НОВЫЕ СПОСОБЫ СТАЛКИВАТЬ ЧАСТИЦЫ

Чтобы достичь новых пределов фундаментальной физики, ученые должны создать еще более мощные ускорители элементарных частиц

Чандрашекхар Джоши

Illustration by Peter and Maria Hoey

ОБ АВТОРЕ

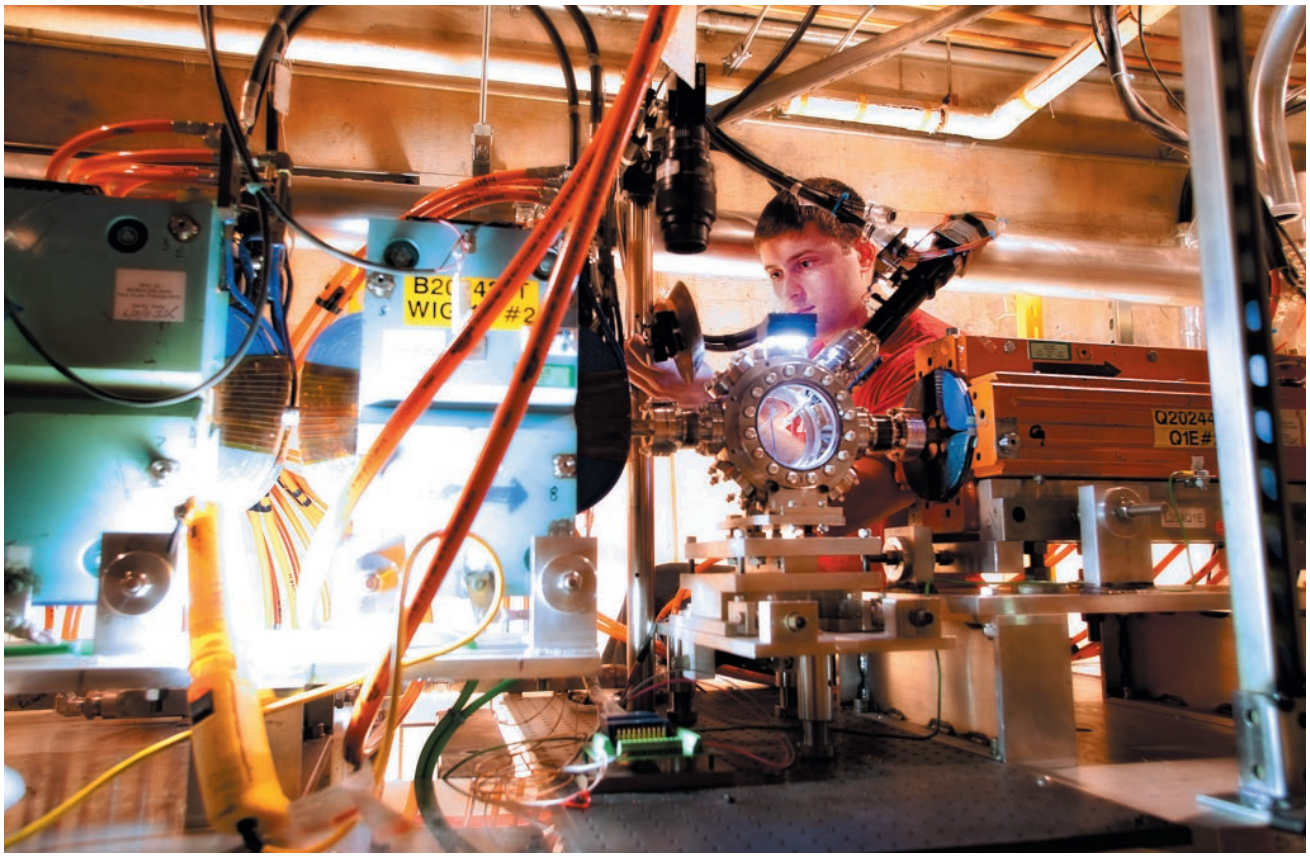
Чандрашекхар Джоши (Chandrashekhar Joshi) — заслуженный профессор электротехники Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, где он возглавляет Группу лазерной плазмы, лауреат премии им. Джеймса Клерка Максвелла Американского физического общества в области физики плазмы.

В начале XX в. ученые мало что знали о строительных кирпичиках, из которых состоит наш физический мир. К концу века они открыли не только все элементы, составляющие фундамент всей наблюдаемой материи, но и множество еще более фундаментальных частиц, из которых состоят наш космос, наша планета и мы сами. И инструмент, позволивший совершить эту революцию, — ускоритель элементарных частиц.

Вершина достижений ускорителей элементарных частиц пришлась на 2012 г., когда на Большом адронном коллайдере (БАК) была обнаружена долгожданная частица — бозон Хиггса. БАК — это 27-километровое кольцо ускорителя *CERN*, расположенное недалеко от Женевы, в котором сталкиваются два пучка протонов с энергией 7 трлн эВ (ТэВ) каждый. Это самый большой, самый сложный и, пожалуй, самый дорогой научный объект из когда-либо созданных. Бозон Хиггса был последним звеном господствующей теории физики элементарных частиц, называемой Стандартной моделью. Тем не менее за почти десять лет, прошедших со времени этого открытия, ни это устройство, ни какой-либо другой ускоритель не обнаружили ни одной новой частицы.

Неужели мы нашли все частицы, которые было необходимо найти? Сомнительно. Стандартная модель физики элементарных частиц не объясняет темную материю — частицы, которых во Вселенной много, но они невидимы. Популярное расширение Стандартной модели, называемое суперсимметрией, предсказывает гораздо больше частиц, чем нам известно. Есть у физиков и другие остающиеся без ответа глубинные вопросы, например: существуют ли дополнительные измерения пространства и почему в наблюдаемой Вселенной большой дисбаланс материи и антиматерии? Чтобы разгадать все эти загадки, нам, вероятно, понадобится более мощный коллайдер, чем те, которые есть в нашем распоряжении сегодня.

Многие ученые поддерживают план создания Международного линейного коллайдера (МЛК) — ускорителя, вытянувшегося вдоль прямой, в котором частицы будут сталкиваться с энергией 250 млрд эВ (или 250 ГэВ). Хотя МЛК не такой мощный, как БАК, в нем электроны будут сталкиваться с их двойниками из антивещества, позитронами; и те и другие — фундаментальные частицы, столкновения которых, как ожидается, позволят получить гораздо более четкие данные, чем столкновения протонов с протонами в БАК. К сожалению, конструкция МЛК предполагает необходимость строительства объекта длиной около 20 км и, как ожидается, стоимость его составит более $10 млрд —



***Ученый** проводит испытания прототипа плазменного ускорителя на Установке для испытаний перспективных ускорителей (FACET) Национальной ускорительной лаборатории SLAC в Калифорнии*

BRAD PLUMMER AND SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

цена настолько высока, что ни одна страна пока не взяла на себя обязательство разместить его на своей территории.

Между тем есть планы повысить энергию БАК до 27 ТэВ в существующем туннеле за счет увеличения силы сверхпроводящих магнитов, используемых для изгиба траектории протонов. Помимо этого, *CERN* предлагает кольцевой электрон-позитронный и протон-протонный коллайдер с длиной окружности 100 км, получивший название «Будущий кольцевой коллайдер» (*Future Circular Collider*). Такая машина позволила бы достичь беспрецедентной энергии 100 ТэВ в протон-протонных столкновениях. Однако стоимость этого проекта, вероятно, будет такой же, как у МЛК, или еще больше. Даже если этот коллайдер и будет построен, эксперименты на нем не смогут начаться до тех пор, пока после 2035 г. БАК не завершит работу.

Но эти гигантские и дорогие машины — не единственно возможный вариант. С 1980-х гг. физики разрабатывают альтернативные концепции коллайдеров. Среди них одна, получившая название «плазменный (кильватерный) ускоритель», открывает широкие перспективы для создания коллайдера ТэВ-масштаба, более компактного и намного более дешевого, чем машины, базирующиеся на существующих методах.

Зоопарк элементарных частиц

История ускорителей элементарных частиц началась в 1897 г. в физической Кавендишской лаборатории Кембриджского университета. Там Джозеф Джон Томсон создал самую первую версию ускорителя элементарных частиц, воспользовавшись катодной трубкой, прообразом тех, которые впоследствии использовались в большинстве телевизоров до появления плоских экранов. Он открыл отрицательно заряженную частицу — электрон.

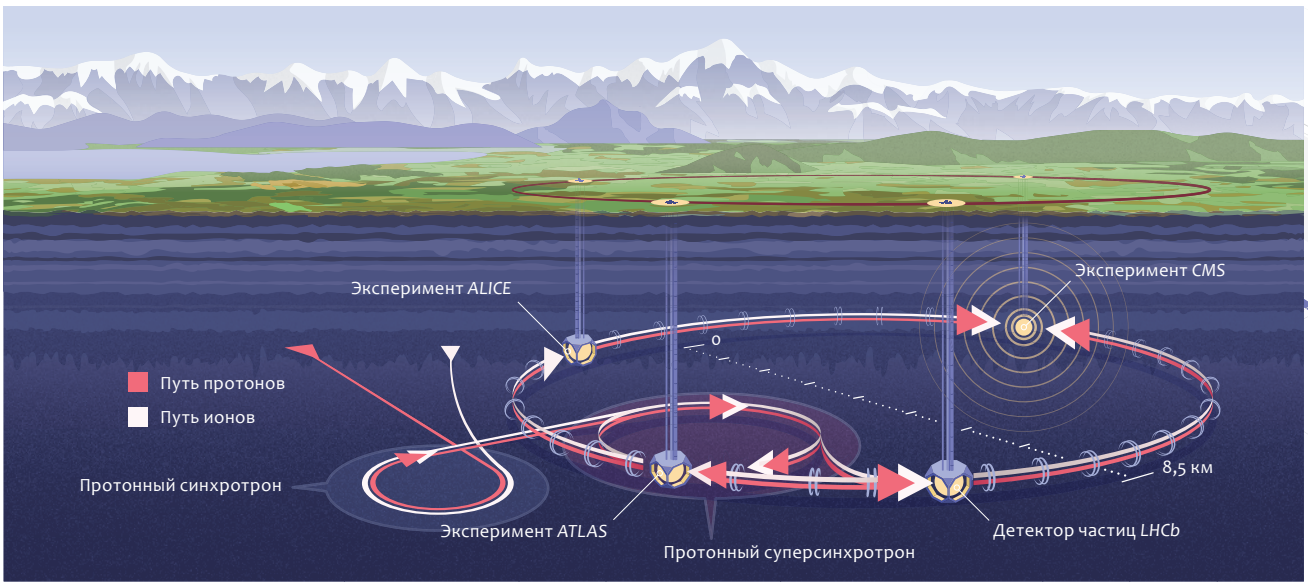
Вскоре физики установили две другие составляющие атома — протон и нейтрон, используя радиоактивные частицы в качестве снарядов для бомбардировки атомов. А в 1930-х гг. появился первый циклический ускоритель частиц — изобретенное Эрнестом Лоуренсом устройство размером с ладонь, получившее название «циклотрон»

Следующее поколение ускорителей

В большинстве ускорителей частиц, построенных на текущий момент, для генерирования электрических полей используется радио- или СВЧ-излучение, которое ускоряет заряженные частицы, чтобы затем столкнуть их друг с другом, вызвав всплеск энергии, который может породить новые частицы. Совершенная машина такого типа — Большой адронный коллайдер CERN. А некоторые физики уже предложили устройство, которое придет ему на смену, получившее название «Международный линейный коллайдер». Однако реализация этих грандиозных планов может оказаться непомерно дорогостоящей затеей. Чтобы достичь уровня энергии, необходимого для новых открытий, ученым, возможно, придется обратиться к экзотической технике, например к концепции, называемой плазменным кильватерным ускорением.

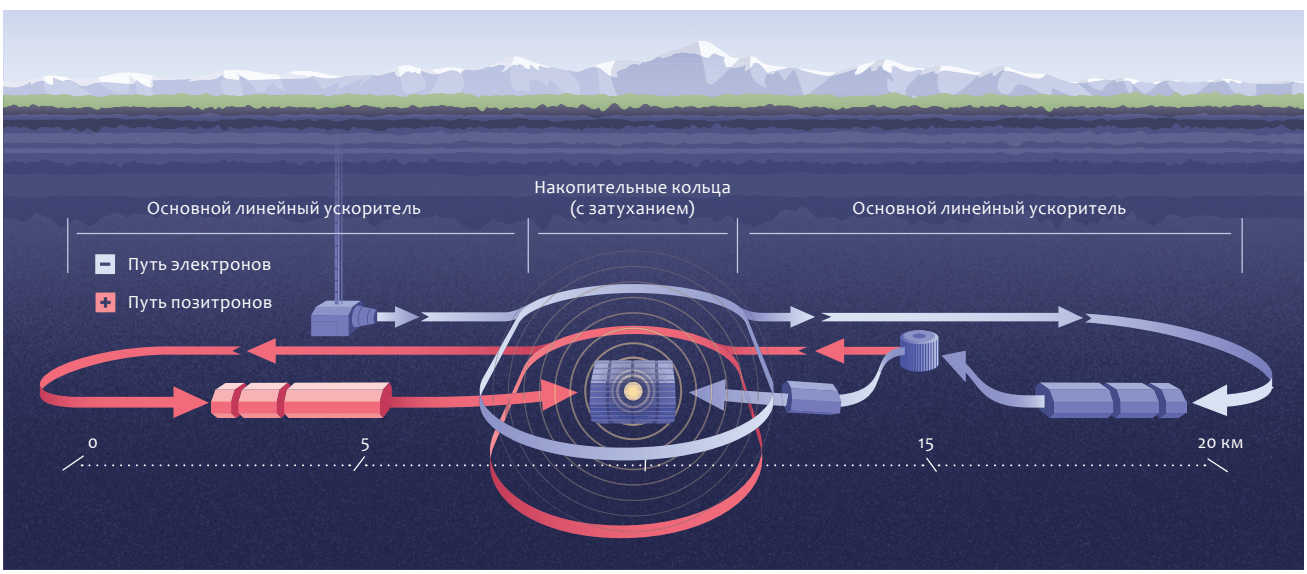
Нынешний лидер: Большой адронный коллайдер (БАК)

Это 27-километровое кольцо — самый большой и мощный из когда-либо построенных ускорителей элементарных частиц, в котором сталкиваются протоны с энергией до 14 трлн эВ (ТэВ). На расположенной под землей недалеко от Женевы машине стоимостью $4,75 млрд ведутся четыре экспериментальных исследования в разных точках столкновения. Главным достижением БАК стало открытие в 2012 г. бозона Хиггса. Чтобы сделать возможными дальнейшие открытия, некоторые ученые хотели бы повысить энергию БАК до 27 ТэВ, увеличив силу поля его сверхпроводящих магнитов.

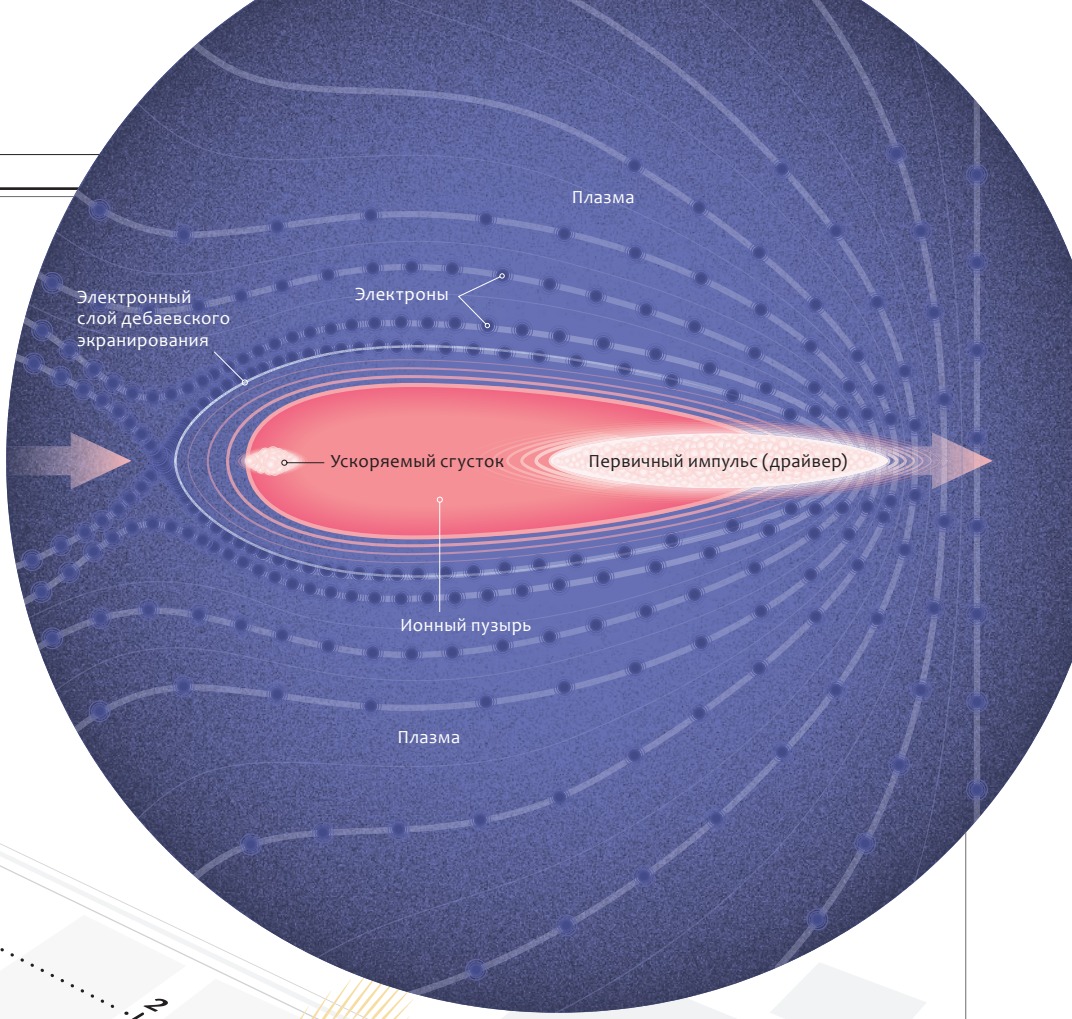


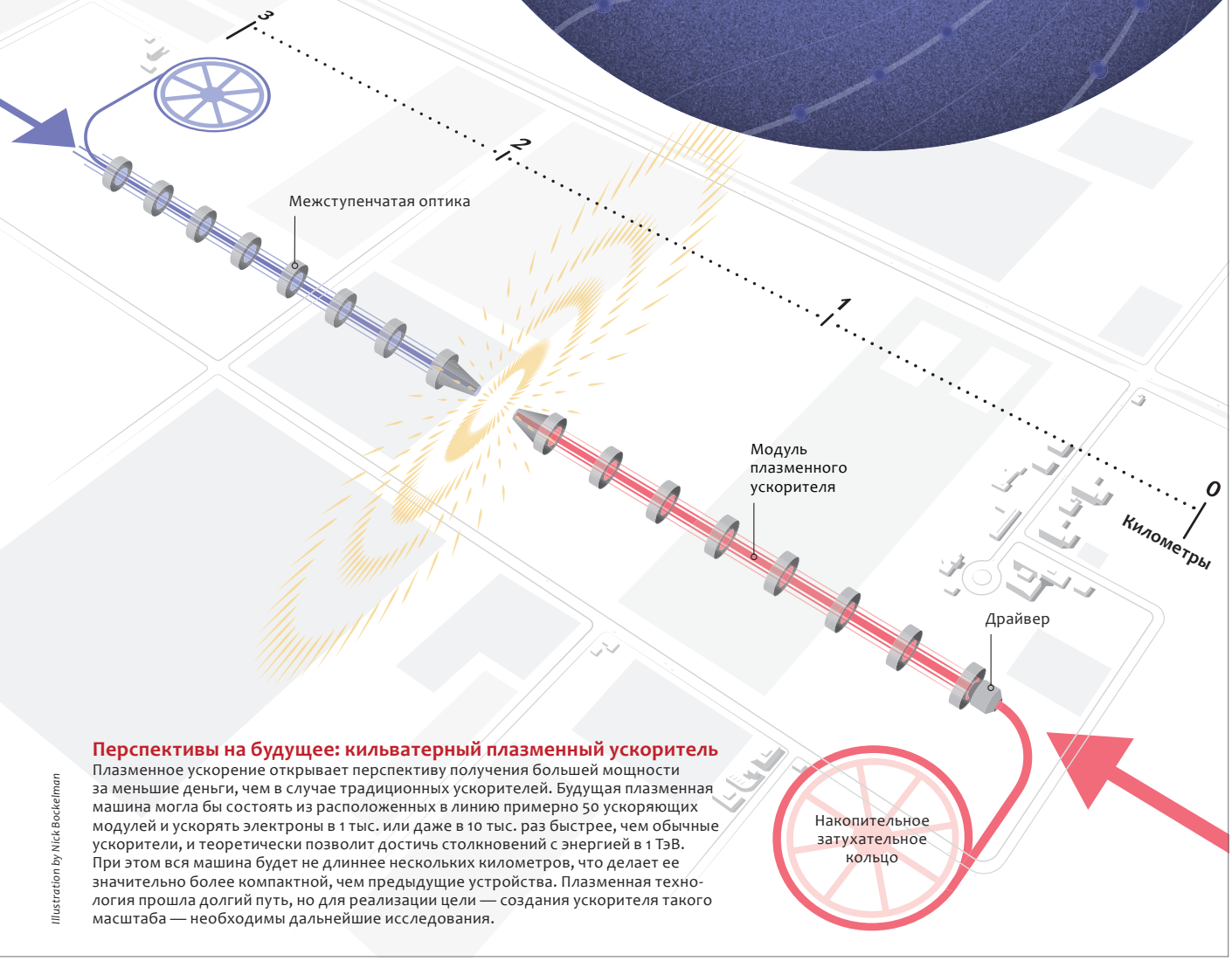
На подходе: Международный линейный коллайдер (МЛК)

Предлагаемый линейный ускоритель будет сталкивать электроны с их двойниками из антиматерии — позитронами. 20-километровая машина будет разгонять частицы до более низкой энергии (250 ГэВ), чем БАК, но позволит получить более четкие данные. Однако стоимость его оценивается примерно в $10 млрд, и на сегодня ни одна из стран не согласна принять его у себя.



Когда начальный импульс лазера или пучок электронов — «драйвер» — проходит через плазму, он выталкивает электроны плазмы наружу. Когда драйвер продолжает движение, плазма, испытывающая теперь дефицит электронов, заряжается положительно и притягивает вытесненные электроны к себе назад. Когда электроны устремляются к оси, они по инерции пролетают мимо, а затем электростатические силы снова тянут их назад, что создает в кильватерном следе осциллирующее электрическое поле. Теперь, когда второй «ускоряемый» сгусток электронов летит через плазму, электрическое поле его ускоряет.

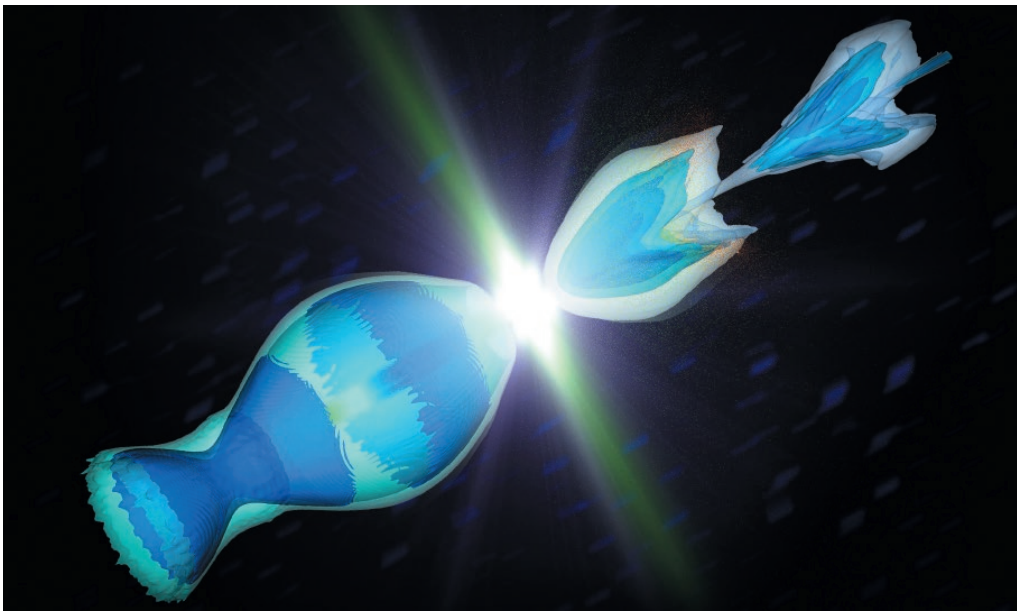




Перспективы на будущее: кильватерный плазменный ускоритель

Плазменное ускорение открывает перспективу получения большей мощности за меньшие деньги, чем в случае традиционных ускорителей. Будущая плазменная машина могла бы состоять из расположенных в линию примерно 50 ускоряющих модулей и ускорять электроны в 1 тыс. или даже в 10 тыс. раз быстрее, чем обычные ускорители, и теоретически позволит достичь столкновений с энергией в 1 ТэВ. При этом вся машина будет не длиннее нескольких километров, что делает ее значительно более компактной, чем предыдущие устройства. Плазменная технология прошла долгий путь, но для реализации цели — создания ускорителя такого масштаба — необходимы дальнейшие исследования.

Illustration by Nick Bockelman



Компьютерное моделирование *перспективной схемы ускорителя: сталкиваются ускоренные плазмой электроны и позитроны*

F. TSUNG, W. AN/U.C.L.A. AND SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

и способное ускорять протоны примерно до 80 кэВ. После этого техника ускорителей стремительно развивалась и ученые смогли увеличить энергию заряженных частиц в ускорителе до величины, позволяющей исследовать атомное ядро. Этот прогресс привел к открытию «зоопарка» из сотен субъядерных частиц, что положило начало эре физики высоких энергий, базирующейся на ускорителях. После того как в последней четверти прошлого века энергия пучков в ускорителях быстро выросла, было показано, что частицы этого зоопарка состоят всего из 17 элементарных частиц, предсказанных Стандартной моделью. Все они, кроме бозона Хиггса, были открыты в экспериментах на ускорителях к концу 1990-х гг. Возможное явление бозона Хиггса ученым на БАК сделало Стандартную модель венцом современной физики элементарных частиц.

Помимо того что ускорители — один из самых успешных инструментов научных открытий в истории, они нашли множество применений в медицине и в нашей повседневной жизни. Они используются в компьютерных томографах, для рентгена костей и для лучевой терапии злокачественных опухолей. Они жизненно важны для стерилизации пищевых продуктов и для производства радиоактивных изотопов для несметного числа медицинских тестов и методов лечения. Они служат основой рентгеновских лазеров на свободных электронах, которые используются тысячами ученых и инженеров для проведения передовых исследований в области физических, медицинских и биологических наук.

Основы ускорителя

Ускорители бывают двух типов: кольцевые (синхротронные) и линейные. Все они запитываются СВЧ-излучением или излучением в диапазоне радиоволн, которое может ускорять частицы почти до скорости света. Например, в Большом адронном коллайдере два протонных пучка, бегущие в противоположных направлениях, многократно проходят через расположенные вдоль кольца участки так называемых радиочастотных полостей. Электромагнитные волны внутри этих полостей создают [переменные] электрические поля, частота которых подбирается таким образом, чтобы на положительно заряженный протон всегда действовала сила, направленная вперед по его движению. Эта сила ускоряет протоны и сообщает им [дополнительную] энергию. Как только частицы набирают достаточную энергию, магнитные линзы очень точно фокусируют пучки протонов в нескольких точках, расположенных вдоль кольца, где и происходят столкновения. При столкновении на таких скоростях образуется чрезвычайно высокая плотность энергии, что приводит к рождению новых частиц бóльшей массы.

Однако когда заряженные частицы летят по дуге окружности, они излучают «синхротронное излучение». При любом данном радиусе кольца для более тяжелых частиц, таких как протоны, эта потеря энергии существенно меньше, поэтому БАК — протонный коллайдер. Но в случае электронов потери слишком велики, особенно когда их энергия растет, поэтому ускорители будущего, на которых предполагается сталкивать

электроны и позитроны, должны быть либо линейными коллайдерами, либо иметь очень большой радиус, то есть меньшую кривизну, что снижает мощность излучения, испускаемого электронами.

Размер ускорительного комплекса для данной энергии пучка в конечном итоге зависит от того, сколько высокочастотной мощности можно закачать в ускоряющую структуру до того, как в ней случится электрический пробой. В традиционных ускорителях для создания этой ускоряющей структуры использовалась медь и порог пробоя ограничивал максимальную энергию, которую можно добавить на дистанции в 1 м, величиной от 20 до 50 млн эВ (МэВ). Ученые, разрабатывавшие ускорители, экспериментировали с новыми типами ускоряющих структур, которые работают на более высоких частотах, что позволило увеличить порог электрического пробоя. Они работали также над увеличением силы ускоряющих полей в сверхпроводящих полостях, которые теперь повсеместно используются как в синхротронах, так и в линейных ускорителях. Эти усовершенствования очень важны и почти наверняка будут реализованы до того, как какие-нибудь новые, коренным образом меняющие основные принципы концепции отправят на металлолом успешную технику традиционных ускорителей.

В конечном итоге, возможно, потребуются другие стратегии. В 1982 г. в рамках программы физики высоких энергий Министерства энергетики США стартовала скромная инициатива по исследованию совершенно новых методов ускорения заряженных частиц. Эта программа породила множество идей; три из них выглядят особенно многообещающими.

Первая — двухпучковый ускоритель. В этой схеме относительно медленный высокозарядный пучок электронов используется для генерации высокочастотного излучения в полости, а затем это излучение ускоряет параллельный электронный пучок во второй полости. Эта концепция проходит испытания в *CERN* на машине под названием «Компактный линейный коллайдер» (*CLIC*).

Другая идея: столкнуть гораздо более тяжелых родственников электронов — мюоны. Большая масса мюонов означает, что их можно ускорять в кольце, не теряя столько энергии на синхротронное излучение, сколько теряется при ускорении электронов. Существенный недостаток этой идеи в том, что мюоны — нестабильные частицы, время жизни которых составляет две миллионные доли секунды. Они образуются при распаде частиц, называемых пионами, для получения которых необходимо направить интенсивный пучок протонов на специальную мишень. Никто еще никогда не строил мюонные ускорители, но среди ученых, занимающихся ускорителями, есть убежденные сторонники этой идеи.

И, наконец, третья идея: плазменное, или кильватерное, ускорение. Его концепция возникла в 1970-х гг. у Джона Доусона (John M. Dawson) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, который предложил использовать плазменный след, создаваемый интенсивным лазерным импульсом или пучком электронов, для ускорения второго пучка частиц в 1 тыс. или даже в 10 тыс. раз быстрее, чем в обычных ускорителях. Эта концепция получила название плазменного (кильватерного) ускорителя. Она вызвала большой ажиотаж, высветив перспективу миниатюризации этих гигантских машин, во многом подобно тому, как интегральные схемы миниатюризировали электронику с начала 1960-х гг.

Четвертое состояние вещества

Большинство людей знакомы с тремя состояниями вещества: твердое, жидкое и газообразное. Плазму часто называют четвертым состоянием вещества. Хотя она достаточно редко встречается в нашей повседневной жизни, это наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной. По некоторым оценкам, более 99% всего видимого вещества в космосе находится в состоянии плазмы — так, например, из плазмы состоят звезды. Плазма — это, по сути, ионизированный газ с одинаковой плотностью электронов и ионов. Ученые могут легко получать плазму в лабораторных условиях, пропуская электричество через газ, как это происходит в обычной люминесцентной лампе.

Плазменный ускоритель с кильватерным полем использует что-то вроде следа, оставляемого моторной лодкой или реактивным самолетом. Когда лодка движется вперед, она расталкивает воду, которая движется в противоположном от лодки направлении, оставляя позади лодки след. Точно так же хорошо сфокусированный лазерный импульс огромной интенсивности, движущийся через плазму со скоростью света, может генерировать релятивистский след (то есть след, также распространяющийся почти со скоростью света), оказывая

радиационное давление и смещая электроны плазмы со своего пути. Если вместо лазерного импульса через плазму направить сильноточный пучок электронов высокой энергии, электростатические силы отталкивания отрицательного заряда этих электронов могут вытеснить все электроны плазмы. Положительно заряженные более тяжелые ионы плазмы остаются на месте. После прохождения импульса ионы притягивают обратно вытесненные электроны, воздействуя электростатической силой между своими положительными зарядами и отрицательными зарядами электронов. Электроны движутся так быстро, что обгоняют ионы, а затем снова испытывают притяжение в обратном направлении, что создает осциллирующий кильватерный след. Из-за пространственного разделения в плазме электронов и ионов внутри этого следа возникает электрическое поле.

Конечная цель ученых, занимающихся плазменными ускорителями, — реализовать линейный ускоритель, в котором сталкивались бы хорошо сфокусированные пучки электронов и позитронов или два пучка электронов общей энергией более 1 ТэВ. Чтобы добиться этого, потребуется последовательно соединить примерно 50 отдельных плазменных ускорительных ступеней

Если второй «ускоряемый» сгусток электронов следует непосредственно за первичным («драйвером»), электроны в ускоряемом сгустке могут получать энергию из кильватерного следа наподобие того, как сгусток электронов ускоряется электромагнитной волной в обычном ускорителе.

Если в ускоряемом сгустке достаточное количество электронов, они могут поглощать из следа достаточно энергии, чтобы ослабить электрическое поле. Теперь на все электроны в этом сгустке действует постоянное ускоряющее поле и они с одинаковой скоростью набирают энергию, тем самым уменьшается разброс энергии электронов в сгустке.

Основное преимущество плазменного ускорителя перед другими схемами состоит в том, что электрические поля в плазменном кильватерном следе могут быть в 1 тыс. раз сильнее, чем в традиционных радиочастотных полостях. К тому же значительная доля энергии, передаваемой лучом-драйвером в кильватерный след, может быть извлечена ускоряемым пучком. Эти эффекты делают коллайдер на основе плазменного кильватерного поля потенциально более компактным и более дешевым, чем обычный.

Будущее плазмы

За последние два десятилетия плазменные кильватерные ускорители с лазерной и электронной накачкой совершили огромный шаг вперед. Моя собственная группа в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе провела эксперименты на нашем прототипе совместно с физиками Национальной ускорительной лаборатории *SLAC* (*SLAC* — Центр Стэнфордского линейного ускорителя), используя их Установку для испытаний перспективных ускорителей (*FACET*) в Менло-Парке, штат Калифорния. Мы инжектировали первичный и ускоряемый сгустки электронов с начальной энергией 20 ГэВ и обнаружили, что энергия ускоряемых электронов увеличивается на величину до 9 ГэВ после прохождения через плазму на отрезке длиной 1,3 м. В эксперименте по проверке концепции, используя плазму, мы также достигли усиления 4 ГэВ в сгустке позитронов на отрезке длиной всего 1 м. Несколько других лабораторий по всему миру, используя в качестве драйвера излучение лазера, получили для сгустков электронов усиление энергии в несколько ГэВ.

Конечная цель ученых, занимающихся плазменными ускорителями, — реализовать линейный ускоритель, в котором сталкивались бы хорошо сфокусированные пучки электронов и позитронов или два пучка электронов общей энергией более 1 ТэВ. Чтобы добиться этого, нам, вероятно, потребуется последовательно соединить примерно 50 отдельных плазменных ускорительных ступеней, при этом в каждой из них энергия пучка будет увеличиваться на 10 ГэВ.

Однако обеспечение соосности и синхронизации первичного и ускоряемого пучков

при прохождении через такое количество ступеней плазменного ускорителя, необходимое, чтобы столкнуть два пучка с требуемой точностью, вырастает в огромную проблему. Типичный радиус кильватерного следа — менее 1 мм, а ученые должны ввести ускоряемый сгусток электронов с субмикронной точностью. Необходимо синхронизировать временны́е параметры первичного импульса и ускоряемого пучка с точностью не хуже одной стотриллионной доли секунды. Любое отклонение от оси может привести к ухудшению качества пучка и потере энергии, а также заряда, вызванного осцилляцией электронов в окрестности оси кильватерного следа в плазме. Эта потеря проявляется в виде жесткого рентгеновского излучения, называемого бетатронным излучением, и накладывает ограничение на то, сколько энергии можно получить от плазменного ускорителя.

Существуют и другие технические препятствия, которые не позволяют немедленно превратить эту идею в коллайдер. Возьмем основной показатель качества коллайдера — светимость. Попросту говоря, это мера того, сколько частиц сможет пролететь через данную площадку за данное время. Светимость, умноженная на сечение, или вероятность столкновения двух частиц, говорит вам, сколько столкновений определенного вида в секунду вы, вероятно, будете наблюдать. Желаемая светимость для линейного электрон-позитронного коллайдера с энергией 1 ТэВ составляет 10^{34} см$^{-2}$·с$^{-1}$. Для достижения такой светимости требуется, чтобы встречные пучки имели среднюю мощность 20 МВт каждый — 10^{10} частиц в сгустке при частоте повторения 10 кГц и размере пучка в точке столкновения в десятки миллиардных долей метра. Чтобы проиллюстрировать, насколько это сложно, давайте рассмотрим среднюю потребляемую мощность. Даже если бы можно было передавать энергию от первичного пучка к ускоряющемуся с 50-процентной эффективностью, в двух тонких трубках плазмы останется 20 МВт мощности. В идеальном случае мы могли бы частично восстановить эту мощность, но это отнюдь не тривиальная задача.

Хотя ученые добились значительного прогресса в технике для электронного плеча плазменного линейного коллайдера, ускорение позитронов все еще находится в младенческом состоянии. Вероятно, потребуется еще десятилетие скоординированных фундаментальных научных исследований, чтобы довести ускорители позитронов до такого же уровня, которого мы достигли в работе с электронами. В качестве альтернативного варианта мы могли бы сталкивать электроны с электронами или даже с протонами, где одно или оба электронных плеча базируются на плазменном кильватерном ускорении. Другая концепция, которую изучают ученые в *CERN*, — попытка модулировать протонный сгусток многосантиметровой длины, направив его через столб плазмы и используя сопровождающий его плазменный след для ускорения электронного сгустка.

Будущее плазменных ускорителей неясно, но заманчиво. Вполне возможно, что не пройдет и десяти лет, как мы научимся строить настольные плазменные ускорители на 10 ГэВ для различных научных и коммерческих приложений, используя существующие лазерные и электронно-лучевые устройства. Но путь от этих достижений до реализации линейного плазменного коллайдера, способного служить инструментом для новых открытий физики, все еще далек. Несмотря на то что мы добились впечатляющего прогресса в экспериментальных исследованиях плазменных ускорителей, параметры пучка, достигнутые на сегодня, еще далеки от того, что нам потребуется даже для электронного плеча будущего электрон-позитронного коллайдера, способного вести исследования на переднем крае физики элементарных частиц. Тем не менее, поскольку перспективы Международного линейного коллайдера и Будущего кольцевого коллайдера туманны, наилучшим вариантом для нас может быть дальнейшее совершенствование экзотической техники, которая сулит экономию в размерах и затратах. Разработка плазменной ускорительной техники — грандиозная научная и инженерная задача этого столетия, она предлагает исследователям огромное поле деятельности для риска, творчества, решения интереснейших проблем и заманчивую возможность открыть новые фундаментальные компоненты природы. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Джоши Ч. Плазменные ускорители // ВМН, № 5, 2006.