

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
НАУК

ОЛЕЙНИКОВ ВЛАДИСЛАВ ПЕТРОВИЧ

**ИЗМЕРЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО ВЫХОДА ДЛЯ ЯДЕР  
ОТДАЧИ В ЖИДКОМ Ar МЕТОДОМ ДВОЙНОГО РАССЕЯНИЯ  
НЕЙТРОНОВ**

01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
Бузулуцков Алексей Федорович  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Новосибирск — 2016

# Содержание

Введение	3
----------	---

## Введение

Прямой поиск частиц темной материи (WIMP – Weakly Interacting Massive Particle) производится в детекторах ядер отдачи по наблюдению упругого рассеяния WIMP на атомных ядрах вещества детектора [1–3]. Форма спектра энергий ядер отдачи, образованных в результате такого взаимодействия, предсказывается экспоненциальной в диапазоне от нуля до нескольких десятков кэВ.

В настоящее время ситуация с наблюдением сигналов от частиц темной материи является довольно запутанной. Так, несколько экспериментов с твердотельным активным веществом, такие как DAMA / LIBRA [4] (на основе NaI), CoGeNT [5] (Ge), CREST [6] (CaWO<sub>4</sub>) и CDMS [7] (Si), сообщают о положительных результатах по возможной регистрации легких WIMP, с массой порядка 10 ГэВ, причем при довольно низких энергиях ядер отдачи – менее 10 кэВ. С другой стороны, эксперименты на основе жидких благородных газов, такие как XENON10 [8], XENON100 [9] и ZEPLIN3 [10], не наблюдают сигналов от WIMP в этом же диапазоне энергий ядер отдачи.

Аналогично, для регистрации низкоэнергетических нейтрино (с энергией менее 20 МэВ), и в частности процесса когерентного рассеяния нейтрино на ядрах [11, 12], также требуется регистрация ядер отдачи с очень низкой энергией – менее 1 кэВ. В детектирующей среде жидкого Ar это соответствует предельно малому количеству электронов первичной ионизации – менее 10.

Некоторые авторы считают, что одной из причин расхождения данных различных экспериментов по поиску темной материи является проблема достоверной калибровки энергетической шкалы для ядер отдачи [13, 14]. В этой связи особенно актуальной является задача калибровки детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино, особенно в области низких энергий ядер отдачи – менее 10 кэВ. Обычно такая калибровка осуществляется с помощью системы рассеяния нейтронов, так как упругое рассеяние нейтронов на ядрах приводит к образованию ядер отдачи, идеально имитируя сигнал от WIMP или когерентно рассеянного нейтрино.

В двухфазных детекторах темной материи [8–10] и низкоэнергетических нейтрино [11, 12] на основе благородных газов поиск взаимодействия WIMP или нейтрино с веществом детектора может осуществляться в жидкой фазе детектора по двум каналам регистрации: по первичному ионизационному сигналу и первичному сцинтилляционному сигналу, генерируемых ядрами отдачи [1–3]. Отсюда следует, что калибровка в таких детекторах должна осуществляться по обоим каналам регистрации, т. е. должен измеряться как ионизационный, так и сцинтилляционный выход по отношению к ядрам отдачи. Причем желательно провести такие измерения не только для Xe и Ar, используемых в действующих [8–10] и планиру-

емых экспериментах, но и для Ne и He, которые также планируется использовать в экспериментах по поиску темной материи [15, 16].

Под калибровкой энергетической шкалы детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино подразумевается привязка экспериментальных данных к шкале энергий ядер отдачи. Это нетривиальная задача, поскольку непосредственно во время эксперимента по поиску темной материи калибровка энергетической шкалы осуществляется только с помощью гамма-источников ионизации, т. е. с образованием электронов (а не ядер) отдачи. Такую шкалу принято обозначать в единицах keVee. Калибровка энергетической шкалы для ядер отдачи (nuclear recoil), обозначаемой в единицах keVnr, должна проводиться в специальных экспериментах – на специально оборудованных установках с использованием системы рассеяния нейтронов.

О трудности проведения таких калибровок можно судить по тому факту, что в ряде экспериментов по поиску темной материи, например DAMA/LIBRA [4] и CoGeNT [5], результаты представлены в энергетической шкале электронов отдачи, а не ядер отдачи, что затрудняет их сравнение с другими экспериментами. Тем не менее в ряде работ были либо проведены измерения ионизационных и сцинтилляционных выходов, либо представлены теоретические предсказания их значений [11, 16–18] для детектирующих сред Ge [19], NaI [20], жидкого Xe [21–23], жидкого Ar [11, 24, 25], жидкого Ne [26] и жидкого He [16]. Исходя из этих данных можно сделать вывод, что ситуация с измерениями выходов и факторов гашения для ядер отдачи в жидких благородных газах является неудовлетворительной. Так, для жидкого Ar полностью отсутствуют экспериментальные данные по ионизационному выходу, а надежные данные по сцинтилляционному фактору гашения имеются только для относительно высоких энергий, более 20 кэВ. Наиболее тщательно ионизационный выход и сцинтилляционный фактор гашения измерялись для жидкого Xe. Однако и здесь, для энергий менее 5 кэВ, данные разных групп существенно расходятся – до фактора 2.

Таким образом, не вызывает сомнений актуальность задачи калибровки детекторов ядер отдачи на основе жидких благородных газов, причем в широком диапазоне энергий (от 1 до 100 кэВ), а также создание соответствующих систем рассеяния нейтронов. В данной работе в качестве высокочувствительного детектора ядер отдачи используется двухфазный криогенный лавинный детекторы (КЛД, или CRAD) [2], разработанный в ИЯФ и предназначенный для поиска темной материи и регистрации низкоэнергетических нейтрино, в частности когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.

Для обеспечения широкого диапазона энергий ядер отдачи в ИЯФ возможно использовать две системы рассеяния нейтронов: на основе малогабаритного DD

генератора быстрых (2.45 МэВ) моноэнергетических нейтронов с использованием отпаянной нейтронной трубки и на основе тандемного протонного ускорителя и Li мишени. В первом случае обеспечивается диапазон энергий ядер отдачи более 10 кэВ; во втором случае – от 0.5 до 10 кэВ. В обоих случаях ожидаемая интенсивность потока нейтронов составит порядка  $10^6$  н/с.

В простейшем варианте системы калибровки детектор облучается узконаправленным пучком моноэнергетических нейтронов, угол рассеяния определяется геометрией системы (взаимным расположением генератора и детекторов), а события, связанные с рассеянием на заданный угол, выделяются с помощью схемы совпадений (рис.1).

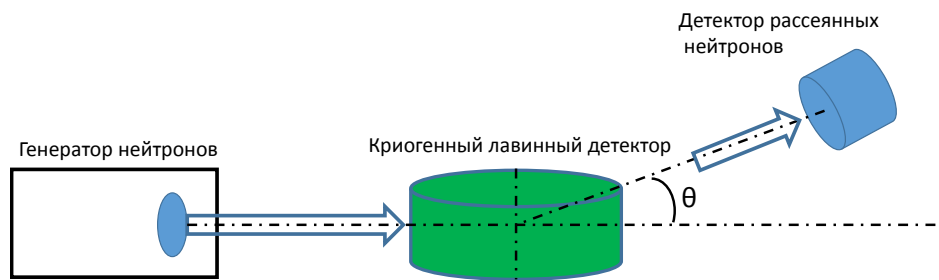


Рис. 1. Схема калибровки криогенного лавинного детектора с помощью генератора нейтронов.

Для упругого рассеяния энергия ядра отдачи связана с углом рассеяния и начальной энергией нейтрона следующей зависимостью:

$$E_{rec} = 2 \cdot E_0 \frac{m}{M} (1 - \cos \theta) \left[ 1 - 2 \frac{m}{M} + o \left( \left( \frac{m}{M} \right)^2 \right) \right], \quad (1)$$

где  $M$  - масса ядра отдачи,  $m$  - масса нейтрона,  $E_0$  - начальная энергия нейтрона,  $\theta$  - угол рассеяния нейтрона в лабораторной системе отсчета.

В эксперименте точность определения энергии ядра отдачи в значительной степени определяется «геометрической» ошибкой, связанной с конечными размерами источника нейтронов и детекторов. Ошибка определения энергии ядра отдачи равна

$$\frac{\Delta E_{rec}}{E_{rec}} \approx \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \Delta \theta \quad (2)$$

Как видно из приведенной формулы, «геометрическая» погрешность резко возрастает при уменьшении угла рассеяния. Кроме того, при малых углах рассеяния детектор рассеянных частиц не может быть защищен от потока первичных нейтронов, что приводит к появлению фоновых событий вследствие наложения независимых импульсов в КЛД и детекторе рассеянных нейтронов. Эти эффекты ограничивают минимальную энергию ядер отдачи, которая может быть использована для калибровки при заданной энергии падающего нейтрона. Практически

калибровка может быть выполнена при углах рассеяния, превышающих  $20^\circ$ , что соответствует энергии ядер аргона выше 10 кэВ при рассеянии нейтронов с энергией 2.45 МэВ

Для уменьшения «геометрической» погрешности необходимо иметь малый угловой размер детектора рассеянных нейтронов. Однако малые размеры детектора приведут к существенному уменьшению скорости счета и возрастанию вклада фоновых событий. В данной работе рассматривается метод регистрации рассеянных нейтронов с помощью самого же КЛД (метод двойного рассеяния). Такой подход позволяет сохранить высокую скорость счета, однако приводит к необходимости иметь высокое пространственное разрешение для правильной реконструкции событий.

На защиту выносятся следующие основные выводы и положения:

Измерение ионизационного выхода ядер отдачи в жидком Аг при дрейфовых полях от 0.5 кВ / см до 2.3 кВ / см и ядрах отдачи от 50 до 233 кэВ.

Разработка многопоточной системы сбора данных с графическим интерфейсом, позволяющей записывать данные с частотой 2кГц / канал.

## Список литературы

- [1] Akimov D. Detectors for Dark Matter search (Review) // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. Vol. 598. P. 275.
- [2] Buzulutskov A. Advances in Cryogenic Avalanche Detectors // J. of Instrumentation. 2012. Vol. 7. C02025.
- [3] Chepel V., Araujo H. Liquid Noble Gas Detectors for Low Energy Particle Physics // J. of Instrumentation. 2013. Vol. 8. R04001.
- [4] Bernabei R. et al. New Results from DAMA/LIBRA // Eur. Phys. J. C. 2010. Vol. 67. P. 39.
- [5] Aalseth C. E. et al. CoGeNT: A Search for Low-Mass Dark Matter using p-type Point Contact Germanium Detectors // Eprint arXiv:1208.5737. 2012.
- [6] Angloher G. et al. Results from 730 kg Days of the CRESST-II Dark Matter search // Eur. Phys. J. C. 2012. Vol. 72. P. 1971.
- [7] Agnese R. et al. Dark Matter Search Results Using the Silicon Detectors of CDMS II // Eprint arXiv:1304.4279. 2013.
- [8] Angle J. et al. Search for Light Dark Matter in XENON10 Data // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 107. 051301.
- [9] Aprile E. et al. Dark Matter Results from 225 Live Days of XENON100 Data // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109. 181301.
- [10] Akimov D. et al. WIMP-Nucleon CrossSection Results from the Second Science Run of ZEPLIN-III // Phys. Lett. B. 2012. Vol. 709. P. 14.
- [11] Hagmann C., Bernstein A. Two-Phase Emission Detector for Measuring Coherent Neutrino-Nucleus Scattering // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. Vol. 51. P. 2151.
- [12] Akimov D. et al. Detection of Reactor Antineutrino Coherent Scattering off Nuclei with a Two-Phase Noble Gas Detector // J. of Instrumentation. 2009. Vol. 4. P06010.
- [13] Collar J. I., McKinsey D. N. Comments on «First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment» // Eprint arXiv:1005.0838. 2010.
- [14] Sorensen P. A Coherent Understanding of Low-Energy Nuclear Recoils in Liquid Xenon // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2010. Vol. 9. 033.

- [15] McKinsey D. N., Coakley K. J. Neutrino Detection with CLEAN // *Astropart. Phys.* 2005. Vol. 22. P. 355.
- [16] Guo W., McKinsey D. N. A Concept for a Dark Matter Detector Using Liquid Helium-4 // *Eprint arXiv:1302.0534*. 2013.
- [17] Mangiarotti A. et al. A Survey of Energy Loss Calculations for Heavy Ions between 1 and 100 keV // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2007. Vol. 580. P. 114.
- [18] Mei D.-M. et al. A Model of Nuclear Recoil Scintillation Efficiency in Noble Liquids // *Astropart. Phys.* 2008. Vol. 30. P. 12.
- [19] Barker D. et al. Ionization Efficiency Study for Low Energy Nuclear Recoils in Germanium // *Eprint arXiv: 1304.6773*. 2013.
- [20] Collar J.I. Quenching and Channeling of Nuclear Recoils in NaI[Tl]: Implications for Dark Matter Searches // *Eprint: arXiv:1302. 0796*. 2013.
- [21] Manzur A. et al. Scintillation Efficiency and Ionization Yield of Liquid Xenon for Monoenergetic Nuclear Recoils down to 4 keV // *Phys. Rev. C.* 2010. Vol. 81. 025808.
- [22] Horn M. et al. Nuclear Recoil Scintillation and Ionisation Yields in Liquid Xenon from ZEPLIN-III Data // *Phys. Lett. B.* 2011. Vol. 705. P. 471.
- [23] Plante G. et al. New Measurement of the Scintillation Efficiency of Low-Energy Nuclear Recoils in Liquid Xenon // *Phys. Rev. C.* 2011. Vol. 84. 045805.
- [24] Gastler D. et al. Measurement of Scintillation Efficiency for Nuclear Recoils in Liquid Argon // *Phys. Rev. C.* 2012. Vol. 85. 065811.
- [25] Regenfus C. et al. Study of Nuclear Recoils in Liquid Argon with Monoenergetic Neutrons // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2012. Vol. 375. 012019.
- [26] Lippincott W. H. et al. Scintillation Yield and Time Dependence from Electronic and Nuclear Recoils in Liquid Neon // *Phys. Rev. C.* 2012. Vol. 86. 015807.