

Кравченко Игорь Игоревич
Кравченко Ивета Николаевна

Физика для всех:
от оптики до квантовой физики

*Электронный иллюстрированный справочник
по физике*

Оглавление

I	Оптика	4
1	Геометрическая оптика	5
1	Свет. Луч света	6
2	Отражение света. Зеркало	7
3	Преломление света	8
4	Полное внутреннее отражение	9
5	Линза	10
6	Ход лучей в тонкой линзе	11
7	Построение изображения в линзе	12
8	Глаз	13
2	Волновая оптика	14
9	Сложение световых волн	15
10	Интерференция света	16
11	Дифракция света	17
12	Дисперсия света	18
II	Теория относительности	19
3	Основы специальной теории относительности (СТО)	20
13	Принципы СТО	21
14	Основные формулы СТО	22
III	Квантовая физика	23
4	Фотоны	24
15	Фотоэффект	25
16	Формулы для фотоэффекта	26
17	Давление света	27
5	Физика атома	28
18	Постулаты Бора	29
19	Спектры	30
6	Физика атомного ядра	31
20	Атомное ядро	32
21	Радиоактивность. Ядерные реакции	33

IV	Приложение	34
7	Как решать задачи по физике	35
22	Как находить ответ к задаче по физике	36
23	Решение специфических задач по физике	37

Часть I

Оптика

Глава 1

Геометрическая оптика

1 Свет. Луч света

Видимый свет (кратко — свет) есть частный случай электромагнитных волн (свет воспринимается человеческим глазом). Частоты видимого света лежат в диапазоне примерно от $4 \cdot 10^{14}$ Гц до $8 \cdot 10^{14}$ Гц (длины волн этого диапазона в *вакууме* принимают значения примерно от 380 нм до 780 нм).

Источник света — это тело, испускающее свет. Если размеры источника света (кратко — источника) много меньше расстояния до освещаемого тела, то такой источник считают *точечным*. (Если данное тело воспринимается как черное, то это значит, что это тело не излучает свет в направлении наблюдателя.)

Луч света — это линия, вдоль которой распространяется свет (передается энергия от источника). На первых порах луч света можно представлять себе просто как узкий пучок света (наподобие солнечного луча).

Закон прямолинейного распространения света. В прозрачной однородной среде¹ лучи света являются прямыми линиями.

На рис. 1 показан ход луча света в чистой равномерно прогретой воде.

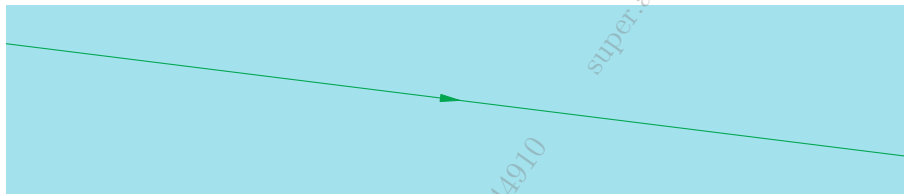


Рис. 1. Прямолинейное распространение света

Прямолинейное распространение света приводит к образованию тени от непрозрачного тела. *Тень* — это область пространства, в которую не попадает свет от источника. Если непрозрачное тело освещают точечным источником, то для нахождения области тени от источника проводят лучи, касающиеся поверхности непрозрачного тела. Если непрозрачное тело освещается *протяженным* источником, то возникает также *полутень* — область пространства, в которую попадает свет только от части источника.

Закон независимости лучей света. При пересечении лучей света характер их распространения не изменяется. Каждый луч освещает пространство так, как если бы других лучей вообще не было.

На рис. 2 показан ход двух пересекающихся лучей света в прозрачной однородной среде.

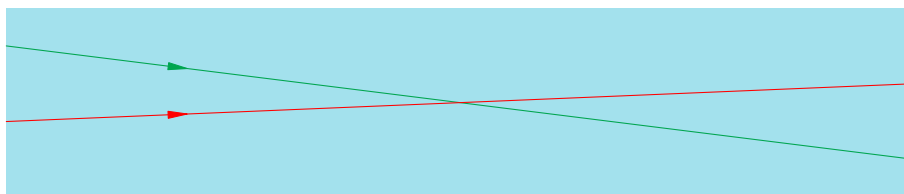


Рис. 2. Независимость лучей света

¹Прозрачная среда — это среда, в которой может распространяться свет; однородная среда — это среда с одинаковыми свойствами в каждой ее точке.

2 Отражение света. Зеркало

Отражение света — это изменение направления хода луча света, падающего на границу раздела двух сред, при котором луч возвращается в исходную среду.

На рис. 1 показано отражение узкого пучка света.

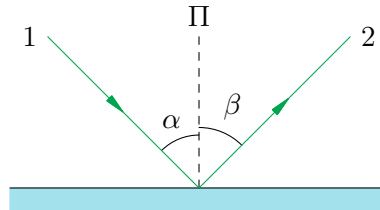


Рис. 1. Отражение света

Падающий луч 1 образует угол α (угол падения) с перпендикуляром П к поверхности отражения в точке падения. Отраженный луч 2 образует угол β (угол отражения) с упомянутым перпендикуляром П. (Углы падения и отражения отсчитываются от перпендикуляра к отражающей поверхности!)

Закон отражения. Угол падения равен углу отражения:

$$\alpha = \beta, \quad (1)$$

причем падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к поверхности отражения в точке падения лежат в одной плоскости.

Пусть имеются две отражающие поверхности, на каждую из которых падает широкий пучок света (рис. 2).

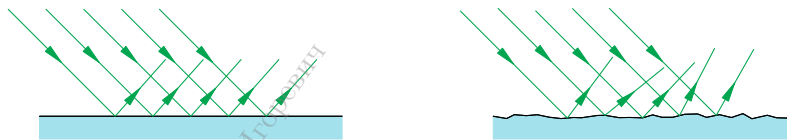


Рис. 2. Зеркальное и рассеянное отражения

При отражении от *зеркальной* поверхности (*зеркала*) пучок света (множество параллельных лучей) после отражения сохраняет свою параллельность: отражённые лучи также идут параллельно (рис. 2, слева). *Матовая* (шероховатая) поверхность дает *рассеянный свет* — лучи лучи такого света идут во всевозможных направлениях (рис. 2, справа).

Особый интерес представляет отражение в *плоском* зеркале. *Изображение* произвольного предмета в плоском зеркале *симметрично предмету относительно зеркала* (рис. 3; предмет обозначен буквой П, изображение — буквой И).



Рис. 3. Изображение не зависит от расположения и размеров зеркала

3 Преломление света

Преломление света — это изменение направления хода луча света при прохождении границы двух прозрачных сред.

Пусть два луча света, идущих в воздухе, падают под одинаковыми углами на поверхность воды и стекла соответственно (рис. 1).

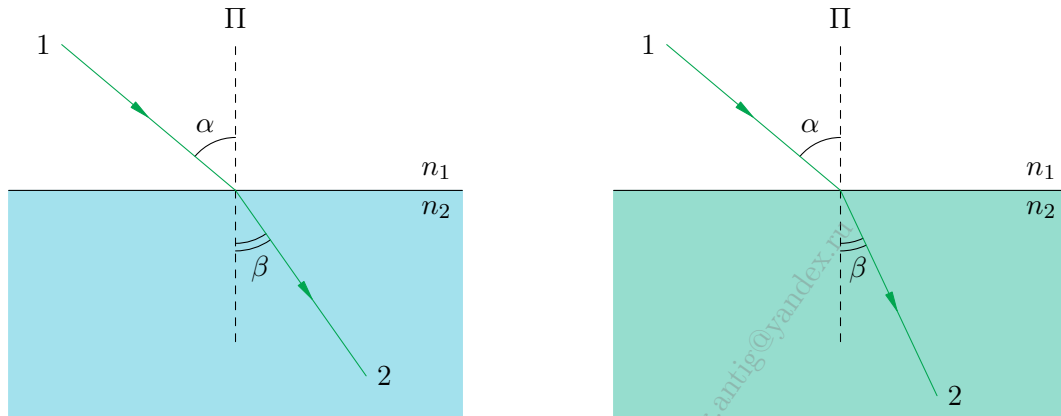


Рис. 1. Преломление света

На рис. 1 (слева) показано преломление луча при его переходе из воздуха в воду, а на рис. 1 (справа) — его преломление при переходе из воздуха в стекло.

Показатель преломления (n) — это характеристика способности среды преломлять луч (см. справочные таблицы):

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, v — скорость света в среде¹.

Показатель преломления — это, как говорят, *оптическая плотность* среды. Так как на рис. 1 стекло преломляет падающий луч сильнее, чем вода (при прочих равных условиях), то говорят, что стекло является оптически более плотной средой, чем вода (в данном случае показатель преломления стекла больше показателя преломления воды).

В обоих случаях, проиллюстрированных на рис. 1, луч 1 называется *падающим лучом* (он идет в среде с показателем преломления n_1), а угол α между падающим лучом и *перпендикуляром* Π к границе раздела сред в точке падения называется *углом падения*. Луч 2, называется *преломленным лучом* (он идет в среде с показателем преломления n_2), а угол β между преломленным лучом и упомянутым перпендикуляром Π называется *углом преломления*.

Сравнивая ход луча 1 и ход луча 2 на рис. 1, можно заключить: чем оптически *плотнее* среда, тем *ближе* к перпендикуляру Π идет луч в этой среде.

Закон преломления можно сформулировать так:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (2)$$

причем падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения лежат в одной плоскости.

¹При переходе света (и вообще любой электромагнитной волны) из одной среды в другую частота света остается неизменной (частота света задается его источником).

4 Полное внутреннее отражение

Пусть точечный источник света находится в воде, над поверхностью которой находится воздух (рис. 1).

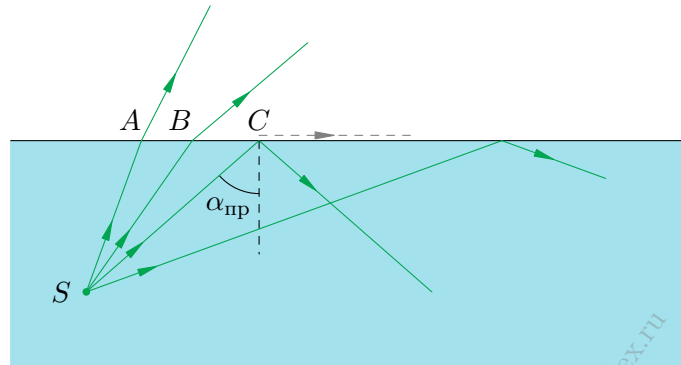


Рис. 1. Полное внутреннее отражение

Источник S испускает лучи во все стороны (на рисунке показаны некоторые из них). Луч SA , падающий на поверхность воды под сравнительно малым углом¹, как и следовало ожидать, преломляется, выходя в воздух². Угол падения луча SB больше; этот луч также выходит в воздух, но после преломления (в воздухе) луч идет ближе к поверхности воды.

С увеличением угла падения преломленный луч идет все ближе к поверхности воды, и наступает такой момент, когда угол преломления становится равным 90° : этому случаю соответствует луч SC , который после преломления должен был бы пойти параллельно поверхности воды (серый штриховой луч). В действительности падающий луч SC отражается обратно в воду. При дальнейшем увеличении угла падения луч уже не выходит из воды.

Рассмотренное явление называют *полным внутренним отражением*. Угол падения, которому соответствует угол преломления 90° , называется *предельным углом полного внутреннего отражения* (обозначается $\alpha_{\text{пр}}$; см. рис. 1). При углах падения, равных или превышающих $\alpha_{\text{пр}}$, оптически более плотная среда не выпускает наружу лучи света. (Угол $\alpha_{\text{пр}}$ вычисляют из закона преломления, рассматривая случай хода луча из более плотной среды в менее плотную с углом преломления 90° : $n_1 \sin \alpha_{\text{пр}} = n_2 \sin 90^\circ$, где n_1 — показатель преломления более плотной среды, n_2 — показатель преломления менее плотной среды.)

Задача. Найти показатель преломления рубина, если предельный угол полного отражения для рубина равен 34° .

Решение. Если нет специальных оговорок, то оптически менее плотной средой является воздух (или вакуум) с показателем преломления, равным единице. В таком случае рассмотрение хода луча с углом падения, равным $\alpha_{\text{пр}}$, позволяет записать закон преломления так: $n_p \sin \alpha_{\text{пр}} = n_v \sin 90^\circ$, где n_p и n_v — показатели преломления рубина и воздуха соответственно.

Отсюда искомый показатель преломления равен:

$$n_p = \frac{n_v \sin 90^\circ}{\sin \alpha_{\text{пр}}} = \frac{1 \cdot \sin 90^\circ}{\sin 34^\circ} \approx 1,79.$$

¹Угол падения отсчитывается от перпендикуляра к границе раздела сред в точке падения!

²Лучи SA и SB также частично отражаются назад в воду (на рисунке не показано).

5 Линза

Линза — это прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями. Выделяют два вида линз¹.

1. **Собирающая:** толщина середины линзы *больше* толщины ее края. На рис. 1 показаны все возможные собирающие линзы.



Рис. 1. Собирающие линзы

2. **Рассеивающая:** толщина середины линзы *меньше* толщины ее края. На рис. 2 изображены все возможные рассеивающие линзы.



Рис. 2. Рассеивающие линзы

Пусть имеются две линзы; на них падают параллельные пучки света (рис. 3).



Рис. 3. Действия собирающей и рассеивающей линз

Собирающая линза преобразует параллельный пучок света в *сходящийся* пучок (рис. 3, слева), а рассеивающая — в *расходящийся* (рис. 3, справа).

Линзу можно считать *тонкой*, если ее *толщина* *много меньше* *характерных расстояний в задаче*. На рис. 4 показаны обозначения тонких линз.

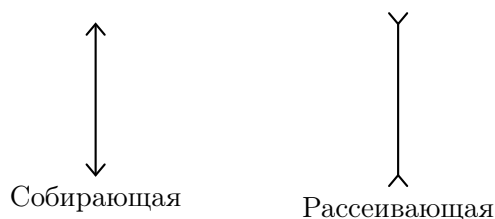


Рис. 4. Обозначения тонких собирающей и рассеивающей линз

¹Далее предполагается, что показатель преломления линзы *больше* показателя преломления окружающей среды.

6 Ход лучей в тонкой линзе

Пусть имеются два параллельных пучка света: один падает на тонкую собирающую линзу, другой — на тонкую рассеивающую (рис. 1).

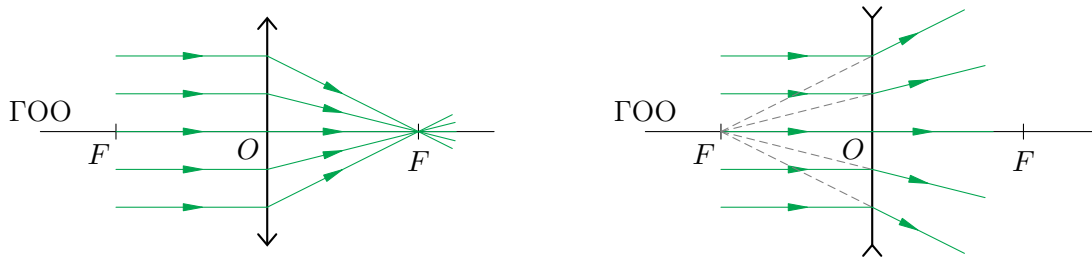


Рис. 1. Фокусировка и рассеяние параллельного пучка света

В случае собирающей линзы (рис. 1, слева) пучок света, параллельный *главной оптической оси* ГОО (оси симметрии линзы), после прохождения линзы собирается в ее правом *фокусе* F (любая линза имеет два фокуса — слева и справа на ГОО; обычно фокусы расположены на одинаковых расстояниях от линзы). Рассеивающая же линза (рис. 1, справа) преобразует такой пучок света в расходящийся пучок, как бы (мнимо) выходящий из левого фокуса F линзы. Точки O на рис. 1 называются *оптическими центрами* линз. Расстояния OF называются *фокусными расстояниями* линз (в формулах обозначаются F).

Падающие на линзы лучи на рис. 1 удобно называть «нормальными» (они как бы падают на линзу под *прямым* углом).

Оптическая сила (D [дптр]) — это характеристика преломляющей способности линзы:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (1)$$

Чем больше оптическая сила линзы, тем ближе к линзе фокусируется (возможно, мнимо) пучок света, падающий на нее «нормально» (см. рис. 1).

Правила хода лучей в линзе можно сформулировать так¹.

1. «Нормальный» луч после преломления идет через фокус (рис. 2, слева).
2. Луч, падающий в оптический центр, не преломляется (рис. 2, посередине).
3. Если луч падает на линзу *наклонно* («ненормально»), то для построения его дальнейшего хода через центр линзы проводят *побочную оптическую ось* ПОО, параллельную этому лучу, и находят *побочный фокус* P , находящийся в точке пересечения ПОО с *фокальной плоскостью* ФП, проходящей через фокус F перпендикулярно ГОО. Преломленный луч идет через этот побочный фокус (рис. 2, справа).

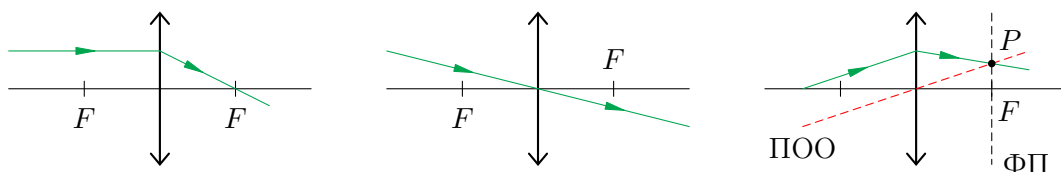


Рис. 2. К правилам хода лучей в линзе

¹В случае рассеивающей линзы выражение «идет через» понимать как «мнимо идет через».

7 Построение изображения в линзе

Теорема об изображении. Если перед линзой¹ находится светящаяся точка S (*предмет*), то после преломления в линзе все лучи (или их продолжения) пересекаются в одной точке S' , называемой *изображением* точки S .

Для построения изображения любой точки (предмета) достаточно найти точку пересечения (возможно, мнимого) каких-либо *двух* лучей, вышедших из этой точки (рис. 1).

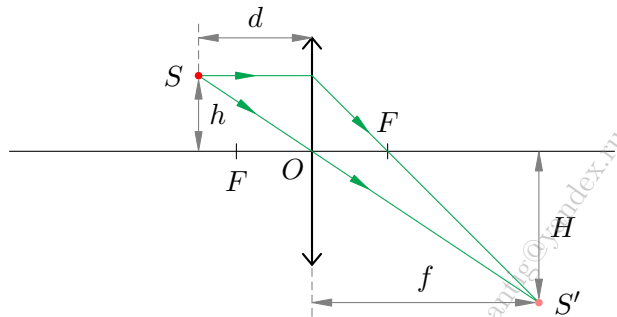


Рис. 1. Построение изображения точки

Расстояние от предмета до линзы обозначают d , расстояние от изображения до линзы обозначается f . Через h и H обозначены как бы высоты предмета и изображения соответственно.

Формула линзы есть следующее соотношение:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1)$$

при этом:

- F считается *отрицательным*, если линза *рассеивающая*;
- f считается *отрицательным*, если изображение *мнимое*.

Увеличение линзы находят так:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \quad (2)$$

Изображение может быть (**характеристики изображения**):

- 1) увеличенным или уменьшенным;
- 2) прямым или обратным;
- 3) действительным или мнимым.

Так, изображение S' на рис. 1 является как бы увеличенным ($H > h$), как бы обратным (изображение находится по другую сторону от главной оптической оси по сравнению с предметом S) и действительным (изображение дается пересечением действительных преломленных лучей).

Чтобы построить изображение произвольного предмета в линзе, нужно найти изображение каждой точки этого предмета.

¹Далее предполагается, что речь идет о тонких линзах.

8 Глаз

Пусть *нормальный* глаз рассматривает сначала очень удаленный предмет, а затем — предельно близкий, который можно четко рассмотреть (рис. 1).

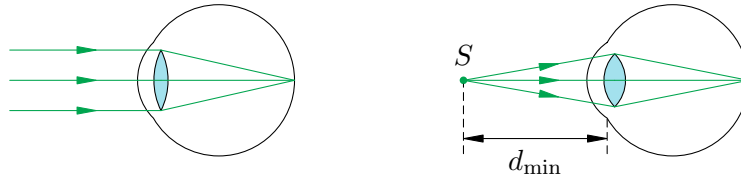


Рис. 1. Рассматривание очень далекого предмета и предельно близкого

Если предмет очень далеко от глаза (рис. 1, слева), то до глаза от предмета доходят параллельные лучи, преломляющиеся *хрусталиком* (обозначен светло-голубым цветом), который является собирающей линзой (хрусталик может менять свою кривизну — тем самым меняется его фокусное расстояние). Изображение предмета (точка пересечения лучей) получается на *сетчатке* (задней внутренней поверхности глаза). В этом случае глазные мышцы не напряжены, а хрусталик не деформирован.

Если предмет рассматривается глазом с предельно близкого расстояния d_{\min} (рис. 1, справа), то хрусталик максимально деформирован (искривлен). Лучи после прохождения хрусталика также собираются в одной точке на сетчатке глаза (при дальнейшем приближении предмета к глазу преломленные лучи уже не фокусируются в одну точку — изображение становится размытым).

Расстояние наилучшего зрения для нормального глаза составляет 25 см. На таком расстоянии предмет можно рассматривать без напряжения довольно долгое время (хрусталик деформирован не сильно).

Близорукий глаз фокусирует параллельные лучи *перед* сетчаткой — изображение удаленного предмета оказывается размытым (рис. 2, слева).



Рис. 2. Близорукость и ее коррекция

Близорукость корректируют *рассеивающей* линзой (рис. 2, справа).

Дальнозоркий глаз фокусирует параллельные лучи *за* сетчаткой — изображение удаленного предмета оказывается размытым (рис. 3, слева).

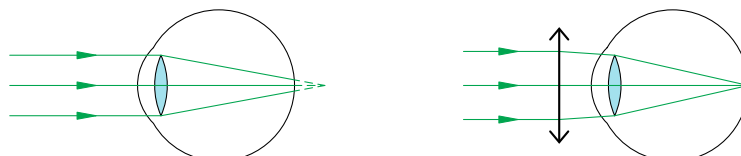


Рис. 3. Дальнозоркость и ее коррекция

Дальнозоркость корректируют *собирающей* линзой (рис. 3, справа).

Глава 2

Волновая оптика

9 Сложение световых волн

Свет — это электромагнитные *волны*, поэтому распространение света можно представлять себе как поток волн. (Сказанное далее относится к волнам любой природы, речь о световых волнах идет для определенности.)

Принцип суперпозиции волн. При наложении волн света в некоторой точке пространства их напряженности (индукции) складываются.

Имеются два важных случая сложения волн (рис. 1).

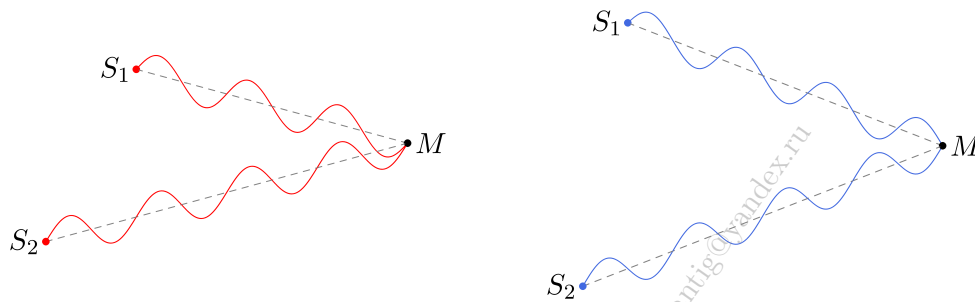


Рис. 1. Наложения двух волн в точке пространства

Пусть точечные источники S_1 и S_2 являются *когерентными* (то есть они излучают свет *одинаковой частоты*¹ и имеют *постоянную разность фаз*; в данном случае разность фаз равна нулю — источники «колеблются» одинаково). Волны от этих источников накладываются друг на друга в точке M .

На рис. 1 (слева) разность расстояний $\Delta = S_2M - S_1M$ (*разность хода*) равна длине волны ($\Delta = \lambda$). В этом случае волны в точке M складываются *в фазе* — в точке M достигается *максимально возможная освещенность* от данных источников.

Условие максимума. При наложении когерентных волн освещенность в данной точке максимальна, если разность хода равна *целому* числу длин волн:

$$\Delta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (1)$$

На рис. 1 (справа) разность хода $\Delta = S_2M - S_1M$ составляет половину длины волны ($\Delta = \lambda/2$). Теперь волны в точке M складываются *в противофазе* — в точке M достигается *минимально возможная освещенность* от данных источников.

Условие минимума. При наложении когерентных волн освещенность в данной точке минимальна, если разность хода равна *полуцелому* числу длин волн:

$$\Delta = m\lambda + \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (2)$$

Если разность хода принимает какое-то иное значение, не равное целому или полуцелому числу длин волн, тогда волны, приходящие в данную точку, создают в ней колебания с некоторой промежуточной освещенностью (больше минимально возможной освещенности, но меньше максимально возможной).

¹Свет одной частоты (одного цвета) называется *монохроматическим* светом. Белый свет не является монохроматическим: он представляет собой смесь волн с разными частотами (эти частоты отвечают цветам от красного до фиолетового).

10 Интерференция света

Интерференция света — это сложение волн света в пространстве, при котором возникает *интерференционная картина*, то есть фиксированное, не зависящее от времени распределение мест максимумов и минимумов освещенности¹. *Устойчивая* интерференционная картина будет образована при наложении волн от *когерентных* источников.

На рис. 1 показана интерференционная картина, созданная наложением волн двух когерентных точечных источников.

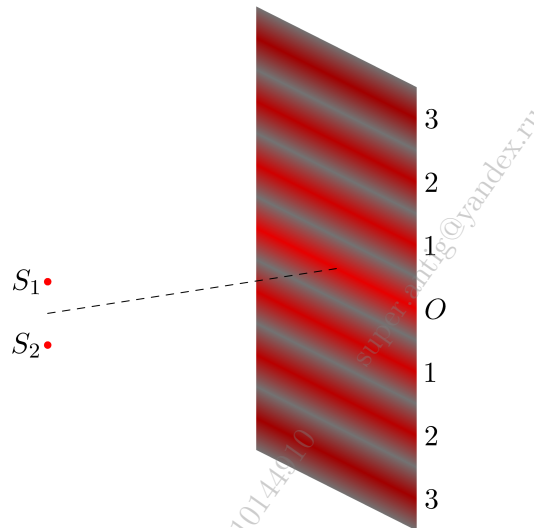


Рис. 1. Интерференция волн двух точечных источников

Источники S_1 и S_2 (красного света) находятся достаточно далеко от серого экрана (непрозрачной плоскости), на котором наблюдается картина. Ось симметрии интерференционной картины отмечена штриховой линией.

В этом случае интерференционная картина представляет собой практически чередование как бы светлых и темных полос (*интерференционные полосы*). Светлые полосы — это сильно освещенные места, или *интерференционные максимумы* (на рис. 1 обозначены красным цветом); темные полосы — это слабо освещенные места, *интерференционные минимумы* (на рис. 1 обозначены серым цветом). При переходе от некоторой полосы к соседней освещенность меняется плавно.

На центральной светлой полосе², обозначенной буквой O , расположены так называемые *центральные максимумы*. Ближайшие к центральной (сверху и снизу) две соседние светлые полосы — это полосы первых максимумов (обозначены цифрами 1). Сразу за ними (с удалением от центра картины) следуют полосы вторых максимумов, обозначенные цифрами 2 (и так далее: цифры 3 обозначают, соответственно, полосы третьих максимумов).

По мере удаления от центра картины она становится все менее контрастной и на некотором расстоянии от центра вообще исчезает. Если бы источники на рис. 1 излучали белый свет, то полосы максимумов (кроме центральной полосы) состояли бы из полосок всех цветов радуги.

¹Вообще интерферировать могут волны любой природы.

²Через нее проходит ось симметрии картины.

11 Дифракция света

Дифракция света — это огибание световыми волнами краев препятствия. (Дифракция свойственна волнам любой природы.)

Пусть волна падает на экран с достаточно узкой щелью (рис. 1).

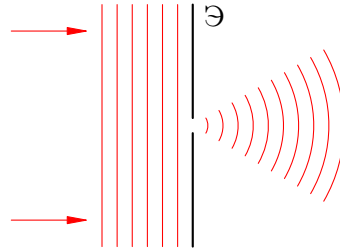


Рис. 1. Дифракция на щели

В данном случае на экран \mathcal{E} слева падает *плоская* волна: ее «гребни» выстроены вдоль параллельных линий (обозначенных красным цветом). После прохождения щели волна становится практически *сферической*: «гребни» лежат на дугах концентрических окружностей (волна расходится)! Расходящаяся волна заходит в область предположительной тени от экрана.

Пусть на **дифракционную решетку** — совокупность узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками, — падает плоская волна света (рис. 2).

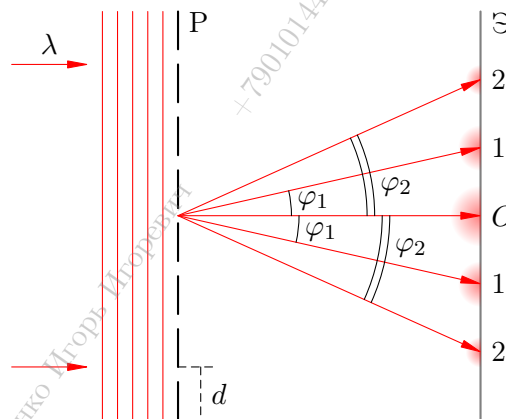


Рис. 2. Дифракция на решетке

На решетку P с периодом¹ d падает плоская волна красного света с длиной волны λ . На экране \mathcal{E} за решеткой наблюдается интерференционная картина — чередование максимумов и минимумов интерференции (места сильной освещенности отмечены красными полукругами — это центральный максимум O (в центре картины), а также первые и вторые максимумы, расположенные симметрично относительно максимума O и обозначенные цифрами 1 и 2). Направления, например, на первый и второй максимумы (относительно направления на центр картины) задают углы φ_1 и φ_2 соответственно.

Формула дифракционной решетки описывает положения максимумов (с номерами m) на экране:

$$d \sin \varphi_m = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (1)$$

¹Период решетки есть ширина щели плюс ширина непрозрачного промежутка.

12 Дисперсия света

Прежде всего нужно сказать, что белый (солнечный) свет является смесью световых пучков разных цветов, а именно — смесью волн всего видимого диапазона (от красного до фиолетового).

На рис. 1 показан *спектр* белого света — полоса со всеми цветами радуги, плавно переходящими друг в друга.



Рис. 1. Спектр белого света

Каждому цвету соответствует волна определенной частоты в диапазоне видимого света (волны с частотами примерно от $4 \cdot 10^{14}$ Гц до $8 \cdot 10^{14}$ Гц). Красный свет имеет наименьшую частоту, а фиолетовый — наибольшую.

В спектре белого света удобно выделять семь цветов — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый¹. Так цвета перечислены в *порядке возрастания частоты* света (см. рис. 1).

Дисперсия света — это зависимость преломляемости луча света от его частоты (на данной границе сред).

Пусть узкий луч солнечного света падает на стеклянную призму (рис. 2).

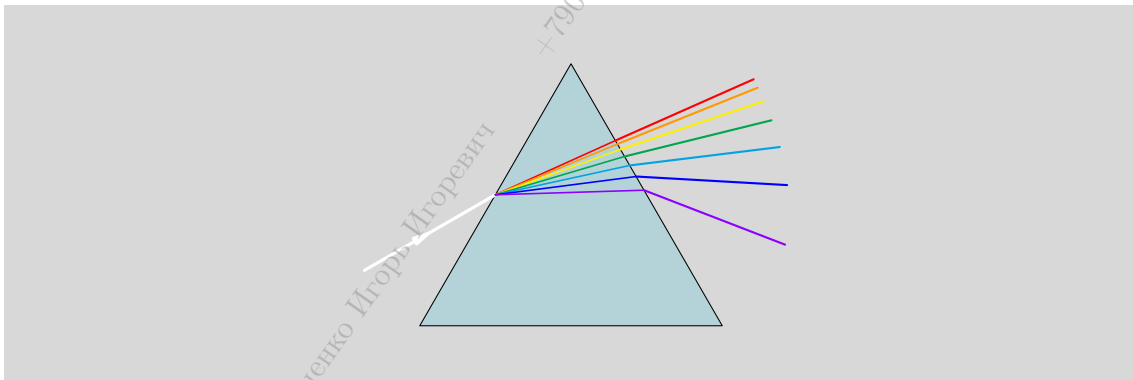


Рис. 2. Дисперсия света

Можно считать, что на призму падают разноцветные лучи, смешанные в один луч (эту «смесь» глаз воспринимает как белую). Преломление цветных лучей при вхождении в призму оказывается разным (на рис. 2 ход лучей показан качественно): *при переходе от красного цвета к фиолетовому (при увеличении частоты света) отклонение цветного луча увеличивается*.

Зависимость показателя преломления среды от частоты света имеет вид²:

$$n \sim \nu. \quad (1)$$

¹Для запоминания цветов можно использовать такое правило: «каждый охотник желает знать, где сидит фазан» (первые буквы слов фразы соответствует первым буквам цветов).

²Эта зависимость («чем больше ν , тем больше n ») работает на очень малых изменениях частоты, но ей можно пользоваться для качественных ответов: например, показатель преломления для синего цвета больше показателя преломления для зеленого и т. д.

Часть II

Теория относительности

Глава 3

Основы специальной теории относительности (СТО)

13 Принципы СТО

Экспериментально установлено, что *свет распространяется в вакууме только с одной скоростью, равной примерно:*

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (1)$$

Отличие распространения света от, например, движения тел «в обычной жизни» состоит в том, что *скорость света от любых источников в вакууме одинакова для всех наблюдателей в любых инерциальных системах отсчета.*

Пусть имеются два наблюдателя, измеряющих скорость света от одного источника (рис. 1; этот рисунок носит иллюстративный характер).

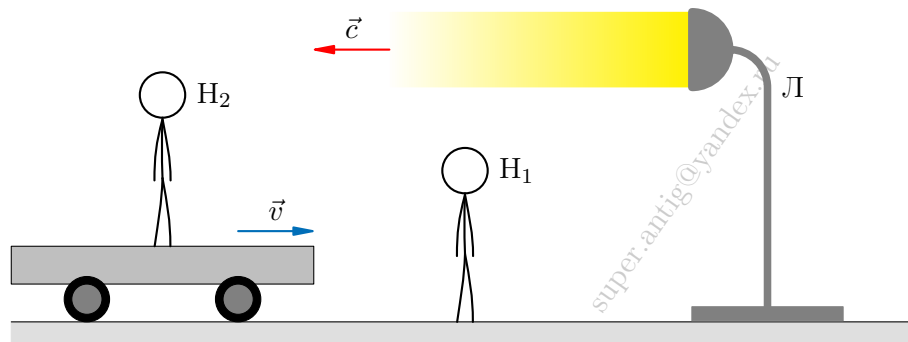


Рис. 1. Наблюдатели фиксируют одинаковую скорость света

Пусть наблюдатели и источник света располагаются вблизи планеты без атмосферы (вокруг вакуум). Наблюдатель H_1 стоит на поверхности планеты, а наблюдатель H_2 стоит на тележке, движущейся с постоянной скоростью \vec{v} (относительно планеты). Источник света — лампа Л.

Оказывается, что приборы каждого из этих наблюдателей показывают одно и то же значение скорости света \vec{c} — свет «проносится» мимо наблюдателя H_2 с такой же скоростью, как и мимо наблюдателя H_1 . Это значит, что аналогия с ветром (как бы дующим из лампы) в случае со светом не работает.

В описанном опыте применительно к свету классическая механика отказывает, так как она предназначена для описания движений тел со скоростями, много меньшими скорости света: классическая механика требует у тела такую скорость v , что $v \ll c$.

Для описания движения любых материальных объектов (в том числе света и тел, скорости v которых не удовлетворяют соотношению $v \ll c$) Эйнштейн предложил новое учение — *специальную теорию относительности (СТО)*. В основе СТО лежат два принципа.

Принцип относительности Эйнштейна. Всякое физическое явление при одних и тех же начальных условиях протекает одинаково в любой инерциальной системе отсчета.

Принцип инвариантности скорости света. В каждой инерциальной системе отсчета свет движется в вакууме с одной и той же скоростью.

Эти принципы называют постулатами Эйнштейна. Одним из удивительных следствий этих постулатов является то, что *скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью движения любого материального объекта* (в том числе физического поля: гравитационного, электромагнитного и т. д.).

14 Основные формулы СТО

Пусть изолированное тело¹ покоится в данной системе отсчета. Согласно Эйнштейну это тело обладает так называемой **энергией покоя**:

$$E_0 = mc^2. \quad (1)$$

Формула (1) утверждает, что любое тело обладает энергией просто благодаря тому, что оно существует. Соотношение (1) называют *формулой Эйнштейна*.

Пусть теперь изолированное тело движется в некоторой системе отсчета. Тогда его **полная энергия**² в этой системе вычисляется по формуле:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

где v — скорость тела.

Выражение для энергии (2) позволяет сделать следующие выводы о возможных скоростях движения материальных объектов.

- При $v \rightarrow c$ полная энергия массивного тела стремится к бесконечности ($E \rightarrow \infty$), что невозможно. Это значит, что *скорость v массивного тела всегда меньше скорости света в вакууме: $v < c$.*
- Энергия безмассовой частицы (например, фотона) по формуле (2) получается нулевой, хотя тот же фотон (как частица света) энергию имеет! Поэтому приходится принять, что *безмассовая частица всегда движется со скоростью света в вакууме*³ (тогда формула (2) просто отказывает — формулы для энергии безмассовых частиц находят в квантовой физике).

Релятивистский импульс⁴ движущегося тела равен:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3)$$

Связь энергии и импульса есть следующее соотношение:

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2. \quad (4)$$

Задача. Мощность общего излучения Солнца $3,83 \cdot 10^{26}$ Вт. На сколько в связи с этим уменьшается каждую секунду масса Солнца?

Решение. С учетом определения мощности энергия, отдаваемая каждую секунду Солнцем, равна: $\Delta E = P \cdot t = 3,83 \cdot 10^{26} \cdot 1 = 3,83 \cdot 10^{26}$ Дж.

Ясно, что «неподвижное» Солнце теряет свою энергию покоя, значит его масса уменьшается (формула (1)). Поскольку в формуле (1) энергия покоя тела прямо пропорциональна его массе, то искомое изменение массы равно:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{3,83 \cdot 10^{26}}{(3 \cdot 10^8)^2} \approx 4,26 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

¹Изолированное тело — это тело, практически не взаимодействующее с другими телами.

²Или просто энергия.

³Согласно СТО даже в среде безмассовая частица движется со скоростью c света.

⁴Релятивистский — значит устанавливаемый в СТО.

Часть III

Квантовая физика

Глава 4

ФОТОНЫ

15 Фотоэффект

Эйнштейн в поисках объяснения результатов опытов по взаимодействию света¹ с веществом пришел к выводу, что свет (*и электромагнитное излучение вообще*) состоит из отдельных порций — квантов (или, как говорят, *фотонов*)². Таким образом, стали считать, что свет — это поток особых частиц (фотонов), движущихся в вакууме со скоростью c .

Энергия фотона пропорциональна частоте излучения:

$$E_{\text{ф}} = h\nu, \quad (1)$$

где h — *постоянная Планка* (см. справочные таблицы).

Фотоэффект — это вырывание электронов из тела падающим светом. Явление фотоэффекта было исследовано Столетовым с помощью специального устройства, основная часть которого показана на рис. 1.

Главная часть этого устройства состоит из двух металлических пластин — пластина А (анод) и пластина К (катод). К пластинам от батарейки подводится напряжение U (на анод подан «плюс», а на катод — «минус»). В данном случае напряжение U считается положительным (его знак определяется знаком анода).

При освещении катода, например, ультрафиолетовым светом его фотоны (желтые шары) выбивают с катода электроны (синие шары), которые разгоняются электрическим полем (созданным пластинами) в сторону анода. Достигшие анода выбитые электроны (*фотоэлектроны*) устремляются к «плюсу» — через батарейку протекает ток $I_{\text{ф}}$, называемый *фототоком* (потому что его создают фотоэлектроны).

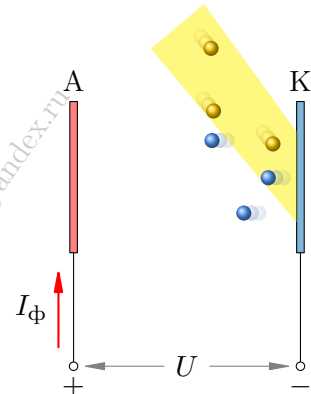


Рис. 1. Фотоэффект

Три закона *фотоэффекта* формулируются так.

- I. Число электронов, вырываемых из катода за секунду, пропорционально мощности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте)³:

$$N_{\text{фэ}} \sim P_{\text{изл}}. \quad (2)$$

- II. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от мощности падающего излучения⁴:

$$E_{\text{к. max}} \sim \nu. \quad (3)$$

- III. Фотоэффект наблюдается только при частотах, больших некоторой частоты $\nu_{\text{кр}}$, называемой *красной границей фотоэффекта* и зависящей от облучаемого вещества:

$$\nu > \nu_{\text{кр}}. \quad (4)$$

¹Здесь и далее любое электромагнитное излучение называется для краткости светом.

²Эйнштейн развил идею Планка (*гипотезу Планка*), которая состоит в том, что свет излучается и поглощается отдельными порциями (квантами).

³Мощность падающего излучения — это отношение суммарной энергии фотонов, попадающих на облучаемое тело, ко времени, за которое эти фотоны попали на тело.

⁴Эту зависимость можно использовать только для качественных ответов: например, чем больше частота излучения, тем больше максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

16 Формулы для фотоэффекта

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта позволяет объяснить все экспериментально установленные законы фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{\text{к. max}}, \quad (1)$$

где $h\nu$ — энергия фотона, $A_{\text{вых}}$ — *работа выхода*¹ (см. справочные таблицы), $E_{\text{к. max}}$ — *максимальная кинетическая энергия* фотоэлектронов.

Формула (1) есть закон сохранения энергии: энергия фотона идет на совершение работы по «вытаскиванию» электрона из вещества и на придание электрону кинетической энергии.

Работа выхода вычисляется через красную границу фотоэффекта²:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}}. \quad (2)$$

Минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ («критическая частота»), при которой еще возможен фотоэффект, есть частота, при которой преломляется полученный из эксперимента график зависимости максимальной кинетической энергии $E_{\text{к. max}}$ фотоэлектронов от частоты ν света (рис. 1, слева; облучаемое вещество не меняется). Ход графика на рис. 1 (слева) объясняется формулой (1), если в ней выразить энергию $E_{\text{к. max}}$ и учесть, что энергия не может быть отрицательна.

Запирающее напряжение (U_z [В]) — это минимальная величина напряжения в опыте по исследованию явления фотоэффекта, при котором фототок равен нулю (это значит, что фотоэлектроны практически достигают анода, но их скорость у анода равна нулю).

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов находится через запирающее напряжение³:

$$E_{\text{к. max}} = eU_z, \quad (3)$$

где e — заряд электрона (см. таблицы).

Запирающее напряжение U_z есть напряжение, при превышении которого появляется фототок (см. график зависимости фототока $I_{\text{ф}}$ от напряжения U при постоянных мощности и частоте света на рис. 1, справа; при достаточно больших положительных напряжениях ток достигает предельной величины $I_{\text{н}}$, называемой *током насыщения*).

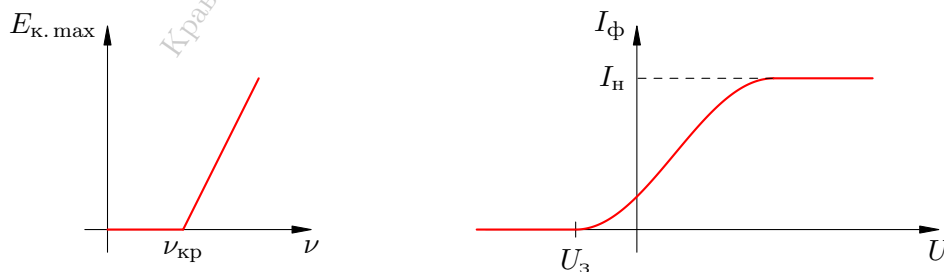


Рис. 1. Зависимости $E_{\text{к. max}}(\nu)$ и $I_{\text{ф}}(U)$ для фотоэффекта

¹Минимальная энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы он покинул вещество.

²Красная граница фотоэффекта ($\nu_{\text{кр}}$) — термин, *не связанный с цветом* света! Для избежания лишних ассоциаций вместо этого термина используют термин «критическая частота».

³Фактически это запись закона изменения энергии: работа электрического поля равна изменению механической энергии тела.

17 Давление света

Опыт показывает, что свет оказывает давление на освещаемую поверхность (подобно тому как поток жидкости давит на стенку, в которую он врзается).

Пусть два одинаковых луча света падают под одинаковыми углами на зеркальную и черную поверхность некоторого тела соответственно (рис. 1).



Рис. 1. Падение света на зеркальную и черную поверхность

Пусть зеркальная поверхность полностью отражает свет (рис. 1, слева), а черная — полностью его поглощает (рис. 1, справа). Оказывается (при прочих равных условиях), *давление света на абсолютно отражающую поверхность в два раза больше его давления на абсолютно поглощающую поверхность.*

Давление света получает простое объяснение, если свет рассматривать как поток частиц (фотонов). Пусть для простоты за одну секунду на поверхность тела падает только один фотон (рис. 2).

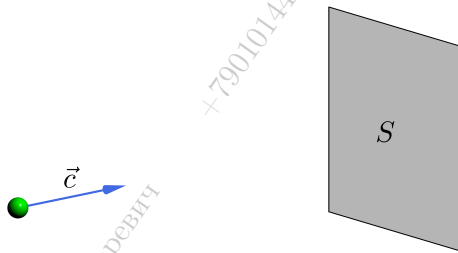


Рис. 2. Падение фотона на поверхность тела

Падающий фотон движется перпендикулярно поверхности площади S в вакууме со скоростью света \vec{c} . При столкновении с поверхностью фотон (подобно мячу) оказывает на нее давление P . Из классических представлений это давление равно: $P = F/S$, где F — сила, действующая на площадку. Сила F , также действующая на фотон, есть скорость изменения импульса фотона $\Delta p/\Delta t$. После отражения фотон движется с прежними скоростью и импульсом p (начальный импульс), но в обратном направлении: изменение его импульса равно $2p$. Согласно СТО импульс фотона (фотон не имеет массу) равен $E_{\text{ф}}/c$, где $E_{\text{ф}}$ — энергия фотона. Энергия света, поступающая на поверхность, связана с мощностью N падающего излучения так: $E = N \cdot \Delta t$. С учетом сказанного после упрощений формула для давления приобретает вид: $P = \frac{2N}{c \cdot S}$. То есть давление света зависит от мощности излучения и площади поверхности.

В случае поглощения фотон как бы «застревает» в поверхности, и изменение его импульса тогда равно p — коэффициент 2 в полученной формуле для давления убирается, так что давление в этом случае при прочих равных условиях уменьшается в два раза по сравнению с отражением!

Глава 5

Физика атома

18 Постулаты Бора

Планетарная модель атома предполагает, что вокруг ядра электроны движутся как бы по окружностям, а значит, имеют ускорения. Как известно, ускоренно движущиеся заряды излучают электромагнитные волны, уносящие энергию этих зарядов. Получается, что теряя энергию, электроны должны в конце концов прекратить свое движение и упасть на ядро. Итак, классическая физика предсказывает «схлопывание» атома — то есть его неустойчивость, что противоречит опыту.

Для разрешения этого противоречия Бор предложил такие три постулата.

- I.** Атом (система атомов) может находиться только в особых (стационарных) состояниях, в которых энергия атома принимает определенные значения E_1, E_2, \dots . Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает энергию.

На рис. 1 изображена модель атома водорода по Бору.

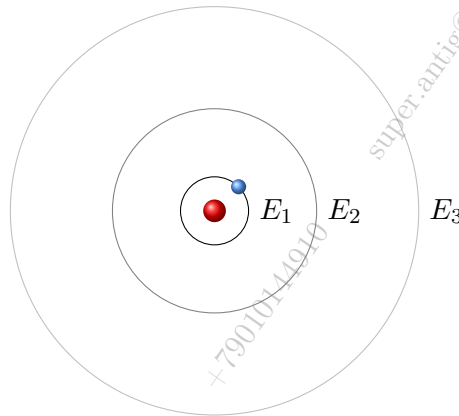


Рис. 1. Модель атома водорода по Бору

В атоме вокруг ядра электрон может «летать» только по *стационарным орбитам* (окружности на рисунке). Двигаясь по одной из таких орбит, электрон не излучает. Каждой стационарной орбите отвечает определенное значение из набора *уровней энергии* атома E_1, E_2, \dots

- II.** При переходе из состояния с большей энергией E_n в состояние с меньшей энергией E_k атом излучает фотон с энергией

$$E_{\text{ф}} = E_n - E_k. \quad (1)$$

Атом также может перейти из состояния E_k в состояние с большей энергией E_n , поглотив фотон, но только такой, энергия которого удовлетворяет соотношению (1).

- III.** Значения скорости v электрона и радиуса r его орбиты могут принимать только дискретный набор значений так, что выполняется условие:

$$mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

где m — масса электрона (см. таблицы), $\hbar = h/2\pi$ («аш с чертой»; деление постоянной Планка на 2π).

Энергия атома водорода на уровне n по Бору равна: $E_n = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{n^2}$.

19 Спектры

Опыт показывает, что белый свет разлагается в *сплошной спектр* — полосу со всеми цветами радуги, плавно переходящими друг в друга (рис. 1).



Рис. 1. Сплошной спектр

Спектр называется сплошным (или непрерывным) потому, что в нем присутствуют все частоты видимого диапазона — то есть все возможные цвета, получающиеся плавным переходом от красной границы до фиолетовой. Оказывается, что любые тела в любом агрегатном состоянии¹ с высокой температурой дают излучение со сплошным спектром.

Однако, очень разреженный *атомарный* газ, нагретый достаточно сильно, излучает свет с *линейчатым спектром* — спектром, состоящим из отдельных тонких линий. Выделяют два вида линейчатых спектров.

1. **Спектр испускания** образован тонкими отдельно стоящими разноцветными линиями. На рис. 2 показан спектр испускания для водорода (в видимом диапазоне).



Рис. 2. Линейчатый спектр испускания для водорода

Каждому химическому элементу (каждому виду атомов) соответствует свой уникальный набор линий спектра. Так как газ разрежен, то можно считать что каждый его атом излучает независимо от соседних атомов. Поэтому можно заключить, что *атом характеризуется определенным набором частот (или длин волн в вакууме) излучаемого света*.

2. **Спектр поглощения** образован тонкими отдельно стоящими темными линиями. На рис. 3 показан спектр поглощения для водорода (в видимом диапазоне).



Рис. 3. Линейчатый спектр поглощения для водорода

Спектр поглощения получается, если через разреженный атомарный газ, охлажденный достаточно сильно, пропустить свет со сплошным спектром. Данный химический элемент как бы «забирает себе» только определенные частоты из непрерывного спектра. Так, водород «поглощает» те частоты, которые излучает сам и которые отражены в его спектре испускания (см. рис. 2).

¹Газы должны быть довольно плотными.

Глава 6

Физика атомного ядра

20 Атомное ядро

Общепризнанной моделью атомного ядра является *нуклонная модель*: ядро состоит из протонов и нейтронов (общее название этих частиц — *нуклоны*).

Зарядовое число (Z) — это число протонов в ядре. Если заряд протона обозначить q_p , то заряд ядра равен Zq_p . Нейтральный атом несет в себе также Z электронов (заряд ядра равен по величине сумме зарядов электронов). Получается, что зарядовое число есть порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева.

Массовое число (A) — это число нуклонов в ядре. Таким образом, число нейтронов в ядре равно $A - Z$.

Ядро любого химического элемента обозначается так: A_ZX (под X подразумевается символ химического элемента). Например, ядро железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ состоит из 56 нуклонов, а именно из 26 протонов и 30 нейтронов.

Изотопами называются разновидности атомов одного химического элемента, *различающиеся только числом нейтронов* в ядре. При этом изотопы проявляют одинаковые химические свойства, так как эти свойства определяются числом электронов в атоме, а значит — зарядовым числом Z ядра, которое для каждого изотопа есть величина постоянная.

На рис. 1 условно изображены три изотопа водорода.

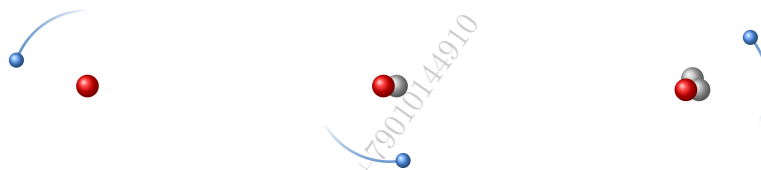


Рис. 1. Изотопы водорода

Ядра атома водорода представлены в природе тремя изотопами (на рисунке красные шары — протоны, серые — нейтроны, синие — электроны): протием ${}^1_1\text{H}$ (рис. 1, слева), дейтерием ${}^2_1\text{H}$ (рис. 1, посередине) и тритием ${}^3_1\text{H}$ (рис. 1, справа).

Нуклоны внутри ядра удерживаются так называемыми *ядерными силами* (которые относят к сильному взаимодействию). Для того, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, нужно *совершить работу* против ядерных сил, скрепляющих нуклоны между собой в ядре (аналогия: совершение работы для разрыва куска резины).

Энергия связи ядра ($E_{\text{св}}$)¹ — это минимальная энергия, которую нужно затратить для разделения ядра на составляющие его нуклоны. Оказывается, *сумма масс отдельно взятых нуклонов, составляющих ядро, больше массы ядра* на величину, называемую **дефектом масс**:

$$\Delta m = (M_p + M_n) - m_{\text{ядра}}, \quad (1)$$

где M_p — масса всех протонов, а M_n — масса всех нейтронов, образующих ядро².

Дефекту масс Δm данного ядра отвечает его энергия связи³: $E_{\text{св}} = \Delta mc^2$.

¹Энергии атомов и элементарных частиц удобнее измерять в *электронвольтах* (эВ): 1 эВ есть энергия, которая приобретается электроном при прохождении ускоряющего напряжения 1 вольт: 1 эВ $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл \cdot 1 В = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

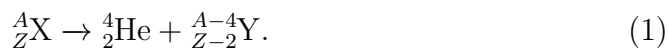
²Массы элементарных частиц (а также атомов) можно найти в справочных таблицах.

³По формуле Эйнштейна $E = mc^2$.

21 Радиоактивность. Ядерные реакции

Радиоактивность — это самопроизвольное (спонтанное) превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц (например, электронов, протонов, фотонов и др.). Явление радиоактивности называют еще *радиоактивным распадом*. Выделяют следующие основные типы таких распадов.

- При **альфа-распаде** ядро испускает ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ (α -частицу):



- При **бета-распаде** ядро дает электрон ${}^0_{-1}\text{e}$ (β -частицу):



Также может происходить так называемый *позитронный бета-распад*, при котором ядро выбрасывает *позитрон* ${}^0_{+1}\text{e}$ — частицу с массой электрона, но с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона (позитрон — это как бы «положительно заряженный электрон»). В связи с этим формула (1) описывает, как говорят, *электронный бета-распад*. (Также α - и β -распады могут сопровождаться испусканием γ -излучения (γ -лучей) — электромагнитных волн чрезвычайно высокой частоты с большой проникающей способностью.)

Период полураспада (T) — это время, за которое исходное количество радиоактивных ядер *убывает вдвое*. Каждый радиоактивный изотоп имеет определенный период полураспада.

Закон радиоактивного распада позволяет найти число N *нераспавшихся* радиоактивных ядер спустя время t после начала наблюдения:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

где N_0 — начальное число радиоактивных ядер.

График зависимости $N(t)$ числа нераспавшихся ядер радиоактивного элемента от времени представлен на рис. 1. Из рисунка видно: за период полураспада T число «целых» ядер уменьшается в два раза (это справедливо при любом начальном числе нераспавшихся ядер).

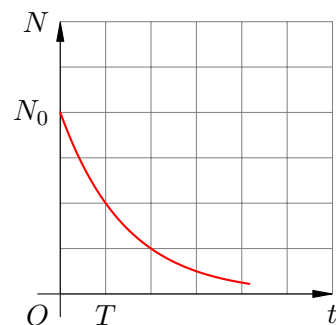


Рис. 1.
Зависимость $N(t)$

Ядерными реакциями называют превращения ядер, вызванные их взаимодействием друг с другом или с налетающими на них частицами. Исторически первой ядерной реакцией, осуществленной человеком, была реакция превращения ядра азота в ядро кислорода:



При любых ядерных превращениях (см. формулы (1), (2) и (4)) соблюдаются следующие два закона (законы сохранения массового и зарядового чисел).

1. *Сумма массовых чисел ядер и частиц до реакции равна сумме массовых чисел ядер и частиц после реакции.* Из формулы (4) видно: $14 + 4 = 17 + 1$.
2. *Сумма зарядовых чисел ядер и частиц до реакции равна сумме зарядовых чисел ядер и частиц после реакции.* Из формулы (4) видно: $7 + 2 = 8 + 1$.

Часть IV

Приложение

Глава 7

Как решать задачи по физике

22 Как находить ответ к задаче по физике

На примере конкретной задачи будет показано, как прийти к ответу при решении задачи по физике. Если следовать предложенному алгоритму, то можно решить большинство задач школьной физики. Язык изложения — доступный.

ЗАДАЧА. Трактор за первые 5 мин проехал 600 м. Какой путь он пройдет за 0,5 ч, двигаясь с той же скоростью?

1. **Записать «дано» и «найти».** В данной задаче известно: $t_1 = 5$ мин, $S_1 = 600$ м, $t_2 = 0,5$ ч. Найти нужно S_2 .

Далее нужно *не забыть про «СИ»* — единицы измерения (буквы после чисел в «дано») должны быть принятыми. Так, следует подкорректировать данные: $t_1 = 300$ с, $t_2 = 1800$ с.

Дальнейшие записи начинают со слова «решение», после которого¹ полезно сделать рисунки с указанием на них букв, перечисленных в «дано» и «найти».

2. **Написать формулу для искомой.** Для предложенной задачи понадобится «простая» формула пути:

$$S_2 = v_2 \cdot t_2. \quad (1)$$

Формула должна соответствовать данным задачи и, разумеется, ее теме.

3. **Заменять неизвестные в правой части.** Имеется в виду, что необходимо подменять неизвестные буквы в правой части написанной выше формулы. Для этого понадобятся другие формулы (или формулы того же вида других ситуаций и т. п.).

Например, в формуле (1) неизвестно v_2 . Однако, так как скорость тела в рассматриваемой задаче не изменяется, то справедливо: $v_2 = v_1$. Эта формула помогает заменить v_2 в формуле (1):

$$S_2 = v_2 \cdot t_2 = v_1 \cdot t_2. \quad (2)$$

Теперь v_1 в формуле (2) можно заменить с помощью «простой» формулы пути для первой ситуации задачи: $S_1 = v_1 \cdot t_1$, что дает $v_1 = \frac{S_1}{t_1}$. Тогда:

$$S_2 = v_2 \cdot t_2 = v_1 \cdot t_2 = \frac{S_1}{t_1} \cdot t_2. \quad (3)$$

Формально — задача решена (осталось подставить числа).

Сразу после замены какой-то буквы следует *упрощать правую часть* (если возможно). Если есть трудности с заменами² (о случае с появлением искомой в правой части см. ниже), то можно снова перейти к шагу 2, начав уже с другой формулы.

Если в правой части остается искомая, то нужно записать уравнение вида «искомая = правая часть с искомой» и решить его³.

¹Если задача не требует «обязательных записей» — то есть записей, на которых строится решение специфических задач.

²Чем больше формул знает решающий, тем меньше вероятность такого события.

³Искомая справа может повторяться несколько раз.

23 Решение специфических задач по физике

Решение специфических задач (задач на важные законы) по школьной физике удобно строить на «**обязательных записях**» — записях, которые требуется сделать *перед* поиском ответа к задаче.

Ниже приводятся темы специфических задач и «обязательные записи», требующиеся для их решения. Изложение ведется кратко в доступной форме.

1. **Сложное движение.** *Движение кажется сложным.* 1. Рисунки с траекториями тел и удобными осями. 2. Уравнения координат и (проекций) конечных скоростей на оси: $x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$ и $v = v_0 + at$ (выбрать знаки для v_0 и a). (И, если нужно, закон сложения скоростей или относительная скорость на оси.)
2. **Силы.** *Видны причины движения, и/или речь идет о силах.* 1. Рисунки с важными телами: показать силы на эти тела и ускорения этих тел (для удобства — оси). 2. Уравнение сил (для каждого важного тела по каждому направлению [оси]): $\pm F_1 \pm F_2 \pm \dots = \pm ma$.
3. **Равновесие.** *Рассматривается покоящееся «длинное» тело.* 1. Рисунок с «длинным» телом: показать силы на это тело в точных местах (для удобства показать оси). 2. Уравнения сил (по каждому направлению [оси]) и моментов для этого тела: $\pm F_1 \pm F_2 \pm \dots = 0$ и $\pm M_1 \pm M_2 \pm \dots = 0$.
4. **Гидравлический пресс, сообщающиеся сосуды.** Уравнение прессы или сосудов: $P_{\text{л}} = P_{\text{п}}$ (рисунок по усмотрению).
5. **Столкновение (расталкивание) тел.** 1. Рисунки для ситуаций «до» и «после» (слева и справа) с телами: показать импульсы тел (для удобства — оси). 2. Закон сохранения импульса (по каждому направлению [оси]): $\pm p_1 \pm p_2 \pm \dots = \pm p'_1 \pm p'_2 \pm \dots$ (Если взаимодействие тел упругое, то для системы тел также выполняется закон сохранения полной механической энергии: $E_1 = E_2 = \dots$)
6. **Энергия (механическая).** *Условие задачи кажется очень кратким, и/или речь идет об энергии.* 1. Рисунки со всеми ключевыми положениями важных тел. 2. Закон сохранения полной механической энергии (для каждого важного тела или системы): $E_1 = E_2 = \dots$
7. **Смесь газов.** Закон Дальтона: $P_{\text{см}} = P_{1\text{см}} + P_{2\text{см}} + \dots$
8. **Теплообмен.** *Тела «смешивают»: одни принимают тепло, другие — отдают.* 1. Перечислить все процессы с каждым телом (каждому процессу соответствует своя теплота: Q_1, Q_2, \dots). 2. Уравнение теплового баланса: $\pm Q_1 \pm Q_2 \pm \dots = 0$.
9. **Энергия «к газу».** *Речь о газе и «его» теплоте, энергии и работе.* Первый закон термодинамики: $Q = \Delta U + A$.