

## Ответ Л.И.Меньшикова

Л. И. Меньшиков

Российский научный центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 9 января 2008 г.

PACS: 29.27.Bd

Рассмотрим электронное облако диаметром  $D \sim 1$  см с плотностью частиц  $n \sim 10^9$  см $^{-3}$ , помещенное в магнитное поле  $B \sim 1000$  Гс. Электроны имеют сильно анизотропное распределение:  $\Delta_{\parallel} \ll \Delta_{\perp}$  (обозначения совпадают с [1]). Плазменная и циклотронная частоты составляют:  $\omega_P = \sqrt{4\pi n e^2 / m} \sim 2 \cdot 10^9$  с $^{-1}$ ,  $\omega_H = eB / m_e c \sim 2 \cdot 10^{10}$  с $^{-1}$ . Длина излучаемых циклотронных волн равна  $\lambda = 2\pi c / \omega_H \sim 10$  см. Поскольку  $D \ll \lambda$ , в области сгустка можно пренебречь запаздыванием, что упрощает качественный анализ. По механизму Гапонова-Грехова, изложенному в [1], в облаке за время  $\tau = 1/\gamma \sim c/\omega_P \Delta_{\perp}$  происходит фазировка, группировка электронов по углу циклотронного вращения. Таким образом, из-за взаимодействия через общее коллективное электрическое поле  $\mathbf{E}$  циклотронное вращение электронов становится коррелированным. Образуется коллективный вращающийся дипольный момент  $d \sim e r_H \cdot N_e$ , где  $N_e \sim n D^3$  – полное число частиц. Поскольку  $D \ll \lambda$ , облако излучает в единицу времени энергию

$$I = \frac{2(\ddot{d})^2}{3c^3} \sim \omega_H^4 e^2 r_H^2 n^2 D^6 / c^3. \quad (1)$$

Энергия облака равна  $E \sim m \Delta_{\perp}^2 n D^3$ , поэтому при завершившейся фазировке время излучения составляет  $\tau_R \sim c^3 / \omega_P^2 \omega_H^2 D^3$ . Для отношения времен получаем:

$$\frac{\tau}{\tau_R} \sim \frac{\omega_P \omega_H^2 D^3}{c^2 \Delta_{\perp}} \sim 100.$$

Отсюда следует, что, как написано в [1], “фазировка ... является лимитирующей, наиболее медленной стадией всего процесса мазерного излучения”. Таким образом, характерное время уменьшения  $\Delta_{\perp}$  равно  $\tau$ , в чем и состоит основной результат [1]. Кинетическая энергия частиц уменьшается из-за того, что на каждую из них действует сила  $\mathbf{F} = (-e)\mathbf{E}$ . Коллективное поле  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_R$  содержит два слагаемых:  $\mathbf{E}_d$  – суммарное поле, созданное вращающимися диполями,  $\mathbf{E}_R = 2\dot{\mathbf{d}}/3c^3$  [2] – поле радиационного трения. В единицу времени, в согласии с (1), поле  $\mathbf{E}_R$  совершает над каждой частицей работу

$$\begin{aligned} \langle W \rangle &= \langle \dot{\mathbf{r}}(-e)\mathbf{E} \rangle \sim \frac{1}{N_e} \langle \dot{\mathbf{d}}\mathbf{E}_R \rangle \sim \frac{1}{c^3 N_e} \langle \dot{\mathbf{d}}\ddot{\mathbf{d}} \rangle = \\ &= -\frac{1}{c^3 N_e} \langle \dot{\mathbf{d}}^2 \rangle \sim -\frac{I}{N_e} \end{aligned}$$

(для сгруппированного по фазе сгустка работа дипольного поля равна нулю [1]).

Рассмотренная в [1] циклотронная неустойчивость электронов с анизотропным распределением хорошо известна (см., например, [3]). Она развивается и в неограниченной плазме. Для ее возникновения не требуются резонаторы (хотя, как предполагается в [1], их использование может ускорить процесс). Это первая, наиболее длительная, линейная по коллективному электрическому полю часть процесса поперечного охлаждения электронов. Этот процесс завершается нелинейной стадией – потерей поперечной энергии электронов в режиме сверхизлучения [4].

Следует упомянуть статью [5], в которой рассматривался, по сути, тот же самый процесс: импульсное мазерное излучение сгустка электронов с анизотропным распределением.

Сверхбыстрый механизм поперечного охлаждения электронов, рассмотренный в [6], отличен от нашего и основан на применении заранее приготовленной опорной циркулярно поляризованной электромагнитной волны. Анализ этой возможности дан в работе [7]. Однако, на наш взгляд, стоило бы еще раз вернуться к работе [6] и учесть поле  $\mathbf{E}_R$ , которое, как указано выше, и вызывает торможение отдельных частиц.

1. В. В. Березовский, Л. И. Меньшиков, Письма в ЖЭТФ **86**, 411 (2007).
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория поля*, М.: Наука, 1988.
3. А. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев, *Физика плазмы для физиков*, М.: Атомиздат, 1976.
4. В. В. Березовский, Л. И. Меньшиков, С. Оберг, К. Д. Лэссэм, *Физика плазмы*, 2008 (принята в печать).
5. С. В. Голубев, А. Г. Шалашов, Письма в ЖЭТФ **86**, 98 (2007).
6. H. Ikegami, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1773, 2593 (1990).
7. S. van der Meer, *Workshop on beam cooling and related topics*, Montreux, 4–8 October, 1993, p. 123. CERN 94-03, 26 April, 1994, Proton Synchrotron Division.