УДК 538.3

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. М. Арутюнян, Г. К. Аветисян

Отражение электронов от плоской электромагнитной волны в среде

(Представлено чл.-корр АН Армянской ССР М. Л. Тер-Микаеляном 25/1 1971)

Если электрон с начальной скоростью v движется вдоль направления распространения плоской электромагнитной волны в среде, то решая классические уравнения движения, находим

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{n^2 - 1} \left\{ n^2 \left(1 - \frac{v}{cn} \right) \mp \sqrt{\left(1 - n \frac{v}{c} \right)^2 - (n^2 - 1) \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \xi^2} \right\},$$

$$E - cP_x/n = \text{const}, \quad \xi = \frac{e}{mc\omega} |\vec{E}|, \quad (1)$$

где E и P_x — полная энергия и импульс электрона в поле волны, E_0 — начальная энергия электрона, $\vec{E}$ и ω — напряженность электрического поля и частота волны, n — показатель преломления среды (волна предполагается квазимонохроматической и дисперсией среды пренебрегается). В дальнейшем мы ограничимся случаем $n > 1$.

Характер движения электрона существенным образом зависит от начальных условий и значений параметра ξ . Если $\xi_{\text{max}} < \xi_{\text{кр}}$ (ξ_{max} — максимальное значение параметра ξ) и

$$\xi_{\text{кр}} = \left(1 - n \frac{v}{c} \right) / \sqrt{(n^2 - 1) \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}, \quad (2)$$

то в выражении (1) необходимо брать верхний знак. Тогда после взаимодействия ($\xi \rightarrow 0$) $E = E_0$, и энергия электрона не меняется. Если же $\xi_{\text{max}} > \xi_{\text{кр}}$, то наступает своеобразная ситуация, когда электрон не в состоянии проникнуть в волну (при $\xi > \xi_{\text{кр}}$ корень в выражении (1) становится комплексной величиной). Поэтому до значения $\xi = \xi_{\text{кр}}$ в (1) имеет место верхний знак, а после значения $\xi = \xi_{\text{кр}}$ — нижний знак ($\xi = \xi_{\text{кр}}$ выступает в этом случае как точка поворота). При $\xi \rightarrow 0$

$$E = E_0 \left(1 + 2 \frac{1 - n \frac{v}{c}}{n^2 - 1} \right). \quad (3)$$

Если начальные условия таковы, что импульс волны догоняет электрон ($c/n > v$), то $E > E_0$ и электрон ускоряется. Если же электрон догоняет волну ($c/n < v$), то $E < E_0$ и электрон при взаимодействии с волной теряет энергию.

Физику указанного явления можно понять, если учесть, что при $\xi = \xi_{кр}$, как это следует из (1) продольная составляющая скорости электрона $v_z = c/n$. Такой электрон в среде может поглощать фотоны, в результате чего его энергия увеличивается и электрон отрывается от волны (обратный черенковский эффект).

Отражение электронов наиболее наглядно в системе покоя волны. В этой системе электрон налетает на волну, и, если имеет место условие $\xi > \xi_{кр}$, то происходит отражение электрона. Простые преобразования Лоренца позволяют легко получить (2) и (3), не решая уравнения движения. Квантовое рассмотрение не меняет основных результатов, поскольку пространственные размеры реальных импульсов всегда много больше комptonовской длины волны электрона.

Если начальный электрон покоится, то

$$\xi_{кр} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad E = mc^2 \left(1 + \frac{2}{n^2 - 1} \right). \quad (4)$$

Значительное ускорение в этом случае имеет место при $n \rightarrow 1$. Однако для этого необходимо иметь сильное поле ($\xi \gg 1$). Если $n \gg 1$, то $\xi_{кр} \ll 1$ и $E_{кр}/mc^2 = 2/n^2 \ll 1$. Например, для $n = 10^2$, $E_{кр} = 100$ эв. В металлах и полупроводниках такое ускорение электронов может привести к ряду интересных эффектов.

Более благоприятная ситуация для отражения имеет место для релятивистских электронов в газах. Если $\frac{v}{c} = 1 - \varepsilon$, $n = 1 + \eta$ ($\varepsilon \ll 1$, $\eta \ll 1$), то

$$\xi_{кр} = \frac{|\varepsilon - \eta|}{2\sqrt{\varepsilon\eta}}, \quad \frac{E}{E_0} = \frac{\varepsilon}{\eta}. \quad (5)$$

Необходимо однако учитывать, что эффективное ускорение электронов ($\varepsilon > \eta$) или замедление ($\varepsilon < \eta$) происходит на фронте волны на расстоянии порядка

$$l \approx \frac{c\tau}{|\varepsilon - \eta|}. \quad (6)$$

С увеличением начальной энергии электрона l растет как $(E_0/mc^2)^2$, поэтому необходимо иметь ультракороткие импульсы. Например, для ускорения электронов с энергией $E_0 = 5$ Мэв до $E = 50$ мэв необходимо иметь $\xi \sim 1,6$ и $l \sim 10^2 c\tau$. Для уменьшения энергетических потерь электрона можно в качестве среды использовать газы при небольших давлениях, резонирующие на частоте света (область дисперсии).

Эффект можно реально наблюдать и при гораздо меньших по-

лях. Например, изменение энергии электрона на 1% возможно уже при $\xi_{кр} \sim 5 \cdot 10^{-3}$, что вполне доступно для наблюдения с использованием современной лазерной техники. Например, в резонансных газах электрон с энергией $E_0 = 5 \text{ МэВ}$ теряет энергию 50 кэВ на расстоянии 100 см. По-видимому, эта энергия передается волне в виде вынужденного черенковского излучения. Так как электрон ультрарелятивистский ($v > c/n$), то даже незначительная доля энергии электрона, переданная волне, может значительно усилить ее.

Другое возможное применение эффекта — сепарирование частиц по скоростям. Попав в яму волны, черенковская частица оттуда выйти не может. Поле в этом случае будет определять область скоростей частиц, захваченных волной (формула (1)).

Авторы выражают благодарность чл.-корр. АН Армянской ССР М. Л. Тер-Микаеляну, В. М. Галицкому, И. И. Гольдману за обсуждение и ценные замечания.

Институт физических исследований
Академии наук Армянской ССР

Վ. Ի. ՇԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Հ. Կ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

Էլեկտրոնների անդրադարձումը հարթ էլեկտրամագնիսական ալիքից միջավայրում

Ուսումնասիրվում է էլեկտրոնների շարժումը հարթ էլեկտրամագնիսական ալիքի դաշտում, մեկից մեծ բեկման ցուցիչ ունեցող միջավայրում: Ցույց է տրվում, որ որոշ կրիտիկական արժեքից մեծ դաշտերի դեպքում էլեկտրոնները անդրադառնում են ալիքի ֆրոնտից, և եթե նրանց սկզբնական արագությունները փոքր են ալիքի ֆազային արագությունից, տեղի է ունենում էլեկտրոնների արագացում (կրիտիկական կետում տեղի է ունենում հակառակ շերտնկովյան էֆեկտ: որի հետևանքով էլեկտրոնի էներգիան մեծանում է և նա սովորվում է ալիքից): Հակառակ դեպքում էլեկտրոնները կորցնում են էներգիա, որը տրվում է ալիքին ստիպողական շերտնկովյան ճառագայթման ձևով: Իսկ այն էլեկտրոնները, որոնք բնկած կլինեն ալիքի հորում, նույն պայմանի դեպքում այնտեղից դուրս գալ չեն կարող, այսինքն տեղի է օւնենում էլեկտրոնների դավթում ալիքի կողմից: