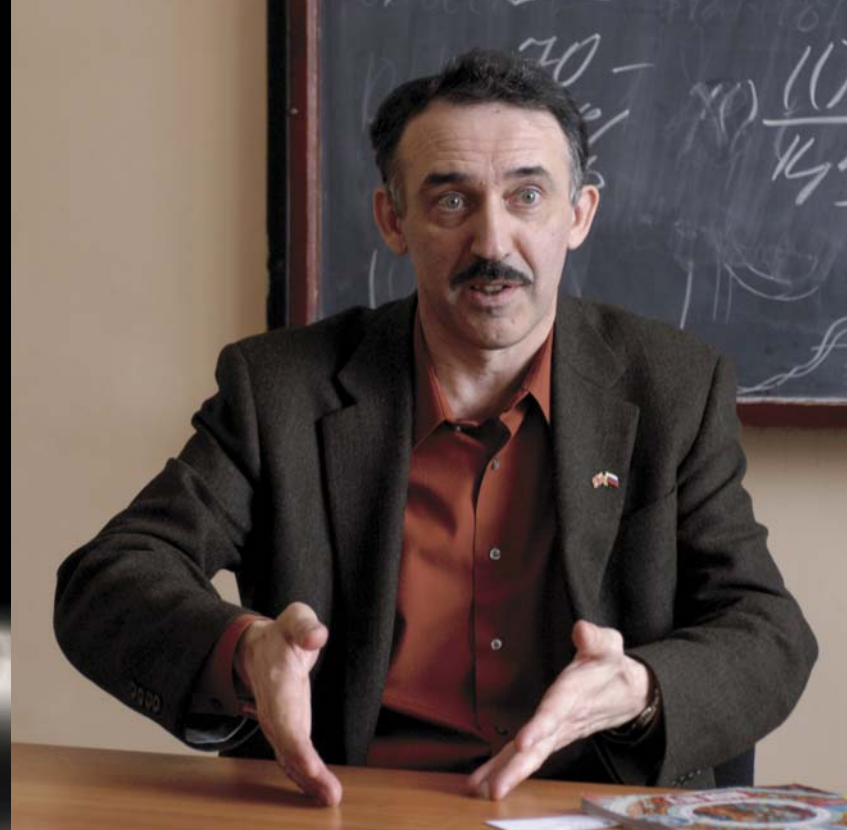


Профессор Оксфордского университета, директор Института ускорительной физики им. Джона Адамса (Оксфорд, Великобритания) Андрей Анатольевич Серый на встрече с редакторами журнала «НАУКА из первых рук». Новосибирск, 2015



Эпоха Ускорения

Прежде чем стать директором британского научно-исследовательского института, бывший выпускник физфака Новосибирского государственного университета Андрей Серый прошел немалый путь. Сначала работа в Новосибирском Академгородке, в Институте ядерной физики СО РАН, затем в филиале ИЯФ в Протвино. До того, как А. Серый в 1999 г. был приглашен на работу в Стэнфордский центр линейных ускорителей (Калифорния, США), он успел поработать в Центре атомной энергии под Парижем и в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми около Чикаго. В 2008 г. за вклад в разработку линейного коллайдера он был избран членом Американского физического общества, а через два года возглавил Институт ускорительной физики, названный в честь известного британского физика Джона Адамса, бывшего одним из генеральных директоров ЦЕРНа. Свои исторические и научные «корни» Андрей Серый не забывает, проявляя в своей заботе порой и юмор: в частности, вместе с женой, выпускницей ФЕНа НГУ, они учредили стипендию для успешных студентов университета, но только для женатых пар с двух факультетов – ФФ и ФЕН

© А. А. Серый, 2015

Одним из самых зрелищных явлений, наблюдаемых невооруженным глазом, является метеорный поток – широкий пылающий след, оставляемый мельчайшими крупинками вещества. Еще более удивительно полярное сияние, вызываемое столкновением с атмосферой субатомных элементарных частиц, разгоняемых Солнцем. Космические лучи – элементарные частицы крошечной массы, которые входят в земную атмосферу с энергией крикетного мяча, – наблюдать гораздо труднее, да и механизм их ускорения пока остается загадкой. Однако в земных условиях люди научились разгонять элементарные частицы в искусственных ускорителях, что дало возможность не только изучать фундаментальные основы мироздания, но и открыло перспективы для создания новых технологий.

На сегодня энергия элементарных частиц, получаемая в ускорителях, не достигает и миллионной доли самых «энергичных» космических частиц, однако физики

Ключевые слова: физика высоких энергий, синхротронные источники света, плазменное ускорение, компактные источники света, комптоновские источники света.

Key words: accelerators, high energy physics, synchrotron light sources, plasma acceleration, compact light sources, compton light sources





«В нашем институте работает 25 профессоров, остальные – «постдоки» и аспиранты. Все вместе (около 80 человек) мы составляем большую «ускорительную» команду; администраторов, конструкторов и других технических работников предоставляют Оксфордский университет, Имперский Колледж и Ройал Холлоуэй. Университеты берут на себя и все заботы по патентованию, публикациям, грантам и т. д., поэтому сами ученые освобождены от рутинной работы по поддержке своих исследований. Однако такая академически свободная атмосфера не означает, что мы делаем то, что пожелаем, – мы прислушиваемся и к советам независимых экспертов. Периодически, раз в несколько лет, создается комиссия приглашенных экспертов, которой мы предоставляем отчет о том, что сделано и что планируется сделать. Есть разные критерии оценки работы ученых, и это не только число публикаций. Кстати сказать, в ускорительной физике не бывает очень уж много публикаций. Есть даже такая шутка: «мы публикуемся в железе и бетоне». Наши установки – это и есть наши публикации. И комиссии, которые нас оценивают, это понимают. Что же касается финансирования института, то примерно треть его составляет зарплата профессоров – это постоянная стабильная часть. Еще одна треть – это базовое финансирование от британского аналога российского Министерства образования и науки, и для его продления требуется один раз в несколько лет предоставлять отчет и планы на будущее. Последнюю треть финансирования составляют гранты, проекты, договоры, сотрудничество с компаниями и т. д. – и за эти деньги нам приходится бороться почти ежедневно, преодолевая большую конкуренцию, естественную для современной науки»

Ежегодно десятки миллионов людей пользуются диагностикой и лечением с помощью ускорителей заряженных частиц, а рыночная стоимость всей продукции, произведенной за год с их помощью, составляет более 500 млрд долларов (Accelerators for America's Future, DOE, 2009). Ускорительная техника использовалась и в трети всех исследований, удостоенных Нобелевских премий по физике (Chao *et al.*, 2010)

и инженеры не отстают от природы: они создали методы одновременного ускорения многих и многих миллиардов частиц, при этом научившись фокусировать их поток и сжимать его до крошечных размеров. Так, одна из самых амбициозных современных ускорительных установок – Большой адронный коллайдер в ЦЕРНе – ускоряет протонные пучки до энергии, эквивалентной энергии Боинга-747 в момент взлета, при том что эта энергия сосредоточена в «точке» диаметром тоньше человеческого волоса.

Тот факт, что мы, следуя примеру великой эпохи Возрождения, готовы в настоящее время посвятить столько усилий изучению самых фундаментальных основ природы и вкладывать огромные средства в ускорители и другие машины, делающие подобные исследования возможными, служит признаком цивилизованного общества. Безусловно, существует также множество практических задач, которые требуют внимания «ускорительных» ученых. И в данном случае наука и практика вполне совместимы: поддержка фундаментальных исследований обеспечивает создание установок и технологий, пригодных для широкого использования, в то же время стимулируя обучение специалистов, способных вести исследования, нацеленные на будущее.

К исследовательским центрам Великобритании, в которых занимаются подобными работами, относятся Институт ускорительной физики им. Джона Адамса (JAI) и его аналог на северо-западе Англии Институт ускорительной физики и технологии им. Кокрофта (CI), созданные в 2004 г. Оба эти института являются достаточно уникальными организациями, так как они созданы на базе нескольких университетов. Так, Институт им. Джона Адамса был первоначально организован Оксфордским университетом и Лондонским университетом Ройял Холлоуэй, а с 2011 г., благодаря усилиям нынешнего директора JAI, партнером центра стал и Имперский колледж Лондона.

Институт им. Джона Адамса работает в тесном сотрудничестве с известными британскими и международными исследовательскими орга-

низациями, в том числе с ЦЕРНом, Резерфордской лабораторией и синхротронным центром «Даймонд»*, а также с промышленными предприятиями. Новые ускорители для фундаментальных наук разрабатываются здесь одновременно с системами, имеющими медико-биологические и промышленные приложения. JAI получил международную репутацию также в качестве центра подготовки следующего поколения физиков-ускорительщиков для национальных исследовательских лабораторий и промышленных производств.

«Перекрестное опыление»

Не всегда возможно предугадать, какие из инновационных результатов, полученных при разработке новых ускорителей частиц для фундаментальной физики элементарных частиц, могут иметь практические приложения в других областях науки, медицины или техники.

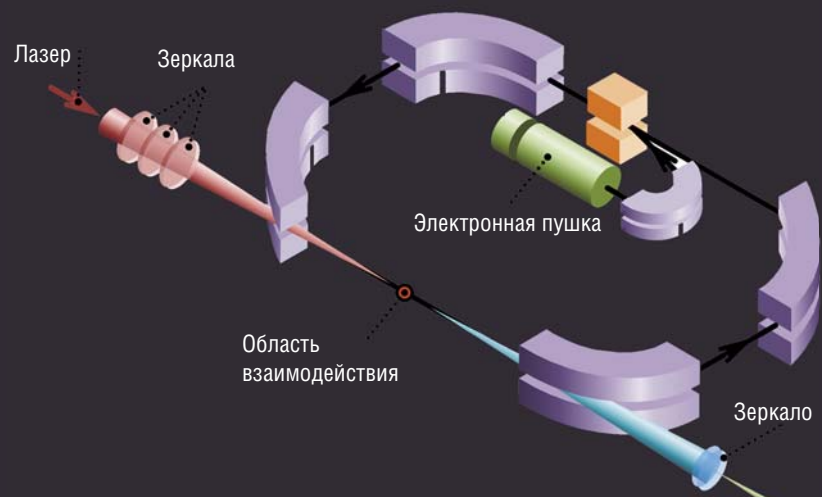
* Подробнее о центре *Diamond Light Source* читайте на с. 28–39

Кто бы мог предвидеть, к примеру, что попытки наладить информационную коммуникацию в рамках такого глобального научного проекта, как ЦЕРН, могут привести к созданию «всемирной паутины» – Интернета, который сейчас буквально захватил весь мир? А на основе самых продвинутых детекторов элементарных частиц удалось создать лучшие масс-спектрометры для химических и биологических исследований.

Примером современной научно-технической проблемы является создание, накопление и фокусировка пучков таких короткоживущих элементарных частиц, как мюоны. Эти частицы нестабильны по своей природе, однако в будущем они могут быть использованы для создания относительно компактных ускорителей следующего поколения. А методы фокусировки мюонных пучков, которые сегодня активно исследуются в Институте им. Джона Адамса, как оказалось, могут иметь интересные приложения и в медицине.

Установка ATF2 была построена в Исследовательском центре физики высоких энергий КЕК (Япония) для проверки идеи итальянского физика П. Раймонди и А. Серого, позволяющей укоротить систему фокусировки для линейных коллайдеров с нескольких километров до нескольких сот метров. Оптическая система для ATF2 была спроектирована Серым, который затем руководил и ее созданием. Сейчас установка успешно работает и достигла плановых параметров: пучок электронов энергии 1 ГэВ удалось сфокусировать до очень малого размера – всего 40 нм по вертикали.
Фото Н. Тогэ (КЕК, Япония)





Создатели квантовой физики называли «игрой в бильярд фотонами и электронами» эффект Комптона, суть которого состоит в упругом рассеивании электромагнитного излучения на свободном электроне. На основе этого эффекта создаются компактные источники рентгеновского излучения: столкновение лазерных фотонов с пучком электронов приводит к их отражению со значительным увеличением их энергии. На схеме – принципиальное устройство комптоновского источника. Рис. Е. Серой

Рентгеновские лучи

Так, идеи, возникшие в ходе разработки мюонного коллайдера, вдохновили исследователей на разработку новой конструкции устройства для антираковой терапии. В наши дни для этого чаще всего используются ускорители электронов, которые и генерируют рентгеновское излучение, направленное на уничтожение клеток опухоли. В более современном методе терапии вместо электронов используются протоны или даже легкие ионы, что позволяет вести по опухоли более «прицельный огонь» и облучать как можно меньший объем окружающих здоровых тканей, сводя к минимуму поражение чувствительных органов. С помощью методов, разрабатываемых сегодня в JAI, эти ионные пучки могут быть направлены более точно и действовать более эффективно.

Степень «перекрестного опыления» между научными исследованиями в JAI и в промышленности можно проиллюстрировать еще массой примеров. В частности, исследования когерентного излучения электронных пучков стимулировали создание компактных терагерцовых источников с потенциальными приложениями в области информационных технологий, в биологических и медицинских науках. А методика измерения абсолютного расстояния, разработанная в ходе конструирования линейных коллайдеров, сейчас интегрируется в метрологический инструмент, которым будут пользоваться не только для калибровки станков с ЧПУ и геодезических инструментов, но даже для контроля деформации корпусов авиалайнеров.

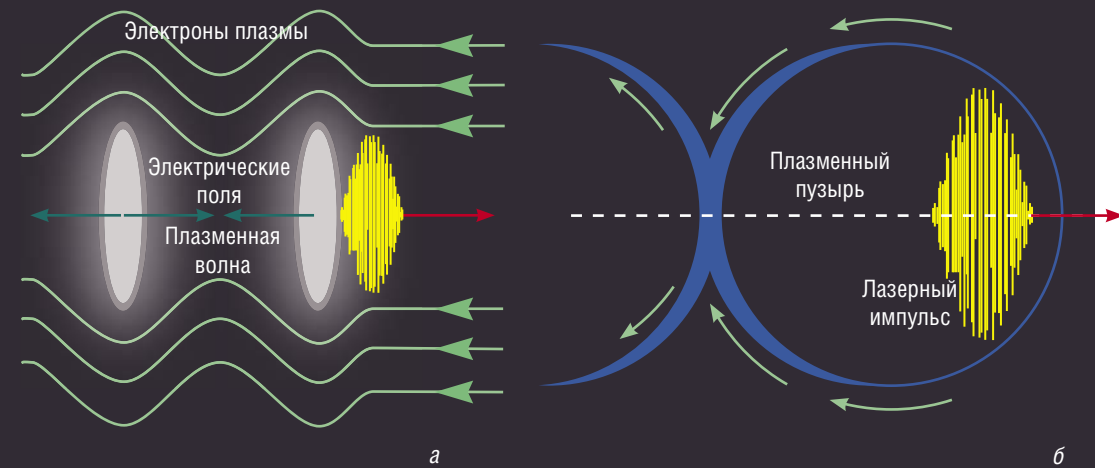
Рентгеновский «взгляд»

Все более важную роль в ускорительной физике начинают играть лазеры. Разработанные в JAI лазерные методы диагностики электронного пучка позволяют

измерять его свойства, не разрушая ни пучок, ни сам детектор. Но еще более интересные результаты ожидаются при использовании лазеров, которые будут управлять самим процессом ускорения.

Сегодня обычные лазеры видимого света с длиной волны излучения около полмикрона можно встретить почти везде – от проигрывателя компакт-дисков до магазинных сканеров. Но ускорительная физика и техника позволяют создать рентгеновские лазеры с длиной волны субнанометрового диапазона: их излучение из-за малой длины волны незаменимо для анализа структуры биологических макромолекул, новых материалов, анализа быстропротекающих процессов. Источником таких высокоэнергичных фотонов служат релятивистские электроны, получаемые в ускорителях. И основными препятствиями, которые сдерживают широкое использование таких рентгеновских лазеров, являются их размеры и высокая стоимость (например, LCLS, запущенный в калифорнийской ускорительной лаборатории SLAC, имеет длину около километра и стоимость – около 500 млн долларов).

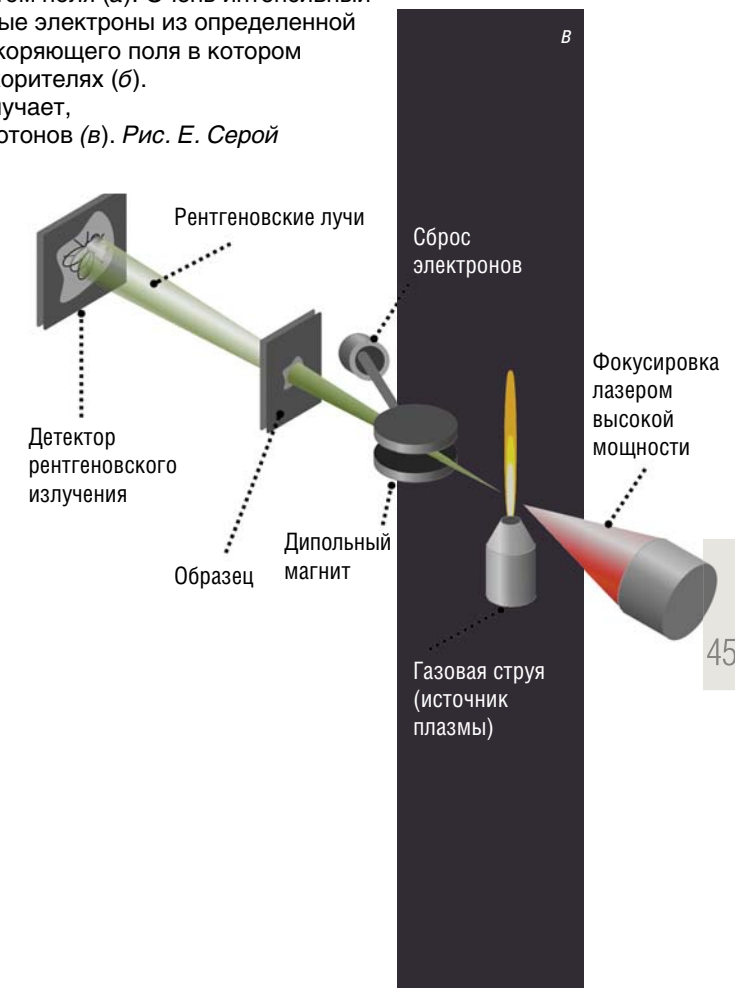
Обычные ускорители, как известно, основаны на механизме ускорения частиц в резонаторах – металлических сосудах определенной формы, способствующей возникновению условий для создания ускоряющих полей. Но способность металлов выдерживать сильные электромагнитные поля ограничена из-за возможных электрических пробоев и разрушения стенок резонатора. Однако в плазме, возникающей в потоке газа под воздействием интенсивного пучка частиц или лазерного импульса, можно создать подходящую для ускорения волну, амплитуда которой не будет ограничена пробоями, ведь плазма – это материал, который сам по себе уже «разрушен». Сильное электрическое поле в плазменном «кильватерном» следе (подобном тому,



Еще один подход к созданию компактных источников излучения – использование лазерно-плазменного ускорения. В этом случае короткий и интенсивный лазерный импульс расталкивает электроны плазмы, которые затем притягиваются к ионам, создавая плазменную волну с очень высоким градиентом поля (а). Очень интенсивный лазерный импульс способен вытолкнуть все плазменные электроны из определенной области, создавая «плазменный пузырь», градиент ускоряющего поля в котором может в тысячу раз превышать таковой в обычных ускорителях (б). Ускоренный в плазме пучок электронов в ней же и излучает, создавая яркий и точечный источник рентгеновских фотонов (в). Рис. Е. Серой

что оставляет корабль на поверхности моря) позволит ускорять частицы до высоких энергий на гораздо меньших расстояниях, чем в обычном ускорителе. Прямое столкновение пучка частиц и лазерного света открывает еще одну возможность в отношении создания рентгеновских источников света благодаря использованию эффекта Комптона (когда фотоны видимого света отражаются от релятивистских электронов, уменьшая длину своей волны до субнанометрового уровня).

Самый очевидный результат взаимодействия ускорительной физики с лазерной и плазменной физикой – создание новых компактных рентгеновских лазеров и источников света. Первый, более простой тип комптоновских рентгеновских источников в настоящее время уже активно разрабатывается, а для более сложного потребуются сверхпроводящий ускоритель с рекуперацией энергии, который обеспечит значительно более сильный поток электронов и, соответственно, более высокую рентгеновскую яркость. Наконец, наиболее сложной, но и самой перспективной задачей является создание лазера на свободных электронах на основе лазерно-плазменного ускорения. Сложность этой задачи очень высока, но и возможный выигрыш от ее решения огромен, что вдохновляет и JAI, и другие исследовательские группы во всем мире работать над этим многообещающим направлением.





Наука
и производство.
Рис. Саши Серой

Вопросами взаимодействия лазерного света, плазмы и пучка ускоренных частиц сегодня занимаются в различных научных организациях по всему миру. В том числе с участием сотрудников Института им. Джона Адамса уже удалось достичь темпа лазерно-плазменного ускорения, превышающего темп ускорения в стандартных ускорителях в тысячу раз, и начать использовать ускоренные пучки для генерации излучения для медицинских приложений.

Уже первые полученные результаты свидетельствуют, что плазменные ускорители являются очень яркими источниками рентгеновского излучения, которое характеризуется такими уникальными свойствами, как сверхкороткая длительность импульсов (несколько фемтосекунд) и чрезвычайно малый размер излучающей области (доли микрона). Все это дает возможность достижения гораздо более высокой точности временного и пространственного разрешения по сравнению с существующими источниками.

Появление нового семейства компактных плазменных ускорителей даст возможность и университетам, и промышленным лабораториям самостоятельно проводить исследования в биологии, медицине и материаловедении, которые доступны сегодня только в крупных технологических центрах.

Да будет свет!

Одна из важных функций Института Джона Адамса – просветительская. Донести восхищение наукой и понимание ее, пусть и на простом уровне, до широкой аудитории – это не просто одна из многих задач института, но одна из основных официально прописанных целей его работы.

В мире науки и инноваций «долиной смерти» называют трудно преодолимый барьер между самой наукой и промышленностью. Суть проблемы и противоречия здесь в том, что, с одной стороны, для производства нужен готовый образец, так как воплотить на практике «сырую» идею трудно, да и коммерческий риск может в этом случае оказаться слишком высок. Но, с другой стороны, создание образца, готового к производству, как правило, не входит в задачу ученых. Поэтому путь от идеи и экспериментальных демонстраций до коммерческих приложений очень тернист. Трудность представляет собой наведение «моста», т. е. продвижение технологически готовых научных идей от научно-исследовательских институтов до промышленных предприятий. Для решения этой общемировой проблемы применяются разные подходы, чтобы привлечь инвесторов и довести какое-то интересное решение до промышленного использования. В частности, в нашем институте мы пытаемся преодолеть эту проблему, работая одновременно над несколькими вариантами компактных источников излучения

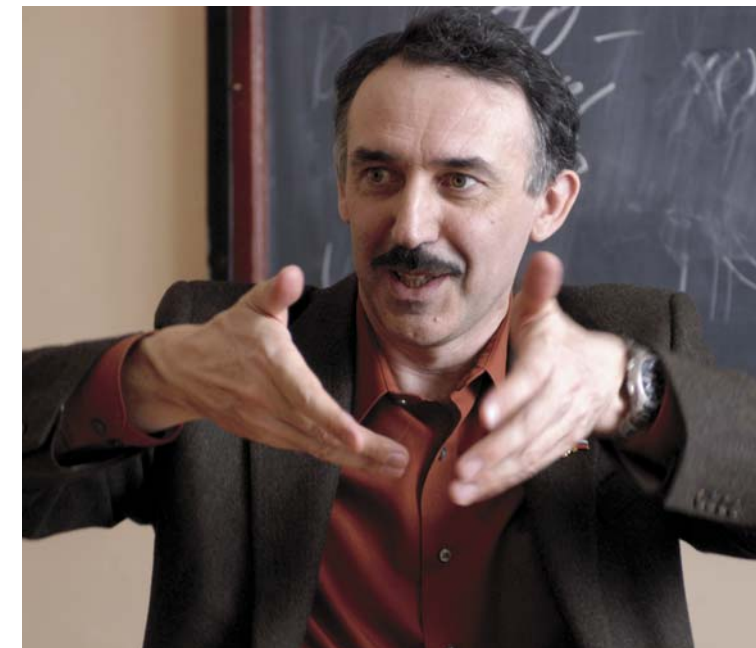
Сотрудники института постоянно стремятся к тому, чтобы сделать ускорительную физику доступной и привлекательной для самой широкой публики, прежде всего для детей, школьных учителей, представителей других наук и промышленности. Ведь мало кто знает, что ускорители частиц встречаются в нашей повседневной жизни гораздо чаще, чем можно было бы подумать. Их широко применяют в областях, весьма далеких от физики: от уничтожения раковых опухолей, дезинфекции медицинских средств и продуктов питания до выявления подделок произведений искусства!

Среди популяризаторской деятельности JAI стоит отметить уникальное захватывающее шоу для школьников «Ускоряйтесь!» с использованием пляжных мячей, жидкого азота и огромных огненных шаров, с помощью которых проводят демонстрацию работы ускорителей; ежегодный музыкальный фестиваль, на котором концерты совмещаются с научными лекциями, а также «Призыв» – ежегодная летняя школа для учителей физики старших классов, где они получают представление о работе Большого адронного коллайдера и других подобных ускорителей и даже могут иметь возможность изготовить простую модель ускорителя либо пузырьковой камеры из подручных средств.

Сотрудники института периодически читают лекции в школах, готовят научно-популярные публикации, и все это при относительно небольшом штате, большую часть которого составляют аспиранты. К этому нужно добавить, что институт выпускает в научную жизнь ежегодно около 5–8 специалистов квалификации PhD (доктор философии) – примерно столько же, сколько признанный мировой центр в области ускорителей – новосибирский Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, где работает около 3 тыс. человек. «Производство» высококвалифицированных специалистов с глубокими теоретическими знаниями, практическими навыками и гибким умом – важнейшая задача JAI.

Мир ускорительной физики должен работать как единый организм, в котором фундаментальные и прикладные компоненты находятся в равновесии. Физик, который думает о кварках и космических лучах, может в следующую минуту стать инноватором, обдумывающим создание настольного рентгеновского аппарата для больниц или промышленности.

Следуя этому принципу, Институт ускорительной физики Джона Адамса полон решимости довести свои фундаментальные исследования до промышленного применения уже в ближайшем будущем. Мы надеемся, что наши исследования помогут создать компактные источники синхротронного излучения, основанные на принципе синергии лазеров и новых ускорителей, которые будут способны революционизировать всю область ускорительной физики и ее приложений, подобно тому, как это случилось с лазерами видимого света, подстегнувшими науку и промышленность в XX в. В частности, создание очень компактных источников рентгеновских импульсов – первое практическое приложение плазменных ускорителей – может стать вдохновляющим примером преодоления «долины смерти», лежащей между ускорительной наукой и технологическими инновациями.



«Как научный результат превратить во что-то вещественное и полезное? Этим вопросом я серьезно заинтересовался совсем недавно. Раньше, когда занимался чисто фундаментальной наукой, меня это волновало гораздо меньше. Может быть, этот вопрос пришел с возрастом, может быть, вместе с ответственностью в связи с теперешней должностью.

Пройти весь путь от научной идеи до реализации – это вызов. Хочется понять, как правильно выбрать те проекты, которые стоит довести до логического завершения и как этого добиться.

Мы стараемся ориентировать своих сотрудников на такие практические задачи, мотивировать их. Например, есть идея создать новый рентгеновский источник, но его параметры могут варьироваться в широком диапазоне – он может работать на материаловедение, на медицину... Какие параметры выбрать и как сделать его более компактным? Или, к примеру, как сделать, чтобы он лучше прочих смог диагностировать какой-то вид рака? И после того, как сама идея созрела, начинается тот длинный путь, который требует и времени, и сил, и ресурсов. Для начала нужно найти один, наиболее выигрышный вариант. И если он заработает, можно будет делать различные версии этого инструмента. Но все же сначала нужно эту первую тропинку протоптать...

А вообще у нас есть сильная мотивация и от правительства, и от университетов: пытаться в первую очередь смотреть на те вещи, которые можно осуществить на практике, искать реальные приложения и возможности их реализовать»