

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И НАКОПЛЕНИЯ ДАННЫХ ОТ ГЕРМАНИЕВОГО
ДЕТЕКТОРА-БОЛОМЕТРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА EDELWEISS
(ПОИСК ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ)**

Р. Б. Подвиянюк¹, Пиа Лоанза², В. Н. Коваленко³

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *Подземная лаборатория Модан, Франция*

³ *ОАО “Электротехнический завод”, Киев, Украина*

Один из наиболее чувствительных экспериментов по поиску слабо взаимодействующих частиц темной материи (WIMP, weakly interacting massive particles) проводится в подземной лаборатории Модан во Франции (эксперимент EDELWEISS). В эксперименте используются детекторы на основе кристаллов германия, охлажденных до сверхнизких температур. Одновременная регистрация как ионизационного, так и теплового сигналов позволяет отличить события от ядер отдачи, которые могут возникать в результате взаимодействия WIMP-частиц с ядрами, от фоновых событий, вызванных гамма-квантами и бета-частицами. Еще одним источником фона детекторов при низких энергиях, где ожидаются сигналы от WIMP-частиц, могут быть акустические сигналы. Для разделения полезных и акустических сигналов была разработана система сбора и накопления данных, которая состоит из оцифровщика формы импульса с частотой оцифровки 10 МГц и программного обеспечения, которое позволяет передать оцифрованный импульс в компьютер, визуализировать его, построить энергетический спектр событий. Тестовые измерения с гамма-источниками ⁶⁰Co и ¹⁵²Eu продемонстрировали эффективность примененного подхода.

Введение

В течение XX ст. астрофизики постепенно пришли к заключению, что барионное вещество составляет не более 5 % массы Вселенной. Примерно на 95 % Вселенная состоит из материи, форма которой остается для нас тайной, поскольку она не взаимодействует с электромагнитным излучением, оставаясь невидимой. Вместе с тем она проявляет себя посредством гравитационного взаимодействия. Согласно результатам наблюдений анизотропии реликтового излучения с помощью спутника WMAP, 74 % плотности Вселенной может быть приписано темной энергии, 22 % - темной материи и только 4 % - обычной барионной материи [1]. Одним из возможных кандидатов на роль темной материи является новый класс слабо взаимодействующих массивных частиц (weakly interacting massive particles, WIMP), предсказываемых суперсимметричными моделями [2 - 4]. Во многих лабораториях мира предпринимаются попытки прямой регистрации частиц темной материи, например путем наблюдения ядер отдачи в веществе детектора (DAMA [5], EDELWEISS [6], CRESST [7], ROSEBUD [8], KIMS [9]). Однако ввиду чрезвычайно слабого взаимодействия WIMP-частиц и из-за большого числа фоновых событий и малой энергии отдачи эти попытки пока не увенчались успехом. Тем не менее авторы [5] утверждают, что существуют годовые модуляции WIMP-частиц. На сегодняшний день это утверждение никем не подтверждено, но и не опровергнуто. Именно на поиск WIMP-частиц

темной материи направлен эксперимент EDELWEISS в подземной лаборатории Модан во Франции [10, 11].

Задача состояла в разделении полезных и акустических сигналов от германиевого детектора. Акустические сигналы – это сигналы, вызванные механическим воздействием на детектор. Амплитуда и частота акустических сигналов могут быть любыми и ограничиваются динамическим диапазоном прибора. Однако форма импульса этих сигналов, как правило, значительно отличается от формы импульсов полезных сигналов. Задачи подавления различных фоновых сигналов решаются путем применения оцифровщиков формы импульса (transient digitizer), что позволяет записать оцифрованную форму импульса на жесткий диск компьютера, произвести ее анализ и определить тип сигнала (полезный или фоновый) или тип частицы [12 - 14]. Оцифровщики формы импульса, выпускаемые фирмами-производителями, обладают довольно высокой стоимостью, поэтому наиболее оптимальным вариантом была разработка собственного оцифровщика формы импульса и написание собственного программного обеспечения. Предварительные оценки показали, что для идентификации типа сигнала (полезного или акустического) достаточно 15 - 20 точек оцифрованного импульса. Для этих целей был выбран простой способ решения задачи, а именно непосредственная оцифровка импульса, управление прибором с помощью LPT-порта компьютера без использования памяти, запись файлов данных на жесткий диск компьютера и off-line анализ информации.

Система сбора и накопления информации

Измерительная система (рис. 1) состоит из планарного германиевого детектора, предварительного усилителя, блока инвертирования-формирования, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера. Импульс с выхода предварительного усилителя имеет отрицательную полярность, фронт около 0,1 мкс, длительность примерно 250 мкс и амплитуду 250 мВ (соответствующую сигналам от гамма-квантов с энергией примерно 1,3 МэВ).

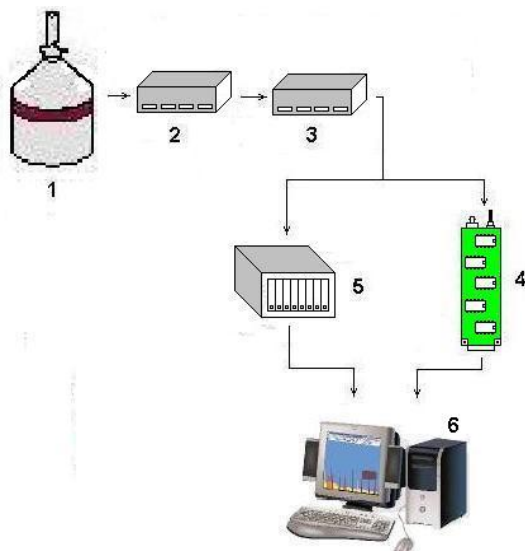


Рис. 1. Блок-схема системы сбора и накопления информации: 1 - планарный германиевый детектор; 2 - предварительный усилитель; 3 - блок инвертирования-формирования; 4 - оцифровщик формы импульса; 5 - спектрометрический АЦП; 6 - персональный компьютер.

Было принято решение сделать двухканальное устройство, состоящее из инвертора с регулируемым коэффициентом усиления и спектрометрического формирователя импульсов квази-гауссовой формы с длительностью на полувысоте сигнала около 50 мкс. Спектрометрический формирователь необходим для последующих параллельных измерений энергетических спектров с использованием спектрометрического тракта и оцифровщика формы импульса для их сравнения [15].

Оцифровщик формы импульса (рис. 2) состоит из компаратора, АЦП с временем преобразования 0,1 мкс и блока регистров. Алгоритм работы системы следующий. Сигнал отрицательной полярности с выхода предварительного усилителя поступает на вход инвертора, где инвертируется и усиливается. С выхода инвертора сигнал поступает на входы АЦП и компаратора. Вход АЦП защищен повторителем и парой диодов Шотки, ограничивающих максимальную ампли-

туду входного сигнала до 5 В. АЦП включен по схеме, предложенной в его описании. Система начинает работать, как только уровень входного сигнала превысит значение опорного сигнала компаратора, который можно установить при помощи потенциометра. Сигнал выхода компаратора, соответствующий логической единице, поступает на один из входов LPT-порта, где происходит его инициализация и, если его значение логическая единица, происходят стробирование тактового входа АЦП, оцифровка сигнала и считывание амплитуд оцифрованного импульса посредством LPT-порта в компьютер.

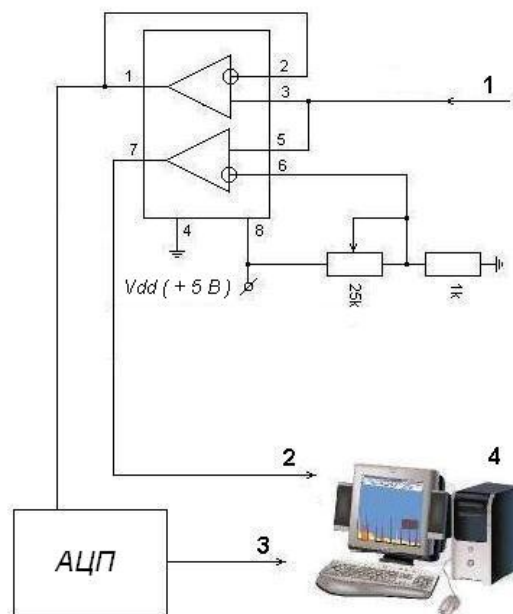


Рис. 2. Блок-схема оцифровщика формы импульса: 1 – вход; 2 - выход компаратора; 3 - выход повторителя; 4 - персональный компьютер.

Разработанная программа (рис. 3) позволяет отобразить оцифрованный сигнал и построить энергетический спектр, имеет дружелюбный интерфейс пользователя с достаточным количеством элементов управления для настройки параметров системы и проста в использовании. Программа имеет возможность установки: а) нижнего порога амплитуды сигнала, начиная с которого будут отображаться и записываться в файлы значения амплитуд сигналов; б) масштабирования импульса по осям X и Y; в) выделения и просмотра участка спектра; г) отображения номера канала и количества отсчетов в канале. Перед запуском измерений необходимо задать директорию, куда будут записываться файлы спектра и формы импульса. Файл формы импульса представляет собой ASCII файл, куда записывается время прихода импульса, площадь импульса, значение амплитуды импульса и оци-

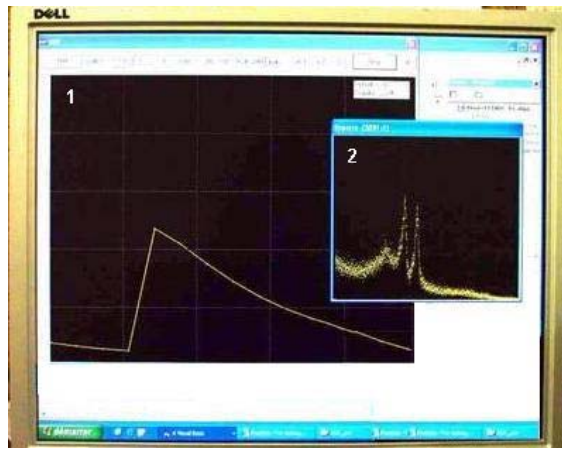


Рис. 3. Отображение записываемой системой информации: 1 - окно отображения импульса; 2 - окно отображения энергетического спектра.

франный импульс. Исходный код программы был написан на языках C++, Pascal и Visual Basic. Окончательный вариант программы под Windows был реализован на VisualBasic. Стоит отметить, что скорость обращения к LPT-порту из C++ и Visual Basic практически не отличаются по времени. Незначительное отличие может быть только в быстроте отображения графики.

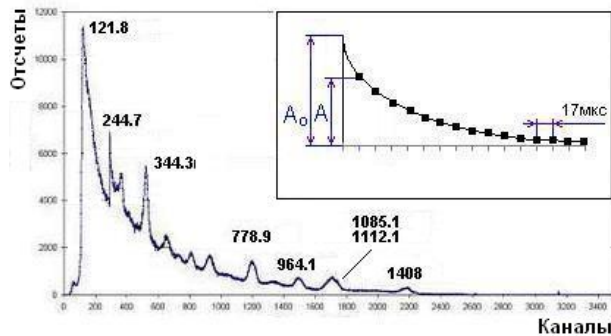


Рис. 4. Спектр ^{152}Eu , измеренный с помощью разработанного оцифровщика импульса. На вставке показаны оцифровка (точки) и импульс (непрерывная линия). Энергии гамма-линий указаны в кэВ.

Однако поскольку система предназначена для дискриминации акустических сигналов (рис. 6), а не для набора энергетических спектров, отмеченные искажения энергетического спектра не имеют значения для оценки ее параметров. Проведенные измерения продемонстрировали работоспособность системы. Для дальнейшего анализа ее эффективности необходимо разработать методы математической обработки сигнала, способные разделить полезные импульсы от акустических шумов.

Из результатов проведенных тестовых измерений можно сделать вывод, что разработанная система дает возможность провести разделение

Результаты тестовых испытаний

Были проведены тестовые испытания системы регистрации с генератором точной амплитуды и источниками гамма-квантов ^{60}Co и ^{152}Eu . Производился набор спектра и формы импульсов. Импульс оцифровывался по 15 точкам. Один из спектров ^{152}Eu , набранный за 4 ч, показан на рис. 4. Для сравнения приведен спектр, полученный с использованием стандартного спектрометрического тракта с временем формирования 10 мкс (рис. 5). Как видно, большинство пиков спектра ^{152}Eu , полученного при использовании разработанного оцифровщика формы импульса, соответствуют присутствующим в спектре, набранном с помощью обычной спектрометрической системы (см. рис. 5). Искажения в спектре, особенно при малых энергиях, связаны с тем, что для определения амплитуды сигнала бралось максимальное значение оцифрованного импульса A (вставка рис. 4), которое не совпадает с действительным значением амплитуды A_0 . Кроме того, для построения энергетических спектров целесообразно использовать значения площадей оцифрованных сигналов.

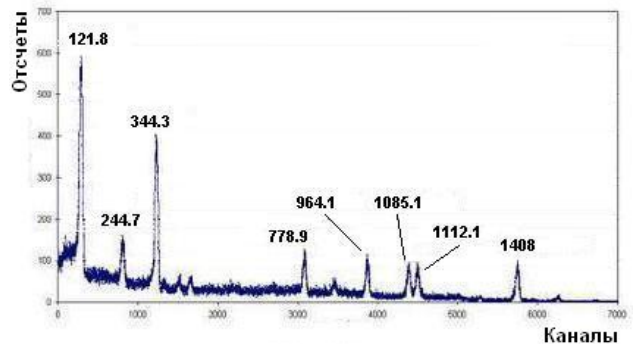


Рис. 5. Спектр ^{152}Eu , измеренный с помощью стандартного спектрометрического тракта. Энергии гамма-линий указаны в кэВ.

акустических и полезных сигналов по форме импульсов, что и являлось целью работы.

Выводы

Разработана система сбора и накопления информации от германиевого полупроводникового детектора для эксперимента по поиску частиц темной материи (EDELWEISS). Система включает в себя оцифровщик формы импульса. Система позволяет регистрировать и записывать файлы форм импульсов, файлы спектров, разделять полезные и акустические сигналы по форме импульсов. Тестовые измерения с источниками гамма-квантов ^{60}Co и ^{152}Eu показали принципиальную работоспособность системы.

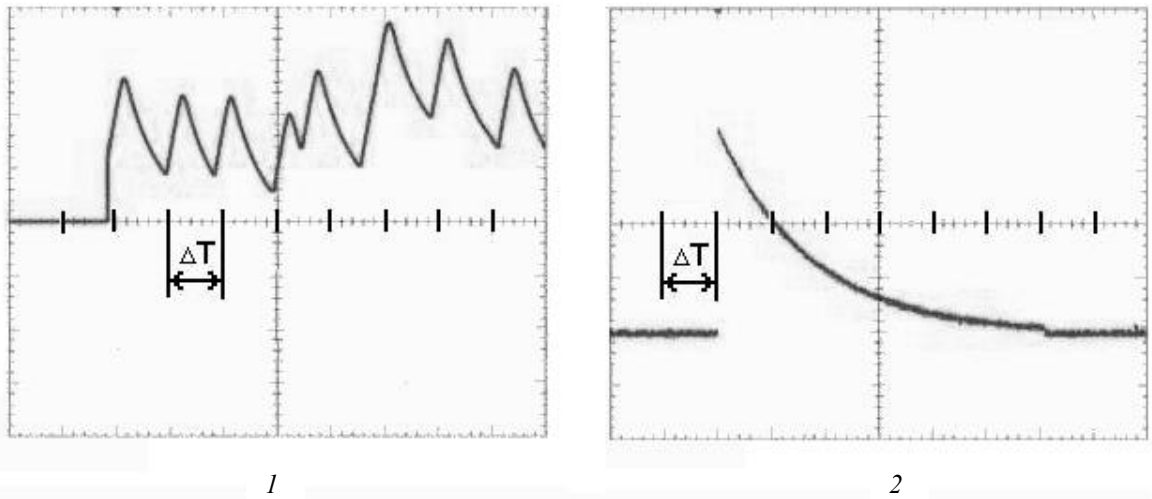


Рис. 6. Полезный и акустический сигналы: 1 - акустический сигнал, вызванный ударом отвертки по сосуду Дьюара, в котором находился детектор; 2 - полезный сигнал, полученный при измерениях с источником ^{152}Eu ($\Delta T = 50$ мкс).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang X., Wu F., Zhang J. New generalized Chaplygin gas as a scheme for unification of dark energy and dark matter // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. - 2006. - Vol. 01. - P. 003 (1 - 18).
2. Hoper D., Taylor A. Determining supersymmetric parameters with dark matter experiments // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. - 2007. - Vol. 03. - P. 017 (1 - 31).
3. Kaminkowski M., Kurilov A. Generalized analysis of WIMP searches // New Astronomy Reviews. - 2005. - Vol. 49. - P. 241 - 244.
4. Profumo S., Ullio P. The role of antimatter searches in the hunt for supersymmetric dark matter // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. - 2004. - Vol. 07. - P. 006 (1 - 32).
5. Barnabei R., Belli P., Montecchia P. et al. Dark matter signals: from underground to space investigations // Nucl. Phys. - 2007. - Vol. 166. - P. 87 - 95.
6. Benoit A., Bergé L., Blumer J. et al. Sensitivity of the EDELWEISS WIMP search to spin-dependent interactions // Phys. Lett. - 2005. - Vol. B616. - P. 25 - 30.
7. Cozzini C., Angloher G., Bucci C. et al. CREST cryogenic dark matter search // New Astronomy Reviews. - 2005. - Vol. 49 (2). - P. 255 - 258.
8. Cebrian S., Coron N., Dambier G. et al. First results of the ROSEBUD dark matter experiment // Astroparticle Physics. - 2001. - Vol. 15 (1). - P. 79 - 85.
9. Lee H.S., Bhang H., Croi J.H. et al. First limit of WIMP cross section with low background CsJ(Tl) crystal detector // Phys. Lett. B. - 2006. - Vol. 663(2). - P. 201 - 208.
10. Martineau O., Benoit A., Bergé L. et al. Calibration of the EDELWEISS Cryogenic Heat-and-ionisation Germanium Detectors for Dark Matter Search // NIM. - 2004. - Vol. 530. - P. 426 - 439.
11. Benoit A., Bergé L., Broniatowski A. et al. Event categories in the EDELWEISS WIMP search experiment // Phys. Lett. - 2000. - Vol. B479. - P. 8 - 14.
12. Bardelli L., Bini M., Bizzeti P.G. et al. Further study of CdWO_4 crystal scintillators as detectors for high sensitivity 2β experiments: scintillation properties and pulse-shape discrimination // NIM. - 2006. - Vol. 569. - P. 743 - 753.
13. Elliot S.R., Gehman V.M., Kazkaz K. et al. Pulse shape analysis in segmented detectors as a technique for background reduction in Ge double-beta decay experiments // NIM. - 2006. - Vol. 558. - P. 504 - 510.
14. Fazzini T., Bizzeti P.G., Maurenz P.R. et al. Pulse-shape discrimination with CdWO_4 crystal scintillators // NIM. - 1998. - Vol. 410. - P. 213 - 219.
15. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. - М.: Мир, 1983. - Т. 1 - С. 248 - 270.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА НАКОПИЧЕННЯ ДАНИХ ВІД НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ГЕРМАНІЄВОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ EDELWEISS

Р. Б. Подвіянюк, Піа Лоаіза, В. М. Коваленко

Один із найбільш чутливих експериментів з пошуку слабковзаємодіючих частинок (WIMP, weakly interacting massive particles) темної матерії (EDELWEISS) проводиться в підземній лабораторії Модан у Франції.

У досліді використовуються детектори з кристалів германію, охолоджених до наднизьких температур. Одночасна реєстрація як іонізаційного, так і теплового сигналів дає змогу відрізнити події від ядер віддачі, що можуть виникати в результаті взаємодії WIMP-частинок з ядрами, від фонових подій, спричинених гамма-квантами та бета-частинками. Ще одним джерелом фону детекторів при низьких енергіях, де якраз і очікуються сигнали від WIMP-частинок, є акустичні сигнали. Для розділення корисних та акустичних сигналів було розроблено систему збору та накопичення даних, яка складається з оцифровувача форми імпульсу з частотою оцифровки 10 МГц і програмного забезпечення, що дозволяє передати оцифрований імпульс у комп'ютер, візуалізувати його, побудувати енергетичний спектр подій. Тестові вимірювання з гамма-джерелами ^{60}Co та ^{152}Eu продемонстрували ефективність застосованого підходу.

DEVELOPMENT OF COLLECTION AND DATA ACQUISITION SYSTEM FROM GERMANIUM SEMICONDUCTOR DETECTOR FOR EDELWEISS EXPERIMENT

R. B. Podviyanuk, Pia Loaiza, V. N. Kovalenko

One of the most sensitive experiment in search for weakly interacting massive particles (WIMP) of dark matter (EDELWEISS) is carried out in the Modane underground laboratory (France). Germanium crystals cooled up to ultra low temperature are used in the experiment. Simultaneous registration of ionizing and thermal signals allows to distinguish events from recoil nucleus, which can appear as a result of interaction of WIMP particles with matter, from gamma and beta background. Data acquisition system based on 10 MHz digitizer to discriminate signals detection from acoustic noises was developed. The system allows transferring digitally processed pulse into computer, to visualize it, and create energy spectra. Tests with ^{60}Co and ^{152}Eu gamma sources have shown effectiveness of the applied approach.

Поступила в редакцію 15.02.07,
после доработки – 05.07.07.