

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Объединенного  
института ядерных исследований  
академик РАН



В.А. Матвеев

«29» мая 2014 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Объединенного института ядерных исследований на диссертацию Ханбекова Никиты Дмитриевича «Изучение свойств монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  и изготовление на их основе сцинтилляционных элементов криогенного детектора для поиска безнейтринного двойного бета распада изотопа  $^{100}\text{Mo}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа Н.Д. Ханбекова «Изучение свойств монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  и изготовление на их основе сцинтилляционных элементов криогенного детектора для поиска безнейтринного двойного бета распада изотопа  $^{100}\text{Mo}$ » посвящена исследованию характеристик монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ , которые планируются использовать в качестве элементов сцинтилляционного детектора (балометра) в международном эксперименте нового поколения AMoRE (Advanced Mo based Rare process Experiment) по поиску безнейтринного двойного бета распада ( $0\nu 2\beta$ )  $^{100}\text{Mo}$ . Актуальность работы не вызывает сомнения. Открытие  $0\nu 2\beta$ -процесса даст ответ на множество вопросов физики нейтрино: иерархия масс нейтрино, природа нейтрино Майорановская или Дираковская, нарушение CP четности и др., которые находятся за рамками стандартной модели. Также в этом эксперименте имеется возможность и планируется поиск темной материи (WIMP).

Диссертация логически состоит из двух частей: производство и исследование сцинтилляционных характеристик монокристалла  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  как элемента сцинтилляционного детектора эксперимента АМоRE и определение его радиоактивной загрязненности (фон эксперимента), уровень которой является определяющим при поиске  $0\nu 2\beta$ -распада, а также разработка методов подавления внутреннего фона.

Выбор изотопа  $^{100}\text{Mo}$  для поиска  $0\nu 2\beta$ -распада определяется, во-первых, его высокой энергией двойного бета распада (суммарная энергия двух  $\beta$ -частиц 3034 кэВ), чем больше энергия, тем меньше фон, во-вторых, возможностью производства центрифужной методикой (только в России) десятков и сотен килограммов  $^{100}\text{Mo}$ , необходимых для эксперимента АМоRE.

Монокристаллы  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  являются неорганическими сцинтилляторами с высокими: содержанием  $^{100}\text{Mo}$ , что делает эксперимент более компактным, световыходом, прозрачностью и энергетическим разрешением. При тщательных отборе и очистке исходных материалов и специальной методике выращивания кристаллов (метод Чохральского, процедура двойной перекристаллизации) достигается чрезвычайно низкий уровень радиоактивной загрязненности  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ , требуемый в эксперименте АМоRE. Поскольку данный монокристалл является одновременно источником  $0\nu 2\beta$ -распада и его детектором (источник=детектор) эффективность регистрации  $\beta$ -частиц приближается, как обычно в такого типа экспериментах, к 100%, а энергетическое разрешение близко к разрешению ППД. Возможность анализа сигналов со сцинтилляционного детектора по форме импульса и по времени дает дополнительную возможность подавления фона. В свете всего вышесказанного исследование монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  является весьма актуальной задачей.

Диссертация содержит 123 страницы текста и состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы из 121 наименования, а также включает в себя 56 рисунков и 17 таблиц.

**Введение** посвящено определению целей работы, ее актуальности, состояние дел в исследовании и использовании монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ .

В **первой главе** диссертации изложено состояние дел в теоретических и экспериментальных исследованиях  $0\nu 2\beta$ -распада, оцениваются перспективы экспериментов нового поколения по его поиску. Описаны основные особенности и преимущества использования  $^{100}\text{Mo}$  в эксперименте AMoRE. Видно хорошее понимание диссертантом важности и проблем поиска  $0\nu 2\beta$ -распада.

**Вторая глава** посвящена описанию принципа работы, как сцинтиллятора, и процесса производства  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ , а также преимуществ использования его в эксперименте по поиску  $0\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  AMoRE. Общая масса  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  составит 200 кг. С целью анализа формы импульса для подавления фона будут регистрироваться сцинтилляционный и балометрический сигналы. Ожидается уровень фона в области  $Q_{\beta\beta}$  около  $3 \times 10^{-4}$  событий  $\times$  кэВ $^{-1}$   $\times$  кг $^{-1}$   $\times$  год $^{-1}$  и энергетическое разрешение в этой области 5 кэВ. В результате ожидаемая чувствительность по периоду  $0\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  будет составлять  $T_{1/2} \sim 10^{27}$  лет. Что находится на уровне чувствительности проектов нового поколения по поиску  $0\nu 2\beta$ -распада.

В **главе три** приведены описание установки, созданной при активном участии автора, и результаты характеристики образцов монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ . Измерены: абсолютный световыход при комнатной температуре, относительный световыход при комнатной и криогенных температурах, поглощение света кристаллами и удельная активность радиоактивных примесей.

**Глава четыре** посвящена описанию исследований внутреннего радиоактивного фона сцинтилляционных элементов, изготовленных на основе монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ , проведенных в подземной лаборатории ЯнгЯнг (Республика Корея). Описана установка, использованная для данных измерений. Для идентификации  $\alpha$  и  $\gamma$  – событий использовался метод отношения части сигнала к полному сигналу (tail to tail method).



Для подавления фона от  $^{214}\text{Bi}$  из цепочки распада  $^{238}\text{U}$  был использован метод время-амплитудного анализа. Вторым используемым методом анализа формы импульса основан на отборе событий по среднему времени высвечивания кристалла. Определено отношение  $\alpha/\beta$  (Quenching factor, QF), которое лежит в диапазоне 0.21 – 0.25 в зависимости от энергии  $\alpha$ -частиц (5.41 – 7.83 МэВ), в среднем около 0.23.

В заключении представлены наиболее значимые результаты диссертации.

Диссертационная работа Н.Д. Ханбекова является законченным экспериментальным исследованием, включающим в себя как оригинальные методические разработки, создание установок для определения характеристик монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ , написанные программы накопления и обработки данных, так и собственно полученные экспериментальные физические результаты, которые используются и еще будут использоваться в эксперименте по поиску  $0\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  AMoRE.

Оформление диссертационной работы удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

### **Замечания**

Следовало объяснить, чем был обусловлен выбор калибровочного кристалла при относительных измерениях световыхода.

Следовало указать параметры прозрачности и световыхода для исходных и отожжённых кристаллов.

Также в качестве замечаний к работе следует отметить ряд грамматических ошибок и стилистических неточностей, в том числе в автореферате. В качестве замечания по оформлению считаю нужным отметить крайнюю «разностильность» графического материала, на некоторых рисунках подписи приведены на английском языке.

Полученные в диссертационной работе результаты докладывались автором на сессии-конференции секции ядерной физики отделения физических наук РАН и на семинарах ИТЭФ, а также на рабочих совещаниях

коллораации АМоRE и опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах. Автореферат диссертации точно и полностью отражает ее содержание.

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком уровне и отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, а сам Н.Д. Ханбеков безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук за изучение свойств монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  и изготовление на их основе сцинтилляционных элементов криогенного детектора для поиска безнейтринного двойного бета распада изотопа  $^{100}\text{Mo}$ .

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на совместном заседании семинара «Физика низких энергий и структура атомного ядра» и НТС Научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, протокол № 6-14 от 26 мая 2014г.

Отзыв составил  
с.н.с., к.ф.м.н.



А.А. Клименко

Директор ЛЯП ОИЯИ  
д.ф.м.н.



В.А. Бедняков

Председатель НТС НЭОЯСиРХ  
д.ф.м.н.



В.Б. Бруданин