

РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ МНОГОЗАРЯДНЫХ ПОЛЫХ ИОНОВ, ИЗЛУЧАЕМЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ

А.М.Урнов, Ж.Дюбо*¹⁾, А.Я.Фаенов**, Т.А.Пикуз**, И.Ю.Скобелев**,
Д.Абдаллах⁺¹⁾, Р.Е.Г.Кларк⁺¹⁾, Ж.Кохен⁺¹⁾, Р.П.Джонсон⁺¹⁾, Ж.А.Кирала⁺¹⁾,
М.Д.Вилке⁺¹⁾, А.Л.Остерхельд^{□1)}

Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, 117924 Москва, Россия

* Парижская обсерватория, F-9211195 Мидон, Франция

** Центр данных по спектрам многозарядных ионов, ВНИИФТРИ
141570 Менделеево, Московская обл., Россия

+ Лос Аламоская национальная лаборатория
87545 Лос Аламос, Нью Мексико, США

□ Ливерморская национальная лаборатория
94551 Ливермор, Калифорния, США

Поступила в редакцию 23 января 1998 г.

После переработки 10 марта 1998 г.

Получен и интерпретирован новый тип квазинепрерывных спектров излучения фемтосекундной лазерной плазмы в окрестности линии Ly_{α} H-подобного иона. Показано, что данные спектры излучаются многозарядными полыми ионами, присутствие которых в плазме обеспечивается ее сверхвысокой плотностью, что, в свою очередь, связано с использованием для создания плазмы лазерных импульсов высокого контраста. Обсуждается новый спектроскопический подход, основанный на анализе и композиции спектральных комплексов полых ионов.

PACS: 32.30.Rj, 52.25.Nr

Рентгеновские спектры излучения нано- и субнаносекундной лазерной плазмы интенсивно исследовались на протяжении более чем 20 последних лет. В частности, к настоящему времени очень подробно изучены спектральные характеристики излучения в окрестности резонансных линий H-подобных и He-подобных многозарядных ионов. Спектры в этой области имеют типичную структуру (см. рис.1а), характеризуемую присутствием сателлитных линий и их групп (дизэлектронные сателлиты, ДС), обусловленных переходами с автоионизационных состояний ионов. Эта структура хорошо описывается радиационно-столкновительными кинетическими моделями, в которых используются теоретические значения атомных характеристик (энергии уровней, вероятности элементарных атомных процессов). Диагностические свойства таких спектров, основанные на относительных интенсивностях линий и спектральных профилях, общеизвестны и широко используются в плазменных экспериментах (см., например, обзоры [1, 2]).

Рентгеновское излучение плазмы, создаваемой пико- и субпикосекундными лазерами, стало предметом различных исследований в последние годы. Спектральные особенности этого излучения подобны наблюдавшимся ранее в экспериментах

¹⁾ J.Dubau, J.Abdallah, R.E.H.Clark, J.Cohen, R.P.Johnson, G.A.Kyrala, M.D.Wilke, A.L.Osterheld

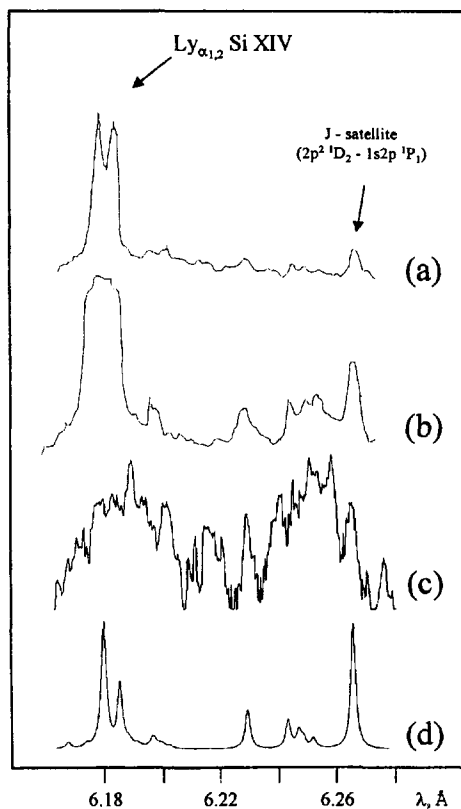


Рис.1. Эмиссионные спектры кремниевой плазмы, нагреваемой наносекундным (a) [1], субнаносекундным (b) [3] и субпикосекундным (c) [4] лазерными импульсами, в окрестности резонансной линии Ly_{α} H-подобного иона Si XIV. Теоретический спектр (d) соответствует корональной модели

с более длинными лазерными импульсами. Измеренные спектры имеют довольно стандартную форму (см. рис.1b), хорошо воспроизводимую корональной моделью, а изменения интенсивностей линий описываются изменениями таких параметров плазмы, как ее температура, плотность и ионизационный состав. Важно отметить, что при взаимодействии коротких лазерных импульсов с веществом существенную роль играет создание преплазмы, связанной с присутствием лазерного предимпульса. Настоящие эксперименты были проведены с фемтосекундным лазером, характеризующимся сверхвысоким контрастом (отношение интенсивностей импульса и предимпульса) порядка 10^{11} [4]. Их результатом явилась регистрация спектров нового типа, не наблюдавшихся ранее в этой спектральной области (рис.1c).

Наблюдаемые нами "необычные" спектры отличаются от более привычных наличием сложной спектральной структуры квазинепрерывного характера, в которую погружаются основные линии. Теоретические спектры, рассчитанные с помощью корональной квазистационарной кинетической модели плазмы (см. рис.1d), похожи на типичные экспериментальные спектры (рис.1a, b), но совершенно не пригодны для описания нового спектра (рис.1c). Физическая причина такого резкого спектрального реструктурирования естественно связана с различием в механизмах получения плазмы. Отсутствие преплазмы обеспечивает непосредственное взаимодействие сверхкороткого лазерного импульса с твердым веществом, приводя в результате к образованию плазмы со значительно более высокой электронной плотностью. При

таких плотностях в эмиссионном спектре плазмы начинает доминировать множество спектральных линий, практически не возбуждающихся в корональных условиях.

В настоящей работе показано, что новый тип наблюдаемых спектров может быть проинтерпретирован только при учете излучения, испускаемого многозарядными полыми ионами (то есть ионами с пустой K -оболочкой) в сверхплотной плазме. Переходы этого типа в нейтральных и квазинейтральных объектах (полые атомы) наблюдались в экспериментах по взаимодействию пучков ионов с поверхностью твердого тела и активно изучались в течение последних нескольких лет в связи с их свойствами атомных часов (см., например, [5–10]). Аналогичные структуры для многозарядных ионов недавно наблюдались в спектрах близких к поверхности мишени областей плазмы, создаваемой импульсом лазера "NIKE" [11].

Экспериментальные исследования проводились на лазерной установке "TRIDENT" Лос Аламосской национальной лаборатории [4]. Лазерный импульс имел длительность 500 фс, энергию 550 мДж и максимальную интенсивность порядка $(0.5 - 1) \cdot 10^{19}$ Вт/см². Контраст мощности между основным импульсом и естественным предимпульсом наносекундной длительности составлял не менее $10^{10} - 10^{11}$. Использовались твердые кремниевые мишени.

Рентгеновские спектры плазмы наблюдались с помощью спектрографа со сферически изогнутым кристаллом слюды. Использовались кристаллы с радиусами кривизны, равными 100, 150 и 186 мм. Кристалл, плазма и фотопленка располагались в соответствии с FSSR-1D и FSSR-2D схемами [2]. Это позволяло проводить регистрацию спектров одновременно с высоким спектральным ($\lambda/\delta\lambda = 10000$) и пространственным ($\delta x = 10$ мкм) разрешениями.

Спектральные структуры в области 6.16 – 6.28 Å (в окрестности резонансной линии иона Si XIV) могут принадлежать только переходам с возбужденных ионных уровней без $1s$ электронов. Такие переходы, например, приводят к излучению самой резонансной линии Ly_α и ее так называемых He-подобных диэлектронных сателлитов, то есть линий, чьи верхние уровни являются дваждывозбужденными состояниями двухэлектронного иона. Чтобы найти дополнительные спектральные линии, лежащие вблизи линии Ly_α , в настоящей работе были проведены атомные расчеты по программе "SUPERSTRUCTURE" [12]. Метод [13,14] использовался для вычисления автоионизационных ширин. Многоконфигурационные волновые функции для связанных состояний строились в приближении промежуточной связи с учетом релятивистских поправок Брейта – Паули. Вычисление автоионизационных матричных элементов, включающих орбитали непрерывного спектра, проводилось методом искаженных волн.

Проведенные расчеты показали, что в исследуемый спектральный диапазон попадает множество линий, обусловленных переходами в многоэлектронных системах с количеством электронов $q \geq 3$ (Li-, Be-, ... подобные ионы) и имеющих пустую K -оболочку, то есть переходами в полых ионах. Населенности состояний полых ионов с $q \geq 3$ в корональной плазме пренебрежимо малы и спектры излучения такой плазмы, обусловленные ионами с $q < 3$, имеют характерный вид, показанный на рис.1а, б. В сверхплотной плазме с электронной плотностью N_e , превышающей критическую величину N^* (для плазмы кремния N^* порядка 10^{22} см⁻³), нелинейные по N_e механизмы заселения уровней ведут к значительному увеличению населенностей состояний полых ионов, увеличивая тем самым амплитуды соответствующих

спектральных линий. Заметим, что наиболее важные последствия этого эффекта состоят в: а) столкновительном перемешивании различных l -подоболочек в конфигурациях с заданным значением главного квантового числа n и б) возрастании роли дополнительных механизмов заселения состояний с $q \geq 3$, таких, как, например, диэлектронный захват с возбужденных состояний и тройная рекомбинация [15, 16].

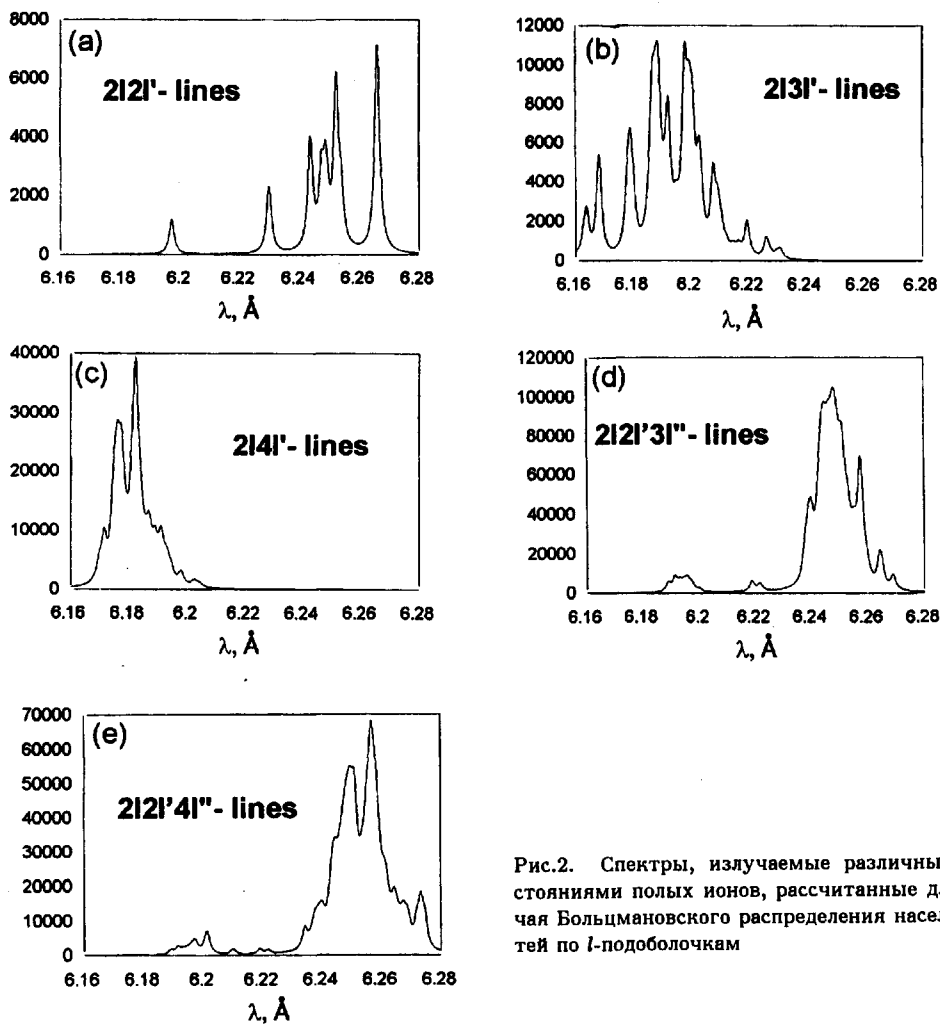


Рис.2. Спектры, излучаемые различными состояниями полых ионов, рассчитанные для случая Больцмановского распределения населенностей по l -подоболочкам

На рис.2 показаны результаты расчетов спектров, излучаемых состояниями полых ионов с $q = 2, 3$, характеризуемых различными наборами главных квантовых чисел $[2, n]$ и $[2, n, n_1]$. Построение суммарного спектра излучения требует, естественно, решения соответствующей системы кинетических уравнений. Следует отметить, что больцмановское распределение по l -подоболочкам дает существенное упрощение кинетического моделирования из-за резкого уменьшения количества рассматриваемых атомных уровней. Кинетическая система в данном случае должна решаться не для отдельных атомных состояний, а для целых ионных комплексов, характери-

зуемых различными наборами главных квантовых чисел. В сверхплотной плазме распределение ионов по ионным комплексам будет Саха-Больцмановским, соответствующий этому случаю суммарный спектр приведен на рис.3. Отметим, что при расчете указанного спектра эффект самопоглощения линии Ly_{α} был учтен в приближении Бибермана – Холстейна.

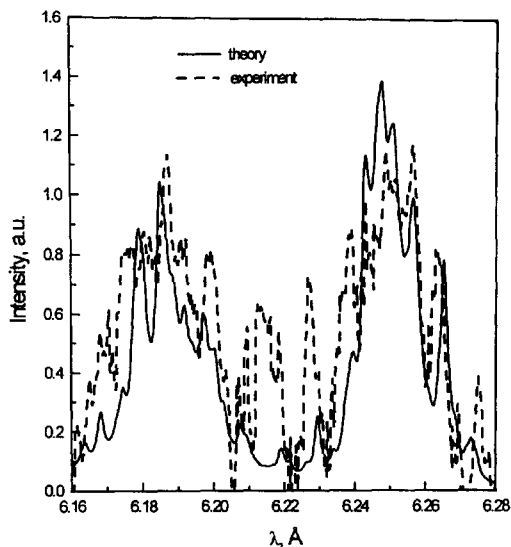


Рис.3. Сравнение эмиссионного спектра кремниевой фемтосекундной лазерной плазмы с расчетом, выполненным для ЛТР плазмы с $T_e = 350$ эВ и $N_e = 6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$

Как видно из рис.3, синтезированный спектр в целом достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Имеющиеся различия (присутствие двух необъяснимых максимумов около 6.215 \AA и 6.23 \AA , а также некоторая недооценка наблюдаемой интенсивности во всей спектральной области), согласно предварительным расчетам²⁾, связаны с не учетом полых ионных комплексов типа: $[2, n, n]$ с $n \geq 3$ и $[2, n]$ с $n > 4$ и конфигураций с $q \geq 4$.

В настоящей работе показано, что новый тип квазинепрерывных спектров, обнаруженный в фемтосекундной лазерной плазме, создаваемый импульсом высокого контраста, обусловлен переходами в многозарядных полых ионах. Таким образом, лазерная плазма представляет собой естественный источник полых ионов и дает новые возможности для анализа их свойств. Присутствие ионных состояний с пустыми K -оболочками в такой плазме является следствием ее сверхвысокой плотности, приводящей к разрушению корональных условий. Предложен новый тип спектральной диагностики, основанный на построении эмиссионного спектра плазмы не из отдельных спектральных линий, а из целых спектральных комплексов, характеризующихся различными наборами главных квантовых чисел $[n, n_1, n_2]$. Модельные расчеты, сделанные в предположении Саха-Больцмановского равновесия, демонстрируют хорошее количественное согласие с измеренными спектрами и показывают, что адекватная кинетическая модель сверхплотной плазмы должна строиться с учетом состояний полых ионов. Работа частично поддерживалась грантами INTAS-RFBR

²⁾ R.Doron, частное сообщение (1998).

1. V.A.Boiko, A.V.Vinogradov, S.A.Pikuz et al., J. Sov. Las. Research. **6**, 85 (1985).
2. I.Yu.Skobelev, A.Ya.Faenov, B.A.Bryunetkin et al., JETP **81**, 692 (1995).
3. A.Ya.Faenov, I.Yu.Skobelev, S.A.Pikuz et al., Phys. Rev. **A51**, 3529 (1995).
4. A.Ya.Faenov, J.Abdallah, R.E.H.Clark et al., Proc. of SPIE-97 **3157**, 10 (1997).
5. J.-P.Briand, L.de Billy, P.Charles et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 159 (1990).
6. A.McPherson, B.D.Thompson, A.B.Borisov et al., Nature **370**, 631 (1994).
7. J.-C.Gauthier, J.-P.Geindre, P.Audebert et al., Phys. Rev. **E52**, 2963 (1995).
8. J.-P.Briand, G.Giardino, G.Borsoni et al., Phys. Rev. **A54**, 4136 (1996).
9. S.Ninomiya, Y.Yamazaki, F.Koike et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 4557 (1997).
10. J.-P.Briand, D.Schneider, S.Bardin et al., Phys. Rev. **A55**, 3947 (1997).
11. Y.Aglitsky, J.Seely, C.Pawley et al., Phys. Plasmas **3**, 9 (1996).
12. W.Eissner, M.Jones, and H.Nussbaumer, Comput. Phys. Commun. **8**, 270 (1974).
13. P.Faucher and J. Dubau, Phys Rev. **A31**, 3672 (1985).
14. M.K.Inal and J.Dubau, J. Phys. **B22**, 3329 (1989).
15. F.B.Rosmej, A.Ya.Faenov, T.A.Pikuz et al., JETP Lett. **65**, 708 (1997).
16. F.B.Rosmej, A.Ya.Faenov, T.A.Pikuz et al., JQSRT **58**, 859 (1997).