

# Рентгеновские лучи



Рентген Вильгельм Конрад (1845-1923 г.), немецкий физик. Открыл (1895 г.) рентгеновские лучи, исследовал их свойства. Нобелевская премия (1901 г.)

Рентгеновское излучение — электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на энергетической шкале между ультрафиолетовым излучением и гамма - излучением.



- Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном. Рентген умел наблюдать, умел замечать новое там, где многие ученые до него не обнаруживали ничего примечательного. Этот особый дар помог ему сделать замечательное открытие.
- В конце XIX века всеобщее внимание физиков привлек газовый разряд при малом давлении. При этих условиях в газоразрядной трубке создавались потоки очень быстрых электронов. В то время их называли катодными лучами. Природа этих лучей еще не была с достоверностью установлена. Известно было лишь, что эти лучи берут начало на катоде трубки.
- Занявшись исследованием катодных лучей, Рентген скоро заметил, что фотопластинка вблизи разрядной трубки оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завернута в черную бумагу. После этого ему удалось наблюдать еще одно очень поразившее его явление. Бумажный экран, смоченный раствором быстрых электронов) сталкивались со стекляннной стплатино-синеродистого бария, начинал светиться, если им обертывалась разрядная трубка. Причем когда Рентген держал руку между трубкой и экраном, то на экране были видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний всей кисти руки.
- Ученый понял, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное ранее сильно проникающее излучение. Он назвал его X-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи».
- Рентген обнаружил, что новое излучение появлялось в том месте, где



# Рентгеновские лучи





# Свойства рентгеновских лучей

- Лучи, открытые Рентгеном, действовали на фотопластинку, вызывали ионизацию воздуха, но заметным образом не отражались от каких-либо веществ и не испытывали преломления. Электромагнитное поле не оказывало никакого влияния на направление их распространения.
- Сразу же возникло предположение, что рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, которые излучаются при резком торможении электронов. В отличие от световых лучей видимого участка спектра и ультрафиолетовых лучей рентгеновские лучи имеют гораздо меньшую длину волны. Их длина волны тем меньше, чем больше энергия электронов, сталкивающихся с препятствием. Большая проникающая способность рентгеновских лучей и прочие их особенности связывались именно с малой длиной волны. Но эта гипотеза нуждалась в доказательствах, и доказательства были получены спустя 15 лет после смерти Рентгена.

# Основные свойства рентгеновского излучения

- интерференция
- дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решётке
- большая проникающая способность

# Дифракция рентгеновских лучей

- Если рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, то оно должно обнаруживать дифракцию — явление, присущее всем видам волн. Сначала пропускали рентгеновские лучи через очень узкие щели в свинцовых пластинках, но ничего похожего на дифракцию обнаружить не удавалось. Немецкий физик Макс Лауэ предположил, что длина волны рентгеновских лучей слишком мала для того, чтобы можно было обнаружить дифракцию этих волн на искусственно созданных препятствиях. Ведь нельзя сделать щели размером  $10^{-8}$  см, поскольку таков размер самих атомов. А что если рентгеновские лучи имеют примерно такую же длину волны? Тогда остается единственная возможность - использовать кристаллы. Они представляют собой упорядоченные структуры, в которых расстояния между отдельными атомами по порядку величины равны размеру самих атомов, т. е.  $10^{-8}$  см. Кристалл с его периодической структурой и есть то естественное устройство, которое неизбежно должно вызвать заметную дифракцию волн, если длина их близка к размерам атомов.
- И вот узкий пучок рентгеновских лучей был направлен на кристалл, за которым была расположена фотопластинка. Результат полностью согласовался с самыми оптимистическими ожиданиями. Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли регулярно расположенные небольшие пятнышки вокруг центрального пятна (рис. 50). Появление этих пятнышек можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.



# Применение рентгеновских лучей

- Рентгеновские лучи нашли себе много очень важных практических применений.
- В медицине они применяются для постановки правильного диагноза заболевания, а также для лечения раковых заболеваний.
- Весьма обширны применения рентгеновских лучей в научных исследованиях. По дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удается установить порядок расположения атомов в пространстве - структуру кристаллов. Сделать это для неорганических кристаллических веществ оказалось не очень сложно. Но с помощью рентгеноструктурного анализа удается расшифровать строение сложнейших органических соединений, включая белки. В частности, была определена структура молекулы гемоглобина, содержащей десятки тысяч атомов.
- Эти достижения стали возможными благодаря тому, что длина волны рентгеновских лучей очень мала, - именно поэтому удалось «увидеть» молекулярные структуры. Увидеть, конечно, не в буквальном смысле; речь идет о получении дифракционной картины, с помощью которой после немалой затраты труда на ее расшифровку можно восстановить характер пространственного расположения атомов.
- Из других применений рентгеновских лучей отметим рентгеновскую **дефектоскопию** — метод обнаружения раковин в отливках, трещин в рельсах, проверки качества сварных швов и т. д. Рентгеновская дефектоскопия, основана на изменении поглощения рентгеновских лучей в изделии при наличии в нем полости или инородных включений.

# Применение рентгеновского излучения



В медицине



Диагностика

Рентгенотерапия

флюорография

рентгенография





# Вред

Большая проникающая способность и энергия рентгеновских лучей делают их довольно опасными для организма человека. Рентгеновское излучение является одним из наиболее распространенных видов радиации. Во время прохождения через организм человека рентгеновские лучи взаимодействуют с его молекулами и ионизируют их. Говоря проще, рентгеновские лучи способны «разбивать» сложные молекулы и атомы организма человека на заряженные частицы и активные молекулы.

# Тепловое излучение

## Тепловое (температурное) излучение\*

В нагретых телах часть внутренней энергии вещества может превращаться в энергию излучения. При достаточно высокой температуре нагретые тела светятся в видимом и ультрафиолетовом (**УФ**) диапазонах; при более низких температурах – в инфракрасном (**ИК**) диапазоне.



Излучение нагретого металла  
в видимом диапазоне

Поэтому нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне.

Такое излучение называют **тепловым (или температурным)**.

**Тепловое излучение** - самое распространенное в природе и

осуществляется за счет тепловой энергии атомов и молекул вещества, т.е. за счет внутренней энергии тела (системы тел).



# Тепловое излучение

**Тепловое излучение **равновесно**.** Если нагретые (излучающие) тела поместить в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой, то через некоторое время (в результате непрерывного обмена энергией между телами и излучением, заполняющим полость) наступит **равновесие** т.е. **каждое тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать.**

При нарушении равновесия (например, тело будет излучать больше энергии, чем поглощать) температура тела понизится. Следствием этого станет уменьшение количества энергии, излучаемой телом, пока вновь не установится равновесие. Все другие виды излучения – **неравновесны**.



Равновесное тепловое излучение **однородно**, то есть его плотность энергии одинакова во всех точках внутри полости, где оно заключено. Такое излучение **изотропно** и неполяризовано: оно содержит все возможные направления распространения и направления колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ .

Характеристики теплового излучения.

**Излучательность тела** (или лучеиспускательная способность)

$$R_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл}}{d\nu} \text{ (Джс / м}^2\text{)}$$

**(1)** - это энергия  $dW^{изл}$ , излучаемая с единицы площади поверхности тела в единицу времени в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu+d\nu$ .

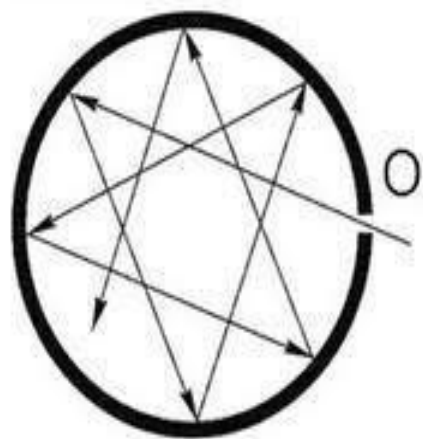
**Излучательность тела**  $R_{\nu, T}$  иногда называют **спектральной плотностью энергетической светимости**, т.к. она является спектральной характеристикой теплового излучения тела: зависит от частоты  $\nu$ , абсолютной температуры  $T$  тела, от его материала, формы и состояния поверхности.

Если тело при любой температуре способно поглощать все падающие на него виды излучения (излучения любой частоты), такое тело называют **абсолютно черным телом**.

Поглощательная способность абсолютно черного тела  $A_{\nu,T} = 1$

### Модель абсолютно черного тела

Идеальная модель абсолютно черного тела (**АЧТ**) - замкнутая полость с небольшим отверстием  $O$ , внутренняя поверхность которой зачернена.



Луч света, попавший внутрь такой полости, испытывает многократные отражения от стенок, в результате чего интенсивность вышедшего излучения оказывается практически равной нулю.

**Абсолютно черное тело — идеализированная модель.** Таких тел в природе нет, но, например, сажа, черный бархат в определенном интервале частот по своим свойствам близки к абсолютно черным телам.

Из опытов установлено, что при диаметре отверстия  $\sim 0,1$  диаметра полости, падающее излучение практически полностью поглощается.



# ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

## Закон Кирхгофа

$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$  — отношение спектральной плотности энергетической светимости  $R_{\nu,T}$  к спектральной поглощательной способности  $A_{\nu,T}$  не

зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты  $\nu$  (или длины волны  $\lambda$ ) и температуры  $T$ .

$r_{\nu,T}$  — универсальная функция Кирхгофа — спектральная плотность энергетической светимости черного тела.

Из закона Кирхгофа можно получить формулу для вычисления **интегральной** (полной) **энергетической светимости тел**:

$$R_{\nu,T} = A_{\nu,T} \cdot r_{\nu,T}, \Rightarrow R_T = \int_0^{\infty} A_{\nu,T} \cdot r_{\nu,T} d\nu.$$



Для энергетической светимости АЧТ с учетом, что его поглощательная способность  $A_{\nu,T} = 1$  имеем

$$R_T^{\rightarrow 0} = \int_0^{\infty} A_{\nu,T}^{\rightarrow 0} \cdot r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Для серого тела ( $A_{\nu,T}^c = A_T^c = \text{const}$  и зависит только от  $T$ ) получаем

$$R_T^{\rightarrow 0} = \int_0^{\infty} A_{\nu,T} \cdot r_{\nu,T} d\nu = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_{\rightarrow 0}^{\rightarrow 0}.$$

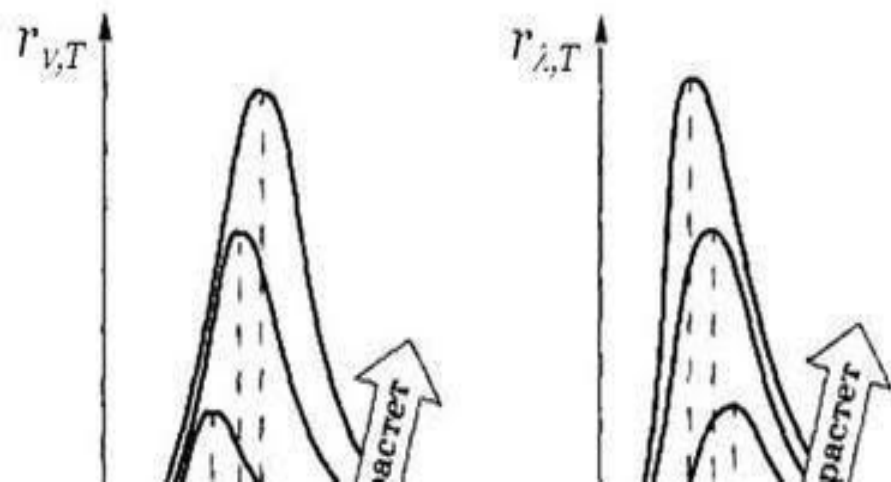
*Примечание.* Закон Кирхгофа описывает только тепловое излучение и может служить критерием для определения природы излучения.

Излучение, не подчиняющееся закону Кирхгофа не является тепловым.

# Законы Стефана - Больцмана и Вина

| Закон                   | Формулировка закона   | Формула                              | Постоянная   |
|-------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Закон Стефана-Больцмана | Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры  | $R_e = \sigma T^4$                   | $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$<br>(постоянная Стефана—Больцмана) |
| Закон смещения Вина     | Длина волны $\lambda_{\text{max}}$ , соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре | $\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$ | $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$<br>(постоянная Вина)                                    |

Экспериментальные кривые зависимости  $r_{\nu,T}$  от частоты  $\nu$  и  $r_{\lambda,T}$  от длины волны  $\lambda$



Экспериментальные кривые подтверждают выводы закона смещения Вина: происходит смещение максимума  $r_{\lambda,T}$  по мере возрастания температуры в область коротких длин волн