

Renata Bożek*
Magdalena Dobrowolska⁺
Artur Obłuski[‡]
Jaap Velthuis[§]
Noemi Zabari[!]
Katsiaryna Katrankova[¶]

Rozwój metod analizy strukturalnej stanowisk archeologicznych i formacji geologicznych oraz pojedynczych obiektów dziedzictwa kulturowego z zastosowaniem nieniszczącej metody radiografii i tomografii mionowej[†]

The development of methods for the non-destructive structural analysis of archaeological sites, geological formations and individual cultural heritage objects using radiography and muon tomography[†]

Renata Bożek et al., *Rozwój metod analizy strukturalnej stanowisk archeologicznych i formacji geologicznych oraz pojedynczych obiektów dziedzictwa kulturowego z zastosowaniem nieniszczącej metody radiografii i tomografii mionowej*, „Ochrona Zabytków” 2025, nr 2, s. 51–72.

* Muotech sp. z o.o., Rzeszów; Państwowe Muzeum Auschwitz-Birkenau w Oświęcimiu, e-mail: renata@muotech.io

⁺ Muotech sp. z o.o., Rzeszów; School of Physics, HH Wills Physics Laboratory, University of Bristol, ORCID: 0000-0002-9851-8814, e-mail: magda@muotech.io

[‡] Centrum Archeologii Śródziemnomorskiej Uniwersytetu Warszawskiego, ORCID: 0000-0001-8527-3523

[§] School of Physics, HH Wills Physics Laboratory, University of Bristol, ORCID: 0000-0002-4649-3221, e-mail: jaap.velthuis@bris.ac.uk

[!] Muotech sp. z o.o., Rzeszów, ORCID: 0000-0001-6835-3687, e-mail: noemi@muotech.io

[¶] Muotech sp. z o.o., Rzeszów, e-mail: kate@muotech.io

[†] Artykuł powstał na podstawie wystąpienia podczas II edycji międzynarodowej konferencji *ETHER – Eternal Heritage / Wieczne Dziedzictwo*, która odbyła się 5 i 6 listopada 2024 roku w Warszawie. Organizatorem wydarzenia był Narodowy Instytut Dziedzictwa, a współorganizatorem – Muzeum Historii Żydów Polskich POLIN.

[†] This article is based on a presentation given during the second edition of the international *ETHER – Eternal Heritage / Wieczne Dziedzictwo* conference, held on 5 and 6 November 2024 in Warsaw. The event was organized by the National Institute of Cultural Heritage and co-organized by the POLIN Museum of the History of Polish Jews.

Abstrakt

Artykuł omawia zastosowanie radiografii i tomografii mionowej w badaniach stanowisk archeologicznych, formacji geologicznych oraz obiektów dziedzictwa kulturowego. Wyjaśnia, w jaki sposób miony – naturalnie występujące cząstki kosmiczne zdolne do przenikania przez duże materie – umożliwiają nieniszczącą analizę struktur wewnętrznych.

W treści podkreślono szeroki zakres zastosowań wspomnianych metod, w tym badania piramid w Gizie i Teotihuacán, analizę wulkanów, monitorowanie stabilności konstrukcyjnej zabytkowych budowli oraz badanie mniejszych artefaktów kulturowych. Tekst akcentuje, że obrazowanie mionowe jako metoda nieinwazyjna daje wysoką precyzję przestrzenną i cenne informacje, doskonale uzupełnia inne techniki i sprawdza się w trudnych warunkach. Radiografia i tomografia mionowa to obiecujące narzędzia przyszłości w ochronie dziedzictwa kulturowego i badaniach archeologicznych.

Słowa kluczowe

tomografia mionowa, radiografia mionowa, obrazowanie, archeologia, konserwacja, nieinwazyjna inspekcja

Abstract

The article discusses the application of radiography and muon tomography in the study of archaeological sites, geological formations and cultural heritage objects. It explains how muons – naturally occurring cosmic particles with the capability to penetrate thick materials – enable the non-destructive analysis of internal structures.

The article highlights the wide range of applications of these methods, including the study of the pyramids at Giza and Teotihuacán, the analysis of volcanoes, the monitoring of the structural stability of historic buildings, and the study of smaller cultural artefacts. The text emphasizes that muon imaging, as a non-invasive method, provides high spatial precision and valuable information, perfectly complements other techniques, and works well in difficult conditions. Muon radiography and tomography are promising tools for the future protection of cultural heritage and archaeological research.

Keywords

muon tomography, muon radiography, imaging, archaeology, conservation, non-invasive inspection

POSTĘP W DZIEDZINIE FIZYKI CZĄSTEK UMOŻLIWIŁ OPRACOWANIE METOD NIENISZCZĄCYCH, które wykorzystują techniki atomowe i jądrowe. Coraz częściej znajdują one zastosowanie w ochronie i dokumentacji dziedzictwa kulturowego jako bezinwazyjne narzędzia obrazowania. Do takich metod należą radiografia i tomografia mionowa, pozwalające zajrzeć do wnętrza obiektów i struktur¹. Miony to cząstki wysokoenergetyczne o dużej zdolności przenikania przez materię, umożliwiające obrazowanie wewnętrznej struktury obiektów bez konieczności stosowania dodatkowych źródeł promieniowania. Detekcja mionów rozwijana jest od lat 50. XX wieku. W ostatnich latach zyskuje coraz więcej praktycznych zastosowań, szczególnie w badaniach geofizycznych. Wykorzystywana jest również w przemyśle jądrowym, budownictwie, inżynierii lądowej, bezpieczeństwie oraz badaniach obiektów dziedzictwa kulturowego – na przykład do analizy konstrukcji piramid egipskich. Ze względu na zdolność przenikania przez całe struktury oraz całkowitą nieinwazyjność zastosowanie tomografii/radiografii mionowej stwarza ogromne możliwości w ochronie dziedzictwa kulturowego.

Przykłady w tym artykule dobrano tak, aby pokazać wpływ różnych zmiennych na skuteczność obrazowania mionowego: skalę obiektu, rodzaj materiału, środowisko oraz wymagania konserwatorskie. Dzięki temu można uchwycić zarówno potencjał metody, jak i jej ograniczenia.

¹ L. Bonechi, R. D'Alessandro, A. Giammanco, *Atmospheric Muons as an Imaging Tool*, „Reviews in Physics” 2020, vol. 5.

Pionierskie badania w piramidzie Chefrena w Gizie w latach 60. XX wieku dowiodły, że miony można wykorzystać do prześwietlania masywnych struktur bez ich naruszania. Technologia była wówczas niedoskonała i nie przyniosła szybkich rezultatów, ale zapoczątkowała dalszy rozwój badań. Projekt ScanPyramids w piramidzie Cheopsa zostanie tu przywołany jako przykład istotnego osiągnięcia współczesnej technologii obrazowania z użyciem mionów. Ukazuje on, jak postęp w tej metodzie detekcji oraz nowoczesne algorytmy przetwarzania danych umożliwiły dokonanie istotnego odkrycia.

Badania Piramidy Słońca w Teotihuacán posłużyły do przedstawienia wyzwań związanych z adaptacją metody do innych materiałów budowlanych, takich jak ziemia czy cegły. Ten przykład podkreśla, że skuteczność radiografii mionowej w równym stopniu zależy od zrozumienia specyfiki materiałowej i architektonicznej obiektu, co od zaawansowania technologicznego. Stanowisko archeologiczne w La Milpa dowodzi przydatności obrazowania mionami w trudnym terenie, gdzie stosowanie standardowych metod geofizycznych jest ograniczone.

Prace prowadzone w Neapolu ilustrują zastosowanie metody mionowej w złożonych środowiskach: na skalistym podłożu wulkanicznym oraz w warunkach gęstej zabudowy miejskiej, z licznymi nakładającymi się warstwami archeologicznymi i współczesnymi strukturami. Jako przykłady wybrano badania Palazzo della Loggia w Brescii, Kopuły Brunelleschiego we Florencji oraz murów obronnych w Xi'an, aby pokazać wykorzystanie obrazowania mionami w monitorowaniu stanu zachowania obiektów architektonicznych i podkreślić zdolność do wykrywania tą metodą powolnych deformacji oraz ukrytych elementów konstrukcyjnych. Potencjał tej technologii w diagnostyce i prewencji konserwatorskiej zaprezentowano na przykładzie badań przeprowadzonych przez zespół naukowców z Cornell University, który wykonał wstępne analizy między innymi zabytków z kolekcji muzeów w Belgii. Wymienione przypadki potwierdzają skuteczność metody obrazowania mionami, która obecnie może być pełnoprawnym i istotnym narzędziem we współczesnych badaniach w dziedzinie ochrony dziedzictwa kulturowego, uzupełniającym tradycyjne techniki.

Obecne metody

Obecnie wśród nieniszczących metod badań w archeologii stosowane są metody teledetekcji, dzielące się na pasywne i aktywne. Pasywne opierają się na wykorzystywaniu naturalnego promieniowania docierającego do sensora urządzenia pomiarowego. Najpopularniejszą i najdłużej stosowaną z nich jest fotografia. W obrazowaniu całych stanowisk archeologicznych wykorzystywana jest fotografia lotnicza wykonywana z różnych wysokości. Większą częstotliwość obrazowania, niezależnie od warunków atmosferycznych, umożliwia obrazowanie radarowe. Trzecia z pasywnych metod to prospekcja magnetyczna, służąca do rejestrowania anomalii magnetycznych pod powierzchnią gruntu. Metody aktywne polegają na emisji energii z urządzenia pomiarowego i rejestracji sygnału odbitego od elementów struktury. Do tej grupy należą: metoda elektrooporowa, georadar oraz skanowanie laserowe. Te ugruntowane w badaniach archeologicznych metody są stale udoskonalane – szczególnie w zakresie wykorzystania zaawansowanych modeli matematycznych, analizy danych oraz optymalizacji układów pomiarowych².

Dzięki metodom teledetekcji, wspieranym przez narzędzia geoinformacyjne i technologie cyfrowe, możliwe jest nowoczesne zarządzanie danymi, co miało istotne znaczenie choćby w programie AZP+ (Archeologiczne Zdjęcie Polski Plus), opracowanym przez Narodowy Instytut Dziedzictwa. Celem projektu było rozpoznanie dziedzictwa archeologicznego w skali ogólnokrajowej, zwiększenie efektywności zarządzania danymi o dziedzictwie, podnoszenie kwalifikacji archeologów i służb konserwatorskich oraz upowszechnianie wiedzy o archeologii. Program ten stanowi jedną z najbardziej obiecujących strategii wspierających efektywną dokumentację

² *Metody teledetekcyjne dla archeologów. Poradnik*, cz. 1, red. A. Makowska, W. Rączkowski, Warszawa 2023, s. 20.

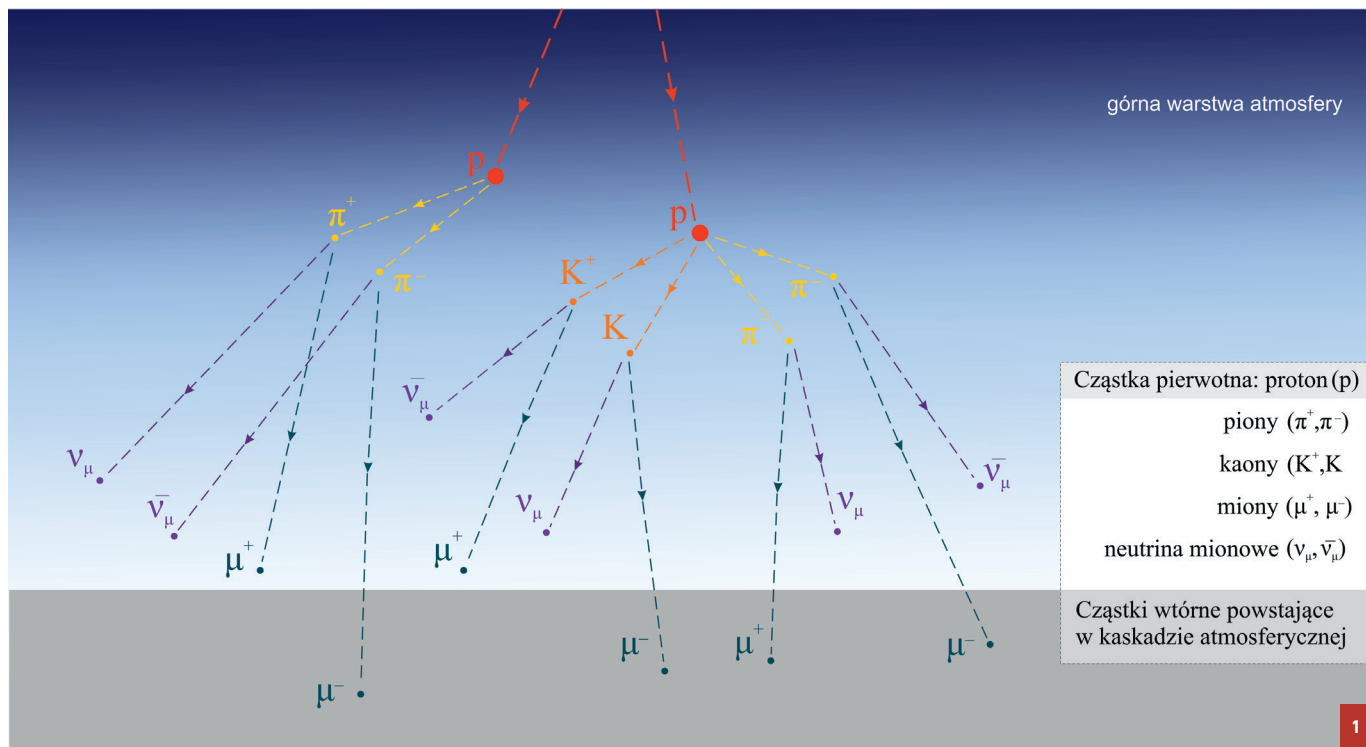
i zarządzanie dziedzictwem z wykorzystaniem metod nieinwazyjnych. Jego rozwiązania opierają się na postanowieniach sygnowanej przez Polskę Europejskiej konwencji o ochronie dziedzictwa archeologicznego. Niestety na razie zatrzymał się na etapie koncepcyjnym – nie uzyskał finansowania i nie został wdrożony.

Radiografia i tomografia mionowa należą do dynamicznie rozwijających się metod obrazowania, stosowanych przede wszystkim w badaniach pojedynczych i złożonych obiektów dziedzictwa kulturowego. Najlepiej sprawdza się przy masywnych konstrukcjach kamiennych oraz formacjach skalnych, w przypadku których tradycyjne techniki nieinwazyjne mają ograniczenia. Choć opisywana metoda nie jest przeznaczona do prospekcji masowej, to w praktyce znajduje zastosowanie w różnorodnych obiektach i wszędzie tam, gdzie istotna jest głęboka penetracja materiału przy zachowaniu pełnej nieinwazyjności. Rozwój tej technologii oraz narzędzi analitycznych stopniowo zwiększa precyzję badań, co ma szczególne znaczenie wobec narastającej degradacji materiałowej oraz intensywnego użytkowania wielu zabytków. Analiza struktur wewnętrznych obiektów zabytkowych bez ingerencji w ich integralność fizyczną wymaga zastosowania technik obrazowania o wysokiej zdolności penetracji, które zapewniają bezpieczeństwo zarówno obiektowi i otoczeniu, jak i konserwatorom oraz badaczom. Obecnie laboratoria konserwatorskie i instytuty badawcze wykorzystują radiografię i tomografię rentgenowską do obrazowania wnętrza obiektów oraz fluorescencję rentgenowską do oznaczania składu pierwiastkowego materiału. Wspomniane metody wymagają jednak stosowania źródeł promieniowania lub akceleratorów cząstek, co wiąże się z ryzykiem dla badanych obiektów i osób obsługujących te urządzenia, wysokimi kosztami oraz rozbudowanymi procedurami bezpieczeństwa. W tym kontekście technologia obrazowania za pomocą mionów może być metodą komplementarną, umożliwiającą bezpieczne bezpośrednie obrazowanie obiektów³.

Czym są miony?

Miony to cząstki elementarne o właściwościach podobnych do elektronów, ale mające około 200 razy większą masę. Powstają, gdy pierwotne promieniowanie kosmiczne zderza się z atomami w górnych warstwach atmosfery ziemskiej. W wyniku tych zderzeń tworzy się wtórne promieniowanie kosmiczne, którego częścią jest strumień mionów docierający do powierzchni Ziemi (il. 1). Podczas przechodzenia przez różne materiały miony oddziałują z ich strukturą. W efekcie stopniowo tracą energię kinetyczną i zmieniają kierunek ruchu. Podobnie jak promieniowanie rentgenowskie miony przenikają przez materię, jednak ich znacznie większa zdolność penetracji pozwala na badanie obiektów o większych rozmiarach i wyższej gęstości. Dzięki temu możliwe jest obrazowanie struktur, które w pewnych przypadkach pozostają poza zasięgiem tradycyjnych metod archeologicznych, takich jak metoda elektrooporowa czy elektromagnetyczna. Metody mionowe pozwalają na nieinwazyjne rozpoznawanie podziemnych struktur i tworzenie ich trójwymiarowych modeli. Ich skuteczność może być jednak ograniczona przez właściwości fizyczne obiektów i podłoża, co często prowadzi do niskiego kontrastu sygnału. Dodatkowo zakłócenia zewnętrzne i warunki środowiskowe mogą utrudniać interpretację wyników. Z kolei promieniowanie rentgenowskie jest stosowane przede wszystkim w diagnostyce konserwatorskiej, ponieważ dobrze obrazuje struktury o mniejszych rozmiarach i materiały o niskiej gęstości, na przykład kości, drewno, tkaniny, papier czy cienką ceramikę z małą zawartością tlenków metali. Obrazowanie przy użyciu mionów uzupełnia te metody i pozwala na badanie dużych obiektów, znajdujących się nawet kilkaset metrów pod ziemią, oraz obrazowanie struktur składających się z materiałów o wysokiej gęstości, takich jak metale, skały czy kompozyty betonowe. Możliwości metod mionowych są szczególnie przydatne w badaniach archeologicznych oraz analizie struktury zabytków architektury i zabytków ruchomych wykonanych z gęstych materiałów.

³ G. Festa et al., *Neutrons for Cultural Heritage – Techniques, Sensors, and Detection*, „Sensors” 2020, vol. 20, iss. 2, s. 502.



1 Uproszczony schemat powstawania mionów w wyniku oddziaływań pierwotnego promieniowania kosmicznego z atmosferą ziemską. Rys. Renata Bożek

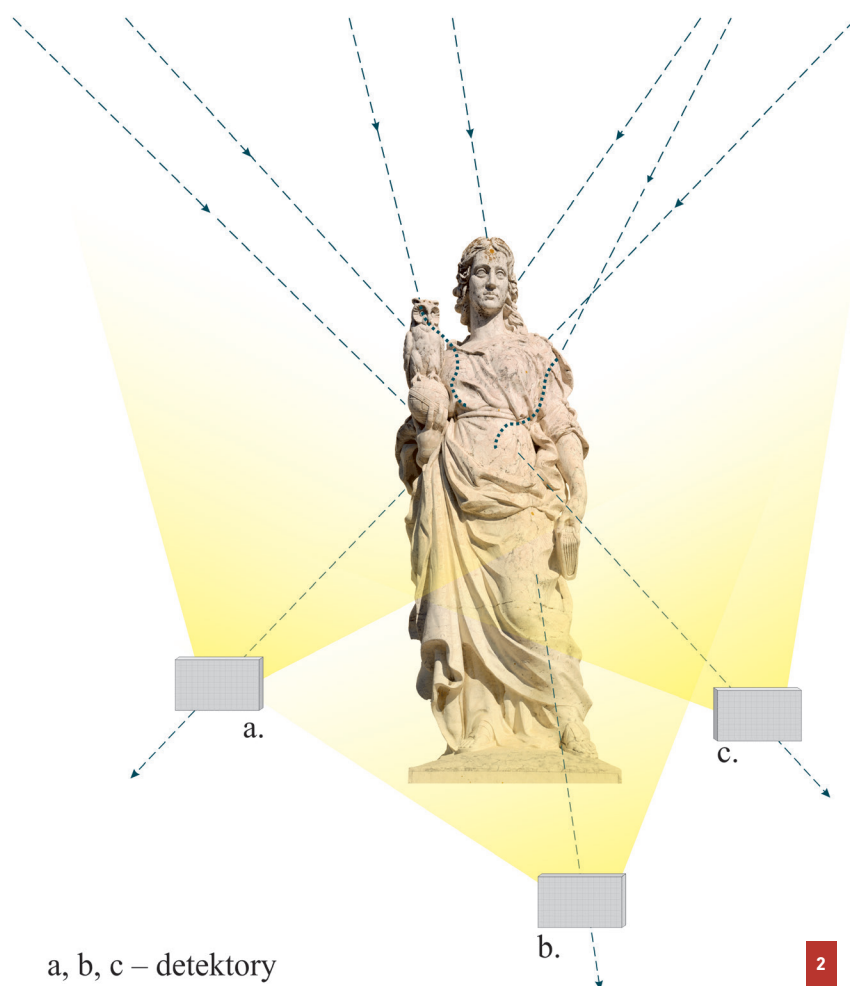
Simplified diagram of the formation of muons as a result of the interaction of primary cosmic radiation with the Earth's atmosphere. Compil: Renata Bożek

Miony są wtórną składową promieniowania kosmicznego, a ich detekcja dostarcza danych umożliwiających obrazowanie ukrytych struktur archeologicznych i geologicznych, w tym obiektów położonych w miejscach trudno dostępnych lub całkowicie niedostępnych dla innych metod geofizycznych. Główną zaletą tej techniki jest odporność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz brak konieczności ingerencji w badany obiekt⁴.

Wyróżniamy dwie nieinwazyjne techniki badawcze oparte na detekcji mionów. Pierwszą jest radiografia mionowa (il. 2), w której analizuje się pochłanianie mionów przez badany obiekt. Radiografia mionowa wymaga stosunkowo prostego wyposażenia. Wystarczy jeden zestaw detektorów umieszczony pod badanym obiektem lub obok niego. Detektory rejestrują tory lotu mionów i analizują, ile z nich zostało pochłoniętych przez strukturę. Metoda ta sprawdza się szczególnie dobrze przy badaniu większych obiektów, takich jak budynki, relikty budynków zachowane pod ziemią, tunele czy kopalnie. Drugą techniką jest tomografia rozpraszania mionów (il. 3)⁵, w której bada się zmiany kierunku ruchu mionów podczas przechodzenia przez dany materiał. Tomografia rozpraszania opiera się na obserwacji zjawiska rozpraszania mionów podczas przechodzenia przez materię. Miony ulegają drobnym odchyleniom od pierwotnego toru lotu, podobnie jak światło załamuje się, przechodząc przez różne ośrodki. Wielkość tych odchylenia zależy od właściwości i gęstości napotkanego materiału. Analiza kątów odchylenia pozwala uzyskać informacje o strukturze wewnętrznej badanego obiektu. Metoda ta wymaga minimum dwóch zestawów detektorów: jednego umieszczonego przed obiektem, drugiego umieszczonego za nim. Tomografia rozpraszania jest szczególnie przydatna przy badaniu mniejszych obiektów, takich jak sarkofagi, rzeźby czy detale architektoniczne. Proces badania za pomocą mionów

⁴ M. Tanabashi et al., *Review of Particle Physics*, „Physical Review D” 2018, vol. 98, s. 424.

⁵ K.N. Borozdin et al., *Radiographic Imaging with Cosmic-Ray Muons*, „Nature” 2003, vol. 422, s. 277.



2

Uproszczony schemat radiografii mionowej.
Rys. Renata Bożek

Simplified diagram of muon radiography.
Compil: Renata Bożek

a, b, c – detektory

2

składa się z kilku etapów. Pierwszym jest wykrywanie mionów za pomocą detektorów. Detektory te mają charakter pasywny i – podobnie jak w technice fotograficznej rejestrującej skutek działania fotonów – rejestrują naturalny strumień mionów. Obecnie najczęściej stosowanymi urządzeniami detekcyjnymi są detektory scyntylacyjne, w których materiałem detekcyjnym jest plastik organiczny. Detektory gazowe zapewniają większą precyzję od scyntylacyjnych, jednak ze względu na swoją budowę są droższe i trudniejsze w instalacji. Trzecią grupę stanowią detektory emulsji jądrowej, tanie i łatwe w instalacji, działające na zasadzie podobnej jak w tradycyjnej fotografii analogowej, w której cząstki pozostawiają ślady na specjalnej emulsji. Wadą tej metody jest konieczność wywoływania emulsji. Płytkę z emulsją jest chemicznie utrwalana, aby ujawnić ślady cząstek zapisane na materiale podczas ekspozycji. Emulsja musi być szczególnie chroniona w trakcie transportu do specjalistycznych pracowni.

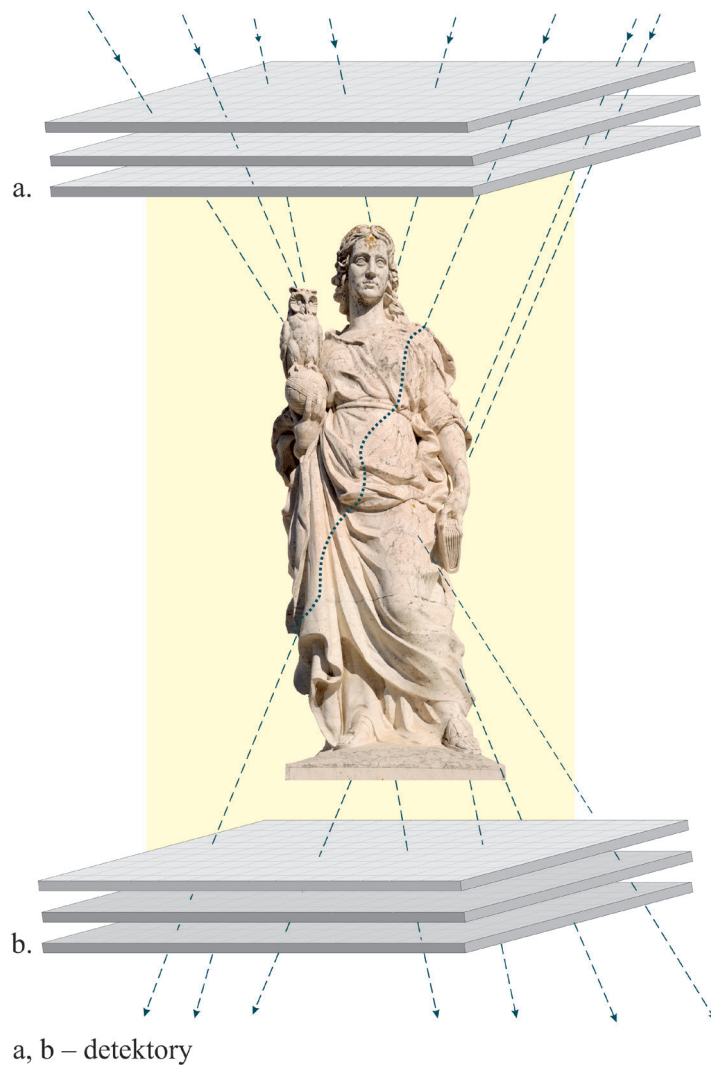
Surowe dane pozyskane z detektorów muszą być poddane analizie. W tym celu wykorzystuje się algorytmy obliczeniowe, w tym metodę modelowania matematycznego Monte Carlo, która jest używana między innymi do analizy zdjęć rentgenowskich czy tomografii komputerowej stosowanej w medycynie⁶. Obecnie do analizy danych coraz powszechniej wykorzystuje się sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe. Wszystkie te techniki służą do rekonstrukcji obrazów i interpretacji uzyskanych wyników. Etapy całego procesu – od rejestracji mionów, po rekonstrukcję i interpretację – przedstawiono na il. 6.

⁶ H.K.M. Tanaka et al., *Muography*, „Nature Reviews Methods Primers” 2023, vol. 3, s. 88.

3

Uproszczony schemat tomografii mionowej.
Rys. Renata Bożek

Simplified diagram of muon tomography.
Compil: Renata Bożek



3

Krótki zarys historii rozwoju technologii opartej na wykrywaniu mionów

Początki badań nad promieniowaniem kosmicznym sięgają pierwszych dekad XX wieku⁷. Same miony odkryto zaś w 1936 roku (dokonali tego Seth Neddermeyer i Carl Anderson)⁸. Już w 1955 roku Eric Philip George zastosował je do badań geologicznych w Australii⁹. W latach 70. XX wieku Lars Erik Malmqvist wykorzystywał obrazowanie mionami w górnictwie i geofizyce¹⁰. W tym samym czasie Luis Walter Alvarez prowadził pionierskie próby obrazowania zabytków¹¹. Lata 90. przyniosły rozwój badań wulkanów w Japonii, a od 2000 roku technikę mionową zaczęto

⁷ T. Wulf, *About the Radiation of High Penetration Capacity Contained in the Atmosphere*, „Physikalische Zeitschrift” 1910, vol. 10, s. 152–157; D. Pacini, *Penetrating Radiation at the Surface of and in Water*, arxiv.org/abs/1002.1810, 9.02.2010, dostęp: 30.04.2025.

⁸ S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*, „Physical Review” 1937, vol. 51, s. 884; P. Galison, *The Discovery of the Muon and the Failed Revolution against Quantum Electrodynamics*, „Centaurus” 2008, vol. 50, iss. 2, s. 24.

⁹ E.P. George, *Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel*, „Commonwealth Engineer” 1955, vol. 42, s. 455.

¹⁰ L. Malmqvist et al., *Theoretical Studies of In-Situ Rock Density Determinations Using Underground Cosmic-Ray Muon Intensity Measurements with Application in Mining Geophysics*, „Geophysics” 1979, vol. 44, iss. 9, s. 1549–1569.

¹¹ L.W. Alvarez et al., *Search for Hidden Chambers in the Pyramids. The Structure of the Second Pyramid of Giza Determined by Cosmic-Ray Absorption*, „Science” 1970, vol. 167, iss. 3919, s. 832–839.

stosować również w detekcji materiałów o wysokiej liczbie atomowej¹². Przełomowym momentem było jednak monitorowanie w 2009 roku aktywności jednego z najaktywniejszych wulkanów w Japonii – wulkanu Asama – przez zespół z Uniwersytetu Kiusiu oraz Japońskiej Agencji Badań Kosmicznych (JAXA)¹³. Na początku XXI wieku miony zaczęto wykorzystywać również do wykrywania materiałów o wysokiej liczbie atomowej, w tym materiałów radioaktywnych, co otworzyło nowe możliwości w zakresie bezpieczeństwa oraz zastosowań w energetyce jądrowej¹⁴.

Obecnie miony znajdują zastosowanie w różnorodnych dziedzinach, od górnictwa i energetyki jądrowej po ochronę dziedzictwa kulturowego.

Wykorzystanie radiografii mionowej w ochronie dziedzictwa kulturowego na świecie

Nowe możliwości w badaniach nad dziedzictwem archeologicznym, a także w dokumentacji i konserwacji obiektów dziedzictwa kulturowego, jakie otwiera fizyka cząstek, znajdują potwierdzenie w prowadzonych obecnie badaniach z wykorzystaniem radiografii i tomografii mionowej¹⁵. Zapoczątkowały je pionierskie badania Luisa Waltera Alvareza i jego zespołu, przeprowadzone w Piramidzie Chefrena w latach 60. XX wieku. Badacze dążyli do wykrycia nieznanymi komór bez naruszania konstrukcji budowli. Analizowali w tym celu rozkład kątowy mionów wnikających w głąb piramidy i porównywali go z jej modelem geometrycznym. Detektory mionów zainstalowano w tak zwanej komorze Belzoniego. Po kilku latach zbierania danych nie wykryto anomalii, które wskazywałyby na istnienie nieznanymi pustek. Choć z perspektywy archeologicznej eksperyment nie doprowadził do odkrycia nowych przestrzeni, to stanowił przełom metodologiczny, dowiódł bowiem, że miony mogą być używane do nieinwazyjnego prześwietlania masywnych struktur kamiennych, podobnie jak rentgen, ale w znacznie większej skali.

Po eksperymencie Alvareza badania nie były kontynuowane przez długi czas z kilku powodów. Po pierwsze, ówczesna technologia nie była jeszcze wystarczająco rozwinięta, a detektory charakteryzowały się dużymi rozmiarami, a małą czułością i wymagały wieloletniego zbierania danych. Po drugie, istotne okazały się kwestie finansowe oraz brak współpracy interdyscyplinarnej. Ponadto instalacja detektorów wymagała licznych zezwoleń, dostępu do źródeł energii oraz zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. W rezultacie metoda ta była bardzo kosztowna, powolna, mało precyzyjna i miała ograniczoną wartość aplikacyjną w archeologii¹⁶.

Od tamtego czasu technologia radiografii mionowej przeszła ogromną ewolucję, a jej zastosowanie w archeologii przyniosło istotne osiągnięcia. Dzisiejsze badania nad ukrytymi strukturami obejmują różnorodne konteksty archeologiczne, od starożytnych monumentów po współczesne środowiska miejskie¹⁷. Każdy z tych kontekstów stawia przed badaczami inne wyzwania techniczne i metodologiczne. Przełomem okazały się prace międzynarodowych zespołów badawczych w ramach projektu ScanPyramids. Dzięki wykorzystaniu zaawansowanych detektorów mionów oraz nowoczesnych algorytmów przetwarzania danych udało się im wreszcie ujawnić oczekiwane pustki wewnątrz największej piramidy w Gizie. Ten sukces był możliwy dzięki znacznemu postępowi w technologii detekcji oraz lepszemu zrozumieniu fizyki mionów, a także dzięki rozwiązaniu problemów metodologicznych, które przez dziesięciolecia hamowały rozwój

¹² K. Nagamine et al., *Method of Probing Inner-Structure of Geophysical Substance with the Horizontal Cosmic-Ray Muons and Possible Application to Volcanic Eruption Prediction*, „Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment” 1995, vol. 356, iss. 2–3, s. 585–595.

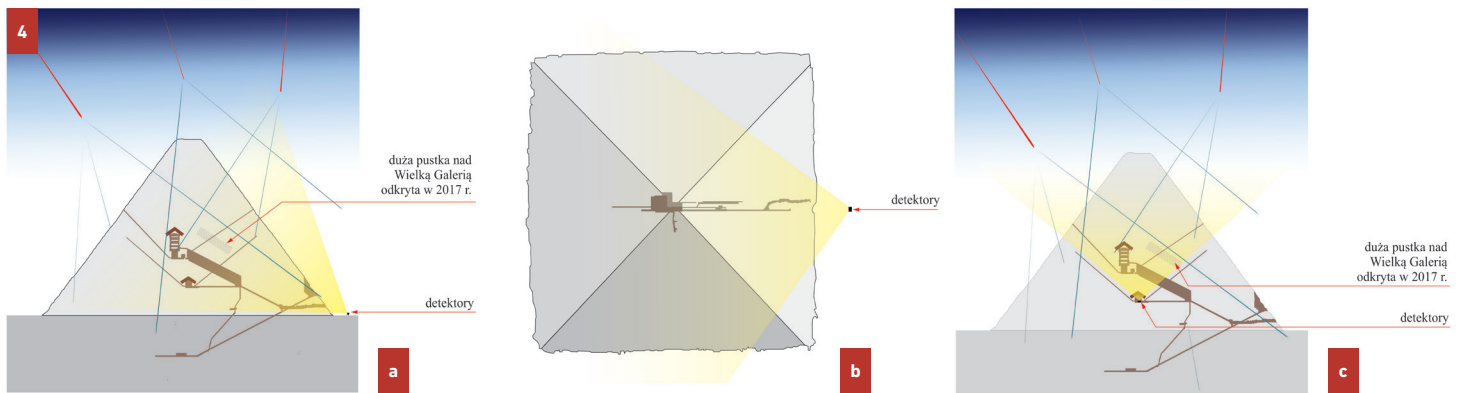
¹³ H.K.M. Tanaka et al., *Detecting a Mass Change Inside a Volcano by Cosmic-Ray Muon Radiography (Muography). First Results from Measurements at Asama Volcano, Japan*, „Geophysical Research Letters” 2009, vol. 36, iss. 17.

¹⁴ K.N. Borozdin et al., *Radiographic Imaging...*, op. cit., s. 277.

¹⁵ M. Moussawi et al., *Muons for Cultural Heritage*, arxiv.org/abs/2309.08394, 15.09.2023, dostęp: 17.07.2025.

¹⁶ L.W. Alvarez et al., *Search for Hidden Chambers in the Pyramids...*, op. cit., s. 832–839.

¹⁷ S. Vanini et al., *Muography of Different Structures Using Muon Scattering and Absorption Algorithms*, „Philosophical Transactions of the Royal Society A” 2019, vol. 377, iss. 2137.



4 Schemat obrazowania Piramidy Cheopsa w 2017 roku z wykorzystaniem radiografii mionowej: detektory na zewnątrz piramidy – przekrój pionowy (a), detektory na zewnątrz piramidy – widok z góry (b), detektory w Komnacie Królowej – przekrój pionowy (c). Czerwone linie oznaczają pierwotne promieniowanie kosmiczne, a niebieskie – tory mionów. Żółte pola wskazują część piramidy objętą obrazowaniem. Rys. Renata Bożek

Diagram of the imaging of the Pyramid of Cheops in 2017 using muon radiography: detectors outside the pyramid – vertical cross-section (a), detectors outside the pyramid – view from the top (b), detectors in the Queen's Chamber – vertical cross-section (c). The red lines represent primary cosmic radiation, and the blue lines represent muon tracks. The yellow areas indicate the part of the pyramid covered by the imaging. Compil: Renata Bożek

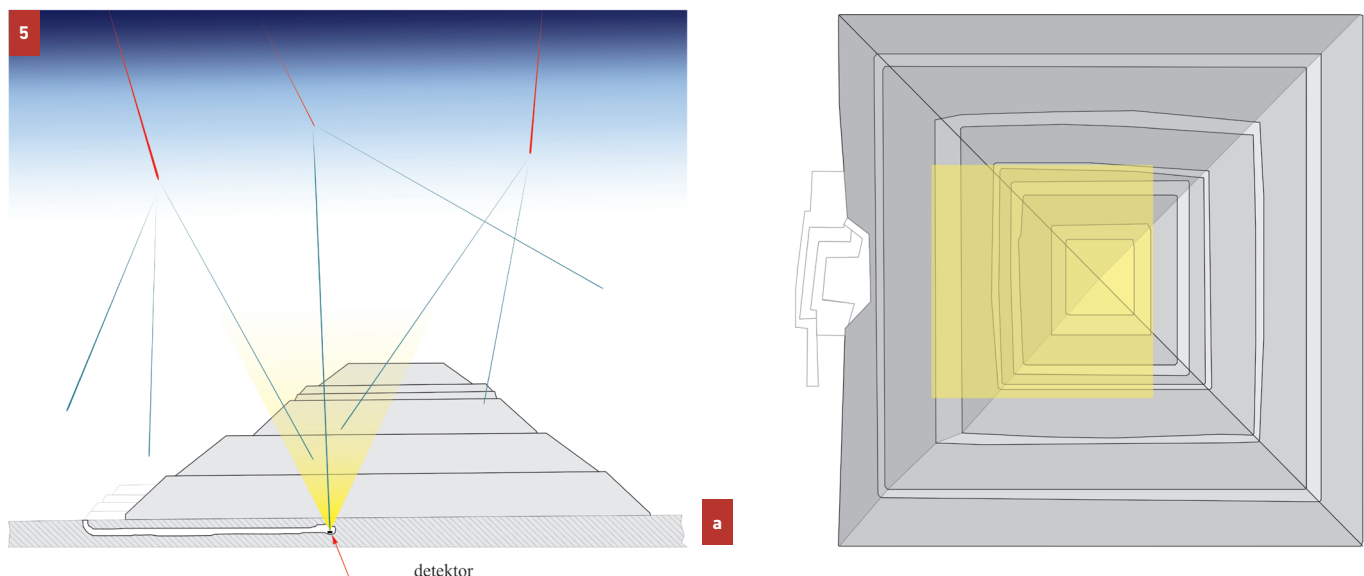
tej dziedziny¹⁸. Podstawowym dylematem badawczym było zapewnienie wiarygodności odkryć poprzez zastosowanie niezależnych metod detekcji. W Piramidzie Cheopsa ujawniono dużą pustkę nazwaną ScanPyramids Big Void, ale jej istnienie musiało zostać potwierdzone przez co najmniej trzy różne systemy detektorów mionowych (il. 4). W pierwszym etapie badań wykorzystano emulsję jądrową, która jest rodzajem filmu fotograficznego rejestrującego ślady mionów. Technologia ta, choć nie wymaga zewnętrznego zasilania, stawiała przed badaczami poważne problemy logistyczne. Płytki musiały być transportowane między Egiptem a Japonią w celu ich wywołania i analizy za pomocą specjalistycznych systemów komputerowych. Problem geometrii i lokalizacji detektorów okazał się kluczowym wyzwaniem. Początkowe badania z użyciem detektorów scyntylacyjnych nie przyniosły oczekiwanych rezultatów. Nowo wykryta pustka na początku nakładała się wizualnie na znaną Wielką Galerię. Wynikało to z geometrii pomiaru, a nie z błędu aparatury. Dopiero zmiana lokalizacji detektorów pozwoliła poprawnie rozpoznać anomalię. Dzięki temu potwierdzono, że pustka jest odrębna od Wielkiej Galerii. Ten przypadek dobrze pokazuje, jak trudna bywa interpretacja danych mionowych w złożonych strukturach architektonicznych¹⁹.

Ostatecznym sprawdzianem była detekcja z zastosowaniem detektorów gazowych umieszczonych na zewnątrz piramidy. To rozwiązanie, choć technicznie bardziej wymagające ze względu na większą odległość od obiektu badań, pozwoliło niezależnie potwierdzić istnienie pustki. Rozwiązało to wszelkie wątpliwości co do wiarygodności odkrycia. Cały proces badawczy pokazuje, jak współczesna archeologia musi łączyć zaawansowaną fizykę z dylematami logistycznymi, interpretacyjnymi i metodologicznymi, aby osiągnąć rezultaty akceptowalne dla społeczności naukowej.

Badania potwierdziły, że obrazowanie przy użyciu mionów jako pasywna i nieinwazyjna metoda pozwala archeologom zajrzeć do wnętrza masywnych budowli, takich jak piramidy czy kurhany, bez ich naruszania. Zaletami tej metody są bezpieczeństwo dla zabytku, możliwość

¹⁸ Heritage Innovation Preservation Institute, hip.institute, dostęp: 28.05.2025.

¹⁹ K. Morishima et al., *Discovery of a Big Void in Khufu's Pyramid by Observation of Cosmic-Ray Muons*, „Nature” 2017, vol. 552, s. 386–390.



5 Schemat obrazowania Piramidy Słońca w Teotihuacán w Meksyku z wykorzystaniem radiografii mionowej: przekrój pionowy (a) i widok z góry (b). Czerwone linie oznaczają pierwotne promieniowanie kosmiczne, a niebieskie – tory mionów. Żółte pola wskazują część piramidy objętą obrazowaniem. Rys. Renata Bożek

Diagram of the imaging of the Pyramid of the Sun in Teotihuacán, Mexico, using muon radiography: vertical cross-section (a) and view from the top (b). The red lines represent primary cosmic radiation, while the blue lines represent muon tracks. The yellow areas indicate the part of the pyramid covered by the imaging. Compil: Renata Bożek

badania dużych struktur oraz jej komplementarność wobec innych technik geofizycznych. Wadą pozostaje długi czas zbierania danych, ograniczona rozdzielczość, a także konieczność stosowania zaawansowanej aparatury i przeprowadzania specjalistycznych analiz. W dobie dynamicznego rozwoju sztucznej inteligencji i technik uczenia maszynowego technologia ta ewoluuje w szybkim tempie, a wspomniane ograniczenia mogą zostać przezwyciężone w niedalekiej przyszłości²⁰.

Technologia radiografii mionowej w archeologii napotyka różnorodne wyzwania, z których najważniejsze dotyczą adaptacji metody do odmiennych materiałów budowlanych. Podczas gdy piramidy w Gizie składają się z masywnych bloków kamiennych, wiele obiektów archeologicznych wykonano z suszonych cegieł, gliny, ceramiki i innych materiałów o całkowicie odmiennych właściwościach fizycznych. Ta różnica stawia przed badaczami pytanie, czy metoda skuteczna dla kamienia sprawdzi się równie dobrze w przypadku konstrukcji ziemnych, z jakimi najczęściej mamy do czynienia w archeologii. Odpowiedź przyniosły badania Piramidy Słońca w Teotihuacán, prowadzone w latach 2011–2013 (il. 5). Budowla powstała z ziemi i suszonych cegieł, co postawiło przed badaczami z Meksyku i Peru trzy istotne trudności. Pierwszą z nich było dostosowanie symulacji komputerowych do właściwości tych materiałów. Modele stworzone dla kamiennych piramid w Egipcie nie nadawały się do bezpośredniego wykorzystania w tym przypadku. Ziemiste bloki mają bowiem odmienną gęstość i w inny sposób reagują na przechodzący przez nie strumień mionów²¹. Poza tym konstrukcja Piramidy Słońca jest bardziej rozłożysta niż jej egipskie odpowiedniki, co wymagało odmiennego podejścia do lokalizacji detektorów. Urządzenia musiały zostać zdemontowane i przetransportowane przez wąski tunel, wydrążony jeszcze w latach 70. XX wieku. Tunel ten prowadził do naturalnej jaskini pod podstawą piramidy, gdzie aparaturę

²⁰ Ibidem.

²¹ Detektory gazowe, [if.pw.edu.pl, tinyurl.com/u22jpxt2](https://if.pw.edu.pl/tinyurl.com/u22jpxt2), dostęp: 28.04.2025; S. Aguilar et al., *Search for Cavities in the Teotihuacan Pyramid of the Sun Using Cosmic Muons – Preliminary Results* [w:] *Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), Rio De Janeiro, Brazil*, [s.l.] 2013.

ponownie zmontowano w ograniczonej przestrzeni. Trzecią trudnością były także odmienne oczekiwania archeologiczne. Podczas gdy w Gizie poszukiwano nieznanych pustek i komór strukturalnych, w Teotihuacán głównymi celami były odnalezienie grobu władcy miasta oraz identyfikacja niedostępnych dotąd przestrzeni o charakterze sepulkralnym. Ta różnica w celach badawczych wymagała zupełnie innego sposobu interpretacji uzyskanych danych mionowych.

Badania w Teotihuacán przyniosły rezultaty, które okazały się równie wartościowe naukowo co odkrycie w Gizie. Udało się zidentyfikować różnice w gęstości materiałów w strukturze piramidy, ustalono, że niektóre jej części są mniej stabilne konstrukcyjnie, oraz potwierdzono znane wcześniej cechy charakterystyczne budowli. Choć nie odkryto poszukiwanego grobu władcy, to eksperyment dostarczył cennych informacji o ograniczeniach i możliwościach metody w kontekście różnych materiałów budowlanych. Przypadek Teotihuacán pokazuje, że skuteczność radiografii mionowej zależy nie tylko od zaawansowania technologicznego detektorów, lecz także od zrozumienia specyfiki materiałowej i architektonicznej badanego obiektu. Każda struktura archeologiczna wymaga indywidualnego podejścia metodologicznego, uwzględniającego jej unikalne właściwości fizyczne i konteksty kulturowe. Skuteczność metody zależy od geometrii obiektu, rodzaju materiału i warunków terenowych. Radiografia mionowa pozwoliła na całkowicie nieinwazyjne przebadanie piramidy i zidentyfikowanie różnic w gęstości materiału budowlanego. Przypadek Teotihuacán, w połączeniu z doświadczeniami z Gizy, pokazuje, że lokalizacja detektorów ma znaczenie dla interpretacji wyników, ale nie zawsze decyduje o skuteczności samej detekcji. W Piramidzie Cheopsa detektory umieszczone zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz konstrukcji potwierdziły istnienie tej samej pustki, co dowodzi, że zastosowana metoda może być skuteczna w różnych konfiguracjach. Wykorzystanie już istniejących przestrzeni wewnętrznych może jednak ułatwiać interpretację wyników, pozwala bowiem na pomiary z różnych perspektyw i eliminację niektórych czynników zakłócających²².

Badania przy użyciu tej technologii prowadzono również na stanowisku La Milpa, jednym z najważniejszych miejsc związanych z kulturą Majów. Przedmiotem badań był kopiec porośnięty drzewami, w którego wnętrzu podejrzewano istnienie piramidy. W tym przypadku testowano obrazowanie mionowe obiektów znajdujących się na nierównym, trudnym terenie, gdzie występują liczne skały i bujna roślinność, co uniemożliwia zastosowanie standardowych technologii, takich jak georadar. Badania z wykorzystaniem obrazowania mionami podjęto w 2010 roku. Prowadziła je Maya Muon Group z Uniwersytetu Teksasńskiego w Austin²³.

Potwierdzona przydatność radiografii mionowej w geologii stanowi ogromny potencjał do badań na stanowiskach archeologicznych znajdujących się na skalistych terenach, w skałach magmowych. Takim przykładem może być góra Echia, miejsce najstarszego osadnictwa w Neapolu, gdzie znajdują się pozostałości po starożytnej kolonii greckiej Partenope, założonej w VIII wieku przed naszą erą. Góra składa się głównie z miękkiej skały wulkanicznej – żółtego tufu. Wykute są w niej liczne niecki, jamy i nisze powstałe przy eksploatacji tufu jako materiału budowlanego. Przechodzi przez nią również tunel, zwany Tunelem Burbońskim, wykuty w połowie XIX wieku. Do badań góry Echia użyto radiografii mionowej oraz ulepszonej wersji detektora Mu-Ray, opracowanego do badań wulkanów²⁴. W ciągu niespełna miesiąca badań zebrano dane, które potwierdziły dotychczasową wiedzę o istniejących strukturach wewnętrznych, a największe z nich zobrazowano już po kilku godzinach pomiarów. Uzyskano również dane mogące wskazywać na istnienie dotychczas nieznanymi przestrzeni – by to oficjalnie potwierdzić, detektory zostaną

²² A. Menchaca-Rocha, *Using Cosmic Muons to Search for Cavities in the Pyramid of the Sun, Teotihuacan – Preliminary Results* [w:] *Proceedings, 10th Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, Montevideo, Uruguay, December 1–6, 2013*, [s.l.] 2014; S. Aguilar et al., *Search for Cavities in the Teotihuacan Pyramid...*, op. cit.

²³ *About the Maya Muon Group*, hep.utexas.edu, tinyurl.com/3ymsvf8m, dostęp: 28.04.2025; L. Bonechi, D'Alessandro, A. Giammanco, *Atmospheric Muons...*, op. cit.

²⁴ G. Saracino et al., *Applications of Muon Absorption Radiography to the Fields of Archaeology and Civil Engineering*, „Philosophical Transactions of the Royal Society A” 2019, vol. 377, iss. 2137.

ustawione w innych lokalizacjach. Technika umożliwiła również pomiar średniej gęstości skał. Detektor umieszczono w istniejącej jamie około 40 m pod warstwą skał²⁵.

Równie złożone wyzwania stawia przed badaczami konieczność pracy na terenach o skomplikowanej historii użytkowania. Stanowisko w parku San Silvestro w Campiglia Marittima w Toskanii ilustruje dylematy badawcze związane z miejscami, które są jednocześnie obiektami archeologicznymi i pozostałościami działalności przemysłowej. Teren ten obejmuje 25 km tuneli górniczych ze śladami działalności sięgającej czasów etruskich, a także nowożytną kopalnię czynną do 1982 roku. Badacze musieli opracować metodologię uwzględniającą równocześnie cele archeologiczne i górnicze. Oznaczało to konieczność rozróżnienia między starożytnymi wyrobiskami etruskimi a nowożytnymi tunelami oraz identyfikacji różnych typów struktur: od pustek po skały żylne o wysokiej gęstości. Ten przypadek pokazuje, jak radiografia mionowa może służyć za narzędzie interdyscyplinarne, łączące archeologię z geologią i górnictwem²⁶.

Sukcesy radiografii mionowej w badaniu odizolowanych monumentów, takich jak piramidy, postawiły przed naukowcami nowe wyzwania. Jednym z nich było zastosowanie tej metody w złożonym środowisku miejskim, gdzie warstwy archeologiczne i współczesna infrastruktura przenikają się wzajemnie. Problem nakładających się struktur, a zwłaszcza konieczność rozróżnienia między obiektami historycznymi a nowszymi elementami, stanowi jeden z ważniejszych dylematów metodologicznych. Badania archeologiczne na gęsto zaludnionych terenach są tego przykładem. W 2018 roku w historycznym centrum Neapolu, w dzielnicy Sanità, badacze zmierzali się z wyjątkowo trudnym zadaniem. Ich celem było rozpoznanie starożytnych struktur greckich z czasów wielkiej kolonizacji, znajdujących się około 18 m pod współczesną zabudową. Detektory ustawiono w dziewiętnastowiecznej piwnicy. Miony przechodziły kolejno przez cysterny, schody, fundamenty i kanały, co prowadziło do nakładania się obrazów poszczególnych warstw. Aby rozwiązać ten problem, zespół opracował nową metodę interpretacji danych. Najpierw przygotowano szczegółowy model 3D podziemnych struktur na podstawie wcześniejszych skanów laserowych. Następnie wprowadzono go do programu Geant4, aby prześledzić tor mionów w tak złożonym środowisku. Porównanie wyników symulacji z rzeczywistym obrazowaniem mionowym potwierdziło ich zgodność. Badania doprowadziły do odkrycia nieznannej wcześniej komory z czasów starożytnego greckiego miasta, znajdującej się około 10 m pod poziomem ulicy. W tym eksperymencie użyto detektorów emulsji jądrowej, a ekspozycja trwała 28 dni. Weryfikacja wyników w gęstej zabudowie miejskiej jest szczególnie trudna ze względu na ograniczone możliwości umieszczania detektorów w różnych miejscach. Z tego powodu, aby zapewnić wiarygodność wyników, zespół badawczy z Neapolu postanowił przeprowadzić niezależną analizę danych w dwóch ośrodkach naukowych: w Neapolu i w Nagoi. To podejście, choć angażujące dodatkowe zasoby, pozwoliło wyeliminować potencjalne błędy interpretacyjne. Doświadczenia z tych badań pokazują, że radiografia mionowa jest skuteczną metodą w złożonych kontekstach archeologicznych, jednak wymaga opracowania indywidualnych strategii badawczych²⁷.

Monitorowanie i badanie stanu zachowania obiektów architektury zabytkowej

W dziedzinie konserwacji zabytków od dziesięcioleci poszukuje się metod badania obiektów zabytkowych, które pozwoliłyby na diagnostykę bez naruszania ich struktury. Odpowiedzią na te wyzwania mogą być radiografia i tomografia mionowa, których działanie jest podobne do promieniowania rentgenowskiego. W przeciwieństwie jednak do promieniowania jonizującego miony nie są szkodliwe ani dla środowiska, ani dla ludzi. Jednym z najbardziej obiecujących zastosowań

²⁵ G. Saracino et al., *Imaging of Underground Cavities with Cosmic-Ray Muons from Observations at Mt. Echia (Naples)*, „Scientific Reports” 2017, vol. 7.

²⁶ G. Baccani et al., *Muon Radiography of Ancient Mines. The San Silvestro Archaeo-Mining Park (Campiglia Marittima, Tuscany)*, „Universe” 2019, vol. 5, iss. 1, s. 34.

²⁷ V. Tioukov et al., *Hidden Chamber Discovery in the Underground Hellenistic Necropolis of Neapolis by Muography*, „Scientific Reports” 2023, vol. 13.

w prewencji konserwatorskiej jest monitoring ciągły stabilności konstrukcji zabytkowych²⁸. Przykładem takiego wykorzystania technologii obrazowania mionami są badania renesansowego Palazzo della Loggia w Brescii. Antonietta Donzella i jej zespół wykazali, że metoda ta może wykrywać bardzo powolne deformacje konstrukcji bez konieczności instalowania inwazyjnych czujników²⁹. Wspomniany budynek zabytkowy pozostawał bez stałego zadaszenia po pożarze z drugiej połowy XVI wieku aż do początku XX wieku. Współczesne sklepienie wzniesiono dopiero w 1914 roku, jednak od początku ta konstrukcja była niestabilna. Pomiary przy użyciu detekcji mionów prowadzono na podstawie obserwacji metalowych drutów rozpiętych jeszcze w latach 90. XX wieku do monitoringu z wykorzystaniem tradycyjnych metod. W badaniach uwzględniono cztery z siedmiu głównych łuków kratownicowych. Ustalono, że łuki w konstrukcji sklepienia osiadają około 1 mm w ciągu roku. Wynik ten wskazuje na bardzo wysoką skuteczność tego rodzaju monitorowania obiektu. Biorąc jednak pod uwagę wszystkie badania przeprowadzone w tym przypadku, należy podkreślić, że system monitoringu oparty na mionach nie zastępuje wszystkich dotychczasowych metod. Ponieważ jednak miony mają zdolność swobodnego przenikania przez przeszkody, może się okazać skuteczniejszy w konkretnych sytuacjach, szczególnie w przypadku obiektów, w których występują trudno dostępne miejsca i masywne przegrody (ściany, stropy i inne elementy konstrukcyjne) ograniczające dostęp do sygnału GPS oraz nie ma możliwości zapewnienia stałego oświetlenia³⁰.

Innym przykładem zastosowania obrazowania z użyciem mionów w dziedzinie konserwacji zabytków jest możliwość wykrywania ukrytych elementów konstrukcyjnych w obiektach zabytkowych. Możliwości te sprawdzili naukowcy z Los Alamos National Laboratory w kontekście badań kopuły Brunelleschiego we Florencji. Szczególną uwagę zwrócono na wzmocnienia konstrukcji, które stanowią system wewnętrznych, poziomych pierścieni napinających, zwanych *catene*. Są one wykonane z kamienia, żelaza oraz drewna i pełnią taką funkcję jak obręcze na beczce – skutecznie przeciwdziałają siłom rozpierającym. Dokumentacja wskazuje na istnienie czterech takich pierścieni z kamienia i łańcuchów oraz piątego, wykonanego z drewna. Ze względu na osiadanie i mikroprzemieszczenia murów budynku w kopule powstają rozwarstwienia. Znajomość rozmieszczenia ukrytych elementów konstrukcyjnych jest niezbędna do oceny stanu technicznego obiektu, planowania prac konserwatorskich oraz zapobiegania nieprzewidzianym uszkodzeniom podczas konserwacji³¹. By dokładnie zidentyfikować układ, który spina kopułę, planowane jest obrazowanie za pomocą mionów. Wstępnie w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono symulację z użyciem modelu matematycznego, który symulował wszystkie elementy struktury kopuły. Analiza przeprowadzona przez naukowców z Los Alamos National Laboratory pokazuje, że szczegółowa identyfikacja tego systemu jest możliwa³².

Kolejnym przykładem badań diagnostycznych w zabytkach architektury z wykorzystaniem radiografii mionowej są badania murów obronnych w mieście Xi'an w Chinach. Decyzje o obrazowaniu mionami tego rodzaju zabytków architektury podjęto po zawaleniu się fragmentów historycznych murów, do którego doszło w latach 2006 i 2020. Zespół prof. Zhiyi Liu z Uniwersytetu Lanzhou opracował system CORMIS (COsmic Ray Muon Imaging System) przeznaczony do badań w środowisku miejskim. Za pomocą wspomnianego systemu detekcji już na wstępnym etapie badań wykryto niewidoczne wcześniej uszkodzenia, które mogły prowadzić do dalszej destabilizacji konstrukcji murów. Ten przykład ilustruje wartość metody w sytuacjach kryzysowych,

²⁸ S. Vanini et al., *Cultural Heritage Investigations Using Cosmic Muons*, „Comptes Rendus. Physique” 2018, vol. 19, iss. 7, s. 533–542.

²⁹ A. Donzella, *Stability Monitoring of a Historical Building by Means of Cosmic Ray Tracking*, „Il Nuovo Cimento C” 2014, vol. 37, s. 223.

³⁰ Ibidem, s. 223–232.

³¹ J. Jasieńko, A. Kadłuczka, *Kopuła Brunelleschiego we Florencji, wybrane problemy budowlane, statyczne i konserwatorskie*, „Wiadomości Konserwatorskie” 2021, nr 66, s. 182–194.

³² E. Guardincerri et al., *Imaging the Dome of Santa Maria del Fiore Using Cosmic Rays*, „Philosophical Transactions of the Royal Society A” 2019, vol. 377, iss. 2137.

gdy szybka diagnostyka może zapobiec dalszej destrukcji, a tradycyjne metody są zbyt kosztowne lub czasochłonne³³.

Ciekawym przykładem zastosowania techniki detekcji mionów jest obrazowanie obiektów zabytkowych, w których zachowały się ślady katastrof, takich jak trzęsienia ziemi. Hiroyuki Tanaka, pionier w dziedzinie detekcji mionów, poddał badaniom kurhan Furuya w regionie Wakayama, który przyciągnął uwagę badaczy ze względu na ślady trzęsień ziemi zachowane w jego strukturze. Analiza danych pochodzących z obrazowania mionowego pozwoliła wykryć niższą gęstość w strukturze kurhanu, co interpretuje się jako duże, podłużne pęknięcia i uszkodzenia, które mogły powstać w wyniku trzęsienia ziemi z 1596 roku.

Pomimo obiecujących rezultatów tomografia mionowa napotyka jeszcze istotne ograniczenia techniczne. Naturalny strumień mionów jest relatywnie słaby, co wymaga długich czasów ekspozycji, wynoszących od kilku tygodni do kilku miesięcy. Rozdzielczość przestrzenna, choć stale się poprawia, nadal ustępuje metodom geofizycznym w przypadku drobnych struktur. Dodatkowo interpretacja wyników wymaga ścisłej współpracy między fizykami a archeologami i konserwatorami³⁴.

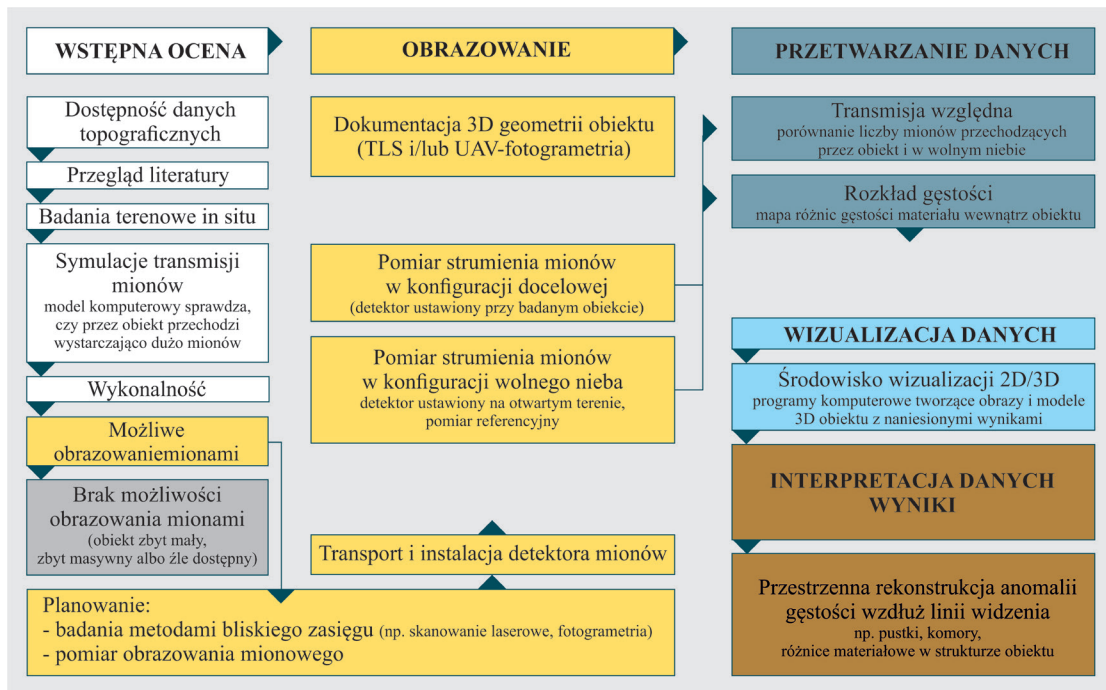
Wskazane tu przykłady pokazują, podobnie jak wcześniejsze, że mocną stroną obrazowania mionami jest możliwość nieinwazyjnego badania wnętrza obiektów zabytkowych bez ingerencji w ich strukturę. Technika ta pozwala na wykrywanie deformacji, ukrytych elementów konstrukcyjnych i uszkodzeń niewidocznych dla tradycyjnych metod. Jej zaletą jest także skuteczność w przypadku masywnych przegród i trudno dostępnych miejsc, gdzie inne metody zawodzą. Ograniczeniem jest natomiast długi czas zbierania danych wynikający ze słabego strumienia mionów oraz wciąż niższa rozdzielczość przestrzenna w porównaniu z innymi technikami geofizycznymi. Dodatkowym wyzwaniem pozostaje konieczność zaawansowanej interpretacji wyników, wymagającej współpracy specjalistów z różnych dziedzin.

Detekcja mionów w diagnostyce i dokumentacji ruchomych obiektów dziedzictwa kulturowego – od wyzwań metodycznych do praktycznych rozwiązań

Ocena stanu zachowania obiektów dziedzictwa kulturowego to jedno z podstawowych działań konserwatorskich i dokumentacyjnych. Współczesne wymagania stawiane metodom badawczym znacznie jednak przewyższają to, co mogą zaoferować tradycyjne praktyki. Badacze muszą dziś zmierzyć się z procesem obejmującym planowanie logistyczne, zbieranie danych, ich filtrowanie i interpretację. Proces ten wykracza poza wybór odpowiedniej technologii i obejmuje rozwiązanie takich problemów, jak: dostęp do obiektu w godzinach pracy muzeum, kalibracja urządzeń diagnostycznych w warunkach ekspozycji muzealnej czy minimalizacja wpływu ruchu zwiedzających. Co najważniejsze, wymaga przekształcenia zebranych danych w użyteczną wiedzę. Zasadą przewodnią jest tu *primum non nocere*, czyli: po pierwsze nie szkodzić. Dlatego dąży się do diagnostyki z użyciem nieinwazyjnych metod, które można zastosować bezpośrednio w miejscu przechowywania obiektu, bez konieczności transportowania do specjalistycznych laboratoriów. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w kontekście ograniczeń tradycyjnych metod obrazowania, takich jak radiografia czy tomografia rentgenowska. Mimo powszechnie uznawanej skuteczności promieniowanie rentgenowskie napotyka istotne bariery fizyczne w postaci ograniczonej głębokości penetracji w strukturze obiektów wykonanych z materiałów gęstych oraz bariery praktyczne związane z koniecznością wykorzystania specjalistycznego wyposażenia, potencjalnymi zagrożeniami radiacyjnymi i – jak wspomniano – transportem obiektów do pracowni. Udokonałanie metod opartych na detekcji mionów przychodzi tu z pomocą w konkretnych przypadkach.

³³ G. Liu et al., *High-Precision Muography in Archaeogeophysics. A Case Study on Xi'an Defensive Walls*, „Journal of Applied Physics” 2023, vol. 133, iss. 1.

³⁴ H.K.M. Tanaka, K. Sumiya, L. Oláh, *Muography as a New Tool to Study the Historic Earthquakes Recorded in Ancient Burial Mounds*, „Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems” 2020, vol. 9, iss. 2, s. 357–364.



6

Schemat prezentujący etapy badań z wykorzystaniem radiografii i tomografii mionowej – od oceny wstępnej, przez obrazowanie i przetwarzanie danych, po wizualizację i interpretację wyników. Rys. Renata Bożek

Diagram showing the stages of research using muon radiography and tomography – from preliminary assessment, through imaging and data processing, to visualization and interpretation of results. Compil: Renata Bożek

Walidację metody detekcji mionów na obiektach o średnich i mniejszych rozmiarach przeprowadza zespół naukowców z Uniwersytetu Cornella, który podjął się systematycznego testowania przydatności tej technologii w diagnostyce³⁵. Opracowano metodologię pozwalającą przeprowadzić wiarygodne analizy w warunkach, w jakich na co dzień znajdują się zabytki. W pierwszym etapie przeprowadzono testy bazujące na modelu 3D drewnianej statuetki o wysokości 80 cm z kolekcji Królewskiego Muzeum Afryki Centralnej w Belgii, opracowanym wcześniej do celów badań tomografii rentgenowskiej. Na potrzeby analizy w symulacji matematycznej zmieniono materiał z drewna na marmur, ponieważ miony, jak wspomniano wcześniej, sprawdzają się najlepiej w badaniach materiałów gęstych. W tak opracowanym modelu statuetki umieszczono modele cylindrycznych elementów z brązu i przeprowadzono symulację. To pozwoliło precyzyjnie porównać wyniki z wcześniej przeprowadzonymi badaniami mikrotomografii rentgenowskiej w ramach projektu TOCOWO (Tomography of Congolese Wooden Objects). Badania wykazały skuteczność tomografii mionowej w wykrywaniu przedmiotów znajdujących się wewnątrz obiektów. Ten rezultat stanowił punkt wyjścia do bardziej ambitnych przedsięwzięć badawczych, a współpraca z Muzeum Miejskim w Brukseli umożliwiła testowanie metody na obiektach o różnej proveniencji, wykonanych z rozmaitych materiałów i wiążących się z odmiennymi problemami konserwatorskimi³⁶.

Grupę problemów badawczych stanowią także obiekty, w przypadku których kluczowe jest rozpoznanie technologii wykonania oraz historii wcześniejszych działań konserwatorskich. Najważniejszym pytaniem badawczym jest to, jak dostosować parametry pomiaru do specyfiki obiektu – jego materiału, rozmiarów i stanu zachowania. Przykładem takich rozważań są badania

³⁵ A. Giammanco et al., *Cosmic Rays for Imaging Cultural Heritage Objects*, arxiv.org/abs/2405.10417, 16.05.2024, dostęp: 30.04.2025.

³⁶ Ibidem.

konserwatorskie renesansowej fontanny Trzech Gracji autorstwa Giacoma della Porty. Głównym wyzwaniem dla konserwatorów jest w tym przypadku identyfikacja technologii konstrukcji oraz wcześniejszych interwencji konserwatorskich. Naukowcy wskazują ten obiekt jako idealny do badań techniką obrazowania mionami, która umożliwi nieinwazyjną inspekcję wnętrza. Według takich samych kryteriów wytypowano też nagrobek Lamorala II z Tour et Taxis. W obu przypadkach badacze muszą uwzględnić kwestie ustawienia detektorów oraz określić, jak długo prowadzić pomiary, aby uzyskać wystarczającą precyzję, nie zakłócając funkcjonowania muzeum. Podobne wyzwania metodologiczne dotyczą rzeźb przedstawiających anioły, zdobionych zworniki kopuły w kościele Notre-Dame aux Riches Claires w Brukseli. Wykonane z wapienia figury zostały odrestaurowane po pożarze w latach osiemdziesiątych XX wieku, jednak działania te nie zostały dostatecznie udokumentowane. Podstawowym wyzwaniem metodycznym jest odróżnienie oryginalnych fragmentów od późniejszych uzupełnień oraz identyfikacja zastosowanych materiałów konserwatorskich. Podobny problem dotyczy *Fontanny na dzień morza* z białego marmuru autorstwa Gabriëla Grupella, znajdującej się w Królewskich Muzeach Sztuk Pięknych w Brukseli, tu jednak koncentrowano się na obrazowaniu wewnętrznej nierozpoznanej dotąd, skorodowanej struktury³⁷.

Diagnostyka obiektów w krytycznym stanie zachowania to kategoria problemów badawczych obejmujących obiekty w tak złym stanie zachowania, że jakiegokolwiek przemieszczenie wiąże się z ryzykiem ich uszkodzenia. Technologia obrazowania mionami może się okazać skutecznym narzędziem w diagnostyce. Przykładem może być tu kwarcytowy posąg przedstawiający boga księżycy Chonsu z około 1050 roku przed naszą erą. Obiekt o wadze około dwóch i pół tony, z niestabilną strukturą osłabioną przez pożar i długotrwałe wystawienie na niekorzystne warunki atmosferyczne nie może być bezpiecznie przemieszczony bez wcześniejszego rozpoznania skali uszkodzeń. Najważniejszym problemem badawczym jest określenie, czy pęknięcia przebiegają tylko powierzchniowo, czy występują w całej strukturze obiektu, co wymaga opracowania metody wysokorozdzielczego skanowania. Wykorzystanie tutaj tomografii mionowej pozwoli na precyzyjne mapowanie sieci pęknięć i ocenę stabilności strukturalnej bez jakiegokolwiek fizycznej ingerencji w obiekt³⁸.

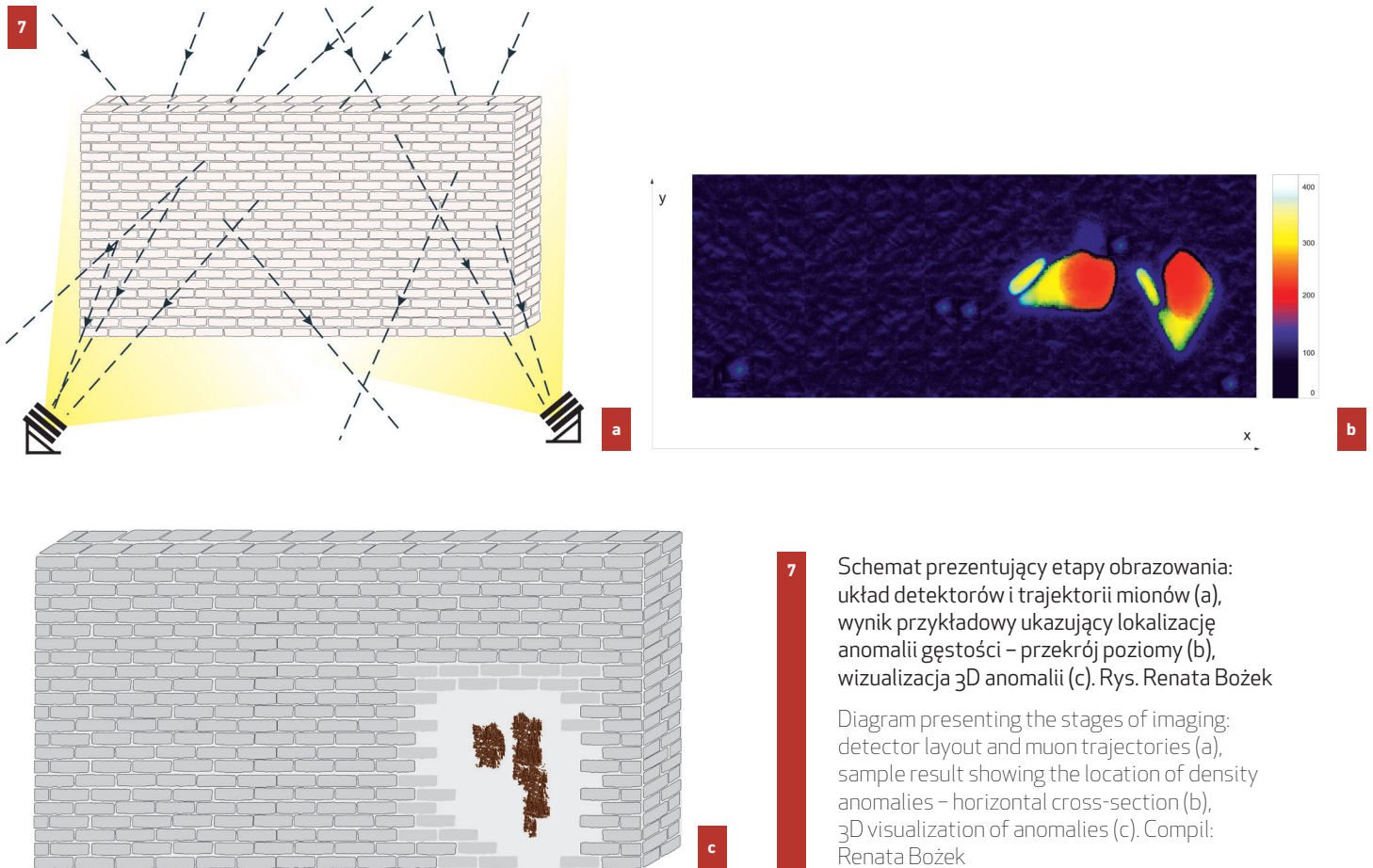
Monitorowanie poziomu wilgotności w dużych zespołach obiektów jako następny typ problemów badawczych dotyczy możliwości stałego monitorowania dużych zespołów obiektów narażonych na procesy degradacji. Zespół badawczy z Uniwersytetu Cornella przeanalizował przydatność systemu detekcji mionów do oceny poziomu wilgotności na przykładzie 68 oryginalnych obiektów rzeźbiarskich (rzeźb i reliefów) z piaskowca znajdujących się przy kościele św. Pawła w Antwerpii, w tak zwanej Kalwarii. Najważniejsze pytanie w tym przypadku dotyczy możliwości rozróżnienia między powierzchniową wilgocią a głębokim przeniknięciem wody w strukturę kamienia. Dotychczasowe metody pomiaru wilgotności, choć również oparte na technikach nieinwazyjnych i wykorzystujące pomiary rezystancji, pojemności elektrycznej, mikrofal czy obrazowania termicznego, pozwalają na obserwacje obiektu jedynie do głębokości kilku centymetrów. Istotnymi problemami w badaniach są kalibracja pomiarów w warunkach zmiennej pogody oraz uwzględnienie wpływu codziennych fluktuacji temperatury i wilgotności powietrza. Możliwość prowadzenia stałego, nieinwazyjnego monitoringu poziomu zawilgocenia na pełnej głębokości struktury obiektu stanowi istotny postęp w dziedzinie prewencji konserwatorskiej. Technologia obrazowania mionami pozwala zarówno na wczesne wykrywanie problemów związanych z wilgotnością, jak i na długoterminowe planowanie działań ochronnych, co może znacząco wpłynąć na skuteczność ochrony obiektów dziedzictwa kulturowego³⁹.

Analiza możliwości i ograniczeń metody detekcji mionami dla przedstawionych przypadków studyjnych pozwala sformułować ocenę miejsca tomografii i radiografii mionowej w arsenale

³⁷ Ibidem.

³⁸ E. Niederleithinger et al., *Muon Tomography of the Interior of a Reinforced Concrete Block. First Experimental Proof of Concept*, „Journal of Nondestructive Evaluation” 2021, vol. 40, s. 1–14.

³⁹ A. Giammanco et al., *Cosmic Rays...*, op. cit.



7 Schemat prezentujący etapy obrazowania: układ detektorów i trajektorie mionów (a), wynik przykładowy ukazujący lokalizację anomalii gęstości – przekrój poziomy (b), wizualizacja 3D anomalii (c). Rys. Renata Bożek

Diagram presenting the stages of imaging: detector layout and muon trajectories (a), sample result showing the location of density anomalies - horizontal cross-section (b), 3D visualization of anomalies (c). Compil: Renata Bożek

współczesnych metod diagnostycznych stosowanych w ochronie dziedzictwa kulturowego. Podstawą jest zrozumienie, że technologia ta nie służy rewolucyjnemu zastąpieniu istniejących rozwiązań, lecz daje komplementarne narzędzie diagnostyczne, które uzupełnia tradycyjne techniki obrazowania w specyficznych obszarach zastosowań.

Praktyczna użyteczność tej technologii ujawnia się w kontekście obiektów, których transport wiąże się z wysokim ryzykiem uszkodzenia. W takich przypadkach możliwość przeprowadzenia badań diagnostycznych *in situ*, bez konieczności przemieszczania do specjalistycznych laboratoriów, ma niewątpliwą przewagę. Mobilność współczesnych detektorów mionów w połączeniu ze stosunkowo niskim kosztem operacyjnym czyni tę technologię atrakcyjną dla instytucji muzealnych i zajmujących się opieką nad zabytkami, placówki te zwykle dysponują bowiem ograniczonymi zasobami finansowymi i logistycznymi⁴⁰.

Długoterminowy monitoring stanu zachowania zarówno monumentalnej architektury zabytkowej, jak i obiektów o mniejszych gabarytach to kolejne potencjalne zastosowanie metod mionowych. Uniwersalność skalowania urządzeń oraz ich zestawień daje istotną przewagę nad wieloma konwencjonalnymi metodami, których efektywność jest silnie uzależniona od rozmiarów badanego obiektu. Wśród ograniczeń obecnie zawężających zakres praktycznych zastosowań tomografii i radiografii mionowej pozostaje stosunkowo niska rozdzielczość obrazowania, co ogranicza skuteczność metody w diagnostyce małych obiektów wymagających precyzyjnego odwzorowania detali strukturalnych. Czas detekcji może się wahać od kilku godzin dla prostych struktur do kilku dni dla złożonych obiektów, co może mieć praktyczne znaczenie w badaniach w kontekstach muzealnych czy konserwatorskich, szczególnie w przypadku obiektów eksponowanych w głównych

⁴⁰ M. Cataldo et al., *A Novel Non-Destructive Technique for Cultural Heritage. Depth Profiling and Elemental Analysis Underneath the Surface with Negative Muons*, „Applied Sciences” 2022, vol. 12, iss. 9.

salach lub w miejscach, gdzie odbywają się uroczystości. Równie istotne są ograniczenia wynikające z fizycznych właściwości samych mionów. O ile obrazowanie mionami wykazuje wysoką skuteczność w penetracji obiektów zbudowanych z materiałów o dużej gęstości (metal, kamień, ceramika), przy których tradycyjne promieniowanie rentgenowskie napotyka nieprzekraczalne bariery, o tyle w przypadku obiektów wykonanych z materiałów o niższej gęstości (drewno, tkaniny, papier) konwencjonalne techniki wykorzystujące promieniowanie X lub gamma pozostają bardziej efektywne i praktyczne. Wyzwania metodologiczne i perspektywy rozwoju wiążą się przede wszystkim z wypracowaniem kryteriów doboru odpowiedniej metody do konkretnego zadania badawczego, z uwzględnieniem nie tylko właściwości fizycznych obiektu, ale także kontekstu instytucjonalnego oraz ograniczeń czasowych i finansowych. Ta komplementarność metod wymusza na badaczach i konserwatorach wypracowanie nowego podejścia metodologicznego, które wykracza poza proste porównywanie skuteczności poszczególnych technik. Ponadto każdy przypadek wymaga nie tylko technicznego opracowania danych, ale także głębokiego zrozumienia kontekstu historycznego, w tym pozyskania danych o tym, kto wykonał obiekt, z czego, w jakich okolicznościach i jak ów obiekt był używany przez wieki. Wszystko to wpływa na interpretację wyników pomiarów. Proces analizy wszystkich warunków uwidacznia, że skuteczne wprowadzanie innowacyjnych metod w ochronie dziedzictwa kulturowego to nie kwestia czysto techniczna, ale złożony proces wymagający nabycia kolejnych kompetencji interpretacyjnych i metodologicznych.

Istotnym zagadnieniem pozostaje też kwestia standaryzacji procedur pomiarowych oraz wypracowania jednolitych protokołów interpretacji wyników, które umożliwiłyby porównywanie rezultatów uzyskanych przez różne zespoły badawcze. Dla rozwoju tej dziedziny kluczowe jest zrozumienie, że optymalne wyniki diagnostyczne osiąga się nie za sprawą konkurencji między metodami, ale poprzez ich świadome i strategiczne łączenie, ponieważ każda technika ma swoje mocne strony, co można obecnie stwierdzić na podstawie dostępnych danych porównawczych.

Perspektywa rozwoju obrazowania mionami obiektów dziedzictwa kulturowego wydaje się obiecująca w obliczu postępującej miniaturyzacji detektorów, poprawy rozdzielczości obrazowania oraz rozwoju algorytmów, sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Pełne wykorzystanie potencjału tej technologii będzie wymagać nie tylko dalszego rozwoju technicznego, ale także systemu gromadzącego i analizującego dane, wspierającego naukowców w interpretacji wyników w szerokim kontekście interdyscyplinarnym. Nad takim systemem pracuje obecnie polska firma Muotech.

Perspektywy rozwoju

W ciągu ostatnich dwóch dekad dynamiczny rozwój technologii obrazowania z wykorzystaniem cząstek promieniowania kosmicznego wykazał, że metoda ta stanowi obiecujące narzędzie badawcze w wielu dziedzinach – od geologii, inżynierii lądowej, przemysłu jądowego i kosmicznego, przez wulkanologię i prognozowanie trzęsień ziemi, aż po ochronę dziedzictwa kulturowego oraz bezpieczeństwo publiczne. Zdolność tej technologii do obrazowania pojedynczych obiektów, złożonych struktur oraz zmian w gęstości materiałów otwiera nowe perspektywy badawcze i stanowi cenne uzupełnienie metod zaproponowanych w polskim programie Archeologiczne Zdjęcie Polski Plus (AZP+)⁴¹. Radiografia i tomografia mionowa, jako metoda komplementarna wobec innych metod nieinwazyjnych, może wspierać dokumentację wybranych obiektów i struktur, które wymagają głębokiej penetracji, nie do osiągnięć standardowymi technikami. Tym samym może ograniczyć potrzebę prowadzenia wykopaliśk archeologicznych, co jest szczególnie istotne w kontekście zachowania integralności dziedzictwa kulturowego oraz minimalizacji ryzyka uszkodzenia obiektów zabytkowych – zgodnie z wytycznymi sygnowanej przez Polskę konwencji maltańskiej. Skanowanie obiektów dziedzictwa kulturowego przy użyciu

⁴¹ Pomimo rosnącej precyzji radiografii i tomografii mionowej metody te pozostają wyspecjalizowanymi narzędziami i nie są przeznaczone do standardowych badań przedinwestycyjnych realizowanych w ramach AZP+, lecz mogą być stosowane pomocniczo oraz w przypadku obiektów o dużej kubaturze i złożonej strukturze, przeznaczonych do zachowania *in situ*.

naturalnie występujących mionów jako metoda nieniszcząca już dziś otwiera nowe perspektywy w diagnostyce konserwatorskiej oraz dokumentacji zabytków. Dzięki temu, że miony przenikają materiały o dużej gęstości, jest możliwe zobrazowanie wewnętrznej struktury obiektów bez konieczności ich demontażu, przewożenia do specjalistycznych laboratoriów czy pobierania próbek o charakterze destrukcyjnym. Możliwe jest też monitorowanie zmian temperatury i ekspozycji na światło. Udoskonalanie skalowalnych systemów detektorów oraz systemu do analizy danych, nad którym pracuje również polska firma Muotech w ramach programu Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej 2021–2027, ma istotne znaczenie dla rozwoju omawianej technologii, stanowiącej narzędzie wspomagające działania w dziedzinie archeologii oraz prewencji i narzędzie diagnostyczne w konserwacji obiektów dziedzictwa kulturowego⁴².

Podsumowanie

Zastosowanie radiografii i tomografii mionowej w ochronie dziedzictwa kulturowego wyznacza nowy kierunek rozwoju nieniszczących metod, które łączą osiągnięcia fizyki cząstek z potrzebami archeologii oraz konserwacji i dokumentacji zabytków. Obrazowanie z użyciem mionów ma unikatowe walory, takie jak duża zdolność penetracji, wykorzystywanie naturalnego, nieniszczącego promieniowania kosmicznego, brak konieczności bezpośredniego dostępu do badanego obiektu, bezpieczeństwo dla obiektów, ludzi i środowiska oraz możliwość monitorowania stanu zachowania obiektu w czasie rzeczywistym. Dzięki tym właściwościom opisana metoda może skutecznie wspierać nowoczesne strategie zarządzania dziedzictwem, takie jak program AZP+. W dobie postępującej urbanizacji, zmian klimatycznych i coraz większego nacisku na zrównoważone zarządzanie zasobami kultury wdrażanie tej technologii jako komplementarnego narzędzia w archeologii, diagnostyce i dokumentacji zabytków wydaje się nie tylko uzasadnione, ale wręcz konieczne. Radiografia i tomografia mionowa mogą się stać narzędziem zwiększającym bezpieczeństwo i trwałość zasobów dziedzictwa kulturowego⁴³.

Finansowanie

Muotech sp. z o.o. realizuje projekt nr FEPW.01.01-IP.01-0135/25 pod tytułem „Innowacyjny system analizy strukturalnej obiektów z wykorzystaniem tomografii mionowej i algorytmów Monte Carlo” w ramach programu Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej 2021–2027, priorytet FEPW.01 Przedsiębiorczość i Innowacje, działanie FEPW.01.01 Platformy startowe dla nowych pomysłów – Komponent IIa: Wsparcie rozwoju działalności gospodarczej startupu. Autorzy pragną serdecznie podziękować za wsparcie finansowe i organizacyjne, które umożliwiło realizację tego przedsięwzięcia. Dzięki dofinansowaniu możliwy jest rozwój innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie tomografii mionowej oraz jej praktycznego zastosowania w analizie struktur archeologicznych oraz obiektów dziedzictwa kulturowego.

Funding

Muotech sp. z o.o. is carrying out project No. FEPW.01.01-IP.01-0135/25, entitled ‘Innovative system for structural analysis of objects using muon tomography and Monte Carlo algorithms’ as part of the European Funds for Eastern Poland 2021–2027 programme, with a focus on priority FEPW.01 Entrepreneurship and Innovation, measure FEPW.01.01 Start-up platforms for new ideas – Component IIa: Support for the development of start-up business activities. The authors would like to express their sincere gratitude for the financial and organizational support that made this project possible. The co-funding will facilitate the development of innovative solutions in the field of muon tomography and their practical application in the analysis of archaeological structures and cultural heritage objects.

⁴² Muotech, muotech.io, dostęp: 8.07.2025.

⁴³ S.F. Parker, P.J. Baker, R. McGreevy, *A Vision for the Future of Neutron Scattering and Muon Spectroscopy in the 2050s*, „ACS Physical Chemistry Au” 2024, vol. 4, iss. 5, s. 439–452; A.D. Hillier et al., *Muon Spin Spectroscopy*, „Nature Reviews Methods Primers” 2022, vol. 2, iss. 1, s. 4.

mgr Renata Bożek

Muzealnik i historyk, pracownik w dziale zbiorów w Państwowym Muzeum Auschwitz-Birkenau w Oświęcimiu. Dyrektor ds. innowacji w firmie Muotech, specjalizującej się w obrazowaniu mionowym. Członek indywidualny ICOM Polska oraz członek Polskiego Stowarzyszenia Inwentaryzatorów Muzealnych. Jej działalność jest związana z dokumentacją i ochroną obiektów dziedzictwa kulturowego oraz wdrażaniem innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie ochrony zabytków.

Renata Bożek, MA

Museum curator and historian, working in the collections department at the Auschwitz-Birkenau State Museum in Oświęcim. Director of Innovation at Muotech, a company specializing in muon imaging. Individual member of ICOM Poland and a member of the Polish Association of Museum Registrars. Her work focuses on the documentation and protection of cultural heritage objects, as well as the implementation of innovative solutions in the field of monument protection.

mgr Magdalena Dobrowolska

Badaczka w dziedzinie fizyki stosowanej. Doświadczenie zdobyła, pracując na uniwersytetach w Bristolu i Lancasterze w Wielkiej Brytanii. Jej praca koncentrowała się głównie na tomografii mionowej – opracowała algorytmy nieniszczących rozwiązań do inspekcji strukturalnej infrastruktury cywilnej i jądrowej. Specjalizuje się w analizie danych i tworzeniu symulacji. Swoje doświadczenie wykorzystuje jako CTO w firmie Muotech.

Magdalena Dobrowolska, MA

Researcher in the field of applied physics. She gained her experience working at the universities of Bristol and Lancaster in the United Kingdom. Her work focused mainly on muon tomography – she developed algorithms for non-destructive solutions for structural inspection of civil and nuclear infrastructure. She specializes in data analysis and simulation. She uses her experience as CTO at Muotech.

dr hab. Artur Obłuski, prof. UW

Polski archeolog, profesor Uniwersytetu Warszawskiego, dyrektor Centrum Archeologii Śródziemnomorskiej Uniwersytetu Warszawskiego, specjalista w dziedzinie nubiologii.

Artur Obłuski, PhD, University of Warsaw Professor

Polish archaeologist, professor at the University of Warsaw, director of the Centre for Mediterranean Archaeology at the University of Warsaw, and a specialist in the field of Nubian studies.

prof. Jaap Velthuis

Fizyk cząstek elementarnych zajmujący się rozwojem detektorów promieniowania do eksperymentów fizycznych i zastosowań w radioterapii, gospodarce odpadami jądrowymi i bezpieczeństwie. Bada także wpływ promieniowania na elektronikę.

Prof. Jaap Velthuis

Particle physicist involved in the development of radiation detectors for physical experiments and applications in radiotherapy, nuclear waste management and safety. He also studies the impact of radiation on electronics.

dr Noemi Zabari

Fizyk cząstek elementarnych, specjalizująca się we wtórnym promieniowaniu kosmicznym. Prezes zarządu spółki Muotech. Członek Rady Klastra Technologii Kosmicznych. Koncentruje się na komercjalizacji zaawansowanych technologii naukowych. Jej działalność obejmuje przenoszenie wiedzy z sektora badawczo-rozwojowego do przemysłu.

Noemi Zabari, PhD

Particle physicist specializing in secondary cosmic radiation. President of the board of Muotech. Member of the Space Technologies Cluster Council. She focuses on the commercialization of advanced scientific technologies. Her activities include the transfer of knowledge from the research and development sector to industry.

mgr Katsiaryna Katrankova

Specjalistka w zakresie strategii doświadczeń klienta (CX), analityk badań rynkowych, koordynator projektów międzynarodowych. Dyrektor ds. doświadczeń w spółce Muotech.

Katsiaryna Katrankova, MA

Specialist in customer experience (CX) strategy, market research analyst, international project coordinator. Director of Experiments at Muotech.

Bibliografia

- Aguilar Sergio et al., *Search for Cavities in the Teotihuacan Pyramid of the Sun Using Cosmic Muons – Preliminary Results* [w:] *Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), Rio De Janeiro, Brazil*, [s.l.] 2013.
- Alvarez Luis Walter et al., *Search for Hidden Chambers in the Pyramids. The Structure of the Second Pyramid of Giza Determined by Cosmic-Ray Absorption*, „Science” 1970, vol. 167, iss. 3919.
- Baccani Giacomo et al., *Muon Radiography of Ancient Mines. The San Silvestro Archaeo-Mining Park (Campiglia Marittima, Tuscany)*, „Universe” 2019, vol. 5, iss. 1.
- Bonechi Lorenzo, D’Alessandro Raffaello, Giammanco Andrea, *Atmospheric Muons as an Imaging Tool*, „Reviews in Physics” 2020, vol. 5.
- Borozdin Konstantin N. et al., *Radiographic Imaging with Cosmic-Ray Muons*, „Nature” 2003, vol. 422.
- Cataldo Matteo et al., *A Novel Non-Destructive Technique for Cultural Heritage. Depth Profiling and Elemental Analysis Underneath the Surface With Negative Muons*, „Applied Sciences” 2022, vol. 12, iss. 9.
- Donzella Antonietta, *Stability Monitoring of a Historical Building by Means of Cosmic Ray Tracking*, „Il Nuovo Cimento C” 2014, vol. 37.
- Festa Giulia et al., *Neutrons for Cultural Heritage – Techniques, Sensors, and Detection*, „Sensors” 2020, vol. 20, iss. 2.
- Galison Peter, *The Discovery of the Muon and the Failed Revolution against Quantum Electrodynamics*, „Centaurus” 2008, vol. 50, iss. 2.
- George Eric P., *Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel*, „Commonwealth Engineer” 1955, vol. 42.
- Giammanco Andrea et al., *Cosmic Rays for Imaging Cultural Heritage Objects*, arxiv.org/abs/2405.10417, 16.05.2024, dostęp: 30.04.2025.
- Guardincerri Elena et al., *Imaging the Dome of Santa Maria del Fiore Using Cosmic Rays*, „Philosophical Transactions of the Royal Society A” 2019, vol. 377, iss. 2137.
- Hillier Adrian D. et al., *Muon Spin Spectroscopy*, „Nature Reviews Methods Primers” 2022, vol. 2, iss. 1.
- Jasieńko Jerzy, Kadłuczka Andrzej, *Kopuła Brunelleschiego we Florencji, wybrane problemy budowlane, statyczne i konserwatorskie*, „Wiadomości Konserwatorskie” 2021, nr 66.
- Liu Guorui et al., *High-Precision Muography in Archaeogeophysics. A Case Study on Xi’an Defensive Walls*, „Journal of Applied Physics” 2023, vol. 133, iss. 1.
- Malmqvist Lennart et al., *Theoretical Studies of In-Situ Rock Density Determinations Using Underground Cosmic-Ray Muon Intensity Measurements with Application in Mining Geophysics*, „Geophysics” 1979, vol. 44, iss. 9.
- Menchaca-Rocha Arturo, *Using Cosmic Muons to Search for Cavities in the Pyramid of the Sun, Teotihuacan – Preliminary Results* [w:] *Proceedings, 10th Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, Montevideo, Uruguay, December 1–6, 2013*, [s.l.] 2014.
- Metody teledetekcyjne dla archeologów. Poradnik*, cz. 1, red. Agnieszka Makowska, Włodzimierz Rączkowski, Warszawa 2023.
- Morishima Kunihiko et al., *Discovery of a Big Void in Khufu’s Pyramid by Observation of Cosmic-Ray Muons*, „Nature” 2017, vol. 552.
- Moussawi Marwa et al., *Muons for Cultural Heritage*, arxiv.org/abs/2309.08394, 15.09.2023, dostęp: 17.07.2025.
- Nagamine Kanetada et al., *Method of Probing Inner-Structure of Geophysical Substance with the Horizontal Cosmic-Ray Muons and Possible Application to Volcanic Eruption Prediction*, „Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment” 1995, vol. 356, iss. 2–3.
- Neddermeyer Seth H., Anderson Carl D., *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*, „Physical Review” 1937, vol. 51.
- Niederleithinger Ernst et al., *Muon Tomography of the Interior of a Reinforced Concrete Block. First Experimental Proof of Concept*, „Journal of Nondestructive Evaluation” 2021, vol. 40.
- Pacini Domenico, *Penetrating Radiation at the Surface of and in Water*, arxiv.org/abs/1002.1810, 9.02.2010, dostęp: 30.04.2025.
- Parker Stewart F., Baker Peter J., McGreevy Robert, *A Vision for the Future of Neutron Scattering and Muon Spectroscopy in the 2050s*, „ACS Physical Chemistry Au” 2024, vol. 4, iss. 5.
- Saracino Giulio et al., *Applications of Muon Absorption Radiography to the Fields of Archaeology and Civil Engineering*, „Philosophical Transactions of the Royal Society A” 2019, vol. 377, iss. 2137.
- Saracino Giulio et al., *Imaging of Underground Cavities with Cosmic-Ray Muons from Observations at Mt. Echia (Naples)*, „Scientific Reports” 2017, vol. 7.
- Tanabashi Masaharu et al., *Review of Particle Physics*, „Physical Review D” 2018, vol. 98.

Tanaka Hiroyuki K.M. et al., *Detecting a Mass Change Inside a Volcano by Cosmic-Ray Muon Radiography (Muography). First Results from Measurements at Asama Volcano, Japan*, „Geophysical Research Letters” 2009, vol. 36, iss. 17.

Tanaka Hiroyuki K.M. et al., *Muography*, „Nature Reviews Methods Primers” 2023, vol. 3.

Tanaka Hiroyuki K.M., Sumiya Kenji, Oláh László, *Muography as a New Tool to Study the Historic Earthquakes Recorded in Ancient Burial Mounds*, „Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems” 2020, vol. 9, iss. 2.

Tioukov Valeri et al., *Hidden Chamber Discovery in the Underground Hellenistic Necropolis of Neapolis by Muography*, „Scientific Reports” 2023, vol. 13.

Vanini Sara et al., *Cultural Heritage Investigations Using Cosmic Muons*, „Comptes Rendus Physique” 2018, vol. 19, iss. 7.

Vanini Sara et al., *Muography of Different Structures Using Muon Scattering and Absorption Algorithms*, „Philosophical Transactions of the Royal Society A” 2019, vol. 377, iss. 2137.

Wulf Theodor, *About the Radiation of High Penetration Capacity Contained in the Atmosphere*, „Physikalische Zeitschrift” 1910, vol. 10.

Źródła internetowe

About the Maya Muon Group, hep.utexas.edu, tinyurl.com/3ymsvf8m, dostęp: 28.04.2025.

Detektory gazowe, if.pw.edu.pl, tinyurl.com/u22jpxt2, dostęp: 28.04.2025.

Heritage Innovation Preservation Institute, hip.institute, dostęp: 28.05.2025.

Muotech, muotech.io, dostęp: 8.07.2025.