КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА **ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет

Кафедра ядерної фізики

На правах рукопису

**«Вивчення можливості використання нейтроно активаційного аналізу для пошуку небезпечних речовин на морському дні»**

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

**Освітня програма** – Фізика

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

**Спеціалізація** – фізика високих енергій

Бакалаврська робота

Студента 4 року навчання

Муляра Андрій Васильовича

Науковий керівник

Доцент Єрмоленко Р.В.

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

Зав. кафедри ядерної фізики Каденко І.М

Київ, 2020

Зміст

[Нейтронно активаційний аналіз(NAA) 2](#_Toc33396619)

[Огляд 3](#_Toc33396620)

[Варіації 5](#_Toc33396621)

[Джерело нейтронів 6](#_Toc33396622)

[Детектори 7](#_Toc33396623)

[Аналітичні можливості 9](#_Toc33396624)

[Резюме 10](#_Toc33396625)

[Geant4 11](#_Toc33396626)

[Можливості 11](#_Toc33396627)

# Нейтронно активаційний аналіз(NAA)

Нейтронно активаційний аналіз (НАА) – це ядерний процес, що використовується для визначення концентрації елементів у величезній кількості матеріалів. НАА дозволяє дискретно відбирати елементи, оскільки не враховує хімічну форму зразка і зосереджується виключно на його ядрі. Даний метод заснований на активації нейтронів і тому вимагає джерела нейтронів. Зразок бомбардується нейтронами, внаслідок чого елементи утворюють радіоактивні ізотопи. Радіоактивне випромінювання та радіоактивний розпад добре відомі для кожного елемента. Використовуючи цю інформацію, можна вивчити спектри випромінювання радіоактивного зразка та визначити концентрації елементів всередині нього. Особливою перевагою цього методу є те, що він не руйнує зразок, а тривалість наведеної радіації зазвичай становить від декількох наносекунд до годин. Метод використовується для аналізу творів мистецтва та історичних артефактів. НАА також може бути використаний для визначення активності радіоактивних зразків та дорогоцінних металів у рудах.

Якщо НАА проводиться безпосередньо на опромінених зразках, то має назву Інструментальний нейтронно-активаційний аналіз (ІННА). У деяких випадках опромінені зразки підлягають хімічному розділенню для видалення перешкод або зосередження радіоактивних ізотопів, ця техніка відома як Радіохімічний нейтронно-активаційний аналіз (РНАА).

NAA може проводити неруйнівні аналізи на тверді речовини, рідини, суспензії та гази без жодної або мінімальної підготовки. Завдяки проникаючому характеру падаючих нейтронів та результуючих гамма-променів, методика забезпечує справжній об'ємний аналіз. Оскільки різні радіоізотопи мають різний період напірозпаду, підрахунок може бути відкладений, щоб дозволити перешкоджати видам розпаду, усуваючи перешкоди. До впровадження ICP-AES та PIXE, НАА був стандартним аналітичним методом для виконання багатоелементного аналізу з мінімальними межами виявлення у суб-промільному діапазоні. Точність NAA знаходиться в області 5%, а відносна точність часто краща за 0,1%. Є два вагомі недоліки використання NAA:

1. незважаючи на те, що методика по суті не руйнує, опромінений зразок залишатиметься радіоактивним протягом багатьох років після первинного аналізу, вимагаючи протоколів поводження та утилізації радіоактивних матеріалів низького та середнього рівня;
2. також зменшується кількість відповідних активаційних ядерних реакторів; при нестачі засобів опромінення техніка знизилася в популярності і стала дорожчою.

## Огляд

Нейтроно активаційний аналіз є чутливий багатоелементний аналітичний прийом, який використовується як для якісного, так і кількісного аналізу практично всіх елементів. NAA було відкрито в 1936 році Гевесі та Леві, які виявили, що зразки, що містять певні рідкісноземельні елементи, стали високо радіоактивними після впливу джерела нейтронів. Це спостереження привело до використання наведеної радіоактивності для ідентифікації елементів. NAA значно відрізняється від інших спектроскопічних аналітичних методів тим, що заснований не на електронних переходах, а на ядерних переходах. Для проведення аналізу NAA зразок поміщають у відповідний опромінювальний заклад та обстрілюють нейтронами. Це створює штучні радіоізотопи присутніх елементів. Для проведення аналізу НАА зразок поміщають у придатний для цього об'єкт опромінення та бомбардують нейтронами. Це створює штучні радіоізотопи елементів, наявних в об'єкті. Після опромінення, штучні радіоактивні ізотопи розпадаються з випромінюванням частинок або, що ще важливіше, гамма-променів, характерних для елемента, з якого вони випромінювались.

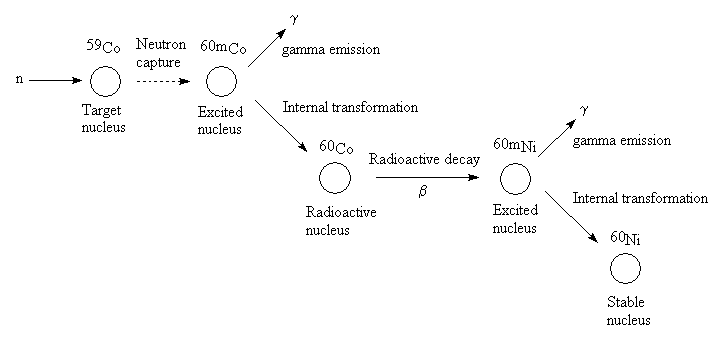
Щоб процедура NAA була успішною, зразок повинні бути ретельно відібрані. У багатьох випадках дрібні предмети можуть бути опромінені та проаналізовані неушкодженими без необхідності відбору проб. Але, частіше, береться невеликий зразок, як правило, бурінням в непомітному місці. Близько 50 мг (одна двадцята грам) є достатньою пробою, тому шкода предмету зводиться до мінімуму. Часто вдалою практикою є видалення двох зразків за допомогою двох різних свердел, виготовлених з різних матеріалів. Це дозволить виявити будь-яке забруднення зразка з самого бурового матеріалу. Потім зразок поміщають у флакон, зроблений з лінійного поліетилену або кварцу високої чистоти. Дані флакони для зразків випускаються у багатьох формах і розмірах для розміщення багатьох зразків. Потім зразок і еталон упаковують і опромінюють у відповідному реакторі при постійному, відомому потоці нейтронів. Типовий реактор, що використовується для активації, використовує поділ урану, забезпечуючи високий потік нейтронів і найбільшу доступну чутливість для більшості елементів. Потік нейтронів з такого реактора знаходиться в порядку 1012 нейтронів см-2 с-1. Тип нейтронів, що утворюються, мають відносно низьку кінетичну енергію (КЕ), як правило, менше 0,5 еВ. Ці нейтрони називають тепловими нейтронами. При опроміненні теплові нейтрони взаємодіють з ядром мішені за допомогою непружних зіткнень, внаслідок чого відбувається захоплення нейтронів. Це зіткнення утворює складене ядро в збудженому стані. Збуджений стан є нестабільним і складене ядро майже миттєво переходить у стабільнішу конфігурацію шляхом емісії частинок та одного або кількох швидких гамма-фотонів. У більшості випадків стабільніша конфігурація дає радіоактивне ядро. Новоутворене радіоактивне ядро розпадається на дві частинки та один або більше гамма-фотон. цей процес розпаду є набагато повільнішим, ніж початкове збудження та залежить від індивідуального періоду напіврозпаду радіоактивного ядра. Період напіврозпаду залежить від конкретних радіоактивних ізотопів і може варіюватися від часток секунди до декількох років. Зразок, що залишився після опромінення поміщають у детектор, який вимірює подальший розпад відповідно з випромінюванням частинок або гамма-променів.

## Варіації

NAA може змінюватися залежно від ряду експериментальних параметрів. Кінетична енергія нейтронів, що використовуються для опромінення, буде головним експериментальним параметром. Вищеописаний опис стосується активації повільними нейтронами, повільні нейтрони повністю модеруються в реакторі і мають КЕ <0,5 еВ. Середні КЕ нейтрони також можуть використовуватися для активації, ці нейтрони були лише частково модеровані і мають КЕ від 0,5 еВ до 0,5 МеВ, і називаються епітермальними нейтронами. Активація епітермальними нейтронами відома як Епітермальна НАА (ENAA). Для активації іноді використовують високі нейтрони КЕ, ці нейтрони модеруються і складаються з первинних нейтронів поділу. Високі КЕ або швидкі нейтрони мають КЕ> 0,5 МеВ. Активацію швидкими нейтронами називають швидкою НАА (FNAA). Іншим важливим експериментальним параметром є те, чи вимірюються продукти ядерного розпаду (гамма-промені або частинки) під час нейтронного опромінення (швидка гамма) або через деякий час після опромінення (затримка гамма, DGNAA). ПГНАА, як правило, виконується з використанням потоку нейтронів, відведеного від ядерного реактора через промінь порту. Потоки нейтронів з пучкових портів на порядок в 106 разів слабкіші, ніж всередині реактора. Це дещо компенсується, розміщуючи детектор дуже близько до зразка, зменшуючи втрати чутливості через низький потік. PGNAA зазвичай застосовується до:

1. елементів із надзвичайно високими перерізами захоплення нейтронів; елементи, які занадто швидко розпадаються, щоб їх вимірювати DGNAA;
2. елементи, що продукують лише стійкі ізотопи;
3. або елементи зі слабкою інтенсивністю розпадів гамма-променів.

PGNAA характеризується коротким часом опромінення і коротким часом занепаду, часто в порядку секунд і хвилин. DGNAA застосовна до переважної більшості елементів, що утворюють штучні радіоізотопи. Генеральні аналізи часто проводяться протягом днів, тижнів або навіть місяців. Це покращує чутливість для довгоживучих радіонуклідів, оскільки дає можливість короткочасним радіонуклідом розпадатись, ефективно усуваючи перешкоди. Для DGNAA характерні тривалий час опромінення і тривалий час занепаду, часто в порядку годин, тижнів і довше.



## Джерело нейтронів

Для отримання нейтронів можна використати різні джерела:

* Реактори.

Деякі реактори використовуються для нейтронного опромінення зразків при виробництві радіоізотопів для різних цілей. Зразок для опромінення може бути поміщений в контейнер, який потім поміщають в реактор. Якщо немає епітеплових нейтронів, необхідних для опромінення, то Кадмій може бути використаний для фільтрації теплових нейтронів.

* Фузор.

Порівняно простий фузор Фарнсворта – Гірша може бути використаний для отримання нейтронів для експериментів з НАА. Переваги цього апарату полягають у тому, що він є компактним, часто розміром на стільниці та що його можна просто вимкнути та увімкнути. Недоліком є ​​те, що цей тип джерела не виробляє потік нейтронів, який можна отримати за допомогою реактора.

* Актиноїди, такі як каліфорній, який випускає нейтрони через спонтанне ділення.
* Альфа-джерела, наприклад, радій або америцій, змішане з берилієм, це генерує нейтрони реакцією  (α,12C+n).
* Реакція термоядерного синтезу в газорозрядній трубці.

Вони можуть бути використані для створення імпульсів нейтронів, їх використовували для деяких активаційних робіт, де розпад цільового ізотопу відбувається дуже швидко. Наприклад, у нафтових свердловинах.

* Ізотопні джерела.

Для багатьох робітників на місцях реактор є надто дорогим предметом, натомість зазвичай використовується джерело нейтронів, яке використовує комбінацію альфа-випромінювача та берилію. Ці джерела, як правило, значно слабкіші, ніж реактори.

## Детектори

Існує ціла низка детекторів, що використовуються в НАА. Більшість з них призначені для виявлення випущеного гамма-випромінювання. Найбільш поширені типи детекторів: газ-іонізуючі, сцинтиляційні та напівпровідникові. Серед них сцинтиляційні та напівпровідникові є найбільш поширеними. існує також два типи детекторів, з різною конфігурацією: плоскі детектори, використовувані для ШНАА, і детектори для ЗНАА. Плоский детектор має велику площу поверхні і може бути розміщений близько до зразка.

Сцинтиляційний тип детекторів використовує радіаційно-чутливі кристали, частіше за все, леговані йодидом натрію або талію (NaI(Tl)), який випромінює світло при попаданні на нього гамма-фотонів. Такі детектори мають високу чутливість, стабільність, і пристойну роздільність.

Для напівпровідникових детекторах використовують напівпровідниковий елемент Германій. Германій обробляють, для того щоб сформувати контактний (позитивно-негативний) діод, і при охолодженні до ~ 77 К за допомогою рідкого нітрогену для зменшення темнового струму і шуму детектора, виробляється сигнал, пропорційний енергії фотонів падаючого випромінювання. Існує два типи детекторів з германію — літій-плаваючий Ge(Li), і з високочистого германію HPGe (від англ. high purity — висока чистота). Для напівпровідникових детекторів можна використати також Кремній, але германій є найкращим, оскільки розмір його атома більший ніж розмір атома кремнію, що робить германій більш ефективним при виявленні гамма-променів високої енергії. Обидва детектори — Ge(Li) і HPGe мають високу чутливість та роздільність, але Ge(Li) детектор нестабільний при кімнатній температурі. Розвиток виробництва германію високої чистоти допоможе подолати цю проблему.

Детектори також можуть бути використані для виявлення випромінювання альфа (α) й бета (β) частинок, які часто супроводжують випромінювання гамма-фотонів. Детектування (α) і (β) частинок є менш сприятливим, оскільки вони випускаються лише від поверхні зразка та часто поглинаються або послаблюються атмосферними газами, і вимагають дорогого вакуумного устаткування для ефективного виявлення. Гамма-промені, однак, не поглинаються і не послаблюються атмосферними газами, і також можуть ховатися в глибині зразка з мінімальним поглинанням.

## Аналітичні можливості

NAA може виявити до 74 елементів залежно від експериментальної процедури, при цьому мінімальні межі виявлення становлять від 0,1 до 106 нг н-1 в залежності від досліджуваного елемента. Важкі елементи мають більші ядра, тому вони мають більший перетин захоплення нейтронів і, швидше за все, активуються. Деякі ядра можуть захоплювати ряд нейтронів і залишатися відносно стабільними, не зазнаючи трансмутації або розпаду протягом багатьох місяців і навіть років. Інші ядра розпадаються миттєво або утворюють лише стійкі ізотопи і їх можна ідентифікувати лише за допомогою PGNAA.

|  |  |
| --- | --- |
| Розрахункові межі виявлення INAA за допомогою гамма-випромінювань, що розпадаються (припускаючи опромінення в потоці нейтронів реактори 1013 n см-2 с-1 ) | |
| Чутливість (пікограм) | Елементи |
| 1 | Dy, Eu |
| 1 – 10 | In, Lu, Mn |
| 10 – 100 | Au, Ho, Ir, Re, Sm, W |
| 100 – 1000 | Ag, Ar, As, Br, Cl, Co, Cs, Cu, Er, Ga, Hf, I, La, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, Yb |
| 1000 – 104 | Al, Ba, Cd, Ce, Cr, Hg, Kr, Gd, Ge, Mo, Na, Nd, Ni, Os, Pd, Rb, Rh, Ru, Sr, Te, Zn, Zr |
| 104 – 105 | Bi, Ca, K, Mg, P, Pt, Si, Sn, Ti, Tl, Xe, Y |
| 105 – 106 | F, Fe, Nb, Ne |
| 107 | Pb, S |

## Резюме

Нейтроно активаційний метод має широкий спектр застосувань, включаючи сфери археології, ґрунтознавства, геології, криміналістики та напівпровідникової галузі.

Археологи використовують NAA для визначення елементів, які містять певні артефакти. Цей прийом використовується, оскільки він не руйнує, і він може пов’язати артефакт зі своїм джерелом за своїм хімічним підписом. Цей метод виявився дуже успішним у визначенні торгових шляхів, особливо для обсидіану, із здатністю NAA розрізняти хімічні композиції. У сільськогосподарських процесах на рух добрив і пестицидів впливає поверхневий і надповерховий рух, оскільки він проникає у запаси води. Для відстеження розподілу добрив та пестицидів використовуються бромідні іони в різних формах як відсліджувачі, які вільно рухаються потоком води, маючи мінімальну взаємодію з ґрунтом. Аналіз активації нейтрону використовується для вимірювання броміду, щоб екстракція не була необхідною для аналізу. NAA використовується в геології для допомоги у дослідженні процесів, що утворювали гірські породи, шляхом аналізу рідкоземельних елементів та мікроелементів. Він також допомагає знаходити рудні родовища та відстежувати певні елементи. Аналіз активації нейтронів також використовується для створення стандартів у напівпровідниковій галузі. Напівпровідники вимагають високого рівня чистоти, при цьому забруднення значно знижує якість напівпровідника. NAA використовується для виявлення домішок слідів та встановлення стандартів забруднення, оскільки це включає обмежену обробку зразків та високу чутливість.

# Geant4

Geant4 – система бібліотек програм, призначених для симуляції проходження елементарних частинок крізь речовину за допомогою методу Монте – Карло. Geant4 є наступником серії Geant, розробленої в CERN і є першою, яка використовує об’єктно – орієнтоване програмування С++. Розробку бібліотеки, її супровід та підтримку користувачів проводить міжнародна спільнота.

Сфера застосування Geant4 – фізика елементарних частинок, ядерні реакції, медицина та фізика космічної плазми, дослідження на прискорювачах. Бібліотека використовується у великій кількості дослідницьких проектів по всьому світу. Програмне забезпечення системи та її джерельний код знаходяться у вільному доступу на сайті проекту.

## Можливості

Geant4 включає в себе можливості для роботи з геометричними властивостями систем, відстеження треків частинок та відгуку детектора, керування запуском, візуалізація та організація інтерфейсу користувача.

Геометрія – аналіз схеми розміщення експерименту, в тому числі детектора, поглиначів тощо, беручи до уваги, як ця схема впливатиме на траєкторії частинок в експеременті.

Трекінг (відстежування треків) – симуляції проходження частинок крізь матерію. Це передбачає врахування можливих взаємодій і процесів радіоактивного розпаду.

Керування запусками – запис протоколів кожного «запуска» (набору подій) та налаштування різних конфігурацій експерименту між запусками.

Візуалізація та інтерфейс користувача забезпечуються рядом можливостей, включно з OpenGL.

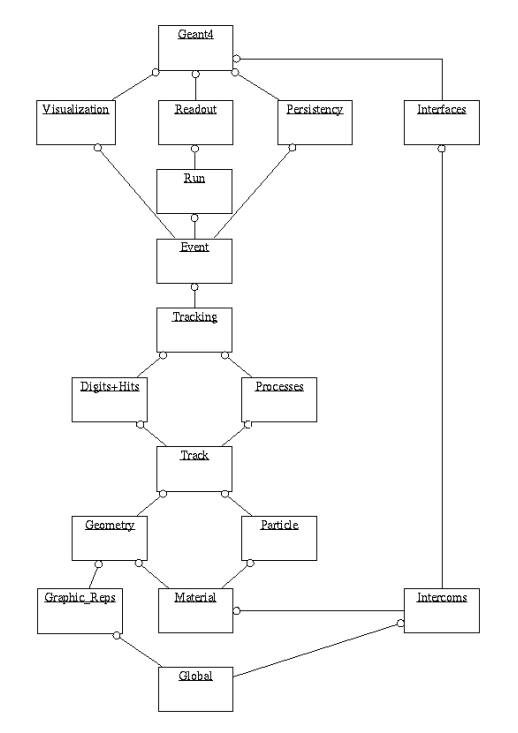
Також Geant4 має базові можливості ля побудови гістограм. Для реалізації розширених можливостей аналізу даних він вимагає зовнішнього програмного забезпечення, яке підтримує абстракний інтерфейс аналізу даних. Починаючи з версії 10.0 бібліотека також підтримує багатопотоковість, даючи можливість використання локальної пам’яті ниток для організації ефективної паралельної симуляції подій.

Використовують у: BaBAR, GLAST, SLAC, ATLAS, CMS, LHCb, CERN, MINOS та інші.

Оскільки по своїй природі Geant4 є бібліотекою загального призначення, вона добре підходить для створення обчислювальних систем аналізу взаємодії частинок та матерії у багатьох сферах застосування. Зокрема це:

* Космічні застосування, де Geant4 використовується для аналізу взаємодії космічного випромінювання і космічної техніки та космонавтів
* Медицина, де проводиться симуляція взаємодії випромінювань, що використовуються для лікування
* Радіаційні ефекти у мікроелектроніці, де моделюються іонізаційні ефекти у напівпровідниках
* Ядерна фізика

|  |  |
| --- | --- |
| **Основні поняття** | **Опис** |
| Сеанс (Run)  Представлений класом G4Run | Період набора статистики в якому не міняються умови проведення експерименту. |
| Подія (Event)  Представлений класом G4Event | Одиничне незалежна вимірювання фізичного явища детектором. |
| Шаг (Step)  Представлений класом G4Step | Описує мінімальне проходження частинки через речовину з урахування різний фізичний процесів |
| Трек (Track)  Представлений класом G4Track | Клас вміщує інформацію про останній шаг, описує повний шлях частинки в речовині до моменту звернення |
| Спрацьовування (Hit) | Описує одиничну взаємодію частинки з речовиною в детектуючому об’ємі. |
| Оцифрований сигнал (Digi) | Моделюється на основі спрацьовувань і вміщує інформацію у вигляді «канал-сигнал» |



іііііі