

WSZĘDOBYLSKIE NEUTRONY



Artystyczna wizja zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego dokonującego nieinwazyjnej inspekcji podejrzanych przedmiotów zalegających na dnie morza za pomocą sensora SABAT wykorzystującego neutrony

W wykrywaniu toksycznych substancji zatopionych w głębinach mórz mogą pomóc urządzenia do szybkiej ich identyfikacji oparte na neutronowych technikach aktywacyjnych.

Michał Silarski

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

Na przełomie czerwca i lipca 2023 roku na plażę w Gąskach sztorm wyrzucił beczkę z nieznaną substancją. Zostali ewakuowani wszyscy wypoczywający w tym miejscu turyści z obawy, że może ona zawierać niebezpieczne substancje. Na szczęście okazało się, że pojemnik jest szczelnie zamknięty i nie zagraża środowisku, ale strach wywołany przez takie znalezisko jest w tym przypadku uzasadniony. Do podobnych zdarzeń dochodziło nad Bałtykiem wielokrotnie, bardzo często z tragicznymi skutkami. W 1955 roku w Darłówniku fale wyrzuciły na brzeg uszkodzony pojemnik z ciemną, oleistą cieczą, która okazała się iperytem i poważnie poparzyła wypoczywające na plaży dzieci. Do podobnego zdarzenia doszło w 1990 roku w Królewcu, wówczas bryłki gazu musztardowego poparzyły kilkanaście osób, które wzięły je za kawałki bursztynu. Do dziś zdarza się, że rybacy znajdują w sieciach skorodowane pociski zawierające materiały wybuchowe lub gazy bojowe lub nawet „gołe” bryły iperytu przypominające glinę.

Na dnie Bałtyku możemy znaleźć też inne substancje niebezpieczne, głównie gazy bojowe: adamsyt, Clark 1, Clark 2, Tabun, iperyt azotowy czy fosgen. Znalazły się tam po II wojnie światowej na mocy międzynarodowych porozumień dotyczących neutralizacji broni chemicznej znalezionej na terenie Niemiec. Zatopienie tego arsenału wydawało się w 1945 roku najlepszym rozwiązaniem, ale z perspektywy czasu może okazać się katastrofalne w skutkach. Amunicję konwencjonalną oraz chemiczną zatapiało głównie w Głębi Gotlandzkiej, Głębi Bornholmskiej i kilku innych miejscach, gdzie Bałtyk jest dość głęboki. To są oficjalne miejsca składowania tych niebezpiecznych substancji z dobrze udokumentowaną ilością i rodzajem amunicji. W okresie zimnej wojny broń

chemiczna została również pozostawiona w rejonie Głębi Gdańskiej, a spora część arsenału Niemiec leży na dnie Bałtyku w dużo płytszych miejscach w zatopionych wrakach lub w wyniku niekontrolowanego wyrzucenia za burtę po drodze do docelowego miejsca zatopienia. W rezultacie nie wiemy dokładnie, w jakich rejonach Morza Bałtyckiego zalega powojenna amunicja oraz w jakich ilościach. Stwarza to nie tylko bezpośrednie zagrożenie dla ludzi pracujących na morzu lub jego wybrzeżach, turystów (także podwodnych), lecz także jest poważnym zagrożeniem ekologicznym. Pośrednio dotyczy ono w zasadzie każdego z nas. Badania niektórych ryb bałtyckich pokazują małe zawartości trotylu i jego pochodnych oraz arsenu (jednego z pierwiastków budujących m.in. gazy Clark 1 i Clark 2). Podobny (a może nawet większy) problem ekologiczny dotyczy zatopionego we wrakach ciężkiego paliwa, które po potencjalnym uwolnieniu wypłynie na powierzchnię morza i może skażić duże obszary wybrzeża. Zanieczyszczenie Bałtyku ma też duży wpływ na koszty prac inżynierskich, np. budowy farm wiatrowych. Ze względów bezpieczeństwa wymagają one zawsze badań dna i jego rozminowania. Ich koszty są znaczące m.in. ze względu na stosowane metody wykrywania oraz identyfikacji przedmiotów zalegających na dnie.

Niestety, Bałtyk nie jest wyjątkiem, a zatopioną amunicję oraz paliwo można znaleźć w zasadzie we wszystkich miejscach intensywnych walk na morzu. Duże ilości iperytu zostały zatopione np. w porcie w Bari w 1943 roku przez Luftwaffe. Broń ta przyplęła tam ze Stanów Zjednoczonych i miała być potencjalnie wykorzystana przez aliantów przeciw siłom niemieckim.

Igła w stogu siana

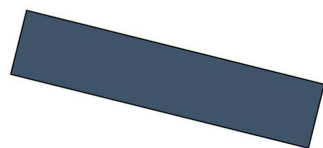
Detekcja i wstępna klasyfikacja obiektów odbywa się za pomocą magnetometrów oraz sonarów, które co prawda są w stanie zobrazować duże obszary dna, ale pokazują tylko kształt przedmiotów, a nie ich skład chemiczny. Dlatego dokładne badania wymagają dodatkowej weryfikacji, a duża część z nich okazuje się niegroźnymi pozostałościami



dr Michał Silarski

Jest adiunktem na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego. W ramach swoich zainteresowań badawczych zajmuje się testami zachowania fundamentalnych symetrii fizyki cząstek elementarnych w rozpadach mezonów K oraz badaniami aplikacyjnymi nad zastosowaniem neutronów prędkich w nieinwazyjnym wykrywaniu oraz identyfikacji niebezpiecznych substancji pod wodą. Interesuje się też rozwojem terapii borowo-neutronowej BNCT, w szczególności metodami monitorowania rozkładu boru w ciele pacjenta za pomocą rejestracji powstającego podczas terapii wtórnego promieniowania.
michal.silarski@uj.edu.pl

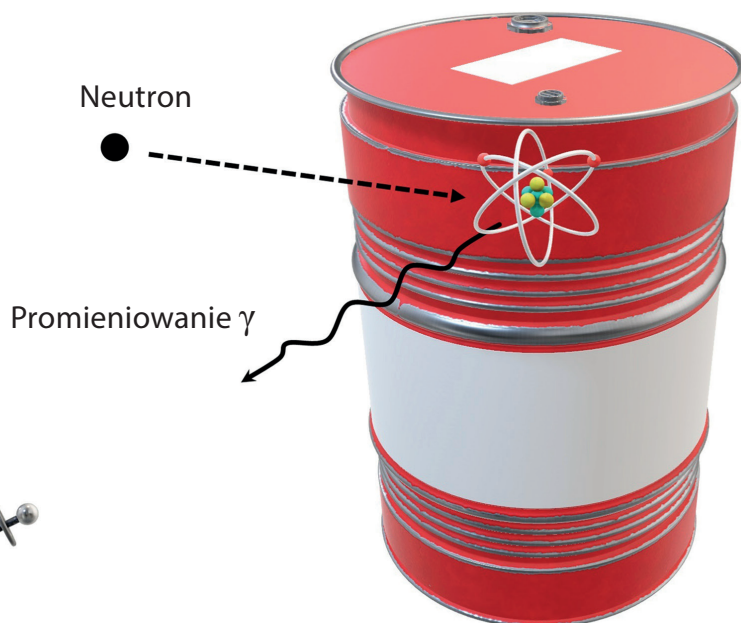
Schematyczne przedstawienie nieinwazyjnej identyfikacji materiałów za pomocą szybkich neutronów. Neutrony wytwarzane w generatorze neutronów typu deuter – tryt przenikają przez ścianki badanego obiektu i wzbudzają jądra atomowe, które emitują kwanty gamma o energii charakterystycznej dla izotopu. Powstające wtórne promieniowanie jest rejestrowane przez detektor scyntylacyjny, który pozwala na oszacowanie stechiometrii badanego obiektu



Generator neutronów



Detektor kwantów γ



(np. po połowach) wykonanymi ze stali. Identyfikacja dokonuje się za pomocą podwodnych pojazdów wyposażonych w kamery lub przez wysłanie wykwalifikowanego nurka, który może rozpoznać amunicję, ale nie jest najczęściej w stanie określić rodzaju substancji zamkniętych w skorodowanych pociskach. Generuje to bardzo duże koszty i znacznie wydłuża proces rozminowania. W badaniach środowiskowych są również pobierane próbki dna, które zbiera się z większego obszaru i analizuje w laboratorium, głównie za pomocą spektrometru mas. Duże koszty wiążą się także z badaniami wraków w poszukiwaniu zatopionego paliwa. Polegają one na wykonaniu otworu w burcie wraków i analizie kontrolowanych wycieków. Dla niektórych wraków jest to operacja bardzo ryzykowna ze względu na możliwość uszkodzenia skorodowanych zbiorników i wywołania niekontrolowanego uwolnienia dużych ilości mazutu do środowiska. Idealnym rozwiązaniem tych problemów byłoby wykorzystanie nieinwazyjnych metod określania składu chemicznego substancji, jak np. neutronowej analizy aktywacyjnej (NAA).

Nieinwazyjni posłańcy

Promieniowanie neutronowe jest wykorzystywane do badania składu pierwiastkowego substancji od wielu lat, głównie w laboratoriach pracujących przy reaktorach jądrowych, które oferują wysokie

intensywności termicznych neutronów (ich energia kinetyczna odpowiada średniej energii ruchu cząsteczek gazu doskonałego w temperaturze 20 st. C). Mogą one oddziaływać z atomami badanej substancji przez reakcje wychwytu radiacyjnego, w których neutrony są pochłaniane przez jądra atomowe. Prowadzi to do powstania nowych izotopów, najczęściej radioaktywnych, które bardzo często emitują wtórne promieniowanie gamma (wysokoenergetyczne fale elektromagnetyczne emitowane przez wzbudzone jądra atomowe). Jego energia jest charakterystyczna dla wyprodukowanego izotopu, dlatego pomiar rozkładu energii promieniowania gamma emitowanego przez aktywowaną substancję pozwala na określenie koncentracji większości pierwiastków. Można w ten sposób oszacować np. zawartość złota, srebra czy manganu.

W zastosowaniach poza laboratorium stosuje się zwykle przenośne źródła neutronów – generatory. Są to w istocie małe akceleratory zderzające jony deuteru z tarczą zawierającą tryt. Proces ten prowadzi do fuzji tych dwóch izotopów wodoru, w której powstaje cząstka alfa (jądro helu) oraz neutron o dobrze określonej i wysokiej energii (14 megaelektronowoltów). Tak wyprodukowane neutrony można także wykorzystać do aktywacji, ale w procesie nieelastycznego rozpraszania, w którym jądro jest wzbudzone podobnie jak przy wychwycie, ale neutron nie jest pochłaniany. Nie powstaje więc nowy izotop, a tyl-

ko promieniowanie gamma charakterystyczne dla wzbudzonego jądra. Zastosowanie szybkich neutronów ma zasadniczą zaletę, są one wysoce przenikliwe, co pozwala na wzbudzenie substancji znajdujących się w zamkniętych pojemnikach, zakopanych lub ukrytych np. za ścianą. Poza tym niektóre pierwiastki budujące niebezpieczne substancje mogą być wzbudzone prawie wyłącznie przez nieelastyczne rozpraszanie wysokoenergetycznych neutronów. Należą do nich np. siarka, węgiel czy tlen. Inne pierwiastki (głównie chlor i azot) mogą reagować z wymoderowanymi (wyhamowanymi) w badanej substancji neutronami termicznymi. Do detekcji powstających przy napromienianiu neutronami kwantów gamma wykorzystuje się w laboratoriach detektory germanowe (HPGe) potrafiące odróżnić fotony o bardzo zbliżonych energiach. Muszą być one jednak chłodzone (najczęściej ciekłym azotem) i są w związku z tym mało mobilne. Nie mogą one także pracować przez dłuższy czas w obecności promieniowania neutronowego, ponieważ ulegają pod jego wpływem degradacji. Dlatego w zastosowaniach do nieinwazyjnego wykrywania groźnych substancji najczęściej stosuje się detektory scyntylacyjne. Promieniowanie gamma oddziałuje, przekazując swoją energię (lub jej część) elektronom w aktywnej części takiego detektora, co w konsekwencji powoduje powstawanie błysków świetlnych (tzw. scyntylacji). Część powstającego światła jest zamieniana przez fotopowielacz na impulsy elektryczne, których ładunek (lub amplituda) pozwala na określenie zdeponowanej w scyntylatorze energii.

Istnieje kilka rozwiązań wykorzystujących aktywność neutronami do identyfikacji materiałów wybuchowych na ziemi (np. CALSEC z USA), a prototyp jednego z takich systemów, nazwany SWAN, powstał w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Składają się one z kompaktowych generatorów neutronów oraz detektorów scyntylacyjnych, które razem z zasilaniem i elektroniką mieszczą się w średniej wielkości walizce i mogą być montowane na robotach lub małych pojazdach lub dronach. Umożliwia to zdalną identyfikację podejrzanych obiektów.

Generatory neutronów (a w zasadzie wszystkie źródła neutronów) emitują te cząstki w każdym kierunku z praktycznie jednakowym prawdopodobieństwem. Jest to istotna wada indukująca w otoczeniu znaczne ilości promieniowania gamma nie pochodzącego od badanego przedmiotu, która stanowi swoisty szum dla urządzeń opartych na NAA. Jest on szczególnie istotny dla zastosowań podwodnych ze względu na wysokie prawdopodobieństwo oddziaływania neutronów z wodą, zawierającą pierwiastki budujące materiały, które chcemy wykrywać. Kolejnym problemem jest mocne pochłanianie oraz moderowanie neutronów i promieniowania gamma w wodzie. Powoduje to, że sensor musi zbliżyć się do badanego obiektu na małą odległość, by identyfikacja była moż-

liwa. Problemy te sprawiają, że nie ma komercyjnie dostępnych urządzeń pozwalających na nieinwazyjną identyfikację substancji w wodzie. Dotychczas powstał jeden prototyp takiego urządzenia (projekt UNCOSS), a drugi jest rozwijany na Uniwersytecie Jagiellońskim w projekcie SABAT. Dzięki zastosowaniu specjalnych przewodnic dla neutronów i kwantów gamma oraz wielu metod odrzucenia tła wykorzystujących m.in. algorytmy uczenia maszynowego polski sensor będzie w stanie wykryć ładunki zawierające kilkaset gramów materiałów wybuchowych lub gazów bojowych zalegających na dnie.

Perspektywy na przyszłość

Zastosowanie neutronowych technik aktywacyjnych daje realne szanse na istotne zmniejszenie kosztów oraz czasu rozminowania zarówno akwenów wodnych, jak i dużych obszarów na lądzie. Mogą one także zdecydowanie zwiększyć bezpieczeństwo takich prac oraz ludności cywilnej w ogólności. Sensory te będzie

W najbliższej przyszłości będzie możliwe tanie i dokładne określenie miejsc zalegania substancji niebezpiecznych w Bałtyku oraz stałe ich monitorowanie. Wciąż nierozwiązanym i znacznie poważniejszym problemem pozostaje neutralizacja tych zanieczyszczeń.

można w coraz większym stopniu miniaturyzować dzięki ciągłym innowacjom zarówno w wytwarzaniu neutronów (np. w USA powstał miniaturowy generator neutronów: neutristor), jak i detekcji promieniowania gamma. Ich czułość będzie można w niedalekiej przyszłości znacznie polepszyć dzięki jednoczesnemu zastosowaniu innych technik neutronowych: głęboko nieelastycznego rozpraszania termicznych neutronów lub ich transmisji. Wymagają one pobrania próbek, co nie jest problemem dla współczesnych pojazdów podwodnych (tzw. ROV), a ich analiza może być przeprowadzona w zasadzie natychmiast. Istnieje więc duża szansa, że będzie możliwe dokładne określenie miejsc faktycznego zalegania substancji niebezpiecznych w Bałtyku oraz stałe ich monitorowanie. Kolejnym nierozwiązanym i znacznie poważniejszym problemem pozostaje kwestia wydobycia tej bomby ekologicznej i jej neutralizacja. Nad jego rozwiązaniem pracują międzynarodowe zespoły naukowców, m.in. w startującym właśnie projekcie BALTWRECK, którego liderem jest Polska. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Dodson B., *World's smallest neutron generator – it's not just for nukes anymore*, newatlas.com/sandia-neutristor-neutron-generator-chip/23856

Najwyższa Izba Kontroli, *Przeciwdziałanie zagrożeniom wynikającym z zalegania materiałów niebezpiecznych na dnie Morza Bałtyckiego*, raport nr 192/2019/P/19/068/LGD, www.nik.gov.pl/plik/id,21969,vp,24636.pdf

Silarski M., Moskal P., *Atometria jako metoda wykrywania substancji niebezpiecznych*, „Foton” 2011, vol. 112.