

физическую природу, представляя собой электромагнитные волны с разными частотами колебаний. Величина  $c$  является одной из фундаментальных физических постоянных, но скорость распространения электромагнитных волн равна  $c$  только в вакууме. Если же волна проходит через какую-нибудь среду, процесс распространения существенно усложняется. И вот почему.

Даже в том случае, когда среда является электрически нейтральной, в ней все равно присутствуют электрические заряды, которые входят в состав атомов и молекул. Рассмотрим, например, особое состояние вещества – *плазму*. Она представляет собой смесь свободных отрицательных и положительных зарядов. Отрицательными зарядами являются обычно электроны, оторванные от атомов каким-либо внешним ионизирующим воздействием. Положительные заряды (ионы) – это атомы, потерявшие один или несколько электронов. Могут быть и отрицательные ионы – атомы с «прилившими» электронами, но их вклад обычно мал по сравнению с электронами.

Электромагнитная волна вызывает колебания электрических зарядов – как связанных (в атомах и молекулах), так и свободных (в плазме). Колеблющиеся заряды сами излучают вторичные электромагнитные волны, которые складываются с исходной волной. Результирующая волна распространяется в среде со скоростью, уже отличной от  $c$ . Это обстоятельство учитывают, вводя специальную характеристику среды – коэффициент преломления  $n$ , который показывает, во сколько раз уменьшается скорость распространения электромагнитных волн в среде по сравнению с вакуумом:

$$v_{\phi} = \frac{c}{n(\omega)}. \quad (1)$$

Обратите внимание на обозначения. Скорость волны в среде обозначена через  $v_{\phi}$ , где индекс « $\phi$ » показывает, что речь идет о *фазовой скорости* (ниже мы поясним смысл этого определения). Коэффициент преломления зависит от частоты волны  $\omega$ , что и подчеркивается введением аргумента:  $n(\omega)$ . Зависимость показателя преломления, а значит, и скорости распространения волны от частоты называют *дисперсией* среды. По-

скольку коэффициент преломления является безразмерной величиной, аргумент  $\omega$  должен входить в  $n(\omega)$  в безразмерной комбинации  $\omega/\omega_p$ , где  $\omega_p$  – собственная частота среды, в плазме ее называют *плазменной частотой*.

Плазменное состояние вещества характерно для космического пространства. В близком к Земле окружении плазма образуется из нейтрального газа, который подвергается внешнему воздействию, способному оторвать электроны от атомов. Таким является, например, коротковолновое излучение Солнца (рентгеновские и ультрафиолетовые лучи). В результате ионизации атмосферы на высоте 50–60 км и выше возникает слой плазмы, который называют *ионосферой*. В дальнем космосе степень ионизации очень высокая, и по современным представлениям 99,9% видимого вещества представляет собой плазму. Искусственно создаваемая плазма широко используется в разнообразных лабораторных установках.

Хотя в состав плазмы входят свободные заряды разных знаков, среда в целом остается электрически нейтральной, точнее *квазинейтральной*. Это означает, что концентрации отрицательных и положительных зарядов равны друг другу в среднем, но могут не совпадать в небольших объемах или в течение коротких промежутков времени. Дело в том, что всегда существует хаотическое тепловое движение частиц, и в любой данный момент времени в одном месте может возникнуть избыток положительных (или отрицательных), а в другом месте – избыток отрицательных (или положительных) зарядов. Тогда, в соответствии с законом Кулона, электроны начнут притягиваться к той области пространства, где имеется избыток положительного заряда (или, что то же, дефицит электронов). Движущиеся заряды пролетят по инерции положение равновесия, и в том месте, где был дефицит электронов, возникнет их избыток. Сила электрического притяжения сменится на силу отталкивания, и электроны начнут двигаться в противоположном направлении. Потом они снова пролетят положение равновесия, остановятся и начнут возвращаться обратно. Этот колебательный процесс будет происходить с определенной частотой  $\omega_p$ ,

которую мы сможем легко оценить по аналогии с колебаниями обычного маятника.

Вспомним формулу для частоты собственных колебаний математического маятника:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, а  $l$  – длина маятника. В плазме кулоновская сила, действующая между двумя электронами, равна  $F = ke^2/d^2$ , где  $k$  – коэффициент, зависящий от выбора системы единиц, в СИ, например,  $k = 9 \cdot 10^9$  м/Ф,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $d$  – среднее расстояние между взаимодействующими зарядами. Если концентрация электронов (число электронов в единице объема) равна  $N$ , то  $d = N^{-1/3}$ . Ускорение, приобретаемое электроном под действием силы  $F$ , равно  $g_p = F/m$ , где  $m = 9 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона.

Воспользуемся для определения  $\omega_p$  формулой (2), подставив в нее  $g_p$  вместо  $g$  и  $d$  вместо  $l$ :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ke^2N}{m}}. \quad (3)$$

Интересно, что это выражение полностью совпадает с тем, которое получается на основании строгих вычислений.

К сожалению, вывести формулу для коэффициента преломления простым способом не удастся (для этого нам пришлось бы рассчитать, как движется электрон в поле электромагнитной волны и как он излучает вторичные волны), поэтому воспользуемся готовым результатом:

$$n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}. \quad (4)$$

Как и следовало ожидать (об этом мы уже говорили), частота  $\omega$  входит в  $n(\omega)$  в безразмерной комбинации  $\omega/\omega_p$  с собственной частотой плазмы. Еще одно важное свойство  $n(\omega)$ , а именно обращение в 1 при бесконечно высокой частоте ( $n(\omega) \rightarrow 1$  при  $\omega/\omega_p \rightarrow \infty$ ), имеет простое физическое объяснение. Электрические заряды всегда связаны с материальными частицами, которые, в силу инерции, не могут колебаться с бесконечно высокой частотой. Следовательно, они не будут излучать вторичных электромагнитных волн, и исходная волна