

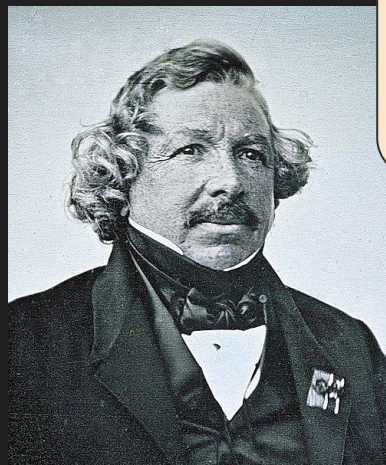
Прикладные применения элементарных частиц

Андрей Шешуков
ЛЯП ОИЯИ

Камчатская школа по физике элементарных частиц и
смежным темам

Сентябрь 2019

Восстановление справедливости



Луи Даггер 1831

Современные проблемы
требуют современных
решений



Мариетта Блау 1925



Ричард Меддокс 1871

Восстановление справедливости

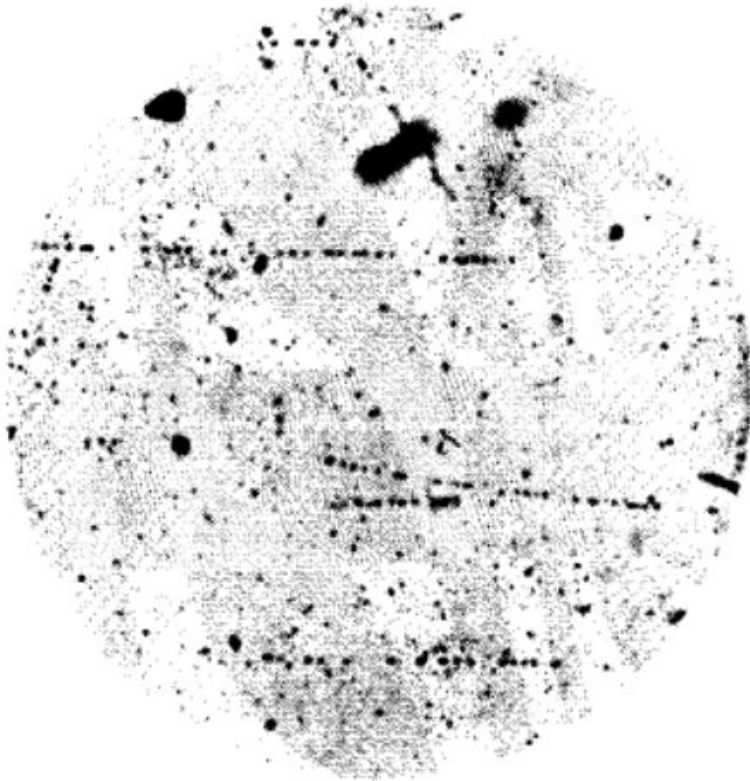
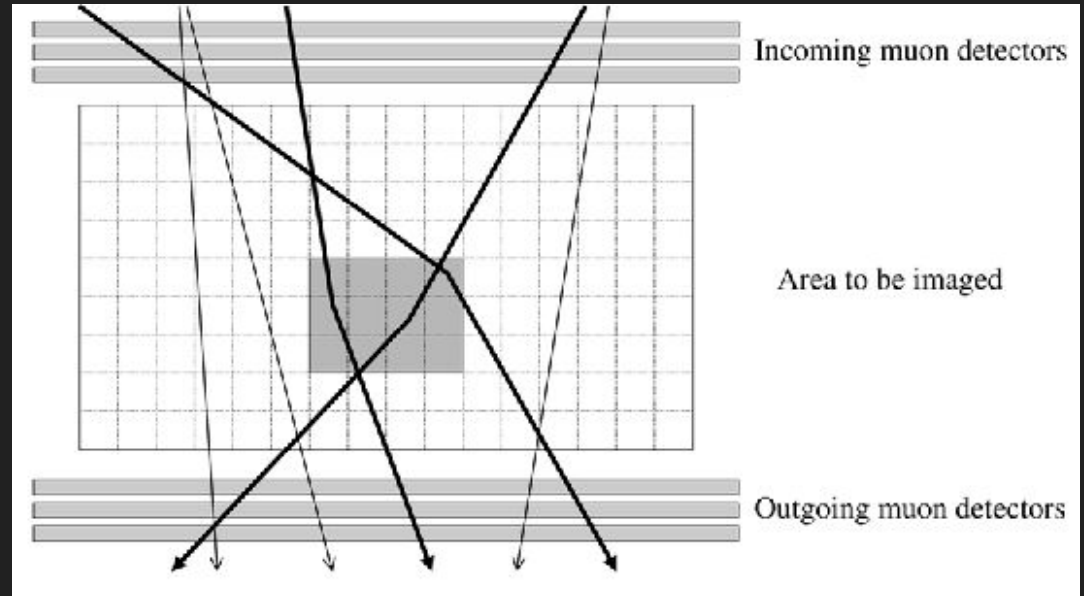


Figure 3.1 Blau and Wambacher, star (1937). Blau and Wambacher's first golden event was a nuclear "star" with eight tracks, found in emulsion exposed on the Hafelekar near Innsbruck. Because of the angles of the tracks, only some of them could be put into focus simultaneously. The emulsion itself was 70 microns thick. Source: Blau and Wambacher, "Disintegration Processes." Reprinted with permission from *Nature* 140 (1937): 585, © 1937 Macmillan Magazines Limited.

Томография с помощью рассеянных мюонов

- Измеряем угол входящего мюона и выходящего
- Реконструируем области, где, возможно, произошло рассеяние
- Можно отделять тяжёлые (high Z) от лёгких (low Z) материалы



Можно исследовать более мелкие объекты (т.е. которые можно обложить детекторами)

Множество применений!

Рассеяние заряженной частицы в веществе

Формула Резерфорда для рассеяния частицы в электрическом поле.

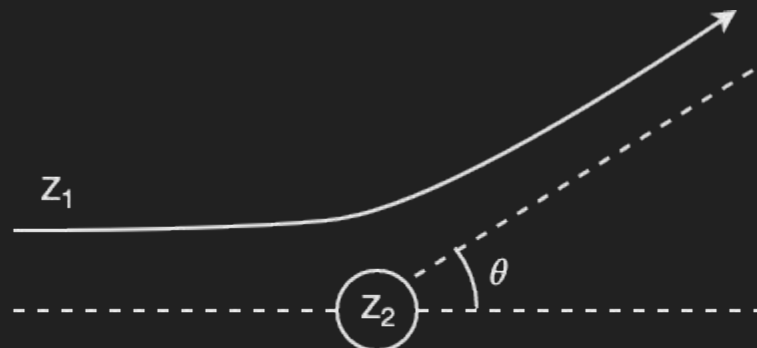
Пролетая через вещество, частица испытывает множество таких рассеяний.

Как будет распределён угол отклонения после множества рассеяний?

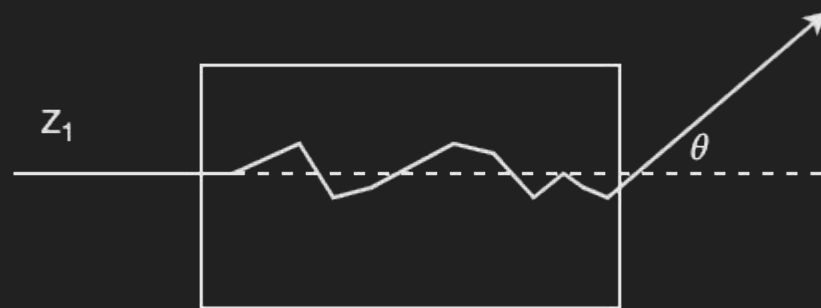
$$\theta_{rms} \sim \frac{Z_1}{p} \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

$$X_0 \sim \frac{A}{Z(Z+1)}$$

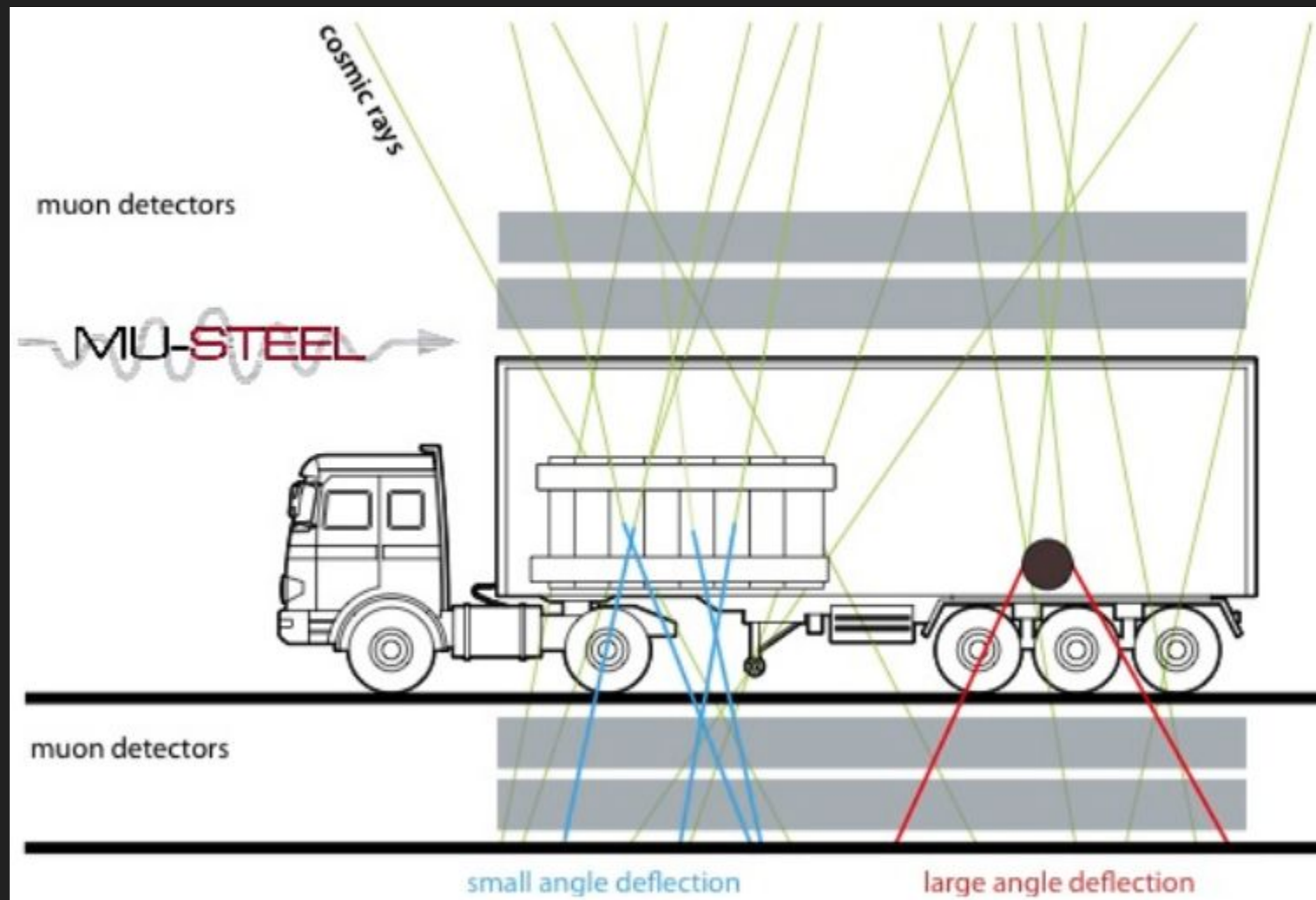
То есть, измеряя средний угол рассеяния мы можем определить радиационную длину.



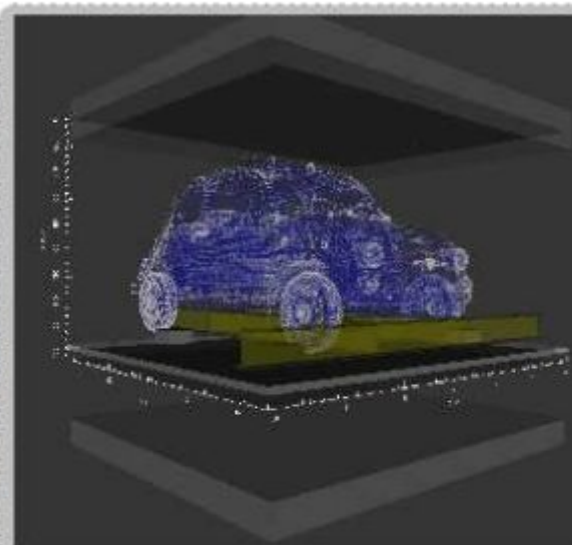
$$\frac{d\sigma}{d \cos \Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e}{2mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \theta}$$



Контроль грузов (машин, контейнеров)

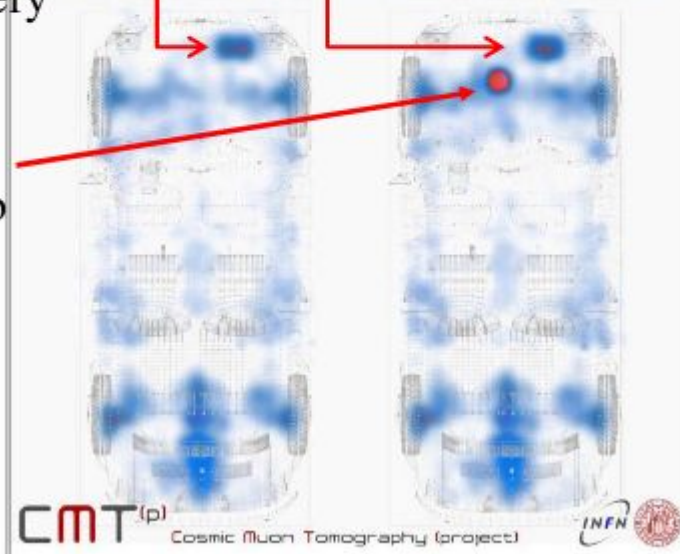


A tomographic image of an original FIAT "500"!



Battery

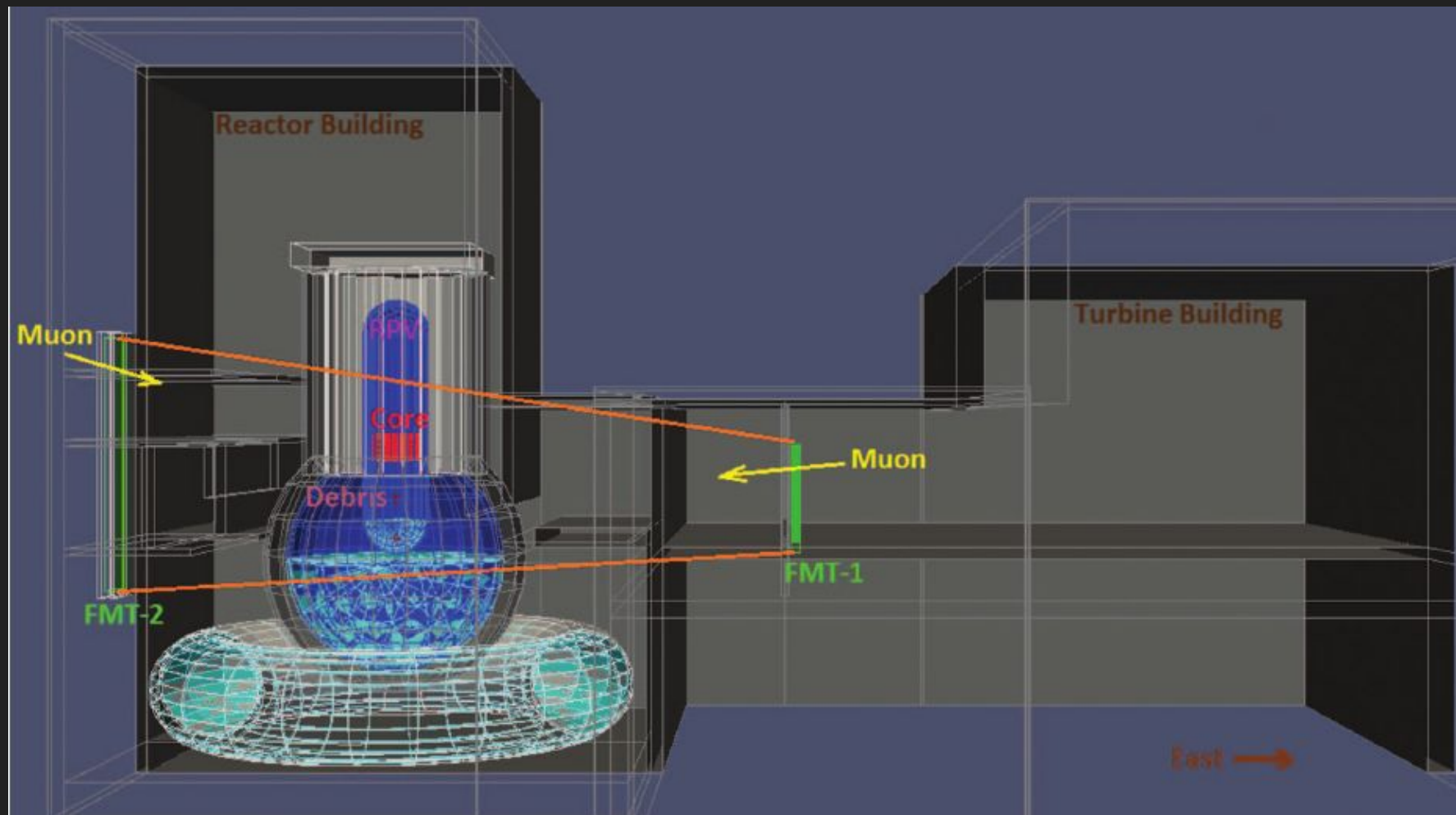
11 Pb



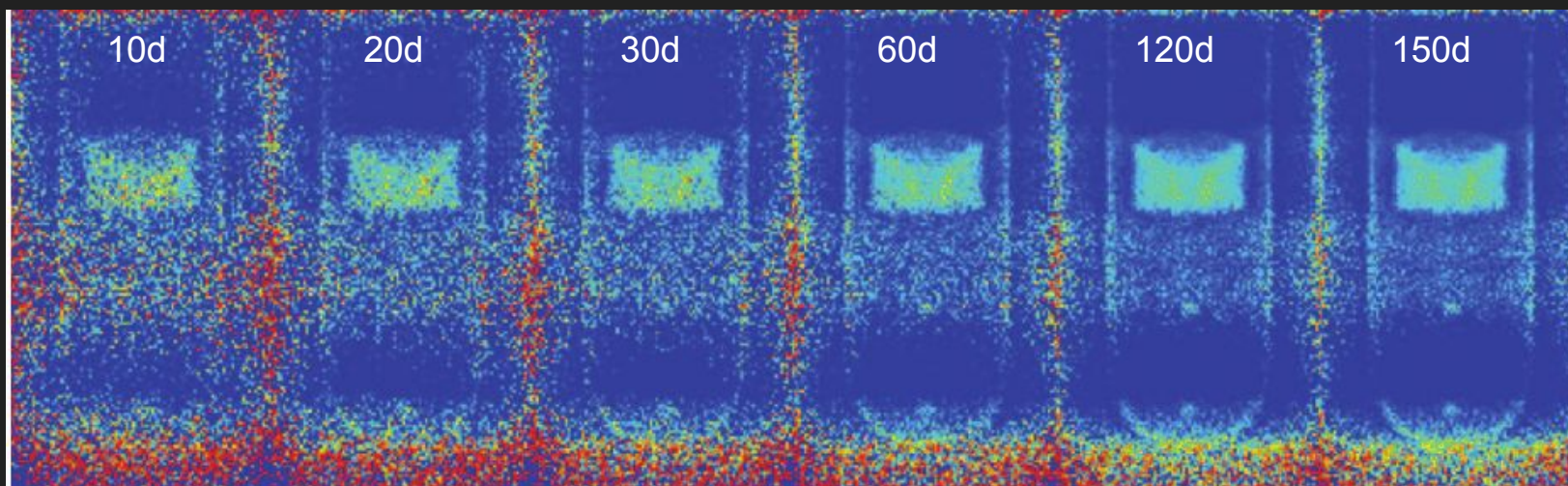
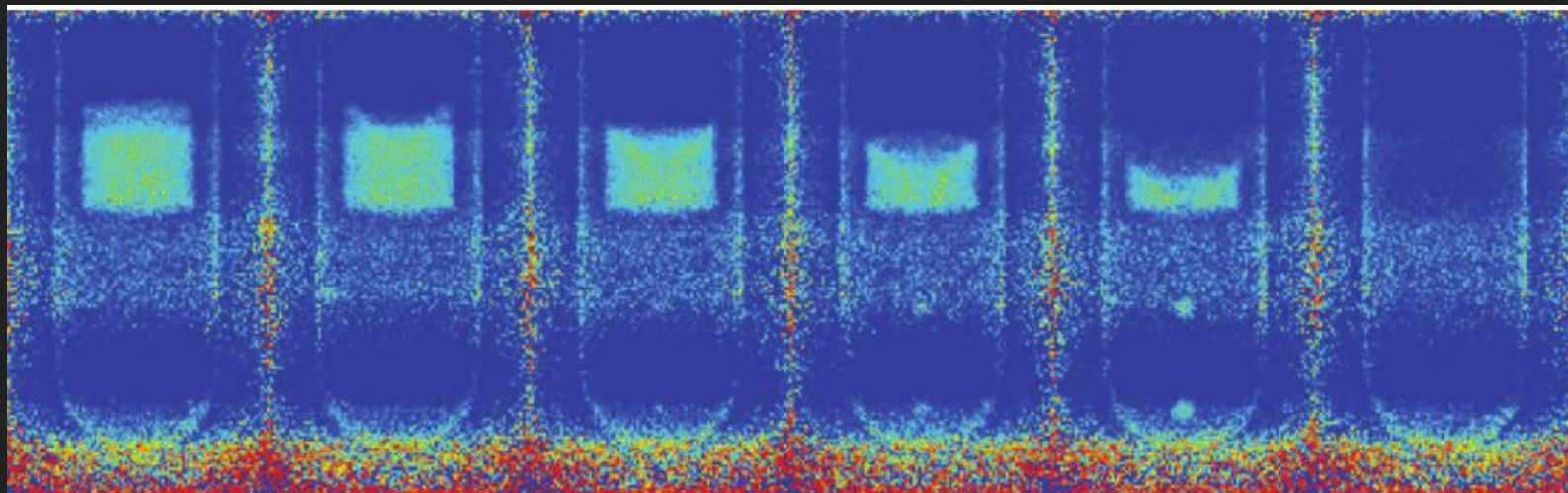
F. Gonella, M. Furlan, A. Rigoni, S. Vanini, G. Zumerle, P.C.



Исследование ядра реактора на Фукусиме



Исследование ядра реактора на Фукусиме

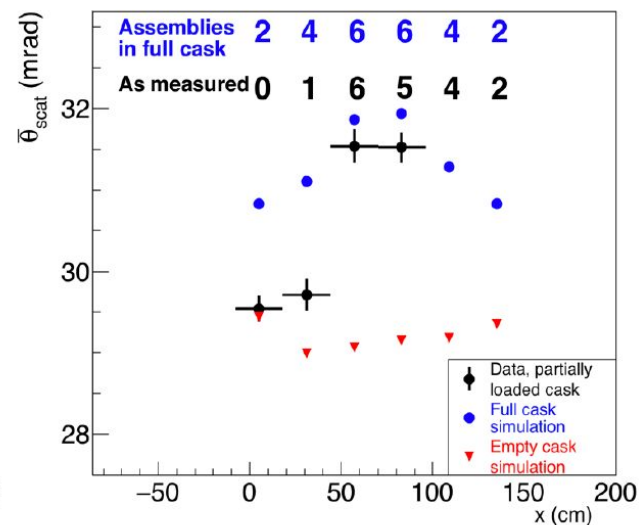
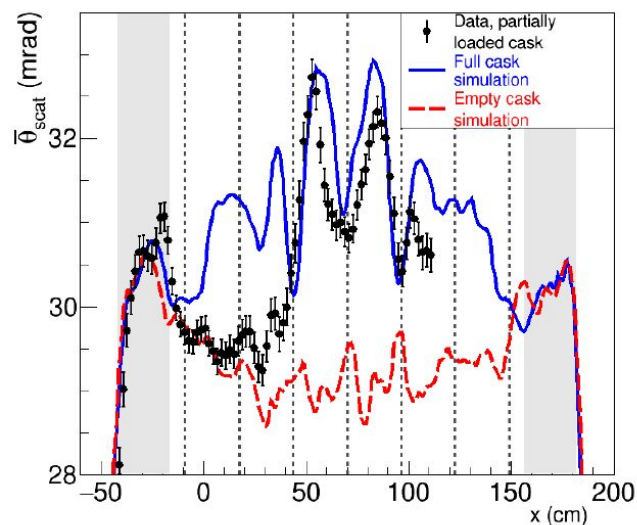
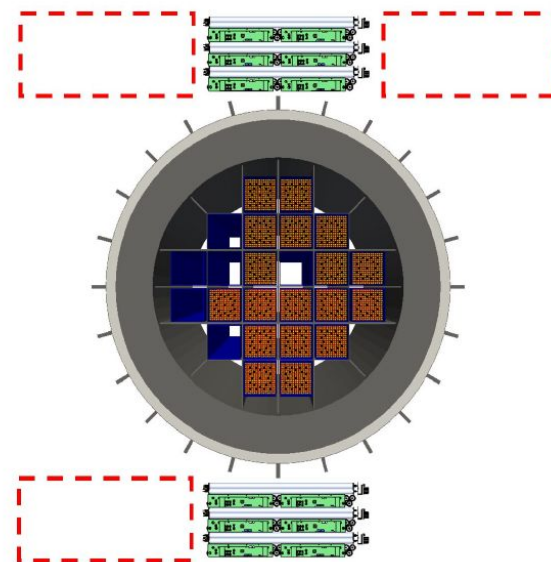
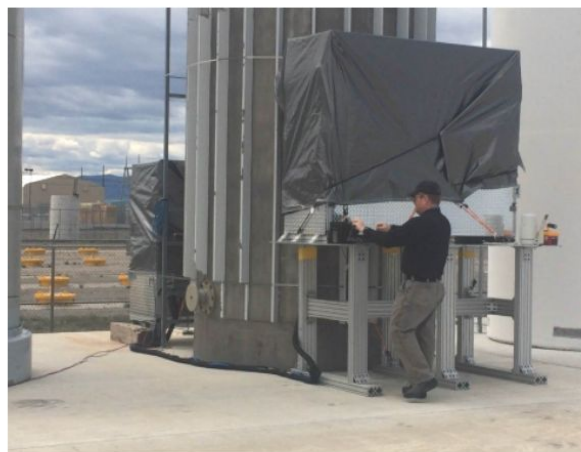


Мониторинг отработанного ядерного топлива

ОЯТ хранят и транспортируют в специальных экранирующих цистернах.

Вскрывать их опасно. Чтобы узнать содержимое, нужно поместить топливо обратно на реактор в воду.

С помощью мюонов можно изучить содержимое.



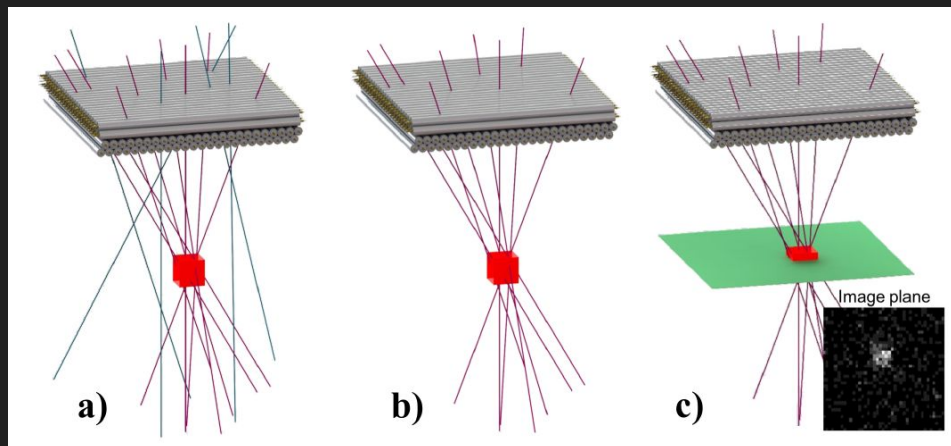
Мюоны, таггированные нейтроном

Мюон может захватываться атомом, который при этом испускает быстрый нейтрон.

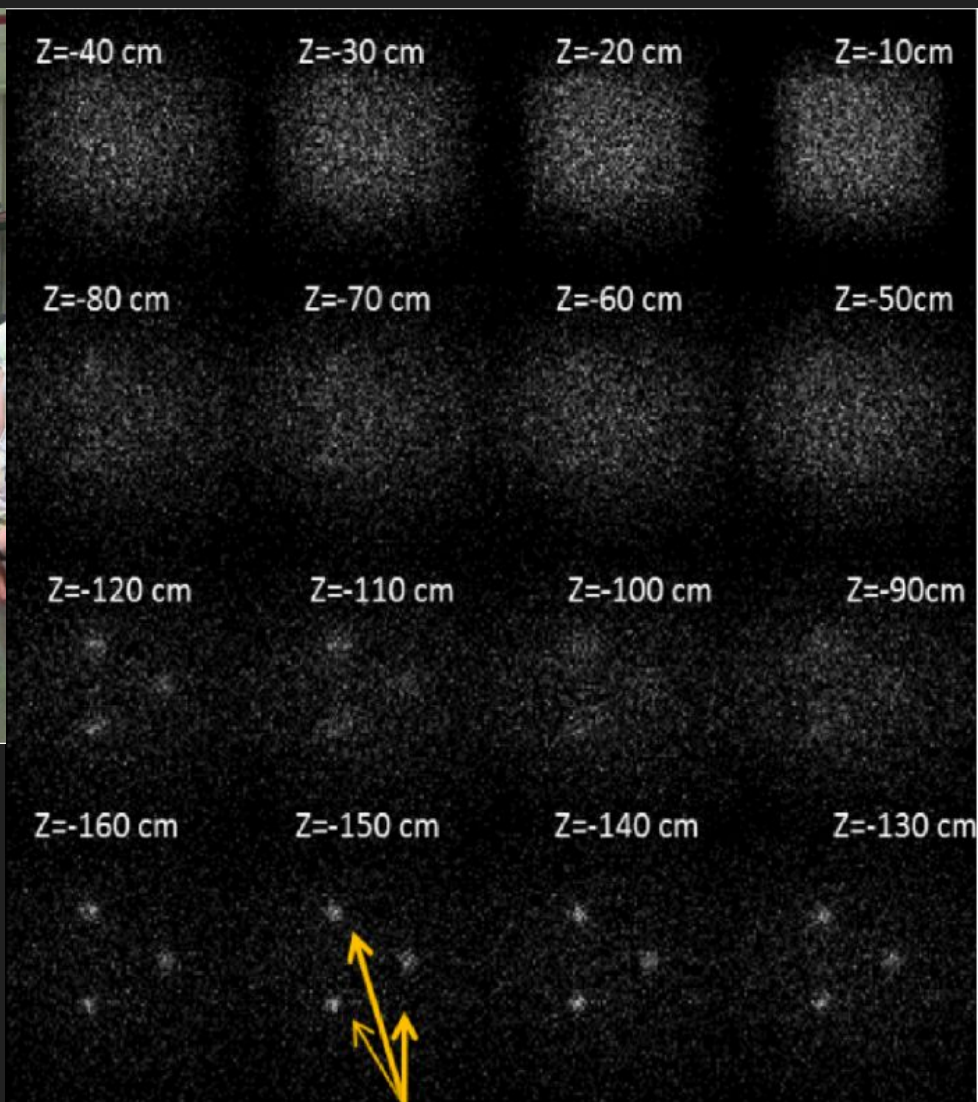
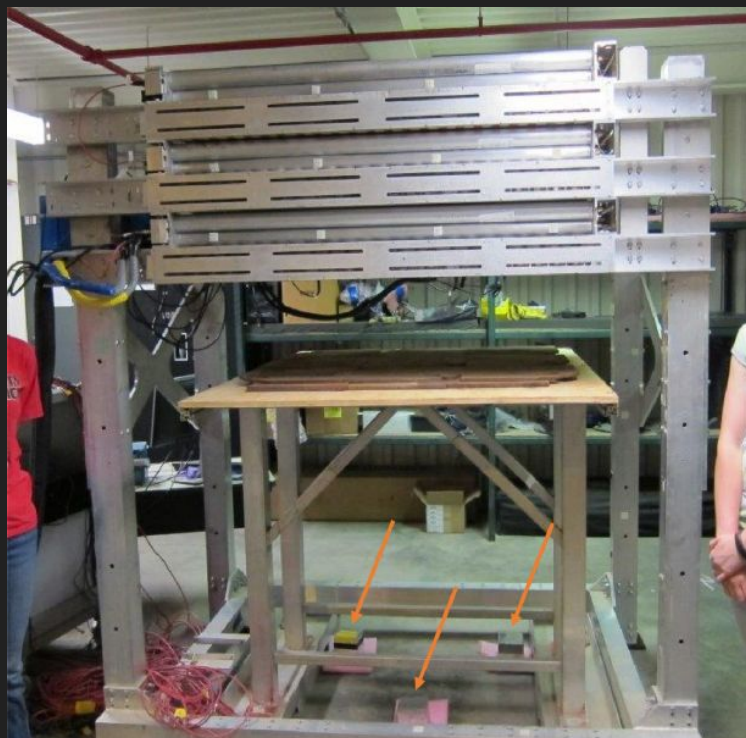
Детектируем мюон и нейтрон.

Если мюон совпал по времени с нейтроном ($\sim 70\text{-}80\text{нс}$ для урана), значит уран есть где-то на линии мюона.

После набора статистики таггированных мюонов, можно найти места с ураном.

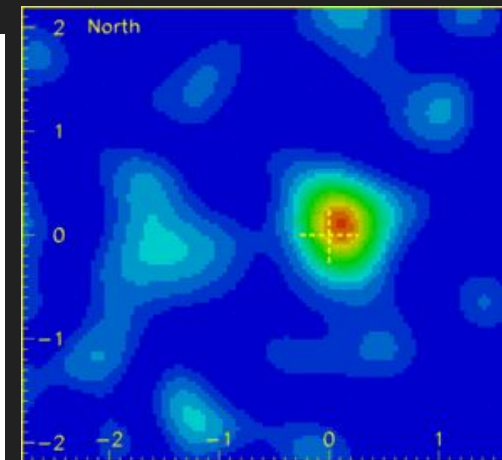
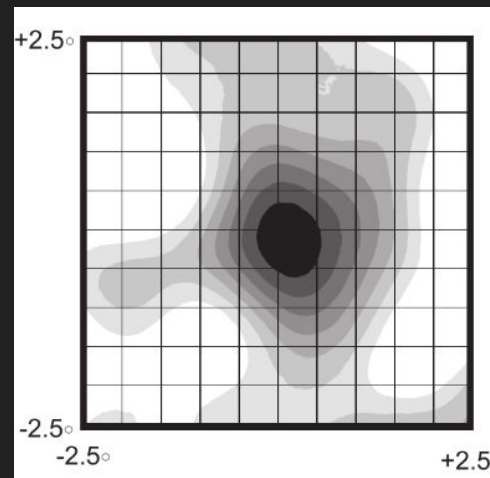
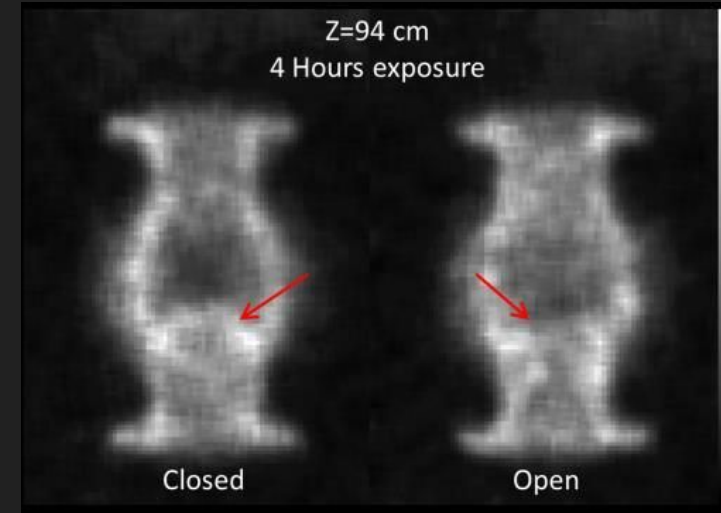


Мюоны, таггированные нейтроном



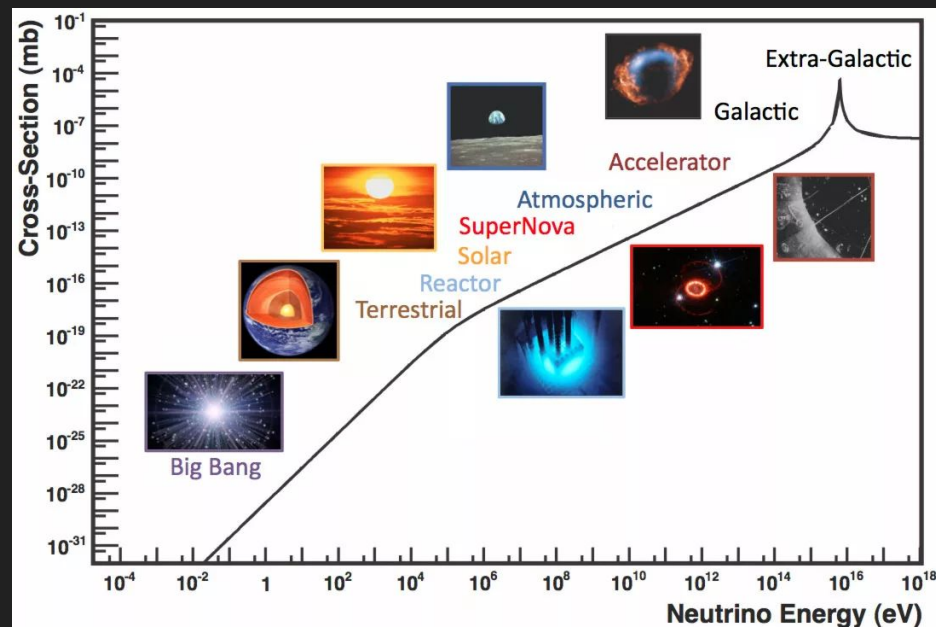
Другие примеры мюонной томографии/радиографии

- Сканирование инженерных сооружений
 - захоронения ядерных отходов и т.п.
- Сканирование кораблей, заходящих в порт
 - Детекторы располагаются под водой
- Мониторинг ядерных боеголовок
 - Детектор мюонов+нейтронов над шахтой ракеты
- Можно поставить на марсоход и изучать марсианские горы!
- И т. д.



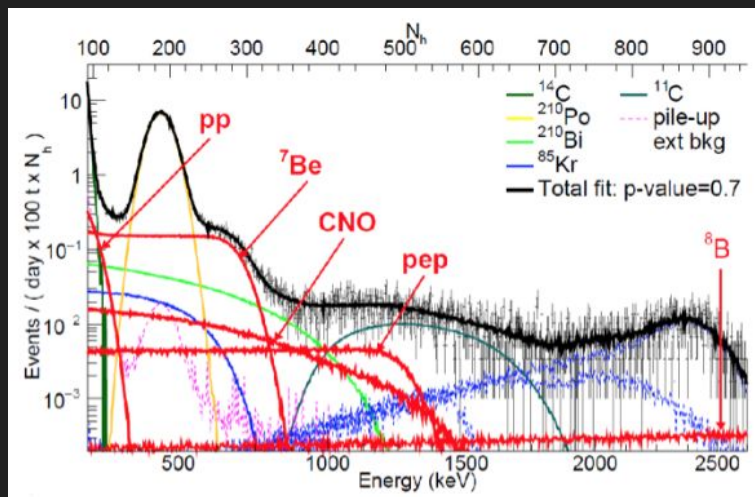
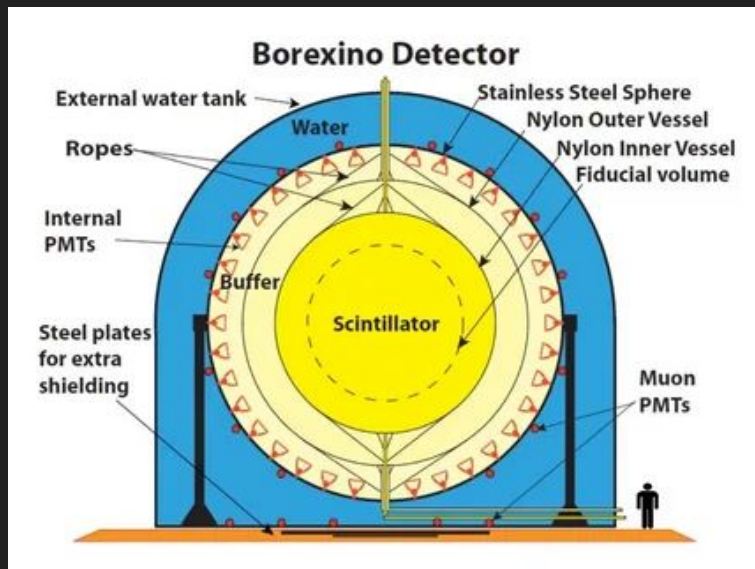
Нейтрино

- Электрически нейтральны
- Имеют очень малую массу
- Стабильны
- Очень слабо взаимодействуют
 - свободный пробег $\sim 10^{11} R_{\text{Земли}}$
 - требуют очень массивных детекторов
- Осциллируют! Детектируются не то, что родились
- Окружают нас, летят из разных источников

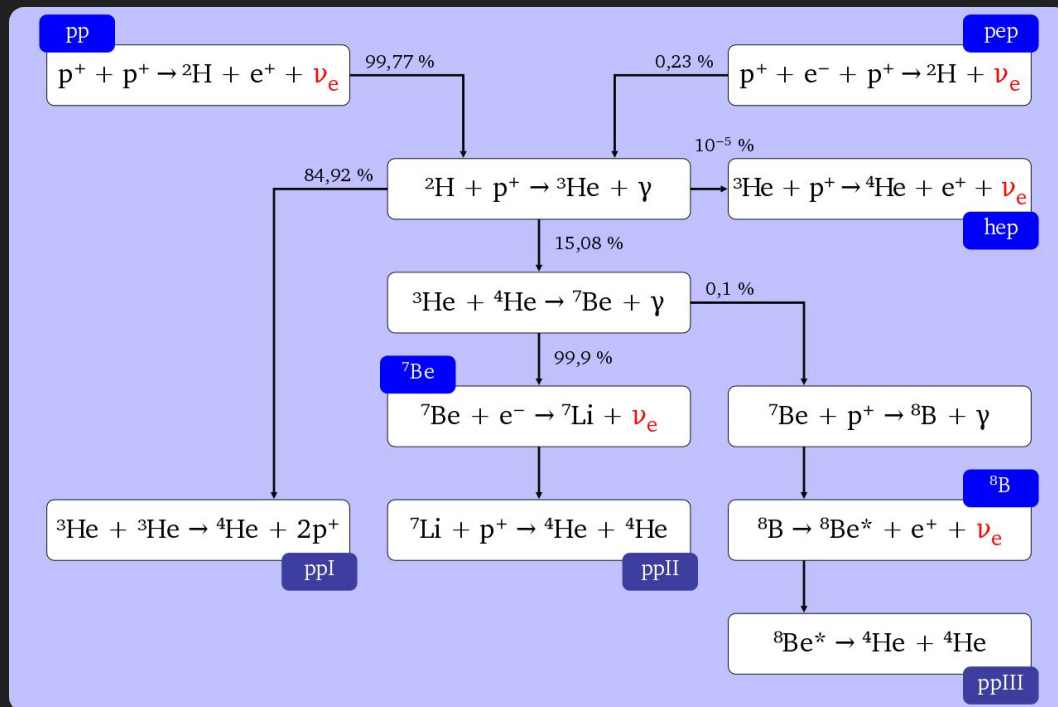


Ну и как такое можно использовать практически?

Проверка солнечных моделей с помощью нейтрино



Эксперимент Borexino смог с высокой точностью измерить потоки нейтрино из разных цепочек реакций в Солнце.



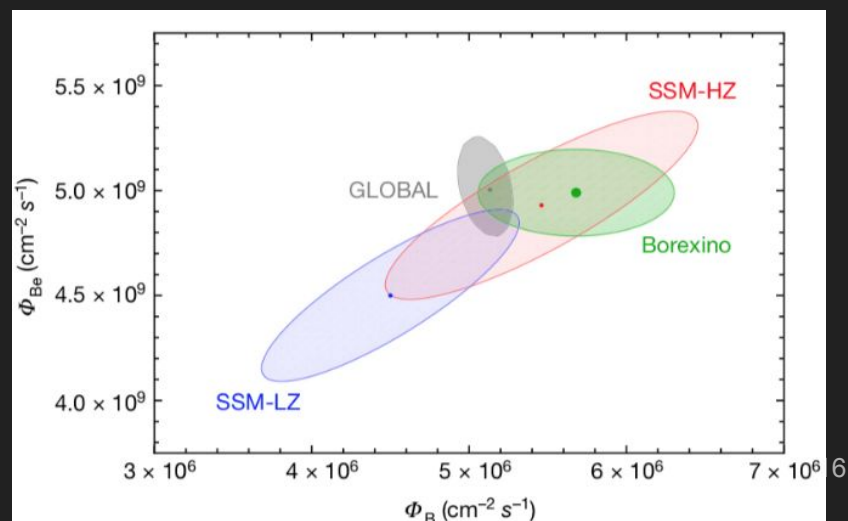
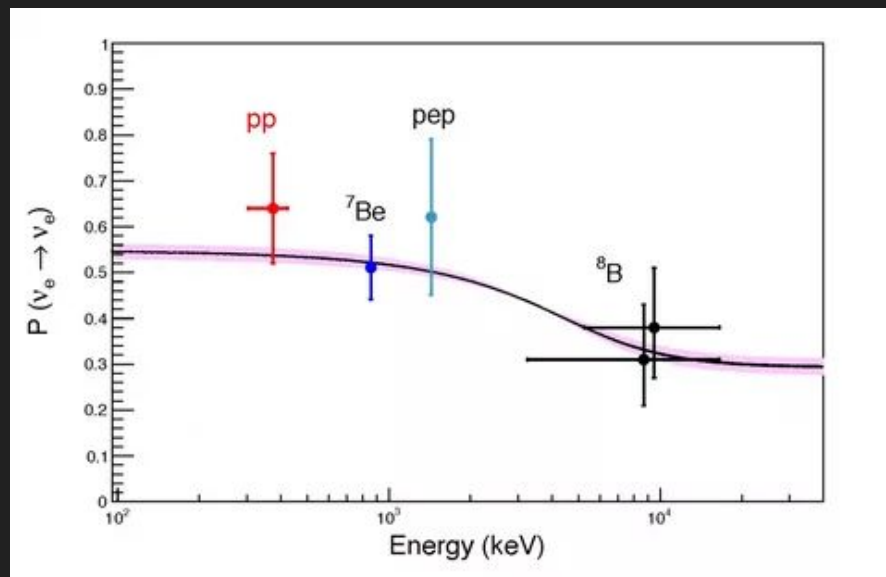
Проверка солнечных моделей с помощью нейтрино

Две основные солнечные модели предсказывают разную “металличность” Солнца - т.е. разное количество тяжёлых элементов ($> \text{He}$).

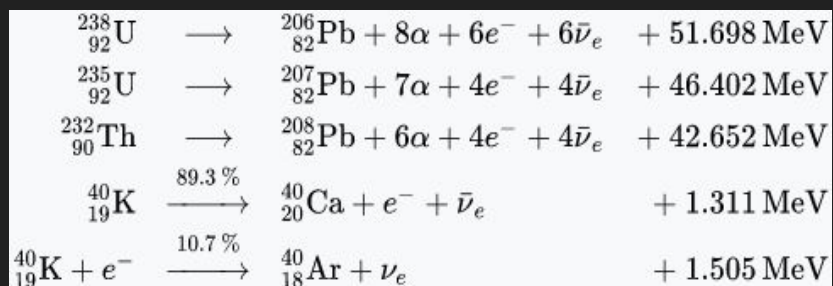
По измеренным потокам В и Ве нейтрино можно проверить эти модели.

Не забываем сделать поправку на нейтринные осцилляции!

По результатам Borexino модель с высокой металличностью более предпочтительна.

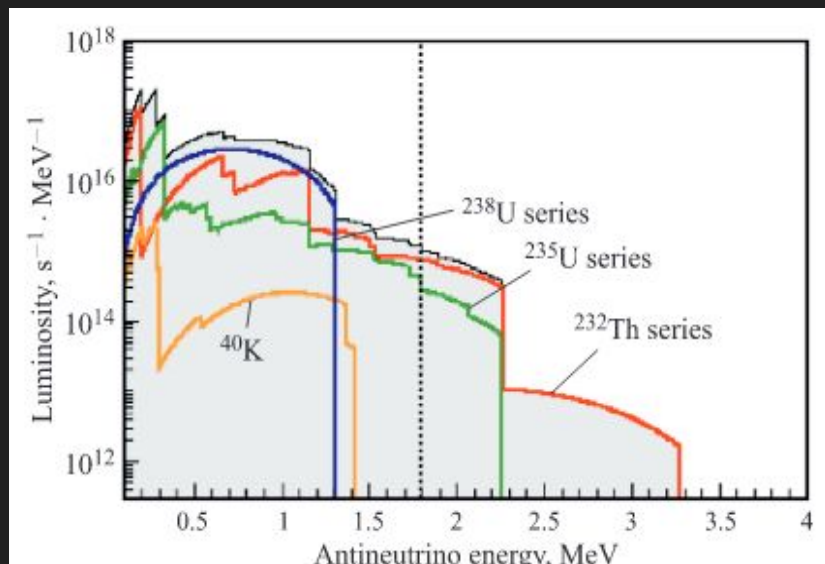


Нейтрино от Земли (геонейтрино)

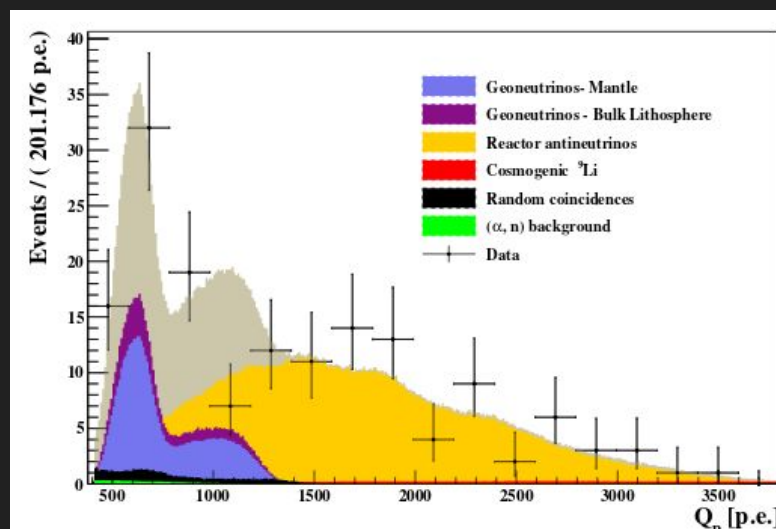


В коре и мантии Земли происходят радиоактивные распады с рождением нейтрино.

Всё, кроме нейтрино, переходит в тепловую энергию Земли.



Детектирование геонейтрино позволит оценить радиогенное тепло Земли H_{rad}



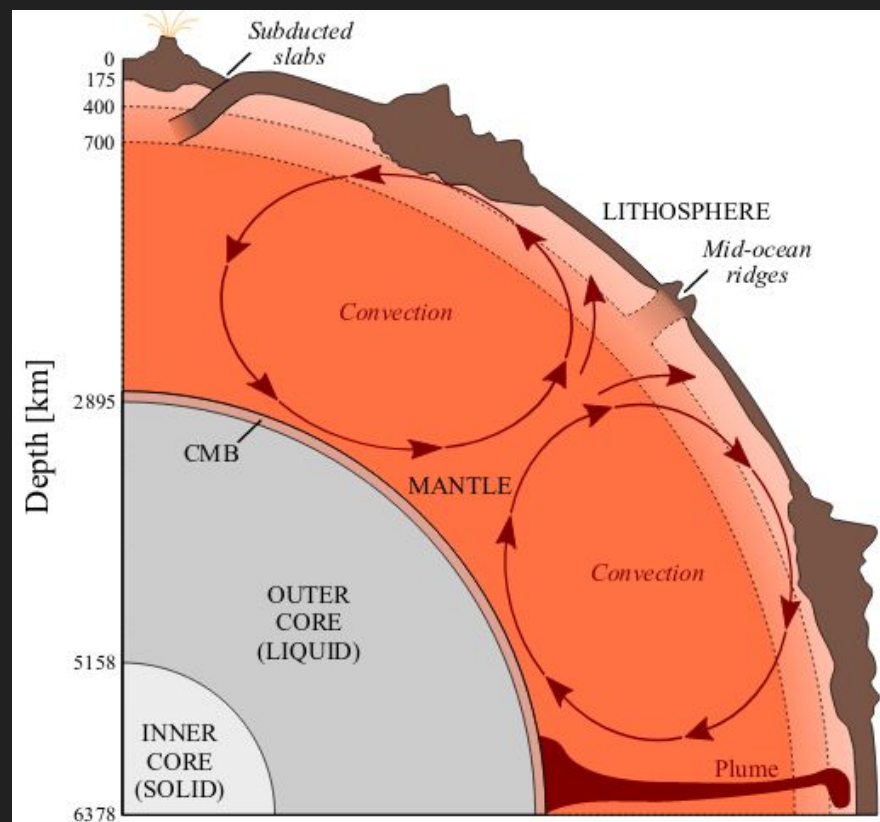
Проверка моделей образования Земли

Земля излучает около 47 ТВт тепла.

Какая часть даётся радиоактивными распадами? Откуда происходит оставшаяся часть?

Уран и торий должны быть в основном в коре, но разные модели предполагают и различные концентрации и распределения в мантии.

Есть модель, предполагающая что уран и торий скопились в ядре в одном месте - природный ядерный реактор!



Проверка моделей Земли

Model	$H_{\text{rad}}(\text{U})$ [TW]	$H_{\text{rad}}(\text{Th})$ [TW]	$H_{\text{rad}}(\text{K})$ [TW]	$H_{\text{rad}}(\text{U+Th+K})$ [TW]
J	4.8	4.6	2.0	11.3
L & K	6.8	6.7	2.6	16
T	7.2	7.5	2.4	17
M & S	8.0	8.5	3.2	19.7
A	8.0	8.2	2.0	18.2
W	8.0	8.0	3.2	19.1
P & O	8.8	8.9	3.5	21.1
T & S	13.9	14.9	4.7	33.5
<i>CC</i>	4.8 ± 0.8	4.6 ± 0.4	2.0 ± 0.4	11.3 ± 1.6
<i>GC</i>	8.0 ± 1.6	8.5 ± 1.4	3.8 ± 0.8	20.2 ± 3.8
<i>GD</i>	13.9 ± 1.6	14.9 ± 1.5	4.7 ± 0.5	33.5 ± 3.6
<i>FR</i>	19.4 ± 0.8	20.2 ± 0.8	7.5 ± 0.3	47 ± 2

$$UR_{CV} = \frac{H_{\text{rad}} - H_{\text{rad}}^{CC}}{H_{\text{tot}} - H_{\text{rad}}^{CC}}$$

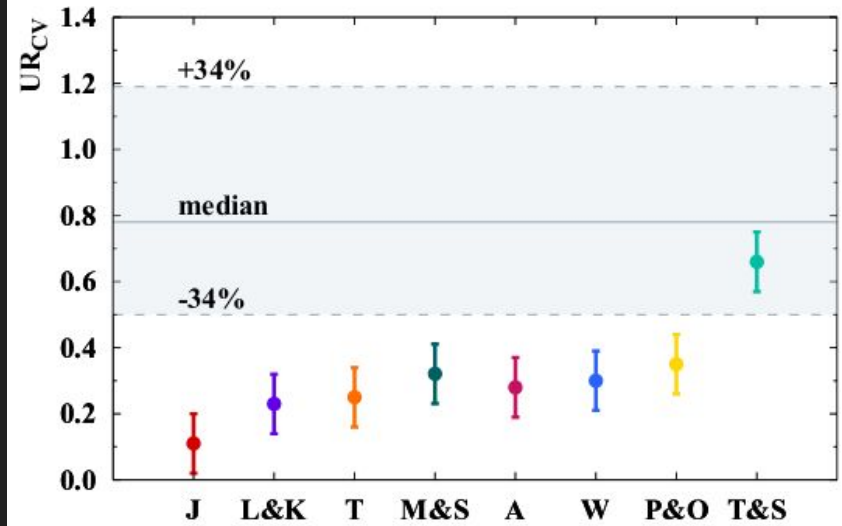


FIG. 55. Comparison of Borexino constraints (horizontal band) with predictions of the BSE models (points with $\pm 3\sigma$ error bars, Table VII) for the convective Urey ratio UR_{CV} (Eq. 6), assuming the total heat flux $H_{\text{tot}} = (47 \pm 2) \text{ TW}$ and the radiogenic heat of the continental crust $H_{\text{rad}}^{CC} = 6.8^{+1.4}_{-1.1} \text{ TW}$ (Table V).

Нейтрино от ядерных реакторов

Neutrino experiments at Kalinin NPP

- Pressurised Water Reactor (ВВЭР-1000)
- Thermal Power: 3 100 MW
- Neutrino Flux: $\sim 6 \times 10^{20} \bar{\nu}_e / 4\pi / \text{day}$
- Campaign: 18 months

(Tver region, 285 km NW from Dubna)

GEMMA
(Neutrino Magnetic Moment)

VGeN
(Coherent ν -Ge scattering)

DANSS
(reactor monitoring and search for sterile neutrino oscillations)

Электронные антинейтрино рождаются при делении ядер в реакторах.

Существует множество экспериментов, изучающих реакторные нейтрино.

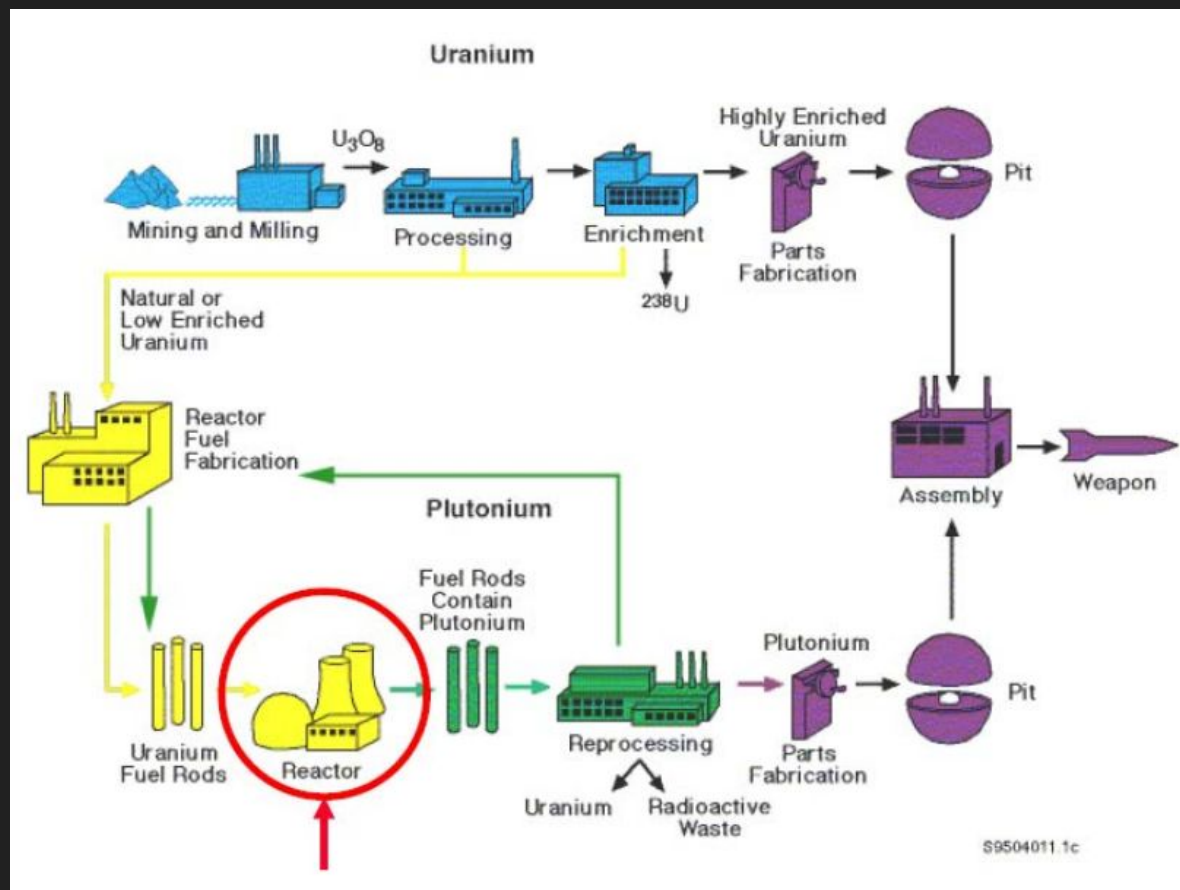
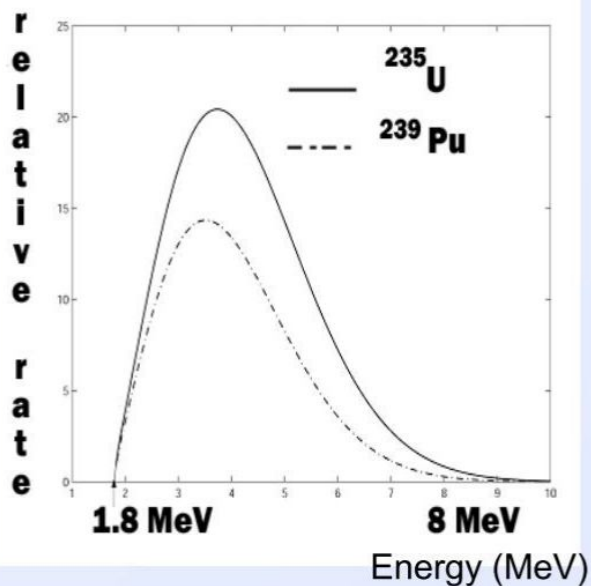
С другой стороны, можно изучать реакторы с помощью нейтрино.

Поток нейтрино зависит от состояния ядерного топлива (стадии выгорания), тепловой мощности реактора и других параметров.

Мониторинг состава ядерного топлива

Реактор нарабатывает плутоний в процессе работы.

Это меняет поток антинейтрино.

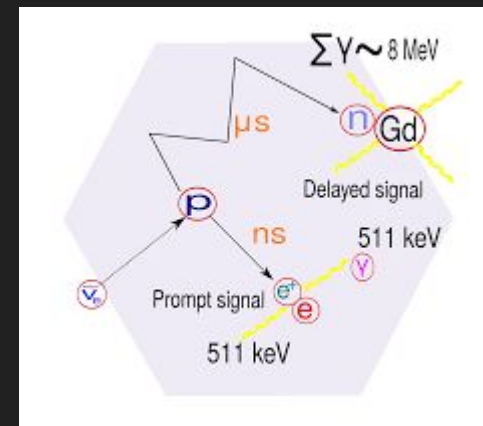


Мониторинг ядерных реакторов

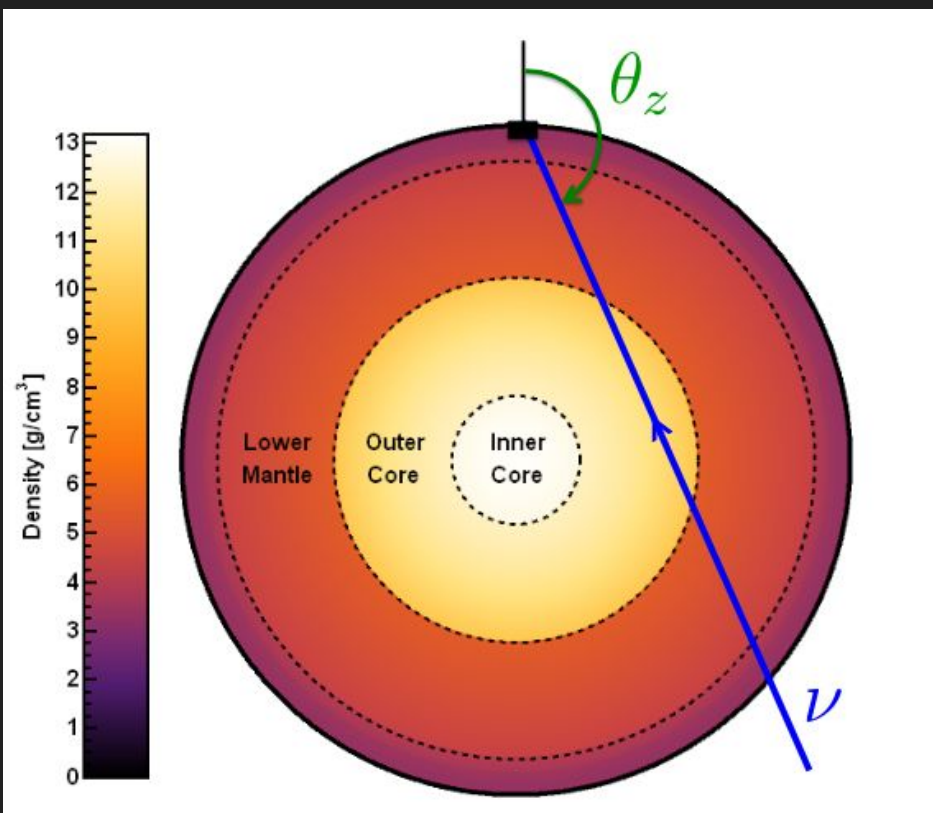
Существующие технологии детектирования нейтрино позволяют создавать детекторы для такого мониторинга.

Множество разработок во многих странах мира:

- Маленькие мобильные детекторы
 - можно подогнать поближе к реактору (например, в грузовике)
- Плавучий нейтринный детектор
 - Все измерит с моря (реакторы часто располагают на побережьях)
- Подводный детектор
 - Сможет также измерять геонейтрино вдали от континентальной коры
- Мегатонные стационарные детекторы
 - Те же, что используются для изучения нейтрино
 - Они смогут увидеть наличие нелегального реактора на дальних расстояниях



Нейтринная томография Земли



Атмосферные нейтрино пролетают сквозь всю Землю под разными углами.

Мы можем детектировать их, определяя их энергию и направление прилёта.

Могут ли они что-нибудь сказать нам о внутренностях Земли?

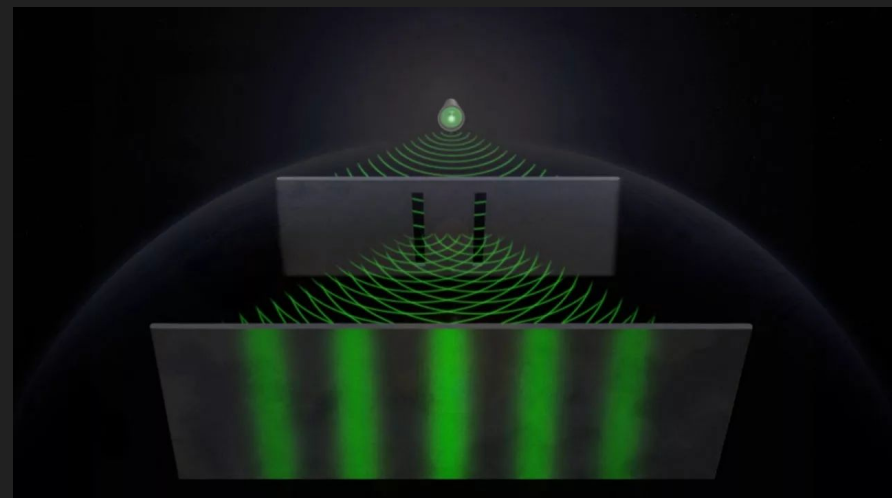
Нейтрино, рождённое в атмосфере и поглощённое в детекторе не взаимодействовало в среде - казалось бы, что оно может о ней знать?

Нейтринные осцилляции в веществе

Нейтринные осцилляции похожи на эксперимент с двумя щелями:

- Складываются волновые функции массовых состояний нейтрино.
- Наблюдается интерференционная картина - состояния нейтрино с определённым лептонным ароматом (e, μ, τ)

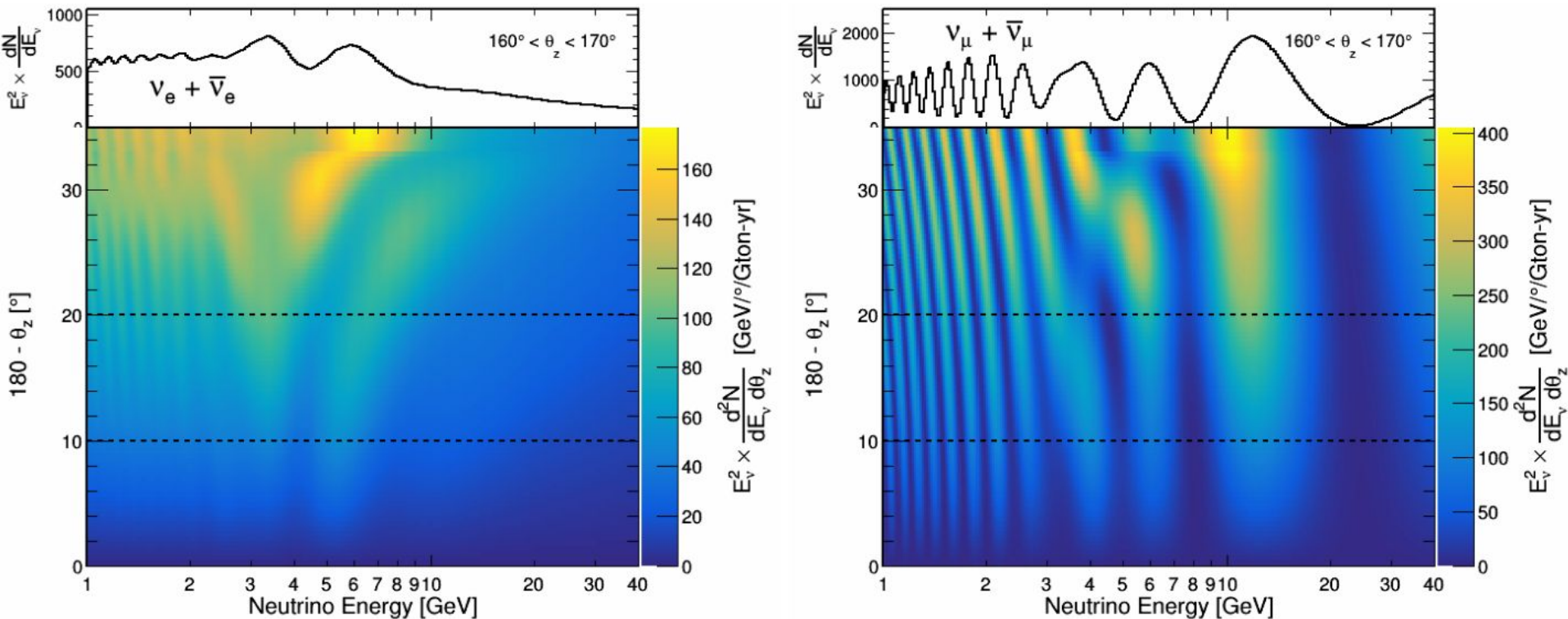
В веществе электронные нейтрино могут рассеиваться на электронах. Нейтрино “чувствуют” возможность рассеяния вперёд (амплитуды суммируются)



В результате распространение нейтрино меняется - наличие электронной среды создаёт перекося в прохождении нейтрино.

Эффективно это меняет угол смешивания.

Эффект от осцилляций в детекторе



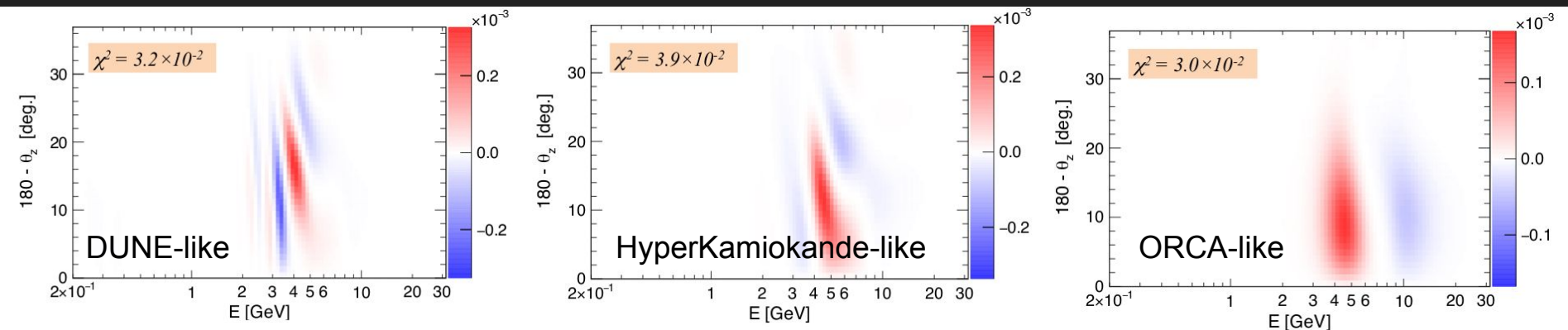
Осцилляции модифицируются для разных углов прилёта (т.е. разный путь через регионы разных плотностей)

Проверка моделей хим.состава Земли

Model	(0) Default (Fe-Ni)	(A) Badro[4]	(B) Kaminski & Javoy[15]	(C) Tagawa[16]	(D) Sakamaki[5]
Light elements	none	7%wt Si 2%wt O	2%wt Si 4%wt O	0.3%wt H 6.5%wt Si	1%wt H
Z/A	0.4661	0.4680	0.4689	0.4697	0.4713

Средняя плотность электронов меняется из-за возможного присутствия водорода в модели. Однако, меняется она слабо.

Эксперименты текущего (планирующегося) поколения будут чувствительны к присутствию водорода на уровне нескольких процентов.



Спасибо за внимание

