

УДК 539.123.17, 539.12, 539.16, 539.1.08, 53.08, 52

Р. С. Бойко¹, Ф. А. Даневич¹, О. В. Зуєва¹, В. В. Кобичев¹, Л. М. Кобичева¹,
Р. В. Кобичев^{1,2}, Б. М. Кропив'янський¹, В. М. Мокіна¹, Д. В. Пода^{1,3},
О. Г. Поліщук^{1,4}, А. І. Тимошенко¹, В. І. Третяк^{1,4}, Д. М. Черняк¹

¹ Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, Київ

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

³ Центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція

⁴ Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі «Ла Сапієнца», Рим, Італія

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЙТРИНО І ПОШУКИ ЕФЕКТІВ ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЇ МОДЕЛІ ЧАСТИНОК

Властивості елементарних частинок тісно пов'язані з проблемами космології і астрофізики. Пояснення явища нейтринних осциляцій, природи темної матерії і темної енергії, асиметрії баріонної і антибаріонної речовини у Всесвіті вимагають розширення стандартної моделі частинок, де нейтрино відіграють ключову роль. Вимірювання потоків нейтрино від різних джерел, дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду здатні дати відповіді на фундаментальні питання про природу нейтрино (частинка Дірака чи Майорани?), величину маси і схему масових станів цієї частинки, порушення закону збереження лептонного заряду, порушення CP-симетрії завдяки змішуванню нейтрино та ін. Пошуки гіпотетичних частинок темної матерії методами ядерної спектроскопії покликані дати відповідь на питання про природу і склад темної матерії.

Ключові слова: нейтрино, стандартна модель елементарних частинок, подвійний бета-розпад, темна матерія.

ВСТУП

Розуміння будови і еволюції Всесвіту неможливе без застосування теорії елементарних частинок і взаємодій між ними [1]. З іншого боку, саме астрономія, астрофізика і космологія своїми спостереженнями темної матерії спонукають розширювати стандартну модель елементарних частинок, у той час як для пояснення темної енергії можуть знадобитися зовсім нові підходи.

Одним із найбільш вражаючих досягнень фізики елементарних частинок (у першу чергу не прискорювальної, або «підземної» фізики) ста-

ли спостереження явища осциляцій нейтрино у численних експериментах, які вимірюють потоки нейтрино від Сонця, ядерних реакторів, з верхніх шарів атмосфери, прискорювачів. Ці спостереження можна пояснити у припущенні про наявність масових станів нейтрино, у той час як спостережувані аромати нейтрино є результатом змішування масових станів. Важливою задачею є підвищення точності вимірювань у широкому діапазоні відстаней між джерелом нейтрино і детектором, а також у широкому діапазоні енергій нейтрино.

Але точність експериментів, що спостерігають осциляції нейтрино, поки що не дає можливості визначити величину маси і схему масових станів нейтрино: вона може бути вироджена, інвертована чи нормальна [43]. Крім того, відкритими залишаються питання про природу нейтрино

© Р. С. БОЙКО, Ф. А. ДАНЕВИЧ, О. В. ЗУЄВА,
В. В. КОБИЧЕВ, Л. М. КОБИЧЕВА, Р. В. КОБИЧЕВ,
Б. М. КРОПИВ'ЯНСЬКИЙ, В. М. МОКІНА, Д. В. ПОДА,
О. Г. ПОЛІЩУК, А. І. ТИМОШЕНКО, В. І. ТРЕТЯК,
Д. М. ЧЕРНЯК, 2015

(частинка Дірака чи Майорани?) і збереження лептонного заряду. Нейтрино майоранівської природи виглядають привабливими з точки зору теорії, і тому пошуки безнейтринного подвійного бета-розпаду ($0\nu 2\beta$) ядер (процесу, можливого лише за умови, що нейтрино є масивною частинкою Майорани) виглядають найбільш багатобіляючим шляхом дослідження властивостей нейтрино і слабкої взаємодії. Важливо відмітити, що майоранівська природа нейтрино є одним із можливих пояснень асиметрії баріонної матерії у Всесвіті [27].

Пошуки гіпотетичних частинок темної матерії методами ядерної спектроскопії залишаються однією з ключових задач фізики. Суперечливі дані підземних експериментів (спостереження річних модуляцій сигналу в експерименті DAMA [26], у той час як у ряді інших дослідів очікуваний ефект від ядер віддачі не спостерігається [4, 5, 10]), відсутність спостереження суперсиметричних частинок у прискорювальних експериментах [11, 31] вимагають підвищення чутливості експериментів і пошуків інших кандидатів на роль темної матерії: аксіонів, стерильних нейтрино та ін. Вимірювання потоків нейтрино, пошуки $0\nu 2\beta$ -розпаду і темної матерії об'єднує вимога подальшого зниження фону детекторів, розробки нових підходів. Нещодавно розроблені криогенні сцинтиляційні детектори виглядають найбільш перспективними для вирішення цих задач.

Дана робота підсумовує результати останніх робіт в цих напрямках, виконані в рамках проекту «Супутникові та лабораторні експерименти для досліджень космічних променів, верхніх шарів атмосфери, Сонця, пошуку ефектів за рамками стандартної моделі частинок ядерно-фізичними методами» в Інституті ядерних досліджень НАН України.

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙТРИНО ВІД СОНЦЯ, ЗЕМЛІ ТА ІНШИХ ДЖЕРЕЛ

Установка Borexino є на сьогоднішній день одним з найбільш потужних нейтринних детекторів [37, 47, 49]. Детектор Borexino був розроблений з метою вимірювання у режимі реального часу спектру нейтрино від розпадів ${}^7\text{Be}$ у термоядер-

них реакціях на Сонці [6]. Успішно виконуючи цю задачу [18, 19], детектор виявився унікальним інструментом для досліджень нейтрино різної природи. Зокрема, уперше в світі здійснено пряме спектрометричне спостереження сонячних нейтрино від синтезу двох протонів (p-p-циклу) та виміряно їхній потік. Нейтрино, які утворюються в результаті протон-протонного синтезу, є головним компонентом потоку сонячних нейтрино. В експерименті уперше був вимірний спектр p-p-нейтрино, який підтверджує, що близько 99 % енергії Сонця, а саме $3.84 \cdot 10^{26}$ Вт, генерується саме у p-p-циклі. Експеримент підтверджує стабільність енерговиділення у центрі Сонця за останні сто тисяч років [20]. Ще одним видатним досягненням є спостереження антинейтрино із надр Землі (гео-нейтрино). Вимірний потік антинейтрино $3.9^{+1.6}_{-1.3}$ (стат.) $^{+5.8}_{-3.2}$ (сист.) подій/(100 тонн детектора за рік) узгоджується з моделлю будови Землі без припущення про наявність активного геореактора в ядрі Землі. Цю гіпотезу відкинуто з довірчою ймовірністю 95 % (у припущенні, що потужність такого реактора не перевищує 3 ТВт) [17, 37, 49].

Завдяки дуже низькому радіаційному фону і великим розмірам детектор Borexino може реєструвати низькоенергетичні електронні нейтрино і антинейтрино, що дозволяє вивчати нейтринні осциляції зі штучними джерелами на коротких відстанях у кілька десятків метрів (проект SoX) [21]. Планується застосувати потужні джерела нейтрино (${}^{51}\text{Cr}$) і антинейтрино (${}^{144}\text{Ce}$ - ${}^{144}\text{Pr}$). Очікується, що експеримент буде чутливий до стерильних нейтрино масою на рівні кількох електронвольт. Крім того, буде здійснено пошук магнітного моменту нейтрино, точне вимірювання кута змішування в електрослабкій взаємодії [25, 44]. У 2014 р. розпочато спорудження антинейтринного джерела ${}^{144}\text{Ce}$ - ${}^{144}\text{Pr}$ з активністю порядку 100 кКі та енергіями антинейтрино до 3 MeV.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЙТРИНО У ПОДВІЙНОМУ БЕТА-РОЗПАДІ АТОМНИХ ЯДЕР

Дослідження подвійного бета-розпаду є одним з пріоритетних напрямків фізики ядра і елементарних частинок завдяки унікальним можливостям

визначати природу нейтрино та його масу, схему масових станів, перевірити закон збереження лептонного заряду, існування правих токів у слабкій взаємодії та бозонів Намбу — Голдстоуна (так званих майоронів), ряд інших ефектів за межами стандартної моделі частинок [14, 28, 36, 46, 50].

Чутливість сучасних експериментів усе ще недостатня, щоб визначити схему масових станів нейтрино (можна стверджувати, що найбільш чутливі експерименти відкидають лише вироджену схему [14]). Задачею експериментів наступного покоління є досягнення чутливості до ефективної маси нейтрино на рівні $\langle m_{\nu} \rangle \sim 0.05$ eВ, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино. Для досягнення цієї мети необхідні детектори великої маси (сотні кг досліджуваного ізотопу) з високими ефективністю реєстрації ефекту і енергетичною роздільною здатністю, низьким (в ідеальному випадку нульовим) фоном. Таким вимогам задовольняють низькотемпературні сцинтиляційні детектори [39, 45], у яких сцинтиляційні кристали використовуються як джерело 2 β -розпаду і як детектор одночасно (це означає, що кристал має містити у своєму складі елементи, у яких є 2 β -активні ізотопи). Важливою є вимога великої енергії розпаду (більше за енергію 2615 кеВ, яка випромінюється у вигляді гамма-квантів при розпаді радіонуклідів ^{208}Tl , дочірнього ^{232}Th) і можливість збагачення ізотопу у великих кількостях [12].

З огляду на вищевикладене, одним з найбільш перспективних є ядро ^{100}Mo . Для здійснення експерименту з пошуку 0 ν 2 β -розпаду ^{100}Mo необхідна розробка сцинтиляційних кристалів з молібденом. Найбільш перспективними виглядають молібдати літію (Li_2MoO_4) [15], кальцію (CaMoO_4) [9] і цинку (ZnMoO_4) [38]. В рамках проекту LUMINEU був розроблений кристал ZnMoO_4 із молібдену, збагаченого до 99.5 % ізотопом ^{100}Mo , масою 171 г з високим виходом кристалу 84 % і достатньо низьким рівнем невідворотних втрат на рівні близько 4 %. Кристал був вирощений за допомогою унікального методу Чохральського з низьким градієнтом температури [40]. Досліджені сцинтиляційні і болометричні властивості детекторів при температурах 15—20 мК. Показано, що за боломет-

ричними властивостями та рівнем радіоактивної чистоти матеріал не поступається зразкам із незбагаченого молібдену [13]. Цей результат досягнуто завдяки розробленому в рамках проекту LUMINEU методу глибокої очистки молібдену від радіоактивних елементів та перехідних металів [24, 48]. Нещодавно за такою ж методикою був вирощений ізотопно збагачений кристал з вагою близько 1.4 кг.

Підготовка чутливого експерименту для пошуку 0 ν 2 β -розпаду ^{100}Mo за допомогою низькотемпературних сцинтиляційних болометрів з кристалами молібдату кальцію із збагаченого молібдену 100 і кальцію, збідненого на 2 β -активний ізотоп ^{48}Ca ($^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$), ведеться в рамках колаборації AMoRE [41, 42].

Ще одним, не менш привабливим низькотемпературним сцинтилятором, є кристали Li_2MoO_4 . Важливими перевагами цього матеріалу є висока концентрація молібдену, відсутність радіоактивних елементів у складі сполуки, відносна простота виробництва сцинтиляційних елементів із збагаченого молібдену. Було розроблено монокристали Li_2MoO_4 (зокрема, один зразок розмірами $\varnothing 40 \times 40$ мм) і досліджено люмінесценцію під дією рентгенівського випромінювання, спектри емісії, залежність інтенсивності люмінесценції від температури, фосфоресценцію, термостимульовану люмінесценцію (при температурах до температури рідкого гелію), сцинтиляційні і болометричні властивості (при температурах близько 15 мК) [16].

Однією з найважливіших характеристик спектрометрів для пошуку 2 β -розпаду є рівень фону. У випадку сцинтиляційних детекторів суттєвим джерелом фону є радіоактивна забрудненість фотоелектронних помножувачів (ФЕП). Для зменшення фону сцинтиляційного детектора від ФЕП були запропоновані світловоди з вольфрамату свинцю [33]. Із глибоко очищеного археологічного свинцю [29] був розроблений сцинтиляційний кристал PbWO_4 $\varnothing 40 \times 83$ мм [2], який успішно використовується як світловод у низькофоновому експерименті з пошуку подвійного бета-розпаду ізотопу ^{106}Cd у підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія) за допомогою сцинтиляційного кристалу вольфрамату кадмію із кадмію,

збагаченого ізотопом ^{106}Cd до 66.4 %. Чутливість експерименту до процесів подвійного електронного поглинання (2ε) та поглинання електрона з випромінюванням позитрона ($\varepsilon\beta^+$) у ядрі ^{106}Cd очікується на рівні $T_{1/2} \sim 10^{20} - 10^{21}$ років [22].

Дослідження радіоактивної забрудненості церію мало на меті розробку сцинтиляторів з церієм (або активованих церієм) і дослідження подвійного бета-розпаду ізотопів ^{136}Ce , ^{138}Ce і ^{142}Ce . Найбільш цікавим є ^{136}Ce , оскільки це ядро може розпадатися за трьома каналами розпаду: 2ε , $\varepsilon\beta^+$ і шляхом подвійного позитронного розпаду ($2\beta^+$). Безнейтринні 2ε - і $\varepsilon\beta^+$ -процеси чутливі до гіпотетичних домішок правих токів у слабкій взаємодії. Пошуки 2β -розпаду церію були здійснені на новому рівні чутливості за допомогою наднизькофонової γ -спектрометрії. Встановлено нові обмеження на періоди напіврозпаду ядер $^{136,138,142}\text{Ce}$ на рівні $10^{17} - 10^{18}$ років [23].

ПОШУКИ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

Обладнання, створене для забезпечення проекту *Worexino* (а саме, допоміжний детектор *Counting Test Facility* [7]), який використовувався для перевірки рідкого сцинтилятора для експерименту *Worexino*) виявилось достатньо потужним для розміщення в ньому низькофонової установки *DarkSide*. Детектор буде виконувати пошук частинок темної матерії за допомогою двофазової (рідина — газ) часово-проекційної камери, наповненої аргонном, видобутим з надр Землі для зменшення фону від радіоактивного ізотопу ^{39}Ar космогенного походження [3, 30]. Прототип детектора буде містити близько 10 кг аргону (*DarkSide-10*), наступним кроком буде збільшення маси аргону до 50 кг (*DarkSide-50*) з перспективою розробки детектора з чутливою масою на рівні кількох тонн.

Підвищення чутливості експериментів з пошуку масивних слабковзаємодіючих частинок вимагає збільшення маси детектора, якомога нижчого фону, чутливості до ядер віддачі різної маси з надзвичайно малою енергією у кілька кеВ. Європейський проект *EURECA* має на меті спорудження великого кріогенного детектора з різними кристалами (напівпровідниковими і сцинтиляційними) для дослідження широкого діапазону мас частинок

темної матерії. Колаборацією було розроблено конструкцію детектора [8], спорудження якого планується розпочати у 2017 р.

Оптимізація умов збирання світлових фотонів у кріогенних сцинтиляційних болометрах є особливо важливою для зниження порогу реєстрації (для пошуку частинок темної матерії) і підвищення відношення ефект/шум (для зниження фону від випадкових збігів подій в експериментах з пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра ^{100}Mo за допомогою кріогенних детекторів [32]). Показано експериментально і підтверджено у розрахунках методом Монте-Карло, що із сцинтиляційними кристалами у формі призми (з 3, 4, 6 гранями) з дифузною поверхнею, оточеними відбивачем світла у формі зрізаного конуса, можна отримати значно більшу ефективність збирання фотонів на фотодетектор, ніж у випадку використання полірованих сцинтиляторів у формі циліндра з циліндричним відбивачем світла (типова конструкція кріогенного модуля у детекторах темної матерії) [34, 35].

ВИСНОВКИ

Вимірювання потоків нейтрино від різних джерел за допомогою детектора *Worexino* здатні дати важливу інформацію не лише про властивості нейтрино (що є ключовими для побудови розширень стандартної моделі елементарних частинок), але й досліджувати внутрішню будову Сонця і Землі. Виключно низький фон детектора *Worexino* у підземній лабораторії Гран-Сассо дозволяє планувати унікальний експеримент для дослідження осциляцій нейтрино на малих відстанях (метри — десятки метрів, проект *SOX*), вести пошуки слабковзаємодіючих частинок темної матерії (проект *DarkSide*).

Дослідження подвійного бета-розпаду вступають у новий етап, коли чутливість експериментів має бути достатньою для реєстрації процесу, якщо нейтрино є частинкою Майорани з ефективною масою, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино близько 0.05 еВ. Для цього ведеться розробка кріогенних сцинтиляційних болометрів з кристалами молібдатів літію, кальцію і цинку із збагаченого ізотопу ^{100}Mo . Уперше у світі розроблено кристали $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$ масою

171 г та 1.4 кг із молібдену, збагаченого цим ізотопом. Експеримент з детекторами $Zn^{100}MoO_4$ масою близько кілограма планується розпочати навесні 2015 р. Надалі буде прийняте рішення про підготовку експерименту з пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ^{100}Mo з масою ізотопу близько 10 кг (з кристалами $Li_2^{100}MoO_4$ або $Zn^{100}MoO_4$), що буде одним з найбільш чутливих 2β -експериментів. Метою цих розробок є побудова детектора масою кілька сотень кілограмів для перевірки інвертованої схеми маси нейтрино.

Пошуки взаємодій гіпотетичних частинок темної матерії дають суперечливу інформацію: у той час як в експерименті DAMA спостерігаються річні модуляції сигналу (які можна пояснити взаємодією частинок темної матерії з матеріалом детектора), ряд інших експериментів не бачить ефекту. Необхідно підвищувати чутливість таких експериментів шляхом збільшення маси (як це заплановано у проєкті EURECA), а також вести пошуки інших можливих кандидатів на роль темної матерії, з яких найбільш привабливими виглядають аксіони і стерильні нейтрино.

Описані дослідження були частково підтримані проєктом № 9/14 «Супутникові та лабораторні експерименти для досліджень космічних променів, верхніх шарів атмосфери, Сонця, пошуку ефектів за рамками стандартної моделі частинок ядерно-фізичними методами» в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр.

1. Долгов А. Д. Космология и элементарные частицы, или небесные тайны // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2012. — **43**, вып. 3. — С. 528–572.
2. Ковтун Г. П., Бойко Р. С., Даневич Ф. А. и др. Производство и свойства низкофоновых сцинтилляторов вольфраматов кадмия и свинца для поиска двойного бета-распада // Ядерная физика та енергетика. — 2014. — **15**. — С. 92–100.
3. Aalseth C. E., Agnes P., Alexander T., et al. DarkSide // Annual Report Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 2013. — Assergi 2014. — P. 71–79.
4. Agnese R., Ahmed Z., Anderson A. J., et al. Silicon detector dark matter results from the final exposure of CDMS II // Phys. Rev. Lett. — 2013. — **111**. — 251301. — 6 p.
5. Akerib D. S., Araujo H. M., Bai X., et al. First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility // Phys. Rev. Lett. — 2014. — **112**. — 091303. — 7 p.
6. Alimonti G., Arpesella C., Back H., et al. Science and technology of Borexino: a real-time detector for low energy solar neutrinos // Astropart. Phys. — 2002. — **16**, N 3. — P. 205–234.
7. Alimonti G., Arpesella C., Bacchiocchi G., et al. A large-scale low-background liquid scintillation detector: the counting test facility at Gran Sasso // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 1998. — **406**, N 3. — P. 411–426.
8. Angloher G., Armengaud E., Augier C., et al. EURECA Conceptual Design Report // Phys. Dark Universe. — 2014. — **3**. — P. 41–74.
9. Annenkov A. N., Buzanov O. A., Danevich F. A., et al. Development of $CaMoO_4$ crystal scintillators for a double beta decay experiment with ^{100}Mo // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 2008. — **584**. — P. 334–345.
10. Aprile E., Arisaka K., Arneodo F., et al. First dark matter results from the XENON100 experiment // Phys. Rev. Lett. — 2010. — **105**. — 131302. — 5 p.
11. Baer H., Barger V., Huang P., Tata X. Natural supersymmetry: LHC, dark matter and ILC searches // J. High Energy Phys. — 2012. — **05**. — 109. — 28 p.
12. Barabash A. S. The new generation of double beta decay experiments: are there any limitations? // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. — 2012. — **39**, N 8. — 085103. — 8 p.
13. Barabash A. S., Chernyak D. M., Danevich F. A., et al. Enriched $Zn^{100}MoO_4$ scintillating bolometers to search for $0\nu 2\beta$ decay of ^{100}Mo with the LUMINEU experiment // Eur. Phys. J. C. — 2014. — **74**. — 3133. — 7 p.
14. Barea J., Kotila J., Iachello F. Limits on neutrino masses from neutrinoless double- β decay // Phys. Rev. Lett. — 2012. — **109**. — 042501. — 4 p.
15. Barinova O. P., Danevich F. A., Degoda V. Ya., et al. First test of Li_2MoO_4 crystal as a cryogenic scintillating bolometer // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 2010. — **613**. — P. 54–57.
16. Bekker T. B., Coron N., Danevich F. A., et al. Aboveground test of an advanced Li_2MoO_4 scintillating bolometer to search for neutrinoless double beta decay of ^{100}Mo // Astropart. Phys. — 2016. — **72**. — P. 38–45.
17. Bellini G., Benziger J., Bonetti S., et al. Observation of geo-neutrinos // Phys. Lett. B. — 2010. — **687**, N 4-5. — P. 299–304.
18. Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Precision Measurement of the 7Be Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino // Phys. Rev. Lett. — 2011. — **107**. — 141302. — 5 p.
19. Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy // Phys. Rev. D. — 2014. — **89**. — 112007. — 68 p.

20. Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun // *Nature*. — 2014. — **512**. — P. 383–386.
21. Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Borexino: recent solar and terrestrial neutrino results and description of the SOX project // Proc. of the 2013 Europhysics conference on High Energy Physics, 18–24 July 2013, Stockholm, Sweden, Proceedings of Science 2014 (EPSHEP2013) 529. — 8 p.
22. Belli P., Bernabei R., Boiko R. S., et al. Search for double- β decay processes in ^{106}Cd with the help of a $^{106}\text{CdWO}_4$ crystal scintillator // *Phys. Rev. C—Nucl. Phys.* — 2012. — **85**. — 044610. — 12 p.
23. Belli P., Bernabei R., Boiko R. S. et al. Search for double beta decay of ^{136}Ce and ^{138}Ce with HPGe gamma detector // *Nucl. Phys. A.* — 2014. — **930**. — P. 195–208.
24. Berge L., Boiko R. S., Chapellier M., et al. Purification of molybdenum, growth and characterization of medium volume ZnMoO_4 crystals for the LUMINEU program // *J. Instrum.* — 2014. — **09**. — P06004. — 18 p.
25. Berguno D. B. Sterile neutrino search through disappearance studies with a high-intensity ^{51}Cr source and the Borexino detector // Proceedings of the XV International Workshop on Neutrino Telescopes, March 11–15 2013, Venice, Italy, Proceedings of Science 2014 (Neutel2013) 065. — 4 p.
26. Bernabei R., Belli P., Cappella F., et al. New results from DAMA/LIBRA // *Eur. Phys. J. C.* — 2010. — **67**, N 1-2. — P. 39–49.
27. Bilenky S. M. Neutrino Majorana // *Ann. Fondation Louis de Broglie*. — 2006. — **31**, N 2–3. — P. 139–156.
28. Bilenky S. M., Giunti C. Neutrinoless double-beta decay: a brief review // *Mod. Phys. Lett. A.* — 2012. — **27**. — 1230015. — 22 p.
29. Boiko R. S., Virich V. D., Danevich F. A., et al. Ultrapurification of archaeological lead // *Inorg. Mater.* — 2011. — **47**. — P. 645–648.
30. Bossa M. (on behalf of the DarkSide collaboration). DarkSide-50, a background free experiment for dark matter search // *J. Instrum.* — 2014. — **09**. — C01034. — 11 p.
31. Bottino A., Fornengo N., Scopel S. Phenomenology of light neutralinos in view of recent results at the CERN Large Hadron Collider // *Phys. Rev. D—Parts and Fields.* — 2012. — **85**. — 095013. — 9 p.
32. Chernyak D. M., Danevich F. A., Giuliani A., et al. Rejection of randomly coinciding events in ZnMoO_4 scintillating bolometers // *Eur. Phys. J. C.* — 2014. — **74**. — 2913. — 6 p.
33. Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobaychev V. V., et al. Application of PbWO_4 crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of ^{116}Cd // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* — 2006. — **556**. — P. 259–265.
34. Danevich F. A., Kobaychev V. V., Kobaychev R. V., et al. Impact of geometry on light collection efficiency of scintillation detectors for cryogenic rare event searches // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* — 2014. — **336**. — P. 26–30.
35. Danevich F. A., Kobaychev R. V., Kobaychev V. V., et al. Optimization of light collection from crystal scintillators for cryogenic experiments // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* — 2014. — **744**. — P. 41–47.
36. Deppisch F. F., Hirsch M., Päs H. Neutrinoless double-beta decay and physics beyond the standard model // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* — 2012. — **39**. — 124007. — 23 p.
37. Giammarchi M. G. (on behalf of the Borexino Collaboration). Solar and geoneutrino physics with Borexino // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Assoc. Equip.* — 2014. — **742**. — P. 250–253.
38. Gironi L., Arnaboldi C., Beeman J. W., et al. Performance of ZnMoO_4 crystal as cryogenic scintillating bolometer to search for double beta decay of molybdenum // *J. Instrum.* — 2010. — **5**. — P11007. — 12 p.
39. Giuliani A. Neutrino physics with low-temperature detectors // *J. Low Temp. Phys.* — 2012. — **167**, N 5-6. — P. 991–1003.
40. Grigoriev D. N., Danevich F. A., Shlegel V. N., Vasiliev Ya. V. Development of crystal scintillators for calorimetry in high energy and astroparticle physics // *J. Instrum.* — 2014. — **09**. — C09004. — 8 p.
41. Kim G. B., Choi S., Jang Y. S., et al. Thermal model and optimization of a large crystal detector using a metallic magnetic calorimeter // *J. Low Temp. Phys.* — 2014. — **176**. — P. 637–643.
42. Lee S. J., Choi J. H., Danevich F. A., et al. The development of a cryogenic detector with CaMoO_4 crystals for neutrinoless double beta decay search // *Astropart. Phys.* — 2011. — **34**. — P. 732–737.
43. Mohapatra R. N., Antusch S., Babu K. S., et al. Theory of neutrinos: A white paper // *Repts Progr. Phys.* — 2007. — **70**, N 11. — P. 1757–1867.
44. Pallavicini M. The SOX project: a search for sterile neutrinos with Borexino // Proceedings of the XV International Workshop on Neutrino Telescopes, March 11–15 2013 Venice, Italy, Proceedings of Science 2014 (Neutel2013) 026. — 10 p.
45. Pirro S., Beeman J. W., Capelli S., et al. Scintillating double-beta-decay bolometers // *Phys. Atom. Nucl.* — 2006. — **69**, N 12. — P. 2109–2116.
46. Rodejohann W. Neutrino-less double beta decay and particle physics // *Int. J. Mod. Phys. E.* — 2011. — **20**, N 9. — P. 1833–1930.
47. Rossi N., Bellini G., Benziger J., et al. The Borexino experiment: Recent results and future plans // *Nuovo cim.* — 2014. — **37**. — P. 119–123.
48. Shlegel V. N., Berge L., Boiko R. S., et al. Purification of molybdenum oxide, growth and characterization of medium size zinc molybdate crystals for the LUMINEU

- program // EPJ Web of Conf. — 2014. — 65. — 03001. — 6 p.
49. *Testera G. (on behalf of the Borexino Collaboration)*. Solar and geo neutrinos in Borexino: summary of the Phase-I measurements and recent results // Proceedings of the XV Workshop on Neutrino Telescopes, 11–15 March 2013, Venice, Italy, Proceedings of Science 2014 (Neutel 2013) 008. — 10 p.
50. *Vergados J. D., Ejiri H., Šimkovic F.* Theory of neutrinoless double-beta decay // Repts Progr. Phys. — 2012. — 75, 106301. — 52 p.

Стаття надійшла до редакції 29.12.14

Р. С. Бойко¹, Ф. А. Даневич¹, Е. В. Зуева¹, В. В. Кобычев¹, Л. М. Кобычева¹, Р. В. Кобычев^{1,2}, Б. Н. Кропив'янський¹, В. М. Мокіна¹, Д. В. Пода^{1,3}, О. Г. Полищук^{1,4}, А. И. Тимошенко¹, В. И. Третьяк^{1,4}, Д. Н. Черняк¹

¹ Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, Киев,

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев

³ Центр ядерной физики и материаловедения, Орсе, Франция

⁴ Национальный институт ядерной физики, отделение в Риме «Ла Сапиенца», Рим, Италия

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО И ПОИСКИ ЭФФЕКТОВ ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ЧАСТИЦ

Свойства элементарных частиц тесно связаны с проблемами космологии и астрофизики. Объяснение явления нейтринных осцилляций, природы темной материи и темной энергии, асимметрии барионного и антибарионного вещества во Вселенной требуют расширения стандартной модели частиц, где нейтрино играют ключевую роль. Измерение потоков нейтрино от различных источников, исследования безнейтринного двойного бета-распада способны дать ответы на фундаментальные вопросы о природе нейтрино (частица Дирака или Майораны), величину массы и схему массовых состоя-

ний этой частицы, нарушение закона сохранения лептонного заряда, нарушение CP-симметрии благодаря смешиванию нейтрино и др. Поиски гипотетических частиц темной материи методами ядерной спектроскопии призваны дать ответ на вопрос о природе и составе темной материи.

Ключевые слова: нейтрино, стандартная модель элементарных частиц, двойной бета-распад, темная материя.

R. S. Boiko¹, F. A. Danevich¹, O. V. Zueva¹, V. V. Kobychiev¹, L. M. Kobychева¹, R. V. Kobychiev^{1,2}, B. N. Kropiv'yan'skyi¹, V. M. Mokina¹, D. V. Poda^{1,3}, O. G. Polischuk^{1,4}, A. I. Tymoshenko¹, V. I. Tretyak^{1,4}, D. M. Chernyak¹

¹ Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

³ CSNSM, Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière, CNRS/IN2P3, Université Paris-Sud, Orsay, France

⁴ INFN, Sezione di Roma “La Sapienza”, Rome, Italy

PROPERTIES OF NEUTRINO AND SEARCH FOR EFFECTS BEYOND THE STANDARD MODEL

Particles' properties are closely related to cosmology and astrophysics. Explanation of neutrino oscillations, nature of dark matter and dark energy, baryon-antibaryon asymmetry call for extension of the Standard Model of particles. Properties of neutrino play an important role in the development of elementary particles models. Measurements of neutrinos from various sources, search for neutrinoless double beta decay are able to answer the key questions on the neutrino nature (whether it is Majorana or Dirac particle?), the absolute mass scale and the neutrino mass hierarchy, the lepton number conservation, the CP-symmetry violation due to neutrino mixing, etc. Search for interaction of hypothetical dark matter particles could answer to the question about nature and composition of dark matter in the Universe.

Key words: neutrinos, standard model of elementary particles, double beta decay, dark matter.