

## Investigation of the $2\nu\beta\beta$ -decay processes of $^{82}\text{Se}$ with the SuperNEMO detector

*Руководитель от ОИЯИ: О.И. Кочетов*

*Авторы: ОИЯИ, ЛЯП*

*В.Б. Бруданин, О.И. Вагина, Д.В. Караиванов, И.И. Камнев, А.А. Клименко, О.И. Кочетов, Н.А. Мирзаев, И.Б. Немченко, А.В. Рахимов, Н.И. Рухадзе, А.В. Саламатин, А.А. Смольников, И.А. Суслов, В.А. Тимкин, В.И. Третьяк, Д.И. Философов, Ю.А. Шитов*

### Абстракт

Проект SuperNEMO направлен на поиск безнейтринного двойного бета-распада ( $0\nu\beta\beta$ ). Обнаружение этого процесса, выходящего за рамки Стандартной модели, было бы указанием на майорановскую природу нейтрино (нейтрино тождественно антинейтрино) и позволило бы установить абсолютную шкалу и иерархию масс нейтрино. Наблюдение  $0\nu\beta\beta$  также может помочь в решении актуальных задач фундаментальной физики: CP-нарушение, лептогенезис, правосторонние токи, существование майорона, моды суперсимметрии с нарушением R-четности.

Основным преимуществом проекта SuperNEMO является уникальная треко-калориметрическая методика, которая была разработана в коллаборации NEMO. Потенциально с нулевым фоном, она позволяет идентификацию  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $e^+$  и  $e^-$  частиц, реконструировать топологию и полную кинематику события, включая индивидуальные энергии частиц, вершину треков для  $\beta\beta$ -распадных электронов и углы их вылета. Это позволяет серьезно подавить фон, проверку различных гипотез о механизмах  $0\nu\beta\beta$ -распада в случае его открытия.

Для проверки работоспособности треко-калориметрической методики и фонов на данном этапе создается Демонстратор SuperNEMO. Хотя прототип NEMO-3, используя данную методику, отлично себя зарекомендовал, с его помощью были измерены периоды полураспада двухнейтринного бета ( $2\nu\beta\beta$ ) и получены ограничения для безнейтринного двойного бета распада ( $0\nu\beta\beta$ ) для семи  $\beta\beta$ -изотопов:  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ , требовалась проверка работоспособности методики в связи с ее модернизацией. За время измерений (8 лет) на установке NEMO-3 не было найдено событий  $0\nu\beta\beta$ -распада. Был определен предел для механизма легкого Майорановского массового нейтрино  $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 1.1 \times 10^{24}$  у (90% C.L.) для  $\text{Mo}^{100}$ . Это соответствует эффективной Майорановской массе нейтрино в диапазоне  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.3 - 0.6$  eV в зависимости от используемой величины ядерного матричного элемента. Для защиты от космических мюонов спектрометры NEMO-3 и Демонстратор SuperNEMO были установлены в подземной лаборатории LSM в г. Модане, Франция. SuperNEMO детектор имеет модульную конструкцию со способностью измерять одновременно несколько изотопов, в настоящее время основным изотопом является  $^{82}\text{Se}$ . Ожидаемая чувствительность за 5 лет измерений на 20 модулях детектора SuperNEMO (100 кг  $^{82}\text{Se}$ ) составит  $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 10^{26}$  лет ( $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.04 - 0.11$  эВ), что сравнимо с другими проектами нашего поколения. В 2020 году был проведен комплекс завершающих работ по оснастке и наладке Демонстратора. Создание Демонстратора закончится летом 2021 года. В течении последующих 2.5 лет будет осуществляться набор данных с 6.3 кг обогащенного  $\text{Se}^{82}$ . Основной задачей Демонстратора является

достижение заявленных в проекте SuperNEMO параметров его работы, прежде всего по уровню фона и энергетическому разрешению калориметра.

Успешным окончанием первой фазы SuperNEMO (Демонстратор) должно стать подтверждение работоспособности предлагаемой методики и достижения практически нулевого фона при массовом производстве элементов детектора, демонстрация возможности ее масштабирования на полноформатный эксперимент со 100 кг источника (20 модулей). Кроме этого планируется получить физический результат по  $0\nu\beta\beta$ -распаду на уровне  $T(1/2) \sim 6 \times 10^{24}$  лет (стандартный массовый механизм) за 2.5 года измерений с изотопом  $Se^{82}$  (6.3 кг)

## Аннотация

Экспериментальные поиски безнейтринного двойного бета распада – одно из наиболее активных направлений исследований в физике нейтрино. Наблюдение такого процесса дает такую важную информацию как доказательство Майорановской его природы и может дать возможность определить абсолютную шкалу масс. Майорановская природа нейтрино дает фундаментальное расширение Стандартной Модели. Например, “see-saw” механизм требует существования Майорановского нейтрино для объяснения малой величины массы нейтрино. Майорановское нейтрино дает естественное объяснение нарушения лептонного числа и, особенно, процесса «лептогенезиса», который может объяснить асимметрию материи-антиматерии в мире.

В этом случае период-полураспада можно записать как:

$$T_{0\nu}(A,Z)]^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z)|M_{0\nu}(A,Z)|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2, \quad (1)$$

где  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  - эффективная Майорановская масса нейтрино,  $M_{0\nu}$  – Ядерный Матричный Элемент (ЯМЭ) и  $G_{0\nu}$  – кинематический фазовый фактор. Другие возможные механизмы включают в себя: существование правых токов в электро-слабых взаимодействиях, обмен супер симметричными частицами через нарушение “R-parity coupling” или экзотические размеры.

## Эксперимент NEMO-3

Детектор NEMO-3 был установлен в подземной низкофоновой лаборатории LSM (г.Модан, Франция) на глубине 1700 м скального грунта (4800 м.в.э.) и набирал данные с 2003 по 2011 г. Основной особенностью NEMO-3 была его уникальная способность полностью восстанавливать

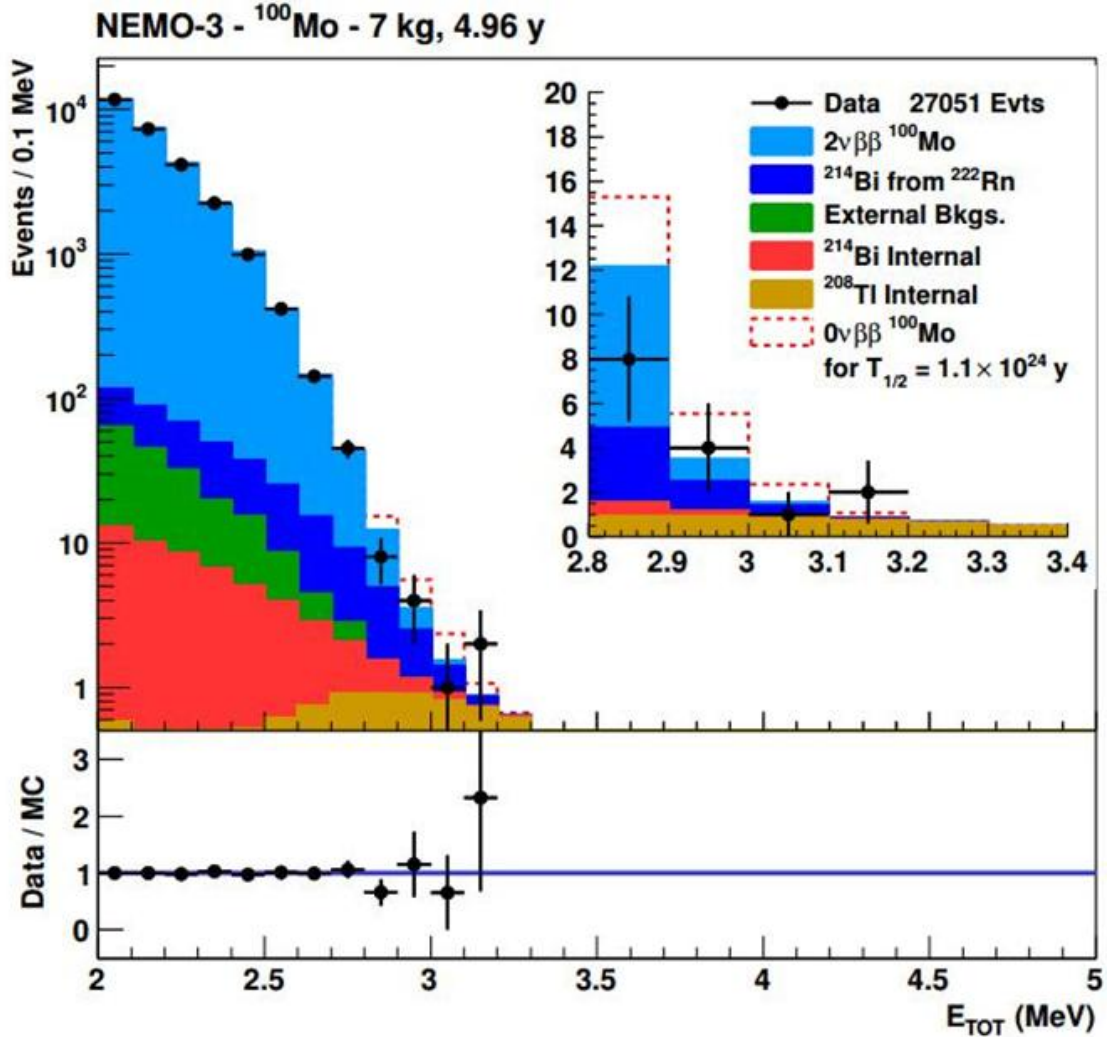
кинематику событий, которая позволяет существенно подавить фон и отделить различные механизмы от безнейтринного двойного бета распада. Электроны от  $\beta\beta$ -распада излучались из тонких фольг-источников ( $40 - 60 \text{ мг/см}^2$ ), проходя через два трековых объема. Трековой детектор, представляющий собой 6180 Гейгеровских ячеек, позволял достичь точности  $\sigma_t = 2-3 \text{ мм}$  на ячейку в поперечной плоскости и  $\sigma_z = 7-13 \text{ мм}$  в вертикальной плоскости. Трековый объем был окружен сегментированным калориметром, состоящим из 1940 больших блоков пластмассовых сцинтилляторов, соединенных с низко-радиоактивными 3" R 6591 и 5" R6594

ФЭУ (НАМАМАТСУ). Калориметр позволял достигнуть временного разрешения  $\sigma = 250 \text{ пс}$ , а энергетическое разрешение FWHM было [14-17] % для 1 МэВ электронов. На детектор накладывалось магнитное поле 25 Гс, которое позволяло разделять электроны  $e^-$  и позитроны  $e^+$ , а также идентифицировать  $\alpha$ -частицы и  $\gamma$ -лучи, что позволяло существенно подавить фон. Использовалась защиты от внешних гамма излучений (19 см низко-радиоактивного железа) и нейтронов (30 см воды с борированной кислотой).

Наиболее важные фоны для  $\beta\beta$ -распада эксперимента происходят от естественной радиоактивности материалов детектора, обусловленных долгоживущими изотопами, главным образом:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и продуктами их распада. Так как NEMO-3 детектор был способен различать частицы различного типа и топологию событий, это позволяло определить источники и вклад фонов по регистрируемой энергетической, трековой и временной информации [2]. Внешние фоны, происходящие в результате пересечения  $\gamma$ -лучей детектора, определялись в результате регистрации электронов, производимых в результате эффекта Комптона в одном из сцинтилляторов, и пересекающим трековый объем детектора. Внутренний фон, обусловленный вкладом в фольгу-источник, определялся как одиночное  $\beta$ -излучение и  $\beta$ - $\nu\gamma$  события, если один или несколько  $\gamma$ -квантов излучаются вместе с электроном. Вклад от радона определялся по задержанным  $\beta$ - $\alpha$  событиям (совпадениям) от  $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$  каскада в цепочке  $^{222}\text{Rn}$ .

Высокоэнергичный "хвост" спектра  $2\nu 2\beta$ -распада является неустранимым фоном при поиске  $0\nu 2\beta$ -распада. Измерения  $2\nu 2\beta$ -распада интересны сами по себе, так как могут давать информацию для теоретических вычислений ЯМЭ и для проверки различных ядерных моделей. NEMO-3 позволяет измерять не только периоды полураспада для всех твердотельных  $2\nu 2\beta$ -изотопов, но и одноэлектронные энергетические спектры, а также распределение углов между 2 электронами. Результаты по  $2\nu 2\beta$ -распаду, полученные для ряда изотопов в эксперименте NEMO-3, до сих пор являются наиболее точными прямыми измерениями [3-5], востребованы и крайне приветствуются теоретиками, работающими над расчетами NME.

Поиск  $0\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  был выполнен на статистике (экспозиции)  $34.7 \text{ кг}\cdot\text{лет}$  [6]. При этом не наблюдалось событий выше ожидаемого фона в энергетическом окне  $[2.8, 3.2] \text{ МэВ}$  около  $Q_{\beta\beta}$  значения для  $^{100}\text{Mo}$ . Предел на период  $0\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  был получен при помощи модифицированного log-likelihood-анализа [7]. Основные систематические погрешности составили 7 % для эффективности регистрации и 10 % для вклада от фонов. Финальные спектры от сигнала и фона в энергетическом окне  $[2.0, 3.2] \text{ МэВ}$  представлены на Рис. 1.



**Рис.1.** Сверху: конечный спектр суммы энергий двух электронов  $E_{\text{tot}}$ , полученный для  $^{100}\text{Mo}$  с помощью детектора NEMO-3. Снизу: отношение между наблюдаемым и ожидаемым распределениями полученными в результате Монте Карло моделирования. Сплошная гистограмма представляет ожидаемый спектр, содержащий  $2\nu 2\beta$ -распад и радиоактивные фоны, определяемые в результате Монте Карло моделирования. Гистограмма, представленная точками это гипотетический  $0\nu 2\beta$ -сигнал с  $T_{1/2}(0\nu) > 1.1 \times 10^{24}$  лет.

В результате был получен предел на период  $0\nu 2\beta$ -полураспада для

нейтрино масс механизма  $T_{1/2}(0\nu) > 1.1 \times 10^{24}$  лет (90 % C.L.), что соответствует  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 300-600$  мЭВ в зависимости от ЯМЭ [8-12] и вычислений

фазового фактора [13-14]. Пределы на механизм нарушения числа лептонов также были получены в работе [6]. Все результаты, полученные с помощью NEMO-3 для различных механизмов, сравнимы с лучшими текущими результатами для других изотопов и методик. Заслуживает внимания то, что не наблюдалось событий в энергетическом окне [3.2, 10.0 МэВ] для содержащихся в NEMO-3 изотопов с  $Q_{\beta\beta}$  ниже чем 3.2 МэВ ( $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ) или без  $\beta\beta$ -излучателей (Cu) в период накопления данных, соответствующих экспозиции 47 кг\*лет.

Треко-калориметрическая методика NEMO-3 позволила достичь нулевого фона при поиске  $0\nu 2\beta$ -распада для изотопов с высоким  $Q_{\beta\beta}$  таких как  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$ .

### *SuperNEMO эксперимент*

SuperNEMO является  $0\nu\beta\beta$ -экспериментом следующего поколения,

основанном на усовершенствованной комбинированной треко-калориметрической методике NEMO-3. Целью проекта является увеличение чувствительности детектирования  $0\nu\beta\beta$ -распада на два порядка по сравнению

с достигнутым результатом, до уровня  $T_{1/2}(0\nu) > 1 \times 10^{26}$  лет, соответствующего эффективной массе нейтрино  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 40-100$  мЭВ. SuperNEMO будет состоять из 20 идентичных планарных модулей, содержащих 5 кг изотопа двойного бета распада каждый. Основным исследуемым изотопом является  $^{82}\text{Se}$ , который можно относительно просто получить в большом количестве с высоким обогащением и высокой степенью очистки и, что актуально, за реальное время. Ведется разработка методик получения значительных количеств  $^{150}\text{Nd}$  и  $^{96}\text{Zr}$ , которые очень интересны, поскольку имеют высокое значение  $Q_{\beta\beta}$ . Источники двойного бета распада будут производиться в виде тонких фольг из порошка селена, наклеенного на пленку (майлар) или тонкую сетку.

Проведенное R&D позволило улучшить энергетическое разрешение калориметра FWHM до 4 % на 3 МэВ электронах. Особенное достижение,

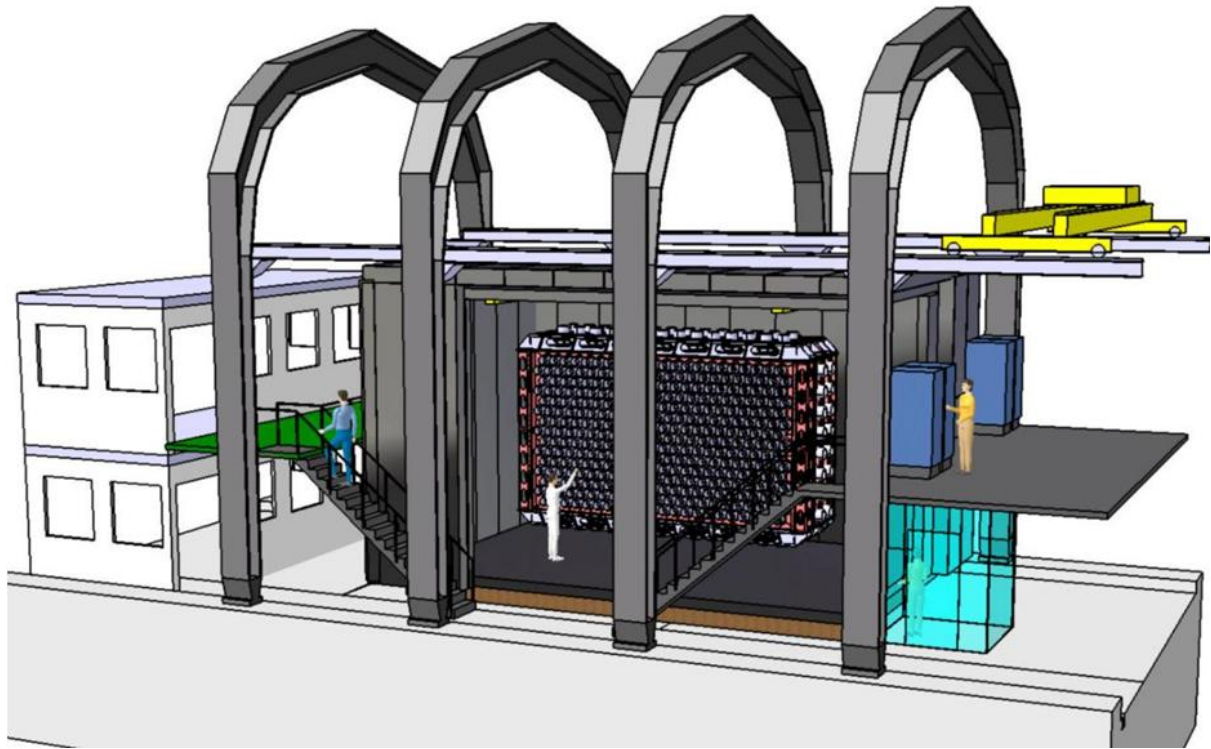
это уменьшение эманации радона из материалов детектора и предотвращение проникновения радона в объем детектора. Проведены исследования материалов по поглощению и пропусканию радона в радоновых камерах, оснащенных высокочувствительными детекторами радона. Также были проведены исследования с целью

совершенствования систем очистки трековых газов от радона. Радиоактивная чистота фольг-источников измеряется с помощью специально разработанного и построенного коллаборацией SuperNEMO BiPo детектора [15], имеющего чувствительность 2 и 10 мкБк/кг для  $^{208}\text{Tl}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , соответственно.

SuperNEMO коллаборация в настоящее время создает первый модуль (Демонстратор), в котором будет исследоваться 7 кг  $^{82}\text{Se}$ . Цель Демонстратора – получить нулевой фон в энергетической области  $0\nu\beta\beta$ -распада после 2.5 года измерений. В этом случае крайне важен выбор материалов, направленных на уменьшение вклада фона и увеличение физического потенциала SuperNEMO детектора. Чувствительность к периоду полураспада Демонстратора ожидается на уровне  $T_{1/2} > 6.5 \times 10^{24}$  лет, которая ведет к ограничению на массу  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.20\text{-}0.40$  эВ (90 % C.L.), что в 6 раз лучше текущего предела, полученного с помощью NEMO-3 для 10 кг  $^{100}\text{Mo}$ .

Калориметр демонстратора находится в стадии создания с оптическими модулями : пластмассовый сцинтиллятор + низкофонное 8” ФЭУ НАМАМАТСУ. Механическая конструкция на основе чистого железа находится в стадии создания и сборки. Полностью собран трековый детектор, оснащенный Гейгеровскими ячейками, и в настоящее время идет тест модуля на эманацию радона. Приобретено и очищено 5.5 кг обогащенного изотопа  $^{82}\text{Se}$ . Из него были изготовлены и измерены в сверхнизкофоновом BiPo-детекторе (стрипы) все фольги-источники. С помощью низкофонового HPGe-детектора, расположенного в подземной лаборатории LSM, отобраны низкорadioактивные материалы для изготовления системы крепления источников. Системы калибровок (radioактивные источники и источники света) демонстрируют высокую требуемую стабильность. Электроника для калориметра также создана и находится в стадии тестирования. Завершено изготовление электроники для трековых ячеек. Сборка Демонстратора в LSM в основном закончена за исключением пассивной защиты из сверхчистого железа от внешних  $\gamma$ -квантов и борированного полиэтилена от внешних нейтронов.

Набор физических данных начнется в начале 2022 г.



**Рисунок 2.** Демонстратор SuperNEMO в LSM

### **Заключение**

NEMO-3 был уникальным экспериментом с возможностью прямой реконструкции полной сигнатуры  $0\nu 2\beta$ -распада и рекордного подавления фона. При экспозиции 34.7 кг x лет событий  $0\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  не было найдено. Был определен предел на период полураспада для механизма легкого Майорановского массового нейтрино  $T_{1/2}(0\nu) > 1.1 \times 10^{24}$  лет (90 % C.L.), который соответствует пределу на эффективную Майорановскую массу нейтрино  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.3-0.6$  эВ. SuperNEMO – эксперимент следующего поколения с целью достижения уровня чувствительности  $T_{1/2}(0\nu) > 1 \times 10^{26}$  лет, что соответствует эффективной Майорановской массе нейтрино  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 40 - 100$  мэВ. Первый модуль – Демонстратор – SuperNEMO находится в стадии завершения. В течении 2.5 лет планируется нулевой фон в  $0\nu 2\beta$ -области в течении 2.5 лет для 7 кг  $^{82}\text{Se}$ . Чувствительность относительно периода полураспада ожидается  $T_{1/2}(0\nu) > 6.5 \times 10^{24}$  лет, что соответствует пределу чувствительности на эффективную майорановскую массу нейтрино  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 200-400$  мэВ (90 % C.L.). Набор физических данных с помощью Демонстратора ожидается в начале 2022 г.



*Публикации:*

- [1] R. Arnold et al., Nucl. Inst. Meth. A 536 (2005) 79
- [2] J. Argyreades et al., Nucl. Inst. Meth. A 066 (2009) 449
- [3] R. Arnold et al., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 062504
- [4] R. Arnold et al., Phys. Rev. C 80 (2009) 032501
- [5] R. Arnold et al., Nucl. Phys. A 847 (2010) 168
- [6] R. Arnold et al., Phys Rev. D 89 (111101 (R)) (2014)
- [7] T. Junk, Nucl. Inst. Meth. A 434 (1999) 435
- [8] J. S uhonen and O. Civitarese, J. Phys. G 39 (2012) 124005
- [9] F. Simkovic et al., Phys Rev. C87 (2013) 045501
- [10] J. Barea and F. Iachello, Phys. Rev. C 79 (2009) 044301
- [11] P.K. Rath et al., Phys. Rev. C 82 (2010) 064310
- [12] T.R. Rodrigues and G. Martines-Pinedo, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 252503
- [13] J. Kotila and F. Iachello, Phys. Rev. C 85 (2012) 034316
- [14] S. Stoica and M. Mirea, Phys. Rev. C 88 (2013) 037303
- [15] H. Gomes, Nucl. Inst. Meth A 718 (2013) 52