

Прикладные применения элементарных частиц

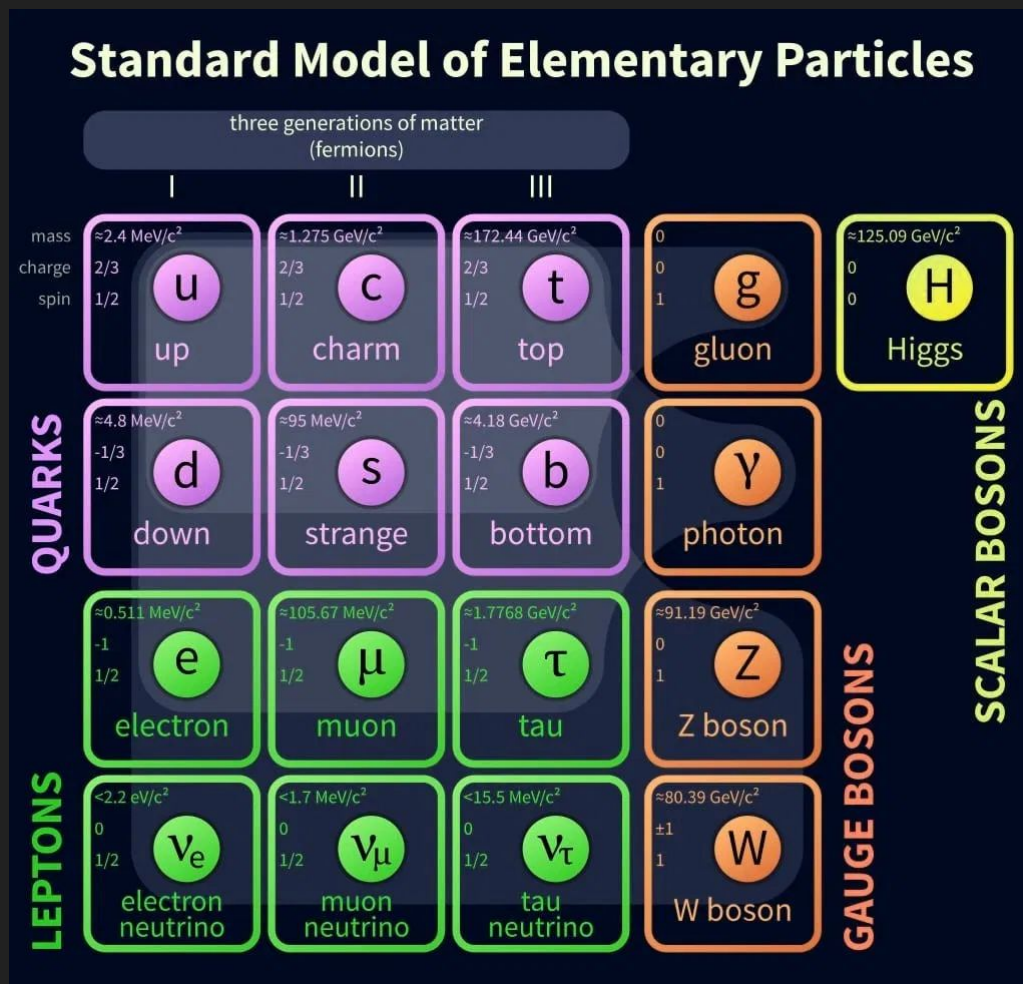
Андрей Шешуков
ЛЯП ОИЯИ

Камчатская школа по физике элементарных частиц и
смежным темам

Сентябрь 2019

Элементарные частицы? Прикладное применение?

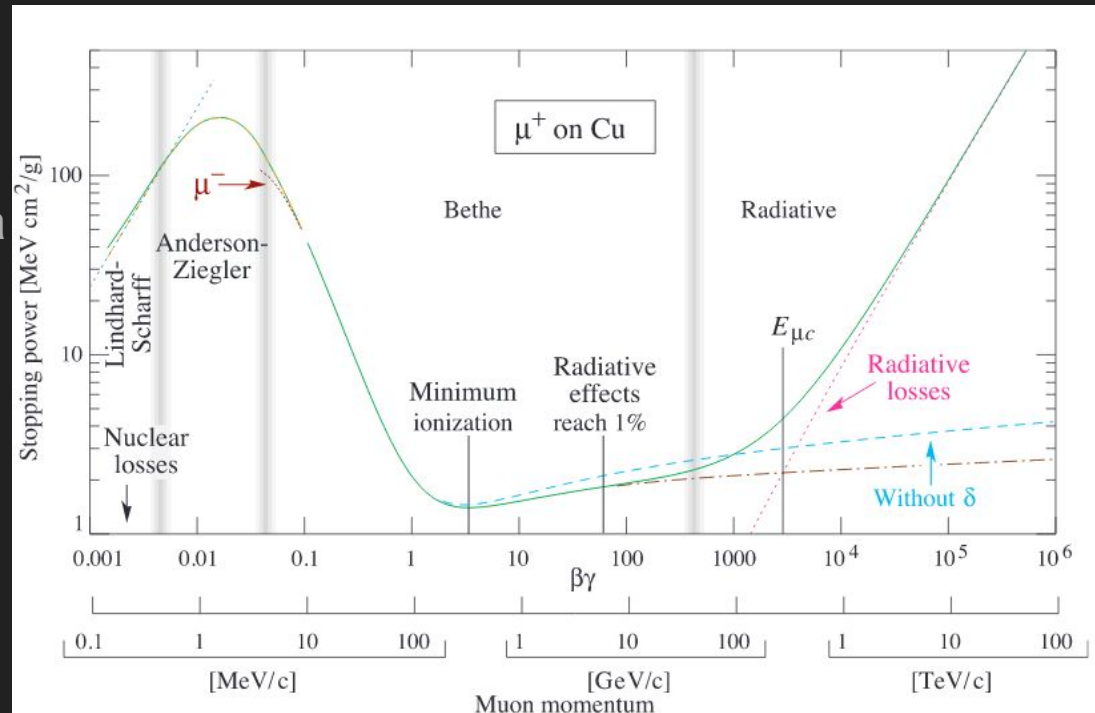
- Кварки и глюоны встречаются в свободном состоянии
 - Но мы можем использовать адроны: протоны, нейтроны
- W и Z имеют слишком малое время жизни
- Что-то давно известно и применяется повсеместно:
 - фотон, электрон
- Мюоны
- Нейтрино



Мюон

- Заряженный
 - Легко детектировать
- В 200 раз тяжелее электрона ($m_\mu = 106 \text{ МэВ}$)
- Довольно стабилен: время жизни $\tau = 2.2 \text{ мкс}$
 - $c\tau > 600 \text{ м}$
 - $c\tau\gamma > 6 \text{ км}$ для $E_\mu = 1 \text{ ГэВ}$
- Не рождается при естественной радиоактивности.

Много и бесплатно
(попробуй откажись)



- Довольно тяжёлый
 - Малая передача энергии электронам при ионизации
 - Радиационные потери на высоких энергиях $E_\mu > 600 \text{ ГэВ}$
- Довольно лёгкий:
 - Ионизация растёт при $E_\mu < 100 \text{ MeV}$

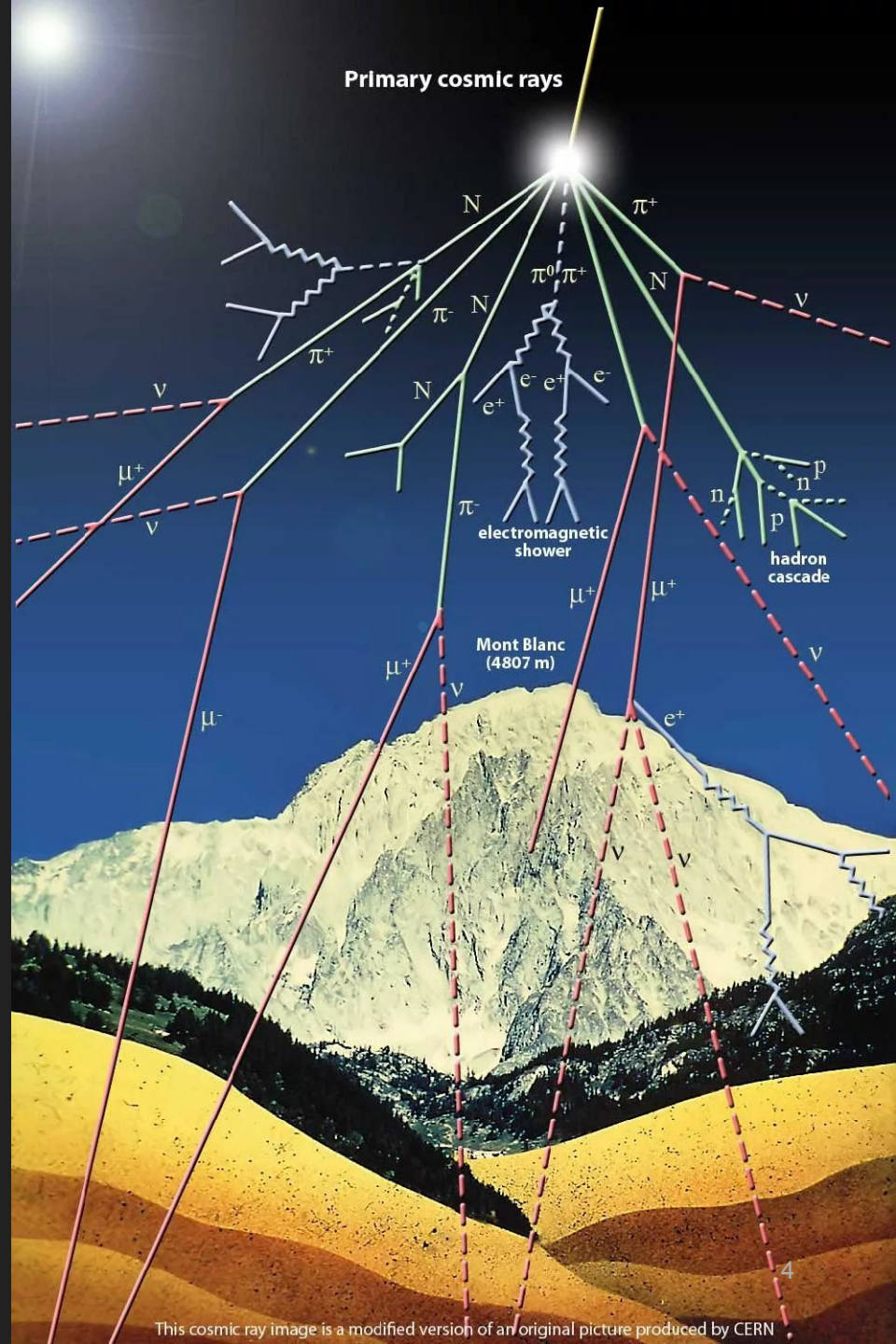
Атмосферные ливни

Земля постоянно бомбардируется космическими лучами (p, He, ...)

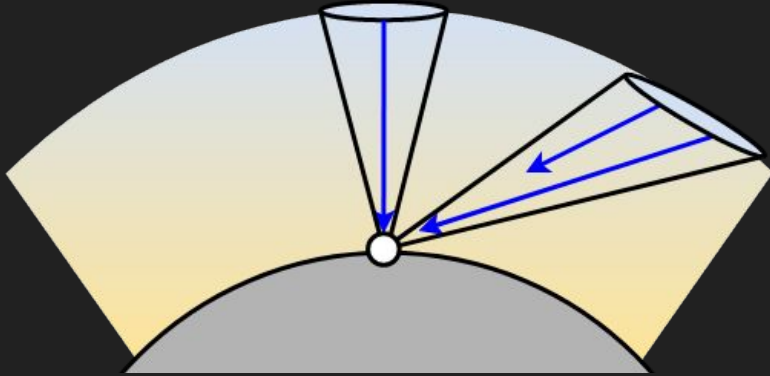
Они взаимодействуют в верхних слоях атмосферы (~15 км), разбивая ядра в атмосфере.

- Образуется адронный ливень
 - Больше всего лёгких адронов (π , K)
- $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \rightarrow e^+ e^- + \dots \rightarrow$ ЭМ ливни
- $\pi^{+/-} \rightarrow \mu^{+/-} + \nu_\mu$

Зависит от космической и земной погоды (солнечная активность, магнитные поля, толщина и плотность атмосферы)



Атмосферные мюоны на поверхности Земли

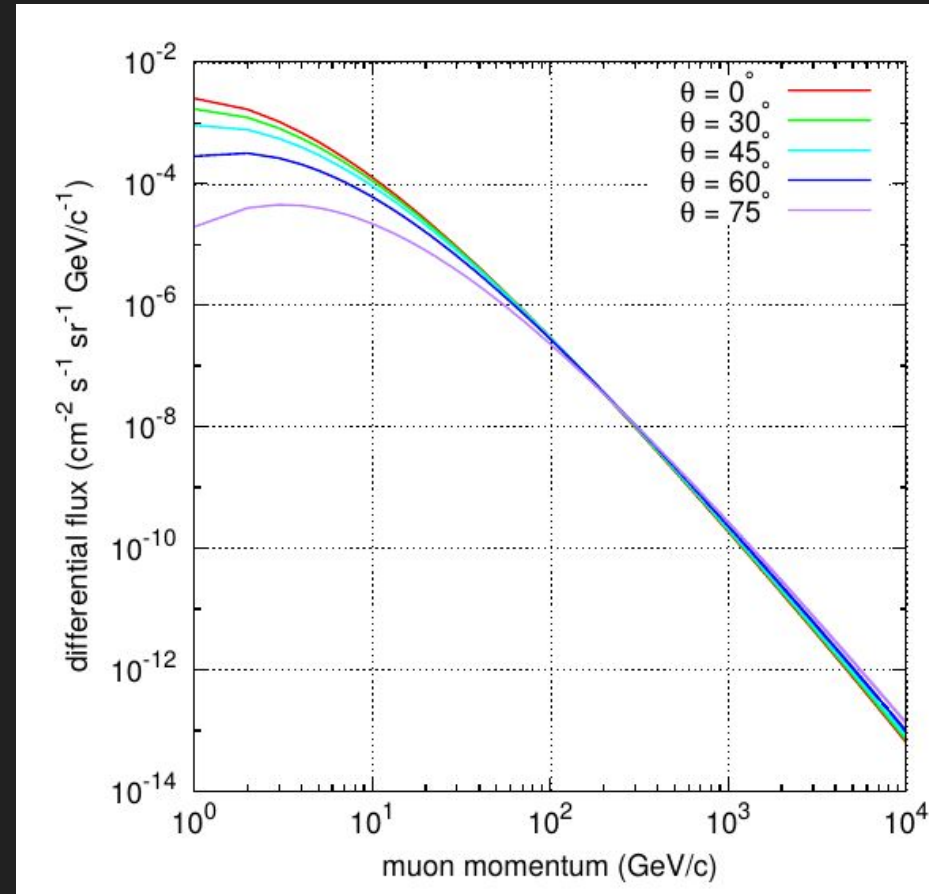


Космические лучи летят со всех направлений

- Мюонов больше рождается под углом к горизонту
 - Больше взаимодействий в том же телесном угле
 - Но выживают более энергичные

Суммарный поток:

~10000 мюонов/м²/с



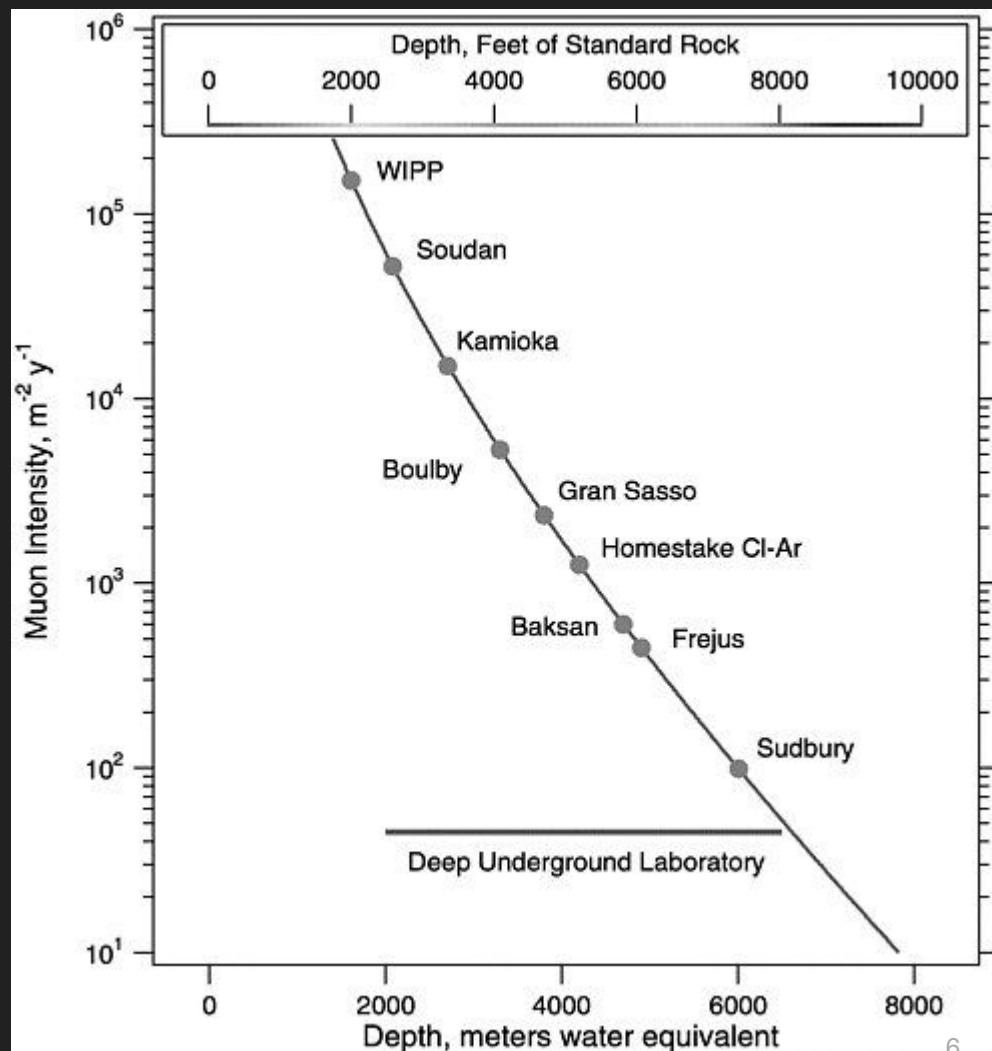
Защита от атмосферных мюонов

Атмосферные мюоны - фон для чувствительных экспериментов.

Мюоны ~ГэВной энергии находятся в минимуме ионизации. В воде (1г/см^3) $\langle dE/dx \rangle \sim 2 \text{ МэВ/см}$

В других веществах потери растут пропорционально плотности.

Эксперименты вынуждены прятаться в глубоких шахтах и тоннелях



Обратная задача

Можно ли по измеренному потоку мюонов восстановить толщину вещества над детектором?

George, E. P. "Cosmic rays measure overburden of tunnel". Commonwealth Engineer, 455 (1955).

А если измерять направление прилёта мюонов, то можно получить "мюографию" - карту плотности объекта с помощью мюонов.

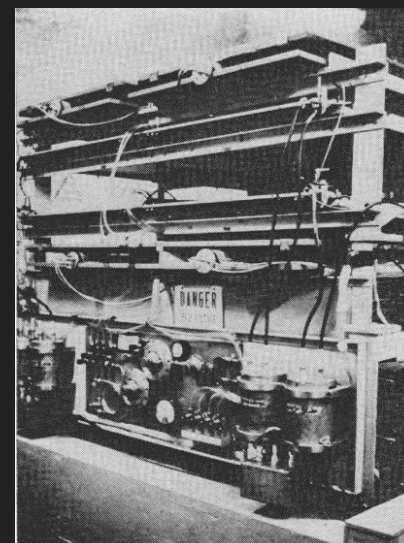
- Неинвазивный метод изучения - никакого влияния на исследуемый объект
- Не нужно никаких дополнительных источников излучения
- Только детектор, реконструирующий угол мюона

Рождение мюонной радиографии: 1970г



Луис Альварес исследовал пирамиду Хефрена в поисках скрытой комнаты.

Он установил искровую камеру внутри пирамиды.

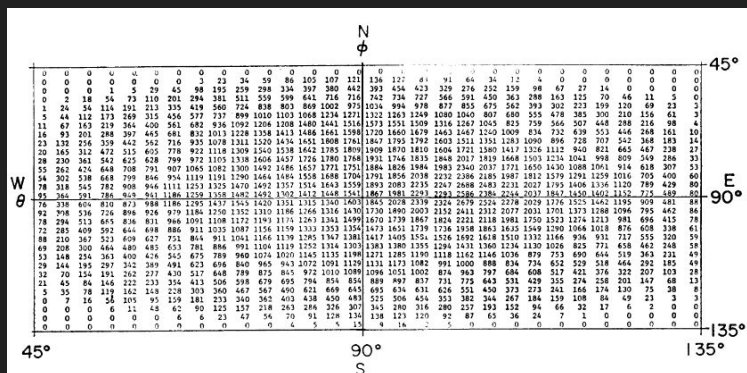


Площадь детектора: 4 м^2

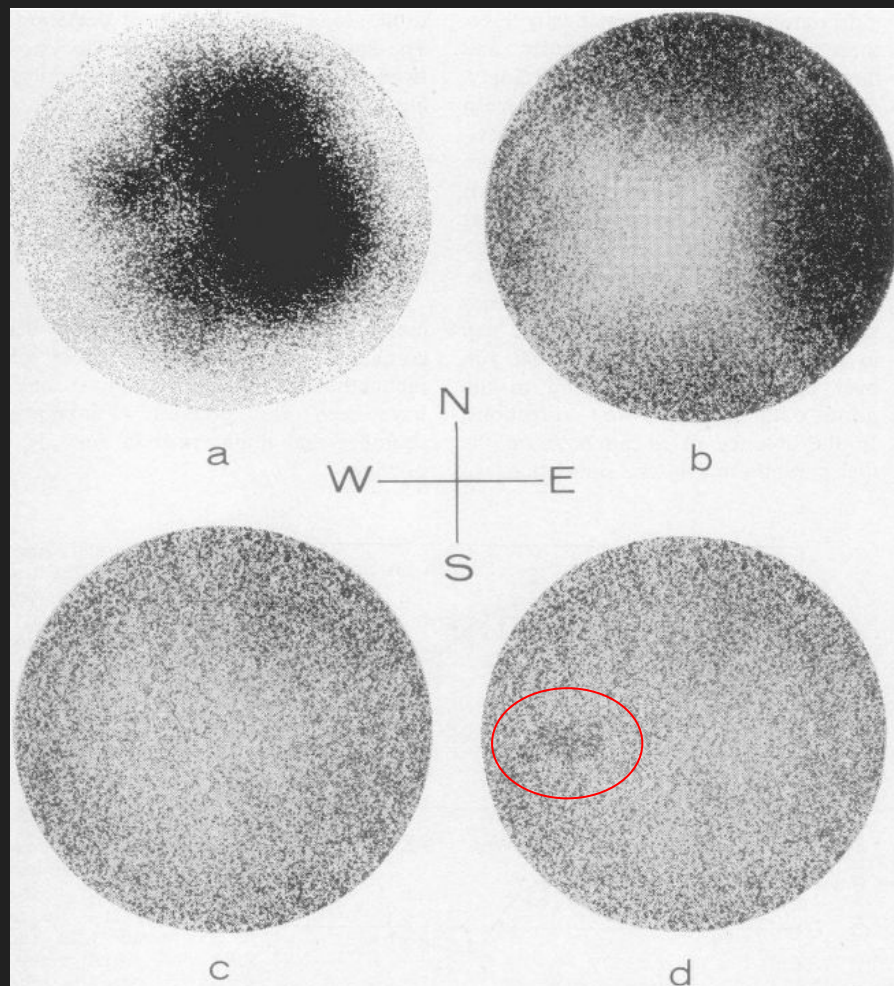
Экспозиция: несколько месяцев

Статистика: 650 000 мюонов

Рождение мюонной радиографии: 1970г



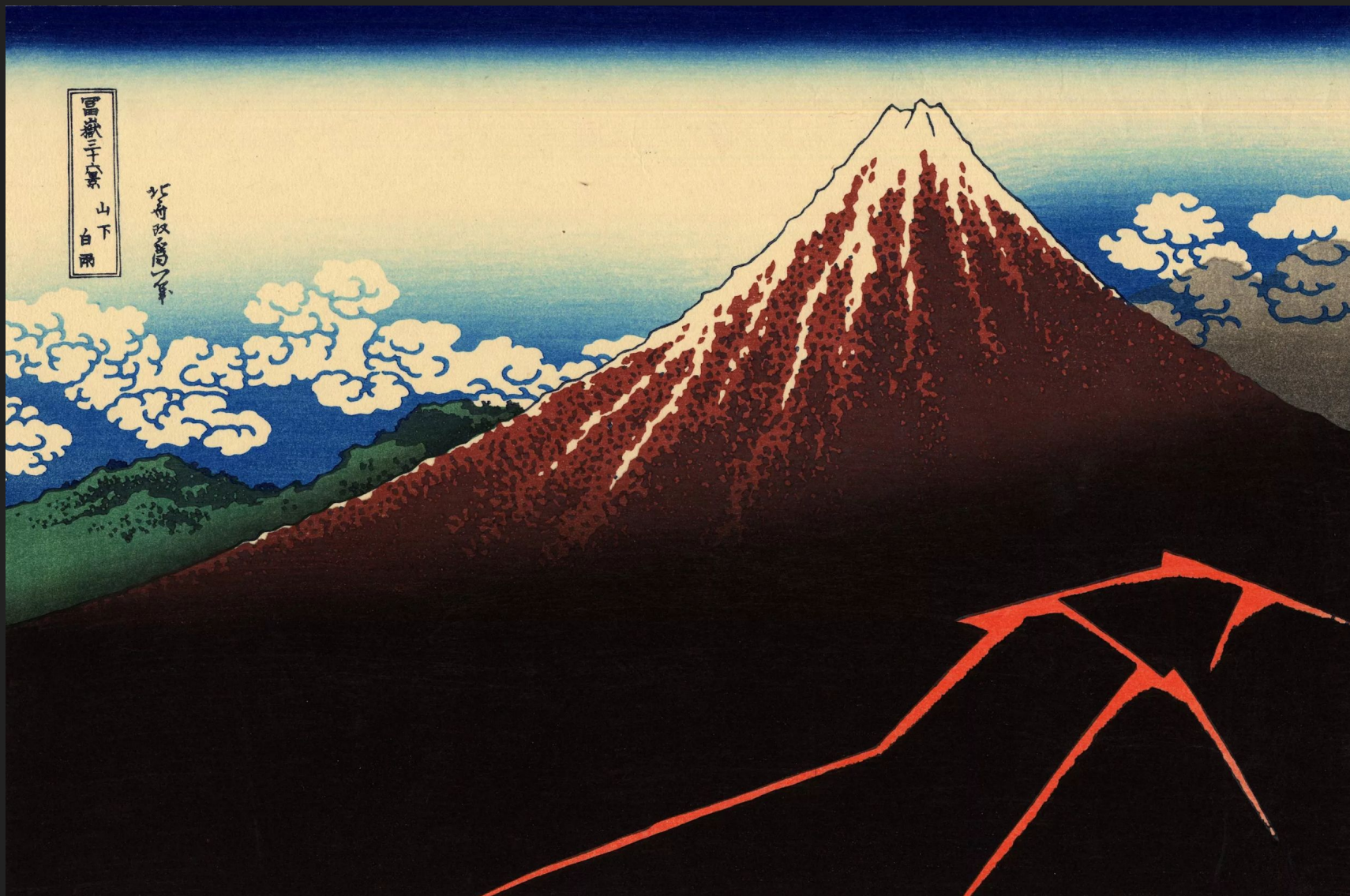
- a) Угловое распределение полученных мюонов
- b) Данные, поправленные на эффективность детектора
- c) Разница данных с симуляцией полной пирамиды
- d) Ожидаемая разница, если бы была тайная комната



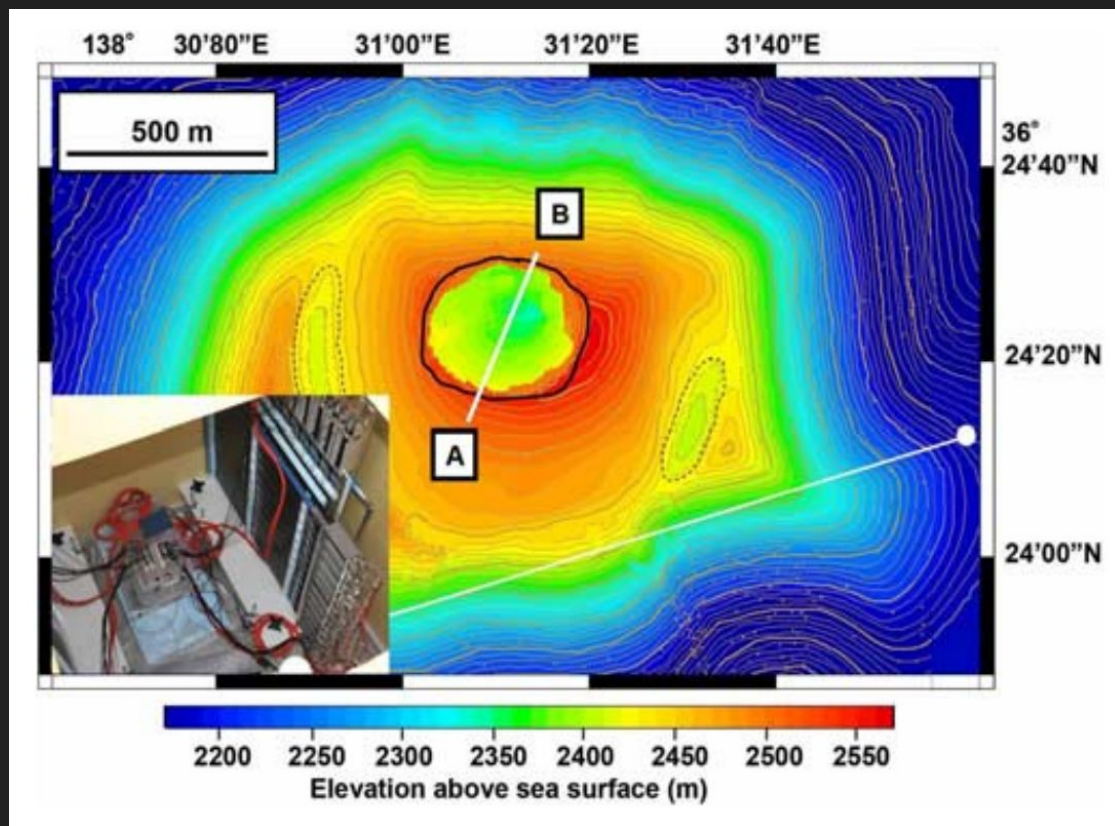
Отрицательный результат - тоже результат!

Что делать, если у вас нет пирамид?

Что делать, если у вас нет пирамид?



Вулкан Asama, Япония (2007 г)



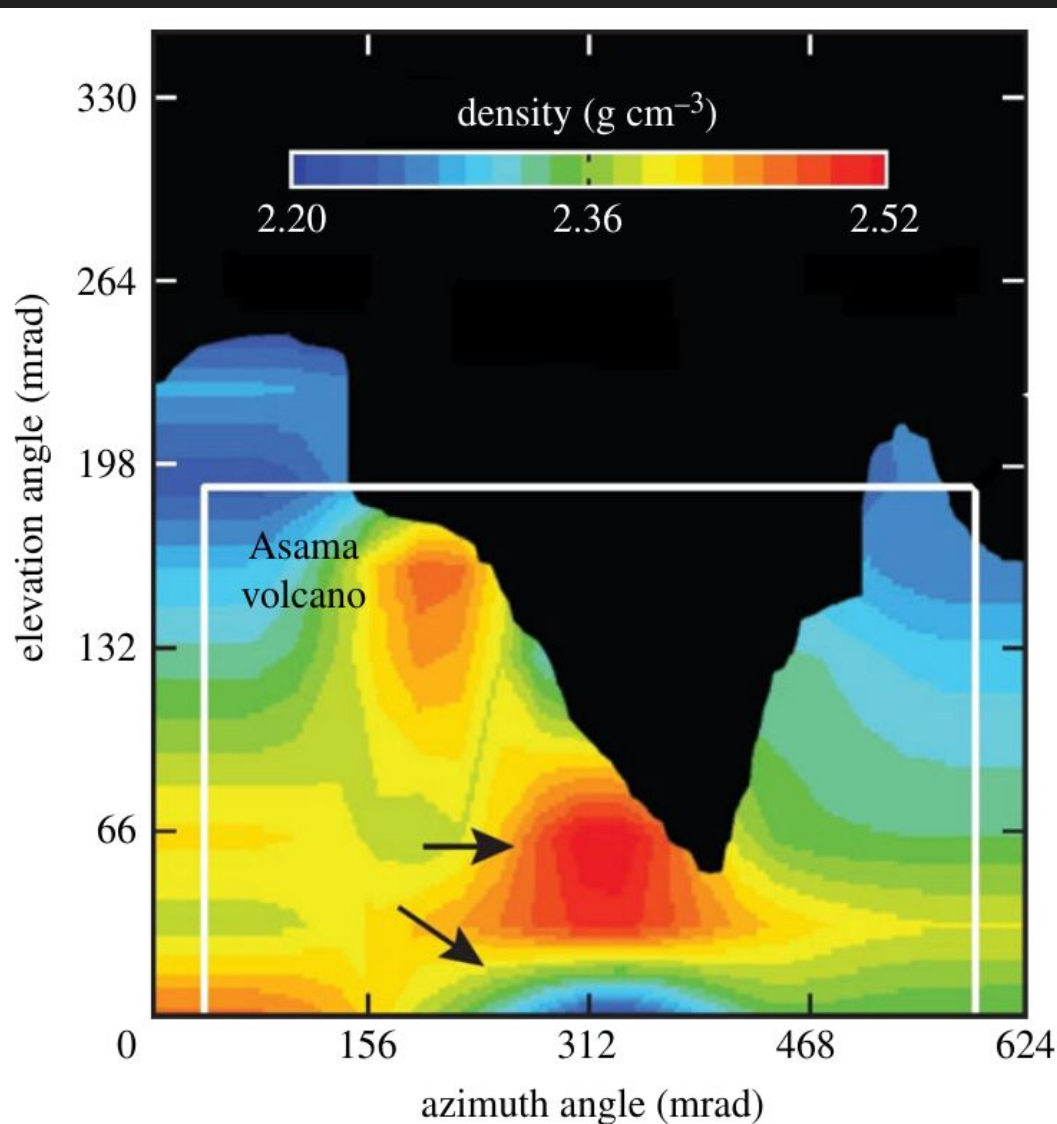
Сцинтилляционный детектор: скрещенные ячейки измеряют 2 координаты роходящего мюона.

Расстояние между 2 наборами ячеек: 128см

Угловое разрешение:
~60мрад

Детектор установлен в подземном убежище в 1.2 км от кратера

Вулкан Asama, Япония (2007 г)



После извержения 2004 года образовался купол из застывшей лавы.

Измерения показывают, что магма ушла вниз, оставив пустой проход, который заполняется газами. Следующее извержение может начаться с того, что газ взорвёт пробку наверху.

Вулкан Asama, Япония (2009 г)

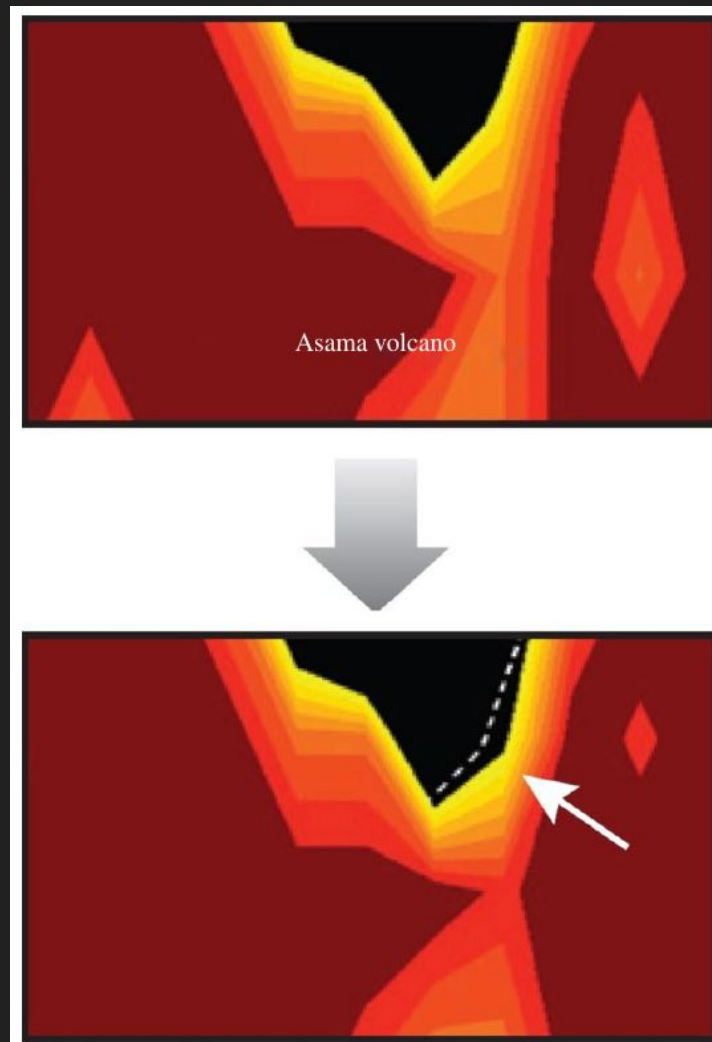
Гипотеза подтвердилась уже через 2 года.

- 6 января - 1 февраля
- 2 февраля - извержение!
- 2 февраля - 5 марта

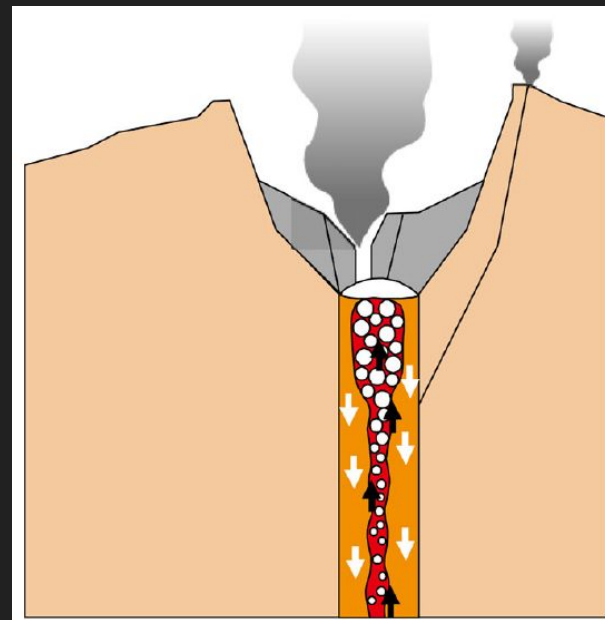
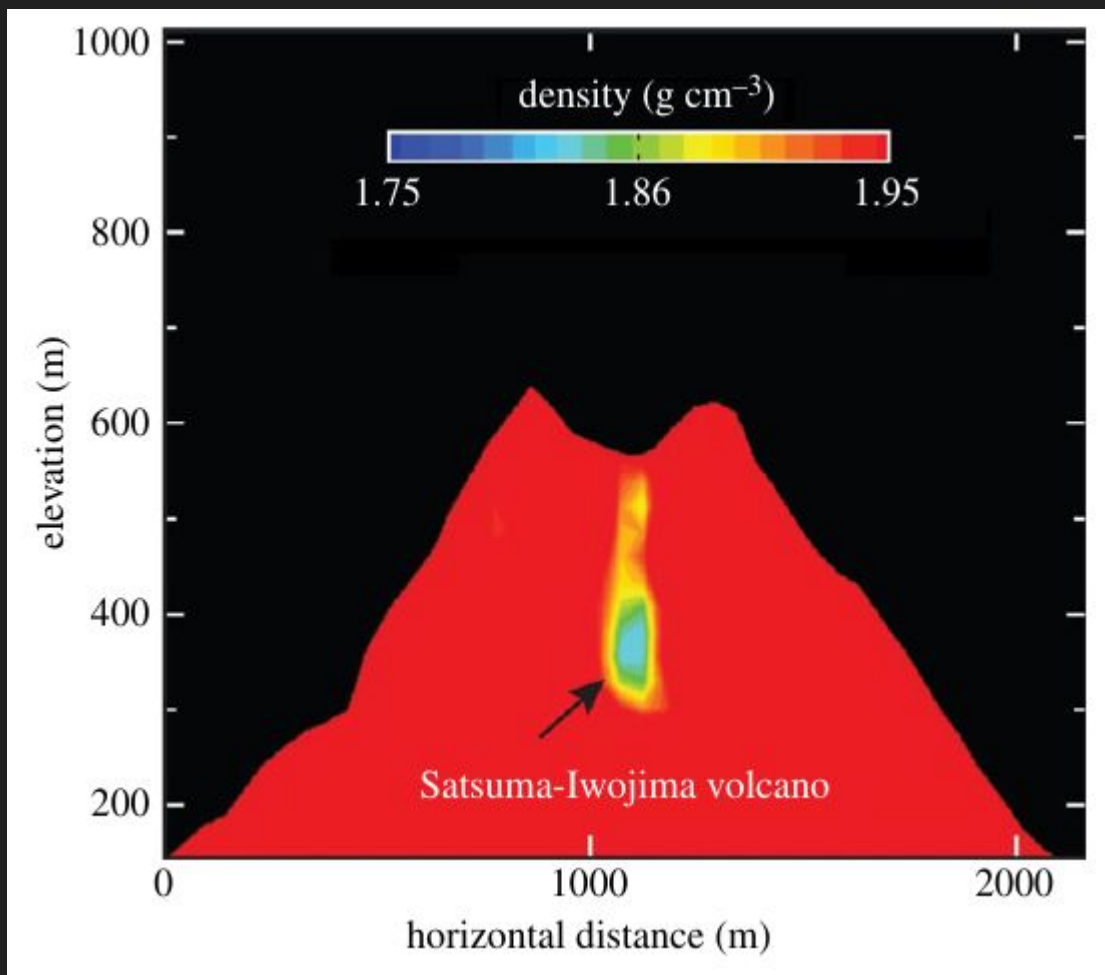
Газ под давлением сорвал лавовый купол.

Форма кратера изменилась

Но внизу по-прежнему остаётся пустота - магма не поднялась.

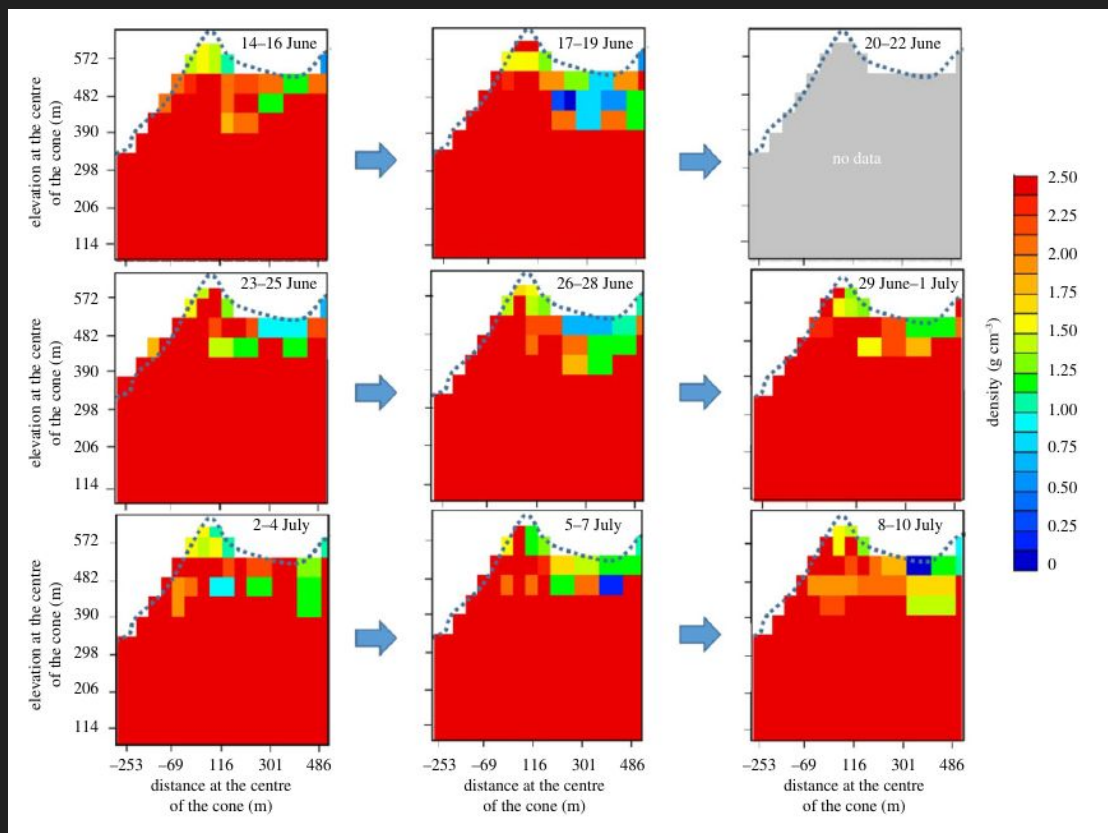


Вулканический остров Satsuma-Iwojima (2013)



Конвекция:
лёгкая, насыщенная
газами магма
поднимается, закипает,
испускает пар, и
спускается обратно.

Вулканический остров Satsuma-Iwojima (2013)

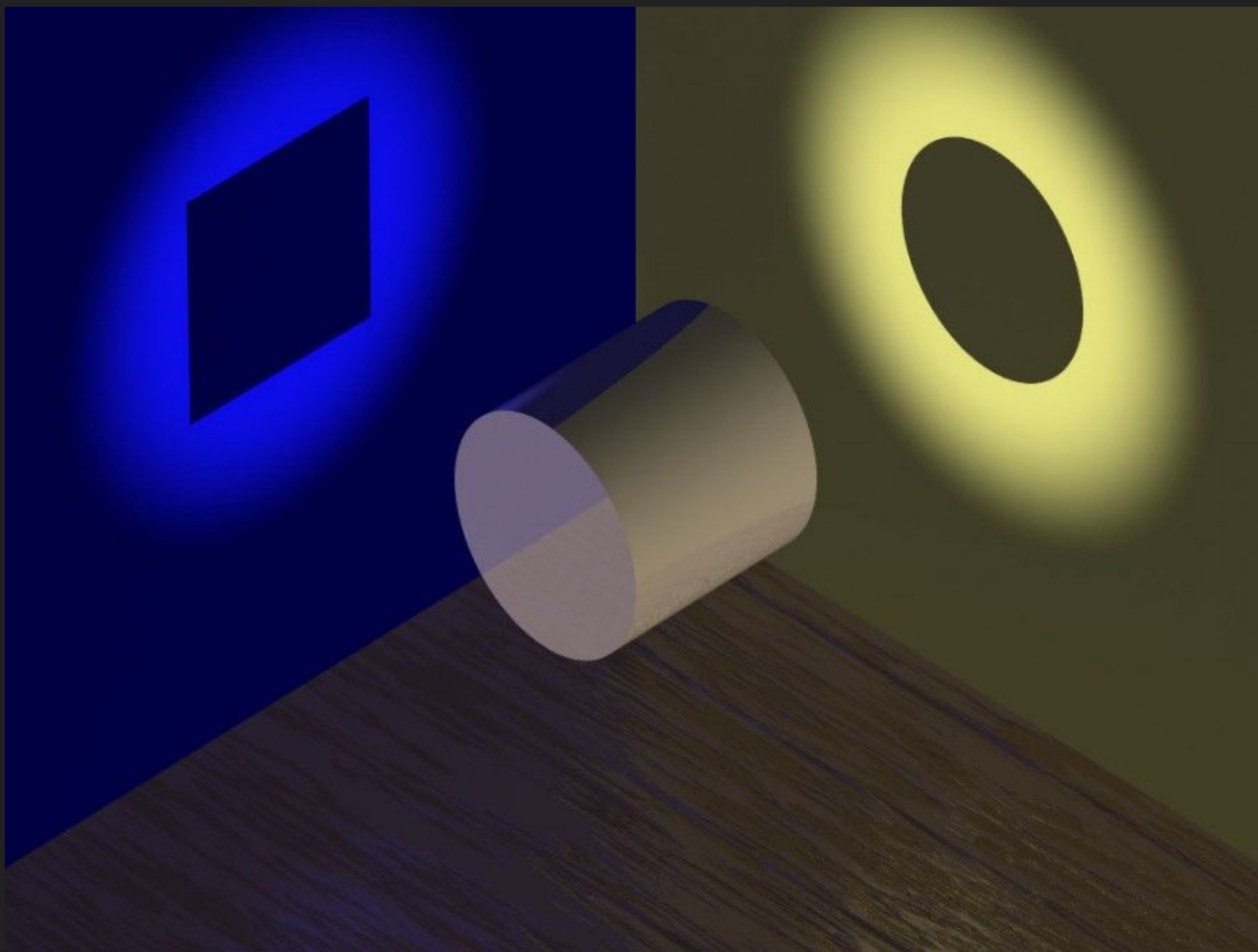


Извержение 2-10 июня 2013
- Высокий газовый шлейф
~600м над вулканом.

Открылся новый кратер.

Мюонная радиография
позволяет увидеть это в
движении! Но с очень
плохой статистикой.

Можно ли восстановить трехмерную карту плотности?



Можно ли восстановить трехмерную карту плотности?

Надо просто найти модель, котрая лучше всего описывает нашу

Разобьем вулкан на кубики с плотностью ρ_i

В идеале:

$$\Phi_D = M(\rho_1, \rho_2, \rho_{3...}) * \Phi_0 \quad \rho = \operatorname{argmin} \|M(\rho_1, \rho_2, \rho_{3...}) * \Phi_0 - \Phi_D\|^2$$

На самом деле

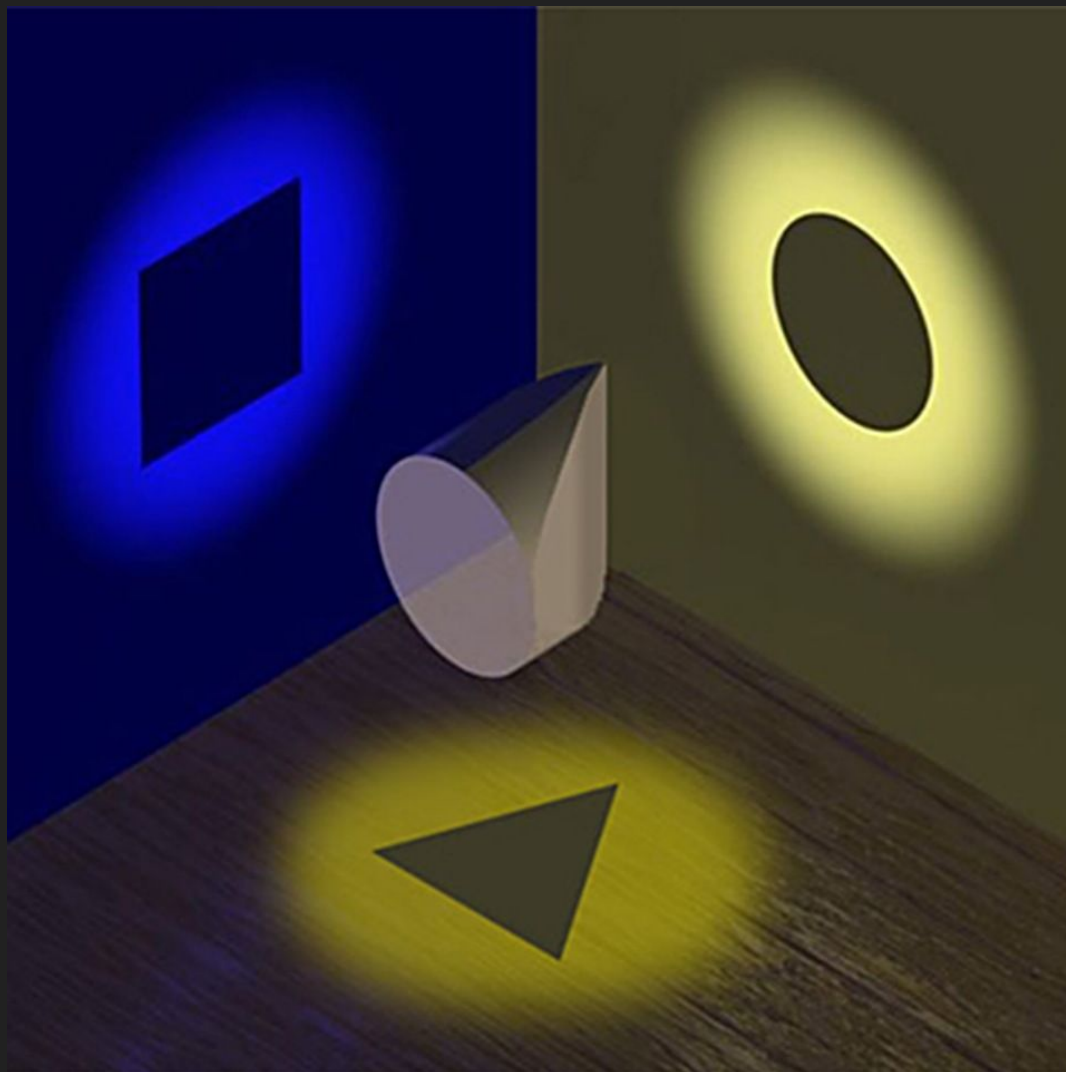
$$\Phi_D = M(\rho_1, \rho_2, \rho_{3...}) * \Phi_0 + \epsilon$$

Малые флуктуации потоков ϵ могут привести к большим флуктуациям плотностей. Поэтому выражение регуляризуют, притягивая ответ к некоторой ожидаемой модели ρ'_i

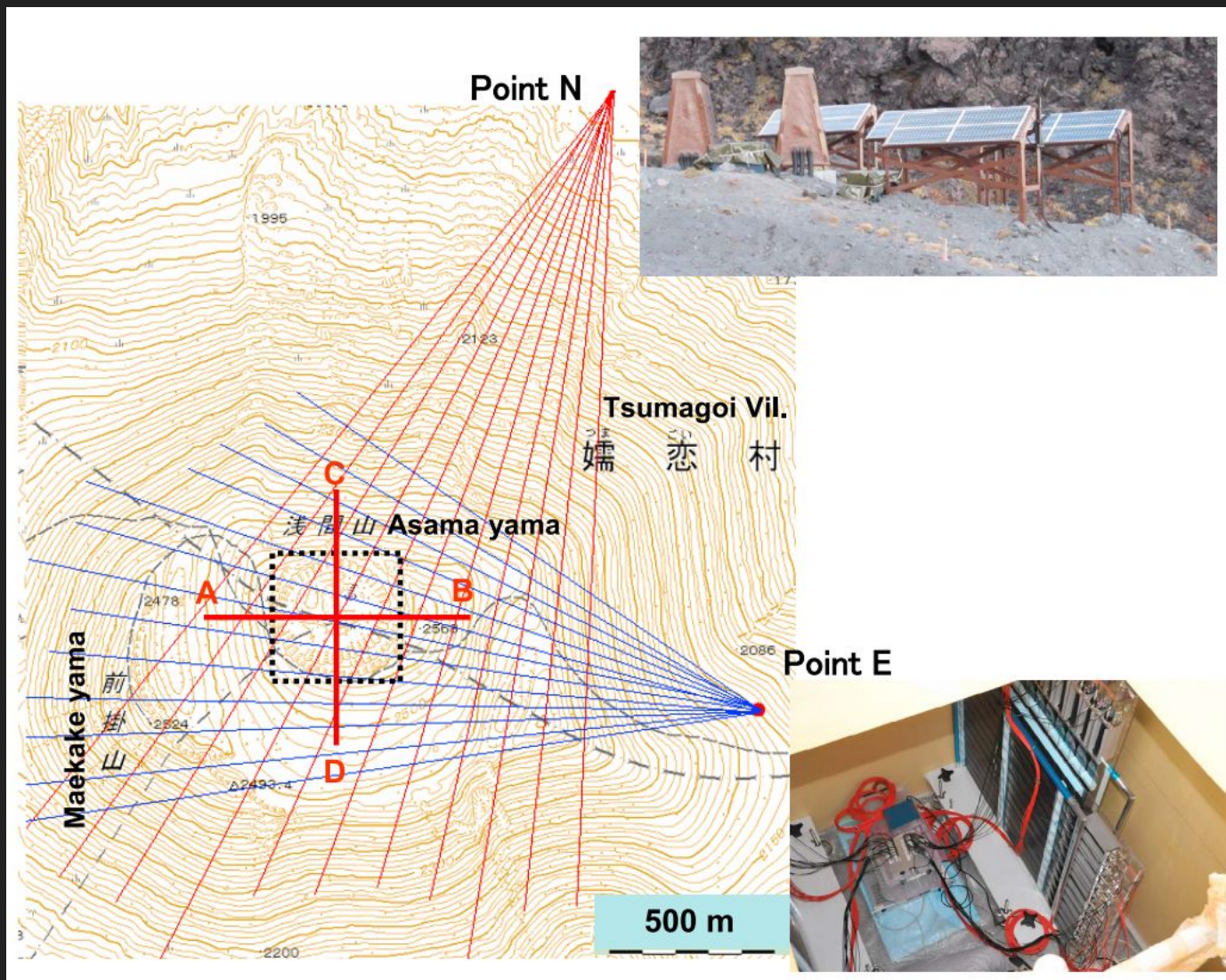
$$\rho = \operatorname{argmin} \|M(\rho_1, \rho_2, \rho_{3...}) * \Phi_0 - \Phi_D\|^2 + \|\rho - \rho'\|^2$$

Можно ли восстановить трехмерную карту плотности?

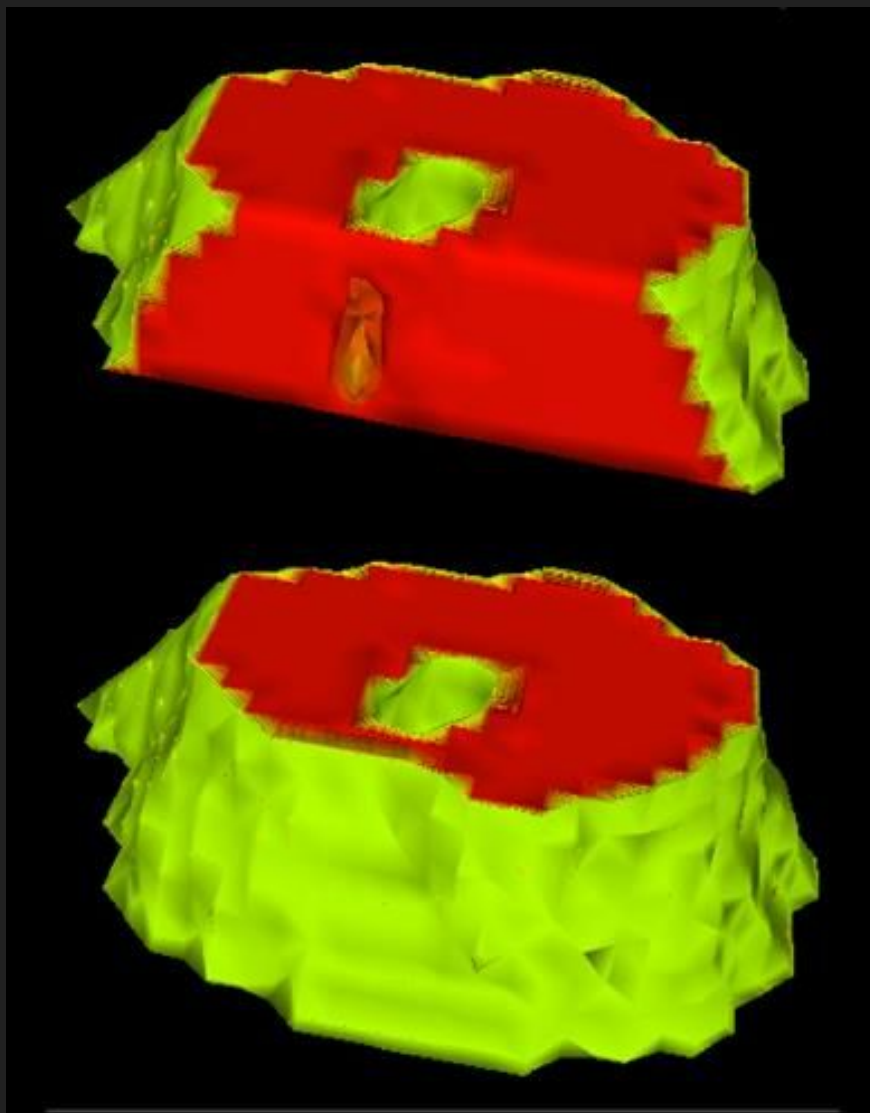
Измеренных данных
всегда меньше, чем
неизвестных



Вулкан Asama, Япония (2010г) - томография



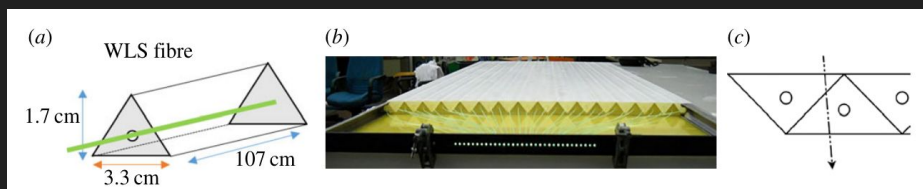
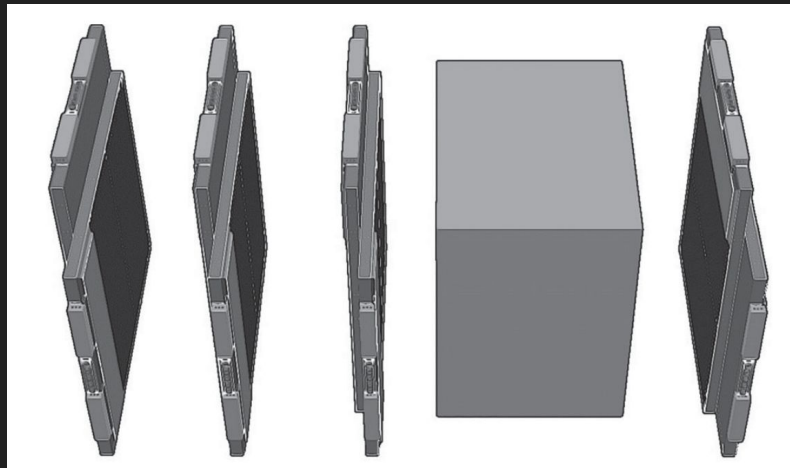
Вулкан Asama, Япония (2010г) - томография



MURAVES - MUon Radiography of VESuvius

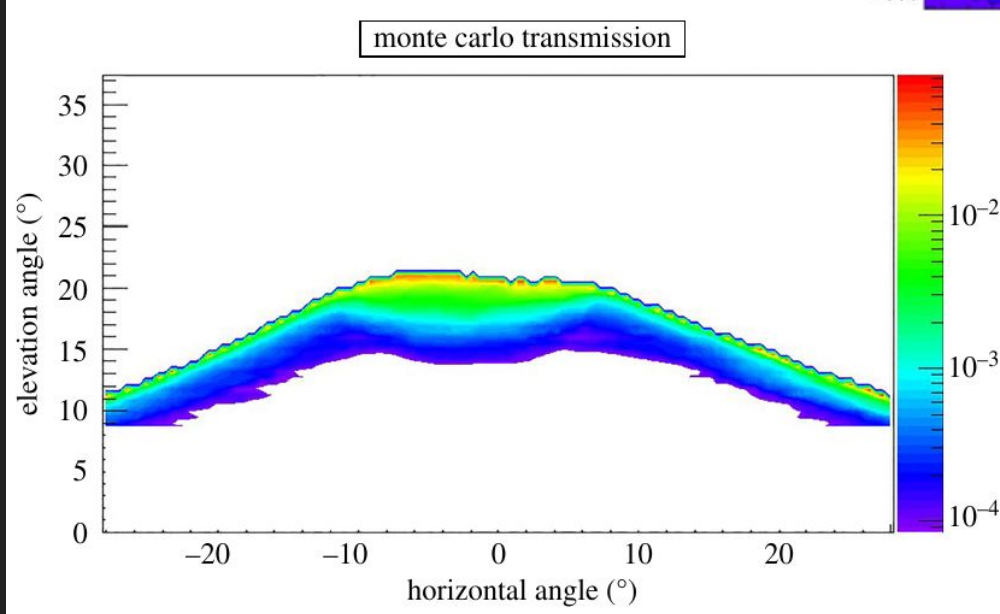
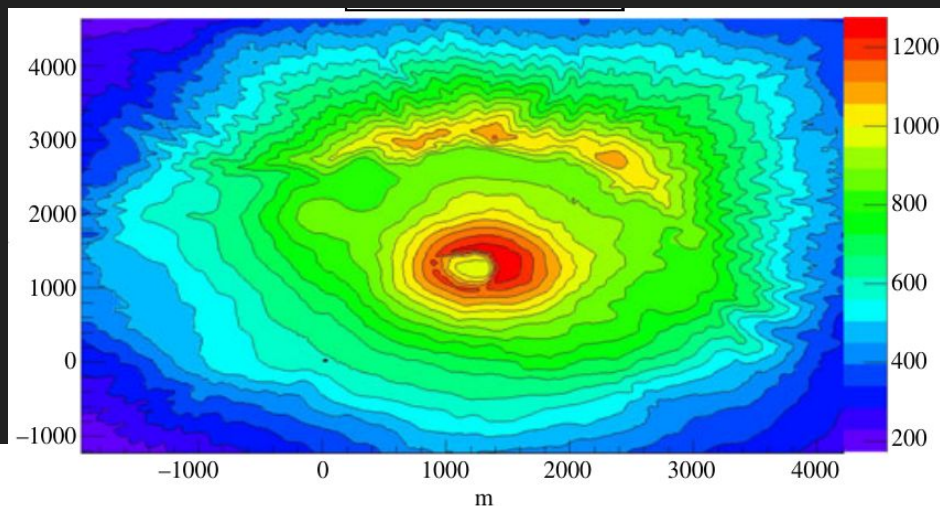


MURAVES - MUon Radiography of VESuvius



MURAVES - MUon RAdiography of VESuvius

Очень важный проект - вокруг густонаселённая зона, а Везувий активный вулкан. Последнее извержение - 1944г



Трудная мишень для мюонной радиографии из-за своей толщины.

Статистика очень низкая, можно изучать лишь верхние области.

А что-нибудь посложнее вулканов и пирамид?

Древние катакомбы под Неаполем

Разветвлённая система коридоров, вырубленная в вулканическом туфе.

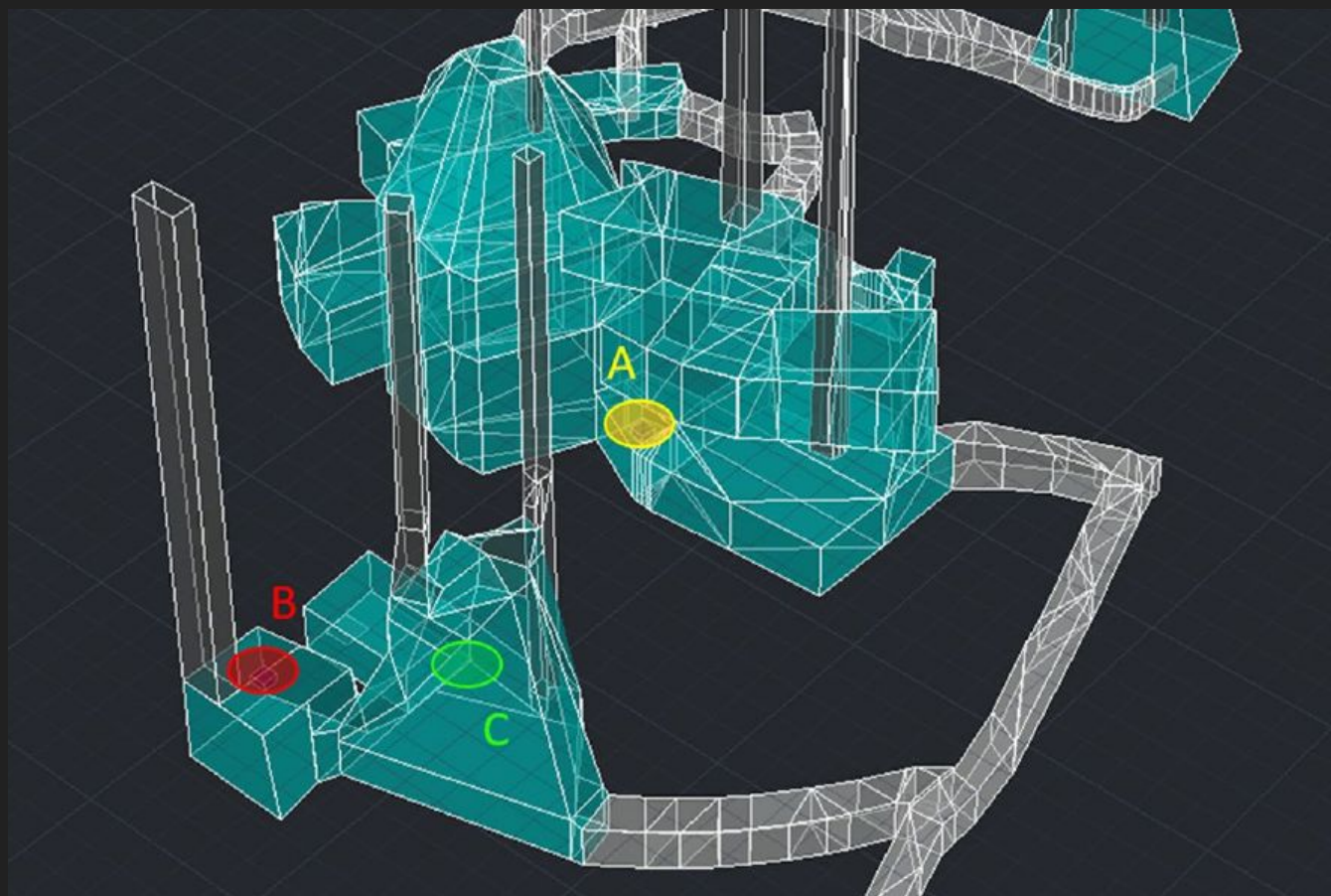
Начата ~2500лет назад

В разное время использовалась

- Первыми христианами как убежище
- В качестве склепа
- Для хранения воды
- Городскими ворами
- Для мусора
- Во время ВМВ как бомбоубежище

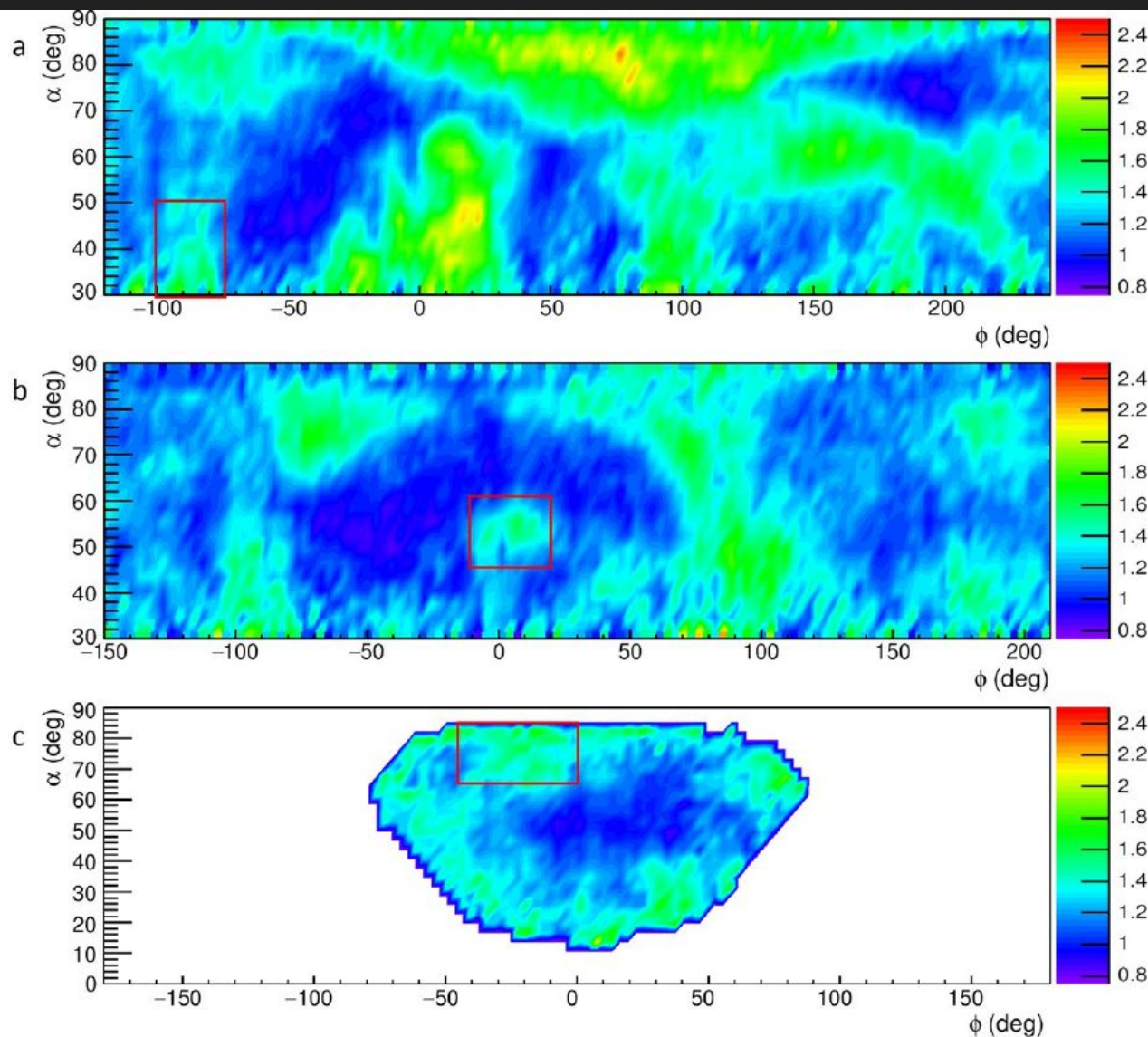


Мюонная радиография в катакомбах



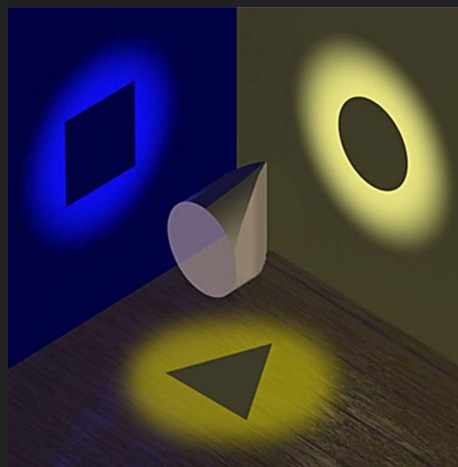
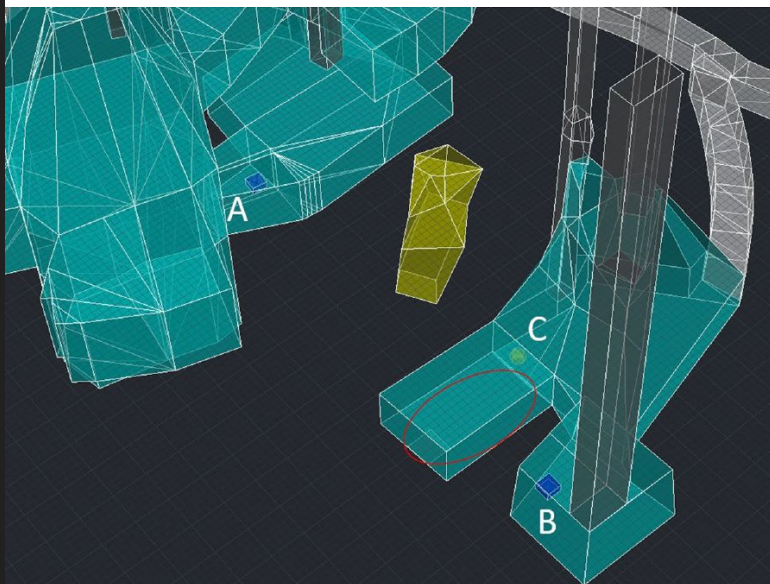
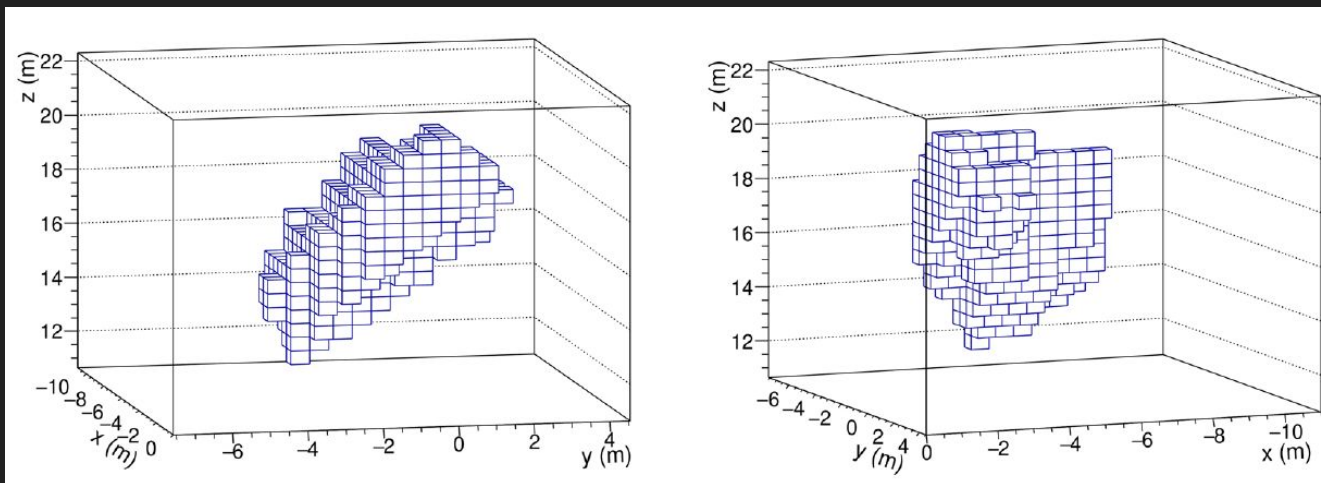
Сцинтилляционные детекторы в 3 местах.

Мюонная радиография в катакомбах



Обнаружена новая полость! Со всех трёх точек.

Мюонная радиография в катакомбах



Трёхмерная
реконструкция
формы полости.

Здесь томография
проще, потому что
рассматривалось
2 типа плотности -
воздух или туф.

Сцинтилляционные детекторы имеют ряд недостатков

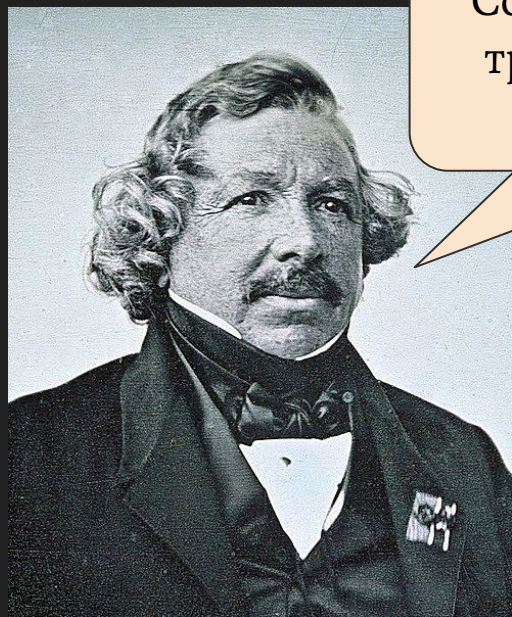
- Низкое угловое разрешение
- Громоздкое оборудование, нужно отдельное помещение
- Требуют электричества и защиты от внешней среды (воды и т.д.)

А какие есть альтернативы?

Сцинтилляционные детекторы имеют ряд недостатков

- Низкое угловое разрешение
- Громоздкое оборудование, нужно отдельное помещение
- Требуют электричества и защиты от внешней среды (воды и т.д.)

А какие есть альтернативы?



Луи Даггер 1831

Современные проблемы
требуют современных
решений!



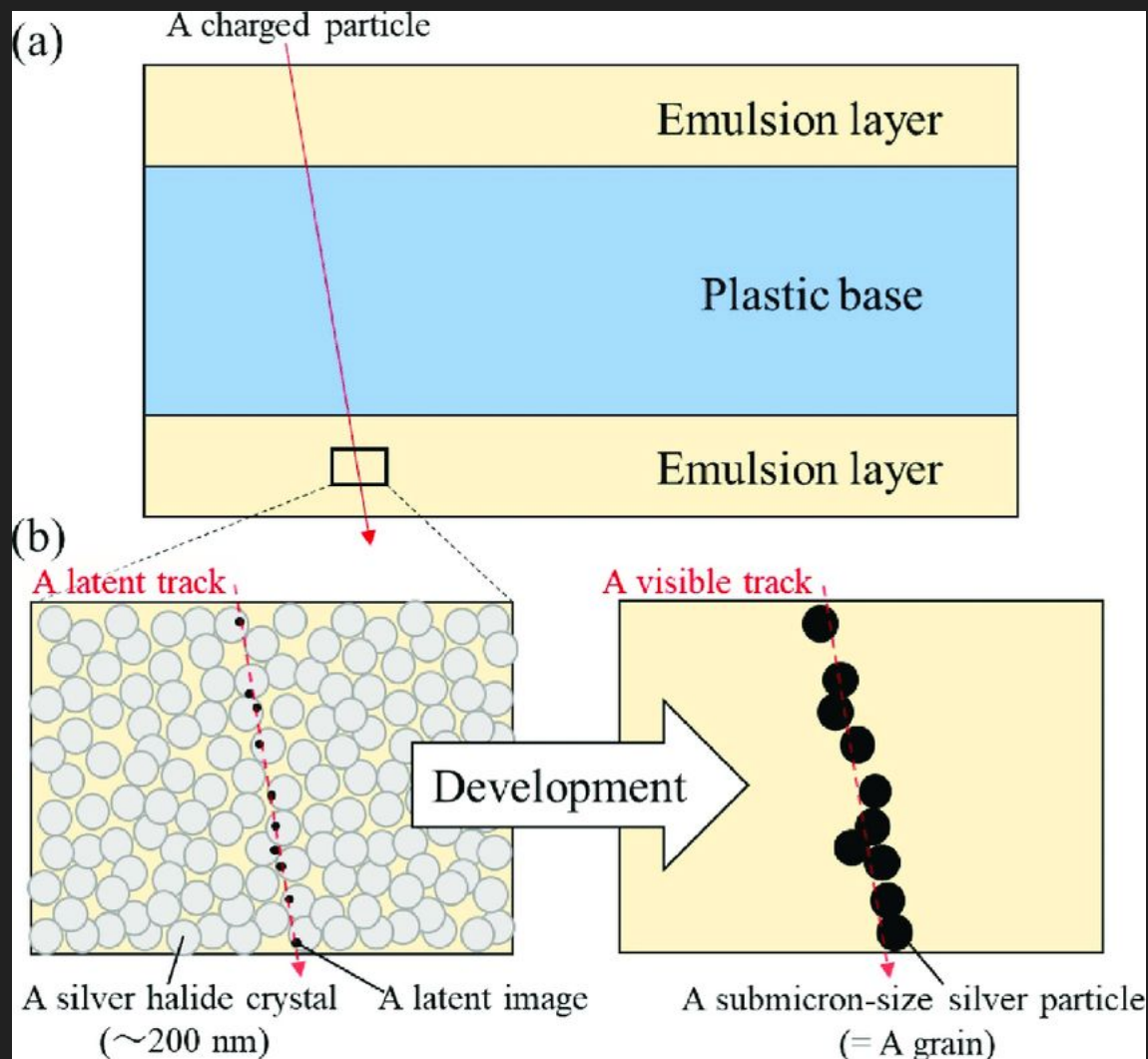
Ричард Меддокс 1871

Ядерная фотоэмульсия

Кристаллы бромида серебра, распределённые в желатине.

Когда ионизирующая частица пролетает рядом, кристалл захватывает электроны в дефектах решётки.

При проявке вокруг этих заряженных дефектов вырастает серебряная гранула.



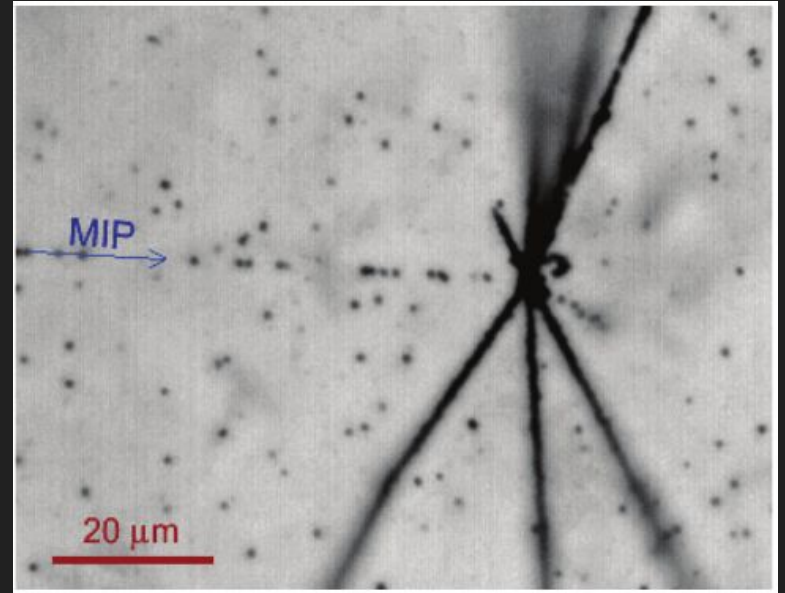
Ядерная фотоэмульсия

Не требует электричества.

Прекрасное пространственное разрешение $\sim 0.5\mu\text{m}$

Можно просто положить возле вулкана, под пирамиду, в катакомбы и т.п. и оставить на полгода.

Потом проявить, взять микроскоп и считать мюоны.



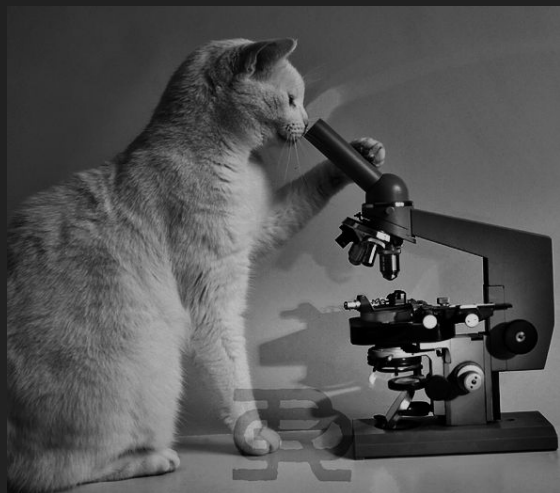
Ядерная фотоэмульсия

Не требует электричества.

Прекрасное пространственное разрешение $\sim 0.5\mu\text{m}$

Можно просто положить возле вулкана, под пирамиду, в катакомбы и т.п. и оставить на полгода.

Потом проявить, взять микроскоп и считать мюоны.

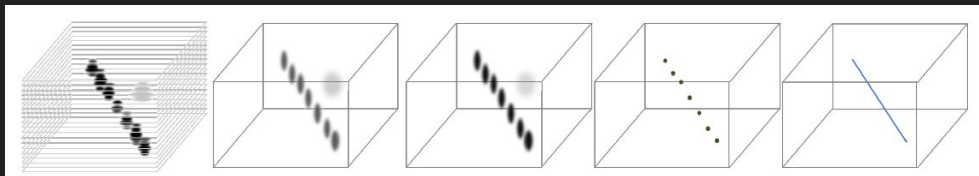


В эксперимента Альвареса было 700 000 мюонов

Ручное сканирование займёт годы.

Автоматические сканирующие системы

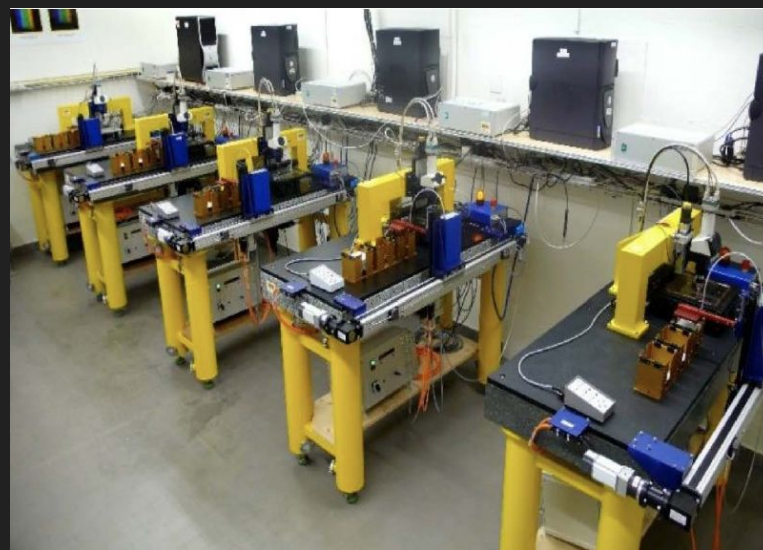
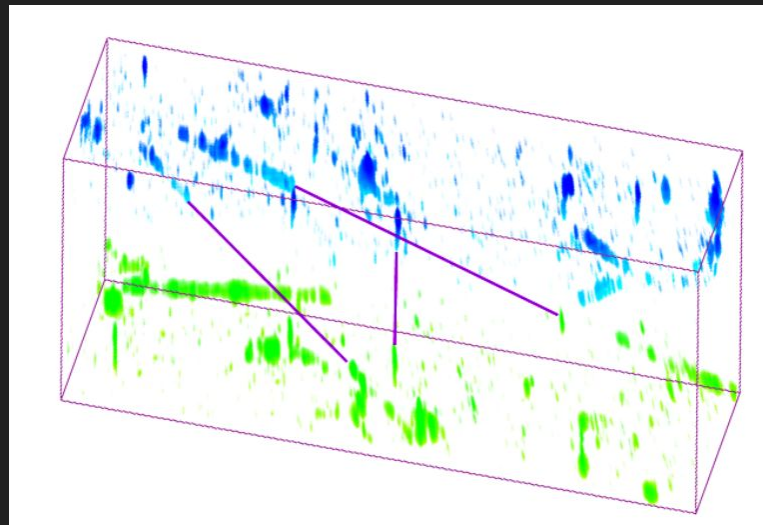
Камера считывает изображение, восстанавливает положение зерён в 3D, реконструирует треки.



Разработаны в Японии и Европе для экспериментов CHORUS и OPERA.

Сканирующая станция работает в Дубне.

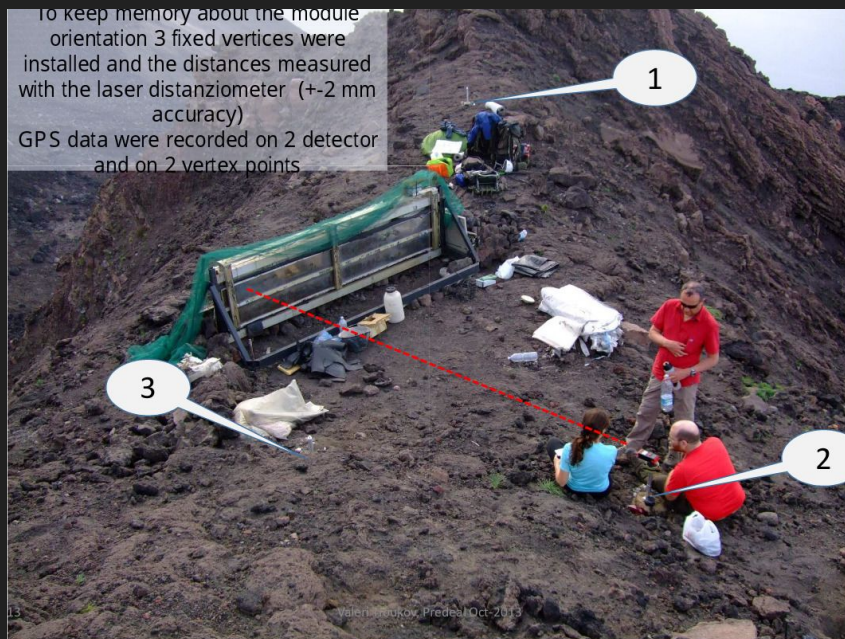
Способны отсканировать квадратные метры за несколько дней/часов.



Применение эмульсионных детекторов для мюонной радиографии

- Ундзен, Япония
- о.Стромболи, Италия
- Тейде, о.Тенерифе, Канарские острова
- о. Ла Пальма, Канарские острова

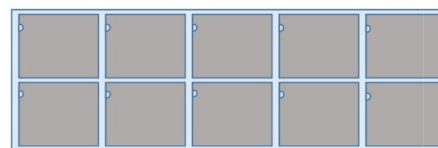
To keep memory about the module orientation 3 fixed vertices were installed and the distances measured with the laser distanziometer (+/-2 mm accuracy)
GPS data were recorded on 2 detector and on 2 vertex points



Scheme of the internal module structure

One module with 10 emulsion "cells"
Each cell has 2 emulsions doublets attached to both sides of the central metal plate.

Front view of the central plate (26 x 80 cm)

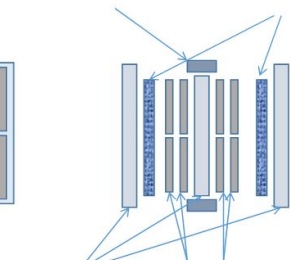


The total weight of one module is of 26 kg
Total amount of emulsions/module: 40
The active surface covered is of 1200 cm²

The overall weight of 8 modules and the support frame is about 250 kg

"Exploded view"

Aluminum Frame Elastic (rubber) layers

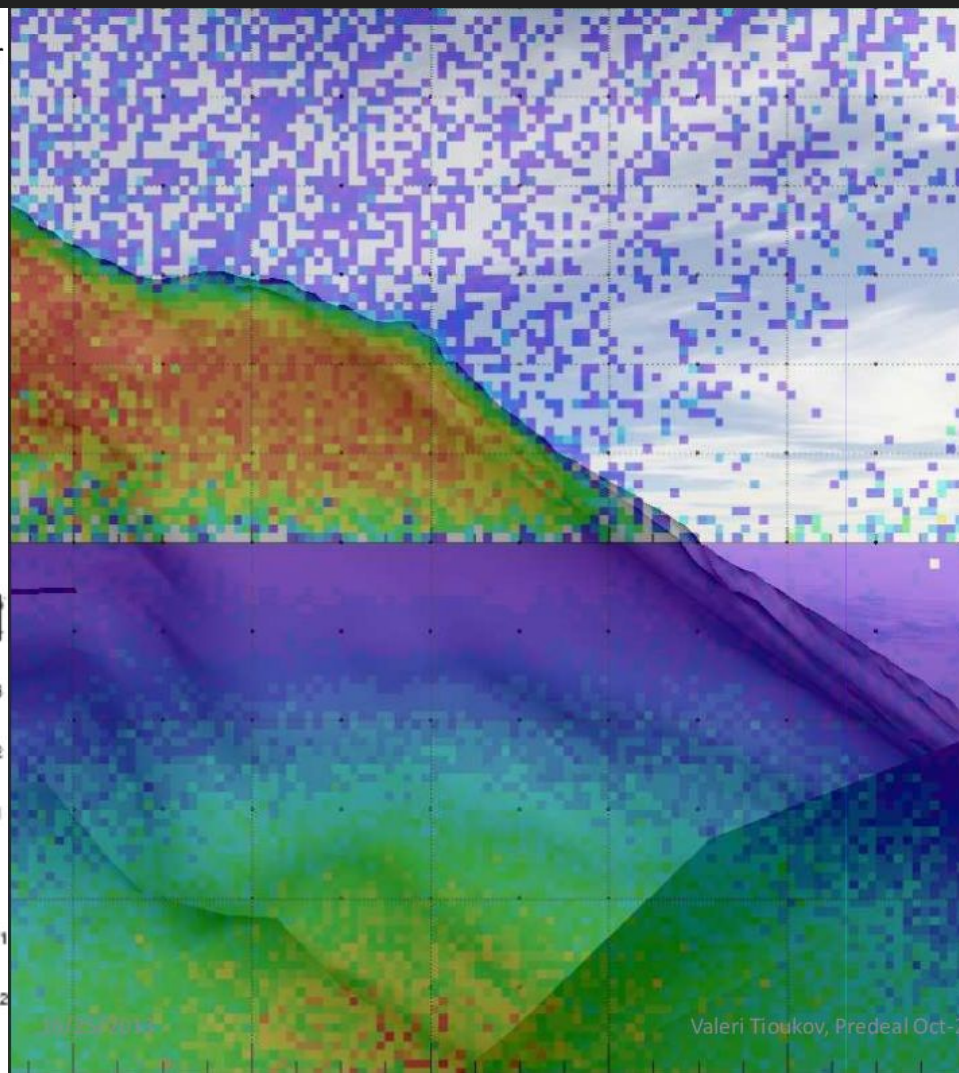
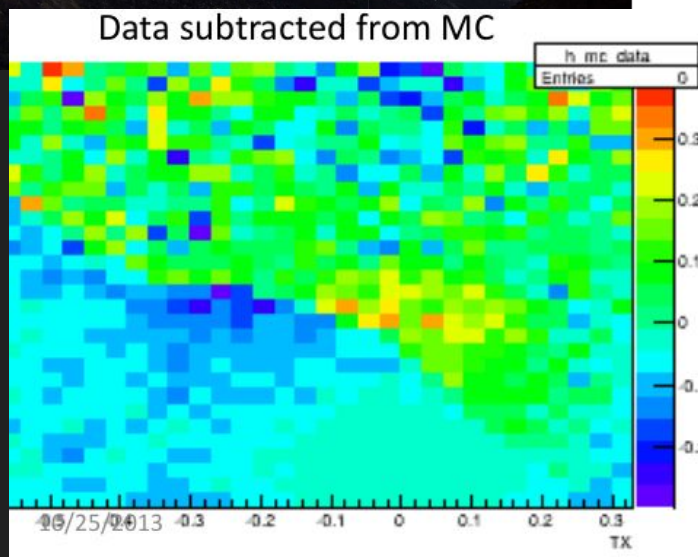
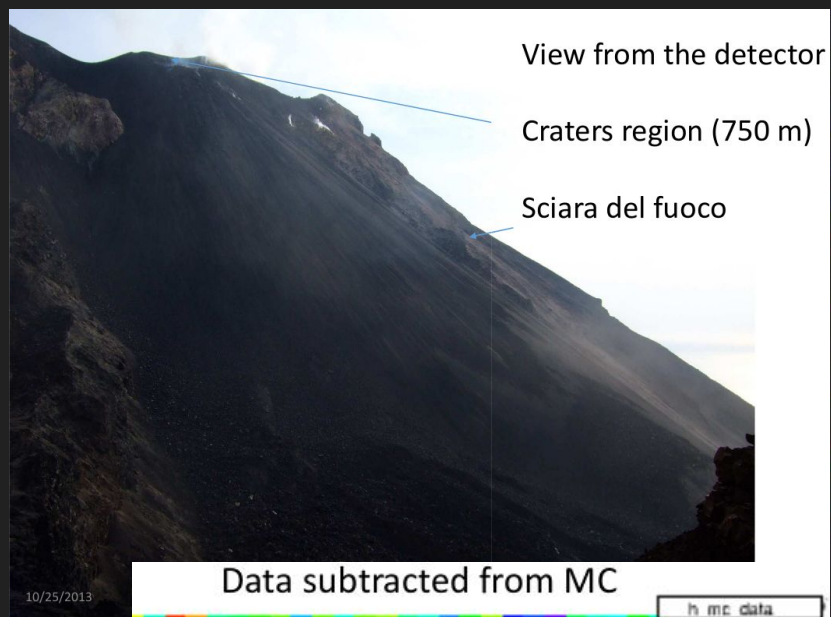


Metal plates of 5mm (inox)

Envelopes with emulsions glued to the central inox plate

Valeri Tioukov, Predeal Oct-2013

Мюография и фотография: Стромболи

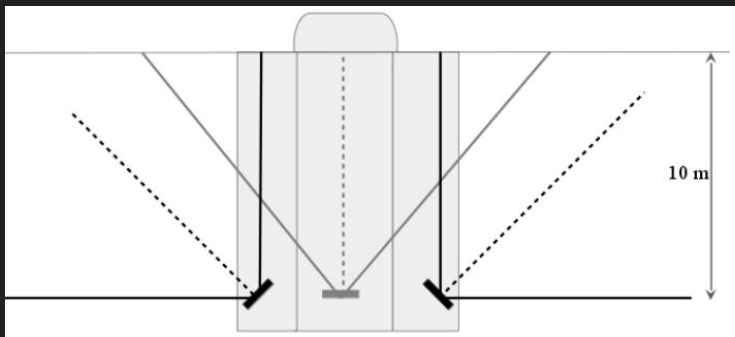


Мюонная археология в России (2018г)

Дербент, крепость Нарын Кала

Засыпанная землей “цистерна для воды” имеет крестообразную форму, ориентированную по сторонам света, и основание для купола.

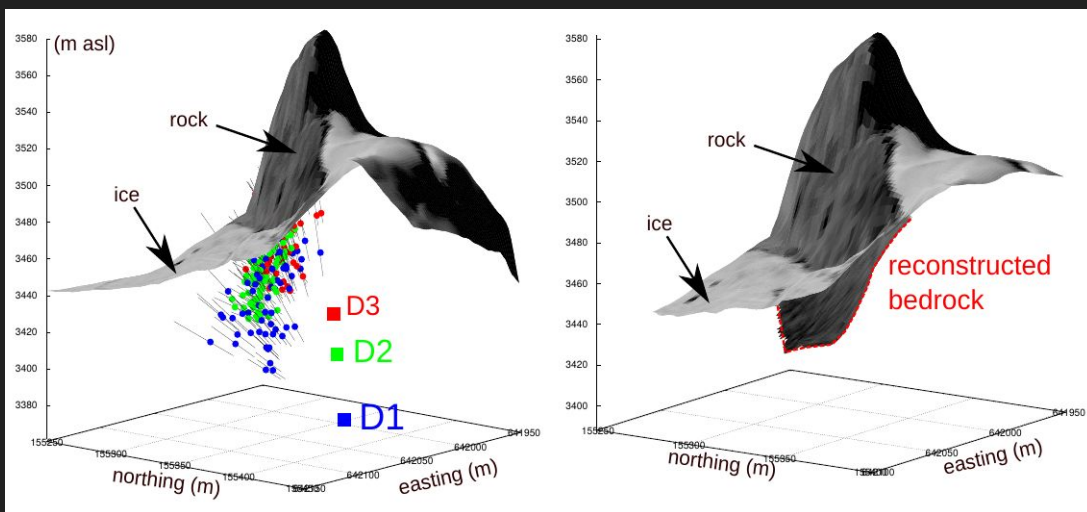
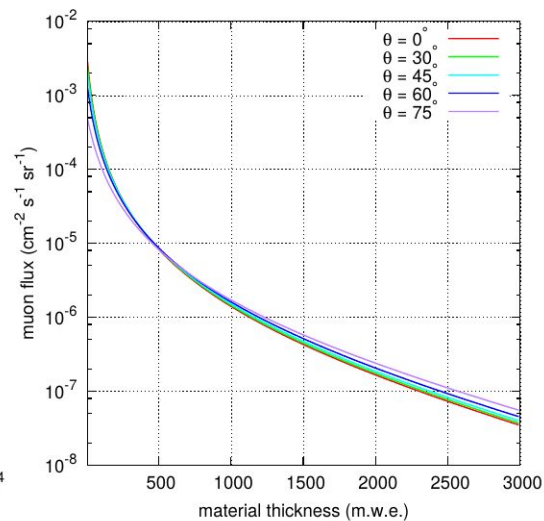
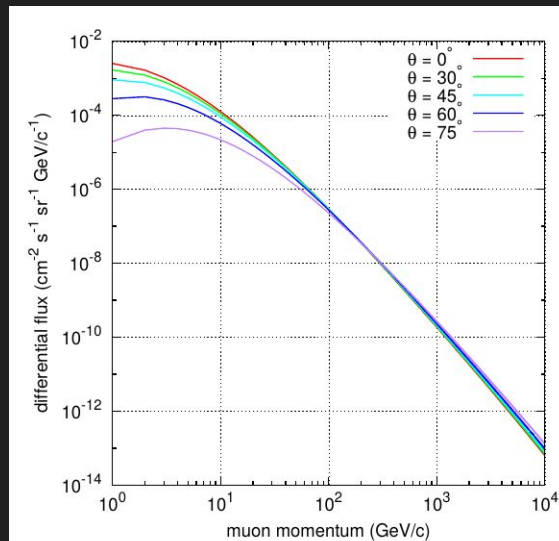
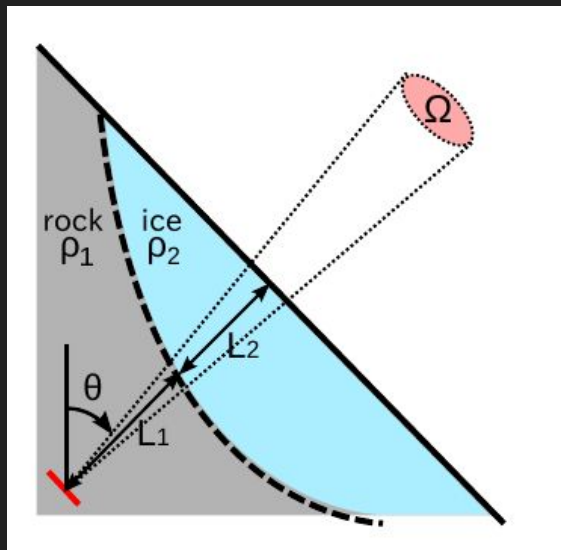
Скорее всего это христианский храм V-VI(!) века.



Экспозиция: 2 месяца

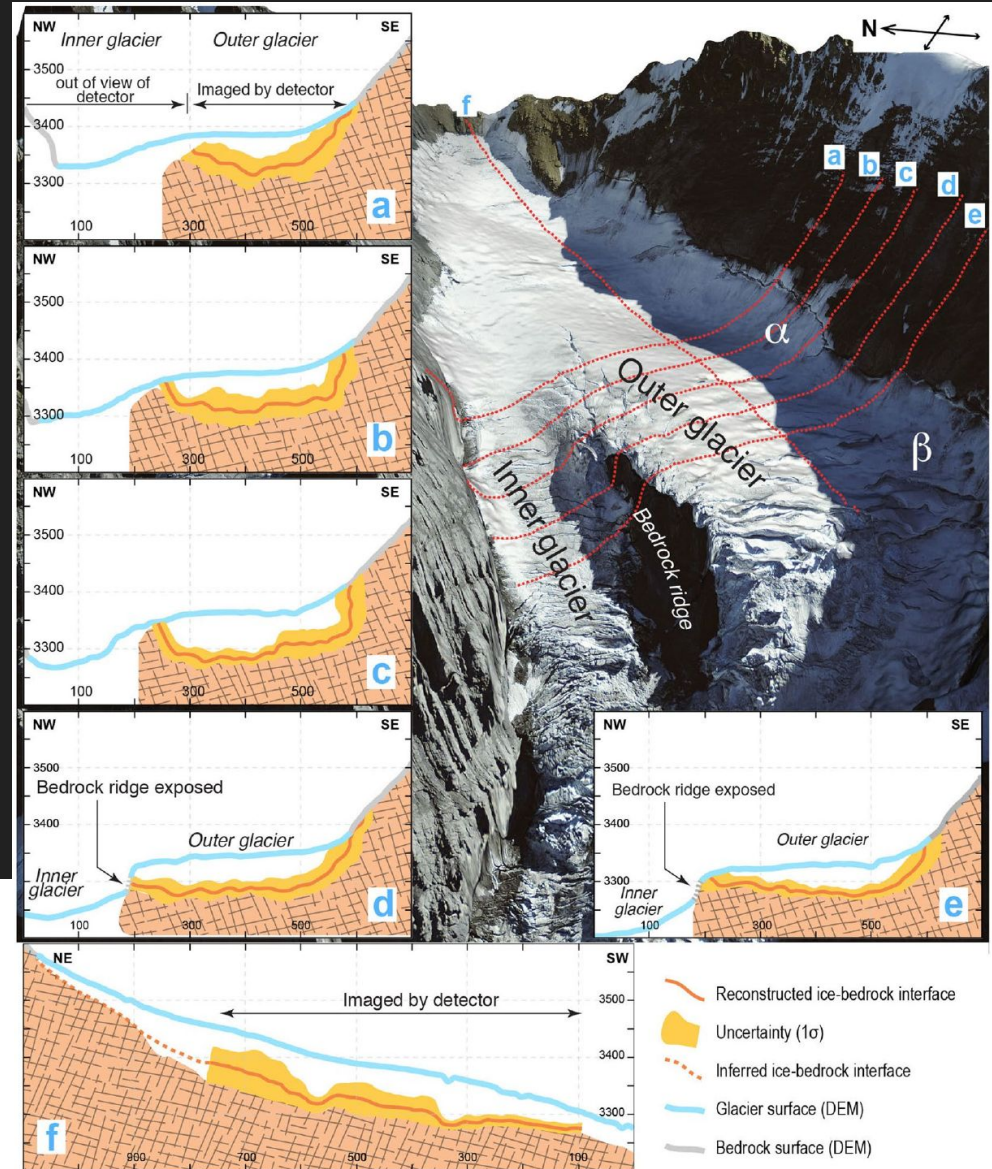
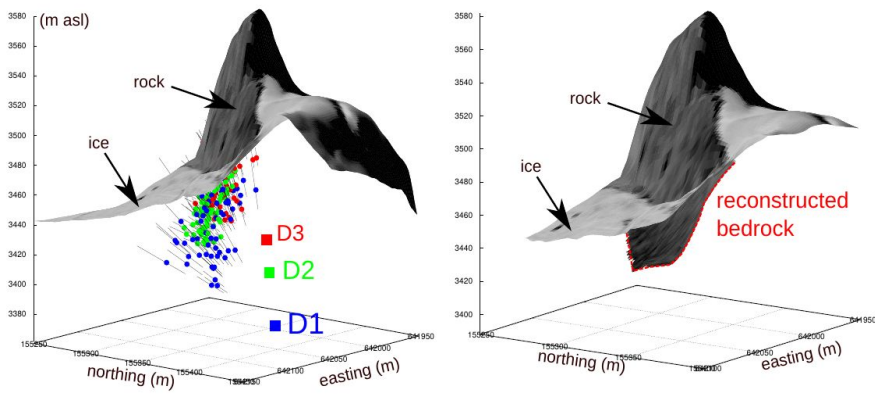
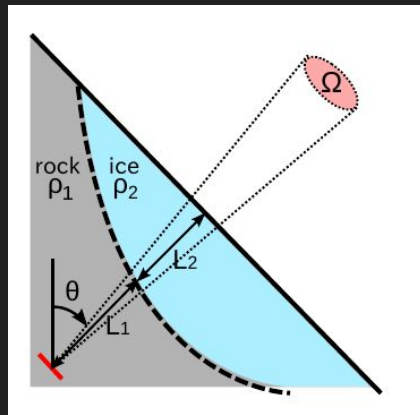
Предварительные результаты не выявили дополнительных структур вокруг.

Исследование ледника в Альпах, Швейцария



Исследование ледника в Альпах, Швейцария

Цель - изучение механизмов ледниковой эрозии.



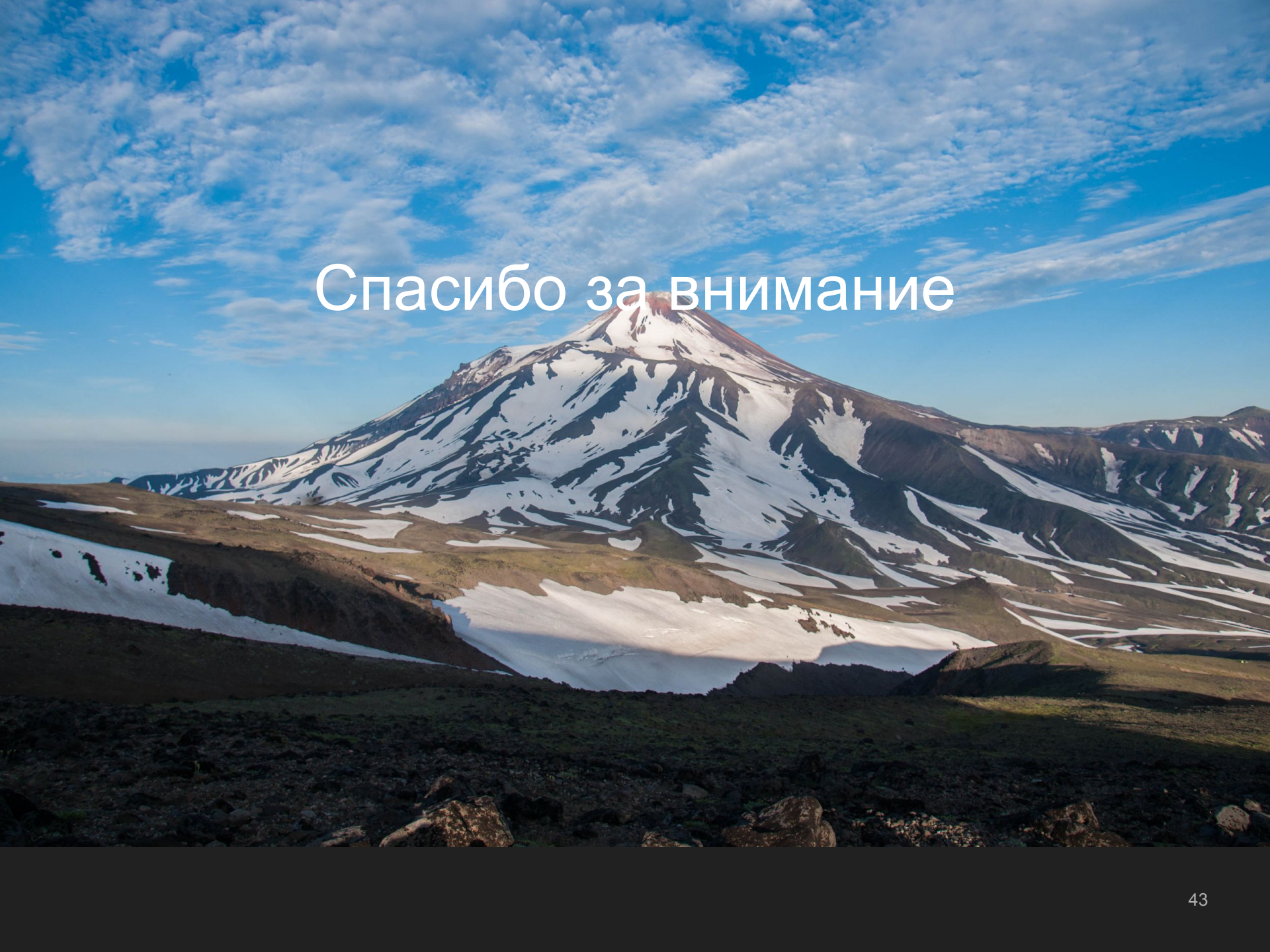
Назад к пирамидам с новыми детекторами

Международная группа, используя эмульсионные и сцинтилляционные детекторы исследовала пирамиду Хеопса.



SCAN
PYRAMIDS

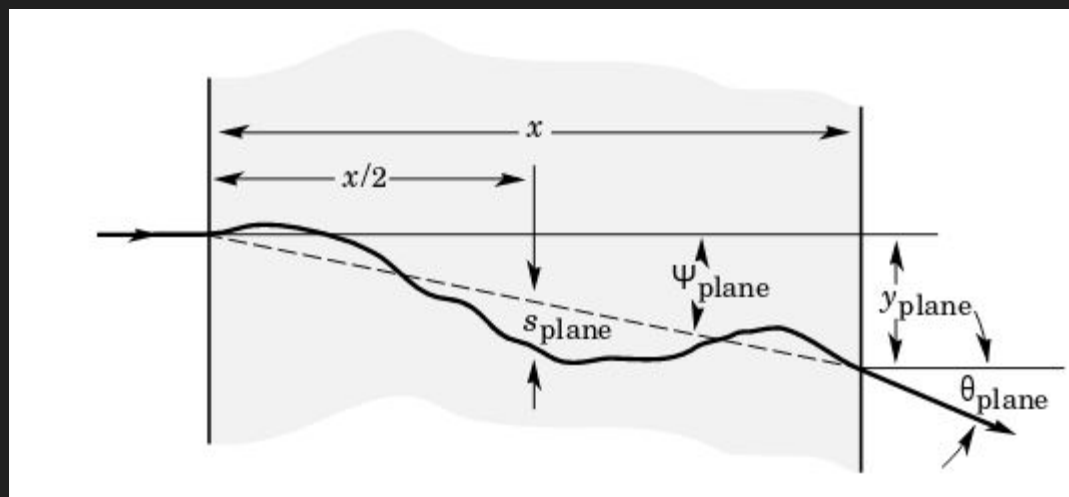




Спасибо за внимание

Прохождение заряженной частицы в веществе

Рассеяние



Прохождение заряженной частицы в веществе

Процессы:

- Рассеяние на электронах
 - Ионизация
 - Возбуждение
- Рассеяние на ядрах
 - Упругое рассеяние
 - Тормозное излучение
 - Образование электрон-позитронных пар
- Захват
- Неупругие взаимодействия
- Остановка
- Распад

Ионизация

