

Галлий-германиевый нейтринный эксперимент



Современная наука - вещь для стороннего наблюдателя довольно скучная. И потому что не совсем понятная, даже для весьма образованных - но в другой области - людей, и потому, что неординарные события происходят в науке достаточно редко. В общем, незря сериалы снимают про кого угодно, но только не про учёных. Мало того, что в науке почти нет места фантастике и детективу, так еще и герои-одиночки перевелись. Серьёзные открытия сегодня практически не рождаются «на кончике пера» или под глазом индивидуального микроскопа. Все сколько-нибудь заметные... даже не открытия, а шаги в постижении окружающего мира, делаются огромными, как правило, интернациональными коллективами, и каждый такой шагок даётся большим и кропотливым трудом с огромными финансовыми затратами и в течение значительных временных интервалов.

История, рассказанная ниже, умудрилась, однако, объединить в себе и все основные признаки современной науки, и признаки, присущие более лёгким жанрам, позволяющие снять захватывающий фильм. Длится эта история, однако, более 50 лет, да и сейчас в ней до точки далеко, хотя Главная Загадка вроде бы решена. Термин «Загадка» здесь употреблен отнюдь не для красного словца. При активном участии героев нашей публикации была решена одна из фундаментальных проблем современной физики, которая так и называлась «Загадка солнечных нейтрино».

Погружение в звезду

Ответ на вопрос, зачем надо изучать Солнце, думается, очевиден. Жизнь на Земле полностью зависит от ближайшей к нам звезды. Наблюдения за Солнцем ведутся давно, знания накоплены изрядные, но они обладают одним существенным недостатком: хорошо изучены только те явления, которые происходят на поверхности Солнца. Информация, как правило, визуальная, о том, что происходит внутри Солнца, доходит до нас с опозданием более чем в миллион лет.

Солнце - самая обычная звезда, каких во Вселенной много. В основе современной теории строения и эволюции звезд лежит гипотеза о термоядерных реакциях, как об источнике энергии, предложенная американским физиком Хансом Бете еще в 1939 году. Согласно этой гипотезе, светимость звезд главной последовательности (в том числе Солнца) обусловлена первой стадией ядерного синтеза, в результате которой происходит слияние четырёх протонов в альфа-частицу с рождением двух позитронов и двух нейтрино. Позитроны аннигилируют с электронами, в Солнце генерируется тепловая энергия, а образующиеся нейтрино являются единственными частицами, способными практически без потерь энергии пройти толщу вещества любой звезды. Чрезвычайно слабое взаимодействие с веществом позволяет нейтрино преодолевать практически любые расстояния и преграды. Нейтрино, которые зарождаются в ядерных реакциях, протекающих как угодно глубоко в недрах Солнца, улетают с места возникновения по прямой, нигде и ничем не отклоняясь, и должны почти в полном своём количестве достигать поверхности Земли. И пролетать сквозь неё, что днём (сверху), что ночью (снизу). Измерить солнечный нейтринный поток можно, только получив и интерпретировав данные о взаимодействии нейтрино с веществом. Для этой цели советский физик Бруно Понтекорво в 1946 году предложил использовать радиохимический метод. Общую схему радиохимического детектора можно представить следующим образом:

1. Нейтринный поток взаимодействует с веществом-мишенью с образованием радиоактивного изотопа другого вещества;
2. Образовавшийся изотоп химическими методами выделяют из мишени и переводят в состояние, позволяющее определить его количество;
3. Нейтринный поток, проходящий через мишень, рассчитывают путем измерения числа единичных распадов атомов наработанного радиоактивного изотопа.

Нейтрино является частицей, вступающей только в слабые взаимодействия, поэтому для эффективной регистрации нейтринного потока необходима чрезвычайно большая масса вещества-мишени. Но для отдельных ядер сечение взаимодействия на два порядка больше, и на основе некоторых взаимодействий возможно создание радиохимических детекторов.

Впервые один из них - хлор-аргоновый детектор - был анонсирован американцем Луисом Альваресом в 1949 году (Нобелевский лауреат 1969 года). Однако этот вариант так и остался на бумаге. И только в середине 1960-х под руководством профессора Рэймонда Дэвиса (США), химика по специальности, начал работать, а в 1968 году дал первые результаты эксперимент по радиохимической регистрации солнечных нейтрино.

От слов к делу

В основе эксперимента лежало превращение ядер ^{37}Cl в ^{37}Ar . При создании хлор-аргонового детектора был решён ряд

пионерских задач. Для начала потребовалось огромное количество вещества-мишени, содержащее ^{37}Cl . Даже во многих тоннах этого вещества под воздействием нейтрино образуются считанные атомы аргона. Во-вторых, пришлось научиться без потерь отделять эти драгоценные атомы от многотонной мишени и считать их с большой точностью. В-третьих, было необходимо исключить влияние на мишень фоновых частиц, в изобилии поставляемых космическими лучами. Все это нетривиально и в начале XXI века, а в 50-х годах прошлого столетия балансировало на грани фантастики. Тот же ^{37}Cl отнюдь не идеален в качестве мишени - он поддается воздействию только высокоэнергетичных нейтрино. И, по большому счету, хлорная мишень была выбрана с точки зрения возможностей существовавших тогда технологий.



Пропорциональный счётчик, внутри него распадаются и регистрируются единичные атомы радиоактивного германия

Носителем ловушки для нейтрино стал перхлорэтилен (жидкость, используемая в химчистках), помещённый в бак объёмом 380 000 литров. Это вещество в качестве мишени подкупало своей доступностью, относительной дешевизной и возможностью глубокой очистки от примесей. Получаемый из хлора под воздействием солнечных нейтрино аргон, как газ благородный, не вступал в реакцию с другими веществами и, будучи летучим, относительно просто, со 100% эффективностью извлекался из мишени продувкой чистым гелием. Далее аргон сорбировался активированным углем при температуре жидкого азота (77 К). На последней стадии аргон с помощью специального ртутного насоса закачивался в миниатюрный пропорциональный счётчик, где и происходил счёт атомов ^{37}Ar по их радиоактивному распаду. Защиту от космических лучей предоставила детектору золотеносная шахта Хоум-стейк, что в Южной Дакоте на Среднем Западе США. Лаборатория расположилась в действующей горной выработке на глубине 1480 метров.

Лирическое отступление

Автору доводилось бывать в лаборатории Дэвиса в 1991 году. Шахтеры вовсю выдавали на-гора металл, и учёные были вынуждены подстраивать расписание своей работы под смены горняков. Что, впрочем, особого труда не составляло - одна научная смена порой превышала шахтерскую раза в 4. В клетку одноразово помещалось человек двадцать, и на полуторакилометровую глубину люди падали «стремительным домкратом» - уши закладывало, и желудок соприкасался с горлом. От главного шахтного ствола приходилось топтать по подземным тоннелям ещё метров 300. Лаборатория была выполнена в минималистском стиле - главный зал, где размещен бак с ^{37}Ar , сделан практически под размер этой гигантской бочки, стены никак не отделаны (сплошной неровный камень). Ну, и еще небольшая комната, в которой располагаются установка заполнения счётчиков, счётная система и пульт управления комплексом. Мы спускались в лабораторию целой советской делегацией (6 человек) плюс двое хозяев эксперимента — так что было тесновато, не хватало обычных стульев, чтобы рассесться. Двенадцать часов под землей в таком составе и режиме - удовольствие для оригиналов...

«Гранаты не той системы»

Но вернемся в 60-е. Первые результаты, полученные в эксперименте Дэвиса, повергли научную общественность в шок, а от самого учёного потребовалось значительное мужество их опубликовать. Оказалось, что аргоновый детектор (позднее эти комплексы стали называть телескопами) регистрирует только треть от ожидаемого количества нейтрино высоких энергий.

Кто-то выражал скепсис по поводу самого эксперимента, кто-то сел за разработку новых моделей Солнца, Дэвис с сотрудниками искал ошибки и не находил. По дороге от Солнца до Земли нейтрино «пропадали неизвестно куда». Окончательно «загадку солнечных нейтрино» признали (заодно оправдав Дэвиса и согласившись с полной корректностью поставленного им эксперимента) лишь к середине 80-х.

К этому времени технологии доросли до электронных детекторов нейтрино. Первопроходцами стали японцы, последовательно построившие детекторы Камиоканде и Камиоканде-II в шахте Камиока, что в префектуре Гифу в центральной части страны юго-западнее Токио. В основе работы электронных детекторов лежит рассеяние нейтрино на электронах воды. При столкновении нейтрино с атомами воды выбивается электрон, в полете с огромной скоростью создающий свечение тёмно-голубого цвета, называемое черенковским излучением.

Эта методика позволяет регистрировать все типы нейтрино, но наиболее чувствительна к электронным нейтрино. Кроме того, вылетевший электрон сохраняет направление движения породившего его нейтрино - то есть можно определить, откуда именно прибыла регистрируемая частица. В японских экспериментах использовались 3000 тонн сверхчистой воды, помещенной в стальной цилиндр. На внутренней поверхности резервуара разместили 1000 фотоэлектронных умножителей, фиксирующих черенковское излучение.

Через тысячу дней наблюдений, в 1988 году, эксперимент Камиоканде-II также был вынужден констатировать 50% дефицит наблюдаемых нейтрино. Эти результаты породили множество попыток объяснить проблему солнечных нейтрино: и гипотезы, касающиеся физики Солнца, и вариации в физике элементарных частиц. Однако все они имели очевидные изъяны и не получали экспериментального подтверждения.

Проблема осложнялась тем, что и эксперимент Р. Дэвиса, и Камиоканде-II чувствительны только к высоко-энергетичной части нейтринного спектра. Нейтрино, обладающие такой энергией, составляют малую часть суммарного потока (около 10^{-2} %). Кроме того, рассчитанный поток нейтрино, регистрируемый в этих экспериментах, существенно зависит от модельных предположений. Следовательно, актуальным становился эксперимент, который позволил бы регистрировать поток нейтрино с более низкой энергией и менее зависимый от того, какие физические параметры предварительно заложены в расчёт.

Свет в конце тоннелей

Такой эксперимент, еще в 1963 году, предложил советский учёный Вадим Кузьмин - галлий-германиевый (ГГ) детектор. Изотоп ^{71}Ge , образующийся в результате захвата солнечных нейтрино, распадается путем К-захвата с периодом полураспада $T_{1/2} = 11,4$ дня. ГГ-детектор позволяет регистрировать 90% нейтринного потока, испускаемого Солнцем. Если результат, полученный на ГГ-детекторе, подтверждал данные ранее осуществленных экспериментов, то найти объяснение такому

эффекту в рамках физики Солнца представлялось невозможным. Следовательно, предстояло изменить наши представления о физике нейтрино.

Важность постановки галлий-германиевого эксперимента была такова, что их запустили целых два. Силами почти всей мировой научной общественности в этой области науки. Один детектор был построен в Италии, в лаборатории Гран Сассо коллаборацией GALLEX (преимущественно европейцы, с небольшим участием американских и израильских учёных). Другой детектор создала советско-американская коллаборация SAGE в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований (еще тогда АН СССР). Оба эксперимента использовали в качестве мишени галлий. Но в GALLEX использовался солянокислый раствор хлорида галлия, а в SAGE - чистый металлический галлий, правда, тоже в жидком (расплавленном) виде.

Каждый из вариантов имел свои особенности и достоинства. Оба эксперимента стартовали приблизительно в одно время - в конце 1980-х. Отечественный чуть-чуть, но опережал западных коллег - и по старту регулярных измерений, и по получаемым результатам. Можно смело утверждать, что здоровое соперничество, сразу возникшее между двумя группами учёных, служило настоящим двигателем прогресса. И довольно быстро оба эксперимента, во-первых, подтвердили правомерность проблемы солнечных нейтрино, а во-вторых, получили величины солнечного нейтринного потока, в пределах погрешности совпадающие друг с другом. Что косвенным образом подтверждало и корректность обеих разработок.

Но самое главное – именно галлий-германиевые эксперименты привели научный мир к осознанию факта, что солнечные нейтрино на Земле действительно регистрируются далеко не в полной мере. И породили, таким образом, следующее поколение нейтринных детекторов (детектор коллаборации SNO в канадском Садбери), которые, наконец, показали, что причиной дефицита нейтрино являются их осцилляции по пути от Солнца к Земле. Именно на детекторе SNO зарегистрированы все три типа нейтрино от Солнца. А вообще приятно осознавать, что на наших глазах (хотя и не за одно поколение) разрешилась одна из фундаментальных загадок современной физики. Но, как это бывает с загадками, одна породила другую, и в этом тоже может быть «повинен» галлий-германиевый эксперимент.

ГГНТ и SAGE

Нас, в принципе, больше интересует российский детектор SAGE, имеющий общепризнанное название ГГНТ (Галлий-германиевый нейтринный телескоп). Тем более что он, в отличие от GALLEXa, по-прежнему функционирует и, более того, планирует очередной смелый опыт, призванный доказать существование ещё одного вида нейтрино - «стерильного».

Немного истории. ГГНТ начал работать первым в мире, в 1988 году. Возглавили эксперимент с российской стороны академик Георгий Зацепин и Владимир Гаврин (тогда кандидат физико-математических наук, ныне доктор наук, член-корреспондент РАН), с американской - физики из Лос-Аламоса и Пенсильванского университета Том Боулс и Кен Ланде. В коллаборацию SAGE вошли порядка 50 ученых - из Института ядерных исследований в Троицке, американских институтов, а в Баксанской обсерватории была создана специальная лаборатория ГГНТ. Масштаб задач требовал и серьезного интеллектуального ресурса, и крупного международного финансирования.

Подземная лаборатория ГГНТ находится в недрах горы Андырчи (Северный Кавказ), в долине реки Баксан, в горизонтальной выработке цилиндрической формы на расстоянии 3,5 километра от поверхности. Стены лаборатории, объём которой 7000 кубических метров, выполнены из низкофонового бетона толщиной 70 сантиметров и покрыты шестимиллиметровой стальной оболочкой.

Как сказано, мишенью для нейтрино в ГГНТ является галлий (сейчас используется около 50 тонн, а бывало и 60). По сосчитанному количеству распадов германия определяется скорость захвата солнечных нейтрино галлием. Поэтому основной задачей химической технологии ГГНТ является селективное извлечение из большой массы галлия единичных атомов германия, концентрирование его в минимальном объёме и перевод в состояние, которое позволяет регистрировать его распады.

Химическая технология ГГНТ в целом - вещь уникальная. Ведь перед создателями телескопа стояла задача извлечь несколько атомов германия из многотонной галлиевой мишени и с минимальной погрешностью подсчитать их количество. Это несколько последовательных процессов, на создание и совершенствование которых ушли годы. Начиналось все с лабораторных опытов «в стакане» еще в середине 70-х, когда во всём СССР даже не было необходимого для проведения эксперимента количества металлического галлия высокой чистоты (не хуже, чем 99,9999%). Для производства металла потребовалось специальное постановление правительства СССР, а нарабатывали его в казахстанском Павлодаре. Некоторое время в распоряжении ИЯИ РАН находилось 2/3 всего мирового запаса металлического галлия.

На столь же высоком уровне принималось и решение о строительстве подземного комплекса Баксанской нейтринной обсерватории (БНО), который стал единственным в мире подобным объектом, специально созданным исключительно для нужд фундаментальной науки. Ведь остальные нейтринные детекторы располагались или в действующих горнодобывающих шахтах, или вблизи автомобильного тоннеля, пробитого сквозь Апеннинские горы в Италии.

Сорок лет труда

Подземная лаборатория ГГНТ была сдана в эксплуатацию в декабре 1987 года. А летом 1988 года учёные и инженеры уже смонтировали аппаратуру для проведения первых полномасштабных измерений, и в реакторы ГГНТ начали загружать галлий. Также были отработаны основы радиохимической технологии извлечения германия из галлия и методика подсчёта распадов единичных атомов германия. Эти исследования проводились в Троицке, в лаборатории радиохимических методов детектирования солнечных нейтрино. Химическая технология ГГНТ создавалась и совершенствовалась под руководством старшего научного сотрудника ИЯИ РАН Евгения Веретёнкина, который по-прежнему является ключевым участником эксперимента SAGE.

Полтора года ушло на то, чтобы от первых пилотных «извлечений» в подземной лаборатории ГГНТ перейти к реальному измерению солнечного нейтринного потока. Проблем хватало - и эффективность извлечения германия из галлия поначалу была недостаточно высока, и аппаратура для счёта не слишком совершенна (несмотря на то, что в эксперименте использовалось в основном американское физическое и компьютерное оборудование - практически самое передовое в то время). Но главной была проблема фоновой радиоактивности, в которой сигналы от распадов ^{71}Ge просто «тонули».

Однако первые трудности удалось преодолеть, в январе 1990 года было проведено извлечение, поддающееся интерпретации, и за 5 месяцев подряд (процесс проводится раз в месяц) была набрана необходимая статистика для оценки величины потока нейтрино. Так, летом 1990 года эксперимент SAGE подтвердил, что «Загадка солнечных нейтрино» существует не только в умах физиков. Но это было только начало. Научный мир вообще всё привык подвергать сомнению, и эксперименту SAGE еще предстояло доказать, что он регистрирует именно солнечные нейтрино и считает именно распады атомов германия, а не какую-то постороннюю радиоактивность.

Для этой цели были проведены два так называемых калибровочных эксперимента, с использованием искусственных источников нейтрино, создание которых само по себе является уникальной научной задачей. Искусственный источник нейтрино - это радиоактивное вещество, специально нарабатываемое в промышленном ядерном реакторе и испускающее поток нейтрино известной энергии. Это вещество размещают в химическом реакторе ГГНТ и облучают им галлий, моделируя таким образом поток солнечных нейтрино, но с гораздо большей интенсивностью, а значит и с более высокой точностью.

В целом калибровки подтвердили корректность всех процедур ГГНТ, но и они же породили новую загадку, подтвержденную в других (реакторных) экспериментах. Вполне вероятно, что, кроме осциллиций нейтрино (превращения их из электронных в мюонные и тау-нейтрино) по пути от Солнца к Земле, существует ещё одна проблема. А именно, ещё один вид нейтрино - стерильные, которые не вступают даже в слабое взаимодействие.

О них, кстати, впервые упомянул все тот же Бруно Понтекорво в далеком 1968 году. Но только спустя почти 40 лет, во многом благодаря галлиевым экспериментам, появились первые экспериментальные намеки на существование стерильных нейтрино.

В нашем случае можно предположить, что они испускались искусственным источником, но оказались «невидимы» для галлиевой мишени. Поэтому в SAGE родилась идея третьего калибровочного эксперимента - с источником гораздо большей мощности (не менее чем в 4 раза) и необычным, «двухзонным» реактором для галлия. Эксперимент получил «говорящее» название BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions). Идея в том, чтобы одновременно наблюдать за взаимодействием потока нейтрино от искусственного источника с обеими зонами галлиевой мишени.

В случае успеха (разный сигнал от нейтрино в каждой из зон) этот эксперимент во многом прольёт свет на красивую, но пока в основном умозрительную гипотезу о стерильных нейтрино. И что характерно - проблема при постановке нового эксперимента уже не в идеях и даже не в технологиях (уровень основных исполнителей позволяет достаточно успешно решать эти задачи), а в финансах. Затраты оцениваются в десятки миллионов долларов, причем большая часть - это стоимость работы ядерного реактора и получения радиоактивного вещества для искусственного источника.

В настоящее время количество ежемесячных циклов измерений на ГГНТ подбирается к концу третьей сотни. Продолжается набор статистики - по сути, ведется постоянный мониторинг солнечного нейтринного потока. Уже внесён вклад в мировую физику, но впереди ещё больше интересных задач. А еще - ГГНТ и учёные, работающие на нём, доказывают - российская наука жива и конкурентоспособна.

Владимир Гаврин (слева)
и Георгий Зацепин

