

Тема: Принцип Гюйгенса

Мы говорили выше, что распространение волн удобно представлять себе как движение волновых поверхностей. Но согласно каким правилам перемещаются волновые поверхности? Иными словами — как, зная положение волновой поверхности в данный момент времени, определить её положение в следующий момент?

Ответ на этот вопрос даёт принцип Гюйгенса — основной постулат волновой теории. Принцип Гюйгенса равным образом справедлив как для механических, так и для электромагнитных волн.

Чтобы лучше понять идею Гюйгенса, давайте рассмотрим такой пример. Бросим в воду горсть камней. От каждого камня пойдёт круговая волна с центром в точке падения камня. Эти круговые волны, накладываясь друг на друга, создадут общую волновую картину на поверхности воды. Важно то, что все круговые волны и порождённая ими волновая картина будут существовать и после того, как камни опустятся на дно. Стало быть, непосредственной причиной исходных круговых волн служат не сами камни, а локальные возмущения поверхности воды в тех местах, куда камни упали. Именно локальные возмущения сами по себе являются источниками расходящихся круговых волн и формирующейся волновой картины, и уже не столь важно, что конкретно послужило причиной каждого из этих возмущений — камень ли, поплавок или какой-то иной объект. Для описания последующего волнового процесса важно только то, что в определённых точках поверхности воды возникли круговые волны.

Ключевая идея Гюйгенса состояла в том, что локальные возмущения могут порождаться не только посторонними объектами типа камня или поплавок, но также и распространяющейся в пространстве волной!

Принцип Гюйгенса. Каждая точка пространства, вовлечённая в волновой процесс, сама становится источником сферических волн.

Эти сферические волны, распространяющиеся во все стороны от каждой точки волнового возмущения, называются вторичными волнами.

Последующая эволюция волнового процесса состоит в наложении вторичных волн, испущенных всеми точками, до которых волновой процесс уже успел добраться. Принцип Гюйгенса даёт рецепт построения волновой поверхности в момент времени $t + \Delta t$ по известному её положению в момент времени t (рис. 3).

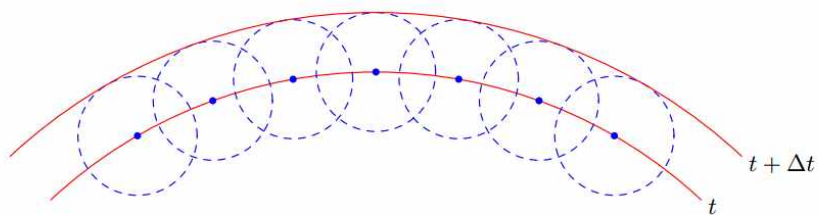


Рис. 3. Принцип Гюйгенса: движение волновых поверхностей

Именно, каждую точку исходной волновой поверхности мы рассматриваем как источник вторичных волн. За время Δt вторичные волны пройдут расстояние $c\Delta t$, где c — скорость волны. Из каждой точки старой волновой поверхности строим сферы радиуса $c\Delta t$; новая волновая поверхность будет касательной ко всем этим сферам¹. Но, конечно, для построения волновой поверхности мы не обязаны брать вторичные волны, испущенные точками, лежащими непременно на одной из предыдущих волновых поверхностей.

Искомая волновая поверхность будет огибающей семейства вторичных волн, излучённых точками вообще всякой поверхности, вовлечённой в колебательный процесс. На базе принципа Гюйгенса можно вывести законы отражения и преломления света, которые раньше мы рассматривали лишь как обобщение экспериментальных фактов.

Вывод закона отражения

Предположим, что на поверхность KL раздела двух сред падает плоская волна (рис. 4). Фиксируем две точки A и B этой поверхности.

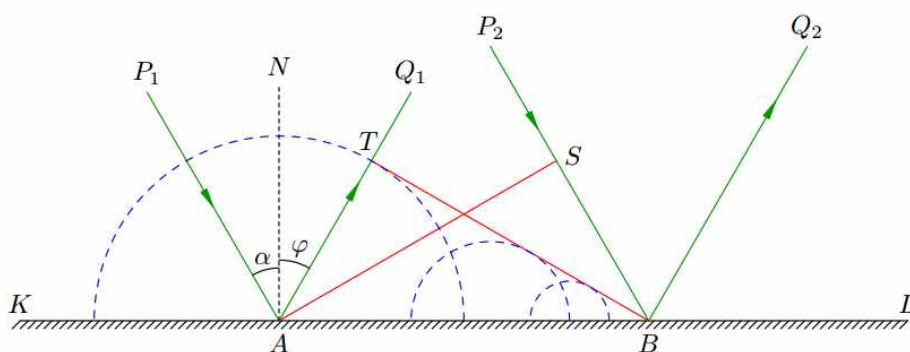


Рис. 4. Отражение волны

В эти точки приходят два падающих луча P_1A и P_2B ; плоскость AS , перпендикулярная этим лучам, есть волновая поверхность падающей волны

В точке A проведена нормаль AN к отражающей поверхности. Угол $\alpha = \angle P_1AN$ есть, как вы помните, угол падения.

Из точек А и В выходят отражённые лучи АQ1 и ВQ2. Перпендикулярная этим лучам плоскость ВТ есть волновая поверхность отражённой волны. Угол отражения $\angle \text{NAQ1}$ обозначим пока ϕ ; мы хотим доказать, что $\phi = \alpha$.

Все точки отрезка АВ служат источниками вторичных волн. Раньше всего волновая поверхность АS приходит в точку А. Затем, по мере движения падающей волны, в колебательный процесс вовлекаются другие точки данного отрезка, и в самую последнюю очередь — точка В.

Соответственно, раньше всего начинается излучение вторичных волн в точке А; сферическая волна с центром в А имеет на рис. 4 наибольший радиус. По мере приближения к точке В радиусы сферических вторичных волн, испущенных промежуточными точками, уменьшаются до нуля — ведь вторичная волна будет излучена тем позже, чем ближе её источник находится к точке В.

Волновая поверхность ВТ отражённой волны есть плоскость, касательная ко всем этим сферам. На нашем планиметрическом чертеже ВТ есть отрезок касательной, проведённой из точки В к самой большой окружности с центром в А и радиусом АТ.

Теперь заметим, что радиус АТ — это расстояние, пройденное вторичной волной с центром в А за то время, пока волновая поверхность АS движется к точке В. Скажем это чуть по-другому: время движения вторичной волны от точки А до точки Т равно времени движения падающей волны от точки S до точки В. Но скорости движения падающей и вторичной волн совпадают — ведь дело происходит в одной и той же среде! Поэтому, раз совпадают скорости и времена, то равны и расстояния: $\text{AT}=\text{BS}$.

Получается, что прямоугольные треугольники АВТ и ABS равны по гипотенузе и катету. Стало быть, равны и соответствующие острые углы: $\angle \text{ABT} = \angle \text{BAS}$. Остаётся заметить, что $\angle \text{ABT} = \phi$ (так как оба они равны $90^\circ - \angle \text{BAT}$) и $\angle \text{BAS} = \alpha$ (оба они равны $90^\circ - \angle \text{NAS}$). Таким образом, $\phi = \alpha$ — угол отражения равен углу падения, что и требовалось.

Кроме того, из построения на рис. 4 нетрудно видеть, что выполнено и второе утверждение закона преломления: падающий луч Р1А, отражённый луч АQ1 и нормаль АN к отражающей поверхности лежат в одной плоскости.

Вывод закона преломления

Теперь покажем, как из принципа Гюйгенса следует закон преломления. Будем для определённости считать, что плоская электромагнитная волна

распространяется в воздухе и падает на границу KL с некоторой прозрачной средой (рис. 5). Как обычно, угол падения α есть угол между падающим лучом и нормалью к поверхности, угол преломления β — это угол между преломлённым лучом и нормалью.

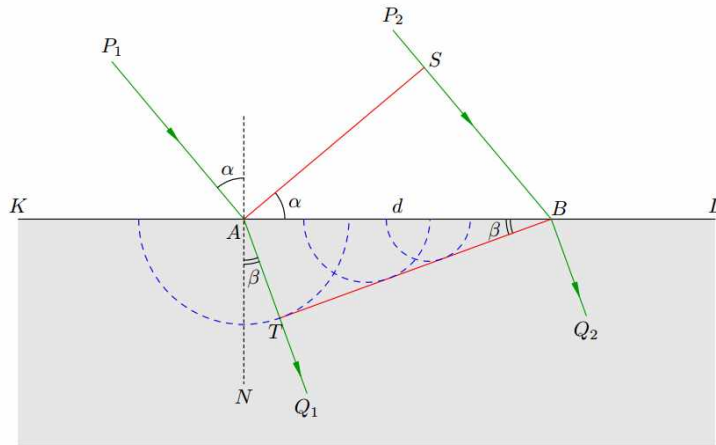


Рис. 5. Преломление волны

Точка A является первой точкой отрезка AB , которой достигает волновая поверхность AS падающей волны; в точке A излучение вторичных волн начинается раньше всего. Пусть t — время, которое с этого момента требуется падающей волне, чтобы достичь точки B , то есть пройти отрезок SB .

Скорость света в воздухе обозначим c , скорость света в среде пусть будет v . Пока падающая волна проходит расстояние $SB = ct$ и достигает точки B , вторичная волна из точки A распространится на расстояние $AT = vt$.

Поскольку $v < c$, то $AT < SB$. Вследствие этого волновая поверхность BT не параллельна волновой поверхности AS — происходит преломление света! В рамках геометрической оптики не давалось никакого объяснения того, почему вообще наблюдается явление преломления. Причина преломления кроется в волновой природе света и становится понятной с точки зрения принципа Гюйгенса: всё дело в том, что скорость вторичных волн в среде меньше скорости света в воздухе, и это приводит к повороту волновой поверхности BT относительно исходного положения AS .

Из прямоугольных треугольников ABS и ABT легко видеть, что $SB = d \sin \alpha$ и $AT = d \sin \beta$ (для краткости обозначено $d = AB$). Имеем, таким образом:

$$d \sin \alpha = ct, \quad d \sin \beta = vt.$$

Поделив эти уравнения друг на друга, получим:

$$\sin \alpha / \sin \beta = c / v .$$

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления оказалось равно постоянной величине c/v , не зависящей от угла падения. Эта величина называется показателем преломления среды:

$$n = c / v$$

Получился хорошо известный нам закон преломления:

$$\sin \alpha / \sin \beta = n.$$

Обратите внимание: физический смысл показателя преломления (как отношения скоростей света в вакууме и в среде) прояснился опять-таки благодаря принципу Гюйгенса. Из рис. 5 очевидно и второе утверждение закона преломления: падающий луч $P1A$, преломлённый луч $AQ1$ и нормаль AN к границе раздела лежат в одной плоскости.