

Муниципальное бюджетное учреждение дополнительного образования  
города Костромы центр творческого развития «Академия»

**ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ИТОГОВЫЙ ПРОЕКТ**

на тему «Мюоны»

Автор проекта:

ученик 10 класса

МБОУ «Лицей 17»

Сорожкин Никита, 16 лет

г. Кострома, Российская Федерация

Руководитель проекта: педагог

дополнительного образования

Улыбышев Сергей Константинович

Кострома, 2018

# Введение

## Гипотеза

Возможно ли обнаружить и зафиксировать частицы, а также изучить некоторые их свойства "в домашних условиях".

## Цели

Обнаружение и регистрация мюонов в домашних условиях. Изучение их свойств.

## Задачи

- Изучить информацию, связанную с природой частиц, а также со способами ее обнаружения и фиксации.
- Провести эксперимент по обнаружению и фиксации мюонов.
- Подтвердить зависимость проникающей способности космических частиц от наличия препятствий путем статистического эксперимента.
- Сформулировать выводы по проведенным опытам.

## Что такое мюоны

Мюон — неустойчивая элементарная частица с отрицательным электрическим зарядом и спином  $\frac{1}{2}$ . В обычных атомах он не встречается, до этого его находили лишь в космических лучах, имеющих скорости, близкие к скорости света. Время жизни мюона весьма невелико — он существует лишь 2,2 микросекунды, а потом распадается на электрон, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино. Масса мюона в 207 раз больше массы электрона; по этой причине мюон можно рассматривать как чрезвычайно тяжёлый электрон. Мюон обозначается буквой из греческого алфавита  $\mu$ . Относится к элементарным частицам, считается бесструктурным, в составе не имеет каких-то более мелких частиц. Мюон имеет отрицательный заряд, равный заряду электрона и спин равный  $\frac{1}{2}$ . Масса мюона  $105,6583745(24)$  МэВ. Время жизни  $2,19703(4) \cdot 10^{-6}$  с. Мюон классифицируется, как лептон, относится к семейству фермионов, имеет античастицу со спином  $\frac{1}{2}$ , с противоположным зарядом и равной массой. «Мюоны почти всегда распадаются в электрон, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино (соответственно антимюоны — в позитрон, электронное нейтрино и мюонное антинейтрино); существуют также более редкие типы распада, когда возникает дополнительный фотон или электрон-позитронная пара.»

## Как был обнаружен

Мюоны были обнаружены Карлом Андерсоном в 1936 году, во время исследования космических лучей. Он обнаружил частицы, которые при прохождении магнитного поля отклонялись в меньшей степени, чем электроны, но более резко, чем протоны. Было сделано предположение, что их электрический заряд был равен заряду электрона, и для объяснения различия в отклонении было необходимо, чтобы эти частицы имели промежуточную массу (лежащую где-то между массой электрона и массой протона).

## Секрет жизни

На Земле мюоны регистрируются в космических лучах, которые возникают в результате распада заряженных пионов. Пионы создаются в верхних слоях атмосферы первичными космическими лучами и имеют очень короткое время распада — несколько наносекунд. Эти мюоны рождаются в верхней части атмосферы, в которую постоянно врезаются высокоэнергетические частицы, также известные, как космические лучи. Это в основном протоны, но очень высоких энергий: они так сильно врезаются в атомы, что это вызывает широкие атмосферные ливни частиц — возникновение пар материи/антиматерии, а также тяжёлых нестабильных частиц вроде пионов, которые также могут распадаться (например, на те же мюоны). Подсчитаем: даже если частицы двигаются почти со скоростью света, 300 000 км/с, и живут 2,2 микросекунды, они должны пройти не более 660 метров, прежде чем распаться. Возникает закономерный вопрос: если мюоны создаются в верхней части атмосферы, примерно в 100 км от Земли, или в 100 000 метров, то как они долетают до земли? Ответом может служить теория временного ускорения Эйнштейна — чем ближе к скорости света двигаются объекты, тем медленнее идут их часы.

С нашей точки зрения, мюон, движущийся с 99,9995% от скорости света, будет испытывать течение времени, замедленное в 1000 раз по сравнению с покоящимся мюоном. Так что вместо пути в 660 метров он может пролететь 660 километров до того, как распадётся. Эта разница для мюонов со средним временем жизни в 2,2 мкс означает, что вместо одного шанса из 1066 достичь вас (такой шанс был бы у

них без всякого замедления времени) они получают 86% шанс это сделать.

И как бы это выглядело со стороны мюона? С его точки зрения время течёт нормально, он появился в верхних слоях атмосферы и спустился до земли. Но «до земли» для него значит совсем не то же самое, что для нас!

## Детектирование мюонов

Луис Альварес весьма интересовался египетскими пирамидами, особенно двумя гигантами, возведенными в Гизе во времена правления второго фараона Четвертой династии Древнего царства Хуфу (Хеопса) и его сына Хафры (Хефрена). Великая пирамида Хуфу имеет три погребальные камеры, расположенные друг над другом, а пирамида Хафры — всего одну, причем на уровне земли. Археологи давно предполагали, что в этой пирамиде есть и другие камеры, скрытые за толщиной камня.

В 1965 году Альварес проверил эту гипотезу с помощью инструментария ядерной физики. Для просвечивания пирамиды он решил использовать мюоны, которые в изобилии возникают в ходе бомбардировки земной атмосферы первичными космическими лучами.

В погребальной камере пирамиды Хафры физики и археологи из США и Египта установили высокочувствительные искровые камеры, обычно используемые для исследования космических лучей. Эти детекторы предназначены для регистрации треков заряженных частиц в газовой среде. Расчет был на то, что если пирамида имеет замурованные погребальные камеры, расположенные выше детекторов, то их удастся обнаружить, так как воздух внутри камер пропустит больше мюонов, нежели строительные блоки из базальта, известняка и гранита.

Перед самым началом измерений разразилась Шестидневная война 1967 года, и зондирование пирамиды пришлось отложить. Позже ученые просветили около пятой части ее объема и не обнаружили никаких пустот. Это была первая попытка детектирования скрытых объектов с помощью космических лучей.

В ноябре 201 года международная команда ученых Scan Pyramids исследовала египетские пирамиды с помощью метода мюонной томографии и обнаружила в пирамиде Хеопса ранее неизвестное помещение. Для анализа использовалось специальное ПО под названием Geant4 — одним из его разработчиков стал научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики высоких энергий Томского Государственного Университета Евгений Черняев.

Исследователям удалось установить, что скрытая комната находится над большой галереей, ведущей в камеру фараона. Длина помещения составила не менее 30 метров, высота — около 15 метров; предназначение помещения пока не ясно. Это первое с XIX века крупное открытие в пирамиде Хеопса, которое, к тому же, было осуществлено без проведения раскопок.

Мюоны легко проходят через каменные блоки и поэтому подходят для мюонной томографии таких массивных объектов, как пирамиды. При прохождении пустот в крупных объектах, поток мюонов будет существенно увеличиваться.

После трагедии 11 сентября 2001 года в США задумались, как предотвратить угрозу ядерного терроризма. Вот тогда-то в Лос-Аламосе, где когда-то работал Альварес, вспомнили о его египетском эксперименте и решили использовать космические мюоны для выявления ядерной контрабанды через национальные границы. Угол рассеяния

этих частиц зависит от атомов вещества, сильнее всего они отклоняются тяжелыми элементами с большим зарядом ядра — ураном или плутонием, без которых нельзя изготовить никакое ядерное оружие, или свинцом, который используется для экранирования делящихся материалов. В 2003 году сотрудник Лос-Аламосской национальной лаборатории Кристофер Моррис возглавил разработку метода, выявляющего подозрительные материалы такого рода с помощью космических мюонов. Спустя три года его группа сконструировала прототип мюонного детектора, который в ходе тестирования отреагировал на дециметровый свинцовый кубик, спрятанный в блоке цилиндров автомобильного мотора. Новую технологию назвали мюонной томографией.

В 2005 году к этому проекту подключилась калифорнийская фирма Decision Sciences Corporation, и до этого задействованная в оборонных проектах. В кооперации с Лос-Аламосом она приступила к разработке крупногабаритных установок для мюонной томографии коммерческих грузов. Для регистрации мюонов было решено использовать дрейфовые камеры, газоразрядные детекторы частиц высоких энергий, вошедшие в употребление уже после эксперимента Альвареса.

Мюоны не только с легкостью пронзают нижние слои атмосферы, но и проходят сквозь многометровую толщу скальных пород. Очень важно, что плотность потока этих частиц весьма стабильна — около 10 000 на 1 м<sup>2</sup> в минуту. Углы рассеяния мюонов на легких ядрах малы, и это дает возможность отличать их от ядер тяжелых элементов. Мюоны, образующиеся в атмосфере под действием космических лучей, проходят через верхний слой детекторов — дрейфовые камеры, наполненные инертным газом. Пролетающие частицы ионизируют газ, что позволяет отследить их траекторию. Затем мюоны пролетают сквозь сканируемый объект, после чего попадают на нижний слой детекторов, где их «выходная» траектория вновь фиксируется и сравнивается с «входной». Рассеяние мюонов на большие углы свидетельствует о наличии веществ, содержащих атомы с большим зарядом ядра, — урана или плутония.

### **Как можно поймать мюоны?**

Однако для того, чтобы зафиксировать Мюон не обязательно иметь дорогую аппаратуру. Для детектирования частиц мною был выбран самый простой способ. Для этого мне потребовались лишь фотоаппарат и компьютер для обработки и анализа снимков. Когда мюон оседает на матрице его можно зафиксировать. Я расположил фотоаппарат в трех разных точках с разной толщиной перекрытия и сделал ряд снимков со снятым объективом и закрытой крышкой. Я предположил, что зависимости от толщины перекрытия должно было изменяться количество кадров с мюонами. Однако, при анализе серии из 60 снимков данная корреляция не была обнаружена. Это объясняется тем, что толщина перекрытия школы является незначительной помехой для мюонов.

Также я использовал счетчик Гейгера в надежде засечь мюоны. Звук с прибора был записан и обработан в аудио редакторе. Зная, что поток мюонов на поверхности составляет примерно 1 частицу на квадратный сантиметр в минуту можно рассчитать периодичность появления «щелчка». Площадь поверхности чувствительного элемента составила 8 см<sup>2</sup>. Тогда мюон должен был «появляться» каждые 7.5 секунд.



Рис.1 Съемка

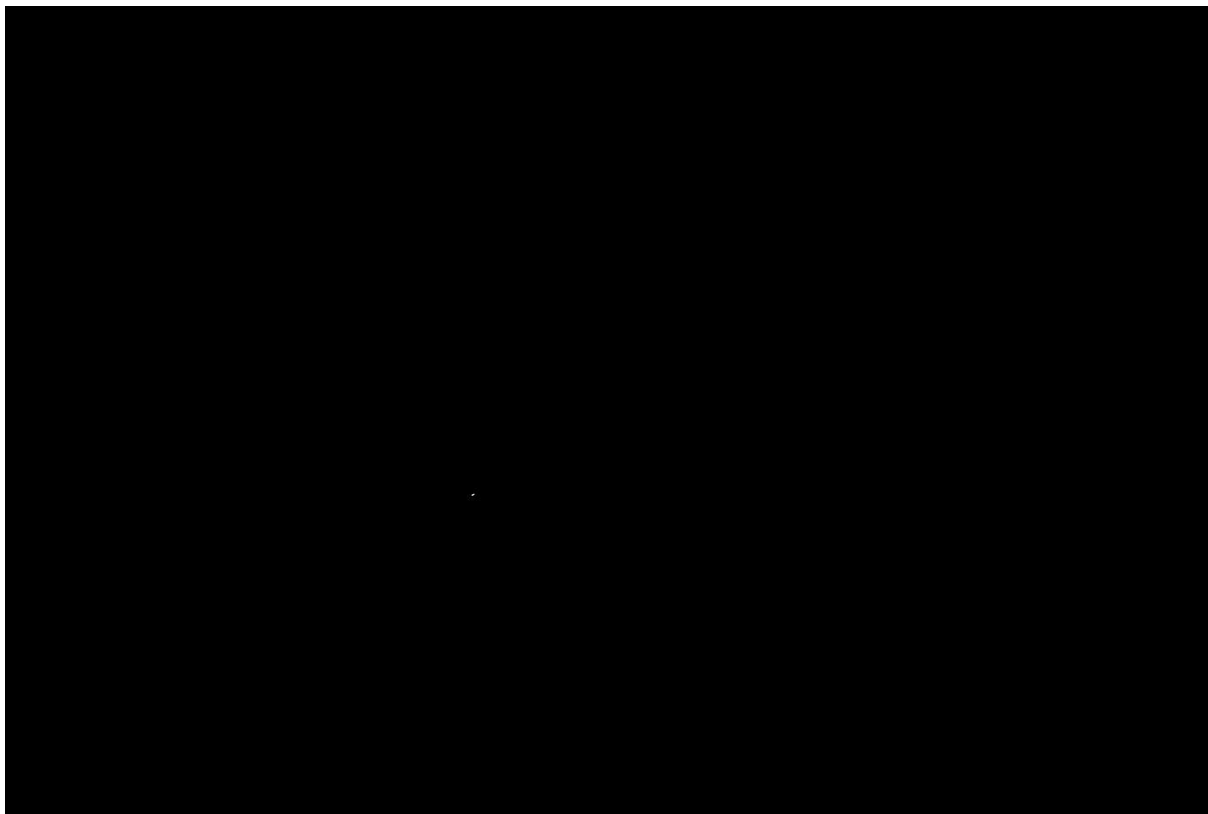


Рис.2 Обработанное фото с мюоном

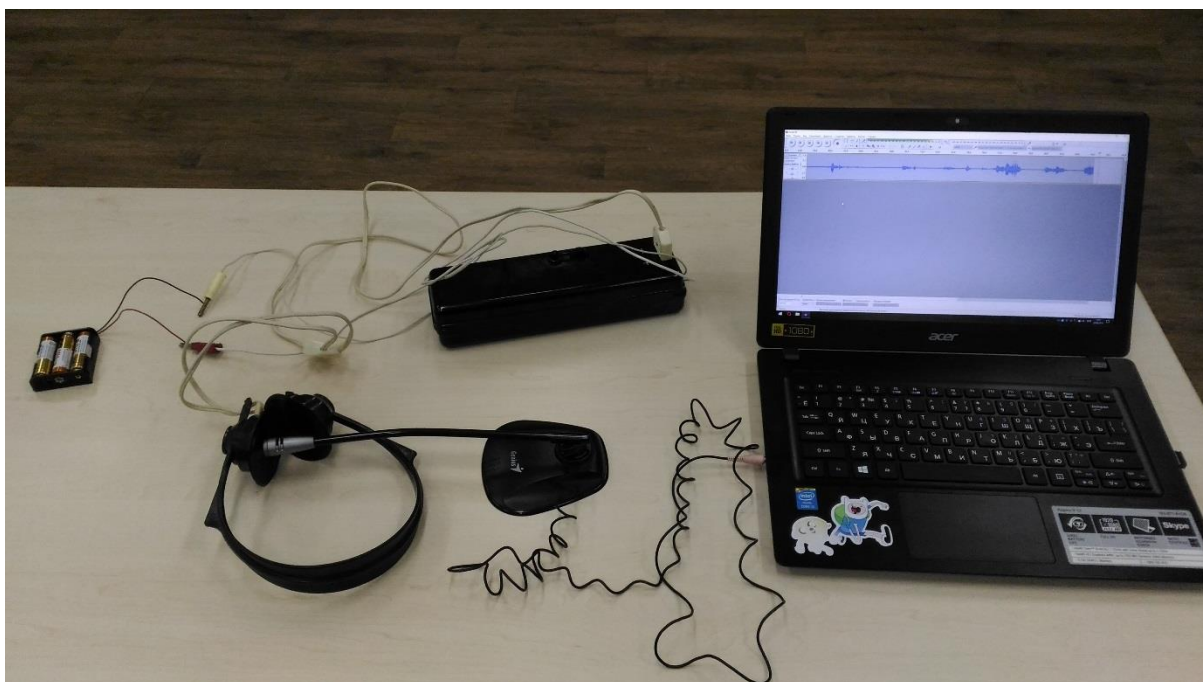


Рис. 3 Производство записи со счетчика гейгера

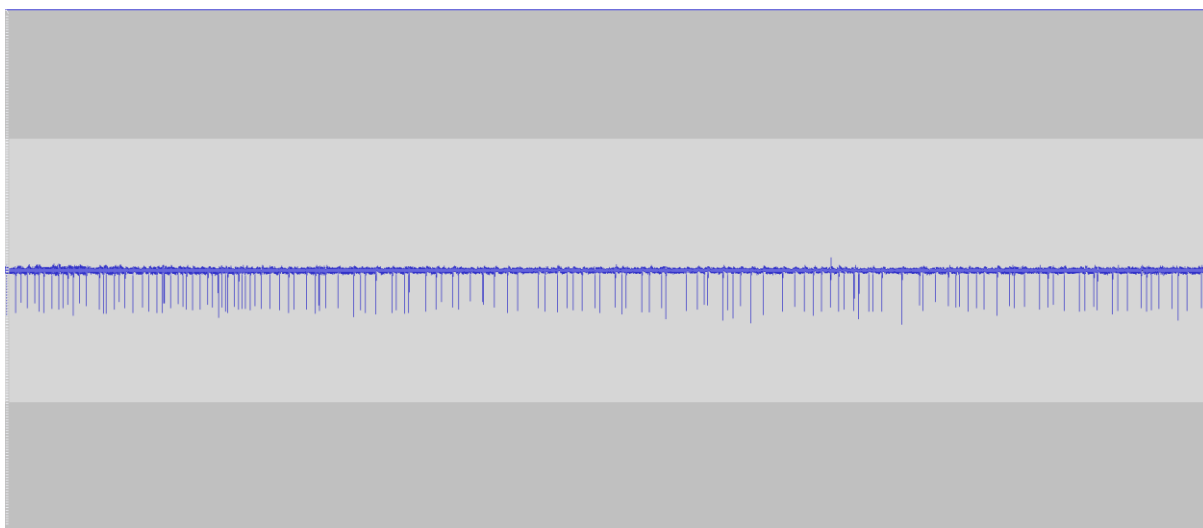


Рис. 4 Запись со счетчика Гейгера

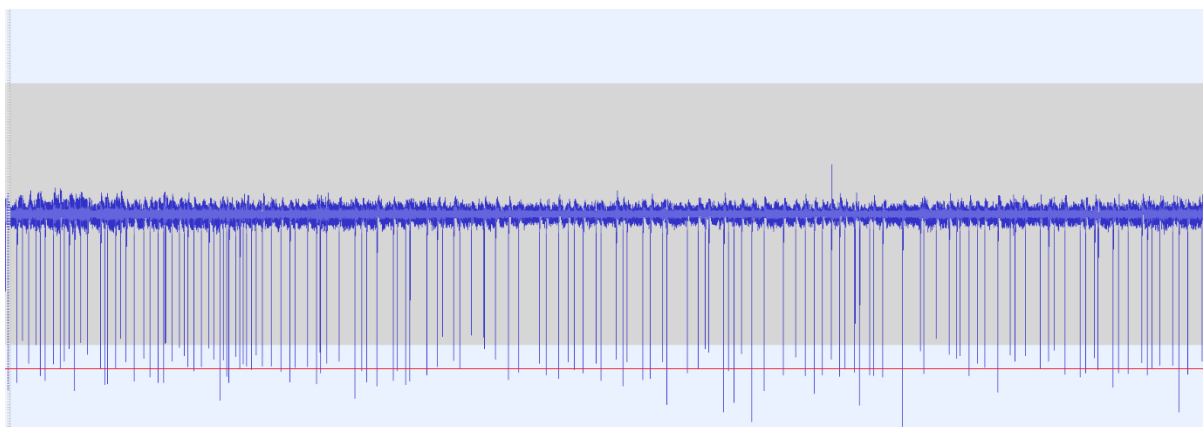


Рис. 5 Усиленная и проанализированная запись со счетчика Гейгера

## **Перспективы детектирования мюонов. К чему может привести их более глубокое изучение?**

Еще на заре физики элементарных частиц, когда новые частицы ловили не на ускорителях, а в космических лучах, ученые сообразили, что этот постоянный поток мюонов — это бесплатный просвечивающий инструмент, который создала для нас сама природа. Это как бы мюонный аналог рентгеновского аппарата, только куда более безопасный и прозорливый. Если мы хотим рассмотреть на просвет — на мюонный просвет — твердый предмет, здание, гору, то нам достаточно поставить рядом мюонный детектор и получить снимок тела «в мюонных лучах». Чем более толстый слой вещества, тем больше мюонов он остановит — вот вам и контрастное изображение внутреннего устройства предмета. Ну, а если поставить несколько таких детекторов и ловить мюоны, прилетевшие с разных сторон, то по ним можно будет восстановить трехмерную картину строения предмета, то есть выполнить настоящую мюонную томографию.

Чем же отличается эта методика от других?

Преимуществ несколько. Во-первых, это огромная проникающая способность мюонов: при подходящей энергии они могут добивать на сотни метров вглубь земли.

Во-вторых, в отличие от фотонов, электронов и других частиц, мюоны не производят внутри вещества никаких ливней вторичных частиц — они просто летят себе и потихоньку теряют энергию. Идеальная «рабочая лошадка» экспериментатора: летит, куда сказали, почти не теряет по пути запасенную в себе энергию и, в общем, никого не сбивает с толку, не мешает работать. Недаром мюоны так любят и экспериментаторы на Большом адронном коллайдере.

В-третьих, источник мюонов — бесплатный. Мюоны везде, их много и днем, и ночью, этот источник никто не отключит и не заслонит — знай себе ставь детекторы и регистрируй потоки. Красота!

В-четвертых (и это немаловажная деталь для практических применений), в отличие от других томографических методов исследования, мюонная томография — это пассивная методика. В ней не осуществляется никакого воздействия на изучаемый объект, детекторы лишь измеряют природный мюонный фон. Поэтому эта методика не требует ни специального лицензирования, ни повышенного контроля безопасности, ни прочих мер предосторожности. Систему детекторов можно установить где угодно, хоть внутри автомобиля, и кататься по городу, обследовать произвольные объекты, например, здания.

Есть, правда, одно важное но: моментального снимка так не получишь. Все-таки природный мюонный фон невелик, поэтому для того, чтобы получить более-менее контрастное изображение здания со всей его внутренней структурой, потребуется экспозиция в несколько дней или недель. Зато она очень полезна в тех ситуациях, когда физически забраться внутрь конструкции невозможно или небезопасно, и тогда мюонная томография может оказаться единственным способом дистанционного разглядывания сложных конструкций, спрятанных от всех иных видов «зрения»



## Тьма египетская

Первым знаменитым примером практического использования мюонной томографии стала попытка нобелевского лауреата и одного из виднейших физиков-экспериментаторов XX века Луиса Альвареса с коллегами обнаружить скрытые помещения в египетских пирамидах. Ровно полвека назад, в 1965 году, Альварес разослал специалистам по космическим лучам и археологам письмо с предложением такого измерения. Хотя к тому времени был уже накоплен солидный с опыт работы с космическими мюонами, предложенный эксперимент был все же технически сложным: требовалось не просто регистрировать мюоны, а еще и измерять их направление прихода с высокой точностью и, к тому же, на большой площади. Однако благодаря созданию незадолго до этого искровых камер большого размера с цифровым снятием данных такие измерения стали возможными.

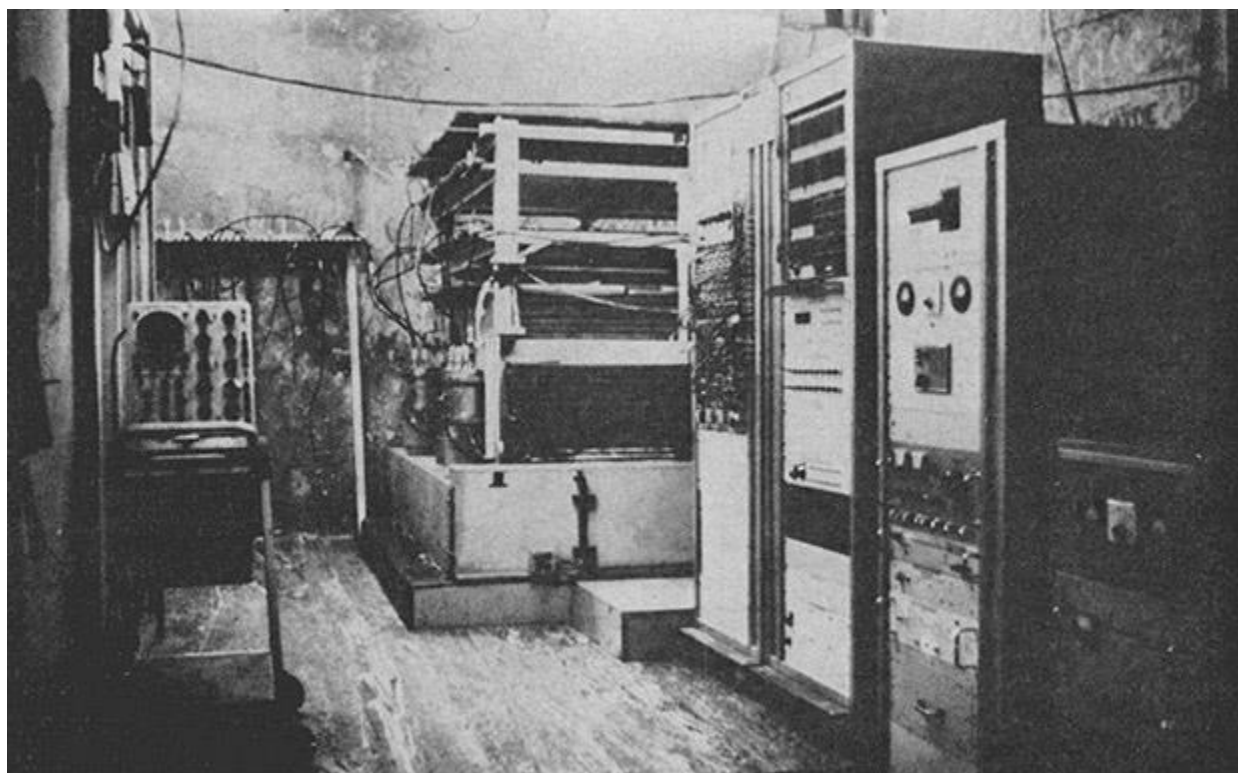


Рис.6 Искровая камера и обслуживающая аппаратура, установленные в Погребальной камере Пирамиды Хефрена.

Был проведен уже настоящий сеанс наблюдений в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов. Весь телесный угол, доступный наблюдениям, был поделен на участки 3 на 3 градуса, и в каждом участке с течением времени накапливалась статистика. Иногда, правда, искровая камера сбила и переставала считать мюоны. К счастью, быстро выяснилось, что причина этого в испорченной атмосфере внутри газовых ячеек. Чувствительность аппаратуры удалось восстановить после продувания свежим неоном. На всякий случай, чтобы не вносить инструментальных погрешностей, физики выкидывали данные за такие дни.

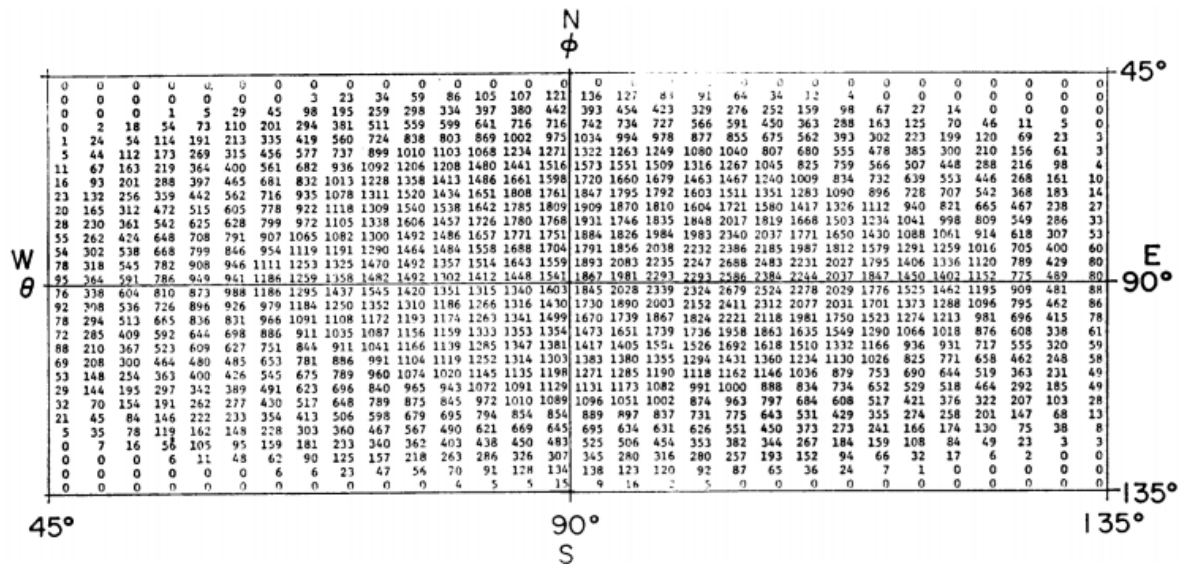


Рис.7 Угловое распределение зарегистрированного мюонного потока. Числа указывают количество событий, зарегистрированных в каждом бине 3 на 3 градуса

Набор данных продлился несколько месяцев и собрал порядка миллиона мюонных событий. На рисунке выше показаны «сырые данные», суммарные числа событий в каждом участке телесного угла за все время наблюдений. Сами по себе они еще не говорят всей правды. Для этого физикам пришлось сосчитать теоретически ожидаемые числа событий, вычестить из одного другое и оценить статистическую значимость отклонений (выраженную в количестве сигм) на каждом угловом участке. Этот анализ был проделан и, в результате, таблица заполнилась числами типа 0, -1, 3, но не более того. Ни в каком направлении, ни в одной ячейке не наблюдалось отклонения более 3 стандартных отклонений. Таким образом, предположение, что где-то в верхней части пирамиды есть тайная камера размером в несколько метров, было опровергнуто прямым наблюдением.

На самом деле, в этой истории была некая загогулина сюжетной линии. В первые два месяца исследователи видели нечто похожее на пустую камеру, якобы расположенную в 30 метрах прямо над камерой наблюдения. Однако по мере уточнения геометрии пирамиды и пересчета теоретических предсказаний аномалия рассосалась. В окончательных данных, опубликованных в журнале Science в 1970 году, никаких намеков на пустоты не осталось.

## До и после

В последующие десятилетия ту же методику использовали и для других задач. Однако по-настоящему она расцвела уже в этом веке. В начале 2000-х годов в Лос-Аламосской Национальной лаборатории в США была разработана новая, гораздо более прозорливая разновидность мюонной томографии — мюонная рассеивающая радиография. Для нее главный показатель — это не то, сколько мюонов поглощается, а то, как они рассеиваются. От этого, во-первых, улучшается контраст изображений: если толща исследуемого объекта не слишком велика, то поглощения почти не будет, а вот рассеиваться мюоны уже вполне могут. Во-вторых, чем тяжелее атом вещества, тем сильнее ядро отклоняет пролетающие поблизости мюоны. А значит, по величине углового разброса при рассеянии можно определить не только наличие пустот или чужеродных вкраплений, но и примерно узнать, что это там за материал.

Может показаться, что, по сравнению с обычной томографией, в рассеивающей мюонной радиографии сильно усложняется задача восстановления трехмерного распределения вещества по мюонным «снямкам». Ведь одно дело смотреть предмет «на просвет» в мюонных лучах, а другое — учесть, что за счет многократного рассеяния каждый мюон может слегка отклониться. Однако проблему помогает снять простой метод, позаимствованный из физики элементарных частиц.

Поставим мюонный детектор до и после исследуемого предмета, как на рисунке. Каждый из них, во-первых, засекает момент прохождения мюона, а во-вторых, измеряет траекторию. Поэтому, чтобы устранить ненужный фон, мы можем обращать внимание только на близкие по времени пары мюонных отсчетов и не любые, а такие, в которых мюон отклонился на заметный угол. Просто проходящие насквозь мюоны нам не потребуются.

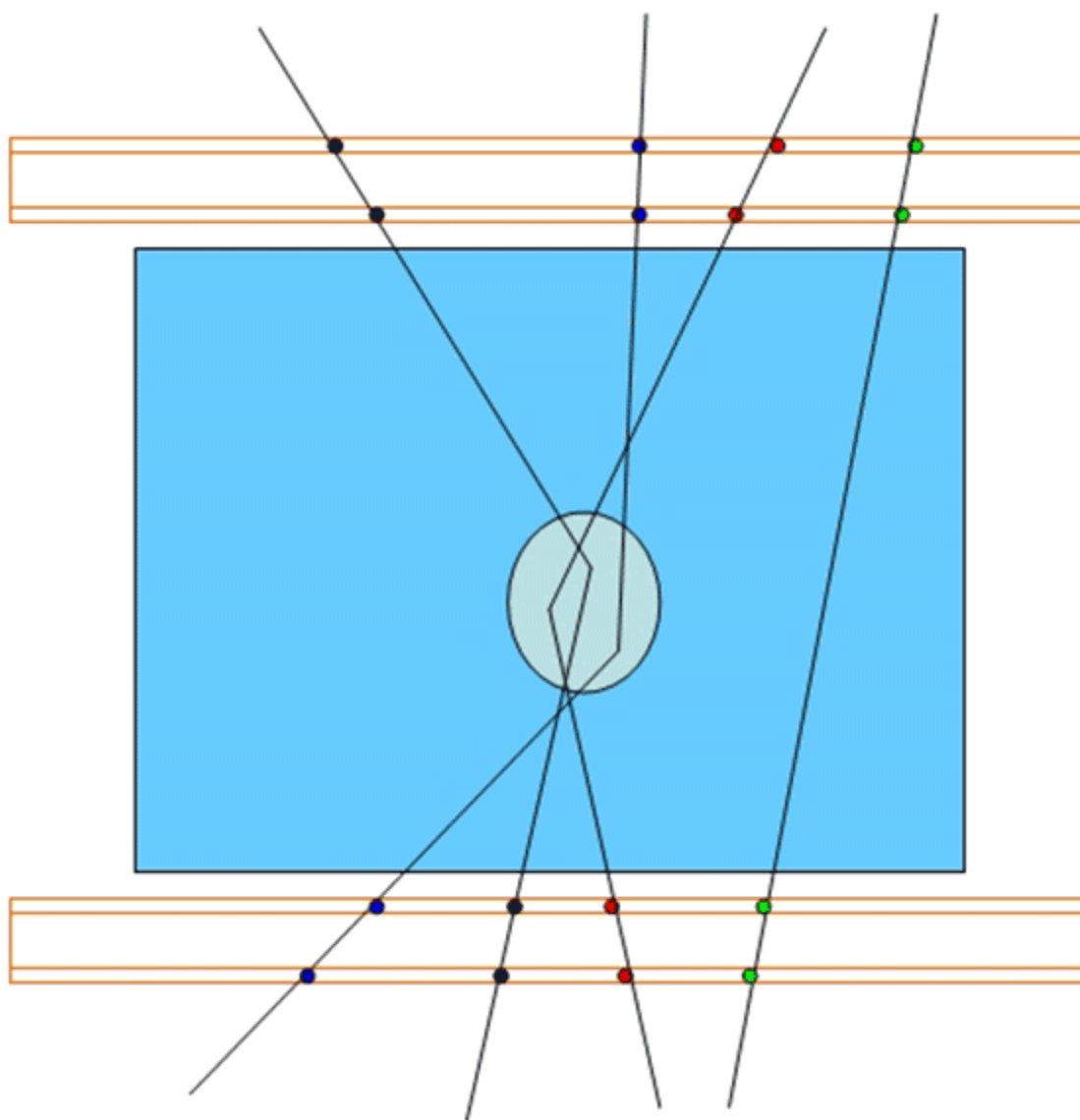


Рис.8 Траектория мюонов до и после объекта позволяет восстановить точку и угол рассеяния.

Благодаря мюонной рассеивающей радиографии удастся за считанные часы получать контрастные изображения внутренностей зданий. Это особенно полезно в тех

ситуациях, когда по каким-то причинам физическое проникновение внутрь конструкции невозможно или опасно. Более того, технология сейчас позволяет видеть даже небольшие детали. Так, в недавней статье исследователи из той же Лос-Аламосской Национальной лаборатории не только разглядели с помощью мюонов вмурованный в бетонную стену вентиль, но и даже смогли отличить состояние «открыт» и «закрыт».

Что касается задачи определения типа материала, то изотопной точности достичь, конечно, нереально. Но заметить, скажем, урановый шар, спрятанный внутри цельнометаллического стального блока, этому методу вполне по силам. Собственно, одним из первых применений этой технологии как раз стала эффективная проверка международных грузов на предмет контрабанды ядерных материалов — мера безопасности, ставшая особенно актуальной после терактов 2001 года. Важную роль в развитии и демонстрации этой технологии сыграла также и Италия.

## **Фукусима**

Звездный час мюонной радиографии настал совсем недавно: она позволила заглянуть в сердце первого энергоблока японской АЭС Фукусима, полуразрушенного в 2011 году после землетрясения и последующего цунами. После кризисных первых недель ситуацию в энергоблоке удалось стабилизировать и можно было приступить к разработке плана по извлечению расплавившегося ядерного топлива. А для этого надо вначале увидеть, что, собственно, произошло в горячей зоне реактора, сколько топлива куда пролилось, что где расплавилось.

Сразу после осознания ситуации специалисты предложили использовать мюонную радиографию для ответа на этот вопрос. В 2012 году в журнале *Physical Review Letters* вышла статья, в которой было тщательно проанализировано, на какую точность можно рассчитывать и какое для этого потребуется время экспозиции. На рисунке внизу показано моделирование того, что должен увидеть детектор размером 50 кв. метров за разное время накопления статистики. Как видно, уже нескольких недель должно хватить, чтобы заметить вытекание топлива. Также бросается в глаза то, насколько контрастнее картинка, полученная методом рассеяния мюонов, по сравнению с традиционной мюонной томографией на просвет.

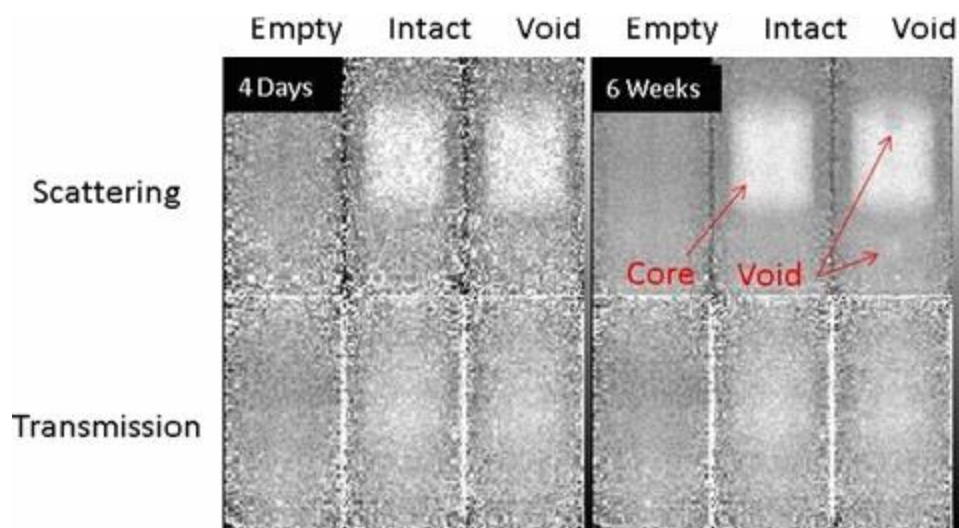


Рис. 9 Моделирование того, что должен увидеть мюонный детектор, рассматривающий внутренности реактора на АЭС Фукусима-1 по технологии рассеивательной радиографии (вверху) и просвечивающей томографии (внизу).

Работа закипела и в 2013 году, в качестве последнего этапа валидации технологии, миниатюрный мюонный трековый детектор площадью в полтора квадратных метра был транспортирован из Лос-Аламоса в Японию. Детектор установили рядом с экспериментальным реактором в Кавасаки и в течение месяца «фотографировали» его в «мюонных лучах». Центральная часть реактора начинала проступать уже через несколько часов после начала работы, пустоты в центре — через сутки. После четырехнедельной экспозиции картинка стала уже настолько четкой, что ее можно было разбить на 10-сантиметровые слои и просматривать устройство реактора слой за слоем. Отчет об этом исследовании был опубликован в январе 2014 года.

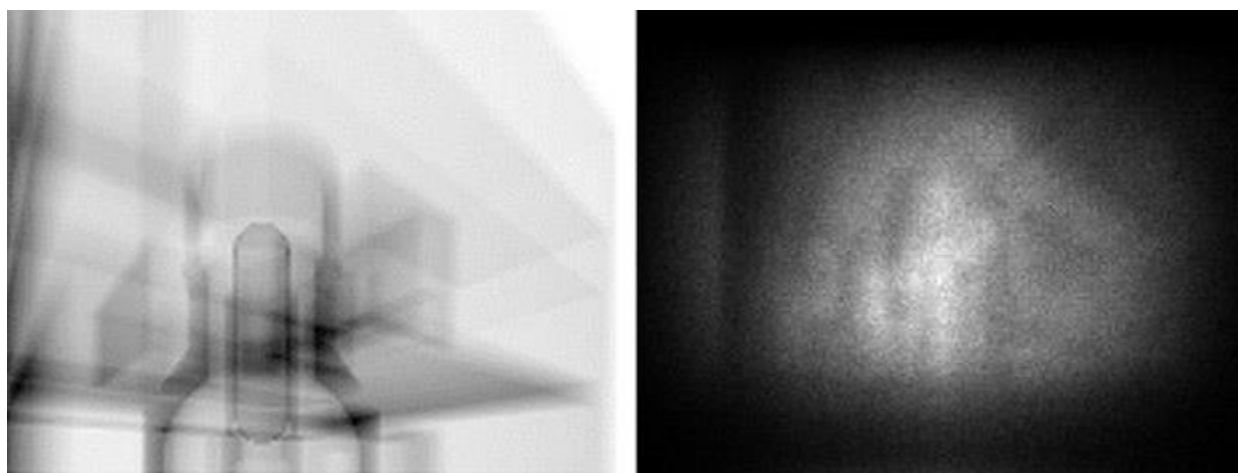


Рис. 10 Мюонная радиография первого энергоблока АЭС Фукусима: моделирование (слева) и реальный снимок (справа) после 26-дневной экспозиции.

В феврале 2015 года была завершена установка семиметровых мюонных детекторов рядом с реакторами Фукусимы. В марте, после первого 26-дневного сеанса набора данных, были получены первые, размытые пока изображения. Предварительные результаты подтверждают, что в горячей зоне реактора отсутствует тот объем топлива, который там должен быть, и, следовательно, расплавление активной зоны действительно произошло и привело к выливанию ядерного топлива на дно гермооболочки. Набор данных будет продолжаться в течение всего года для

получения более контрастных изображений внутренностей поврежденного энергоблока. Специалисты рассчитывают достичь пространственного разрешения 30 см.

### **Заглянуть в вулкан**

А теперь, по-прежнему оставаясь в Японии, изменим масштабы. В 2008 году группа из Университета Токио, возглавляемая Хироюки Танакой, выступила с предложением применить мюонную радиографию к действующим вулканам. Здесь уже размеры исследуемых объектов, а также расстояния от них до детекторов, достигают сотен метров и больше. Но поскольку природные мюоны летят со всех сторон под всеми углами, то общий поток мюонов остается примерно того же порядка.

Впрочем, наблюдать за внутренностями вулкана все равно сложнее, чем за небольшой рукотворной конструкцией, как минимум, по трем причинам. Во-первых, мы не можем поместить детектор непосредственно под изучаемый объект. Детектор должен быть установлен на склоне вулкана, а это значит, что попадут в него только почти горизонтальные мюоны, которые на своем пути прошли вулкан насквозь. Ясно, что чем более пологий склон, тем меньше поле зрения детектора и тем дальше он отстоит от кратера вулкана. Тем не менее, там, где мюонная радиография применима, она дает более детальную картину распределения пород разной плотности внутри вулкана, чем альтернативные методы (например, сейсмическая томография или гравиметрия, основанная на слабом отклонении силы тяжести от вертикали вблизи массивных объектов).

Во-вторых, пройти насквозь несколько сот метров пород могут только высокоэнергетические мюоны, поток которых намного меньше, что, конечно, ухудшает контраст изображений. Ну а в-третьих, не получится воспользоваться роскошью лабораторного эксперимента по рассеянию мюонов — ведь покрыть мюонными детекторами всю дальнюю сторону вулкана невозможно. Поэтому здесь приходится опираться на традиционную трансмиссионную мюонную томографию.

В настоящее время существует несколько групп, которые разрабатывают методику мюонного мониторинга за вулканами и регулярно опробывают свои наработки в полевых условиях. Кроме упомянутой уже пионерской группы Танаки, есть международный проект MU-RAY, который недавно выполнил мюонное сканирование Везувия, французская коллаборация TOMUVOL, которая изучает устройство вулкана Пюи-де-Дом, и французский же проект Diaphane, оттачивающий технологию на Малых Антильских островах и на склонах вулкана Этна. Подробную информацию об этом направлении исследований можно получить из материалов недавней конференции Muon and Neutrino Radiography 2012.

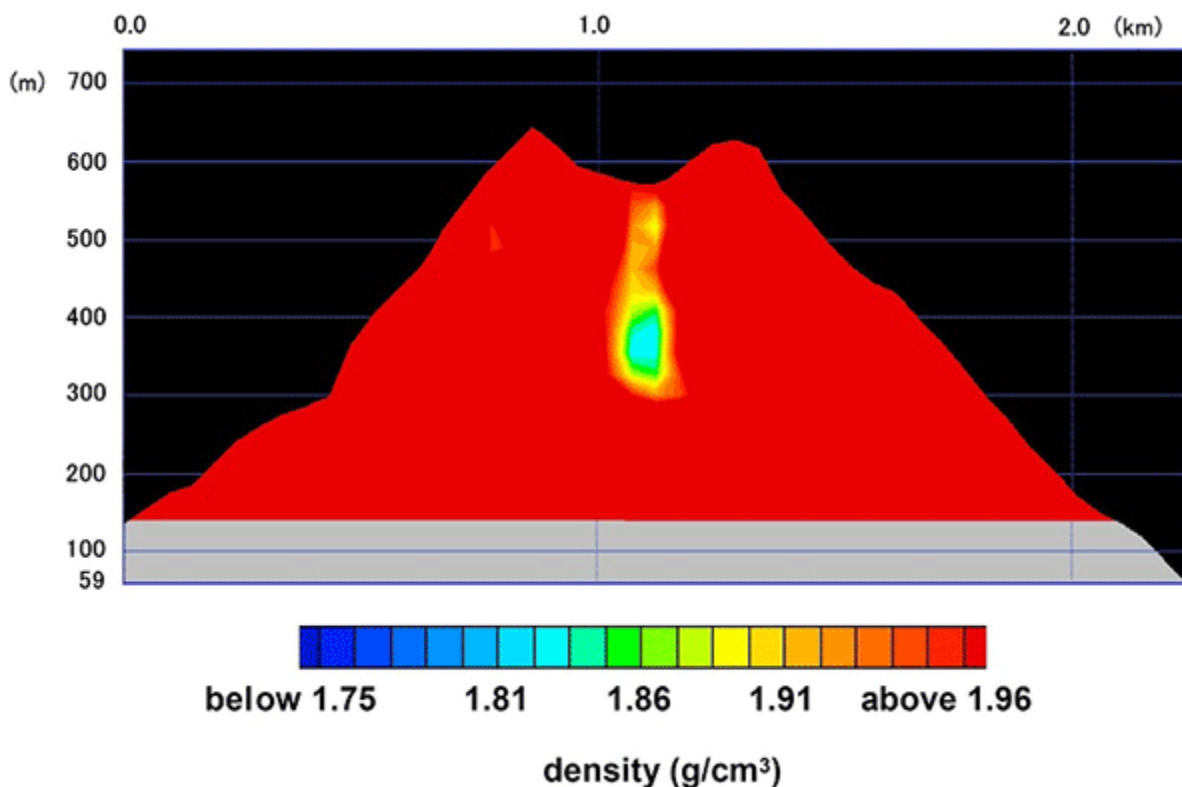


Рис. 11 Мюнограмма вулкана на острове Сацума-Иводзима.

У мюонной радиографии есть еще одно достоинство — она позволяет следить за динамическими изменениями. Пожалуй, самым впечатляющим применением этой методики стало недавнее наблюдение той же группы Танаки за внутренностями вулкана прямо в процессе извержения. В своей статье, опубликованной в 2014 году в журнале *Nature Communications*, коллектив представил подробности мюонного наблюдения за извержением островного вулкана Сацума-Иводзима с 14 июня по 10 июля 2013 года. Японское Метеорологическое Агентство заблаговременно выдало сообщение о скором извержении, поэтому команда из нескольких человек успела прибыть на место (а это достаточно удаленный остров в Тихом океане) и смонтировать полуметровый детектор. Он был установлен у подножия вулкана: и на километровой удалении от кальдеры вулкана, и на несколько сот метров ниже нее, что позволило ловить мюоны, летящие под углом 10-30 градусов к горизонту и прошедшие сквозь вулкан.

Благодаря высокому качеству мюонного детектора и низким инструментальным шумам, каждые три дня накапливалась достаточная статистика мюонов для того, чтобы восстановить, пусть и в общем приблизительном виде, картину распределений плотности внутри кратера. На последовательных снимках видно, как внутри магматической камеры перемещаются массы разной плотности, в том числе и пузыри.

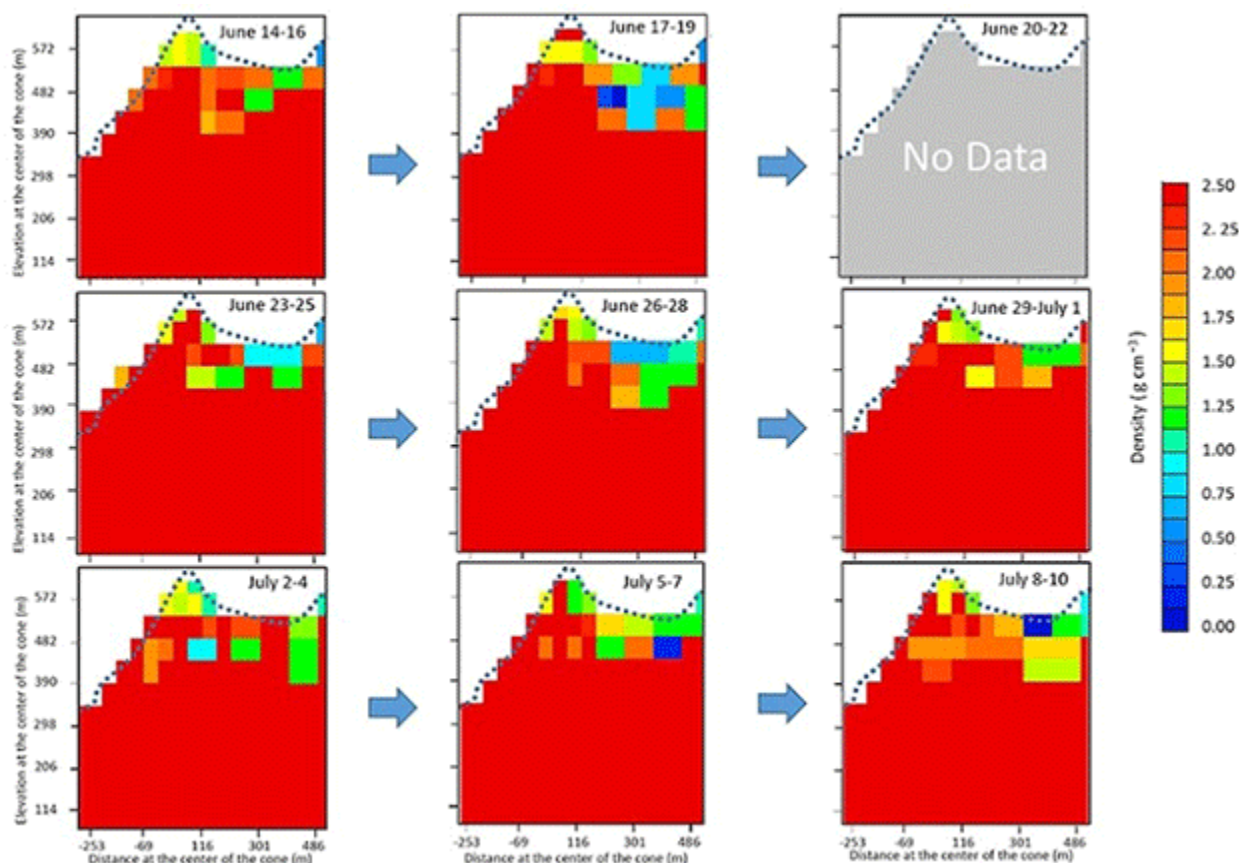


Рис.12 Мюонная радиографии вулкана в процессе извержения вскрывает динамические магматические процессы внутри него.

Эти наблюдения за временной эволюцией извергающегося вулкана выглядят очень обнадеживающими. Они позволяют надеяться на развитие технологий еще более быстрого наблюдения за внутренностями активного вулкана, в котором уровень магмы может быстро повышаться и понижаться.

Французская команда, работающая в рамках проекта Diaphane, решила подналечь именно на эту сторону технологии. В качестве контрольного эксперимента, она установила под водонапорной башней небольшой, но чувствительный мюонный детектор. В течение дня менялся уровень воды в башне, это приводило к изменению толщины вертикально идущих мюонов и, как следствие, меняло мюонный поток. На поток влияли и другие факторы, в частности, температура атмосферы (да-да, она тоже влияет на поток мюонов); все они тоже тщательно отслеживались. Эксперимент проработал месяц и наглядно продемонстрировал, что, несмотря на посторонние долговременные колебания, даже небольшой детектор может уверенно регистрировать внутрисуточные колебания уровня воды всего на десятки сантиметров. Коллектив теперь надеется применить эту методику и для еще более быстрого отслеживания того, что происходит внутри активных вулканов.

## Как увидеть Марс

Успешное применение метода мюонной радиографии для нужд вулканологии, а также перспективы ее использования в более широких геофизических исследованиях, навели исследователей на следующую мысль: а что, если попробовать аналогичным способом изучать и другие планеты? Польза от этого была бы огромной. Например,



исследователи подозревают, что на Марсе есть запасы льда и воды прямо в верхних слоях грунта. А это значит, что любые методики, которые позволят как-то прощупать приповерхностную геологию марсианских пород, могут привести к новым громким открытиям.

В статье 2013 года, с прицелом именно на это, подробно обсуждается перспективы мюонной томографии для изучения марсианской геологии. Конечно, тут есть своя тонкость. Атмосфера на Марсе слабенькая, давление там на уровне поверхности составляет процент от земного. Поэтому, хоть поток космических лучей там примерно тот же, многие из этих космических частиц просто втыкаются в грунт и не производят атмосферных мюонов. Зато с горизонтальными мюонами ситуация намного лучше, чем на Земле, ведь с точки зрения горизонтальных космических лучей толщина атмосферы многократно возрастает. Поэтому можно будет издалека, за несколько километров, наблюдать за горами через их влияние на горизонтальный мюонный поток.

Сейчас разрабатывается предложение по установке на будущих марсианских роверах небольшого мюонного детектора как раз для таких измерений. Поскольку мюонная радиография — это пассивное наблюдение, мюонный детектор будет потреблять совсем небольшую мощность, несколько ватт. Он может работать в любых условиях (день-ночь, зима-лето); его можно установить как на ровере, так и на неподвижных спускаемых модулях, и он не будет никоим образом мешать основной работе миссии. Конечно, мюонная радиография не поможет заглянуть прямо вниз, вглубь грунта, и не сможет полностью заменить такие методы наблюдения за глубинным устройством планет, как магнитометрия, гравиметрия, проникающее радарное зондирование. Однако для возвышающихся над поверхностью элементов топографии она подходит отлично.

## **Кладовщики планеты**

Ну и, наконец, совсем недавно было предложено еще одно, несколько неожиданное применение для мюонной радиографии, касающееся на этот раз климата и окружающей среды. Как широко известно, в последние десятилетия климат изменяется, причем изменяется он такими темпами, которые в природе не наблюдались уже миллионы лет. Считается, что значительную, если не доминирующую роль в этих изменениях играет резкий рост концентрации парниковых газов в атмосфере и, прежде всего, CO<sub>2</sub>. Сейчас предпринимаются огромные усилия не только по сдерживанию промышленных выбросов углекислого газа, но и по его улавливанию из атмосферы и «захоронению» в жидком или твердом виде в подземных резервуарах.

В типичном проекте по захоронению углекислоты предполагается, что она будет закачиваться в пористые породы, закрытые сверху непроницаемым для углекислоты перекрывающим пластом. Разумеется, для реализации технологии потребуется и метод контроля за эволюцией углекислоты в хранилище как по мере его наполнения, так и в дальнейшем. Чтобы вся процедура была экономически целесообразной, этот метод должен быть дешевым. И именно здесь мюонная радиография оказывается очень кстати. Так же существует схема, в которой компактные листы мюонного детектора спускаются под землю через те же шахты, по которым будет закачиваться углекислота. Листы детектора будут установлены под основным объемом резервуара и начнут сразу же мониторить поток и угловое распределение мюонов. Поскольку глубина залегания будет достигать километра, до детектора будет добывать очень мало мюонов, порядка нескольких штук на квадратный метр в час. Однако мюонные детекторы достаточно

дешевы и если покрыть ими площадь в тысячу квадратных метров, то уже за месяц-другой они позволят отслеживать процесс заполнения хранилища с точностью до процентов.

## **Выводы**

Таким образом, я изучил информацию, связанную с природой частиц, а также способами ее обнаружения и фиксации. Следующим этапом стало проведение эксперимента по обнаружению и фиксации мюонов. Исходя из полученной статистики, можно сделать вывод, что перекрытие школы не является преградой для мюонов, а с помощью обычной камеры действительно можно обнаружить мюоны и получить их снимки. Кроме того, было разработано ПО для автоматизации обработки снимков и получено звуковое представление мюона при помощи счетчика Гейгера. Заключительным этапом стало определение дальнейших перспектив мюонной томографии.

## Список использованной литературы

- Черепашук, А.М. Новые Формы материи во Вселенной//Физика. -2012. -№ 2. -С.36-44.
- Черепашук, А.М. Новости науки и техники//Физика. - 2011.-№ 12.-С.33-34.
- Левин А.Е Мюоны дают добро//Популярная механика. - 2013. - №3
- Сайт "гиктаймс" [Электронный ресурс]. URL: <https://geektimes.ru/post/283914/> (дата обращения 05.10.2017)
- Сайт "гиктаймс" [Электронный ресурс].<https://geektimes.ru/post/280434/> (дата обращения 15.11.2017)
- Сайт "tqfp.org — сообщество разработчиков электроники" [Электронный ресурс]. URL; <http://tqfp.org/kvital/registriruem-myuony-doma.html> (дата обращения 15.11.2017)
- Сайт «N+1» - научно-популярное развлекательное издание. Выпуск от 10.27.2015. [Электронный ресурс]. <https://nplus1.ru/material/2015/10/27/muons>