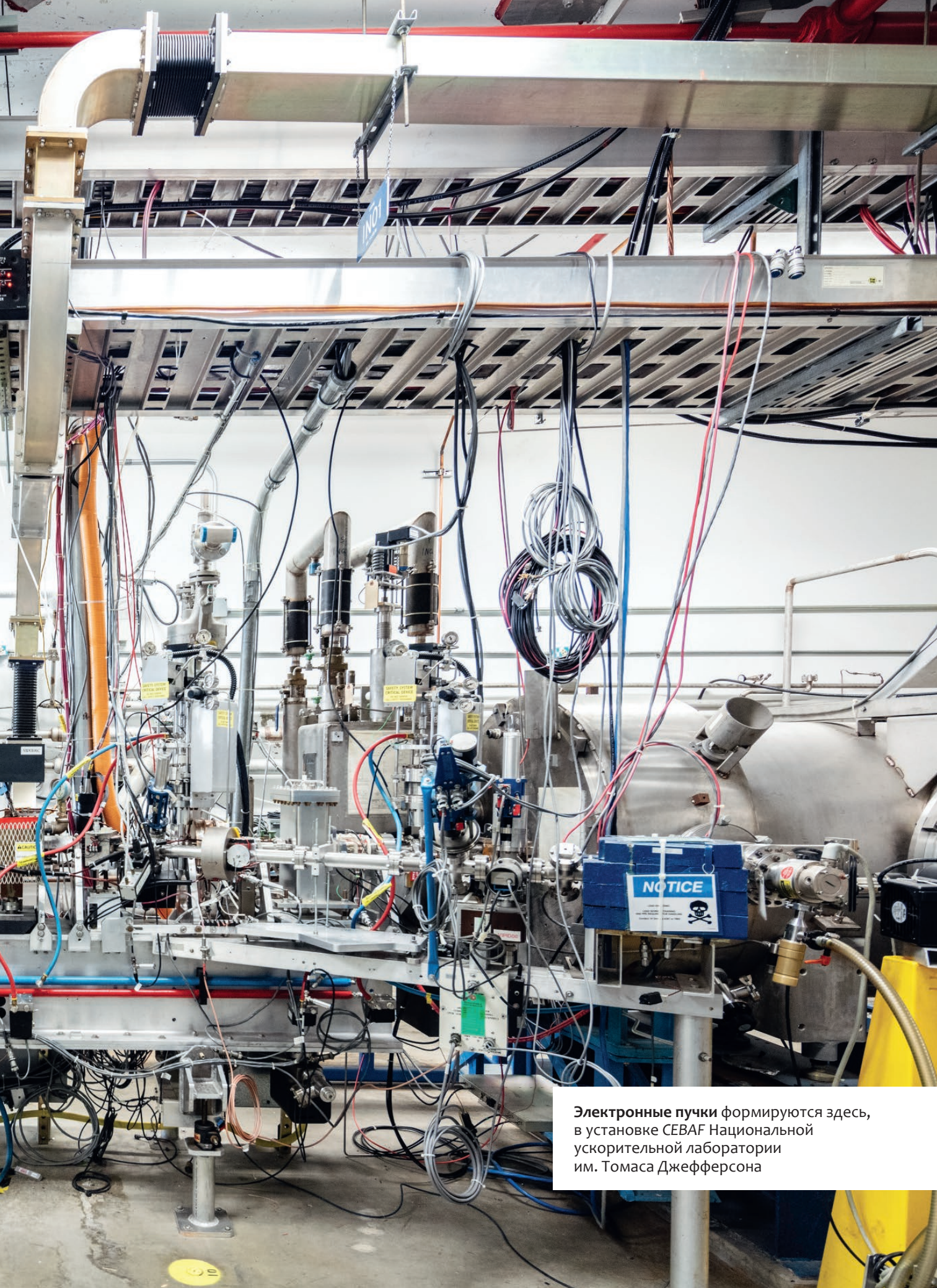
ГЛУБОЧАЙШИЕ ТАЙНИКИ АТОМА

Откуда протоны и нейтроны берут свои массу и спин? Удивительно, но мы не знаем. Новая установка обещает заглянуть внутрь этих частиц, чтобы найти ответы

Абхай Дешпанде и Рикутаро Есида

Photographs by Fioto + Warner



Электронные пучки формируются здесь, в установке *CEBAF* Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона

ОБ АВТОРАХ

Абхай Дешпанде (Abhay Deshpande) — профессор физики Университета штата Нью-Йорк в Стони-Брук, основатель и директор Центра пограничной ядерной физики, цель которого — научное обоснование проекта и поддержка строительства Электрон-ионного коллайдера (ЭИК).

Рикутаро Есида (Rikutaro Yoshida) — главный научный сотрудник Национального ускорительного центра им. Томаса Джефферсона, директор Центра Электрон-ионного коллайдера, который помогает развивать и поддерживать научную программу будущей установки.

Согласно оценкам, наблюдаемая Вселенная содержит примерно 10^{53} кг обычной материи, большей частью в виде около 10^{80} протонов и нейтронов, из которых, а также из электронов, состоят атомы. Но что дает протонам и нейтронам массу?

Ответ на этот вопрос, как оказалось, непрост. Протоны и нейтроны состоят из частиц, называемых кварками, и связывающих их вместе частиц, которые получили название «глюоны». Глюоны не имеют массы, и сумма масс кварков внутри протонов и нейтронов (вместе называемых нуклонами) составляет примерно 2% суммарной массы нуклона. Так откуда же берется остальная?

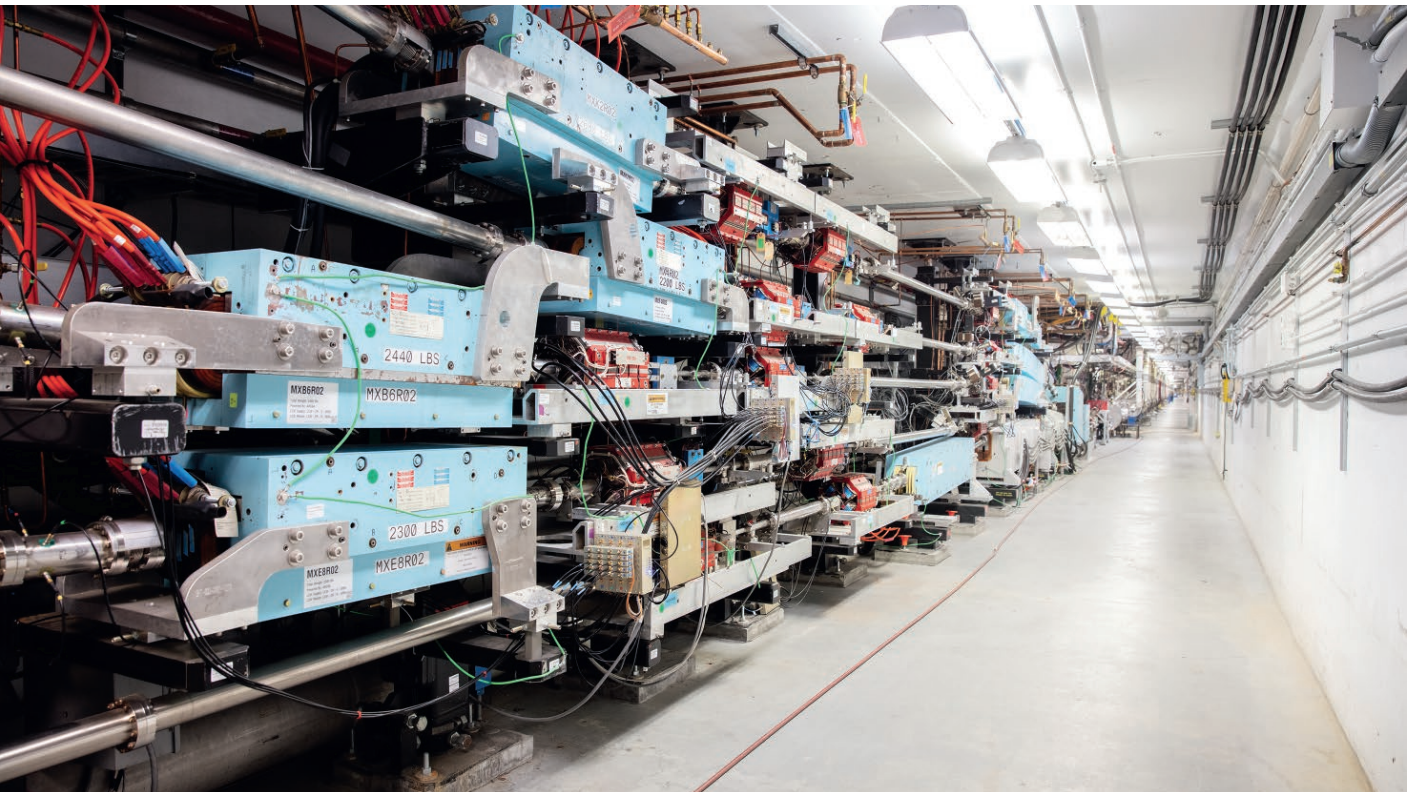
И это не единственная загадка основных компонентов атома. Аналогичным образом необъясним спин нуклонов — спин кварков внутри них не может дать этому объяснение. В настоящее время ученые полагают, что спин, масса и другие свойства нуклона возникают в результате сложного взаимодействия кварков и глюонов внутри него. Но как именно это происходит, остается загадкой. Теория может сказать ученым лишь это немногое потому, что взаимодействия кварков и глюонов описываются теорией под названием «квантовая хромодинамика» (КХД), проводить вычисления в которой невероятно трудно.

Чтобы продвинуться вперед, нам необходимы новые экспериментальные данные. И вот здесь на сцену выходит Электрон-ионный коллайдер (ЭИК). В отличие от других машин, таких как Большой адронный коллайдер *CERN* в окрестностях Женевы или Релятивистский коллайдер тяжелых ионов (*RHIC*) в США, в которых сталкиваются составные частицы, такие как протоны и ионы, внутри ЭИК с протонами и нейтронами будут сталкиваться электроны. У последних нет внутренней структуры, и поэтому они становятся чем-то вроде микроскопа, позволяющего заглянуть внутрь составных частиц.

Электрон-ионный коллайдер — один из главных приоритетов американского сообщества физиков-ядерщиков, и скорее всего он будет построен в одной из двух

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Откуда протоны и нейтроны берут свои массу и спин? Как ни удивительно, ученые этого не знают.
- Каким-то образом компоненты этих частиц — кварки и глюоны — объединяются в сложных взаимодействиях, которые формируют свойства протонов и нейтронов.
- Чтобы понять как, физики хотят построить Электрон-ионный коллайдер, который будет сталкивать протоны и атомные ядра с электронами, чтобы получить трехмерную картину внутренней структуры ядра.



Магнитные диполи, *окрашенные в голубой цвет, помогают управлять пучками электронов, когда они разгоняются в петле CEBAF*

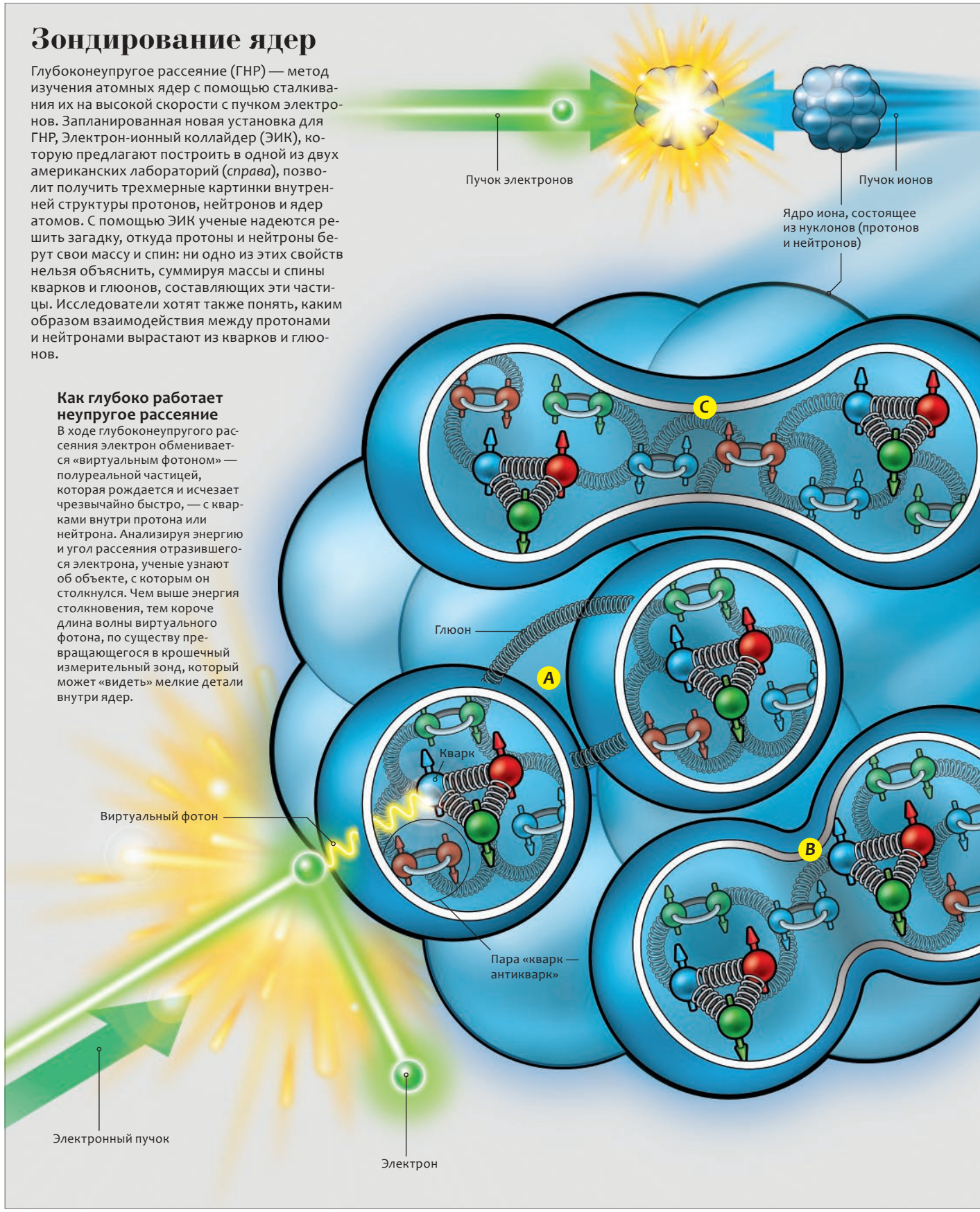
физических лабораторий США — Брукхейвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде или Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона (Лаборатории Джефферсона) в городе Ньюпорт-Ньюс, штат Виргиния. Если одобрение будет получено, коллайдер начнет получать данные где-то около 2030 г. Ускоритель сможет разглядеть, каким образом спин и масса отдельных кварков и глюонов, равно как и энергия их коллективного движения, объединяются, чтобы создать спин и массу протонов и нейтронов. Он должен также ответить на другие вопросы, например: объединены ли кварки и глюоны в единое целое или же распределены внутри нуклонов; как быстро они двигаются; какую роль эти взаимодействия играют в связывании нуклонов в ядрах? Данные измерений на Электрон-ионном коллайдере станут сокровищницей новой информации о том, как базовые компоненты материи взаимодействуют друг с другом, чтобы образовать видимую Вселенную. Спустя 50 лет после открытия кварка мы наконец на пороге раскрытия его тайн.

Эмергентные явления

Ученые достаточно хорошо понимают, как из атомов строятся различные объекты и каким образом характеристики этих объектов определяются характеристиками составляющих их атомов. Безусловно, многое в нашей нынешней жизни зависит от наших знаний об атомах, электронах и об электромагнетизме — именно благодаря этим знаниям движутся наши автомобили и работают смартфоны. Ну так и что из того, что мы не понимаем, каким образом нуклоны образуются из кварков и глюонов? Во-первых, нуклоны по крайней мере в 10 тыс. раз меньше атома и поэтому нет простых способов их изучения. Во-вторых, характеристики нуклонов возникают в результате коллективного поведения кварков и глюонов. Фактически они — эмергентные явления (*эмергентность — наличие у какой-либо системы свойств, не присущих ее элементам. — Примеч. пер.*), результат интеракции множества сложных игроков, чьи взаимодействия изобилуют слишком большим числом деталей, чтобы нам можно было полностью понять их на этом уровне.

Зондирование ядер

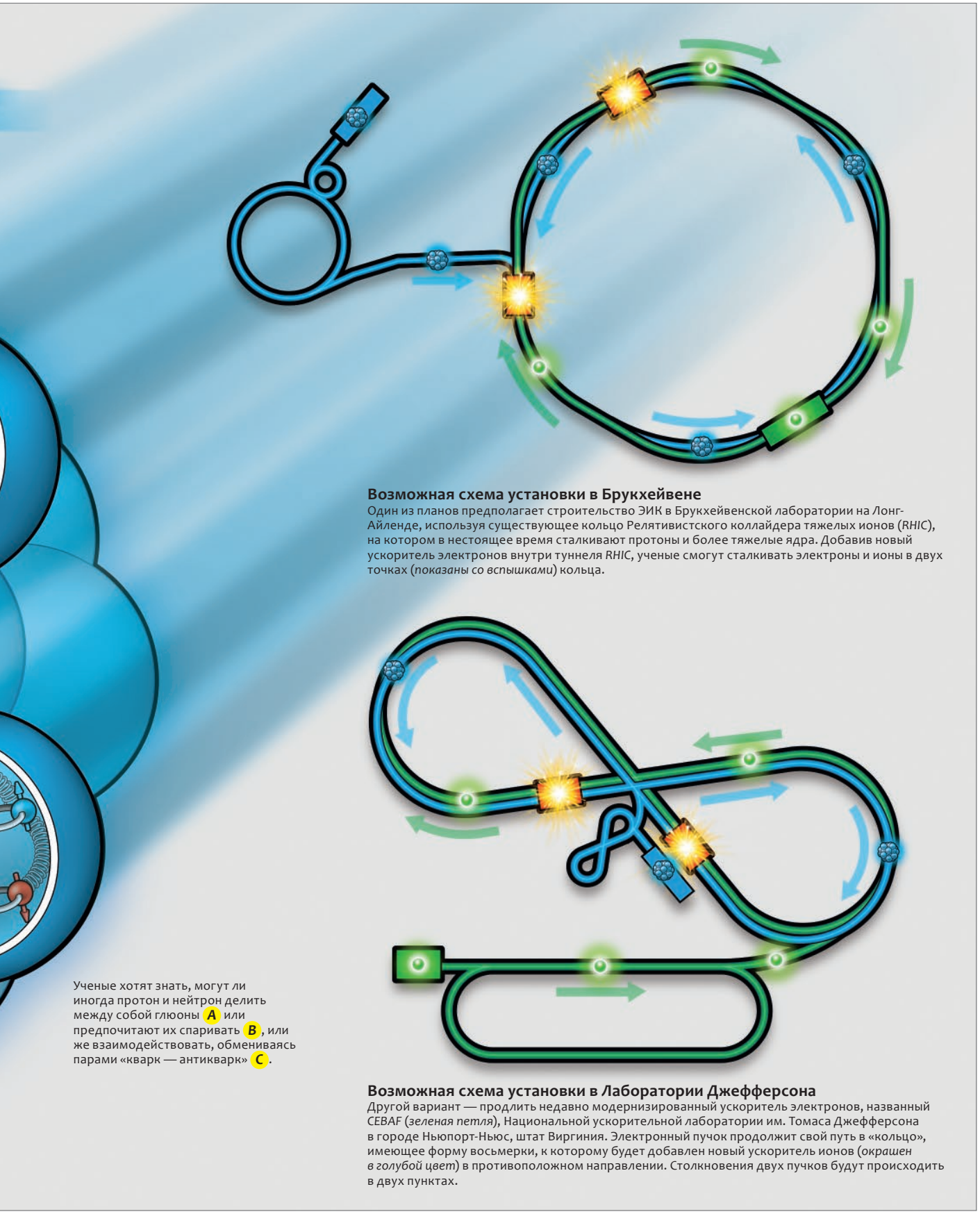
Глубоконеупругое рассеяние (ГНР) — метод изучения атомных ядер с помощью сталкивания их на высокой скорости с пучком электронов. Запланированная новая установка для ГНР, Электрон-ионный коллайдер (ЭИК), которую предлагают построить в одной из двух американских лабораторий (*справа*), позволит получить трехмерные картинки внутренней структуры протонов, нейтронов и ядер атомов. С помощью ЭИК ученые надеются решить загадку, откуда протоны и нейтроны берут свои массу и спин: ни одно из этих свойств нельзя объяснить, суммируя массы и спины кварков и глюонов, составляющих эти частицы. Исследователи хотят также понять, каким образом взаимодействия между протонами и нейтронами вырастают из кварков и глюонов.



Как глубоко работает неупругое рассеяние

В ходе глубоконеупругого рассеяния электрон обменивается «виртуальным фотоном» — полуреальной частицей, которая рождается и исчезает чрезвычайно быстро, — с кварками внутри протона или нейтрона. Анализируя энергию и угол рассеяния отразившегося электрона, ученые узнают об объекте, с которым он столкнулся. Чем выше энергия столкновения, тем короче длина волны виртуального фотона, по существу превращающегося в крошечный измерительный зонд, который может «видеть» мелкие детали внутри ядер.

Illustration by Ben Gilliland



Возможная схема установки в Брукхейвене
Один из планов предполагает строительство ЭИК в Брукхейвенской лаборатории на Лонг-Айленде, используя существующее кольцо Релятивистского коллайдера тяжелых ионов (*RHIC*), на котором в нестоящее время сталкивают протоны и более тяжелые ядра. Добавив новый ускоритель электронов внутри туннеля *RHIC*, ученые смогут сталкивать электроны и ионы в двух точках (*показаны со вспышками*) кольца.

Ученые хотят знать, могут ли иногда протон и нейтрон делить между собой глюоны **A** или предпочитают их спаривать **B**, или же взаимодействовать, обмениваясь парами «кварк — антикварк» **C**.

Возможная схема установки в Лаборатории Джефферсона
Другой вариант — продлить недавно модернизированный ускоритель электронов, названный *CEBAF* (*зеленая петля*), Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона в городе Ньюпорт-Ньюс, штат Виргиния. Электронный пучок продолжит свой путь в «кольцо», имеющее форму восьмерки, к которому будет добавлен новый ускоритель ионов (*окрашен в голубой цвет*) в противоположном направлении. Столкновения двух пучков будут происходить в двух пунктах.

Тяжелые ионы и поляризованные протоны *ускоряются внутри Релятивистского коллайдера тяжелых ионов (RHIC) Брукхейвенской национальной лаборатории*

Теория, описывающая эти взаимодействия, квантовая хромодинамика, была разработана в конце 1960-х — начале 1970-х гг. Это часть всеобъемлющей теории элементарных частиц, называемой Стандартной моделью, которая описывает все известные силы Вселенной (кроме гравитации). КХД утверждает, что сила сильного взаимодействия — сила, удерживающая вместе нуклоны, — переносится глюонами, точно так же как электромагнитные силы между электрически заряженными частицами переносятся фотонами, или частицами света. «Заряд», участвующий в сильном взаимодействии, называется «цвет» (отсюда и название «хромодинамика»). Кварки несут цветовой заряд и взаимодействуют друг с другом, обмениваясь глюонами. Но в отличие от электромагнетизма, где сами фотоны не имеют электрического заряда, у глюонов цветовой заряд есть. Следовательно, глюоны взаимодействуют с другими глюонами, обмениваясь новыми глюонами. Это допущение имеет далеко ведущие последствия. Петля обратной связи взаимодействий — причина того, почему КХД зачастую слишком трудна для вычислений.

Квантовая хромодинамика также отличается от более привычных теорий тем, что сила сильного взаимодействия становится тем слабее, чем теснее сближаются кварки. (В случае электромагнетизма все ровно наоборот: силы ослабевают, когда заряженные частицы удаляются друг от друга.) На достаточно близком расстоянии внутри нуклона кварки испытывают настолько слабую силу, что ведут себя, как если бы они были свободны. За открытие этих странных следствий КХД физики Дэвид Гросс (David Gross), Дэвид Политцер (H. David Politzer) и Фрэнк Вильчек (Frank Wilczek) получили Нобелевскую премию по физике 2004 г. Когда кварки удаляются друг от друга, сила взаимодействия между ними быстро растет и становится настолько сильной, что кварки оказываются «заключены» внутри нуклона, — именно поэтому вы никогда не найдете кварк или глюон в одиночестве, вне протона или нейтрона. Ученые могут вычислять взаимодействия квантовой хромодинамики до тех пор, пока кварки находятся близко друг к другу и слабо взаимодействуют между собой; однако когда они расположены дальше друг тот друга — на расстояниях, близких к радиусу протона, — сила становится слишком сильной, а теория — слишком сложной, чтобы быть полезной.

Чтобы расширить понимание квантового царства сил сильного взаимодействия, нам нужны дополнительные данные. Например, наша власть над царством атомов родилась не только из нашего понимания атомов и их взаимодействий, но и из нашего осмысления эмергентных явлений, которые возникают на вершине этих фундаментальных строительных блоков. Молекулярную биологию невозможно выстроить, исходя из наших знаний ее основ — теорий атомов и электромагнитного взаимодействия. Момент озарения случился, когда ученые открыли двойную спираль структуры ДНК. Что нам необходимо, чтобы добиться прогресса в мире кварков и глюонов, — это заглянуть внутрь нуклонов.

«Разглядывание» атомов

В первой половине XX в. физики научились «разглядывать» атомы методом, получившим название рентгеновской дифракции. Освещая образец пучком рентгеновских лучей и изучая интерференционную картину, которая возникает, когда лучи проходят через материал, ученые смогли увидеть его атомную кристаллическую структуру. Причина, по которой эта методика работает, заключается в том, что длина волны рентгеновского излучения сравнима с размером атома, что дает нам возможность исследовать нанометровую (10^{-9} м) шкалу расстояний, характерную для

BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

атомов. Аналогично первоначально физики «увидели» кварки 50 лет назад в эксперименте, в котором электроны и протоны сталкивались в ходе явления, называемого глубоконеупругим рассеянием (ГНР).

При использовании данного метода электрон отражается от протона (или нейтрона, или ядра) и обменивается с ним виртуальным фотоном. Этот виртуальный фотон не совсем реален — он быстро рождается и исчезает как следствие квантовой механики, которая управляет взаимодействием элементарных частиц. Тщательно измерив энергию и угол рассеяния электрона, мы получаем информацию о той частице, от которой он отразился.

Длина волны виртуального фотона в экспериментах по ГНР — порядка фемтометра (1 фм = 10^{-15} м) — масштаб, соответствующий диаметру протона. Чем больше энергия столкновения, тем короче длина волны виртуального фотона, а чем короче длина волны, тем точнее измерительный зонд и выше пространственное разрешение. Если длина волны достаточно мала, электрон, по сути, отражается от одного из кварков внутри протона (а не всего протона как единого целого), что позволяет разглядеть внутреннюю структуру частицы.

Первым экспериментом по ГНР был совместный проект Стэнфордского центра линейных ускорителей с Массачусетским технологическим институтом на площадке, называвшейся тогда Стэнфордским центром линейных ускорителей. В 1968 г. проект представил первые доказательства существования кварков — открытие, за которое руководители эксперимента получили Нобелевскую премию 1990 г. по физике. В аналогичных экспериментах было обнаружено, что кварки внутри свободных протонов и нейтронов и те, что находятся внутри ядер, ведут себя совершенно по-разному. Более того, оказалось, что спины протона и нейтрона не складываются из суммы спинов составляющих их кварков, как это до того предполагали ученые. Сначала эффект был обнаружен у протонов и получил название «Кризис спина протона». Первым ГНР-коллайдером, на котором перед столкновением разгонялись как электроны, так и протоны, стал Адрон-электронный кольцевой ускоритель (*HERA*) исследовательского центра *DESY* (Немецкий электронный синхротрон) в Гамбурге, который работал с 1992 по 2007 г. Эксперименты на ускорителе *HERA* показали: то, что мы считали простой конфигурацией из трех кварков внутри каждого протона и нейтрона, на самом деле превратилось в суп из частиц, в котором в мгновение ока появляются и исчезают множество кварков и глюонов. Ускоритель *HERA* существенно расширил наше понимание структуры нуклонов, но не смог разрешить спиновый кризис и не позволял получать пучки ядер со скоростью, необходимой для изучения поведения кварков и глюонов в ядрах.

Основной фактор, усложняющий все наблюдения в этом масштабе, — странность самой квантовой механики. Ее законы описывают субатомные частицы как облака вероятности: они не существуют в конкретном состоянии, в конкретном месте и строго определенном времени. Вместо этого мы должны рассматривать кварки как существующие в бесконечном числе квантовых конфигураций одновременно. Более того, мы должны учитывать явление квантового перепутывания, благодаря которому две частицы могут стать связанными таким образом, что их судьбы оказываются переплетенными даже после их расставания. Квантовое перепутывание, возможно, создаст проблему при наблюдении в масштабе ядра, поскольку кварки и глюоны, которые мы хотели бы наблюдать, рискуют стать квантово перепутанными с любым из инструментов, который мы используем, чтобы взглянуть на них; в случае глубоконеупругого рассеяния — с виртуальным фотоном. Представляется невозможным определить, что же мы подразумеваем под структурой нуклона, когда то, что мы находим, зависит от того, как мы его исследуем.

К счастью, к 1970-м гг. квантовая хромодинамика продвинулась вперед достаточно, чтобы ученые додумались, что мишень и зонд в эксперименте по ГНР можно разделить: условие, называемое факторизацией. При достаточно высоких энергиях ученые могут в значительной степени игнорировать эффекты квантового перепутывания в определенных обстоятельствах — настолько, чтобы стало возможным описать структуру протона в одном измерении. Это означает, что с помощью эксперимента по ГНР они могут измерить вероятность того, что любой данный кварк внутри протона вносит определенную долю в результирующий импульс нуклона.

Прогресс, достигнутый в последнее время в теории, позволил нам продвинуться

дальше и описать внутреннюю структуру нуклонов более чем в одном измерении — оценить не только то, сколько кварки и глюоны вносят в его результирующий импульс, но также и то, насколько они перемещаются внутри нуклона с одной его стороны на другую.

Однако настоящий шаг вперед можно будет сделать, когда начнет работу Электрон-ионный коллайдер.

Электрон-ионный коллайдер

Электрон-ионный коллайдер даст возможность составить трехмерную карту внутренней структуры нуклона. Мы ожидаем, что коллайдер позволит измерить расположение и импульсы кварков и глюонов, а также величину, которую каждый из них вносит в суммарную массу и спин нуклона.

Ключевой прорыв ЭИК по сравнению с предыдущими экспериментами по ГНР — его яркость: например, он будет производить в 100–1000 раз больше столкновений в минуту, чем *HERA*. Кроме того, более высокая энергия сталкивающихся пучков в ЭИК позволит получить разрешение в несколько сотых диаметра протона, что даст возможность исследовать области, в которых большое число кварков и глюонов несут примерно 0,01% суммарного импульса протона. Электрон-ионный коллайдер также разрешит нам управлять направлением спина частиц в его пучке, и таким образом мы сможем изучать, как спин протона возникает из КХД-взаимодействий кварков и глюонов. Будучи включенными в рамки нашей современной теории, измерения на ЭИК дадут нам основания создать действительно трехмерную модель протона на основе кварков и глюонов.

У нас накопилось много вопросов, на которые мы надеемся получить ответ. Например, распределены ли составные части протона равномерно внутри него или же перемешаны друг с другом? Вносят ли некоторые из них больший вклад в массу и спин частицы, чем другие? Какую роль кварки и глюоны играют в связывании вместе протонов и нейтронов в ядра? Эти неясности только начинают исследоваться на существующих установках на фемтометровой шкале. ЭИК — первая машина, которая подведет нас к ответу на все эти вопросы.

Одна из самых больших загадок в нашей концепции структуры нуклона — что происходит, когда мы смотрим на эти частицы с помощью чрезвычайно тонкого инструмента в очень мелком масштабе. Здесь начинают твориться странные вещи. КХД предсказывает, что когда энергия вашего зонда растет все выше и выше, вы будете обнаруживать все больше глюонов. Кварки могут излучать глюоны, а эти глюоны, в свою очередь, излучают новые глюоны, образуя цепную реакцию. Удивительно, но вовсе не воздействие измерения вызывает это глюонное излучение, а странность квантовой механики, которая говорит нам, что внутреннее содержимое протона меняется тем сильнее (просто глюонов становится все больше), чем ближе вы вглядываетесь.

Однако мы знаем, что это не может быть полным решением, потому что это означало бы, что материя растет без ограничений. Другими словами, атомы имели бы бесконечное количество глюонов, если бы вы рассматривали их все пристальнее. Предыдущие коллайдеры, включая *HERA*, замечали намеки на состояние «насыщения», в котором протон просто не может вмещать больше глюонов — и начинает рекомбинировать часть из них, прекращая тем самым рост их числа. Физики никогда еще однозначно не фиксировали насыщение, и мы не знаем величину порога, при которой это происходит. Некоторые вычисления дают основания предполагать, что при глюонном насыщении образуется новое состояние вещества — «конденсат цветного стекла» (*в русскоязычной физической литературе нет устоявшегося термина, соответствующего английскому color glass condensate; можно встретить переводы «конденсат цветового стекла» и даже «цветовой стеклообразный конденсат». — Примеч. пер.*) с весьма необычными свойствами. Например, плотность энергии глюонов может достигать беспрецедентной величины в 50–100 раз больше плотности энергии внутри нейтронных звезд. Чтобы достичь областей с самой высокой из возможных плотностью глюонов, на ЭИК вместо протонов будут разгоняться ядра тяжелых элементов, чтобы выявить это поразительное явление и изучить его в деталях.

Строительство ЭИК

Планы по строительству нового коллайдера получили твердую поддержку на последнем заседании (2015 г.) комитета по долговременному планированию американского сообщества физиков-ядерщиков, а также Министерства энергетики

США, которое в 2017 г. запросило независимую оценку ЭИК от Национальной академии наук, техники и медицины США (НАН США). В июле 2018 г. НАН США нашла научные аргументы в пользу строительства ЭИК фундаментальными, полными и своевременными.

Существуют два возможных пути строительства этой машины. Первый — усовершенствовать существующий Релятивистский коллайдер тяжелых ионов (*RHIC*) в Брукхейвене. Согласно этому плану, получившему название *eRHIC*, предполагается добавить электронный пучок внутри туннеля существующего ускорителя *RHIC* и сталкивать его в двух различных точках с одним из пучков существующего релятивистского коллайдера тяжелых ионов.

Другая возможность — использовать электронный пучок Ускорителя с непрерывным электронным пучком (*CEBAF*) Лаборатории Джефферсона (*на самом деле пучок электронов там квазинепрерывный и состоит из очень коротких сгустков «длиной» менее 1 пс. — Примеч. пер.*). В рамках проекта, получившего название «Электрон-ионный коллайдер Лаборатории Джефферсона» (*JLEIC*), пучок электронов с *CEBAF* будет направлен в туннель нового коллайдера, который должен быть сооружен по соседству.

Либо та, либо другая из этих установок позволит совершить огромный скачок в нашем понимании КХД и наконец-то даст визуальное представление о внутреннем строении нуклонов и ядер атомов. Любая из них должна помочь нам разобраться с вопросами спина, массы и других характеристик нуклонов, которые ставили нас в тупик до сих пор. И любая из них будет иметь возможность сталкивать много различных образцов ядер, включая тяжелые — золота, свинца и урана, что позволит нам выяснить, как меняется распределение кварков и глюонов, когда их нуклоны представляют собой часть более крупных ядер. Мы хотели бы, например, узнать, начинают ли некоторые из глюонов перекрывать друг друга так, что один принадлежит двум различным протонам.

Фемтотехника

В XXI в. сам размер атома — ограничивающий фактор в наших технологиях. Если не случится крупного научного прорыва, 10 нм (ширина примерно 100 атомов) — вероятно, будет минимальным размером компонента электронной схемы, и это дает основания утверждать, что вычислительная мощность обычных компьютеров вряд ли будет расти с той же скоростью, что держалась более 50 лет.

В то же время нуклоны и их внутренняя структура существуют в масштабе в 1 млн раз меньшем. Силы сильного взаимодействия, которые управляют этим царством, примерно в 100 раз сильнее электромагнитных, заставляющих работать современные электронные устройства, — по сути, это самая сильная сила во Вселенной. Возможно ли создать фемтотехнику, которая работала бы за счет управления кварками и глюонами? По некоторым оценкам, такого рода техника будет в миллион раз более мощной, чем нынешняя нанотехника. Конечно же, эта мечта — предмет для рассуждений весьма отдаленного будущего. Но чтобы прийти туда, сначала нам необходимо добиться глубокого понимания квантового мира кварков и глюонов.

ЭИК — единственная в мире экспериментальная установка, на которой можно будет получить данные, необходимые для самого полного понимания КХД. Однако строительство ЭИК не обойдется без серьезных проблем. Проект должен формировать очень яркий и в высокой степени сфокусированный пучок электронов, протонов и других атомных ядер в широком диапазоне энергий, чтобы в минуту происходило в 100–1000 раз больше актов соударения, чем на коллайдере *HERA*. Задачи по изучению спинов требуют, чтобы машина обеспечивала пучок частиц, чьи спины в максимально возможной степени направлены в одну сторону, которым можно управлять и на который можно воздействовать. Эти сложные задачи потребуют новых подходов, обещающих преобразить науку об ускорителях и могущих оказаться полезными не только для ядерной физики, но также и при создании будущих ускорителей, для использования в медицине, материаловедении и физике элементарных частиц. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

■ Венугопалан Р., Ульрих Т., Энт Р. Клей, на котором держится мир // ВМН, № 7, 2015.

■ An Assessment of U.S.-Based Electron-Ion Collider Science. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. National Academies Press, 2018. https://doi.org/10.17226/25171