

*Просите, и дано будет вам; ищите, и найдете; стучите, и отворят вам; ибо всякий просящий получает, и ищущий находит, и стучащему отворят.*

*Евангелие от Матфея*

## **ОПТИКА И СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.**

### **Введение**

Физическая оптика – «трудный» раздел школьного курса физики. В школьных учебниках он изложен поверхностно. Теория дифракции света от щели, образование венцов, разрешающая способность оптических приборов, границы применимости геометрической оптики – не нашли достойного места в учебниках, а информация об интерференции и дифракции света нуждается в расшифровке на уроках. Геометрическая оптика, как и в основной школе, начинается с повторения основных законов и заканчивается линзами и их применением. Не лучше ли было вывести эти законы из принципа Ферма, ведь производную от сложной функции ученики к тому времени уже берут? С тем же, почему свет из всех путей между двумя точками выбирает тот, на прохождение которого затрачивает минимальное время, разберемся в квантовой физике. Обычному учителю физики эта задача не по силам, он учит так, как его учили, да и никто не требует, чтобы он учил лучше! Вот и получается, что о свойствах света, с помощью которого мы получаем основную долю информации об окружающем мире, ученик не имеет ясной картины. Как же ему изучать квантовую физику, где представление о частице-волне центральное? Надежда на новые технологии? Работа в сети - это добро, но тот, кто часто в ней бывает, хорошо знает, что Интернет не панацея. Преподаватель, который не умел учить без электроники, он и с электроникой ни чему полезному не научит. Например, интересный пример использования интерактивной доски привела учительница физики на уроке по теме «Оптические иллюзии», когда уточка у нее при повороте на  $180^0$  превращалась в зайца. Таких иллюзий видимо невидимо и, загружать ими компьютер – пустая трата времени. Наш сегодняшний Интернет на уроке – это чаще всего физика картинок, которая не заменит даже простую демонстрацию, и которая ничего не дает для развития мышления. Как сказал Анри Пуанкаре: «Наука строится на фактах. Но сбор фактов является наукой не более чем груда камней – домом». Компьютер и интерактивная доска - высокотехнологичные средства обучения и эффективно они будут работать только тогда, когда умные люди напишут учебные программы, обучение по которым столь же эффективно, как и индивидуальное обучение с толковым учителем. Абсолютное большинство учителей глубоко осознали свое главное предназначение – быть учителем, и что

уровень подготовки учителя является важнейшим из факторов, определяющих успехи или неуспехи учеников по его предмету. Понятно это и ученикам, потому что за успехами каждого из них стоит учитель! Независимо от того, в какой школе обучается ученик, ему необходим минимум сведений о природе и обществе (культурное пространство), который заложен в государственном стандарте образования. Если мы единый народ, то должны разговаривать на одном языке! Некоторым участникам образовательного пространства всегда хотелось эти стандарты обойти и разработать свои, однако любой серьезный мониторинг образовательного процесса в данной конкретной школе и отдаленные результаты обучения с неизбежностью продемонстрируют, что «король был, мягко говоря, не совсем одет». Невозможно «построить социализм» в одной конкретной школе, области и государстве, если весь остальной мир живет и развивается по другим законам. Невозможно достичь высокого качества образовательного процесса и в том образовательном учреждении, где отношение к школе у типичных её представителей лежит между двумя крайностями: «школа для меня» и «школа для учеников».

Специальная теория относительности в учебниках представлена учебным материалом для ознакомительного чтения, поэтому о каких-либо её применениях для решения задач в ядерной физике и физике элементарных частиц говорить не приходится. Единственный постулат, который надежно усваивают ученики, о том, что скорость света одинакова во всех системах отсчета и не зависит от скорости движения источника света. Опыт же преподавания этой теории показывает, что и за шесть часов можно научить учеников рассчитывать стоимость перелета к ближайшей звезде за данное время, определять энергии и импульсы компонент распавшейся релятивистской частицы, и ее массу. Школьные уроки физики часто абстрактны, поскольку учителя уделяют все внимание фундаментальным идеям и законам, открытым, по большей части, еще в XIX и в XX веке, а то и подготовке к ЕГЭ. От этого не уйти, поскольку именно они составляют базовую часть физического знания. Однако необходимо знакомить учеников и с тем, что происходит на переднем фронте науки, какие открытия совершаются в физике в наши дни и что еще предстоит открыть. Это чрезвычайно мотивирует их, увлекает, подвигает некоторых из них стать учеными. При этом они не встраивают новое знание в уже сложившуюся картину мира, а расширяют и изменяют свою картину мира! Как это сделать без хорошего знания оптики и СТО, я не знаю!

Учитель физики НБМОУ "Гимназия № 44"

А. Найдин

*Что такое фотоника?*

## Оглавление

1. Введение .....	2-3
2. Примерные планы уроков по геометрической оптике.....	4-26
3. Примерные планы уроков по физической оптике.....	27-76
4. Примерные планы уроков по СТО.....	77-111
5. Литература .....	112

*Уроки, задачи, вопросы, творческие домашние задания.  
Анатолий Найдин*



г. Новокузнецк

2014 г



*Снова жадными очами  
Свет живительный я пью.  
Ф.Тютчев  
Чудный дар природы вечной,  
Дар бесценный и святой,  
В нём источник бесконечный  
Наслажденья красотой.  
Гимн свету, прозвучавший в опере  
П. И. Чайковского “Иоланта”*

*Скорость распространения электромагнитных волн так точно совпадает со скоростью света, что у нас есть хорошее основание предположить, что сам свет является электромагнитным потоком, который распространяется через электромагнитное поле в виде волны.*

*Максвелл*

## **ПРИМЕРНЫЕ ПЛАНЫ УРОКОВ ПО ОПТИКЕ**



*Говорят, что между двумя противоположными мнениями лежит истина, но это не так. Между двумя противоположными мнениями лежит проблема.*

*Иоганн Вольфганг Гёте*

*Мы имеем серьезные основания сделать заключение, что сам по себе свет (включая лучистую теплоту и другие излучения) является электромагнитным возмущением в форме волн, распространяющихся через электромагнитное поле согласно законам электромагнетизма.*

*Д. Максвелл*

Урок 20.

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА. СКОРОСТЬ СВЕТА.**

**В чем гениальность предсказаний Максвелла?**

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учащихся с гипотезой Максвелла на природу света. Дать представление о методах измерения скорости света.

**ТИП УРОКА:** лекция.

**ОБОРУДОВАНИЕ:**

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Объяснение
3. Закрепление
4. Задание на дом



**II.** Я, как в хорошем сериале, перескажу краткое содержание всех предыдущих серий.

*Цитаты преподавателей МФТИ*

Обобщающая таблица "Электродинамика": уравнения Максвелла, электромагнитное поле, скорость распространения электромагнитных волн. Максвелл: *"... мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений"*.

Эта гипотеза получила блестящее подтверждение во многих экспериментах, большинство из которых мы с вами повторим. Они станут убедительными доказательствами волновой и электромагнитной природы света. Сейчас нам известно, что свет - электромагнитные волны с длиной волны в вакууме от 0,4 до 0,72 мкм. Все электромагнитные волны, в том числе и свет, распространяются в свободном от вещества пространстве с постоянной скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/с. А триста лет назад? А еще раньше? Трудно сказать, когда люди начали размышлять над природой вездесущего света, который по библии был создан богом на третий день и до сих пор служит источником большей части наших знаний об окружающем мире ( $10^9$  бит информации в секунду). Лингвистические аргументы: свидетель (со-видетель), очевидно, по-видимому, сновидения.

Как отец говорил: **ученье свет, а не ученье - чуть свет и на работу!**

Прежде всего, **свет – переносчик действия на расстояние.** Два способа передачи действия на расстояние и две теории на природу света.

*Нет такой вещи в обычном смысле слова, такого тела, которое двигалось бы от Солнца к Земле или от видимого объекта к глазу, а есть состояние, движение, возмущение, которые были сначала в одном месте, затем в другом.*

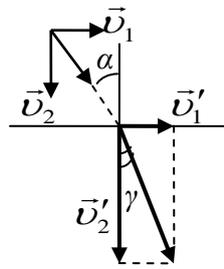
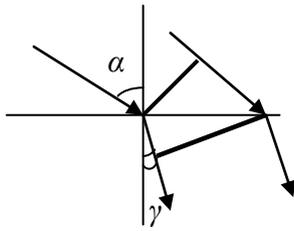
*Х. Гюйгенс*

*Справедливо, что я заключаю из моей теории о телесности света, но я делаю это без всякой абсолютной определенности.*

*И. Ньютон*

Кратко рассказать о достоинствах и недостатках каждой теории.

Демонстрация независимости распространения световых пучков и прямолинейности распространения света. Объяснение этих явлений волновой и корпускулярной теориями. Демонстрация преломления света на границе "воздух - вода". Преломление света с точки



зрения волновой и корпускулярной теорий. С точки зрения волновой теории скорость света при переходе из воздуха в воду должна уменьшаться, а с точки зрения корпускулярной теории – увеличиваться. Ньютон считал, что при падении света на более плотную среду, частицы света испытывают притяжение, и скорость их

увеличивается. Свет ведет себя по-разному между воздухом и водой – одна его часть отражается, а вторая преломляется, что также невозможно объяснить теорией Ньютона.



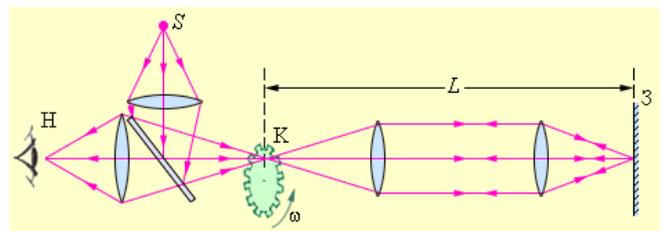
**Решающий эксперимент. Необходимо измерить скорость света в воздухе и в воде, после чего сравнить их и сделать вывод в пользу той или другой теории. Измерение скорости**

**света в вакууме.** Астрономический метод (Рёмер):  $c = \frac{D}{22 \text{ мин}} = 300 \cdot 10^6 \text{ км}/1320$

$c = 227000 \text{ км/с}$ . Уверенность в точности закона тяготения привела к новому открытию!

**Лабораторный метод определения скорости света, предложенный Галилеем.** Опыт Физо:  $c = 313000 \text{ км/с}$ .

Измерение скорости света в воде (Физо). Скорость света в воде оказалась в 1,33 раза меньше, чем в вакууме.



Какая из теорий получила блестящее подтверждение в эксперименте?

**Более точные методы измерения скорости света.**

*... то, что скорость света является категорией, недоступной человеческому воображению, и что, с другой стороны, её возможно измерить с необыкновенной точностью, делает ее определение одной из самых увлекательных проблем, с которой может столкнуться исследователь ...*

*А. Майкельсон*

$$c = 299792458 \pm 1,1 \text{ м/с}$$



Тьма тоже распространяется со скоростью света! Поскольку скорость света измерена так точно, принято новое определение метра. **Метр – это расстояние, проходимое в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299792458 долю секунды.**

Свет распространяется от источника к приемнику с огромной скоростью без какого-либо толчка и проходит все промежуточные точки на линии светового луча!

*Это почти неподвижности мука  
Мчатся куда – то со скоростью звука,  
Зная прекрасно, что есть уже где – то  
Некто,*

*Летящий,*

*Со скоростью*

*Света!*

*Леонид Мартынов*

Сегодня мы знаем, что свет – это не только способ переноса энергии от Солнца к Земле, делающей жизнь на нашей планете возможной, но и невидимая сеть из фотонов, которая позволяет электромагнетизму работать на расстоянии.

**III. Задача:**

1. Свет от ближайшей звезды достигает Земли через 4,3 года. Каково расстояние от этой звезды до Земли?

#### IV. § 40. Упр. 5, № 1,3,4.

1. Философ Шопенгауэр, идеалист и скептик, утверждал по поводу корпускулярной теории света, что она не дает возможности увидеть в зеркале собственную физиономию. В чем причина для этого скептицизма?
2. Почему пуля может срикошетить от поверхности водоема?
3. Предложите свой способ измерения скорости света.

*Скажу, что из всех лучей, падающих из данной точки и, отражающихся в данную точку, минимальны те, которые от плоских и сферических зеркал отражаются под равными углами.*

*Герон Александрийский*

### Урок 21.

## ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

**Почему невозмущенная поверхность воды - «зеркальная гладь»?**

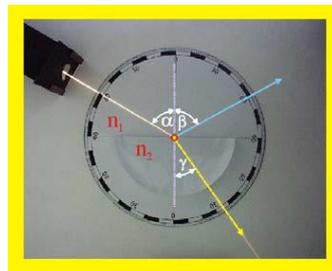
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Вывести законы распространения световых лучей (законы, геометрической оптики) на основе принципа Ферма.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** осветитель для теневого проецирования, экран, непрозрачный предмет, лазер ЛТ-209, оптическая шайба с принадлежностями, прибор для демонстрации солнечных затмений.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



### II. Опрос фундаментальный:

1. Электромагнитная природа света. 2. Методы измерения скорости света.

**Задачи:**

1. В историческом опыте Физо по определению скорости света расстояние между колесом, имеющим 720 зубцов, и зеркалом было 8633 м. Свет исчез первый раз при частоте вращения зубчатого колеса  $12,67 \text{ с}^{-1}$ . Какое значение скорости света получил Физо?

**Вопросы:**

1. Для чего в научных исследованиях стараются повысить точность измерений?
2. Почему Г. Галилею не удалось измерить скорость света в своем опыте?
3. Как мог Г. Галилей в своей попытке измерить скорость света убедиться в том, что засечки моментов времени были источником огромных ошибок?
4. Зависит ли скорость света от свойств той среды, в которой свет распространяется?
5. При слиянии нейтронных звезд возникший гравитационно-волновой сигнал и гамма-всплеск пришли практически одновременно. Почему?

6. Лоренц предположил, что все электромагнитные волны (световые и радиоволны) возникают в результате колебаний микроскопических заряженных частиц – электронов. Как эту гипотезу подтвердить?
7. Как вы думаете, каким был результат опыта Физо по измерению скорости света в движущейся воде?

**III. Световой пучок. Методы получения узкого светового пучка. Световой луч - линия, вдоль которой распространяется световая энергия. Геометрическая оптика – наука о световых лучах!** В жизни мы постоянно сталкиваемся с законами геометрической оптики, даже если их формулировка нам не знакома: солнечные зайчики, резкий отблеск от металла, непонятное положение тел в воде. Принципиальная невозможность получения светового луча, поэтому на практике мы будем иметь дело с узкими световыми пучками. В традиционной микроскопии из-за дифракции света (попадание света в область геометрической тени) зондирующий луч не может иметь диаметр менее 200 нм (в синих лучах). Законы, установленные для световых лучей (законы геометрической оптики), приближенно справедливы и для световых пучков.

**1. Световые лучи распространяются независимо друг от друга.**

Демонстрация с двумя осветителями для теневой проекции или с оптической шайбой (два светофильтра). Остальные три закона геометрической оптики мы выведем, пользуясь принципом Ферма.

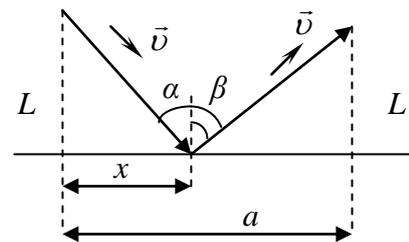
**Принцип Ферма:** Луч света распространяется между двумя точками по пути, на прохождение которого он затрачивает минимальное время.

**2. Закон отражения света:**

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + L^2}}{v} + \frac{\sqrt{(a-x)^2 + L^2}}{v}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v\sqrt{x^2 + L^2}} - \frac{(a-x)}{v\sqrt{(a-x)^2 + L^2}} = 0$$

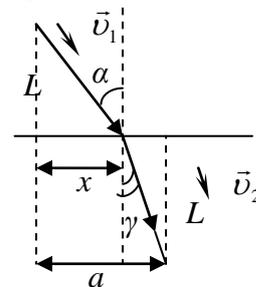
$\sin\alpha = \sin\beta$  и  $\alpha = \beta$ .



**3. Закон преломления света:**

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + L^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(a-x)^2 + L^2}}{v_2}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_1\sqrt{x^2 + L^2}} - \frac{(a-x)}{v_2\sqrt{(a-x)^2 + L^2}} = 0$$



$\frac{\sin\alpha}{v_1} = \frac{\sin\gamma}{v_2} \rightarrow \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  (закон Снеллиуса).

**Абсолютный показатель преломления среды.** Примеры:  $n_{\text{воз}} = 1,00\dots$ ,  $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,33$ ;  $n_{\text{стекла}} = 1,5$  (крон) – 1,9 (флинт). **Физический смысл абсолютного**

**показателя преломления среды:**  $n = \frac{c}{v}$ . При распространении в веществе свет взаимодействует с молекулами, в результате чего его скорость уменьшается. Соотношение между абсолютными показателями преломления двух сред и их относительным показателем преломления:  $n = \frac{c}{v_1}$ ,  $n = \frac{c}{v_2}$ ,  $n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$ .

Зависимость показателя преломления вещества от концентрации в нем примеси и других свойств. Преломлением обусловлен целый ряд оптических иллюзий: излом карандаша в стакане с водой, короткие ноги у человека в воде, миражи.

**4. Закон прямолинейного распространения света.** При  $v_1 = v_2$  (однородная и изотропная среда),  $\alpha = \gamma$  и, следовательно, **в однородной и изотропной среде световые лучи распространяются прямолинейно.**

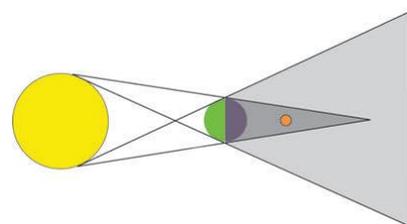
**5. Принцип обратимости световых лучей.**

Первоначально принцип Ферма был рожден интуицией или ясновидением: «природа всегда действует кратчайшим или наиболее простым путем». Эволюция даже очень сложной механической системы должна подчиняться принципу наименьшего действия. Разве не говорят нам психологи о минимизации действия? Найдите счастье в простой жизни. Эффективно работайте, избегайте бесполезных конфликтов и не становитесь рабами ненужных вещей. Вот вам и счастье!

*Молюсь оконному лучу:*

*Он бледен, тонок, прям.*

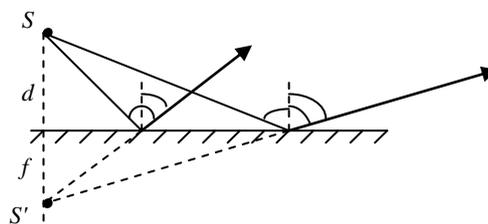
*Анна Ахматова*



**Применение законов геометрической оптики.**

Прямолинейностью распространения света объясняется образование тени и полутени, солнечные и лунные затмения (демонстрация и рисунок).

**Плоское зеркало.** Построение изображения предмета в плоском зеркале. Мнимое изображение предмета. Размеры предмета и его изображения. Расстояние от предмета до зеркала ( $d$ ) и от зеркала до изображения предмета ( $f$ ):  $d = f$ . Область видения. Прохождение света через плоскопараллельную пластинку.



**IV. Задачи:**

1. Палка, стоящая вертикально на горизонтальной площадке, освещаемой солнечным светом, имеет высоту 1,2 м и отбрасывает тень длиной 0,9 м. Палку начинают медленно наклонять в направлении отбрасываемой ею тени так, что ее нижний конец не сдвигается с места. Длина тени при этом до определенного момента увеличивается, а потом начинает уменьшаться. Чему была равна максимальная длина тени от палки?
2. Требуется осветить дно колодца, направив на него солнечные лучи. Как надо расположить плоское зеркало по отношению к земле, если лучи Солнца падают под углом  $60^\circ$  к горизонту?

3. Взрыв Тунгусского метеорита наблюдался на горизонте в городе Киренске в 350 км от места взрыва. Определите, на какой высоте произошел взрыв.
4. На какой высоте летит самолет, если с башни маяка высотой 30 м над поверхностью воды он виден под углом  $0,06$  рад к горизонту, а его отражение в воде – под углом  $0,08$  рад к ее поверхности?
5. Бассейн прямоугольной формы шириной 4,30 м и глубиной 5,00 м полностью заполнен водой. Сторона в 4,30 м ориентирована с востока на запад. Бассейн находится на экваторе, так что Солнце в полдень находится в зените. Оцените, в какое время дно бассейна окажется полностью в тени. Считайте, что показатель преломления воды равен 1,33. 16.00

*Вопросы:*

1. Что чернее: бархат или черный шелк? Три рода войск имеют черные бархатные погоны: артиллеристы (19 ноября 1942 г.), танкисты (Сталинград и Курская дуга), шофера (Ладога).
2. Почему "провода" в линиях оптической связи могут пересекаться друг с другом?
3. Почему тень от ног человека на земле резко очерчена, а тень от головы расплывчата?
4. Почему неровности дороги днем видны хуже, чем ночью при освещении дороги фарами автомобиля?
5. Человек, стоящий на берегу озера, видит на гладкой поверхности воды изображение Солнца. Как будет перемещаться это изображение при удалении человека от озера?
6. Заходящее Солнце освещает решетчатую ограду. Почему в тени, отбрасываемой решеткой на стену, отсутствуют тени вертикальных прутьев, тогда как тени горизонтальных отчетливо видны? Толщина прутьев одна и та же.
7. Если на лист белой бумаги попадает растительное масло, то она становится прозрачной, так что через нее можно даже прочесть текст, напечатанный с другой стороны листа. Как это объяснить?
8. Почему на поверхности реки или озера против Солнца видна сверкающая дорожка? Как она образуется? Будет ли наблюдаться явление при идеально спокойной поверхности воды? Почему дорожка всегда ориентирована на наблюдателя?
9. Зимой, когда земля покрыта снегом, лунные ночи бывают светлее, чем летом. Почему?
10. Почему параллельные лучи света остаются параллельными, пройдя огромные расстояния, что позволяет нам видеть отдельные звезды?
11. Какова должна быть наименьшая высота вертикального зеркала, чтобы человек в нем мог видеть свое изображение во весь рост, не изменяя

положения головы?

12. При сильной облачности можно увидеть светлые и темные лучи, выходящие из облаков вблизи Солнца. Как они возникают?
13. Можно ли при помощи плоского зеркала (системы плоских зеркал) получить действительное изображение точечного источника света?
14. Почему иногда ночью зимой над уличными фонарями видны вертикальные световые столбы?
15. Сколько изображений свечи можно увидеть между двумя параллельными зеркалами? Почему они возникают? Чем дальше от вас изображение свечи, тем оно более тусклое. Почему?
16. Человек разглядывает свое изображение, создаваемое зеркальным шаром. Где находится его изображение относительно центра шара?
17. Как турист с помощью угломерного инструмента и блюдца с водой сможет измерить высоту Солнца, если горизонт закрыт горным хребтом?

**V. §§ 41-42. Упр. 5, № 5-11.**

1. Изготовьте камеру – обскуру (можно изготовить из алюминиевой банки или обувной коробки) и опишите эксперименты с ней.
2. Почему в ясный солнечный день при сближении двух предметов, например, карандашей или пальцев рук, их тени на экране тянутся друг к другу и "слипаются" раньше, чем соприкасаются сами предметы?
3. Правда ли, что плоское зеркало меняет местами лоб и затылок, поэтому правое становится левым и наоборот?
4. Создадут ли параллельные зеркала бесконечное количество отражений?

**Для любознательных:** В реальности мы не увидим бесконечного количества отражений свечи, так как зеркала не идеальны и некоторую часть падающего на них света они поглощают и рассеивают. Кроме того, согласно законам перспективы, изображения свечи будут уменьшаться, и, в конце концов, мы перестанем их различать. Также можно заметить, что далёкие изображения свечи меняют свой цвет – зеленеют, это происходит по той причине, что зеркало не одинаково отражает и поглощает свет разной длины волны.

1. Утром через маленькое отверстие в шторе, закрывающей окно, на противоположную стену падает луч солнечного света. Оцените, на какое расстояние за минуту переместится пятно света на экране.
2. Оцените минимальное время лунного затмения (до Луны примерно  $4 \cdot 10^5$  км).
3. Проткните в фольге от шоколадной конфеты маленькое отверстие и, расположив его как можно ближе к глазу, посмотрите на какой-нибудь ярко освещенный текст, помещенный, тоже близко к глазу. Что вам удалось увидеть? Проведите эксперименты и попытайтесь объяснить наблюдаемое явление, используя известные вам законы распространения света.
4. Возьмите круглый стакан и установите прямо за ним вертикальную измерительную линейку. Глядя через противоположный край стакана на нижнее деление шкалы, наливайте в стакан воду, не изменяя положения головы. Что вы наблюдаете? Как объяснить наблюдаемое явление? Произведя необходимые измерения, определите показатель преломления среды.
5. Если смотреть на освещенную поверхность через широкое отверстие корпуса шариковой ручки, то вокруг узкого отверстия в корпусе видно несколько концентрических темных и светлых колец. Объясните, почему наблюдаются эти кольца?
6. Если добавлять в водный раствор молока сахар, то он станет прозрачным. Почему?

7. Почему свежеснеженный снег отражает более 90% падающего света, а пропитанный водой в оттепель темнеет?
8. Пользуясь аналогией между распространением луча света в среде с непрерывно изменяющимся по высоте показателем преломления и движением тела под действием силы тяжести, решите задачу о брахистохроне кривой наискорейшего спуска.
9. В 2001 г. физики из Университета штата Калифорния в Сан-Диего описали необычный композитный материал с отрицательным показателем преломления, что существенно меняло закон преломления Снеллиуса. Почему?
10. Сколько изображений свечи, помещенной между двумя плоскими параллельными зеркалами можно наблюдать в зеркале, если оно отражает 98% падающего на него света. Изображение практически неразлично, если в глаз попадает менее 1 % от первоначально падающего света.
11. Закрепив на стене светящуюся лампочку, получите зайчик на той же стене. Если зеркало будет двигаться с некоторой скоростью по направлению к стене, то с какой скоростью и куда будет перемещаться зайчик? Каковы его размеры?
12. Как далеко простирается тень Земли?

*Обнаружив преломление света, естественно было поставить вопрос: каково соотношение между углами падения и преломления?*

*Л. Купер*

## Урок 22.

## ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

**Почему поверхность моря кажется более яркой у горизонта, чем вблизи от нас?**

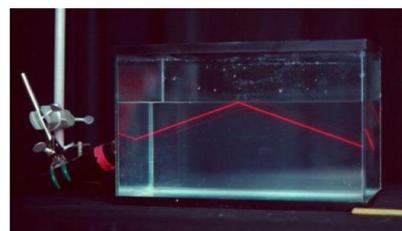
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников с явлением полного внутреннего отражения света и его практическими применениями.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** оптическая шайба с принадлежностями, лазер ЛГ – 209 с принадлежностями, обобщающая таблица "Закон преломления света".

**ПЛАН УРОКА:**

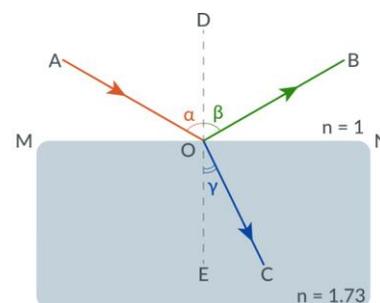
1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Закон отражения света. 2. Закон преломления света. 3. Построение изображения предмета в плоском зеркале.

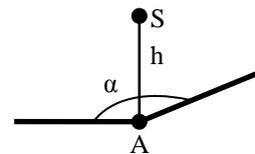
**Задачи:**

1. На дне ручья лежит камешек. Мальчик хочет попасть в него палкой. Прицеливаясь, мальчик держит палку в воздухе под углом  $45^\circ$ . На каком расстоянии от камешка, воткнется палка в дно ручья, если его глубина 12 см?
2. Круглый бассейн радиусом  $R = 5$  м залит до краев водой. Над центром бассейна на высоте  $h_1 = 3$  м от поверхности воды висит лампа. На какое расстояние от края бассейна может отойти человек, рост которого  $h_2 = 1,8$  м, чтобы все ещё видеть отражение лампы в воде.
3. Луч, отраженный от поверхности стекла с



показателем преломления 1,73, образует с преломленным лучом прямой угол. Определите угол падения и угол преломления.

4. Под каким углом должен падать луч света на поверхность материала с показателем преломления 1,732, чтобы угол преломления был в два раза меньше угла падения?



5. Два плоских зеркала образуют двугранный угол  $\alpha = 150^\circ$ . Точечный источник света  $S$  расположен на перпендикуляре к одному из зеркал, восстановленном в точке  $A$  на расстоянии  $h = 10$  см от зеркала. Каково расстояние  $l$  между изображениями источника в зеркалах?
6. Комната имеет длину 4 м и высоту 3 м. На одной стене комнаты вертикально висит зеркало. Человек стоит на расстоянии 1 м от зеркала лицом к зеркалу. Какой должна быть минимальная высота зеркала, чтобы человек мог видеть находящуюся за его спиной стену в полную высоту (от пола до потолка)?
7. Солнечные лучи падают перпендикулярно на непрозрачный круг и на экран, установленный на расстоянии 3 м за кругом. Найдите минимальное значение диаметра круга, при котором на экране существует область, куда не попадают прямые солнечные лучи. Известно, что угловой диаметр Солнца  $0,5^\circ$ .

Примечание: Угловой диаметр Солнца  $0,5^\circ$ . «Шаг» Солнца по небосводу (два диска) примерно равен  $1^\circ$ , и таких шагов в сутки 360. Отсюда возникло деление окружности на  $360^\circ$ .

*Вопросы:*

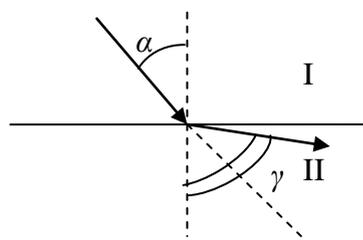
1. Радиоволны отражаются от металлической крыши зеркально, а свет при отражении от этой же крыши сильно рассеивается. Почему?
2. Какой угол образуется между отраженным и преломленным лучом, если угол падения луча на границу раздела двух сред  $\alpha = 18^\circ$ , а угол преломления в три раза меньше угла падения.  $156^\circ$
3. В каких случаях лучи света могут отклоняться от прямолинейного распространения?
4. Почему ночью лужа на дороге кажется водителю темным пятном на светлом фоне?
5. Почему Солнце и Луна у горизонта кажутся овальными?
6. Почему, заглянув через отверстие внутрь раскаленной печи, мы не увидим четких контуров находящихся там предметов?
7. Плоская поверхность с высоким коэффициентом отражения — вот два свойства, делающие невозмущенную поверхность воды прекрасным зеркалом («зеркальная гладь»). Поясните.
8. Однажды, пролетая над зеркально ровной поверхностью пруда, Карлсон обратил внимание на то, что его скорость относительно пруда в точности равна его скорости удаления от своего изображения в воде. Под каким углом к поверхности пруда летел Карлсон?



9. Почему летом с горы видно не так далеко, как зимой?
10. Луч света падает на систему из двух взаимно перпендикулярных зеркал. Угол падения на плоскость первого зеркала составляет  $15^{\circ}$ . Каков угол отражения луча от второго зеркала?
11. Почему цвет облаков может изменяться от белого до чёрного цвета?
12. При каком положении плоского зеркала шар, катящийся прямолинейно по поверхности стола, будет казаться в зеркале поднимающимся вертикально вверх?
13. Почему в погожий летний день кучевые облака заметно сгущаются к горизонту?
14. На плоское зеркало, лежащее на столе, поставлена шахматная фигура. Если на фигуру полого направить пучок света, то на стене (экране) появится двойная тень фигуры – прямая и перевернутая. Построением покажите, почему образуется такая тень.
15. Почему ухудшается резкость изображения предмета в камере-обскуре при уменьшении ее длины? Как зависит этот эффект от диаметра отверстия?
16. Три взаимно перпендикулярных зеркала (или срезанный угол стеклянного кубика) отражают обратно падающий луч при произвольной его ориентации. Докажите это.
17. При каком размере зеркала солнечный зайчик будет иметь форму зеркала, а при каком – форму диска Солнца?
18. Человек удаляется от фонаря с постоянной скоростью. Как быстро удлиняется его тень?

**III.** Прохождение светового луча из оптически менее плотной среды, в оптически более плотную среду:  $n_2 > n_1$ ,  $\sin\alpha > \sin\gamma$ ,  $\alpha > \gamma$ . Падение на границу раздела рассеянного света.

Прохождение светового луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду:  $n_1 > n_2$ ,  $\sin\alpha < \sin\gamma$ ,  $\gamma > \alpha$ . Если световой луч переходит



**из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, то он отклоняется от перпендикуляра к границе раздела двух сред, восстановленного из точки падения луча. При некотором угле падения, называемом предельным,**

**свет во вторую среду не проходит:  $\sin\alpha_{пред} = n_{21}$ .**

**Полное внутреннее отражение. Предельный угол полного внутреннего отражения** при переходе света из стекла в воздух.

Демонстрация полного внутреннего отражения на границе "стекло-воздух". Наблюдаем, как угол преломления  $\gamma$  в воздухе приближается к  $90^{\circ}$ . Как только будет достигнуто это значение, преломление света прекратится, и весь падающий луч будет отражаться в стекло. Измерение предельного угла;

сравнение теоретического и экспериментального результата.

Демонстрация с бутылкой емкостью 0,5 л с плоскопараллельными стенками, заполненной водой и керосином (керосин оптически более плотная среда, чем вода).

Изменение интенсивности отраженного луча при изменении угла падения. При полном отражении от границы отражается 100% света (идеальное зеркало).

**Примеры полного внутреннего отражения:** фонарь на дне реки, кристаллы, обратная призма (демонстрация), оптическое волокно (демонстрация).

Можно ли завязать в узел световой луч? Использование полного внутреннего отражения в волоконной оптике.

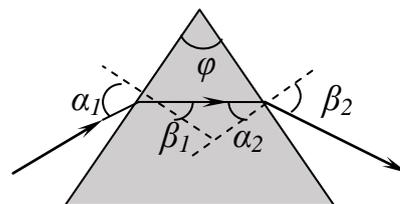


**Дополнительная информация.** Оптическое волокно имеет круглое сечение и состоит из двух частей – сердцевины и оболочки, которые выполнены из материалов с разными коэффициентами преломления. В среднем радиус сердцевины составляет 10–50 мкм, а радиус оболочки – 125 мкм. Обычно на наружную сторону оболочки наносят защитное покрытие. Оптоволокно может использоваться для иллюминации, а также для передачи изображений, позволяя осветить или увидеть объекты в недоступных или труднодоступных областях (пример – медицинская эндоскопия). В системах оптоволоконной связи каждая нить способна обеспечить много независимых каналов передачи информации при помощи света различных длин волн. Аналогия световода – переговорная труба, с помощью которой на судах передаются команды с капитанского мостика в машинное отделение.

Явление преломления происходит и при постепенном изменении показателя преломления среды (атмосферная рефракция, миражи).

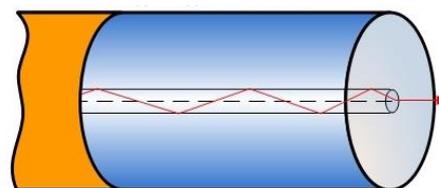
**Мираж** – явление полного отражения света от слоисто-неоднородной среды с переменным показателем преломления. Пример: "лужи" на сухом нагретом асфальте. Моделирование миража с помощью оконного стекла с дефектами (неоднородностями).

Ход лучей в треугольной призме:  $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n$ ;  $\frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{1}{n}$ ;  
 $\beta_1 + \alpha_2 = \varphi$ .



#### IV. Задачи:

1. Показатель преломления стекла, для света данной длины волны равен 1,6. Каким должен быть наибольший угол падения этого луча на равно-стороннюю треугольную призму, чтобы при выходе луча из призмы не наступило явление полного внутреннего отражения?
2. В дно водоема глубиной 2 м вбита свая, на 0,5 м выступающая из воды. Найти длину тени от сваи на дне водоема при угле падения лучей 30°.
3. Световод (длинная тонкая нить) изготовлен из прозрачного материала с показателем преломления 1,2. Один из торцов световода прижат к источнику рассеянного света, другой торец размещен на расстоянии 5 см от экрана. Найти диаметр светового пятна на экране.



4. Луч света падает перпендикулярно к грани призмы, у которой преломляющий угол  $\varphi = 10^\circ$ . Угол отклонения луча, вышедшего из призмы, от первоначального направления  $\theta = 27^\circ$ . Определить показатель преломления  $n$  стекла призмы.
5. Найдите предельный угол полного внутреннего отражения звуковых волн на границе «воздух - соль». Плотность соли  $\rho = 2170 \text{ кг/м}^3$ , модуль Юнга  $E = 50 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

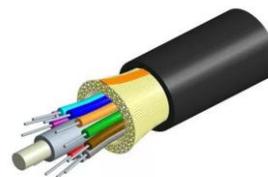
*Вопросы:*

1. Человек стоит по пояс в воде на горизонтальном дне бассейна. Почему ему кажется, что он стоит в углублении?
2. Чем отличается отражение света от явления полного внутреннего отражения?
3. Почему обнаружение подводных лодок или больших косяков рыбы удобно производить с самолёта?
4. Если в тонкий стакан налить примерно до половины воды и посмотреть на нее снизу, то вода вам покажется блестящей, похожей на ртуть. Почему?
5. В утренние и предвечерние часы отражение Солнца в спокойной воде слепит глаза, а в полдень его можно рассмотреть, не жмурясь. Почему?
6. Если вода прозрачная, то почему одежда, попавшая под нее и намокшая, становится темнее?
7. Воздух прозрачен для света, вода также. А пена - пузыри воды, наполненные воздухом, - непрозрачна. Почему?
8. Почему в замерзшей луже те области, где подо льдом образовалась прослойка воздуха, кажутся серебристыми?
9. Такой высокий показатель, а значит и малый предельный угол полного отражения, придаёт огранённому алмазу сильный блеск и игру света. Объясните.
10. Между светящейся точкой и глазом помещается плоскопараллельная стеклянная пластинка. Найдите построением кажущееся положение точки.
11. В жаркую безветренную погоду над морем-океаном можно увидеть парящие танкеры. Возможно ли такое?

**Дополнительная информация:** Важнейшие достоинства световодов и волоконно-оптической связи:

- ничтожно малое затухание сигнала в кварцевом волокне (расстояние между ретрансляторами 100 – 200 км);
- высочайшая пропускная способность (в 10000 раз больше, чем радиоволны);
- нечувствительность к электромагнитным полям;
- невозможность несанкционированного доступа;
- в сотни раз меньшая масса по сравнению с проводами;
- относительная дешевизна и доступность применения;
- стойкость к окислению.

Технология изготовления оптических волокон: Методом осаждения из газовой фазы получают заготовку из кварца диаметром около 2 см и длиной порядка 1 м с добавлением примесей, увеличивающих



(германий) или уменьшающих (фосфор) показатель преломления. Заготовку помещают в печь и с контролируемой скоростью быстро вытягивают волокно.

V. § 43. Упр. 5, № 12.

1. При объяснении причин возникновения радуги принимается, что попавший в дождевую каплю, луч испытывает на его задней стенке полное отражение, а затем выходит через переднюю. Начертите примерный ход солнечного луча через каплю. Какие условия необходимы для наблюдения радуги?
2. В 1841 году швейцарский профессор Колладон продемонстрировал замечательное сооружение – светящийся фонтан. Это красивое зрелище было основано на явлении полного отражения. Попробуйте и вы предложить конструкцию или изготовить действующую модель фонтана.
3. Луч света последовательно проходит через стопку плоскопараллельных пластинок с разными показателями преломления. Доказать, что направление выходящего луча зависит только от угла падения и от показателя преломлений первой и последней сред.
4. Капля жидкости лежит на плоской стороне полусферической стеклянной пластинки. Как определить показатель преломления жидкости и показатель преломления стекла из наблюдений полного внутреннего отражения?
5. Клин с преломляющим углом  $\alpha = 7^\circ$  изготовлен из стекла с показателем преломления 1,6. Перпендикулярно одной из граней клина падает узкий пучок параллельных световых лучей. За клином поставлен экран. Сколько светлых пятен будет видно на экране?
6. Представьте себе, что вы стоите перед большим листом толстого прозрачного стекла (перед стеклянной витриной). Каким образом можно определить толщину стекла, если доступа к его краям нет?
7. Можно ли увидеть что-нибудь через две смежные грани стеклянного куба?  
*Железо ржавеет, не находя себе применения, стоячая вода гниет, либо замерзает на холоде, а ум человека, не находя себе применения, чахнет.*

## Урок 23.

Леонардо да Винчи

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

#### Почему блестят драгоценные камни?

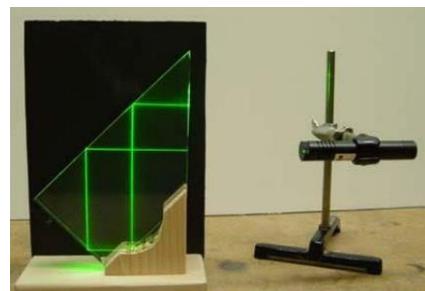
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Научить учащихся применять законы геометрической оптики при решении задач.

**ТИП УРОКА:** решение задач.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** микрокалькулятор.

**ПЛАН УРОКА:**

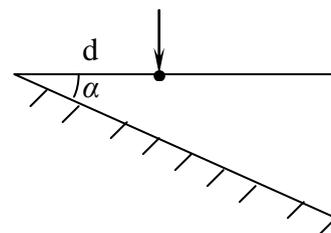
1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Решение задач
4. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Полное внутреннее отражение. 2. Ход лучей в треугольной призме.

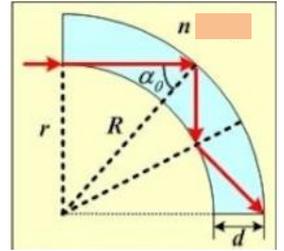
**Задачи:**

1. На верхнюю грань стеклянного клина с углом  $\alpha$  падает узкий пучок света перпендикулярно этой грани на расстоянии 2 см от ребра клина. Нижняя грань клина посеребрена. На каком расстоянии от ребра, отраженный пучок выходит из клина?
2. Луч падает на плоскую стеклянную пластинку толщиной 3 см под углом  $70^\circ$ .



Определить смещение луча внутри пластинки.

3. Каким должен быть внешний радиус  $R$  изгиба световода, сделанного из прозрачного вещества с показателем преломления  $n$ , чтобы при диаметре световода, равном  $d$ , свет, вошедший в световод перпендикулярно плоскости его поперечного сечения, распространялся, не выходя через боковую поверхность наружу?
4. На поверхности озера, имеющего глубину  $H = 2$  м, находится круглый плот радиусом  $R = 8$  м. Найдите радиус полной тени от плота на дне озера при освещении рассеянным светом.



*Вопросы:*

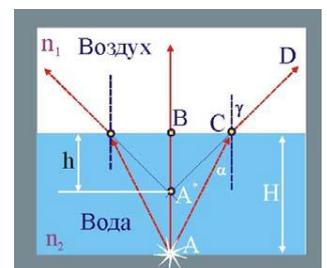
1. На дне водоема находится точечный источник света. Во сколько раз максимальное время, необходимое лучу света, для того, чтобы выйти из воды, больше минимального?
2. Почему разогретая дорога представляется вам как бы зеркалом, отражающим голубое небо?
3. Почему пена непрозрачная, хотя получается из прозрачной воды?
4. Почему трудно получить качественные фотоснимки, фотографируя предметы через оконное стекло?
5. Ловец жемчуга выпускает на глубине изо рта оливковое масло и, блики на поверхности воды исчезают. Почему?
6. Зачем стёкла автомобильных фар делают рифлёными, а не гладкими?
7. Почему пена на лимонаде белая, а не янтарная и не темная, как напиток в кружке?
8. Почему кварцевые волокна с сердцевинной диаметром 5 – 10 мкм, а не большего диаметра, составляют основу современной волоконно-оптической связи?
9. Какая картина откроется пловцу, который нырнул без маски под воду и смотрит вверх через спокойную поверхность пруда?
10. На дне водоема находится точечный источник света. Во сколько раз максимальное время, необходимое лучу света для того, чтобы выйти из воды, больше минимального. 1,52
11. Стекланный куб лежит на монете. При каком минимальном показателе преломления стекла монета не будет видна через боковые грани?

**III. Задачи:**

1. Кажущаяся глубина водоема три метра. Какова его истинная глубина?

Какой бы показалась глубина водоема Декарту, который утверждал, будто свет распространяется в воде на 30% быстрее, чем в воздухе.

2. Луч света выходит из призмы под тем же углом, под каким входит в призму. При выходе из призмы луч отклоняется от



первоначального направления на угол  $\varphi = 15^\circ$ . Преломляющий угол  $\gamma = 45^\circ$ .  
 Определите показатель преломления  $n$  вещества призмы.

3. Небольшой предмет помещен на расстоянии 15 см от плоскопараллельной стеклянной пластинки. Наблюдатель рассматривает его через пластинку, причем луч зрения нормален к ней. Найти расстояние изображения предмета от ближайшей к наблюдателю поверхности пластинки. Толщина пластики 4,5 см, показатель преломления стекла 1,5.

**IV. Упр. 5, № 14.**

- Используя измерительную линейку, фонарик и заполненную водой ванну, определите показатель преломления воды.
- Докажите, что прозрачная пластинка с отрицательным показателем преломления будет собирать свет.
- Если сквозь горизонтальную трубку с вытекающей через неё из стеклянного сосуда водой пропустить луч лазера, то при определенной скорости истечения воды из трубки оказывается освещенным только место падения струи на пол. Как это объяснить?
- Если прозрачную ручку с белым пишущим стержнем опустить в стакан с водой, то вы не увидите стержня. Почему?
- Что вам известно о причинах возникновения следующих световых явлений в атмосфере: горных призраков, нижних и верхних миражей, световых столбов, гало, венцов?
- В плоском зеркале, отражающая поверхность которого покрыта защитным слоем стекла толщиной  $h$ , наблюдают изображение точечного источника света. Доказать, что расстояние от точечного источника света до плоской зеркальной поверхности не равно расстоянию от нее до изображения источника.

*Самое лучшее из всех доказательств – есть опыт.*

*Бэкон*



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА :**

**«ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА».**

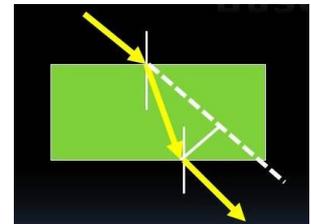
**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Научить учеников наблюдать преломление света, измерять углы падения и преломления луча, определять показатель преломления стекла.

**ТИП УРОКА:** лабораторная работа.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** плоскопараллельная стеклянная пластинка, экран со щелью, блок питания, лампочка на подставке, соединительные провода, линейка.

**ПЛАН УРОКА:**

- Вступительная часть
- Вводный инструктаж
- Выполнение работы
- Подведение итогов
- Задание на дом



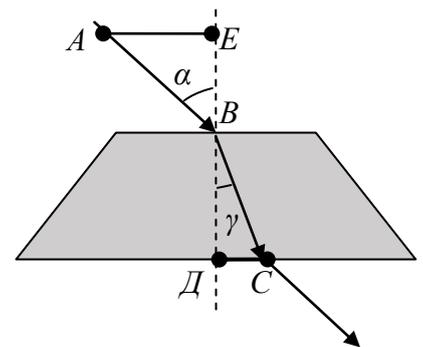
**II.** Проходя через стеклянную пластину, луч света испытывает двукратное преломление, при этом показатель преломления стекла относительно воздуха

измеряется отношением:  $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$ . Так как  $\sin \alpha = \frac{AE}{AB}$ ,

$\sin \gamma = \frac{DC}{BC}$  и  $AB = BC$ , то формула для определения показателя

преломления принимает вид:  $n = \frac{AE}{DC}$ . Трижды измеряем  $n$  и

находим  $n_{cp} = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{3}$ . Максимальную относительную



погрешность рассчитывают по формуле:  $\varepsilon = \frac{\Delta(AE)}{AE} + \frac{\Delta(DC)}{DC}$ .  $n = n_{cp} \pm \Delta n$ , где  $\Delta n = \frac{\Delta n_{cp}}{\sqrt{3}}$ .

### III. Заполнение таблицы:

№ п/п	Измерено		Вычислено			
	$AE, \text{ мм}$	$ДС, \text{ мм}$	$n_{cp}$	$\Delta(AE), \text{ мм}$	$\Delta(ДС), \text{ мм}$	$\epsilon, \%$

IV. Записать измеренные показатели преломления на классной доске.

V. Упр. 5, № 13.

1. Деревни Алексеево и Водники разделены двумя параллельными реками разной ширины. На каждой реке нужно поставить по мосту, так, чтобы путь из одной деревни в другую был наименьшим (при этом мосты перпендикулярны берегам). Как это сделать?
2. В результате искривления светового луча в атмосфере нашей планеты положение звезды, видимое с Земли, немного отличается от истинного. Определите ошибку при фиксировании углового положения звезды, видимой с Земли под углом  $30^\circ$  к вертикали.

*У нас действительно есть возможность понять Вселенную, и современное поколение с его большими телескопами может уловить отблеск первоначальных времен.*

Аллан Сендидж

Урок 25.

## ЛИНЗА

**Почему далекие предметы кажутся нам маленькими, а при сближении словно вырастают в размерах?**

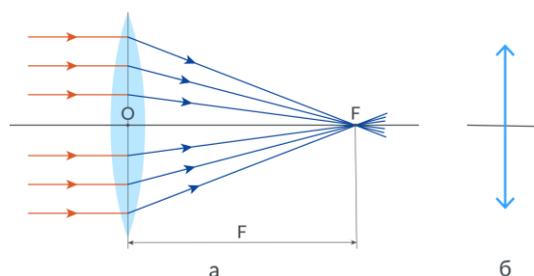
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Применить законы геометрической оптики к линзе, познакомить учеников со способами построения изображения предмета в линзе, вывести формулу линзы и рассмотреть применения линз.

**ТИП УРОКА:** повторительно-обобщающий.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** оптическая шайба с принадлежностями, набор линз и зеркал, свеча, экран, модель линзы.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Повторение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Задачи:**

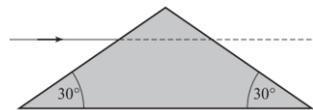
1. На поверхности воды плавает непрозрачный шар радиусом  $R = 1$  м, наполовину погруженный в воду. На какой максимальной глубине  $H_{\max}$  нужно поместить под центром шара точечный источник света, чтобы ни один световой луч не прошел в воздух?  $H_{\max} = 1,33$  м.
2. На тонкую призму из стекла с преломляющим углом  $\varphi = 15^\circ$  падает луч света перпендикулярно боковой грани. Найдите угол  $\gamma$  между продолжением падающего луча и лучом, выходящим из призмы, если показатель преломления стекла  $n = 1,66$ .

**Вопросы:**

1. При каких условиях возможно наблюдение полного внутреннего

отражения?

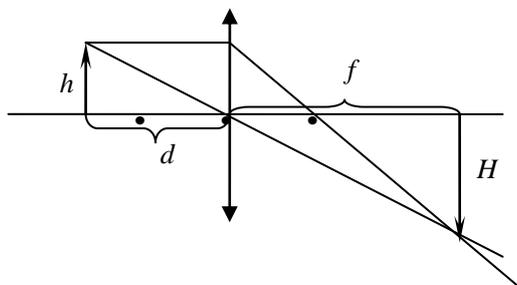
2. С погруженной подводной лодки наблюдают за пролетающим над ней самолетом. Во сколько раз кажущаяся высота самолета больше истинной? А кажущаяся скорость?
3. Почему мокрый асфальт темнее сухого?
4. Что увидит аквалангист, погрузившись в солнечный день в широкий заполненный водой аквариум, стены которого окрашены в черный цвет?
5. Почему использование поворотных призм предпочтительнее использования плоских зеркал?
6. Горизонтальный лазерный луч падает на стеклянную призму, изображенную на рисунке. Найти, на какой угол повернется луч, пройдя через призму. Призма изготовлена из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ . Ответ: 0
7. Почему град, образовавшийся в нижней части облака, темный, а образовавшийся в верхней части – светлый?
8. По торцу длинного стеклянного цилиндра ползет муха, а на боковой поверхности сидит паук. Где должен находиться паук, чтобы он мог увидеть муху?
9. Угол падения равняется  $30^\circ$ , а угол преломления  $150^\circ$ . Может ли быть такое?
10. Почему импульс света, пройдя через световод, становится более широким?



**III.** Применим основные законы геометрической оптики к линзе, получим формулы-следствия и с их помощью объясним принцип действия разных оптических приборов.

**Линза – прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.** Существуют гравитационные линзы, магнитные линза, линзы Френеля.

Демонстрация линз из набора. Рисунок линзы на доске. Основные точки и



и линии: центры и радиусы сферических поверхностей, оптический центр, главная оптическая ось, главный фокус собирающей линзы, фокусное расстояние и оптическая сила собирающей линзы.

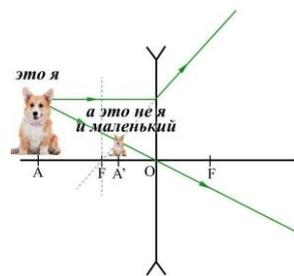
$$D = \frac{1}{F}. \quad [D] = [\text{дптр}]. \quad F = \frac{1}{(n_{21} - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

**Собирающая линза:** Схематическое изображение собирающей линзы ( $F > 0$ ).

Построение изображения точки, лежащей не на главной оптической оси, в собирающей линзе. Замечательные лучи. Как построить изображение точки в собирающей линзе, если эта точка лежит на главной оптической оси линзы?

Построение изображения предмета в линзе (крайние точки). Предмет расположен за двойным фокусом линзы. Где и какое изображение мы получим (построение на доске)? Можно ли его зафиксировать на пленке? Может ли собирающая линза уменьшать или увеличивать?

Схематическое изображение рассеивающих линз ( $F < 0$ ). Построение изображения предмета в рассеивающей линзе. Рассеивающая линза всегда дает мнимое, неперевернутое и уменьшенное изображение предмета! Построение изображения предмета в собирающей линзе. Формулы для увеличения линзы. Вывод формулы линзы:



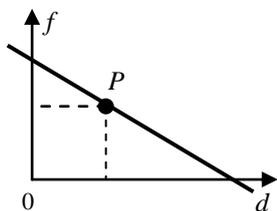
$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f - F}{F}; \quad \Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Что можно определить с помощью формулы линзы? Фокусное расстояние?!

$d$	$d \rightarrow \infty$	$d = 2F$	$2F > d > F$	$d = F$	$d < F$
$f$	$F$	$2F$	$\infty > f > 2F$	$\infty$	$< 0$
Изображение, $\Gamma$	$0 < \Gamma < 1$	$\Gamma = 1$	$\Gamma > 1$	$\Gamma \rightarrow \infty$	$\Gamma \leq -1$

$\Gamma = 1 / (d/F - 1)$ . 1)  $d = F$ ,  $\Gamma \rightarrow \infty$ . 2)  $d = 2F$ ,  $\Gamma = 1$ . 3)  $d \rightarrow \infty$ ,  $\Gamma \rightarrow 0$ . 4)  $d = 0,5F$ ,  $\Gamma = -2$ .

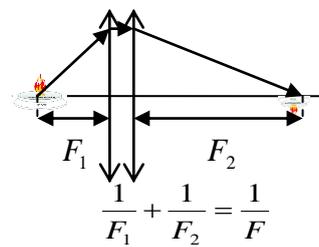
Модель линзы и формула линзы. Исследовать с помощью модели все характерные случаи расположения предмета и линзы. Модель рассеивающей линзы. Каким будет изображение предмета в этой линзе и где оно будет расположено? Применения линз.



**С помощью линзы можно получить:**

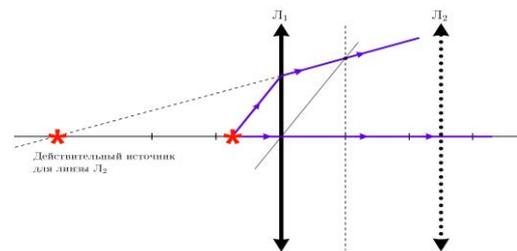
- действительное и увеличенное изображение предмета, (диапроектор);
- уменьшенное изображение предмета (фотоаппарат), получать увеличенные и уменьшенные изображения предметов (телескоп, микроскоп), фокусировать солнечные лучи (ледяная линза, гелиостанция).

**Системы линз. Для тонких контактирующих линз:**  
 $D = D_1 + D_2 + \dots$ . Глаз – как оптическая система. Информацию о мире нам дает мозг, а не глаза! **Аккомодация. Дефекты зрения. Очки.**



Как и глаз, отдельные физические параметры Вселенной так удивительно тонко настроены и согласованы, что этот факт требует объяснений.

**Дополнительная информация** (дефекты линз): Основные причины абберации (дефекты изображения) – сферическая форма линз (лучи, падающие на края линзы, преломляются сильнее, чем более близкие к оси) и дисперсия. Мениск – положительная вогнуто-выпуклая линза. Оптимальное соотношение радиусов кривизны, обеспечивающих минимум искажений, составляет 1:6.



Мениск – положительная вогнуто-выпуклая линза. Оптимальное соотношение радиусов кривизны, обеспечивающих минимум искажений, составляет 1:6.

### III. Задачи (ближ):

1. На каком расстоянии от линзы с фокусным расстоянием 12 см надо поставить предмет, чтобы его действительное изображение было втрое больше самого предмета?

2. Расстояние между предметом и его изображением 72 см. Линейное увеличение равно 3. Найдите фокусное расстояние линзы.
3. Расстояние между предметом и экраном равно 120 см. Где нужно поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием 25 см, чтобы на экране получить отчетливое изображение предмета?
4. С помощью линзы с оптической силой  $D = -5$  дптр наблюдают изображение, находящееся от линзы на расстоянии 10 см. На каком расстоянии от линзы расположен предмет?
5. Расстояние по оси между предметом и его прямым изображением, даваемым линзой, равно 5 см. Линейное увеличение равно 0,5. Определите фокусное расстояние линзы.
6. При фотографировании с расстояния 200 м высота дерева на негативе оказалась равной 5 мм. Если фокусное расстояние объектива 50 мм, то действительная высота дерева?
7. Кинооператору требуется снять автомобиль, движущийся со скоростью  $v = 20$  м/с на расстоянии  $d = 26$  м от оператора. Фокусное расстояние объектива кинокамеры  $F = 13$  мм. Какова должна быть экспозиция  $\Delta t$ , чтобы размытость контуров изображения не превышала значения 0,05 мм?
8. Тонкая стеклянная линза в воздухе имеет оптическую силу 5 дптр. Когда эту линзу погружают в жидкость, она действует как рассеивающая с фокусным расстоянием 100 см. Определите показатель преломления жидкости.

*Вопросы:*

1. Предложите наибольшее число способов измерения фокусного расстояния собирающей линзы. Какой из способов наиболее точный?
2. Может ли плоско-выпуклая линза рассеивать параллельные лучи света, а плоско-вогнутая собирать их?
3. Как изменится фокусное расстояние линзы, если ее температура повысится?
4. Можно ли собирающую линзу назвать "усилителем света"?
5. Как следует расположить электрическую лампу, вогнутое зеркало и собирающую линзу, чтобы получить наиболее интенсивный световой поток?
6. Как можно изменить оптическую силу линзы, не изменяя самой линзы?
7. Во сколько раз отличаются фокусные расстояния двояковыпуклых линз, если у второй линзы показатель преломления и радиусы кривизны обеих поверхностей в 1,5 раза больше, чем у первой?
8. Половина у линзы закрывают непрозрачным экраном. Что произойдет при этом с изображением?
9. В чем разница между действительным и мнимым изображением предмета?
10. Точечный источник находится на главной оптической оси собирающей

линзы. В какую сторону сместится изображение этого источника, если линзу повернуть на некоторый угол относительно оси, лежащей в плоскости линзы и проходящей через ее оптический центр?

11. Симметричную линзу с оптической силой  $D$  разрезали точно пополам по плоскости симметрии так, что образовались две плоско-выпуклые линзы. Чему равна оптическая сила каждой из линз?
12. В плоском зеркале получено мнимое изображение Солнца. Можно ли этим "мнимым Солнцем" прожечь бумагу с помощью собирающей линзы?
13. Как надо расположить две линзы, одна из которых собирающая, а другая рассеивающая, чтобы пучок параллельных лучей, пройдя через обе линзы, остался параллельным?

#### IV. Домашнее задание:

1. Докажите, что формулу линзы можно представить в ньютоновской форме:  $x \cdot x' = F$ , где  $x$  – расстояние от объекта до главного фокуса с передней стороны линзы,  $x'$  – расстояние от изображения до главного фокуса с другой стороны линзы.
2. Если ваш собеседник носит очки, то, как установить, каким дефектом зрения он обладает – близорукостью или дальнозоркостью?
3. Предложите проект измерителя фокусного расстояния очковых линз.
4. Объясните, почему часто близорукие люди наклоняют очки, а дальнозоркие – сдвигают очки на нос? В каком случае надо было бы поступать наоборот?
5. Какое фокусное расстояние должен иметь объектив фотоаппарата, чтобы изображение Солнца (Луны) на фотоснимке было "во весь кадр"?
6. Город Мехико подвергается разрушительным периодическим землетрясениям. Ученые предполагают, что причиной столь интенсивных землетрясений является водяная полость, расположенная на глубине 0,5 км под центром города, диаметр которой 2 км, а толщина в средней части 200 м. Мощность источника землетрясения  $10^{14} - 10^{16}$  Вт. Приняв, что очаг находится на глубине 5 км, оцените интенсивность  $P$  – волн на поверхности Земли. Скорость  $P$  – волн 5 км/с.
7. Оцените максимальное увеличение, с которым видна, рыбка, плавающая в сферическом аквариуме.

*Внутри каждой большой задачи сидит маленькая, пытающаяся пробиться наружу.*

*Закон больших задач Хоара*



### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

**Как измерить фокусное расстояние рассеивающей линзы?**

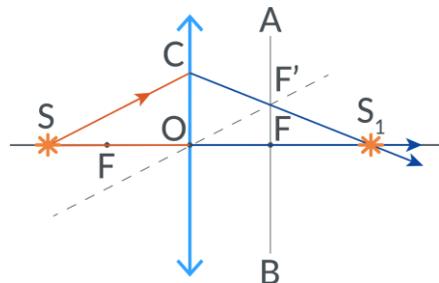
**ЦЕЛЬ УРОКА:** При решении задач познакомить учеников с применениями линз.

**ТИП УРОКА:** решение задач.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** микрокалькулятор.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Решение задач
4. Задание на дом

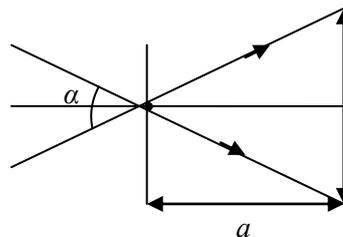


**II. Опрос фундаментальный:** 1. Построение изображения предмета в линзе. 2.

## Формула линзы.

### Задачи:

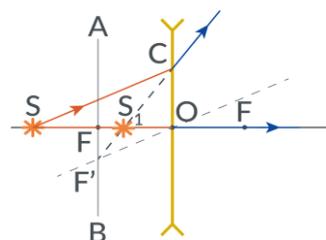
1. Два луча симметрично пересекают главную оптическую ось собирающей линзы на расстоянии 7,5 см от линзы под углом  $4^\circ$ . Определить угол между этими лучами после прохождения ими линзы, если фокусное расстояние линзы  $F = 10$  см.



2. Шарик, висящий на упругой пружине, колеблется вдоль вертикали с периодом 1 с, двигаясь вблизи и перпендикулярно главной оптической оси тонкой собирающей линзы. Изображение шарика в линзе колеблется с амплитудой 2 см. Фокусное расстояние линзы  $F$ . Шарик находится на расстоянии  $3F/2$  от линзы. Найти максимальную скорость шарика.
3. Предмет имеет высоту 2 см. Какую оптическую силу должна иметь линза, расположенная от экрана на расстоянии 4 м, чтобы изображение предмета на экране имело высоту 1 м?
4. Высота автобуса  $h = 3$  м, а высота его изображения на светочувствительной матрице фотоаппарата  $H = 9$  мм. Найти расстояние  $d$  до автобуса, зная, что оптическая сила объектива фотоаппарата  $D = 6,5$  дптр.
5. Параллельный световой пучок падает нормально на тонкую собирающую линзу диаметром 8 см и оптической силой 4 дптр. Экран расположен на расстоянии 10 см за линзой. Определите диаметр светлого пятна, созданного линзой на экране.

### Вопросы:

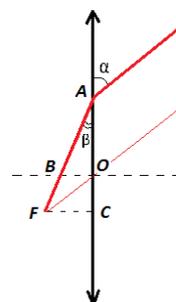
1. На каком расстоянии друг от друга следует расположить две линзы – рассеивающую с фокусным расстоянием – 4 см и собирающую с фокусным расстоянием 9 см, чтобы пучок лучей, параллельный главной оптической оси первой линзы, пройдя через обе линзы, остался бы параллельным? 5 см
2. Дан ход луча через собирающую (рассеивающую) линзу. Найти построением ее фокус.
3. В архивах Снеллиуса нашли рисунок: предмет и его изображение в тонкой линзе. Какая это линза и где находятся ее фокусы?
4. Почему при ярком освещении те, кто пользуется не очень сильными очками, могут читать и без очков?
5. Спичка расположена в фокальной плоскости рассеивающей линзы. Во сколько раз изображение спички меньше ее длины?
6. Если зайти в темную комнату с улицы, то первое время плохо видишь. Почему?
7. Близорукий человек резко видит предметы, расположенные не далее 10 м от него. Какие контактные линзы ему следует носить, чтобы хорошо видеть предметы, расположенные от него на большом расстоянии?



8. Почему в очках для плавания хорошо видно под водой, а без них – плохо?
9. При каких условиях вогнутая линза будет: а) собирающей; б) рассеивающей?
10. Каким образом с помощью мобильных телефонов получают качественные фотоснимки при жестко закрепленном объективе?
11. Может ли собирающая линза и плоское зеркало давать действительное изображение предмета?
12. Почему с наступлением темноты очертания предметов перестают быть резкими?
13. Можно ли изготовить линзу, имеющую одновременно несколько фокусных расстояний?
15. Чем больше фокусное расстояние объектива, тем более крупным и «приближенным» будет изображение объекта съемки. Так ли это?

### III. Задачи:

1. Тонкий луч света падает на тонкую собирающую линзу на расстоянии  $x = 10$  см от её оптического центра. Угол между падающим лучом и плоскостью линзы  $\alpha = 45^\circ$ , между преломлённым лучом и плоскостью линзы  $\beta = 30^\circ$ . Определите её фокусное расстояние. Ответ:  $\approx 13,7$  см.
2. При помощи собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F = 6$  см получают мнимое изображение предмета на расстоянии  $f = 18$  см от линзы. Определить расстояние от линзы до предмета.
3. Какие очки вы припишете близорукому человеку, который может читать текст, расположенный от глаз не далее 20 см, а какие дальнозоркому, который может читать текст, расположенный от глаз не ближе 50 см?
4. В доске имеется круглое отверстие диаметром 10 см. Через отверстие проходит сходящийся пучок света, который дает на экране, расположенном за доской параллельно ей, круглое пятно диаметром 5 см. В отверстие вставили собирающую линзу того же диаметра, и пятно превратилось в точку. Найдите оптическую силу этой линзы. Расстояние от доски до экрана 20 см.
5. В течение, какого времени может быть открыт затвор фотоаппарата при съемке прыжка в воду с вышки? Фотографируется момент погружения в воду. Высота вышки 5 м, фотограф находится на расстоянии 10 м от прыгуна. Объектив фотоаппарата имеет фокусное расстояние 10 см, на негативе допустимо размытие изображения 0,5 мм.
6. Где надо поместить предмет перед собирающей линзой с фокусным расстоянием  $F$ , чтобы расстояние между предметом и его изображением было наименьшим?



### Дополнительная информация (фокус шара):

*И даль свободного романа  
Я сквозь магический кристалл  
Еще не ясно различал.  
А.С. Пушкин*



*Задача:* На некотором расстоянии от стеклянного шара находится точечный источник света, дающий узкий световой пучок, ось которого проходит через центр шара. При каких значениях показателя преломления  $n$  изображение источника будет находиться вне шара независимо от расстояния шара до источника? Внутри шара?

Маленькие капли воды на листьях растений имеют почти сферическую форму. Такие капельки, фокусируя солнечные лучи на листьях, точно обжигают их. Фокусное расстояние стеклянного шара можно определить экспериментально или теоретически. Пусть на такой шарик радиуса  $R$  падает узкий пучок света, который проходит через центр шара. Известно, что расстояние от центра шара до фокуса равно  $F$ , причем  $F > R$ . Определить показатель преломления стекла. *Вопросы:* Правда ли, что капли воды на листьях домашних растений (это не стеклянные шарики) в жаркий солнечный день способны вызвать их ожог (поэтому и не поливают в жару)? Почему продавцы рекомендуют защищать хрустальный шар от попадания на него прямых солнечных лучей?

**Дополнительная информация** (Почему глядя на звезды невооруженным глазом, мы видим их лучистыми?): Причина лучистого вида звезд кроется в нашем глазу – в недостаточной прозрачности хрусталика, имеющего неоднородное строение, не как хорошее стекло, а как волокнистое. Вот что говорит об этом Гельмгольц (в речи «Успехи теории зрения»): «Изображения световых точек, получаемых в глазу, неправильно лучисты. Причина этого лежит в хрусталике, волокна которого расположены лучисто по шести направлениям. Те лучи, которые кажутся нам исходящими из светящихся точек, – например, из звезд, отдаленных огоньков, – не более, как проявление лучистого строения хрусталика. Насколько этот недостаток глаз всеобщ, видно из того, что всякая лучистая фигура обыкновенно называется звездообразной». Существует способ освободиться от влияния этого недостатка нашего хрусталика и видеть звезды без лучей, не обращаясь притом к услугам телескопа. Способ этот еще 400 лет назад указан был Леонардо да Винчи. «Посмотри, – писал он, – на звезды без лучей. Этого можно достигнуть, наблюдая их сквозь малое отверстие, сделанное концом тонкой иглы и помещенное вплотную к глазу. Ты увидишь звезды столь малыми, что ничто другое не может казаться меньше».

#### **IV. Подготовиться к контрольной работе №4.**

1. Точно над карандашом, расположенным вертикально над водой, находится точечный источник света. На дне сосуда с водой видна тень карандаша. Если карандаш опускают в воду, то, когда он входит в нее, размер темного пятна увеличивается. Если затем карандаш вытаскивают из воды, то на месте темного пятна появляется светлое пятно. Объясните явление.
2. Можно ли получить увеличенное изображение предмета без помощи линзы?
3. Почему не видно изображения предмета, помещенного в фокусе собирающей линзы? Если сверху линзы налить слой воды, то изображение предмета становится видимым. Почему?
4. Как оптика борется с абберациями и выдает трехмерные изображения нанообъектов?
5. Если вы сфотографируете светящийся фонарь ночью, то на фотографии получите лучи, исходящие из его центра. Объясните и исследуйте это явление.
6. Как с помощью фотоаппарата измерить высоту пятиэтажного дома?
7. Представьте фотографии быстропротекающего физического процесса.
8. Оценить, во сколько раз увеличивается расстояние при использовании бинокля, с которого еще можно различить слабый источник света ночью.
9. Стеклянный полуцилиндр с показателем преломления 1,5 можно использовать для увеличения размеров букв в печатном издании. Какое увеличение он дает? Покажите, что фокусное расстояние однородного шара радиусом  $R$ , сделанного из прозрачного диэлектрика с коэффициентом преломления  $n$  ( $1 < n < 2$ ), равно  $F = R(2-n)/2(n-1)$ .

*Семь раз отмерь – один раз отрежь.*

*Народная мудрость*

### **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 4**



Наиболее удивительная и чудесная смесь цветов – белый цвет.

И. Ньютон

Урок 27.

## ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

За которое время луч света проходит через оконное стекло?

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников с явлением дисперсии света, происхождением цветов, световыми эффектами, как одним из доказательств волновой природы света.

**ТИП УРОКА:** лекция.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** проекционный аппарат, призма дисперсионная "Флинт", призма прямого зрения, экран. Набор светофильтров, прибор для сложения цветов спектра, линза собирающая, волновая ванна с принадлежностями.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос-повторение
3. Лекция
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II.** Обобщающее повторение по таблице "Электродинамика".

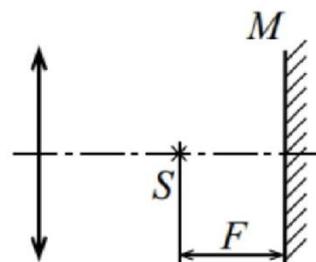
Основные законы электродинамики → важнейшие следствия (существование электромагнитных волн, которые распространяются со скоростью света) → опыты Герца (некоторые из свойств электромагнитных волн). Но аналогичными свойствами обладает и свет! Все это дало основание Максвеллу сделать вывод о том, что "... мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений".

**Вопросы:**

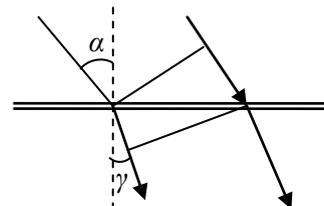
1. Изображение предмета, помещённого перед собирающей линзой на расстоянии  $d = 0,4$  м, получено по другую сторону линзы в натуральную величину. Определить: линейное увеличение линзы; расстояние от плоскости линзы до изображения предмета; фокусное расстояние; оптическую силу линзы. Построить ход лучей от предмета до изображения.

**Задачи:**

1. Объектив телевизионного передатчика создает изображение свободно падающего камня, находящегося перед ним на расстоянии  $d = 5$  м. Определить фокусное расстояние  $F$  объектива, если известно, что изображение движется с ускорением  $a = 0,2$  м/с<sup>2</sup>.
2. На главной оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F$  расположено плоское зеркало  $M$  (перпендикулярно оси) и точечный источник света  $S$ . Оптическая система формирует два действительных изображения источника, расположенных на расстоянии  $2F/3$  друг от друга. Найдите расстояние от линзы до зеркала, если расстояние от источника света до зеркала равно  $F$ . Ответ:  $d_1 + F = 3F$ .



3. Собирающую линзу вертикально погрузили в воду так, что главная оптическая ось линзы лежит на поверхности воды. На главной оптической оси на расстоянии  $a$  от оптического центра линзы расположили точечный источник света. При этом на поверхности воды с другой стороны от линзы появились два изображения этого источника на расстоянии  $\ell$  друг от друга. Определите по этим данным фокусное расстояние линзы. Показатель преломления стекла 1,5, показатель преломления воды  $4/3$ .



### III. Преломление волн (повторение).

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Демонстрация преломления волн различных частот в волновой ванне. Почему “длинные” волны преломляются сильнее, чем короткие? Для коротких волн мелкая вода не такая уж мелкая! Для каких волн показатель преломления больше? **Дисперсия волн - зависимость показателя преломления среды (скорости волн в среде) от частоты.** Дисперсия (от лат. *dispergo* – разбрасывать). Если бы на границу раздела двух сред падали волны различных частот, то после преломления они были бы разбросаны по разным направлениям.



Аналогичный опыт со световыми волнами провел Ньютон.

Призма была куплена Ньютоном в аптеке (в те времена наблюдение призматических спектров было распространенным развлечением, снимающим стресс.)

**Демонстрация опыта.** Что произошло с пучком белого света (стал цветным и расширился).

**Спектр. Семь цветов радуги (КОЖЗГСФ).**

Ньютон выдвинул идею, что каждый цвет соответствует определенному типу частиц



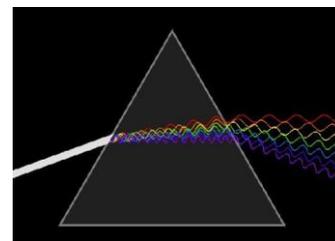
(корпускул). Каждый тип проходит через стекло призмы со своей скоростью, и это вызывает отклонение корпускул на различные углы.

**Как можно объяснить наблюдаемое явление?** Очевидно,

что белый свет - волны различных частот и призма их разбросала. Во всех материалах скорость низких частот

света больше, чем высоких частот. Волны одной частоты вызывают у нас ощущение красного цвета, другой –

зеленого, третьей – синего. Совместное их действие вызывает ощущение белого света (демонстрация сложения цветов линзой).



*Ньютон впервые дал действенное учение о цветах, на основании которого он сам нашел огромное число новых фактов...*

*Леонид Мандельштам*

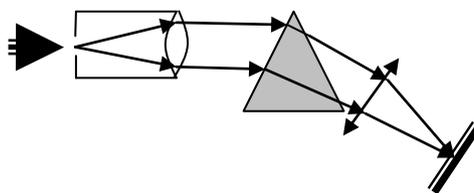
**Белый свет - сложный** (эпиграф). Белый шум в классе - звуки различных частот. Почему такое разбрасывание произошло? Волны различных частот преломляются призмой не одинаково? Какие сильнее? Какие слабее?

**Скорость света в вакууме не зависит от частоты используемого света!**

Дисперсионный график можно зарисовать в тетрадь.

**Лучи, отличающиеся по цвету, отличаются и по степени преломляемости.**

Устройство и принцип действия **спектроскопа** – прибора для наблюдения спектров. Происхождение цветов. Примеры с белой, черной и красной рубашкой. **Цвета без света не существует!**



**Цвет** – это ощущение, возникающее при воздействии световой волны на рецепторы сетчатки. Свет – физическое явление, а вот цвет – явление физиологическое. Человеческий глаз способен видеть только свет с длиной волны от 380 до 780 нанометров. Например, видимый спектр начинается с длин волн, которые мы называем фиолетовыми, между 380 и 450 нм, затем переходит к синему, зеленому, желтому и оранжевому и заканчивается тем, что мы называем красными, между 590 и 780 нм.

Почему волны данной частоты вызывают ощущение красного цвета, а другой - зеленого? Теории зрения. Гете считал, что цвет формирует мозг, но что мог великий Гете против великого Ньютона, за плечами которого был эксперимент.



*Как это может быть, чтобы самый прозрачный, самый чистый цвет – белый – оказался смесью цветных лучей?*

*И. Гете*

**Дополнительная информация.** По современным представлениям сетчатка содержит 125 миллионов палочек и примерно 6 – 7 миллионов

колбочек. Палочки сконцентрированы в основном на краях сетчатки, а колбочки располагаются в небольшой центральной зоне. Колбочки в сотни раз менее чувствительны, чем палочки, но зато "различают" цвета. Зрительный образ формируется в затылочных областях головного мозга, а глаз – это лишь фотоприемник, принимающий внешнюю информацию, преобразующий ее и по нервным волокнам передающий в мозг. Физиологически наше световосприятие основано на наличие трех видов колбочек, избирательно чувствительных к желто-красной (L-типа), зелено-желтой (M-типа) и сине-фиолетовой (S-типа) части спектра. В колбочках содержатся специальные светочувствительные белки-пигменты, называемые опсинами. Когда в них попадают частицы света, светочувствительная клетка посылает электрический разряд. Сила разряда зависит от того, сколько света попадает на активные молекулы.

Через минуту после пребывания в темноте чувствительность глаза к свету возрастает в 10 раз, а через двадцать минут – в 6000 раз! Верхний и нижний пределы освещенности, которые может воспринимать человеческий глаз (мозг), и при которых мы еще что-то видим, различаются примерно в  $10^{10}$  раз. Каким образом ему это удается?

**Дальтонизм.** Безразличны ли дальтоники к цвету кофе? Тюркский дальтонизм — не различение синего, голубого, серого и зеленого оттенков цвета. Для половца всё казалось синим — и «синий Дон», и «синее море», и «синяя мгла».

*Не будь цветов, все ходили бы в одноцветных одеяниях.*

*К. Прутков*

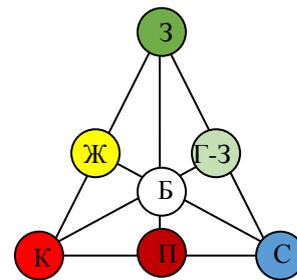
Первобытные люди все самое ценное и значимое отмечали каким-либо цветом: кровь и огонь (красный), молоко (белый), земля (черный).

**Вопрос:** Почему в оптических приборах, предназначенных для работы в широком диапазоне длин волн, стараются использовать отражающие поверхности, а не преломляющие?

**Светофильтры.** Световые эффекты. Комбинации цветов. Демонстрация сложения красного и зеленого цветов. **Цветной**

**треугольник** на магнитной доске. **Основные и дополнительные цвета.**

Можно ли создать фонарик, который будет светить синими (черными) лучами? Сложение красок.



Правда ли, что черный и белый — это "ненастоящие" цвета?

*У меня есть все основания полагать, что эти три основных цвета соответствуют трем типам (модам) ощущения органов зрения, которыми определяется вся цветовая гамма, видимая нормальным человеческим глазом.*

Максвелл.

**Выбор благоприятного сочетания цветов в одежде.** Основные цвета - яркие (кнопки пускателей, места смазки, светофор). Сверкание бриллианта частично обуславливается тем, что он не только отражает свет в вашу сторону, но и разделяет его цвета!

*Все живое стремится к цвету.*

И.В. Гете

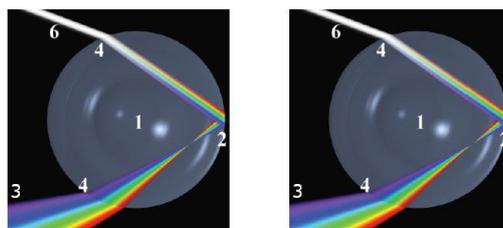
Что произойдет, если смешать желтую краску и циановую краску? Желтая краска отражает красный и зеленый, а голубой поглощает. Циановая краска отражает голубовато-зеленый, а красный поглощает.

**Дополнительный материал:** Радуга.

*Тут, если Солнце блеснет во мгле непогоды лучами  
Прямо против дождя, из тучи кропящего капли,  
Радуги яркой цвета появляются в облаке черном.*

Лукреций

**Работа в группах:** смешивание цветов, распределение энергии в спектре, поглощение света светофильтрами.



**IV. Задачи:**

1. Какой длины путь пройдет фронт волны монохроматического света в вакууме за то же время, за какое он проходит путь длиной 1 м в воде?
2. Определить показатель преломления среды, если известно, что свет с частотой  $4,4 \cdot 10^{14}$  Гц имеет в ней длину волны 0,51 мкм.
3. Луч света с длиной волны в вакууме  $\lambda_0 = 0,5$  мкм падает нормально на стеклянную пластину толщиной  $d = 0,2$  мм с показателем преломления  $n = 1,5$ . Определите длину  $\lambda$  частоту  $\nu$  и скорость этих волн в пластине. Сколько длин волн  $N$  укладывается на толщине пластины?
4. «Вояджер-1», самый дальний из созданных человеком объектов в космосе, находится от нас на расстоянии 145 астрономических единиц. За какое время световой сигнал с Земли достигает «Вояджера-1»?

**Вопросы:**

1. Пучок зеленого света переходит из воздуха в воду. Меняются ли при этом его частота, длина волны, цвет?
2. Каков цвет красного вина в зеленой бутылке?
3. Через какой светофильтр нельзя увидеть надпись, сделанную красной ручкой на белом листе бумаги?
4. В светильниках на светодиодах часто используют светодиоды синего свечения и желтый люминофор. Почему эффект тот же, как при использовании трех светодиодов красного, зеленого и синего свечения?
5. Чем свет отличается от цвета?
6. Дисперсия дарит нам красивые закаты - когда Солнце находится у горизонта. Как это понимать?

7. Почему альпинисты пользуются зелеными солнцезащитными очками?
  8. Если бы скорость света в вакууме зависела от его частоты, то, как бы изменялась окраска спутника Юпитера Ио после затмения?
  9. Почему силуэт на фотоснимке всегда выглядит темным?
  10. Лента, имеющая при дневном свете светло-синий цвет, при свете свечей имеет другой цвет? Какой это цвет и почему? Зеленый
  11. Какого цвета лучами надо осветить золотые украшения, чтобы они казались белыми, как серебро?
  12. Почему жидкая пена белая?
  13. На каком принципе основан световой занавес?
  14. Почему облака кажутся белыми?
- Рассеяние света на капельках воды и кристалликах льда происходит почти равномерно на всех частотах, и потому облака кажутся белыми.
15. Приведите примеры применения «цветного треугольника» в быту.
  16. Для чего при стирке белья в воду добавляют «синьку»?
  17. В одном популярном ролике утверждалось, что после стирки в рекламируемом стиральном порошке белое белье становится «белее белого». Что означают эти слова?

#### V. § 44.

1. Посадите на палочку или травинку каплю воды. Встаньте спиной к Солнцу и осторожно поднимайте каплю. Когда лучи Солнца образуют с направлением глаз угол около  $42^{\circ}$ , прозрачная капля вдруг вспыхнет чрезвычайно чистым по тону цветом. Если осторожно перемещать каплю по дуге окружности, можно увидеть все цвета радуги.
2. М.В. Ломоносов утверждал, что «любой цвет от смачивания водой делается гуще». Почему?
3. Составить обобщающую таблицу «Дисперсия волн», используя рисунки, чертежи и текстовый материал.
4. Оцените спектральную разрешающую способность вашего глаза.
5. *"Здесь покоится сэр Исаак Ньютон, дворянин, который почти божественным разумом первый доказал с факелом математики движение планет, пути комет и приливы океанов. Он исследовал различие световых лучей и проявляющиеся при этом различные свойства цветов, чего ранее никто не подозревал ... пусть смертные радуются, что существовало такое украшение рода человеческого". Слова на памятнике Ньютону.*  
Что вы еще можете добавить к этим словам?
4. Возможна ли радуга ночью (лунная радуга)? Проверьте ваш вывод экспериментально.
5. Нарезьте из цветной бумаги квадратики разных цветов размером  $2 \times 2$  см. Положите цветной квадратик на лист белой бумаги, и смотрите в центр квадратика в течение 30 с, не напрягая зрения. После этого переведите взгляд на белое поле бумаги (квадратики можно нарисовать фломастером на бумаге). Почему на белом поле виден квадратик в дополнительном цвете? Найдите дополнительные цвета.
6. Изобретатель акваланга Жак Кусто описывал такой случай: «Во время одного из первых погружений с аквалангом я случайно порезал руку. И с удивлением увидел, что из моей руки течет зеленая кровь». Объясните явление.
7. В театрах иногда применяют световой занавес. Предложите конструкцию занавеса и объясните принцип его действия.
8. Из карандаша и диска из картона сделай волчок. Вырезав из цветной бумаги секторы (два красных и два синих), оклейте ими поочередно диск. Запустив волчок, наблюдай сметание цветов. Опишите опыты и их результаты.
9. В комнате, освещенной обычным белым светом, зажгите настольную лампу с красной

лампочкой. Положите на стол лист белой бумаги и поместите между ним и лампой карандаш. Почему тень от карандаша зеленая?

10. Леонардо да Винчи утверждал, что «зеленый и голубой усиливают свой цвет в полутени, а красный и желтый выигрывают в цвете в своих освещенных частях». Так ли это?
11. Розовый цвет - это смесь красных и фиолетовых длин волн? Так ли это?

*Вот, бесспорно, самая странная из гипотез! Неожиданностью было видеть ночь среди ясного дня – в точках, которых свободно достигали солнечные лучи, но кто бы мог подумать, что свет, слагаясь со светом, может вызвать мрак!*

*Араго*

Урок 28.

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

**Что общего между возникновением морской волны и излучением света?**

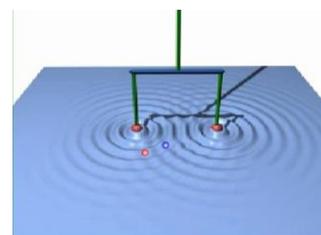
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников с методами наблюдения интерференции света и способами измерения длины световой волны по наблюдаемой интерференционной картине.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** лазер ЛГ-209 с принадлежностями, щели Юнга, проекционный аппарат ФОС-67, осветитель для теневого проецирования, две прямоугольные призмы, кинофильм "Волновые свойства света".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Дисперсия света. 2. Сложение цветов.

**Задачи:**

1. Сколько длин волн монохроматического света с частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц уложится на пути длиной  $s = 1,2$  мм: 1) в вакууме; 2) в стекле ( $n = 1,50$ )?
2. Показатель преломления стекла для крайних красных лучей спектра  $n_1 = 1,510$ , а для крайних фиолетовых  $n_2 = 1,531$ . Определите расстояние  $\Delta l$  между фокусами для красных и фиолетовых лучей двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны  $R_1 = R_2 = R = 15$  см.

**Вопросы:**

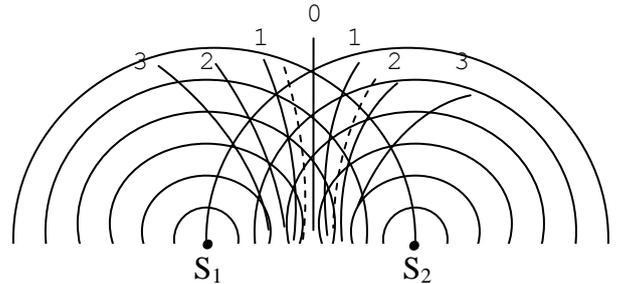
1. Объясните, почему белое тело кажется белым в белом свете, красным в красном и т.д.?
2. Как изменяется длина волны красного света при переходе из воздуха в воду?
3. Для каких лучей – красных или фиолетовых – будет больше главное фокусное расстояние рассеивающей линзы?
4. Почему ультрафиолет преобладает в сумерках и на рассвете?
5. Приведите примеры смешивания цветов в природе и технике.

6. Почему вены именно зелено-синего цвета, ведь кровь темно-красная?
7. Почему изображения предметов, наблюдаемых в телескопе-рефракторе, оказываются окрашенными?
8. Почему снег мы видим белым?
9. Посветите красной лазерной указкой в темноте и при свете, где красный будет более яркий? Почему?
10. Если продолжительное время смотреть на одноцветный рисунок, а затем перевести взгляд на белую бумагу, то на бумаге вы увидите изображение рисунка в дополнительном цвете. Почему?
11. При рассматривании тел через зеленый светофильтр одни из них кажутся зелеными, а другие — черными. Почему?
12. Почему лунной ночью помимо белых наиболее заметны светло-зеленые и светло-голубые предметы, а красные кажутся серыми и черными?
13. Если черное тело поглощает падающий на него свет, то почему оно видно?
14. Почему не наблюдается разделение цветов при прохождении света через оконное стекло?
15. Если смотреть на разноцветную светящуюся рекламу из газоразрядных трубок, то красные буквы всегда кажутся выступающими вперед, по отношению к синим и зеленым. Почему?
16. Цветное стекло растерто в порошок, который кажется белым. Как узнать, каков истинный цвет стекла?
17. Можно ли управлять показателем преломления вещества?
18. Какие явления нельзя объяснить дисперсией света:
  - радугу;
  - прохождение белого света через зеленый светофильтр;
  - зеленый цвет листьев деревьев;
19. При наблюдении растений в свете синей лампы, зеленые листья кажутся малиново-красными. Почему?
20. В опытах, по разложению света И. Ньютон использовал как стеклянные призмы, так и заполненные водой (для большей прозрачности он добавлял в воду свинцовый сахар – ацетат свинца). Почему результаты опытов были идентичными?
21. Почему дым от костра по мере его подъема перестает быть видимым даже в безветренную погоду?
22. Почему в морозный солнечный день снег сверкает разноцветными огнями?
23. Что вам известно об альтернативных вариантах «зрения» у некоторых животных и насекомых (ультразвук, тепловое зрение и т.д.).
24. При проведении радиолокации Луны, взошедшей над горизонтом, чтобы обеспечить правильную направленность, излучатель высокочастотных радиосигналов, был сопряжен

с оптическим телескопом. Однако при наличии оптического изображения Луны отсутствовал отраженный радиосигнал. В то же время, когда удавалось получить отраженный радиосигнал, не было оптического изображения. Объясните явление.

25. Почему волны данной длины вызывают ощущение красного цвета, а другой - зеленого?

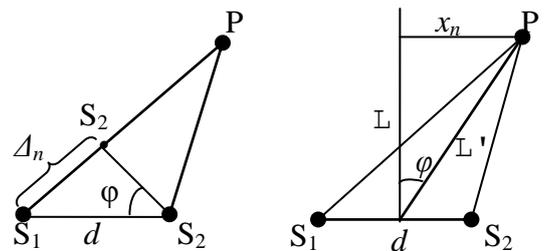
**III. Интерференция волн на поверхности воды (повторение с рисунком на доске и в тетради). Линии максимума и узловые линии. В последнем случае на воде мы наблюдаем точку (линию) штиля, в акустике — мертвую точку, в оптике — точку полного затемнения. Это явление также называется интерференционным гашением волн, или деструктивной интерференцией. Разность хода волн до некоторой точки наблюдения P. Как**



*Разность хода волн до любой точки наблюдения, лежащей на линии максимума, равна целому числу длин волн  $\Delta_n = n\lambda$  — где  $n$  — номер линии максимума, а до любой точки на узловой линии рассчитывается по формуле:  $\Delta_n = (n - 0,5)\lambda$ , где  $n$  — номер узловой линии.*

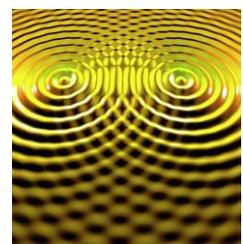
можно рассчитать разность хода?  $\Delta_n = d \cdot \sin \varphi_n \rightarrow \Delta_n = \frac{d \cdot x_n}{L}$ .

Зачем нужно измерять разность хода? По интерференционной картине на доске измеряем расстояние между источниками волн ( $d$ ), расстояние от точки наблюдения, лежащей, например, на второй линии максимума ( $n = 2$ ) до центральной линии ( $x_2$ ) и расстояние от точки наблюдения до точки, лежащей посередине между источниками ( $L$ ). После



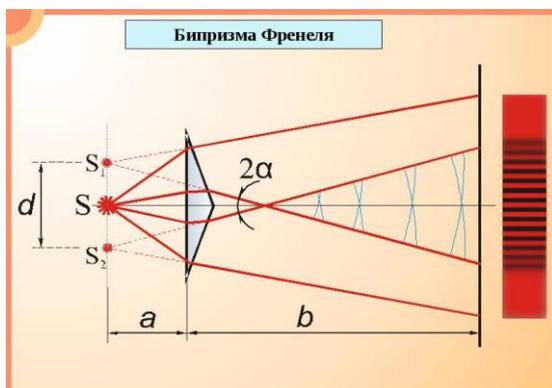
этого рассчитываем разность хода и, пользуясь условием максимума, определяем длину волны.

**По наблюдаемой интерференционной картине всегда, можно определить длину волны!**



Что необходимо для наблюдения интерференции света? Будут ли когерентными источниками света две лампочки, две одинаковых красных лампочки? Нет! Почему? Аналогия с приседанием двух групп людей, разделенных непрозрачной перегородкой и размывание интерференционной картины.

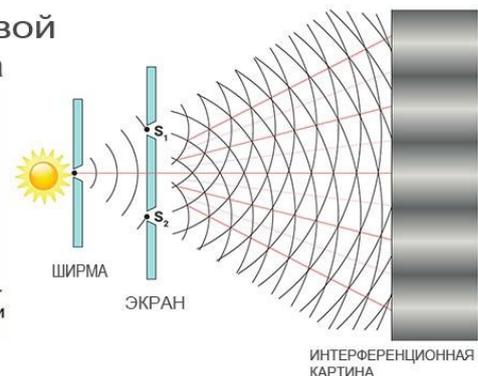
**Два естественных источника света некогерентные. Методы получения**



**Двухщелевой опыт Юнга**



Томас Юнг (1773-1829) — английский физик, врач и астроном

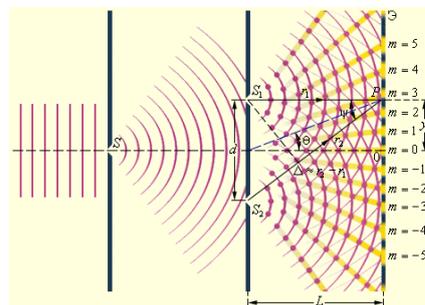


когерентных источников света (схемы зарисовать). Эти два когерентных источника света могут быть или оба мнимые, или оба действительные, или один действительный, а другой мнимый.

Демонстрация интерференции с помощью ЛГ-209 (метод Френеля). Особенности интерференционной картины (штрих-код на экране). Что можно определить по наблюдаемой интерференционной картине? Измерить длину волны?! Измерение и вычисление.

**Интерференция света – одно из опытных подтверждений волновой природы света.**

Чему равна длина волны, вызывающей ощущение красного цвета? Длины световых волн, вызывающих ощущение других цветов, мы измерим при выполнении лабораторной работы.



Демонстрация интерференции света (**метод Юнга**). Две щели ведут себя как два источника света (два фонарика). Казалось бы, что на экране, где соединяются лучи двух источников света, должна возникнуть яркая освещенная область, а по бокам освещенные участки должны быть менее яркими! Но это не так! Интерференцию на двойной щели Юнга мы наблюдаем, когда используем в качестве экрана сетчатку глаза (держа щели перед глазами) или когда используем в качестве источника света – лазер.

Демонстрация интерференции света (**опыт Ллойда**). Демонстрация интерференции света в **белом свете** с помощью двух прямоугольных призм в проекции на вертикальный экран.

Эффект **интерференционного гашения** позволяет нам судить, имеем мы дело с волной или с частицей. Действительно, при встрече двух бильярдных шаров трудно представить ситуацию, при которой оба шара просто исчезнут, — самое большее, при сильном соударении они могут раскрошиться.

*В мире не происходит ничего, в чем бы ни был виден смысл какого-нибудь максимума или минимума.*

*Леонард Эйлер*

**Дополнительная информация:** Интерферометры бывают самых разных конструкций, в зависимости от того, что именно они должны измерять, но принцип работы у любого интерферометра один и тот же: луч разбивается на два **синфазных** луча посредством использования частично пропускающего луч зеркала, после чего один луч направляется на экран напрямую, а другой — через исследуемый образец. В конечном итоге оба луча попадают на регистрационный экран, и по полученной интерференционной картине можно с большой точностью судить о задержке второго светового луча.

**Биографическая справка:** "Огюстен Френель учился так медленно, что восьми лет он едва умел читать... Он никогда не чувствовал склонности к изучению языков, не любил знаний, основанных на одной памяти, и запоминал то, что было доказано ясно и убедительно".

*Ф. Араго*

Биографы Т. Юнга рассказывают о показательном случае, когда его в 14 лет попросили

написать несколько фраз по-английски, чтобы проверить, умеет ли он хорошо писать. Юноша пробыл в комнате для испытаний немного дольше обычного. Новый учитель Юнга уже стал смеяться над неумением своего ученика, когда вышедший из соседней комнаты Юнг протянул ему листок, на котором заданные фразы были не только переписаны, но и переведены на десять разных языков. В 21 год Т. Юнг был избран членом Королевского общества. Юнг – врач, механик, цирковой наездник, канатоходец, играющий чуть ли не на всех музыкальных инструментах, знаток живописи и музыкальной культуры.

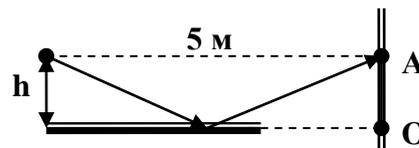
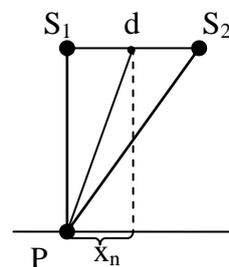
*У меня было правило вставать летом на час раньше моих товарищей, а зимой ложиться часом позже их, чтобы углубить пройденное за день; таким образом, мои школьные дела были вскоре завершены.*

Т. Юнг



#### IV. Задачи:

1. Разность хода лучей двух когерентных источников света с длиной волны 600 нм, сходящихся в некоторой точке, равна 1,5 мкм. Усиление или ослабление света будет наблюдаться в этой точке?
2. Найти все длины интерферирующих волн видимого света, которые при оптической разности хода равной 1,8 мкм будут: 1) максимально усилены; 2) максимально ослаблены.
3. Два когерентных источника света  $S_1$  и  $S_2$  с длиной волны 0,5 мкм находятся на расстоянии 2 мм. Экран расположен на расстоянии 2 м от  $S_1$ . Что будет наблюдаться в точке  $P$  экрана: усиление или ослабление света?
4. Найти длину волны монохроматического излучения, если в опыте Юнга расстояние от центра первого интерференционного максимума до центральной линии 0,05 см, расстояние между источниками 0,5 см, расстояние от щелей до экрана 5 м. Какова ширина интерференционного максимума.
5. Два когерентных источника света с длиной волны 0,5 мкм находятся на расстоянии 0,5 мм. Под каким углом к центральной линии расположен третий максимум интерференционной картины?
6. На рисунке представлена схема наблюдения интерференции света с помощью плоского зеркала. Центральный интерференционный максимум наблюдается в точке  $O$  экрана. Расстояние от источника  $S$  до зеркала равно  $h$ , длина волны света 600 нм. Луч 1 идет параллельно зеркалу и попадает в точку  $A$  экрана, где наблюдается второй интерференционный минимум. Чему равно расстояние  $h$  в этом опыте?



#### V. §45. Упр. 6, № 1.

*Для того чтобы действия двух потоков света могли таким образом сложиться, необходимо, чтобы они были порождены одним источником, и чтобы они достигали одной точки разными путями по направлениям, не сильно различающимся друг от друга.*

Т. Юнг

Урок 29.

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

Свет, слагаясь со светом, порождает и свет, и тьму! Так ли это?

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников с интерференцией света в тонких пленках и практическими применениями этого явления.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** проекционный аппарат ФОС-67 с принадлежностями, раствор мыла, рамка, экран, лазер ЛТ-209 с принадлежностями.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Интерференция света (метод Юнга). 2. Интерференция света (метод Френеля).

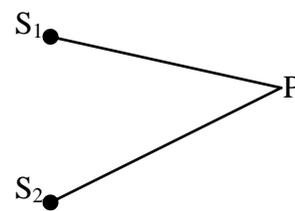
**Задачи:**

1. Два когерентных источника света, расстояние между которыми 0,24 мм, удалены от экрана на расстояние 2,5 м. При интерференции света на экране наблюдаются чередующиеся темные и светлые полосы, причем на расстоянии в 5 см умещаются 10 полос. Чему равна длина волны падающего на экран света?

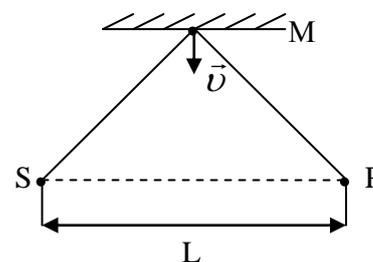
2. Два когерентных источника излучают монохроматический свет. Определить длину волны света, если расстояние между первыми максимумами на экране равно 7,2 мм. Экран удален от источников на 3 м, а расстояние между источниками 0,5 мм.

3. Когерентные источники белого света, расстояние между которыми 0,32 мм, имеют вид узких щелей. Экран, на котором наблюдают интерференцию света от этих источников, находится на расстоянии 3,2 м от них. Найти расстояние между красной ( $\lambda_k = 740 \text{ нм}$ ) и фиолетовой ( $\lambda_{\phi} = 400 \text{ нм}$ ) линиями второго интерференционного спектра на экране.

4. Когерентные источники света  $S_1$  и  $S_2$  находятся в среде с показателем преломления 1,5. Геометрическая разность хода испускаемых ими лучей в точке  $P$ , где наблюдается второй интерференционный минимум, равна 0,8 мкм. Определите частоту источников света.



5. Интерференционная схема включает в себя точечный источник  $S$  монохроматического света с длиной волны 0,5 мкм, фотоприемник  $P$ , отстоящий от источника на расстоянии 2 м и плоское зеркало  $M$ , движущееся со скоростью 0,2 см/с по направлению к линии  $SP$ , соединяющей источник и фотоприемник. Определите частоту колебаний фототока приемника в тот момент, когда зеркало будет находиться на расстоянии 0,5 см от линии  $SP$ .



### Вопросы:

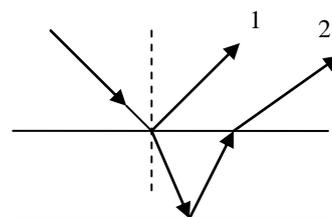
1. При интерференции волны могут гасить друг друга. Не противоречит ли этот факт закону сохранения энергии?
2. Если две волны интерферируют друг с другом, то влияет ли одна волна на распространение другой?
3. Разность фаз колебаний двух интерферирующих лучей монохроматического света с длиной волны 500 нм равна  $\frac{3\pi}{2}$ . Определить разность хода этих лучей.
4. Что общего и в чем различие методов наблюдения интерференции света Юнгом и Френелем?
5. Почему у волн от двух естественных источников с одинаковыми средними длинами волн не наблюдается когерентности, и они не интерферируют?
6. При каких условиях можно наблюдать интерференцию света от двух источников?
7. Как можно измерить расстояние между мнимыми источниками света в опыте Френеля?
8. Возможно ли наблюдать явление интерференции света, расположив на очень близком расстоянии две светящиеся тонкие проволоочки.
9. Почему капли дождя, обладая значительной энергией, не возбуждают волны большой амплитуды на поверхности водоема?

**III. Постановка проблемы:** Чем объясняется радужная окраска тонких бензиновых пленок? Таким образом, к наблюдателю отправляются два луча - отраженный от границы «воздух-бензин» и границы «бензин-вода». Оба они белые примерно настолько же, насколько и падающий луч. Так, где же творится магия? Красота, как говорится, в глазах смотрящего человека, поэтому на сетчатке.



*Учитель:* Направим почти нормально луч лазера на тонкую стеклянную пластинку и посмотрим, что у нас получилось (демонстрация). Почему на экране в отраженном свете наблюдаются темные и светлые кольца?

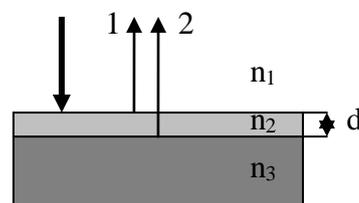
*Ученики:* Очевидно, происходит отражение света от противоположных граней плоскопараллельной пластинки (рисунок на доске), между лучами есть разность хода, поэтому на экране наблюдается интерференция монохроматического света.



*Учитель:* Когерентны ли отраженные от пластинки световые лучи?

*Ученики:* Конечно, ведь они получены из одного луча!

*Учитель:* Будут ли они интерферировать при попадании к нам в глаз? В каком случае лучи будут усиливать друг друга, ослаблять?

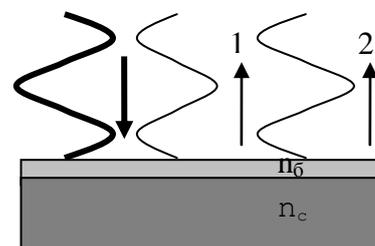


*Учитель:* Рассмотрим случай нормального падения луча на пленку, толщина которой много меньше длины световой волны. Пусть вторая среда оптически более плотная, чем первая, а третья - оптически более плотная, чем вторая (бензиновая пленка на стекле). Вспомним, что при отражении от границы менее жесткой и более жесткой сред волна распространяется обратно перевернутой.

*Ученики:* Такая пленка в отраженном свете будет светлой!

*Учитель:* Правильно! Теперь начнем мысленно увеличивать толщину пленки. Какая часть волны должна скрыться внутри пленки, чтобы в отраженном свете она казалась темной?

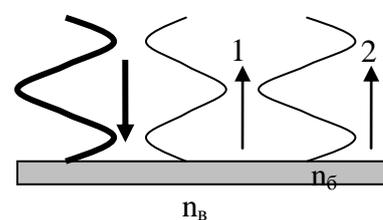
*Ученики:* Половина длины волны!



*Учитель:* Верно! На разности хода  $\Delta = 2d$  должна скрыться  $\frac{\lambda'}{2}$ , где  $\lambda' = \frac{\lambda}{n_{21}}$ . Это

дает нам возможность рассчитать минимальную толщину пленки, при которой она в отраженном свете будет темной:  $d_{\text{мин}} = \frac{\lambda}{4n_{21}}$ . В общем случае  $\Delta = k \frac{\lambda'}{2}$ , где

если  $k$  – четное, то происходит усиление, а если нечетное, то ослабление:  $2d = k \frac{\lambda}{2n_{21}}$ .



*Ученики.* В случае если второй луч отражается границы оптически более плотной и менее плотной сред, то усиление происходит при нечетных  $k$ , а ослабление – при четных. Пример: бензиновая пленка ( $n_b = 1,4$ ) на поверхности воды ( $n_c = 1,33$ ) или мыльная пленка в воздухе.

*Учитель:* **Демонстрация интерференции света** от мыльной пленки в отраженном белом свете. Объяснение происхождения радужных полос.

**Мыльные пузыри (демонстрация).** Почему мыльный пузырь на солнце переливается всеми цветами радуги?

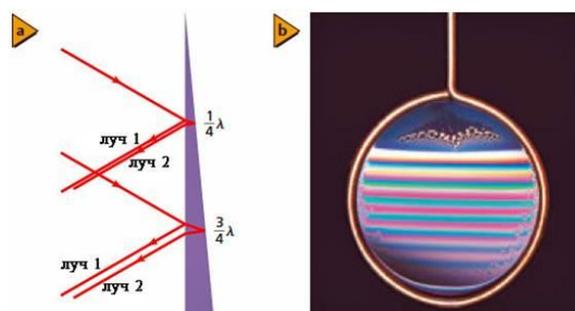
*Вдуйте мыльный пузырь и смотрите на него: вы можете заниматься всю жизнь его изучением, не переставая извлекать из него уроки физики.*

*Кельвин*

Французский физик Доменик Араго написал о Томасе Юнге: «Ценнейшее открытие доктора Юнга, которому суждено навеки обессмертить его имя, было ему внушено предметом, казалось бы, весьма ничтожным: теми самыми яркими и лёгкими пузырями мыльной пены, которые, едва вырвавшись из трубочки школьника, становятся игрушкой самых незаметных движений воздуха».

Почему поверхность мыльного пузыря при его надувании вначале играет всеми цветами радуги, затем приобретает красноватый оттенок, а затем синий?

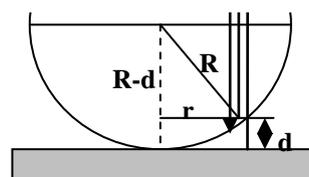
*Ученики:* Пленка становится очень тонкой и



условие максимума при отражении выполняется для более коротких длин волн.

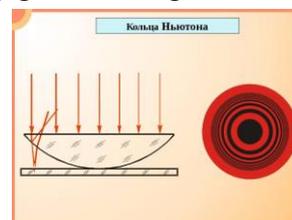
**Учитель: Просветление оптики.**

Кольца Ньютона:  $(R-d)^2 + r^2 = R^2 \rightarrow r^2 \approx 2dR$ . Условие минимума:  $2d = m\lambda \rightarrow r_m = \sqrt{mR\lambda}$ , где  $m$  - номер темного кольца.



**Применения интерференции:** Помимо мыльных пузырей, интерференция дарит нам множество других красочных явлений — она украшает крылья насекомых, перья птиц, морские раковины.

Проверка качества обработки поверхности; измерение малых углов; интерферометр (по кадрам диафильма); просветление оптики; цвета побежалости (измерение температуры). Цвета раковин (перламутровый слой) и крыльев бабочек (хитиновый покров). Модельеры Великобритании создали красивые вечерние платья, меняющие цвет. Сшиты они из черного материала, на который нанесен тонкий слой краски, содержащей мельчайшие капсулы из желатины, наполненные холестериком (холестерическими жидкими кристаллами). Тонкий слой холестерика имеет спиральную структуру. При нагревании изменяется шаг спирали и длина волны отраженного света.



**IV. Задачи:**

1. На стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ) нанесена прозрачная пленка ( $n = 1,4$ ). На пленку нормально к поверхности падает монохроматический свет ( $\lambda = 600$  нм). Какова наименьшая толщина пленки, если в отраженном свете пленка кажется темной?
2. На мыльную пленку падает нормально пучок лучей белого света. Какова наименьшая толщина пленки, если в отраженном свете она кажется зеленой ( $\lambda = 523$  нм)?
3. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками заключен очень тонкий воздушный клин. На пластинку нормально падает монохроматический свет ( $\lambda = 0,5$  мкм). Определить угол между пластинками, если в отраженном свете на протяжении 1 см наблюдается 20 интерференционных полос.
4. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы 8,6 м. Наблюдение ведется в отраженном свете. Измерениями установлено, что радиус четвертого темного кольца  $r_4 = 4,5$  мм. Найдите длину волны света.

**Вопросы:**

1. Очень тонкая мыльная пленка в отраженном свете кажется темной. Куда же девается падающая на неё световая энергия?
2. Почему естественные источники света не излучают когерентные световые волны?
3. На тонкий клин падает узкий пучок монохроматического света. В отраженном или проходящем свете будет лучше и более четко видна интерференционная картина?

4. Тонкая прозрачная пленка, на поверхность которой перпендикулярно падает пучок белого света, в отраженном свете окрашена в зеленый цвет. Какой будет окраска пленки такой же толщины, но с чуть большим показателем преломления?
5. Свет частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц падает нормально на систему из двух параллельных полупрозрачных зеркал. При каком расстоянии между зеркалами будет наблюдаться первый интерференционный минимум в отраженных лучах?
6. Почему для получения интерференционной картины в пленках они должны быть тонкими?
7. Какова приблизительно толщина пленки мыльного пузыря в местах, где он кажется голубым?
8. Почему в установке для наблюдения колец Ньютона используется линза с большим радиусом кривизны?

**V. §§ 46-47. Упр. 6, №12.**

1. Нагревая кусок лезвия в пламени горелки, наблюдайте возникновение на его поверхности цветов побежалости. Зарисуйте наблюдаемую картину и объясните ее происхождение. Зависит ли вид наблюдаемой картины от температуры? Проведите эксперименты и сделайте выводы.
2. Темной или светлой будет в отраженном свете мыльная пленка толщиной  $d = 0,1\lambda$ ? Пленка находится в воздухе.
3. Почему интерференционная картина от мыльного пузыря представляет собой концентрические разноцветные кольца разной ширины?
4. Предложите конструкцию оптического прибора для измерения малых углов.
5. Экспериментатор наблюдает интерференцию волн от двух когерентных монохроматических источников. При каких условиях он не увидит на экране полного гашения волн?
6. Можно ли, используя две призмы, получить когерентные источники света?
7. Наполните таз теплой водой и капните на поверхность воды каплю масла (на дне таза желательно поместить черную ткань или бумагу, чтобы избежать нежелательного отражения от дна). Опишите наблюдаемую интерференционную картину. Можно ли по наблюдаемой интерференционной картине измерить длину световой волны или оценить толщину пленки?
8. Если параметры падающих волн определенным образом совпадают, их взаимодействие приводит к идеальному поглощению с нулевым отражением. Как вы себе это представляете?



*Свет распространяется и рассеивается не только по прямой линии, испытывая преломление и отражение, но и посредством дифракции.*

*Гримальди*

**Урок 30.**

## **ДИФРАКЦИЯ СВЕТА**

**Почему мы слышим, но не видим того, кто стоит за углом дома?**

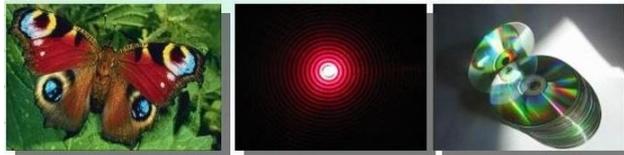
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Развить и обобщить знания учащихся о дифракции волн. Построить элементарную теорию дифракции света от щели и осуществить ее экспериментальную проверку. Применить теорию для измерения длины волны лазерного излучения.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** лазер ЛГ-209 с принадлежностями, набор по интерференции и дифракции света, лампочка на подставке, 3 штангенциркуля.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



## II. Опрос фундаментальный:

1. Интерференция света в тонких пленках. 2. Просветление оптики.

*Задачи:*

1. Какой наименьшей толщины пленку с показателем преломления  $n = 4/3$  надо нанести на поверхность стекла, чтобы при нормальном падении света, содержащего излучение двух длин волн с  $\lambda_1 = 700$  нм и  $\lambda_2 = 420$  нм, отраженный свет был максимально ослаблен для обеих длин волн?
2. В очень тонкой клиновидной пластинке в отраженном свете при нормальном падении наблюдаются интерференционные полосы. Расстояние между соседними темными полосами 5 мм. Зная, что длина волны света равна 0,58 мкм, а показатель преломления пластинки 1,5, найти угол между гранями пластинки.
3. Собирающая линза оптической силы 5 дптр разрезана точно посередине и части линзы раздвинуты на расстояние  $h = 0,50$  мм. Линза освещается источником монохроматического света на расстоянии  $d = 15$  см с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Оценить число  $N$  светлых интерференционных полос на экране, расположенном за линзой на расстоянии  $L = 60$  см. Промежуток между частями линзы закрыт непрозрачной перегородкой.

*Вопросы:*

1. Как с помощью свечи или зажигалки выяснить, из скольких слоев состоит оконный стеклопакет?
2. Пленка толщиной  $d \approx 0,01$  мкм напылена в вакууме на подложку с показателем преломления меньшим, чем у пленки. Отражает ли пленка падающий на нее свет?
3. При каком условии очень тонкая пленка, установленная перпендикулярно монохроматическому световому пучку, в наименьшей степени ослабит его?
4. Малые изменения угла падения света на пленку почти не меняют интерференционной картины. В тонких пленках эти изменения значительны. Почему?
5. Почему разные участки мыльного пузыря отсвечивают различными цветами радуги?

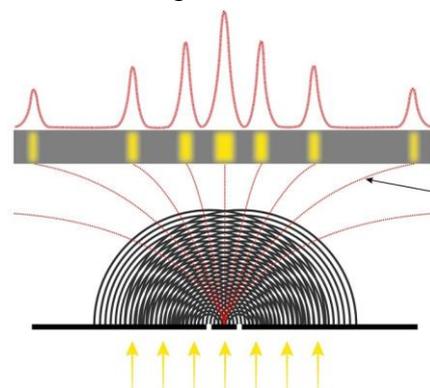
6. Почему каждый участок мыльного пузыря со временем меняет свою окраску?
7. Почему на поверхности мыльного пузыря перед разрывом появляются черные пятна?
8. При отражении света от пыльного зеркала на поверхности зеркала можно наблюдать радужные узоры. Почему?
9. Почему толстый слой нефти не имеет радужной окраски?
10. Почему при наблюдении колец Ньютона следует выбирать линзу с большим радиусом кривизны?
11. Почему центр колец Ньютона, наблюдаемых в отраженном свете, обычно темный?
12. В приборе для наблюдения колец Ньютона воздушную прослойку заполнили водой. Как изменились радиусы интерференционных колец?

**Ш.** Имеется ряд других полезных применений **принципа Гюйгенса** при рассмотрении волновых явлений — он широко используется в волновой оптике и в телекоммуникационной инженерии, где световые волны и радиоволны регулярно сталкиваются с препятствиями на пути их распространения и огибают их.

**Дифракция света – явление огибания световыми волнами препятствий (повторение).**

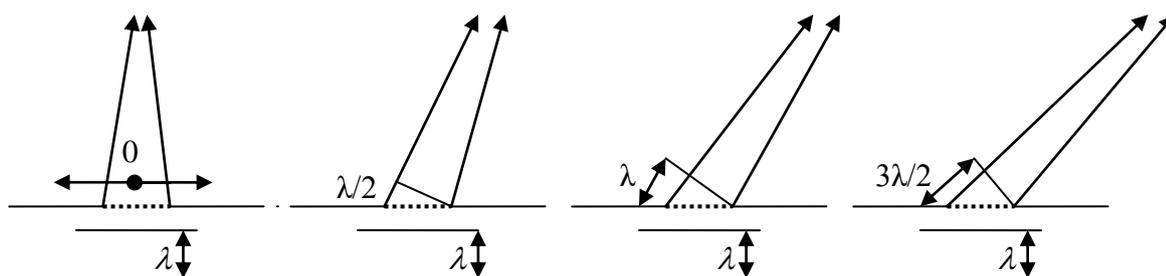
Условия наблюдения дифракции (размеры препятствия должны быть сравнимы с длиной волны). Можно ли наблюдать дифракцию света? Наблюдается ли дифракция света, при его прохождении через замочную скважину? Почему не наблюдается? А если уменьшить ширину щели?!

Наблюдение точечного источника света через прищуренные веки (два близко расположенных пальца). Почему происходит "расширение" источника света, (рисунок)?



Теория дифракции света (волн) от щели (повторение). Падение плоской волны на щель. Принцип Гюйгенса. Вторичные волны. Интерференция вторичных волн. У волн, идущих прямо, амплитуда больше, чем у боковых волн. Чем уже щель, тем меньше различаются амплитуды – это означает, что «загибание» больше.

**Принцип Френеля: Дифракционная картина – результат интерференции вторичных волн.** Рассмотреть направления с разностью хода  $\Delta = 0, \lambda/2, 1,5\lambda$

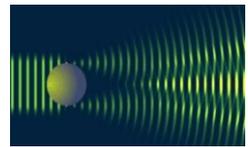


(частичное усиление,  $\Delta_1 = 1,5\lambda$ ) и направления с разностью хода  $\Delta_n = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$  (полное гашение).



Полуширина центрального максимума:  $d \cdot \sin \varphi_1 = \lambda = \frac{d \cdot x_1}{L} \rightarrow x_1 = \frac{\lambda \cdot L}{d}$ .

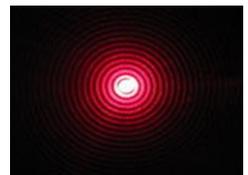
**Полная ширина центрального максимума:**  $y = d + \frac{2\lambda L}{d}$ .



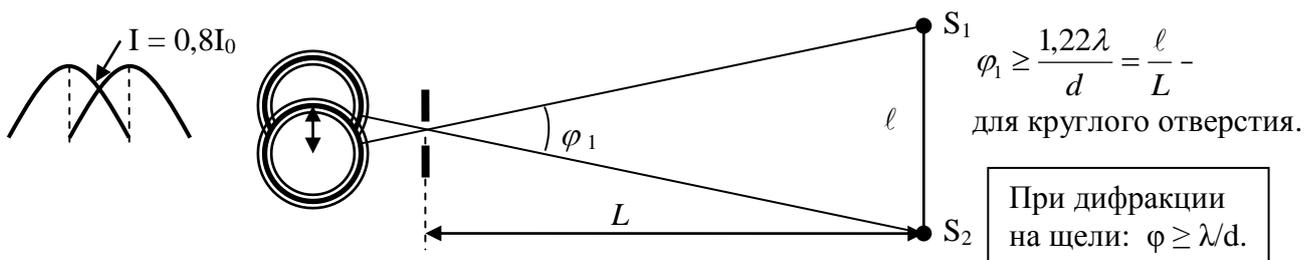
Демонстрация дифракции света от щелей разного диаметра и от тонкой проволоки с помощью лазера. Основные особенности дифракционной картины. **Как изменяется ширина центрального максимума при уменьшении (уменьшение) диаметра щели? Дифракционная картина в белом свете (наблюдение через щель фонарика сотового телефона).**

**Дифракционная картина от двух щелей (демонстрация).** Как подсчитать, сколько интерференционных максимумов укладывается на центральном дифракционном максимуме? Демонстрация дифракционной картины в белом свете с помощью штангенциркуля.

**Дифракционная картина от круглого отверстия или круглой преграды.** Пятно Пуассона. **Венцы.** Условие минимума для венцов от круглых препятствий имеет вид:  $d \sin \varphi_1 = 1,22\lambda$ ;  $d \sin \varphi_2 = 2,23\lambda$ ;  $d \sin \varphi_3 = 3,24\lambda$ ; ... Более 84% общего количества энергии, проходящей через отверстие, попадает в область центрального максимума. Наблюдение венцов: в морозный день подышите на удаленный источник света (фонарь, фару автомобиля).



**Угол, под которым виден предмет, называется углом зрения. Наименьший угол, начиная с которого изображения двух точек сливаются и перестают быть различимыми, называется пределом разрешения глаза.** Диаметр зрачка изменяется в пределах 2 – 6 мм. Дифракция на круглом отверстии и образование венцов. **Изображения двух точек можно видеть отдельно, если центр дифракционного пятна одной из них пересекается с краем первого темного кольца другой (условие Рэля, 1879 г):  $d \cdot \sin \varphi_1 \geq 1,22\lambda$ .**



При выполнении критерия Рэля интенсивность света в "провале" между максимумами составляет 80% от  $I_0$ , что является достаточным для разрешения изображений источников.

**Разрешающая способность оптических приборов** на примере автомобильных фар и зрачка. Микроскоп, телескоп и другие оптические приборы; их разрешающая способность.

**Вопрос:** Почему получаются не резкие изображения обычных объектов в инфракрасных лучах?

**Дополнительный материал:** При каком условии при описании распространения света необходимо пользоваться лучевыми представлениями (границы применимости геометрической оптики)?  $y' = 1 - 2\lambda L/d^2 \rightarrow d = \sqrt{2\lambda L}$ . При ширине отверстия  $d \gg \sqrt{2\lambda L}$  справедливы законы геометрической оптики, а при ширине отверстия  $d \approx \sqrt{2\lambda L}$  справедлива волновая оптика.

**Дополнительный материал:** При прохождении света через диафрагму 20 – 30 нм на расстоянии меньше длины световой волны за ней выходящий свет не успевает расшириться из-за дифракции, поэтому с его помощью можно разрешать объекты на порядок меньше длины волны света.

**Дополнительный материал:** По положению дифракционного венца можно определить координаты точечного объекта. Если набор точечных источников света (протяженный объект) заставить светиться по очереди, то можно получить информацию о форме и размере объекта.

- Сканирующая микроскопия ближнего поля (отверстие диаметром 30 – 100 нм на конце светодиода).
- Использовать объекты, которые светятся разными цветами.
- Существование таких источников света, которые можно «включать» и «выключать» с помощью специально подобранного света.

#### **IV. Задачи:**

1. Какой должна быть ширина щели, чтобы при освещении ее синим светом с длиной волны 440 нм первый дифракционный минимум, наблюдался под углом  $45^\circ$ ? Лучи перпендикулярны к плоскости щели.
2. Желтый свет ( $\lambda = 0,6$  мкм) освещает одиночную щель шириной 0,1 мм. Дифракционная картина наблюдается на экране, удаленном на 1,5 м от щели. Каково расстояние между двумя соседними темными линиями, расположенными с одной стороны от главного максимума?
3. Испускаемый лазером свет представляет собой параллельный пучок кругового сечения диаметром  $d = 5$  см. Длина волны света равна  $\lambda = 6328$  А. Если этот пучок направить на теневую сторону поверхности Луны, то каким будет размер светового пятна на этой поверхности? Расстояние до Луны  $L = 3,84 \cdot 10^8$  м, 5,9 км
4. Каков размер предмета, детали которого может уверенно различить на Земле космонавт, пользуясь оптической трубой с диаметром 20 см? Спутник находится на высоте 300 км над поверхностью Земли.
5. На узкую щель шириной 20 мкм нормально падает параллельный пучок света ( $\lambda = 500$  нм). Найти ширину изображения щели на экране, удалённом от неё на расстояние 1 м.

#### **Вопросы:**

1. Какое дополнение в принцип Гюйгенса ввел Френель?
2. Если человек видит радужные кольца в чистом воздухе вокруг источника света, то доктора считают это признаком помутнения прозрачных сред глаза (началом возникновения катаракты). Почему?
3. Правда ли, что лилипуты обладают несравненно лучшим зрением, чем мы?
4. Каким должно быть наименьшее угловое расстояние между двумя точечными объектами, чтобы их можно было различить невооруженным глазом с диаметром зрачка 5 мм? Длину волны света считать равной 600 нм.  $1,46 \cdot 10^{-4}$  рад =  $0,5'$
5. При наблюдении дифракции света от двух щелей (метод Юнга) освещенность в области максимумов больше, чем от одной щели. Почему?
6. Как скажется в эксперименте с двумя щелями с учетом дифракции и

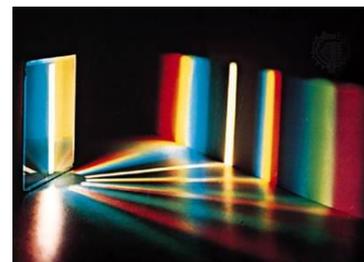
интерференции увеличение: а) длины волны; б) расстояния между щелями; в) ширины щели?

7. Если смотреть вдоль железнодорожного полотна, то, кажется, что рельсы постепенно сходятся. Как объяснить такое явление?
8. Действительные размеры атомов лежат приблизительно между  $1/5000$  и  $1/2000$  длины волны желтого света. О чем это говорит?
9. На круглое отверстие в непрозрачном экране падает параллельный пучок электромагнитного излучения. Почему при увеличении радиуса отверстия в некоторой точке на оси отверстия может наблюдаться уменьшение интенсивности излучения, хотя его поток через отверстие при этом возрастает?
10. Поemu изображения звезд в телескоп имеют вид дифракционных кружков (венцов), имеющих радужную окраску?
11. Почему диаметр отверстия камеры-обскуры должен быть заметно больше длины волны красного света?
12. Во время полного солнечного затмения на поверхности Земли появляются широкие кольцеобразные тени (скользящие тени). Почему?
13. Можно ли закрыть спичкой звезду на темном небе?

#### V. §§ 48-49. Упр. 6, № 3.

1. Изготовьте одиночные щели Юнга и опишите наблюдаемые с их помощью дифракционные картины.
2. Возможно, вы замечали, что если свести почти вплотную большой и указательный пальцы, то между ними возникает темная линия. Чем объяснить появление этой линии?
3. Определить минимальный размер предмета, который можно еще различить, на фотографии, сделанной со спутника, летящего на высоте 300 км.
4. В морозный вечер подышите на кусок стекла. Через образовавшуюся тонкую пленку кристалликов льда посмотрите на светящиеся уличные фонари. Почему фонари оказываются при этом окруженными радужными кругами (ближе к источнику – синеголубой цвет, дальше от источника - оранжево-красный)?
5. Почему нельзя получить громадное увеличение, присоединив к телескопу микроскоп (к микроскопу микроскоп)?
6. Смазав предметное стекло тонким слоем вазелина, прижмите его жирной стороной к порошку ликподия, рассыпанному ровным слоем на газете. Встряхнув пластину, удалите излишки порошка. Рассматривая через пластинку пламя зажженной свечи, опишите наблюдаемую картину и оцените длину световой волны.
7. Оцените разрешающую способность ваших глаз – отдельно для правого и левого; исследуйте зависимость разрешающей способности от условий наблюдения.
8. На каком расстоянии можно отличить двугорбого верблюда от одногорбого верблюда?
9. Обычная булавка с колечком освещается лампочкой карманного фонаря с расстояния 1 – 1,5 м, после чего булавка на просвет рассматривается через лупу (круглое отверстие). Объясните явление.
10. Пронаблюдайте за отражением света в шарике от подшипника ( $d \approx 3$  мм) и объясните наблюдаемое явление.
11. Если камеру-обскуру сделать длиной 10 км, то при диаметре отверстия 16 см диаметр изображения Солнца в такой камере составит 100 м, а качество изображения будет около 2". Докажите это. Почему отверстие такого диаметра оптимально для этой камеры?

... колебания световой волны в каждой ее точке могут рассматриваться как результат сложения элементарных движений, которые посылают в эту точку в один и тот же момент времени, действуя изолированно, все отдельные части этой волны, взятой в какой-нибудь из ее предшествующих положений.



Френель

Урок 31.

## ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Чем объясняется радужная окраска крыльев стрекозы и других насекомых?

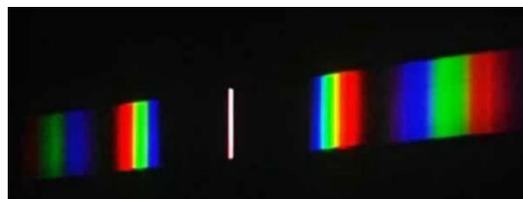
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учащихся со способами изготовления дифракционных решеток. Развить и обобщить знания учащихся о дифракции света; дать представление об ее технических применениях.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** лазер ЛГ-209 с принадлежностями, дифракционная решетка, проекционный аппарат ФОС-67 с принадлежностями, набор светофильтров, волновая ванна с принадлежностями, осветитель, штатив, обобщающая таблица "дифракция волн".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Дифракция света. 2. Разрешающая способность оптических приборов.

**Задачи:**

1. Оцените, на каком наибольшем расстоянии инспектор ГАИ может отличить приближающуюся к нему ночью автомашину с включенными фарами, расстояние между которыми 1,2 м, от мотоцикла с одной фарой?  $\lambda = 600$  нм.
2. Орел способен заметить кролика размером (длиной) 0,5 м на расстоянии 3,2 км. Найдите угловое разрешение глаза орла и минимальный диаметр зрачка глаза орла, если его спектральная чувствительность простирается и в область мягкого ультрафиолетового излучения (400 нм). 0.000156 радиан. 3,13 мм.
3. Камера-обскура представляет собой черный ящик длиной 10 см с крошечным отверстием, играющим роль линзы. Какой диаметр отверстия обеспечивает наибольшую резкость изображения?

**Вопросы:**

1. Диаметр зрачка человеческого глаза меняется от 2 до 8 мм. Чем объяснить, что максимальная острота зрения имеет место при диаметре зрачка 3-4 мм?
2. Что будет наблюдаться на экране при дифракции на щели, если ширина щели равна длине волны света?

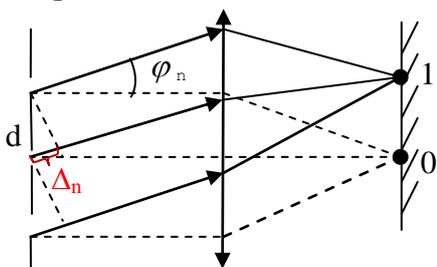
3. Почему у орла должен быть большой зрачок?
4. Почему объекты размером менее 0,2 мкм не видны в микроскоп?
5. В чем разница между дифракцией и интерференцией?
6. Почему некоторые звезды выглядят двойными в голубых лучах, но не разрешаются в красных лучах?
7. На изображении участка неба, полученного с помощью телескопа, звезды ближнего фона можно легко отличить по дифракционным лучам. Объясните.
8. Предположим, что диаметр зрачка орла равен 10 мм. Чему равен минимальный угол, под которым орёл может видеть в отдельности две точки предмета?
9. Древняя единица длины в Сибири – бука, это расстояние, на котором человек перестает разделять видеть рога быка. Сколько километров в одной буке?
10. Как по виду венцов определить, состоит облако из капель воды или кристалликов льда?
11. Почему диаметр отверстия камеры-обскуры должен быть заметно больше длины волны красного света?
12. Оптический микроскоп – прибор, увеличивающий разрешающую способность глаза. Что еще вы можете добавить к этим словам?

**III. Демонстрация интерференции волн** от шести когерентных источников в волновой ванне (максимальная частота колебаний).

Максимумы и минимумы. Можно ли такой эксперимент провести со светом? Методы изготовления дифракционных решеток. Число штрихов на 1 мм и период дифракционной решетки. **Дифракционная решетка** – система параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.



Нормальное падение монохроматического (красного) света на решетку



(рассмотреть на чертеже). Центральный максимум. Разность хода волн вдоль другого направления. **Условие максимума:**  $d \cdot \sin \varphi_m = m\lambda$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2 \pm$  и т.д. Определение направлений (углов), вдоль которых лежат линии максимума. Демонстрация дифракционной картины от

решетки в монохроматическом и свете с помощью лазера. Какой вид будет иметь дифракционная картина в белом свете?

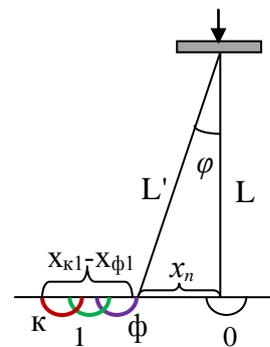
Дифракционная картина через красный и фиолетовый светофильтры (красным светофильтром закрыто, только верхняя часть решетки).

**Применения дифракционных решеток.** Ширина дифракционного спектра и его зависимость от периода решетки:  $x_{nk} - x_{nf} = \frac{nL}{d}(\lambda_k - \lambda_\phi)$ . Максимум второго порядка в два раза

шире максимума первого порядка! Получение дифракционного спектра первого порядка длиной 18 м в астрономии (От рефракции к дифракции). Измерение длины волны света с помощью дифракционной решетки (чертеж на доске). Подготовка к лабораторной работе:

$$\lambda = d \sin \varphi_1 = d \frac{x_1}{L'} \approx d \frac{x_1}{L}; \quad d = 0,01 \text{ мм}, \lambda - ?$$

Ресницы – как дифракционная решетка. Дифракционная картина от компакт-диска.



#### IV. Задачи:

1. При помощи дифракционной решетки с периодом 0,02 мм на экране, находящемся на расстоянии 1,8 м от нее, получена дифракционная картина, у которой первый максимум удален от центрального на 3,6 см. Определить длину волны света.
2. Найдите период дифракционной решетки, если дифракционный максимум первого порядка получен на расстоянии 2,43 см от центрального, а расстояние от решетки до экрана 1 м. Решетка была освещена светом с длиной волны 486 нм.
3. Какой наибольший порядок спектра можно получить с помощью дифракционной решетки с периодом 0,02 мм? ( $\lambda_\phi = 0,4 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_k = 0,74 \text{ мкм}$ ).
4. Какую максимальную длину волны можно наблюдать в спектре дифракционной решетки с периодом 0,01 мм?

#### V. Упр. 6, № 4.

1. Пронаблюдайте и объясните происхождение спектра на долгоиграющей музыкальной пластинке.
2. Покажите, что создаваемые дифракционной решеткой спектры второго и третьего порядков в случае белого света всегда перекрываются.
3. Методом фотографии изготовьте дифракционную решетку.
4. Структурная окраска насекомых возникает за счет оптических эффектов (дифракции, интерференции, рассеяния света и т. д.) в кутикуле. Часто это разнообразные «металлические», переливчатые рисунки. Так ли это?
5. Можно построить изображение точечного источника в плоском зеркале. Фронт отраженного возмущения будет сферой с центром в некоторой точке. Эта точка и будет мнимым изображением источника света в зеркале. Попробуйте это сделать.

*Ощущение различных цветов зависит от различной частоты колебаний, возбужденных цветом на сетчатке глаза.*

*Т. Юнг*

Урок 32.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА:

#### «ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СВЕТА»

Как определить ширину щели оптическим методом?

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Научить учащихся измерять длину световой волны с помощью дифракционной решетки.

**ТИП УРОКА:** лабораторная работа.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** прибор для определения длины волны света, дифракционная решетка, источник света с прямой нитью накала.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Вводный инструктаж
3. Выполнение работы
4. Задание на дом

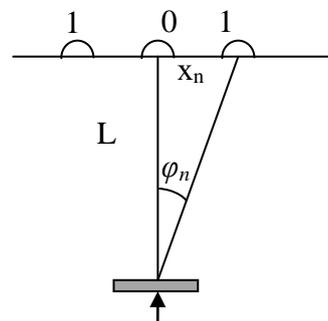


**II.** Записать в тетрадь для лабораторных работ название работы, оборудование, краткую теории, сделать рисунок. Демонстрация прибора для измерения длины волны света (рисунок на доске). Как определить длину волны света по наблюдаемой дифракционной картине?

$$d \cdot \sin \varphi = n\lambda; \sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi; \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_n}{L}.$$

Чему равен период вашей дифракционной решетки?

**Дополнительное задание:** Определите границы чувствительности человеческого глаза; максимальную чувствительность глаза в синих, зеленых и красных лучах; сделать выводы.



**III.** Отчетная таблица:

№ п/п	d, м	$x_n$ , м	L, м	$\sin \varphi$	n	$\lambda$ , м	Цвет
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

**IV.** Выполнение работы. Текущий инструктаж.

**V.** Упр. 9, № 4.

1. Оцените величины индуктивности и емкости колебательного контура, необходимые для генерации частот видимого света. Разумны ли такие величины?
2. Как изменится вид спектров дифракционной решетки, если опыты проводить в воде?
3. Что мы увидим на экране, если длина волны падающего на дифракционную решетку света будет равна периоду решетки ( $\lambda > d$ ;  $\lambda \ll d$ )?

*В этом мире наша первая обязанность состоит в том, чтобы устраивать произвольные островки порядка и системы.*

*А. Эйнштейн*

**Урок 33.**

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

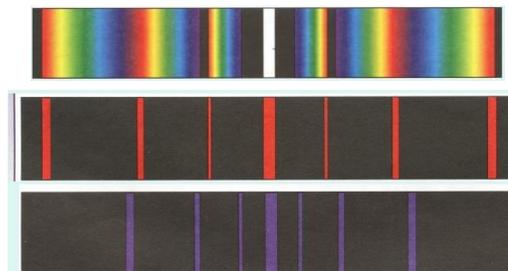
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Научить учащихся применять при решении задач закономерности, полученные при изучении волновых свойств света.

**ТИП УРОКА:** решение задач.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** микрокалькулятор.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Решение задач
4. Задание на дом



## II. Опрос фундаментальный: Методы измерения длины световой волны.

### Задачи:

1. Какова ширина всего спектра первого порядка (длины волн заключены в пределах 0,38 до 0,76 мкм), полученного на экране, отстоящем на 3 м от дифракционной решетки с периодом 0,001 мм?
2. Определите длину волны спектральной линии, изображение которой, даваемое дифракционной решеткой в спектре третьего порядка, совпадает с изображением линии 0,4861 мкм в спектре четвертого порядка.
3. На дифракционную решетку, которая имеет  $N = 1000$  щелей на  $\ell = 1,5$  мм, падает одновременно фиолетовое излучение с длиной волны  $\lambda_1 = 400$  нм и оранжевое излучение с длиной волны  $\lambda_2 = 600$  нм. Сколько всего максимумов образует дифракционная решетка? Под каким углом наблюдается последний минимум?
4. Свет с длиной волны 530 нм падает нормально на дифракционную решетку с периодом 1,5 мкм. Найти угол дифракции, под которым наблюдается максимум наибольшего порядка. 2.  $45^\circ$ .
5. На дифракционную решетку с числом штрихов  $N = 300$  на 1 мм направляют луч лазера. На экране наблюдается 15 дифракционных максимумов. Получить оценку сверху длины волны лазера.

### Вопросы:

1. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. От чего зависит число главных максимумов дифракционной картины на экране?
2. Что общего и в чём различие между эффектами интерференции и дифракции?
3. В чём преимущество дифракционной решётки как спектрального прибора по сравнению с отдельной щелью?
4. Почему в центральной части спектра, полученного на экране при освещении дифракционной решётки белым светом, всегда наблюдается белая полоса?
5. Как с помощью линейки определить период дифракционной решетки?
6. Почему при прохождении света через призму сильнее отклоняются фиолетовые лучи, а при наблюдении дифракции света на дифракционной решетке сильнее отклоняются красные лучи?
7. Если сквозь ресницы смотреть на свет уличного фонаря, то вокруг него появляются радужные блики. Почему?
8. Чем объясняется радужная окраска крыльев стрекозы и других насекомых?

### III. Задачи:

1. На грань кристалла каменной соли падает параллельный пучок рентгеновских лучей с длиной волны 0,15 нм. Расстояние между атомными

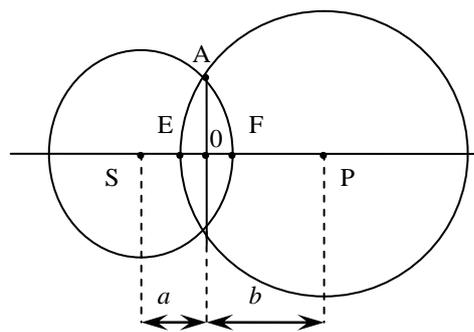
плоскостями кристалла равно 0,28 нм. Под каким углом к плоскости грани наблюдается дифракционный максимум второго порядка?

2. Дифракционная решетка с периодом  $d = 0,5$  мкм помещена в кювету с бензолом. Свет, прошедший через решетку, выходит из сосуда через плоское тонкое дно и образует на экране дифракционную картину. Первому дифракционному максимуму соответствует угол  $\varphi_1 = 45^\circ$ . Чему равна длина волны  $\lambda$  падающего света в бензоле? Показатель преломления бензола  $n = 1,55$ . Ответ: 228 нм.
3. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. Угол между направлениями на первый и второй дифракционные максимумы равен  $15^\circ$ . Найдите общее число максимумов, которые наблюдаются в этой картине дифракции.  $d \sin \varphi_2 / \sin \varphi_1 = 2$ ,  $\sin \varphi_2 = \sin(\varphi_1 + \Delta \varphi)$ . Находим  $\varphi_1$ .  $n = 9$

#### IV.

1. Определите оптическим способом ширину щели на закопченной пластинке (щель Юнга).
2. Как рассчитать упаковку информации на лазерном диске (количество дорожек на одном сантиметре), пользуясь подручными средствами и лазером?
3. В ярком солнечном свете мы видим мельчайшие пылинки, взвешенные в воздухе, благодаря дифракции. Так ли это?
4. Исследуйте характеристики своего глаза как оптического прибора. Определите спектральные границы его чувствительности, разрешающую угловую способность, оптическую силу (глубина глазного яблока 2 см).

**Дополнительный материал:** Зонная пластинка Френеля, с помощью которой можно фокусировать свет, плоская, что позволяет ей быть более компактной и лёгкой при прочих равных оптических свойствах. Пусть между точечным источником монохроматического света  $S$  и точкой наблюдения  $P$  поставлен непрозрачный экран, плоскость которого перпендикулярна оси  $SP$ . Найдём на экране геометрическое место точек, сумма расстояний от каждой из которых до точек  $S$  и  $P$  отличаются от расстояния  $SP$  на целое число длин полуволн. Если  $A$  – одна из искомых точек, то  $SA + AP = SP + m \frac{\lambda}{2}$ , где  $m$  – целое число.  $SA + AP = SP + EF$ ;  $SA = a + OF$ ;  $AP = b + OE$ ;  $OA^2 = 2aOF$ ;  $OA^2 = 2bEC$ ;



$OF \ll a$ ;  $EO \ll b$ ;  $EF \ll SP$ . Тогда  $EF = EO + OF = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) OA^2 = m \frac{\lambda}{2} \rightarrow OA = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}$   
 $= \rightarrow = R_1 \sqrt{m}$ , где  $R_1 = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} \lambda$  радиус первой окружности. Что произойдет, если в

непрозрачном экране сделать отверстие радиусом  $R_1$ ? Расчет показывает, что в сравнении со случаем отсутствия экрана интенсивность света в точке  $P$  возрастет в 4 раза! Почему? А если на пути световых лучей поставить непрозрачную пластинку, которая закрывает все четные (или все нечетные) зоны? Зонная пластинка Френеля аналогична собирающей линзе:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}, \text{ где } \frac{1}{F} = \frac{\lambda}{R_1^2}$$

Можете ли Вы изготовить зонную пластину Френеля? Каким образом можно измерить фокусное расстояние зонной пластинки (опишите методику)? Можно ли с помощью зонной пластики измерить длину световой волны? Если на пути луча поставить экран с маленьким

отверстием, диаметр которого равен диаметру центральной зоны Френеля, то освещенность за экраном будет больше, чем без отверстия. Площадь центральной зоны меньше  $1 \text{ мм}^2$ , поэтому световой пучок распространяется прямолинейно. Тени не будет и за миниатюрным шариком, наклеенным на стекло. Пластика в виде рассеивающих отражателей на фарах.

*С этой точки зрения сам акт поляризации состоит не в создании этих поперечных движений, а в разложении их по двум перпендикулярным неизменным направлениям и в отделении составляющих друг от друга ...*

Огюстен Френель

Урок 34.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Чем отличается естественный свет от поляризованного света?

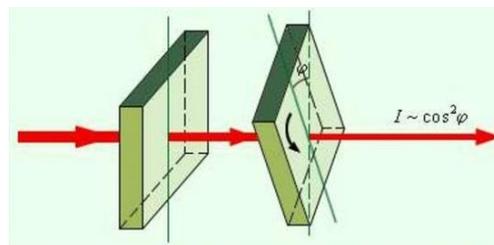
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Привести одно из убедительнейших доказательств электромагнитной природы света – явление поляризации света. Рассмотреть практические применения этого явления.

**ТИП УРОКА:** лекция.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** набор по поляризации света, проекционный аппарат ФОС-57 с принадлежностями, генератор ГВЧ с приемным диполем, поляризационная решетка, выпрямитель ВУП-2.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Лекция
3. Закрепление
4. Задание на до

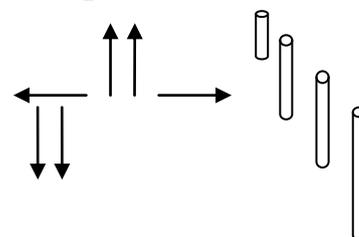


**II.** Обобщающая таблица "Электромагнитная волна". Мы продолжаем изучать свет, продолжаем доказывать, что свет - электромагнитные волны. На уроках мы показали, что свет, как и все волны, отражается, преломляется, интерферирует, дифрагирует, наблюдали дисперсию света и измерили длины световых волн. Кроме того, свет, как и все электромагнитные волны, распространяется в вакууме со скоростью  $c$ . Доказательств достаточно!

**Сегодня приведем последнее, решающее! Тема урока - поляризация света!**

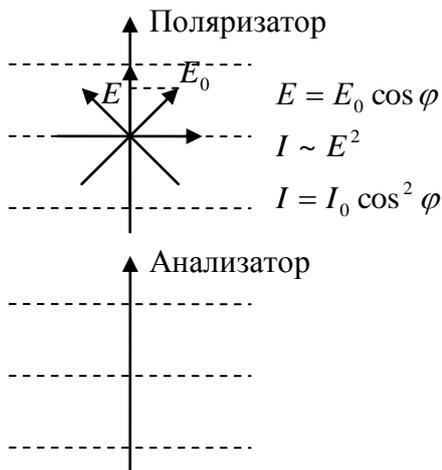
Два проблемных эксперимента с поляроидами. Какие волны называют поперечными, продольными?

Демонстрация на спиральной пружине. Поперечная волна отличается от продольной волны, прежде всего тем, что ее колебания лежат в одной плоскости и это направление отлично от других. Продольная волна таким свойством не обладает.



**Волна, в которой колебания происходят в одной плоскости, называется плоскополяризованной.**

А электромагнитные волны поперечны или продольны? Демонстрация с ГВЧ и ПСР. В какой плоскости колеблется вектор магнитной индукции, вектор напряженности электрического поля? **Электромагнитная волна поперечна!** Можно изобрести устройство (демонстрация поляризационной решетки),



которое будет пропускать электромагнитные волны одного направления и не пропускать другого (демонстрация). **Волна, в которой присутствуют колебания разных направлений, называется естественной.** С помощью поляризационной решетки из естественной волны можно получить плоскополяризованную волну. **Плоскость поляризации.** Степень поляризации.  $P = I_{\text{пол}}/I_0$ .  $I_0 = I_{\text{ест}} + I_{\text{пол}}$ . До падения света на поляроид:  $I_{\text{пол1}} = P \cdot I_0$ ,  $I_{\text{ест1}} = (1 - P) \cdot I_0$ ,  $I_1 = I_{\text{ест1}} + I_{\text{пол1}}$

Интенсивность света после прохождения поляроида:  $I_{\text{пол2}} = I_{\text{пол1}} \cdot \cos^2 \varphi = P I_0 \cos^2 \varphi$ ,  $I_{\text{ест2}} = I_{\text{ест1}}/2 = (1 - P) \cdot I_0/2$ ,  $I_2 = I_{\text{ест2}} + I_{\text{пол2}}$ . Если свет электромагнитные волны, то можно ли получить **поляризованный свет**? Что излучает свет в нагретом теле? Как расположены атомы-антенны? Естественная световая волна. Можно ли изготовить поляризационную решетку для света? Есть кристаллы, которые пропускают свет одного направления и не пропускают другого (электроны в них "легко" колеблются в одних направлениях и "плохо" в других). Поляризатор. Какого направления он пропускает свет? А если следом поставить другой поляроид? А если их установить перпендикулярно? Демонстрация. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $E$  называется **естественным**. Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется **поляризованным**. Расположите два фильтра в ряд, оставив между ними зазор. Пропустите свет через эту пару и поворачивайте один фильтр до тех пор, пока свет не перестанет проходить; оси их поляризации стали перпендикулярными. Теперь вставьте третий фильтр *между* первыми двумя. Вы увидите, что свет начнет проходить через эту конструкцию: каким-то образом добавление лишнего фильтра позволяет пропускать свет.

**Световые волны поперечны! Свет – электромагнитные волны с длиной волны от 0,4 мкм до 0,76 мкм.**

**Дополнительный материал.** Технология приготовления поляроидных пленок: пленку из поливинилового спирта сильно вытягивают в одном направлении в парах йода или окрашивают раствором йода. Плоскость, перпендикулярная этому направлению, называется плоскостью поляризации (главное направление). Зависимость интенсивности света, прошедшего через два скрещенных поляризатора, от угла между плоскостями поляризации:  $I = I_0 \cos^2 \varphi$  (закон Малюса).  $I \sim E^2$ ;  $E = E_0 \cos \varphi$ .

**Практические применения поляризованного света:**

1. **Автомобиль** (сам с линейкой под углом  $45^\circ$  и ученик).
2. **Стерекино.**
3. **Вращение плоскости поляризации** (поляризационно-оптический метод исследования); демонстрация метода.

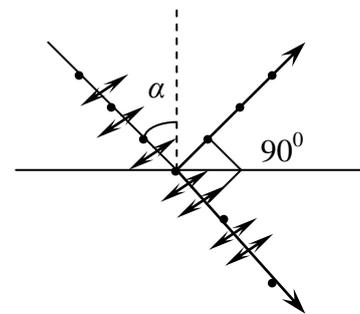


4. **Поляризация** (разделение) – слово в нашем лексиконе.

5. **Поляризация при отражении.** Угол полной поляризации:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1} \text{ (Брюстера).}$$

Если падающий при угле Брюстера луч поляризован в плоскости падения, то отраженного луча не будет (нарушается закон отражения). Объяснение (колеблющиеся электроны не излучают вдоль линии своих колебаний).



6. **Плавная регулировка интенсивности светового пучка.**

**Поляризационные (антибликовые) очки.** Благодаря своей способности поляризовать падающий свет поляроидные очки на 50% ослабляют неполяризованный свет.

**Жидкие кристаллы в устройствах индикации.** Посмотреть через поляроид и объяснить наблюдаемое явление. Что вам известно о жидкокристаллических термометрах, которые при нагревании меняют цвет?

**III. Задачи:**

1. Степень поляризации частично поляризованного света 0,2. Определите отношение максимальной интенсивности этого света, прошедшего через поляроид, к минимальной интенсивности, создаваемой при различных его положениях.
2. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два поляризатора, расположенных так, что угол между их главными плоскостями равен  $45^\circ$ , а в каждом из поляризаторов теряется 5% интенсивности падающего на него света. В 4,43 раза
3. Показатель преломления воды равен 1,33. Под каким углом полностью исчезает отражение от поверхности воды, если использовать поляроид? Как направлена при этом ось поляроида – горизонтально или вертикально?

**Вопросы:**

1. Во сколько раз изменится интенсивность естественного света при его прохождении через идеальный поляроид? Уменьшается в 2 раза.
2. Свет, отраженный от поверхности, частично поляризован. Как убедиться в этом?
3. Естественный свет, пройдя скрещенные поляроиды, дал на экране темное пятно. Можно ли, поместив между ними третий поляроид, получить светлое пятно?
4. Почему поляризационные солнцезащитные очки позволяют блокировать отраженный от полотна дороги или от водной поверхности слепящий свет?
5. Почему поляризационные очки не полностью ослабляют свет и дают возможность видеть?
6. Если верить древним скандинавским сагам, штурманы викингов могли установить положение Солнца, закрытого облаками, с помощью "солнечного

камня". Как это им удавалось (кристаллы кордерита)?

7. Поляроид пропускает только те электромагнитные волны, вектор напряженности электрического поля которых параллелен его оптической оси. Куда исчезают волны, у которых вектор напряженности не параллелен оптической оси?

#### IV. §§ 51, 52.

1. Докажите, что скотч поляризует падающий на него свет (вращает плоскость поляризации поляризованного света, причем угол поворота зависит от толщины ленты).
2. Почему поляризация света, падающего на поверхность под углом Брюстера, больше, чем при иных углах падения?
3. Почему антибликовые (поляризационные) очки избавляют нас от бликов – отражений света от различных поверхностей? Почему в таких очках возникают проблемы при работе с жидкокристаллическими дисплеями компьютеров и мобильных телефонов?
4. До XX века считалось, что существует особая светонесущая среда – эфир, которая заполняет все пространство. Какими свойствами должна была обладать эта среда?
5. Покажите, что если два источника света одинаковой интенсивности испускают плоскополяризованный свет, причем их плоскости поляризации взаимно перпендикулярны, то они не смогут создать интерференционную картину даже при условии, что их разность фаз постоянна или равна нулю.
6. 1844 году немецкий ученый Гайдингер обнаружил, что 25-30% людей способны отличать поляризованный свет от неполяризованного. Он установил, что наблюдатель, глядя в течение нескольких секунд на однородное поле, освещенное поляризованным светом, должен видеть бледно-желтую фигурку на голубоватом фоне. По своим очертаниям фигурка напоминает сноп с расширяющимися концами. Проверьте и вы свои способности.
7. Вырежьте из полимерной пленки (полипропилена) полоску и сложите ее несколько раз пополам так, чтобы получился восьми – или шестнадцатислойный многослойник. Покажите, что вы получили поляризатор, работающий на просвет и отражение.
8. Толстую полиэтиленовую пленку (покрытие парников) поместите между двумя скрещенными поляризаторами и растяните ее. Опишите ваши наблюдения и объясните их.
9. Возможна ли интерференция волн, поляризованных в разных плоскостях?
10. Через поляроид рассмотрите любые прозрачные пластмассовые детали и объясните ваши наблюдения.

*Действительно, как свет обнаруживает и самого себя и окружающую тьму, так и истина есть мерило и самой себя и лжи.*

Спиноза

### ФОТОМЕТРИЯ

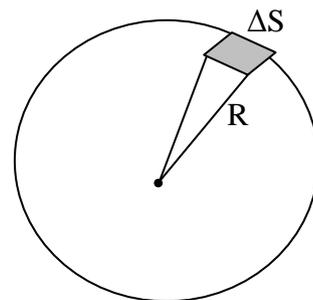
Доп. урок:

Почему лучи жаркого солнца сильно нагревают все отвесно возвышающиеся предметы? Воздействие света на глаз или какой-либо другой приемный аппарат состоит, прежде всего, в передаче этому регистрирующему аппарату энергии, переносимой световой волной. **Методы измерения световой энергии, переносимой световыми волнами, составляют раздел физической оптики, называемый фотометрией.** Точечным источником света называется источник, размеры которого много меньше расстояния, на котором оценивается его действие (на данном расстоянии излучаемую им волну можно считать сферической). *Примеры:* звезды.

**Световой поток ( $\Phi$ )** – количество световой энергии, протекающей через площадку  $\Delta S$  за единицу времени (мощность оптического излучения через поверхность, оцениваемая по вызываемому им световому ощущению).

$$\frac{Q}{t} = \Delta\Phi$$

Выделим площадку  $\Delta S$  на поверхности сферы, в центре которой находится точечный



источник света. Отношение  $\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{R^2}$  безразмерно, однако имеет смысл телесного (объемного) угла.

**1 стерадиан** – телесный угол, вырезающий на поверхности сферы площадку, равную  $R^2$ .  
 Полный телесный угол  $\Omega = 4\pi$  ср.

**Сила света (I)** - свойство света переносить энергию, измеряемое отношением светового потока к телесному углу, внутри которого он распространяется.

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} = \frac{\Phi}{4\pi}$$

Единица силы света - *кандела (кд)*, равная 1/60 силы света, излучаемого в направлении нормали Государственным световым эталоном.

**1 люмен (лм)** – световой поток, посылаемый источником света в 1 кд внутри телесного угла 1 стерадиан. Полный поток, посылаемый этим источником света  $4\pi$  лм. На упаковке светодиодной продукции обязательно указывается световой поток в люменах.

**Освещенность (E)** измеряется отношением светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности.

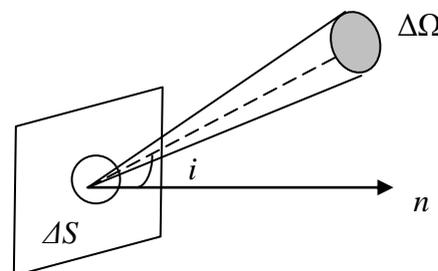
$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$$

Законы освещенности:  $E = \frac{I}{R^2} \cos\alpha$ , где  $\alpha$  – угол падения (демонстрация с фотоэлементом).

Освещенность земной поверхности в ясный солнечный день 100000 лк, для чтения книги достаточно 60 лк, наименьшая освещенность рабочего места допускается 10 лк.

Световая отдача лампы:  $H = \Phi/P$ . [H] = [лм/Вт]

У лампы накаливания при мощности 100 Вт,  $H = 13,5 - 15$  лм/Вт. Почему к концу срока службы световая отдача снижается на 12 - 14%? За последние 60 лет световая отдача ламп накаливания увеличилась на 6,2 лм/Вт. У люминесцентных ламп срок службы в 12 - 14 раз выше, световая отдача выше в 3 - 6 раз. Почему же продолжают использовать лампы накаливания (простота эксплуатации, спектральный состав света, малая стоимость).



Светимость

**(L)** – световой поток, испускаемый единицей поверхности излучающего тела.

**Дополнительная информация:** Если требуется передать световую энергию на большие расстояния, то пользуются источником света большой яркости (B).

$$B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \Delta\Omega \cos i}$$

Яркость Луны  $2,5 \cdot 10^3$  кд/м<sup>2</sup>, лампы накаливания  $5 \cdot 10^6$  кд/м<sup>2</sup>, Солнца -  $1,5 \cdot 10^9$  кд/м<sup>2</sup>.

Яркость идеально рассеивающей свет (диффузной) поверхности одинакова во всех направлениях (закон Ламберта).

*Задачи:*

1. Спираль электрической лампочки силой света 1000 кд заключена в матовую сферическую колбу диаметром 20 см. Найдите светимость этого источника света и освещенность экрана, на который падает 10% светового потока, излучаемого этим источником света. Коэффициент отражения света поверхностью экрана 0,8. Площадь экрана 2,5 м<sup>2</sup>.
2. Определить полный световой поток и силу света источника, если на расстоянии 2 м от него освещенность 15 лк. Силу света по всем направлениям считать одинаковой.
3. Для освещения улицы применяются лампы силой света 300 кд, подвешенные на столбах на высоте 3 м. Расстояние между столбами 28 м. Определите освещенность поверхности земли посередине между столбами и под каждым из них.
4. На какой высоте следует поместить лампу над центром круглого стола, чтобы на его краях получить максимальную освещенность?

*Вопросы:*

1. Для чего лампу закрывают матовым колпаком?
2. Какими факторами определяется почернение фотографической бумаги при экспонировании?
3. Почему с помощью собирающей линзы можно зажечь бумагу светом от Солнца, а от звезды – нельзя? Почему яркость неба, обусловленная излучением всех галактик Вселенной, незначительная?
4. Многие думают, что лето наступает тогда, когда Земля подходит ближе к Солнцу, а зима – когда удаляется от него. Так ли это?
5. Что произойдет с изображением, даваемым линзой, если верхнюю половину линзы закрасить черной краской?
6. Почему южный склон муравейника положе северного склона?
7. Почему на планетах, входящих в системы кратных звезд, невозможно возникновение жизни?
8. Если световой поток измеряется в люменах, то почему на бытовых лампах указывают ватты?
9. Почему два одинаковых фонаря, находящихся на разных, но небольших расстояниях, часто кажутся нам одинаково яркими. Почему этот эффект не наблюдается при большом расстоянии между фонарями?
10. Свеча стоит на расстоянии  $l$  от стены. Как изменится освещенность точки на стене, если с одной и с другой стороны от свечи на расстоянии  $l$  поставить два плоских идеальных зеркала, строго параллельные друг другу (возрастет на 23 %).
11. Найдите соотношение между тепловой и световой энергией, излучаемой небольшой электрической лампочкой, при разных величинах напряжения на ней.

*Тепло, которое излучается поверхностью всех тел..., подчиняется специальным законам и вызывает самые различные явления.*

*Жан Фурье*

*Даже кусок льда - источник света, но света, невидимого.*

*С.И. Вавилов*

## **Урок 35. НЕВИДИМЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ**

**Почему люди загорают особенно быстро на берегу моря и высоко в горах?**

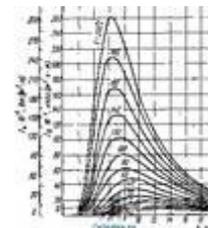
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников со свойствами и применениями невидимых излучений оптического диапазона – инфракрасных и ультрафиолетовых лучей.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** проекционный аппарат ФОС-67, фильтры, дуговая лампа, фотоэлемент кремниевый, призма прямого зрения, экран, гальванометр. Вогнутое зеркало, отрезок черной фотопленки, лапка от штатива, экран люминесцирующий, ртутная лампа, набор по фотолюминесценции.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:**

1. Поляризация света.
2. Практические применения поляризации света.

### Задачи:

1. Под каким углом следует расположить оси двух поляроидов, чтобы интенсивность естественного света, прошедшего через них, уменьшилась: а) в три раза; б) в десять раз?  $35^\circ$ ;  $63^\circ$
2. На решетку с периодом 5 мкм подает перпендикулярно монохроматический свет с длиной волны 480 нм, интенсивностью  $600 \text{ Вт/м}^2$ . На экране, расположенном на расстоянии 2 м, возникает интерференционная картина. Причем в экране, там, где расположены максимумы, прорезаны щели, в которые попадает свет той интенсивности, которая принадлежит максимуму. Этот частично поляризованный свет попадает на поляризатор. При повороте поляризатора на угол  $50^\circ$  из положения соответствующего максимальному пропусканию, интенсивность прошедшего света уменьшается в три раза.
  - 1) Постройте рисунок и найдите интенсивность света, проходящего в щель второго максимума. 36 Вт
  - 2) Определите расстояние на экране от второго максимума до центрального. Вычислите степень поляризации частично поляризованного света. 19%

**Примечание.** Распределение интенсивности света по максимумам (проценты):

1 – 9; 2 – 6; 3 – 3,8; 4 – 2,5; 5 – 1,4; 6 – 1.

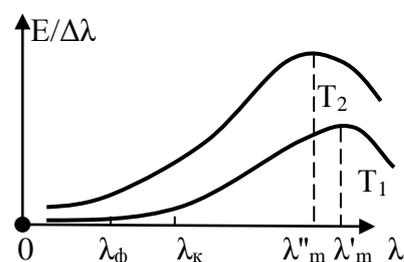
### Вопросы:

1. Почему свет от яркого источника, проходя через узкий зазор между щечками микрометра (15 – 20 мкм), поляризуется?
2. Поляризован ли рассеянный свет голубого неба? Как это можно установить на опыте?
3. Для чего в фотографии используют поляризационные светофильтры – поляроиды?
4. Почему рулон тонкой гладкой полимерной пленки выглядит блестящим, как будто это рулон фольги или металлизированной пленки?
5. Какие очки вы посоветуете рыболову, чтобы его глаза меньше утомлялись от сверкающих бликов водной ряби?
6. Плоско – поляризованный лазерный луч падает на лист белой бумаги. Почему же отраженный свет неполяризованный?

**III. Виды излучения:** тепловое излучение, электролюминесценция, хемилюминесценция, катодолюминесценция, фотолюминесценция. Демонстрация электролюминесценции и фотолюминесценции.

### Излучение нагретого тела (тепловое излучение).

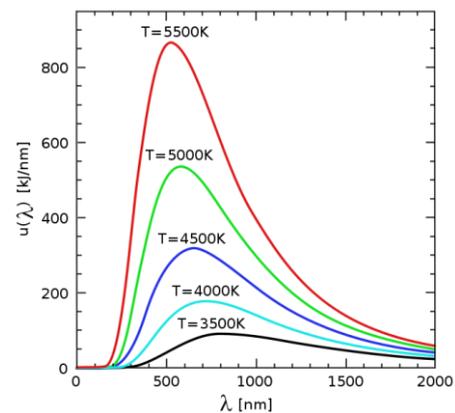
Получение сплошного спектра на экране. Изучение распределения энергии в спектре нагретого тела (демонстрация при напряжении на лампе осветителя 100 В). График распределения энергии на доске.



Демонстрация распределения энергии в спектре

нагретого тела при напряжении на лампе осветителя 180 В. Зависимость

энергии, излучаемой с единицы поверхности нагретого тела, от температуры. **Закон Стефана-Больцмана:**  $W = \sigma \cdot T^4$ . Энергия, излучаемая единицей поверхности твердого тела в единицу времени (**энергетическая светимость**) прямо пропорциональна четвертой степени его температуры:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . **Мощность излучения нагретого тела (P)** – свойство нагретого тела излучать энергию в пространство, измеряемая отношением излученной телом энергии, к промежутку времени, за который она излучена. Мощность излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна площади поверхности и четвертой степени температуры тела:  $P = W \cdot S$ ;  $E = P \cdot t$ .



**Зависимость длины волны, на которую приходится максимум излучения в спектре нагретого тела, от температуры:**  $\lambda_m = \frac{b}{T}$ , где  $b = 0,0029 \text{ К} \cdot \text{м}$ .

**Дополнительная информация.** Светодиодная революция в современной технологии освещения позволила получать чистый видимый свет, не тратя ватты на невидимые части спектра! Так, нагревательный элемент электрокамина или калорифера светится красным. Если температура повышается, свет становится белым, то есть смещается в голубую сторону. Это относится не только к кускам металла, но также и к звездам (красные, желтые, белые, голубые). Максимум энергии в спектре Солнца располагается в области:  $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$  (наши глаза наиболее чувствительны к зелёному). У молодых нейтронных звезд, имеющих температуру миллионы Кельвин, максимум энергии приходится на рентгеновский диапазон.

**Инфракрасное излучение:** (Джон Гершель в 1800 г). Демонстрация выделения и поглощения инфракрасных лучей фильтрами. Диапазон частот (длин волн) инфракрасного излучения от 0,76 мкм до 1-2 мм.

Лучи этой части спектра человек ощущает непосредственно кожей — как тепло. Говорят же люди, что лучи Солнца осветили комнату (свет – это видимое излучение), но также говорят: «греться в лучах Солнца» (тепло распространяется тоже в виде невидимых лучей).

**Практические применения:** инфракрасный нагрев, сушка, приборы ночного видения, инфракрасная фотография (инфракрасное излучение свободно проходит через облака межзвездной пыли), тепловизор, инфракрасный спектральный анализ, инфракрасные сенсорные экраны, парниковый эффект (открыл в 1824 году французский физик Жозеф Фурье). Люди при комнатной температуре светятся инфракрасным светом.

**Ультрафиолетовое излучение:** (И. В. Риттер и У. Волластон в 1801 г.). Диапазон длин волн (частот) ультрафиолетового излучения от 400 до 10 нм. Источники искусственного УФ-излучения – ртутные лампы, лазеры.

Диапазоны УФ-излучения: 1) Ближний (380 - 200 нм); 2) Дальний (200 - 10 нм).

**Проявления:** выгорание полос, загар, образование озонового слоя. Под действием ультрафиолетового излучения Солнца молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  на высотах 30 – 50 км распадаются на водород и кислород (каждую секунду из атмосферы в космос улетает 1 кг



водорода, а кислорода образуется 8 кг). Живые организмы за 1 с производят  $3 \cdot 10^6$  кг кислорода.

**Применения:** Люминесцентные краски (защита документов и денежных знаков от подделок). Ультрафиолетовая дезинфекция воды и воздуха. Медицина (полимеризация пломб). Фотохимические реакции. Фотолитография (создание больших интегральных схем). Ультрафиолетовый телескоп.

#### **IV. Задачи:**

1. Принимая температуру накала нити электрической лампы  $2000^{\circ}\text{C}$ , определить длину волны, на которую приходится максимум энергии в спектре ее излучения. В какой части спектра лежит это излучение?
2. В фокусе сферического зеркала помещен сосуд, содержащий 100 г воды при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Каков должен быть диаметр зеркала, чтобы вода выкипела через 1 мин, если зеркало направить прямо на Солнце? Солнечная постоянная  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . Потерями пренебречь.
3. Солнечный свет падает перпендикулярно на некоторую область, находящуюся в Экваториальной Африке. Если поверхность излучает как абсолютно черное тело, то какова, максимальная температура этой области? Солнечная постоянная у поверхности Земли  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . Парниковый эффект.

В дополнение к солнечной радиации существует исходящий радиационный тепловой поток от Земли в космическое пространство. Такой исходящий тепловой поток возможен потому, что атмосфера Земли прозрачна в среднем инфракрасном диапазоне длин волн. Величина такого исходящего теплового потока очень велика, поскольку он должен в среднем уравнивать тепловой поток от входящего солнечного потока, чтобы Земля поддерживала свою температуру. Таким образом, имея доступ к ясному небу, любой объект на Земле может излучать тепло в космическое пространство, что обеспечивает механизм радиационного охлаждения. В последнее время такой эффект вызывает значительный интерес, когда основное внимание уделяется охлаждению различных материалов и интеграции в приложения, связанные с энергетикой, такие как охлаждение зданий.

#### **Вопросы:**

1. Температуры нитей накала двух одинаковых лампочек отличаются в два раза. Во сколько раз отличаются их мощности излучения?
2. Почему спираль электрической плитки нагревается сильнее в том месте, где она тоньше?
3. Испускает ли красные лучи кусок железа, нагретый до белого каления?
4. Как изменилась бы температура Земли, если бы на небе светило два Солнца?
5. Почему температура всех тел в неотопливаемом закрытом помещении становится одной и той же?
6. В парниках температура заметно выше, чем у окружающего воздуха, даже в отсутствие отопления и удобрений. Как это объяснить?
7. Если вся приходящая на Землю от Солнца энергия, в конечном счете, излучается в космическое пространство, то почему существует жизнь на Земле?

8. При сухом воздухе и безоблачном небе (например, в пустыне) после захода Солнца земля быстро остывает, а влажный воздух и облака наоборот сглаживают суточные колебания температуры. Почему?
9. Почему цвета некоторых материалов при дневном и электрическом освещении различны?
10. Каким образом Земля избавляется от излишков тепла?
11. Где можно применить устройство для изменения частоты световой волны, а стало быть, и цвета луча?
12. Почему самая низкая температура во Вселенной –  $270,5^{\circ}\text{C}$  (реликтовое излучение)?
13. Почему глаз не реагирует на ультрафиолетовые лучи, хотя сетчатка чувствительна к ним?
14. Почему кусок мела выглядит темным среди раскаленных углей?
15. Правда ли, что чёрные солнцезащитные очки могут способствовать ожогу сетчатки глаза от УФ - излучения?
16. Почему инфракрасные лучи нельзя создавать антеннами из провода?
17. Почему измерение температуры ртутным медицинским термометром продолжается долго (около 10 мин), а «стряхнуть» термометр можно практически сразу же после измерения температуры?
18. Почему на поверхности Венеры даже олово и свинец плавится, а на Меркурии прохладнее?

#### V.

1. Выйдите на улицу и, закрыв глаза, “посмотрите” на Солнце. Что вы ощущаете? Добейтесь таких же ощущений (теплоты и красноты) при приближении к электрической лампочке в комнате. Зная мощность лампочки и расстояние до нее, рассчитайте плотность энергии излучения по формуле  $I = P/(4 \cdot \pi \cdot R^2)$ . Почему это значение величины называют "солнечной постоянной"?
2. Почему ультрафиолетовые лампы притягивают насекомых гораздо сильнее обычных ламп накаливания?
3. Если нажимать на кнопки пульта дистанционного управления телевизора, направив его к стене, то каналы всё равно переключатся. Почему?
4. Замечено, что выцветание красок происходит главным образом от лучей, цвет которых является дополнительным к цвету краски. Как это истолковать?
5. Чему равен КПД «солнечного паруса», который перемещается в околоземном космическом пространстве под действием солнечного ветра.
6. С помощью закона Стефана-Больцмана установите, как зависит температура охлаждения нити лампочки накаливания от времени.
7. Докажите теорему о равенстве яркости предмета и изображения, получаемого с помощью собирающей линзы или вогнутого зеркала. Что вы можете сказать о температуре источника света и его изображения?
8. Сравните мощность лунного света в полнолуние с мощностью лунного света в новолуние (пепельный свет).
9. В известной легенде жители Сиракуз под руководством Архимеда сожгли корабли римского флота, фокусируя на них свет Солнца с помощью плоских зеркальных щитов. Принимая, что диаметр щита 1 м, расстояние до кораблей 500 м и температура, при

которой загорается дерево, 1000 К, оцените необходимое число щитов.

10. Оцените температуру спирали электроплитки мощностью 0,5 кВт и нити накала электролампы мощности 150 Вт. Принять, что теплопередача осуществляется только излучением.
11. Докажите, используя метод размерностей, что плотность потока излучения с единицы поверхности нагретого тела прямо пропорциональна четвертой степени его температуры.
12. Опишите вымышленную ситуацию в форме рассказа, содержание которого во многих случаях находилось бы в противоречии с электромагнитными представлениями о свете.

*Вскоре мы обнаружили, что все тела прозрачны для этого агента, хотя и в весьма различной степени..., который проходит через черную картонную крышку, непрозрачную для видимого и ультрафиолетового излучения Солнца.*

*Рентген*

Урок 36

## РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учащихся со свойствами и применениями рентгеновских лучей.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** рентгеновская трубка, диафильм "Рентгеновские лучи".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Распределение энергии в спектре нагретого тела. 2. Невидимые излучения оптического диапазона.

**Задачи:**

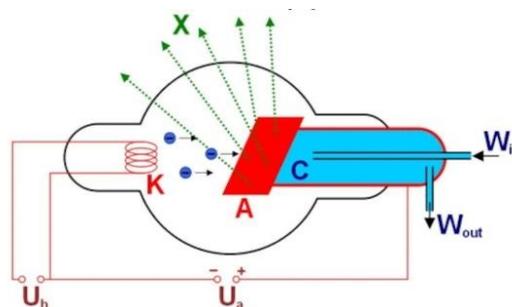
1. Определите энергию, излучаемую открытой дверцей печи за 1 ч, если площадь дверцы  $500 \text{ см}^2$ , а температура печи 1200 К.
2. Эталон единицы силы света - кандела - представляет собой излучатель, поверхность которого площадью  $0,5305 \text{ мм}^2$  имеет температуру затвердевания пластины, равную  $1063^\circ\text{C}$ . Определить мощность излучателя. 95,8 мВт
3. При какой температуре максимум плотности потока излучения будет приходиться на: 1) фиолетовое излучение  $\lambda_1 = 0,40 \text{ мкм}$ ; 2) красное излучение  $\lambda_2 = 0,72 \text{ мкм}$ ?
4. Чёрный металлический шарик освещается Солнцем и располагается на пробковой поверхности стола. Оценить температуру шарика, если температура воздуха  $t_0 = 27^\circ\text{C}$ . Плотность потока солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, считать равной  $\gamma = 1,0 \text{ кВт/м}^2$ .
5. Два белых карлика, первый из которых имеет радиус R и массу M, а второй – радиус  $2 \cdot R$  и массу  $M/8$ , медленно остывают за счет теплового излучения. На момент наблюдения оба карлика имели одинаковую температуру и состав. Известно, что второй карлик остывает

на  $1^{\circ}\text{C}$  за 15000 тысяч лет. За какое время первый карлик остынет на  $1^{\circ}\text{C}$ ?

*Вопросы:*

1. Как обнаружить невидимые ультрафиолетовые и инфракрасные лучи?
2. Картофель собираются запечь в фольге, одна сторона которой матовая, а другая блестящая. Какая сторона должна быть снаружи?
3. Почему при свертывании вольфрамовой нити электрической лампочки в спираль ее температура повышается?
4. Лампа мощностью 150 Вт горит ярче лампы в 75 Вт. Почему же электроплитка мощностью 600 Вт светится слабее?
5. Почему кофе в термосе все равно со временем остывает?
6. Почему говорят, что снег «греет» землю?
7. Горы находятся к источнику тепла ближе равнин, но на их вершинах гораздо холоднее. Почему?
8. Если бы природа «подарила» нам более широкий диапазон видимого света, то к чему бы это привело?
9. Почему при уменьшении напряжения «световая отдача» ламп накаливания уменьшается, и свечение приобретает красноватый оттенок?
10. Почему не следует смотреть на электрическую дугу, возникающую при электрической сварке? Какую роль играет светофильтр маски сварщика?
11. Два совершенно одинаковых спиртовых термометра отличаются только цветом окраски спирта. Будут ли термометры показывать одинаковую температуру, будучи выставленными, на солнце, на одинаковое время?
12. Почему медицинскую лампу, дающую много ультрафиолетовых лучей, называют «горным солнцем»?
13. Почему грязный снег тает быстрее, чем чистый?
14. Почему на снимках, сделанных в инфракрасных лучах, зеленая растительность кажется белой?
15. Как изменится температура Земли, если Солнце все покроется пятнами?
16. Почему за день хомяк съедает столько пищи, сколько сам весит, а слон съедает гораздо меньше 0,1 своей массы?
17. Почему стеклянная призма непригодна для получения спектров инфракрасного и ультрафиолетового излучений?
18. Можно ли с помощью камеры-обскуры получить изображение предмета в ультрафиолетовых или инфракрасных лучах?

**III. Открытие рентгеновских лучей.** 8 ноября 1895 г. пятидесятилетний немецкий профессор физического института г. Вюрцбурга Вильгельм Рентген решил поработать перед тем, как лечь спать. Спустившись из своей квартиры в лабораторию, он занялся исследованием катодных лучей. Около полуночи, почувствовав усталость, он собрался уходить и выключил свет в лаборатории. Окинув взглядом помещение, он заметил, что

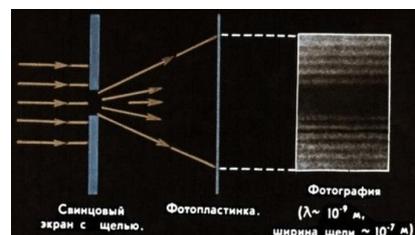


покрытый платиносинеродистым барием экран почему-то светится. В чем дело? Оказывается, не выключен источник напряжения, питающий катодную трубку. Но ведь трубка покрыта непрозрачным картонным чехлом, через который никак не могут проникнуть катодные лучи. К тому же экран находился далеко от трубки, а катодные лучи поглощаются воздухом на расстоянии нескольких сантиметров от нее. Значит, свечение вызывается не катодными лучами. Рентген выключил рубильник – свечение прекратилось. Значит, «виновата» трубка, создающая какое-то новое излучение. Он отходил с экраном от трубки – свечение ослабевало и исчезало на расстоянии полутора-двух метров. Через картон излучение проходило. А через другие предметы? Рентген ставил между трубкой и экраном разные предметы и обнаруживал большую проникающую способность излучения. В число попавших под руку предметов был листок станиоля. Когда Рентген, взяв его в руки, поднес к трубке, на экране отчетливо вырисовался силуэт костей руки. Можно представить, какое это было впечатляющее зрелище! Лишь к утру Рентген возвратился домой. Так были открыты новые лучи, по-русски они так и называются — *рентгеновскими*. И совсем скоро выяснилось, что они проходят через многие материалы и позволяют «заглянуть внутрь» человеческого тела и других объектов.

### Получение рентгеновских лучей. Рентгеновская трубка.

#### Свойства рентгеновских лучей:

- Вызывают люминесценцию некоторых веществ (сернистый барий).
- Не отклоняются электрическими и магнитными полями.
- Оказывают действие на фотопластинку.
- Ионизируют воздух.
- Проникают через все тела, хотя и в различной степени.
- Биологическое или повреждающее действие на организм.



#### Природа рентгеновских лучей (дифракция на кристаллах).

*То, что выходящее из кристалла излучение имеет волновую природу, ясно доказывается резкостью максимумов интенсивности, которую можно объяснить, как проявление интерференции, но весьма затруднительно – на основе корпускулярных понятий ...*

*Лауэ*

Достигая поверхности анода, электрон резко тормозится, при этом возникает электромагнитный импульс с длинами волн в определенном интервале.

**Рентгеновские лучи - электромагнитные волны с длиной волны от  $10^{-8}$  м (10 нм) до  $10^{-14}$  м.**

#### Применения рентгеновских лучей:

**1. Рентгенодиагностика.** Для медицинского мира лучи Рентгена были чудом, которое следовало немедленно поставить на службу диагностике. Через три недели после открытия лучи были использованы для фотографирования переломов. Жена Рентгена, увидев странное изображение своих пальцев с обручальным кольцом, громко воскликнула: «Я видела смерть!».



Газеты сообщали о чудесах превращения с помощью таинственных лучей свинца в золото, о возможности узнать чужие мысли, подсмотреть, что скрывается за стенами, в сейфах и под платьем ничего не подозревающей собеседницы, о вложении в мозг студентов без особого труда знаний, если страницу учебника спроецировать на голову учащегося.

*Смеясь, Франсуаза ответила: Мадам знает обо всем. Она не хуже X-лучей.*

*Марсель Пруст*

Вильгельм Конрад Рентген получил письмо с просьбой прислать ... несколько рентгеновских

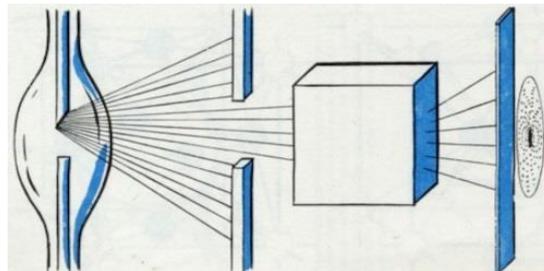
лучей с указанием, как ими пользоваться. Оказалось, что у автора письма в грудной клетке застряла револьверная пуля. Рентген ответил так: *К сожалению, в настоящее время у меня нет икс – лучей, к тому же пересылка их – дело очень сложное. Считаю, что мы можем поступить проще: пришлите мне вашу грудную клетку.*

Уже в начале XX века X-лучи нашли широкое применение в России. Тогда в нашей стране заболеваемость туберкулёзом достигла катастрофических размеров, а с помощью рентгеновского излучения врачи могли вовремя увидеть патологические процессы в лёгком и назначить пациенту соответствующее лечение. Сегодня трудно поверить, но первая рентгенологическая клиника открылась именно в России, в 1918 году. Причём здесь «новейшие методы исследования» человеческого организма помогали выявить не только легочные заболевания, но и многие другие болезни, не говоря уже о переломах костей.

## 2. Рентгенотерапия.

## 3. Рентгеноструктурный анализ.

Для идентификации людей есть паспорт. С помощью рентгена мы можем заглянуть вглубь материала и узнать, какова у него структура и из чего он состоит. Выходит, что у любого нового материала, который, например, синтезируют химики, тоже есть свое «удостоверение личности» - рентгеновский паспорт.



## 4. Рентгенодефектоскопия.

**5. Рентгеновские микроскопы и телескопы.** Ученые США (университет Огайо) впервые сделали рентгеновский снимок отдельного атома.

## 6. Компьютерная рентгеновская томография.

При флюорографии используют более мягкое излучение, поскольку для возбуждения атомов чувствительного слоя экрана требуются менее энергичные рентгеновские фотоны, чем в случае рентгеноскопии, когда необходимо ионизировать атомы серебра в светочувствительном слое фотобумаги.

«Невидимые лучи» произвели настоящую революцию в науке. Причём их применение не только усовершенствовало медицинскую диагностику, но и приблизило человечество к открытию радиоактивности, а также помогло получить новые, неизвестные ранее сведения о строении различных веществ. Излучение, совершенно случайно обнаруженное Рентгеном, легло в основу некоторых научных дисциплин, носящих сегодня его имя, таких как рентгенология, рентгеновская астрономия, рентгенография и многих других.

**Исторический факт.** Вильгельм Рентген никогда не приклонялся даже перед королями. Однажды у учёного состоялась официальная встреча с кайзером Германии Вильгельмом II. Тот, желая поразить всем известную знаменитость своей эрудицией, принялся рассказывать прославленному тёзке об оружии. Рентген, послушав повествование правителя несколько минут, резко оборвал того на полуслове и сказал: *«Это знает каждый мальчик. Не можете ли вы сообщить мне что-либо посодержательнее?»*.

**Задачи:**

1. Пучок электронов в телевизионной трубке, достигнув экрана, внезапно тормозится. Не возникает ли при этом рентгеновское излучение? Определите кинетическую энергию электронов, достигающих экрана, если анодное напряжение 16 кВ.
  2. Для пульсара, находящегося на расстоянии 10 световых лет от Земли, удалось обнаружить всплеск видимого света и рентгеновского излучения, одновременность их прихода установлена с погрешностью 1 мкс. С какой относительной погрешностью можно установить при этом равенство скоростей видимого света и рентгеновских лучей?
- V.** Какие у вас есть доказательства того, что рентгеновские лучи - электромагнитные волны?

*И всюду явный - ты, и всюду тайный - ты?  
И на что бы ни упал мой взор - это все ты.  
Джами, "Книга мудрости"*

Урок 37.

## СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Человек видит менее 1% от всего электромагнитного спектра!

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Систематизировать и обобщить знания учащихся, полученные в изучении электромагнитных излучений оптического диапазона.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** таблица "Шкала электромагнитных излучений".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом

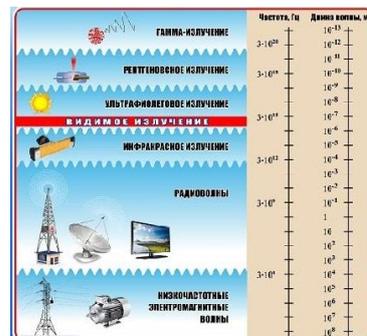
**II. Опрос фундаментальный:** Рентгеновские лучи.

**Задача:**

1. Электроны в рентгеновской трубке достигают анода со скоростью  $1 \cdot 10^8$  м/с. При каком напряжении работает трубка?
2. Космический аппарат питается от солнечной панели площадью  $5 \text{ м}^2$  с коэффициентом полезного действия 0,15. Солнечные лучи падают на панель под углом  $60^\circ$  к её поверхности. За 8 часов работы панель собрала 3 кДж энергии. На каком расстоянии от Солнца сейчас находится аппарат?
3. Какую энергию могут приобрести электроны в электрическом поле лазерного пучка? Амплитуда напряженности поля равна  $10^{11}$  В/м, частота  $3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ .

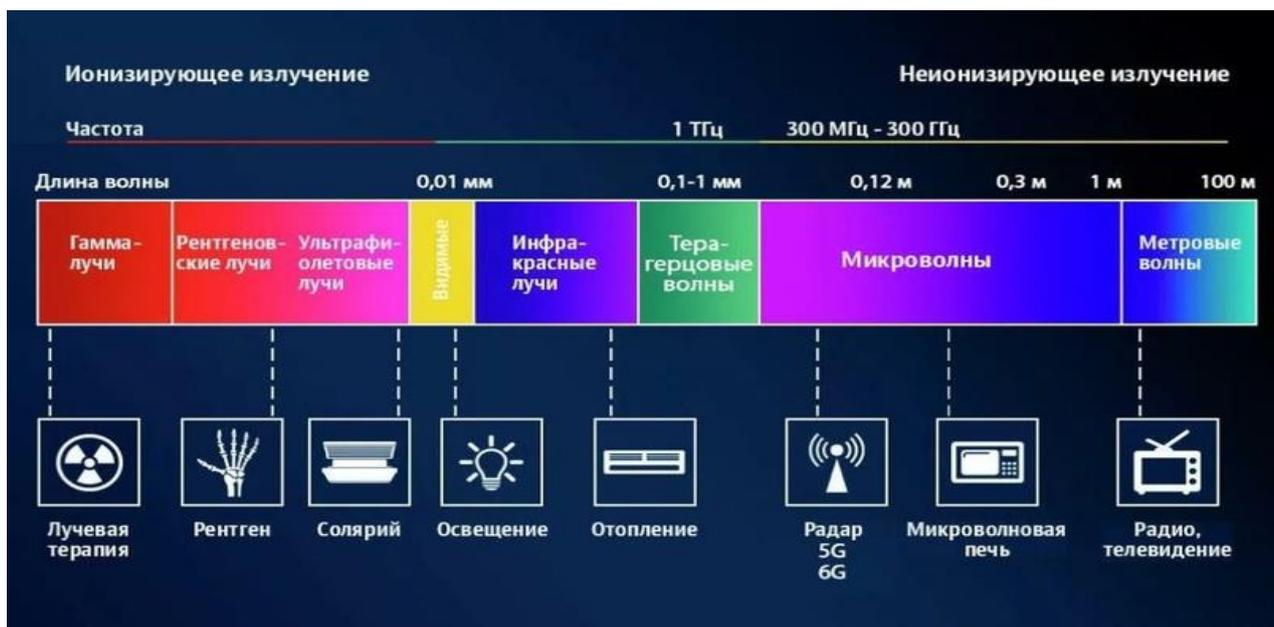
**Вопросы:**

1. Существуют ли рентгеновские лучи в природе? Что служит их источником и где они находятся?
2. Для чего врачи – рентгенологи пользуются при работе перчатками, фартуками и очками, в которые введены соли свинца?
3. При рентгенодиагностике желудочно-кишечного тракта больному дают «бариевую кашу». Для чего это делается?
4. Электроны в телевизионной трубке, работающей при напряжении 16 кВ, достигнув экрана, останавливаются. Не возникает ли при этом рентгеновское излучение? Не опасно ли оно?
5. Металлическая пластинка под действием рентгеновских лучей зарядилась. Каков знак ее заряда?
6. Как устроена рентгеновская трубка!
7. Почему рентгеновскую пленку хранят в свинцовой коробке, а при съемке ее помещают в светонепроницаемую обертку из фольги?



8. Почему звонок по мобильному телефону может вызвать местный разогрев тканей человеческого тела, но на очень незначительную величину?
9. Почему молния является ещё и радиоактивным источником - один удар по дозе излучения равен двум походам на флюорографию?
10. Почему трудно изготовить рентгеновский микроскоп!
11. Нередко утверждают, что работающие рентгеновские установки и тракторы создают радиопомехи. Почему это утверждение не верно?
12. Подумайте, каким может быть принцип устройства поляризатора для рентгеновских лучей.

**III.** Виды электромагнитных излучений (диапазон частот или длин волн). Источники электромагнитных излучений. Все типы электромагнитных волн также возникают в результате различных видов ускоренного движения электрических зарядов.



Подобно световым волнам, **радиоволны** могут практически без потерь распространяться на большие расстояния в земной атмосфере, и это делает их полезнейшими носителями закодированной информации. **Микроволны и радиоволны диапазона сверхвысоких частот (СВЧ)** имеют длину от 300 мм до 1 мм. Сантиметровые волны, подобно дециметровым и метровым радиоволнам, практически не поглощаются атмосферой и поэтому широко используются в спутниковой и сотовой связи и других телекоммуникационных системах. Размер типовой спутниковой тарелки как раз равен нескольким длинам таких волн.

*Будь не солнечен наш глаз,  
Кто бы Солнцем любовался?*

*И. Гете*

**Методы регистрации.** Приемники электромагнитных излучений. Человеческий глаз представляет собой идеальный инструмент для регистрации

и анализа электромагнитных волн видимого диапазона. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, волны видимой части спектра практически беспрепятственно распространяются в прозрачной для них атмосфере. Во-вторых, температура поверхности Солнца (около 5000°С) такова, что пик энергии солнечных лучей приходится именно на видимую часть спектра.

*Вопрос:* Поскольку в прошлом мы были вынуждены спасаться от хищников и отыскивать добычу, человек похож на радиоприемник, настроенный на узкий диапазон длин волн: значительная часть окружающего мира остается скрытой от нас. Так ли это?

Человек крайне ограничен в своём восприятии окружающего мира, в восприятии широчайшего океана физических полей, спектра электромагнитных волн различной частоты, всего того многообразия форм жизни и природных явлений, которые существуют в мире. Мы рисуем свою картину окружающего мира лишь в очень узком диапазоне длин волн — в видимых цветах радуги. Для радиоволн есть другое атмосферное окно (именно поэтому радиотелескопы могут всматриваться в космос), но большинство других длин волн блокируются земной атмосферой. Вспоминается история про одного физика, который на лекции нарисовал такую шкалу электромагнитных излучений на доске и сказал: "в ощущения нам была дана лишь узкая щель диапазона длин волн, но благодаря науке мы познали всю шкалу".

**Свойства электромагнитных излучений.** Зависимость свойств электромагнитных излучений от частоты. Электромагнитные волны разных частот неодинаково распространяются в различных средах. Например, человеческое тело непрозрачно для волн видимой части спектра, но не представляет преграды для рентгеновских лучей. Инфракрасные лучи длиной более 1 мкм не проходят сквозь слой воды толщиной несколько сантиметров (тепловой фильтр). Радиоволны сверхвысоких частот в диапазоне от 2,45 до 5,8 ГГц почти не поглощаются атмосферой, не отражаются ионосферой и эффективно преобразуются в электричество (КПД ~ 80%). Атмосфера прозрачна и для видимого света (альбедо Земли порядка 30%). Только 9% энергии солнечного излучения несут с собой ультрафиолетовые лучи, и 44% энергии приходится на видимую часть спектра. Остальные 47% своей энергии Солнце посылает нам в виде инфракрасных лучей. На сегодняшний день астрономы активно используют наблюдения в различных спектральных диапазонах для раскрытия тайн Вселенной. Среди них особо важную роль играет рентгеновская астрономия.

**Явления, происходящие с поглощающим или излучающим свет объектом;** их проявление в природе.

**Почему небо синее?** Молекулы воздуха имеют как раз подходящий размер, чтобы рассеивать видимый свет. За рассеяние света отвечали не какие-то примеси вроде пыли,

солей или пузырьков. «Даже в отсутствие чужеродных частиц, – заявил Рэлей, – небо все равно будет синим». Только азот, кислород и аргон окрашивают наш небосвод в синий цвет. В соответствии с теорией Рэля вероятность рассеяния и отклонения синих волн выше, чем любых других. И поэтому синие волны могут распространяться в разные стороны. Они вновь могут попасть на небо, в космос, но могут и к вам в глаз. Еще сильнее рассеиваются ультрафиолетовые лучи, поэтому загар по телу распределяется достаточно равномерно.

#### IV. Заполнение таблицы:

Излучение		Радиоволны	Инфракрасные лучи	Видимый свет	Ультрафиолетовые лучи	Рентгеновские лучи
Диапазон частот						
Источники						
Приемники						
Свойства	общие					
	характерные					
Основные количественные характеристики						
Явления, обусловленные излучением						
Практические применения						

#### Дополнительные вопросы:

1. Чем отличается спичка от радиостанции?
2. Вообразите мир без электромагнитного взаимодействия. Чем еще интересен этот мир?
3. В чем сходство и в чем различие между светом и звуком?
4. Какого диапазона электромагнитные излучения используют в медицине?
5. Предложите проект детектора электромагнитного излучения.
6. К какому виду излучения относятся электромагнитные волны с частотой 30 ГГц; 600 ТГц; 100 кГц; 1200 ТГц?
7. Что не излучает электромагнитные волны?
8. Что общего и в чем различие между электрическими и магнитными явлениями?
9. Почему цвет неба у горизонта кажется бледнее или даже кажется совсем белым?
10. Почему небо вокруг заходящего солнца может быть окрашено в красные и розовые цвета?
11. Почему пламя свечи в нижней части синее, а в верхней – желтое?
12. Какими явлениями объясняется возникновение радуги?
13. Почему в радиодиапазоне можно наблюдать излучение от очень далеких космических объектов?
14. Как измерить температуру тела человека за 1 с?

V. Домашнее сочинение: "Электромагнитные волны вокруг нас".

*Непрерывная, победоносная война за истину, никогда не завершающаяся окончательной победой, имеет, однако, свое неоспоримое оправдание. На пути понимания природы света человек получил микроскопы, телескопы, дальномеры, радиолучи Рентгена; это исследование помогло овладеть энергией атомного ядра. В поисках истины человек безгранично расширяет области своего владения природой. А не в этом ли подлинная задача науки?*

С.И. Вавилов

Урок 38.

## ОБОБЩАЮЩИЙ УРОК ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

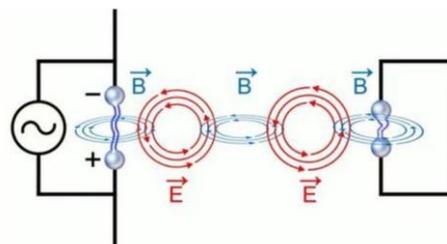
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Систематизировать и обобщить знания, полученные учащимися при изучении электродинамики и оптики.

**ТИП УРОКА:** повторительный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** прибор ПСР с принадлежностями, проекционный аппарат ФОС – 67 с принадлежностями, лазер, набор по интерференции и дифракции света, набор по поляризации, обобщающая таблица "Электродинамика", Обобщающая таблица "Электромагнитные волны", обобщающая таблица "Шкала электромагнитных излучений".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Обобщающее повторение
3. Заполнение таблицы
4. Самостоятельная работа
5. Задание на дом



**II.** Какие гипотезы существовали на природу света? На основании, каких фактов Максвелл высказал предположение об электромагнитной природе света? Волновые свойства света (по таблице "Электромагнитные волны").

**Шкала электромагнитных излучений.** Сегодня мы понимаем, что весь электромагнитный спектр: сигналы радаров, микроволновое излучение и телевизионные волны, инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый свет, рентгеновские и гамма-лучи — это не что иное, как электромагнитные волны; а те, в свою очередь, представляют собой вибрации физических полей. Электромагнитное излучение - его поведение одинаково для самых разных видов излучения: микроволновое и инфракрасное излучения, видимый свет, рентген. То есть идея универсальности в том, что мы можем объединить какие-то явления, которые изначально кажутся совсем разными, и понять их с общей точки зрения.

Какие явления удалось объяснить электродинамике и электромагнитной теории света в частности?

*Раз мы пришли к представлению, что не существует никакой материальной массы, а есть только масса электромагнитная; нельзя ли распространить*

*это представление на положительные электроны и вообще на всю материю. Я лично охотно готов принять электромагнитную теорию материи и сил, действующих между материальными частицами.*

*Лоренц*

Электромагнитная форма движения материи и электромагнитная картина мира.

### **III. Заполнение обобщающей таблицы "Физическая оптика".**

#### **I. ОСНОВАНИЕ**

1. Наблюдения: радуга, цвета побежалости, цвета тонких пленок, световые эффекты.
2. Эксперименты: опыты по наблюдению дисперсии, интерференции, дифракции и поляризации света.
3. Основные понятия: электромагнитная волна, дисперсия света, интерференция света, дифракция света, дифракционная решетка, поляризация света, разрешающая способность оптического прибора.
4. Модель: синусоидальная электромагнитная волна.

#### **II. ЯДРО ТЕОРИИ**

1. Постулаты: принцип Гюйгенса-Френеля.
2. Законы: источниками электрического поля являются электрические заряды; у магнитного поля источников нет; вихревое электрическое поле создается переменным магнитным полем; магнитное поле создается электрическим током и переменным электрическим полем.
3. Константы:  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

#### **III. СЛЕДСТВИЯ**

1. Формулы-следствия: существование электромагнитных волн, законы отражения и преломления света, закон прямолинейного распространения света, условия максимума и минимума освещенности в данной точке при интерференции волн и при дифракции света.
2. Экспериментальная проверка: измерение длины световой волны.
3. Границы применимости: законы электродинамики неприменимы при больших частотах электромагнитных волн.
4. Практические применения: стереокино, измерение малых углов и малых длин, контроль качества обработки поверхности, разрешающая способность оптических приборов, поляризационно-оптический метод исследования, поляризационные очки, жидкокристаллические устройства индикации.

Пользуясь планом изучения любой физической теории, выясните, к каким элементам теории можно отнести приведенные ниже утверждения.

1. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна  $299792458 \pm 1,1$  м/с.
2. Вихревое электрическое поле создается переменным магнитным полем.

3. Дифракционная решетка - прибор, предназначенный для изучения спектрального состава света.
4. Условие максимума при прохождении света через дифракционную решетку:  
 $d \cdot \sin \varphi_n = n\lambda$ .
5. Электромагнитная волна - взаимосвязанные колебания электрических и магнитных полей, распространяющиеся с конечной скоростью в пространстве.
6. При ширине отверстия  $d \gg \sqrt{2\lambda L}$  справедливы законы геометрической оптики, а при ширине отверстия  $d \approx \sqrt{2\lambda L}$  справедлива волновая оптика.
7. Скорость света в воде оказалась в 1,33 раза меньше, чем в вакууме.
8. Уравнения Максвелла описывают излучение строго постоянной частоты и амплитуды в течение бесконечно большого времени, что является идеализацией.
9. Т. Юнг и О. Френель экспериментально подтвердили волновую теорию света.
10. Электромагнитные волны, как и любые волны, способны проходить друг через друга, не изменяя своей формы.

**IV.** Самостоятельная работа по зачетной папке "Электромагнитные колебания и волны".

**V.** Подготовка к контрольной работе.

1. Как бы выглядел наш мир, если бы переменное электрическое поле не создавало магнитного поля?
2. Почему же мы видим звёзды лучистыми, а не круглыми точками? Как освободиться от влияния этого недостатка нашего хрусталика и видеть звезды без лучей?
3. Если мы из темного помещения выйдем сразу на яркий свет, то на некоторое время мы почти утрачиваем способность что-нибудь различать. Почему?

*Лучше скажи мало, но хорошо.*

*Козьма Прутков*

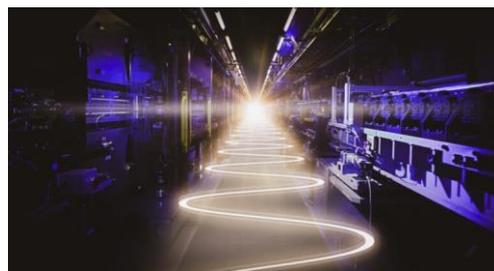
*Мозги, как и сердца, тянутся туда, где их ценят.*

*Роберт Макнамара*

**Урок 39.**

## **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 5**

**Дополнительная информация.** В США создан самый мощный в мире рентгеновский лазер — установка LCLS-II. С его помощью можно снять кино о жизни молекул и атомов в реальном времени, что позволит открывать секреты мироздания. LCLS-II использует температуры ниже, чем в глубоком космосе, чтобы разгонять электроны почти до скорости света и испускать миллион рентгеновских вспышек в секунду. В установке электроны генерируются, а затем ускоряются вниз по длинной трубе, прежде чем они попадут в «ондулятор», который заставляет их колебаться, пока они не отбрасывают рентгеновские лучи из стороны в сторону.



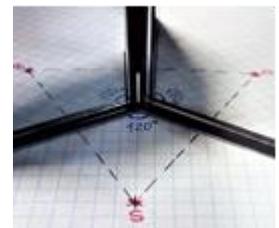
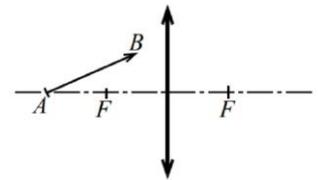
*Если можешь, иди впереди века; если не можешь – иди с веком, но никогда не будь позади века.*

*В.Я. Брюсов*

Примерные темы курсовых работ	Примерные темы рефератов
<ol style="list-style-type: none"> <li>Световые явления в атмосфере: горные призраки, верхние и нижние миражи, световые столбы, гало, венцы.</li> <li>Парниковый эффект.</li> <li>Эволюция печи: от очага пещерных людей до микроволновой печи.</li> <li>Принципы и устройства генерации света - современные источники освещения.</li> <li>Оптические устройства отображения и хранения информации.</li> <li>Фотохромные и электрохромные материалы.</li> <li>Фотография, фоточувствительные материалы и обработка изображений.</li> <li>Биологические принципы получения света, влияние света на живые организмы.</li> <li>Нелинейно-оптические материалы.</li> <li>Оптические явления и их описание (моделирование).</li> <li>Свойства человеческого зрения.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Электромагнитная сигнализация в живой природе.</li> <li>Оптические иллюзии.</li> <li>Температура Вселенной.</li> <li>Новые фотографии.</li> <li>Первичные цвета света</li> <li>Цвета тела, освещенного белым светом.</li> <li>Первичные цвета художников.</li> <li>Смещение масляных красок.</li> <li>Насыщенность цвета.</li> <li>Цвет неба и зорь.</li> <li>Фотохимические реакции.</li> <li>Пигменты и красители.</li> <li>Электричество в живых организмах.</li> <li>Формы фотолюминесценции.</li> <li>Полное отражение в технике и в быту.</li> <li>Зрительные иллюзии.</li> </ol>

#### Дополнительные задачи и вопросы.

- Постройте изображение стрелки АВ, находящейся перед тонкой собирающей линзой.
- Вы светите лазерной указкой на стену противоположного дома. Оцените расстояние до дома, если диаметр пятна на стене  $D = 20$  см (границы пятна оцениваются из условия, что в области пятна лучи, идущие от различных участков источника, не «гасят» друг друга), диаметр выходного пучка лазера  $d = 3$  мм, а длина волны  $\lambda = 600$  нм.
- Два плоских зеркала составляют двугранный угол  $120^\circ$ . В биссекторной плоскости расположен точечный источник света. Расстояние между первыми мнимыми изображениями источника равно 20 см. Чему будет равно расстояние между изображениями, если двугранный угол уменьшить в два раза?
- Вертикально поляризованный свет с интенсивностью  $I_0$  проходит девять идеальных поляроидов. Ось первого поляроида составляет  $10^\circ$  с вертикалью, ось второго повернута еще на  $10^\circ$  и т.д. Чему равна интенсивность света, прошедшего через поляроиды?
- Чему равна ширина центрального дифракционного максимума на экране, расположенном на расстоянии 5,5 м за щелью шириной 0,1 мм, освещаемого светом с длиной волны 400 нм?
- Сколько интерференционных полос содержится в центральном дифракционном пике картины, возникающей при дифракции от двух щелей, если а)  $D = 2d$ ; б)  $D = 12d$ ?



*Все это было тайной для людей  
И стало им открыто лишь поздней.*

*Гете «Фауст»*

*Тщетно, художник, ты мнишь,  
Что Творений своих ты создатель,  
Вечно носились они над Землею,  
Незримые оку...*

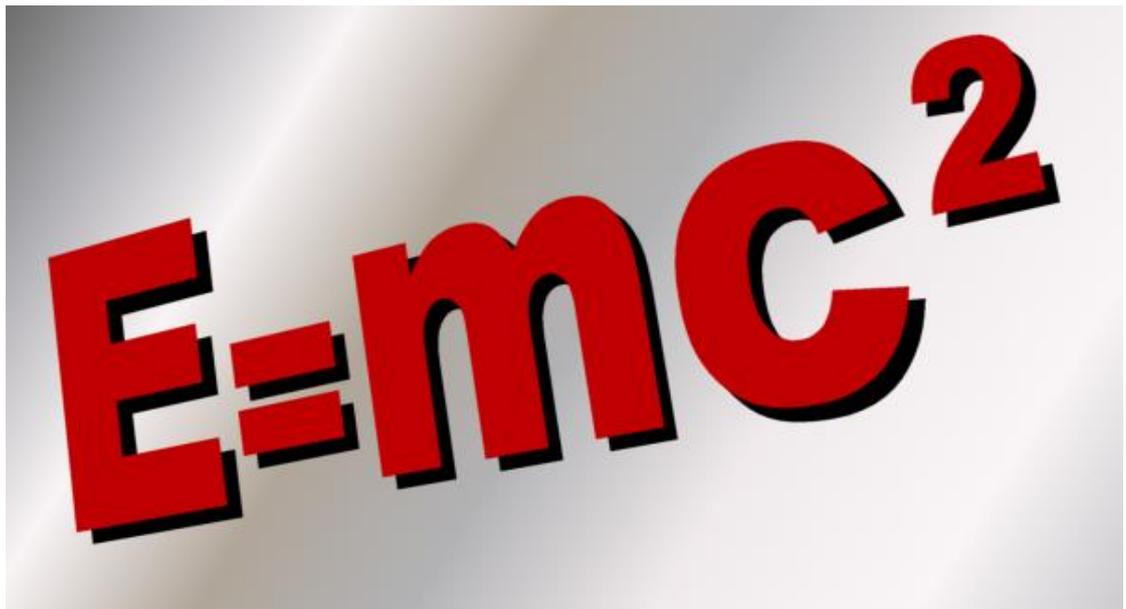
*Много в пространстве невидимых  
Форм и неслышимых звуков,  
Много чудесных в нем есть  
Сочетаний и слова, и света.*

*А.К. Толстой*

*В теории относительности я вижу пример того, как фундаментальное научное открытие, иногда даже вопреки сопротивлению ее создателя, дает начало дальнейшему плодотворному развитию, следующему уже своим независимым путем.*

*В. Паули*

## **ПРИМЕРНЫЕ ПЛАНЫ УРОКОВ ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**



На рубеже 20-го века многие физики считали, что их работа «сделана». В 1894 году Альберт Майкельсон сказал: «Кажется вероятным, что большинство великих основополагающих принципов уже твердо установлены». В 1901 году лорд Кельвин провозгласил: «Будущие истины физических наук следует искать в шестом десятичном знаке».

*Изучая физику, мы обнаруживаем, что существует огромное количество законов – законы гравитации, электричества и магнетизма, ядерных взаимодействий и т.д. Но все это многообразие законов пронизано несколькими общими принципами, которые, так или иначе, содержатся в каждом законе. Примерами таких принципов могут служить некоторые свойства симметрии...*

*Р. Фейнман*



## **ИНВАРИАНТНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.**

**Почему нельзя определить, с какой скоростью плывет корабль в тумане?**

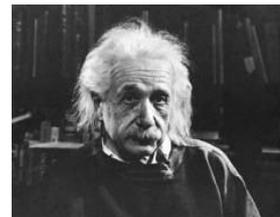
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Более глубоко познакомить учащихся с понятием "физический закон". Дать представление об инвариантности физических законов относительно сдвигов во времени, сдвигов и поворотов в пространстве, равномерного прямолинейного движения. Сформулировать принцип относительности и записать формулы преобразований Галилея. Выяснить, инвариантны ли законы механики Ньютона и законы электродинамики относительно преобразований Галилея. Обрисовать ситуацию в физике накануне создания теории относительности.

**ТИП УРОКА:** лекция

**ОБОРУДОВАНИЕ:** кинофрагмент "Принцип относительности Галилея".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Лекция
3. Основные выводы
4. Задание на дом



### **II. Что вы знаете о теории относительности?**

Почему мы начинаем изучать теорию относительности? Стоит ли ее изучать, если предсказанные эффекты заметны лишь при больших скоростях? Да!!!

- Мы будем продолжать изучать свойства света, для которого  $v = c$ .
- Чтобы понять явление магнетизма и электродинамику, надо разобраться с теорией относительности.
- Ядерная физика и астрономия.
- Для общей культуры необходимо знать такие вещи, как замедление времени, лоренцево сокращение, парадокс близнецов и т.д.

**Специальная теория относительности (СТО) – новое учение о пространстве и времени.**

Взаимосвязь между ними обнаруживается при движении.

Ньютоновское пространство было подобно миллиметровке с системой координат, и любое движение происходило, словно на фоне этой решетки.

**СТО начинается с понятия инвариантности физического закона. Законы симметричны (инвариантны), если над ними можно произвести некоторые операции, в результате которых закон будет выглядеть точно так же, как и прежде.**

Спустя тысячелетия в природе все осталось по-прежнему: Солнце каждый день всходит на востоке, вода в реках замерзает при нуле градусов Цельсия, а раскаленный металл остывает

по вечным законам термодинамики. Свет отдаленных галактик доносит до нас вести о том, какие законы действовали вскоре после Большого Взрыва. Спектральные линии свидетельствуют, что Вселенная в ту эпоху подчинялась тем же законам, что и сейчас.

Физические законы инвариантны относительно **сдвигов во времени**, иначе каждый день нам необходимо было бы устанавливать новые законы. Инвариантность физических законов относительно **сдвигов и поворотов в пространстве** на примере справедливости второго закона Ньютона для наблюдателей в Москве и в Томске (однородностью пространства).

*"Истина одна и та же и в Париже, и в Тулузе"*, - сказал Блез Паскаль. Что он имел в виду? Простой поворот игровой карты на  $180^\circ$  вокруг центра карты ничего не изменит для внешнего наблюдателя, и она будет выглядеть так, как и прежде. Мы даже не обнаружим, что поворот был кем-то сделан, если не видели самого поворота. **Некоторые изменения ничего не меняют! Симметрия** — это реализация принципа инвариантности. Набор всех преобразований системы отсчета, при которых вид объекта не изменяется, называется группой инвариантности. Симметрия делает нашу жизнь красивой.

Инвариантность физических законов относительно **равномерного прямолинейного движения**. Примеры с самолетом, поездом, космическими телами. Законы физики должны иметь одинаковый вид и форму в системах отсчета, движущихся друг относительно друга без ускорения (**инвариантны относительно равномерного прямолинейного движения**).

*...сотни раз, сидя в своей каюте, я спрашивал себя, движется корабль или стоит неподвижно. Иногда ... я полагал, что корабль движется в одном направлении, тогда как движение его шло в сторону противоположную.*

*Галилео Галилей*

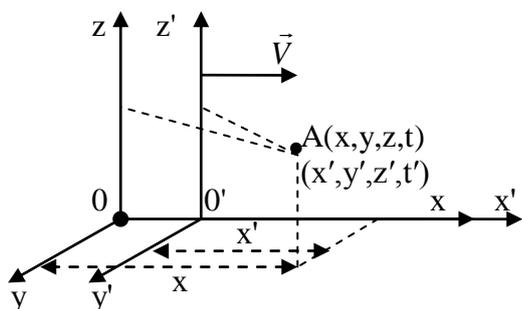
Как для данного случая перефразировать слова Блеза Паскаля? Это и есть знаменитый принцип относительности! Инерциальная система отсчета (ИСО). Инерциальная система отсчета — это система отсчета, в которой справедлив закон инерции!

*Земля постоянно движется, но люди этого не знают; они как команда на закрытом судне, этого не замечают.*

*Лося Хун*

Ньютоновское пространство было подобно миллиметровке с системой координат, и любое движение происходило, словно на фоне этой решетки. Мах, однако, с этим согласен не был, он утверждал, что говорить о движении физического тела можно только в том случае, когда движение измеряется относительно другого физического тела, но не решетки. Двигаться можно лишь относительно чего-то, не так ли?

Две ИСО на рисунке. Событие (вспышка молнии) и его координаты в разных ИСО. **Событие** – это нечто, происходящее в определенной точке пространства и в определенный момент времени. Связь между координатами события (**преобразования Галилея**). Что они позволяют сделать?



*Преобразования Галилея:*

$$\begin{aligned} x &= x' + Vt' & x' &= x - Vt \\ y &= y' & y' &= y \\ z &= z' & z' &= z \\ t &= t' & t' &= t \end{aligned}$$

**Классический закон сложения скоростей** (вывод). В тот момент, когда ученик проезжает мимо учителя, по крыше поезда начинает бежать кот. Необходимо определить скорость кота относительно учителя.

$$\frac{x}{t} = \frac{x' + Vt'}{t} \rightarrow \frac{x}{t} = \frac{x'}{t'} + \frac{Vt'}{t} \rightarrow v_x = v_x' + V_x$$

С помощью преобразований Галилея можно найти вид и форму физического закона в одной ИСО, если известны его вид и форма в другой. Второй закон Ньютона в ИСО ученика:

$$\vec{F}' = m \frac{d\vec{v}'}{dt}. \text{ Поскольку } \vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}, \text{ то в ИСО учителя } \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \frac{d\vec{v}'}{dt}. \text{ Так как}$$

$\vec{F} = \vec{F}'$  (силы зависят от расстояния и относительной скорости), то второй закон Ньютона инвариантен относительно преобразований Галилея. С точки зрения физики среди ИСО для природы нет любимчиков. **Законы механики Ньютона инвариантны относительно преобразований Галилея.** Принцип относительности Галилея – механические явления при одинаковых условиях протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

Описание любого физического события или явления зависит от системы отсчета, в которой находится наблюдатель, но законы природы (например, законы Ньютона) от него не зависят.

**Инвариантны ли законы электродинамики относительно преобразований Галилея? Скорость света.** Она входит в уравнения электродинамики как фундаментальная постоянная  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Но в какой ИСО? На Земле?

Ведь в движущихся друг относительно друга ИСО скорость света имеет разные значения, если использовать для ее определения классический закон сложения скоростей. Максвелл рисовали картину мира, заполненного особой субстанцией — эфиром, — который, как и всякое обычное вещество, был связан с покоящейся системой отсчета, в которой он был неподвижен. Эта система отсчета, согласно приверженцам теории эфира, была единственной, в которой уравнения Максвелла были верны. В то время как из уравнений Максвелла следовало постоянство скорости света, механика Ньютона утверждала, что она будет зависеть от скорости наблюдателя!

**Законы электродинамики не инвариантны относительно преобразований Галилея!**

*Неладно что-то в Датском королевстве  
У. Шекспир*

Возможные пути выхода из возникшей ситуации:

- **Законы электродинамики не верны, и их нужно изменить (Г. Герц).**

Немецкий физик Генрих Рудольф Герц (1857-1894) пытался «подправить» уравнения Максвелла, чтобы сделать их инвариантными относительно преобразований Галилея. Герц получил новые законы электродинамики, но в его же опытах они не нашли подтверждения!

- **Принцип относительности не распространяется на законы электродинамики (Лоренц). Тогда для какой ИСО они получены?!**

Такая гипотетически выделенная ИСО была объявлена сопутствующей мировому эфиру как среде, в которой распространяются электромагнитные волны. Эфир должен быть текучим, как жидкость или газ, чтобы равномерно заполнять пространство, и вместе с тем в миллионы раз тверже стали, чтобы поддерживать высокие частоты распространения электромагнитных волн. Кроме того, эфир должен быть безмассовым и с нулевой вязкостью, чтобы не влиять на орбиты планет, а также полностью прозрачным, несжимаемым и т.д. Такой эфир выходил за все рамки здравого смысла. **Опыт Майкельсона** (дополнительная информация).

- **Законы электродинамики верны, принцип относительности на них распространяется, но неверны преобразования Галилея (Эйнштейн).**

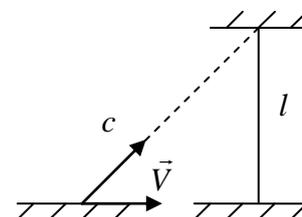
Если прав Эйнштейн, то необходимо найти **новые преобразования** (преобразования Лоренца), относительно которых будут инвариантны законы электродинамики. А будут ли инвариантны относительно новых преобразований законы механики? Нет! "**Прости меня, Ньютон**" - с этих слов начиналась статья Эйнштейна. Исправлять надо законы механики Ньютона! В 1905 г революция произошла не только в России, но и в физике!

**Дополнительная информация:** Опыт Майкельсона. Для наблюдателя в ИСО, связанной с мировым эфиром:

$$t' = \frac{l}{c-V} + \frac{l}{c+V} = \frac{2lc}{c^2 - V^2} = \frac{2l}{c(1 - \frac{V^2}{c^2})}$$

$$t'' = \frac{2l}{c \sin \alpha} = \frac{2l}{c \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}} = \frac{2l}{c \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$\frac{t'}{t''} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, t' > t'', \text{ однако}$$



никакого сдвига интерференционных полос не было обнаружено. Этот результат можно было объяснить полным увлечением эфира Землей (но тогда оптические эффекты!), или что его нет и  $c$  – инвариант, тогда в ИСО, связанной с Землей:  $t' = \frac{2l}{c}, t'' = \frac{2l}{c}; t' = t''$ .

У пловца, который переплывает реку туда и обратно, уходит на это меньше времени, чем если проплыть ровно такое же расстояние, двигаясь против течения, а затем по нему, - Михельсон и Морли ожидали получить такой же результат и для света. Но не получили - оба луча вернулись к источнику одновременно. Совершенно независимо от того, в каком направлении распространялся свет, и в каком двигалась Земля. На скорости света движение Земли никак не сказывалось. Этот эксперимент показал, что эфира не существует.

*Если эфирный ветер где-то дует, то только не над Брюсселем.*

*Пикар*

**Дополнительная информация:** Родился А. Эйнштейн в 1879 г. в год смерти Максвелла. Но как легко мог быть потерян Эйнштейн для науки, особенно если бы он родился в развивающейся стране. В возрасте 15 лет его вызвал один из учителей гимназии: он высказал пожелание, что Эйнштейн оставил школу. Как впоследствии вспоминал сам Эйнштейн, на его замечание, что он не сделал ничего дурного, учитель заметил только: "Одно ваше присутствие подрывает уважение класса ко мне". Это был намек на независимость Эйнштейна. Когда ему исполнилось 16 лет, Эйнштейн решил поступить в Цюрихский политехникум, но к счастью для физики, провалился. С 1900 года ему пришлось перебиваться временной работой.

### III. Вопросы:

1. Какую систему отсчета с очень хорошим приближением можно считать инерциальной системой отсчета?
2. Будет ли кто-то из дуэлянтов иметь преимущество, если дуэль на пистолетах происходит в трюме движущегося корабля?
3. Что в физике понимают под событием?
4. Зачем, договариваясь о встрече, люди указывают время и место встречи? Время — это координата, оно помогает нам находить объекты.
5. В чем заключается физическое содержание принципа относительности?
6. Какие из кинематических величин изменяются при переходе из одной ИСО в другую, а какие остаются неизменными?

7. Покажите, что закон всемирного тяготения инвариантен относительно преобразований Галилея.
8. Какие у вас есть основания утверждать, что законы физики не инвариантны относительно преобразований подобия (изменения масштабов)?
9. В какой системе отсчета расстояние между событиями «выстрел пушки» и «разрыв ее снаряда» (при попадании его в цель) равно нулю?
10. Покажите, что, например, вид и форма лошади не инвариантны относительно сдвигов во времени, сдвигов и поворотов в пространстве.
11. Что вы можете сказать об относительной скорости двух материальных точек в инерциальных системах отсчета при преобразованиях Галилея?

#### IV.

1. До XX века считалось, что существует особая светоносная среда – эфир, который заполняет все пространство. Какими свойствами должна была обладать эта среда?
2. Выскажите ассоциации, которые возникают у вас, когда вы слышите следующие словосочетания: «биологическое время»; «геологическое время»; «астрономическое время».
3. Каковы общие свойства пространства и времени, и в чем различие между ними?
4. Остаются ли моральные нормы «вечными ценностями», или они не инвариантны относительно сдвигов во времени?
5. Китайский мыслитель Хун Цзычен утверждал: «Размеры пространства обусловлены нашим сознанием». Что он имел в виду?

*Законы, управляющие явлениями природы, не зависят от состояния движения системы координат, по отношению к которой эти явления наблюдаются, если эта система движется без ускорения.*

А. Эйнштейн

## Урок 2.

### ПОСТУЛАТЫ СТО. СКОРОСТЬ СВЕТА В ВАКУУМЕ, КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПОСТОЯННАЯ.

С какой скоростью летит луч света, если бежишь рядом с ним?

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Сформулировать постулаты СТО. Углубить знания учащихся о фундаментальной постоянной – скорости света.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** набор диапозитивов.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Принцип относительности. 2. Преобразования Галилея.

*Задачи:*

1. Пассажирский поезд движется со скоростью 90 км/ч и обгоняет товарный состав длиной 1800 м, скорость которого 60 км/ч. Сколько времени пассажир, стоящий у окна, будет видеть товарный состав?

2. Два автомобиля, двигаясь в одну и ту же сторону по горизонтальному шоссе, удаляются друг от друга со скоростью в 2 раза меньшей, чем в случае, когда они с теми же скоростями движутся навстречу друг другу. Во сколько раз скорость одного автомобиля больше скорости другого?
3. Чему равна скорость частицы, которая проходит расстояние 6 световых лет за 8 лет?

*Вопросы:*

1. Что имел в виду сержант, который приказ солдатам копать канаву «отсюда и до обеда»?
2. В каком смысле состояние покоя и состояние равномерного прямолинейного движения эквивалентны? *Покой нам только снится!*
3. Почему установленная в опыте нейтральность молекулы водорода свидетельствует о независимости заряда частиц от их скорости?
4. Какие свойства движущегося тела (модуль перемещения, модуль скорости, модуль ускорения, масса, модуль импульса, кинетическая энергия) не изменяются при переходе из одной ИСО в другую ИСО?
5. Заряженная частица движется прямолинейно. Как изменится энергия электрического поля этой частицы при переходе в систему отчета, в которой эта частица покоится?
6. Время измеряет продолжительность периодов между событиями. Так ли это?
7. Покажите, что угловые законы не инвариантны относительно сдвигов во времени, сдвигов и поворотов в пространстве.
8. Эксперимент, проведенный с достаточной точностью, покажет, что перемещения тел в трюме движущегося корабля и корабля неподвижного будут различаться между собой. Почему?
9. Китайский мыслитель Хун Цзычен утверждал: «Продолжительность времени зависит от нашего настроения». Что он имел в виду?
10. Выскажите ассоциации, которые возникают у вас, когда вы слышите следующие словосочетания; а) межатомное пространство; б) воздушное пространство; в) космическое пространство; г) информационное пространство; д) социальное пространство.
11. Люди, как и почти все остальные животные, обладают практически идеальной внешней зеркальной симметрией. Ее еще называют билатеральной. Как это понимать? Например, процедура, которая нам нужна для восстановления всего изображения лица — это просто поставить реальное (воображаемое) зеркало вместо закрытой половины лица.
12. Попробуйте объяснить эти утверждения: «время – деньги», «время – лучший учитель»?

**III. Принцип относительности и законы электродинамики. Направления и результаты исследований:**

- Законы электродинамики верны (Г. Герц).

- Привилегированной ИСО не существует (опыты Майкельсона - Морли).
- Правильным оказалось третье направление (А. Эйнштейн).

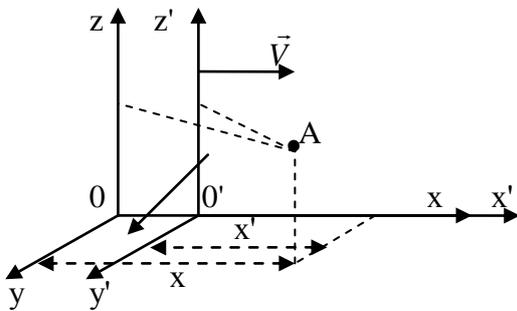
### Постулаты СТО:

**1. Все физические явления протекают одинаково в системах отсчета, движущихся друг относительно друга без ускорения.**

С точки зрения физики среди систем отсчета для природы нет любимчиков.

**2. Скорость света одинакова во всех системах отсчета и не зависит от скорости движения источника.**

Преобразования Галилея неверны при больших скоростях и, необходимо найти другие преобразования. Преобразования Лоренца (записать):



$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y = y'; \quad y' = y.$$

$$z = z'; \quad z' = z.$$

$$t = \frac{t' + \frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

Следствия из преобразований Лоренца. Движение мухи по капоту автомобиля ученика с того момента времени, как он проехал мимо учителя. Определить скорость мухи относительно покоящейся системы отсчета (учителя):

$$\frac{x}{t} = \frac{x' + Vt'}{t' + \frac{V}{c^2}x'} = \frac{\frac{x'}{t'} + V}{1 + \frac{V}{c^2} \cdot \frac{x'}{t'}} \rightarrow v_x = \frac{v'_x + V_x}{1 + \frac{V_x}{c^2} \cdot v'_x} \quad \text{- релятивистский закон сложения скоростей.}$$

### Обсуждение формулы:

- $v'_x \ll c, V \ll c; v_x = v'_x + V_x$
- $v'_x = c, v_x = c$
- $v'_x = c, V_x \rightarrow c, v_x = c$

*Перед Эйнштейна мудростью и скрипкой  
Почтительно мы головы склоним,  
Хотя понятен он, всего двоим –  
Себе и временами Богу!  
Джек Россеттер*

Это означает, что независимо от того, насколько быстро движется наблюдатель, он всегда будет видеть одну и ту же скорость света!

Почему при скоростях  $v'_x = -c, V_x = c$  формула дает неопределенность 0/0? Почему он выполняется при, например,  $V_x = 0,999c$ , но не выполняется при  $V_x = c$ ? Где закралась ошибка в наших рассуждениях (Кайгородов Михаил и Энгель Денис)?

Если закон верен, то единственным выходом из ситуации будет вывод о том, что скорость любого источника света (прожектор, звезда, источник инфракрасных лучей) не может достигать скорости света в вакууме.

**Скорость света – максимальная скорость передачи сигнала (это закон)!**

**Скорость света не меняется при ускорении источника света!**

**Законы электродинамики верны. Принцип относительности на них распространяется (на все физические явления). Верны преобразования Лоренца** (неизменность формы законов электродинамики относительно преобразований Лоренца показал Анри Пуанкаре 5.06.1905), **поэтому законы механики Ньютона нужно изменить так, чтобы они были инвариантны относительно этих преобразований.** При малых скоростях преобразования Лоренца "переходят" в преобразования Галилея и, следовательно, только при таких скоростях справедливы законы механики Ньютона.

#### **IV. Задачи:**

1. Космический корабль удаляется от Земли со скоростью  $0,5 c$ , и в некоторый момент времени с него запускается небольшая ракета в направлении от Земли со скоростью  $5/6 c$  относительно корабля. Какую скорость ракета будет иметь по измерениям земного наблюдателя?
2. Ускоритель сообщил радиоактивному ядру скорость  $0,4 c$ . В момент вылета из ускорителя ядро выбросило в направлении своего движения  $\alpha$  – частицу со скоростью  $0,75 c$  относительно ускорителя. Найдите скорость частицы относительно ядра.
3. Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростью  $0,75 c$  относительно неподвижного наблюдателя. Определить скорость их сближения по классической и релятивистской формулам сложения скоростей.

#### **Вопросы:**

1. Зависит ли скорость света в вакууме от длины волны, от частоты, от интенсивности, от скорости источника или наблюдателя? Обоснуйте ответ.
2. Почему нельзя определить относительную скорость двух  $\gamma$  - квантов, движущихся в противоположные стороны?
3. В отдаленной точке Вселенной вспыхнула сверхновая. Её радиус увеличивается с очень большой скоростью  $V$ . Через какое время на земле астрономы увидят новую звезду?
4. Каким образом наблюдения двойных звезд убеждают в независимости скорости света от движения его источника?
5. Складываются ли скорости по правилу параллелограмма?
6. Смогут ли пассажиры выйти на палубу корабля, если космический корабль движется равномерно со скоростью  $0,99 c$ ?
7. Почему нельзя двигаться с около световой скоростью, например, в воздухе?
8. Находясь в каюте с зашторенными окнами, невозможно измерить скорость судна! Почему?
9. Существует ли какой-либо эксперимент, который с определенностью показал бы, движется объект или покоится?
10. Оцените относительную погрешность, возникающую при расчете, если

вместо релятивистского закона сложения скоростей воспользоваться классическим законом.

11. Зависит ли скорость света в вакууме от свойств вакуума?

12. Есть мнения, что каждый постулат отражает не природу явления, а природу автора постулата. Что вы думаете по этому поводу?

V. §§ 65.67. Вопросы 1,2 к § 67.

1. Если бы не было ограничения скорости объектов, и они могли бы двигаться бесконечно быстро, то расстояние потеряло бы свой смысл. Так ли это?

2. Чем ближе скорость космического корабля к скорости света, тем более яркое световое пятно возникает в центре поля зрения космонавта (релятивистская абберация). Почему?

3. Если скорость света в неподвижной воде равна  $c/n$ , то чему она равна, если вода движется?

4. Построить график функции  $v = v(v')$  при  $v' = V$  и исследовать его.

*Отныне пространство и время, взятые по отдельности, обречены влечь лишь призрачное существование, и только единство их обоих сохранит реальность и самостоятельность.*

*Герман Минковский*

Урок 3.

## ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ, РАССТОЯНИИ, ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ.

**Можно ли замедлить или ускорить время в реальности?**

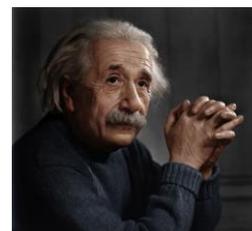
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников с основными следствиями СТО и научить применять их для решения задач.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** набор диапозитивов, кинофильм "Что такое теория относительности?".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II. Опрос фундаментальный:** 1. Постулаты СТО. 2. Релятивистский закон сложения скоростей.

**Задачи:**

1. Человек, находящийся внутри звездолета, движется относительно Земли со скоростью  $0,8c$ . Звездолет приближается к группе звезд со скоростью  $0,6c$  относительно них. С какой скоростью эта группа звезд удаляется от Земли?

2. Первый квазар удаляется от нас со скоростью  $0,7c$ , второй движется в том же направлении со скоростью  $0,3c$ . Какова скорость второго квазара относительно первого?

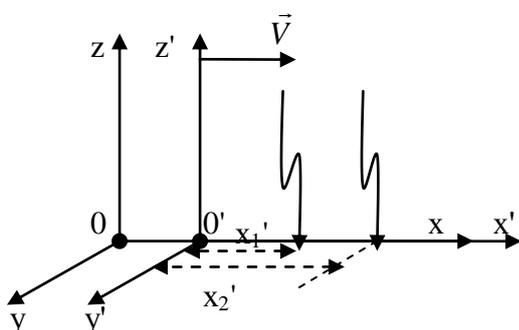
**Вопросы:**

1. Пусть бегун смотрит на себя в зеркало, держа его перед собой в вытянутой

- руке. Если он бежит почти со скоростью света, увидит ли он себя в зеркале?
- Если я включу фонарик, то из него полетят фотоны со скоростью света, относительно фонарика. Фонарик в системе отсчёта, связанной с фотоном, сам будет лететь со скоростью света в противоположную сторону. Так ли это?
  - Допускает ли СТО существование абсолютно твердых тел, имеющих конечные размеры?
  - Эффект Доплера при распространении света в вакууме один и тот же при движении источника света и при движении наблюдателя. Так ли это?
  - Могут ли две точки двигаться в одной системе отсчета по параллельным прямым, а в другой - по пересекающимся?
  - До какой минимальной скорости следует разогнать электрон в среде с показателем преломления 1,5, чтобы возникло излучение Черенкова?
  - Если для земного наблюдателя угол между двумя звездами равен  $\varphi$ , то каким он будет для наблюдателя, движущегося в направлении этих звезд со скоростью  $\vec{V}$ ?
  - Исходя из принципа относительности, покажите, что максимальная скорость распространения взаимодействия должна быть фундаментальной (инвариантной) постоянной.
  - При движении друг относительно друга двух расчесок с различной частотой зубьев можно наблюдать перемещающиеся темные и светлые полосы (демонстрация). Способно ли это перемещение происходить со скоростью, большей скорости света?
  - Абсолютный показатель преломления среды, измеренный в некоторой ИСО, равен  $n$ . Каков абсолютный показатель преломления этой среды для наблюдателя в другой ИСО, движущейся относительно первой со скоростью  $\vec{V}$ ?

### III. Относительность одновременности.

Две ИСО, одна из которых связана с учеником, а другая с учителем. Они сверили часы в тот момент, когда ученик на машине проезжал мимо учителя. Одновременность событий в одной ИСО (две молнии ударили одновременно для ученика на разных расстояниях от него по оси  $x$ ) и неодновременность в другой ИСО. Объяснение на основе формул преобразований Лоренца и конечности скорости распространения света.



$$t = \frac{t' + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad t_2 > t_1$$

**Одновременность разделенных в пространстве событий относительна!**

Таким образом, можно сказать, что время течет

по-разному для разных наблюдателей!

Люди идут в физику в уверенности, что это не просто приятные исключения из анархии жизни, а проблески лежащего в основе порядка!

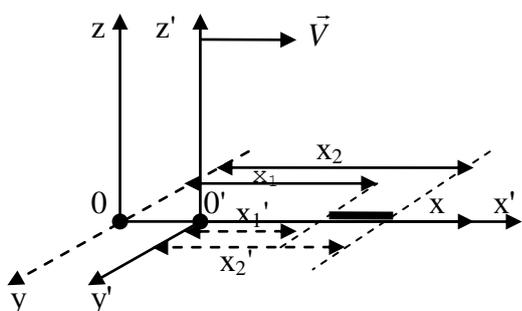
**Относительность расстояний.** Стержень, покоящийся

вдоль оси  $x$  в ИСО учителя, длина которого  $L_0 = x_2 - x_1$ . 1.  $V \ll c, L \approx L_0$

Измерение длины стержня проезжающим мимо учителя 2.  $V = 0,8 \cdot c, L = 0,6 \cdot L_0$

учеником, которому необходимо одновременно измерить 3.  $V \rightarrow c, L \rightarrow 0$

координаты обеих концов стержня. Объяснение на основе формул преобразований Лоренца и мысленного эксперимента с измерением длины светящегося стержня.



$$L_0 = x_2 - x_1; L = x'_2 - x'_1.$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}.$$

*И в сфере звезд, и в облаке планет,  
На атомы Вселенная крошится  
Все связи рвутся, все в куски дробится,  
Основы расшатались, и сейчас  
Все стало относительным для нас.*

*Джон Донн*

**Длина относительна!**

Предположим, что в определенный момент все в космосе начинает двигаться медленнее или быстрее. Удастся ли заметить это изменение? Такого эксперимента, с помощью которого удалось бы заметить это, не существует. Время, как и расстояние, относительно!

**Относительность промежутков времени.** Ученица улетела на ракете, и по ее часам прошел промежуток времени  $\tau_0 = t'_2 - t'_1$ .  $\tau_0$  - промежуток времени по часам наблюдателя, в системе отсчета которого события происходят в одной точке пространства (не разделены в пространстве). Какой промежуток времени прошел по часам учителя (по часам наблюдателя, в системе отсчета которого события происходят в разных точках пространства)?  $\tau = t_2 - t_1$ . Объяснение на основе формул преобразования Лоренца.

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

1.  $\tau_0 = 10 \text{ лет}, V \ll c, \tau \approx 10 \text{ лет}$
2.  $\tau_0 = 10 \text{ лет}, V = 0,8c, \tau \approx 16,6 \text{ лет}$
3.  $\tau_0 = 10 \text{ лет}, V \rightarrow c, \tau \rightarrow \infty.$

**Промежутки времени относительны!**

Согласно теории относительности, часы тикают с разной скоростью в зависимости от того, кто их носит!

**Парадокс близнецов.**

*Сегодня в полдень пущена ракета.  
Она летит куда быстрее света,  
И в семь прибывает, в семь утра ...  
вчера.*

*С.Я. Маршак*



Для наблюдателя, пролетающего мимо Земли со скоростью 0,8 с, все предметы на Земле были бы сжаты в направлении движения, а события происходили бы медленнее (часы бы на Земле шли медленнее). Для движущихся со скоростью света объектов не существовало бы ни событий, ни времени.

Относительность промежутков времени означает, что в различных инерционных системах отсчета часы должны идти по-разному. Что и было доказано в 1971 году: две пары идентичных атомных часов поместили в обычные рейсовые самолеты, которые дважды обогнули земной шар, одна пара летела на восток, другая на запад. А когда их сравнили с пятью часами, простоявшими все это время на земле, выяснилось, что в сравнении с ними вся четверка отстала на долю секунды — в согласии со специальной теорией относительности.

*Время идет различным шагом с различными людьми.*

*Уильям Шекспир.*

Анекдот: Старый зек на вопрос молодого заключенного, что такое теория относительности, ответил: *"Ты стоишь, а я лежу, но вместе мы сидим"*.

Анекдот: *Два волоса на голове — это мало, а в супе — уже много.*

**Дополнительный материал. Общая теория относительности (ОТО).** Наблюдатель внутри лифта не сможет установить, чем вызвано увеличение его веса – ускорением лифта или увеличением силы тяжести. Из этого следует, что невозможно отличить, какая сила действует на данное достаточно малое тело – сила тяготения или сила инерции. Если, например, космической капсуле придать, скажем, с помощью ракетного двигателя такое же ускорение, какое получает падающий на землю объект, к, примеру, яблоко, упавшее на Ньютона, то он не сможет отличить это состояние от обычного состояния покоя на Земле. То есть ускорение и гравитация ощущаются одинаково. **Все законы природы одинаковы в ускоренно движущихся системах отсчета и в гравитационных полях (общая теория относительности).** Для наблюдателя, находящегося внутри ускоряющегося лифта, траектория луча света окажется искривленной. Но если ускорение в лифте эквивалентно покою в гравитационном поле, то луч света должен изгибаться, проходя мимо массивных тел. Гравитационное отклонение света — изменение направления распространения света в гравитационном поле. Угол отклонения света



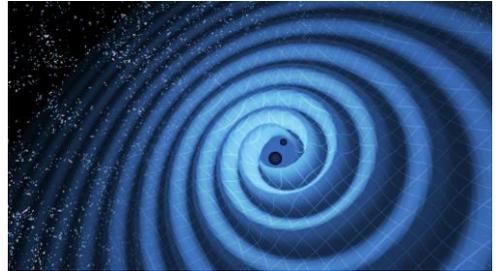
$$\varphi = \frac{4GM}{Rc^2}$$
Постулат общей теории относительности подтвердили на орбите: два предмета с разной массой действительно падают с одинаковым ускорением. Следствия из ОТО: 1) Гравитационное линзирование; 2) Замедление времени в гравитационных полях. На крыше здания время течет чуть быстрее, чем у основания; на поверхности нейтронной звезды (чайная ложка ее вещества имеет массу больше массы всех континентов Земли) время течет вдвое медленнее, чем на поверхности Земли, а у черной дыры время бесконечно замедлившееся. Разница в ходе часов на разных высотах над поверхностью Земли учитывается в очень точных навигационных системах, работающих на сигналах со спутников (если не учитывать, то ошибка в определении координат составит несколько километров). С помощью атомных часов ученые подтвердили гипотезу о том, что течение времени могут замедлять объекты даже очень небольшой массы, удаленные друг от друга на несколько микрометров. Пространство и время не только влияют на все, что происходит во Вселенной, но и сами изменяются под влиянием всего в ней происходящего.

ОТО не работает на планковских длинах и временах.

*Вселенная не только страннее, чем мы думаем, но и страннее, чем мы можем предположить.*  
*Дж.Б.С. Холдейн.*

**Дополнительная информация.** Гравитационные волны порождаются движением гравитирующих тел с переменным ускорением, «отрывающиеся» от источника, свободно распространяющиеся в пространстве и приводящие к изменению (возмущению) гравитационного поля в окружающем пространстве (так называемая «рябь пространства-времени»). Эти возмущения пространства-времени перемещаются со скоростью света. Период гравитационных волн может составлять миллионы лет, частота - наногерцы.

Физики поняли, что лазерный интерферометр может быть использован для измерения крошечного сжатия и растяжения пространства, поскольку это приведет к тому, что рукава оборудования сожмутся на минутную величину. Это означает, что при разделении лазера и направлении его через рукава интерферометра сжатие пространства, вызванное прохождением гравитационной волны, приведет к тому, что один лазер придет немного раньше другого - это означает, что они находятся вне фазы и вызывают деструктивную интерференцию. Таким образом, эта разница во времени прихода вызывает интерференцию, которая указывает на то, что гравитационные волны прошли через один из рукавов. Но не любой лазерный интерферометр подойдет. Физикам понадобится интерферометр настолько большой, что он станет настоящим достижением инженерной мысли. На помощь приходит лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория (LIGO). 14 сентября 2015 года обновленная обсерватория LIGO зарегистрировала гравитационно-волновой всплеск, порожденный слиянием двух черных дыр с массами 29 и 36 солнечных масс в далекой галактике на расстоянии примерно 1,3 млрд световых лет.



Гравитационные волны:

- Гравитационные волны - это рябь в ткани пространства-времени.
- Эта рябь движется от своего источника со скоростью света.
- Прохождение гравитационных волн сжимает и растягивает само пространство.
- Гравитационные волны можно обнаружить, измерив эти бесконечно малые изменения расстояния между объектами.
- Они создаются, когда объект или событие, искривляющее пространство-время, заставляет эту кривизну изменять форму.
- Среди причин гравитационных волн - сталкивающиеся черные дыры и нейтронные звезды, сверхновые и звезды, испытывающие гравитационный коллапс.
- Они несут информацию об их происхождении, которая свободна от искажений или изменений, вызванных электромагнитным излучением, когда она проходит межгалактическое пространство.

#### IV. Демонстрация фрагментов кинофильма.

*Задачи:*

1. Далекая звезда удаляется от нас со скоростью 0,8 с. По наблюдениям с Земли ее блеск меняется с периодом 5 суток. С какой периодичностью изменяется блеск в системе отсчета, связанной со звездой?
2. Собственное время жизни некоторой нестабильной частицы 10 нс. Найти путь, который пройдет эта частица до распада в лабораторной системе

отсчета, где ее время жизни 20 нс.

3. С какой скоростью должен лететь мюон, чтобы пролететь до распада 100 км?

Среднее время жизни мюона в покое  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с.

Мюоны, образующиеся при столкновениях космических лучей с атмосферой, в среднем возникают на высоте 100 километров. Однако среднее время жизни мюона составляет всего 2,2 микросекунды. Если бы мюон двигался со скоростью, близкой к скорости света, то до распада он пролетал бы всего около 660 метров. Но мюоны прибывают на поверхность Земли, преодолевая более 100 километров с момента своего создания, и при этом не распадаются! Как такое возможно?

4. Допустим, что граница видимой Вселенной по наблюдениям с Земли расположена от нас на расстоянии  $10^{10}$  световых лет. Как далеко отстоит граница видимой Вселенной по измерениям космического путешественника, движущегося со скоростью 0,99 с?

*Вопросы:*

1. Предположим, что вы видите, как два светофора в разных концах улицы одновременно переключаются на красный свет. Почему для водителей их переключение неодновременное?
2. Какие события называются одновременными пространственно разделенными?
3. Что, называется собственным временем? собственной длиной?
4. Человек улетает с Земли в ракете, движущейся с постоянной скоростью 0,8 с. Заметит ли человек какие-либо изменения в своем пульсе? Изменятся ли другие его параметры?
5. Почему при движении навстречу монохроматическому источнику света частота его излучения увеличивается?
6. В одной ИСО установили зависимость периода колебаний пружинного маятника от массы груза:  $T \sim \sqrt{m}$ . Каким будет результат опытов в ИСО, движущейся относительно данной со скоростью, близкой к скорости света?
7. Мюоны рождаются на высоте примерно 15 км над поверхностью Земли, движутся с около световой скоростью и успевают пролететь до распада около километра. Почему же многие из них достигают поверхности Земли?
8. Если применить формулы теории относительности для промежутков времени и для длины к фотонам, то получается, что для них время не течет и Вселенная не имеет длины. Так ли это?
9. По длинному прямому металлическому проводнику течет электрический ток. Можно ли избавиться от его магнитного поля, устремившись вдоль провода со скоростью, равной средней скорости упорядоченного движения электронов в нем?

**V. §§ 66,67. Упр. 10 №1. Вопросы 3-5 к § 67.**

1. Подготовить пятиминутное сообщение о жизни и научной деятельности А. Эйнштейна.
2. Покажите, что формула линзы инвариантна относительно преобразований Лоренца.
3. Покажите, что закон всемирного тяготения не инвариантен относительно преобразований Лоренца.
4. Если изготовить идеально прямую трубку длиной 1 км, расположить ее горизонтально,

откачать из нее воздух и строго по ее оси запустить лазерный луч, на выходе из трубки луч окажется смещенным от оси вниз, т.к. в гравитационном поле его траектория искривляется. Оцените смещение луча, считая, что скорость света в вакууме  $c \approx 300000$  км/с.

*Люди принимают всё так серьёзно, что это становится обузой для них.  
Учитесь больше смеяться. По мне, смех так же свят, как и молитва.*

*Ошо*

*Прости меня, Ньютон: ... Понятия, созданные тобой, и сейчас еще остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если будем стремиться к более глубокому пониманию взаимосвязей, то должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта.*

*А. Эйнштейн*

## Урок 4.

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА.

**Спокойно! Сейчас все объясню!**

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учеников с некоторыми "измененными" законами механики. Получить формулу зависимости импульса тела от его скорости.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** таблицы, кинофильм "Что такое теория относительности".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом

**II. Опрос фундаментальный:** 1. Относительность одновременности. 2. Относительность длины. 3. Относительность промежутков времени.

*Задачи:*

1. Сколько времени для жителя Земли и для космонавта займет космическое путешествие до звезды и обратно на ракете, летящей со скоростью  $0,99 c$ ?  
Расстояние до звезды равно 40 световым годам.

Рассмотрим женщину как релятивистский объект. Представим себе ситуацию: она сказала, что придёт через 10 минут, а пришла через 30. На первый взгляд, это повод обидеться. Но давайте рассмотрим ситуацию глубже. Предположим, она сдержала своё обещание, то есть в её собственной системе отсчёта прошло 10 минут, однако в нашей системе отсчёта прошло 30 - значит. Зная его, находим скорость женщины — 282 тыс. км/с. Вот видите, как она к вам спешила! Впрочем, вопрос, что она делала за полмиллиарда километров от вас, остаётся открытым.

2. Через какое время фотон пролетит галактику диаметром  $10^5$  световых лет по наблюдениям с космического корабля, движущегося вслед за фотоном со скоростью  $0,6 c$ ?
3. Пучок протонов согласно лабораторным измерениям проходит через трубу длиной 12 см за  $5 \cdot 10^{-10}$  с. Чему равна скорость протонов в единицах  $c$ ? Какова длина трубки с точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с пучком? Сколько времени протон затрачивает на прохождение трубки?

4. Космический корабль движется к Земле со скоростью  $(24/25)c$ . Какое расстояние в системе отсчета, связанной с Землей, пройдет корабль за промежуток времени 7 с, отсчитанный по корабельным часам?
5. Найти расстояние между двумя точками, в которых происходят два события в неподвижной инерциальной системе отсчета, если в движущейся инерциальной системе отсчета эти события произошли в одной точке с интервалом времени 3.9 нс. Относительная скорость движения систем отсчета  $19,2 \cdot 10^7$  м/с. 0,975 м

*Вопросы:*

1. Два события в некоторой ИСО происходят в одной точке пространства одновременно. Будут ли эти события одновременными в другой ИСО?
2. Какие существуют экспериментальные доказательства факта замедления времени в движущихся ИСО?
3. Сколько лет пройдет на Земле, если в космическом корабле, движущемся со скоростью 0,8 с относительно Земли, пройдет 21 год?
4. Может ли скорость удаления далекой галактики от нас быть равной скорости света в вакууме? Если бы такое было возможно, то смогли бы мы увидеть эту галактику?
5. Стержень длиной 1 м пролетает с релятивистской скоростью через трубку длиной тоже 1 м. Как описывает происходящее в момент, когда стержень целиком находится внутри трубки, наблюдатель в движущейся и в неподвижной ИСО?
6. Если бы все процессы в вашем организме ускорились, например, в пять раз, то, как это можно было бы обнаружить?
7. С какой скоростью должен двигаться наблюдатель вдоль гипотенузы равнобедренного треугольника, чтобы он казался равносторонним?
8. Какая взаимосвязь пространства и времени установлена теорией относительности?

**III.** Теперь мы с вами знаем, что законы механики Ньютона неверны при больших скоростях, и их необходимо изменить так, чтобы они были инвариантны относительно преобразований Лоренца. Необходимость получения нового выражения для полного импульса ("новых" законов механики). Выражение для **полного импульса**:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{V}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

**Для того чтобы достигнуть скорости света, тело должно иметь бесконечный импульс!**

Из формулы для релятивистского импульса вроде бы следует зависимость массы тела от его скорости. На следующем уроке мы узнаем, что с увеличением скорости тела увеличиваются его импульс и энергия, но **масса остается неизменной!**

При увеличении импульса масса не прирастает, но тело ведет себя так, словно это происходит. **Можно продолжать считать, что импульс и энергия частицы увеличиваются из-за увеличения массы частицы, но это не так!**

$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$  В таком виде 2-ой закон Ньютона инвариантен относительно преобразований Лоренца. Почему?

Если на покоящееся тело начинает действовать постоянная сила, то приобретенный телом импульс  $p = Ft$ , откуда  $t = \frac{mV}{F\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$ . При скорости

$V \rightarrow c, t \rightarrow \infty$ . Почему невозможно разогнать любое тело до скорости света? Как объясняют этот факт "новые" законы механики? Для того чтобы увеличить скорость тела, импульс которого стал бесконечно большим, необходима **бесконечная сила или бесконечное время!**

Оказывается, даже в мире мельчайших частиц, подчиняющихся собственным законам, скорость не может нарастать бесконечно. Даже ученым, работающим на БАК ЦЕРНа, не удалось разогнать протоны до световой скорости, хотя и подошли к ней вплотную. Результатом стало открытие «частицы бога», бозона Хиггса, отвечающего за наличие массы тел. Со скоростью света движутся только частицы, **не обладающие массой**, такие как фотоны или гипотетический гравитон, потому что скорость распространения гравитации предположительно равна скорости света.

### **с - предельная скорость передачи сигнала (информации)!**

Можно ли догнать световой луч?

*Я должен был бы воспринять такой луч света как покоящееся, переменное в пространстве электромагнитное поле.*

*А. Эйнштейн*

### **IV. Задачи:**

1. Сравнить величину релятивистского и классического импульсов электрона при скорости 0,96 с.

*Вопросы:*

1. Если бы скорость распространения сигнала превышала скорость света в вакууме, то нарушались бы причинно-следственные связи. Почему?
2. С какой скоростью передается гравитационное взаимодействие?
3. Если взять лазерную указку и быстро описать ей в воздухе дугу, то на достаточно большом расстоянии линейная скорость зайчика превысит скорость света в вакууме. Почему при этом информация не переносится?
4. Покажите, что при ускорении частицы под действием постоянной силы ее скорость стремится к конечному пределу?
5. В движущемся относительно Земли космическом корабле, космонавт изменил скорость некоторого тела, приложив к нему силу. Почему для земного наблюдателя ускорение тела оказалось меньше? Как зависит этот эффект от скорости корабля? Не означает ли это, что масса тела возрастает с увеличением его скорости?
6. Утверждают, что, последовательно избавляясь от ошибок, наука приближается к истине.

Обоснуйте это утверждение.

**IV.** Демонстрация фрагмента кинофильма.

**V.** § 68. Упр. 10, № 12. Вопросы 1 и 2 к § 69.

1. В одной из книг Дж. Гамова его герой попадает в мир, где скорость света равна 50 км/ч. Чем еще интересен этот мир?
2. В современной физике всерьез обсуждается вопрос о существовании тахионов - частиц, имеющих мнимую массу и движущихся со скоростью, большей скорости света. В частности, тахион, движущийся со скоростью  $V \rightarrow \infty$ , энергии не имеет и чтобы "затормозить" его до скорости света, необходимо затратить бесконечную энергию. Обсудите свойства этих частиц и условия их обнаружения.

*Из принципа относительности в сочетании с фундаментальными уравнениями Максвелла следует, что масса должна быть непосредственной мерой энергии, содержащейся в теле; свет переносит массу.*

*А. Эйнштейн*

## Урок 5.

## СВЯЗЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

**Буханка какого хлеба тяжелее: горячего или холодного?**

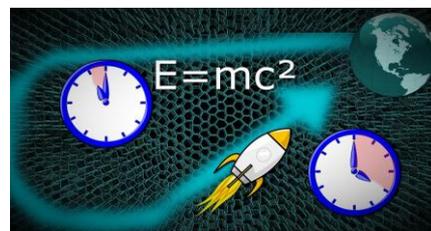
**ЦЕЛЬ УРОКА:** Познакомить учащихся с основным законом СТО и научить их применять его на практике.

**ТИП УРОКА:** комбинированный.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** таблицы, кинофильм "Что такое теория относительности".

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Опрос
3. Объяснение
4. Закрепление
5. Задание на дом



**II.** Опрос фундаментальный: Релятивистская динамика.

*Задачи:*

1. Протон влетает со скоростью  $V = 0,99c$  в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1,2$  Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить радиус окружности, которую опишет протон в магнитном поле. Расчёт сделать по формулам ньютоновской и релятивистской механики.
2. С космического корабля, движущегося к Земле со скоростью  $v_1 = 0,4 c$ , посылают два сигнала: световой и пучок быстрых частиц, имеющих относительно корабля скорость  $v_2 = 0,8 c$ . В момент пуска сигналов корабль находился на расстоянии  $s = 12$  Гм от Земли. Какой из сигналов и на сколько раньше будет принят на Земле?
3. На сколько процентов скорость протона с импульсом 10 ГэВ/с отличается от скорости света?
4. Два электрона, испущенные одновременно радиоактивным веществом в противоположных направлениях с одинаковыми скоростями  $v_1 = v_2 = 0,7 c$  относительно наблюдателя в лаборатории. Чему равно расстояние между электронами в лабораторной системе отсчёта через 1 секунд после их

испускания?

*Вопросы:*

1. Скорость электрона всегда меньше скорости света. Устанавливает ли это условие верхний предел для импульса электрона?
2. Почему межзвездная пыль при релятивистских скоростях становится тормозом и опасным разрушителем (при скорости 0,1 с «стирается» 90 см титановой брони за световой год)?
3. Как скажется на самочувствии космонавта полет с ускорением  $10 \text{ м/с}^2$  и скоростью 0,999999 от световой скорости?

**III. Энергия движущегося тела в СТО:**  $E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$ . **Чтобы ускорить тело до**

**скорости света, необходима бесконечная энергия!**

$E_0 = mc^2$  - энергия покоящегося тела.

Это уравнение описывает, сколько энергии присуще любой массивной частице, находящейся в состоянии покоя, включая то, сколько энергии требуется для её создания и сколько энергии выделяется при её разрушении. Масса - не только мера инертности и гравитационного взаимодействия, но и мера энергии, содержащейся в теле!

*Масса тела, есть мера содержащейся в нем энергии...*

*А. Эйнштейн*

*Если тело излучает энергию E, его масса уменьшается на величину E/c<sup>2</sup>. Масса тела отражает его энергетическое содержание; если изменить энергию на E, масса изменится соответствующим образом.*

*А. Эйнштейн*

Любая передача энергии телу увеличивает его массу (порождает вещество), а, например, излучение энергии телом уменьшает его массу (вещество порождает излучение).

**Материя (вещество и излучение) - это энергия!**

*«Вот хочу продать мою материю и получить энергию. Сколько дадите?»*

"Эйнштейн, таки да, был прав! Поскольку у евреев цорес (невзгоды) всегда в квадрате по отношению к мазл (счастью), то формула:  $E = MC^2$ , где E — еврей, M — мазл и C — цорес, прекрасно описывает жизнь любого из нас!"

Преобразование формулы при скорости  $V \ll c$ :  $E \approx E_0 \left( 1 + \frac{V^2}{2c^2} \right) \approx mc^2 + \frac{mV^2}{2}$ .

$E = E_0 + E_k$ , где  $E_k$  — кинетическая энергия тела,  $E_0$  — **энергия покоящегося тела**,  $E$  — **полная энергия тела**.

Говорят, что кинетическая энергия «сходит с ума» при приближении относительной скорости к скорости света? Почему?

**Какая энергия запасена в ученике массой 60 кг?**  $E_0 = 60 \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 5,4 \cdot 10^{18}$  Дж. Сколько времени потребовалось бы Чернобыльской АЭС для того, чтобы выработать эту энергию?  $P_{\text{ч}} = 3 \cdot 1000 \text{ МВт} = 3 \cdot 10^9 \text{ Вт} \rightarrow t = E/P \approx 57 \text{ лет}$ .

Для сравнения, энергия сгорания двух граммов угля питает одну лампочку примерно час. Вся энергия в 2 граммах угля позволяет питать 50 тысяч стоваттных лампочек целый год!

## Как эту энергию выделить? Эффективность освобождения энергии покоя:

1. Химические реакции  $10^{-6} - 10^{-7} \%$

Вся наша цивилизация может быть названа "цивилизацией химических реакций". Самые слабосвязанные, самые удаленные от ядра атома электронные облака - есть основа почти всех наших технологических достижений.

2. Расщепление 0,1 %
3. Синтез 0,9 %
4. Гравитация до 50 %
5. Аннигиляция 100 %

Частицы антивещества практически идентичны своим собратьям из материи, за исключением того, что они несут противоположный заряд и спин. Когда антивещество встречается с веществом, они немедленно аннигилируют, при этом выделяется определённое количество энергии, определяемое массами аннигилировавшей пары частиц. В физике элементарных частиц аннигиляция — процесс превращения частицы и античастицы при их столкновении в какие-либо другие частицы. Аннигиляция - не уничтожение вещества, а его трансформация в кванты света.

*Сначала была энергия, потом материя. Материя создана из начальной и вечной энергии, которая нам известна как свет. Она светила и звезды, планеты, человек и все на Земле и во Вселенной появлялось. Материя – это выражение бесконечных форм света, потому что энергия старше ее.*

*Тесла.*

Дейтерий, извлеченный из одного литра морской воды, в процессе полной реакции синтеза выделяет энергетический эквивалент сжигания 300 литров бензина!

Если создать кирпич из антивещества и столкнуть его с «нормальным» кирпичом, то энергия взрыва составит десятки миллионов тонн в тротиловом эквиваленте!

**Преобразование:** 
$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \rightarrow E^2 = \frac{E_0^2}{1 - \frac{V^2}{c^2}} \rightarrow E^2 - E^2 \frac{V^2}{c^2} = E_0^2 \rightarrow E^2 - p^2 c^2 = E_0^2.$$

$$E = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2} - \text{связь энергии и импульса.}$$

- 1)  $p = 0, E = \pm mc^2$  (антиматерия).
- 2)  $V = c, m = 0, E = p \cdot c$  (фотоны).

*Не обращаются ли большие тела и свет друг в друга? ... Превращение тел в свет и света в тела соответствует ходу природы, которая как бы услаждается превращениями.*

*Исаак Ньютон*

**Дополнительный материал:** Различные способы написания одного и того же уравнения могут говорить о совершенно разных вещах, даже если они являются логически эквивалентными. Первый закон Эйнштейна - это, разумеется,  $E = mc^2$ . Здорово, что первый закон предполагает возможность получения большого количества энергии из небольшого количества массы. Он наводит на мысль о ядерных реакторах и ядерных бомбах. Второй закон Эйнштейна формулируется следующим образом:  $m = E/c^2$ . Он предполагает возможность объяснения того, как масса возникает из энергии. Если мы сможем объяснить массу в терминах энергии, мы улучшим наше описание мира. Второй закон Эйнштейна позволяет дать хороший ответ на вопрос, который мы задали ранее. Откуда берётся масса? Может быть, из энергии? На самом деле, как мы увидим далее, в основном так и есть. Когда Вселенная только зародилась, в ней гораздо чаще из энергии получалось вещество, а не наоборот. Сейчас мост или туннель идет в обратном направлении - от массы к энергии! Однако в ранние мгновения существования Вселенной температуры и давление были до того велики, что самый обычный свет регулярно совершал этот обратный переход по мосту и сгущался вплоть до образования массы. Атомные (эВ), ядерные (МэВ) и субъядерные (ГэВ)

процессы. Это бесконечное преобразование вещества в энергию (и обратно) питает космос, материю и саму жизнь. Но в процессе этого содержание энергии-материи вселенной никогда не меняется.

**Дополнительный материал:** Энергия системы взаимодействующих частиц. **Масса системы взаимодействующих частиц больше или меньше суммы масс составляющих ее частиц.** Для протона, только 1,3% его массы определяется массой трех кварков, а остальное – их кинетической энергией и взаимодействием между ними. Похоже, что физический мир – это единый океан энергии, который возникает и спустя миллисекунды исчезает, пульсируя снова и снова! Большая часть нашей массы обеспечивается энергией связи сильного взаимодействия, удерживающего фундаментальные частицы вместе. Частицы с ненулевой массой могут превратиться в безмассовые частицы, а при взаимодействии легких частиц большой энергии, могут рождаться частицы очень тяжелые!

$$M = \sum_i m_i + \frac{\sum_i E_{ki}}{c^2} + \frac{U}{c^2}$$

Что вы теперь можете сказать внутренней энергии тела?!  $U = mc^2$ !

**Дополнительный материал (фотон):** Электроны могут быть быстрыми или медленными. Если они быстры, то обладают большой энергией. Если они медленные, то их энергия мала. Но полная энергия электрона никогда не может быть меньше его энергии покоя. Энергия фотона (частота) может быть, как большой, так и малой, но скорость фотона при этом не меняется. В частности, не существует нижнего предела энергии фотона. Это должно означать, что энергия покоя фотона (масса) равна нулю. И это принципиальная разница между фотоном и большинством других частиц: фотон не имеет массы. **Любой массе отвечает энергия, но не любой энергии отвечает масса, например, масса частицы света (фотона) равна нулю!** Масса нейтрино не превышает  $0,3 \text{ эВ}/c^2$ ! **Чем больше энергия покоящегося тела, тем больше его масса (пример с деформированной пружиной или с нагретым телом)!**

Энергия и масса рассматривались в течение веков как вещи совершенно различные. Представления о них развивались, не соприкасаясь друг с другом. Энергия мыслилась в лошадиных силах или в киловатт-часах; массу измеряли в килограммах. Связывать эти единицы никому в голову не приходило. Лавуазье (закон сохранения массы) и Фарадей (закон сохранения энергии) увидели только часть истины. Энергия не стоит особняком, точно так же, как масса. Неизменно постоянной оказывается сумма энергии и массы. Любой атом, из которого сложены объекты Вселенной, обладает пусть ничтожной, хотя вполне измеряемой массой - особенно она заметна, когда атомы собираются в кучу и образуют кирпич, который падает на ногу. Собираясь в кучу, фотоны способны совершить больше, чем летящий кирпич - поджарить или испепелить любой материал. Ещё интересный факт о фотонах. Да, сами они не имеют массы, но если фотон образуется в какой-то системе, то её масса уменьшается! А если фотон поглощается (уничтожается) другой системой, то её масса увеличивается. Кажущееся противоречие разрешается простым, но гениальным принципом - всякая энергия эквивалентна массе и в случае чего, одно переходит в другое.

**Интересная цифра.** В доступной наблюдению Вселенной заключено около  $10^{68}$  Дж энергии. Какова масса наблюдаемой Вселенной? Годовое потребление энергии всеми странами на Земле в 2010 г. достигло величины, эквивалентной сжиганию 10 Гт нефти. Какой массе, переводимой полностью в энергию, соответствует эта величина? 0,45 т

Альберт Эйнштейн, в восторге просмотрев одну из знаменитых кинолент Чарли Чаплина, написал ему: *«Ваши безмолвные действия так понятны любому человеку. Не зря Вы знаменитый и известный человек!»* Чаплин ответил: *«Вы тоже знамениты, хотя Вашу теорию не понимает никто!»*

*Это было для меня большой неожиданностью, – вспоминал Минковский. – Мой цюрихский студент Эйнштейн?.. Да ведь раньше он был настоящим лентяем и совсем не занимался математикой...*

*Герман Минковский*

Докторскую степень Герман Минковский получил в 21 год!

#### IV. Задачи:

1. Найти скорость, при которой кинетическая энергия частицы равна ее энергии покоя.
  2. Какую работу необходимо совершить, чтобы увеличить скорость частицы с массой  $m$  от  $0,6 c$  до  $0,8 c$ .
  3. Электрон начинает двигаться в однородном электрическом поле с напряженностью  $10 \text{ кВ/см}$ . Через сколько времени после начала движения кинетическая энергия электрона станет равной его энергии покоя?
  4. Электрон, влетевший в камеру Вильсона, оставил след в виде дуги окружности радиусом  $r = 0,1 \text{ м}$ . Камера находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 10 \text{ Тл}$ . Определите кинетическую энергию электрона.
  5. Частица, имеющая массу  $m$  и заряд  $q$ , разгоняется из состояния покоя до релятивистской скорости  $V$  в однородном электрическом поле, модуль напряженности которого  $E$ . Какое расстояние  $L$  проходит при этом частица?
  6. Какую ускоряющую разность потенциалов  $U$  должен пройти электрон, чтобы его скорость составила  $V = 0,95 c$ ?
  7. Стартуя с Земли, космонавт намеревается достичь звезды  $\alpha$  - Центавра за  $0,43$  года своей жизни. Расстояние до этой звезды, согласно земным измерениям, равно  $4,3$  светового года. С какой скоростью должен двигаться космонавт? Положив, что масса космонавта и его кабины равна  $1000 \text{ кг}$ , определите, какая минимальная энергия требуется для этого (выразите эту энергию в  $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ ). Как сказал Энрико Ферми, «оценка по порядку величины позволяет вам ощутить почву под ногами».
  8. Частица массы  $m$ , движущаяся со скоростью  $0,8 c$ , испытывает неупругое соударение с покоящейся частицей равной массы. Чему равна скорость образовавшейся составной частицы? Чему равна ее масса? При взаимодействии частиц масса не сохраняется.
  9. В Большом адронном коллайдере (БАК) протоны разгоняются до энергий в  $14 \text{ ТэВ}$ . С какой скоростью они летят?
  10. Спустя примерно сутки после хромосферной вспышки возникают различные геофизические возмущения. Какова кинетическая энергия вызывающих их протонов?
  11. Определите время жизни  $\mu$  - мезона с кинетической энергией  $10^9 \text{ эВ}$ . Время жизни покоящегося  $\mu$ -мезона  $2,2 \text{ мкс}$ , масса в  $206,7$  больше массы электрона.
- Если протянуть руку и направить ладонь вверх, к небу, то с каждой секундой через вашу руку будет проходить примерно один мюон (или антимюон).
12. Электрон ускоряется из состояния покоя до кинетической энергии, в три раза превышающей его начальную полную энергию. Найти работу по ускорению данной частицы и конечную скорость.  $1,54 \text{ МэВ}$ .  $0,968 c$ .

**Дополнительная информация:** Во второй половине XX века физики выясняли внутреннее устройство атомов и частиц, прибегая к грубой силе - разбивая их в мелкие куски. Колоссальные магниты ускорителей элементарных частиц разгоняют их до чрезвычайно высоких скоростей, а затем вбивают поток частиц либо в некоторую мишень, либо в другой, противоположно направленный поток. Энергия не создается и не уничтожается, однако кинетическую энергию можно конвертировать в вещество (массу). Коллайдер. При столкновении протонов рождаются частицы куда более массивные, чем исходные. Поскольку масса - это «замороженная» энергия, для высвобождения более тяжелых частиц требуется поток с очень высокой энергией. Расколов частицы в ускорителях, требуется определить затем, что представляют собой осколки, - это делается посредством фотографирования следов, которые они оставляют, проходя через магнитное поле. Положительно заряженные частицы отклоняются магнитным полем в одну сторону, отрицательно заряженные - в другую. Кроме того, масса частицы определяет быстроту ее проскакивания через детектор и степень искривления траектории.

*Вопросы:*

1. В каких физических явлениях обнаруживает себя энергия покоя?
2. Одинакова ли масса сжатой и свободной пружины?
3. Взрыв атомной бомбы в миллионы раз мощнее любых взрывов химических боеприпасов? Почему это можно утверждать?
4. Почему нагревание образца приводит к увеличению его массы?
5. Насколько уменьшится масса 10 кг воды при замерзании?
6. В чем заключается преимущество использования встречных пучков в физике высоких энергий?
7. Продукты реакции при столкновении частиц в ускорителях имеют массу в десятки тысяч раз большую, чем массы исходных частиц. Почему масса не сохраняется?
8. Почему невозможен процесс, единственным результатом которого будет рождение электронно-позитронной пары из одного фотона (как и обратный)? Всегда есть ИСО, в которой импульс пары нуль, а импульс фотона не равен нулю.
9. Сохраняется ли масса вещества при химических превращениях?
10. Какова кинетическая энергия протона, движущегося со скоростью 0,8 с? Каков ее импульс? Какова его масса?
11. Почему в ускорителях на встречных пучках относительная энергия частиц увеличивается не в 2 раза, а в несколько сотен раз?
12. Назовите известные вам формы энергии.
13. Каковы преимущества ускорителя протонов на встречных пучках с точки зрения закона сохранения импульса?
14. Если вы движетесь настолько быстро, что ваша полная энергия равна удвоенной энергии покоя, то время замедляется в два раза. Так ли это?
15. Масса самого тяжелого нейтрино приблизительно равна 0,1 эВ. Как это понимать?
16. Почему в фотонной ракете необходим эффективный отражатель  $\gamma$  - квантов высокой энергии?

17. Каким образом постоянная аннигиляция магнитных полей в верхней части солнечной атмосферы приводит к возникновению вспышек и разогреву короны?
18. Правда ли, что падающее на черную дыру тело на её границе разгоняется до скорости света?
19. Фотоны в конце фотонной эры были последними рассеявшимися на электронах в тех областях Вселенной, где накапливалось вещество, поэтому имеют меньшую частоту, чем те, которые рассеялись на свободных электронах. Почему?
20. Вещество – это «застывшая» энергия. Так ли это?
21. Если формула  $E = mc^2$  универсальная, то как ее применить к фотонам, которые обладая энергией и зачастую весьма немалой (гамма-кванты), массы всё же не имеют? Эта энергия не замораживается?
22. К нулю или к бесконечности должна стремиться температура тела, скорость которого приближается к скорости света в вакууме?
23. Во сколько раз отличается энергия аннигиляции двух нуклонов от энергии того же процесса для двух бета-частиц?

**Дополнительные задачи:**

1. Электрон обладает кинетической энергией 2 МэВ. Определить импульс электрона, считая его энергию покоя 0,51 МэВ.
2. Электрон движется со скоростью  $0,8c$ , где  $c$  — скорость света в вакууме. Найти: а) импульс частицы; б) отношение кинетической энергии к полной энергии.  $21,8 \cdot 10^{-23}$  кг·м/с. 0,4
3. Вычислить скорость, импульс и полную энергию протона, получившего в ускорителе кинетическую энергию 1,0 ГэВ.  $0,88 c$ .  $9 \cdot 10^{-19}$  кг·м/с. 1938 МэВ.
4. Покоящаяся частица массой  $m$  поглощает безмассовую частицу с энергией  $\epsilon$ . Определите новую массу частицы.
5. Два протона, ускоренных до одной и той же энергии, в 10 раз превышающей энергию покоя (порядка 10 ГэВ), движутся навстречу друг другу и сталкиваются между собой. Определите энергию второй частицы в системе отсчета, связанной с первой частицей (ускоритель на встречных пучках).
6. Каким напряжением должны быть ускорены протоны, чтобы при столкновении с неподвижными протонами стало возможно образование пары протон-антипротон. Считайте, что энергия покоя протона равна приблизительно 1 ГэВ.  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ . ( $E = E_p + E_0$ .)

**Дополнительный материал.** Фотонные ракеты.

Недостатки фотонных ракет:

- При аннигиляции рождаются не только  $\gamma$  - кванты, но и другие заряженные частицы и нейтрино, причем значительная часть энергии и импульса теряется безвозвратно;
- Высокая стоимость антивещества (1 г антивещества стоит  $10^{13}$  \$);

Заряженные частицы антиматерии, такие как позитроны и антипротоны, можно удерживать в устройствах, называемых ловушками Пеннинга. Их можно сравнить с крошечными ускорителями. Внутри них частицы вращаются по спирали, поскольку магнитные и электрические поля удерживают их от столкновения со стенками ловушки. Нейтральные античастицы (антиводород) удерживаются в ловушках Иоффе, которые работают путём создания области пространства, где магнитное поле увеличивается при движении в любом направлении. Частица застревает в области с самым слабым магнитным полем, подобно

тому, как шарик катится внутри широкой чаши, постепенно приближаясь к её дну.

- Большая масса ракеты (для разгона ракеты массой 100 т до скорости 0,9 с потребуется  $25 \cdot 10^6$  т антивещества, вещество можно захватывать из межзвездной среды).

V. § 69. Упр. 10, вопросы 4,5.

1. В современном ускорителе (сверхпроводящий суперколлайдер) протоны ускоряются до таких скоростей, что их энергия в 20000 раз превышает энергию покоя. В системе отсчета, связанной с такой частицей, время растянуто настолько, что одна секунда соответствует 5,5 ч в нашей системе отсчета; каждый километр камеры, по которой проносится частица, будет "казаться" ей сжатым всего лишь до 5 см. Согласуются ли приведенные утверждения? Если согласуются, то какова скорость протонов?
2. Если электрон рассматривать как точку, не имеющую размеров и формы, то чему была бы равна его масса?
3. При какой энергии сталкивающихся во встречных пучках протонов (БАК) энергия их гравитационного притяжения сравняется с энергией их электростатического отталкивания? Эта энергия составит порядка  $10^{27}$  эВ, энергия протонов в космических лучах достигает  $10^{21}$  эВ, на ускорителе же собираются достичь энергии всего  $7 \cdot 10^{15}$  эВ.
4. Годовое потребление энергии всеми странами на Земле в 2010 г. достигло величины, эквивалентной сжиганию 10 Гт нефти. Какой массе, переводимой полностью в энергию, соответствует эта величина?
5. Почему огонь такой завораживающий? Возможно это из-за его разрушающей способности, хаотичности и недолговечности. Огонь одно из самых очевидных преобразователей массы в энергию. В тепловую энергию. Так ли это?
6. Давайте рассчитаем массу не одной человеческой мысли, а массу мыслей, произведенных за минуту. Чему она равна?
7. Опишите вымышленную ситуацию в форме рассказа, содержание которого во многих случаях находилось бы в противоречии с законами СТО.
8. Представьте себе, говорит он, что ночью, когда вы крепко спите, все во Вселенной стало в тысячу раз больше, чем прежде. Говоря все, Пуанкаре имеет в виду действительно все: электроны, атомы, длины волн света, самих вас, вашу кровать, ваш дом. Землю, Солнце, звезды. Сможете ли вы сказать, когда проснетесь, что произошли какие-то изменения?
9. Докажите, что когда частица движется перпендикулярно вектору  $\vec{v}$ , то она описывает окружность радиусом  $R = qcB \sqrt{2 \cdot E_0 E_k + E_k^2}$ .

*Хорошо построенная теория в некоторых отношениях, несомненно, является произведением искусства. Теория относительности Эйнштейна должна рассматриваться как великолепное произведение искусства!*

*Э. Резерфорд*



## ОБОБЩАЮЩИЙ УРОК ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

**Сможем ли мы когда-нибудь отправиться в прошлое и будущее?**

**ЦЕЛЬ УРОКА:** Систематизировать и обобщить знания учащихся по СТО, установить ее границы применимости и рассмотреть практические применения.

**ТИП УРОКА:** повторительно-обобщающий.

**ПЛАН УРОКА:**

1. Вступительная часть
2. Заполнение таблицы
3. Применения СТО
4. Задание на дом

## II. Заполнение обобщающей таблицы:

# СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## I. ОСНОВАНИЕ

1. Наблюдения: наблюдения за двойными звездами.
2. Эксперименты: опыты Майкельсона - Морли.
3. Основные понятия: инвариантность закона, преобразования Галилея и Лоренца.
4. Идеализированный объект: ИСО.

## II. ЯДРО ТЕОРИИ

1. Постулаты: принцип относительности; скорость света одинакова во всех системах отсчета и не зависит от скорости движения источника.

2. Законы: 
$$\vec{p} = \frac{m\vec{V}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad E = mc^2.$$

3. Константы:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

## III. СЛЕДСТВИЯ

1. Формулы-следствия: 
$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}; \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}.$$

2. Экспериментальная проверка: опыты с  $\gamma$  - лучами.
3. Границы применимости: применять при больших скоростях.
4. Практические применения: расчеты траекторий частиц в ускорителях, объяснение астрофизических, атомных и ядерных явлений.

Пользуясь планом изучения любой физической теории, выясните, к каким элементам теории можно отнести следующие утверждения:

1. Законы СТО справедливы при любых скоростях, но не работают на квантовых масштабах, где царит неопределенность.
2. Покоящийся в данной ИСО стержень в движущейся вдоль него ИСО имеет длину  $L = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$ .
3. Закон инвариантен относительно данных преобразований, если его вид и форма не изменяются при данных преобразованиях.
4. Скорость света в вакууме  $c = 299792458 \pm 1,1$  м/с.
5. При релятивистских скоростях зависимость энергии тела от скорости его движения имеет вид:  $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$ .

6. В опытах Майкельсона - Морли не удалось обнаружить мирового эфира.
7. Скорость света в вакууме – предельная скорость распространения сигнала.

8. Инерциальной называется система отсчета, в которой свободное тело сохраняет свою скорость неизменной.
9. Характерное для специальной теории относительности замедление времени наблюдается при распадах нестабильных элементарных частиц в космических лучах.
10. СТО лежит в основе всех современных теорий, рассматривающих явления при релятивистских скоростях.

*В 1923 году канадский ученый спросил Э. Резерфорда, что он думает о теории относительности. «А, чепуха! – ответил Резерфорд. – Для нашей работы это не нужно».*

*Альберт Эйнштейн мало заботился о своей внешности и одежде, одевался очень небрежно. Однажды он встретил в Нью-Йорке знакомого, который после приветствия посоветовал: — Господин Эйнштейн, вы непременно должны купить себе новое пальто. Это уже износилось.*

*— Зачем же? В Нью-Йорке меня никто не знает, — неохотно пробурчал Эйнштейн. Спустя несколько лет Эйнштейн снова повстречался с этим знакомым. Великий ученый ходил все в том же пальто. Назойливый собеседник опять советовал купить новое пальто. — Зачем же? — ответил Эйнштейн. — Здесь меня знает каждый.*

**III.** Ключевой урок теории относительности Эйнштейна заключается в том, что независимо от того, каково ваше положение или как оно меняется со временем, законы физики и природные константы, включая скорость света, всегда будут выглядеть одинаково. Развитие основных понятий физики: пространство, материя, движение. Понятие инвариантности физического закона. Эмми Нётер доказала, что для каждой непрерывной пространственно-временной симметрии существует свой закон **сохранения**. Закон сохранения энергии следует из трансляционной симметрии времени, закон сохранения линейного импульса — из трансляционной симметрии пространства, а закон сохранения момента импульса — из вращательной симметрии пространства. До тех пор, пока законы физики остаются неизменными во времени для любой физической системы, энергия в ней будет сохраняться. Это справедливо и для сильных ядерных сил, и для слабых ядерных сил, и для электромагнитных сил.

**Метазаконы** - необходимые требования симметрий!

*По-видимому, одной из фундаментальных особенностей природы является то, что фундаментальные физические законы описываются в терминах математической теории большой красоты и мощи, для понимания которой требуется довольно высокий уровень математики.*

*Поль Дирак*

*Пространство-время говорит материи, как двигаться;  
материя сообщает пространству-времени, как искривляться.*

*Джон Арчибальд Уилер.*

**Дополнительная информация. Общая теория относительности (ОТО).** Планеты Солнечной системы двигаются вокруг Солнца по эллипсам, однако по некоторым причинам (в частности, из-за большого количества массивных тел) большие оси их орбит подвержены прецессии – то есть, меняют направление. В начале XX века Хендрик Лоренц, обнаружил, что реальная прецессия орбиты Меркурия не совпадает с расчётной орбитой.

Астрономы предположили, что между Меркурием и Солнцем существует не найденная до сих пор планета, которую они назвали Вулкан. Однако эту загадку совершенно по-другому разрешил Эйнштейн. Его ОТО закрыла пробел в расчётах, а также стала преемницей ньютоновской теории гравитации. Он предположил, что гравитация является следствием искривления пространства-времени, происходящего благодаря влиянию на последнее массы-энергии. Например, Луна вращается вокруг нашей планеты из-за искривления пространства-времени, вызванного массой Земли, как велосипедист на велотреке. Она просто движется вдоль изгиба или нисходящего склона, который делает наша планета. В этом отношении на спутник Земли не действует какая-либо сила. На сегодня все предсказания ОТО, которые мы смогли проверить, подтверждают её правильность – это ускорение систем отсчёта (гравитационное красное смещение света), гравитационное линзирование, существование чёрных дыр, орбитальные эффекты, увлечение инерциальных систем отсчёта и гравитационные волны.

Одна из ключевых проверок теории относительности Эйнштейна была проведена в 1919 году во время полного солнечного затмения. Согласно теории Эйнштейна, наличие большого количества энергии в одном месте пространства-времени (на Солнце) должно было искривлять и искажать траекторию движения всех объектов, проходящих вблизи него. В том числе и свет от фоновых звёзд, который, хотя и не имеет массы, всё равно будет двигаться по траектории, создаваемой искривлённым пространством — важная ключевая концепция общей теории относительности. Но что же предсказывала более старая теория, которую пыталась заменить общая теория относительности, — ньютоновская теория всемирного тяготения? Одни настаивали на том, что она предсказывает нулевое отклонение, поскольку свет не имеет массы покоя, а в теории Ньютона гравитационное притяжение определяется исключительно массой. Но другие признавали, что фотоны всё же несут энергию в виде  $E = pc$ , и поэтому, если использовать энергию фотонов вместо массы (т.е. подставить  $E/c^2$  фотона

вместо ньютоновской массы  $m$ )  $F_T = G \frac{M(E/c^2)}{r^2}$ , то можно предсказать отклонение и для ньютоновской гравитации. Тот факт, что теория Эйнштейна предсказала удвоение ньютоновского значения, и это действительно подтвердилось наблюдениями, стал ключевым тестом, который позволил нам проверить и подтвердить теорию Эйнштейна, что привело к революции в нашем понимании Вселенной.

За последние 100 лет бесчисленные исследования доказали, что величайшая теория Альберта Эйнштейна — его общая теория относительности — практически пуленепробиваема и способна на всё: от предсказания поведения чёрных дыр до управления GPS-технологией.

**Дополнительная информация.** Общая теория относительности и квантовая механика, эти два сокровища, которые оставил нам XX век, оказались щедрым подарком, способствующим пониманию мира и созданию современных технологий. Первое способствовало развитию космологии, а также астрофизики, изучению гравитационных волн и черных дыр. Второе обеспечило нас основами атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц и конденсированного состояния, а также развитием многих других направлений. И все же между этими двумя теориями есть серьезная коллизия. Одним из примеров могут служить внутренние области черных дыр. Другой пример — то, что случилось с Вселенной во время Большого взрыва. Иными словами, мы не знаем, как время и пространство ведут себя на очень малых масштабах. Во всех этих случаях современные теории начинают сбивать и больше не дают нам ничего разумного: квантовая механика не может работать с кривизной пространства-времени, а общая теория относительности не может учитывать кванты. Это и есть проблема квантовой гравитации. Нужно заново осмыслить основы наших представлений о мире. Очень большое количество энергии в очень маленькой области искривляет пространство настолько сильно, что оно схлопывается в черную дыру. Общий вывод: из совместного применения квантовой механики и общей теории относительности вытекает, что существует предел для делимости пространства. Это расстояние называется планковской длиной. В этом масштабе пространство и время меняют свою природу. Они

становятся чем-то совершенно иным — квантовым пространством и временем, и понять, что это значит, довольно трудно. В масштабах нашего восприятия, невероятно превосходящих планковскую длину, пространство гладкое. Если же мы спустимся к планковскому масштабу, оно рвется и пенится. В специальной теории относительности представления о пространстве и времени подверглись радикальному пересмотру. Сначала было осознано, что они образуют единое 4-мерное многообразие, а затем, с созданием общей теории относительности, — что это многообразие искривлено. Наше пространство интуитивно воспринималось как сцена, не меняющаяся оттого, сколько актеров на ней находится и есть ли они вообще. В принципе схема «сцена — пространство» и «актер — материя» сохранилась до наших дней, однако сложившиеся к настоящему времени представления о физической реальности убедительно свидетельствуют о том, что пространство-время должно рассматриваться в неразрывном единстве со свойствами находящихся в нем материальных объектов и физических взаимодействий между ними.

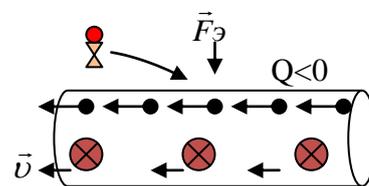
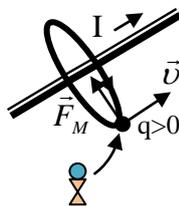
*Сколько отрезков бесконечно малой длины  
может уместиться на отрезке конечной длины?*

*Чисто математическая задача*

**Дополнительная информация. Применения теории относительности.**

**МЕХАНИКА И СТО.** Границы применимости третьего закона Ньютона.  
**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И СТО.** Существует ли верхний предел температур?

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И СТО.** До Ньютона считалось (говоря современным языком), что существует один закон тяготения для Земли, а другой - для небес. Ньютон объединил их, доказав, что в основе лежит одна и та же сила, которая описывает движение, как яблок, так и планет в рамках единого закона всемирного тяготения. В XIX веке считалось, что электричество и магнетизм - это две разные силы, пока Майкл Фарадей и Джеймс Клерк Максвелл не объединили их в одну силу, названную электромагнитной. Заметьте, что если сила электрического взаимодействия вызвана статическим зарядом, а сила магнитного взаимодействия - движущимся зарядом, то с точки зрения принципа относительности Галилея они должны быть равны (пример с заряженной частицей, движущейся параллельно проводнику с током)! Электрическое и магнитное поле, как проявления **единого и неделимого электромагнитного поля!** Локализация каждого из них зависит от системы отсчета наблюдателя.



Вокруг движущегося заряда возникает магнитное поле, силовые линии которого замкнуты и охватывают направление движения заряда. Изменяется ли при этом электрическое поле данного заряда по сравнению с электрическим полем неподвижного заряда? Происходит ослабление электрического поля в направлении движения заряда. Почему?

**Где в жизни применяется теория относительности?**

1) **GPS и другая спутниковая навигация**

Одно из самых заметных применений теории относительности — это глобальная система позиционирования (GPS).

2) **Астрономия и космология**

Теория относительности также играет ключевую роль в астрономии и космологии. Она помогает астрономам понимать такие явления, как движение планет, орбиты искаженные гравитацией, черные дыры и расширение Вселенной. Теория Эйнштейна предсказывает существование гравитационных волн — искажений в ткани пространства-времени, которые недавно были обнаружены.

3) **Ядерная энергетика**

Эйнштейновское уравнение  $E = mc^2$  является основой для понимания ядерной энергии. Это уравнение объясняет, как масса может быть преобразована в огромное количество энергии, что лежит в основе ядерных реакций как в ядерном оружии, так и в ядерных реакторах.



#### 4) **Физика элементарных частиц**

Многие эксперименты с высокими энергиями, такие как те, что проводятся в Большом адронном коллайдере, основываются на теории относительности. В этих экспериментах частицы ускоряются до скоростей, близких к скорости света, и их поведение можно объяснить только с помощью теории Эйнштейна.

#### 5) **Радиационная терапия в медицине**

В медицинской физике и радиационной терапии учитываются некоторые принципы теории относительности. При радиационной терапии рака используются высокоэнергетические частицы, которые ускоряются до значительных скоростей. Точное дозирование и направление этих частиц требуют учета релятивистских эффектов для обеспечения безопасности и эффективности лечения.

#### 6) **Технология волоконной оптики**

В системах волоконной оптики, которые используются в современных телекоммуникациях и интернете, важным аспектом является точность времени. Для синхронизации передачи данных между различными узлами сети необходимо учитывать временную дилатацию, предсказанную теорией относительности, особенно в случаях использования спутниковых систем.

#### 7) **Исследования квантовой механики**

Теория относительности также находит применение в квантовой механике и квантовой физике. Разработка квантовых технологий, включая квантовые компьютеры и квантовую криптографию, требует учета релятивистских эффектов для точного описания и управления квантовыми состояниями.

#### 8) **Солнечная энергетика**

Наконец, теория относительности имеет значение и в понимании процессов, происходящих внутри Солнца. Ядерные реакции в солнечном ядре, которые являются источником солнечной энергии, могут быть поняты и описаны с помощью принципов, изложенных в уравнении  $E = mc^2$ .

**Историческая справка.** Всю свою жизнь Альберт Эйнштейн посвятил научной деятельности, и вся его история — это борьба с самой природой, с консервативностью научного сообщества и с самим собой. При всем при этом следует признать, что он не умел говорить до 3-летнего возраста, а к 7 годам едва научился произносить отдельные фразы. В раннем возрасте на Эйнштейна огромное впечатление произвел компас, который ему подарил отец. Для него было настоящим чудом наблюдать за тем, как компасная стрелка показывала всегда одно направление, несмотря на повороты прибора. Если какая-то научная проблема никак не хотела даваться ему, Эйнштейн начинал играть на скрипке. Как он сам говорил, во время игры на него часто снисходят озарения. Почему именно Эйнштейн создал теорию относительности? «Когда я задаю себе такой вопрос, мне кажется, что причина в следующем. Нормальный взрослый человек вообще не задумывается над проблемой пространства и времени. По его мнению, он уже думал об этой проблеме в детстве. Я же развивался интеллектуально так медленно, что пространство и время занимали мои мысли, когда я стал уже взрослым. Естественно, я мог глубже проникать в проблему, чем ребёнок с нормальными наклонностями».

**Дополнительная информация:** Наверное, многие из нас в детстве, глядя в зеркало, задавались вопросом: а что происходит там, в отражённом пространстве? То же самое, что у нас, или нечто совсем иное? И что будет, если войти туда, за зеркальную рамку? На правую руку нельзя надеть левую перчатку (то есть можно, конечно, при известном старании, подобно героине стихотворения Анны Ахматовой, но будет неудобно). Изучая под микроскопом строение кристаллов винного камня, Пастер обнаружил, что они напоминают карандашные стерженьки со скошенными вправо или влево торцами. Бактерии охотно поедали «правые» стерженьки и совершенно не трогали «левые». Это значит, решил Пастер, что сами бактерии по природе являются несимметричными, «правыми». В природе превращение симметричного в несимметричное происходит постоянно. Например, растения

используют симметричные молекулы воды и углекислого газа и превращают их в несимметричные молекулы крахмала и сахара. Поэтому пить зазеркальное молоко Алисиному котёнку нельзя. С развитием микробиологии, исследованием ДНК и РНК выяснилось, что все основные строительные «кирпичики», или буквы, с помощью которых в ДНК записана вся история нашего организма, зеркально несимметричны. Итак, жизнь отличается от не жизни отсутствием (или нарушением) **зеркальной симметрии!!!**

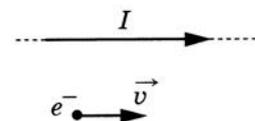
В некоторых случаях, симметрии, представленные в базовых законах природы, оказываются нарушенными в реальности. К примеру, когда энергия превращается в вещество через старое доброе  $E = mc^2$ , в результате получаются равные количества материи и антиматерии - симметрия. Но если энергия Большого взрыва создала материю и антиматерию в равных количествах, они должны были взаимно аннигилировать, не оставив от вещества и следа. **Но мы-то здесь!!!**

**Дополнительная информация:** Рентгеновское излучение, аналогичное по свойствам лазерному излучению, может создать пучок электронов, разогнанный до скоростей, близких к скорости света. Ускоренные электроны попадают в ондулятор - устройство, создающее в пространстве периодически изменяющееся магнитное поле. Двигаясь в нём по зигзагообразной траектории, электроны излучают в рентгеновском диапазоне. Новая уникальная установка будет генерировать ультракороткие рентгеновские вспышки с рекордной частотой - 27 000 раз в секунду, а её пиковая яркость ожидается в миллиард раз выше существующих источников рентгеновского излучения.

**Дополнительная информация (эффект Черенкова).** При прохождении частицы через материальную среду со скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде, наблюдается характерное излучение. В стекле или в воде, например, свет распространяется со скоростью, составляющей 60-70% от скорости света в вакууме, и ничто не мешает быстрой частице (например, протону или электрону) двигаться быстрее света в такой среде. Все это время частица тормозит и, следовательно, теряет энергию, которой надо куда-то деваться. При торможении машины кинетическая энергия переходит в нагрев тормозов, а сверхсветовые частицы отдают избыток в виде квантов излучения, то есть света. Когда в глаз влетает частица с около световой скоростью, она так же начинает излучать, поэтому космонавты, например, неоднократно видели вспышки перед глазами. Угол при вершине конуса света зависит от скорости частицы и от скорости света в среде. Определив угол при вершине конуса, физики могут рассчитать по нему скорость частицы.

#### IV. Подготовка к контрольной (самостоятельной) работе.

1. Поле тяготения действует на все: на легкие частицы и тяжелые, даже на свет. То, что свет притягивается массивными телами, предполагал еще И. Ньютон. Каким образом, ведь свет не имеет массы?
2. Какова максимальная сила электрического взаимодействия между двумя протонами с энергией  $10^6$  эВ, летящими во встречных пучках?
3. Земля искривляет пространство вокруг себя (делает в пространстве как бы воронку), и в эту воронку «падает» Луна. Почему же тогда Луна не «скатывается» окончательно в воронку, образованную Землей?
4. Фотон, с его точки зрения, живет и существует только мгновение, при этом никуда не движется - до тех пор, пока не будет поглощен каким-либо объектом. А с точки зрения нас - наблюдателей - фотон может существовать бесконечно долго, пересекая пространство со скоростью света. Излученный в самом начале зарождения Вселенной, он может существовать до самого конца. С нашей точки зрения - вечность. Найдите ошибки в рассуждениях.
5. Электрон  $e^-$  имеет скорость  $\vec{v}$ , направленную вдоль прямого длинного проводника с током  $I$ . Куда направлена относительно рисунка (вверх, вниз, влево, вправо, от наблюдателя, к наблюдателю) действующая на электрон сила в ИСО электрона?



*Нам уготовлено, мальчик мой,  
Легкое это бремя.  
Двигаться вдоль по одной прямой,  
Имя которой Время.*

*А. Макаревич, «Машина времени»*

Урок 7.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 6

**Сколько времени живет фотон?**

*Есть тонкие властительные связи  
Меж контуром и запахом цветка.  
Так бриллиант невидим нами, пока  
Под гранями не оживет в алмазе.*

*В.Я. Брюсов*

*С тех пор как за теорию относительности принялись  
математики, я ее уже сам больше не понимаю.*

*Шутка А. Эйнштейна*

*Невероятная эффективность математики в естественных науках  
— это что-то мистическое и этому нет рационального объяснения.*

*Юджин Вигнер*

**Дополнительная информация: Эффективность математики в естественных науках.**

Наиболее явно этот парадокс можно наблюдать в ситуациях, когда какие-то физические объекты были сначала открыты математически, а уже потом были найдены доказательства их физического существования. Наиболее известный пример — открытие Нептуна. Урбен Леверье сделал это открытие, просто вычисляя орбиту Урана и исследуя расхождения предсказаний с реальной картиной. Другие примеры — предсказание Дираком о существовании позитронов и предположение Максвелла о том, что колебания в электрическом или магнитном поле должны порождать волны.

*Как может математика, порождение человеческого разума, независимое от индивидуального опыта, быть таким подходящим способом описывать объекты в реальности? Может ли тогда человеческий разум, силой мысли, не прибегая к опыту, постичь свойства вселенной?*

*Альберт Эйнштейн*

*Физики пришли к выводу, что математика, если ее использовать с достаточной осторожностью, — это проверенный путь к истине.*

*Брайан Грин.*

Теологи, например, предложили Бога, который строит законы природы, и при этом использует язык математики. Натуралисты верят в существование «мира идей», который содержит все математические объекты, формы, а так же Истину. Там же находятся и физические законы. Третьи считают, что мы изучаем математику, наблюдая за физическим миром. С этой точки зрения, неудивительно, что физика идет за математикой, ведь математика формируется при тщательном изучении физического мира. Живые существа должны защищаться. Чем лучше они понимают своё окружение, тем лучше они выживают. Неживые объекты, например камни и палки, никак не взаимодействуют со своим окружением. Растения же, с другой стороны, поворачиваются к Солнцу, а их корни тянутся к воде. Более сложное животное может замечать больше вещей в своем окружении. Люди замечают вокруг себя множество закономерностей. Шимпанзе или, например, дельфины не могут этого. Закономерности наших мыслей мы называем математикой. Некоторые из этих закономерностей являются закономерностями физических явлений вокруг нас, и мы называем эти закономерности физикой.

Вопрос: Почему медитация не сильно помогает в предсказании результата экспериментов квантовой механики?

*Ученые стали носителями факела открытий в нашем стремлении к знаниям.*

*Стивен Хокингс*

*«В XX веке ни один другой человек не сделал так много для безмерного расширения области познанных. Тем не менее, ни один человек не был столь скромн, обладая властью, которой является знание, ни один человек не был столь уверен, что власть без мудрости смертельно опасна».*

*Президент США Дуайт Эйзенхауэр*

Эйнштейн – гениальный физик, сложно представить человека, который о нем никогда не слышал, как и о его теории относительности. Рекомендуют сохранить и время от времени перечитывать подборку его лучших цитат.

- Лучше верить, чем не верить, потому что с верой все становится возможным. Воображение важнее, чем знания. Знания ограничены, тогда как воображение охватывает целый Мир.
- Единственное, что мешает мне учиться – это полученное мною образование.
- Разум, однажды расширивший свои границы, никогда не вернется в прежние.
- Все знают, что это невозможно. Но вот приходит невежда, которому это неизвестно – он-то и делает открытие.
- Логика приведет вас из пункта А в пункт Б. Воображение приведет вас куда угодно.
- Все мы гении. Но если вы будете судить рыбу по ее способности взбираться на дерево, она проживет всю жизнь, считая себя дурой.
- Воображение – это самое главное. Оно является отражением того, что мы притягиваем в свою жизнь.
- Только те, кто предпринимают абсурдные попытки, смогут достичь невозможного.
- Ваша жизнь становится тем, во что вы больше всего верите.

*Кусок железа стоит 300 рублей. Если переплавить его в подковы, то цена будет около 800 рублей. Железо в виде иголок будет стоить уже 250000 рублей. А если делать из него пружинки для швейцарских часов, то этот кусок будет уже стоить 2000000 рублей. Твоя ценность в том, что ты сам из себя сделаешь.*

*Природа не заботится о том, доступны ли человеческому восприятию ее скрытые причины и способы действия.*

*Галилей*

## **ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ И ДОКЛАДОВ**

1. Парадокс близнецов.
2. Принцип относительности.
3. Опыты Майкельсона - Морли.
4. Релятивистская динамика.
5. Можно ли передать информацию со скоростью, большей скорости света в вакууме?
6. Могут ли частицы двигаться со скоростью, большей скорости света в вакууме?

7. Нет никакой разницы между временем и любым из трех измерений пространства, за исключением того, что именно вдоль него движется наше сознание? А как думаете вы?
8. Нулевой закон Ньютона гласит, что масса не создается и не уничтожается (закон сохранения массы) Так ли это?
9. Каким «видел» бы мир объект, летящий со скоростью света?
10. Если бы нейтрино двигался быстрее света, то какие законы нам бы пришлось пересмотреть?
11. Почему  $E = mc^2$  — это лишь часть описания происходящего?
12. Способы получения голограмм.
13. Оптические явления в атмосфере.
14. Жидкие кристаллы в технике.
15. Какими свойствами обладает время; пространство?
16. Почему время отличается от пространства по своим свойствам?
17. Современные источники света: физика и экономика.
18. Два одинаковых шарика из пластилина движутся навстречу друг к другу с одинаковыми скоростями. Чему равна масса образовавшегося шарика? Куда делась их кинетическая энергия?
19. Как действует цифровой фотоаппарат?
20. Действительно ли летящая почти со скоростью света иголка может уничтожить Землю?
21. Почему в пространстве путешествовать можно, а во времени - нельзя?

#### **Историческая справка.**

*Нет студента, не мечтающего о девушке, с которой между двумя поцелуями можно было бы, и поговорить о теории относительности!*

1. Как-то английского ученого Артура Эддингтона спросили:

- Сэр, правда ли, что Вы один из трех человек в мире, кто понимает теорию относительности Эйнштейна?

Наступила длительная пауза – ученый явно затруднялся с ответом и спрашивающий попытался исправить положение.

- Ничего, ничего, – прервал его Эддингтон, – просто я задумался, пытаюсь вспомнить, кто же этот третий.

2. В 1930 году в Германии вышла книга с критикой теории относительности под заглавием «Сто профессоров доказывают, что Эйнштейн неправ». Узнав об этом, Эйнштейн только пожал плечами: «Сто? Зачем так много? И одного было бы достаточно».

3. Однажды Эйнштейн пришел на премьеру фильма Чаплина, толпа приветствовала их с невероятным энтузиазмом. Еще не привыкший к славе ученый спросил: «Что все это значит?» «Абсолютно ничего», – ответил Чаплин.

4. В Египте времен царя Птолемея было два вида дорог: одни для обычного люда и другие, более короткие и удобные, - для царя и его курьеров. Решив как-то изучить геометрию, Птолемей обнаружил, что это не такое простое дело. Тогда он призвал к себе Евклида и спросил, нет ли более легкого пути для ее изучения.

- В геометрии нет царских путей! - гордо ответил Евклид.

**Дополнительная информация.** С понимания того, что свет также подчинен силам тяготения, и начинается предыстория черных дыр, история предсказаний их поразительных

свойств. Сила тяготения на поверхности звезды с радиусом, равным гравитационному радиусу, должна стать бесконечно большой, так же, как и бесконечно большим должно быть ускорение свободного падения. К чему это может привести? Сферическое тело, радиус которого равен гравитационному радиусу и меньше, не может находиться в покое, должно сжиматься к центру. Физики называют это явление релятивистским коллапсом. Самое странное в черных дырах то, что на самом деле они - просто пустое пространство, за исключением сингулярности в центре. Все, что мы понимаем, это то, что сингулярность искажает пространство-время таким образом, что возникает окружающий ее горизонт. После пересечения горизонта у вас нет больше шансов остановить свое падение.

Очень интересно рассмотреть простейшее периодическое движение тела в поле черной дыры по круговой орбите. Чем ближе к центру тяготения, тем больше скорость движущегося по окружности тела. На окружности, удаленной на полтора гравитационных радиуса, скорость обращающегося тела достигает световой. На еще более близкой к черной дыре окружности движение его вообще невозможно, ибо для этого ему потребовалась бы скорость больше скорости света. Оказывается, в реальной ситуации движение по окружности вокруг черной дыры невозможно и на больших расстояниях, начиная с трех гравитационных радиусов, когда скорость движения составляет всего половину скорости света. Дело в том, что на расстояниях меньше трех гравитационных радиусов движение по окружности неустойчиво. Малейшее возмущение, сколько угодно малый толчок заставят вращающееся тело уйти с орбиты и либо упасть в черную дыру, либо улететь в пространство. Но, пожалуй, самое интересное и необычное в новой небесной механике - это возможность гравитационного захвата черной дырой тел, прилетающих из космоса. Когда звезда приближается к черной дыре, части звезды, находящиеся ближе к черной дыре, притягиваются ею сильнее, и звезду начинает растягивать в разные стороны. Приблизившаяся к горизонту черной дыры звезда в конечном итоге будет разорвана на куски. Однако при падении в черную дыру материя может создавать между собой трение и нагреваться. Конечным результатом этого трения становится излучение. Если темпы аккреции будут достаточно велики, то давление исходящего излучения потенциально будет способно уберечь дополнительную окружающую материю от падения. Когда сверхмассивная черная дыра поглощает двойную звездную систему, то одна звезда поглощается черной дырой, а вторая выстреливает в сторону, словно из огромной рогатки. Просто представьте себе огромный огненный шар газа, который в 4 раза больше нашего Солнца, мчащийся на скорости миллионы километров в час! Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение черной дыры запросто может сдуть толстый слой атмосферы с планет-гигантов в радиусе 70 световых лет. У многих из наиболее массивных черных дыр во Вселенной, обладающих массой миллиардов солнц, наблюдается максимально возможный показатель аккреции. Черная дыра с массой, равной массе наблюдаемой части Вселенной, будет иметь размер, сравнимый с размером видимой части Вселенной, при средней плотности всего лишь порядка  $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>! Характер расширения Вселенной более всего соответствует пограничному случаю между открытой и закрытой Вселенными, который носит название плоской Вселенной, и если источником гравитационного притяжения служит материя, то расширение Вселенной будет в этом случае происходить замедляющимися темпами, но никогда не остановится.

**Дополнительная информация.** Синхронизация – приведение двух или нескольких процессов к синхронности, когда одинаковые или соответствующие элементы процессов совершаются с неизменным сдвигом по фазе друг относительно друга или одновременно. Синхронизация, присущая Вселенной, проявляется даже в нашей повседневной жизни:

- в свечении светлячков;
- в движении планет и астероидов;
- в ритмичном биении наших сердец;
- в установке часов по сигналам точного времени;
- в сверхпроводниках, триллионы электронов в которых маршируют в ногу;

- в совпадении речи оратора и переводчика при синхронном переводе;
- в движениях танцовщиц в кордебалете;
- в точном соответствии зрительных и слуховых образов в кино;
- в выравнивании напряжений генераторов в электроэнергетической системе;
- в технологическом процессе, когда несколько станков выполняют заданную заранее последовательность операций в строго определенные моменты времени;
- в синхронизации строчной и кадровой разверток в иконоскопе и кинескопе;
- в совокупности алгоритмов, которые позволяют сохранять некоторые информационные объекты в одном и том же состоянии на различных устройствах и в разные промежутки времени даже при условии изменения в одном источнике;
- и во многих других явлениях.

Каких именно?

*В небе тают облака,  
И, лучистая на зное,  
В искрах светится река,  
Словно зеркало стальное.  
Ф.И. Тютчев*

Каких процессов синхронизацию в природе обнаружил поэт?

*Лучше идти к цели со скоростью черепахи, чем со скоростью  
света придумывать оправдания, почему ты стоишь на месте.*

*Бодо Шефер*

*«В теории относительности Эйнштейна наблюдатель — это человек,  
который отправляется на поиски истины, вооруженный мерной  
рейкой. В квантовой теории он отправляется с решетом».*

*Сэр Артур Эддингтон*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Основы методики преподавания физики в средней школе / В.Г. Разумовский и др.; Ред. А.В. Перышкин. – М.: Просвещение, 1984.
2. А.П. Рымкевич, П.А. Рымкевич. Сборник задач по физике для 8 – 10 классов средней школы. – М.: Просвещение, 1978
3. В.А. Касьянов. Физика. 10, 11 кл. – М.: Дрофа, 2002.
4. М.Е. Тульчинский. Качественные задачи по физике в средней школе. - М.: Просвещение, 1972.
5. В.А. Буров, Б.С. Зворыкин, А.П. Кузьмин и др. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы. - М.: Просвещение, 1972.
6. Д. Джанколи. Физика. - М.: Мир, 1989.
7. А.А. Найдин. Использование обобщающих таблиц при формировании понятий. Физика в школе, 3 (1989).
8. О.Я. Савченко. Задачи по физике. Новосибирский государственный университет, 1999.
9. Н.В. Любимов, С.М. Новиков. Знакомимся с электрическими цепями. – М.: Наука, 1972.
10. А.А. Найдин. Обобщающий урок по квантовой физике // Физика в школе, № 2, 1991.
11. Дж. Орир. Физика: Пер. с англ.-М.: Мир, 1981.
12. В.И. Лукашик. Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Просвещение, 1981.
13. А.М. Прохоров и др. Физический энциклопедический словарь – М.: Советская энциклопедия, 1983.
14. Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев. Физика: Учебное пособие: В 3 кн. Кн. 3. Строение и свойства вещества. – М.; ФИЗМАТЛИТ, 2004.

15. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. Физика: Молекулярная физика и термодинамика: Учебник для 10-11 классов с углубленным изучением физики. – М.: Дрофа, 2005.
16. Исаков А. Я. Физика. Решение задач ЕГЭ, часть 1 - 9. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012.
17. Горлач В. В. Методы решения физических задач. – М.:ООО Юрайт, 2024.
18. К о н д р а т ь е в А. С., У з д и н В. М. Физика. Сборник задач. —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 392 с. — ISBN 5-9221-0579-5.
19. Личный сайт Найдина Анатолия Анатольевича. <https://naidin.ru>