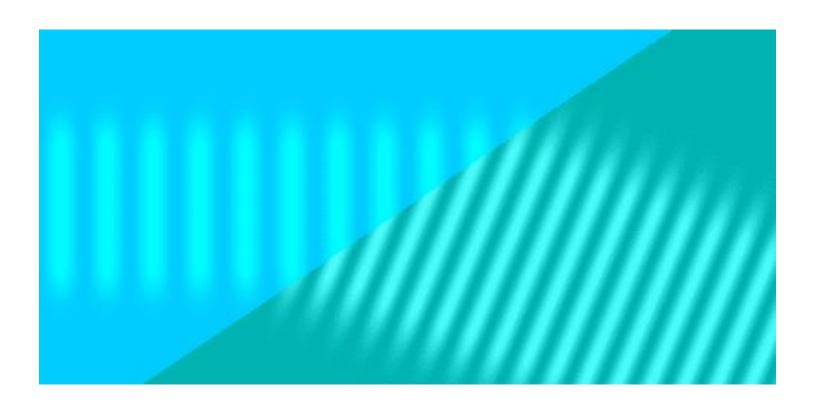
# Лекция 2. Показатель преломления Коэффициент преломления Index of refraction Index



#### Законы геометрической оптики

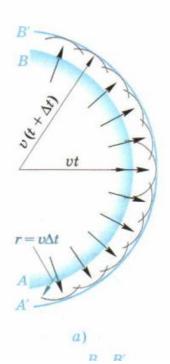
В основе геометрической оптики лежат несколько простых эмпирических законов:

- •Закон прямолинейного распространения света
- •Закон независимого распространения лучей
- •Закон отражения света
- •Закон преломления света (Закон Снеллиуса, или Снелла)
- •Закон обратимости светового луча.

#### План лекции

- Принцип Гюйгенса
- Дисперсия света. Скорость света в среде.
- Объяснение явления дисперсии
- Преломление на границе двух сред
- Коэффициенты преломления материалов
- Прохождение света через призму. Призма и принцип Ферма. Оптическая длина пути
- Прохождение света через плоскопараллельную пластинку
- Полное внутреннее отражение

#### Принцип Гюйгенса



Передний фронт волны — совокупность наиболее отдалённых от источника точек, до которых одновременно дошёл процесс распространения волны.

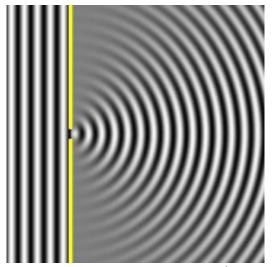
Фронт механической волны — совокупность точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

В 1678 г. голландский учёный *Христиан Гюйгенс* сформулировал этот результат следующим образом.

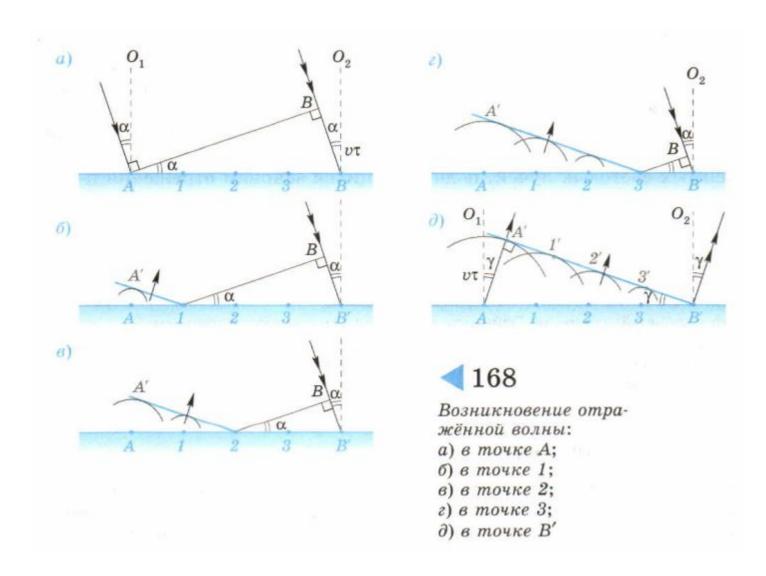
#### Принцип Гюйгенса

Каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде.

Принцип Гюйгенса хорошо объясняет явления волновой оптики



# Объяснение принципом Гюйгенса свойства отражения света (угол падения равен углу отражения)



#### Принцип Гюйгенса и преломление света

Абсолютный показатель преломления среды. Максимальной скоростью распространения взаимодействия является скорость света в вакууме. В любой среде свет распространяется с меньшей скоростью. Физической величиной, характеризующей уменьшение скорости распространения света в среде по сравнению со скоростью света в вакууме, является абсолютный показатель преломления среды.

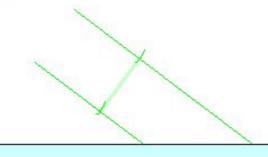
Абсолютный показатель преломления среды — физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}.\tag{163}$$

Абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость распространения света в данной среде меньше, чем скорость света в вакууме:

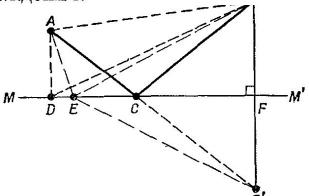
$$v = \frac{c}{n} \,. \tag{164}$$

Принцип Гюйгенса, преломление света и отражение света

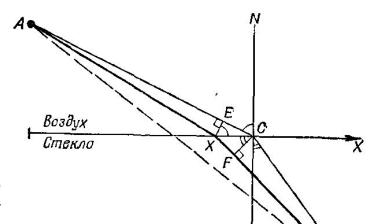


#### Принцип наименьшего времени Ферма

Впервые общий принцип, наглядно объясняющий закон поведения света, был предложен Ферма примерно в 1650 г. и получил название принципа наименьшего времени, или принципа Ферма. Вот его идея: свет выбирает из всех возможных путей, соединяющих две точки, тот путь, который требует наименьшего времени для его прохождения.



Фиг. 26.3. Иллюстрация принципа наименьшего времени.



 $\sin \theta_i = n \sin \theta_r.$ 



Фиг. 26.4. Иллюстрация принципа Ферма для случая преломления.

#### Оптическая длина пути. Принцип Ферма

- В основу геометрической оптики может быть положен принцип Ферма: «Свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время».
   (Это формулировка самого Ферма)
  - Для прохождения участка пути *ds* свету требуется время dt=ds/v, где v скорость света в данной точке среды. Следовательно, время, необходимое свету для прохождения пути от точки1 до точки 2, равно

$$au = \int\limits_{1}^{2} rac{ds}{\upsilon} = \int\limits_{1}^{2} rac{n}{c} ds = rac{1}{c} \int\limits_{1}^{2} n ds$$
 Величина, имеющая размерность длины  $L = \int\limits_{1}^{2} n ds$ 

называется **оптической длиной пути**. В оптически однородной среде L=ns

 Так как t=L/c, то можно принцип Ферма сформулировать следующим образом: «Свет распространяется по такому пути, оптическая длина которого экстремальна (т.е. минимальна, максимальна, или стационарна- одинакова для всех путей)».

#### § 4. Применения принципа Ферма

Рассмотрим теперь некоторые интересные следствия принципа наименьшего времени. Первое из них — принцип обратимости. Мы уже нашли путь из A в B, требующий наименьшего времени; пойдем теперь в обратном направлении (считая, что скорость света не зависит от направления). Наименьшему времени отвечает та же траектория, и, следовательно, если свет распространяется по некоторому пути в одном направлении, он будет двигаться по этому пути и в обратном направлении.

 $\Phi$  и г. 26.6. Луч света, выходящий из прозрачной пластины, параллелен падающему лучу.

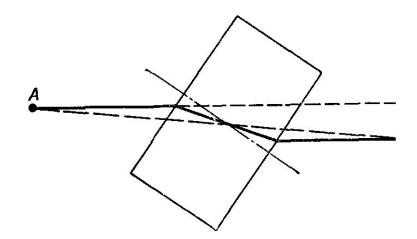
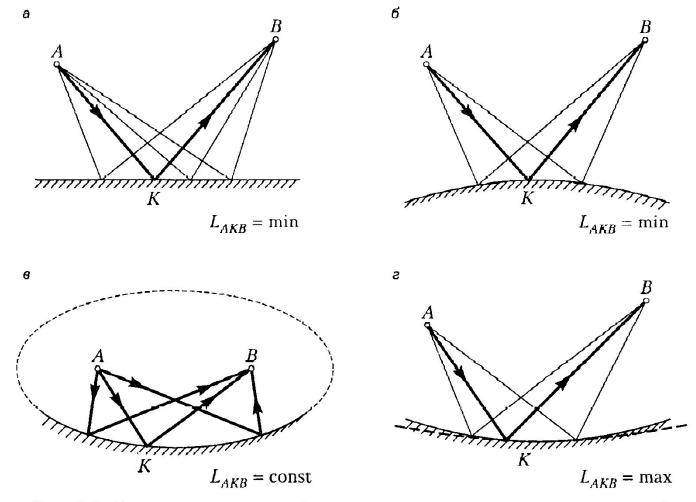
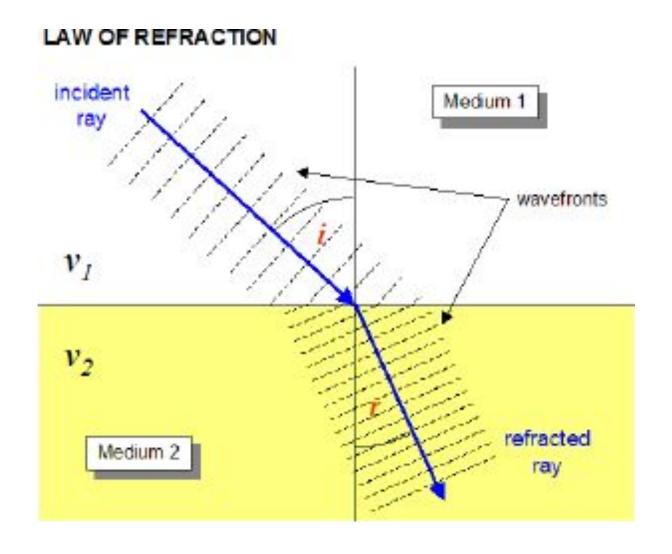


Иллюстрация применения принципа Ферма к отражению света от поверхностей различной кривизны показана на рис. 2.9. Нетрудно доказать, что для плоской (рис. 2.9, a) и выпуклой (рис. 2.9, b) поверхностей из всех возможных траекторий AKB, соединяющих точки A и B, таких что точка K лежит на зеркале наименьшую длину имеет та, для когорой угол падения равен углу отражения.



**Рис. 2.9.** Иллюстрация принципа Ферма отражением от зеркальных поверхностей различной формы

#### Скорость света и угол преломления



# Причина возникновения показателя преломления

#### § 56. Дисперсия света

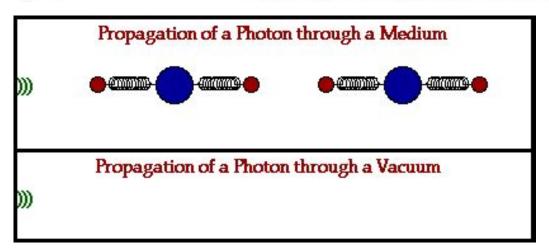
**Призма Ньютона.** В вакууме электромагнитные волны различных частот (длин волн) распространяются с одной и той же скоростью  $c=3\cdot 10^8\,\mathrm{m/c}$ . Однако в среде скорости распространения монохроматических волн разных частот отличаются друг от друга.

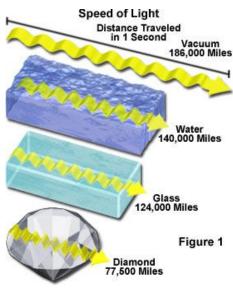
Монохроматическая волна — электромагнитная волна определённой постоянной частоты.

Монохроматические волны разных частот распространяются в одной среде с различными скоростями.

Дисперсия света — зависимость скорости света в веществе от частоты волны.

Различным скоростям распространения волн соответствуют разные абсолютные показатели преломления среды (n = c/v). Поэтому можно утверждать, что дисперсия света — зависимость абсолютного показателя преломления от частоты световой волны. Подобная зависимость





Длина волны в среде меньше, чем в вакууме Частота э/м волны в среде и в вакууме одинакова.

# Дисперсия

**Дисперсия** (от <u>лат.</u> *dispersio* «рассеяние») в зависимости от контекста может означать:

<u>Дисперсия волн</u> — в физике зависимость фазовой скорости волны от её частоты, различают:

Дисперсия света

Дисперсия звука

Закон дисперсии — в физике закон, выражающий зависимость фазовой скорости волны от её частоты.

<u>Дисперсия случайной величины</u> — одна из усреднённых характеристик случайной величины.

<u>Дисперсия (химия)</u> — образования из двух или более фаз (тел), которые совершенно или практически не смешиваются и не реагируют друг с другом химически.

<u>Дисперсия (биология)</u> — термин, обозначающий разнообразие признаков в популяции.

Дисперсия (материаловедение)

Дисперсия второй вязкости

#### Дисперсия света

#### Дисперсия света

(разложение <u>света</u>) — это совокупность явлений, обусловленных зависимостью абсолютного <u>показателя преломления</u> вещества от <u>частоты</u> (или <u>длины волны</u>) света (частотная дисперсия),

или, то же самое, зависимостью фазовой скорости света в веществе от частоты (или длины волны).



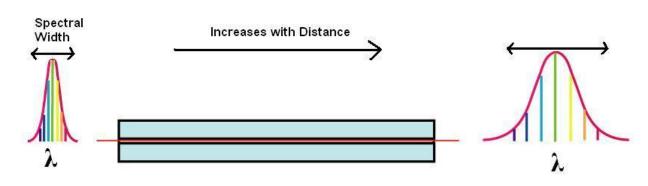


Figure 2: Chromatic Dispersion

## Преломление света в призме.



неправильно



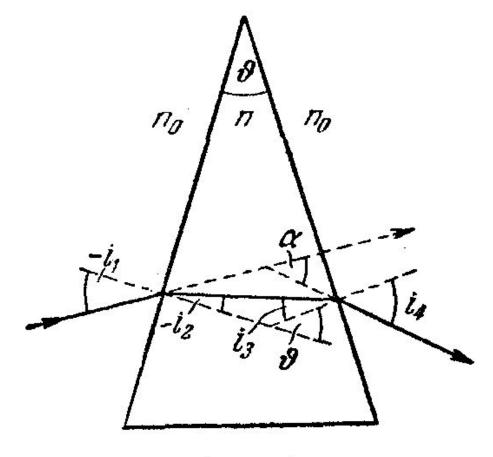


Рис. 5.

#### Преломление света на границе двух однородных сред

Закон был установлен голландским математиком Виллебрордом Снеллом и читается так: пусть  $\theta_i$  есть угол в воздухе и  $\theta_r$  есть угол в воде, тогда синус  $\theta_i$  равен синусу  $\theta_r$ , умноженному на некоторую константу

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r. \tag{26.2}$$

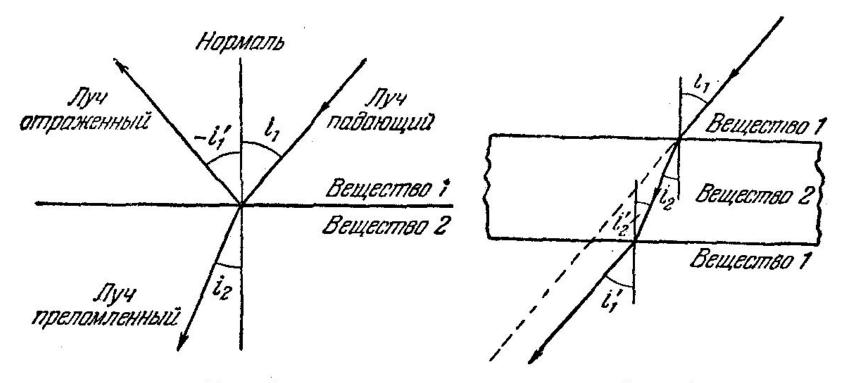


Рис. 1.

Рис. 2.

## Путь света через плоскопараллельную

#### пластинку

 $\sin \theta = n \sin r$   $x = t \sin r$   $x + y = t \sin \theta$ 

$$\Rightarrow \qquad t \frac{\sin \theta}{n} + y = t \sin \theta$$

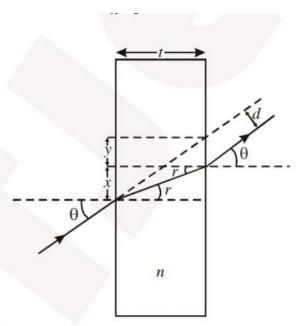
and  $\frac{d}{y} = \cos \theta$ 

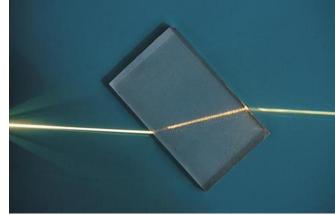
$$\sin\theta \simeq \theta$$
$$\cos\theta \simeq \bot$$

$$\Rightarrow \frac{t\theta}{n} + d = t\theta$$

or 
$$d = t\theta \left( \bot - \frac{1}{n} \right)$$

$$=\frac{t\Theta(n-1)}{n}$$





# Две пластинки с разными коэффициентами преломления

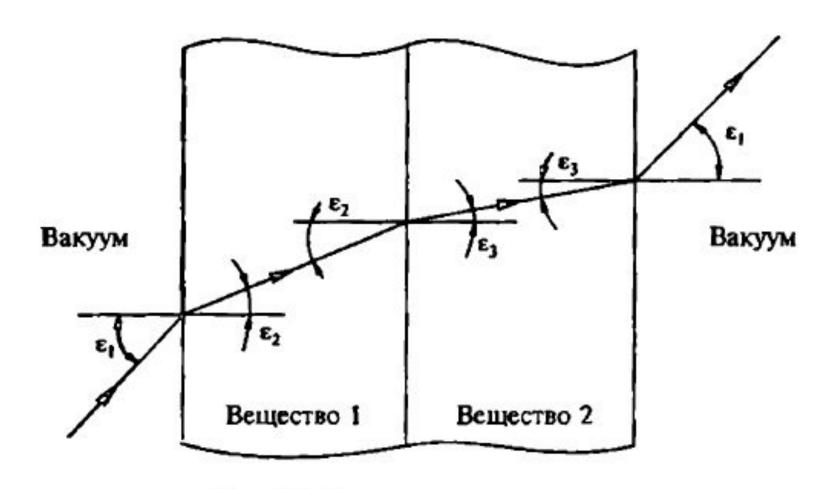


Рис. 1.9. Две пластинки в вакууме

#### Index of refraction

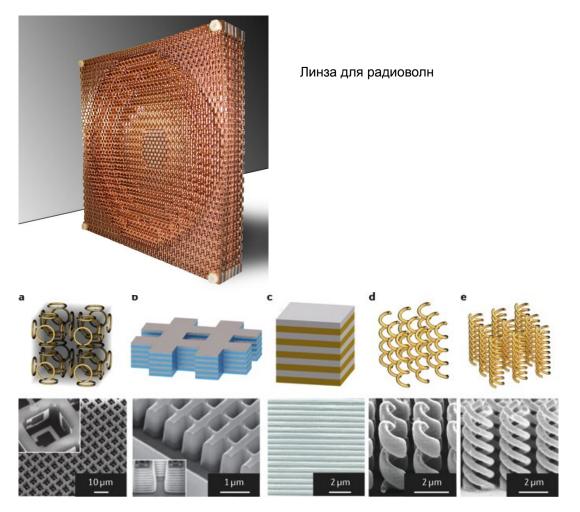
XVII. Коэффициенты (показатели) преломления

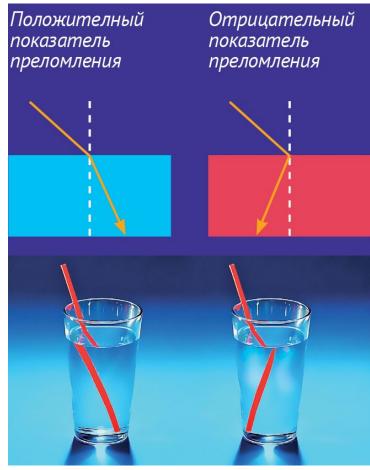
| Вещество   | n  | Вещество   | n   |
|--|--|--|---|
| Алмаз<br>Анилин<br>Ацетон<br>Бензол<br>Вода<br>Воздух<br>Глицерин<br>Каменная соль<br>Кварц<br>Лед | 2,42<br>1,59<br>1,36<br>1,50<br>1,33<br>1,0003<br>1,47<br>1,54<br>1,54<br>1,31 | Сахар Сероуглерод Сильвин Скипидар Спирт метиловый Спирт этиловый Стекло (легкий крон) Стекло (флинт) Четыреххлористый углерод | 1,56<br>1,63<br>1,49<br>1,51<br>1,33<br>1,36<br>1,50<br>1,6÷1,8 |

Показатель преломления веществ лежит в интервале от 1 до 2.42. Показатель преломления вакуума равен 1

#### Метаматериалы

Отрицательного показателя преломления или показателя преломления меньше единицы в обычных материалах не бывает. Разрабатываются метаматериалы, но это оптика будущего

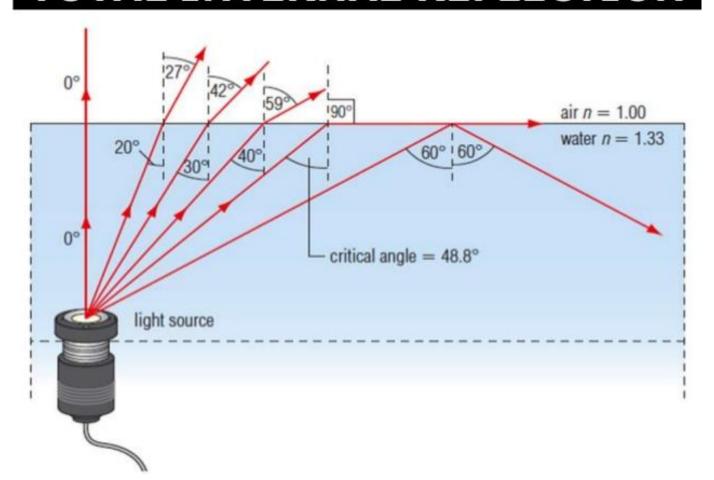




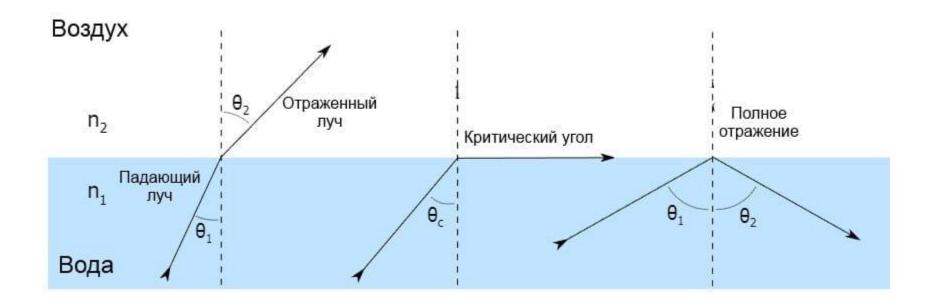
#### Полное внутреннее отражение

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \arcsin{(n_2/n_1)}$$
.

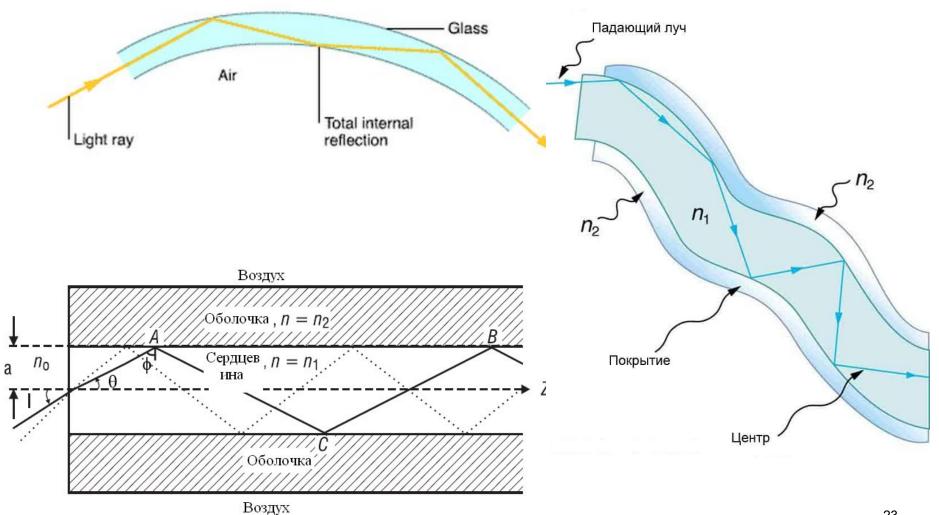
#### **TOTAL INTERNAL REFLECTION**



# Предельный угол полного внутреннего отражения



## Оптоволокно: принцип полного внутреннего отражения



#### Призмы

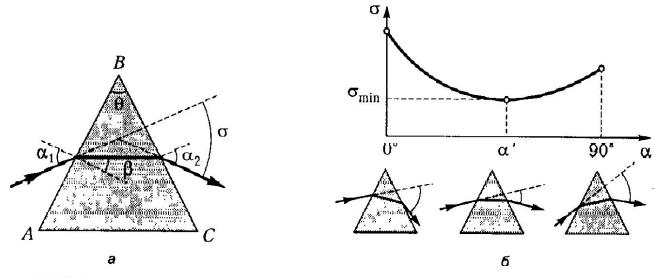


Рис. 2.18. Ход луча через призму (а) и зависимость угла отклонения от угла падения (б)

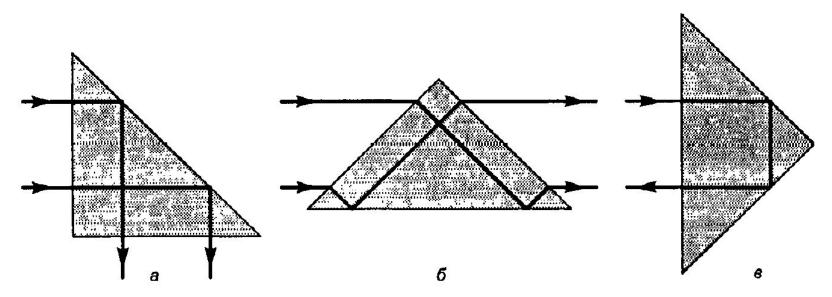
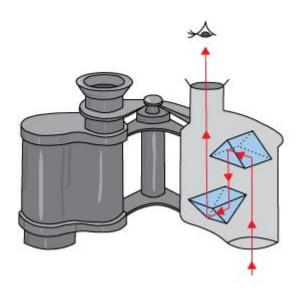
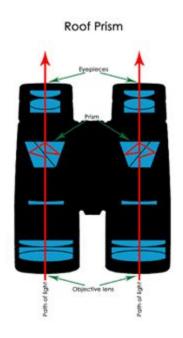
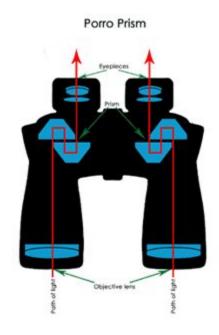


Рис. 2.20. Поворотная (а), оборачивающая (б) и отражающая (в) призмы ПВО

# Использование призм в качестве зеркал

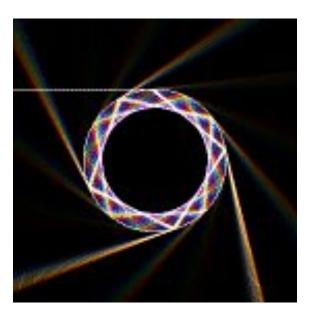


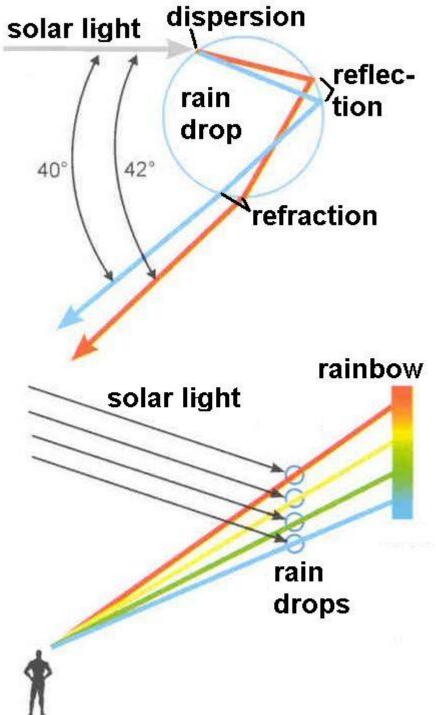




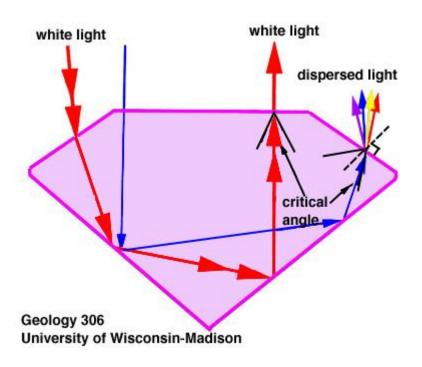
## Радуга

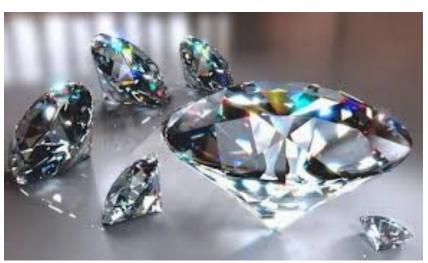


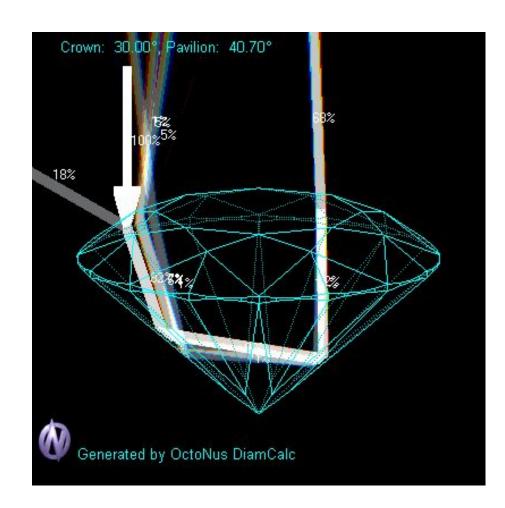




## Огранка бриллиантов

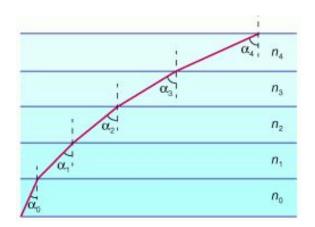


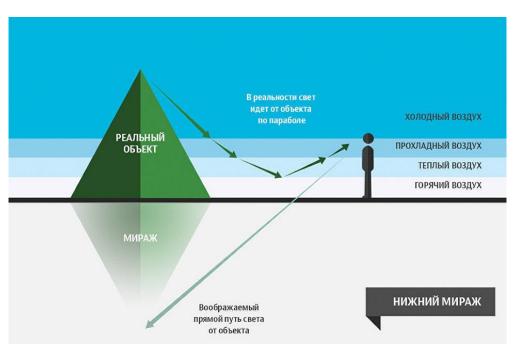


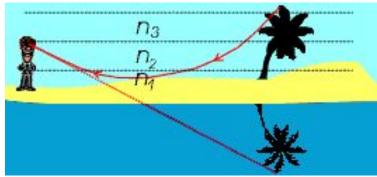


#### Миражи. Путь света через воздух и воду







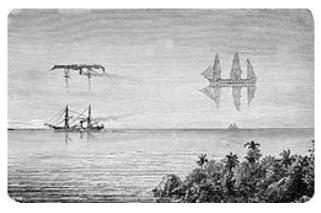


Это – геометрическая оптика, а не волновая

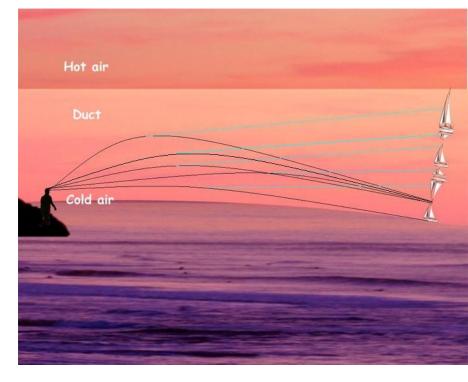
Фата-Моргана



Фата-Моргана (итал. fata Morgana) — редко встречающееся сложное оптическое явление в атмосфере) — редко встречающееся сложное оптическое явление в атмосфере, состоящее из нескольких форм миражей) — редко встречающееся сложное оптическое явление в атмосфере, состоящее из нескольких форм миражей, при котором отдалённые объекты видны многократно и с разнообразными искажениями. Своё название получило в честь волшебницы — персонажа английских легенд феи Моргана.



Летучий голландец



# Экзаменационные вопросы (по материалам лекций 1 и 2)

- Спектр электромагнитных волн.
- Основные законы оптики. Ограничения геометрической оптики. Закон прямолинейного распространения света, закон независимости световых лучей
- Закон отражения света, закон преломления света.
- Показатель преломления, полное внутреннее отражение
- Прохождение света через призму. Дисперсия света в призме
- Принцип Ферма. Оптическая длина пути. Скорость света, ее измерения.
   Закон Снеллиуса
- Взаимодействие света с веществом. Дисперсия света.