

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Фізичний факультет
Кафедра ядерної фізики

На правах рукопису

**Розрахунки в GEANT4 для оцінки ефективності
використання ТТД детекторів при дослідженні
фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок**

Галузь знань: 10. Природничі науки

Спеціальність: 104. Фізика та астрономія

Освітня програма: Фізика високих енергій

Кваліфікаційна робота бакалавра

Студента 4 року навчання

Коваленка Данила Сергійович

Науковий керівник:

доктор фіз.-мат. наук

кандидат фіз.-мат. наук

доц. Безшийко Олег Анатолійович

Зав. кафедри
ядерної фізики,

проф. Каденко І. М.

Київ – 2020

ВИТЯГ

з протоколу № _____
засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент Коваленко Данило Сергійович виконав та захистив
кваліфікаційну роботу бакалавра з оцінкою: _____.

Голова ЕК _____

«_____» _____ 2020.

АНОТАЦІЯ

Коваленко Д. С. Розрахунки в GEANT4 для оцінки ефективності використання ТТД детекторів при дослідженні фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок

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

Науковий керівник: к.ф.-м.н., доц. Безшийко Олег Анатолійович, доцент каф. яд. фізики.

Ключові слова: GEANT4 моделювання, фотоядерні реакції, важкі заряджені частинки, перетин реакції.

Далі сама анотація

SUMMARY

Kovalenko D. Simulation in GEANT4 to evaluate the efficiency of the use of Solid State nuclear Track Detectors (SSNTD) in the study of photonuclear reactions with the escape of charged particles.

Bachelors qualification work in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «High energy physics». — Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Nuclear Physics Department. — Kyiv — 2022.

Research supervisor: PhD of Physics and Mathematics, Assoc. Prof. Bezshyyko O., Associate Professor of Department of Nuclear Physics.

Key words: GEANT4 simulation, photo-nuclear reactions, heavy charged particles, reactions cross sections.

Translation of the abstract.

Зміст

1	Вступ	3
2	Фотоядерні реакції	3
2.1	Загальні відомості	3
2.2	Означення перетинів реакцій	4
2.3	Коротко про теоретичні моделі фотоядерних реакцій	5
2.4	Коди для розрахунку фотоядерних реакцій	6
2.5	Інформація що використовується в цій роботі	7
3	Твердотільні трекові детектори	8
3.1	Історія	8
3.2	Формування прихованих треків	9
3.3	Протравлення треків та збір інформації	11
4	Описання роботи GEANT4	11
4.1	Основні відомості	11
4.2	Використання	11
4.3	Мій приклад використання	11
5	Експеримент в GEANT4 та результати	11
A	Новітнє експериментальне обладнання	12
	Література	13

1 Вступ

Існує багато типів ядерних реакцій, які несуть інформацію про структуру ядра, яку нам так важливо дослідити. Серед усіх, вигідно виділяються фотоядерні реакції. З ними можна отримати унікальну інформацію яку не отримати при використанні частинок у вхідному каналі, оскільки гамма-квант не має тих вагомих квантових характеристик, як масивні заряджені частинки (великий спін та момент, енергія зв'язку). Крім того, енергію збудження можливо плавно регулювати та не має Кулонівських ефектів при взаємодії.

Саме тому у роботі досліджується ефективність використання ТТД при реєстрації продуктів фотоядерних реакцій. Основна ідея в тому, щоб провести модулювання експериментів з різними початковими умовами, та отримати із них максимально можливу кількість інформації з приводу реєстрації цікавих продуктів фотоядерних реакцій. [1] [2]

2 Фотоядерні реакції

2.1 Загальні відомості

Сучасні представлення про фотоядерні реакції (фотодезінтеграцію) побудовані на величезній кількості експериментальних даних. Головним чином було зібрано для різних ядер переріз реакції в залежності від енергії налітаючого γ -кванту. Далі створюються моделі що можуть для різних частинних випадків в деякому наближенні описати поведінку перетину реакції. Ця сфера фізики необхідна для багатьох цікавих застосувань:

- Аналіз радіаційного захисту та радіаційного переносу.
- Розрахунок поглинутої дози людським тілом в радіотерапії.
- Активаційний аналіз.
- Технології захисту і контролю.
- Перетворення ядерних відходів.
- Технології реакторів розпаду і злиття.

- Астрофізичний ядерний синтез.

Дуже багато перетинів фотоядерних реакцій було отримано в Ліверморській національній лабораторії (США) та центр ядерних досліджень у Сакле (Франція) протягом майже 3х деkad (1962-1987). Там використовували квазімонохроматичні пучки γ -квантів як продуктів анігіляції позитронів на льоту, нова технологія у 1960х. Але як завжди цих експериментів зовсім недостатньо: не можна покладатися лише на виміри перетинів реакції, існує фактор систематичної похибки яку важко усунути, важко поставити експерименти для деяких ядер. Тому дослідження продовжувалися - утворюються ще дані в додаток до величесного масиву утвореного раніше, та повторюються аналогічні експерименти але на більш точному обладнанні (High Intensity γ -ray Source (HI γ S) та Laser Compton Scattering Facility A)

Звичайно дані треба систематизувати, обробити, заповнити прогалини де вимірів провести не вдалося. Таким чином утворюють бази даних для прикладного використання у багатьох областях. Щоб оцінити найбільш імовірні значення, де експерименту провести не вдалося використовують моделі, які можуть бути як чисто емпіричними, так і напівтеоретичними (загальної теорії фотоядерних реакцій поки не існує, що характерно для ядерної фізики).

Наразі існує сучасна база даних EXFOR, для 220 ізотопів (164 - експериментальні, інші - чисельні розрахунки за моделлю). І окрім усього іншого, в ній задокументовані перетини та вихід реакцій як з нейтронами так і з важкими зарядженими частинками в якості продукту. Саме такі реакції нас найбільше цікавлять.

EXFOR спеціально було використано при формуванні бібліотеки для GEANT4 - Low Energy Nuclear Data (LEND). LEND треба завантажувати окремо та прописувати у джерелах інстальованого GEANT4.

2.2 Означення перетинів реакцій

Експериментально фотоядерні реакції вимірюють рахуючи напряму кількість випромінених частинок або вимірюючи залишкову ядерну активність. В силу того, що енергія γ -квантів може бути більше поро-

гу реакції, кількість комбінацій реакцій також зростає. В цьому випадку треба враховувати що шукана реакція може супроводжуватися випроміненням додаткових частинок, імовірністю появи яких не можна нехтувати в порівнянні з досліджуваною реакцією. Таким чином слід враховувати перетин реакцій в яких крім шуканого, є і інші продукти:

$$\sigma_{sx} = \sigma(\gamma, 1x) + \sigma(\gamma, 1xp) + \sigma(\gamma, 1x\alpha) + \dots + \sigma(\gamma, 2x) + \sigma(\gamma, 2xp) + \sigma(\gamma, 2x\alpha) + \dots + \sigma(\gamma, 3x) + \sigma(\gamma, 3xp) + \sigma(\gamma, 3x\alpha) + \dots = \sum_i \sigma_{ixY}.$$

Таким чином варто додатково обмежувати експериментальні дані щоб відкидати непотрібні реакції. Треба чітко розуміти, що ми маємо на увазі під перетином утворення певної частинки - повний перетин із усіх можливих комбінацій перетинів, які включають шукану частинку, або окремий випадок реакції що нас цікавить. В нашому випадку це саме перший варіант - повний перетин, оскільки в нашому експерименті GEANT4 ми рахуємо усі цікаві нам важкі частинки поява яких спричинена фотоядерними реакціями.

2.3 Коротко про теоретичні моделі фотоядерних реакцій

Для того щоб розраховувати та оцінювати перетини фотоядерних реакцій в межах 1-200 MeV енергії γ -квантів, використовується незалежна гіпотеза про реакції через компаунд ядро, а саме, що розпад і формування компаунд ядра - процеси незалежні, хоча енергія, спін і парність - зберігаються.

- Поглинання

Налітаючий γ -квант поглинається ядром через два чітко відмінні механізми: гігантський дипольний резонанс (ГДР) (Giant Dipole Resonance (GDR)) та квазідейтрон (КД) (quasi-deuteron (QD)). Поки НДР є домінуючий процес у енергетичному діапазоні типових додатків фотоядерних даних ($E_\gamma = 10 - 20$ MeV), Модель QD описує механізм фотопоглинання для $E_\gamma > 30$ MeV або близько того. Перетин реакції поглинання γ -кванту складається з двох доданків відповідно як показано в рівнянні 2.1.

$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \sigma_{GDR}(E_\gamma) + \sigma_{QD}(E_\gamma) \quad (2.1)$$

Декілька можливих моделей може використовуватися для представлення перетину поглинання в механізмі ГДР $\sigma_{GDR}(E_\gamma)$, серед них - функції Лоренца, Брейта-Вігнера, Гаусса. Найбільш точно описує експеримент саме форма Лоренца 2.2.

$$\sigma_{GDR}(E_\gamma) = \sigma_R * \frac{E_\gamma^2 * \Gamma_R^2}{(E_R^2 - E_\gamma^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma_R^2} \quad (2.2)$$

Тут σ_R - це пікове значення перетину реакції, Γ_R - ширина резонансу, E_R - резонансна енергія. Для цього рівняння (2.2) ще є додаткові уточнення для деформованих ядер наприклад - перехід до стандартного Лоренціану.

У рівнянні 2.3 представлено модель Чедвіка для механізму КД. Перетин фотодезентиграції параметризується як в рівнянні 2.4.

$$\sigma_{QD}(E_\gamma) = L \frac{NZ}{A} \sigma_d P_b \quad (2.3)$$

$$\sigma_d(E_\gamma) = \begin{cases} 61.2(E_\gamma - B_b)^{3/2} E_\gamma^{-3}, & E_\gamma > B_b \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.4)$$

Фактор блокування Паулі $P_b(E_\gamma)$ представляється у вигляді поліному для проміжку енергій від 20 до 140 МеВ, і у вигляді експонент для зовнішніх проміжків. Константа Левінгера L береться рівною 6.5. N, Z, A - стандартні позначення, числа нейтронів, протонів і нуклонів в ядрі. У 2.4 B_b - це енергія зв'язку дейтрона (2.22452 МеВ).

До ГДР слід додати передрівноважну емісію частинок, яка хоча і не дуже широко розроблена для фотоядерних реакцій, але у розрахункових кодах має місце. Не буду довго зупинятися на теоретичній частині, скажу тільки, що для варіювання енергії γ -квантів в більш широкому діапазоні, варто уточнювати вигляд залежності перетину реакції від енергії - додавати ще теоретичні моделі (рис. 2.1).

•

2.4 Коди для розрахунку фотоядерних реакцій

Оскільки майже неможливо отримати повну інформацію про фотоядерні реакції лише з експериментів, важливу роль грають коди що утво-

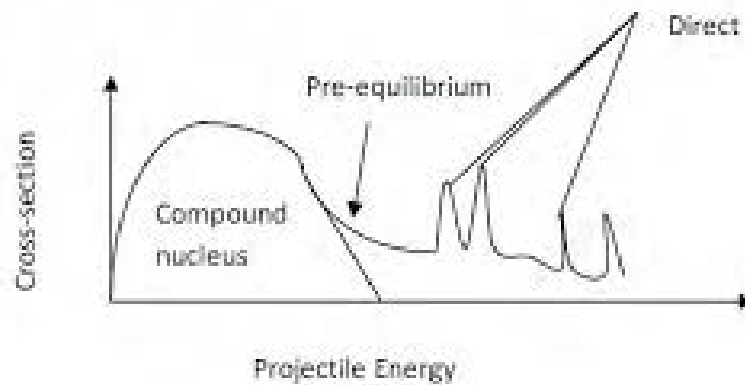


Рис. 2.1. Якісна залежність перетину реакції від енергії

рюють бібліотеки необхідних даних штучно. Сучасні коди на основі теорії Хаузера-Фешбаха - EMPIRE, TALYS, CCONE, and CoH3, які зазвичай використовуються для реакцій спричинених нуклідом, також підходять для розрахунку фото-спричинених перетинів реакцій. В результаті вони широко використовуються в оцінці ядерних даних загального загального призначення, і скомбіновані з функціональним кодом що може створювати спеціальний формат даних - ENDF-6, який надалі лежить в основі модулювання фізичних експериментів.

Але незважаючи на те, що ці коди побудовані на добре зарекомендованій фізичній моделі, їх вихідні дані можуть відрізнятися. Першопричиною цього є саме внутрішній процес розрахунку, який разом із обмеженою точністю чисельних даних у комп'ютерах може приводити до різного результату лише із-за різниці алгоритму. Тому слід тримати у пам'яті що дані можуть відрізнятися (при використанні різних ENDF файлів, або різних інструментів модулювання).

2.5 Інформація що використовується в цій роботі

У підсумку до пункту про фотоядерні реакції важливо зазначити які відомості є ключовими для нашої роботи. Як вже зазначалося раніше всі реакції що модулюються в GEANT4 мають чисельний перетин розсіяння взятий або із відомих експериментальних значень, або розрахованих спеціальними кодами. Тому сама реалізація експерименту вже повністю

покладається на ENDF файли.

Далі настає черга детектування вилітаючих продуктів фоторозкладання, і тут вже мова йде про реакції іонізації - це вже взаємодії на рівні електронних оболонок. Фізика цих процесів також не є екзотичною і включена у вигляді необхідних бібліотек до GEANT4. Цікавим буде спробувати оцінити вручну вихід фотоядерних реакцій, та імовірність детектування продуктів цього виходу матеріалом ТТД. Але спочатку поговоримо про те як влаштовані детектори.

3 Твердотільні трекові детектори

3.1 Історія

В 1958-му році у Науково-дослідному центрі атомної енергетики в Гарвеллі вперше було помічено та відзвітовано роботу твердо-тільного трекового детектора (далі - ТТД). Д.А. Янг помітив, що коли фторид літія (LiF) у кристалічній формі тримати на відстані 1 мм від уран-оксидної плівки що випромінює теплові нейтрони, то кристал покривається чисельними неглибокими протравленням після обробки поверхні хімічним реагентом ($HF + CH_3COOH$) насиченим FeF_3 . Пізніше виявилось, що кількість цих ямок (порахованих за допомогою мікроскопа) приблизно відповідало кількості теоретично розрахованих розпадів ядер в сторону кристалу. Тільки 3 роки після цього, Янг написав коротку статтю, про те, що ці ямки можуть бути оптично видимими, а інтерпретувати їх можна як треки частинок - як слід руйнувань ґратки, що залишає за собою продукт радіоактивного розпаду.

Це було першим поштовхом, після якого почалися перші спроби модельного опису механізму за яким залишається трек, та створювали перші детектори. Основним, що так привабляло вчених було те, що на відміну від вже давно відомих бульбашкових камер, стріпових детекторів та іншого обладнання детектування, в кристалах надовго (перманентно) зберігався зліпок сліду, його можна було доволі довго розглядати під мікроскопом. Крім того доволі просто з цим детектором працювати, оскільки для самого набору треків ніяких зайвих дій не потрібно - просто розмістити шматок

кристалу на шляху випромінення.

3.2 Формування прихованих треків

Заряджена частинка проходить крізь матеріал діелектрику (кристал, неорганічне скло, полімер) і створює субмікроскопічну стежку неперервних пошкоджень вздовж свого шляху. Ці стежки отримали назву прихованого треку і його неможливо розгледіти під оптичним мікроскопом, лише, при деяких обставинах, - під трансмісійним електронним мікроскопом. Тому знайшли декілька способів розширення цих треків - прикладання напруги або хімічне протравлення (перевагу віддають хімічному травленню).

Механізми за якими в тій чи іншій речовині формуються приховані треки досі чітко не з'ясовані. Згідно сучасним поглядам утворення треку визначається фізико-хімічними властивостями речовини детектора і має бути описано для полімерів та кристалів окремо.

- Модель шипо-подібного іонного вибуху (1965 Флайшер і Прайс).

Згідно цій моделі, вибух іонізації вздовж шляху зарядженої частинки створює електростатично нестабільний масив сусідніх позитивних іонів, які викидають один одного із їх нормального положення у ґратці в деяке нестіке, за рахунок Кулонівської взаємодії. Первинна іонізація займає час менший фемптосекунд. Після цього відбувається еластична релаксація - зменшення гострих локальних механічних напруг шляхом розподілення напруги по більшій області. Таким чином утворюються дифекти певної форми у кристалі, і саме їх вже можна спостерігати в трансмісійній мікроскоп. Є декілька свідчень того, що саме іонізація майже повністю відповідає за утворення треку. Ніяких треків не формується в провідниках чи напів провідниках, де тільки атомні зіткнення можуть спричинити стабільний дефект (в таких матеріалах іонізація - перехідний процес і вільних електронів достатньо щоб швидко компенсувати електричний дефект). Але у випадку ТТД процес утворення іонів настільки швидкий (вибух), що вільні електрони не встигають компенсувати утворену електростатичну напругу і вона переходить у механічну деформацію.

Доволі міцні свідотства того, що δ —електрони та процеси збудження не впливають на утворення треків у неорганічних кристалах. Основний внесок саме за рахунок прямої іонізації атомів.

- Механізм радіаційно-хімічного руйнування.

У випадку органічних твердих матеріалів - полімерів, δ —електронами вже не можна нехтувати. Тут більшість реакцій, не тільки іонізація, ведуть до руйнування довгих хімічних ланок, на більш легкі та короткі (див. рис. 3.1). Простіші сполки швидше розкладаються протравлювачем, ніж оточуючий незруйнований пластик. Органіка має низький поріг детектування, але чутливість складно кількісно оцінити. І взагалі поки не існує певних методів для оцінки теоретичної чутливості того чи іншого матеріалу. Можливі тільки певні узагальнення: * Сильно нестабільні хімічно системи, такі як Нітрат Целюлози, мають бути більш чутливі ніж полімери що мають опір до радіації. * Термореактивні матеріали, такі як CR-39, які не "зшиваються" при опроміненні і підвласні деградації зв'язку між частинами системи при правильному протравленні, можуть представляти непоганий варіант детектора. А якщо вводити більш слабких зв'язків в структуру полімера, що легко ламаються зарядженими частинками, ще більше повисить чутливість, як у випадку SR-86.

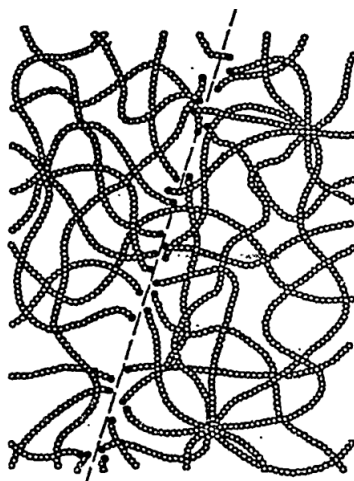


Рис. 3.1. Радіологічний механізм руйнування

3.3 Протравлення треків та збір інформації

Найбільшого розповсюдження, через відсутність необхідності використання трансмісійного мікроскопа, набули саме органічні детектори.

[3]

4 Описання роботи GEANT4

4.1 Основні відомості

Набір інструментів що дозволяє моделювати проходження випромінювання крізь речовину - це і є GEANT4. Як відомо, всі процеси у фізиці частинок та ядерній фізиці мають стохастичний характер. Маючи ключовий параметр - перетин розсіювання, можна задавати процес проходження тієї чи іншої реакції за допомогою методу монтекарло.

4.2 Використання

4.3 Мій приклад використання

5 Експеримент в GEANT4 та результати

А Новітнє експериментальне обладнання

Література

1. *Meer S. van der*. Calibration of the Effective Beam Height in the ISR. — 1968. — Черв.
2. Review of Particle Physics / M. Tanabashi [та ін.] // Phys. Rev. D. — 2018. — Серп. — Т. 98, вип. 3. — С. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001.
3. *Bhagwat A.* Solid State Nuclear Detection: Theory and Application. — 1993.