

20 Излучения и спектры

20.1 Виды источников. Люминесценция.

Свет излучается атомами и молекулами при переходе из возбужденного состояния с большей энергией, когда электроны находятся на более высоких орбиталях, в основное состояние с меньшей энергией, когда электроны находятся на нижних орбиталях. Соответственно, для того чтобы вещество начало излучать свет для начала необходимо электроны перевести на верхние орбитали, а атомы и молекулы соответственно в возбужденное состояние.

Все источники света можно разделить на две группы по способу поступления энергии, которая идет на возбуждение атомов и молекул.

1. Тепловые источники

С ростом температуры растет средний квадрат скорости движения молекул, увеличивается количество столкновений между ними и раст вероятность перехода атомов и молекул в возбужденное состояние.

Def. Тепловые источники светят за счет разогрева вещества до определенной температуры.

2. Нетепловые, холодного свечения или люминесцентные источники.

Def. Люминесцентными называют источники, свечение которых основано на явлении люминесценции.



тепловые
источники



люминесцентные
источники

Def. Люминесценцией называют спонтанное излучение, избыточное над тепловым, если его длительность значительно превышает период колебания электромагнитной волны соответствующего излучения.

Люминесценция наблюдается в газообразных, жидких и твердых телах.

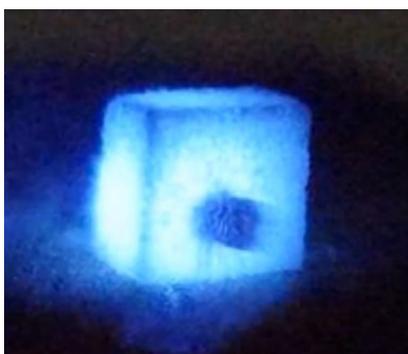


Виды люминесценции

1. Триболюминесценция

Def. Триболюминесценция - люминесценция, возникающая при разрушении кристаллических тел.

К примеру, при раскалывании кристалла сахара получается слабая синеватая вспышка.



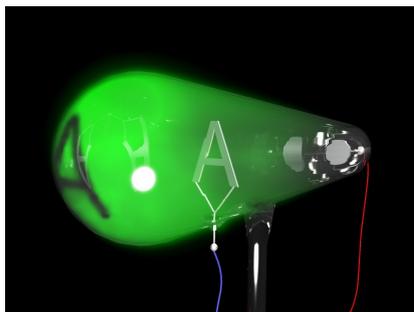
Триболюминесценцию можно наблюдать при вращении лопастей вертолета в пыльном воздухе. Свечение появляется в результате контакта песчинок с лопастями. Это явление называется эффектом Коппа-Этчеллса.



2. Катодолюминесценция

Def. Катодолюминесценция - свечение, вызванное бомбардировкой электронами.

Пример: электронно-лучевые трубки, лампы дневного света.



3. Хемилюминесценция

Def. Хемилюминесценция- свечение возникает в результате химической реакции.

Пример: биосвечение светлячка или медузы, свечение химических реактивов, свечение фосфора при окислении.



При протекании химической реакции образуются молекулы в возбужденном состоянии.

4. Электролюминесценция

Def. Электролюминесценция - свечение возникающее в электрическом поле или под действием электрического тока.

Пример: северное сияние.



5. Фотолюминесценция

Def. Фотолюминесценция - свечение возникающие при облучении вещества светом в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Примером фотолюминесценции может служить свечение часового циферблата и стрелок, окрашенных соответствующим люминофором.

20.2 Законы люминесценции.

Явление люминесценции достаточно интересно. Хотя законы свечения были известны достаточно давно, объяснить их можно только с позиции квантовой физики.

Закон 1

Law →

Каждое вещество светится характерным для него светом.



Закон 2

Law →

Существует послесвечение.

Время жизни атомов в возбужденном состоянии различно. У тех веществ, для которых это время мало, послесвечение продолжается очень недолго. Практически они светятся только, когда есть облучающий свет. По времени послесвечения принято выделять два вида люминесценции.

Def. Флуоресценция - вид люминесценции, при котором свечение прекращается сразу с прекращением освещения.

Пример флуоресценции - лампа дневного света.

Def. Фосфоресценция - вид люминесценции, при котором наблюдается длительное послесвечение.

Примером является вещество, по названию которого было названо излучение, это фосфор.

Закон 3 Закон граничной длины волны

Law → *Для каждого вещества есть такая максимальная длина волны (минимальная частота), при которой наступает явление люминесценции.*

Некоторые вещества начинают люминесцировать при облучении синим светом или ультрафиолетом. Если же их облучать желтым или красным светом, люминесценция не происходит.

Закон 4 Правило Стокса

Law → *Свет люминесценции характеризуется большей длиной волны, чем свет возбуждающий люминесценцию.*

Закон был открыт в 1852 году английским ученым Джорджем Стоксом.

При облучении ультрафиолетом в результате люминесценции возникает свет в видимом диапазоне, т.е. меньшей частоты или большей длины волны. Деньги под ультрафиолетом, защитные элементы, светятся синим и зеленым светом.

Объяснение законов люминесценции с точки зрения волновой оптики невозможно.

Советский физик С.И. Вавилов создал квантовую теорию люминесценции. Более подробно эти законы будут объяснены в разделе квантовая физика.

20.3 Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела.

Далее будем говорить о тепловом излучении.

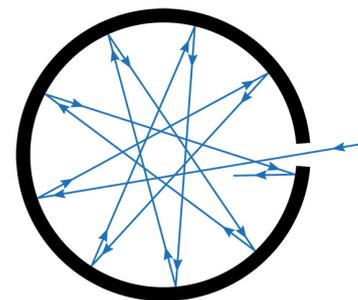
Def. Излучение вызванное тем, что тело нагрето до определенной температуры называется тепловым излучением.

Каждое тело, может не только испускать, но и поглощать тепловое излучение.

Опыты показали, что чем больше энергии тело излучает при некоторой постоянно температуре, тем сильнее оно поглощает излучение той же длины волны.

Def. Тело, которое при любой не разрушающей его температуре полностью поглощает все энергию падающего на него света любой частоты, называется абсолютно черным телом(АЧТ).

Хорошей моделью абсолютно черного тела, является небольшое отверстие в сфере. Свет попадающий в отверстие, многократно отразится, прежде чем выйдет назад. И при каждом отражении будет теряться часть энергии. Поэтому вышедшее назад излучение, будет очень слабо и отверстие снаружи будет казаться совершенно черным.



Еще одним примером АЧТ может являться Солнце. В любом диапазоне длин волн, оно излучает значительно больше, чем поглощает.

Стоит заметить, что АЧТ не всегда является по цвету черным. Если сферу с отверстием нагреть до определенной температуры, то она начнет светиться и цвет ее отверстия перестанет быть черным. Т.е. слово "черное" в АЧТ описывает отражающую способность тела.

АЧТ не существует, это идеализация.



Нагретое тело состоит из огромного количества атомов, каждый из которых излучает электромагнитное излучение своей частоты. Поэтому излучение нагретого тела содержит волны всевозможных частот.

Опыт показывает, что распределение энергии не равномерно в зависимости от длины волны.

Определим такую величину, как энергетическая светимость.

Def. Энергетическая светимость показывает, чему равна мощность излучения единицы поверхности тела по всем направлениям (т.е. внутри телесного угла 4π стерадиан).

Энергетическая светимость является функцией температуры.

$$R(T) = \frac{dE(T)}{dS \cdot dt}$$

Единица измерения энергетической светимости: $[R] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$

Далее определим спектральную плотность энергетической светимости (спектральную светимость, испускательную способность).

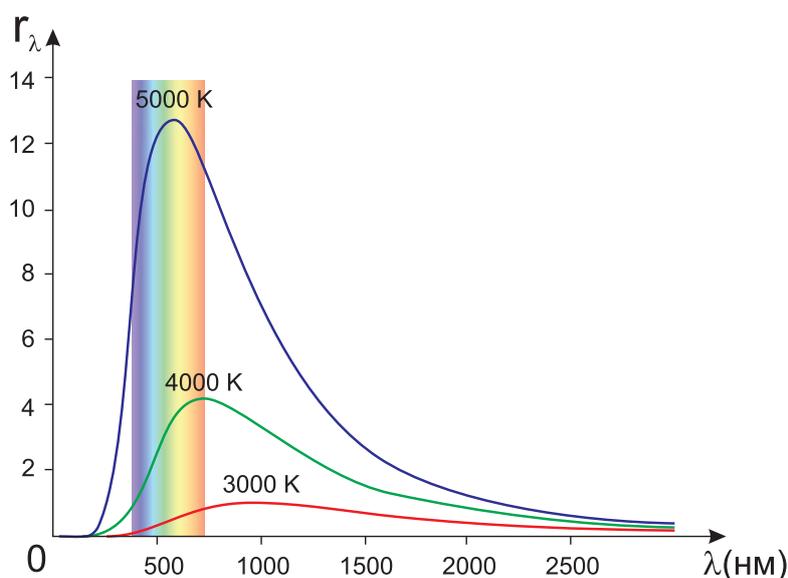
Def. Спектральная плотность энергетической светимости – это мощность излучения с единицы площади поверхности тела во всех направлениях в интервале частот (длин волн) единичной ширины.

Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) является функцией частоты (длины волны) и температуры.

$$r(\lambda, T) = \frac{dR(T)}{d\lambda}$$

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda$$

Для спектральной плотности энергетической светимости опытным путем был получен следующий график:



Основные свойства графика:

1. Площадь под графиком, численно равна мощности излучения в данном диапазоне длин волн
2. При каждой температуре, существует такая длина волны на которую приходится максимум излучения
3. При данной температуре длина волны, меньше некоторой граничной, не излучается
4. При повышении температуры граничная длина волны смещается в область коротких волн
5. При повышении температуры мощность излучения в любом диапазоне длин волн увеличивается

20.3.1 Закон Стефана-Больцмана.

Закон открыт сначала опытным путем Йозефом Стефаном в 1879 году, и через пять лет в 1884 году выведен теоретически Людвигом Больцманом в рамках термодинамики теоретически доказал, что

Law →

Интегральная светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

Из закона Стефана-Больцмана следует, что интегральная светимость АЧТ определяется только его температурой.

$$R = \sigma T^4$$

σ - постоянная Стефана-Больцмана.

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$$

20.3.2 Закон Вина.

Если посмотреть на график излучения абсолютно твердого тела то можно заметить, что с ростом температуры АЧТ длина волны на которую приходится максимум излучения (λ_{max}) смещается в область коротких волн. По этой причине, когда тело нагревают, оно сначала светится темно-красным светом, потом оранжевым и потом желто-белым.

Немецкий физик Вильгельм Вин (лауреат Нобелевской премии по физике в 1911 году «за открытия в области законов, управляющих тепловым излучением») впервые вывел этот закон в 1893 году, путём применения законов термодинамики к электромагнитному излучению. В настоящее время закон смещения Вина может быть получен математически из закона Планка.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

Эту формулу, принято называть законом смещения Вина.

Law →

Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения АЧТ, обратно пропорциональна абсолютной температуре.

b - постоянная Вина.

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Закон Вина и закон Стефана-Больцмана применяют в астрономии, для определения температуры поверхности звезд. Однако это применимо только к звездам, у которых спектр очень близок к спектру черного тела. Также, должны быть доступны спектры, откалиброванные по потоку рассматриваемой звезды. Однако этот метод не дает очень точных результатов, поскольку звезды, как правило, не являются черными телами. Таким образом, измерения температуры звезд существуют только для нескольких гигантов и нескольких десятков ближайших звезд главной последовательности. Их используют, как фундаментальные калибраторы, с которыми астрофизики сравнивают и калибруют другие методы.

Примеры задач

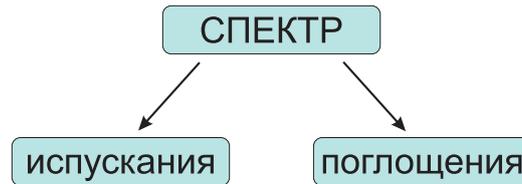
1. Температура плавильной печи повысилась с 600°C до 1200°C . Во сколько раз возросла излучаемая ею энергия?

2. Максимум излучения в спектре звезды сместился с 500 нм до 400 нм . Как изменилась излучаемая ею энергия? Во сколько раз?

20.4 Виды спектров. Спектральный анализ.

Широко применяется исследование веществ с помощью спектров этих веществ. Для большинства веществ в газообразном состоянии спектр является своеобразным паспортом, по нему можно определить химический состав.

Спектры по своему внешнему виду принято подразделять на спектры испускания и поглощения.

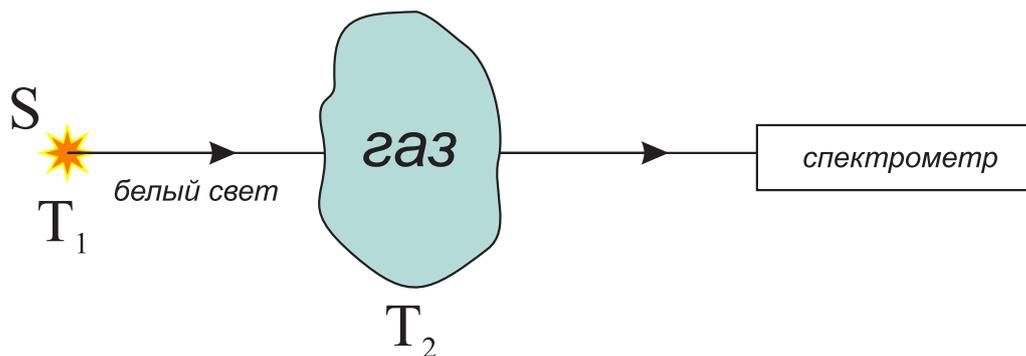


20.4.1 Спектры испускания и поглощения

Def. Спектры, которые дают самосветящиеся тела, называют спектрами испускания.

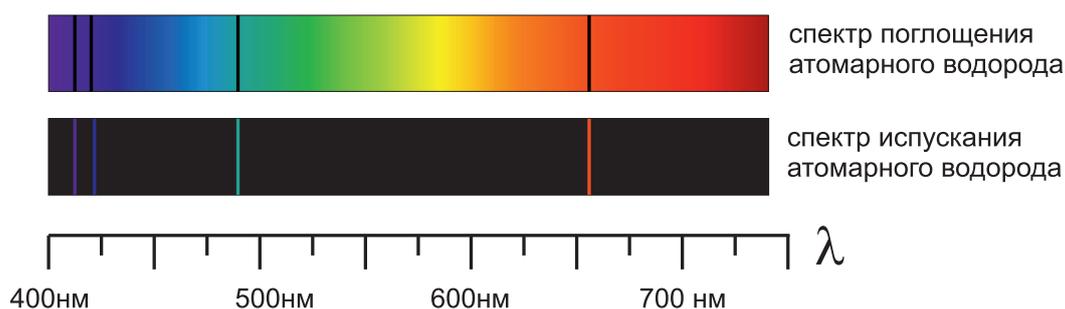
Если свет от источника с температурой T_1 будет проходить сквозь прозрачное вещество в газообразном состоянии, то возможны два варианта. Если температура газа T_2 будет меньше температуры источника, то газ будет поглощать свет тех частот, которые он хорошо излучает. И в сплошном спектре возникнут темные полосы. В этом случае спектр называют спектром поглощения.

Если температура газа T_2 будет выше температуры источника, то свет пройдет через газ без поглощения и даст сплошной спектр, если от источника идет белый свет.



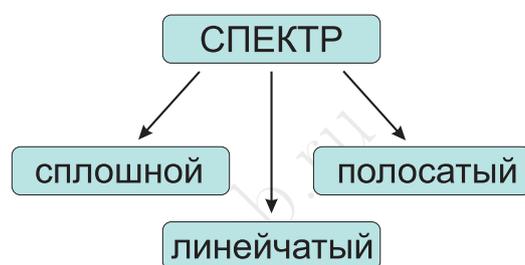
$$T_1 > T_2 \Rightarrow \text{спектр поглощения}$$

$$T_1 < T_2 \Rightarrow \text{спектр испускания}$$



20.4.2 Сплошной, линейчатый, полосатый спектры

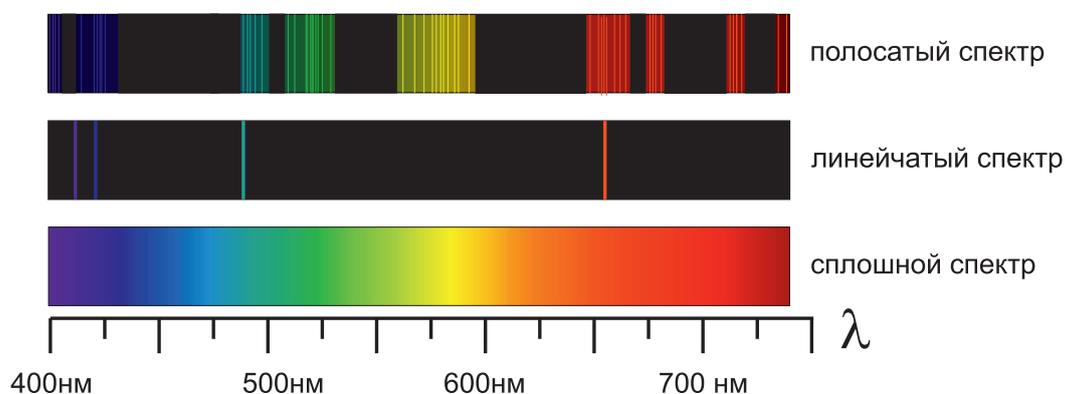
Обычно спектры испускания подразделяют на три вида.



При этом линейчатый спектр бывает не только испускания, но и поглощения.

Опыт показывает, что сплошные (или непрерывные) спектры дают тела, в твердом и жидком состояниях. Также сплошной спектр дают плотные газы при больших давлениях и высокотемпературная плазма. Для получения сплошного спектра, вещество нужно нагреть до большой температуры.

Линейчатый спектр характерен обычно для вещества в газообразном атомарном состоянии. Изолированные, не взаимодействующие друг с другом атомы, будут излучать электромагнитные волны строго определенных частот.



Полосатые спектры характерны для молекулярных газов, в них полосы разделены темными промежутками и представляют из себя плотный набор отдельно расположенных линий.

20.4.3 Спектральный анализ.

Def. Спектральный анализ это метод, позволяющий определить химический состав вещества по его спектру.

На данный момент определены спектры всех атомов из таблицы Менделеева и составлены таблицы спектров. При помощи спектрального анализа были открыты некоторые химические элементы, такие как рубидий и цезий.

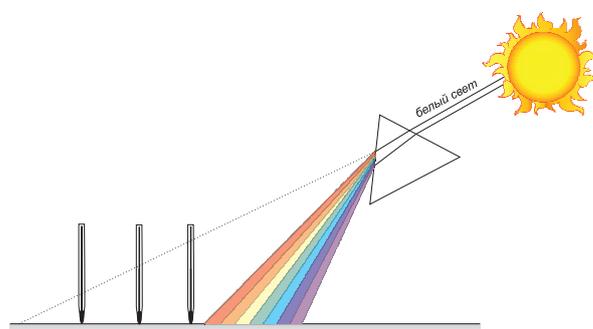
Спектральный анализ не применяют для оценки количественного содержания данного типа атомов, т.к. яркость линии в спектре зависит не только от количества данного типа атомов, но и от способа их возбуждения.

Спектральный анализ активно применяется в астрофизике. Он позволяет определить химический состав звезд, включая Солнце, газовых туманностей и т.п. Спектры звезд с учетом эффектом Доплера, позволяют определить скорость движения объектов относительно Земли.

20.5 Инфракрасное излучение

Уильям Гершель, знаменитый английский астроном, в 1800 году наблюдал Солнце сквозь различно окрашенные темные стекла. "Самым замечательным, - писал он, - было то, что при рассматривании Солнца через определенные стекла я чувствовал тепло, несмотря на то что стекло почти не пропускало света; в то же время в опытах с другими стеклами, пропускавшими много света, тепловое ощущение было ничтожным".

Для объективной оценки тепловых ощущений, Гершель поставил эксперимент, в котором белый свет проходил через призму, разлагаясь на составляющие. При помощи термометра, Гершель измерил температуру во всех частях спектра. Оказалось, что чем ближе к красной области видимого света, тем больше температура. Передвинув термометр за границу красного света, в невидимую глазом область, он обнаружил, что термометр по-прежнему показывает высокое значение температуры.

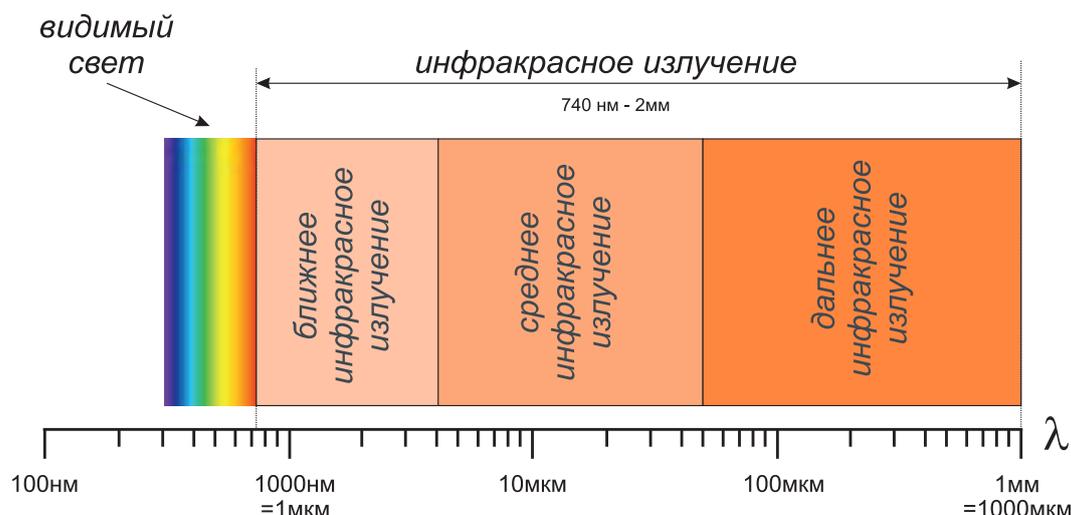


Оказалось, что существуют лучи, не дающие света, но несущие тепло. Гершель назвал их «инфракрасными». Сейчас инфракрасное излучение определяется следующим образом:

Def. Инфракрасное излучение это электромагнитные волны с длиной от 740 нм до 2 мм.

Обычно инфракрасный диапазон делят по своим волновым свойствам и применению на три части

Обозначение	Абревиатура	Длина волны
Ближний инфракрасный диапазон	NIR	740 нм—3 мкм
Средний инфракрасный диапазон	MIR	3—50 мкм
Дальний инфракрасный диапазон	FIR	50 мкм—1 мм

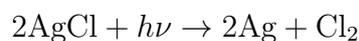


20.5.1 Применение инфракрасного излучения

- Термография
- Инфракрасное самонаведение
- Обогревательные приборы
- Инфракрасная спектроскопия
- Передача данных
- Дистанционное управление

20.6 Ультрафиолетовое излучение.

Ультрафиолетовое излучение было открыто в 1801 году немецким физиком Иоганном Риттером, который обнаружил, что хлорид серебра, который разлагается под действием света, быстрее разлагается под действием невидимого излучения за пределами фиолетовой области спектра.



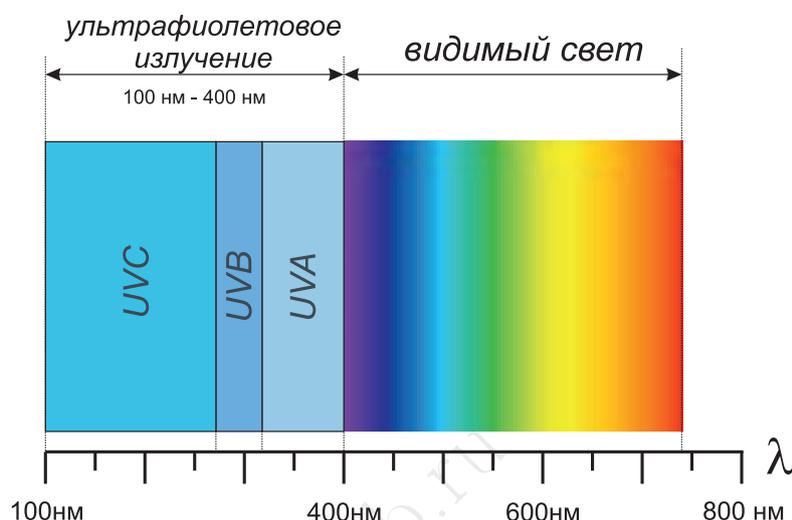
Длительное время инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение называли с химической точки зрения, соответственно - окислительным, осветительным и восстановительным. Пока в середине 19 века не появилась классическая электродинамика и стало понятно, что все это есть электромагнитные волны разных длин.

Сейчас ультрафиолетовое излучение определяется следующим образом:

Def. Ультрафиолетовое излучение это электромагнитные волны с длиной от 100 нм до 400 нм.

Аналогично инфракрасному излучению, ультрафиолетовое также принято делить на три части

Обозначение	Абревиатура	Длина волны
Ультрафиолет А, длинноволновой диапазон	UVA	315 нм - 400 нм
Ультрафиолет В, средневолновой диапазон	UVB	280 нм - 315 нм
Ультрафиолет С, коротковолновой диапазон	UVC	100 нм—280 нм



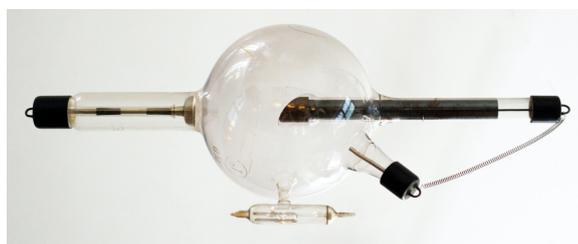
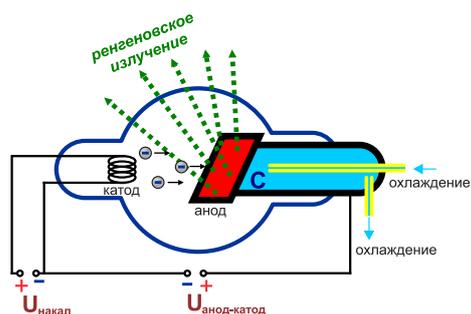
20.6.1 Применение ультрафиолетового излучения

- Люминесцентные лампы излучающие ультрафиолет для подсветки специальных красителей;
- Люминесцентная дефектоскопия;
- Обеззараживание воды, воздуха, упаковки и т.п.;
- Формовка полимерных изделий под действием ультрафиолета;
- В малых дозах УФ активирует выработку витамина D в организме человека;

20.7 Рентгеновское излучение.

20.7.1 История открытия

Вильгельм Конрад Рентген, открыл рентгеновское излучение 8 ноября 1895 г. Открытие было сделано совершенно случайно: вечером, когда уже никого не было в лаборатории, он выключил свет и заметил зеленоватое свечение, флуоресценцию, исходящую от бумажного экрана, покрытого кристаллами платиноцианистого бария.



Рядом в этот момент, находилась катодная трубка Крукса, которая была обернута черной светонепроницаемой бумагой. При выключении напряжения на трубке, флуоресценция экрана прекращалась. При подаче напряжения, флуоресценция начиналась снова. Рентген предположил, что из трубки выходит не видимое человеческим глазом излучение, которое возбуждало кристаллы бария и вызывало тем самым флуоресценцию. Это неизвестное излучение Рентген назвал X-лучами.

28 декабря 1895 года Рентген представил описание, открытых им лучей, председателю Вюрцбургского физико-медицинского общества. Также он представил первый рентгеновский снимок, сделанный 22 декабря. На снимке была запечатлена рука его жены.

Когда она увидела этот снимок, была настолько поражена, что сказала: «Я видела свою смерть».

23 января 1896 года Рентген прочитал лекцию в Вюрцбургском физико-медицинском обществе. После ответа на вопросы о проведенных опытах Рентген предложил председателю общества Альберту фон Келликеру, сделать снимок его руки с помощью новых лучей. Когда Рентген продемонстрировал аудитории готовый снимок, она разразилась оглушительными овациями. Было предложено назвать новое излучение - рентгеновским. Хотя в западной науке данное излучение в итоге вошло под названием Икс-лучи ("X-rays").

В январе 1896 года в России была опубликована брошюра о новом открытии и уже в конце января А.С. Попов изготовил первый в России рентгеновский аппарат, с помощью которого была сделана первая рентгенограмма в России.

К маю 1897 года, Рентген описал все основные свойства нового излучения и опубликовал еще две научных статьи. Самым ценным свойством нового излучения оказалась его способность проникать через непрозрачные мягкие ткани человека. Что нашло широкое применение в медицине. В 1901 г. Вильгельм Рентген был удостоен за своё открытие первой Нобелевской премии в области физики.



20.7.2 Классификация и свойства рентгеновского излучения.

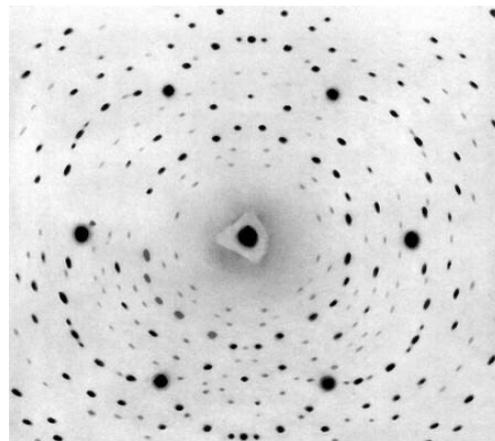
Общепризнанной нижней границы длин волн рентгеновского излучения не существует. Обычно его определяют следующим образом:

Def. Рентгеновское излучение это электромагнитные волны с длиной от 0,005 нм до 100 нм.

Поскольку нижняя граница дана ориентировочно, диапазоны рентгеновского излучения и гамма-излучения перекрываются. В перекрывающейся части, оба излучения абсолютно одинаковы по своим свойствам. При таких коротких длинах волн в основном проявляются корпускулярные свойства этих излучений. Отличие заключается, только в способе появления рентгеновского и гамма излучений. Рентгеновское излучение образуется при бомбардировки электронами атомов, которые сначала переходят в возбужденное состояние, а потом при возврате в основное состояние, с меньшей энергией, происходит излучение в рентгеновском диапазоне. А в случае с гамма излучением, оно возникает при переходе атомного **ядра** из возбужденного состояния в невозбужденное, или при радиоактивном распаде **ядер** атомов.

20.7.3 Применение рентгеновского излучения

- Медицина - рентгенограмма. С помощью рентгенограммы врачи могут судить не только о месте перелома костей, но и об особенностях строения желудка, сердца, лёгких, о расположении язв и опухолей пациента.
- Контроль качества материалов и дефектоскопия (выявление скрытых неоднородностей вещества, трещин, полостей);
- Рентгеновское излучение применяется также для исследования полотен живописи с целью установления их подлинности;
- Дифракция рентгеновского излучения на кристаллах позволила получить их рентгенограмму, на которой можно было наблюдать структуру кристаллов. За открытие дифракции рентгеновских лучей М. Лауэ в 1914 г. был удостоен Нобелевской премии по физике;



Лауэграмма берилла.
Источник: БСЭ.

- Рентгеноструктурный анализ. Дифракционный метод применяется для очень точного определения межатомных расстояний, выявления внутренних напряжений (неоднородностей распределения сил упругости) и дефектов внутри кристалла;