

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение. Общие свойства и проблемы описания атомных спектров в плазме</b>	<b>11</b>
1.1	Атомная физика и физика плазмы Квазиклассические методы для атомных процессов . . .	11
1.2	Общая проблема смешивания атомных состояний в плазменной среде. Метод матрицы плотности . . . . .	15
1.3	Свойства симметрии кулоновского поля . . . . .	20
1.4	Неводородоподобные атомы. Разрешенные и запрещенные переходы. Свойства спектров многозарядных атомов . . . . .	24
1.4.1	Структура неводородоподобного атомного спектра. Разрешенные и запрещенные переходы	24
1.4.2	Свойства спектров многозарядных ионов (МЗИ) . . . . .	26
1.5	Автоионизационные состояния. Стационарное (Фано) и временное (Компанеец) описания . . . . .	30
1.5.1	Автоионизационные состояния . . . . .	30
1.5.2	Взаимодействие дискретных состояний с континуумом. Стационарное (Фано) и временное (Компанеец) описания . . . . .	31
1.6	Ридберговские атомные состояния в плазме . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Квазиклассические радиационные переходы в атомах</b>	<b>37</b>
2.1	Классические спектры излучения в кулоновском поле. Особенности высокочастотной области. Крамерсовская электродинамика . . . . .	37
2.2	Вероятности линейчатого излучения в приближении КрЭД. Классические основы правила Бете . . . . .	43
2.3	Сечения фоторекомбинации (ФР) . . . . .	48
2.4	Общие закономерности для квазиклассических вероятностей переходов . . . . .	53

2.5	Матричные элементы между высоковозбужденными состояниями.	
	Дипольные переходы в атоме водорода . . . . .	57
2.6	Неводородные ридберговские атомы . . . . .	63
2.6.1	Квазиклассический метод квантового дефекта . . . . .	63
2.6.2	Поляризуемость ридберговского атома . . . . .	68
2.6.3	Статическая поляризуемость. . . . .	69
2.6.4	Резонансная и высокочастотная поляризуемости. . . . .	70
2.7	Динамическая поляризуемость ридберговских состояний в приближении Крамерса . . . . .	72
2.8	Статистическая теория атомной поляризуемости . . . . .	75
<b>3</b>	<b>Квазиклассические методы в теории столкновений заряженных частиц с атомами</b>	<b>83</b>
3.1	Приближение классического тока. Методы Ферми и Борна . . . . .	83
3.2	Модель эквивалентных фотонов Ферми . . . . .	84
3.3	Возбуждение электронным ударом как поглощение эквивалентных фотонов атомом . . . . .	87
3.4	Диэлектронная рекомбинация как нерезонансная флюоресценция эквивалентных фотонов . . . . .	90
3.5	Поляризационное излучение как нерезонансное рассеяние эквивалентных фотонов . . . . .	94
3.6	Квазиклассические матричные элементы для неупругих переходов в борновском приближении . . . . .	101
<b>4</b>	<b>Квазиклассические методы в атомной кинетике</b>	<b>107</b>
4.1	Квазиклассическая модель радиационного каскада в атоме . . . . .	108
4.1.1	Классическое кинетическое уравнение . . . . .	110
4.1.2	Квантовое кинетическое уравнение в квазиклассическом случае . . . . .	111
4.1.3	Связь квазиклассического решения с квантовой каскадной матрицей. Алгоритм построения решения в общем квантовом случае . . . . .	116
4.1.4	Населенности атомных уровней при фоторекомбинационном источнике заселения . . . . .	119
4.1.5	Законы подобия. Сравнение с квантовыми численными расчетами . . . . .	122
4.2	Унифицированная радиационно-столкновительная кинетическая модель для ридберговских состояний . . . . .	128
4.3	Универсальный подход к кинетике заселения атомных состояний в плазме . . . . .	132

4.4	Интерференция атомных состояний в ионном поле. Обобщенные кинетические уравнения для атомной матрицы плотности . . . . .	138
<b>5</b>	<b>Водородоподобный атом в постоянном электрическом поле. Квазиклассическое рассмотрение</b>	<b>141</b>
5.1	Квазиклассические результаты для вероятностей перехода и времен жизни в параболических координатах . . . . .	141
5.1.1	Вводные замечания . . . . .	141
5.1.2	Водородоподобные атомы в электрическом поле. Общие соотношения . . . . .	143
5.1.3	Радиационные времена жизни состояний . . . . .	146
5.2	Интенсивности штарковских компонент . . . . .	150
5.3	Слабое поле. Асимптотическая теория распада атома . . . . .	155
5.4	Классическая теория для атома в электрическом поле . . . . .	156
5.5	Распад уровней вблизи критического значения электрического поля . . . . .	158
5.6	Общая квазиклассическая теория для атомных состояний в электрическом поле . . . . .	160
5.6.1	Основы квазиклассического метода . . . . .	160
5.6.2	Уровни энергии . . . . .	162
5.6.3	Скорости распадов . . . . .	163
5.7	Результаты численных расчетов . . . . .	164
<b>6</b>	<b>Атом в магнитном поле и скрещенных F-В полях</b>	<b>169</b>
6.1	Вводные замечания. Энергетический спектр низлежащих атомных состояний . . . . .	169
6.1.1	Спектр энергии нижних состояний . . . . .	170
6.2	Адиабатическая теория для высоковозбужденных атомных состояний в сильном магнитном поле . . . . .	174
6.3	"Скрытая" симметрия атома в магнитном поле . . . . .	178
6.4	Силы осцилляторов для атомных переходов в сильном магнитном поле . . . . .	186
6.5	Классические траектории атомного электрона в магнитном поле. Эффекты стохастизации . . . . .	191
6.6	Водородный атом в скрещенных электрическом и магнитном полях . . . . .	199
6.6.1	Эффекты первого порядка . . . . .	199
6.6.2	Эффекты второго порядка . . . . .	201
6.6.3	Атом в электрическом и сильном магнитном полях . . . . .	203
6.7	Разложение по обратным степеням главного квантового числа . . . . .	205
6.8	Заключение . . . . .	208

<b>7 Атом в нерезонансном осциллирующем электрическом поле</b>	<b>211</b>
7.1 Типы осциллирующих полей в плазме. Квазиэнергетическая структура уровней . . . . .	211
7.2 Спектр Блохинцева . . . . .	213
7.3 Атом водорода во вращающемся электрическом поле . . . . .	216
7.4 Многофотонные переходы в двухуровневой системе . . . . .	218
7.5 Квазиэнергетический спектр двухуровневой системы. Интенсивности сателлитов . . . . .	221
7.6 Высоковозбужденный атом в низкочастотном нерезонансном электрическом поле. Квазиклассическое решение . . . . .	228
<b>8 Атом в резонансном осциллирующем электрическом поле. Одновременное воздействие постоянного и переменного полей</b>	<b>237</b>
8.1 Особенности условий резонанса в плазме . . . . .	237
8.2 Воздействие на атом слабых осциллирующих электрических полей широкого спектрального состава . . . . .	239
8.3 Водородный атом в статическом ( $S$ ) и сильном осциллирующем (динамическом - $D$ ) полях. Численные решения для случая $S \perp D$ . . . . .	245
8.4 Аналитическая теория многоквантовых резонансов в $S$ - $D$ - полях . . . . .	249
8.5 Структура водородных спектральных линий вблизи резонансов в $S$ - $D$ полях . . . . .	257
8.6 О стохастизации движения высоковозбужденного электрона в периодическом поле . . . . .	261
<b>9 Распады атомных состояний</b>	<b>265</b>
9.1 Резонанс дискретных состояний на фоне континуума . . . . .	265
9.1.1 Несколько дискретных состояний на фоне одного континуума . . . . .	265
9.1.2 Несколько континуумов. Задачи рассеяния . . . . .	267
9.1.3 Двухуровневая задача при стационарном возмущении . . . . .	269
9.1.4 Некоторые примеры . . . . .	271
9.2 Затухание атомных состояний, обусловленное их релаксацией в плазме . . . . .	277
9.2.1 Ударная релаксация атомных уровней . . . . .	277
9.2.2 Особенности контура спектральной линии при ударной релаксации подуровней в ионном поле . . . . .	280
9.3 Излучение запрещенных линий и распад метастабильных уровней в плазме . . . . .	283

9.3.1 Поляризационный механизм излучения запрещенных переходов в атоме . . . . .	283
9.3.2 Взаимоотношение между неупругим и поляризационным механизмами . . . . .	286
9.3.3 Адиабатическое приближение для поляризационного излучения . . . . .	289
9.4 Распад атомных состояний и некоторые элементарные процессы в плазме . . . . .	291
9.4.1 Переход от дискретного к непрерывному спектру в водородной плазме . . . . .	291
9.4.2 Перезарядка атомов на многозарядных ионах как процесс распада . . . . .	292
9.4.3 Автоионизационный распад и диэлектронная рекомбинация в плазме . . . . .	293
9.5 Ионизация атомных состояний в сильном низкочастотном поле . . . . .	294
<b>10 Возбужденный водородоподобный атом в электрических полях заряженных частиц</b>	<b>299</b>
10.1 Эволюция атомных состояний в электрическом поле классически движущейся заряженной частицы . . . . .	300
10.2 Эффекты перемешивания водородоподобных состояний при перезарядке атома на многозарядном ионе . . . . .	304
10.3 Квантовое движение электрона в электрическом поле возбужденного водородоподобного атома или иона. Связь с проблемой уширения линий . . . . .	308
10.3.1 Классическая и квантовая постановка задачи о взаимодействии электрона с возбужденным атомом . . . . .	308
10.3.2 Система волновых функций возбужденного водородного атома и уширяющей частицы . . . . .	308
10.3.3 Контур водородной линии и интеграл перекрытия волновых функций уширяющих частиц . . . . .	313
10.3.4 Классический предел . . . . .	317
10.3.5 Обобщение на случай водородоподобного иона . . . . .	318
10.4 Дифференциальные сечения рассеяния электронов и ионов на возбужденном атоме водорода. Точные решения . . . . .	322
<b>11 Столкновения атома с атомными частицами во внешних полях</b>	<b>327</b>
11.1 Столкновительные переходы между подуровнями тонкой структуры водородного атома в магнитном поле . . . . .	327
11.2 Столкновения двухуровневого атома с частицами в сильном резонансном электромагнитном поле . . . . .	331
11.2.1 Оптические столкновения. Основная система уравнений . . . . .	331

11.2.2	Оптические столкновения и характеристики поглощения света средой . . . . .	335
11.3	Ландау-Зинеровский механизм поглощения сильного электромагнитного излучения в крыльях спектральных линий . . . . .	336
11.3.1	Модель Ландау-Зинера для оптических явлений . . . . .	336
11.3.2	Нелинейные эффекты в поглощении при столкновении тождественных атомов . . . . .	338
11.3.3	Экспериментальные аспекты . . . . .	344
11.4	Многочастичные эффекты. Изменение направления квантования атома в плазме в сильном электромагнитном поле . . . . .	346
11.4.1	Многочастичный подход к описанию поглощения мощного излучения атомом в плазме . . . . .	346
11.4.2	Расчет спектра в лазерном поле . . . . .	347
11.4.3	Изменение направления квантования атома в лазерном поле . . . . .	352
11.5	Радиационные столкновения . . . . .	355
11.6	Влияние электрического микрополя на резонансную перезарядку в плотной среде . . . . .	359
<b>12</b>	<b>Атом под воздействием стохастических возмущений</b>	<b>363</b>
12.1	Атом под воздействием стохастических ускорений. Модель броуновского движения для оптических явлений . . . . .	363
12.1.1	Нелинейные эффекты в спектрах броуновски движущихся атомов . . . . .	363
12.1.2	Метод амплитуд состояний и континуальное интегрирование . . . . .	364
12.2	Нелинейные эффекты в поглощении света, обусловленные броуновскими флуктуациями атомной скорости . . . . .	369
12.3	Атом под воздействием возмущений марковского типа . . . . .	372
12.3.1	Общая постановка задачи. Приближенные решения для слабых и сильных возмущений . . . . .	373
12.3.2	Точные решения для модельных возмущений. Метод модельного микрополя (МММ) . . . . .	375
12.4	Электрон в планковском поле излучения. Инфракрасная "катастрофа" . . . . .	379
12.4.1	Приближение классического тока . . . . .	379
12.4.2	Многофотонные индуцированные процессы в планковском поле излучения . . . . .	382
12.4.3	Расчет поглощаемой энергии . . . . .	386