

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Моделювання модернізованої методики гамма-нейтронної
спектрометрії з використанням супутніх альфа-частинок**

Галузь знань: 10

Спеціальність: 104

Освітня програма:

Кваліфікаційна робота бакалавра

4 б

Науковий керівник:

.....

, No 17 16.06. 2022 .



б 2022

ВИТЯГ

,

_____.

«____» _____ 2022

Анотація

Сластьон Є.П. Моделювання модернізованої методики гамма-нейтронної спектрометрії з використанням супутніх альфа-частинок

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики. Київ – 2022.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент

БЕЗШИЙКО О.А., доцент кафедри ядерної фізики

В наш час системи неруйнівного контролю відіграють важливу роль. В даній роботі розглянуто спосіб визначення ізотопного складу зразка на основі взаємодії з ним нейтронів з енергією 14 МеВ. Обґрунтовано використання технології супутніх альфа-частинок для цього методу.

Ключові слова: нейтрон, супутня частинка, YAP, генератор.

Summary

Slaston Y.P. Simulation of enhanced method of gamma-neutron spectrometry with associate alpha particles. Bachelor's qualification in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «Physics». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Nuclear Physics Department. – Kyiv. – 2022.

Research supervisor: candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate

Professor BEZSHYYKO O.A., Associate Professor of Nuclear Physics Department

Nowadays, non-destructive control systems play an important role. In this work, I consider a method for determining the isotopic composition of a sample based on the interaction of neutrons with an energy of 14 MeV with the investigated sample. Also the usage of associated alpha particle technologies for this method was substantiated.

Keywords: neutron, associated particle, YAP, generator

Зміст

Вступ	3
Geant4	5
Вступ	5
Історія.....	5
Опис архітектури	6
Метод Монте-Карло	8
Багатопіксельні детектори	11
Вступ	11
Сцинтиляційні волоконні детектори.....	11
SMSD.....	12
Використання супутніх альфа-частинок	14
Візуалізація на основі вимушеного поділу	14
Детектування ^{12}C	16
Поєднання гамма-спектрометрії з методом супутніх частинок.....	18
Висновки	20
Список джерел	21

Вступ

У наш час технологія неруйнівного контролю відіграє важливу роль в науці та інженерії. Вивчення ізотопного складу ядерного матеріалу, розпізнавання заборонених речовин при проходженні контролю, роботи з пошуку боєприпасів та розмінування, виявлення затонулих цистерн з небезпечними речовинами, знаходження покладів нафти – ось лише декілька прикладів використання методики неруйнівного контролю. Однією з таких методик є гамма-нейтронна спектрометрія з використанням супутніх альфа-частинок. Джерелом нейтронів у цьому випадку є дейтерій-тритієвий генератор. Енергія нейтронів для такої реакції становить 14 МеВ, що достатньо для того, щоб відбулося непружне розсіяння нейтрона на ядрі, і після переходу ядра у стан з нижчою енергією вилетів гамма-квант, який і буде характеризувати склад ядра-мішені. При реакції альфа-частинка і нейтрон розлітаються у протилежних напрямках, що дозволяє застосувати дану методику. Оскільки пробіг альфа-частинок в твердій речовині є дуже малий, то детектор альфа-частинок потрібно розташовувати всередині герметичної трубки реактора. Детектор фіксує місце потрапляння альфа-частинки та час, і, опираючись на ці дані, а також на геометрію установки, визначається напрямок вильоту нейтрона. Знаючи час детектування альфа-частинки, ми можемо зробити прив'язку до гамма-кванта, який зареєструється спектрометром. Як наслідок, ми можемо відсіювати фонові сигнали, та оцінити глибину в об'ємі зразка, на якій відбулася взаємодія. Детектор альфа-частинок повинен мати достатньо гарну часову і просторову роздільну здатність, а також працювати при високих температурах, оскільки фактично є частиною нейтронного генератора. Прикладом такого детектора є системи на основі ітрієво-алюмінієвого перовскіту. В якості гамма-спектрометра використовують зазвичай сцинтиляційні і напівпровідникові детектори. Сцинтилятори мають гарну часову роздільну здатність, що дозволяє працювати з більш сильним потоком генерованих нейтронів, але через недостатню роздільну здатність по

енергії накладається обмеження на визначення ізотопного складу зразка, і як правило неможливе без порівняння з еталонним спектром. Напівпровідникові детектори мають гіршу часову роздільну здатність, але мають кращу роздільну здатність по енергії, внаслідок чого можна більш точно визначати ізотопний склад зразка, який досліджується. Також такі детектори менше вразливі до дії фонового випромінювання.

GEANT 4

Вступ

Geant4 — це набір інструментів для моделювання проходження частинок через речовину. Він включає в себе широкий спектр можливостей, включаючи відстеження, геометрію, фізичні моделі та зіткнення. Пропоновані фізичні процеси охоплюють широкий діапазон, включаючи електромагнітні, адронні та оптичні процеси, великий набір довгоживучих частинок, матеріалів і елементів у широкому діапазоні енергій, починаючи, в деяких випадках, від 250 еВ і до діапазону енергії порядку ТеВ. Він був розроблений і сконструйований для того, щоб показати використовувані фізичні моделі складної геометрії, а також для його легкої адаптації для оптимального використання в різних наборах програм. Набір інструментів є результатом всесвітньої співпраці фізиків та інженерів-програмістів. Він був створений з використанням програмної інженерії та об'єктно-орієнтованої технології та реалізований на мові програмування C++. Geant4 використовують у фізиці елементарних частинок, ядерній фізиці, розробці прискорювачів, космічній техніці та медицині фізики. [1]

Історія

Походження Geant4 пов'язують з двома незалежними дослідженнями, які проводилися CERN і KEK у 1993 році [4].

Обидві групи прагнули з'ясувати, як можна застосувати сучасні чисельні методи для покращення вже існуючої програми Geant3[5], яка вважалася еталоном, джерелом ідей і досвіду. Ці два дослідження об'єдналися в Комітет дослідження і розробки детекторів (DRDC) [6] з метою створення програми для симуляцій, базованої на об'єктно-орієнтованій технології. Результатом став проєкт RD44 – міжнародна колаборація, яка включає в себе зусилля більше ніж 100 науковців та інженерів Європи, Японії, Канади та Сполучених Штатів.

Перша версія Geant4 з'явилася 1988 року. Пізніше, у січні 1999 року, була створена

спільнота Geant4, для продовження розробки та удосконалення, а також для

забезпечення обслуговування та підтримки користувачів.

Опис архітектури

Geant4 створений відповідно до потреб сучасних експериментів. Як типова програмна система Geant4 містить генератор подій, симуляцію детектора, реконструкцію і аналіз. Ці компоненти можуть бути використані як окремо, так і в різноманітних комбінаціях. Програмний комплекс є базисом для симуляційної компоненти. З цього випливає, що він має:

- мати компоненти з чітко визначеними інтерфейсами;
- забезпечити використання своїх частин іншими компонентами.

Також важливими вимогами є модульність і гнучкість, а також зрозуміла реалізація фізики, яку користувач міг би легко перевірити. Це має дозволити користувачу зрозуміти, налаштувати і розширити її на всі домени, а модульна конструкція передбачала вибір лише потрібних компонент.

Ключовими аспектами симуляції проходження частинок крізь матерію є:

- геометрія і матеріали;
- керування треками;
- взаємодія частинок з речовиною;
- оцифрування і опрацювання зіткнень;
- візуалізація і фреймворк для візуалізації;
- інтерфейс користувача;
- керування подіями і треками.

Всі ці елементи природнім чином приводять до створення категорій класів зі зв'язаними інтерфейсами, де для кожної категорії створена своя робоча група з чітко визначеною областю відповідальності. Це лежить в основі концепції «тулкіта» (за англ. toolkit – інструментарій), яка припускає, що користувач може збирати програму, яка йому потрібна для моделювання, з реалізованих в Geant4 компонент або компонент, описаних самостійно. Схема ієрархії зображена на Рис.1

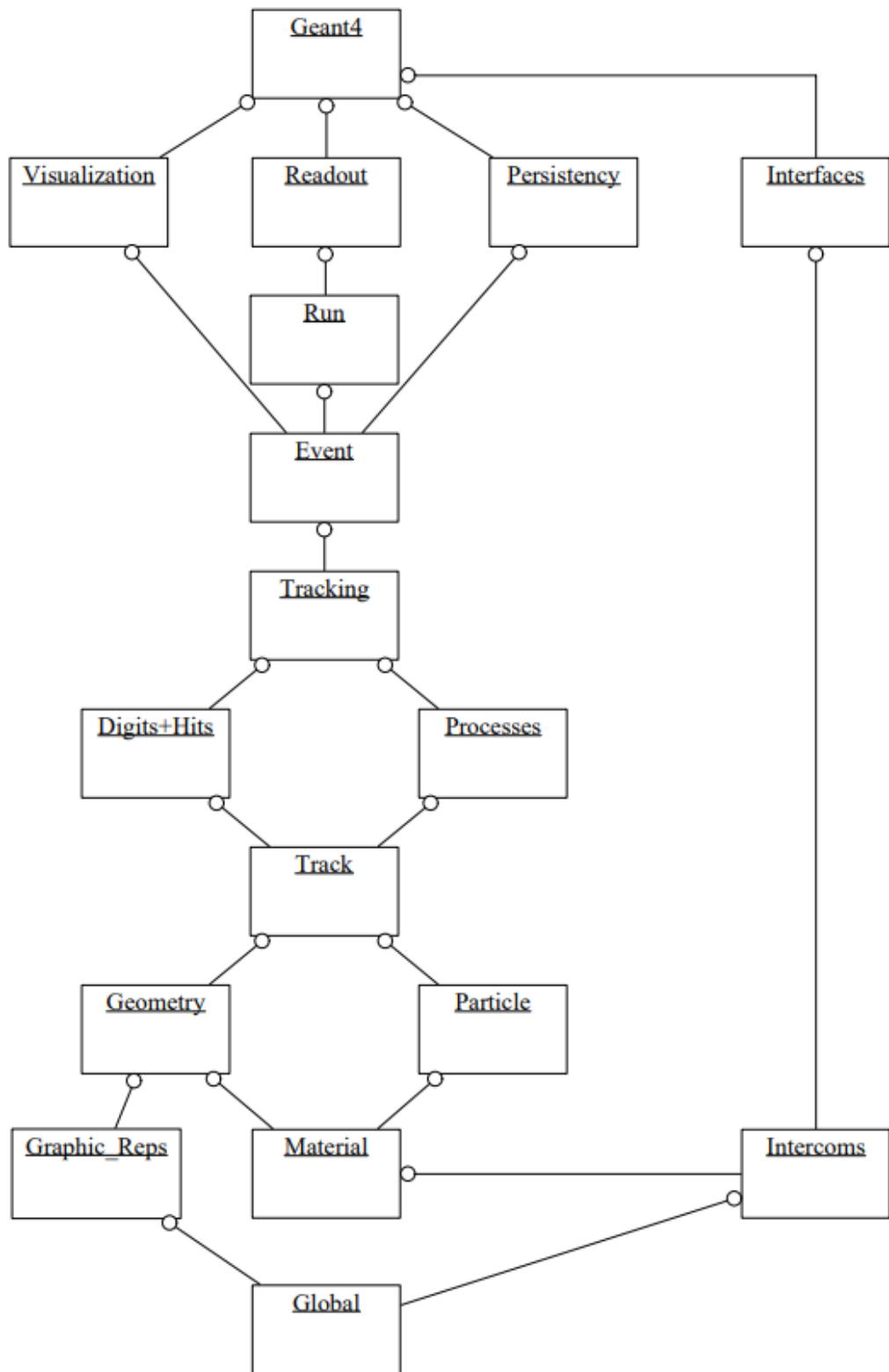


Рис. 1. Діаграма категорій верхнього рівня пакета Geant4. Відкрите коло репрезентує використане відношення; категорія на кінці кола використовує приєднану категорію

Geant4 надає повний набір фізичних процесів для моделювання поведінки частинок. Користувач має змогу вибирати потрібний підхід, або додати власний.

Крім того, користувач може взаємодіяти з тулкітом через інтерфейс користувача і візуалізувати геометрію та треки через інтерфейс користувача, а також реалізовувати інтерфейс за його вибором.

Протягом розробки дизайн змінювався, і станом на сьогодні містить 17 великих категорій. З діаграми видно, що нижні категорії використовуються у верхніх, що і забезпечує фундамент Geant4. Таким фундаментом є наступні категорії:

- global – включає в себе систему одиниць, константи, числа, обробку випадкових величин;
- materials – описує матеріали;
- particles – описує частинки;
- graphical representations – описує графічне представлення;
- geometry – включає у себе об'єм описання детектора та навігації в геометричній моделі;
- intercoms – забезпечує взаємодію користувача з Geant4 через інтерфейс користувача, а також між модулями, які мають бути незалежними.

Рівнем вище розташовані категорії, необхідні для опису треків частинок а також фізичних процесів, пов'язаних з ними. Категорія track включає в себе класи для треків, які використовуються категорією processes, яка містить реальну модель фізичних взаємодій.

Усі такі процеси можуть бути викликані за допомогою функції tracking, яка керує їх внеском в еволюцію трека та відповідає за інформацію в чутливих об'ємах для попадань та оцифрування.

Над ними категорія event керує подіями в межах треків, та керує набором подій які мають спільний пучок і детектор. Категорія redout дозволяє вирішити проблему «нагромадження» пучків.

Врешті решт, можливості які використовують усі вищезгадане і підключаються без тулкіта представлені категоріями visualization, persistency і [user]interface.

Метод Монте-Карло

Geant4 використовує метод Монте-Карло для моделювання взаємодії частинок з речовиною. Метод Монте-Карло — це чисельний розв'язок задачі, який моделює

взаємодію об'єктів з іншими об'єктами або середовищем на основі простих відносин об'єкт-об'єкт або об'єкт-середовище [3]. По суті – це метод знаходження розв'язку для макроскопічної системи шляхом моделювання її мікроскопічних взаємодій.

Метод суттєво навантажує обчислювальну техніку, оскільки заточений на вивчення статистики при великій вибірці. При роботі методу відбувається генерація псевдорандомних чисел, які імітують дані із досліджуваної генеральної сукупності. За умови достатньо великої кількості повторень дані досить точно моделюють реальний статистичний розподіл результату.

Метод Монте-Карло є способом знаходження невизначеності оцінки параметрів в широкому діапазоні. Метод часто використовують для оцінки діапазону зміни результатів і відносної частоти значень в цьому діапазоні. Моделювання з використанням даного методу може бути застосоване для досягнення наступних цілей:

- трансформування невизначеності для звичайних аналітичних моделей;
- розрахунку ймовірності, якщо застосувати аналітичні методи неможливо[7].

Метод застосовують при неможливості аналітичного отримання результатів у досліджуваному випадку, або якщо має місце велике значення невизначеності вхідних та/або вихідних даних.

Для моделювання методом Монте-Карло потребує такі вхідні дані, як опрацьована модель системи, інформація про тип вхідних даних, джерелах невизначеності та формат вихідних даних. Вхідні дані розглядають як випадкові величини з відповідним розподілом. На практиці часто зустрічаються такі розподіли випадкових величин як рівномірні, трикутні та нормальні.

За допомогою обчислювальної техніки багатократно використовують модель з різноманітними вхідними даними і отримують певний набір вихідних даних. Після обробки сукупності вихідних даних статистичними методами отримуються оцінки середнього, стандартного відхилення, довірчих інтервалів.

Як результат, метод Монте-Карло для задач взаємодії частинок з речовиною

зводиться до покрокового моделювання руху частинки через задані об'єми, вирахування її координат у просторі $(x, y, z, t, p_x, p_y, p_z)$. Результат зіткнення і вихідні характеристики частинки визначаються заданим розподілом ймовірностей, який побудований на основі значень диференціальних перерізів відповідних явищ. Для отримання шуканих макроскопічних параметрів застосовується обробка отриманого результату статистичними методами.

Метод Монте-Карло має низку переваг і недоліків. До переваг належать:

- універсальність відносно розподілу вхідних даних;
- відносна простота моделей та можливість їх розширення;
- метод враховує будь-які взаємодії і взаємозв'язки;
- зрозумілість моделі і прозорість зв'язку вхідних даних з вихідними;
- можливість застосування моделей дослідження багатокомпонентних систем
- можливість отримання результату з наперед заданою точністю;
- доступність програмного забезпечення.

До недоліків можна віднести:

- точність напряму залежить від кількості ітерацій;
- необхідність припущення про опис невизначеності наперед заданим розподілом;
- великі і громіздкі моделі несуть за собою дискомфорт для спеціалістів з моделювання;
- метод не може адекватно розраховувати події, ймовірність яких занадто велика або занадто мала.

Багатопіксельні детектори

Вступ

Однією з найважливіших частин експериментальної установки є детектор. Задачі ядерної фізики та фізики високих енергій накладають суворі обмеження на системи детектування, які можуть бути використані для проведення дослідження. В останні роки в ядерній фізиці спостерігається зріст попиту на прецизійні часопробіотні системи великої площі [8]. Існує необхідність високої сегментації часопробіотної системи і детекторів з високою часовою роздільною здатністю

Сцинтиляційні волоконні детектори

Властивість сцинтилятора – випромінювати світло під дією іонізуючого випромінювання. Однією з проблем є поглинання світла всередині матеріалу. Для її уникнення застосовують люмінофори, які змінюють довжину хвилі світла. Цей процес має власну ефективність, яка впливає на ефективність детектора. Сцинтиляційні волокна розроблені таким чином, що не тільки продукують сцинтиляційні фотони, але й направляють їх з мінімальним самопоглинанням. Було показано, що варіації таких детекторів добре працюють у дослідженнях з фізики елементарних частинок, а також у області медичної фізики. Сцинтиляційне волокно складається з двох частин: сцинтиляційного осердя та оптичної оболонки. Іонізуюче випромінювання створює сцинтиляційне в серцевині. Оболонка забезпечує процес повного внутрішнього відбиття фотонів, які через неї проходять. Більшість комерційно доступних сцинтиляційних волокон виробляють синє або зелене світло і тому придатні для виявлення за допомогою широко доступних фотопомножувачів. Діаметр типового волокна становить близько 1 мм², але також доступні волокна діаметром 100 мкм або менше. Волокна можуть бути виготовлені в будь-якій формі поперечного перерізу, але найбільш популярними є волокна круглої та квадратної форми. Більшість пристроїв обробки зображень використовують фотопомножувачі для перетворення світлового сигналу в електричний. Оскільки типовий пристрій на основі такого волокна містить десятки тисяч ниток, одноканальний ФЕП не

підходить для обробки сигналів даного типу. Тому часто використовуються такі структури як мікроканалні фотоелектронні помножувачі. Світло розповсюджується по волокну як по світловоду. Просторова роздільна здатність такої системи буде залежати від схеми передачі волокно-ФЕП та просторової роздільної здатності ФЕП.

SMSD

Зазвичай для виготовлення SMSD використовуються такі напівпровідники як кремній та германій, причому кремній є більш популярним варіантом. Кремнієві мікростріпові детектори є стандартним рішенням в експериментах в області фізики високих енергій. З іншого боку, детектори на основі германію також набули широкого вжитку в рентгенівській спектроскопії та медичній фізиці. Найбільший недолік мікростріпових напівпровідникових детекторів полягає в тому, що їх розміри обмежені розмірами напівпровідникової пластини.

Основним матеріалом або підкладкою є напівпровідник n-типу, на який імплантовано смужки з n+ матеріалу. Зворотне зміщення встановлюється між цими смужками та алюмінієвою імплантацією з іншого боку кремнієвої пластини. Це створює зону виснаження, яка для найкращої продуктивності має поширюватися до кінця обох сторін. Це гарантує, що всі пари зарядів, створені в об'ємі кремнію, становлять вихідний сигнал. Кажуть, що сповіщувач у такій конфігурації працює в режимі повного або надлишкового виснаження, що є звичайним режимом роботи SMSD. Вихідний сигнал зчитується через алюмінієві смужки, імплантовані на n+ смужки. Однак вони розділені ізоляційною смугою, як правило, з SiO₂. Ізоляція створює ємність між двома смужками, і, отже, зчитування фактично є ємнісним зв'язком. Іншими словами, дзеркальні заряди на алюмінієвих смужках насправді бачать схеми зчитування. Така конструкція усуває необхідність встановлення зовнішніх конденсаторів зв'язку, що може бути важко реалізувати з огляду на наявний простір.

В іншій конструкції замість спрею між n+ смужками імплантуються смужки p+ матеріалу. В даний час дизайн p-stop є більш популярним, ніж дизайн p-spray, головним чином через інженерні труднощі. Для належного функціонування

кожна зі смужок повинна бути зміщена таким чином, щоб детектор повністю виснажився. Однак подача зміщення не є тривіальним питанням, оскільки воно передбачає розподіл вихідного джерела живлення на всі смуги через резистори зміщення. Ці резистори зміщення займають місце, і тому повинні бути якомога меншими. Доступні конструкції включають імплантовані резистори, полікремнієві резистори та пробивні резистори; кожен має свої плюси і мінуси. Конкретний вибір залежить від типу детектора, радіаційного середовища та вартості. Основним виміром, який визначає просторову роздільну здатність мікросмужкового детектора, є його крок p , який є просто відстанню між двома послідовними зчитуваннями.

Використання супутніх альфа-частинок

Візуалізація на основі вимушеного поділу

Метод дозволяє отримати відомості про просторовий розподіл речовини, яка може ділитися під дією нейтронів. Для цього використовують нейтрони енергією 14 MeV, отримані в ході D-T реакції. Швидкі нейтрони поділу фіксуються масивом сцинтиляційних детекторів. Для кожного нейтрона, який вилітає з генератора в напрямку досліджуваного зразка, відомі його час вильоту та траєкторія завдяки детектуванню супутньої альфа частинки. Індуковані поділи будуть розташовані вздовж шляху нейтрона, що дозволяє побудувати просторовий розподіл речовини, що ділиться. Така технологія може використовуватись в областях, де потрібно визначити присутність або просторовий розподіл ядерного матеріалу. Дані про поділ пов'язується зі шляхом нейтрона. Оскільки сигнал від поділу пов'язаний з реакцією з об'єктом, методами реконструкції можна застосувати для знаходження ймовірності індукованого поділу на одиницю довжини, помножену на властивість ланцюга поділу. Нейтрони, які не провзаємодіяли з досліджуваним об'єктом можна використати для знаходження повної ймовірності взаємодії на одиницю довжини.

Детектором альфа-частинок фіксується час і місце її прильоту, що визначають час і напрямок руху нейтрона на об'єкт, однак існує деяка неточність, яка обумовлена роздільною здатністю детектора альфа-частинок і скінченними розмірами джерела. Взаємодія з досліджуваним об'єктом пропорційна перерізу взаємодії та густині ядер. Такими взаємодіями є пружним та непружним розсіянням, вибивання нейтронів та індукований поділ. Нейтрони, які не провзаємодіяли, разом з продуктами реакцій потрапляють на матрицю швидкого сцинтилятора, де фіксується їх положення і час прильоту. Нейтрони, що пройшли через об'єкт можна відрізнити, оскільки час і місце їх фіксації наперед прораховані по супутній альфа-частинці. Нейтрони поділу та інші продукти реакції відокремлюються за часом прильоту.

14 MeV нейтрони мають енергію більшу, ніж нейтрони поділу, і ця енергія більша

за енергію зв'язку нейтрона для більшості речовин. Це залишає ймовірність нейтронам-продуктам і розсіяним нейтронам потрапити в проміжок часу, в який очікуються нейтрони поділу. Відношення між нейтронами різного походження може бути оцінене з використанням перерізів відповідних реакцій. Таким чином, кількість нейтронів, яка прилетить після нейтронів, що не провзаємодіяли, визначається підсумовуванням перерізів реакцій з вильотом нейтрона. Реакції з вильотом декількох нейтронів, в тому числі реакція вимушеного поділу, будуть зважені кількістю вивільнених нейтронів. Наявність нейтронних пар вказує на процес поділу в більшості випадків, але також існує ненульова ймовірність виходу кількох нейтронів в реакції іншого типу.

Кількість нейтронів, які пройшли, пропорційна $e^{-\mu x}$, де μ – коефіцієнт ослаблення. Цей коефіцієнт є добутком поперечного перерізу на концентрацію ядер. Добуток $\Delta x \mu$ визначає ймовірність взаємодії нейтрона при проходженні малої відстані Δx . Величина $1/\mu$ називається довжиною ослаблення і визначає відстань, пройшовши яку інтенсивність потоку нейтронів зменшиться в e разів. Рентгенограма дає μx вздовж кожного шляху через об'єкт і отримується з вимірюваних даних шляхом логарифма відношення кількості нейтронів з присутнім об'єктом і без нього. Різні матеріали мають різне значення коефіцієнта ослаблення.

Подібним чином можна ввести μ_f , який відповідав би за ослаблення внаслідок поділу. На відміну від повної ймовірності взаємодії, кількість індукованих поділів неможливо виміряти безпосередньо. Однак кількість індукованих нейтронів можна виміряти як розподіл за кількістю та часом. Також на відміну від повної ймовірності взаємодії, кількість індукованих нейтронів визначається як ядерними даними, так і геометрією об'єкта в цілому. Поєднання цих факторів визначає середню довжину ланцюгів поділу, ініційованих у певному вокселі об'єкта. Контраст зображення на рентгенограмі індукованого поділу складається з добутку ймовірності поділу на одиницю довжини та довжини ($\mu_f x$) на деяку властивість довжини ланцюга нейтронів, наприклад середню кількість нейтронів у ланцюзі, для кожного шляху через об'єкт.

У елементі об'єму для якого коефіцієнт ослаблення, зумовленого вимушеним

поділом, дорівнює μ_f , а його розмір – Δx , ймовірність настання поділу в елементі довжини Δx дорівнює $\mu_f \Delta x$. Середню кількість нейтронів, що вивільняються ланцюгом поділу, можна записати як $\langle \nu \rangle_{chain}$, породжуючи число нейтронів внаслідок поділу $\mu_f \langle \nu \rangle_{chain} \Delta x$. Кількість нейтронів $\langle \nu \rangle_{chain}$ ланцюга можна пов'язати з розподілом ймовірностей нейтронів у ланцюзі поділу $P(\nu)$ точково-кінетичною теорією до множення об'єкта (що кодує залежність довжини ланцюга поділу від геометрії об'єкта в цілому), M ; середня кількість нейтронів, що виділяються в результаті поділу, викликаного нейтронами 14 MeV, $\langle \nu \rangle_{14MeV}$; і кількість нейтронів, що виділяються в результаті поділу нейтронів зі спектром поділу $\langle \nu \rangle$,

$$\langle \nu \rangle_{chain} = \sum \nu P(\nu) = \langle \nu \rangle_{14MeV} \left(M - \frac{1}{\langle \nu \rangle} (M - 1) \right)$$

$$\Delta n = N e^{-\mu L} (\mu_f \langle \nu \rangle_{chain} \Delta x)$$

$\mu_f \langle \nu \rangle_{chain} \Delta x$ – середнє число нейтронів, продуковане в елементі об'єму, $e^{-\mu L}$ – поглинання нейтронів поділу в об'ємі. Для спрощення записано загальний коефіцієнт поглинання, хоча коректніше було б проінтегрувати по всьому об'єму. Таким чином, загальна кількість нейтронів індукованого n на нейтрон джерела, що виходить з дальньої сторони об'єкта $N e^{-\mu L}$, є сумою ймовірностей утворення нейтронів у кожному елементі об'єму вздовж шляху від джерела до детектора

$$\sum \mu_f \langle \nu \rangle_{chain} \Delta x = \frac{n}{N e^{-\mu L}}$$

Детектування ^{12}C

API – технологія в ядерній фізиці, яка дозволяє проводити неруйнівне дослідження ізотопного розподілу. Метод заснований на детектуванні супутніх альфа-частинок, пов'язаних з нейтронами, що випромінюються в реакції синтезу дейтерію-тритію (DT), що надає інформацію про напрямок і час випромінюваного нейтрона 14 MeV. Непружне розсіювання нейтронів призводить до характерного гамма-випромінювання від певних ізотопів, наприклад ^{12}C , яке можна співвіднести з місцем взаємодії з нейтроном.

В D-T реакції альфа частинка вилітає в протилежному до нейтрона напрямку, де

детектором фіксується її позиція і час. Знаючи ці дані, можна розрахувати напрямок вильоту нейтрона, а знаючи також початкову енергію нейтронів можна виконати прив'язку до часу. Якщо відбудеться непружне розсіяння нейтрона на ядрі ^{12}C , ядро випустить гамма-квант з енергією 4.4 МеВ внаслідок переходу з першого збудженого стану в основний. Якщо детектується гамма-квант, який відповідає супутній альфа-частинці, то розташування ядра може бути розраховане опираючись на напрямок вильоту нейтрону та різницею між часом детектування альфа-частинки та часом детектування гамма-кванта. В залежності від точності, якої необхідно досягти, та відстані до досліджуваного об'єкта, час проведення заміру може лежати в межах від декількох годин.

Постановка задачі вимагає від детектора альфа-частинок наявності певних характеристик. Детектор альфа-частинок має фіксувати час реєстрації супутньої частинки (для визначення глибини) та місце попадання альфа частинки (для визначення напрямку руху нейтрона). Оскільки нейтрон з енергією 14 МеВ проходить за 1 нс відстань приблизно рівну 5 см, то для досягнення роздільної здатності по глибині 5 см роздільна здатність детекторної системи по часу повинна бути не гіршою ніж 1 нс. Роздільна здатність по напрямку визначається просторовою роздільною здатністю детектора та відстанню від джерела альфа-частинок, на якій він знаходиться, однак треба зауважити, що оскільки альфа-частинки мають дуже низьку величину пробігу в твердій речовині, детектор треба розташувати всередині герметичного генератора нейтронів. Як результат, необхідний детектор, який може працювати за високих температур, причому чим ближча буде відстань до джерела, тим більша термічна стійкість вимагається. Таким критеріям задовольняють неорганічні сцинтилятори, які мають швидку реакцію, малий час затримки, досить не погану світлову здатність, та гарну енергетичну роздільну здатність. Як приклад, можна взяти детектор з ітрієво-алюмінієвого перовскіту (YAP). Час наростання для YAP становить приблизно декілька сотень пікосекунд. Його світловихід становить $17 \cdot 10^3$ фотонів на МеВ (для альфа частинок це значення приблизно в 3 рази менше). Також кристал YAP не є гігроскопічним, що спрощує роботу з ним. Усі альфа-частинки зупиняться в

межах кількох мікрометрів всередині УАР. Цей процес створює велику кількість пар електронних дірок, які при дезбудженні через активаторні ділянки (церій) випромінюють оптичні фотони з основною довжиною хвилі приблизно 370 нм.

Поєднання гамма-спектрометрії з методом супутніх частинок

PGNAA (high-resolution prompt gamma-ray neutron activation analysis) реалізується з використанням методики супутніх альфа-частинок з дейтронно-третієвим генератором нейтронів та високоточним детектором гамма-випромінювання з надчистого германію. Хоча часова роздільна здатність HPGe детекторів нижча ніж у швидких сцинтиляційних детекторів, сильне приглушення фону та гарна роздільна здатність по енергії забезпечує приріст чутливості до певних ключових елементів, який особливо важливий при дослідженні зразків, оточених металом, таких як боєприпаси.

Хоча метод супутніх частинок використовувався декілька десятиліть тому, з появою нейтронних генераторів, які містять в собі детектор альфа-частинок, в останні роки метод набуває популярності у зв'язку з покращенням чутливості до гамма-випромінювання, яке утворюється в досліджуваних зразках внаслідок непружного розсіяння нейтронів на ядрах. Так, набувають популярності системи пошуку вибухових речовин і контрабанди, бойових хімічних речовин, мін, системи аналізу проб повітря, засновані на даному методі. Одним із обмежень, які накладаються на цей метод, є те, що випромінені гамма-кванти не можуть бути співставлені у часі з відповідною їм альфа-частинкою. Для багатьох ядер гамма-кванти захоплення забезпечують більш чуттєвий метод детектування і ідентифікації. Так, практично водень можна задетектувати лише за гамма-лінією захвата. Тим не менш, метод є застосовним разом із методикою аналізу швидких нейтронів.

До теперішнього часу більшість PGNAA AP систем використовували спектрометри, побудовані на базі сцинтиляторних детекторів, через їх гарну часову роздільну здатність. Такі детектори необхідні якщо стоїть задача визначити місцезнаходження і просторовий розподіл шуканої речовини. Але на практиці така інформація не завжди потрібна, особливо якщо йде мова про

портативні і компактні тестові прилади. Для багатьох сценаріїв основним обмеженням є фонове випромінювання навколишнього середовища, яке створює шуми. Крім того, сцинтиляційні детектори мають гіршу роздільну здатність по енергії, що унеможлиблює їх використання, якщо стоїть задача виявити елементи з низькою інтенсивністю гамма-випромінювання, або з близьким розташуванням спектральних ліній. Висока роздільна здатність спектрометрії досягається за рахунок використання HPGe детектора, забезпечує високу точність виявлення широкого спектру хімічних елементів, що є ключовим при ідентифікації бойових речовин, боєприпасів та вибухівки, димових шашок. Результати вказують на зниження фонового впливу AP технологією, не зважаючи на гіршу роздільну здатність по часу у детектора гамма-випромінювання, виготовлено з HPGe. Крім того, завдяки гарній енергетичній роздільній здатності, хімічні елементи легко детектуються без необхідності бази даних з еталонним виглядом спектрів чистих елементів, яка часто необхідна при аналізі суміші елементів з використанням сцинтиляційного детектора з високою роздільною здатністю по часу.

Висновки

У ході роботи було розглянуто технологію гамма-нейтронної спектрометрії з урахуванням супутніх альфа-частинок. Теоретичне обґрунтування можливості застосовності відповідної технології досліджено в ході опрацювання матеріалу. Було наведено переваги даної методики для проведення аналізу ізотопного складу досліджуваних зразків, а також оцінки на основі цих даних потенційної небезпеки гіпотетичного об'єкта, або наявності корисних копалин чи мінералів в надрах. Під час виконання кваліфікаційної роботи був проведений аналіз наукових статей на відповідну тематику, порівняння результатів, як наслідок відмінності в підходах до постановки задачі в плані геометрії, програмних пакетів, за допомогою яких відбувалося моделювання експерименту, генераторних та детекторних систем. Розглянув питання вибору детектора для отримання оптимального результату для досягнення потрібних технічних вимог, в залежності від специфіки досліджуваних зразків, умов, в яких проводиться аналіз, та інших вимог, які накладаються технічним завданням установки неруйнівного контролю.

Список джерел

- [1] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, et al, Geant4—a simulation toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 506, Issue 3, 2003, Pages 250-303,
- [2] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asai, T. Aso et al, Recent developments in Geant4, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 835, 2016,
- [3] “Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport” Alex F Bielajew
- [4] K. Amako, et al., Proceedings of CHEP94, San Francisco, CA, USA, LBL-35822 CONF-940492.
- [5] GEANT—Detector description and simulation tool, CERN Program Library Long Write-up W5013, CERN Geneva.
- [6] A. Dellacqua, et al., Geant4: an object-oriented toolkit for simulation in HEP, CERN/DRDC/94-29 DRDC/ P58, 1994.
- [7] Implementation of the reverse/adjoint Monte Carlo method into Geant4 L.Desorgher , F.Lei, G.Santin
- [8] S.V. Afanasiev “Scintillation Detectors for Precise Time Measurements”
- [9] S. Afanasiev, T. Alber, H. Appelshäuser, J. Bächler, D. Barna, et al, The NA49 large acceptance hadron detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,
Volume 430, Issues 2–3,
1999, Pages 210-244,

[10] Syed Naeem Ahmed “Physics and Engineering of Radiation Detection”

[11] Hausladen, Paul & Blackston, Matthew & Mullens, James & Mcconchie, Seth & Mihalczko, J.T. & Bingham, Philip & Ericson, Nance & Fabris, Lorenzo. (2010).
Induced-Fission Imaging of Nuclear Material.

[12] Position Sensitive Alpha Detector for an Associate Particle Imaging System
Mauricio Ayllon Unzueta, Will Mixter, Zachary Croft, John Joseph, Bernhard
Ludewigt, and Arun Persaud, Accelerator Technology & Applied Physics Division,
E.O. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA Engineering
Division, E.O. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

[13] B. Bucher, E.H. Seabury, J. Hix, K.M. Krebs, C.J. Wharton, S.M. McConchie, P.A.
Hausladen, “Assessment of the associated particle technique with high-resolution
gamma-ray spectroscopy for in-field identification of chemical warfare agents and
explosives”