

НЕПРЕРЫВНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ  
ОБОЛОЧЕЧНЫХ МИШЕНЕЙ ПРИ ПЛОТНОСТЯХ ПОТОКА  $q \sim 10^{14}$  ВТ/СМ<sup>2</sup>

А. А. Ерохин, С. А. Зверев, А. А. Кологривов, В. В. Кушин,  
В. К. Ляпидевский, А. А. Рупасов, Г. В. Склизков, А. С. Шиканов

УДК 533.951:621.039

Проведено комплексное исследование непрерывного рентгеновского излучения лазерной плазмы на установке "Кальмар" с помощью четырех независимых методов. Зарегистрировано, что число квантов с энергией  $\sim 15-30$  кэВ значительно больше, чем в плазме с тепловым распределением электронов по скоростям.

Интерес к исследованию спектра рентгеновского излучения лазерной плазмы первоначально был вызван тем, что при максвелловском распределении свободных электронов по скоростям имеется возможность определения электронной температуры плазмы  $T_e$  по спектральным измерениям. Однако некоторые явления в лазерной плазме (резонансное поглощение, параметрические и гидродинамические неустойчивости, спонтанные магнитные поля и др.) могут приводить к генерации "быстрых" электронов, наличие которых приводит к отклонению спектра рентгеновского излучения от теплового в области больших энергий квантов. Вид распределения электронов по скоростям, в частности наличие "быстрых" электронов, определяет электронную теплопроводность и на весь процесс нагрева и сжатия лазерных термоядерных мишеней. Поэтому детальное исследование спектра рентгеновского излучения представляется важной задачей.

Информацию о спектральном распределении непрерывного рентгеновского излучения можно получить по исследованию ослабления излучения в веществе /1/. Детекторы, применяемые для регистрации рентгеновского излучения - фотоэмульсии (ФЭ) /2/, сцинтилляционные (СД) /3/, термоллюминесцентные (ТЛД) /4/, полупроводнико-

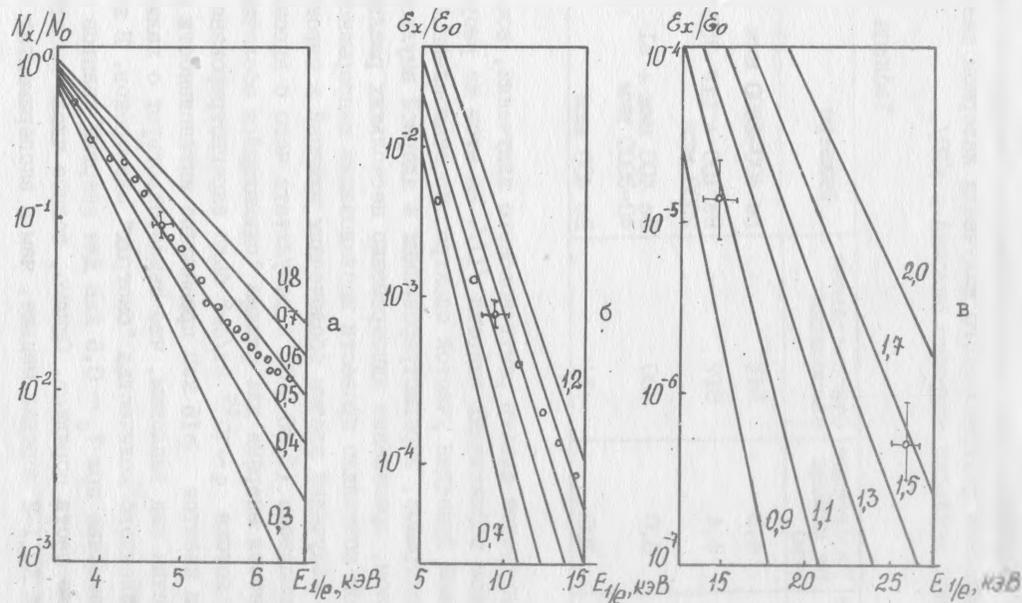
вые (ПЩ) /5/ можно приближенно считать идеальными (т.е. такими, у которых сигнал на выходе линейно зависит от числа квантов или энергии излучения) лишь в ограниченном спектральном диапазоне. Во всех детекторах на величину сигнала в большей или меньшей степени влияют энергия кванта регистрируемого излучения, пробег вторичных электронов и их линейная плотность ионизации, объемная плотность поглощенной в объеме детекторов энергии и эффективность регистрации. Точный учет влияния всех этих факторов достаточно сложен. Поэтому к данным, полученным только от одного детектора, следует относиться с осторожностью и лишь комплексное применение нескольких детекторов в одном эксперименте позволяет, во-первых, компенсировать "неидеальность" одного детектора с помощью другого, и, во-вторых, расширить спектральный диапазон регистрации.

В эксперименте применялись стеклянные оболочечные мишени /6/ диаметром 70–150 мкм, нагреваемые излучением 9-канальной лазерной установки "Кальмар" /7/ в режиме "сжимающейся оболочки" /8/. Плотность потока лазерного излучения составила  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Использовались три различных типа детекторов: фотоэмульсия типа УФ-ВР, сигнал на выходе которой (плотность почернения) в идеальном случае пропорционален числу поглощенных квантов, термомлюминесцентные детекторы на основе фтористого лития и аллюмофосфатного стекла и сцинтилляционный детектор; сигнал на выходе последних (светосумма) пропорционален поглощенной в объеме детектора энергии. Кроме того, рентгеновское излучение регистрировалось ядерными эмульсиями (ЯЭ).

В таблице I приведены расстояния датчиков от мишени, относительная экспозиция каждого из них и данные о фильтрах, стоявших перед детекторами.

На рис. I приведены экспериментальные данные, полученные при работе с фотоэмульсией (рис. Ia), термомлюминесцентными детекторами (рис. Ib) и сцинтилляционными детекторами (рис. Ic), а также расчетные кривые для максвелловского спектра при различных  $T_e$ . Анализ результатов позволяет установить, что спектр рентгеновского излучения лазерной плазмы отличается от максвелловского наличием "хвоста" в области больших энергий квантов. Эффективная "температура" в области энергий отсечки  $E_{1/e}$  15–27 кэВ составляет  $\sim 2,7$  кэВ, в то время, как в области  $E_{1/e}$  4–6 кэВ,  $T_e \sim 0,5$  кэВ.



Р и с. 1. Относительное число квантов (а) и относительная энергия (б, в) рентгеновского излучения в зависимости от энергии отсечки фильтров для различных детекторов а - ФЭ, б - ТЦ, в - ЯЭ. Сплошными линиями показаны расчетные значения для максвелловской плазмы. Цифры соответствуют значениям электронной температуры (в кэВ)

Рассмотренные методы в принципе не позволяют определить энергию отдельных квантов рентгеновского излучения. С целью измерения энергии отдельных квантов и приближенного определения спектра рентгеновского излучения была применена ядерная эмульсия Р-2Т. Методика исследования рентгеновского излучения лазерной плазмы с помощью ядерной эмульсии подробно описана в /10/.

Таблица I

Наименование детектора	Расстояние от мишени (см)	Относительная экспозиция	Фильтры
ФЭ	4,3	54I	Be 400-2500 мкм
ТЛД	4,4	5I7	Be 100 + LiF 350-2900 мкм
СД	5,0	400	Be 400 мкм + Al 40-3000 мкм
ЯЭ	100	I	Be 400 мкм

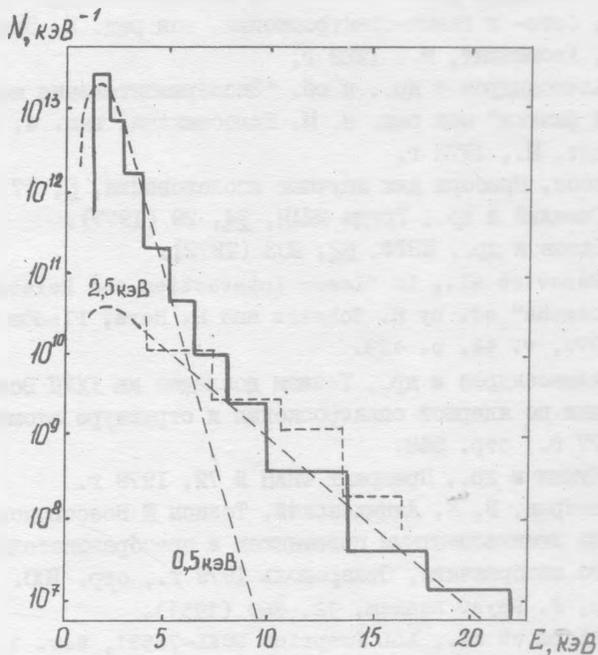
На рис. 2 приведен спектр рентгеновского излучения, восстановленный методом эффективных энергий /11/. На этом же рисунке пунктирной линией приведен участок спектра, восстановленный по спектру фотоэлектронов, зарегистрированных в ядерной эмульсии \*).

Таким образом, применение одновременно нескольких различных типов детекторов позволило провести исследование непрерывного рентгеновского излучения плазмы оболочечных мишеней в широком спектральном диапазоне (3-30 кэВ) в результате чего с высокой степенью надежности впервые для режима "сжимающейся оболочки" при плотностях потока  $q \sim 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> было зарегистрировано в области энергии квантов  $\geq 15$  кэВ превышение интенсивности рентгеновского излучения над тепловым, что свидетельствует о наличии в плазме определенного количества "быстрых" электронов. В нашем случае это превышение при  $T_e \sim 0,5$  кэВ для энергий квантов  $\sim 17$  кэВ составляет около шести порядков. Однако, полное число квантов с этой энергией на I-2 порядка меньше, чем в экспериментах /13/.

\* ) Методика определения пробегов электронов и зависимости пробег-энергия для эмульсии Р-2Т описана в /4,9,12/.

проведенных в режиме "взрывающейся оболочки" при  $q \approx 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Поступила в редакцию  
25 мая 1979 г.



Р и с. 2. Спектр рентгеновского излучения (число квантов  $N$ , испускаемых в 4 $\pi$  ср) в предположении изотропного распределения), прошедшего сквозь бериллиевый фильтр толщиной 100 мкм, восстановленный по кривым рис. 1 (сплошная линия) и по спектру фотоэлектронов в ядерной эмульсии (пунктирная линия). Для сравнения приведены расчетные спектры излучения плазмы с температурой 0,5 и 2,5 кэВ

## Л и т е р а т у р а

1. F. Jahoda et al., Phys. Rev., 119, 843 (1960).
2. А. А. Кологривов и др., Квантовая электроника, 2, 2223 (1975).
3. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия, под ред. К. Зигбина, вып. I, Атомиздат, М., 1969 г.
4. А. А. Александров и др., в сб. "Экспериментальные методы ядерной физики" под ред. В. М. Колобашкина, вып. 4, стр. 70, Атомиздат, М., 1978 г.
5. Д. Джонсон, Приборы для научных исследований, 5, 47 (1974).
6. Е. Г. Гамалий и др., Труды ФИАН, 94, 29 (1977).
7. Н. Г. Басов и др., ЖЭТФ, 62, 203 (1972).
8. N. G. Basov et al., in "Laser Interaction and Related Plasma Phenomena" ed. by H. Schwarz and H. Hora, Plenum Press, N.Y. 1977, v. 4A, p. 479.
9. А. А. Александров и др., Тезисы докладов на XXVII Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Л., 1977 г., стр. 568.
- Ю. В. В. Кушин и др., Препринт ФИАН № 72, 1979 г.
- II. С. А. Зверев, В. К. Ляпидевский, Тезисы III Всесоюзного симпозиума по люминесцентным приемникам и преобразователям рентгеновского изображения, Ставрополь 1979 г., стр. 100.
12. M. Blum, J. Phys. Radium, 12, 860 (1951).
13. E. K. Storm et al., LLL Preprint UCKL-78581, Rev. 1 (1976).