



ВСЕ, ЧТО ВЫ ХОТЕЛИ УЗНАТЬ ОБ ИЗОТОПЕ МОЛИБДЕН-100, НО СТЕСНЯЛИСЬ СПРОСИТЬ

Возможно, именно молибден поможет ученым понять природу нейтрино, и тогда человечество перевернет еще одну страницу в книге знаний о фундаментальных законах Вселенной.

Кадочников Д., Скорынин Г., Все, что вы хотели узнать об изотопе молибден-100, но стеснялись спросить // Импульс-ЭХЗ. – 2016. – 24 марта

Европейская наука только к концу XIX века смогла понять, в чем секрет средневековых японских мечей – их крепость, острота и одновременно гибкость объяснялись тем, что сталь легендарных самурайских катан содержала примеси молибдена. Целенаправленное применение молибдена в XX веке открыло новую страницу в металлургии легированных сталей.

А в XXI веке, возможно, именно молибден поможет ученым понять природу загадочного нейтрино, и тогда человечество перевернет еще одну страницу в книге знаний о фундаментальных законах Вселенной.

ЧАСТИЦА-ПРИЗРАК

Из более чем шести десятков элементарных частиц, описанных физиками-теоретиками в так называемой Стандартной модели строения и взаимодействия частиц материи, нейтрино, пожалуй, можно отнести к самым загадочным и малоизученным. Существование нейтрино предсказал швейцарский физик-теоретик Вольфганг Паули, чтобы «спасти» законы сохранения энергии, импульса и его момента при β -распаде. В отличие от α -частиц и γ -излучения, β -частицы, вылетающие при распаде одинаковых ядер, обладают различной энергией.

Паули в начале декабря 1930 года выдвинул гипотезу, согласно которой в процессе β -распада из ядра вместе с электроном вылетает ускользающая от наблюдений нейтральная частица, которая уносит с собой недостающую часть энергии и момента импульса. В то время были известны всего три элементарные частицы: протон, электрон и фотон. Нейтрон еще не был открыт и Паули предложил назвать гипотетическую частицу «нейтроном». Самому Паули гипотеза показалась настолько дерзкой, что он вместо публикации научной статьи изложил ее в полшутливом письме-обращении к участникам конференции по радиоактивности, проходившей в Тюбингене (Германия). Письмо начиналось фразой «Уважаемые радиоактивные дамы и господа!», но сам Паули предпочел бал в Цюрихе.

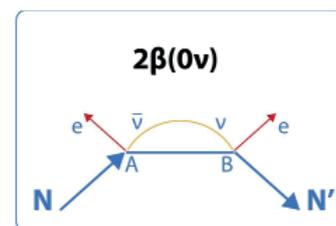
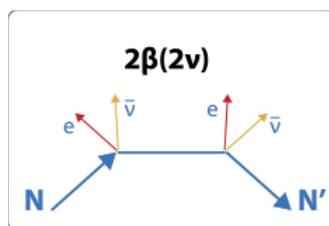
Смелую гипотезу Паули поддержал профессор римского университета Энрико Ферми. На ее основе он разработал стройную математическую теорию бета-распада, которую опубликовал в 1934 году. К этому времени Джеймс Чедвик уже открыл нейтрон, и Ферми переименовал «нейтрон» Паули на итальянский манер в «нейтрино», что означает «нейтрончик». Как образно выразилась писательница Кристина Саттон в книге «Космический корабль нейтрино», «если письмо Паули, адресованное „радиоактивным дамам и господам“, можно сравнить с зачатием нейтрино, то статья Ферми возвестила о рождении новой частицы». Однако сохранялась ключевая проблема: никто понятия не имел, как обнаружить эту неуловимую малышку.

Многие известные ученые искали способ отловить призрачные нейтрино. Многие сомневались, возможно ли это вообще. Два немецких физика – Ханс Бете и Рудольф Пайерлс – после теоретического анализа пришли к выводу, что вероятность поглощения нейтрино атомом ничтожна и наблюдать нейтрино «практически невозможно». Сам Паули поспорил на бутылку шампанского, что никому не удастся экспериментально обнаружить нейтрино. Возможно, он сомневался в реальности той частицы-призрака, которую сам же и придумал.

Только через четверть века, в 1956 году, эксперимент на ядерном реакторе в Южной Каролине доказал существование нейтрино. Позднее оказалось, что у нейтрино несколько разновидностей – в зависимости от ядерных реакций, в которых частицы образуются: электронный, мюонный и тау-нейтрино.

Различные виды нейтрино могут преобразовываться друг в друга – это так называемые нейтринные осцилляции. Впервые идею осцилляций нейтрино высказал Бруно Понтекорво, который в 1950 году эмигрировал с Запада в СССР. В 2015 году Нобелевская премия по физике присуждена Такааки Кадзита и Артуру Макдональду «за открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу». Ранее в Стандартной модели считалось, что нейтрино массы покоя не имеет. Теперь факт наличия массы установлен. Но какова ее величина?

И таких вопросов в отношении свойств нейтрино еще много. К примеру, основоположник квантовой физики британец Поль Дирак, предсказавший существование античастиц, полагал, что должна существовать частица «антинейтрино», отличающаяся по свойствам от нейтрино. Итальянский физик Этторе Майорана, напротив, считал, что нейтрино и антинейтрино – это одна и та же частица. Для ответа на этот вопрос ученые пытаются обнаружить двойной β -распад без образования нейтрино. Регистрация безнейтринного двойного β -распада будет однозначно свидетельствовать о майорановской природе нейтрино.



Схемы распада атома с образованием двух нейтрино и безнейтринного распада



Двойной бета-распад ($2\beta(2\nu)$ -распад) – радиоактивный распад атомного ядра, который сопровождается увеличением заряда ядра на две единицы и испусканием двух электронов (они же β -частицы). При этом, как считается, в полет отправляются еще и два нейтрино (ν). Но есть предположение, что нейтрино имеет майорановскую природу (то есть одновременно выступает и как антинейтрино), и тогда при распаде два нейтрино взаимно уничтожат друг друга. Потому он и безнейтринный, и обозначается $2\beta(0\nu)$ -распад.

ПОИСК НЕВИДИМКИ

Итак, в тот момент, когда ученые пришли к выводу, что масса нейтрино не равна нулю, рычаг для серьезного научного переосмысления физической картины микромира был получен. Осталось найти точку опоры – «поймать» самую многочисленную во всем космосе после фотона элементарную частицу и снять вопросы, которые она вызывает.

Но вот парадокс: нейтрино повсюду, однако пока неуловим. Даже обычный двойной бета-распад – очень редкое событие (период полураспада – порядка 10^{20} лет), насчитывает всего несколько десятков достоверных наблюдений. А безнейтринный двойной бета-распад, который, как оценивает теория, случается в тысячи раз (!) реже, вообще никто еще ни разу не наблюдал. Первому, кто зарегистрирует $2\beta(0\nu)$ -распад, Нобелевская премия обеспечена – это будет крупным открытием в физике нейтрино и следующим важным шагом в понимании фундаментальных свойств материи.

В настоящее время в мире уже действует около десятка крупных подземных детекторов, предназначенных для поиска безнейтринного двойного бета-распада – с использованием различных изотопов. И еще несколько сооружается.

Коллаборация AMoRE (Advanced Mo based Rare process Experiment), объединяющая 91 ученого из 21 научных институтов восьми стран, в том числе 18 исследователей из России, сделала ставку на молибден-100. Этот изотоп по энергии, выделяющейся при безнейтринном распаде, входит в тройку рекордсменов (после ^{48}Ca и ^{150}Nd) среди всех изотопов-кандидатов. Чем больше энергия, тем легче обеспечить его «поймку» такой хитрой ловушкой, как сцинтилляционный детектор (о нем чуть позже). И еще один нюанс – молибден-100 может быть произведен центрифужным методом (!) в количестве десятков и даже сотен килограммов. Именно столько необходимо для проведения эксперимента, который будет продолжаться несколько лет. «Охотникам» на «редкого зверя» – $2\beta(0\nu)$ -распад – потребуется завидное терпение.

ИСКАТЬ ТАМ, ГДЕ ГЛУБЖЕ

Непосредственно эксперимент научной группы AMoRE, лидирующее место в которой занимают физики Республики Корея, будет проходить на территории этой страны, в подземной лаборатории.

Южнокорейские ученые для проведения двух глобальных научных экспериментов – по поиску темной материи (проект KIMS) и безнейтринного двойного бета-распада (AMoRE) – решили воспользоваться горными выработками, созданными при строительстве в горах недалеко от города Янъян (YangYang) гидроаккумулирующей электростанции.

Чтобы попасть в лабораторию, нужно преодолеть двухкилометровый тоннель, ведущий внутрь скального массива. 700-метровая «крышка» горных пород над лабораторией снижает фон от вторичных нейтронов и космического излучения – ведь стоит задача свести любые возможные воздействия на микроуровне к нулю.

Идея эксперимента в следующем: в криогенную камеру – сверхнизкие температуры также снижают погрешности наблюдений и измерений – будет

помещена целая батарея сцинтилляционных детекторов, изготовленных из кристаллов молибдата кальция. Да не простого, а высокообогащенного. Молибден в нем будет представлен, как уже сказано, только изотопом ^{100}Mo , а кальций – только изотопом ^{40}Ca .

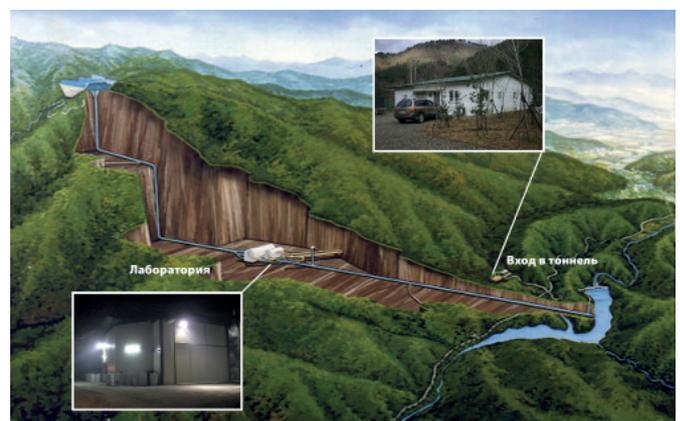
Почему ^{40}Ca ? Потому что его много, в природном кальции этого изотопа почти 97 %. Но обогащать кальцием-40 необходимо, чтобы максимально снизить в детекторе содержание изотопа ^{48}Ca , которого в природе всего 0,187 %. Дело в том, что изотоп ^{48}Ca тоже дает двойной бета-распад. Чтобы избежать «конкуренции» между ^{48}Ca и ^{100}Mo и не «целиться одним ружьем в двух зайцев», кальций для эксперимента желательно максимально обеднить кальцием-48 (приемлемое содержание – менее 0,001 %!).

А теперь чуть подробнее о сцинтилляционном детекторе. Сцинтиллятором называют вещество, обладающее способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения (гамма-квантов, электронов, альфа-частицы т. д.). Кристалл молибдата кальция как раз и является таким сцинтиллятором, то есть если сквозь него пролетит электрон, в толще кристалла возникнет микровспышка, которую зарегистрирует подключенная к детектору умная электроника. Вот тут-то и есть главная хитрость: поскольку в самом детекторе есть атомы ^{100}Mo , способные распадаться, то эти события, если они случатся, будут зарегистрированы самим же детектором. Такая схема называется «источник \equiv детектор».

Вот теперь понятны все ухищрения с защитой от внешних воздействий и с обогащением кальция и молибдена: ученые должны быть уверены, что микровспышка в детекторе – результат распада единственного в поле эксперимента источника бета-частиц, ^{100}Mo , а значит, аппаратура регистрирует именно $2\beta(0\nu)$ -распад.

В настоящий момент коллаборация AMoRE рассматривает модель детектора с использованием цилиндрических кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ диаметром 50 мм и высотой 50 мм, массой около 300 г. Каждый кристалл помещается в индивидуальный медный крепеж с покрытыми тефлоном фосфорно-бронзовыми держателями. На поверхность кристалла наносится золотая пленка, толщиной 200 нанометров, которая золотыми проводами соединяется с чувствительным сенсором. Сцинтилляционный сигнал снимается с помощью такого же сенсора, соединенного с пластиной на основе кремния или германия.

Схема расположения лаборатории





НИКТО, КРОМЕ НАС

Сейчас идет подготовка к эксперименту – сложная, многоэтапная, причем каждый этап требует своих исследований, инженерных решений, тщательной проверки методик наблюдения, регистрации, измерений. Важнейший этап подготовки – создание источника (он же детектор). По условиям эксперимента для него, как мы помним, нужны изотопночистые кальций и молибден. Коллаборация AMoRE знает, где их взять. В России.

Сегодня единственное место в мире, где можно наработать нужное количество молибдена-100 – промплощадка ЭХЗ.

Более 20 лет специалисты производственно-технологической службы разделительного производства ЭХЗ, цеха по производству изотопов, центральной заводской лаборатории работают с технологией комплексного получения изотопов молибдена на газовых центрифугах. Опытные работы по освоению процесса разделения изотопа ^{100}Mo и его аналитического сопровождения начаты в 1990-х годах. Затем шла непрерывная оптимизация и совершенствование технологии с учетом возможностей производства и все возрастающих требований научных коллабораций, выступавших в качестве конечных заказчиков молибдена-100.

В результате Электрохимический завод в настоящее время – единственное предприятие в мире, способное осуществить полный технологический цикл получения изотопов молибдена: от изготовления рабочего вещества и проведения процессов разделения в газовых центрифугах до получения товарной формы изотопной продукции и аттестации ее в собственной аналитической лаборатории.

НО ЭТО ЕЩЕ НЕ ВСЕ!

Итак, молибден, обогащенный по изотопу ^{100}Mo до уровня более 96 %, делает АО «ПО «Электрохимический завод», поставляя его в виде порошка оксида молибдена $^{100}\text{MoO}_3$.

Карбонат кальция $^{40}\text{CaCO}_3$, обогащенный по изотопу ^{40}Ca (99,964-99,988 %) и обедненный по изотопу ^{48}Ca (0,001 %), производит еще одно предприятие Росатома – ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор» (г. Лесной) – методом электромагнитной сепарации. Более того, специалисты ЭХП разработали и успешно применяют технологию глубокой очистки соединений кальция CaCO_3 и $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ от «вредных» для хода эксперимента примесей.

Монокристалл $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$.

Для получения сцинтилляционного элемента конусные части отрезают, а торцы кристалла оптически полируют.



Кальций-40 тоже нигде, кроме России, сегодня не сделают. Аналогичное американское предприятие – знаменитый обогатительный завод Y-12 в Ок-Ридже, нарабатывавший уран для бомбы, сброшенной на Хиросиму, в настоящее время закрыт.

Чтобы убедиться, что изотопная продукция ЭХЗ и ЭХП полностью соответствует условиям эксперимента, ее образцы прошли гамма-спектрометрические испытания в Баксанской нейтринной обсерватории – экспериментальной базе Института ядерных исследований Российской академии наук. Эксперты AMoRE, убедившись в том, что заданные параметры полностью выдержаны, дали добро на дальнейшее использование российских изотопов. Сравнение свойств сцинтилляционных элементов, полученных с помощью российских специалистов и технологий на российских предприятиях, с образцами, которые были сделаны в самой Республике Корея в 2003 году и тремя годами позже на Украине, убедило экспертов AMoRE – марка «Сделано в России» дает все шансы на успех эксперимента.

Поставки молибдена-100 в интересах коллаборации AMoRE рассчитаны на несколько лет. Килограммы продукции обернутся сотнями тысяч долларов экспортной выручки. Но для АО «ПО «Электрохимический завод» наработка молибдена-100 – не только прибыльный бизнес. Собственная технология, дающая на выходе продукт высочайшей изотопной чистоты, – это еще и наглядная демонстрация уникальных возможностей российских газовых центрифуг и технологического лидерства ЭХЗ в сфере производства изотопной продукции. А участие предприятий и организаций Росатома в обеспечении глобального научного проекта высокотехнологичными материалами, укрепляет международный престиж Госкорпорации «Росатом», всей отечественной атомной отрасли.

При подготовке текста использовались: кандидатская диссертация научного сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Н. Д. Ханбекова «Изучение свойств монокристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и изготовленных на их основе сцинтилляционных элементов криогенного детектора для поиска безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{100}Mo »; статьи сотрудника ГИЦ «Институт теоретической и экспериментальной физики», доктора физ.-мат. наук А. С. Барабаша в журналах УФН (№ 5, 2014 г.) и «Природа» (№ 11, 2011 г.); технический отчет о реализации проекта AMoRE (декабрь 2015 г.) и другие материалы.



Внешний вид
источника
детектора.

Источник:
<https://amore.ibs.re.kr>