

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. "Дослідження можливості застосування нейтронно активаційного аналізу для пошуку корисних копалин в глибинах океану"

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.

Сьогодні дуже гостро ставиться питання нестачі ресурсі, на даний момент, вже вдалося досить точно знаходити та підтверджувати родовища на поверхні. Але згідно прогнозам цих родовищ вистачить не надовго, тому було звернено увагу на океани, які досіх пір повністю не дослідженні. Враховуючи умови проведення дослідження, для вирішення поставленої задачі був обраний нейтронно-активаційний аналіз. Ця робота проводилась надихаючись проектом "SABAT метою якого було створення системи пошуку відходів на дні Балтійського моря. Відповідно роботу можна розбити на такі етапи: вибір найбільш підходящих мінералів для тестування методу, моделювання геометрії за допомогою коду GEANT4, валідація моделі, аналіз отриманих даних. За основні матеріали для дослідження були обрані $CuFeS_2$, Ag_3AuS_2 , U^{238} . Для валідація моделі відбувався набір спектру $C_4H_8Cl_2S$. Всі етапи були виконані, та також був проаналізований спектор за відсутності мішені, для виявлення не доліків, та встановлення подальшого плану дій. **Ключові слова:** Нейтронно активаційний аналіз, HPGe, GEANT4, $CuFeS_2$, Ag_3AuS_2 , U^{238} , $C_4H_8Cl_2S$, SABAT

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

1	Вступ	2
2	Розділ 1	3
2.1	<i>QGSP_BERT</i>	3
2.2	Мультиточність Geant4	4
2.3	Джерела нейтронів	5
3	Розділ 2	6
3.1	Геометрії моделювання	7
3.2	Чутливий об'єм детектора та захист	9
3.3	Код моделі	10
4	Розділ 3	12
4.1	Опис обробки спектру	12
4.2	Валідація моделі	13
4.3	Дослідження (n, γ) реакцій, Au та Cu	15
4.4	Аналіз спектрів Ag_3AuS_2	17
4.5	Аналіз спектрів $CuFeS_2$	18
4.6	Аналіз спектру U^{238}	19
5	Висновки	21
6	Додатки	22
	Література	25

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 *QGSP_BERT*

QGSP_BERT - ця фізична модель входить в перелік стандартних фізичних моделей розрахункового пакету Geant4. Базується на каскадній моделі Бертіні. Для валідації данної моделі необхідне виконання наступних умов $\frac{\lambda_B}{\nu} \ll \tau_c \ll \Delta t$, λ_B - хвиля де-Бролля для налітаючої частинки, ν - швидкість налітаючої частинки, Δt - час між зіткненнями. Та модель яка лягла в основу коду Geant4 була протестована на частинках з енергіями від 100 MeV до 3 GeV.

В конструкторі данної фізичної моделі ініціалізуються наступні класи фізики:

- G4EmStandardPhysics
- G4EmExtraPhysics
- G4DecayPhysics
- G4HadronElasticPhysics
- *HadronPhysicsQGSP_BERT*
- G4StoppingPhysics
- G4IonPhysics

Кожен з класів наслідується від базового класу фізичної G4PhysicsConstructor. Подібна архітектура дозволяє не дублювати код, та додавати лише необхідні процеси для моделювання.

QGSP_BERT_HP - це фізична модель що базується на данній - та має майже той самий перелік інкапсульованих класів, за виключенням наступних двох:

- *G4HadronElasticPhysicsHP*
- *HadronPhysicsQGSP_BERT_HP*

Ця фізична модель була створенна для більш точного врахування процесів гальмування нейтронів в речовині, від енергій $E_n = 20$ MeV до $E_n = 0.0025$ eV (теплових). Ця фізична модель була провалідована на експерименті TARC

Тобто данний клас *QGSP_BERT* і *QGSP_BERT_HP* представляють собою інтерфеси ів з інкапсульованими в нього базовими фізики.

2.2 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 архієктури 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 створюється 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.

2.3 Джерела нейтронів

Нейтроний 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, α) - 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 свої 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.

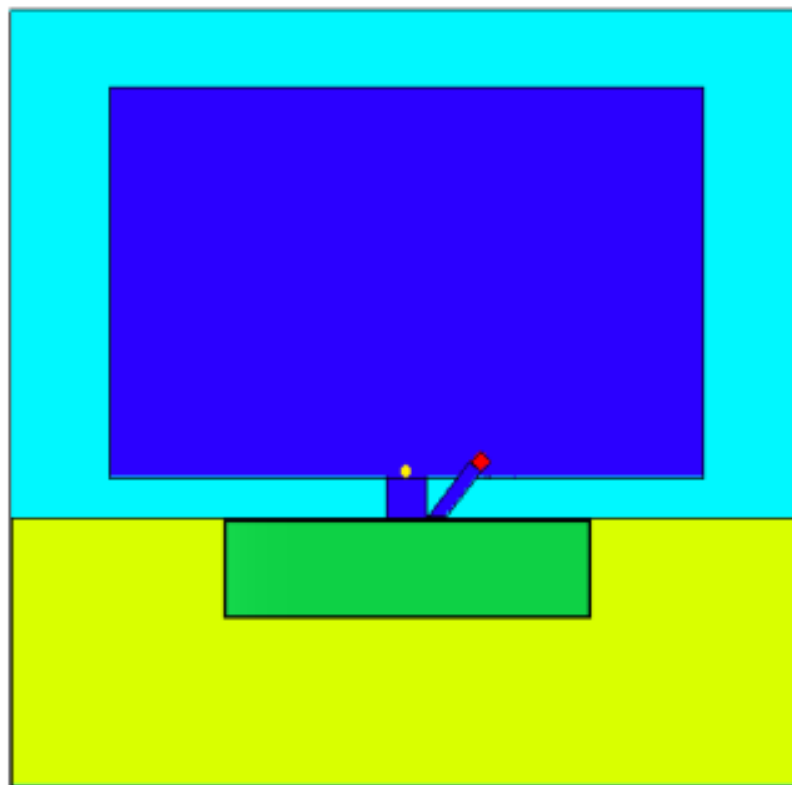


Рис. 3.1: Геометрія проекту SABAT

Геометрія яка використовувалась для набору спектрів зображена на Рис. 3.2, довжина ребра кубу середовища 1 м., довжина ребра бічної поверхні мішені (Рис. 3.2 - 3) 40 см., від мішені до чутливого об'єму детектора 30 см., від чуливого об'єму до джерела 30 см., (відстані задані не

враховуючи зовнішній захист) матеріал середовища був взятий з запропонованою бази матеріалів Geant4 - "G4_WATER". Джерело нейтронів поміщене в направляючий об'єм (Рис. 3.2 - 1), 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)

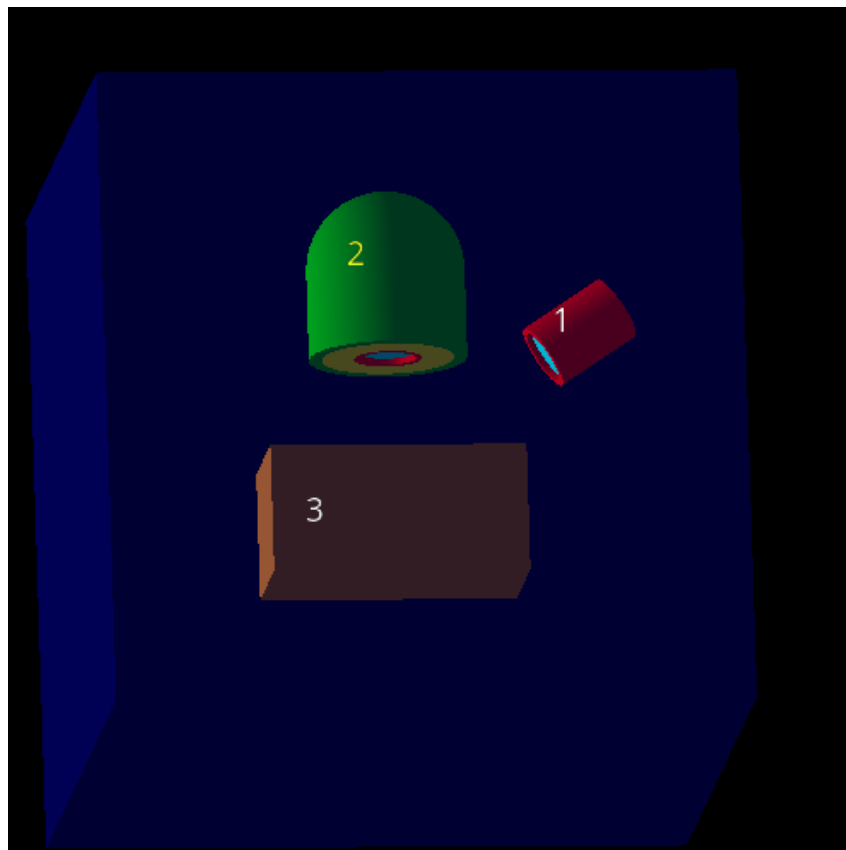


Рис. 3.2: Геометрія моделі, 1 - джерело і його направляючий об'єм, 2 - захист детектора та детектор, 3 - мішень

Для спрощення моделювання точкове джерело нейтронів було розміщене всередині набравляючого 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

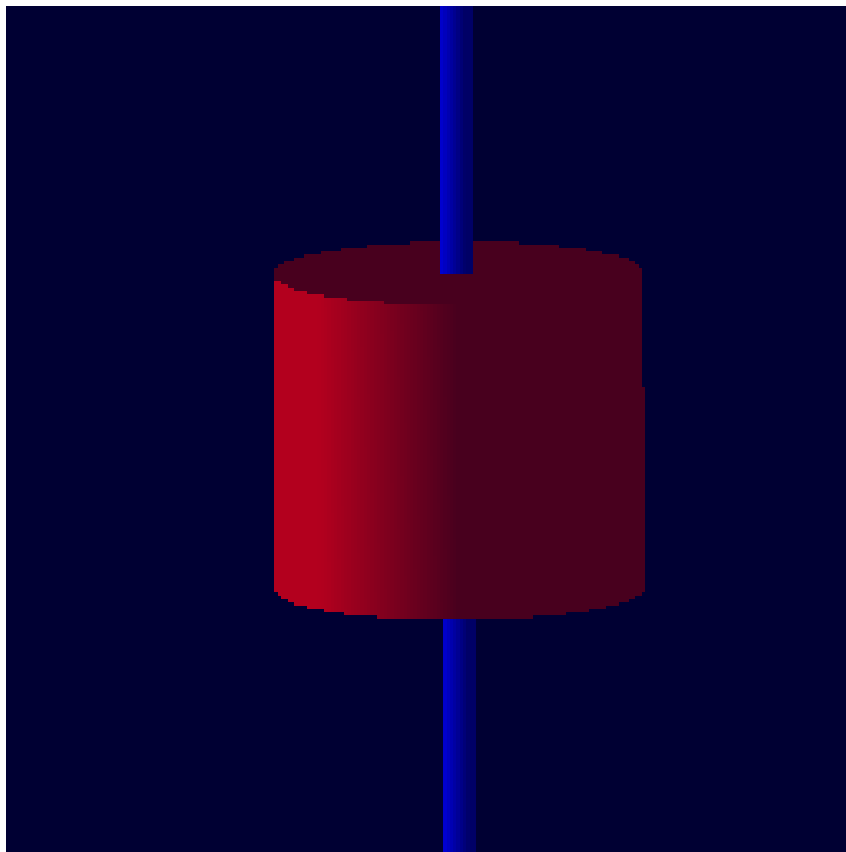


Рис. 3.3: Форма чутливого об'єму

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 ПВЕЛ-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. $E_\gamma =$

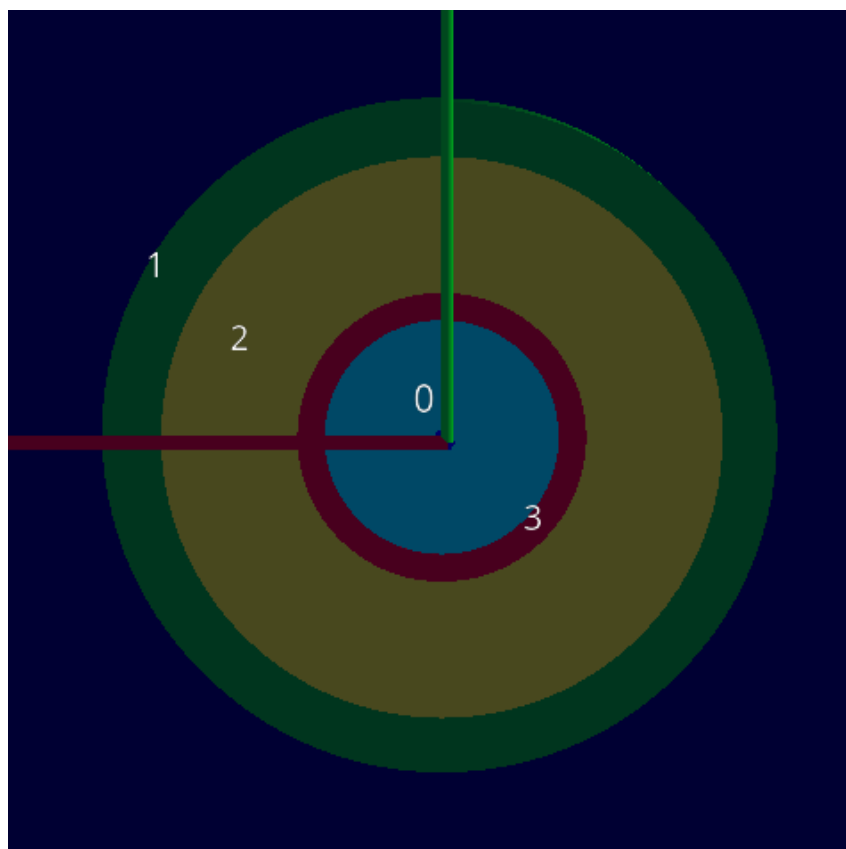


Рис. 3.4: Захист детектора, Al - 1 (зелений) товщина 2 см., В - 2 (жовтий) товщина 5 см., Рb - 3 (червоний) товщина 1 см. 0 (Блакитний) шар повітря

480 кеВ, реакція з вильотом γ - 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 дестрибютера.

3.3 Код 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 по-

легшення контролю над пам'яттю використовувалися розумні вказівники C++ 14 стандарту. Архітектура коду моделювання зображена на Рис. 3.5 Проаналізувавши різницю між двома фізичними моделями

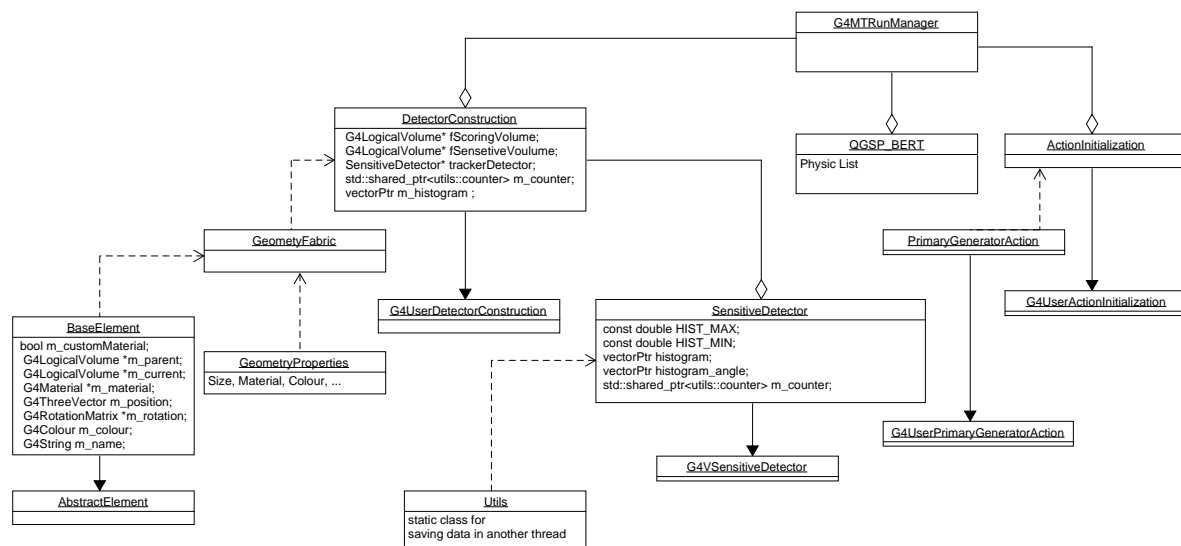


Рис. 3.5: Діаграма класів коду моделі

QGSP_BERT_HP та *QGSP_BERT*, для проведення моделювання була обрана *QGSP_BERT* - так як на данному етапі вона виявилась більш підходящою, через вищу продуктивність.

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 $\Delta E = 2.36\sqrt{F\frac{w}{E}}w$, ΔE - енергія на один бін, F - Фано фактор, w - кількість енергії на утворення пари, та пронормований на кількість нейтронів з джерела. Так як для спрощення побудови джерела в моделі, використовувалась спрощена 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. В моїй роботі для зглажування спектру були взяті наступні параметри Табл. 4.1

Параметр	Значення	Розмірність
F	0.13	-
w	3.62	eV

Табл. 4.1: Таблиця значень для уширення піків

Фон Рис. 4.1 набрався за тих тої самої геометрії Рис. 3.1, але 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 теплових нейтронів Ge з $E_\gamma = 0.505\text{MeV}$, $E_\gamma = 1.42\text{MeV}$ - це означає що данної геометрії частина нейтронів від джерела проходячи через захист потрапляє в чутливий об'єм детектора, та призводить до його руйнації. Данні піки відповідають пікам $Ge^{72}(n, \gamma)Ge^{73}$

HPGe Background

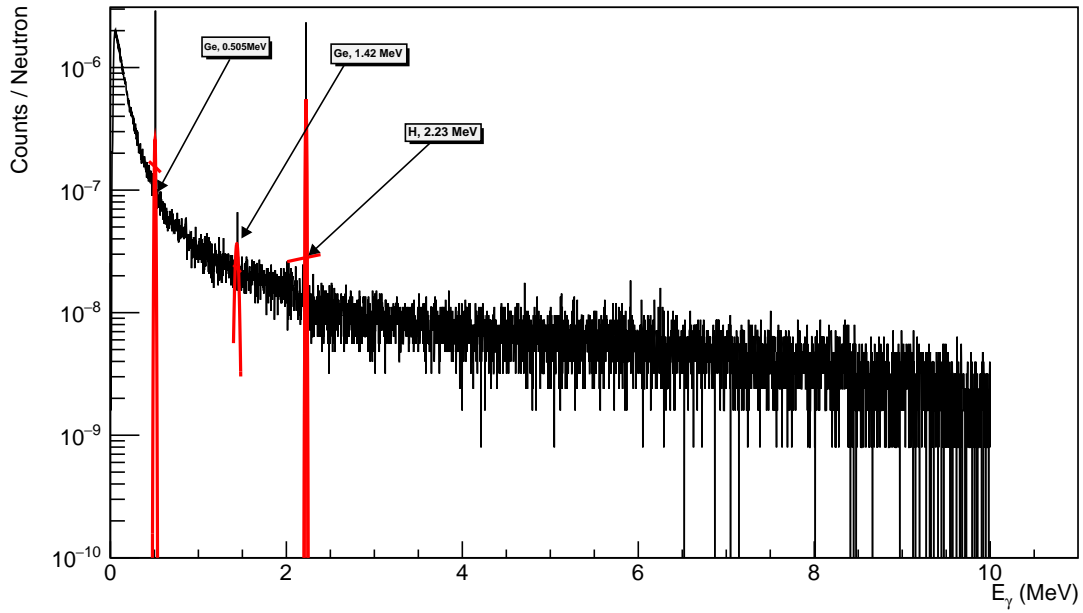


Рис. 4.1: Фон

- реакції з нейтронами енергій близькими до теплових - $E_n = 0.025\text{eV}$. Ge^{72} - основний ізоотоп Ge, і саме він використовується в основі чутливого об'єму.

E_γ , MeV	ΔE , MeV	$I = I_\gamma/I_b$	ΔI
0.505	0.008	12	3
1.420	0.004	20	4
2.230	0.003	22	4

Табл. 4.2: Фонові піки

4.2 Валідація моделі

Для підтвердження можливості проведення наборів на моїй моделі був набраний спектр для Гірничного газу ($\text{C}_4\text{H}_8\text{Cl}_2\text{S}$). Рис 4.2. Та порівняний з отриманим спектром набраним за допомогою коду для моделювання MCNP в проєкті SABAT. Це спектр набирався для валідації мо-

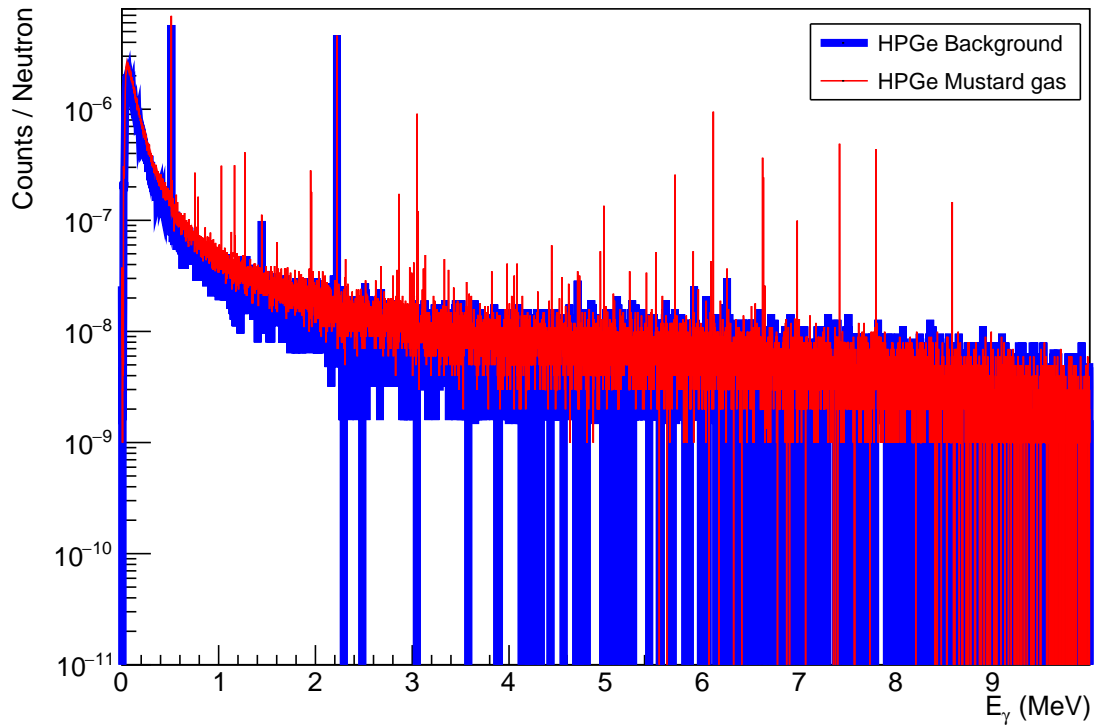


Рис. 4.2: Червоним - представлений спектр для Гірчичного газу. Синім - фону

делі - тому до уваги бралися лише ті піки, які були вказані в проєкті SABAT. Табл. 4.3

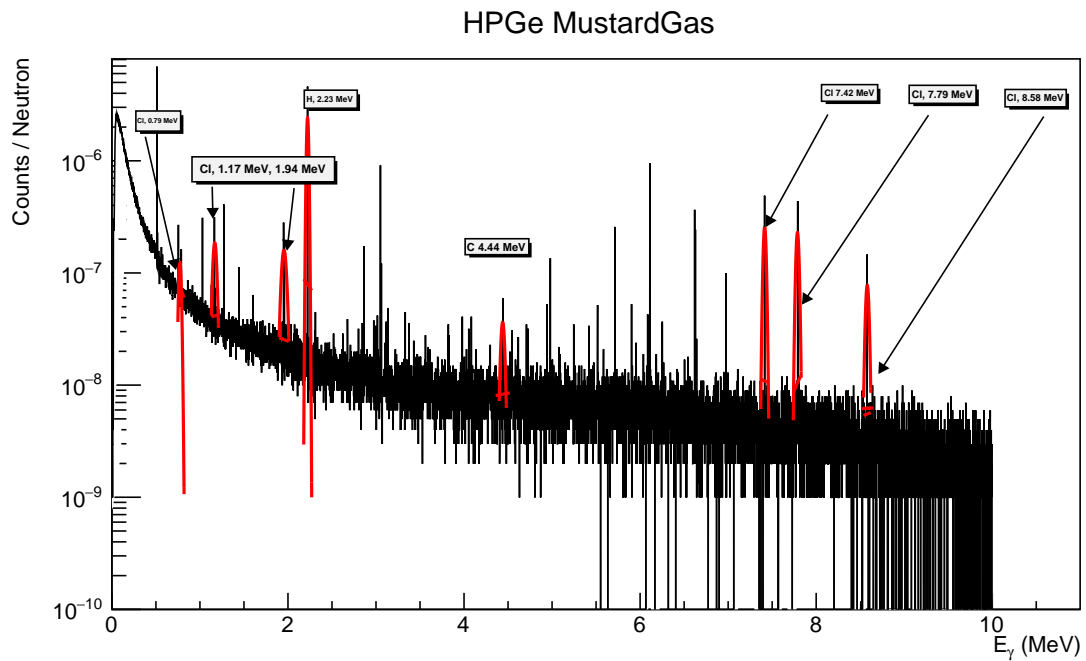


Рис. 4.3: Ініціалізація піків, Cl, H, C - в спектрі гірчичного газу

E_γ , MeB	ΔE , MeB	$I = I_\gamma/I_b$	ΔI	Елемент
0.79	0.008	12	3	Cl
1.165	0.004	20	4	Cl
1.95	0.003	22	4	Cl
4.44	0.003	22	4	C
7.41	0.003	22	4	Cl
7.78	0.003	22	4	Cl
8.58	0.003	22	4	Cl

Табл. 4.3: Піки гічичного газу - $C_4H_8Cl_2S$

4.3 Дослідження (n, γ) реакцій, Au та Cu

$Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$ - реакція захоплення нейтронна, переріз захоплення нейтронів в залежності від енергії зображено на Рис. 4.4.

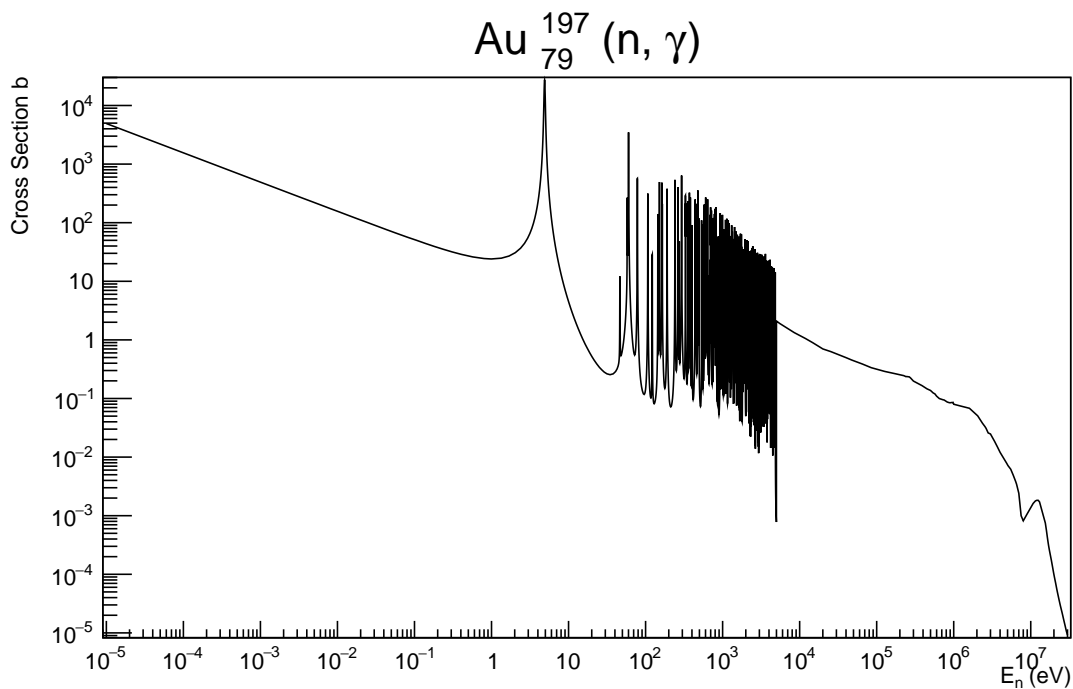


Рис. 4.4: Залежність захоплення нейтрона від енергії нейтронів в реакції $Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$

Au^{198} - ізоотп, має 2 - рівні в результаті розпаду з яких випромінюються гамма кванти, $T_{1/2} = 2.6$ днів. На Рис. 6.3 зображенно перехід з

збудженого $J\pi$ 12- на J/π 2- з якого у данного ізотопу відбувається β^- розпад до стабільного Hg_{80}^{198} .

Hg^{198} - має два збудженні рівні $J\pi$ 2+ - перехід з в основний стан відбувається з випромінювання γ -кванту $E_\gamma = 1087 \text{ keV}$, каскадний перехід є основним способом переходу на стабільний рівень Hg^{198} , відбувається з випромінювання двох γ -квантів $E_\gamma = 675 \text{ keV}$ та $E_\gamma = 411 \text{ keV}$.

На Рис. 4.4 - гарно видно що є резонансна область поглинання нейтронів розтягується до декількох кеВ.

E_n , eV	E_γ , keV	ΔE_γ , keV	$I_\gamma/100_n$	ΔI
4.9	6252.6	0.7	40.0	1.6
4.9	6457.8	0.7	20.4	0.5
4.9	5710.7	0.7	10.1	0.7
60	6061.3	0.9	16.2	1.5
60	5710.7	0.7	16.0	1.5
78	4958	1.0	10.5	0.6
107	5808.2	0.9	17.3	1.0

Табл. 4.4: E_γ , для нейтронів з енергіями поблизу резонансної області для Au^{197}

В реакція $Cu^{64}(n, \gamma)Cu^{65}$ переріз захоплення теплового нейтрона $\sigma = 2.1 \times 10^3 \pm 1.9 \times 10^3$ барн. Cu^{65} - стабільний елемент. $Cu^{65}(n, \gamma)Cu^{66}$. Для данного ізотопу спостерігається існування резонансної області в діапазоні десятків кеВ Рис. 4.5. Cu^{66} - не стабільний ізотоп, якому притаманний β^- розпад в Zn_{30}^{66} , $T_{1/2} = 5.12$ хвилин. Zn^{66} - стабільний ізотоп з основним рівнем $J\pi$ 0+. β^- - розпад Cu^{66} в основному відбувається у стабільний стан, але є ймовірність розпаду на $J\pi$ 1+ рівень, з подальшим випромінювання γ - кванту з енергією $E_\gamma = 1039 \text{ keV}$. Рис. 6.4

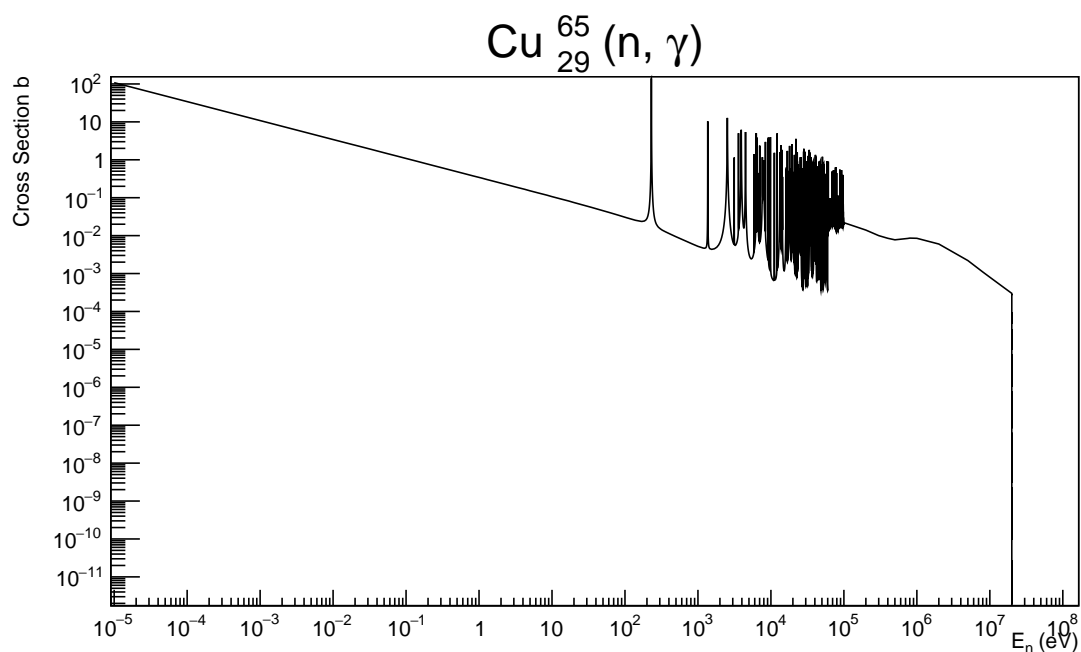


Рис. 4.5: Залежність захоплення нейтрона від енергії нейтронів в реакції $Cu^{65}(n, \gamma)Cu^{66}$

4.4 Аналіз спектрів Ag_3AuS_2

За матеріал було обрано ютенбогардтит Ag_3AuS_2 - родовища з даними мінералами були знайдені на камчатці поблизу побережжя. Даний мінерал відноситься до рідкісних золотоносних руд, зустрічається в природі у твердому стані. Був знайдений на Камчатських родовищах. Рис. 4.6 Даний спектор і фон були набрані при опроміненні нейтронами з джерела максимальної енергією 14.5 MeV Для порівняння було проведено опромінення за допомогою нейтронів енергією 8.5 та 2.8 MeV. Рис. 6.1 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. 6.2

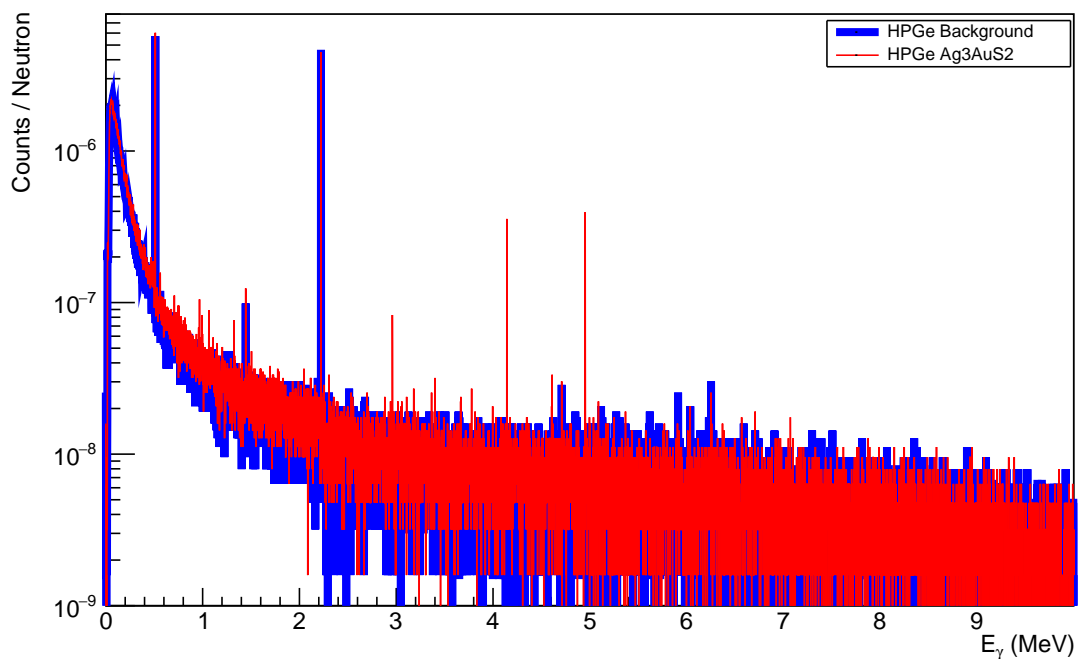


Рис. 4.6: Червоним - представлений спектр для Ag_3AuS_2 . Синім - фону

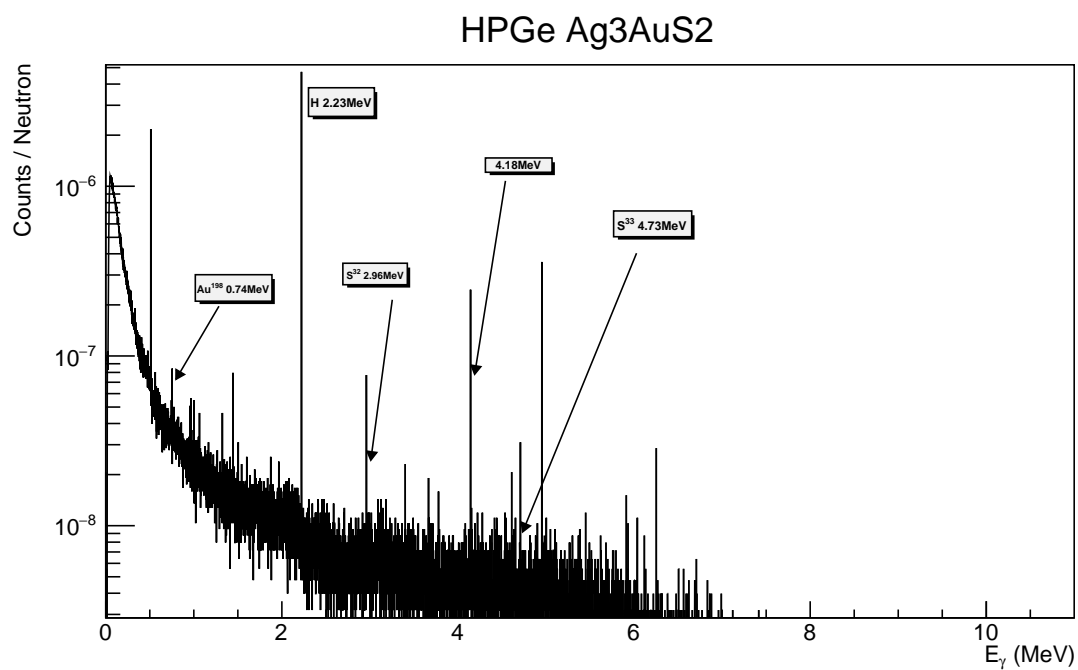


Рис. 4.7: Спектр Ag_3AuS_2 , $E_n = 8.5\text{MeV}$ - енергія нейтронів з джерела

4.5 Аналіз спектрів $CuFeS_2$

Даний мінерал являється основною складовою мідної руди, спектр для нього представлений на Рис. 4.8 В високо енергетичній частині спектру можна спостерігати пік для S_2

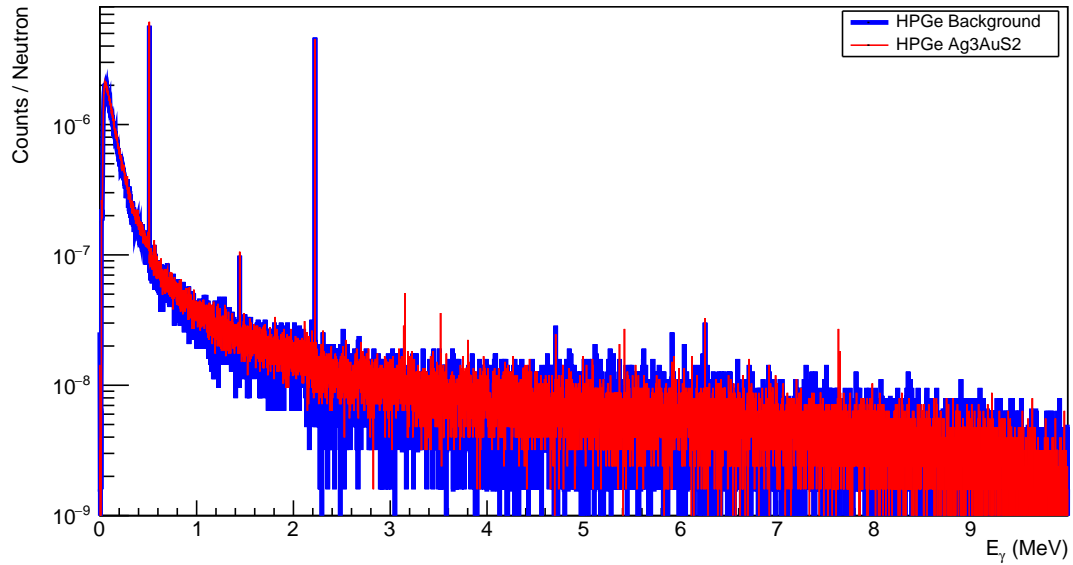


Рис. 4.8: Червоним - представлений спектор для $CuFeS_2$. Синім - фону

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 4.9 На данному спектрі

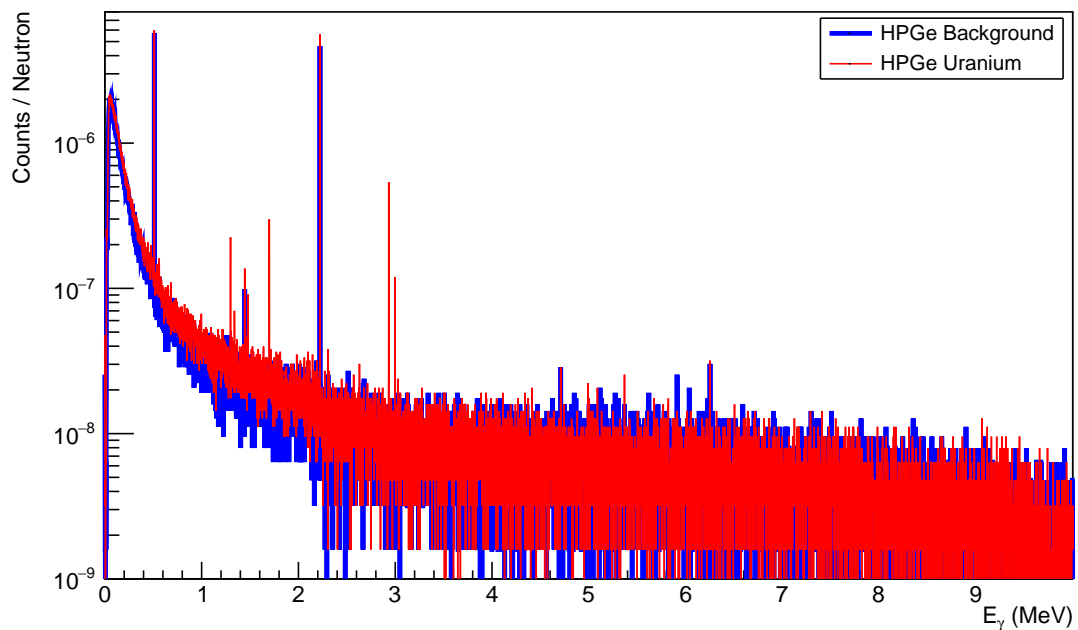


Рис. 4.9: Червоним - представлений спектор для U^{238} . Синім - фону

можна 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, та необхідного рельєфу.

Модель була успішно пройшла валідацію на спектрі для гірничного газу з проекту SABAT.

Проведення набору спетрів для нейтронів різних енергій дало, можливість виявити та зареєструвати недоліки данної моделі та геометрії.

На данному етапі було проведено перевірку використання данної моделі для обмеженої кількості речовин. Та згідно з результату, подібна модель має можливість для застосування, для високо збагачених руд.

Встановлення відстань від джерела нейтронів до досліджуваної речовини може варіюватись і бути більшою за 30 см. - енергіях нейтронів 14 MeV. Також було визначено що при використанні напівпровідникового детектора, відстань між джерелом та детектором однозначно повинна бути більшою за 30 см.

Використання захисту детектора з B^{10} - є не достатньо ефективним.

Також було встановлено що використання ізотопних джерел нейтронів є не доцільним

6 Додатки

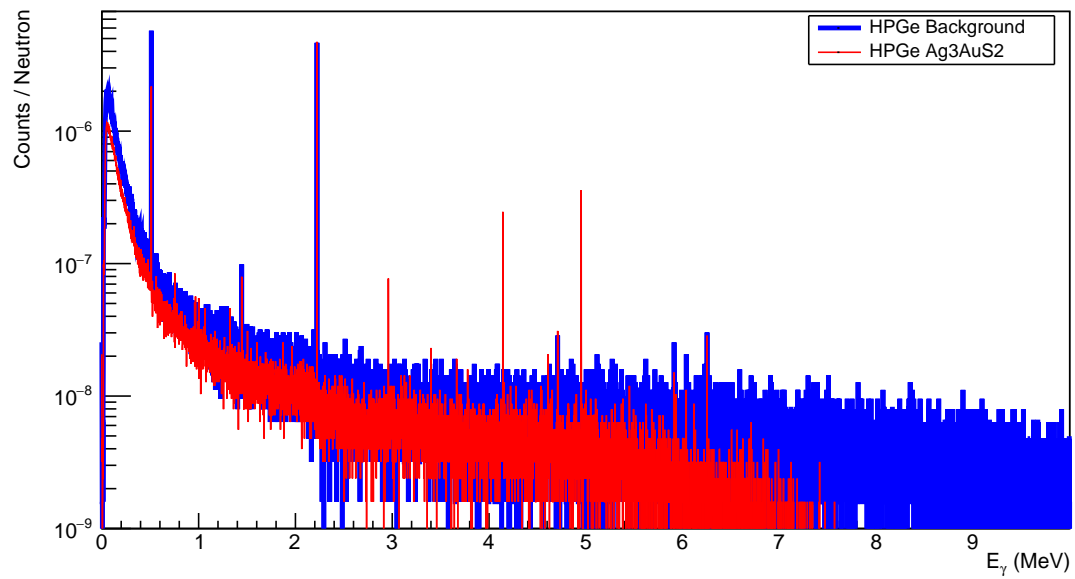


Рис. 6.1: Червона - лінія спектру, набраного за опромінення нейтронами 8.5 MeV

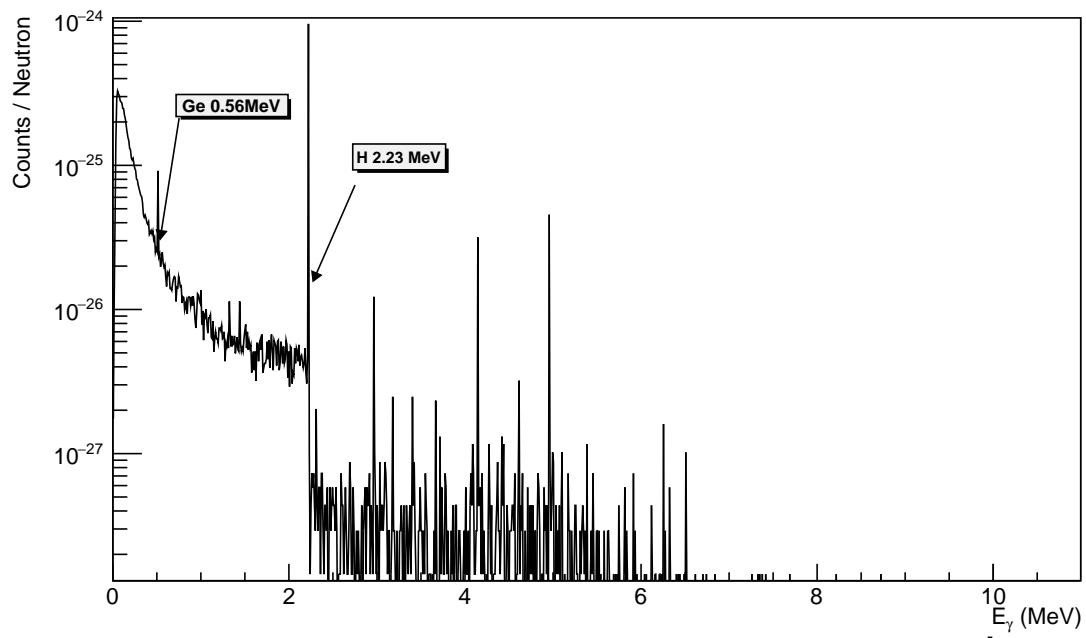


Рис. 6.2: Червона - лінія спектру, набраного за опромінення нейтронами 8.5 MeV

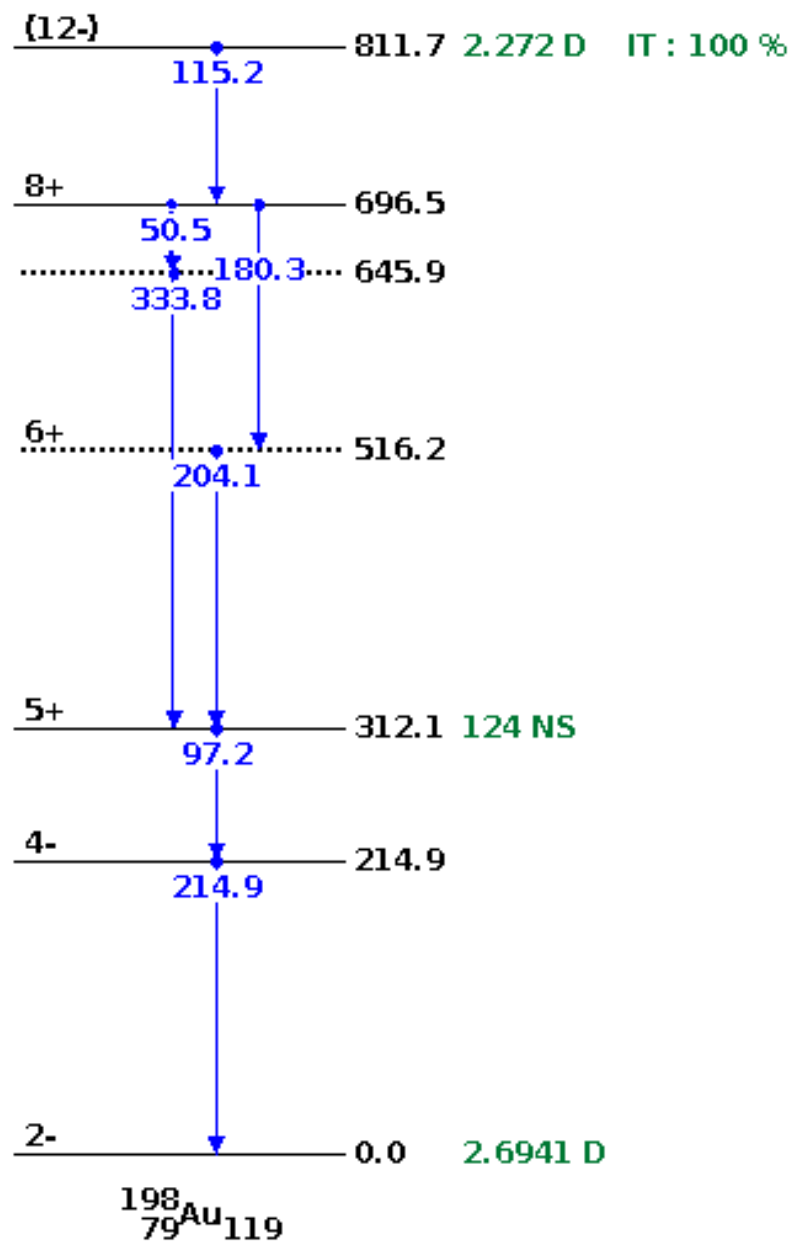


Рис. 6.3: Au^{198} Рівень $J\pi 12-$

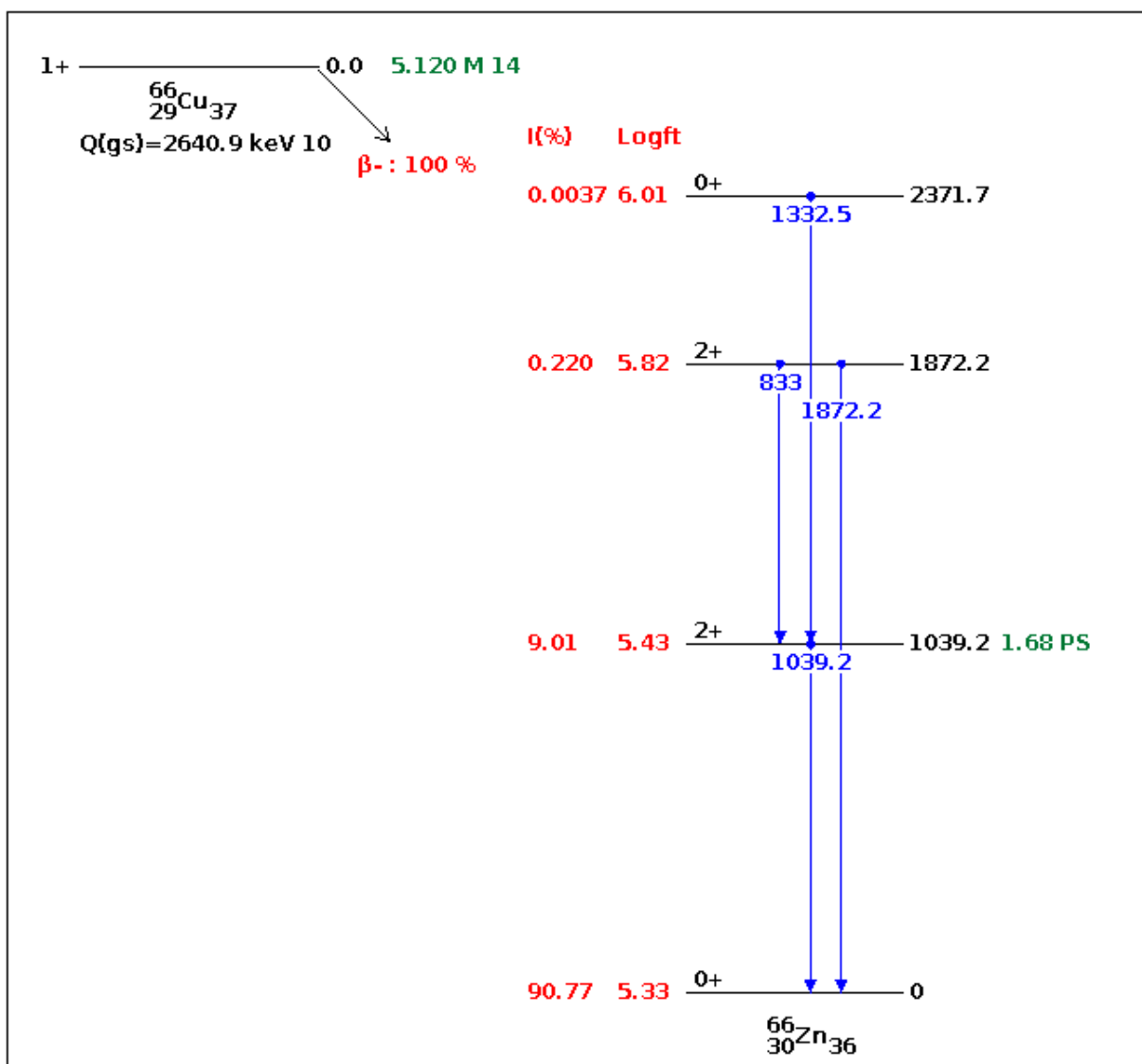


Рис. 6.4: $\text{Cu}_{29}^{66}(\beta^- \tilde{\nu})\text{Zn}_{30}^{66}$ Схема розпаду та збудженні рівні Zn^{66}

Література

- [1] *R.M. Keyser and T.R. Twomey* - Extended Source Sensitivity and Resolution Comparisons of Several HPGe Detector Types with Low-energy Capabilities
- [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
- [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 $Ag_3Au(Se, S)_2$
- [4] *В. М. Округин¹, А. У. Ким* О рудах Асачинского золото-серебряного месторождения (Южная Камчатка)
- [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*
- [7] *O. A. Wasson, R. E. Chrien, M. R. Bhat, M. A. Lone, and M. Beer* $Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$ Reaction Mechanism
- [8] *I.A.Kondurov, A.I.Egorov, M.Kaminker, E.M.Korotkikh, A.M.Nikitin* Neutron capture cross sections measurements for Co58m, Cu64, and Sc46
- [9] *Geant4 Collaboration* Book For Application Developers Release 10.3

- [10] *Alexander Howard, Gunter Folger, Jose Manuel Quesada, Vladimir Ivanchenko* Validation of Neutrons in Geant4 Using TARC Data - production, interaction and transportation