

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
канд. 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 ресурсів, 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 до сих пір повністю не дослідженні. Враховуючи умови проведення дослідження, для вирішення поставленої задачі був обраний нейтронно-активаційний аналіз. Ця робота проводилась надихаючись проектом "SABAT"[Літ. 1] - 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 недоліків, 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	Теоретична частина	3
2.1	Фізична модель $QGSP_BERT$	3
2.2	Мультипоточність Geant4	4
2.3	Джерела нейтронів	5
3	Постановка задачі	6
3.1	Геометрії моделювання	6
3.2	Чутливий об'єм детектора та захист	8
3.3	Досліджувані речовини	10
3.4	Опис програмної моделі	11
4	Аналіз результатів	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
4.7	Оцінка потужності джерела	20
5	Висновки	21
6	Додатки	22
	Література	25

1 Вступ

З розвитком технологій та промисловості, забрудненням навколишнього середовища, ростом популяції населення, все частіше починає піднімати питання нестачі вичерпання природних ресурсів. Особливо гостро це торкається невідновлюваних природних ресурсів. З кожним роком вичерпних родовищ стає все більше. Так, наприклад, по оцінкам "Римського клубу"[Літ. 13]: 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 даним досліджено від 5% до 7% дна. Океанічне дно 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.

За рахунок 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 неможливим.

На основі проекту SABAT(Stoichiometry Analysis By Activation Techniques)[Літ. 1] - 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 Теоретична частина

2.1 Фізична модель *QGSP_BERT*

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

В конструкторі даної 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 створена 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[Літ. 11]

Тобто дані класи: *QGSP_BERT* і *QGSP_BERT_HP* представляють собою інтерфейси з інкапсульованою в них базової 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. Але потрібно зважати, що продуктивність лінійно збільшується лише в тому випадку коли під задачу виділяється фізичне чи віртуальне ядро

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, що 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 кла-

си інтерфейсу які відповідають за створення даних об'єктів були доступні для всіх об'єктів пулу.

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 14.1 MeV. Ядра D розганяються різницею потенціалів 100-300 кВ і спрямовуються на мішень з тритія чи дейтерія. Максимальний енергетичний вихід реакції на тритії 17.6 MeV. В основі ізотопних джерел нейтронів лежить (α, n) - реакція, в основному воно собою представляє запаяну капсулу циліндричної форми, та діє по схожому принципу, як і генератор. Як джерело альфа частинок поміщується ізопои Pu, Am, Cm за мішень Be, Li. Такі джерела нейтронів в більшості свої випромінюють нейтрони 2.8 MeV

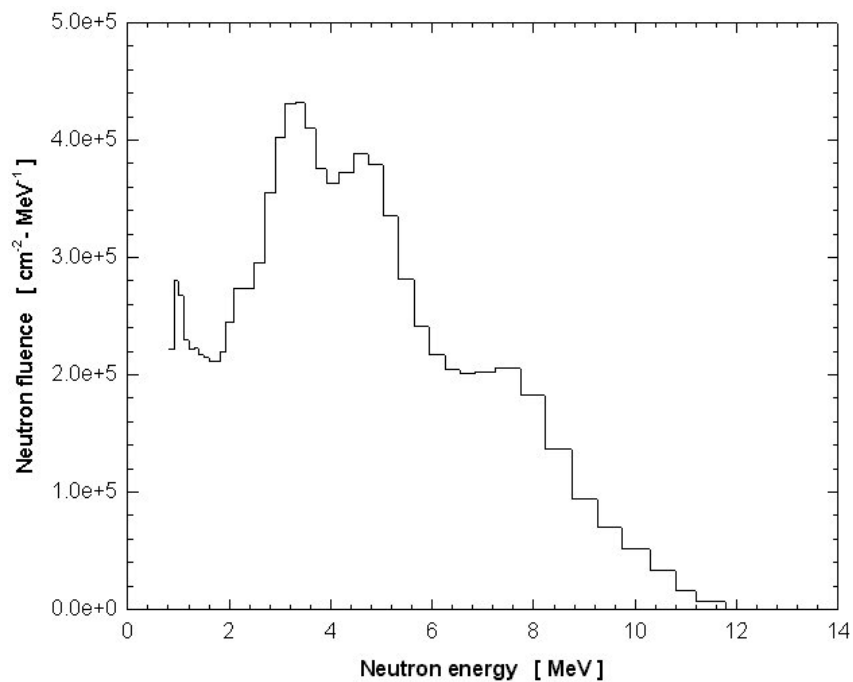


Рис. 2.1: Спектр нейтронів ізотопічного джерела з Pu та Be - мішенню

3 Постановка задачі

Метою даної роботи було створення моделі за допомогою якої можна було б отримати інформацію про елементи що входять до складу океанічного дна.

3.1 Геометрії моделювання

Змодельована геометрія схожа на ту яка використовувалась у проекті SABAT [Літ. 1]Рис. 3.1, але с наступними відмінностями: по-перше, не моделювався корпус самої субмарини, так як в він не ніс жодного корисного навантаження при проведенні розрахунків, по-друге детектор та джерело були рознесені на дещо більшу відстань, та поміняні місцями, по-третє на даному 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.

Геометрія яка використовувалась для набору спектрів зображена на Рис. 3.2, довжина ребра куба середовища 1 м., довжина ребра бічної поверхні мішені (Рис. 3.2 - 3) 40 см., від мішені до чутливого об'єму детектора 30 см., від чутливого об'єму до джерела 30 см., (відстані задані не враховуючи зовнішній захист) матеріал середовища був взятий с запропонованою бази матеріалів Geant4 - "G4_WATER". Джерело нейтронів поміщене в направляючий об'єм(Рис. 3.2 - 1), який виготовлений з тонкого шару свинцю. Чуттєвий об'єм детектора поміщений у захист зі свинцю, бору, та алюмінія, направляючі об'єми заповнені повітрям(G4_AIR). Для спрощення моделювання точкове джерело нейтронів було розміщене всередині направляючого коаксіального об'єму (Рис. 3.2, 1 - червоного

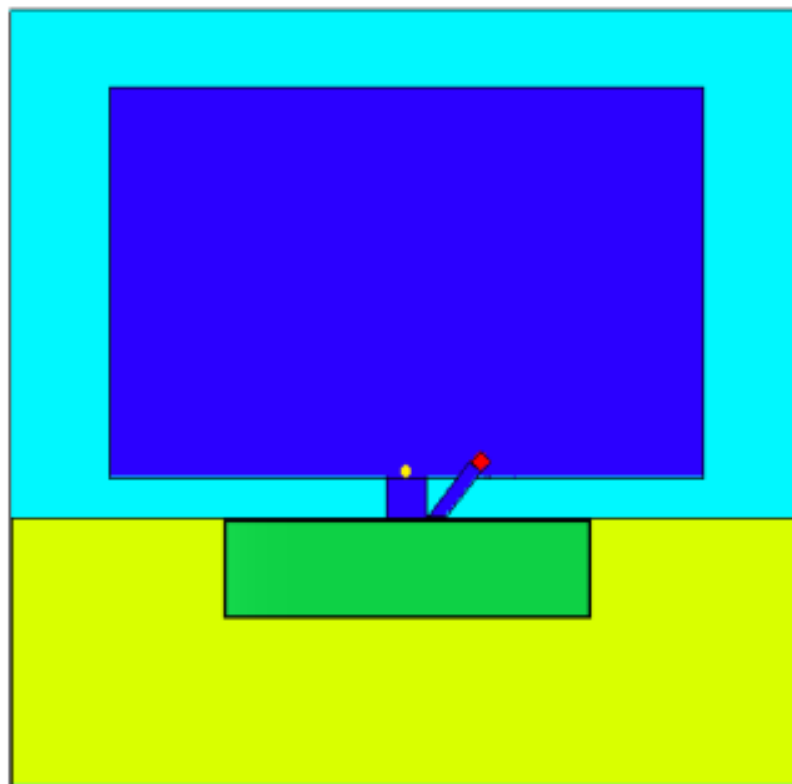


Рис. 3.1: Геометрія проекту SABAT

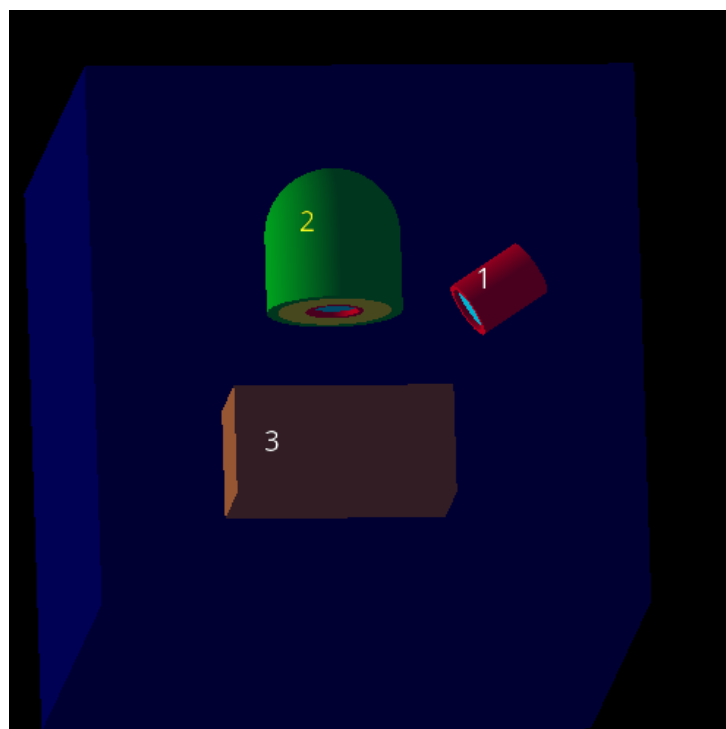


Рис. 3.2: Геометрія моделі, 1 - джерело і його направляючий об'єм, 2 - захист детектора та детектор, 3 - мішень

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 За

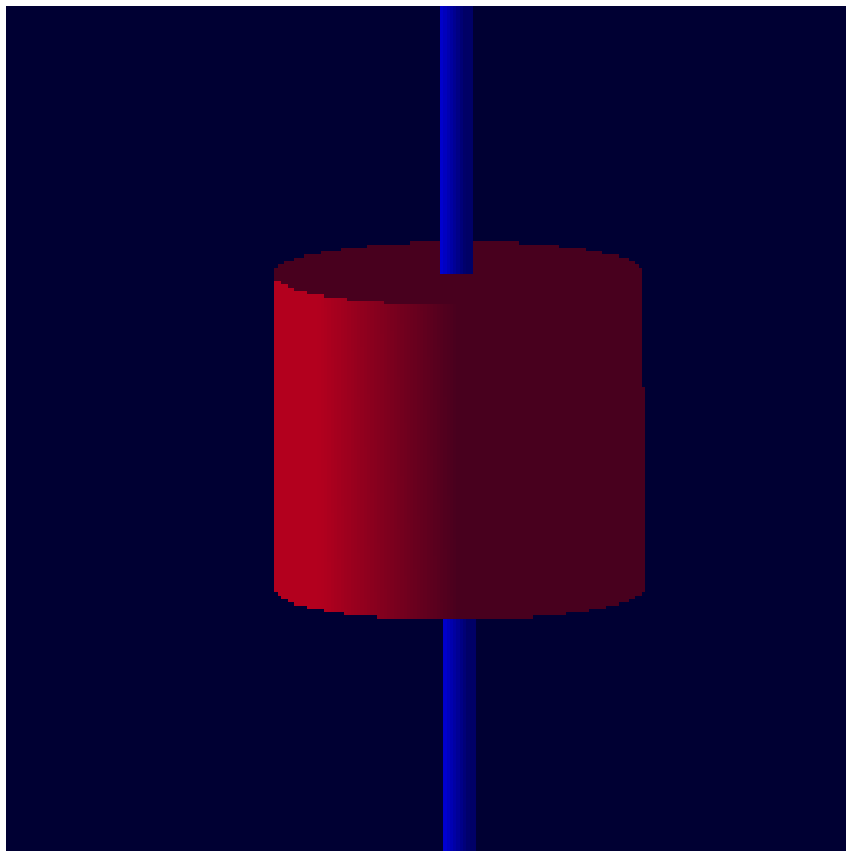


Рис. 3.3: Форма чутливого об'єму

основу для моделювання було взято розміри детектора N21879A виробника від ORTEC АМЕТЕК, параметри розмірів були взяті від офіційного дистриб'ютора.

Детектор буде розміщений поряд з джерелом нейтронів високих енергій, 14.1 МеВ. Тому детектор був розміщений у трьох шаровий захист. Рис. 3.4 В захисті використовується Бор для поглинання теплових

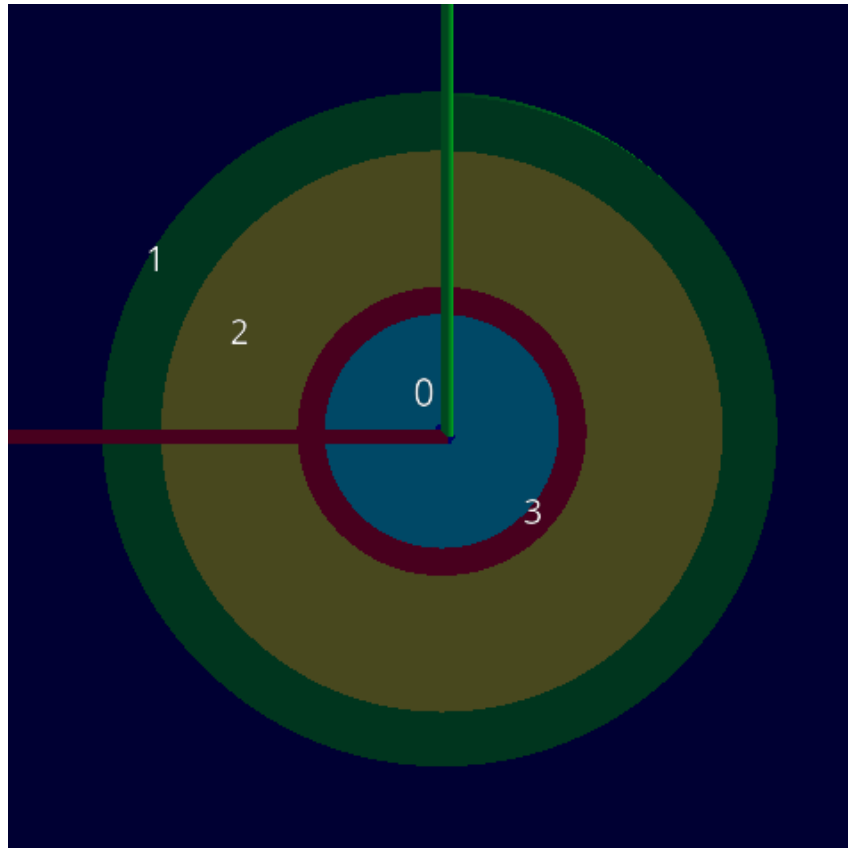


Рис. 3.4: Захист детектора, Al - 1 (зелений) товщина 2 см., В - 2 (жовтий) товщина 5 см., Рb - 3 (червоний) товщина 1 см. 0 (Блакитний) шар повітря

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 ^{10}B .

$^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)\text{Li}_3^7$, Переріз захоплення нейтрона ^{10}B $\sigma = 3380$ барн. $E_\gamma = 480$ кеВ, реакція з вильотом γ - кванту відбувається з ймовірністю 0.94.

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

3.3 Досліджувані речовини

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

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

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}

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

Табл. 3.2: Таблица енергій найбільш інтенсивних піків

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

3.4 Опис програмної моделі

Моєю метою було написати максимально зручний код для набору спектрів за різних умов та на різних мішенях, 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 полегшення контролю над пам'яттю використовувалися розумні вказівники C++ 14 стандарту. Архітектура коду моделювання зображена на Рис. 3.5 Проаналізувавши різницю між двома фізичними моделями

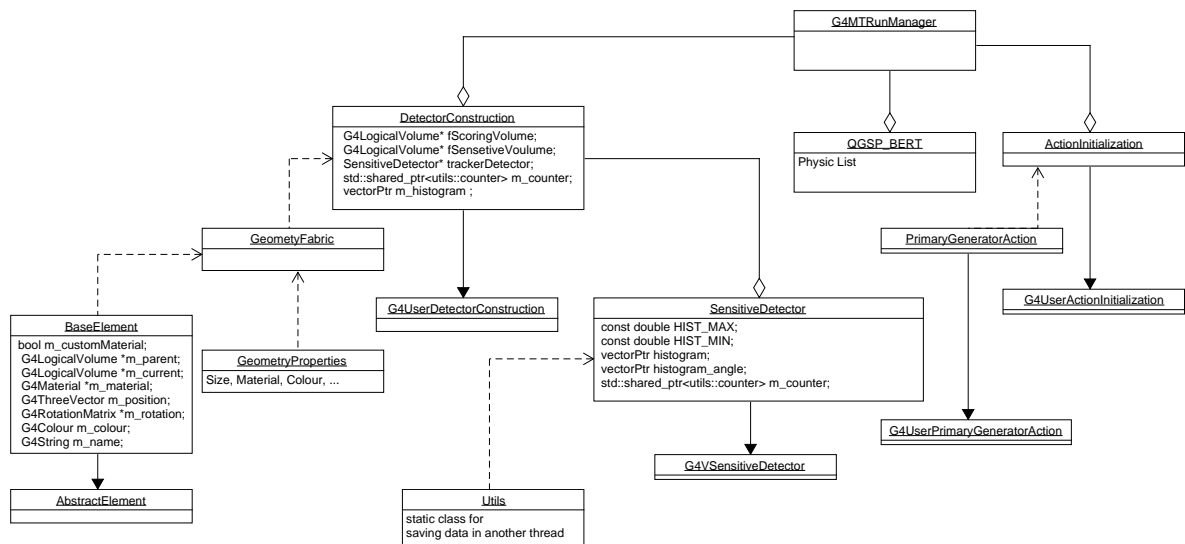


Рис. 3.5: Діаграма класів коду моделі

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

4 Аналіз результатів

4.1 Опис обробки спектру

В результаті моделювання, набирались апаратні спектри, встановлена роздільна здатність на апаратному спектрі дорівнювала 16384 біни. Далі для наближення спектру до реального, була проведена його сглажування за наступної формулою $\Delta E = 2.36\sqrt{F\frac{w}{E}}w$, ΔE - енергія на один бін, F - Фано фактор, w - енергія на утворення пари, та про нормований на кількість нейтронів з джерела. Так як для спрощення побудови джерела в моделі, використовувалась спрощена геометрія, а генерація нейтронів відбувалися 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 згладжування 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 тої самої геометрії Рис. 3.1, але за відсутності мішені(коричневий паралелепіпед), У фоні були проаналізовані наступні три піки: Н з $E_\gamma = 2.23MeV$, та два піки які отримали за рахунок захоплення теплових нейтронів Ge з $E_\gamma = 0.505MeV$, $E_\gamma = 1.42MeV$ - це означає що даної геометрії частина нейтронів від джерела проходячи через захист потрапляє в чутливий об'єм детектора, та призводить до його руйнації. Дані піки відповідають пікам $^{72}Ge(n, \gamma)Ge^{73}$ - реакції з

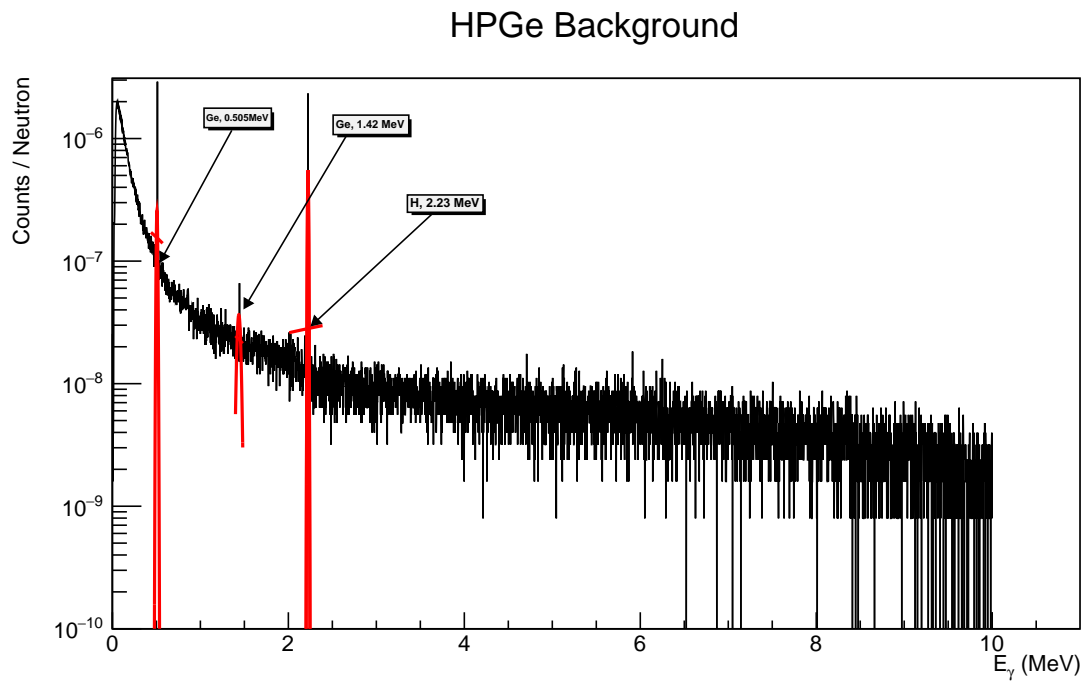


Рис. 4.1: Фон

нейтронами енергій близькими до теплових - $E_n = 0.025\text{eV}$. ^{72}Ge - 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 в проекті SABAT [Літ. 1]. Цей спектр набрався для валідації моделі - тому до уваги бралися лише ті піки, які були вказані в проекті SABAT. Табл. 4.3

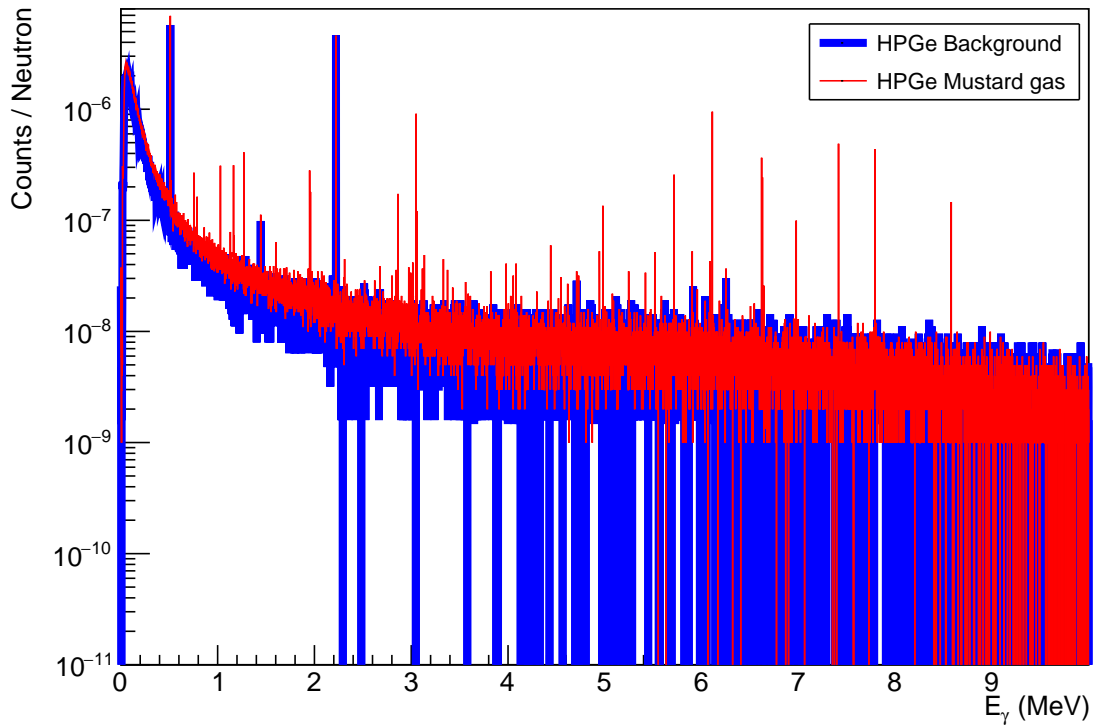


Рис. 4.2: Червоним - представлений спектр для Гірничного газу. Синім - фону

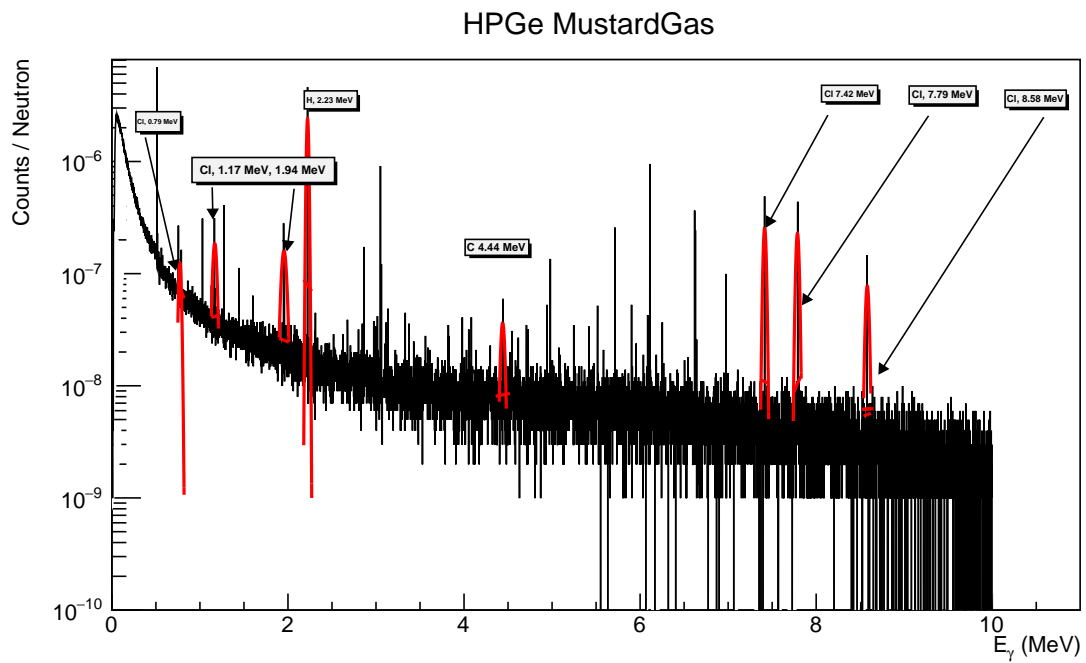


Рис. 4.3: Ініціалізація піків, Cl, H, C - в спектрі гірничного газу

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 гірчичного газу - $C_4H_8Cl_2S$

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

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

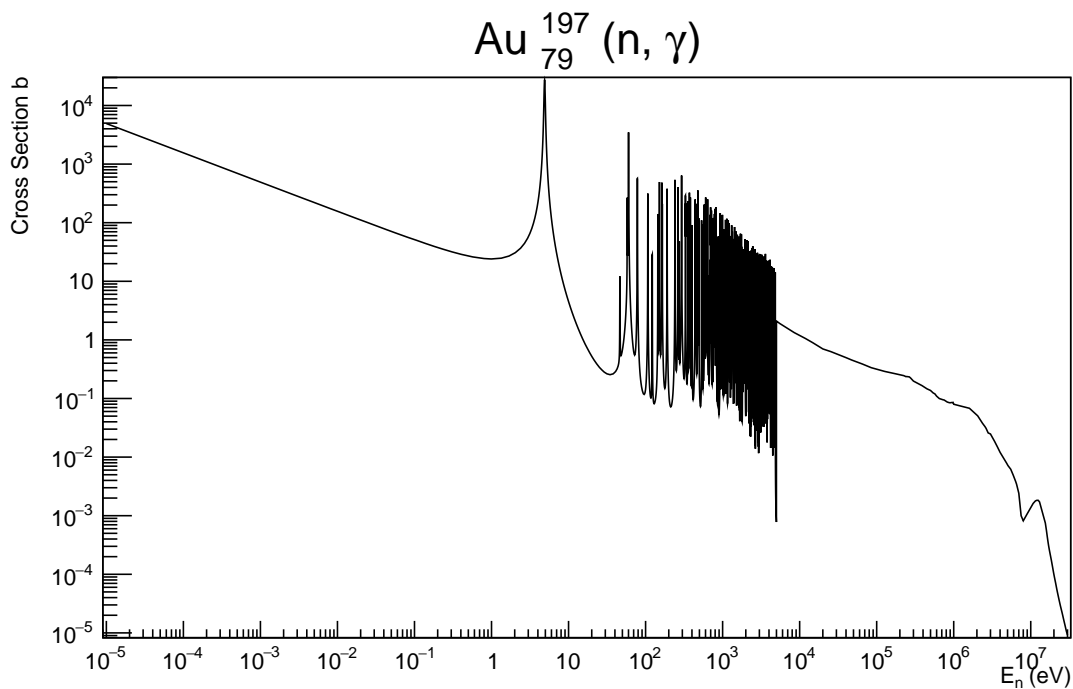


Рис. 4.4: Залежність захоплення нейтрона від енергії нейтронів в реакції $Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$

Au^{198} - ізоотп, має 2 - рівні в результаті розпаду з яких випромінюється гамма кванти, $T_{1/2} = 2.6$ днів. На Рис. 6.3 зображено 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 випромінення γ -кванту $E_\gamma = 1087 keV$, каскадний перехід є основним с способом переходу на стабільний рівень Hg^{198} , відбувається з випромінення двох γ -квантів $E_\gamma = 675 keV$ та $E_\gamma = 411 keV$.

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

E_n , eV	E_γ , кеВ	ΔE_γ , кеВ	$I_\gamma/100_n$	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 реакції $^{64}Cu(n, \gamma)Cu^{65}$ переріз захоплення теплового нейтрона $\sigma = 2.1 \times 10^3 \pm 1.9 \times 10^3$ барн. ^{65}Cu - стабільний елемент. $^{65}Cu(n, \gamma)Cu^{66}$. Для данного ізотопу спостерігається існування резонансної області в діапазоні десятків кеВ Рис. 4.5. ^{66}Cu - не стабільний ізотоп, якому притаманний β^- розпад в ^{66}Zn , $T_{1/2} = 5.12$ хвилин. ^{66}Zn - стабільний ізотоп з основним рівнем $J\pi$ 0+. β^- - розпад ^{66}Cu в основному відбувається у стабільний стан, але є ймовірність розпаду на $J\pi$ 1+ рівень, з подальшим випромінювання γ - кванту з енергією $E_\gamma = 1039 keV$. Рис. 6.4

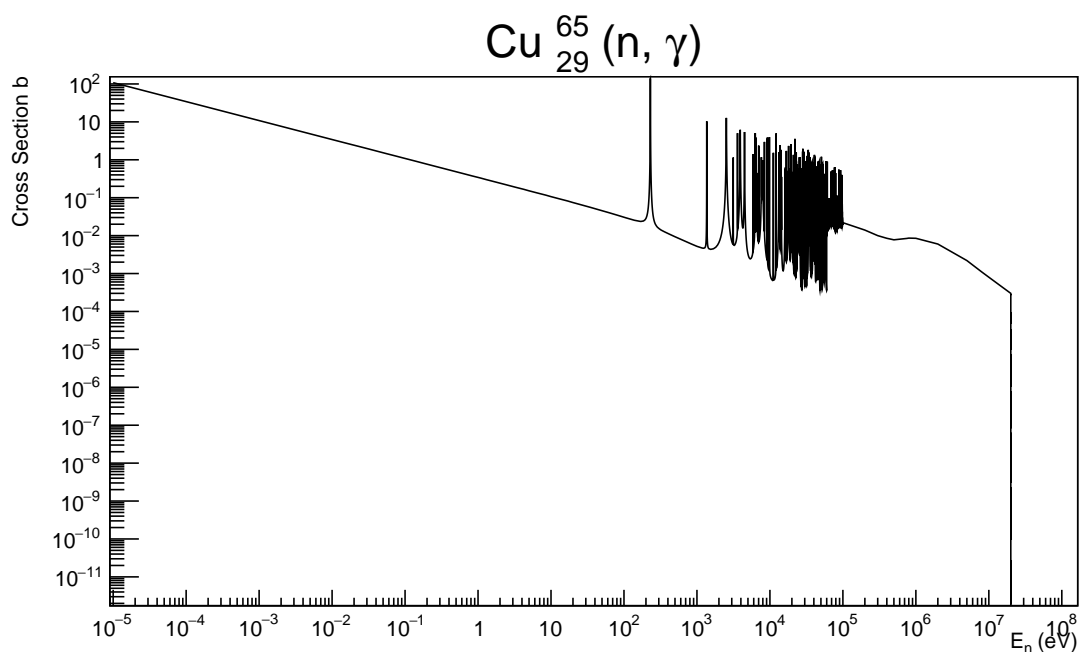


Рис. 4.5: Залежність захоплення нейтрона від енергії нейтронів в реакції $\text{Cu}^{65}(n, \gamma)\text{Cu}^{66}$

4.4 Аналіз спектрів Ag_3AuS_2

Виконано аналіз можливості детектування ютенбогартита Ag_3AuS_2 - Родовища з даними мінералами були знайдені на Камчатці поблизу узбережжя. Данний мінерал відноситься до рідкісних золотоносних руд, зустрічається в природі у твердому стані. Був знайдений на Камчатських родовищах. Рис. 4.6 Даний спектр і фон були набрані при опроміненні нейтронами з джерела максимальної енергією 14.1 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. Для того щоб проаналізувати залежність можливості використання ізотопних джерел був набраний спектор, за енергій нейтронів 2.8 MeV Рис. 6.2

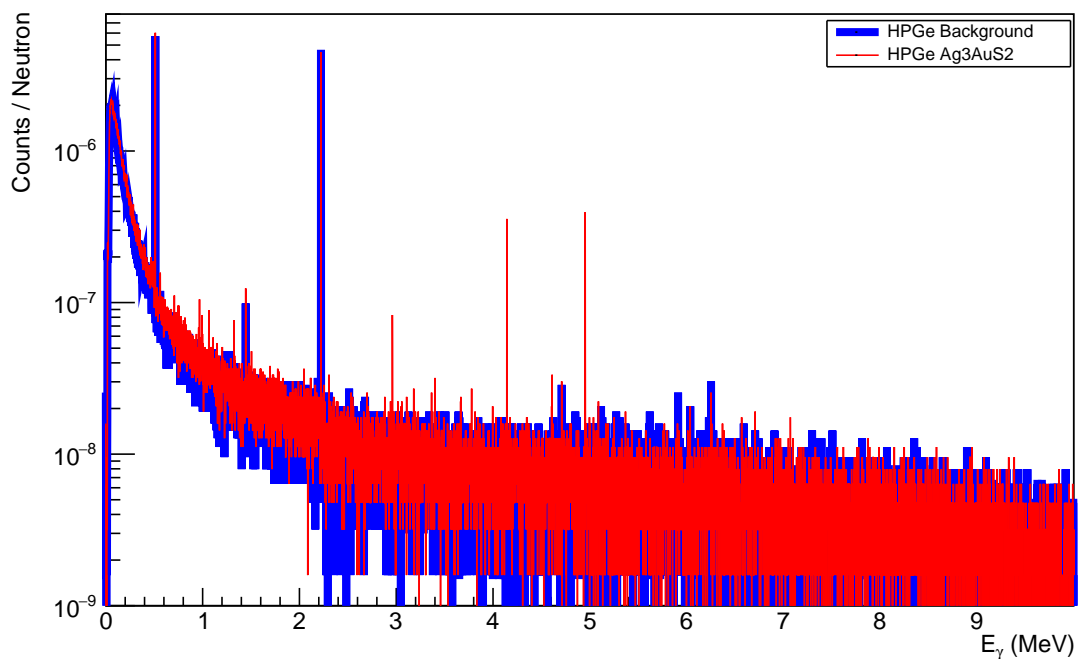


Рис. 4.6: Червоним - представлений спектр для Ag_3AuS_2 . Синім - фону

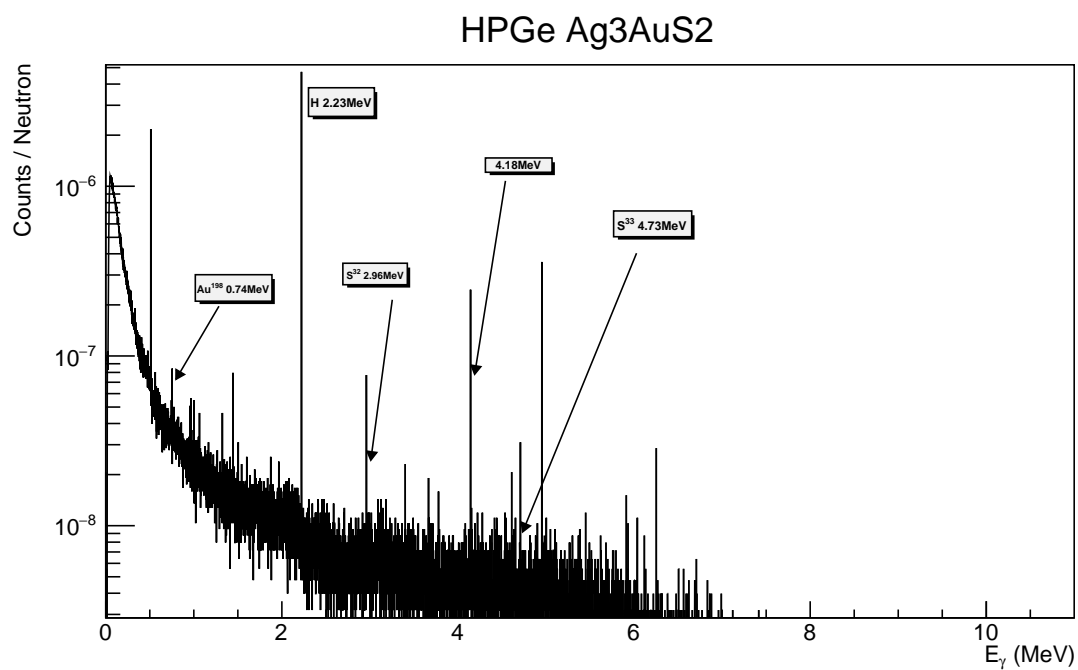


Рис. 4.7: Спектр Ag_3AuS_2 , $E_n = 8.5 MeV$ - енергія нейтронів з джерела

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

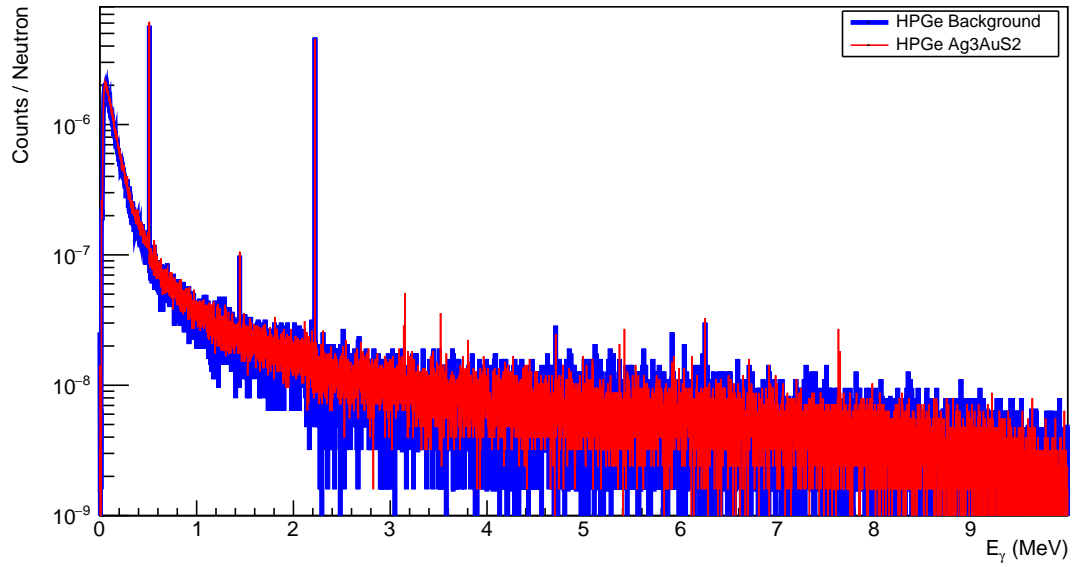


Рис. 4.8: Червоним - представлений спектр для $CuFeS_2$. Синім - фону

4.6 Аналіз спектру U^{238}

Було обрано збіднений уран, з наступним ізотопним складом 99.27%— ^{238}U , 0.72%— ^{235}U , 0.005%— ^{234}U , У ході набору було отримано наступний спектр Рис. 4.9

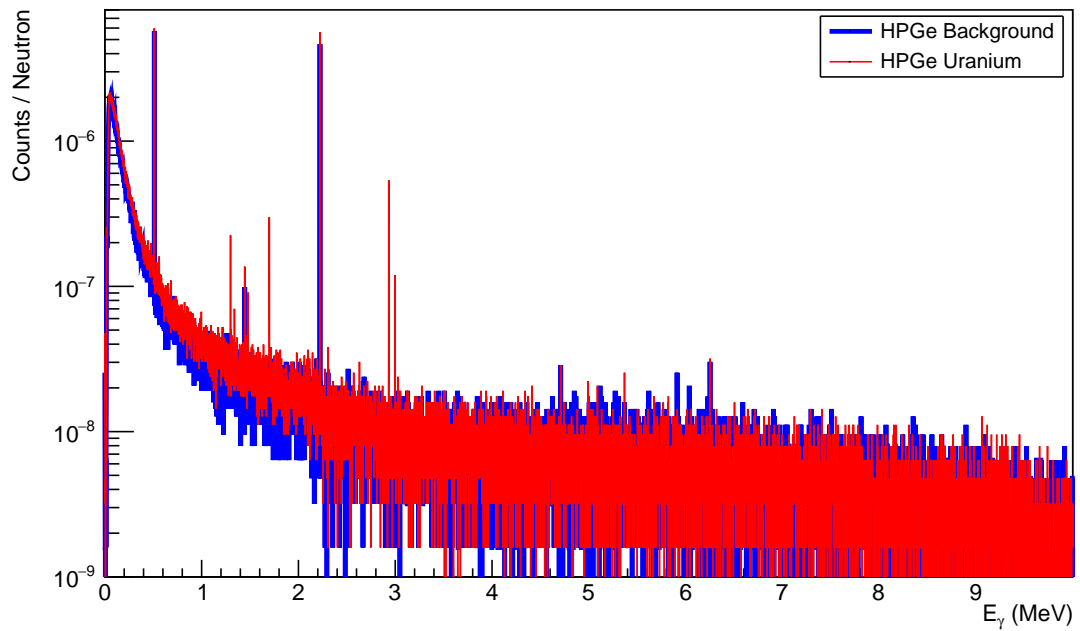


Рис. 4.9: Червоним - представлений спектр для U^{238} . Синім - фону

4.7 Оцінка потужності джерела

Для усіх представлених спектрів з енергіями нейтронів 14.1 MeV, було проведено моделювання для 314 мільйонів частинок, розрахунок проводиться за наступною формулою $4\pi n = N$, де $n = 25 \times 10^6$ частинок. Нейтронний генератор який розміщений кафедрі генерує 10^9 нейтронів в секунду.

5 Висновки

Метою даної роботи було створення моделі для детектування елементів що входять до складу корисних копалин на дні океану, та її валідація.

Для роботи було обрано ряд матеріалів, що входять до складу металічних руд.

Для кожного з даних матеріалів були набрані та проаналізовані спектри, та встановленні значення інтенсивності відносно фону.

Модель успішно пройшла валідацію.

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

На даному етапі було проведено перевірку використання даної моделі для обмеженої кількості речовин.

Встановлена відстань від джерела нейтронів до досліджуваної речовини може варіювати і бути більшою за 30 см. при енергіях нейтронів 14.1 MeV.

6 Додатки

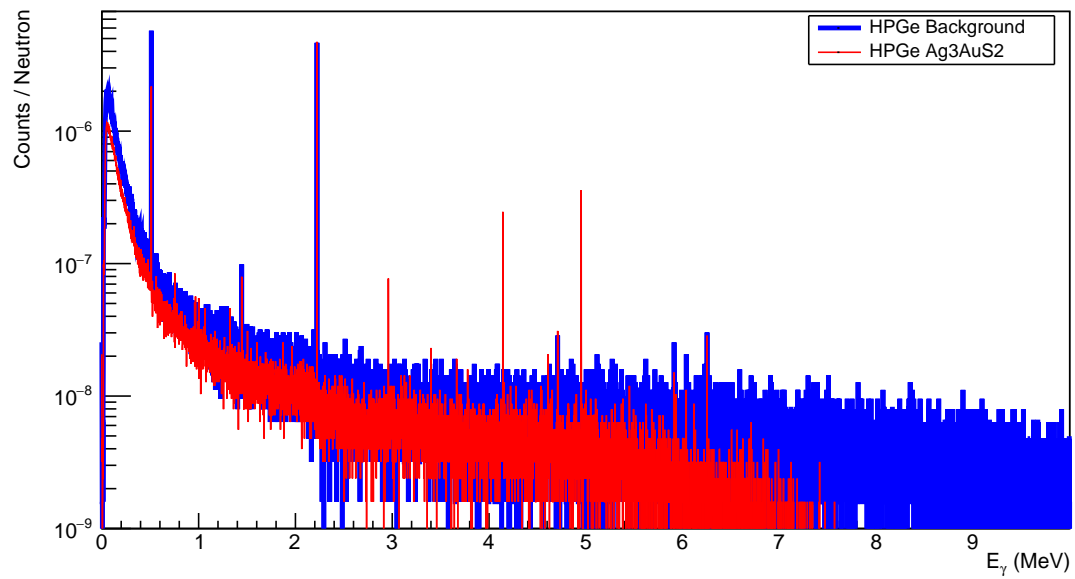


Рис. 6.1: Червона - лінія спектру, набраного за опромінення нейтронами 8.5 MeV

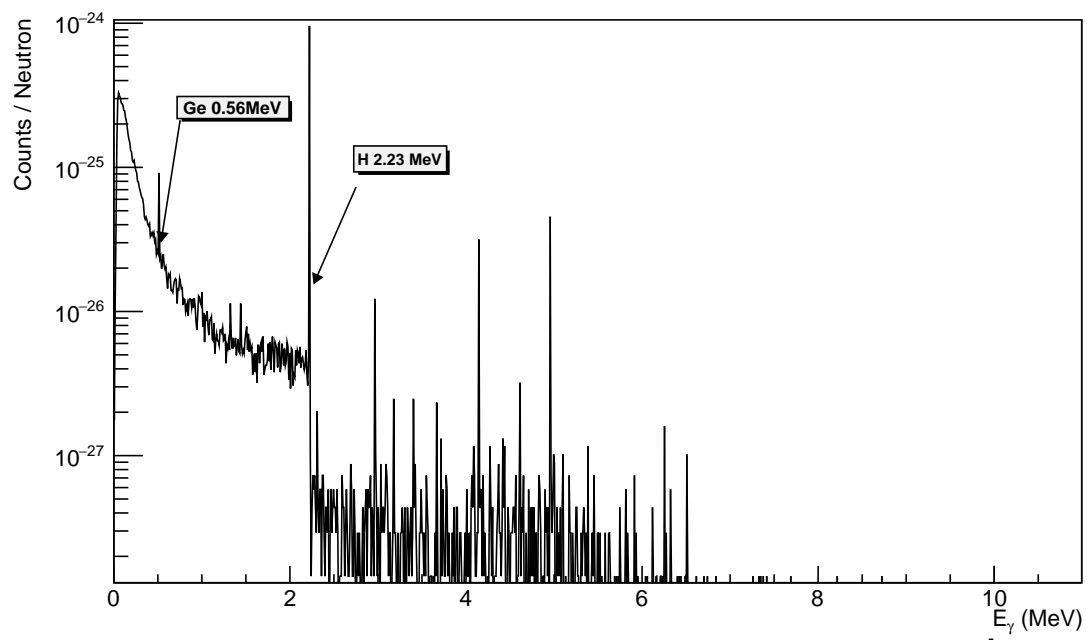


Рис. 6.2: Червона - лінія спектру, набраного за опромінення нейтронами 8.5 MeV

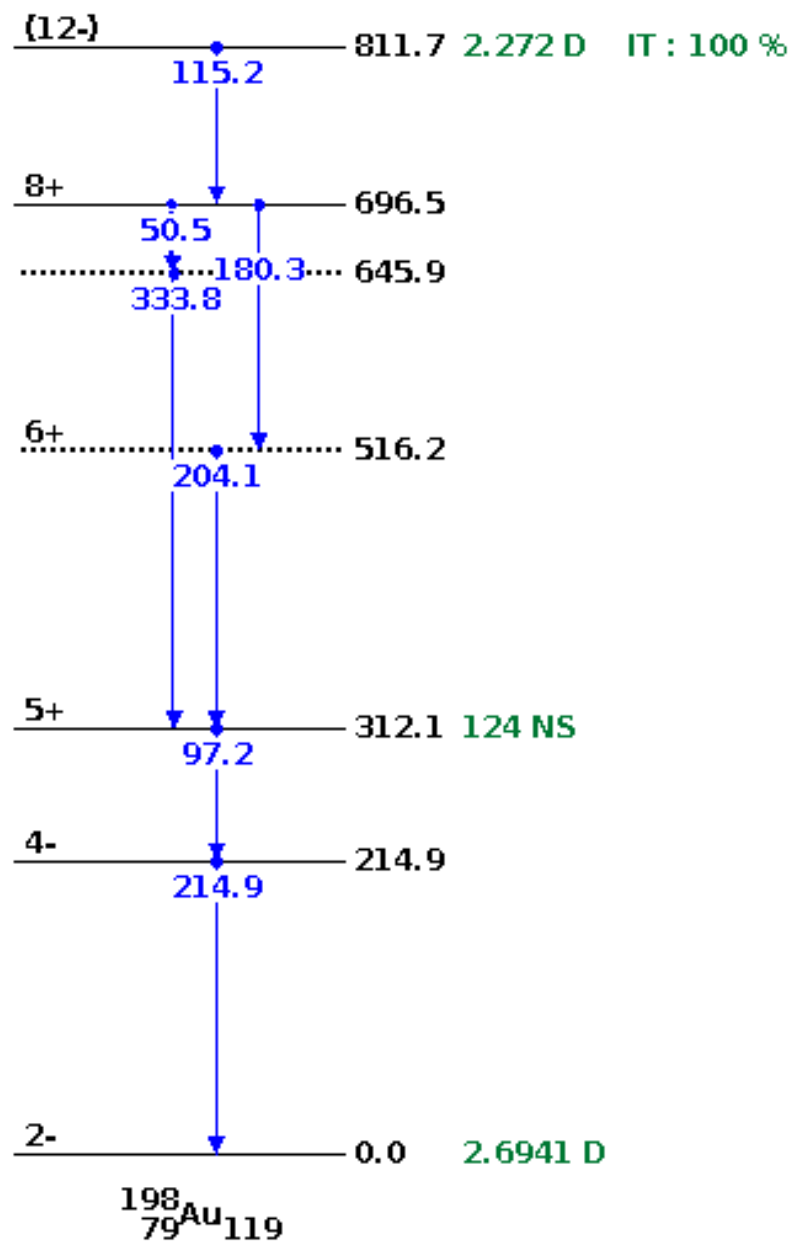


Рис. 6.3: Au^{198} Рівень $J\pi 12-$

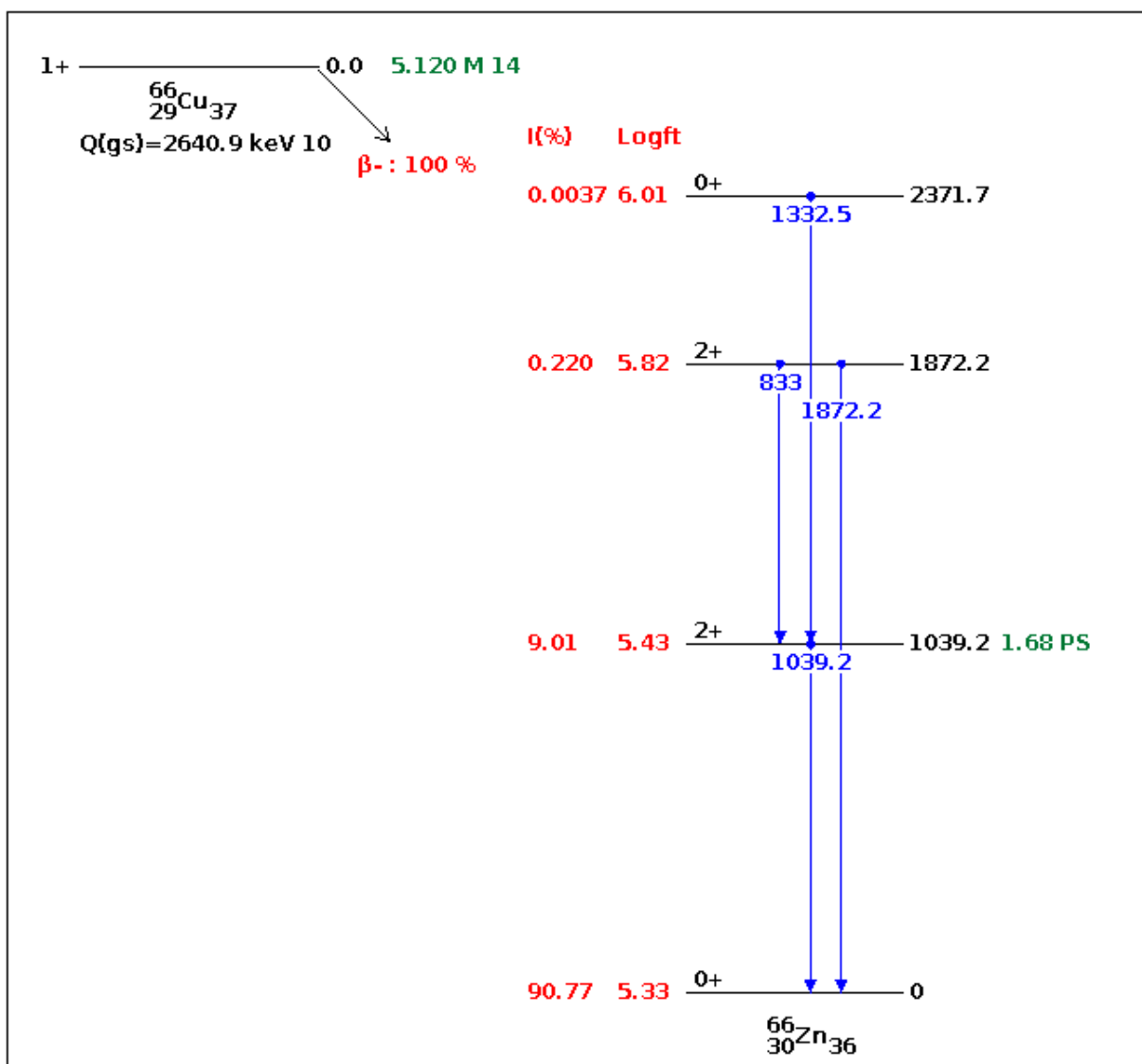


Рис. 6.4: $\text{Cu}_{29}^{66}(\beta^- \tilde{\nu})\text{Zn}_{30}^{66}$ Схема розпаду та збудженні рівні Zn^{66}

Література

- [1] *M. Silarski, P. Sibczyński, Sz. Niedźwiecki, S. Sharma, J. Raj, P. Moskal Institute of Physics, Jagiellonian University, Lojasiewicza 11, 30-348 Kraków, Poland, National Centre for Nuclear Research, Sołtana 7, 05-400 Otwock, Poland* Underwater detection of dangerous substances: status the SABAT project
- [2] *R.M. Keyser and T.R. Twomey* - Extended Source Sensitivity and Resolution Comparisons of Several HPGe Detector Types with Low-energy Capabilities
- [3] *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
- [4] *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 $Ag_3Au(Se, S)_2$
- [5] *В. М. Округин¹, А. У. Ким* О рудах Асачинского золото-серебряного месторождения (Южная Камчатка)
- [6] *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»
- [7] *Experimental Nuclear Reaction Data*

- [8] *O. A. Wasson, R. E. Chrien, M. R. Bhat, M. A. Lone, and M. Beer*
 $Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$ Reaction Mechanism
- [9] *I.A.Kondurov, A.I.Egorov, M.Kaminker, E.M.Korotkikh, A.M.Nikitin*
Neutron capture cross sections measurements for Co58m, Cu64, and Sc46
- [10] *Geant4 Collaboration* Book For Application Developers Release 10.3
- [11] *Alexander Howard, Gunter Folger, Jose Manuel Quesada, Vladimir Ivanchenko* Validation of Neutrons in Geant4 Using TARC Data - production, interaction and transportation
- [12] *Héctor René, Vega-Carrillo Celia, Torres-Muñech, Universidad Autónoma de Zacatecas* Low energy neutrons from a $^{239}\text{PuBe}$ isotopic neutron source inserted in moderating media
- [13] *Посилання на українську асоціацію Римського Клубу*