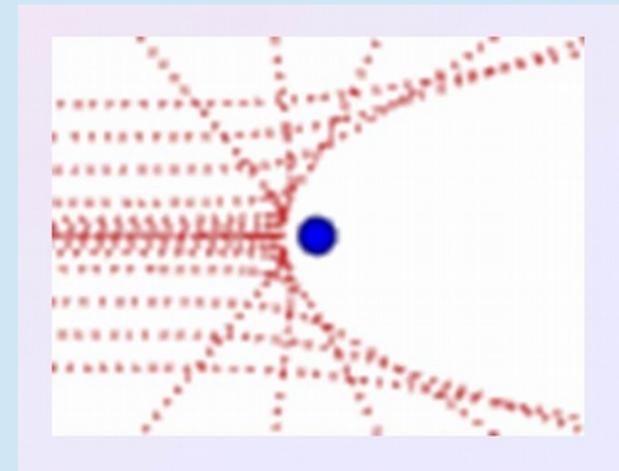
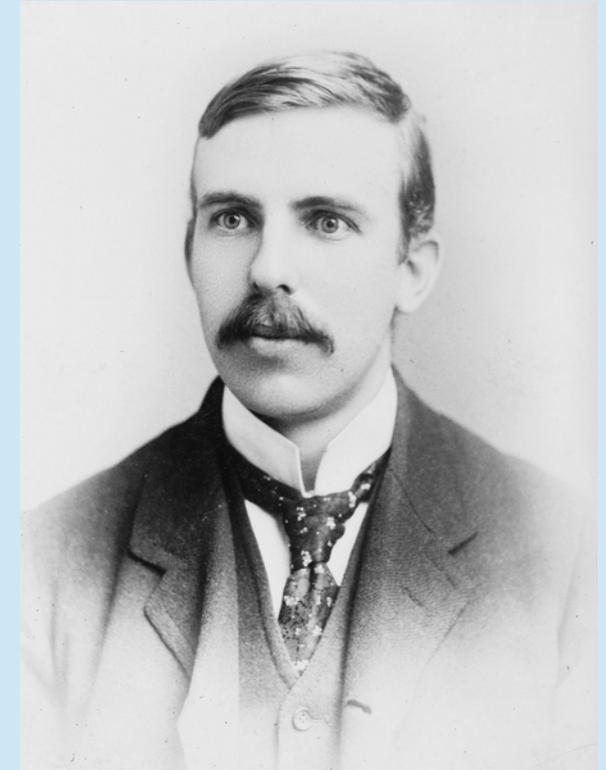
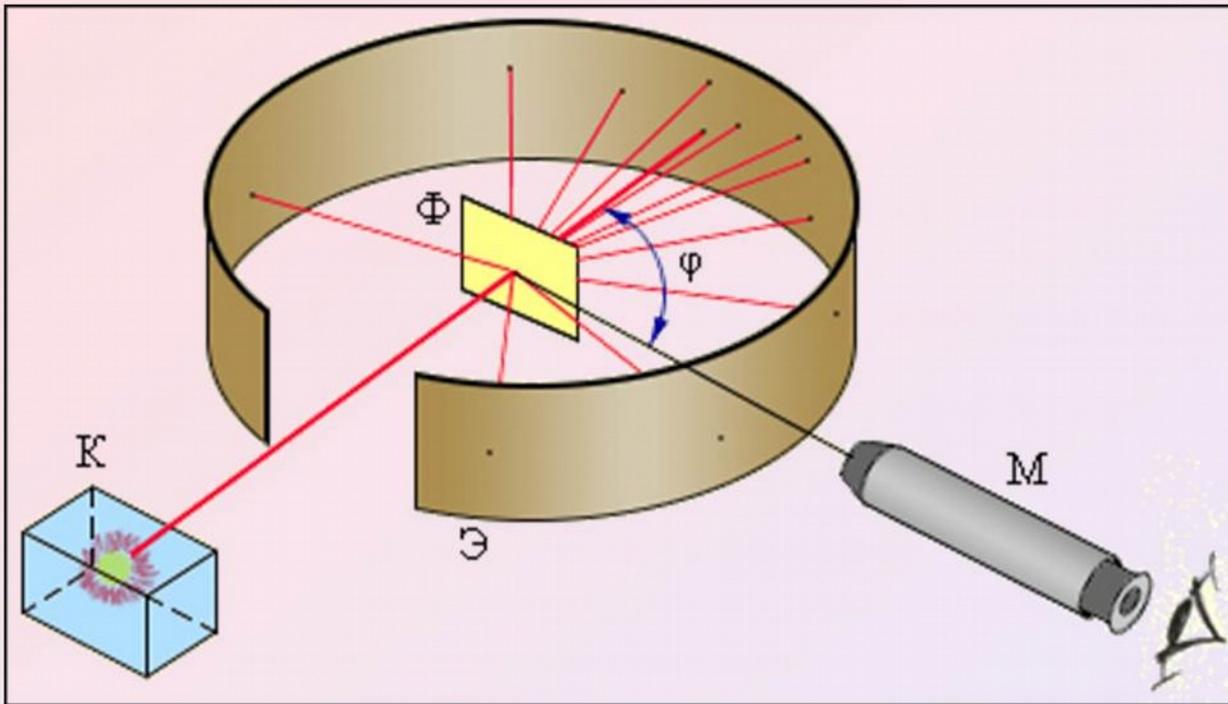
*Первое изображение, полученное с помощью Большого бинокулярного телескопа
(галактика NGC891, 12 октября 2005 г.).*

Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

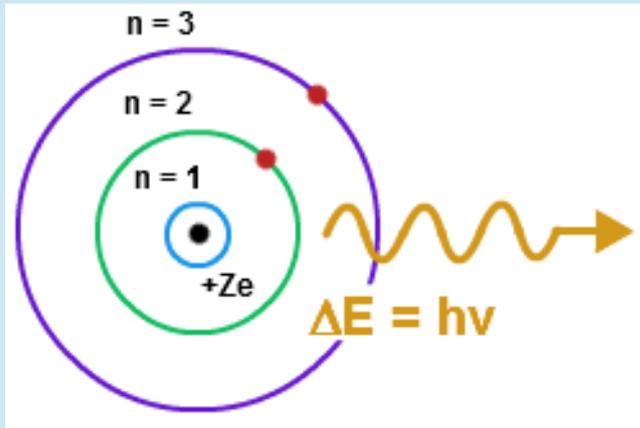
Спектр водорода. Опыт Резерфорда (1906г.).

Картина атома, нарисованная Резерфордом по результатам опыта, нам сегодня хорошо знакома. Атом состоит из сверхплотного, компактного ядра, несущего на себе положительный заряд, и отрицательно заряженных легких электронов вокруг него.



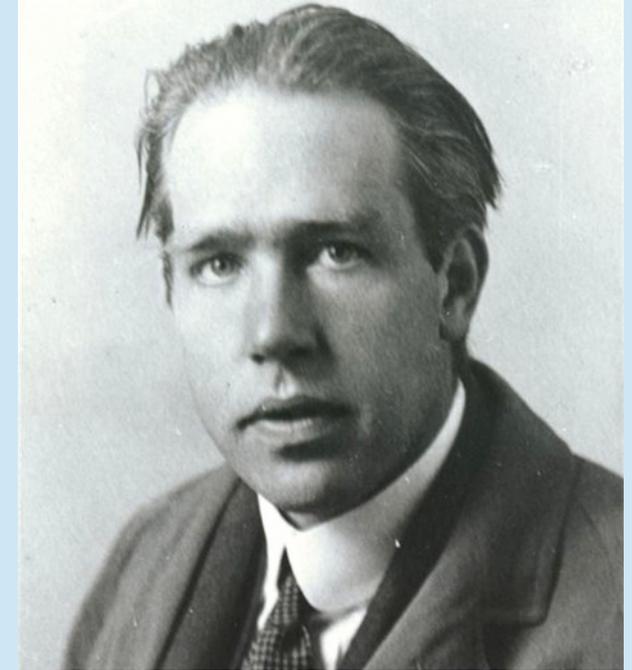
2. Излучение. Спектры.

Спектр водорода. Атом Бора.



В 1900 году Макс Планк показал, что энергия электромагнитного излучается и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями – квантами с энергией :

$$E = h \nu$$



За основу Бор взял планетарную модель атома Резерфорда

Постулаты Бора

Атом может находиться только в особенных стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых отвечает определённая энергия. В стационарном состоянии атом не излучает электромагнитных волн. Эти состояния определяются правилом квантования момента импульса:

$$m_e v R = \frac{h n}{2 \pi}$$

Излучение и поглощение энергии атомом происходит при скачкообразном переходе из одного стационарного состояния в другое.

2. Излучение. Спектры.

Спектр водорода. Атом Бора.

Спектр водорода. Атом Бора.

Задание:

используя закон Кулона:

$$\frac{m_e v^2}{R} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 R^2}$$

выражение для энергии:

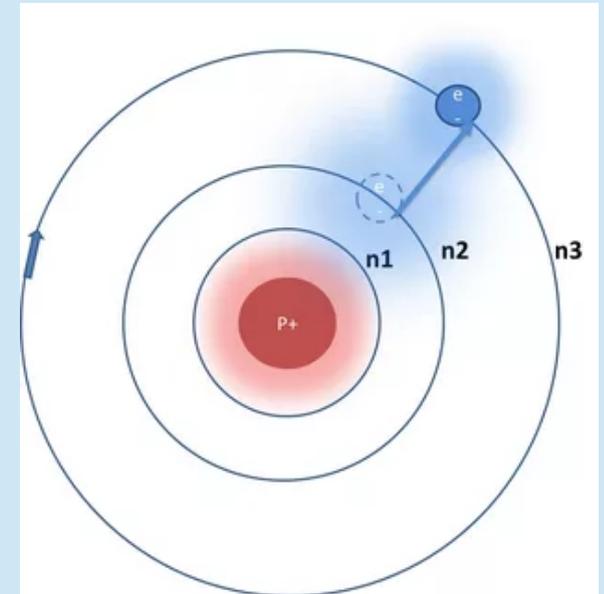
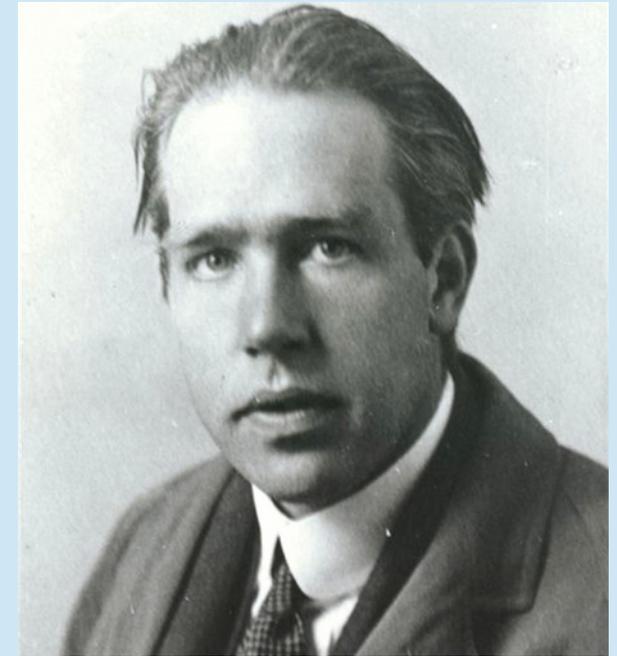
$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 R} < 0$$

*и условие квантования
момента импульса:*

$$m_e v R = \frac{h n}{2 \pi}$$

*произвести вывод формулы для частоты
испускаемого фотона при переходе электрона с
одной стационарной орбиты на другую :*

$$h\nu = E_n - E_m = -\frac{m_e e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$



2. Излучение. Спектры.

Спектр водорода. Серия Бальмера.

Серия Бальмера

1885 г

видимый диапазон

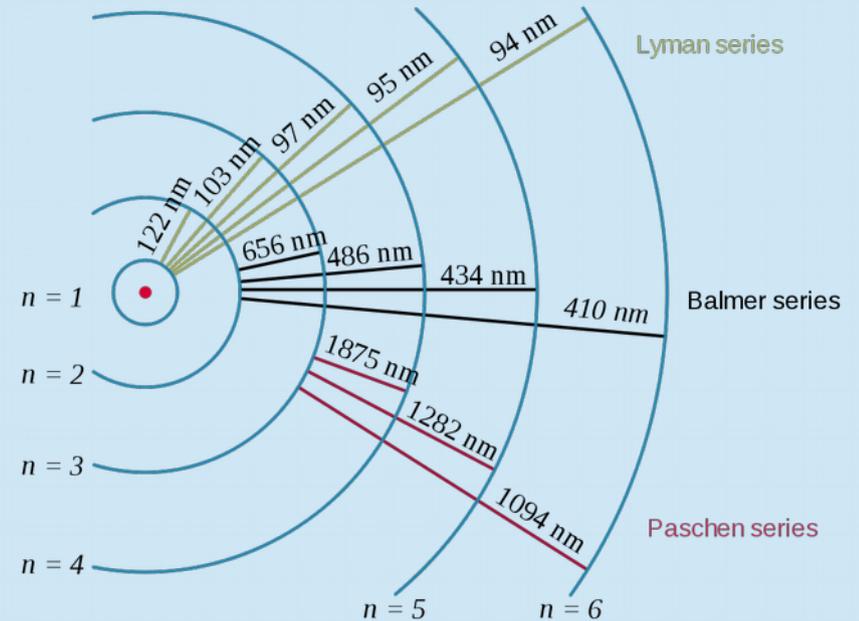
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

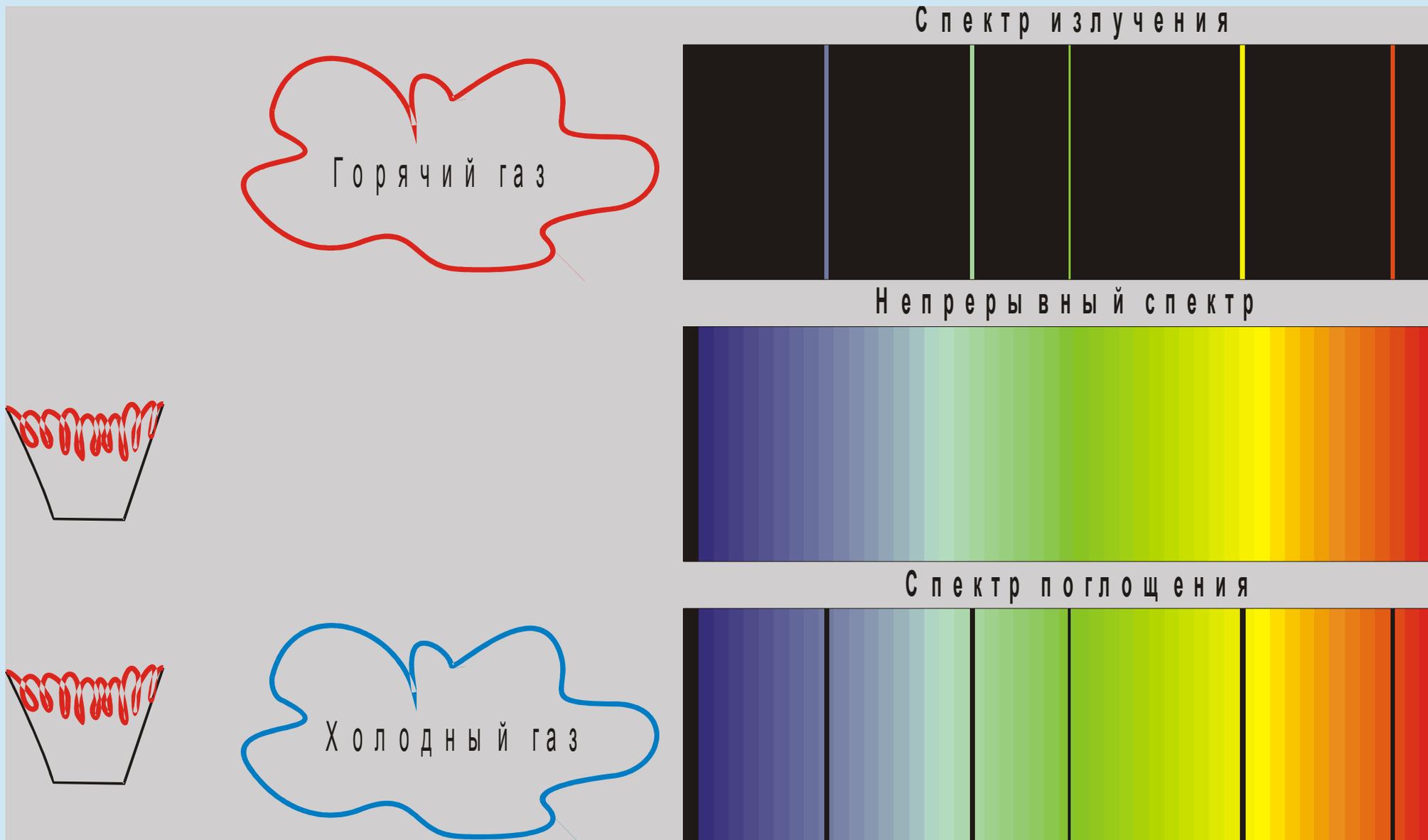
$$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \quad \nu = cR \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Задание: проверить численное значение постоянной Ридберга R .



2. Излучение. Спектры.

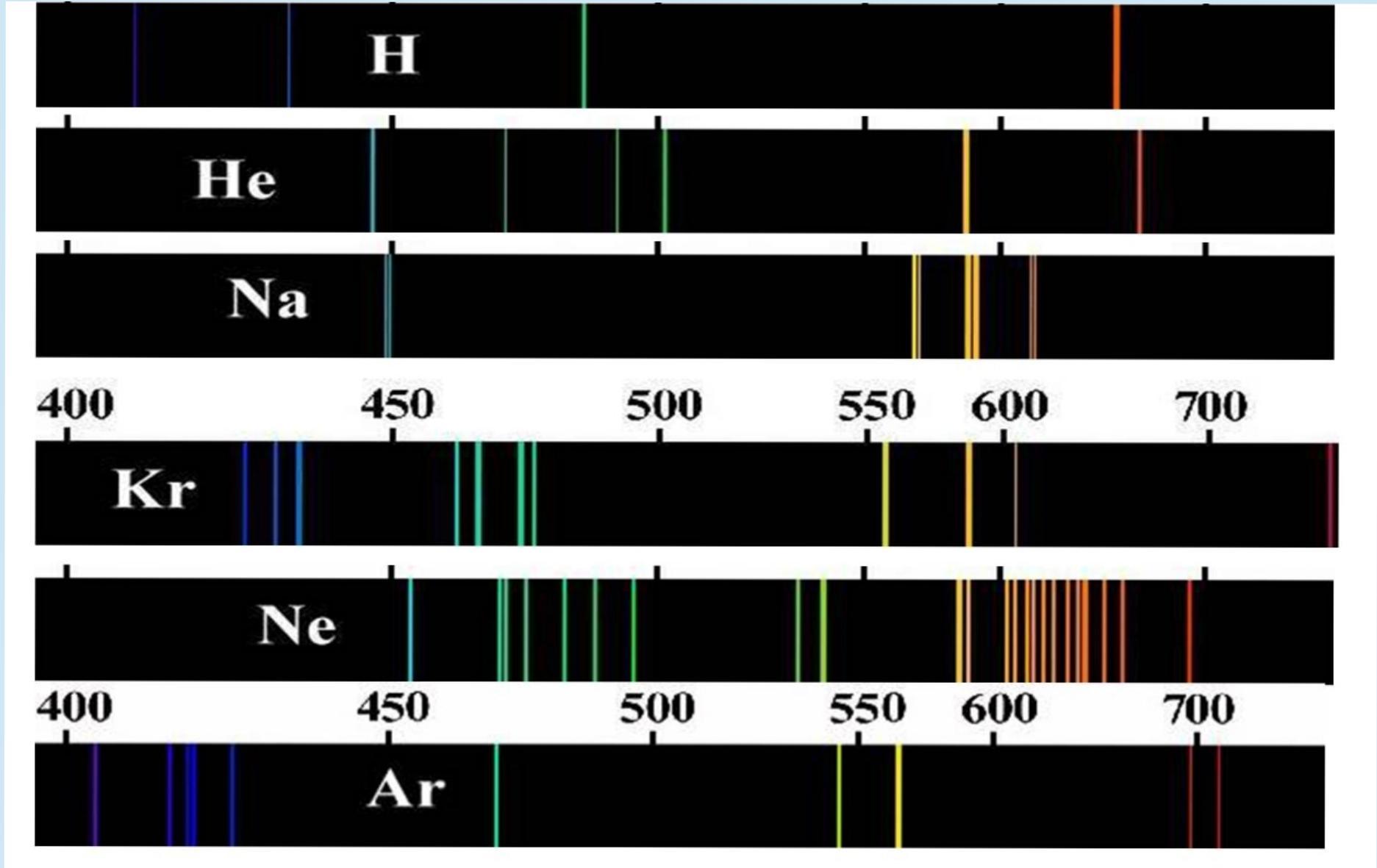
Виды спектров Спектры излучения и поглощения.



2. Излучение. Спектры.

Виды спектров Спектры излучения и поглощения.

Примеры линейчатых спектров излучения.



2. Излучение. Спектры.

Виды спектров.

Спектры излучения

Непрерывный



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

Линейчатый



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

Полосатый

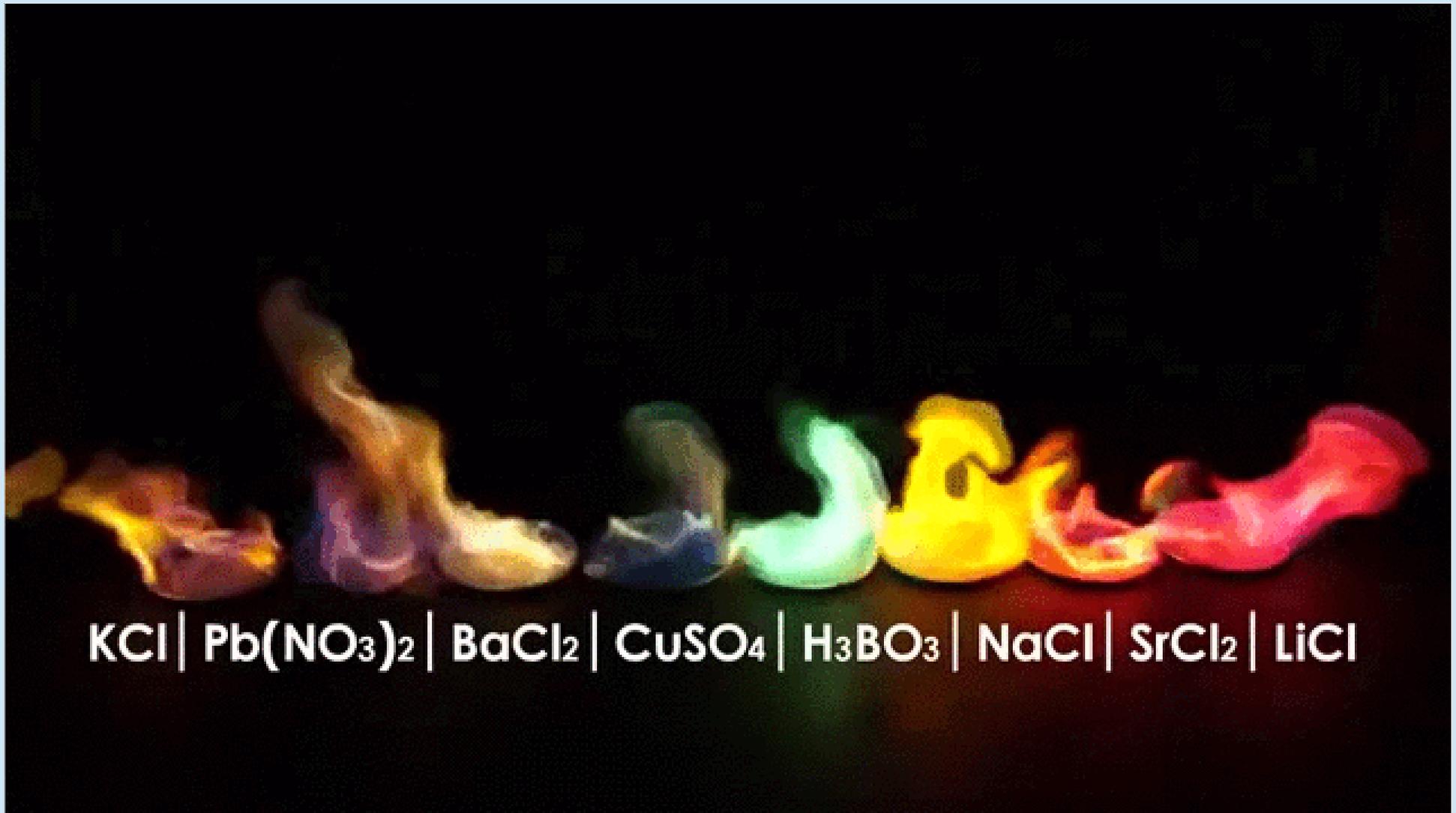


Полосатые спектры в отличие от линейчатых спектров создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

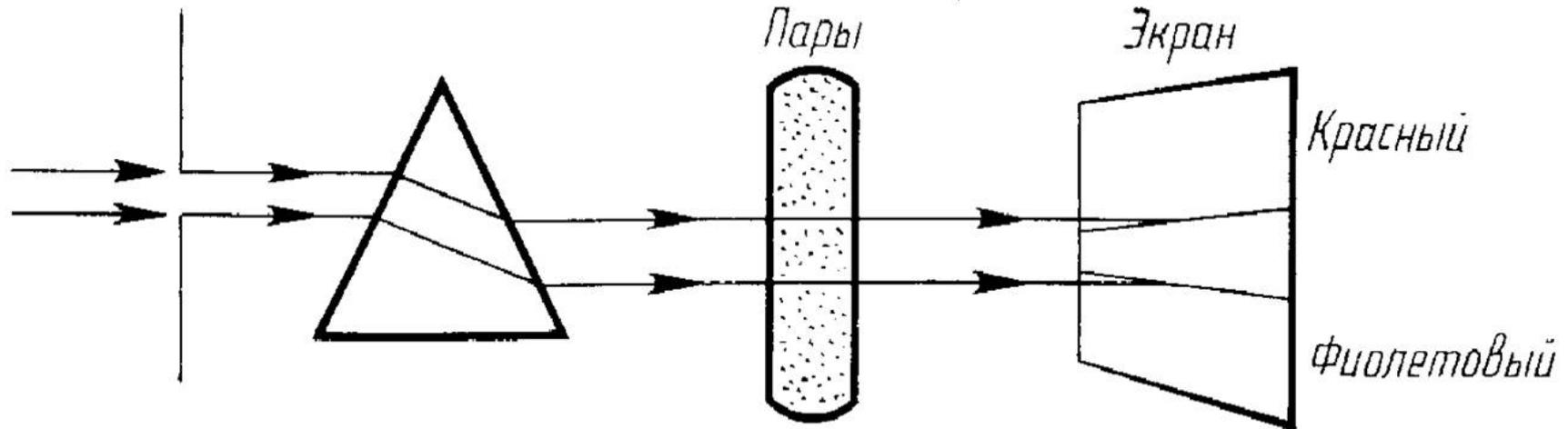
Виды спектров Спектры излучения и поглощения.



2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Виды спектров Спектры излучения и поглощения.

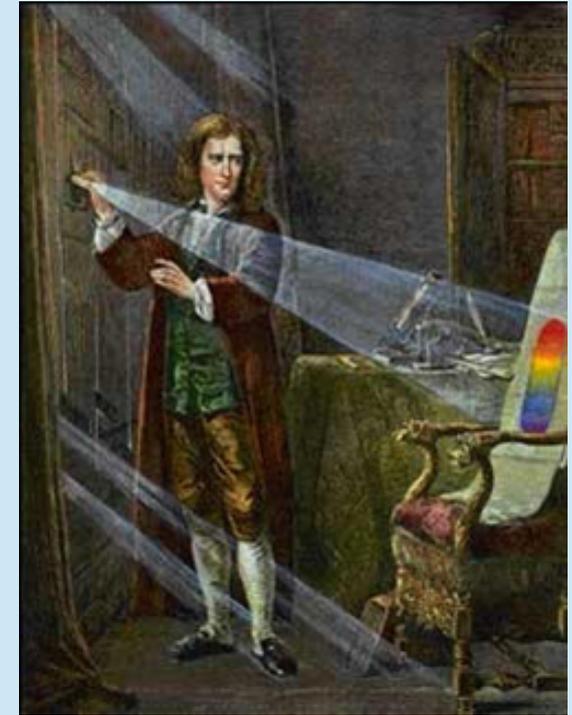
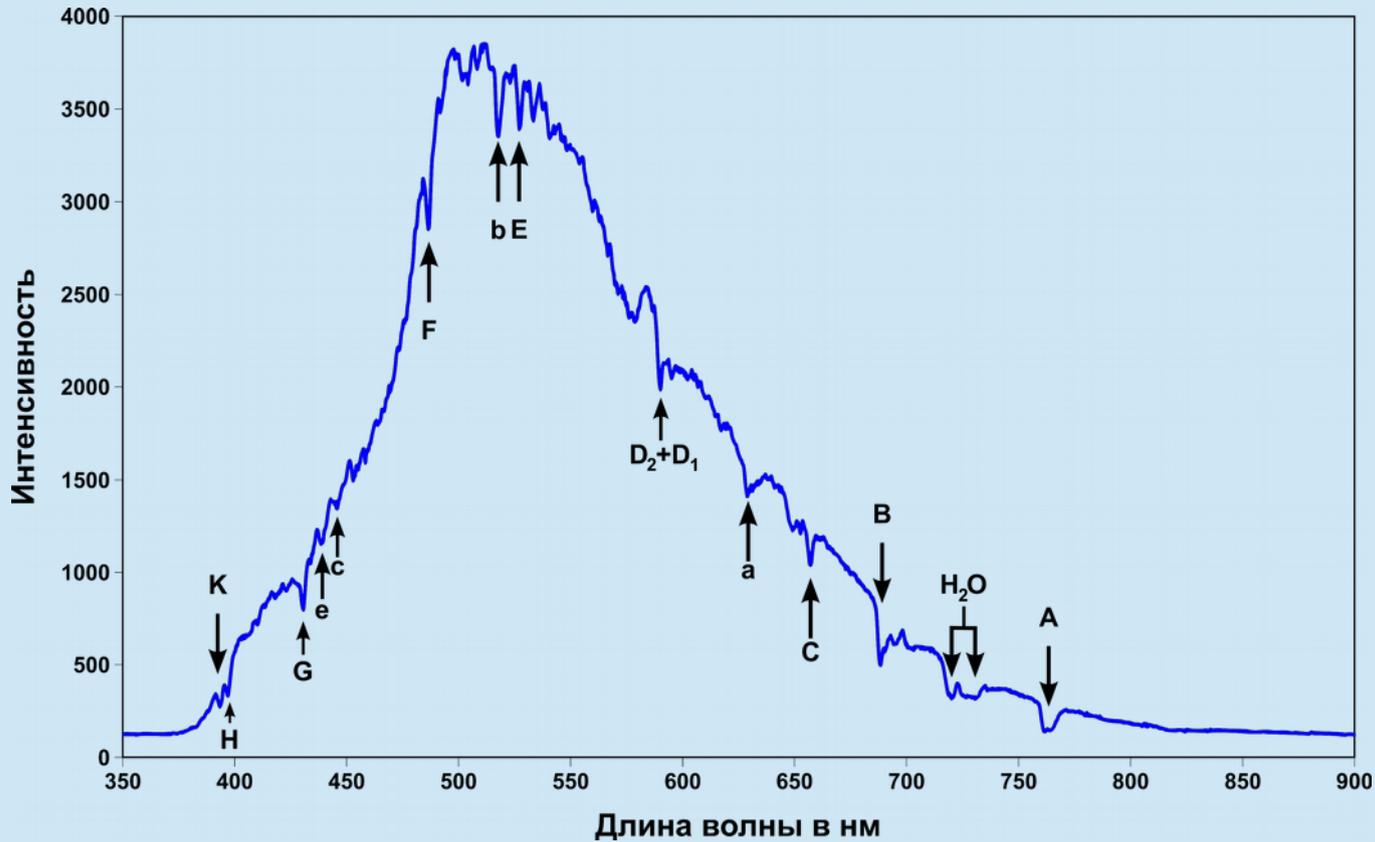
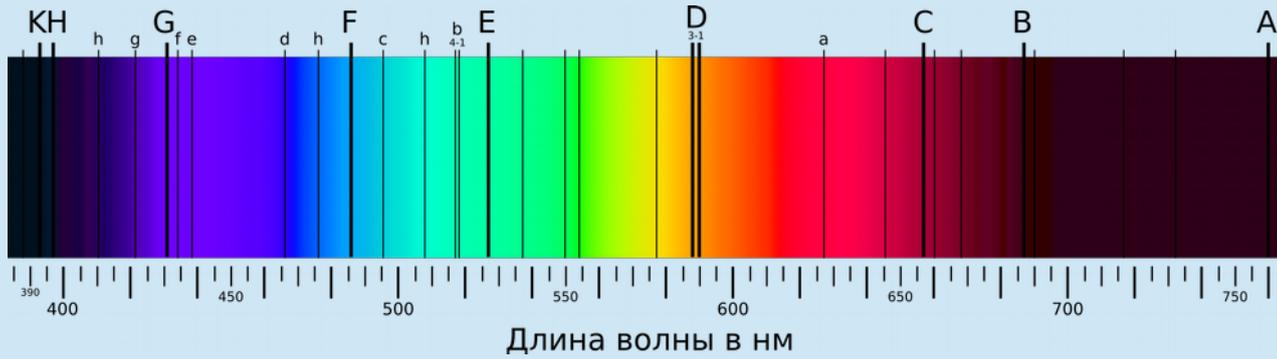


Спектры поглощения получают, пропуская свет от источника, дающего сплошной спектр, через вещество, атомы которого находятся в невозбужденном, состоянии.

Спектр поглощения — это совокупность частот, поглощаемых данным веществом.

2. Излучение. Спектры.

Фраунгоферовы линии

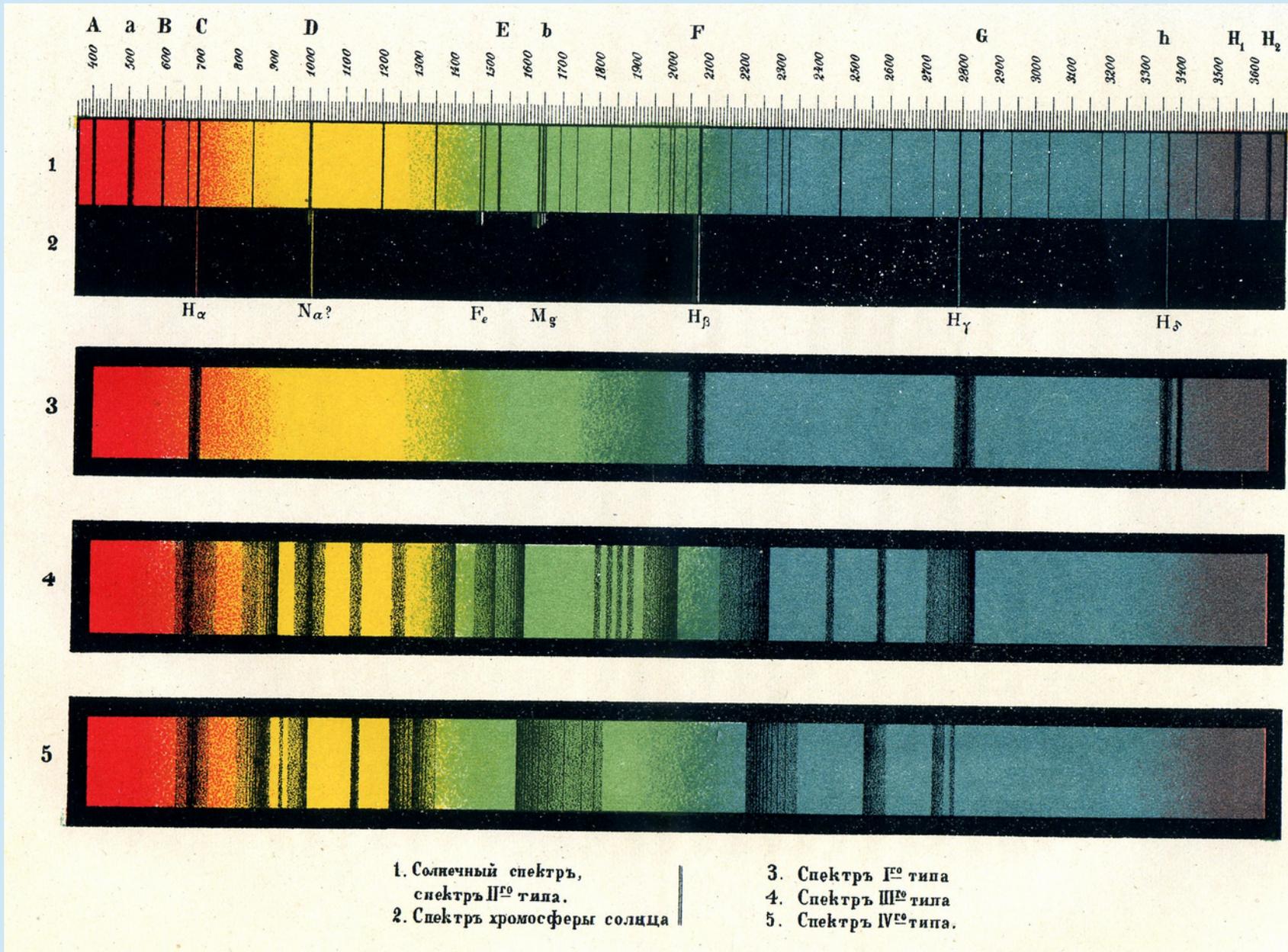


Уильям Волластон — 1802
Йозеф Фраунгофер — 1814

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

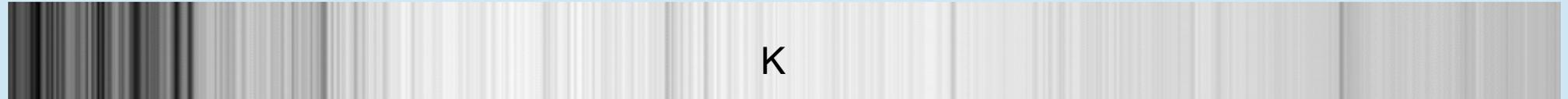
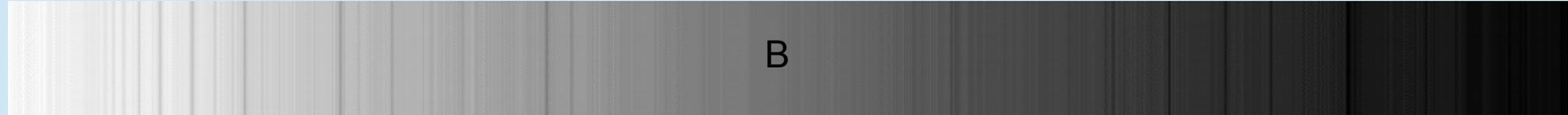
Спектры звезд.



2. Излучение. Спектры.

Спектры звезд.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)



2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Спектры звезд.

Мы осознаём возможность определения их форм, их расстояний, их размеров и их движений, но мы **никогда не узнаем**, как можно каким-либо способом изучить их химический состав, их минералогическую структуру и более всего природу каких-либо организованных существ, что способны обитать на их поверхностях. Говоря коротко, наше позитивное знание в отношении звёзд с необходимостью **ограничено только геометрическими и механическими явлениями** и вовсе неспособно охватить прочие направления физических, химических, физиологических и даже социологических исследований, каковые составляют суть изучения доступных (то есть земных) существ всеми нашими разнообразными методами наблюдения.

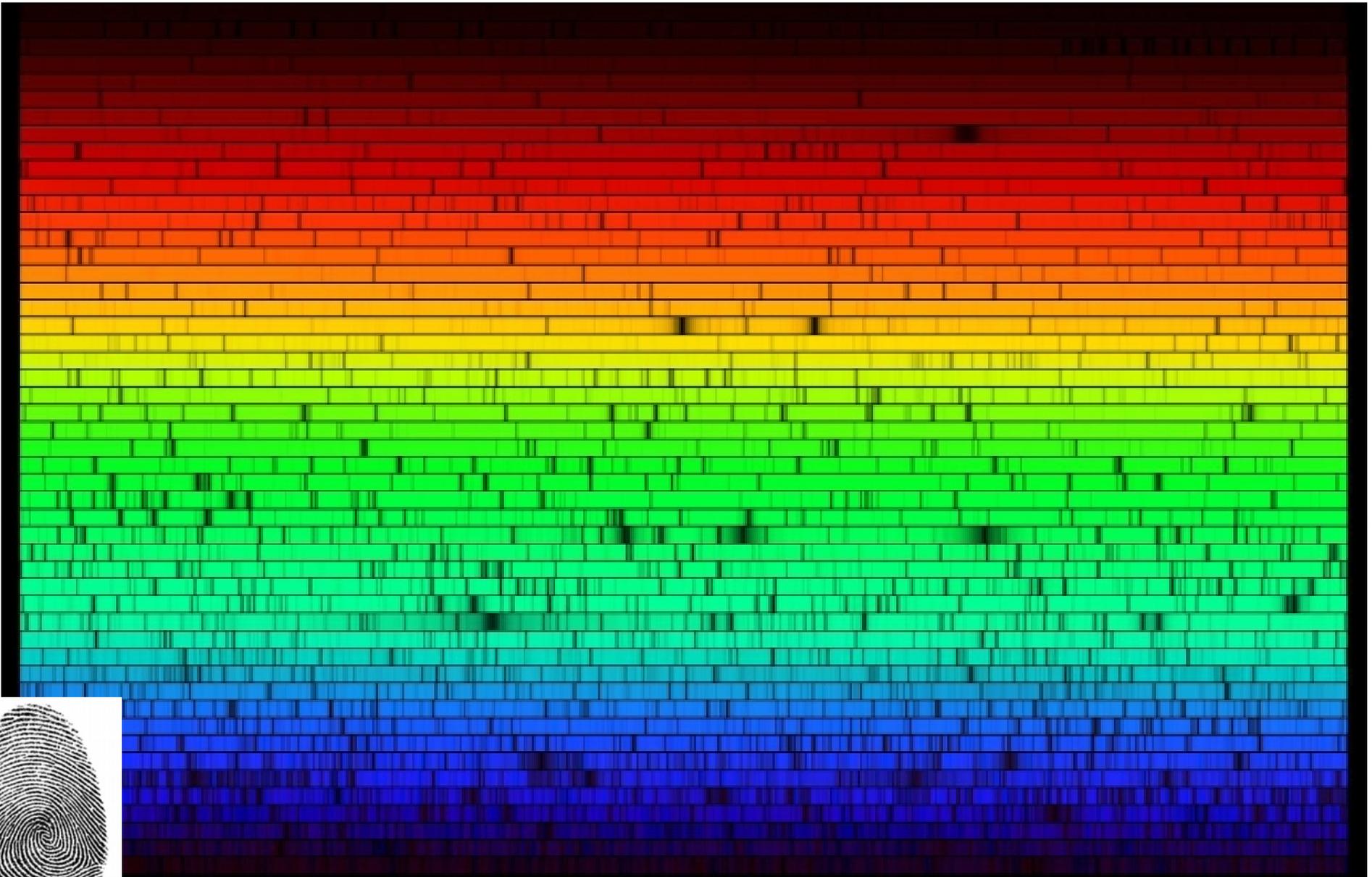


Comte, A.,
Cours de Philosophie Positive, II, 19th lesson (1835)

2. Излучение. Спектры.

Видимый спектр Солнца.

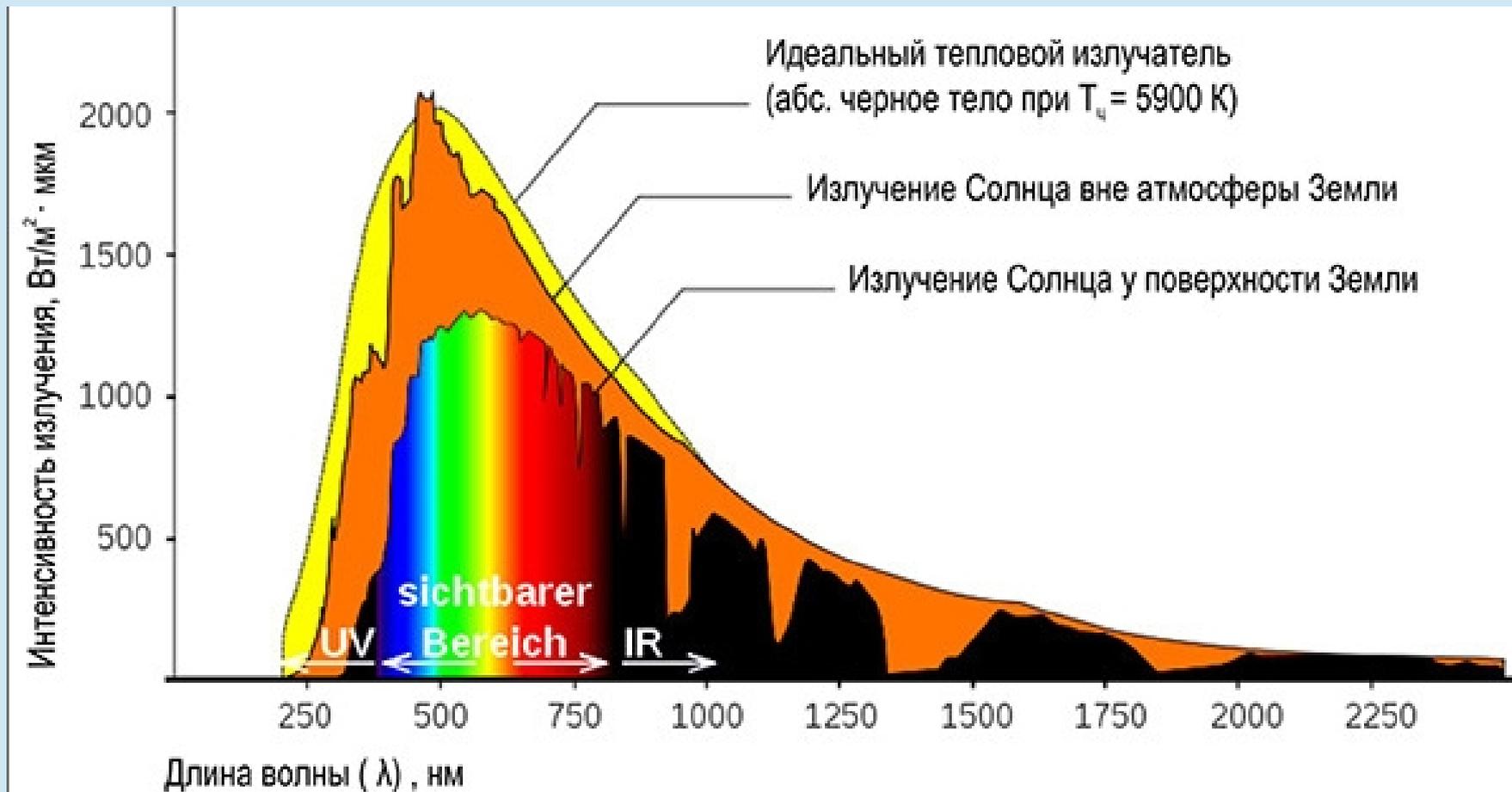
Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)



Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Видимый и радиодиапазон излучения.



2. Излучение. Спектры.

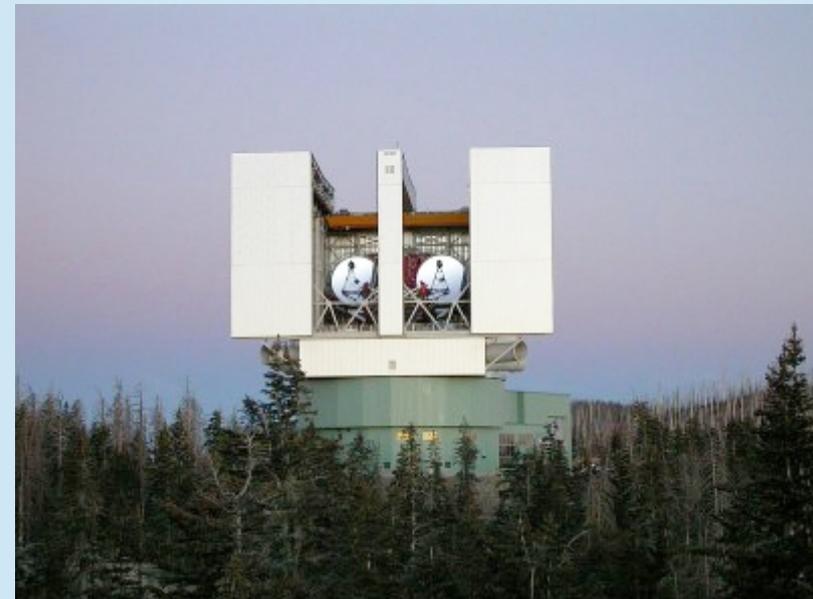
Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Видимый и радиодиапазон излучения.



Сеть австралийских радиотелескопов ATCA (Australia Telescope Compact Array) работает с 1988 года.

Большой бинокулярный телескоп (Large Binocular Telescope — LBT) — расположен на горе Грэхем (высота 3,3 км) в штате Аризона (США). С 2008 года он заработал в бинокулярном режиме и в режиме интерферометра.



Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Видимый спектр Солнца.

Астрономы, работающие с космической Обсерваторией солнечной динамики (SDO), опубликовали коллаж из изображений, сделанных благодаря объединению нескольких фотографий Солнца, сделанных телескопом в различных спектрах.

Некоторые из волн на этом изображении, вроде сильнейшего ультрафиолетового излучения, невозможно разглядеть человеческому глазу, поэтому для более удобного наблюдения снимок в этом спектре был подкрашен.

Желтый снимок, например, был сделан при 5800 Å (ангстрем). На нем показана поверхность Солнца. Обычно области, генерирующие этот тип света, обладают температурой около 5700 градусов Цельсия.

Благодаря зеленому светофильтру на изображении, мы можем видеть сверхгорячие солнечные вспышки, температура которых может достигать 6,3 миллиона градусов Цельсия. SDO обычно снимает их при 94 Å (ангстрем).

**ВИДЕО
ДЕМОНСТРАЦИЯ**

Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры.

Шкала электромагнитного излучения.

Крабовидная туманность в разных диапазонах электромагнитных волн.

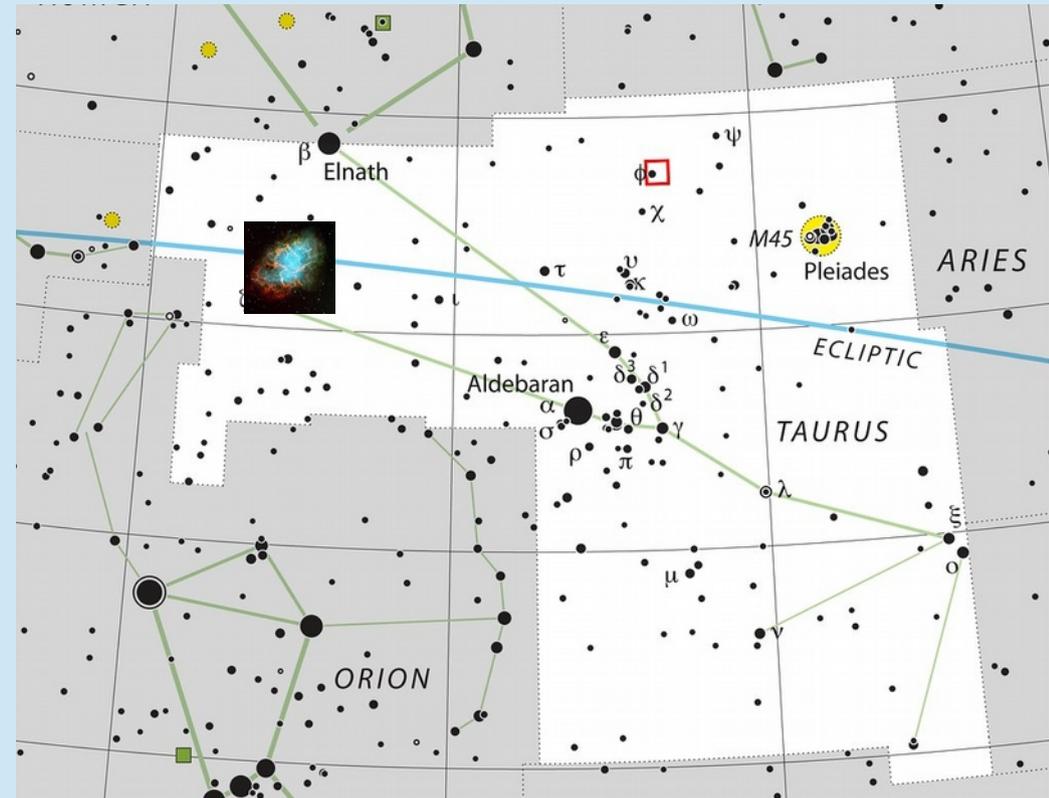
Крабовидная туманность

(M1, NGC 1952, Taurus A) — газообразная туманность в созвездии Тельца является остатком сверхновой SN 1054.

Удаленность около 6500 световых лет от Земли.

Диаметр в 11 световых лет (3,4 пк) и расширяется со скоростью около 1500 километров в секунду

Она стала первым астрономическим объектом, отождествлённым с историческим взрывом сверхновой, записанным китайскими и арабскими астрономами в 1054 году.



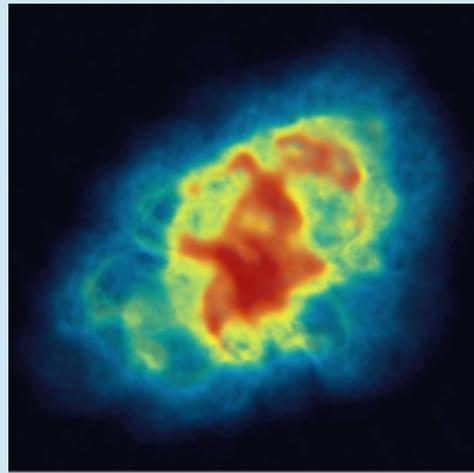
Задание:
M1- Обзорный ролик

2. Излучение. Спектры.

Астрономия, лекция 6
(СУНЦ НГУ 10 кл. 2021 г.)

Шкала электромагнитного излучения.

Крабовидная туманность в разных диапазонах электромагнитных волн.



RADIO



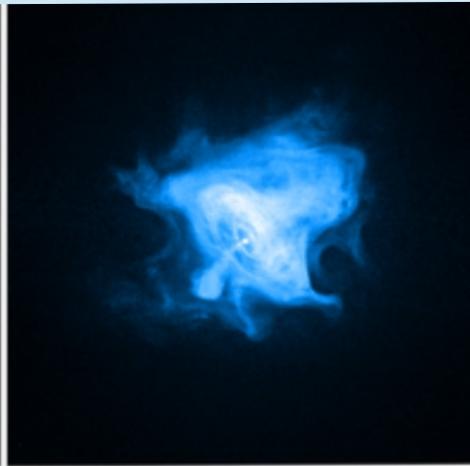
INFRARED



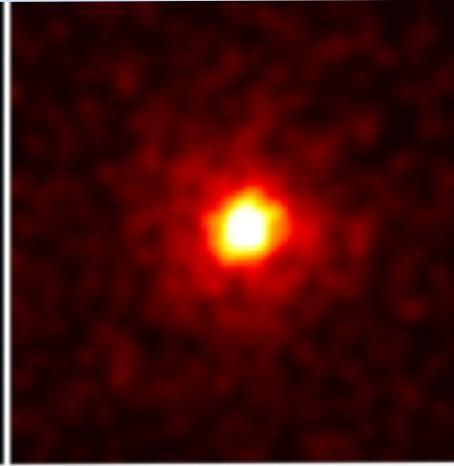
VISIBLE LIGHT



ULTRAVIOLET



X-RAYS



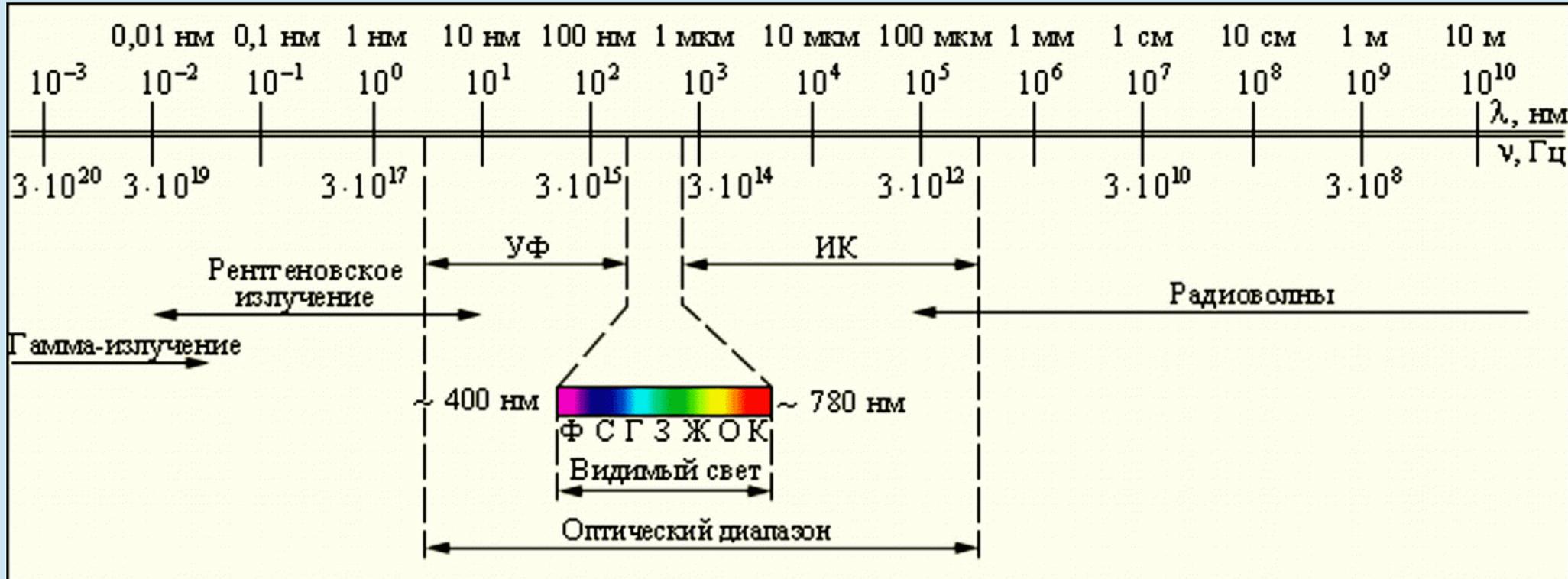
GAMMA RAYS

**ВИДЕО
ДЕМОНСТРАЦИЯ**

Серебрякова Д.В. ФФ НГУ

2. Излучение. Спектры

Шкала электромагнитного излучения.



Задание:
перенесите в свой конспект шкалу электромагнитного излучения по частотам и длинам волн.

2. Излучение. Спектры.

Формулы

Энергия и импульс кванта эл.-магн. излучения (фотона)

$$E = h \nu$$

$$p_\nu = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Частота испускаемого (поглощаемого) фотона при переходе между уровнями m и n в атоме Бора

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Уравнение фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$$

Условие максимума дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = k\lambda$$

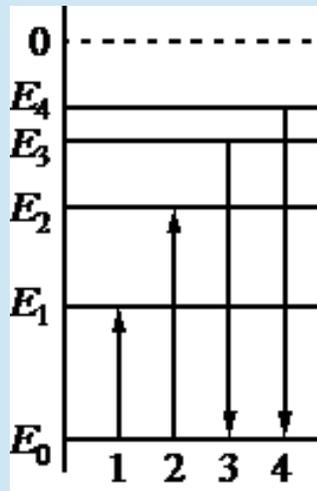
Типовые задачи

Источник света в 100 Вт испускает $5 \cdot 10^{20}$ фотонов за 2 с. Найти среднюю длину волны излучения.

В двух опытах по фотоэффекту металлическая пластинка облучалась светом с длинами волн соответственно $\lambda_1 = 350$ нм и $\lambda_2 = 540$ нм. В этих опытах максимальные скорости фотоэлектронов отличались в $v_1 / v_2 = 2$ раза. Какова работа выхода металла, из которого изготовлена пластинка?

Каков импульс фотона, энергия которого равна 3 эВ?

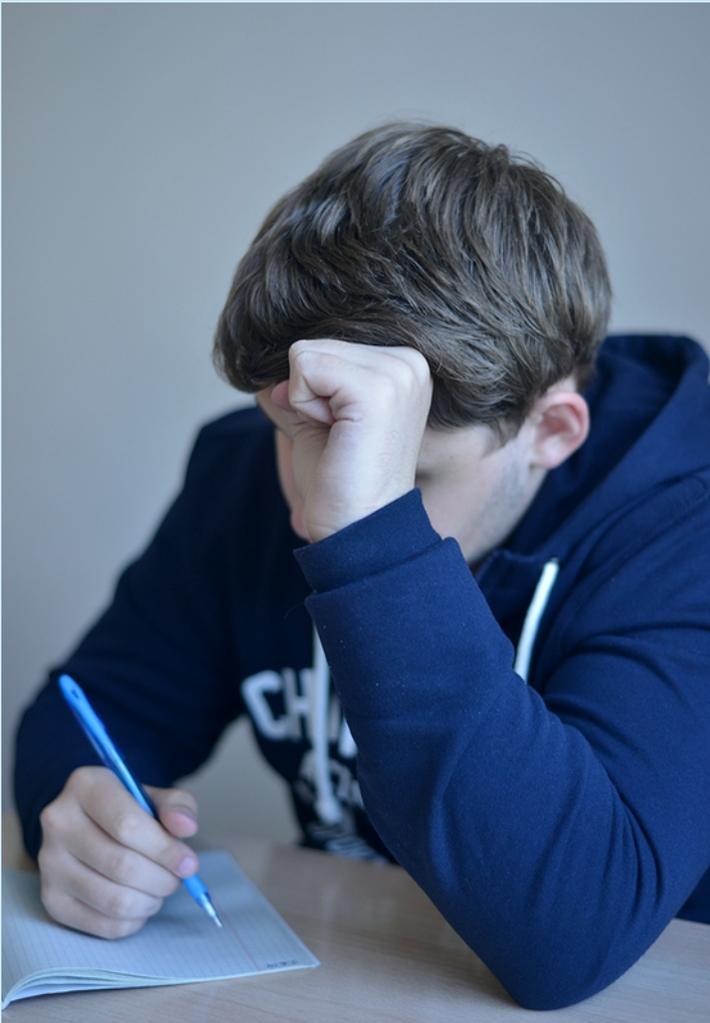
Дифракционная решетка содержит 120 штрихов на 1 мм. Найти длину волны монохроматического света, падающего на решетку, если угол между двумя спектрами первого порядка составляет 8° .



На рисунке изображена упрощённая диаграмма энергетических уровней атома. Нумерованными стрелками отмечены некоторые возможные переходы атома между этими уровнями. Какие из этих четырёх переходов связаны с поглощением света наибольшей длины волны и излучением света наибольшей частоты?

2. Излучение. Спектры.

Домашнее задание:



- 1. Перенесите в свой конспект шкалу электромагнитного излучения по частотам и длинам волн.**
- 2. Для подготовки к контрольной работе прорешайте типовые задачи.**
- 3. Произвести вывод формулы для частоты испускаемого фотона при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую.**
- 4. М1- Обзорный ролик**