

Отсыпьте мне сто грамм частичек!

*Рассказы о практической пользе
элементарных частиц*

Игорь Иванов
Instituto Superior Tecnico (Португалия)

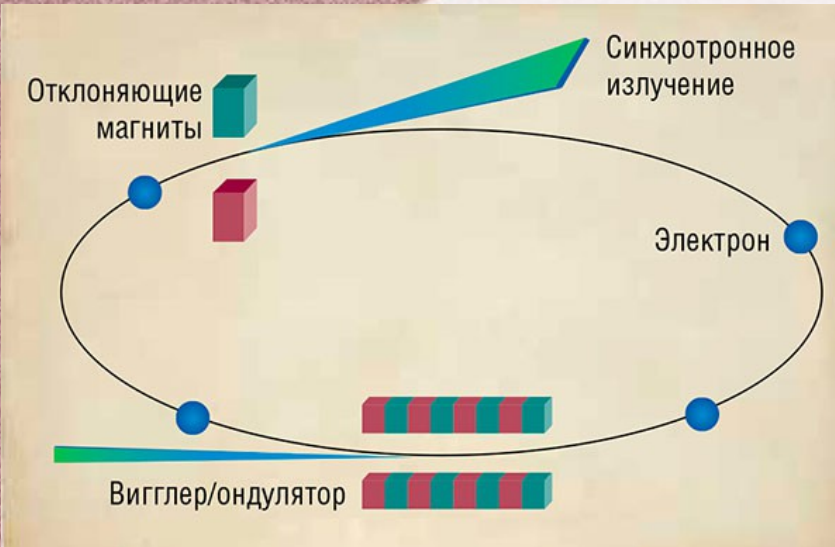
Иркутск, 28 апреля 2017 г.

Электроны

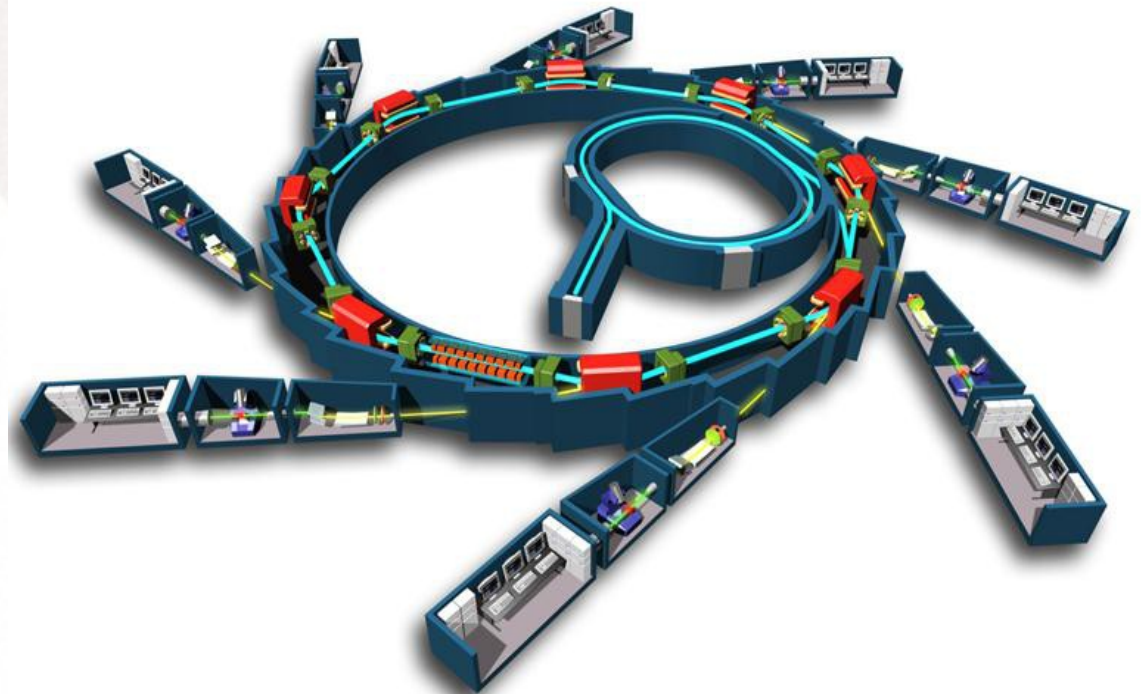
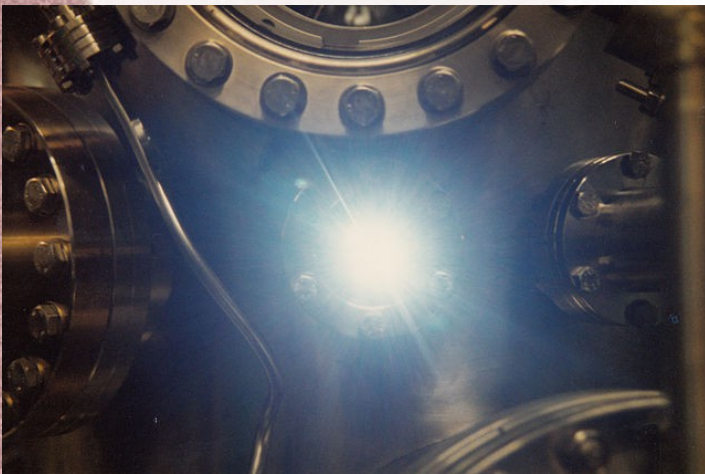
рабочие лошадки в мире частиц

Ускорители

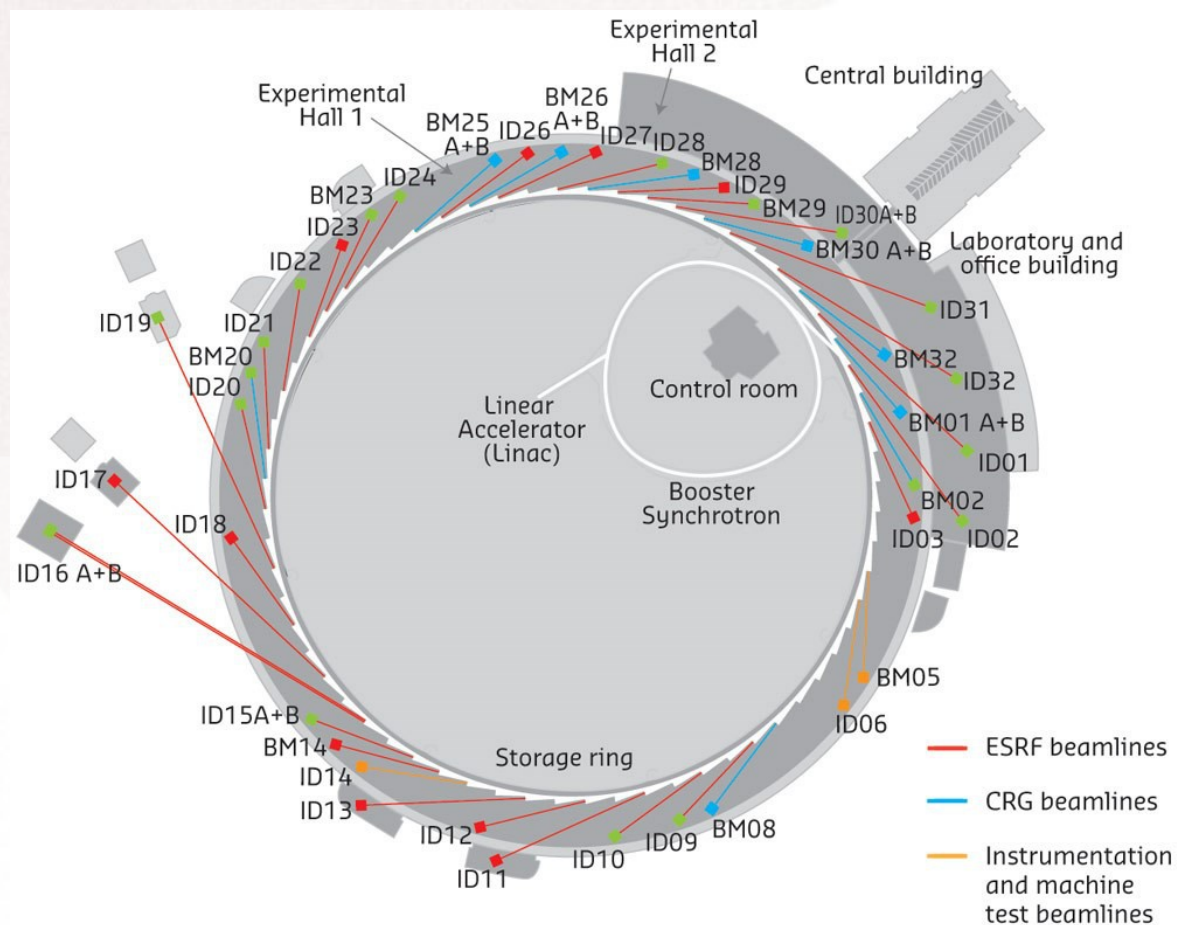
Сейчас во всем мире работают свыше 30 тыс. ускорителей.



Подавляющее большинство — электронные циклотроны, производящие синхротронное излучение, яркий, направленный, когерентный пучок рентгена.



ESRF, European Synchrotron Radiation Facility



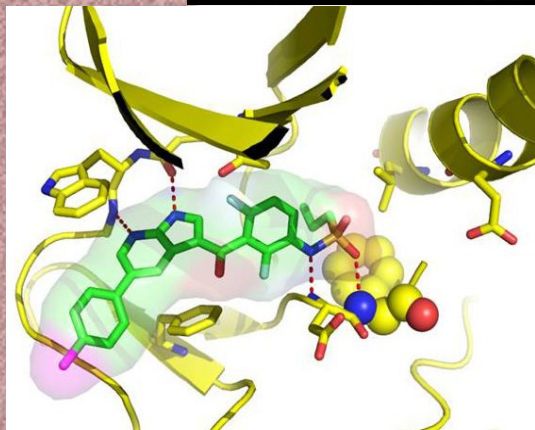
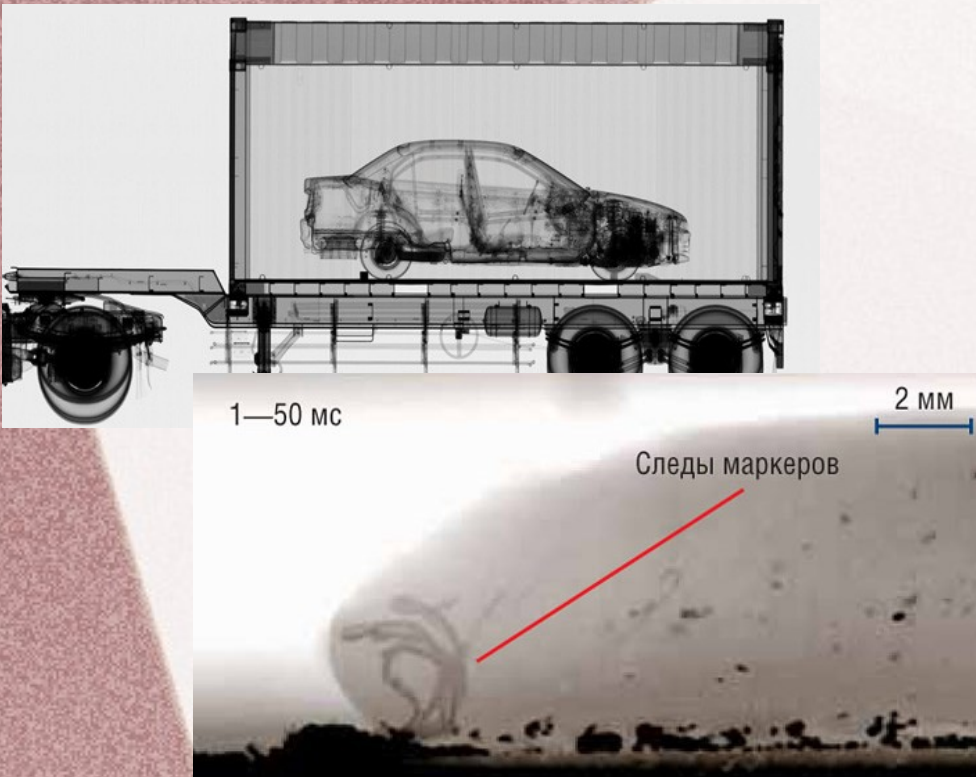
- Европейский проект (19 стран),
- расположен в Гренобле,
- запущен в 1994 году,
- синхротрон на 6 ГэВ, свыше 30 каналов вывода СИ;
- **тысячи экспериментов** и 2 тыс. научных публикаций в год.

Другие центры: СЦСТИ (Новосибирск, 1981), КИСИ (Москва, 1999), SOLEIL (Франция, 2006), DLS (Великобритания, 2007), NSLS-II (США, 2015)

Синхротронное излучение

Применения:

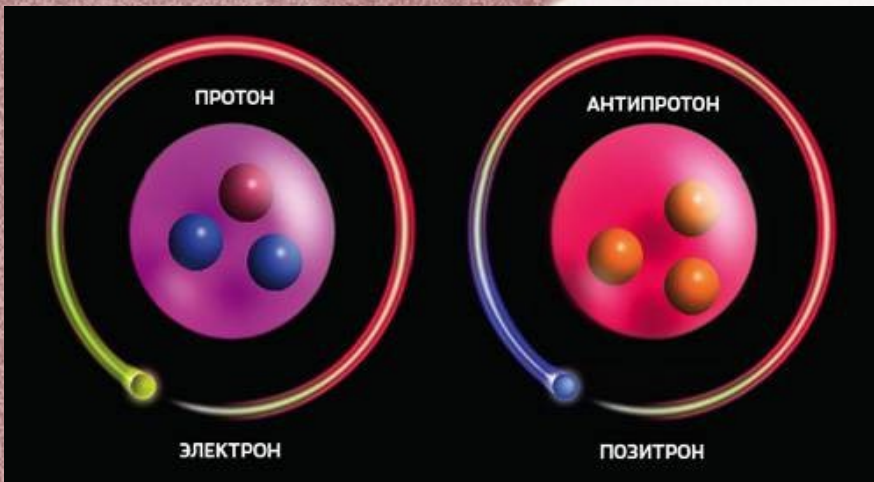
- **радиография**, безопасности (сканирование грузов);
- **рентгеновская микроскопия**;
- **структурная биология** (рентгеноструктурный анализ биологических молекул);
- **рентгеновская кристаллография** и разработка новых лекарств;
- **структурные и электронные свойства материалов** (поиск новых материалов для аккумуляторов, сверхабсорбирующие полимеры)
- **обработка** поверхностей и материалов
- эксперименты при **высоких температурах и давлениях** (геофизика, вулканология)



Позитроны

и их приключения в веществе

Антиматерия

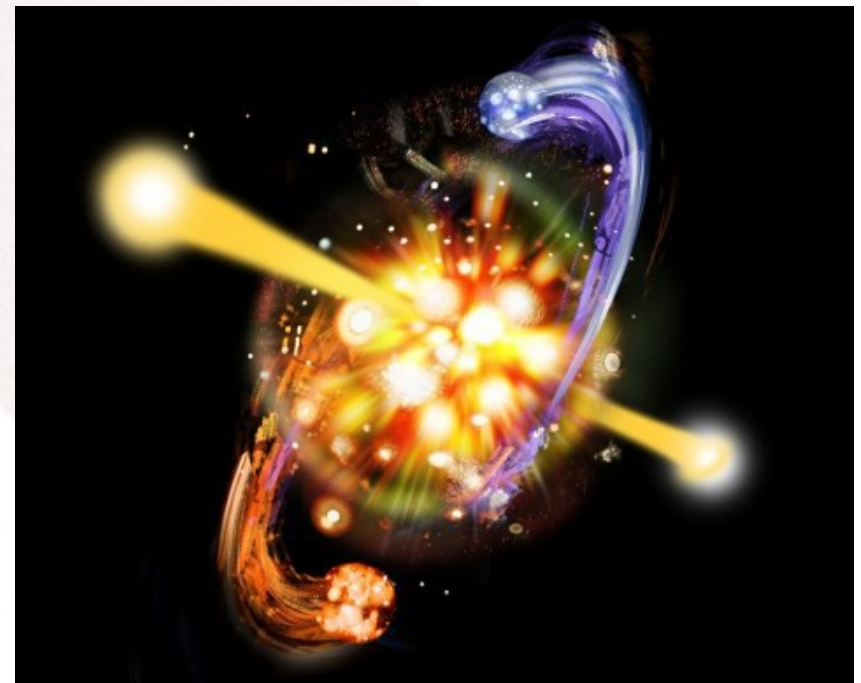


У каждого типа частиц есть **античастицы**:
электрон \leftrightarrow позитрон
протон \leftrightarrow антипротон
нейтрон \leftrightarrow антинейтрон
Из них можно сложить антиядра,
антиатомы и антиматерию.

При встрече частица и античастица

аннигилируют:

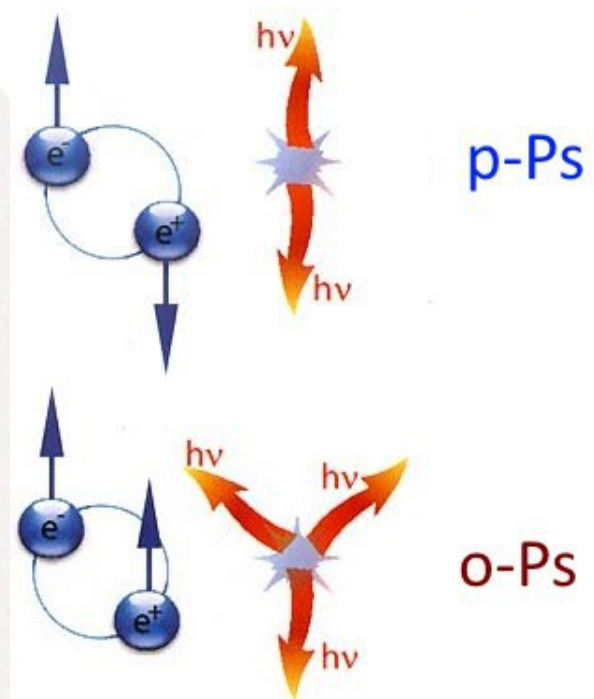
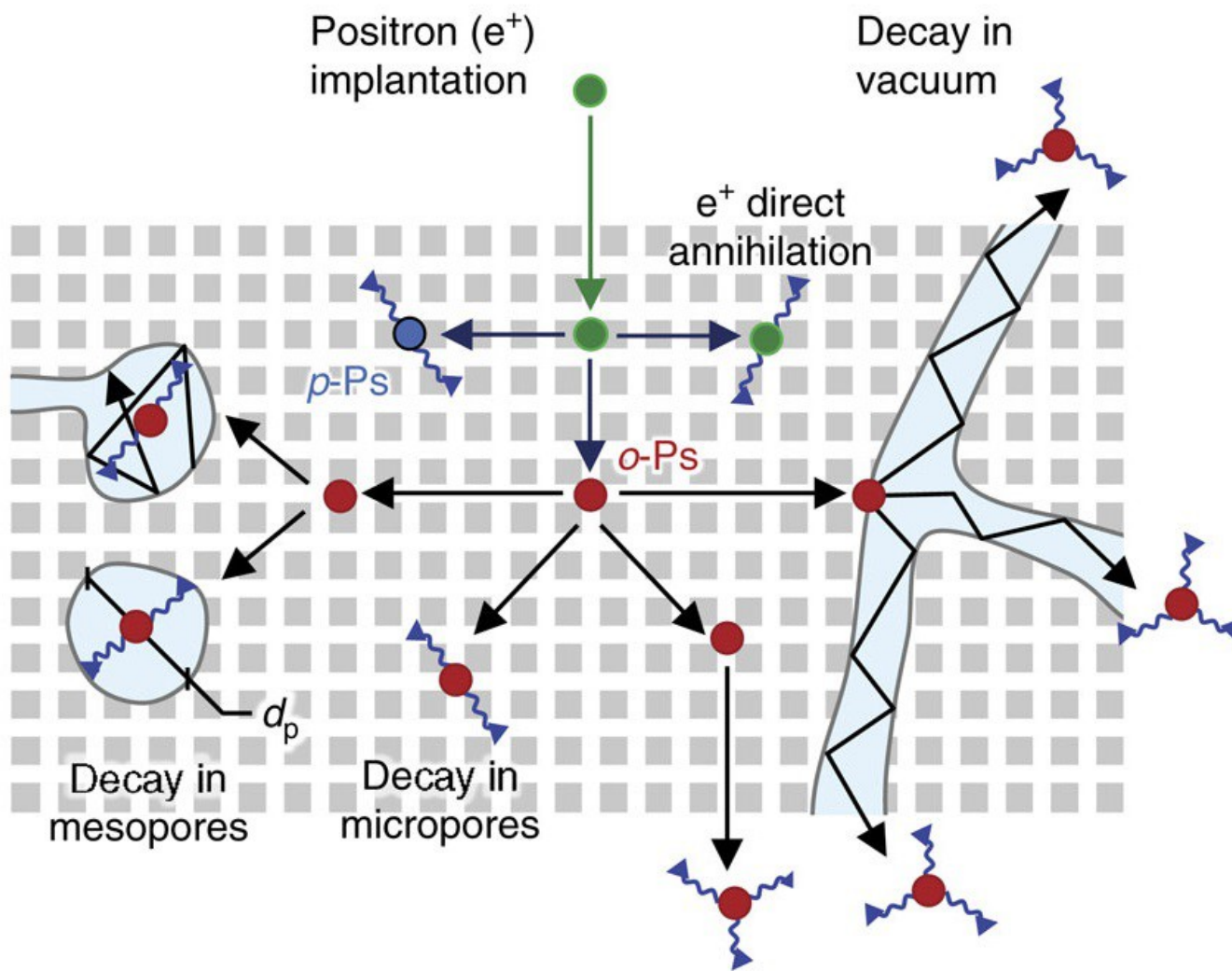
взаимно уничтожаются,
превращаясь в излучение.



Позитроны в веществе

Аннигиляция не обязана быть моментальной!

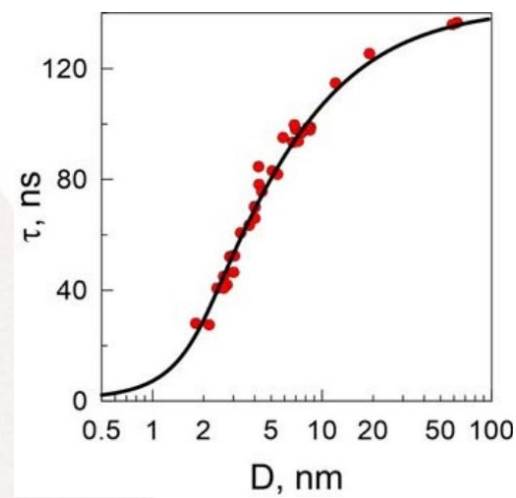
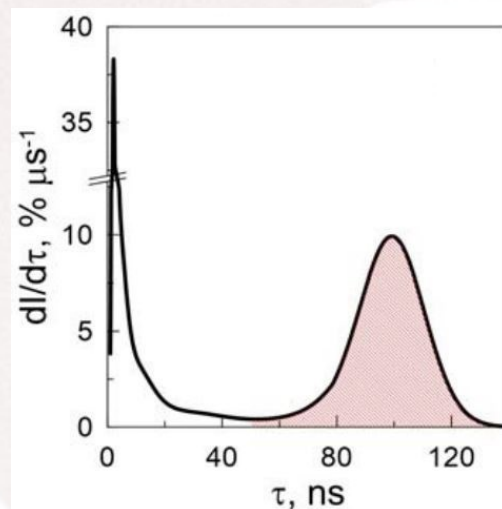
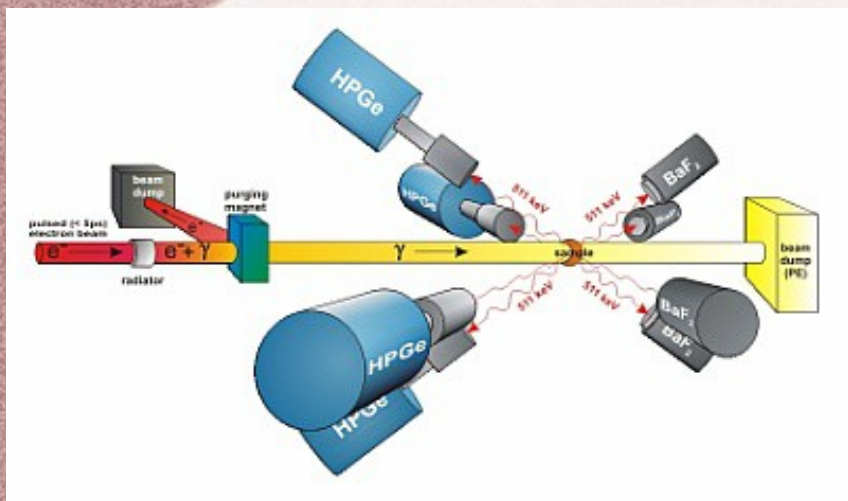
Позитрон, попав в вещество, может прожить
богатую событиями жизнь.



позитроний

Позитронная порометрия (PALS)

Удобный метод измерения **пористости материала** для наноразмерных пор (размер, концентрация, связность, распределение по глубине)



Области применения:

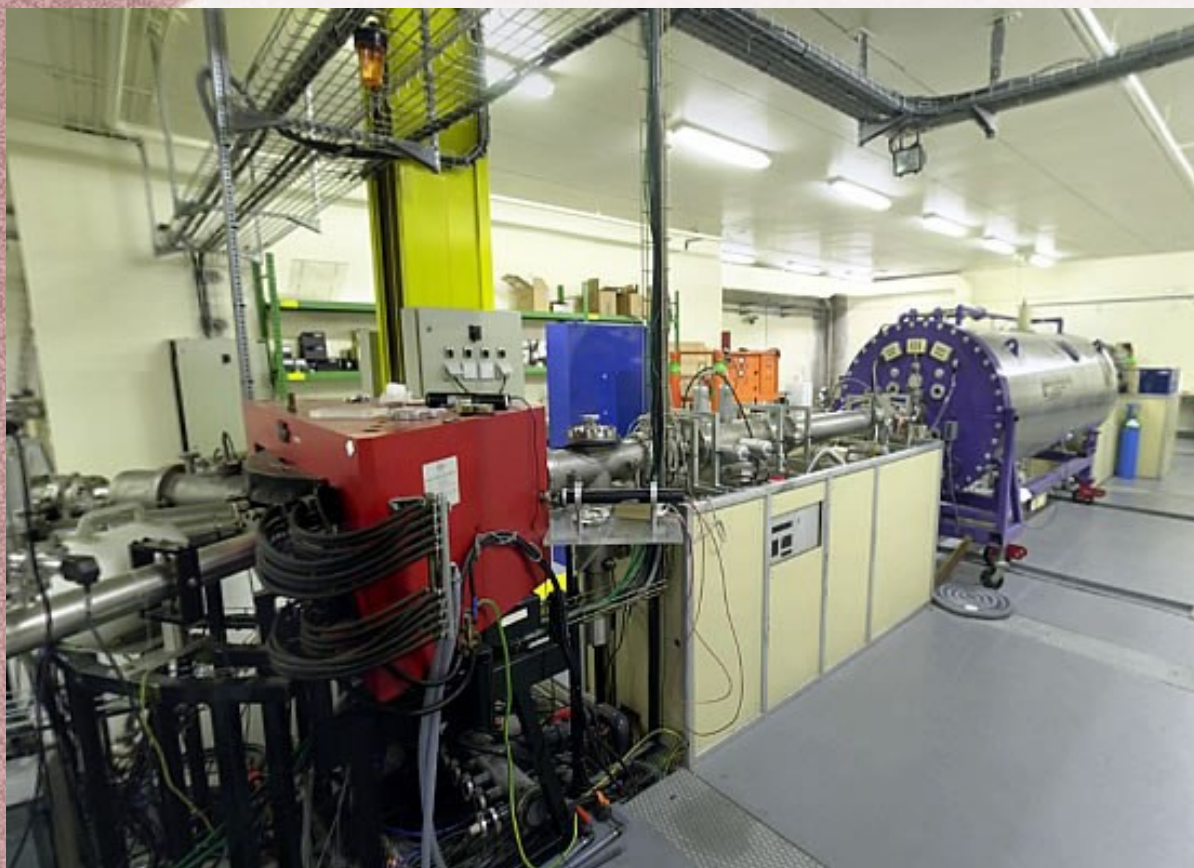
- **структурные мезоскопические свойства** материалов (дисперсных систем, вязких жидкостей, полупроводников)
- **каталитическая способность** материалов
- заполненность **пористых мембран** биологически-активными молекулами

ПРОТОНЫ

на службе искусства

Ускоритель AGLAE в Лувре

Ускоритель **AGLAE** (*Accélérateur Grand Louvre d'analyse élémentaire*)



- Запущен в 1989 году и используется на 100% для задач искусствоведения;
- Ускоряет протоны и альфа-частицы до 4-6 МэВ;
- Позволяет узнать **химический состав** объекта неинвазивными методами (PIXE, BRS, и др.).

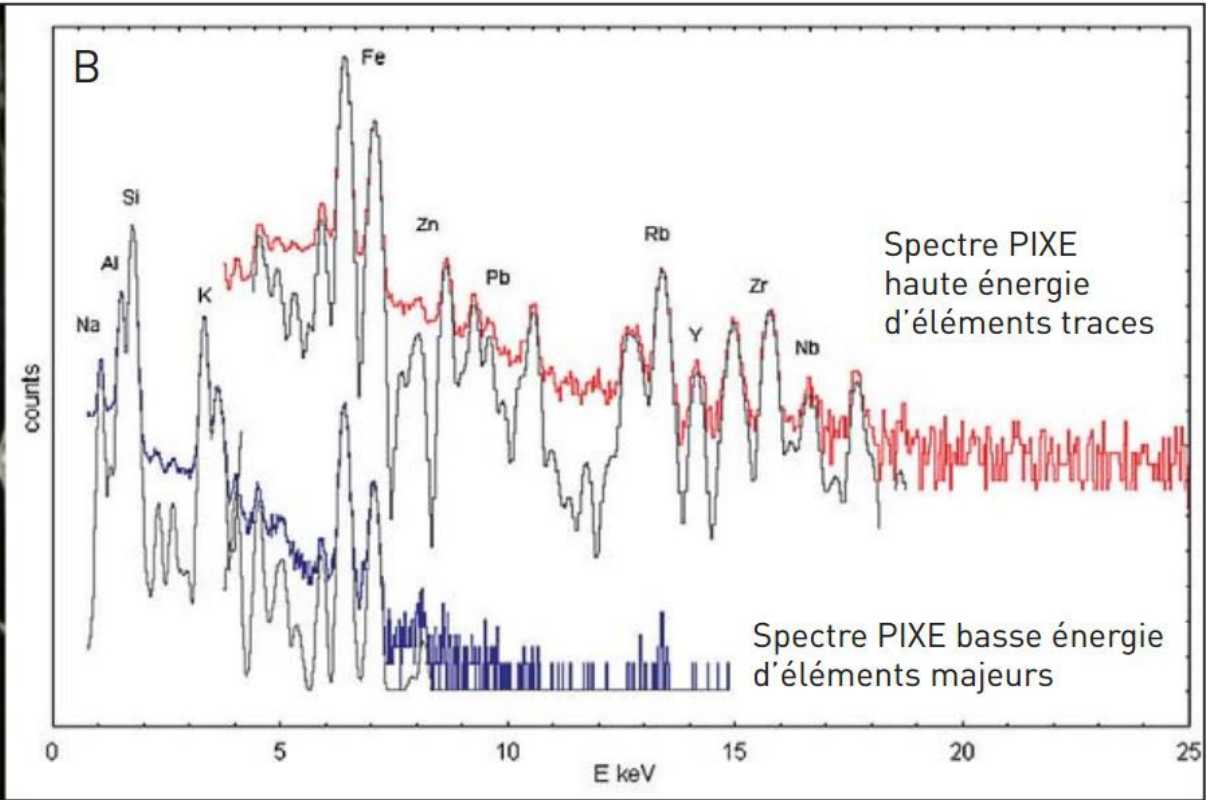
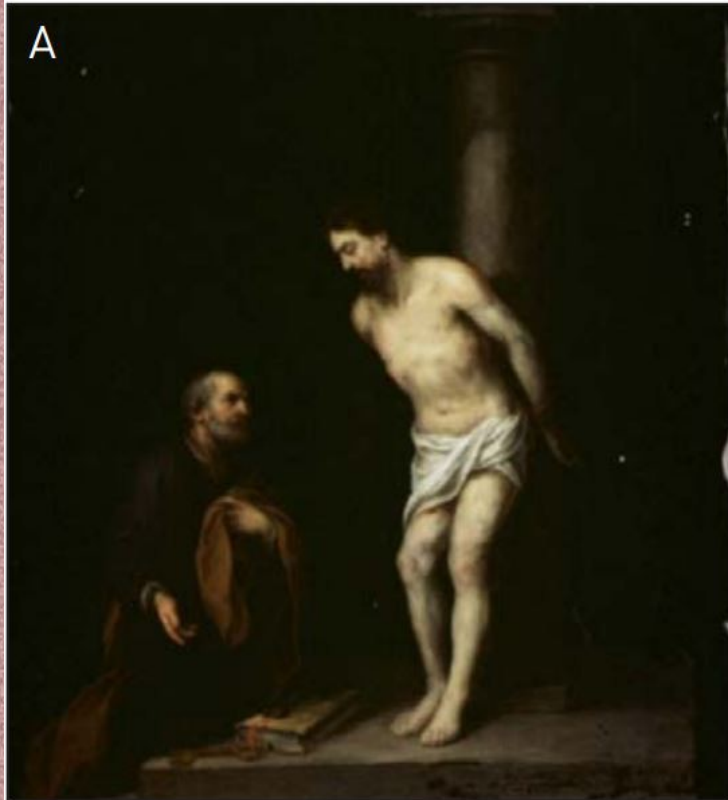
Ускоритель AGLAE в Лувре



Ускоритель AGLAE в Лувре



Ускоритель AGLAE в Лувре

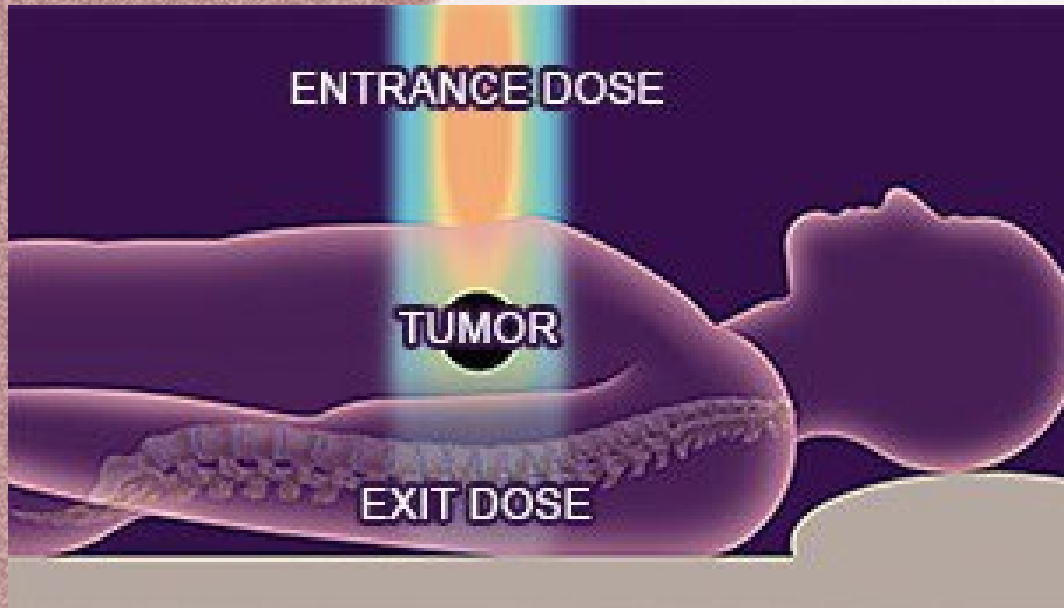


Пример результата, полученного [методом PIXE на ускорителе AGLAE](#): испанский живописец Бартоломе Эстебан Мурильо (1617-1682) использовал для изготовления основы обсидиан мексиканского происхождения.

Антипротоны

для нужд медицины

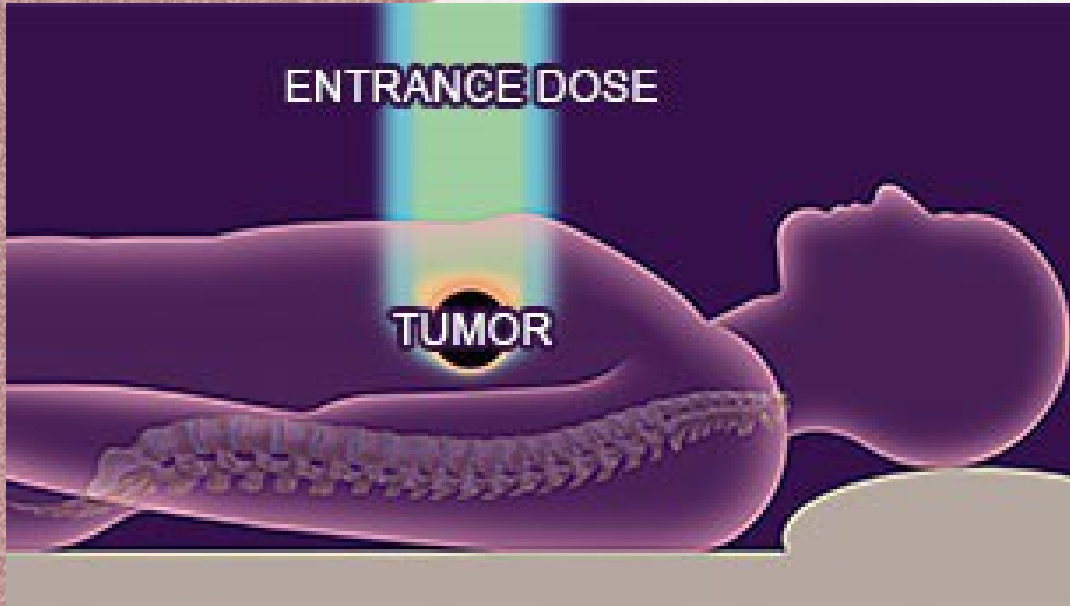
Радиотерапия опухолей



Радиотерапия раковых опухолей: облучение области тела мощным пучком рентгена.

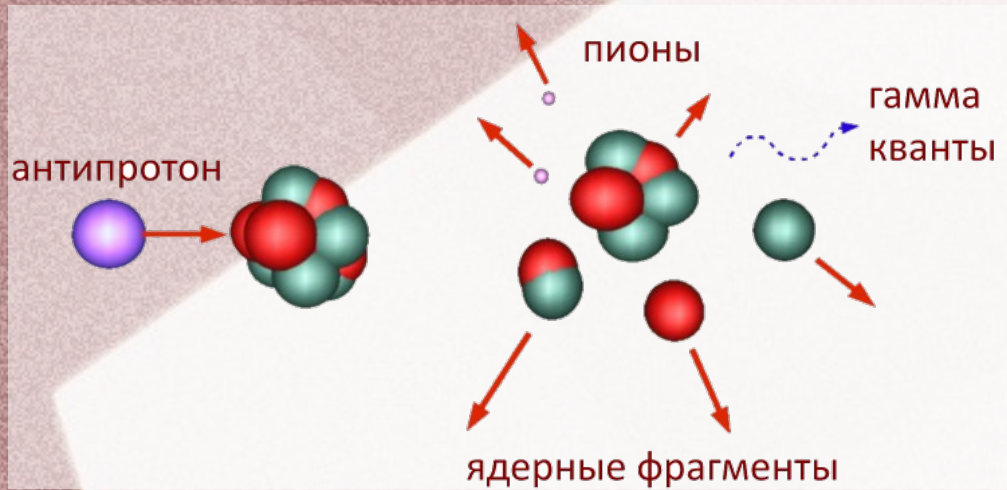
Главный недостаток — рентген жжет всё, что попадает под луч. Особенно проблематично облучать глубокие опухоли.

Радиотерапия опухолей



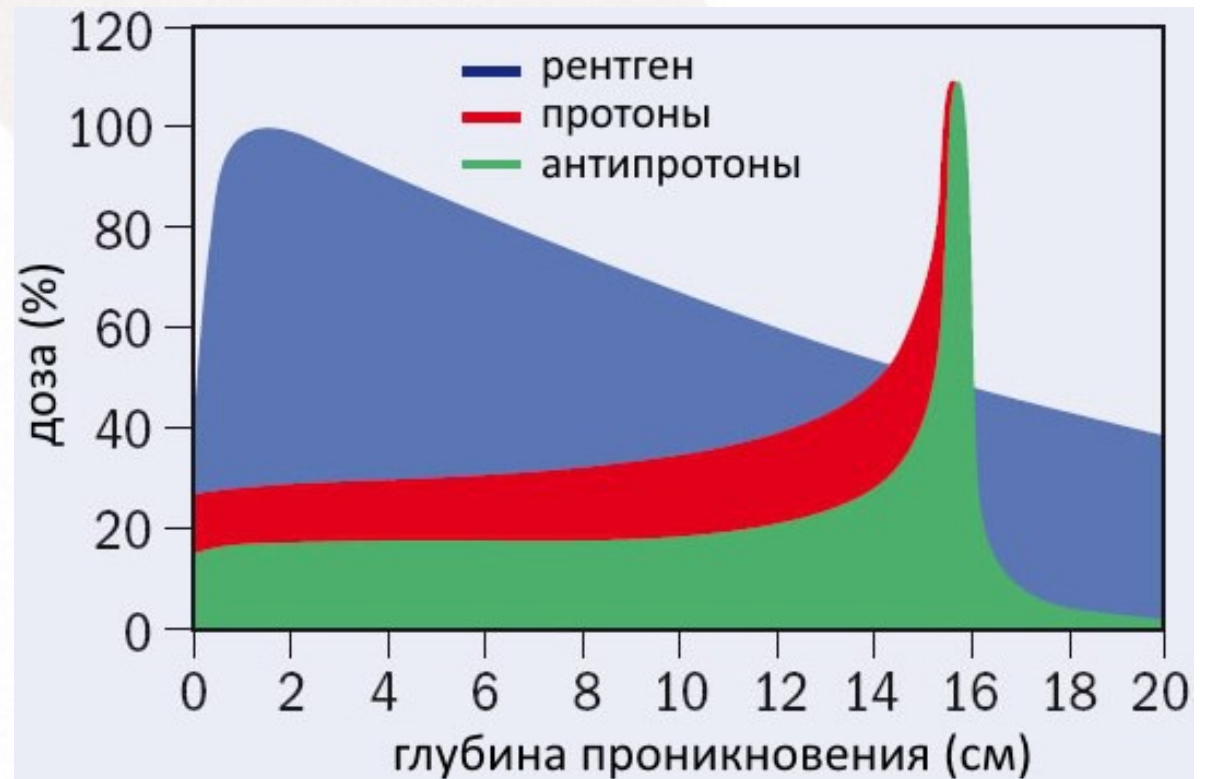
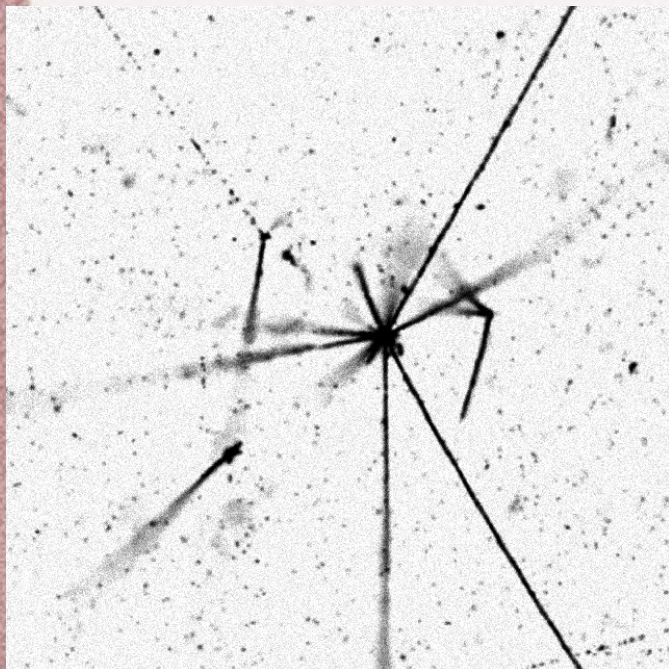
Протонный пучок намного эффективнее рентгена: энергосвободное высвобождение резко возрастает на последних сантиметрах пути!

Антипротонная терапия



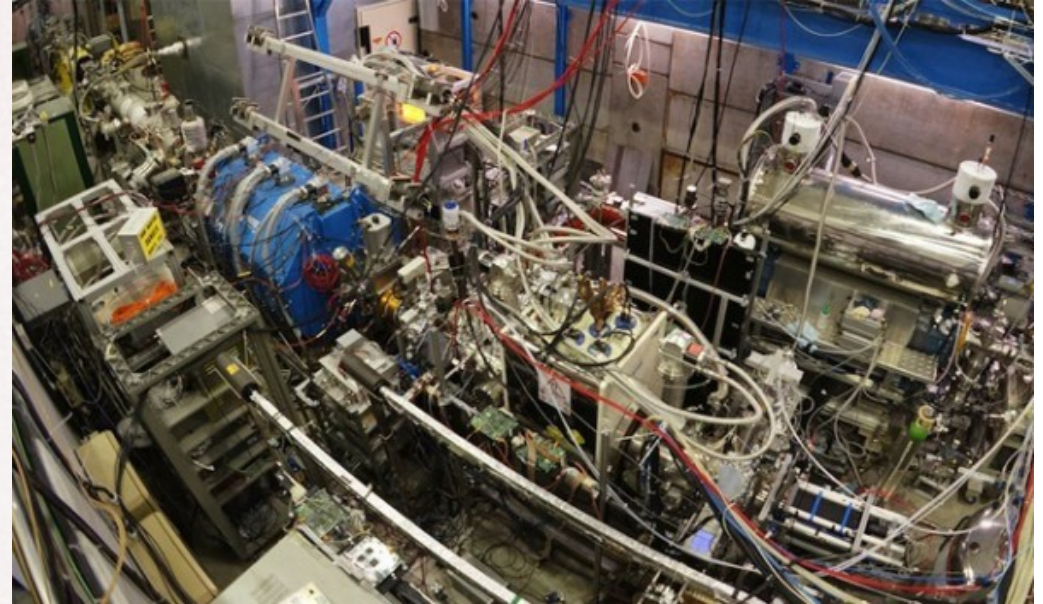
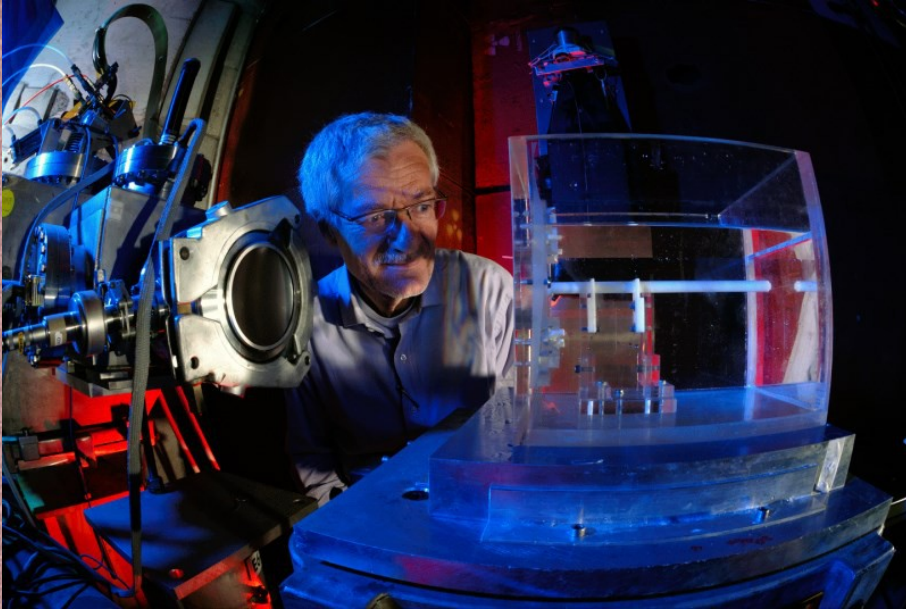
Антипротоны:

не только теряют энергию, но и **аннигилируют** → дополнительное энергосвечение в опухоли

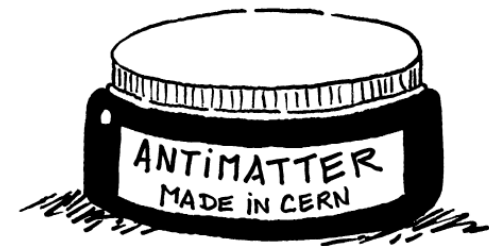


Эксперимент АСЕ в ЦЕРНе

Эксперимент АСЕ изучает радиационное воздействие антипротонного пучка на культуру живых клеток



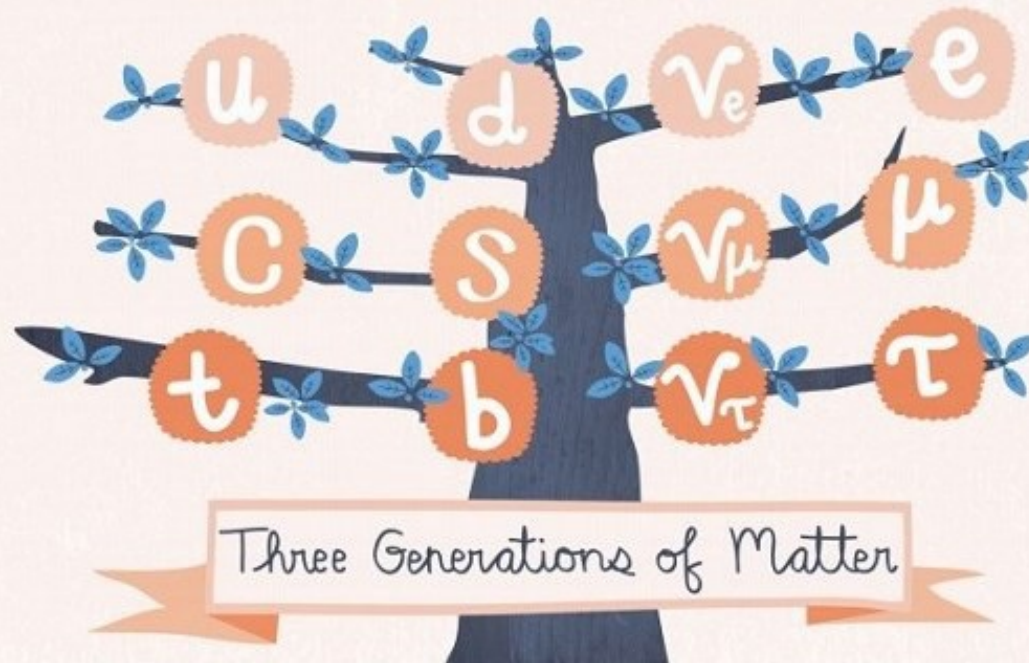
Производит антипротоны
ускорительный комплекс AD =
Антипротонный замедлитель



Мюоны,

льющиеся с небес

Кто такие мюоны



Три «набора»
материальных частиц
в нашей Вселенной:
основной и **два запасных**.

Мюоны — **тяжелые собратья электронов**, частицы из «второго набора запчастей». Они чужаки для нашего мира, но чужаки привычные и ненавязчивые.

- Нестабильные, но **долгоживущие** → могут пролететь километры
- Неохотно взаимодействуют → **высокая проникающая способность**
- Их вокруг нас — **очень много!**

Космические мюоны

первичные космические лучи

→ вторичные частицы

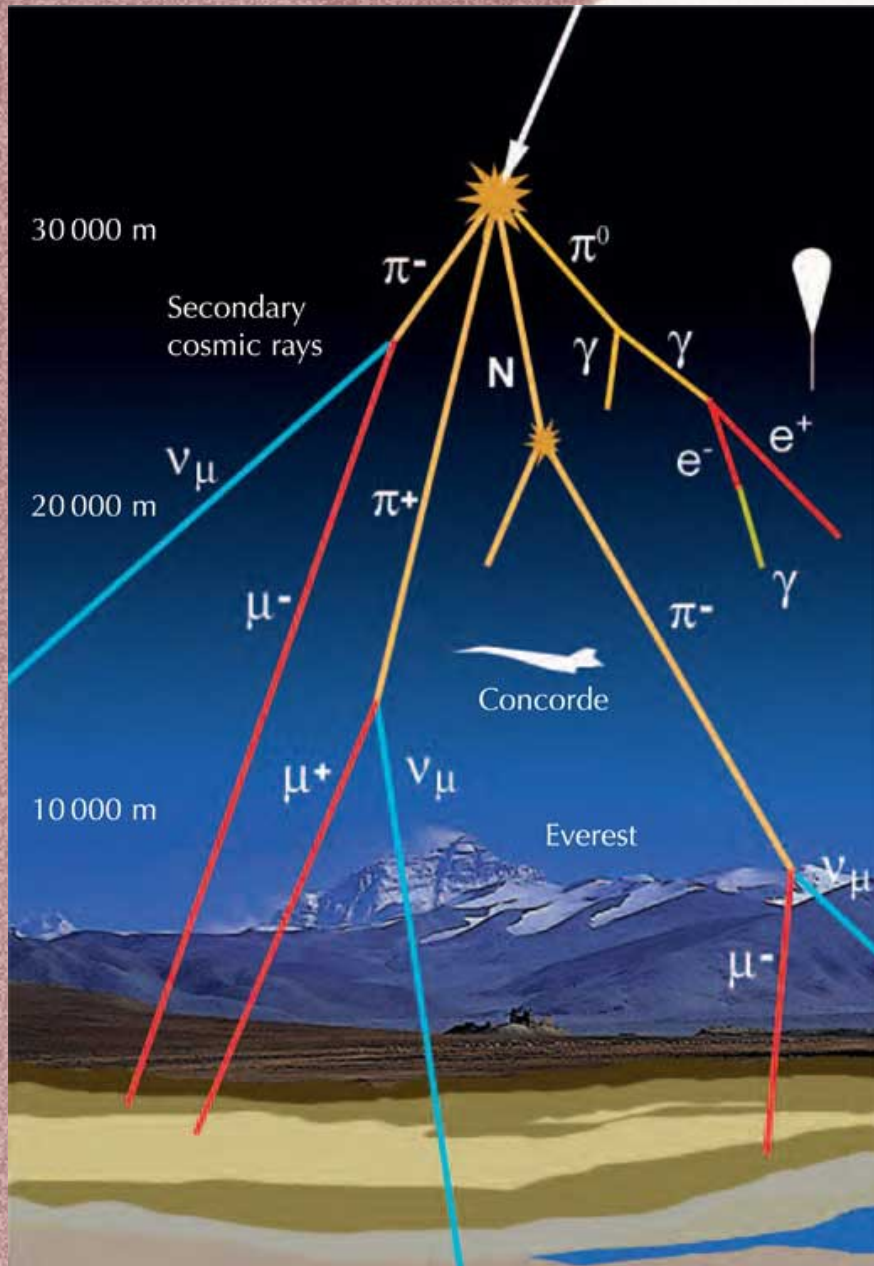
→ **мюоны**

поток на уровне моря: ~ 100 шт/сек/м²

**Бесплатный природный
«рентгеновский аппарат»**
для просвечивания
массивных преград!

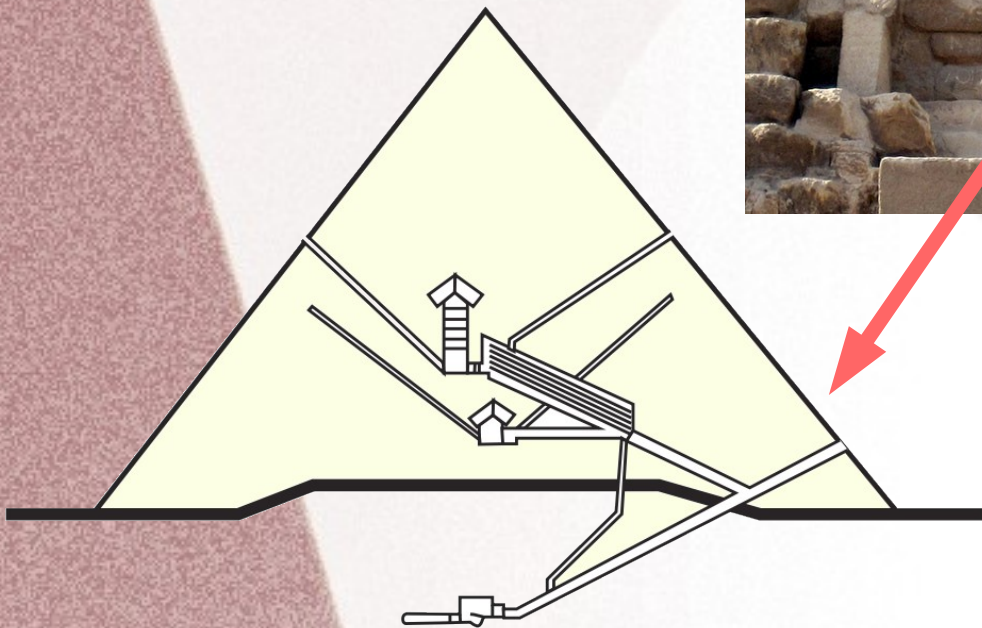
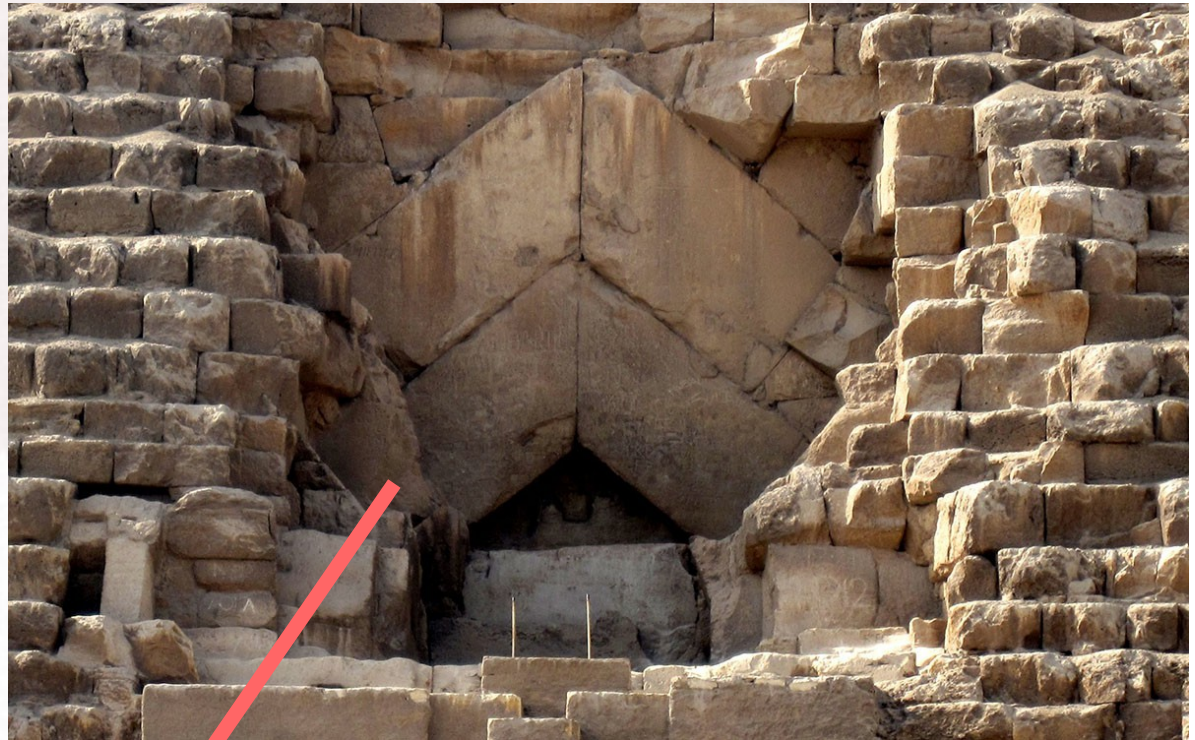
Преимущества:

- высокая проникающая способность,
- бесплатный непрерывный источник мюонов,
- пассивная методика наблюдения



Мюонная томография

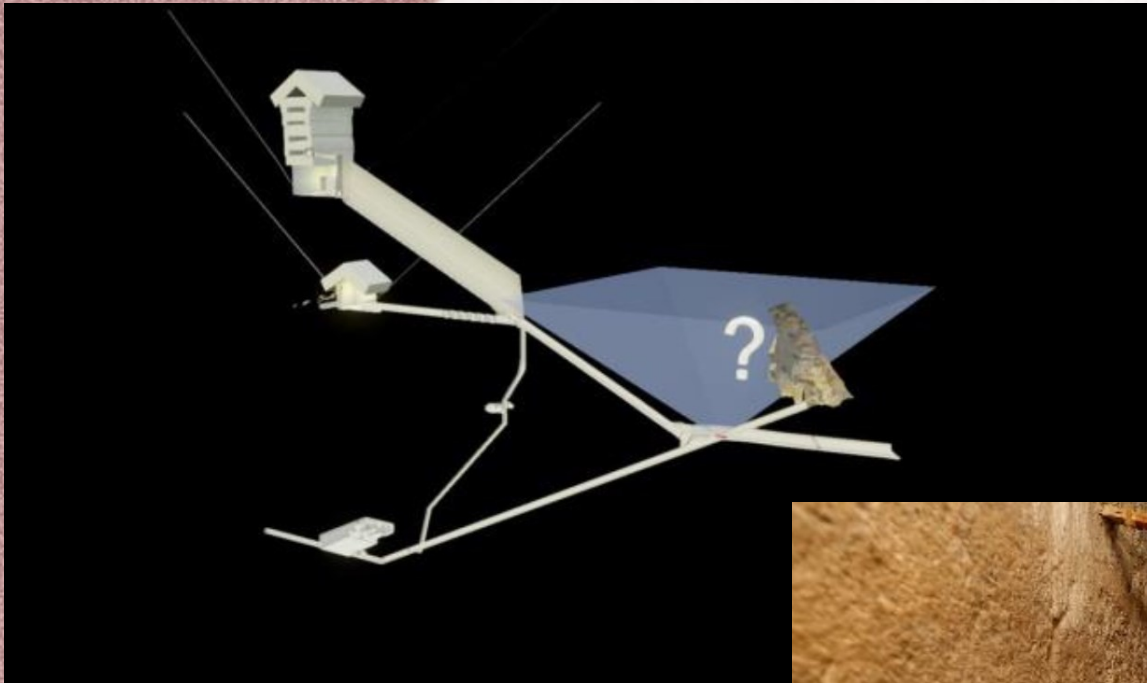
ScanPyramids: сканирование пирамиды Хеопса



Блоки
избыточной защиты

Мюонная томография

ScanPyramids: сканирование пирамиды Хеопса



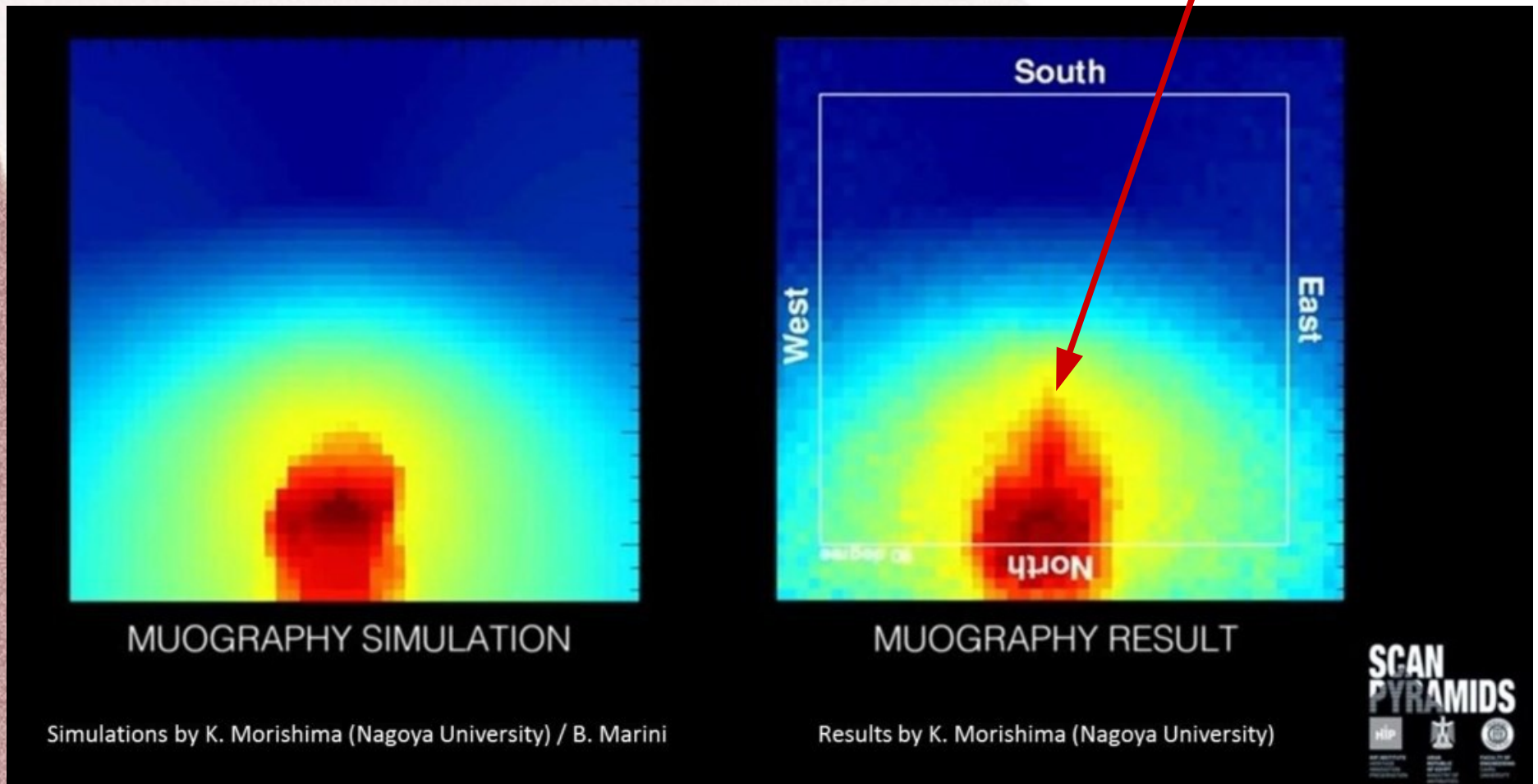
июнь-август 2016:
три мюонные платы
собирали данные
в течение 67 дней



Мюонная томография

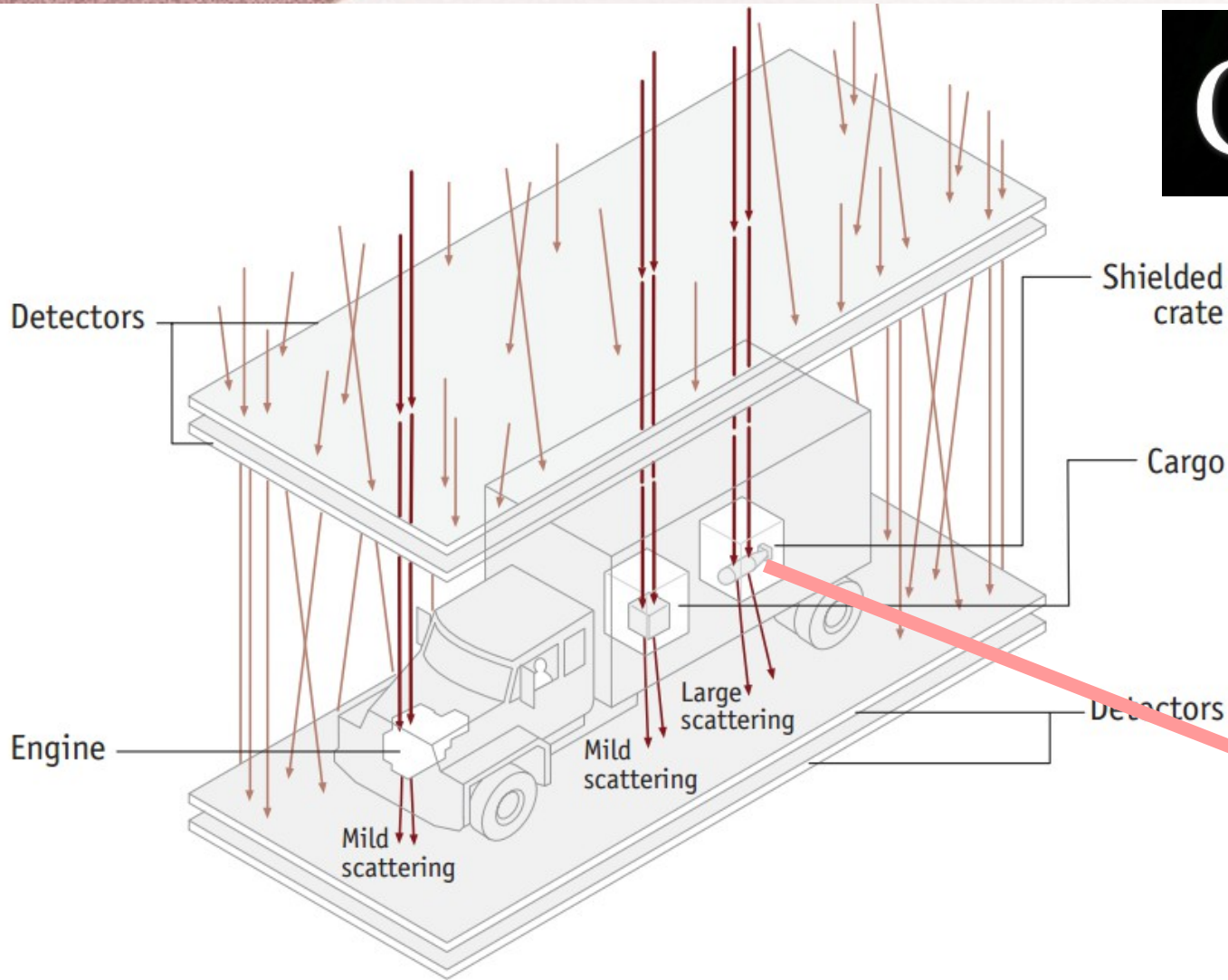
ScanPyramids: сканирование пирамиды Хеопса

15 октября 2016: первые результаты
в пирамиде есть **НОВЫЕ ПУСТОТЫ!**

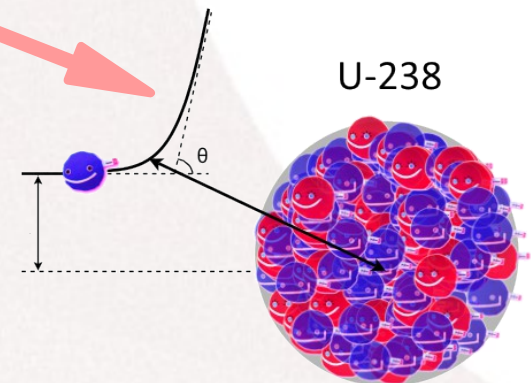


Рассеивающая мюонная радиография

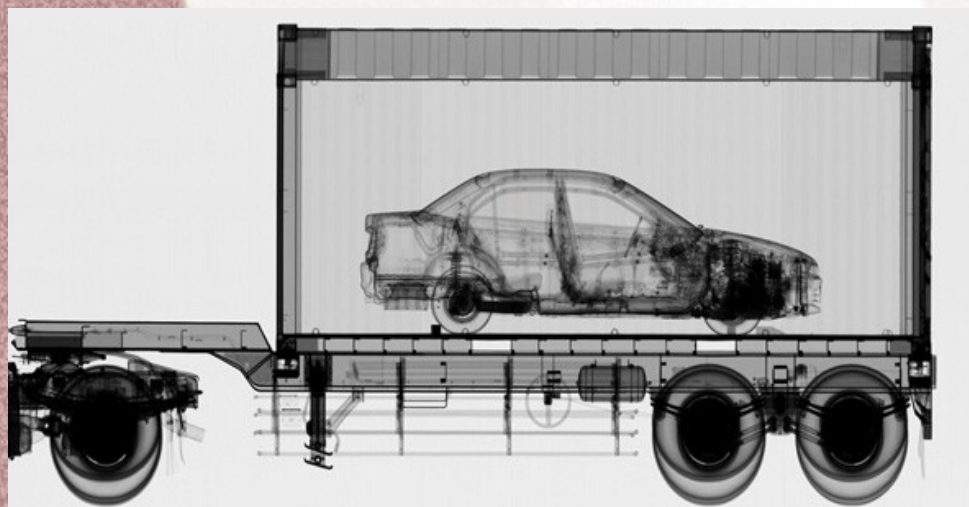
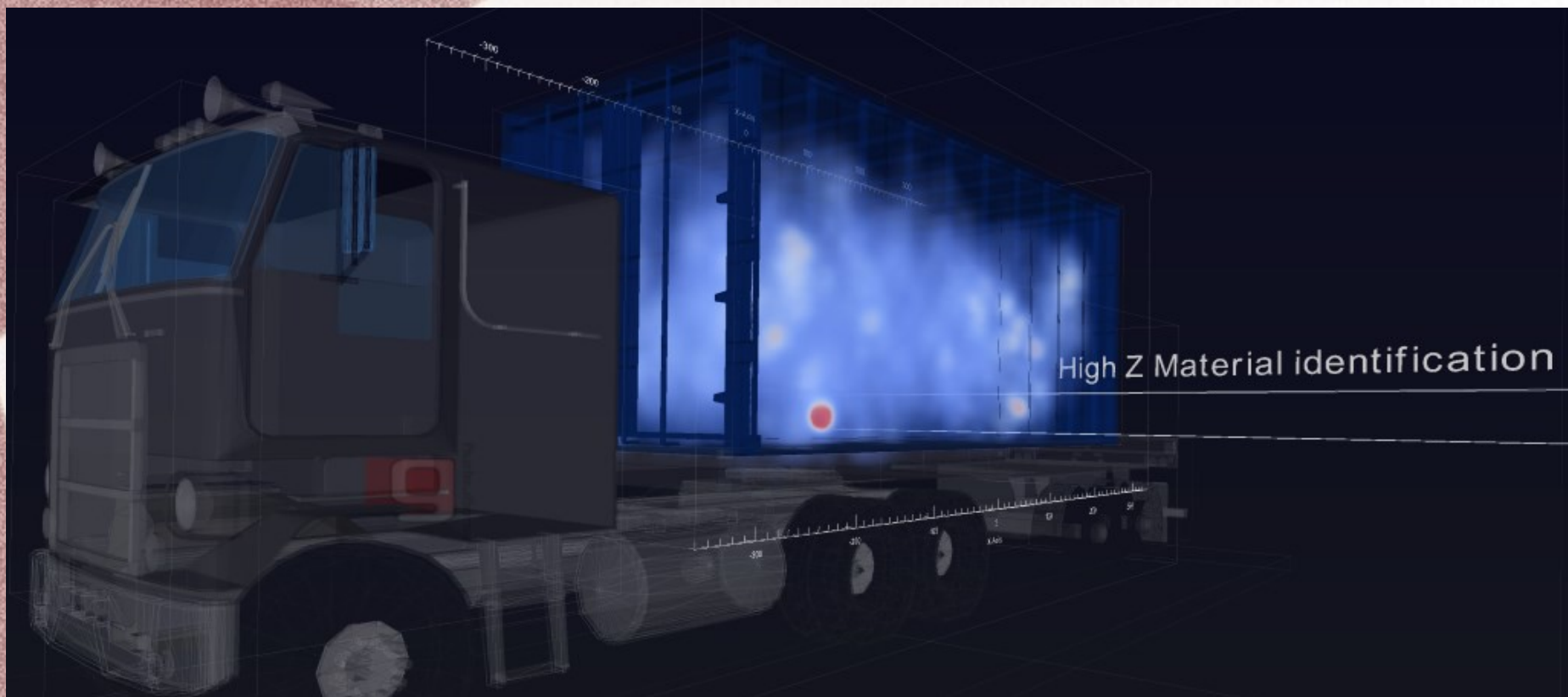
пассивное сканирование грузов и поиск ядерных материалов



Чем тяжелее ядро,
тем больше угол
рассеяния мюонов



Рассеивающая мюонная радиография



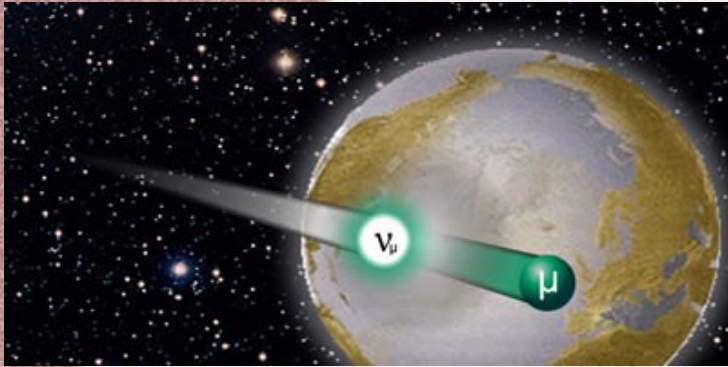
Для сравнения:
рентген/гамма радиография пробивает
20-40 см стали, выдает большую дозу
облучения, и очень затратна

Нейтрино

привидения микромира

Кто такие нейтрино

«Напарники» электрона, оставшиеся без электрического заряда



Чувствуют только слабое взаимодействие

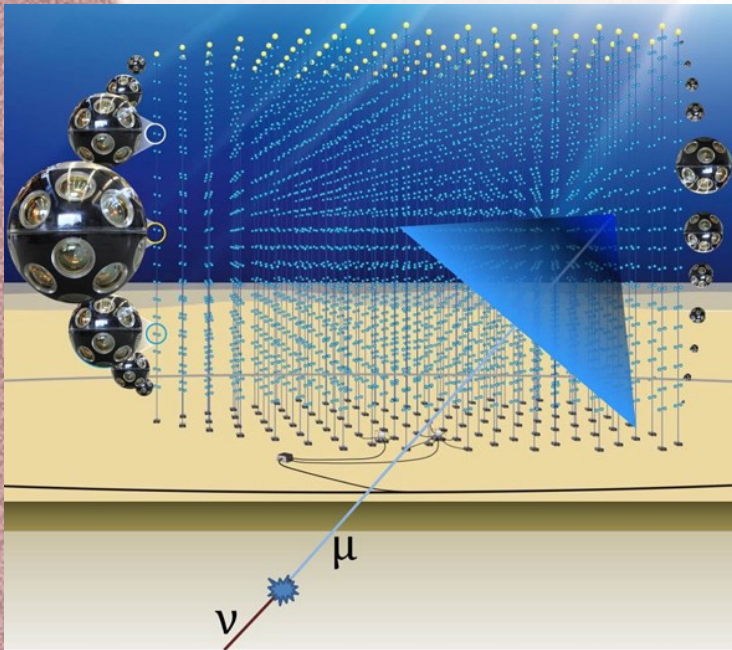
→ исключительно редко взаимодействуют с веществом; могут пролететь Землю насквозь, ни разу ни с кем не столкнувшись.

Рождаются при изменении типа частиц

→ Солнце, Земля, ядерные реакторы, атмосфера, сама Вселенная — все они **ярко светят нейтринами!**

Присутствуют вокруг нас в безумных количествах

→ поток солнечных нейтрино: 10^{11} шт/см²/с,
поток антинейтрино вблизи реактора:
 10^{13} шт/см²/с.



Кто такие нейтрино

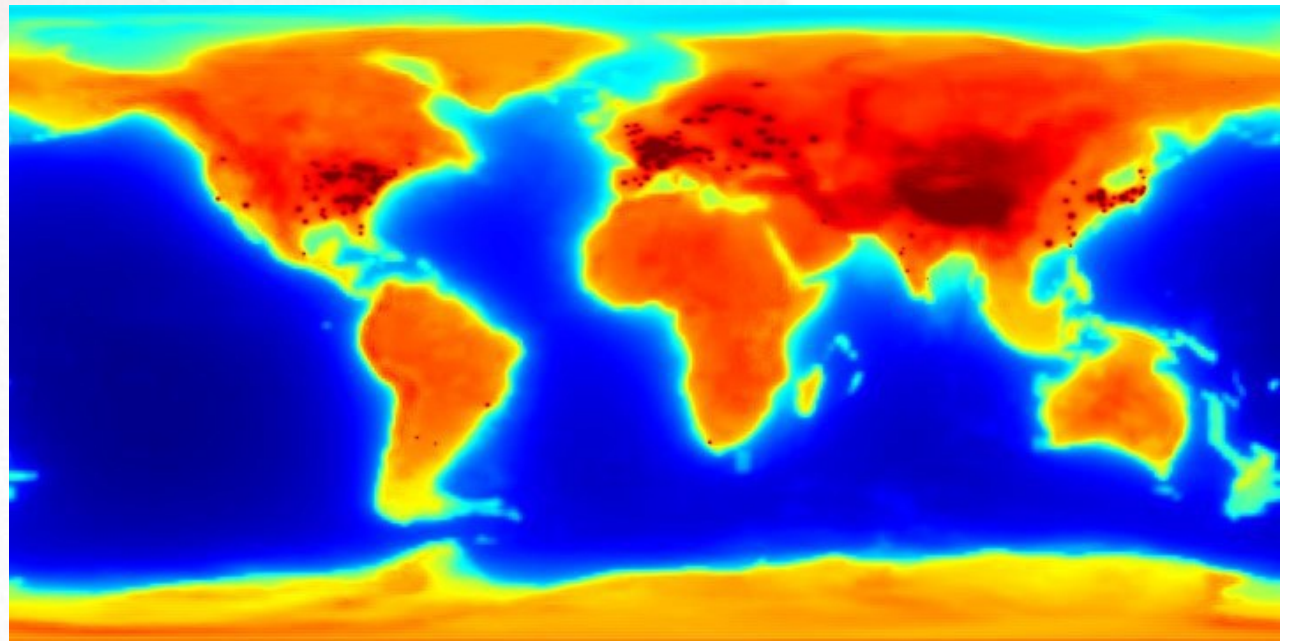
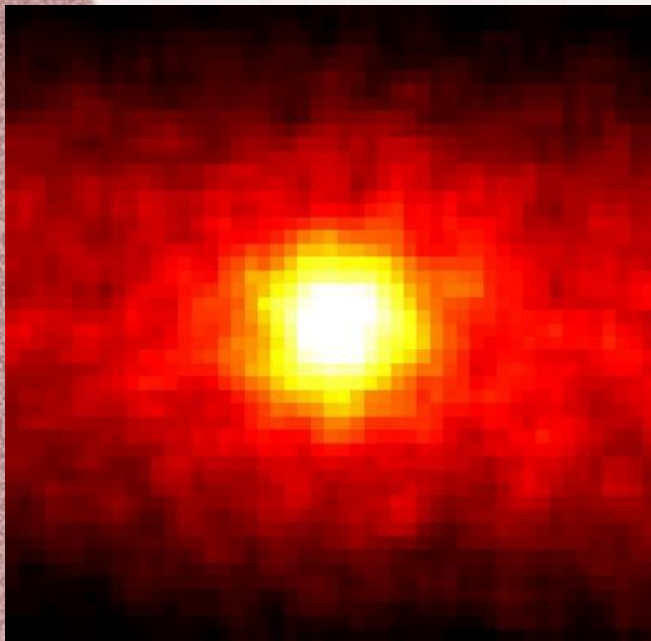
Огромные потоки × трудноуловимость
× безумная проникающая способность



нейтрино позволяют заглянуть внутрь

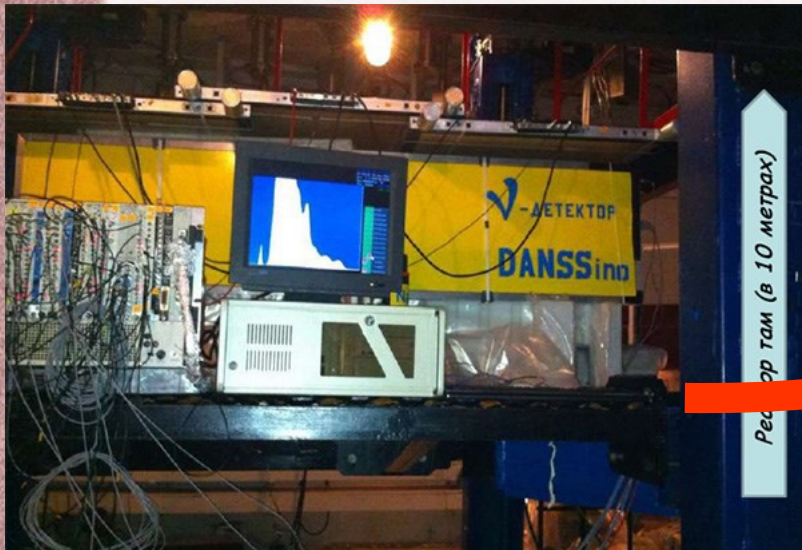
самых экстремальных процессов!

Но при этом требуют огромных усилий от экспериментаторов.



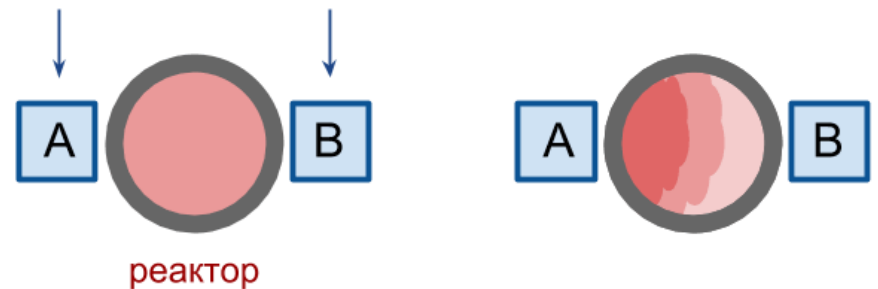
Мониторинг ядерного реактора

Нейтринный детектор
DANSS (ОИЯИ, Дубна)
на Калининской АЭС

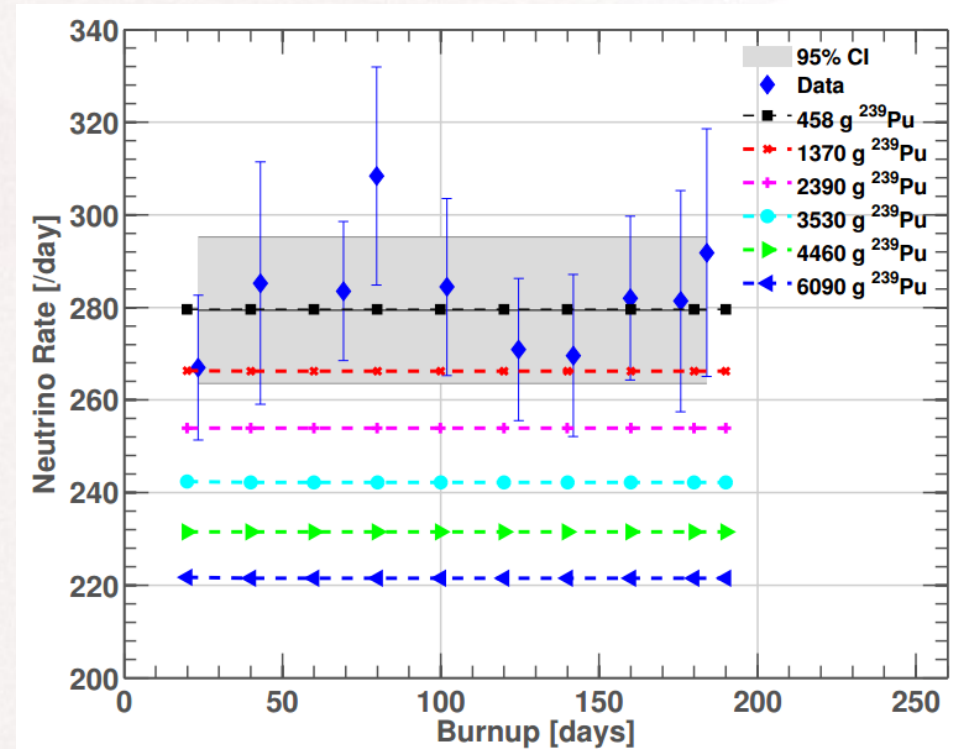
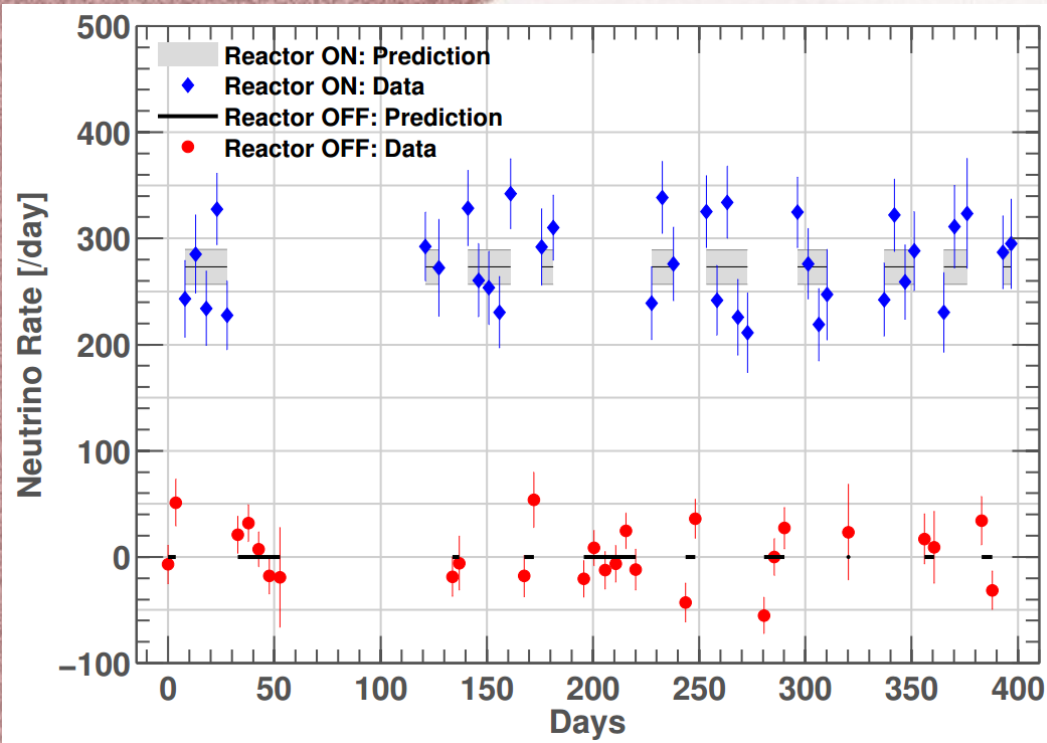


Дополнительная возможность: проверка
однородности выгорания топлива

нейтринные детекторы

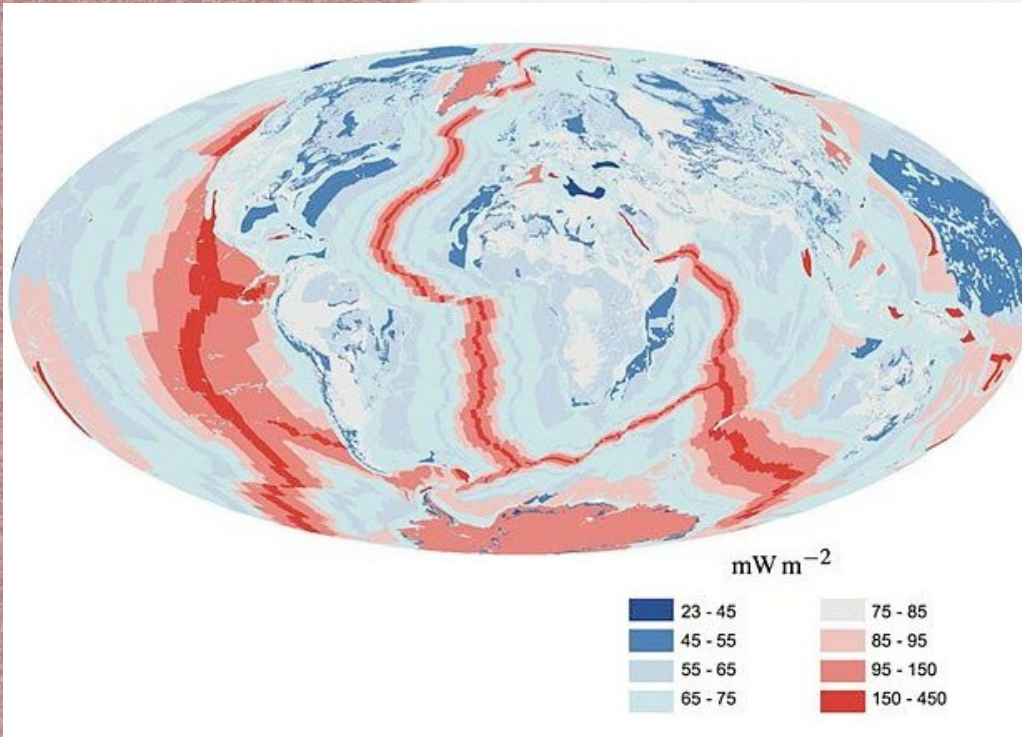


Мониторинг ядерного реактора



Данные нейтринного детектора Nucifer [2015]
(реактор Osiris, Франция)

Радиогенное тепло Земли



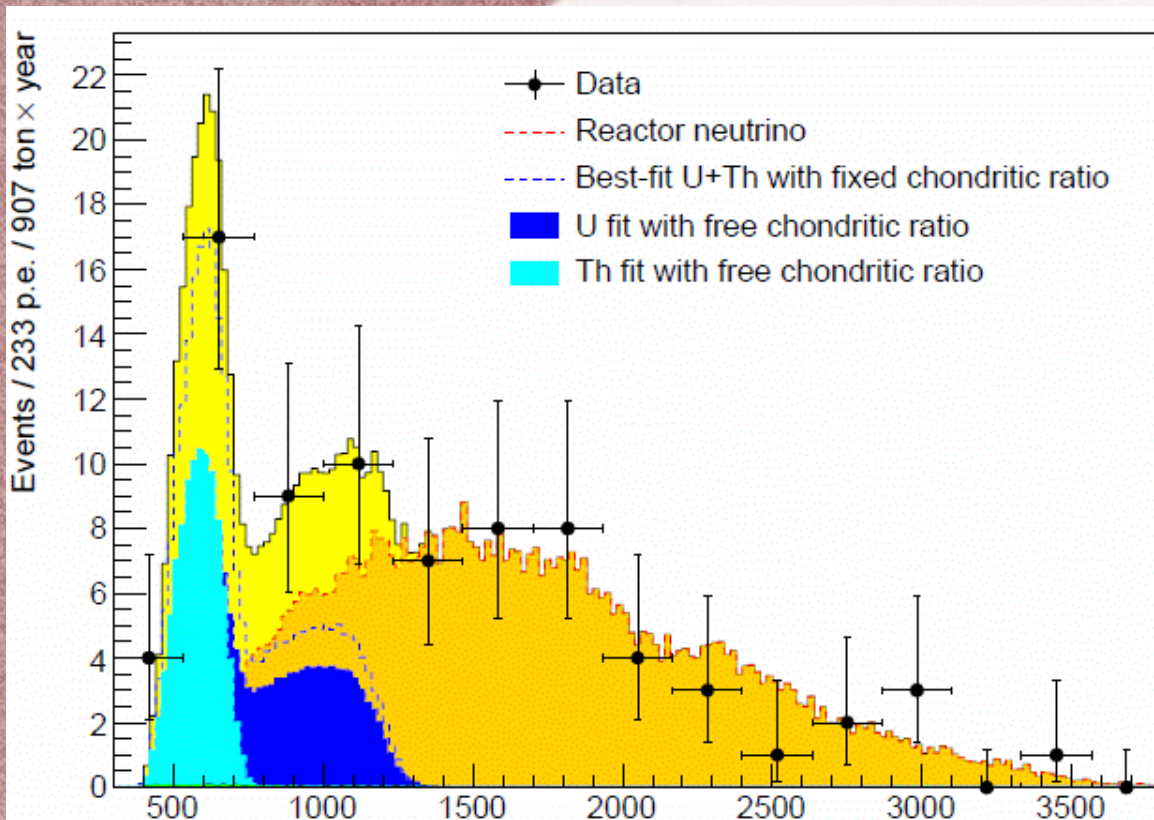
Полный тепловой поток из земных глубин: 47 ± 2 ТВт

Разделить на остаточное тепло и **радиогенный вклад** (распад U, Th, K) очень трудно.

Оценки радиогенного тепла еще несколько лет назад: $4-40$ ТВт

Загадку можно решить с помощью **геонейтрино**, которые порождаются той же цепочкой радиоактивных распадов

Радиогенное тепло Земли



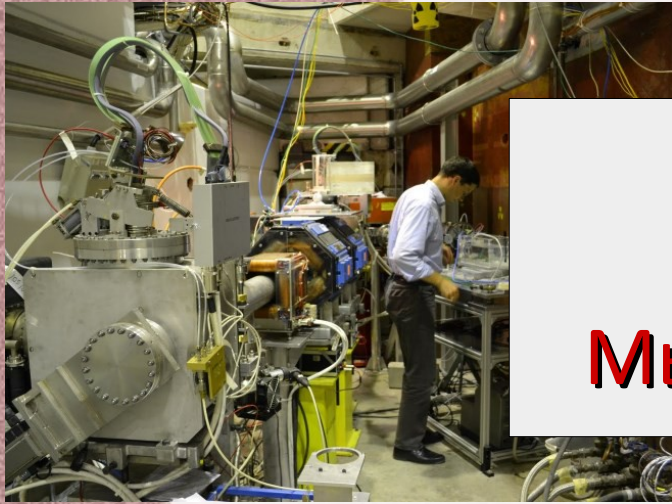
- знаем, какие элементы распадаются;
- знаем связь между нейтринным потоком и энерговыделением;
- знаем чувствительность детектора;
- умеем отличать геонейтрино.

Измеряем геонейтринный поток → **вычисляем радиогенное тепло**

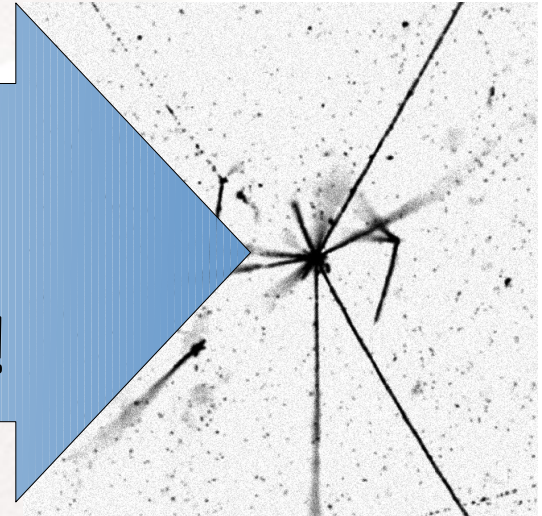
Результат детектора Borexino [2015]: радиогенный поток = **23-36 ТВт**

**Как возникли все эти
технологии?**

*Элементарные частицы — это грань Вселенной,
скрытая от нашей повседневности.*



Исходная цель —
фундаментальная наука
Мы хотим понимать мир!



Развитие инструментов
исследования

- **Ускорители** частиц
- **Детекторы** частиц
- **Теоретическое** описание

