

## **Проект «Новые источники синхротронного излучения и нейтронов на принципах лазерного ускорения заряженных частиц»**

В течение нескольких лет сотрудники Института прикладной физики РАН проводят исследования в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы. В 2023 году завершился первый трехлетний этап проекта с названием «Новые источники синхротронного излучения и нейтронов на принципах лазерного ускорения заряженных частиц». В нем ярко проявилась уникальность института, его способность к созданию новаторских, нестандартных решений.

Синхротроны и построенные на их основе источники рентгеновского излучения остро необходимы для развития инновационных технологий в промышленности и медицине. Такие установки появились более 70 лет назад, принципы их работы хорошо известны, а используемые технологии доведены фактически до совершенства. Но несмотря на это, стоимость синхротронов остается колоссальной, поскольку это крупные сооружения, требующие миллиардных затрат на строительство, серьезный штат сотрудников и значительных средств на ежедневную эксплуатацию. Основная часть участников федеральной программы занимается именно классическими радиочастотными синхротронами. ИПФ РАН при этом двигается «против течения» и предлагает инновационный подход с использованием современных фемтосекундных лазерных систем. При этом лазерный синхротрон заведомо будет более компактным и дешевым.

**«В рамках этой федеральной программы у ИПФ РАН – особое, уникальное направление», – комментирует руководитель проекта, доктор физико-математических наук, заместитель директора ИПФ РАН, Михаил Стародубцев. – «Мы исследуем лазерные принципы ускорения частиц для получения яркого рентгеновского излучения. Мы обладаем уникальной экспериментальной базой: в институте находится самый мощный в России петаваттный лазер PEARL, разработанный здесь же, в ИПФ РАН. В этой установке впервые для столь мощных лазерных систем были использованы технологии параметрического усиления чирпированных импульсов. В наши дни эта технология широко применяется, и фактически все новые проекты мультиметтаваттных лазеров в мире строятся именно на ней. Кроме того, в проекте используется еще одно ноу-хау института – гиротроны, сверхмощные СВЧ-генераторы. Мы исследуем все возможные подходы и убеждены, что это работа на опережение. Именно дешевые и компактные решения в будущем получат наибольшее распространение и обеспечат технологический прорыв в экономике страны».**

ИПФ РАН – ведущая организация данного проекта. Соисполнителями стали Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» и Приволжский исследовательский медицинский университет (ПИМУ) со своими экспериментальными и теоретическими базами.

В первый неполный календарный год сильные группы теоретиков физических институтов провели обширные численные исследования, рассматривая самые разные взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Второй год проекта был посвящен экспериментальному исследованию режимов лазерно-плазменного ускорения из низкоплотных газовых мишеней. В таких мишенях

реализуется хорошо известный режим взаимодействия «ускорение в кильватерной плазменной волне». Он широко признан научным сообществом в качестве надежного и стабильного источника пучков электронов с высокими энергиями до гигаэлектронвольтов и бетатронного излучения с энергиями квантов порядка 10 кэВ. Однако исследования, как и ожидалось, подтвердили, что в данном режиме платой за моноэнергетичность и высокие энергии ускоренных электронов является их относительно малое количество и, как следствие, скромный коэффициент преобразования лазерной энергии в энергию ускоренных частиц и рентгена. Современные тенденции требуют гораздо больших потоков электронов, более «ярких» пучков. И, значит, нужно переходить к более плотным мишеням.

**«Задача синхротронных источников – генерация яркого рентгеновского излучения для различных приложений», – поясняет Александр Соловьев, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией лазерно-плазменных источников синхротронного излучения и нейтронов. – «Максимальная яркость лазерного синхротрона достигается, когда лазерное излучение воздействует на плазму резонансным образом, что происходит только при точном совпадении внутренних масштабов плазмы и параметров мощного лазерного импульса. Именно такой режим соответствует максимальной эффективности конверсии энергии лазерного импульса в желаемое рентгеновское излучение. Происходит это только при определенной концентрации плазмы, порядка  $10^{21}$  частиц на  $\text{см}^3$ . Это так называемая критическая концентрация плазмы. Но веществ такой плотности в естественных условиях не существует. Есть газовые среды плотностью около  $10^{19}$  частиц в  $\text{см}^3$ , есть твердые вещества и жидкости, у которых концентрация  $10^{23}$  частиц в  $\text{см}^3$ . А нужно что-то посередине рядом с  $10^{21}$ , что в лаборатории создать довольно трудно. Нужно либо очень сильно сжимать газ, или какими-то методами «разрыхлять» твердые вещества. Именно по этой причине сама физика взаимодействия с околоскритической плазмой в эксперименте пока излучена очень слабо, остается очень много открытых вопросов».**

В 2022 году лаборатория Александра Соловьева исследовала новый механизм ускорения электронов, который реализуется при воздействии сфокусированного лазерного импульса на пористые мишени. По удачному стечению обстоятельств, ведущие специалисты по изготовлению таких мишеней работают в ФИАН, что и стало залогом успешной реализации проекта. Основу пористых мишеней составляет твердое вещество с типичной твердотельной концентрацией, но на микроскопическом уровне испещрённое микропустотами – порами, размеры которых в десятки раз меньше толщины человеческого волоса. В чем-то такие мишени похожи на швейцарский сыр с огромным количеством микроскопических дырок. Основная сложность изготовления таких мишеней сопряжена с тем, что доля объема, занимаемая дырками, составляет примерно 99% от объема всей мишени.

В случае взаимодействия с лазерным импульсом, кроме средней плотности, ключевыми параметрами для пористой мишени являются ее однородность и характерный размер пор. Ученые ФИАН разработали и запатентовали уникальную пену, поры в которой не превышают одного микрона, а средняя однородность пены изменяется не более чем на 1%. Они нашли очень удачный состав, долго сохраняющий стабильность.

На режим взаимодействия с лазерным импульсом влияют любые неоднородности плазмы с масштабом более четверти длины волны лазерного импульса  $\sim 200$  нм. Поэтому пространственный профиль концентрации плазмы подвергается разглаживанию при

помощи предварительной ионизации дополнительным маломощным лазерным импульсом, приходящим на мишень за несколько наносекунд перед основным лазерным воздействием. За это время профиль плазмы успевает стать идеально однородной средой с необходимой критической концентрацией порядка  $10^{21}$  в  $\text{см}^3$ .

Другой важной технической задачей при взаимодействии с пористыми мишенями является повышение качества фокусировки лазерного импульса и наведение на мишень. Мощное лазерное излучение должно быть сфокусировано в минимальное пятно, что достижимо только при помощи высокотехнологичных оптических элементов большого размера с тончайшим контролем качества поверхностей. При изготовлении крупных оптических элементов отклонений от идеального профиля не избежать. Причем излучение накапливает эти отклонения по мере распространения в лазерной схеме, что проявляется в искажениях волнового фронта, которые приводят к увеличению пятна фокусировки. Компенсировать эти искажения позволяют специальные элементы с управляемой формой поверхности – адаптивные оптические системы. В ИПФ РАН исправлению волнового фронта излучения уделяется особое внимание. Сотрудники разработали специализированную систему, способную компенсировать искажения волнового фронта лазерного излучения лазера PEARL таким образом, что интенсивность лазерного излучения в пятне фокусировки после исправления составляет не менее 70% от теоретического предела. Для лазерных систем такой мощности это очень высокий показатель, заметно превышающий типичные значения.

На следующем этапе проекта, в 2023 году, на основе прямого лазерного ускорения электронов в ИПФ РАН был создан прототип нового лазерно-плазменного ускорителя. Источник обладает исключительной эффективностью за счет резонансной передачи энергии лазерного излучения электронам, число которых в одном импульсе достигает типичных значений для классических радиочастотных ускорителей. Энергия электронов в этом случае составляет величину порядка 10 МэВ, что ниже, чем в режиме кильватерного ускорения, но за счет значительно возросшего числа ускоренных электронов общая эффективность только увеличивается.

Исследовательская работа на этом, однако, еще не закончилась. Экспериментальную и теоретическую оптимизацию необходимо провести еще по массе параметров, но участники проекта считают, что будущее лазерно-плазменных ускорителей может быть связано именно с использованием околокритических мишеней. Ученые института находятся в мейнстриме поисков мирового научного сообщества, а в чем-то и впереди зарубежных конкурентов.

Новые источники синхротронного излучения в будущем помогут проникнуть в структуру сверхтонких биологических и технологических микрообъектов, находить опасные грузы, диагностировать и лечить опасные заболевания, оказывая при этом минимальную лучевую нагрузку. Это путь к новым прорывным технологиям будущего. И лазеры сделают эти технологии более простыми и доступными.

Параллельно в рамках данного проекта исследователи из отдела физики плазмы ИПФ РАН искали альтернативные подходы к созданию компактных источников нейтронов. Нейтральные частицы «не видят» лазерный импульс, однако большие потоки нейтронов из тяжелых изотопов водорода можно выбить с помощью энергии мощных СВЧ-генераторов – гиротронов. И опять-таки эта уникальная технология не требует строительства полноценного громоздкого ускорителя.

**«Расчеты и импульсные эксперименты показывают, что полученного нами количества нейтронов уже может быть достаточно для использования в исследованиях и в медицине», – рассказывает Иван Изотов, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией ионных источников. – «Если все будет работать, как задумано, то в ближайшем будущем мы надеемся построить свой мощный и компактный нейтронный генератор. В институте для этого уже создано необходимое помещение. У нейтронного генератора масса применений. Нас больше всего привлекает медицина. Мы уже участвуем и хотим продолжать работу по развитию отечественной бор-нейтронозахватной терапии для точечного уничтожения раковых клеток. Другие применения – неразрушающий контроль сложных промышленных узлов, таких как, например, турбогенераторы. Очень востребовано радиационное тестирование электроники, предназначенной для работы в космосе и в иных тяжелых условиях эксплуатации»**

В 2023 году в сотрудничестве с ПИМУ ученые ИПФ РАН провели первые тестовые эксперименты по облучению клеточных культур.

За эти три года ученые института постарались охватить все возможные подходы к созданию альтернативных источников электронов и нейтронов. Например, запатентовали капсульную газовую мишень для лазерного импульса, где довели давление газа до 2 атмосфер. Это шаг к параметрам критической плазмы со стороны уплотнения газов. При этом получили очень резкую границу газовой мишени, которая стандартными методами не получается. С такого рода мишенями будут экспериментировать дальше.

Ведутся исследования в области получения новых бетатронных источников электронов, когда электронов меньше, чем от источников околокритической плотности, но энергия их на порядки выше. Отрабатывают и другие способы получения нейтронов, например, с помощью фотоядерных реакций. Весь спектр поисков направлен на развитие физики лазерно-плазменных взаимодействий. И эта работа будет продолжена.