

УДК 53.06/550.34

ПРИМЕНЕНИЕ МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ВУЛКАНОВ

Горнушкин Ю.А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, gornushk@jinr.ru

Аннотация

Методика мюонной радиографии (мюографии) зародилась в 60-х годах и основана на использовании обладающего глубокой проникающей способностью потока космических мюонов для исследования структуры плотности масштабных природных, археологических или промышленных объектов. С начала 2000-х годов в дополнение к другим методам в мире проводятся исследования вулканов с помощью мюографии с использованием как электронных, так и эмульсионных детекторов. В связи с техническим прогрессом достигнутым в последние годы в области детекторов возможности мюонной радиографии и область ее применения расширяются.

Дается краткий обзор состояния этих исследований, рассматриваются возможные постановки исследований, ограничения методики, преимущества и недостатки используемых инструментов, достигнутые результаты, описываются перспективы использования методики в изучении вулканов в России.

Введение.

Мюоны, рождающиеся в атмосфере при распаде адронов в ливнях от первичных космических частиц, представляют собой естественный источник проникающей радиации, который можно использовать для исследования внутренней структуры больших объектов так же, как рентгеновское излучение применяется в медицине и системах неразрушающего контроля в промышленности. Интенсивность потока космических мюонов ($\sim 70 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стp}^{-1}$), его энергетический спектр (Рис.1) и угловое распределение ($\sim \text{Cos}^2\theta$) известны благодаря многим измерениям, сделанным со времени открытия мюонов в 1936 г., а разнообразные детекторы регистрации хорошо развиты и давно применяются в физике элементарных частиц.

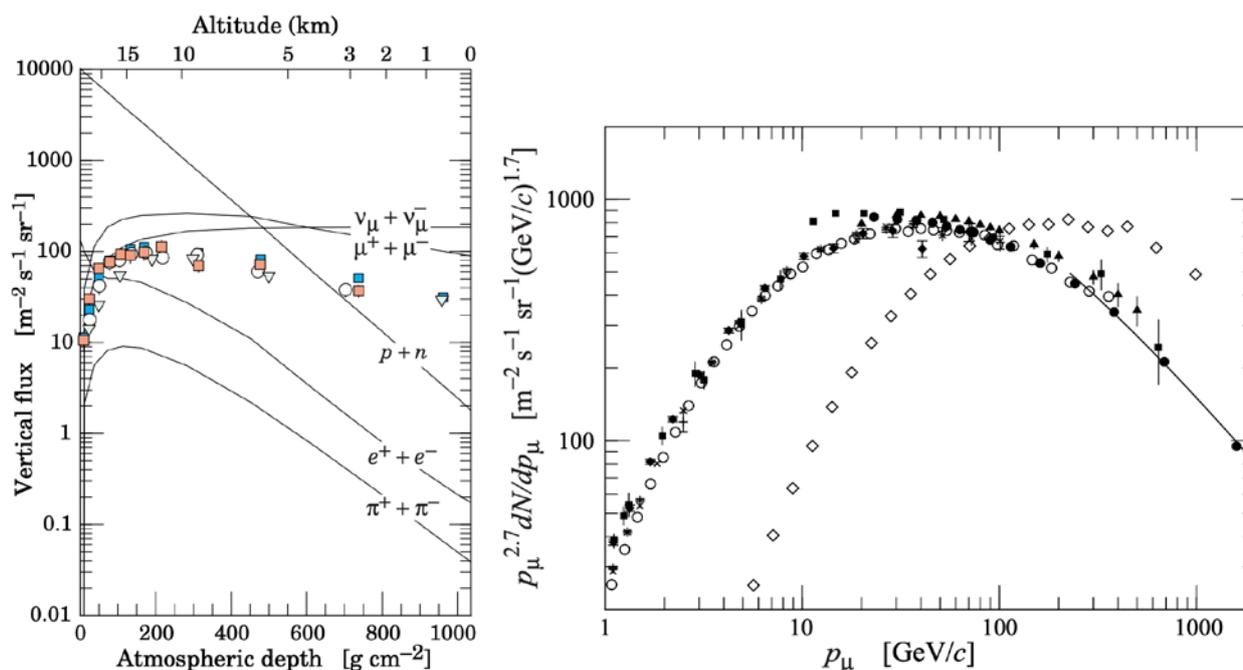


Рис.1 Распределение потока атмосферных мюонов. Слева вертикальный поток космических мюонов с $E > 1 \text{ ГэВ}$ (точки обозначают экспериментальные данные). Справа импульсное распределение космических мюонов ($P > 1 \text{ ГэВ}/c$) для $\Theta = 0^\circ$ и $\Theta = 75^\circ$ [21]

Измеряя поглощение и рассеяние потока космических мюонов, проходящих через объект исследования, можно получить информацию о распределении плотности вещества внутри объекта. При этом, поскольку энергетический спектр мюонов тянется до очень высоких энергий, метод может применяться для изучения объектов размером в десятки метров и даже сотни метров таких как вулканы, пирамиды, ледники, геологические объекты.

Хотя сама идея использования космических мюонов для исследования внутренней структуры объектов кажется вполне очевидной, реальное применение метода стало возможным только с появлением электронных детекторов заряженных частиц, способных эффективно и с необходимым пространственным и угловым разрешением регистрировать космические мюоны. В 70-х годах XX века, Нобелевский лауреат Луис Альварес установил систему искровых камер в пирамиде Хефрен в Египте для поиска скрытых полостей и комнат [5]. Эксперимент не дал результатов из-за несовершенства аппаратуры и короткого времени экспозиции, не позволившего набрать достаточное количество мюонов и увидеть с необходимым разрешением флуктуации плотности вещества в пирамиде.

Действительно, для успешного применения мюонной радиографии нужны детекторы с хорошим угловым разрешением и возможность набрать достаточное количество экспериментальных данных. В прошлом применение мюографии сдерживалось громоздкостью детекторов – популярные в экспериментальной физике газовые детекторы (искровые, а затем пропорциональные и дрейфовые камеры) нуждаются в источниках высокого напряжения и газа. К тому же применяемые газовые смеси часто являются горючими. Применение мюографии в прошлом сдерживали также примитивные с сегодняшней точки зрения системы сбора данных электронных детекторов. Существенный прогресс в методике регистрации мюонов, электронике сбора данных и средствах их анализа за последние десятилетия сильно изменил ситуацию.

Методы.

Метод исследования внутренней структуры объектов с помощью мюографии основан на измерении поглощения мюонов в веществе. Исходный поток мюонов известен, так же как и длина пути частиц через объект до детектора (например, она может быть рассчитана из данных геодезической съемки). При прохождении через вещество мюоны теряют энергию (типично несколько МэВ/см), полное изменение энергии мюона связано с интегралом плотности вещества вдоль выбранного направления. При этом мюоны относительно низких энергий останавливаются в веществе, и, соответственно, общий поток мюонов уменьшается. Таким образом, пустоты или, наоборот, области с повышенной плотностью (важно, например, в геологии при поиске залежей полезных ископаемых) могут быть обнаружены по отклонению количества зарегистрированных мюонов от расчета, сделанного в приближении постоянной плотности вещества вдоль выбранного направления.

В настоящее время для исследования внутренней структуры масштабных объектов в области вулканологии, археологии, поиска полезных ископаемых, гляциологии, используются как электронные трековые детекторы, так и ядерно-эмульсионные камеры. Каждый из этих методов имеет как преимущества, так и ограничения.

Электронные трековые детекторы.

Электронные детекторы элементарных частиц широко применяются в экспериментальной физике. Существует достаточно много типов таких детекторов, но в мюонной радиографии в основном применяются сцинтилляционные годоскопы, как самые простые и надежные. Одним из пионеров мюонной радиографии был Х.Танака, который применил метод для исследования активных вулканов в Японии [22], реализовав идеи К.Нагамине[17]. Танака исследовал вулкан Асама и продемонстрировал, что с помощью горизонтальных мюонов можно получать изображения вулканов, включая их кратер и жерло, дополняя таким образом информацию, получаемую другими методами [23].

Во Франции, начиная с середины 2000-х годов, также развивалась методика исследования вулканов с помощью электронных детекторов. Коллаборация DIAPHANE проводит систематические измерения вулканов во Франции, Италии, на Филиппинах [15]. Конструкция детектора мюонов – три плоскости сцинтилляционных годоскопов – отличается малым потреблением энергии, что позволяет работать автономно, получая питание от солнечных батарей и передавая получаемую информацию по каналам сотовой или спутниковой связи [13].

В Италии в проекте MU-RAY[6] для исследования структуры Везувия и археологических поисков в окрестностях Неаполя используются похожие детекторы, имеющие 3 слоя

сцинтилляционных годоскопов с расстоянием между первым и последним слоями в 50 см. Слой состоит из двух плоскостей, собранных из стрипов треугольного сечения (равносторонние треугольники с основанием 3.3 см и высотой 1.7 см) и измеряющих координату точки пересечения плоскости мюоном. Детектор имеет относительно хорошее угловое разрешение в 4 мрад.

Эмульсионные детекторы.

Хотя ядерная эмульсия относится к самым старым детекторам частиц, за последние 20 лет, благодаря появлению методики быстрого считывания информации из нее, эмульсионные детекторы стали вновь востребованы в задачах, где уникальное пространственное разрешение эмульсии играет ключевую роль. Начиная с 90-х годов благодаря появлению цифровых камер и общему прогрессу вычислительной техники стало возможным применение автоматического съема информации в ядерной эмульсии. До тех пор информация о следах заряженных частиц, прошедших через ядерную эмульсию, считывалась вручную, процесс был медленным и трудоемким. Для анализа даже относительно небольших объемов эмульсии требовались месяцы и даже годы. В 90-е годы группа Нагойского университета в Японии начала разработку устройства автоматического чтения информации из эмульсии [8]: эмульсия под управлением компьютера перемещалась под объективом микроскопа, а его объектив двигался по вертикали шагами по 2 микрона. Изображение в поле зрения микроскопа и в фокусе объектива на каждом шаге фиксировалось синхронно работающей видеокамерой. Изображение обрабатывалось специальным алгоритмом в реальном времени и координаты зерен серебра в плоскости, соответствующей глубине фокуса, записывались в память компьютера. По цепочке зерен определялись параметры трека частицы в одном слое эмульсии (микротрек). Микротреки, принадлежащие разным пластинкам эмульсии, объединялись в треки. Самые первые автоматические микроскопы были построены на базу специально разработанных элементов и еще не отличались высокой производительностью (менее 0.1 кв.см в час). Однако, уже в 2000-х годах в рамках эксперимента OPERA, где для регистрации осцилляций нейтрино было использовано рекордное количество эмульсионных пластин [11] общей площадью более 100000 кв.м, были созданы сканирующие станции способные снимать информацию со скоростью несколько десятков кв.см в час [8]. Работа на усовершенствовании таких приборов велась уже не только в Японии, но и в Европе – Италии [2,3,4,11,14] и Швейцарии [9,12]. Продолжающийся технический прогресс в области видеотехники и создание новых алгоритмов работы позволяет создавать все более производительные инструменты считывания информации из ядерной эмульсии, и уже сегодня она достигает 5000 кв.см в час и более [19,27].

Применение ядерно-эмульсионных детекторов имеет ряд преимуществ перед электронными: они не требуют источников питания для работы, обладают очень высоким угловым разрешением порядка 1 мрад, детектор может легко наращиваться по площади, если того требуют условия задачи, стоимость эмульсии относительно невысока – несколько долларов за квадратный дециметр. Эмульсия может набирать данные совершенно автономно и в довольно широком диапазоне температур (5-25 град.). В то же время есть и недостатки: эмульсия накапливает информацию обо всех прошедших частицах, независимо от направления, что увеличивает фон. Эмульсионные детекторы используются несколькими группами в Японии и в Европе для исследования вулканов (Стромболи, Везувий в Италии [25,26], Асама в Японии [24]), археологических поисков в Италии [10], изучения динамики таяния ледников в Швейцарии [20]. Пожалуй наиболее значительным успехом мюонной радиографии с использованием эмульсионных детекторов является открытие неизвестной комнаты в пирамиде в Египте в 2017 году [16] (Рис.2).

До недавнего времени определенные сложности имели место с доступностью ядерной эмульсии. Поскольку цифровая фотография повсеместно вытеснила традиционные пленочные аппараты, производство фотопленки в мире сильно сократилось. Однако, в университете Нагоя создали лабораторию, производящую эмульсию, куда пригласили специалистов из Fuji. Теперь физические эксперименты с участием Японии имеют надежный источник ядерной эмульсии.

В России также удалось организовать производство ядерной эмульсии в компании «Славич» и последние партии эмульсии обладают достаточно высокой чувствительностью и могут быть использованы для мюонной радиографии [1]. Собственное угловое разрешение ядерной эмульсии меньше 0.5 мрад, внешние факторы могут вносить заметный вклад особенно при длительных экспозициях в полевых (неконтролируемых) условиях, тем не менее, ядерная эмульсия имеет самое высокое угловое разрешение из всех применяемых методов регистрации мюонов. Допустимая полная накопленная за время экспозиции плотность треков может достигать 10^5 см^{-2} , она определяет максимальное время экспозиции эмульсионной камеры. При необходимости большей статистики мюонов от интересующего направления площадь камеры можно просто увеличить или заменить

новой, спустя соответствующее время. Обычно эмульсионная камера представляет собой жесткую раму, на которой установлены пластины эмульсии несколькими слоями, разделенными металлическими пластинами для подавления фона частиц низких энергий, повышения эффективности регистрации и улучшения общего углового разрешения. Пластины помещаются в светонепроницаемые конверты. После экспозиции камеры разбираются и эмульсия проявляется. После этого информация о треках мюонов считывается из эмульсионных пластин с помощью автоматических сканирующих станций и в цифровом виде сохраняется на диске компьютера. Существуют развитые алгоритмы анализа этой информации, реконструкции треков мюонов и в конце концов построения распределения плотности вещества в изучаемом объекте.

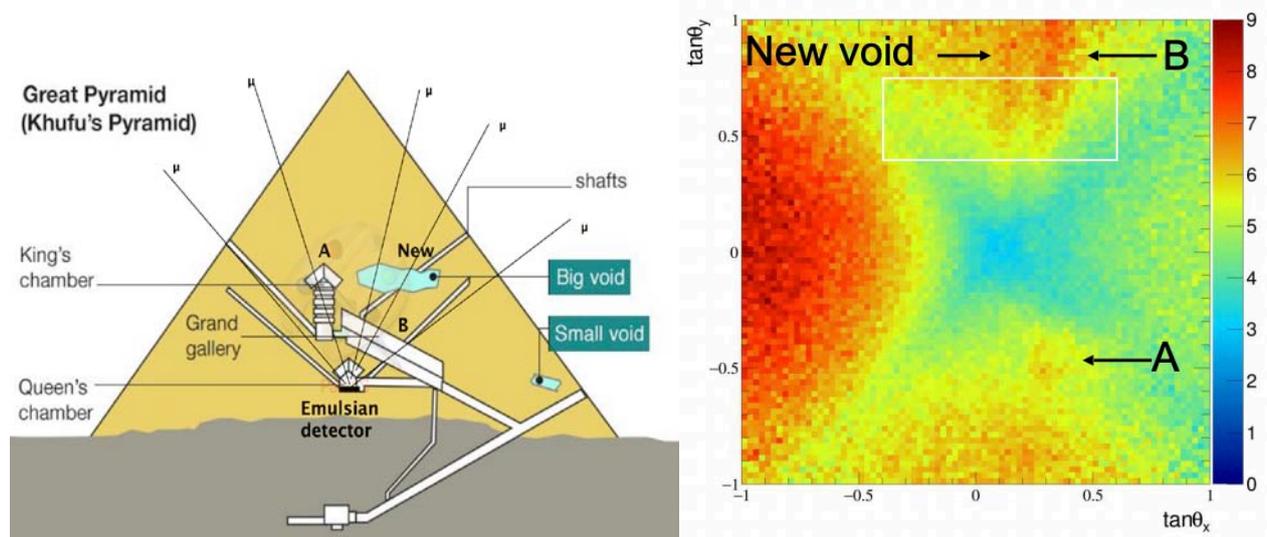


Рис.2 Открытие неизвестной полости (комнаты) в пирамиде Хеопса методом мюонной радиографии с помощью эмульсионной камеры. Камера была установлена в Queen Chamber, посередине пирамиды (рисунок слева). Справа – количество зарегистрированных мюонов в зависимости от их направления. «А» - известная комната King's Chamber, «В» - галерея, рядом с которой - неизвестная ранее камера.

В России исследований вулканов с помощью мюонной радиографии до сих пор не проводилось. В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) за время участия в эксперименте OPERA накоплен большой опыт анализа эмульсии, есть две автоматические сканирующие станции, которые могут быть применены для обработки данных эмульсии при проведении соответствующих измерений вулканов в России. С учетом растущего интереса в мире к такого рода исследованиям и имеющихся возможностей проведение таких измерений представляется интересным и перспективным.

Список литературы

1. Abiev A. et al., Muon Radiography Method for Non-Invasive Probing an Archaeological Site in the Naryn-Kala Citadel // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. P2040.
2. Alexandrov A. et al., A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsion // J. Inst. 2015. V. 10. P. P11006.
3. Alexandrov A. et al., A new generation scanning system for the high speed analysis of nuclear emulsion // J. Inst. 2016. V. 11. P. P06002
4. Alexandrov A. et al., A novel optical scanning technique with an inclined focusing plane // Nature Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 1–10.
5. Alvares L.W. et al., Search for hidden chambers in the pyramids // Science. 1970. V. 167. P.832–839.
6. Ambrosino F. et al., The MU-RAY detector for muon radiography of volcanos // Nucl.Instr. and Methods. 2013. V. A732. P. 423-426.
7. Aoki S. et al. A fully automated emulsion analysis system // Nucl.Instrum.Meth. 1990. V. B51. P.466–472.
8. Armenise N. et al, High speed particle tracking in nuclear emulsion by last generation automatic microscope // Nucl.Instrum.Meth. 2005. V. A551. P. 261–270.
9. Ariga A. and Ariga T., Fast 4pi track reconstruction in nuclear emulsion detectors based on GPU technology // JINST. 2014. V. 9. P. P04002.
10. Cimmino L. et al., 3D Muography for the Search of Hidden Cavities // Nature,Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 2974.

11. *DiMarco N.* The Emulsion Scanning System for the OPERA experiment // Nucl.Phys.Proc.Suppl. 2012. V. 269. P. 229–232.
12. *Kreslo I. et al.* High-speed analysis of nuclear emulsion films with the use of dry objective lenses // J. Inst. 2008. V. 3. P. P04006.
13. *Lesparre, N., et al.,* Design, operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. Geoscientific Instrumentation, Methods, Data Systems // 2012. V. 1. №1. P. 33–42.
14. *Leva M.* European Scanning System for measurement and analysis of OPERA neutrino interactions with nuclear emulsions // Nucl.Instrum.Meth. 2010. V. A617. P. 275–279.
15. *Marteau J., et al.,* DIAPHANE: muon tomography applied to volcanoes, civil engineering, archaeology // JINST. 2017. V. 12. P. C02008.
16. *Morishima K. et al.,* Discovery of a big void in Khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons // Nature. 2017. Том 552. С.386–390.
17. *Nagamine K. et al.,* Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction // Nucl.Instr. and Methods. 1995. V. A356. P.585–595.
18. *Nakamura T. et al.,* OPERA film-new nuclear emulsion for large-scale high-precision experiments // Nucl.Instrum.Meth. 2006. V. A556. P. 80–86.
19. *Nakano T., Yoshimoto M., Komatani R.,* The Newest Technique for Nuclear Emulsion Readout // Journal of The Society of Photographic Science and Technology of Japan. 2016. V. 79. №1. P. 54–59.
20. *Nishiyama et al.,* Bedrock sculpting under an active alpine glacier revealed from cosmic-ray muon radiography // Nature Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 6970.
21. *Tanabashi M. et al.,* (Particle Data Group) // Phys.Rev. D 2018. V. 98. P.030001.
22. *Tanaka H. et al.,* Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano // Nucl.Instr.and Methods. 2003. V. A507. P.457.
23. *Tanaka H. et al.,* High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography. The density structure below the volcanic crater floor of Mt.Asama // Japan.Earth Planet.Sci.Lett. 2007. № 263. P. 104113.
24. *Tanaka, H. K. et al,* Development of an emulsion imaging system for cosmic-ray muon radiography to explore the internal structure of a volcano, Mt. Asama. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2007. V. A575. P.489-497.
25. *Tyukov V. et al.,* First muography of Stromboly volcano // Nature Scientific Reports. 2019. V. 9. P.6695.
26. *Tyukov V.,* Muography with nuclear emulsions // 19 Ломоносовская конференция по физике частиц. 2019. Москва.
27. *Yoshimoto M., Nakano T., Komatani R., Kawahara H.,* Hyper-track selector nuclear emulsion readout system aimed at scanning an area of one thousand square meters // PTEP. 2017. V. 10. P. 103.