

## Радиоволна в плазме

Под действием внешних факторов (излучение, соударения) один или несколько электронов могут оторваться от атомов. Так возникают «свободные» электроны и ионы. Ионизированный газ называется *плазмой*. В нем обычно присутствуют и нейтральные частицы, но чем их меньше, тем ярче проявляются специфические свойства плазмы.

В нижних слоях атмосферы естественной плазмы почти нет, так как ионизирующее излучение Солнца (ультрафиолетовые и рентгеновские лучи) здесь очень сильно ослаблено. Начиная с высоты ~ 50 км и выше солнечная радиация ионизирует воздух все сильнее, и плотность плазмы возрастает. Здесь начинается ионосфера — плазменная оболочка Земли. На высотах 300—400 км плотность электронов и ионов становится максимальной, а далее медленно спадает, хотя интенсивность ионизирующих факторов с высотой возрастает. Просто на больших высотах плотность воздуха очень мала, и, хотя он почти полностью ионизирован, число «свободных» электронов и ионов все равно оказывается малым. В дальнем космосе степень ионизации очень высокая, и по современным представлениям примерно 99,9% видимой Вселенной находится в плазменном состоянии.

Вы, наверное, обратили внимание, что, говоря о плазменных электронах, мы заключаем слово «свободные» в кавычки. Дело в том, что плазменные электроны, хотя и оторваны от своих атомов, но взаимодействуют с другими электронами и ионами через электрические поля. Эти силы являются дальнедействующими, и именно с ними связаны специфические плазменные колебания.

Представим себе, что плотность электронов в каком-то небольшом объеме случайно возросла. Тогда здесь возникает избыток отрицательного заряда, и электрическое поле выталкивает электроны из этой области. Постепенно избыточный заряд ликвидируется, но электроны продолжают по инерции разлетаться. В результате число их в рассматриваемом объеме становится меньше среднего, а плотность положительных ионов остается прежней. Дефицит электронов равносителен появлению положительного заряда и электрического

поля, притягивающего электроны обратно. Но двигаясь назад электроны опять пролетают по инерции положение равновесия, опять создается избыток отрицательного заряда и т.д.

Для оценки частоты возникающих колебаний можно снова воспользоваться формулой (4), но вместо размеров атома  $a$  надо подставить в нее среднее (равновесное) расстояние между электронами. Пусть среднее число электронов в  $1\text{ м}^3$  равно  $N_0$ . Тогда расстояние между частицами равно  $N_0^{-1/3}$ . Положив в (4)  $a = N_0^{-1/3}$ , приходим к следующей формуле для собственной частоты колебаний электронов в плазме:

$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{ke^2 N_0}{m}} \quad (5)$$

Если измерять частоту в герцах, а плотность электронов в  $\text{м}^{-3}$ , то после подстановки в (5) значений  $k$ ,  $e$  и  $m$  получим следующее простое выражение:

$$f_p [\text{Гц}] \approx 9 \sqrt{N_0 [\text{м}^{-3}]}$$

Плотность электронов в области их наибольшей концентрации достигает  $10^{12}\text{ м}^{-3}$ , поэтому частота  $f_p \sim 10\text{ МГц}$  попадает в диапазон радиоволн. Это означает, что коэффициент преломления ионосферы может заметно отличаться от 1, а при  $\omega \approx \omega_p$  должна возникнуть сильная дисперсия. Действительно, формула для коэффициента преломления выглядит так:

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad (6)$$

Мы приводим ее без вывода, но главные особенности все же обсудим. Если увеличивать частоту радиоволны, переходя от  $\omega < \omega_p$  к значениям  $\omega > \omega_p$ , то можно заметить, что при резонансе, когда  $\omega = \omega_p$ , свойства плазмы резко меняются. Когда  $\omega < \omega_p$ , подкоренное выражение в (6) является отрицательным, а коэффициент преломления — мнимым. Это означает, что столь низкочастотные волны в плазме распространяться не могут. Если же  $\omega > \omega_p$ , то  $n < 1$  и все более приближается к 1 по мере возрастания частоты. Стремление  $n(\omega)$  к 1 при  $\omega \rightarrow \infty$  является характерным свойством не только плазмы, но и любых сред. Оно объясняется тем, что, в силу инерции, электроны не могут колебаться с бесконечно

высокой частотой. Следовательно, вторичные волны в среде не возбуждаются, и электромагнитная волна распространяется так же, как в вакууме.

Согласно формуле (1), при  $n < 1$   $v_\phi > c$ , т.е. волна распространяется в плазме со *сверхсветовой скоростью*. Может показаться, что таким образом нарушается принцип относительности Эйнштейна, согласно которому никакое воздействие (сигнал) не может распространяться со скоростью, превышающей  $c$ . Конечно, это не так. Вычисляемая по формуле (1) скорость относится к волне, имеющей какую-то одну определенную частоту. Такая волна представляет собой бесконечную синусоиду, которая сама по себе не может передать никакого сигнала, так как форма ее остается все время неизменной. Для передачи сообщения необходимо воспользоваться не одной волной, а группой волн разных частот, из которых можно сформировать сигнал требуемой формы. Скорость распространения всей группы волн отличается от скорости одной волны и определяется по формуле

$$v_{\text{гр}} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (7)$$

Чтобы не путать эти два понятия, скорость, определяемую по формуле (1), называют фазовой (отсюда индекс «ф»), а по формуле (7) — групповой (индекс «гр»). В вакууме  $n = 1$ , а производная  $dn/d\omega = 0$ . Поэтому в вакууме  $v_\phi = v_{\text{гр}} = c$ . Для плазмы же после вычисления  $dn/d\omega$  с помощью (6) легко убедиться, что

$$v_\phi v_{\text{гр}} = c^2$$

Поскольку  $v_\phi > c$ ,  $v_{\text{гр}} < c$ , т.е. радиосигнал передается, как и должно быть, со скоростью меньшей  $c$ . При приближении  $\omega$  к  $\omega_p$  со стороны высоких частот  $v_\phi \rightarrow \infty$ , а  $v_{\text{гр}} \rightarrow 0$ . Поэтому при  $\omega \leq \omega_p$  сигнал в плазме вообще не распространяется.

## Радиоволны в магнитоактивной плазме

В космосе повсюду существуют магнитные поля. Они создаются электрическими токами (потоками заряженных частиц) и намагниченными небесными телами, к которым относится и наша Земля. Основное маг-