*Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 606 – 609* *20 июня 1970г*

# ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЫ НА РЕЛАКСАЦИЮ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов*

В работе [1] предлагается эксперимент по созданию и нагреву плазмы ультрарелятивистским электронным пучком при его взаимодействии с твердой мишенью. Предварительные оценки, содержащиеся в этой работе, позволяют сделать следующие два вывода: 1) приемлемая длина торможения пучка ($L \lesssim 1$ *см*) может быть достигнута только в том случае, если релаксация пучка вызывается коллективными процессами, возникающими вследствие пучковой неустойчивости; 2) нагрев плазмы трудно произвести за время, много меньшее времени ее свободного расширения, т. е. плазма в упомянутом эксперименте обязательно будет существенно неоднородной.

С другой стороны, как показано авторами в работе [2], релаксация нерелятивистского пучка в неоднородной плазме идет намного менее эффективно, чем в однородной, а в ряде случаев и вовсе отсутствует. По этой причине представляется интересным рассмотреть влияние неоднородности на релаксацию ультрарелятивистского пучка.

Пусть пучок с концентрацией $n_b$ и энергией частиц $E >> mc^2$ инжектируется в плазму, концентрация которой $n >> n_b$ есть функция $z$ с характерным масштабом изменения $L$ [1]. Если начальный разброс частиц пучка по углу $\theta$ в импульсном пространстве удовлетворяет условию:

$$\Delta\theta \gtrsim (n_b / n)^{1/6} (mc^2 / E)^{1/3} , \qquad (1)$$

то пучковая неустойчивость является кинетической. Если же это условие не выполнено, то на первой стадии релаксации будет развиваться гидродинамическая неустойчивость, которая, как показано в работе [3], быстро приведет к увеличению углового разброса пучка до значений, удовлетворяющих неравенству (1), без заметной потери энергии. Поэтому мы будем считать неравенство (1) выполненным.

Процесс релаксации обусловлен черенковским взаимодействием частиц пучка с раскачиваемыми им волнами. Условие черенковского резонанса для ультрарелятивистской частицы имеет вид:

$$\omega_p - c \frac{k_\parallel p_\parallel + k_\perp p_\perp \cos\phi}{(p_\parallel^2 + p_\perp^2)^{1/2}} = 0, \qquad (2)$$

где $k_\parallel$ и $k_\perp$ – продольная и поперечная по отношению к оси пучка составляющие волнового вектора, $p_\parallel$ и $p_\perp$ – соответствующие составляющие импульса частицы, а $\phi$ – угол между $\mathbf{k}_\perp$ и $\mathbf{p}_\perp$.

Если угловой разброс в пучке мал ($\Delta\theta << 1$), то из соотношения (2) видно, что взаимодействовать с ним могут волны, у которых $k_\parallel$ лежит в интервале

$$| k_\parallel - \frac{\omega_p}{c} | < \frac{\omega_p}{c} \Delta\theta^2 + k_\perp \Delta\theta . \qquad (3)$$

Для таких волн инкремент неустойчивости $\gamma$ можно оценить по формуле:

$$\gamma \sim \frac{\omega_p}{\Delta\theta^2} \frac{n_b}{n} \frac{mc^2}{E} \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2 + k_\perp^2 c^2} .$$

В неоднородной плазме продольная составляющая волнового вектора каждого колебания изменяется при его распространении вдоль оси $z$ в соответствии с уравнением:

$$dk_\parallel / dt = - \partial\omega_p / \partial z .$$

За время $\Delta t$ волновой вектор изменяется на величину $\Delta k_\parallel \sim (\omega_p / L) \Delta t$. Имея в виду это обстоятельство, можно оценить время, в течение которого

[1] При проведении численных оценок мы будем использовать параметры пучка и плазмы, указанные в работе [1]: $n \sim 10^{22}$ *см*$^{-3}$, $n_b \sim 10^{18}$ *см*$^{-3}$, $E \sim 10$ *Мэв*, $L \sim 0{,}2$ *см*.

колебание находится в резонансе с пучком:

$$\Delta t \sim \frac{L}{c}\,\Delta\theta^2 + \frac{k_\perp L}{\omega_p}\,\Delta\theta\,. \tag{5}$$

За время $\Delta t$ энергия колебания должна вырасти от начального (теплового) уровня до уровня, существенно превышающего начальный (иначе колебания с данным $k_\perp$ не могли бы оказать существенного влияния на пучок). Это условие можно записать так:

$$\gamma\Delta t > \Lambda, \tag{6}$$

где $\Lambda$ – кулоновский логарифм. Комбинируя соотношения (3) – (6), получаем условие, при котором колебания с заданным $k_\perp$ могут играть роль в процессе релаксации пучка:

$$\frac{n_b}{n}\,\frac{mc^2}{E}\,\frac{L\,\omega_p}{c}\,\frac{1+(k_\perp c/\omega_p\Delta\theta)}{1+(k_\perp c/\omega_p)^2} > \Lambda\,. \tag{7}$$

При заданных параметрах пучка и плазмы существует максимальное значение $\Delta\theta$, при котором неравенство (7) еще может быть выполнено хотя бы для одного значения $k_\perp$:

$$\Delta\theta_{max} \sim \frac{L\omega_p}{c}\,\frac{n_b}{n}\,\frac{mc^2}{E\Lambda}\,. \tag{8}$$

Если величина $\Delta\theta_{max}$, формально вычисленная согласно соотношению (8), удовлетворяет неравенству $\Delta\theta_{max} \gtrsim 1$, то неоднородность плазмы не оказывает решающего влияния на процесс релаксации (большое значение $\Delta\theta_{max}$ соответствует, как видно из формулы (8), большому масштабу неоднородности, т. е. предельному случаю однородной плазмы).

Если же $\Delta\theta_{max} \lesssim 1$, то неоднородность плазмы существенна, так как пучок с угловым разбросом $\Delta\theta$, большим, чем $\Delta\theta_{max}$, не может потерять при прохождении через плазму сколько-нибудь значительной части своей энергии (условие нарастания колебаний (7) при $\Delta\theta > \Delta\theta_{max}$ не выполнено ни для одного значения $k_\perp$).

Для конкретных параметров пучка и плазмы, предлагаемых в работе [1], величина $\Delta\theta_{max}$ оказывается равной $3\cdot 10^{-2}$, т. е. ограничение на угловой разброс пучка с экспериментальной точки зрения является весьма жестким.

Подробное исследование релаксации пучка в случае малого начального разброса ($\Delta\theta < \Delta\theta_{max} \lesssim 1$) будет опубликовано позже. Укажем здесь только, что в результате такой релаксации пучок достигает углового разброса $\Delta\theta \sim \Delta\theta_{max}$ и выделяет в плазме энергию $\Delta E \sim E\Delta\theta_{max} \lesssim E$.

Учитывая, что в эксперименте [1] $\Delta\theta_{max} = 3\cdot 10^{-2}$, можно утверждать, что даже в том случае, когда начальный угловой разброс пучка много меньше $3\cdot 10^{-2}$, пучок в таком эксперименте может выделить в плазме не более 10% своей энергии.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
18 мая 1970 г.
После переработки
1 июня 1970 г.

## Литература

[1] F. Winterberg. Phys. Rev., 174, 212, 1968.

[2] Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов. ЖЭТФ, 57, 1401, 1969.

[3] Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. ЖЭТФ, 57, 966, 1969.