

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту ядерних досліджень НАН України
доктору фізико-математичних наук,
провідному науковому співробітнику
відділу структури ядра Інституту ядерних
досліджень НАН України
Саврасову Андрію Миколайовичу

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата фізико-математичних наук, старшого дослідника,
старшого наукового співробітника відділу фізики важких іонів
Інституту ядерних досліджень НАН України
Улещенка Володимира Васильовича
на дисертацію

Сокура Назара Володимировича
«Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елемента сиборгію»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань “10 Природничі науки”
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

Актуальність теми дисертації.

Представлена дисертаційна робота Сокура Н. В. «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елемента сиборгію» присвячена дослідженням ядерних розпадів, отриманню нових та уточненню наявних експериментальних даних про періоди напіврозпадів певних ізотопів, про їх поширеність в природі, вдосконаленню методології таких досліджень, розробці нових методів обробки даних.

Альфа-розпад вивчають вже понад 100 років. Цей процес є потужним інструментом, завдяки якому можна уточнювати вже відомі ядерні дані, перевіряти справедливність теоретичних моделей, уточнювати їх параметри. Також не припиняється процес розширення реєстрації таких процесів на ядра, які раніше вважались стабільними. Так 2003 року в дослідженні з кристалом германату вісмуту було виявлено альфа-активність ^{209}Bi (який вважався найважчим стабільним ядром), період напіврозпаду якого оцінили в $T_{1/2} \approx 1.9 \times 10^{19}$. Про результати відкриття повідомили в журналі Nature.

Події альфа-радіоактивності часто є фоном у дослідженнях подвійного бета-розпаду. Вивчення подвійного бета-розпаду може дати нам відповіді на

найбільш фундаментальні питання про природу нейтрино, що пов'язані з самими основами Стандартної моделі фізики частинок. В таких дослідженнях низький рівень фону є однією з найбільш важливих умов успішності, оскільки періоди напіврозпаду, характерні для подвійного бета-розпаду перевищують 10^{17} р, а тому шукані події є рідкісними. Відповідно розуміння і точний опис фону в експериментах, пошук шляхів його мінімізації, чому присвячена величезна частина представленої роботи, є невід'ємною частиною досліджень подвійного бета-розпаду.

До процесів, які вносять істотний вклад до фону, належать швидкі ланцюжки розпаду, такі як $^{212}\text{BiPo}$ -подія, яка ретельно вивчається в представленій роботі з використанням сцинтиляційної техніки. Крім цього через неузгодженість деяких останніх вимірів періоду напіврозпаду ^{212}Po , виникла потреба перевірки цього значення, а точність застосованих в роботі методів дозволила це успішно реалізувати.

Точне визначення фону в експерименті також може дозволити побачити рідкісні події, що потенційно очікуються від розпадів надважких елементів. Таких як, наприклад, сиборгій. Відкриття чи встановлення обмежень на поширеність надважких елементів дозволить нам краще прояснити природу ядерних сил, перевірити модельні розрахунки магічних чисел протонів і нейтронів.

Тому дослідження, представлені в дисертації, відносяться до тематики, що знаходиться на передньому краї науки, і безсумнівно є актуальними.

1. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості/достовірності положень, що в ній сформульовані

Представлена дисертаційна робота має 138 сторінок друкованого тексту, містить структурно оформлені анотацію (українською та англійською мовами), вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел з 264 найменувань, а також один обов'язковий додаток з вказаними окремо працями, що ілюструють публікацію та апробацію основних результатів, представлених у дисертації.

Структура роботи і викладення матеріалу є логічними і зрозумілими

У **вступі** обґрунтовано необхідність проведеної роботи, описано мету досліджень, описано їх методику, винесено основні результати, які мають наукову новизну, відзначено особистий внесок здобувача. Також наведено список публікацій та перераховано конференції, на яких пройшли апробацію результати роботи. Тут же наведено наукові проекти у ході виконання яких проводились дослідження.

У **першому розділі** описано основну теорію альфа-розпаду та розвиток моделей структури ядра. Вказано на те, як особливості структури впливають на ймовірність альфа-розпаду. В кількох підпунктах описано деякі особливості різних моделей, за якими обчислюють періоди напіврозпаду потенційно можливих рідкісних альфа-розпадів та передбачають існування надважких елементів. Також наведено основні відомості про подвійний бета-розпад, історичний розвиток теоретичних моделей, різні розширення Стандартної моделі, що передбачають поки-що не спостережений безнейтринний подвійний бета-розпад. Перераховано останні дослідження, присвячені його вивченню.

Другий розділ присвячено опису дослідження з визначення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po – найбільш короткоживучого з відомих учасників ланцюжків розпаду природних ізотопів. Детально описано експериментальну установку та її переваги перед іншими дослідженнями, завдяки чому вдалося досягти найточнішого результату серед усіх проведених досліджень. Проведено аналіз швидкого ланцюжка $^{212}\text{BiPo}$, вивчено особливості сигналів, такі як передній фронт, середній час сигналу, вклад у сигнал різних сцинтиляційних складових та вплив повільної складової на визначення положення сигналу. Побудовано енергетичні спектри BiPo -подій. Детально описано вплив систематичних неточностей на отримуване значення періоду напіврозпаду: від особливостей аналізу, таких як, наприклад, енергетичний відбір до часового розподілу подій між сигналами BiPo -події, до зовнішнього впливу — температури, точності апаратури тощо.

У **третьому розділі** описано стан досліджень надважких елементів. Докладно описано експеримент, головною метою якого було вивчення подвійного бета-розпаду ізотопу ^{116}Cd в кристалі CdWO_4 , але велика експозиція дозволила встановити найкраще обмеження на поширеність сиборгію відносно хімічно подібного вольфраму. Проведено аналіз форм сигналів та змодельовано сигнали від BiPo -подій, які можуть бути присутніми на високоенергетичній частині спектру, де, відповідно до певних теоретичних передбачень, може бути пік від альфа-розпаду дочірнього елементу сиборгію. Результати дослідження зробили обмеження на поширеність сиборгію жорсткішим на порядок порівняно з попереднім подібним дослідженням з кристалом ZnWO_4 .

У **четвертому розділі** викладено особливості дослідження експерименту AMoRE , метою якого є дослідження подвійного бета-розпаду ^{100}Mo . Приведено план роботи з переліком завдань на три стадії дослідження. Надано звіт про вивчення альфа-фону на першій стадії AMoRE-pilot , що надало розуміння подальшого розвитку установки та аналізу наступної стадії AMoRE-I . Викладено методи аналізу внутрішньої та поверхневої забрудненості кристалів

та навколишніх матеріалів, що спричиняють фон у спектрі на енергетичному проміжку навколо Q-значення ^{100}Mo . Вказано, що встановлений рівень фону, що становить, $(2,22 \pm 0,03) \times 10^{-2}$ вкр, потребує зменшення на наступних стадіях, щоб збільшити чутливість експерименту до безнейтринного подвійного бета-розпаду ^{100}Mo .

У **висновках** підбито підсумки всіх трьох викладених досліджень.

Високий науковий рівень та достовірність положень, що сформульовані в роботі забезпечуються використанням сучасної експериментальної техніки, сучасних методів обробки даних, підтверджуються апробацією результатів на 9-х наукових конференціях та 2-х колабораційних зустрічах, публікацією результатів у 3-х престижних наукових журналах з обов'язковим рецензуванням.

2. Наукова новизна одержаних результатів

- Отримано найточніше на сьогодні значення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po на рівні $T_{1/2} = 295,1(4)$ нс, що узгоджується з результатами колаборацій Bogehino та XENON, але відхиляється від попереднього табличного значення $T_{1/2} = 299(2)$ нс. Зараз табличне значення складає $T_{1/2} = 294,3(8)$ нс, яке також узгоджується із виміряним у цьому дослідженні.
- З аналізу даних вимірювань із низькофоновими сцинтиляційними детекторами з кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$ встановлено обмеження на поширеність надважкого елементу сиборгію на рівні $\eta \leq 5,1 \times 10^{-15}$ атомів(Sg)/атомів(W) з 90% довірчою ймовірністю. Це знижує попереднє обмеження, отримане з кристалом ZnWO_4 , на порядок.
- Вивчено поверхневу забрудненість кристалів кадмій молібдатів (СМО) з використанням симуляцій у Geant4. Виконано розрахунки для ланцюжків розпадів ^{238}U , ^{232}Th та ^{235}U внутрішнього та поверхневого забруднень. Усі симульовані фонові спектри добре описують дані всіх шести детекторів в області 2,5-7,0 MeV. Середній рівень фону п'ятих детекторів від поверхневого забруднення становить $(2,22 \pm 0,03) \times 10^{-2}$ вкр в досліджуваній області, тобто є вищим ніж потрібен на стадії АМоRE-II.

3. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Перш за все отримані значення періоду напіврозпаду ^{212}Po та обмеження на поширеність надважкого сиборгію поповнять базу об'єктивних даних про природу, які можуть бути використані в наступних дослідженнях і роботах.

Крім цього представлені результати дисертаційної роботи з дослідження ВіРо-подій покращують методи аналізу швидких сигналів та ланцюжків сигналів, що допоможе в багатьох низькофонових дослідженнях, включно з

подвійним бета-розпадом. Вивчення фону в дослідженні АМоRE допоможе покращити установку для досягнення поставлених цілей в дослідженнях подвійного бета-розпаду ^{100}Mo на етапі АМоRE-II.

4. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

Основні положення досліджень, виконаних в рамках дисертаційної роботи, викладені у 3 статтях у престижних наукових виданнях з першого квартилю, котрі відповідають проблематиці дисертаційної роботи, і досить повно висвітлюють наукові результати, покладені в основу дисертації та шляхи їх отримання.

Додатково результати, що відносяться до теми дисертації опубліковані в одній статті у виданні, що відноситься до четвертого квартилю.

Наукові публікації відповідають вимогам пп. 8-9 “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. з наступними змінами.

Також за результатами апробації результатів на конференціях опубліковано 9 тез доповідей.

5. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У кількох місцях не зайвим було б дати коментар про неочікуваний ізотопний склад забруднення досліджуваних кристалів. Наприклад наведені у Табл. 3.1 на стор. 87 співвідношення активностей ізотопів урану, виявлених у сцинтиляційних кристалах $^{116}\text{CdWO}_4$ не відповідає очікуванням від природної суміші урану. Якщо весь уран, що є в кристалах походить з природної суміші, то активність ^{235}U мала би бути всього у пару десятків разів меншою за активність ^{238}U чи ^{234}U . Так у наведених в цій же таблиці результатах роботи [231] ці активності відрізняються у приблизно 15 разів. Відповідно при заявленій активності ^{238}U та ^{234}U рівня 0.5-0.6 мБк/кг, активність ^{235}U не повинна бути меншою за 0.02-0.03 мБк/кг, що не повинно бути непомітним при заявленій точності в кілька тисячних мБк/кг, а в наведеному результаті активність ^{235}U зовсім відсутня. Аналогічно в Табл. 4.2 на стор. 100 чомусь зовсім відсутнє забруднення від ^{234}U і це ніяк не коментується. Хоча на попередній стор. 99 помічене і обговорюється лише трішки підвищене забруднення ізотопом ^{235}U одного з кристалів.

2. Було б добре детальніше описати як проводилося моделювання сигналів ВіРо-події та які особливості детекторної системи при цьому використовувалися.
3. Загалом робота написана хорошою українською мовою і непогано вичитана, але часом містить не зовсім загальноживані форми слів. Наприклад «забруднености» замість «забрудненості» на стор. 94 чи «матеріялів» замість «матеріалів» на стор. 93, 96.

Крім того автору не вдалося зовсім позбавитись одруків. Наприклад у підписі Рис. 3.11 на стор. 88 помилково вказано ізотоп ^{220}Ra замість ^{220}Rn . Позначення ^{220}Rn присутнє на рисунку, і беручи до уваги енергію α -частинки розпаду, саме такий ізотоп присутній у результатах вимірів тож мав би бути у описі. На стор. 110 пропущено літеру «є» у слові «має».

Вказані зауваження не є критичними і не змінюють загальну позитивну оцінку роботи.

6. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертація оформлена відповідно до вимог, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40, містить всі необхідні структурні елементи, написана державною мовою, усі використані матеріали, результати і висновки мають відповідні літературні посилання. Ознаки порушення автором вимог академічної доброчесності не спостерігаються.

7. Загальний висновок.

Представлена дисертація є самостійною, цілісною і завершеною науковою працею з чіткою постановкою задачі, описом методів досліджень та викладенням отриманих результатів. Робота відзначається належним науковим рівнем, а сформульовані в ній положення є обґрунтованими і достовірними. Зміст дисертації відповідає поставленим меті і завданням дослідження. Отримані результати достатньо значущі, мають наукову новизну, відносяться до актуальної тематики, пройшли необхідну апробацію та опубліковані належним чином.

Вважаю, що дисертаційна робота Сокура Назара Володимировича «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елемента сиборгію» відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах) затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 з наступними змінами; пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення

разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 з наступними змінами, а її автор Сокур Назар Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

к.ф.-м.н. ст. досл.
старший науковий співробітник
відділу фізики важких іонів



Володимир
УЛЕЩЕНКО

Підпис В.В. Улещенка засвідчую
Вчений секретар
Інституту ядерних досліджень НАН України



Наталія
ДОРОШКО