

# Лк\_39

Двойное лучепреломление

Поляризация света играет важную роль в процессах преломления и отражения его от границы раздела прозрачных сред. Пусть граница раздела плоская. Плоскостью падения света на нее называется плоскость образованная падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела. Все три луча: падающий, отраженный и преломленный находятся в плоскости падения. Существенным оказывается Положение светового вектора падающего луча по отношению к плоскости падения. При этом падающая волна мысленно раскладывается на две плоско поляризованные волны.



Световой вектор первой волны лежит в плоскости падения и обозначается как  $E_{1\parallel}$ . Световой вектор второй волны перпендикулярен плоскости падения, его обозначают —  $E_{1\perp}$ . Каждая из этих, мысленно выделенных волн, испытывает преломление и отражение на границе раздела независимо от другой волны. Обозначив углы падения, отражения и преломления соответственно как  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , можно выразить световые векторы отраженных преломленных волн через световые векторы падающих волн.

.

$$E_{2\parallel} = E_{1\parallel} \frac{\frac{n_2}{n_1} - \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)}}{\frac{n_2}{n_1} + \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)}} \quad (38.5)$$

$$E_{3\parallel} = E_{1\parallel} \frac{2}{\frac{n_2}{n_1} + \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)}}$$

$$(38.6) \quad E_{2\perp} = E_{1\perp} \frac{\cos(\alpha_1) - \frac{n_2}{n_1} \cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1) + \frac{n_2}{n_1} \cos(\alpha_3)}$$

$$E_{3\perp} = \frac{2E_{1\perp}}{\frac{n_2}{n_1} \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)} + 1}$$

Эти формулы называются формулами Френеля для отражения и преломления света. Из них можно получить формулы для интенсивностей отраженных и преломленных волн. Поскольку  $I = E_m^2 n / 2Z_0$

$$I_{2\parallel} = I_{1\parallel} \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\operatorname{tg}^2(\alpha_1 + \alpha_3)}$$

$$I_{3\parallel} = I_{1\parallel} \left[ 1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\operatorname{tg}^2(\alpha_1 + \alpha_3)} \right] \quad (38.7)$$

$$I_{2\perp} = I_{1\perp} \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_3)}$$

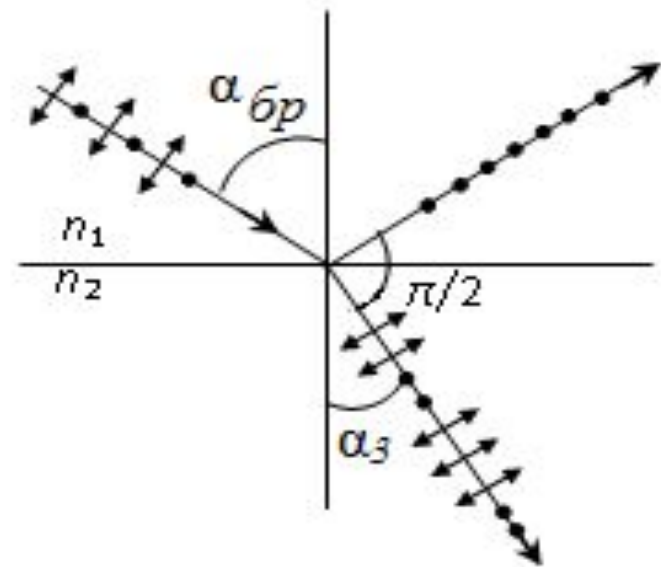
$$I_{3\perp} = I_{1\perp} \left[ 1 - \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_3)} \right] \quad (38.8)$$

**Задача.** Из воздуха на плоскую поверхность стекла под углом Брюстера падает свет с интенсивностью  $I_0$ . Показатель преломления стекла равен 1.6. Определить величину угла падения и интенсивность отраженного света.

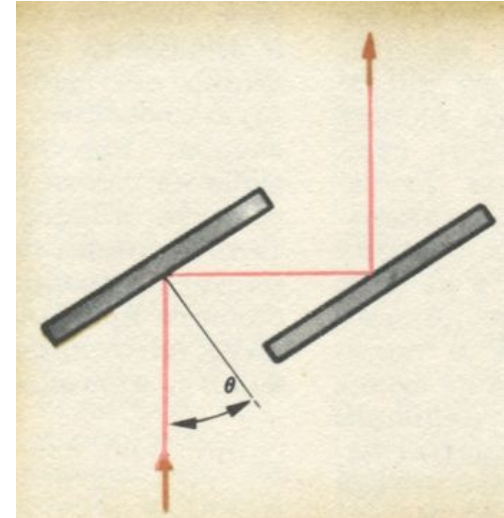
**Решение:** Угол Брюстера найдем из формулы  $\text{tg}(\alpha_{\text{Бр}}) = n$ . Откуда  $\alpha_{\text{Бр}} = \text{arctg}(1.6) = 1.04$  рад. (59.6 град.). Угол преломления определится из условия перпендикулярности отраженного и преломленного лучей:  $\alpha_3 = \pi/2 - \alpha_{\text{Бр}} = 0.53$  рад. Отраженный свет будет полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения:

$$I_{2\perp} = I_{1\perp} \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_3)} = \frac{I_0}{2} \frac{\sin^2(1.04 - 0.53)}{1} = 0.12I_0$$

Из первой формулы (38.7) вытекает интересное свойство процесса отражения: если  $\alpha_1 + \alpha_3 = \pi/2$ , т.е. преломленный и отраженный лучи перпендикулярны друг другу, то  $\text{tg}(\alpha_1 + \alpha_3) = \infty$  и интенсивность отраженного света оказывается равной нулю. Угол падения, соответствующий этому случаю называется углом *Брюстера*. Если на границу раздела диэлектриков под углом Брюстера направить естественный свет, то отраженный луч будет линейно поляризован, так как он не будет содержать компоненту с поляризацией параллельной плоскости падения. Преломленный луч будет частично поляризован.



На этом принципе основано устройство отражательного поляризатора. Обычно это одна или несколько пластин из прозрачного материала. Их устанавливают под углом Брюстера  $\theta$  к падающему свету. Для различных материалов угол



По углу Брюстера легко определяется показатель преломления вещества, так как

$$n = \operatorname{tg}(\alpha_{\text{бр}}) \quad (38.9).$$



# Двойное лучепреломление

Большинство кристаллических прозрачных веществ обладают эффектом двойного лучепреломления.....



Прозрачная  
модификация  
кальцита  
известна под  
названием  
Исландский  
шпат

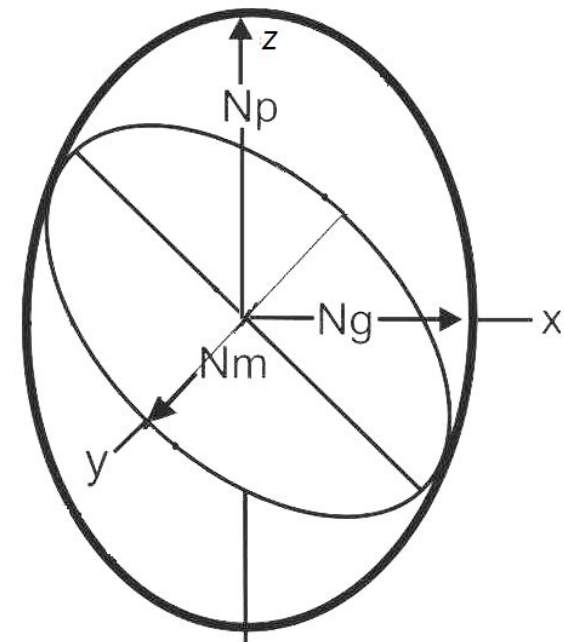
Причина раздвоения светового луча – анизотропия показателя преломления, т.е. зависимость его от направления колебаний светового вектора. Если поворачивать плоскость поляризации, то при некоторых ее положениях эффекта раздвоения луча нет

*Механизм двойного лучепреломления* заключается в анизотропии электрических свойств кристаллических тел. Возможность колебательного движения электронов зависит от направления этого движения

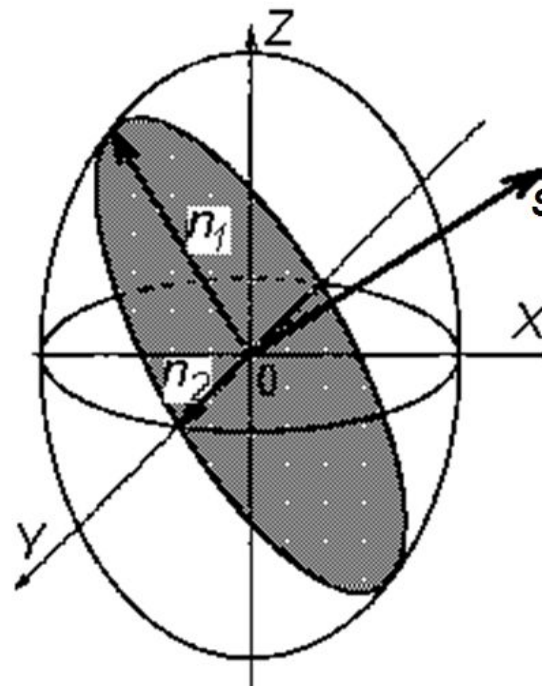
относительно кристаллической решетки вещества.



Следствием этого является зависимость скорости света в веществе и показателя преломления от ориентации светового вектора – вектора напряженности электрического поля. *Не от направления распространения света, а от ориентации светового вектора.* Если для каждого из бесконечного множества ориентаций светового вектора построить в пространстве отрезок, пропорциональный показателю преломления в данном направлении, то концы этих отрезков образуют в пространстве некую поверхность, называемую **оптической индикатрисой**. Ее форма – эллипсоид, у которого все три оси разные:  $N_g$  – наибольший,  $N_m$  – средний,  $N_p$  – наименьший показ.

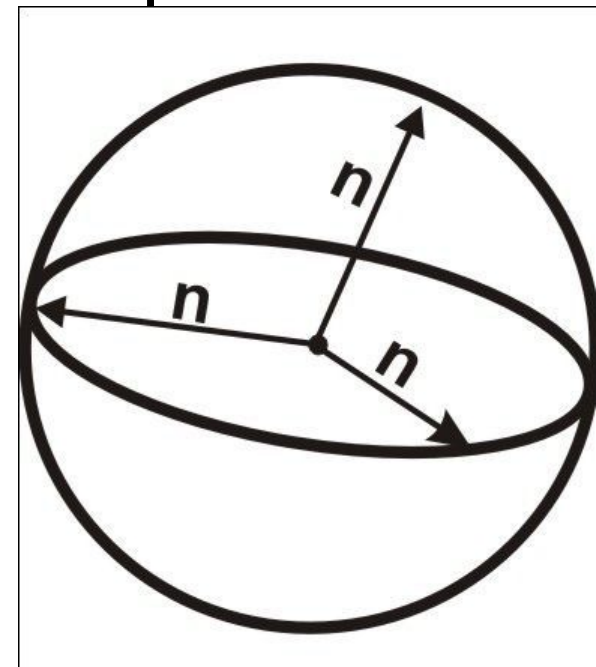


Пусть в этом веществе распространяется световая волна в произвольном направлении (вектор  $S$ ). Световой вектор находится в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Сечение эллипсоида этой плоскостью является эллипсом (закрашен на рисунке). Две оси этого эллипса обозначены  $n_1$  и  $n_2$ . При этом волна сама собой распадается на две волны со световыми векторами вдоль направлений  $n_1$  и  $n_2$ . Каждая из этих волн имеет свою скорость распространения, соответствующую своему показателю преломления -  $n_1$  или  $n_2$ . Т.О. В анизотропном веществе световая волна распадается на две плоско



По виду оптической индикатрисы можно судить о свойствах распространения света в веществе. При этом можно выделить три типа индикатрис и соответствующих им веществ

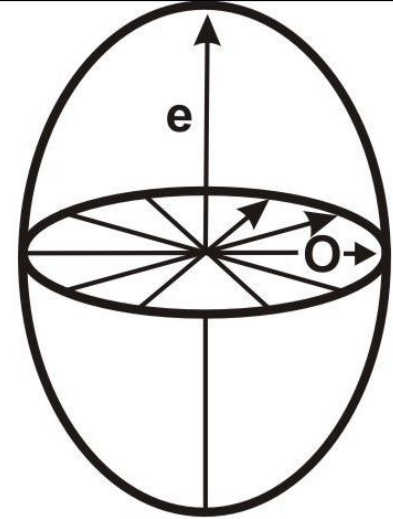
Это означает, что скорость света не зависит от ориентации его светового вектора. Вещество называется оптически изотропным и подчиняется обычным законам распространения и преломления света.



2. Индикатрисой является эллипсоид вращения. Такой эллипсоид можно представить, как сферу, сплюснутую или растянутую вдоль одного из направлений.

1. Индикатриса является сферой.

Направление, вдоль которого «деформирована» индикатриса, называется оптической осью вещества, а кристаллы с таким видом индикатрисы – одноосными. В перпендикулярном направлении сечение эллипсоида вращения – окружность. Если свет идет по веществу в направлении оптической оси, то световой вектор будет находиться в перпендикулярной плоскости, где сечением индикатрисы является окружность. Это означает, что скорость света для данного направления распространения не зависит от ориентации светового вектора, и вещество будет вести себя как изотропное. Для другого направления распространения света (не вдоль оптической оси) сечение



В этом случае скорость света оказывается зависимой от ориентации светового вектора. При этом вещество само по себе разбивает луч на два. Один из них имеет световой вектор,

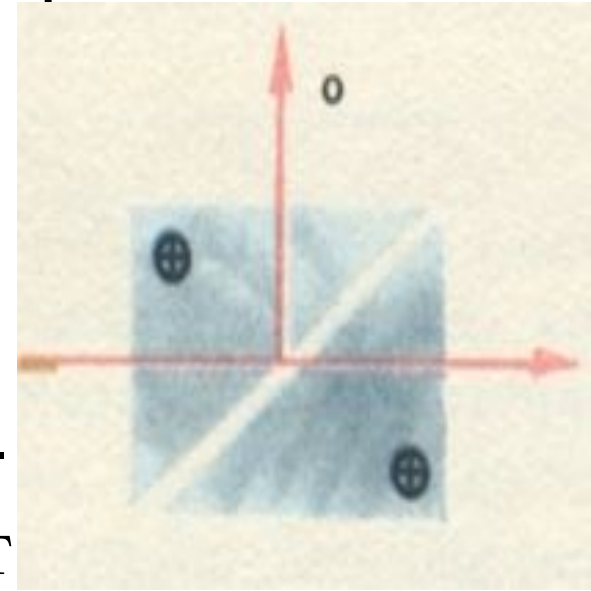


перпендикулярный оптической оси. Его скорость не зависит от ориентации светового вектора и он называется обыкновенным лучом. Другой луч имеет световой вектор параллельный оптической оси. Этот луч называется необыкновенным. Оба луча плоско поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях

3. Индикатрисой является разноосный эллипсоид. Это означает, что при почти любом направлении распространения света в данном веществе показатель преломления будет зависеть от ориентации светового вектора. Можно сказать, что оба луча будут необыкновенными. Однако в разноосном эллипсоиде существуют два сечения, представляющие собой окружности. Если свет идет в направлении, перпендикулярном какому-либо из этих сечений, то показатель преломления не будет зависеть от ориентации светового вектора, и раздвоение луча не происходит. В результате, мы имеем две



**Поляризаторы света** – это устройства, превращающие естественный свет в линейно поляризованный. Если на поверхность анизотропного вещества падает неполяризованный свет, то он расщепится на два пучка с взаимно ортогональными линейными поляризациями. Выделяя один из этих пучков, мы получим линейно поляризованный свет. Поляризатор «призма Николя» Склеивается из двух призм прозрачным клеем, у которого коэффициент преломления находится в интервале между величинами коэффициентов преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей материала призм. Обыкновенный луч отражется на границе раздела.



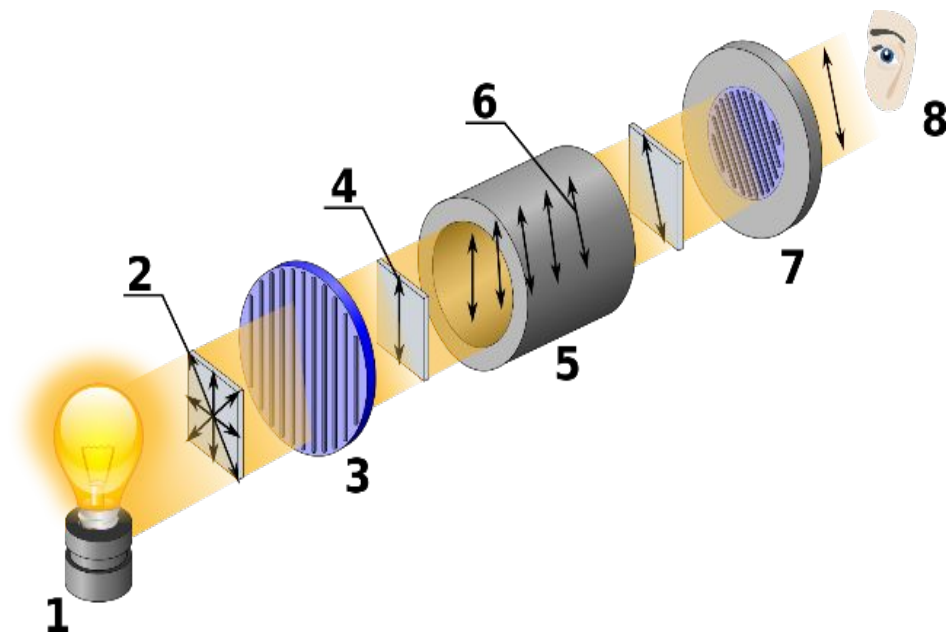
Помимо призмы Николя используются другие призмённые поляризаторы. Более дешёвыми являются поляризаторы из дихроичных материалов - поляроиды. **Дихроизм – это различие коэффициентов поглощения обыкновенного и необыкновенного лучей.** У турмалина эти коэффициенты отличаются в сотни раз. Пластика толщиной 1 мм поглощает обыкновенный луч почти полностью, а необыкновенный ослабляется не очень сильно.

*Искусственные плёночные поляроиды* делают из органической плёнки с добавлением йода. При растягивании плёнки длинные органические молекулы поворачиваются вдоль направления растяжения и плёнка становится оптически анизотропной, а йод придаёт ей дихроичные свойства.

***Оптическая активность*** - это способность среды (кристаллов, растворов, паров вещества) вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через неё поляризованного света. Оптически активные вещества подразделяются на 2 типа: относящиеся к 1-му из них оптически активны в любом агрегатном состоянии (сахара, камфара, винная кислота), ко 2-му — активны только в кристаллической фазе (кварц, киноварь). У веществ 1-го типа оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул, 2-го типа — специфической ориентацией молекул (ионов) в элементарных ячейках кристалла (асимметрией поля сил, связывающих частицы в кристаллической решётке)

**Поляриметрия** — методы физических исследований, основаны на измерении степени поляризации света и угла поворота плоскости поляризации света при прохождении его через оптически активные вещества. Угол поворота в растворах зависит от их концентрации; поэтому поляриметрия широко применяется для измерения концентрации оптически активных веществ. **Схема поляриметра:** 1- источник света; 3 – поляризатор; 5 – исследуемое вещество; 7 – анализатор.

Поляриметры, предназначенные для измерения концентрации сахара, называются сахариметрами.



**Жидкие кристаллы** - вещества, которые обладают одновременно свойствами как жидкостей (текучесть), так и кристаллов (анизотропия). По структуре ЖК представляют собой вязкие жидкости, состоящие из молекул вытянутой формы, упорядоченных во всем объёме этой жидкости. Важным свойством ЖК является их способность изменять ориентацию молекул под действием электрических полей. Это открывает широкие возможности для промышленного применения ЖК. В частности, воздействуя на ЖК пленку электрическим полем можно очень быстро изменять ее прозрачность для поляризованного света. Эта возможность используется в ЖК дисплеях.

## Квантовая физика

В конце XIX – начале XX в. Был открыт и изучен экспериментально ряд явлений, таких, как ***тепловое излучение***, **фотоэффект**, **эффект Комптона** и др. Эти явления нельзя было истолковать в рамках электродинамики Максвелла. В физике создалась ситуация, которую называли кризисом ***классической физики***.

Разрешение этой проблемы привело к возникновению квантовой теории. Создание современной квантовой теории началось с изучения закономерностей ***теплого излучения***.

# Тепловое излучение

Из повседневного опыта известно, что тела, нагретые до высоких температур светятся.



Излучение тел, обусловленное нагреванием, называется *тепловым*. Естественно предположить, что тела излучают ЭМ волны при любой температуре. Сильный нагрев только позволяет сделать это излучение

Тепловое излучение совершается за счет энергии теплового движения заряженных частиц, которые входят в состав атомов и молекул вещества (т.е. за счет внутренней энергии тела). Следовательно, излучение сопровождается понижением температуры.

Одновременно с излучением ЭМ волн тела поглощают падающее на них извне ЭМ излучение. При этом их температура повышается. Только таким способом может поддерживаться тепловое равновесие тел между собой и с окружающей средой. Интенсивность теплового излучения можно характеризовать его мощностью. *Мощность излучения с единицы поверхности излучающего тела по всем направлениям при данной температуре  $T$  называется интегральной энергетической светимостью тела  $R(T)$ .*

Прилагательное «интегральной» обусловлено тем.



# ***Спектральная излучательная способность***

Интенсивность теплового излучения в разных диапазонах частот (длин волн) разная. Поэтому вводят понятие ***спектральная излучательная способность тела ( $r$ )*** – это мощность излучения с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот (длин волн). Связь между энергетической светимостью и излучательной способностью очевидна:

$\infty$   
r

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется **спектральной поглощательной способностью**, определяемой как отношение потока поглощенной телом энергии к потоку падающей лучистой энергии.

$$a(\omega, T) = \frac{\Phi_{\text{погл}}(\omega)}{\Phi_{\text{пад}}(\omega)} \quad (39.2)$$

По определению  $a(\omega) \leq 1$ . Тело, у которого  $a=1$ , т.е. полностью поглощающее упавшее на него излучение всех частот, называется **абсолютно черным телом (АЧТ)**. Если поглощательная способность не зависит от частоты, но меньше 1 ( $a < 1$ ), то тело называется абсолютно серым. Между излучательной и поглощательной способностями должна быть связь. Эта связь определяется Законом Кирхгофа.

# Закон Кирхгофа для теплового излучения

## ИЗЛУЧЕНИЯ

*Отношение испускательной и поглощательной способности тела не зависит от его природы и выражается универсальной функцией частоты и температуры.* Действительно, для равновесного состояния тела с окружающей средой (другими телами) необходимо, чтобы при равновесной температуре тело поглощало и излучало строго одинаковую мощность в любом интервале частот. Отсюда следует

$$\frac{r(\omega, T)}{a(\omega, T)} = f(\omega, T) \quad (39.3)$$

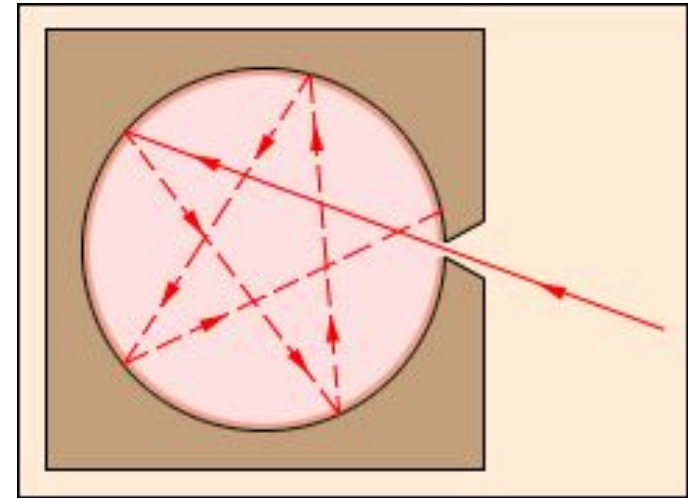
Легко устанавливается и характер универсальной функции  $f(\omega, T)$ . Если тело является абсолютно черным, то  $a(\omega, T) = 1$ , и формула (10.3) даст:

$$r_{\text{ачт}}(\omega, T) = f(\omega, T) \quad (39.4)$$

Т.е. универсальная функция – это испускательная способность абсолютно черного тела.

# Абсолютно черное тело (АЧТ)

Абсолютно черных тел в природе не существует. Сажа, черный бархат все же не являются абсолютно черными. Хорошей моделью АЧТ является небольшое отверстие в замкнутой полости, показанное на рисунке. Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощен стенками, и отверстие снаружи будет казаться совершенно черным. Именно таким образом моделировалось абсолютно черное тело во всех экспериментах по исследованию теплового



В конце 19 века экспериментально (Стефан) и теоретически (Больцман) получили формулу, выражающую интегральную энергетическую светимость абсолютно черного тела через его абсолютную температуру:

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (39.5)$$

Этот закон получил название закона Стефана–Больцмана. Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет

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

Как мы знаем

$$R(T) = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega$$

**Пятиминутка 1:** Абсолютно черный радиатор должен рассеять мощность 15 Вт. Температура окружающей среды  $27^{\circ}\text{C}$ , допустимая температура радиатора  $60^{\circ}\text{C}$ . Пренебрегая другими видами теплоотдачи кроме излучения, определить необходимую площадь радиатора. (Отв.  $S=0.063 \text{ м}^2$ )

**Пятиминутка 2:** На какую длину волны приходится максимум излучательной способности солнца, у которого температура поверхности равна 6000 К, и лампочки накаливания с температурой нити 2800 К.