



ШИЛЬЦЕВ Владимир Дмитриевич – известный русский и американский физик, специалист в области физики частиц высоких энергий и физики ускорителей. Работает в отделе ускорителей Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Фермилаб, Батавия, США). В 2001–2018 гг. возглавлял отдел коллайдера *Tevatron* и Центр физики ускорителей в Фермилаб; в 2018 г. руководил Отделением физики пучков Американского физического общества. Награжден рядом престижных премий и наград, в том числе Премией им. Нишикава за выдающиеся достижения в области ускорителей (2019)

# Ускорители частиц — инструменты научных открытий

Детектор тяжелых ионов ALICE – один из семи экспериментальных детекторов, работающих на Большом адронном коллайдере. Фото М. Швейцер. © 2008 CERN

© В. Д. Шильцев, 2020

**Ключевые слова:** мегасайенс-установки, ускорители, физика ускорителей, пучки высоких энергий.

**Key words:** megascience-facilities, accelerators, accelerator science, high-energy beams

В. Д. ШИЛЬЦЕВ

Сегодня из-за все более высоких запросов и усложнения передовых методов исследований растут требования к научным установкам в самых разных областях: от медицины и биологии до физики плазмы и элементарных частиц. Не единственный, но широко распространенный и эффективный подход – строительство больших (и дорогостоящих) научно-исследовательских комплексов, уникальных научных установок, рассчитанных на одновременное использование большим количеством групп и исследователей, почти всегда с широким международным участием.

Такие мегасайенс-установки являются не отдельными центрами, университетами и лабораториями, а общенациональными или даже международными проектами. Среди наиболее известных уже действующих установок – ускорительные комплексы в ЦЕРН (Швейцария) и ОИЯИ (Дубна, Россия).

В СССР в 1980-х гг. было начато строительство ускорительного комплекса УНК периметром 21 км на рекордную энергию столкновений для изучения рождения новых элементарных частиц. Из-за распада страны и сокращения финансирования науки проект был закрыт в середине 1990-х гг. В последующие два десятилетия ситуация постепенно выравнивалась: РФ стала принимать сначала умеренное, а затем все большее участие в зарубежных мегасайенс-проектах, таких как БАК (LHC), ITER, XFEL, FAIR, ESRF.

«Первой ласточкой» в России стал международный коллайдер ионов NICA, строительство которого началось в 2016 г. в Дубне. А в 2019 г. вышел Указ Президента РФ от 25.07.2019 N356, инициировавший работы по созданию еще пяти таких установок в России. Примерная стоимость каждой – от 10 до 50 млрд руб., строиться и настраиваться они будут в течение пяти лет или более. При этом каждая из них даст уникальные возможности сотням, а в идеале и тысячам исследователей, включая международные коллаборации.

Большинство этих установок базируется на уникальных ускорителях заряженных частиц высоких энергий. Строящийся в Кольцово источник синхротронного излучения СКИФ (Сибирский кольцевой источник фотонов) – первый в России источник так называемого четвертого поколения и будущая гордость Новосибирского научного центра. Он станет центром притяжения не только для всех специалистов новосибирского Академгородка, но и Сибири, России, всего мира. Синхротронное излучение электронов в рентгеновском диапазоне позволит глубоко заглянуть в структуру вещества: от биологических объектов и лекарств до горных пород и полупроводников. Благодаря очень сложной магнитной системе СКИФ будет давать пучок синхротронного излучения с уникальной яркостью, в несколько раз превосходящей как уже работающие источники подобного класса в Швеции и Бразилии, так и те, создание которых только планируется в мире



Эта публикация является авторским переводом статьи\*, опубликованной в апрельском номере *Physics Today*, главном журнале Американского физического общества. Статья была написана по заказу редакции. Причиной послужило то, что в Европе и Америке начиная с 2019 г. в сообществах ученых из разных областей науки широко обсуждаются возможные приоритеты исследований на следующее десятилетие и в более отдаленном будущем. На основании выводов, сделанных в результате обсуждений, которые могут продолжаться год-полтора из-за широкого охвата участников и мнений, финансирующие организации планируют выделить средства на фундаментальные научные исследования. Успехи во многих областях наук критическим образом зависят от ускорителей трех основных классов: коллайдеров, источников

синхротронного излучения и источников нейтронов. Поэтому состояние и перспективы физики и техники ускорителей интересуют практически всех. Англоязычная версия статьи вызвала огромный интерес, множество отзывов и даже лидировала в рейтинге популярности публикаций журнала. Я очень признателен редакции журнала «НАУКА из первых рук» за приглашение опубликовать ее на русском языке. Надеюсь, что мой рассказ и выводы будут интересны и в России, которая очень динамично начала развивать мегасайенс

\* *Reproduced from Shiltsev V. Particle beams behind physics discoveries // Physics Today. 2020. V. 73. № 4. P. 32.*  
URL: <https://doi.org/10.1063/PT.3.4452>, with the permission of the American Institute of Physics

В ночь на 30 июня 2017 г. группа физиков-ускорительщиков собралась в Центре управления ЦЕРН (CERN). Некоторые участники были из отделов и групп ЦЕРН, другие, как я, даже перелетели через океан. Нашей целью была проверка новой идеи по *коллимации* (формированию тонкого параллельно идущего потока) пучка Большого адронного коллайдера (БАК), имеющей решающее значение для грядущего улучшения самого мощного ускорителя в мире. Для изучения физики пучка БАК была назначена восьмичасовая смена. Как это часто бывает на крупных ускорительных установках, ускорительщики получают полный контроль над своими машинами полдню, чтобы минимизировать неудобства для пользователей и физиков, занимающихся детекторами частиц высокой энергией, и избежать многочисленных дневных отвлекающих факторов.

## Одна ночь из жизни физика-ускорительщика

Мы планировали получить доступ к пучку в 10:00 вечера, но из-за проблем с криогеникой коллайдера в последнюю минуту нам пришлось ждать до полуночи. Стефано Редаелли, глава группы коллимации БАК, мой давний коллега и близкий друг, планировал это исследование в течение нескольких предыдущих месяцев. Для изучения физики пучка БАК была назначена восьмичасовая смена.

В ожидании пучка мы несколько раз просмотрели подробный пошаговый план нашего эксперимента, подкрепляясь кофе из знаменитой эспрессо-кофеварки Центра управления. БАК имеет более ста *коллиматоров* – армированных волокном графитовых пластин длиной 1,2 м – для перехвата паразитных протонов (Brüning & Collier, 2007). Они защищают сверхпроводящие магниты с полем 8 Тл и другое чувствительное оборудование от повреждения даже малым числом протонов с рекордной энергией 6,5 ТэВ (что примерно в 7 тыс. раз больше, чем энергия массы покоя), которые по каким-то причинам далеко отклоняются от заданной центральной траектории. Это происходит, к примеру,

Вскоре после полуночи 30 ноября 2009 г. БАК побил новый мировой рекорд: два пучка протонов внутри ускорителя были разогнаны до энергии 1,18 ТэВ. Фото сделано в Центре контроля ЦЕРН – большом зале, где находятся четыре консоли-«островка», контролирующие Большой адронный коллайдер, протонный синхротрон и суперпротонный синхротрон в цепи впрыска коллайдера и техническую инфраструктуру ускорительного комплекса.  
© 2009 CERN

когда протоны сталкиваются либо с молекулами остаточного газа внутри вакуумной камеры, либо с пучком протонов противоположного направления в точках взаимодействия внутри одного из массивных детекторов новых элементарных частиц.

Между параллельными пластинами коллиматоров, расположенных в нескольких миллиметрах друг от друга, пролетают со скоростью света пучки протонов диаметром около 0,25 мм, чья энергия (примерно 500 МДж) сравнима с кинетической энергией летящего авиалайнера средних размеров. По сути, именно коллиматоры являются ближайшими к пучкам БАК объектами. И хотя графитовые пластины очень прочны и могут поглощать энергию рассеянных частиц, не разрушаясь, их электропроводность относительно низка, что имеет значение при очень высоких токах протонов.

После следующего крупного апгрейда БАК будет работать с гораздо более высокими токами, поэтому если коллиматоры не модифицировать, то это приведет к нестабильным поперечным колебаниям протонных пучков. План нашего ночного эксперимента заключался в том, чтобы испытать коллиматор нового типа, у которого графит был покрыт слоем материала с более высокой проводимостью толщиной 5 мкм.

Мы подготовили новый коллиматор, на поверхности которого были нанесены три параллельные полосы шириной 10 мм из карбида молибдена, нитрида титана и чистого молибдена. Помещая протонный пучок рядом с каждой из проводящих полос по очереди, мы ожидали увидеть трехкратное улучшение стабильности луча.

Получив наконец циркулирующий пучок от инжекторов БАКа, мы медленно ускоряли его в течение 20 мин, пока не достигли рабочей энергии 6,5 ТэВ. Потом происходило самое интересное. Перемещая протонные пучки относительно каждой из проводящих полос, мы наблюдали за изменениями частоты поперечных колебаний пучков, чтобы определить наилучшую последовательность действий. Затем начались плановые испытания, которые закончились лишь к 5 ч утра.

С нетерпением рассмотрев предварительные результаты наших измерений, мы убедились, что пучок протонов был наиболее устойчивым вблизи полосы чистого молибдена, имеющего лучшую электрическую проводимость.

Уже в 7 ч утра я вылетел обратно в Чикаго. В течение следующих нескольких месяцев собранные данные были проанализированы, сравнены с компьютерными моделями, представлены на крупной международной конференции и опубликованы. Главное, что наш подход оказался жизнеспособным, коллиматоры с покрытием из молибдена были одобрены в рамках проекта по увеличению светимости БАК, который планируется реализовать к 2026 г.



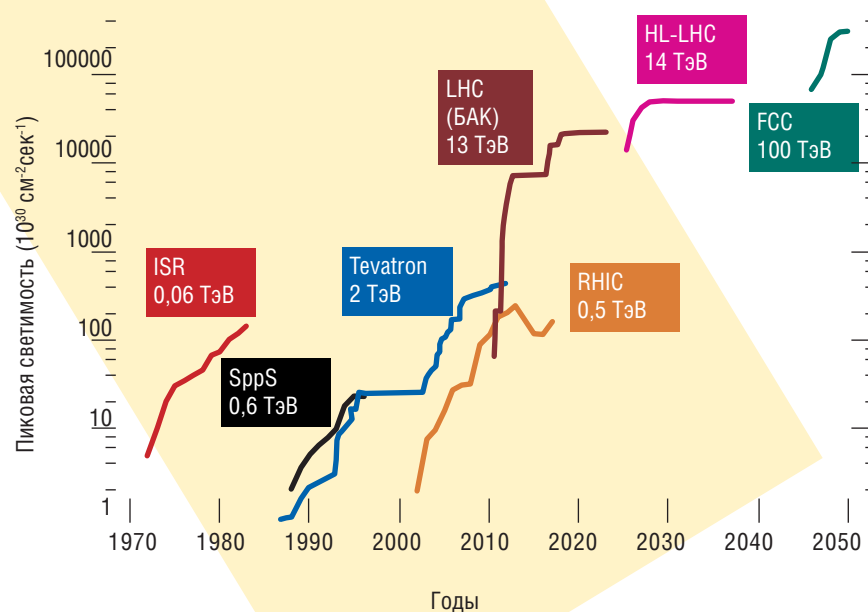


Светимость коллайдера количественно определяет его способность рожать новые частицы посредством высокоэнергетических столкновений. Скорость производства частиц, представляющих интерес, является производением светимости и поперечного сечения для реакции рождения частицы. Для получения высокой светимости обычно требуется сжать пучки высокой интенсивности в маленький поперечный размер в месте столкновений.

Значения светимости приведены для протон-протонных и протон-антипротонных коллайдеров.

По данным автора

Для справки: при рабочей светимости БАК в 2019 г. столкновения двух протонных пучков с энергией 6,5 ТэВ приводили к рождению примерно одной частицы Хиггса каждую секунду внутри детекторов ATLAS и CMS



ISR — первый в мире адронный коллайдер, ЦЕРН  
 SppS — суперпротонный синхротрон, ЦЕРН  
 Tevatron — кольцевой коллайдер, Фермилаб (США)  
 LHC — Большой адронный коллайдер (БАК), ЦЕРН  
 RHIC — релятивистский коллайдер тяжелых ионов, Брукхейвенская национальная лаборатория (США)  
 HL-LHC — проект модернизации БАК, ЦЕРН  
 FCC — будущий кольцевой коллайдер, ЦЕРН

## По ступенькам — к рекордам

Пока БАК, огромное подземное сооружение длиной 27 км, использующее сверхпроводящие магниты, — самый сложный научный инструмент нашего времени, но его жизненный цикл такой же, как и у его предшественников. Все ускорители сначала проектировались, строились и вводились в эксплуатацию, а затем улучшались в течение многих лет, постепенно повышая свою светимость. Такие периоды поиска путей к все более высокой светимости часто характеризуются повторяющимся циклом осознания проблем и их решений.

Так, протон-антипротонный коллайдер *Tevatron* в Фермилабе дольше всех оставался рекордсменом по энергии столкновений: с октября 1985 г. по сентябрь 2011 г. За эти четверть века было сделано более четырех десятков улучшений, касающихся физики пучков и методов ускорения, что позволило в 430 раз повысить пиковую светимость по сравнению с первоначальным расчетным значением (Holmes & Shiltsev, 2013). Эффект от некоторых из них составил 25–40%, но многие добавили всего лишь около 5%.

Многие улучшения эффективности можно провести в рабочем режиме, «на ходу» и, как правило, без

прерывания исследований по физике частиц. Но более значительные апгрейды (например, плановое увеличение светимости БАК в три раза во второй половине текущего десятилетия) требуют многих лет подготовки и долговременной остановки коллайдера для установки нового оборудования, необходимого для увеличения токов протонов и более сильной фокусировки пучков в точках взаимодействия.

Примечательно, что у всех коллайдеров есть довольно длительные периоды устойчивого экспоненциального роста светимости. Светимость самых мощных коллайдеров с 1970-х гг. до настоящего времени увеличилась в 10 тыс. раз, среднее время удвоения — приблизительно 4 года. Для сравнения вспомним *закон Мура*, согласно которому число транзисторов в микропроцессорных микросхемах удваивается каждые два года. С учетом сложности и размеров современных ускорителей такой быстрый темп развития их эффективности поражает воображение.

Люди, которые занимаются всем этим, — специалисты по физике пучков. Помимо рутинной поддержки работы ускорителя, они постоянно изобретают и внедряют

новые идеи, методы и подсистемы, а также совершенствуют уже существующие. Только в новом веке физики разработали дюжину оригинальных инструментов для высокоэнергетических адронных и электрон-позитронных коллайдеров, некоторые из них имеют странные для обычного уха названия: «краб-фокусировка», «электронные линзы», «нанопучки», «краб-резонаторы» и др.

Помимо физики элементарных частиц, ускорители являются основными инструментами фундаментальных и прикладных исследований в самых разных областях. В ускорителях движущиеся электроны высокой энергии в магнитных полях генерирует электромагнитное излучение от терагерцевых волн до рентгеновских лучей. Способность источника рентгеновского излучения исследовать атомные структуры молекул для биологических и материаловедческих исследований определяется так называемой *яркостью*. Этот показатель отражает не только интенсивность потока фотонов, но и его пространственную и угловую компактность, т. е. насколько хорошо он сфокусирован (Altarelli, Salam, 2004).

Современные источники синхротронного света в 10<sup>11</sup> раз ярче, чем те, которые используются в рентгеновских аппаратах в больницах. А лазеры на свободных электронах обеспечивают дополнительное увеличение яркости еще на десяток порядков, т. е. в 10 млрд раз. Увеличение яркости примерно в 10<sup>22</sup> раз с середины 1960-х гг. до настоящего времени соответствует среднему времени удвоения примерно в 8 месяцев — в три раза быстрее, чем для транзисторов, и в шесть раз — для светимости коллайдеров!

Причиной такого феноменального прогресса является устойчивая эволюция технологии генерации излучения релятивистских электронов. Источники синхротронного излучения первого и второго поколений использовали свет, излучаемый электронами в кольцевых ускорителях, в качестве полезного побочного продукта. Осознание его полезности пришло быстро. Только за последние два десятилетия во всем мире было построено около 40 специализированных накопительных колец третьего поколения, производящих рентгеновские лучи высокой яркости. Они используют специально разработанные магниты, называемые *ондуляторами*, которые отклоняют электроны из стороны в сторону по типу змейки, чтобы увеличить мощность электромагнитного излучения, и могут одновременно доставлять рентгеновские лучи на несколько десятков экспериментальных станций.

## УСКОРИТЕЛИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2011 г. исследователи Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США) Э. Хауссекер и А. Чао решили оценить влияние ускорителей на физическое сообщество (Haussecker & Chao, 2011). Они проанализировали все исследования по физике, удостоенные Нобелевской премии, начиная с 1939 г., когда Э. Лоуренс получил эту награду за изобретение первого современного ускорителя (циклотрона), до 2009 г. Их основной вывод: ускорители были и остаются неотъемлемой частью физических исследований. Этот вывод не изменится, если учитывать награды и 2010–2018 гг.

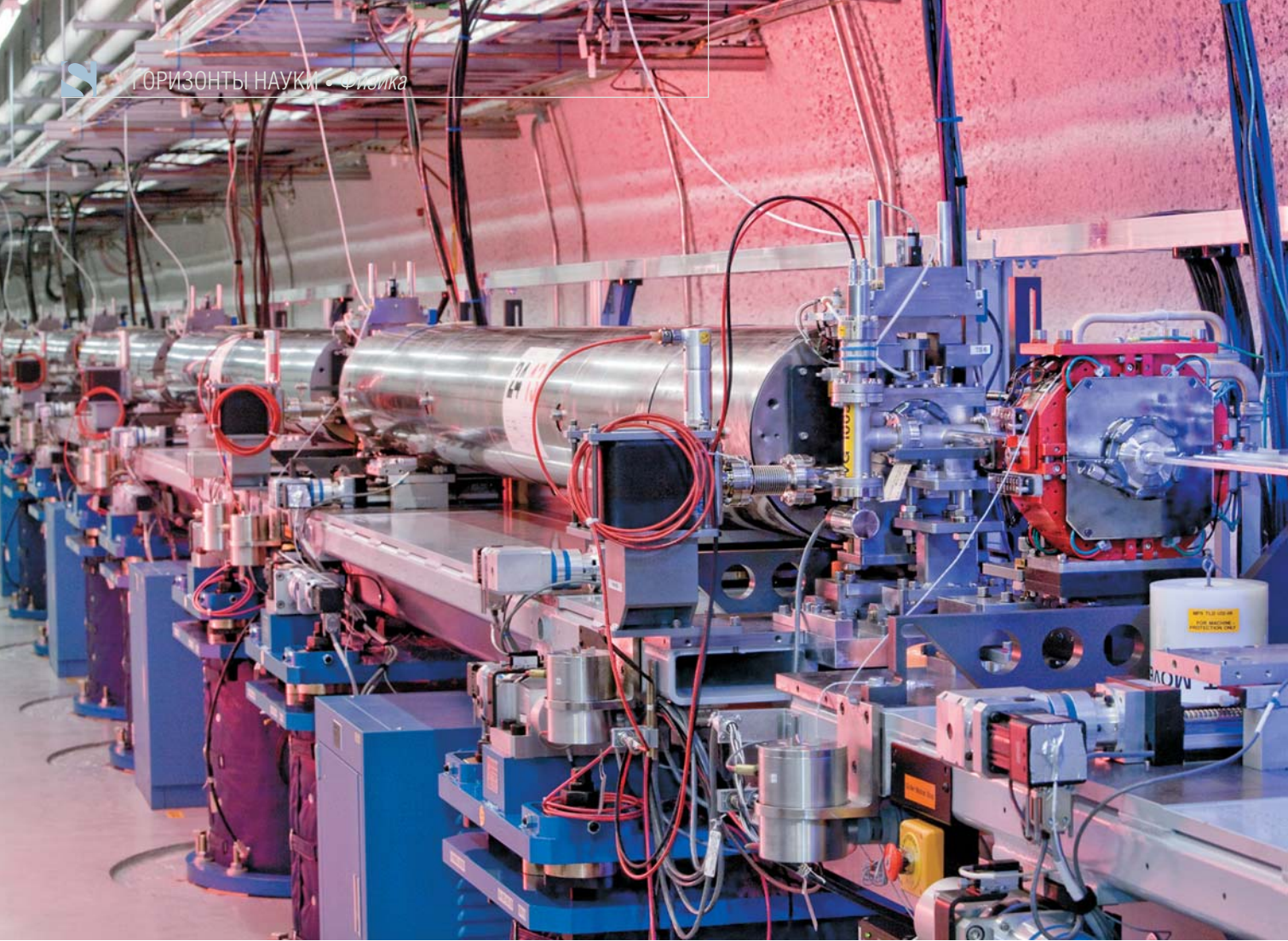
В 1939–2018 гг. ускорители использовались в работе каждого четвертого физика, исследования на ускорителях отмечались Нобелевской премией по физике каждые три года. Еще две премии за саму науку об ускорителях были вручены после Лоуренса: награду получили Д. Кокрофт и Э. Уолтон в 1951 г. за изобретение линейного ускорителя, а половина премии 1984 г. досталась С. ван дер Мееру за разработку метода стохастического охлаждения.

Еще несколько разработок были признаны мировым научным сообществом как работы нобелевского калибра. Одна из них — это открытие в 1952 г. принципа сильной фокусировки, при котором пучок заряженных частиц проходит через переменные градиенты магнитного поля, оставаясь хорошо сфокусированным. В настоящее время этот принцип используется в большинстве ускорителей. Еще одно — изобретение лазеров на свободных электронах, в частности самоусиливающихся ЛСЭ со спонтанным излучением, которое произвело революцию в рентгеновских исследованиях. К этому списку можно добавить и впечатляющие результаты по синтезу новых сверхтяжелых элементов.

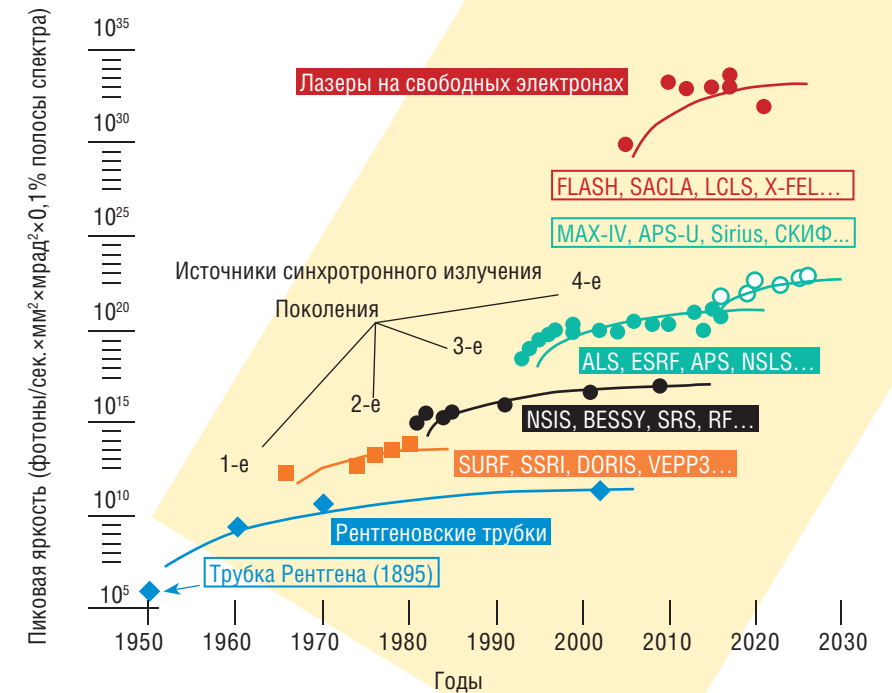
Ускорительные источники синхротронного излучения также сыграли важную роль в работе ряда лауреатов Нобелевской премии по химии: Д. Уокера (1997 г.), награжденного за раскрытие ферментативного характера синтеза АТФ в клетке; Р. Маккиннона (2003 г.), продемонстрировавшего структуру клеточных ионных каналов; Р. Корнберга (2006 г.), определившего структуру фермента РНК-полимеразы; А. Йонат (2009 г.), открывшей структуру и функции рибосомы; Б. Кобилка и Р. Лефковица (2012 г.) за изучения клеточных рецепторов, связанных с G-белком и ответственных за распознавание света, запахов и ряда гормонов.

Управление науки Министерства энергетики США является спонсором 28 пользовательских установок для фундаментальных исследований класса мегасайенс. Из них 16 — это ускорители: коллайдеры, источники света и источники нейтронов. Годовой бюджет на их эксплуатацию и строительство новых превышает 2 млрд долл. На этих установках ежегодно работает около 20 тыс. пользователей из академических, промышленных и государственных лабораторий. Около 400 ученых и студентов проводят исследования в области физики пучков на десятке специализированных исследовательских ускорителей и центров





За годы, прошедшие с открытия В. Рентгеном рентгеновских лучей в 1895 г., пиковая яркость источников вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения значительно возросла. Источники синхротронного излучения первого, второго, третьего и четвертого поколений базируются на электронных кольцевых ускорителях-накопителях. Основным элементом лазеров на свободных электронах являются сверхточные линейные ускорители электронов. По: (Eberhardt, 2015; с изменениями)



**Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) – это новое слово в науке, так как мощность электромагнитного излучения в нем превосходит все другие источники в миллиард раз. Сложность в создании таких лазеров в том, что для усиления рентгеновского излучения нельзя использовать обычный оптический резонатор: в случае ЛСЭ излучение генерируется за один-единственный пролет электронов высокой энергии. Еще в 1947 г. советский физик В. Л. Гинзбург предложил использовать для усиления интенсивности излучения заряженной частицы периодическое магнитное поле. Но само устройство для этого – ондулятор, обеспечивающий движения электронов по волнистой траектории вдоль продольной оси, – был создан намного позже. Метод был предложен в 1980 г. сотрудниками Института ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) А. М. Кондратенко и Е. Л. Салдиным. Уехав после перестройки в Германию, Салдин убедил руководство национальной лаборатории DESY построить ускоритель-прототип, который заработал в начале 2000 г.**

эффективности (преобразования используемой энергии в энергию излучения) сейчас предлагаются схемы на основе линейных ускорителей с рекуперацией энергии, что позволит объединить преимущества схем, использующих накопительные кольца и линейные ускорители.

Когда высокоэнергетические частицы попадают в твердые или жидкие мишени, они в изобилии производят вторичные частицы (например, мюоны, нейтрино и нейтроны), которые, в свою очередь, могут использоваться в таких приложениях, как мюонная спектроскопия, физика нейтрино и рассеяние нейтронов. Интенсивность потока вторичных частиц пропорциональна мощности первичного пучка, ускоряемого циклотроном, синхротроном или линейным ускорителем. За последние десятилетия ученым удалось увеличить эту мощность примерно на три порядка, улучшив технологию и решив множество проблем, связанных с конечным временем жизни мишеней, опасными неконтролируемыми потерями частиц и др.

## Прогресс технологий

В середине XX в. произошла «ускорительная» революция: ускорители стали способны генерировать пучки с энергией частиц, превышающей на несколько порядков ту, что достижима в ядерных реакциях и лазерах (Sessler & Wilson, 2008). Тем не менее рекорды по энергии пучков росли существенно медленнее, чем по мощности, светимости или пиковой яркости.

Самые высокие энергии сталкивающихся частиц выросли с примерно 60 ТэВ в начале 1970-х гг. (на ускорителе пересекающихся накопительных колец SPS в ЦЕРН) до 13 ТэВ в 2019 г. (на БАК), что дает среднее время удвоения этой величины около 6 лет. Основной причиной такого относительно медленного прогресса энергии ускорителей является их стоимость, которая сильно зависит от используемых технологий.

Стоимость и доступность ускорителей определяют и их спектр: из более чем 30 тыс. ускорителей, действующих по всему миру, 99% относительно малы и работают с пучками низкой энергии. Они используются для коммерческого производства радионуклидов и радиофармацевтических

Яркость источника излучения может быть увеличена в десятки раз за счет уменьшения размера электронного пучка в накопителе. За последнее десятилетие физики-ускорительщики разработали многочисленные усовершенствования, такие как ультрасовременные сверхпроводящие ондуляторные магниты, новые системы для стабилизации орбит пучка вплоть до нескольких нанометров.

Одно из впечатляющих недавних изобретений – *многоровотная ахроматическая фокусирующая оптика* (она, кстати, будет использоваться и в SKIF), которая оптимизирует расположение и силу дипольных, квадрупольных и секступольных магнитов, задающих траекторию и размер пучка. Такая оптика может сделать размеры электронного пучка и угловые расхождения настолько малыми, что фазовое пространство излучаемых фотонов будет ограничено только дифракцией. Соответственно, на два-три порядка увеличивается и яркость источников четвертого поколения (также известных как *накопительные кольца, ограниченные дифракцией*) по сравнению с предыдущими.

Самым последним революционным достижением в производстве излучения стало самоусиливающееся

Ондулятор из 33 магнитов, отклоняющих проходящий электронный пучок на рентгеновском лазере, работающем в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США).

© SLAC National Accelerator Laboratory

спонтанное излучение в рентгеновских *лазерах на свободных электронах (ЛСЭ)\**. ЛСЭ используют пучки электронов из линейных ускорителей. Их более высокая яркость по сравнению с источниками на основе накопительного кольца обусловлена чрезвычайно короткими и интенсивными световыми импульсами, которые генерируются короткими и очень плотными сгустками релятивистских электронов, проходящих через переменное магнитное поле в длинной линейке ондуляторов и когерентно накачивающих их собственное излучение. Для увеличения энергетической

\* Кулипанов Г. Н. От субмиллиметрового – к рентгеновскому // НАУКА из первых рук. 2012. № 6(48). С. 16; Шильев В. Д. Русские корни рентгеновского лазера // НАУКА из первых рук. 2012. № 6(48). С. 15.



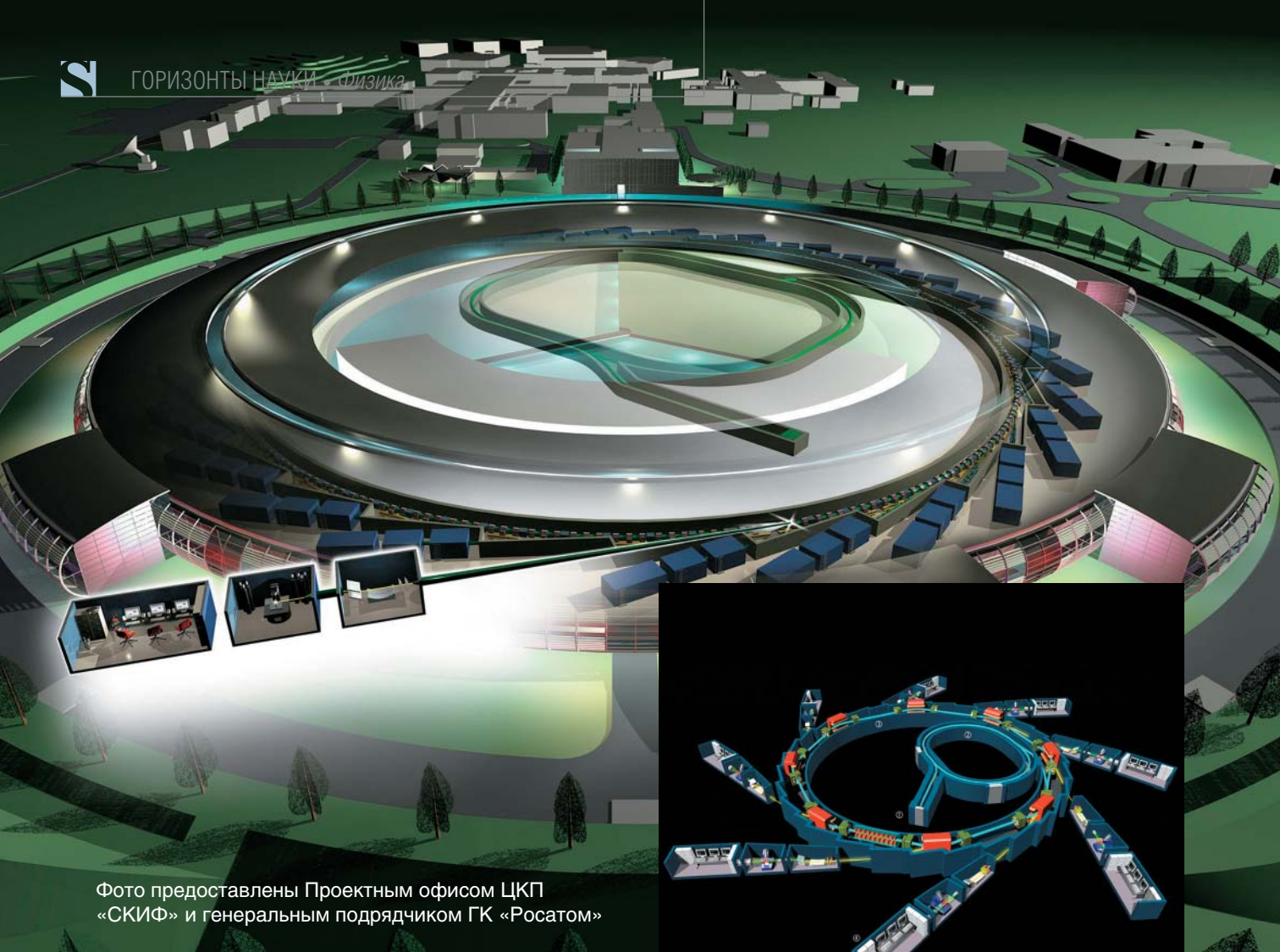


Фото предоставлены Проектным офисом ЦКП «СКИФ» и генеральным подрядчиком ГК «Росатом»

### ДА БУДЕТ СКИФ!

ЦКП «СКИФ» – Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов». Эта установка класса мегасайенс, не имеющая мировых аналогов по выходным параметрам, строится в новосибирском наукограде Кольцово. Проект был разработан Институтом ядерной физики, Институтом катализа и другими организациями СО РАН, РАН и Минобрнауки РФ.

Основа ЦКП «СКИФ» – ускорительный комплекс, источник синхротронного излучения поколения 4+ с энергией электронов в 3 ГэВ. Периметр основного ускорителя СКИФ составит 476 м, его кольцо будет разделено на 18 элементов, состоящих из поворотных и прямолинейных частей: в них будут встроены устройства для генерации СИ, которое пойдет на пользовательские станции. Установка способна генерировать излучение с энергией фотонов от 1 до 100 килоэлектронвольт.

Уже стартовали работы по проектированию и комплексным инженерным изысканиям для СКИФ, идет отработка технологий создания элементов ускорительного комплекса.



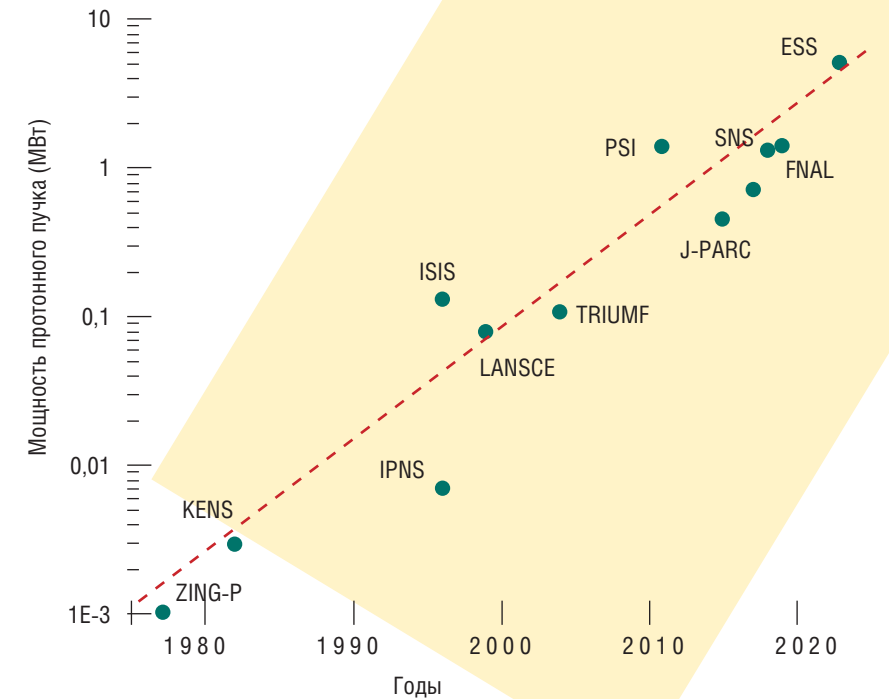
Так, в ИЯФ СО РАН разработан стенд одного из элементов инжектора, в котором будет происходить первоначальное ускорение электронов. В создании установки принимают участие специалисты из различных научных и производственных коллективов не только Новосибирска, но и Томска, Красноярска, Москвы, Калининграда, Екатеринбурга. Строительство должно завершиться к концу 2023 г., а запуск первой очереди – 6 из 30 экспериментальных станций – планируется в 2024 г. Предполагаемая общая стоимость проекта – около 37 млрд руб. На новой установке будут идти работы в области промышленных технологий, включая глубокую переработку сырья; биомедицинских технологий, в том числе направленного дизайна новых лекарственных препаратов и средств их доставки, изучения механизма патогенеза особо опасных инфекционных заболеваний; создания возобновляемых источников энергии и получения новых материалов; исследования художественных ценностей, археологических, палеонтологических находок и т. п.

Рекордная мощность пучка в ускорителях протонов значительно возросла за последние несколько десятилетий. Пунктирная линия соответствует времени удвоения мощности, равному четырем годам. По: (Lindroos et al., 2013)

препаратов, ионной имплантации, генерации нейтронов, литографии, исследований материалов, приложений в полупроводниковой промышленности, а также применяются в энергетике и при защите окружающей среды.

Лишь около 60 источников рентгеновского излучения во всем мире являются исследовательскими. А коллайдеров частиц в мире вообще только семь, включая два в новосибирском Институте ядерной физики СО РАН. И только два из них имеют энергии пучка более 100 ГэВ (100 млрд эВ): релятивистский коллайдер тяжелых ионов в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) и БАК в ЦЕРН.

Ускорители рекордно высоких энергий часто стоят более 1 млрд долл., а устремления исследователей, работающих в физике частиц, требующих еще больших энергий, соответствующие установки, по оценкам, могут стоить на порядок дороже. Такие расходы становятся весьма заметными даже в масштабах национальных экономик. Для сокращения затрат принимаются все меры, включая повторное применение нынешних ускорителей в качестве инжекторов для новых, использование существующей инфраструктуры (электросетей, водоснабжения, дорог, туннелей и т. п.), а также распределение финансовой нагрузки между несколькими лабораториями или даже странами, как в ЦЕРН. Основные надежды на создание



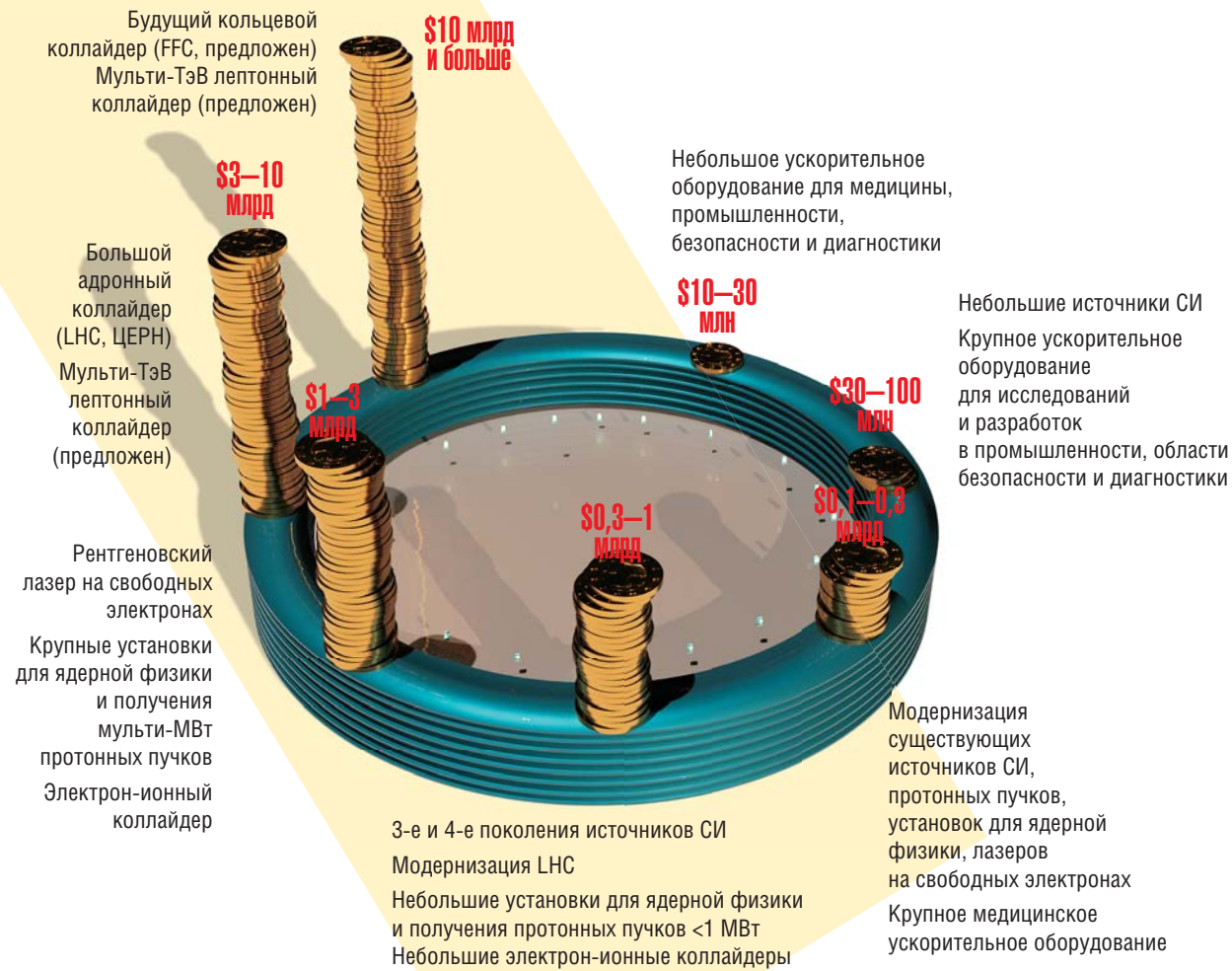
- ZING-P – Аргоннская национальная лаборатория (США);
- KENS – Национальная лаборатория высоких энергий, КЕК (Япония);
- IPNS – Аргоннская национальная лаборатория (США);
- ISIS – Национальная лаборатория Резерфорда – Эплтона (Великобритания);
- LANSCE – Лос-Аламосская национальная лаборатория (США);
- TRIUМF – Лаборатория в Ванкувере (Канада);
- PSI – Институт Пауля Шеррера (Швейцария);
- J-PARC – Исследовательский институт в Токае (Япония);
- SNS – Национальная лаборатория Ок-Ридж (США);
- FNAL – Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (США);
- ESS – Европейский источник нейтронов (Швеция)

новых больших установок прямо связаны с улучшением их технологических характеристик и снижением стоимости, в идеале – с обоими этими показателями.

Основные современные ускорительные технологии включают теплые и сверхпроводящие магниты, а также теплые и сверхпроводящие радиочастотные резонаторы для ускорения частиц. Магниты фокусируют либо изгибают пучки в кольцевых ускорителях, а быстро изменяющиеся во времени высокочастотные электрические поля в радиочастотных полостях нужны для ускорения заряженных частиц. Туннели, электрическая инфраструктура и другие технические подсистемы могут быть довольно дорогими. Однако в полной стоимости строительства ускорителей пучков высоких энергий и больших мощностей обычно доминирует именно цена главных компонентов ускорителя – магнитов и ВЧ-структур.

За последние четверть века сообщество ускорительщиков успешно работало над снижением стоимости основных технологий. Максимальные магнитные поля в работающих ускорителях выросли с примерно 4 до 12 Тл, это означает, что вместо трех магнитов можно теперь обойтись одним. Ускоряющие электрические поля достигли рекордных максимумов,





увеличившись в три раза или более: до более чем 30 МВ/м в сверхпроводящих ВЧ-резонаторах и 100 МВ/м в теплых структурах с нормальной проводимостью, работающих при комнатных температурах.

Без улучшений магнитных и радиочастотных технологий затраты росли бы линейно с энергией пучка  $E$ , однако стоимость современных больших ускорителей увеличилась пропорционально примерно корню из  $E$  (Shiltsev, 2014). Тем не менее спрос на пучки со все более высокими энергиями опережает прогресс традиционных ускорительных технологий, поэтому исследователи продолжают искать и разрабатывать новые идеи и технологические решения.

## Наука о пучках

Сегодня около 5 тыс. ученых и инженеров-ускорительщиков работают в более чем 50 странах мира и сотрудничают с примерно в три раза большим числом технических экспертов. Несмотря на то что большинство из нас глубоко вовлечены в каждодневную работу

Стоимость ускорителя или его крупной модификации во многом зависит от масштаба установки и технологий, лежащих в ее основе. Она может варьировать от десятков миллионов долларов для небольших медицинских установок до десятков миллиардов для будущих коллайдеров, энергия которых превзойдет Большой адронный коллайдер. По данным автора. Идея рисунка Д. Падиан (Shiltsev V. Particle beams behind physics discoveries // Physics Today. 2020. V. 73. № 4. 32 p.)

и постоянные обновления своих установок, карьера ученого-ускорительщика включает в себя проектирование и строительство новых машин, исследования в области физики пучков, разработку важных технических компонентов и руководство проектами. К этому надо добавить передачу технологий в промышленное применение, обучение и подготовку следующего поколения экспертов по ускорителям, а также распространение знаний о наших достижениях в широких научных кругах и обществе в целом.

За последние 20 лет физика пучков превратилась в отдельную научную дисциплину со своим собственным предметом исследований и методами обучения. Ежегодно проходит серия международных конференций по ускорителям частиц, в которых участвуют около 1,5 тыс. человек, а также почти две дюжины других регулярно проводимых конференций и семинаров по всем важным темам, начиная от компьютерного моделирования до технологий ускорителей. Есть и специализированные рецензируемые журналы, ведущий из которых, *Physical Review – Accelerators and Beams*, отметил в 2018 г. свое двадцатилетие.

Каждый год несколько тысяч человек (около 1400 человек в Европе и 400 в США) проходят подготовку по физике и технике ускорителей (Barletta, Chattopadhyay, Seryi, 2012). Такую подготовку обеспечивают около 40 академических программ в университетах по всему миру, в том числе по дюжине в США и Европе. В этой связи нельзя не упомянуть и выдающуюся новосибирскую школу подготовки, базирующуюся в Новосибирском государственном университете и ИЯФ СО РАН.

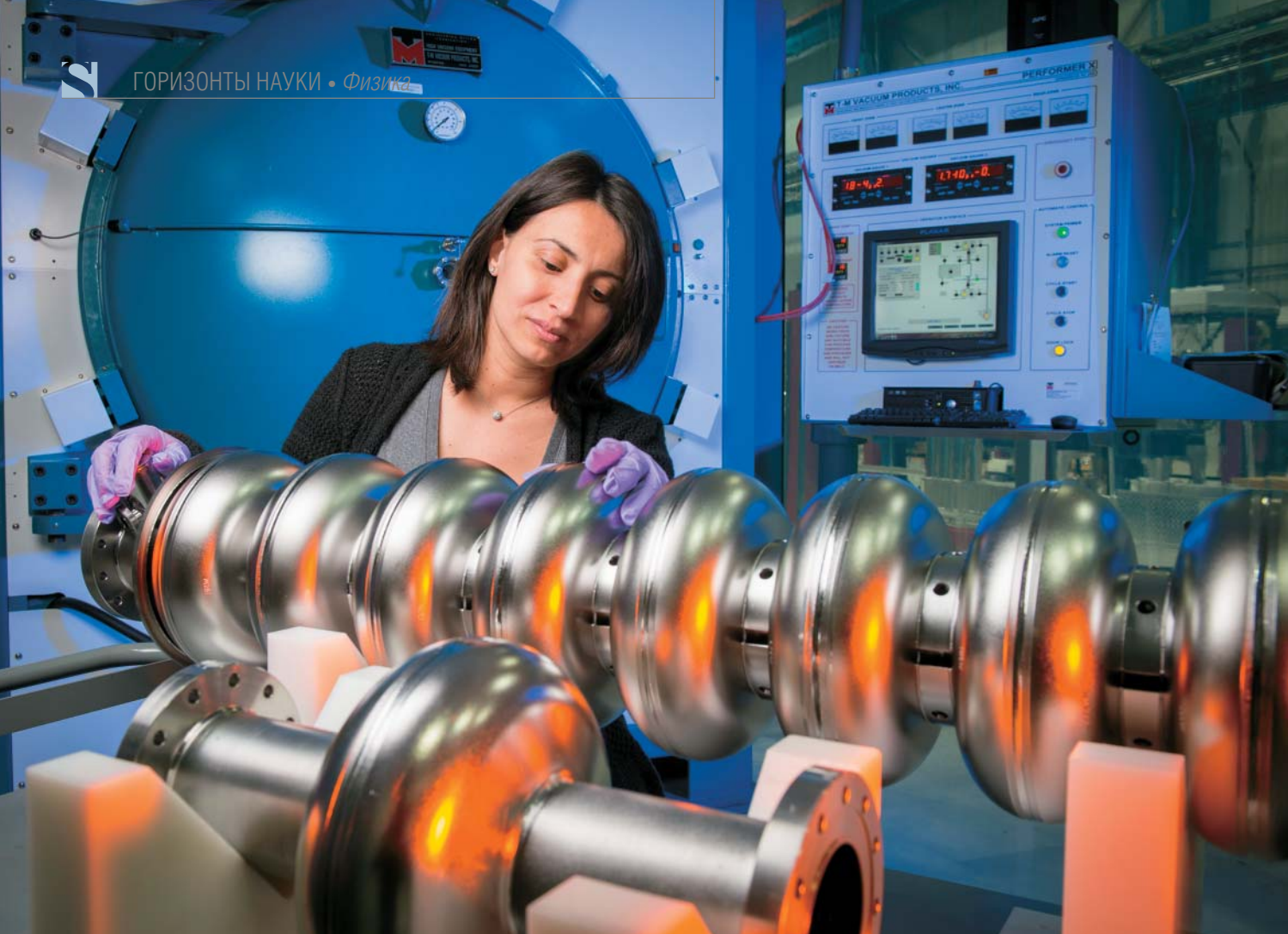
Обучение физиков и инженеров-ускорительщиков также включает в себя практику на рабочем месте, которая дополняется интенсивными курсами в рамках таких программ, как школы по ускорителям в США, ЦЕРН и Дубне. Приблизительно сотня специалистов ежегодно получает степени кандидатов и докторов наук в области физики ускорителей и пучков.

Ученые-ускорительщики широко представлены во многих научных обществах, советах и группах по всему миру. Так, рабочая группа

В Европейском центре синхротронного излучения (ESRF, Франция) проводится модернизация всех систем основного кольца ускорителя – электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ, что позволит увеличить яркость источника СИ в 30 раз. В Институте ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск) разработали и изготовили для ESRF 66 октапольных магнитов, предназначенных для коррекции нелинейного движения пучка электронов. На фото на переднем плане – октапольный магнит на специальном столе-гирдере, где идет сборка магнитной системы. Вес магнита 200 кг, гарантийный срок службы – десятки лет. Фото С. Гурова (ИЯФ СО РАН)







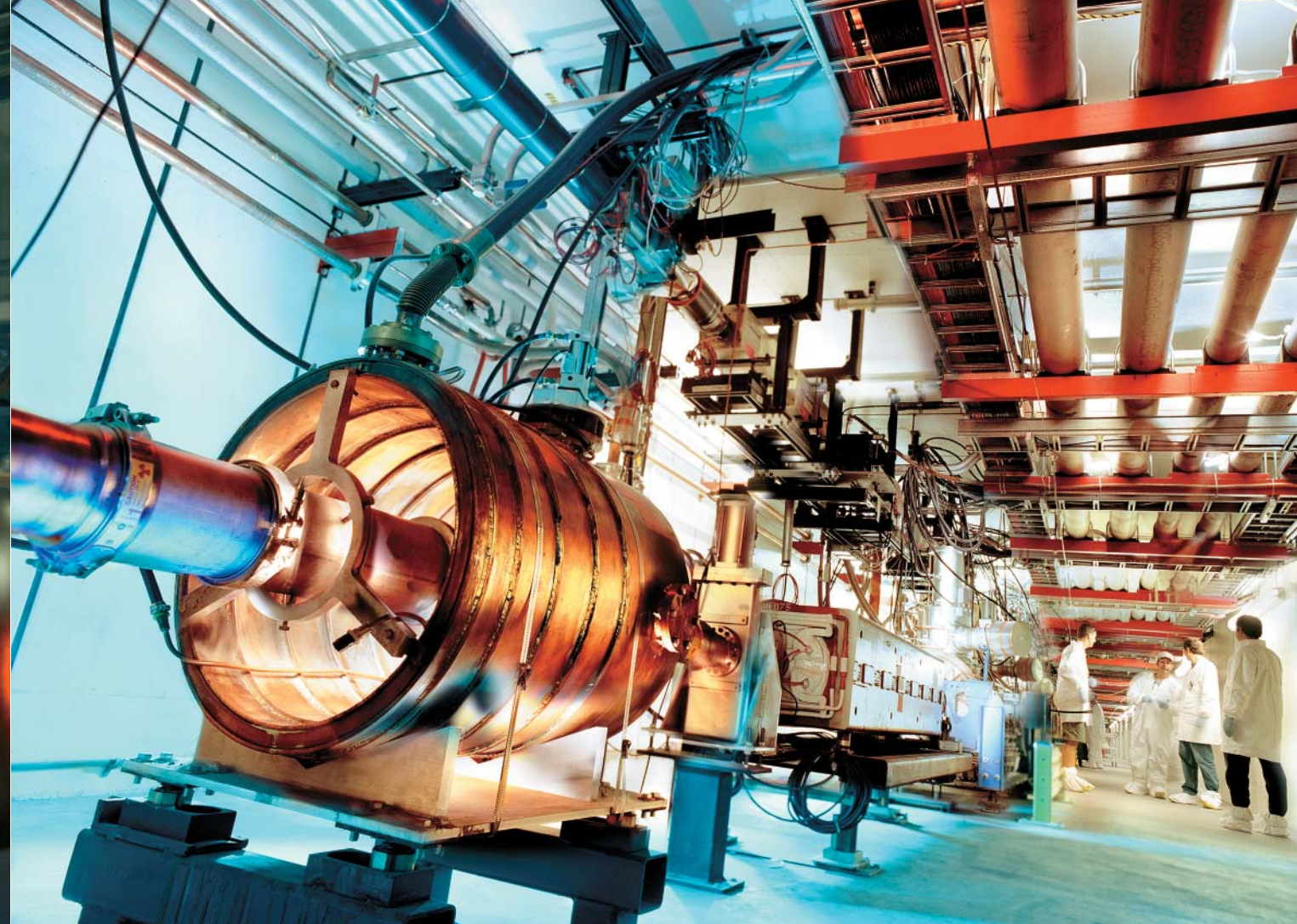
14 Международного союза теоретической и прикладной физики (UIPAP) содействует обмену информацией и мнениями между членами сообщества ускорителей с 2015 г., а Международный комитет по будущим ускорителям (ICFA) – сотрудничеству в области создания и использования ускорителей на высокие энергии с 1976 г.

В США финансирование исследований и разработок по физике пучков и техники в области ускорителей составляет примерно 120 млн долл. в год, поступающие в основном от Управления науки Министерства энергетики США, которое ведет программы по физике высоких энергий, фундаментальным энергетическим наукам и ядерной физике, а также от Национального научного фонда (NSF). На сегодняшний день крупнейшим спонсором является Программа по физике высоких энергий: около 5% ее годового бюджета направляется на общие исследования и разработки ускорителей. Крупные специализированные исследовательские центры по физике пучков имеются и в больших национальных лабораториях, таких как *Fermilab*, *SLAC*, Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли (*Lawrence Berkeley*) и др., а также в нескольких университетах, включая

Ускоряющие структуры на основе сверхпроводящих радиочастотных резонаторов – это технология выбора для ускорителей частиц нового поколения. С их помощью можно понизить энергетические затраты на ускорение частиц пучка и улучшить его динамику, а также работать в непрерывном режиме при относительно высоком градиенте ускоряющего поля. *Фото Р. Хана. © Fermilab*

Корнелльский, Мичиганский и Университет Мэриленда. Их установки играют ключевую роль в развитии науки о пучках.

Самой большой проблемой для физиков-ускорителей является разработка технологий получения пучков рекордных энергий. Проблема в том, что если бы мы использовали лишь существующие технологии, то стоимость строительства коллайдеров с существенно более высокой энергией, чем тот же БАК, была бы непомерно высокой. Мы вряд ли найдем деньги или такое место на Земле, где труд, земля и сырье достаточно дешевы, чтобы использовать принцип «чем больше ускоритель, тем лучше».



Главный инжектор *Tevatron* – двухмиллиметровая «беговая дорожка» для протонов, самый мощный действующий ускоритель частиц в Фермилабе – поставляет пучки протонов для различных экспериментов по физике элементарных частиц и испытательного стенда. Благодаря недавним улучшениям ускорительный комплекс Фермилаб производит 750-киловаттные протонные пучки, используемые для рождения самого высокоэнергетического потока нейтрино в мире, и интенсивного потока мюонов. *Фото П. Гинтера. © Fermilab*

Вместо этого мы ведем разработки по нескольким направлениям. Один из подходов заключается в использовании традиционных сверхпроводящих магнитов и радиочастотных резонаторов для ускорения нетрадиционных частиц, а именно мюонов. В отличие от протонов, в которых энергия распределена между составляющими их кварками и глюонами, мюоны являются точечными частицами, отдающими в столкновениях все 100% своей энергии для рождения новых частиц.

Соответственно, энергия центра масс в мюон-мюонных столкновениях будет в 6–10 раз больше, чем

в протон-протонных при той же энергии пучка. Поэтому мюонный коллайдер на 14 ТэВ (что номинально является энергией в системе центра масс для БАК) будет приблизительно эквивалентен адронному коллайдеру на 100 ТэВ. Циклические электрон-позитронные коллайдеры при таких энергиях нецелесообразны, потому что легкие частицы теряли бы огромную энергию в виде синхротронного излучения. Но гораздо более тяжелые мюоны, имеющие массу в 207 раз больше, чем у электронов, свободны от этих проблем.

Мы разрабатывали эту стратегию в течение последних 20 лет и в настоящее время доказали концептуальную осуществимость мюонного коллайдера для сверхвысоких энергий. В 2019 г. был экспериментально продемонстрирован ключевой метод – ионизационное охлаждение мюонов. Прежде чем мы сможем окончательно убедиться в технической и экономической осуществимости такого коллайдера, придется, безусловно, решить еще много проблем, связанных, например, с эффективным и экономичным производством мюонных пучков высокой яркости. Но сама эта идея является очень многообещающей и стоит всех усилий.





Менее революционный подход, который также имеет определенные перспективы, – это продолжать совершенствовать уже существующие технологии. Предполагая, что пучки рекордных энергий следующего поколения появятся через 15–20 лет, а скорость нашего технологического прогресса не замедлится, мы можем таким образом удвоить или даже утроить рекорды по энергии частиц. Например, уже есть идеи, как создавать магниты с полем 20–24 Тл при помощи высокотемпературных сверхпроводников или как получить темпы ускорения 60–90 МВ/м используя сверхпроводящие ВЧ-резонаторы новых типов и материалов. Конечно, нужно экспериментально подтвердить потенциал таких технологий, чтобы понять, насколько новые машины станут с их помощью осуществимыми и доступными. Этим разработкам будет способствовать наше многолетнее сотрудничество со специалистами в физике твердого тела и промышленных технологий.

Одним из самых значительных достижений может стать новая технология ускорения частиц плазменными волнами, которые возбуждаются либо лазерами, либо пучками частиц. За последние 25 лет эта область развивалась и расширялась благодаря наплыву методов и идей от ученых, работающих в области плазмы и лазеров (Seryi, 2015). Так, за работы в этих смежных областях Ж. Муру и Д. Стрикленд были удостоены Нобелевской премии по физике в 2018 г. За эти десятилетия мы стали свидетелями того, что прирост энергии электронов, ускоряемых в плазменной ячейке

Электрон-позитронный коллайдер SuperKEKB построен в Японии Организацией по изучению высокоэнергетических ускорителей (КЕК). Официально запущен 26 апреля 2018 г. 2019 г. © КЕК

длиной 1 м, увеличился с нескольких мегаэлектронвольт до 9 ГэВ, со временем удвоения энергии около 2,5 лет (Joshi *et al.*, 2018).

В то же время исследователи стали лучше понимать, что требуется для создания коллайдера на основе плазменного ускорения. В настоящее время научно-исследовательская работа в области ускорения плазмы направлена не столько на разработку рекордных ускоряющих градиентов, сколько на решение более обыденных, но важных вопросов. К ним относятся эффективность использования энергии, многостадийное ускорение, сохранение высокой яркости и энергии в пучках электронов и позитронов, проходящих через плотную плазму, разработка экономичных драйверов (возбудителей) плазменных волн.

Мы еще не создали надежную техническую конструкцию для доступного электронно-позитронного плазменного коллайдера на энергию более 1 ТэВ и высокую светимость. Однако основания для оптимизма есть: в наши дни более дюжины исследовательских групп по всему миру строят испытательные установки для систематического изучения различных вариантов и ведут эксперименты по достижению оптимальных режимов ускорения.

В январском выпуске *Physics Today* за 2001 г. директор лаборатории физики элементарных частиц Корнельского университета М. Тигнер, основополагающая и ключевая фигура современной физики ускорителей, написал статью «Есть ли будущее у физики элементарных частиц на основе ускорителей?». Он сделал много умозаключений, удивительно близких к изложенным выше, и призвал других ученых, в частности тех, кто занимается физикой элементарных частиц, помочь изучить новые идеи и повысить экономическую эффективность наших ускорителей.

Отвечая сейчас на вопрос, вынесенный в заголовок его статьи, мы можем точно сказать – да, будущее есть, и мы быстро движемся в правильном направлении. Физика пучков развилась в отдельную научную дисциплину, и сообщество ускорительщиков гордится своими достижениями: источниками синхротронного излучения четвертого поколения, рентгеновскими лазерами на свободных электронах, протонными пучками с мегаваттной мощностью, современными источниками нейтронов и нейтрино и др. Мировые рекорды были установлены по всем параметрам ускорителей, так как возможности основных технологий удвоились или даже утроились. Увеличение максимальной энергии частиц было не столь значительным, но все-таки БАК расширил эту границу в семь раз по сравнению с *Tevatron*, и это привело к открытию в 2012 г. бозона Хиггса – последнего недостающего фрагмента Стандартной модели.

Множество достижений, прорывов и открытий ждут нас впереди. Совершенствование методов ускорения частиц продолжается по нескольким направлениям, включая использование экзотических частиц, таких как мюоны, разработку более совершенных магнитов и радиочастотных резонаторов, компактных ускорителей плазмы с высоким градиентом. Достижения в физике твердого тела, лазерах, плазме и физике высоких энергий, сотрудничество с экспертами в этих дисциплинах придают нам дополнительный импульс. Ускорительщики и специалисты по физике пучков уверены, что современные исследования и разработки уже в ближайшие десятилетия приведут к созданию более эффективных и экономичных исследовательских установок на основе пучков заряженных частиц.

Автор благодарит М. Арена, Д. Денисова, П. Гарбинсуса, Х. О'Коннелла, Ц. Цина и Ф. Циммермана за их советы и полезные обсуждения при подготовке статьи

*Lumepamypa*

Altarelli M., Salam A. *The quest for brilliance: light sources from the third to the fourth generation* // *Europhys. News*. 2004. V. 35. N. 2. P. 47–50.

Barletta W., Chattopadhyay S., Seryi A. *Educating and Training Accelerator Scientists and Technologists for Tomorrow* // *Rev. Accel. Sci. Technol.* 2012. V. 5. P. 313–331.

Brüning O., Collier P. *Building a behemoth* // *Nature*. 2007. V. 448. P. 285–289.

Eberhardt W. *Synchrotron radiation: A continuing revolution in X-ray science—Diffraction limited storage rings and beyond* // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 2015. V. 200. P. 31.

For more on accelerator-based light sources worldwide, see [www.lightsources.org](http://www.lightsources.org).

Haussecker E. F., Chao A. W. *The Influence of Accelerator Science on Physics Research* // *Phys. Perspect.* 2011. V. 13. N. 146.

Holmes S. D., Shiltsev V. D. *The Legacy of the Tevatron in the Area of Accelerator Science* // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2013. V. 63. P. 435–465.

Joshi C., Adli E., An W. *et al. Plasma wakefield acceleration experiments at FACET II* // *Plasma Phys. Control.* 2018. V. 60. N. 3. 14 p.

Lindroos M. *et al., In Elementary Particles: Accelerators and Colliders* // eds. S. Myers, H. Schopper // Springer. 2013. 514 p.

Seryi A., *Unifying Physics of Accelerators, Lasers and Plasma* // CRC Press. 2015. 288 p, 267 B/W Illustrations.

Sessler A., Wilson E., *Engines of Discovery: A Century of Particle Accelerators* // World Scientific, Hackensack, New Jersey. 2008. 194 p.

Shiltsev V. *A phenomenological cost model for high energy particle accelerators* // *J. Instrum.* 2014. V. 9. T07002.