

КОЛЛАЙДЕР
НИСА!

*достать
до нейтронных
звезд*

В Московской области продолжается строительство коллайдера тяжелых ионов *NICA*, где будут изучать кварк-глюонную материю — состояние вещества, которое находится в недрах нейтронных звезд. Ученые Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне уже получили из Италии ключевой элемент исследовательской установки *MPD* (*Multi-Purpose Detector*) строящегося ускорительного комплекса — катушку сверхпроводящего соленоидального магнита.

Об уникальной логистической операции и о том, зачем мировой науке нужен проект NICA, нам рассказал член-корреспондент РАН Владимир Дмитриевич Кекелидзе, и.о. вице-директора ОИЯИ по мегасайенс-проекту NICA, директор Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.



С В.Д. Кекелидзе мы встретились в сердце синхрофазотрона — внутри ярма знаменитого ускорителя, запущенного еще в 1957 г. Тогда это был самый высокоэнергичный протонный ускоритель в мире: человечество впервые перешагнуло рубеж по энергии в 10 ГэВ. Создателем советского ускорителя, попавшего в Книгу рекордов Гиннеса за самый тяжелый в мире электромагнит, был известный физик-экспериментатор В.И. Векслер. Сегодня нутро бывшего синхрофазотрона служит туннелем для бустера (промежуточного синхротрона тяжелых ионов) будущего коллайдера NICA. Из-за своего веса — 36 тыс. т — он выполняет также роль якоря, стабилизирующего фундамент всего здания.

— **Владимир Дмитриевич, в Дубне состоялось уникальное событие: из Италии привезен главный элемент детектора будущего коллайдера NICA — сверхпроводящая катушка магнита. Сложно ли было организовать логистику операции доставки?**

— Сам по себе магнит такого размера — уже исключительное инженерное сооружение. Причем мы должны не просто получить катушку с большим объемом магнитного поля, внутри которого будут располагаться детектирующие элементы, но нам необходимо будет создать поле очень высокой однородности; это позволит восстанавливать

с высокой точностью процессы, которые мы будем изучать в ходе столкновения ионов на пучках коллайдера.

Ярмо самого магнита уже в нашем институте, это железо весом около 700 т. Катушка, создающая поле, проектировалась в России («Нева-Магнит»), но собиралась в Италии на известном предприятии ASG Superconductors. Компания уже имела опыт изготовления похожих катушек, в частности для одного из детекторов Большого адронного коллайдера (БАК), поэтому мы выбрали именно эту фирму.

Процесс изготовления занял около пяти лет. Почему так долго? Потому что прежде чем создать магнит такого размера, обеспечивающий магнитное поле высокой однородности, причем из уникальных материалов, надо было спроектировать и сделать набор инструментов, с помощью которого изготавливаются основная и корректирующие катушки, криостат (вакуумный сосуд) и многие другие элементы магнита. Кстати, этот набор инструментов — намоточная машина, механическая оснастка, внутренних размеров печь для запекания обмотки — имеет гораздо большие размеры, чем сама катушка.

Несколько лет ушло на разработку и создание этого набора инструментов, с помощью которого надо было протестировать сверхпроводящую кабель для катушки, поскольку она работает при температуре, близкой к нулю по абсолютной шкале Кельвина, намотать основную и корректирующие катушки. Далее необходимо было изготовить криостат и поместить в него основную катушку — и это тоже очень непростая инженерная задача, — затем все собрать, обеспечить вакуум в криостате и испытать.

И, наконец, сегодня криостат со сверхпроводящей катушкой внутри прибыл к нам в Дубну! Крайне сложная логистическая операция завершилась успешно. Вся процедура доставки заняла чуть больше месяца, но волнений было очень много.

— **Доставка была возможна только по воде?**

— Да, из-за размера и веса криостата скатушкой. По пути из Генуи в Дубну груз побывал в красивейших местах России: в порту Санкт-Петербурга, на Ладожском, Онежском, Белом озерах и реке Волге.

Саркофаг с нашим инженерным сооружением внутри был погружен на корабль в Генуе 25 сентября. Ровно через месяц он прибыл в порт Северной столицы, где был разгружен и растаможен, а оттуда его перегрузили на баржу с буксиром и отправили к нам в Дубну.

5 ноября мы, собравшиеся у порта местные жители и журналисты стали свидетелями того, как долгожданная «посылка» перегружается с баржи на автомобильную платформу. Для этого был задействован самый мощный мобильный портовый кран в мире — *Liebherr LHM 800*. Затем автомобильная платформа должна была преодолеть последнюю дистанцию, перед тем как попасть к месту назначения, — дорогу от порта Дубны до нашего института, около 3 км. Машина прошла этот путь за несколько часов. Из-за больших габаритов груза (высота — 7,6 м) в городе на это время даже пришлось отключить электричество: в двух местах нужно было проехать под высоковольтными линиями. Потребовалось их обесточить, согласно технике безопасности, заземлить и слегка приподнять, чтобы груз смог пройти.

Задача по перевозке криостата с катушкой из Италии усложнялась тем, что навигация обычно заканчивается в середине или в конце ноября. Поэтому мы переживали, успеем или нет, ведь кроме того что груз нужно доставить в Россию, еще необходимо успеть его растаможить в порту Санкт-Петербурга. К счастью, благодаря серьезной подготовительной работе наших служб и согласованным действиям с таможней груз удалось провести через таможню в установленный срок.

— **Правда ли, что NICA будет работать с такими энергиями и состояниями вещества, которые недостижимы на других установках, например на том же БАК?**

— Вы правы. Каждая установка, коллайдер или просто ускоритель, детектор, нацелена на определенный круг задач. Задача БАК — приблизиться к максимально достижимым энергиям, которые вообще возможны на данном этапе технологического развития. Достигнутые энергии позволили открыть бозон Хиггса, ведь проект изначально и был на это ориентирован.

В нашем же случае задача — достичь максимальной возможной в лабораторных условиях и вообще во Вселенной плотности ядерной материи. Такое ядерное состояние вещества ожидается в недрах нейтронных звезд, там, где очень большая гравитация и где обычные ядра переходят

не просто в свои составляющие — протоны и нейтроны, а где последние, сжимаясь, превращаются в «кашу» из кварков и глюонов.

Вот такую «кашу» из кварков и глюонов мы и будем создавать, но только не путем гравитационного сжатия, как в нейтронных звездах, а путем столкновения тяжелых ядер, например двух ионов золота, при вполне определенной энергии. Причем если энергия будет ниже оптимальной — около 10 ГэВ на каждый нуклон иона, — то не удастся разрушить ядро и нуклоны, а если, напротив, выше, то не удастся создать большую ядерную плотность. Поскольку мы нацелены на исследование ядерной материи максимальной плотности, нам нужны вполне определенные энергии и определенные ядра, которые мы будем сталкивать.

Хочу, кстати, отметить огромный вклад ученых и инженеров Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, без поддержки которых мы вряд ли решились бы на реализацию столь амбициозного проекта, как NICA.

— **Что представляет собой ядерная материя, о которой вы упомянули?**

— Ядерная материя — достаточно широкое определение. В нашем случае это барионная материя. А барионы, барионная материя — это все, что нас окружает, из чего состоите вы, я и весь окружающий нас мир, потому что барион — это протон или нейтрон, а все ядра состоят из протонов и нейтронов. Так что материя — это в основном барионы, а антиматерия — антибарионы. Накопить

Коллайдер NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility)

Коллайдер NICA — новый ускорительный комплекс, который создается на базе ОИЯИ для изучения свойств плотной барионной материи. Ожидается, что ученые смогут воссоздать в лабораторных условиях особое состояние вещества — кварк-глюонную плазму, которое существует в недрах нейтронных звезд. С помощью коллайдера NICA физики надеются получить новые знания о строении ядерной материи (одна из целей — поиск критической точки на фазовой диаграмме ядерной материи) и решить ряд фундаментальных и прикладных задач. В реализации международного проекта участвуют более 20 стран мира. Ввод всего комплекса в эксплуатацию намечен на 2023 г. В лабораторных условиях ученые смогут наблюдать, как бесконечно малые частицы — кварки — начнут группироваться и образовывать обычное ядерное вещество. Подобный процесс происходил при нескольких других условиях во время рождения Вселенной.

максимальное количество барионов в единице объема и есть наша задача, то есть загнать в микроскопический объем максимальное количество ядер.

— **Таким образом вы получите состояния, схожие с теми, что существуют в недрах нейтронных звезд? А ведь предполагают, что внутри нейтронных звезд как раз и находятся кварки, а сверху — оболочка из нейтронов.**

— Все верно. Ожидается, что внутри нейтронных звезд будет «каша», или «суп», из кварков и глюонов. И вот на какое-то мгновение в микроскопическом объеме мы надеемся получить с помощью коллайдера *NICA* то же самое состояние материи, а потом постараться понять, как она переходит из одной фазы в другую (из привычной нам фазы исходных ядер, сталкивающихся в коллайдере в кварк-глюонную материю) и, остывая, возвращается в начальную фазу, формируя уже новые частицы и ядра.

— **Тогда я не могу не задать, наверное, самый популярный вопрос: а не создадим ли мы тем самым нейтронную звезду «в пробирке»? Помню, когда строился БАК, многие неспециалисты всерьез опасались, что там случайно родится черная дыра и всех нас погубит. Насколько правдоподобны такие сценарии?**

— Никаких глобальных угроз в ускорительных экспериментах нет. Здесь, как и в любых технически сложных установках, есть риски механических повреждений плюс опасность облучения: например, если кто-то попадет под пучок заряженных частиц. Кстати, такие случаи в мировой практике бывали.

В отличие от реакторов, где сложно управлять ядерным процессом, в ускорителях заряженных частиц все устроено проще: вы выключили рубильник, отключили электричество — и у вас больше нет ни радиации, ни пучков элементарных частиц. Поэтому коллайдер — весьма безопасный прибор, но обращаться с ним нужно очень осторожно, как и с любым сложным инструментом.

Что же касается опасных природных явлений, которые якобы могут быть воспроизведены путем таких экспериментов, то это, конечно, полная глупость. Никакой угрозы эти опыты не несут, потому что все, что там происходит, это настолько микроскопические масштабы, что вы их даже не сможете увидеть ни под каким оптическим микроскопом.

Кстати, сам по себе детектор нашего коллайдера, *MPD*, и есть весьма сложный микроскоп, создаваемый для того, чтобы увидеть, распознать то, что происходит в масштабах порядка Ферми или нескольких Ферми, а Ферми — это 10–13 см.

— **Есть такое необычное явление при фазовом переходе из одного состояния вещества в другое, скажем, из жидкости в пар, когда поведение физических величин становится универсальным. То есть кривая фазового перехода заканчивается некоей критической точкой, вблизи которой даже самые разные вещества (например, железо, вода) ведут себя совершенно одинаково, и это поистине удивительно! Планируется ли изучать это явление на уровне ядерной материи с помощью коллайдера *NICA*?**

— Да, такое интересное явление действительно может существовать. Фазовая диаграмма ядерной материи наглядно показывает эти переходы. Скажем, если отложить по горизонтальной оси плотность барионов, а по вертикальной шкале — энергию или температуру (что фактически одно и то же), то при повышении температуры ожидается плавный фазовый переход в кварк-глюонное состояние в области минимальной плотности барионов; это уже было показано в экспериментах на БАК и на коллайдере *RHIC* в Брукхейвенской национальной лаборатории.

Ожидается, что в эксперименте на коллайдере *NICA*, в условиях большой барионной плотности, должен существовать фазовый переход первого рода, при котором характерные параметры состояния материи изменяются скачком. Так вот сам по себе фазовый переход первого рода, если он будет обнаружен, станет важным открытием. А если есть фазовый

переход первого рода, если он будет обнаружен, станет важным открытием. А если есть фазовый



Для транспортировки саркофага со сверхпроводящей катушкой внутри использовался самый мощный в мире мобильный портовый кран

переход первого рода и есть в какой-то части диаграммы плавный переход, то между ними должна быть критическая точка. Это уже фазовый переход второго рода.

Такое открытие может стать сенсацией и позволит глубже понять свойства кварковой материи.

— Ожидается, что с помощью нового коллайдера удастся зафиксировать свободные кварки?

— Многие знают из научно-популярной литературы, что каждый протон и нейтрон состоит из трех кварков. Чтобы вырвать кварки оттуда, необходима огромная сила, поскольку кварки в нуклонах (нейтронах и протонах) связаны так называемым сильным взаимодействием, максимальной из известных сил природы. И кварки не могут существовать в природе самостоятельно. Если вырвать кварк из протона или нейтрона, то он мгновенно находит себе пару — антикварк — и образует частицу — мезон; или находит еще два кварка и образует опять же протон или нейтрон. Но если кварки сильно сблизить, то взаимодействие между ними ослабевает и кварки становятся квази-свободными.

— Но ранее их свободными ни разу не видели?

— Верно. Свободными они могут быть лишь ничтожное мгновение и при определенных условиях. Чтобы получить свободные кварки, нужно невероятно плотно сжать материю, и вот в таком состоянии кварки становятся свободными и забывают своих «родителей»: кому они принадлежали, какому протону или нейтрону. Они перемещиваются, взаимодействуют и, объединяясь, воспроизводят новые частицы: новые протоны, нейтроны, более легкие частицы — мезоны, — словом, весь спектр элементарных частиц, который известен сегодня.

— Мы знаем, что кварки удерживаются между собой глюонами, справедливо получившими свое название от английского слова *glue* («клей»). Существует интересная гипотетическая частица глюбол, состоящая исключительно из этого клея. Как вы относитесь к подобной идее?

— Идея вполне здравая. Есть ряд экспериментов, в которых ищут так называемые глюболы, но сегодня, насколько мне известно, нет явных доказательств их существования. Глюбол теоретически может существовать и имеет право на жизнь. Глюоны — это переносчики сильного взаимодействия, так же как фотоны — переносчики электромагнитного взаимодействия. Электроны, позитроны или любые заряженные частицы могут излучать фотоны. Тепло и свет, которые нас согревают и освещают, — это тоже фотоны. В сильных взаимодействиях роль фотонов играют глюоны, только они переносят не электромагнитные, а сильные взаимодействия. Они как раз и связывают кварки между собой.

— Считается, что кварк — это фундаментальная частица, мельче которой ничего нет. Но можно ли предположить, что у кварка все же есть структура, то есть более мелкие элементы? Поможет ли NICA ответить на этот вопрос?

— Какой-то коллайдер, возможно, и поможет, но уж точно не наш. Даже Большой адронный коллайдер не проникнет в структуру кварков. Если там и есть структура, то для ее обнаружения нужны гораздо большие энергии, чем у того же БАК. Дело в том, что чем глубже и тоньше внутренняя структура, чем она мельче, тем более высокие требуются энергии для ее распознавания. На сегодня, конечно, кварки считаются точечной, то есть бесструктурной частицей, хотя они имеют массу и даже определенный размер. Не исключено, что на самом деле кварки могут иметь структуру, но это — и новые теоретические идеи, и эксперименты далекого будущего, а не нашего поколения.

— То есть там нужны принципиально новые ускорители?

— Следующий ускоритель, который, возможно, построят в CERN, будет иметь периметр не 27 км, как сейчас, а уже 100 км. Но и этого, скорее всего, будет недостаточно для разрушения кварка и обнаружения его внутренней структуры, если такая имеется.

Кстати, попытки сделать ускорители, коллайдеры масштаба БАК предпринимались неоднократно. Первая попытка была у нас — это Ускорительно-накопительный комплекс (УНК) в Протвине, вторая — SSC в Техасе, третья, оказавшаяся самой удачной, — БАК в CERN. Но, видимо, в будущем останется лишь одна международная организация, обладающая установкой столь глобального масштаба, потому что слишком уж расточительно делать несколько мощнейших коллайдеров. И именно международное сотрудничество и глобализация позволяют оптимизировать ресурсы и усилия, чтобы создавать такие мощные ускорители.

— Чем больше диаметр ускорителя, тем сильнее можно разогнать частицы?

— Да. В целом, чем длиннее ускорительная установка, тем до больших энергий можно разогнать частицы. В этом плане кольцевой ускоритель — наиболее выгодная конструкция, потому что частицы многократно пробегают ускоряющий блок и каждый раз ускоряются все сильнее.

В этом кольце будущего ускорителя, бустера, которое вы сейчас видите перед собой, для того чтобы разогнать частицы до заданной энергии, нужно сделать около 1 млн оборотов. Кольцевой ускоритель в этом отношении выгоден, так как вы можете гонять частицы по кругу сколько угодно и каждый раз, подталкивая, разгонять их. Но для того чтобы обеспечить движение заряженных частиц

по кругу, необходимы магниты, ведь известно, что в магнитном поле заряженная частица летит по траектории окружности. Чем выше энергия частицы, тем больше радиус траектории в одном и том же магнитном поле. Поэтому радиус любого кольцевого ускорителя определяется энергией ускоряемых частиц и величиной магнитного поля.

Сегодня максимальное магнитное поле, которое применяется в ускорителях, — 8 Тесла. Именно на восьмитесловых сверхпроводящих магнитах и был построен БАК. Такие магниты позволили достичь энергии 14 ТэВ в существующем туннеле. Если же мы хотим увеличить в два раза энергию, то при том же магнитном поле нам необходимо в два раза увеличить радиус кольца или в два раза усилить магнитное поле в том же кольце. Новый коллайдер, скорее всего, будет создаваться на магнитах 16 Тл, но надежное производство таких магнитов пока не налажено и понадобится лет десять для того, чтобы научиться создавать подобные магниты.

— **А это в принципе возможно?**

— Да. Прототипы таких магнитов уже изготавливают в *CERN*. *CERN* поставил задачу в течение десяти лет доработать технологию подобных магнитов и обеспечить их серийное производство.

Поэтому если вы просто увеличите магнитное поле в два раза в том же кольце, вы в два раза можете увеличить и энергию разгоняемых частиц. А если хотите получить еще бóльшую энергию, то вам нужно пропорционально увеличивать и радиус кольца. Посчитайте сами: 100 км — в четыре раза больше, чем периметр Большого адронного коллайдера, и магниты с еще более обширным полем (в два раза), поэтому и энергия будет почти на порядок выше.

— **До какой скорости будут разгоняться частицы в коллайдере NICA?**

— Это уже так называемые релятивистские скорости. При энергиях коллайдера *NICA* частицы летят практически со скоростью света.

— **Ожидается, что с помощью нового коллайдера удастся заглянуть в прошлое Вселенной. О каком отрезке времени идет речь?**

— Чем выше энергия, тем ближе к началу Большого взрыва вы можете заглянуть. В этом отношении, конечно, БАК наиболее близок к тому, чтобы разглядеть или понять то, что происходило в первые мгновения Вселенной. То, что мы будем воссоздавать на коллайдере *NICA*, — это более поздний



Автомобильная платформа с ценным грузом на борту отправляется в ОИЯИ

период, когда возникла ядерная материя большой барионной плотности, которая существует в природе только в нейтронных звездах. Других объектов, в которых она могла бы быть, мы на сегодня не знаем.

По времени это тот период, когда уже были звезды и при их столкновениях образовывались в частности нейтронные звезды. Это происходило спустя сотни миллионов лет после Большого взрыва.

— **Мы много говорили о привычной для нас барионной материи, а занимается ли кто-либо всерьез поисками антивещества, антиматерии?**

— Антивещество — вопрос очень интересный. Все мы знаем из научно-популярных книг, что в момент возникновения Вселенной был полный баланс вещества и антивещества. Но потом в силу разных причин, из-за нарушения *CP*-симметрии, несохранения барионного числа и нарушения теплового равновесия, стало доминировать вещество. Возникла небольшая разница преобладания вещества над антивеществом. Эта разница и есть Вселенная, которую мы сегодня знаем.

Поиск антивещества во Вселенной ведется, но оно до сих пор не найдено. Куда оно делось? Это одна из больших загадок. Проводится много экспериментов по поиску антиматерии. Кстати, искусственно синтезировать антивещество можно, и первые такие успехи уже были достигнуты в *CERN*, где на мгновение были синтезированы несколько атомов антиводорода. Они были удержаны в специальной ловушке. Но это всего лишь несколько атомов, притом на очень короткое время.

— Исследования на коллайдере NICA будут иметь сугубо фундаментальный характер или прикладная составляющая тоже присутствует?

— В основном наши исследования нацелены на фундаментальные результаты, на получение новых знаний в той области, в которой их еще нет или они очень скудны. Пока никто не знает, какие открытия нас ждут. Но нашим приборам присущи большие масштабы и технологическая сложность, для их создания часто требуется решение новых инженерных задач, вот вам и первый практический аспект. В процессе таких решений возникают интересные инженерные и технологические результаты, которые можно будет применить в практических целях.

Кстати, хороший пример — интернет. Он не создавался в *CERN* целенаправленно, а понадобился для того, чтобы обмениваться большими объемами данных по специальному протоколу; он был создан для ученых, а впоследствии оказался неотъемлемой частью всей современной жизни. Таких примеров, когда инженерные сооружения, созданные для науки, нашли свое применение в народном хозяйстве, немало.

Кроме того, в рамках проекта *NICA* мы предусматриваем создание зоны для прикладных работ, где ученые и инженеры будут заниматься практическими исследованиями. Ускоритель — это уникальный инструмент, который позволяет не только проводить фундаментальные исследования, но и получать прикладные результаты.

Одно из наших традиционных направлений — изучение работы электроники в сложных радиационных условиях. Такие исследования необходимы не только для того, чтобы создавать электронику, работающую близко к реакторам, но и для космических полетов; ведь в космосе происходит интенсивное облучение всевозможными частицами, в том числе теми, которые будут доступны на нашем ускорителе. Поэтому для разработки радиационно стойкой электроники будет создана зона прикладных исследований.

С вводом комплекса *NICA* планируется продолжить испытание биологических объектов на их устойчивость к радиационному воздействию, потому что, если мы хотим летать к далеким звездам, да что там к звездам — даже к Марсу, необходимо рассчитать, какая доза радиации будет получена космонавтами. Подобные исследования ведутся давно. В ОИЯИ есть лаборатория радиационной биологии, где ученые используют пучки уже существующих ускорителей для таких работ. На комплексе *NICA* мы хотим создать специальную зону, где биологические объекты будут облучаться, благодаря чему можно будет понять, как они меняют свои свойства под воздействием радиации.

В далеком космосе существует опасность облучения ионами, вплоть до железа. Все эти ионы мы сможем воспроизводить на нашем комплексе, чтобы облучать биологические объекты тем спектром частиц, который будет присутствовать при космических полетах.

Если говорить об ожиданиях в целом, прежде всего в области фундаментальных исследований, то мы нацелены на изучение фазовых переходов в ядерной материи — поиск фазового перехода первого рода, поиск критической точки, о чем вы сегодня уже спрашивали; а на пути к этим целям мы, надеюсь, узнаем много нового и интересного. Однако и прикладные исследования принесут ряд практически применимых результатов.

— В ваших исследованиях будут использоваться технологии искусственного интеллекта?

— Искусственный интеллект — настолько широкое понятие, что даже сложно ответить. Конечно, многие процессы нужно автоматизировать. Ведь автоматизация — тоже в каком-то смысле искусственный интеллект, вопрос только в том, насколько он интегрирован и требует вмешательства обычного, естественного интеллекта.

Для управления многими блоками детекторов и коллайдера *NICA* будут разработаны программы и системы управления, которые не представляют собой ИИ в узком смысле этого термина, но имеют важные элементы автоматизации, такие как система обратной связи, чтобы корректировать свои действия в зависимости от характера внешних условий. Подобные системы уже существуют на всех крупных современных высокотехнологичных установках. Понятно, что проводить экспериментальные исследования будут ученые, а не искусственный интеллект, ведь мы имеем дело с поиском и изучением неизведанных явлений и свойств природы.

— Какая судьба ждет коллайдер после того, как он отслужил свое? Их обычно как-то утилизируют или разбирают на запчасти?

— В мировой истории коллайдеров было не так много, и первые из них, кстати, были отнюдь не плохи. Есть классический пример — коллайдер *ISR* в *CERN*. По ряду параметров он был совершенен, хоть и запущен в 1970-е гг. Прослужил совсем немного, до середины 1980-х гг., и был разобран. Только недавно, в 2004 г., на коллайдере Тэватрон (США) были достигнуты параметры, характерные для того пионера из 70-х гг. прошлого столетия.

Конечно, каждый коллайдер нацелен на решение определенных задач. Когда задачи решены и нет других, подходящих для его профиля, коллайдер или разбирают, или утилизируют, или он частично входит в состав другого, более сложного комплекса ускорителей. ■

Беседовала Янина Хужина