*1987 г. Ноябрь* *Том 153, вып. 3*

*УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*

## СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

# НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР

## (27-28 мая 1987 г.)

27 и 28 мая 1987 г. в Институте физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

*27 мая*

1. В. В. Железняков, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский. Циклотронное сверхизлучение в плазме как классический аналог сверхизлучения Дике.
2. В. Ю. Трахтенгерц. Ионный циклотронный мазер и динамика кольцевого тока магнитосферы.
3. В. В. Зайцев, Е. Я. Злотник, В. Е. Шапошников. Циклотронный механизм декаметрового радиоизлучения Юпитера.

*28 мая*

4. А. А. Боярчук, Ю. Н. Гнедин. О наблюдениях Сверхновой 1987-а (в Большом Магеллановом облаке) советскими обсерваториями.
5. Г. Т. Зацепин, О. Г. Ряжская. О событиях, зарегистрированных 23 февраля на подземных детекторах.
6. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. И. Волченко, И. В. Кривошеина. О возможной регистрации нейтринной вспышки 23 февраля в 7 часов 36 минут подземными водно-черенковскими установками и Баксанским сцинтилляциойным телескопом.

Краткое содержание трех докладов приводится ниже.

621.385.6(048);

**В. В. Железняков, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский.** Циклотронное сверхизлучение в плазме как классический аналог сверхизлучения Дике. В докладе развиты представления об эффекте циклотронного сверхизлучения (СИ) в классической физике плазмы и электронике [1] и установлена его аналогия с эффектом СИ Дике в квантовой электронике [2,3]. Последний, как известно [4], связан с диссипативной неустойчивостью волн поляризации (поляритонных мод) в образце предварительно инвертированных атомов. Развитие этой неустойчивости приводит к самопроизвольному возникновению сфазированных дипольных колебаний атомов, совместное когерентное излучение которых фор-

мирует короткий импульс СИ. Его мощность пропорциональна квадрату числа активных атомов: $Q \backsim N^2$.

Исследование аналогичного эффекта СИ в классической электронике и физике плазмы вызвано поиском способов импульсной генерации мощного когерентного электромагнитного излучения, не опирающихся на применение высокодобротных резонаторов. Известные способы генерации в более или менее открытых образцах чаще всего основаны на так называемом эффекте суперлюминесценции, т. е. вынужденном усилении спонтанного излучения несфазированных возбужденных частиц. Однако процесс суперлюминесценции развивается медленно в масштабе времени жизни $T_2$ (некогерентной релаксации) дипольных колебаний отдельных частиц — атомов или электронов — и поэтому возникающая в активном образце поляризация оказывается сравнительно небольшой, а коллективное поведение частиц проявляется сравнительно слабо.

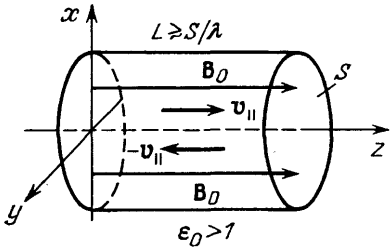


Рис. 1. Одномерная модель магнитной ловушки с небольшим числом Френеля $F = S/L\lambda$ ($\lambda$ — длина волны излучения, $L$ — длина ловушки, $S$ — площадь ее торцов, отражающих электроны и электромагнитное поле)

В этой связи важен анализ тех механизмов генерации, в которых самопроизвольное возникновение колебаний излучающих частиц сопровождается их эффективной взаимной фазировкой, происходящей вследствие взаимодействия частиц друг с другом через поле излучения. Особый интерес представляет тот случай, когда постоянно действующая накачка отсутствует и процесс излучения, спонтанно развивающийся в открытой неравновесной системе изначально неколеблющихся активных частиц, является нестационарным когерентным процессом малой длительности $\Delta t \ll T_2$. Такой быстрый переходный процесс имеет ряд преимуществ и принципиальных отличий от процесса суперлюминесценции и называется *коллективным спонтанным излучением.*

В классической физике плазмы и электронике, где активными частицами являются движущиеся электроны-осцилляторы со слабо неэквидистантным спектром энергетических уровней, подобные процессы мало изучены. С целью установления конкретной аналогии процессов такого рода со сверхизлучением Дике в докладе подробно рассмотрена симметричная одномерная модель магнитной ловушки, в которой имеются два встречных моноскоростных потока электронов (с концентрацией $N_e$ и энергией $\mathscr{E}_0$),летящих вдоль однородного магнитного поля $\mathbf{B}_0$ в условиях аномального эффекта Допплера, когда их скорость $v_\parallel$ превышает фазовую скорость электромагнитных волн в среде $c_0 = c/\varepsilon_0^{1/2}$. Роль среды может играть замедляющая электродинамическая система или диэлектрик с проницаемостью $\varepsilon_0 > 1$ (рис. 1). Показано, что в этой ситуации возможен эффект *циклотронного сверхизлучения* — поток классических электронных осцилляторов в магнитном поле может спонтанно излучать короткие когерентные импульсы в модах с дискретным спектром, причем максимальная мощность импульсов пропорциональна квадрату электронной концентрации: $Q_{max} \backsim N_e^2$. Установлено, что механизмом циклотронного сверхизлучения является диссипативная неустойчивость медленной циклотронной волны отрицательной энергии, развивающаяся за счет потери энергии электромагнитного поля — омической или дифракционной, обусловленной высвечиванием излучения через боковую поверхность ловушки.

Существенно, что циклотронное сверхизлучение представляет собой нестационарный переходный процесс, который принципиально отличается как от обычно используемых в электронике квазистационарных процессов в резонаторах (например, в случае циклотронных мазеров на аномальном эффекте Допплера), так и от известных в физике плазмы квазипериодических

осцилляции, связанных с нелинейным затуханием Ландау. В отличие от нелинейного затухания Ландау, существующего в отсутствие реальной диссипации энергии и обусловленного расфазировкой частиц, обладающих различными скоростями и энергиями, в рассматриваемой системе моноскоростных частиц процесс теряет осцилляторный характер и становится апериодическим благодаря сильной диссипации энергии поля, связанной с ее выводом из ловушки.

В докладе изложены условия возникновения циклотронного сверхизлучения, его линейная и нелинейная стадии, а также временные и энергетические параметры импульсов, генерируемых в одномодовом и многомодовом

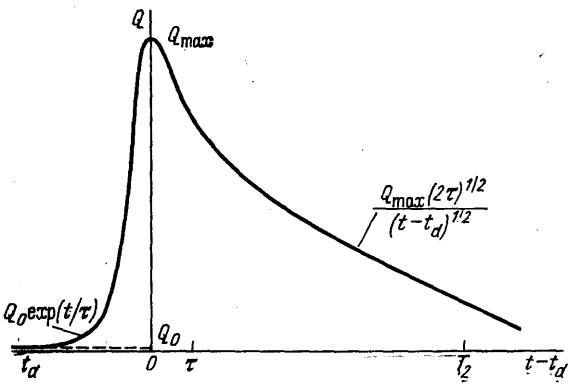


Рис. 2. Форма импульса циклотронного сверхизлучения в одномодовом режиме.

Длительность импульса порядка нескольких $\tau = 2\pi\sigma_0 c_0/\omega_L^2 (v_{||} - c_0)$, время задержки $t_d = \tau \ln (Q_{max}/Q_0)$, максимальная мощность в расчете на единицу объема $Q_{max} = \mathscr{E}_0 N_e \omega_L^2 (v_{||} - c_0)/\omega_0(\varepsilon_0 - 1)\varepsilon_0 c_0$, где $\omega_0 = \omega_B c_0/(v_{||} - c_0)$ — частота излучения, $\omega_B = eB_0/mc$ — релятивистская гирочастота, $\omega_L = (4\pi e^2 N_e/m)^{1/2}$ — плазменная частота электронного пучка, $\sigma_0$ — эффективная проводимость, характеризующая распределенные дифракционные или омические потери излучения в ловушке, и $Q_0$ — начальный спонтанный уровень мощности некогерентного циклотронного излучения из ловушки

режимах сверхизлучения [1,5]. Характерная форма импульса в случае неустойчивости одной циклотронной моды колебаний ловушки представлена на рис. 2. В случае одновременной неустойчивости нескольких циклотронных мод показано существование режима «эстафеты мод», отвечающего равнозамедленному движению электронного потока и распространению мощности излучения вверх по частотному спектру мод ловушки.

Наряду с общими свойствами циклотронного сверхизлучения и сверхизлучения. Дике выяснен ряд различий этих двух процессов. Наиболее значительное различие связано с типом нелинейности, определяющей форму имлульса сверхизлучения. Если для двухуровневых атомов — это нелинейность типа насыщения, обусловленная изменением разности населенностей их уровней и одинаково влияющая на инкременты поляритонных мод с различными волновыми числами, то для движущихся электронов в магнитном поле — это нелинейность резонансного типа, вызванная допплеровским изменением частоты колебаний электронов при их торможении под действием поля и оказывающая выборочное влияние на инкременты циклотронных мод с различными волновыми числами.

Следует подчеркнуть, что установленная конкретная аналогия между сверхизлучением Дике в системе квантовых (двухуровневых) атомных осцилляторов и циклотронным сверхизлучением в системе классических электронных осцилляторов, движущихся в магнитном поле в условиях аномального эффекта Допплера, не исчерпывает, а фактически лишь ставит проблему СИ (коллективного спонтанного излучения) в классической физике плазмы и электронике. В частности, согласно [6], возможности реализации коллективного спонтанного излучения движущегося сгустка электронов имеются также в лазерах на свободных электронах. При этом представляет интерес излучение электронным сгустком как дискретных мод, так и волн непрерывного спектра, в том числе в режиме однонаправленного высвечивания импульса сверхизлучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняков В. В., Кочаровский В. В., Кочаровский Вл. В.// Изв. вузов. Сер. «Радиофизика». 1986. Т. 29. С. 1095.
2. Dicke R. H.//Phys. Rev. 1954. V. 93. P. 99.
3. Железняков В. В., Кочаровский В. В., Кочаровский Вл. В.// УФН. 1986. Т. 150. С. 455.
4. Железняков В. В., Кочаровский В. В., Кочаровский Вл. В.// ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 1565.
5. Zheleznyakov V. V., Kocharovsky V. V., Kocharovsky Vl. V.// Proceedings of Contributed Papers of the Intern. Conference on Plasma Physics. — Kiev, 1987. — V. 4. P. 111.
6. Bonifacio R., Casagrande F.//Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. Ser. A. 1985. V. 239.P. 36.

[621.348.9+537.67](048)