

Методика регистрации антинейтрино с помощью жидко-сцинтилляционных детекторов и её особенности. Современный статус.

Громов М.Б., Чепурнов А.С., Сабельников А.А.,
Лукьянченко Г.А., Марков Д.С.

22.04.2014



Междисциплинарные фундаментальные исследования

Задачи:

- изучение осцилляций нейтрино особенно актуален вопрос осцилляций на короткой базе (реакторные антинейтрино)
- исследование структуры Земли и её компонентного состава (гео-нейтрино)
- изучение эволюции звёзд и нуклеосинтеза во Вселенной (нейтрино от сверхновых)

Методики регистрации:

- с помощью жидкого-сцинтилляционных детекторов
- с помощью пластиковых сцинтилляторов (в разработке)
- используя когерентное рассеяние антинейтрино на электронах/ядрах (в разработке)

**Необходимо регистрировать
антинейтрино**

- 11

Физика процесса детектирования



Реакция характеризуется четкой сигнатурой:

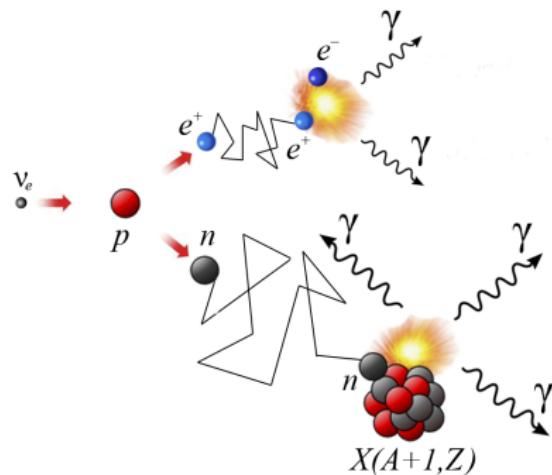
- мгновенное событие (prompt event) – аннигиляция
 $e + e^+ \rightarrow 2\gamma$

$$\begin{aligned} & \text{Видимая энергия при условии} \\ & \text{пренебрежения отдачей нейтрона} \\ E_{\text{МГН}} &= E_{\text{кин}}(e^+) + m_{e^+} + m_{e^-} = \\ &= E_{\bar{\nu}_e} + Q + 2m_e = E_{\bar{\nu}_e} - 0.784 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

- запаздывающее событие (delayed event) – захват термализованного нейтрона с последующим испусканием γ -квантов
 $n + X(A, Z) \longrightarrow X(A + 1, Z) + \gamma$

Реакция является пороговой, $|Q| = m_n + m_{e^+} - m_p$, $Q < 0$

$$E_{\text{pop}} = |Q| \left(1 + \frac{|Q|}{2m_p} \right), \text{ t.k. } m_{\bar{\nu}_e} \sim 0, \quad E_{\text{pop}} = 1.806 \text{ MeV}$$





Открытие антинейтрино



Фредерик Райнес

(Frederick Reines)



Клайд Коэн

(Clyde Cowan)

Эксперименты Райнеса и Коэна

С 1956 года — «Проект Полтергейст» ("Project Poltergeist")

Период: с 1951 по 1960 гг.

Основная задача: открыть нейтрино/антинейтрино

Разработали основы измерения нейтринных потоков в

режиме реального времени, метода задержанных совпадений

Результаты:

- Открытие нейтрино (антинейтрино)
- Полученное значение сечения согласуется с предсказаной величиной:
 $\sigma_{\text{теор}} = (5 \pm 1) \times 10^{-44} \text{ см}^2$,
 $\sigma_{\text{эксп}} = (12^{+7}_{-4}) \times 10^{-44} \text{ см}^2$
- Скорость счёта $3.0 \pm 0.2 \text{ ч}^{-1}$ в 11 м от активной зоны при потоке от реактора на АЭС Саванна-Ривер в $1.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ($\sim 700 \text{ МВт}$)
- Сигнал/шум 4:1

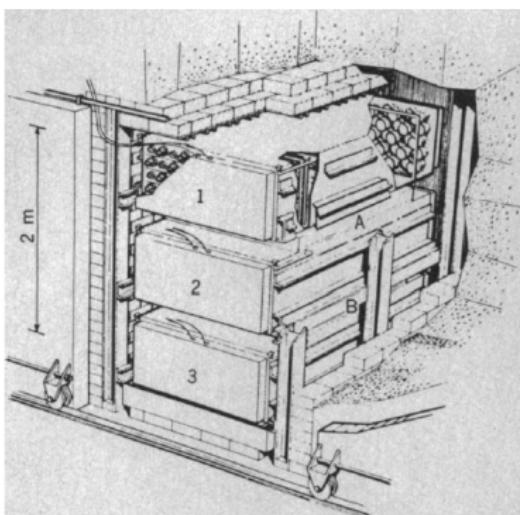
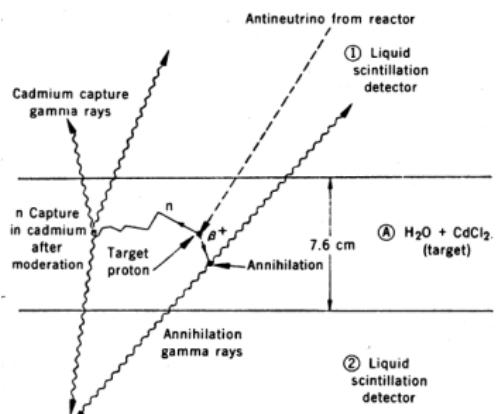
Нобелевская премия 1995 года

вручена Ф. Райнесу «За экспериментальное обнаружение нейтрино»

Антинейтрино. Жидко-сцинтилляционные детекторы



Техника эксперимента. Установка Райнеса



1,2,3 — резервуары с сцинтиллятором для регистрации γ -квантов.

Каждый бак имел объём в 1400 л и снабжался 110 5-дюймовыми ФЭУ.

A,B — резервуары, заполненные водным раствором хлорида кадмия $CdCl_2$.

Каждый бак содержал 200 л воды, водород в которой выступал в качестве

мишени, и 40 кг хлорида кадмия, использованного для захвата нейтронов.

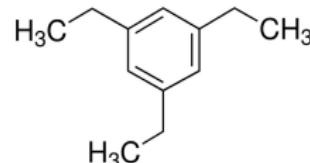
Сцинтилляторы

Четыре основные компоненты:

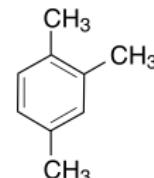
- 1** Прозрачный растворитель, богатый водородом. Служит мишенью. Обычно не сцинтилирует. Райнес использовал 1,3,5 -триэтилбензол (англ. сокр. ТЕВ).

В последствии применялись

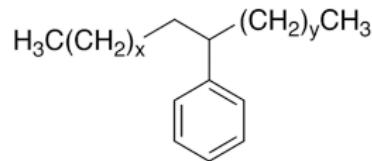
- уайт-спирит
 - 1,2,4 -триметилбензол или псевдокумол (англ. PC)
 - «линейный» алкилбензол (англ. LAB, рус. ЛАБ)



1,3,5 -триэтилбензол



Псевдокумол



ЛАБ

- 10

Сцинтилляторы

2 Активатор. Непосредственно синтетирующая добавка.

2,5-дифенилоксазол (англ. PPO) $C_{15}H_{11}ON$

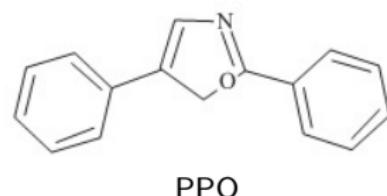
Порядка 3 г/д (**Райнес - наши дни**)

3 Вещество-переизлучатель. Смещает вторичное излучение в видимую для ФЭУ область спектра

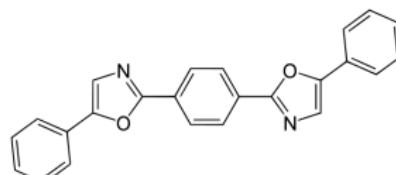
1,4-бис(4-метил 5-фенил 2-оксозолил)бензол
(англ. POPOP) $C_{24}H_{16}O_2N_2$ Порядка 0.2 г/л
(Райнес - наши дни)

4 Вещество-поглотитель нейтронов

Обеспечивает запаздывающий сигнал за счёт перехода ядра из возбуждённого в стабильное состояние после захвата нейтрона.



PPC

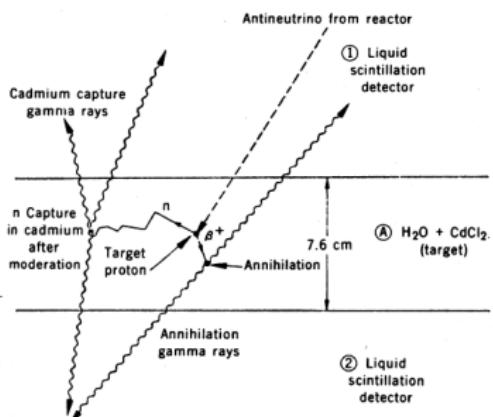


POPOF

- $n + {}^1H \longrightarrow d + \gamma$ (2.22 МэВ),
 $\tau_n \sim 250$ мкс
 - $n + Gd \longrightarrow Gd + \gamma$ (~ 8 МэВ),
 $\tau_n \sim 30$ мкс



Недостатки методики Райнеса



С современной точки зрения

- Детектируются не все γ -кванты
- Небольшой объём (требуются потоки порядка $10^{13} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$)
- Высокий фон (соотношение сигнал/шум 4:1)
- Грязный детектор
- ФЭУ не работают в однофотоэлектронном режиме
- Трудоемкость обработки данных (в том числе из-за аналоговой дискретной медленной электроники)

Чего можно достичь с помощью детектора Райнеса?

- открыть (задетектировать) антинейтрино — **Да**
- исследовать свойства нейтрино или изучать связанные с ним междисциплинарные проблемы фундаментального плана — **Нет**

Эксперименты Микаэляна

ЖС детектор RONS
(Курчатовский институт)

Цель: развитие методики Райнеса для мониторинга работы АЭС.

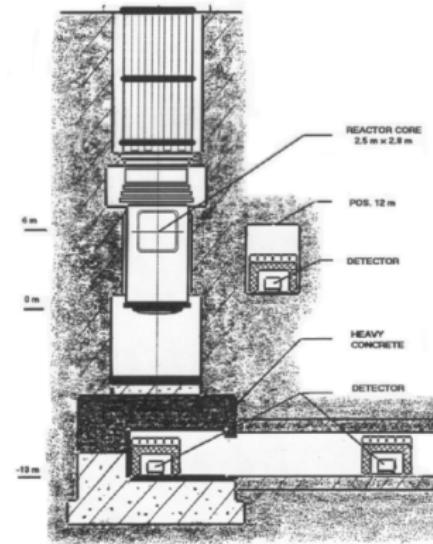
Период исследований: с 1982 по
1995 гг.



Лев Александрович Мицалян

Громов М.Б. (ОЯФ ФФ МГУ)

Антинейтрино. Жидко-сцинтилляционные детекторы



План нейтринной лаборатории на Ровненской АЭС — ВВЭР-440

Эксперименты Микаэляна

Решено:

- сцинтиллятор — рабочее вещество
- соотношение сигнал/шум 10:1
- скорость счёта
 $\sim 2 - 3 \times 10^3$ день $^{-1}$ (1,4 ГВт)
- чувствительный объем — 510 л
- использование дополнительного объема (γ -кэтчера) для регистрации фотонов от запаздывающего сигнала — 540 л

Проблемы:

- деградация жидкого сцинтиллятора, допированного Gd
- эффективность регистрации нейтронов — 60%

Достигнуто/показана возможность:

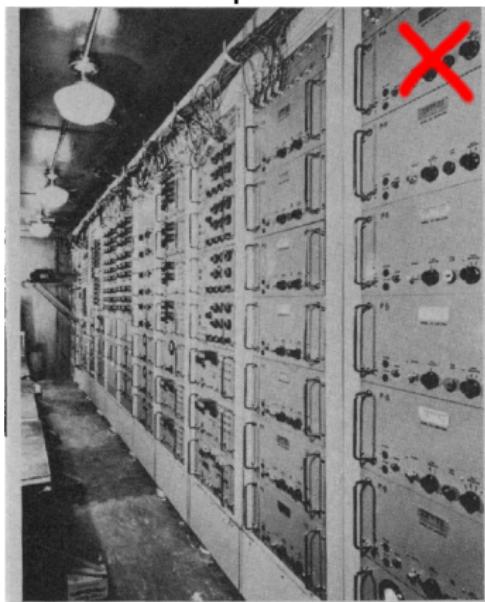
- контроля за процессом выгорания топлива в реальном времени
- провести оценку содержания плутония в топливе
- определить остановку реактора в течении одного дня

Это означает, что могут быть зарегистрированы неразрешенные режимы работы реактора, в частности внеплановые остановки с целью извлечения плутония.

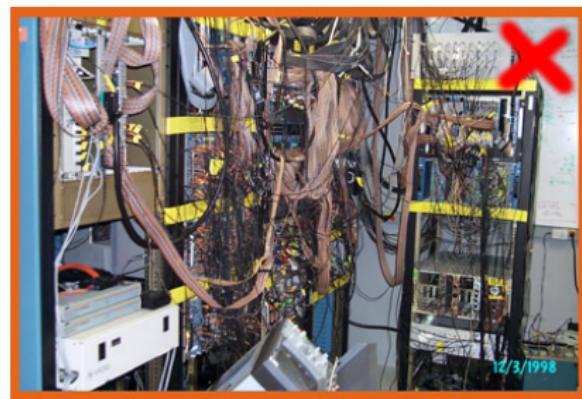
-
-
-
-
-

Системы сбора данных

Проект Полтергейст: система
изготовлена специально под
эксперимент



Системы сбора данных



Дискретная электроника с
выверенными схемами
задержки и
спектрометрическими АЦП

- ○○
- ○○
- ○○
- ○○

-
-

Участие НИИЯФ МГУ
○○

Заключение

Что изменилось?

Стабильные Gd-содержаще жидкые сцинтилляторы были разработаны и в промышленных масштабах производятся для экспериментов



В качестве растрорителя используется ЛАБ.

Плюсы:

- побочный продукт нефтяной промышленности
- удобен в обращении



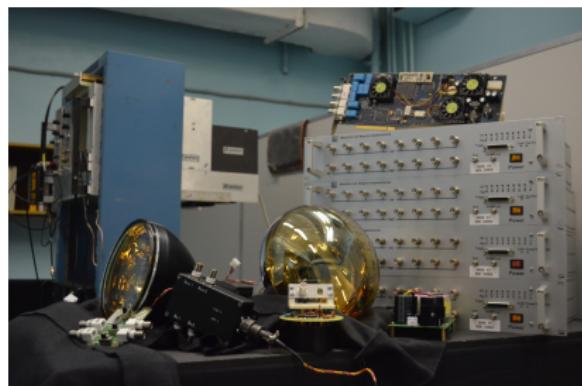
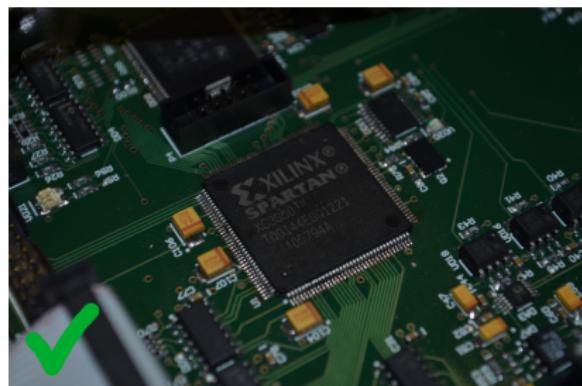
Минусы:

- физико-химические характеристики несколько хуже, чем у псевдокумола

А также

- вырос объём детекторов
- увеличилась эффективность регистрации γ -квантов от нейтронов ($\sim 100\%$)
- детально разработана и реализована концепция слоистой защиты
- разработаны новые ФЭУ с хорошими временными характеристиками и чувствительностью

Что изменилось?



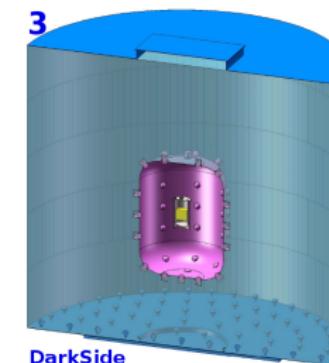
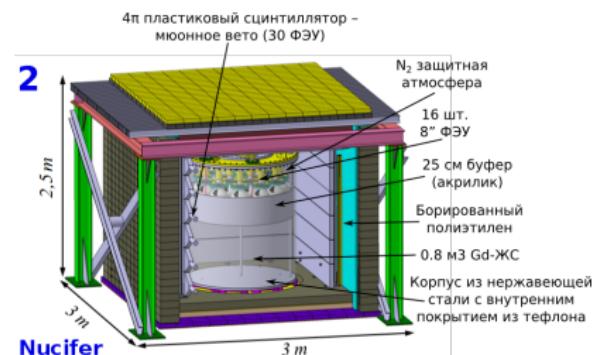
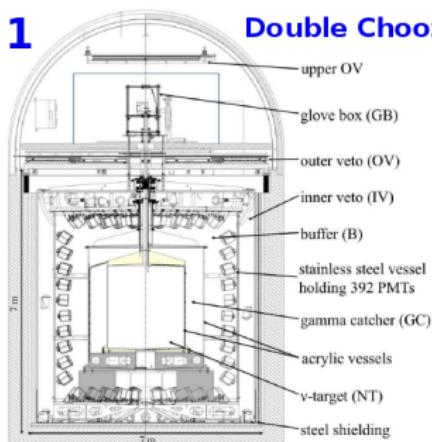
Высокопроизводительная электроника стала доступной.

Система сбора данных на базе программируемых логических интегральных схем для организации триггеров (англ. PLD, в частности, FPGA; рус. ПЛИС) и быстрых АЦП для дискриминации по форме импульса.

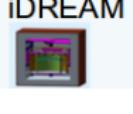


Область применения

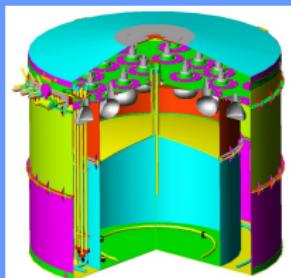
- 1** Антинейтринные эксперименты
- 2** Мониторинг работы АЭС
- 3** Использование достижений для создания детекторов, предназначенных для поиска тёмной материи



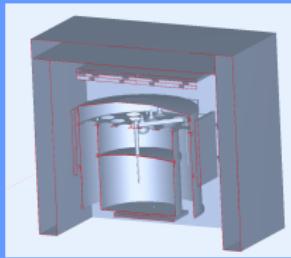
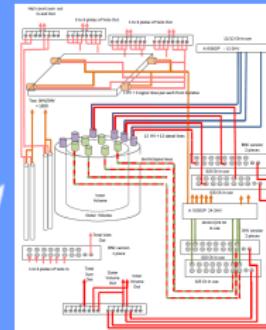
Научная деятельность группы

	Цель	Наша зона ответственности
Borexino 	Изучение нейтрино от Солнца, Земли, ядерных реакторов и других природных и искусственных источников	Система сбора данных Обработка данных
DarkSide 	Поиск темной материи в предположении гипотезы WIMP	Исследование методов изготовления низкофоновых материалов
SOX	Поиск «стерильных» нейтрино с использованием р/а источников	Системы сбора данных
Double CHOOZ 	Изучение матрицы смешивания нейтрино в эксперименте на ядерном реакторе	Разработка методики нейтронных калибровок с «открытым оптическим каналом»
iDREAM 	Внедрение методов нейтринного контроля в ядерную энергетику	Разработка и физический пуск первого пром. детектора

Научная деятельность группы



industrial Detector REactor Antineutrino Monitoring



Заключение

- В настоящее время методика регистрации антинейтрино с помощью жидкого-сцинтилляционных детекторов является единственной хорошо разработанной
- Активно применяется для решения междисциплинарных фундаментальных задач
- На базе этой методики ведутся работы по созданию системы независимого мониторинга работы АЭС (прикладная физика нейтрино!)
- Созданные технологии и аппаратура нашли применение в новых разделах физики частиц (тёмная материя)