

Neutrino-Based Tools for Nuclear Verification and Diplomacy in North Korea  
Rachel Carr, Jonathon Coleman, Mikhail Danilov, Giorgio Gratta, Karsten Heeger, Patrick Huber, YuenKeung Hor, Takeo Kawasaki, Soo-Bong Kim, Yeongduk Kim, John Learned, Manfred Lindner, Kyohei Nakajima, James Nikkel, Seon-Hee Seo, Fumihiko Suekane, Antonin Vacheret, Wei Wang, James Wilhelmi, and Liang Zhan  
*Science and Global Security*, 2019, Volume 27, No. 1, pp. 15-28

## **СРЕДСТВА НА БАЗЕ НЕЙТРИНО ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ И ДИПЛОМАТИИ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ**

***Рэйчел Карр, Джонатон Коулмен, Михаил Данилов, Джорджио Гратта,  
Карстен Хеегер, Патрик Хубер, Юэн Кеунг Хор, Такео Кавасаки,  
Соо-Бонг Ким, Еонгдук Ким, Джон Лернед, Манфред Линднер,  
Антонин Вашерет, Вэй Ванг, Джеймс Вилхелми, и Лианг Жан***

### **АННОТАЦИЯ**

Мы представляем основанные на регистрации нейтрино возможности верификации того, что ядерные реакторы в ядерном исследовательском центре в Йонбене больше не работают, или что они работают в согласованном режиме, предотвращающем производство оружия. Детекторы нейтрино могут быть взаимно согласованным дополнением к традиционным протоколам верификации, поскольку они не требуют доступа внутрь строений реактора, могут быть установлены в режиме сотрудничества, и позволяют проводить продолжительные и специфические измерения. В Йонбене детекторы нейтрино могут пассивно подтверждать отключения реактора или отслеживать уровни мощности и содержание плутония, находясь за пределами зданий реактора. Представленные здесь варианты мониторинга основаны на недавних достижениях фундаментальной физики частиц. После специального проектного исследования эти приборы могут быть развернуты по разумной стоимости менее, чем за один год. Совместное развертывание детекторов нейтрино в Северной Корее может помочь перенаправить ограниченное количество ученых и инженеров с военных применений на мирную техническую работу в международном сообществе. Особенно важны возможности научного сотрудничества с Южной Кореей. Мы призываем политических деятелей рассмотреть совместные нейтринные проекты в рамках расширенной программы действий в направлении стабильности и безопасности на Корейском полуострове.

Рэйчел Карр, Департамент ядерной физики и техники, Массачусетский технологический институт, Кембридж, Массачусетс, США.

Джонатон Коулмен, Департамент физики Ливерпульского университета, Мерсисайд, Великобритания.

Михаил Данилов, Физический институт Российской Академии Наук имени П.Н. Лебедева, Москва, Россия.

Джорджио Гратта, Департамент физики, Стэнфордский университет, Стэнфорд, Калифорния, США.

Карстен Хеегер, Лаборатория Райта, Департамент физики, Йельский университет, Нью-Хэйвен, Коннектикут, США.

Патрик Хубер, Центр физики нейтрино, Политехнический университет Виргинии, Блэксбург, Виргиния, США.

Юэн Кеунг Хор, Школа физики, Университет Сун Ят Сена, Гуанчжоу, Китай.

Такео Кавасаки, Департамент физики, Университет Китасато, Сагамихара, Япония.

Соо-Бонг Ким, Департамент физики, Сеульский национальный университет, Сеул, Корея.

Еонгдук Ким, Центр подземной физики, Институт фундаментальных наук, Тэджон, Корея.

Джон Лернед, Департамент физики и астрономии, Университет штата Гавайи в Маноа, Гонолулу, Гавайи, США.

Манфред Линднер, Институт Макса Планка по ядерной физике, Гейдельберг, Германия.

Киохей Накаджима, Высшая техническая школа, Фукуйский университет, Фукуи, Япония.

Джеймс Никкел, Лаборатория Райта, Департамент физики, Йельский университет, Нью-Хэйвен, Коннектикут, США.

Сеон-Хее Seo, Центр подземной физики, Институт фундаментальных наук, Тэджон, Корея.

Фумихико Суекане, Исследовательский центр науки о нейтрино, Университет Тохоку, Сендай, Япония.

Антонин Вашерет, Департамент физики, Лондонский имперский колледж, Лондон, Великобритания.

Вэй Ванг, Школа физики, Университет Сун Ят Сена, Гуанчжоу, Китай.

Джеймс Вилхелми, Департамент физики, Университет Темпл, Филадельфия, Пенсильвания, США.

Лианг Жан, Институт физики высоких энергий, Китайская академия наук, Пекин, Китай.

Почтовый адрес для корреспонденций: Rachel Carr, Department of Nuclear Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., 24-607, Cambridge, MA 02139, USA.

Адрес электронной почты: recarr@mit.edu

Статья получена 19 декабря 2018 года и принята к публикации 6 марта 2019 года.

## КОНТЕКСТ: ВЫКЛЮЧЕНИЕ ИЛИ ИЗМЕНЕНИЕ ЦЕЛЕЙ РЕАКТОРОВ В ЙОНБЕНЕ

Начиная с 1960-х годов, в Северной Корее строились и эксплуатировались ядерные реакторы. Как показывают доступные общественности свидетельства, все функционирующие реакторы находятся в ядерном исследовательском центре в Йонбене. Плутоний для северокорейской программы ядерного оружия вырабатывался на реакторе мощностью 5 МВт (эл.) (20 МВт (тепл.))<sup>1</sup> с графитовым замедлителем, газовым охлаждением и топливе с природным ураном, который начал работать в 1986 году<sup>2</sup>. В Йонбене находится также экспериментальный реактор на легкой воде (ELWR) мощностью 100 МВт (тепл.) с топливом с низко обогащенным ураном (LEW)<sup>3</sup>, предположительно приближающийся к началу эксплуатации<sup>4</sup>. В Йонбене также находится другой небольшой исследовательский реактор, работавший с перерывами с 1960-х годов, остатки проекта реактора мощностью в 50 МВт (эл.), работа над которым была прекращена в 1990-х годах, установки для изготовления и переработки ядерного топлива, и завод обогащения урана<sup>5</sup>.

Руководители в Северной Корее и вне ее предлагали изъятие из эксплуатации предприятий в Йонбене в качестве шага к уменьшению международной напряженности. Совместная Пхеньянская декларация от сентября 2018 года выражает открытость Северной Кореи для «перманентного демонтажа ядерных установок» в Йонбене в ответ на действия США<sup>6</sup>. Официальные лица США высказывали поддержку полного верифицируемого демонтажа<sup>7</sup>. Важным этапом в процессе демонтажа должно быть выключение реакторов. Этот этап должен предшествовать сносу зданий реактора на период в несколько месяцев или лет, необходимого для распада остаточной радиоактивности. В качестве альтернативы, или предшественника полного демонтажа, бывший официальный представитель США по ядерным вопросам предложил «демилитаризацию» Йонбена<sup>8</sup>. Демилитаризацию можно было бы провести посредством кооперативной конверсии реакторов от производства оружия на гражданские задачи, такие, как генерация электроэнергии или производство медицинских изотопов.

Какие бы цели не преследовали политические деятели в Йонбене, они будут добиваться конкретной и объективной гарантии выполнения согласованных пределов. Традиционные верификационные протоколы для реакторов визуальные инспекции и количественные анализы топлива и других материалов. Стандартные измерения включают взвешивания, анализы с детекторами гамма-лучей и нейтронов, и сбор образцов для анализа в удаленных лабораториях. Ответственность за эти работы обычно берет на себя Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). История инспекций МАГАТЭ в Северной Корее была сложной, и альтернативные методы, требующие меньшего доступа на площадку, могут оказаться полезными. Наблюдения со спутников нередко могут показать, что реакторы выделяют тепло. Однако, излучаемое тепло является довольно грубым индикатором состояния реактора и не позволяют точно определить разницу между гражданскими и военными операциями. Спутниковые наблюдения в диапазонах видимого и инфракрасного излучения не могут проникнуть через облачный покров, а работа на малой мощности может быть оказана незамеченной.

Детекторы нейтрино могут дополнить традиционные средства верификации и могут быть привлекательными для всех сторон. Официальные лица Северной Кореи могут предпочесть нейтринные детекторы стандартным инспекциям реакторов, потому что они не требуют доступа внутрь зданий реакторов, в которых может оказаться иное секретное содержимое. В то же время, Соединенные Штаты и другие стороны могут оценить более непрерывную и специфическую информацию, предоставляемую детекторами нейтрино по сравнению с изображениями со спутников. Обе стороны могут оценить возможность совместной работы в Йонбене по научно значимому проекту, не имеющему исторического прецедента. Таким образом, детекторы нейтрино могут стать шагом вперед к более всесторонним инспекциям в Йонбене, не требующем детального проникновения, помогающем построить доверие и заложить основы для последующих кооперативных действий. Другим вариантом может стать установка одного, или более, нейтринных детекторов во время начальных инспекций на месте. Если последующие инспекции будут задержаны из-за последующих дипломатических препятствий, детекторы нейтрино могут продолжать предоставлять данные мониторинга до тех пор, пока не возобновятся инспекции на месте.

## ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП: МОНИТОРИНГ РЕАКТОРА С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРИНО

Применение нейтрино для дистанционного мониторинга реакторов было впервые предложено физиками из Советского Союза в 1978 году<sup>9</sup>. Нейтрино – это побочный продукт деления ядер; они образуются в результате бета-распада продуктов деления с избытком нейтронов. Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях, и поэтому нейтрино из активной зоны реактора практически без поглощения проходят через защитную оболочку реактора. Из реактора мощностью 100 МВт (тепл.) изотропно вылетают около  $10^{19}$  нейтрино в секунду. Этот поток не может быть ни изменен, ни задержан защитой.

Излучение нейтрино несет информацию в реальном времени непосредственно из активной зоны реактора. В частности, излучение нейтрино несет информацию об уровне мощности реактора и эволюции состава топлива. Связь между скоростью излучения нейтрино и мощностью реактора проста: обе эти величины пропорциональны количеству актов деления в активной зоне реактора за единицу времени. Помимо этой пропорциональности, скорость генерации нейтрино модулируется изотопным составом делящихся ядер. В типичном реакторе смесь делящихся изотопов состоит из  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{241}\text{Pu}$ . Изотопы плутония, включая пригодный для ядерного оружия  $^{239}\text{Pu}$ , образуются при захвате нейтронов в урановом топливе. Чем дольше работает реактор, и чем выше мощность реактора, тем больше производится плутония.

Скорость образования нейтрино разными делящимися изотопами различна. Например, для  $^{239}\text{Pu}$  скорость образования нейтрино в полтора раза меньше, чем для  $^{235}\text{U}$ . Энергетический спектр нейтрино делящихся изотопов в топливе также различен. Например,  $^{239}\text{Pu}$  образует нейтрино с меньшими энергиями, чем  $^{235}\text{U}$ . Поэтому измерение количества и энергетического спектра нейтрино, излучаемых ядерным реактором, может позволить определить уровень мощности и состав топлива реактора. За несколько недель наблюдений можно будет независимо ограничить историю изменения мощности и эволюцию состава топлива, не обращаясь к эксплуатационным записям<sup>10</sup>.

Физики начали регистрировать нейтрино от реакторов более 60 лет назад. Наиболее доступный канал обнаружения нейтрино от реактора – это обратный бета-распад (ОБР). В этой реакции нейтрино<sup>11</sup> взаимодействует с ядром атома водорода, образуя позитрон и нейтрон. Мишени, богатые протонами, такие, как вода и углеводороды, представляют идеальную среду детектора. На протяжении десятилетий эволюции детекторов нейтрино, органические сцинтилляторы оставались наилучшим типом детекторов для регистрации ОБР из-за их хорошего энергетического разрешения и умеренной стоимости. Продолжающиеся исследования и разработки могут предложить другие методы для наблюдения нейтрино от реакторов<sup>12</sup>. Здесь мы направим особое внимание на ОБР в сцинтилляторах как на доступный и хорошо зарекомендовавший себя вариант.

Первое в мире наблюдение нейтрино было проведено на реакторе для производства плутония на площадке Саванна Ривер Комиссии по атомной энергии США в 1950-х годах<sup>13</sup>. В начале 2000-х годов в гораздо большем эксперименте KamLAND были измерены осцилляции аромата нейтрино от энергетических реакторов в Японии, что стало ключевым свидетельством в пользу того, что у нейтрино есть масса<sup>14</sup>. В середине 2010-х годов были проведены прецизионные измерения нейтрино на реакторах в Китае<sup>15</sup>, Южной Корее<sup>16</sup>, и Франции<sup>17</sup>. Недавно поиски стерильного нейтрино, гипотетической частицы, не входящей в рамки стандартной модели физики частиц, стимулировали разработку высокоточных развертываемых на поверхности детекторов. Эти компактные и относительно простые конструкции детекторов также могут быть идеально приспособлены для мониторинга реакторов.

В настоящее время ежедневно на коммерческих и исследовательских реакторах в Восточной Азии, Европе и Соединенных Штатах регистрируются сотни нейтрино. До сих пор были записаны и проанализированы более пяти миллионов взаимодействия нейтрино от реактора. Использование данных по нейтрино для измерения уровней мощности реактора и эволюции состава топлива сейчас стало общепринятой практикой в экспериментах по физике частиц, как одного из этапов в более сложном анализе<sup>18</sup>. По крайней мере с начала 2000-х годов национальные и международные агентства признают потенциал применения этой технологии к практическим проблемам<sup>19</sup>.

В следующих разделах мы представляем варианты применения детекторов нейтрино как верификационных инструментов в Йонбене. Мы намечаем три отдельных сценария развертывания. Первый вариант использует детекторы нейтрино для верификации того, что реактор с мощностью 5 МВт (эл.), реактор ELWR, или оба реактора, выключены. Во втором варианте детектор нейтрино используется для того, чтобы верифицировать, что реактор ELWR используется для гражданского назначения (генерации электричества), а не для производства оружейного плутония. Аппаратура каждого из этих двух вариантов может быть развернута вблизи от зданий реакторов, с использованием продемонстрированной технологии, в течение примерно одного года после разработки конкретного плана развертывания. В третьем варианте используется большой детектор нейтрино, который может верифицировать выключение обеих реакторов на расстоянии до 1 км.



Рисунок 1. Возможности верификации на основе регистрации нейтрино показаны на полученном со спутника изображении части площадки в Йонбене (полное объяснение приводится в тексте). Авторские права на изображение принадлежат DigitalGlobe (2018).

Возможный сценарий развертывания показан на рисунке 1. Красно-белые круги вокруг реакторов 5 МВт (эл.) и ELWR соответствуют радиусу примерно в 50 м. Как отмечалось в предыдущем анализе<sup>20</sup>, места, пригодные для кооперативного развертывания детекторов нейтрино, по-видимому, расположены на расстояниях около 20 м от каждой активной зоны. Лиловый контур показывает возможную огороженную площадку; детектор может быть установлен за ее пределами на расстоянии несколько более 100 м. Вставка внизу справа показывает концепцию детектора и защиты, располагаемых в стандартных транспортных контейнерах ISO, вместе с возможным средством транспортировки на площадку. Область, указанная дугой и стрелкой, показывает, где может быть размещен большой детектор, расположенный в горизонтальном туннеле с заглублением по крайней мере 100 м на расстоянии около 800 м от реактора.

### ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫКЛЮЧЕНИЯ РЕАКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРИНО НА МАЛЫХ РАССТОЯНИЯХ

Если реакторы в Йонбене будут выключены, то детекторы нейтрино могут подтвердить, что они остаются выключенными в течение периода охлаждения длительностью в несколько месяцев или лет перед полным демонтажем. Для того, чтобы сделать это, детекторы должны будут следить за аномальным излучением нейтрино из активных зон. Выключенные реакторы и отработавшее топливо будут излучать очень слабый поток нейтрино из-за распада долгоживущих продуктов деления. Поток нейтрино от выключенного реактора обычно уменьшается ниже порога регистрации через несколько дней после выключения. Поток нейтрино от реактора, работающего даже на низких уровнях мощности, намного больше потока от выключенного реактора. Поэтому повторный запуск реактора будет регистрироваться на достаточно чувствительном детекторе нейтрино как отчетливый сигнал.

Переходы реактора между включенным и выключенным состояниями наблюдались на детекторах нейтрино, начиная с 1980-х годов. Первые такие измерения были проведены советскими физиками на реакторе в Ровно<sup>21</sup>. Американские физики исследовали эту идею в начале 2000-х годов<sup>22</sup> и провели аналогичный эксперимент на Ядерной генерирующей станции Сан Онофре<sup>23</sup>. Дальнейшие наблюдения демонстраций выключения и повторного запуска были проведены в ориентированном на применение эксперименте во Франции<sup>24</sup>, а также в экспериментах по фундаментальной физике во Франции<sup>25</sup>, Китае<sup>26</sup>, и Южной Корее<sup>27</sup>. Из этой последовательности экспериментов был извлечен важный урок: сегментация детектора служит ключом к отсечению фона, позволяя детекторам работать на земной поверхности без какой-либо защиты от космических лучей.

Сегодня современные детекторы могут обнаружить переход реактора из выключенного во включенное состояние (или наоборот) в течение нескольких часов, в зависимости от размеров детектора и расстояния до

реактора. Примечательным примером является детектор PROSPECT в Ок-Риджской национальной лаборатории с общей массой в 4 тонны и заглублением менее одного метра водного эквивалента<sup>28</sup>. В течение последних двух лет различие в количестве нейтринных событий между включенным и выключенным состояниями реактора наблюдалось в экспериментах PROSPECT (Соединенные Штаты), NEOS (Южная Корея)<sup>29</sup>, DANSS (Россия)<sup>30</sup>, CHANDLER<sup>31</sup>, Нейтрино-4 (Россия)<sup>32</sup>, STEREO (Франция)<sup>33</sup>, и SoLid (Бельгия)<sup>34</sup>, а также на детекторе на реакторе Wylfa (Великобритания)<sup>35</sup>. Некоторые из этих экспериментов показали определенную степень готовности к работе в полевых условиях, включая детекторы SoLid и Wylfa (сейчас модифицированного в проекте VIDARR), развернутые в транспортных контейнерах ISO, и CHANDLER, развернутый в передвижном автоприцепе. Группы ученых также стремятся получить сигнала обратного бета-распада от реакторов в Бразилии (детектор Angra, собирающий данные на энергетическом реакторе с тем же названием)<sup>36</sup>, Японии (эксперимент PANDA, подготавливаемый к установке на энергетическом реакторе Ohi)<sup>37</sup>, и Индии (детектор ISMRAN, разрабатываемый в Атомном исследовательском центре Баба)<sup>38</sup>.

Детекторы на основе аналогичной технологии могут быть развернуты в Йонбене. Они смогут верифицировать постоянное выключение реактора с мощностью 5 МВт (эл.), реактора ELWR, или их обоих. Как отмечалось в предыдущем анализе<sup>39</sup>, наиболее близкое расстояние от активной зоны, на котором можно разместить детектор, составляет примерно 20 м. Это положение, в особенности в случае реактора с мощностью 5 МВт (эл.), соответствует внешней стене здания реактора. Мы предполагаем, что детектор будет установлен вне здания реактора, который первоначально, как будет известно всем сторонам, будет выключен, и будет оставаться в выключенном состоянии в течение достаточно длительного времени (например, нескольких недель) для измерения фоновой скорости счета. Затем детектор будет искать аномальное увеличение скорости счета. На реакторе ELWR четырехтонный сегментный сцинтилляционный детектор сможет идентифицировать несанкционированный пуск реактора на уровне достоверности 99% и выше в течение одних суток в 95% случаев (с вариацией, обусловленной статистической вариацией скорости счета). На меньшем реакторе с мощностью 5 МВт (эл.) запуск может быть обнаружен на уровне достоверности 95% или выше в течение двух недель в 95% случаев.

В этих оценках были использованы измеренные фоновые скорости счета и эффективность сигнала для детектора PROSPECT, работавшего в Ок-Ридже, и тест на основании скорости счета, приведенный в Приложении. В обоих случаях частота ложных положительных сигналов при простом критерии скорости счета будет равна примерно одному событию в год. Анализ энергетического спектра событий, существенно различный для фона и сигнала, может устранить большую часть этих ложных положительных сигналов. В кампании реального мониторинга информация о форме спектра и временном ряде может быть включена в саму гипотезу теста. Это, вероятно, повысит чувствительность по сравнению с приведенными здесь простыми оценками. Стоимость прибора PROSPECT равна 5 миллионам долларов, и детектор может быть построен менее, чем за один год.

## **ВЕРИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРИНО**

В качестве альтернативы полного выключения в Йонбене политические лидеры могут согласиться продолжать эксплуатацию одного, или более, реакторов на этой площадке для гражданских нужд. Например, они могут выбрать продолжение эксплуатации реактора ELWR. Этот реактор был спроектирован для генерации электроэнергии, и он не оптимален для производства пригодного для оружия плутония<sup>40</sup>. Однако, эксперты отметили, что в модифицированном реакторе ELWR для увеличения производства плутония можно применить другую загрузку топлива и изменить профиль мощности<sup>41</sup>.

Для верификации гражданских операций детекторы нейтрино должны будут определять профиль мощности и эволюцию состава топлива реактора ELWR. Как отмечалось в предыдущем разделе, отслеживание профилей мощности реактора детекторами нейтрино было продемонстрировано во многих экспериментах. Так же было продемонстрировано определение эволюции состава топлива с помощью нейтрино. В частности, детекторы нейтрино на реакторах с легкой водой и топливом с низкообогащенным ураном наблюдали характерное изменение от делений в исходном топливе с  $^{235}\text{U}$  к делениям в смеси  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ <sup>42</sup>. В этих наблюдениях использовались как скорость счета нейтрино, так и информация о форме спектра. Моделирование показано, что с использованием аналогичной техники детекторы нейтрино могут отличить нормальную эксплуатацию реактора на легкой воде для производства электроэнергии от эксплуатации, характерной для производства плутония, пригодного для оружия<sup>43</sup>.

Конкретный пример показывает, что детектор нейтрино вне здания реактора ELWR в Йонбене может проверить, использует ли реактор обычную наполовину израсходованную активную зону, или в него была загружена свежая активная зона с возможным направлением облученного топлива для производства оружейного

плутония. 20-тонный детектор с использованием современной сцинтилляционной технологии может обнаружить извлечение активной зоны, содержащей 8 кг  $^{239}\text{Pu}$  (одно существенное количество по определению МАГАТЭ) за примерно 200 суток. Эта оценка использует эффективность сигнала и уровни фона, измеренные на детекторе PROSPECT, как это рассмотрено в Приложении. Преимущество мониторинга активной зоны с помощью нейтрино по сравнению с другими подходами к определению запасов плутония заключается в том, что реконструкция содержания плутония в реакторе будет возможна даже после перерыва в получении данных<sup>44</sup>. Таким образом, детектор нейтрино сможет помочь восстановиться после перерыва в получении верификационных данных. Обнаружение отвлечения плутония из реактора мощностью 5 МВт (эл.) потребует более длительного времени, возможно, превышающего полезные временные пределы, из-за меньшей мощности реактора и из-за того, что профиль деления в графитовом реакторе эволюционирует медленнее, чем в реакторе на легкой воде.

Мы подчеркиваем, что как вариант верификации остановки реактора, представленный в предыдущем разделе, так и вариант мониторинга активной зоны, представленный в этом разделе, можно реализовать с относительно небольшими развертываемыми на поверхности системами, использующими продемонстрированную технологию. Детектор типа PROSPECT, предложенный в предыдущем абзаце, может быть собран за пределами площадки, внутри стандартного транспортного контейнера, с контейнерами, заполненными водой и свинцом, обеспечивающими адекватную защиту от космических лучей. Эта концепция представлена на вставке на рисунке 1. Требования к инфраструктуре на площадке и обработке данных будут сравнимыми с требованиями обычных систем регистрации излучений.

### **ВЕРИФИКАЦИЯ РЕАКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРИНО НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ**

До сих пор мы рассматривали варианты установки детекторов нейтрино рядом со зданиями реакторов. Эти варианты привлекательны, потому что они позволяют детектору оставаться небольшим и относительно простым по своей конструкции. Сигналы нейтрино могут быть зарегистрированы и на больших расстояниях, но следует учитывать, что требуемые размеры детектора (или времена наблюдений) будут увеличиваться, поскольку поток нейтрино будет обратно пропорционален квадрату расстояния до активной зоны<sup>45</sup>. Для таких наблюдений критичными будут очень низкие скорости фонового счета. Низкий фон достигается переносом детекторов под землю.

В Йонбене можно будет следить за выключением реактора с мощностью 5 МВт (эл.) и реактора ELWR с расстояния в 800 – 1000 м. Этот сценарий потребует детекторов, больших по сравнению с теми, которые рассматривались в двух предыдущих разделах. Хорошим продемонстрированным вариантом может быть детектор с жидким сцинтиллятором, подобный тем, которые использовались в эксперименте Daya Bay (площадка с восемью такими детекторами)<sup>46</sup>, RENO (два детектора)<sup>47</sup>, и Double Chooz (два детектора)<sup>48</sup>. Для защиты от космических лучей таким детекторам потребуется серьезное заглубление. Гора Yaksan на противоположном от реакторов в Йонбене берегу реки Kuryong может предоставить защиту от космических лучей, аналогичную экспериментам Daya Bay, RENO, и Double Chooz.

Для горизонтального туннеля в горе Yaksan мы оценили, что примерно 30-тонный детектор с жидким сцинтиллятором может, в 95% случаев, обнаружить изменение состояния реактора ELWR от включенного к выключенному с уровнем достоверности в 99% и выше, в течение 15 суток. Запуск реактора с мощностью 5 МВт (эл.) может быть обнаружен с уровнем достоверности 95% и выше в 95% случаев в течение примерно 250 дней. Время для изготовления 8 кг плутония (одно существенное количество) в реакторе с мощностью 5 МВт (эл.) составляет примерно 400 суток. По этому стандарту предупреждение за 250 суток может считаться своевременным. Для удовлетворения более жесткому стандарту для обнаружения пуска реактора в течение времени, необходимого для производства 4 кг плутония (примерно 200 суток), что оценивается как достаточное для изготовления ядерного боеприпаса, потребуется примерно на 25% больший детектор<sup>49</sup>. В дополнение к наблюдениям за несанкционированными пусками реактора с мощностью 5 МВт (эл.) и реактора ELWR, детекторы этого типа могут определить верхний предел на все операции с реакторами в радиусе до 1-2 км. Размеры и местоположение детектора могут быть подстроены под конкретную цель мониторинга. Длительность постройки и стоимость будут больше, чем для вариантов в двух предыдущих разделах.

### **ВАРИАНТЫ СОВМЕСТНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕЙТРИНО НА КОРЕЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ**

Верификация на базе нейтрино может стать частью широкого круга деятельности, реинтегрирующей Северную Корею в международное сообщество. Нейтринные проекты, если проводить их совместно, могут дополнить более широкие усилия по перенаправлению ученых и инженеров из оружейной программы в мирную

техническую работу. Как мы отмечали, физика нейтрино как экспериментальная наука зародилась на площадке военных реакторов усилиями группы оружейных физиков<sup>50</sup>. Позднее перенаправление рабочей силы стало ключевой частью кооперативных программ сокращения угрозы в республиках бывшего Советского Союза<sup>51</sup>. Для Северной Кореи политические эксперты снова подчеркивают значение научного сотрудничества для построения доверия, защиты опасных материалов, и сопротивления распространения сведений об ядерном оружии другим сторонам<sup>52</sup>. Группа из нескольких десятков ученых и инженеров может поддерживать нейтринный проект в Йонбене, в состав которой может входить как северокорейский, так и иностранный персонал. Подобно другим детекторам общего назначения, таким, как гейгеровские счетчики, нейтринные детекторы могут быть совместно разработаны и использованы без обмена секретной или относящейся к оружию информации. Описание соответствующей технологии и анализов уже появились в публично доступной научной литературе, цитируемой в настоящей статье.

Нейтринные проекты представляют особую возможность для укрепления взаимодействия между Северной и Южной Кореей. В Южной Корее находится одна из крупнейших установок для экспериментов с нейтрино из реактора, «Эксперимент по осцилляциям нейтрино из реакторов» (RENO)<sup>53</sup>, а также продолжающиеся эксперименты «Нейтринный эксперимент по осцилляциям на коротком расстоянии» (NEOS)<sup>54</sup> и «Модифицированный эксперимент по редким процессам на молибдене» (AMoRE)<sup>55</sup>. Физики из Южной Кореи активно работают в совместных проектах за пределами их границ, включая предстоящий эксперимент Super-Kamiokande в Японии, и, возможно, в Корее<sup>56</sup>. Китай также производит крупные новые инвестиции в физику нейтрино. Все эти предприятия требуют предельных усилий в конструировании электроники и создании компьютерных алгоритмов. Для Северной Кореи участие в международном физическом сотрудничестве могут создать ценные научные и экономические возможности в регионе и за его пределами.

На первом этапе политические деятели могут согласиться на привлечение ученых и инженеров из Северной Кореи в основанные на нейтрино верификационные проекты в Йонбене. Вслед за этим университеты и лаборатории за пределами Северной Кореи могут рассмотреть обмен студентами и визиты профессоров в физику нейтрино и связанных областях. Недавно заверченный научно-технический комплекс в Пхеньяне может принять международную конференцию по физике частиц. Для дальнейшего укрепления единства между Севером и Югом детекторы нейтрино в Йонбене могли бы быть дополнены детекторами на энергетических реакторах в Южной Корее. В этой объединенной программе можно было бы исследовать темы как фундаментальной, так и прикладной физики. В малом масштабе совместная работа Севера и Юга по физике частиц вызывает в памяти основание ЦЕРН в 1954 году в одном из первых дипломатических соглашений между Францией, Германией, и соседними странами после Второй мировой войны.

В завершение мы отмечаем, что технология и опыт готовы к реализации любого из вариантов, представленных в этом документе. Подготовку подробного плана строительства и оценки стоимости одного, или более конкретных вариантов развертывания можно начать сразу сейчас. Мы призываем политических деятелей рассмотреть основанные на нейтрино варианты в качестве части более широкого подхода к увеличению стабильности и безопасности на Корейском полуострове.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ: БАЗИС ДЛЯ ОЦЕНОК

Оценки чувствительности для вариантов с расстоянием 20 м получены масштабированием скоростей счета наблюдаемого сигнала и фоновых событий детектора PROSPECT<sup>57</sup>. Этот детектор регистрировал 771 событие сигнала в сутки для 2 тонн фидуциарного объема (4 тонн полного объема). Отношение сигнала к фону в эксперименте PROSPECT для событий типа ОБР равно 0,83. Детектор располагался на расстоянии 7,9 м от реактора мощностью 85 МВт (тепл.). Скорости счета сигнала и фона (в событиях за сутки) для различных расстояний и мощностей реактора следуют этим простым масштабным соотношениям:

$$S = 771 \left( \frac{m}{2} \right) \left( \frac{P}{85} \right) \left( \frac{7.9}{L} \right)^2 \quad (1.1)$$

$$B = \frac{771}{0.832} \left( \frac{m}{2} \right) \quad (1.2)$$

где масса  $m$  измеряется в тоннах, мощность  $P$  – в МВт (тепл.) и расстояние  $L$  – в метрах. При масштабировании

к размерам детектора, отличающимся от действительного размера PROSPECT, мы предполагаем, что фидуциарный объем включает себя весь объем сцинтиллятора, за исключением внешнего слоя толщиной 15 см. В этом масштабировании фидуциарная масса в 12 тонн соответствует примерно 20 тоннам полной массы сцинтиллятора.

Оценки чувствительности для детектора, размещенного на большем расстоянии, получаются масштабированием по формулам, аналогичным уравнениям (1-2). В этом случае опорным детектором будет не PROSPECT, а ближний детектор Daya Bay в экспериментальном зале <sup>158</sup>. Детекторы Daya Bay в этом местоположении заглублены на 250 метров водного эквивалента, что соответствует толщине реального скального грунта в 100 метров. Фидуциарный объем детекторов Daya Bay равен 20 тоннам, скорость счета сигнала равна примерно 700 событий в сутки, а полная скорость счета фона равна примерно 12 событиям в сутки. Суммарная тепловая мощность двух ближайших реакторов равна 5,8 ГВт (тепл.), а расстояние приблизительно равно 400 метрам. Высота горы Yaksan равна 480 м, и она находится на расстоянии около 2 км от реактора мощностью 5 МВт (эл.) и реактора ELWR. Места с толщиной заглубления 100 метров скального грунта можно найти, начиная с расстояния в 800 метров от реактора с мощностью 5 МВт (эл.), как это показано на рисунке 1.

Простой метрикой чувствительности является время T, необходимое для обнаружения перехода реактора из выключенного во включенное состояние на уровне достоверности в 95%, или более, в по крайней мере 95% случаев. Используя простую статистику счета, критерием для обнаружения на 95% уровне достоверности перехода от известного фона B к сигналу с фоном S + B за время t будет:

$$\int_{-\infty}^{(S+B)t} dx f(x | \mu = Bt, \sigma^2 = Bt) = 0.95 \quad (1.3)$$

где  $f(x|\mu, \sigma^2)$  – функция нормального распределения со средним значением  $\mu$  и дисперсией  $\sigma^2$ . Этот критерий выполняется или превышает в 95% случаев, если среднее ожидаемое количество событий, равное  $(S + B)T$ , удовлетворяет условию:

$$\int_{(S+B)t}^{\infty} dx f(x | \mu = (S + B)T, \sigma^2 = (S + B)T) = 0.95 \quad (1.4)$$

Мы используем уравнения 1–4 для оценки времени, необходимого для обнаружения перехода реактора из выключенного во включенное состояние, увеличивая критерий в уравнении 3 до 0,99 там, где необходимо уменьшить количество ложных положительных результатов.

При анализе состояния активной зоны моделирование активной зоны реактора ELWR базируется на модели конвертированного реактора на легкой воде IR-40 в Араке, Иран, с мощностью реактора, измененной до 100 МВт (тепл.)<sup>59</sup>. Модель реактора мощностью 5 МВт (эл.) взята из предыдущего анализа этого реактора<sup>60</sup>. Время  $t_{SQ}$ , необходимое для производства 8 кг плутония (1 существенное количество, или SQ, по определению МАГАТЭ), равно 450 суток для реактора с мощностью 5 МВт (эл.) и 330 суток для реактора ELWR. Методика анализа спектра была рассмотрена в предыдущей работе<sup>61</sup>. Отметим, что для реактора с мощностью 5 МВт (эл.) замена активной зоны не может быть обнаружена даже в сценарии с нулевым фоном менее, чем за 500 суток, что превышает время изготовления 8 кг плутония в этом реакторе.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Различие между электрической мощностью, обозначающейся дополнением (эл.), и тепловой мощностью, обозначающейся дополнением (тепл.), важно, потому что испускание нейтрино пропорционально тепловой мощности. Мы используем название реактора мощностью 5 МВт (эл.), потому что это название используется чаще всего.
2. D. Albright and K. O'Neill, *Solving the North Korean Nuclear Puzzle* (ISIS Press, 2000).
3. S. S. Hecker, "A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex," Center for International Security and Cooperation, Stanford University, November 2010, <https://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/a-return-trip-to-north-koreas-yong-byon-nuclear-complex/>.
4. K. K. R. Lai, W. J. Broad, and D. E. Sanger, "North Korea Is Firing up a Reactor That Could Upset Trump's Talks with Kim," *New York Times*, 27 March 2018, <https://www.nytimes.com/interactive/2018/03/27/world/asia/north-korea-nuclear.html>.

5. Albright and O'Neill, "Solving the North Korean Nuclear Puzzle (ссылка 2); "U.S. nuclear expert hails N.K. offer to close Yongbyon nuke complex as remarkable," *Yonhap News Agency*, 27 September 2018, <http://english.yonhap-news.co.kr/news/2018/09/27/0200000000AEN20180927010400315.html>.
6. DPRK and ROK, "Pyongyang Joint Declaration of September 2018," 19 September 2018, [https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2018/09/103\\_255848.html](https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2018/09/103_255848.html).
7. U.S. Department of State, "On the Outcome of Summit Meeting between President Moon and Chairman Kim," 19 September 2018, <https://www.cnbc.com/2018/09/19/pompeo-says-north-korea-nuclear-talks-must-be-done-by-january-2021.html>.
8. Yonhap News Agency. "U.S. nuclear expert hails N.K. offer to close Yongbyon nuke complex as remarkable." 27 September 2018 (ссылка 5).
9. A. A. Borovoi, and L. A. Mikaelyan, "Possibilities of the Practical Use of Neutrinos," *Soviet Atomic Energy* 44 (1978): 589.
10. E. Christensen, P. Huber, and P. Jaffke, "Antineutrino Reactor Monitoring – a Case Study," *Science and Global Security*, 23 (2015): 20. arXiv: 1312.1959.
11. Специфически, антинейтрино электронного аромата. Это единственный тип нейтрино, образующийся в реакторах.
12. W. Maneschg, "The Status of CONUS" (XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics. DOI:10.5281/zenodo.1286927, 2018)
13. C. L. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, and A. D. McGuire, "Detection of the Free Neutrino: A Confirmation," *Science* 124 (1956): 103–4.
14. K. Eguchi, "First Results from KamLAND: Evidence for Reactor anti-Neutrino Disappearance," *Physical Review Letters* 90 (2003): 021802. arXiv: hep-ex/0212021 [hep-ex].
15. F. P. An, "Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay," *Physical Review Letters* 108 (2012): 171803. arXiv: 1203.1669 [hep-ex].
16. J. K. Ahn, et al., "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment," *Physical Review Letters* 108 (2012): 191802. arXiv: 1204.0626 [hep-ex].
17. Y. Abe et al., "Indication of Reactor  $\bar{\nu}_e$  Disappearance in the Double Chooz Experiment," *Physical Review Letters* 108 (2012): 131801. arXiv: 1112.6353 [hep-ex].
18. F. P. An et al., "Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay," *Physical Review Letters* 118 (2017): 251801. arXiv: 1704.01082 [hep-ex]; G. Bak et al., "Fuel-composition dependent reactor antineutrino yield and spectrum at RENO," 2018. arXiv: 1806.00574 [hep-ex].
19. International Atomic Energy Agency, Final Report: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications, 2008.
20. E. Christensen et al., "Antineutrino Monitoring for Heavy Water Reactors," *Physical Review Letters* 113 (2014): 042503. arXiv: 1403.7065 [physics.ins-det].
21. A. I. Afonin et al., "Neutrino Experiment in the Reactor of the Rovno Atomic Power Plant: Cross-Section for Inverse Beta Decay," [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.41,355(1985)]," *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 41 (1985): 435–8.
22. A. Bernstein, Y. Wang, G. Gratta, and T. West, "Nuclear Reactor Safeguards and Monitoring with Anti-Neutrino Detectors," *Journal of Applied Physics* 91 (2002): 4672. arXiv: nucl-ex/0108001 [nucl-ex].
23. N. S. Bowden et al., "Experimental Results from an Antineutrino Detector for Cooperative Monitoring of Nuclear Reactors," *Nuclear Instrumentation Methods A572* (2007): 985–98. arXiv: physics/0612152 [physics].
24. G. Boireau et al., "Online Monitoring of the Osiris Reactor with the Nucifer Neutrino Detector," *Physical Review D93* (2016): 112006. arXiv: 1509.05610 [physics.ins-det].
25. Abe et al., "Indication of Reactor  $\bar{\nu}_e$  Disappearance in the Double Chooz Experiment." (ссылка 15)
26. An et al., "Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay." (ссылка 16)
27. Ahn et al., "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment." (ссылка 17)
28. J. Ashenfelter et al., "First Search for Short-Baseline Neutrino Oscillations at HFIR with PROSPECT," *Physical review letters* 121 (2018): 251802. arXiv: 1806.02784 [hep-ex].
29. Y. J. Ko et al., "Sterile Neutrino Search at the NEOS Experiment," *Physical Review Letters* 118 (2017): 121802, no. arXiv: 1610.05134 [hep-ex].
30. I. Alekseev et al., "Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment," *Physics Letters B* 787 (2018): 56–63. arXiv: 1804.04046 [hep-ex].
31. A. Haghghat et al., "Observation of Reactor Antineutrinos with a Rapidly-Deployable Surface-Level Detector," 2018. arXiv: 1812.02163 [physics.ins-det].
32. A.P. Serebrov et al., "The First Observation of Effect of Oscillation in Neutrino-4 Experiment on Search for Sterile

- Neutrino," 2018. arXiv: 1809.10561 [hep-ex].
33. H. Almazan, et al., "Sterile Neutrino Constraints from the STEREO Experiment with 66 Days of Reactor-On Data," *Physical Review Letters* 121 (2018): 161801. arXiv: 1806.02096 [hep-ex].
  34. N. van Remortel, "Commissioning and Calibration of the SoLid Experiment" (XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 4–9, June 2018, Heidelberg. DOI:[10.5281/zenodo.1287001](https://doi.org/10.5281/zenodo.1287001), 2018).
  35. J. Carroll et al., "Monitoring Reactor Anti-Neutrinos Using a Plastic Scintillator Detector in a Mobile Laboratory," 2018. arXiv: 1811.01006 [physics.ins-det].
  36. J. C. Anjos et al., "Using Neutrinos to Monitor Nuclear Reactors: The Angra Neutrino Experiment, Simulation and Detector Status," *Nuclear and Particle Physics Proceedings* 267–269. (2015): 108–15.
  37. Y. Kuroda et al., "A Mobile Antineutrino Detector with Plastic Scintillators," *Nuclear Instrumentation Methods A690*. (2012): 41–7. arXiv: 1206.6566 [physics.ins-det].
  38. D. Mulmule et al., "A Plastic Scintillator Array for Reactor Based Anti-Neutrino Studies," *Nuclear Instrumentation Methods A911*(2018): 104–14. arXiv: 1806.04421 [physics.ins-det].
  39. Christensen, Huber, and Jaffke, "Antineutrino Reactor Monitoring – A Case Study." (ссылка 10)
  40. Hecker, *A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex*. (ссылка 3)
  41. D. Albright, "North Korean Plutonium and Weapon-Grade Uranium Inventories," October 2015, <http://isis-online.org/isis-reports/category/korean-peninsula/#2017>.
  42. An et al., "Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay" (ссылка 16); Bak et al., "Fuel-Composition Dependent Reactor Antineutrino Yield and Spectrum at RENO." (ссылка 18)
  43. Christensen et al., "Antineutrino Monitoring for Heavy Water Reactors" (ссылка 20); Christensen, Huber, and Jaffke, "Antineutrino Reactor Monitoring – A Case Study." (ссылка 10)
  44. Christensen, Huber, and Jaffke, "Antineutrino Reactor Monitoring – A Case Study." (ссылка 10)
  45. Нейтрино от реакторов наблюдались на расстояниях, превышающих 100 км, с помощью самого большого в мире действующего детектора с жидким сцинтиллятором массой 1000 тонн KamLAND, установленного на глубине в 1 км под землей (Eguchi et al., "First Results from KamLAND: Evidence for Reactor anti-Neutrino Disappearance" – ссылка 14). Отметим, что этот детектор примерно в 30 раз меньше самого крупного детектора, рассматриваемого нами для Йонбена. При длительных временах наблюдений слабые сигналы нейтрино от реактора наблюдались на расстояниях до 1000 км на трехсоттонном реакторе Борексико с очень низким уровнем фона, расположенном на глубине 1,4 км (G. Bellini et al., "Observation of Geo-Neutrinos," *Physical Letters*, B687(2010): 299–304. arXiv: 1003.0284 [hep-ex]).
  46. An et al., "Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay." (ссылка 15)
  47. Ahn et al., "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment." (ссылка 16)
  48. Abe et al., "Indication of Reactor  $\bar{\nu}_e$  Disappearance in the Double Chooz Experiment." (ссылка 17)
  49. Steve Fetter et al., "Fissile Materials and Weapon Design," *Science and Global Security* 1 (1990): 225–302.
  50. F. Reines, *The Neutrino: From Poltergeist to Particle*, Nobel Lecture, 1995.
  51. A. F. Woolf, "Nonproliferation and Threat Reduction Assistance: U.S. Programs in the Former Soviet Union," Congressional Research Service, 2012.
  52. S. Nunn and R. Lugar, "What to do if the talks with North Korea succeed," *Washington Post*, [https://www.washingtonpost.com/opinions/global-opinions/were-all-preparing-for-the-trump-kim-summit-to-go-wrong-but-what-if-it-goes-right/2018/04/23/77ada258-472c-11e8-9072-f6d4bc32f223\\_story.html?utm\\_term=.3103f177c6ba](https://www.washingtonpost.com/opinions/global-opinions/were-all-preparing-for-the-trump-kim-summit-to-go-wrong-but-what-if-it-goes-right/2018/04/23/77ada258-472c-11e8-9072-f6d4bc32f223_story.html?utm_term=.3103f177c6ba).
  53. Ahn et al., "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment." (ссылка 17)
  54. Ko et al., "Sterile Neutrino Search at the NEOS Experiment." (ссылка 29)
  55. H. Bhang et al., "AMoRE Experiment: A Search for Neutrinoless Double Beta Decay of Mo-100 Isotope with Ca-40 MoO-100(4) Cryogenic Scintillation Detector," *Journal of Physics: Conference Series* 375 (2012): 042023.
  56. K. Abe et al., "Hyper-Kamiokande Design Report," 2018. arXiv: 1805.04163 [physics.ins-det]; K. Abe et al., "Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea," *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 6(2018): 063C01, arXiv: 1611.06118 [hep-ex].
  57. Ashenfelter et al., "First Search for Short-baseline Neutrino Oscillations at HFIR with PROSPECT." (ссылка 28)
  58. An et al., "Observation of Electron-antineutrino Disappearance at Daya Bay." (ссылка 16)
  59. T. M. Willig, C. Futsaether, and H. Kippe, "Converting the Iranian Heavy Water Reactor IR-40 to a More Proliferation-Resistant Reactor," *Science and Global Security*, 20 (2012): 97–116.
  60. Christensen, Huber, and Jaffke, "Antineutrino Reactor Monitoring – A Case Study." (ссылка 10)
  61. Christensen et al., "Antineutrino Monitoring for Heavy Water Reactors." (ссылка 20)