

# Геофизика



---

2023 Лекция №14

---

Носов Михаил Александрович

*отделение геофизики, физический факультет МГУ*

---

**<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>**

# Оптические явления в атмосфере и океане





# Оптические явления в атмосфере вызываются

## преломлением (рефракцией)

- ❑ миражи, фата-моргана
- ❑ мерцания
- ❑ смещение положения небесных тел
- ❑ искажение формы небесных тел

## поглощением и рассеянием

- ❑ зеленый луч
- ❑ голубой цвет неба
- ❑ явления сумерек

## ядрами конденсации

- ❑ радуга, белая радуга
- ❑ гало
- ❑ ложные солнца и ложные луны
- ❑ световые столбы

# Оптические явления в океане вызываются

преломлением  
(рефракцией)

поглощением и  
рассеянием

ядрами  
конденсации

- цвет океанов, морей  
и вод суши

**Явления,  
вызываемые  
преломлением в  
воздухе**

$$c_0 \neq f(\lambda)$$

скорость света в  
вакууме

$$c = c_0 / n = f(\lambda)$$

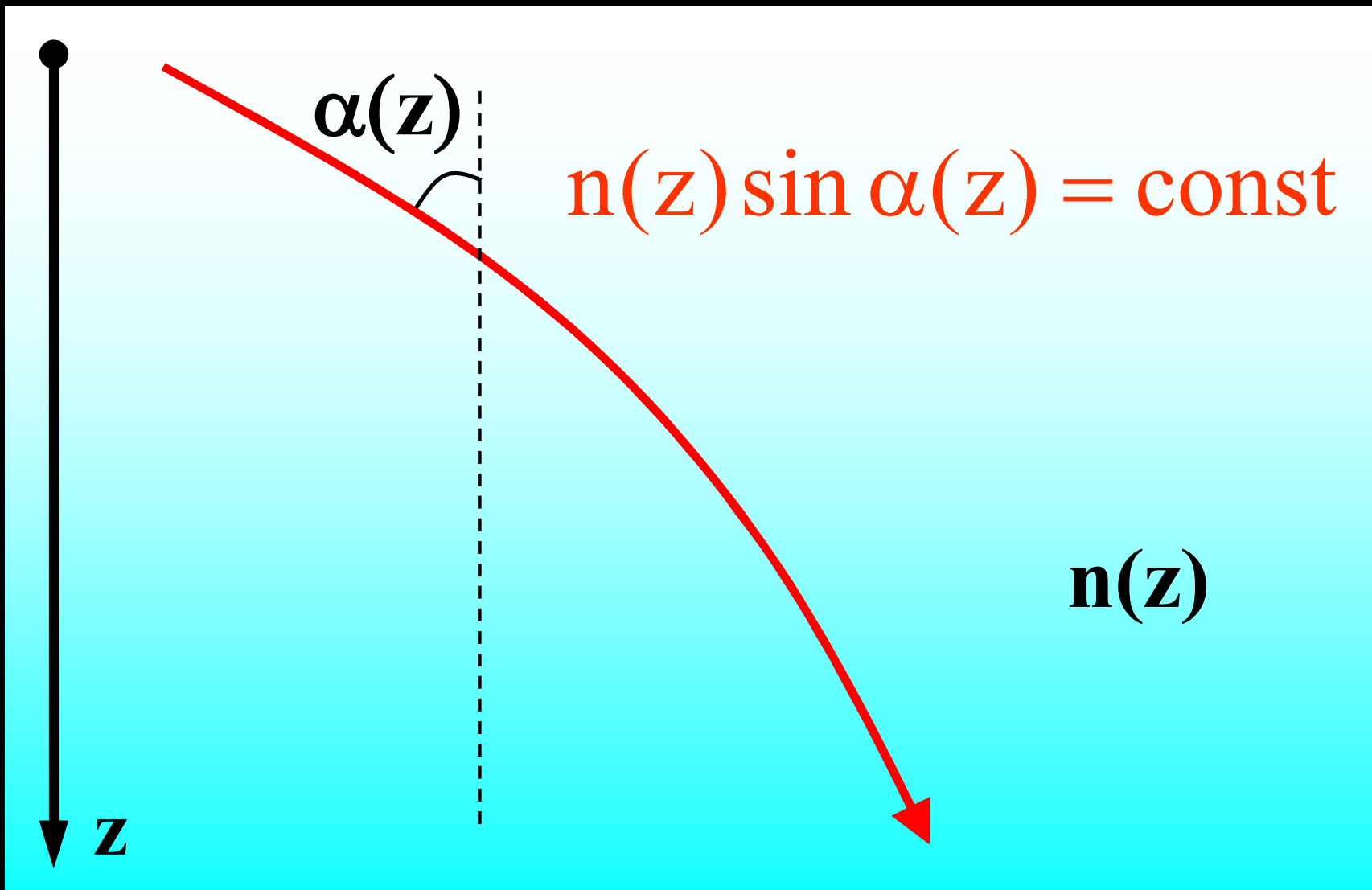
скорость света  
в среде

## Показатель преломления

**Воздух**            **1.00029**

**Вода**                **1.33**

# Рефракция



## Изменение показателя преломления воздуха с высотой

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{\rho} = \gamma$$

Удельная  
рефракция

Формула  
Лоренц-  
Лорентца

$$n = 1 + \Delta n, \quad \Delta n \ll 1$$

$$\frac{\Delta n}{\rho} = \text{const}$$

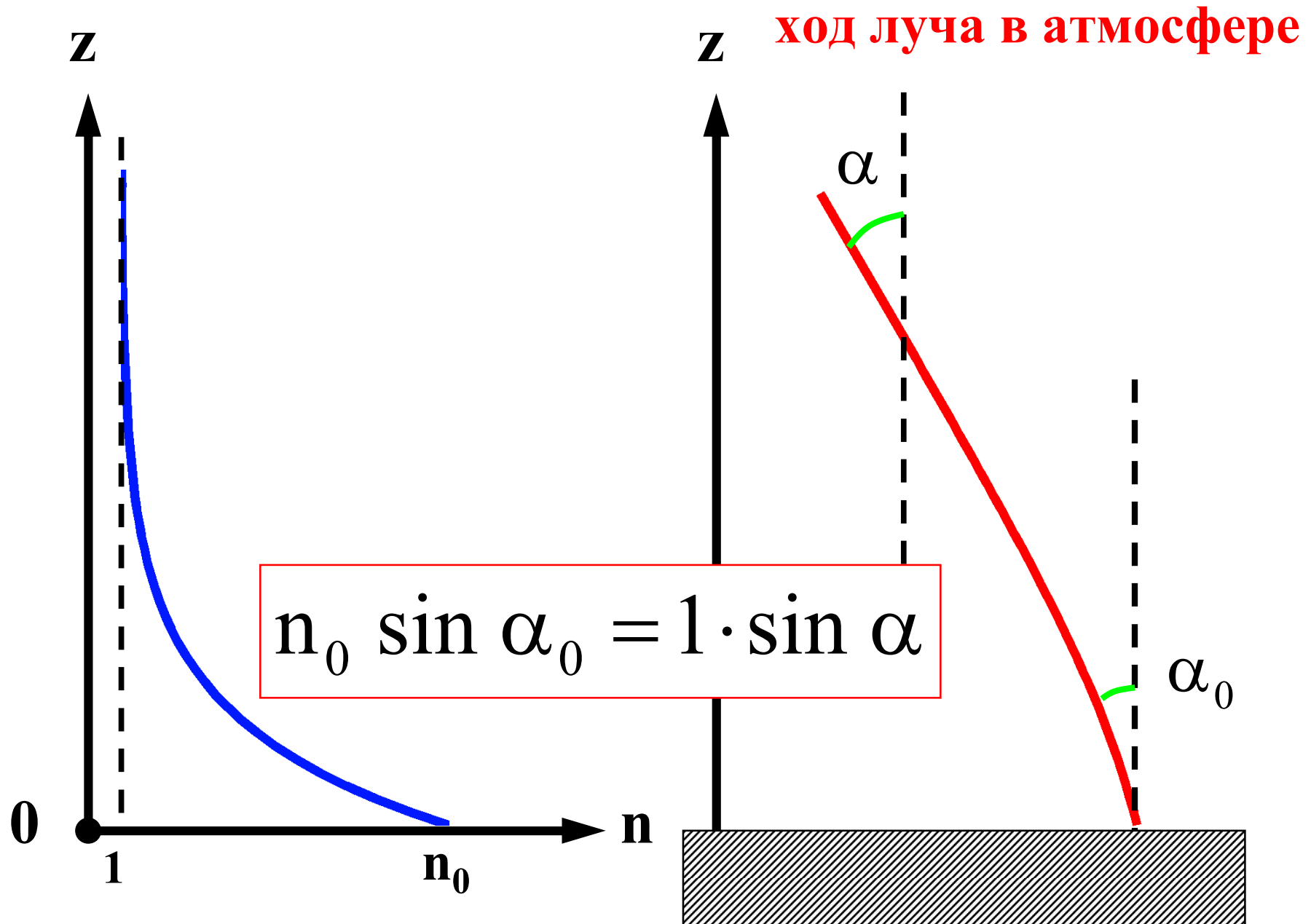
$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H}$$

«Барометрическая формула» для  
показателя преломления

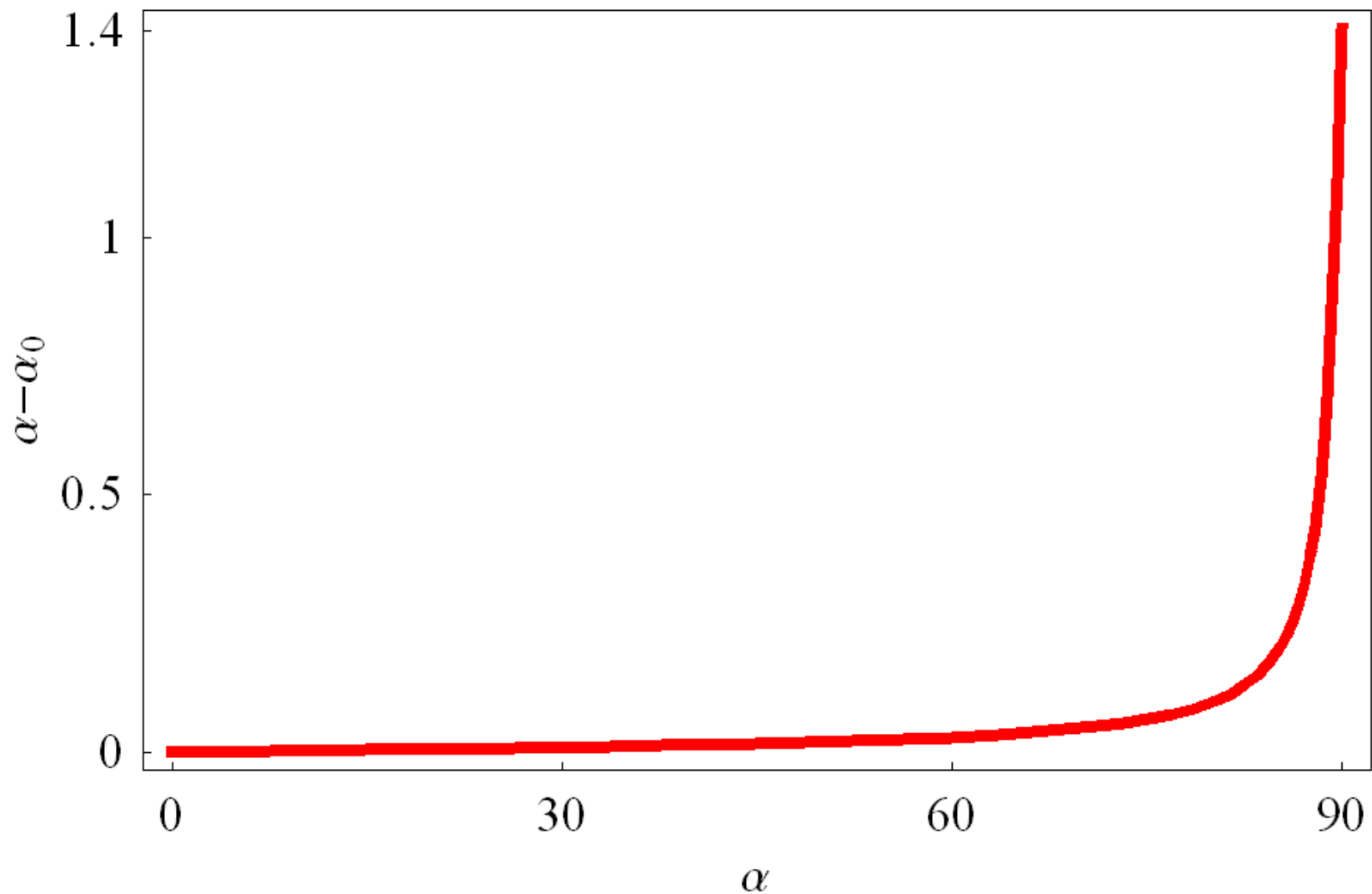
$$n(z) = 1 + (n_0 - 1)e^{-z/H}$$



# Рефракция света в атмосфере

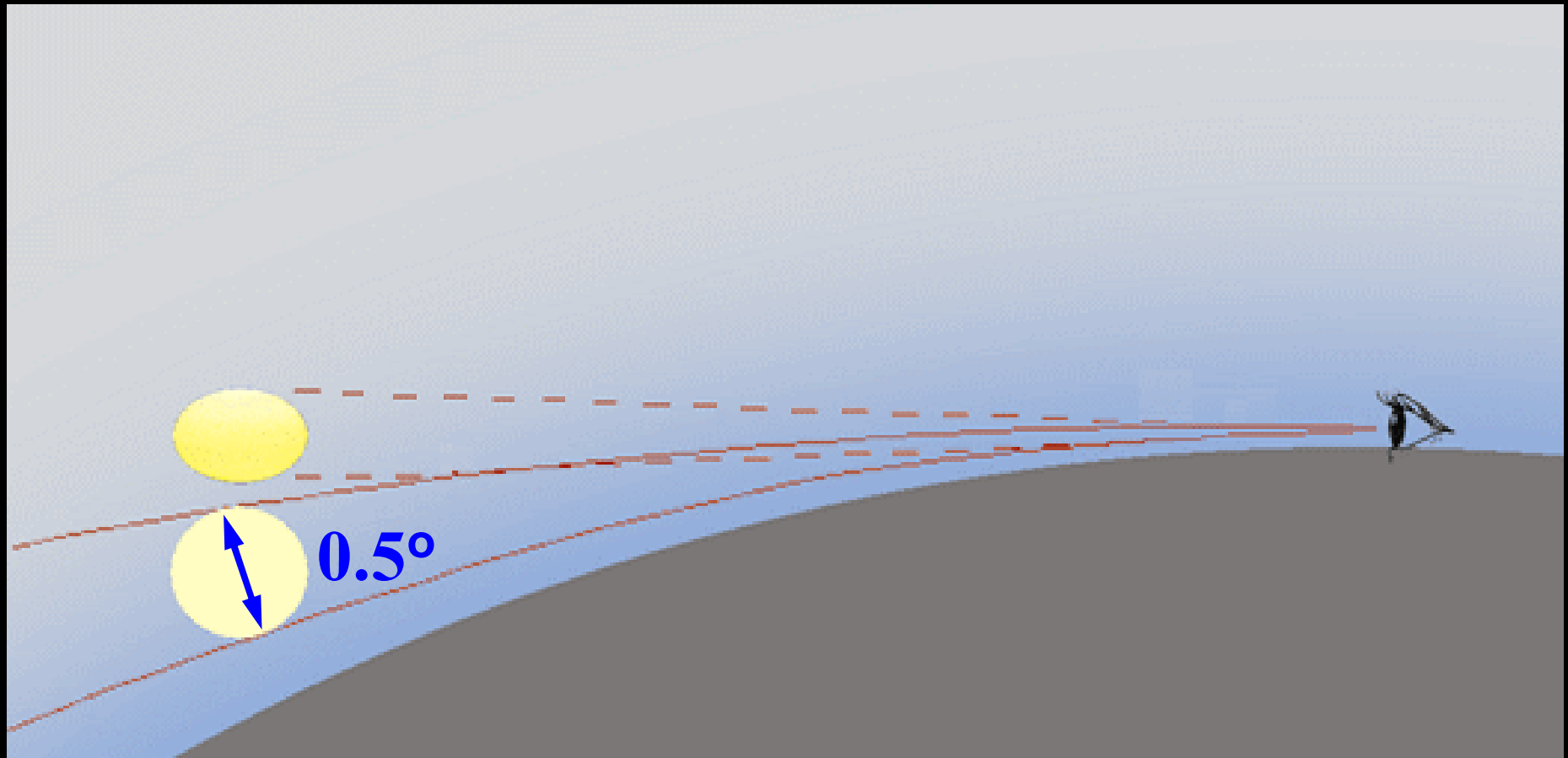


# Отклонение светового луча в атмосфере как функция угла падения

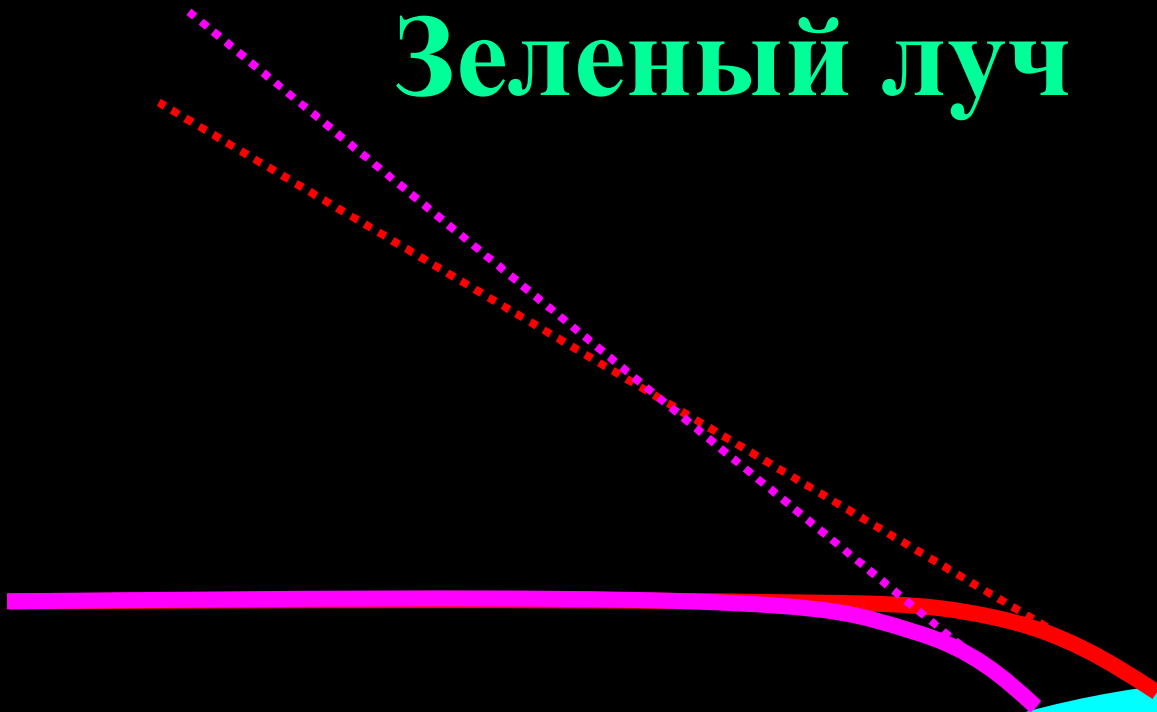
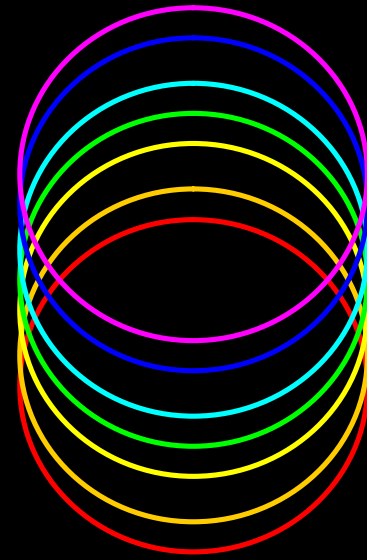


# Искажение формы небесных тел





# Зеленый луч



# Зеленый луч (green flash)





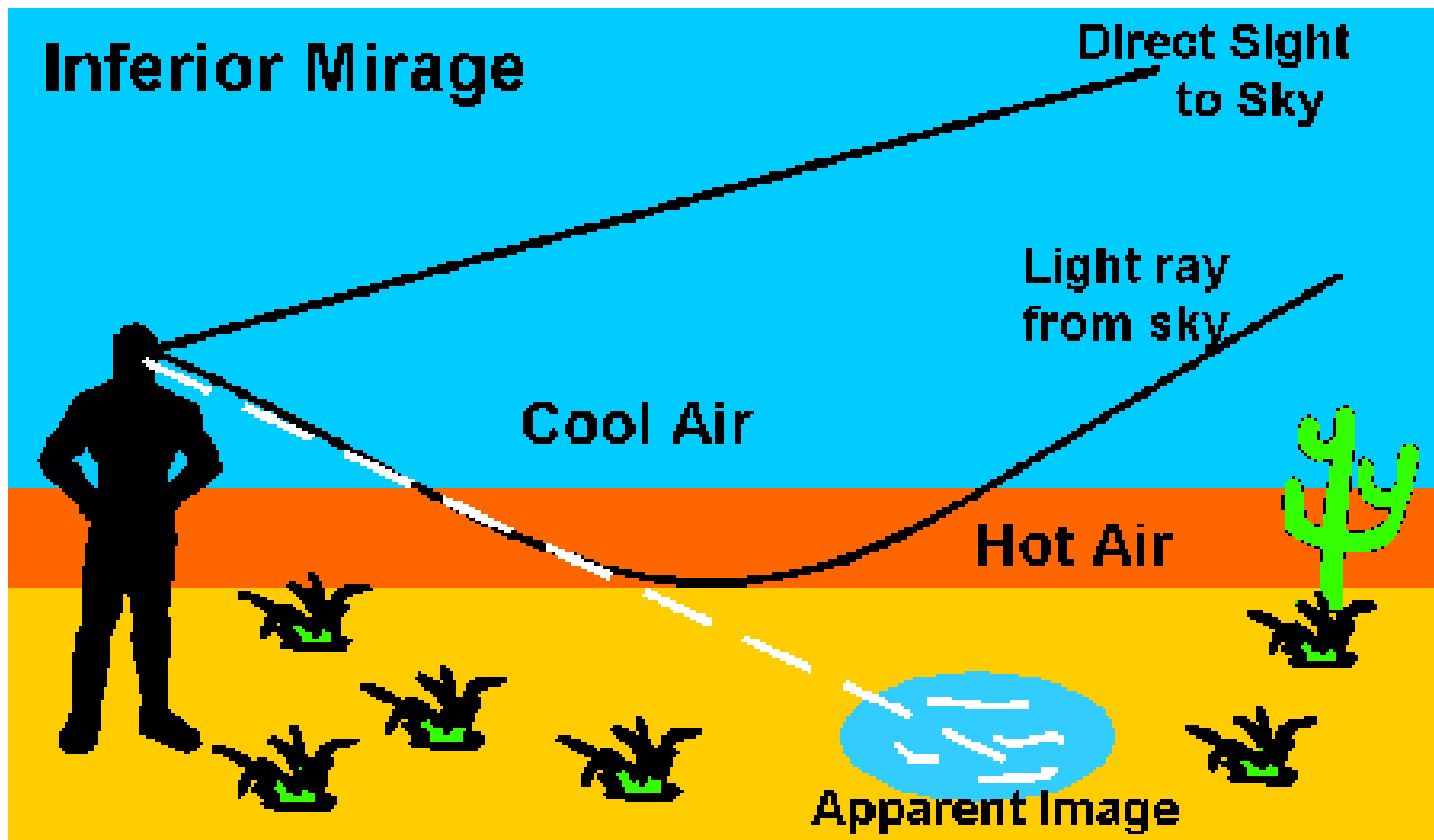
**Миражи** - оптическое явление в атмосфере, состоящее в том, что вместе с отдалённым предметом (или участком неба) видно его мнимое изображение, смещенное относительно предмета

**Причина образования** – полное внутреннее отражение света на границах, разделяющих слои воздуха с различной температурой

\* в зависимости от расположения по отношению к предмету различают **верхний**, **нижний** и **боковой** миражи

\* мираж всегда виден в той области, где выше температура воздуха

# Мираж (нижний)









Явления,  
вызываемые  
поглощением и  
рассеянием



# Закон Бугера (1729 г.)

$$dI = -\sigma I dx$$

показатель  
ослабления

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma \cdot x}$$

В атмосфере и в океане

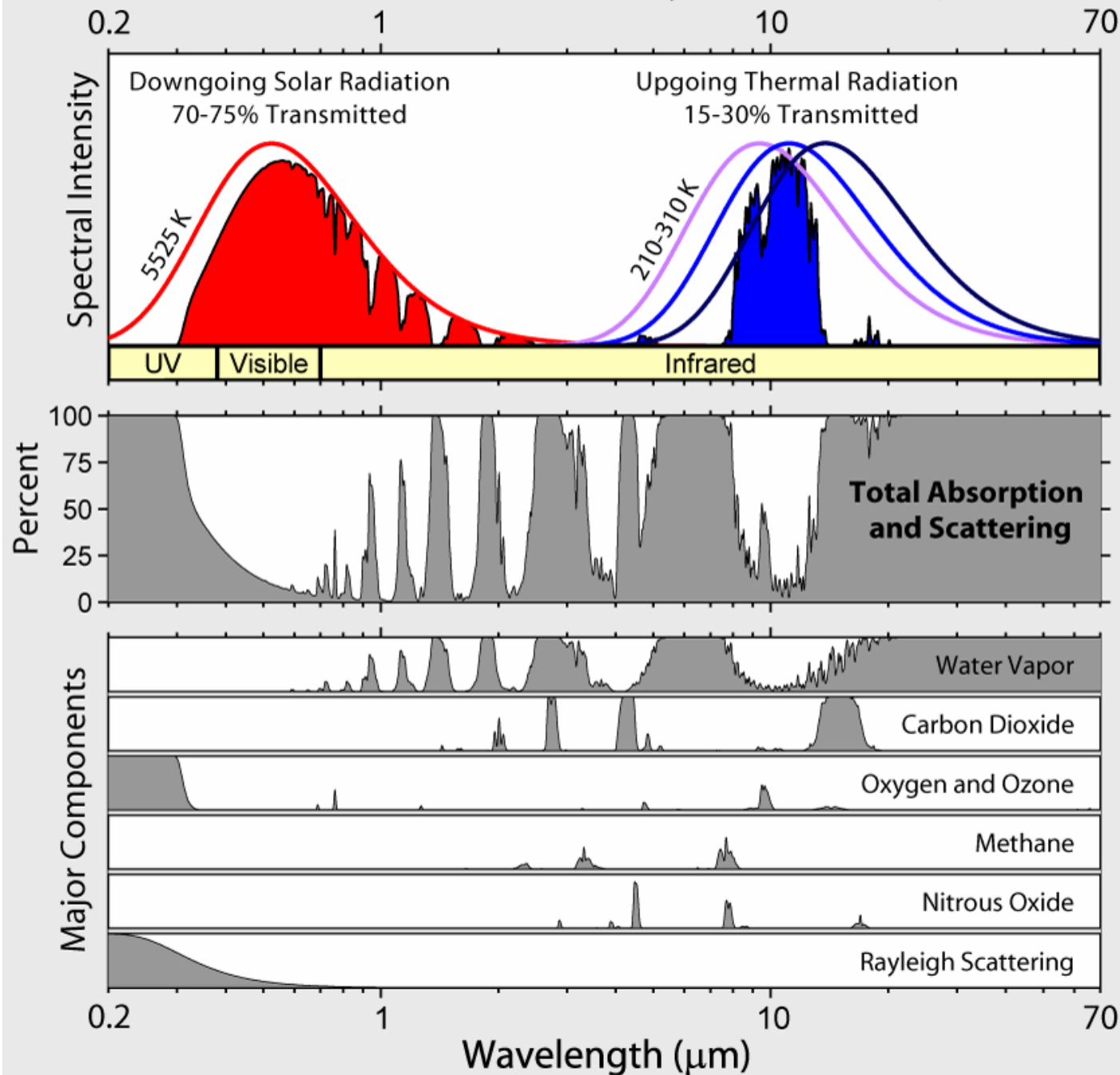
$$\sigma = \sigma(\lambda)$$



**Pierre Bouguer**  
1698-1758

French  
mathematician,  
geophysicist,  
geodesist, and  
astronomer

# Radiation Transmitted by the Atmosphere



Нормированные  
спектры  
излучения  
Солнца и Земли

Спектр  
поглощения  
атмосферы

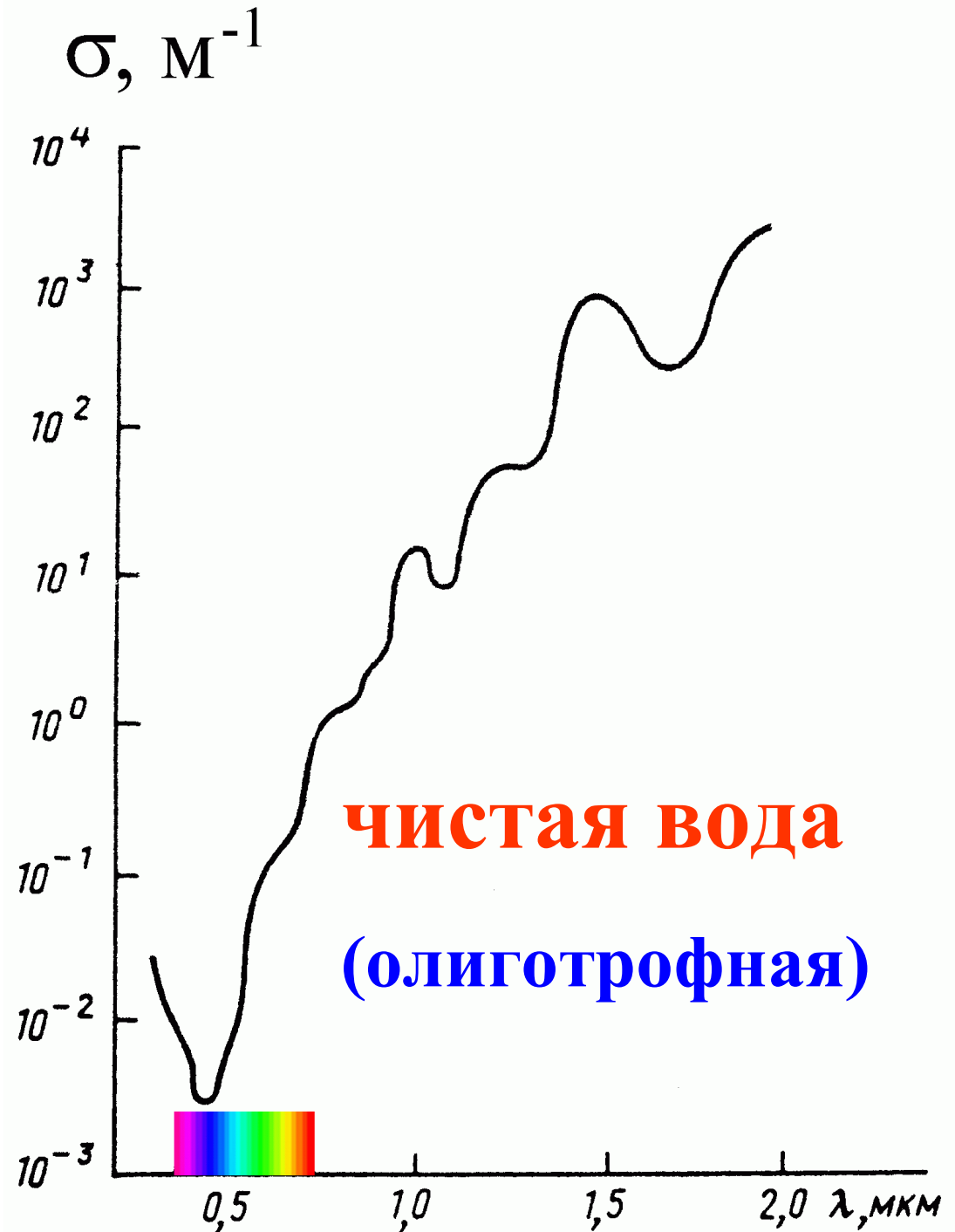
водяной пар  
углекислый газ  
кислород и озон  
метан  
закись азота

Коэффициент  
ослабления для  
морской воды

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma x}$$

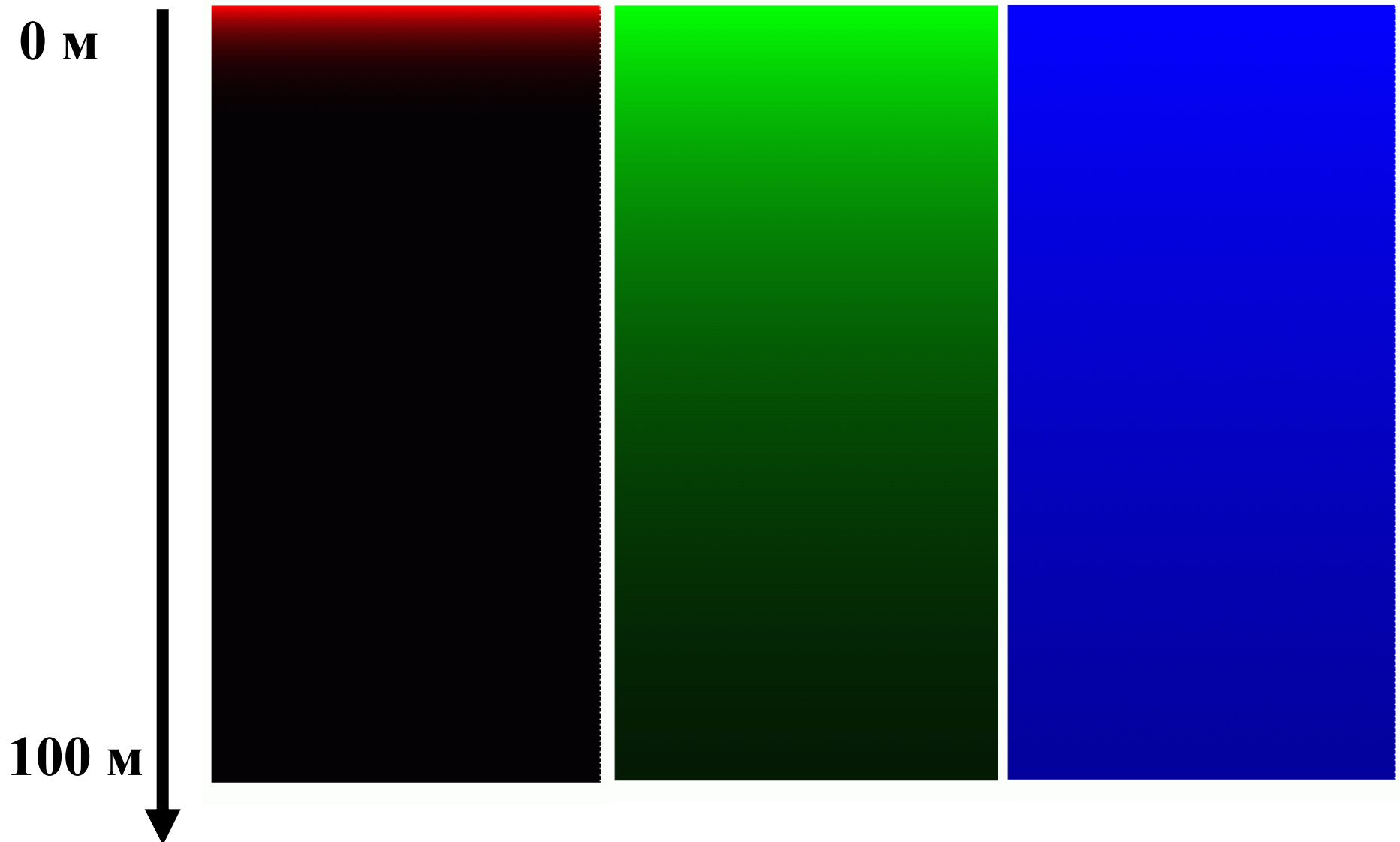
$$\sigma = \sigma(\lambda)$$

наличие  
желтого вещества  
меняет вид  
зависимости

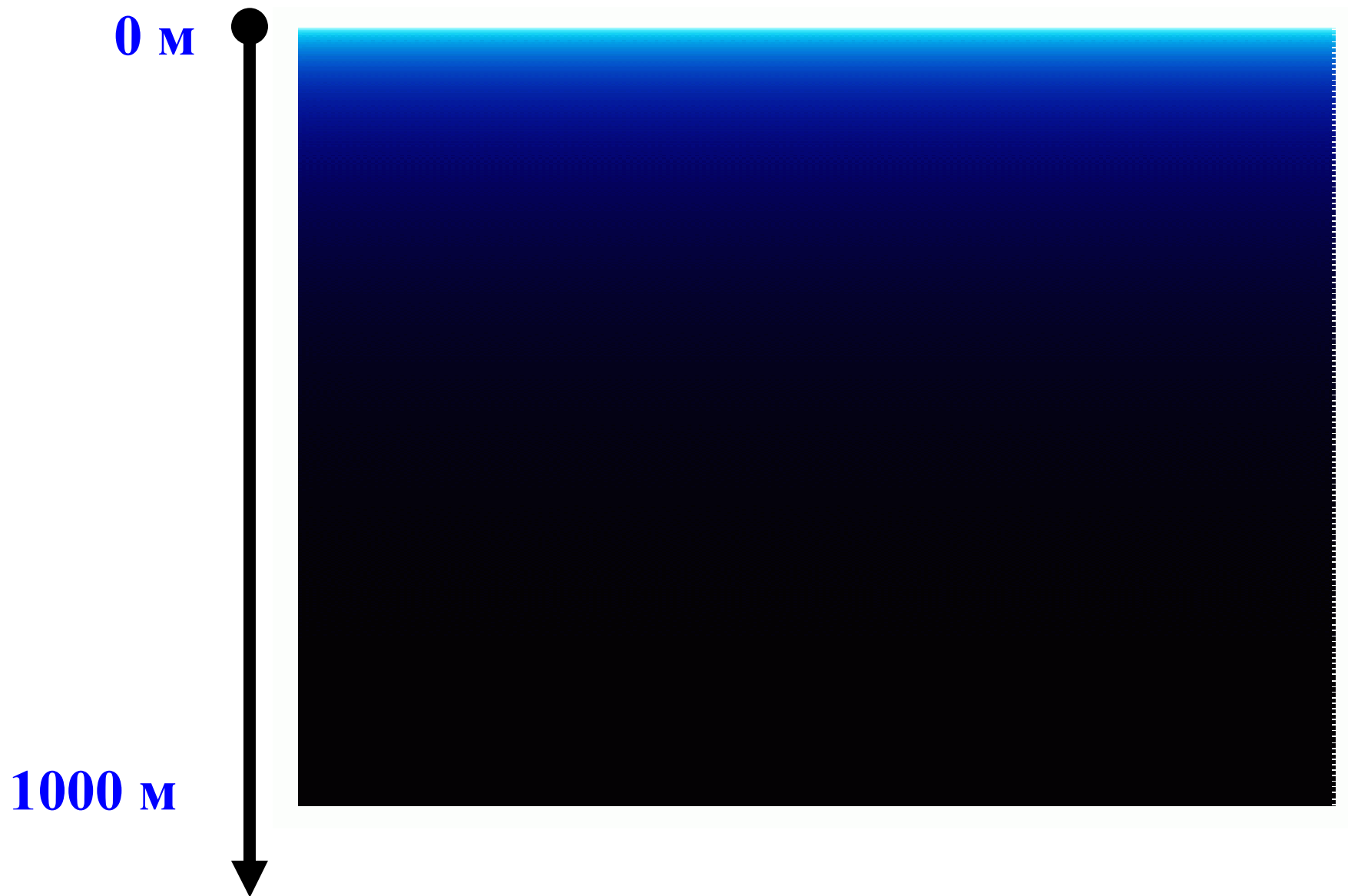


## Ослабление света с глубиной в чистой воде

$$\sigma=0.27 \text{ м}^{-1} \quad \sigma=0.023 \text{ м}^{-1} \quad \sigma=0.005 \text{ м}^{-1}$$



# Ослабление света с глубиной в чистой воде



# Ослабление электромагнитного излучения есть следствие факторов:

1. Поглощения (переход энергии в тепло)

2. Рассеяния («переизлучения»)



крупные частицы  
(неоднородности)  
 $D \gg \lambda$

рассеяние Ми



мелкие частицы  
(неоднородности)  
 $D \ll \lambda$

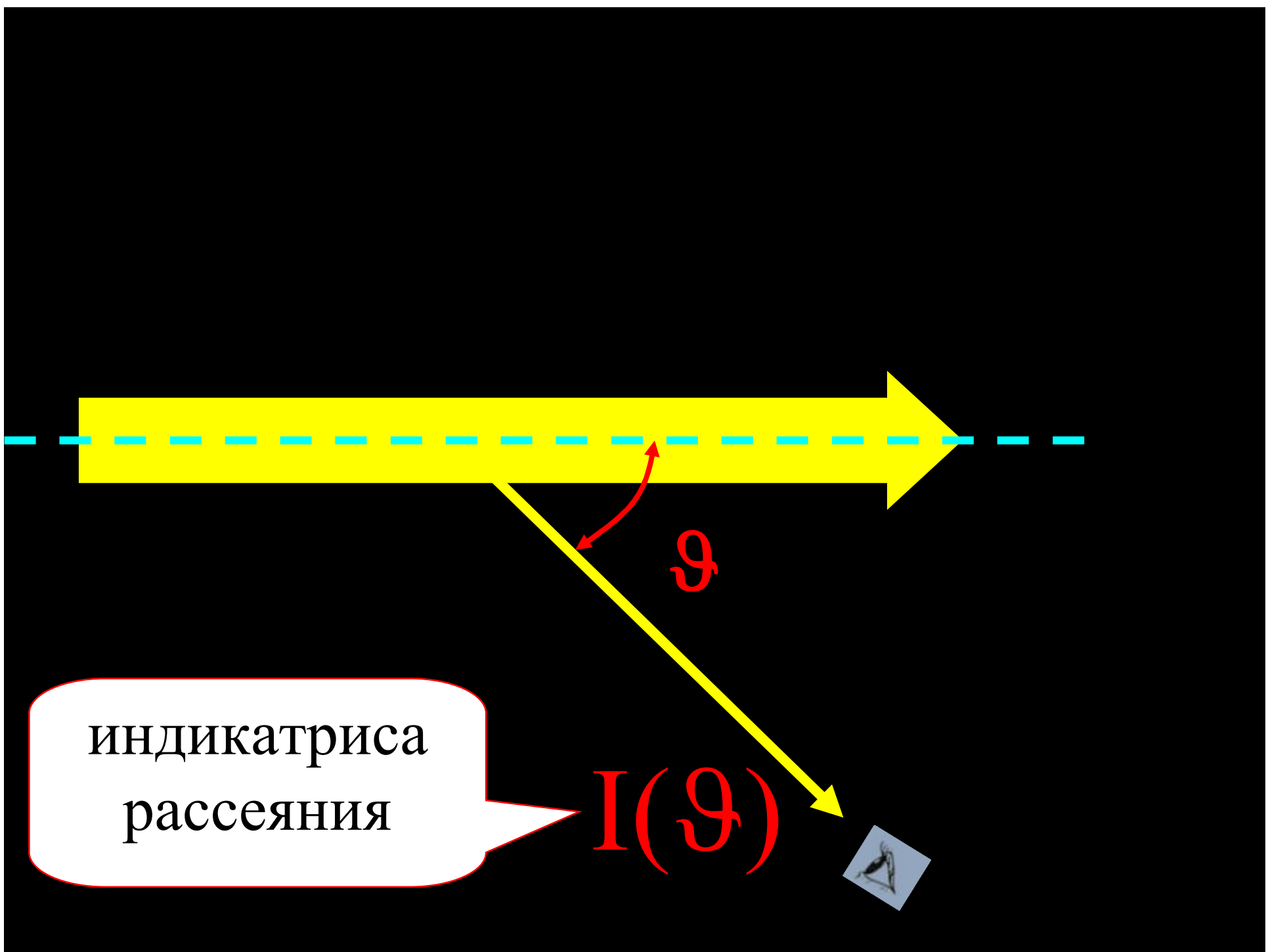
рассеяние Рэля  
или молекулярное

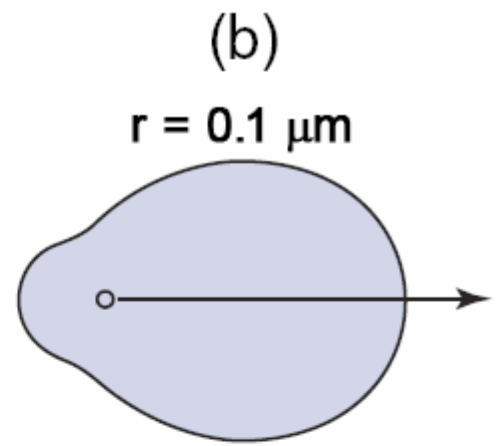
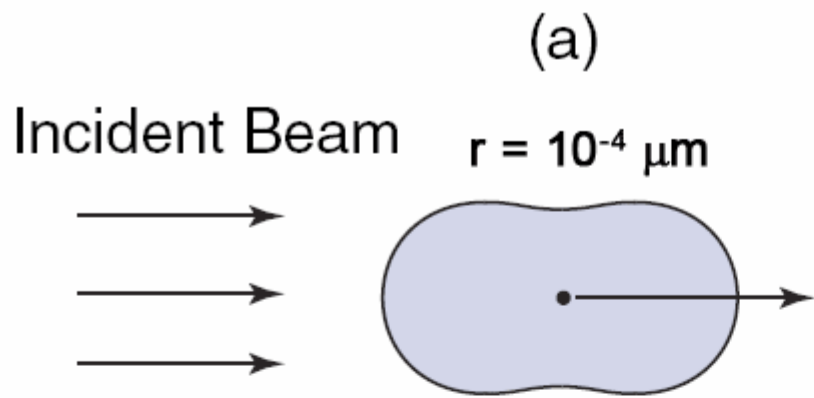


индикатриса  
рассеяния

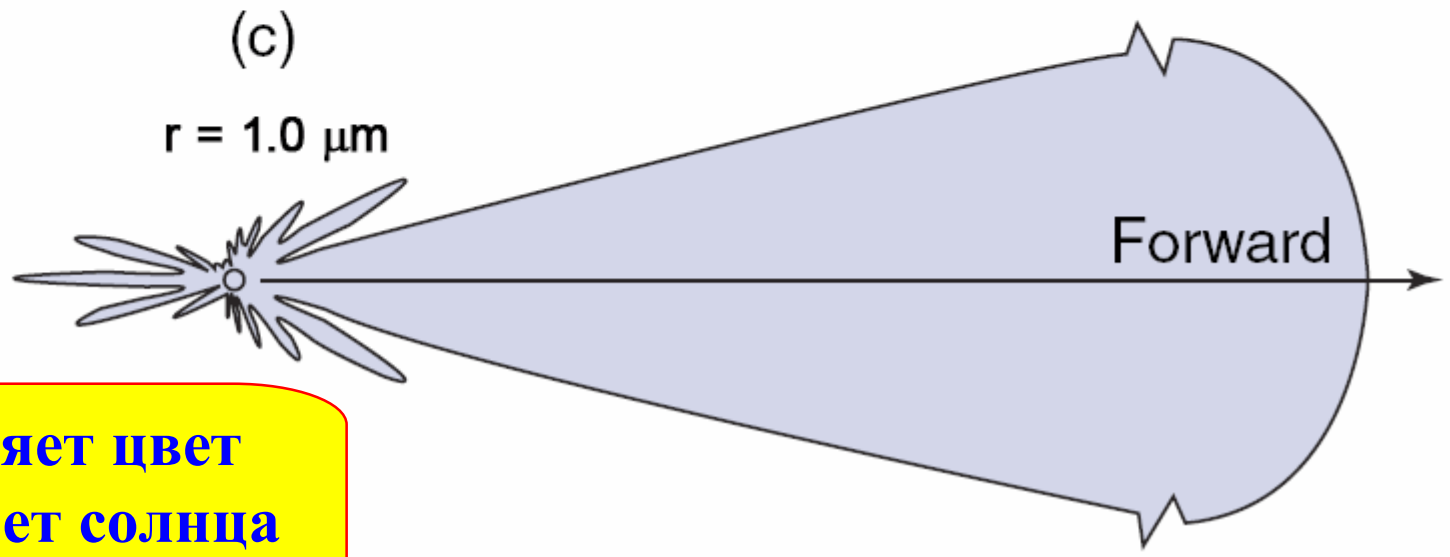
$$I(\vartheta)$$

$\vartheta$

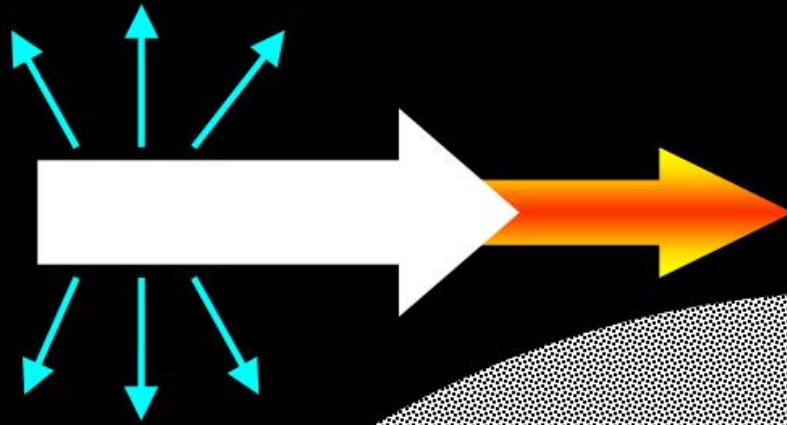
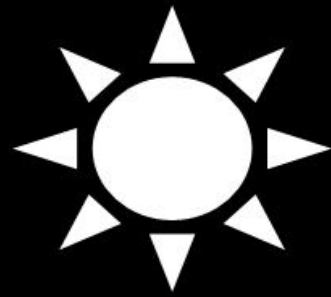




$$I \sim \frac{1}{\lambda^4} [1 + \cos^2 \vartheta]$$



**определяет цвет  
неба и цвет солнца  
на закате**



$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}$$





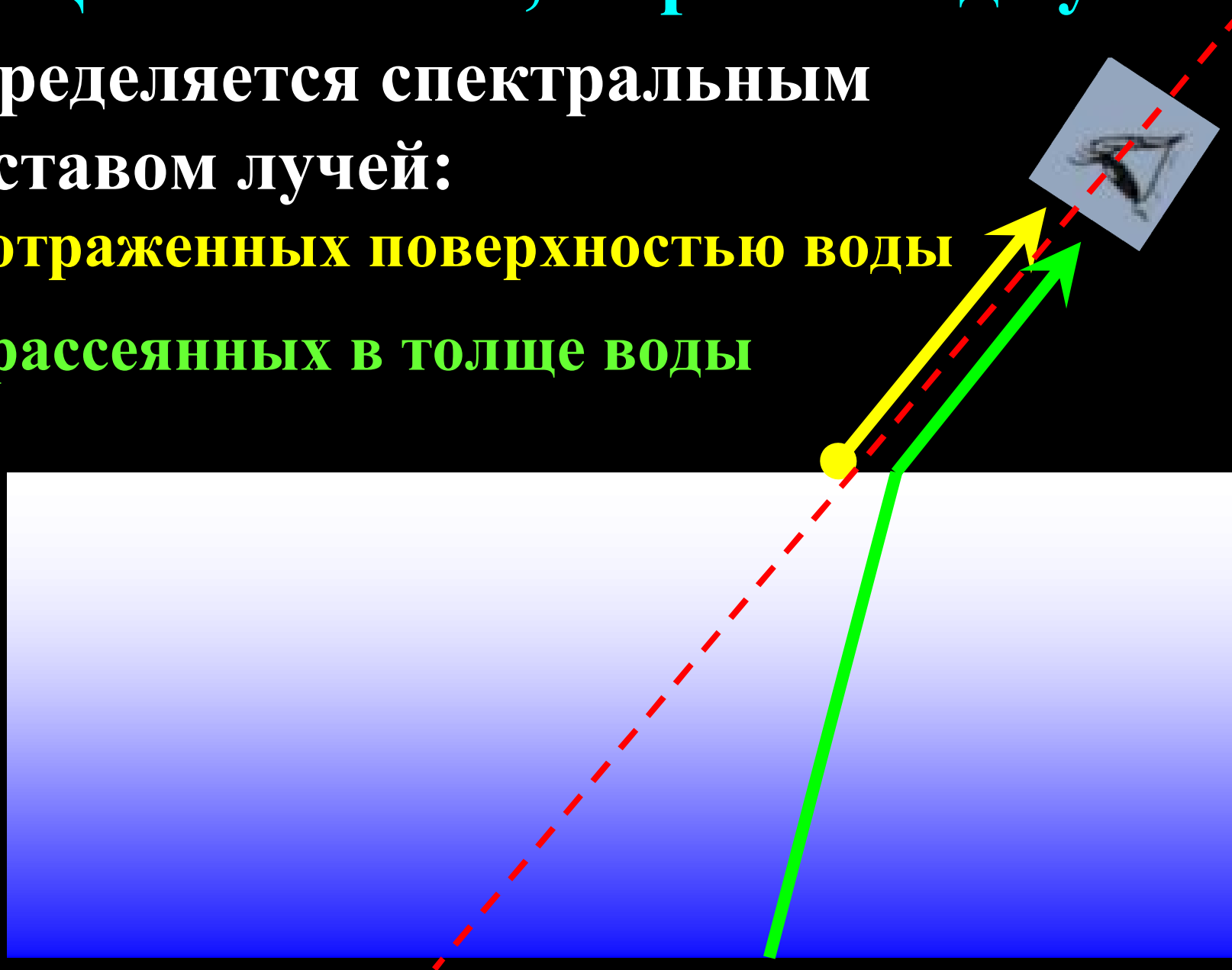




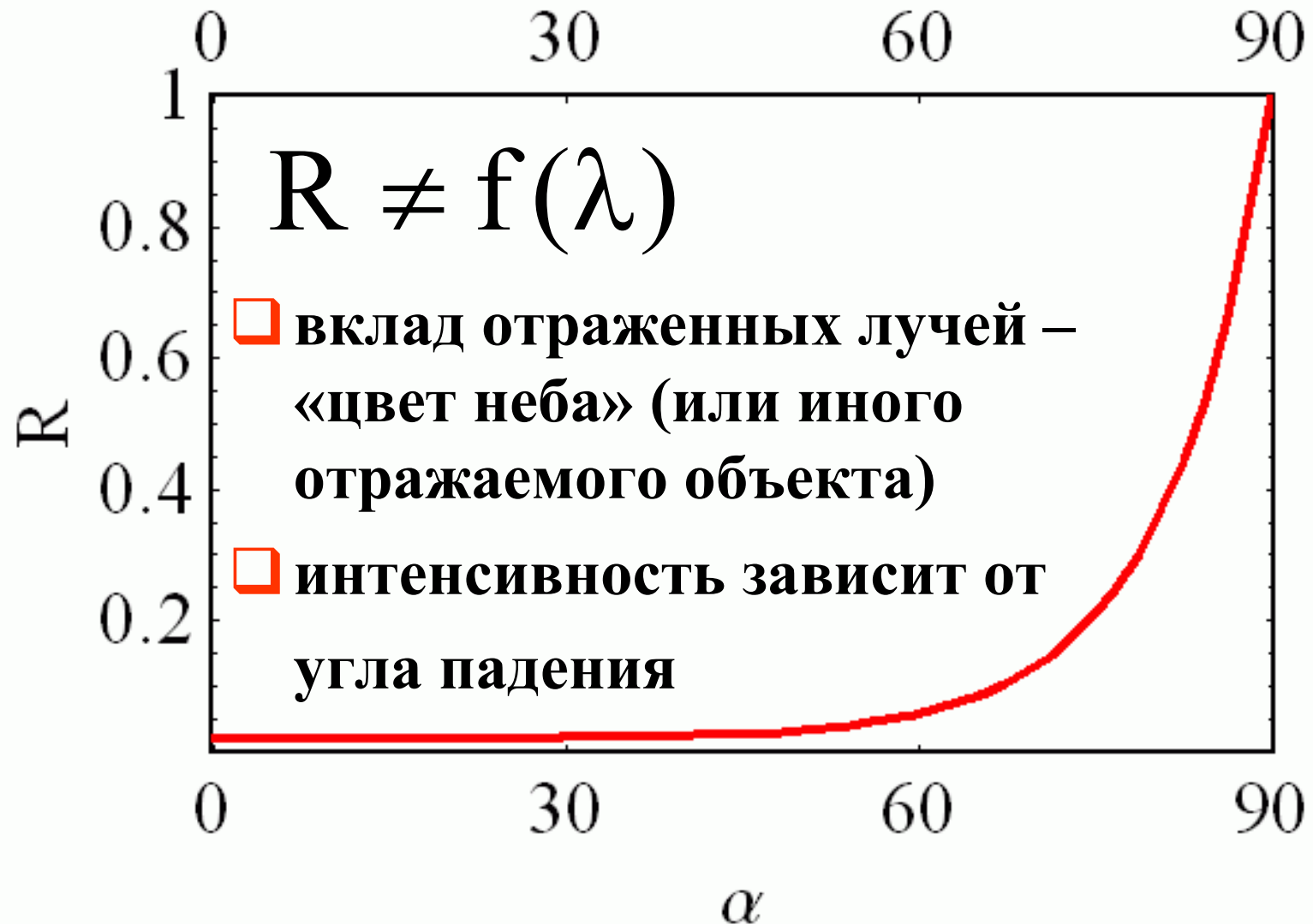
# Цвет океанов, морей и вод суши

определяется спектральным составом лучей:

1. отраженных поверхностью воды
2. рассеянных в толще воды



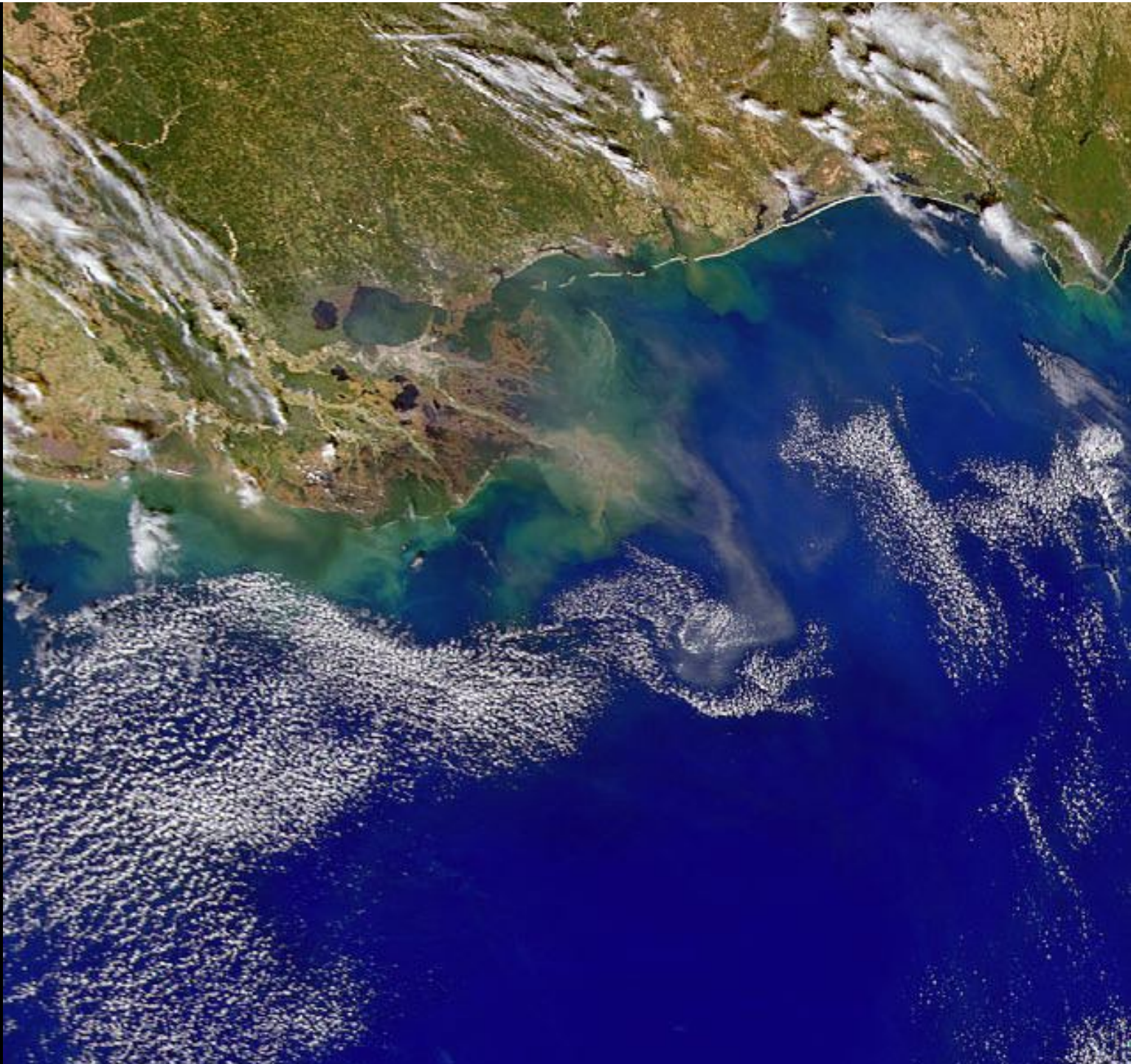
# Коэффициент отражения неполяризованного излучения на границе «воздух-вода» как функция угла падения







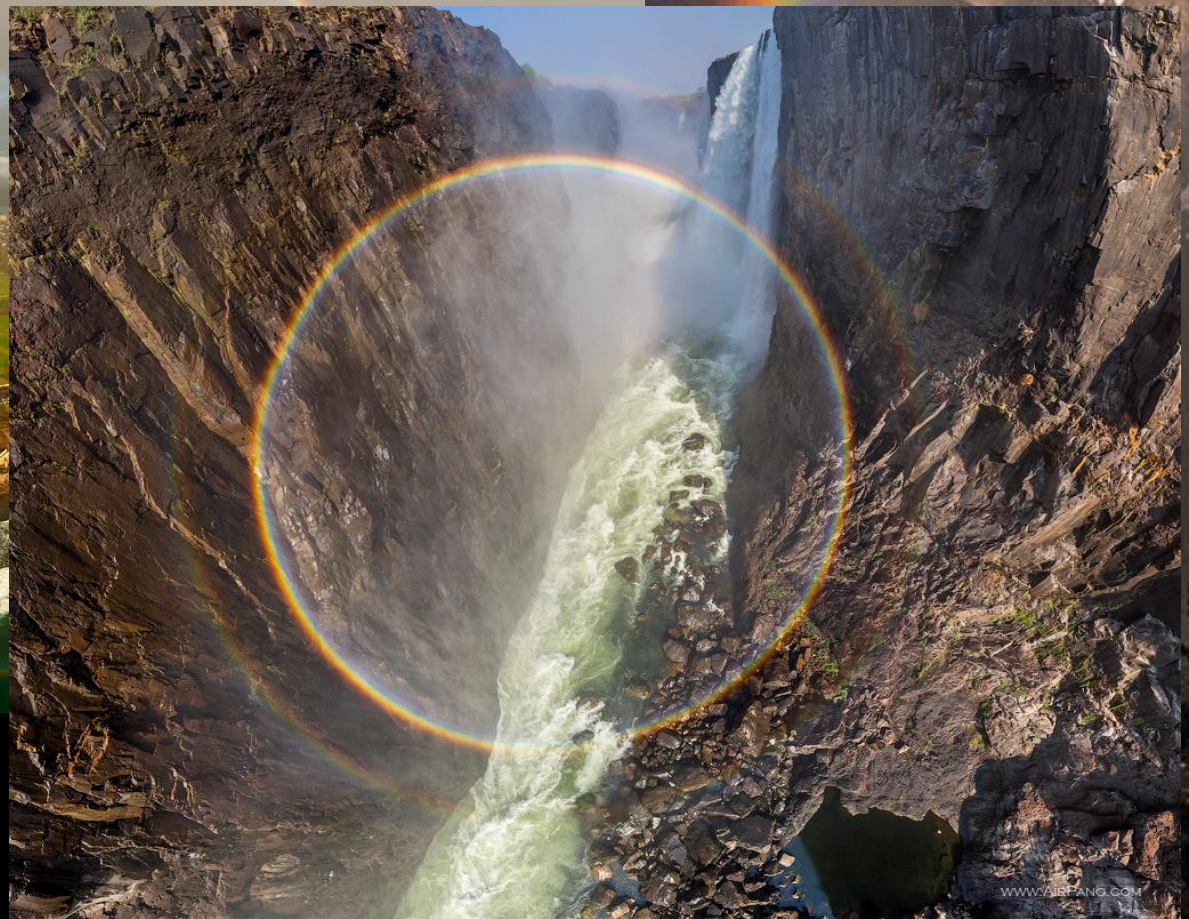


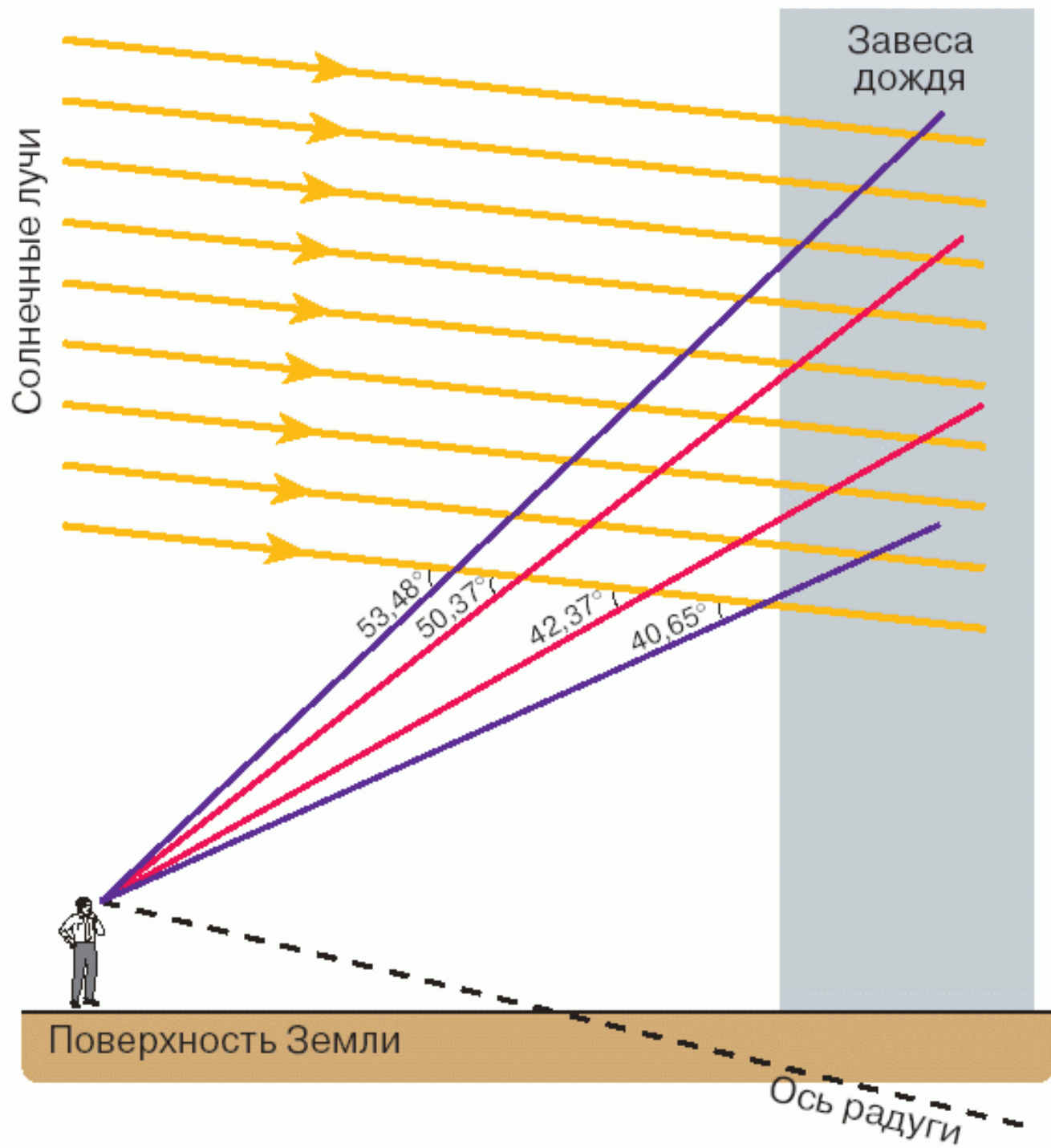


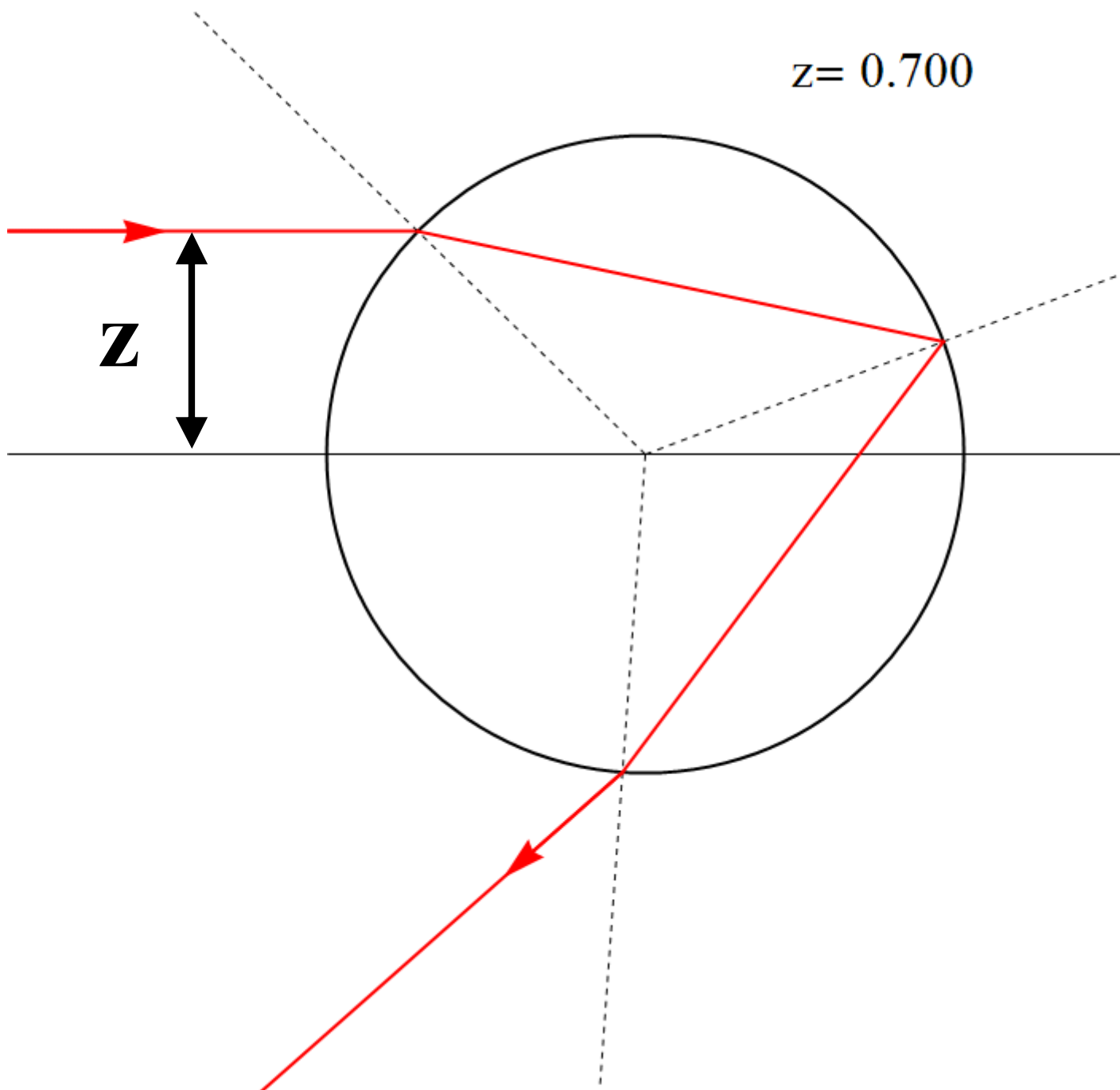
**Оптические  
явления,  
вызываемые  
ядрами  
конденсации**

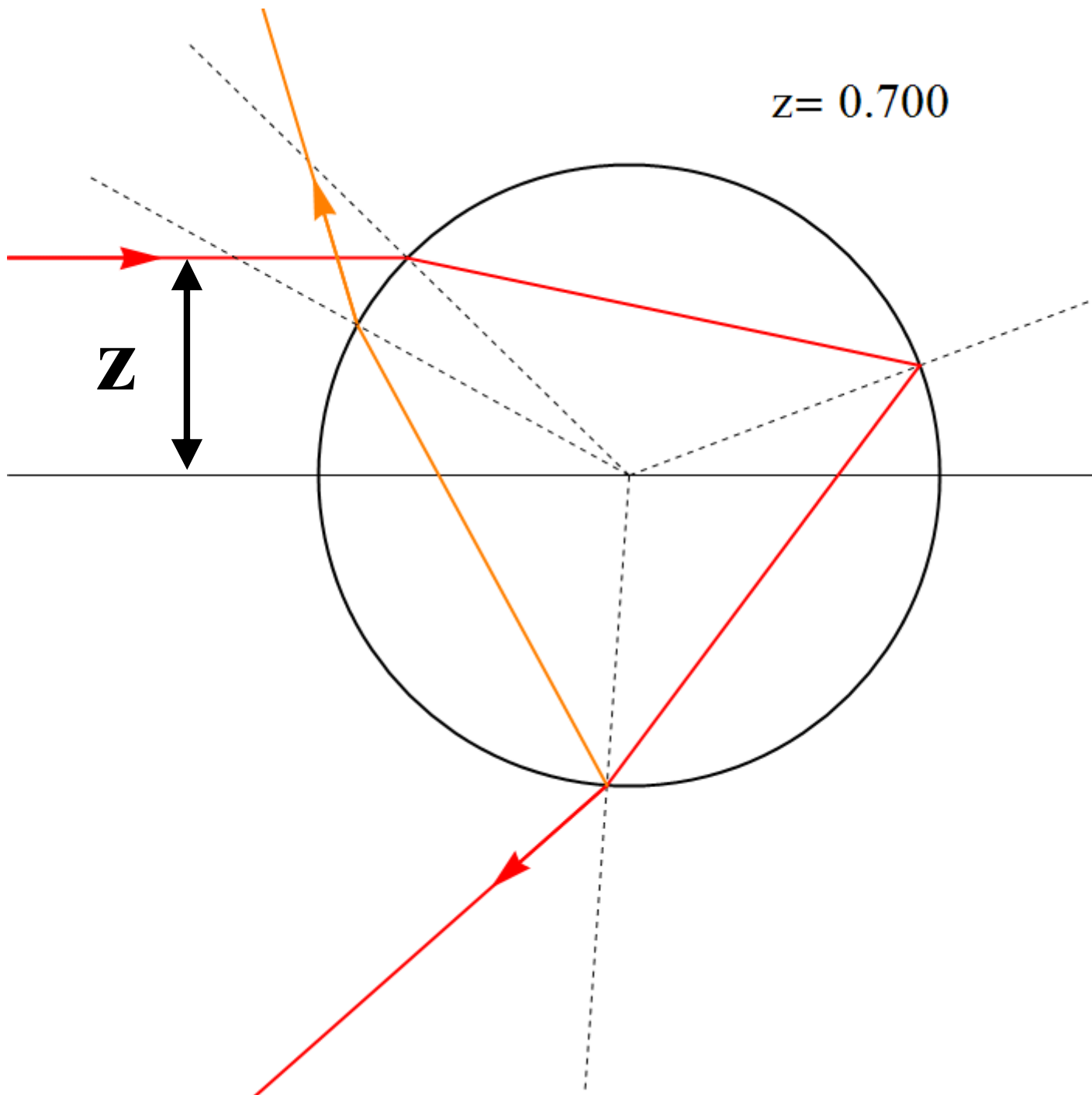


# Радуга



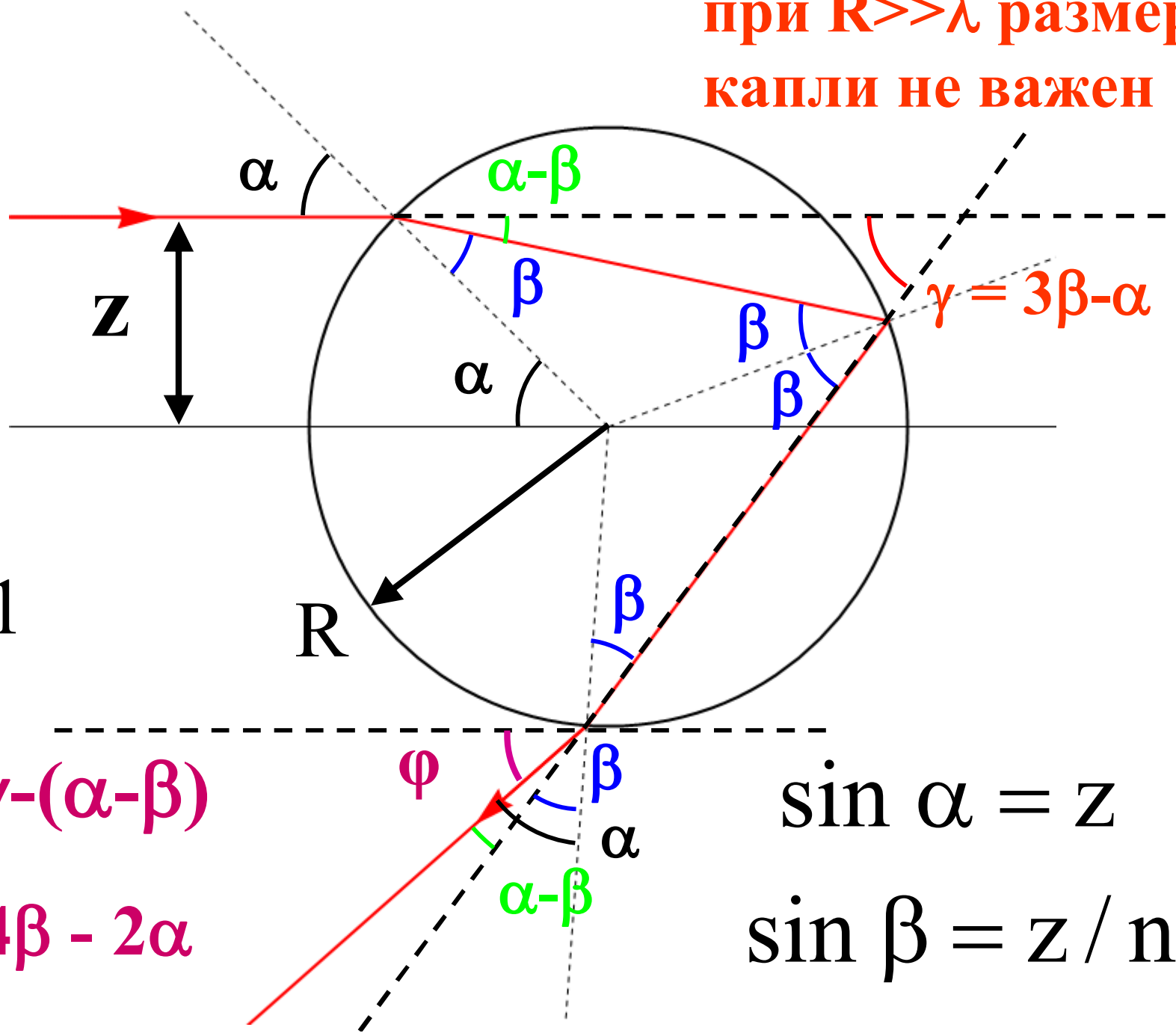








при  $R \gg \lambda$  размер  
капли не важен



$R=1$

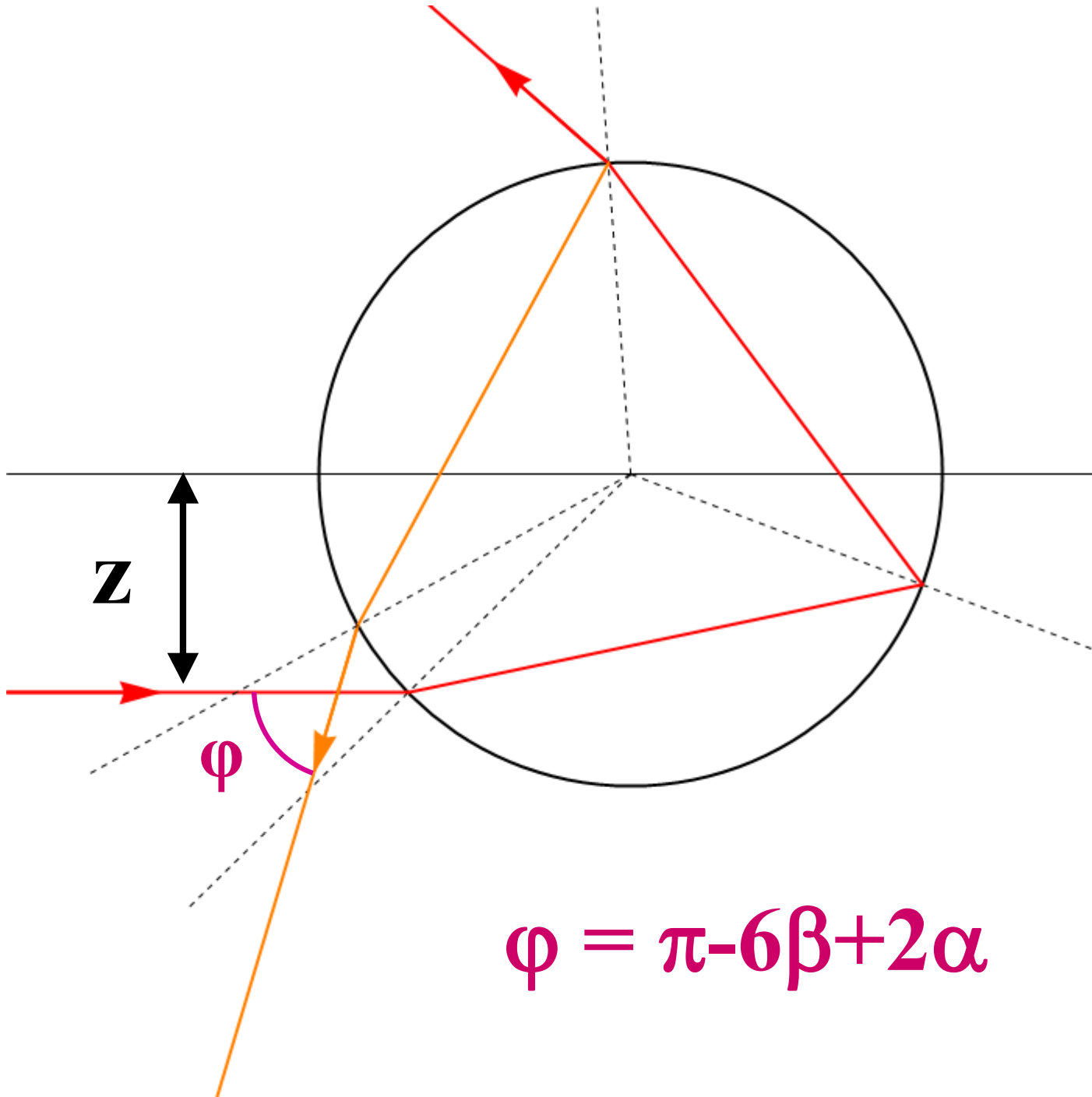
$R$

$\varphi = \gamma - (\alpha - \beta)$

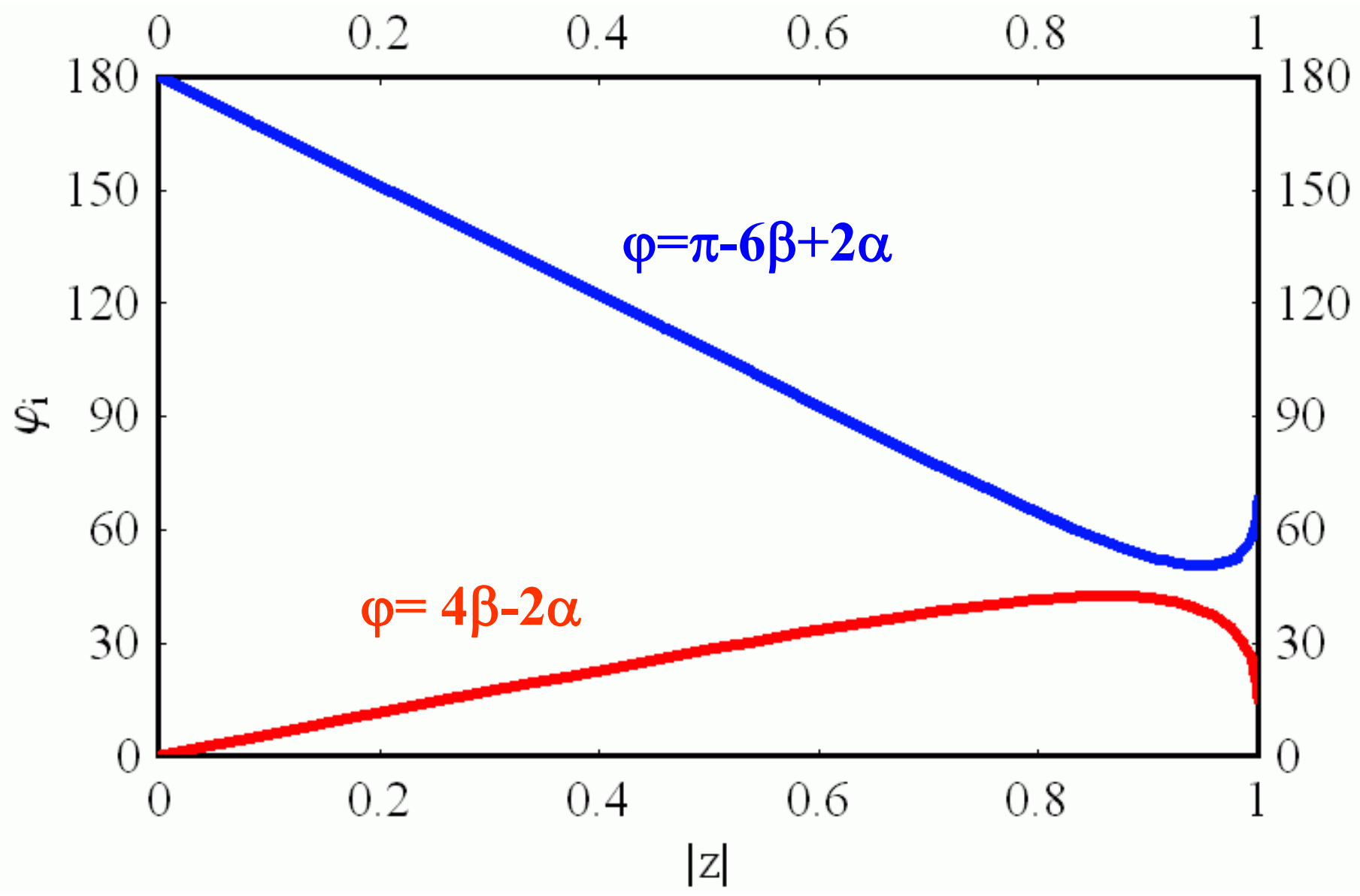
$\varphi = 4\beta - 2\alpha$

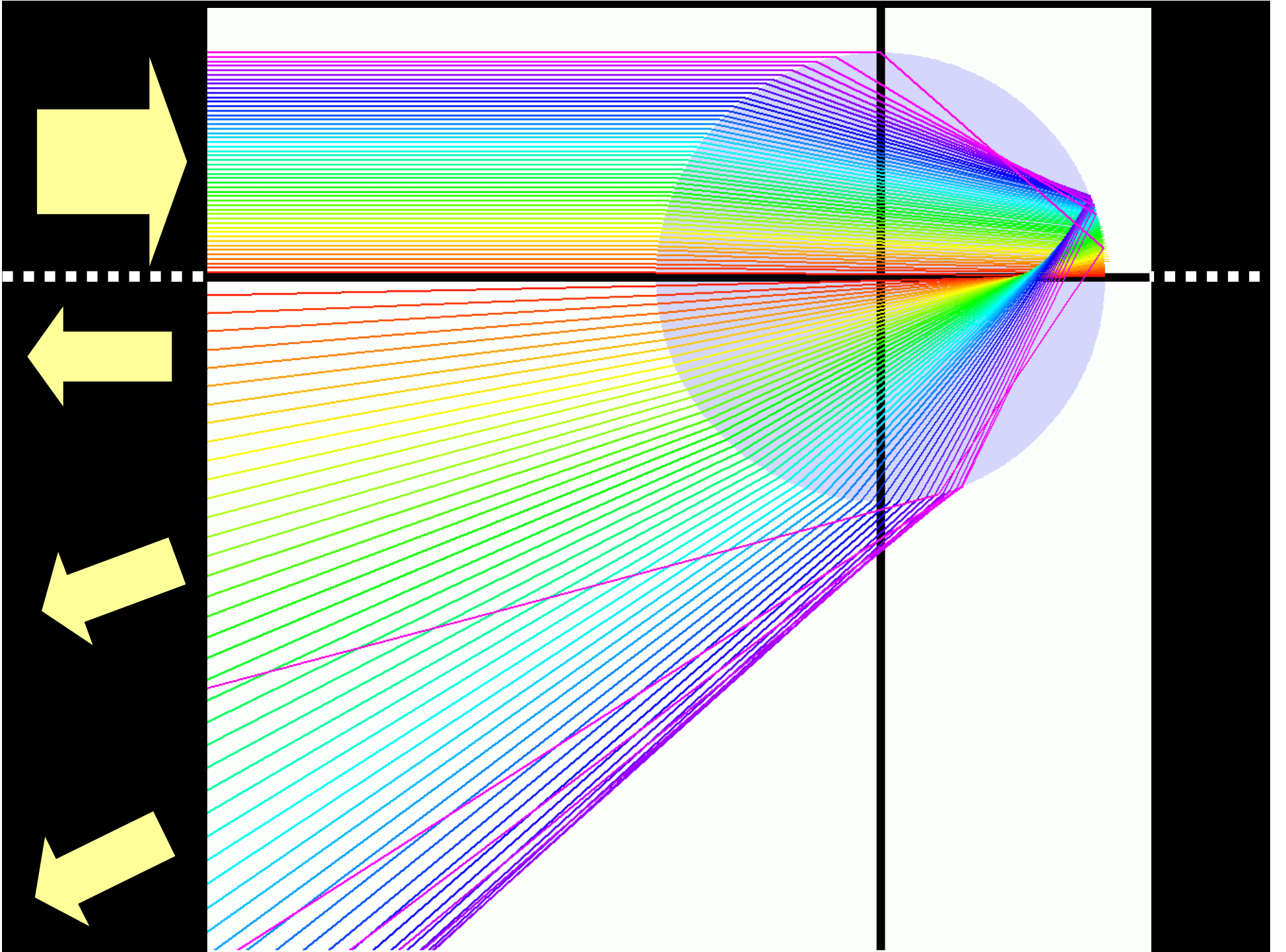
$\sin \alpha = z$

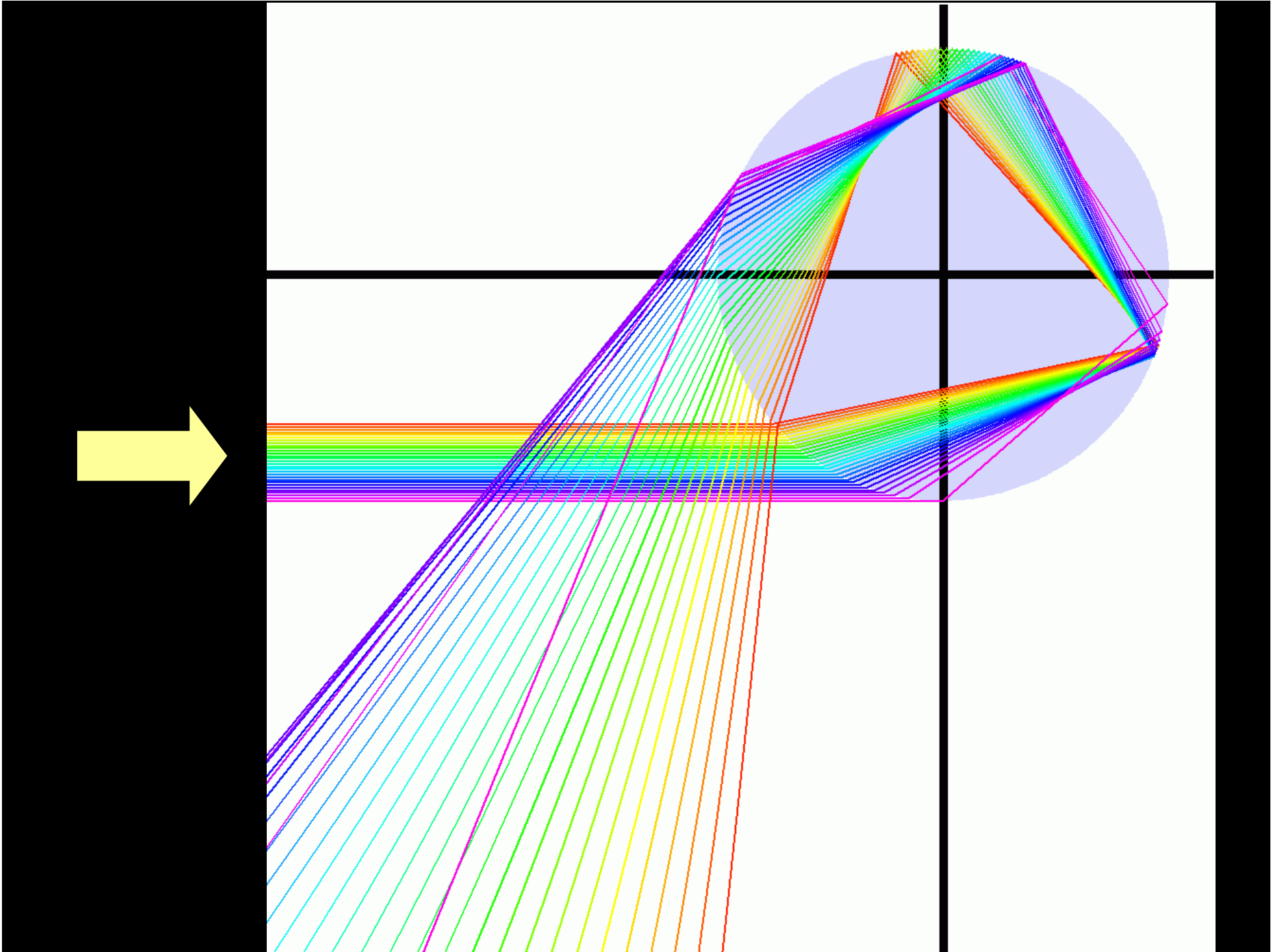
$\sin \beta = z / n$

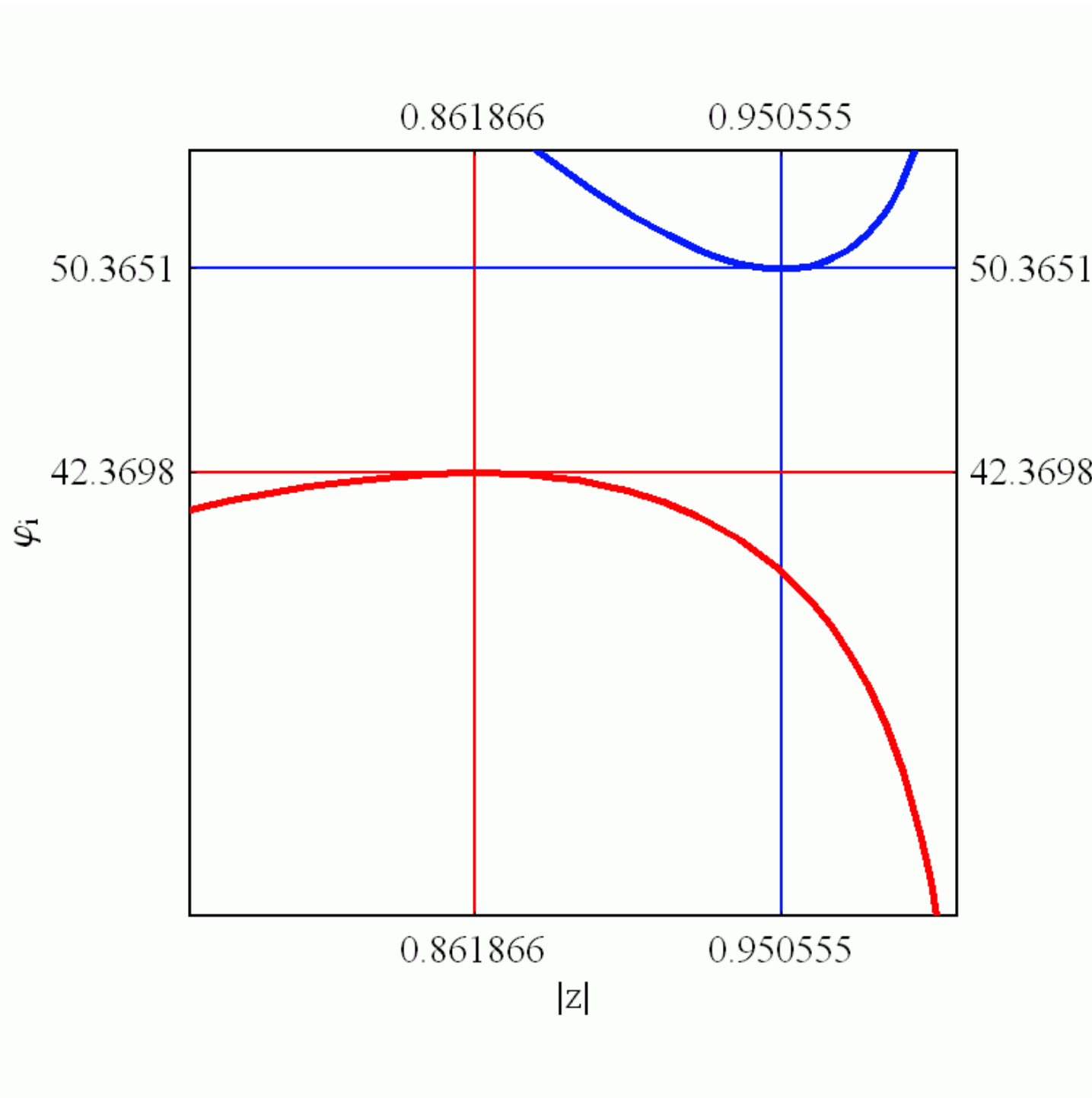


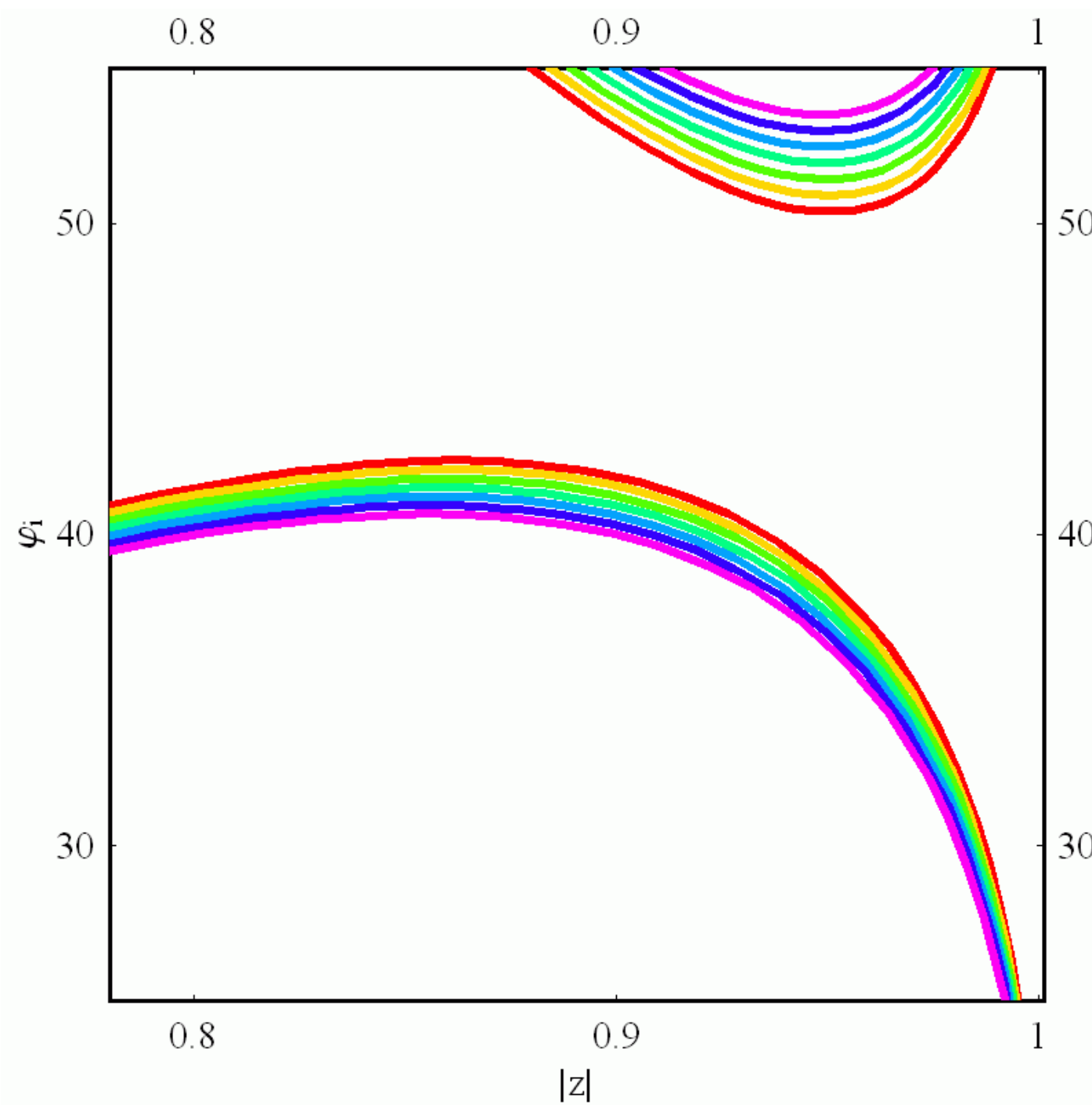


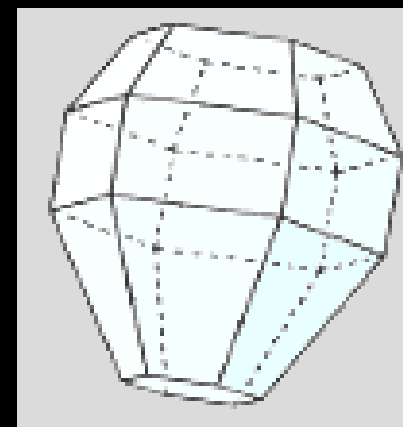
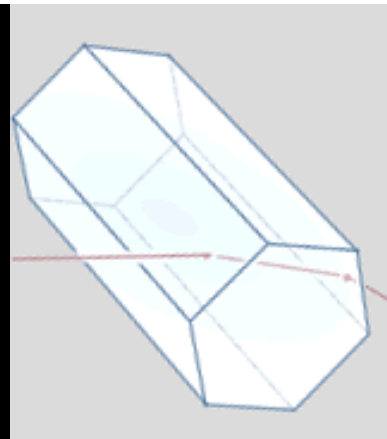
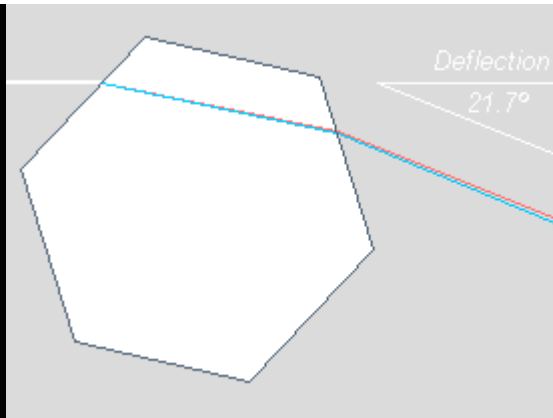




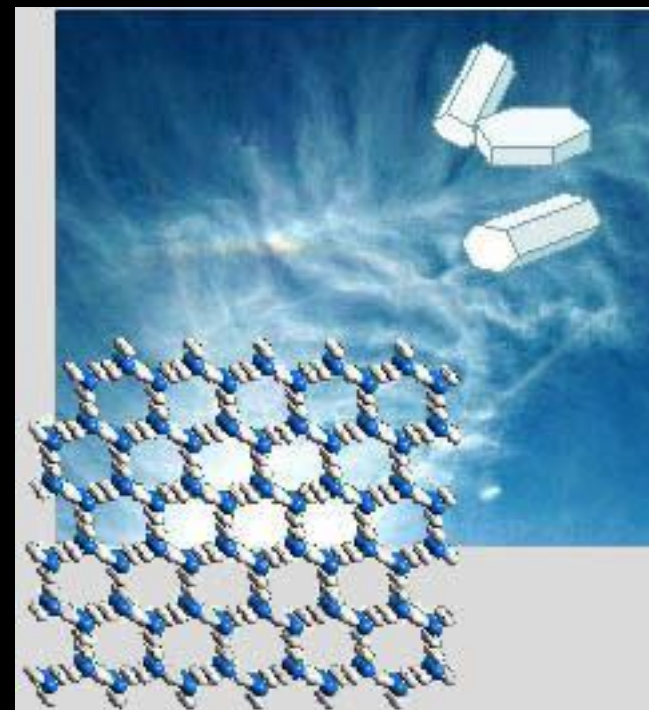
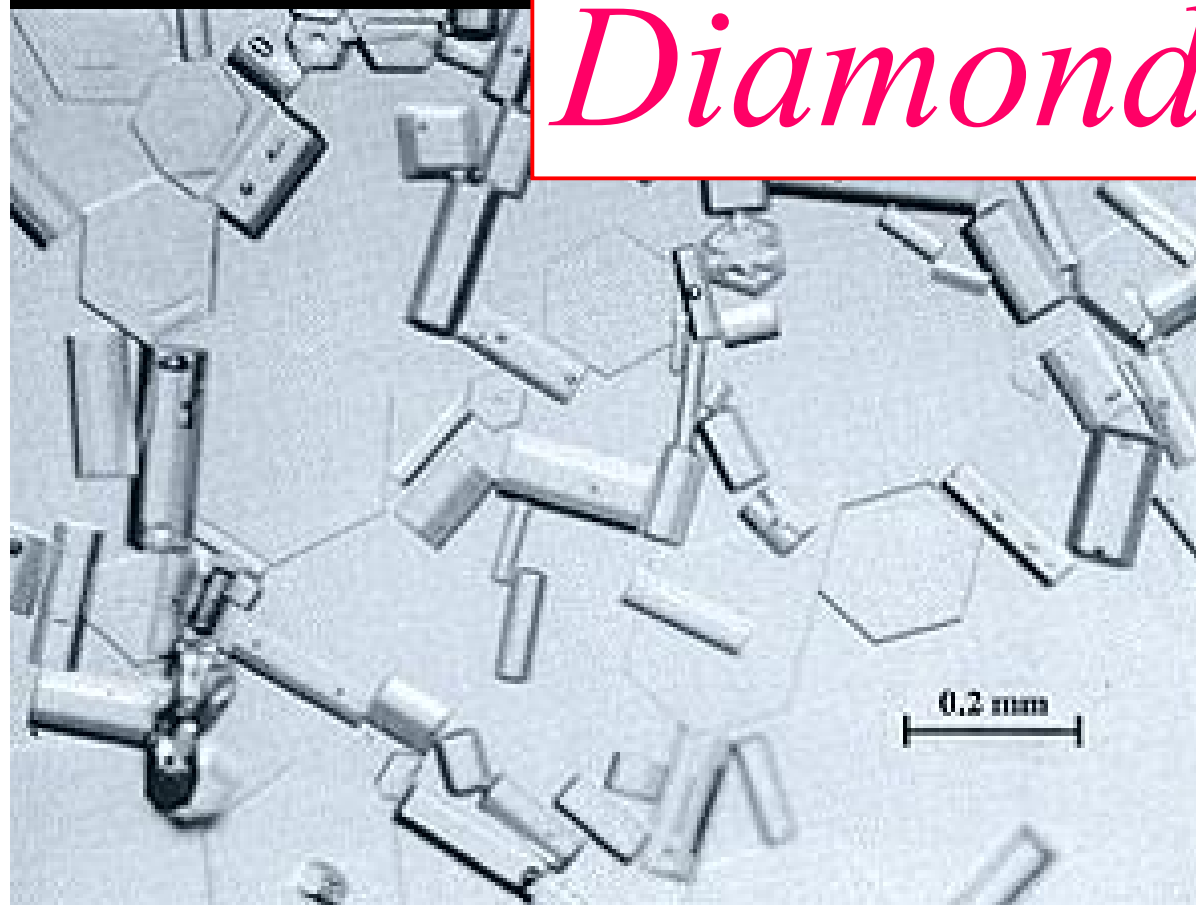








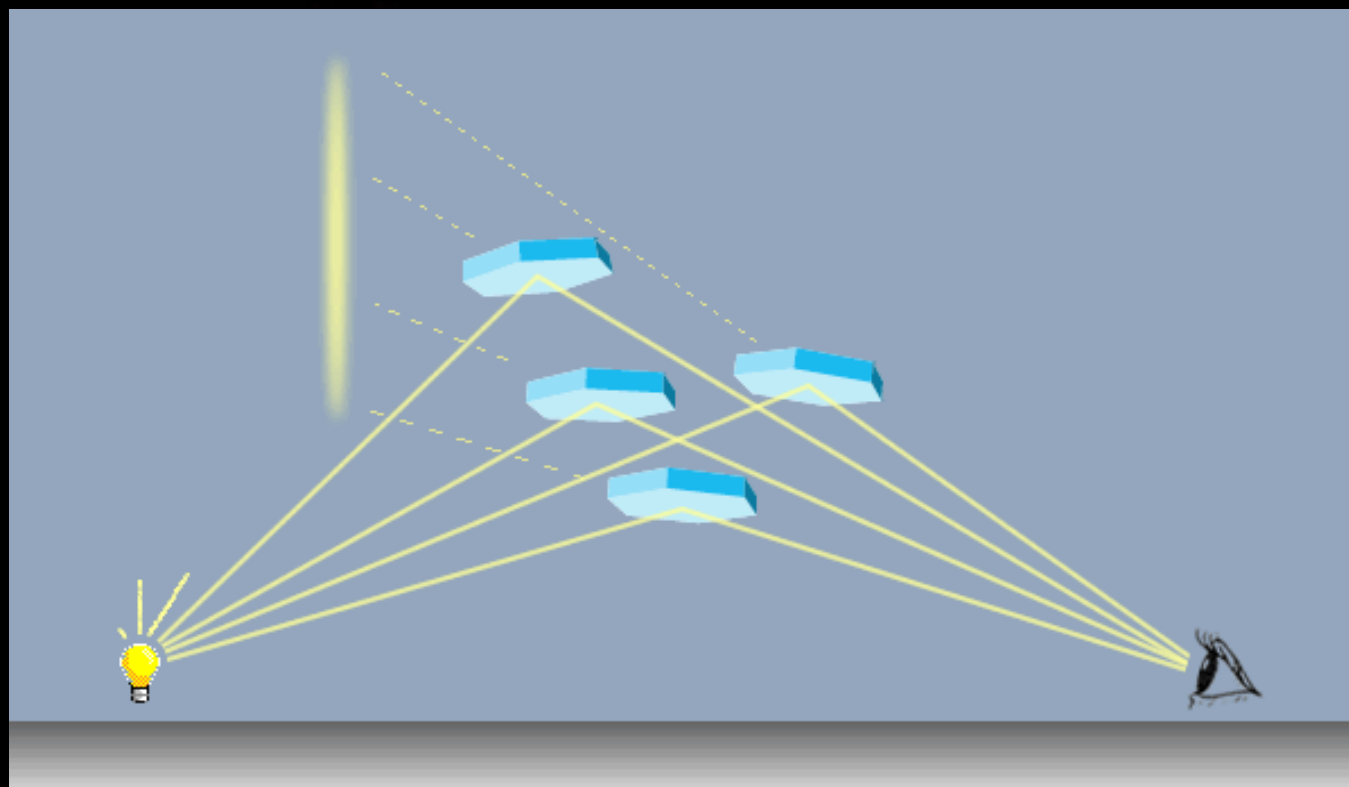
# *Diamond dust*



# Оптические эффекты, вызываемые кристаллами льда



# Световые столбы

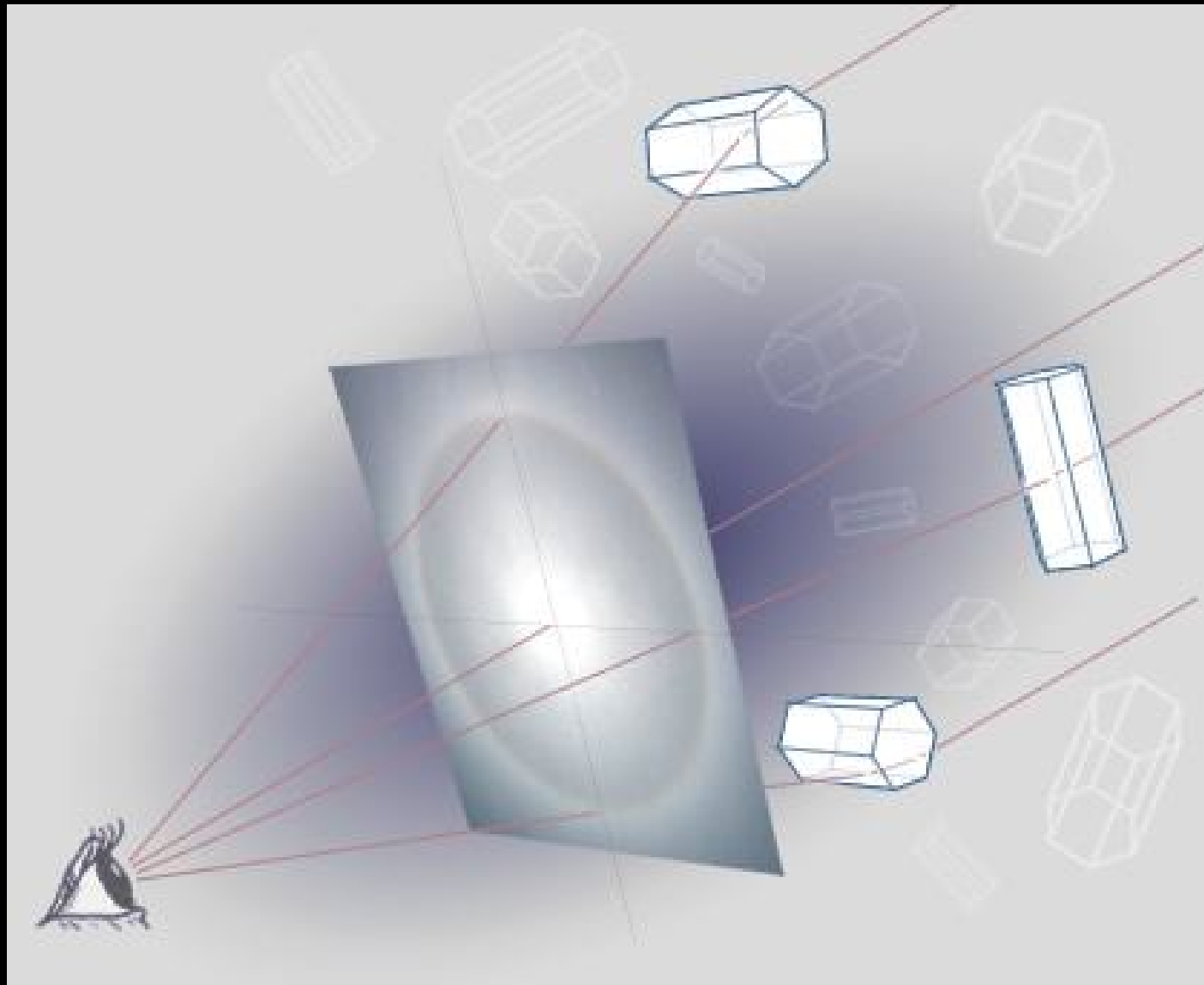


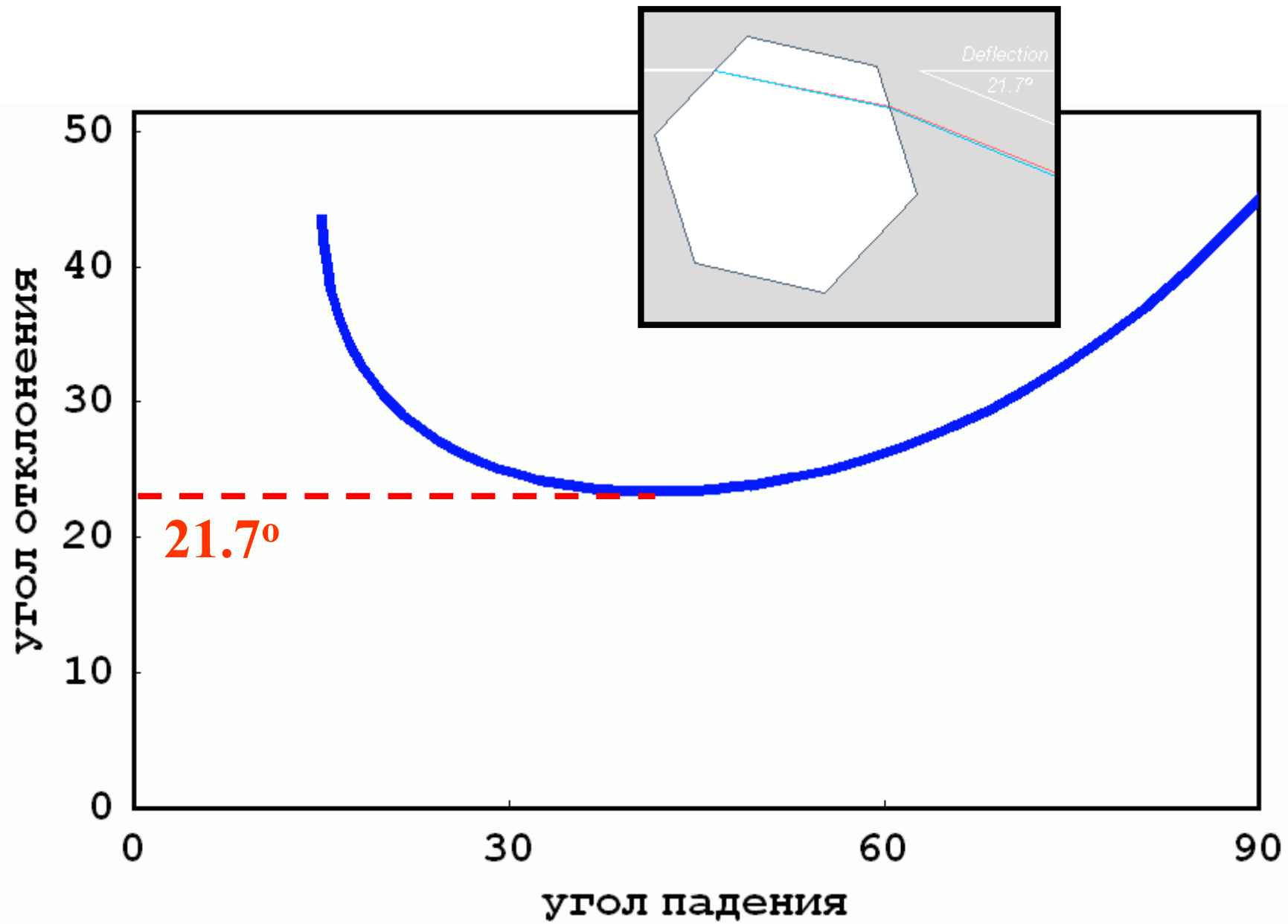


# Световой столб (Sun Pillar)



# Гало

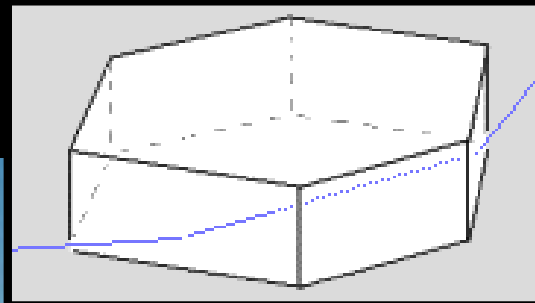
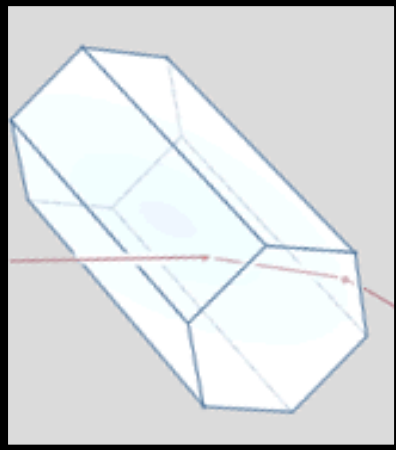




# 22 град. гало вокруг Луны



# Ложные солнца (Sundogs)



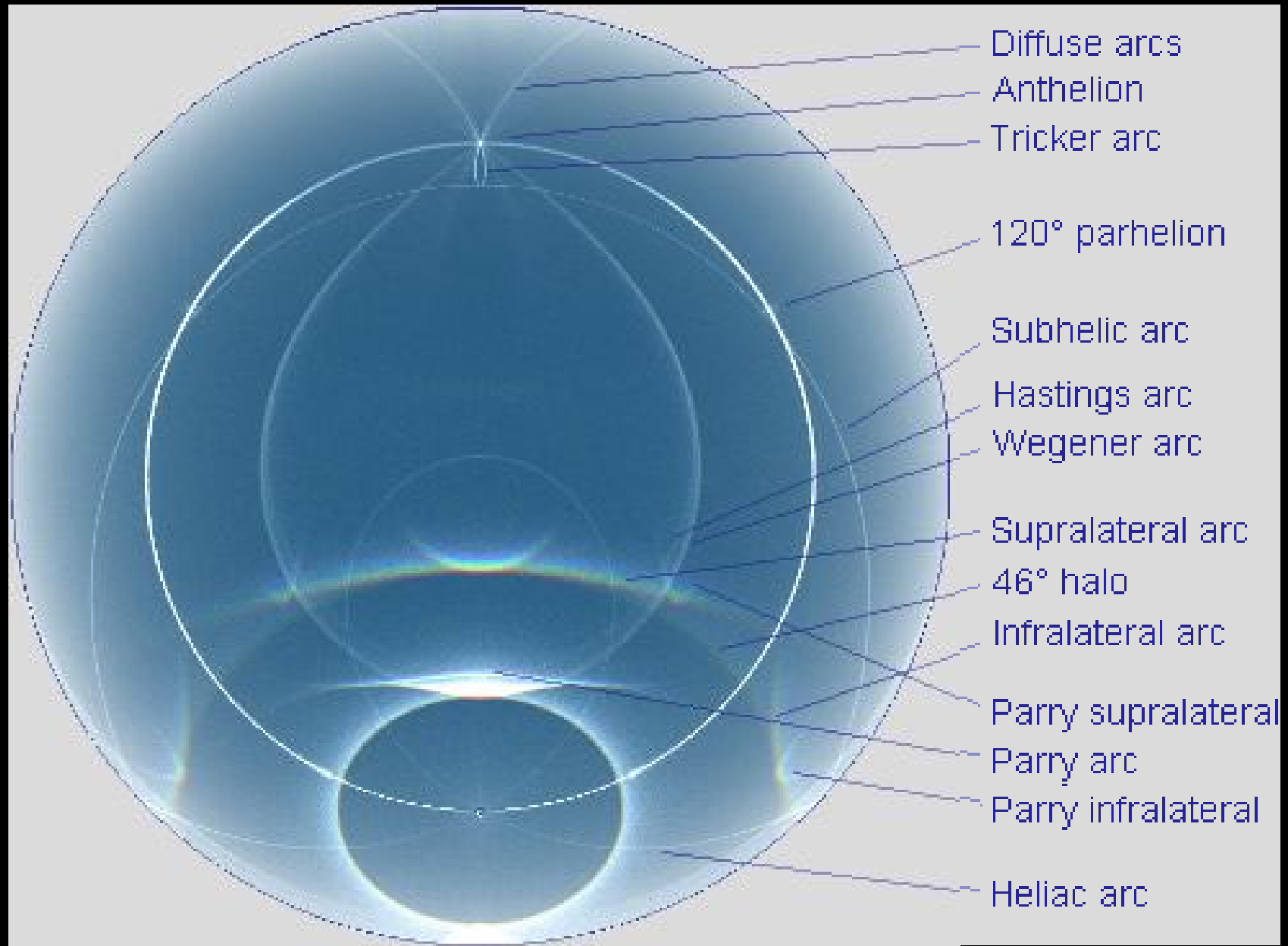


**Москва, 10/12/2021**



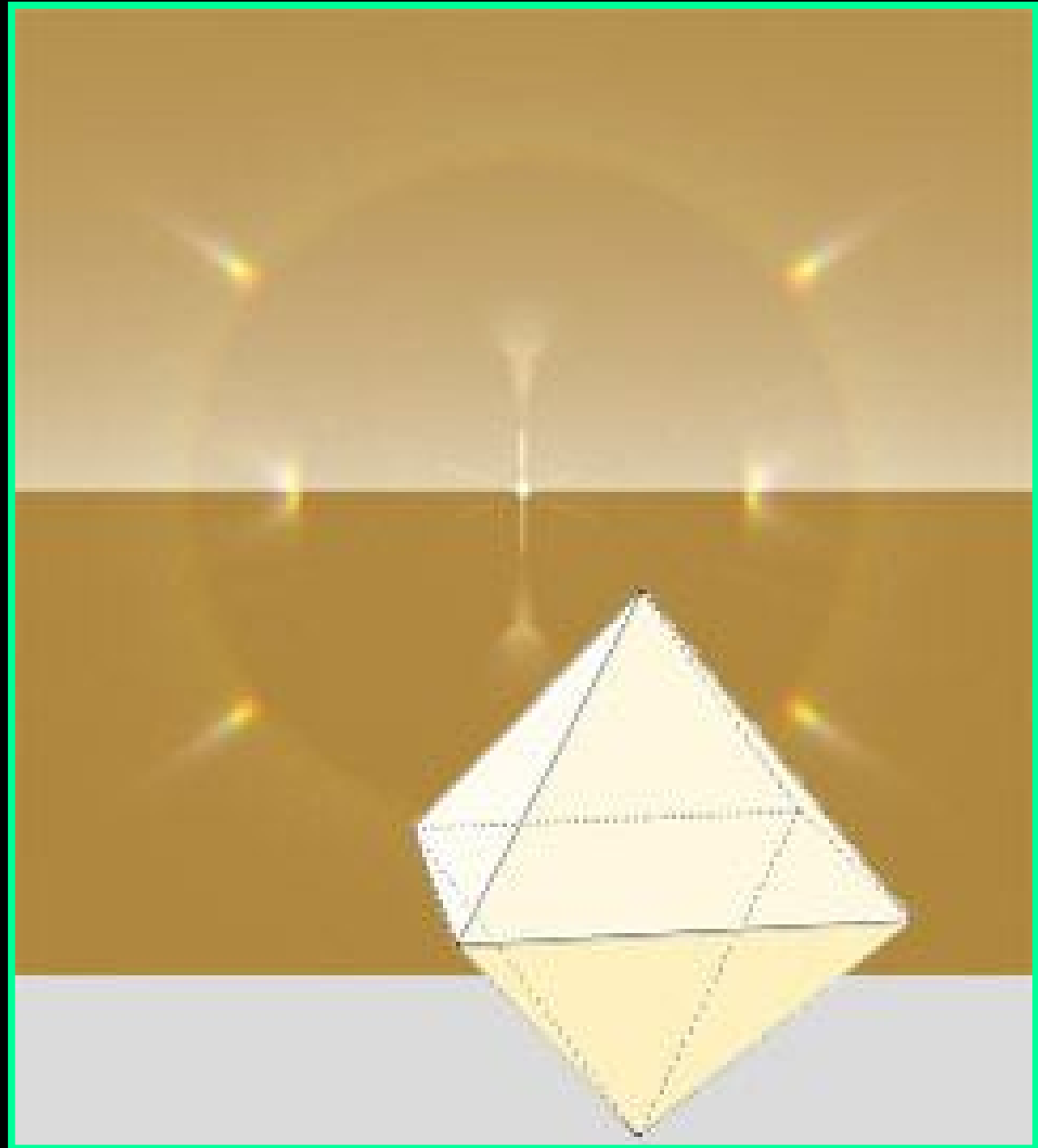
# Ложная Луна (Moon Dogs)







**Кристаллы  
аммония  
(атмосферы  
Юпитера и  
Сатурна)**



# Atmospheric Optics

**<http://www.atoptics.co.uk/>**