

Международный центр исследований экстремальных световых полей (ЦИЭС)



«Международный центр исследований экстремальных световых полей» (ЦИЭС)

Проект заявки подготовлен Институтом прикладной физики РАН





Содержание

1.	Краткое описание проекта	5				
	Приоритетные направления исследований	5				
	Интерес к проекту в других странах	7				
	Основные параметры инфраструктуры ЦИЭС	9				
	Общий бюджет проекта и сроки его реализации	11				
2.	ЦИЭС: Почему в России и почему в Нижнем Новгороде					
	Основные научные школы России в области ЦИЭС	12				
	Нижний Новгород и Нижегородская область – обзор	15				
	Нижегородский научно-образовательный кластер	17				
	Институт прикладной физики РАН – инициатор ЦИЭС проекта	20				
	Опыт Института прикладной физики по тематике проекта	24				
	Предполагаемое место размещения ЦИЭС	27				
3.	Создание и функционирование инфраструктуры	00				
	(цель 1 и задачи по ее достижению)					
	Задача 1. Создание прототипов двух 15 ПВт лазерных модулей					
	Мероприятие 1.1. Строительство здания (зооокв.м.) и инженерных сетей	32				
	мероприятие т.2. Создание общей стартовой части					
	компактный 200 Дж 527 нм лазер на необимовом стекле оля накачки	36				
	Мероприятие 1.3. Создание первого прототила модуля мошностью 10 ПВт					
	Разработка и создание устроисть увеличения контраста					
	Мероприятие 1.5. Фазировка двух модулей					
	Мероприятие 1.6. Уредицение моншости молудей до 15 ПВт					
	Мероприятие 1.7. Создание ускорителя электронов до энергии 20 МэВ	00				
	на основе фотокатода и СВЧ резонаторов	61				
	Мероприятие 1.8. Создание прототипа лазера с частотой повторения импульсов 1 кГц	71				
	Мероприятие 1.9. Создание и оснащение лаборатории для исследования взаимодействия изпучения с веществом					
	Задача 2. Строительство зданий и инженерных сетей МЕГА-проекта					
	Задача 3. Создание 200 ПВт лазера					
	Мероприятие 3.1. Разработка детальной документации для 200 ПВт пазера					
	Мероприятие 3.2. Развитие необходимых технологий					
	Мероприятие 3.3. Создание обшей стартовой части					
	Мероприятие 3.4. Создание двенадцати модулей					

Мероприятие 3.5. Фазировка двенадцати модулей	81
Мероприятия 3.6. и 3.7. Создание системы диагностики и системы управления 200 ПВт лазера	82
Мероприятие 3.8. Транспортировка двенадцати пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории	86
Задача 4. Создание комплекса мощных фемтосекундных лазеров с	
высокой средней мощностью для инновационных приложений	87
Мероприятие 4.1. Разработка концепции комплекса лазеров с большои	88
Мероприятие 4.2 Развитие технологии производства диодных пазеров	00
Мероприятие 4.3. Создание лазера с частотой повторения импульсов 1-10 Гц	93
Мероприятие 4.4. Создание лазера с частотой повторения импульсов несколько кГц	95
Мероприятие 4.5. Транспортировка лазерных пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории	97
Задача 5. Создание источника электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов	98
Задача 6. Создание главной мишенной камеры	100
Задача 7. Создание и оснащение экспериментальных лабораторий	102
Задача 8. Обеспечение радиационной безопасности	103
Задача 9. Создание вычислительно-коммуникационного центра	108
Задача 10. Оснащение инженерно-вспомогательных мастерских	109
Задача 11. Обеспечение функционирования установки	110
Список литературы	111
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры	
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению)	113
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных	113
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом Мероприятие 1.1. Разработка теоретических моделей процессов Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов	113 114 114 117
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом Мероприятие 1.1. Разработка теоретических моделей процессов Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов	113 114 114 117
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом Мероприятие 1.1. Разработка теоретических моделей процессов Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов Задача 2. Проведение экспериментов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц	113 114 114 117 123
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом Мероприятие 1.1. Разработка теоретических моделей процессов Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов Задача 2. Проведение экспериментов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц Мероприятие 2.1. Лазерно-плазменное ускорение электронов до энергий 10-1000 ГэВ.	113 114 114 117 123 123
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом Мероприятие 1.1. Разработка теоретических моделей процессов Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов Задача 2. Проведение экспериментов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц Мероприятие 2.1. Лазерно-плазменное ускорение электронов до энергий 10-1000 ГэВ. Мероприятие 2.2. Лазерно-плазменное ускорение ионов до энергией 1-10 ГэВ	113 114 114 117 123 123 128
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 128
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 128 139
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению)	113 114 114 117 123 123 128 139
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению). Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 128 139 141
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению). Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 128 139 141
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 128 139 139 141 141 149
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 123 128 139 139 141 141 149
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 123 123 123 123 123 123 139 141 141 149 151
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом. Мероприятие 1.1. Разработка теоретических моделей процессов Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов Задача 2. Проведение экспериментов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц Мероприятие 2.1. Лазерно-плазменное ускорение электронов до энергий 10-1000 ГэВ. Мероприятие 2.2. Лазерно-плазменное ускорение ионов до энергией 1-10 ГэВ Мероприятие 2.3. Комбинированное ускорение в линейных и лазерно- плазменных ускорителях заряженных частиц Задача 3. Создание новых источников излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах Мероприятие 3.1. Создание источников жесткого излучения с рекордно высокой яркостью. Мероприятие 3.2. Создание компактного лазера на свободных электронах. Создание вигглеров Мероприятие 3.3. Создание пучков узкополосного гамма-излучения высокой яркости Мероприятие 3.4. Создание источников электромагнитных импульсов	113 114 114 123 123 123 123 123 123 123 123 123 123 139 141 141 149 151
Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению) Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	113 114 114 117 123 123 123 123 123 123 123 139 141 141 151 159

4.

Задача 4. Исс. свет	педование нелинейных свойств вакуума в экстремальных говых полях	172
Мероприятие 4.	 Исследование нелинейно-оптических свойств вакуума при воздействии лазерного излучения с интенсивностью до 10²⁵ Вт/см² 	172
Мероприятие 4	2. Изучение явлений квантовой электродинамики в присутствии экстремально сильных лазерных полей, включая процессы создания вещества и антивещества с помощью излучения	
Мероприятие 4.	 Исследование пространственно-временной структуры вакуума при его зондировании рентгеновским и гамма-излучением с интенсивностью до 10²⁷ Вт/см² 	a 180
Задача 5. Про	ведение исспедований по фотоядерной физике	183
Мероприятие 5	1. Развитие диагностических методов и инструментов фотоядерной физики	
Мероприятие 5	2. Исследование внутриядерных процессов, инициированных вторичными источниками излучения	184
Мероприятие 5	 Исследование методов управления внутриядерными процессами и создания экзотических ядерных структур 	184
Задача 6. Эксі	териментальное моделирование астрофизических явлений.	186
Мероприятие 6	 Лабораторное моделирование процессов в недрах звёзд и планет 	186
Мероприятие 6	2. Лабораторное моделирование гравитационных явлений	188
Мероприятие 6	 Лабораторное моделирование ранних космологических явлений 	191
Задача 7. Исс.	педование возможностей создания экзаваттных и	
Зетт	аваттных источников света	193
Инновационны	урыы исследования	197
(Цель 3 и зада	чи по ее осуществлению)	200
Заключение		201
Приложения		203
Приложение 1:	Дорожная карта	203
	Сводная таблица	203
	Графическая форма дорожной карты	204
	Список исполнителей	213
Приложение 2:	Список зарубежных организаций, планирующих принять участие в проекте мегасайенс «Центр исследований экстремального света», и ответственных лиц со стороны	
	этих организаций для ведения переговоров	215
Приложение 3:	Письма поддержки	217
Приложение 4:	Письма Министерства инвестиционной политики	
	Нижегородской области и Нижегородского госуниверситета	226
Приложение 5:	Интервью председателя Международного комитета ICUIL профессора Т. Таджимы	230
Приложение 6:	Соглашение о создании Международного научного объединения (МНО) «Экстремальные световые поля:	.
	источники и приложения» ELISA "	232

5.

6.

1. Краткое описание проекта

Целью проекта является создание крупной научной инфраструктуры -Международного центра исследований экстремальных световых полей (ЦИЭС) на базе использования источников лазерного излучения с гигантской (экзаваттного уровня) пиковой мощностью. Проект базируется на значительных успехах, достигнутых в России и мире в последнее десятилетие по созданию петаваттных $(1 \Pi e T a B a T T = 10^{15} B a T T)$ 10²² Вт/см² С интенсивностью до и лазеров сверхкороткими импульсами излучения (< 100 фемтосекунд = 10⁻¹³ с). В основе планируемой инфраструктуры будет находиться новый уникальный источник мощностью около 0.1-0.2 Экзаватта (1-2·10¹⁷ Вт). света с в сотни раз превосходящей имеющиеся в настоящее время. Фундаментальные процессы взаимодействия такого излучения с веществом представляют совершенно новую область знания и будут основной исследовательской задачей инфраструктуры. Впервые откроются возможности изучения пространственно-временной структуры вакуума и неизвестных явлений на стыке физики высоких энергий и физики сверхсильных полей. Предполагаемые приложения результатов исследований будут включать, в том числе, разработку компактных ускорителей заряженных частиц с размерами в сотни раз меньшими имеющихся, создание источников сверхкоротких импульсов жесткого рентгеновского и гамма излучения для диагностики материалов с беспрецедентным пространственным и временным разрешением, разработку новых источников излучения и частиц для клинических приложений и др.

Приоритетные направления исследований

Программа исследований, обеспечивающая приоритетность работы ЦИЭС, будет включать следующие основные направления:

1. Создание источников сверхкороткого когерентного и некогерентного излучения с рекордно высокой яркостью в рентгеновском и гамма-диапазонах на основе излучения ультрарелятивистских заряженных частиц, движущихся в сверхсильных лазерных полях; использование этих источников для диагностики процессов и структур с пикометровым пространственным и субфемтосекундным временным разрешением.

5

2. Разработка многокаскадных компактных лазерных ускорителей электронов с энергиями более 100 ГэВ, использование принципов лазерно-плазменного ускорения для разработки перспективных ускорительных комплексов с энергиями частиц на уровне 1-10 ТэВ.

3. Создание компактных лазерных ускорителей ионов с энергией 0.1-10 ГэВ и разработка их приложений для лучевой диагностики и медицины.

4. Получение И исследование экстремальных состояний вещества, возникающих действием ультрарелятивистских под лазерных полей; моделирование астрофизических ранних космологических явлений И в лабораторных условиях.

5. Создание источников электромагнитных волн аттосекундной (10⁻¹⁸ с) и субаттосекундной длительности на основе генерации высоких гармоник лазерного излучения и суперконтинуума в сверхширокой спектральной области в процессе нелинейного взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с веществом; разработка методов применения таких источников для фундаментальной метрологии и диагностики быстропротекающих процессов в веществе.

6. Создание источника электромагнитного излучения с пиковой мощностью более 1 Экзаватта (10¹⁸ Вт) на основе взаимодействия мультипетаваттных лазерных импульсов с плазмой в ультрарелятивистском режиме.

7. Исследование пространственно-временной структуры вакуума при его зондировании излучением с интенсивностью более 10²⁵ Вт/см²; изучение явлений квантовой электродинамики в присутствии экстремально сильных лазерных полей, в том числе создание вещества и антивещества с помощью излучения.

8. Исследования в новой области науки – ядерной оптике – на основе использования вторичных источников гамма-излучения для возбуждения и диагностики внутриядерных процессов

Представленная выше программа приоритетных исследований определяет многофункциональность ЦИЭС. Значительный объем исследований будет выполняться на стыке с другими областями знаний – физики высоких энергий, ядерной физики, астрофизики и биомедицины.

Интерес к проекту в других странах

Характеристики источника излучения ЦИЭС существенно превосходят уровень самых мощных из доступных или проектируемых лазерных установок в мире, в том числе самых передовых из них в рамках европейской инфраструктуры мега-проекта ELI (Extreme Light Infrastructure). Поэтому ЦИЭС естественно привлекает интерес мирового научного сообщества, предоставляя возможности для международного сотрудничества в широком спектре современных наук и приложений.

К настоящему времени интерес к участию в создании и эксплуатации ЦИЭС высказали Министерство образования и науки Франции, Комиссариат атомной энергетики Франции, Агентство по атомной энергии Японии, Европейский центр ядерных исследований CERN, Лос-Аламосская национальная лаборатория (США), Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми (США), Институт исследования ускорителей больших энергий КЕК (Япония), Резерфордовская лаборатория (Великобритания), Институт ускорителей им. Дж. Адамса (Великобритания), Центр исследований антипротонов и ионов FAIR (Германия), Национальный институт научных исследований Канады. Предполагается, что основной вклад зарубежных партнеров будет состоять в поставках высокотехнологичного научного оборудования для оснащения лазерного комплекса и исследовательских лабораторий на общую сумму около 15% от стоимости проекта.

В настоящее время наиболее важный зарубежный вклад в развитие проекта ЦИЭС вносит Франция. В 2009 г. между Россией и Францией было подписано международное соглашение о развитии исследований в области экстремальных световых полей ELISA, которое стимулировало разработку проекта ЦИЭС. В сентябре 2011 г. Министерство образования и науки Франции организовало новый международный институт IZEST (International Institute for Zettawatt-Exawatt Science and Technology, Международный институт зетаваттно-экзаваттной науки и технологий) с целью обеспечения научной и научно-организационной поддержки проектам по созданию лазеров экзаваттной мощности и их применениям. ЦИЭС рассматривается этим институтом в качестве основного научного проекта, который определит на ближайшее десятилетие развитие соответствующей области знаний. Данная инициатива получила поддержку (см. письма поддержки в Приложении 3) со стороны крупнейших исследовательских лабораторий, желающих принять участие в сотрудничестве с IZEST и ЦИЭС.

Переговоры о возможностях сотрудничества по проекту ЦИЭС ведутся с руководителями европейского инфраструктурного проекта ELI и представителями Европейской комиссии. Проект ELI, имеющий целью создание и использование источников экстремальных световых полей, успешно прошел подготовительный этап, в котором приняли участие 13 европейских государств. По результатам этапа в 2010 г. Европейская Комиссия приняла решение о строительстве в 2011-2016 г.г. трех новых лазерных центров с источниками с мощностью около 10 ПВт в Венгрии, Чехии и Румынии со стоимостью строительства каждого около 280 млн. евро. На установке, которая будет построена в Венгрии, планируется проводить исследования по генерации и использованию аттосекундных импульсов. На установке, конструируемой в Чехии, будут разрабатываться лазерно-плазменные ускорители и новые источники рентгеновского и гамма излучения. В Румынии будет развернута установка для проведения исследований в области фотоядерной физики. ЦИЭС естественным образом будет представлять интерес для международного сотрудничества с консорциумом ELI в области экстремальных световых полей, имея в своем составе источник следующего поколения И программу лазерный исследований С использованием полей, недоступных в других исследовательских центрах.

Важную роль играет поддержка проекта ЦИЭС со стороны инициатора и руководителя подготовительной стадии европейского проекта ELI, директора IZEST проф. Жерара Муру (Франция). В 2009 г. по предложению Ж. Муру Президент РАН Ю.С. Осипов обратился к Президенту РФ Д.А. Медведеву с просьбой рассмотреть предложение о полномасштабном участии России в международной программе по изучению экстремальных световых полей. Предложение было рассмотрено и направлено Администрацией Президента на согласование в ряд министерств, в том числе в Министерство образования и науки РФ, которое, в целом, поддержав предложение, выразило мнение о том, что такое участие наиболее правильно при строительстве на территории страны международного центра как субъекта международной кооперации в области экстремальных световых полей при решении ряда вопросов юридического международного права.

Проект ЦИЭС имеет также поддержку ведущей международной организации по созданию и использованию сверхмощных лазеров ICUIL (International Committee on Ultra Intense Lasers), которая координирует деятельность крупнейших лазерных лабораторий во всем мире. Письмо поддержки ЦИЭС со стороны председателя ICUIL проф. Т. Таджимы и его интервью представлены в Приложении 5.

8

Основные параметры инфраструктуры ЦИЭС

Субэкзаваттный лазер, существенно превосходящий по мощности излучения уровень самых мощных из имеющихся, строящихся или проектируемых лазерных комплексов в мире, будет основан на технике оптического параметрического усиления частотно модулированных лазерных импульсов (ОРСРА) петаваттной мощности, разработанной в Институте прикладной физики РАН. Комплекс будет включать 12 одинаковых каналов, в каждом из которых будет генерироваться импульс с энергией 300-400 Дж, длительностью 20-30 фс, максимальной интенсивностью при фокусировке более 10^{23} Вт/см² (Рис. 1.1). Каналы работают по схеме параметрического усиления в кристаллах KD*P с апертурой оконечных каскадов 30×30 см².



Fig. 1.1. Схема расположения каналов субэкзаваттного лазера, главной мишенной камеры, линейного ускорителя и научных лабораторий

Предполагается, оптические что импульсы в лазерных модулях субэкзаваттного комплекса будут сфазированы с точностью до сотых долей периода световой волны (10⁻¹⁶ с). Первой фазой проекта будет создание в ИПФ PAH ДВVХ таких модулей С мощностью 15 ПВт каждый основе на параметрического усиления в кристаллах KD*P. Это позволит не только создать надежный прототип модуля ЦИЭС, но и решить принципиальные вопросы, связанные с фазировкой каналов, а также с отработкой диагностического оборудования для приложений. При этом будут внесены окончательные

коррективы в архитектуру и компонентную базу установки ЦИЭС. В дальнейшем по отработанной технологии будут собраны и размещены во вновь построенном здании международного центра 12 каналов основного лазерного комплекса ЦИЭС.

Излучение, полученное на выходе лазерного комплекса, будет иметь следующие параметры: мощность 200 ПВт, длительность импульса 25 фс, длина волны 910 нм, расходимость не более 3 дифракционных пределов.

В ЦИЭС вместе с залом для размещения субэкзаваттного лазера будут располагаться линейный ускоритель электронов на 100 МэВ и уникальные лаборатории для проведения экспериментов по физике сильных полей, физике высоких энергий, лабораторной астрофизике и космологии, ядерной оптике, нейтронной физике, лаборатории по изучению свойств вакуума, аттосекундной и зептосекундной физике, фундаментальной метрологии. В состав ЦИЭС будет также входить мощный центр обработки данных и компьютерного моделирования взаимодействий экстремальных световых полей.

ЦИЭС будет уникальным исследовательским центром международного уровня как по параметрам источника излучения, так и по программе планируемых исследований. Период превосходства над имеющимися И строящимися зарубежными установками, предназначенными для исследования экстремальных световых полей, начнется с момента запуска первого прототипа лазера с уровнем мощности 10 ПВт (2014 г.) и будет продолжаться по мере нарастания мощности лазерного комплекса (2018 г.). В дальнейшем превосходство будет обеспечено созданием источника электромагнитного излучения с пиковой мощностью более 1 Экзаватта на основе взаимодействия мультипетаваттных лазерных импульсов с плазмой в ультрарелятивистском режиме (2020 г.). Превосходство по совокупной программе экспериментальных работ будет сохраняться с момента начала первых экспериментов на двухканальном прототипе (2015 г.) и на далекую перспективу.



Fig. 1.2. Предполагаемый вид ЦИЭС

Исходя планируемой программы научных исследований, ИЗ уровня технологических требований к уникальному лазерному комплексу и необходимой квалификации научного и инженерно-технического персонала, наиболее подходящей базой для строительства ЦИЭС в Российской Федерации представляется Институт прикладной физики РАН в Нижнем Новгороде. В процессе создания и эксплуатации будет ЦИЭС работать большой совместный коллектив российских исследовательских и образовательных центров, включая ИПФ РАН, ИПЛИТ РАН, РНЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, ФИАН, ИОФ РАН, ИЯФ СО РАН, ОИВТ РАН, ИЛФ СО РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, МГУ, МИФИ, ННГУ, НГУ и др.

Наряду с основной базой в структуре ЦИЭС предусматриваются сателлитные лаборатории, занимающиеся разработкой и доводкой различных критических технологий субэкзаваттного лазера и развитием некоторых приложений результатов фундаментальных исследований, полученных в ЦИЭС. Такие лаборатории могут быть прежде всего организованы в ИПЛИТ РАН, РНЦ «Курчатовский институт» и в Национальном исследовательском ядерном университете (МИФИ).

Средняя численность сотрудников ЦИЭС составит около 300 чел., из них 100 чел. – постоянный инженерно-технический и административный состав; 100 чел. – постоянный состав российских ученых, 100 чел. – приезжающие зарубежные и российские специалисты.

Общий бюджет проекта и сроки его реализации

Предварительная стоимость центра оценивается в 40.3 млрд. руб., из них средства госбюджета 32.2 млрд. руб., средства иностранных партнеров 6.1 млрд. руб., внебюджетные средства из отечественных источников 2 млрд. руб.

год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
млрд. руб	2.1	3.3	3.3	5.4	7.5	5.8	2.4	0.8	0.8	0.8

Планируемое распределение средств госбюджета по годам:

Детальное распределение средств по задачам проекта представлено в Дорожной карте проекта.

2. ЦИЭС: Почему в России и почему в Нижнем Новгороде

Помимо существенных бюджетных инвестиций, реализация проекта ЦИЭС в России обосновывается наличием всемирно известных научных школ и высококвалифицированных ученых и инженеров в области проекта.

Основные научные школы России в области ЦИЭС

В России существуют всемирно признанные научные школы по основным направлениям работ ЦИЭС – в области лазерной физики, взаимодействия мощного электромагнитного излучения с веществом, высокочувствительных оптических измерений, в области теоретической физики. Эти школы работают в основных российских институтах Академии наук и в университетах.

В Институте общей физики РАН работают три научных школы, происхождение которых связано с деятельностью выдающихся отечественных ученых лауреатов Нобелевской премии академиков А.М. Прохорова и Н.Г. Басова:

- «Физика взаимодействия когерентного излучения с веществом, методы управления пространственными, временными и спектральными характеристиками лазерного излучения» под руководством чл.-корр. РАН Пашинина Павла Павлович.
- «Физика и технология кристаллов и нанокристаллических материалов для фотоники», руководитель школы – академик РАН Осико Вячеслав Васильевич.
- «Новые эффективные оптические материалы и компоненты для ближнего и среднего ИК-диапазонов спектра», руководитель – чл.-корр. РАН Щербаков Иван Александрович.



Александр Михайлович Прохоров



Николай Геннадьевич Басов

В Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН работают научная школа по теоретической физике под руководством академика Келдыша Леонида Вениаминовича, школа квантовой радиофизики под руководством академика Крохина Олега Николаевича школа фундаментальных И по теории взаимодействий под руководством члена-корреспондента РАН Ритуса Владимира Ивановича.

Школа в Московском государственном университете была образована выдающимися советскими учеными, основателями нелинейной оптики академиком Хохловым Рэмом Викторовичем и профессором Ахмановым Сергеем Александровичем. В настоящее время это школа «Фемтосекундная нелинейная и квантовая оптика», и возглавляет ее профессор Макаров Владимир Анатольевич.



Рем Викторович Хохлов



Сергей Александрович Ахманов

В Институте прикладной физики РАН работают три научные школы, обязанные своим происхождением основателям нижегородской радиофизики академику Александру Александровичу Андронову, лауреату Нобелевской премии академику Виталию Лазаревичу Гинзбургу и академику Андрею Викторовичу Гапонову-Грехову.

К этим школам относятся:

- «Взаимодействие интенсивного электромагнитного излучения с плазмой» под руководством академика Литвака Александра Григорьевича.
- «Фемтосекундная оптика, нелинейная динамика оптических систем и высокочувствительные оптические измерения», руководитель – чл.-корр.
 РАН Сергеев Александр Михайлович.

 Школа «Сверхсильные световые поля, их взаимодействие с веществом, широкоапертурные нелинейно-оптические кристаллы, лазеры с высокой средней и пиковой мощностью, параметрическое преобразование лазерного излучения», основанная профессором Беспаловым Виктором Ивановичем и профессором Фрейдманом Геннадием Иосифовичем.



Александр Александрович Андронов



Виталий Лазаревич Гинзбург



Андрей Викторович Гапонов-Грехов

В Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН) работает школа «Исследование свойств конденсированных веществ и плазмы в экстремальных условиях при высоких плотностях энергии" под руководством академика Фортова Владимира Евгеньевича.

Школу «Лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения и ее применения» в Институте лазерной физики СО РАН возглавляет академик Багаев Сергей Николаевич.

В Национальном исследовательском ядерном университете (МИФИ) работает школа «Фундаментальные проблемы поведения квантовых систем в полях излучения» под руководством профессора Нарожного Николая Борисовича.



Нижний Новгород и Нижегородская область – обзор

Почему Нижний Новгород выбран для реализации ЦИЭС?

Нижний Новгород является одним из крупнейших промышленных, научных, образовательных и культурных центров России. Он был основан в 1221 году. Недавно ему было возвращено его первоначальное имя после переименования в Горький в 1932 году в честь знаменитого писателя Максима Горького, который родился в Нижнем Новгороде. Нижний Новгород расположен в центре европейской части России, примерно в 400 км к востоку от Москвы, в месте слияния Волги и Оки. Город имеет выгодное географическое положение для экономического и социального развития.

Он занимает площадь в 41,1 тыс. га, его население составляет 1370,2 тысячи человек, средний возраст жителей 36 лет.



Нижний Новгород – выдающийся исторический и культурный центр. Образ города сохраняет множество исторических и культурных слоев, которые дали основание ЮНЕСКО включить Нижний Новгород в список 100 городов, составляющих мировую историческую и культурную ценность.



Блестящими примерами старой русской архитектуры являются Нижегородский Кремль, сохранившийся с начала 16-го века, архитектурный ансамбль Нижегородской ярмарки, которая в 19 веке была вторым центром города и крупнейшей ярмаркой в России и Европе, а также многочисленные церкви и монастыри, более 600 уникальных исторических, архитектурных и культурных памятников.

В городе около 200 учреждений культуры и искусства, в том числе 8 театров, 5 концертных залов, 97 библиотек, 17 кинотеатров, 25 учреждений дополнительного образования детей, 16 музеев, 7 красивейших парков. Нижегородская государственная академическая филармония имени Мстислава Ростроповича, созданная в 1937 году, – одна из крупнейших концертных организаций в России.

Выгодное географическое положение и традиционная роль Нижнего Новгорода как ведущего торгового центра обусловили создание высокоразвитой транспортной инфраструктуры. Железные дороги, автомобильные дороги, водные и воздушные пути удобно связывают Нижний Новгород с любым регионом России, СНГ и с зарубежными государствами.

Нижегородский транспортный узел, который включает в себя международный аэропорт "Нижний Новгород", железнодорожный вокзал и речной порт, является одним из самых посещаемых в России. Реки и каналы соединяют Нижний Новгород с 5 морями, с последующим выходом в порты Скандинавских стран, стран Восточной Европы, Африки и Азии.

Нижний Новгород входит в пятерку самых населенных городов России с развитой промышленностью. Он является центром Нижегородской области и признанной столицей Волжского экономического района. Это крупный деловой и промышленный центр. Ритм бизнеса и поиск новых технологий гарантируют его экономический успех в третьем тысячелетии. Промышленность занимает важнейшее место в структуре города. Основными отраслями являются автомобилестроение, радиоэлектроника, судостроение, атомная промышленность, металлообрабатывающая промышленность, черная и цветная металлургия, деревообрабатывающая, пищевая, легкая, медицинская и полиграфическая промышленность. Многие достижения Нижнего Новгорода имеют мировую известность: первый в мире коммерческий реактор на быстрых нейтронах, радиолокационные станции пятого поколения, мировое лидерство в проектировании судов на подводных крыльях и экранопланов.



Прогресс в промышленности стал возможным благодаря хорошо развитой системе образования.

Нижегородский научно-образовательный кластер

Нижегородская область имеет все необходимые условия для эффективного развития научно-образовательного комплекса и инновационной деятельности.

Научно-образовательный потенциал региона формируется как фундаментальной, так и прикладной наукой. В Нижегородской области более 100 научно-исследовательских организаций и учреждений, включая 10 филиалов федеральных министерств и ведомств, институты Российской академии наук, Российский федеральный ядерный центр (г. Саров), 18 специализированных научно-исследовательских институтов, 24 конструкторских, технологических и изыскательских компаний, более 20 промышленных предприятий. Количество исследователей на 10 000 населения в Нижегородской области превышает средние показатели по России в 4 раза.

Развитый оборонный комплекс, машиностроение (включая авиа- и судостроение), радиоэлектроника и приборостроение, ядерная физика и энергетика, медицина, материаловедение составляют основу технологического фундамента научно-образовательного комплекса области.

Стратегическая цель в области образования основывается на инновационном развитии и широком сотрудничестве с российскими и международными партнерами.

Мощная система образования Нижнего Новгорода охватывает около 300,000 школьников и 247 тысяч студентов колледжей и университетов ежегодно. Нижегородские университеты входят в число лидеров в России и занимают высокие позиции в рейтинге Министерства образования и науки России.

В настоящее время число высших учебных заведений Нижегородской области (сосредоточенных в Нижнем Новгороде) с учетом филиалов иногородних ВУЗов превышает полсотни. В них обучаются десятки тысяч студентов, работают около 5 тысяч профессоров и преподавателей. Ведущие вузы города, в том числе Нижегородский государственный университет, Нижегородская государственная медицинская академия, Нижегородский лингвистический университет, а также Нижегородский технический университет и Государственный университета Высшая школа экономики входят в список лучших вузов Россиию

Происходит постоянное развитие международных образовательных программ. Российско-Французский, Российско-Итальянский, Российско-Датский открытые университеты, Международный институт экономики, права и менеджмента созданы при сотрудничестве нижегородских и европейских университетов.

Фундаментальные исследования сосредоточены, в основном, в институтах Российской академии наук и в Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского. Первый в СССР радиофизический факультет был открыт в ННГУ после Второй мировой войны, а в начале 60-х прошлого века – первый в стране факультет вычислительной математики и кибернетики. Именно здесь проводились первые исследования по тематике проекта – квантовой электронике, лазерной физике, физике плазмы, математическому моделированию физических процессов, параллельным вычислениям.

В Нижнем Новгороде работает 6 институтов Российской академии наук: Институт прикладной физики РАН Институт физики микроструктур РАН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН Нижегородский филиал Института машиноведения Нижегородский отдел Института социологии

18

В 2009 году на базе институтов Российской академии наук был создан Нижегородский научный центр (ННЦ РАН), который возглавляет академик Александр Григорьевич Литвак.



Научный совет НРЦ РАН на общем собрании в 2009 году

Нижегородский научный центр РАН создан для координации работы академических институтов в Нижегородском регионе. особенно по междисциплинарным научным исследованиям и организации их взаимодействия с отраслевой наукой, промышленными предприятиями и региональными вузами. Важнейшей задачей центра является также решение инфраструктурных и социальных проблем академической науки в регионе, включая обеспечение институтов современными информационными, суперкомпьютерными технологиями, а также взаимодействие с местными органами власти, особенно по реализации проектов, выполняемых в интересах региона.

Признанным лидером академической науки Нижнего Новгорода является Институт прикладной физики РАН.



Здание ИПФ РАН

Институт прикладной физики РАН – инициатор ЦИЭС проекта

ИПФ РАН начал самостоятельную деятельность в апреле 1977 года. Институт был создан на базе нескольких отделов Научно-исследовательского радио-физического института Министерства высшего образования РФ. В течение четверти века его возглавлял академик Андрей Викторович Гапонов-Грехов. В 2003 году директором института был назначен Александр Григорьевич Литвак, а А.В. Гапонов-Грехов стал научным руководителем ИПФ РАН.

ИПФ РАН является одним из крупнейших и успешно работающих институтов Российской академии наук. Научные исследования обеспечивают около 1200 сотрудников, из которых более 490 человек научные сотрудники, в том числе 8 академиков и членов-корреспондентов РАН, 89 докторов и 202 кандидата наук. Около трети научных сотрудников молодые люди в возрасте до 35 лет.

ИПФ РАН был задуман и создан как многоцелевое учреждение, сочетающее фундаментальные и прикладные исследования в области физики плазмы, электроники больших мощностей, геофизики и лазерной физики. Проблемы колебаний и волн, общие для этих научных направлений, сильная научная база для прикладных исследований, тесные связи науки и высшего образования, а также высокие критерии обучения молодых исследователей являются основными компонентами модели крупной академической организации, реализуемой в ИПФ РАН.

Эта модель доказала свою жизнеспособность в течение более тридцати лет: она работала и в девяностые годы, которые были тяжелыми временами для русской науки, ее основополагающие принципы верны и сегодня.

В настоящее время исследования в ИПФ РАН сосредоточены в трех основных научных отделениях: Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей, Отделение гидрофизики и гидроакустики и Отделение нелинейной динамики и оптики.

Директор	Научный руководитель					
Дирекция Ученый совет						
Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей	Отделение нелинейной динамики и оптики					
Инженерно-технологические подразделения	Опытное производство					
Научно- образовательный центр и специалистов	Научно-организационные и научно-вспомогательные подразделения					
Планово-финансовые, хозяйственные и социальные подразделения	Отдел автоматизации научных исследований					

Структура ИПФ РАН

Основные направления научных исследований института:

- электроника больших мощностей (гиротроны и их приложения, релятивистская электроника, микроволновая обработка материалов),
- электродинамика плазмы (взаимодействие мощного излучения с плазмой, плазменная астрофизика, геофизическая электродинамика),
- радиофизические методы диагностики (диагностика плазмы, миллиметровая и субмиллиметровая радиоастрономия, дистанционная диагностика природных сред, когерентная сейсмоакустика, виброакустика и спектроскопия, нелинейная акустика, оптическая томография),
- низкочастотная акустика океана (дальнее распространение звука в океане, акустическая томография океана, низкочастотные излучающие комплексы, технические средства подводной акустики),
- динамика нелинейных процессов (нелинейные волны, динамический хаос и структуры, внутренние и поверхностные волны),
- лазерная физика и нелинейная оптика (фемосекундные лазеры и сверхсильные поля, процессы в системах с обращением волнового фронта, динамика лазеров, водорастворимые кристаллы, биофотоника).

ИПФ РАН проводит более 350 научных исследований по основным направлениям деятельности ежегодно, принимает активное участие в реализации федеральных целевых, академических, межведомственных, международных и иных программ и проектов.

К наиболее важным достижениям ИПФ РАН последних лет можно отнести следующие:

- Создание уникальных гиротронных комплексов для обработки и получения материалов с новыми свойствами и мощных гиротронов нового поколения для Международного термоядерного реактора (ITER).
- Разработка уникальной технологии плазмохимического осаждения алмазных пленок из газовой фазы, позволяющей заметно увеличить скорость роста алмазных дисков высокого оптического и механического качества.
- Разработку скоростного роста и точной обработки водорастворимых кристаллов.
- Разработка метода оптической когерентной томографии для получения изображения внутренней структуры биотканей и создание соответствующих приборов, открывших новые возможности нанобиофотоники и медицинской диагностики, включая диагностику онкологических заболеваний.
- Создание петаваттного параметрического лазерного комплекса (PEARL), одного из самых мощных лазеров в мире, основанного на технике оптического параметрического усиления, наиболее перспективной для продвижения в мультипетаваттный диапазон.



 Создание мультитераваттного Ті-сапфирового лазерного комплекса и его использование в экспериментах по ускорению кильватерной волны электронов, генерации когерентного мягкого рентгеновского излучения и возбуждению атмосферного разряда фемтосекундным излучением в режиме филаментации. ИПФ РАН располагает собственным опытным производством, оснащенным современным оборудованием. Основная задача опытного производства – своевременное и качественное выполнение задач, поставленных научными подразделениями института.

При институте создан ряд инновационных предприятий, основная задача которых – доведение результатов научных исследований до действующих образцов и прототипов, производство высокотехнологичных приборов и оборудования.

Научные работы института и его сотрудники удостоены многих наград, включая Ленинскую премию (1988 г.) и четырнадцать Государственных премий (1980, 1983, 1984, 1985, 1987, 1991, 1997, 1999, 2000, 2003 гг.), Государственную премию РФ для молодых ученых (2003 г.), ряд медалей РАН, медаль Европейского геофизического общества, медаль К.Д. Батона, медаль Уиллиса Лэмба, премию Международной ассоциации по термоядерному синтезу и другие.

ИПФ РАН имеет широкие международные научные связи. Его сотрудники участвуют в крупных международных научно-технических программах и международных проектах в рамках CRDF, HATO, MHTЦ, и др. Ежегодно около 150 сотрудников выезжают за границу для участия в международных научных конференциях, собраниях и заседаниях различных комитетов и обществ, и примерно такое же количество иностранных ученых посещает институт.



Международные контакты по всему миру

В 2011 году в институте выполняются работы в рамках более чем 25 международных проектов и грантов, среди них такие международные проекты как ITER, HiPER, LIGO, и совместные работы с такими научными центрами как CERN, DESY, KEK и другие.

Опыт Института прикладной физики по тематике проекта

Уверенность в реализуемости проекта создания субэкзаваттного лазера основывается на высоком научном и технологическом уровне ИПФ РАН и сотрудничающих с ним организация. В настоящее время ОРСРА является единственной существующей техникой усиления с обеспеченной компонентной базой, обеспечивающей лидирующее положение ИПФ в освоении и развитии ОРСРА. В 2007 г. в институте в результате выполнения совместного проекта с РФЯЦ-ВНИИЭФ был запущен лазер "PEARL" с импульсной мощностью 0.56 ПВт, длительностью импульсов около 45 фс и энергией 25 Дж, который сейчас является одним из наиболее мощных лазеров в мире. В этом лазере использовано параметрическое усиление в кристалле KD*P с апертурой 10×10 см², выращенном в ИПФ РАН по оригинальной технологии быстрого направленного роста кристаллов.

В 2009 году начались и успешно продвигаются работы по строительству лазерного комплекса "PEARL-10" с импульсной мощностью более 5 ПВт (Рис. 2.1). Оборудовано чистое помещение с развязанным заглубленным фундаментом площадью около 200 м² и специальными средствами радиационной защиты от повреждающих факторов, сопровождающих взаимодействие сверхмощного излучения с веществом. Ведется монтаж оптического оборудования. Первая фаза проекта ЦИЭС – создание двух модулей с мощностью15 ПВт – будет естественным продолжением этих работ, которые должны быть завершены в 2016 году. Дальнейшие работы по созданию субэкзаваттного лазера будут связаны с тиражированием лазерных каналов (12 каналов) и сборкой единого комплекса в здании ЦИЭС.

Другим важным фактором для успешной реализации проекта является наличие в ИПФ РАН уникальной технологии скоростного выращивания нелинейнооптических кристаллов KDP и KD*P, являющихся ключевыми элементами сверхмощных параметрических усилителей света. Эта технология основана на методе скоростного роста профилированных моносекториальных кристаллов. Она явилась результатом научных исследований, проводившихся в ИПФ РАН в течение нескольких десятилетий. Данный метод позволяет получать оптические элементы с апертурой до 40×40 см² и, что немаловажно для уникальной установки, содержащей десятки нелинейно-оптических кристаллов, почти на порядок уменьшить время роста по сравнению с классическим методом и минимизировать отходы кристалла при его обработке.



Fig. 2.1. Строящийся в ИПФ РАН лазерный комплекс "PEARL-10": лазер накачки для параметрического усилителя (слева), стартовая часть и оптический компрессор диаметром 110см и длиной 500см (справа)

ИПФ РАН обладает производственными мощностями, необходимыми для производства нелинейно-оптических компонент лазерных систем для обеспечения проекта ЦИЭС (Рис. 2.2). Имеется линия механической обработки кристаллических заготовок, включая уникальные станки алмазного точения, контроля монокристаллических установки для заготовок И параметров шероховатости обработанной поверхности нанометровой точности.



Fig. 2.2. Установки для роста широкоапертурных нелинейно-оптических кристаллов в ИПФ РАН (слева) и элемент для преобразования частоты сверхмощного оптического излучения

Для создания в ЦИЭС каналов с пиковой мощностью 15 ПВт необходимы лазерные системы накачки на неодимовом стекле с импульсной энергией более 1 КДж и длительностью импульсов около 2 нс. Большой опыт в создании и эксплуатации таких систем имеет РФЯЦ-ВНИИЭФ. В этом институте имеется лазерная установка «Луч» с 4 каналами с энергий импульса в каждом канале более 3 КДж и длительностью около 3 нс. В рамках совместного проекта РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИПФ РАН установка «Луч» была использована для получения импульсов с энергией около 100 Дж в параметрическом усилителе «Фемта». Данный результат является мировым рекордом по энергии параметрического усиления фемтосекундных импульсов и демонстрацией владения одной из критических технологий для реализации проекта ЦИЭС (Рис. 2.3).



Fig. 2.3. Установка «Луч» с параметрическим усилителем «Фемта» в РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) и рекордные характеристики параметрического усиления фемтосекундных импульсов

Экспериментальные исследования фундаментальных научных проблем и новых приложений, которые будут проводиться в ЦИЭС, также основаны на серьезном научно-технологическом заделе, имеющемся у ученых нашей страны. Например, в ИПФ РАН на базе петаваттного лазера "PEARL" была создана установка по исследованию лазерно-плазменного ускорения электронов при взаимодействии мощного оптического излучения с газовыми мишенями. Были получены ускоряющие поля > 1 ГэВ/см и продемонстрировано ускорение сгустков электронов с энергией до 300 МэВ, шириной спектра около10 МэВ, зарядом до 200 пК и угловым разбросом около 2 мрад, что находится на уровне лучших мировых результатов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц. Данные результаты были получены С использованием исключительно отечественной экспериментальной и диагностической базы (Рис. 2.4).



Рис. 2.4. Схема экспериментов по лазерно-плазменному ускорению электронов на установке "PEARL" в ИПФ РАН (А), распределения ускоренных электронов по углам и энергиям, полученные с помощью уникального спектрометра (Б)

Предполагаемое место размещения ЦИЭС

Для размещения ЦИЭС необходим земельный участок площадью около 5 Га, удаленный на значительное расстояние от автомобильных магистралей и промышленных предприятий. Общая площадь лабораторных, административнохозяйственных и вспомогательных помещений составит около 25 000 м², из них около 15 000 м² – с различной степенью радиационной защиты.

Предложения о предоставлении земельных участков поступили от Администрации Нижегородской области и Нижегородского госуниверситета (см. Приложение 4). На рис. 2.5 показаны три возможных местоположения ЦИЭС (участки 1-3) и участок 4, принадлежащий ИПФ РАН, для размещения строительства прототипа 200 ПВт лазера. Конкретный участок для размещения ЦИЭС будет выбран на основании международной экспертизы проекта.

Предполагаемые земельные участки для строительства объектов ЦИЭС



Участок земли, предлагаемый администрацией Нижегородской области (федеральная собственность)

Участок земли, предлагаемый администрацией Нижегородской области (муниципальная собственность)

Участок земли, предлагаемый Нижегородским государственным университетом (федеральная собственность)

Участок земли, предлагаемый ИПФ РАН для размещения прототипа (федеральная собственность)

3

Рис. 2.5.

3. Создание и функционирование инфраструктуры (Цель 1 и задачи по ее достижению)

Первая цель Проекта заключается в создании инфраструктуры, которая включает в себя здания, инженерные коммуникации, прототип двух 15 ПВт. лазерных модулей, 200 ПВт лазерный комплекс, комплекс фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных приложений, источник электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов, комплекс экспериментальных лабораторий, главную мишенную камеру, вычислительно-коммуникационный центр, инженерно-вспомогательные мастерские. Для полноценного выполнения следующих целей необходимо не указанной инфраструктуры, только создание HO поддержание ee функционирования на протяжении всего проекта, для чего в структуру Цели 1 мероприятия, носящие инженерно-техническую, управленческую, включены кадровую направленность, а также мероприятия, обеспечивающие радиационную защиту персонала.

Для достижения Цели 1 планируется решить 11 задач.

Задача 1. Создание прототипов двух 15 ПВт лазерных модулей

Ключевым элементом Проекта ЦИЭС является лазерный комплекс с мощностью 200 ПВт (0.2 экзаватта), который будет состоять из 12 одинаковых модулей, оптические импульсы которых сфазированы с точностью, много меньшей периода световой волны. В связи с этим, первой задачей является создание двух прототипов таких модулей и их фазировка. Прототип будет строиться на основе отработанной в ИПФ РАН технологии параметрического усиления света, однако мощность одного модуля более чем на порядок превосходит мощность лазерного излучения, достигнутую на сегодняшний день в России и в мире. В связи с этим, создание и тестирование прототипа до начала строительства всех 12 модулей является необходимым. Кроме того, несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ в области фазировки лазерных модулей, работ по фазировке импульсов с огромной энергией (сотни джоулей) и/или с длительностью порядка десятка периодов лазерного поля нам не известно. Это связано, на наш взгляд, с двумя ключевыми физическими проблемами: широкополосностью излучения и с разовым режимом

работы лазера (один импульс в минуту или даже десятки минут). Первая делает невозможным применение широко развитых методов фазировки с помощью нелинейной оптики, а вторая значительно затрудняет использование линейной делает необходимым адаптивной оптики. Bce это проведение экспериментального исследования по фазировке на прототипе до строительства системы фазировки 12 модулей. С другой стороны, решение Задачи 1 позволит проведение как фундаментальных, так и инновационных также начать исследований на уровне, значительно превышающем мировой, за несколько лет до создания 200 ПВт лазерного комплекса и ввода в строй всей инфраструктуры ЦИЭС. По результатам мероприятий Задачи будут внесены проекта 1 необходимые окончательные коррективы в архитектуру и компонентную базу установки ЦИЭС.

В настоящее время оптическое параметрическое усиление чирпированных импульсов (ОРСРА) является единственной существующей техникой усиления с обеспеченной компонентной базой, позволяющей проектировать и строить лазерные комплексы с мощностью 10 ПВт и выше. В ОРСРА-системах используется традиционный для генерации сверхсильных полей метод (частотной модуляции) коротких растяжения световых импульсов, многокаскадного усиления их энергии и последующей рекомпрессии усиленных импульсов. За счет должного выбора усиливающей нелинейной среды, частот и взаимодействующих направлений распространения волн в каскадах параметрических усилителей можно реализовать условия широкополосного синхронизма. Детальное описание этих процессов можно найти в [1-15].

Наиболее перспективной накачкой для создания мощных параметрических усилителей является излучение второй гармоники Nd:glass лазеров с длиной волны 527 нм. Для этой накачки единственными кандидатами на роль нелинейных элементов конечных каскадов параметрического усиления являются кристаллы KDP и KD*P, апертура которых в соответствии с современными технологиями роста может достигать 30 см и более [16]. В работе [17] проведен сравнительный анализ кристаллов KDP и KD*P с точки зрения их использования в качестве нелинейных элементов мощных параметрических усилителей. В кристалле KD*P максимальная ширина полосы усиления достигается в неколлинеарной схеме взаимодействия при длине волны сигнала 911 нм и длине волны сопряженной (холостой) волны 1250 нм. Ее значение составляет ~ 2300 см⁻¹, что более чем в два раза превосходит максимальную полосу усиления в KDP ~ 1000 см⁻¹. Столь

30

существенная разница в полосах усиления кристаллов связана с тем, что в KD*P можно реализовать условия сверхширокого синхронизма.

Лидирующее положение в мире в освоении и развитии ОРСРА занимает ИПФ РАН. В 2007 г. в этом институте в результате выполнения совместного проекта с РФЯЦ-ВНИИЭФ был запущен лазер "PEARL" [18] с импульсной мощностью 0.56 ПВт, длительностью импульсов около 45 фс и энергией 25 Дж. В этом лазере использовано параметрическое усиление в кристалле KD*P с апертурой 10×10 см, который выращен в ИПФ РАН по оригинальной технологии быстрого направленного роста кристаллов. В институте имеется технология производства кристаллов с существенно большей апертурой, что открывает возможности для создания на базе техники ОРСРА прототипов лазерных модулей с мощностью 10 ПВт, их последующего апгрейда до 15ПВт, а также создания всего 200 ПВт комплекса из 12 модулей (*Задача 3*). Предложенная в ИПФ РАН схема ОРСРА с центральной длиной волны сигнального излучения 910 нм в кристалле KD*P также используется в строящемся 10 ПВт комплексе на лазерной системе Vulcan [19].

Принципиальная схема 2-х канального прототипа субэкзаваттного лазера приведена Рис. 3.1. Для достижения импульсной мощности в 15 ПВт, в каждом из каналов прототипа генерируется импульс с энергией до 400 Дж, длительностью около 25 фс, максимальной интенсивностью при фокусировке более 10²³ Вт/см² и частотой повторения 1 выстрел в несколько часов. Апертура оконечных каскадов параметрического усиления в кристаллах KD*P составляет 30×30 см. Каждый из каналов параметрического усиления накачивается второй гармоникой Nd:glass лазерного усилителя с апертурой 30х30 см. Энергия излучения основной и второй гармоники составляет 3000 Дж и 2000 Дж, соответственно, при длительности импульса 1.5 нс. Максимальная интенсивность излучения накачки при этом равна 1.5 ГВт/см². Как показал опыт функционирования системы "PEARL", это значение не превышает порога разрушения кристалла KD*P.

Задача 1 включает в себя следующие девять мероприятий:

- Мероприятие 1.1. Строительство здания (3000кв.м.) и инженерных сетей.
- Мероприятие 1.2. Создание общей стартовой части.
- Мероприятие 1.3. Создание первого прототипа модуля мощностью 10 ПВт.
- Мероприятие 1.4. Создание второго прототипа модуля мощностью 10 ПВт.
- Мероприятие 1.5. Фазировка двух модулей.
- Мероприятие 1.6. Увеличение мощности модулей до 15 ПВт.

- Мероприятие 1.7. Создание ускорителя электронов до энергии 20 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов.
- Мероприятие 1.8. Создание прототипа лазера с частотой повторения импульсов 1 кГц.
- Мероприятие 1.9. Создание и оснащение лаборатории для исследования взаимодействия излучения с веществом.

Описание работ в рамках этих мероприятий приводится ниже.



Рис. 3.1. Принципиальная схема 2-х канального прототипа субэкзаваттного лазера

Мероприятие 1.1. Строительство здания (3000кв.м.) и инженерных сетей

Для размещения двух прототипов 15 ПВт модулей потребуется здание общей площадью около 3000 кв. метров. Значительная часть этой площади должна быть обеспечена радиационной защитой персонала (см. *Задачу 8*). В ходе выполнения этого мероприятия планируется: определение требований к зданию, выбор места строительства, выбор проектной организации, разработка проекта здания, выбор строительной компании, строительство дорог, капитальное строительство, подключение и ввод инженерных коммуникаций и оборудования, отделочные работы, оснащение необходимым оборудованием и ввод здания в эксплуатацию.

После этого в здании будут проведены работы, описанные в *Мероприятиях 1.2-1.9*.

<u>Мероприятие 1.2.</u> Создание общей стартовой части

Общая схема стартовой части

Стартовая часть прототипа двух 15 ПВт лазерных модулей является как источником широкополосного сигнального излучения (910 нм) на входе в оконечный параметрический усилитель (обеспечивая формирование пространственновременной структуры излучения), так и источником сигнала для синхронизации Nd:glass лазерного усилителя с апертурой 30х30 см, поскольку прецизионная синхронизация накачки и сигнала является ключевым требованием для ОРСРА.

Для уменьшения линейных и нелинейных искажений фазы сигнала в оконечных параметрических усилителях, а также с точки зрения технологии роста кристаллов, разумным представляется, что длина нелинейного элемента не должна превышать 4-5 см. Проведенные расчеты показывают, что энергия сигнала на входе в усилитель должна лежать в диапазоне 20-40 Дж (см. рис. 3.2). Это значение близко к энергии сигнального излучения на выходе последнего параметрического усилителя в системе "PEARL" [18]. Таким образом, стартовая часть 2-х канального усилителя в плане формирования широкополосного сигнального излучения может быть построена на основе уже опробованной оптической схемы. Далее приводится краткое описание лазера "PEARL" с небольшими изменениями, которые будут внесены при создании стартовой системы.



Рис.3.2. Зависимость оптимальной длины нелинейного элемента оконечного параметрического усилителя от энергии сигнала на его входе



Рис.3.3. Принципиальная схема стартовой части 2-х канального прототипа 200 ПВт лазера

Стартовая часть прототипа двух 15 ПВт лазерных модулей основана на трех параметрических усилителях. Ее принципиальная схема приведена на Рис. 3.3.

Задающим фемтосекундным генератором служит хром-форстеритовый лазер, генерирующий 40 фс импульсы с энергией 2 нДж на центральной длине волны 1250 нм. Стретчер 1, имеющий полосу пропускания 1000 см⁻¹, растягивает 600 пс. длительность импульса до Источником накачки первых двух параметрических усилителей (ОРА1 и ОРА2) служит вторая гармоника излучения одномодового одночастотного Nd:YLF-лазера с длиной волны 527 нм и энергией до 1 Дж в импульсе 1.2 нс [20]. Интенсивность накачки на входе в ОРА1 и ОРА2 имеет почти постоянное распределение в поперечном сечении и составляет порядка 1 ГВт/см². Двухступенчатая схема величину синхронизации [21] обеспечивает одновременное (с точностью до ~ 50 пс) прохождение импульса излучения накачки и импульсов усиленного излучения в нелинейных кристаллах OPA3 параметрических усилителей. накачивается второй гармоникой шестикаскадного Nd:glass усилителя [22]. Часть основной гармоники излучения Nd:YLF-лазера подается на вход этого усилителя, который работает с периодом повторения один выстрел в 10 минут и обеспечивает на выходе импульсы длительностью 1 нс с энергией 300 Дж на основной длине волны. Энергия импульса излучения второй гармоники достигает 180 Дж (подробности см. ниже).

Усилитель OPA1 собран по двухпроходной схеме. На первом проходе OPA1 осуществляет широкополосное усиление чирпированных импульсов на длине волны 1250 нм; при этом одновременно рождаются импульсы излучения на сопряженной длине волны 910 нм. На втором проходе через OPA1 усиливается именно это излучение с длиной волны 910 нм. В дальнейшем мы будем называть инжектируемое излучение на 1250 нм холостым, а излучение на 910 нм – сигнальным.

Энергия сигнала на выходе OPA1 составляет 1 мДж. Для улучшения контраста скомпрессированного импульса на выходе прототипа, сигнальное излучение после OPA1 компрессируется и проходит через XPW (Cross polarized wave) фильтр, затем вновь стретчируется и усиливается в OPA2.

После ОРА2, энергия импульса достигает 100 мДж. После ОРА2 сигнальное излучение проходит через пространственный фильтр, линию задержки и расширяющий телескоп и направляется на ОРА3.

В случае возбуждения сигнала холостой волной требования К дисперсионным характеристикам стретчера существенно меняются. При этом в процессе трехволнового взаимодействия у холостой и сигнальной волн чирп имеет противоположный знак – и, таким образом, при переходе от холостой волны к сигнальной происходит обращение чирпа [23]. В этом случае квадратичная дисперсия системы стретчер-компрессор равна нулю, если дисперсии второго порядка стретчера и компрессора являются идентичными. Что же касается кубической дисперсии системы, то она может обращаться в нуль при условии, что третьи производные фазового набега в стретчере и компрессоре противоположны по знаку. Мы использовали оригинальную схему стретчера, которая включает в себя призменную пару между дифракционными решетками [17, 24]. При определенном выборе параметров (подробности см. в [25]), такой стретчер позволяет осуществлять эффективное сжатие импульса на длине волны 910 нм после параметрического усиления с использованием обычного решеточного компрессора 1.

В стретчере 2 используется стандартная схема [26] на антипараллельных решетках с переворачивающим изображение телескопом. Возможной альтернативой описанному выше источнику широкополосного излучения с центральной длиной волны 910 нм и энергией импульса ~ 100 мДж является стартовая часть 10 ПВт ОРСРА системы на основе лазера Vulcan [27].
<u>Компактный 200 Дж 527 нм лазер на неодимовом стекле для накачки</u> оконечного параметрического усилителя

Излучение частотно-импульсного Nd:YLF-лазера, описанного ранее в [20], направляется на вход усилителя на неодимовом стекле. Система усилителя включает в себя схему формирования пространственной структуры пучка, шестикаскадный лазерный усилитель на фосфатном стекле с неодимом, а также генератор второй гармоники. Усилитель состоит из пяти однопроходных усилителей, одного двухпроходного усилителя и транспортных телескопов. Чтобы избежать самовозбуждения усилителя используются изолятор Фарадея и клин из *х*-среза кристалла KDP. Пространственная структура пучка формируется с помощью диафрагменной линии. На выходе из диафрагменной линии излучение представляет собой ее собственную моду. Пространственное распределение и направление излучения на выходе линии изменяются незначительно при варьировании направления И поперечного распределения импульснопериодического Nd:YLF лазерного пучка.

Ключевая идея системы формирования пучка (подробно описанной в [20, 28]) состоит в том, что на выходе диафрагменной линии поле в области дифракции Френеля имеет конфигурацию, отличную от входной. Мы выбираем плоскость с большим фактором заполнения и передаем ее изображение в плоскость мягкой аподизирующей диафрагмы, состоящей из линзы из кристаллического кварца и поляризатора. Это препятствует образованию дифракционной кольцевой структуры.

Таким образом, выбирая геометрические параметры, мы обеспечиваем коэффициент заполнения 0,6 на входе усилителя с высоким коэффициентом передачи. Расширяющий Галилеев телескоп, добавленный в оконечный каскад линии, необходим для согласования диаметра пучка на выходе диафрагменной линии и диаметра 10 мм активного элемента (АЭ) на входе усилителя. Получение максимальной интенсивности в пучке на каждом усилительном каскаде требует контроля мелкомасштабной самофокусировки. Основной вклад в В-интеграл привносится на достаточно короткой длине на выходе стержней на неодимовом стекле, поскольку интенсивность излучения возрастает при его распространении через стержни. Вот почему увеличение усиления приводит к уменьшению В-интеграла, а также к увеличению интенсивности на выходе.

Мы используем "плотную упаковку" головок лазерных усилителей с диффузным керамическим отражателем (диаметром 30, 60, 85 и 100 мм).

Пластинка $\lambda/4$, расположенная перед 100 мм усилителем на неодимовом стекле используется для создания циркулярной поляризации в целях снижения В-интеграла [29-30].

Транспортные телескопы (пространственные фильтры) необходимы для согласования диаметров пучка с апертурой усилителей. Кроме того, они выполняют функцию ретрансляторов (уменьшая вариации интенсивности в АЭ, расположенных в сопряженных плоскостях телескопов Кеплера), уменьшают угол видения усилителей И ограничивают высокочастотную составляющую пространственного спектра пучка. Конструктивно транспортный телескоп представляет собой металлическую кювету, из которой откачан воздух до 10⁻³ Торр. Линзы служат окнами кюветы. В центре кюветы на миниатюрном трехкоординатном оптическом трансляторе установлена диафрагма, перемещаемая при помощи шаговых двигателей с минимальным шагом 6 мкм вдоль оптической оси и 2 мкм поперек. Управление двигателями осуществляется дистанционно при помощи аналогового устройства или компьютера.

Ключевыми вопросами в создании пространственных фильтров являются аберрации линз и фильтрация пространственных мод для подавления самовозбуждения усилителей и мелкомасштабной самофокусировки. Минимизация аберрации определяет форму линзы, в то время как эффективность фильтрации пространственных мод зависит от размера диафрагмы, подробности см. в [31].

На Рис. 3.4. показана типичная картина поперечного распределения интенсивности в ближнем дальнем поле пучка с энергией 300 Дж. И Распределение интенсивности в дальнем поле для основной гармоники получено С помощью объектива _ дуплета С фокусным расстоянием 300 см. скорректированным на сферическую аберрацию. Для генерации второй гармоники мы использовали 22.5 мм кристалл KD*P, вырезанный под синхронизм I типа (оое). Циркулярно-поляризованное излучение первой гармоники преобразуется в линейно поляризованное излучение с помощью $\lambda/4$ пластинки, размещенной за оконечным усилителем. Полная ширина фазового синхронизма для малого сигнала составляет величину ±1000 мкрад. Точность настройки оси кристалла ± 10 мкрад. Энергия импульса второй гармоники достигает 180 Дж при КПД преобразования 70%.



Рис. 3.4. Распределение интенсивности в пучке выходного излучения лазера на неодимовом стекле (300 Дж, фундаментальная длина волны) в ближнем и дальнем поле

Характеристика оконечного параметрического усилителя

Нелинейный элемент ОРАЗ представляет собой кристалл КD*Р без имеющий длину 80 мм и чистую апертуру 120 мм; степень покрытия, дейтерирования – на уровне 85%. Основные физические характеристики широкополосного оптического параметрического усиления в кристалле KD*P были исследованы нами на стартовой системе [12, 17]. Хотя третий параметрический усилитель выполняет только функцию масштабирования энергии системы, разовый режим работы лазера накачки требует выполнения специальной процедуры настройки ОРА 3. Эта процедура описана в [32]. Выходная энергия сигнального импульса и эффективность ОРА 3 приведены на Рис. 3.5. Представленные зависимости, а также временная форма импульса накачки, прошедшей через усилитель, показывают глубокое насыщение параметрического усиления. Максимальная энергетическая эффективность ОРА 3 составляет 23%. Относительно невысокая эффективность связана с колоколообразной временной огибающей импульса накачки. Прямоугольная форма импульса накачки во времени больше подходит для оконечного каскада параметрического усиления. Энергия чирпированных импульсов на выходе ОРА 3 достигает 38 Дж и достаточно стабильна от импульса к импульсу (см. Рис. 3.5). Из-за насыщения выходной спектр расширяется до 57 нм (FWHM). Типичные спектры представлены Рис. 3.6. сигнального Довольно хорошее качество пучка на излучения демонстрирует Рис. 3.7. Распределение интенсивности в дальнем поле измерялось в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием 5 метров.



Рис. 3.5. Энергия сигнального импульса на выходе ОРА 3 (треугольники) и энергетическая эффективность ОРА 3 (квадраты) в зависимости от энергии импульса накачки



Рис. 3.6. Спектры инжектируемого импульса в пересчете на длину волны сигнала (1), импульсы на выходе OPA2 (2) и OPA3 (3), полоса параметрического усиления в кристалле KD*P (5). Пунктирная линия (4) показывает интенсивность накачки, при которой усиливаются соответствующие спектральные компоненты сигнала



Рис. 3.7. Распределение интенсивности в пучке сигнального излучения на выходе ОРАЗ (38 Дж) в ближнем и дальнем поле

<u>Мероприятие 1.3.</u> Создание первого прототипа модуля мощностью 10 ПВт

Для получения выходной мощности 10 ПВт необходимая энергия импульса до компрессора должна быть 350 Дж. Учитывая, что мощность модуля будет увеличена до 15 ПВт (*Мероприятие* 1.6), необходимо эту цифру увеличить до 500 Дж. Для уменьшения линейных и нелинейных искажений фазы сигнала в оконечных параметрических усилителях, а также с точки зрения технологии роста кристаллов, разумным представляется, что длина нелинейного элемента не должна превышать 4-5 см. Проведенные расчеты (см. *Мероприятие* 1.2) показывают, что при энергии сигнала на входе в усилитель 20-40 Дж одного параметрического усилителя с апертурой не более 30х30 см достаточно для получения энергии сигнального импульса 500 Дж.

Создание модуля на основе двух последовательных параметрических усилителей уменьшает требования к лазеру накачки, но усложняет схему модуля и, главное, значительно затрудняет фазировку модулей, без которой невозможно достижение 200 ПВт уровня мощности. В то же время, современные достижения в создании лазеров на неодимовом стекле (см. ниже) позволяют удовлетворить требованиям к импульсу накачки даже в варианте модуля с одним параметрическим усилителем.

Исходя из вышеизложенного, модуль будет содержать только один параметрический усилитель. На Рис. 3.8. приведена принципиальная схема модуля и параметры излучения в ключевых точках. Стартовая система подробно описана выше (*Мероприятие 1.2*). Далее описаны ключевые элементы модуля: лазер накачки на неодимовом стекле, параметрический усилитель, компрессор, устройства увеличения контраста лазерного импульса, система уменьшения расходимости излучения на основе адаптивной оптики, система управления и диагностики.



Рис. 3.8. Схема модуля с выходной мощностью 10 ПВт

Разработка и создание лазера накачки

Для обеспечения на выходе параметрического усилителя энергии на уровне 350 Дж, которая после компрессии позволит достичь мощности лазера порядка 10 ПВт в одном канале, необходим импульс накачки с энергией на уровне 1.4 кДж на длине волны около 0.5 мкм при длительности лазерных импульсов 1.5 нс. При сегодняшнем уровне развития лазерной техники это осуществимо только в лазерах на неодимовом стекле с преобразованием во вторую гармонику. Активные элементы лазера должны быть выполнены в виде тонких слэбов, наклонённых к направлению распространения пучка под углом Брюстера. Для более эффективного использования энергии ламп накачки активных элементов (АЭ) лазера, лазерные пучки необходимо делать квадратными в сечении.

Оценки, основанные на данных о лучевой стойкости неодимового фосфатного стекла, на величине кубичной нелинейности стекла и экспериментальных данных по созданию лазерных установок килоджоульного уровня энергии, позволяют сделать вывод о необходимости использования световых пучков с апертурой порядка 25 см. Поскольку лазер накачки — одна из самых дорогостоящих составных частей, целесообразно сразу заложить в концепцию 10 ПВт модуля возможность увеличения мощности до 15 ПВт (*Мероприятие 1.6*). Для этого апгрейда необходимо увеличение энергии импульса лазера накачки до 2 кДж во второй гармонике. В связи с этим, наиболее целесообразным представляется использовать размер пучка 30 см, что, хотя и несколько больше, чем требуется для достижения мощности 10 ПВт, но зато не потребует замены многих дорогостоящих элементов при выполнении *Мероприятия 1.6*.

Таким образом, лазер накачки должен состоять из маломощного задающего генератора (ЗГ) с предварительным усилителем (ПУ) и силовых оконечных усилителей. Выходная энергия ПУ не должна превышать уровня энергии порядка 1-10 Дж. ЗГ и ПУ должны полностью сформировать пространственные и временные характеристики лазерного пучка с учётом последующих искажений характеристик в силовых каскадах лазера.

В России (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров) существует 4-канальная установка "ЛУЧ" с близкими параметрами, но с апертурой пучка 20 см [33]. Излучение второй гармоники одного из каналов используется для накачки параметрического усилителя петаваттной мощности [34].

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ стартовал проект многоканальной установки УФЛ-2М для управляемого термоядерного синтеза с суммарной энергией 2 МДж и апертурой пучка в каждом канале 40 см. В рамках Проекта ЦИЭС планируется широкое сотрудничество с проектом УФЛ-2М, что будет взаимовыгодным для обоих проектов. Создание лазера накачки параметрических усилителей – крупнейший пункт этого сотрудничества.

Во Франции вблизи г. Бордо работает лазерная установка LIL с параметрами, близкими к параметрам лазера накачки параметрических усилителей. В апертуре 37х37 см² каждый канал лазера LIL обеспечивает энергию до 15 кДж. Каналы сгруппированы в пучки по 4 штуки. Два пучка лазерных каналов LIL направляются в мишенную камеру. В камере все 8 пучков направляются на мишень для изучения условий, при которых может возникать управляемый термоядерный синтез. Установка LIL является прототипом мегаджоульного лазера LMJ. Всего в LMJ планируется ввести в строй 240 каналов с параметрами, идентичными параметрам лазера LIL.

На Рис. 3.9 приведён схематический вид одного канала установки LIL, а также схема одного канала лазера NIF (Ливерморская Национальная Лаборатория, США) – наиболее детально проработанная и апробированная схема подобного лазера.



Рис. 3.9. Схема одного канала установки LIL (сверху) и NIF (снизу)

Главная идея одного канала лазера NIF состоит в том, что в отличие от где апертура пучка традиционных схем мощных лазерных усилителей, расширяется по мере продвижения его вдоль по установке, сравнительно маломощный пучок выхода ПУ поступает сразу в усилители с предельной апертурой. Для того, чтобы эффективно снять запасённую в главном усилителе энергию, необходимо организовать достаточное количество проходов по усилителю. Это делается за счет помещения усилителя в резонатор, в котором предусмотрены схемы ввода и вывода излучения. Как видно из Рис. 3.9, схема ввода реализована через пространственный фильтр усилителя, а схема вывода осуществляется при помощи поворота поляризации излучения широкоапертурной ячейкой Поккельса с плазменными (прозрачными для лазерного пучка) электродами. Далее энергия излучения повышается в мощном усилителе до предельного значения, которое лимитируется пробойными характеристиками элементов лазера и мелкомасштабной самофокусировкой лазерного пучка в АЭ лазера.

На Рис. 3.10 показан общий вид разработанных и изготовленных в ИПФ РАН широкоапертурных ячеек Поккельса с плазменными электродами. При помощи плазменных электродов, прозрачных оптическом диапазоне, В удаётся эффективно высокое напряжение подводить К торцевым поверхностям плазменной ячейки Поккельса и управлять поляризацией лазерных пучков.



Рис.3.10. Общий вид плазменных ячеек Поккельса на апертуру 100х100 мм и 300х300 мм

Параметры одного канала лазера NIF и лазера накачки параметрического усилителя различаются, поэтому схему NIF можно взять за основу, но её необходимо доработать для параметров, необходимых лазеру накачки. В частности, в отличие от NIF, в нашем случае на выходе неодимового лазера

обеспечить временную огибающую близкую необходимо импульса, К прямоугольной с длительностью 1.5 нс [35]. Из-за высокого суммарного коэффициента усиления всего многокаскадного усилителя (более 10°) очены трудно рассчитать временной профиль входного импульса, обеспечивающий на прямоугольную форму. Поэтому необходимы выходе предварительные эксперименты с отдельным каналом накачки. В ходе этих экспериментов также необходимо будет уточнить количество слэбов в главном усилителе и в усилителе мощности.

На выходе лазера накачки, необходимо установить эффективный преобразователь излучения во вторую гармонику (1055 нм в 527.5 нм). Для этого понадобятся широкоапертурные (30х30 см) кристаллы KD*P. Такие же кристаллы необходимо использовать и в ячейке Поккельса для переключателя поляризации и в полуволновой пластинке, согласующей поляризацию излучения основной гармоники лазера с ориентацией кристалла преобразователя частоты лазера.

Также следует упомянуть о решенной, но, тем не менее, достаточно дорогостоящей задаче питания крупногабаритных импульсных ламп накачки Для эффективного усиления силовых усилителей лазера. излучения неодимовыми слэбами с апертурой 30х30 см, каждый слэб необходимо освещать 12 лампами с размером Ø4x30 см. С учётом необходимого количества слэбов в канале, учитывая, что в системе два канала, требуется 384 крупногабаритные лампы. Если эти лампы использовать с 40% нагрузкой, то понадобится накопитель с 5 МДж батареей. Такая батарея представляет собой достаточно габаритное и дорогое сооружение. Даже при использовании компактных, самовосстанавливающихся конденсаторов с удельной запасаемой энергией на уровне 0.5-1 Дж/см³, объём батареи будет 5-10 м³. Конденсаторы с такой удельной запасаемой энергией производят ряд зарубежных фирм. В России такие конденсаторы производятся под маркой К75-100 предприятием ЭЛКОД.

Разработка и создание параметрических усилителей

Оконечный параметрический усилитель каждого из двух каналов прототипа будет изготовлен из кристалла KD*P с чистой апертурой 30x30 см и толщиной 4-5 см. Необходимая для этого уникальная технология выращивания широкоапертурных нелинейно-оптических кристаллов KDP существует в ИПФ РАН.

Эта технология основана на методе скоростного роста профилированных моносекториальных кристаллов. Она явилась результатом научных исследований, ведущихся в течение нескольких десятилетий в ИПФ РАН. Данный метод позволяет получать оптические элементы с апертурой до 40×40 см и, что немаловажно для уникальной установки, содержащей десятки нелинейно-оптических кристаллов, почти на порядок уменьшить время роста по сравнению с классическим методом и минимизировать отходы кристалла при его обработке.

ИПФ РАН обладает производственными мощностями, необходимыми для нелинейно-оптических компонентов производства лазерных систем для обеспечения Проекта ЦИЭС (Рис. 3.11). Имеется линия механической обработки кристаллических заготовок, включая уникальные станки алмазного точения, установки для контроля монокристаллических заготовок И параметров шероховатости обработанной поверхности нанометровой точности.



Рис.3.11. Кристаллы КDP и DKDP, выращенные в ИПФ РАН. Кристаллы 1 – 3 размерами 365×400×50 мм выращены скоростным методом в ИПФ РАН в течение ~40 суток; 4 – кристалл KDP размерами 140×140×300 мм, выращенный традиционным методом в течение ~1 года.

Накачкой оконечного параметрического усилителя будет служить излучение второй гармоники неодимового лазера с апертурой 30х30 см, энергия излучения второй гармоники составит 2 кДж, при длительности импульса 1.5 нс (см. соответствующий раздел). Широкополосное сигнальное излучение с энергией 20 Дж при длительности ~0.9 нс, полученное в стартовой части около (Мероприятие 1.2), после расширяющего телескопа будет подаваться на вход усилителя. Излучения сигнала и накачки должны быть синхронизованы во 100 пс. времени с точностью порядка Контроль синхронизации будет осуществляться С помощью быстрых фотодиодов широкополосного И осциллографа.

Для получения широкополосного параметрического усиления в неколлинеарной геометрии трехволнового взаимодействия необходима настройка двух углов синхронизма, а именно - угла между направлением распространения излучения накачки и оптической осью кристалла и угла между направлениями распространения излучения сигнала и накачки. В процессе создания системы "PEARL" была разработана методика настройки указанных углов синхронизма основанная на наблюдении спектрально-угловой диаграммы распределения параметрической люминесценции [36]. Предложенная методика позволяет проводить независимую настройку углов синхронизма, что необходимо при разовом режиме работы лазера накачки. Эта методика была также применена при настройке оконечного параметрического усилителя канала «Фемта», созданного в рамках совместного проекта РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИПФ РАН [34]. Накачкой этого усилителя служило излучение установки «Луч», работающей с частотой повторения два лазерных импульса в день. Таким образом, юстировка оконечных параметрических усилителей 2-х канального прототипа будет осуществляться по хорошо отработанной методике.

Для оценки энергетических и спектральных характеристик оконечного усилителя было проведено численное моделирование процесса параметрического усиления. Расчеты проводились для указанных параметров излучения накачки и в предположении, что энергия сигнального излучения на входе в оконечный усилитель составляет 20 Дж, а его спектр имеет форму супергаусса 4-й степени с шириной 60 нм (при этом импульс сигнального излучения имеет такой же профиль при длительности 0.9 нс). Это хорошо согласуется с экспериментальными данными о спектре усиленного сигнала, полученными на установке "PEARL". При расчете предполагалось однородное поперечное распределение интенсивности в пучках сигнала и накачки, снижение эффективности усиления, связанное с неоднородностью пучка накачки, учитывалось умножением энергии сигнала на коэффициент 0.75. Адекватность такого подхода была подтверждена сравнением с экспериментальными данными при моделировании работы параметрического усилителя установки "PEARL". На Рис. 3.12. приведена зависимость энергии сигнала от длины нелинейного элемента. Насыщение усиления достигается при длине кристалла 4.5 см, энергия сигнала при этом составляет 500 Дж при эффективности преобразования 25%. Соответствующие такой длине нелинейного элемента импульс сигнала на выходе усилителя приведен на Рис. 3.13. Таким образом, результаты численного

моделирования подтверждают возможность усиления сигнального излучения до уровня энергии, необходимой для получения импульсной мощности в 15 ПВт после компрессии.



Рис. 3.12. Зависимость энергии сигнала от длины нелинейного элемента



Рис. 3.13. Импульсы излучения сигнала (красный) и накачки (синий) на входе (слева) и выходе (справа) конечного параметрического усилителя толщиной 4.5 см

Разработка и создание компрессора импульсов

Согласно основной цели Проекта ЦИЭС на выходе каждого из 12-ти каналов лазерного комплекса излучение будет иметь следующие параметры: мощность 15 ПВт, длительность импульса 25 фс, длина волны 910 нм, расходимость не более 3 дифракционных пределов. Формирование этих характеристик происходит в компрессоре сверхкоротких импульсов.

Компрессор является важнейшим элементом CPA (chirped pulse amplification) систем. В нем растянутый во времени усиленный лазерный импульс сигнального излучения сжимается до фемтосекундных длительностей. Дисперсия, внесенная стретчером при растяжении исходного сверхкороткого импульса, рождаемого в задающем фемтосекундном генераторе, здесь компенсируется, благодаря чему импульс укорачивается. При этом пиковая мощность импульса возрастает во

столько же раз, во сколько сжимается импульс. А именно, в Проекте будет компрессироваться чирпированный 500-джоульный импульс длительностью 1 нс до импульса длительностью порядка 25 фс. Неизбежные потери в компрессоре приведут к снижению энергии импульса до 400 Дж.

Основными оптическими элементами компрессора являются дифракционные решетки. За счет разности хода и большой угловой дисперсии спектральных компонент широкополосного импульса между двумя параллельно расположенными и повернутыми рабочими поверхностями друг к другу решетками такая система обладает рекордной на настоящий момент дисперсией групповых скоростей. Именно ДГС (GVD) приводит к изменению длительности импульса. При этом знаки ДГС в стретчере и компрессоре различны – эти устройства дополняют друг друга, компенсируя дисперсию.

Однако между стретчером и компрессором помимо принципиального различия в конструкции есть существенная разница: стретчер располагается в стартовой части системы, где оптическая нагрузка невелика. В отличие от него компрессор испытывает максимальные нагрузки – максимальные интенсивности излучения в схеме (не считая, естественно, мишени). Собственно, именно поэтому мощность сверхмощных лазерных комплексов ограничена стойкостью дифракционных решеток. Для предохранения решеток от разрушения в мультипетаваттном лазерном комплексе размер лазерного пучка в компрессоре будет увеличен до 400 мм в диаметре. Поскольку диаметр пучка в усилителе будет 300 мм, то перед компрессором будет располагаться расширяющий телескоп, образованный двумя сферическими зеркалами. Компрессор будет состоять из четырех дифракционных решеток (см. Рис. 3.14.).



Рис.3.14. Принципиальная схема компрессора. Решетки G-2 и G-3 изображены составными

Для нормальной работы 15 ПВт компрессора требуются дифракционные решетки, имеющие соответствующий (500 мм х 800 мм) размер. При энергии излучения в импульсе, приходящем на компрессор, 500 Дж, плотность энергии в

40 см пучке будет чуть больше 0.4 Дж/см². Такая величина близка к рекордным значениям для голографических покрытых золотом дифракционных решеток, работающих в долговременном режиме (десятки и сотни импульсов). Лучшую стойкость к оптическому излучению показывают решетки с диэлектрическим покрытием, однако здесь могут возникнуть проблемы с шириной полосы отражения, что может привести к увеличению длительности импульса выходного излучения. Вероятнее всего в компрессоре будут использованы составные решетки, аналогично используемым в Laboratory for Laser Energetics (LLE), University of Rochester (Рис. 3.15). Этот путь существенно облегчает положение, связанное С практическим отсутствием технологий изготовления крупногабаритных решеток, однако существенно усложняет систему настройки компрессора.



Рис. 3.15. (а) Компрессор OMEGA EP состоит из четырех решеток, каждая из которых является составной. Размер каждой составной решетки 1.41 м х 0.43 м. (b) Конструкция составной решетки и настраиваемые параметры. Рисунок взят из [37]

В процессе выполнения Проекта будут разработаны новые технологии производства габаритных дифракционных решеток различного типа с требуемой лучевой стойкостью и спектральными характеристиками. Особое внимание также будет уделено минимизации потерь энергии излучения на решетках, неизбежно отражающих свет в нулевой - зеркальный порядок. Предполагается, что коэффициент отражения решеток в первый (рабочий) порядок дифракции будет составлять 95%.

Интенсивность выходного излучения в скомпрессированном импульсе настолько велика, что при его распространении по воздуху на первых же сантиметрах начнутся нелинейные эффекты самофокусировки и дробления пучка,

что в свою очередь полностью разрушит пучок. Поэтому компрессор должен быть расположен в вакуумной камере (см. Рис. 3.16). Все оптические элементы компрессора, включая вспомогательную оптику, управляются дистанционно с помощью шаговых двигателей с точностью до нескольких угловых секунд и микрометров.

Вакуумная камера компрессора будет иметь размеры: длина 7 м, диаметр 2 м. Она будет изготовлена из нержавеющей стали или алюминия как более легкого материала. Наличие фланцев необходимого размера обеспечит как свободный доступ к компрессору при его настройке, так и возможность дистанционно контролировать состояние его оптических элементов, когда он находится под вакуумом. Выходное окно компрессора будет соединено вакуумным трактом с мишенной камерой. Таким образом, в едином объеме: компрессор – тракт – мишенная камера с помощью форвакуумных и турбомолекулярных насосов будет поддерживаться необходимый уровень вакуума (не хуже 10⁻⁶ Торр).





Рис. 3.16. Вакуумная камера компрессора петаваттных импульсов параметрического лазера во ВНИИЭФ (г.Саров), вид снаружи (слева) и изнутри (справа) [34]

Разработка и создание устройств увеличения контраста

Задачи по экспериментальному исследованию взаимодействия сверхсильных лазерных полей с газовыми и твердотельными мишенями определяют высокие требования к временному профилю интенсивности оптических импульсов. В первую очередь эти требования обусловлены необходимостью исключить возможность изменения физических характеристик мишени предвестниками сверхмощного излучения до прихода основного лазерного импульса.

Структура временного профиля интенсивности определяется методами генерации и усиления лазерного излучения. В частности, в лазерных комплексах на параметрического основе усиления чирпированных импульсов основными причинами являются: параметрическая суперлюминесценция, нескомпенсированная остаточная дисперсия высших порядков в импульсе, неполное отражение спектра дифракционными решетками стретчера и компрессора, а также случайный фазовый шум, связанный с неоднородностями оптических элементов. Временной профиль условно разделяют на три части: основной импульс, области ближнего (<1 пс) и дальнего контраста (>1 пс). Уровень дальнего контраста не должен превышать порога образования плазмы, для твердотельных мишеней эта величина составляет 10¹⁰ Вт/см².

В настоящее время разработано достаточно большое количество методов для повышения временного контраста фемтосекундного излучения. Основные из них – это нелинейная фильтрация с использованием вращения эллипса поляризации (NER) [38], применение полого волновода, заполненного благородным газом [39], использование оптических волокон с двулучепреломлением [40].

Для повышения временного контраста фемтосекундного излучения стартовой части лазерного комплекса наиболее обещающим является процесс генерации волны ортогональной поляризации вследствие влияния кубической нелинейности в кристалле. В результате взаимодействия интенсивного линейно поляризованного лазерного излучения с волной кубической поляризации, возникающей в кристалле, происходит генерация ортогонально поляризованного света. Интенсивность генерируемой волны пропорциональна третьей степени интенсивности входного излучения. Нелинейность процесса позволяет существенным образом повысить временной контраст и сократить длительность импульса. К примеру, для исходного гауссова импульса коэффициент компрессии равен √3. Более того, некогерентный шум не преобразуется в волну ортогональной поляризации. В качестве нелинейного элемента может использоваться кристалл фторида бария BaF₂, поскольку он обладает достаточно высоким значением анизотропного тензора кубичной нелинейности $\chi^{(3)}$, что способствует увеличению эффективности преобразования [41]. КПД такого процесса может достигать 33% [42]. Процесс генерации волны ортогональной поляризации с целью повышения временного контраста планируется применять в стартовой части сверхмощного фемтосекундного лазерного комплекса (см. Мероприятие 1.2).

В дополнение к указанным методам повышения контраста, связанным со стартовой системой, в Институте прикладной физики РАН активно исследуется возможность увеличения временного контраста у излучения петаваттного уровня мощности. В этом случае базовым физическим процессом является генерация второй гармоники основного излучения в сверхтонких (менее 1 мм) нелинейных элементах KDP с апертурой более 10 см. Последние экспериментальные исследования показали, что эффективность преобразования во вторую гармонику излучения с плотностью мощности в несколько ТВт/см² превышает 70% (см. Рис. 3.17). Теоретический анализ И результаты численного трехмерного моделирования позволили установить, что вследствие влияния эффектов само- и кросс- воздействия излучение на удвоенной частоте приобретает фазовую модуляцию, коррекция которой позволяет существенным образом сократить длительность [43]. Тем самым продемонстрировано, что процесс удвоения частоты сверхмощного излучения позволит значительно увеличить временной контраст, повысить пиковую мощность и интенсивность излучения, приходящего на мишень.



Рис. 3.17. Экспериментальная и теоретическая зависимости энергетической эффективности ГВГ в кристалле толщиной 1 мм от пиковой интенсивности импульса первой гармоники на входе в кристалл

Разработка и создание адаптивной оптики

Для большинства фундаментальных исследований на создаваемом комплексе ключевым требованием является максимальная интенсивность излучения, для достижения которой необходима фокусировка мощных импульсов в минимальное по размеру световое пятно. Согласно законам дифракции при достаточно острой фокусировке лазерный импульс может быть сфокусирован в пятно с размером порядка длины волны. Однако, в случае искажений фазового фронта, эффективный размер пятна фокусировки увеличивается, а интенсивность излучения в области перетяжки резко падает. Искажения фазового фронта лазерного излучения неизбежны при генерации импульсов с мощностью в десятки петаватт из-за нелинейных эффектов и из-за неизбежных аберраций в крупногабаритных оптических элементов. К существенным искажениям фазы могут приводить также тепловые эффекты, возникающие из-за неравномерного нагрева оптических элементов при прохождении лазерного излучения.

Корректировка фазового фронта базируется на использовании современного арсенала адаптивной оптики. Огромный опыт в данной области имеется в ИПЛИТ РАН, где разработана технология деформируемых зеркал с пьезоэлектрическими приводами распределенного действия и созданы системы датчиков волнового фронта, управляющих формой поверхности зеркала в режиме обратной связи в реальном времени. Эти устройства с успехом используются во многих крупных лазерных лабораториях в мире, в том числе в Институте квантовой оптики Макса Планка в Гархинге (Германия), Университете г. Лаваль (Канада) и др.[44-46].

Опыт создания систем петаваттного уровня мощности показывает, что фазовый фронт излучения на выходе обладает случайной модуляцией с пространственным масштабом более одного сантиметра и амплитудой до нескольких длин волн. Такие искажения фазы наиболее проблематичны, поскольку не могут быть отфильтрованы пространственными фильтрами без существенных потерь энергии лазерного импульса. Однако, адаптивная система коррекции на базе деформируемого зеркала может с высокой точностью компенсировать искажения с таким масштабом и амплитудой, включая тепловые искажения фазы в оптических элементах [47]. Интенсивность излучения после компенсации может увеличиться на один-два порядка. Пример подобной коррекции приведен на рисунке 3.18.



Рис. 3.18. Примеры использования устройств адаптивной оптики ИПЛИТ РАН: возрастание пиковой интенсивности в фокусе в 10 раз при включении адаптивной системы (Университет г. Лаваль) – слева; гомогенизация распределения интенсивности на поверхности дифракционной решетки для уменьшения световой нагрузки в оптическом компрессоре лазерной системы ATLAS (Институт квантовой оптики Макса Планка) – справа

Для удобства транспортировки и коррекции излучение каждого из 12 каналов масштабируется от 40 см на выходе из компрессора до апертуры 20 см при помощи зеркального телескопа. После этого излучение подается на деформируемое зеркало, которое вносит фазовые искажения, равные исходным искажениям волнового фронта, только с противоположным знаком. Обратная связь может быть реализована как через датчик волнового фронта, использующий ослабленное излучение, прошедшее через одно ИЗ зеркал с высоким коэффициентом отражения, либо напрямую – через оптимизацию пятна фокусировки. Последний вариант не может быть реализован в режиме реального времени и подразумевает долгую (несколько тысяч итераций) процедуру оптимизации формы деформируемого зеркала. Однако он является более эффективным и позволяет дополнительно компенсировать геометрические аберрации в фокусирующей оптической системе. В зависимости от задач эксперимента может быть использован любой из этих вариантов обратной связи.

Разработка и создание систем управления и диагностики

Наличие диагностики у сложной лазерной системы позволяет в любой момент (в том числе и непосредственно перед началом эксперимента) оценить состояние системы: готовность к работе или наличие проблем в отдельных узлах, а также готовность системы в целом к выполнению лазерного «выстрела». Более того, диагностика позволяет эффективно управлять экспериментом, делать это быстро и гибко. Использование автоматизации позволяет существенно увеличить число контрольных точек, количество которых может достигать нескольких тысяч. К примеру, на лазерном комплексе NIF число контролируемых элементов составляет 60000 [48].

Система диагностики и система управления являются важной частью любой физической установки, но в столь уникальной и масштабной установке, как 200 ПВт лазерный комплекс, эти системы приобретают особую значимость. Им посвящены соответственно *Мероприятия 3.6 и 3.7.* В то же время, уже на 10 ПВт системе – прототипе первого модуля лазерного комплекса – будут отработаны ключевые элементы систем диагностики и управления лазером (*Мероприятие 1.3.*).

Основные задачи систем диагностики и управления лазерным комплексом удобно рассмотреть в привязке к этапам выполнения эксперимента. В Проекте предполагается, что практически все описанные ниже операции выполняются в автоматическом режиме.

<u>Этап I.</u> Подготовительный – выполняется до начала эксперимента.

1. Контроль качества оптических элементов (на наличие пробоя проходных элементов, зеркал, решеток, др. оптики), а также других элементов лазера, например, ламп накачки квантронов усилителя.

2. Контроль прохождения пучков излучения накачки, сигнального излучения через всю схему (с использованием излучения юстировочных лазеров, генерирующих на соответствующей длине волны). При этом подача команд, включение светового табло, предупреждающего о наличии юстировочного излучения.

При необходимости – подстройка в автоматическом режиме.

В случае возникновения нештатной ситуации – подача соответствующих команд и предупреждений о необходимости вмешательства оперативного персонала для юстировки системы.

3. Контроль качества пучков – заполнение апертуры, качество переноса изображения, коллимированность излучения, направление распространения пучков.

4. Контроль фокусировки излучения на мишень.

5. Контроль работы стартовой части лазерного комплекса.

6. Контроль настройки компрессора.

(Для пунктов 3-6 – Подстройка в автоматическом режиме; в случае нештатной ситуации – вмешательство оперативного персонала.)

Этап II. Задание параметров эксперимента.

1. Задание количества рабочих каналов.

2. Заказ энергии в каждом канале лазерной системы.

3. Задание длительности компрессированного импульса.

4. Подключение диагностики (измерителей энергетических, спектральных и др. характеристик, осциллографов и т.п.), выбор режима работы измерительной аппаратуры.

5. Установка необходимых фильтров оптического излучения, блокировок оптического излучения.

<u>Этап III.</u> Эксперимент.

1. Контроль включения и выключения необходимых блокировок (оптических, электрических и т.д.), световых щитов, отключения и блокировки юстировочных и зондирующих лазеров и т.п.

2. Контроль наличия персонала в эксплуатационном (мишенном) зале.

3. Контроль включения измерительной аппаратуры, в том числе – приборов радиационного контроля, компьютеров и т.д.

4. Проверка связи – для подачи звуковых команд и сигналов.

5. Проверка готовности персонала, задействованного в эксперименте.

6. Отдача команды - разрешения на проведение эксперимента.

7. Зарядка накопительных батарей с необходимыми временными задержками - по схеме проведения эксперимента, и т.д.

8. Пуск (автоматический или ручной) – «выстрел».

9. Автоматическое сохранение всех измеренных параметров эксперимента. Предварительная обработка. Отправка данных в архив. Выполнение статистической обработки данных.

10. Информация о результатах: основные параметры, отказы и т.д.

<u>Этап IV.</u> Окончание эксперимента.

1. Информация о сохранении параметров эксперимента.

2. Проверка экспресс - датчиков радиационного контроля.

3. Срабатывание системы заземлений, блокировок и т.д.

4. Информация о радиационной, электрической, оптической безопасности.

 При возможности и необходимости – разрешение на вход в экспериментальный зал.

6. Объявление об окончании эксперимента.

Мультипетаваттный лазерный комплекс состоит их стартовой части, а также 12 однотипных лазеров мощностью 15 ПВт. Каждый из этих лазеров представляет собой систему, основными крупными составными частями которой являются: лазерный канал системы накачки параметрических усилителей, каскады параметрического усилителя, компрессор чирпированных импульсов.

Более детальное описание системы управления и диагностики этих составных частей приводится ниже в Задаче 3 (*Мероприятия* 3.6 и 3.7).

<u>Мероприятие 1.4.</u> Создание второго прототипа модуля мощностью 10 ПВт

После апробации работы 10 ПВт модуля будут разработаны рекомендации по улучшению его работы, повышению надежности, стабильности и воспроизводимости основных параметров излучения. С учетом накопленного опыта будет создан второй прототип. Основная цель создания второго прототипа – это проведение экспериментов по фазировке двух модулей на максимальной мощности излучения. Проблема фазировки модулей является краеугольной для всего Проекта, подробно она описана в следующем разделе (*Мероприятие 1.5*).

<u>Мероприятие 1.5.</u> Фазировка двух модулей

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ в области фазировки лазерных модулей (каналов) [49-52], работ по фазировке импульсов с огромной энергией (сотни Дж) и с длительностью порядка десятка периодов лазерного поля нам не известно. Это связано, на наш взгляд, с двумя ключевыми физическими проблемами: широкополосностью излучения и с разовым режимом работы лазера (один импульс в минуту или даже десятки минут). Первая делает невозможным применение широко развитых методов фазировки, основанной на нелинейной оптике, а вторая значительно затрудняет использование линейной адаптивной оптики. В непрерывном режиме разность фаз между пучками должна быть тщательно измерена и скорректирована через петлю обратной связи, чтобы обеспечить когерентное сложение электрических полей. В фемтосекундном режиме групповая и фазовая задержки имеют принципиально разное значение и должны рассматриваться независимо. Поскольку длительность 25 фс импульса существенно больше периода поля, групповая задержка может быть подстроена с очень медленной обратной связью (практически можно считать ее статической), а фазовая задержка должна корректироваться динамически, причем весьма быстро. Важное отличие фазировки фемтосекундных импульсов от наносекундных – учет дисперсии групповых скоростей, которая влияет на форму импульса, и, следовательно, должна быть одинаковой во всех модулях, чтобы обеспечить хорошее перекрытие импульсов.

Распространение двух лазерных пучков относительно друг друга характеризуется направлением их волновых векторов, положением, поляризацией временной задержкой. Чтобы достичь максимальной интенсивности в И фокальной плоскости, направление волновых векторов лазерных пучков должно быть одинаковым. При фокусировке идеальной линзой положение лазерных пучков относительно друг друга не очень важно, и мы его рассматривать не будем. Обычно поляризацию легко подстроить с помощью поляризаторов и волновых пластинок, но для мощных фемтосекундных импульсов она задается ориентацией дифракционных решеток (ее легко сделать одинаковой во всех модулях), и главная задача – сохранить ее до области взаимодействия. В то же время, задержка между импульсами лазерных модулей существенно влияет на интенсивность суммарного поля и требует очень точной подстройки.

Изменение длины оптического пути в одном из модулей на полдлины волны полностью разрушит фазировку – вместо того чтобы интерферировать в фазе и складываться поля будут интерферировать в противофазе и вычитаться. Для обеспечения более 90% от максимально возможной пиковой интенсивности необходимо, чтобы направления волновых векторов двух пучков отличались не более чем на ±0.7 микрорадиан, а временной джиттер между двумя импульсами должен быть меньше чем $\lambda/10$. Другими словами, импульсы должны быть сфазированы с погрешностью менее ±90 нм.

Режим редко повторяющихся (минуты) импульсов также накладывает свои трудности при фазировке. Дело в том, что для работы линейной адаптивной оптики (в отличие от нелинейной) нужен сигнал обратной связи, позволяющий в

реальном времени "выравнивать" оптические длины пробега света в различных модулях. Очевидно, что полученная при предыдущем (т.е. минуты назад) импульсе информация безнадежно устаревает. Следовательно, единственно возможная стратегия – выровнять оптические длины пробега света в модулях непосредственно перед выстрелом. Однако нет гарантии, что этот баланс сохранится и в момент импульса, т.к. огромная энергия направляется в виде накачки на параметрические усилители (кристаллы KD*P). Если усилители во всех модулях абсолютно идентичны, то, конечно, оптические длины изменятся абсолютно одинаково и, следовательно, их равенство не нарушится. Однако на практике представить себе одинаковость большого числа усилителей и особенно большого числа лазеров накачки этих усилителей довольно трудно, учитывая, что суммарная энергия всех лазеров накачки – десятки килоджоулей. Основные физические механизмы изменения длины оптического пути в параметрических усилителях на кристаллах KD*P – это выделение тепла в кристалле, нелинейный набег фазы, вызванный как квадратичной, так и кубической нелинейностью.

Как уже указывалось выше, длины оптических путей в модулях должны быть одинаковы с точностью не хуже, чем λ/10. В то же время, даже сформулировать (и тем более - экспериментально проверить) требование на одинаковость лазеров накачки довольно трудно, т.к. связь энергии накачки с изменением длины оптического пути весьма сложна и зависит от многих параметров. Грубые оценки показывают, что отличие интенсивности импульсов накачки должно быть порядка 1%. Мы предполагаем как теоретическое, так и экспериментальное исследование эффекта изменения длины оптического пути в усилителях на KD*P за время действия накачки. Это позволит окончательно определить требования на одинаковость фазируемых модулей.

Таким образом, фазировку лазерных модулей можно разбить на два этапа – медленный и быстрый. На первом этапе, используя излучение пилотного лазера, работающего с большой частотой повторения, осуществляется компенсация статической разности длин оптического пути в каналах, а также медленных изменений этих длин. Статическая разница возникает из-за геометрической из-за неидентичности дифракционных разности хода, а также решеток компрессоров. Последняя причина представляет наибольшую трудность, поскольку на абсолютную фазу пучка может влиять неодинаковая плотность штрихов, их наклон, а также фаза этих штрихов. Для прецизионного контроля потребуется юстировать решетки по всем шести степеням свободы.

Эксперименты, проведенные в [53], продемонстрировали когерентное сложение пучков двух фемтосекундных волоконных СРА-усилителей, излучение в которые инжектировалось общим генератором. При использовании обратной связи достигнута эффективность суммирования 95%. Пространственно-временные параметры излучения генератора сохранились, и суммированный импульс имел длительность 230 фс.

Для получения сигнала обратной связи необходимо измерение разности фаз между каналами. В литературе описано несколько методов. Отметим, например, работы [53-55]. В частности, в [55] разработан метод когерентного сложения двух пучков в дальней зоне со спектральным разрешением. Этот метод может быть использован и при когерентном сложении большего количества лазерных пучков. Метод позволяет измерить разницу в направлениях волновых векторов в одной плоскости. Используя аналогичную вторую измерительную систему, можно получить информацию и о разнице волновых векторов в другой плоскости. В [56] с помощью этого метода продемонстрировано когерентное сложение двух мультитераваттных пучков, каждый из которых компрессировался на своей дифракционной решетке в 'мозаичном' компрессоре.

Таким образом, фазировка двух мультипетаваттных модулей хотя и представляет собой сложную, не решенную на сегодняшний день проблему, вполне может быть осуществлена с помощью либо уже развитых методов, либо еще более эффективных новых методов, которые появятся в результате исследований.

Мероприятие 1.6. Увеличение мощности модулей до 15 ПВт

На сегодняшний день создание одного модуля с выходной мощностью более 10 ПВт представляется проблематичным из-за ряда ограничений, связанных, главным образом, с ограниченной лучевой стойкостью дихроичных зеркал и дифракционных решеток. Более того, необходимая для надежного достижения такой мощности энергия сигнального импульса должна быть увеличена. В связи с этим, первоначально (в сжатые сроки) мы планируем создание двух прототипов с мощностью 10 ПВт (*Мероприятия 1.3 и 1.4*) и последующее увеличение мощности в полтора раза.

Это увеличение будет достигнуто за счет увеличения энергии накачки, за счет повышения КПД финального параметрического усилителя, за счет повышения стойкости решеток или увеличения их площади (в том числе в

мозаичной геометрии), за счет укорочения длительности импульса с помощью нелинейного уширения его спектра после компрессора и последующего сжатия дисперсионными зеркалами. В ближайшие годы следует ожидать существенного прогресса по многим (если не по всем) из указанных направлений, поэтому увеличение мощности в полтора раза выглядит вполне реальным. В то же время, быстрое создание 10 ПВт модуля позволит начать работы по их фазировке (*Мероприятие 1.5*), а также начать проводить исследования по взаимодействию излучения с веществом (Цель 2) задолго до достижения мощности 15 ПВт.

На рисунке 3.19 представлена схема двух 15 ПВт модулей и параметры лазерного излучения в ключевых точках.



Рис. 3.19. Схема двух модулей с мощностью 15 ПВт каждый

<u>Мероприятие 1.7.</u> Создание ускорителя электронов до энергии 20 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов

Одно из направлений исследований в ЦИЭС – это взаимодействие мощного лазерного излучения с пучками (сгустками) заряженных частиц. Эти сгустки могут создаваться при воздействии мощного лазерного излучения на мишень, что обеспечивает их синхронизацию с лазерным импульсом, однако качество таких частота повторения ограничена. СГУСТКОВ не велико И Использование традиционного источника электронов на основе СВЧ резонаторов позволяет получить электронные сгустки хорошего качества, а использование фотокатода – синхронизовать электронный пучок с лазерным импульсом. Энергия электронного сгустка – 100 МэВ – выбрана исходя из требований к параметрам электронного

сгустка для инжекции в лазерно-плазменный ускоритель. Создание такого источника на прототипе представляется чрезмерно дорогим и громоздким. В то же время, источники электронов с энергией 20 МэВ более доступны, но позволяют проводить уникальные эксперименты по инжекции электронов в лазерно-плазменный ускоритель.

Основными элементами ускорителя являются фотоинжектор (RF-пушка с фотокатодом) и лазерный драйвер фотокатода, которые позволяют обеспечить синхронизацию источника электронных банчей с лазерным импульсом. Описание этих устройств с параметрами, планируемыми в Проекте, приводится ниже.

В качестве основных блоков ускорения в современных линейных ускорителях электронов применяют объёмные СВЧ резонаторы, работающие в диапазоне 1-3 ГГц, конфигурация которых имеет на оси Z – компоненту электрического поля. Это накладывает определённые требования на инжектор электронов в ускорителях. Инжектор электронов в ускорителях должен обеспечивать очень короткие, порядка 1-10 пс всплески электронов (банчи), двигающиеся строго в одном направлении и с одинаковыми скоростями. В фазовом пространстве координат - скоростей эти банчи должны занимать как можно меньше объёма. Другими словами, эмиттанс электронных банчей должен быть минимальным. Такие электронные пучки имеют максимальную яркость и востребованы в современных приложениях. В первую очередь в рентгеновских лазерах на свободных электронах, коллайдерах и др.

К числу наиболее перспективных инжекторов, эмитирующих электронные банчи с низким и ультранизким эмиттансом можно отнести фотоинжекторы. В таких инжекторах электроны из катода выбиваются при помощи коротких лазерных импульсов, частота следования которых должна с высокой точностью подстраиваться под СВЧ излучение клистрона, питающего резонатор инжектора. Хорошо известны фотокатоды, позволяющие с приемлемой эффективностью испускать банчи электронов с зарядом до нескольких нКл на протяжении длительного срока. На Рис. 3.20 приведена такая зависимость для CsTe фотокатода, облучаемого пикосекундными лазерными импульсами с длиной волны вблизи 0.25 мкм. Как видно из этого рисунка, через несколько дней эксплуатации фотокатода, его эффективность снижается до 1%, но остаётся на этом уровне в течение длительного срока.



Рис. 3.20. Зависимость квантовой эффективности CsTe фотокатода

СsTe фотокатод представляет собой тонкую (порядка нескольких нм) плёнку, нанесенную на металлическую подложку. Технология производства таких катодов освоена в нескольких организациях (CERN, KEK и др.). Специфика использования таких фотокатодов требует хранения катодов в вакууме. Поэтому катоды либо изготавливают в самом фотоинжекторе, либо отдельно от него в вакуумном объёме. В этом случае изготовленные катоды не перенося через воздух, их помещают в небольшой вакуумный контейнер и переносят в фотоинжектор. В инжекторе, в условиях вакуума при помощи робота контейнер открывается и устанавливается на постоянное место.

На Рис. 3.21 схематически показано устройство фотоинжектора. Как видно из этого рисунка, выбитый из фотокатода электронный банч, в полуторном СВЧ резонаторе ускоряется до энергий 4.6 МэВ.



Рис. 3.21. Устройство фотоинжектора

Как показывают расчёты, для нормальной работы линейного ускорителя электронов, в каждом электронном банче заряд электронов должен быть 3-10 нКл. Это накладывает требования на энергию каждого лазерного импульса при 1% эффективности катода на уровне 1.4-4.7 мкДж.

Лазерный драйвер фотокатода – лазер, удовлетворяющий требованиям фотоинжектора. Для эффективной работы ускорителя электронов, все электронные банчи должны быть сгруппированы в макроимпульсы банчей, идущие с частотой повторения 1-50 Гц. Количество требуемых банчей в макроимпульсе в разных задачах колеблется от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч. Длительность макроимпульсов 1-1000 мкс. Эти параметры накладывают требования и на лазерный драйвер.

Ниже описывается лазерный драйвер. изготовленный нами для фотоинжектора установки STF (КЕК, Цукуба, Япония). Полный список требований на лазерный драйвер в Табл. 1. Выходные каскады драйвера выполнены на базе стержневых усилителей С ламповой накачкой. Задающий генератор, предварительные усилители, а также система формирования огибающей цугов импульсов в лазере изготовлены на основе оптического волокна.

Длительность макроимпульса	900 мкс
Фронты макроимпульса	0.3 мкс (по уровню 0.1-0.9)
Контраст (отношение мощности импульсов шума к мощности микроимпульсов) вне 50 мкс	1:500
Длительность микроимпульса	8-12 пс
Среднее квадратичное отклонение (СКВ) длительности микроимпульсов	1%
Частота следования микроимпульсов	2.708 МГц +/- 1.3 КГц с флуктуацией 50-100 Гц
Число микроимпульсов в макроимпульсе	2437
Длина волны	260-266 нм
Энергия микроимпульса	1.4 мкДж
СКВ энергии микроимпульсов (10 последовательных импульсов)	3%
СКВ энергии микроимпульсов (во всем 900 мкс импульсе)	10%

Таблица 1. Требования для лазерного драйвера фотоинжектора KEK-STF

На Рис. 3.22 показана оптическая схема лазерного драйвера. Как видно из рисунка, драйвер состоит из волоконной части (волоконного ЗГ, акустооптического модулятора (AOM) и двух предусилителей), схемы формирования пучка (пространственного фильтра и "мягкой" диафрагмы), двухпроходного двухкаскадного стержневого Nd:YLF усилителя с вращателем Фарадея (ВФ) и генераторов второй и четвертой гармоник (ГВГ и ГЧГ).



Рис. 3.22. Оптическая схема лазерного драйвера

Как видно из таблицы 1, кроме постоянства энергии микроимпульсов в каждом макроимпульсе, достаточно жесткие требования предъявляются к частоте следования микроимпульсов. Это определило выбор волоконного типа лазера для задающего генератора. В волоконном генераторе с активированным иттербием волокном, работающем в режиме самосинхронизации мод без модуляции добротности, частота повторения импульсов очень стабильна и определяется только оптическим путём излучения в резонаторе. Подстраивать эту частоту под частоту клистрона ВЧ ускорителя при помощи механического растяжения волоконного резонатора лазера также достаточно удобно.

Синхронизация мод осуществляется при помощи полупроводникового насыщающегося зеркала SESAM. Для изменения частоты следования импульсов излучения в линейный резонатор ЗГ введены элементы, изменяющие его длину. Грубое изменение частоты осуществляется при помощи воздушного зазора в резонаторе, а тонкая подстройка – за счет растяжения активного волокна резонатора на пьезоцилиндре. Пределы грубой настройки 40.65-40.585 МГц, т.е. ±32 кГц, в то время как тонкая настройка изменяет частоту в пределах ±230 Гц при подаче на пъезоцилиндр напряжения ±200 В. При этом напряжение 23 В на пьезоцилиндре соответствует одному шагу линейного транслятора. Обе эти подстройки легко включаются в автоматизированный цикл настройки частоты с привязкой к стандарту частоты, либо к внешнему сигналу, например, ВЧ сигналу резонатора фотоинжектора.

Частота повторения лазерных импульсов в волоконном лазере флуктуирует в очень узком интервале – около 10 Гц. Средняя частота повторения импульсов после получасового прогрева изменяется незначительно и только в случае изменения температуры окружающей среды. Средняя выходная мощность ЗГ составляет 2 мВт, что соответствует энергии микроимпульса 50 пДж. Флуктуации средней мощности в течение 4 часов не превышали ±0.5%. Длительность микроимпульсов составляет 10 пс.

Волоконный ПУ, также как и волоконный ЗГ, изготовлен на основе активного иттербиевого световода с волоконной накачкой. Между двумя каскадами усиления (Рис. 3.22) установлен АОМ, выполняющий следующие функции. Во-первых, пропуская каждый пятнадцатый импульс, он снижает частоту повторения импульсов до величины 2.708 МГц. Во-вторых, АОМ формирует из непрерывной последовательности импульсов излучения прямоугольные во времени макроимпульсы с длительностью 900 мкс. В-третьих, с его помощью происходит управление огибающей макроимпульса (см. далее). На выходе ПУ2 мощность микроимпульсов повышается до 1600 Вт.

Пиковая мощность излучения волоконного ПУ ограничивается в нашем случае кубичной самофокусировкой на уровне 1600 Вт, т.е. энергия в микроимпульсе на выходе ПУ2 составляет величину W = 16 нДж. Для повышения мощности излучения до требуемого уровня (Табл. 1) мы использовали два стержневых усилителя с активными элементами (АЭ) из Nd:YLF (диаметр 5 мм, длина 90 мм) с *π* – ориентацией.

Для получения прямоугольной формы выходного макроимпульса его предварительно надо исказить так, чтобы скомпенсировать временную неоднородность коэффициента усиления. Для этого в схеме управления АОМом заложена возможность управления его пропусканием во времени. Зная экспериментальную форму временной зависимости коэффициента усиления и плотность энергии входного излучения, можно рассчитать такую временную зависимость коэффициента пропускания АОМ, чтобы форма макроимпульса на выходе лазера была прямоугольной. Однако из-за неоднородности интенсивности излучения в плоскости сечения усилителя, эти расчёты не дадут требуемой точности. Поэтому мы использовали итерационную процедуру компенсации временной неоднородности коэффициента усиления. На каждой итерации измерялось среднеквадратичное отклонение мощности макроимпульса от средней мощности. Одна итерация занимала 10-20 макроимпульсов. Коррекция заканчивалась, если среднеквадратичное отклонение формы макроимпульса от плоской не превышало 2%.

Получение четвертой гармоники излучения лазера достигается в два этапа: удвоения и учетверения частоты (ГВГ и ГЧГ). По совокупности трёх параметров, характеризующих кристалл: эффективного параметра нелинейности, ширины углового синхронизма и ширины частотного синхронизма, наиболее подходящим для ГВГ является кристалл КТР. Как видно из рисунка 3.23, максимальное значение эффективности преобразования излучения из основной гармоники во вторую гармонику составляет 55-60%.

При определении наиболее предпочтительного кристалла для ГЧГ кроме вышеупомянутых критериев эффективного преобразования ГВГ необходимо учитывать также сильное влияние теплового самовоздействия излучения четвёртой гармоники. В качестве источников тепла при тепловом самовоздействии выступают как линейное или двухфотонное поглощение излучения четвёртой гармоники, так и образующиеся в объёме кристалла центры поглощения. Причём последний фактор может оказаться особенно важным. После предварительных экспериментов в качестве преобразователя излучения в 4-ю гармонику мы выбрали кристалл ВВО. Как видно из Рис. 3.23, максимальная эффективность преобразования из первой в четвёртую гармонику составляет 27%, а из второй в четвёртую – 49%.



Рис. 3.23. Зависимость эффективности (а) и энергии микроимпульсов в гармониках от энергии микроимпульса в основной гармонике (б)

Как было сказано выше, из-за временной неоднородности коэффициента усиления оконечных стержневых усилителей, макроимпульсы, выходящие из волоконного усилителя, становятся двугорбыми. Для устранения ЭТОЙ особенности была разработана система формирования огибающей макроимпульса. Такая система при помощи АОМ управляет пропусканием каждого ИЗ 2437 импульсов. Сигналы управления вырабатываются микропроцессором при анализе огибающей макроимпульса, полученной с помощью цепочки: фотодиод – осциллограф – компьютер. Если для анализа использовать излучение первой гармоники, то заведомо прямоугольным будет импульс только для первой гармоники, но нет гарантии, что огибающая выходного излучения также сохранится прямоугольной. Это происходит из-за того, что эффективность преобразования в гармоники может изменяться на протяжении эффектов. макроимпульса вследствие тепловых Если скорректировать огибающую импульса первой гармоники, то огибающая импульса второй гармоники будет незаметно отличаться от прямоугольной даже при полной выходной мощности. Это говорит о слабом влиянии теплового самовоздействия в кристалле КТР при ГВГ. Однако при преобразовании второй гармоники в четвёртую это не так.





На Рис. 3.24 изображены две пары осциллограмм макроимпульсов: для случаев коррекции по импульсу первой и четвёртой гармоник. Из рисунка видно, что, если добиться хорошей формы импульса первой гармоники, то в импульсе четвёртой будет наблюдаться немонотонный спад. При коррекции по импульсу четвёртой гармоники можно получать прямоугольную форму этого импульса. Но в таком случае макроимпульс первой гармоники будет нарастающим во времени. Это несколько снижает эффективность системы в целом, но позволяет иметь прямоугольный макроимпульс.

Тестирование лазерного драйвера показало, что среднеквадратичное отклонение мощности, нормированное на его среднее значение равно 2.5% для первой гармоники, 3.6% для второй и 2.3% для четвёртой. На коротком отрезке времени порядка 3-х минут эта величина составила 0.5% для четвёртой гармоники.

Описанная выше лазерная система была изготовлена и протестирована в ИПФ РАН (Нижний Новгород, Россия), затем разобрана и перевезена в организацию КЕК (Цукуба, Япония). Там она была собрана, протестирована и сдана в эксплуатацию в состав строящегося прототипа Международного Линейного Коллайдера (установка STF) [57]. На Рис. 3.25 показан внутренний вид волоконного 3Г драйвера. Слева виден пъезобарабан, обеспечивающий плавную подстройку частоты следования микроимпульсов. Справа в нижнем углу размещён узел SESAM на линейном

трансляторе, обеспечивающий грубую подстройку частоты следования микроимпульсов. На Рис. 3.26 приведён общий вид всего лазерного драйвера. Подробнее лазерный драйвер описан в работах [58-59].



Рис. 3.25. Внутренний вид волоконного ЗГ лазерного драйвера



Рис. 3.26. Общий вид лазерного драйвера

<u>Мероприятие 1.8.</u> Создание прототипа лазера с частотой повторения импульсов 1 кГц

Прототип фемтосекундного (~20 фс) лазера с киловаттной средней мощностью и пиковой мощностью в десятки тераватт будет построен по следующей архитектуре: задающий генератор; стретчер; параметрические усилители на кристаллах ВВО или LBO; вакуумный компрессор и система фокусировки излучения на мишень.

Блок-схема лазера приведена на Рис. 3.27 Задающим генератором является оригинальный волоконный фемтосекундный лазер, разработанный в ИПФ РАН, генерирующий два сфазированных и сдвинутых по частоте фемтосекундных импульса на длинах волн ~ 1.8 мкм (20 фс, 1 нДж) и ~ 1 мкм (180фс, 100нДж) [60].



Рис. 3.27. Блок-схема лазера

Первый импульс будет являться усиливаемым сигналом; второй – выступать в роли накачки в параметрических усилителях. Для этого первый импульс, попадая на стретчер, растягивается до длительности ~ 5 пс. Второй импульс после стретчера и приобретает ~ 10 мДж регенеративного усилителя энергию в импульсе наносекундной длительности. Затем, второй импульс усиливается в криогенном дисковом усилителе КДУ1 до 0.5 Дж и делится на две части, каждая из которых усиливается до 3 Дж (каждый канал) в идентичных криогенных дисковых усилителях КДУ2 и КДУ3. После компрессирования и удвоения частоты обе части второго импульса выступают в качестве параметрической накачки в трех кристаллах ВВО. В результате параметрического усиления и последующего компрессирования первый импульс длительностью ~ 20 фс приобретает энергию 1 Дж.
Главным элементом прототипа лазера является параметрическая накачка. Остановимся на ней более подробно. В качестве лазерной накачки для параметрических усилителей используется вторая гармоника излучения оригинального лазера на дисковых активных элементах [61], выполненных из лазерной керамики Yb:YAG и охлаждаемых до криогенных температур. Инверсия в активных элементах осуществляется высокоэффективной диодной накачкой с волоконным выходом, работающей в непрерывном режиме.

Оптическая схема криогенного дискового лазера состоит из двух частей. Первая – предусилительная – КДУ1 обеспечивает импульс субджоульного уровня энергии и представляет собой 4-х проходный 2-х каскадный усилитель на активных элементах диаметром 15 мм и толщиной ~ 1 мм. На Рис. 3.28 изображен криостат прототипа квантового усилителя, разработанного в ИПФ РАН.

Вторая часть – два канала –идентичные криогенные дисковые усилители КДУ2 и КДУ3, представляющие собой 8-ми проходные 2-х каскадные усилители на композитных активных элементах диаметром 30 мм и толщиной ~ 1 мм. Мощность непрерывной диодной накачки на каждый активный элемент составит 6-8 кВт. Охлаждение активного элемента будет осуществляться как с торца, так и с боковой поверхности АЭ, для чего будет разработан проточный криостат с жидким азотом в качестве хладагента.



Рис. 3.28. Прототип оптического квантового усилителя

<u>Мероприятие 1.9.</u> Создание и оснащение лаборатории для исследования взаимодействия излучения с веществом

Исследование взаимодействия лазерного излучения с веществом будет проводиться не только на 200 ПВт лазере (*Задача 3*), но и в экспериментальной лаборатории на прототипе. Для этого будут созданы несколько мишенных камер, которые будут оснащены соответствующим оборудованием.

Цель проводимых экспериментов – моделирование (на относительно низкой мощности) экспериментов, планируемых в главной мишенной камере и отработка диагностического оборудования. В соответствии с этими требованиями будут проведены мероприятия по разработке концепции и созданию системы доставки лазерных пучков и электронного сгустка в лаборатории, а также оснащению экспериментальных лабораторий необходимым оборудованием.

Важно заметить, что эти исследования начнутся гораздо раньше, чем появится возможность проведения аналогичных экспериментов на 200 ПВт лазере.

Задача 2. Строительство зданий и инженерных сетей МЕГА-проекта

Здания ЦИЭС должны будут включать в себя:

- "чистые" • помещения для всего экспериментального оборудование: помещения для 200 ПВт лазерного комплекса и комплекса мощных фемтосекундных лазеров С высокой средней мощностью для инновационных приложений, тоннель для источника электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов, зал для главной мишенной камеры, лаборатории для экспериментальных исследований, зал для вычислительно-коммуникационного центра, инженерновспомогательные мастерские;
- инженерную инфраструктуру: котельная, трансформаторная, парковка и т.д.;
- помещения для сотрудников центра: офисы, конференц-залы, столовая, гостиничный комплекс.

Кроме мероприятий, направленных на проектирование и строительство, в *Задачу 2* входит мероприятие по выбору места строительства, отводу земельного участка и оформление соответствующих правовых документов. Эти работы уже ведутся совместно с Правительством Нижегородской области.

Предполагаемый внешний вид комплекса представлен на рисунке.



Задача 3. Создание 200 ПВт лазера

Мощность излучения 200 ПВт более чем на два порядка превышает мировой рекорд. Она будет обеспечивать превосходство создаваемой установки не только в момент ее создания, но и на многие годы вперед. Лазерный комплекс с выходной мощностью 200 ПВт является сердцем всего проекта, его создание – ключевая и самая дорогостоящая задача проекта. *Задача 3* включает в себя два подготовительных *Мероприятия (3.1 и 3.2)*, пять *Мероприятий*, направленных собственно на создание лазерного комплекса (3.3 - 3.7), транспортировку двенадцати лазерных пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории (*Мероприятие 3.8*) и ввод комплекса в эксплуатацию (*Мероприятие 3.9*).

<u>Мероприятие 3.1.</u> Разработка детальной документации для 200 ПВт лазера

Разработка детальной проектной документации будет сделана как на основе имеющегося опыта, так и опыта, полученного при создании и эксплуатации прототипов двух модулей (Задача 1).

Общая схема 200 ПВт лазера приведена на Рис. 3.29.



Рис. 3.29. Общая схема 200 ПВт лазера

Мероприятие 3.2. Развитие необходимых технологий

До начала создания 200 ПВт лазерного комплекса будут развиты необходимые ключевые технологии (*Мероприятие 3.2*):

- варки и полировки неодимового стекла,
- производства ламп накачки,
- производства дифракционных решеток,
- роста широкоапертурных нелинейных кристаллов,
- напыления стойких тонкопленочных покрытий с заданными дисперсионными свойствами,
- изготовления адаптивной оптики.

На сегодняшний день с точки зрения достижения параметров, необходимых для успешной реализации Проекта, Россия имеет различные уровни развития этих технологий.

Безусловным лидером в России в технологии варки и полировки широкоапертурного неодимового стекла является НИИТИОМ. Созданные в этом институте слэбы для пучка апертурой 20 см используются в установке "ЛУЧ" (РФЯЦ-ВНИИЭФ). Однако требования на размеры (апертура пучка 30 см) и, самое главное, на качество слэбов, предъявляемые проектом, существенно выше, что требует улучшения технологии.

Производство ламп накачки имеет давнюю историю, начавшуюся еще на заре лазерной эпохи. Опыт создания больших лазерных установок в последние годы во РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИПФ РАН, ИОФ РАН и др. показал, что технология изготовления ламп существует, однако не все параметры ламп удовлетворяют требованиям Проекта. В первую очередь это относится к стабильности параметров от образца к образцу, к долговечности ламп при большом количестве вспышек. Кроме того, размеры ламп, используемых даже в установке "ЛУЧ" (РФЯЦ-ВНИИЭФ), значительно меньше тех, что предстоит использовать в Проекте. Заметим, что лампы накачки широко используются в лазерной технике и имеют большой рынок, как в России, так и за рубежом.

Дифракционные решетки, используемые в петаваттных установках "PEARL" (ИПФ РАН) и "Фемта" (РФЯЦ-ВНИИЭФ) произведены в компании Хологрейт (С. Петербург). Они могут служить прототипом решеток для 200 ПВт лазера, но их размеры, лучевая стойкость, эффективность и спектральная полоса должны быть существенно увеличены. Альтернативным поставщиком решеток может быть, например, французская фирма Horiba Jobin Yvon. Технология роста широкоапертурных нелинейных кристаллов для генерации второй гармоники, параметрического усиления и для ячеек Поккельса существует в ИПФ РАН. Габариты выращиваемых кристаллов (апертура 40 см) даже превышают требования проекта (30 см), но лучевая стойкость и оптическое качество должны быть улучшены. Кроме того, технология изготовления тонких кристаллов, необходимых для удвоения частоты фемтосекундного излучения (диаметр 30 см, толщина 400 микрометров), находится только в начале своего развития.

Технология напыления стойких тонкопленочных покрытий с заданными дисперсионными свойствами в России, насколько нам известно, отсутствует. В то же время большой опыт работы с тонкопленочным напылением позволяет рассчитывать, что такая технология может быть создана.

Большой опыт в изготовлении адаптивной оптики имеется в ИПЛИТ РАН. В то же время, технология требует доработки, учитывая высокие требования Проекта, как к поперечному разрешению адаптивной оптики, так и к глубине вносимой модуляции фазы.

Важно отметить, что это мероприятие будет завершено до окончания строительства зданий центра (*Задача 2*).

Мероприятие 3.3. Создание общей стартовой части

Создание общей стартовой части будет начато также до завершения строительства зданий в помещении двух прототипов. Впоследствии стартовая часть будет перенесена и введена в эксплуатацию в главном здании центра.

Несмотря на общие принципы построения, стартовая часть 200 ПВт лазера существенно отличается от стартовой части прототипа двух модулей, поскольку энергия выходного импульса сигнального излучения должна быть на порядок больше. Необходимый уровень энергии (~ 500 Дж ≈ 12х40 Дж) соответствует выходной энергии одного из каналов прототипа. Таким образом, для создания стартовой части 12-ти канального 200 ПВт лазера, стартовая часть прототипа должна быть дополнена еще одним каскадам параметрического усиления с апертурой 30х30 см. Накачкой этого каскада будет служить излучение 2-й гармоники одного из каналов 16-ти канального усилителя на неодимовом стекле (см. Рис. 3.29 выше). Еще 12 его каналов будут использованы для накачки оконечных параметрических усилителей 200 ПВт лазера. Оставшиеся 3 канала будут являться резервными или использованы для создания субпикосекундных мультипетаваттных каналов на основе непосредственного лазерного усиления широкополосных импульсов с длиной волны 1054 нм.

Мероприятие 3.4. Создание двенадцати модулей

Создание двенадцати модулей (*Мероприятие* 3.4) начинается с комплектации базовых элементов сразу после физического пуска прототипа первого модуля (*Мероприятие* 1.3). После завершения работ по созданию (*Мероприятия* 1.3 и 1.4) и фазировке (*Мероприятие* 1.5) двух прототипов окончательные детали схемы будут определены, что позволит закончить комплектацию и далее произвести сборку, юстировку, отладку, синхронизацию и апробацию одновременной работы 12 модулей в несфазированном режиме.

Для обеспечения накачки параметрических усилителей 200 ПВт лазера потребуется 13 идентичных каналов (12 – для двенадцати 15 ПВт модулей и один для стартовой системы), описанных ранее в *Мероприятии 1.3* (создание прототипа). Однако, несмотря на то, что оптическая схема каналов должна повторять схему каналов прототипа, конструктивно они должны сильно различаться.

Всего планируется 16 идентичных каналов, сгруппированных по 8 каналов. Каждые 8 каналов подходят к мишенной камере с противоположных сторон. Всего в 200 ПВт лазере одновременно потребуется 13 каналов. Излучение остальных каналов может быть использовано либо как самостоятельный источник света в других приложениях, либо в качестве запасного на время ремонта какого-либо из основных каналов. Группировка каналов в матрицы по 8 штук в каждой (как это сделано в установке NIF и как планируется в установке УФЛ-2М) накладывает серьёзные конструктивные изменения в лазере накачки.

На Рис. 3.30 приведён общий вид одной половины матрицы 2х4 усилителей. Как видно из рисунка, лазерные пучки, собранные в матрицы по 2х4 штук могут сделать всю установку более компактной, а усилители смогут освещаться меньшим количеством ламп. Вместо 384х8 = 3072 ламп при простом масштабировании одиночных каналов при группировке каналов в матрицы по 2х4 штук, должно хватить всего 640 более длинных ламп.



Рис. 3.30. Общий вид одной половины матрицы 2х4 усилителей (слева) и широкоапертурных ячеек Поккельса с плазменными электродами (справа) установки NIF

Ячейки Поккельса также должны быть сгруппированы в матрицы. На Рис. 3.30 показан общий вид половины матрицы широкоапертурных ячеек Поккельса с плазменными электродами установки NIF. При помощи плазменных электродов, прозрачных в оптическом диапазоне, удаётся эффективно подводить высокое напряжение к торцевым поверхностям плазменной ячейки Поккельса и управлять поляризацией лазерных пучков.

На выходе лазера накачки, необходимо установить эффективный преобразователь излучения во вторую гармонику (1055 нм в 527.5 нм). Для этого понадобятся крупноапертурные (30х30 см) кристаллы DK*P. Также, как и всё остальное, они должны быть сгруппированы в матрицы по 2х4 штук.

Оценка спектральных и энергетических характеристик оконечных каскадов параметрического усиления была проведена аналогично тому, как описано в *Мероприятии 1.3* (см. раздел *Разработка и создание параметрических усилителей*). Предполагается, что энергия сигнала на входе последнего каскада параметрического усилителя стартовой части ОРА4 составляет 40 Дж, и 1/12 часть усиленного в нем сигнала подается на вход каждого из 12 оконечных усилителей ОРА5. Вычисления показали, что оптимальная длина нелинейных элементов усилителей составляет 4 см (см Рис. 3.31). Форма импульсов (а, соответственно, и спектров) сигнального излучения на входе в ОРА4, на его выходе и на выходе ОРА5 приведены на Рис. 3.32. Энергия сигнала на выходе ОРА5 составляет 530 Дж.



Рис. 3.31. Зависимость энергии сигнала от длины нелинейного элемента в усилителях ОРА4 (а) и ОРА5 (b)



Рис. 3.32. Импульсы излучения сигнала (красный) и накачки (синий) на входе в OPA4 (а), на выходе из него (b) и на выходе оконечного параметрического усилителя OPA5 (c)

Мероприятие 3.5. Фазировка двенадцати модулей

Мероприятие 3.5 начинается сразу после создания стартовой части (Мероприятие 3.3): будут проведены эксперименты по фазировке 12 модулей без усиления лазерного излучения в модулях. Это позволит протестировать большую часть функциональных параметров системы фазировки еще до создания 12 модулей. Отладка и доработка фазировки модулей в силовом варианте начинается после завершения Мероприятия 3.4.

Безусловно, фазировка двенадцати мультипетаваттных модулей с технологической и технической стороны гораздо сложнее, чем фазировка двух модулей. В то же время, физические основы, подробно описанные в *Мероприятии 1.5*, остаются неизменными.

Заметим, что фазировка двенадцати модулей тесно связана с работой системы адаптивной оптики. С одной стороны, пучки с большими аберрациями трудно поддаются фазировке, т.к. процесс измерения фазы затруднен (строго говоря, это касается и фазировки двух пучков, но для двенадцати пучков ограничения на максимальную величину аберраций значительно более сильные). С другой стороны, адаптивное зеркало – наиболее простой и элегантный способ корректировки абсолютной фазы в каждом модуле. В то же время, исправление аберраций в каждом канале (адаптивная оптика) и корректировка абсолютной фазы каждого канала (фазировка) – два процесса управления фазой излучения, каждый их которых требует петлю обратной связи. Для устойчивой работы необходимо, чтобы эти петли обратной связи работали независимо, без перекрестного влияния друг на друга. С этой точки зрения использование одного оптического элемента (адаптивное зеркало) для управления как аберрациями, так и абсолютной фазой, может оказаться ненадежным. В этом случае абсолютная фаза каждого модуля будет управляться с помощью обычного зеркала, перемещаемого поперек своей поверхности с помощью механического двигателя (актуатора).

Таким образом, задача фазировки двенадцати мультипетаваттных модулей, хотя и представляет собой сложную, не решенную на сегодняшний день проблему, вполне может быть решена с помощью либо уже развитых методов, либо еще более эффективных новых методов, которые появятся в результате исследований.

<u>Мероприятия 3.6. и 3.7.</u> Создание системы диагностики и системы управления 200 ПВт лазера

Наличие диагностики у сложной лазерной системы позволяет в любой момент (в том числе и непосредственно перед началом эксперимента) оценить состояние системы: готовность к работе или наличие проблем в отдельных узлах, а также готовность системы в целом к выполнению «выстрела». Более того, диагностика позволяет эффективно управлять экспериментом, делать это быстро и гибко. Использование автоматизации существенно увеличивает число контрольных точек, количество которых может достигать нескольких тысяч. К примеру, на лазерном комплексе NIF число контролируемых элементов составляет 60000 [48].

Система диагностики и система управления являются важной частью любой физической установки, но в столь уникальной и масштабной установке, как 200 ПВт лазерный комплекс, эти системы приобретают особую значимость. Им посвящены соответственно *Мероприятия 3.6 и 3.7*. В то же время, уже на 10 ПВт системе – прототипе первого модуля лазерного комплекса – будут отработаны ключевые элементы систем диагностики и управления лазером (см. *Мероприятие 1.3*).

Каждый канал лазера накачки помимо самих усилителей содержит также большое количество оптических элементов – зеркала, линзы, диафрагмы, а также систему оптической накачки активных элементов с помощью импульсных ламп. Длина каждого канала составляет величину порядка 150 м, некоторые элементы схемы (главный усилитель) будут собраны по многопроходной схеме. Таким образом, для контроля нормальной (штатной) работы системы накачки необходима диагностика излучения лазера вдоль всей его трассы распространения. При этом необходимо обеспечить возможность автоматической подстройки ключевых оптических элементов лазера накачки.

Некоторые элементы диагностики и управления экспериментом на NIF из работы [35] приведены на рисунке 3.33. Мы планируем использовать аналогичную архитектуру.



Рис. 3.33. Иллюстрация работы системы диагностики и управления установки NIF [35]

Между каскадами параметрического усилителя, также как и в системе накачки, будет расположено большое количество оптических элементов, включая пространственные фильтры. Для контроля качества поверхности и объема нелинейных кристаллов – основных элементов параметрического усилителя, качества зеркал и других оптических элементов схемы, для контроля положения всех этих устройств – планируется обеспечить схему системой настройки оптических узлов, основанной на дистанционно управляемых шаговых двигателях.

Для удобства автоматической подстройки оптических элементов лазера предполагается весь лазерный тракт просвечивать маломощным излучением дополнительных юстировочных (пилотных) лазеров. Лазеры должны иметь длину волны и поляризацию излучения близкую к соответствующим характеристикам излучения накачки или сигнала.

Измерение положения пучка юстировочного лазера позволит подстроить различные оптические компоненты лазерной установки. Для этого за основными поворотными зеркалами системы предполагается установить датчики ближнего поля пучка и датчики дальнего поля пучка. Специально разработанное программное обеспечение, получив информацию с датчиков положения пучка юстировочного лазера, будет подавать сигналы управления на шаговые двигатели трансляторов и поворотных устройств оптических элементов.

Во времени излучение юстировочного лазера системы накачки должно состоять из коротких (порядка 1 пс) импульсов с высокой частотой повторения. Для этого идеально подходит излучение волоконного лазера, работающего в режиме непрерывной самосинхронизации мод (CW Mode Locking). Импульсный 1 пс режим излучения позволит с высокой точностью (до 0.1 мм) синхронизовать импульсы различных каналов во времени. Для этого необходимо получать сигналы со стрик-камер, измеряющих временное рассогласование различных каналов лазера накачки.

Аналогичным образом – с использованием трансляторов и поворотных устройств – будут управляться дифракционные решетки внутри вакуумного компрессора. Система контроля и настройки компрессора чирпированных импульсов также включает в себя зрительные трубы и автоколлиматоры, оснащенные ССD-камерами, дополнительные – вспомогательные источники лазерного излучения. На Рис. 3.34. видны элементы управления дифракционной решеткой на субпетаваттной установке PEARL в ИПФ РАН.



Рис. 3.34. Элементы системы управления дифракционной решеткой на субпетаваттной установке PEARL в ИПФ РАН

Другим немаловажным элементом контроля работы лазерного комплекса является измерение пространственных, временных и энергетических характеристик излучения в ключевых точках лазерной схемы. Такой контроль необходим в связи с предъявляемыми к пучкам лазерного излучения накачки требованиями: равномерность интенсивности по поперечному сечению, высокие энергетические параметры, близкие к пробойным для оптических элементов лазера.

Для диагностики пространственных, временных и энергетических параметров основного излучения лазера будут разработаны диагностические станции, измеряющие в каждой вспышке лазера энергию, ближнее и дальнее поле пучка, деполяризацию излучения и временные параметры излучения лазера. Эти станции должны быть установлены на входе в главный и разгонный усилители накачки, на выходе после каждого прохода главного усилителя и на выходе всей системы накачки. Также они должны измерять характеристики сигнального излучения вдоль его трассы между каскадами параметрического усилителя, на входе в компрессор и на выходе из него.

Помимо диагностики оптических элементов будет осуществляться контроль электрических схем. Так, в цепь питания импульсных ламп накачки активных элементов усилителей будут установлены датчики, измеряющие временную зависимость тока разряда ламп. Всего потребуется наблюдать за 640 лампами. Поэтому в каждом выстреле необходимо записывать 640 токовых импульсов. Также необходимо иметь информацию об энергии в конденсаторной батарее до и после выстрела, информацию о характеристиках разрядной цепи, например, о предионизационном импульсе в лампах, о форме электрического напряжения на лампах и др.

Таким образом, в рамках задачи по созданию системы диагностики и управления лазерным комплексом должно быть создано и введено в действие вышеприведённое оборудование, позволяющее получать информацию о работе отдельных узлов и всей системы в целом. Предварительные оценки показывают, что в настоящем Проекте необходимо следить одновременно примерно за 3000 параметрами лазера одновременно. Должно быть создано программное и аппаратное обеспечение по сбору и хранению информации. Программное обеспечение должно также помимо первичной обработки результатов измерения различных параметров в эксперименте выдавать информацию о работе установки в целом, – чтобы предотвратить внештатные ситуации при работе лазерного комплекса.

<u>Мероприятие 3.8.</u> Транспортировка двенадцати пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории

Для использования излучения 200 ПВт лазера в физических экспериментах необходимо доставить все 12 пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории. Основными трудностями при создании системы транспортировки являются большой диаметр лазерных пучков (не менее 20 см), необходимость обеспечить вакуум на всей трассе от компрессора лазерных импульсов до мишеней, а также прецизионная фокусировка и контроль оптического пути с погрешностью много меньше длины волны.

Геометрия заведения 12 пучков определяется геометрией фокусировки, при которой достигается наибольшая интенсивность поля в фокусе. Подробное теоретическое рассмотрение этой задачи (см. *Задача 6*) показывает, что оптимальным является конфигурация, при которой лазерные импульсы наиболее близко описывают диаграмму направленности излучения диполя, расположенного в центре фокуса. С этой точки зрения, наиболее эффективной оказывается геометрия двойного кольца (double-circle geometry), изображенная на Рис. 3.35. Полученная с помощью численного решения уравнений Максвелла интенсивность в фокусе более чем в два раза превышает интенсивность при фокусировке одного пучка с мощностью 200 ПВт.



Рис. 3.35. Геометрия двойного кольца

<u>Задача 4.</u> Создание комплекса мощных фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных приложений

200 ПВт лазер (Задача 3) является, безусловно, главным элементом Проекта ЦИЭС, однако не единственным. Естественной "платой" за эту рекордную мощность является маленькая частота повторения импульсов (один раз в несколько часов). Для целого ряда приложений, особенно для инновационных, столь низкая частота повторения недопустима, однако и столь огромная мощность не нужна. В связи с этим важной составляющей Проекта ЦИЭС является создание комплекса мощных фемтосекундных лазеров с большой частотой повторения (от 1 Гц до 10 кГц) и относительно небольшой мощностью до 1 ПВт. Этот комплекс, являясь комплементарным к 200 ПВт лазеру, с точки физических приложений, будет использовать ту же зрения инженернотехническую инфраструктуру (Задачи 2, 5 - 10). Кроме того, синхронизация 200 ПВт лазера с лазерами, работающими с большой частотой повторения, открывает большие возможности для использования последних для диагностики взаимодействия 200 ПВт излучения с веществом.

Техника ОРСРА имеет ряд преимуществ, позволяющих использовать ее не только для достижения мощности 200 ПВт, но и для создания лазеров с мощностью петаваттного уровня, но работающих с большой частотой повторения (от единиц Герц до килогерц). Прежде всего, необходимо отметить, что в отличие от СРА, при ОРСРА разница энергии кванта накачки и сигнала не выделяется в кристалле в виде тепла, т.к. выносится холостой волной. Это открывает работы с возможности для большой частотой повторения, поскольку обеспечивает малые тепловые нагрузки и, как следствие, дифракционное качество пучка. Более того, полоса усиления, которую могут обеспечить нелинейные кристаллы LBO, превосходит полосу усиления даже рекордсмена среди СРА лазеров – кристалла Ті:сапфира. Таким образом, открывается возможность достижения не рекордной, но достаточно высокой мощности и большой частоты повторения при относительно небольшой энергии импульса, и, следовательно, при небольшой энергии накачки [62].

<u>Мероприятие 4.1.</u> Разработка концепции комплекса лазеров с большой частотой повторения

На сегодняшний день в мире существует несколько проектов лазеров с высокой пиковой и средней мощностью. К ним можно отнести такие проекты как "Lucia" [63], "Halna" [64], "Mercury", "Polaris" [65], "Genbu" [66]. Часть проектов еще не завершены и в ближайшие годы ожидается достижение максимальной энергии в 10-30 Дж.

Все перечисленные лазерные системы используют диодную накачку, некоторые из них используют криогенное охлаждение активных элементов. Например, в проекте "Lucia" сейчас [67] разрабатывается криостат (Рис. 3.36) активный элемент в котором обдувается газообразным гелием, который, в свою очередь охлаждается жидким азотом (Рис. 3.37).





Рис. 3.36. Криостат в проекте "LUCIA"



Рис. 3.37. Охлаждение активного элемента в проекте "LUCIA"



Рис. 3.38. Охлаждение активного элемента в проекте "GENBU"



Рис. 3.39. Полностью отражающее активное зеркало (TRAM) в проекте "GENBU"

В проекте "Genbu" криогенное охлаждение дисковых активных элементов осуществляется жидким азотом непосредственно (Рис. 3.38). Форма и внешний вид активных элементов постоянно оптимизируются. На сегодняшний день они представляют собой композитный элемент в форме слэба (Рис. 3.39) с тремя допированными активатором областями – активными зеркалами. Оригинальную геометрию криогенной Yb:YAG композитной керамики с полностью отражающим активным зеркалом назвали TRAM (total-reflection active-mirror).

В России разработок в области лазеров с высокой средней и пиковой мощностью, основанных на технологиях, использующих диодную накачку,

криогенное охлаждение, слэбовую или дисковую геометрию практически не ведется. В ИПФ РАН разработана лазерная система с энергией в импульсе 0.1 Дж и частотой повторения до 200 Гц, эта система построена с использованием диодной накачки и криогенного охлаждения дисковых активных элементов [61]. Следующий шаг – повышение частоты следования импульсов до 1 кГц и увеличение энергии в импульсе до 1 Дж. Импульс этого лазера будет использован для накачки сверхширокополосных параметрических усилителей на кристаллах LBO и BBO, обеспечивающих длительность скомрессированного импульса до 5 фс (*Мероприятие 1.8*) в разрабатываемой петаваттной лазерной системе.

В настоящее время исследуется большое количество активных сред для дисковых лазеров (Nd:YAG, Yb:GGG, Yb:LuVO, Yb:YVO, Yb:NaGd(WO₄)₂ и т.д.). Появление и бурное развитие оптической лазерной керамики должно привести к существенному продвижению дисковых лазеров в больший диапазон мощностей. Керамические элементы, имея одинаковые с кристаллом оптические свойства, обладают большей прочностью [68] и могут быть изготовлены диаметром в десятки (!) сантиметров [69].

Кроме большой апертуры, чрезвычайно важным преимуществом оптической керамики является возможность создания активных сред, которые практически не могут быть выращены в виде монокристалла. Примером могут служить допированные неодимом и иттербием оксиды редкоземельных элементов: Nd:Y₂O₃, Nd:Lu₂O₃, (Nd,Yb):Sc₂O₃, Yb:Y₂O₃ и т.д. В [70] на кристаллах Yb:Lu₂O₃ и Yb:Sc₂O₃ получена генерация с длительностью 65 фс и 70 фс соответственно. Эти среды являются прекрасными кандидатами для создания источников сверхсильных полей, работающих с большой частотой повторения. Одним из вариантов построения мультипетаваттного лазера является разработанная в ИПФ РАН схема: CPA в широкоапертурной керамике (Nd,Yb):Lu₂O₃ или (Nd,Yb):Sc₂O₃ с ламповой накачкой аналогично лазерам на неодимовом стекле. Возбуждение от ионов неодима передается ионам иттербия, которые обеспечивают широкую полосу (прямая накачка иттербия возможна только диодными лазерами, что затрудняет возможность масштабирования). Еще более широкая полоса может быть получена с помощью одновременного использования нескольких оксидных кристаллов (Sc₂O₃, Y₂O₃, Lu₂O₃ и т.д.) аналогично использованию нескольких марок неодимовых стекол.

Разработанная в ИПФ РАН методика расчета термооптических констант путем измерения термодеполяризации [71] позволит впервые зарегистрировать

оптическое качество керамики, изготовленной в России [72] (см. Рис. 3.40) и экспериментально подтвердить предсказанный нами ранее эффект случайной мелкомасштабной модуляции термодеполяризации в оптической керамике [71].



Рис. 3.40. Образец керамики отечественного производства [72]

Мероприятие 4.2. Развитие технологии производства диодных лазеров

Для твердотельных лазеров с различными активными элементами все чаще используются высокомощные диодные лазеры в качестве высокоэффективной оптической накачки. Диодные лазеры должны удовлетворять большому количеству требований, и для каждого приложения должны быть оптимизированы с точки зрения спектральных и конструкционных характеристик, электрооптического кпд, частоты следования импульсов, а также стоимости.

Диодные лазеры давно нашли свою «нишу» в обработке материалов. На данный момент разработкой диодных лазеров в России занимаются несколько организаций. Перечислим некоторые из них: ЗАО "Полупроводниковые приборы", ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха, ОАО «НПП «Инжект», General Nano Optics. Недавно компания General Nano Optics получила поддержку в размере ~ 2 млрд. рублей на организацию производства и новые инновации в рамках поддержки ГК «Роснано» [73]. В основном эти организации специализируются на изготовлении диодных лазерных модулей с длиной волны излучения 800-810 нм, длительностью импульса до 0.5 мс и частотой повторения до 30 Гц (Рис. 3.41.). Яркость этих модулей не превышает 2 кВт/см², а стоимость за 1 кВт составляет не менее 30 тыс. руб. при массовом производстве. Кроме того, ни один из отечественных производителей не специализируется на изготовлении полностью готовых к работе диодных лазеров.



Рис. 3.41. Типичная продукция ОАО «НПП «Инжект»

Наиболее перспективными лазерными средами для лазеров с высокой средней и пиковой мощностью являются среды, легированные иттербием (Yb:YAG, Yb:CaF2, Yb:GGG и др.). Максимумы поглощения таких сред находятся в области 940 и 975 нм с шириной линии поглощения от 2 до 20 нм в зависимости от среды. Также можно выделить два режима работы диодного лазера в качестве накачки: импульсный режим работы для лазеров с частотой повторения менее 1 кГц и непрерывный режим работы с частотой повторения более 1 кГц. Причем, исходя из мирового опыта, в обоих режимах можно достигнуть электрооптического кпд выше 60%. Для подачи излучения накачки в активный элемент используются два варианта: продольная накачка (для чего нужна коллимирующая оптика, волоконный выход из диодного модуля) или поперечная накачка (для чего нужна фокусирующая оптика). Исходя из этих требований, а также основываясь на технологиях, которые уже доступны в России, необходимо решить ряд задач для создания диодных лазеров, качество которых позволяет осуществлять высокоэффективную оптическую накачку лазеров с высокой средней и пиковой мощностью:

1) Оптимизация спектральных характеристик диодных лазеров: разработка диодных лазеров с длиной волны излучения 940 нм и 975 нм, разработка диодных лазерных линеек с шириной спектра не более 2 нм, стабилизация длины волны излучения при помощи термостабилизации элементами Пельтье.

2) Разработка диодных лазерных линеек с высокой яркостью и электрооптическим КПД в импульсном и непрерывном режимах работы:

повышение качества материалов и изготовления, разработка эффективного охлаждения диодных линеек, использование новых технологий в области изготовления диодных лазеров (например, криогенное охлаждение диодных линеек).

3) Изготовление оптических элементов для подачи излучения в активный элемент лазера: разработка волоконного выхода излучения из диодного лазера, разработка микролинз для коллимации излучения, разработка оптических схем для подачи излучения накачки в активный элемент (изготовление квантронов с продольной и поперечной диодной накачкой).

4) Уменьшение стоимости изготовления диодных лазерных линеек: организация мелкосерийного производства на роботизированном оборудовании.

Заметим, что приложения, в том числе коммерческие, диодных лазеров существенно шире рамок Проекта. Рыночный спрос на диодные лазеры весьма велик в настоящее время и в ближайшие годы будет только расти.

<u>Мероприятие 4.3.</u> Создание лазера с частотой повторения импульсов 1-10 Гц

Лазер со средней мощностью 2 кВт, пиковой мощностью более 1 ПВт и частотой повторения импульсов 1-10 Гц будет построен по следующей архитектуре: задающий генератор на Ті:сапфире; стретчер; параметрические усилители на кристаллах ВВО (LBO) и вакуумный компрессор.

Блок-схема лазера приведена на Рис. 3.42. Из задающего генератора, выполненного на Ті:сапфире выделяются два импульса, первый из которых будет являться усиливаемым сигналом; второй – выступать в роли накачки в параметрических усилителях. Для этого первый импульс, попадая на стретчер (либо дисперсионные зеркала) растягивается до длительности ~ 5 пс. Второй спектрально обрезается (либо сдвигается при помощи фотонных кристаллов) на длине волны 1.03 мкм и после стретчера и регенеративного усилителя приобретает энергию ~ 10 мДж в импульсе наносекундной длительности. Затем второй импульс усиливается в дисковом усилителе ДУ1 до 0.5 Дж и делится на две части, каждая из которых усиливается до 3 Дж (каждый канал) в идентичных дисковых усилителях ДУ2 и ДУ3. Излучение после ДУ3 также делится пополам, усиливаясь в идентичных дисковых усилителях ДУ4 и ДУ5 до энергии в импульсе 30 Дж (каждый канал). После компрессирования и удвоения частоты четыре части второго импульса (см. Рис. 3.42) выступают в качестве параметрической накачки в четырех кристаллах BBO. В результате параметрического усиления И компрессирования последующего первый импульс длительностью ~ 5 фc приобретает энергию 8 Дж.

Главным элементом прототипа лазера является параметрическая накачка. В качестве лазерной накачки для параметрических усилителей используется вторая гармоника излучения оригинального лазера на дисковых активных элементах выполненных из лазерной керамики Yb:YAG. Инверсия в активных элементах осуществляется высокоэффективной диодной накачкой с волоконным выходом, работающей в импульсном режиме.

Оптическая схема дискового лазера состоит из двух частей. Первая – предусилительная (КДУ1) обеспечивает импульс субджоульного уровня энергии и представляет собой 12-ти проходный 2-х каскадный усилитель на активных элементах диаметром 10 мм и толщиной ~ 1 мм. Вторая часть - усилительная состоит из двух идентичных усилителей КДУ2 и КДУ3 и обеспечивает усиление импульсов до 3 Дж. Она представляет собой 8-ми проходный 2-х каскадный усилитель на активных элементах диаметром ~ 30 мм и толщиной ~ 5 мм. Третья часть оконечного усиления – также состоит из двух идентичных усилителей КДУ4 и КДУ5 и обеспечивает усиление импульсов до 30 Дж. Представляет собой 8-ми проходный 2-х каскадный усилителей КДУ4 и КДУ5 и обеспечивает усиление импульсов до 30 Дж. Представляет собой 8-ми проходный 2-х каскадный усилитель на активных элементах диаметром ~ 80 мм и толщиной ~ 2 см.



Рис. 3.42. Блок-схема лазера

<u>Мероприятие 4.4.</u> Создание лазера с частотой повторения импульсов несколько кГц

Килогерцовый лазер с киловаттной средней мощностью (с энергией в импульсе 1 Дж) и пиковой мощностью в сотни тераватт (длительность импульса 5 фс) будет построен по следующей архитектуре: задающий генератор на Ti:canфирe; стретчер; параметрические усилители на кристаллах BBO (LBO), позволяющие усиливать широкополосное (~2000 см⁻¹) излучение; вакуумный компрессор. Схема несколько отличается от архитектуры лазера, описанного в *Мероприятии 1.8*, поэтому рассмотрим ее независимо и более подробно.

Блок-схема лазера приведена на Рис. 3.43. Из задающего генератора, выполненного на Ті:сапфире выделяются два импульса, первый из которых будет являться усиливаемым сигналом; второй – выступать в роли накачки в параметрических усилителях. Для этого первый импульс, попадая на стретчер (либо дисперсионные зеркала) растягивается до длительности ~ 5 пс. Второй спектрально обрезается (либо сдвигается при помощи фотонных кристаллов) на длине волны 1.03 мкм и после стретчера и регенеративного усилителя приобретает энергию ~ 10 мДж в импульсе наносекундной длительности. Затем второй импульс усиливается в криогенном дисковом усилителе КДУ1 до 0.5 Дж и делится на две части, каждая из которых усиливается до 3 Дж (каждый канал) в криогенных дисковых усилителях КДУ2 КДУЗ. После идентичных И компрессирования и удвоения частоты обе части второго импульса выступают в качестве параметрической накачки в трех кристаллах ВВО. В результате, параметрического усиления и последующего компрессирования первый импульс длительностью ~ 5 фс приобретает энергию 1 Дж.

Главным элементом прототипа лазера является параметрическая накачка. В качестве лазерной накачки для параметрических усилителей используется вторая гармоника излучения оригинального лазера на дисковых активных элементах выполненных из лазерной керамики Yb:YAG и охлаждаемых до криогенных температур. Инверсия в активных элементах осуществляется высокоэффективной диодной накачкой с волоконным выходом, работающей в непрерывном режиме.

Оптическая схема криогенного дискового лазера состоит из двух частей. Первая – предусилительная (КДУ1) обеспечивает импульс субджоульного уровня энергии и представляет собой 4-х проходный 2-х каскадный усилитель на активных элементах диаметром 15 мм и толщиной ~ 1 мм. Вторая часть аналогична описанной в разделе *Мероприятие 1.8*. Однако необходимо отметить, что при увеличении частоты следования импульсов до нескольких килогерц (при сохранении энергии в импульсе) увеличиваются проблемы, связанные с накоплением тепла из-за возникновения паразитных эффектов в оптических элементах лазера, таких, например, как термодеполяризация и тепловая линза. Поэтому потребуется осуществить ряд доработок в имеющейся материальной базе:

1. Для эффективного охлаждения активных элементов лазера накачки потребуется модернизировать систему криогенного теплоотвода. Необходимо будет перейти от заливного криостата к проточному, в котором охлаждение осуществляется протоком жидкого азота через радиатор активного элемента.

2. Каждый активный элемент должен изготавливаться из композитного материала, представляющего собой сэндвич-структуру: тонкий (менее 1 мм) Yb:YAG диск и чистый YAG толщиной ~ 10 мм, соединенные диффузионной сваркой, оптическим контактом или иным способом. Такое изменение дизайна усилительной части лазера накачки позволит сохранить высокое качество лазерного пучка и высокий КПД преобразования излучения накачки в энергию лазерного импульса.

3. Такие же методы борьбы с тепловыми эффектами можно использовать и при удвоении частоты излучения лазера накачки, и на каскадах параметрического усиления. Небольшая толщина кристалла по сравнению с диаметром позволит организовать эффективный теплоотвод с торцов данных элементов и обеспечить наименьшие температурные градиенты в нем.

4. При компрессировании лазерного импульса с частотой повторения 1 кГц и более тепловые эффекты могут также проявиться и в дифракционных решетках. Для уменьшения этих эффектов, возможно, потребуется использовать решетки не с золотым, а с диэлектрическим напылением. Существует также способ компрессирования при помощи дисперсионных диэлектрических зеркал. Такие зеркала практически не вносят тепловые искажения и, кроме того, позволяют компрессировать короткие лазерные импульсы без потери энергии.



Рис. 3.43. Блок-схема лазера

<u>Мероприятие 4.5.</u> Транспортировка лазерных пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории

Излучение лазеров с высокой средней мощностью будет использоваться как в главной мишенной камере (*Задача 6*) совместно с излучением 200 ПВт лазера и электронным пучком, так и в других лабораториях (*Задача 7*). В Проекте предусмотрена возможность доставки лазерных пучков во все экспериментальные зоны с возможностью оперативного переключения с одной лаборатории на другую. Это обеспечивает гибкость в подготовке и проведении экспериментов. Однако для этого необходима система транспортировки пучков.

Учитывая большую пиковую мощность, необходимо создать вакуумный тракт, что не представляет больших трудностей, тем более, что диаметр пучков существенно меньше, чем в 200 ПВт лазере. Более трудной задачей является передача изображения с выхода лазеров на область взаимодействия в лабораториях. Без этого распределение пучка в экспериментальных лабораториях и главной мишенной камере будет неоднородным. Для этого потребуются зеркальные телескопы, что увеличит диаметр вакуумного тракта.

Кроме того, система синхронизации каждого лазера с высокой средней мощностью с 200 ПВт лазером должна учитывать время прохождения света до главной мишенной камеры и его возможные изменения в процессе эксплуатации, связанные, например, с изменением геометрии системы транспортировки.

<u>Задача 5.</u> Создание источника электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов

Одно из направлений исследований в ЦИЭС – это взаимодействие мощного лазерного излучения с пучками (сгустками) заряженных частиц. Эти сгустки могут создаваться при воздействии мощного лазерного излучения на мишень, что обеспечивает их синхронизацию с лазерным импульсом, однако качество таких сгустков не велико и частота повторения ограничена. Использование традиционного источника электронов на основе СВЧ резонаторов позволяет получить электронные сгустки хорошего качества, а использование фотокатода – синхронизовать электронный пучок с лазерным импульсом. Энергия электронного сгустка – 100 МэВ – выбрана исходя из требований к параметрам электронного сгустка для инжекции в лазерно-плазменный ускоритель. В результате открывается возможность для проведения уникальных экспериментов по ускорению электронов до энергий более 10 ГэВ (Цель 2, Задача 2, Мероприятие 2.1).

Основными элементами ускорителя являются фотоинжектор (RF-пушка с фотокатодом), лазерный драйвер фотокатода, которые позволяют обеспечить синхронизацию источника электронных банчей с лазерным импульсом, ускорительные секции. Описание первых двух устройств с параметрами, планируемыми в Проекте, приведено в *Мероприятии 1.7*.

В ускорительных секциях будут использованы стандартные для ускорительной техники объёмные СВЧ резонаторы, запитываемые излучением мощных (несколько МВт) клистронов. Рекордные темпы ускорения в таких ускорителях составляют 20-30 МэВ/м, а величина 10 МэВ/м достигается рутинно. При таком, рутинном, темпе ускорения длина всего источника электронов (включая фотоинжектор) с энергией 100 МэВ составит 100-150 м, что вполне вписывается в инфраструктуру Проекта.

Для создания ускорителя планируется использовать большой опыт ИЯФ СО РАН, ОИЯИ (Дубна) и DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron). С последними двумя организациями ИПФ РАН в настоящее время ведет совместные работы по созданию и исследованию фотоинжекторов с уникальными параметрами. На Рис. 3.44 показан вид RF-пушки с фотокатодом.



Рис. 3.44. RF-пушка с фотокатодом в DESY

Задача 6. Создание главной мишенной камеры

В ЦИЭС исследование взаимодействия лазерного излучения с веществом будет проводиться в главной мишенной камере и экспериментальных лабораториях. К этой камере будут подведены все 12 пучков 200 ПВт лазера, электронный сгусток, а также излучение лазеров с большой частотой повторения. Камера должна быть оснащена необходимым инженерным и диагностическим оборудованием. Размер камеры будет определен позднее, однако опыт больших лазерных установок (например, NIF в Ливерморской национальной лаборатории США) показывает, что камеру необходимо устанавливать во время строительства здания (*Мероприятие 2.7*), что и предусмотрено в Дорожной карте.

Существенным аспектом при разработке и создании главной мишенной камеры является геометрия фокусировки 12 лазерных пучков. Задача достижения максимальной интенсивности излучения при фиксированной суммарной мощности нескольких лазерных импульсов, кроме технических аспектов включает вопрос об оптимальной геометрии фокусировки, то есть об оптимальном пространственном расположении фокусирующихся импульсов. Если считать, что импульсы могут быть синхронизованы с точностью до фазы волны излучения и сфокусированы произвольным образом, то задача поиска оптимума может быть сформулирована математически и состоит в анализе соответствующих решений уравнений Максвелла.

Пиковая амплитуда в фокусе пропорциональна квадратному корню из интенсивности. Поэтому при когерентной фокусировке в одну точку двух ИМПУЛЬСОВ, распространяющихся BO встречных направлениях, пиковая интенсивность оказывается в два раза больше, чем в случае фокусировки одного импульса с той же суммарной мощностью. Следовательно, для достижения максимальной интенсивности выгодно разделить общую мощность на несколько каналов, что обусловлено также техническими аспектами. С другой стороны, при увеличении числа каналов уменьшается угол фокусировки и, как следствие, уменьшается интенсивность в центре из-за увеличения размеров фокального пятна. Таким образом, понятно, что существует некоторое оптимальное число каналов.



Рис. 3.45. Интенсивность в фокусе в зависимости от числа лазерных импульсов при когерентном сложении в рамках геометрии кольца (слева) и двойного кольца (справа) при суммарной интенсивности импульсов 180 ПВт

Другим важным фактором является необходимость ориентировать направление распространения лазерных импульсов и их поляризацию таким образом, чтобы получить максимальную напряженность поля при линейном сложении полей всех импульсов в точке фокуса. Очевидно, что с этой точки зрения выгодно ориентировать лазерные импульсы по кольцу (single-circle geometry) так, как показано на рисунке 3.45 слева. Однако в этом случае угол фокусировки быстро уменьшается с ростом числа импульсов, тогда как часть пространства кольца оказывается незадействованной. Подробное около теоретическое рассмотрение этой задачи показывает, что оптимальным является конфигурация, при которой лазерные импульсы наиболее близко описывают диаграмму направленности излучения диполя, расположенного в центре фокуса. С этой точки зрения, кроме геометрии кольца довольно эффективной оказывается геометрия двойного кольца (double-circle geometry), изображенная на рисунке 3.45 справа. Полученная с помощью численного решения уравнений Максвелла интенсивность в фокусе для обеих геометрий в зависимости от числа лазерных пучков приведена в верхней части рисунка 3.45. При этом считалось, что каждый лазерный импульс имеет равномерное распределение интенсивности в пределах угла фокусировки, а их суммарная мощность равна 180 ПВт. Из приведенных результатов видно, что в данной постановке задачи оптимальным оказывается 10 или 12 пучков, ориентированных в соответствии с геометрией двойного кольца. При этом, для суммарной мощности 180 ПВт интенсивность в фокусе оказывается приблизительно 1,2×10²⁶ Вт/см², что по оценкам достаточно для исследования таких эффектов, как появление лавин рождения электрон-позитронных пар.

Задача 7. Создание и оснащение экспериментальных лабораторий

Исследование взаимодействия лазерного излучения с веществом будет проводиться не только в главной мишенной камере (*Задача* 6), но экспериментальных лабораториях, которых будет около десяти. Точное их число и назначение каждой из них будет определено позднее. Одна из функций этих лабораторий – проведение специальных экспериментов, другая – моделирование (на относительно низкой мощности) экспериментов, планируемых в главной мишенной камере, и отработка диагностического оборудования. В соответствии с этими требованиями будут проведены мероприятия по разработке концепции и созданию системы доставки лазерных пучков и электронного сгустка в лаборатории, а также оснащению экспериментальных лабораторий необходимым оборудованием.

В настоящее время планируется создание следующих лабораторий: лаборатория физики сверхсильных полей, лаборатория физики высоких энергий, лаборатория по моделированию астрофизических явлений и ранней космологии, лаборатория ядерной оптики, лаборатория нейтронной физики, лаборатория по изучению свойств вакуума, лаборатория аттосекундной и зептосекундной физики, лаборатория фундаментальной метрологии.

Этот список в процессе выполнения Проекта может быть дополнен.

В Задачу 7 входят 4 мероприятия:

- Мероприятие 7.1. Разработка концепции доставки лазерных пучков и электронного сгустка в лаборатории
- Мероприятие 7.2. Создание системы доставки лазерных пучков и электронного сгустка в лаборатории
- Мероприятие 7.3. Оснащение экспериментальных лабораторий необходимым оборудованием
- Мероприятие 7.4. Создание и оснащение сателлитных лабораторий.

В рамках последнего *Мероприятия* 7.4 будут созданы и оснащены сателлитные лаборатории в ИПЛИТ РАН, РНЦ КИ и МИФИ, занимающиеся отработкой различных критических технологий субэкзаваттного лазера и развитием ряда приложений фундаментальных исследований, ведущихся в ЦИЭС.

Задача 8. Обеспечение радиационной безопасности

При взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом заряженные частицы ускоряются до ультрарелятивистких скоростей. При их торможении неизбежно возникает тормозное излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах. В некоторых случаях это излучение обладает уникальными свойствами и является непосредственной целью экспериментов, в других является паразитным. В любом случае радиационная защита сотрудников и дозиметрический контроль является абсолютно необходимой задачей. Срок ее выполнения совпадает со сроком выполнения всего проекта. Начало выполнения *Задачи 8* совпадает с началом выполнения Проекта, поскольку расчеты системы радиационной защиты персонала и оборудования должны быть учтены при проектировании всех элементов конструкций главного здания установки, тоннеля ускорителя, других сооружений, расположенных в непосредственной близости к ним.

В рамках этой *Задачи*, планируется семь мероприятий, включающих в себя определение требований к системе радиационной защиты; разработку проекта радиационной защиты персонала от источников излучения, находящихся в мишенном зале, в экспериментальных лабораториях и в тоннеле ускорителя; создание радиационной защиты персонала; изготовление и тестирование средств защиты, обеспечение дозиметрического контроля в процессе эксплуатации установки.

Проведение масштабных экспериментов с использованием сверхмощного лазерного излучения ставит задачу защиты персонала от вредных факторов (в первую очередь – всех видов электромагнитных излучений) на одно из первых мест при проектировании и создании таких систем.

Расчеты показывают, что уже для субпетаваттного режима работы лазерной установки необходимо обеспечивать защиту персонала от радиационного излучения из релятивистской плазмы. Так, например, в работе [74] представлены результаты подробных радиологических исследований, которые проводились вблизи 100 ТВт лазерной установки в лаборатории LULI (Laboratory for the Use of Intense Lasers) в Ecole Polytechnique, Франция. Оценка радиологического состояния экспериментального зала и других, соседствующих с мощной лазерной установкой, помещений выявила значительные уровни рентгеновского, гамма- и нейтронного излучения. Для обнаружения и измерения этих излучений использовались различные приборы и методы: термолюминесцентные детекторы, фотопленки, пузырьковые детекторы и германиевая спектрометрия. Серия радиологических измерений была проведена для 150 лазерных импульсов

(длительностью 300 фемтосекунд) с энергиями в диапазоне от 1 до 20 Дж и интенсивностью на мишени 10¹⁹Вт/см². Эквивалентная гамма доза в непосредственной близости от мишенной камеры варьировалась от 0,7 до 73 мЗв. Эквивалентная доза за счет нейтронной компоненты оценивалась в 1% от эквивалентной дозы гамма-излучения.

В статье [75] подробно описаны результаты работы, выполненной на петаваттной лазерной системе Vulcan (CCLRC Rutherford Appleton Laboratory) в Великобритании. В ходе исследований при вводе установки в эксплуатацию были измерены фотонные дозы до 43 мЗв на расстоянии 1 м от места фокусировки сверхмощного лазерного излучения за один импульс. Также в статье приводится обзор системы защиты и экранирования мишенной камеры в целях соблюдения правил IRR99 (Ionising Radiation Regulations 1999), устанавливающих значения предельных доз для персонала менее 1 мЗв в год.

На рисунке 3.46 приведена фотография защитного сооружения, окружающего мишенную камеру на петаваттном лазерном комплексе «Vulcan» в Великобритании.



Рис. 3.46. Петаваттная лазерная система Vulcan, CCLRC Rutherford Appleton Laboratory. Петаваттная мишенная камера окружена системой фотонной и нейтронной защиты [75]

Таким образом, для мультипетаваттных и экзаваттных лазерных систем дозиметрический контроль и задача обеспечения радиационной безопасности персонала — как работающего непосредственно на лазерной установке и ускорителе, так и всего обслуживающего и вспомогательного персонала, находящегося на прилегающей к мишенному залу территории выходит на первый план. Расчет системы радиационной защиты персонала и оборудования будет предшествовать проектированию всех элементов конструкций главного здания установки. В работе [76], посвященной радиационной защите на Большом Адронном Коллайдере, отмечена важность и необходимость проведения таких предварительных расчетов:

«На первом этапе, максимальные интенсивности и потери, которые служат основой проектируемой защиты, должны быть утверждены руководством лаборатории *до* начала составления спецификации на защиту. Второй этап, на котором должно быть получено согласие соответствующих контролирующих органов, может быть проиллюстрирован на примере конструктивных ограничений, принятых для Большого Адронного Коллайдера (БАК) CERN.»

Источником проникающего излучения являются возникающие в момент лазерного импульса ускоренные лазерным полем до ультрарелятивистских скоростей элементарные частицы (электроны, протоны), нейтральные и ионизированные атомы, вторичные частицы, возникающие в результате каскадных процессов и «выбиваемые» из материала мишени, стенок мишенной камеры, и т.п. Образующиеся при этом в материале конструкций различные изотопы также могут являться источниками радиации, имеющими большие времена полураспада.

Особое внимание при расчете защиты необходимо уделять тормозному излучению, возникающему в результате торможения электронов при их взаимодействии с поглотителем (защитой), а также стенками мишенной камеры. Другим наиопаснейшим видом излучения является поток нейтронов, выбиваемый тяжелыми частицами ИЗ окружающих мишень материалов. Диаграммы направленности разлета частиц и ионизирующего излучения существенно зависят от специфики проводимого эксперимента, геометрии, материала мишени (объекта исследований), интенсивности излучения. Таким образом, необходимо учитывать как наличие ненаправленного радиационного излучения, так и узконаправленные компоненты излучения.

Работы по рентгеновской диагностике докритической плазмы, создаваемой при взаимодействии излучения петаваттного лазера с газовой струей гелия, выполняются на установке «Vulcan», Великобритания.

Было показано [77], что при интенсивностях в фокусе более 2x10²⁰ Вт/см² электроны могут ускоряться до энергий свыше 300 МэВ, распространяясь по сильно нелинейным траекториям, что приводит к росту рентгеновского излучения.

Целью эксперимента была задача полностью характеризовать угловую и спектральную структуру рентгеновского излучения, а также размер источника излучения и, следовательно, определить динамику энергичных электронов.

Для оценок и расчетов защиты персонала от радиационного воздействия используются различные методы определения фотонной дозы из области взаимодействия короткого лазерного импульса высокой пиковой мощности с мишенью. В частности, в работе [78] авторы выводят некоторые простые соотношения для оценки компоненты фотонной дозы, рассеянной в прямом, по лазерному лучу, направлении. Доза, оцененная с помощью этого метода, примерно соответствует результатам моделирования с использованием метода Монте-Карло.

Защитные сооружения могут иметь весьма впечатляющий масштаб. На Рис. 3.47. изображена одна из сорока четырех защитных дверей мишенного зала в NIF (National Ignition Facility, US) [79].



Рис. 3.47. Одна из сорока четырех защитных дверей мишенного зала в NIF, которые были собраны, установлены и заполнены бетоном; эти двери, некоторые весом до пяти тонн, обеспечивают нейтронную и радиационную защиту вокруг мишенной камеры [79]

В комплексе NIF существуют многочисленные системы безопасности, необходимые для обеспечения полной уверенности в безопасности всех проводимых экспериментов [80]. Нейтроны, рентгеновское и гамма- излучение, образующиеся при мощном лазерном импульсе, крайне опасны, если они должным образом не контролируются. Бетонные стены двухметровой толщины и двери, окружающие мишенную камеру, служат основной защитой – они поглощают большую часть энергии испускаемого излучения. Стены прилегающих территорий также снижают энергию до безопасного для персонала уровня. В процессе проектирования, строительства и ввода установки в эксплуатацию безопасность персонала имеют первостепенный приоритет. Итак, учитывая мировой опыт создания наикрупнейших лазерных и ускорительных комплексов, задача обеспечения радиационной безопасности персонала будет решаться в первую очередь – как одна из самых важных задач. Для этого будет выполнен комплекс мер, удовлетворяющий российским и международным нормам безопасности. В частности, планируется:

- размещение мишенной камеры в отдельном помещении мишенном зале, удаленном от лабораторий и офисов, в которых в момент мощного лазерного импульса будет находиться непосредственно не задействованный в эксперименте персонал,
- достаточно большие размеры мишенного зала будут обеспечивать дополнительную защиту, поскольку интенсивность радиационного излучения точечного источника уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния до объекта,
- стены мишенного зала будут иметь слоистую структуру, состоящую из замедлителя и поглотителя вторичных нейтронов, включая специальные марки бетона достаточной толщины,
- мишенное помещение будет иметь лабиринтные входы с массивными защитными дверьми,
- изготовление мишенной камеры и ее «начинки» преимущественно из материалов, в которых отсутствуют процессы активации,
- экранировка мишенной камеры в целом в непосредственной близости от камеры,
- локальная дополнительная защита в местах, соответствующих наиболее вероятному направлению выхода вредного излучения и частиц,
- каждый работник будет обеспечен персональным дозиметром, контроль за показаниями которого будет осуществлять как сам работник, так и специальная служба контроля,
- оснащение мишенного зала дозиметрической аппаратурой, а также системой блокировок и защит, предотвращающих нахождение работников в зале в течение проведения эксперимента,
- будут проводиться специальные мероприятия по исследованию интенсивности и диаграмм направленности вредных излучений из мишенной камеры,
- в планы проведения того или иного эксперимента в обязательном порядке будут в качестве первых пунктов внесены мероприятия по измерению и контролю рассеяния ионизирующего излучения внутри и на поверхности мишенной камеры.
Задача 9. Создание вычислительно-коммуникационного центра

Современный научный центр невозможно себе представить без собственного достаточно мощного вычислительно-коммуникационного центра, обеспечивающего необходимыми вычислительными мощностями все виды проводимых работ. В частности, вычислительно-коммуникационный центр должен будет выполнять следующий набор функций. Во-первых, это обработка, систематизация и архивация экспериментальных данных, полученных в ЦИЭС. Во-вторых, это дистанционное управление научным инженерным И оборудованием. В-третьих, численное моделирование проводимых экспериментов как на стадии их планирования (предсказание результатов и оптимизация параметров экспериментов), так и при интерпретации полученных результатов. В-четвертых, численное исследование новых явлений и эффектов. В-пятых, визуализация данных, полученных в ходе экспериментов и численного моделирования. В-шестых, связь ЦИЭС с другими научными центрами в России и за рубежом.

Для эффективного выполнения всего комплекса имеющихся задач требуется строительство мощного вычислительного кластера, обладающего производительностью на уровне нескольких Пфлопс (10¹⁵ вычислений с плавающей точкой в секунду). По состоянию на октябрь 2011 года наиболее мощный суперкомпьютер, созданный в мире, K computer, располагающийся в Институте физико-химических исследований в японском городе Кобе, имеет максимальную производительность около 8 Пфлопс [81]. При этом максимальная производительность вычислительных систем растёт со временем по экспоненциальному закону, увеличиваясь каждые три года в 10 раз (см. Рис. 3.48).



Рис. 3.48. Статистика 500 самых мощных суперкомпьютеров в мире [81]. Верхняя (фиолетовая) линия – суммарная производительность 500 самых мощных суперкомпьютеров. Средняя (голубая) линия – производительность самого мощного суперкомпьютера. Нижняя (оранжевая) линия – производительность суперкомпьютера, стоящего на 500 месте в рейтинге

Одним из перспективных направлений в технологии суперкомпьютеров является создание систем на основе графических процессоров (GPGPU). Их преимуществом по сравнению с традиционными системами является более низкая стоимость в расчёте на единицу производительности, а также более низкое энергопотребление (порядка 1 МВт в расчёте на 1 Пфлопс). Такие системы уже запущены в ряде мировых центров, в частности, в Китае и Японии, занимая в рейтинге самых производительных систем три места в первой пятёрке. В то же время использование систем, основанных на графических процессорах, в силу специфики используемого аппаратного оборудования подразумевает более сложный процесс разработки программного обеспечения, в частности. принципиально новых численных методов и схем. Разработка таких методов станет одной из задач, которые будут решаться при работе над Проектом ЦИЭС.

Задача 10. Оснащение инженерно-вспомогательных мастерских

Для эффективной работы ЦИЭС необходимо оперативное выполнение работ, связанных как с созданием установки, так и с проведением на ней запланированных исследований. Для этого в Центре будут созданы и оснащены соответствующим оборудованием оптический участок (полировка и нанесение тонкопленочных покрытий), радиоэлектронная лаборатория (разработка и создание блоков питания, плат сбора данных, блоков управления шаговыми двигателями и т.д.), лаборатория вакуумного оборудования (тестирование вакуумного тракта и всех элементов до помещения их в вакуумный тракт), механические мастерские (изготовление, сборка и тестирование оптических столиков и других механических изделий), криогенная станция (обеспечение установки жидким азотом, а при необходимости и жидким гелием).

Задача 11. Обеспечение функционирования установки

Функционирование установки как на стадии создания, так и на стадии экспериментов требует выполнения мероприятий в области проведения управления (Мероприятие 11.1), кадровой политики (Мероприятие 11.2), инфраструктуры (Мероприятие 11.3) международного поддержания И сотрудничества (Мероприятие 11.4). Начинается выполнение мероприятий Задачи 11 либо одновременно с началом Проекта, либо вскоре после его начала. Окончание всех мероприятий совпадает с окончанием Проекта.

<u>Мероприятие 11.1.</u> (Обеспечение эффективного управления) включает в себя разработку и внедрение структуры управления на стадии строительства установки и на стадии экспериментов, разработку правил внутреннего документооборота, организацию структуры, управляющей международными связями, организацию учета и регистрации научных результатов.

<u>Мероприятие 11.2.</u> (Формирование кадрового потенциала) включает в себя распространение информации о Проекте, привлечение одаренных старшеклассников к учебно-научной работе, разработку и внедрение в университеты спецкурсов по тематике Проекта, руководство бакалаврскими и магистерскими дипломами по тематике Проекта, руководство кандидатскими диссертациями по тематике Проекта, организацию стажировок российских специалистов за рубежом.

<u>Мероприятие 11.3.</u> (Обеспечение функционирования инфраструктуры) направлено обеспечение функционирования зданий инженерных на И коммуникаций, двух прототипов 15 ПВт модулей, 200 ПВт лазера, комплекса лазеров с высокой средней мощностью, источника электронов до энергии 100 экспериментальных лабораторий, MэB, главной мишенной камеры, вычислительно-коммуникационного центра, инженерно-вспомогательных мастерских.

<u>Мероприятие 11.4.</u> (Обеспечение эффективного международного сотрудничества) включает в себя создание и работу международного наблюдательного совета, привлечение иностранных ученых для работ по созданию установки и для проведения исследований на установке, привлечение зарубежных технологий, организацию научных конференций по тематике Проекта, создание и обновление сайта Проекта.

- 1. Piskarskas, A., et al., Sov. Phys. Usp., **29**, 969, 1986.
- 2. Dubietis, A., et al., Optics Communications, **88**, 437, 1992.
- 3. Ross, I.N., et al., Optics Communications, **144**, 125, 1997.
- 4. Matousek, P., et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, **36**, 158, 2000.
- 5. Collier, J., et al., Applied Optics, **38**, 7486, 1999.
- 6. Ross, I.N., et al., Applied Optics, **39**, 2422, 2000.
- 7. Jovanovic, I., et al., in Conference on Lasers and Electro-Optics Baltimore, MD, 2001.
- 8. Yoshida, H., et al., in *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, MD, 2001.
- 9. Ross, I.N., et al., in *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, MD, 2001.
- 10. Zhang, S.K., et al., in Conference on Lasers and Electro-Optics Baltimore, MD, 2001.
- 11. Yang, X., et al., Applied Physics B, 73, 219, 2001.
- 12. Andreev, N.F., et al., JETP Letters, 79, 144, 2004.
- 13. Freidman, G., et al., in Conference on Lasers and Electro-Optics Long Beach, CA, 2002.
- 14. Bespalov, V.I., et al., in Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Technical digest CLEO/IQEC 2004 cd-rom2004.
- 15. Dvorkin, K.L., et al., in *Modern Problems of Laser Physics*. Novosibirsk, Russia, 2004.
- 16. <u>http://www.clevelandcrystals.com/news.shtml</u>.
- 17. Lozhkarev, V.V., et al., Laser Physics, 15, 1319, 2005.
- 18. Lozhkarev, V.V., et al., Laser Physics Letters, 4, 421, 2007.
- Hernandez-Gomez, C., et al., CLF Annual Report <u>http://www.clf.rl.ac.uk/resources/PDF/ar06-07_s7vulcan_10pwproject.pdf</u>, 2006-2007.
- 20. Потемкин, А.К., et al., Квантовая Электроника, 35, 302, 2005.
- 21. Катин, Е.В., et al., Квантовая Электроника, **33**, 836, 2003.
- 22. Poteomkin, A.K., et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, 45, 854, 2009.
- 23. Danelius, R., et al., JETP Letters 42, 122, 1985.
- 24. Андреев, Н.Ф., et al., Письма в ЖЭТФ, 79, 178, 2004.
- 25. Фрейдман, Г.И., et al., Квантовая Электроника, **37**, 147, 2007.
- 26. Martinez, O.E., IEEE J. Quantum Electron., **QE-23**, 59, 1987.
- 27. Lyachev, A., et al., Opt. Express, 19, 15824, 2011.
- 28. Мартьянов, М.А., et al., Квантовая Электроника, **38**, 354, 2008.
- 29. Bunkenberg, J., et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, **QE-17**, 1620, 1981.
- 30. Власов, С.Н., et al., Квантовая Электроника, 9, 14, 1982.
- 31. Poteomkin, A.K., et al., Applied Optics, 46, 4423, 2007.
- 32. Lozhkarev, V.V., et al., Optics Express, 14, 446, 2006.
- 33. Гаранин, С.Г., et al., Квантовая Электроника, **35**, 299, 2005.
- 34. Belov, I.A., et al., in Laser Optics 20102010.
- 35. Haynam, C.A., et al., Applied Optics 46, 3276, 2007.
- 36. Khazanov, E.A., et al., in *International Conference on High Power Laser Beams*. Nizhny Novgorod Yaroslavl Nizhny Novgorod, 2006.
- 37. Review, L., Quarterly Report, **115**, 2008.
- 38. Jullien, A., et al., Optics Letters, **29**, 2184, 2004.
- 39. Homoelle, D., et al., Opt. Lett., 27, 1646, 2002.
- 40. Stolen, R.H., et al., Opt. Lett., 7, 512, 1982.
- 41. Jullien, A., Opt. Lett., 30, 8, 2005.
- 42. Ramirez, L.P., et al., OSA/HILAS, 2011.
- 43. Mironov, S.Y., et al., Applied Optics, **48**, 2051, 2009.
- 44. Druon, F., et al., Opt. Lett. , 23, 1043, 1998.
- 45. Wattellier, B., et al., Rev. Sci. Instrum., 75, 5186, 2004.
- 46. Fourmaux, S., et al., Optics Express, , 16, 11987, 2008.
- 47. Fourmaux, S., et al., Optics Express, , 17, 178, 2009.
- 48. https://www.llnl.gov/str/September03/Moses.html.
- 49. Fan, T.Y., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. , **11**, 567, 2005.

- 50. Leger, J.R., *External methods of phase locking and coherent beam addition of diode lasers, in Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays*, ed. G.A. Evans and J.M. Hammer. 1993: Academic.
- 51. Kapon, E., et al., Opt. Lett., 9, 125, 1984.
- 52. Andreev, N., et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, 27, 135, 1991.
- 53. Daniault, L., et al., in In Proc. 8th ultrafast conference Ultrafast Optics. Monterey, 2011.
- 54. Shay, T.M., et al., Opt. Express, **14**, 12015, 2006.
- 55. Hornung, M., et al., Optics Letters, **35**, 2073, 2010.
- 56. Horung, M., et al., in In Proc. 8th ultrafast conference Ultrafast Optics. Monterey, 2011.
- 57. International Linear Collider reference design report ILC global design effort and world wide study. Executive Summary. Executive Summary ed. J. Brau, Y. Okada, and N. Walker. Vol. XXIV. 2007, ILC.
- 58. Potemkin, A.K., et al., Quantum Electronics, 40, 1123, 2010
- 59. Kuriki, M., et al., in *Annual meeting of Particle accelerator society of Japan*. Himeji, Japan, 2010.
- 60. Andrianov, A.V., et al., Optics Letters, **35**, 3805, 2010.
- 61. Palashov, O., et al., in SPIE Optics + Optoelectronics Prague, Czech Republic, 2011.
- 62. Butkus, R., et al., Applied Physics B, **79**, 693, 2004.
- 63. Chanteloup, J.F., et al., in Conference on Lasers and Electro-Optics, Technical Digest (CD) (OSA, 2006)2006.
- 64. Kawashima, T., et al., J. Phys. IV France 133, 615 2006.
- 65. Hein, J., et al., in Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD) (OSA, 2003)2003.
- 66. Tokita, S., et al., Optics Express, **15**, 3955, 2007.
- 67. Lucianetti, A., et al., Beyond 10 J/2 Hz LUSIA current status with cryogenic amplifier, in SPIE Optics and Optoelectronics. 2011: Prague.
- 68. Kaminskii, A., et al., Optics Letters, **32**, 1890, 2007.
- 69. Lu, J., et al., Applied Physics, **39**, 1048, 2000.
- 70. Tokurakawa, M., et al. in Advanced Solid-State Photonics. Nara, Japan, 2008.
- 71. Mukhin, I.B., et al., Optics Express, 13, 5983, 2005.
- 72. Палашов, О.В., et al., Квантовая Электроника, **37**, 27, 2007.
- 73. <u>http://rusnanonet.ru/rosnano/project_diode-laser</u>.
- 74. Borne, F., et al., Radiation Protection Dosimetry, **102**, 61, 2002.
- 75. Clarke, R.J., et al., J. Radiol. Prot., 26, 277, 2006.
- 76. Stevenson, G.R., Radiation Protection Dosimetry, 96, 359, 2001.
- 77. Kneip, S., et al., Central Laser Facility Annual Report, 34 2005/2006.
- 78. Hayashi, Y., et al., Radiation Protection Dosimetry, **121**, 99, 2006.
- 79. Moses, E.I. in 23rd IAEA Fusion Energy Conference. Daejon, Korea Rep., 2010.
- 80. https://lasers.llnl.gov/about/nif/how_nif_works/target_chamber.php.
- 81. <u>http://top500.org/lists/2011/06</u>.

Проведение фундаментальных исследований на базе созданной ифраструктуры (Цель 2 и задачи по ее осуществлению)

Второй целью проекта является проведение фундаментальных инфраструктуры. исследований на базе созданной Экспериментальные исследования планируется вести в четырех основных направлениях, которые в настоящее время принято называть «четырьмя колоннами физики экстремального света», включая создание вторичных источников ускоренных частиц и жестких фотонов на базе взаимодействия экстремально сильных полей с веществом, разработку аттосекундных и зептосекундных источников электромагнитного излучения, фотоядерную физику и изучение нелинейных свойств вакуума в сверхсильных полях. Дополнительным экспериментальным направлением, базирующимся в определенной мере на результатах предыдущих, является лабораторное моделирование астрофизических и ранних космологических явлений. Для обеспечения постановки экспериментов и интерпретации их результатов будет осуществляться теоретическое моделирование процессов взаимодействия излучения с веществом в диапазоне интенсивностей 10²³-10²⁷ Вт/см², на несколько порядков превосходящих достигнутые к настоящему времени на наиболее передовых установках в мире. Наряду с этим, будет осуществляться разработка ИСТОЧНИКОВ излучения концепций создания экзаваттного И зеттаваттного уровней мощности на базе взаимодействия мультипетаваттных импульсов с плазмой. Разработка этих концепций будет сопровождаться развитием соответствующей элементной базы.

Наиболее близким по научным задачам к предлагаемому проекту ЦИЭС является европейский проект ELI (Extreme Light Infrastructure, http://www.extremelight-infrastructure.eu/). В настоящее время проект находится в стадии разработки. Проект предусматривает исследования в области физики сильных полей с помощью интенсивного лазерного излучения. Предполагается, что интенсивность лазерного поля в фокусе после сложения всех лучей достигнет значения 10^{23} Вт/см². Проект состоит из трех «колонн», посвященным исследованиям в области ускорения заряженных частиц, аттосекундной физики и фотоядерной физики, соответственно. В рамках проекта ЦИЭС планируемая интенсивность излучения должна быть на 2 порядка выше значения, предусматриваемого в проекте ELI, что впервые позволит в лабораторных условиях исследовать квантово-электродинамические эффекты, такие как пробой вакуума, генерация электромагнитных каскадов и пр. Таким образом, проект ЦИЭС можно рассматривать, как четвертую «колонну» ELI, посвященную физики сверхсильных полей. Более того, благодаря более высокой интенсивности лазерного излучения в ЦИЭС можно ожидать более высоких значений энергии заряженных частиц и гамма-квантов. В этом смысле, проекты можно считать взаимодополняющими друг друга и синергетическое взаимодействие между ними позволит успешно реализовать оба проекта.

<u>Задача 1.</u> Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом

В мероприятия данной задачи входит разработка, анализ и расчет моделей лазерно-плазменного ускорения частиц, новых источников излучения R рентгеновском и гамма-диапазонах, включая источники аттосекундной И зептосекундной длительности, моделей квантовой электродинамики в сверхсильных лазерных полях, экстремальных состояний вещества в условиях сверхвысоких температур и давлений. Для обеспечения моделирования будут компьютерные создаваться И внедряться новые коды, в том числе предназначенные для расчетов на высокопроизводительных компьютерах вычислительно-коммуникационного центра ЦИЭС. На базе аналитических и численных расчетов будут планироваться эксперименты по наблюдению новых явлений и интерпретироваться экспериментальные результаты.

<u>Мероприятие 1.1.</u> Разработка теоретических моделей процессов

Фокусировка мощного лазерного излучения на вещество приводит к концентрации энергии в малой пространственно-временной области и генерации быстрых частиц. Большой прогресс в настоящее время достигнут в в лазерноплазменном ускорении электронов. В лаборатории удалось получить квазимоноэнергетичесие сгустки электронов с энергией 1 ГэВ [1]. Процесс ускорения плазменных электронов может быть условно разделен на три стадии: (i) рассеяние на лазерном импульсе, (ii) самоинжекция (захват) электрона в плазменную полость, (iii) ускорение электрона в полости. Сначала плазменные электроны, участвующие во взаимодействии, рассеиваются в поле лазерного импульса, образую плазменную полость. Лишь малая часть рассеянных электронов захватывается в образовавшуюся полость и ускоряются до больших

энергий. В настоящее время отсутствуют надежные теоретические модели, описывающие как данные три стадии, так и динамику лазерного импульса при его распространении в плазме. Кроме этого, требуют анализа различные способы контроля самоинжекции, а также различные схемы инжекции внешнего электронного пучка. Среди способов контроля, активно обсуждающихся в последнее время, можно отметить: способ со сталкивающимися лазерными импульсами [2-3], с изменяющейся плотностью плазмы вдоль трассы ускорения в [4-6], с ионизационным контролем [7] и др. Разработанные в ЦИЭС теоретические модели будут использоваться для планирования и анализа экспериментов.

Одним из важнейших применений продуктов взаимодействия мощного лазерного импульса с веществом является создание нового поколения источников электромагнитного излучения в труднодоступных областях электромагнитного спектра с предельными параметрами. Возможные приложения охватывают изучение сверхбыстрых процессов в атомах, молекулах и твёрдых телах, новые методы диагностики в медицине, структурные исследования сложных молекул в биологии, органической химии, фармацевтике и т.д. В настоящее время в этом диапазоне отсутствуют мощные, компактные и эффективные источники излучения. Существует много механизмов, приводящих к эффективной генерации коротковолнового излучения: бетатронный механизм [8], комптоновский механизм [9], генерацию высоких гармоник при взаимодействии лазерного импульса с поверхностью твердотельных мишеней [10][, электромагнитные каскады [11]. Следует отметить, что создание теоретических моделей, описывающих данные механизмы, далеко от завершения. Определённые успехи были достигнуты при использовании асимптотического анализа, основанного на применении теории релятивистского самоподобия [12]. Этот подход позволил получить относительно универсальные спектры генерируемых на поверхности мишени высоких гармоник [13-14]. Эти спектры были подтверждены экспериментально [15-16].

В сильно нелинейных режимах более точной моделью оказалась модель релятивистской электронной пружины [17]. Эта модель описывает процесс генерации гармоник как трёхстадийный: энергия лазерного излучения сначала перекачивается в энергию плазменных полей, возникающих при разделении зарядов, затем эта энергия трансформируется в кинетическую энергию электронов, вылетающих навстречу излучению, а на последнем этапе пучок разогнанных электронов генерирует короткий аттосекундный всплеск.

Начиная с начала 1960-х годов были выполнены многочисленные расчеты фундаментальных квантовоэлектродинамических процессов (в т.ч., вероятностей излучения и поглощения фотона, рождения пары фотоном и однофотонной аннигиляция пары, расщепления фотона, поляризационного и массового операторов – в магнитном, постоянном скрещенном поле и в поле плоской монохроматической волны), которых учитывалось в внешнее поле непертурбативно (эти исследования были начаты в работах [18-25]). Следует отметить, что при достаточно высоких интенсивностях лазерного поля для получения корректных результатов при расчете квантовых процессов нужно учитывать все множество радиационных поправок, возникающих от вставки неограниченного числа поляризационных петель, поскольку параметр разложения теории возмущений в этих условиях может оказаться больше единицы [26-27]. По этой причине разработанный к настоящему времени формализм на самом деле принципиально ограничен интенсивностями порядка 10²⁹ Вт/см². К сожалению, естественно возникающая задача преодоления указанных трудностей до сих пор пока не получила должного внимания в литературе.

В недавней работе [28] на основе простых оценок было предсказано, что в электромагнитных полях интенсивности порядка 10²⁴ Вт/см² и выше следует ожидать возникновения «спонтанных» квантовоэлектродинамических каскадов, первоначально медленными инициированных затравочными заряженными частицами. В этом случае лазерное поле играет сразу двоякую роль, сначала ускоряя заряженные частицы, а затем инициируя квантовоэлектродинамические процессы с набравшими энергию в результате ускорения заряженными частицами. При этом, возникновение каскадов в принципе возможно практически при произвольной конфигурации лазерного поля. В данном случае развитие каскадов будет продолжаться вплоть до полного выталкивания всех заряженных частиц из фокуса лазерного поля пондеромоторным потенциалом, либо, при более экстремальных условиях, вплоть до истощения лазерного поля за счет его поглощения быстро образующейся электрон-позитронной плазмой [29]. К настоящему времени теория коллективных квантово-плазменных процессов пока не построена. Поэтому в ЦИЭС большое внимание будет уделено разработки теоретических явлений КЭД процессов в сильных световых полях.

Мероприятие 1.2. Разработка и реализация новых компьютерных кодов

Из-за трудностей теоретического описания взаимодействия мощного лазерного импульса с плазмой, численное моделирование является важным и мощным средством, как для исследования самого взаимодействия, так и для проверки теоретических результатов, планирования экспериментов И интерпретации экспериментальных данных. Поскольку интенсивности излучения настолько велики, что любое вещество, попадающее в область его локализации, практически мгновенно ионизируется, основной задачей является моделирование самосогласованной динамики взаимодействия электромагнитных волн с плазмой. Для решения этой задачи применяются различные методы, основанные на различных приближениях. В частности, можно выделить численные методы, основанные на решении гидродинамических и кинетических уравнений для плазмы. При этом для решения кинетического уравнения (уравнения Власова) применяются как эйлеровы методы (основанные на конечных разностях, конечных объёмах, спектральном разложении и т. д.) и лагранжевые. Среди последних особо популярен метод частиц в ячейках (PIC — Particle-In-Cell), на основе которого получено подавляющее большинство современных численных результатов в области взаимодействия сверхсильного лазерного излучения с веществом.

Данный метод развит для математической модели, в рамках которой плазма представляется ансамблем отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных ионов, создающих и двигающихся под действием электромагнитных полей, и фактически состоит в последовательном интегрировании уравнений движений всех частиц плазмы и уравнений эволюции электромагнитного поля, заданного на некоторой дискретной сетке в определенной части пространства. Эволюция электрического и магнитного полей описывается в рамках уравнений Максвелла, которые могут решаться как методом конечных разностей (в частности, популярным является метод FDTD [30]), так и спектральными методами, например, методом разложения в ряд Фурье.

Общая структура вычислительного цикла метода частиц в ячейках изображена на рис. 4.1. Вычислительный цикл состоит из четырех основных частей, выполняющихся последовательно на каждой временной итерации. Сверху и снизу на рис. 4.1 изображены процедуры численного интегрирования уравнений движения для частиц плазмы и для уравнений Максвелла для электромагнитных полей на следующей итерации соответственно. Слева и справа изображены, так называемые, процедуры взвешивания, определяющие связь между частицами,

имеющими непрерывные значения координат, И пространственными распределениями тока и электромагнитного поля, задаваемыми на дискретной решетке. Взвешивание частиц заключается в определении матрицы пространственной плотности тока по непрерывным значениям координат и Взвешивание электромагнитных полей заключается скоростей частиц. в определении электрического и магнитного поля в точке нахождения каждой из частиц по значениям электромагнитного поля, заданного на дискретной решетке.



Рис. 4.1. Общая схема вычислительного цикла метода частиц в ячейках

В одномерной геометрии техника моделирования плазмы методом частиц в ячейках при использовании современных персональных компьютеров чаще всего при правильной реализации алгоритма позволяет проводить численный эксперимент за времена от нескольких секунд до нескольких часов. В сравнении с моделированием в одномерной геометрии для двумерной и трехмерной геометрии требуется выполнение больших объемов вычислений, вследствие чего чрезвычайно важной является возможность использование суперкомпьютеров для параллельных вычислений.

Помимо имеющихся в наличие у коллектива стандартных трехмерных кодов QUILL [31], и ELMIS [32], основанных на методе частиц в ячейке, предполагается разработать линейку более быстрых трехмерных кодов для моделирования лазерно-плазменного ускорения на больших трассах:

1) Код основанный, на методе частиц в ячейках с использованием пондеромоторного приближения.

Стандартные вычислительные программы, основанные на методе частиц в ячейках, даже на современных вычислительных системах требуют слишком большого количества вычислительного времени для моделирования больших трасс ускорения. Численный алгоритм, использующий метод частиц в ячейках и пондеромоторное приближение для описания действия лазерного поля на частицу, позволяет моделировать в трехмерной геометрии взаимодействие релятивистски сильного лазерного импульса с плазмой, используя больший шаг пространственной сетки, определяемый плазменной длиной волны, чем шаг в стандартных вычислительных программах, основанных на методе частиц в ячейках, определяемый лазерной длиной волны. Данное обстоятельство для газовых мишеней, в свою очередь, позволит с помощью данного численного алгоритма моделировать большие трассы ускорения электронов. Все это в совокупности будет способствовать решению основной задачи по заявленной проблеме.

2) Код основанный, на методе частиц в ячейках с использованием квазистатического и пондеромоторного приближения.

В случае моделирования ускорения электронов на трассах, длиною в несколько метров, необходимо использовать более быстрые и устойчивые численные схемы. Такие трассы возможны при взаимодействии мультипетаваттных лазерных импульсов с сильно разреженной газовой струей. Численная схема, использующий метод частиц в ячейках и квазистатическое приближение для описания электромагнитных полей, обладает повышенной устойчивостью и позволяет моделировать большие трассы ускорения.

3) Код, основанный на моделировании процессов в системе отсчёта, двигающейся с околосветовой скоростью по отношению к лабораторной [33]. В этом случае интересна проблема численной неустойчивости, обнаруженная не так давно [34]. Эта проблема, возможно, будет решена путём использования метода параллельного Фурье-преобразования для вычисления электромагнитных полей, разработанного в нашем коллективе.

4) Одним из перспективных направлений в создании современных параллельных программ является использование для вычислений графических процессоров (GPU), которые отличаются меньшей стоимостью и меньшим энергопотреблением в расчёте на единицу производительности [35-36]. Особый интерес вызывает возможность создания программ, способных работать на гибридных архитектурах: используя как традиционные процессоры, так и графически. В то же время моделирование под графические процессоры сопряжено с рядом трудностей, связанных с особенностями устройства хранения и доступа к памяти в них. В рамках проекта ЦИЭС будет проводиться работа по развитию кода *Picador*, предназначенного для работы на гибридной архитектуре CPU/GPU [37].

Для моделирования новых источников излучения в рентгеновском и гаммадиапазонах предлагается разработать как отдельные модули, описывающие радиационные и квантовые эффекты, так и самостоятельные программы, полностью моделирующие основные процессы в источниках. Предполагается, что модули могут быть интегрированы в существующие и новые программы, описывающие взаимодействие интенсивного электромагнитного излучения с веществом.

Для изучения динамики электрон-позитронной плазмы, образовавшейся в результате развития каскад, предполагается разработать трехмерную численную модель, основанную на методе частиц в ячейке и методе Монте-Карло. Двухмерная версия была представлена в работе [29]. Однако данная модель использует уравнения электростатики для описания плазменных полей. классический подход для излучения фотонов и силу реакции излучения в уравнениях движения. Предполагаемая численная модель будет использовать более общий подход: излучение фотона рассматривается в рамках квантовой теории, динамика лазерного и плазменного полей описывается в рамках уравнения Максвелла. Важно отметить, что характерные энергии фотонов в электрон-позитронной плазме различаются на много порядков. Энергия фотонов лазерного и плазменного поля достаточно низкая ($\hbar \omega \ll mc^2$) в то время как энергия фотонов, излучаемых ускоренными электронами и позитронами наоборот очень высокая ($\hbar \omega \gg mc^2$). Данное обстоятельство позволяет рассматривать высокоэнергетические фотоны как частицы, рассчитывая их распространение в результате решения уравнения движения, а эволюцию лазерных и плазменных полей рассчитывать путем численного решения уравнений Максвелла. Таким образом, динамика электронов, позитронов и жестких фотонов, а также эволюция плазмы и лазерных полей рассчитывается с помощью метода частиц в ячейках, в то время как излучение жестких фотонов и рождение электрон-позитронных пар будет рассчитываться с помощью метода Монте-Карло.

Излучения фотона предполагается моделировать следующим образом. На каждом шаге по времени для каждого электрона и позитрона, проверяется возможность испускания фотонов с распределением вероятности. Излученный фотон появляется в области моделирования как новая частица. Координаты такого фотона совпадают с координатами его электрона (позитрона), излучающими данный фотон. Импульс фотона направлен в сторону импульса электронов (позитронов) в момент излучения. При этом значение импульса электрона (позитрона) уменьшается на величину импульса фотона. Аналогичные алгоритм используется для моделирования рождения фотонами электрон-позитронных пар. Новые электрон и позитрон добавляются в область моделирования, в то время как фотон, распадающийся на эту пару, удаляется. При этом, сумма энергий электрона и позитрона равна энергии фотона, а скорость электрон-позитронной пары направлена вдоль скорости фотона в момент распада.

Движение частиц и эволюция низкочастотного электромагнитного поля будет рассчитываться с помощью стандартной численной схемы, использующей метод частиц в ячейках [31]. Для того, чтобы предотвратить переполнение памяти во время моделирования из-за экспоненциального роста числа частиц в каскаде, будет использоваться метод слияния частиц. Если число частиц в области моделирования становится слишком большим, то случайно выбранные частицы удаляются, в то время как заряд, масса и энергия остальных частиц увеличиваются на заряд, массу и энергию удаленных частиц, соответственно. Блок-схема расчета радиационных и квантовых эффектов в лазерной плазме показана на рисунке 4.2.



Рис. 4.2. Блок-схема расчета радиационных и квантовых эффектов в лазерной плазме, рассчитываемой по методу PIC

Большое внимание в ЦИЭС будет уделено также созданию кодов для моделирования экстремальных состояний вещества в условиях сверхвысоких температур и давлений. Для описания таких состояний на «микроуровне» предполагается использовать методы молекулярной динамики, для моделирования состояний на больших масштабах – методы радиационной магнитогидродинамики.

Будет произведена разработка, трехмерных отладка кодов И полномасштабное численное моделирование развития процессов в лазерных полях реалистичной конфигурации с учетом радиационных и квантовых эффектов в диапазоне значений параметров, отвечающих планируемым экспериментам на установке. На базе аналитических и численных расчетов будут планироваться эксперименты ПО наблюдению новых явлений, интерпретироваться И экспериментальные результаты.

<u>Задача 2.</u> Проведение экспериментов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц

Данная задача направлена на создание компактных источников ускоренных заряженных частиц на основе лазерно-плазменных взаимодействий. Будет осуществлено исследование различных механизмов ускорения электронов и ионов в газовых, твердотельных и структурированных мишенях. Уже к настоящему времени продемонстрированы темпы лазерно-плазменного ускорения заряженных частиц на 3-4 порядка большие, чем в конвенциональных ускорителях. В планах ЦИЭС стоит вопрос о достижении в компактных установках интегральных характеристик ускорения и качества пучков, соответствующих требованиям экспериментов по физике высоких энергий. отдельный интерес представляет вопрос о комбинированном ускорении электронов в линейных и лазерно-плазменных ускорителях, что даст возможность объединить высокое качество инжектируемых сгустков частиц и высокий темп их ускорения. Основываясь на прогнозируемых результатах ЦИЭС, ускорение электронов до энергий в сотни ГэВ и ионов до энергий десятки ГэВ может быть реализовано в относительно небольших лабораториях академических и университетских центров, что значительно расширит фронт исследований по физике высоких энергий. Работы по данной задаче будут включать в себя разработку лазерных мишеней, проведение экспериментов на прототипе экзаваттного комплекса, в том числе с использованием малого линейного ускорителя, и эксперименты на 200 ПВт лазере и 100 МэВ линейном ускорителе электронов.

<u>Мероприятие 2.1.</u> Лазерно-плазменное ускорение электронов до энергий 10-1000 ГэВ

Стандартные современные методы ускорения заряженных частиц подошли к технологическому пределу, при котором дальнейшее увеличение ускоряющего поля может привести к разрушению ускоряющей структуры. Трудности, которые стоят перед современными ускорителями, заставляют искать альтернативные способы ускорения заряженных частиц, позволяющие добиться более высокого темпа ускорения. Наиболее обсуждаемые в последнее время альтернативные схемы с высоким темпом ускорения заряженных частиц основаны на использовании сверхсильных световых полей. Плазма, возникающая в результате взаимодействия лазерного поля с мишенью, позволяет эффективным образом преобразовать лазерную энергию в кинетическую энергию заряженных частиц. При распространении в плазме короткого и мощного лазерного импульса в ней образуются структуры с гигантским продольным электрическим полем, напряженность которого на несколько порядков превышает напряженность ускоряющего поля в современных ускорителях. Такие структуры двигаются за лазерным импульсом со скоростью, близкой к скорости света. Заряженная частица, захваченная в плазменную структуру в ускоряющей фазе продольного поля, может быть ускорена до больших энергий (Рис. 4.3).



Рис. 4.3. Распределение электронной концентрации позади лазерного импульса

В случае высокой интенсивности лазерного излучения, что характерно для предлагаемой установки, взаимодействия импульса с плазмой происходит в сильно нелинейном режиме. Пондеромоторная сила релятивистски интенсивного лазерного импульса выталкивает плазменные электроны из области высокой интенсивности. За счет этого позади лазерного импульса создается плазменная полость, лишенная электронов [38] (Рис. 4.4). Огромный незаэкранированный заряд ионов создает внутри полости сильные ускоряющие и фокусирующие поля. Кроме того, большое число плазменных электронов может быть захвачено полостью последующим ускорением больших энергий. Недавние С до эксперименты показали возможность захвата электронов И получения квазимоноэнергетических электронных пучков с энергией до 1 ГэВ [1].



Рис. 4.4. Распределение электронной концентрации (а) и быстрых электронов (b) в сильно нелинейном режиме [38]

В простейшем случае схема ускорения электронов с помощью мощного лазерного импульса может быть проиллюстрирована Рис. 4.5. В фокусе параболического зеркала, на которое падает несфокусировнный лазерный импульс, располагается мишень – газовая струя, создаваемая соплом. При взаимодействии лазерного импульса с газом, происходит его ионизация передним фронтом импульса. Основная часть импульса генерирует ускоряющую плазменную структуру. Захваченные плазменные электроны или электроны, инжектированные извне, могут ускоряться в такой структуре до больших энергий. Состав газа, форма лазерного импульса могут меняться, что позволяет управлять параметрами ускоренных электронов. Данная схема может совершенствоваться и использовать плазменные каналы, многоступенчатое ускорение, профилирование плазмы и т.д.







Как следует из теории самофокусировки [40], для того чтобы дифракция волнового пучка была подавлена в плазме, его мощность должна быть больше некоторой величины, так называемой критической мощности самофокусировки

$$P > P_c = 0.017 \frac{n_c}{n}$$
 [TBT] (2.1.1)

где n – плотность плазмы, $n_c \approx 1.3 \cdot 10^{21}$ см⁻³ – критическая плотность плазмы для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 910$ нм. Это условие задает нижнюю границу плотности плазмы, при которой возможно самоканалирование лазерного импульса. Например, для мощности одного луча установки 15 ПВт: $n > 10^{15}$ см⁻³, для суммарной мощности 180 ПВт: $n > 10^{14}$ см⁻³. Следует отметить, что это условие приближенное, поскольку оно получено для бесконечно длинного лазерного импульса. Помимо дифракции лазерного импульса ускорение электронов в лазерной плазме также ограничивается дефазировкой электронов (электроны, двигаясь в плазменной волне, могут попасть из ускоряющей фазы в

тормозящую фазу поля) и поглощением энергии лазерного поля в плазме. Характерная длина, на которой происходит дефазировка электронов, определяется выражением [41]

$$l_d \approx \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \lambda_p$$

$$1, \quad a_0^2 \ll 1,$$

$$\frac{2a_0^2}{\pi}, \quad a_0^2 \gg 1,$$

$$(2.1.2)$$

w – частота лазерного излучения, *w*_p – электронная плазменная частота, *a*₀ – нормализованный вектор потенциал лазерного излучения. Нормализованный вектор потенциал связан с интенсивностью лазерного излучения следующим соотношением

$$a_0 = 8.6 \times 10^{-10} \lambda \left[\text{MKM} \right] \sqrt{I \left[\text{BT/cm}^2 \right]}.$$
(2.1.3)

В сильно нелинейном режиме, который характерен для экспериментов в ЦИЭС, происходит сильная электронная кавитация. В результате позади лазерного импульса образуется плазменная полость, почти полностью свободная от плазменных электронов. В этом сильно нелинейном режиме длина дефазировки определяется выражением [12]

$$l_p \approx (2/3) \left(\omega^2 / \omega_p^2 \right) R , \qquad (2.1.5)$$

где *R* – радиус полости. Оценка для длины, на которой теряется значительная часть энергии лазерного импульса, может быть записана в виде [41]

$$l_{pd} \approx \frac{\omega^{2}}{\omega_{p}^{2}} \lambda_{p}$$

$$a_{0}^{-2}, \quad a_{0}^{2} << 1,$$

$$a_{0} / 3\pi, \quad a_{0}^{2} >> 1.$$
(2.1.6)

Данные оценки получены в одномерном приближении. Для реальной трехмерной геометрии простых и точных оценок для l_{nd} нет.

Теория подобия, развитая в работах [12, 42], позволяет связать параметры пучка ускоренных в плазме электронов с параметрами лазера и плазмы. Из теории следует, что требование эффективного ускорения электронов накладывает определенные ограничения на геометрию лазерного импульса

$$R < cT , \qquad (2.1.7)$$

где *R* – поперечный размер лазерного импульса, а *T* – его длительность. Кроме этого, плотность плазмы должна быть также ограничена сверху [42]

$$n_1 < n_c \sqrt{\frac{P}{P_{rel}}} \frac{1}{\omega T} , \qquad (2.1.8)$$

где $P_{rel} = m_e^2 c^5 / e^2 \approx 8.5$ ГВт – релятивистская мощность. Энергия ускоренных электронов может быть оценена из теории подобия следующим образом [42]

$$E_{mono} \approx 0.65 m_e c^2 \sqrt{\frac{P}{P_{rel}}} \frac{cT}{\lambda}$$
 (2.1.9)

Для минимальной длительности лазерного импульса 25 фс и мощности одного луча 15 ПВт из оценки (2.1.9) получаем энергию электронов 3.6 ГэВ. Если сложить энергию всех 12 лучей, то энергия электронов достигнет 12.5 ГэВ.

Однако данная длительность лазерного импульса не является оптимальной, поскольку в этом случае $a_0 \gg 1$. Действительно полагая, что R = cT формулу (2.1.9) можно переписать в следующем виде

$$E_{mono} \approx 299 a_0^{-1/3} \left(\frac{W}{\lambda}\right)^{2/3} MeV.$$
 (2.1.10)

Из полученной формулы следует, что наибольшую энергию ускоренных электронов можно получить при наименьшем возможном значении параметра *a*₀ ≈1. Тогда для одного луча с энергией импульса 370 Дж энергия ускоренных электронов может достичь 16.6 ГэВ. При этом длительность импульса должна быть 537 фс. Схема лазерной установки ЦИЭС позволяет увеличивать длительность лазерного импульса. В случае сложения всех 12 лучей энергия импульса достигает 4440 Дж. Тогда энергия ускоренных электронов может достигнуть 87 ГэВ, что значительно превышает значение энергии, достижимой на современных линейных ускорителях.

Наконец гидрирование лазерного импульса с использованием плазменных каналов и инжекция в лазерно-плазменную ускоряющую структуру внешнего электронного пучка позволяет еще больше повысить эффективность ускорения. В этом случае, как показывают оценки, сделанные в группе из UCLA (см. Таблицу 4.1), для параметров сходных с параметрами ЦИЭС энергия ускоренных электронов может превысить 1 ТэВ, что означает выход на недостижимый современными ускорителями уровень энергий лептонов.

P(PW)	τ (fs)	n _p (cm ⁻ 3)	w _o (μm)	L(m)	a 0	$\Delta n_c/n_p$	Q(<mark>nC</mark>)	E(<mark>GeV</mark>)
0.020	30	1×10 ¹⁸	14	0.016	1.76	60%	0.18	0.99
0.040	30	1.5×10 ¹⁸	14	0.011	2.53	40%	0.25	0.95
0.100	30	2.0×10 ¹⁸	15	0.009	3.78	0%	0.40	1.06
0.200	100	1.0×10 ¹⁷	45	0.52	1.76	60%	0.57	9.9
2.0	100	3.0×10 ¹⁷	47	0.18	5.45	0%	1.8	10.2
2.0	310	1.0×10 ¹⁶	140	16.3	1.76	60%	1.8	99
40	330	4.0×10 ¹⁶	146	4.2	7.6	0%	8	106
20	1000	1.0×10 ¹⁵	450	500	1.76	60%	5.7	999
1000	1000	6.5×10 ¹⁵	460	82	12.1	0%	40	1040

Таблица 4.1. Максимальная энергия ускоренных электронов для различных значений параметров лазера и плазмы, с использованием и без плазменного канала, с самоинжекцией и внешней инжекцией [43]

Распространение в плазменном канале: 60% and 40%; без канала: 0%; внешняя инжекция электронов: 60%; самоинжекция: 40% и 0%; P/P_c = 0.7 для случая 60%, и 2 для случая 40%.

<u>Мероприятие 2.2.</u> Лазерно-плазменное ускорение ионов до энергией 1–10 ГэВ

В сравнении с лазерным ускорением электронов изучение возможностей лазерного ускорения протонов и лёгких ионов началось относительно недавно — чуть более десяти лет назад. Основной причиной этому является то, что протоны как значительно более тяжелые, чем электроны, частицы существенно менее подвержены непосредственному воздействию быстро осциллирующих лазерных полей, поэтому для их ускорения требуется большие интенсивности излучения. Например, в экспериментах по лазерному ускорению электронов в прозрачной плазме, образующейся при ионизации газовых мишеней, ионы остаются практически неподвижными, играя роль фонового положительного заряда. В случае взаимодействия с мишенью в виде плотной (например, твердотельной) плазмы, на фемтосекундных временных масштабах энергия интенсивного лазерного излучение переходит в основном в энергию движения небольшой приповерхностной фракции электронов. При этом из-за высокой приобретаемой тепловой энергии эти электроны, имея малое сечение рассеяния, разлетаются в пределах плазменной мишени практически бесстолкновительным образом.

Поэтому тепловое равновесие наступает на временных и пространственных масштабах, значительно превышающих характерные значения длительностей доступных сегодня сверх интенсивных лазерных импульсов, что в целом обеспечивает рассредоточение лазерной энергии и, в результате, относительно невысокие тепловые энергии ионов.

Тем не менее, благодаря ряду важнейших приложений лазерное ускорение протонов и легких ионов является сегодня одним из приоритетных направлений исследований в области применения сверхмощных лазерных систем. Среди таких приложений следует особо выделить разработку относительно компактных и ионных ускорителей для целей. дешевых медицинских являющихся альтернативой используемых сегодня огромных и дорогостоящих классических ускорителей. Разработка на основе лазерных технологий компактных источников протонных и ионных пучков с управляемой энергией на уровне до нескольких сотен МэВ может иметь революционное значение для развития и массового применения адронной терапии онкологических заболеваний. Суть этой терапии, подобно другим видам радиотерапии, заключается в ионизирующем воздействии на клетки опухоли. При этом важнейшее значение имеет возможность локализованного в пространстве воздействия, чтобы исключить негативное воздействие излучения на располагающиеся в окрестности биологические ткани. Преимущество применения ускоренных легких ионов перед более часто применяемыми сегодня другими методиками радиотерапии легко видеть на рис. 4.6, на котором изображена относительная доза поглощаемой энергии в зависимости от глубины проникновения излучения. На графике для ускоренных ионов углерода хорошо виден так называемый брэгговский пик поглощаемой энергии, положение которого может управляться путем изменения энергии ионов на входе в биологические ткани. В случае применения ионов, воздействие на расположенные рядом биологические ткани оказывается значительно меньшим, чем у альтернативных методик. Следует, однако, отметить, что протонная терапия предъявляет весьма существенные требования к качеству ионного пучка. В частности, требуется чрезвычайно малый разброс по энергиям (около 1 %).



Рис. 4.6. Зависимость относительной дозы поглощаемой энергии излучения от глубины проникновения в воду для различных методик радиотерапии

Среди других приложений лазерного ускорения протонов можно выделить протонографию, то есть методику определения внутренней структуры различных объектов, путем регистрации прошедших через них протонов. Обсуждается также концепция «быстрого поджига» для управляемого термоядерного синтеза на основе использования для сжатия и нагрева топлива протонов, ускоренных лазерным излучением [44].

Благодаря росту доступных интенсивностей лазерного излучения И стимулированию со стороны возможностей применения для вышеупомянутых приложений направление лазерного ускорения протонов и легких ионов особенно активно развивается последние десять лет. За это время было разработано множество различных теоретических концепций, основанных на применении различных структурированных мишеней и использовании сильно нелинейных Кроме были релятивистских эффектов. того, проведены первые экспериментальные исследования, благодаря которым на данный момент уже удалось получить протоны с энергией несколько десятков МэВ.

Исторически первым исследованным механизмом ускорения протонов и лёгких ионов стало ускорение приповерхностным слоем нагретых электронов (Target Normal Sheath Acceleration — TNSA) [45], суть которого заключается в следующем (см. рис. 4.7). Интенсивный лазерный импульс фокусируется на поверхность тонкой металлической фольги обычно под некоторым углом, чтобы увеличить степень поглощения лазерного излучения и избежать обратного отражения, что может привести к повреждению усиливающей среды лазерной системы. При взаимодействии с металлической поверхностью происходит ионизация приповерхностных атомов и быстрый (на временах порядка периода оптического излучения) нагрев электронов, в результате которого они приобретают большие энергии (от нескольких десятков и сотен кэВ до нескольких МэВ). Далее происходит разлет этих электронов во всех направлениях, при этом из-за высоких энергий электроны имеют малые сечения рассеяния на атомах мишени и практически бесстолкновительно проникают сквозь толщь фольги, достигая поверхности, противоположной облучаемой. За счет высокой энергии, несмотря на удерживающие электростатические силы со стороны ионов мишени, быстрые электроны по инерции вылетают за пределы металлической фольги, формируя вблизи поверхности квазистационарное электрическое поле разделения зарядов, направленное по нормали к поверхности. Это поле в свою очередь обеспечивает ускорение ионов по нормали с поверхности мишени. Следует отметить, что в первых экспериментах наблюдались протоны и легкие ионы, которые содержались в приповерхностном слое, обычно присутствующем в естественных условиях из-за образования оксидной пленки и конденсации паров воды.



Рис. 4.7. Условная схема метода ускорения ионов приповерхностным слоем нагретых электронов (источник:[46]). Падающий слева лазерный импульс нагревает электроны мишени, которые, расширяясь за пределы мишени, создают электростатическое поле. Лёгкие ионы и протоны, находящиеся на поверхности мишени ускоряются этим полем по направлению, практически перпендикулярному к поверхности мишени

Одним из первых экспериментов, демонстрирующим возможность ускорения ионов в вышеописанном процессе, стал эксперимент проведенной в Ливерморской национальной лаборатории, в котором генерируемый петаваттной лазерной системой *Nova* импульс с длительностью 0,5-5 пс и пиковой интенсивностью более 10^{20} BT/cm² фокусировался на поверхность различных металлических фольг. В эксперименте регистрировались ускоренные с обратной поверхности фольг лёгкие ионы, имевшие квазимаксвелловское распределение по энергиям, которое тянулось до энергии около 55 МэВ. Всего было ускорено более 10^{13} частиц со средней энергией около 1 МэВ [47].

Одним из способов получения ионных пучков с квазимоноэнергетическими спектрами, что требуется для большинства приложений, является использование структурированной мишени в виде металлической фольги намеренно покрытой тонким слоем, содержащим ускоряемые лёгкие ионы [48]. Идея заключается в том, что после формирования ускоряющего поля вблизи задней поверхности тяжелые ионы фольги в течение относительно длительного времени остаются почти неподвижными, формируя постоянное во времени ускоряющее поле, тогда как легкие ионы из поверхностного слоя покрытия ускоряются в этом поле на сравнительно небольших временах. При этом, если количество легких ионов столь мало, что они не сильно возмущают ускоряющее поле, а толщина покрытия значительно меньше характерного масштаба спадания ускоряющего поля, то легкие ионы оказываются в одинаковых условиях и набирают в процессе ускорения почти одинаковые энергии, образуя квазимоноэнергетичный спектр. Эта методика была подтверждена как численным моделированием, так и в экспериментах [46, 49], в которых удалось получить пучки протонов с энергией около 1,2 МэВ и разбросом по энергиям порядка 25 %.

Для увеличения эффективности поглощения энергии и, как следствие, увеличения ускоряемых ИОНОВ перспективным энергии представляется использование наноструктурированных мишеней. Например, было показано, что использование фольги с небольшими отверстиями, размер которых был оптимизирован, эффективность конверсии энергии лазерного импульса в кинетическую энергию ионов может достигать 17,6 % [50]. Предлагалось также использовать в качестве мишени фольгу с приставленной к ней в плоскости падения другой фольгой [51]. Утверждается, что эта фольга может играть роль дополнительного источника горячих электронов, эффективно ускоряемых распространяющимся неё лазерным импульсом. Альтернативным вдоль источником горячих электронов может служить мишень в виде тонкой фольги с приставленной более толстой фольгой, имеющей тонкий канал, распространяясь в котором, лазерный импульс ускоряет электроны с поверхности канала по направлению к тонкой фольге [52].

В рамках работы проекта ЦИЭС предполагается провести экспериментальное исследование новых методов более эффективного ускорения в режиме TNSA, а также изучить эффективность данного метода при высоких интенсивностях.

В то же время, несмотря на относительный успех схемы TNSA, при больших интенсивностях более эффективными, по всей видимости, являются другие схемы, большинство из которых не может быть реализовано при малых интенсивностях. Среди них следует особо отметить предложенную в 2004 году так называемую схему лазерного поршня [53] (также её называют схемой светового паруса или схемой ускорения световым давлением). Эта схема основана на предложенной ещё в начале XX века идее ускорения тел под действием светового давления. В предложенной изначально схеме тонкая фольга, состоящая из водорода, облучается лазерным импульсом интенсивностью порядка 10²³ BT/cм², в результате чего происходит вырывание сгустка плазмы, состоящей из электронов и ионов, и ускорение его как целого до энергий протонов порядка нескольких ГэВ (см. рис. 4.8).



Рис. 4.8. Моделирование процесса ускорения тонкой (10 нм) металлической фольги световым давлением сверхмощного лазерного излучения. Слева – система в начальный момент времени, справа – система в процессе ускорения. Зелёным отображена плотность электронов, белым – плотность ионов, коричневым – величина электромагнитного поля

В этой же работе была предложена простая модель ускорения ионного слоя, основанная на предположении, что слой как целое ускоряется силой давления со стороны лазерного импульса. При этом необходимо учесть, что в силу эффекта Доплера отражённый импульс имеет значительно меньшую частоту, чем падающий, поэтому при релятивистских скоростях слою может быть передано практически 100% энергии падающего излучения. Оценка конечной энергии ионов в слое в зависимости от времени ускорения для ультрарелятивистского случая имеет вид:

$$E_i^{kin}(t) \approx m_i c^2 \left(\frac{3E_L^2 t}{8\pi n_e l m_i c}\right)^{\frac{1}{3}},$$

где введены следующие обозначения: m_i – масса ионов, E_L – амплитуда электрического поля в лазерном импульсе, n_e – первоначальная концентрация

электронов в слое, *l* – первоначальная толщина слоя. Для характерных значений параметров, которые планируется достичь в одном канале установки ЦИЭС (длительность импульса 25 фс, максимальная интенсивность 10²³ Вт/см²) оценка даёт результат 30 ГэВ для фольги толщиной 1 мкм и плотностью электронов 10²² см⁻³.

Похожая идея может быть использована для ускорения ионов на передней границе [54-58]. В этой схеме используется нормальное падение циркулярно поляризованного импульса на твердотельную мишень. Использование циркулярной поляризации обеспечивает отсутствие бесстолкновительного нагрева, а нормальное падение приводит к квазистационарной картине ускорения: электроны отжимаются под действием пондеромоторной силы и формируют некий ускоряющий потенциал, проходя который ионы, находившиеся на передней границе, приобретают энергию, пропорциональную амплитуде лазерного импульса [59]. Позднее эта схема была дополнена идеей использовать слой многократно: на первом этапе происходит ускорение неподвижного слоя, когда же импульс доходит до его конца, он начинает снова ускорять уже ускоренные ионы, увеличивая их энергию [60]. При малых толщинах слоя эта схема сводится к той же идее ускорения тонких плёнок световым давлением. Существенным, однако, является использование циркулярно поляризованного импульса, что позволяет снизить требуемые для реализации схемы интенсивности излучения [61]. Особенностью схемы является то, что все ионы получают одну и ту же энергию. Были также показаны такие преимущества данной схемы как высокая эффективность, высокие плотности получаемых ионных сгустков, малая расходимость генерируемого пучка и его короткая — фемтосекундная длительность [62].

Недостатком метода ускорения ионов световым давлением является её подверженность поперечным неустойчивостям рэлей-тейлоровского типа [63] или более мелкомасштабным [64-65], что может привести к просветлению слоя и полной остановке процесса ускорения. Было, однако, показано, что эти неустойчивости могут быть подавлены, если движение ускоряемого слоя будет ультрарелятивистским (для чего требуются очень большие интенсивности излучения) [66], кроме того возможно использование специальным образом профилированных лазерного импульса [67] или мишеней [68]. Стабилизация слоя также возможна за счёт краевых эффектов [69] или за счёт присоединения первоначального этапа самоканалирования импульса [70]. Предлагалось также использование двухкомпонентной мишени [71], состоящей из атомов углерода и

водорода. Следует также отметить возможность каскадирования процесса ускорения на нескольких тонких плёнках [72].

Режим ускорения световым давлением на данный момент мало исследован экспериментально, поскольку требует достаточно высоких интенсивностей излучения. В 2008 году были проведены две серии экспериментов на субпетаваттной установке VULCAN в Резерфордовской лаборатории [73]. Были использованы лазерные импульсы с энергией 60 и 250 Дж, длительностью 1 и 0,7 пс соответственно. При этом в фокусе достигались интенсивности в интервале 10¹⁹—10²⁰ Вт/см². При облучении такими импульсами металлических фольг из алюминия и меди толщиной 2 и 5 мкм соответственно наблюдались ускоренные протонные пучки, вылетающие с задней стороны мишени. Их особенностью являлось то, что низкоэнергетическая часть этих пучков имела относительно небольшую расходимость и была испущена с пятна небольшой площади. Это резко контрастирует с тем, что ранее наблюдалось в режиме TNSA, поэтому был сделан вывод, что в этих экспериментах ионы были ускорены силой светового давления, что было также подтверждено проведённым численным моделированием. В 2009 году были опубликованы результаты экспериментов, проведённых в Институте Макса Борна на установке мощностью 20 ТВт [74]. В этих экспериментах впервые был использован циркулярно поляризованный лазерный импульс, имеющий энергию 1,2 Дж и длительность 45 фс с длиной волны 810 Используя двойного плазменного HM. технику зеркала, экспериментаторы достигли контраста импульса порядка 10⁻¹¹ на временах меньших 10 пс. Это позволило осуществить взаимодействие лазерного импульса с неразрушенными мишенями ультрамалой толщины: в эксперименте были использованы углеродные плёнки толщиной от 2.9 до 40 нм. В результате эксперимента наблюдалось формирование моноэнергетического пучка ионов углерода С⁶⁺ с энергией порядка 30 МэВ. При этом оптимальным оказалось взаимодействие с фольгой толщиной 5.3 нм (см. рис. 4.9). Оба результата хорошо согласуются как с развитой ранее теорией, так и с проведённым в работе численным моделированием.



Рис. 4.9. (а) Экспериментально измеренная зависимость максимальной энергии протонов (зелёная и светло-зелёная пунктирные линии) и ионов углерода С⁶⁺ (красная и оранжевая пунктирные линии) для случаев облучения линейно и циркулярно поляризованными импульсами. Серые пунктирные линии соответствуют результатам, полученным методом двумерного PIC-моделирования. (b) Спектры электронов, измеренные для случая оптимальной толщины мишени (5,3 нм). Видно, что для случая циркулярной поляризации нагрев электронов значительно слабее. Результаты взяты из работы [74]

В рамках проекта ЦИЭС возможности ускорения протонов и лёгких ионов световым давлением будет уделено особое внимание. Для этого придётся решить ряд технологических проблем, из которых можно выделить следующие. Вопервых, необходимо научиться получать импульсы высокой интенсивности, имеющие циркулярную поляризацию. Во-вторых, получающиеся импульсы должны обладать высоким контрастом, чтобы взаимодействие шло С неразрушенной мишенью. Это особенно важно для мишеней, представляющих собой тонкие, нанометровой толщины, плёнки. Необходимо также разработать технологию производства наноструктурированных мишеней с произвольной геометрией, позволяющей оптимизировать процесс взаимодействия.

В научной литературе рассматриваются также и другие методы получения пучков протонов и лёгких ионов высоких энергий. Из них следует отметить следующие. Рассматривалась возможность ускорения протонов в кавитационном режиме распространения лазерного импульса в прозрачной плазме [75], однако эта схема требует релятивистских энергий ионов, поэтому предлагалось соединить её с предускорением методом светового давления [76]. Другим предлагавшимся режимом является так называемый режим BOA (Breakout Afterburner) [77]. В режиме происходит взаимодействие ЭТОМ линейно поляризованного лазерного излучения с тонкой фольгой, которая нагревается по всему объёму и разрушается, в результате чего происходит распространение

импульса в разогретой плазме. В этом случае наблюдается развитие релятивистской бунемановской неустойчивости [78], которая приводит к эффективной передаче энергии от электронов ионам. Именно этим методам недавно были получены ионы с наибольшей энергией [79-80].

В эксперименте, проведённом на установке Trident в Ливерморской лаборатории, национальной был использован импульс энергией 80 Дж длительностью 500-600 фс, сфокусированный на мишень внеосевой параболой F/3. Средняя интенсивность на мишени составляла величину около 2×10²⁰ Вт/см². а пиковая достигала величины 5×10²⁰ Вт/см². Важным моментом являлось использование специальных технологий (короткоимпульсного оптического параметрического усиления) для увеличения контраста излучения. В итоге был получен контраст <2×10⁻¹² для пьедестала длительностью 1,2 нс и <5×10⁻¹⁰ для пьедестала 0,5 пс. Это позволило проводить эксперименты с ультратонкими (вплоть до 3 нм толщиной) плёнками. В качестве мишени использовались плёнки из алмазоподобного углерода (DLC), разработанные в Курчатовском институте. Важной особенностью DLC по сравнению с другими формами углерода является то, что изготовленные из него тонкие плёнки обладают повышенной механической прочностью.

В качестве диагностирующего оборудования была использованы специально разработанная томсоновская парабола высокого разрешения [81]. Эта парабола позволяла измерять энергии ионов углерода вплоть до 2 ГэВ. Типичный спектр ионов, полученный для толщины фольги 150 нм, приведён на рис. 4.10. Максимальная полученная энергия ионов углерода С⁶⁺ составила 500 МэВ, ионы с меньшим зарядом практически отсутствовали. С изменение толщины мишени максимальная энергия ионов значительно менялась (см. рис. 4.11), что связано с переходом в другие режимы взаимодействия. Если толщина фольги слишком мала, она быстро становится слишком прозрачной, в то время как наилучшие ионов наблюдаются в условия ДЛЯ ускорения режиме релятивистской прозрачности плазмы, то есть концентрация плазмы должна быть выше, чем случае, критическая концентрация в линейном НΟ ниже, чем порог самоиндуцированной релятивистской прозрачности. Для больших же толщин плазмы релятивистская прозрачность не наступает, и ускорение происходит в менее эффективном режиме TNSA.



Рис. 4.10. Спектр ионов углерода, ускоренных лазерным импульсом, в случае оптимальной толщины DLC-плёнки. Спектры померены для различных углов по отношению к направлению распространения лазерного импульса (который падал перпендикулярно поверхности мишени). Чёрный: 0°, красный: 22,5° в вертикальной плоскости, синий: 22,5° в горизонтальной плоскости. Результаты взяты из работы [80]



Рис. 4.11. Зависимость максимальной энергии ионов углерода от толщины плёнки для параметров экспериментов на установке *Trident* (результат численного моделирования). Источник: [79]

В рамках проекта ЦИЭС планируется осуществлять тесное сотрудничество с Ливерморской национальной лабораторией с целью обмена опытом ПО производству и использованию ультратонких нанометровых мишеней, а также по вопросам диагностики процессов, происходящих в эксперименте. На лазерных ЦИЭС установках, построенных в рамках возможно осуществление экспериментов, аналогичных тем, что были проведены на установке Trident, однако с большей энергией излучения, что позволит получить ещё большие энергии ускоренных ионов.

<u>Мероприятие 2.3.</u> Комбинированное ускорение в линейных и лазерноплазменных ускорителях заряженных частиц

Как следует из содержания *Мероприятия 2.1*, перспективной схемой для достижения максимальных значений энергий ускоренных электронов является схема, базирующаяся на ускорении внешнего электронного пучка, инжектированного в ускоряющую плазменную структуру. Более того, в последнее время такая схема считается наиболее удобной для достижения высокого качества пучка ускоренных электронов (малый разброс по энергии, низкий эмитанс и т.д.), что особенно важно для ряда приложений, например, создание рентгеновских лазеров на свободных электронах.

Ключевой проблемой, которая должна быть решена прежде, чем лазерноплазменный рентгеновский лазер может быть построен, является необходимость уменьшения энергетического разброса ускоренных электронов в пучке до значения менее 0.1%. Для решения этой проблемы предлагаются два способа:

- Анализ и выбор наиболее подходящей схемы для самоинжекции плазменных электронов, обеспечивающий минимальный энергетический разброс электронов в пучке (менее 0.1%). Схема может использовать различные методы: использование вспомогательного лазерного импульса, создание специального пространственного профиля плазмы, добавление в плазму примесей и т.д.
- Исследование внешней инжекции, основанной на инжекции в ускоряющую плазменную структуру электронного пучка, созданного во внешнем фотоинжекторе. Цель исследования – подобрать режим, при котором сохранится начальный энергетический разброс и будет установлена точная синхронизация между фотоинжектором и лазерным импульсом, генерирующем ускоряющую плазменную структуру.

В рамках проекта предполагается строительство ускорителя электронов низкой энергии, основанного на стандартной технологии с использованием фотоинжектора. Пучок, полученный на таком ускорителе, будет инжектирован в ускоряющую плазменную структуру, образованную мощным лазерным импульсом. В настоящее время большой интерес вызывает схема инжекции электронного пучка под небольшим углом к оси распространения лазерного импульса [82-86] (см. Рис. 4.12). Данная схема может обеспечить высокую эффективность инжекция, так что процент электронов, захваченных в ускоряющую плазменную структуру, может достигать 50% [1].



Рис. 4.12. Схема угловой инжекции в ускоряющую плазменную структуру [86]

Несмотря на то, что часть электронов может вначале попасть в дефокусирующую область ускоряющей плазменной структуры, благодаря продольной динамике (торможению или ускорению вдоль оси распространения лазерного импульса) электроны могут перейти в фокусирующую фазу и ускорится (см. Рис. 4.13).



Рис. 4.13. Траектории тестовых электронов внешнего пучка, инжектированного в ускоряющую плазменную структуру

Как показываю оценки, оптимальный угол для инжекции электронов составляет [86]

$$\alpha \approx (V_w - V_e) \frac{\sigma^2 \omega_p}{2c^2 r_0} , \qquad (2.3.1)$$

где V_W – фазовая скорость ускоряющей плазменной структуры, V – начальная скорость электронов в пучке, ω_p – электронная плазменная частота, c – скорость света, σ – размер фокального пятна лазерного импульса, r_0 – расстояние точки инжекции от оси.

<u>Задача 3.</u> Создание новых источников излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах

В рамках данной задачи предполагается создание нескольких классов уникальных источников излучения рентгеновского и гамма-диапазонов, включая фемтосекундные источники некогерентного излучения рекордно высокой яркости, источники фемтосекундного когерентного излучения – компактные рентгеновские лазеры на свободных электронах, источники излучения аттосекундной и зептосекундной длительности, а также узкополосные источники гамма-излучения для задач фотоядерной физики. Для создания таких источников будут разработаны лазерные мишени и вигглеры, изучены особенности трансформации энергии сверхмощных оптических импульсов в рентгеновский и гамма-диапазоны, проведены эксперименты на прототипе и затем на 200 ПВт лазере. Новые источники излучения будут иметь огромный диагностический потенциал, по впервые существу, открывая возможности исследования объектов С пикометровым пространственным И субфемтосекундным временным разрешением.

<u>Мероприятие 3.1.</u> Создание источников жесткого излучения с рекордно высокой яркостью

Высокий темп ускорения заряженных частиц в лазерной плазме, позволяет использовать лазерно-плазменные ускорители в источниках жесткого электромагнитного излучения, например, в рентгеновских лазерах на свободных электронах. Более того, огромные фокусирующие силы в плазменных ускоряющих структурах, делает возможным их применение в качестве плазменных вигглеров. Все это позволяет значительно сократить размеры и стоимость источников излучения. Компактные и яркие источники рентгеновского излучения, в настоящее время сильно востребованы, в медицине для малодозной фазоконтрастной рентгеновской томографии, делающей возможной диагностику новообразований в без гистологических исследований. организме использования Создание компактных рентгеновских и гамма источников позволило бы внедрить рентгеновскую томографию в широкую медицинскую практику и проводить исследования наноструктур в небольших лабораториях, поскольку современные также строятся вокруг гигантских нанотехнологические центры центров синхротронных излучения.

В сильно нелинейном режиме взаимодействия релятивистски сильного лазерного импульса с плазмой, который характерен для установки ЦИЭС, электроны, захваченные в плазменную полость, при ускорении совершают поперечные бетатронные колебания (см. Рис. 4.14). Бетатронные колебания приводят к генерации электромагнитного излучения. В результате эффекта Доплера частота излучения ультрарелятивистского электрона во много раз превосходит частоту бетатронных колебаний. Для типичных параметров взаимодействия лазерного импульса с плазмой частота «бетатронного» излучения находится в рентгеновской области электромагнитного спектра [8]. Как показывают расчеты [87-88] и последние эксперименты [89-93] такой механизм может быть использован для создания компактного и мощного источника рентгеновского излучения и для диагностики лазерной плазмы.

Фокусирющие силы, действующие на электрон в плазменной полости, могут быть представлены ы виде: $\mathbf{F}_{\perp} \approx -m\omega_p^2 \mathbf{r}_{\perp}/2$, где \mathbf{r}_{\perp} - радиус-вектор от оси полости до электрона. Если продольный импульс электрона много больше поперечного импульса, то уравнение описывающие поперечные (бетатронные) колебания совпадает с уравнением линейного осциллятора: $\ddot{\mathbf{r}}_{\perp} + \mathbf{r}_{\perp}\omega_p^2/2\gamma = 0$, где γ – релятивистский гамма-фактор электрона. Следовательно, бетатронная частота есть: $\omega_b = \omega_p (2\gamma)^{-1/2}$. Период бетатронных колебаний $\lambda_b = 2\pi/k_b = 2\pi\sqrt{2\gamma}/k_p$ был измерен в экспериментах [94], где $k_p = \omega_p/c$.



Рис. 4.14. Генерация бетатронного излучения в плазменной полости (схематически)

Длина волны, излучаемая электроном, совершающим бетатронные колебания с малой амплитудой вблизи оси канала, порядка $\lambda \approx \lambda_b / (2\gamma^2)$. Если амплитуда колебаний увеличивается, то электрон излучает высокие гармоники. Если амплитуда колебаний r_0 настолько велика, что параметр

$$K = \gamma k_b r_0 = 1.33 \cdot 10^{-10} \sqrt{\gamma n_e [cm^{-3}]} r_0 [\mu m], \qquad (3.1.1)$$

характеризующий интенсивность «ионного ондулятора»', становится большим *K* >> 1, то спектр излучения становится широкополосным и квази-непрерывным. В этом случае частотная зависимость спектра излучения становится схожа с частотной зависимостью спектра синхротронного излучения, который определяется универсальной функцией (см. Рис. 4.15)

$$S(\omega/\omega_c) = (\omega/\omega_c) \int_{\omega/\omega_c}^{\infty} K_{5/3}(x) dx, \qquad (3.1.2)$$

где ω_c – критическая частота [95]. Для частот много меньших критической излучаемая энергия возрастает по закону ~ $\omega^{2/3}$, достигая максимума при ~ $0.29\omega_c$, и спадает экспоненциально при $\omega > \omega_c$. Критическая частота для электрона, совершающего бетатронные колебания в ионном канале, дается выражением [88]

$$\hbar\omega_{c} = \frac{3}{2}\gamma^{3}\hbar cr_{0}k_{b}^{2} \approx 5 \times 10^{-24}\gamma^{2}n_{e}[cm^{-3}]r_{0}[\mu m] \ keV.$$
(3.1.3)

Поскольку частицы ультрарелятивистские, то излучение заключено в очень маленький телесный угол

$$\theta \approx \frac{K}{\gamma}$$
. (3.1.4)

Синхротронное излучение в ионном канале наблюдалось недавно в экспериментах [89].



Рис. 4.15. Универсальная функция для спектра синхротронного излучения S(x)
Средняя мощность, излучаемая электроном в плазменной полости, определяется формулой [87]

$$\langle P_{total} \rangle \approx \frac{e^2 c}{12} N_b \gamma^2 k_b^4 r_0^2,$$
 (3.1.5)

где N_b – число бетатронных колебаний, совершаемых электроном. Можно ввести также величину, соответствующую количеству энергии, теряемой электроном в единицу длины,

$$Q = \langle P_{total} \rangle / c \approx 1.5 \cdot 10^{-45} \left(\gamma n_e \left[cm^{-3} \right] r_0 [\mu m] \right)^2 \frac{MeV}{cm}.$$
 (3.1.6)

Среднее количество фотонов энергией $\hbar \omega_c$, испускаемое электроном, есть [88]

$$\langle N_{ph} \rangle \approx \frac{4\pi}{9} \frac{e^2}{\hbar c} N_b K \approx 1.02 \cdot 10^{-2} N_b K.$$
 (3.1.7)

Из соотношения (3.1.7) следует, что излучаемая мощность пропорциональна квадрату плотности плазмы, что было подтверждено экспериментально [94].

Плазменный виглер обеспечивает горзда большую фокусирующую силу, чем стандартный магнитный вигглер. Действительно отношение фокусирующих сил в плазменном и магнитном вигглерах может быть оценено следующим образом: $F_{\perp,pl}/F_{\perp,m} \approx \omega_p^2 r_0/(\omega_H c)$, где $\omega_H = eH/(mc)$ – нерелятивистская циклотронная частота, H – характерная напряженность магнитнго поля вигглера. Для типичных параметров ЦИЭС $n_e = 10^{19}$ cm⁻³, $r_0 = 1 \mu$ m, $H = 10^4$ G, плазменная фокусирующая сила на 5 порядков больше магнитной. Таким образом, для заданной энергии электрона, энергия излучаемого фотона будет в 10^5 выше, а излучаемая мощность в 10^{10} раз больше для плазменного вигглера, чем для магнитного.

Резонансное взаимодействие электромагнитной (ЭМ) волны и бетатронных колебаний электронов приводит к группировки электронов в пучке, что в свою очередь может привести к усилению (или затуханию) волны. Такой процесс может быть описан в рамках вынужденного излучения (поглощения) электронов в ионном канале. Рост интенсивности бетатронного излучения в последних экспериментах [92-93] связывают с резонансным раскачиванием бетатронных колебаний лазерным полем.

Выражение (3.1.7) может быть также переписано следующим образом [96]

$$\langle N_{ph} \rangle \approx \frac{1}{9} \frac{e^2}{\hbar c} (k_p L) (k_p r_0) \approx \frac{1}{9} \frac{e^2}{\hbar c} (k_p L) \left(\frac{a_0^2}{\gamma} \right)^{1/4},$$
 (3.1.8)

где L – расстояние, на котором электрон совершает бетатронные колебания. Мы предполагаем, что начальная амплитуда бетатронных колебаний порядка размера плазменной полости $k_p R \approx \sqrt{a_0}$, где a_0 – безразмерный вектор-потенциал лазерного поля, R – радиус лазерной полости. При ускорении амплитуда бетатронных колебаний уменьшается: $k_p r_0 \approx k_p R \gamma^{-1/4} \approx a_0^{1/2} \gamma^{-1/4}$. Однако, по мере движения внутри полости ускоряемые электроны могут попасть в область, занимаемую лазерным импульсом. В результате бетатронного резонанса амплитуда бетатронных колебаний может опять вырасти до размеров полости. В этом случае число излучаемых фотонов увеличивается в $\gamma^{1/4}$ раз. Эффективность преобразования энергии электронов в жесткое излучения может быть оценена следующим образом

$$\frac{N_{ph}\hbar\omega_c}{mc^2} \approx \frac{1}{12} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{\hbar\omega_p}{mc^2} (k_p L) a_0 \gamma.$$
(3.1.9)

Из полученного выражения следует, что в отличие от ускорения, где радиационое трение играет отрицательную роль, генерация излучения наиболее эффективна в плотной плазме и при больших значениях a_0 . Оценки показывают, что при плотности плазмы $n > 10^{18}$ сm⁻³ и энергии ускоренных электронов более 10 GeV, значительная часть энергии пучка переходит энергию излучения. Поскольку для эффективной генерации важна большая энергия электронов, то можно использовать двухступенчатый профиль плазмы. На первой стадии, где плотность плазмы мала, происходит ускорение электронов до большой энергии, а во второй стадии с высокой плотнотью плазмы происходит преобразование энергии электронов в излучение.

Как следует из выражения (3.1.3) энергия фотона, излучаемого электроном в плазменной полости, растет квадратично с энергией электрона. Когда эти энергии сравниваются, классическая теория излучения становится неприменима. Квантовые эффекты в сильном электромагнитном поле характеризуются инвариантами [97] $\chi = e\hbar/(m^3c^5) | F_{\mu\nu}p_{\nu}| \approx \gamma(F_{\perp}/eE_{cr})$ и $\Upsilon \approx (\hbar\omega/mc^2)(F_{\perp}/eE_{cr})$, где $F_{\mu\nu}$ – тензор электромагнитного поля, p_{μ} – четырех-вектор частицы, $\hbar\omega$ – энергия фотона, $F_{\perp} = m\omega_p^2 r$ – поперечная сила, действующая на релятивистский электрон, находящийся на расстоянии r от оси полости. χ определяет отношение напряженности электрического поля E_{cr} . Υ определяет взаимодействие фотона с

электромагнитным полем. Квантово-электродинамические эффекты становятся существенными при $\chi >> 1$ или $\Upsilon >> 1$. Если $\chi >> 1$ то $\hbar \omega >> \varepsilon$, и квантовая отдача электрона, связанная с испусканием фотона, становится значительной. Инварианты могут быть представлены в виде $\chi \approx 10^{-6} \gamma$ и $\Upsilon \approx 10^{-6} (\hbar \omega/mc^2)$ для параметров $n_0 \approx 10^{19}$ см⁻³ и r = 15 мкм. Как следует из полученных выражений, инварианты становятся близки к единице при энергиях частиц около 500 ГэВ. При плотности плазмы $n_0 = 10^{20}$ см⁻³ пороговое значение энергии электрона, выше которой излучение фотона носит квантовой характер, близко к 50 ГэВ. На Рис. 4.16 показаны различные режимы динамики электрона в плазменной полости с учетом силы реакции излучения в плоскости параметров γ_0 (начальная энергия электрона) – r_0 (начальное отклонение).



Рис. 4.16. Различные режимы динамики электрона в плазменной полости с учетом силы реакции излучения в плоскости параметров γ (начальная энергия электрона) – r_0 (расстояние от электрона до оси полости в начальный момент). Прямая 1 соответствует границе, где ускоряющая сила равна силы радиационного трения. Прямая 2 соответствует границе, на которой время пролета через полость равна периоду бетатронных колебаний. Прямая 3 соответствует границе, отделяющей квантовую область излучения от классической

Проанализируем одноступенчатую схему для параметров ЦИЭС. В экспериментах [92-93] яркость рентгеновского бетатронного излучения достигала $10^{22} \div 10^{23}$ фотонов за 1 с на 1 мм² мрад² в 0.1% полосу частот. При этом спектр излучения достигал 7 МэВ при энергии ускоренных электронов 700 МэВ для энергии лазерного импульса $2 \div 5$ Дж. Такая яркость сравнима с яркостью синхротронных источников 3-го поколения при значительно меньших размерах. Полагая плотность плазмы неизменной $2 \div 8$ 10^{18} см⁻³ и рассматривая ту же длительность лазерного импульса ~30 фс [92], с помощью формул (3.1.1)–(3.1.9) и теории подобия для сильно-нелинейного режима [12] можно пересчитать параметры полученного в

данных экспериментах излучения в параметры излучения, которое будет доступно в ЦИЭС. Энергия квантов излучения в ЦИЭС будет в $\alpha^{5/4}$ выше, чем экспериментах [92-93] и достигнет 2 ГэВ, где α – отношение энергии лазерного импульса в ЦИЭС (4.4 кДж в случае сложения 12 лучей). При этом яркость будет выше в $\alpha^{1/4}$ раз и достигнет 10^{24} фотонов за 1 с на 1 мм² мрад² в 0.1% полосу частот. Управляя плотностью плазмы и размером фокального пятна можно значительно увеличить яркость, снизив характерную энергию фотонов.

Рассмотрим теперь с помощью численного моделирования [8] двуступенчатую схему для ЦИЭС. Предположим, что на первой стадии получен электронный сгусток с парметрами: энергия – 28.5 ГэВ, диаметр – $2r_0$ =24.6 мкм, длина – L_b = 82 мкм, полный заряд – Q_b = 5.4 нКл. Во второй стадии сгусток взаимодействует с плазменнной полостью, образуемой циркулярно поляризованным лазерным импульсом, с гауссовой огибающей $a(t,r) = a_0 \exp(-r_1^2/r_L^2 - t^2/T_L^2)$ и следующими параметрами: $r_L = 8.2$ мкм, $T_L = 22$ фс, $a_0 = 10$, где $a = eA/mc^2$. Лазерный импульс распространяется в плазме с плотностью $n_e = 10^{19}$ см⁻³. Параметры, использованные в моделировании, близки к параметрам ЦИЭС. В начале взаимодействия передний фронт сгустка находится примерно в области центра лазерного импульса (см. Рис. 4.17(а)). Передний фронт внешнего электронного сгустка обогнал центр лазерного импульса на 46 λ в течении времени $T_{int} = 4500 \lambda/c$. Число бетатронных колебаний совершаемых электронами сгустка равно примерно $N_0 = c T_{int} / \lambda_b \approx 1.1$. Как видно из Рис. 4.17(b), лазерный импульс и плазменная полость не разрушаются в течение всего времени взаимодействия, когда происходит фокусировка внешнего сгустка.



Рис. 4.17. Электронная коцентрация плазмы и пучка, а также интенсивность лазерного импульса **a**) вначале взаимодействия и **b**) при $ct/\lambda = 1500$



Рис. 4.18. а) Спектр излучения внешнего электронного пучка, после прохождения лазерным импульсом дистанции $ct/\lambda = 4500$; b) распределение по энергии электронов пучка: сплошная линия соответствует $ct/\lambda = 4500$, пунктирная стрелка показывает начальное моноэнергетическое распределение электронного пучка c) фотонный поток и d) спектральная яркость. Пунктирная линия на Рис. c) и d) соответствует $ct/\lambda = 500$, сплошная линия соответствует $ct/\lambda = 4500$

Распределение фотонов по энергии течение времени И углу В взаимодействия $T_{int} = 4500 \lambda/c$ показано на Рис. 4.18(а). При такой энергии пучка интенсивность плазменного ондулятора равна примерно $K \approx 817$. Как следует из Рис. 4.18(а) релятивистский сгусток излучает жесткие фотоны в узкий телесный угол. Максимум спектра фотонов лежит вблизи энергии 210 МэВ. Излучение заключено в узком угле относительно оси распространения пучка $\theta \approx 10$ мрад, что близко к значению, которое следует из оценки $K/\gamma \approx 15$ мрад. Полное число 2×10¹¹. Это фотонов, испускаемых электронами сгустка, равно примерно что каждый фотон испускает примерно фотонов. Оценивая означает, 6 количество фотонов с энергией $\hbar \omega_c$, получаем $N_X \approx N_e \langle N_X \rangle$; 1.5×10^{11} , где N_e число электронов в сгустке. Таким образом, значение, следующее из оценки, находится в хорошем согласии с результатами моделирования. Сгусток потерял примерно треть своей энергии на излучение. Распределение энергии электронов сгустка после взаимодействия показано на Рис. 4.18(b). Поток фотонов и яркость как функция энергии фотона показаны на Рис. 4.18(c,d). Яркость излучения

вначале взаимодействия несколько выше, чем яркость в конце взаимодействия, поскольку вначале взаимодействия сгусток еще не значительно сфокусирован и излучает под малыми углами к направлению распространения. Пиковая яркость такого источника превышает пиковую яркость синхротронных источников третьего поколения.

<u>Мероприятие 3.2.</u> Создание компактного лазера на свободных электронах. Создание вигглеров

Создание компактных ускорителей и источников рентгеновского излучения и рентгеновских лазеров является очень острой и актуальной задачей мировой науки и техники. Такие компактные устройства неизбежно завоюют большую часть научного рынка, конкурируя С единичными большими установками, существующими в мире, а также создадут новые возможности и новые рынки. Такие компактные системы будут очень востребованы в университетских лабораториях, медицинских технологических центрах, широкое И И ИΧ распространение намного облегчит использование И доступ К таким инструментам. Рассматриваемый рентгеновский лазер на свободных электронах представляет собой лазерно-плазменный ускоритель и магнитный вигглер, преобразующий энергию ускоренных электронов в электромагнитное излучение (см. Рис. 4.19).



Рис. 4.19. Схема лазера на свободных электронов с лазерно-плазменным ускорителем

Преимущества лазерно-плазменной технологии для компактных рентгеновских лазеров основаны на следующих недавних достижениях:

- Разработка и создание мощных лазерных систем, позволяющих создать в плазме высокий градиент ускорения (достигающий 1 ГэВ на сантиметр).
- Разработка различных методов самоинжекции и внешней инжекции, позволяющих ускорить электронные пучки до энергии более 1 ГэВ с малым разбросом по энергии электронов в пучке (менее 1% в настоящее время) и позволяющих прогнозировать, что наилучший подход для достижения энергетического разброса ниже 0.1% со временем будет найден.
- Устойчивый прогресс лазерных технологий, делающий возможным создание более эффективных лазерных систем, способных генерировать качественные электронные пучки с высокой частотой повторения.
- Экспериментально опробированная идея, основанная на использовании вместо обычного магнитного ондулятора плазменного вигглера, обеспечивающего на несколько порядков более высокое значение напряженности поля, отклоняющего ускоренные электроны. Данное решение позволяет значительно сократить размер источника излучения.

Следующие технологические трудности необходимо преодолеть, прежде чем коммерчески привлекательные, технологически подготовленные образцы рентгеновских лазеров могут быть созданы:

- выбор оптимальных схем для генерации рентгеновского излучения, как с использованием стандартных магнитных ондуляторов, так и с использованием плазменных вигглеров
- анализ и оптимизация лазерной системы для повышения эффективности, частоты повторения, снижения затрат на создание компонентов системы и т.д.
- в случае использования внешнего фотоинжектора, разработка оптимальной схемы временной синхронизации лазерной системы и инжектора, выбор схемы (магнетрон или клистрон) и оптимизация СВЧ системы инжектора
- в случае, если схема ускорения в капилляре будет выбрана как лучший способ для поддержания длительного взаимодействия между лазером и электронным сгустком, будет необходима разработка путей решения проблемы отвода тепла из капилляра при желаемой высокой частоте повторения рентгеновского лазера



Рис. 4.20. Обратное комптоновское излучение (схематически)

Другим относительно простым способом генерации высокоэнергетичных фотонов и тестирования квантовой электродинамики в лаборатории является комптоновское рассеяние электронного пучка на лазерном импульсе (см. Рис. 4.20). В случае нелинейного комптоновского рассеяния каждый электрон поглощает несколько квантов лазерного поля с энергией $\hbar \omega_L$ и излучает гамма-квант с энергией $\hbar \omega$:

$$e + n\hbar\omega_{I} \to e' + \hbar\omega \tag{3.3.1}$$

Наиболее высокая энергия гамма-квантов получается при встречном столкновении. В линейном режиме, когда интенсивность лазерного импульса не очень высокая $a_0 \ll 1$, а электронный пучок релятивистский $\gamma \gg 1$, энергия рассеянных назад фотонов увеличивается в $4\gamma^2$ раз, где $a_0 = |e|E_0/(mc\omega)$, E_0 – амплитуда электрического поля. В нелинейном режиме, когда $a_0 \gg 1$, спектр комптоновского излучения состоит из множества гармоник и может быть описан универасльной функцией S(x), определяемой вражением (3.1.2). Критическа частота в этом случае имеет вид

$$\omega_c = 3\sqrt{2\gamma^2} a_0 \omega_L \,. \tag{3.3.2}$$

Число фотонов, излучаемых отдельным электроном, может быть оценено следующим образом [98]

$$N_{ph} \approx \alpha a^2 N_{osc}, \quad a_0 \ll 1,$$

$$N_{ph} \approx \alpha a N_{osc}, \quad a_0 \gg 1,$$
(3.3.3)

где $\alpha = e^2/\hbar c \approx 137$ – постоянная тонкой структуры, N_{osc} – число периодов лазерного поля, в течение которого электрон взаимодействует с лазерным импульсом. Из полученных выражений следует, что количество излучаемых

фотонов зависит только от a_0 , в то время как энергия излучаемого кванта растет с ростом a_0 и γ .

Энергия излучаемого фотона растет как γ^2 . Когда она становится сравнима с энергией электрона, γmc^2 , классическое описание перестает быть справедливым. В этом случае становятся важными эффект отдачи и спиновый эффект. Их необходимо учитывать в рамках квантовой электродинамики. В этом случае спектр излучения определяется функцией $S_a(\delta)$

$$S_q(\delta) = S(\delta) + x \left(\frac{1}{1-x} - x - 1\right) K_{2/3}(\delta),$$
 (3.3.4)

где $\delta = 2x/3\chi(1-x)$ и $x = \hbar\omega/\gamma mc^2$. $S_q(\delta) \to S(\omega/\omega_c)$ в классическом пределе $\chi <<1$ и $\hbar\omega <<\gamma mc^2$. КЭД параметр χ может быть также выражен через критическую частоту ω_c : $\chi = 3\hbar\omega_c\gamma mc^2/2$. В противоположном классическому пределе $\chi >>1$ спектр излучения имеет максимум вблизи γmc^2 . Характерное время между двумя последовательными моментами излучения фотонов одним и тем же электроном (время излучения фотона) может быть оценено как отношение характерной энергии излученных фотонов к мощности излучения. В классическом пределе средняя энергия излученных фотонов примерно равна $\hbar\omega_{em} \approx a_0 \gamma^2 \hbar\omega$, в квантовом пределе $-\hbar\omega_{em} \approx \gamma mc^2$. Используя выражения для мощности излучения фотона получаем:

$$t_{rad} \approx \frac{\hbar c}{e^2} \left(1 + \chi^{1/3} \right) t_f$$

где ct_f – так называемая длина формирования излучения, которая равна длине пути, пройденного электроном за время, за которое направление движения электрона изменяется на угол порядка $1/\gamma$. Длина формирования излучения для рассматриваемой задачи может быть оценена как $1/(2\pi a_0)$.

Для генерации узкополосного гамма-излучения высокой яркости в ЦИЭС можно использовать электронный пучок с энергией 300 МэВ и лазерный импульс длительностью 50 пс с амплитудой $a_0 \approx 0.7$. Энергия излучаемых гамма-квантов в этом случае составит около 2 МэВ. Каждый электрон излучит в среднем около 70 фотонов. Таким образом, почти половина энергии пучка перейдет в жесткое излучение.

Установка ЦИЭС позволяет также исследовать сильно нелинейное комптоновское рассеяние, когда будут существенны квантовые эффекты. До этого единственный подобный эксперимент был поставлен в SLAC, где электронный пучок с энергией 47 ГэВ сталкивался с тераваттным лазерным импульсом с $a_0 \approx 0.4$ [99]. В этом случае нелинейная природа комптоновского рассеяния проявлялась очень слабо. В качестве примера рассмотрим с помощью численного моделирования кодом QUILL [29] взаимодействие релятивистского электронного пучка с лазерным импульсом. Лазерный импульс линейно поляризован $\overline{E}_{v} = \overline{B}_{z} = a_{0} \exp[-y^{2}/\sigma_{v}^{2} - (x-t)^{2}/\sigma_{x}^{2}]$, где \overline{E} и \overline{B} напряженности электрического и магнитного полей, соответственно, σ_{x} – длительность импульса, σ_{v} ширина импульса. Здесь координаты нормированиы на длину волны лазерного импульса, а время – на период колебаний поля. Параметры лазерного импульса и электронного пучка доступны для установки ЦИЭС и имеют значения: $\sigma_x = 1.6$, $a_0=100$ и $\gamma_0=2\times 10^4$. Для этих параметров $\chi\approx 6$ и $t_{rad}\approx 0.2$. Энергетический спектр электронов после взаимодействия показан на Рис. 4.21, из которого видно, что пучок потерял большую часть своей начальной энергии. Кроме того, некоторые из излученных фотонов распались с образованием электрон-позитронных пар, таким образом образуя электромагнитные каскады. Электромагнитные каскады являются одним из основных явлений физики сильных полей. В отличие от классической физики, в квантовой физике возможен распад фотона во внешнем электромагнитном поле. Фотон может распасться с образованием электрон-позитронной пары. Если энергия образовавшихся электрона и позитрона окажется достаточно высокой, каждый из них сможет излучить новые фотоны, которые, в свою очередь, также могут распасться с образованием новых электрон-позитронных пар. Такой процесс называется электромагнитным каскадом или ливнем.



Рис. 4.21. Энергетический спектр электронного пучка после столкновения с линейно поляризованным лазерным импульсом. $a_0=100$, $\sigma_x=1.6$, начальный гамма-фактор электронов равен 2*10⁴

Еще один интересный пример комптоновского рассеяния с параметрами, доступными для установки ЦИЭС: $\gamma mc^2 = 50$ ГэВ, $a_0 = 5$, $\sigma_x = 32\lambda_L$, σ_y много больше поперечного размера пучка. Для данных парметров $\chi \approx 3$, что соответствует квантовому режиму излучения (т.е. энергия излучаемого фотона порядка энергии электрона и отдача сильная). Спектр излучаемых фотонов показан на рисунке 4.22.



Рис. 4.22. Энергетический спектр излучаемых фотонов (пунктирная линия) и электронов пучка (сплошная линия), после прохождения через лазерный импульс

Энергия электронов пучка и энергия излучаемых фотонов как функция времени показана на Рис. 4.23. Как следует из результатов моделирования, электроны потеряли 75% свое первоначальной энергии. Каждый электрон в среднем излучил 12 фотонов со средней энергий 3 ГэВ. Интересно отметить, что около 1% первоначальной энергии пучка перешло в энергию позитронов, родившихся в результате распада высокоэнергетичных фотонов в лазерном поле. Похожий эффект недавно обсуждался в работе [11].



Рис. 4.23. Энергия электронов пучка (сплошная линия) и энергия излучаемых фотонов (пунктирная линия) как функция времени

Предполагается, что электронный пучок, участвующий в комптоновском рассеянии, будет формироваться лазерным импульсом одного из лучей системы. Остальные лучи будут сталкиваться с этим электронным пучком. Поскольку генерация электронного пучка производится также лазерным импульсом, то упрощается временная синхронизация пучка и рассеивающего импульса.

Также возможна реализация недавно предложенной схемы генерации гаммаизлучения на эффекте Комптона тем же лазерным импульсом, что производил ускорение электронов в плазме [100]. В этой схеме лазерный импульс интенсивностью около 10²² Вт/см² распространяется в относительно плотной плазме (концентрация электронов – 10²⁰ см⁻³) и осуществляет ускорение пучка электронов в баббл-режиме. Согласно оценкам и результатам численного моделирования, в выбранном режиме пучок содержит порядка 10¹¹ захваченных электронов, имеющих квазитепловой энергетический спектр. На дистанции порядка 200-300 мкм электроны достигают энергии порядка 1 ГэВ, а импульс, имевший в начале длительность порядка 30 фс, практически полностью истощается, сокращаясь до одного полупериода (см. Рис. 4.24 и 4.25). В этот момент на пути лазерного импульса ставится металлическая пластинка, полностью его отражающая. В результате отражённый импульс сталкивается с ускоренным пучком электронов. Следует отметить, что в обсуждаемой схеме непростая в общем случае задача пространственной и временной синхронизации лазерного импульса и электронного пучка решается автоматически. Для указанных параметров импульса оценки показывают, что излучённые в результате нелинейного комптоновского рассеяния гамма-фотоны будут иметь энергию около 200 МэВ, а их общее число составит 10¹⁰ частиц. Несложно оценить, что такой источник будет иметь рекордно высокую пиковую яркость свечения – 10²⁷ фотонов за 1 с на 1 мм² мрад². Полная энергия, конвертированная в гамма-излучение, составит величину около 0,1 Дж.

Электромагнитные каскады в поле двух сталкивающихся лазерных импульсов сами по себе являются эффективным источником гамма-квантов [101]. Параметры установки ЦИЭС позволяют исследовать каскады и использовать их в качестве источников высокоэнергетичных фотонов. Рассмотрим с помощью численного моделирования кодом QUILL этот процесс подробнее. Пусть лазерные импульсы линейно поляризованы, имеют гауссовую огибающую и распространяются навстречу друг другу вдоль оси x. В начальный момент времени t = 0 расстояние между центрами лазерных импульсов равно $2\sigma_x$, и

координаты центров равны $x = -\sigma_x$ и $x = \sigma_x$. Каскад был инициирован двенадцатью 1 ГэВ-фотонами, расположенными вблизи точки x = -15, x = 0. Значения параметров, использованные при моделировании: $\sigma_x = 19$, $\sigma_y = 8$. Для распространяющегося слева направо лазерного импульса: $a_{left} = 2.1 \cdot 10^3$, для импульса, распространяющегося справа налево: $a_{right} = 1.4 \cdot 10^3$.



Рис. 4.24. Динамика ускорения электронов лазерным импульсом. Первая колонка – распределение поперечного электрического поля. Вторая колонка – распределение концентрации электронов. Третья колонка – распределение электронов на фазовой плоскости. Четвёртая колонка – распределение электронов по энергиям в логарифмическом масштабе



Рис. 4.25. (а) Распределение энергии электромагнитного поля в расчётном окне, (b) энергетический спектр ускоряемых электронов в зависимости от прошедшего времени, (c) относительное изменение во времени электромагнитной энергии (синий), энергии электронов (красный) и полной энергии излучения, которая была бы получена, если бы в этот момент времени было произведено отражение импульса (зелёный)

Пространственное распределение нормированных электронной и фотонной плотностей, а также интенсивности лазерного поля в различные моменты времени показаны на Рис. 4.26-4.28. На начальной стадии развития каскада плотность электрон-позитронной плазмы быстро доходит до значения релятивистской критической плотности a_0n_{cr} , где $n_{cr} = m\omega^2/4\pi e^2$ – нерелятивистская критическая плотность электрон-позитронной плазмы. Характерный масштаб вдоль оси *x* созданной в ходе развития каскада плазмы порядка длины волны лазерного импульса. Создание плотной плазмы приводит к сильному поглощению лазерных импульсов и уменьшению величины электрического поля в области, занятой плазмой, что резко снижает скорость роста числа частиц. На поздних стадиях происходит разлет образовавшейся плазмы.

Сильное поглощение лазерных импульсов наблюдается, начиная с момента времени $t \approx 80 \lambda_L/c$, когда плотность плазмы становится близка к $a_0 n_{cr}$. Асимметрия начального распределения лазерного поля приводит к асимметрии в распределении излученных жестких фотонов. Как видно из Рис. 4.27 и 4.28 большая часть жестких фотонов распространяется направо. Анизотропное распределение излученных фотонов может быть использовано в ЦИЭС для создания ярких источников гамма-квантов. С помощью соответствующих фильтров можно вырезать из широкополосного спектра необходимую узкую полосу частот.

157





Рис. 4.26. Распределение плотности (а) электронов и (b) фотонов, (c) – распределение плотности энергии электромагнитного поля в начальный момент времени *t* = 0. Зеленая стрелка показывает положение и направление распространения сгустка фотонов, инициирующих каскад

Рис. 4.27. Распределение плотности (а) электронов и (b) фотонов, (c) – распределение плотности энергии электромагнитного поля в момент времени $t = 80\lambda_L/c$



Рис. 4.28. Распределение плотности (а) электронов и (b) фотонов, (c) – распределение плотности энергии электромагнитного поля в плоскости x - t при y = 0

<u>Мероприятие 3.4.</u> Создание источников электромагнитных импульсов аттосекундной и субаттосекундной длительности

Одним из главных направлений развития лазеров с момента их появления являлось получение все более коротких электромагнитных импульсов. В конце XX века был достигнут теоретический предел: длительность оптических импульсов сравнялась с величиной одного периода волны, равного единицам фемтосекунд. Это привело к появлению целого ряда новых диагностических методов и, в том числе, позволило изучать временную динамику колебательно-вращательных движений молекул, а также проблемы электронного транспорта в больших молекулах (например, белках), что особенно важно при исследовании фотосинтеза в клетках растений. Однако внутриатомная динамика электронов таким импульсам недоступна, поскольку характерные времена обращения электронов на орбите составляют десятки аттосекунд.

Задача получения импульсов столь малой длительности чрезвычайно сложна, поскольку требует создания эффективного генератора высокочастотного излучения ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов, способного к тому же работать в импульсном режиме. В то же время в нелинейных режимах взаимодействия сверхсильного лазерного излучения с веществом может осуществляться эффективная конверсия энергии оптического излучения в высокие гармоники, сконцентрированные в импульсах субфемтосекундной длительности.

Исторически основой для первого поколения источников аттосекундых импульсов стал процесс ионизации атомов и молекул при взаимодействии с газовой мишенью лазерных импульсов с интенсивностью на уровне 10¹⁴ Вт/см². При таких интенсивностях процесс ионизации каждого атома может быть описан в рамках динамики волнового пакета электрона ионизующегося атома, которая подчиняется нестационарному уравнением Шредингера. В процессе ионизации для эволюции волнового пакета электрона характерны не только покидание окрестности родительского иона, но и осцилляция во внешнем лазерном поле (в случае линейной поляризации), что, как следствие, при некоторых условиях может приводить к возврату части волнового пакета ранее покинувшего окрестность родительского иона. В этом процессе дипольный момент системы атома и электрона изменяется с течением времени довольно сложным образом и обеспечивает тем самым сильно нелинейный отклик атомной системы в целом. Благодаря этому, излучение, генерируемое изменяющимся дипольным моментом атомной системы, имеет широкий спектр, содержащий довольно интенсивные высокие гармоники.

Несмотря на явные успехи в генерации аттосекундных импульсов при воздействии лазерных импульсов на газовые мишени, дальнейшее увеличение мощности лазерных импульсов в связи с развитием лазерной техники принципиально не открывает новых более эффективных механизмов, которые могли бы обеспечить как большую интенсивность, так и меньшую длительность генерируемых импульсов. Сегодня интенсивность аттосекундных импульсов генерируемых на газовых мишенях ограничивается на уровне 10¹⁴ Вт/см². В первую очередь, повышение эффективности невозможно, поскольку для отдельного атома процесс генерации высоких гармоник фактически близок по эффективности к пределу, тогда как количество атомов участвующих в излучении ограничено концентрацией газа мишени. Увеличение же интенсивности лазерного импульса приводит к возрастанию роли его магнитного поля и релятивистских эффектов, которые, в целом, негативно сказываются на достижении поставленной задачи. С другой стороны, увеличение плотности газа мишени нарушает механизмы, лежащие в основе генерации гармоник, поскольку электроны, ускоряемые полем лазерного импульса, начинают испытывать влияние соседних атомов и молекул, возмущающих их траекторию. В итоге это приводит к значительному снижению эффективности генерации.

Поэтому одним из наиболее естественных путей увеличения интенсивности аттосекундных импульсов является поиск механизмов их генерации на поверхности твердотельной мишени, где за счет высокой плотности коллективное движение электронов вещества может обеспечить когерентное излучение аттосекундных импульсов с интенсивностью, значительно превышающей интенсивность генерируемых импульсов при использовании газовой мишени.

Еще в начале 80-х годов было показано, что генерация высоких гармоник возможна и на поверхности твердых тел, однако физика этого процесса значительно отличается от физики процесса генерации на отдельных атомах. В частности, из-за высокой плотности доминирующую роль в генерации играют коллективные эффекты. Дальнейшие исследования этого процесса показали его высокую эффективность и возможность получения этим методом сверхвысоких интенсивностей.

Первые работы по генерации высоких гармоник на поверхности твердого тела были выполнены в Лос-Аламосе в 1981 года [102]. При облучении СО₂-

160

лазером интенсивностью 10¹⁴—10¹⁶ Вт/см² твердотельных мишеней из алюминия, железа, золота, меди, полиэтилена и тефлона в отраженном сигнале наблюдались гармоники вплоть до 29-ой. При этом количество гармоник определялось материалом мишени.

Первая идея объяснения механизма генерации гармоник на поверхности твердого тела заключалась в следующем. Интенсивный лазерный импульс вызывает ионизацию и последующий нагрев и разлет образовавшейся плазмы. Хотя частота плазмы, образующейся при ионизации вещества с твердотельной плотностью, примерно на порядок превосходит частоту оптического излучения, в области теплового разлета для плазмы с меньшей концентрации возможно резонансное возбуждение колебаний плазмы падающим лазерным излучением. Далее в результате какой-либо квадратичной нелинейности могут возбудиться колебания плазмы на удвоенной частоте в более глубоком слое, где концентрация больше, и так далее до возбуждения колебаний в плазме с твердотельной плотностью и последующего излучения электромагнитного излучения на частоте колебаний плазмы. Не вдаваясь в обсуждение конкретных физических механизмов, можно сделать один общий вывод в рамках такой идеи: частота генерируемого излучения ограничена частотой колебаний плазмы, которая образуется при ионизации вещества мишени, т. е. для типичных материалов возможна генерация не более чем нескольких десятков гармоник. Кроме того, сомнительной оказывается возможность получения большой эффективности возбуждения ленгмюровских колебаний, которая напрямую зависит OT нелинейности в этой системе, что требует, например, использование лазерных импульсов с релятивистской интенсивностью (то есть с интенсивностью, при которой электроны начинают двигаться релятивистски, обеспечивая механизм нелинейности). По этой причине интерес к генерации высоких гармоник на твердотельных мишенях практически отсутствовал в течении длительного времени, пока не возобновилось более подробное теоретическое И экспериментальное исследование этого процесса.

Теоретическое исследование взаимодействия интенсивного излучения с поверхностью закритической плазмы, образующейся при ионизации вещества с твердотельной плотностью, является одной из важнейших задач не только для направления генерации высоких гармоник, но и для ряда других приложений. Численное моделирование плазмы методом частиц в ячейках (Particle-In-Cell) [103] позволяет весьма точно моделировать поведение плазмы при характерных

161

для данной задачи параметрах в трехмерной геометрии, о чем говорит согласие получаемых при моделировании результатов с результатами экспериментов. В основанном приближении другом подходе, на гидродинамики, система дифференциальных уравнений в частных производных позволяет в общем виде математически описать процесс облучения поверхности закритической плазмы релятивистски интенсивным излучением [104]. Однако для рассматриваемого процесса характерно сильно нелинейное поведение плазмы, что значительно затрудняет развитие аналитических подходов для исследования этой задачи и вынуждает часто ограничиваться качественным анализом результатов численного моделирования с последующим развитием феноменологических моделей.

Чтобы понять физику, лежащую в основе генерации высоких гармоник на твердотельных мишенях, рассмотрим результат численного расчета процесса взаимодействия линейно поляризованного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы. Пусть лазерное излучение падает под некоторым углом θ к поверхности, а вектор электрического поля лежит в плоскости падения. Чтобы учесть эффект теплового разлета плазмы, для общности рассмотрим случай плавной границы плазмы, так что имеется некоторый градиент концентрации. Подобные расчеты удобно проводить в системе отсчета, движущейся со скоростью $c \sin \theta$ вдоль поверхности. В этой системе отсчета лазерное излучение падает перпендикулярно поверхности и задача становится одномерной (см. Рис. 4.29.



Рис. 4.29. Сведение задачи наклонного облучения поверхности плазмы к одномерной геометрии при переходе в движущуюся систему отсчета

На Рис. 4.30 приведен результат расчета для следующих параметров: $\theta = \pi/4$, $N_e = 8 \cdot 10^{22}$ см⁻³, $I = 5 \cdot 10^{17}$ Вт/см². Толщина плазменного слоя составляла 60 нм, с облучаемой стороны слоя располагалась область с экспоненциальным градиентом концентрации, имеющая характерный масштаб спадания концентрации равный 60 нм, длина волны лазерного излучения — 1 мкм. Видно наличие двух источников высоких гармоник, имеющих вид аттосекундных импульсов. Один источник располагается непосредственно на поверхности плазмы, а второй — немного в глубине.



Рис. 4.30. Динамика взаимодействия лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы. Светло-серым градиентом показана концентрация электронов в логарифмическом масштабе, черным показана интенсивность излучения в частотном окне от 5-ой до 9-ой гармоник лазерного импульса. Лазерный импульс распространяется в положительном направлении оси *х*. С необлучаемой стороны плазменного слоя видны вылетающие пучки брюнелевских электронов

Подробные исследования показывают, что первый источник проявляется только для релятивистски интенсивных полей, то есть для таких интенсивностей лазерного импульса, для которых энергия осцилляций электронов в его поле сравнивается с их энергией покоя. В то же время второй источник доминирует для малых интенсивностей, однако практически пропадает в случае слишком резких градиентов плазмы.

На данный момент полагается, что второй источник связан с генерацией так называемых брюнелевских электронов, вбрасываемых на каждом периоде лазерного импульса внутрь плазмы. Этот эффект был впервые описан Брюнелем в 1987 году [105]. Им было показано, что при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы часть электронов, осциллирующих в поле импульса, оказывается вырванной из плазмы и вброшенной обратно с образованием электронного пучка, распространяющегося вглубь плазмы. Этот пучок, проходя сквозь плазму, генерирует позади себя ленгмюровские колебания. Как известно, в неоднородной плазме ленгмюровские колебания могут быть преобразованы в электромагнитные волны, что и наблюдается в градиенте электронной концентрации в виде генерируемых высоких гармоник. Этот процесс получил название когерентного кильватерного излучения (coherent wake emission) [106]. Он является частным случаем линейной трансформации плазменных волн и в некоторой степени может считаться процессом, обратным процессу резонансного поглощения.

Уже в середине 90-х годов прошлого века было замечено, что генерация гармоник может быть объяснена эффектом Доплера [107], который предсказывал генерацию гармоник с частотой, пропорциональной квадрату релятивистского фактора электронов и, что важно, не был ограничен плотностью плазмы. Модель на основе этой идеи носит название модели «осциллирующего зеркала» (ОММ – oscillating mirror model), и заключается в следующем. Поверхность закритической плазмы, как и в линейном случае, полностью отражает падающее излучение. Однако в отличие от случая малой интенсивности поверхность зеркала, то есть точка отражения, немного колеблется под действием сил светового давления. На как показывает численное моделирование, распределение самом деле, электронов на границы плазмы не имеет ярко выраженного скачка, положение которого колеблется с течением времени, а, напротив, представляет собой довольно сложно изменяющийся плавный перепад. Однако в рамках модели фактически предполагается существование некоторой эффективной точки отражения x_{ARP} (ARP – apparent reflection point) падающего излучение, что оказывается весьма продуктивной идеализацией.

Поскольку идея зеркала, по сути, означает отражение всей падающей электромагнитной энергии от поверхности, то для точки эффективного отражения можно написать условия равенства нулю потока электромагнитной энергии, что эквивалентно равенства нулю тангенциальной компоненты электрического поля, являющейся суммой тангенциальных компонент падающей и отраженной волн:

$$E_{\tau}^{i}(x_{ARP}+ct)+E_{\tau}^{r}(x_{ARP}-ct)=0.$$
(3.4.1)

Пользуясь этим условием, через функцию зависимости положения эффективной отражающей точки от времени можно математически выразить точную форму генерируемого плазмой излучения, для которого эта точка фактически является перемещающимся источником.

Таким образом, излучение плазмы равно падающему излучению с фазой, изменяющейся в соответствии с движением точки эффективного отражения. В общем случае определение ее динамики является сложной задачей, но оказывается, что для нахождения спектральных свойств генерируемого плазмой излучения достаточно ограничиться асимптотическим анализом. Это связано с тем, что высокие гармоники, интересные для приложений, генерируются в момент быстрого изменения фазы, то есть в момент, когда точка эффективного отражения максимально быстро движется навстречу падающему излучению. Предполагая квадратичную зависимость от времени скорости отражающей точки вблизи максимального значения, которое близко к скорости света, можно в общем виде показать, что отражаемый плазмой электромагнитный импульс будет содержать резкий перепад на масштабах 1/у, где у – релятивистский фактор, соответствующий максимальной скорости точки отражения. Подробный анализ позволяет сформулировать следующее общее утверждение, не зависящее от параметров задачи: для спектра излучения от поверхности плазмы при облучении излучением с релятивистской интенсивностью имеет место универсальный закон распределения интенсивности гармоник в виде степенного спадания с показателем -8/3, при этом спектр простирается до частоты отсечки, значение которой пропорционально кубу релятивистского фактора электронов.

Это предсказание, полученное в работах [13-14], подтверждается численным моделированием и проведенными экспериментами [15-16, 108]. Одним из наиболее интригующих следствий этой теории является идея не только получения интенсивных высоких гармоник, но и их последующей когерентной фокусировки в наноразмерном объеме за счет использование в качестве мишени сферической плазменной поверхности [109].

Следует подчеркнуть, что модель осциллирующего зеркала не предполагает, что плазма эффективно представляется колеблющимся зеркалом. В этом случае, как известно, отраженное от релятивистски быстро двигающегося навстречу зеркала излучение могло бы иметь амплитуду, значительно превышающую амплитуду падающего излучения. В рамках же модели осциллирующего зеркала предполагается существование в каждый момент времени точки, в которой поток энергии равен нулю, что эквивалентно равенству амплитуд падающего и отраженного излучения в этой точке в лабораторной системе отсчета в любой момент времени. Поэтому в рамках модели осциллирующего зеркала амплитуда отраженного излучения не может превышать амплитуду падающего. Это напрямую связано с тем, что предполагается локальное во времени сохранение энергии, то есть в каждый момент времени излучается поток энергии равный поглощаемому. Как показывает численное моделирование и теоретическое исследование [100], такая ситуация характерна только при S > 5, где S = n/a – ультрарелятивистский параметр подобия, равный отношению плотности плазмы *n*, обезразмеренной на критическую плотность, к амплитуде падающей волны *a*, обезразмеренной на релятивистскую амплитуду.

В случае, когда обратно излучаемый плазмой импульс имеет амплитуду, превосходящую амплитуду возбуждающего излучения, для процесса взаимодействия характерен следующий сценарий. Падающая на слой электромагнитная волна посредством пондеромоторной силы приводит к смещению электронов вглубь плазмы. На полупериоде, когда электрическое поле направлено вдоль оси у (см. Рис. 4.29), электроны увеличивают свой импульс в направлении обратном оси у, и сила Лоренца, обусловленная магнитным полем оголившихся ионов, дополнительно смещает их дальше от границы, приводя к формированию тонкого электронного токового слоя с плотностью заряда и тока, существенно превосходящими исходные значения в плазме. Возникновение внутренних полей в плазме и ускорение движения части электронов плазмы приводит к аккумулированию плазмой энергии падающей волны на этой стадии. Поскольку в случае линейной поляризации сила светового давления осциллирует на периоде поля, в некоторый момент она начинает уменьшаться и под действием силы разделения зарядов сформировавшийся из смещенных электронов пучок летит навстречу падающей волне, становясь источником срывается И аттосекундного всплеска. При этом аккумулированная на первой стадии энергия высвечивается за время порядка нескольких десятков аттосекунд. Такое трехстадийное описание процесса ввиду сходства со сценарием аккумулирования энергии механической пружиной получило название модели «релятивистской электронной пружины» [100], которая подразумевает не локальное, а глобальное сохранение энергии на каждом периоде оптического излучения. Теория, развитая для этой модели, основана на анализе нелинейного дифференциального уравнения, описывающего динамику тонкого слоя электронов, который при ультрарелятивистских интенсивностях имеет размер всего порядка нескольких нанометров. Теория хорошо согласуется С результатами численного моделирования и позволяет получить оптимальные условия для генерации наиболее интенсивных аттосекундных импульсов:

$$\theta_a \approx 62^\circ, \quad S_g \approx 1/2$$
 (3.4.2)

При ЭТОМ коэффициент усиления, то есть отношение амплитуды генерируемого аттосекундного импульса к амплитуде падающего, растет с увеличением интенсивности падающего излучения например, И. при интенсивности 10²³ Вт/см² достигает значения 10.

166

При оптимальных условиях плазменная граница работает как эффективный конвертер оптического излучения в короткий и мощный аттосекундный всплеск, аккумулируя энергию оптического излучения на каждом периоде и резко высвечивая ее в виде гигантского импульса. Этот эффект с последующей фокусировкой гигантского аттосекундного импульса в пространстве можно использовать для создания ранее не доступных в лабораторных условиях напряженностей электромагнитных полей. Концепция получения таких полей основана на использовании в качестве мишени твердотельного объекта с слабоискривленного поверхностью В форме желоба, облучаемого при оптимальных параметрах так, что направляющая желоба располагается в плоскости падения (см. Рис. 4.31(а)). Как показывает численное моделирование методом частиц в ячейках, при использовании десятипетаваттного лазерного импульса (соответствующего одному каналу установки ЦИЭС) с интенсивностью в фокусе 5×10²² Вт/см² можно достичь в области с размером несколько нанометров интенсивности 2×10²⁶ Вт/см² (см. Рис. 4.31(б)).



Рис. 4.31. (а) Схематическое изображение концепции мишени в виде желоба для получения интенсивностей, необходимых для наблюдения эффектов нелинейности вакуума. (б) Распределение электрического поля в момент фокусировки гигантских аттосекундных импульсов, сгенерированных на поверхности мишени, полученное при численном моделировании в системе отсчета, движущейся вдоль направляющей желоба

<u>Мероприятие 3.5.</u> Использование источников для диагностики процессов и структур с пикометровым пространственным и субфемтосекундным временным разрешением

С самого своего открытия в 1896 году рентгеновское излучение является одним из наиболее востребованных инструментов получения изображений в науке, медицине и промышленности [110]. По сравнению с оптическим излучением рентген обладает значительно более короткой длиной волны, а также большей пропускной способностью. Первое обеспечивает высокое (вплоть до нано- и даже пикометровых масштабов) разрешение, а второе – возможность увидеть то, что недоступно человеческому взгляду.

Рентгеновская томография может быть поделена на абсорбционную, основанную на различии показателей поглощения в различных материалах, и на фазоконтрастную, основанную на различии в показателях преломления [111-112]. Если речь идёт о живых организмах, то абсорбционная томография позволяет получать изображения только достаточно плотных тканей, например, костей. Для получения изображения более мягких тканей методом поглощения рентгеновского излучения требуется использование специальных агентов, что либо сильно ограничивает применимость метода, либо требует инвазивного вмешательства. Фазоконтрастная томография лишена подобных недостатков, однако предъявляет более жёсткие условия к качеству рентгеновского излучения, в частности, требуя наличия когерентного источника. Кроме того, используя фазоконтрастную томографию более жёсткими (то есть коротковолновыми) фотонами, С обладающими большей проникающей способностью, можно в значительной степени снизить дозу радиации, поглощаемую организмом.

Особый интерес вызывает возможность осуществления томографии с высоким (фемтосекундным) временным разрешением. Это позволило бы изучать не только структуру того или иного объекта, но и его динамику во времени. Имея подобный инструмент можно было бы изучать в деталях биомеханику движений насекомых, кинетику биохимических реакций, процессы переноса вещества и передачи сигналов в биологических молекулах и т.п. На данный момент так называемая четырёхмерная (4D) томография (то есть получение трёхмерного изображения с развёрткой во времени) реализована, например, методом электронной томографии [113] и является бурно развивающимся разделом современной физики. Следует отметить, что для достижения фемтосекундного временного разрешения необходимо использование лазерных технологий, поскольку только они способны обеспечить столько высокую частоту следования импульсов. Так, в 4D электронной томографии лазер используется для генерации электронных пучков на фотокатоде. Рентгеновское излучение, получаемое при взаимодействии сверхмощного лазерного излучения с веществом, является естественным инструментом для создания четырёхмерной рентгеновской томографии.

В мире уже реализована как абсорбционная [92], так и фазоконтрастная [93, 114-115] трёхмерная рентгеновская томография с использование сверхмощных лазерных установок. Принципиальная схема таких экспериментов относительна проста и изображена на Рис. 4.32. Лазерный импульс фокусируется на газовую струю, ионизирует газ и возбуждает в образовавшейся плазме кильватерную волну, способную захватить часть электронов и ускорить их до энергий в сотни МэВ. Эти электроны, находясь в своеобразном ионном канале, совершают небольшие поперечные колебания, называемые бетатронными. В результате происходит генерация рентгеновского излучения. На выходе из струи электронный пучок отклоняется в сторону специальным магнитом, а сгенерированное им рентгеновское излучение попадает на мишень, изображение которой необходимо получить. Пройдя сквозь мишень, излучение попадает на детектор.



Рис. 4.32. Принципиальная схема эксперимента по рентгеновской томографии с использование сверхмощного лазерного излучения. Источник: [115]

Абсорбционная рентгеновская томография позволяет получать изображения достаточно плотных материалов. Например, на Рис. 4.33 приведён результат эксперимента по получению изображения металлических проводов и фольги с микронными отверстиями [92].



Рис. 4.33. (а) профиль рентгеновского пучка в одном выстреле; (b) суммарный профиль пяти пучков; (c-h) изображения трёх проводов и тонкой серебряной фольги, полученные в одном и пяти выстрелах соответственно, размер самых мелких деталей на изображениях составляет около 3 мкм; (i, j) фотографии тех же объектов, полученные в оптическом диапазоне. Источник: [92]

Фазоконтрастная рентгеновская томография требует высокой степени пространственной когерентности источника, что можно добиться либо увеличением расстояния от источника излучения до исследуемого объекта, либо уменьшением размера источника. И то, и другое требует наличия достаточно ярких источников. Экспериментаторам удалось довести яркость бетатронного рентгеновского излучения из лазерно-плазменных источников до уровня синхротронов 3-го поколения (10^{22} – 10^{23} фотонов в сек. в мм² в мрад² на 0,1 % полосы частот) [93, 115]. Это позволило получить изображения живых тканей с высокой чёткостью. Результат одного из таких экспериментов приведён на Рис. 4.34. Особо следует отметить значительно лучшее качество изображения стрекозы, полученное фазоконтрастным методом. В частности, его использование увеличивает контрастность всех краёв и позволяет разглядеть мелкие детали строения крыла, ног и экзоскелета насекомого.

Несмотря на относительный успех в использовании сверхмощных лазеров как источников рентгена для целей томографии, в данной области имеется немало возможностей для новых исследований. В частности, до сих пор не реализована идея полноценной четырёхмерной томографии. Кроме того, представляет интерес возможность увеличения энергии фотонов, используемых для томографии. На данный момент в экспериментах продемонстрированы фотоны с энергиями до нескольких МэВ [93], однако не вызывает сомнений, что увеличение мощности лазерного излучения позволит продемонстрировать источники гамма-излучения со значительно большими энергиями фотонов,

170

обладающие к тому же рекордно высокими яркостями. Разработка таких источников станет одним из направлений исследований в рамках проекта ЦИЭС.



Рис. 4.34. Изображение оранжевой тетры (а) и стрекозы (b), полученные методом абсорбционной рентгеновской томографии, и изображения той же стрекозы (c) и осы (d), полученные методом фазокнтрастной рентгеновской томографии. Фазоконтрастные изображения получены в одном выстреле с экспозицией 30 фс. Источник: [115]

Задача 4. Исследование нелинейных свойств вакуума в экстремальных световых полях

Данное направление (так называемая «четвертая колонна физики экстремального света») является наиболее фундаментальным и сложным для экспериментальных исследований, поскольку впервые ставит в повестку дня наблюдение пространственно-временной структуры и нелинейных свойств вакуума, и, с другой стороны, требует для проведения экспериментов предельно возможных параметров лазерного излучения. Эксперименты будут проводиться на 200 ПВт лазерном комплексе, позволяющим при острой фокусировке оптического излучения и когерентном сложении всех каналов достигать значений интенсивности более 10²⁵ Вт/см², а в режиме генерации аттосекундных импульсов рентгеновского диапазона, до 10²⁷ Вт/см². Эти уровни будут достаточными для наблюдения эффектов взаимодействия электромагнитных полей в вакууме и квантово-электродинамических эффектов, таких как генерация электроннопозитронных пар и рождение ливней частиц в вакууме.

<u>Мероприятие 4.1.</u> Исследование нелинейно-оптических свойств вакуума при воздействии лазерного излучения с интенсивностью до 10²⁵ Вт/см²

Квантовая электродинамика предсказывает, что вакуум в сильных полях ведёт себя по отношению к распространению фотонов подобно нелинейной Этот фундаментальный вывод в настоящее среде. время не имеет экспериментального подтверждения, поскольку получать достаточно сильные поля в настоящее время технически невозможно. Изучение сильных электромагнитных полей имеет большое значение для астрофизики. Например, пульсаров напряжённость магнитного поля может быть вокруг порядка Швингеровской (при такой напряжённости вакуум существенно нелинеен). Предполагается, что многие астрономические объекты, природа которых до конца не ясна, также обладают большими магнитными полями (например, квазары). Экспериментальное изучение квантовой электродинамики в ранее недоступных областях также, возможно, обогатит науку ранее неизвестными эффектами.

Лагранжиан, которым описываются электромагнитные поля, в квантовой электродинамике нелинеен. Однако этот лагранжиан зависит от инвариантов поля так, что для плоской волны нелинейность вакуума не проявляется. Поэтому для обнаружения этой нелинейности недостаточно лишь генерации высоких интенсивностей, необходима также разработка схем экспериментов, в которых нелинейность вакуума могла бы проявиться.

Получение больших напряжённостей поля может быть произведено различными методами. При использовании лазера с интенсивностью около 10²⁵ Вт/см² напряжённость поля в 100 раз меньше Швингеровской. Таким образом, даже на лазерной установке со столь интенсивными импульсами наблюдение нелинейности вакуума является сложной экспериментальной задачей. Поэтому в настоящее время разработка схем эксперимента, которые позволили бы наблюдать квантовоэлектродинамическую неленейность при наиболее низком уровне интенсивности, является довольно актуальной задачей.



Рис. 4.35. Схема одного из предлагаемых экспериментов по обнаружению нелинейных свойств вакуума. Линейно-поляризованный лазерный импульс малой интенсивности падает перпендикулярно на два распространяющихся навстречу друг другу сильносфокусированных интенсивных лазерных импульса. Предлагается наблюдать дифракционную картину, возникающую за счёт изменения показателя преломления интенсивными лазерными импульсами [116]

При генерации и фокусировке гармоник лазерного излучения от поверхности твёрдого тела в точке фокусировки напряжённость электрического поля может быть намного больше, чем напряжённость исходного лазерного импульса [109], благодаря чему можно надеяться даже на достижение Швингеровского поля в лаборатории. Также предложены различные, часто довольно сложные, экспериментальные схемы, в которых даже при использовании не слишком больших интенсивностей возможно наблюдение нелинейных эффектов в вакууме [116] (см. Рис. 4.35). Основой таких схем, как правило, является эффект рассеяния света на свете. Суть его в том, что

при взаимодействии пучков оптического или рентгеновского излучения часть фотонов может изменить своё направление распространения или поляризацию. Поляризация фотонов в настоящее время может быть измерена с очень хорошей точностью, благодаря чему уже в настоящее время производятся попытки экспериментального обнаружения нелинейности вакуума [117].

<u>Мероприятие 4.2.</u> Изучение явлений квантовой электродинамики в присутствии экстремально сильных лазерных полей, включая процессы создания вещества и антивещества с помощью излучения

Высокая интенсивность лазерного излучения, которая предполагается в ЦИЭС, позволит исследовать структуру физического вакуума и проверить основы квантовой электродинамики (КЭД). Одним из КЭД эффектов, вызывающий повышенный интерес в настоящее время, является образование электронпозитронной плазмы в сверхсильном лазерном поле [28, 118]. Такая плазма может быть образована в результате развития электромагнитного каскада: затравочная зараженная частица сначала ускоряется в лазерном поле и излучает высокоэнергетичный фотон, который распадается в лазерном поле на электронпозитронную пару. Образовавшаяся пара также ускоряется в лазерном поле и образует следующее поколение электрон-позитронных пар и фотонов (см. Рис. 4.36). В работе [118] было предсказано, что существенная часть лазерной энергии расходуется на образование и нагрев электрон-позитронной плазмы. Такой процесс может ограничить интенсивность, достижимую лазером в лабораторных условиях.



Рис. 4.36. Развитие электромагнитного каскада (схематически)

Квантовые эффекты в сильных полях могут характеризоваться безразмерными параметрами:

$$\chi_e = e\hbar/(m^3 c^4) | F_{\mu\nu} p_{\nu} \approx \gamma(F_{\perp}/eE_{cr}), \qquad (4.2.1)$$

$$\chi_{\gamma} \approx (\hbar \omega/mc^2) (F_{\perp}/eE_{cr})$$
(4.2.2)

где $F_{\mu\nu}$ – тензор электромагнитного поля, p_{μ} – четырех-импульс частицы, $\hbar\omega$ – энергия фотона, γ – гамма-фактор частицы, F_{\perp} – компонента силы Лоренца, поперечная к мгновенному направлению скорости частицы, \hbar – постоянная Планка, m – масса электрона, c – скорость света, а критическое поле определяется выражением: $E_{cr} = m^2 c^3 / (e\hbar) = 10^{16}$ В/см. Параметр χ_e определяет излучение фотонов релятивистским электроном (позитроном), в то время как χ_{γ} определяет взаимодействие высокоэнергетичного фотона с электромагнитным полем. Квантовые эффекты становятся существенны, когда $\chi_e >> 1$ или $\chi_{\gamma} >> 1$. Если $\chi_e >> 1$, то $\hbar\omega \approx \gamma mc^2$ и эффект отдачи при излучении фотона электроном становится сильным. Если же для некоторого фотона $\chi_{\gamma} > 1$, то для него становится возможным процесс распада, в противном случае ($\chi_{\nu} <<1$)

вероятность распада фотона экспоненциально мала.

Рассмотрим развитие каскада в поле двух сталкивающихся циркулярно поляризованных лазерных импульсов [118-119]. Каскад наиболее эффективно развивается в области максимума электрического поля, где магнитное поле отсутствует. Поскольку при $\chi_{\gamma} < 1$ вероятность распада фотона мала, то можно считать, что порог развития каскада соответствует тому, что средний квантовый параметр частиц достигает значения $\chi_{\gamma} = 1$. Чтобы оценить, при какой напряжённости внешнего поля это происходит, воспользуемся следующими допущениями. Во-первых, мы будем считать, что электрон после излучения останавливается. Во-вторых, мы будем использовать квазиклассические выражения для вероятностей излучения и распада фотонов, полученные в пределе $\chi_{\gamma} >> 1$. В этом пределе вероятность распада фотона по порядку величины совпадает с вероятностью излучения, поэтому характерное время жизни фотона порядка характерного времени между последовательными процессами испускания фотонов электроном t₁. Используя выражение для

вероятности излучения излучения в единицу времени, W, полученное в рамках квазиклассического подхода для частиц с $\chi >> 1$, имеем:

$$t_l \sim \frac{1}{W} \sim \frac{\hbar^2 \gamma}{e^2 m c \, \chi^{2/3}}.$$
 (4.2.3)

Введём темп роста каскада Г, характеризующий время, необходимое для удвоения числа частиц в каскаде, то есть будем считать, что число частиц в каскаде растёт как $N \propto \exp\Gamma t$, где Г может зависеть от времени. Очевидно, что время жизни t_i связано с темпом роста каскада Г: $\Gamma >> 1/t_i$. Другим важным характерным временем является время, за которое электрон ускоряется до энергии так, что $\chi \sim 1$. Обозначим его t_{χ} .

Для малых времен $t \ll \omega^{-1}$ и изначально покоящегося электрона, имеем:

$$t < \gamma \approx eEt / mc$$
, (4.2.4)

$$\psi \approx \omega t$$
, (4.2.5)

$$\chi \approx \frac{\hbar e \gamma E \psi}{m^2 c^3}, \qquad (4.2.6)$$

где ψ – угол между векторами – Е и р. Подставляя в эти решения $t = t_i$ и используя уравнение (4.2.3), найдём t_i и среднее значение параметра χ в каскаде:

$$\omega t_l \approx \frac{1}{\alpha \mu^{1/4}} \sqrt{\frac{\hbar \omega}{mc^2}} , \qquad (4.2.7)$$

$$<\chi>\sim\mu^{3/2}$$
, (4.2.8)

где $\mu = E / \alpha E_{cr}$. Подставляя $t = t_{\chi}$ в уравнения (4.2.4)-(4.2.5), и приравнивая χ единице, находим t_{χ} :

$$\omega t_{\chi} \approx \frac{1}{\alpha \mu} \sqrt{\frac{\hbar \omega}{mc^2}},$$
 (4.2.9)

Из полученных выражений можно сделать несколько важных выводов. Во-первых, χ может стать порядка единицы, если $\mu > 1$ и выполнены условия, при которых были произведены оценки. Таких условий два: $\omega t_l <<1$ и $t_l / t_{\chi} >>1$, то есть мы считали, что характерное время жизни много меньше периода (что использовалось для вывода уравнений (4.2.4)-(4.2.5)) и что частица за время жизни успевает набрать $\chi >>1$. Для $\mu \sim 1$ оценка времени жизни даёт $\omega t_l \sim 0.21$ для длины волны $\lambda_L = 911$ nm, используемой в ЦИЭС, следовательно, время жизни много меньше периода вращения поля. Кроме того, легко найти, что

 $t_l / t_{\chi} \sim \mu^{3/4} > 1$ для $\mu > 1$, следовательно, предположение о том что $\chi >> 1$ для большинства частиц каскада, также оказывается выполненным. Таким образом, можно заключить, что

$$E_{th} \sim \alpha E_{cr} , \qquad (4.2.10)$$

$$\Gamma/\omega \sim \alpha \mu^{1/4} \left(\frac{mc^2}{\hbar\omega}\right)^{1/2}$$
(4.2.11)

где *E*_{th} – пороговое поле для развития каскадов. Однако, определение порога развития каскада не вполне однозначно, а пороговая интенсивность может зависеть от фокусировки, длительности, поляризации используемых лазерных импульсов, а также от других параметров. С помощью найденных соотношений зависимость числа частиц в каскаде от времени может быть представлена в виде

$$N \approx \exp\left(t\pi\alpha\mu^{1/4}\sqrt{\frac{mc^2}{\hbar\omega}}\right).$$
 (4.2.12)

Сделаем оценки для параметров ЦИЭС. Пусть электромагнитный каскад, инициируется частицей, находящейся в поле двух сталкивающихся линейнополяризованных лазерных импульсов с энергией 2220 кДж и длительностью 25 фс. Импульсы сфокусированы в фокальное пятно размером $2\lambda_L \approx 1.8$ мкм. Тогда интенсивность в фокусе составит $4 \cdot 10^{24}$ Вт/см² ($a_0 \approx 1500$), при этом $\mu \approx 0.83$. После прохождения импульсов количество образованных электрон-позитронных пар согласно оценкам составит 10^{50} . Полученная оценка дает, очевидно, значительно завышенное количество пар, поскольку не учитывает поглощение энергии лазерных импульсов. Тем не менее, полученный результат показывает, что на установке ЦИЭС может быть получена очень плотная электрон-позитронная плазма.

Развитие каскада заканчивается, когда вся энергия лазерного импульса переходит в энергию частиц и плазменных полей. Тогда характерная плотность образовавшейся электрон-позитронной плазмы может быть оценена из баланса энергии лазерного импульса и частиц. Для простоты будем считать, что гаммафактор электронов и позитронов равен *у* ≈ *a*₀. Тогда из баланса энергии

$$W_{laser} = \frac{E^2}{4\pi} V = \frac{a_0^2 m^2 c^2 \omega^2}{4\pi e^2} \approx Nmc^2 a_0$$
(4.2.13)

находим характерную плотность электрон-позитронной плазмы

$$n = \frac{N}{V} = \frac{a_0 m^2 \omega^2}{4\pi e^2} \approx n_{cr} a_0.$$
 (4.2.14)

Как видно из полученного выражения она близка к релятивистской критической плотности.

Более точное определение динамики каскада можно получить с помощью численного моделирования. Рассмотрим образование электрон-позитронной плазмы в результате развития электромагнитного каскада, инициированного одним электроном, находящимся в поле двух сталкивающихся лазерных импульсов [29]. Лазерные импульсы имеют Гауссову огибающую и распространяются вдоль оси x. Компоненты лазерного поля в момент времени t = 0 имеют следующий вид:

$$E_{y}, B_{z} = a \exp\left[ix + i\Psi - \frac{y^{2}}{\sigma_{r}^{2}}\right] \left[e^{-(x+x_{0})^{2}/\sigma_{x}^{2}} \pm e^{-(x-x_{0})^{2}/\sigma_{x}^{2}}\right]$$
(4.2.15)

Здесь напряженности поля нормированы на $mc\omega_L/|e|$, где ω_L – циклическая частота лазерного импульса. Координаты нормированы на c/ω_L , время нормировано на $1/\omega_L$. $a = |e|E_0/(mc\omega_L)$, где E_0 – амплитуда электрического поля одного лазерного импульса. $2x_0$ – начальное расстояние между лазерными импульсами, Ψ – фазовый сдвиг, описывающий в том числе и фокусировку импульсов.

Выберем параметры близкие к параметрам ЦИЭС: энергия каждого из двух импульсов (состоящего из 6 пучков установки ЦИЭС) 2220 Дж, длительность импульса 25 фс, размер фокального пятна $2\lambda_L \approx 1.8 \mu m$. Каскад инициируется одним электроном расположен в момент t = 0 в точке x = y = 0 с нулевым начальным импульсом, когда лазерные импульсы приближаются друг к другу (σ_x – расстояние между центрами импульса при t = 0). Развитие каскада в начальный момент времени t = 0 и на более поздней стадии $t = 9\lambda/c$ показано на рисунках 4.37 и 4.38, где представлены: распределение плотности электронов (распределение плотности позитронов почти совпадает с распределением для электронов), плотность распределения фотонов и распределение интенсивности лазерного излучения. Как видно из рисунка 4.38, возникает сгусток сверхплотной электрон-позитронной плазмы микронного размера.



Рис. 4.37. Нормированная плотность электронов $\rho_e = 50 n_e/(a_0 n_{cr})$, нормированная плотность фотонов $\rho_{\gamma} = 50 n_{\gamma}/(a_0 n_{cr})$ (б) и интенсивность лазерного излучения, нормированная на максимум начальной интенсивности ρ_l (в) при столкновении двух линейнополяризованных лазерных импульсов в начальный момент времени t = 0



Рис. 4.38. Нормированная плотность электронов $\rho_e = 50n_e/(a_0n_{cr})$, нормированная плотность фотонов $\rho_{\gamma} = 50n_{\gamma}/(a_0n_{cr})$ (б) и интенсивность лазерного излучения, нормированная на максимум начальной интенсивности ρ_l (в) при столкновении двух линейнополяризованных лазерных импульсов в момент t = 9/c

На рисунке 4.39 показана временная эволюция числа электронов в каскаде. До *ct* < 7*λ* число электронов росло экспоненциально. После прохождения центров импульсов через друг друга рост становится более медленным, поскольку амплитуда суммарного лазерного поля в центре уменьшается. Число электронпозитронных пар достигло значения 10¹⁰. Количество фотонов на порядок больше. Как видно из рисунка 4.38, в центральной части лазерного импульса вблизи горизонтальной оси заметно небольшое поглощение лазерной энергии образовавшейся электрон-позитрон-гамма плазмой. Согласно расчетом примерно 1% лазерной энергии перешло в энергию частиц. Причем суммарная энергия фотонов примерно в 3.5 раза больше суммарной энергии электрон-позитронных пар. Средняя энергия электрона (позитрона) – около 600 МэВ.
Таким образом, численные расчеты также подтверждают, что параметры ЦИЭС позволят впервые получить плотную и горячую электрон-позитрон–гамма плазму и впервые исследовать в лабораторных условиях коллективные КЭД эффекты высокой энергии.



Рис. 4.39. Число электронов, образованных в результате развития каскада, как функция времени

<u>Мероприятие 4.3.</u> Исследование пространственно-временной структуры вакуума при его зондировании рентгеновским и гаммаизлучением с интенсивностью до 10²⁷ Вт/см²

Одной из наиболее важных проблем современной физики является проблема объединения квантовой механики и теории гравитации. Однако её решение представляется затруднительным в связи с недоступностью в лабораторных условиях источников фотонов или частиц с необходимой для исследований энергией. Действительно, проведения квантовая природа гравитации должна проявляться на расстояниях порядка планковской длины, для чего требуется наличие частиц с энергией порядка планковской (около 10¹⁸ эВ). В то же время существует предположение, что пространственно-временная структура вакуума, обусловленная квантовой природой гравитации (см. Рис. 4.40) должна проявлять себя в виде уменьшения скорости фотонов достаточно высоких энергий [120-121]. Существуют и другие теории, предсказывающие замедление высокоэнергичных фотонов [122-124].



Рис. 4.40. Структура вакуума (так называемая, квантовая пена) согласно теории петлевой квантовой гравитации. На масштабах порядка 10⁻³⁰ м начинает проявляться неоднородность этой структуры, что может повлечь за собой более медленную скорость распространения фотонов высоких энергий. Источник: [125]

Вопрос о наличии подобного замедления высокоэнергичных фотонов, таким образом, имеет фундаментальное значение, помимо прочего являясь важным не только для развития теории квантовой гравитации, но и для проверки постулатов специальной теории относительности и возможной модификации этой теории.

Для регистрации значимого отклонения скорости фотона от скорости света необходимы фотоны с энергиями на уровне сотен ТэВ. На данный момент доступными для наблюдения источниками таких фотонов служат активные ядра галактик [126-127] и гамма-всплески [128-129]. Являясь далёкими от Земли астрофизическими объектами, эти источники не могут контролироваться, а потому их исследование сопряжено с известными трудностями. Несмотря на это, изучение самых далёких гамма-всплесков показало, что имеется некоторая задержка во времени регистрации фотонов с большими энергиями. Естественно, эта задержка не обязательно связана с разницей в скорости распространения, а может объясняться, например, конкретным механизмом генерации гамма-излучения.

Таким образом, контролируемый эксперимент, проведённый в лабораторных условиях, является единственной возможностью однозначно ответить на вопрос, зависит ли скорость фотона от его энергии, и связана ли эта зависимость, и если связана, то как, со структурой вакуума. В то же время использование традиционных ускорителей с этой целью крайне затруднительно. Предложенный Энрико Ферми ускоритель ПэВ-ного уровня потребовал бы строительства синхротрона с радиусом, равным радиусу Земли, что, очевидно, является практически невозможным с экономической точки зрения. Альтернативой является использование ускорителей, основанных на сверхмощных лазерах.

Недавние оценки, проведённые Т. Таджимой и др. [130], показали, что для достижения необходимого уровня энергии потребуются лазеры, характеристики которых несильно выше тех, которые построены или планируются к постройке в ближайшее время. Несмотря на то, что характеристики лазерной системы, планируемой к созданию в рамках ЦИЭС, далеки от тех, что требуются для лазерного ускорения электронов до уровня ПэВ (по оценкам, требуется лазерный импульс мощностью около 42 ПВт с энергией около 4,1 кДж при условии наличия 1000 каскадов ускорения [130]), можно ожидать, что имея источник рентгеновского и/или гамма-излучения интенсивностью 10²⁷ Вт/см² (такой источник планируется рамках ЦИЭС), возможно создание условий (например, создать в при взаимодействии такого излучения с пучком высокоэнергичных электронов) для генерации фотонов с энергиями, превышающими ТэВ. Эта перспектива будет подробно исследована в рамках проекта ЦИЭС, в результате чего планируется провести модельный эксперимент по генерации фотонов высокой энергии с измерением зависимости их скорости от их энергии.

Задача 5. Проведение исследований по фотоядерной физике

Подобно тому, как создание источников когерентного оптического излучения привело к развитию атомной оптики, создание источников узкополосного гаммаизлучения высокой яркости будет в недалеком будущем основой для становления ядерной оптики, или фотоядерной физики. Такие источники в проекте ЦИЭС будут получены в различных режимах взаимодействия мультипетаваттных лазерных импульсов с релятивистскими электронными пучками. Источники узкополосного гамма-излучения составят одну из основ инструментария фотоядерной физики. Другая основа – это адаптация традиционных методов и инструментов ядерной физики к данному научному направлению. Исследовательская часть данной задачи будет заключаться в изучении внутриядерных процессов, инициированных вторичными источниками излучения, создании экзотических ядерных структур и развитии методов лазерного управления внутриядерными процессами.

<u>Мероприятие 5.1.</u> Развитие диагностических методов и инструментов фотоядерной физики

Мощные лазерные системы позволят получать пучки гамма-излучения высокой яркости, например, с помощью обратного комптоновского рассеяния электронами фотонов лазерного импульса. Использование мощного лазерного импульса и плотного короткого пучка электронов (который может быть получен, например, с помощью лазерно-плазменных методов ускорения) может позволить получать пучки гамма-излучения экстремально высокой яркости и очень маленькой длительности (десятки фемтосекунд), что откроет новые возможности по изучению ядерной физики. Возможно, с использованием механизма релятивистского плазменного зеркала удастся создать источник гамма-квантов с ещё большей яркостью. Оценки показывают, что для фотонов с энергиями порядка МэВ (типичная энергия возбуждения ядер 100 кэВ – 1 МэВ) можно ожидать до 10¹⁴ фотонов за выстрел с площади около мкм². Это позволит впервые провести эксперименты по двойному возбуждению ядер, а также откроет возможность проводить измерения по методике pump-probe (накачка и измеряющий импульс). С использованием новых источников гамма-квантов также станет возможно более глубокое исследование резонансной флюоресценции ядер. Это явление может использоваться не только для диагностики, но и для удалённого контроля за ядерными выбросами, поскольку легко позволяет находить изотопы тяжёлых элементов.

<u>Мероприятие 5.2.</u> Исследование внутриядерных процессов, инициированных вторичными источниками излучения

К первичным процессам относится ускорение электронов, протонов и ядер мишени. Ускоренные электроны могут генерировать фотоны при рассеянии на ядрах, эти фотоны могут инициировать ядерные реакции. Также ионы, ускоренные лазерным импульсом, могут участвовать в ядерных реакциях. Эти реакции и столкновения могут привести к генерации разнообразных вторичных частиц: гамма-квантов, нейтронов и т. п. Отдельной задачей является диагностика вторичных частиц. Низкоэнергетические уровни многих метастабильных изотопов изучены недостаточно хорошо [131] (см. Рис. 4.41). Возбуждение ядер в плотной горячей лазерной плазме (в том числе и вторичными источниками) может дать новые методы их изучения, а новые экспериментальные данные стимулируют развитие теории.



Рис. 4.41. Энергетические уровни диспрозия-161 и их времена жизни, стрелками показаны различные пути возбуждения уровней (см. [131])

<u>Мероприятие 5.3.</u> Исследование методов управления внутриядерными процессами и создания экзотических ядерных структур

Ускорение ионов мощными лазерными импульсами позволит получать до 10¹⁵ раз более плотные ионные пучки, чем доступны на современных классических ускорителях. Благодаря этому каскадные реакции деления и синтеза ядер могут впервые позволить получить тяжёлые ядра с очень высокой долей нейтронов. Также откроются новые возможности по изучению реакций синтеза тяжёлых ядер, что, возможно, позволит решить проблему происхождения тяжёлых элементов во Вселенной.

В настоящее время хорошо изучены возбуждённые состояния ядер с невысокими энергиями возбуждения, поскольку распространены источники гаммаквантов с низкими энергиями. Такие состояния, как правило, связаны с вращательными и колебательными степенями свободы ядер. Более высоколежащие уровни возбуждения, связанные с более хаотической динамикой ядер, можно будет исследовать с помощью пучков гамма-квантов, полученных с использованием мощных лазерных систем.

В настоящее время для описания хаотических возбуждённых состояний применяется теория случайных матриц, и благодаря новым способам возбуждения ядер появятся возможности по её проверке [132]. Используя мощные лазерные системы, планируется получать пучки гамма-квантов с более узким спектром, нежели при использовании стандартных способов получения пучков гамма-квантов. Благодаря меньшей ширине спектра может быть получено лучшее разрешение верхних возбуждённых уровней ядер, благодаря чему может стать возможным проведение экспериментов по проверке теории нарушения симметрии в квантовой хромодинамике [133].

Задача 6. Экспериментальное моделирование астрофизических явлений

Основой для моделирования астрофизических явлений с помощью сверхмощных лазеров являются рекордные значения давлений, ускорений и напряженностей электромагнитных полей, достигаемых при воздействии лазерного излучения на вещество. Тем самым в лабораторном эксперименте могут быть реализованы условия, имеющие место в крупномасштабных астрофизических явлениях, в том числе в недрах звезд или в окрестности черных дыр, а также некоторые особенности взаимодействия частиц на ранних стадиях эволюции Вселенной.

<u>Мероприятие 6.1.</u> Лабораторное моделирование процессов в недрах звёзд и планет

Поскольку при взаимодействии 200-петаваттного лазерного импульса с различными мишенями могут достигаться температуры от многих тысяч до миллионов градусов Кельвина в макроскопических образцах с размерами больше кубического микрона за время, малое по сравнению с временем разлёта образца, то становится возможным изучение свойств вещества при гигантских давлениях, отвечающих внутренним слоям планет, коричневых карликов и различных звёзд, а также поверхностным слоям белых карликов и нейтронных звёзд. При этом существует довольно длительный этап квазиадиабатического гидродинамического расширения образца с законами падения температуры и давления, управляемыми за счёт профилирования геометрии, химического состава и плотности исходной мишени. В результате с использованием надлежащей диагностики текущего состояния вещества мишени за счёт различного рода синхронного просвечивающего излучения и детектирования фотонов и частиц, излучаемых самой мишенью, можно рассчитывать на решение некоторых проблем внутреннего строения планет и звёзд и объяснения целого ряда их динамических свойств.

Так, выяснение реологических, электрофизических и микроструктурных свойств внутренних слоёв планет земной группы важно для изучения дрейфа континентов и анализа условий существования и динамики планетарных магнитных полей. Для газовых планет-гигантов подобные эксперименты позволят продвинуться в вопросах существования и выяснения свойств плотного ядра (в частности, в вопросе о металлическом водороде в ядре Юпитера). Для коричневых и белых карликов данные указанных экспериментов помогут понять турбулентную структуру их поверхностных слоёв и особенности генерируемого

186

там магнитного поля, управляющего вспышечной активностью этих звёзд. Для нейтронных звёзд можно рассчитывать на определение деталей строения верхних слоёв коры, ответственной за звёздотрясение и, в частности, явление магнетаров - вспышек рентгеновского излучения, возникающих при перестройке коры нейтронных звёзд со сверхсильным магнитным полем. Несомненно полезными предлагаемые эксперименты окажутся и для анализа вспышек сверхновых первого и второго типов, связанных соответственно с термоядерными взрывами на поверхности белых карликов и с коллапсом ядер выгоревших звёзд, исходная масса которых составляла десять И более масс Солнца. Многие из перечисленных и других подобных астрофизических явлений вполне доступны для астрономических наблюдений (см. как пример Рис. 4.42), однако из-за своей сложности до сих пор не имеют сколько-нибудь детальной и обоснованной интерпретации. Её получение, даже с учётом постоянно нарастающей мощности компьютеров, вряд ли будет доступно в обозримом будущем без использования результатов предлагаемого лабораторного моделирования.



Рис. 4.42. Supernova 1987А – сверхновая звезда, вспыхнувшая в Большом Магеллановом Облаке в 1987. Снимок сделан в 1999 году космическим телескопом "Хаббл"

<u>Мероприятие 6.2.</u> Лабораторное моделирование гравитационных явлений

Объектами с наиболее сильными гравитационными полями являются нейтронные звёзды и чёрные дыры. При наличии аккреционного потока окружающего вещества на них, например, со звёзды – компаньона в двойной системе, в экваториальной области образуются горячие аккреционные диски, а из области полюсов вырываются релятивистские джеты – хорошо сколлимированные выброса горячей плазмы (см. схему на рисунке 4.43). Астрономические наблюдения предоставляют довольно богатую информацию о подобных структурах, обязанных своим существованием потокам плазмы и излучения в сильно неоднородном гравитационном поле. Однако, ввиду многообразия радиационно-плазменных явлений в аккреционных дисках и джетах, до сих пор отсутствует сколько-нибудь удовлетворительное теоретическое описание этих структур. Пондеромоторное действие сильного лазерного поля в определённых условиях может моделировать неоднородное гравитационное поле, и тогда экспериментальное изучение поведения лазерной плазмы позволит разобраться в ряде явлений, присущих астрофизической плазме в указанных структурах.



Рис. 4.43.

Существенный интерес представляет также эффект «квантового испарения» чёрных дыр, теоретически обоснованный Хокингом. Суть его заключается в следующем. В очень сильном гравитационном поле вблизи чёрной дыры существует ненулевая вероятность рождения пар частица-античастица различных полей, поскольку постоянно рождающиеся и исчезающие в вакууме пары таких виртуальных частиц за время своего «существования» могут набрать в гравитационном поле достаточно большую энергию, необходимую для разрыва пары. Получающееся излучение в виде реальных частиц и фотонов, исходящее из пространства вблизи чёрной дыры, имеет характерную температуру *T~ha/kc*, где *h* — постоянная Планка, *k* — постоянная Больцмана и *a* — ускорение на расстоянии, равном радиусу Шварцшильда для данной чёрной дыры. Из-за постоянной траты энергии на излучение масса чёрной дыры сокращается.

Экспериментальная проверка этого эффекта является фундаментальной физической задачей, решить которую можно с использованием следующего обстоятельства.

Одним из основных принципов Общей теории относительности является принцип эквивалентности, утверждающий, что гравитационное поле локально может быть сведено к нулю выбором соответствующей неинерциальной системы отсчёта. Отсюда следует, что эффекты, наблюдающиеся в сильном гравитационном поле, можно наблюдать и в неинерциальной (ускоряющейся) системе отсчёта. Таким образом, ускоряемая частица также «видит» излучение Хокинга, которое для случая неинерциальной системы отсчёта часто называют излучением Унру [134]. (Рис. 4.44).





Легко оценить, что для того чтобы в неинерциальной системе отсчёта температура излучения равнялась одному кельвину, необходимо, чтобы её ускорение равнялось 10²⁰ g, где g — ускорение свободного падения на поверхности Земли. В то же время для электрона, ускоряющегося в $10^{28}q$. Швингеровском поле, ускорение равно Поскольку интенсивность, составляет ~10²⁹ Вт/см² соответствующая Швингеровскому полю, И эта интенсивность пропорциональна полю в квадрате, то для интенсивности 10^{25} BT/cm² имеем: a~ 10^{26} g и T~ 10^{6} K. Таким образом, на лазерной установке с интенсивностью 10²⁵ Вт/см² можно пытаться обнаружить слабый сигнал от рассеянных ускоряемым электроном тепловых фотонов (co спектром, соответствующим T~10⁶ K), которые присутствуют в неинерциальной системе отсчёта, связанной с электроном. Основная трудность состоит в том, что помимо излучения Унру есть и другие механизмы, приводящие к излучению фотонов ускоряемым электроном, и выделить слабое излучение Унру на общем фоне не так просто, особенно для быстропеременного во времени ускорения электрона (соответствующего сильно неоднородному гравитационному полю), когда характер излучения Унру сильно меняется.

Для обнаружения эффекта Унру предложены различные схемы. Например, электрон, испытывающий рассеяние в кристалле, помимо тормозного излучения испускает излучение Унру. Спектр излучения Унру существенно отличается от спектра тормозного излучения, однако для того, чтобы мощность излучения Унру стала сопоставима с мощностью тормозного излучения, нужно использовать электроны с энергией около 100 ТэВ [136], что в 1000 раз больше достигнутой в настоящее время в ускорителях энергии электронов (около 100 ГэВ). (Рис. 4.45).



Рис. 4.45. Схема эксперимента по обнаружению излучения Унру, основанная на использовании мощных лазерных импульсов и не требующая внешних ускорителей частиц [135][D. Habs]

Более интересен метод обнаружения излучения Унру при ускорении электронов в сильном лазерном поле [137]. Помимо большой величины ускорения лазерное поле обладает ещё и тем преимуществом, что электрон в нём можно ускорять вдоль прямой траектории (когда тормозное излучение имеет наиболее простой характер и не связано с искривлением траектории). При этом помимо излучения Унру должно присутствовать только ларморовское излучение, диаграмма направленности которого имеет «слепую зону». Это значит, что есть направление, в котором интенсивность ларморовского излучения равна нулю, тогда как интенсивность излучения Унру в этом направлении отлична от нуля. Кроме того, излучение Унру имеет более «острую» временную структуру, чем излучение Лармора, что также может упростить детектирование [136]. Кроме того, было показано, что фотоны излучения Унру испускаются парами с чётко связанными поляризациями [135], соответственно, отделить излучение Унру от ларморовского излучения за счёт использования можно пытаться поляризационной статистики принятых детекторами фотонов.

С помощью генерации и фокусировки гармоник лазерного излучения от поверхности твёрдого тела можно получить напряжённости полей, намного превосходящие лазерные. В таких полях наблюдение эффекта Унру может оказаться более простым. Также можно использовать предварительно ускоренные электроны, поскольку в их системе отсчёта напряжённости поля ещё выше. При этом ускоренные электроны можно получать в лазерно-плазменном ускорителе. В целом предлагаемые эксперименты предоставляют широкие возможности для исследования таких фундаментальных эффектов как эффект Унру и эффект квантового испарения чёрных дыр.

<u>Мероприятие 6.3</u>. Лабораторное моделирование ранних космологических явлений

Сделанное выше утверждение ещё в большей степени относится к исследованию ранних космологических явлений. Прежде всего, это явления, происходившие в высокотемпературной (тысячи и более градусов Кельвина) плазме Вселенной моложе 0,4 млн. лет (лептонная эра, до эпохи рекомбинации и образования нейтрального водорода) – квазиоднородной, но нестационарной и неравновесной из-за космологического расширения. Хотя свойства отдельных частиц этой эпохи неплохо изучены на ускорителях, коллективные явления в подобной многокомпонентной плазме с учётом интенсивного фотонного поля до сих пор остаются весьма загадочными и требуют лабораторного моделирования в экспериментах с лазерной плазмой.

Подобное моделирование поможет понять и особенности формирования и эволюции различных классов обогащённых металлами звёзд в условиях, сложившихся после появления первых массивных водородно-гелиевых звёзд и массовых вспышек связанных с ними сверхновых, когда возраст Вселенной был порядка 1 млрд. лет и произошла её реионизация. Изучение параметров ожидаемой лазерной плазмы необходимо и для выяснения деталей эволюции массивных звёзд (особенно 3-го поколения), включая выяснение механизмов вспышек сверхновых 2-го типа, которые связаны с коллапсом ядра из отработанного термоядерного горючего звезды. Проблема теоретического описания таких сверхновых до сих пор остаётся нерешённой как на стадии коллапса, так и на стадии образования расходящейся ударной волны, приводящей к срыву и разлёту большей части наружных слоёв звезды (см. Рис. 4.46). С физической точки зрения речь идёт об исследовании кинетики экстремальной плазмы ранней Вселенной и плотных астрофизических объектов в условиях множественного рождения и взаимопревращения высокоэнергичных фотонов и легких фермионов, а также об изучении спектрально-динамических особенностей излучения сгустков неравновесной релятивистской плазмы, характерной для взрывных астрофизических процессов и ударных волн.



Два остатка сверхновых **DEM L316**.

Слева - тип Ia Справа - тип II

Изображение в оптическом диапазоне

Рис. 4.46. Данные космического телескопа Хаббла

Уникальная возможность создания 200-петаваттными фемтосекундными лазерными импульсами сгустков ускоренных заряженных частиц (электронов, протонов и др.) с микронными размерами и относительно небольшим разбросом импульсов позволяет рассчитывать на создание столь же компактных (в реальном и импульсном пространствах) сгустков нейтрино или антинейтрино. Подобные спектрально плотные нейтринные сгустки, трудно создаваемые другими методами, можно будет впервые использовать для изучения эффектов резонансного рассеяния нейтрино типа Брэгга и Мессбауэра (известных, например, для рентгеновских лучей) в структурированных мишенях с ядрами, имеющими резонансные нейтрино переходы. В результате можно будет выяснить возможности получения брэгговского и мессбауэровского отражения, а следовательно, и фокусировки нейтрино. Это, в свою очередь, позволит выяснить детали, в том числе релятивистские, нейтринных осцилляций и особенностей распространения нейтрино в средах с различными (резонансными и нерезонансными) ядрами и структурами.

<u>Задача 7.</u> Исследование возможностей создания экзаваттных и зеттаваттных источников света

Дальнейшее продвижение мощности лазерного излучения в экзаваттный и зеттаваттный диапазон за счет прямого масштабирования параметров лазерных каналов или простого увеличения их числа является невозможным в связи с принципиальными техническими ограничениями (например, размеры усилительных элементов, стойкость дифракционных решеток компрессора), либо нарастанием сложностей в управлении лазерным комплексом. Поэтому развитие новых концепций получения импульсов с мощностью более 1 Экзаватта является перспективной задачей ЦИЭС. Наиболее интересной концепцией в этом плане является отказ от традиционных решеточных компрессоров лазерных импульсов и переход к рамановскому усилению и сжатию мультипетаваттных импульсов в плазме в присутствии относительно длинноимпульсного (десятки пикосекунд) импульса накачки. Этот эксперимент планируется в ЦИЭС после запуска 200 ПВт лазера. Развитие данного и ряда других подходов к увеличению мощности излучения будет сопровождаться развитием соответствующей элементной базы.

С помощью обратного рамановского (комбинационного) рассеяния в плазме можно получить несфокусированную интенсивность на выходе в 10⁴-10⁵ раз выше [138-139] по сравнению с обычной техникой усиления частотно-модулированных импульсов.

Механизм использования обратного рамановского рассеяния для сжатия импульсов следующий. В нелинейную среду (плазму) навстречу друг другу подаются два импульса с разностью частот равной резонансной частоте среды (плазменной частоте). Один из импульсов (накачка) имеет большую длительность, но относительно малую интенсивность. Второй импульс (усиливаемый) с более низкой частотой должен быть максимально коротким и иметь хороший фазовый и амплитудный профиль, но его интенсивность может быть очень малой. При прохождении усиливаемого импульса сквозь накачку происходит обратное рамановское рассеяние с возбуждением плазменной волны в среде. Причем плазменная волна возбуждается таким образом, что фазовый профиль усиливаемого импульса не меняется, а все поперечные фазовые неоднородности накачки принимает на себя плазменная волна. Это позволяет использовать в качестве накачки почти произвольные лазерные импульсы, не заботясь об их форме и фазовом профиле. Более того, в рамках такого механизма возможно использование накачки, состоящей из множества импульсов. При этом, чтобы избежать возникновения поперечной дифракционной структуры, каждый импульс накачки может производить усиление в отдельной области в поперечном сечении. Поскольку усиливаемый импульс при усилении не меняет свой фазовый профиль, такая схема позволяет сфокусировать импульс усиленный несколькими импульсами, не синхронизированными с точностью до фазы.

В настоящем проекте речь идет о предельно высоких интенсивностях, при которых применение на финальном этапе усиления какого-либо материала кроме плазмы становится невозможным из-за превышения порога пробоя (при технически разумных поперечных масштабах). В рамках идеи использования вышеописанного механизма рамановской компрессии была разработана так названная схема С³ (Cascaded Conversion Compression), которая основывается на трех основных методиках компрессии: усиление через чирпованные импульсы (Chirped Pulse Amplification (CPA)), параметрическое усиление через чирпованные импульсы (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification (OPCPA)) и рамановская компрессия в плазме [140].

Чтобы достичь эксаваттного уровня мощности, требуется достичь компрессии импульса с энергией как минимум порядка 10 кДж до времен порядка 10 фс. Ни одна из существующих методик компрессии не позволяет сделать это по отдельности. Например, если мы стартуем с уровня энергии импульса накачки 10 кДж при длительности 5 нс и хотим добиться компрессии до 10 фс методикой СРА или ОРСРА, возникают серьезные проблемы пробоя на дифракционных решетках. Вследствие чрезвычайно малой длительности для этой цели необходимо использовать широкополосные дифракционные решетки С металлическим покрытием (толщиной 200 нм). Такие решетки [141] имеют низкий порог пробоя порядка 100 мДж/см². Поэтому, в этом случае стандартная схема СРА/ОРСРА потребует использования десяти достаточно дорогостоящих дифракционных решеток с размером порядка 100 м², каждая из которых может 1 м². Использование решеток с площадью быть составлена из сотни исключительно только техники плазменной компрессии потребует нереалистично обширной области однородной плазмы, длина которой, как не сложно понять, определяется произведением длительности импульса на скорость света. Это соответствует 75 см для импульса накачки с длительностью 5 нс, что не представляется возможным с технической точки зрения.

Идеология методики С³ состоит в разбиении процесса компрессии на три этапа, включающих СРА, ОРСРА и компрессии на основе обратного рамоновского рассеяния. Чтобы пояснить концепцию, рассмотрим в качестве примера лазерную систему LIL в центре CEA (Франция), состоящую из восьми пучков, каждый из которых имеет энергию 10 кДж, длительность 5 нс и длину волны 1,05 мкм. За счет небольшой частотной модуляции со сдвигом *Δt* = 1/(20 пс) позволит произвести компрессию приблизительно до 20 пс.

Применение на первом этапе компрессии техники СРА, нацеленное на преобразование исходных импульсов в импульсы с энергией 10 кДж и длительностью 20 пс, подразумевает на выходе достаточно узкополосный сигнал. Поэтому этой цели использование для возможно диэлектрических дифракционных решеток вместо решеток с металлическим покрытием. Диэлектрические решетки имеют три важных преимущества. Во-первых, для узкополосного сигнала они имеют высокую эффективность на уровне 99%. Вовторых, порог пробоя для используемого диэлектрика для длительности 20 пс находится на уровне 5 Дж/см², тогда как для решеток с металлическим покрытием он составляет всего около 0.1 Дж/см² для 10-20 фс. В-третьих, такие решетки коммерчески доступны с апертурой до 1 м². На этом промежуточном шаге потребуется использование решеток с площадью всего около 0.2 м² для оперирования с пучками с энергией 10 кДж.

На втором этапе с помощью методики ОРСРА предполагается сгенерировать мощный фемтосекундный импульс на длине волны 1250 нм, который в дальнейшем (на третьем этапе) будет использоваться в качестве затравки для рамоновской компрессии. Относительно высокая интенсивность и качество получаемого импульса, а так же малый предимпульс, доступные в рамках этой методики, важны, поскольку на третьем этапе затравка должна быть многократно усилена, конкурируя с рядом нежелательных эффектов: обратное рамановское рассеяние (RBS), обусловленное рассеянием на Ленгмюровских волнах на трассе распространения импульса накачки до взаимодействия с основным импульсом затравки [142], истощение импульса накачки за счет усиления предимпульса [143], рассеяние на плазменных неоднородностях [144] и резонансное рассеяние в сторону, что обусловлено большими значениями поперечных масштабов [145].

Влияние указанных негативных процессов может быть значительно уменьшено путем введения градиента плотности плазмы и соответствующей линейной частотной модуляции в импульсе накачки (например, так, как описано в [142]). Заметим, что такая идея может быть реализована и для нескольких импульсов накачки при соответствующем согласовании [146]. В случае подавления тем или иным способом всех описанных выше эффектов, импульс затравки будет резонансно усиливаться, поглощая большую часть энергии накачки. В целом, этого можно добиться потому, что все нежелательные эффекты обычно более чувствительны к частотной расстройке, чем процесс усиления затравки. Методика ОРСРА замечательно подходит для генерации требуемого на этапе импульса затравки. В ИПФ РАН на установке PEARL уже была продемонстрирована возможность получения импульсов с энергией 50 Дж и длительностью до 20 фс с подстраиваемой длиной волны 1250 нм.

На третьем этапе для компрессии импульса, полученного методикой СРА, от 20 пс до 10 фс предлагается использовать эффект обратного рамановского рассеяния. Этот эффект приводит к усилению излучения с частотой равной разности между частотой излучения накачки и плазменной частотой. Для условия резонансного усиления затравки с длиной волны 1250 нм всем импульсом накачки с длиной волны 1050 нм потребуется плазма с концентрацией 10¹⁹ см⁻³ и размером области взаимодействия порядка 3 мм. При этом пиковая интенсивность после усиления ограничена проявлением релятивистских эффектов на уровне 10¹⁷ Вт/см², что соответствует поперечному диаметру области взаимодействия порядка 3 см для энергии накачки 10 кДж. Следует отметить, что плазма в качестве усиливающей среды по сравнению с кристаллами менее чувствительна к направлениям импульса накачки из-за отсутствия каких либо выделенных осей, и потому допускает использование нескольких импульсов накачки. С другой стороны, в плазме проявление различных нелинейных эффектов в процессе усиления при достижении высоких интенсивностей может приводить к снижению эффективность. Тем не менее, как показывают численные эксперименты с применением метода частиц в ячейках импульс затравки при определенных условиях может усиливаться достаточно стабильно до интенсивностей порядка 4×10¹⁷Вт/см² с эффективностью передачи энергии от накачки порядка 50% [147].

Следует отметить, что идея рамановского усиления лазерных импульсов развивается ещё в нескольких экспериментальных группах. В частности, помимо уже упомянутой лазерной системы LIL, проектируемой во Франции, эксперименты по рамановскому усилению планируется к проведению на установке Trident, располагающейся в Лос-Аламосской национальной лаборатории, в США. На этой установке уже проводились (совместно с французским центром LULI) эксперименты по вынужденному комбинационному рассеянию. Планируется, что в рамках проекта ЦИЭС будет организовано тесное сотрудничество с Лос-Аламосской лабораторией с целью обменом опытом и проведением совместных исследований по данной проблеме. В рамках этого сотрудничества возможен также взаимовыгодный обмен диагностирующим и другим экспериментальным оборудованием.

Список литературы

- Leemans, W.P., et al., Nature Physics, 2, 696 (2002).
- [2] Esarey, E., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 2682 (1997).
- [3] Faure, J., et al., *Nature (London)*, **444**, 737 (2006).
- [4] Bulanov, S., et al., *Phys. Rev. E*, **58**, R5257 (1998).
- [5] Esirkepov, T., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 014803 (2006).
- [6] Suk, H., et al., Phys. Rev. Lett., 86, 1011 (2001).
- [7] Oz, E., et al., Phys. Rev. Lett., 98, 084801 (2007).
- [8] Kiselev, S., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 1350041 (2004).
- [9] Weller, H.R., et al., Prog. Part. Nucl. Phys., 62, 257 (2009).
- [10] Pukhov, A., *Nature Phys.*, **2**, 439 (2006).
- [11] Nerush, E.N., et al., *NIMA*, **653**(1), 7 (2011).
- [12] Gordienko, S., et al., Phys. Plasmas, 12, 043109 (2005).
- [13] Gordienko, S., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **93**(11), 115002 (2004).
- [14] Baeva, T., et al., Phys. Rev. E, 74(4), 046404 (2006).
- [15] Dromey, B., et al., *Nature Phys.*, **2**, 456 (2006).
- [16] Dromey, B., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **99**(8), 085001 (2007).
- [17] Gonoskov, A.A., et al., *Phys. Rev. E*, **84**, 046403 (2011).
- [18] Reiss, H.R., et al., J. Math. Phys., 3, 59 (1962).
- [19] Brown, L.S., et al., *Phys. Rev.*, **133**, A705 (1964).
- [20] Goldman, I.I., Sov. Phys. JETP, **19**, 954 (1964).
- [21] Goldman, I.I., Phys. Lett., 8, 103 (1964).
- [22] Nikishov, A.I., et al., Sov. Phys. JETP, 19, 529 (1964).
- [23] Nikishov, A.I., et al., Sov. Phys. JETP, 19, 1191 (1964).
- [24] Nikishov, A.I., et al., Sov. Phys. JETP, 20, 757 (1965).
- [25] Narozhnyi, N.B., et al., Sov. Phys. JETP, 20, 622 (1965).
- [26] Narozhny, N.B., Phys. Rev. D, 20, 1313 (1979).
- [27] Narozhny, N.B., Phys. Rev. D, 21, 1176 (1980).
- [28] Bell, A.R., et al., Phys. Rev. Lett., 101, 200403 (2008).
- [29] Nerush, E.N., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 035001 (2011).
- [30] Yee, K., IEEE Trans. Ant. Prop., 14, 302 (1966).
- [31] Nerush, E.N., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 035001 (2009).
- [32] Korzhimanov, A.V., et al., in *Proc. of the 22nd Int. Conf. On Numerical Simulations of Plasma*, (2011).
- [33] Martins, S.F., et al., *Nature Phys.*, **6**, 311 (2010).
- [34] Martins, S.F., et al., *Comp. Phys. Comm.*, **181**, 869 (2010).
- [35] Burau, H., et al., IEEE Trans. Plasma Science, 38, 2831 (2010).
- [36] Decyk, V.K., et al., Comp. Phys. Comm., 182, 641 (2010).
- [37] Meyerov, I., et al., in *Proc. of the 22nd Int. Conf. On Numerical Simulations of Plasma*, (2011).
- [38] Pukhov, A., et al., Appl. Phys. B, 74, 355 (2002).
- [39] Malka, V., in *Dream Beam Conference*, Garching, (2007).
- [40] Litvak, A.G., JETP, 57, 629 (1969).
- [41] Esarey, E., et al., IEEE Trans. Plasma Sci., 24, 252 (1996).
- [42] Lu, W., et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 10, 061301 (2007).
- [43] Lu, W., et al., in UCLA, Dream Beam Conference, (2007).
- [44] Roth, M., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 436 (2001).
- [45] Wilks, S., et al., Physics of Plasmas, 8, 542 (2001).
- [46] Schwoerer, H., et al., *Nature*, **439**, 445 (2006).
- [47] Hatchett, S., et al., *Physics of Plasmas*, 7, 2076 (2000).
- [48] Esirkepov, T., et al., Phys. Rev. Lett., 89, 175003 (2002).
- [49] Hegelich, B.M., et al., *Nature*, **439**, 441 (2006).
- [50] Takahashi, K., et al., *Physics of Plasmas*, **17**, 093102 (2010).
- [51] Wang, F., et al., *Physics of Plasmas*, **16**, 093112 (2009).
- [52] Pae, K., et al., *Physics of Plasmas*, **16**, 073106 (2009).
- [53] Esirkepov, T., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 175003 (2004).

[56] Коржиманов, А.В., et al., Письма в ЖЭТФ, 86, 662 (2007). [57] Yan, X.Q., et al., Phys. Rev. Lett., 100, 135003 (2008). [58] Davis, J., et al., Physics of Plasmas, 16, 023105 (2009). [59] He, M.-Q., et al., Phys. Rev. E, 76, 035402 (2007). Zhang, X., et al., Physics of Plasmas, 14, 073101 (2007). [60] [61] Zhang, X., et al., *Physics of Plasmas*, **14**, 123108 (2007). [62] Liseikina, T.V., et al., Appl. Phys. Lett., 91, 171502 (2007). [63] Pegoraro, F., et al., Phys. Rev. Lett., 99, 065002 (2007). [64] Robinson, A.P.L., et al., New Journal of Physics, 10, 013021 (2008). [65] Klimo, O., et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 11, 031301 (2008). [66] Pegoraro, F., et al., Eur. Phys. J. D, 55, 399 (2009). [67] Chen, M., et al., *Physics of Plasmas*, **15**, 113103 (2007). [68] Chen, M., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 024801 (2008). [69] Yan, X.Q., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 135001 (2009). [70] Qiao, B., et al., Phys. Rev. Lett., 102, 145002 (2009). [71] Yu, T.-P., et al., Phys. Rev. Lett., 105, 065002 (2010). [72] Gonoskov, A.A., et al., Phys. Rev. Lett., 102, 184801 (2009). [73] Kar, S., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 225004 (2008). [74] Henig, A., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 245003 (2009). [75] Shen, B., et al., *Phys. Rev. E*, **76**, 055402 (2007). [76] Shen, B., et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 12, 121301 (2009). [77] Yin, L., et al., *Physics of Plasmas*, **14**, 056706 (2007). [78] Albright, B.J., et al., Physics of Plasmas, 14, 094502 (2007). [79] Yin, L., et al., *Phys. Plasmas*, **18**, 063103 (2011). [80] Hegelich, B.M., et al., *Nucl. Fusion*, **51**, 083011 (2011). [81] Jung, D., et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 013306 (2011). [82] Kalmykov, S.Y., et al., Phys. Plasmas, 13, 113102 (2006). Luttikhof, M.J.H., et al., Phys. Plasmas, 14, 083101 (2007). [83] [84] Luttikhof, M.J.H., et al., Laser and Particle Beams, 27, 69 (2009). Pukhov, A., et al., Phys. Rev. Lett., 107(14), 145003 (2011). [85] [86] Lotov, K.V., Plasma Physics, arXiv:1109.6081, (2011). [87] Esarey, E., et al., *Phys. Rev. E*, **65**, 056505 (2002). [88] Kostyukov, I., et al., *Phys. Plasmas*, **10**, 4818 (2003). [89] Rousse, A., et al., Phys. Rev. Lett., 93, 135005 (2004).

[54] Macchi, A., et al., Phys. Rev. Lett., 94, 165003 (2005).

He, F., et al., *Physics of Plasmas*, **13**, 073102 (2006).

[55]

- [90] Ta Phuoc, K., et al., *Phys. Plasmas*, **14**, 080701 (2004).
- [91] Shah, R., et al., *Journal De Physique IV*, **133**, 473 (2006).
- [92] Kneip, S., et al., *Nature Physics*, **6**, 980 (2010).
- [93] Cipiccia, S., et al., Nature Physics, DOI: 10.1038/nphys2090 (2011).
- [94] Clayton, C.E., et al., Phys. Rev. Lett., 88, 154801 (2002).
- [95] Jackson, J.D., Classical Electrodynamics (Wiley, New York, 1975).
- [96] Pukhov, A., et al., Plasma Phys. Control Fusion, 52, 124039 (2010).
- [97] Berestetskii, V.B., et al., "Quantum Electrodynamics". 1982, New York: Pergamon Press.
- [98] Kostyukov, I.Y., et al., *Proc. of SPIE*, **8075**, 807504 (2011).
- [99] Bamber, C., et al., *Phys. Rev. D*, **60**, 092004 (1999).
- [100] Коржиманов, А.В., et al., УФН, **181**, 9 (2011).
- [101] Sokolov, I.V., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 195005 (2010).
- [102] Carman, R.L., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **46**(1), 29 (1981).
- [103] Badsell, C., et al., Plasma Physics and Simulation (Énergoatomizdat, Moscow, 1989).
- [104] Akhiezer, A.I., et al., *Sov. Phys. JETP*, **3**, 696 (1956).
- [105] Brunel, F., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1), 52 (1987).
- [106] Quéré, F., et al., Phys. Rev. Lett., 96(12), 125004 (2006).
- [107] Bulanov, S.V., et al., *Phys. Plasmas*, **1**(1), 745 (1994).
- [108] Nomura, Y., et al., *Nat. Phys.*, **5**, 124 (2009).
- [109] Gordienko, S., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **94**(10), 103903 (2005).
- [110] Roentgen, W.C., *Nature*, **53**, 274 (1986).

- [111] Bonse, U., et al., Appl. Phys. Lett., 6, 155 (1965).
- [112] Momose, A., et al., *Med. Phys.*, **22**, 375 (1995).
- [113] Kwon, O.H., et al., Science, 328, 1668 (2010).
- [114] Fourmaux, S., et al., Opt. Lett., 36, 2426 (2011).
- [115] Kneip, S., et al., Appl. Phys. Lett., 99, 093701 (2011).
- [116] King, B., et al., *Phys. Rev. A*, **82**, 032114 (2010).
- [117] Zavattini, E., et al., Phys. Rev. Lett., 96, 110406 (2006).
- [118] Fedotov, A.M., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 080402 (2010).
- [119] Nerush, E.N., et al., Phys. Plasmas, 18, 083107 (2011).
- [120] Ellis, J., et al., Phys. Lett. B, 665, 412 (2008).
- [121] Amelino-Camelia, G., et al., Nature, 393, 763 (1998).
- [122] Sato, H., et al., Prog. Theor. Phys., 47, 1788 (1972).
- [123] Coleman, S., et al., Phys. Lett. B, 405, 249 (1997).
- [124] Coleman, S., et al., Phys. Rev. D, 59, 116008 (1999).
- [125] http://www.aei.mpg.de.
- [126] MAGIC Collaboration: Albert, J., et al., *Phys. Lett. B*, **668**(4), 253 (2008).
- [127] Aharonian, F., et al., Phys. Rev. Lett., 101, 170402 (2008).
- [128] Gonzr'alez, M.M., et al., *Nature*, **424**, 749 (2003).
- [129] Abdo, A.A., et al., Astrophys. J., 706, L138 (2009).
- [130] Tajima, T., et al., Prog. Theor. Phys., 125, 617 (2010).
- [131] Andreev, A.V., et al., Hyperfine Interactions, 143, 23 (2002).
- [132] Dietz, B., et al., *Phys. Lett. B*, **693**, 316 (2010).
- [133] Finelli, P., et al., Nucl. Phys. A, 735, 449 (2004).
- [134] Unruh, W.G., *Phys. Rev. D*, **14**, 870 (1976).
- [135] Schützhold, R., et al., Phys. Rev. Lett., 97, 121302 (2006).
- [136] Rosu, H., in "Quantum Aspects of Beam Physics", P. Chen, Editor (World Scientific, 2004).
- [137] Chen, P., et al., Phys. Rev. Lett., 83, 256 (1999).
- [138] Malkin, V.M., et al., Phys. Rev. Lett., 82, 4448 (1999).
- [139] Malkin, V.M., et al., Phys. Plasmas, 7, 2232 (2000).
- [140] Mourou, G.A., et al., v1 [physics.optics], arXiv:1108.2116 (2011).
- [141] Stuart, B.C., et al., Phys. Rev. Lett., 74, 2249 (1995).
- [142] Malkin, V.M., et al., Phys. Rev. Lett., 84, 1208 (2000).
- [143] Tsidulko, Y.A., et al., Phys. Rev. Lett., 88, 235004 (2002).
- [144] Solodov, A., et al., *Physics of Plasma*, **10**, 2540 (2003).
- [145] Solodov, A.A., et al., *Physical Review E*, 69, 066413 (2004).
- [146] Balakin, A.A., et al., Physics of Plasma, 10, 4856 (2003).
- [147] Trines, R.M.G.M., et al., *Nature Physics*, 7, 87 (2011).

Инновационные Исследования (Цель 3 и задачи по ее осуществлению)

Третьей целью проекта является осуществление инновационных разработок с использованием созданной инфраструктуры ЦИЭС. Эта цель включает три задачи по разработке и созданию прототипов ускорительной техники, диагностических и метрологических комплексов, а также лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью.

Задача 1. Разработка и создание прототипов ускорительной техники нового поколения.

Мероприятия этой задачи включают разработку прототипов компактных лазерно-плазменных ускорителей электронов, комбинированных комплексов конвенциональных и лазерно-плазменных ускорителей электронов, а также компактных лазерно-плазменных ускорителей ионов. Разработка соответствующих прототипов будет базироваться на результатах фундаментальных исследований в рамках *Задачи* 2, Цели 2 данного проекта.

Задача 2. Разработка прототипов диагностических и метрологических комплексов с рекордным разрешением.

Мероприятия этой задачи включают разработку прототипов диагностических комплексов для наблюдения процессов С аттосекундным временным разрешением, для изучения материалов с пикометровым пространственным и аттосекундным временным разрешением, а также для зондирования материалов и сред с комбинированным использованием световых и корпускулярных импульсов фемтосекундной длительности. Разработка соответствующих прототипов будет базироваться на результатах фундаментальных исследований в рамках Задачи 3, Цели 2 данного проекта.

<u>Задача 3. Новые технологии для создания лазерных источников с высокой</u> пиковой и средней мощностью.

Мероприятия этой задачи включают разработку и создание прототипов лазерных источников нового поколения для промышленности, медицины, термоядерной и гибридной энергетике. По каждому из этих направлений будут разработаны и запатентованы концепции и технические решения, разработаны ключевые лазерные, оптические и электронные компоненты, соответствующие технологии будут переданы в производство. Разработка соответствующих прототипов будет базироваться на результатах исследований в рамках Задачи 4, Цели 1 данного проекта.

5. Заключение

Результаты, ожидаемые по всем разделам программы ЦИЭС, будут иметь прорывной характер, обеспечивая получение совершенно новых знаний и развитие новых технологий. Будет создана уникальная научная инфраструктура мирового уровня, которая позволит проводить экспериментальные исследования свойств вещества и вакуума в недостижимых прежде условиях. Они будут определяться гигантской пиковой мощностью оптического излучения, на 2-3 порядка превышающей достигнутый К настоящему времени уровень, ультрарелятивистской интенсивностью излучения, на 5-6 порядков превышающей рекордные на сегодняшний день значения, и сверхкороткой длительностью излучения, позволяющей разрешать внутриатомные и внутриядерные процессы. Будут разработаны вторичные источники излучения и быстрых частиц, которые могут революционизировать ускорительные технологии и сделать исследования по физике высоких энергий доступными для широкого класса лабораторий, в том числе академических и университетских. Будут созданы новейшие методы диагностики вещества с недостижимой до сих пор точностью, и тем самым существенно расширены горизонты фундаментальной метрологии. Впервые будет исследована пространственно-временная структура вакуума и разработаны методы создания вещества и антивещества в вакууме в присутствии полей сверхвысокой интенсивности.

Наряду с решением уникальных задач фундаментальной науки, значимость результатов создания ЦИЭС будет определяться многочисленными приложениями, которые будут разработаны в процессе эксплуатации комплекса. Они включают, в частности, разработку новых источников излучения и частиц для клинической диагностики и терапии, новых метрологических комплексов для диагностики материалов с пикометровым пространственным и аттосекундным временным разрешением. Важный инновационный и экономический эффект может дать существенное удешевление ускорительной техники, работающей на новых принципах, для создания новых исследовательских центров физики высоких энергий. Будут разработаны новые технологии создания лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью, что обеспечит развитие в ЦИЭС прикладных исследований в перспективных отраслях промышленности, медицины, ядерной и гибридной энергетики.

ЦИЭС будет поистине международным научно-исследовательским центром, обеспечивающим эффективное сотрудничество ученых из многих стран в области физики экстремального света и приложений. Он предоставит помещения для оборудования лабораторий и время для использования основного источника лазерного излучения и вторичных источников излучения для проведения исследований в рамках международных соглашений. Для определения важности и приоритетности научно-исследовательских программ ЦИЭС будет сформирован международный руководящий комитет. ЦИЭС будет тесно сотрудничать с ведущими мировыми центрами в области лазерных, ускорительных и ядерных исследований, в первую очередь с теми, где выполняются родственные программы, такими как ELI, CEA, CERN, KEK, RAL, LANL, и другими.

			Сто	имость раб	ют	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наяменование работ	Время начала и завершения работ	Запраши- ваемые средства из федераль ного бюджета	Ожидаем ый объем внебюд- жетных средств из отечест- венных источни- ков	Ожидае мый вклад инопарт нера	1 11 111 1	17 1 11 111	17 1 11 111	v 1 11 111 117	1 11 111 117	1 11 111 117	1 11 111 117		1 11 111 11	
Цель 1. Создание и функци	онирование инфраструктуры МЕГА-проекта	I.2012-IV.2021	28 900	1 600	4 700					35200	млн.				
Задача 1. Создание прототипов д	цвух 15 ПВт-ных лазерных модулей	I.2012-IV.2017	5 300	500				5800 M	илн.						
Задача 2. Строительтство здани	й и инженерных сетей МЕГА-проекта	II.2012-I.2016	4 200	600				4800 млн.							
Задача 3. Создание 200 ПВт-ного) лазера	I.2012-IV.2018	12 000	200	2 000				14200 млн						
Задача 4. Создание комплекса м	ощных фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных	I.2012-II.2018	900	100	100				1100	млн.					
Задача 5. Создание источника эл	ектронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов	I.2013-IV.2016	550					550	млн.						
Задача 7. Создание и оснащение	экспериментальных лабораторий	I.2013-II.2018	2 880		2 600					5480 мл	ιн.				
Задача 8. Обеспечение радиацио	нной безопасности	I.2012-IV.2021	400							400 м	илн.				
Задача 9. Создание вычислители	ьно-коммуникационного центра	III.2014-II.2017	600						600 M	илн.					
Задача 10. Оснащение инженерн	ю-вспомогательных мастерских	I.2015-IV.2016	350						350 M	илн.					
Задача 11. Обеспечение функцие	энирования МЕГА-установки	I.2012-IV.2021	1 300	200						15	500 млн.				
Цель 2. Проведение фундам	ентальных исследований на базе созданной ифраструктуры	I.2012-IV.2021	1 400	100	600					2	100 млн.				
Задача 1. Моделирование проце	ссов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	I.2012-IV.2021	100							100 м	илн.				
Задача 2. Проведение экспериме	нтов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц	I.2013-IV.2021	230	100	100						43	80 млн.			
Задача 3. Создание новых источ	ников излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах	I.2013-IV.2021	310		100							410 млн.			
Задача 4. Исследование нелине	іных свойств вакуума в экстремальных световых полях	I.2016-IV.2021	230		100								330 млн.		
Задача 5. Проведение исследова	ний по фотоядерной физике	I.2018-IV.2021	190		100									290 млн.	
Задача 6. Экспериментальное м	оделирование астрофизических явлений	I.2017-IV.2021	240		100								340 м	илн.	
Задача 7. Исследование возможн	юстей создания экзаваттных и зеттаваттных источников света	I.2017-IV.2021	100		100							200 млн.			
			1000	200	000										
Цель 3. Осуществление инн	овационных разработок с использованием инфраструкутуры	I.2012-IV.2021	1900	300	800					3	000 млн.				
Задача 1. Разработка и создание	прототипов ускорительной техники нового поколения	I.2016-I.2021	600		250							85	50 млн.		
Задача 2. Разработка прототипо	в диагностических и метрологических комплексов с рекордным разрешением	I.2018-I.2021	400		100								50	0 млн.	
Задача 3. Новые технологии для	создания лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью	I.2012-I.2021	900	300	450						1650	млн.			
итого			32 200	2 000	6 100	+ + +	++++	┝┼┼┼┤	┽┼┼┼	┟┟┟┟┟	++++	┟┼┟┼	++++	╎╎╎	++++
ВСЕГО			52 200	40 300	0 100	┝┼┼┤						++++			
		1													

	Графическая форма дорожной карты																				Пр	ило	жен	ие 1	
			20	012		20 ⁻	13		2014		20)15	20	016	20	17	201	18	201	19	20	20	2	2021	
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель			IV I	П	III IV	1		IV I	Ш	III IV	1 11	III IV	1 11	III IV I		III IV		III IV	1 11	III IV		1 111 1V	,
Цель 1. Создание и функцио	нирование инфраструктуры МЕГА-проекта												3	5200	млн.										
Задача 1. Создание прототипов д	вух 15 ПВт лазерных модулей			l	ÌÌ		ĺ		5800	млн	I.	II	I I									\square	П		1
Мероприятие 1.1. Строительство					939 (млн.																			٦
здания (3000кв.м.) и инженерных	Определение требований	ИПФ																							
сетей.	Выбор места строительства	ИПФ, ПНО																							٦
	Выбор проектной организации	ИПФ																							
	Разработка проекта	НОП																							
	Выбор строительной компании	ИПФ						11																	
	Строительство дорог	НОП																							
	Капитальное строительство	ноп																				\vdash	++		-
	Подключение и ввод инженерных коммуникаций и оборудования	ноп															+ +					\vdash			٦
	Отделочные работы	ноп																				\vdash	++	++	-
	Оснашение необходимым оболудованием	ноп																				\vdash	++	++	-
	Веод в эксплуатанию	НОП							+													\vdash	++	++	-
Мероприятие 1.2. Создание общей	Door o sterily unaquio				4	49 M	пн										++					\vdash	++	++	-
тартовой насти	Разработка оптической схемы	ИПФ			-	-3 WI	лн. 	+														\vdash	++	++	-
стартовой части	Газрадотка оппической ехонов	ИПФ					_	+	+							┝─┼─╂						\vdash	++	++	-
	Голински нация Сборка юстировка и отладка	ИПФ						+	+								++					\vdash	++	++	-
	Соорта, востарован и оплавот и оплавание и оплавание и оплавание и оплавание и оплавание и оплавание и оплавание Апгооблиция поботь общей сталатовой части	ИПФ																				\vdash	++	++	-
	τη γουτημή μιστική στη παρατική ματά τη προστά ποι πολιτική που πορογοριάτερα τη προστή τη προστή τη προστή που Ραγαλογισμό μα αλαματική τη προστή ποι προστή που προστή που προστή που προστή που προστή που προστή που προστή	ИПФ						+												_		\vdash	+	++	-
	Газосновно на оба ну наста правонортировка ну ново о явоума Ввод в эксплуатацию			_																		\vdash	++	++	-
		ИПФ																				\vdash	++	++	_
Мероприятие 1.3. Создание первого							1417	млн	۱.										_			\vdash	++	++	_
прототипа модуля мощностью 10 ПВт	Определение оптической схемы модуля	ИПФ						++														\vdash	++	++	_
	Разработка и создание стартовой системы	ИПФ, ФИАН						++												_	_	\vdash	+	\rightarrow	_
	Разработка и создание лазеров накачки	ИПФ, ВНИИЭФ					_	+	_													\vdash	++	++	_
	Разработка и создание параметрических усилителей	ИПФ, ИОФ					_		_										_			\vdash	++	++	_
	Разработка и создание компрессора импульсов	ИПФ						+												_		\vdash	++	++	_
	Разработка и создание устроиств увеличения контраста	ИПФ					_	+	_								+			_		\vdash	++	++	_
	Разработка и создание адаптивной оптики	иплит						+	_													\vdash	++	++	_
	Разработка и создание системы управления	ИПФ, НИИКИ						++	_											_		++	++		_
	Разработка и создание системы диагностики	ИПФ, ФИАН							_													\vdash	++	\rightarrow	_
	Апробация работы 1011Вт-ного модуля	ИПФ		_					_											_		⊢⊢	++		_
	Быраоотка рекомендации по улучшению раооты модуля	ИПФ		_				+		-	_								_			\vdash	++	\rightarrow	_
	Комлектация окончательного варианта	ИПФ		_				++														⊢⊢	++		_
	Апродация окончательного варианта модуля					_		+	_		_					┝─┼─╂						\vdash	++	++	-
14.0	Газраоотка оокументации	ипΦ		_		_	_	+											_			⊢⊢	++	++	-
Мероприятие 1.4. Создание второго						_			12	235 M	илн.						_		_			\vdash	++	++	-
прототипа модуля мощностью 10 ПВт	Комплектация модуля			_	\vdash		_				_						+			_		\vdash	++	++	-
	Соорка, юстировка и отлаока			_	\vdash		_	+			_									_	_	\vdash	++	++	-
	Синхронизация (оез фазировки) овух мооулей	ИПФ				_			_												_	\vdash	++	++	-
Management 1.5 december 200	Апровация воновременой равоты овух мовулей в несфизированном режиме	hπψ					_		473 .	4011							++					\vdash	++	++	-
Мероприятие 1.5.Фазировка двух	Μαναπιπροσμικά η μος ταδροσμικά παιτημικής αποςοδός φατηπροκή δάτις ποδηλικά	ипа иплит						-	4/3 1											_		\vdash	++	++	-
модулеи	микетировиние и исслеобвиние ризличных способов физировки овух мобулей Определение опримального еарианта фагировки деух модулей	ИПФ, ИПЛИТ		-				++	-		-						++			_	-	\vdash	++	++	-
	опревеление оптимального варианта физировки овух мобулей Комплектация сболка юстиповка	ипф иплит		-			_															\vdash	++	++	-
	Тестирование фазировки двух, модулей на промежуточном уровне мошности Тестирование фазировки двух, модулей на промежуточном уровне мошности	ипф, иплит		-			_	+														\vdash		++	-
	Тестирование фазировки двух модулей на максимальной мошности	ИПФ		+	\vdash	++	-	$^{++}$		++				++		┝┼┼	++					\square	++	++	1
	Оптимизация фазировки двух модулей	ИПФ						\dagger																	
	Макетирование фазировки двенадцати модулей	ИПФ		1																		\square			٦
	Определение схемы фазировки двенадцати модулей	ИПФ																				\square			٦
Мероприятие 1.6. Увеличение												41	0 млн	ł.											1
мощности модулей до 15 ПВт	Оптимизация лазеров накачки	ИПФ, ВНИИЭФ																							
	Оптимизация параметических усилителей	ИПФ																							
	Оптимизация стретчера-компрессора	ИПФ					T															iТ			
	Проверка работы модулей на полной мошности	ИПФ			ΙT			1 1		1 T			ΙT									(T	T T		

	Графическая форма дорожной карты	_																			Пр	илож	кени	1e 1
			2	012		20	13	:	2014		20	15	2	2016		2017		2018	20	019	20)20	20	021
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель			IV I		III IV			N I		III IV			vi		vı			III IV				
Мероприятие 1.7. Создание									285 м	лн.			t ti				<u> </u>						i ti	
ускорителя электронов до энергии 20	Создание фотокатода и СВЧ-пушки	ОИЯИ																						
МэВ на основе фотокатода и СВЧ	Создание лазерного драйвера для фотокатода	ИПФ																						
резонаторов	Синхронизация лазерного драйвера с 15 ПВт-ным лазером	ИПФ																						
P	Создание ускорительных секций	ИЯФ, DESY																				\square	\square	
	Создание системы фокусировки и доставки электронного пучка	ИЯФ, DESY																			\square	\square	\vdash	+
Мероприятие 1.8. Создание								242	млн.				\square						\square		++	\square	\vdash	
прототипа лазера с частотой	Разрадотка оптической схемы 17	ИПФ		_					_	_					_		_				\square	\square	\vdash	
повторения импульсов 1 кГц	Komnzermajus	ИПФ, ИОФ						++		_		_	+							++	⊢⊢'	\vdash	\vdash	+++
	юстировка, тестирование и оттимизация параметров	ИПФ		_	++						+ +	_									\vdash	\vdash	\vdash	++-
Мероприятие 1.9 Созлание и оснашение	Созоание системы фокусировки на мишень	iiit‡		-		-		350	мпы				╉┼┼								++	++	\vdash	++-
паборатории для исследования	Uppomographie in vemanogen Minierutury en ven	ипф		-				550	WUTH.						_						\vdash	++	\vdash	
взаимолействия излучения с веществом	Создание системы ввода дахх туков 15-ПВт-ных модулей	ИПФ																				\vdash	\vdash	++
	Оснашение вспомогательным оборудованием	ИПФ																					\square	
	Обеспечениерадиационной зациты персонала	ИПФ																						++-
								ΪÌ			ΪÌ		11	11										
Залача 2. Строительтство зланий	і и инженерных сетей МЕГА-проекта			1	i i	Ĺ	49	300 M	пн		ÌÌ	1		++							HT	HH	ΠŤ	++
Мероприятие 2.1. Определение			1	13 MP	н		-0							++	+		+	++	+		\vdash	\vdash	\vdash	++
требораций	Главное здание установки МЕГА-ппоекта	ИПФ																			H	+++	\vdash	++-
треоовании		ипф оияи																			ht	\vdash	\square	
	Оптические, механические, электронные и вакуумные мастерсткие	ИПФ																						
	Инженерная инфраструктура (котельная, трансформаторная и т.д.)	ИПФ																					\square	
	Гостиничный комплекс	ИПФ																					\square	
	Парковка	ИПФ																						
	Столовая	ИПФ																					ĹĹ	
Мероприятие 2.3. Определение места	строительства	ИПФ. ПНО		3 N	илн.																		Π	
Мероприятие 2.4. Выбор проектной о	рганизации(й)	ИПФ		1 м	илн.																			
Мероприятие 2.5. Проектирование зда	ний, инженерных сетей и дорог	НОП				45	0 млн	١.																
Мероприятие 2.6. Выбор строительно	й компании(й)	ИПФ					1 млн	н.															Π	
Мероприятие 2.7.Строительство										3	700 r	илн.												
зданий	Капитальное строительство	НОП																					ĹĹ	
	Отделочные работы	НОП																			\square	\square	\square	
	Оснащение необходимым оборудованием	НОП																			\square	\square	\square	
	Ввод в эксплуатацию	HOII											_								\square	\square	\vdash	++
Мероприятие 2.8. Подключение и										_	632	2 млн	I.								\square	\square	\vdash	++
ввод инженерных коммуникаций	Капитальное строительство	HOII		_	\vdash	_						_			_			++			\vdash	\vdash	⊢┼─	++-
	Отелочные работы	HOII			++	-		++		_		_		+			+			+	\vdash	\square	\vdash	++
	Оснащение неоохобилым оборуоованием Васд с очиплистично	НОП		_		_			_	_					_						++	\vdash	\vdash	++
						1				_					_						++	++	\vdash	++-
Залана 3. Созлание 200 ПВт даза						1		1 1		1.	4200	мпн										++		++
Мероприятие 3.1. Разработка				65	мпн			1			1		İ						\vdash		H	++	H	++-
локументации 200 ПВт дазера	Оппеделение требований к стартовой части 200 ПВт-ного лазера	ИПФ																				++		++
документации 200 прт лазера		ИПФ RAL																				++		
	Определение требований к транспотрировке пучков в мишенный зал	ИПФ. ВНИИЭФ																			H		H	
	Разработка системы транспотрировки пучков в мишенный зал	ИПФ ВНИИЭФ						1 1													ht	\vdash	\square	
	Привязка расположения стартовой части, двенадцати модулей и системы транспотрировки пучков в лазерном зале																							
		ипф																				1 /	11	
	Определение окончательного варианта дизайна 200 ПВт-ного лазера	ИПФ							+	\vdash			+	++		++	+		\vdash	++	H	H	\vdash	++
	Разработка проектно-сметной документации	НОП							+	\vdash			+	++		++	+		\vdash	++	H	H	\vdash	++
Мероприятие 3.2. Развитие					6	10 M	лн.	\mathbf{T}				+	\square	++			+		\square		\square	HΗ	\square	++
необхолимых технологий	Развитие технологиии варки и полировки неодимового стекла	НИИТИОМ. НИИКИ			Ť						+			++			+		H			H	ГŤ	++
	Развитие технологиии производства ламп накачки	НОП											t t	++					H		HT	HH	ΠŤ	+++
	Развитие технологиии производства дифракционных решеток	СЕА, ИПФ											t t	++					H	$\uparrow \uparrow$	H	HH	ΠŤ	+++
	Развитие технологиии роста широкоапертурных нелинейных кристаллов	ИПФ, ИГМ											ГŤ	+					\square		ΠŤ	\square	ГŤ	\square
	Развитие технологиии напыления стойких тонкопленочных покрытий с заданными дисперсионными свойствами	нгу											11						H		ГГ	ΠĦ	\square	+ -
	Развитие технологиии адаптивной оптики	ИПЛИТ																				ΠH	\square	

	Графическая форма дорожной карты	-																				Прі	илох	кені	ие 1
				201	2	2	013		2014		201	5	20	016	2	2017	2	2018		2019	э	202	20	2	:021
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель																							
Мероприятие 3.3. Созлание общей					III IV	1 11				10 1	07 мп	I IV		III P	/ 1 11		VIII								
стартовой части	Комплектаиция	ИПФ		1 1						Ĭ				+	+ +			+			++	++			++
eruprobon mern	Сборка, юстировка и отладка	ИПФ												T						TT	++	11		tτ	
	Апробация работы общей стартовой части	ИПФ												T						TT	++	11		tτ	
	Разделение на 12 пучков и транспортировка пучков в 15 ПВт-ные модули	ИПФ																							
	Ввод в эксплуатацию	ИПФ																							
Мероприятие 3.4. Создание									I			120	000 м	ІЛН.											
лвеналиати молулей	Комплектациия	ИПФ. СЕА					++												H	Ħ	++	11		hτ	
,	Сборка, юстировка и отладка	ИПФ. СЕА					++												H	Ħ	++	11		hτ	
	Синхронизация (без фазировки) 12 модулей	ИПФ СЕА		11			++											+		++	++	++	-	Ηt	++
	ангобашия одновременной работы 12 модулей в несфазированном режиме	ИПФ, СЕА		11			++							++				+		++	++	++	-	Ηt	++
Мероприятие 3.5. Фазировка		- É		11			++							\mathbf{T}	362	млн.				++	++	++	-	Ηt	++
пероприяти модилей	Комплектация	ИПФ		11			++	+			++				002			+		++	++	++	-	Ηt	++
двенадцати модулей	Тестирование фазировки 12 модулей на промежуточном уровне мошности	ИПФ		11			++	+			++									++	++	++	-	Ηt	++
	Тестирование фазировки 12 модулей на максимальной мошности	ИПФ																			++	++	-	t t	++
	Вылаботка рекомендаций по улучшению системы синхронизации, включая работу адаптивной оптики	ипф иплит		1			+											+		+++	++		-	t t	
	Оптимизация фазировки 12 модулей	ипф иплит																			++	++	-	t t	++
	Ввод в эксплуатацию двенадцати сфазированных модулей	ИПФ																++			++	++	-	t t	++
Мероприятие 3.6. Создание системы				11			++							3	32 мл	H.					++			H	
лиагностики 200 ПВт дазера	Комплектация	ИПФ. СЕА																			++	++	-	t t	++
dha noethki 200 HBT hasepa	Сборка, юстировка и отладка	ИПФ. СЕА					++												H	Ħ	++	11		hτ	
	Ввод в эксплуатацию	ИПФ																			++	++	-	t t	++
Мероприятие 3 7 Создание системы							++							2	87 мл	H.				Ħ	++	11		hτ	
управления 200 ПВт дазера	Комплектация	НОП					++													Ħ	++	11		hτ	
jiipubleliin 200 HBT hasepa	Сборка, юстировка и отладка	НОП																							
	Ввод в эксплуатацию	НОП																						TT	
Мероприятие 3.8. Транспортировка										T T				54 .											
лвеналиати лазерных пучков в	Laurannana.		-	+			++	+-						54 M	UIH.				┢╋╋	┢╋╋	++	++	+	┢┼╋	++'
главную мишенную камеру и другие	Комплектация		_															\perp	⊢⊢	\vdash	++	++	_	\vdash	
лаборатории	Сборка, юстировка и отладка	ВНИИЭФ, ИПФ																							
huoopurophin	Ввод в эксплуатацию	внииэф ипф																							
Мероприятие 3.9. Врод в эксплуатации	0 200 IBT 192803		-				++	+						+					┢╋╧╌	┶╋╴	++	++	+	┢┼╴	++
мероприятие 5.9. Ввод в эксплуатация	0.200 HDF nasepa	ИПФ																	37 мл	лн.					
			_	+															++-	┢╋╋	++	++	+	┢┿┝	++
Задача 4. Создание компл	екса мощных фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных	приложений									1	100 ו	илн.												
Мероприятие 4.1. Разработка						1	4 млн	ι.																	
концепции комплекса лазеров с	Определение параметров лазеров	ипф иоф																							
большой частотой повторения	Оппеделение требований на технологию и производство диодных лазеров	ИПФ ВНИИТФ		11														++	++		++	++		\vdash	++-
······································	определение апуштектупы трансполтировки зазерных туков в заборатории	ипф		1 1										+			++	+	\vdash	++	++	++	+	\vdash	++
	опросолония применянура применартировки лизерных ну коо о лисоритории Выпуск документации Выпуск документации	ИПФ	-					-			+			++	++			┥┙	H	┢╋╋	++	++	+	┢┼╴	++
Managanya 4.2 Daanugua	Болускоокументиции			1				-	200 •						++			┯	++	++	++	++	+	++	++
мероприятие 4.2. газвитие		DUUUTA	-	+	+				300 N	JUIH.				++	++		++		\vdash	┢╋╋	++	++	+	┢┼╋	++'
технологии производства диодных	г изриоонна облагнов и улуниания конструкции и тахнологии Тастирования образнов и улуниания конструкции и тахнологии		+	++	+								+	++	++	++	++	+	\vdash	┢╋╋	++	++	+	┢╋╋	++-'
лазеров	Гестирование образцов и улучшение конструкции и технологии	ΒΗΝΝΙΦ, ΝΠΦ		+			+	_							++		_	-	┢╋┝	┢┼╋	++	++	+	┢┼╋	++
12.0	Cosounue napmuu	DIMITY	+	+	+	-	+	+-			75			\vdash	+	++	++	┯	\vdash	++	++	++	+	⊢	++
Мероприятие 4.3. Создание лазера с			_	+						1	/5 МЛ	н.							++-	┿┿	++	++	_	┢┿┝	++-'
частотой повторения импульсов 1-10	Разраоотка оптическои схемы	ИЛФ, ИОФ	_																┢┝┝	┢╋╋	++	\rightarrow	_	┢┼┥	'
Гц	Komnzekmaijus	ИЛФ, ИОФ															\rightarrow		\vdash	┢┥┝	44	\rightarrow	_	┢┝┝	++
	Юстировка, тестирование и оптимизация параметров	ИЛФ, ИОФ															\rightarrow		\vdash	┢┥┝	44	\rightarrow	_	┢┝┝	++
	Ввод в эксплуатацию	ИЛФ, ИОФ																	\square	\square	\square	\square	\rightarrow	\square	
Мероприятие 4.4. Создание лазера с											4	27 м	лн.							\square	\square	\square	$ \rightarrow $	\square	++
частотой повторения импульсов	Разработка оптической схемы	ИПФ																'		\perp	\square	\square		Ш	\perp
несколько кГц	Комплектация	ИПФ		1			\square													\square		Ш		Щ	
	Юстировка, тестирование и оптимизация параметров	ИПФ																7						Ш	
	Ввод в эксплуатацию	ИПФ																							
Мероприятие 4.5 Транспортировка											184	млн.				TI									
лазерных пучков в главную	Разработка оптической схемы	внииэф								П														П	
мишенную камеру и другие	Комплектация	внииэф		11										П					ГТ	\square	++	++	T	ГŤ	
лаборатории	Монтаж и юстировка	внииэф		11											11			+	Ħ	\square	++	++	+	Ħ	++
nucoputopun	Ввод в эксплуатацию	PUNNA		$^{++}$			+ †	+		++	+					++	++	┯	Ħ	++	++	++	+	Ħ	++
		Ψεινινησ	+	+	+		+ 1	+		++	+	+		+	++	++	++	┛	\vdash	++	++	++	+	⊢	++
				11			1			1 1				11					11	11	11			1 1	11

	Графическая форма дорожной карты	-																						При	лож	кени	1e 1	
			20	012		20	13		201	4	2	2015	5	20	16	2	017		201	8	20	19		2020)	20	021	
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель			IV I	Ш		/ 1		II IV			IV I	=	III IV		=	IV I		II IV			v I		IV			IV
Задача 5. Создание источника эл	ектронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов							T	5	550 N	илн.		ÌÌ		Ì	1												_
Мероприятие 5.1. Разработка						19	млн.																					_
концепции источника электронов,	Фотокатод и СВЧ-пушка	ИЯФ, ОИЯИ, ИПФ																										_
синхронизованного импульсом 200	Лазерный драйвер для фотокатода	ИПФ																										
ПВт лазера	Система синхронизации	ИПФ																										
*	Ускорительные секции	ИЯФ, ОИЯИ														ш									Ш	\perp	Ш	
	Фокусировка и транспортировка электронного пучка	ИЯФ, ОИЯИ, DESY														Ц				\square			\square		Ш	\square	\square	
	Создание документации на ускоритель	ИЯФ, ОИЯИ, ИПФ			╇			_								4				\square			\square	\perp	\square	\perp	++	
Мероприятие 5.2. Создание					\square				182	млн	I.		++			Ц				\square			\square	_	\square	\rightarrow	$\downarrow \downarrow$	_
фотокатода и СВЧ-пушки	Комплектация	ФRN		_	+	_				_			++						++	\rightarrow			+	\rightarrow	++	+	++	
	Монтаж, наладка и тестирование	ФRN		_	+	_		_				_	++						++	\rightarrow			+	\rightarrow	++	+	++	
N 53.0	Ввод в эксплуатацию	ФКИ	+	_	+	_		_		107.0		_		_			_			\rightarrow			\rightarrow	_	++	_	++	_
Мероприятие 5.3. Создание лазерного	V			_	+	_	\vdash	-	1	107 N	илн.	_	++			\vdash			++	++	_		+	+	++	+	++	_
драйвера для фотокатода	комплектация	шть		_	+	_				_		_		_	-	\vdash	_		+	\rightarrow	_		++	_	++		++	_
	монтаж, налаока и тестирование	ИПФ	+ $+$	-	+	-	\vdash	+			++	-	+			\vdash			++	++	-		++	+	++	+	++	-
Monormurgeus 5.4. Cuumpourg	рвоо в эксплуатацию	iiii‡	+ +	_	+		\vdash	-				_	++			+			++	++	_		++	+	++	+	++	_
мероприятие 5.4. Синхронизация назавиного прайвара со 200 ПРт									47 n	илн.													\square		\square		\square	
лазерного драивера со 200 ПВГ	Комплектация																											
средней мощностью	Монтаж, наладка и тестирование	ИПФ																										
	Ввод в эксплуатацию	ИПФ																										
Мероприятие 5.5. Создание											123	млн	ł.															
ускорительных секций	Комплектация	ИЯФ, DESY																										
· ·	Монтаж, наладка и тестирование	ИЯФ, DESY																										
	Ввод в эксплуатацию	ИЯФ, DESY																										
Мероприятие 5.5. Создание системы												72	2 млн							\square			\square		Ш	\square	\square	
фокусировки и доставки	Комплектация	ИЯФ, ОИЯИ? DESY		_																\square			\square	<u> </u>	\square	_	$\downarrow \downarrow$	
электронного пучка	антаж, наладка и тестирование	ИЯФ, ОИЯИ? DESY		_	+	_				_									++	\rightarrow			+	_	++	_	++	_
	Ввод в эксплуатацию	ияФ, ОИЯИ? DESY		_	┿╋	_		+		_		_	+		_	++			++	\rightarrow			+	\rightarrow	++	+	++	_
											11		11			<u> </u>			++	\rightarrow			\rightarrow	_	+	_	++	
Задача 6. Создание главной миш	енной камеры									42	20 мл	٦Η.																
Мероприятие 6.1. Определение					5 м.	лн.																						_
требований на главную мишенную	Определение габаритов и геометрии камеры	ИПФ, ВНИИЭФ																										
камеру и ее вспомогательное	Определение параметров вспомогательного оборудования	ИПФ																										
•••• • ••	Определение геометрии ввода лазерных и электронного пучков	ВНИИЭФ, ОИЯИ																										
Мероприятие 6.2. Разработка и							1	75 N	илн.														_		\square	_	\square	
изготовление главной мишенной	Разработка эскиза	ИПФ, ВНИИЭФ		_								_							++	\rightarrow				_	+	_	++	
камеры	Выпуск конструкторкой документации	НОП		_	+	_				_		_	++			\square				\rightarrow			\rightarrow		++	_	++	
	Выбор компании-изготовителя	ИПФ				_				_									+	\rightarrow			\rightarrow	_	+	_	++	
	Изготовление камеры	HOII		_	╷╷	_				_			++			++			++	\rightarrow			\rightarrow	_	++	_	++	
Мероприятие 6.3. Установка главной	m	11077	+	_	++	_		_		_	8 м	лн.		_			_			\rightarrow			+	_	++	—	++	_
мишенной камеры в мишенном зале	Гранспортировка камеры История и полновить составляется с с с с с с с с с с с с с с с с с с	HOII		_	++	_	\vdash	-		_		_	++			++			++	++			++	_	++	_	++	_
	Монтаж камеры в мишенном зале	HOII		_	++	_		-		_		-		_	-	+	_		+	++			+	_	++	—	++	_
	дакуумные испытания	ИПФ									Ļ													\perp			\square	
Мероприятие 6.4. Оснащение камеры				_	++	_				_		14	14 мл	н.						\rightarrow			\square	_	+	-	++	
вспомогательным оборудованием	Комплектация			_	+		\square									\square		\square	++	\square			\square	\perp	$\downarrow \downarrow$	\perp	$\downarrow \downarrow$	
	Монтаж и тестирование	НОП					\square												\square						\square	\perp	\square	
	Ввод в эксплуатацию	НОП																										
Мероприятие 6.5. Разработка и					LΤ				Π			88	3 млн			Π			Π						Ш		\square	
изготовление системы ввода	Определение геометрии и параметров	ИПФ, ВНИИЭФ																	μſ	\square			Ш	\bot	⊥⊥	\bot	\bot	
двенадцати пучков и их фокусировки	Разработка конструкторкой документации	ИПФ, ВНИИЭФ		_	++		\square	_					\square			\square			++	\square			\square	\perp	$\downarrow \downarrow$	\perp	$\downarrow \downarrow$	
	Изготовление и комплектация системы ввода	НОП	++	_	++		\vdash	_	Ш			+				\square		⊢⊢	++	+	-	\square	+	-L	+	+	++	
	Монтаж, тестирование и оптимизация	НОП	+	_	++	+	\vdash	_	\square	_	++	+	++			++			++	+		\square	++	+	++	+	++	_
L	ввоо в эксплуатацию	пОП	+ +		+	+		-		+	$\left \right $	+	++			++		_	++	++	_	\vdash	++	+	++	+	++	\neg
				1	1 1		1 1	1	1 1	1	1 1		1 1		1	1 1			1 1		1	1 1		. 1	1 1			- 1

	Графическая форма дорожной карты	-					-			-												При.	лож	ение	e 1
				2012		20 ⁻	3	20	14	20	015		2016	;	20 ⁻	17	20	018	2	2019		2020	J	20:	21
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель					II IV				шл	/		IV I		III IV		шк	/		IV I		IV I		
Залача 7. Созлание и оснашение	жспериментальных лабораторий		ľ		1	Î İ						1 L	5480	MOH					T T	- <u></u>	Ť		ŤŤ	Ť	ËË
Мероприятие 7.1. Разработка			-						0.	4811			3400						+		+	\vdash	++	++	
концепции доставки дазерных пучков	Определение геометрии ввода лазерных пучков	шть							3 1	win.		+		++					++	+	+	⊢⊢	++	++	┢┼┼┤
и электронного сгустка в лаборатории	Определение геометрии ввода электронного слустка	ипф	-											+								H	++	++	
	Спроделяние сожетрии опосо электропний вушество судение Опроделяние сожетрии опосо электропний вушество судение Опроделяние сожетрии спрособласти в совется с с с с с с с с с с с с с с с с с с	ИПФ	-									+	-	++						+	'	\vdash	++	++	⊢┼┤
Мараниятиа 7.2. Создания анатония	Определение всех вириантов пересечении пучков в катере	инφ	_		+			_				+ +	224						+		<u> </u>	⊢	++	++	\vdash
мероприятие 7.2. Создание системы	Определение зеометрии и параметрое	ИПФ	-						_				324 1	илн.					++	+	'	\vdash	++	++	
доставки лазерных пучков и	Опреселение гесометрии и нарижетров Разработия конструкторалов документации															-				+	+-	\vdash	++	++	┢┼╋┥
электронного стустка в лаооратории	Lapadomine koncentry interfection of the second and the	ОИЯИ ИЯФ ИПФ																	++		+	H	++	++	H
	Монтаж, тестированиеи оптимизация	ОИЯИ, ИЯФ, ИПФ																					\pm	++	
	Ввод в эксплуатацию	ОИЯИ, ИЯФ, ИПФ																							
Мероприятие 7.3. Оснащение														314	7 млн	ł.									
экспериментальных лабораторий	Определение параметров оборудования	ИПФ																							\square
необходимым оборудованием	Комплектация	ИПФ																							
	Монтаж	ИПФ																							
	Ввод в эксплуатацию	ИПФ																					Ш	\square	
Мероприятие 7.4 Создание и									2000	млн.											'	ЦĻ	\square	\square	\square
оснащение сателитных лабораторий	Определение параметров оборудования	ИПЛИТ, РНЦ КИ,																			'	\square	\square	\rightarrow	\square
	Комплектация	ИПЛИТ, РНЦ КИ,	_		+														-		<u> </u>	\vdash	++	++	\square
	Mohmaæ D	ИПЛИТ, РНЦ КИ,	_																		'	⊢⊢	++	\rightarrow	\vdash
	ввоо в эксплуатацию	ИПЛИТ, РНЦ КИ,		++								+ +	_	+ +	-				+		'	++-	++	++	\vdash
	Lune & Case of a second second		_								T İ	+ +	40	0									<u> </u>		H
Мароприятия 8.1. Оправление трабо	нной осзопасности		30 .										4(н.						_	┢╋╋			H-H-I
Мероприятие 8.1. Определение треоон	ании к системе радиационной защиты персонала и осорудования	ИПФ, ВНИИЭФ	30 1	MJIH.	40.				_			+	-	++				++		+	'	\vdash	++	++	
Мероприятие 8.2. Разработка проекта	радиационной защиты персонала от источников излучения, находящихся в мишенном зале	ИПФ, ВНИИЭФ	_		40 1	илн.						+	_	++				++	+	+	<u> </u>	\vdash	++	++	\vdash
Мероприятие 8.5. Разраоотка проекта	радиационной защиты персонала от источников излучения, находящихся в экспериментальных лаоораториях	ипа внииза				10	илн.																		i
Мероприятие 8.4. Разработка проекта	радиационной защиты персонала от источников излучения, находящихся в тоннеле ускорителя	ИПФ, ВНИИЭФ			20 м	илн.					ΤŤ						Ħ	İΤ			-	h	Ħ		
Мероприятие 8.5. Создание радиацион	ной защиты персонала	ИПФ, ВНИИЭФ							20	0 млн	ł.													T	íΠ
Мероприятие 8.6. Проектирование, из тоннеле ускорителя	отовление и тестирование средств защиты оборудования, находящегося в мишенном зале, лабораториях и										50 N	ілн.											П		iΠ
Мероприятие 8.7. Обеспечение дозими	PTDUBECKOFO KOUTDOUG B IDOHECCE SKCHUVATAHUU	ИПФ, ВНИИЭФ	-		+													3	0 мпн			H	+	++	\square
Мероприятие 8.7. Обеспечение дозим	прического контроля в процессе эксплуатации		_		++	+ +		-				+ +		11							—	H H	+++		
Задача 9. Создание вычислитель	но-коммуникационного центра											<u> </u>									+		+		
Management 0.1. Opened and a			-		++						600	млн.			-			++	+	+	<u> </u>	\vdash	++	++	\vdash
Мероприятие 9.1. Определение архите	ктуры и характеристик вычислительно-коммуникационного центра	инф, ппі ў,	_		+				51	илн.		+									'	⊢⊢	++	\rightarrow	\vdash
Мероприятие 9.2. Разработка проекта	аппаратно-программного комплекса	ИПФ, ННГУ, ИПМ	_		++					5	млн.							++	-		<u> </u>	\vdash	++	++	\square
Мероприятие 9.3. Разработка и/или ос	нащение аппаратным обеспечением	ННГУ, МГУ	_		++							430) млн	ł.				++	-		<u> </u>	\vdash	++	++	\square
Мероприятие 9.4. Разработка и/или ос	нащение программным обеспечением	ННГУ, МГУ, ИПМ											70 м.	лн.							'	\square	\square	\rightarrow	\square
Мероприятие 9.5. Оснащение коммун	икационным оборудованием	ИПФ										60	млн.								'	ЦĻ	\square	\square	\square
Мероприятие 9.6. Тестирование, адапт	ация и ввод в эксплуатацию вычислительно-коммуникационного центра	ИПФ												30 N	илн.						'	ЦĻ	\square	\square	\square
																							Ш	\square	
Задача 10. Оснащение инженерн	»-вспомогательных мастерских										350	млн.													i L
Мероприятие 10.1. Оснащение											157	млн.													1
оптического участка	Определение требований на оборудование	ИПФ																							
	Комплектация	НОП												П										T	ΠT
	Установка, наладка и ввод в эксплуатацию	НОП																							\square
Мероприятие 10.2. Оснащение											47 N	ілн.							$\uparrow \uparrow$				$\uparrow\uparrow$	\top	П
радиоэлектронной лаборатории	Определение требований на оборудование	ИПФ																			T				
	Комплектация	НОП																							
	Установка, наладка и ввод в эксплуатацию	НОП																							\square
Мероприятие 10.3. Оснащение											72 N	ілн.													
лаборатории вакуумного	Определение требований на оборудование	ИПФ																							\square
оборудования	Комплектация	НОП				\square									\square		\square			\square		Ш	Ш	Ш	μЦ
	Установка, наладка и ввод в эксплуатацию	НОП																							i L

	Графическая форма дорожной карты										Прило»	жение 1
			2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель	I II III IV		' I II III IV	I II III IV	I II III IV	1 11 111 1V	1 IV	I II III IV	I II III IV	1 11 111 11/
Мероприятие 10.4. Оснащение						32 м.	лн.					
механических мастерских	Определение требований на оборудование	ИПФ										
	Комплектация	НОП										
	Установка, наладка и ввод в эксплуатацию	НОП										
Мероприятие 10.5. Оснащение						42	2 млн.					
криогенной станции	Определение требований на оборудование	ИПФ										
I	Комплектация	НОП										
	Установка, наладка и ввод в эксплуатацию	НОП										
Залача 11. Обеспечение функции	нипования установки				1 1 1 1		15	500 млн.				
Мероприятие 11.1. Обеспечение							33	3 млн.				
эффективного управления	Разработка и внедрение структуры управления на стадии строительства установки	ИПФ										
эффективного управления	Разработка и внедрение структуры управления на стадии экспериментов	ИПФ										
	Расзработка правил внутреннего документооборота проекта	ИПФ										
	Организация структуры, управляющей международными связями	ИПФ										
	Организация учета и регистрации научных результатов	ИПФ										
Мероприятие 11.2. Формирование							20	07 млн.				
кадрового потенциала	Распространение информации о МЕГА-проекте	ИПФ										
	Привлечение одаренных старшекласников к учебно-научной работе	ИПФ										
	Разработка и внедрение спецкурсов по тематике проекта	ННГУ, НГУ, МИФИ										
	Руководство бакалаврскимим и магистрскими дипломами по тематике проекта	ННГУ, НГУ, МИФИ										
	Руководство кандидатскими диссертациями по тематике проекта	ИПФ, ФИАН										
	Организация стажировок российских специалистов зарубежом	ИПФ										
Мероприятие 11.3. Обеспечение									1010 млн.			
функционирования инфраструктуры	Обеспечение зданий и инженерных коммуникаций	ИПФ										
	Обеспечение двух прототипов 15 ПВт-ных модулей	ИПФ										
	Обеспечение 200 ПВт-ного лазера	ИПФ										
	Обеспечение комплекса лазеров с высокой средней мощностью	ИПФ										
	Обеспечение ускорителя электронов до энергии 100 МэВ	ИПФ										
	Обеспечение оснащения экспериментальных лабораторий	ИПФ										
	Обеспечение главной мишенной камеры	ИПФ										
	Обеспечение вычислительно-коммуникационного центра	ИПФ										
	Обеспечение инженерно-вспомогательных мастерских	ИПФ										
Мероприятие 11.4. Обеспечение							25	50 млн.				
эффективного международного	Создание и работа международного наблюдательного совета	Президиум РАН										
сотрудничества	Привлечение иностранных ученых для работ по созданию установки	ИПФ										┶┶┶┶┶
	Привлечение иностранных ученых для исследований на установке	ИПФ										
	Привлечение зарубежных технологий	ИПФ									┥┥┥┙	╆╋╋
	Организация научных конференций по тематике МЕГА-поректа	ИПФ										
	Создание и обновление сайта МЕГА-проекта	ΨПΦ										

Цель 2. Проведение фундам	ентальных исследований на базе созданной ифраструктуры						210	0 млн					
Задача 1. Моделирование проце	і 2008 взанмодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом	L					100 мл	н.					
Мероприятие 1.1. Разработка					20 млн								
теоретических моделей процессов	Разработка моделей лазерно-плазменного ускорения частиц	IZEST											
	Разработка моделей новых источников излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах	ИПФ, LANL, IZEST											
	Разработка моделей квантовой электродинамики и взаимодействия экстремальных световых полей с вакуумом	MPIK, IZEST											
	Разработка моделей экстремальных состояний вещества в условиях сверхвысоких температур и давлений	ИПФ,ИЛФИ										\square	
Мероприятие 1.2. Разработка и					40 млн								
реализация новых компьютерных	Коды для моделирования лазерно-плазменного ускорения частиц	ИПФ, LANL									\square		
кодов	Коды для моделирования новых источников излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах	ИПФ,LANL											
- / 1-	Коды для моделирования взаимодействия экстремальных световых полей с вакуумом	MPIK									\square		
	Коды для моделирования экстремальных состояний вещества в условиях сверхвысоких температур и давлений	ИПФ,ИЛФИ											
Мероприятие 1.3. Теоретическое									40 млн.				
обеспечение экспериментов	Сопровождение экспериментов по лазерно-плазменного ускорения частиц	IZEST											
*	Сопровождение экспериментов по созданию новых источников излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах	ИПФ, LANL, IZEST											
	Сопровождение экспериментов взаимодействия экстремальных световых полей с вакуумом	MPIK, IZEST											
	Сопровождение экспериментов по созданию экстремальных состояний вещества в условиях сверхвысоких температур и давлений	ИПФ, ИЛФИ											

	Графическая форма дорожной карты																					Пр	ило	жени	ие 1	
			20)12		201	3	20)14		2015	;	20	16	2	017	2	2018		2019	9	20	20	2	2021	
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель																			T	T	i T			1
			1 11		VI		IIV	1 11	III IV	/ I		IV I		III IV	1 11	III IV	<u>' </u>	· III	IV I					+ -		IV
Dereve 2 Hasserson and another				+	_														_		++				_	
Задача 2. проведение экспериме	нтов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц				_		┼┢						-			4	30 MJ	<u>ин.</u>	<u> </u>	┿	+++		┢╋╋	┿┿╸		
мероприятие 2.1.Лазерно-плазменное	Пловедение экспелиментов на прототире	ипф			+		+ +									(<u>+</u> +		++-	++		H-	++-		
1000 ГъВ	Обработка и публикация результатов экспериментов на прототипе.	ИПФ			+			-										╉╡	+	++	++	++	\square	++	++	_
1000130	Планирование и подготовка экспериментов на 200 ПВт лазере	KEK			+													+		++	++	+	\square			_
	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИПФ ИЛФИ																						tt	11	-
	Проведение экспериментов	ИПФ RAL KEK																		H	+	┯				
	Обработка и публикация результатов	ИПФ																		H		┯		+	+	
Мероприятие 2.2. Лазерно-плазменное		•													90) млн.		T		TT	T	$\neg \neg$	(T)	TT	T	
ускорение ионов до энергией 1-10	Разработка мишеней	ИПФ																								
ГэВ	Проведение экспериментов на прототипе	ИПФ																					П			
	Обработка и публикация результатов экспериментов на прототипе	ИПФ																								
	Планирование и подготовка экспериментов на 200 ПВт лазере	ИПФ,ОИЯИ, LANL																								
	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИПФ, ОИЯИ																								
	Проведение экспериментов	ИПФ, LANL																								
	Обработка и публикация результатов	ИПФ																								
Мероприяти 2.3. Комбинированное																		70	млн.				\square			
ускорение в линейных и лазерно-	Проведение экспериментов на прототипе и малом ускорителе	ИПФ, ИЯФ																4		\square	++	\square	\vdash	$\downarrow \downarrow$	\square	<u> </u>
плазменных ускорителях заряженных	Обработка и публикация результатов экспериментов на прототипе	ИПФ			_					_									_	╇	\rightarrow		⊢⊢	++	\square	_
частиц	Планирование и подготовка экспериментов на 200 ПВт лазере и большом линейном ускорителе	JAI			_			_				+				++				┶┷┶	┿	┶┶┙	⊢⊢	┿┿	+	_
	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИПФ,ИЯФ, ЈАІ			_		+					+								╇	44	\square	⊢⊢	╇	┿	
	Проведение экспериментов	ИПФ,ИЯФ, JAI			_					_			_						_	╇╋	44		⊢⊢	╇╋	44	_
	Оораоотка и пуоликация результатов	ИПФ					++					+						44	<u> </u>	╇╇	44	뿌	<u> </u>	╇╇	44	_
2.0					_														╧		_		<u> </u>		_	
задача 5. Создание новых источ	ников излучения в жестком ренттеновском и гамма-диапазонах																410	млн.								
Мероприятие 3.1. Создание																	80 M	илн.								
источников жесткого излучения с	Проведение экспериментов на прототипе	ИПФ																								
рекордно высокой яркостью	Обработка и публикация результатов экспериментов на прототипе	ИПФ																								
	Планирование и подготовка экспериментов на 200 ПВт лазере	RAL																					í L			
	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИЯРФ																								
	Проведение экспериментов	RAL																								
	Обработка и публикация результатов	ИПФ																								
Мероприятие 3.2. Создание																70 м	лн.									
компактного лазера на свободных	Создание вигглеров	ИПФ, ИЯФ										\square						4	<u> </u>	++	++	\square	\vdash	$\downarrow \downarrow$	\square	<u> </u>
электронах	Проведение экспериментов на прототипе	ИПФ			_													\rightarrow		++	\rightarrow		⊢⊢	++	\square	_
	Обработка и публикация результатов экспериментов на прототипе	ИПФ			_		+	_								++		$ \rightarrow $		┷	++	\square	⊢⊢	++	+	_
	Планирование и подготовка экспериментов на 200 ПВт лазере	ΗΠΦ,ΗΆΦ, JAI			+		++	_				+	_					44		╇	┿	╺╋┙	⊢⊢	┢╋┢	┿	
	Проведение экспериментов Обработка и публикания разультатов	ИПФ,ИЯФ, ЈАГ			+		++	-		-		++	-			++		+		╋	┿	┯	⊢	┿	╋	
Мероприятие 3.3. Создание пулков	Обработка и публикация резулотатов	init.			+		++		+	-		++					++	+		+-	++	++	H	+	++	
узкополосного гамма-излучения	Планирование и подготовка экспериментов на 200 ПВт лазере	NP						_				+									+	++	rt-			_
высокой яркости	Разработка и модернизация диагностического оборудования	NP										+											(T)			
billeonon aprice in	Проведение экспериментов	NP																								
	Обработка и публикация результатов	ИПФ																								
Мероприятие 3.4. Создание																50 м	лн.									
источников электромагнитных	Разработка мишеней	ИПФ																	\square				\square			
импульсов аттосекундной и	Проведение экспериментов на прототипе	ИПФ										\square									\square		⊢⊢	\perp	\square	_
субаттосекундной длительности	Обработка и публикация результатов экспериментов на прототипе	ИПФ		++	_	Щ	++	_	\square			+			++	++		4	–	4	++	\downarrow	⊢⊢	++	++	_
	11ланирование и подготовка экспериментов на 200 11Вт лазере Проседение системилациес	ИПФ,CEA	\square	++	+	\vdash	++	+	\vdash	+	\vdash	╉╋			++	++		4	<u>_</u>	╆┿┢	╈	┿┙	┢╋	╉┼╋	+	_
	провесение экспериментов Обработка и тбликация разультатов	ипф,СЕА		++	+	\vdash	++		\vdash	+	\vdash	++	+	\vdash	++	++		4	-	++	++	-	+	╋╋	┿	
Manounumus 2.5 Horrow concurs	Оораоотка и пуоликация результатов	rmΨ	\vdash	++	+	\vdash	++	_	++	+	\vdash	++	+	\vdash	++	++				++-	++	-	50	4		-
истонников лля листиользование	<u> โดงวิสัมเมล</u> สินสวนออ มน และหอน วอบน			++	+	\vdash	++		\vdash	+	\vdash	++	+	\vdash	++	++	++	+	_	++	++	-	DU MI	nH.	-	
полочников для диагностики		инф, РНЦ КИ	\square	++	-	\vdash	++	+	\vdash	+	\vdash	++	+	\vdash	++	++	++	+	┍╼┠━	++	44	+	H	╉┼┼	+	_
процессов и структур с	Синлронизация комплексов лучевои и корпускулярнои оиагностики	ИПФ, РНЦ КИ	\square	++	_	\vdash	+		\vdash	+	\vdash	++	+	\vdash	++	++	++	+	┍╼┠╴	++	┿	+	A	╋	+	
субфемтосекундным временным и	провечение экспериментов по 4D томографии молекулярных комплексов	ИПФ, РНЦ КИ		++	_	\vdash	++	-	\vdash	+	\square	++	+	\square	++	++	++	+	┍╼┠╴	++	+	4	4	44	4	
разрешением	проведение экспериментов по 4D томографии твердотельных структур	ИПФ, РНЦ КИ		++	_	\vdash	++		\square	Н	\square	++		\square	++	++	++	+	⊢┣	++	┿	4	4	44	4	
r ··· r ·	Оораоотка и пуоликация результатов	ИПФ, РНЦ КИ		1 1			11	1	11		11	1		1 1	1 1		1 1	11	. 1	1	1 1			4		

	Графическая форма дорожной карты																					П	рило	кени	1e 1	
			2	012		2013		201	4	20	15	2	2016		201	7	2	018		201	9	20	020	20	021	
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель	1 11		IV I		IV I		II IV	1 11	III IV	1 11		IV I		ı IV I	1 11	шг	N I		II IV	1 11	III IV	1 11	Ш	IV
Залана 4. Исследование наличей	и и свайств ваючима в экстранали и и сватави и палох		+	+			++	++	+							++	+	_	22	20.147		-				
Мероприятие 4.1 Исследование	пых своисть вакуума в экстремальных световых полях				-											++	+	+++	- 33				++-	++-	-	H
нелинейно-оптических свойств	Планипование и подготовка экспериментов						+									+		+		00 N	UIH.		+	⊢⊢	+	⊢
вакуума при воздействии лазерного	Глянарочние и носсолюва эксперияснико Разработка и модернизация диагностического оборудования	ипф,мифи, мик			-			++								+	+	+	-	H		<u> </u>		\vdash	++	\vdash
излучения с интенсивностью до 10 ²⁵	Гаравонна и люсернизация онасности непосо осорусскития Ппоредение экспепниентое	ИПФ		++	-			+	+							++	-	++	4-	H	++	+	╘	H	++	H
$B_{T/CM}^2$														_		++	+	++	+	⊢	++	+	╞	⊢⊢	++	⊢
	Обработка и публикация результатов	ИПФ,МИФИ, МРІК		+	_			+	+			_	+	_		┿	—	++	—	╇┻		_	╇	▙	4	⊢
мероприятие 4.2. Изучение явлении																				70 r	илн.					
квантовой электродинамики в	Планирование и подготовка экспериментов	ИПФ,МИФИ, МРІК														Π				Π						ſ
пазерных полей включая процессы	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИПФ																Π		Π				П		Г
создани вешества и антивешества	Проведение экспериментов	ИПФ																++								Г
	Обработка и публикация результатов	ИПФ МИФИ МРІК		+ +												++	+	++		++	+			H	H	F
Мероприятие 4.3. Исселедование		mito, mitori, mitic		+ +				+							┡───	++	+	++	╈	┢╋╋	+	-	80 MI		++	-
пространственно-временной	Планирование и подготовка экспериментов	ИПФ.МИФИ. МРІК														++	+	++		H						F
структуры вакуума при его	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИПФ																		Ħ	+					Γ
зондировании излучением	Проведение экспериментов	ИПΦ														\square				Π	\Box					
	Обработка и публикация результатов	ИПФ,МИФИ, МРІК																								
2 5 8				+	_			++	+					_		┿	_	+++	_	┢	╧╧┥		┶┷┷		_	
Задача 5. Проведение исследован	ии по фотоядернои физике			+	_			++						_	\vdash	┿╋	_	4			4	290	илн.		4	<u> </u>
Мероприятие 5.1.Развитие	Π	UTA FLUND		+	_			++	+					_		+	—	++	50	імлн			╋┿	\vdash	+	⊢
диагностических методов и	применение пучков узкополосного гамма-излучения высокой яркости Адаржання ниструматия ядарной физики к диагностика фотоядарных пронассов	UIIQ, ELI-NP		+				+				_	+		+	┿╋	+	╈	+	⊢	╇	<u> </u>	╉┼─	\vdash	+	⊢
инструментов фотоядерной физики	Лоаптиция инструментирия яверной физики к бийгностике фотояберных процессов Проведение тестовых экспетиментов	NP			-									-		+	+	++	+	╄╋	╋	<u> </u>	++	H	++	⊢
Мероприятие 5.2. Исследование																				T	+	80 м	лн.			
внутриядерных процессов,	Планирование и подготовка экспериментов	NP																								
инициированных вторичными	Оборудование диагностического комплекса	NP																		Π						Г
источниками излучения	Проведение экспериментов	ИПФ, ELI-NP																								
	Обработка и публикация результатов	ИПФ, ELI-NP														\square				┶		⊥				
Мероприятие 5.3. Исследование																						60 м.	лн.			
методов управления внутриядерными	Планирование и подготовка экспериментов	ИПФ, ОИЯИ, IN2P3																		ш						1
процессами и создания экзотических	Оборудование диагностического комплекса	ИПФ, ОИЯИ, IN2P3																								1
ядерных структур	Проведение экспериментов	ИПФ, ОИЯИ, IN2P3																								
	Обработка и публикация результатов	ИПФ, ОИЯИ, IN2P3														Ш										
																Ш				П						
Задача 6. Экспериментальное мо	делирование астрофизических явлений	-																		3	40 м	лн.				
Мероприятие 6.1.Лабораторное																		8	30 мл	ιн.				\square		<u> </u>
моделирование процессов в недрах	Планирование и подготовка экспериментов	ИПФ,ИВТ		+				++	+							44	4	44	4	┢┥	┶┷┥		++	\vdash	+	4
звезд планет	Разработка и модернизация диагностического оборудования	ИПФ,ИВТ										_				┿	4	44	4	⊢	_		++-'	4	+	1
	Созоание и оиагностика экстремальных состоянии вещества в условиях сверхвысоких оавлении и температур	ИПФ,ИВТ																								
	Обработка и публикация результатов	ИПФ,ИВТ																		ш				L		
Мероприятие 6.2. Лабораторное																+		4			90	млн.	4			L
моделирование гравитационных	Планирование и подготовка экспериментов	ИПФ														┿╋	4	4-+	4	44			┶┶┶	⊢	\rightarrow	
явлений	Разработка и модернизация диагностического оборудования Сталитического оборудования	ИПФ		+	_			++				_	+	_	++	+	—	++	_	H			╘┼┼╴	⊢⊢	++	⊢
	Созоание и опагностика экстремальных состоянии вещества и излучения в условиях сверхвысоких ускорении	ИПФ																								
	Обработка и публикация результатов	ИПΦ		+		\square	\square	\square	+				\square			╇	\rightarrow	$\downarrow\downarrow$	_	╇					4	Ē
Мероприятие 6.3. Лабораторное	77 \		\vdash	++	\rightarrow	\square	+	++	+	\rightarrow	+		+			44	4	+		44	70	млн.	44-	⊢	4	F
моделирование ранних	Планирование и подготовка экспериментов Разпаботиа и иодатичация диагностичение ботидорании	ИПФ,ОИЯИ, CERN	\vdash	++	+	\vdash	++	++	++	+	+	+	+	-	+	44	4	╇	4	┢╋╋	┢	<u> </u>	++	\vdash	뉘	⊢
космологических явлений	г изриоотки и мооернизация онагностического оооруоования Проведение экспетичештое	ИПФ, ОИЯИ, CERN	\vdash	++	-	\vdash	++	++	+	+	+	+	++	+	\vdash	┿	4	++	4	+	+	-	┢╋┝	\vdash	⊢	
	нгровсоепие эксперименниов Облаботка и публикания результатов	ИПФ,ОИЯИ, СЕКМ	+	++	+	\vdash	++	++	+	+	+	+	+	+	\vdash	++	+	╋	+	+	+	+	++	\vdash	⊢	F
		,,		+		\vdash	$^{++}$	++	+				+		Η	++	+	$\uparrow \uparrow$	T	Ħ					Ħ	F

	Графическая форма дорожной карты																	При	ложе	ние 1
			20	012	2	013	20	14	2015	5	2016	6	2017		2018	2	2019	202)	2021
Цели, задачи и мероприятия проекта	Наименование работ	Исполнитель	1 11	III IV	/ 1 11	III IV	1 11	III IV I	11 111	IV I	11 111	IV I	11 111	IV I	II III IV	1 11	111 11	/ 1 11 11	IV I	II III IV
Задача 7. Исследование возможн	остей создания экзаваттных и зеттаваттных источников света													20	00 млн.					
Мероприятие 7.1. Разработка														70 м	лн.					
источника излучения с пиковой	Исследование концепций получения экзаваттных импульсов при нелинейном взаимодействии экстремальных световых	ИПФ, СЕА																		
мощностью 1 Экзаватт	Планирование и подготовка экспериментов	ИПФ, СЕА																	++	
	Проведение экспериментов	ИПФ, СЕА															44			
	Обработка и публикация результатов	ИПФ, СЕА	_															╇╋	╇	
Мероприятие 7.2. Исследования по															30 м.	лн.				
мультиэкзаваттным и зеттаваттным источникам излучения	Разработка концепций создания и применения мультиэкзаваттных и зеттаваттных источников излучения	ИПФ, IZEST																		
	Развитие элементной базы мультиэкзаваттных и зеттаваттных источников излучения	ИПФ, IZEST					П										\mathbf{T}			
										11	İİ					İİ	TT	\square	\square	
Цель 3. Осуществление инн	овационных разработок с использованием инфраструкутуры											300	0 млн							
Задача 1. Разработка и создание	прототипов ускорительной техники нового поколения											11			8	50 мл	ін.			
Мероприятие 1.1. Компактные лазер	ю-плазменные ускорители электронов	ИПФ, ОИЯИ													60	00 млі	н.			
Мероприятие 1.2. Комбинированные	комплексы конвенциональных и лазерных ускорителей заряженных частиц	ИПФ, ЈАІ															1/	50 млн.		
Мероприятие 1.3. Компактные лазерн	о-плазменные ускорители ионов	ИПФ, ИЯРФ												1(00 млн.					
																	┶┷		<u></u> _	
Задача 2. Разработка прототипо	в диагностических и метрологических комплексов с рекордным разрешением																5	00 млн.		
Меропритие 2.1. Комплексы для диаг	ностики процессов с аттосекундным временным разрешением	ИПФ, ELI-ALPS														2	50 млі	н.		
Мероприятие 2.2. Комплексы для		ALPS																1	50 млн.	
Меропритие 2.3. Комплексы с		LANL																1)0 млн.	
																	╈╈	╈╋╋	┶┶┙	
Задача 3. Новые технологии для	создания лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью												16	50 мл	пн.				+	
Мероприятие 3.1. Разработка концепт	ций лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью	ИПФ, RAL,CEA						50 млн	ι.											
Мероприятие 3.2. Разработка элемен	гной базы лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью	ИПФ, RAL,CEA									60	00 млн	н.						\square	
Мероприятие 3.3. Создание прототип	ов лазерных источников нового поколения для промышленных применений	ИПФ, RAL,CEA															2	00 млн.		
Мероприятие 3.4. Создание прототип	ов лазерных источников нового поколения для медицинских применений	ИПФ, ИЯРФ		\square												8	00 млі	н.		
Мероприятие 3.5. Создание прототип	ов лазерных источников нового поколения для применений в энергетике	ИПФ, RAL,CEA																		400 млн.
					1 [_	T							\top					

Приложение 1

Список исполнителей

Сокращенное название	Полное название
ИПФ (IAP)	Институт прикладной физики РАН Institute of Applied Physics RAS
ВНИИЭФ (VNIIEF)	Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно- исследовательский институт экспериментальной физики Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics
ИПЛИТ (ILIT)	Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН Institute of Laser and Information Technologies RAS
ОИЯИ (JINR)	Объединенный институт ядерных исследований Joint Institute for Nuclear Research
ИЯФ (INP)	Институт ядерной физики СО РАН Institute of Nuclear Physics SB RAS
НИИТИОМ (SRTIOM)	Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Scientific Research and Technological Institute of Optical Materials
НГУ (NSU)	Новосибирский государственный университет Novosibirsk State University
ИЛФ (ILP)	Институт лазерной физики CO PAH Institute of Laser Physics SB RAS
ИОФ (GPI)	Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН AM Prokhorov General Physics Institute RAS
ННГУ (UNN)	Нижегородский государственный университет Nizhny Novgorod State University
МИФИ (MEPhI)	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» National Nuclear Research University "MEPhI"
ФИАН (LPI)	Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН PN Lebedev Physics Institute RAS
НИИКИ (NIIKI)	Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико- электронных приборов и систем Scientific Research Institute of Complex Testing of Opto-electronic Devices and Systems
ВНИИТФ (VNIITF)	Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно- исследовательский институт технической физики (РФЯЦ-ВНИИТФ) Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Technical Physics (VNIITF)
ИГМ (IGM)	Институт геологии и минералогии СО РАН Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
ОИВТ (JIHT)	Объединенный институт высоких температур РАН Joint Institute for High Temperatures RAS
МГУ (MSU)	Московский государственный университет Moscow State University
ПНО (NNRG)	Правительство Нижегородской области Nizhny Novgorod Regional Government

ИЯРФ (INRP)	Институт ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ Institute of Nuclear and Radiation Physics, RFNC-VNIIEF	
Президиум РАН (Presidium RAS)	Президиум РАН Presidium RAS	
РНЦ КИ (RRC KI)	Российский научный центр «Курчатовский институт» Russian Research Center "Kurchatov Institute"	
ИПМ (ІАМ)	Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН MV Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS	
IZEST	Международный центр зеттаваттной-экзаваттной науки и технологии (Франция) International Center for Zettawatt-Exawatt Science and Technology (France)	
LANL	Лос-Аламосская национальная лаборатория (США) Los Alamos National Laboratory (USA)	
MPIK	Институт ядерной физики Макса Планка (Германия) Max-Planck-Institut für Kernphysik (Germany)	
KEK	Институт исследований ускорителей больших энергий (Япония) High Energy Acceleration Research Organization - KEK (Japan)	
RAL	Резерфордовская лаборатория в Апплтоне (Великобритания) Rutherford Appleton Laboratory (UK)	
JAI	Институт ускорителей Джона Адамса (Великобритания) John Adams Institute for Accelerator Science (UK)	
ELI-NP	Центр ELI в Румынии Extreme Light Infrastructure site in Romania	
CEA	Комиссариат по атомной энергии (Франция) Commissariat à l'énergie atomique (France)	
IN2P3	Национальный институт ядерной физики и физики элементарных частиц (Франция) National Institute of Nuclear Physics and Particle Physics (France)	
CERN	Европейская организация по ядерным исследованиям European Organization for Nuclear Research	
ELI-ALPS	Центр ELI в Венгрии Extreme Light Infrastructure site in Hungary	
DESY	Немецкий электронный синхротрон Deutsches Elektronen-Synchrotron	
НОП (TBD)	Необходимо определить позднее To be determined	

Список зарубежных организаций, планирующих принять участие в проекте мега-сайенс «Центр исследований экстремального света», и ответственных лиц со стороны этих организаций для ведения переговоров

Страна	Организация	Ответственное лицо, участвующее в переговорах
Франция	CEA – Commissariat à l'énergie atomique (Комиссариат атомной энергии)	Thierry Massard Директор по науке thierry.massard@cea.fr
Великобритания	RAL – Rutherford Appleton Laboratory (Резерфордовская лаборатория)	John Collier Директор Главного лазерного комплекса john.collier@stfc.ac.uk
Великобритания	John Adams Institute for Accelerator Science (Институт Ускорителей им. Джона Адамса)	Andrei. Seryi Директор andrei.seryi@adams-institute.ac.uk
США	LANL – Los Alamos National Laboratory (Лос-Аламосская национальная лаборатория)	Susan Seestrom Заместитель директора seestrom@lanl.gov
США	Fermi National Accelerator Laboratory (Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми)	Young-Kee Kim Заместитель директора ykkim@fnal.gov
Япония	KEK – High Energy Acceleration Research Organization (Институт исследования ускорителей больших энергий)	Atsuto Suzuki Генеральный директор atsuto.suzuki@kek.jp
Япония	JAEA – Japan Atomic Energy Agency (Агентство атомной энергии Японии)	Paul Bolton Заместитель генерального директора Института фотонных исследований Агентства атомной энергии Японии
		bolton.paul@jaea.go.jp
-----------	--	--
Германия	FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research (Центр исследования антипротонов и ионов)	Boris Sharkov Научный директор b.sharkov@gsi.de
Швейцария	CERN – European Organization for Nuclear Research (Европейский центр ядерных исследований)	Rolf Heuer Генеральный директор rolf.heuer@cern.ch
Канада	Institut National de la Recherche Scientifique (Национальный институт научных исследований)	Jean-Claude Kieffer Директор Центра материалов для энергетики и коммуникаций Национального института научных исследований kieffer@emt.inrs.ca

Приложение 3

FOR ULTRA-HIGH

Sept. 28, 2011

Professor Alexander Litvak Director, Institute for Applied Physics Nizhny Novgorod, Russia

Re: Support Letter of XCELS

Dear Professor Litvak:

I am writing to you to express my respect for your initiative of XCELS (Exawatt Center on Extreme Light Studies) in Russia and my strongest support of this project from the point of view of the Chairman of the International Committee for Ultrahigh Intensity Lasers (ICUIL) under the commission of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP).

ICUIL represents all world's research institutes that hold intense lasers that can deliver intensities more than 10^{19} W/cm², which now amount hundred of institutions. ICUIL promotes the research of intense lasers and their applications to science, industrial usages, medical and other societal merits. It also aspires to advance the frontier of high field science.

Thus the initiative by the Russian scientists headed by Professor Alexander Litvak of the Institute of Applied Physics at Nizhny Novgorod for the Mega Science Project toward exawatt laser at XCELS is an extraordinary example of what ICUIL espouses to push the frontier of intense lasers. Many world's intense lasers have exceeded the level of PW now. However, seldom do the 10PW level. XCELS, on the other hand, not only exceeds 10PW threshold, but not only 100PW, it would go toward 1000PW, in another word, 1EW. This is an endeavor unprecedented in the world and what the ICUIL community covets. I am so enthused by this research initiated and thus I express my strongest support and my willingness to actively participate in its research proceedings along the way. We also would like to congratulate their far-sighted vision of the EW class laser and its applications.

I also mention that as Chairman of Extreme Light Infrastructure Preparatory Phase (ELI-PP) Science Advisory Chair, I have advanced the science of the world most intense lasers at ELI. There are three pillars to ELI now (attosecond, photonuclear, and laser-driven beam pillars) and we are anticipating the fourth and final pillar of high field science pillar. The Russian initiative might fit this aspiration of ELI fourth pillar in its scope.

Among the research arena it opens up, I consider the following can be seen: Fundamental High Energy Physics (HEP) has been mainly driven by the high energy fermionic colliding beam paradigm. Today the possibility to amplify laser to extreme energy and peak power offers, in addition to possibly more compact and cheaper ways to help HEP, a suit of complementary new alternatives underpinned by single shot, large field laser pulse, that together we could call Laser-based High Field Fundamental Physics. Thus, Professor Mourou and I started form the International Center for Zetta-Exawatt Science Technology (IZEST) this September. The main mission of the IZEST is to muster the scientific community behind this new concept. The XCELS is the most essential part of this effort. In other words, the Russian initiative of XCELS has the world support by the leading scientists

www.ICUIL.org

ICUIL Board

Chair Toshiki Tajima

Co-Chairs Chris Barty Wolfgang Sandner

Secretary Terry Kessler

Treasurer Tsuneyuki Ozaki



who are engaged in high field scientist and blessed by their scientific wisdom. It is a worldwide effort already.

As an example, it could provide the avenue to use the laser field to probe the nonlinearity of vacuum due to nonlineairities and light-mass weak coupling fields such as Heisenberg-Euler QED, dark matter and dark energy. We envision that seeking the noncollider paradigm without large luminosity substantially shorten our time-line;. The accelerated research on the non-collider paradigm in TeV and beyond could, however stimulate innovation in collider thinking such as lower luminosity paths, novel radiation cooling, and gamma-gamma colliders. The advancement of intense short-pulsed laser energy by 2-3 orders of magnitude empowers us a tremendous potential of unprecedented discoveries. These include: TeV physics, physics beyond TeV, new light-mass weakcoupling field discovery potential, nonlinear QED and QCD fields, radiation physics in the vicinity of the Schwinger field, and zeptosecond dynamical spectroscopy of vacuum. In addition, we want to take advantage of the ultrashort particle or radiation pulses produced in the femto, atto, and zeptosecond timescale to perform a new type of particle/radiation precision metrology that would help to remove the uncertainty around the neutrino speed. Finally, the TeV particles that can be produced on demand could offer a new tool to TeV Astrophysics.

Hereby, once again I would like to voice my appreciation for and fullest support of XCELS project. The Russian Government's strongest support will further mankind's quest in high field science and the world will benefit from it. We are fully behind your XCELS effort.

Sincerely yours,

shiki Tajima Chair, ICUIL

Chair Professor, Faculty of Physics, Ludwig Maximilian University of Munich





The John Adams Institute for Accelerator Science

Prof. Andrei Seryi, Director Denys Wilkinson Building Keble Road, Oxford OX1 3RH, UK Mobile: [+44][0] 7722 474701 Tel: [+44][0] 1865 273595 Fax: [+44][0] 1865 273601

e-mail: Andrei.Seryi@adams-institute.ac.uk

29 September 2011

Prof Alexander Litvak Director, Institute for Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia

Dear Alexander,

With this letter I would like to express our strongest support for your efforts to promote and create the International Center for Extreme Light Studies (XCELS) proposed to be built in Nizhny Novgorod, Russia, within the framework of the Mega-Science Projects.

Lasers of extreme power, in synergy with accelerator and plasma science, have the potential and great promise to revolutionise the entire scientific landscape. In particular, the laser-plasma acceleration, enabled by novel lasers, is now on the verge of breaking through towards applications, for compact light sources, medical applications, and other scientific and technical fields. The XCELS project, due to its exawatt capabilities, has also the potential to redefine the contours of high energy physics, and open new possibilities for investigations of nonlinear quantum electrodynamics.

Realisation of this potential and creation of XCELS will require coherent efforts of many scientists. The laser-plasma acceleration is a major direction of the John Adams Institute, and we will be happy to become a part of the international collaboration supporting your efforts for development of XCELS, for participation in the joint research and for possible in-kind contribution of accelerator and other components to XCELS.

I am also very delighted that collaboration on the XCELS project is coherent with the ongoing joint efforts of the Institute for Applied Physics and of the John Adams Institute towards development of compact laser-plasma acceleration based X-ray sources. I am happy that these joint plans received attention at the highest level of the governments, and that the UK Prime Minister David Cameron briefly mentioned these plans during his speech in Moscow State University on September 12, 2011, and that these plans were also highlighted in the press release of the Science and Technology Section of UK Embassy in Russia. Collaboration in this area will significantly boost both projects.

I would like to assure you that the JAI we will do its best to support you in this endeavour to create the International Center for Extreme Light Studies (XCELS) in Nizhny Novgorod.

Sincerely,

Andrei Seryj

Andrei Seryi

The John Adams Institute for Accelerator Science is jointly hosted by the Departments of Physics of the University of Oxford and the Royal Holloway University of London



Professor John Collier Director, Central Laser Facility

Central Laser Facility Science and Technology Facilities Council Rutherford Appleton Laboratory Harwell Oxford Didcot, Oxfordshire OX11 0QX Tel: +44 (0)1235 446728 Fax: -44 (0)1235 445888 Email: john.collier@stfc.ac.uk www.stfc.ac.uk

Prof. Alexander Litvak Director, Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences

7th October 2011

Dear Professor Litvak,

Letter of Support for the International Centre for Extreme Light Studies

I write in support of establishing the International Centre for Extreme Light Studies (XCELS) at the Institute of Applied Physics in Nizhny Novgorod that is aimed at increasing laser power to unprecedented levels and promoting new fundamental science and compelling applications. Unique opportunities will be created with XCELS to gain insight into the space-time structure of vacuum. Laser-matter interaction at highest intensity levels provided by XCELS will open new routes to particle and ultra brilliant gamma-ray sources. Accelerators could become compact, more versatile, and available by many university and academic laboratories, which in turn will result in significant impact on many branches of science, spurning new applications, including those in medical, industrial, and other sectors.

I believe that the proposal to build the international centre at the Russian Academy of Sciences is a very timely and fascinating initiative that I strongly support. The Institute of Applied Physics is an ideal place in Russia where this establishment will surely be a success. I have been acquainted with the outstanding results of the Institute in ultra intense laser physics, especially in creating a Petawatt laser facility and demonstrating electron acceleration to the multi-hundred MeV energy level.

The XCELS project and its promise of science are compelling. It will be a facility of revolutionary capability which would create new science and a new scientific community. To make this possible a multidisciplinary joint effort is required and we would hope to participate in research activities under this project. RAL looks forward to collaborating with XCELS, for example through assisting (via mutual agreement) in the construction of the exawatt laser facility and performing advanced research at this infrastructure. We understand that an international steering committee for XCELS will be necessary and we stand ready to participate in this, and to assist in other agreed activities, together with other major research establishments.

Finally, we believe that the proposed XCELS infrastructure is highly promising and could ensure advanced science not only in Russia but well beyond its borders.

Yours sincerely

Professor John Collier Director Central Laser Facility





INTER-UNIVERSITY RESEARCH INSTITUTE CORPORATION HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION

1-1.OHO.TSUKUBA-SHI IBARAKI-KEN.305-0801 JAPAN http://www.kek.jp/ e-mail: atsuto.suzuki@kek.jp

October 20, 2011

Letter of interest for IZEST and its activities by KEK

Dear Professor Gerard Mourou and Professor Alexander Litvak,

It is our intention for KEK to support your efforts of and participate in the joint research activities of promoting the highest intensity frontier of lasers and high field science associated with such lasers and in particular for laser plasma accelerators and in forming an international team and network of scientists under the International Center for Zettawatt-Exawatt Science and Technology (IZEST) and its reach of activities including the LIL and XCELS, as explained in your letter dated Sept. 1, 2011.

I am of opinion that revolutionary ideas are essential for future advanced ultra-high energy and ultra-high power accelerators. Such accelerators open up not only the new paradigms of fundamental physics, but also widespread application-fields. The laser-plasma accelerator is the most challenging and prospective area for future high energy accelerators. I seriously feel the requirement of technological advances will come from the current proof-of-principle oneshot laser-plasma acceleration to multi-shots with high repetition acceleration, that is, the laser-plasma accelerator of practical importance. Noting this, your IZEST to increase the laser power and capabilities much beyond the current level and form a team of international scientific talents is one of keys for achieving this goal.

But we need to forge the effort of the accelerator physics community and laser physics community in a positive collaborative framework. This is why I promoted as Chair of ICFA to closely collaborate with ICUIL. I am glad that the joint activities of ICFA-ICUIL are fostering the necessary research and environment. I am also aware that a lot more is necessary to meet the new challenges to realize laser accelerators. This is why I am so impressed with the activities of IZEST and whose goals to erect the exawatt lasers that can drive particle accelerators with energies of TeV and beyond and we at KEK would participate in this process.

We understand that IZEST will assist and promote the world-wide efforts, for example, that of French LIL Exawatt, that of Russian Mega Science laser project (XCELS), and possibly the deliberated Japanese Exawatt Laser among others. KEK is glad to closely collaborate in these research activities by bringing in its research capabilities and resources in trained personnel, accelerator and detector components, high energy physics expertise, and related technologies contributions as becoming necessary. By introducing the "Laser-based high energy and fundamental physics" paradigm, IZEST has the potential to redefine the contours of high energy physics. I admire the leading role that France with the Ecole Polytechnique and the Commissariat al Energie Atomique is taking in this matter. At KEK we want to assure you that we will do our utmost to second you in this endeavor to reshape and reenergize high energy physics around the ultra high intensity laser. KEK will also collaborate with IZEST by assisting the world-wide initiatives.

Sincerely yours,

A. Much

Atsuto Suzuki Director General of KEK High Energy Accelerator Research Organization



Fermi National Accelerator Laboratory P.O. Box 500 Batavia, IL 60510-0-500

September 16, 2011

Subject: Letter of interest for IZEST and its activities by Fermi National Accelerator Laboratory

Dear Professor Mourou:

I am writing to express Fermilab's support for your efforts to establish joint research activities to extend the capability and applicability of the highest intensity lasers to the fields of particle physics and high field science, and in particular for the development of laser plasma accelerators for high-energy physics. I would like to express our intention to participate in these joint research activities through the newly formed International Center for Zettawatt-Exawatt Science and Technology (IZEST).

I believe that innovative ideas are essential for future advanced ultra-high energy and ultra-high power accelerators. Such accelerators open up not only new paradigms of fundamental physics, but also widespread application in a variety of scientific fields. The laser-plasma accelerator is one of the most challenging and interesting areas for future high-energy accelerators. I believe that the required technological advances will only be realized through a dedicated effort focused on proof-of-principle demonstration, which is an essential element of the IZEST mission. Noting this, the mission of IZEST to increase the laser power and capabilities far beyond the current level by forming a team of international scientific talent is one of the keys for achieving these long-term goals.

Reaching these goals will require forging the effort of the accelerator physics community and laser physics community in a positive collaborative framework. That is why I directed our staff, as Deputy Director of Fermilab, to look into such research possibilities and to participate in the ICFA-ICUIL collaboration on related efforts. I am also aware that much more is necessary to meet these new challenges to realize practical laser accelerators and the associated laser technology that is required. That is why Fermilab is already a participating member of the International Coherent Amplification Network (ICAN) consortium that you head. I am very impressed with the activities and goals of IZEST to erect exawatt lasers that can drive particle accelerators with energies of a TeV and beyond. Fermilab has expertise which will be useful in realizing these goals.

We understand that IZEST will assist and promote the world-wide efforts, for example, at the French LIL exawatt, the Russian Mega Science laser project (XCELS), and possibly the Japanese Exawatt Laser, among others. Fermilab looks forward to closely collaborating in these research activities by bringing in its research capabilities and resources in terms of trained personnel, accelerator and detector components, high energy physics expertise, and expertise in related technologies. By introducing the "Laser-based high-energy and fundamental physics" paradigm, IZEST has the potential to redefine the contours of high-energy physics. I applaud the leading role that France, with the Ecole Polytechnique and the Commissariat à l Energie Atomique, is taking in this matter. At Fermilab we want to assure you that we will do our utmost to support you in this endeavor to reshape and reenergize high-energy physics based on the development of ultra-high intensity lasers for particle acceleration.

Sincerely,

young-Idee Him

Young-Kee Kim Deputy Director, Fermilab Professor of Physics, the University of Chicagao



Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency 8-1-7 Umemidai Kizugawa city Kyoto, 619-0215, Japan

Oct. 18, 2011

Letter of interest for IZEST from QuBS at Kansai

Dear Professor Gerard Mourou and Professor Alexander Litvak:

In response to your letters of August 10, 2011 and September 01, 2011 we support your initiative for the International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology (IZEST) and intend for QuBS at Kansai to participate in appropriate joint research activities that are aimed at promoting the highest laser intensity frontier along with associated high field science that this capability will enable. We are pleased to be part of the international team and network of scientists associated with IZEST and its global reach of activities including the LIL and XCELS new developments.

Increasing laser power and capabilities to levels far beyond those of the current state-of-the-art mandates a multidisciplinary coordinated effort that is intrinsically global. Pioneering and even revolutionary ideas must be encouraged and examined from many sources mindful of the novel and diverse applications afforded by such extreme optical fields. The potential application to advanced ultra-high energy and ultra-high power accelerators represents an excellent example of this, opening new paradigms in fundamental science.

It is critical at this time to forge the efforts of the accelerator physics and laser physics communities with a constructive collaborative framework like IZEST. I have recently established a new initiative at QuBS at Kansai to assess our future role in high field science which necessarily includes novel laser plasma acceleration research at significantly higher intensities. The goals of IZEST to develop exawatt lasers that can drive particle accelerators to TeV energies and beyond are consistent with my new initiative. We at QuBS are pleased to support IZEST and to cooperate with this truly exciting effort of global scale.

I admire the leading role that France with the Ecole Polytechnique and the Commissariat à l Energie Atomique is taking in this matter. It evinces a vision and a tacit optimism in the spirit of human innovation that we share with you. QuBS at Kansai will be proud to engage with the IZEST global team and network to advance ultra high intensity lasers to levels that can usher high energy and fundamental physics thereby promoting a newly emerging 'high field' scientific discipline.

Sincerely yours,

aut R. Bilton

Paul R. Bolton,

Deputy-Director-General, Quantum Beam Science Directorate (QuBS) at the Kansai Photon Science Institute (KPSI), Japan Atomic Energy Agency (JAEA).



Professor Rolf HEUER Director-General CERN CH - 1211 GENEVA 23, Switzerland

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH Laboratoire Européen pour la Physique des Particules

ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

European Laboratory for Particle Physics

To Whom It May Concern

Telephone: Direct + 41 22 767 2300

Secretariat + 41 22 767 4054/1240 Telefax:

Direct + 41 22 767 8995 Rolf.Heuer@cern.ch Electronic mail:

Our reference: DG/2011-325

Geneva, 19 October 2011

Support Letter for IZEST

CERN has been informed by Prof. Mourou and Prof. Tajima about the intended creation of an International center on Zetta-Exawatt Science and Technology, abbreviated IZEST. This initiative aims at investigating the use of ultra-intense lasers for so-called "(Laser-based) High Field Fundamental Physics", essentially the study of fundamental physics questions in a regime of very high energy (TeV and beyond) but low luminosity. The theoretical IZEST studies are complemented by an experimental program relying on the French LIL laser.

The creation of such high energy events is of strong interest for the development of future high energy physics accelerators with ultra-intense lasers. Lasers have seen a dramatic progress in recent years and they are expected to progress further, not only in peak and average power but also in stability and efficiency.

CERN believes that IZEST will provide useful insights into the feasibility and physics potential of accelerators with high energies and low luminosity. The IZEST activity will feed efficiently into the European work towards novel accelerators with high beam brightness and high luminosity, as recently discussed at the EuroNNAC (European Network on Novel Accelerators) workshop at CERN. IZEST will be able to cover an additional and potentially promising regime of future accelerators.

In summary, CERN believes that the regime addressed by IZEST is very interesting and therefore supports the further studies and discussions towards IZEST.

Yours sincerely,

Rolf Heuer

CTP1

TEN: 23 CEH 2011 16:20 Министерство инвестиционной политики Нижегородской области Кремль, корп. 2, г. Нижний Новгород, 603082 тсл. 411-82-16, факс 411-83-27 e-mail: official@invest.krcml.nnov.ru 22,09,2011 № 307-01 - 9222/11 на №

О рассмотрении обращения

OT:

Директору Института прикладной физики PAH

А.Г.Литваку

Ул. Ульянова, дом 46, г. Нижний Повгород, 603950

Уважаемый Алсксандр Григорьевич!

Во исполнение поручения заместителя Губернатора Нижегородской области Д.В.Сватковского № ПР-001-41/11-0-0 от 11.08.2011г. министерством инвестиционной политики Нижегородской области совместно С заинтересованными органами исполнительной власти местного и самоуправления Нижсгородской области рассмотрено Ваше обращение о подборе земельного участка для реализации проекта по созданию Международного центра исследований экстремальных световых полей в Нижегородской области.

По результатам проработки, учитывая, что на территории Кстовского района на продолжении Казанского шоссе в непосредственной близости от границы г. Нижнего Новгорода находится земельный участок, принадлежащий ИПФ PAH. предлагаем Вам рассмотреть возможность размещения Международного центра исследований экстремальных световых полей на следующих земельных участках Кстовского района:

1. Земельный участок, расположенный по Казанскому шоссе, восточнее участка ИПФ РАН. Предоставление под реализацию проекта возможно при условии освобождения участка от прав третьих лиц, перевода земельсельскохозяйственного назначения в иную категорию. Участок расположен на склоне оврага, при строительстве потребуется проведение комплекса работ по инженерной подготовке территории.

226

23 CEH 2011 16:20 CTP2

2. Земельный участок, расположенный по Казанскому шоссе, южнее участка ИПФ РАН. Предоставление под реализацию проекта возможно при условии освобождения участка от прав третьих лиц (частично участок в собственности ООО ПП «Этап» под индивидуальную жилую застройку), перевода земель сельскохозяйственного назначения в иную категорию. Кроме того, по участку проходит напорный канализационный коллектор D=3000 с охранной зоной 50 м. (участок рассматривался по предложению заявителя).

2

3. Земельный участок, расположенный в Кстовском районе, ориентировочно в 1100 м по направлению на юго-восток от н.п. Опалиха. Участок непосредственно примыкает к трассе М-7 «Волга». В соответствии с проектом планировки и межевания Большеельнинского сельсовета относится к зоне производственных и коммунально-складских территорий IV-V класса опасности. Участок рекомендован администрацией Кстовского района как перспективная инвестиционная территория.

4. Земельный участок, расположенный в Приокском районе г. Н.Новгорода, с южной стороны Старокстовской дороги. Предоставление под реализацию проекта возможно при условии освобождения участка от прав третьих лиц (участок в федеральной собственности).

Прошу Вас в срок до 30.09.2011 проинформировать министерство инвестиционной политики Нижегородской области о принятом решении.

Приложение: схемы размещения участков на 3 л. в 1 экз.

Министр

spert

Н.В.Казачкова

όT:

11ономарёв 419-68-84 TEN:



29.09.201 1927/01.16

01

Ha Ne

Директору Института прикладной физики РАН академику А.Г. Литваку 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 4б

Уважаемый Александр Григорьевич!

В связи с планами участия ННГУ им. Н.И. Лобачевского в проекте по созданию Международного центра исследований экспериментальных световых полей в Нижнем Новгороде предлагаю Вам рассмотреть вопрос размещения будущего центра на земельном участке, кадастровый номер 52:18:080136:0003, г. Нижний Новгород, Приокский район, находящийся в оперативном пользовании ННГУ им. Н.И. Лобачевского.



Приложение 5

http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=358&d no=40863



Σ Стерлигов Иван Государственная политика: Госполитика

Сверхмощный лазер как интегратор науки

В числе меганаучных проектов, которые будут реализованы на территории России, – Международный центр исследований экстремальных световых полей на основе сверхмощного лазерного комплекса в Нижнем Новгороде. Руководит центром всемирно известный физик Жерар Муру при поддержке Минобрнауки России. STRF.ru подробно рассказывал об этой работе в статье «Российские учёные строят сверхмощный лазер». Насколько значим этот проект для мировой науки, мы выяснили у Тосики Тадзимы, заведующего кафедрой физического факультета Университета Людвига Максимилиана в Мюнхене, председателя Международного комитета по сверхмощным лазерам (International Committee on Ultra-High Intensity Lasers, ICUIL).



Тосики Тадзиме не терпится поучаствовать в российском мегапроекте по созданию сверхмощного лазера

Справка STRF.ru:

Международный комитет по сверхмощным лазерам – подразделение Международного союза фундаментальной и прикладной физики, основанное в 2003 году. Задача ICUIL - продвижение науки и технологии сверхмощных лазеров и координация исследований и разработок в этой области. Под сверхмощными лазерами в комитете понимают лазеры с интенсивностью 10¹⁹ ватт на см² и мощностью около 10 тераватт

На Ваш взгляд, что примечательного произошло в области сверхмощных лазеров в последнее время?

 Прошлый год стал эпохальным для нас благодаря решению Евросоюза о запуске проекта Extreme Light Infrastructure [ELI, включает целый ряд сверхмощных лазеров в нескольких регионах Европы], а также началу реальной работы National Ignition Facility в США – альтернативный токамакам проект термоядерной энергетики, основанный на лазерном нагреве и инерционном удержании плазмы. Мы предполагаем, что развитие сверхмощных лазеров и сопутствующих областей науки значительно ускорится, и стараемся способствовать этому процессу во всём мире. Очень воодушевляет участие новых стран и регионов в развитии сверхмощных лазеров:

Венгрии, Чехии и Румынии (в составе ELI), Китая и, конечно, России.

Наблюдая эти тенденции, я верю, что физика сверхмощных лазеров в скором времени откроет новые области: ускорение сверхвысоких энергий, ещё более короткие импульсы излучения, ядерную фотонику и даже исследования природы вакуума.

Как Вы оцениваете амбиции России стать одним из ключевых игроков в физике сверхмощных лазеров с помощью проекта в Нижнем Новгороде?

– Я считаю, что это смелая и дальновидная инициатива, и очень уважаю принятое решение. Для меня здесь важны три момента. Во-первых, наука за последнее столетие продвинулась столь далеко вперёд, что перед ней остались исключительно сложные задачи. Поэтому требуется значительная воля и концентрация ресурсов, чтобы получить ответы на ныне стоящие перед нами важные вопросы.

Во-вторых, эти оставшиеся нерешёнными сложные проблемы важны для науки и технологий в целом и способны повлиять на жизнь людей не только в стране-спонсоре, но и во всём мире. Поэтому для их решения требуется международное сотрудничество, плоды которого будут разделены соответствующим образом. Другими словами, сам мир и встающие перед ним научные проблемы сейчас гораздо более взаимосвязаны, чем раньше, и требуют более глобального подхода к исследованиям.

Наконец – и это особенно очевидно для исследований с помощью эксаваттных (10¹⁸ ватт) лазеров, – сверхмощные лазеры способны оказать влияние на очень широкий спектр дисциплин. Например, они могут придать второе дыхание физике высоких энергий, а также сделать более доступными компактные установки для лучевой терапии рака. В то же время сверхбыстрая метрология и кристаллография атто (10⁻¹⁸ секунд) и зептоуровня (10⁻²¹ секунд) позволят нам непосредственно наблюдать ход химических и биологических процессов. Эксаваттные лазеры станут интеграторами науки XXI века, противостоя тенденциям к узкой специализации науки, характерным для XX века.

Какова может быть роль Международного центра исследований экстремальных световых полей в мировой науке и есть ли у ICUIL и Вас лично желание непосредственно поддержать его?

– Число лабораторий, стремящихся заниматься лазерами сверхвысокой интенсивности, в последнее время в мире растёт экспоненциально. Но если мы говорим о действительно переднем крае, требуется самый мощный лазер с самыми короткими импульсами. Как мы с Жераром Муру недавно установили (см. сообщение в журнале Science. – STRF.ru), исторически длина импульсов прямо связана с мощностью лазерных установок. Необходим по меньшей мере один мировой центр с лазером сверхвысокой мощности для действительно прорывных открытий.

Российский центр – именно то, что нужно.

Ни один другой проект не готов превысить эксаваттный рубеж. В числе возможных применений – новый и наиболее привлекательный принцип работы коллайдеров, требующий лазерных импульсов уровня 10 килоджоулей, а также исследования тёмной материи и тёмной энергии, для которого необходим значительный объём фотонов, чтобы надёжно отделять важные сигналы из шума. Зептосекундное временное разрешение также требует наибольшей интенсивности лазера.

Поэтому благодаря мощности лазера центр сразу станет основной точкой притяжения науки и технологии экстремально сильных полей, в которой учёные со всего мира будут двигать вперёд целый блок научных дисциплин. Установка подобного уровня неминуемо породит массу производных технологий и инновационных технологических компаний вокруг центра. Оптика, физика плазмы, ядерная физика, физика высоких энергий, нелинейная наука, атомная физика, материаловедение, химия, биология, медицина, ядерные технологии, астрономия, геофизика и геология – все эти дисциплины получат импульс к развитию. Сверхмощный лазер способен предоставить совершенно новые возможности решения целого ряда разнообразных принципиальных научных проблем.

У ICUIL есть полномочия содействовать подобному центру и сотрудничать с ним. Его миссия и цели, отражённые в нашем уставе, прекрасно сочетаются. Лично я настолько полон энтузиазма, что хотел бы сам участвовать в проекте.

Добавлю, для того чтобы привлечь лучших мировых учёных-лазерщиков, необходима среда, способствующая свободным академическим поискам. Кроме того, нельзя недооценивать качество и комфорт социально-бытовой инфраструктуры для учёных и их семей.

СОГЛАШЕНИЕ О СОЗДАНИИ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ (МНО)

«Экстремальные световые поля: источники и приложения»

ELISA

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК, самоуправляемое учреждение, имеющее государственный статус, в дальнейшем именуемое РАН, юридический адрес: Ленинский проспект, 14, 119991 В-71, Москва, Россия, в лице вице-президента академика Александра Федоровича АНДРЕЕВА, действующего от имени и по поручению:

- Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
- Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
- Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
- Института лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск
- Объединенного института высоких температур РАН, г. Москва
- Института проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Москва
- Института прикладной математики им. М.В. Келдыша, г. Москва
- Института минералогии и петрологии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, государственная некоммерческая организация в форме федерального учреждения, находящегося в ведении Правительства Российской Федерации, именуемый в дальнейшем РФФИ, юридический адрес: 117334 Россия, Москва, Ленинский проспект 32a, в лице председателя совета фонда, академика Владислава Яковлевича ПАНЧЕНКО

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА, государственное учреждение научного и профессионального характера, в дальнейшем именуемое МГУ, юридический адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Воробьевы Горы, в лице его ректора, академика Виктора Антоновича САДОВНИЧЕГО, действующего от имени и по поручению:

• Международного лазерного центра

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ), государственное учреждение научного и профессионального характера, в дальнейшем именуемое МИФИ, юридический адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, в лице ректора профессора Михаила Николаевича СТРИХАНОВА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. С.И. ВАВИЛОВА, федеральное государственное унитарное предприятие, научно-производственная корпорация, в дальнейшем именуемое ГОИ, юридический адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12, в лице директора профессора Владимира Алексеевича ТУПИКОВА, с одной стороны,

И

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, государственное учреждение научного и технологического характера, в дальнейшем именуемое НЦНИ, юридический адрес: 3 rue Michel Ange, 75794 Paris, cedex 16, в лице генерального директора, профессора Арнольда МИГЮСА, действующего от имени и по поручению:

- Лаборатории прикладной оптики (LOA UMR 7639),
- Лаборатории использования интенсивного лазерного излучения (LULI UMR 7605),
- Лаборатории взаимодействия Х-излучения с веществом (LIXAM UMR8624),
- Лаборатории Шарля Фабри института оптики (LCFIO UMR8501),
- Лаборатории Лепранса Рангэ (LLR UMR 7638),
- Центра теоретической физики (CPhT UMR 7644),
- Лаборатории радиационной физики твердого тела (LSI UMR 7642),
- Лаборатории физики газа и плазмы (LPGP UMR 8578),
- Лаборатории линейных ускорителей (LAL UMR 8607)
- Центра изучения интенсивного лазерного излучения и его применения (CELIA UMR5107)
- Института изучения экстремальных световых полей (ILE UMS3205)

КОМИССАРИАТ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, государственное учреждение научного, технологического и промышленного профиля, в дальнейшем именуемое «КАЭ», юридический адрес: sis Batiment 447, 91191, Gif-sur-Yvette cedex, France, в лице генерального администратора, профессора Бернара БИГО, действующего от имени и по поручению:

- Институт изучения взаимодействия излучения с веществом (LILM)
- Департамент исследования конденсированного состояния, атомов и молекул (DRECAM)
- Лаборатории использования интенсивного лазерного излучения (LULI UMR 7605),
- Лаборатории радиационной физики твердого тела (LSI UMR 7642)
- Центра изучения интенсивного лазерного излучения и его применения (CELIA UMR5107)

ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ ШКОЛА, учреждение административного характера, в дальнейшем именуемое **ПШ**, юридический адрес: sis Route de Saclay 91128 Palaiseau Cedex, в лице генерального директора профессора **Ксавье МИШЕЛЯ**, действующего от имени и по поручению:

- Лаборатории прикладной оптики (LOA UMR 7639),
- Лаборатории использования интенсивного лазерного излучения (LULI UMR 7605),
- Лаборатории Лепранса Рангэ (LLR UMR 7638)
- Центра теоретической физики (CPhT UMR 7644),
- Лаборатории радиационной физики твердого тела (LSI UMR 7642)
- Института изучения экстремальных световых полей (ILE)

УНИВЕРСИТЕТ ПАРИЖ ЮГ, государственное учреждение научного, культурного и профессионального характера, в дальнейшем именуемое ПАРИЖ 11, юридический адрес: sis 15 rue George Clémenceau, 91405 Orsay Cedex, в лице президента профессора Ги КУАРРАЗА, действующего от имени и по поручению:

- Лаборатории прикладной оптики (LOA UMR 7639),
- Лаборатории взаимодействия Х-излучения с веществом (LIXAM UMR8624),
- Лаборатории Шарля Фабри института оптики (LCFIO UMR8501),
- Лаборатории физики газа и плазмы (LPGP UMR 8578),
- Лаборатории линейных ускорителей (LAL UMR 8607)
- Института изучения экстремальных световых полей (ILE)

ВЫСШАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ ШКОЛА ПРОДВИНУТЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, государственное учреждение административного характера, в дальнейшем именуемое **ВНШПТ**, юридический адрес: sis 32 Boulevard Victor, 75739 Paris cedex 15, в лице директора профессора **Ива ДЕМЭ**, действующего от имени и по поручению:

- Лаборатории прикладной оптики (LOA UMR 7639),
- Института изучения экстремальных световых полей (ILE)

ИНСТИТУТ ОПТИКИ ВЫСШАЯ ШКОЛА частное учреждение, признанное общественно-полезным, в дальнейшем именуемое **ИОВШ**, юридический адрес: Campus Polytechnique, RD 128,91127 Palaiseau Cedex, в лице генерального директора профессора **Жана-Луи МАРТЭНА**, действующего от имени и по поручению:

- Лаборатории Шарля Фабри института оптики (LCFIO UMR8501),
- Института изучения экстремальных световых полей (ILE)

УНИВЕРСИТЕТ ИМ. ПЬЕРА И МАРИИ КЮРИ, государственное учреждение научного, культурного и профессионального характера, в дальнейшем именуемое УПМК, юридический адрес: sis 4, place Jussieu 75005 Paris, в лице президента профессора Жана-Шарля ПОМЕРОЛЯ, действующего от имени и по поручению:

• Лаборатории использования интенсивного лазерного излучения (LULI UMR 7605)

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ БОРДО 1, государственное учреждение научного, культурного и профессионального характера, в дальнейшем именуемое **НТУБ**, юридический адрес: sis 351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex, в лице президента профессора **Алэна БУДУ**, действующего от имени и по поручению:

• Центра изучения интенсивного лазерного излучения и его применения (CELIA UMR5107)

с другой стороны,

в дальнейшем именуемые коллективно "Стороны", или индивидуально "Сторона",

ССЫЛАЯСЬ НА:

- Соглашение о культурном сотрудничестве между Правительством Российской Федерации и Правительством Французской Республики, подписанное в Париже 6 февраля 1992 г.

- Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между Правительством Российской Федерации и Правительством Французской Республики, подписанное в Москве 28 июля 1992 г.,

- Соглашение о научном сотрудничестве между Российской академией наук и НЦНИ, подписанное в Москве 12 марта 2002 г., продленное в Париже 4 июля 2006 г.

- Соглашение о научном сотрудничестве между Российским фондом фундаментальных исследований и НЦНИ, подписанное в Париже 6 марта 2003 г.,

- Декларация о намерениях между Российским Фондом Фундаментальных Исследований и Национальным Центром Научных Исследований, подписанная в Париже 10 октября 2008 г.

ПРЕАМБУЛА

Сегодня уже можно сказать, что в скором времени пиковая мощность лазерного излучения достигнет экзаваттного уровня. Такая мощность, сфокусированная в размер, сравнимый с длиной волны света, позволит получить интенсивности до 10^{25} BT/cm², существенно выше тех, которые можно достичь на сегодняшний день. Эта интенсивность на три порядка величины больше имеющейся в настоящее время, что откроет возможности для создания принципиально нового режима взаимодействия между светом и веществом, а именно, сверхрелятивистского режима.

способные В настоящее время строятся две новые установки, обеспечить сверхрелятивистские интенсивности. Одна из них - "Аполлон", располагающаяся в Institut de la Lumière Extrême (ILE) во Франции с мощностью 10 ПВт. Она аналогична 5-10 ПВт лазеру, создаваемому в Институте прикладной физики (ИПФ РАН) в Нижнем Новгороде. Обе системы позволят получить сверхрелятивистский режим. Это даст возможность проводить новые исследования в области физики частиц, ядерной физики, теории нелинейного поля, физики сверхвысоких давлений, аттосекундной физики, физики плазмы и пучков, лабораторной астрофизики и космологии. "Аполлон" станет предшественником Extreme Light Infrastructure (ELI), состоящего из работающих в одной фазе десяти пучков, каждый из которых аналогичен лазеру "Аполлон". Одной из основных задач ILE является оценка технологии "Аполлон" для ELI. "Аполлон" обеспечит получение сверхкоротких частиц высокой энергии (10-100 ГэВ) и пучков излучения (с энергией кванта до нескольких МэВ) от компактных лазерно-плазменных ускорителей.

Французские (ILE) и нижегородские ученые, работающие на этих сверхрелятивистских установках, объединят усилия для решения научных, технических и медицинских задач на благо науки и промышленности. Например, предполагаемые в рамках проектов вторичные источники обеспечат рентгеновские технологии, которые смогут прояснить полную временную историю реакций, таких как белковая активность и свертывание, радиолиз, мониторинг химических связей и процессов катализа. Это позволит лучше понять и обеспечить контроль над ключевыми событиями в процессе образования и разрушения химических связей. Как ожидается, это будет иметь большое влияние на общество и новые технологии для промышленности.

Международный коллектив исследователей, GDRI, состоящий из французских и российских ученых, будет способствовать взаимодействию в этой новой области как на технической, так и на научной основе. GDRI будет первым шагом на пути к Laboratoire International Associé с четко определенными целями.

ВЗАИМНЫМ СОГЛАШЕНИЕМ УСТАНОВЛЕНО:

СТАТЬЯ 1 – СОЗДАНИЕ И СРОК ДЕЙСТВИЯ

Международное научное объединение «ELISA» в области фундаментальных и прикладных исследований экстремальных световых полей, в дальнейшем именуемой «Область», не обладающее ни правосубъектностью, ни правоспособностью, в дальнейшем именуемое МНО, основано Сторонами с 1 января 2010 г на период 4 (четыре) года.

Соглашение об учреждение МНО (в дальнейшем именуемое «Соглашение») может быть продлено дополнительным соглашением.

Решение о продлении принимается Сторонами после уведомления Научного совета и Правления МНО.

СТАТЬЯ 2 – ЦЕЛИ

Целью МНО является обеспечение поддержки в исследовании и координации научной деятельности, описанной в Приложении 1, которое является составной частью настоящего Соглашения.

С этой целью МНО стремится к следующему:

- способствовать развитию контактов и обмену между учеными;

- благоприятствовать сотрудничеству как внутри научного сообщества, так и с третьими сторонами;

- координировать и структурировать партнерские исследовательские программы, направленные на поддержание научных исследований в рамках национальных, европейских или международных программ поддержки научных исследований и технологического развития

- стремиться к согласованию и взаимодополняемости программ конференций, конгрессов, посвященных научной тематике;

- способствовать проведению образовательных мероприятий;

СТАТЬЯ 3 – СОСТАВ

МНО состоит из лабораторий или групп, указанных в Приложении 2, являющемся неотъемлемой частью настоящего Соглашения.

Персонал, назначенный на работу в МНО, остается в полном административном подчинении организации, в которой они работают.

Список персонала на момент создания МНО приводится в Приложении 2.

СТАТЬЯ 4 – ОРГАНИЗАЦИЯ

4.1. КООРДИНАТОРЫ

Сторонами совместно назначается один ответственный за координацию работы МНО с французской стороны и один ответственный с российской стороны. Координаторы МНО, информация о которых представлена в Приложении 3, назначаются Сторонами на срок 4 (четыре) года.

Координаторам в помощь создается бюро, члены которых назначаются совместно Сторонами по инициативе Координаторов на срок 4 (четыре) года. Информация о членах бюро представлена в Приложении 3. Координаторы МНО готовят годовой бюджет и составляют научный доклад и годовой финансовый отчет МНО, который затем они передают Сторонам, после утверждения Правления МНО.

4.2. ПРАВЛЕНИЕ

Правление МНО состоит из представителей лабораторий или групп, представленных в Приложении 2, по одному представителю от лаборатории.

Правление возглавляют Координаторы МНО.

Правление контролирует продвижение работы МНО, производит оценку выставленных на конкурс международных проектов, определяет необходимые бюджетные средства и человеческие ресурсы в МНО, принимает годовой финансовый отчет.

Координаторы консультируют Правление по всем другим вопросам, касающимся МНО.

Заседание Правления проводится, по крайней мере, один раз в год, либо по инициативе Координаторов или 1/3 его членов. При необходимости, с единого согласия членов Правления, заседания могут проводиться по конференц-связи.

В случае невозможности личного присутствия члена Правления, он может выдать доверенность на представление его интересов другому члену Правления. Один член Правление не может иметь больше одной доверенности.

По инициативе Координаторов МНО, Правление вправе пригласить на заседания любого эксперта на условиях конфиденциальности, если этого требуют цели и задачи МНО.

4.3. НАУЧНЫЙ СОВЕТ

Для координации научной программы МНО, Сторонами учрежден Научный совет. Научный совет имеет в составе:

- одного представителя от РАН
- одного представителя от МГУ
- одного представителя от РФФИ
- одного представителя от НЦНИ
- одного представителя от КАЭ
- одного представителя от ВНШПТ

Научный совет МНО:

- дает свою оценку финансовому управлению МНО, научной программе МНО, подготовленную Координаторами, а также продвижению работ, предлагая, в случае необходимости новые направления;

- выносит решение о присоединении новых лабораторий к МНО, предварительно проконсультировавшись с Правлением МНО

- вносит предложения об изменениях в настоящее Соглашение.

Заседания Научного совета проводятся не реже одного раза в два года по инициативе одной четверти его членов. Председательство Научного Совета обеспечивается попеременно одним из его членов, который выбирает секретаря заседания, ведущего протокол. Протокол заседания, одобренный членами Научного Совета, адресуется всем Сторонам МНО.

Решения Научного совета принимаются компетентным большинством (3/4) голосов присутствующих Сторон или их представителей. Каждый член Научного Совета может быть представлен другим членом, при условии, что один член представляет не более одного отсутствующего на заседании.

Координаторы МНО участвуют в заседаниях Научного совета с правом совещательного голоса.

СТАТЬЯ 5 – ФИНАНСОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В начале каждого календарного года каждая сторона информирует Координаторов МНО о планируемой сумме кредитов, предназначенных для лабораторий или групп МНО для достижения поставленных целей МНО (Приложение 4). Каждая из Сторон осуществляет самостоятельное управление выделенными для нее средствами.

СТАТЬЯ 6. ПРАВА НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНУЮ СОБСТВЕННОСТЬ

6.1. Публикации

В публикациях, касающихся Результатов совместно проведённых в рамках МНО работ, должна быть отражена связь с учреждениями – учредителями МНО. Публикация научных Результатов осуществляется в соответствии с правилами, существующими в научном сообществе, после согласования полученных результатов со всеми действующими партнерами.

6.2. Передача информации - Конфиденциальность

Каждая лаборатория обязуется передавать другим участникам МНО всю информацию, необходимую для осуществления деятельности МНО. Информация, являющаяся результатом работы, проведенной вне рамок МНО, является собственностью Сторон.

В отношении любой информации, явно определённой в качестве «конфиденциальной», полученной в рамках применения настоящего Соглашения одной из Сторон от другой Стороны, Сторона – Получатель или Стороны – Получатели обязуется (ются), в течение пяти (5) лет со дня раскрытия информации не сообщать данную информацию третьим лицам без Стороны, раскрывающей информацию, а также не разглашать информацию, являющуюся личной интеллектуальной собственностью другой Стороны, определенную, в качестве «конфиденциальной»

Все вышеизложенное не должно препятствовать представлению диссертации членам жюри в соответствии с правилами и обычной практикой каждой из Сторон; в крайнем случае, члены жюри должны быть связаны столь же строгими обязательствами конфиденциальности, как и те, что были сформулированы выше.

В случае, когда информация является конфиденциальной, участники МНО могут предоставить ее в виде конфиденциального отчета в рамках внутреннего пользования.

6.3. Собственность и использование результатов

Каждая Сторона сохраняет всю полноту собственности на любой результат, запатентованный или нет, полученный либо вне рамок совместных исследований, проводимых в рамках данного Соглашения в период, предшествующий данному Соглашению или параллельно с его действием, либо самостоятельно. Другие Стороны не имеют права претендовать на владение вышеупомянутыми результатами.

Результаты, оформленные или не оформленные патентом, полученные в рамках настоящего Соглашения, являются общей собственностью Сторон, причем Стороны обязуются на договорной основе уточнить правила распределения и использования совместно полученных результатов.

Каждая из Сторон пользуется правом бесплатного и непередаваемого использования Совместных Результатов, полученных в рамках данного Соглашения, за исключением любой деятельности производственного либо коммерческого характера.

СТАТЬЯ 7 – РАЗНОЕ

7.1. Вступление

Вступление в МНО новой лаборатории или команды одной из Сторон, или новой Стороны осуществляется по решению Научного совета.

Вступление в МНО команд новых Сторон требует подписания дополнительного соглашения, которое вступает в силу после его подписания. РАН и НЦНИ имеют право подписать дополнительное соглашение от имени всех Сторон-участников МНО по единогласному решению Правления МНО.

Дополнительное соглашение ни коим образом не меняет положений настоящего соглашения, за исключением Приложений 2 и 4. Все Стороны информируются в письменной форме о любом вступлении новой команды в МНО и получают копию дополнительного соглашения о вступлении в МНО.

7.2. Выход

Выход из Соглашения лаборатории или команды, входящей в состав МНО, осуществляется по просьбе Стороны (Сторон) при предварительном уведомлении Координаторов. Стороны уведомляются за 6 месяцев до предполагаемого выхода лаборатории (ий).

7.3. Ответственность

Ни одна из Сторон не несет ответственность перед другими Сторонами или третьими лицами в отношении соответствия, важности или исчерпывающего характера информации, а также неправильного использования или неправильного понимания Стороной или третьими лицами полученной информации в рамках Соглашения.

Каждая Сторона несет ответственность, в рамках общего права, за ущерб, который их персонал может причинить третьим лицам или персоналу других Сторон в связи с выполнением настоящего Соглашения, включая ущерб при использовании оборудования, принадлежащего другим Сторонам и представленного в распоряжение данного персонала.

Каждая Сторона сохраняет за собой ответственность (за исключением тяжелого и умышленного ущерба, причиненного другой Стороной), за исправление ущерба, нанесенного его личному имуществу в рамках выполнения настоящего Соглашения.

7.4. Расторжение

Настоящее Соглашение может быть расторгнуто по исключительным и обоснованным причинам до окончания срока его действия, прописанного в Статье 1 с предварительным уведомлением, направляемым за шесть (6) месяцев до предполагаемого срока расторжения. В этом случае Стороны будут стремиться завершить уже начатые совместные мероприятия.

Решение о расторжении Соглашения принимается Сторонами после получения заключения Координаторов и Правления МНО.

В случае расторжения или выхода одной из Сторон из МНО, положения статей 6 и 7.3 остаются в силе.

7.5. Спорные вопросы

В случае возникновения сложностей в толковании или в исполнении настоящего Соглашения, Стороны будут стремиться урегулировать все спорные вопросы путём переговоров.

В случае невозможности достижения подобного урегулирования, спорные вопросы будут разрешены в соответствии с положениями международного права. В противном случае решение будет приниматься в соответствии с положениями Комиссии ООН по вопросам международного торгового права (CNUDCI).

Настоящее Соглашение совершено в двадцати шести (26) экземплярах, тринадцать (13) экземпляров на русском и тринадцать (13) экземпляров на французском языке, причем все тексты имеют одинаковую силу. Приложения составлены на английском языке.

Совершено в Москве, 21 декабря 2009 года.

За Российскую академию наук	За Национальный центр научных исследований
Академик А. Ф. АНДРЕЕВ вице-президент	Профессор А. МИГЮС генеральный директор
За Российский Фонд Фундаментальных Исследований	За Комиссариат по Атомной Энергии
Академик В. Я. ПАНЧЕНКО председатель совета фонда	Профессор Б.БИГО генеральный администратор
За Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова	За Политехническую Школу
Академик В.А. САДОВНИЧИЙ ректор	Профессор К. МИШЕЛЬ генеральный директор
За Московский инженерно-физический институт	За Университет Париж Юг
Профессор М.Н. СТРИХАНОВ ректор	Профессор Г. КУАРРАЗ президент
За Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова	За Высшую Национальную Школу Продвинутых Технологий
Профессор В.А. ТУПИКОВ директор	Профессор И.ДЕМЭ директор
За Научно-технологический Университет Бордо 1	ЗА Институт Оптики
Профессор А.БУДУ президент	Профессор Ж-Л. МАРТЭН директор
	За Университет им. Пьера и Марии Кюри
	Профессор Ж-Ш. ПОМЕРОЛЬ президент