

Национальная Академия Наук Украины
Госкомитет Украины по использованию ядерной
энергии
Научный центр
"Институт Ядерных Исследований"

На правах рукописи

ПЛЮЙКО Владимир Андреевич

**РЕЛАКСАЦИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ
ВОЗБУЖДЕНИЙ
В НАГРЕТЫХ ЯДРАХ**

Специальность 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

Киев - 1996

А.В. 23.634

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760411 (J)

ь.
: "Институт ядерных исследова-
раины по использованию ядерной

энергии

- Официальные оппоненты:
- доктор физико-математических наук,
профессор
ИГНАТЮК Анатолий Владимирович
(ГНЦ РФ "ФЭИ", г. Обнинск, Россия)
 - доктор физико-математических наук,
профессор
ФИЛИППОВ Геннадий Федорович
(ИТФ НАН Украины, г. Киев, Украина)
 - доктор физико-математических наук,
в.н.с.
ФУРСА Аркадий Дмитриевич
(НЦ "ИЯИ", г. Киев, Украина)

Ведущая организация:

НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына Московского университета
(г. Москва, Россия)

Защита состоится "24" октября 1996 г.
в 14¹⁵ на заседании Специализированного Совета Д.01.68.01 при НЦ
"Институт ядерных исследований" по адресу:
252028, г.Київ, пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НЦ "Институт
ядерных исследований".

Автореферат разослан "19" сентября 1996 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета

В.Чес В.Д. Чеснокова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Изучение процессов затухания и распада высоковозбужденных состояний ядер является одной из основных задач ядерной физики. Экспериментальные и теоретические исследования этих явлений интенсивно развиваются. В последнее время наибольшее внимание уделяется изучению различных механизмов затухания и распада коллективных мод движений в нагретых ядрах.

Достаточно успешное описание коллективного движения в ядрах было достигнуто благодаря использованию приближенного способа описания системы многих взаимодействующих частиц в терминах одночастичных состояний в самосогласованном среднем поле. При соответствующем выборе эффективного нуклон - нуклонного взаимодействия удается получить единое описание как спектроскопических свойств ядер, так и сложных процессов их столкновения и деления. Трудности возникают в случае диссипативных процессов, например, при расчетах дисперсий массового, энергетического и зарядового распределений ядер в столкновениях тяжелых ионов, при исследовании динамики формирования осколков деления, при вычислении ширин затухания гигантских мультипольных резонансов (ГМР). Для исследования таких процессов с передачей энергии коллективного движения во внутренние степени свободы необходим выход за пределы зависящего от времени приближения среднего поля и учет корреляционного взаимодействия между частицами. Для коллективных движений с малыми амплитудами колебаний этого можно достичь, например, с помощью приближения случайных фаз с учетом частично-дырочных $2p2h$ конфигураций. Однако уже расчеты полных ширин распада ГМР в средних ядрах, в рамках таких полумикроскопических подходов, требуют больших затрат машинного времени, и результаты, как правило, не позволяют получить однозначную информацию о вкладах различных каналов релаксации и их взаимосвязи при формировании полных ширин.

Помимо затухания высоколежащих коллективных состояний за счет их связи с внутренними степенями свободы ядра происходит и

их прямой радиационный распад, когда γ -квант уносит всю энергию коллективной моды и ее спин. С последним процессом конкурирует и гамма - разрядка состояний компаунд - ядра. Причем информация о полных ширинах и других характеристиках ГМР, в частности гигантских дипольных резонансов (ГДР) в нагретых ядрах, извлекается именно при исследовании спектров гамма - распада компаунд - ядер, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью исследования механизмов релаксации возбужденных состояний нагретых ядер, в том числе и с помощью полуклассических моделей, позволяющих получить аналитические выражения для характеристик процессов затухания и γ - распада и благодаря этому значительно упростить проблемы расчета и физической интерпретации результатов.

Основные задачи и цели работы

Основными задачами работы являлись:

1. Вывод уравнения эволюции для квантовой одночастичной функции распределения Вигнера при условии быстрого изменения во времени среднего поля; развитие на этой основе полуклассических методов расчета характеристик быстрых неравновесных диссипативных процессов в ферми- системах "с памятью", когда значение интеграла столкновения определяется парными взаимодействиями во все предшествующие моменты времени (эффект запаздывания в интеграле столкновений).

2. Расчеты столкновительного вклада в ширины ГМР в холодных и нагретых ядрах с учетом эффекта запаздывания; разработка модели для учета в ширинах затухания однотельного механизма релаксации и вылета частиц, а также анализ взаимосвязи различных механизмов затухания коллективного движения в зависимости от температуры.

3. Разработка микроскопически обоснованных способов расчета средних характеристик гамма - разрядки возбужденных ядер, позволяющих использовать макроскопические подходы для описания динамики частиц; исследование зависимости от энергии возбуждений радиационной силовой функции, т.е., степень нарушения гипотезы Акселя -

Бринка; расчеты ширин и угловых распределения прямого радиационного распада изоскалярных ГМР, а также изучение справедливости высокотемпературного и высокоспинового приближений при вычислении γ -спектров.

Основная цель данной работы состояла в разработке достаточно надежных и не требующих проведения громоздких расчетов при их численной реализации полуклассических методов исследования ширин затухания быстрых неравновесных процессов и γ -распада возбужденных состояний ядер, а также в применении развиваемых подходов для анализа экспериментальных данных.

Теоретическая и практическая ценность исследований и их научная новизна

Получено выражение для линейаризованного интеграла столкновений в средах с запаздыванием в котором впервые одновременно учтены: быстрое изменение функции распределения, согласованное с ним изменение среднего поля, тождественность частиц и которое соответствует интерпретации звуковых колебаний в ферми-жидкости как квантов коллективных возбуждений, сопровождающих столкновения частиц.

Интеграл столкновений с запаздыванием в присутствии быстрых диссипативных колебаний представлен в виде разложения по мультиполям деформации поверхности Ферми. Исследована зависимость времен релаксации от мультипольности деформации поверхности Ферми. Показана применимость модифицированного приближения времени релаксации для интеграла столкновений с зависимостью эффективного времени релаксации от частоты коллективных возбуждений и температуры.

Впервые найдены аналитические соотношения для столкновительной ширины слабозатухающих коллективных возбуждений и вязкости в ядерной материи, а также в системах с резкой поверхностью, при произвольных частотах столкновений между нуклонами и для искажений поверхности Ферми с произвольной мультипольностью.

Построена и проанализирована модель независимых источников диссипации для расчета полной внутренней ширины слабозатухаю-

щих коллективных колебаний, учитывающая двухчастичные столкновения, механизм односторонней диссипации и вылет частиц. Исследованы нелинейные корреляции между различными каналами диссипации, обусловленные влиянием самосогласованного среднего поля. Продемонстрирована плавность поведения столкновительного компонента ширины с ростом энергии возбуждения и в отсутствие фазовых переходов в ядре.

Впервые получено выражение для средней скорости радиационного распада высоколежащих состояний ядер с произвольными (в том числе и малыми) значениями спина через мнимую часть температурной функции линейного отклика ядра на электромагнитное поле и согласованные с ним уравнения, определяющие термодинамическое состояние возбуждаемого поля ядра. Исследована применимость при расчете средних γ -ширин усреднения по каноническому ансамблю Гиббса и приближения больших спинов.

Построена новая микроскопически обоснованная модель для описания приведенной дипольной радиационной силовой функции, в рамках которой одновременно учтена зависимость от температуры как ширины распада коллективных состояний, так и средней тепловой энергии электромагнитного поля в нагретом ядре.

Выполненные исследования дают возможность понять механизмы затухания высокочастотных коллективных возбуждений в нагретых ядрах. Разработанные модели достаточно наглядны, что важно при их дальнейших обобщениях. Разработанные в диссертации полуклассические методы расчета ширины затухания и γ -распада дают возможность исследовать их среднее макроскопическое поведение, что позволяет выделить из эксперимента гладкий компонент и тем самым извлечь характеристики тонкой структуры этих величин. Важность оценки величин столкновительного времени релаксации и двухсторонней вязкости обусловлена тем, что эти величины входят в теории диссипативной динамики коллективных движений. В частности, вязкость в значительной степени определяет наблюдаемые характеристики деления возбужденных ядер и динамику слияния тяжелых ионов.

Информация о ширинах ГМР и форме радиационных силовых функций необходима также в прикладных задачах, в частности, для

расчета спектра γ -квантов и сечений при радиационном захвате нуклонов, и для изучения влияния коллективных возбуждений на плотность уровней.

Достоверность полученных результатов подтверждается как их совпадением с результатами исследований других авторов, в тех случаях когда они имеются, так и анализом использовавшихся при их выводе приближений с помощью более сложных подходов.

Характеристика метода исследований

Существуют микроскопические подходы в теории ядра с математически корректным разделением коллективных и одночастичных степеней свободы при котором строго учитываются кинематические корреляции в движении нуклонов и сохраняется полное число степеней свободы. Однако трудности, которые возникают при расчете с их помощью характеристик ядер, делают такие подходы практически не реализуемыми в тяжелых ядрах.

Наиболее адекватным при изучении средних (макроскопических) свойств процесса релаксации коллективных движений в тяжелых ядрах представляется использование кинетического уравнения Власова - Ландау, дополненного интегралом столкновений. Это транспортное уравнение учитывает одно из основных свойств ферми-системы, а именно взаимодействие частиц через самосогласованное поле. Для периодических коллективных движений уравнение Власова - Ландау совпадает с квазиклассическим приближением к соответствующему уравнению приближения случайных фаз. Выход за приближение среднего поля достигается с помощью добавления интеграла столкновения. Этот путь также удобен тем, что позволяет установить связь с макроскопическими подходами. Во многих ситуациях используя его можно получить замкнутые выражения для характеристик коллективного движения. Кроме того, таким способом легко достигается обобщение на случай отличных от нуля температур. Ранее выполненные исследования демонстрируют высокую степень достоверности результатов, полученных с использованием уравнения Власова - Ландау, при расчетах энергий и распределения сил ГМР в средних и тяжелых

ядрах. Именно поэтому в настоящей работе используется кинетический подход для описания коллективного движения в ядрах.

Апробация диссертации, публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации обсуждались и докладывались на 30 - 43, 45, 46 Всесоюзных (Международных с 1992) совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1980 - 1993, 1995, 1996); на Всесоюзной школе - семинаре по физике тяжелых ионов (г. Ужгород, 1984); на теоретической школе - семинаре по коллективной ядерной динамике (г. Саратов, 1988); на конференции "Коллективные состояния в атомных ядрах" (г. Дубна, 1988); на сессиях отделения ядерной физики АН СССР (1985, 1990); Всесоюзных (Международных) конференциях по нейтронной физике (г. Киев, 1983, 1987); Международной конференции "Ядерные данные в науке и технологии" (ФРГ, г. Юлих, 1991); 3, 4 Киевских международных школах по ядерной физике (г. Киев, 1992, 1994); а также были представлены на Международной конференции по ядерной физике (ФРГ, г. Висбаден, 1992); Международной конференции по ядерной структуре и ядерным реакциям при низких и промежуточных энергиях (г. Дубна, 1992); Международном рабочем совещании по динамическим флуктуациям и корреляциям в ядерных столкновениях (Франция, Aussois, 1992) и опубликованы в международных физических периодических журналах и трудах конференций.

Основные результаты диссертации содержатся в 30 публикациях (список см. в конце автореферата). В работах, выполненных в соавторстве, автор принимал непосредственное участие на всех этапах работы, а некоторые из них являются дальнейшим развитием самостоятельных работ автора.

Объем и структура диссертации

Диссертация содержит 267 страниц, включая 31 рисунок, 4 таблицы и список цитируемой литературы из 276 наименований. Она состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. В начале каждой главы приводится краткое введение, а в конце — основные результаты, которые в ней получены.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Обоснована актуальность темы, сформулированы цель и постановка задачи, отмечена новизна работы, и ее научное и практическое значение. Дан обзор литературы, связанной с экспериментальными и теоретическими исследованиями процессов затухания и γ -распада высоковозбужденных состояний ядер. Поясняется структура работы, а также приведены основные положения выносимые на защиту и апробация диссертации.

ГЛАВА 1. ЭФФЕКТЫ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В КИНЕТИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ

При выводе кинетического уравнения для одночастичной функции распределения Вигнера из точных квантовых уравнений описывающих систему многих тел обычно используются предположения о плавности среднего поля в пространстве и во времени. В результате получается кинетическое уравнение Власова-Ландау с интегралом столкновений Улинга-Уленбека, в котором сохраняются энергии и импульсы сталкивающихся частиц. Такие предположения ограничивают область применимости кинетического уравнения медленными неравновесными процессами.

В данной главе линеаризованный интеграл столкновений вычислен для быстрых неравновесных процессов. Получено кинетическое уравнение для одночастичной функции распределения в смешанном представлении Вейля - Вигнера (квантовый аналог фазового пространства) с учетом эффектов запаздывания в интеграле столкновений, основываясь на микроскопических уравнениях Кадапола - Бейма для квантовых функций Грина (корреляционных функций)¹. Были использованы: линейное приближение по отклонению корреляционных функций от их статических значений и теория возмущения по остаточному взаимодействию. В случае квазиднородных систем полученное выражение для

линеаризованного интеграла столкновений представляет собой вариацию интеграла столкновений вида

$$St(\vec{p}, \vec{r}, T) = \int \frac{d\vec{p}_2 d\vec{p}_3 d\vec{p}_4}{(2\pi\hbar)^6} \int d\vec{R}' \int_{-\infty}^T dt \exp\left\{\frac{\alpha(t-T)}{\hbar}\right\} w(\{\vec{p}_k\}) Q(\{f_j(\vec{R}, t)\}) P(t, T; \vec{R}', \vec{R}, \{\vec{p}_j\}). \quad (1)$$

где ϵ_j, \vec{p}_j - энергии и импульсы сталкивающихся частиц,

$$P(t, T; \vec{R}', \vec{R}, \{\vec{p}_j\}) = \frac{1}{(2\pi\hbar)^4} \cos\left\{\frac{1}{\hbar} \left[\int_t^T dt' \Delta\epsilon(\vec{R}, t') - \Delta\vec{p}(\vec{R} - \vec{R}') \right]\right\}, \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_3 - \epsilon_4, \quad \Delta\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 - \vec{p}_3 - \vec{p}_4,$$

Это выражение имеет наглядную физическую интерпретацию.

1. В соответствии с принципом причинности, интеграл столкновений в момент времени T формируется взаимодействием частиц во все предшествующие времена (эффект запаздывания или памяти).

2. Отток частиц из одночастичных состояний в момент времени t обусловлен парными столкновениями и определяется вероятностью столкновений частиц $w(\{\vec{p}_k\})$ и балансом заселенности одночастичных состояний $Q(\{f_j\}) = (1 - f_1)(1 - f_2)f_3f_4 - f_1f_2(1 - f_3)(1 - f_4)$ с учетом принципа Паули.

3. Функция P характеризует движение частиц без столкновений в интервале времени $T - t$ от точки \vec{R}' к \vec{R} и определяет относительный вклад в интеграл столкновений частиц, проваимодействовавших в момент времени t в точке \vec{R}' .

4. Множитель $\exp\{-\alpha(T-t)/\hbar\}$ явно учитывает принцип ослабления начальных корреляций.

В соотношении (1) одновременно учтены: изменение во времени функций распределения Вигнера $f_j(\vec{R}, t) \equiv f(\vec{p}_j, \vec{R}, t)$, согласованное с ним изменение среднего поля $\delta U = \epsilon - \epsilon^{eq}$ и тождественность частиц. При этом однако были отброшены градиентные слагаемые, связанные с изменением функции распределения в пространстве, и вероятность столкновений соответствовала борновскому приближению по взаимодействию частиц. Первый эффект, связанный с пространственной нелокальностью вклада столкновений, можно учесть заменив в (1), (2) величины f и ϵ в точке \vec{R} их значениями в точке \vec{R}' . Многократные

столкновения частиц и изменения потенциала парного взаимодействия в результате динамической поляризации среды учитываются, считая, что величина w соответствует полной вероятности рассеяния частиц $w(\{\vec{p}_k\}, \{f_j(\vec{R}', t)\})$, которая также зависит и от функции распределения. В результате, для ферми-жидкости (когда вероятность рассеяния и статический компонент \bar{f} не зависят от пространственной координаты, а неравновесный компонент изменяется по гармоническому закону $\delta f \sim \exp\{-i(\vec{k}\vec{R} - \omega t)\}$) вариация интеграла столкновений будет пропорциональна $\delta(\Delta\epsilon \pm \hbar\omega)\delta(\Delta\vec{p} \pm \hbar\vec{k})$, что соответствует предложенной Ландау квантовой интерпретации ноль-звуковых колебаний с частотой ω и волновым вектором \vec{k} как квантов коллективной моды с энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar\vec{k}$, излучаемых и поглощаемых при столкновениях частиц.

Линеаризованный интеграл столкновений в общем случае состоит из трех компонентов

$$\delta St = \delta St_f + \delta St_U + \delta St_w. \quad (3)$$

Первое слагаемое δSt_f связано с изменением функции распределения δf . Второй компонент δSt_U обусловлен изменением среднего поля. Третье слагаемое δSt_w возникает в результате влияния высокочастотных коллективных колебаний на двухчастичное рассеяние.

Для расчета линеаризованного интеграла столкновений необходима информация о статической функции распределения Вигнера $\bar{f}(\vec{r}, \vec{p})$. Существуют точные квантовые расчеты этой функции в холодных конечных ядрах. Основными особенностями функции Вигнера являются наличие диффузного слоя по импульсам вблизи поверхности ядра и осцилляции внутри ядра.

В § 1.5 рассмотрено разложение функции распределения $\bar{f}(\vec{r}, \vec{p})$ для холодных конечных систем в виде ряда по интегральным функциям нормального распределения и их производным. Такое представление статической функции распределения воспроизводит как ее размытость в импульсном пространстве вблизи поверхности системы так и ее осцилляции внутри ядра. Все коэффициенты разложения определяются средним полем и его производными. Показано, что после усреднения $\bar{f}(\vec{r}, \vec{p})$ методом Струтинского ее диффузность вблизи поверхности системы мало изменяется, а амплитуда ее осцилляций внутри ядра умень-

шается. Таким образом, диффузность статической функции распределения может считаться макроскопической характеристикой системы (хотя она формально и пропорциональна \hbar^2), т. к. ее величина практически не изменяется после усреднения. Вблизи поверхности ядра величина \bar{f} является довольно плавной функцией импульса оставаясь, тем не менее, относительно резкой функцией энергии.

ГЛАВА 2. ЗАТУХАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ КАК ЭФФЕКТ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

В этой главе исследуется роль эффектов запаздывания в формировании столкновительной части ширины коллективных возбуждений в ядерной материи. Получено следующее выражение для времени $\tau_\ell(\omega_0)$ релаксации коллективной моды с частотой $\omega_0 \equiv \text{Re}\{\omega\}$ в ферми-жидкости с температурой T при искажении поверхности Ферми с мультипольностью ℓ ($\{\hbar\omega_0, T\} \ll \epsilon_F$)

$$\frac{1}{\tau_\ell(\omega_0, T)} \equiv \int_0^\infty d\epsilon_1 \int d\Omega_p \delta S t_1(\vec{p}_1) Y_{\ell 0}(\hat{p}) / \int_0^\infty d\epsilon_1 \int d\Omega_p \delta f Y_{\ell 0}(\hat{p}) =$$

$$= \left(\frac{m^*}{\hbar^2}\right)^3 \langle w \Phi_\ell(\theta, \varphi) \rangle > \frac{T^2}{12\pi^2} \{1 + C_\omega (\hbar\omega_0/2\pi T)^2\}, \quad (4)$$

где символ $\langle \dots \rangle$ обозначает усреднение по углам относительных импульсов сталкивающихся частиц. Эффекты запаздывания в интеграле столкновений (1) приводят к зависимости времен релаксации от частоты. Функция Φ_ℓ характеризует угловые ограничения, накладываемые на рассеяние нуклонов внутри искаженных слоев поверхности Ферми с мультипольностью ℓ . Коэффициент C_ω определяет величину коллективных времен релаксации в квантовой области $\hbar\omega_0 \gg T$. При учете лишь первых двух компонентов в (3), связанных с изменениями функции распределения и среднего поля: $C_\omega = 3$. Согласно феноменологическим расчетам Ландау для коэффициента поглощения ноль звука в ферми-жидкости $C_\omega = 1$. Это значение соответствует учету всех компонентов в (3) для интеграла столкновений.

Показано, что в пределе $\ell \rightarrow \infty$ времена релаксации τ_ℓ совпадают:

$$1/\tau_\ell = 1/\tau_c + O(1/(2\ell + 1)), \quad \ell \gg 1, \quad (5)$$

где

$$\tau_c(\omega, T) \equiv \bar{\tau}_2(T) d_2 / \{1 + C_\omega (\hbar\omega / 2\pi T)^2\},$$

с $\bar{\tau}_2(T) \equiv \tau_2(\omega = 0, T)$ и $d_2 \equiv \langle w\Phi_2 \rangle / \langle w \rangle \approx 0.8$. Величина $\bar{\tau}_2(T)$ представляет собой время релаксации для вязкости.

В § 2.3 получены выражения для ширин слабозатухающих коллективных возбуждений в ядерной материи в двух предельных случаях редких ($\omega_0\tau_c \gg 1$) (0-звук) и частых ($\omega_0\tau_c \ll 1$) (1-й звук) столкновений с учетом эффектов памяти в интеграле столкновений:

$$\Gamma(\omega_0\tau_c \gg 1) = 2\hbar\mathcal{R}(S_r)/\tau_c, \quad \Gamma(\omega_0\tau_c \ll 1) = 2B(S_f)\hbar\omega_0\tau_2. \quad (6)$$

Ширина 0-звуковых возбуждений в холодной ферми-жидкости полностью определяется (в отсутствие затухания Ландау) эффектами запаздывания в интеграле столкновений. Функция $\mathcal{R}(S_r)$ зависит как от вероятности рассеяния квазичастиц так и от амплитуды искажения поверхности Ферми в отсутствие интеграла столкновений. При относительной скорости $S_r \equiv \omega_0/(v_F k)$ 0-звука близкой к единице и $\mathcal{R} \approx 1$, а при больших значениях $S_r \gg 1$ — $\mathcal{R}(S_f) = d_2 B(S_f) = 2d_2/15S_f^2$; S_f — относительная скорость первого звука.

В режиме первого звука (частые столкновения между нуклонами) доминирующую роль играют деформации поверхности Ферми не выше квадрупольных. В режиме редких столкновений значения мультипольностей искажения поверхности Ферми определяются средним полем и поэтому зависят от величины скорости нулевого звука S_r . При $S_r \gg 1$, что соответствует сильно отталкивательному взаимодействию, искажения поверхности Ферми ограничены мультипольностями $\ell \leq 2$. При $S_r \approx 1$ существенный вклад в ширину связан с рассеянием частиц в искаженных слоях поверхности Ферми с мультипольностями $\ell > 2$.

Выражения для Γ получаются (с точностью до $\approx 20\%$ и с $S_r \approx 1$ для 0-звука) при использовании для интеграла столкновения модифицированного τ -приближения вида $\delta St(\vec{p}, \vec{r}, T) = [\delta f(\vec{p}, \vec{r}, T) - \delta f_{00}(p, \vec{r}, T)Y_{00}(\hat{p}) - \sum_{m=-1}^1 \delta f_{1m}(p, \vec{r}, T)Y_{1m}(\hat{p})]/\tau$, с зависящим от частоты временем релаксации $\tau \equiv \tau_c(\omega_0, T)$.

В § 2.4 вычисляются кинетические коэффициенты (коэффициент вязкости, модули сдвига и сжатия) в ферми-жидкости. Например, интерес к вязкости вызван использованием для описания ядерных процессов с релаксацией (таких, например, как деление возбужденных ядер)

методов классической гидродинамики, согласно которой в несжимаемой жидкости коэффициенту вязкости пропорциональна энергия диссипируемая в единицу времени. Получено выражение для тензора плотности потока импульса, состоящее из двух компонентов — жидкостной и твердотельной. Показано, что в режиме редких столкновений доминирует твердотельный компонент, т.е. ферми - жидкость ведет себя как упругая среда.

ГЛАВА 3. ШИРИНЫ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНИХ И ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ

В этой главе на основе уравнения Власова - Ландау с учетом эффектов запаздывания в интеграле столкновений изучаются внутренние ширины ГМР в средних и тяжелых ядрах.

В общем случае полная ширина ГМР зависит от внутренней ширины, от деформации поверхности ядра, обусловленной его вращением, а также от термодинамических флуктуаций параметров формы и углов вращения. Внутренняя ширина определяется связью когерентных одночастично - однодырочных состояний как с более сложными состояниями (столкновительное затухание) так и с поверхностью (однотельный механизм затухания). Она также зависит от вероятности вылета частиц в непрерывный спектр и от флуктуаций плотности.

В § 3.1 исследуются столкновительные ширины изоскалярных ГМР в рамках макроскопической модели ядра, в которой решения уравнения Власова- Ландау в бесконечной ядерной материи комбинируются с граничными условиями гидродинамического типа (т.н. газово- капельная модель ядра (ГКМ)). Вычислен вклад столкновений в ширины Γ_n нижайших изоскалярных монополюльных, квадрупольных и октупольных гигантских резонансов ($n=1$), используя в качестве амплитуд рассеяния квазичастиц амплитуду рассеяния вперед при нулевой переданной энергии. Также вычислены энергии $E_n = \hbar(\omega_0)_n$ резонансов и их вклад $S_n^{(R)}$ в безмодельную энергетически взвешенную сумму (ЭВС). Для октупольных резонансов результаты расчетов этих величин представлены на Рис. 1, где штрихованные линии - $F_0 = -0,2$; сплошные - $F_0 = 0,2$, справа — значения F_1 .

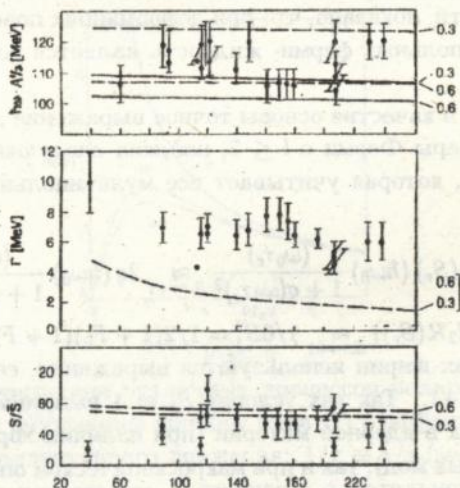


Рис. 1

Энергии и относительные вклады нижайших резонансов в ЭВС для малых отрицательных значений параметров взаимодействия Ландау удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для всех трех типов колебаний. Результаты слабо чувствительны к параметру F_1 в интервале значений $0.3 \div 0.6$.

Расчитанные столкновительные ширины меньше наблюдаемых значений. Например, вычисленные ширины квадрупольных и октупольных резонансов в среднем не превышают $\approx 40\%$ (при $C_w = 3$) и $\approx 15\%$ (при $C_w = 1$) от экспериментальных значений.

Таким образом, для описания полных ширин ГМР необходимо учитывать другие механизмы формирования ширин, связанные с отражениями частиц от подвижной поверхности ядра и которые аналогичны фрагментации в методе хаотических фаз. Феноменологический учет различных механизмов затухания рассмотрен ниже в § 3.4.

В § 3.2 и § 3.3 получены выражения для (обусловленных парными столкновениями) вязкости, коэффициента поглощения и ширин слабозатухающих коллективных возбуждений в случае динамических искажений поверхности Ферми не выше квадрупольных. Эти выражения

справедливы при произвольных скоростях столкновений между нуклонами. В частности, показано, что при деформациях поверхности Ферми не выше квадрупольных ферми-жидкость является жидкостью Максвелла.

Используя в качестве основы точное выражение для ширины при деформациях сферы Ферми с $l \leq 2$, найдена следующая модифицированная формула, которая учитывает все мультипольности искажения сферы Ферми:

$$\Gamma = 2q \mathcal{R}(S_r) (\hbar\omega_0) \frac{(\omega_0\tau_c)}{1 + q(\omega_0\tau_c)^2} S_{r \rightarrow +1} \approx 2q (\hbar\omega_0) \frac{(\omega_0\tau_c)}{1 + q(\omega_0\tau_c)^2}, \quad (7)$$

где $q \equiv B(S_f)/(d_2 \mathcal{R}(S_r)) \approx 1/6 S_f^2 = 1/2(1 + F_0)(1 + F_1/3)$. В дальнейшем при расчетах ширины используются выражения, соответствующие ситуации $S_r \rightarrow +1$. Так как условие $S_r \approx 1$ выполняется в хорошем приближении как в ядерной материи (при наличии хорошо определенных коллективных мод), так и при макроскопическом описании ядра как ферми-системы, ограниченной резкой поверхностью.

Формула (7) справедлива при произвольных соотношениях между частотой коллективных возбуждений и частотой столкновений между нуклонами, т.е., в том числе и в переходной области между бесстолкновительным и гидродинамическим режимами.

На Рис. 2 приведена зависимость ширин от $\omega_0\tau_c$. Кривые 1a и 1b — (7): 1a — $q = 0.192 (S_f = 0.931)$; 1b — $q = 0.254 (S_f = 0.81)$; $\hbar\omega_0 = 15.6 \text{ MeV}$. Кривая 2 — приближение времени релаксации: $\Gamma \equiv \Gamma_0 = 2\hbar/\tau_c = 2(\hbar\omega_0)/(\omega_0\tau_c)$. Выражение Γ_0 ранее часто применялось для оценки ширин затухания коллективных возбуждений в ферми-жидкости. Как это следует из (6), (7) значение Γ_0 можно использовать в качестве ширины затухания только в режиме редких столкновений и при $S_r \rightarrow +1$. Отличия между Γ (7) и Γ_0 обусловлены действием самосогласованного среднего поля. Ширина Γ_0 растет при убывании величины $\omega_0\tau_c$. В отличие от этого, значение ширины Γ по (7) стремится к нулю при $\omega_0\tau_c \rightarrow 0$.

Далее учитываются вклады в полные внутренние ширины ГМР односторонней диссипации и эмиссии частиц в рамках феноменологического подхода, основанного на добавке в кинетическое уравнение источниковых слагаемых, определяющих изменение функции распределения

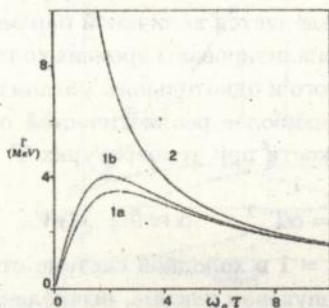


Рис. 2

вследствие присутствия различных процессов релаксации. Получено выражение для внутренней ширины вида (7) с эффективным временем τ релаксации коллективного движения: $1/\tau \equiv 1/\tau_c(\omega_0, T) + 1/\tau_s + 1/\tau_f$, где τ_s — время релаксации, связанное с однотельной диссипацией, а τ_f — эффективное время релаксации, определяемое шириной Γ_f^+ вылета частиц. При этом учитывается лишь т.н. однотельная "стеночная" (wall) диссипация, отсутствующая в бесконечной системе. Источником ее являются столкновения частиц с движущейся стенкой и этот тип диссипации приводит к затуханию коллективных параметров, описывающих поверхность системы. При этом наличие диссипации зависит от вида граничных условий, накладываемых на поверхность системы.

Условия распространения различных типов коллективных возбуждений в конечной системе определяются параметром $\omega_0\tau$, где τ содержит вклад не только от двухчастичных столкновений (как в случае бесконечного вещества), но и от однотельной стеночной диссипации и от вылета частиц. В режиме длинных времен релаксации, т.е., когда $\omega_0\tau \gg 1$, внутренняя ширина обратно пропорциональна времени релаксации $\Gamma \equiv \Gamma_0 = 2\hbar/\tau$, что соответствует незарисимости различных каналов диссипации. В режиме коротких времен релаксации ($\omega_0\tau \ll 1$) ширина пропорциональна времени релаксации $\Gamma \equiv \Gamma_f = 2q(\hbar\omega_0)^2\tau/\hbar$, т.е., не равна сумме парциальных ширин затухания и механизмы затухания сильно скоррелированы. Таким образом, полная внутренняя ширина, в общем случае, не равна сумме ширин парциальных каналов затухания. Это связано с некогерентным взаимным влиянием друг на

друга различных механизмов диссипации. Интерференция различных механизмов затухания определяется величиной параметра $\omega_0\tau$.

Далее в §§ 3.5, 3.6 проанализированы времена коллективной релаксации в каналах двухтельного и однотельного механизмов диссипации. Продемонстрировано, что наиболее реалистической оценкой для времени $\tilde{\tau}_2(T)$ релаксации вязкости при температурах $T \ll \epsilon_F$ является следующая:

$$\tilde{\tau}_2(T)/\hbar = \alpha T^{-2}, \quad \alpha \approx 9.2 \text{ MeV}. \quad (8)$$

Показано, что при $C_\omega = 1$ в холодной системе столкновительный вклад в ширину ГМР в 0- звуковом режиме, вычисленный с помощью уравнения Власова -Ландау, совпадает с шириной распада (некогерентных) $1p-1h$ состояний в $2p-2h$ состоянии.

В § 3.7 вычислены внутренние ширины изовекторных (1^-) и изо- скалярных ($0^+, 2^+, 3^-$) ГМР в холодных ($50 \lesssim A \lesssim 260$) и нагретых ($A \approx 112$) ядрах. Обсуждается зависимость от массового числа отношения ширин двойного и одинарного ГДР. Исследуется вопрос о соотношении между вкладами различных механизмов релаксации в полную ширину и их зависимости от энергии возбуждения.

В качестве примера, на Рис. 3 приведена зависимость от энергии возбуждения внутренней ширины ГДР для изотопов Sn на примере ядра ^{112}Sn . Кривые: 1 — полная ширина; 2- 4 — вклады соответственно двухтельного, однотельного механизмов диссипации и релаксации за счет вылета частиц; 5 - ширина без учета вылета частиц; 6 — приближение больших времен релаксации (Γ_0); $\alpha = 9.2$ МэВ; однотельный вклад — результат подгонки экспериментальных данных при $T = 0$. Использование (7) (кр. 1 и 5) приводит к значительно более плавному поведению полной внутренней ширины с ростом энергии возбуждения, чем это предсказывается моделью времен релаксации для ширин ((кр. 6)). Согласно (7), равенство $\omega_0\tau \equiv x_0 = (\omega_0\tau)_0 = q^{-1/2}$ является условием плавного перехода между режимами длинных и коротких времен релаксации. Из полученных результатов следует, что для ядер с $A \approx 112$ это условие достигается при температуре $\approx 4.5 \text{ MeV}$.

Для реалистических значениях q величина внутренней ширины ГДР не превышает $\approx 50\%$ от экспериментальных значений

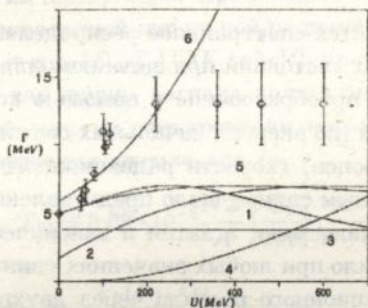


Рис. 3

в области температур $T \approx 2.5 - 7$ МэВ независимо от оценок времен релаксации. Столкновительный вклад в ширины не превышает 30%.

ГЛАВА 4. МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАММА - РАСПАДА ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМНЫХ ЯДЕР

Если в предыдущих главах рассматривалось затухание коллективных состояний ядра за счет их связи с внутренними степенями свободы, то в данной главе изучается конкурирующий с ним канал — γ -разрядка ядер: радиационные переходы между высоколежащими состояниями нагретых ядер и прямой радиационный распад ГМР.

Уже при энергиях возбуждения ядер вблизи энергии связи нейтрона ядерные состояния сильно смешиваются и поэтому в этой области энергий и выше экспериментально наблюдаются лишь характеристики электромагнитного излучения усредненные по большой группе состояний. Согласно статистической механике состояния возбужденной системы, состоящей из конечного числа частиц образуют микроканонический ансамбль с фиксированной энергией возбуждения, а не канонический, характеризуемый температурой. Впервые выражение для средней по спидам полной γ -ширины с использованием микроканонического распределения было получено Игнатьюком. Был исследован переход к усреднению по каноническому ансамблю в случае слабой зависимости радиационной ширины от термодинамических параметров.

В §§ 4.1, 4.2 изучается спектральное распределение γ -излучения из высоковозбужденных состояний при заданном спине начальных состояний. Предложено преобразование с помощью которого исходное выражение для средней (по энергии начальных состояний, а также числам протонов и нейтронов) скорости радиационного распада состояний ядер с фиксированным спином было представлено в виде величин средних по микроканоническому, а затем и каноническому ансамблям состояний. Это позволило при любых значениях спина выразить средние вероятности радиационного распада через двухвременные корреляционные функции, а тем самым через температурные двухвременные функции Грина и мнимую часть функции линейного отклика термодинамически - равновесного нагретого ядра на электромагнитное взаимодействие. Получены уравнения, определяющие термодинамическое состояние возбуждаемого электромагнитным полем ядра. Учтены ограничения на спины, накладываемые законом сохранения углового момента, и изменения температуры ядра за счет вылета гамма-квантов. Полученное выражение для радиационной ширины согласуется с принципом детального баланса.

Показано, что скорость γ -переходов между высоковозбужденными состояниями в общем случае зависит от флуктуаций мультипольных моментов в "промежуточных" состояниях со значениями температуры и химпотенциалов, промежуточными между величинами соответствующими начальным и конечным состояниям. При слабой зависимости ширины γ -распада компаунд-состояний от термодинамических параметров "промежуточные" состояния совпадают с начальными, а при медленном изменении радиационной силовой функции - с конечными. Проанализирована возможность применения для расчета средних γ -ширин усреднения по каноническому ансамблю Гиббса и приближений больших спинов и температур.

Используя реалистическое предположение о медленном изменении логарифма радиационной силовой функции по сравнению с логарифмом статистической суммы, найдено общее выражение для сечения $\sigma_{\lambda}(E_{\gamma}, T_f)$ поглощения электромагнитного E_{λ} излучения нагретым ядром с зависимостью не только от энергии E_{γ} излучения, но и от температуры T_f поглощающих состояний ядра при фиксирован-

ной полной энергии поле + ядро. Предложен и проанализирован новый метод расчета приведенной дипольной радиационной силовой функции $f_{E1} \equiv f_{E1}(E_\gamma, T_f) \equiv \sigma_{\lambda=1}(E_\gamma, T_f)/[3E_\gamma(\pi\hbar c)^2]$, учитывающий зависимость от температуры как ширины распада коллективных состояний, так и средней тепловой энергии электромагнитного поля в нагретом ядре. Получено следующее выражение для f_{E1} :

$$f_{E1}(E_\gamma, T_f) \cong 5.02 \cdot 10^{-6} \frac{NZ}{A} \left[\frac{C_0}{100} \right] \frac{E_\gamma}{1 - \exp(-E_\gamma/T_f)} \cdot \frac{\Gamma_\gamma(E_\gamma, T_f)}{(E_G^2(T_f) - E_\gamma^2)^2 + (\Gamma_\gamma(E_\gamma, T_f)E_\gamma)^2}, \quad [\text{MeV}^{-3}]. \quad (9)$$

Здесь явно указаны возможные зависимости энергии ГДР E_G и ширины $\Gamma_\gamma(E_\gamma)$ функции линейного отклика ядра на поле от температуры T_f поглощающего ядра; $C_0 \approx 120\%$ — степень истощивания правила сумм Томаса- Райха- Куна.

Обычно функции f_{E1} извлекаются из экспериментальных данных по γ -разрядке ядер с фиксированной энергией E возбуждения (температурой T_i) начальных (для излучения) состояний. Поэтому температура T_f находится из решения уравнений термодинамического состояния конечного ядра с энергией $E_f = E - E_\gamma$. Из требования слабой зависимости режимов диссипации коллективных состояний в электромагнитном поле от частоты поля, найдено следующее выражение для ширины $\Gamma_\gamma(E_\gamma, T_f)$ распада коллективных состояний в электромагнитном поле: $\Gamma_\gamma(E_\gamma, T_f) = 2qE_G(E_G\tau(E_\gamma, T_f)/\hbar)/[1 + q(E_G\tau(E_\gamma, T_f)/\hbar)^2]$, где в соответствии с приближением независимых источников диссипации время релаксации τ коллективного движения равно $1/\tau(E_\gamma, T_f) = 1/\tau_c(\omega = E_\gamma/\hbar, T_f) + 1/\tau_s + 1/\tau_1$. При энергии гамма-квантов равной E_G эта ширина совпадает шириной распада ГДР в нагретом ядре с температурой T_f .

Вычислены силовые функции f_{E1} для ядер Nd^{144} , Ba^{137} . На рис.4 приведена энергетическая зависимость приведенной радиационной силовой функции $E1$ - переходов Nd^{144} при фиксированной энергии E , равной энергии отделения нейтрона. Сплошные кривые — (9) ($\alpha = 9.2$ МэВ). Верхняя часть рис.: 1 — модель Кадменского- Маркушева-Фурмана (КМФ); 2 — аппроксимация стандартной однокомпонентной

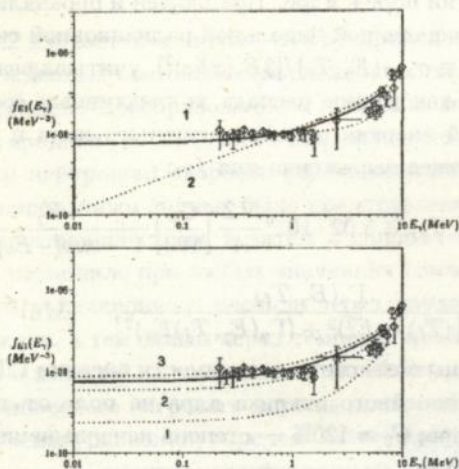


Рис. 4

кривой Лорентца (Л- модель). Нижняя часть рис.: 1, 3 — расчет с Γ_{γ} в приближении исчерпывания затухания двухтельным и однотельным механизмами диссипации, соответственно; 2 — тоже, что и сплошная, но $\alpha = 4.6$ МэВ.

Расчеты с помощью (9) и КМФ- модели приводят примерно к одинаковым результатам и по сравнению с Л- моделью заметно лучше описывают экспериментальные данные при низких энергиях γ - переходов. Вместе с тем, по сравнению с КМФ, метод (9) дополнительно учитывает зависимость средней тепловой энергии электромагнитного поля от температуры и возможность вклада в ширины различных механизмов диссипации. Силовая функция f_{E1} достаточно чувствительна к значению параметра α , определяющего вклад двухтельной диссипации. Довольно удовлетворительное описание экспериментальных данных получается при "реалистичном" значении $\alpha \approx 9.2$ МэВ, соответствующему столкновительному вкладу в полную ширину $\approx 30\%$.

Степень нарушения гипотезы Акселя - Бринка, т.е., зависимость от энергии возбуждения радиационной силовой функции, представлена на рис. 5, где изображены приведенные радиационные силовые

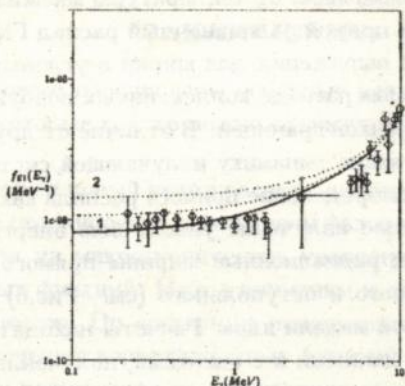


Рис. 5

функции $E1$ - переходов Nd^{144} при разных энергиях E конечных (для процесса поглощения) состояний. Кривые: сплошная — $E = B_n = 7.8$ МэВ; 1 — $E = 20$ МэВ; 2 — $E = 50$ МэВ.

Видно, что с ростом энергии конечных состояний увеличивается и степень нарушения гипотезы Акселя-Бринка. Причем отклонения силовых функций f_{E1} вычисленных при разных энергиях E растут с уменьшением энергии гамма-квантов и существенны для γ -переходов с энергиями меньше или порядка температуры ядра.

В §§ 4.4, 4.5 предложен полуклассический метод корреляционных функций для расчета скорости γ -излучения из макроскопических нагретых систем, справедливый (в отличие от формул полученных в рамках классической электродинамики) и в области средних частот излучения $i/\hbar \lesssim \omega_\gamma$. Получено выражение для спектральной плотности уносимого электромагнитным полем углового момента.

Найдены выражения для спектральных интенсивностей электромагнитного излучения из вращающихся аксиально-деформированных систем с учетом и без учета флуктуаций мультипольных моментов. Вычислены спектральные характеристики низкоэнергетического $E2$ -излучения из вращающегося нагретого аксиально-деформированного ядра с учетом флуктуаций поверхности квадрупольного типа. Получено выражение для сечения фотопоглощения, которое имеет вид произведения

функции Лорентца на зависящий от температуры множитель.

В § 4.8 рассмотрен прямой радиационный распад ГМР. Получены простые аналитические выражения для ширин и угловых распределений γ -квантов при прямом распаде коллективных возбуждений в многочастичной системе с резкой границей. В отличие от других подходов величины, характеризующие динамику излучающей системы, не квантуются, а используется определение прямого распада как процесса при котором электромагнитное излучение уносит всю энергию резонанса и его спин. Вычислены радиационные ширины прямого распада изоскалярных квадрупольного и октупольного (см. Рис.6) резонансов в рамках газовой-капельной модели ядра. Расчеты находятся в согласии с экспериментальными данными и с оценками, полученными с использованием ЭВС.

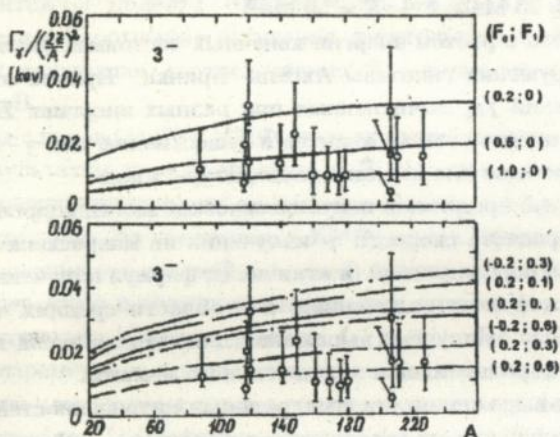


Рис. 6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации, которые кратко можно сформулировать следующим образом:

1. Предложен новый метод расчета линеаризованного выражения для интеграла столкновений в квантовом фазовом пространстве Вейля-Вигнера исходя из микроскопических уравнений для двухвременных корреляционных функций. Метод применим и для быстрых неравновесных процессов. Он основан на использовании линейного приближения по отклонению корреляционных функций от их статических значений и теории возмущения по остаточному взаимодействию.

2. Получено выражение для линеаризованного интеграла столкновений для систем с памятью. В интеграле столкновений одновременно учтены: изменение во времени функции распределения, согласованное с ним изменение среднего поля и тождественность частиц. Найдено дифференциальное уравнение для ядра интеграла столкновений с учетом градиентных слагаемых функции распределения. Предложено общее выражение для интеграла столкновения в квазиоднородных системах с пространственной нелокальностью. Показано, что для периодического поля линеаризованный интеграл столкновений с запаздыванием имеет форму записи Ландау, которая соответствует интерпретации звуковых колебаний в ферми-жидкости как квантов коллективного возбуждения, сопровождающих столкновения частиц.

3. Предложено новое представление статической функции распределения Вигнера в холодных ферми-системах на основе разложения спектральной функции в ряд по полиномам Эрмита со смещенными аргументами, которое воспроизводит размытость статической функции распределения в импульсном пространстве вблизи поверхности системы и ее осцилляции внутри ядра. Продемонстрировано, что диффузность статической функции распределения может считаться макроскопической характеристикой системы (хотя она формально и пропорциональна \hbar^2), т. к. ее величина практически не изменяется после усреднения функции распределения методом Струтинского.

4. Получено выражение для интеграла столкновений с запаздыванием в виде разложения по мультиполям деформации поверхно-

сти Ферми. Исследована зависимость времен релаксации от мультипольности деформации поверхности Ферми. Показано, что затухание продольного 0- звука при его относительной скорости близкой к единице определяется всеми мультипольностями деформации поверхности Ферми. Получены выражения для тензора потока импульса с выделенными жидкостной и твердотельной частями и для коэффициента динамической вязкости.

Продемонстрирована применимость модифицированного приближения времени релаксации для интеграла столкновений (с зависимостью эффективного времени релаксации от частоты коллективных возбуждений) для расчетов коэффициентов затухания коллективных возбуждений в ядерной материи.

5. Получены аналитические выражения для столкновительных ширин коллективных возбуждений и вязкости в бесконечной нагретой ядерной материи при учете динамической деформации поверхности Ферми не выше квадрупольной и эффектов запаздывания в интеграле столкновений. Соотношения также пригодны и для расчета ширин слабозатухающих и сильноколлективизированных ГМР в средних и тяжелых ядрах, где применима макроскопическая модель ядра как капли ядерной материи с резкой поверхностью (с граничными условиями гидродинамического типа на поверхности). Эти выражения справедливы и в переходной области между режимами редких и частых столкновений между частицами.

Показано, что ферми-жидкость при деформациях поверхности Ферми не выше квадрупольных является жидкостью Максвелла. Найдено выражение для столкновительной ширины, учитывающее возможность как любых частот столкновений между двумя частицами, так и искажений поверхности Ферми с произвольной мультипольностью.

6. Предложен и обсуждается феноменологический метод учета различных механизмов релаксации коллективных возбуждений. Однотельное затухание и связь с непрерывным спектром (эмиссия частиц) учитываются добавлением в уравнение Власова-Ландау источниковых слагаемых, определяющих изменение функции распределения вследствие присутствия этих процессов.

7. Получено замкнутое выражение для полной внутренней

ширины слабозатухающих коллективных колебаний, учитывающее двухчастичные столкновения, однотельную ("стеночную") диссипацию и вылет частиц. Внутренняя ширина, в общем случае, не равна некогерентной сумме ширин различных каналов релаксации из-за присутствия в уравнении Власова-Ландау самосогласованного среднего поля, которое приводит к нелинейным корреляциям между различными каналами диссипации. Показано, что взаимосвязь каналов затухания зависит от величины эффективного времени релаксации по сравнению с периодом коллективных вибраций. Вклады различных механизмов диссипации в полные внутренние ширины практически некогерентны при больших эффективных временах релаксации и сильно скоррелированы при малых временах релаксации.

8. Проанализированы различные оценки времен коллективной релаксации в каналах двухтельного и однотельного затухания. Для времен столкновительной релаксации продемонстрировано, что наиболее реалистичными (в предположении изотропного рассеяния нуклонов) являются оценки использующие в качестве сечения взаимодействия нуклонов в ядре сечение в свободном пространстве, уменьшенное примерно в 2 раза. Метод перенормировки вероятности рассеяния квазичастиц в среде применяемый в теории ферми-жидкости (амплитуда вероятности столкновения отождествляется с амплитудой вероятности рассеяния вперед при нулевой переданной энергии) приводит к уменьшению эффективных сечений взаимодействий в среде примерно в 4-5 раз.

Получено соотношение, выражающее (в классической области и низкотемпературном режиме) коллективные времена столкновительной релаксации через время жизни квазичастицы, внесенной в начальный момент времени в вырожденную и находящуюся в тепловом равновесии ферми-жидкость.

Проанализирован коэффициент C_ω , определяющий поведение времен столкновительной релаксации в квантовой области. Показано, что при $C_\omega = 1$ и в режиме 0-звука столкновительный компонент ширины коллективных возбуждений в ферми-жидкости совпадает с микроскопическим выражением для ширины распада (некогерентного) $1p1h$ состояния в $2p2h$ состояния. Этот факт, а также обсуждение способа рас-

чета коэффициента C_w , указывают на то, что наиболее реалистическое его значение равно единице., Это соответствует результату Ландау для поглощения 0- звука.

9. Вычислены внутренние ширины изоскалярных ($0^+, 2^+, 3^-$) и изовекторных (1^-) ГМР в холодных ядрах в рамках макроскопической модели ядер как капли бесконечной ферми- жидкости с резкой поверхностью. Показано, что величина вклада в ширины двухтельного механизма затухания не превышает $\approx 50\%$ от экспериментальных значений (при использовании сечений взаимодействия нуклонов в свободном пространстве) независимо от типа ГМР и массовых чисел ядер. При реалистическом значении сечения нуклон- нуклонного взаимодействия в ядрах величина вклада столкновительного затухания не превышает $\approx 30\%$ от экспериментальных значений. Таким образом, основным механизмом затухания ГМР в холодных ядрах является однотельная диссипация.

Полученные из подгонки экспериментальных данные значения времен однотельной релаксации в гигантских квадрупольных резонансах (при реалистических временах двухтельной релаксации) качественно согласуются с результатами расчетов в рамках микроскопической теории линейного отклика, а также с подходом, где источником однотельной диссипации являются двухчастичные столкновения вблизи поверхности ядра.

Исследованы соотношения между вкладами различных механизмов релаксации в полную внутреннюю ширину ГДР и их зависимость от энергии возбуждения с учетом перехода от режима (почти) редких столкновений нуклонов в холодной системе к режиму частых столкновений в нагретой системе. Расчеты внутренней ширины ГДР демонстрируют ее плавное поведение с ростом температуры. Её вклад в экспериментально наблюдаемую ширину не превышает $\approx 50\%$ в области $T \approx 2.5 - 7$ МэВ независимо от оценок для сечений столкновений между нуклонами. Показана невозможность резкого перехода между режимами больших и малых времен релаксации при котором значение внутренней ширины может измениться на порядок.

10. Предложено преобразование с помощью которого выражение для средней (по энергии начальных состояний), а также числам прото-

нов и нейтронов) скорости радиационного распада высоколежащих состояний ядер с фиксированным спином представляется в виде величин средних по микроканоническому, а затем и каноническому ансамблю состояний. Это позволило при любых значениях спина выразить средние вероятности радиационного распада через мнимую часть функции линейного отклика термодинамически-равновесного нагретого ядра на электромагнитное взаимодействие.

Проанализирована возможность применения для расчета средних γ -ширин усреднения по каноническому ансамблю Гиббса и приближения больших спинов. Получены уравнения, определяющие термодинамическое состояние возбуждаемого электромагнитным полем ядра.

Получено выражение для радиационной ширины в котором учитываются изменения спина и температуры ядра за счет вылета гамма-кванта и которое согласуется с принципом детального баланса. Найдено общее выражение для сечения поглощения электромагнитного излучения нагретым ядром, которое зависит не только от энергии излучения, но и от температуры ядра.

11. Предложен и проанализирован новый метод расчета приведенной дипольной радиационной силовой функции f_{E1} , учитывающий зависимость от температуры как ширины распада коллективных состояний в электромагнитном поле, так и средней энергии электромагнитного поля, поглощаемой нагретой системой. Вычислены силовые функции f_{E1} для ядер Nd^{144} , Ba^{137} и Ba^{139} при разных энергиях возбуждения. Исследована роль вкладов однотельного и двухтельного механизмов диссипации в ширину затухания коллективных состояний в электромагнитном поле при расчетах приведенных радиационных силовых функций. Показано, что широко применяемая при расчетах средних вероятностей γ -распада гипотеза Акселя-Бринга, согласно которой сечение фотопоглощения не зависит от температуры, справедлива (при плавном поведении функции отклика) при энергиях γ -переходов превышающих температуру ядра.

12. Предложен полуклассический метод корреляционных функций для расчета скорости γ -излучения из макроскопических нагретых систем, справедливый (в отличие от формул полученных в рамках классической электродинамики) и в области средних частот излуче-

ния $T/\hbar \lesssim \omega_\gamma$. Используя закон сохранения углового момента системы "заряды + поле", получено выражение для спектральной плотности уносимого электромагнитным полем углового момента. Получены выражения для спектральной интенсивности электромагнитного излучения из вращающихся аксиально - деформированных систем с учетом и без учета флуктуаций мультипольных моментов. Вычислены спектральные характеристики низкоэнергетического E2- излучения из вращающегося нагретого аксиально - деформированного ядра с учетом флуктуаций поверхности квадрупольного типа. Показано, что в отсутствие флуктуаций мультипольных моментов излучение из макроскопически вращающегося ядра с квадрупольным распределением заряда состоит из двух компонентов с частотой равной и в два раза большей частоты процессии. При этом практически при всех значениях проекций углового момента на ось симметрии доминирует интенсивность полос с двойной частотой.

13. Получены выражения для ширин и угловых распределений γ - квантов при прямом распаде коллективных возбуждений в многочастичной системе с резкой границей. В отличие от других подходов величины, характеризующих динамику излучающей системы, не квантуются, а используется определение прямого распада как процесса при котором электромагнитное излучение уносит всю энергию резонанса и его спин. Вычислены радиационные ширины прямого распада изоскалярных квадрупольного и октупольного резонансов в рамках газовой-капельной модели ядра.

14. Статистические методы описания были также применены для исследования флуктуационных составляющих средних сечений и угловых распределений продуктов реакций с нуклонами, а также ряда других величин необходимых для их расчета. В работах [10]- [19] был предложен автором и исследован, совместно с С.Н.Ежовым, оптимальный метод вычисления сечений флуктуационного рассеяния, справедливый в присутствии прямых процессов при различном поглощении в каналах неупругого рассеяния. В [20] был предложен метод учета влияния вибрационных возбуждений на плотность ядерных состояний, сохраняющий полное число степеней свободы ядра и учитывающий изменение температуры ядра при включении коллективных состояний.

В работах [6]- [9] исследовались неупругое рассеяние частиц в поле электромагнитных волн и тормозное излучение при столкновении нуклонов с ядрами, т.е. радиационный канал, дополнительный к эмиссии γ - квантов из компаунд- ядра. Были проанализированы различные приближения, используемые для описания тормозного излучения как в области изолированных так и перекрывающихся резонансов, а также информация о характеристиках ядер, которую можно извлечь из спектров тормозных гамма - квантов. Была доказана справедливость теоремы Эренфеста для состояний непрерывного спектра.

В приложении 1 описан способ расчета вариации интеграла столкновений.

В приложении 2 приведены детали метода аналитического вычисления интегралов по импульсам в интеграле столкновений в ферми- жидкости.

В приложении 3 дан способ оценки величин, входящих в выражение для ширины затухания 0- звука в ядерной материи.

В приложении 4 приведен вывод выражения для ширины затухания коллективных возбуждений в ферми- жидкости при динамических деформациях поверхности Ферми не выше квадрупольных без применения моментных уравнений.

В приложении 5 получены выражения для спектральной плотности энергии излучения и для спектральной плотности уносимого углового момента.

Основные результаты диссертации содержатся в следующих работах:

1. Strutinsky V., Plujko V. Quantal Radiation for Macroscopic Rotation // Zeit.Phys. 1988. V.A331. P. 235 - 237.
2. Плюйко В.А. Полуклассическое описание гамма - распада нагретых ядер // ЯФ. 1989. Т. 50. В.5 (11). С. 1284 - 1291.
3. Плюйко В.А. Статистическое описание ширин гамма - распада состояний с фиксированным угловым моментом // ЯФ. 1990. Т. 52. В. 11. С. 1004' - 1014.
4. Магнер А.Г., Плюйко В.А. Радиационный распад гигантских резонансов в газовой - капельной модели // ЯФ. 1990. Т. 51. В.1. С. 85 - 93.

5. Магнер А.Г., Плюйко В.А. Прямой гамма - распад гигантских резонансов в газовой - капельной модели // Изв. АН СССР, сер. физ. 1990. Т. 54. С. 877 - 882.

6. Pluyko V.A., Poyarkov V.A. The theorem of Ehrenfest in the theory of direct radiative transitions between unbound states // Phys. Letters. 1983. V.123, N6. P.373 - 374.

7. Плюйко В.А., Поярков В.А. Особенности ядерного тормозного излучения в присутствии изолированного одночастичного резонанса // ЯФ. 1983. Т. 37, В. 2. С. 298 - 304.

8. Плюйко В.А., Поярков В.А. Ядерные тормозные излучения в реакциях с протонами // ЭЧАЯ. 1987. Т. 18, В. 1. С.374 - 418.

9. Плюйко В.А. Соотношение между сечениями спонтанных и индуцированных лазерным излучением ядерных реакций // ЯФ. 1986. Т. 44, В. 2(8). С. 362 - 368.

10. Ежов С.Н., Плюйко В.А. О применимости метода Сатчлера для вычисления флуктуационного сечения в присутствии прямых процессов // ЯФ. 1984. Т. 39, В. 2. С. 394 - 401.

11. Плюйко В.А. Эмиссия частиц из компаунд - ядра при большом числе открытых каналов // Сб.: Нейтронная физика. Т.1. ЦНИИАтоминформ. Москва, 1984. С. 204 -208.

12. Ежов С.Н., Кабакова Н.Е., Плюйко В.А. Возбуждение уровней основной ротационной полосы нейтронами низкой энергии // ЯФ. 1985. Т. 42, В. 1(7). С. 154 - 164.

13. Ежов С.Н., Плюйко В.А. Статистическое описание неупругого рассеяния нейтронов в присутствии прямых процессов // Изв. АН СССР, сер. физ. 1988. Т.52, В 5. С. 973 - 978.

14. Гирко В.Л., Ежов С.Н., Плюйко В.А. Интегральное уравнение для средней матрицы рассеяния // УФЖ. 1988. Т.33. N 10. С. 1451 - 1455.

15. Гирко В.Л., Ежов С.Н., Плюйко В.А. Некоторые свойства стохастической матрицы рассеяния // Докл. АН УССР, сер.А, физ. - мат. и техн. науки 1987. N 1. С. 3 - 6.

16. Ежов С.Н., Плюйко В.А. Матрица рассеяния для стохастических систем с большим числом степеней свободы // ЯФ. 1990. Т.51, В.4. С.1001 - 1007.

17. Ezhov S.N., Plujko V.A. The integral equations for the average stochastic scattering matrix // Zeit.Phys. 1991. V. A339 P.243 - 247.

18. Ежов С.Н., Плюйко В.А. Оптимальный метод расчета сечений компаунд процессов // Изв. РАН, сер. физ. 1993. Т.57. С. 184 -190.

19. Ezhov S.N., Plujko V.A. The fast computation of the compound cross sections // *Zeit.Phys.* 1993. V. A346. N4. P. 275 - 280.
20. Ежов С.Н., Плюйко В.А. Влияние вибрационных состояний на термодинамические характеристики нагретых ядер // *Изв. РАН, сер. физ.* 1993. Т.57. N5. С.78 - 84.
21. Коломиец В.М., Магнер А.Г., Плюйко В.А. Эффекты запаздывания в кинетическом уравнении // *ЯФ.* 1992. Т. 55, В. 8. С. 2061 - 2069.
22. Коломиец В.М., Плюйко В.А. Интеграл столкновений с запаздыванием для пространственно - неоднородной системы // *ЯФ.* 1994. Т.57, N6. С. 992 - 1000.
23. Коломиец В.М., Плюйко В.А. Разложение статической функции распределения Вигнера по полиномам Эрмита // *ЯФ.* 1994. Т.57, N2. С.377 - 382.
24. Коломиец В.М., Магнер А.Г., Плюйко В.А. Затухание ядерных коллективных возбуждений с учетом эффектов запаздывания // *ЯФ.* 1993. Т.56, В.2. С.110 - 124.
25. Kolomietz V.M., Magner A.G., Plujko V.A. The retardation effects in collision integral // *Nucl. Phys.* 1992. V.A545. P.99c - 104c.
26. Kolomietz V.M., Magner A.G., Plujko V.A. Retardation effects in damping of nuclear collective excitations. I. Relaxation time // *Zeit.Phys.* 1993. V.A345. P.131 - 136.
27. Kolomietz V.M., Magner A.G., Plujko V.A. Retardation effects in damping of nuclear collective excitations. II. Viscosity // *Zeit.Phys.* 1993. V. A345. P. 137 - 142.
28. Kolomietz V.M., Plujko V.A. The giant multipole resonance collisional widths in heated nuclei based on the Vlasov - Landau kinetic equation // *Collective Nuclear Dynamics:Proc. of the Fourth Int. KINR School on Nucl. Phys. Kiev, Ukraine, August 29 - Sept.7, 1994. Kiev, 1994. P. 336 - 345.*
29. Kolomietz V.M., Plujko V.A., Shlomo S. Collisional damping in heated nuclei within the Landau - Vlasov kinetic theory // *Phys. Rev.* 1995. V.C52, P. 2480 - 2487.
30. Коломиец В.М., Плюйко В.А. Вклады различных каналов затухания в ширины гигантских мультипольных резонансов в рамках полуклассической динамики Власова - Ландау // *46 Международное совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра". Тезисы докладов. М. Наука. 1996. С. 286; Kolomietz V.M., Plujko V.A., Shlomo S. Preprint # 96-05, Cyclotron Institute, Texas A&M University, 1996, 30 P.*

Плюйко В.А. Релаксація колективних збуджень у нагрітих ядрах.

Дисертація (рукопис) на здобуття вченого ступеня доктора фізики - математичних наук по спеціальності 01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок, НЦ "Інститут ядерних досліджень" НАН України та Держкомітету України по використанню ядерної енергії. Київ. 1996.

Захищаються теоретичні дослідження напівкласичними методами процесів релаксації швидких колективних збуджень у нагрітих ядрах. Вперше вивчено вплив ефектів запізнювання у інтегралі зіткнень на внесок двотільної дисипації у ширини загасання гігантських мультипольних резонансів у холодних та нагрітих ядрах. Досліджені нелінійні кореляції між різними каналами дисипації, обумовлені впливом самоузгодженого середнього поля. Побудована нова мікроскопічно обґрунтована модель опису радіаційної силової функції, в якій одночасно ураховується залежність від температури як ширин розпаду колективних станів, так і середньої теплової енергії електромагнітного поля у нагрітому ядрі.

Plujko V.A. Relaxation of collective excitations in heated nuclei

A thesis (manuscript) for the Doctor of Sciences degree (Physics & Mathematics). Speciality 01.04.16 - physics of nuclei and elementary particles. Scientific Centre "Institute for Nuclear Research" Ukrainian National Academy of Science and State Committee on Nuclear Energy Employment. Kiev. 1996.

The results of the theoretical investigations of the relaxation processes of fast collective excitations in heated nuclei by use of semiclassical methods are maintained. Collisional damping of giant multipole resonances (GMR) in cold and heated nuclei is studied for the first time with taking into account retardation effects in collision integral. An interplay between different dissipative mechanisms in the formation of the intrinsic widths of GMR due to action of the mean-field is investigated. A new model based on microscopic approach is considered for description of the radiative strength function that takes into account the dependence on temperature both damping widths and thermal energy of the electromagnetic field in heated nuclei.

Ключові слова: кінетичне рівняння, релаксація, нагріті ядра, колективні збудження, інтеграл зіткнень, гігантські резонанси, ширини загасання, радіаційний розпад.

ПЛЮЙКО Владимир Андреевич

РЕЛАКСАЦИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НАГРЕТЫХ
ЯДРАХ

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук)

Подписано в печать: 02.07.96. Формат 60x90/16 Бум. офс. Офс.печ.
Усл. печ. л. 2.1 Тираж 100 экз. Заказ 27

СКТБ с ЭП НЦ "Института ядерных исследований"
НАН Украины и Госкомитета Украины по использованию ядерной
энергии
252028, Киев-28, проспект Науки, 47

439299

AB 35.634

AB. 35.634