

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА  
ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет  
Кафедра ядерної фізики

На правах рукопису

**Галузь знань:** 10 «Природничі науки»

**Освітня програма** - Фізика

**Спеціальність** - 104 «Фізика та астрономія»

**Спеціалізація** Ядерна енергетика

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
студента 4 курсу  
Галонова Валентина Вікторовича

**Науковий керівник**  
доц. ф.-м. наук  
Єрмоленко Руслан Вікторович

Робота заслухана на засіданні кафедри ядерної фізики та рекомендована до захисту  
на ЕК, протокол , протокол № \_\_\_\_\_ від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Завідувач кафедри

Каденко І. М.

Київ, 2020

## **ВИТЯГ**

з протоколу № \_\_\_\_\_  
засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент \_\_\_\_\_ виконав та захистив кваліфікаційну роботу бакалавра з оцінкою \_\_\_\_\_  
.

Голова ЕК \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

# Анотація

**Гапонов В.В.**

*Кваліфікаційна робота бакалавра за напрямом підготовки 6.040203 — Фізика, спеціалізація «Ядерна енергетика». — Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики. — Київ, 2020.*

**Науковий керівник:** д. ф.-м. н. Єрмоленко Р.В.

**Ключові слова:** Нейтронно активаційний аналіз, германієвий детектор, метод Монте Карло

# Summary

**Haponov V.V. "**

*Qualifying work of the bachelor on a speciality 6.040203 — physics, specialization "Nuclear power". — Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics. — Kyiv, 2020.*

**Research supervisor:** Dr. R. Yermolenko.

**Key words:.**

# Зміст

<b>1</b>	<b>Вступ</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Розділ 1</b>	<b>3</b>
2.1	Мультипоточність Geant4 . . . . .	3
2.2	<i>QGSP_BERT</i> . . . . .	3
2.3	Джерела нейтронів . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Розділ 2</b>	<b>5</b>
3.1	Геометрії моделювання . . . . .	6
3.2	Чутливий об'єм детектора та захист . . . . .	8
3.3	Опис коду моделі . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Розділ 3</b>	<b>11</b>
4.1	Опис обробки спектру . . . . .	11
4.2	Валідація моделі . . . . .	12
4.3	Аналіз спектрів $Ag_3AuS_2$ . . . . .	13
4.4	Дослідження $Au(n, \gamma)$ реакцій . . . . .	14
4.5	Аналіз спектрів $CuFeS_2$ . . . . .	14
4.6	Аналіз спектру $U^{238}$ . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Висновки</b>	<b>18</b>
	<b>Література</b>	<b>19</b>

# 1 Вступ

З розвитком технологій та промисловості, забрудненням навколишнього середовища, ростом популяції населення, все частіше починає підніматись питання нестачі вичерпання природних ресурсів. Особливо гостро це торкається невідновлюваних природних ресурсів. З кожним роком вичерпаних родовищ стає все більше. Так, наприклад, по оцінкам "Римського клубу": запасів алюмінієвих руд вистачить на 55 років, міді - 49 років, заліза - 173 роки, свинцю - 64 роки, хрому - 154 роки. Це змушує шукати нові родовища.

З іншого боку 3/4 поверхні планети вкриті океанами, а по різних даних дослідженню від 5% до 7% дна. Океанічне ложе має плоский або горбистий рельєф, та в основному від 3,5 - 6 кілометрів глибини, але зустрічаються глибоководні жолоби до 11 кілометрів в глибину, їх найбільше Тихому океані.

Зарахунок досить складних умов і високого тиску, стандартні методи аналізу мінеральних порід за допомогою габаритного обладнання є дуже складними, а в деяких місцях такий етап пошуку родовищ як буріння опорних та параметричних свердловин є не можливим.

На основі проекту SABAT (Stoichiometry Analysis By Activation Techniques) - за мету в якому було поставлено пошук небезпечних речовин на дні Балтійського моря з використання нейтронно активаційного аналізу для неінвазивного дослідження об'єкту. Я допустив можливість використання даного методу дослідження для отримання більш розгорнутої інформації про океанічне дно.

## 2 Розділ 1

### 2.1 Мультипоточність Geant4

Geant4 - написаний на об'єктно орієнтованій мові програмування C++, яка дає можливість використовувати мульти-поточну архітектуру, і отримувати більшу продуктивність коду. При переносі процесу в інший потік, під процес бути виділене ядро тільки в тому випадку якщо воно не зайняте іншим процесом, це призводить до зменшення швидкості виконня при збільшенні кількості потоків.

При використанні мульти-поточної архітектури обов'язково необхідно дбати про синхронізацію потоків для безпечного виконання коду. Geant4 - використовує G4MTRunManager - данний клас наслідується від базового G4RunManager - але включає в себе реалізацію пулу потоків, це дає змогу контролювати кожен з об'єктів які створюються в рамках пулу, та валідувати їх.

Так як при моделюванні потрібно щоб кожен запуск відбувався з однаковими параметрами та за тієї ж самої геометрії, необхідно щоб класи інтерфейсу які відповідають за створення даних об'єктів були доступні для всіх об'єктів пулу.

### 2.2 QGSP\_BERT

QGSP\_BERT - ця фізична модель входить в перелік стандартних фізичних моделей розрахункового пакету Geant4. Базується на каскадній моделі Бертіні та враховує реакції для нейтронів менше ніж 20 MeV. Для валідації данної моделі необхідне виконання наступних умов  $\frac{\lambda_B}{\nu} \ll \tau_c \ll \Delta t$ ,  $\lambda_B$  - хвиля де-Бролля для налітаючої частинки,  $\nu$  - швидкість

налітаючої частинки,  $\Delta t$  - час між зіткненнями. Та модель яка лягла в основу коду Geant4 була протестована на частинках з енергіями від 100 MeV до 3 GeV

## 2.3 Джерела нейтронів

Нейтронний генератор це одне з джерел нейтронів, в основі лежить  $D(D, n)He^3$ , та  $D(T, n)He^4$ , в реакції с тритієм утворюються нейтрони більш високих енергій, близько 14.2 MeV. Ядра D розганяються під напругою 100-300 кВ і спрямовуються на мішень з тритія чи дейтерія. Максимальний енергетичний вихід данної реакції 18.3MeV. В основі ізотопних джерел нейтронів лежить  $(n, \alpha)$  - реакція, в основному воно собою представляє запаяну капсулу циліндричної форми, та діє по схожому принципу, як і генератор. Як джерело альфа частинок поміщується ізотопи Pu, Pb, за мішень Be, Li. Такі джерела нейтронів в більшості своїй випромінюють нейтрони 2.8 MeV



### 3 Розділ 2

В рамках данного моделювання були розглянуті матеріали розглянуті в Таб. 3.1.

Назва	Хімічна склад	Ізотопний склад
Гірчичний газ	$C_4H_8Cl_2S$	$C^{12}$ , $H^1$ , $Cl^{35}$ , $S^{32}$
Ютенбогардтит	$Ag_3AuS_2$	$Ag^{108}$ , $Au^{197}$ , $S^{32}$
Халькопірит	$CuFeS_2$	$Cu^{64}$ , $Fe^{56}$ , $S^{32}$
Збіднений уран	U	99.27% $U^{238}$ , 0.7% $U^{235}$ , 0.005% $U^{234}$

Табл. 3.1: Елементи та ізотопи які вхьодять до їх складу

Найбільш інтенсивні піки для кожного з елементів розглянуті в Табл. 3.2, використовувались елементи з бази доступної в Geant4

Елемент	Енергія, MeV
$Cl$	0.79, 1.17, 1.94, 2.12, 6.12, 7.79, 8.58
$H$	2.23
$C$	4.44
$Fe$	7.64, 9.30
$S$	2.96, 4.73
$Cu$	
$U$	1.26
$Ag$	0.74, 6.26
$Au$	0.67, 1.087, 2.24, 1.37

Табл. 3.2: Таблица енергій найбільш інтенсивних піків

### 3.1 Геометрії моделювання

Змодельована геометрія схожа на ту яка використовувалась у проекті SABAT Рис. 3.1, але с наступними відмінностями: по-перше не моделювався корпус самої сабмарини так як в він не ніс жодного корисного навантаження припроведені розрахункі, детектор та джерело були рознесені на дещо більшу відстань, та поміняні місцями, також на данному етапі було вирішено відмовитись від моделювання морського дна, так як це дуже суттєва знижувало ефективність виконання коду. Також було приділено більшу увагу моделюванню захисту детектора.

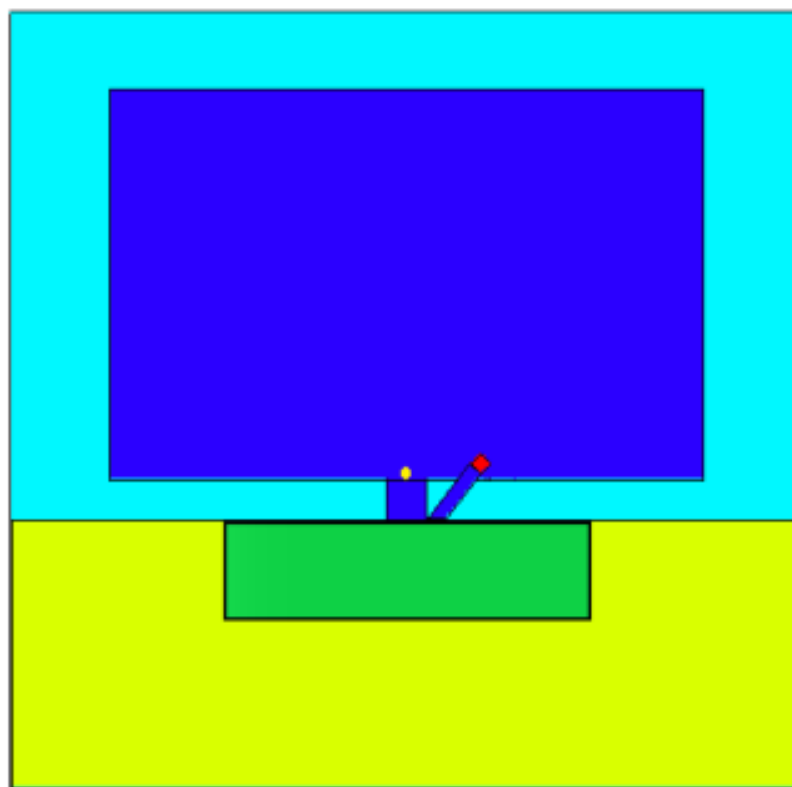


Рис. 3.1: Геометрія проекту SABAT

Геометрія яка використовувалась для набору спектрів зображена на Рис. 3.2, довжина ребра кубу середовища 1 м., довжина ребра бічної поверхні мішені(коричневий паралелепіпед) 40 см., від мішені до чутливого об'єму детектора 30 см., від чуливого об'єму до джерела 30

см., матеріал середовища був взятий з запропонованою бази матеріалів Geant4 - "G4\_WATER". Джерело нейтронів поміщене в направляючий об'єм (червоний циліндр), який виготовлений з того ж шару свинцю. Чутливий об'єм детектора поміщений у захист зі свинцю, бору, та алюмінія, направляючі об'єми заповнені повітрям (G4\_AIR)

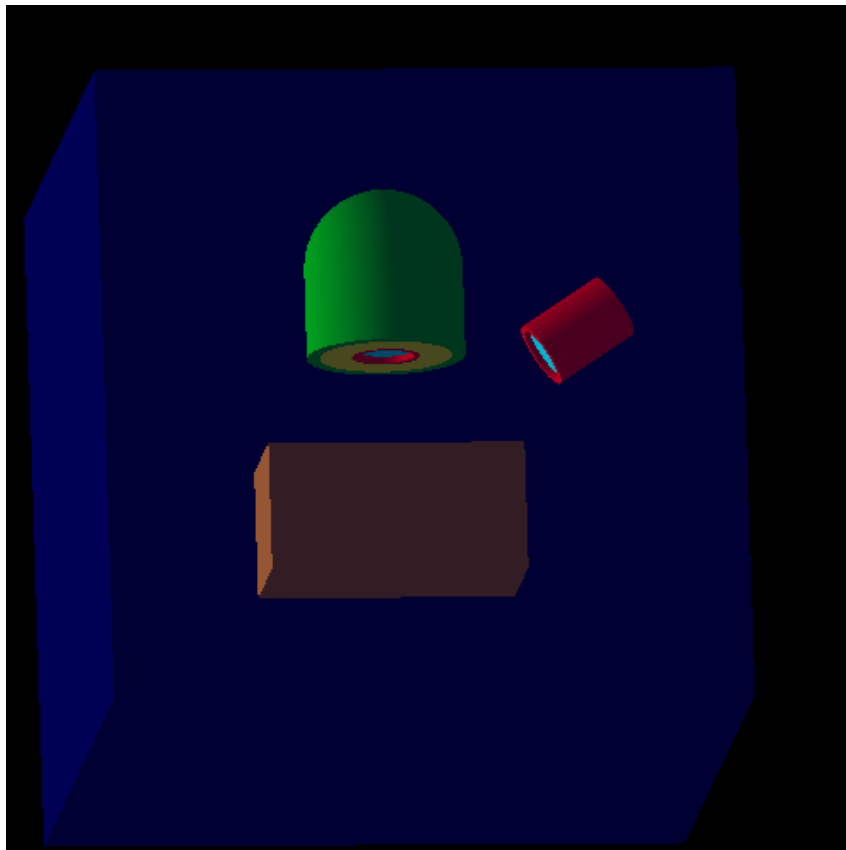


Рис. 3.2: Геометрія моделі

Для спрощення моделювання точкове джерело нейтронів було розміщене всередині направляючого коаксіального об'єму Рис. 3.2 (червоного кольору), під кутом для того щоб більша кількість нейтронів потрапляла в поверхню яка безпосередню знаходиться під чутливим об'ємом детектора

## 3.2 Чутливий об'єм детектора та захист

Для моделювання чутливого об'єму був обраний надчистий германій, з діаметром 60.6 міліметрів, та довжиною 56.7 міліметрів. Рис. 3.3

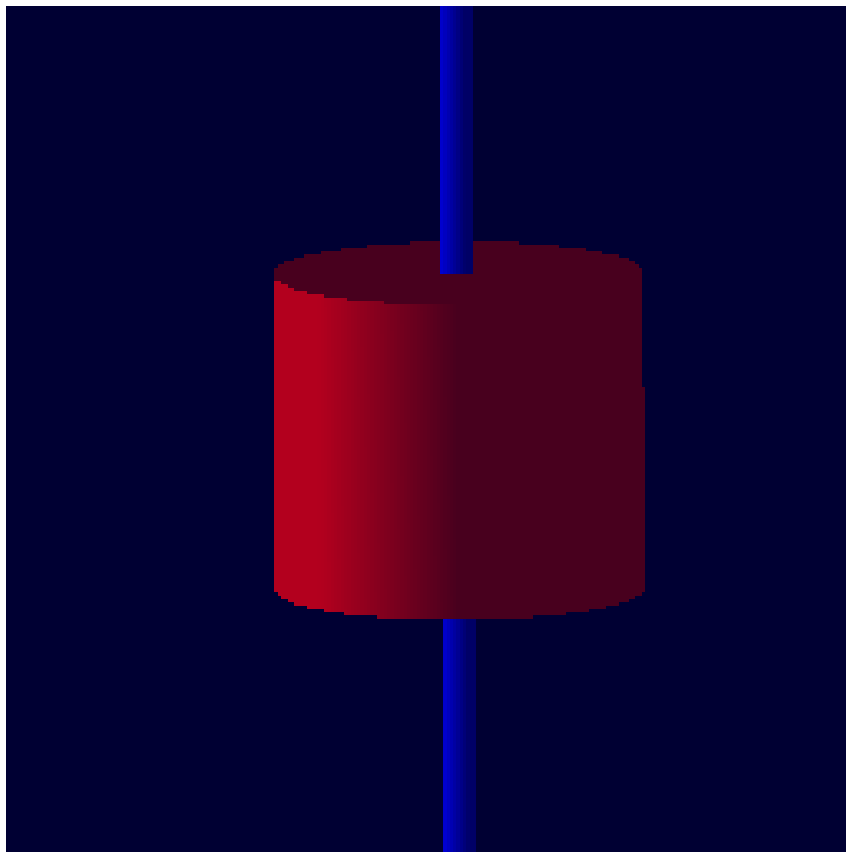


Рис. 3.3: Форма чутливого об'єму

Детектор буде розміщений поряд з джерелом нейтронів високих енергій, 14.5 MeV. Тому детектор був розміщений у трьох шаровий захист. Рис. 3.4

В захисті використовується Бор для поглинання теплових нейтронів, так як вся детекторна система буде знаходитися під водою, то нейтрони від джерела будуть втрачати енергію при пружному розсіянні на водню.

Для поглинання теплових нейтронів перед чутливим об'ємом детектора був обраний  $B^{10}$ . Використовується в ТВЕЛ-ах для контролю кількості теплових нейтронів в активній зоні реакторної установки ВВЕР.  $B^{10}(n, \alpha\gamma)Li_3^7$ , Переріз захоплення нейтрона  $B^{10}$   $\sigma = 3380$  барн.  $E_\gamma =$

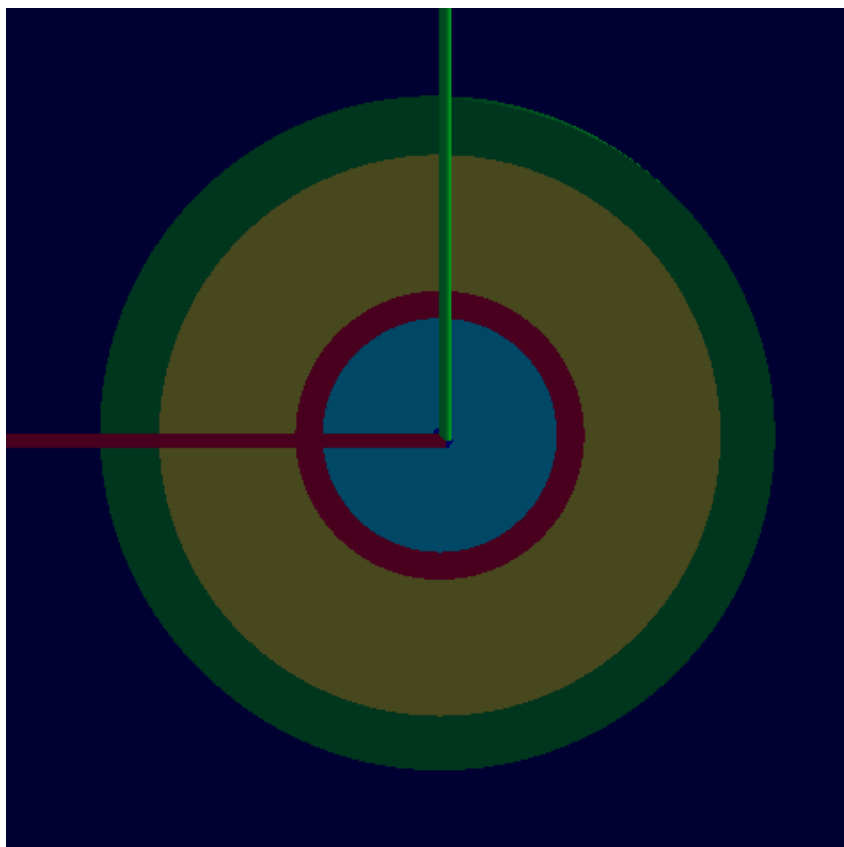


Рис. 3.4: Захист детектора, Al - зелений товщина 2 см., В - жовтий товщина 5 см., Pb - червоний товщина 1 см. Блакитний шар повітря

480 кеВ, реакція з вильотом  $\gamma$  - кванту протікає з ймовірністю 94%.

Для зовнішнього корпусу захисту чутливого об'єму використовувався  $Al^{26}$  - товщиною 1 см на Рис. 3.4 - зображений зеленим кольором

За приклад було взято детектор N21879A виробника від ORTEC АМЕТЕК, параметри розмірів були взяті від офіційного дистриб'ютера.

### 3.3 Опис коду моделі

Цілью було написати максимально зручний код для набору спектрів за різних умов та на різних мішеннях, тому були створені абстрактні класи для створення геометричних об'єктів. Для зручності створення матеріалів були створенні структури. Та для пришвидшення роботи були всі можливі константи ініціалізувалися на етапі компіляції. Для полег-

шення контролю над пам'яттю використовувалися розумні вказівники C++ 14 стандарту. Архітектура коду моделювання зображена на Рис. 3.5

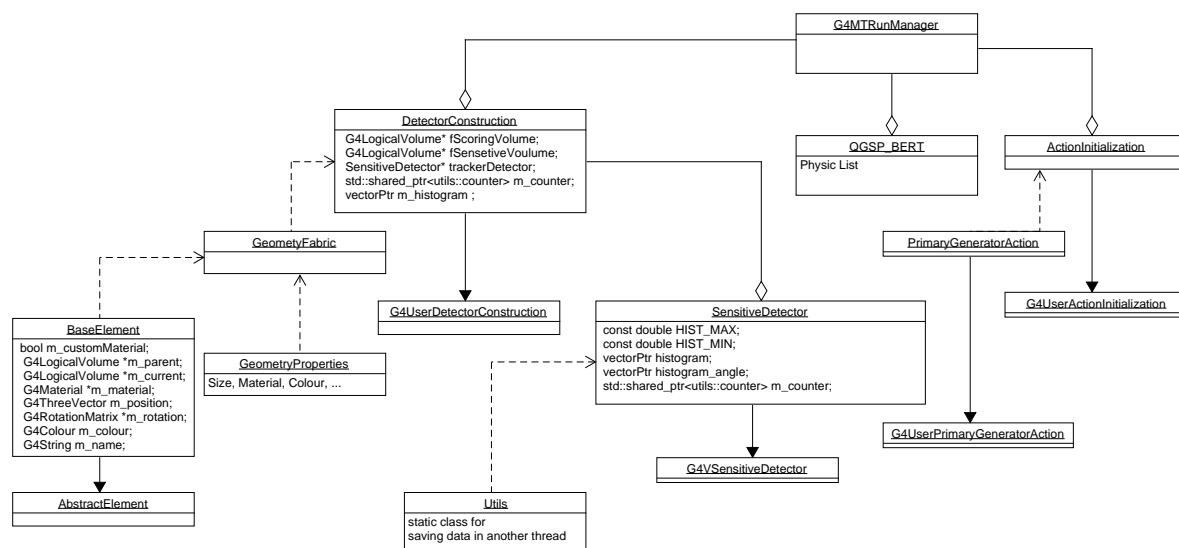


Рис. 3.5: Діаграма класів коду моделі

## 4 Розділ 3

### 4.1 Опис обробки спектру

В результаті моделювання, чутливим об'ємом набирались апаратні спектри, для чутливого об'єму було встановлено 16384 біни. Далі для наближення спектру до реального, була проведення його сглажування за наступної формулою  $\Delta E = 2.36\sqrt{F\frac{w}{E}}w$ ,  $\Delta E$  - енергія на один бін,  $F$  - Фано фактор,  $w$  - кількість енергії на утворення пари, та проновормований на кількість нейтронів з джерела. Так як для спрощення побудови джерела в моделі, використовувалась спрощенна геометрія, а генерація нейтронів відбувалась майже строго у заданому напрямку. Так як джерело нейтронів вважалось ізотропним, то загальна кількість частинок розраховувалась наступною формулою  $4\pi n = N$ , де  $N$  - це загальна кількість частинок. Фон Рис. 4.1 набрався за тих тої самої геометрії Рис. 3.1, але

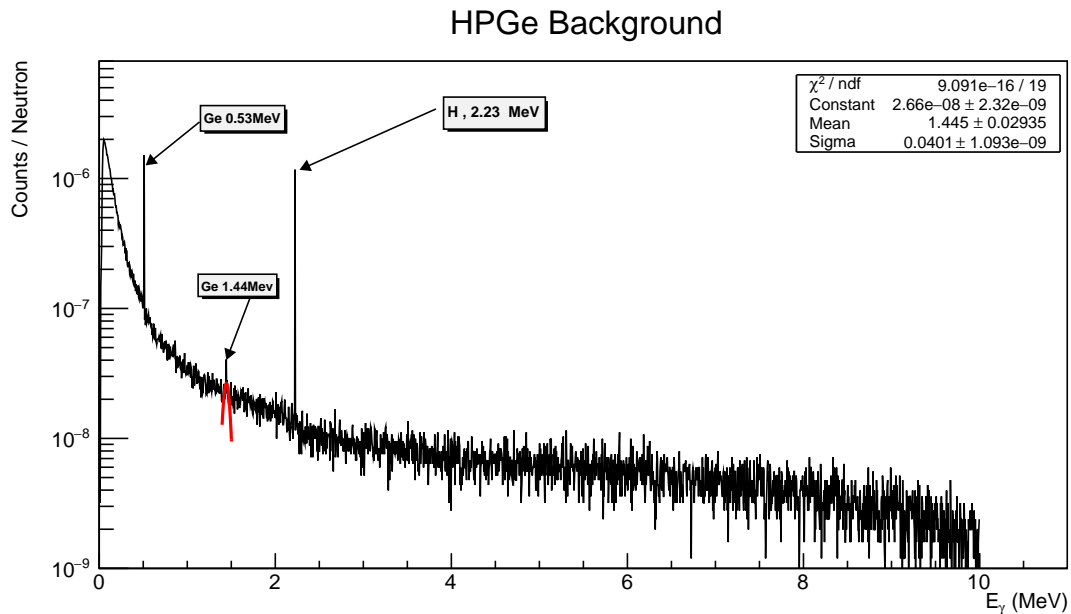


Рис. 4.1: Фон

за відсутності мішені(коричневий паралелепіпед), У фоні були проаналізовані наступні три піки: Н з  $E_\gamma = 2.23\text{MeV}$ , та два піки які отримались

за рахунок захоплення нейтронів  $Ge$  з  $E_\gamma = 0.56 MeV$ ,  $E_\gamma = 1.44 MeV$  - це означає що данної геометрії частина нейтронів від джерела проходячи через захист потрапляє в чутливий об'єм детектора, та призводить до його руйнації.

## 4.2 Валідація моделі

Для підтвердження можливості проведення наборів на моїй моделі був набраний спектр для Гірчичного газу. Рис 4.2. Та порівняний з отриманим спектром в статті [\[1\]](#) У висновках до про-

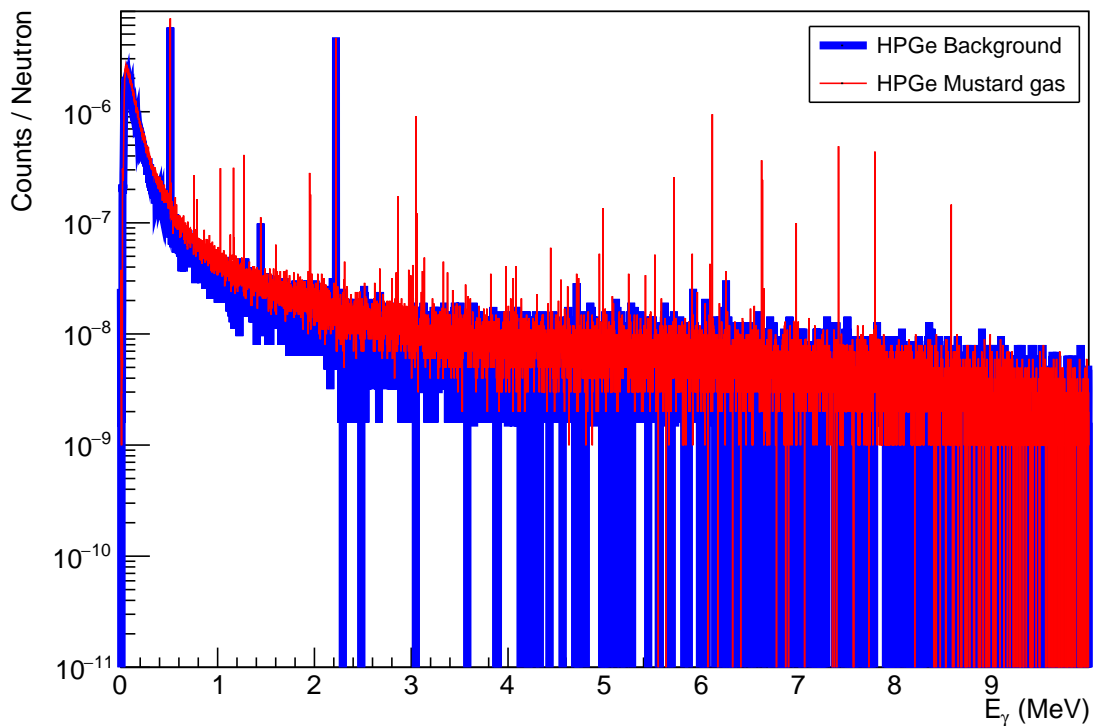


Рис. 4.2: Червоним - представлений спектр для Гірчичного газу. Синім - фону

веденої роботи в данній статті було вказано, що най більш вираженими і читкими були лінії Cl 7,42 7,80 8,58 MeV, також було вказано ряд ліній які їм не вдалося валідувати (перефразувати "лінії") На Рис. 4.3 - зображені піки 7.42 та 7.80 MeV Рис. 4.4 - 8.58 MeV



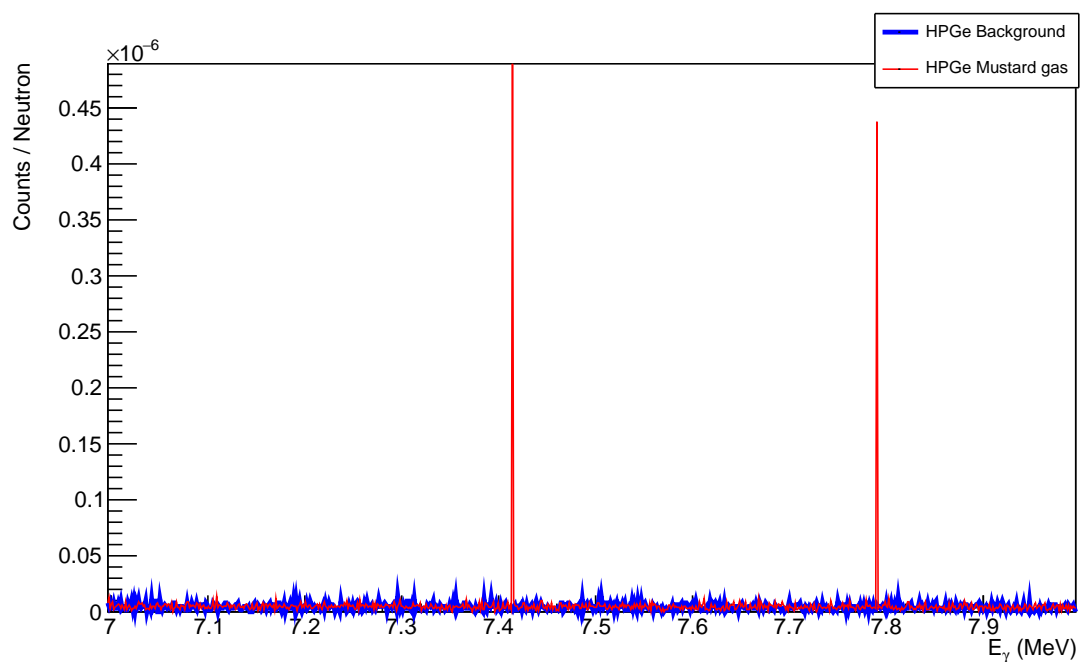


Рис. 4.3: Червоним - представлений спектор для Гірничного газу. Синім - фону

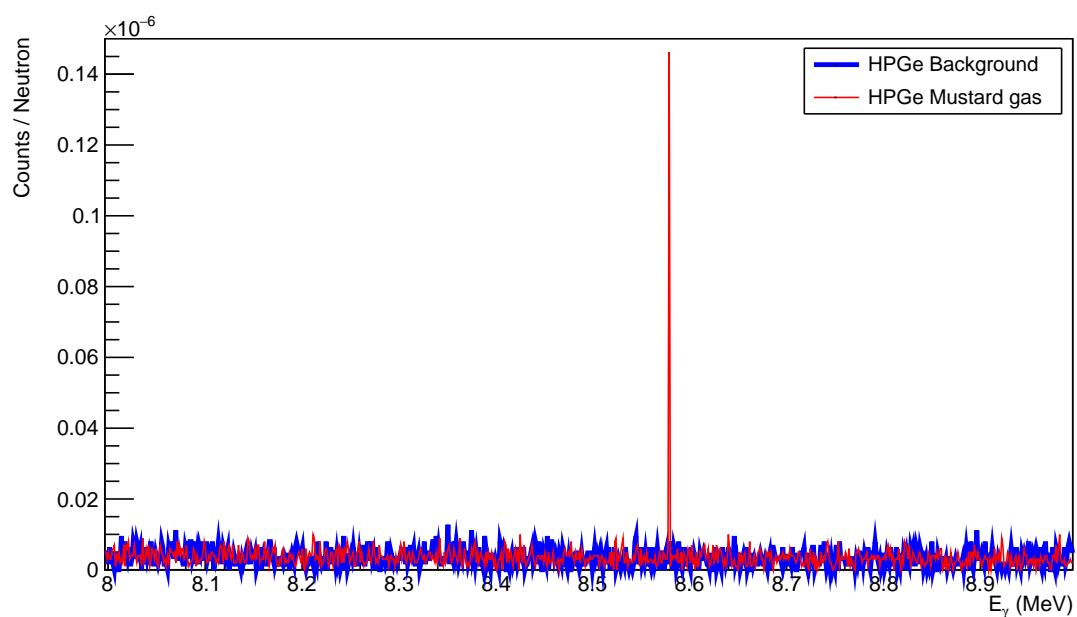


Рис. 4.4: Червоним - представлений спектор для Гірничного газу. Синім - фону

### 4.3 Аналіз спектрів $Ag_3AuS_2$

За матеріал було обрано ютенбогардтит  $Ag_3AuS_2$  - родовища з даними мінералами були знайдені на камчатці поблизу побережжя. Данний

мінерал відноситься до рідкісних золотоносних руд, зустрічається в природі у твердому стані. Був знайдений на Камчатських родовищах. Рис. 4.5 Даний спектор і фон були набрані при опроміненні нейтронами з

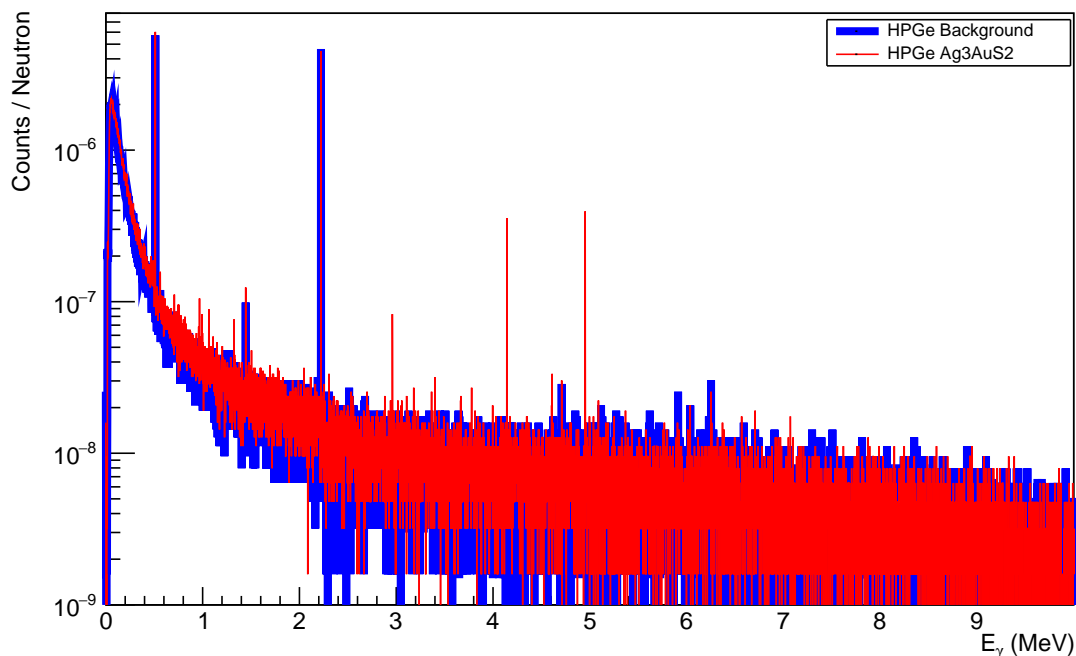


Рис. 4.5: Червоним - представлений спектор для  $Ag_3AuS_2$ . Синім - фону

джерела максимальної енергією 14.5 MeV Для порівняння було проведено опромінення за допомогою нейтронів енергією 8.5 та 2.8 MeV. Рис. 4.6 В набраному спектрі при енергіях нейтронів з джерела 8.5 MeV, були проаналізовані наступні піки Для того щоб проаналізувати залежність можливості використання ізотопних джерел був набраний спектор, за енергій нейтронів 2.8 MeV Рис. 4.8

#### 4.4 Дослідження $Au(n, \gamma)$ реакцій

#### 4.5 Аналіз спектрів $CuFeS_2$

Даний мінерал являється основною складовою мідної руди, спектор для нього представлений на Рис. 4.9 В високо енергетичній частині спе-

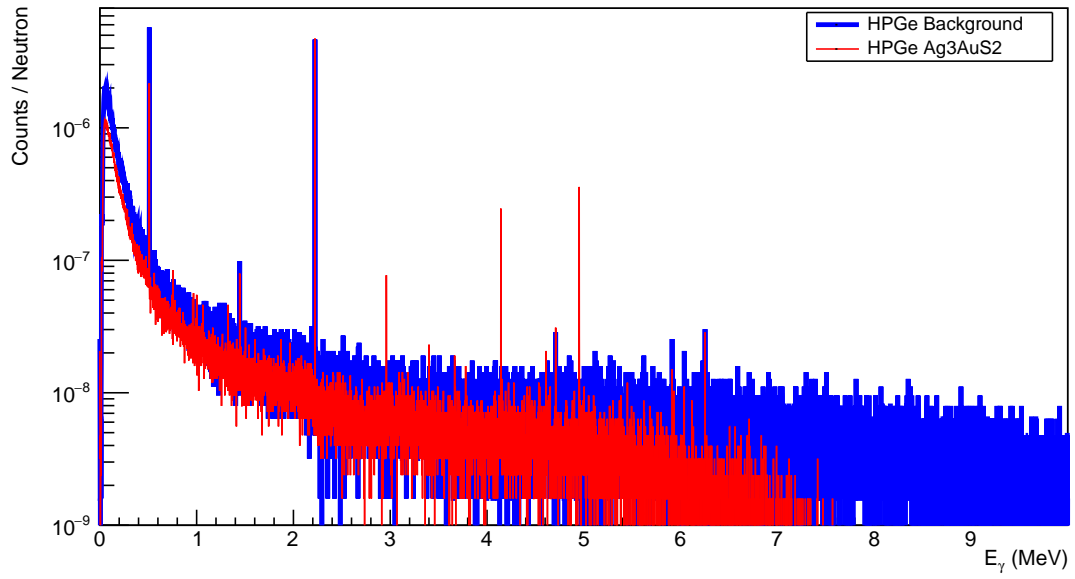


Рис. 4.6: Червона - лінія спектру, набраного за опромінення нейтронами 8.5 MeV

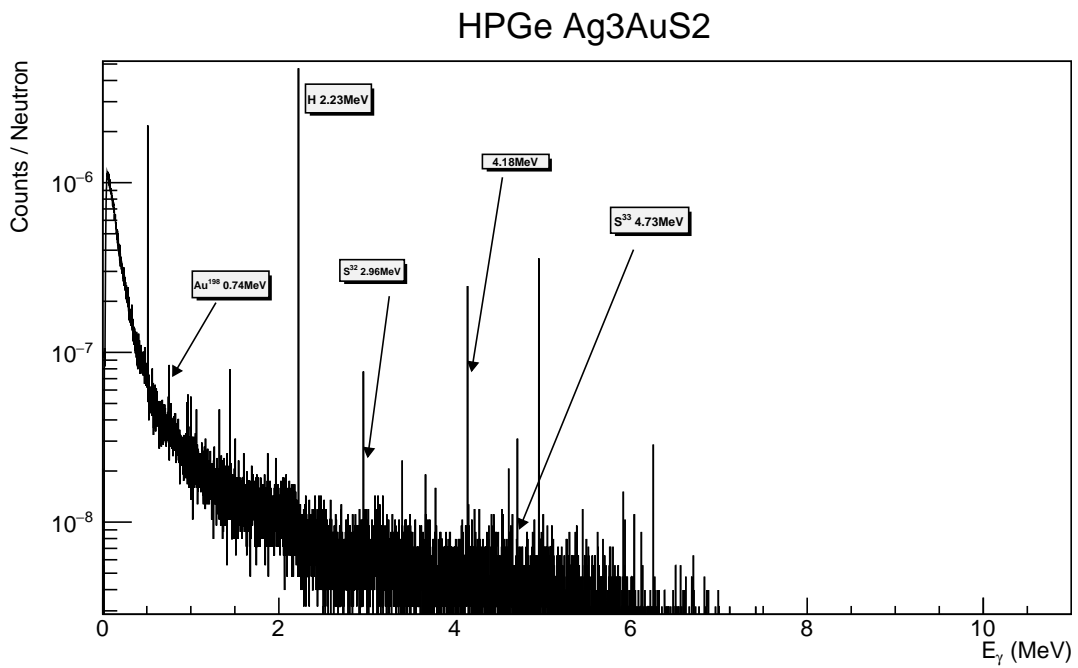


Рис. 4.7: Спектор  $Ag_3AuS_2$ ,  $E_n = 8.5 MeV$  - енергія нейтронів з джерела ктру можна спостерігати пік для  $S_2$

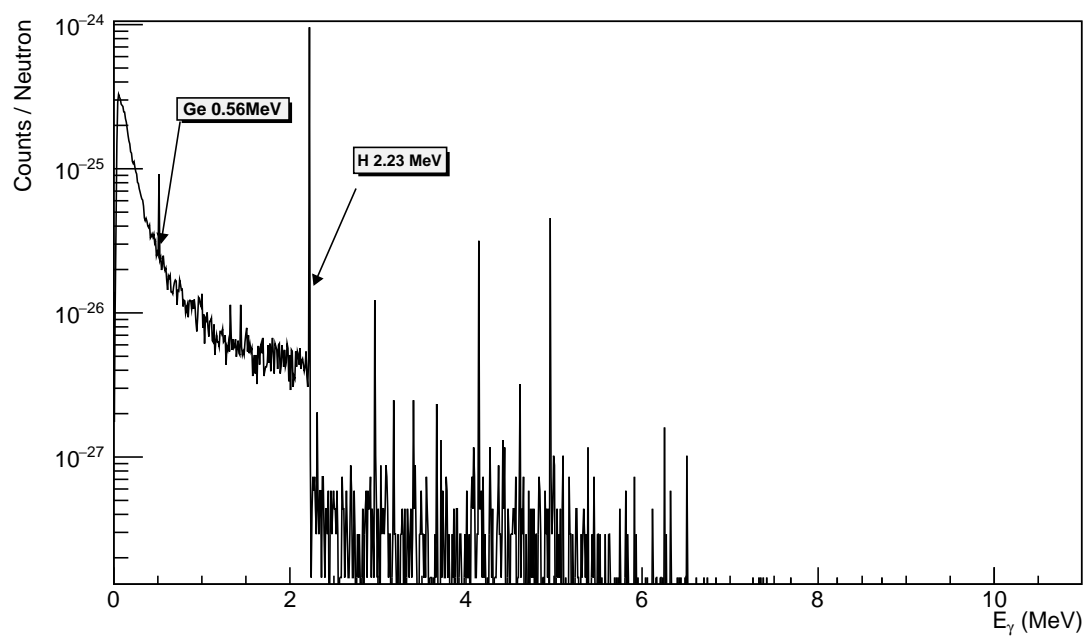


Рис. 4.8: Червона - лінія спектру, набраного за опромінення нейтронами 8.5 MeV

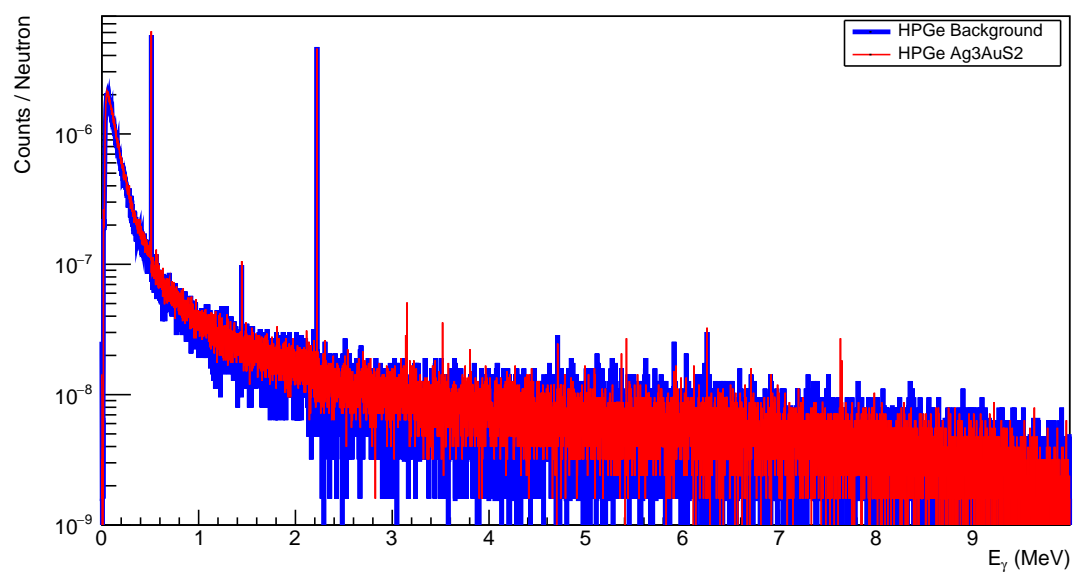


Рис. 4.9: Червоним - представлений спектор для  $CuFeS_2$ . Синім - фону

## 4.6 Аналіз спектру $U^{238}$

<Мета набору> Було обрано збіднений уран, з наступним ізотопічним складом 99.27% –  $^{238}U$ , 0.72% –  $^{235}U$ , 0.005% –  $^{234}U$ , У ході набору було отримано наступний спектор Рисю 4.10 На данному спектрі можна

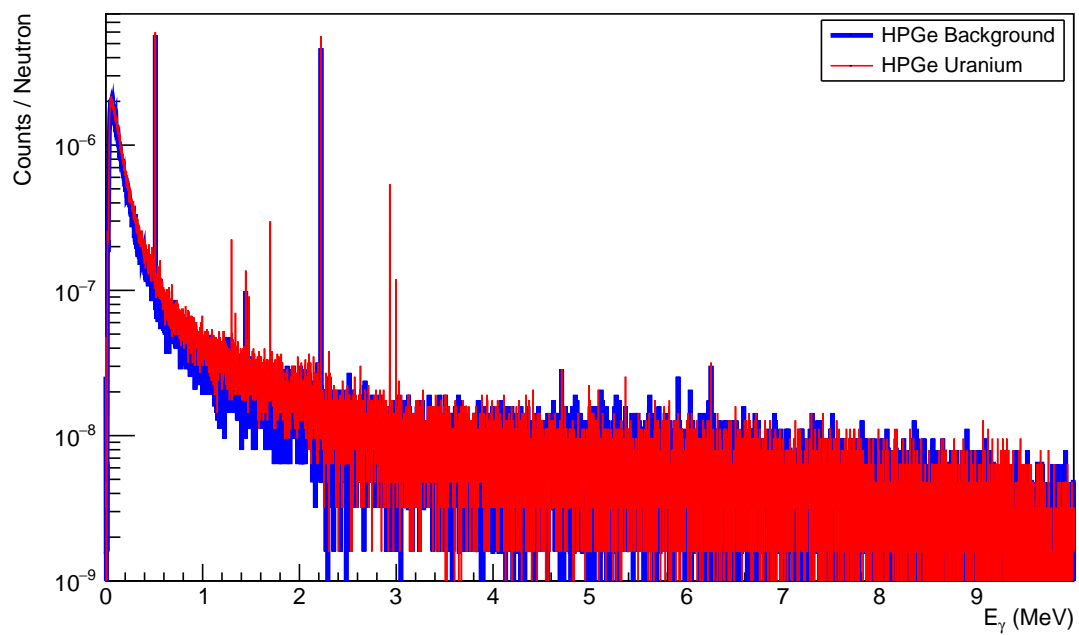


Рис. 4.10: Червоним - представлений спектор для  $U^{238}$ . Синім - фону спостерігат

## 5 Висновки

У роботі була змодельована спрощена версія системи яка дає змогу досліджувати, та ідентифікувати речовини які знаходяться не лише на поверхні океанічного дна, при достатніх потоках нейтронів. Порівнюючи з проектом SABAT, де використовувався сепіляційний детектор, була проведена спроба вирішення проблем, які супроводжуються використання напівпровідникових детекторів, та оптимізацією для більш універсального застосування. Було встановлено що оптимальна відстань між досліджуваною речовиною та детектором близько 30см. Було проведено дослідження залежності від енергії нейтронів з джерела, за цими результатами було встановлено що джерело можна по-перше розміщувати на більшій відстані, та енергія 14MeV досить велика для подібного моделювання, тому можна або зменшувати енергію але наприклад 2.8 MeV енергії за низька тому використання ізотопних джерел не можливе. Також враховуючи той факт що я спостерігав взаємодію нейтронів з чуливим об'ємом детектора є доцільним змінити геометрію, або енергію нейтронів, також приділити додаткову увагу захисту детектора

# Література

- [1] *R.M. Keyser and T.R. Twomey* - Extended Source Sensitivity and Resolution Comparisons of Several HPGe Detector Types with Low-energy Capabilities  
HPGe Detector Types
- [2] *Aatos Heikkinen, Nikita Stepanov Helsinki Institute of Physics, P.O. Box 64, FIN-00014 University of Helsinki, Finland Johannes Peter Wellisch CERN, Geneva, Switzerland* - Bertini intra-nuclear cascade implementation in Geant4 link
- [3] *Ю.В. Сереткин, Г.А. Пальянова Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН* - ИЗОМОРФНОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ СЕРЫ СЕЛЕНОМ И МОРФОТРОПНЫЙ ПЕРЕХОД В РЯДУ  $Ag_3Au(Se, S)_2$  link
- [4] *В. М. Округин1, А. У. Ким* О рудах Асачинского золото-серебряного месторождения (Южная Камчатка) link
- [5] *Омельчук О.В., Загнітко В.М., Курило М.М.* ПОШУКИ ТА РОЗВІДКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
Навчально-науковий інститут «Інститут геології»
- [6] *Experimental Nuclear Reaction Data*