

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО И ИОННОГО ПУЧКОВ С КАЛИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

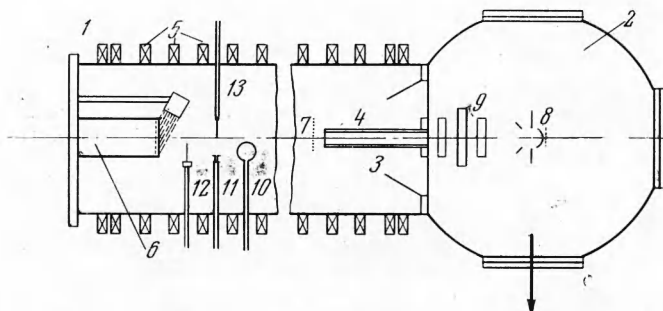
Н. С. Бучельникова, А. М. Бударяцев

(Новосибирск)

Исследованию взаимодействия пучков заряженных частиц с плазмой посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ [1]. Однако практически все эксперименты с электронными пучками выполнены в условиях, когда плазма создается самим пучком. Экспериментов с быстрыми ионными пучками ($v_{0i} \gg v_{Te}$, где v_{Te} — тепловая скорость электронов плазмы) нет.

В настоящей работе исследовано взаимодействие электронного и протонного пучков с сильноионизованной калиевой плазмой, создаваемой независимо от пучка.

Описание установки. Схема установки показана на фиг. 1. Вакуумная камера представляет собой охлаждаемую водой трубу 1 из нержавеющей стали внутренним диаметром 15 см и длиной 144 см. Труба соединена с объемом 2 через фланец 3, имеющий окно с подвижной шторкой и «градиентную трубку» 4. При закрытой шторке регулировкой натекания можно довести давление в трубе до 10^{-2} торр при давлении в объеме $2 \cdot 10^{-5}$ торр. Это позволяет использовать установку для работы с плазмой, образованной самим пучком. Рабочее давление в трубе при открытой шторке и отсутствии натекания составляет $1 \cdot 10^{-6}$ торр.



Фиг. 1. Схема установки: 1 — труба, 2 — объем электронной (ионной) пушки, 3 — переходный фланец, 4 — «градиентная» трубка, 5 — катушки магнитного поля, 6 — ионизатор с напылителем калия, 7 — подвижная вольфрамовая сетка, 8 — электронная (ионная) пушка, 9 — линза электронной (ионной) пушки, 10 — магнитный зонд, 11 — дипольный зонд, 12 — штывевой зонд, 13 — лэнгмюровский зонд

Магнитное поле, направленное вдоль оси трубы, создается системой катушек 5. Питание катушек импульсное, длительность импульса тока ~ 15 мксек. Магнитное поле может меняться от 0.6 до 6 кэ. Неоднородность поля вдоль оси не превышает 2%. Длина зоны однородного поля ~ 100 см.

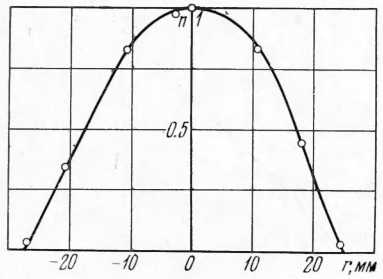
Щелочная плазма создается при термической ионизации паров калия на вольфрамовом ионизаторе 6 диаметром 4 см, имеющем температуру ~ 2000 °К. Ионизатор расположен в зоне однородного поля. Столб плазмы ограничен по длине подвижной сеткой 7, находящейся обычно на расстоянии ~ 50 см от ионизатора. На сетку подается потенциал, равный потенциалу плазмы. Плотность плазмы максимальна на оси и спадает по радиусу. Распределение плотности плазмы по радиусу и длине представлено на фиг. 2 и 3. Эксперименты проводились при плотности плазмы $1 \cdot 10^9$ — $7 \cdot 10^{10}$ см³ (плотность измерялась на оси столба в 10 см от ионизатора).

Электронный пучок создается трехэлектродной пушкой 8, расположенной в объеме 2, вне магнитного поля. Пушка работает в импульсном режиме, длительность импульса 100 мксек. Энергия пучка 2—23 кэв, максимальный ток в районе ионизатора ~ 300 ма (плотность тока ~ 1 а/см²). Диаметр пучка 6 мм, разброс по энергии, определенный при помощи электростатического анализатора, составляет $\sim 1\%$. Смещение пучка относительно оси трубы, определенное при помощи флюоресцирующего экрана, не превышает 2 мм.

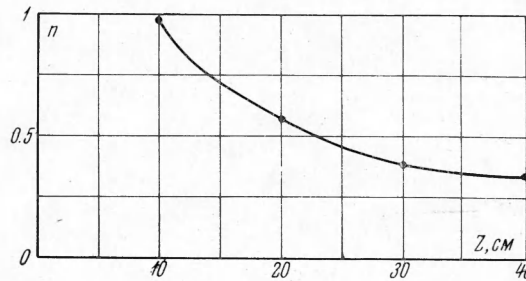
При работе с ионными пучками вместо электронной пушки устанавливается тот или иной ионный источник. Один из них — импульсный водородный дуговой источник, разработанный под руководством Г. И. Димова, обладающий следующими параметрами: энергия пучка 1,5—6 кэв, ток в районе ионизатора 20 ма (плотность тока ~ 40 ма/см²), диаметр пучка 7—8 мм, длительность импульса 100 мксек. Второй источник — «дуоплазматрон» — имеет следующие параметры: энергия пучка 20—50 кэв, ток в районе ионизатора 30 ма (плотность тока ~ 40 ма/см²), диаметр пучка 9—10 мм, длительность импульса 100 мксек. В обоих случаях пучок инжектируется строго по оси.

Плотность плазмы измерялась одиночными лэнгмюровскими зондами 13, перемещающимися по радиусу.

Высокочастотные колебания в плазме измерялись штывревыми, дипольными и магнитными зондами — антеннами 10—12. В качестве измерительных приемников использовались приемники типа П5-1-П5-7, перекрывающие диапазон частот 20—7000 мгу и обладающие чувствительностью 10^{-11} — 10^{-12} вт, а также селективный усилитель с диапазоном измеряемых частот 0.5—25 мгу и чувствительностью 10^{-12} вт.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Распределение плотности плазмы n в относительных единицах по радиусу

Фиг. 3. Распределение плотности плазмы n по длине z , при этом $z = 0$ — координата ионизатора

Результаты эксперимента. В ряде работ, посвященных исследованию взаимодействия электронного пучка с плазмой [$2-6$], показано, что в плазме, образованной пучком и имеющей малую плотность ($\omega_e < \omega_{He}$), возбуждается неустойчивость на электронной циклотронной частоте. При этом было обнаружено, что возбуждение происходит в ограниченной области магнитных полей и энергий пучка. В качестве контрольного эксперимента был повторен эксперимент [2]. Параметры последнего таковы: энергия пучка 1—4 кэв, ток 50 ма, диаметр пучка 5 мм, магнитное поле 500—2000 э, давление 10^{-2} — 10^{-3} тор, длина области взаимодействия $L \leq 40$ см.

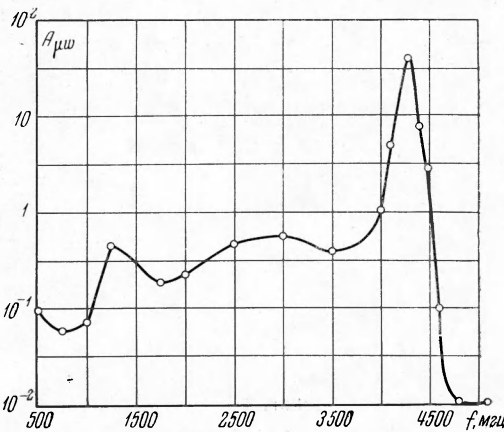
Параметры нашего эксперимента: энергия пучка 3 кэв, ток 50 ма, диаметр 6 мм, магнитное поле 600—2500 э, давление от 4 до $6 \cdot 10^{-3}$ тор, длина области взаимодействия 50 см. Отличие практически заключалось лишь в том, что пучок импульсный, с длительностью 100 мксек.

В результате было получено удовлетворительное согласие с экспериментом [2]. Действительно, в диапазоне магнитных полей 1—2.5 кэ наблюдалось возбуждение циклотронной частоты в некоторой области частот и вблизи нее. Типичный спектр колебаний приведен на фиг. 4. Отметим, что максимальные амплитуды, измеренные штывревым зондом (длина 6 мм, диаметр 0.5 мм), в районе оси пучка достигают величины 0,5 мвт (полоса пропускания измерительного приемника 3 мгу). Плотность плазмы в этих экспериментах не измерялась.

При исследовании взаимодействия электронного пучка с калиевой плазмой параметры плазмы и пучка были выбраны так, что выполнялись следующие неравенства:

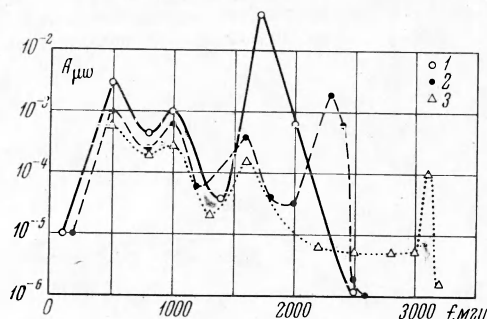
$$v_0 \gg v_{Te}, \quad n_0 \gg n_1, \quad f_{He} > f_{oe}$$

Здесь v_0 — 2.5—8.5 $\cdot 10^9$ см/сек — скорость электронов пучка (2—23 кэ); v_{Te} — 2.4 $\cdot 10^7$ см/сек — тепловая скорость электронов плазмы; n_1 — 1—3 $\cdot 10^8$ см $^{-3}$ — плотность электронов пучка ($I = 100$ ма); n_0 — 1—70 $\cdot 10^9$ см $^{-3}$ — плотность электронов плазмы; f_{oe} — 0.3—2.2 $\cdot 10^9$ мгу — лэнгмюровская частота плазмы; f_{He} — 1.7—6 $\cdot 10^9$ мгу — электронная циклотронная частота ($H = 0.6$ —2.2 кэ).



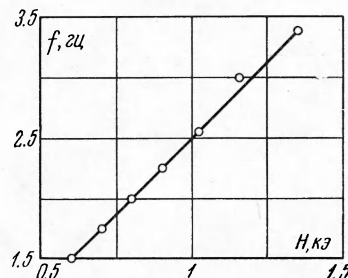
Фиг. 4. Спектр колебаний пучковой плазмы; $H = 1.5$ кэ, $p = 4.1 \cdot 10^{-3}$ тор, $I = 60$ ма, $U_0 = 3$ кэ

При таких условиях можно было ожидать возбуждения циклотронной неустойчивости, а также неустойчивости в области плазменных частот [1,7,8]. Действительно, циклотронная неустойчивость была обнаружена при малых магнитных полях ($H < 1,2 \text{ кэ}$) и больших энергиях ($\sim 18\text{--}20 \text{ кэв}$) электронов пучка. Одновременно с циклотронной частотой возбуждается и сплошной спектр более низких частот, который тя-



Фиг. 5

Фиг. 5. Спектры колебаний щелочной плазмы при различных магнитных полях; $n_0 = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $I = 60 \text{ ма}$, $U_0 = 20 \text{ кэв}$, 1 — $H = 0,6 \text{ кэ}$, 2 — $H = 0,8 \text{ кэ}$, 3 — $H = 1,1 \text{ кэ}$



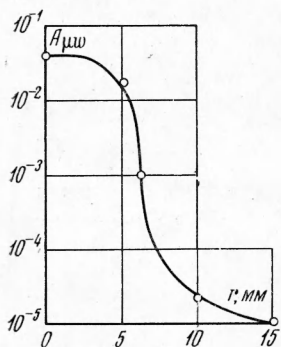
Фиг. 6

Фиг. 6. Зависимость возбуждаемой частоты от магнитного поля. Прямая — $f_{He} = eH/2\pi mc$, $n_0 = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $I = 60 \text{ ма}$, $U_0 = 20 \text{ кэв}$

нется до 150—200 мГц. Типичные спектры представлены на фиг. 5. Зависимость наблюдаемой частоты пика от магнитного поля хорошо согласуется с расчетной (фиг. 6). Колебания локализованы вблизи оси плазменного столба и занимают область диаметром около 1 см (фиг. 7).

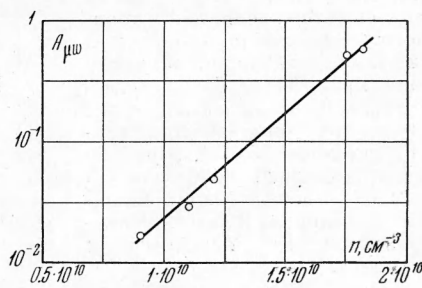
Амплитуда колебаний на циклотронной частоте возрастает с ростом плотности плазмы (фиг. 8) и ростом тока пучка (фиг. 9) и падает с ростом магнитного поля (фиг. 10). Следует отметить, что максимальные амплитуды, наблюдавшиеся в этом эксперименте, не превышали 10^{-7} вт (для того же зонда и того же измерительного приемника, что и в случае «пучковой» плазмы).

При помощи подвижной сетки, ограничивающей плазменный столб по длине, можно было менять длину столба от 66 до 34 см. Зависимость амплитуды циклотронной частоты A (в относительных единицах), измеренной неподвижным штыревым зондом, от длины столба L см показана на фиг. 11 (зонд расположен в 20 см от ионизатора). Видна четкая периодичность в изменении амплитуды с длиной столба, причем длина периодичности оказывается равной $\lambda_H = v_0 / f_{He}$.



Фиг. 7

Фиг. 7. Распределение амплитуды циклотронной частоты по радиусу; $H = 0,6 \text{ кэ}$, $n_0 = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $I = 60 \text{ ма}$, $U_0 = 20 \text{ кэв}$

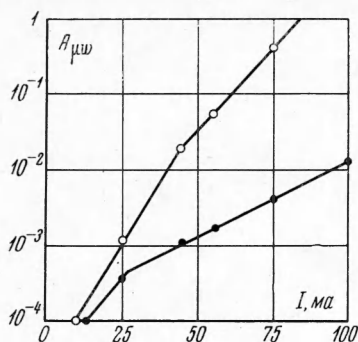


Фиг. 8

Фиг. 8. Зависимость амплитуды циклотронной частоты от плотности плазмы; $H = 0,6 \text{ кэ}$, $I = 60 \text{ ма}$, $U_0 = 20 \text{ кэв}$

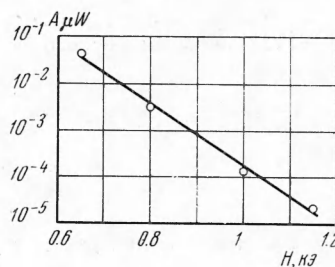
Характерные частоты в области плазменных или кратных им частот, зависящие от плотности плазмы, обнаружены не были, несмотря на то, что в поисках оптимального режима их возбуждения снимались семейства спектральных кривых при различных

магнитных полях и энергиях электронов пучка. Магнитное поле менялось от 0.7 до 2.5 кэ через 0.4 кэ, энергия пучка — от 2.5 до 23 кэв через 3—4 кэв. При этом плотность плазмы составляла $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, ток пучка 60 ма. Изменения характера спектров, а также мощности излучения не обнаружено. Типичные спектры приведены на фиг. 12. Максимальная амплитуда не превышает при этом 10^{-9} — 10^{-10} вт . Следует отметить, что с ростом плотности плазмы граница спектра несколько смещается в сторону более вы-



Фиг. 9

Фиг. 9. Зависимость амплитуды циклотронной частоты от тока пучка: $U_0 = 20 \text{ кэ}$; $n_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; 1 — $H = 0.6 \text{ кэ}$; 2 — $H = 1 \text{ кэ}$



Фиг. 10

Фиг. 10. Зависимость амплитуды циклотронной частоты от магнитного поля: $n_0 = 1.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; $I = 60 \text{ ма}$; $U_0 = 20 \text{ кэ}$

соких частот и амплитуды колебаний незначительно увеличиваются. С ростом тока пучка амплитуды растут почти пропорционально току.

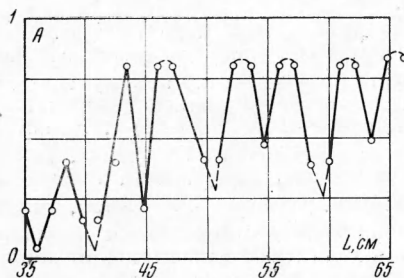
При исследовании взаимодействия с плазмой ионного пучка выполнялись те же условия, что и для электронного: $v_0 > v_{Te}$, $n_0 > n_1$, $f_{He} > f_{oe}$ (в большинстве случаев).

При этом $v_0 = 5 \cdot 10^7$ — $1 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ (энергия 1.5—6 кэв); $n_1 = 2.5 \cdot 10^9$ — $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (ток 20 ма); $v_0 = 1.8 \cdot 10^8$ — $2.8 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ (энергия 20—50 кэв); $n_1 = 9 \cdot 10^8$ — $1.4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (ток 30 ма); $n_0 = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; $f_{oe} = 1400 \text{ мГц}$; $f_{He} = 560$ — 7000 мГц (200—2500 э).

В диапазоне частот 3—4000 мГц возбуждения колебаний не обнаружено.

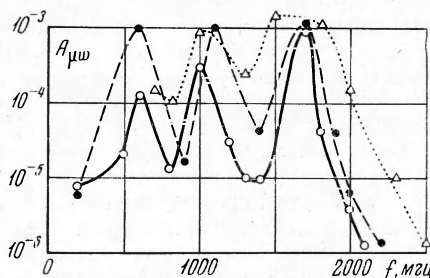
Пучок более быстрых ионов (20—50 кэв) возбуждает в плазме сравнительно низкочастотные колебания (до 2.5—3 мГц) с амплитудами $\sim 10^{-7} \text{ вт}$. В рассматриваемом эксперименте эти колебания не исследовались, но можно предположить, что они связаны с ионными плазменными частотами.

Обсуждение результатов. Теоретические исследования вопроса о взаимодействии пучка заряженных частиц с плазмой, проведенные рядом авторов, показывают, что система плазма — пучок неустойчива по отношению к колебаниям, как правило,



Фиг. 11

Фиг. 11. Зависимость амплитуды циклотронной частоты от длины столба: $H = 0.6 \text{ кэ}$, $n_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; $I = 50 \text{ ма}$; $U_0 = 19 \text{ кэ}$



Фиг. 12

Фиг. 12. Спектры колебаний щелочной плазмы при разных плотностях:
 $H = 1.5 \text{ кэ}$; $I = 80 \text{ ма}$; $U_0 = 3.5 \text{ кэ}$;
 1 — $n_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; 2 — $n_0 = 1.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; 3 — $n_0 = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

продольным и лежащим на частотах, близких к характерным частотам плазмы, таким, как электронная циклотронная частота ω_{He} , плазменная электронная частота ω_0 , «гибридная» частота $(\omega_{He} \omega_{H_1})^{1/2}$ и т. д. [1]. Вопрос о взаимодействии ограниченного пучка с плазмой того же диаметра, находящейся в магнитном поле, рассмотрен в [7]. Неогра-

ническая задача рассмотрена в работе [8]. В обоих случаях показано, что механизмом возбуждения неустойчивости может быть черенковский эффект или аномальный эффект Допплера. Возбуждаемые частоты лежат вблизи ω_{He} и ω_0 (при $\omega_{He} > \omega_{0e}$). Аналогичные выводы сделаны в работе [9] при рассмотрении взаимодействия «тонкого» пучка с плазмой большого диаметра. Так как в рассматриваемом случае колебания сосредоточены в области, занятой пучком, правомерно использовать решения, полученные для пучка и плазмы равного диаметра [7].

Выражения для инкрементов нарастания колебаний вблизи ω_{0e} и ω_{He} для обоих механизмов возбуждения таковы:

Условие черенковского резонанса $\omega \approx k_z v_0$

$$\text{Im } \omega_{0e} \approx \left(\frac{\Omega_0^2 k_z^2 a^2}{\omega_{0e}^2 \lambda_p^2} \right)^{1/3} \omega_{0e} \approx n_0^{1/6} n_1^{1/3} k_z^2 / 3,$$

$$\text{Im } \omega_{He} \approx \left(\frac{\Omega_0^2 \omega_{0e}^2 k_z^2 a^2}{\omega_{He} \lambda_p^2} \right)^{1/3} \approx \left(\frac{n_0 n_1 H}{v_0^2} \right)^{1/3}$$

Условие доплеровского резонанса $\omega \approx k_z v_0 - \omega_{He}$

$$\text{Im } \omega_{0e} \approx \frac{\Omega_0}{2} \left(\frac{\omega_{0e} k_z a}{\omega_{He} \lambda_p} \right)^{1/2} \approx \frac{n_0^{1/2} n_1^{1/2}}{v_0^{1/2}},$$

$$\text{Im } \omega_{He} \approx \frac{\Omega_0}{2} \frac{\omega_{0e} k_z a}{\omega_{He} \lambda_p} \approx \frac{n_0^{1/2} n_1^{1/2}}{v_0}$$

где Ω_0 — плазменная частота пучка; k_z — продольная компонента волнового вектора; v_0 — скорость частиц пучка; λ_p — числовой параметр порядка от 1 до 2.4; a — радиус пучка.

Численные значения инкрементов для параметров, соответствующих нашему эксперименту, имеют один порядок величины для всех четырех случаев: $\text{Im } \omega \approx 1-5 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$, причем отношение значения $\text{Im } \omega_H$ при черенковском механизме к значению $\text{Im } \omega_H$ при доплеровском механизме приблизительно равно 2.

Таким образом, можно ожидать возбуждения колебаний в районах электронной, циклотронной и плазменной частот.

Действительно, обнаружено, что при взаимодействии электронного пучка с калиевой плазмой возбуждаются колебания в районе электронной циклотронной частоты в довольно узком интервале $\Delta f \approx 100 \text{ мГц}$.

Длина волны этих колебаний была измерена в эксперименте с изменением длины плазменного столба. Очевидно, что при возбуждении продольных колебаний в ограниченной по длине системе должны возбуждаться стоячие волны с длиной волны, удовлетворяющей условию $L = n\lambda = nv_0 / f$ ($n=1,2,3,\dots$).

В экспериментах настоящей работы при данном магнитном поле возбуждаемая частота постоянна ($f = f_{He}$). Естественно, что при плавном изменении L это условие может выполняться только при изменении фазовой скорости волны. Однако при «ухуде» фазовой скорости от скорости частиц пучка амплитуда колебаний должна уменьшаться из-за уменьшения инкремента. Когда $\Delta L = \lambda$, т. е. $L - \Delta L = (n-1)\lambda$, v_ϕ снова приближается к v_0 , и амплитуда вновь возрастает до максимального значения. Таким образом, определенная в эксперименте λ_H действительно дает длину волны. Оказалось, что $\lambda = v_0 / f_{He}$ (измеренное значение $\lambda = (4.6 \pm 0.4) \text{ см}$, расчетное $\lambda = 4.5 \text{ см}$), откуда следует, что колебания на электронной циклотронной частоте возбуждаются черенковским механизмом. Отметим, что слабая зависимость амплитуды максимумов от длины столба может быть связана с абсолютным характером неустойчивости, что согласуется с теоретическими предположениями [9].

Можно было ожидать, что зависимость амплитуды колебаний от различных параметров будет соответствовать зависимости от них инкремента. Действительно, оказывается, что, так же как и инкремент, амплитуда растет с ростом тока пучка и плотности плазмы. Однако зависимость амплитуды от v_0 и H отличается от ожидаемой. Неустойчивость наблюдается только при больших скоростях пучка (18–20 μe), в то время как $\text{Im } \omega_{He} \approx 1 / v_0^{2/3}$, амплитуда колебаний резко падает с ростом магнитного поля, а $\text{Im } \omega_{He} \approx H^{1/3}$.

В области плазменных частот, согласно работам [7,9], должны возбуждаться колебания в районе ω_{0e} и ниже — $\omega \approx \omega_{0e} k_z a$ ($k_z a < 1$) с инкрементами, растущими при $\omega \rightarrow \omega_{0e}$. Выше ω_{0e} спектр должен довольно резко обрываться.

