

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ МЕГАВОЛЬТНЫХ ЭНЕРГИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

*Н.Г.Басов*¹⁾, *С.В.Бобашев*³⁾, *К.Гетц*²⁾, *М.П.Калашиников*¹⁾,
*А.П.Мещеркин*¹⁾, *Ю.А.Михайлов*¹⁾, *А.В.Роде*¹⁾,
*Г.В.Склизков*¹⁾, *С.И.Федотов*¹⁾, *Э.Ферстер*²⁾, *Х.Эндерт*²⁾ ψ

В работе обсуждается уширение резонансной линии гелиеподобного иона фосфора, излучаемой лазерной плазмой. Уширение интерпретируется как доплеровский сдвиг частоты излучения высокоэнергетических ионов P^{+13} . Определен энергетический спектр быстрых ионов и оценена температура электронов, ответственных за их ускорение.

Методы рентгеновской спектроскопии¹ находят широкое применение в исследованиях лазерной плазмы, в частности, в экспериментах по нагреву и сжатию мишеней на лазерных термоядерных установках (см., например,²). В таких экспериментах важное место занимает изучение процессов образования электронов и ионов в плазме, оказывающих заметное влияние как на энергетический баланс в мишенях, так и на их сжатие. В настоящей работе зарегистрировано излучение быстрых ионов из лазерной плазмы, построен их энергетический спектр и оценена температура быстрых электронов, ответственных за ускорение ионов.

Для создания лазерной плазмы использовались линейные каскады предварительного усиления установки „Дельфин”³. Излучение неодимового лазера с энергией ~ 20 Дж и расходимостью $2,3 \cdot 10^{-4}$ рад фокусировалось асферическим объективом на плоскую массивную мишень из фосфора. Диаметр пятна фокусировки составлял ~ 40 мкм, что обеспечивало плотность потока излучения на поверхности мишени $\sim 2 \cdot 10^{14}$ Вт/см².

Спектр излучения лазерной плазмы (рис. 1) зарегистрирован в диапазоне длин волн $4,4 \div 6 \text{ \AA}$ с помощью рентгеновского спектрографа с плоским кристаллом CaF_2 на рентгеновскую фотопленку УФ-ВР, кривая почернения которой известна⁴. Используемый в работе кристалл флюорида кальция ($[111]$, $2d = 6,28 \text{ \AA}$) по сравнению с обычно применявшимися в рентгеновской спектроскопии лазерной плазмы кристаллами¹ имеет высокий коэффициент отражения¹⁾. Использование кристалла CaF_2 позволяет заметно повысить чувствительность спектрографа и зарегистрировать некоторые особенности спектра, не наблюдавшиеся ранее, в том числе ряд слабых линий в спектральных диапазонах $4,78 - 4,81 \text{ \AA}$, $4,92 - 5,06 \text{ \AA}$ и $5,39 - 5,45 \text{ \AA}$.

1) Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР.

2) Йенский университет им. Ф.Шиллера, ГДР.

3) Ленинградский физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР.

1) Величина коэффициента отражения для идеального кристалла CaF_2 , рассчитанная по динамической теории интерференции рентгеновских лучей⁵, равна $8,7 \cdot 10^{-5}$ рад для $\lambda = 5,76 \text{ \AA}$.

Анализ геометрии эксперимента позволяет сделать вывод о незначительном влиянии размеров плазменного факела на уширение регистрируемой линии.

На рис. 1 внизу представлен участок спектра вблизи наиболее интенсивной резонансной линии [He]-иона фосфора Р XIV. Электронная плотность N_e и температура T_e плазмы, определенные по отношениям интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий, а также резонансной линии и диэлектронных спутников, составляют соответственно $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и 260 эВ. Обращает на себя внимание несимметричное уширение резонансной линии [He]-иона фосфора Р XIV ($1s^2 \ ^1S_0 - 1s \ 2p \ ^1P_1$, $\lambda_0 = 5,7591 \text{ \AA}$) в коротковолновую область спектра. По нашему мнению, причиной такого уширения является доплеровский сдвиг частоты излучения быстрых ионов фосфора P^{+13} , покидающих лазерную плазму. В рамках этого предположения уширение линии относительно λ_0 в коротковолновую область объясняется отсутствием сферической симметрии при разлете быстрых ионов. Возможное уширение резонансной линии из-за самопоглощения излучения, предполагающее большую оптическую толщину плазмы ($\tau \gg 1$) и приводящее к заметному смещению максимума спектральной линии относительно длины волны нерезорбированного перехода, в настоящем эксперименте не реализуется, поскольку указанное смещение на спектрограмме не наблюдается.

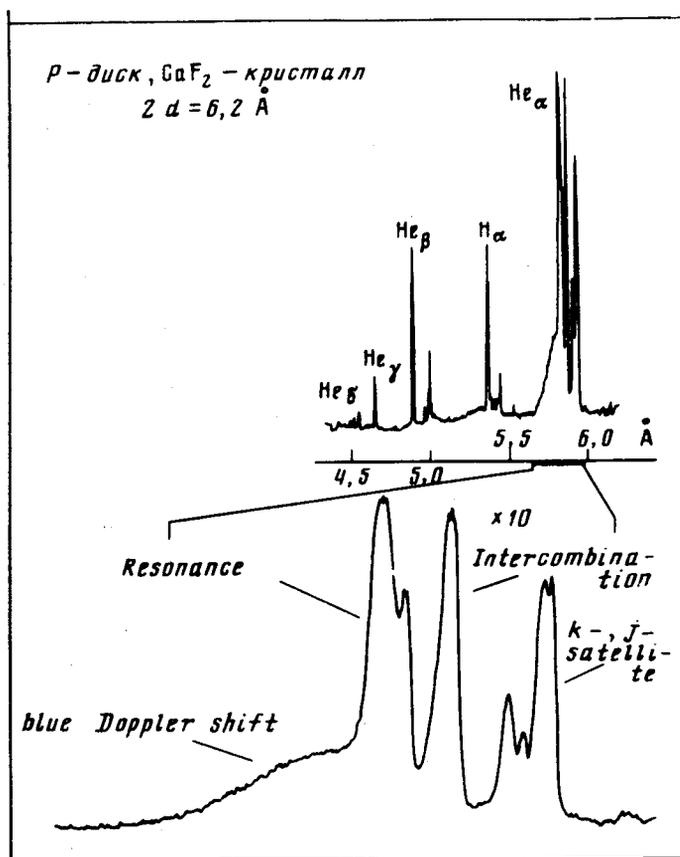


Рис. 1. Рентгеновский спектр излучения лазерной плазмы в диапазоне $4,5 \div 6 \text{ \AA}$

Образование высокоэнергетических ионов, обуславливающих наблюдающийся доплеровский сдвиг частоты излучения, можно, например, объяснить в рамках модели ускорения ионов быстрыми электронами при расширении разреженной плазмы⁸. Оценка средней температуры быстрых электронов по этой модели дает значение $T_h \sim 8 - 15 \text{ кэВ}$, находящееся

в хорошем соответствии с экспериментальными измерениями T_h по спектру жесткой компоненты непрерывного рентгеновского излучения. Другим возможным механизмом образования высокоэнергетичных ионов может являться кумулятивное ускорение плазмы, вследствие неоднородности нагрева поверхности мишени, наблюдавшееся ранее в экспериментах с лазерной плазмой^{9, 10}, в том числе и на установке „Дельфин”.

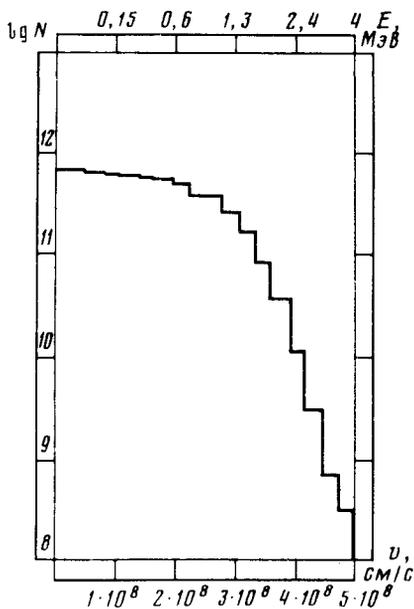


Рис. 2. Распределение „быстрых” ионов в лазерной плазме по скоростям

По доплеровскому сдвигу частоты излучения ионов Р XIV построено распределение быстрых ионов по скоростям (рис. 2). На рис. 2 можно различить две энергетические области, для которых зависимость числа ионов (N) от их скорости существенно различная. Начиная с энергии $E \sim 1$ МэВ ($v \approx 2,6 \cdot 10^8$ см/с) количество быстрых ионов резко падает вплоть до максимальной энергии ~ 4 МэВ ($v \approx 5,2 \cdot 10^8$ см/с), зарегистрированной в эксперименте.

Суммарная интенсивность излучения ионов с кинетической энергией до ~ 50 кэВ составляет $\sim 10^{13}$ квантов, при этом интенсивность резонансной линии $\sim 10^{14}$. Оценка кинетической энергии ионов со скоростями $> 5 \cdot 10^7$ см/с дает до 5% от поглощенной энергии лазерного излучения.

Авторы благодарят А.В.Гуревича и А.В.Сартори за полезные обсуждения

Литература

1. Бойко В.А., Виноградов А.В., Пикуз С.А., Скобелев И.Ю., Фаенов А.Я. Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы, М.: ВИНТИ, 1980.
2. Basov N.G., Galichy A.A., Danilov A.E., Kalashnikov M.P., Mikhailov Yu.A., Rode A.V., Senatsky Yu.V., Sklizkov G.V., Fedotov S.I. In: Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, vol. 5 ed by H.J.Schwarz, H.Hora, M.Lubin, V.Yaakobi. Plenum Publishing Corporation, 1981.
3. Басов Н.Г., Быковский Н.Е., Данилов А.Е., Калашников М.П., Крохин О.Н., Круглов Б.В., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Плетнев Н.В., Роде А.В., Сенатский Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И., Федоров А.Н., М.: Наука, Труды ФИАН, 1978, 103.
4. Кологривов А.А., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И., Шиканов А.С., Шпольский М.Р. Квантовая электроника. 1975, 2, 2223.

5. Пинскер З.Г. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. М.: Наука, 1974.
6. Irons F.E. Austr. J. Phys., 1980, 33, 25.
7. Бойко В.А., Виноградов А.В., Илюхин А.А., Катулин В.А., Майоров С.А., Носач Ю.Ю., Перегудов Г.В., Петров А.Л., Пикус С.А., Скобелев И.Ю., Фаенов А.Я., Чирков Б.А., Шилов К.А., Квантовая электроника, 1981, 8, 28.
8. Гуревич А.В., Мещеркин А.П. ЖЭТФ, 1981, 80, 1810.
9. Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н., Крохин О.Н., Михайлов Ю.А., Рупасов А.А., Склизков Г.В., Шиканов А.С. ЖЭТФ, 1976, 70, 547.
10. Андреев Н.Е., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н., Склизков Г.В., Шиканов А.С. ЖЭТФ, 1979, 76, 976.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Йенский университет им. Ф.Шиллера, ГДР.

Поступила в редакцию
11 июня 1982 г.