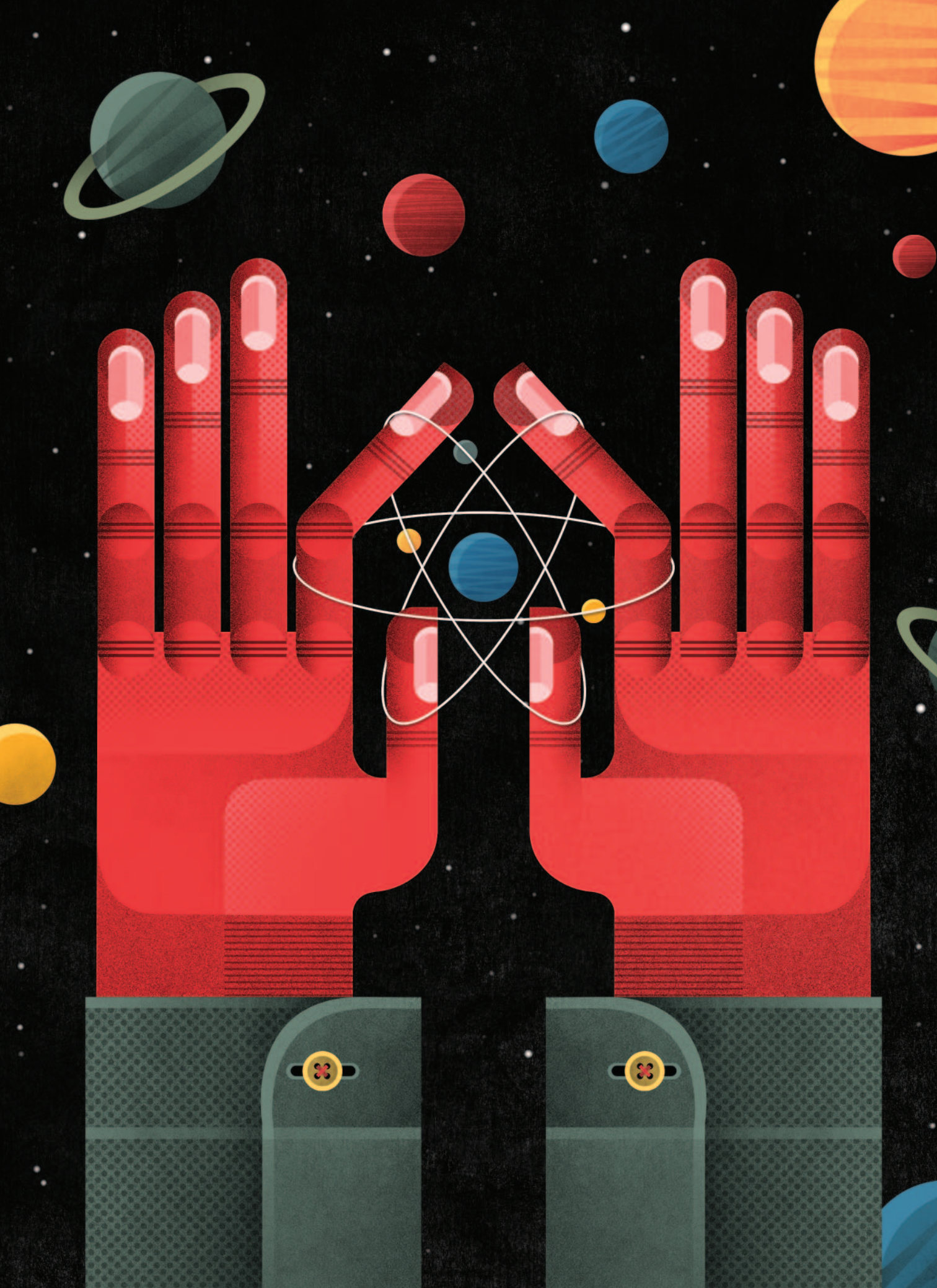
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Клей, на котором держится мир

Уже несколько десятилетий назад физики выяснили, что частицы, называемые глюонами, сохраняют протоны и нейтроны в неизменном виде — и таким образом удерживают Вселенную от разрушения; однако детали того, как именно глюоны делают это, до сих пор, как это ни странно, неизвестны

Раджу Венугопалан, Томас Ульрих и Рольф Энт

Illustration by Maria Corte



ОБ АВТОРАХ

Раджу Венугопалан (Raju Venugopalan) возглавляет Теоретическую группу по ядерной физике в Брукхейвенской национальной лаборатории, где он изучает взаимодействия кварков и глюонов высоких энергий.

Томас Ульрих (Thomas Ullrich) работает в Брукхейвенской национальной лаборатории с 2001 г., при этом одновременно ведет научные исследования и преподает в Йельском университете. Он принимал участие в ряде экспериментов по поиску и изучению кварк-глюонной плазмы сначала в CERN, а затем в Брукхейвене. Его нынешние усилия сфокусированы на создании электрон-ионного коллайдера.

Рольф Энт (Rolf Ent) с 1993 г. работает в Национальной лаборатории ускорителей им. Томаса Джефферсона в Ньюпорт-Ньюсе, штат Виргиния, заместителем директора по экспериментальной ядерной физике. Некоторое время был официальным представителем Национальной лаборатории по ряду экспериментальных исследований в области кварк-глюонной структуры адронов и атомных ядер.

Древние греки считали, что атомы — мельчайшие частицы материи во Вселенной. Ученые в XX в. расщепили атом, получив еще более мелкие составные части: протоны, нейтроны и электроны. В свою очередь, было показано, что протоны и нейтроны состоят из еще более мелких частиц, получивших название «кварки», которые удерживаются вместе с помощью «клейких» частиц, названных соответственно глюонами *(gluon от англ. glue — «клей». — Примеч. пер.)*. Данные частицы, как мы теперь знаем, — действительно фундаментальны, но оказалось, что даже эта картина неполна.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Материя, которая формирует наш мир, на фундаментальном уровне состоит из частиц, называемых кварками, которые удерживаются вместе «клейкими» частицами, соответственно получившими название «глюоны». Физики достигли огромных успехов в понимании механизма функционирования кварков и глюонов, но ряд таинственных загадок остаются до сих пор.
- Не ясно, например, каким образом кварки и глюоны вносят свой вклад в массу протонов и нейтронов или же каким образом они передают этим частицам свой спин. По-видимому, и кварки и глюоны обладают странным «цветовым» зарядом, но ни протоны, ни нейтроны «цвета» не имеют.
- Будущие эксперименты, которые позволят гораздо детальнее, чем когда-либо ранее, рассмотреть строительные блоки материи, возможно, помогут физикам лучше понять, как взаимодействуют кварки и глюоны.

Экспериментальные методы, позволяющие заглянуть внутрь протонов и нейтронов, открывают внутри них настоящий «симфонический оркестр». Каждая из этих частиц состоит из трех кварков и различного числа глюонов, а также из того, что мы называем морем кварков: пар «кварк — антикварк» (кварки в сопровождении своих партнеров из антиматерии, антикварков), которые непрерывно рождаются и исчезают. Но протоны и нейтроны — не единственные частицы, состоящие из кварков, найденные во Вселенной. В минувшую половину столетия в ходе экспериментов на ускорителях получено буквально полчище других частиц, состоящих из кварков и антикварков, которые вместе с протонами и нейтронами называются адронами.

Несмотря на все знание глубинных причин и взаимосвязей — и хорошее понимание того, каким образом отдельные кварки и глюоны взаимо-

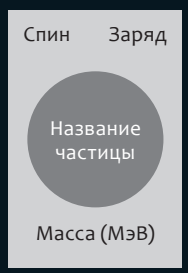
действуют друг с другом, — физики, к нашему разочарованию, не могут полностью объяснить, каким образом кварки и глюоны порождают весь диапазон характеристик и свойств, демонстрируемых протонами, нейтронами и другими адронами. Например, сложение масс кварков и глюонов внутри протонов не дает в сумме полную массу протонов, порождая загадку: откуда же берется недостающая масса? Более того, интересно выяснить, сколько именно глюонов выполняют работу по связыванию кварков и почему это связывание зависит, по-видимому, от специального типа «цветового» заряда кварков. Мы не понимаем также, каким образом вращение протона — измеряемая величина, называемая спином, — получается из спинов кварков и глюонов внутри него: это еще одна загадка, поскольку спины более мелких частиц не просто суммируются для получения результирующего спина.

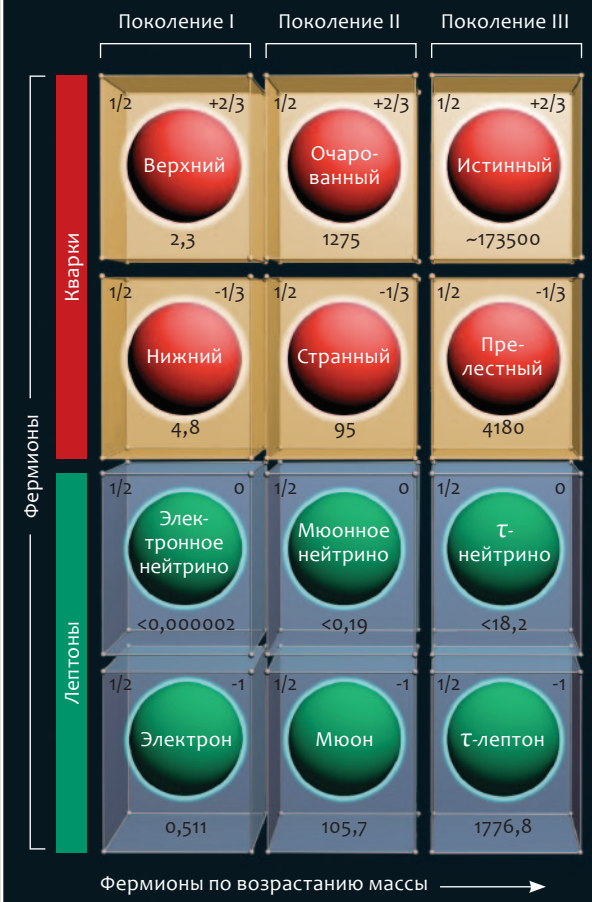
Если бы физики смогли найти ответы на эти вопросы, мы бы в конце концов начали понимать, как функционирует материя на своем фундаментальном уровне. Выявление основных загадок, затуманивающих картину взаимодействия кварков и глюонов (более подробно мы поговорим о них ниже), само по себе стало бы ключевым шагом к пониманию физики материального мира на его самых тонких уровнях. Ведущаяся сегодня работа и программы на будущее, включая исследования, сфокусированные на изучении экзотических конфигураций кварков и глюонов, вероятно, помогут пролить свет на эти загадки. А если удача улыбнется нам, то мы уже скоро сможем увидеть свет в конце туннеля.

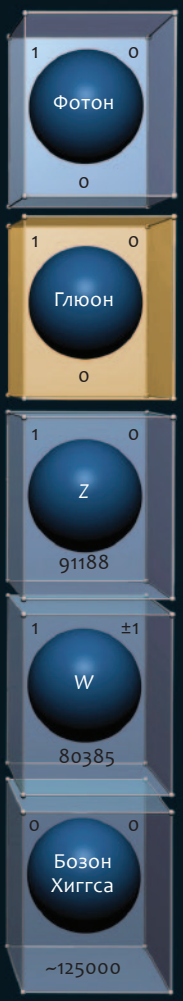
Строительные блоки природы

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ядра внутри всех атомов Вселенной содержат всего лишь две известные фундаментальные частицы: кварки и глюоны. Глюоны принадлежат к категории частиц, называемых бозонами (*справа*), которые, за исключением бозона Хиггса, служат переносчиками сил природы. Глюоны переносят самую мощную из всех сил — силу сильного взаимодействия, ответственную за связывание в единое целое кварков внутри протонов и нейтронов. Помимо бозонов, другие известные фундаментальные частицы во Вселенной относят к классу фермионов (*слева*), который включает в себя лептоны, такие как электрон, и кварки. Кварки бывают шести видов, или, как говорят физики, «ароматов», но кварки лишь двух ароматов, «верхний» и «нижний», компоненты протонов и нейтронов обнаружены в природе в большом количестве.







Откуда берется масса протона?

Загадочная история с массой — один из самых дебатируемых вопросов, очевиднее всего демонстрирующий, почему исследования кварков и глюонов столь сложны.

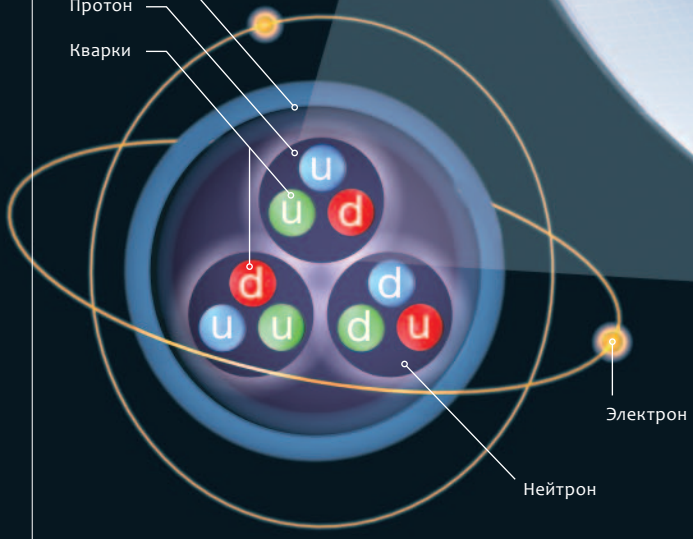
У нас есть вполне четкое понимание того, каким образом кварки и лептоны (класс элементарных частиц, который включает и электроны) обретают свою массу. Этот механизм возникает из бозона Хиггса, частицы, под гром фанфар открытой в 2012 г. на Большом адронном коллайдере (БАК), и связанного с ним поля Хиггса, которое пронизывает все пространство. Когда частицы пролетают через это поле, их взаимодействие с этим полем

СТРАННОСТИ КВАРКОВ И ГЛЮОНОВ

Каждый протон или нейтрон внутри атома содержит три кварка, удерживаемых вместе глюонами *(на этой стр.)*. Помимо этих трех основных кварков рождаются и почти сразу же исчезают дополнительные пары кварков и их двойников из мира античастиц — антикварков, а также фантомы— глюоны, которые тоже появляются и пропадают, создавая так называемую «квантовую пену», которая непрерывно меняет ландшафт внутри протонов и нейтронов. Эта какофония усложняет решение ряда фундаментальных вопросов, скажем, каким образом кварки и глюоны могут объяснить массы и спины своих родительских частиц и как именно глюоны удерживают кварки в стабильных конфигурациях. Один из способов, с помощью которых физики пытаются решить эти загадки, — рассмотреть теоретические свойства и даже попытаться искусственно воспроизвести необычные конфигурации глюонов и кварков *(на противоположной стр.)*.

Строение атома: две теории

В классической картине атома *(показано ниже)* электроны вращаются по орбитам вокруг ядра, состоящего из протонов и нейтронов, каждый из которых образован из трех кварков. Но на изображении справа показана квантовая пена — более соответствующее действительности представление о внутреннем строении субатомных частиц.



Глюон

Квантовая пена

Кварк

Вглядываясь внутрь протона или нейтрона, мы видим динамическую картину. Кроме основного трио кварков здесь бушует море кварков и антикварков, а также глюонов, возникающих из небытия и почти сразу же исчезающих.

На полный спин протона или нейтрона *(стрелка)*, возможно, влияют составляющие его частицы, а также их орбитальное движение.

Экзотические состояния материи

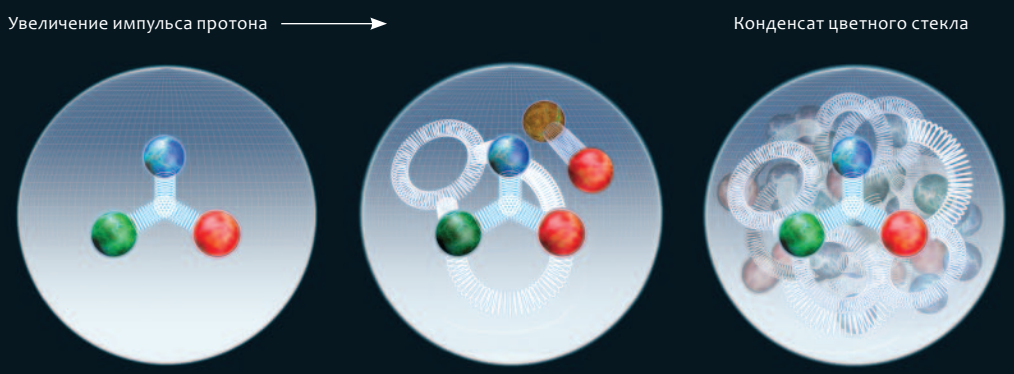
Физики построили теории, а в ряде случаев и экспериментально создали необычные комбинации кварков и глюонов помимо хорошо известных протонов и нейтронов. Эти экзотические состояния дают новые возможности для изучения взаимодействий, которые, вероятно, имеют место между кварками и глюонами, — потенциально полезных для разрешения основополагающих загадок материи.

Глюболы и их родственники

Теоретические модели дают основания предполагать, что кварки и глюоны, сочетаясь, могут порождать не только протоны и нейтроны, но и другие частицы. Например, возможно, что существуют «глюболы» *(a)* — частицы, состоящие из одних лишь глюонов, а также «гибридные частицы», представляющие собой связанные состояния «кварк – антикварк – глюон» *(b)*, или даже «тетракварки» — частицы, в которых два антикварка связаны с двумя кварками *(c)*. Существуют все больше доказательств, что тетракварки уже были обнаружены, хотя глюболы и частицы-гибриды все еще ждут своего открытия.

Насыщенные состояния

Когда протоны и нейтроны ускоряются до релятивистских скоростей, глюоны в них начинают множиться. При большой скорости энергия протона возрастает и глюоны расщепляются на дочерние пары, энергия каждой из которых слегка меньше, чем у родительской. Новые глюоны, в свою очередь, порождают другие дочерние с еще немного меньшей энергией. В конце концов в протоне достигается «максимальная населенность», предел, когда внутри протона уже не может поместиться больше глюонов, — теоретическое состояние, получившее название «конденсат цветного стекла». Достаточно веские признаки существования такого состояния были получены на ускорителях элементарных частиц, но убедительного подтверждения этого до сих пор нет.



Имитация Вселенной юного возраста

Когда космос был молод, он был слишком горяч, чтобы могли образоваться атомы или даже стабильные протоны и нейтроны. Кварки и глюоны роились свободно в беспорядочном круговороте. В построенных на Земле ускорителях в последнее время удается воспроизвести такое состояние, называемое кварк-глюонной плазмой *(в представлении художника, внизу слева)*, сталкивая ядра атомов со скоростями, близкими к скорости света. Изучая процесс остывания плазмы, физики могут узнать не только о поведении кварков и глюонов, но и о ранней эволюции нашей Вселенной.

Illustration by Moonrunner Design

наполняет их массой. Часто говорят, что механизм Хиггса служит причиной возникновения массы в наблюдаемой Вселенной. Это утверждение, однако, не соответствует действительности. Масса кварков составляет лишь 2% массы протона и нейтрона. Остальные 98%, как мы полагаем, возникают в основном из-за воздействия глюонов. Но каким образом глюоны способствуют возникновению массы протона и нейтрона, совсем не очевидно, поскольку сами они массы не имеют.

Ключ к решению этой загадки дает известное уравнение Альберта Эйнштейна, связывающее массу частицы с остальной ее энергией. Обращая это уравнение следующим образом: $m = E/c^2$, мы замечаем, что можно сказать, что масса *(m)* покоящегося протона возникает из его энергии *(E)*, выраженной в единицах скорости света *(c)*. Поскольку основной вклад в энергию протона дают глюоны, теоретически, чтобы рассчитать массу протона, требуется лишь выяснить суммарную энергию глюонов.

Однако вычислить энергию глюонов трудно, отчасти потому что их суммарная энергия порождается несколькими различными факторами. Энергия свободной частицы (не связанной с другими) — это энергия ее движения. Однако кварки и глюоны почти никогда не существуют изолированно, сами по себе. Их существование в виде свободных частиц — прежде чем они соединятся друг с другом, образуя другие субатомные частицы, и в буквальном смысле исчезнут из виду — длится невообразимо короткое время (менее 3×10^{-24} секунды). Более того, энергия в глюонах возникает не только из их движения; она неотделима от энергии, которую они тратят, связываясь вместе с кварками в долгоживущие частицы. Следовательно, для разрешения загадки массы необходима бóльшая ясность в понимании того, каким именно образом глюоны «склеивают» кварки. Но и здесь тоже глюоны расставили барьеры, препятствующие расшифровке их загадок.

Как глюоны склеивают кварки?

С одной стороны, ответ на вопрос, каким образом глюоны склеивают кварки, довольно прост: они используют для этого силы сильного взаимодействия. Но сила эта сама по себе таит загадки.

Сила сильного взаимодействия — одна из четырех фундаментальных сил природы вместе с гравитационной и электромагнитной силами, а также силой слабого взаимодействия (последняя ответственна за радиоактивный распад). Из этих четырех сил она самая сильная (отсюда и ее название). Кроме того что она связывает воедино кварки, образуя адроны, сила сильного взаимодействия также связывает вместе протоны и нейтроны в атомные ядра, преодолевая гигантское электромагнитное отталкивание, которое наблюдается между одинаково заряженными протонами в ядре. Каждая из фундаментальных сил природы, как полагают, связана с определенной частицей, так называемым переносчиком взаимодействия. Так же как фотон, фундаментальная единица света, — переносчик сил электромагнетизма, глюон — переносчик сил сильного взаимодействия.

До сих пор все верно. Но сила сильного взаимодействия иногда ведет себя неожиданным образом. Согласно квантовой механике, расстояние, на котором действует сила, обратно пропорционально массе ее переносчика. Так, например, пространственный диапазон действия электромагнитных сил не ограничен; свободный электрон на Земле теоретически испытывает легкое отталкивание со стороны электрона, расположенного на другой стороне Луны. Следовательно, фотоны, которые переносят силы между электронами, не имеют массы. В противоположность электромагнитным силам диапазон действия сил сильного взаимодействия не выходит за пределы ядер атомов. Из этого факта должно было бы следовать, что глюоны очень массивны. Однако, как оказалось, глюоны массы не имеют.

Странность сил сильного взаимодействия состоит также и в том, что они, по-видимому, притягивают кварки тем сильнее, чем больше те удаляются. В противоположность этому электромагнитная сила притяжения (или отталкивания) между двумя магнитами сильнее всего, когда они находятся рядом друг с другом, и слабеет, когда они удаляются друг от друга. Впервые физики наблюдали кварки в 1960-е гг. в экспериментах в Стэнфордском центре линейных ускорителей (сегодня Национальная лаборатория ускорителей СЦЛУ), в ходе которых высокоэнергетические электроны сталкивались с мишенями из протонов. Иногда электроны проходили насквозь, но в других случаях они сталкивались с чем-то твердым и отражались назад. Их отраженная скорость и направление показывали наличие и расположение кварков внутри протонов. Эти эксперименты по так называемому «глубоконеупругому рассеянию» (ГНР) показали, что кварки слабо притягивают друг друга на коротких расстояниях; однако на больших дистанциях никаких свободных кварков не наблюдалось, из чего следует предположение, что они должны сильно притягивать друг друга.

Чтобы получить представление о том, как работают силы сильного взаимодействия, вообразите два кварка, связанных друг с другом пружинами. Когда они расположены рядом друг с другом, натяжение пружины ослабевает и кажется, что кварки не испытывают никаких воздействий. Когда они отодвигаются дальше друг от друга, силы механического напряжения пружины удерживают их вместе. Эта сила притяжения между кварками соответствует весу 16 т при удалении

примерно равном размеру протона. Но что случится, если внешняя сила будет действовать, сжимая кварки, в направлении противоположном действию притяжения сил сильного взаимодействия? Пружина разорвется. Еще одна загадка, которой мы не можем полностью найти объяснение, — как именно происходит этот разрыв, и это центральный момент загадки, каким образом глюоны склеивают кварки внутри атомного ядра, а не вне его.

Почему некоторые частицы имеют цвет?

В 1970-е гг. физики выдвинули теорию, получившую название «квантовая хромодинамика» (КХД), которая математически описывает силу сильного взаимодействия. Так же как электромагнитная сила «привязана» к электрическому заряду частицы, сила сильного взаимодействия, согласно КЭД, «привязана» к свойству, получившему название «цветовой заряд». Понятие цвета помогает прояснить, почему силы сильного взаимодействия ведут себя столь отлично от электромагнитных сил. Но при этом оно рождает ряд новых проблем — например, почему у некоторых частиц есть цвет, а у других нет и, следовательно, они «дальтоники».

Число глюонов и кварков внутри всем хорошо известного протона может значительно изменяться

Согласно КЭД, как кварки, так и глюоны несут цветовой заряд. Все «цветные» частицы взаимодействуют, обмениваясь глюонами, а это подразумевает, что не только кварки посылают туда и обратно глюоны, но и сами глюоны тоже обмениваются глюонами друг с другом. Это допущение квантовой хромодинамики — значительный отход от электромагнетизма. Фотоны не взаимодействуют друг с другом, как это ясно и понятно можно показать, пересекая один световой пучок другим в запыленной комнате. Физики полагают, однако, что взаимодействие глюонов друг с другом — основная причина того, почему силы сильного взаимодействия ослабевают на близкой дистанции. Глюон может временно превратиться либо в пару «кварк — антикварк», либо в глюонную пару, прежде чем снова предстать перед нами в виде одного глюона. Флуктуации «кварк — антикварк» делают силу взаимодействия между цветовыми зарядами сильнее, тогда как флуктуации глюонных пар ее уменьшают. Поскольку в КХД такие глюонные осцилляции происходят чаще, чем обмен между кварками, они и одерживают победу. (Физики Дэвид Гросс, Фрэнк Вилчек и Дэвид Политцер получили Нобелевскую премию 2004 г. по физике за это открытие.)

За десятилетия, прошедшие со времени открытия КЭД, эксперименты во всем мире подтвердили обоснованность притязаний этой теории на роль одного из столпов стандартной модели физики элементарных частиц. Однако многие детали КЭД остаются неуловимыми. Странно, например, то, что, хотя каждый из трех кварков в протоне несет один из трех цветовых зарядов, скажем, красный, зеленый и синий, сам протон не имеет суммарного цветового заряда. Аналогичным образом и кварк, и антикварк в адроне, получившем название «ϖ-мезон» (часто называемом также «пион»), оба несут цветовые заряды, но пион бесцветен. Цветовая нейтральность адронов аналогична электрической нейтральности атомов. Но если нулевой суммарный электрический заряд атомов — понятное следствие нейтрализации положительного заряда протонов отрицательными зарядами электронов, каким образом цветные кварки и цветные глюоны комбинируются, чтобы получились бесцветные адроны, КЭД ответа не дает.

КЭД должна также объяснить, каким образом протоны и нейтроны преодолевают мощное электромагнитное отталкивание между протонами, чтобы держаться вместе внутри ядер атомов. Но, несмотря на некоторый прогресс, вывести законы ядерной физики из КЭД — задача очень непростая. Это препятствие остается, поскольку уравнения КЭД невероятно трудно решать при больших *(с точки зрения фемтомира. — Примеч. пер.)* расстояниях, когда взаимодействие между кварками и глюонами становится очень сильным. К тому же у нас нет математического доказательства того, как уравнения КЭД обеспечивают то, что цветные кварки и глюоны удерживаются внутри бесцветных адронов. Загадка цветового удержания, или, как говорят, конфайнмента, в буквальном смысле представляет собой «вопрос на миллион» — это одна из шести проблем, за решение которых Математический институт Клэя установил награду размером $1 млн.

Почему число глюонов не растет до бесконечности?

Поразительное следствие КЭД состоит в том, что число глюонов и кварков внутри всем хорошо известного протона может значительно изменяться. В дополнение к трем основным кваркам вокруг как светлячки носятся, вспыхивая и тут же угасая, глюоны, число которых постоянно изменяется. Здесь же образуются и снова исчезают пары «кварк — антикварк». Результат — «квантовая пена» рождающихся и умирающих частиц. Физики полагают, что, когда протоны и нейтроны достигают экстремальных скоростей, глюоны внутри протонов расщепляются на пары новых глюонов, каждый со слегка меньшей энергией, чем

у родителей. Дочерние глюоны, в свою очередь, рождают новых дочерей с еще меньшей энергией. Такое расщепление глюонов напоминает поведение вышедшей из-под контроля машины для попкорна. Теория утверждает, что этот процесс мог бы продолжаться бесконечно, однако мы знаем, что этого не происходит.

Если бы глюоны продолжили порождать новые, у машины для попкорна сорвало бы крышку — другими словами, протон стал бы нестабильным и разрушился. Но поскольку материя очевидно стабильна (мы существуем), ясно, что нечто должно сдерживать этот каскад лавины, — но что? Одна из идей заключается в том, что природе удается установить знак максимальной населенности, когда глюонов становится так много, что они начинают перехлестываться друг с другом внутри протона. Сильные самовоздействия заставляют их отталкиваться друг от друга, и глюоны с меньшей энергией рекомбинируют, образуя глюоны с большей энергией. Когда рост числа глюонов сходит на нет, глюоны достигают стабильного равновесного состояния — одинакового числа актов деления и рекомбинации, называемого глюонным насыщением, приводя тем самым машину для попкорна под контроль.

Недавно физики открыли еще одно экстремальное состояние материи, получившее название «кварк-глюонная плазма». Эта плазма — самая горячая материя, которая когда-либо была создана на Земле, с температурой более чем триллион градусов Цельсия

Это гипотетическое состояние глюонного насыщения, часто называемое «конденсат цветного стекла», стало бы дистиллированной сущностью некоторых из самых сильных сил во Вселенной. До сих пор у нас есть только намеки на существование такого состояния, и его свойства еще полностью не выяснены. Изучая это состояние с использованием экспериментов по глубоконеупругому рассеянию с энергией большей, чем это возможно сегодня, физики смогут «с близкого расстояния» изучать глюоны в их самой плотной, экстремальной форме. Возможно, поле силы, ограничивающее количество глюонов, которые могут образоваться внутри конденсата цветного стекла, — это то же самое удерживающее поле, что скрепляет протоны в первом случае? Если это так, то наблюдение одного и того же поля в различных обстоятельствах, может статься, даст нам новое понимание того, каким образом глюоны порождают это поле.

Откуда берется спин протона?

Еще одна загадка из мира кварков и глюонов: какой вклад вносят их спины в суммарный спин их родительских частиц? Все адроны имеют спин, который есть квантовая аналогия энергии вращения волчка вокруг его оси. Адроны с различными спинами в поле мощных магнитов прецессируют и закручиваются в различных направлениях.

Эксперименты по изучению спина протона показывают, что вклад кварков составляет приблизительно 30% его полной величины. Где прячется оставшаяся часть спина этих адронов? Многочастичная картина протона как бурлящего моря из кварков и глюонов непосредственно предполагает, что остальная часть спина, вероятно, вносится глюонами. Но эксперименты по бомбардировке поляризованными протонами (когда их спины ориентированы вдоль направления движения или строго в противоположную сторону) других поляризованных протонов показывают, что спин глюонов составляет всего лишь 20% спина протона, а значит, 50% спина все еще где-то прячутся.

Небесная аналогия иллюстрирует возможное решение этой проблемы. Момент импульса Солнечной системы состоит из суммы моментов импульса, связанных с вращением планет вокруг их осей, а также вызванных их орбитальным движением вокруг Солнца. Чтобы понять, насколько важно это орбитальное движение, мы должны нанести на карту как скорости, так и расположение кварков и глюонов внутри протона. Один из нас (Рольф Энт) участвует в проведении экспериментов по глубоконеупругому рассеянию электронных пучков очень большой интенсивности. По уровню детализации мы двигаемся от простых фотографий к трехмерным фильмам, показывающих материю на субфемтометровых (менее одной квадриллионной доли метра, 10^{-15} м) расстояниях.

Экзотические состояния материи

Чтобы понять истинную природу взаимодействий кварка и глюона, мы должны изучить их не только лишь в знакомых конфигурациях протона, нейтрона и других хорошо известных частиц, но также и во всех возможных их формах. КХД допускает существование экзотических адронных состояний помимо протона и нейтрона. Моделирование дает основания предполагать, что могут существовать и другие «бесцветные» адроны, такие как «глюбол» (состоящий исключительно из глюонов),

«молекулы», состоящие из двух пар «кварк — антикварк», или сущности, представляющие собой гибриды, классифицируемые как связанное состояние «кварк — антикварк — глюон». Экспериментальные свидетельства существования этих экзотических адронов ограничены, до сих пор удалось обнаружить всего лишь несколько кандидатов на молекулу тетракварка *(экзотический адрон, состоящий из двух кварков и двух антикварков. — Примеч. пер.)*. Однако эта ситуация, возможно, уже в скором времени радикально изменится благодаря ряду экспериментальных исследований, ведущихся сейчас во всем мире. Особенно следует отметить специальную установку, названную «Глю-Х», которая начинает работу в Национальной лаборатории ускорителей им. Томаса Джефферсона в Ньюпорт-Ньюсе, штат Виргиния.

Недавно физики открыли еще одно экстремальное состояние материи, получившее название «кварк-глюонная плазма». Она образуется, когда ядра атомов сталкиваются со скоростями, близкими к скорости света. Теоретики подозревают, что, когда летящие с огромными скоростями нейтроны и протоны двух ядер сталкиваются друг с другом, их конденсаты цветного стекла рушатся, разрушая цветовое удержание кварков и глюонов и высвобождая энергию конденсатов, и образуют бешеный рой кварков и глюонов. Эта плазма — самая горячая материя, которая когда-либо была создана на Земле, с температурой более чем триллион градусов Цельсия. Поразительно, но это вещество течет, почти не испытывая сопротивления, — почти в 20 раз меньше, чем вода.

Кварк-глюонная плазма очень сильно напоминает раннюю Вселенную. Ученые создали такую плазму в Брукхейвенской национальной лаборатории на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов и в *CERN* на Большом адронном коллайдере и наблюдают сегодня самые мелкие и совершенные ручьи. Исследуя такую плазму, когда она остывает, двое из нас (Раджу Венугопалан и Томас Ульрих) и другие физики получают более четкую картину того, как эволюционировала Вселенная. А устроив разрушение протонов и нейтронов и превращение их в плазму таким способом, ученые могут изучать цветовое удержание в обратной последовательности в надежде открыть секреты того, как склеиваются друг с другом кварки и глюоны.

Дальнейшие шаги

В идеале физики хотели бы полностью картографировать расположение, характер движения и спины глюонов и кварков внутри протона и нейтрона. Такие карты помогли бы нам рассчитать вклад, который кварки и глюоны делают в полную массу и спин из родительских частиц. Эти карты позволят получить беспрецедентное проникновение в тайны поведения кварков и глюонов, которые скрепляют воедино протоны и нейтроны. Построение подобных изображений потребует «кварк-глюонного фемтоскопа» — инструмента для глубоконеупругого рассеяния, чего-то вроде микроскопа, который будет вглядываться во Вселенную в масштабах порядка одной тысячной радиуса протона. В США Лаборатория им. Джефферсона и Брукхейвенская лаборатория ищут средства и одобрение правительства на сооружение фемтоскопа, в котором электроны будут сталкиваться с поляризованными протонами и ядрами свинца. В противоположность предыдущим экспериментам, в которых быстролетящие электроны сталкивались с неподвижными ядрами мишеней, оба типа частиц, прежде чем столкнуться лоб в лоб, будут ускоряться в этой машине почти до скорости света.

Электрон-ионный коллайдер (ЭИК), который пока существует только на бумаге, достигнет беспрецедентного уровня интенсивности, т.е. частицы в сталкивающихся пучках будут упакованы столь плотно и их число будет столь велико, что столкновения будут происходить с большей частотой, чем когда-либо ранее. Увеличение числа столкновений до количества в 1 тыс. раз больше, чем на предыдущем ГНР-коллайдере, позволит ученым получить множество отдельных фотографий внутреннего устройства протонов и нейтронов.

За четыре десятилетия, прошедшие со времени формулировки квантовой хромодинамики, физики сделали довольно много шагов в объяснении того, почему силы сильного взаимодействия ведут себя так, а не иначе, и в понимании того, где имеются пробелы в наших знаниях о динамике кварков и глюонов. Однако мы еще не вписали главы, которых недостает для того, чтобы создать простую и логически последовательную историю о том, каким образом глюоны — эти клейкие частицы — склеивают наш мир. Техника, разрабатываемая сегодня, дает нам надежду, что по прошествии еще 40 лет мы наконец-то разгадаем важнейшую загадку, как устроена материя на ее фундаментальном уровне. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

■ Райордэн М., Зэйц У. Первые микросекунды // ВМН, № 8, 2006.

■ Reliable Perturbative Results for Strong Interactions? H. David Politzer in Physical Review Letters, Vol. 30, No. 26, pages 1346–1349; June 25, 1973.

■ Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories. David J. Gross and Frank Wilczek in Physical Review Letters, Vol. 30, No. 26, pages 1343–1346; June 25, 1973.