

МОНИТОРИНГ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

А. В. Пинчук¹⁾, Д. В. Горошевич¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, avrtemphi@gmail.com

Предлагаемая в работе методика основывается на новом физическом принципе регистрации антинейтрино от реактора - упругом когерентном рассеянии нейтрино на атомных ядрах. Основным преимуществом данного эффекта, по сравнению с текущими перспективными проектами регистрации потока антинейтрино от реактора на эффекте обратного бета-распада, является высокое (~ 700 раз) сечение реакции, следствием чего является возможность создания более компактных и мобильных детекторов для контроля за состоянием активной зоны.

Ключевые слова: УКРН; мониторинг ядерных реакторов; антинейтрино; детектор антинейтрино; когерентное рассеяние нейтрино.

MONITORING OF NUCLEAR REACTORS BASED ON NEW PHYSICAL PRINCIPLES

A. V. Pinchuk¹⁾, D. V. Harashevich¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, avrtemphi@gmail.com

The proposed method is based on a new physical principle for detecting antineutrinos from a reactor - coherent elastic neutrino-nucleus scattering. The main advantage of this effect, compared with current promising projects for detecting the antineutrino flux from a reverse beta decay reactor, is a high (~ 700 times) reaction cross-section, resulting in the possibility of creating more compact and mobile detectors to monitor the state of the core.

Keywords: CEvNS; monitoring of nuclear reactors; antineutrino; antineutrino detector; coherent neutrino scattering.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-103-106>

Процесс упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) на атомном ядре был предсказан в 1974 году [1, 2] и впервые экспериментально наблюден в 2017 году в международном ускорительном эксперименте COHERENT [3]. В этом процессе нейтрино взаимодействует не с отдельными нуклонами ядра, а с ядром в целом, и передает ему часть своей кинетической энергии. Сечение процесса УКРН на несколько порядков превышает все другие процессы взаимодействия реакторных нейтрино с веществом и в рамках Стандартной Модели, по аналогии с упругим рассеянием нейтрино на протоне, дифференциальное сечение процесса УКРН на атомном ядре описывается как:

$$\frac{d\sigma}{dT_{coh}} = \frac{G_F^2 M}{2\pi} \left((G_v + G_a)^2 + (G_v - G_a)^2 \left(1 - \frac{T}{E_\nu} \right)^2 - \frac{(G_v^2 - G_a^2) M T}{E_\nu^2} \right),$$

где G_F – константа Ферми; M – масса ядра; T – энергия ядра отдачи; E_ν – энергия нейтрино; $\vec{G}_v$ и $\vec{G}_a$ – векторные и аксиально-векторные константы связи нейтронов и протонов с Z -бозоном, соответственно.

Единственным детектируемым продуктом этой реакции является ядро отдачи с кинетической энергией в кэВ- ном энергетическом диапазоне.

Системы контроля ядерных реакторов, введенные Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в рамках Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), направленные на выявление незаконного использования реакторов, например, изменение содержания плутония или отклонение от норм облучения топлива, используют в основном косвенные методы, такие как проверки пломб и видеонаблюдение. Методика, описанная в данной работе, отличается от традиционных методов, обеспечивая получение информации о мощности и изотопном составе активной зоны реактора в режиме онлайн, бесконтактным способом. Регистрация реакторных электронных антинейтрино обеспечивает доступность указанной информации в реальном времени, повышение эффективности обнаружения нарушений в эксплуатации реакторов, минимизацию инвазивности и упрощение для операторов процедуры контроля над состоянием активной зоны реакторов. Несмотря на сложность регистрации, связанную с необходимостью регистрации слабых ионизационных сигналов, нейтринный детектор может обеспечить необходимые данные для обеспечения безопасности атомной энергетики и контроля над соблюдением международных соглашений о нераспространении ядерного оружия [4, 5]. Отклонения измеряемого сечения процесса УКРН для реакторных электронных антинейтрино от предсказаний Стандартной Модели могут быть также использованы для исследования новой физики за ее пределами [6-8]. Кроме того, технологию регистрации процесса УКРН можно использовать для изучения ядерных форм-факторов [9, 10] и магнитного момента нейтрино [11]. Упругое когерентное рассеяние солнечных и атмосферных нейтрино является фоном для следующего поколения экспериментов по прямому поиску темной материи в виде массивных слабовазаимодействующих частиц вимпов (от английского WIMP – Weakly Interacting Massive Particle), поэтому экспериментальная информация о величине сечения УКРН поможет увеличить чувствительность этих экспериментов [12].

В водо-водяных энергетических реакторах исходное топливо состоит из стержней из обогащенного урана, содержание ^{235}U обычно составляет $\sim 4,5\%$, остальное – ^{238}U . Во время работы реактора, реакции захвата нейтронов на ^{238}U производят ^{239}Pu (и ^{241}Pu), которые также являются делящимися изотопами и способствуют производству энергии. Тем не менее, чистый баланс плутония положителен, и стандартный водо-водяной энергетический реактор производит около 200 кг плутония в год. При каждом делении делящегося изотопа образуются два осколка деления неравных масс. Распределение самого легкого осколка сосредоточено около $A = 94$ для деления ^{235}U и около $A = 102$ в случае ^{239}Pu . Все эти ядра, перенасыщены нейтронами, нестабильны и, следовательно, испытывают бета-распад в сторону стабильных ядер со средним числом 6 β -распадов и, следовательно, с 6 антинейтрино.

Исходя из предсказанных и наблюдаемых β -спектров, известно, что количество антинейтрино при делении ^{239}Pu меньше, чем количество антинейтрино ^{235}U , а выделяемая энергия на 5% больше. Следовательно, гипотетический реактор, способный использовать только ^{235}U , вызовет в детекторе сигнал антинейтрино на 60% выше, чем тот же реактор, производящий такое же количество энергии, но сжигающий только ^{239}Pu . Эта значительная разница позволяет отслеживать изменения относительных количеств ^{235}U и ^{239}Pu в активной зоне. В сочетании с высокой проникающей способностью антинейтрино это дает новые средства для проведения дистанционных измерений содержания плутония в реакторах.

Корреляция сигнала антинейтрино с тепловой мощностью и выгоранием была продемонстрирована экспериментами Bugey и Ровно.

Если известны мощность реактора и начальная загрузка топливом, а также если скорость регистрации антинейтрино достаточно высока (например, сотни или тысячи событий в день или неделю), то по интенсивности антинейтрино можно оценить изменения в количестве расщепляемых материалов, таких как уран и плутоний, в активной зоне реактора. Скорость выго-

рания топлива, которая определяется степенью нейтронного облучения, напрямую влияет на эти изменения. Выгорание топлива – это мера того, сколько энергии было извлечено из топлива за время его нахождения в реакторе, и этот параметр коррелирует с количеством плутония в отработанном топливе, что делает его критически важным для ядерных гарантий.

Наблюдение реакторных антинейтрино через УКРН на атомных ядрах представляет собой сложную задачу, требующую регистрации значительно более слабых сигналов на фоне космических мюонов, быстрых нейтронов и гамма-квантов окружающей среды. В этом направлении активно работают несколько экспериментальных групп, таких как CONUS, TEXONO, GeN, использующие детекторы из высокочистого германия, а также MINER, RICOCHET и CONNIE, применяющие болометры, работающие при температурах мК, и малошумящие устройства с зарядовой связью (ПЗС) для идентификации частиц. На сегодняшний день известно около десяти экспериментов, направленных на исследование УКРН с использованием различных детекторных технологий. Несмотря на разнообразие существующих экспериментальных программ, наиболее перспективным для исследования УКРН, требующего массивного низкорогового детектора, выглядит использование двухфазных эмиссионных детекторов на сжиженных благородных газах, обладающих высокой чувствительностью к событиям с малым ионизационным выходом, вплоть до одиночных электронов.

Эмиссионный метод регистрации частиц, предложенный в МИФИ около 50 лет назад, изначально использовался для визуализации треков частиц в плотной среде в области физики высоких энергий. Основа работы детектора – явление эмиссии электронов ионизации из плотной конденсированной фазы в газовую под действием электрического поля, превышающего 2 кВ/см. В 1995 году предложено использовать усиление электронного сигнала за счет электролюминесценции газовой фазы, возникающей при дрейфе электронов в сильном электрическом поле (> 1 кВ/см·атм), для поиска редких событий с низким ионизационным выходом. Регистрация сигналов от сцинтилляции S1 и электролюминесценции S2 позволяет создавать детекторы «без стенок», обеспечивающие трехмерную позиционную чувствительность и выделяющие объем внутри детектора, известный как fiducial volume (FV). В настоящее время данный тип детекторов активно применяется в экспериментах по поиску частиц темной материи в форме WIMP, проводимых в низкофоновых подземных лабораториях с использованием жидкого ксенона в качестве рабочего вещества.

Недавно эмиссионный принцип регистрации частиц нашел новое применение в нейтринном осцилляционном эксперименте DUNE, где в качестве дальнего детектора рассматривается использование четырех двухфазных эмиссионных детекторов на жидком аргоне общей массой 40 килотонн. Прототип такого детектора с массой жидкого аргона около 300 тонн в настоящее время проходит испытания в CERN. В ближайшей перспективе масса рабочего вещества двухфазных эмиссионных детекторов может достигнуть десятков килотонн.

Библиографические ссылки

1. *Freedman D. Z.* Coherent effects of a weak neutral current // *Phys. Rev.*, 1974. Vol. 9, P. 1389.
2. *Копелиович В. Б., Франкфурт Л.Л.* // *Письма в ЖЭТФ*. 1974. Т. 19. С. 236.
Kopeliovich V. B. and Frankfurt L. L. // *JETP Lett.*, 1974. Vol. 19, P. 145.
3. COHERENT collaboration. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // *Science*, 2017. Vol. 357, № 6356. P. 1123.
4. *Mikaelyan L.A.* Neutrino laboratory in the atomic plant. // *Conf. «Neutrino-77» «Nauka»*, Moscow, 1978. Vol.2, P. 383-387.
5. Nuclear security applications of antineutrino detectors: current capabilities and future prospects / A. Bernstein [et al.] // *Science & Global Security*, 2010 Vol. 18, № 3, P. 127-192.

6. COHERENT collaboration. First Detection of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering on Argon / Akimov D. [et al.] // *Phys. Rev. Lett.*, 2021. Vol. 126, P. P012002
7. *Freedman D. Z., Schramm D. N., Tubbs D. L.* The weak neutral current and its effects in stellar collapse. // *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, 1977. Vol. 27, P. 167–207.
8. *Barranco J., Miranda O. G., Rashba T.I.* Probing new physics with coherent neutrino scattering off nuclei. // *Journal of High Energy Physics*, 2005. Vol. 12, P. P021.
9. *Amanik P.S., McLaughlin G.C.* Nuclear neutron form factor from neutrino nucleus coherent elastic scattering. // *J. Phys. G*, 2009. Vol. 36, P. P015105.
10. Neutrino-nucleus coherent scattering as a probe of neutron density distributions / Patton K [et al.] // *Phys. Rev.*, 2012. Vol. 86, № 2. P. P024612.
12. *Billard J., Figueroa-Feliciano E., Strigari L.* Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments. // *Phys. Rev.*, 2014. Vol. 89, № 2. P. P023524.