

На правах рукописи

КИМ Наталья Енчуновна

**Коллективные явления в магнитоактивных плазменных средах с учетом
спина электронов**

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2005

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор П.А. Поляков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Н.С. Ерохин
доктор физико-математических наук
М.А. Степович

Ведущая организация: Московский государственный институт
электроники и математики (технический университет)

Защита состоится «___» _____ 2005 г. в ___ час. на заседании Диссертационного Совета К 501.001.17 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ, физический факультет, ауд. ___

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан «___» _____ 2005 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета К 501.001.17
д.ф.-м.н.

П.А. Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации обусловлена повышенным интересом современной физики к гиромагнитным явлениям в плазменных и других средах, вызванным спином частиц. Эти исследования могут иметь большой интерес для понимания явлений, протекающих в сверхплотной фемтосекундной лазерной плазме, плазме астрофизических объектов (пульсары), а также могут быть полезными для современной спинтроники.

Цель работы. Данная диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию влияния собственного магнитного момента электронов на коллективные колебательные явления в классических магнитоактивных плазменных средах. Основной целью являлось построение непротиворечивой гидродинамической и кинетической теории с учетом спина электронов и исследование волн, распространяющихся в плазме при наличии внешнего поля.

Научная новизна. В диссертации впервые получены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы с учетом собственного аномального магнитного момента электрона в рамках гидродинамического и кинетического подхода. На основе анализа полученных дисперсионных уравнений обнаружена новая мода в окрестности циклотронной частоты, связанная с наличием у электрона собственного магнитного момента. Показано, что в случае распространения волны перпендикулярно внешнему магнитному полю в приближении $g = 2$ имеется единственная мода в окрестности циклотронной частоты, которая при малых температурах определяется спиновым вкладом (Кузьменков Л.С., Харабадзе Д.Э., 2004 г.), а при больших — вырождается в моду Бернштейна на циклотронной частоте.

Впервые получены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы с использованием двухтемпературной функции распределения электронов с нерелятивистским разбросом компонент скоростей, перпендикулярных внешнему магнитному полю. Показано, что при достижении продольной температурой релятивистских значений происходит вырождение циклотронных мод.

Впервые получены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной релятивистской одномерной плазмы с учетом спинового тока электронов. В случае волн, распространяющихся вдоль магнитного поля, обнаружено релятивистское температурное вырождение спиновой моды в области больших длин волн.

Результаты диссертации являются обоснованными и достоверными, так как они получены с помощью строгих математических методов в рамках достаточно полных и хорошо зарекомендовавших себя моделей макроскопической электродинамики и согласуются в частных случаях с результатами других авторов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование наличия ветви, обусловленной наличием спина, в магнитоактивной плазме в рамках гидродинамического и кинетического подхода.
2. Вырождение циклотронных мод в магнитоактивной плазме при релятивистских температурах.
3. Вырождение моды, обусловленной наличием спина, в магнитоактивной плазме в области больших длин волн при релятивистских температурах.

Научная и практическая значимость. Результаты настоящей диссертации могут быть использованы в экспериментальных и теоретических исследованиях плотных плазменных сред, например, плазмы, получаемой в результате воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на вещество, а также плазменных сред различных астрофизических объектов, таких как пульсары.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы, включающего 100 наименований. Общий объем текста – 102 машинописных страницы. Работа содержит 11 рисунков.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 статей и 8 тезисов докладов на конференциях, список которых приведен в конце автореферата.

Апробация. Результаты диссертации докладывались на XXX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2003 г.), Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2003» (Москва, 2003 г.), XII и XIII Международных конференциях по спиновой электронике и гировекторной электродинамике (Фирсановка Московской обл., 2003 г., 2004 г.), XL Всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2004 г.), Международной конференции МСС-04 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (Москва, 2004 г.), X Всероссийской школе-семинаре по физике микроволн (Звенигород, 2005 г.), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2005) (Москва, 2005 г.), III Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005 г.).

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется основная цель работы, представлен обзор современного состояния исследований по теме диссертации.

В первой главе диссертации исследуется распространение продольных и поперечных волн в нерелятивистской магнитоактивной плазме в рамках гидродинамической теории с учетом собственного магнитного момента электронов в приближении Баргманна — Мишеля — Телегди. Приведено обоснование формул, описывающих влияние спина электронов на дисперсионные свойства плазмы, выражающееся в наличии спинового тока и дополнительной пондеромоторной силы, обусловленной наличием собственного магнитного момента. Выводятся дисперсионные уравнения на основе стандартной процедуры линеаризации и преобразования Фурье. Проводится тщательный численный и аналитический анализ распространения волн перпендикулярно и параллельно внешнему магнитному полю. Показано, что распространение поперечных волн параллельно внешнему магнитному полю описывается следующими дисперсионными уравнениями:

$$N^2 = \frac{\omega \pm \frac{g}{2} \Omega}{\omega \pm \frac{g}{2} (\Omega - \Omega_\mu)} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \Omega)} \right),$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n/m}$ — плазменная частота, $\Omega = eH_0/mc$ — циклотронная частота, $\Omega_\mu = 4\pi eI_0/mc$ — характерная частота, обусловленная наличием спина, $g \approx 2\left(1 + \frac{\alpha}{2\pi}\right)$ — гиромагнитный коэффициент (фактор Ланде), $\alpha \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры. Приведенный далее анализ показывает наличие новой ветви электромагнитных волн в окрестности циклотронной частоты, распространяющихся вдоль внешнего магнитного поля.

Получено, что распространение волн перпендикулярно внешнему магнитному полю в рамках гидродинамической теории описывается следующими дисперсионными уравнениями:

$$N^4 \omega^4 \left(\frac{V^2}{c^2} - \frac{\Omega_\mu^2}{\omega_p^2} \right) - N^2 \omega^2 \left((\omega^2 - \omega_p^2) \left(1 + \frac{V^2}{c^2} \right) - (\Omega^2 - 2\Omega_\mu \Omega) \right) + (\omega^2 - \omega_p^2)^2 - \omega^2 \Omega^2 = 0,$$

$$N^2 = \frac{1}{\omega^2} \frac{(\omega^2 - \frac{1}{4} g^2 \Omega^2)(\omega^2 - \omega_p^2)}{\omega^2 - \frac{1}{4} g^2 (\Omega^2 - \Omega_\mu \Omega)},$$

где V^2 — тепловая скорость электронов. Анализ последнего уравнения показывает наличие ветви в окрестности циклотронной частоты, что было ранее отмечено в работе Кузьменкова и Харабадзе, однако учет влияния флуктуаций вакуума путем введения фактора Ланде корректирует положение данной моды.

Во второй главе диссертации рассмотрено распространение продольных и поперечных волн в нерелятивистской магнитоактивной плазме в рамках кинетической теории Власова с учетом собственного магнитного момента электронов. Выводятся дисперсионные уравнения на основе стандартной процедуры линеаризации и преобразования Фурье. Получено дисперсионное уравнение, описывающее распространение поперечных волн перпендикулярно внешнему магнитному полю:

$$N^2 = \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \Omega^2} \frac{\theta}{mc^2} + \frac{g^2}{4} \frac{\Omega_\mu \Omega}{\omega^2 - \frac{1}{4} g^2 \Omega^2} \right)}.$$

Обнаружено, что в окрестности циклотронной частоты имеется две моды, описываемые данным уравнением (рис. 1): мода Бернштейна и мода, обусловленная наличием спина, отмеченная в первой главе. Показано, что в приближении $g = 2$ (то есть без учета влияния флуктуаций вакуума) указанные моды вырождаются в одну, которая при высоких температурах представляет собой моду Бернштейна, а при низких — моду, обусловленную спином (моду Кузьменкова — Харабадзе).

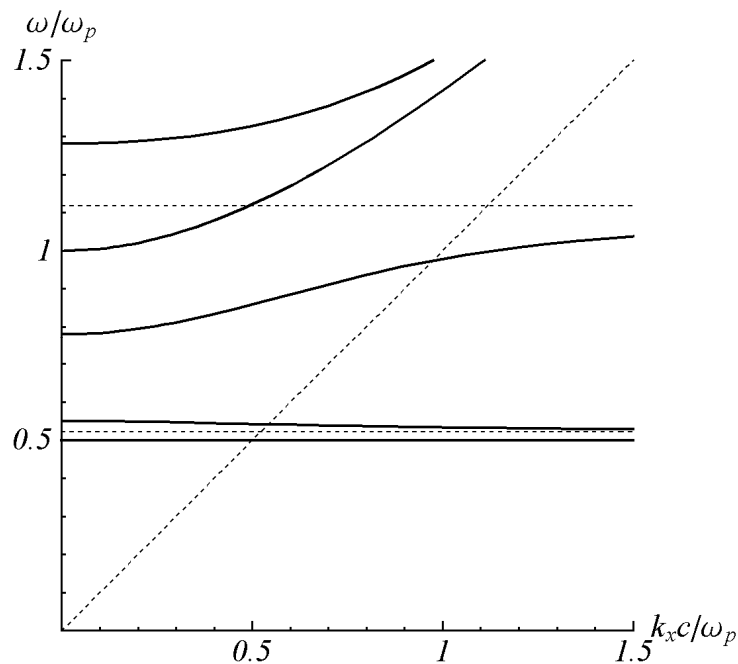


Рис. 1. Дисперсионные кривые для волн, распространяющихся перпендикулярно внешнему магнитному полю ($\Omega = 0.5\omega_p$, $\Omega_\mu = 0.1\Omega$, $\theta/mc^2 = 10^{-6}$, $g = 2.2$). Штриховыми линиями показаны асимптоты.

Получено дисперсионное уравнение, описывающее распространение поперечных волн вдоль внешнего магнитного поля:

$$N^2 = \frac{\left(\omega \mp \frac{g}{2}\Omega\right) \left[\omega \mp \Omega - \frac{\omega_p^2}{\omega} + i\pi \frac{\omega_p^2 (\omega \mp \Omega)}{k_z \omega} \sqrt{\frac{m}{2\pi\theta}} \exp\left(-\frac{m(\omega \mp \Omega)^2}{2\theta k_z^2}\right) \right]}{\left(\omega \mp \Omega\right) \left[\omega \mp \frac{g}{2}(\Omega - \Omega_\mu) + \frac{\omega_p^2 \omega (\omega \mp \frac{g}{2}\Omega)}{(\omega \mp \Omega)^3} \frac{\theta}{mc^2} \right]}.$$

Показано, что в этом случае также имеется мода, обусловленная наличием собственного магнитного момента, расположенная в окрестности циклотронной частоты.

Третья глава диссертации посвящена исследованию свойств релятивистской магнитоактивной плазмы. В первом параграфе рассмотрена задача распространения циклотронных волн перпендикулярно внешнему магнитному полю в релятивистской магнитоактивной плазме с двухтемпературной функцией распределения:

$$f_0 = C \exp\left(-\alpha\sqrt{1+u_\perp^2} - \beta\sqrt{1+u_z^2+u_\perp^2}\right),$$

$$C^{-1} = \int_{(\infty)} \exp\left(-\alpha\sqrt{1+u_\perp^2} - \beta\sqrt{1+u_z^2+u_\perp^2}\right) d\vec{u},$$

где $u_z = u_0 v_z / c$, $u_\perp = u_0 v_\perp / c$, $u_0 = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$, $v^2 = v_z^2 + v_\perp^2$; v_z , v_\perp — компоненты скорости параллельно и перпендикулярно внешнему магнитному полю, соответственно; $\alpha \gg 1$, β — температурные параметры, характеризующие поперечную и продольную температуры, соответственно.

Показано, что затухание циклотронных мод увеличивается с увеличением температуры, и в пределе ультрарелятивистских температур эти моды полностью вырождаются.

Второй параграф посвящен влиянию неволнового вклада на распространение электромагнитного возмущения в релятивистской одномерной магнитоактивной плазме, который обусловлен возникновением неаналитических особенностей компонент тензора диэлектрической проницаемости. Была рассмотрена начальная задача Ландау о распространении электромагнитного возмущения в плазме. Известно, что релятивистская зависимость массы частиц от скорости приводит к возникновению новых областей неаналитичности функции диэлектрического отклика на плоскости комплексных частот. Это обстоятельство в методе Ландау приводит к дополнительному неволновому вкладу, обусловленному наличием разрывов на римановой поверхности значений функции диэлектрического отклика.

Для волн, распространяющихся перпендикулярно внешнему магнитному полю, в коротковолновом пределе показано, что при достаточно больших температурах амплитуда неволнового вклада зависит от времени как e^{-t^2/σ^2} , где параметр σ не зависит от времени и растет с температурой. Получено также, что начальная амплитуда неволнового вклада растет с увеличением температуры, в то время как начальная амплитуда волнового вклада убывает с ростом температуры. На основании указанных соотношений сделан вывод, что хотя амплитуда неволнового вклада быстро убывает со временем, на начальном этапе она может достигать или даже превосходить амплитуду волнового возмущения.

В третьем параграфе приведен анализ влияния собственного магнитного момента на распространение волн параллельно внешнему магнитному полю в релятивистской магнитоактивной одномерной плазме. Влияние спина учитывалось в виде спинового тока

$$\vec{j}_s = c \operatorname{rot} \left(\frac{2\mu}{\hbar} n_e \langle \vec{\zeta} \rangle_{\vec{v}} \right), \text{ где } \langle \vec{\zeta} \rangle_{\vec{v}} \text{ — усредненное значение спина электронов по скоростям:}$$

$$\langle \vec{\zeta} \rangle_{\vec{v}} = \frac{\int \vec{\zeta}_{\vec{u}} f_e c^3 d^3 u}{\int f_e c^3 d^3 u},$$

где $\vec{\zeta}_{\vec{u}}$ — среднее значение оператора спина по состоянию квазиклассического волнового пакета и по всем частицам со скоростью \vec{u} — определяется уравнением Баргманна — Мишеля — Телегди:

$$\frac{d\vec{\zeta}_{\vec{u}}}{dt} = \frac{e}{2mc} \left(\left(g - 2 + \frac{2}{\gamma} \right) [\vec{\zeta}_{\vec{u}}, \vec{H}] + (g - 2) \frac{\gamma}{1 + \gamma} (\vec{\beta}, \vec{H}) [\vec{\beta}, \vec{\zeta}_{\vec{u}}] + \left(g - \frac{2\gamma}{1 + \gamma} \right) [\vec{\zeta}_{\vec{u}}, [\vec{E}, \vec{\beta}]] \right).$$

С учетом вида исходных уравнений тензор диэлектрической проницаемости рассматриваемой плазменной среды был представлен в виде $\epsilon_{\alpha\beta} = \epsilon_{\alpha\beta}^{(j)} + \epsilon_{\alpha\beta}^{(s)}$, где $\epsilon_{\alpha\beta}^{(j)}$ — компонента тензора диэлектрической проницаемости, обусловленная током проводимости электронов (которая определяется уравнениями без учета влияния спина), а $\epsilon_{\alpha\beta}^{(s)}$ — компонента тензора, обусловленная учетом вклада собственного магнитного момента электронов. На основе анализа выражений для компонент тензора диэлектрической проницаемости получено, что в ультрарелятивистской плазме для волн, распространяющихся вдоль внешнего магнитного поля, в длинноволновом приближении $\epsilon_{11}^{(j)} \pm i\epsilon_{12}^{(j)} \gg \epsilon_{11}^{(s)} \pm i\epsilon_{12}^{(s)} - \frac{k^2 c^2}{\omega^2}$, следовательно, описанная в первых двух главах мода,

обусловленная наличием собственного магнитного момента, вырождается при ультрарелятивистских температурах (по крайней мере в области длинных волн).

Выводы

В заключение сформулируем основные результаты, полученные в диссертации:

1. Получены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы с учетом собственного магнитного момента в гидродинамическом и кинетическом приближениях при нерелятивистских температурах.
2. В частных случаях распространения электромагнитных волн параллельно и перпендикулярно внешнему магнитному полю обнаружена новая ветвь в окрестности циклотронной частоты, связанная с наличием у электрона собственного магнитного момента.
3. Показано, что в случае распространения волны перпендикулярно внешнему магнитному полю в приближении $g = 2$ имеется единственная мода в окрестности циклотронной частоты, которая при малых температурах определяется спиновым вкладом, а при больших — вырождается в моду Бернштейна на циклотронной частоте.
4. Показано, что в магнитоактивной плазме с релятивистским разбросом продольных компонент скоростей электронов для случая распространения волн перпендикулярно внешнему магнитному полю происходит вырождение циклотронных мод и пропадание соответствующих резонансов.
5. Получены оценки влияния неволнового вклада на дисперсионные свойства релятивистской магнитоактивной плазмы, связанного с наличием неаналитических особенностей тензора диэлектрической проницаемости. Показано, что при $\alpha = mc^2/\Theta < 1$ неволновой вклад играет существенную роль, а в ультрарелятивистском пределе может значительно превышать традиционный волновой вклад.
6. Получены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной релятивистской одномерной плазмы с учетом спинового тока электронов.
7. В случае волн, распространяющихся вдоль магнитного поля, обнаружено релятивистское температурное вырождение спиновой моды в области больших длин волн.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ким Н. Е., Поляков О. П., Поляков П. А., Русаков А. Е. Циклотронный резонанс, обусловленный собственным магнитным моментом электронов в магнитоактивной плазме // XXX Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (24–28 февраля 2003 г.), сборник тезисов. — М., 2003. — С. 104.
2. Ким Н. Е. Влияние собственных магнитных моментов электронов на дисперсию верхнегибридной электронной ветви // Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2003» (15–18 апреля 2003 г., Москва), секция «Физика», сборник тезисов. — М.: Изд. МГУ им. М. В. Ломоносова, 2003. — С. 236–237
3. Ким Н. Е., Поляков П. А. Релятивистский тензор магнитоактивной плазмы с учетом спина электронов // Сборник статей по материалам XII Международной конференции по спиновой электронике и гировекторной электродинамике (19–21 декабря 2003 г., Фирсановка Московской обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2003. — С. 348–361.
4. Ким Н. Е., Поляков П. А. Влияние собственного магнитного момента электронов на верхнегибридный резонанс холодной магнитоактивной плазмы // XL Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии (19–23 апреля 2004 г., Москва), секция «Физика», тезисы докладов. — М., Изд-во РУДН, 2004. — С. 59–62.
5. Вагин Д. В., Ким Н. Е., Поляков О. П., Поляков П. А., Русаков А. Е. Циклотронные моды в релятивистской плазме с нерелятивистским поперечным разбросом температур // Труды ИЭИ. 2004. Вып. 4. — С. 496–502.
6. Ким Н. Е., Кирпичев С. Б., Поляков П. А., Русаков А. Е. Неволновые особенности релятивистской магнитоактивной плазмы // Международная конференция МСС-04 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (23–25 ноября 2004 г., Москва). Сборник трудов. — М.: РОХОС, 2004. С. 55–60.
7. Н. Е. Ким, П. А. Поляков. Влияние собственного магнитного момента электронов на линейный отклик плазменной среды // Международная конференция МСС-04 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (23–25 ноября 2004 г., Москва). Сборник трудов. — М.: РОХОС, 2004, с. 61–66.
8. Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е. О гидродинамической модели магнитоактивной плазмы // Сборник статей по материалам XIII Международной конференции по спиновой электронике и гировекторной электродинамике (3–5 декабря 2004 г., Фирсановка Московской обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2004. — С. 270–280.

9. Д. В. Вагин, Н. Е. Ким, П. А. Поляков, А. Е. Русаков. Особенности распространения электромагнитных волн в горячей магнитоактивной плазме с учетом спина электронов // X Всероссийская школа-семинар по физике микроволн (23-28 мая 2005, Звенигород), «Труды школы-семинара «Волны – 2005». — С. 35–37.
10. Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е. Коллективные спиновые эффекты в классических плазменных системах // Нелинейный мир, №3, 2005. — С. 155–162.
11. M. L. Akimov, N. E. Kim, P. A. Polyakov, A. E. Rusakov and N. N. Usmanov. Domain structure screening of a local magnetic inhomogeneity // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2005) (25–30 June 2005, Moscow). Book of Abstracts. — М.: Физический факультет МГУ, 2005. — Р. 434
1. Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е. Влияние собственного магнитного момента частиц на коллективные процессы в плотной плазме // III Межд. конф. «Фундаментальные проблемы физики» (13–18 июня 2005 г., Казань). Сборник тезисов. — Казань, 2005. — С. 208.