



Монтаж ФЭУ детектора Борексина

ОТ НЕЙТРИНО к 3D-томографам

ФИЗИКА НЕЙТРИНО В КУРЧАТОВСКОМ ИНСТИТУТЕ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» подготовил развернутую программу работ по нейтринной физике до 2020 г. В этой программе есть как фундаментальные исследования, так и создание детекторов нового поколения, междисциплинарные работы по физике Солнца, астро- и геофизике и даже практические приложения, например по мониторингу ядерных реакторов для задач МАГАТЭ или созданию медицинских 3D-томографов.

Исследования нейтрино – традиционная область для Курчатовского института, а сегодня, когда в состав Национального исследовательского центра вошли Институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Институт физики высоких энергий и Институт теоретической и экспериментальной физики, здесь сосредоточивается около 80% всех работ по физике нейтрино в России. О нынешних и будущих проектах в этой области мы говорим с заместителем директора Института общей и ядерной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» доктором физико-математических наук, профессором **Михаилом Скоруховым**.

Несоблюдение закона

Предсказал существование нейтрино Вольфганг Паули в своем знаменитом письме участникам физического семинара в Тюбингене. Шел 1930 г., физика частиц только начиналась (нейтрон был открыт лишь в 1932 г.), но уже существовала загадка бета-распада атомных ядер, в котором заряд ядра изменялся на единицу и сопровождался эмиссией бета-частиц (электронов). Загадка состояла вот в чем: энергия электронов не была постоянной, но имела непрерывный спектр. Закон сохранения энергии не соблюдался, и Паули ввел новую частицу, которая и уносила недостающую энергию. Предсказанная частица получила название «нейтрино».

– Основное свойство нейтрино – колоссальная проникающая способность, – отмечает Михаил Скорыхватов. – Взаимодействие нейтрино с веществом на 19-20 порядков меньше, чем, скажем, характерное взаимодействие нейтронов или гамма-квантов. Поэтому ее крайне тяжело регистрировать, и это смогли сделать только в середине 1950-х гг. прошлого века.

Зарегистрировать нейтрино в свободном состоянии удалось американцам Фредерику Райнесу и Клайду Коэну на атомном реакторе производственного комплекса «Саванна-Ривер» в Южной Каролине. Атомный реактор – самый интенсивный искусственный источник нейтрино (точнее, антинейтрино), образующихся в результате распадов продуктов цепной реакции деления. Антинейтрино взаимодействовали в мишени детектора с протонами (ядрами водорода) с образованием позитрона и нейтрона, которые и регистрировались с помощью больших по тем временам однотонных детекторов на основе жидкого сцинтиллятора – жидкости, которая флуоресцирует при прохождении заряженных частиц. Годом открытия нейтрино считается 1956 г., а в 1995 г. Райнесу была присуждена Нобелевская премия. Нужно сказать, что регистрация антинейтрино по реакции с протонами мишени используется до сих пор в самых современных детекторах.



Райнес и Коэн, 1953 г.



АЭС «Шооз»

– В Курчатовском институте заинтересовались этим направлением и начали работы с реакторными антинейтрино, – рассказывает Михаил Скорыхватов. – В конце 1960-х гг. была разработана программа исследований под руководством наших выдающихся ученых Петра Ефимовича Спивака и Льва Александровича Микаэляна, созданы две нейтринных лаборатории: на атомной станции в Ровно и в Красноярске. И здесь мы достигли очень больших успехов, поскольку большая часть мировой статистики принадлежала Курчатовскому центру. Я начинал работу в секторе Спивака под руководством Микаэляна, затем, в начале 1990-х гг. у нас началось международное сотрудничество – с французами, американцами и итальянцами. Во Франции на атомной станции в Бюже мне, кстати, довелось поработать с группой Фреда Райнеса. У него было особенное отношение к русским, потому что его родители эмигрировали из России. И вот он пригласил меня поучаствовать в эксперименте по изучению взаимодействия реакторных антинейтрино с дейтроном, и у нас есть с ним даже совместная статья, чем я, конечно, горжусь.

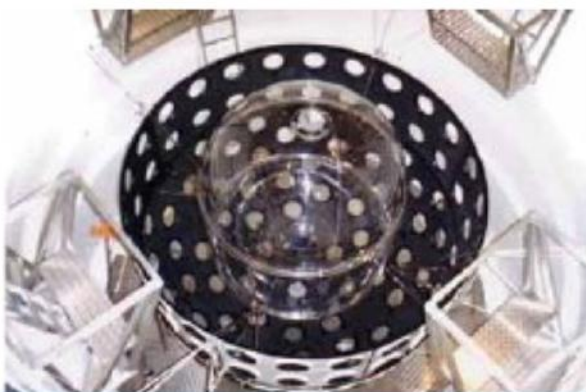
Свойства нейтрино

Что мы знаем сегодня об этой частице? Что нейтрино – фермион, т.е. спин его равен одной второй, и у нейтрино нет заряда. Процессы, в которых участвуют нейтрино, обусловлены слабым взаимодействием. Еще известно, что существуют три поколения нейтрино – электронное, мюонное и тау-нейтрино. Каждое из таких поколений соответствует тому заряженному лептону (электрону, мюону или тау), который сопровождает рождение или поглощение нейтрино.

Отдельный вопрос – масса нейтрино. Долгое время считалось, что у нейтрино нет массы покоя, потом это мнение изменилось на противоположное. Тем не менее в прямых экспериментах массу нейтрино так никто никогда и не измерил. Но есть эксперименты, в которых были найдены ограничения на ее предел для всех трех поколений.

– Лучшее ограничение на массу электронного нейтрино получено на спектрометре, который был разработан

ФИЗИКА



Детектор «Шооз-1»

в Курчатовском институте Петром Ефимовичем Спиваком совместно с Владимиром Михайловичем Лобашовым из Института ядерных исследований. Эксперимент проводился в Троицке, и там выяснили, что масса электронного нейтрино не может быть выше 2,2 электронвольта.

В силу нейтральности нейтрино может быть как дираковским, так и майорановским фермионом, причем в последнем случае нейтрино тождественно антинейтрино. Оказалось, что установить это возможно, только если существует процесс безнейтринного двойного бета-распада некоторых ядер, т.е. процесс, в котором, например, заряд ядра увеличивается на две единицы и испускаются только два электрона. Обнаружить этот процесс пока не удалось, хотя интенсивные поиски, имеющие принципиальное значение, ведутся во многих научных центрах мира. Работы по изучению двойного бета-распада тесно связаны с разработкой технологий и с производством изотопно-обогащенных материалов. – В Курчатовском институте были созданы и действуют экспериментальные установки, использующие самые современные методики разделения изотопов. В частности, с использованием таких методов были получены наиболее интересные для экспериментов по изучению двойного бета-распада обогащенные мишени, среди которых ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Xe , ^{150}Nd . Отмечу, что результаты совместных с немецкими учеными работ по поиску безнейтринной моды двойного бета-распада германия-76, произведенного в нашем институте, признаны лучшими в мире.

Солнечный парадокс и осцилляции нейтрино

Электронные нейтрино, появляющиеся в термоядерных реакциях на Солнце, зарегистрировала в 1964-1968 гг. группа Рэймонда Дэвиса в США. И сразу же обнаружилось, что поток этих частиц меньше ожидаемого примерно в три раза. В последующие годы предлагалось множество объяснений этого парадокса, но самой верной оказалась гипотеза Бруно Понтекорво, которая заключалась в том, что

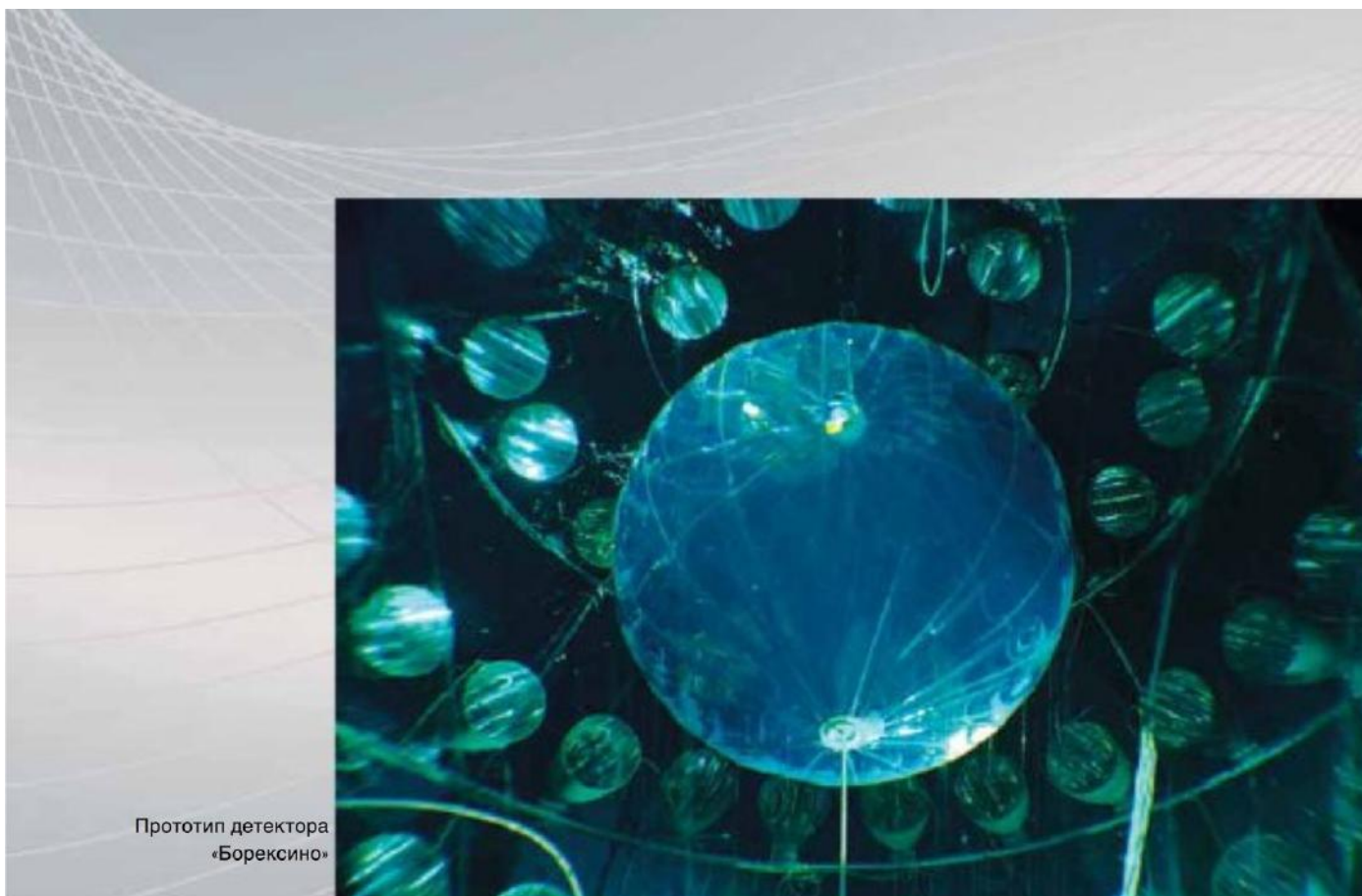
часть электронных нейтрино по пути от Солнца к Земле превращается в нейтрино мюонные, которые детектор Дэвиса не мог регистрировать. Проверка в нескольких крупномасштабных экспериментах подтвердила, что до Земли долетают потоки солнечных нейтрино уже смешанного состава – как электронные, так и мюонные. Превращение одного поколения нейтрино в другое получило название нейтринных осцилляций, и этот феномен сегодня активно изучается в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино, а также на ускорителях и реакторах. – Осцилляции возможны только в том случае, если нейтрино имеют массы и зависят еще от ряда параметров, которые известны не все. В частности, не измеренным в силу малости остается так называемый угол смешивания θ_{13} , с которым связано «подавление» осциллирующей электронной в тау-нейтрино. Рекордное ограничение на этот параметр было получено в реакторном эксперименте на АЭС «Шооз» во Франции при активном участии физиков Курчатовского института. А сейчас по новой методике, предложенной нашими учеными, реализуются сразу три высокочувствительных эксперимента с целью измерения θ_{13} – «Шооз-2» во Франции, а также в Китае и Южной Корее. Для активизации совместных российско-французских исследований в НИЦ «Курчатовский институт» недавно была создана Международная ассоциированная лаборатория «Низкофононовая физика частиц низких энергий».

Исследования в подземной лаборатории

Другой аспект исследований солнечных нейтрино связан с изучением механизмов генерации энергии Солнца. Изучение состава солнечных нейтрино может пролить свет на различные астрофизические проблемы, например роль pp - и CNO -циклов в энергетике Солнца, содержание тяжелых элементов на поверхности Солнца и начальные условия для солнечной эволюции и т.д. Курчатовский институт принимает участие в, пожалуй, самом технически сложном из таких эксперимен-



Экспериментальный зал – экспериментальный комплекс «Борексина»



Прототип детектора
«Борексино»

тов – международном проекте «Борексино» в итальянской подземной лаборатории в Гран-Сассо-д’Италия. – Я бы сказал, что «Борексино» – это не отдельный детектор, а некий экспериментальный комплекс или технологическая платформа, на которой исследуется все, что можно исследовать, – уточняет Михаил Скорохватов. – Наш институт ответственный от России, а всего в эксперименте на разных стадиях участвовали 11 стран. Основные доноры – США, Италия, Германия, Франция и Россия. Здесь изучаются фундаментальные свойства нейтрино, проверяется Стандартная модель, проводятся междисциплинарные исследования по физике Солнца и геофизике, разрабатываются новые технологии.

Установка «Борексино» – это фактически очень большой сцинтилляционный спектрометр. Устроен он по принципу матрешки. В центре – прозрачный шар из нейлона радиусом 4,25 м, заполненный 300 т чистой сцинтилляционной жидкости, в которой и взаимодействуют нейтрино. Этот шар висит в другой жидкости, заполняющей стальную сферу. А вокруг – 2,4 тыс. т ультрачистой воды в цилиндрическом корпусе. И все это спрятано в толщу горы. Такие уникальные условия нужны для того, чтобы избавиться от постороннего радиоактивного фона. Сегодня «Борексино» – самая радиационно-чистая среда, которая есть на Земле.

Несколько впечатляющих результатов уже получены. Например, впервые проведены прецизионные измерения потоков солнечных нейтрино с энергиями менее 2 МэВ в реальном времени, подтверждено усиление осцилляций солнечных нейтрино более высоких энергий (эффект Михеева – Смирнова – Вольфенштей-

на), получены новые ограничения на вероятность редких процессов, нарушающих Стандартную модель, и др. – Как я сказал, на «Борексино» можно решать самые разные задачи, – продолжает Скорохватов. – Например, в Курчатовском институте мы создали отдельный измерительный комплекс для поиска взрывов сверхновых звезд. Выброс нейтринного излучения может происходить на ранней стадии звездных коллапсов. Для астрофизики детектирование коррелированного со сверхновой нейтринного излучения сулит возможность более глубокого понимания эволюции звезд. С помощью такого «курчатовского» сегмента экспериментального комплекса «Борексино» ведется постоянное мониторингирование нейтринных сигналов, а все данные передаются в наш институт для анализа.

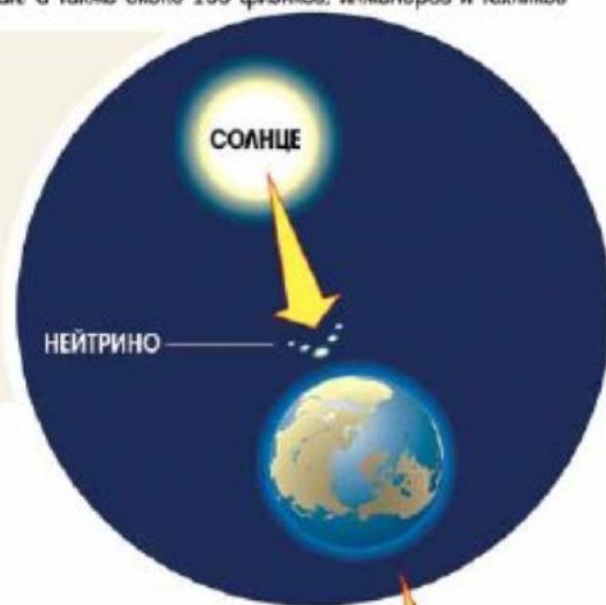
Помимо нейтрино из космоса «Борексино» детектирует и нейтрино из недр Земли – так называемые геонейтрино, рожденные в процессах радиоактивного распада природных элементов – урана, тория, калия. Регистрация геонейтрино в эксперименте «Борексино» доказывает, что значительная доля генерируемого нашей планетой тепла стала по своей природе радиогенной. Возможно существование и других источников энергии. Одна из гипотез, которая также проверяется, связана с существованием естественного ядерного геореактора в центре Земли. Прикладное значение исследований связано с влиянием огромного количества тепла, производимого в недрах нашей планеты, на конвективное движение внутри земной мантии, которое вызывает вулканическую активность, перемещения тектонических

ЭКСПЕРИМЕНТ «БОРЕКСИНО»



«Борексина» — международный проект. Базируется в Италии, участие в проекте принимают научно-исследовательские центры из шести различных стран, а также около 100 физиков, инженеров и техников

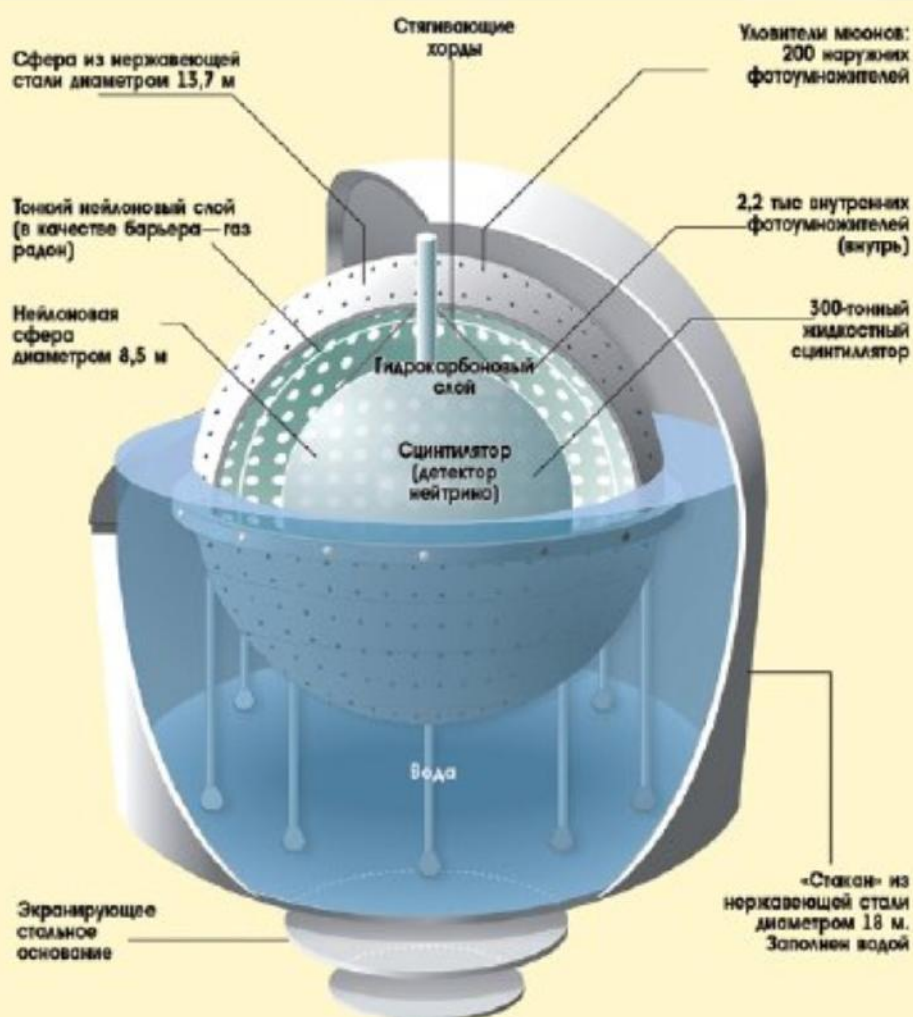
- Происходящие на Солнце реакции термоядерного синтеза постоянно порождают огромное количество нейтрино, достигающих Земли. Каждую секунду через кончик среднего человеческого пальца их проходит около 60 млрд
- «Борексина» отмечает низкоэнергетические нейтрино (с энергией менее 1 МэВ), которые образуются на поверхности солнечного ядра



- Нейтрино, будучи нейтральными частицами с крайне малой массой, очень мало взаимодействуют с прочей материей, ее составляющими и могут беспрепятственно проходить через огромные массивы любого материала



- Чтобы их обнаружить, необходимы гигантские приборы. Они помещаются под землей, чтобы оградить их от воздействия прочих частиц, приходящих из космоса и порождаемых естественной радиоактивностью окружающей среды



■ «Борексина» похож на матрешку, погруженную в 2,4 тыс. т сверхчистой воды. Внутри находится стальной шар, содержащий 1 тыс. т углеводородного сырья, в котором, в свою очередь, расположена нейлоновая сфера с 300 т чистой жидкости

■ Во внутренней сфере нейтрино взаимодействуют с жидкостным сцинтиллятором, производя небольшие световые вспышки. Ежедневно «Борексина» отмечает десятки таких сигналов



■ Фотоумножители, которые стали ультрачувствительными технологическими «глазами» «Борексина», фиксируют такие «нейтринные» вспышки и передают информацию о них на центральный компьютер

Источник: <http://www.interactions.org/>

ФИЗИКА



Установка внутренней сферы детектора «Борексино»

плит и сейсмическую активность, а также генерирует механизм геодинамо, создающего магнитное поле Земли.

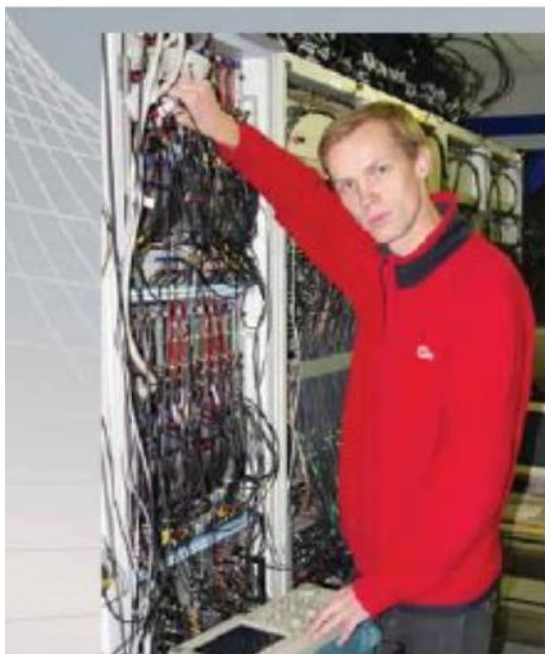
Нейтринные технологии

– *Итальянцы молодцы!* – восклицает Михаил Скорохватов. – *Ведь сравнительно небольшими средствами им удалось создать международный центр, куда едут исследователи со всего мира. А такой центр – это прежде всего технологии, те же технологии очистки жидкостей. Сегодня ими интересуются фармакологи, электронная промышленность. Такие большие комплексы всегда связаны как с фундаментальными и междисци-*

плинарными исследованиями, так и с развитием технологий. И нам обязательно нужно разрабатывать такую экспериментальную базу здесь, у себя, особенно по тем направлениям, где мы – абсолютные лидеры.

Обычно считается, что физика нейтрино – синоним фундаментальной науки, далекой от практики. Однако это не так. Есть область, где нейтринные технологии уже сегодня могут применяться, и лидер здесь – НИЦ «Курчатовский институт». Сегодня контроль активной зоны осуществляется внутренними датчиками. Но в случае разных обстоятельств или аварий было бы очень хорошо иметь датчики, которые следят за состоянием активной зоны снаружи, за биологической защитой. Пионерские работы по такой удаленной диагностике были проведены как раз в лаборатории в Ровно под руководством Льва Микаэляна еще в 1980-е гг. – *Оказалось, что это представляет большой интерес для МАГАТЭ, – говорит Скорохватов. – Почему? Потому что с развитием атомной энергетики мы поставляем атомные реакторы в ряд зарубежных стран. В начале кампании в зоне реактора образуется оружейный плутоний из того топлива, которым атомный реактор загружен. Этот оружейный плутоний можно изъять, если заглушить реактор, и использовать для производства атомного оружия. И оказалось, что единственный метод контроля режимов работы реактора, который невозможно сфальсифицировать, – нейтринный. Для внедрения технологии стоит задача поставить в рамках международной кооперации демонстрационный эксперимент, и приоритет здесь у нас.*

Среди других перспективных технологий, которые впервые были отработаны в России, – детекторы на жидких благородных газах, теоретически позволяющие регистрировать нейтринное излучение по реак-



120

Курчатовский измерительный комплекс

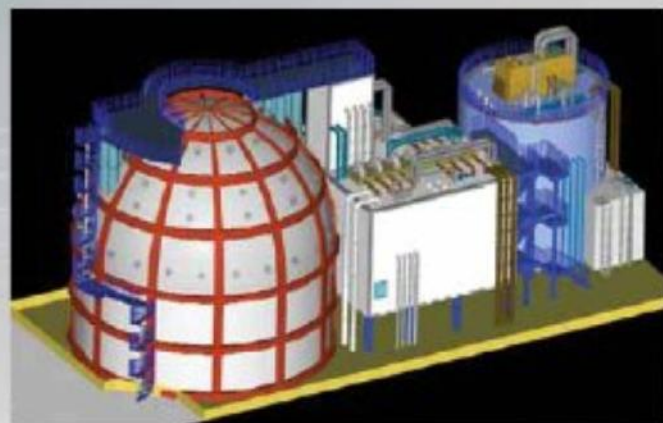


Схема «Борексино»

ции когерентного рассеяния на ядрах. Вероятность взаимодействия нейтрино в таких процессах возрастает, например, для ксенона в несколько тысяч раз, что позволит уменьшить размеры нейтринных детекторов. Когда-то такая технология была разработана в МИФИ, а затем развивалась на Западе. Сейчас стоит задача вернуться к таким работам в рамках широкой кооперации российских институтов с целью создания мощной современной экспериментальной базы. В этом направлении активно сотрудничают ученые НИЦ «Курчатовский институт», ИТЭФ, ПИЯФ, НИЯУ МИФИ, НИИЯФ МГУ и другие организации.

Эмиссионные детекторы на жидких благородных газах наиболее перспективны и для поиска частиц темной материи – той самой, которой по данным астрономических наблюдений во Вселенной в пять-шесть раз больше, чем обычного вещества, но которую еще никому не удавалось обнаружить, и на поиске которой сосредоточены огромные ресурсы.

Помимо собственно нейтринной физики такие детекторы представляют большой интерес для ядерной медицины. С их помощью можно создать новые классы томографов. Например, если заменить детекторами на жидком ксеноне современные дорогостоящие кристаллы, то можно разработать и создать томограф на все тело: 3D-томограф.

Еще о сюрпризах нейтрино

– В действительности о нейтрино мы знаем очень мало, – говорит Михаил Скорохватов. – Мы, например, знаем, что есть три поколения нейтрино, но мы не понимаем, почему их именно три. Все нейтрино значительно легче своих заряженных партнеров – электрона, мюона и тау-лептона, но мы не понимаем, почему

так. Или следующая задача, которая сегодня актуальна, – стерильные нейтрино. Суть в следующем. В Курчатовском институте была разработана методика и создан детектор для прецизионного измерения сечения реакции взаимодействия электронного антинейтрино с протоном. Измерения были проведены на реакторах в Ровно и в Бюже (Франция), в результате было получено рекордное по точности значение, которое вошло во все справочники и по которому нормируют все реакторные эксперименты. Ситуация приобрела драматический характер после работы французских физиков, в которой было рассчитана ожидаемая величина сечения, и это теоретическое значение оказалось больше измеренного на несколько процентов. Эффект получил название «аномалия реакторных антинейтрино», и для его объяснения выдвинута гипотеза, что существует по меньшей мере еще одно состояние нейтрино, которое не взаимодействует с веществом обычным образом и поэтому названо стерильным. Осцилляции реакторных антинейтрино в это состояние и стали причиной наблюдаемого дефицита. Для проверки гипотезы планируются новые эксперименты, в частности в России, на новом исследовательском реакторе ПИК в ПИЯФ и на экспериментальном комплексе «Борексино».

Думаю, что дальнейшие исследования нейтрино преподнесут нам еще немало сюрпризов и откроют возможность изучения явлений за пределами Стандартной модели, актуальных для построения более фундаментальной теории субатомной материи, теории эволюции Вселенной и решения других научных проблем. ■

Материал подготовил Алексей Торгашев, журнал «Русский репортер», специально для «В мире науки»



Детекторы из обогащенного германия



Михаил Дмитриевич Скорохватов – доктор физико-математических наук, заместитель директора Института общей и ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», начальник лаборатории ядерных излучений, заведующий кафедрой физики элементарных частиц МИФИ, руководитель с российской стороны международного проекта «Борексино» (Borexino). Область научных интересов – ядерная физика и физика частиц, фундаментальные и прикладные исследования в области нейтринной физики.