

*Письма в ЖЭТФ, том 20, вып. 4, стр. 239 – 243      20 августа 1974 г.*

## **АНИЗОТРОПИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ**

*О.Н.Крохин, Ю.А.Михайлов, В.В.Пустовалов,  
А.А.Рупасов, В.П.Силин, Г.В.Склизков, А.С.Шиканов*

Экспериментально обнаружена анизотропия непрерывного рентгеновского излучения из плотной лазерной плазмы, образующейся при фокусировании плоскополяризованного излучения неодимового лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм) на поверхность алюминиевой мишени при плотностях потока  $q \sim 10^{14}$  ст/см<sup>2</sup>. Проводится обсуждение полученных результатов.

В проблеме нагрева плазмы лазерным излучением до термоядерных температур [1] важную роль играет выявление механизмов поглощения

лазерного излучения большой мощности в плазменной короне и изучение влияния каждого из них на параметры плазмы. В экспериментах [2] был обнаружен ряд эффектов, таких как уменьшение коэффициента отражения  $R$  с увеличением плотности потока  $q$ , генерация плазмой гармоник греющего излучения ( $m\omega_0/2$ , где  $m$  — целое число), осцилляция интенсивности отраженного излучения с частотой  $\sim 10^9$   $\text{гц}$  и т. д., появление которых невозможно объяснить в рамках тормозного поглощения. В предыдущих работах, например [3], по исследованию рентгеновского излучения из лазерной плазмы, анизотропии рентгеновского излучения не наблюдалось. Однако, в работах [4] была обнаружена поляризация рентгеновского излучения, свидетельствующая об аномальном характере взаимодействия лазерного излучения с плазмой. В данной работе проведены тщательные исследования углового распределения рентгеновского излучения с целью обнаружения анизотропии, которая ожидалась как результат развития параметрических неустойчивостей [5].

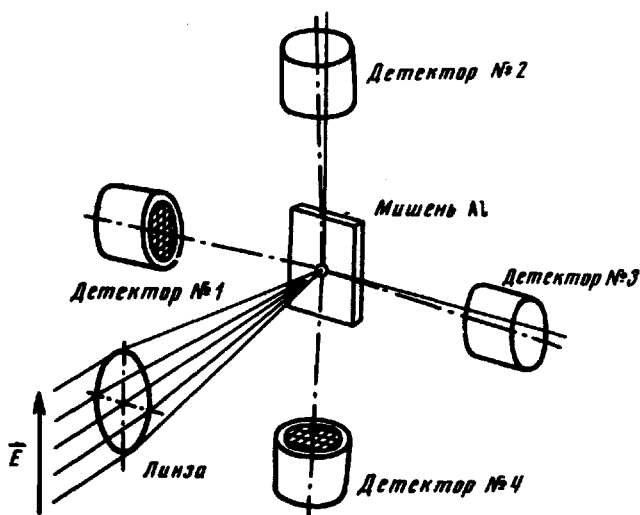


Рис. 1. Расположение многоканальных рентгеновских детекторов относительно мишени

Плоскополяризованное излучение неодимового лазера (степень поляризации  $\sim 90\%$ ) с энергией до 30 дж, длительностью  $\sim 3,5$  нсек. по уровню половины мощности, контрастом не хуже  $5 \cdot 10^5$  и расходимостью  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  рад фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 10 см на поверхность плоских массивных мишеней из алюминия. Плотность потока излучения достигала значения  $q \approx 10^{14}$   $\text{вт/см}^2$ . Исследовалось угловое распределение числа квантов рентгеновского излучения в диапазоне энергии 1,3 + 12  $\text{кэв}$ , прошедшего через фильтры с различными кривыми пропускания. В качестве детектора использовалась рентгеновская фотопленка с областью чувствительности до 1  $\text{А}$  (типа УФ – Р и УФ – ВР), помещавшаяся в специальную кассету, на входе которой монтировалось до 14 фильтров из бериллия с толщи-

нами от 100 до 2600 мкм. Кассеты ориентировались под различными углами к исследуемой плазме и вектору поляризации греющей световой волны  $E$  (см. рис. 1).

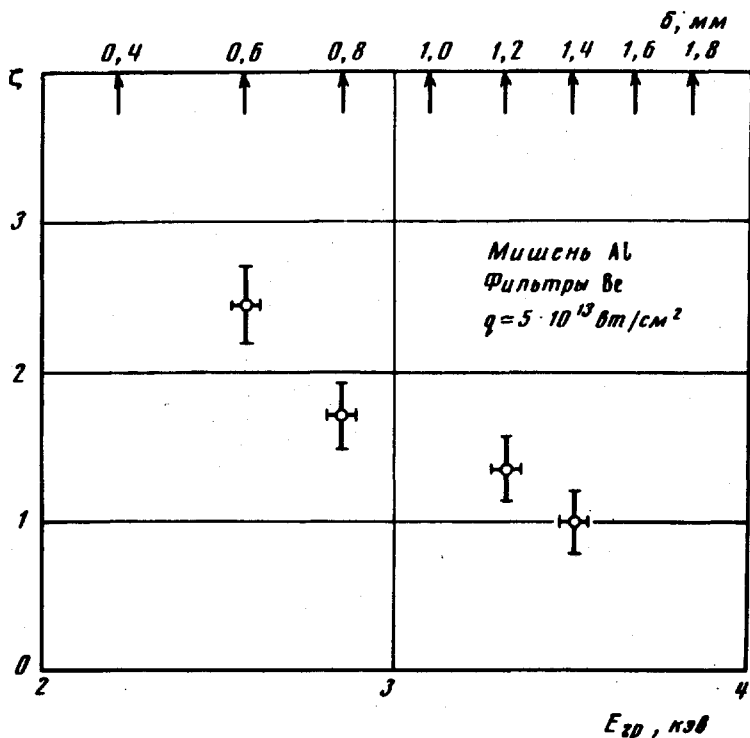


Рис. 2. Зависимость степени анизотропии  $\zeta$  рентгеновского излучения от граничной энергии пропускания бериллиевого фильтра  $E_{гр}$  (соответствует ослаблению интенсивности излучения фильтром толщиной  $\delta$  в  $10^2$  раз

Было обнаружено, что при плотностях потока  $q \geq 3 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>2</sup>, появляется заметная анизотропия рентгеновского излучения, выражающаяся в том, что в направлении, перпендикулярном  $E$  испускается большее число квантов в единичный телесный угол, чем в направлении, параллельном  $E$ . На рис. 2 представлены результаты измерения степени анизотропии  $\zeta$ , определенной как отношение чисел рентгеновских квантов в единице телесного угла поперек и вдоль  $E$ , от граничной энергии пропускания бериллиевого фильтра  $E_{гр}$ . Электронная "температура" плазмы  $T$ , измеренная во вспышках с анизотропией рентгеновского излучения методом фильтров в предположении максвелловского распределения электронов по скоростям, оказалась различной в зависимости от направления, в котором регистрировалось излучение. Например, во вспышке, соответствующей рис. 2, электронная "температура", определенная для направления перпендикулярного  $E$  составила  $T \approx 350$  эв, а для параллельного направления  $T_{||} \approx 700$  эв. Этот результат показывает, что наличие анизотропии сказывается существенным образом на величине измеряемой методом фильтров температуры.

Эффект анизотропии углового распределения излучения числа рентгеновских квантов лазерной плазмой естественно интерпретировать в рамках установившихся в последние годы представлений теории параметрического резонанса [5]. Согласно [5, 2] пороговые потоки для развития периодической и аperiodической потенциальных неустойчивостей в алюминиевой плазме с плотностью, близкой к критической, составляют величину, изменяющуюся в интервале значений  $10^{12} + 10^{13}$  *вт/см<sup>2</sup>* в зависимости от типа неустойчивости и относительного вклада эффектов диссипации и неоднородности лазерной плазмы. В условиях нашего эксперимента максимально быстро растет амплитуда плазменных колебаний, которые распространяются в направлении, параллельном *E*. Это нарастание в сочетании с одним из механизмов линейного, квазилинейного или нелинейного насыщения неустойчивости [5] приводит плазму в турбулентное состояние с достаточно высоким уровнем плазменных колебаний, обеспечивающим согласно эффекту Черенкова квазилинейную деформацию функции распределения электронов в области надтепловых скоростей  $v \gg v_T$ , равных по порядку величины фазовой скорости высокочастотных плазменных колебаний. В результате функция распределения электронов в этом диапазоне скоростей становится немаксвелловской, близкой к функции распределения электронных пучков, распространяющихся вдоль *E* [6]. Относительное число таких быстрых электронов растет пропорционально потоку лазерного излучения и в условиях нашего эксперимента составляет величину порядка долей процента [6] от общего числа электронов в области критической плотности плазмы. Для неустойчивости типа распада световой волны на электронное ленгмюровское и ионно-звуковое колебания функция распределения имеет степенной вид  $\delta f \sim v^{-n}$ . Интегрирование сечения тормозного излучения быстрых электронов с такой функцией распределения при их торможении на ионах алюминия дает число рентгеновских квантов с энергией  $1,3 + 12$  *кэв*, значительно превосходящее число квантов рекомбинационного излучения, которое приблизительно на два порядка превышает число квантов тормозного излучения при максвелловском распределении электронов. Это обстоятельство оказывается решающим для проявления анизотропии углового распределения рентгеновского излучения, характерного для нерелятивистского электронного пучка. Расчетная величина для степени анизотропии  $\zeta$  находится в соответствии с результатами эксперимента (при  $n = 4$  и интервале скоростей  $v$  быстрых электронов от  $7,5 v_T$  до  $25 v_T$ ). Таким образом, обнаруженная анизотропия рентгеновского излучения в сочетании с результатами работ [2], укладываясь в рамки теории параметрического резонанса в лазерной плазме, отчетливо указывает на аномальный характер взаимодействия мощных световых потоков с плазмой.

Авторы благодарны академику Н.Г.Басову за постоянный интерес к работе, М.Р.Шпольскому за предоставление фотопленок и К.И.Копытку за помощь в проведении эксперимента.

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

Поступила в редакцию  
24 июня 1974 г.

## Литература

- [1] Н.Г.Басов, О.Н.Крохин. ЖЭТФ, **46**, 171, 1964; Н.Г.Басов, О.Н.Крохин. Вестник АН СССР, №6, 55, 1970.
- [2] А.А.Рупасов, Г.В.Склизков, В.П.Цапенко, А.С.Шиканов. ЖЭТФ, **65**, 1898, 1973; А.А.Рупасов, В.П.Цапенко, А.С.Шиканов. Препринт ФИАН СССР, №94, 1972; Н.Г.Басов, О.Н.Крохин, В.В.Пустовалов, А.А.Рупасов, В.П.Силин, Г.В.Склизков, В.Т.Тихончук, А.С.Шиканов. ЖЭТФ, **67**, 118, 1974; Препринт ФИАН СССР № 17, 1974.
- [3] K.Eidmann, R.Sigel. VI European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 30.7 – 4.8, 1973, Vol. 1, Contributed Papers, p. 435.
- [4] R.P.Godwin, J.F.Kephart, G.H.Mc Call. Bull. APS, 971, 1972; K.Boyer. Progress Report LA-5251 – PR, 1972.
- [5] В.П.Силин. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М., изд. Наука, 1973.
- [6] В.В.Пустовалов, В.П.Силин, В.Т.Тихончук. Письма в ЖЭТФ, **17**, 2, 120, 1973.
-