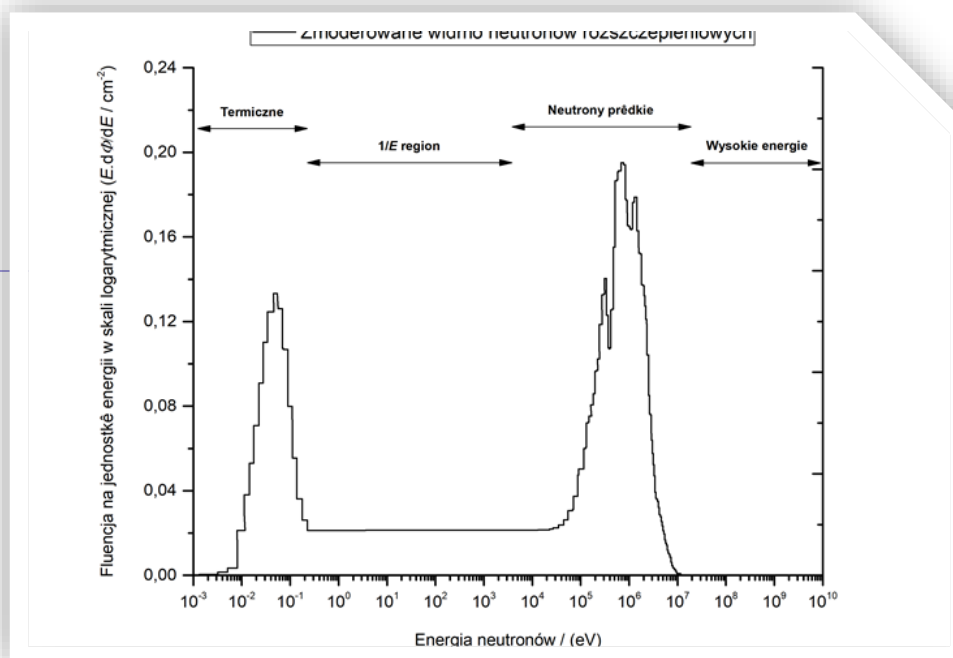






Opracowanie studium wykonalności projektu neutronowej dozymetrii indywidualnej

Ł. MODZELEWSKI, Z. BARANOWSKA, S. JEDNORÓG,
K. WOŁOSZCZUK, P. KRAJEWSKI, E. ŁASZYŃSKA, K. SZEWCZAK

Neutrony – charakterystyka

Neutrony są tym rodzajem promieniowania, którego rola niezmiennie wzrasta. Mają one istotne znaczenie w energetyce jądrowej, zarówno opartej na rozszczepieniu jak i powstającej, opartej na syntezie izotopów wodoru.

Neutron został odkryty w roku 1932 przez angielskiego badacza sir Jamesa Chadwicka, późniejszego laureata Nagrody Nobla. Pojęcie neutron z łacińskiego oznacza **obojętny** ponieważ **nie posiada ładunku elektrycznego**. Neutrony wewnątrz jąder atomowych są **zwykle stabilne**. Poza jądrem atomowym są nietrwałe i w wyniku oddziaływań słabych rozpadają się. **Średni czas życia** swobodnego neutronu wynosi 885,7 sekund (**około 15 minut**). Neutron rozpada się z wytworzeniem **protonu, elektronu i antyneutrino elektronowego**:



Metrologia neutronów

Metrologia neutronów jest nauką, która pozwala na wykonanie pomiarów natężenia pól neutronowych w zakresach energii obejmujących kilkanaście rzędów wielkości i intensywnościach obejmujących do dwudziestu rzędów wielkości.

Istota metrologii neutronów polega na **oszacowaniu ilości neutronów** wyemitowanych ze źródła i przechodzących przez pewną określoną powierzchnię. Wielkość tą nazywamy **fluencją** [$\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}$] (ang.: fluence).

W Tabeli 1 podano podział neutronów ze względu na ich energię i nazwy poszczególnych grup.

CENTRALNE LABORATORIUM OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

Metrologia neutronów

Nazwa grupy energetycznej:	Energia neutronów:
ultra zimne	$< 0,2 \mu\text{eV}$
bardzo zimne	$0,2 \mu\text{eV} \leq E \leq 50 \mu\text{eV}$
zimne 0,05	$\text{meV} < E \leq 25 \text{ meV}$
termiczne 25	meV
rezonansowe	$1 \text{ eV} < E \leq 1 \text{ keV}$
pośrednich energii	$1 \text{ keV} < E \leq 500 \text{ keV}$
prędkie 500	$\text{keV} < E \leq 50 \text{ MeV}$
wysokich energii	$> 50 \text{ MeV}$

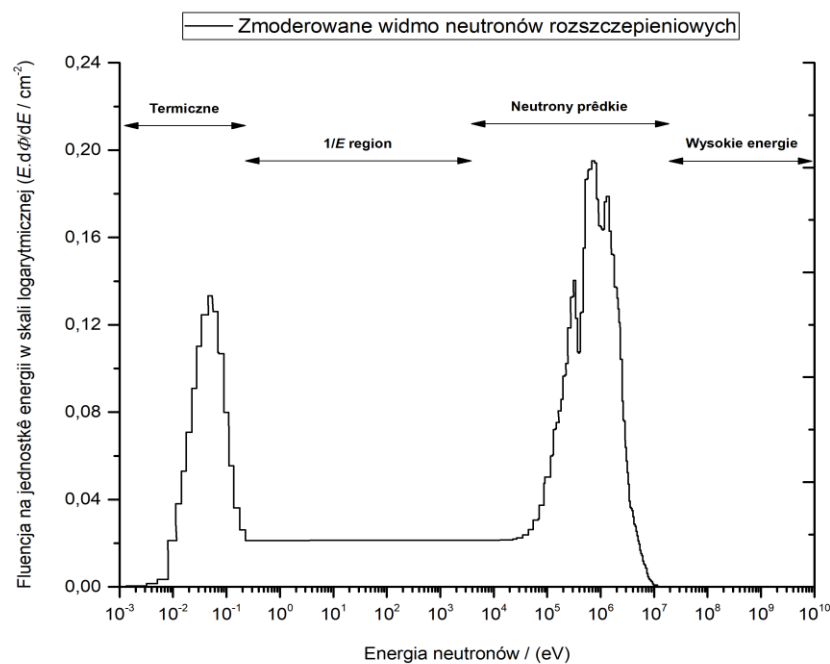
Możliwości pomiarowe neutronów

Bardzo duży zakres energii, dla którego konieczne jest zdefiniowanie standardów fluencji neutronów i równoważników dawek, można podzielić na następujące obszary:

- termiczny,
- $1/E$,
- neutronów prędkich
- wysokich energii

Na Rysunku 1 pokazano podział skali energetycznej na te obszary. Nie ma jednak precyzyjnego rozdzielenia tych obszarów a ich nazwy są raczej umowne. Różnice są jednak na tyle istotne, że związane są z istotnymi różnicami w generowaniu standardowych pól neutronów.

Możliwości pomiarowe neutronów



Rys. 1 Zmoderowane widmo neutronów rozszczepieniowych. Na osi pionowej fluencja na jednostkę energii w skali logarytmicznej

CENTRALNE LABORATORIUM OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

Metody pomiarowe neutronów

Metody spektrometryczne:

- **folie aktywacyjne** - są one wykorzystywane w tak różnorodnych dziedzinach jak fizyka, radiochemia i medycyna. Za pomocą tego typu folii możemy mierzyć szeroki zakres energii neutronów: neutrony prędkie i neutrony termiczne.



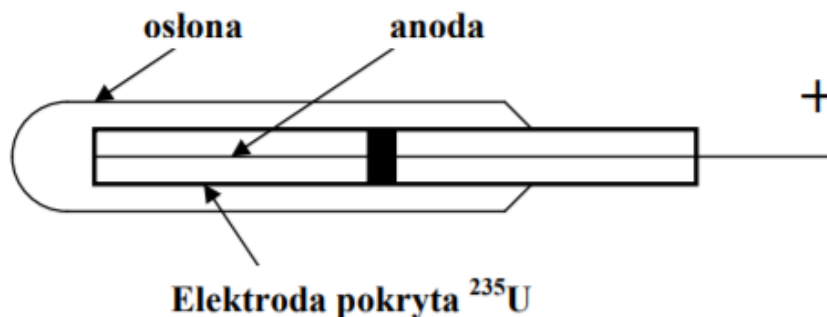
Metody pomiarowe neutronów

- **metoda aktywacyjna** - w przypadku neutronowej analizy aktywacyjnej NAA (ang.: Neutron Activation Analysis) reakcje jądrowe wywoływane są w wyniku napromieniowania strumieniem neutronów. W rezultacie wychwytu neutronów przez jądra materiału tarczy, produkty reakcji mogą emitować promieniowanie natychmiastowe (ang.: prompt) albo opóźnione (ang.: delay). W neutronice NAA służy do badania częstości fluencji, strumienia neutronów, całkowitej wydajności emisji neutronów i w pewnych przypadkach ich rozkładu energetycznego.
- **detektory progowe** - umożliwiają detekcję neutronów w obszarze energii od setek keV do ponad 50 MeV w zależności od materiału (pierwiastka) z którego zostaną wykonane. Po przekroczeniu przez neutrony pewnych wartości progowych energii zachodzą reakcje jądrowe. Pierwiastki stosowane do wykonania tego typu detektorów muszą się charakteryzować dokładnie określonymi wartościami progów energetycznych i możliwym do detekcji promieniowaniem gamma (< kilku MeV).

Metody pomiarowe neutronów

Metody pomiaru fluencji neutronów:

- **rozszczeniowa komora jonizacyjna** - to detektor przeznaczony do pomiarów energii cząstek elektrycznie obojętnych, który **wykorzystuje zjawisko rozszczepienia jąder uranu pod wpływem neutronów**. Ścianki wewnętrzne tego urządzenia pokryte są cienką warstwą związków uranu. Neutrony przechodząc przez komorę rozszczepieniową powodują na jej ściankach rozszczepienie jąder uranu, których fragmenty na swojej drodze **jonizują gaz wypełniający komorę**. Detektor wypełniony jest gazem (argonem) pod ciśnieniem dochodzącym do kilki atmosfer.



Metody pomiarowe neutronów

- gazowe liczniki proporcjonalne

- **detektor borowy:** to gazowy licznik proporcjonalny wypełniony fluorkiem boru $^{10}\text{BF}_3$ pod ciśnieniem około 1 atmosfery wykorzystuje on reakcję jądową:



Cząstki z reakcji ^7Li i α mają na tyle dużą energię, że wywołują wtórną jonizację gazu. To właśnie dzięki niej możliwa jest detekcja neutronów. Przy zastosowaniu odpowiednich moderatorów urządzenie może służyć do detekcji neutronów o energiach od 0.0025 eV do około 10 MeV.

CENTRALNE LABORATORIUM OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

Metody pomiarowe neutronów

- **detektor helowy:** to gazowy licznik proporcjonalny wypełniony helem ^3He pod ciśnieniem nie większym niż kilku atmosfer. Zasada działania licznika wypełnionego helem ^3He jest taka sama jak licznika wypełnionego fluorkiem boru $^{10}\text{BF}_3$.



Metody pomiarowe neutronów

- **detektor helowy (Bonner Sphere Spectrometer):** kula Bonnera, składa się z szeregu liczników proporcjonalnych wypełnionych helem ^3He . Liczniki te otoczone są moderatorami kulistego polietylenu o różnej średnicy. Powoduje to, że różne detektory rejestrują neutrony o różnych energiach docierających do powierzchni moderatora. Poprzez porównanie rezultatów otrzymanych z detektorów o różnych średnicach można określić energie padających neutronów.



Metody pomiarowe neutronów

- **detektor scyntylacyjny:** detektory tego typu są zazwyczaj używane do detekcji promieniowania alfa, beta oraz gamma. Znalazły również zastosowanie w wyznaczaniu energii neutronu za pomocą metody polegającej na pomiarze czasu przelotu od miejsca emisji neutronu do punktu w którym znajduje się urządzenie pomiarowe.

Scyntylatory mogą być wykonane w postaci pojedynczego kryształu, szkła lub plastiku zawierającego **siarczek cynku (ZnS) bądź ^{10}B lub ^6Li .**

Wadę detektorów scyntylacyjnych w stosowaniach w neutronice jest to, że rejestrują one również **promieniowanie gamma** towarzyszące nieodłącznie przechodzeniu neutronów przez otaczające detektor środowisko. Dzięki zastosowaniu metody dyskryminacji amplitud można uzyskać tylko zliczenia impulsów pochodzących od neutronów

Metody pomiarowe neutronów

- **Scyntylicyjny spektrometr neutronowy NE-213:** Opisana powyżej metoda znalazła praktyczne zastosowanie w liczniku NE-213. Scyntylicyjny spektrometr neutronowy NE-213 umożliwia pomiary rozkładów energetycznych neutronów prędkich o energii $E > 1,5 \text{ MeV}$. Rozróżnia on **powstające fotony i neutrony za pomocą zastosowanej analizy kształtu impulsu**.

Przetwarzanie sygnału zostało zrealizowane dzięki analogowemu układowi elektronicznemu w połączeniu z stabilizacją wzmocnienia fotopowielacza detektora. Do rozróżnienia fotonów i neutronów wykorzystana została tzw. metoda „zero-crossing”.

Widmo energetyczne jest odtwarzane metodą dekonwolucji i wymaga podania widma hipotetycznego, obliczonego metodami symulacji numerycznych.

Metody pomiarowe neutronów

- **Detekory Diamentowe (Single – Crystal Diamond Detectors):** detektory diamentowe, działają podobnie jak detektory zbudowane na bazie diody krzemowej. **Charakteryzują się możliwością rejestracją wysokich energii promieniowania, krótkim czasem reakcji i małymi rozmiarami.** Dzięki temu nadają się do rejestracji, neutronów prędkich w środowiskach, w których występują **duża fluencja neutronów** co jest charakterystyczne dla dużych układów fuzyjnych np. ITER .



Metody pomiarowe neutronów

- **Długi licznik dePanghera (DePangher precision long counter):** jest używany do pomiaru absolutnego fluencji neutronów pod różnymi kątami. Zaletami tego licznika jak **wysoką czułość, pomijalna** odpowiedź na **promieniowanie gamma** w większości przypadków oraz relatywnie stałą odpowiedź na neutrony w zakresie energii od 1 keV do 7 MeV. Powyżej tej energii odpowiedź zmniejsza się monotonicznie.

Długi licznik dePanghera ma cylindryczny kształt, długość 43 cm, średnicę 40 cm. Składa się z centralni umieszczonego licznika proporcjonalnego BF_3 . Tuba licznika otoczona jest warstwą moderującą polietylenu a na zewnątrz warstwą osłonną.

Metody pasywne pomiarów neutronów

Metody pasywne służące do monitoringu środowiska i osób narażonych na oddziaływanie promieniowania neutronowego:

- **Dozymetry Termoluminescencyjne (TLD):** są to dozymetry pasywne, zbierające informacje o dawce pochłoniętej w trakcie trwania ekspozycji (od wyzerowania do odczytu). Niektóre z materiałów wykorzystywanych do produkcji dozymetrów termoluminescencyjnych są czułe również na neutrony.

Przykładem materiału o **wysokim przekroju czynnym na reakcję z neutronami** jest ${}^6\text{Li}$. Informację o dawce pochodzącej od neutronów otrzymujemy za pośrednictwem cząstek alfa i jonów trytu uwalnianych w wyniku reakcji.

Sprawia to, że pastylki termoluminescencyjne mogą być wykorzystywane do pomiaru dawki pochodzącej od neutronów. Należy jednak pamiętać, że jednocześnie są one czułe na inne rodzaje promieniowania (gamma, X, beta). Najczęstszym przypadkiem wykorzystywania pastylek **TLD w dozymetrii neutronowej** jest połączenie w ramach jednego dozymetru (obudowy) par **pastylek czułych i nieczułych** na neutrony.

Metody pasywne pomiarów neutronów

- **CR-39 - detektory śladowe:** najczęściej wykorzystywanym detektorem śladowym jest węglan poliallilodiglikolu - PADC, znany jako CR-39.

Neutrony nie powodują bezpośredniej jonizacji w detektorze, a więc **nie zostawiają w nim śladów**. Tym, co umożliwia ich detekcję są **zjawiska wtórne**, jakie powstają w wyniku odrzutu jąder materiału z którego wykonany jest detektor po zderzeniu z neutronami.

W wyniku kolizji z neutronami (poprzez zderzenia sprężyste i niesprężyste) powstają jądra odrzutu. najczęściej są to **protony**. Są to, cząstki naładowane dodatnio powodujące jonizację w detektorze zostawiając w nimi ślady.

Metody pasywne pomiarów neutronów

- **Detektor bąbelkowy:** detektor bąbelkowy to detektor w postaci fiolki wewnątrz której znajdują się mikroskopijne **krople zawieszone w płynie** który jest **rodzajem żelu**. Neutrony oddziałując z tym żelem przekazują część swojej energii powodując jego zagotowanie, czego skutkiem jest przemiana **mikroskopijnych kropli w widzialne bąbelki**. Dawka pochłonięta od neutronów jest proporcjonalna do powstałych w detektorze bąbelków.

Detektor bąbelkowy dzięki temu, że jest niewielkich rozmiarów może być użyty w **dozymetrii osobistej** lub do **pomiarów środowiskowych**.

Za pomocą urządzenie tego typu można wyznaczyć średnią wartość przestrzennego równoważnika dawki $H^*(10)$ w zakresach energii neutronów od 100 keV do około 10 MeV. Zaletą detektora jest to, że jest **nieczuły na promieniowanie gamma**.



CENTRALNE LABORATORIUM OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

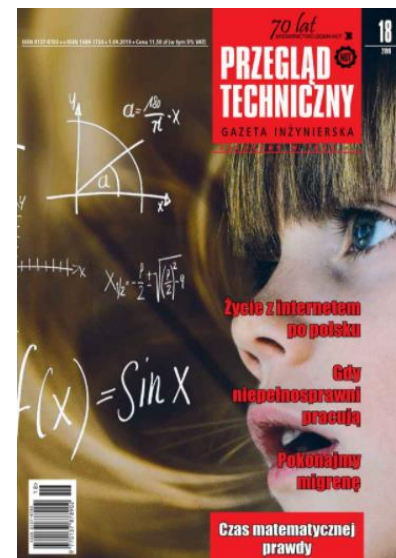
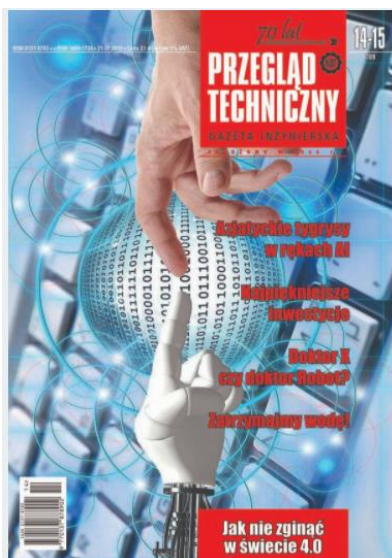
Podsumowanie

Publikacja pt. „Metrologia neutronów” (cz. I, II, III)

Przegląd Techniczny – Gazeta Inżynierska

Łukasz Modzelewski, Zuzanna Baranowska, Katarzyna Wołoszczuk,

Paweł Krajewski, Sławomir Jednoróg, Ewa Łaszyńska, Kamil Szewczak



Dziękuję za uwagę

