

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Решетняк Александр Олегович

**Влияние световыхода жидкого органического
сцинтиллятора на эффективность регистрации
антинейтрино в детекторе iDREAM**

Курсовая работа
по курсу «Ядерная физика»

Научный руководитель:
Чепурнов Александр Сергеевич

Москва — 2020

Содержание

Введение	3
1 Детектирование антинейтрино с помощью ЖОС	5
1.1 Реакция обратного β -распада	5
1.2 Органический сцинтиллятор	6
1.3 Сцинтилляционный спектрометр	8
2 Детектор iDREAM	10
2.1 Устройство детектора	10
Заключение	13
Список литературы	14

Введение

Использование атомных электростанций подразумевает большую опасность при эксплуатации, следовательно, требует особого контроля. Нейтринный метод контроля ядерных энергетических реакторов был предложен и подтвержден экспериментально в Курчатовском институте в 80-х годах прошлого века при испытаниях на Ровенской АЭС [1]. Современные энергетические реакторы в АЭС являются источниками электронного нейтрино большой интенсивности. Значит, этот факт можно использовать для мониторинга исправности ядерных реакторов.

В связи с увеличением количества атомных электростанций по всему миру, а так же появлением проблемы нераспространения ядерных материалов, так как промышленные ядерные реакторы атомных электростанций являются потенциальными источниками оружейного плутония и других опасных ядерных материалов, в МАГАТЭ был выработан целый ряд регламентов, направленных на реализацию гарантий нераспространения, закрепленных в таких международных документах, как INFCIRC/153, INFCIRC/540 [2], [3] и др. В конце 2000-х годов эксперты МАГАТЭ признали полезность метода нейтринного наблюдения и дистанционного контроля активной зоны реактора и поддержали его использование для следующих целей:

1. повышение безопасности использования атомных установок, хранилищ с отработанным ядерным топливом и т.д.
2. обеспечение гарантий нераспространения ядерных материалов

Тем не менее, внедрение метода контроля (включая нейтринное) в регламент работы АЭС должно отвечать ряду требований которые отличают экспериментальную научную установку от промышленной:

1. детектирование должно быть удаленным на расстояние 10-20 м от активной зоны реактора за биологической защитой и за границами реакторного цеха;
2. детектор должен быть компактным, и размещаться в имеющихся технологических помещениях АЭС;
3. детектор должен работать автономно, без обслуживания, стабильно и безопасно в течении как минимум срока эксплуатации реактора;
4. детектор должен иметь встроенные средства калибровки и самодиагностики;
5. данные от детектора должны передаваться по каналам связи в удаленный центр контроля и управления;

6. принципы регистрации, лежащие в основе детектора должны исключать возможность фальсификации физических данных внешними воздействиями на детектор.

Наиболее перспективным инструментом является детектор антинейтрино на жидком органическом сцинтиляторе. В отличие от научных детекторов, вычисляющих значения исследуемых величин: Double-CHOOZ - θ_{13} [4], RENO - θ_{12} , Δm_{21} , Δm_{32} [5], Daya Bay - θ_{13} [6], NEOS - θ_{14} [7] и время кампаний которых всего несколько месяцев, промышленный детектор iDREAM можно откалибровать лишь после окончания кампании реактора (одна кампания длится 3 года), поэтому требуется сцинтиллятор с малой деградацией световыходов. От параметров, таких как световыход, время высвечивания и др., и их стабильности зависит эффективность регистрирования реакторных антинейтрино.

1 Детектирование антинейтрино с помощью ЖОС

Нейтрино - легкая, слабо взаимодействующая частица с полужелтым спином. Нейтрино окружает нас со всех сторон. Их масса очень мала - порядка 10^{-4} эВ. Число антинейтрино, вылетающих из ядерного реактора, порядка $10^{20}\bar{\nu}_e$ за 1с при мощности реактора 1ГВт [8]. Чтобы зарегистрировать нейтрино из реактора, используется жидкий органический сцинтиллятор (ЖОС) - вещество, обладающее способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения. Реакторные антинейтрино взаимодействуют с протонами ЖОС, происходит реакция обратного β -распада, в следствие чего сцинтиллятор начинает излучать фотоны.

Жидкие органические сцинтилляторы обладают свойствами: световыход, время высвечивания, конверсионная эффективность. Но именно благодаря световыходу регистрируются антинейтрино, а его стабильность уменьшает вероятность ошибок регистрации. Световыход — количество фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении определённого количества энергии (обычно 1 МэВ). Большим световыходом считается величина 50—70 тыс. фотонов на МэВ. Однако для детектирования высокоэнергичных частиц могут использоваться и сцинтилляторы со значительно меньшим световыходом.

1.1 Реакция обратного β -распада

В методе детектирования антинейтрино с помощью жидкого органического сцинтиллятора большую роль играет реакция обратного β -распада, в результате которой происходит захват электронного антинейтрино свободным протоном сцинтиллятора, после чего образуется нейтрон и позитрон.



Порог реакции для энергии составляет 1.8 МэВ, то есть регистрироваться могут лишь антинейтрино с энергией более 1.8 МэВ, что примерно 25% от всего спектра.

Образовавшийся позитрон уносит большую часть кинетической энергии от входящего $\bar{\nu}_e$ аннигиляции с электронами сцинтиллятора и образует первый (быстрый) сигнал в детекторе, после чего свободный нейтрон испытывает нейтронный захват и выделяется гамма-квант энергией 2.2 МэВ, образуя тем самым второй сигнал в детекторе (задержанный) со временем задержки порядка 250 мкс от быстрого сигнала. Именно наличие быстрого и задержанного сигналов является характерной "подписью" реакции обратного бета-распада. Зависимость сечения реакции от энергии $\bar{\nu}_e$ может быть аппроксимирована следующим выражением [9]:

$$\sigma = 9,5 \cdot (E_\nu - 1,29)^2 \cdot 10^{-44} \quad (2)$$

1.2 Органический сцинтиллятор

Продукты реакции обратного β -распада, двигаясь в веществе, теряют свою энергию при столкновении с атомами, причем энергия частиц расходуется на ионизацию и возбуждение атомов среды. Возбуждение атомов снимается в основном путем испускания квантов света характерной для данного вещества частоты. Обычно излучение, возникающее при этом, поглощается в той же среде (т.е. спектр излучения совпадает со спектром поглощения). В конечном счете, энергия заряженной частицы переходит в энергию теплового движения. В люминесцирующих средах часть высвеченной энергии может выйти за их пределы (т.е. люминесцирующая среда прозрачна к собственному излучению). Процесс люминесценции может осуществляться двумя путями. В тех случаях, когда переходы из возбужденных энергетических состояний в основное разрешены, испускание света происходит в соответствии со средним временем жизни данного возбужденного состояния по обычным статистическим законам. Такого рода высвечивание называется флуоресценцией.

В органических сцинтилляторах отдельные молекулы слабо взаимодействуют друг с другом, т.е. энергетические уровни отдельных молекул практически не возмущены присутствием соседних молекул. Поэтому можно считать, что характер взаимодействия заряженных частиц с веществом органического сцинтиллятора не зависит от его агрегатного состояния и сводится к ионизации и возбуждению отдельных молекул непосредственно заряженной частицей.

Если молекулы органического сцинтиллятора оказались в высоком энергетическом состоянии, то переход в первое возбужденное состояние может произойти либо путем прямого преобразования энергии возбуждения в колебательную энергию (за время 10^{-12} с), либо путем излучения фотонов большой энергии. Эти жесткие фотоны будут поглощены окружающими молекулами, которые в свою очередь, излучают свет несколько меньшей частоты. Процесс этот может повторяться несколько раз (за время 10^{-11} - 10^{-12} с) до тех пор, пока энергия фотонов не станет сравнимой с энергией первого возбужденного состояния. Потенциальная энергия изолированной молекулы является функцией взаимных расстояний между атомами. На рис.1 схематически изображена зависимость потенциальной энергии от расстояния r между центрами атомов для двухатомного фрагмента молекулы, находящейся в основном состоянии (кривая а) и в первом возбужденном состоянии (кривая б).

При заданной температуре молекула должна находиться на соответствующем колебательном уровне, изображенном горизонтальными отрезками вблизи минимума кривой. Возбуждение молекулы может быть изображено линией АВ. Точка В соответствует сильно воз-

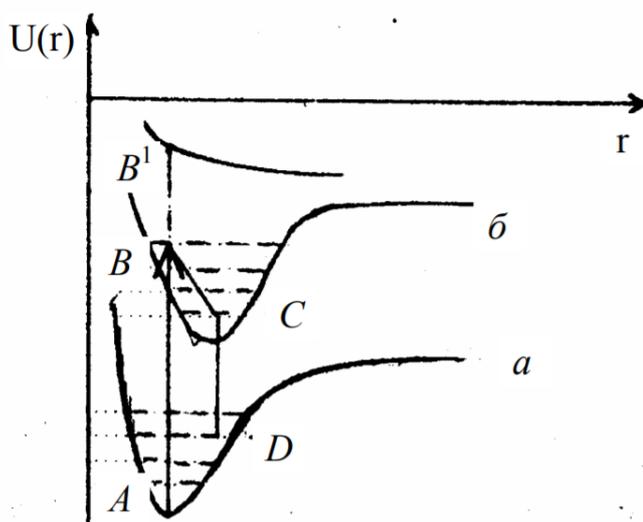


Рис. 1: Зависимость потенциальной энергии для двухатомного фрагмента органической молекулы от расстояния между центрами атомов: а - основное состояние; б - возбужденное состояние

бужденному колебательному состоянию. Эта избыточная энергия быстро переходит в тепловую энергию колебаний решетки, и молекула достигает уровня С. Из этого состояния молекула может возвратиться в основное состояние (CD) посредством флуоресцентного излучения.

Основными характеристиками сцинтилляторов являются конверсионная эффективность, спектр излучения и время высвечивания.

Конверсионная эффективность – это отношение энергии световой вспышки, к энергии, потерянной заряженной частицей в сцинтилляторе. Конверсионная эффективность характеризует эффективность преобразования сцинтиллятором энергии заряженной частицы в световую. Количество света, испускаемое сцинтиллятором, характеризуется световым выходом.

Световой выход – это отношение энергии среднего числа фотонов люминесценции к энергии, потерянной ионизирующей частицей в сцинтилляторе. Конверсионная эффективность зависит от типа и качества сцинтиллятора; для обычно применяемых сцинтилляторов она лежит в диапазоне от долей процента до нескольких десятков процентов. В идеальных сцинтилляторах конверсионная эффективность не зависит от плотности ионизации, т.е. от энергии заряженной частицы. В этом случае энергия световой вспышки пропорциональна энергии, потерянной частицей в сцинтилляторе. В реальных сцинтилляторах, однако, это выполняется не всегда, и для частиц, обладающих различными ионизирующими способностями, конверсионная эффективность может быть разной. Вообще говоря, конверсионная эффективность нелинейно зависит от плотности ионизации, причем с ростом последней конверсионная эффективность уменьшается. Поэтому медленные частицы и частицы с кратным зарядом дают меньший световой выход, чем быстрые однозарядные частицы.

Большая величина конверсионной эффективности вещества еще не определяет его пригодности в качестве сцинтиллятора. Действительно, чтобы зарегистрировать световую вспышку, необходимо, чтобы световые фотоны вышли за пределы сцинтиллятора. Отношение световой энергии, вышедшей из сцинтиллятора, к энергии, потерянной в нем заряженной частицей, называют техническим выходом или технической эффективностью. Технический выход зависит от величины сдвига спектров испускания и поглощения, т.е. от прозрачности сцинтиллятора к собственному излучению, а также от ряда чисто практических причин: толщины слоя сцинтиллятора, количества примесей, уменьшающих его прозрачность, состояния поверхности и прочее.

В большинстве случаев интенсивность вспышки I с течением времени t спадает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (3)$$

Величина τ - время, в течение которого интенсивность падает в e раз, характеризует длительность свечения и называется **временем высвечивания** сцинтиллятора [10] [11].

Параметр деградации световых выходов является одним из важнейших при выборе материала для ЖОС. С помощью детектора на ЖОС засекается только 25% всего спектра нейтрино. То есть при сильной деградации сцинтиллятора "видимый" спектр уменьшается еще сильнее. Поэтому чем меньше световых выходов деградирует в единицу времени, тем больший спектр антинейтрино можно захватить в течение работы детектора. А значит, главной задачей при разработке детектора на ЖОС является создание и использование стабильных сцинтилляторов с малой деградацией световых выходов.

1.3 Сцинтилляционный спектрометр

Сцинтилляционный спектрометр применялся на Ровенской АЭС. Жидкий органический сцинтиллятор выполняет функции мишени, спектрометра позитронов, замедлителя и детектора нейтронов. Нейтроны регистрируются по γ -квантам захвата в Gd, введенном в состав сцинтиллятора. Корпус детектора изготовлен из прозрачного оргстекла. Объем жидкого сцинтиллятора с добавками гадолиния составляет 510л. На двух противоположных гранях располагаются по двенадцать ФЭУ-125. Это выравнивает сбор счета и частично защищает жидкий сцинтиллятор от собственной радиоактивности ФЭУ.

События реакции (1) регистрируются по запаздывающим совпадениям между позитроном и нейтроном. Среднее время жизни нейтрона до захвата $\tau=50$ мкс. Старт цикла регистрации служит любое событие с амплитудой до 10 МэВ. Частота стартовых событий составляет $24c^{-1}$. Стартовое событие с небольшой задержкой открывает на 1000 мкс нормально запертую систему регистрации второго события, которые регистрировались в диапазоне до 10 МэВ.

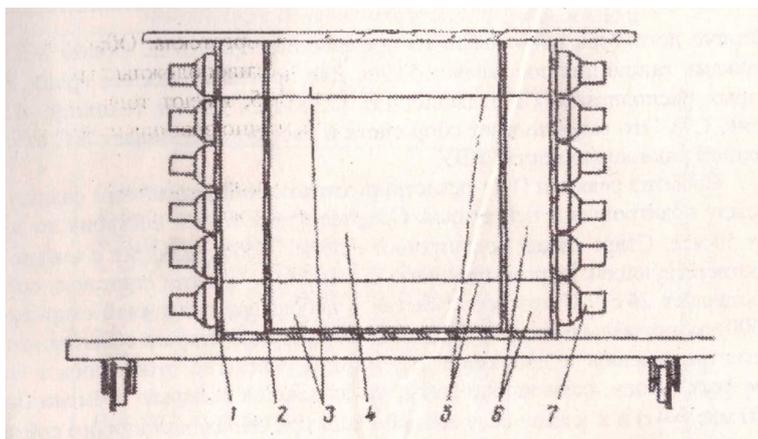


Рис. 2: Сцинтиляционный спектрометр: 1 - корпус; 2 - стакан для сцинтиллятора; 3 - кольцевой объем (540л); 4 - центральный объем (мишень, 510л); 5 - зеркальные отражатели; 6 - световоды (масло); 7 - ФЭУ-125

Событие относилось к классу эффект+фон, если второе событие попадало в интервал от 0 до 200 мкс ($\approx 4\tau$) и к классу "случайный фон" при попадании второго события в интервал от 400 до 1000 мкс (8τ - 20τ). В память компьютера записывается время первого и второго события и время между ними [12].

2 Детектор iDREAM

Цель создания опытного образца детектора- спектрометра реакторных антинейтрино iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) - демонстрация применения нейтринного метода в условиях промышленной АЭС с реакторами типа ВВЭР. Детектор разрабатывается в соответствии с промышленными требованиями, позволяющими включить его в состав оборудования АЭС в качестве дополнительного штатного прибора, обеспечивающего операторов станции дополнительными объективными данными о состоянии активной зоны реактора. Детектор также можно применять в исследовательских и образовательных целях. Компактные размеры, низкая стоимость и ожидаемая высокая эффективность детектирования реакторных антинейтрино делает этот детектор уникальным исследовательским инструментом для изучения перспективных атомных реакторов, например реакторов на быстрых нейтронах, для которых исследования таких процессов, как динамика выгорания топлива, являются на сегодня открытыми научно-техническим вопросам. Расчетная эффективность регистрации антинейтрино детектора iDREAM позволяет его размещать вне реакторного цеха на удалении 20-30 м. от активной зоны реактора [1].

2.1 Устройство детектора



Рис. 3: Конструкция детектора iDREAM

Детектор iDREAM изготовлен в виде двух концентрических баков из нержавеющей стали, накрытых общей герметичной крышкой. Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной мембраной из полиметилметакрилата (ПММ) и просматривается 16 ФЭУ. Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1 м^3 заполняется гадолинизированным ЖОС.

Жидкий органический сцинтиллятор в нашем случае выполняет функции мишени, спектрометра позитронов (положительно заряженных электронов), замедлителя и детектора нейтронов. Нейтроны регистрируются по γ -квантам захвата в Gd (суммарная энергия $E = 8$ МэВ). Для предотвращения контакта гадолинизированного ЖОС с нержавеющей сталью внутренний бак имеет вставку из ПММ по всей площади цилиндрических стенок. Доступ к мишени обеспечивается через вертикальную трубку из ПММ, вклеенную в центр мембраны, верхний конец которой выходит за пределы бака. Пространство внутреннего бака над мембраной заполняется линейным алкилбензолом (ЛАБ), оно служит для выравнивания светосбора и защищает мишень от гамма-фона от ФЭУ. Наружный бак из соображений удобства транспортировки и перемещений внутри зданий, также разделен по вертикали на две части. Кольцевой объем заполняется ЖОС и служит активной защитой мишени детектора, а также повышает общую эффективность за счет регистрации гамма-квантов, вышедших за пределы мишени. Кольцевой объем просматривают 12 ФЭУ. Заполнение/откачка ЖОС и барботирование ЖОС азотом осуществляется через коллектор с помощью системы трубок и кольцевых сепараторов. Для залива и слива жидкостей из объемов детектора, для контроля уровня жидкостей, температуры и давления в детекторе предусмотрена система медленного контроля на основе промышленных ультразвуковых датчиков уровня, датчиков температуры, электронных реле, объединенных с помощью промышленной шины CANopen.

Для повышения светосбора внутренние стенки буферного и основного чувствительного объемов покрыты светоотражающим материалом «Lumirror E6SRc» с коэффициентом отражения до 90 для спектра сцинтилляции ЖОС. Таким образом, в детекторе используется два типа жидкого сцинтиллятора (с гадолинием и без него) и буферная жидкость, сделанные на основе ЛАБ российского производства. Общий объем жидкости около 3500 л [13].

Растворитель	Эмпирическая формула	Плотность, г/см ³	Температура вспышки, °С
Толуол	C ₇ H ₈	0,87	4
Ксилол	C ₈ H ₁₀	0,88	27
Ундекан	C ₁₁ H ₂₄	0,74	60
Додекан	C ₁₂ H ₂₆	0.75	74
ЛАБ	C ₆ H ₅ CHC _n H _{2n+1}	0.86	147

Рис. 4: Некоторые характеристики растворителей

В качестве растворителя для изготовления ЖОС могут быть использованы различные вещества (рис. 4). Для детектора iDream был выбран линейный алкилбензол - ЛАБ, так как

он соответствует необходимым требованиям безопасности: низкая токсичность, высокая температура вспышки, хорошая прозрачность.

Заключение

Технология детектирования антинейтрино по реакции обратного бета-распада в жидких органических сцинтилляторах является наиболее хорошо изученным на сегодня методом регистрации антинейтринного излучения, позволяющим регистрировать как интенсивность, так и спектральные характеристики излучения. Именно этот метод реализован в детекторе iDREAM, который находится в состоянии сборки и физического пуска в НИИЯФ МГУ. Созданный детектор iDREAM является уникальной и не имеющей аналогов в мире установкой, которая может применяться для прикладных и фундаментальных исследований.

Для наиболее эффективной работы детектора важно фиксировать максимально возможный спектр антинейтрино в течение всей кампании реактора. Это невозможно при большой величине деградации световыходов. Именно поэтому этот параметр сцинтиллятора играет решающую роль в эффективности регистрации антинейтрино и влияет на качество детектора.

Список литературы

- [1] А.С. Чепурнов, Нейтринный метод мониторинга ядерных реакторов - истории и текущее состояние вопроса.
- [2] МАГАТЭ, 1975
- [3] МАГАТЭ, 1998
- [4] F. Ardellier et al., Letter of intent for Double-CHOOZ: A Search for the mixing angle θ_{13} , 2004
- [5] J.S. Park, J. Lee, I.S. Yeo et al, Production and optical properties of Gd-loaded liquid scintillator for the RENO neutrino detector, 2012
- [6] Jun Cao, Kam-Biu Luk, An overview of the Daya Bay reactor neutrino experiment
- [7] Ba Ro Kim, Boyoung Han, Eun-ju Jeon et al, Liquid Scintillator for the NEOS Short-baseline Neutrino Experiment
- [8] Д.В Наумов, Введение в физику нейтрино, 2010
- [9] P. Vogel and J.F. Beacom, The angular distribution of the reaction, 1999
- [10] Балашов В.В. Строение вещества. Учеб. пособие, 1993
- [11] Фано У., Фано Л. Физика атомов и молекул. Пер. с англ./Под ред. Пономарева Л.И., 1980
- [12] В.Д. Русов, В.А. Тарасов, Д.А. Литвинов, Физика реакторных антинейтрино, 2018
- [13] А.С. Чепурнов, Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM для прикладных и фундаментальных исследований, 2019