# Badanie pola wysokoenergetycznych neutronów spalacyjnych na zestawie KWINTA przy pomocy próbek Y-89

Elżbieta Strugalska-Gola Zakład Energetyki Jądrowej UZ3



# Plan prezentacji

#### Spis treści

- 1. Cel badań
- 2. Problem odpadów jądrowych
- 3. Systemy sterowane akceleratorem ADS
- 4. Zestaw eksperymentalny "KWINTA" w ZIBJ Dubna
- 5. Wyznaczanie pola wysokoenergetycznych neutronów przy pomocy próbek itru 89
  - Omówienie metodyki pomiarów
  - Wyniki eksperymentalne
- 6. Zależność widma neutronów od rodzaju wiązek z akceleratora i energii cząstek.
- 7. Wnioski



# 1. Cel badań

- Jednym z głównych nurtów badań dotyczących przyszłych reaktorów jądrowych jest problem utylizacji odpadów promieniotwórczych, czyli takie zaprojektowanie i wykonanie przyszłych generacji reaktorów jądrowych oraz układów ADS (reaktorów sterowanych akceleratorem, od ang. *Accelerator Driven Systems*), aby umożliwiały one oprócz wytwarzania energii, jednoczesną wydajną transmutację odpadów promieniotwórczych
- Wyniki teoretycznych i eksperymentalnych naszych zadań badawczych mogą być wykorzystane przy projektowaniu przyszłych instalacji ADS oraz do dopracowania technik obliczeniowych (kodów). Umożliwią ustalenie optymalnej lokalizacji i parametrów, przy których wydajność transmutacji i wypalania aktynowców będzie największa.
- Eksperymenty te pozwalają opanować i udoskonalić techniki pomiaru widma neutronów wewnątrz reaktora oraz wewnątrz zestawów eksperymentalnych.
- Celem pośrednim tych prac jest poznanie procesów fizycznych zachodzących w źródle spalacyjnym.

Problem transmutacji jest do tej pory jeszcze nie rozwiązany na świecie i dlatego włączyliśmy się w ten nurt badań.

### 2. Problem odpadów jądrowych

Rozważając zagadnienie transmutacji odpadów radioaktywnych wytworzonych w reaktorach energetycznych należy w pierwszej kolejności oszacować rozmiar problemu.

Z 1 tony świeżego paliwa o wzbogaceniu 3,3% (967 kg U-238 + 33 kg U-235) otrzymujemy paliwo wypalone o składzie:

- 943 kg U-238, 8 kg U-235, 4,6 kg U-236,
- 35 kg produktów rozszczepienia,
- •8,9 kg różnych izotopów Plutonu,
- 0,5 kg Np.=237, 0,12 kg Am-243, 0,04 kg Cm-244.

Powyższe dane odpowiadają wypaleniu paliwa ok. 40 GWD/iU.

W skali świata 433 elektrownie o łącznej mocy 367 000 MWe wytwarzają ok. 10000 ton paliwa wypalonego rocznie.

We współczesnych reaktorach wypalamy tylko 2-3% uranu. Reszta idzie do przechowalników i czeka aż następne pokolenia opracują efektywne techniki wypalania reszty uranu

W zasadzie są trzy podejścia do rozwiązania problemu radioaktywnych odpadów jądrowych:

- Składowanie w długoterminowych przechowalnikach po wstępnym odczekaniu aż radiotoksyczność wypalonego paliwa spadnie dostatecznie,
- Tzw. recykling czyli przeróbka wypalonego paliwa i wykorzystanie odzyskanego paliwa do ponownego użycia,
- Transmutacja jądrowa (przekształcenie jednego izotopu w inny). Do transmutacji potrzebne są silne źródła wysokoenergetycznych neutronów

# 2. Odpady radioaktywne

Są dwa rodzaje odpadów radioaktywnych:

- **produkty rozszczepienia (PR)** zalicza się do nich izotopy Tc99, Cs137, I129, Sr90 i inne; radiotoksyczność Tc99, II29 stanowi 95% całkowitej radiotoksyczności długożyciowych PR; może być ona zaniedbana po 250 latach bezpiecznego składowania; Intensywny strumień neutronów termicznych powoduje transmutację PR ale większą efektywność transmutacji osiągnie się za pomocą neutronów epitermicznych w przedziale energii od 2 eV do 15keV.
- **aktynowce** zaliczamy do nich 15 chemicznych pierwiastków o liczbie atomowej od 89 do 103. Uran i pluton (mayor actinides) są podstawowymi składnikami paliwa jądrowego. Tzw. mniejsze aktynowce (minor actinides MA) tj. izotopy neptunu(237Np i 238Np), ameryku (241Am i Am 243) oraz kiuru (242Cm, 243Cm i 244Cm); powstają w paliwie jądrowym podczas naświetlania w reaktorze w efekcie wychwytu neutronu; MA decydują przede wszystkim o wysokim poziomie aktywności odpadów radioaktywnych; radiotoksyczność aktynowców pozostaje jeszcze znaczna po składowaniu ponad milion lat (Rys.1).
- Problemem jest to, że odpady radioaktywne mniejszych aktynowców (Np, Am i Cm) nie ulegają transmutacji (rozszczepieniu) w strumieniu neutronów termicznych w typowym komercyjnym reaktorze o mocy (3000 MW). Wychwytują one raczej neutrony tworząc izotopy o wyższych masach atomowych. Aktynowce te ulegają rozszczepieniu dla wyższych energii neutronów (powyżej 0,6 MeV).



2. Zanik w czasie względnej aktywności promieniowana wypalonego paliwa w

odniesieniu do aktywności uranu wydobytego z kopalni (rys.1)





# 3. Systemy sterowane akceleratorem (Accelerator – Driven Systems ADS, Rys.2).



Pomysł ADS polega na połączeniu akceleratora wysokoenergetycznych cząstek (protonów, deuteronów) o energii większej od 1 GeV z reaktorem podkrytycznym.

Autorem projektu takiego ADS był Carlo Rubia (1993r). Reaktor mógłby *służyć do transmutacji i spalania odpadów promieniotwórczych, a jednocześnie do produkcji energii elektrycznej na zewnątrz,* w tym do zasilania akceleratora cząstek.

Wysokoenergetyczne cząstki uderzają w blok z ciężkiego metalu (np. uranu, ołowiu itd.) wywołując w nim reakcje kruszenia (spalację). W wyniku **tych reakcji powstają neutrony prędkie,** które są kierowane do reaktora podkrytycznego. W ten sposób można podtrzymać reakcję łańcuchową ale też w każdej chwili ją przerwać przez wyłączenie akceleratora protonów.

# 3. ADS

Wydajność spalacyjnego źródła neutronów zależy od wielu parametrów takich jak;

- rodzaj cząstki wiązki i jej energii,
- rodzaj tarczy (skład chemiczny) i jej rozmiary (poprzeczne i podłużne);
- przekroje czynne na zachodzenie w tarczy reakcji (wtórnych) a zwłaszcza (n,2n),(n,3n), (n,f).

Zalety ADS:

- Niedobór neutronów prędkich jest uzupełniany z zewnątrz
- ADS pracują w stanie podkrytycznym czyli w sytuacji awaryjnej szybko można przerwać reakcję łańcuchową wyłączając akcelerator
- Możemy kierować warunkami i daną sytuacją w rdzeniu z zewnątrz.

Wady ADS to:

• Systemy te wymagają kosztownego akceleratora cząstek

Konstrukcja wydajnego układu ADS musi być poprzedzona żmudnymi badaniami. NCBJ maj 2016

## 4. "Kwinta" - zestaw do badania transmutacji

• **Celem pracy** było badanie pola wysokoenergetycznych neutronów spalacyjnych w zestawie KWINTA przy pomocy aktywacyjnych detektorów progowych z Y-89.

• Na świecie jest niewiele pracujących zestawów do badania transmutacji.

• W ZIBJ w Dubnej Pracownia Analiz Reaktorowych Zakładu UZ3 uczestniczy w badaniach tych systemów w międzynarodowym programie naukowym: "Badanie fizycznych aspektów produkcji energii i transmutacji odpadów radioaktywnych przy użyciu relatywistycznych wiązek z akceleratora Nuclotron - projekt "E+T RAW"

• Prace badawcze prowadzone w ramach kilkuletniej międzynarodowej współpracy przez naukowców z Rosji, Czech, Niemiec, Grecji, Francji dają wyniki transmutacji innych pierwiastków i badają inne obszary widma neutronów. Znajomość widma neutronów w zestawach o najróżniejszej konfiguracji pozwoli kiedyś zbudować zestaw podkrytyczny o widmie optymalnym z punktu widzenia transmutacji długo-życiowych produktów rozszczepienia i aktynowców.

• Ten program jest częścią większego projektu dotyczącego badania fizycznych właściwości systemów ADS, w których głęboko podkrytyczny aktywny rdzeń z różnych materiałów jest naświetlany wiązką relatywistycznych deuteronów.



## 4. "Polska" metoda pomiaru pola neutronów

- Każda grupa naukowców biorąca udział w projekcie preferowała swoją metodę pomiaru. Głównie stosowano metodę aktywacyjną różnych próbek i także detektory neutronów ciała stałego SSNTD.
- Podstawową przyczyną wykorzystania kilku różnych detektorów jest zwiększenie liczby kanałów (energii reakcji progowych) oraz uzyskania wyników pokrywających (bez większych przerw) badany zakres energii. Inni uczestnicy eksperymentu badali detektory takie jak Al.,Au, Bi, Co, Ni itd..
- Jako detektorów aktywacyjnych polska grupa użyła próbek wykonanych z czystego (99,9%) Itru 89.



## 4. "Polska" metoda pomiaru pola neutronów

Zalety Itru jako detektora aktywacyjnego są następujące:

- naturalny Itr składa się tylko z jednego izotopu Y-89
- nie ma "nakładania się" reakcji
- reakcje są łatwe do śledzenia
- powstaje kilka izotopów wystarczająco długożyciowych
- powstające izotopy są łatwe do identyfikacji (linie gamma)
- Y-89 oddziałuje z neutronami na wiele sposobów (kanałów). Każdy kanał ma swoją energie progową i dlatego Y-89 nadaje się do wyznaczenia widma neutronów.

## Reakcje Y89(n,xn) wykorzystywane do analiz

Reaction	Produced Isotope	T1/2	Reaction Threshol d [MeV]	γ-line Energy [keV]	γ-line Intensity [%]
Y-89(n,2n)	Y-88	106,65d	11 5	898.042	93.7
			11,5	1836.063	99.2
Y-89(n,3n)	Y-87	79,8h	20.0	388.53	82.00
			20,0	484.805	89.7
Y-89(n,4n)	Y-86	14,74h	32,7	1076.64	82.00
Y-89(n,5n)	Y-85	2.68h	42.633	231.67	84.00
		4.86h	42.633	231.67	22.8



## 4. Eksperymenty na zestawie "KWINTA"

- Do tej pory w bazach danych jądrowych mamy dość dużo informacji o neutronach nisko i średnio- energetycznych. Mało natomiast jest rezultatów dla neutronów wysoko energetycznych (E>10MeV). Konsekwencją tego jest skąpa ilość eksperymentalnych przekrojów czynnych dla reakcji z neutronami wysoko energetycznymi. Badania Y89 dają dodatkowy kanał do otrzymywania danych o neutronach wysokich energii. Dlatego zajęliśmy się tym zagadnieniem.
- Zestaw Kwinta imituje głęboko podkrytyczny reaktor na neutronach prędkich sterowany wiązką z akceleratora Nuclotron (ADS) w ZIBJ w Dubnej.
- Wiązka deuteronów lub protonów przyspieszona w akceleratorze do energii kilku GeV pada na materiał rdzenia (tarcza z uranu naturalnego) rozbijając jądra uranu i produkując neutrony spalacyjne.
- Na zestawie KWINTA było przeprowadzone kilka eksperymentów (od marca 2011 do grudnia 2014) w celu wyznaczenia widma neutronów wysokich energii poprzez wykorzystanie 12 detektorów aktywacyjnych Y89 w tym zestawie



### 4. Zestaw "KWINTA"



Rys.3. Widok zestawu KWINTA . Z lewej strony widok na tarczę uranową z 5 sekcjami i płytami, na których umieszczane są detektory aktywacyjne; z prawej strony tarcza otoczona płaszczem z ołowiu o grubości 10 cm.

Zestaw składa się z 5 heksagonalnych sekcji wypełnionych elementami paliwowymi z uranu naturalnego w osłonach aluminiowych o średnicy 36mm i długości 104 mm. W każdej sekcji jest 61 prętów paliwowych. Łączna masa uranu wynosi 512kg, i jest otoczona płaszczem z ołowiu o grubościn10 cm. I masie 1780kg. Między sekcje w szczeliny o wymiarze 17mm są wkładane płytki z aluminium z naklejonymi detektorami aktywacyjnymi



#### 4. Rozmieszczenie detektorów Y-89 w zestawie KWINTA (2011 – 2014)

Dla każdej energii deuteronów naświetlano 12 próbek Y89.



Rys. 4. Przekrój podłużny KWINTY ze szczelinami na płyty z detektorami aktywacyjnymi







DETECTOR PLATES 1, 2, 3, 4, 5

Rys.5. Rozmieszczenie detektorów progowych Y-89







# 4. Widmo energetyczne neutronów

- Aby unieszkodliwiać odpady radioaktywne przy pomocy neutronów musimy posiadać dobrą znajomość widma energetycznego neutronów, którymi chcemy niszczyć odpady.
- Strumienie neutronów [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] i widma neutronów [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>MeV<sup>-1</sup>] są podstawowymi parametrami, jakimi są zainteresowani badacze reaktorów jądrowych. Są to parametry lokalne (zależne od miejsca wewnątrz reaktora). Ich dokładna znajomość jest niezbędna szczególnie w miejscach planowanego wypalania materiałów przeznaczonych do transmutacji.
- Badamy rozkłady osiowe i radialne strumienia neutronów oraz zależność strumienia i widma od rodzaju wiązki i energii cząstek



# Parametry eksperymentów

Accelerator:	JINR LWE Nuclotron								
Time:	Mar 2011	Mar 201	L1	Mar	2011	Dec 2	2011	Dec 2	2011
Beam:	Deuteron	Deutero	on	Deut	teron	Deut	teron	Deut	eron
Energy:	2 GeV	4 GeV	6	GeV		1	GeV	4	GeV
Irrad. Time:	6	7829 s	823	81 s	66952	2 s	76026	ö s	63060 s
Collected beem particles:	1,54*10 <sup>13</sup>	1,5*10 <sup>13</sup>			2.17*1	0 <sup>13</sup>	6,791°	*10 <sup>13</sup>	3,37*10 <sup>13</sup>
Target "KWINTA":	Model U/l	Aodel U/U without shield		Model U/U + Pb shield					
Activation Detectors: Yttrium 89 – disc shape, h $\cong$ 1-2 mm, d = 10 mm									



# **5. POMIARY**

- Po zakończeniu naświetlania mierzono aktywność gamma próbek Itru na spektrometrze germanowym HPGe ORTEC New lub Canbertra.
- Wykonano dwie serie pomiarowe krótkookresowe (czas ~ kilkunastu min) i długookresowe (od paru do 8 godz).
- Zmierzono próbki wzorcowe.
   1 GeV/nucleon Quinta

10000 1000 Count 10 10 2.00 738.25 1474.50 2210.75 2947.00 Energy (keV) Acquired: 2011-Mar-15 23:36:08 Real Time: 65259.06 s. Live Time: 64255.32 s. File: C:\Swierk\Dubna\2011 03\Y89 2GeV kwinta\P-Y01-p2-2.Chn Channels: 8192 Delector: #65539 HPGe ORTEC new



Rys. 6. Przykładowe widmo gamma próbki itru NCBJ maj 2016

## 5. Przebieg obróbki wyników

- Pierwszy etap obróbki wyników pomiarów prowadzony był przy pomocy programu DEIMOS [1]. Program umożliwiał wyznaczenia linii gamma, powierzchni piku, szerokości połówkowej (FWHM) i ich błędów.
- W drugim etapie przeprowadzało się identyfikację izotopów w oparciu o zidentyfikowane linie gamma (biblioteka danych jądrowych).
- Następnie obliczano liczbę jąder danego izotopu generowanego w 1 gramie materiału próbki przypadającą na jeden deuteron wiązki (parametr B czyli produkcja danego izotopu); uwzględniono we wzorze niezbędne poprawki – kalibrację po czasie (grupa trzech poprawek, która uwzględnia fakt, że wykryty radioaktywny izotop ulega rozpadowi cały czas - czas trwania eksperymentu tirr, czas od końca eksperymentu do początku pomiaru t+, czas trwania pomiaru treal i t live), poprawki związane z właściwościami materiału próbek, detektorem (jego czułość) i geometrią pomiaru. Wielkość błędu parametru B jest średnio na poziomie ok. 15% -20%.
- Końcowym etapem pracy było wyznaczenie widma neutronów o energiach wyższych od 10MeV w 3ch przedziałach energetycznych (11.5-20.8, 20.8-32.7, 32.7-100MeV) w oparciu o dane jądrowe z programu TALYS.



## 5. Parametr "B" – produkcja izotopów Y-89

$$B = N_1 \cdot \frac{1}{m \cdot I} \cdot \frac{\Delta S(G) \cdot \Delta D(E)}{N_{abs} \cdot \varepsilon_p(E) \cdot COI(E,G)} \cdot \frac{(\lambda \cdot t_{ira})}{[1 - \exp(-\lambda \cdot t_{ira})]} \cdot \exp(\lambda \cdot t_+) \cdot \frac{1}{[1 - \exp(-\lambda \cdot t_{real})]} \cdot \frac{t_{real}}{t_{live}}$$

gdzie

[S]

B liczba uzyskanych nuklidów na jeden gram materiału próbki i na jeden padający deuteron

N <sub>1</sub>	powierzchnia piku (linii gamma)
N <sub>abs</sub>	absolutna intensywność danej linii [%]
$\varepsilon_{n}(\tilde{E})$	efektywność detektora w funkcji energii
COI(E,G)	efekt kaskadowy (w funkcji energii i geometrii)
$\Delta S(G), \Delta I$	D(E) funkcje kalibracyjne na grubość i kształt próbki (detektora)
Ι	całkowita liczba padających protonów/deuteronów
λ	stała rozpadu ( $\lambda = \ln(2)/t_{1/2}$ )
$t_{1/2}$	czas połowiczny życia [s]
t <sub>ira</sub>	całkowity czas naświetlania [s]
t <sub>+</sub>	czas pomiędzy końcem naświetlania i początkiem danego pomiaru
t <sub>real</sub>	czas pomiaru [s]
m	masa próbki (tarczy) [g]

Główny wkład do błędu wartości parametru B pochodzi od błędu statystycznego,  $\Delta N_1$  i błędu liczby I.

#### Wykresy produkcji izotopów Y-88,Y-87, Y-86, Y-85 dla deuteronów o energii 2 GeV w marcu 2011r – KWINTA bez osłony z ołowiu



Y-87 spatial distribution based on lines 388.53 and 484.805 keV







keV 2 GeV deuteron beam 4.0 8.0 0 1 2 3 4 5 0,00E+00 0 Distance from the front of the target

Y-86 spatial distribution based on gamma line 1076.64

NCBJ maj 2016

#### Wykresy produkcji izotopów Y-88,Y-87, Y-86, Y-85 dla deuteronów o energii 1 GeV w GRUDNIU 2011r – KWINTA z osłoną ołowianą o grubości 10 cm



## 5. Inna postać wyników – indeksy spektralne

Y-87 S2/Y-88 S2 spectral index



Widmo neutronów jest prawie takie samo w całym zestawie "KWINTA"



a)

#### 5. Wyznaczenie widma neutronów w zestawie KWINTA

- Mając tylko trzy izotopy Y89 nie można dokładnie wyznaczyć widma neutronów. Dlatego wybrano 3 przedziały energetyczne neutronów, w których będzie ono oszacowane dla 3ch izotopów Y89. Są to przedziały: (11.5-20.8, 20.8-32.7, 32.7-100MeV). Widmo będzie wyznaczone dla różnych energii wiązki cząstek z akceleratora (Energia deuteronów od 1-8GeV)
- Wykorzystujemy przestrzenne rozkłady produkcji izotopów Y89.
- Zakładamy, że średni strumień neutronów (Φ srd)[n/cm2\*s] w zakresie energii (E1-E2) jest stały podczas naświetlania deuteronami (intensywność wiązki deuteronów w przybliżeniu jest stała w czasie naświetlania



Φ

### 5. Przekroje czynne dla reakcji progowych (n,xn) izotopów Y-89

W zależności od ilości wykorzystanych reakcji progowych wykonujemy podział badanego zakresu energii na przedziały.

Rysunek 7 (obok z prawej) prezentuje przekroje czynne dla trzech reakcji progowych (n,xn) dla Y-89. Energie progowe: E1 = 11,5 MeV dla Y88, E2 = 20,8 MeV dla Y87 E3 = 32,7 MeV dla Y86



### Przekroje czynne dla reakcji progowych (n,xn) izotopów Y-89

Do wyznaczenia pola neutronów wysokiej energii niezbędna jest nam znajomość mikroskopowych przekrojów czynnych dla reakcji progowyc (n ,xn) izotopów <sup>89</sup>Y. Niestety w bazach danych dostępne są tylko dane dla reakcji <sup>89</sup>Y(n, 2n)<sup>88</sup>Y i dla małej części zakresu energii dla reakcji <sup>89</sup>Y(n, 3n)<sup>87</sup>Y (EXFOR). Z tego powodu do naszych obliczeń posłużono się wartościami wyliczonymi za pomoca kodu TALYS 1.6.



Rys. 8. Wartości przekrojów czynnych dla reakcji progowych <sup>89</sup>Y(n, xn) - TALYS.

Rys.9. Eksperymentalne dane z bazy EXFOR.



### Formuła dla wyznaczenia średniego strumienia neutronów

• Otrzymujemy układ trzech równań dla wyznaczenia średniego strumienia neutronów w zadanych przedziałach energii

$$\overline{\phi_{1}} = \frac{C}{\overline{\sigma_{11}}} \left[ B^{88} - B^{87} \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{22}} + B^{86} \left( \frac{\sigma_{23}}{\overline{\sigma_{33}}} \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{22}} - \frac{\sigma_{13}}{\overline{\sigma_{33}}} \right) \right]$$
$$\overline{\phi_{2}} = \frac{C}{\overline{\sigma_{22}}} \left[ B^{87} - B^{86} \frac{\overline{\sigma_{23}}}{\overline{\sigma_{33}}} \right]$$
$$\overline{\phi_{3}} = \frac{C}{\overline{\sigma_{33}}} B^{86}$$
$$C = \frac{S G^{89}}{A t}$$



Przykładowy wynik obliczenia średniego strumienia neutronów w zestawie KWINTA dla przedziału energii 11.5-20.8 MeV dla Ed= 6GeV- KWINTA Marzec 2011r,. Rys.10





### Średnia gęstość strumienia neutronów

Porównanie średniej gęstości strumienia neutronów na 1MeV, 1 deuteron i na 1GeV energii wiązki z akceleratora dla odległości R=4cm

od osi dla 3 eksperymentów (dla Ed= 2,4 i 6 GeV, QUINTA w III 2011) r.



Generalną cechą eksperymentalnej gęstości strumienia neutronów na 1MeV w zestawie KWINTA jest maksimum, które występuje w odległości i 13.1 cm od czoła targetu spalacyjnego z U-238.. Krzywe gęstości strumienia na 1 deuteron i 1 GeV pokrywają się w przedziałach energii neutronów 11.5-20.8 MeV i 32.7-100 MeV, i prawie się pokrywają w zakresie energii 20.8-32.7 MeV dla promienia 4 cm

## Średnia gęstość strumienia neutronów

Porównanie średniej gęstości strumienia neutronów na 1MeV, 1 deuteron i na 1 GeV energii wiązki z akceleratora dla odległości R=8 cm od osi dla 2 eksperymentów (z energią 1 i 4 GeV, KWINTA w XII 2011 (z dodatkowa osłona ołowianą) i jednego z III



2011 o energii 4GeV (bez osłony ołowianej).

Rys. 11 (rys. lewy) Linia żółta odpowiada eksperymentowi z III 2011 bez osłony ołowianej dla deuteronów o energii 4 GeV w przedziale energii neutronów (11,5-20,8) MeV: inne – z osłoną ołowiana z XII 2011. Osłona ołowiana powoduje wzrost strumienia

Rys. prawy przedstawia średnią gęstość strumienia neutronów dla przedziału (32,7-100) MeV. Widzimy, że dla R=8 cm nie obserwuje się pokrywania krzywych dla energii deuteronów 4GeV w eksperymentach Wamarcu i grudniu 2011r. 30

## Parametry eksperymentów

Accelerator:	J	Phasotron		
Time:	Dec 2012	Dec 2012	Dec 2012	Dec 2014
Beam:	Deuteron	Deuteron	Deuteron	Proton
Energy: Irrad. Time: Collected beem particles:	2 GeV 3,05*10 <sup>13</sup>	4 GeV 22 561 s 33 3,57*10 <sup>13</sup>	8 GeV 3 631 s 58 1.39*10 <sup>13</sup>	0.66 GeV 213 s 20580 s 8,64*10 <sup>14</sup>
Target "KWINTA":	Ν	/lodel U/U + Pl	b shield	



# Porównanie przestrzennego rozkładu izotopu Y-87dla energii wiązki 2,4,8 GeV w eksperymencie KWINTA , XII 2012



NCBJ maj 2016

#### Wykresy produkcji izotopu Y-88 dla deuteronów o energii 2,4,8 GeV (KWINTA XII 2012r.) i dla protonów o energii 0,660MeV (KWINTA XI 2014r.).



Przykładowe wyniki dla protonów o energii 0,66 GeV - eksperyment (2014-11) Osiowe rozkłady szybkoś<u>ci reakcji Y-89(n,xn)</u>



6. Porównanie średniej gęstości strumienia neutronów na 1 cząstkę z wiązki i 1 GeV dla deuteronów o energii 2,4 i 8 GeV (eksperyment XII 2012) i dla protonów o energii 0,66 GeV (XI 2014r)



Na przedstawionych wykresach widać, że efektywność produkcji neutronów w naszych próbkach była bardzo zbliżona i niezależna nie tylko od energii wiązki ale też od rodzaju cząski w wiązce.



### Zestawienie produkcji Y87 wyznaczonej doświadczalnie i obliczonej programem MCNPX – KWINTA 2011r



Zgodność danych doświadczalnych i obliczeniowych jest zadawalająca ale należy objąć pomiarami szerszy zakres energii neutronów.



## Wnioski

- Zaprezentowane wyniki wykazały użyteczność itru jako detektora bardzo dobrego do prostego wyznaczania średnich wartości strumienia neutronów o wysokich energiach w zestawach eksperymentalnych i przyszłych instalacjach ADS. Opracowana metoda wykonywania itrowych detektorów jest skuteczna i powtarzalna.
- W naszych analizach brane pod uwagę były tylko 3 izotopy (3 punkty) do obliczania widma energetycznego neutronów. To za mało dla pełnej informacji o widmie neutronów.
- Dlatego w przyszłości musimy stosować więcej rodzajów próbek, o różnych energiach progowych i wtedy wyznaczymy widmo z większą dokładnością.
- Należy w dalszym ciągu wyznaczać widma energetyczne neutronów ponieważ posłużą one do weryfikacji programów obliczeniowych dla neutronów wysokoenergetycznych. Istniejące programy były dobrze przetestowane dla energii neutronów do 1MeV, powyżej tego zakresu często wykazują rosnące błędy. Nie istnieje jeden spójny model reakcji jądrowych (np. model spalacji).
- Produkcja izotopów itru we wszystkich eksperymentach wykazuje wyraźne maksimum w odległości około 12-13 cm od czoła tarczy. Wielkość tej produkcji zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości radialnej od osi zestawu.



## Wnioski cd.

- Rozkład przestrzenny pola neutronów wewnątrz zestawu eksperymentalnego jest generalnie niezależny od energii wiązki.
- Kształt krzywych średniej gęstości strumienia neutronów dla eksperymentów KWINTA w latach 2011 -2014 o energii wiązki 1,2, 4, 6 i 8GeV (deuterony) i 0,66 GeV (protony) jest taki sam .
- Wydajność transmutacji normalizowana na 1GeV energii wiązki jest taka sama dla energii większych od około 0,5 GeV. Można z tego wnioskować, że optymalna energia wiązki będzie 1-1,5 GeV.
- Nie zaobserwowano znaczących różnic w rozkładzie neutronów przy zmianie wiązki z deuteronów na protony .
- Eksperymenty tego typu powinny symulować jak najbliżej przyszłe instalacje ADS. Dlatego badania te będą kontynuowane z kolejnymi zestawami eksperymentalnymi takimi jak BURAN.
- Uzyskane rezultaty i doświadczenie mogą być wykorzystane w konstrukcji przyszłych reaktorów i układów ADS jako zestawów do wypalania odpadów promieniotwórczych. Są też wykorzystywane do weryfikacji kodów używanych do teoretycznego wyznaczania wartości produkcji neutronów.

#### Literatura

- 1. J. Frana Program DEIMOS32 for Gamma Ray Spectra Evaluation. Radioanal. and Nucl. Chem., V. 257, p.583, 2003.
- 2. TALYS : A Nuclear reaction code. A.J. Koning, S.Hilaire, M.Duijvestijn. <u>www.talys.eu</u> [2]Experimental Nuclear Reaction Data; EXFOR/CSISRS
- M.Bielewicz, S. Kilim, E. Strugalska-Gola, M. Szuta, A. Wojciechowski; Yttrium as a New Threshold Detector for Fast Neutron Energy Spectrum (>10 MeV) Measurement, J. Korean Phys. Soc. Vol.59 No 2 p.2014, 2011
- 4. M.Salvatores, G.Patmiotti : Progress in particles and b Nucleon Physics, 66 (2011),144-166.
- 5. S.R. Hashemi-Nezhad, W. Westmeier, M. Zamani-Valasiadou, B. Thomauske and R. Brandt: "Optimal ion beam, target type and size for Accelerator Driven Systems: Implications to the associated accelerator power": Annals of Nuclear Energy 38/5 (2011) 1144-1155
- E.Strugalska-Gola, M.Bielewicz et al.: Measurements of fast neutron spectrum in QUINTA assembly irradiated with 2,4 and 8 GeV deuterons, PoS Baldin XXII 052, 2015.
- 7. S.Kilim, E.Strugalska-Gola, M.Szuta et al.: PoS Baldin XXII 056, 2015.
- 8.7. TABLE OF ISOTOPES, 8E
- 9.8. Evaluated Nuclear Data File (ENDF); https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm

## Dziękuję za uwagę

# Dodatkowe slajdy

#### Miejsce transmutacji w zamkniętym cyklu paliwowym



#### Wyznaczanie strumienia neutronów z danych eksperymentalnych

(1

(2)

Całkowitą liczbę atomów danego izotopu itru  $(N_y)$  wytworzoną w próbce (detektorze) itru 89 o objętości  $(V_p)$  [cm<sup>3</sup>], zawierającej (N) atomów itru89, podczas trwania naświetlania o czasie (t) [s] i uwzględniającą średni strumień neutronów z zadanego przedziału energi  $(\overline{\Phi})$  [n/cm<sup>2</sup>·s] będzie wynosić

$$N_{y} = V_{p} \,\overline{\phi} \, N \,\overline{\sigma} \, t \,,$$

Gdzie  $\overline{\sigma}$  [barn] jest średnim mikroskopowym przekrojem czynnym dla reakcji (n,xn) v przedziale energi (E<sub>1</sub>-E<sub>2</sub>). Można to zapisać pod postacią

$$\overline{\sigma} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \sigma(E) dE}{E_2 - E_1}$$

A liczbę atomów w próbce (N) można wyznaczyć z zależności

gdzie

 $\rho_p$  - gęstość itru Y<sup>89</sup>, G<sup>89</sup> - gramo-atom dla Y<sup>89</sup>, A - liczba Avogadro

Następnie wprowadzając pojęcie gęstości strumienia neutronów  $\psi(E)$ , które jest strumieniem neutronów na jednostkę energii, czyli dla przedziału energii neutronów wynoszącego 1 MeV, zapisujemy średni strumień w następującej postaci (4). Należy pamiętać o założeniu, że średni strumień jest stały podczas całego eksperymentu czyli podczas naświetlania wiązką z akceleratora.

 $N = \frac{\rho_p}{C^{89}} A$ 

$$\overline{\Phi} = (E_2 - E_1)\overline{\psi}; \ \overline{\psi} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \psi(E) dE}{E_2 - E_1}$$
(4)

Liczbę  $N_{y}$ , wyprodukowanych atomów izotopów Y-88, Y-87 i Y-86 w próbce detektora za pomocą reakcji (n,xn) możemy też wyznaczyć korzystając z zależności

$$V_y = B_y W_p S , (5)$$

gdzie

- By produkcja (wydajność) izotopów w detektorze na jeden gram materiału próbki i na jeden padający deuteron z akceleratora (Parametr B – obserwabla)
- $W_p ciężar$  detektora:  $W_p = \rho_p V_{p_i}$
- S całkowita liczba deuteronów padających z akceleratora na badany model podczas eksperymentu

Kiedy podstawimy wzór (5) do wzoru (1) to otrzymamy

$$\overline{\phi} = \frac{B^{\gamma} S G^{89}}{\overline{\sigma} A t} [1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$$
(6)

Wykorzystując ustalone przedziały energii i korzystając z wzoru (6), oraz aby uprościć równania, przyjmując , że  $C = \frac{S G^{89}}{A t}$  możemy napisać następujący układ równań algebraicznych

$$B^{88} C = \overline{\phi}_1 \,\overline{\sigma}_{11} + \overline{\phi}_2 \,\overline{\sigma}_{12} + \overline{\phi}_3 \,\overline{\sigma}_{13} \tag{7}$$

$$B^{87} C = 0 + \overline{\phi}_2 \,\overline{\sigma}_{22} + \overline{\phi}_3 \,\overline{\sigma}_{23} \tag{8}$$

$$B^{86} C = 0 + 0 + \overline{\phi}_3 \,\overline{\sigma}_{33} \tag{9}$$

gdzie

 $B^{88}$ ,  $B^{87}$ ,  $B^{86}$  - zmierzone wartości produkcji izotopów <sup>88</sup>Y, <sup>87</sup>Y i <sup>86</sup>Y skalibrowane do postaci parametru B czyli na jeden gram i jeden deuteron z wiązki.

 $\sigma_{11}$ – $\sigma_{33}$  - średnie przekroje czynne na reakcje (n,xn) w zadanych przedziałach energii

 $\overline{\phi_1}, \overline{\phi_3}, \overline{\phi_3}$  - Szukana wartość średniego strumienia neutronów w danym przedziale energii [n/cm<sup>2</sup>·s].

43

(3)

#### Wyznaczanie strumienia neutronów z danych eksperymentalnych

Rozwiązanie powyższego układu równań (7-9) prowadzi do trzech wyrażeń (10-12) podających średni strumień neutronów w zadanych przedziałach energii, do wyliczenia których potrzebujemy znać odpowiednie przekroje czynne (w tym wypadku wyliczone) oraz wyznaczone z eksperymentów wartości parametru B.

$$\overline{\phi}_{1} = \frac{C}{\overline{\sigma}_{11}} \left[ B^{88} - B^{87} \frac{\overline{\sigma}_{12}}{\overline{\sigma}_{22}} + B^{86} \left( \frac{\overline{\sigma}_{23} \overline{\sigma}_{12}}{\overline{\sigma}_{33} \overline{\sigma}_{22}} - \frac{\overline{\sigma}_{13}}{\overline{\sigma}_{33}} \right) \right]$$
(10)

$$\overline{\phi_2} = \frac{C}{\overline{\sigma_{22}}} \left[ B^{87} - B^{86} \, \frac{\sigma_{23}}{\overline{\sigma_{33}}} \right] \tag{11}$$

$$\overline{\phi_3} = \frac{C}{\overline{\sigma_{33}}} B^{86} \tag{12}$$

gdzie

 $\begin{array}{c} \overline{\sigma_{11}} & \text{dla reakcji} \quad {}^{89}\text{Y}(n,\,2n)^{88}\text{Y} \text{ w przedziale energii 11,5-20,8 MeV} \\ \overline{\sigma_{12}} & \text{dla reakcji} \quad {}^{89}\text{Y}(n,\,2n)^{88}\text{Y} \text{ w przedziale energii 20,8-32,7 MeV} \\ \overline{\sigma_{13}} & \text{dla reakcji} \quad {}^{89}\text{Y}(n,\,2n)^{88}\text{Y} \text{ w przedziale energii 32,7-100 MeV} \\ \overline{\sigma_{22}} & \text{dla reakcji} \quad {}^{89}\text{Y}(n,\,3n)^{87}\text{Y} \text{ w przedziale energii 32,7-100 MeV} \\ \overline{\sigma_{23}} & \text{dla reakcji} \quad {}^{89}\text{Y}(n,\,3n)^{87}\text{Y} \text{ w przedziale energii 32,7-100 MeV} \\ \overline{\sigma_{33}} & \text{dla reakcji} \quad {}^{89}\text{Y}(n,\,4n)^{86}\text{Y} \text{ w przedziale energii 32,7-100 MeV} \\ \end{array}$ 



Przekroje czynne reakcji Y-89(n,xn) wyznaczone programem TALYS