

УДК 533.9, 539.9, 539.17–539–19,  
539.51–74, 539.92, 621.039

**Разработка кинетических моделей движущейся плазмы.  
Константы радиационных  $d-p$  переходов иона ксенона.**

**Кули-заде М.Е.\*, Скороход Е.П.\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [kuli\\_marina@mail.ru](mailto:kuli_marina@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [e.p.skorohod@mail.ru](mailto:e.p.skorohod@mail.ru)*

**Аннотация**

Многоуровневая физико – химическая кинетика в настоящем остаётся актуальной как для общих теоретических вопросов спектроскопии низкотемпературной плазмы, так и для оптической диагностики в рамках радиационной плазмодинамики, в частности, для отладки режимов конкретных устройств, где “рабочим телом” является плазма ксенона. При составлении кинетических уравнений необходимы многочисленные радиационные константы (коэффициенты Эйнштейна).

Приведены вероятности радиационных ( $d - p$ ) переходов иона ксенона. Радиальные интегралы рассчитывались в кулоновском приближении по методу Бейтса – Дамгаард, а также по методу Хартри – Фока – Слетера. Угловые зависимости для этих методов проводились в приближении  $LS$ -связи и в рамках промежуточного типа связи.

**Ключевые слова:** моделирование кинетических процессов плазмы Хе, вероятности радиационных переходов ХеII, коэффициенты Эйнштейна иона ХеII, оптическая диагностика, плазменная струя двигателя холловского типа.

## Введение

Одним из основных направлений механики плазмы является разработка кинетических моделей, позволяющих изучать свойства движущейся плазмы.

Начиная с 70 – х годов прошлого века плазма ксенона привлекает внимание исследователей, поскольку ксенон – перспективное рабочее вещество в линейных холловских ускорителях, ионных двигателях малой тяги, а также различных типах оптических квантовых генераторов.

Физико–химическая плазмомеханика сформировалась как развивающаяся область науки при решении целого ряда задач двигателестроения ракетно–космической отрасли.

Для проведения математического моделирования процессов в установках и устройствах, где “рабочим телом” является плазма ксенона, необходимы справочные данные констант различных плазмохимических реакций. В частности, знание коэффициентов Эйнштейна оказалось необходимым при разработках холловского двигателя [1-3], а также [4-6]. Плазменные двигатели холловского типа – пример технологии мирового уровня, активно используемой не только в России, но и за рубежом. В связи с этим актуальна серия статей [3-7], логическим продолжением

которой является данная работа. Радиационные константы по определению являются составной частью релаксационной матрицы в задачах многоуровневой кинетики [7-9].

В известной монографии [10], посвящённой расчётам вероятностей фото-переходов, сведения о коэффициентах Эйнштейна иона ксенона отсутствуют. Для данной группы в [10] приведены значения коэффициентов Эйнштейна переходов  $2p^4 3p \rightarrow 2p^4 ns$  ( $n = 3, 4, 5$ ) и  $2p^4 ns \rightarrow 2p^4 2p$  ( $n = 3, 4, 5$ ) иона неона, а также  $3p^4 4p \rightarrow 3p^4 ns$  ( $n = 4, 5$ ) и  $3p^4 ns \rightarrow 3p^5$  ( $n = 4, 5$ ) иона аргона. Расчёты проводились в рамках промежуточного типа связи.

Основой этого обзора является малоизвестная работа [11]. Проводится сравнение результатов [11, 16-21, 24].

## 1. Схема возбуждённых уровней иона ксенона

Знания структуры атома (иона), его схемы уровней полезно при изучении спектров, составлении кинетических уравнений, вычислении коэффициентов Эйнштейна.

Общая схема уровней атома и ионов ксенона (XeI – XeIV), принадлежащих основным электронным конфигурациям (рис. 1) построена по данным [12, 13]. При этом использовались закономерности изоэлектронных последовательностей элементов, соседних с ксеноном (XeI – CsII – Ba II – LaIV – CeV; II – XeII – CsIII – BaIV – LaV; TeI – III – XeII – CsIV – BaV; SbI – TeII – III – XeIV CsV; SbII – TeIII).

Спектроскопический символ основного состояния атома ксенона, рис. 1 –  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 \ ^1S_0$ . Атом ксенона имеет два предела ионизации:  $5s^2 5p^5 \ ^2P_{3/2}$  и для смещенной (штрихованной) схемы уровней  $5s^2 5p^5 \ ^2P_{1/2}$ , разность которых составляет 1,306 эВ.

Потенциал ионизации иона ксенона XeIII отстоит на 21,2 эВ от основного состояния иона XeII,  $5s^2 5p^5 \ ^2P_{3/2}$  и на 33,327 эВ от основного состояния атома.

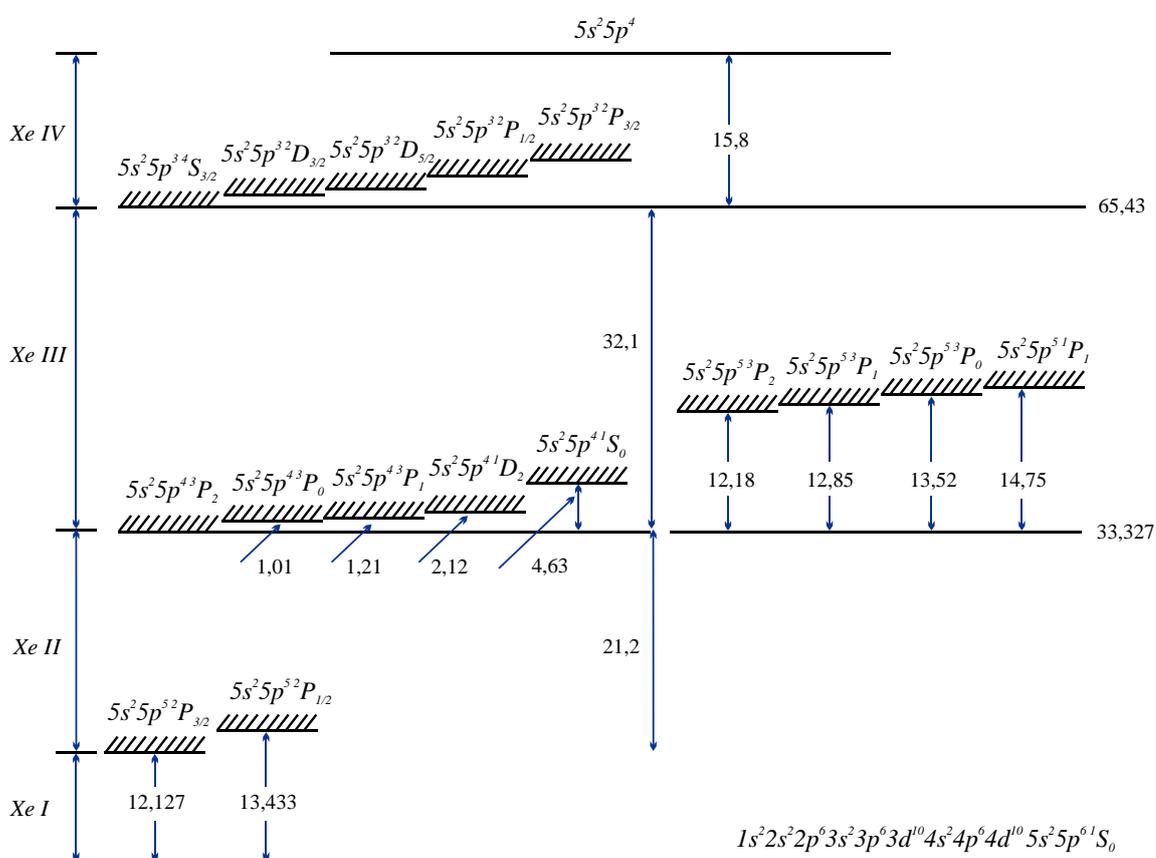


Рис.1. Схема низколежащих состояний атома и ионов ксенона.

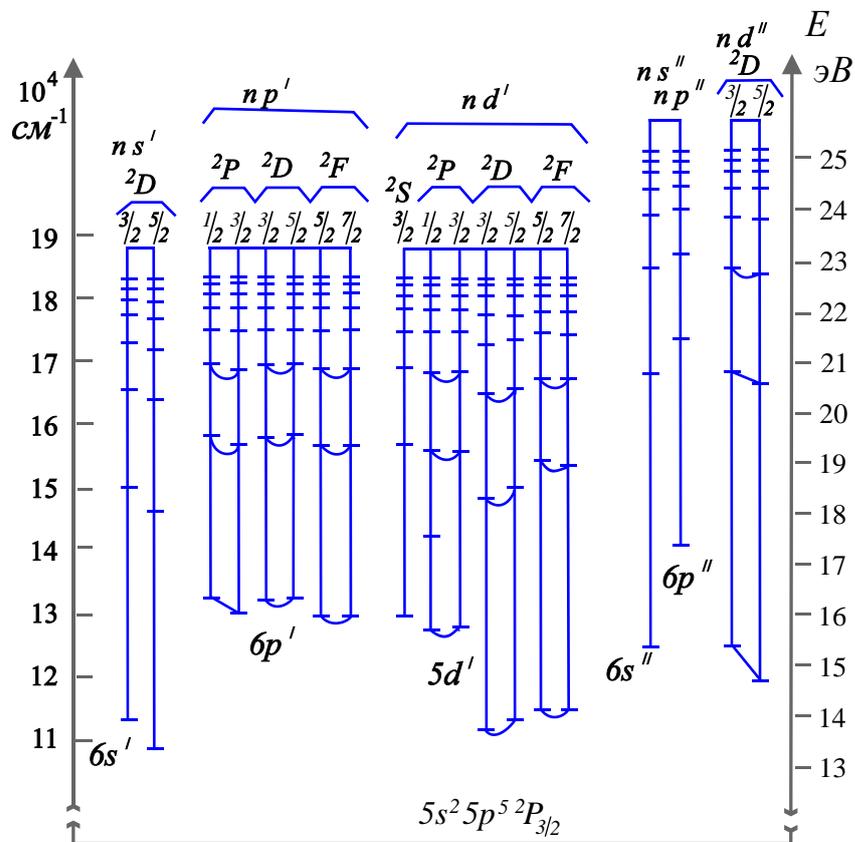
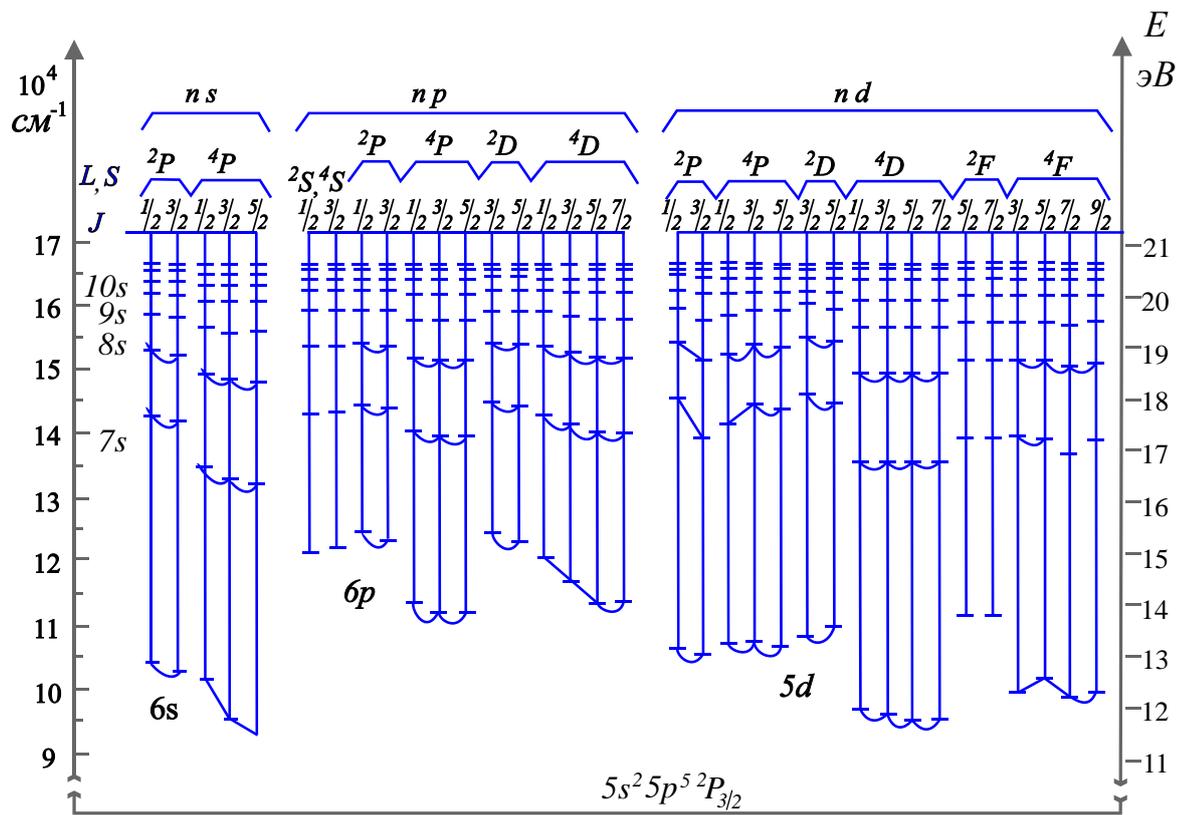


Рис. 2. Схема уровней Хе II.

Значения энергий возбуждённых состояний иона ксенона  $E_i$  для самых нижних уровней брались из [12,13] и частично отражены в табл.1 и на рис.2.

Недостающие значения энергий уровней были получены путём экстраполяции квантового дефекта  $\mu = n - n^*$  в соответствующей последовательности уровней (серии) с использованием формулы Ритца

$$\mu = a + bt; \quad ; \quad t = (n^*)^{-2} = \frac{T}{RZ^2}, \quad (1)$$

где  $n$  – главное квантовое число,  $T$  – значение энергии уровня, отсчитанное от границы ионизации (энергия ионизации уровня),  $Z$  – заряд ядра.

Эффективное главное квантовое число с учётом потенциала ионизации  $I$  и  $Ry = 13,6$  эВ определяется как

$$n_i^* = \sqrt{\frac{Z^2 Ry}{I - E_i}}. \quad (2)$$

Значения эффективных квантовых чисел  $n^*$ , табл.1, необходимы для вычислений матричных элементов в кулоновском приближении и часто используются в теоретических расчётах.

В табл.1 указаны: порядковый номер  $N_0$ , спектроскопический символ уровня, значения квантового дефекта  $\mu = n - n^*$ , главное квантовое число  $n$ , значение эффективных квантовых чисел  $n^*$ , энергия уровня  $E_i$ .

Таблица 1.

№ п/п	Спектроскопич. символ, $\mu$	$n$	$n^*$	$E$ , эВ	№ п/п	Спектроскопич. символ, $\mu$	$n$	$n^*$	$E$ , эВ
1	$s^2P_{1/2}, \mu = 3.05044$	6	2.563007	12.928	95	$d^4D_{7/2}, \mu = 2.486744$	5	2.409066	11.836
2		7	3.949556	17.721	96		6	3.513225	16.801
3		8	4.949556	18.988	97		7	4.513225	18.538
4	$s^2P_{3/2}, \mu = 3.088337$	6	2.535626	12.739	98		8	5.513225	19.418
5		7	3.911663	17.653	99	$d^2F_{5/2}, \mu = 2.290268$	5	2.709732	13.8

6		8	4.911663	18.953
7	$s^4P_{1/2}, \mu = 3.508585$	6	2.50568	12.545
8		7	3.491415	16.746
9		8	4.491415	18.512
10	$s^4P_{3/2}, \mu = 3.595937$	6	2.403142	11.79
11		7	3.404063	16.514
12		8	4.404063	18.404
13	$s^4P_{5/2}, \mu = 3.625671$	6	2.372197	11.543
14		7	3.374329	16.431
15		8	4.374329	18.365
16	$p^2S^0_{1/2}, \mu = 3.033821$	6	2.966179	15.02
17		7	3.966179	17.75
18		8	4.966179	19.003
19	$p^4S^0_{3/2}, \mu = 3.020383$	6	2.979617	15.082
20		7	3.979617	17.774
21		8	4.979617	19.014
22	$p^2P^0_{1/2}, \mu = 2.927558$	6	3.072442	15.446
23		7	4.072442	17.928
24		8	5.072442	19.094
25	$p^2P^0_{3/2}, \mu = 2.970149$	6	3.029851	15.283
26		7	4.029851	17.859
27		8	5.029851	19.058
28	$p^4P^0_{1/2}, \mu = 3.234593$	6	2.765407	14.096
29		7	3.765407	17.372
30		8	4.765407	18.813
31	$p^4P^0_{3/2}, \mu = 3.278819$	6	2.721181	13.863
32		7	3.721181	17.28
33		8	4.721181	18.768
34	$p^4P^0_{5/2}, \mu = 3.274985$	6	2.725015	13.883
35		7	3.725015	17.288
36		8	4.725015	18.772
37	$p^2D^0_{3/2}, \mu = 2.915388$	6	3.086412	15.492
38		7	4.086412	17.948
39		8	5.086412	19.104
40	$p^2D^0_{5/2}, \mu = 2.974641$	6	3.025359	15.265
41		7	4.025359	17.851
42		8	5.025359	19.054
43	$p^4D^0_{1/2}, \mu = 3.056302$	6	2.943698	14.931
44		7	3.943698	17.711
45		8	4.943698	18.982
46	$p^4D^0_{3/2}, \mu = 3.156476$	6	2.843524	14.481
47		7	3.843524	17.526
48		8	4.843524	18.889
49	$p^4D^0_{5/2}, \mu = 3.238454$	6	2.761546	14.076
50		7	3.761546	17.364
51		8	4.761546	18.809
52	$p^4D^0_{7/2}, \mu = 3.233812$	6	2.766188	14.1
53		7	3.766188	17.373
54		8	4.766188	18.814
55	$d^2P_{1/2}, \mu = 1.878989$	5	2.596198	13.138
56		6	4.12101	18.005
57		7	5.12101	19.134
58		8	6.12101	19.756
59	$d^2P_{3/2}, \mu = 2.416352$	5	2.583648	13.06
60		6	3.583648	16.973
61		7	4.583648	18.619
62		8	5.583648	19.463

100	$d^2F_{7/2}, \mu = 2.290268$	6	3.709731	17.256
101		7	4.709731	18.756
102		8	5.709731	19.539
103	$d^4F_{3/2}, \mu = 2.862864$	5	2.737136	13.948
104		6	3.737136	17.313
105		7	4.737136	18.784
106		8	5.737136	19.555
107	$d^4F_{5/2}, \mu = 2.294921$	5	2.512485	12.592
108		6	3.705079	17.246
109		7	4.705079	18.751
110		8	5.705079	19.537
111	$d^4F_{7/2}, \mu = 2.430605$	5	2.464858	12.256
112		6	3.569395	16.939
113		7	4.569395	18.603
114		8	5.569395	19.454
115	$d^4F_{9/2}, \mu = 2.525149$	5	2.474851	12.328
116		6	3.474851	16.703
117		7	4.474851	18.492
118		8	5.474851	19.393
119	$s^{1/2}D_{3/2}, \mu = 3.613168$	6	2.416868	14.008
120		7	3.386832	18.578
121		8	4.386832	20.493
122	$s^{1/2}D_{5/2}, \mu = 3.758066$	6	2.341468	13.399
123		7	3.241931	18.145
124		8	4.241931	20.297
125	$p^{1/2}P_{1/2}, \mu = 3.18337$	6	2.81663	16.464
126		7	3.816629	19.586
127		8	4.816629	20.975
128	$p^{1/2}P_{3/2}, \mu = 3.258493$	6	2.741507	16.083
129		7	3.741507	19.434
130		8	4.741507	20.9
131	$p^{1/2}D_{3/2}, \mu = 3.203946$	6	2.796054	16.362
132		7	3.796054	19.545
133		8	4.796054	20.955
134	$p^{1/2}D_{5/2}, \mu = 3.19685$	6	2.80315	16.398
135		7	3.80315	19.559
136		8	4.80315	20.962
137	$p^{1/2}F_{5/2}, \mu = 3.277084$	6	2.722916	15.984
138		7	3.722916	19.395
139		8	4.722916	20.881
140	$p^{1/2}F_{7/2}, \mu = 3.272542$	6	2.727456	16.008
141		7	3.727456	19.405
142		8	4.727456	20.886
143	$d^{1/2}S_{1/2}, \mu = 2.268273$	5	2.731727	16.031
144		6	3.731727	19.414
145		7	4.731727	20.89
146		8	5.731727	21.664
147	$d^{1/2}P_{1/2}, \mu = 2.3188$	5	2.6812	15.754
148		6	3.6812	19.306
149		7	4.6812	20.838
150		8	5.6812	21.634
151	$d^{1/2}P_{3/2}, \mu = 2.307383$	5	2.692617	15.818
152		6	3.692617	19.331
153		7	4.692617	20.85
154		8	5.692617	21.764
155	$d^{1/2}D_{3/2}, \mu = 2.686695$	5	2.391575	13.81
156		6	3.313305	18.365

63	$d^4P_{1/2}, \mu = 2.186688$	5	2.61552	13.257
64		6	3.813312	17.467
65		7	4.813312	18.86
66		8	5.813312	19.598
67	$d^4P_{3/2}, \mu = 1.96267$	5	2.62527	13.316
68		6	4.03733	17.871
69		7	5.03733	19.064
70		8	6.03733	19.716
71	$d^4P_{5/2}, \mu = 2.017083$	5	2.606781	13.204
72		6	3.982912	17.78
73		7	4.982912	19.017
74		8	5.982912	19.688
75	$d^2D_{3/2}, \mu = 1.820576$	5	2.63611	13.381
76		6	4.179423	18.094
77		7	5.179423	19.18
78		8	6.179423	19.783
79	$d^2D_{5/2}, \mu = 1.944192$	5	2.671419	13.586
80		6	3.671419	17.901
81		7	4.671419	19.08
82		8	5.671419	19.725
83	$d^4D_{1/2}, \mu = 2.567987$	5	2.432013	12.012
84		6	3.432013	16.59
85		7	4.432013	18.439
86		8	5.432013	19.365
87	$d^4D_{3/2}, \mu = 2.476773$	5	2.418611	11.91
88		6	3.523227	16.826
89		7	4.523227	18.549
90		8	5.523227	19.425
91	$d^4D_{5/2}, \mu = 2.484777$	5	2.408415	11.831
92		6	3.515223	16.806
93		7	4.515223	18.54
94		8	5.515223	19.42

157		7	4.313305	20.396
158		8	5.313305	21.393
159	$d'^2D_{5/2}, \mu = 2.617809$	5	2.41332	13.981
160		6	3.382191	18.565
161		7	4.382191	20.487
162		8	5.382191	21.442
163	$d'^2F_{5/2}, \mu = 2.408874$	5	2.446786	14.235
164		6	3.591126	19.102
165		7	4.591126	20.739
166		8	5.591126	21.58
167	$d'^2F_{7/2}, \mu = 2.550492$	5	2.449508	14.255
168		6	3.449508	18.749
169		7	4.449508	20.572
170		8	4.449508	21.488
171	$s'^2S_{1/2}, \mu = 3.719462$	6	2.280538	15.38
172		7	3.280538	20.785
173		8	4.280538	22.871
174	$p'^2P_{1/2}, \mu = 3.464123$	6	2.535822	17.38
175	$p'^2P_{3/2}, \mu = 3.464123$	7	3.535822	21.489
176		8	4.535822	23.196
177	$d'^2D_{3/2}, \mu = 2.716320$	5	2.28368	15.409
178		6	3.28368	20.795
179		7	4.28368	22.875
180		8	5.28368	23.891
181	$d'^2D_{5/2}, \mu = 2.783965$	5	2.216035	14.762
182		6	3.216035	20.58
183		7	4.216035	22.78
184		8	5.216035	23.84

## 2. Вероятности фото-переходов иона ХеII

Важной характеристикой возбуждённого состояния атома (иона) являются коэффициенты Эйнштейна для спонтанного излучения или вероятности радиационных переходов  $A_{ki}$ , определяющие время жизни верхнего уровня  $k$ , как  $1/A_{ki}$ . В табл. 2 представлены результаты расчёта малоизвестной работы [11], в которой достаточно подробно разобран алгоритм промежуточной связи. Радиальные интегралы, необходимые для расчётов вероятностей переходов  $A/10^6$ , рассчитывались по методу Бейтса –

Дамгаард (B – D-I) и (B – D-II), а также по методу Хартри – Фока – Слетера (H – F – S) с потенциалом Германа-Скилмана. Угловые зависимости для этих трёх методов проводились в приближении *LS*-связи [14] и в рамках промежуточной связи.

В случае (B – D-I) для расчётов радиальных интегралов по методу квантового дефекта [14] использовались эффективные квантовые числа, соответствующие экспериментальным значениям энергий уровней, табл. 1.

В случае (B – D-II) энергии уровней усреднялись в целом для всей конфигурации. Так, например, на рис. 2 представлены конфигурации *6s* и *7s*, состоящие из пяти уровней, *6p* (из 13 уровней), *5d* (из 17 уровней) и т.д. Усреднённым значениям энергий уровней для каждой конфигурации соответствует эффективное квантовое число.

В работе [11,15] приведены результаты расчётов вероятностей *s – p* фото-переходов ХеII в поглощении согласно упомянутым моделям, а также данные других авторов [16-24]. Детальный анализ заселённости возбуждённых уровней иона ксенона в плазме холловского двигателя говорит в пользу расчёта вероятностей по методу Хартри – Фока – Слетера. Для угловых матричных элементов вопрос выбора типа связи остаётся открытым.

Самое большое число уровней принадлежит конфигурации *5d* (17 уровней) и *5d'* (7 уровней), рис. 2. Многочисленные переходы с уровней

конфигурации  $p$  на уровне конфигурации  $d$  для иона XeII (в излучении) приведены в табл. 2 (314 дипольных переходов).

В табл. 2 указаны длина волны  $\lambda$  и вероятности  $A/10^6$  переходов согласно разным приближениям (запись — 0.4 означает  $A=0.4 \cdot 10^6$ ):

A) – (B–D I), радиальный интеграл по методу Бейтса – Дамгаард с промежуточным типом связи;

B) – (B–D I), радиальный интеграл по методу Бейтса – Дамгаард с *LS*-связью;

C) – (B–D II), радиальный интеграл по методу Бейтса – Дамгаард (усреднённые энергии уровней) с промежуточным типом связи;

D) – (B–D II), радиальный интеграл по методу Бейтса – Дамгаард (усреднённые энергии уровней) с *LS*-типом связи;

F) – (H–F–S), радиальный интеграл по методу Хартри – Фока – Слетера с промежуточным типом связи;

G) – (H–F–S), радиальный интеграл по методу Хартри – Фока – Слетера с *LS*-типом связи.

В примечании даны: номер перехода; вероятности с указанием ссылки; запись “B [12] нет”, которая означает, что переход в [12] отсутствует.

Приводимые в табл.2 длины волн содержат разные записи: в виде прямых и наклонных цифр одновременно, обозначающие один переход, и общепринятое представление. Запись, когда последние три-четыре символа обозначены наклонно, соответствуют длинам волн [12]. В остальных случаях

(например, номера 8, 9, 11 и др.) длины волн рассчитывались с использованием значений энергий из табл.1.

Таблица 2

**Вероятности  $A_{ki}/10^6$   $p-d$  фото-переходов иона ХеII**

Переход	$\lambda, \text{Å}$	A)	B)	C)	D)	F)	G)	№. $A_{ki}/10^6$ , ссылка, примечание
$6p(^3P)^2S_{1/2} \rightarrow$								
$5d(^3P)^2P_{1/2}$	6563.19	0.399	9.98	0.373	7.99	1.01	21.7	1.
$^2P_{3/2}$	6300.86	6.84	20.3	4.97	18.1	13.5	49.0	2. 62. - [21]
$^2D_{3/2}$	7530.70	4.91		4.32		11.7		3.
$^4P_{1/2}$	7006.96	0.125		0.468		1.27		4.
$^4P_{3/2}$	7245.38	0.066		0.66		1.83		5.
$^4D_{1/2}$	4110.41	17.0		17.0		46.1		6. 5. - [21]
$^4D_{3/2}$	3975.59	8.9		11.6		31.1		7.
$^4F_{3/2}$	5415.36	7.2		5.0		13.6		8. В [11] $\lambda = 5642$ .
$5d(^1D)^2D_{3/2}$	10149.	2.12		1.4		3.7		9. В [12] нет
$6p(^3P)^2P_{1/2} \rightarrow$								
$5d(^3P)^2P_{1/2}$	5368.07	3.8	7.2	2.6	7.2	7.1	19.8	10. 129. - [21] 68.1 - [*]
$^2P_{3/2}$	5192.	0.038	3.8	0.42	4.0	1.1	11.0	11. В [12] нет
$^2D_{3/2}$	5998.3	2.4	27.0	2.4	23.5	6.5	64.0	12.
$^4P_{1/2}$	5659.38	3.3		1.7		4.6		13.
$^4P_{3/2}$	5815.96	2.1		1.6		4.4		14.
$^4D_{1/2}$	3607.41	29.5		28.5		77.3		15.
$^4D_{3/2}$	3504.15	0.82		1.0		2.7		16.
$^4F_{3/2}$	4736.	18.0		9.6		25.9		17. В [12] нет
$5d(^1D)^2D_{3/2}$	7548.45	1.4		0.69		1.9		18.
$6p(^3P)^2P_{3/2} \rightarrow$								
$5d(^3P)^2P_{1/2}$	5776.39	2.9	1.6	2.0	1.5	5.5	4.0	19. 61. - [21]; 12.3 - [*]
$^2P_{3/2}$	5572.19	4.8	8.3	2.8	8.2	7.7	22.0	20.
$^2D_{3/2}$	6512.83	0.92	2.3	0.72	1.8	2.0	5.0	21. 49. - [21]
$^2D_{5/2}$	7301.80	1.1	17.0	0.96	11.8	2.6	32.0	22.

${}^2F_{5/2}$	5080.	17.0		12.0		32.0		23. В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	6115.08	1.3		0.9		2.5		24.
${}^4P_{3/2}$	6298.31	3.0		1.7		4.5		25.
${}^4P_{5/2}$	5958.03	3.0		3.1		8.4		26.
${}^4D_{1/2}$	3787.32	0.95		0.82		2.2		27.
${}^4D_{3/2}$	3672.57	16.0		17.0		46.0		28.
${}^4D_{5/2}$	3588.62	0.025		0.44		1.2		29.
${}^4F_{3/2}$	5051.	2.4		1.0		2.8		30. В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	4604.	7.2		6.9		19.0		31. В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	8383.	0.89		0.49		1.3		32. В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	9477.	0.92		0.58		1.6		33. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	11759	0.059		0.072		0.2		34. В [12] нет
$6p {}^2D_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	5450.45	0.83	0.3	0.76	0.35	2.0	0.95	35. 37. - [21]
${}^2P_{3/2}$	5268.31	2.2	0.068	2.0	0.078	5.4	0.21	36.
${}^2D_{3/2}$	6101.43	0.7	4.4	0.76	4.0	2.0	11.0	37. 146. - [21]
${}^2D_{5/2}$	6790.7	1.0	0.42	0.7	0.33	1.9	0.88	38. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	4827	6.5	81.0	4.8	51.0	13.0	137.0	39. В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	5751.03	0.011		0.048		0.13		40. 106. - [21]
${}^4P_{3/2}$	5912.80	0.11		0.016		0.044		41.
${}^4P_{5/2}$	5613.6	0.18		0.23		0.61		42. В [12] нет
${}^4D_{1/2}$	3644.43	0.0024		0.0067		0.018		43.
${}^4D_{3/2}$	3538.08	0.27		0.37		0.99		44.
${}^4D_{5/2}$	3460.08	0.0483		0.14		0.39		45.
${}^4F_{3/2}$	4800.1	2.9		1.2		3.2		46. В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	4394.8	21.5		22.0		60.0		47. В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	7712.42	1.5		1.3		3.4		48.
${}^2D_{5/2}$	8628.94	3.1		1.9		5.1		49.
${}^2F_{5/2}$	10484.	0.54		0.33		0.91		50. В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	5616.67	5.6	39.0	0.39	0.39	1.1	1.0	51. 35. - [21]
${}^2D_{3/2}$	6573.68	1.4	0.31	0.044	0.24	0.12	0.65	52.
${}^2D_{5/2}$	7378.38	0.21	3.6	0.6	2.4	1.6	6.4	53.
${}^2F_{5/2}$	5117.	0.48	3.8	0.12	2.0	0.33	5.5	54. В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	5988.	0.46	46.6	10.6	25.3	28.8	69.0	55. В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	6356.9	1.6		1.3		3.5		56. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	6008.92	0.056		0.59		1.6		57.

${}^4D_{3/2}$	3691.84	2.9		1.8		5.0		<b>58.</b>
${}^4D_{5/2}$	3608	7.6		14.0		39.0		<b>59.</b> В [12] нет
${}^4D_{7/2}$	3612.37	22.0		0.085		0.23		<b>60.</b>
${}^4F_{3/2}$	5087.5	0.067		0.39		1.1		<b>61.</b> В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	4634.6	8.25		3.6		9.7		<b>62.</b> В [12] нет
${}^4F_{7/2}$	4116.9	0.073		1.3		3.6		<b>63.</b> В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	8482.64	1.8		0.0024		0.0064		<b>64.</b> Вместо $5d'$ надо $5d''$ . Поставить второй штрих в [12]
${}^2D_{5/2}$	9607.1	0.26		0.014		0.038		<b>65.</b> В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	11960.	0.0043		0.18		0.49		<b>66.</b> В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	12197.	0.16		0.11		0.31		<b>67.</b> В [12] нет
${}^2G_{7/2}$	6843.	2.5		1.2		3.4		<b>68.</b> В [12] нет
$6p {}^4S_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	6375.28	3.2		0.2		0.54		<b>69. 62. - [21]</b>
${}^2P_{3/2}$	6127.44	4.5		1.7		4.6		<b>70.</b>
${}^2D_{3/2}$	7284.34	0.00028		0.028		0.075		<b>71.</b>
${}^2D_{5/2}$	8285.70	0.27		0.38		1.0		<b>72.</b>
${}^2F_{5/2}$	5538	4.7		4.2		11.0		<b>73.</b> В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	6790.37	1.5	4.8	1.3		3.6		<b>74.</b>
${}^4P_{3/2}$	7017.06	0.46	9.0	0.17		0.46		<b>75.</b>
${}^4P_{5/2}$	6597.25	0.51	15.0	1.1		3.0		<b>76.</b>
${}^4D_{1/2}$	4035.87	1.5		2.0		5.3		<b>77.</b>
${}^4D_{3/2}$	3905.85	6.4		4.1		11.0		<b>78.</b>
${}^4D_{5/2}$	3811.05	5.4		5.1		14.0		<b>79.</b>
${}^4F_{3/2}$	5503.	1.7		2.5		6.7		<b>80.</b> В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	4977.	6.8		2.7		7.3		<b>81.</b> В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	9707.	0.089		0.092		0.25		<b>82.</b> В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	11204.5	0.27		0.22		0.59		<b>83.</b> В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	14541.	0.033		0.048		0.13		<b>84.</b> В [12] нет
$6p {}^4P_{1/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	12945.	0.37		0.18		0.48		<b>85.</b> В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	11963.	0.57		0.4		1.1		<b>86.</b> В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	17337.	0.36		82.0		223.0		<b>87.</b> В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	14780.	0.16	0.17	0.12	0.088	0.34	0.24	<b>88.</b> В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	15896.	0.28	0.68	0.16	0.35	0.43	0.95	<b>89.</b> В [12] нет

${}^4D_{1/2}$	5945.53	0.49	9.9	0.92	12.0	2.5	33.0	90. 39.4 - [*]
${}^4D_{3/2}$	5667.56	11.0	10.0	14.0	14.0	39.5	38.0	91. 123. - [21]; 14.7 - [*]
${}^4F_{3/2}$	9788.6	0.05		0.038		0.11		92. В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	4262.7	0.012		0.012		0.032		93. В [12] нет
$6p {}^4P_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	17108	0.005		0.005		0.013		94. В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	15434.5	0.28		0.41		1.1		95. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	25720	0.046		0.003		0.0082		96. В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	44863	0.0085		0.0075		0.02		97. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	12164	0.25		0.15		0.42		98. В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	20466	0.002	0.17	0.002		0.0056		99. В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	22670	0.0012	0.037	0.15		0.4		100. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	18807	0.47	0.22	0.32		0.88		101. В [12] нет
${}^4D_{1/2}$	6694.32	0.018	0.74	0.006		0.016		102. 62. - [21]
${}^4D_{3/2}$	6343.96	0.44	5.2	0.28		0.76		103. 82. - [21]
${}^4D_{5/2}$	6097.59	6.2	5.5	7.5		20.0		104. 72. - [21]; 17.1 - [*]
${}^4F_{3/2}$	11996	0.32		0.15		0.4		105. Исключение $d - p$ переход, уровень $p$ - нижний
${}^4F_{5/2}$	9749	0.037		0.09		0.25		106. В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	214593	0.000013		0.00004		0.0001		107. В [12] нет
$6p {}^4P_{5/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{3/2}$	15049	0.16		0.026		0.07		108. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	24667	0.0022		0.0006		0.0016		109. В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	41754	0.0019		0.0003		0.0008		110. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	11923	$3 \cdot 10^{-6}$		0.023		0.063		111. В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	18028	0.036		0.037		0.1		112. В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	21848	0.0083	0.1	0.0045		0.012		113. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	18238	0.22	0.055	0.11		0.3		114. В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	6277.54	0.015	0.34	0.071		0.2		115. 15. - [21]
${}^4D_{5/2}$	6036.20	0.0002	3.3	0.041		0.11		116. 15. - [21]; 98.9 - [*]
${}^4D_{7/2}$	<b>6051.15</b>	1.5	0.48	0.015		0.041		117. 52.- [21]; 21.3 - [18]; 20.5 - [19]; 52. - [20]; 21. - [16]; 52.9 - [*]
${}^4F_{5/2}$	9591.35	0.00004		0.038		0.1		118.

${}^4F_{7/2}$	7613	3.8		3.7		9.9		119. В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	158228	$1.3 \cdot 10^{-4}$		0.00002		0.00005		120. В [12] нет
$6p {}^4D_{1/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	6910.22	1.2		1.0		2.9		121. 20. - [21]
${}^2P_{3/2}$	6620.02	3.7		2.1		5.7		122.
${}^2D_{3/2}$	7993.6	0.011		0.23		0.63		123. В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	7400.50	0.637	0.196	0.941	0.138	2.55	0.375	124.
${}^4P_{3/2}$	7670.66		0.0176	0.113	0.0123	0.31	0.033	125.
${}^4D_{1/2}$	4243.88	1.08	3.3	2.69	6.34	7.29	18.0	126.
${}^4D_{3/2}$	4100.34	0.797	3.39	0.328	7.36	0.889	20.0	127. 5. - [21]
${}^4F_{3/2}$	5897	26.8	66.1	7.148	27.8	19.4	75.3	128. В [12] нет
$5d' {}^2D_{3/2}$	11003.5	0.707		0.557		1.51		129. В [12] нет
$6p {}^4D_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	9226.39	0.0056		0.014		0.036		130.
${}^2P_{3/2}$	8716.19	0.139		0.136		0.368		131.
${}^2D_{3/2}$	11262.5	0.398		0.334		0.905		132. В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	13850	0.048		0.0515		0.14		133. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	7568.9	7.3		5.06		13.7		134. В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	10124.5	0.0113	0.0471	0.0039	0.027	0.0106	0.0733	135. В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	10636	0.066	0.545	0.042	0.03	0.114	0.0812	136. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	9698.68	0.00895	0.00554	0.00369	0.00379	0.01	0.0103	137.
${}^4D_{1/2}$	5018.8	0.383	1.44	0.616	2.01	1.67	5.45	138. В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	4818.02	1.32	4.52	1.52	3.63	4.13	9.86	139. 12. - [21]; 116.8 [*]
${}^4D_{5/2}$	4674.56	1.89	6.77	1.84	3.48	4.99	9.44	140.
${}^4F_{3/2}$	7503.6	0.058	7.32	0.00793	2.69	0.0215	7.31	141. В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	6556.70	0.134	18.0	0.0818	16.2	0.222	43.8	142.
$5d' {}^2D_{3/2}$	18325	0.00098		0.00398		0.0108		143. В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	24509.8	3.03		0.0416		0.113		144. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	49212.6	0.0079		0.00432		0.0117		145. В [12] нет
$6p {}^4D_{5/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{3/2}$	12196.6	0.391		0.04		0.109		146. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	17831.7	$4.3 \cdot 10^{-5}$		0.0025		0.00679		147. В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	25322.8	0.0443		0.0132		0.0357		148. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	10059	0.0028		0.413		1.12		149. В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	14082.5	0.0857		0.0568		0.154		150. В [12] нет

${}^4P_{3/2}$	16310.55	0.0306	0.0863	0.012	0.0109	0.0325	0.0296	151. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	14210.6	0.0014	0.13	0.126	0.0707	0.342	0.192	152. В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	5721	0.546	0.959		1.266		3.44	153. В [12] нет
${}^4D_{5/2}$	5518.56	1.11	27.4	0.813	3.48	2.21	9.45	154.
${}^4D_{7/2}$	5531.07	6.46	0.817	4.45	1.14	12.1	3.1	155. 12. - [21]; 39.2 - [*]
${}^4F_{3/2}$	9944.	0.371	$2.6 \cdot 10^{-4}$	0.346	0.0826	0.939	0.224	156. В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	8347.24	0.0326	20.5	0.2	1.7	0.542	4.62	157.
${}^4F_{7/2}$	6805.74	12.9	14.0	9.65	14.7	26.2	40.0	158.
$5d' {}^2D_{3/2}$	45745.7	0.00892		0.000125		0.000341		159.
${}^2D_{5/2}$	123609	0.000212		$3 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{-5}$		160.
$6p {}^4D_{7/2} \rightarrow$								
$5d {}^2D_{5/2}$	24143.	$1.5 \cdot 10^{-5}$		$1.7 \cdot 10^{-5}$		$4.8 \cdot 10^{-5}$		161. В [12] нет
${}^2F_{5/2}$	9867.8	0.00735		0.00846		0.023		162. В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	13709.9	0.326		0.39		1.06		163. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	13831.	0.00879	0.000142	0.00403	0.0256	0.0109	0.0695	164.
${}^4D_{5/2}$	5460.39	0.0434	0.637	0.442	0.891	1.2	2.42	165. 27. - [21]; 49. - [24]; 98.5 - [*]
${}^4D_{7/2}$	5472.61	0.683	3.66	4.27	5.31	11.6	14.4	166. 49. - [21] 71.7 - [*]
${}^4F_{5/2}$	8214.85	0.144	0.0624	0.118	0.0522	0.32	0.142	167.
${}^4F_{7/2}$	6719.	0.242	1.85	0.193	1.91	0.526	5.19	168. В [12] нет
${}^4F_{9/2}$	6990.88	6.02	14.5	5.26	14.9	14.3	40.3	169. 27. - [21]
$5d' {}^2D_{5/2}$	99800.	$2.6 \cdot 10^{-5}$		$1.3 \cdot 10^{-5}$		$4.3 \cdot 10^{-5}$		170. В [12] нет
${}^2G_{7/2}$	19025.9	0.00393		0.00443		0.012		171. В [12] нет
${}^2G_{9/2}$	20313.	0.016		0.393		1.07		172. В [12] нет
$({}^1D) 6p' {}^2P_{1/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	3731.18	28.1		9.7		26.3		173.
${}^2P_{3/2}$	3646.91	1.66		0.0186		0.0503		174.
${}^2D_{3/2}$	4025.19	11.5		4.16		11.3		175. 7. - [21]
${}^4P_{1/2}$	3869.63	19.6		7.24		19.7		176. 25. - [21]
${}^4P_{3/2}$	3942.21	1.78		1.82		4.93		177.
${}^4D_{1/2}$	2786.8	25.6		9.21		25.0		178. В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	2723.40	6.32		1.41		3.82		179.
${}^4F_{3/2}$	3414.7	1.45		0.0451		0.122		180. В [12] нет
$5d' {}^2S_{1/2}$	28628.7	0.123	0.156	0.0463		0.126		181. В [12] нет
${}^2P_{1/2}$	17449	0.266	0.872	0.142		0.385		182. В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	19168	0.466	0.344	0.526		1.43		183. В [12] нет

${}^2D_{3/2}$	4668.49	0.394	12.7	2.8		7.61		<b>184. 59. - [21]; 36.4 - [*]</b>
$6p' {}^2P_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	4214.69	5.82		2.36		6.41		<b>185.</b>
${}^2P_{3/2}$	4104.95	12.4		4.6		12.5		<b>186. 64. - [21]</b>
${}^2D_{3/2}$	4593.70	9.66		4.25		11.5		<b>187.</b>
${}^2D_{5/2}$	4972.71	10.9		13.8		37.3		<b>188. 96. - [21]</b>
${}^2F_{5/2}$	3832.	0.0128		0.352		0.956		<b>189.</b> В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	4393.5	6.71		3.97		10.8		<b>190.</b> В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	4485.95	7.94		4.46		12.1		<b>191. 7. - [21]</b>
${}^4P_{5/2}$	4312.8	0.207		0.0418		0.113		<b>192.</b> В [12] нет
${}^4D_{1/2}$	3047.9	10.0		3.31		8.98		<b>193.</b> В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	2972.31	1.9		1.44		3.91		<b>194.</b>
${}^4D_{5/2}$	2917.9	1.43		3.06		8.31		<b>195.</b> В [12] нет
${}^4F_{3/2}$	3815.	5.88		3.82		10.4		<b>196.</b> В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	3554.7	0.0786		0.956		2.59		<b>197.</b> В [12] нет
$5d' {}^2S_{1/2}$	238664.	0.000118	$6.82 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$9.9 \cdot 10^{-5}$	$9.3 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	<b>198.</b> В [12] нет
${}^2P_{1/2}$	37636.	0.0178	0.0243	0.00667	0.00953	0.0181	0.0259	<b>199.</b> В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	4666.28	0.00133	0.0639	0.000765	0.0025	0.0021	0.0679	<b>200.</b>
${}^2D_{3/2}$	5450.90	5.36	0.944	1.39	1.47	3.78	3.99	<b>201.</b>
${}^2D_{5/2}$	5893.29	2.47	7.84	3.06	10.4	8.32	28.3	<b>202.</b>
${}^2F_{5/2}$	6702.25	10.01		0.28		0.0759		<b>203.</b>
$({}^1S)5d'' {}^2D_{3/2}$	18639.	0.00023		0.00254		0.0069		<b>204.</b> В [12] нет
${}^2D_{5/2}$	9447.60	0.0154		0.215		0.583		<b>205.</b>
$6p' {}^2D_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	3849.7	4.6		2.24		6.06		<b>206.</b> В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	3756.87	5.59		2.13		5.79		<b>207.</b>
${}^2D_{3/2}$	4162.16	6.81		6.7		18.2		<b>208. 10. - [21]</b>
${}^2D_{5/2}$	4470.90	0.818		0.674		1.83		<b>209. 10. - [21]</b>
${}^2F_{5/2}$	3527	0.0416		4.74		12.9		<b>210.</b> В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	3996.05	2.31		1.03		2.8		<b>211.</b>
${}^4P_{3/2}$	4073.50	0.835		0.0043		0.0117		<b>212.</b>
${}^4P_{5/2}$	3929.6	5.14		2.62		7.1		<b>213.</b> В [12] нет
${}^4D_{1/2}$	2850.95	4.42		2.91		7.91		<b>214.</b>
${}^4D_{3/2}$	2785.42	19.48		29.2		79.1		<b>215.</b>
${}^4D_{5/2}$	2737.7	2.87		6.9		18.7		<b>216.</b> В [12] нет
${}^4F_{3/2}$	3512.8	1.17		17.2		46.6		<b>217.</b> В [12] нет

${}^4F_{5/2}$	3290.8	3.28		1.83		4.95		218. В [12] нет
$5d' {}^2S_{1/2}$	37383	0.00707		0.00289		0.00786		219. В [12] нет
${}^2P_{1/2}$	20354	0.00596	0.128	0.00253	0.0602	0.00688	0.163	220. В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	22732	0.0399	0.0202	0.0784	0.00865	0.0213	0.0235	221. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	4853.77	5.16	10.8	2.61	18.7	7.09	50.7	222.
${}^2D_{5/2}$	5202.9	3.89	2.09	3.17	1.69	8.6	4.5	223. В [12] нет
$5d' {}^2F_{5/2}$	5821.57	13.7	15.5	16.3	19.2	44.2	52.2	224.
$5d'' {}^2D_{5/2}$	7787.04	0.0805		0.128		0.346		225.
$({}^1D) 6p' {}^2D_{5/2} \rightarrow$								
$({}^3P) 5d {}^2P_{3/2}$	3717.20	12.5		4.44		12.1		226.
${}^2D_{3/2}$	4113.52	141		4.48		12.1		227.
${}^2D_{5/2}$	4414.84	8.47		13.8		37.3		228. 42. - [21]
${}^2F_{5/2}$	3492	0.57		2.31		6.27		229. В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	3876.6	0.0345		0.385		1.04		230. В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	4028.	21.7		0.523		1.42		231. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	3885.00	1.6		2.36		6.41		232.
${}^4D_{3/2}$	2763.56	109		3.37		9.15		233.
${}^4D_{5/2}$	2715.76	5.82		8.65		23.5		234.
${}^4D_{7/2}$	2718.79	2.55		4.89		13.3		235.
${}^4F_{3/2}$	3478.	9.19		0.0493		0.134		236. В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	3259.36	0.341		1.41		3.83		237.
${}^4F_{7/2}$	2995.	0.0102		0.969		2.63		238. В [12] нет
$5d' {}^2P_{3/2}$	21353.8	0.589	0.154	0.00457	0.0626	0.0124	0.17	239. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	4787.77	0.494	0.798	1.56	1.44	4.23	3.92	240. 22. - [21]; 65.8 - [*]
${}^2D_{5/2}$	5126.70	4.04	10.3	3.93	16.4	10.7	44.6	241. В [12] $6d' {}^2D_{5/2}$
${}^2F_{5/2}$	5726.91	0.216	1.32	0.0384	0.0964	0.104	2.62	242. 8. - [21]; 62.6 - [*] В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	5782.	14.1	14.9	16.9	18.7	46.0	50.8	243.
${}^2G_{7/2}$	4209.	0.925		0.604		1.64		244. В [12] нет
$({}^1S) 5d'' {}^2D_{5/2}$	7618.57	0.222		0.427		1.16		245.
$6p' {}^2F_{5/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{3/2}$	4244.41	1.45		0.0107		0.0291		246.
${}^2D_{3/2}$	4769.05	$6.2 \cdot 10^{-5}$		0.0476		0.129		247. 20. - [21]; 50.5 - [*]
${}^2D_{5/2}$	5178.82	0.525		0.997		2.71		248. 42. - [21]
${}^2F_{5/2}$	3953.2	1.23		4.93		13.4		249. В [12] нет

${}^2F_{7/2}$	4453.	3.74		8.67		23.5		250. В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	4653.00	0.242		0.203		0.552		251.
${}^4P_{5/2}$	4464.60	0.813		0.00093		0.0025		252.
${}^4D_{3/2}$	3044.75	0.00175		0.893		2.42		253.
${}^4D_{5/2}$	2986.82	0.647		1.47		3.98		254.
${}^4D_{7/2}$	2991.3	1.01		2.36		6.4		255. В [12] нет
${}^4F_{3/2}$	3935.	0.936		0.0123		0.0333		256. В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	3657.74	0.719		3.09		8.39		257.
${}^4F_{7/2}$	3328.	0.489		10.55		28.6		258. В [12] нет
$5d' {}^2P_{3/2}$	74460	0.000324		0.000122		0.000333		259. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	5699.61	0.985	0.677	0.0134	0.978	0.0364	2.66	260. 74. - [21]; 20.8 - [*]
${}^2D_{5/2}$	6185.03	0.206	0.0411	1.08	0.0545	2.92	0.148	261.
${}^2F_{5/2}$	7082.15	2.4	3.46	0.79	3.63	2.14	9.86	262.
${}^2F_{7/2}$	7164.83	0.263	0.169	0.403	0.175	1.1	0.475	263. 69. - [21]
${}^2G_{7/2}$	4897.6	27.8	23.6	34.7	44.5	94.0	121.0	264. В [12] нет
$({}^1S)5d'' {}^2D_{3/2}$	10222.9	0.0722		0.0293		0.0796		265. В [12] нет
$6p' {}^2F_{7/2} \rightarrow$								
$5d {}^2D_{5/2}$	4876.50	0.968		1.13		3.06		266. 94. - [21]
${}^2F_{5/2}$	3774.6	0.024		0.0228		0.062		267. В [12] нет
${}^2F_{7/2}$	4227.8	0.0847		0.0478		0.13		268. В [12] нет
${}^4P_{5/2}$	4239.	0.882		0.913		2.48		269. В [12] нет
${}^4D_{5/2}$	2883.71	0.0193		0.00409		0.0111		270.
${}^4D_{7/2}$	2887.12	8.54		18.2		49.5		271.
${}^4F_{5/2}$	3504.25	0.0282		0.0117		0.0317		272.
${}^4F_{7/2}$	3200.8	2.15		3.22		8.73		273. В [12] нет
${}^4F_{9/2}$	3260.73	4.38		94.9		258.0		274.
$5d' {}^2D_{5/2}$	5758.65	0.091	0.786	0.164	1.01	0.445	2.74	275. 94. - [21]; 33.2 - [*]
${}^2F_{5/2}$	6528.65	0.0088	0.168	0.013	0.174	0.035	0.47	276. 42. - [21]
${}^2F_{7/2}$	6598.84	3.45	30.0	3.66	4.54	9.93	12.3	277.
${}^2G_{7/2}$	4626.	0.055	0.75	0.23	1.47	0.625	3.98	278. В [12] нет
${}^2G_{9/2}$	4699	7.14	207.0	17.3	49.0	47.0	133.0	279. В [12] нет
$({}^1S)5d'' {}^2D_{5/2}$	9106.24	0.00036		0.002		0.0056		280.
$({}^1S)6p {}^2P_{1/2} \rightarrow$								
$({}^3P)5d {}^2P_{1/2}$	2387.	203.0		13.8		37.4		281. В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	2352.	11.8		3.17		8.6		282. В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	2504.	0.0028		4.36		11.8		283. В [12] нет

${}^4P_{1/2}$	2443.	9.87		13.3		36.0		<b>284.</b> В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	2472.	1.72		0.46		1.25		<b>285.</b> В [12] нет
${}^4D_{1/2}$	1962.	21.5		3.26		8.85		<b>286.</b> В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	1930.	4.98		4.41		12.0		<b>287.</b> В [12] нет
${}^4F_{3/2}$	2253.	150.0		198.0		537.0		<b>288.</b> В [12] нет
$5d' {}^2S_{1/2}$	5379.	6.97		0.184		0.5		<b>289.</b> В [12] нет
${}^2P_{1/2}$	4801.	32.0		1.08		2.92		<b>290.</b> В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	4923.	0.445		0.29		0.79		<b>291.</b> В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	2739.	2.0		9.6		26.1		<b>292.</b> В [12] нет
$5d'' {}^2D_{3/2}$	4249.	1.34	4.9	21.7	53.0	58.8	144.0	<b>293.</b> В [12] нет
$6p {}^2P_{3/2} \rightarrow$								
$5d {}^2P_{1/2}$	2919.	11.1		5.94		16.1		<b>294.</b> В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	2866.	0.0033				$10^{-6}$		<b>295.</b> В [12] нет
${}^2D_{3/2}$	3094.53	16.4		21.4		58		<b>296.</b>
${}^2D_{5/2}$	3262.02	10.0		8.8		23.9		<b>297.</b>
${}^2F_{5/2}$	2729.	12.3		8.0		21.7		<b>298.</b> В [12] нет
${}^4P_{1/2}$	3003.	6.21		4.43		12.0		<b>299.</b> В [12] нет
${}^4P_{3/2}$	3045.25	1.23		0.028		0.078		<b>300.</b>
${}^4P_{5/2}$	2963.41	2.0		1.9		5.2		<b>301.</b>
${}^4D_{1/2}$	2307.	0.012		0.455		1.24		<b>302.</b> В [12] нет
${}^4D_{3/2}$	2262.95	0.14		5.54		15.0		<b>303.</b>
${}^4D_{5/2}$	2230.79	6.44		6.15		16.7		<b>304.</b>
${}^4F_{3/2}$	2721.	13.0		27.4		74.5		<b>305.</b> В [12] нет
${}^4F_{5/2}$	2584.88	2.73		2.7		7.27		<b>306.</b>
$5d' {}^2S_{1/2}$	9122.	0.43		0.2		0.55		<b>307.</b> В [12] нет
${}^2P_{1/2}$	7576.	0.11		0.057		0.155		<b>308.</b> В [12] нет
${}^2P_{3/2}$	7882.71	0.012		0.0045		0.012		<b>309.</b>
${}^2D_{3/2}$	3461.26	19.0		3.74		10.0		<b>310.</b>
${}^2D_{5/2}$	3634.48	1.26		0.31		0.85		<b>311.</b>
${}^2F_{5/2}$	3926.80	1.04				2.11		<b>312.</b>
$5d'' {}^2D_{3/2}$	6284.41	0.045	0.49	2.24	2.72	6.1	7.39	<b>313.</b>
${}^2D_{5/2}$	4732.51	0.64	10.3	0.52	57.5	1.41	156.0	<b>314.</b>

В табл.2 (примечание) приведены результаты [21]. Значения вероятностей [21] в пределах порядка больше, чем расчётные шестью способами в [11].

В [22] подробно рассмотрен линейчатый спектр иона ХеII, указан штарковский сдвиг (отстройка основной частоты от центра линии). Для оценок вероятности нами использовалась простейшая теория сдвига линии [14], когда ширина линии пропорциональна сдвигу,  $\gamma = 1.16\Delta$ , или примерно равна ему. Ширина, соответствующая квадратичному Штарк-эффекту, записывается как и в [23]

$$\gamma = 1.41 \cdot 10^{-3} \frac{N_e}{10^{18}} (\bar{C}_4)^{2/3} T_e^{1/6}.$$

Здесь ширина линии  $\gamma$  и температура электронов  $T_e$  выражаются в эВ, концентрация электронов  $N_e$  в  $\text{см}^{-3}$ . Константа квадратичного эффекта Штарка  $\bar{C}_4 = C_4 \cdot 10^{14} [\text{см}^4/\text{с}]$  связана с силой осциллятора  $f_{JJ'}$  перехода со статистическими весами  $g = 2J + 1$  для нижнего уровня и  $g' = 2J' + 1$  для верхнего как

$$\bar{C}_4 = 1.18 \frac{g'}{g} \frac{f_{JJ'}}{(\Delta E)^2},$$

где  $\Delta E$  – разность энергий возбуждённых уровней в эВ.

Вероятность фото-перехода есть

$$A_{JJ'} = 0.829 \cdot 10^{10} \frac{g}{g'} \left( \frac{\Delta E}{Ry} \right)^2 f_{JJ'}.$$

Величина  $Ry = 13.6$  эВ, значения ширины  $\Delta\lambda$ , выраженные в ангстремах, переводятся в эВ как

$$\gamma_{ev} = \frac{1.24 \cdot 10^4}{\lambda^2} \Delta\lambda.$$

Длина волны фото-перехода  $\lambda$  выражена в ангстремах,  $10^{-10}$  м.

В табл.2 приведены вероятности  $A_{ki}/10^6$ , пересчитанные нами по сдвигам линий [22], и обозначенные в табл.2 символом [\*].

Представленные результаты лежат в пределах нескольких порядков разброса указанных значений. Так для перехода № 117,  $6p \ ^4P_{5/2} \rightarrow \ ^4D_{7/2}$  с длиной волны 605.115 нм рассчитанная вероятность в приближении Бейтса – Дамгаард с использованием  $LS$  – связи даёт величину  $A_{ki}/10^6 = 0.48$ , с учётом промежуточной связи – 1.5; по методу Хартри – Фока – Слетера в рамках промежуточной связи – 0.041; другие авторы: 20.5 - [19]; 52. - [20]; 21. - [16]. Значение, полученное из экспериментальных данных по сдвигам линий, соответствующих квадратичному Штарк-эффекту [22] есть  $A_{ki}/10^6 = 52.9$ .

Представленные результаты расчетов коэффициентов Эйнштейна с  $5d$  уровней дополняют справочные данные вероятностей  $6s - 6p$  фото-переходов [15].

### **3. Обсуждение результатов.**

Моделирование в рамках плазмодинамики, в частности, изучение вектора состояния [15] движущейся плазмы, как экспериментального, так и теоретического, невозможно без знания коэффициентов Эйнштейна.

Представленные в данной работе многочисленные радиационные константы позволяют уточнить и расширить релаксационную матрицу в нашей модели [7].

Детальное рассмотрение радиационных констант предваряет схема уровней иона ксенона, записанная в  $LS$  – связи, основное состояние  $XeII$  –  $5s^2 5p^5 {}^2P_{3/2}$ . Нижние возбуждённые состояния отстоят от основного  $\sim 12$  эВ. Конфигурация  $nd$  содержит 26 уровней и образует Гротриану из 314 дипольных переходов для каждой конфигурации. Составленная схема уровней иона ксенона, табл.1 позволяет рассчитывать в приближении квантового дефекта переходы, отсутствующие в справочном издании [12].

Приведены вероятности фото–переходов, полученные в рамках шести моделей. Радиальные интегралы, необходимые для расчётов вероятностей переходов  $A/10^6$ , рассчитывались по методу Бейтса – Дамгаард с использованием двух разных значений эффективного квантового числа (уровня и для всей конфигурации в целом), а также по методу Хартри – Фока – Слетера. Угловые зависимости для этих трёх методов проводились в приближении  $LS$ -связи и в рамках промежуточной связи. Рассчитанные согласно перечисленным моделям коэффициенты Эйнштейна на порядок ниже экспериментальных данных других авторов - [19]; - [20]; - [16].

В справочные данные включены значения вероятностей фото-переходов, полученные нами из экспериментальных данных по сдвигам линий соответствующих квадратичному Штарк-эффекту [22].

Настоящая работа является продолжением исследований [3, 15] по спектроскопической диагностике потока неравновесной низкотемпературной плазмы ксенона ХД.

Представленные результаты расчетов коэффициентов Эйнштейна с  $5d$  уровней дополняют справочные данные вероятностей  $6s - 6p$  фото-переходов [15] и уточняют сведения по вероятностям фотопереходов иона ХеII, полученные в различных моделях, указанных в таблице 2.

### **Библиографический список**

1. Бугрова А.И., Данелия И.А., Ермоленко В.А., Калихман Л.Е. Определение электронной температуры плазменной струи ускорителя с замкнутым дрейфом // Журнал технической физики. 1977. № 47. С. 2310-2311.
2. Бугрова А.И., Ермоленко В.А., Калихман Л.Е. Излучательные характеристики ксенона в разреженной плазме // Теплофизика высоких температур. 1979. Т. 17. № 5. С. 916-921.
3. Криворучко Д.Д., Скрылев А.В., Скороход Е.П. Определение концентраций возбужденных состояний и вероятностей радиационных переходов ХеI плазмы холловских двигателей // Труды МАИ. 2017. № 92.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76859>

4. Гусев Ю.Г., Пильников А.В. Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе // Труды МАИ. 2012. № 60. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35385>
5. Потапенко М.Ю. Разработка и исследование стационарного плазменного двигателя с полым магнитным анодом малой мощности // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49261>
6. Островский В.Г., Смоленцев А.А., Соколов Б.А., Опыт создания электроракетных двигателей большой мощности в ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» // Труды МАИ. 2012. № 60. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35380>
7. Гаврилова А.Ю., Киселёв А.Г., Скороход Е.П. Диаграммы метаравновесных состояний тяжёлых инертных газов // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 174–185.
8. Войницкий С.О., Скороход Е.П. Расчёт заселённостей аргона в проточной дуге // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28694>
9. Гаврилова А.Ю., Кули-заде М.Е. Скороход Е.П. Распределения возбуждённых состояний атомов в плазменной струе аргона // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28604>
10. Груздев П.Ф. Вероятности переходов и радиационные времена жизни уровней атомов и ионов. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 223 с.

11. Годунов А.Л. Земцов Ю.К. Карчевский В.Е., Скороход Е.П. Расчёт сил осцилляторов и вероятностей переходов иона ксенона ХеII. – М.: ВИНТИ, 1985. № 4593-85. - 91 с.
12. Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизированных атомов. - М.: Атомиздат, 1966. - 899 с.
13. Moore, Ch.E. Atomic Energy Levels, National Bureau of Standards Circular 467, Vol. I (1949), II (1952), III (1958) (reprinted as NSRDS-NBS 35, Vol. I, II, III).
14. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. - М.: Физматгизд, 1963. – 643 с.
15. Криворучко Д.Д., Кули-заде М.Е., Скороход Е.П., Скрылев А.В. Вероятности фото–переходов иона ХеII и распределения возбуждённых состояний в низкотемпературной плазме холловского двигателя // Труды МАИ. 2017. №94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80962>
16. El Sherbini T.M., Transition probabilities and radiative lifetimes for singly ionized xenon // Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics. 1976. Vol. 9. № 10. 1665 p.
17. Wiese, W.L. and Martin, G.A. Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions, Part II: Transition Probabilities, United States National Bureau of Standards NSRDS-NBS 68, 1980. 148 p.
18. Michael W. Winter, Christoph Eichhorn, Monika Auweter-Kurtz and Thomas Pfrommer, Universität Stuttgart, Institut für Raumfahrtssysteme (IRS),

Pfaffenwaldring 31, 70550 Stuttgart, Germany, Status on Plasma Diagnostic Measurements on a RIT-10 Ion Thruster IEPC-2007-173 // 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007. URL: [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc\\_articledownload\\_1988-2007/2007index/IEPC-2007-173.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-173.pdf)

19. Gigosos M., Mar S., Perez C., de la Rosa I. Experimental Stark widths and shifts and transition probabilities of several XeII lines // Physical Review, 1994, vol. E 49, № 2, pp. 1575.

20. Manzella D.H. Stationary Plasma Thruster Plume Emissions. Presented as IEPC 93-097, 1993, pp. 13.

21. Miller M.H., Roig R.A. Transition Probabilities of Xe I and Xe II // Physical Review A. 1973. Vol. 8. pp. 480 - 486.

22. Konjevic N., Lesage A., Fuhr J.R. and Wiese W.L. Experimental Stark Widths and Shifts for Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms (A Critical Review of Selected Data for the Period 1989 Through 2000) // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2002. Vol. 31. no. 3. pp. 819.

23. Скороход Е.П. Оптические свойства низкотемпературной ксеноновой плазмы. Дисс. канд. ф.-м.н., МГУ, 1983. —185 с.

24. Rocco H.O. Di, Iriarte D.I., Pomarico J.A. Lifetimes and transition probabilities of XeII: Experimental measurements and theoretical calculations // European Physical Journal D. 2000. Vol. 10(1). pp. 19-26.