

**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**

МЕТОДИЧНА РОЗРОБКА З КУРСУ  
**ФІЗИКА ДЕТЕКТОРНИХ СИСТЕМ**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ КАФЕДРИ ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ ФІЗИЧНОГО ФАКУЛЬТЕТУ

**Київ**

**2021**

- Методичні рекомендації до лабораторного практикуму з курсу «Фізика детекторних систем» для студентів кафедри ядерної фізики фізичного факультету / Упорядн.: О.А.Безшийко, Л.О. Голінка-Безшийко, І.М. Каденко - К. : 2021. - 60 с.

Рецензенти:        В.Т. Маслюк, д-р фіз.-мат. наук, проф.  
                             В.А. Кушнір, д-р фіз.-мат. наук.  
                             О.О. Парлаг, канд. фіз.-мат. наук,

Затверджено  
Радою фізичного факультету  
\_\_\_\_\_ жовтня 2021 року

#### Навчальне видання

- Методичні рекомендації до лабораторного практикуму з курсу «Фізика детекторних систем» для студентів кафедри ядерної фізики фізичного факультету

Упорядники:        БЕЗШИЙКО Олег Анатолійович  
                             ГОЛІНКА-БЕЗШИЙКО Лариса Олександрівна  
                             КАДЕНКО Ігор Миколайович

## ЗМІСТ

<b>ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ .....</b>	<b>4</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ .....</b>	<b>8</b>
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.....</b>	<b>9</b>
МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ З ДЕТЕКТОРІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ДЕТЕКТОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ (FRONT-END ELECTRONICS) .....	9
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.....</b>	<b>14</b>
МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТУРНИХ СПЕКТРІВ ГАММА ТА АЛЬФА ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТА СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ СПЕКТРОМЕТРІВ.....	14
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3.....</b>	<b>17</b>
АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПОШУК ПІКІВ В ГАММА І АЛЬФА СПЕКТРОМЕТРАХ .....	17
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4.....</b>	<b>22</b>
МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРУ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО ДЕТЕКТОРА ВІД РУ- ВЕ ДЖЕРЕЛА НЕЙТРОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ GEANT4 ТА ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ НЕЙТРОННОГО ДЖЕРЕЛА .....	22
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5.....</b>	<b>27</b>
ВИМІРЮВАННЯ СПЕКТРІВ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО СПЕКТРОМЕТРА НА БАЗІ SiPM ФОТОДЕТЕКТОРІВ .....	27
НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОДЕТЕКТОРИ В РЕЖИМІ ГЕЙГЕРА (SiPM).....	27
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6.....</b>	<b>52</b>
ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЮОНІВ КОСМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ RPC-ДЕТЕКТОРНОЇ МАТРИЦІ .....	52

## **ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

Кожний студент готує звіт самостійно в особистому (окремому) зошиті або на листках формату А4, що скріплюються разом і фіксуються (зшиваються) в окремій папці, "колективні" звіти є неприпустими.

Всі звіти в зошитах або папках мають зберігатися до завершення лабораторного практикуму і бути представленими на першу вимогу викладача.

З дозволу викладача допускається підготовка і здача звіту в електронному вигляді без роздрукування за наявності необхідних технічних засобів (в т.ч. достатньої кількості комп'ютерів) у навчальній лабораторії або власного переносного комп'ютера, на якому студент може показувати звіт викладачу. Електронна версія звіту з усіма допоміжними файлами експериментальних даних і результатами обробки має бути передана викладачу на зберігання (формати і умови передачі визначає викладач).

Зошит має бути підписаним - прізвище, ім'я та по батькові студента, назва спецкурсу, прізвище викладача, рік та семестр проведення лабораторного практикуму.

### **Звіт має містити:**

- титульний лист при оформленні на листках А4 або в електронному вигляді (приклад оформлення титульного листа наведено в Додатку 1), назву та номер лабораторної роботи, дату закінчення підготовки звіту, місце для підпису викладача про прийняття ним звіту при оформленні в зошиті;
- анотацію лабораторної роботи;
- мету роботи;
- методику виконання лабораторної роботи;
- опис експерименту, що включає:
  - блок-схему експериментальної установки;
  - опис установки, складових блоків та основних параметрів;
  - проведення вимірювань;
  - результати вимірів;
- обробку результатів вимірів, що включає:
  - обробку результатів вимірів;
  - оцінку похибок;
- обговорення та аналіз отриманих результатів;
- висновки;
- список літератури.

Для підготовки звіту дозволено використовувати один з чотирьох форматів документів.

1. *OpenDocument Format (ODF)* - (міжнародний відкритий формат документів, широка підтримка програмного забезпечення, в першу чергу Open Office).
2. *Adobe Portable Document Format (PDF)*
3. *Microsoft Office формати (DOCX, DOC, RTF)*.
4. *PostScript формат*, при використанні *TEX* необхідно компілювати текст звіту з рисунками в *PostScript* або *PDF* форматі, але надавати викладачу і *TEX* текст також

### **Вимоги до змісту розділів звіту**

**Анотація.** В анотації наводиться коротка характеристика змісту лабораторної роботи. Анотація повинна містити відповіді на питання: "Що є об'єктом дослідження? Що саме досліджується? Який метод застосовується для проведення дослідження? У яких межах змінюються основні параметри? Що вдалося з'ясувати чи визначити, які є найбільш цікаві результати? Обсяг анотації не повинен перевищувати 4–5 речень (1/5 сторінки). Написання анотації наукової роботи є непростю і дуже важливою справою. Необхідно в максимально стисненому вигляді викласти суть роботи і найважливіші результати, що можуть зацікавити читача звіту.

**Мета роботи** – одним, максимум двома реченнями визначити основну мету роботи; як досягнути цієї мети, треба писати у наступному підрозділі

**Методика виконання лабораторної роботи.** Має бути чітко викладена основна ідея експерименту і подано детальний опис методики проведення вимірів та обробки даних. Спочатку необхідно викласти основні фізичні ідеї та технічні методики для досягнення мети роботи. Повинно бути чітко зрозуміло, як буде досягнуто мети лабораторної роботи, з послідовним викладом всіх дій та обґрунтувань, формул - інформація для «фізика», «інженера». Необхідно зупинитися на засобах вимірювання (з посиланням на блок-схему експериментальної установки) і на можливих помилках - зверніть увагу на достовірність результатів, що представляються. У другій частині методики необхідно навести максимально детально хід виконання роботи (як описано на прикладі у підрозділі «Проведення вимірювань», також аналогічно детально повинна бути описана обробка результатів вимірів) - інформація для «лаборанта», безпосереднього виконавця лабораторної роботи. Рівень деталізації повинен гарантувати виконання лабораторної роботи виконавцем без сторонньої допомоги при мінімальній технічній кваліфікації рівня лаборанта.

**Блок-схема експериментальної установки.** Необхідно навести блок-схему, актуальну на момент виконання роботи. Необхідно пересвідчитися у відповідності блок-

схеми, наведеної у методичних рекомендаціях і реальної конфігурації обладнання лабораторної роботи. При наявності розбіжностей скоригувати схему, попередньо проконсультувавшись з викладачем. Усі скорочення і аббревіатури на блок-схемі повинні бути поясненими в подальшому тексті.

**Опис установки та установлених параметрів її складових блоків.** У цій частині звіту мають бути наведені додаткові пояснення до блок-схеми (назви, умовні позначення та номери блоків) та величини параметрів блоків установки (коефіцієнти підсилення, полярності вхідних і вихідних сигналів, параметри формуючих схем і т.і.). Крім того, необхідно вказати використані матеріали, програмні продукти, тип операційної системи при проведенні вимірювань та розрахунків тощо. Наведена детальна інформація про експериментальну установку та умови експерименту є необхідною для успішного виконання поставлених задач в експериментальній ядерній фізиці. Рекомендується додатково навести електронні знімки (за наявності цифрового фотоапарата або фотокамери мобільного телефону чи інших засобів), на яких зображено з достатнім рівнем деталізації робочу конфігурацію обладнання.

**Проведення вимірювань.** В цій частині звіту має бути детально описана послідовність дій, які необхідно виконати для набору експериментальних даних. Необхідно максимально детально розглянути послідовність дій в цій частині, при цьому інформації повинно бути достатньо, щоб таку послідовність могла коректно повторити людина з мінімальним рівнем кваліфікації (лаборант), при цьому не повинно бути частин, які треба додумувати, неоднозначно трактувати і т. п. Тобто, записи мають бути на рівні деталізації: «Запускаю вимірювання на 30 сек., для цього натискаю на блоці X кнопку вибору часу «30» (30 сек.) і після цього натискаю клавішу «Пуск»». Також чітко мають бути прописані або отримані величини, або назви файлів цих величин (у випадку їх великої кількості). З отриманими експериментальними даними не проводяться жодні попередні обробки (усереднення, нормування і т. п.), лише записуються первинні результати, які отримано з використанням приладів. При написанні пунктів цієї частини також рекомендується робити посилання на пункти *Методики виконання лабораторної роботи (МВЛР)* – *перший раз розкриваєте скорочену назву і в наступні рази пишете скорочене - МВЛР* . При необхідності всюди можна проводити записи з аналогічними скороченнями довгих назв розділів. Тобто: «Згідно пункту (вказати номер пункту) МВЛР запускаю вимірювання на 30 сек. ....(*і далі, як наведено вище*)».

**Результати вимірів.** В цій частині наводяться отримані в частині *Проведення вимірювань* експериментальні дані. На відміну від попередньої частини отримані дані групуються в таблиці та блоки, зручні для аналізу. Великі масиви даних мають знаходитись в файлах. Обов'язково мають бути наведені всі назви змінних в таблицях, пояснено скорочення

назв величин, явно вказано одиниці вимірювання для кожної з величин. Крім назв файлів даних також вказують файли, де зберігаються цифрові фотографії експериментальної установки (якщо такі фотографії було зроблено – дивись частину *Опис установки та установлених параметрів її складових блоків*).

**Обробка результатів вимірів.** В цій частині мають бути детально описані всі процедури обробки і перетворення початкових даних, які отримані в частині *Проведення вимірювань*, із записом усіх формул, що при цьому використовуються. Обов'язково необхідно проводити посилання на пункти *Методики виконання лабораторної роботи*. В жодному разі не можна пропускати проміжні розрахунки. У тих випадках, коли необхідно проводити достатньо складні розрахунки із використанням математичних пакетів чи спеціально написаних програм, необхідно вказати назви файлів, де реалізовано необхідні алгоритми, та, відповідно, файли вхідних і вихідних даних. Всі файли мають бути доступними викладачеві для перевірки під час здачі звіту. Рекомендується використовувати для розрахунків або спеціалізовані математичні пакети (MathCAD, MATLAB, Maple, Mathematica), або, як виняток (при достатньому рівні досвіду), програми, написані самостійно на мові PYTHON чи C(C++), пакети ROOT(CERN). Для статистичної обробки та для представлення результатів в графічному вигляді можна користуватися програмними пакетами типу Origin, Python, gnuplot і т.п. Конкретні вимоги та рекомендації з використання програмних інструментів уточнюються викладачем. Навіть при використанні спеціалізованих програмних інструментів для проведення розрахунків у тексті звіту мають бути прописаними основні формули та етапи розрахунків з посиланнями на відповідні місця в файлах для математичних пакетів чи програм. При розрахунках необхідно активно користуватися загально прийнятими методами оцінки параметрів (метод найменших квадратів з ваговими множниками, критерій  $\chi^2$  і т.п.)

**Оцінка похибок.** Для всіх даних, що отримуються при розрахунках в частині *Обробка результатів вимірів*, необхідно навести оцінку похибок. Якщо похибки відсутні, необхідно це обґрунтувати (нехтування, бо відносно малі, неможливо визначити і т. п.). Також необхідно коректно використовувати розрахунки похибок непрямих вимірювань, критерій  $\chi^2$ , тощо. Де можливо необхідно оцінювати похибки вхідних даних для розрахунків (які безпосередньо вимірювались в роботі).

**Обговорення та аналіз отриманих результатів.** В цій частині необхідно навести аналіз отриманих результатів, порівняти експериментально отримані величини із табличними, або теоретично розрахованими даними, пояснити можливі розбіжності та похибки, запропонувати своє бачення використаної методики, запропонувати шляхи покращення методики проведення лабораторної роботи (самостійні власні пропозиції в цій частині особливо враховуються при оцінюванні роботи).

**Висновки.** В цьому розділі необхідно більш розширено ніж в *Анотації*, але не більше ніж на половині сторінки, дати коротку характеристику змісту лабораторної роботи. У висновках мають бути вказаними об'єкт дослідження, метод дослідження, діапазон змінюваних параметрів, вказати чітко, що вдалося з'ясувати чи визначити, суттєві похибки (особливо систематичні), найбільш важливі результати, пропозиції щодо покращення методики виконання лабораторної роботи, тощо.

**Список літератури.** Необхідно дати посилання на всі джерела інформації, що використовувалися в роботі (книжки, журнали, Web сторінки, бази і таблиці даних, програмні інструменти з їх версіями).

## **ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

Перед описом робіт наводяться коротко деякі загальні теоретичні відомості, корисні для виконання багатьох чи кількох робіт. Ця інформація надається максимально стисло в надії, що ви самостійно прочитаете в посиланнях більш детально чи вже знаєте цю інформацію із попередніх навчальних курсів.

Опис кожної роботи наводиться в загальній, мінімально форматованій формі – вам самостійно треба буде виконати конкретні вимоги в описі роботи і оформляти звіт роботи, спираючись на цей мінімально форматований опис - **згідно до рекомендацій [«ВИМОГ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ»](#). Наполегливо рекомендуємо читати посилання перед виконанням лабораторних робіт.**



# **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1**

## **МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ З ДЕТЕКТОРІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ДЕТЕКТОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ (FRONT-END ELECTRONICS)**

### **Теоретична частина**

Для ефективного виконання роботи перед її початком необхідно ознайомитись з теоретичними основами – ознайомитися з основними схемами підключення детекторної електроніки: схема з інтегруванням струму вхідним ланцюгом [2, ст.19, рис.1.10a]; схема включення детекторів з підсиленням струму детектора [2, ст.19, рис.1.10б]; узагальнена еквівалентна схема основної схеми включення детектора (повна і узагальнена) [2, ст.20, рис.1.11a, рис.1.11б]. Ознайомитися з передачею імпульсів напруги з детекторів через довгий кабель [2, ст.30-31, рис.1.18].

### **Мета роботи**

Ознайомитись з базовими характеристиками сигналів з основних типів детекторів іонізуючого випромінювання, методами їх початкового формування з використанням детекторної електроніки (Front-End Electronics – фронтенд електроніка) та навчитися простим методам моделювання сигналів з детекторів та фронтенд електроніки.

### **Завдання**

1. Ознайомитись з вимогами по підготовці звіту про виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з програмним забезпеченням, необхідним для роботи (Micro-Cap 12) [1] – читати Help та Manuals до програми. Установити програмне забезпечення у себе на комп'ютері. Ознайомитися з літературою, яка допомагає освоїти це програмне забезпечення [10]. Зробити записи про склад та функціональне призначення програмного забезпечення.
3. Побудувати схему в Micro-Cap 12 згідно блок-схеми (рис. 1) - схему включення детекторів з інтегруванням струму вхідним ланцюжком  $R_{вх}C_{вх}$  [2, ст.19], підібрати параметри складових схеми (консультуючись із викладачем). Провести аналіз результатів та побудувати відповідні графіки вихідних сигналів.

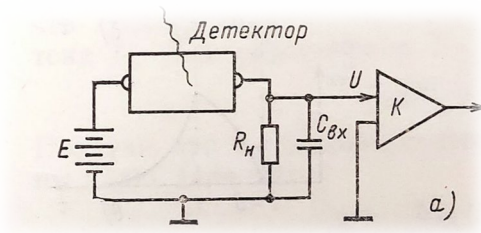


Рисунок 1. Схема з інтегруванням струму вхідним ланцюгом [2, ст.19, рис.1.10а]

4. Побудувати схему в Мікро-Сар 12 згідно блок-схеми (рис. 2) - схему включення детекторів з підсиленням струму детектора [2, ст.19], підібрати параметри складових схеми (консультуючись із викладачем). Провести аналіз результатів та побудувати відповідні графіки вихідних сигналів.

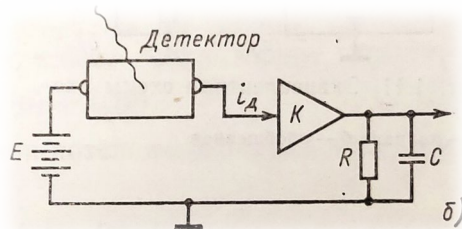


Рисунок 2. Схема включення детектора з підсиленням струму детектора [2, ст.19, рис.1.10а]

5. Побудувати схему в Мікро-Сар 12 згідно блок-схеми (рис. 3) - узагальнену еквівалентну схему основної схеми включення детектора [2, ст.20], підібрати параметри складових схеми (консультуючись із викладачем). Провести аналіз результатів, порівняти з аналітичними формулами [2, ст.21-22] та побудувати відповідні графіки сигналів.

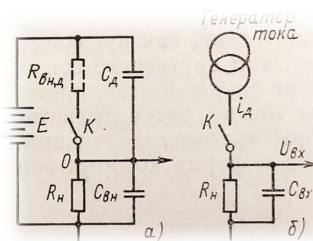


Рисунок 3. Узагальнена еквівалентна схема основної схеми включення детектора (повна і узагальнена) [2, ст.20, рис.1.11а, рис.1.11б]

6. Побудувати схему в Мікро-Сар 12 згідно блок-схеми (рис. 4) – для передачі імпульсів напруги з детекторів через довгий кабель [2, ст.30], підібрати параметри складових схеми (консультуючись із викладачем) – отримати ефект «дзвону» на довгих кабельних

лініях при помилковому підключенні через них швидких (наносекундних) сигналів з детекторів. Визначити вхідний і вихідний опори схеми емітерного повторювача. Провести аналіз результатів та побудувати відповідні графіки сигналів.

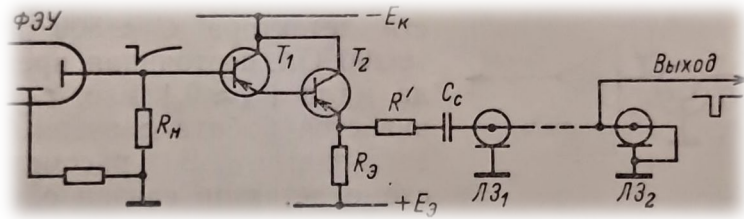


Рисунок 4. Передача імпульсів напруги з детекторів через довгий кабель [2, ст.30-31, рис.1.18].

7. Побудувати еквівалентну схему лічильника Гейгера-Мюллера і отримати основні сигнали в режимі очікування попадання іонізуючої частинки і в режимі попадання іонізуючої частинки.

### Контрольні питання

1. Які основні функціональні можливості Micro-Cap 12?
2. На очах у викладача за кілька хвилин намалюйте схему, яку він замовить зробити і проведіть дослідження основних характеристик схеми на вимогу викладача.
3. Намалюйте основну схему включення детекторів з інтегруванням струму вхідним ланцюжком  $R_{вх}C_{вх}$  [2, ст.19] і поясніть основні властивості.
4. Намалюйте основну схему включення детекторів з підсиленням струму детектора [2, ст.19] і поясніть основні властивості.
5. Намалюйте повну і узагальнену еквівалентну схему основної схеми включення детектора [2, ст.20]. Поясніть складові схеми. Виведіть аналітичну формулу для напруги на вході і порівняйте результати моделювання в Micro-Cap.
6. Вибір параметрів вхідного ланцюжка, оцінка його інтегруючої дії [2, ст.22-28].
7. Поясніть проблеми передачі імпульсів напруги з детекторів через довгий кабель [2, ст.30].
8. Намалюйте еквівалентну схему входу для лічильника Гейгера-Мюллера. Поясніть основні особливості і промодельуйте в Micro-Cap.
9. Класифікація і загальні властивості детекторів іонізуючого випромінювання [3, п 2.1 – 2.2]. Енергетична роздільна здатність детектора. Внесок шумів. Індукційний ефект.

10. Поясніть ефект «дзвону» на довгих кабельних лініях при помилковому підключенні через них швидких (наносекундних) сигналів з детекторів, поясніть на прикладі, змодельованому в Micro-Cap.

### Рекомендована література

1. Micro-Cap 12. Spectrum Software. <http://www.spectrum-soft.com/demo.shtml>. 2019.
2. А.П. Цитович. Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1984. (<http://booksshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=citovich-ap&book=1984>, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/>).
3. В.А.Григорьев, А.А.Колюбин, В.А.Логинов. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з ядерної фізики. М.: Энергоатомиздат, 1988. ([http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/nucl\\_electr.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/nucl_electr.htm)).
4. В. Г. Деменков, П. В. Деменков. Начала электронных методов ядерной физики. Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2016. (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/%D0%94%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2.htm>).
5. Л.Е. Гаврилов. Основы ядерной электроники. Ч.1. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. (<https://ua1lib.org/book/2913556/a6f918?id=2913556&secret=a6f918>)
6. Х. Шмидт. Измерительная электроника в ядерной физике. М.: «Мир», пер. с нем., 1989.
7. Handbook of Particle Detection and Imaging. Claus Grupen and Irene Buvat (Eds.). P. 25 - 82. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
8. Helmuth Spieler. Analog and Digital Electronics for Detectors. Physics Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, U.S.A. ([http://home.iitb.ac.in/~pradeepsarin/students/tether/FEE/Spieler\\_lbl\\_AnalogDigitalDesign.pdf](http://home.iitb.ac.in/~pradeepsarin/students/tether/FEE/Spieler_lbl_AnalogDigitalDesign.pdf)).
9. Helmuth Spieler. Electronics and Signal Processing. Lecture Notes. CFA Instrumentation School. Bariloche, Argentina. Jan. 11 - 22, 2010 ([https://www-physics.lbl.gov/~spieler/ICFA\\_2010/index.html](https://www-physics.lbl.gov/~spieler/ICFA_2010/index.html)).

10. В.В.Фриск, В.В.Логвинов. Основы теории цепей. Основы схемотехники. Радиоприемные устройства. Лабораторный практикум на персональном компьютере. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2**

### **МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТУРНИХ СПЕКТРІВ ГАММА ТА АЛЬФА ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТА СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ СПЕКТРОМЕТРІВ**

#### **Теоретична частина**

Створення алгоритмів обробки фізичних і апаратурних даних вимагає ретельного тестування цих алгоритмів, використовуючи модельні апаратурні спектри, коли фізичний спектр і функція відгуку детектора відомі і на їх основі генеруються апаратурні спектри. Створювані алгоритми обробки будуть генерувати фізичні спектри, які можна порівняти з відомими, які було введено при моделюванні. Студентам пропонується моделювання простого спектру з фотопіками для детекторів гамма випромінювання (як більш складне, розширене завдання – додати і комптонівський розподіл) та піками для альфа детекторів.

#### **Мета роботи**

На основі апаратурних спектрів спектрометрів навчитися створювати модельні апаратурні спектри детекторів для тестування алгоритмів для аналізу даних спектрів.

#### **Завдання**

1. Ознайомитись з вимогами по підготовці звіту про виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з програмним забезпеченням, необхідним для роботи. Можна користуватися різним програмним забезпеченням (яке вам більш зручне). Рекомендовано використовувати – математичні програмні пакети. Тобто, рекомендується використовувати для розрахунків або спеціалізовані математичні пакети (MathCAD, MATLAB, Mathematica), або, як виняток (при достатньому рівні досвіду), програми, написані самостійно на мові PYTHON чи C(C++, рекомендовано фреймворк QT). Зробити записи про склад та функціональне призначення цього програмного забезпечення.
3. Далі йдуть обов'язкові вимоги для написання програми (обов'язково повинен бути графічний інтерфейс).
4. Задати з файлу (чи за вибором викладача в програмі):
  - а. лінії, які будуть присутні в спектрі (їх характеристики – енергія, інтенсивність, ширина на половині висоти  $\Delta E$  в апаратурному спектрі). В файлі необхідно забезпечити написання коментарів у будь-якому рядку, а також значення змінних не повинні прив'язуватися до номеру рядку. На всі змінні повинні бути

коментарі – що це, і можливий діапазон зміни значень. Ліній можна задавати необмежену кількість.

- b. Задати параметри фону: складається із суми спадаючої експоненти та лінійного фону (2 + 2 параметри).
  - c. Задати вхідний досліджуваний енергетичний діапазон (від 0 до  $E_{\max}$ ), кількість каналів спектру та початковий зсув ( $E_0$  при нульовому номері каналу).
5. Сформувати (також може виводиться зображення на кожному етапі – задається у конфігураційному файлі, як і в п.4):
- a. Вхідний (фізичний) спектр без фону і без уширення піків (також виводиться зображення)
  - b. Вхідний (фізичний) спектр з фоном без уширення піків (також виводиться зображення)
  - c. Апаратурний спектр з фоном з уширенням піків без статистичного розкиду в каналах. Уширення проводити за такими алгоритмами (опціональний вибір через вхідні параметри – не програміста, а викладача чи користувача):
    - i.  $\Delta E$  використовується із даних 1 пункту;
    - ii.  $\Delta E = a_0 + a_1 \cdot \sqrt{E}$  (поясніть, чому використовують таку залежність),  $a_0$ ,  $a_1$  – параметри.
  - d. Апаратурний спектр з фоном з уширенням піків із **статистичним розкидом в каналах**:
    - i. згідно закону Пуассона;
    - ii. при значеннях в каналі менше 10 розкид згідно закону Пуассона, при значеннях більше 10 апроксимувати гауссівським наближенням із  $\sigma = \sqrt{N}$ , де  $N$  – кількість відліків в каналі.
6. Вивести спектри, сформовані в попередньому пункті в файл і в графічному вигляді.
7. Протестувати та проаналізувати отримані результати (варіюючи параметри і досліджуючи результуючі спектри).

### Контрольні питання

1. Навіщо проводити моделювання вхідних і вихідних апаратурних даних?

2. Вивести залежність  $\sigma$  від  $\Delta E$  (FWHM, ПШПВ) для розподілу Гаусса (необхідне при симуляції).
3. Для мотивованих студентів – самостійно додати модульований спектр комптонівського розсіяння при реєстрації гамма-квантів

### **Рекомендована література**

1. А.Н. Берлизов и др. Моделирование спектров энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных измерений актиноидов на основе метода Монте–Карло. The Bulletin of Tomsk Polytechnic University 321 (2); 2012. p. 62 - 66. JRC71280.
2. С.Л. Соловьева. Программный комплекс для моделирования гамма-спектрометрических экспериментов и методика обработки гамма-спектров. АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва. МИФИ. 2008. (<http://fizmathim.com/programmnyy-kompleks-dlya-modelirovaniya-gamma-spektrometriceskih-eksperimentov-i-metodika-obrabotki-gamma-spektrov>)



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПОШУК ПІКІВ В ГАММА І АЛЬФА СПЕКТРОМЕТРАХ

#### Теоретична частина

Освоїти найпростіші базові алгоритми для автоматизованого пошуку піків в апаратурних гамма і альфа спектрах детекторів іонізуючого випромінювання. Для студентів пропонується побудувати власні алгоритми пошуку лінійчатих спектрів, що є спрощеним наближенням реальних апаратурних спектрів, де всі неперервні складові спектрів (наприклад, комптонівський розподіл гамма спектрів) розглядатимуться як фон. Задача обробки спектрів складається з кількох етапів [1, 2]. Перший етап – ідентифікація піків (знайти області спектру, де знаходяться піки, а також дуже грубо наближені оцінки максимуму піка і його площі. Другий етап – аналіз мультиплетності піків. Третій етап – точне визначення максимуму, площі і ширини піку. Наряду з цими етапами часто використовується етапи згладжування спектру.

Є багато методів пошуку піків – від дуже простих до складних і на грані мистецтва методів. Спочатку розглянемо *метод першої похідної*. Якщо апаратурний спектр побудувати як неперервну функцію від номеру каналу, то по похідній цієї функції можна визначити місце знаходження піків цієї функції. Дійсно, в області піку похідна спочатку становиться великою позитивною величиною, а далі, міняючи знак в деякій точці, стає великою негативною, в той час як в області поза піком величина похідної із-за загального спадаючого характеру спектру всюди має невелике негативне значення. Цю особливість можна використати для ідентифікації піків. Для цього задають два позитивних числа  $h_1$  і  $h_2$  і знаходяться такі номери каналів, в яких одночасно виконуються такі умови:

$$\left. \begin{array}{l} N'(i - p) > h_1; \\ N'(i) \approx 0; \\ N'(i + p) < -h_2, \end{array} \right\}$$

Де  $N'(i)$  – величина похідної спектра в  $i$ -му каналі. Константи  $h_1$  і  $h_2$  підбираються експериментально. В якості оцінки похідної може слугувати її кінцево-різницевий аналог. У випадку дискретного спектру це просто різниця відліків в сусідніх каналах.

Найбільш популярний, відносно простий і часто вживаний з успіхом в не дуже складних спектрах – *метод другої похідної*. Цей метод і його реалізації аналогічні попередньому методу з тою різницею, що пошук піка проводиться за допомогою другої похідної, яка апроксимується другою кінцевою різницею. Друга похідна фона всюду практично рівна нулю, а в області піка вона має різкі зміни. Вважається, що пік в  $i$ -му каналі

існує, якщо друга кінцева різниця  $\Delta^2 N(i) = N(i+1) - 2N(i) + N(i-1)$  задовольняє вимогам

$$\left. \begin{aligned} \Delta N^2(i-p) &> h_1; \\ \Delta N^2(i) &< -h_2; \\ \Delta N^2(i+p) &> h_1, \end{aligned} \right\}$$

Де позитивні параметри  $h_1$ ,  $h_2$  та  $h_3$  визначаються емпірично. Така методика досить чутлива до статистичних флуктуацій в каналах, тому треба проводити згладжування даних (як спектру так других похідних).  $p$  підбирається емпірично, але найкраща оцінка  $p \leq \text{ПШПВ}$ , де ПШПВ – повна ширина на половині ширини піка.

В **методі максимуму** число відліків в кожному каналі порівнюється з кількістю відліків у сусідніх каналах. Вважається, що пік в  $i$ -му каналі існує якщо кількість відліків в ньому одночасно задовольняє обом вимогам:

$$\left. \begin{aligned} N(i) &> N(i-p) + h\sqrt{N(i)}; \\ N(i) &> N(i+p) + h\sqrt{N(i)}, \end{aligned} \right\}$$

Де  $h$  і  $p$  підбираються емпірично. Величина  $h$  приблизно вибирається для 2-3 для незгладженого спектру, для згладженого – суттєво менше.  $p$  вибирається, проводячи перебір від малих значень до ПШПВ.

**Метод плаваючого відрізка** використовує простий алгоритм – порівнюється кількість відліків над деяким відрізком, який поєднує дві точки спектру на вибраній відстані (найкраще використовувати розмір основи стандартного піку) і можливої статистичної флуктуації цієї величини. Область спектру, де виконується співвідношення  $S_1 > q\sqrt{S_2}$ , ідентифікується як пік.  $q$  – параметр відсіву (2 – 4, підбирається експериментально),  $S_1$  – число відліків над відрізком,  $S_2$  – число відліків під відрізком. Цей метод непогано працює при малій статистиці (менше 100 відліків в каналах).

**Метод згладжування** спирається на такий алгоритм – проводиться сильне згладжування спектру, яке практично не діє на фон, але розмиває пік. Віднімаємо згладжений спектр з початкового отримуємо характерний спектр, який всюди близький до нуля окрім областей піків, де є позитивний викид, який і розглядається як пік.

**Нелінійний варіант метода згладжування** трохи відрізняється від простого методу згладжування. Спочатку проводиться не сильне згладжування, після чого згладжений спектр порівнюється з початковим і в тих точках початкового спектру, де його значення вище величин згладженого спектру проводиться заміна цих значень значеннями згладженого спектру. Після такої заміни вершина піка буде «зрізана». Багатократно повторюючи цю процедуру,

отримаємо тільки фон. Віднімаючи цей фон від початкового спектру отримуємо «чисті» піки, які можна знайти просто по відхиленню значень від нуля.

### Мета роботи

Ознайомитись з простими методами автоматизованого пошуку піків в гамма і альфа-спектрометрах і на прикладі цієї роботи отримати навички і досвід роботи для попередньої обробки даних з детекторів.

### Завдання

1. Ознайомитись з вимогами по підготовці звіту про виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з програмним забезпеченням, необхідним для роботи. Можна користуватися різним програмним забезпеченням (яке вам більш зручне). Рекомендовано використовувати – математичні програмні пакети. Тобто, рекомендується використовувати для розрахунків або спеціалізовані математичні пакети (MathCAD, MATLAB, Mathematica), або, як виняток (при достатньому рівні досвіду), програми, написані самостійно на мові PYTHON чи C(C++, рекомендовано фреймворк QT). Зробити записи про склад та функціональне призначення цього програмного забезпечення.
3. Далі йдуть обов'язкові вимоги для написання програми (обов'язково повинен бути графічний інтерфейс).
4. Зчитати з файлу апаратурний спектр – номер рядку дорівнює номеру каналу, значення в рядку – дорівнює значенню в каналі. Кількість каналів для зчитування довільна (задається викладачем, користувачем, або читається весь спектр).
5. Отримати згладжений варіант спектру за допомогою найпростішої процедури усереднення по кільком (вибір кількості – каналів – у конфігураційному файлі) каналам.
6. Знайти положення піків за методом другої похідної [1, ст.238-243, 2, ст.177-182], оцінити наближені значення  $\sigma$  та амплітуди піка (подвійне згладжування спектру, його диференціювання і потім знову згладжування продиференційованого спектру – потім аналіз).  $\sigma$  – відстань між точками перетину нуля 2-ї похідної (**доведіть це самостійно**)
7. Використовуючи нелінійний МНК (метод найменших квадратів) і гауссівське наближення функції відгуку визначити точно площі піків, їх положення і значення  $\sigma$  (використовуючи наближені значення з попереднього пункту), ширину на половині висоти  $\Delta E$ . Фон під піком вважати лінійним. Визначення для триплету в зоні

зацікавленості (range of interest), тобто підгонка в вибраній вручну зоні спектру сумою лінійного фону та максимум трьох піків.

8. Виконати пункт 7 з автоматичним вибором зон зацікавленості і відповідно автоматичним визначенням характеристик піків по всьому спектру.
9. Знайти положення піків за методом максимуму [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
10. Знайти положення піків за методом першої похідної [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
11. Знайти положення піків за методом згладжування [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
12. Знайти положення піків за методом плаваючого відрізка [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
13. Варіантів і шляхів написання алгоритмів безліч – однакові програми неможливі, навіть наближено :).
14. Порівняти автоматизовану підгонку з різними алгоритмами пошуку піків.

### **Контрольні питання**

1. В чому суть методу пошуку піків за методом максимуму [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
2. В чому суть методу пошуку піків за методом першої похідної [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
3. В чому суть методу пошуку піків за методом другої похідної [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
4. В чому суть методу пошуку піків за методом згладжування [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].
5. В чому суть методу пошуку піків за методом плаваючого відрізка [1, ст.238-243, 2, ст.177-182].

### **Рекомендована література**

1. Н.Г. Волков, В.А. Христофоров, Н.П. Ушакова. Методы ядерной спектрометрии. Уч. Пособие для вузов, М.: Энергоатомиздат, 1990.  
(<https://ua1lib.org/book/2522328/4fe0c8?id=2522328&secret=4fe0c8>)
2. В. В. Аверкиев, Н. Н. Бегляков, Т. А. Горюн и др. Лабораторный практикум по экспериментальным методам ядерной физики: учеб. Пособие. под ред. К.Г. Финогонова, М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. С.Л. Соловьева. Программный комплекс для моделирования гамма-спектрометрических экспериментов и методика обработки гамма-спектров. АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва. МИФИ. 2008. (<http://fizmathim.com/programmnyy-kompleks-dlya-modelirovaniya-gamma-spektrmetricheskih-eksperimentov-i-metodika-obrabotki-gamma-spektrov>).
4. Описание программы "GammaPRO". 2019. ([http://bsi.lv/media/product\\_files/gammapro\\_manual\\_rus.pdf](http://bsi.lv/media/product_files/gammapro_manual_rus.pdf)).
5. С.В. Дюльдя, М.И. Братченко, М.А. Скоробогатов. Моделирование энергетических спектров гамма-излучения перспективных радиационно-технологических источников на основе изотопов европия. Вопросы Атомной Науки И Техники. 2004. № 3. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (85), с. 141-151.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

### МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРУ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО ДЕТЕКТОРА ВІД PU-BE ДЖЕРЕЛА НЕЙТРОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ GEANT4 ТА ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ НЕЙТРОННОГО ДЖЕРЕЛА

#### Теоретична частина

Отримати практичні навички роботи з GEANT4 та аналізу спектрів складних джерел, з використанням фреймворку ROOT.

Реакції типу  $(\alpha, n)$  призвели до відкриття нейтронів, а отже виявилися історично першими джерелами нейтронів. Хоча більшість реакцій  $(\alpha, n)$  ендотермічні, проте для деяких легких ядер, у тому числі берилію, реакція проходить із виділенням енергії. Вихід реакції  $(\alpha, n)$  визначається проникністю бар'єру, який для  $\alpha$ -частинок великий навіть на легких ядрах (для ядра берилію висота бар'єра для  $\alpha$ -частинок досягає приблизно 4 MeV). Проходить реакція  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ , причому вуглець може утворюватися у збудженому стані, а враховуючи енергію альфа-частинок – наймовірніше у першому збудженому стані, для якого характерна енергія 4,44 MeV. Також слід зазначити, що процеси утворення вуглецю в збудженому та основному станах приблизно рівноімовірні. Ці гамма-кванти реєструються сцинтиляційним детектором, і по їх кількості можна визначити вихід нейтронів по відомим формулам.

Більш детальну інформацію по PuBe джерелам самостійно знайдіть в Інтернет та інших місцях [3]. Деякі підказки наведені на рисунках нижче

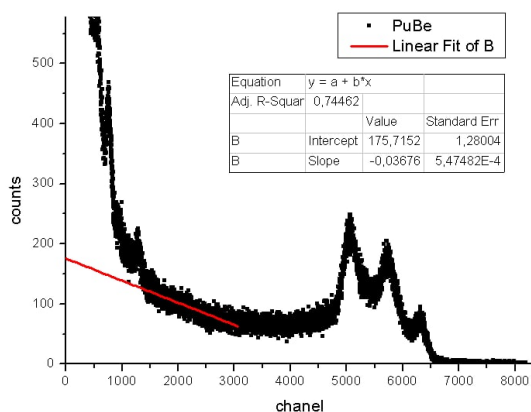


Рисунок 1. Гамма спектр PuBe джерела на NaI (Tl)

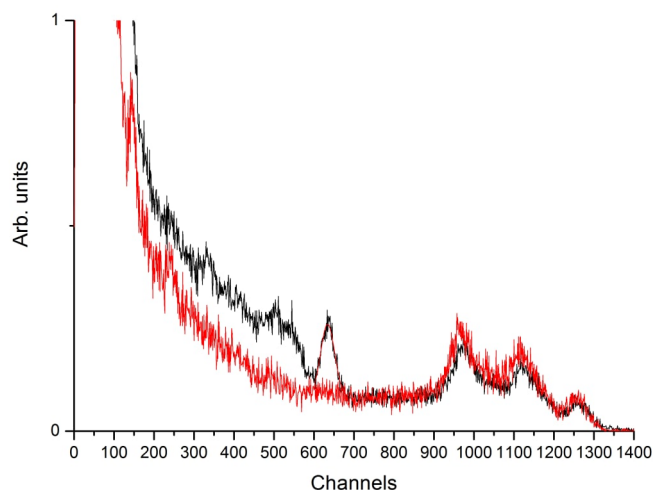


Рисунок 2. Підказка для аналізу спектру з парафінового куба

### **Мета роботи**

Ознайомитись з використанням GEANT4 для моделювання фізичних експериментів, порівняти можливості моделювання детекторних систем з використанням простих формул і спеціальних Монте Карло кодів для моделювання взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною, отримати навички і досвід роботи з джерелами нейтронів, які супроводжуються інтенсивним гамма випромінюванням.

### **Завдання**

1. Ознайомитись з вимогами по підготовці звіту про виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з апаратурою та програмним забезпеченням, необхідними для роботи. Зробити записи про склад та функціональне призначення цієї апаратури та програмного забезпечення.
3. Для моделювання методом Монте Карло інсталиувати і налаштувати GEANT4 [1]. Для використання аналітичних формул і наступного числового інтегрування можна користуватися різним програмним забезпеченням (яке вам більш зручне). Але наполегливо рекомендовано використовувати математичні програмні пакети. Тобто, рекомендується використовувати для розрахунків спеціалізовані математичні пакети (MathCAD, MATLAB, Mathematica). Як виняток (при достатньому рівні досвіду), програми, написані самостійно на мові PYTHON чи C(C++, рекомендовано фреймворк QT чи ROOT).

4. Зібрати установку для проведення експерименту. Згідно блок-схеми (рис. 3) підібрати параметри складових установки (консультуючись із викладачем чи відповідальним за функціонування апаратури в лабораторії).



Рисунок 3. Блок схема установки

5. В якості джерела використовується  $\text{PuBe}$  джерело нейтронів, у якого є інтенсивне високоенергетичне гамма випромінювання. Кристал сцинтилятора  $\text{NaI(Tl)}$  має суттєво видовжену форму – діаметр в кілька раз менший за довжину. Відстань від передньої грані сцинтилятора до джерела – кілька сантиметрів (мінімальна довжина, при якій немає перевантаження детектора).
6. Провести вимірювання гамма-спектру, набрати при цьому високу статистику і діапазон вимірювання до 6 MeV.
7. Зберегти отриманий спектр і провести його аналіз, пояснити всі особливості спектру.
8. Підрахувати повну ефективність реєстрації:
- Використовуючи прості аналітичні формули, порівняти з експериментальними даними
  - Використовуючи GEANT4 [6] та інший пакет (наприклад, ROOT) для уширення спектру згідно експериментальним даним, для цього проводячи фітування експериментальних даних.
9. Визначити гамма-інтенсивність джерела нейтронів і спираючись на ці дані визначити інтенсивність джерела по нейтронам.
10. Порівняти отриману інтенсивність з паспортними даними джерела, пояснити розбіжності .
11. Розмістити  $\text{PuBe}$  джерело нейтронів в середину куба з парафіну, набрати спектр з хорошою статистикою (не менше 30 хв. (рис.4)).



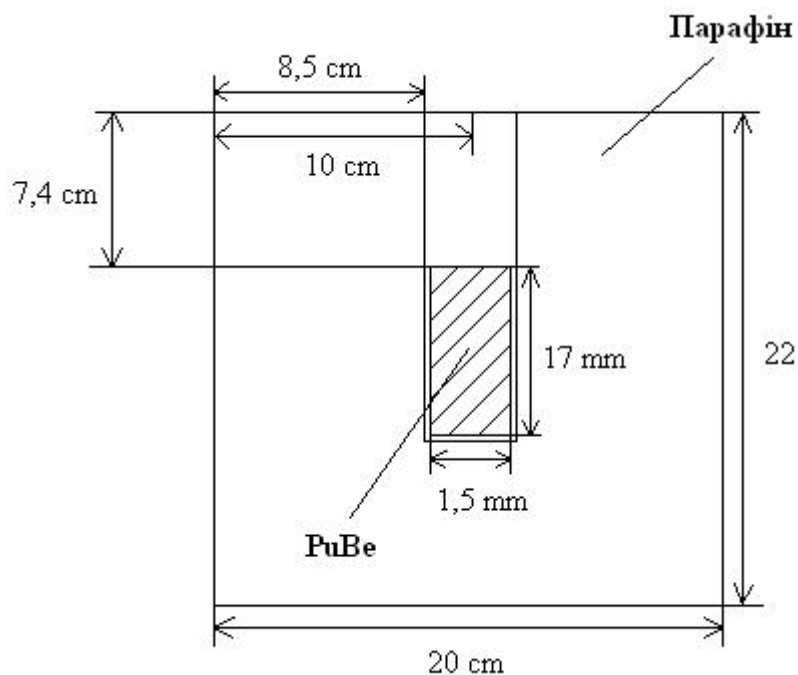


Рисунок 4. Розміщення джерела PuBe всередині парафіну.

12. Побудувати спектр і пояснити причини характерних змін в спектрі (в районі 2 MeV)

### Контрольні питання

1. Звідки в джерелі нейтронів на основі ізотопу плутонію і берилію (PuBe) утворюються нейтрони?
2. Звідки в джерелі нейтронів на основі ізотопу плутонію і берилію (PuBe) утворюються гамма-кванти?
3. Чому в апаратурному спектрі сцинтиляційного детектора на основі неорганічного сцинтилятора кілька високоенергетичних гамма-піків, яка їх енергія?
4. Основні особливості моделювання в GEANT4 [6]?
5. Який внесок нейтронів в апаратурному спектрі сцинтиляційного детектора на основі неорганічного сцинтилятора, яка енергія нейтронів джерела (з літературних джерел)?
6. Питання підвищеної складності: використайте замість GEANT4 пакет FLUKA [7].
7. Питання підвищеної складності: використайте замість GEANT4 пакет EGS4 (EGSnrc) [8].

8. Питання підвищеної складності: промодельуйте в GEANT4 утворення нейтронів і гамма-квантів в PuBe джерелі, оцініть обмеження по інтенсивності джерела в залежності від геометрії.

### Рекомендована література

1. Н.А.Власов. Нейтроны. М., 1971.
2. Н.А.Власов. Источники нейтронов. УФН, т.43, ст.169–253, 1951(<https://ufn.ru/ru/articles/1951/2/a/>).
3. Г.І. Применко, Ю.М. Оніщук, О.А.Безшийко, Б.Ю.Лещенко, І.Б.Міхницький, А.В. Мурзін. Методичні рекомендації до лабораторного практикуму з нейтронної фізики для студентів фізичного факультету. ВЦ “Київський університет”, Київ, 1999.
4. H.R. Vega-Carrillo, V.M. Hernández-Dávila, T. Rivera-Montalvo, A. Sánchez. Characterization of a  $^{239}\text{PuBe}$  Isotopic Neutron Source. Proceedings of the ISSSD, 2012. ([https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/026/44026243.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/026/44026243.pdf)).
5. János Bagi, László Lakosi, Cong Tam Nguyen. Neutron producing reactions in PuBe neutron sources. NIMB, Volume 366, 1 January 2016, Pages 69-76 (Pages 69-76. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X15009787>).
6. Zachary R. Harvey. Neutron flux and energy characterization of a Plutonium-Beryllium isotopic neutron source by Monte Carlo simulation with verification by neutron activation analysis. Master of Science in Health Physics. Thesis. Department of Health Physics and Diagnostic Sciences. School of Allied Health Sciences, Graduate College, University of Nevada, Las Vegas, 2010. (<https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1901&context=thesesdissertations>).
7. <https://geant4.web.cern.ch/>
8. <http://www.fluka.org/fluka.php>
9. <https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/egsnrc-software-tool-model-radiation-transport>

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### **ВИМІРЮВАННЯ СПЕКТРІВ СЦИНТИЛЯЦІЙОГО СПЕКТРОМЕТРА НА БАЗІ SiPM ФОТОДЕТЕКТОРІВ**

#### **Теоретична частина**

Для ефективного виконання роботи перед її початком необхідно ознайомитись з теоретичними основами.

#### ***Напівпровідникові фотодетектори в режимі Гейгера (SiPM)***

##### **1 Історична довідка**

Напівпровідникові фотодетектори в режимі Гейгера (SiPM) або інша назва твердотільні кремнієві фотоелектронні помножувачі (SiФЕП) – новий клас фотодетекторів [3] який швидко розвивається і стає основою для вирішення широкого кола наукових і прикладних задач, які потребують реєстрації імпульсного випромінювання світла малої інтенсивності. Характеристики сучасних детекторів дозволяють не тільки замінювати вакуумні ФЕП в багатьох застосуваннях, але і створювати на їх основі якісно нові системи, що містять тисячі каналів реєстрації: адронні калориметри, телескопи для гамма-астрономії, позитронно-емісійні томографи нового покоління. Малі

габарити, сумісність зі стандартною МОП-технологією і, як наслідок, низька вартість роблять цей клас фотоелектронних приладів перспективним комерційно-технічним продуктом.

Для реєстрації імпульсного оптичного випромінювання малої інтенсивності використовуються різні типи фотодетекторів - приладів, що перетворюють енергію фотонів в електричний сигнал. Найбільш широке поширення для вирішення цієї задачі отримали вакуумні фотоелектронні помножувачі - ФЕП, здатні реєструвати окремі фотони. Ефективність перетворення випромінювання сучасних ФЕП досягає 45%, розширюється і їхня спектральний діапазон чутливості.

Основні недоліки, що перешкоджають використанню ФЕП в деяких конкретних застосуваннях, - великі розміри, висока напруга живлення і чутливість до магнітних полів. Крім того, при побудові систем, що містять сотні тисяч каналів реєстрації, найважливішим чинником стає ціна детектора, яка у випадку використання ФЕП досить висока.

Ці фактори стали причиною активної розробки твердотільних приладів, що використовують явище внутрішнього фотоефекту. Напівпровідникові детектори фотонів можна розділити на дві великі групи:

- фотодетектори, у яких перетворення світлового сигналу відбувається без внутрішнього підсилення заряду;
- фотодетектори з внутрішнім підсиленням заряду.

До першої групи належать р-і-n-фотодіоди, які завдяки своїй надійності, компактності і невисокій вартості успішно застосовуються в різних фізичних експериментах. Квантова ефективність цих фотодіодів в максимумі спектральної чутливості досягає 90%. Проте при реєстрації імпульсів світла малої тривалості (менше 1 мкс) необхідно застосовувати зовнішній широко-смуговий підсилювач, шуми якого не дозволяють зареєструвати спалах світла з кількістю фотонів менше 1000. Крім того, відносно велика товщина збідненої області робить р-і-n-фотодіоди чутливими до інших видів випромінювання (гамма-кванти, заряджені частинки).

У детекторів другої групи внутрішнє підсилення заряду відбувається, як правило, за рахунок ударної іонізації носіїв в сильних електричних полях. Під дією поля вільний носій заряду (електрон або дірка) набуває енергію, достатню для іонізації нейтрального атома та звільнення ще однієї електронно-діркової пари, причому такий процес може повторюватися неодноразово. Напівпровідникові детектори з внутрішнім підсиленням заряду, обумовленим ударної іонізацією, - лавинні фотодіоди (ЛФД) - були розроблені більш 50 років тому. Переваги ЛФД - високі швидкодія і квантова ефективність (до 90%), а також широкий динамічний діапазон. Коефіцієнт підсилення промислових зразків кремнієвих ЛФД, що працюють у пропорційному режимі (тобто при сигналі на виході ЛФД, пропорційному інтенсивності реєстрованого світла), складає  $\sim 10^2$ . Спеціальні технології дозволяють виготовляти ЛФД з коефіцієнтом підсилення до  $\sim 10^3$ . При такому коефіцієнті підсилення сигнал від одиночного фотоелектрону може перевищити рівень шумів підсилювача, проте флуктуації коефіцієнта помноження в ЛФД не дозволяють зареєструвати світлові імпульси, що містять менш 20-50 фотонів. Збільшити коефіцієнт множення традиційного кремнієвого ЛФД до  $10^4$  і більше не можливо. Це пов'язано з тим, що коефіцієнти іонізації для електронів і дірок у кремнії при великих напруженостях електричного поля дуже близькі і в розвитку лавини беруть участь обидва типи вільних носіїв, що призводить до необмеженого зростання лавини і, як наслідок, до теплового пробою рn-переходу і виходу приладу з ладу. Таким чином,

реєструвати поодинокі фотони традиційними детекторами на основі рп-переходу, які працюють без підсилення і в пропорційному режимі підсилення, неможливо.

Однак був знайдений спосіб, що дозволяє збільшити підсилення, - це створення структури, в якій лавинний розряд обмежується механізмом зворотного зв'язку. Роботи в цьому напрямі в Росії проводилися у Фізичному інституті ім. П.Лебедєва РАН, де досліджувалася структура типу метал-діелектрик-напівпровідник (МДП). У таких структурах носії, які з'являються під час лавини накопичуються на межі розділу напівпровідник-діелектрик, що призводить до локального зниження напруженості електричного поля, зменшенню коефіцієнтів ударної іонізації і припиненню розвитку лавини. Основні недоліки МДП-структур - необхідність подачі імпульсної напруги зміщення для розсмоктування інверсного заряду і деградація характеристик приладу. Проблеми були вирішені при використанні структур метал-резистивний шар-напівпровідник (МРП). На відміну від МДП-структур МРП мають високу провідність резистивного шару, що запобігає накопиченню вбудованого заряду на межі розділу шарів. Це дозволило істотно збільшити коефіцієнт підсилення фотоструму (до  $10^4$ ), поліпшити стабільність характеристик, збільшити площу чутливої поверхні і термін служби приладів.

Одночасно у низці лабораторій світу вивчалася можливість застосування для реєстрації одиночних фотонів рп-переходів, що працюють в лавинному режимі при напрузі, яка вище напруги пробоя, тобто в режимі гейгерівського розряду. Такі детектори, названі СПАД (SPAD - Single Photon Avalanche Diode), здатні реєструвати поодинокі фотони з ефективністю до 80%. В режимі Гейгера сигнал від одного фотона, що надходить на 50-Ом навантаження, може становити кілька вольт. Для реєстрації наступного фотона лавина після виникнення повинна якнайшвидше припинитися, згаснути. Це означає, що гейгерівський розряд необхідно обмежувати, що оберігає рп-перехід від пошкодження. Розряд гаситься за допомогою зовнішнього резистора (пасивне гасіння), або електронних схем гасіння лавини і примусового відновлення робочої напруги на рп-переході (активне гасіння).

Активне гасіння дозволяє істотно збільшити швидкодію детектора. В даний час SPAD виготовляються на різних напівпровідникових матеріалах з відповідним діапазоном спектральної чутливості і знаходять широке застосування в системах, де необхідний рахунок окремих фотонів. Недолік SPAD - фіксована амплітуда сигналу на виході, яка не залежить від величини зовнішнього впливу, а також нечутливість детектора до зовнішнього впливу в період після спрацьовування і до моменту відновлення. На рис.2.1 наведено зображення різних конструкцій лавинних фотодіодів, які працюють в режимі Гейгера та велика кількість різних

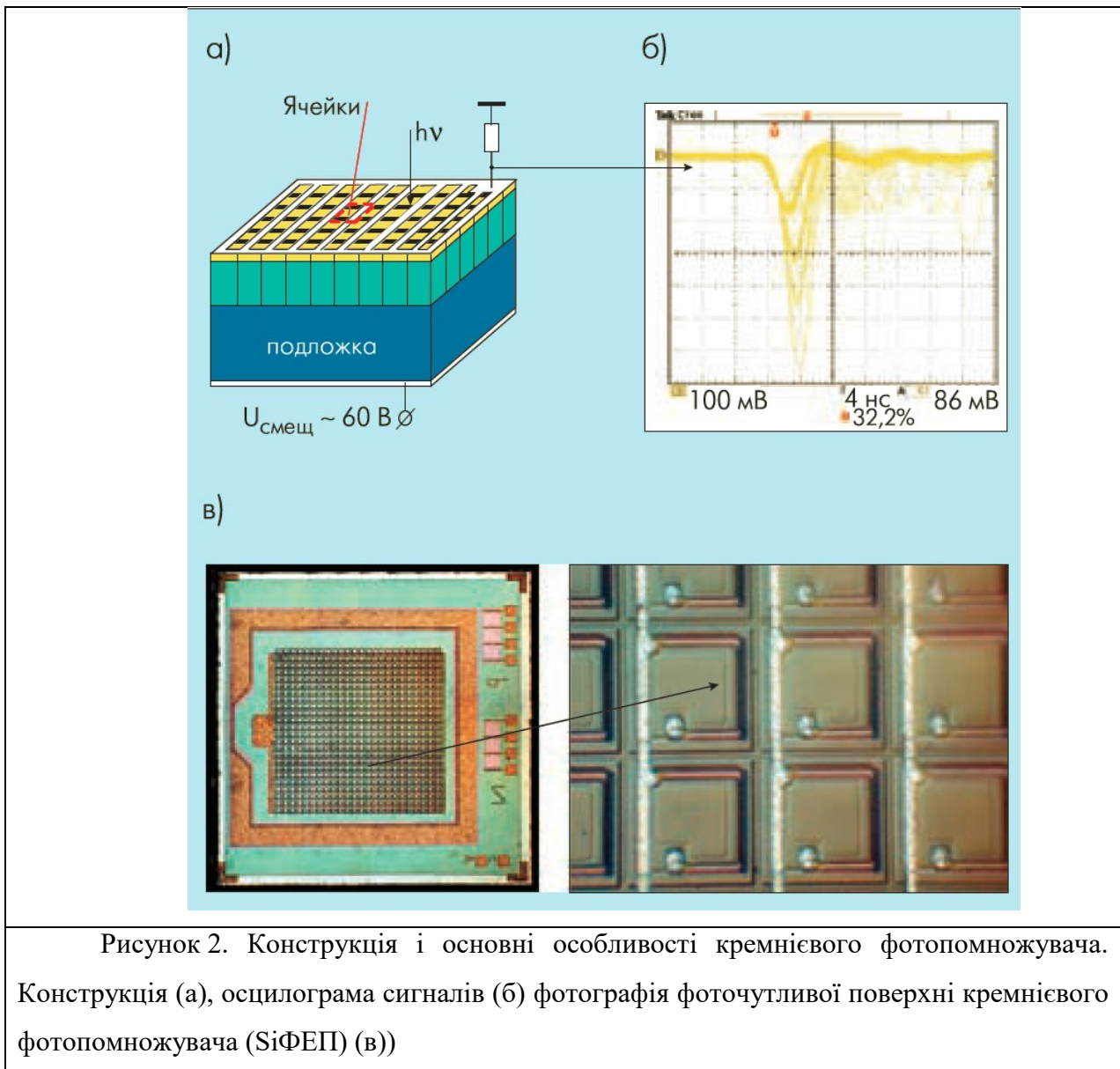
фірм і наукових лабораторій, які долучилися до розвитку та виготовлення таких напівпровідникових структур. Кожний виробник пропонує свою назву таких приладів - MRS APD, MAPD, SiPM, SSPM, SPM, G-APD, MPPC, PPD, DAPD. Але найбільш популярна назва – кремнієві фотопомножувачі (SiPM або SiФЕП)



## 2. Будова, принцип дії та основні характеристики SiPM

SiPM - це фотоприймач на основі впорядкованого набору (матриці) рп-переходів (комірок), виконаних на загальній підкладці (рис. 2, 3). Характерний розмір комірки становить порядку 30-100 мкм. Щільність упаковки матриці - 100-4000 комірок /мм<sup>2</sup>. Площа чутливої поверхні SiPM, лежить в межах від 1 × 1 до 5 × 5 мм. Усі комірки однакові. Всі вони об'єднані в спільній точці струмопровідними шинами. Напруга зміщення всіх комірок спільна і на кілька вольт (значення перенапруги) перевищує напругу пробоя р-п-переходу. Кожна комірка містить струмообмежуючий резистор, в результаті чого гейгерівський розряд в комірці

обмежений. Сигнал кожної комірки - логічний і не залежить від числа первинних носіїв, що викликали спрацювання комірки. Однак сам SiPM як ціле являє собою аналоговий детектор, так як його вихідний сигнал дорівнює сумі однакових сигналів р-n-переходів, що спрацювали при поглинанні ними фотонів.



Ефективність реєстрації фотонів  $\epsilon$  (основна характеристика фотоприймача) - це ймовірність того, що падаючий на Фотоприймальний майданчик SiФЕП фотон буде зареєстрований. Ефективність можна визначити таким чином:  $\epsilon = \langle N_{\text{комірок}} \rangle / \langle N_{\text{фотонів}} \rangle$ , де  $\langle N_{\text{фотонів}} \rangle$  - середнє число фотонів у спалаху, що падають на фотоприймач. Ефективність реєстрації  $\epsilon$  можна виразити через добуток трьох основних незалежних один від одного складових:  $\epsilon = QE \cdot A \cdot G$ , де  $QE$  - квантова ефективність рп-переходу,  $A$  - геометрична ефективність і  $G$  - ймовірність виникнення гейгеровського розряду.



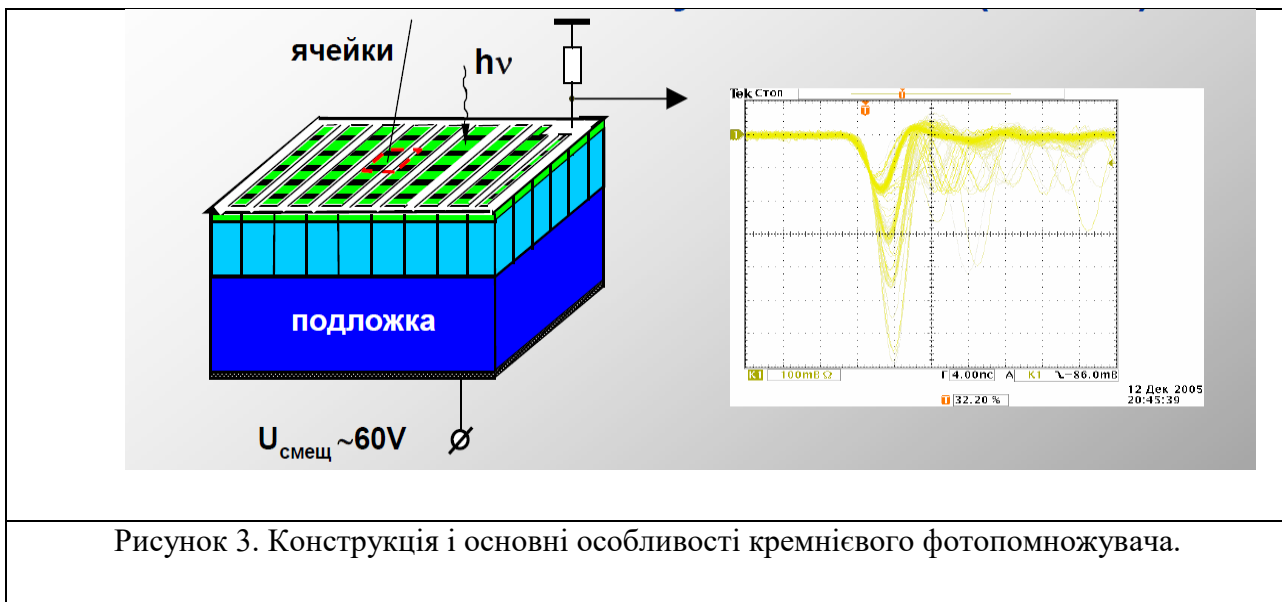


Рисунок 3. Конструкція і основні особливості кремнієвого фотопомножувача.

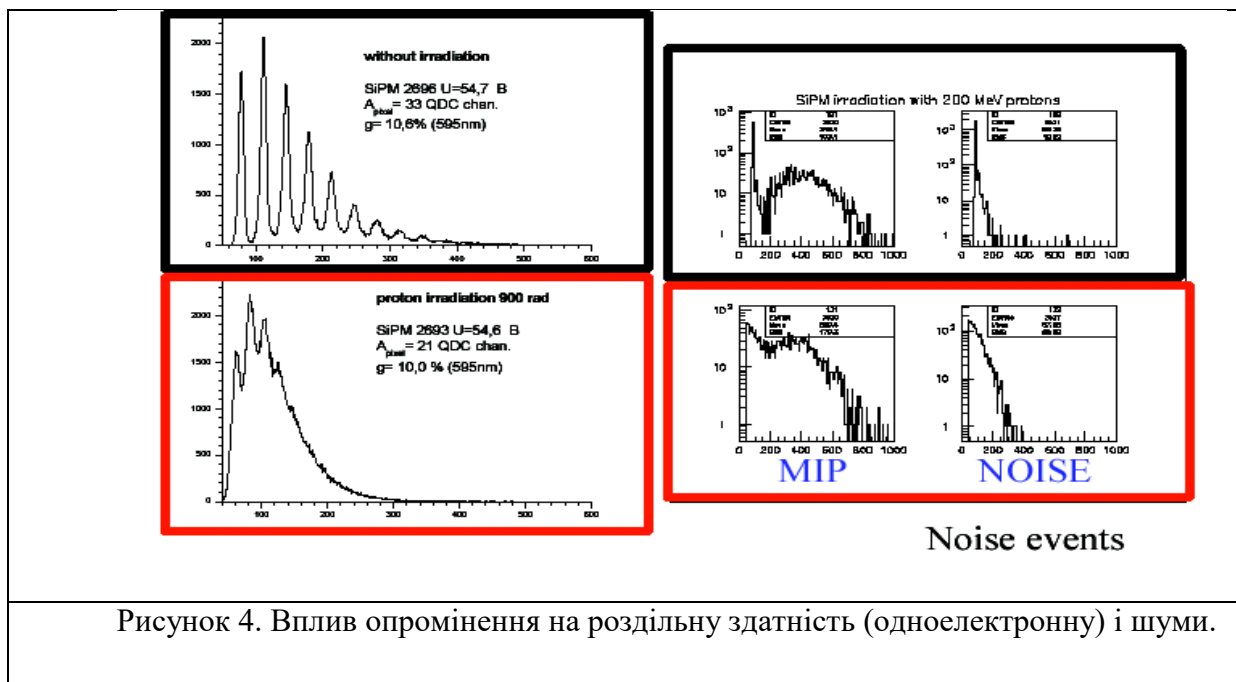
Квантова ефективність QE - ймовірність генерації фотоном вільного носія, який досягне області множення (області високого поля, достатнього для ударної іонізації). Використання просвітлюючого покриття, оптимізація товщини шару, де відбувається поглинання випромінювання, дозволяють отримувати значення квантової ефективності до 90%. Геометрична ефективність  $A$ , обумовлена співвідношенням активної і загальної площі комірки SiФЕП, залежить від розміру комірки і становить 30-80% для комірок розміром від  $30 \times 30$  до  $100 \times 100$  мкм.

Ймовірність виникнення гейгерівського розряду  $G$  при попаданні вільного носія в область високого поля залежить від значення перенапруги, тобто різниці між прикладеною до SiФЕП напругою і напругою пробою. Ефективність реєстрації світла залежить від довжини хвилі реєстрованого випромінювання. Досягнуті на останніх зразках SiФЕП значення  $\epsilon$  в максимумі спектральної чутливості становлять 30-40%.

Коефіцієнт підсилення ФЕП ( $K$ ) залежить від значення накопиченого ємністю комірки заряду:  $K = C_k \cdot (U - U_{пр}) / e$ , де  $C_k$  - ємність комірки;  $(U - U_{пр})$  - перенапруження,  $e$  - заряд електрона. Значення ємності осередку визначається її площею і шириною області просторового заряду. Типове значення ємності лежить в діапазоні (25-500) фФ при розмірах комірки від  $30 \times 30$  до  $100 \times 100$  мкм. При перенапруженні 2-5 В значення коефіцієнту підсилення знаходяться в діапазоні  $3 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^7$ . Треба відзначити, що на відміну від звичайних лавинних фотодіодів залежність коефіцієнта підсилення SiФЕП від перенапруги є лінійною, тому вимоги до стабільності напруги живлення для цих приладів набагато нижче, ніж для ЛФД. Розкид значення коефіцієнта підсилення визначається технологічним розкидом



значень ємності комірок і напруги пробою від комірки до до комірки і складає менше 10%. Це дозволяє отримувати амплітудні спектри сигналів з чудовою одноелектронною роздільною здатністю, на яку впливає суттєво опромінення (див. рис. 4)



При робочій напрузі, прикладеній до SiФЕП у відсутність світлового впливу, вихідні імпульси за формою і амплітуді відповідають сигналам з комірок. Причини їх появи - теплова генерація вільних носіїв, генерація носіїв в сильному електричному полі, звільнення носіїв, захоплених пастками в забороненій зоні при проходженні попередніх розрядів. Абсолютне значення швидкості темнового струму залежить від якості кремнію (часу життя неосновних носіїв) і об'єму, з якого носії можуть потрапляти в область множення. Типові значення в робочому режимі при кімнатній температурі складають 0,5-2 МГц / мм<sup>2</sup>.

Швидкість темної лічби, як і ефективність реєстрації світла і коефіцієнт підсилення, визначається значенням перенапруги. Це означає, що для кожного конкретного застосування SiФЕП необхідно вибирати робочу точку по напрузі, при якій співвідношення параметрів буде оптимальним. При підвищених вимогах до швидкості темної лічби в ряді випадків може допомогти охолодження SiФЕП. Зі зниженням температури частота темнових імпульсів для фіксованого значення перенапруги знижується, зменшується і напруга пробою рп-переходу.

Часові характеристики SiФЕП визначаються часом розвитку гейгерівського розряду в комірці. Власною характеристикою детектора є розкид часу спрацьовування одиночної комірки SiФЕП. Вимірювання, проведені при використанні напівпровідникового лазера ( $\lambda = 670$  нм) з тривалістю імпульсу 40 пс, показували, що такий розкид дорівнює 100 пс

(напівширина на половині висоти). При збільшенні інтенсивності спалаху розкид часу спрацювання зменшується пропорційно квадратному кореню з числа комірок, що спрацювали. Для 30 комірок часова роздільна здатність дорівнює 20 пс.

Сигнал на виході SiФЕП пропорційний інтенсивності вхідного сигналу до тих пір, поки ймовірність того, що спрацювання комірки викликано двома або більшою кількістю електронно-діркових пар, буде дуже малою (коли нею можна знехтувати). У цьому випадку діапазон лінійності SiФЕП визначається повною кількістю комірок. При високій інтенсивності спалаху світла настає насичення сигналу SiФЕП. Форма кривої залежності для детектора з фіксованою конструкцією постійна. Її можна попередньо виміряти і використовувати для корекції насичення вихідного сигналу.

### **3. Деталізація характеристик SiPM**

Нижче наведено деякі детальні характеристики кремнієвих лавинних фотодетекторів в режимі Гейгера [4]

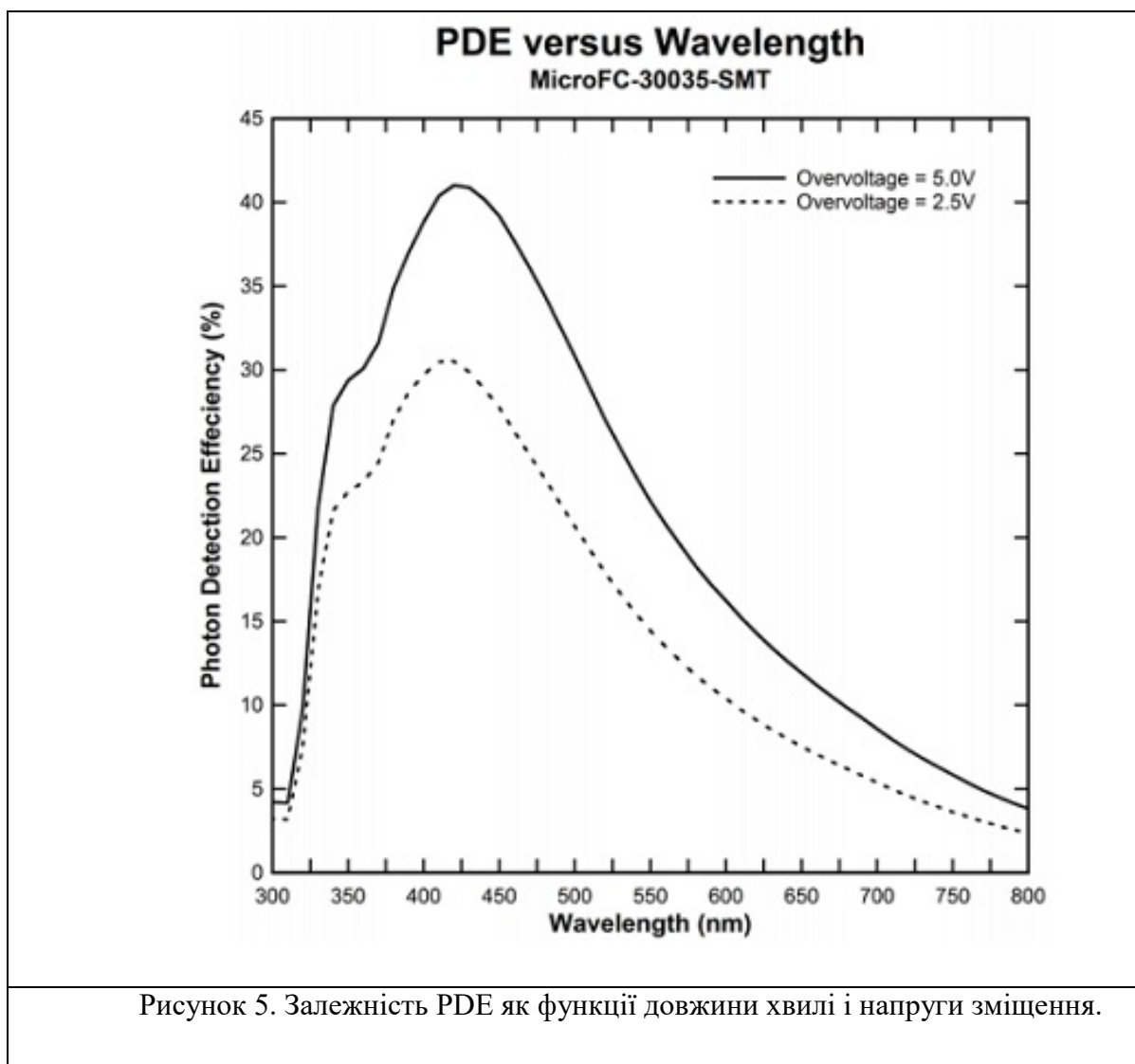
#### *2.1. Чутливість і ефективність реєстрації фотонів (PDE)*

Для великої кількості прикладних задач ефективність реєстрації фотонів (Photon Detection Efficiency - PDE) є основним параметром. Вона є мірою чутливості датчика, і визначається як відсоток падаючих фотонів, які будуть посилені високим внутрішнім коефіцієнтом посилення для створення вимірюваного сигналу. Найкращі в своєму класі кремнієві фотопомножувачі зараз наближаються, і навіть трохи більше 50% ( $PDE > 50\%$ ). Крива PDE є функцією довжини хвилі (Рис. 5) і також залежить від напруги зсуву (Рис. 6). Ефективність реєстрації фотонів кремнієвих фотопомножувачів різних виробників суттєво різниться і навіть між декількома датчиками одного виробника, залежно від типу датчика (див. Розділ присвячений мікрокоміркам в SiPM в статті [5]). Важливо також враховувати чутливість SiPM детектора, яка показана на рис. 7. Через високе внутрішнє підсилення чутливість SiPM залишається високою в широкому спектральному діапазоні.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи має SiPM детектор достатню чутливість на необхідних для застосування довжинах хвиль? Оптимальна продуктивність детектора буде на довжині хвилі, де знаходиться пік чутливості / PDE, але завдяки високій чутливості SiPM також добре реєструє фотони поза області піку.

- Яку перенапругу необхідно прикласти до SiPM детектору для досягнення максимального значення PDE і як це впливає на інші параметри продуктивності?



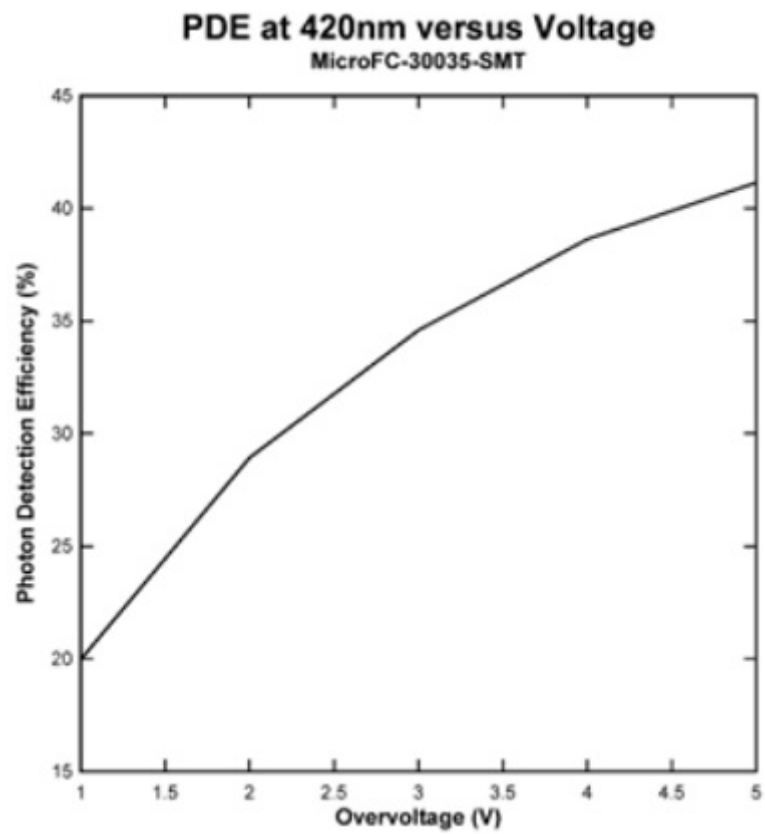
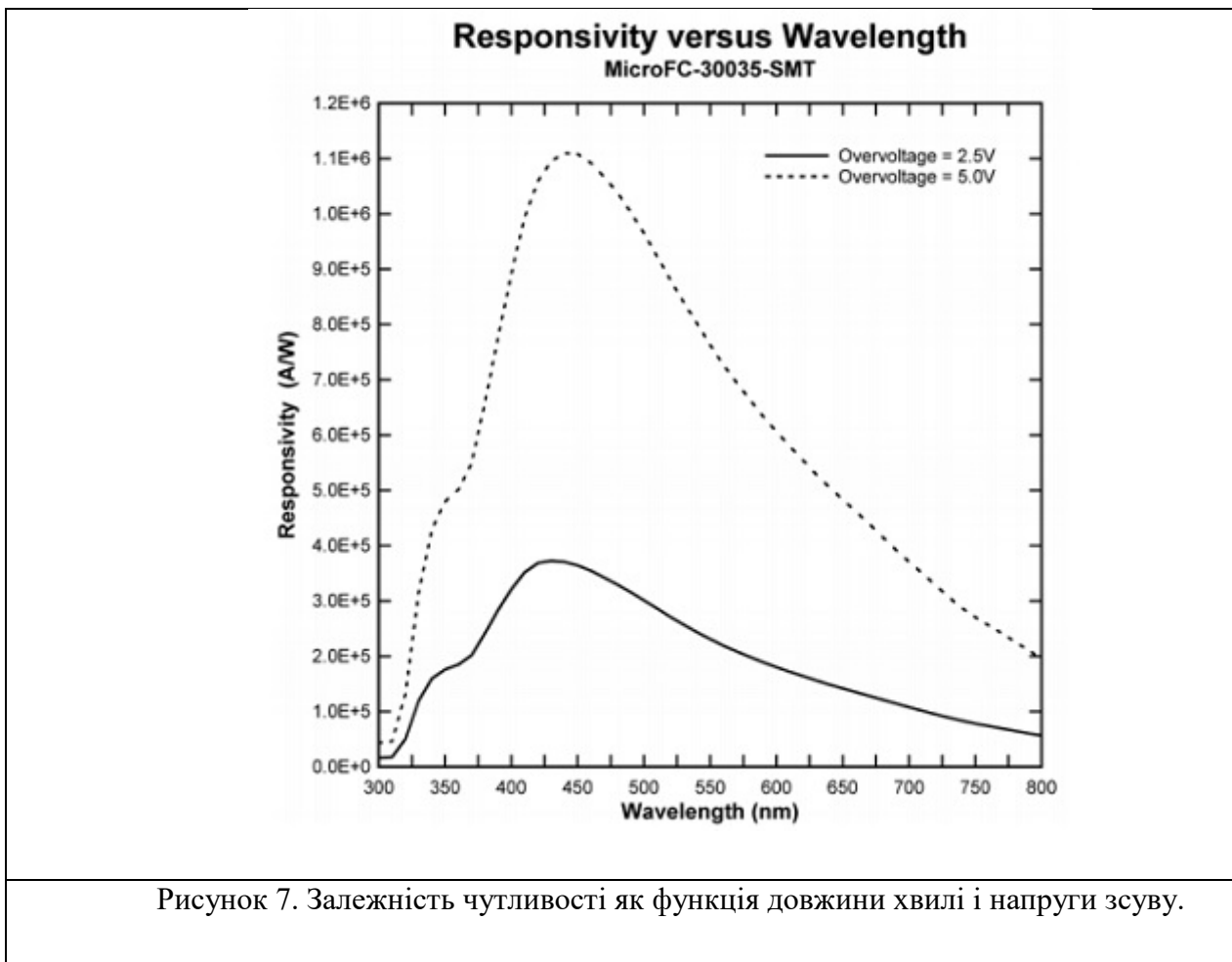


Рисунок 6. Залежність PDE як функція перенапруги.



## 2.2. Швидкість темної лічби (DCR)

Швидкість темної лічби (Dark current rate - DCR) є основним джерелом шуму в кремнієвих фотопомножувачах. Вона визначається як швидкість рахунку на рівні одного фотона, яка створюється тепловою генерацією електронів в активній області кремнію, а не за рахунок падаючого на SiPM джерела світла. Параметр швидкості темного підрахунку є особливо важливим при реєстрації слабкого світіння або в задачах з тривалим часом інтегрування. Проте, в будь-якому застосуванні, швидкість темної лічби (темного підрахунку) впливає на співвідношення сигнал/шум. Типове значення швидкості темного підрахунку для SiPM детекторів SensL становить 30 кГц/мм<sup>2</sup>. Важливо відзначити, що швидкість лічби буде рости зі збільшенням площі сенсора. На рис. 8 показана залежність швидкості темного підрахунку від перенапруги (рис. 8) і температури.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи вказана швидкість темної лічби на  $1 \text{ мм}^2$  активної області або для всієї площі SiPM детектора?

- Чи є швидкість темної лічби SiPM детектора досить низькою, щоб досягти необхідного співвідношення сигнал/шум?

- Швидкість темної лічби змінюється в залежності від прикладеного до SiPM детектору перенапруги і температури

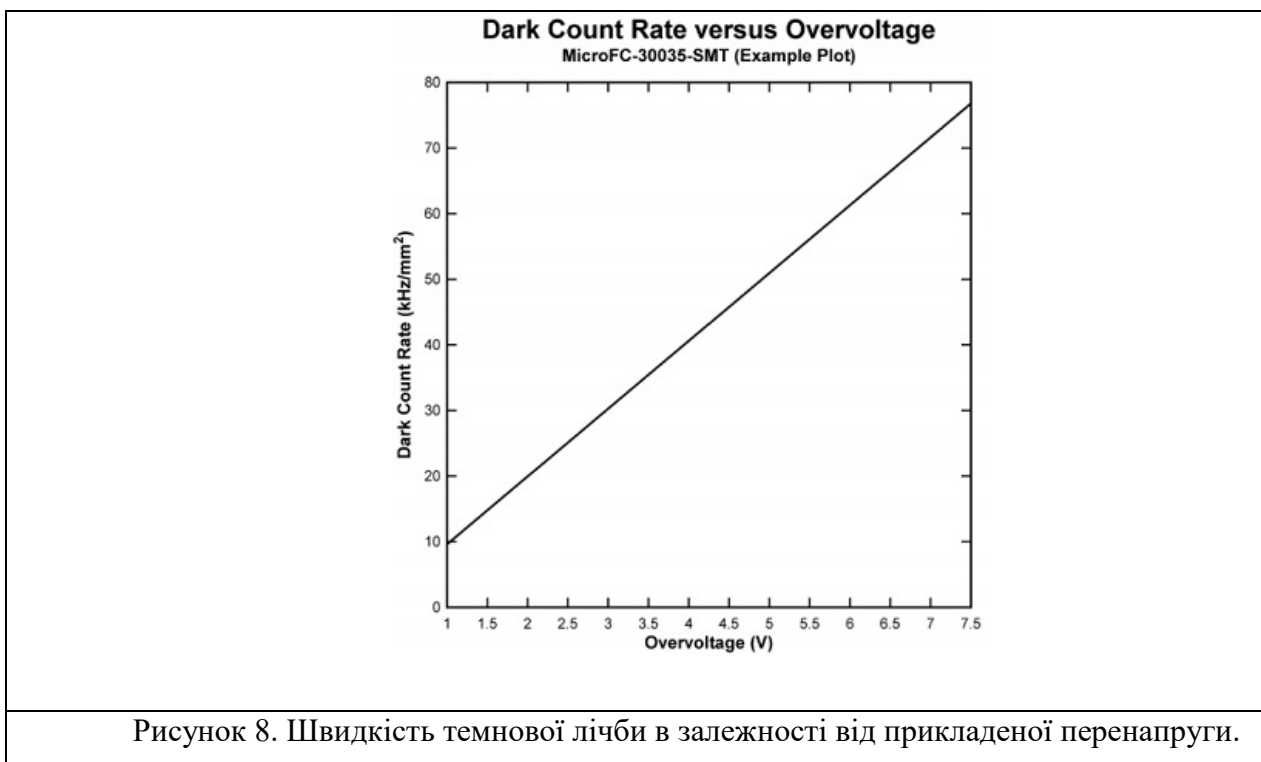


Рисунок 8. Швидкість темної лічби в залежності від прикладеної перенапруги.

### 2.3. Ефекти перехресних перешкод і післяімпульси

Ефекти перехресних перешкод (cross-talk) і післяімпульси (afterpulsing) представляють собою два види перешкод, які викликають виникнення небажаного шуму. Пояснення цих ефектів можна знайти в статті [5]. Обидва явища вказуються в процентах ймовірності їх виникнення для кожного зареєстрованого SiPM детектором фотона. Вимірювання слабких світлових сигналів можуть бути погіршені, якщо значення цих параметрів дуже високі, хоча це сильно залежить від застосування. Недавні дослідження показують, що ефект cross-talk може надавати мінімальний вплив на визначення значення часового роздільної здатності схеми збігів (CRT-coincidence resolving time) в позитронно-емісійній томографії, але вони

мають важливе значення для використання кремнієвих фотопомножувачів в новому великому телескопі для реєстрації черенковського випромінювання.

Як ефект cross-talk, так і післяімпульси збільшуються з ростом перенапруги і розміром мікрокомірок в SiPM детекторі. Існують великі відмінності в цих параметрах у кремнієвих фотопомножувачів різних виробників. Деякі виробники домоглися певного успіху в реалізації «Канавочної» технології (trench technology), що представляє собою нанесення канавки між окремими мікрокомірками в SiPM детекторі, яка раніше вважалася найкращим способом для зниження ефекту cross-talk. Проте на сьогоднішній день одні з найнижчих значень ефекту cross-talk у представлених на ринку кремнієвих фотопомножувачів, які не мають канавок між мікрокомірками.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи важливі ефекти cross-talk і післяімпульси для вибраної задачі?
- Не факт, що наявність канавок між мікрокомірками гарантує кращі параметри для зниження ефекту cross-talk.

#### 2.4. Час наростання сигналу і спадання

Час наростання в мікрокомірці кремнієвого фотопомножувача дуже швидкий, проте в спостережуваному вихідному сигналі переважає імпеданс загального масиву SiPM. Виробники оптимізують даний параметр, щоб забезпечити швидкий тимчасовий сигнал. Типові часи наростання для швидких SiPM детекторів складають одиниці наносекунд.

Час відновлення або час спадання імпульсу визначається в першу чергу періодом скидання заряду мікрокомірки, який визначається ефективною ємністю мікрокомірки і значенням шунтуючого резистора. Оскільки ємність мікрокомірки залежить від її площі, то час скидання заряду мікрокомірки буде відрізнятися для різних розмірів мікрокомірок. Додатковим фактором, що впливає на час відновлення, є послідовний опір від решти SiPM детектора, яке буде більш значним для детекторів великої площі.

Для забезпечення найкращих тимчасових характеристик компанія SensL додала третій електрод (на додаток до анода і катода), який забезпечує спеціальний швидкий вихід для досягнення кращого часу наростання сигналу, рис. 9. Швидкий вихід має ємнісні зв'язок з кожною мікрокоміркой, в той час як вихідний сигнал є похідною від внутрішнього швидкого перемикачання мікрокомірки у відповідь на реєстрацію одиничних фотонів. Ці швидкі вихідні

сигнали зазвичай мають часи наростання від 300 пс до 1 нс і тривалість імпульсу від 600 пс до 3 нс (в залежності від розміру SiPM детектора).

Типові сигнали з швидкого і стандартного виходу кремнієвого фотопомножувача SensL можна побачити на рис. 9. Цей сигнал може бути використаний для проведення надшвидких часових вимірів, використовуючи здатність чітко відрізняти час прибуття першого фотона в імпульсі, а також забезпечувати високу швидкість рахунку або можливості для реєстрації часу приходу другого фотона. Крім поліпшення часових характеристик швидкий вихід має значно нижчу ємність, яка може бути корисна при створенні схем зчитування для SiPM детекторів. Швидкий вихід SiPM детектора з активною областю 1 мм має власну ємність 1 пФ, в той час як зчитування сигналу з анода або катода матиме ємність близько 100 пФ.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

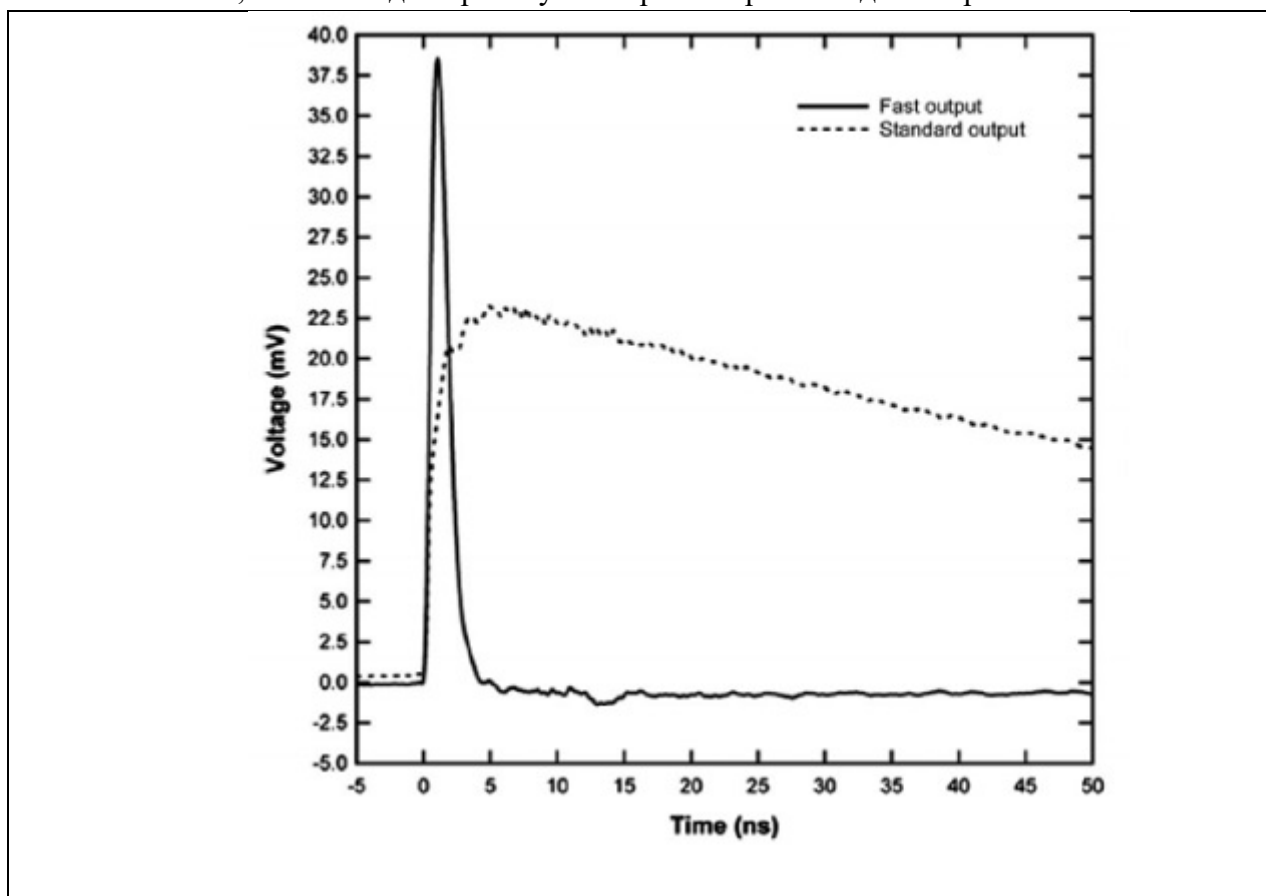


Рисунок 9. Форми вихідного сигналу з швидкого і стандартного виходу з SiPM детектора SensL.

- Чи є вимоги до часових параметрів або швидкості рахунку критично важливими для поставленого завдання? Потрібно мати на увазі використання швидкого виходу.

## 2.5. Напруга пробою та робоча напруга зміщення



Напруга пробою ( $V_{BR}$ ) це точка зміщення, при якій напруженість електричного поля, яка генерується в збідненому шарі кремнієвого фотопомножувача, є достатньою, щоб створити гейгерівський розряд. Наприклад, типова напруга пробою в SiPM детекторах SensL становить близько 24.5 В. Компанія SensL рекомендує вибирати напругу зміщення ( $V_{bias}$ ) між 1 В і 5 В вище напруги пробою. Тому для SiPM детекторів SensL  $V_{bias}$  становить  $<30$  В, у багатьох виробників SiPM фотодетекторів  $V_{bias}$  приблизно від 50 В до більш ніж 100 В. Ще одним фактором, що належать до напруги зміщення, є можливий розкид типового значення напруги зміщення. Ця однорідність значення напруги зміщення може бути жорстко обмежена при серійному виробництві SiPM детекторів, як наприклад в компанії SensL, де виготовляються SiPM детектори, які мають розкид напруги зміщення не пвище  $\pm 250$  мВ. Це особливо важливо при використанні великої кількості кремнієвих фотопомножувачів в одній системі, наприклад в калориметрі або годоскопі. Якщо напруга зміщення  $V_{bias}$  змінюється занадто сильно від детектора до детектора, то буде потрібно індивідуальне налаштування зміщення для кожного отодетектора.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи є перевага при використанні SiPM детектору з низькою напругою зміщення?
- Кілька SiPM детекторів, які використовуються в єдиній системі, вони можуть бути підключені від загальної напруги зміщення?
- Кремнієві фотопомножувачі в межах вузького діапазону розкиду напруги пробою  $V_{br}$ , часто дорожчі
- Приймаються до уваги напруга живлення і споживана потужність SiPM детекторів?

## 2.6. Вплив температури

Температура впливає як на напругу пробою, так і на швидкість темнового підрахунку SiPM детектора. У кремнієвих фотопомножувачах компанії SensL використовується тонкий збіднений шар і малі рівні залягання легуючої домішки, які дозволяють отримати в детекторах низькі значення напруги пробою  $V_{br}$ . Температура, як відомо, впливає на напругу пробою кремнієвих діодів, і детектори з меншим значенням  $V_{br}$  набагато менш чутливі до зміни температури, ніж датчики з високим значенням  $V_{br}$ . Всі кремнієві фотопомножувачі компанії SensL мають температурну залежність тільки 21.5 мВ / °С, тоді як високовольтні SiPM детектори з великою напругою пробою матимуть більшу зміну температури. Оскільки

швидкість темної лічби безпосередньо пов'язана з тепловою генерацією електронів, цей шум також збільшується з ростом температури і є одним з факторів, що лімітують використання датчиків в задачах, де SiPM детектори працюють при підвищених температурах. Навпаки, охолодження кремнієвого фотопомножувача знижує швидкість темного підрахунку таким чином, що кожне зниження температури на 20 °C забезпечує зниження цього фактора в 10 разів (один порядок величини). Деякі недавні дослідження показали, що при температурі рідкого аргону швидкість темного підрахунку SiPM детектора становила <10 Гц/мм<sup>2</sup> при напрузі  $V_{br} + 5$  В. Схеми температурної компенсації можуть бути використані для коригування зміни напруги зміщення SiPM детектора зі зміною температури, але збільшення швидкості темного підрахунку може бути знижено тільки за допомогою активного охолодження детектора.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Коливання температури вимагають схеми компенсації напруги зміщення SiPM детектора?
- При більш високих робочих температурах збільшення швидкості темного рахунку SiPM детектора є допустимим?

#### **4. Специфічні властивості для різних прикладень**

Вибір конкретного кремнієвого фотопомножувача може в кінцевому рахунку зводиться до параметру продуктивності, який є характерним для даного прикладення

Деякі приклади:

Часова роздільна здатність схеми збігів (CRT) важлива для задач в позитронно-емісійної томографії (ПЕТ). Значення CRT впливає на загальну якість одержуваного зображення системи і стає найбільш важливим параметром в комерційних конструкціях ПЕТ систем. Величини PDE і SPTR (однофотонна часова роздільна здатність - Single Photon Timing Resolution) є параметрами SiPM детектора, які в даному конкретному випадку мають найбільший вплив.

Енергетична роздільна здатність гамма випромінювання важлива в спектроскопічних завданнях, таких як радіаційні портальні монітори і гамма-спектрометри для виявлення загроз в системах безпеки. Вища енергетична роздільна здатність детектора дозволяє точно ідентифікувати різні ізотопи. Гарна енергетична роздільна здатність залежить в першу чергу

від наявності високого PDE SiPM детектора, однак, в області низьких температур ефект cross-talk може також мати велике значення для цього застосування.

У таких прикладних задачах, як ЛІДАР і розпізнавання жестів, потрібні виняткові часові параметри для досягнення найкращої просторової роздільної здатності з метою визначення дальності до досліджуваного об'єкта. У цих завданнях число відбитих від об'єкта фотонів може бути дуже невеликим, тому низький рівень шуму і високе значення однофотонної часової роздільної здатності є основними факторами.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи існують які-небудь параметри, які важливі для конкретного застосування і які робочі характеристики SiPM детектора впливають на продуктивність всієї системи?

#### Корпусування

Корпусування кремнієвого фотопомножувача, а саме тип корпусу, в який монтується чіп SiPM детектора, і з'єднання його контактів, також мають важливі особливості при використанні в деяких прикладеннях.

#### Форм фактор

Самою очевидною особливістю при обговоренні типу корпусу кремнієвого фотопомножувача є його форм-фактор (форма і розмір), а також тип контактів вхідних / вихідних сигналів (штирі або контактні площадки).

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи повинен SiPM детектор бути компактним, щоб поміститися в мініатюрній системі?

- Повинна бути зведена до мінімуму мертва зона між гранями активної області чипа SiPM детектора, щоб дозволити сформувати щільноупакований масив (матрицю) з SiPM детекторів?

- Чи є переваги штирьковий роз'єму, до якого зазвичай припаюються ручним паяльником або до контактних площадок, які монтуються методом пайки розплавлення дозованого припою?

#### Оптичне пропускання / поглинання світла

Прозорий матеріал, який використовується для інкапсуляції (корпусування) кремнієвого фотопомножувача, може впливати на криву PDE, як показано на рис. 10.

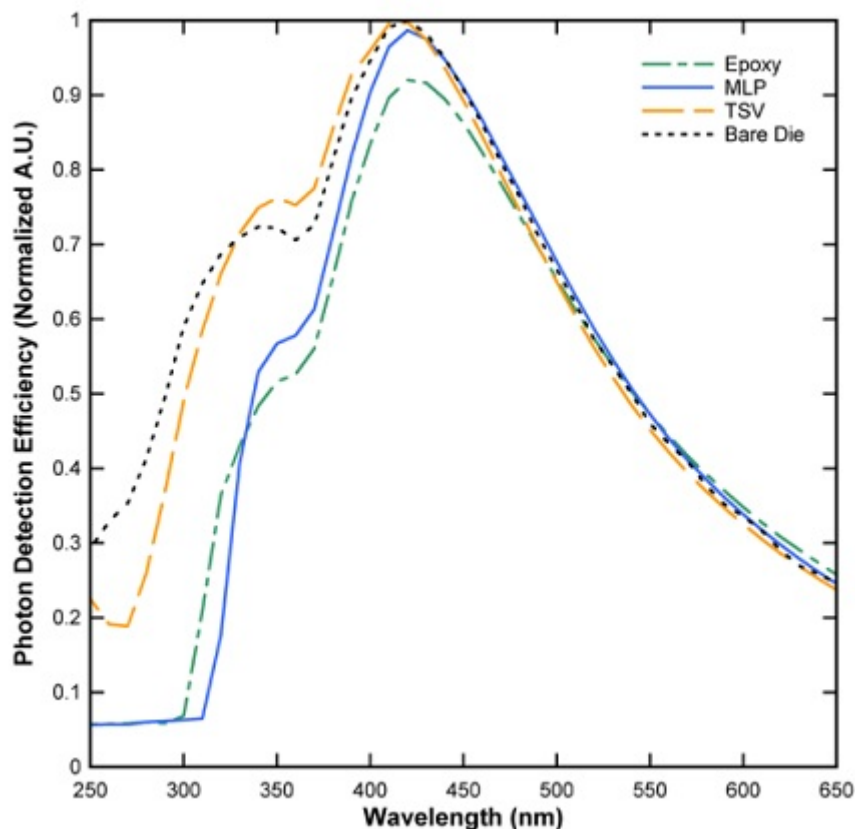


Рисунок 10. Крива PDE для різних типів корпусів SiPM детектора.

Скло, яке використовується в новому TSV корпусі кремнієвих фотопомножувачів SensL має значну перевагу в порівнянні з MLP (SMT) корпусом при реєстрації світла в ультрафіолетовій області спектра. Це розширення в УФ область спектру стало можливим без використання силіконової гуми або тонких плівок, якими покривають різні корпуси фотодіодів.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Використовуються у прикладенні довжини хвиль, які можуть поглинатися матеріалом вхідного вікна корпусу SiPM детектора?

#### Магнітна сумісність

У деяких прикладеннях наявність в корпусі детектора магнітних матеріалів може бути проблемою. Однією з таких областей є позитронно-емісійна томографія, поєднана з магнітно-резонансною томографією (ПЕТ-МРТ), де використовуються магнітні поля індуктивністю до 3 Тл. Було показано, що самі кремнієві фотопомножувачі не схильні до впливу магнітного поля, але в деяких випадках феромагнітні метали на основі сплавів заліза, які використовуються в корпусах SiPM детекторів можуть порушити магнітне поле, викликаючи

незначні спотворення одержуваного зображення. Однак TSV корпус SiPM детекторів компанії SensL має перевагу, що полягає у відсутності будь-яких феромагнітних металів, наприклад нікелю.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи існують у застосуванні будь-які магнітні поля, які можуть бути порушені феромагнітними матеріалами, що містяться в корпусі SiPM детектора?

#### Радіаційна чистота

Матеріали, які використовують для створення корпусу кремнієвого фотопомножувача, можуть містити сліди радіоактивних елементів, таких як U238, Ra226 і Th232, які забезпечують невелику кількість фонові лічби в певних умовах низької освітленості, наприклад в дослідницьких задачах, таких як виявлення темної матерії, це може бути значною проблемою. Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи буде впливати наявність слідів радіоактивних елементів в корпусі SiPM детектора на проведення експерименту?

#### Чутливість до вологості

Існують практичні міркування пов'язані з тим, в якому вигляді кремнієві фотопомножувачі поставляються замовникам і зберігаються до їх фактичного використання. Ці питання зазвичай важливі при поставці SiPM детекторів у великих обсягах. Кремнієві фотопомножувачі в MLP (SMT) і TSV корпусі компанії SensL поставляються на стрічці в котушках (3000 детекторів), які підходять для використання в стандартних системах для автоматизованої пайки. Такий параметр як MSL (Moisture Sensitivity Level - рівень чутливості до вологості) визначає, як довго кремнієві фотопомножувачі можуть зберігатися в оригінальній запечатаній упаковці, перш ніж вони зажадають додаткової процедури випікання, яка передусє процедурі автоматизованої пайки. Кремнієві фотопомножувачі SensL в корпусі MLP (SMT) мають MSL рейтинг №3 (з 5 можливих рівнів), який є галузевим стандартом для інтегральних схем. SiPM детектори SensL в TSV корпусі мають найвищий можливий рейтинг №1 для поверхневого монтажу. Варто відзначити, що корпуси кремнієвих фотопомножувачів, які заливають епоксидною смолою, не мають MSL рейтингу, тому не можуть використовуватися для автоматизованої пайки.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи має контрактний виробник певні вимоги до зберігання кремнієвих фотопомножувачів перед складанням, які можуть вплинути на вибір типу корпусу для SiPM детектора?

### Виробничі можливості та тестування

Виробничі можливості впливають на якість і надійність кремнієвих фотопомножувачів, тестування визначає ймовірність відмінності параметрів детекторів від заданої виробником специфікації. Компанія SensL використовує виробничу і пакувальну лінію, які забезпечують 100% тестування кремнієвих фотопомножувачів. Обробка кремнієвих пластин здійснюється на КМОП фабриці з використанням стандартного КМОП процесу на 8-дюймових пластинах. З метою забезпечення якості продукції, що випускається проводиться тестування моніторингу контролю технологічних процесів, при цьому виконується 1 000 000 різних тестів для кожної партії SiPM детекторів. Будь-які відбраковані при тестуванні детектори не допускаються до стадії корпусування.

Процес корпусування кремнієвих фотопомножувачів розроблений для здійснення серійного виробництва великого обсягу детекторів і також включає в себе 100% тестування кінцевих виробів за допомогою вимірювання темного струму і проведення оптичного контролю. Все SiPM детектори, які не пройшли ці тести, видаляються з партії і знищуються. Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи забезпечує наявний виробник SiPM детекторів високоякісний продукт?
- Наявний виробничий процес відповідає обсягу виробництва і задовольняє вимогам застосування замовника до однорідності параметрів SiPM детекторів, коли продукт вийшов на повну виробничу потужність?

### Однорідність напруги пробою і оптичного струму

Результатом високоякісного виробництва і 100% тестування є кремнієвий фотопомножувач з високою однорідністю (повторюваністю) параметрів, як з точки зору розкиду напруги пробою, так і оптичного струму при заданому рівні освітлення.

Моменти, які необхідно враховувати при виборі SiPM детектора:

- Чи є необхідною умовою постачання SiPM детекторів з однорідною напругою пробою і іншими характеристиками від партії до партії?

### Технічна підтримка та документація

Оптимальний кремнієвий фотоумножувач повинен бути обраний на основі всіх факторів, описаних в цій статті: продуктивність, тип корпусу, надійність, однорідність параметрів. Однак при остаточному розгляді варто враховувати крім перерахованих факторів ще й технічну підтримку пропонованої виробником продукції. Ця особливість реалізується різними шляхами - контакти з групою інженерів і розробників SiPM детекторів, різноманітна технічна документація від довідкових даних і керівництв користувача до заміток і інтернет-

статей в академічній науковій бібліотеці, яка збирає всі опубліковані журнальні статті, де згадані застосування кремнієвих фотопомножувачів.

Моменти, які необхідно врахувати при виборі SiPM детектора:

- Добре чи забезпечується технічна підтримка продукту в разі виникнення проблем?
- Якщо у мене є питання, у мене є технічна підтримка з боку виробника?

## **5. Використання SiФЕП (SiPM) для медичних прикладень**

### **5.1. Покращення характеристик позитронно-емісійних томографів**

Позитронно-емісійна томографія (ПЕТ) за останні десять-п'ятнадцять років стала одним з найважливіших діагностичних засобів при лікуванні онкологічних захворювань. Суть ПЕТ діагностики в тому, що ядра позитрон випромінюючого ізотопу накопичуються в місцях утворення злоякісних пухлин. Позитрони, які випромінюються після гальмування в тілі пацієнта анігілюють з електронами речовини. В результаті утворюються два гамма-кванти з однаковою енергією 511 кеВ кожний, які розлітаються в протилежні боки (під кутом  $180^0$  один відносно іншого). Навколо пацієнта по колу знаходиться матриця з сцинтиляційних детекторів, в яких реєструється енергія гамма квантів та час їх появи. При співпаданні сигналів від двох детекторів матриці визначається пряма (по двом «точкам»-детекторам), на якій знаходиться джерело випромінювання, а точки перетину кількох таких прямих дозволяють визначити місце випромінювання позитронів. Реєстрація складної події – співпадання в часі з точністю кілька наносекунд двох сигналів від різних детекторів, пряма, що проходить через них обов'язково повинна перетинати зону дослідження тіла пацієнта і енергії цих сигналів із сцинтиляційних детекторів відповідають фотопіку 511 кеВ – все це може суттєво подавити фонові сигнали і забезпечити отримання високочутливого якісного діагностичного зображення. Це ідеальний розгляд, в реальних системах із-за різних заважаючих ефектів перерозсіювання та випадкових накладань відношення сигнал-фон суттєво погіршується.

Використання часопрольотного методу дозволяє суттєво зменшити фон, оскільки у випадку істинних збігів є чітко визначене співвідношення між часами руху кожного гамма-кванта, а випадкові і розсіяні кванти, і кванти від сусідніх джерел суттєво випадають із цього співвідношення. Таке покращання методики ПЕТ діагностування може збільшити співвідношення сигнал-фон на порядок.

Для використання часопрольотної методики [6-7] необхідно використовувати швидкі сцинтилятори і фотоелектронні помножувачі. На додачу до жорстких умов по роздільній енергетичній і просторовій здатності це призводить до високої вартості системи, і не дуже високій просторовій гранулярності, оскільки в якості фотопомножувачів до останнього часу

використовувалися вакуумні ФЕП, де практично неможливо отримати малий розмір пікселю зображення і є обмеження по часовій роздільній здатності із-за великих розмірів підсилюючих систем.

Фронти наростання SiPM менше однієї наносекунди, що дозволяє забезпечити унікальні часові характеристики для часопрольотних систем позитронно-емісійної томографії – роздільний час збігів від двох анігіляційних гамма-квантів на швидких сцинтиляторах трохи перевищує сотню пікосекунд, що обмежує просторову фонову складову кількома сантиметрами від істинного джерела. Буквально в останні кілька років SiPM фотодетектори отримали новий поштовх у розвитку – створено цифрові системи - dSiPM. В таких системах замість опору для гасіння в кожній комірці ставиться активна схема управління розрядом і зняття сигналу, а також вбудовується цифрова схема ASIC для аналізу сигналів від кожної комірки з урахуванням їх часових співвідношень. Така модернізація принципово розширює можливості SiPM систем і дозволяє отримувати нові покращені властивості для приладів в різних напрямках науки і техніки, в тому числі для розвитку покращених систем ПЕТ діагностики. Такі системи дозволяють отримувати місце реєстрації в сцинтиляторі як по площині фотодетектора (багатопіксельна структура) так і по глибині сцинтилятора (інформація depth-of-interaction (DOI)), що дозволяє суттєво спрощувати детекторні системи (зменшення кількості і збільшення розмірів сцинтиляторів) і покращувати роздільну здатність просторового визначення позитронного джерела. Сучасні dSiPM мають розміри сторін порядку 3 см (загальна площа розбивається на пікселі, з розмірами сторін в кілька мм), розміри комірок порядку 20 – 60 мікрометрів і кількість комірок на піксель кілька тисяч, ефективність детектування фотонів досягає 30 - 40% з потенціалом досягти в найближчому майбутньому 60 -70 %, внутрішня часова роздільна здатність (з тригеруванням від лазерного імпульсу) – порядку кількох десятків пікосекунд. Досліджуються ще питання температурної і довготривалої стабільності, ще є теми для розвитку в напрямку зменшення інтенсивності шумових сигналів, але вже зараз переваги і перспективність фотодетекторних систем з використанням SiPM (dSiPM) очевидні.

### **Мета роботи**

Навчитися використовувати SiPM фотодетектори для створення сцинтиляційних детекторів різних типів іонізуючого випромінювання – гамма квантів, бета випромінювання і альфа випромінювання.



## Завдання

1. Ознайомитись з вимогами по підготовці звіту про виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з апаратурою, необхідною для роботи. Зробити записи про склад та функціональне призначення цієї апаратури.
3. Зібрати установку для проведення експерименту. Підібрати параметри складових установки (консультуючись із викладачем чи відповідальним за функціонування апаратури в лабораторії).
4. Для вимірювання гамма-спектрів закрити сцинтиблок SiPM+CsI(Tl) світлозахисним екраном.
5. Вибрати характеристики підсилювального тракту, щоб захопити діапазон 2.8 MeV.
6. Набрати фон з високою статистикою (не менше 30 хв).
7. Виміряти гамма-спектр  $^{60}\text{Co}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз.
8. Виміряти гамма-спектр  $^{137}\text{Cs}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз.
9. Виміряти гамма-спектр  $^{22}\text{Na}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз.
10. Виміряти гамма-спектр  $^{108\text{m}}\text{Ag}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз.
11. Виміряти гамма-спектр  $^{228}\text{Th}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз.
12. Виміряти гамма-спектри (в притул до детектора і на відстані 10 см)  $^{133}\text{Ba}$ , оцінити основні характеристики і провести їх аналіз, пояснити різницю в спектрах.
13. Провести калібрування сцинтиляційного спектрометра за енергією і роздільною здатністю по енергії. Провести апроксимуючі криві і порівняти з теоретичними залежностями.
14. Збільшити підсилення спектрометричного тракту – щоб діапазон по енергіям для гамма квантів був до 150 keV, і при цьому з менших енергій поріг був мінімальний (<3 keV).
15. Виміряти форму і величину шумового порогу, спробувати його зменшити максимально.
16. Поміряти фон з високою статистикою (не менше 30 хв).
17. Виміряти гамма-спектр  $^{137}\text{Cs}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз (в області менше 50 KeV).
18. Виміряти гамма-спектр  $^{241}\text{Am}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз (в області менше 70 KeV і до мінімальних енергій).
19. Виміряти гамма-спектр  $^{108\text{m}}\text{Ag}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз (в області менше 100 KeV).
20. Виміряти гамма-спектр  $^{55}\text{Fe}$ , оцінити основні характеристики і провести його аналіз (в області менше 10 KeV максимально близько до шумового порогу).

21. Виміряти гамма-спектр на відстані 10 см від джерела  $^{133}\text{Ba}$ .
22. Провести калібрування сцинтиляційного спектрометра за енергією і роздільною здатністю по енергії в низькоенергетичному діапазоні. Провести апроксимуючі криві і порівняти з теоретичними залежностями.
23. Зняти захисний (від світла) корпус на сцинтилюючому кристалі і всі вимірювання в подальшому проводити в світлозахисному боксі.
24. Виміряти альфа спектр джерела  $^{226}\text{Ra}$  (підібравши відповідні характеристики спектрометричного тракту), визначити роздільну здатність детектора. Самі придумайте, як перевірити внесок гамма випромінювання і якщо воно є, як отримати спектр без цього внеску.
25. Повторити попередній пункт з коліматором для альфа частинок.
26. Підібрати гамма-джерело (не забувши закрити його бета частинки поглиначем) і визначити альфа-бета співвідношення для кристала, який використовується.
27. Використовуючи відповідні коліматори (який надасть викладач) зніміть бета спектри для джерел  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Co}$ . Не забудьте відняти від спектру гамма складову (самі придумайте, як). Поясніть як може виникати гамма-складова у джерела  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ .
28. Побудуйте спектри для всіх випадків вимірювання і всіх типів випромінювання.

### Контрольні питання

1. Принцип дії і особливості використання SiPM фотодетекторів?
2. Порівняйте SiPM фотодетектори і ФЕП, переваги і недоліки.
3. Які типи SiPM фотодетекторів?
4. Які типи SiPM фотодетекторів?
5. Питання підвищеної складності: промодельуйте в GEANT4 проведені експерименти і порівняйте результати.
6. Як провести вимірювання бета спектрів?
7. Основні характеристики ядерного гамма-випромінювання ізотопів, які використовувались в роботі.
8. Основні характеристики бета-випромінювання ізотопів, які використовувались в роботі..
9. Основні характеристики альфа-випромінювання ізотопів, які використовувались в роботі.

## Рекомендована література

1. 1. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors // Nucl. Instr. Meth. A – V.386. – 1997. – P.531-534.
2. 2. MICROMEGAS: A High granularity position sensitive detector for high particle flux environments // Nucl. Instr. Meth. A – V.376. – 1996. – P.29-35.
3. 3. Novel type of avalanche photodetector with Geiger mode operation // Nucl. Instr. Meth. A – V.518. – 2004. – P.560-564.
4. 4. И.Иванов. Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей. Фотоника, #6, 2015.
5. 5. An Introduction to the Silicon Photomultiplier. Technical Note, sensL: <http://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>
6. 6. Focus on time-of-flight PET: the benefits of improved time resolution // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 38. – 2011. – P.1147–57.
7. 7. New approaches for improvement of TOF-PET. // Nucl. Instr. Meth. A – V.732. – 2013. – P.560-563.
8. Stefan Gundacker and Arjan Heering. TOPICAL REVIEW. The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector. *Phys. Med. Biol.* **65** 17TR01, 2020. (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/ab7b2d>).
9. CHEN XU. Study of the Silicon Photomultipliers and Their Applications in Positron Emission Tomography. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Department Physik der Universität Hamburg. 2014 ([https://www.desy.de/~ohartbri/TOP/thesis\\_chen\\_phd.pdf](https://www.desy.de/~ohartbri/TOP/thesis_chen_phd.pdf)).
10. N. D'Ascenzo , V. Saveliev, Q. Xie and L. Wang. The Digital Silicon Photomultiplier. Open access peer-reviewed chapter. 2015. (<https://www.intechopen.com/chapters/49261>)
11. <https://geant4.web.cern.ch/>
12. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
13. [https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive\\_decay](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_decay)
14. [https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha\\_decay](https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_decay)
15. [https://en.wikipedia.org/wiki/Beta\\_decay](https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay)

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6**

### ***ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЮОНІВ КОСМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ RPC-ДЕТЕКТОРНОЇ МАТРИЦІ***

#### **Теоретична частина**

Для ефективного виконання роботи перед її початком необхідно ознайомитись з теоретичними основам.

#### **Космічне випромінювання**

Космічне випромінювання поділяють на первинне (те, яке прилітає з космосу, наприклад, Сонця, з інших галактик) і вторинне – яке утворюється в результаті взаємодії первинного випромінювання з атмосферою Землі і може проходити значні відстані, щоб його можна було зареєструвати. Первинне випромінювання в основному складається з високоенергетичних протонів (92%-95% - відмінності від посилення до посилення і в залежності від напрямку руху і місця на Землі) і альфа частинок (5%-7%). Протони у верхніх шарах атмосфери (різні літературні джерела дають розкид цифр – 15-20 км) взаємодіють з ядрами атомів, з яких складається повітря (в основному азот і тобто кисень), в результаті ядерних реакцій утворюється велика кількість піонів, які швидко розпадаються на мюони та інші частинки (Рис.1, 2).

Ці процеси (ядерні реакції і розпад піонів) проходять дуже швидко – кілька сотень метрів. Далі мюони проходять всю атмосферу (бо вони суттєво легші за протони, гальмівна здатність залежить від маси частинки і при цьому їх маса суттєва більша за масу електронів і тому гальмівне випромінювання незначне).

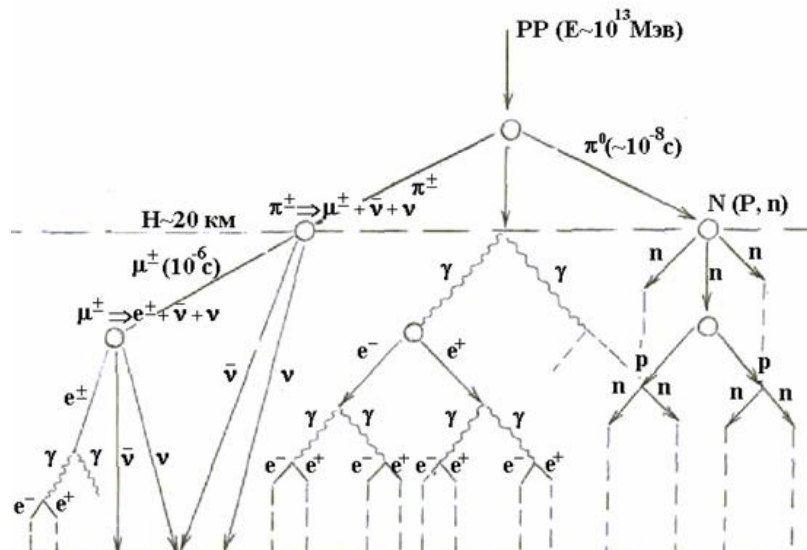


Рисунок 1. Космічне випромінювання

Закон, який показує, що число мюонів  $N(x)$  зменшується як функція кількості пройденної речовини з товщиною  $x$  ( $\text{г/см}^2$ ). Отриманий із експериментів по вимірам інтенсивності вертикального потоку мюонів, що були приведені на різних глибинах під землею.

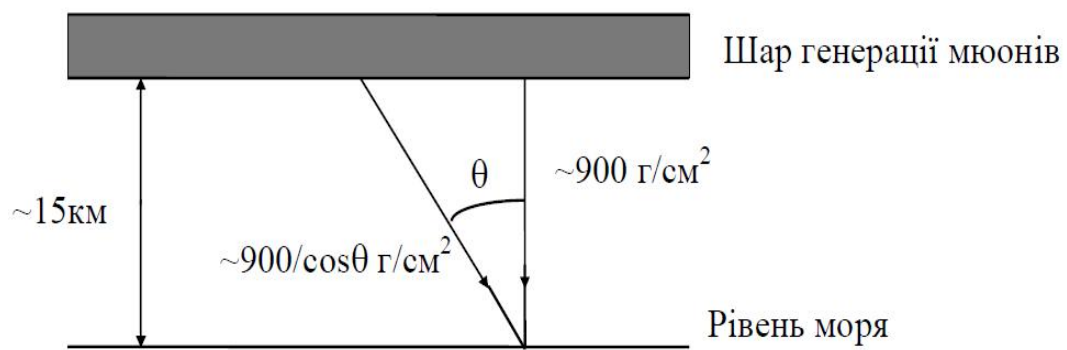


Рисунок 2. Генерація мюонів

$$N(x) = \left( \frac{900}{900+x} \right)^{1,6} = \left( \frac{900}{\xi} \right)^{1,6},$$

де  $\xi = 900 + x$  - повна кількість речовини, яку пройшов мюон від місця генерації до місця поглинання (маса вертикального стовпа повітря прийнята рівній  $900 \text{ г/см}^2$ ).

$\xi = 900 / \cos \theta$  - видно з рисунка

Таким чином, число мюонів, що дійшли до лічильника на рівні моря, зменшується за рахунок поглинання в речовині за законом:

$$P_1(\theta) \sim (\cos \theta)^{1,6}$$

Ймовірність того, що мюон на шляху  $L$  не розпадеться, буде дорівнювати:

$$W(L) = \exp\left(-\frac{L}{\beta\tau c}\right) = \exp\left(-\frac{L}{L_{\text{розп}}}\right)$$

де  $\beta = V/c$ ;  $\tau = \tau_0 / \sqrt{1-\beta^2}$ ;  $L_{\text{розп}}$  - шлях, який пролітає мюон до моменту спонтанного розпаду,  $V$  - швидкість мюона,  $\tau_0$  - час життя мюона, що знаходиться в стані спокою.

Дана ймовірність є величиною статистичною і має експоненційну залежність від пройденої відстані. Ймовірність спонтанного розпаду мюона на шляху  $L$  тим менша, чим більша нерівність  $L \ll L_{\text{розп}}$ .

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$  - лоренц-фактор, безрозмірна величина, що використовується

в релятивістській кінематиці.

Оскільки мюон рухається на швидкості, що близька до швидкості світла, тому

імпульс мюона  $P_\mu = m_\mu V \gamma = \frac{m_\mu V}{\sqrt{1-\beta^2}}$ , а його повна енергія  $E_\mu = m_\mu c^2 \gamma = \frac{m_\mu c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$

розраховуються з використанням релятивістських поправок.

Таким чином

$$L_{\text{розп}} = \beta\tau c = \frac{\beta c \tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta c \tau_0 E_\mu}{m_\mu c^2} = \frac{\tau_0 P_\mu}{m_\mu}$$

Введемо такі позначення:

$N(\theta)$  — кількість мюонів в потоці, який потрапляє на вимірювальний прилад під кутом  $\theta$  до вертикалі. В цьому потоці на шляху  $L$  від шару, де народжуються мюони, до вимірюючого пристрою їх кількість зменшується як за рахунок іонізаційних втрат, так і за рахунок радіоактивного розпаду;

$N(0)$  — потік мюонів, які потрапляють в приймач під кутом  $\theta = 0$  до вертикалі;

$N_1(\theta)$  — потік мюонів в напрямку  $\theta$  до вертикалі, в якому враховано зменшення кількості мюонів виключно за рахунок іонізаційних втрат.

Вище було описано, що експеримент встановив залежність між кількістю зареєстрованих мюонів під різними кутами (враховані лише іонізаційні втрати) до мюонів, що зареєстровані в лічильнику під кутом  $\theta = 0$  градусів до верикалі:

$$N_1(\theta) = N(0)(\cos \theta)^{1,6}$$

Таким чином можна розрахувати зменшення потоку мюонів за рахунок їх спонтанного розпаду.

Візьмемо різницю потоку кількості мюонів під кутом  $\theta$  до вертикалі, в якому зменшення кількості відбувається виключно через іонізаційні втрати  $N_1(\theta)$  (це значення отримується шляхом розрахунку формули вище) та кількості мюонів у потоці, що потрапляють в телескоп під кутом  $\theta$  до вертикалі  $N(\theta)$  (експериментально отримане значення вимірювань під різниці кутами, де кількість мюонів зменшується за рахунок як іонізаційних втрат, так і спонтанного розпаду).

$$\Delta N = N_1(\theta) - N(\theta)$$

З іншого боку, оскільки ймовірність нерозпаду мюонів на шляху  $\Delta L$

$$W = \exp\left(-\frac{\Delta L}{L_{розн}}\right),$$

то ймовірність їхнього спонтанного розпаду на цьому шляху дорівнює

$$W_{розн} = 1 - W = \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta L}{L_{розн}}\right)\right)$$

$$\text{У цьому виразі } \Delta L = L(\theta) - L(0) = \frac{L(0)}{\cos \theta} - L(0) = L(0) \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta}$$

де  $L(\theta)$  – шлях, що проходять мюони в атмосфері, падаючи під кутом  $\theta$  до вертикалі;  
 $L(0)$  – шлях, що проходять мюони в атмосфері падаючи під кутом  $0$  градусів до вертикалі.

Отже визначити зменшення кількості мюонів за рахунок їх спонтанного розпаду можна ще й таким чином(розрахувати, яка кількість мюонів із мюонного потоку розпадеться):

$$\Delta N = N_1(\theta) \cdot W_{\text{розп}} = N_1(\theta) \left( 1 - \exp \left( -\frac{\Delta L}{L_{\text{розп}}} \right) \right)$$

Прирівнюючи два отримані рівняння для  $\Delta N$ :

$$N_1(\theta) \left( 1 - \exp \left( -\frac{\Delta L}{L_{\text{розп}}} \right) \right) = N_1(\theta) - N(\theta) ;$$

$$N_1(\theta) \left( 1 - \exp \left( -\frac{\Delta L}{L_{\text{розп}}} \right) \right) = N_1(\theta) \left( 1 - \frac{N(\theta)}{N_1(\theta)} \right)$$

$$\frac{N(\theta)}{N_1(\theta)} = \exp \left( -\frac{\Delta L}{L_{\text{розп}}} \right)$$

Звідси прологарифмувавши отримаємо

$$L_{\text{розп}} = \frac{\Delta L}{\ln \frac{N_1(\theta)}{N(\theta)}}$$

$$L_{\text{розп}} = \frac{L(0)(1 - \cos \theta)}{\cos \theta \ln \frac{N_1(\theta)}{N(\theta)}}$$

Прирівняємо цей вираз до отриманого раніше

$$L_{\text{розп}} = \frac{\beta c \tau_0 E_\mu}{m_\mu c^2}$$

Маємо



$$\frac{\beta c \tau_0 E_\mu}{m_\mu c^2} = \frac{L(0)(1 - \cos \theta)}{\cos \theta \ln \frac{N_1(\theta)}{N(\theta)}}$$

Мінімальна енергія мюонів, що необхідна для того, щоб вони могли пройти всю атмосферу під кутом  $\theta$  визначається аналогічно до того, як визначається шлях, що проходить мюон в атмосфері:

$$E_\mu = \frac{E_{\mu_0}}{\cos \theta} = \frac{5 \cdot 10^9 \text{ eV}}{\cos \theta}$$

За цих енергій можна вважати, що  $V \approx c$ , а отже  $\beta = \frac{V^2}{c^2} \approx 1$

Тоді виразимо формулу для часу життя мюона

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \frac{m_\mu c^2 L(0)(1 - \cos \theta)}{c E_\mu \ln \left( \frac{N_1(\theta)}{N(\theta)} \right) \cos \theta} = \frac{207 \cdot 0.5 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 15 \text{ km} (1 - \cos \theta)}{3 \cdot 10^5 \text{ km/c} \cdot 5 \cdot 10^9 \text{ eV} \cdot \ln \left( \frac{N_1(\theta)}{N(\theta)} \right)} = \\ &= 1.04 \cdot 10^{-6} \left( \frac{1 - \cos \theta}{\ln \frac{N_1(\theta)}{N(\theta)}} \right) \text{ сек.} \end{aligned}$$

### *Детектори на основі Resistive Plate Chamber (RPC)*

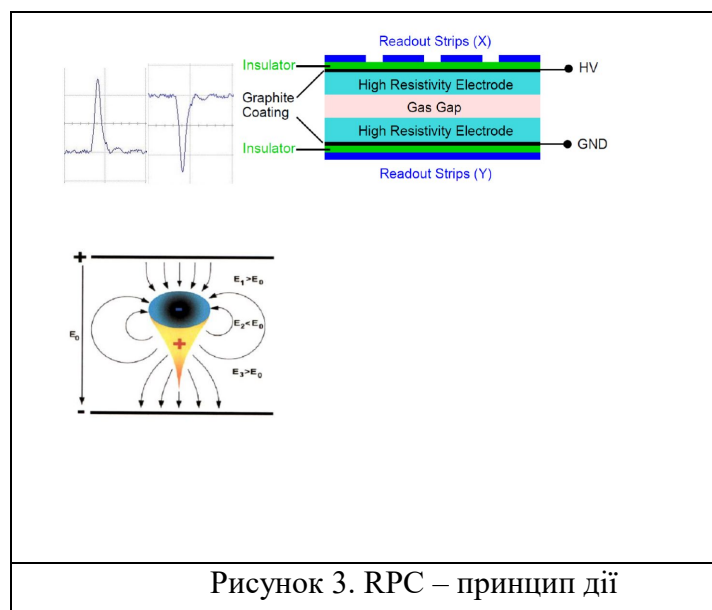
Резистивна камера (RPC), представлена в 1981 р. Р. Сантоніко та Р. Кардареллі, є газовим детектором іонізуючих частинок, заснованим на принципі «іскрової камери», що використовує постійне та рівномірне електричне поле, утворене двома паралельними електродними пластинами, які складається з матеріалу з великим об'ємним питомим опором. Його робочі концепції ґрунтуються на виявленні іонізації газу, що генерується зарядженими частинками, що перетинають активну область детектора, великою лавиною електронів під сильною однорідною електрикою. Газова суміш, а саме R134a, iso-C4H10 та SF6, іонізована зарядженими частинками, що проходять через детектор, пролітає через щілину між електродами. Електроди, які ми використовуємо в цьому експерименті, - це скляні електроди, покриті шаром графіту з зовнішньої сторони.

RPC є кращими перед сцинтиляторами через такі переваги:

- 1) Вони можуть мати велику площу, але з мінімальними витратами на матеріал.
- 2) Вони легко збираються і мають просту електроніку для зчитування.
- 3) Вони мають кращі часові роздільні здатності, ніж сцинтилятори, і довгострокову стабільність.
- 4) Прийнятна позиційна роздільна здатність та хороша ефективність детектування.

Скляні RPC були запропоновані як активний елемент детектора залізного калориметра Індійської обсерваторії Нейтрино. Майже всі великі експерименти з фізики високих енергій, які зараз працюють, використовують RPC для вимірювання тригера або вимірювання часу, тоді як INO збирається нам це як для запуску, так і для відстеження частинок заряду. RPC з зазором (одиначні та подвійні зазори) також знайшли застосування в експериментах з космічними променями, а також у астрофізиці частинок.

Основний принцип роботи RPC заснований на принципі іскрової камери, тобто «іонізації». Іскрові камери складаються з металевих пластин, поміщених у герметичну коробку, наповнену газом, таким як гелій, неон або суміш цих двох речовин. Під час проходження зарядженої частинки через детектор вона буде іонізувати газ між пластинами. Тригерна система використовується для подачі високої напруги на пластини для створення електричного поля відразу після того, як частинка проходить через камеру, створюючи іскри на її точній траєкторії. У лічильниках з металевими електродами іскра розряджає загальну ємність пластин, що призводить до високої температури та згоряння електродів. Пошкоджена поверхня дає спонтанний розряд при менших полях. Можливість уникнути проблеми полягає у використанні матеріалу з високим питомим опором ( $\rho=10^9\text{-}10^{10}\ \Omega\text{-cm}$ ) для одного з електродів. Тоді іскра розряджає лише невелику ділянку конденсатора навколо первинної іонізації.



RPC схожий на іскрову камеру, але високий опір скла/бакеліту між пластинами високої напруги гасить іскроутворення. Скляний RPC складається з двох паралельних електродів, що складаються з скла з об'ємним питомим опором близько  $10^{12}$  Ом-см. Два електроди товщиною 2-3 мм встановлені на відстані 1-2 мм один від одного за допомогою високоізольованих розпірок. Відповідна газова суміш пропускається при атмосферному тиску через зазор, а відповідне електричне поле прикладається до скляних електродів через резистивне покриття на їх зовнішніх поверхнях. Іонізуюча заряджена частинка, що проходить через проміжок, ініціює стример у об'ємі газу, що призводить до локального розряду електродів. Цей розряд обмежений крихітною площею близько  $0,1 \text{ см}^2$  через високий питомий опір скляних електродів та характеристики гасіння газу. Розряд індукує електричний сигнал на зовнішніх смугах збору сигналу з обох сторін, ортогональних один одному, що може бути використано для запису місця та часу іонізації. Область розряду повільно заряджається через скляні пластини з високим опором, і час відновлення становить близько секунд. Тривалість розряду зазвичай  $\sim \text{нс}$ .

### **Мета роботи**

Ознайомитись з роботою детектора на основі RPC (Resistive Plate Chamber), визначити час життя мюонів космічного випромінювання та інтенсивності їх прильоту в залежності від напрямку.

### **Завдання**

1. Ознайомитись з вимогами по підготовці звіту про виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з апаратурою, необхідною для роботи і програмного забезпечення (ROOT, розроблене в ЦЕРН). Зробити записи про склад та функціональне призначення цієї апаратури і програмного забезпечення.
3. Зібрати установку для проведення експерименту. Підібрати параметри складових установки (консультуючись із викладачем чи відповідальним за функціонування апаратури в лабораторії). кисень,
4. Підготувати систему запису для 4-х пластин RPC (між першою і другою – зверху-вниз – 15 см, між 2-ю і 3-ю – 80 см, між 3-ю і 4-ю 15 см), роздільна здатність на пластині  $< 1$  см. Стартувати вимірювання – записуються при появі хоч на одній пластині сигналу: а) в межах вибраного часового проміжку сигнали (чи їх відсутність) для інших 3-х пластин; б) час для кожної з 4-х пластин; в) X-Y координати для кожної пластини, де був сигнал. Вимірювання проводяться не менше 2 годин.

5. Провести аналіз подій (часовий проміжок, який вважатиметься одним і тим же часом), використовуючи пакет ROOT (вивчаючи подію – на скільки сигнали на різних пластинах, добре фітуються на пряму).
6. Визначити кут нахилу для кожної події.
7. Побудувати діаграму кількості падаючих мюонів.
8. Згрупувати по кутам і напрямкам дані і побудувати відповідні гістограми.
9. Визначити час життя мюона з отриманих експериментальних даних.

### Контрольні питання

1. Основні принципи роботи детектора на основі RPC (Resistive Plate Chamber), плюси і мінуси таких детекторів?
2. Назвіть основні типи детекторів на основі RPC (Resistive Plate Chamber), їх особливості.
3. Первинне і вторинне космічне випромінювання.
4. Суть використання мюонних томографів.
5. Питання підвищеної складності: промодельуйте в GEANT4 [5] роботу представленої установки в якості мюонного томографу [4].
6. Покажіть, що принципово обмежує точність визначення часу життя мюону на представленій установці і яку точність можна досягнути?

### Рекомендована література

1. R. R. Shinde, E. Yuvaraj. Fabrication and Characterization of Glass Resistive Plate Chamber (RPC) ([https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04\\_rpc.pdf](https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf)).
2. Yi Wang and Yancheng Yu. Multigap Resistive Plate Chambers for Time of Flight Applications. *Appl. Sci.* 2021, 11(1), 111; <https://doi.org/10.3390/app11010111> (<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/111>)
3. В.С. Мурзин. Введение в физику космических лучей. М.: Атомиздат, 1979.
4. G.Bonomi, P.Checchia, M.D'Errico, D.Pagano, G.Saracino. Applications of cosmic-ray muons. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. Volume 112, May 2020, 103768. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103768> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0146641020300156>)
5. <https://geant4.web.cern.ch/>