

Оглавление

Введение

Глава 1. Поляризационное тормозное излучение быстрой заряженной частицы на атоме.

1.1. Общие соотношения для амплитуды и сечения процесса

1.2. Поляризационное тормозное излучение быстрой заряженной частицы на атоме в локальном плазменном приближении для поляризуемости мишени

1.3. Некогерентное поляризационное тормозное излучение быстрой заряженной частицы на атоме

Глава 2. Поляризационно-интерференционные эффекты в тормозном излучении электронов тепловых энергий

2.1. Локальный плазменный подход к поляризационным эффектам в радиационно-столкновительных процессах

2.2. Поляризационное тормозное излучение на многоэлектронном ионе в приближении классического движения налетающей частицы

2.3. Описание поляризационных эффектов в рамках обобщенного вращательного приближения

2.4. Квантовый (по движению налетающей частицы) анализ поляризационно-интерференционных эффектов

Глава 3. Околорезонансный тормозной эффект на ионах с остовом

3.1. Околорезонансный (в том числе многофотонный) тормозной эффект в дипольном приближении

3.2. Околорезонансное тормозное излучение квазиклассических электронов на ионах с учетом эффектов проникновения в остов

3.3. Квантовый подход к описанию поляризационно-интерференционных эффектов в околорезонансном неупругом рассеянии электронов

Глава 4. Интерференционные и поляризационные явления при взаимодействии бихроматического излучения с веществом

4.1. Фазовые и поляризационные эффекты в ионизации атома под действием бихроматического излучения

4.2. Поверхностный фотоэффект в бихроматическом поле в приближении "Зоммерфельдовского скачка"

4.3. Влияние конечной ширины поверхностного барьера на фотоэффект в бихроматическом поле

4.4. Фотонаведенное двулучепреломление в кубических кристаллах с осесимметричными центрами окраски

Глава 5. Фемтосекундное фотонное эхо в нанокристаллах

5.1. Фемтосекундное фотонное эхо в нанокристаллах с одновременным возбуждением двух экситонных состояний

5.2. Квантовые биения в сигналах двух и трехимпульсного фотонного эха в нанокристаллах

Глава 6. Поляризационный канал в излучательных процессах в рамках статистических моделей для остова мишени

6.1. Радиационные потери энергии электронов умеренных энергий при рассеянии на атоме Томаса-Ферми

6.2. Поляризационный канал излучения и рекомбинации электронов в плазме с тяжелыми ионами

6.3. Тормозное излучение быстрой заряженной частицы на атоме Ленца-Иенсена с учетом поляризованности атомного остова

6.4. Поляризационное тормозное излучение тепловых электронов на дебаевской "шубе" вокруг иона в плазме

Заключение

Литература

Из введения

Книга посвящена поляризационным и интерференционным эффектам, возникающим в ряде излучательных процессов, актуальных с точки зрения современной фундаментальной и прикладной физики. Речь идет о: (i) последних достижениях в теории поляризационного тормозного излучения (ПТИ) -- интенсивно развивающейся области взаимодействия излучения и вещества; (ii) фазовых и поляризационных особенностях атомного и поверхностного фотоэффекта в бихроматическом электромагнитном поле; (iii) фемтосекундном фотонном эхе на нанокристаллах с когерентным возбуждением нескольких экситонных переходов. Указанные группы явлений объединены важной ролью квантовой интерференции.

В поляризационном тормозном излучении имеет место интерференция между обычным (статическим) и поляризационным каналами процесса. При фотоэффекте в бихроматическом поле, (представляющем собой когерентную смесь излучения на основной частоте и его гармонике), происходит интерференция между одно- и двухфотонной ионизацией. В процессе (iii) в эхо-сигнале возникают биения, обусловленные квантовой интерференцией вкладов различных экситонных переходов.

Важность исследования ПТИ (i), помимо несомненного прикладного аспекта, обусловлена фундаментальным характером данного явления, возникающего всегда при рассеянии заряженных частиц на мишенях с электронным остовом.

Актуальность изучения процессов (ii) определяется возможностями управления светоиндуцированными реакциями за счет изменения фазовых и поляризационных характеристик возбуждающих оптических импульсов, что является "hot topic" современной прикладной физики.

Наконец исследование фемтосекундного фотонного эха на нанокристаллах (iii) весьма существенно в контексте развития новейших лазерных и нанотехнологий.

Концепция поляризационного канала в радиационно-столкновительных процессах

Излучение (поглощение) электромагнитного поля при взаимодействии заряженной частицы и структурной мишени (атома, иона с электронным остовом, молекулы, кластера и т.д.) может, вообще говоря, идти по двум каналам:

(1) в результате ускорения рассеивающегося заряда в электростатическом поле мишени -- традиционный ("статический") канал;

(2) как следствие наведенной в ходе столкновения динамической поляризации остова мишени -- поляризационный (синонимы: динамический, атомный) канал.

В обоих случаях энергообмен происходит между заряженной частицей и электромагнитным полем, а мишень играет роль "посредника". Однако, в первом случае это "посредничество" носит пассивный характер: мишень является, по сути, третьим телом, необходимым для выполнения закона сохранения энергии-импульса или, другими словами, источником статического поля, в котором происходит квантовый переход заряженной частицы. Отсюда и следует одно из названий канала -- статический канал. В ходе процесса по этому каналу связанные электроны мишени рассматриваются как распределение статического заряда, экранирующего ядро мишени, т.е. их свойствами как динамической системы пренебрегается. Не случайно данное приближение в теории тормозного излучения Бете--Гайтлера [1] называется приближением экранировки.

В поляризационном канале мишень, напротив, проявляет себя "активным посредником", поскольку излучаемый (поглощаемый) фотон "прокачивается" через электронный остов мишени от заряда к полю или наоборот. Здесь происходит виртуальное возбуждение связанных электронов мишени, и излучательный процесс в значительной степени определяется динамическими свойствами электронного остова.

Следует подчеркнуть, что традиционный (статический) и поляризационный каналы имеют место в едином элементарном акте взаимодействия заряженной частицы и электромагнитного поля, следствием чего является квантовая интерференция между ними.

Существует и более общий развивавшийся Борном и Яблонским [2] подход к интерпретации радиационных явлений с участием структурных мишеней, согласно которому излучательный акт имеет место при взаимодействии единого дипольного момента системы заряженных частиц с электромагнитным полем. С этой точки зрения разделение процесса на два канала представляется приемом, конструктивность которого определяется спецификой конкретной физической ситуации.

Поляризационный канал может быть существенен как для (а) свободно-свободных (тормозное излучение и поглощение), (б) связанно-свободных (фотоионизация и фоторекомбинация) электронных переходов, так и для (в) связанно-связанных (возбуждение и релаксация в дискретном спектре) переходов.

Единая поляризационная природа дополнительного канала излучения (поглощения) во всех вышеперечисленных типах процессов была осознана не сразу: вплоть до последнего времени общность поляризационного механизма в известной мере "застылала" различием в характере излучательного явления. Тем не менее, исторически эта связь проявляла себя. Например, по-видимому, не случайно, что изучению поляризационного канала в тормозном излучении группой исследователей под руководством М.Я.Амусьи предшествовала их интенсивная деятельность по расчету многочастичных эффектов в фотоионизации, позволившая существенно продвинуть теорию атомного фотоэффекта [3]. Это продвижение оказалось возможным в результате использования новых методов описания многочастичных эффектов в излучательных процессах. Одним из этих методов является приближение случайных фаз с обменом, которое можно определить, как учет многочастичных корреляций через использование динамической поляризуемости остова ионизируемого атома. Таким образом, в данном случае поляризационный канал, по существу, присутствовал в теоретическом описании процесса, не будучи явно поименованным.

Другим примером такого неявного включения поляризационного канала могут служить работы И.Б.Берсукера по учету влияния остова щелочного атома на силы осцилляторов валентного электрона [4]. Эти исследования были продолжены и в более поздних работах ряда авторов, в которых учитывалось также и влияние поляризации остова на сечение фотопоглощения [5]. Отметим, что в случае щелочных атомов имеет место значительное разделение остова и внешнего электрона, что существенно облегчает выделение поляризационного канала на фоне "прямой" фотоионизации (статического канала) [6].

В терминах интерференции статического и поляризационного каналов может быть также интерпретирована резонансная структура фотоионизационного спектра атома в окрестности автоионизационного состояния, которая была рассчитана Фано [7] в рамках стационарной теории возмущений, а также А.С.Компанейцем [8] на основе динамического подхода.

Мы остановимся только на одном из вышеперечисленных типов квантовых радиационных переходов заряженных частиц в поле структурной мишени, а именно: тормозном излучении (ТИ) на атомах и атомарных ионах, как спонтанном, так и вынужденном, включая тормозное поглощение (обратный тормозной эффект), резонансные и многофотонные процессы.

Другой пример многоканального тормозного излучения был рассмотрен в работе [9], где рассчитывалось ТИ медленных электронов на ионах во внешнем электромагнитном поле. Здесь процесс сопровождается виртуальным заселением ридберговских состояний атома, расположенных на фоне континуума.

Обзор работ по поляризационно-интерференционным эффектам

Поскольку теория ПТИ на середину 80-х годов достаточно полно отражена в монографии [10], мы ниже остановимся на приоритетных моментах и работах по ПТИ, опубликованных в конце 80-х и 90-х годах. Поляризационный канал в ТИ был идентифицирован и систематически изучался ранее своих аналогов в процессах фоторекомбинации и фотопоглощения. Это связано с тем, что разделение излучающей системы на мишень и частицу, совершающую неупругий переход под действием электромагнитного поля -- "налетающую частицу" (НЧ), наиболее очевидно.

Хотя, с другой стороны, прошло около сорока лет, прежде чем квантовая релятивистская теория Бете и Гайтлера спонтанного ТИ в приближении экранировки [1] была обобщена с учетом динамики связанных электронов мишени работе [11]. Именно с нее и началось систематическое изучение ПТИ.

Уместно также отметить, что поляризационное слагаемое в амплитуде ТИ возникало в работах ряда авторов и ранее. Первой следует упомянуть работу Персивала и Ситона [12], в которой рассчитывалась поляризация излучения атомных спектральных линий, возбуждаемого электронным ударом. В другой работе [13] исследовалось сечение ТИ и тормозного поглощения излучения медленными электронами (начальная энергия $E_{ie} < 3 \text{ эВ}$) при рассеянии на нейтральных атомах, где в классическом приближении по движению НЧ была продемонстрирована важная роль поляризационного канала, названного авторами излучением атомных электронов.

Поляризационное слагаемое в теории ТИ медленных электронов на атомах было получено также в работе [14], где был сделан вывод об относительной малости вклада поляризационного канала по сравнению с традиционным. Это справедливо для ТИ медленных электронов, но, вообще говоря, неверно для тормозного поглощения при достаточно большой энергии поглощаемого фотона, что было показано в более поздних работах других авторов.

Об авторе

Астапенко Валерий Александрович

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лазерного центра Московского физико-технического института.