

УДК 524.1; 539.1

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2024.70.56-62>

Альона МОЗГОВА¹, канд. фіз.-мат. наук
ORCID ID: 0000-0002-8490-4327
e-mail: alenamozgova@knu.ua

Богдан ГНАТИК¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-7113-4709
e-mail: bhnyatyk@knu.ua

Єлизавета ЖИГАНЮК¹, студ.
ORCID ID: 0009-0005-2632-6345
e-mail: zhyganiuk.elizaveta@gmail.com

Сергій ГАБЕЛКОВ², д-р фіз.-мат. наук
ORCID ID: 0000-0002-2303-4305
e-mail: s.gabelkov@isnpnp.kiev.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Інститут проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України, Чорнобиль, Україна

МЮОННА ТОМОГРАФІЯ: ПОГЛЯД УСЕРЕДИНУ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Вступ. Космічні промені – високоенергетичні заряджені частинки (електрони, протони, важчі ядра) – постійно бомбардують атмосферу Землі й породжують зливи вторинних космічних променів, зокрема і високоенергетичних мюонів. Мюони мають великі пробіги навіть у матеріалах із великою густиною, тому виявляються ефективним джерелом сигналів для томографічних досліджень великомасштабних об'єктів до сотень метрів і навіть до кілометрів. Мюонна томографія нині є єдиним методом віддаленого дослідження просторового розподілу різних компонентів ядерних реакторів. В роботі запропоновано схему дослідження структури ядерно-небезпечного скупчення у зруйнованому четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС за допомогою мюонної томографії.

Методи. Первинні космічні промені досягають атмосфери Землі, взаємодіють з атмосферними ядрами (N, O тощо) і внаслідок ядерних каскадів генерують зливи вторинних частинок. До них належить і потік мюонів. Оскільки наша атмосфера постійно бомбардується космічними променями, потік мюонів постійно надходить з атмосфери до земної поверхні і завдяки високій енергії мюонів (від 1 GeV до десятків TeV) вони мають високу проникну здатність і можуть проникати під землю на глибину від сотень метрів і до кількох кілометрів у тверді породи. Причому внаслідок енергетичних втрат і розсіяння інтегральна інтенсивність мюонів зменшується залежно від пройденої стовпчикової густини X як добутку густини середовища ρ на пройденої відстані L : $X(L) = \rho \cdot L$. Позиційно-чутливі детектори мюонів, зокрема і годоскопи, реєструють інтегральну інтенсивність мюонів у певному тілесному куті і за картою інтегральної інтенсивності дозволяють відтворити значення X – розподіл поглинальної речовини вздовж променя зору. За даними спостережень об'єкта з декількох місць із різними зенітними й азимутальними кутами можна відтворити 3D-розподіл поглиначів в об'єкті.

Результати. Запропоновано методику застосування мюонної томографії для встановлення внутрішньої структури розплаву паливовмісних матеріалів, зокрема і ядерно-небезпечного скупчення у зруйнованому четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС. Інтегральна інтенсивність мюонів з імпульсами $p > 1.12$ GeV/c у зенітному куті 75° (напрямок спостереження годоскопа) дорівнює $I(>p = 1.12 \text{ GeV/c}) = 6.90 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$. Кількість зареєстрованих мюонів у тілесному куті (пікселі на небі) $\delta\Omega = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ ср}$ з ефективною площею $\Sigma = 5.76 \text{ см}^2 \text{ср}$ і часом спостереження 100 днів ($8.64 \cdot 10^6 \text{ с}$) буде $N_p = 3.43 \cdot 10^4$. Якщо на промені зору телескопа розміщено поглинальний об'єкт із густиною ρ , протяжністю L і відповідною стовпчиковою густиною $X(L) = \rho \cdot L$, то під час проходження шару бетону завтовшки 10 м, на детектор попадуть мюони з початковим імпульсом $p > 5$ GeV/c. Інтегральна інтенсивність таких мюонів дорівнює $I(>p = 5.0 \text{ GeV/c}) = 4.28 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$, а кількість зареєстрованих мюонів – $2.12 \cdot 10^4$. Якщо ж густина поглинального об'єкта – ядерно-небезпечного скупчення – рівна 5 г/см^3 , на детектор попадуть мюони з початковим імпульсом $p > 10.4$ GeV/c, інтегральною інтенсивністю $I(>p = 10.4 \text{ GeV/c}) = 2.65 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$, а кількість зареєстрованих мюонів – $1.32 \cdot 10^4$. Тобто чутливості запропонованого методу достатньо для вивчення встановлення внутрішньої структури розплаву паливовмісних матеріалів.

Висновки. Мюонна томографія нині є єдиним ефективним методом віддаленого дослідження просторового розподілу компонентів ядерних реакторів. В роботі запропоновано схему дослідження структури ядерно-небезпечного скупчення у зруйнованому четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС за допомогою мюонної томографії. Показано, що для заданих параметрів годоскопа можна провести мюонну томографію реактора для часу спостережень з одного місяця близько 100 днів.

Ключові слова: космічні промені, мюони, мюонна томографія, ядерна безпека, ядерні реактори, Чорнобильська АЕС.

Вступ

Завдяки великій кількості та високій проникній здатності мюонів вторинних космічних променів мюонну томографію (MT) широко використовують в інженерії, індустрії, вулканології, археології для дослідження й аналізу різних конструкцій, виявлення геологічних особливостей вулканів тощо. Мюонна томографія не потребує штучних джерел зондувального випромінювання, що є її суттєвою перевагою над іншими методами неруйнівного контролю. Важливою сферою застосування мюонної томографії є ядерна безпека і контроль за переміщенням ядерних матеріалів і під час поводження з високоактивними радіоактивними відходами, зокрема й аналіз стану енергоблоків АЕС. Мюонну томографію широко застосовують для дослідження розташування ядерних матеріалів у реакторах атомних електростанцій, контейнерах для транспортування ядерних матеріалів тощо. В нашій роботі запропоновано методику її застосування для дослідження стану зруйнованого реактора на Чорнобильській АЕС. Актуальною задачею є дослідження поточного стану лавоподібних паливовмісних матеріалів, які утворились під час аварії на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС в 1986 р. Ми пропонуємо визначати просторовий розподіл радіонуклідів, продуктів поділу й активації, їхню густину у скупченнях лавоподібних паливовмісних матеріалів у приміщеннях четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС із використанням годоскопів як детекторів мюонів.

© Мозгова Альона, Гнатик Богдан, Жиганюк Єлизавета, Габелков Сергій, 2024

Методи

Космічні промені, проникаючи в атмосферу Землі, стикаються з атомами атмосфери (N, O тощо) і породжують широкі атмосферні зливи вторинних частинок (рис. 1). Мюони є найчисленнішими зарядженими частинками зливи на рівні моря – інтегральна інтенсивність мюонного потоку становить приблизно 100 мюонів на секунду на квадратний метр на стерadian. Водночас мюон – нестабільна частинка. Його середній час життя становить $t = 2,2$ мкс, що відповідає середньому вільному пробігу $c \cdot t \approx 700$ м. Щоб досягти земної поверхні, мюон повинен мати Лоренц-фактор $\gamma \geq 10$ або енергію $E \geq 1$ GeV ($E = \gamma m_\mu c^2$, де m_μ – маса мюона, c – швидкість світла).

Більшість мюонів утворюються високо в атмосфері (зазвичай 15 км) і втрачають близько 2 GeV на іонізацію тощо поки досягнуть поверхні Землі. Їхній енергетичний і кутовий розподіл відображає взаємодію процесів народження та втрат енергії в атмосфері й розпадів. На рис.1 також показано енергетичний спектр мюонів на рівні моря для двох zenітних кутів $\theta = 0^\circ$ (вертикальний напрям) та $\theta = 75^\circ$. Під великими zenітними кутами низькоенергетичні мюони розпадаються, перш ніж досягти поверхні Землі, а високоенергетичні піони розпадаються до взаємодії, таким чином середня енергія мюонів зростає із зростанням zenітного кута (у цьому разі інтегральна інтенсивність потоку мюонів спадає). Середня енергія мюонів біля поверхні землі становить приблизно 4 GeV. Чим більша енергія мюонів на поверхні Землі, тим глибше вони можуть проникати під землю. Якщо на поверхні Землі мюон має енергію близько 100 GeV, то він проникне на глибину 150 м, де його енергія становитиме близько 1 GeV. Але мюон, який мав початкову енергію 1000 GeV, рухатиметься глибше, тому що йому вистачить енергії, поки він не досягне 1 GeV до глибини близько 1 км.

Принцип мюонної томографії полягає в тому що, проникаючи крізь деяке середовище, наприклад, гору, піраміду, ядерний реактор тощо, мюони зазнають поглинання та розсіяння. У цьому випадку інтегральна інтенсивність мюонів зменшується залежно від пройденої стовпчикової густини X як добутку густини середовища ρ на пройденої відстань L : $X(L) = \rho \cdot L$. Позиційно-чутливі детектори мюонів, зокрема і годоскопи, реєструють інтегральну інтенсивність мюонів у певному тілесному куті і за картою інтегральної інтенсивності дозволяють відтворити значення X – розподіл поглинальної речовини вздовж променя зору. За даними спостережень об'єкта з декількох місць із різними zenітними й азимутальними кутами можна відтворити 3D-розподіл поглиначів в об'єкті.

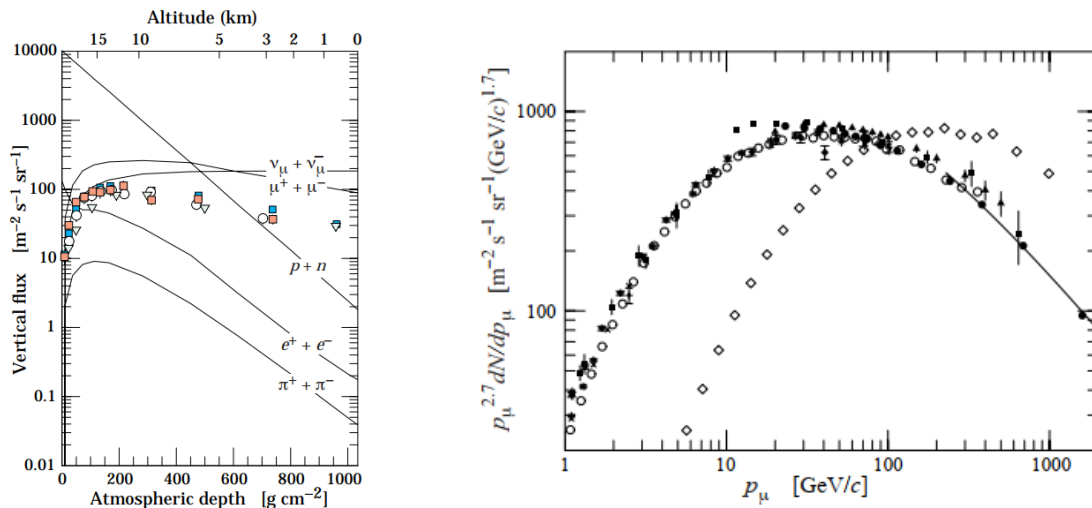


Рис. 1. Ліворуч: вертикальні потоки вторинних космічних променів з енергіями $E > 1$ GeV в атмосфері Землі.

Експериментальні дані наведено для потоків μ^- з енергіями $E > 1$ GeV. Праворуч: диференціальна інтенсивність мюонів для zenітного кута $\theta = 75^\circ$ (незаповнені ромбики) та для $\theta = 0.0^\circ$ (інші символи). Рисунок взято з (Navas et al., 2024)

Диференціальна інтенсивність мюонів на поверхні Землі $I(p, \theta)$ як функція імпульсу мюона p в одиницях GeV/c та zenітного кута θ апроксимується формулою

$$I(p, \theta) = \frac{451}{p/\sec\theta + 77.2} (5p + 9.2 \sec\theta)^{-2.57} \times \frac{p+19.8}{p+19.8 \sec\theta} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} (\text{GeV}/c)^{-1}, \quad (1)$$

тоді як інтегральна інтенсивність мюонів на поверхні Землі $I(> p, \theta) = \int_p^{P_{\max}} I(p, \theta) dp$ апроксимується формулою

$$I(> p, \theta) = \frac{35}{p/\sec\theta + 57.3} (5p + 11.4 \sec\theta)^{-1.57} \times \frac{p+26.7}{p+8.9(2+\sec\theta)} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (2)$$

(Jokisch et al., 1979).

Зокрема, для zenітного кута $\theta = 75^\circ$ апроксимація інтегральної інтенсивності має вигляд (див. також рис. 2) (Jokisch et al., 1979):

$$I(> p, \theta = 75^\circ) = 9.48 \times \frac{p+26.7}{(p+194.2)(p+52.2)} (p + 8.80)^{-1.57} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}. \quad (3)$$

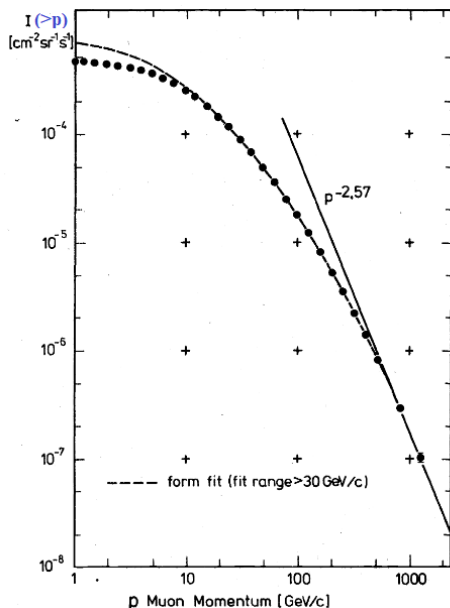


Рис. 2. Інтегральний спектр мюонів на рівні моря для зенітного кута $\theta = 75^\circ$. Рисунок взято з (Jokisch et al., 1979)

Імпульс мюона p та його повна енергія E пов'язані співвідношенням

$$E^2 = p^2 c^2 + m_\mu^2 c^4,$$

де $m_\mu c^2 = 0.106$ ГеВ – маса спокою мюона в енергетичних одиницях. За проходження мюона в середовищі з густиною ρ відстані L , якій відповідатиме стовпчикова густина $X(L)$ уздовж траєкторії, заданої віссю $0l$

$$X(L) = \int_0^L \rho(l) dl \tag{4}$$

енергетичні втрати мюона на іонізацію та випромінювання визначаються рівнянням

$$\frac{dE}{dX} = a(E) + b(E)E, \tag{5}$$

так що мінімальна енергія мюона, який може досягнути стовпчикової густини X , буде такою:

$$E_{\min} = \int_0^X \frac{dE}{dX} dX + m_\mu c^2. \tag{6}$$

Тому після проходження шляху $X(L)$ інтегральний потік мюонів з енергіями $E > 1$ ГеВ ($p > 1$ ГеВ/с) зменшиться від $I(>p=1 \text{ ГеВ/с})$ до $I(>p=p_{\min})$, де імпульс p_{\min} визначається через енергію E_{\min} (6), оскільки внаслідок енергетичних втрат кожним мюоном потоку в кінці шляху $X(L)$ залишаться тільки мюони, енергія яких перевищувала на початку шляху мінімальну енергію E_{\min} (6). В першому наближенні енергетичні втрати мюонів з енергіями менше 100 ГеВ рівні $dE/dX \approx 2$ МеВ/(г/см²), тому за проходження шару води завтовшки 100 м у потоці мюонів залишаться частинки, початкова енергія яких перевищувала $2 \text{ МеВ} \times 10000 = 20$ ГеВ, тобто, близько 20 % початкового потоку для зенітного кута $\theta = 75^\circ$ (рис. 2), причому частинки з початковою енергією входу 20 ГеВ матимуть енергію на виході близько 1 ГеВ. Водночас мюон з енергією 100 ГеВ проникає на глибину близько 160 м у земній корі з густиною $\rho = 2.65$ г/см³ (Workman et al., 2022; Navas et al., 2024).

Ця залежність потоку мюонів від пройденого шляху $X(L)$, пропорційного добутку відстані на густину середовища, і є основою мюонної томографії – включення порожнин чи областей підвищеної густини збільшує чи понижує потік на виході відносно потоку в однорідному середовищі. Перевагою методу є безплатне ізотропне джерело вертикальних мюонів на поверхні Землі, недоліком – необхідність детекторів із достатньо великими площею та часом накопичення сигналу, оскільки загальна кількість зареєстрованих детектором мюонів $N(X)$:

$$N(X) = T \times I(> p = p_{\min}(X)) \times \Sigma, \tag{7}$$

визначається інтенсивністю падаючого на детектор потоку (модульованого поглинанням у досліджуваному об'єкті) $I(>p=p_{\min}(X))$, тривалістю спостереження T та функцією ефективності детектора

$$\Sigma(r_{m,n}) = S(r_{m,n}) \times \delta\Omega(r_{m,n}). \tag{8}$$

Тут координати $(r_{m,n})$ пікселів детектора визначають площу S і тілесний кут $\delta\Omega$ для напрямків, заданих положеннями пікселів детектора (Vasques-Ramiraz et al., 2020, Vesga-Ramirez et al., 2021).

Відносно простий за конструкцією та достатньо чутливий для задач мюонної томографії в геології детектор – годоскоп, розроблений у (Vasques-Ramiraz et al., 2020, Vesga-Ramirez et al., 2021), зображено на рис. 3. Детектор складається з двох панелей, виготовлених зі скінтіляційних матеріалів і розділених на пікселі. На кожній із панелей детектора реєструється сигнал проходження мюонів у конкретних пікселях, що дозволяє відтворити напрямок приходу мюона на детектор.

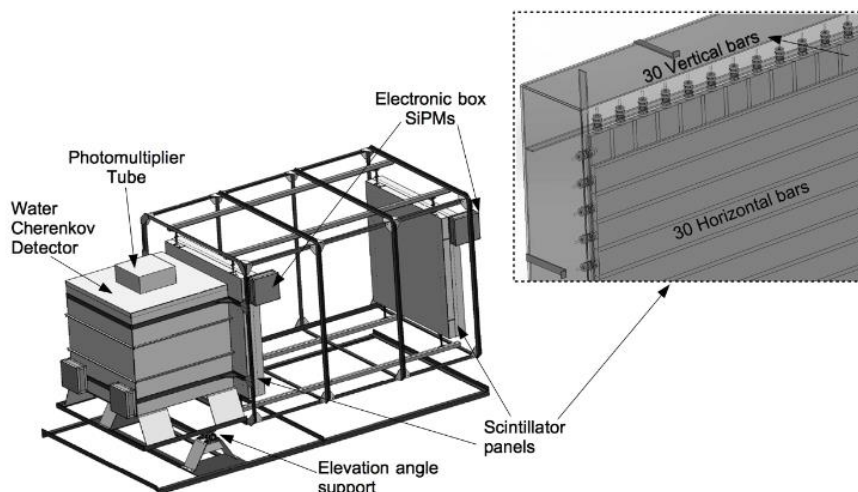


Рис. 3. Схема мюонного детектора Muon Telescope (MuTe). Рисунок взято з роботи (Vásquez-Ramírez et al. 2020)

Важливою характеристикою мюонних детекторів є їхня роздільна здатність. Наприклад, якщо пластини MuTe детектора – X-Y матриці – містять 30×30 пластикових скінтіляційних смужок (120 см × 4 см × 1 см), а кожен масив має 900 пікселів (розмір пікселя 4 см × 4 см = 16 см²), що дає площу детектувальної поверхні 14 400 см², відстань між панелями детектора $D=200$ см, то повна кутова апертура телескопа – близько 50° (0.9 рад), кутова роздільна здатність/піксель становить $\Delta\Omega \approx d/D \approx 4 \text{ см}/200 \text{ см} \approx 0.02 \text{ рад} \approx 1^\circ$, максимальний тілесний кут пікселя на оптичній осі телескопа $1.024 \cdot 10^{-3} \text{ ср}$, відповідна найбільша площа детектування для цього пікселя – функція ефективності – рівна 5.759 см²ср (рис. 4).

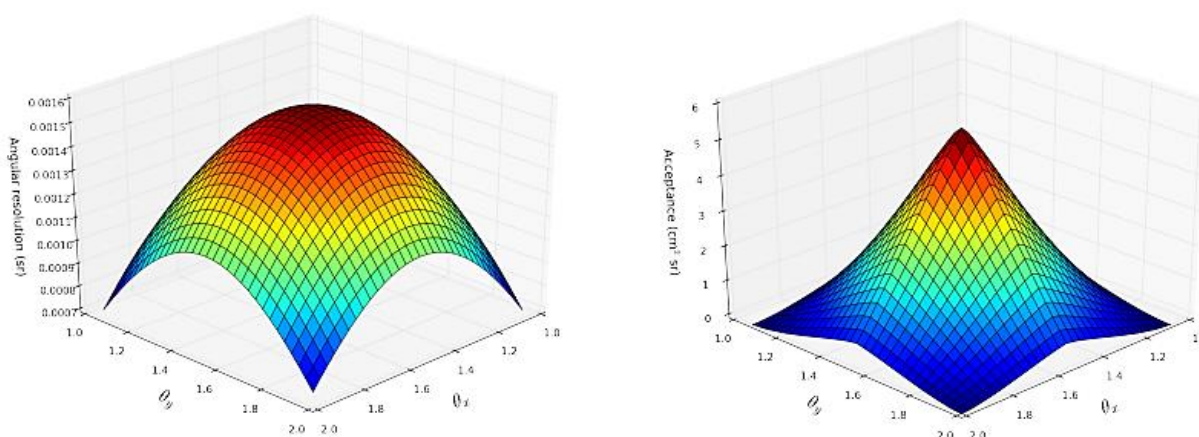


Рис. 4. Кутове роздільня (у ср, ліворуч) та функція ефективності (у см²·ср, праворуч) мюонного детектора MuTe. Рисунок взято з роботи (Vásquez-Ramírez et al., 2020)

Результати

Нині відкритим є питання про розподіл залишків радіоактивного матеріалу та його загальну кількість у зруйнованому четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС. Тривимірною формою розплавленої активної зони і розподіл радіоактивних елементів залишаються невідомими.

Відповідно до рис. 5, активна зона реактора практично порожня. Розплав з активної зони проник у нижні приміщення під реактором, але не проник у ґрунт. Дослідити положення розплаву й оцінити реальне місцезнаходження урановмісного матеріалу та його кількість можна за допомогою мюонної томографії за принципом, який

використовують геологи для вивчення вулканів і геологічних порожнин чи включень. Мюони, які рухаються до детектора в зенітному куті θ , проходять через зону розплаву і внаслідок енергетичних втрат їхній потік зменшується відносно потоку, який не зазнає поглинання. З отриманого розподілу зареєстрованих мюонів за напрямками в тілесному куті, що включає розплав (густина близько $\rho_p = 3 \text{ г/см}^3$, густина ядерних фрагментів може сягати до 10 г/см^3 , а звичайні інженерні конструкції – бетонні стіни з густиною $\rho_b = 2.4 \text{ г/см}^3$), ми можемо відтворити параметри розплаву паливовмісних матеріалів. Оскільки зараз у зруйнованому реакторі залишається близько 40 тонн ядерного палива з характерними розмірами $4 \text{ м} \times 3 \text{ м} \times 2 \text{ м}$ та густиною ρ_r приблизно 5 г/см^3 (ідеться про ядерно-небезпечне скупчення у залі 305/2 на рис. 5 і 6), найпростішим методом його детектування буде встановлення детектора-годоскопа, аналогічного описаному вище, під найменшим можливим зенітним кутом (потік мюонів спадає зі збільшенням зенітного кута). У випадку Чорнобильської АЕС для годоскопа на поверхні Землі зенітний кут оцінюють у 75° (рис. 6).

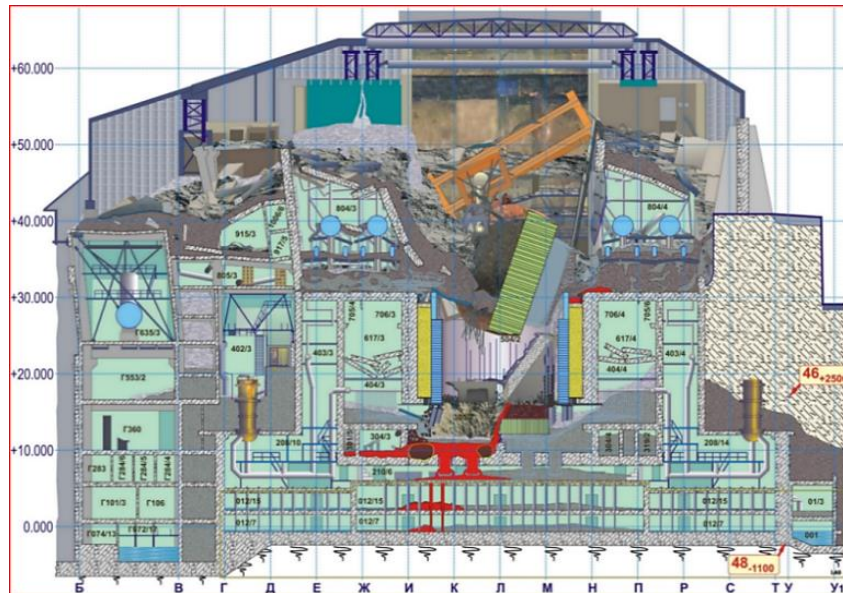


Рис. 5. Розріз четвертого реактора Чорнобильської АЕС, що показує розподіл розплавлених паливовмісних матеріалів. Рисунок взято з роботи (Vogatov et al., 2007)

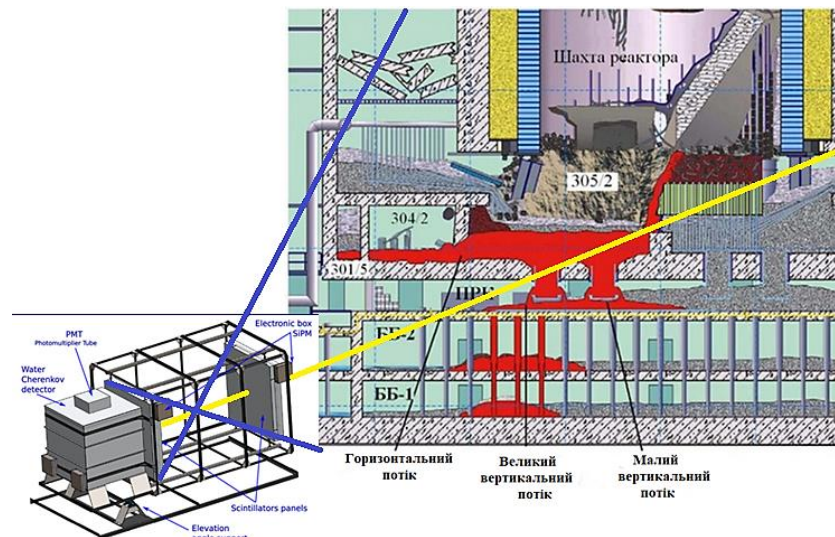


Рис. 6. Схема відтворення параметрів ядерно-небезпечного скупчення за даними мюонного детектора. Зображено оптичну вісь годоскопа (жовта лінія) і його кут зору (сині лінії)

Відповідно до формули (3) інтегральна інтенсивність мюонів з імпульсами $p > 1.12 \text{ Гев/с}$ в зенітному куті 75° рівна $I(>p=1.12 \text{ Гев/с}) = 6.90 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Кількість зареєстрованих мюонів у тілесному куті (пікселі на небі) $\delta\Omega = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ ср}$ з ефективною площею $\Sigma = 5.76 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ і часом спостереження 100 днів ($8.64 \cdot 10^6 \text{ с}$) буде $N_\mu = 3.43 \cdot 10^4$. Якщо на промені зору телескопа міститься поглинальний об'єкт із густиною ρ , протяжністю L і відповідною стовпчиковою густиною

$$X(L) = \rho \cdot L = 2.4 \cdot 10^3 \left[\rho / (2.4 \text{ г/см}^3) \right] [L / 10 \text{ м}] \text{ г/см}^2, \quad (9)$$

то внаслідок енергетичних втрат енергія мюонів зменшиться на $\Delta E = 2X \text{ MeV} \approx 5(\rho/2.4 \text{ г/см}^3)L/(10 \text{ м}) \text{ GeV}$. Як наслідок, під час проходження шару бетону завтовшки 10 м на детектор попадуть мюони з початковим імпульсом $p > 5 \text{ GeV/c}$. Інтегральна інтенсивність таких мюонів рівна $I(>p=5.0)=4.28 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$, а кількість зареєстрованих мюонів – $2.12 \cdot 10^4$. Якщо ж густина поглинального об'єкта – ядерно-небезпечного скупчення – рівна 5 г/см^3 , на детектор попадуть мюони з початковим імпульсом $p > 10.4 \text{ GeV/c}$, інтегральною інтенсивністю $I(>p=10.4 \text{ GeV/c})=2.65 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$, а кількість зареєстрованих мюонів – $1.32 \cdot 10^4$.

Для детектування потоку мюонів можна також використовувати циліндричні детектори з чутливістю в діапазоні $\theta = 20^\circ - 70^\circ$, але для цього потрібно зробити свердловини поруч із блоком реактора. За наявності під реактором підземних тунелів, можна було б поставити детектори всередині них.

Дискусія і висновки

Запропоновано схему дослідження структури ядерно-небезпечного скупчення у зруйнованому четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС за допомогою мюонної томографії. Подібну методику широко використовують у геології, ядерній енергетиці (Pena-Rodríguez et al., 2022; Miyadera et al., 2013; Vetter, 2020).

Ми показали, що для годоскопа з параметрами як у (Vásquez-Ramírez et al., 2020) можна провести мюонну томографію зруйнованого реактора Чорнобильської АЕС із характерним часом спостережень з одного місця близько 100 днів. Неприятливим фактором тут є великий зенітний кут спостережень, на якому інтегральна інтенсивність падаючих на реактор мюонів суттєво менша ніж у випадку малих зенітних кутів (коли годоскоп дивиться вертикально). Щоб зменшити зенітний кут спостережень можна використати циліндричні детектори, але для цього потрібно зробити свердловини поруч із блоком реактора. У разі наявності під реактором підземних тунелів, можна було б поставити детектори-годоскопи під реактором.

Внесок авторів: Альона Мозгова – концептуалізація, аналіз літератури і даних, написання – оригінальна чернетка, перегляд і редагування; Богдан Гнатик – концептуалізація, аналіз літератури і даних, написання – оригінальна чернетка, перегляд і редагування; Єлизавета Жиганюк – написання – перегляд і редагування; Сергій Габелков – написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Роботу виконано за рахунок часткового фінансування в межах виконання держбюджетних тем № 24БФ023-01 та № 22БФ023-04.

Список використаних джерел

- Bogatov, S. A., Borovoi, A. A., Gavrilov, S. L., Lagunenka, A. S., Pazukhin, E. M., & Khvoshchinskii, V. A. (2007). Database on location and status of nuclear fuel at unit-4 of chernobyl NPP before and after accident. *Preprint of RRC "Kurchatov Institute"*, 130–11/2, 1–147. <http://surl.li/ehrz>
- Jokisch, H., Carstensen, K., Dau, W. D., Meyer, H. D., & Allkofer, O. C. (1979). Cosmic-ray muon spectrum up to 1 TeV at 75° zenith angle. *Physical Review D*, 19, 1368. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.19.1368>
- Miyadera, H., Borozdin, K. N., Greene, S. J., Lukić, Z., Masuda, K., Milner, E. C., Morris, C. L., & Perry, J. O. (2013). Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons. *AIP Advances*, 3, 052133. <https://doi.org/10.1063/1.4808210>
- Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., Masoni, A., Mikhasenko, M., Mitchell, R. E., Patrignani, C., Schwanda, C., Spanier, S., Venanzoni, G., Yuan, C. Z., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., & Zyla, P. A. (Particle Data Group). (2024). *Physical Review D* 110, 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001>
- Pena-Rodríguez, J., Vesga-Ramírez, A., Vasquez-Ramírez, A., Suarez-Duran, M., de Leon-Barrios, R., Sierra-Porta, D., Calderon-Ardila, R., Pisco-Guavabe, J., Asorey, H., Sanabria-Gomez, J. D., & N'úñez, L. A. Muography in Colombia: simulation framework, instrumentation and data analysis. (2022). *Journal of Advanced Instrumentation in Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11160>
- Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., Jaimes-Motta, A., Calderón-Ardila, R., Peña-Rodríguez, J., Sánchez-Villafrales, J., Sanabria-Gómez, J. D., Asorey, H., & Núñez, L. A. (2020). Simulated response of MuTe, a hybrid Muon Telescope. *Journal of Instrumentation*, 15(08), P08004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/P08004>
- Vetter, K. (2020). The Nuclear Legacy Today of Fukushima, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 70, 257–292.
- Vesga-Ramírez, A., Sanabria-Gómez, J. D., Sierra-Porta, D., Arana-Salinas, L., Asorey, H., Kudryavtsev, V. A., Calderón-Ardila, R., & Núñez, L. A. (2021). Simulated Annealing for volcano muography. *Journal of South American Earth Sciences*, 109, id. 103248. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103248>
- Workman, R. L., Burkert, V. D., Crede, V., Klempt, E., Thoma, U., Tiator, L., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., Amsler, C., Antonelli, M., Aschenauer, E. C., Asner, D. M., Baer, H., Banerjee, Sw., Barnett, R. M., Baudis, L., Bauer, C. W., & Zyla, P. A. (Particle Data Group). (2022). Review of Particle Physics, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 8, 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>

References

- Bogatov, S. A., Borovoi, A. A., Gavrilov, S. L., Lagunenka, A. S., Pazukhin, E. M., & Khvoshchinskii, V. A. (2007). Database on location and status of nuclear fuel at unit-4 of chernobyl NPP before and after accident. *Preprint of RRC "Kurchatov Institute"*, 130–11/2, 1–147. <http://surl.li/ehrz>
- Jokisch, H., Carstensen, K., Dau, W. D., Meyer, H. D., & Allkofer, O. C. (1979). Cosmic-ray muon spectrum up to 1 TeV at 75° zenith angle. *Physical Review D*, 19, 1368. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.19.1368>
- Miyadera, H., Borozdin, K. N., Greene, S. J., Lukić, Z., Masuda, K., Milner, E. C., Morris, C. L., & Perry, J. O. (2013). Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons. *AIP Advances*, 3, 052133. <https://doi.org/10.1063/1.4808210>
- Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., Masoni, A., Mikhasenko, M., Mitchell, R. E., Patrignani, C., Schwanda, C., Spanier, S., Venanzoni, G., Yuan, C. Z., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., & Zyla, P. A. (Particle Data Group). (2024). *Physical Review D* 110, 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001>
- Pena-Rodríguez, J., Vesga-Ramírez, A., Vasquez-Ramírez, A., Suarez-Duran, M., de Leon-Barrios, R., Sierra-Porta, D., Calderon-Ardila, R., Pisco-Guavabe, J., Asorey, H., Sanabria-Gomez, J. D., & N'úñez, L. A. Muography in Colombia: simulation framework, instrumentation and data analysis. (2022). *Journal of Advanced Instrumentation in Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11160>
- Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., Jaimes-Motta, A., Calderón-Ardila, R., Peña-Rodríguez, J., Sánchez-Villafrales, J., Sanabria-Gómez, J. D., Asorey, H., & Núñez, L. A. (2020). Simulated response of MuTe, a hybrid Muon Telescope. *Journal of Instrumentation*, 15(08), P08004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/P08004>
- Vetter, K. (2020). The Nuclear Legacy Today of Fukushima, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 70, 257–292.
- Vesga-Ramírez, A., Sanabria-Gómez, J. D., Sierra-Porta, D., Arana-Salinas, L., Asorey, H., Kudryavtsev, V. A., Calderón-Ardila, R., & Núñez, L. A. (2021). Simulated Annealing for volcano muography. *Journal of South American Earth Sciences*, 109, id. 103248. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103248>
- Workman, R. L., Burkert, V. D., Crede, V., Klempt, E., Thoma, U., Tiator, L., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., Amsler, C., Antonelli, M., Aschenauer, E. C., Asner, D. M., Baer, H., Banerjee, Sw., Barnett, R. M., Baudis, L., Bauer, C. W., & Zyla, P. A. (Particle Data Group). (2022). Review of Particle Physics, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 8, 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>

Отримано редакцією журналу / Received: 01.12.24

Прорецензовано / Revised: 04.12.24

Схвалено до друку / Accepted: 06.12.24

Alona MOZGOVA¹, PhD (Phys. & Math.)
 ORCID ID: 0000-0002-8490-4327
 e-mail: alenamozgova@knu.ua

Bohdan HNATYK¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
 ORCID ID: 0000-0001-8311-0907
 e-mail: bhnatyk@knu.ua

Yelyzaveta ZHYHANIUK¹, Student
 ORCID ID: 0009-0005-2632-6345
 e-mail: zhyganiuk.elizaveta@gmail.com

Sergey GABELKOV², DSc (Phys. & Math.)
 ORCID ID: 0000-0002-2303-4305
 e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Chernobyl, Ukraine

MUON TOMOGRAPHY: LOOKING INSIDE NUCLEAR REACTORS

Background. Cosmic rays – high-energy charged particles (electrons, protons, heavier nuclei) – constantly bombard the Earth's atmosphere and generate showers of secondary cosmic rays, in particular, high-energy muons. Muons have high mean range even in materials with high density, therefore they are an effective source of signals for tomographic studies of large-scale objects up to hundreds of meters and even up to kilometers. In particular, muon tomography is now the only method for remotely studying the spatial distribution of various components of nuclear reactors. In this paper a scheme for studying the structure of a nuclear-dangerous accumulation in the destroyed fourth reactor of the Chernobyl NPP with the help of muon tomography is proposed.

Methods. Primary cosmic rays reach the Earth's atmosphere, interact with atmospheric nuclei (N, O, etc.) and, as a result of nuclear cascades, generate showers of secondary particles. These include the muon flux. Since our atmosphere is constantly bombarded by cosmic rays, the flux of muons is constantly coming from the atmosphere to the Earth's surface and due to the high energy of muons (from 1 GeV to tens of TeV), they have a high penetration power and can penetrate underground to depths of hundreds of meters and up to several kilometers into solid rocks. At the same time, due to energy losses and scattering, the integral intensity of muons decreases depending on the passed column density X as the product of the density of the medium ρ by the passed distance L : $X(L)=\rho \cdot L$. Position-sensitive muon detectors, in particular, hodoscopes, record the integral intensity of muons at a certain solid angle and, using the integral intensity map, allow to reproduce the value of X – the distribution of the absorbing substance along the line of sight. Based on observations of an object from several locations with different zenith and azimuth angles, it is possible to reproduce a 3D distribution of absorbers in the object.

Results. A method for muon tomography using to determine the internal structure of the melt of fuel-containing materials, in particular, a nuclear-dangerous accumulation in the destroyed fourth reactor of the Chernobyl nuclear power plant, is proposed. The integral intensity of muons with momentum $p > 1.12$ GeV/c at the zenith angle of 75° (the observation direction of the hodoscope) is $I(>p=1.12 \text{ GeV/c})=6.90 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$. The number of muons recorded in the solid angle (pixels in the sky) $\delta\Omega=1.0 \cdot 10^{-3} \text{ sr}$ with an effective area of $\Sigma=5.76 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ and an observation time of 100 days ($8.64 \cdot 10^6 \text{ s}$) would be $N_\mu=3.43 \cdot 10^4$. If there is an absorbing object with a density ρ , length L and the corresponding column density $X(L)=\rho \cdot L$ on the line of sight of the telescope, then when a layer of concrete 10 m thick, muons with an initial momentum of $p > 5$ GeV/c will fall on the detector. If the density of the absorbing object – a nuclear-dangerous cluster – is equal to 5 g/cm^3 , muons with an initial momentum of $p > 10.4$ GeV/c, integral intensity $I(>p=10.4 \text{ GeV/c})=2.65 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, and the number of registered muons – $1.32 \cdot 10^4$. That is, the sensitivity of the proposed method is sufficient to confidently determine the internal structure of the melt of fuel-containing materials.

Conclusions. Muon tomography is currently the only effective method for remote study of the spatial distribution of nuclear reactor components. In this paper a scheme for studying the structure of a nuclear-dangerous accumulation in the destroyed fourth reactor of the Chernobyl NPP with the help of muon tomography is proposed. It is shown that for the specified parameters of the hodoscope, it is possible to perform muon tomography of the reactor with an observation time from one location of about 100 days.

Keywords: muons, cosmic rays, muon tomography, nuclear safety, nuclear reactors, ChNPP.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.