



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)

**Необходимо регистрировать
антинейтрино**

Методики регистрации:

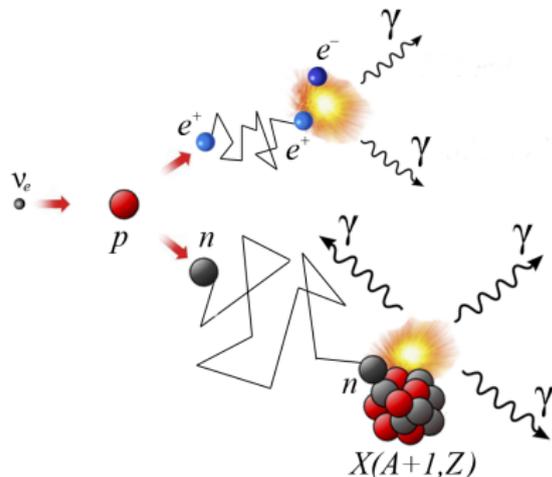
- **с помощью
жидко-сцинтилляционных
детекторов**
- с помощью пластиковых
сцинтилляторов (в разработке)
- используя когерентное рассеяние
антинейтрино на
электронах/ядрах (в разработке)



Обратный β -распад $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ – основной процесс для детектирования антинейтрино в ЖС детекторах

Реакция характеризуется четкой сигнатурой:

- мгновенное событие (prompt event) – аннигиляция $e + e^+ \rightarrow 2\gamma$
Видимая энергия при условии пренебрежения отдачей нейтрона $E_{\text{МГН}} = E_{\text{кин}}(e^+) + m_{e^+} + m_{e^-} = E_{\bar{\nu}_e} + Q + 2m_e = E_{\bar{\nu}_e} - 0.784 \text{ МэВ}$
- запаздывающее событие (delayed event) – захват термализованного нейтрона с последующим испусканием γ -квантов $n + X(A, Z) \rightarrow X(A+1, Z) + \gamma$



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

$$E_{\text{пор}} = |Q| \left(1 + \frac{|Q|}{2m_p} \right), \text{ т.к. } m_{\bar{\nu}_e} \sim 0, \quad E_{\text{пор}} = 1.806 \text{ МэВ}$$



Эксперименты Райнеса и Коуэна



Фредерик Райнес
(Frederick Reines)



Клайд Коуэн
(Clyde Cowan)

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:

$$\sigma_{\text{теор}} = (5 \pm 1) \times 10^{-44} \text{ см}^2,$$

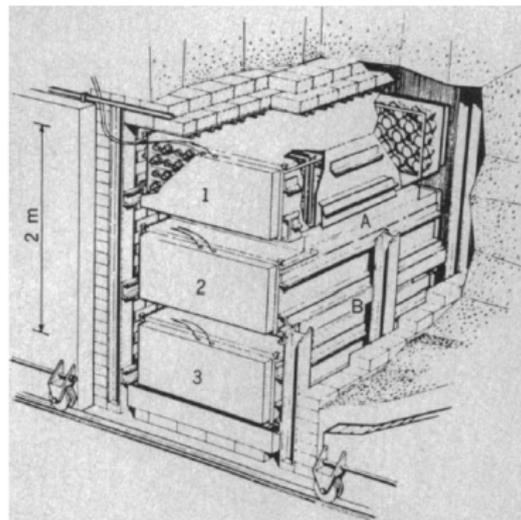
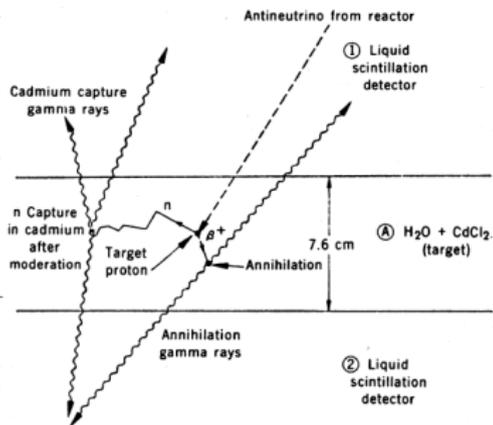
$$\sigma_{\text{эксп}} = (12_{-4}^{+7}) \times 10^{-44} \text{ см}^2$$
- Скорость счёта $3.0 \pm 0.2 \text{ ч}^{-1}$ в 11 м от активной зоны при потоке от реактора на АЭС Саванна-Ривер в $1.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ($\sim 700 \text{ МВт}$)
- Сигнал/шум 4:1

Нобелевская премия 1995 года

вручена Ф. Райнесу «За экспериментальное обнаружение нейтрино»



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.



Четыре основные компоненты:

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

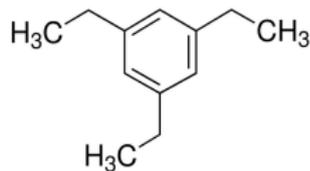
В последствии применялись

- уайт-спирит
- 1,2,4 -триметилбензол или псевдокумол (англ. РС)
- «линейный» алкилбензол

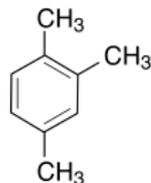
(англ. LAB, рус. ЛАБ)

$C_6H_5CHR_1R_2$, где $R_1 = C_nH_{2n+1}$ и $R_2 = C_mH_{2m+1}$, $n \geq 1$, $m \geq 0$

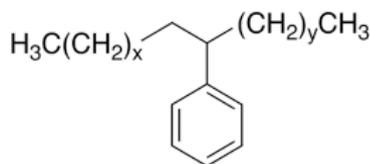
Современный растворитель



1,3,5 -триэтилбензол



Псевдокумол



ЛАБ

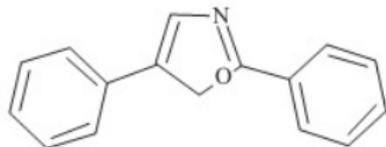


Сцинтилляторы

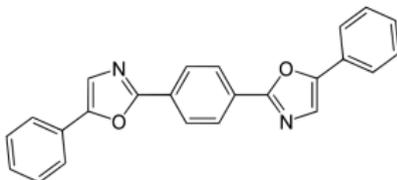
- Активатор. Непосредственно сцинтиллирующая добавка.
2,5 -дифенилоксазол (англ. PPO) $C_{15}H_{11}ON$
Порядка 3 г/л (**Райнес - наши дни**)
- Вещество-переизлучатель. Смещает вторичное излучение в видимую для ФЭУ область спектра.
1,4-бис(4-метил 5-фенил 2-оксозолил)бензол (англ. POPOP) $C_{24}H_{16}O_2N_2$ Порядка 0.2 г/л (**Райнес - наши дни**)
- Вещество-поглотитель нейтронов.
Обеспечивает запаздывающий сигнал за счёт перехода ядра из возбуждённого в стабильное состояние после захвата нейтрона.

Практически всегда:

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



PPO



POPOP



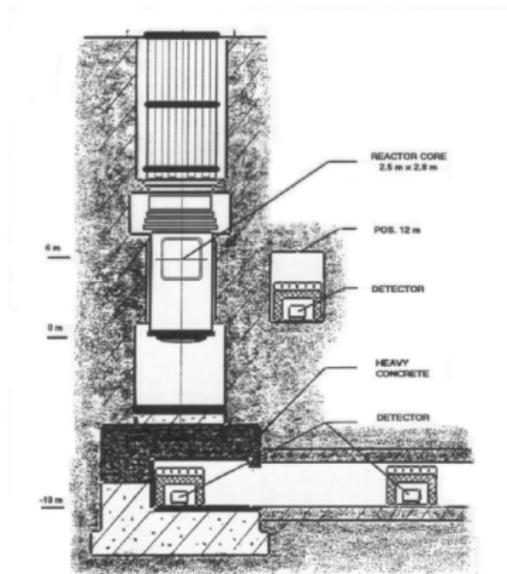
ЖС детектор RONS (Курчатовский институт)

Цель: развитие методики Райнеса
для мониторинга работы АЭС.

Период исследований: с 1982 по
1995 гг.



Лев Александрович Микаэлян



План нейтринной лаборатории на
Ровенской АЭС — ВВЭР-440



Решено:

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

Проблемы:

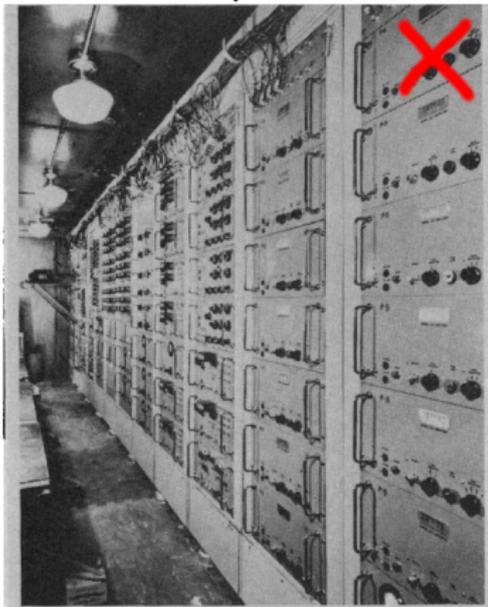
- деградация жидкого скинтиллятора, допированного Gd
- эффективность регистрации нейтронов — 60%

Достигнуто/показана ВОЗМОЖНОСТЬ:

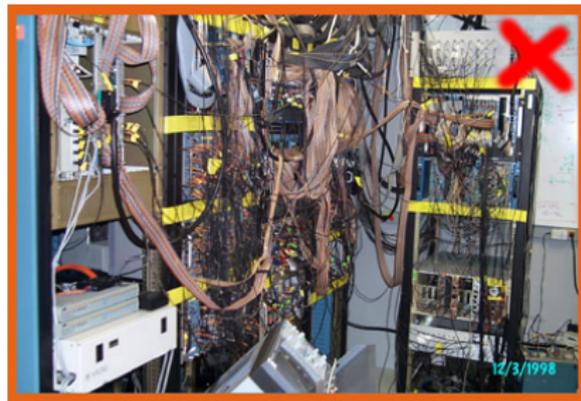
- контроля за процессом выгорания топлива в реальном времени
- провести оценку содержания плутония в топливе
- определить остановку реактора в течении одного дня

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

Проект Полтергейст: система
изготовлена специально под
эксперимент



Системы сбора данных



Дискретная электроника с
выверенными схемами
задержки и
спектрометрическими АЦП



Что изменилось?

Стабильные Gd-содержаще жидкие 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

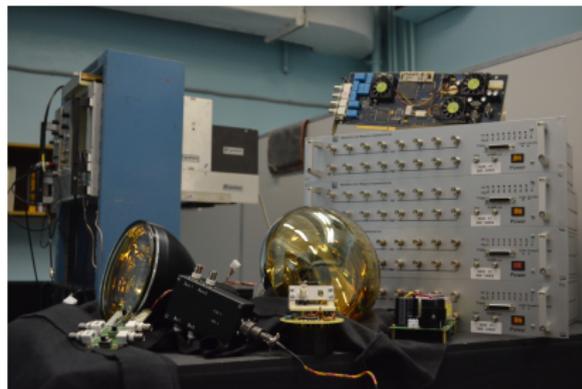
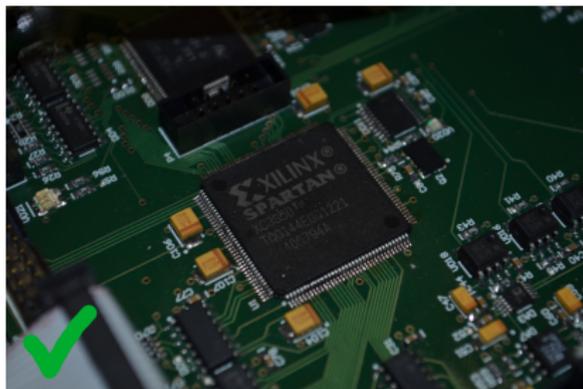
А также

- 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?

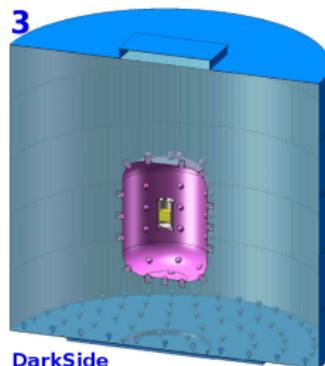
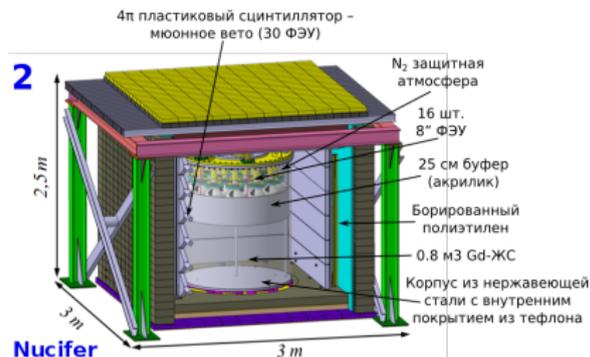
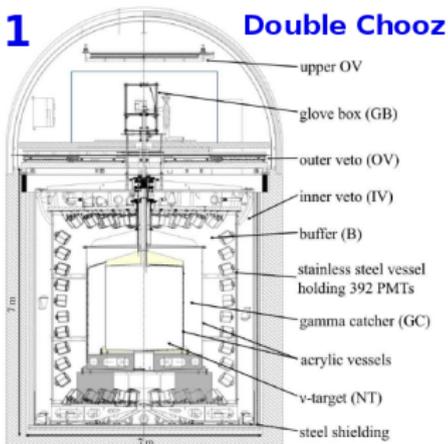


Высокопроизводительная электроника стала доступной.
Система сбора данных на базе программируемых логических интегральных схем для организации триггеров (англ. PLD, в частности, FPGA; рус. ПЛИС) и быстрых АЦП для дискриминации по форме импульса.



Область применения

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



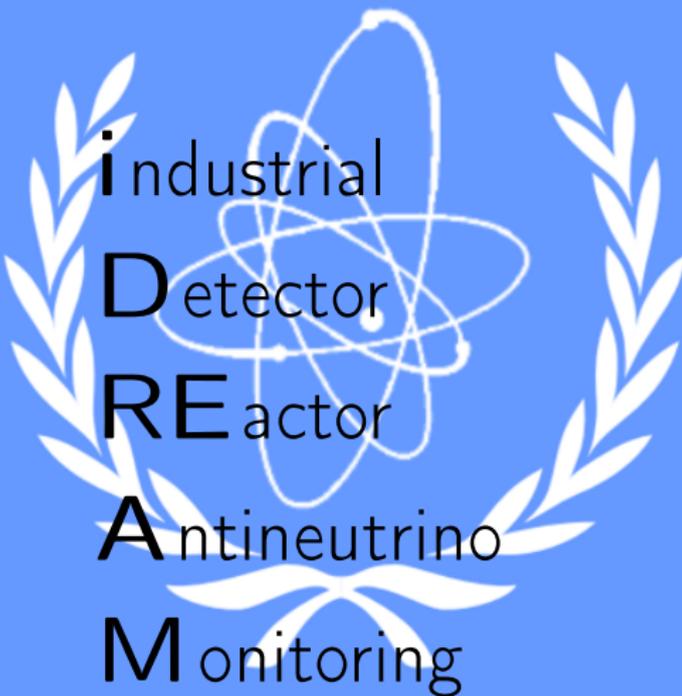
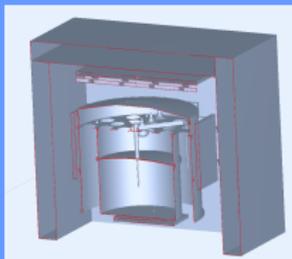
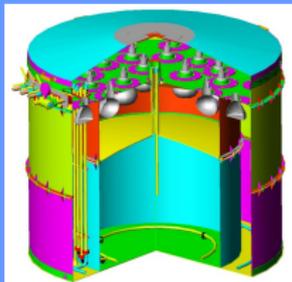


Научная деятельность группы

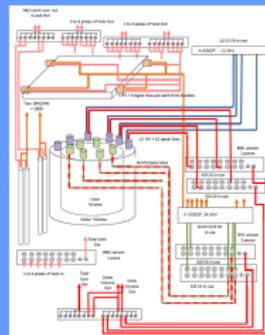
	Цель	Наша зона ответственности
Borexino 	Изучение нейтрино от Солнца, Земли, ядерных реакторов и других природных и искусственных источников	Система сбора данных Обработка данных
DarkSide 	Поиск темной материи в предположении гипотезы WIMP	Исследование методов изготовления низкофоновых материалов
SOX 	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 жидко-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)