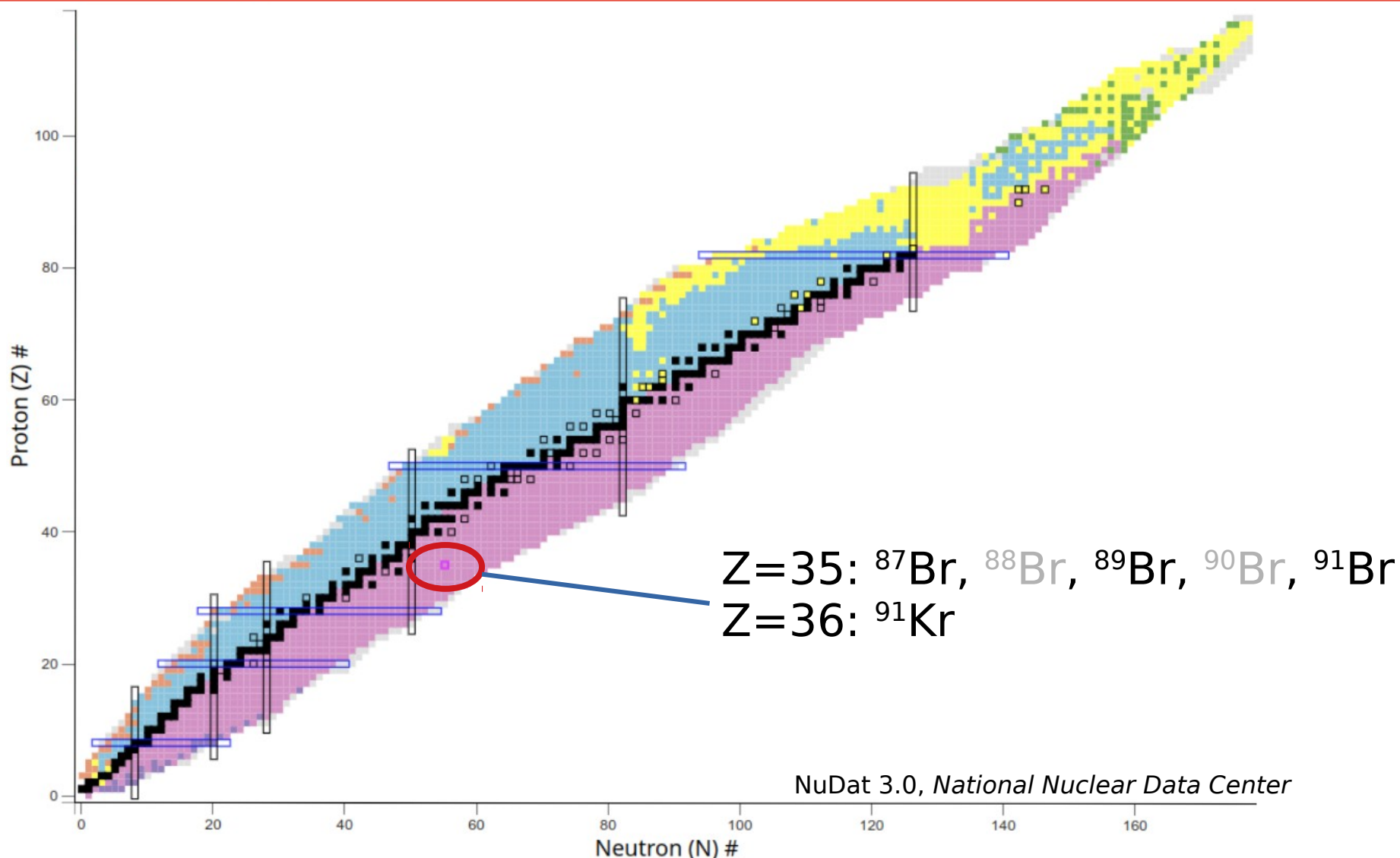


# Badanie rozpadów beta neutrono- nadmiarowych jąder bromu za pomocą Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji

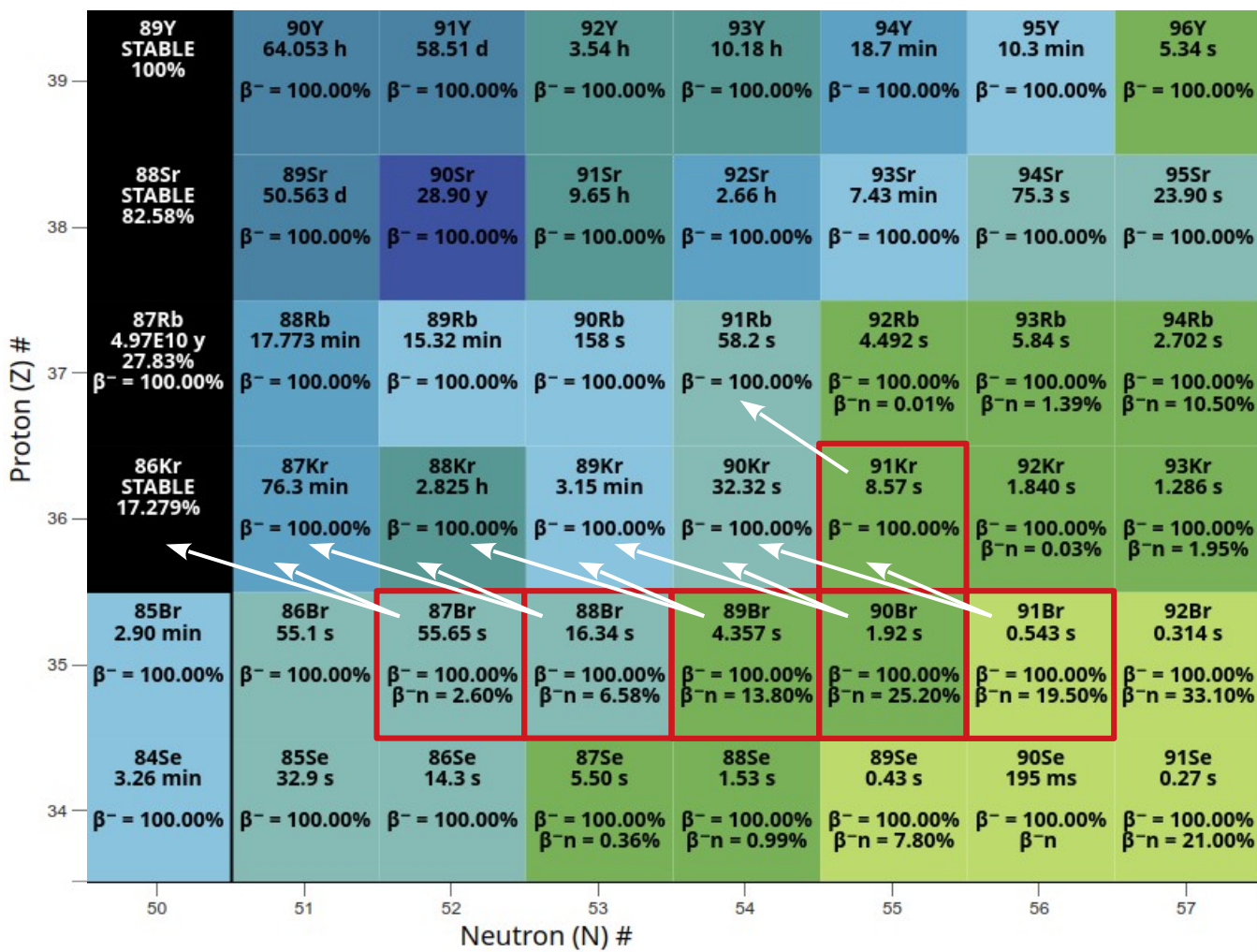
Michał Stepaniuk

Seminarium „Fizyka Jądra Atomowego”  
8 grudnia 2022

# Badane izotopy bromu (i kryptonu)



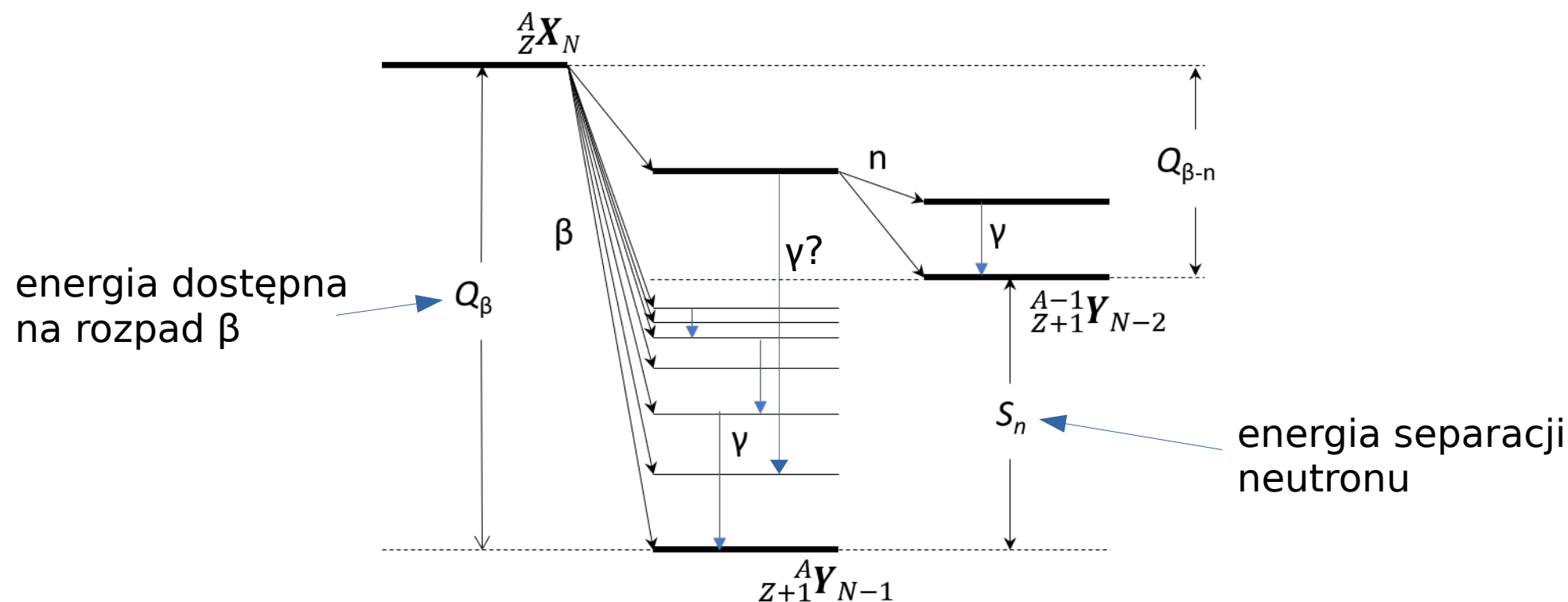
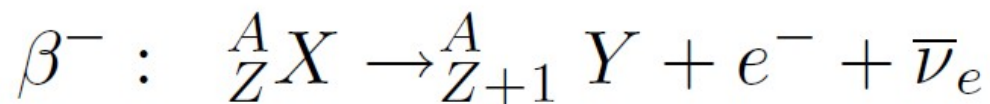
# Badane izotopy bromu (i kryptonu)



Wszystkie badane izotopy rozpadają się  $\beta^-$

Dodatkowo wszystkie badane izotopy bromu są emiterami neutronów opóźnionych!

# Rozpad $\beta$ minus i neutrony opóźnione



$$Q_\beta = M(Z + 1, A) - M(Z, A)$$

# Ciepło powyłączeniowe reaktora

**Ciepło powyłączeniowe - ciepło wytwarzane przez reaktor jądrowy po jego wyłączeniu (przejściu w stan niekrytyczny).**

1. Energia kinetyczna produktów rozszczepienia i natychmiastowych neutronów - krótkotrwałe ciepło.
2. Natychmiastowe kwanty gamma - krótkotrwałe ciepło.
3. **Rozpady produktów rozszczepienia - długotrwałe ciepło.**

Katastrofa elektrowni jądrowej Fukushima nr 1:

- wyłączono reaktory jądrowe,
  - awaria chłodzenia,
  - **ciepło powyłączeniowe!**
- 
- Przechowywanie wypalonego paliwa jądrowego.
  - Kontrola wypalenia paliwa podczas pracy reaktora.

Time after shutdown	Decay heat as a fraction of nominal power	Decay heat for typical 3000MW reactor
0	0.065	195
1 sec	0.055	165
10 sec	0.05	150
1 min	0.035	105
10 min	0.02	60
30 min	0.015	45
1 hour	0.012	36
12 hours	0.006	18
1 day	0.005	15
10 days	0.0025	7.5
30 days	0.002	6
60 days	0.0015	4.5
1 year	0.0009	2.7

<https://www.nuclear-power.com/>

# Ciepło powyłączeniowe reaktora

**Ciepło powyłączeniowe - ciepło wytwarzane przez reaktor jądrowy po jego wyłączeniu (przejściu w stan niekrytyczny).**

**Trzy wkłady wykorzystywane do obliczeń:**

$$H_{HP}(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_i^T N_i(t) E_{HP}^i \quad \leftarrow \text{HP - ciężkie cząstki (}\alpha\text{, neutrony, protony itp.)}$$

$$H_{LP}(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_i^T N_i(t) E_{LP}^i \quad \leftarrow \text{LP - lekkie cząstki (elektrony, pozytony)}$$

$$H_{EM}(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_i^T N_i(t) E_{EM}^i \quad \leftarrow \text{EM - promieniowanie elektromagnetyczne}$$

$\sum$  – suma po wszystkich nuklidach z rozszczepienia  $M$

$\lambda_i^T$  – stała rozpadu nuklidu  $i$

$N_i(t)$  – liczba jąder nuklidu  $i$  po czasie  $t$

$E^i$  – średnia energia cząstek emitowanych w rozpadzie

A. Fijałkowska, rozprawa doktorska, 2016

# Ciepło powyłączeniowe reaktora

Średnie energie komponentów można obliczyć na podstawie schematów ich rozpadu.

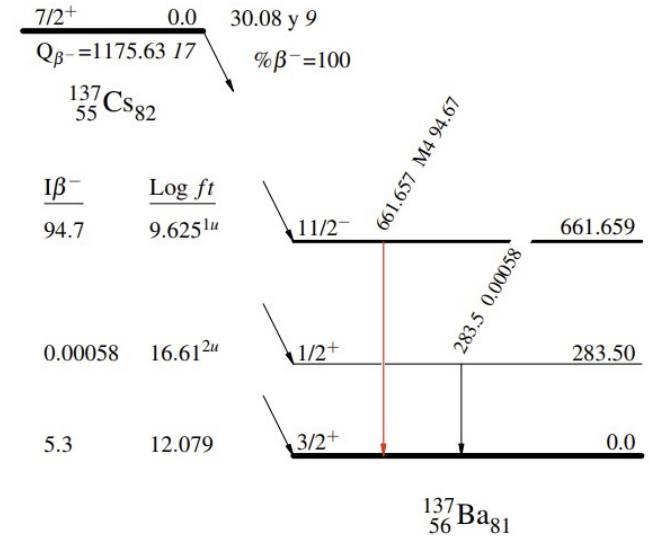
$$\bar{E}_{LP}^i = \sum_{j=1}^K \bar{E}_{\beta}^j I_{\beta}^j$$

$$\bar{E}_{EM}^i = \sum_{j=1}^K E_j I_{\beta}^j$$

średnia energia przejść  $\beta$  zasilających poziom  $j$

energia wzbudzenia poziomu  $j$

intensywność przejścia  $\beta$  na poziom  $j$





# Wybrane izotopy bromu uznane za priorytetowe

lata 70-80 - obliczenia ciepła powyłączeniowego na podstawie danych eksperymentalnych nie zgadzają się z rzeczywistością.

2005 - Powstaje grupa WPEC, która ma wspomóc naukowców w tym problemie.

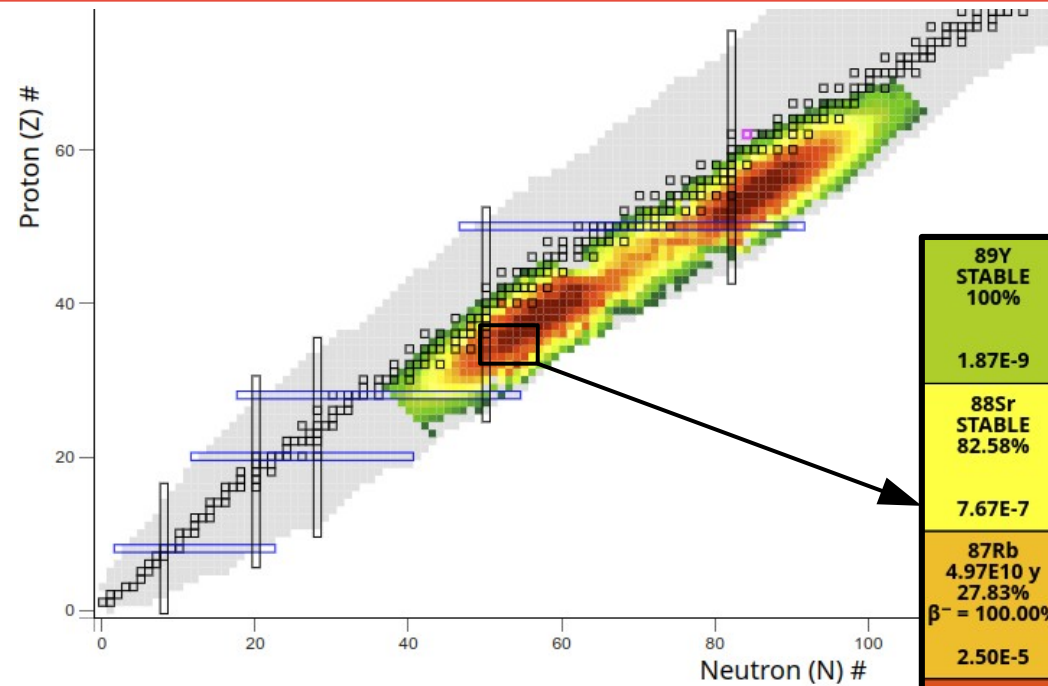
2007 - raport z rekomendacjami nuklidów, które należy ponownie, dokładniej zbadać.

Radionuclide	Priority	$Q_{\beta}$ -value (keV)	Half-life	Comments
35-Br-86	1	7626(11)	55.1 s	
35-Br-87	1	6852(18)	55.65 s	Extremely complex decay scheme with substantial gamma component; large uncertainties in the mean gamma energy arises from significant disagreements between the various discrete gamma-ray measurements. Also ( $\beta^-$ , $n$ ) branch.
35-Br-88	1	8960(40)	16.36 s	( $\beta^-$ , $n$ ) branch.
36-Kr-89	1	4990(50)	3.15 min	Incomplete decay scheme.
36-Kr-90	1	4392(17)	32.32 s	Incomplete decay scheme.
37-Rb-90m	2	6690(15)	258 s	Repeat of INL TAGS measurement; data check.
37-Rb-92	2	8096(6)	4.49 s	Small ( $\beta^-$ , $n$ ) branch.
38-Sr-89	2	1493(3)	50.53 d	
38-Sr-97	2	7470(16)	0.429 s	Extremely short half-life (0.429 s), and possible ( $\beta^-$ , $n$ ) branch.

ASSESSMENT OF FISSION PRODUCT DECAY DATA FOR DECAY HEAT CALCULATIONS: A report by the Working Party on International Evaluation Co-operation of the NEA Nuclear Science Committee  
NUCLEAR ENERGY AGENCY, OECD 2007



# Rozszczepienie $^{235}\text{U}$

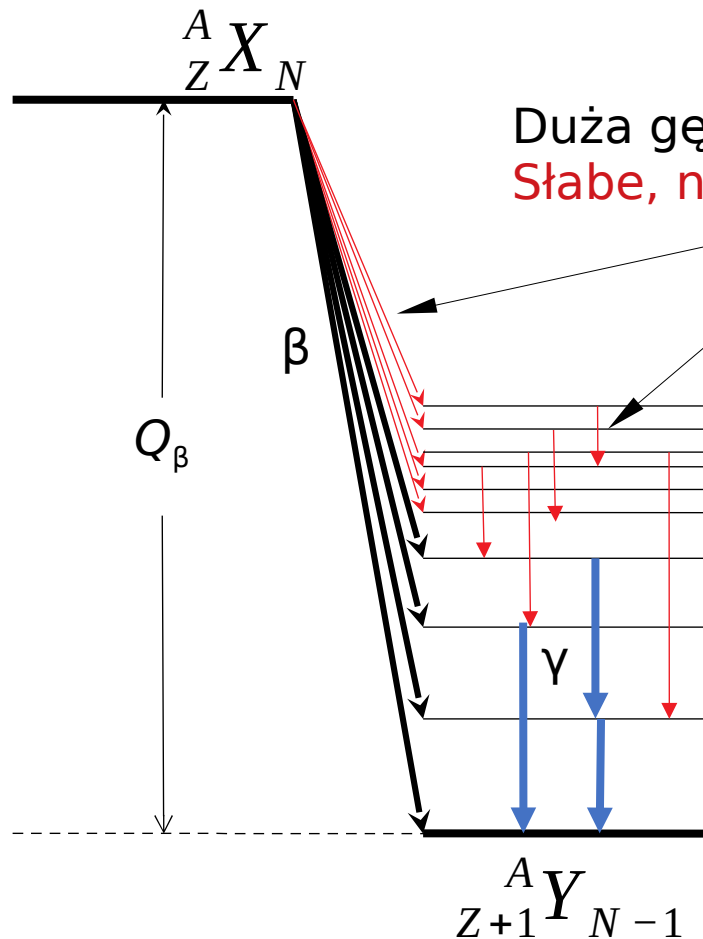


<b>89Y</b> STABLE 100%	<b>90Y</b> 64.053 h	<b>91Y</b> 58.51 d	<b>92Y</b> 3.54 h	<b>93Y</b> 10.18 h	<b>94Y</b> 18.7 min	<b>95Y</b> 10.3 min	<b>96Y</b> 5.34 s
1.87E-9	$\beta^- = 100.00\%$ 4.48E-8	$\beta^- = 100.00\%$ 1.64E-6	$\beta^- = 100.00\%$ 7.14E-4	$\beta^- = 100.00\%$ 5.43E-4	$\beta^- = 100.00\%$ 3.89E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 1.10E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 2.01E-2
<b>88Sr</b> STABLE 82.58%	<b>89Sr</b> 50.563 d	<b>90Sr</b> 28.90 y	<b>91Sr</b> 9.65 h	<b>92Sr</b> 2.66 h	<b>93Sr</b> 7.43 min	<b>94Sr</b> 75.3 s	<b>95Sr</b> 23.90 s
7.67E-7	$\beta^- = 100.00\%$ 1.75E-4	$\beta^- = 100.00\%$ 7.37E-4	$\beta^- = 100.00\%$ 2.50E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 1.07E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 2.56E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 4.51E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 4.53E-2
<b>87Rb</b> 4.97E10 y 27.83%	<b>88Rb</b> 17.773 min	<b>89Rb</b> 15.32 min	<b>90Rb</b> 158 s	<b>91Rb</b> 58.2 s	<b>92Rb</b> 4.492 s	<b>93Rb</b> 5.84 s	<b>94Rb</b> 2.702 s
$\beta^- = 100.00\%$ 2.50E-5	$\beta^- = 100.00\%$ 2.23E-4	$\beta^- = 100.00\%$ 2.04E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 7.06E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 2.22E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.01\%$ 3.13E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 1.39\%$ 3.06E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 10.50\%$ 1.56E-2
<b>86Kr</b> STABLE 17.279%	<b>87Kr</b> 76.3 min	<b>88Kr</b> 2.825 h	<b>89Kr</b> 3.15 min	<b>90Kr</b> 32.32 s	<b>91Kr</b> 8.57 s	<b>92Kr</b> 1.840 s	<b>93Kr</b> 1.286 s
8.72E-4	$\beta^- = 100.00\%$ 1.03E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 1.73E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 3.43E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 4.39E-2	$\beta^- = 100.00\%$ 3.15E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.03\%$ 1.65E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 1.95\%$ 4.25E-3
<b>85Br</b> 2.90 min	<b>86Br</b> 55.1 s	<b>87Br</b> 55.65 s	<b>88Br</b> 16.34 s	<b>89Br</b> 4.357 s	<b>90Br</b> 1.92 s	<b>91Br</b> 0.543 s	<b>92Br</b> 0.314 s
$\beta^- = 100.00\%$ 2.35E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 1.29E-3	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 2.60\%$ 1.27E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 6.58\%$ 1.38E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 13.80\%$ 1.03E-2	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 25.20\%$ 5.52E-3	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 19.50\%$ 2.23E-3	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 33.00\%$ 2.65E-4
<b>84Se</b> 3.26 min	<b>85Se</b> 32.9 s	<b>86Se</b> 14.3 s	<b>87Se</b> 5.50 s	<b>88Se</b> 1.53 s	<b>89Se</b> 0.42 s	<b>90Se</b> 195 ms	<b>91Se</b> 0.27 s
$\beta^- = 100.00\%$ 6.30E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 4.46E-3	$\beta^- = 100.00\%$ 8.35E-3	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.36\%$ 7.31E-3	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.99\%$ 2.67E-3	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 7.80\%$ 4.85E-4	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n$ 1.26E-4	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 21.00\%$ 6.65E-6

$^{89,90,91}\text{Br}$  nie uwzględnione w rekomendacjach, ale ich prawdopodobieństwo powstania po rozszczepieniu niemal tak samo wysokie!

# Brakujące zasilania beta, czyli dlaczego obliczenia nie wychodzą

Wiele schematów rozpadów powstało w oparciu o pomiary detektorami o wysokiej rozdzielczości, ale niskiej wydajności.



Duża gęstość wysokoenergetycznych poziomów.  
Słabe, nierejestrowane przejścia.

Błąd systematyczny prowadzący do przeszacowania średniej energii beta i niedoszacowania średniej energii gamma.

$$\overline{E}_{LP}^i \quad \uparrow \quad \overline{E}_{EM}^i \quad \downarrow$$

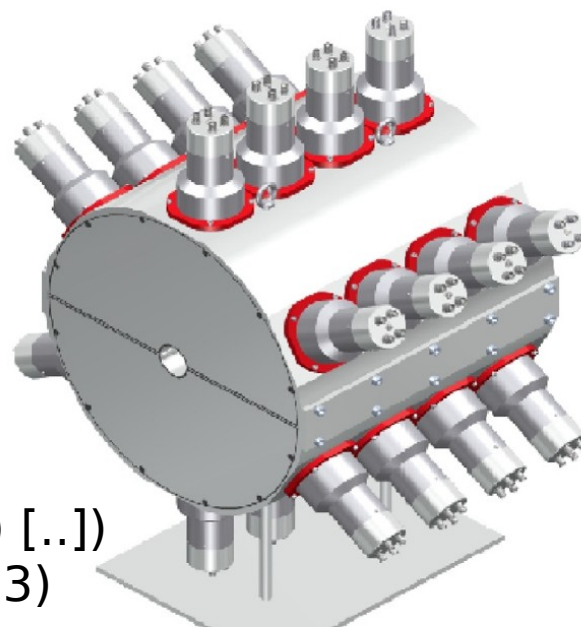
Ważne w obliczeniach **ciepła powyłęczeniowego!**

# Spektroskopia Pełnej Absorpcji

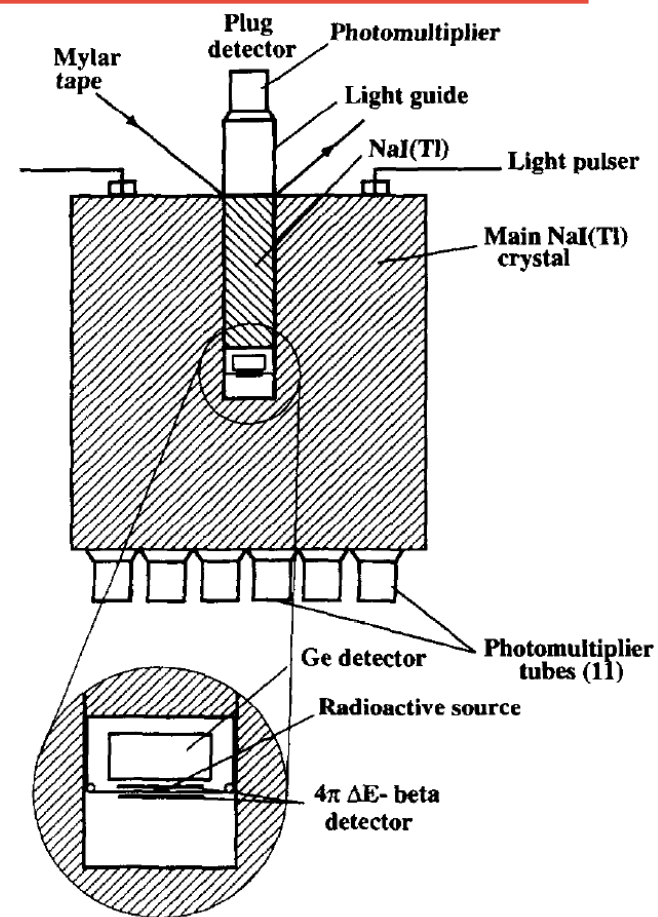
Teoretycznie: układ detektorów o wydajności 100%.

Praktycznie:

- Czynny obszar detekcji pokrywający niemal pełny kąt bryłowy.
- Wydajności rzędu 80-90% na detekcję kwantów  $\gamma$ .
- Możliwość wykrycia promieniowania  $\gamma$ , X, elektronów, pozytonów, cząstek naładowanych, a nawet neutronów.
- Wydajność kosztem rozdzielczości.



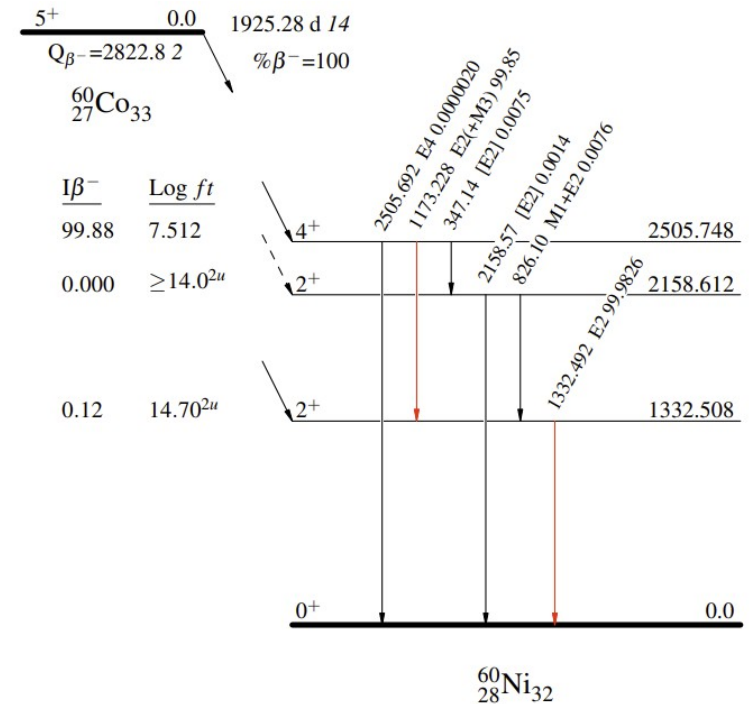
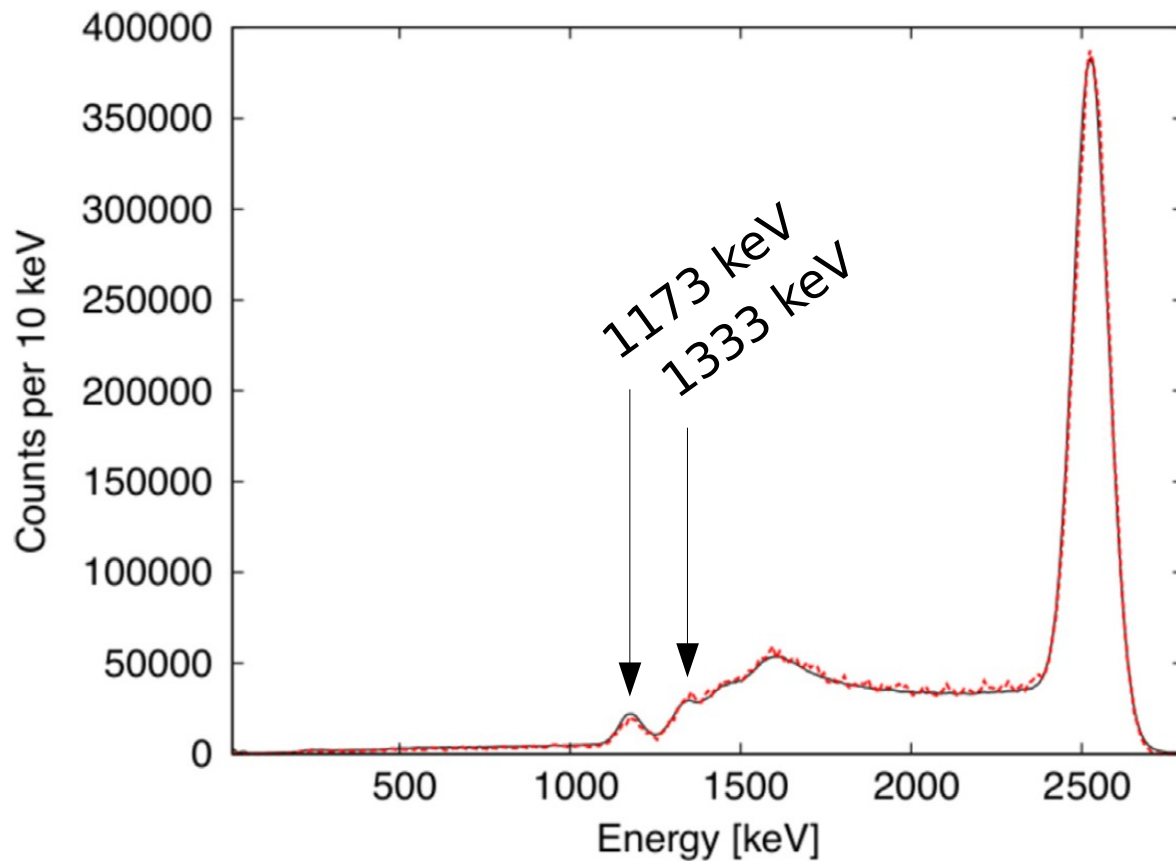
SuN (Summing NaI(Tl) [...])  
A. Simon *et al.* (2013)



GSI TAS  
M. Karny *et al.* (1997)

# $^{60}\text{Co}$ widoczny w TASie

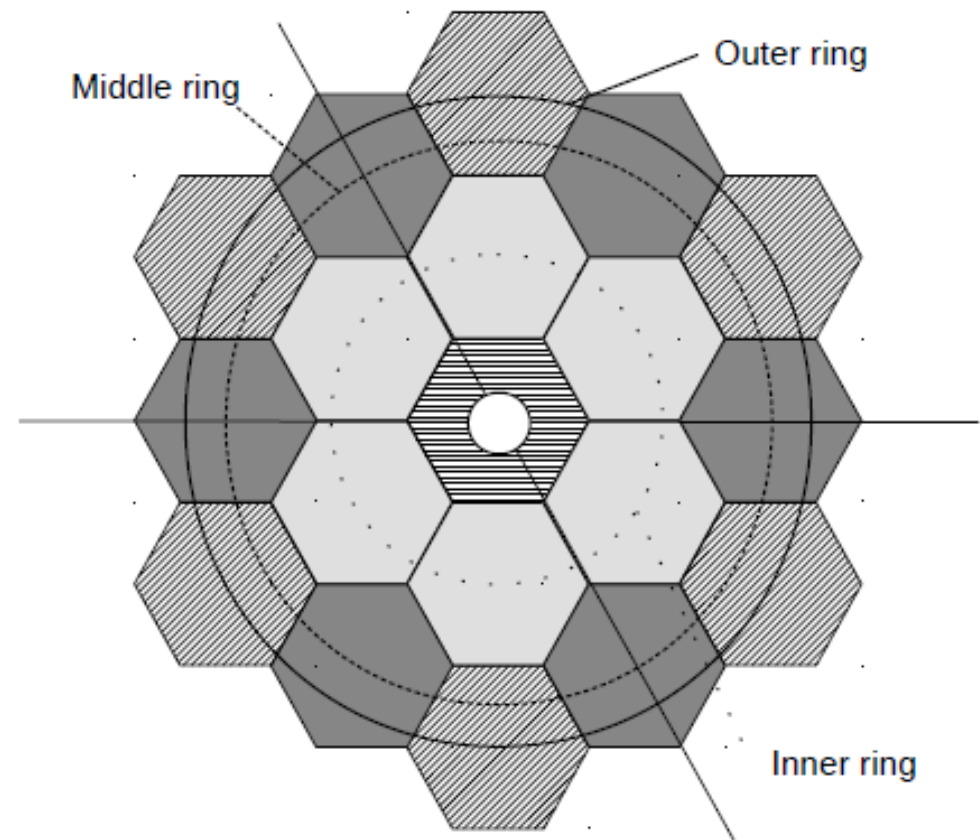
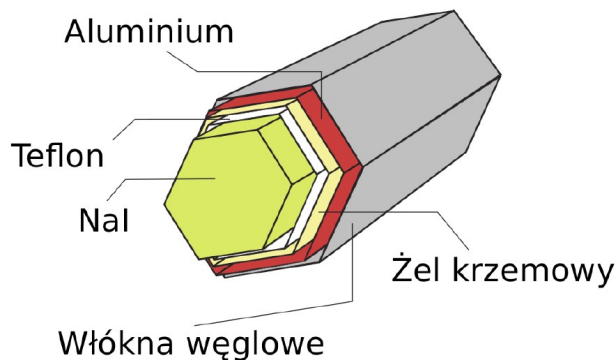
## TAS – Total Absorption Spectroscopy



# Modularny Spektrometr Pełnej Absorpcji

## MTAS - Modular Total Absorption Spectrometer

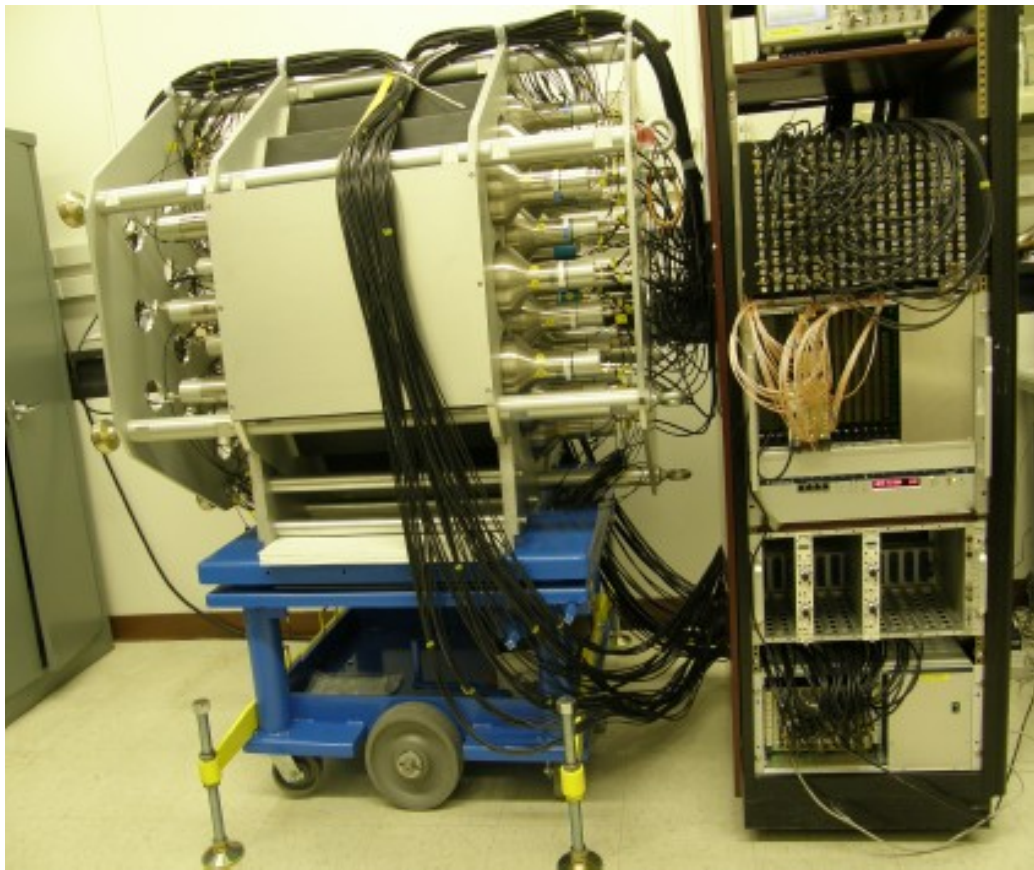
- 19 heksagonalnych kryształów NaI(Tl).
- Największy TAS, całkowita masa ok. 1 tony.
- Podział na moduły i kręgi.
- Wewnątrz krzemowe detektory  $\beta$ .



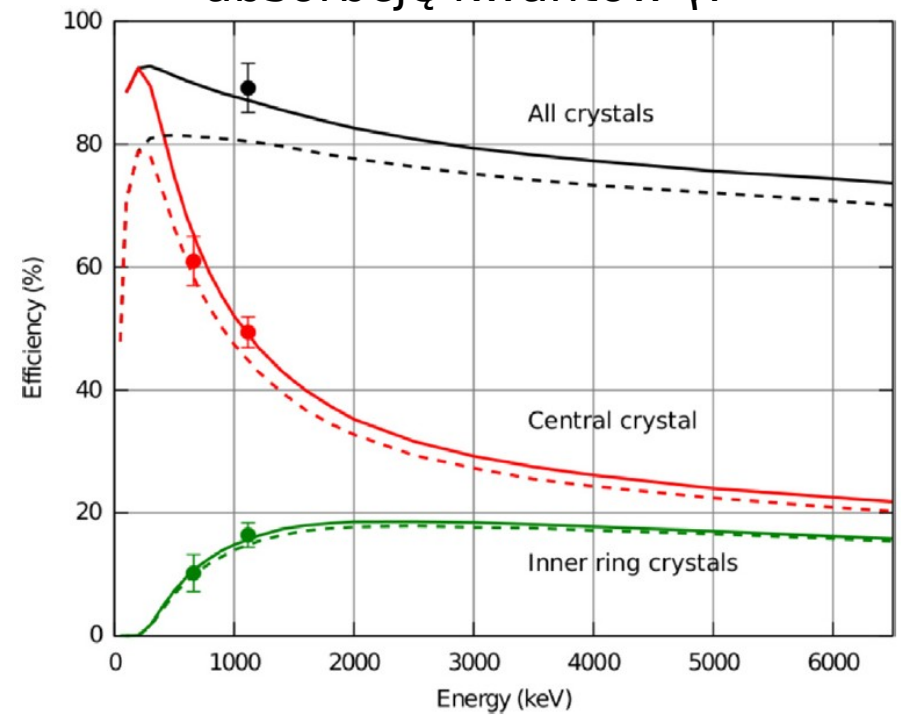
M. Karny *et al.* (2016)



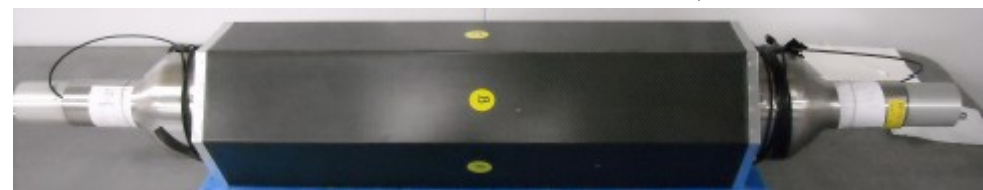
# MTAS



Wydajność na pełną absorbcję kwantów  $\gamma$ .



~ 50cm





ołowiane kocyki

puddło z taśmą



# Opracowane dane MTAS

	97Nb 72.1 min	98Nb 2.86 s	99Nb 15.0 s	100Nb 1.5 s	101Nb 7.1 s	102Nb 4.3 s	103Nb 1.5 s	104Nb 4.9 s
41%	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.06\%$

Proton (Z) #	39	89Y STABLE 100%	90Y 64.053 h	91Y 58.51 d	92Y 3.54 h	93Y 10.18 h	94Y 18.7 min	95Y 10.3 min	96Y 5.34 s
			$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$
	38	88Sr STABLE 82.58%	89Sr 50.563 d	90Sr 28.90 y	91Sr 9.65 h	92Sr 2.66 h	93Sr 7.43 min	94Sr 75.3 s	95Sr 23.90 s
			$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$
	37	87Rb 4.97E10 y 27.83%	88Rb 17.773 min	89Rb 15.32 min	90Rb 158 s	91Rb 58.2 s	92Rb 4.492 s	93Rb 5.84 s	94Rb 2.702 s
		$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.01\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 1.39\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 10.50\%$
36	86Kr STABLE 17.279%	87Kr 76.3 min	88Kr 2.825 h	89Kr 3.15 min	90Kr 32.32 s	91Kr 8.57 s	92Kr 1.840 s	93Kr 1.286 s	
		$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.03\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 1.95\%$	
35	85Br 2.90 min	86Br 55.1 s	87Br 55.65 s	88Br 16.34 s	89Br 4.357 s	90Br 1.92 s	91Br 0.543 s	92Br 0.314 s	
	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 2.60\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 6.58\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 13.80\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 25.20\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 19.50\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 33.10\%$	
34	84Se 3.26 min	85Se 32.9 s	86Se 14.3 s	87Se 5.50 s	88Se 1.53 s	89Se 0.43 s	90Se 195 ms	91Se 0.27 s	
	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.36\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.99\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 7.80\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 21.00\%$	
		50	51	52	53	54	55	56	57
		Neutron (N) #							

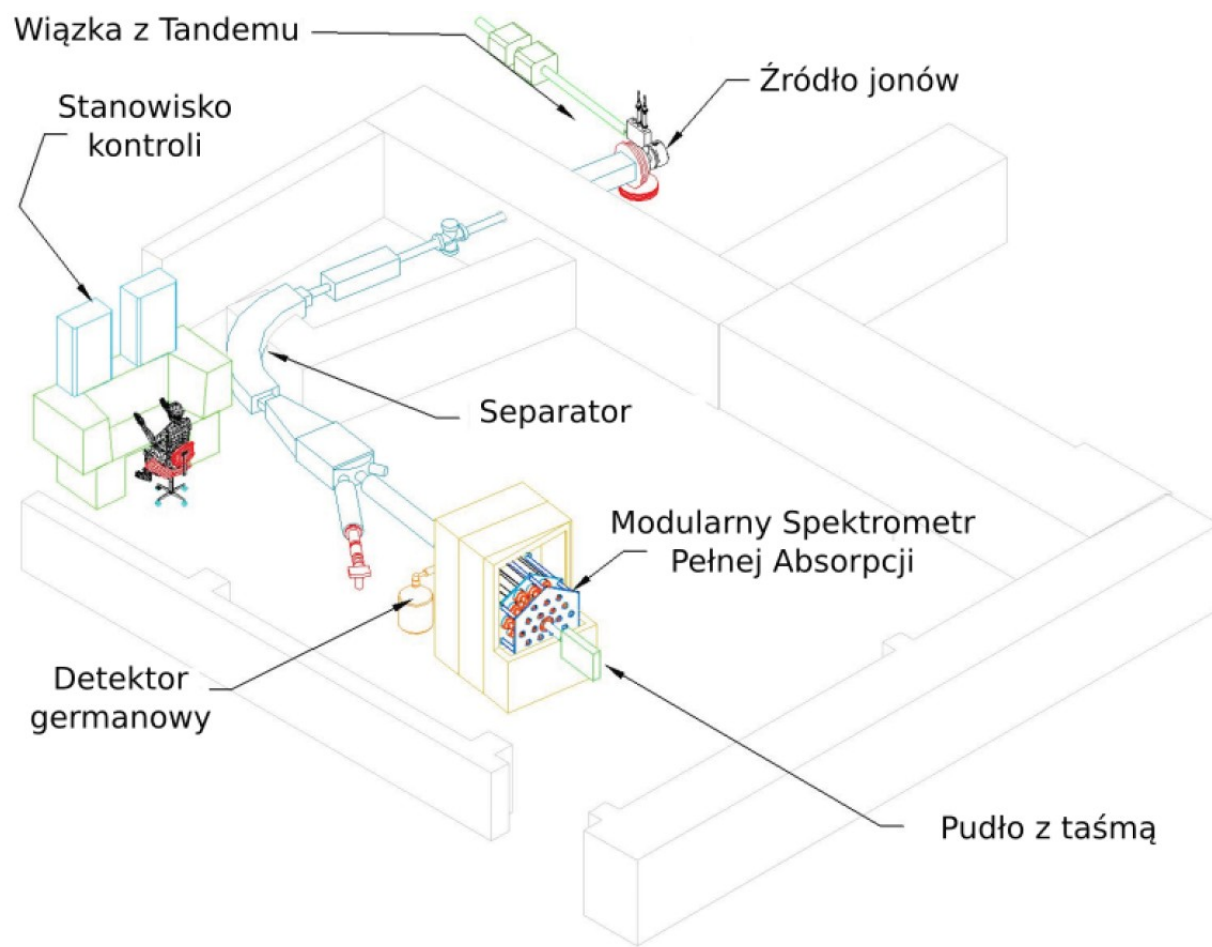
Proton (Z) #	58	140Ce STABLE 88.450%	141Ce 32.511 d	142Ce > 5E+16 y 11.114% 2 $\beta^-$	143Ce 33.039 h	144Ce 284.91 d	145Ce 3.01 min
			$\beta^- = 100.00\%$		$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$
	57	139La STABLE 99.9119%	140La 1.67855 d	141La 3.92 h	142La 91.1 min	143La 14.2 min	144La 40.8 s
			$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$
	56	138Ba STABLE 71.698%	139Ba 83.06 min	140Ba 12.7527 d	141Ba 18.27 min	142Ba 10.6 min	143Ba 14.5 s
			$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$
55	137Cs 30.08 y	138Cs 33.41 min	139Cs 9.27 min	140Cs 63.7 s	141Cs 24.84 s	142Cs 1.684 s	
	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.04\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.09\%$	
54	136Xe > 2.4E+21 y 8.8573% 2 $\beta^-$	137Xe 3.818 min	138Xe 14.14 min	139Xe 39.68 s	140Xe 13.60 s	141Xe 1.73 s	
		$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 0.04\%$	
53	135I 6.58 h	136I 83.4 s	137I 24.5 s	138I 6.23 s	139I 2.280 s	140I 0.86 s	
	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 7.14\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 5.56\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 10.00\%$	$\beta^- = 100.00\%$ $\beta^-n = 9.30\%$	
		82	83	84	85	86	87
		Neutron (N) #					

# Układ eksperymentalny $^{87-91}\text{Br}$

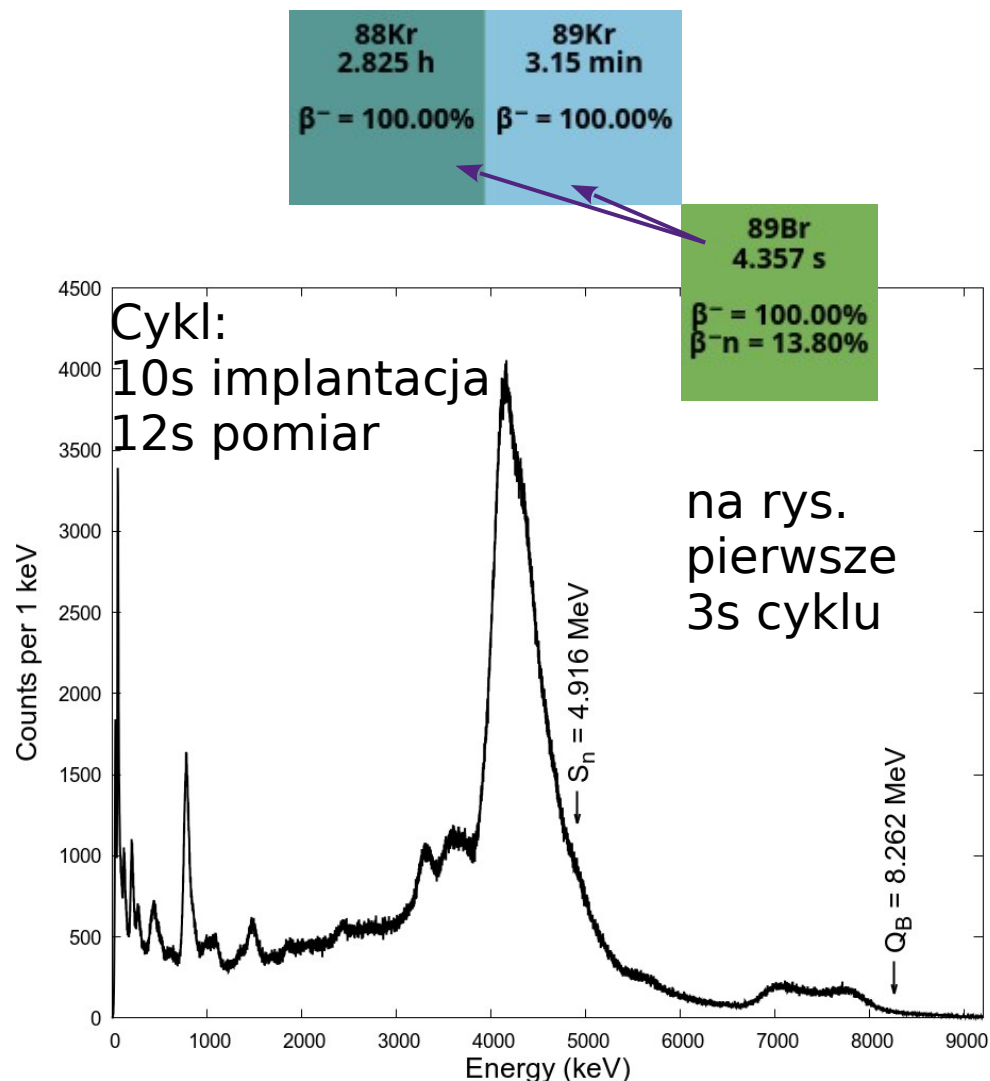
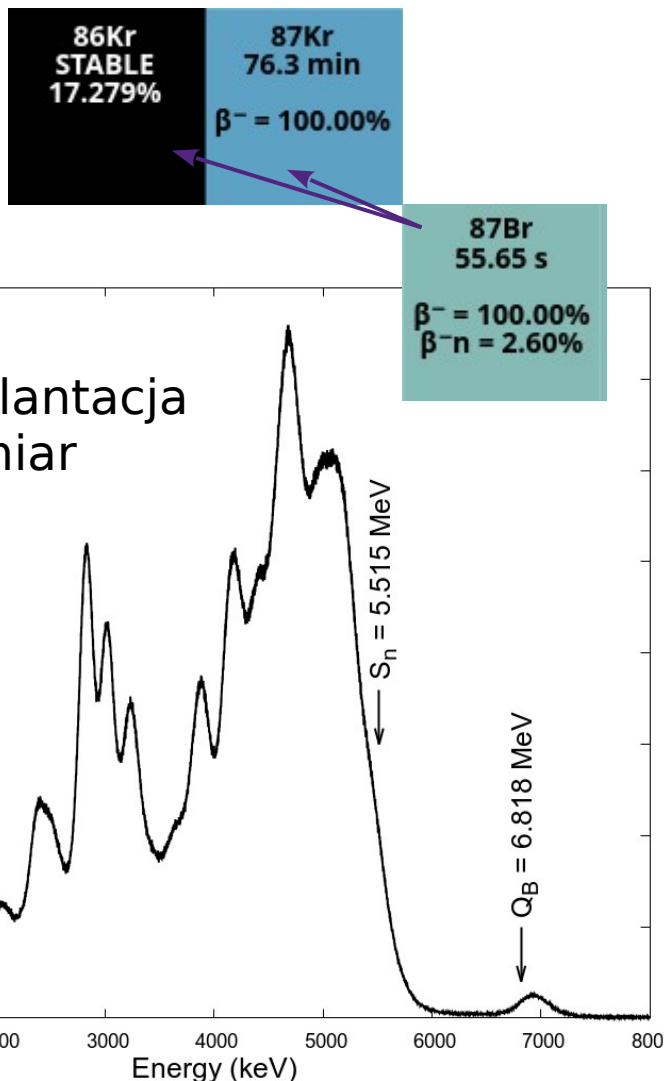
- wiązka protonów
- tarcza  $^{238}\text{UCx}$
- plazmowe źródło jonów
- separator masowy OLTF
- wiązka implantowana na taśmę

Cykle pomiarowe:

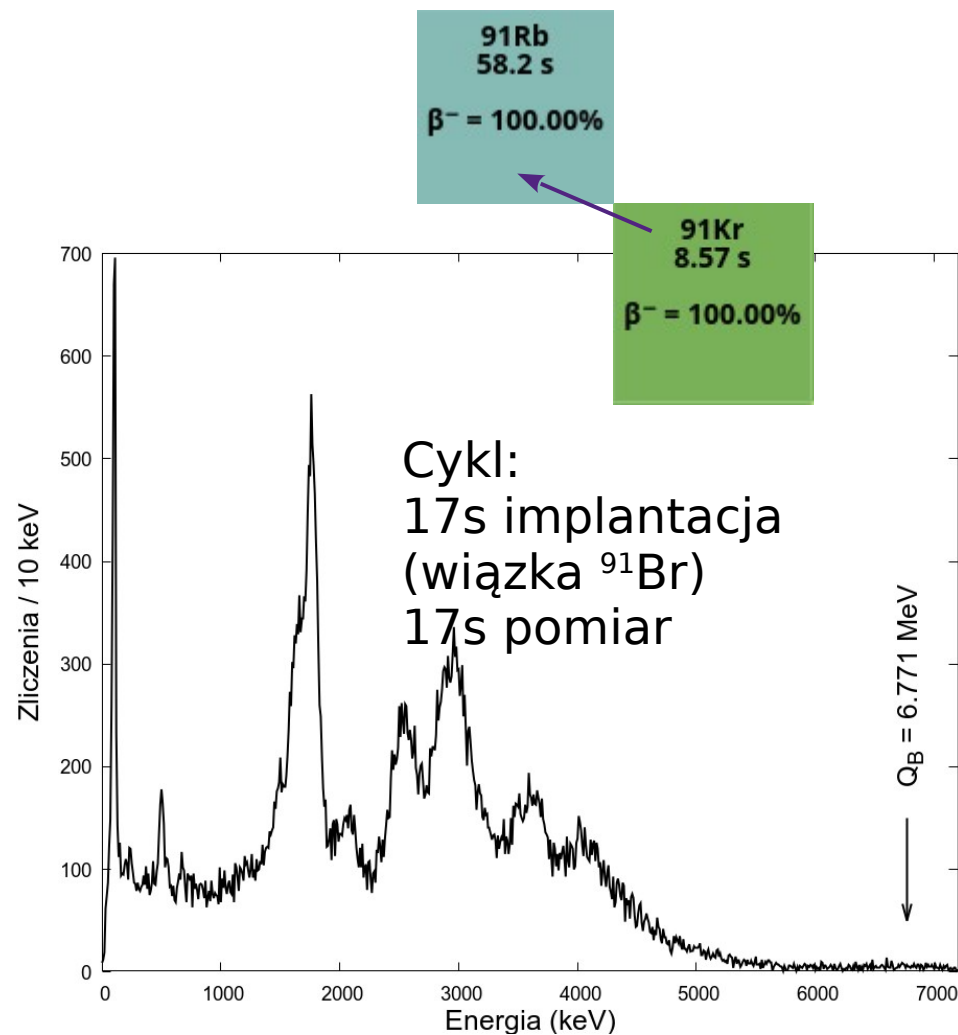
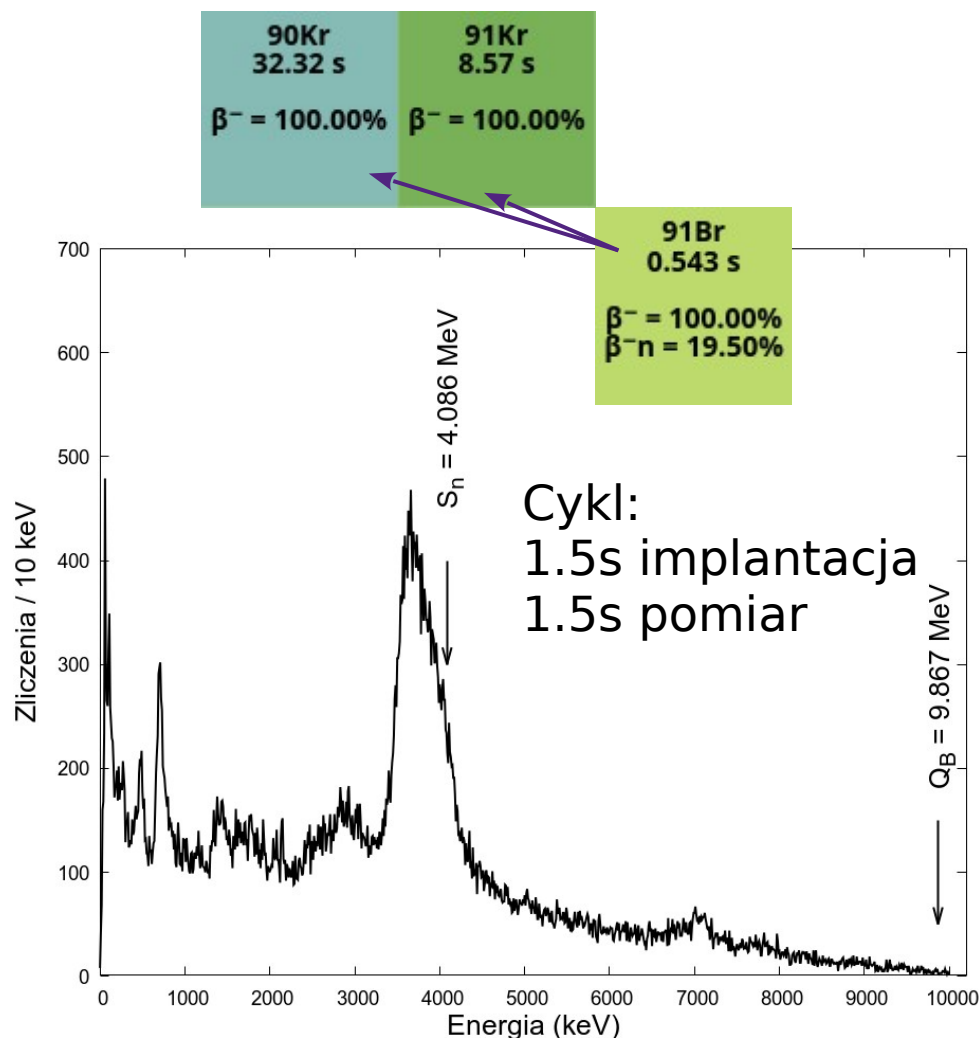
- implantacja,
- transport,
- pomiar.



# Bromy - widma eksperymentalne



# Bromy - widma eksperymentalne



Tylko jak to badać jak nie ma tu żadnych „czystych” pików?!

# Baza danych ENSDF, symulacje Geant4

**Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF)** – format plików, zawierający eksperymentalne dane jądrowe. Baza danych koordynowana jest przez The National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory.



**Geant4** – pakiet narzędzi do symulacji drogi i oddziaływań cząstek z materią.

Symulacje typu Monte Carlo.

Wersja używana do analizy danych: Geant4.10.3.p01

87KR	L	0	5/2+					
87KR	B		12.0	19		7.39	7	
87KRS	B	EAV=3127	9					
87KR	L	531.99	41/2+					
87KR	B		1.2	5		8.23	19	
87KRS	B	EAV=2870	98					
87KR	G	532.03	7	5.4	4			C
87KR	L	1419.67	3(7/2+)					
87KR	B		4.8	16		7.33	15	
87KRS	B	EAV=2441	9					
87KR	G	1419.71	722.0	15				C
87KR	L	1476.11	53/2+,5/2+					
87KR	B		1.7	7		7.76	18	
87KRS	B	EAV=2414	9					
87KR	G	944.12	71.4	1				C
87KR	G	1476.06	77.9	6				C

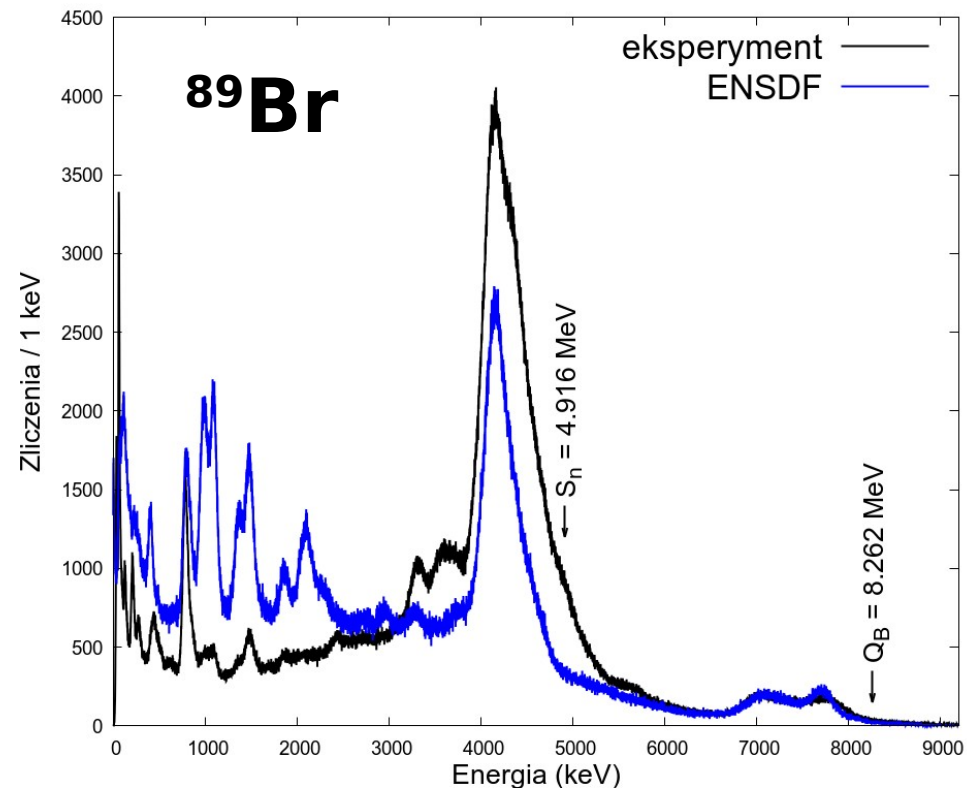
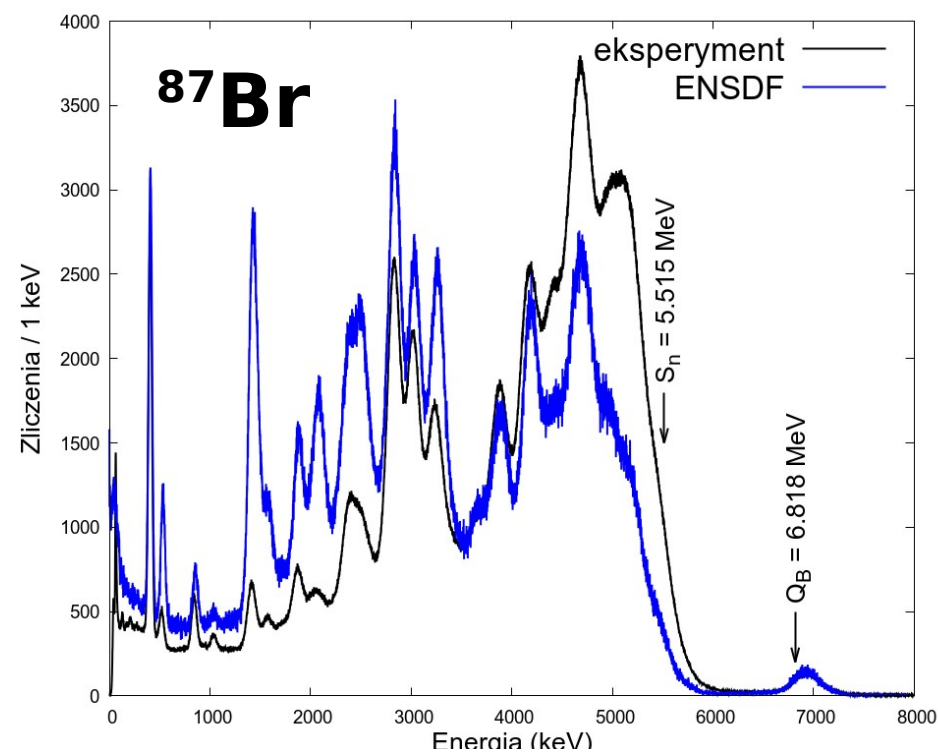
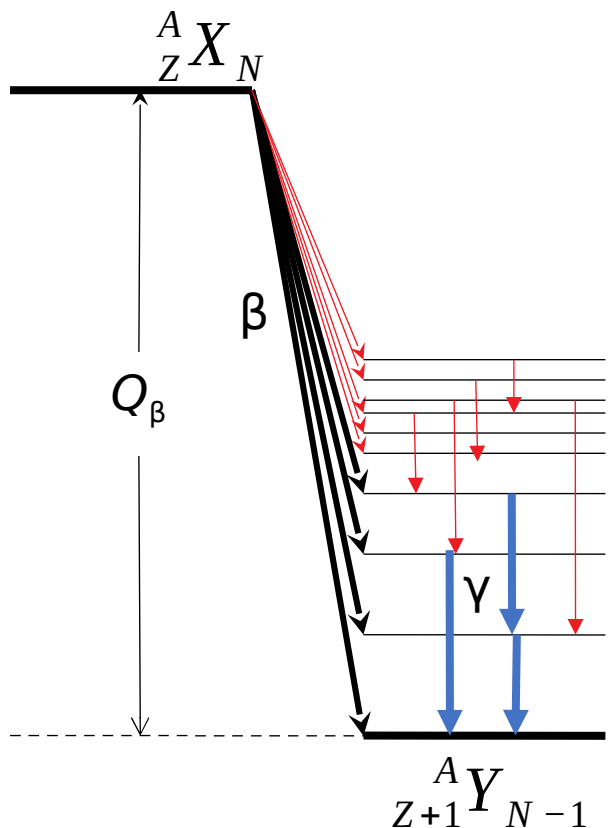
<https://geant4.web.cern.ch>

<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>



# Symulacje ENSDF

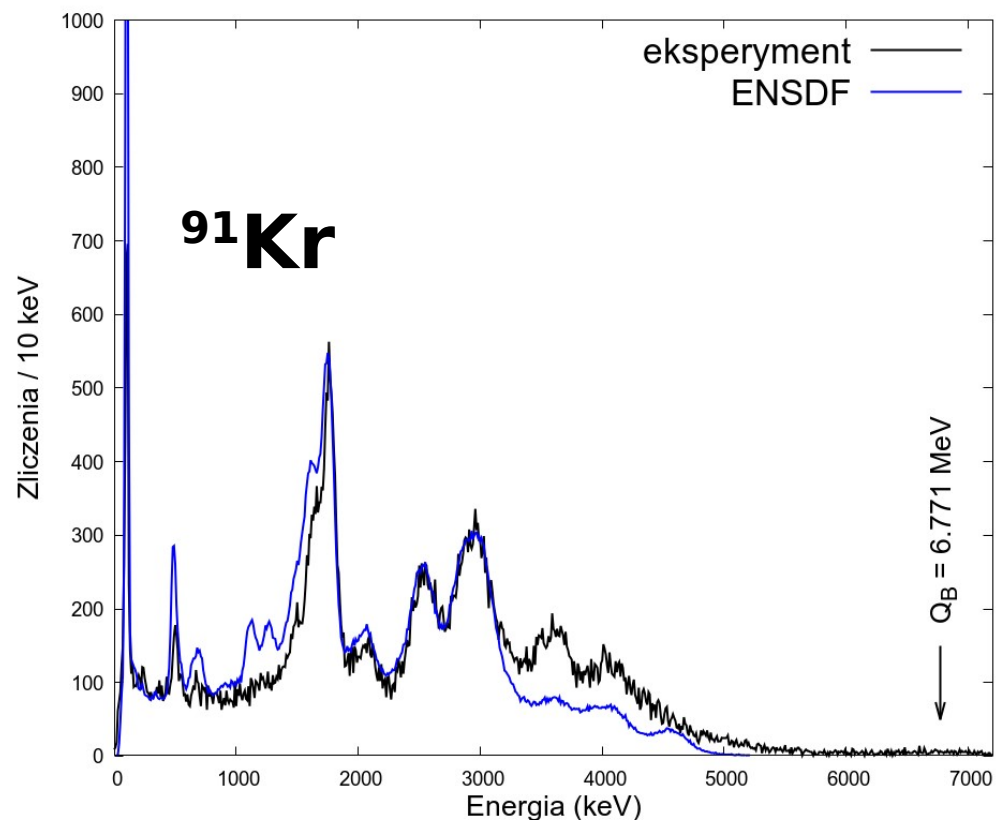
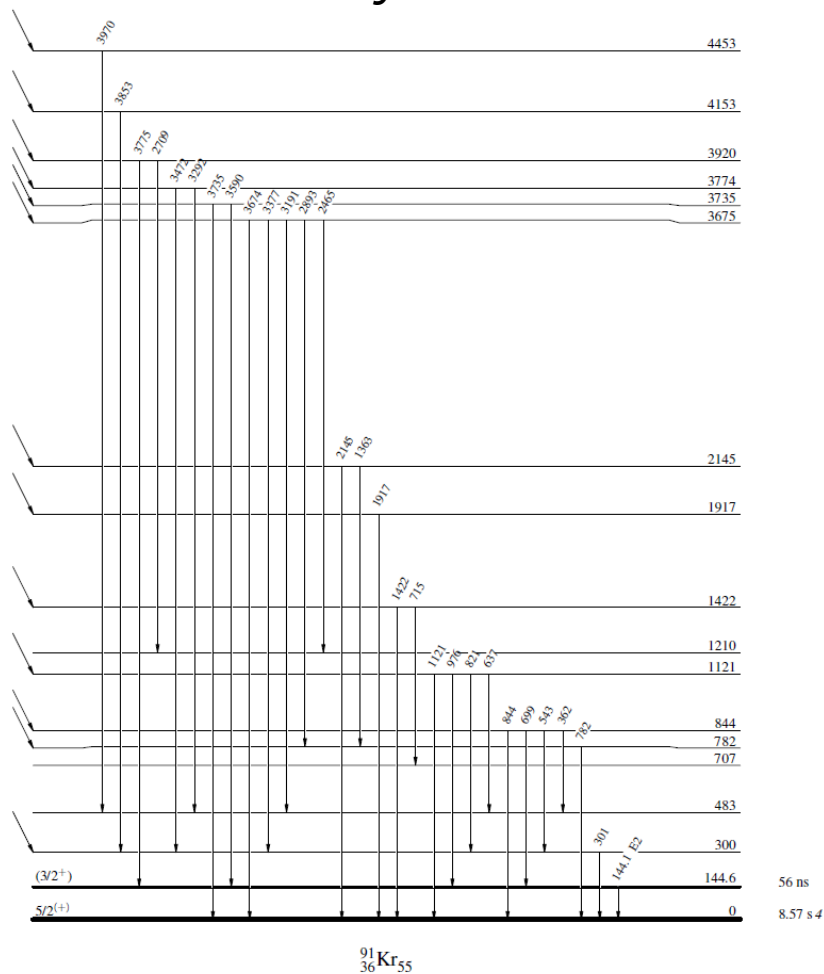
Spodziewany efekt, przeszacowane zasilania niskich energii, niedoszacowane zasilania wysokich energii.



# Symulacje ENSDF

**<sup>91</sup>Br:** brak zasilań  $\beta$  i  $\gamma$  w bazie danych ENSDF!

$Q^- = 9867.4$   
 $0.543 \text{ s } 4$   
 $\% \beta^- = 100$   
 $^{91}_{35}\text{Br}_{56}$





# Analiza danych TAsowych

$$d_i = \sum_{j=0}^{j_{\max}} R_{ij} f_j, i = 1, i_{\max}$$

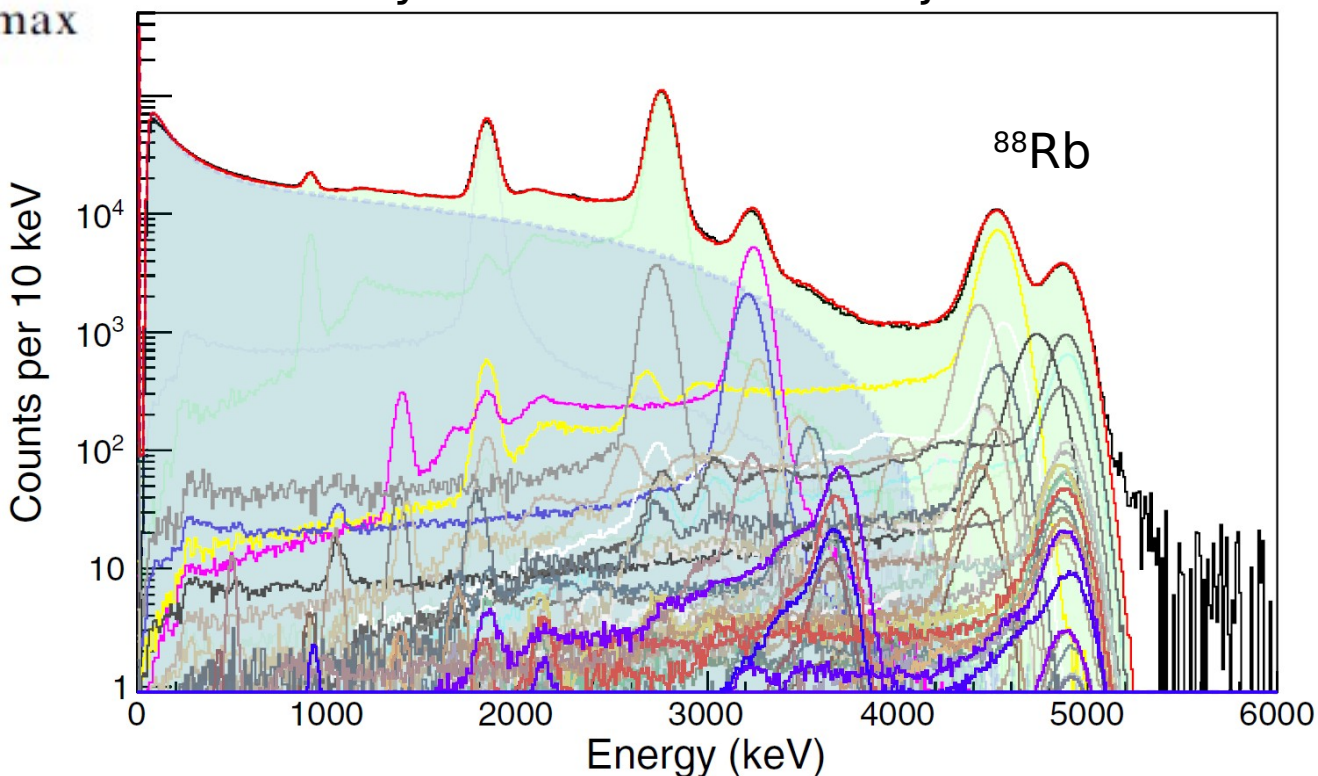
$\mathbf{d}_i$  - dane (zliczenia) w kanale i-tym

$\mathbf{R}_{ij}$  - funkcja odpowiedzi detektora dla i-tego kanału j-tego przejścia  $\beta$

$\mathbf{f}_j$  - zasilanie j-tego przejścia  $\beta$

D. Cano-Ott *et al.* (1999)

Przykładowa dekonwolucja widma



P. Shuai *et al.* (2022)

# Analiza na przykładzie $^{87}\text{Br}$

## Metoda Maksymalizacji Entropii

$$\text{max: } S[\mathbf{f}] - \frac{1}{\lambda} \chi^2[\mathbf{f}] \quad \text{min: } \chi^2[\mathbf{f}] - \lambda S[\mathbf{f}]$$

przedstawiona jako algorytm w iteracyjnej postaci:

$$f_j^{(s+1)} = f_j^{(s)} \exp \left( \frac{2}{\lambda} \sum_{i=1}^n R_{ij} \left( d_i - \sum_{k=1}^m R_{ik} f_k^{(s)} \right) / \sigma_{d_i}^2 \right),$$

$$j = 1, \dots, m.$$

$d_i$  - dane (zliczenia) w kanale i-tym

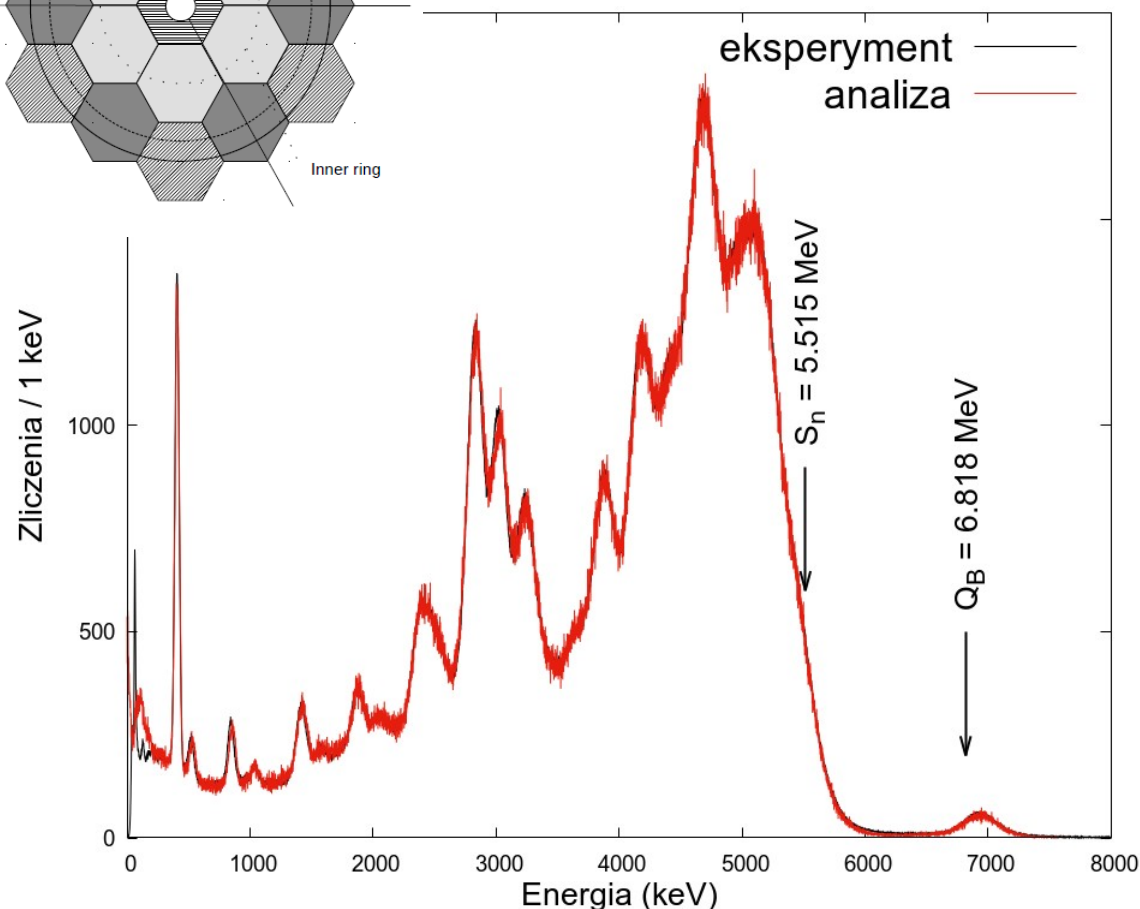
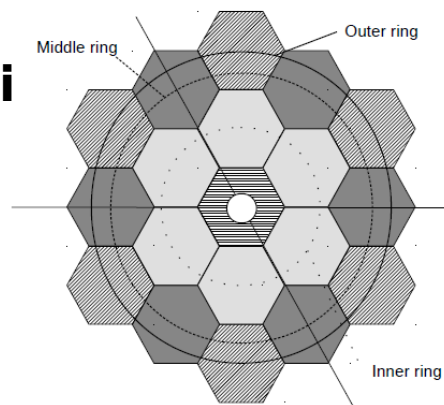
$R_{ij}$  - funkcja odpowiedzi detektora dla i-tego kanału j-tego przejścia  $\beta$

$f_j$  - zasilanie j-tego przejścia  $\beta$

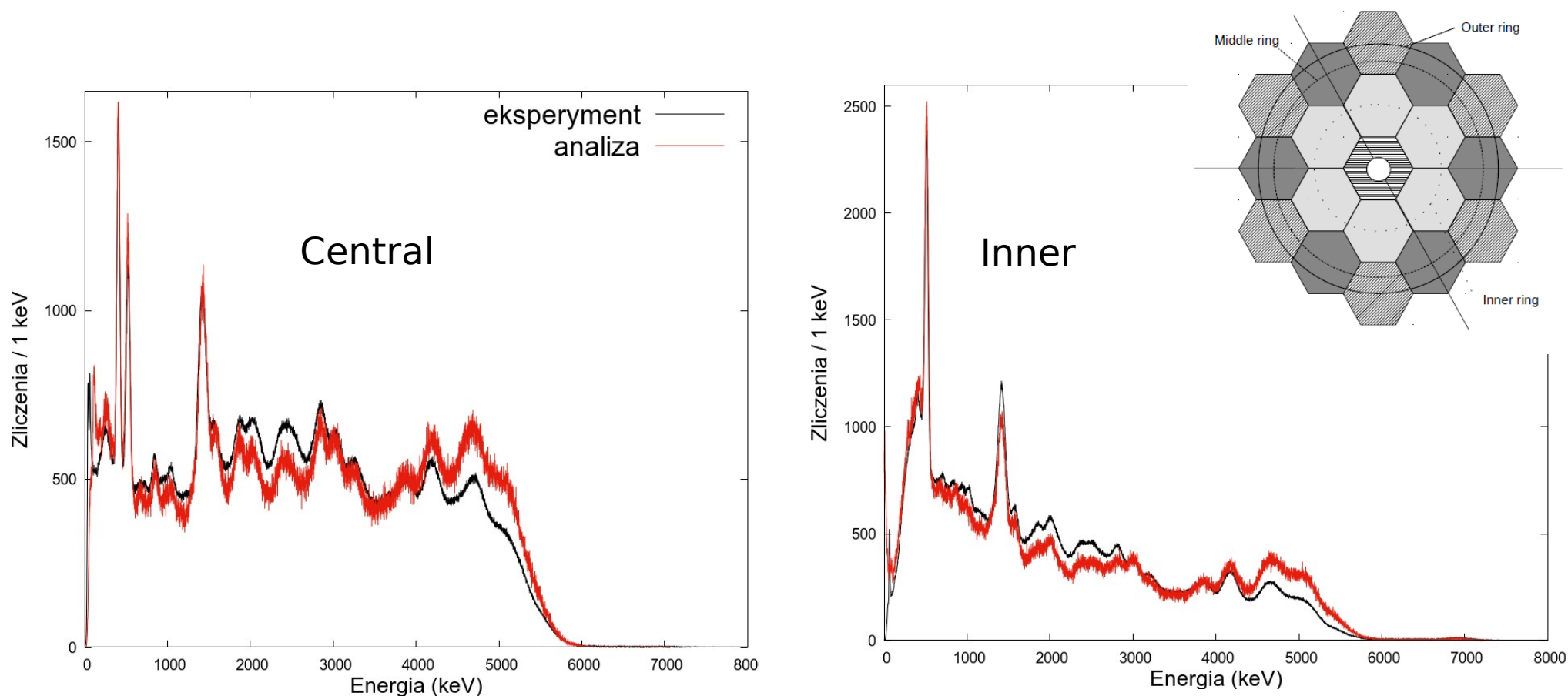
$\lambda$  - parametr dopasowania

$s$  - krok iteracji

J.L. Tain, D. Cano-Ott (2007)



# Analiza na przykładzie $^{87}\text{Br}$



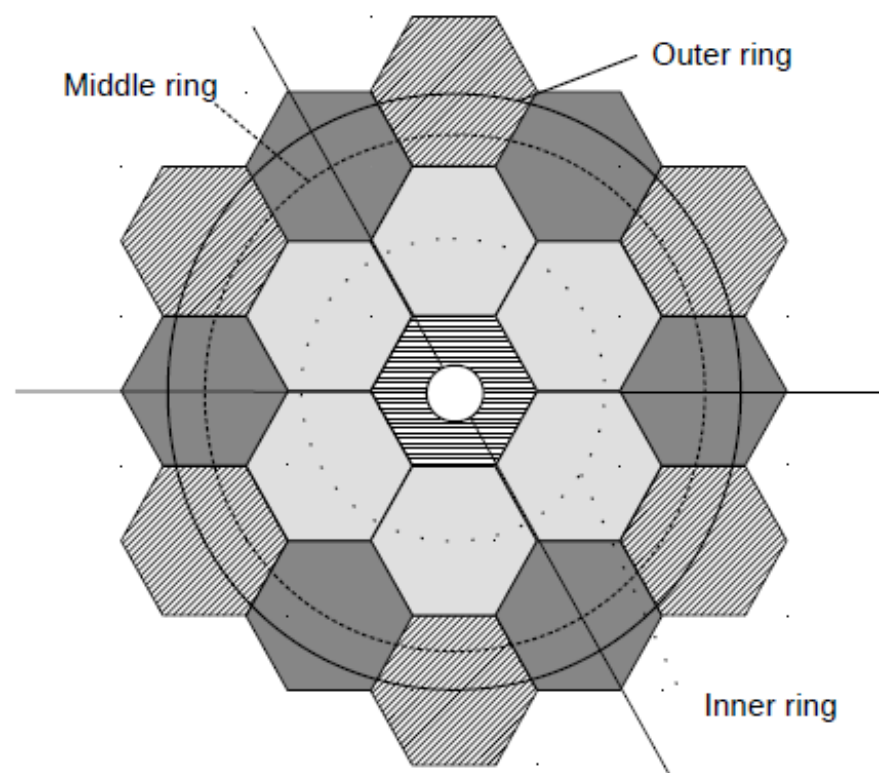
Dopasowanie do jednego modułu/zestawu modułów może dawać poprawne zasilania dla wszystkich, ale w skomplikowanych przypadkach nie jest to wystarczające!

# Co widzimy w różnych modułach MTASa

**Total MTAS** – pełne widmo całkowitej absorpcji

**Central** – „mały TAS”, widmo  $\beta$ , pochłania niemal wszystkie nieskoenergetyczne  $\gamma$

**Inner, Middle, Outer** – różne odległości od środka, mogą wykrywać pojedyncze przejścia  $\gamma$



# Jak wykorzystać moduły MTASa

## Dwa podstawowe podejścia:

**1)** TAS składający się z wybranych kryształów:

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6$$

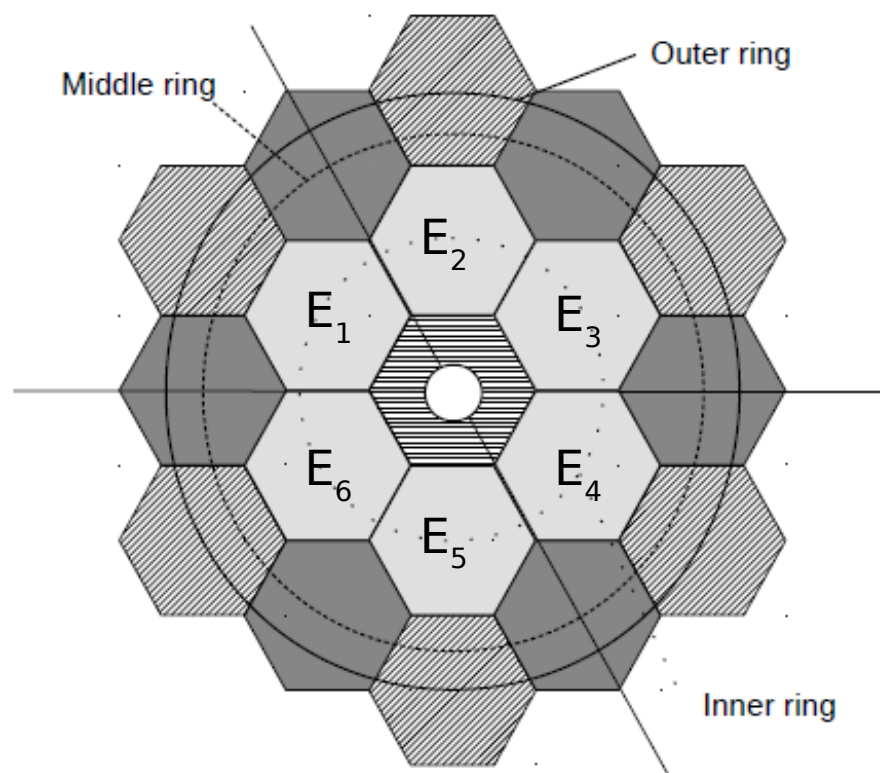


1 zliczenie o zsumowanej energii w końcowym widmie

**2)** Pojedyncze przejścia (na miarę możliwości MTASa):

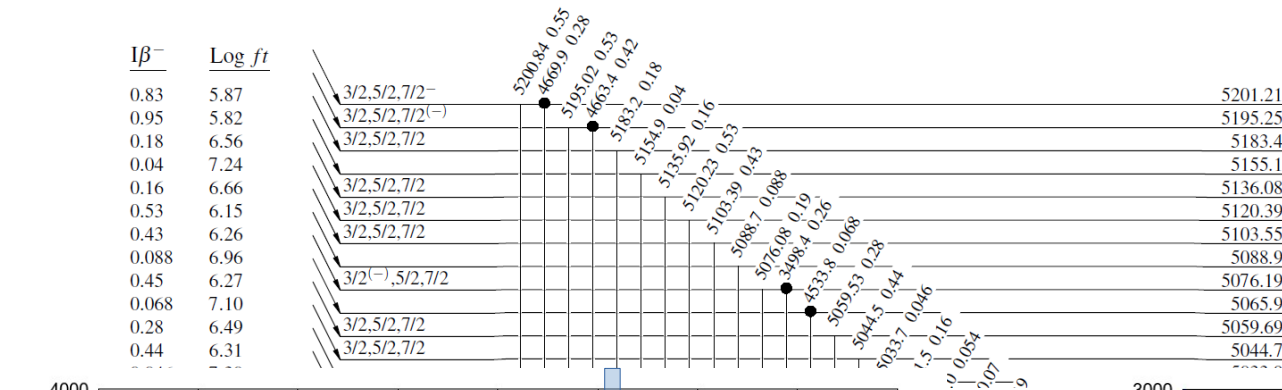
$$\begin{array}{cccccc} E_1 & E_2 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \end{array}$$

6 zliczeń w końcowym widmie, potencjalnie pojedyncze przejścia





# Analiza 2D: Total MTAS vs. pojedyncze kryształy I+M+O

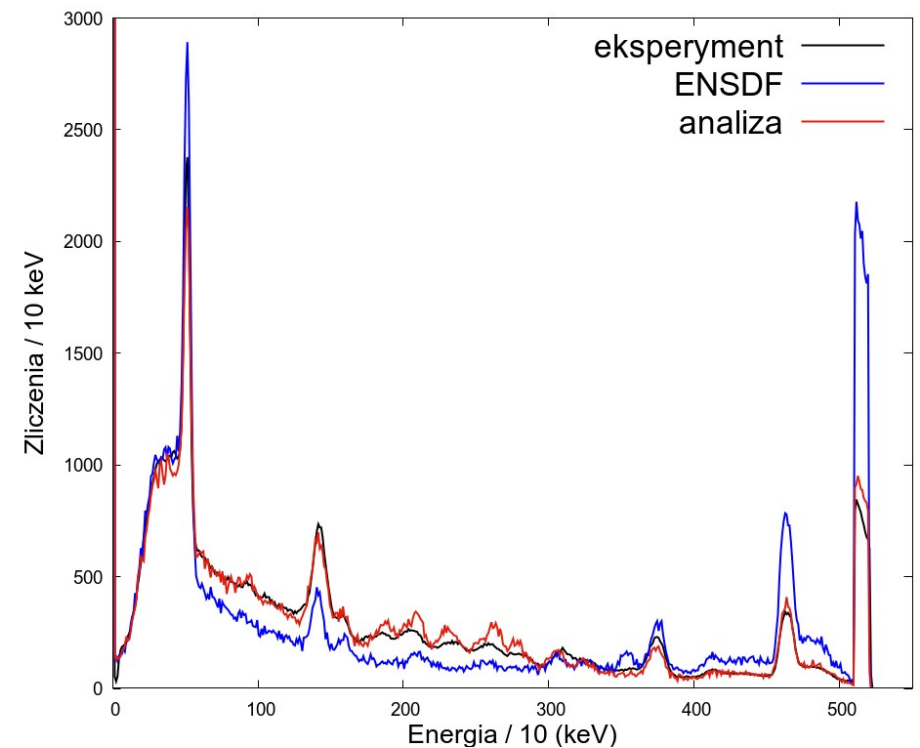
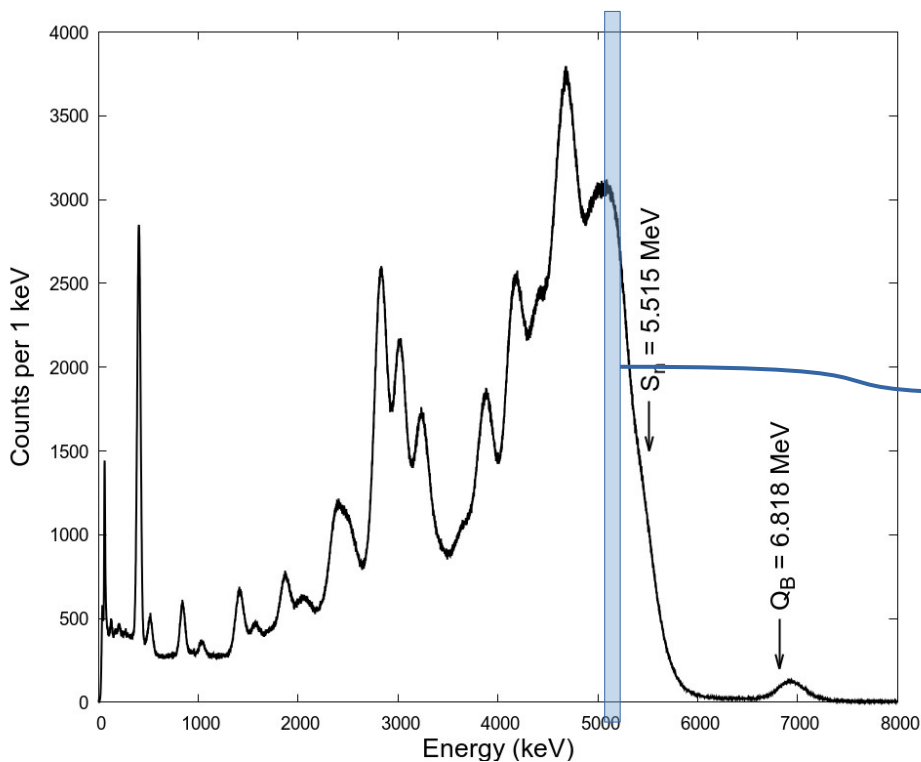


# Analiza 2D: Total MTAS vs. pojedyncze kryształy I+M+O

Potrzebna poważna ingerencja w funkcje odpowiedzi ( $R_{ij}$ ), zmiana intensywności przejść  $\beta$  nie jest wystarczająca.

$$d_i = \sum_{j=0}^{j_{\max}} R_{ij} f_j, i = 1, i_{\max}$$

1 przejście  $\gamma$  z każdego poziomu  
 $\sim 10$  przejść  $\gamma$  z każdego poziomu





# Dopasowanie wszystkiego wszędzie naraz - metoda z P. Shuai et al. (2022)

Wyjście od ogólnego wzoru na dekonwolucję widma.

Iteracyjne dopasowywanie funkcji odpowiedzi  $R_{ia}$  do widma. Inny algorytm, ale ta sama użyteczność co metoda ME.

$R_{ija}$  - funkcja odpowiedzi po wszystkich kanałach, przejściach i dopasowywanych widmach (modułach MTAS).

Wszystko wszędzie naraz.

$$d_i = \sum_{a=1}^M R_{ia} s_a, \quad a = 1, \dots, M,$$

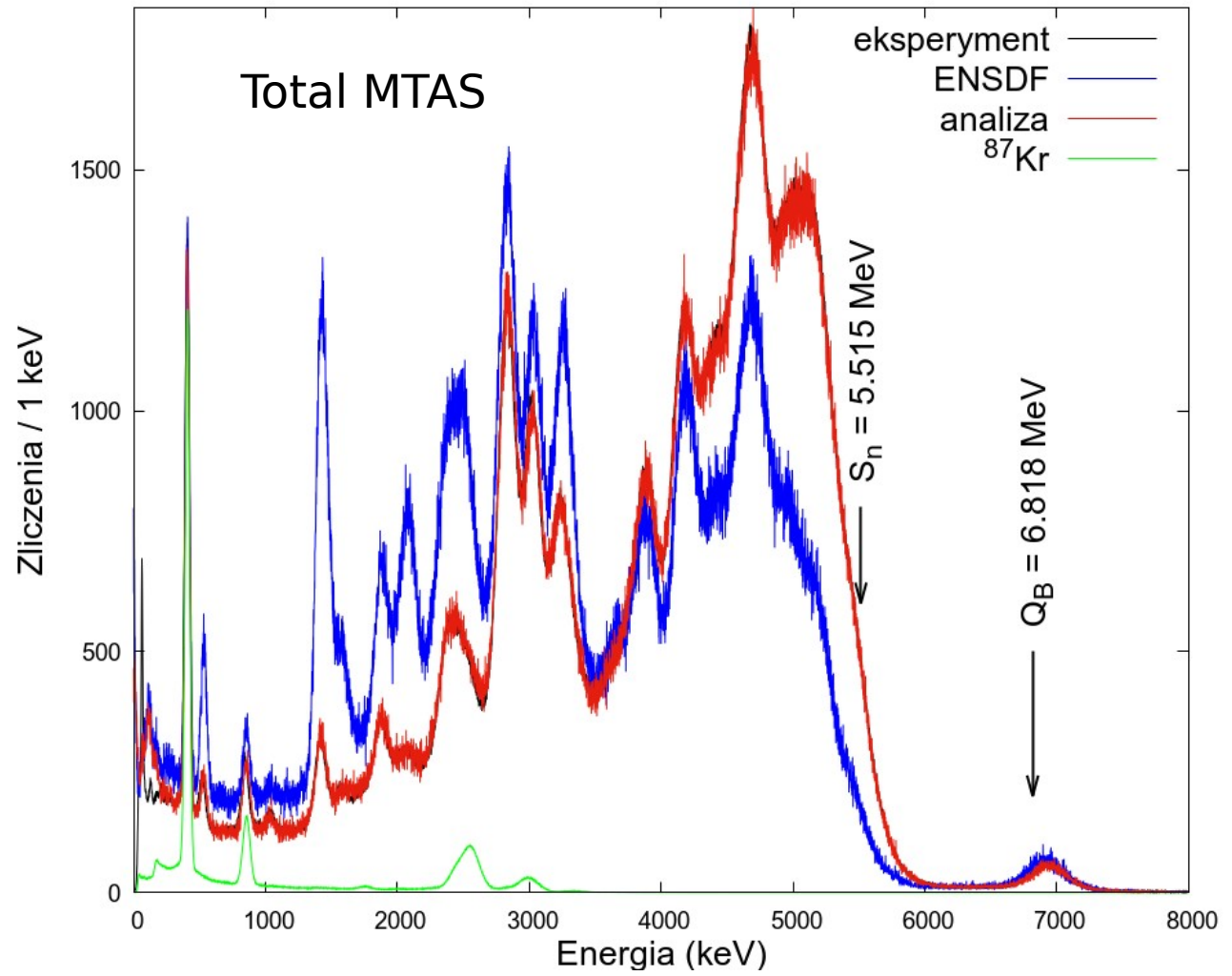
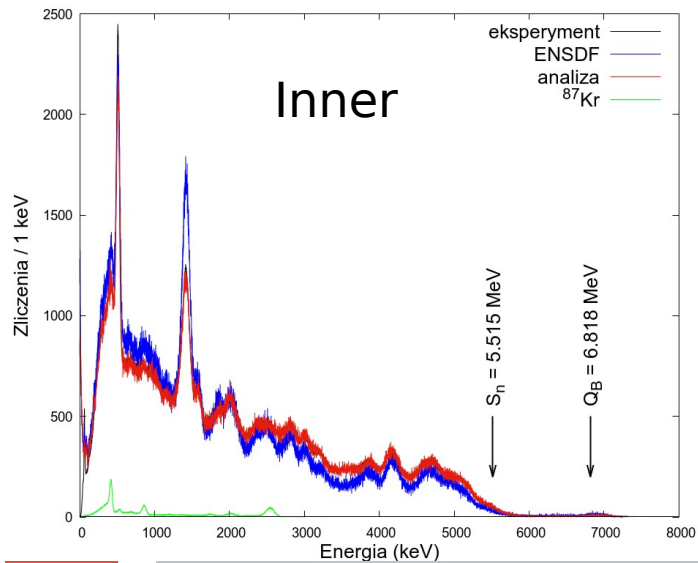
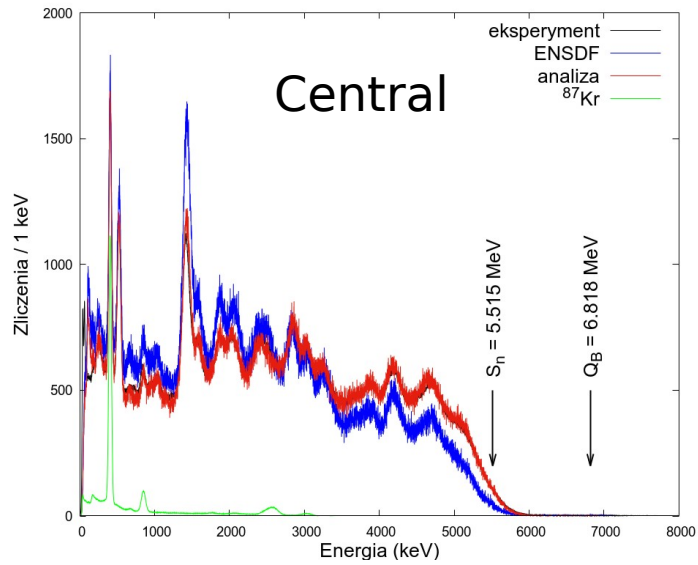
$$s_a^{(r+1)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N R_{ka}} \sum_{i=1}^N \frac{R_{ia} s_a^{(r)} d_i}{\sum_{b=1}^M R_{ib} s_b^{(r)}}, \quad a = 1, \dots, M.$$

$$s_a^{(r+1)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N R'_{kla}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{R'_{ija} s_a^{(r)} d'_{ij}}{\sum_{b=1}^M R'_{ijb} s_b^{(r)}}, \quad a = 1, \dots, M.$$

$$s_a^{(r+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_{ia} s_a^{(r)} d_i}{\sum_{b=1}^M R_{ib} s_b^{(r)}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{R'_{ija} s_a^{(r)} d'_{ij}}{\sum_{b=1}^M R'_{ijb} s_b^{(r)}} + \dots}{\sum_{k=1}^N R_{ka} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N R'_{kla} + \dots}, \quad a = 1, \dots, M.$$

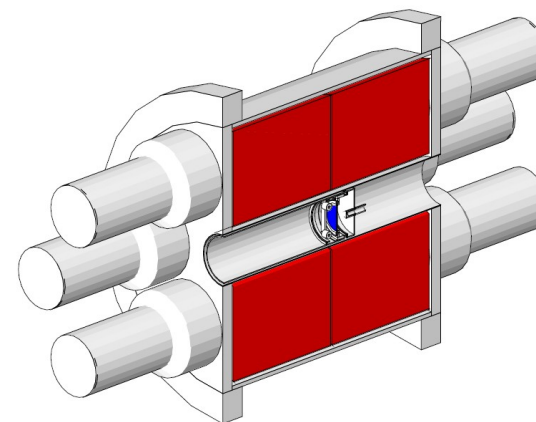
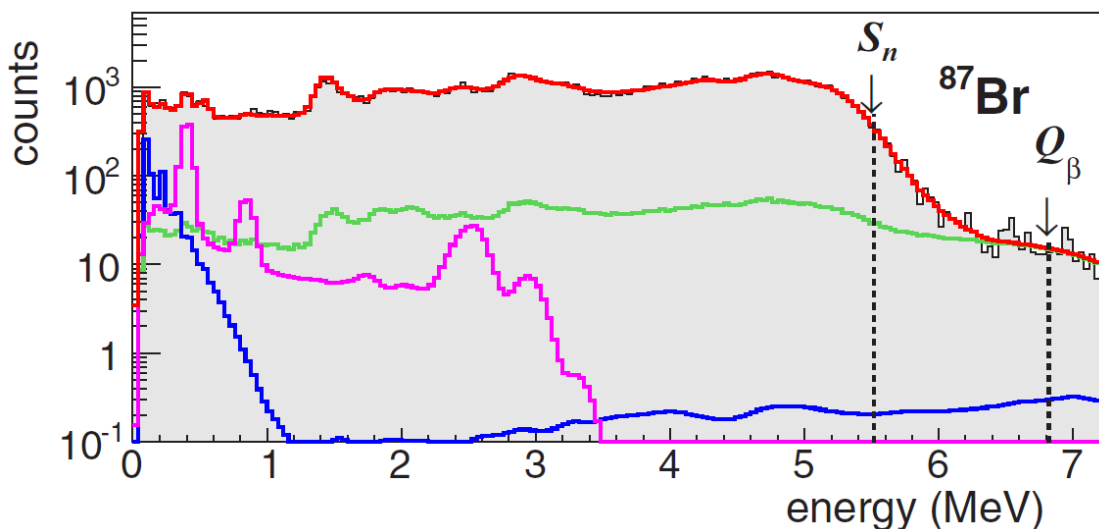
P. Shuai et al. (2022)

# Wyniki $^{87}\text{Br}$

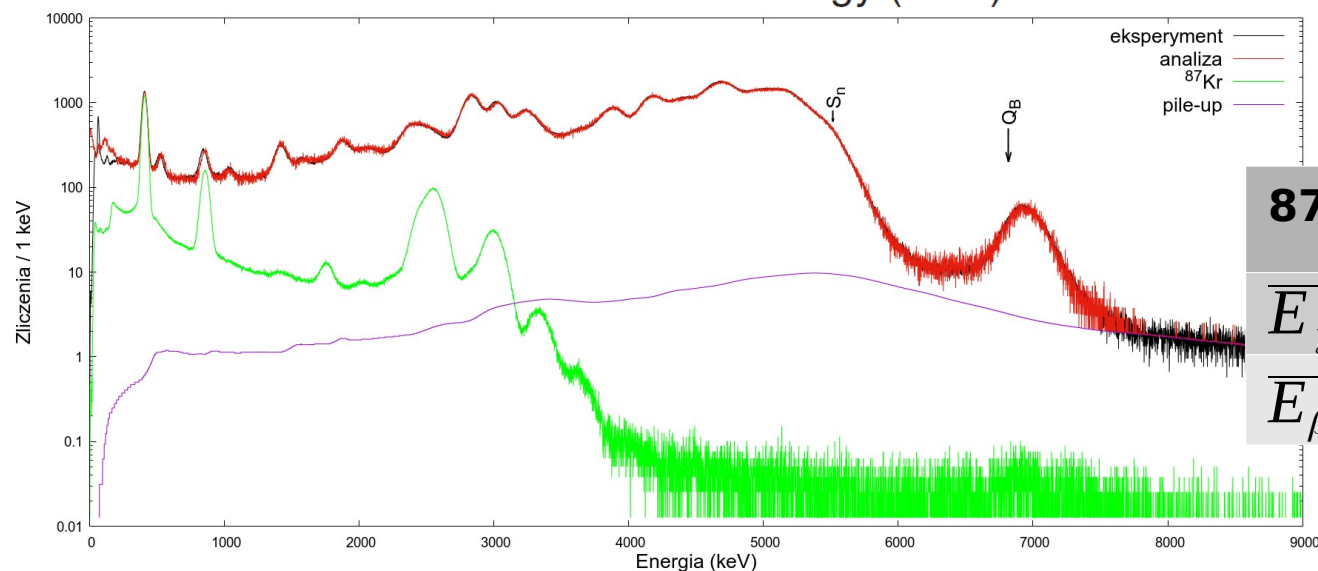


# $^{87}\text{Br}$ – porównanie z innym TASem

E. Valencia *et al.* (2017)



6 kryształów  $\text{BaF}_2$



$^{87}\text{Br}$	ENSDF	E. Valencia <i>et al.</i> (2017)	Analiza
$\overline{E}_\gamma$ (keV)	3087	$3938^{+40}_{-67}$	3938(40)
$\overline{E}_\beta$ (keV)	1603	$1159^{+32}_{-19}$	1209(20)

# $^{87}\text{Br}$ – porównanie z innym TAsEm

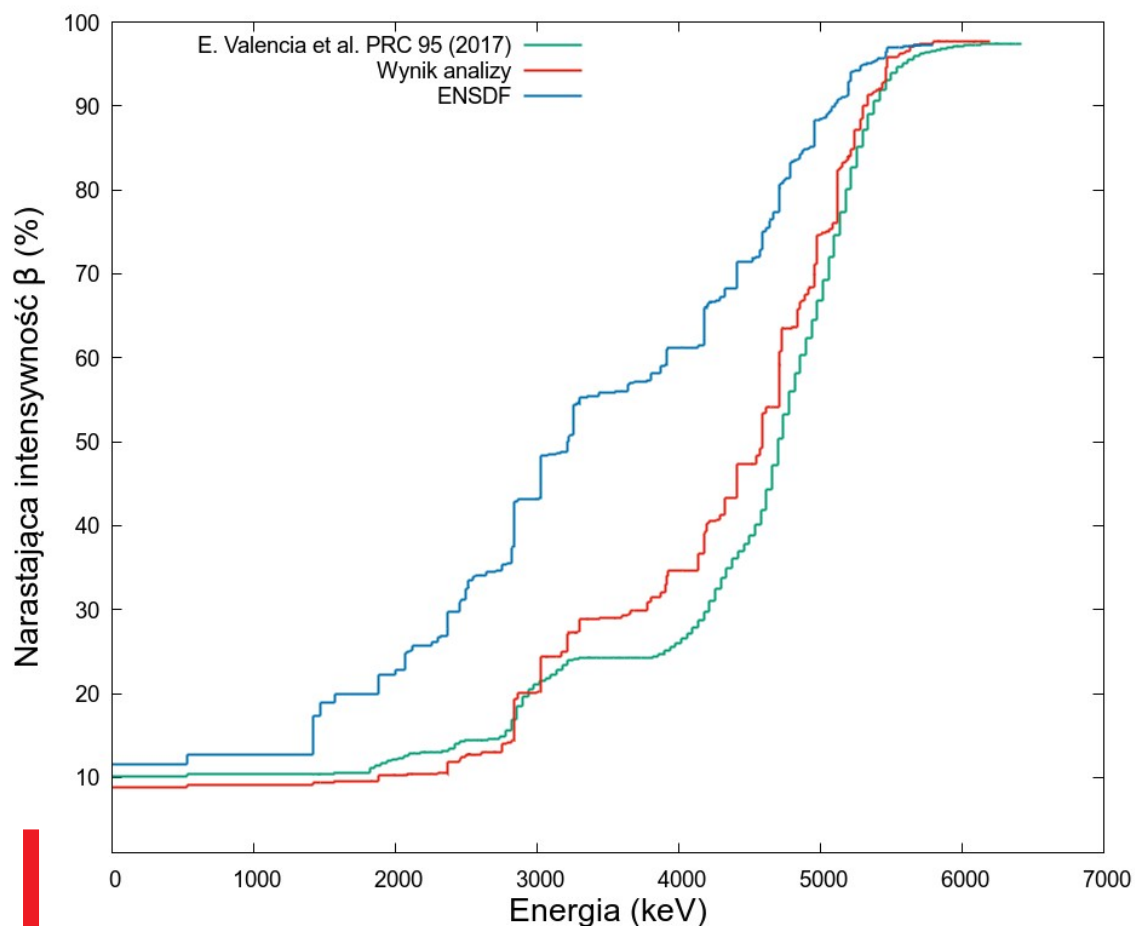
Odejście od schematu rozpadu: pseudo-poziomy co 40 keV powyżej 1.6 MeV.

Mniejsza rozdzielczość – bardziej „wygładzone” widmo.

Takie same średnie energie!

$^{87}\text{Br}$	ENSDF	E. Valencia <i>et al.</i> (2017)	Analiza
$\overline{E}_\gamma$ (keV)	3087	$3938^{+40}_{-67}$	3938(40)
$\overline{E}_\beta$ (keV)	1603	$1159^{+32}_{-19}$	1209(20)

$\overline{E}_\gamma$  28%  $\uparrow$   $\overline{E}_\beta$  28%  $\downarrow$



# $^{87}\text{Br}$ - intensywności przejść $\beta$ i BGT

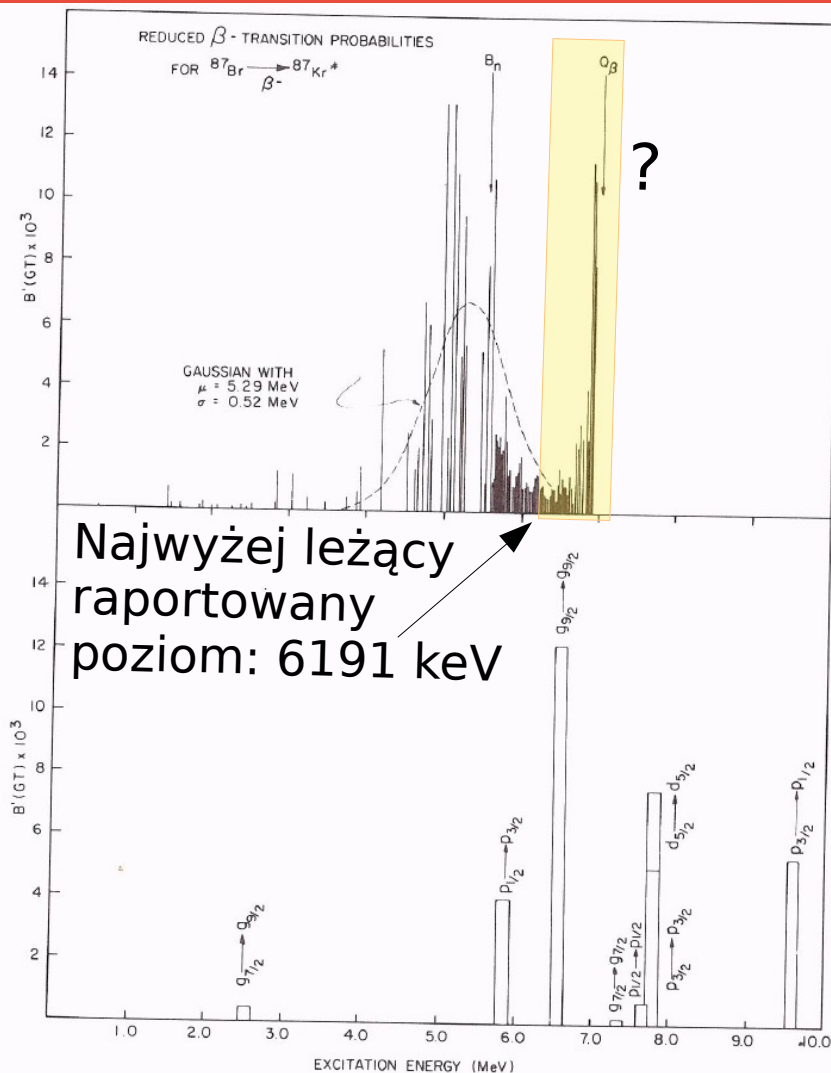
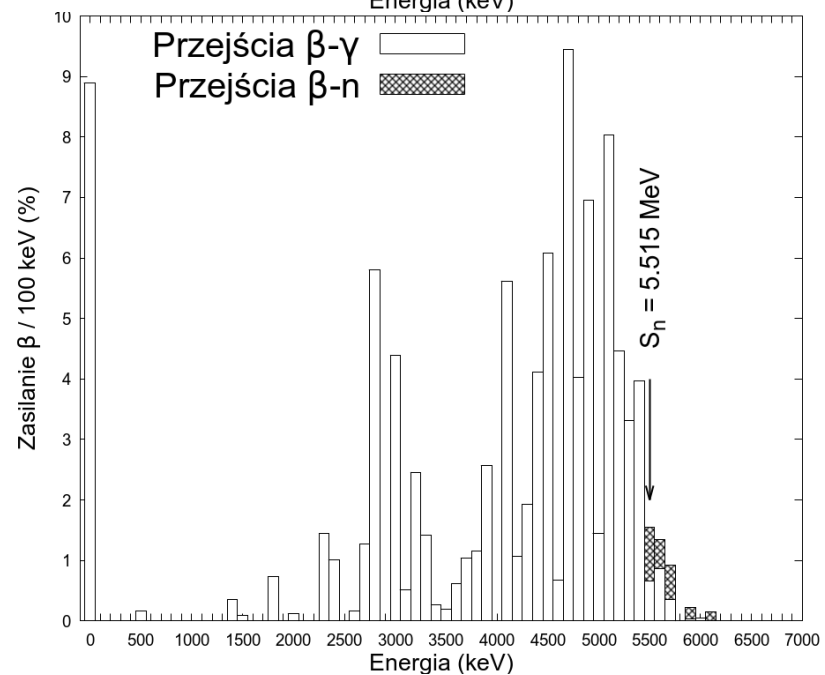
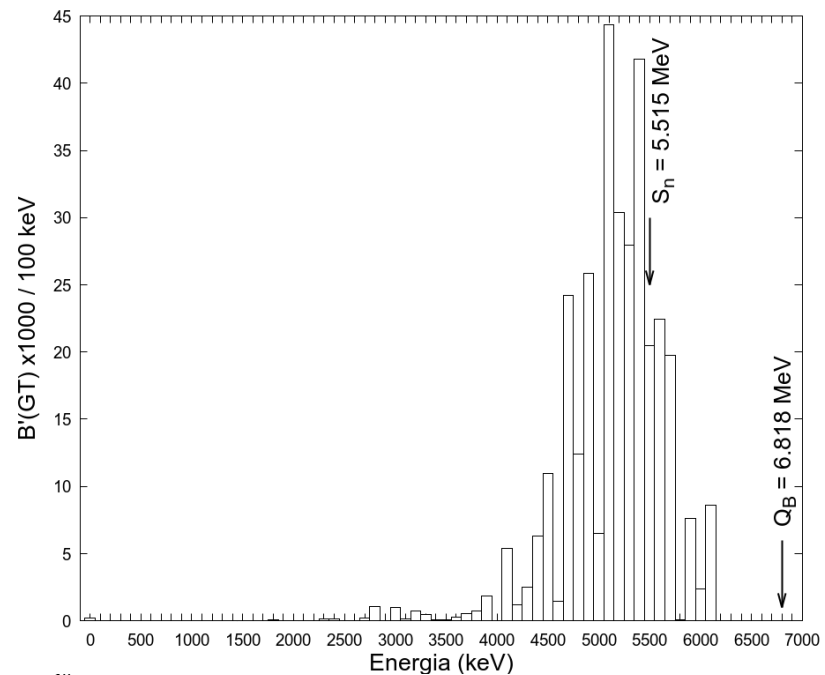


Fig. 4. Reduced transition probabilities ( $B(GT)$ ) for  $\beta^-$  decay of  $^{87}\text{Br}$  to levels in  $^{87}\text{Kr}$  obtained from  $\gamma$ -ray and neutron measurements (upper) and the  $B(GT)$  to single-particle resonances from shell-model calculation (lower) (see subsect. 6.3).

F.M. Nuh *et al.* (1977)



# Neutrony w MTAS

## • Rozpraszanie:

Rozpraszanie energii neutronu -> jonizacja -> depozyt energii w detektorze.

$$E_{\max} \approx E_{\text{kin}}$$

## • Pochłonięcie neutronu: głównie kryształ $^{23}\text{Na}^{127}\text{I}$

Kwanty gamma -> rozpraszanie Comptona, efekt fotoelektryczny, kreacja par -> jonizacja -> depozyt energii w detektorze.

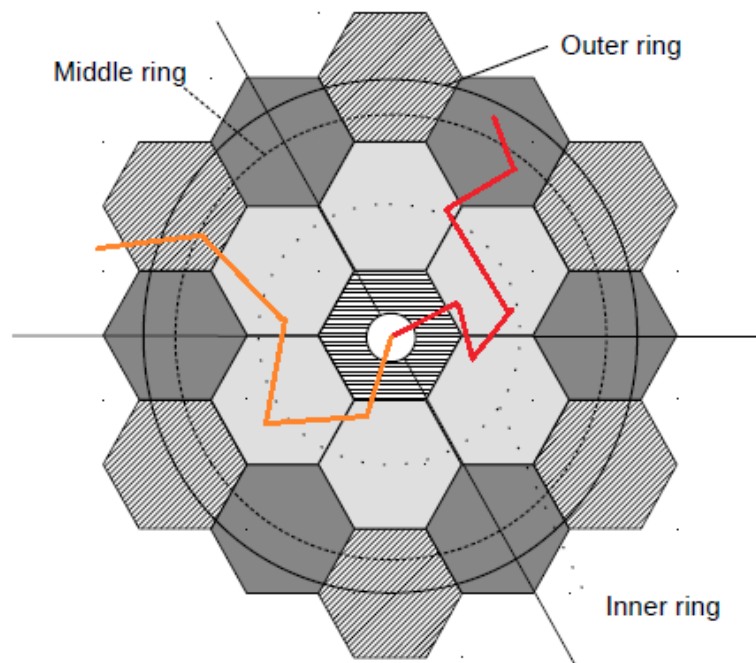
$^{127}\text{I}$ : Przekrój czynny = 6,15 barna,

$^{128}\text{I}$ :  $S_n = 6826.13$  keV

$^{23}\text{Na}$ : Przekrój czynny = 0,53 barna,

$^{24}\text{Na}$ :  $S_n = 6959.42$  keV

$$E_{\max} = E_{\text{kin}} + S_n$$



$E_{\max}$  - maksymalny depozyt energii w detektorze

$E_{\text{kin}}$  - energia kinetyczna neutronu

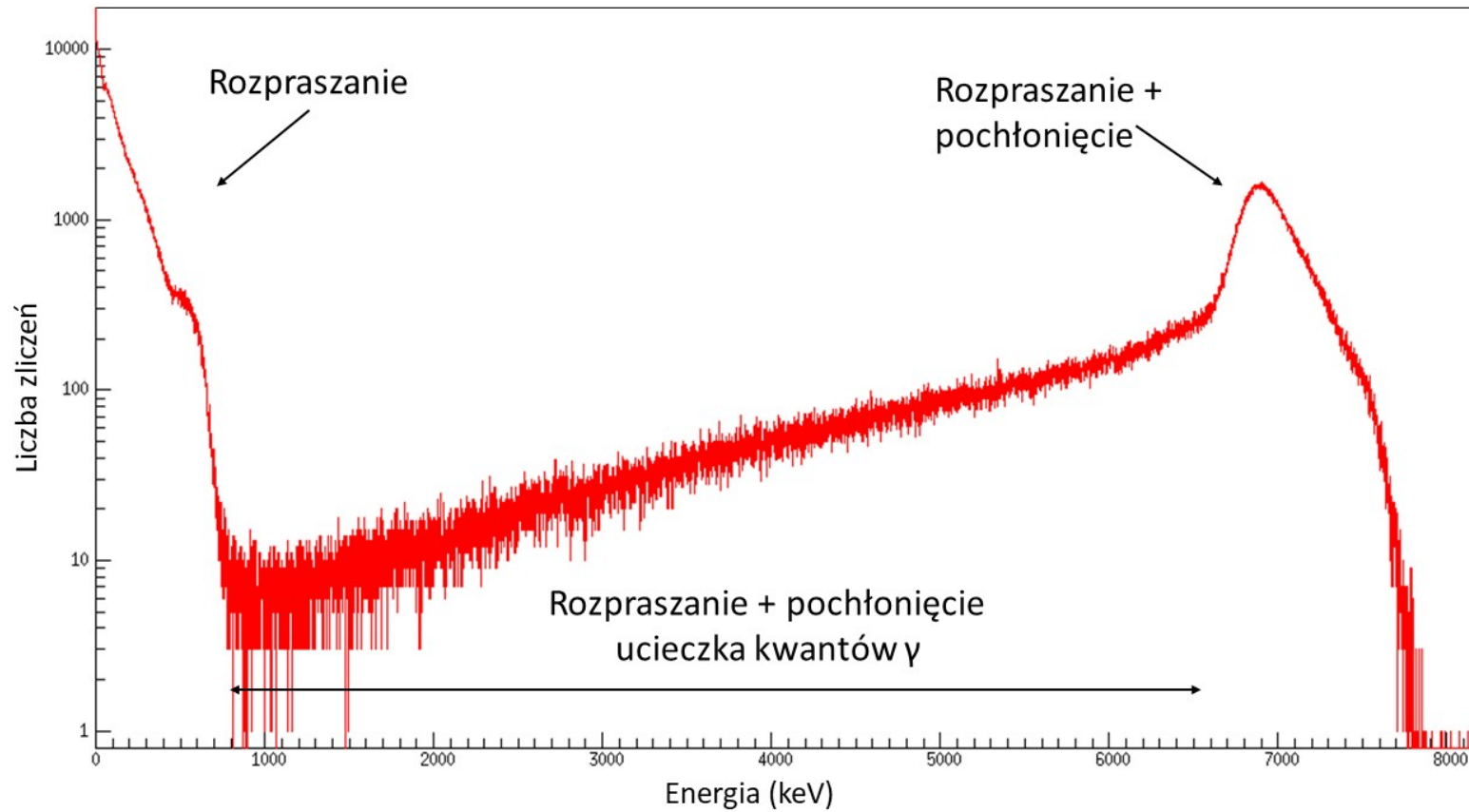
$S_n$  - energia separacji neutronu



# Funkcja odpowiedzi na neutrony MTAS

$^{128}\text{I}$ :  $S_n = 6826.13$  keV

$^{87}\text{Br}$	ENSDF	Analiza
$P_n$ (%)	2.60(4)	2.3(2)

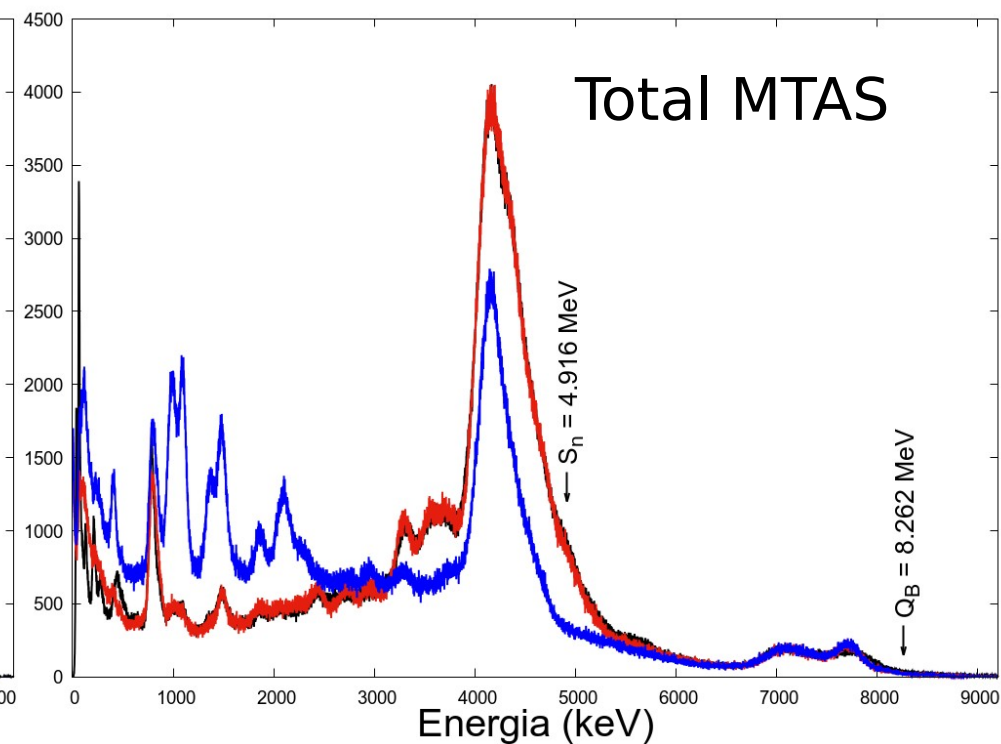
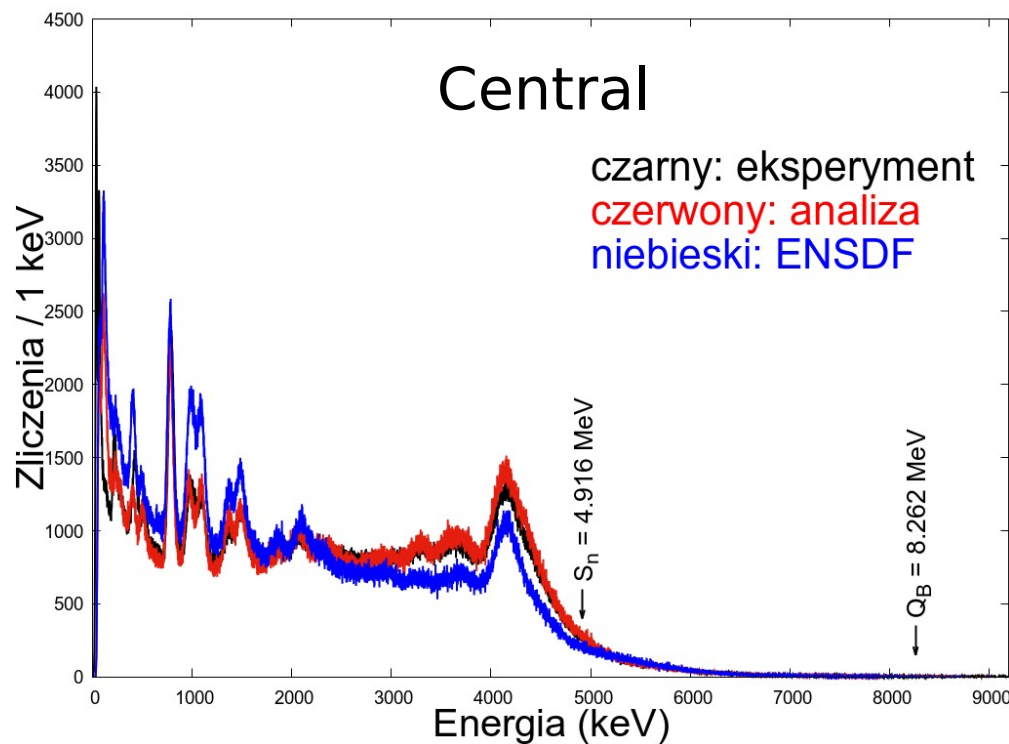




# Wyniki $^{89}\text{Br}$

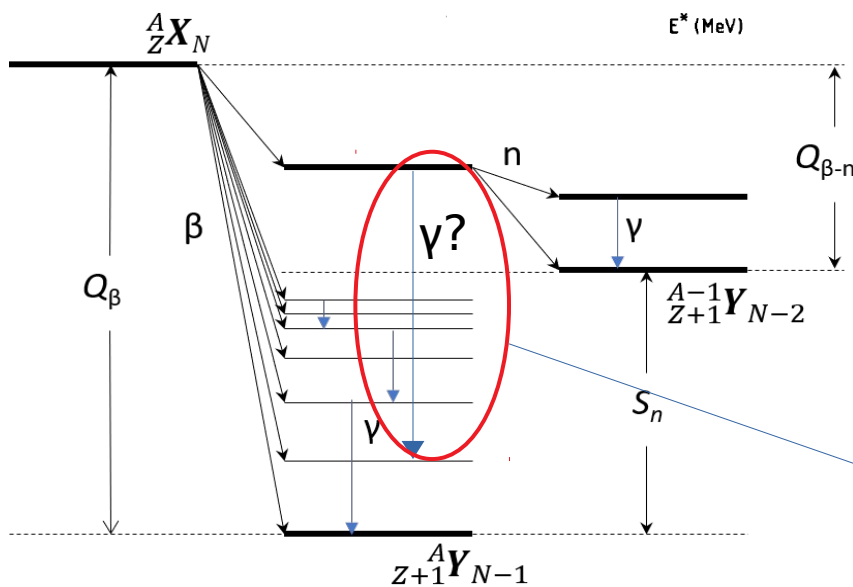
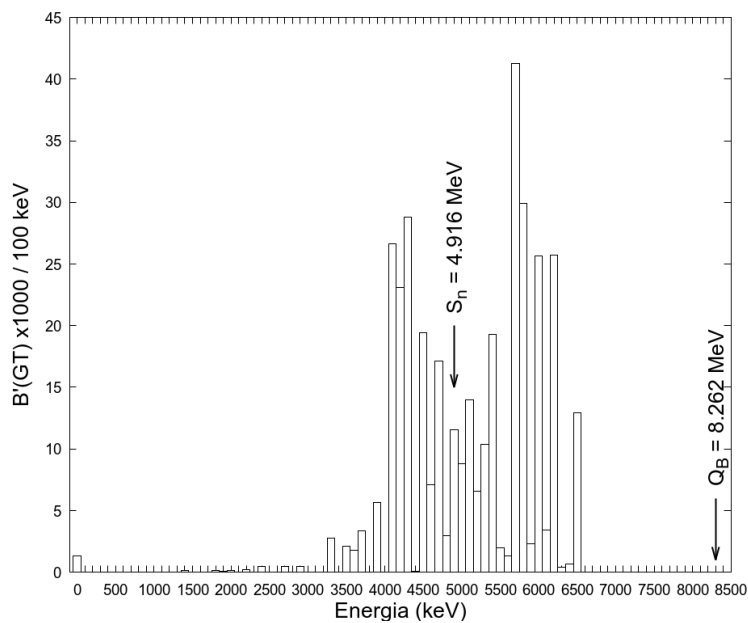
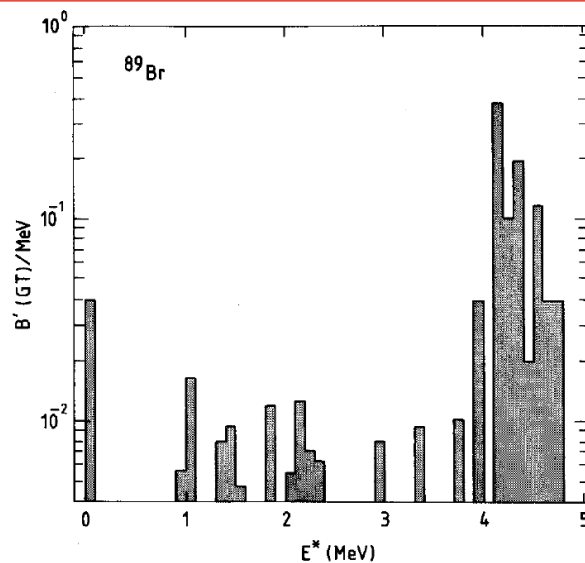
$^{89}\text{Br}$	ENSDF	Analiza
$\overline{E}_\gamma$ (keV)	1714	3357(35)
$\overline{E}_\beta$ (keV)	2735	2065(25)
$P_n$ (%)	13.8(4)	12.3(10)

$$\overline{E}_\gamma \text{ 96\% } \uparrow \quad \overline{E}_\beta \text{ 25\% } \downarrow$$



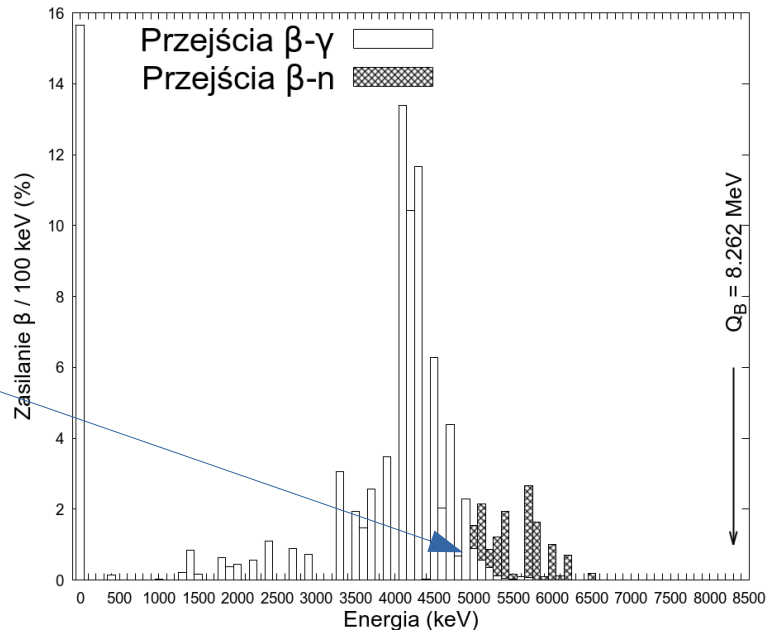
# $^{89}\text{Br}$ – intensywności przejść $\beta$ i BGT

P. Hoff *et al.* (1981)

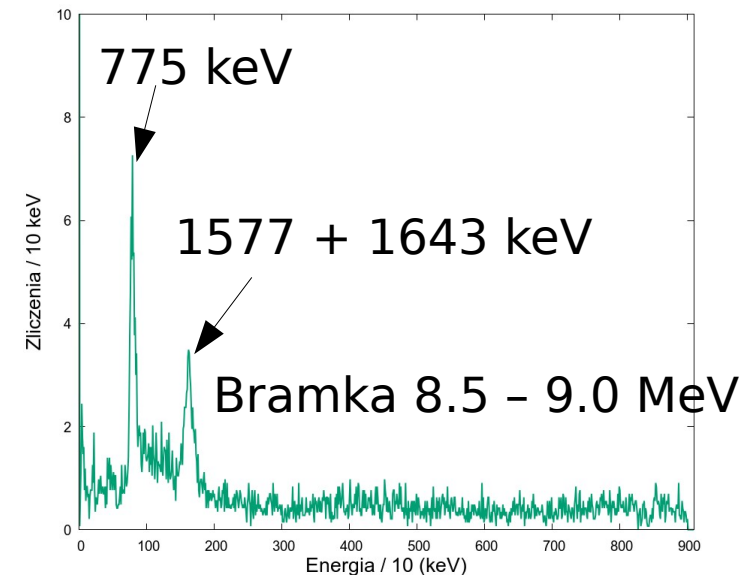
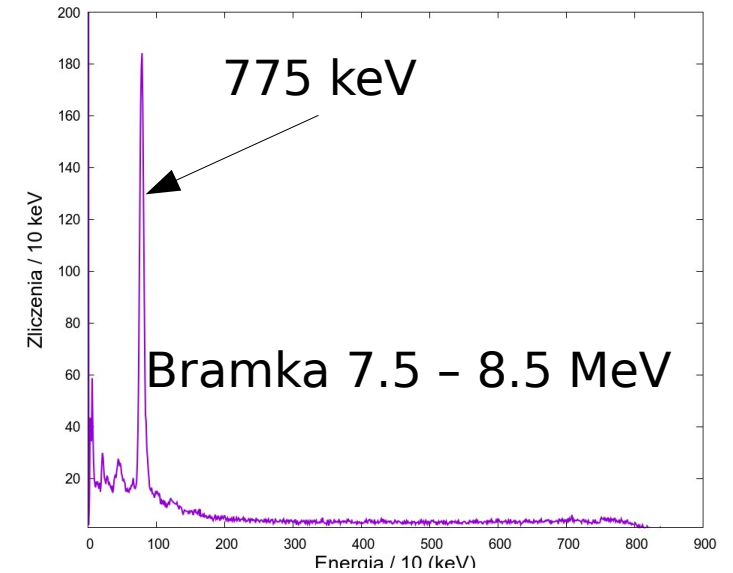
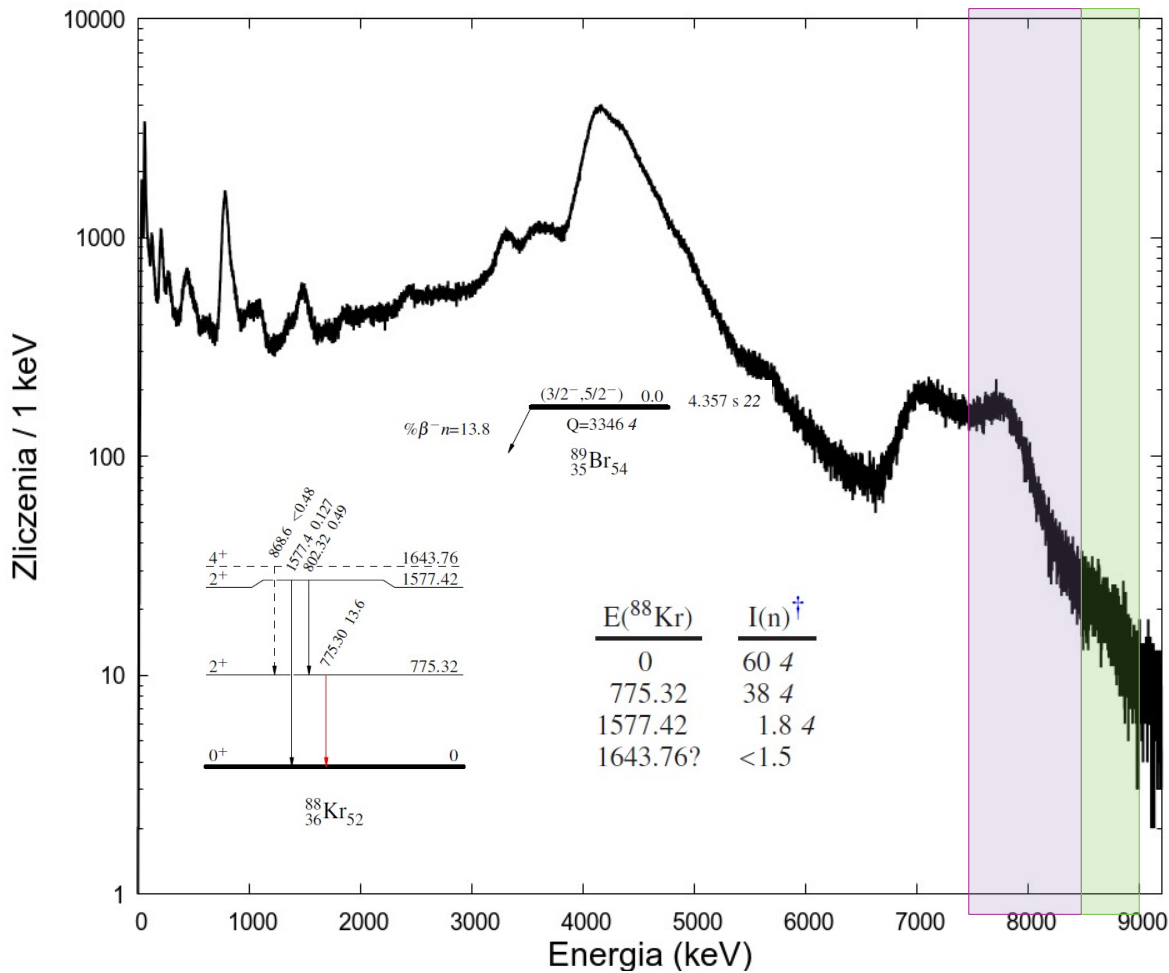


Przejścia  $\gamma$   
ze stanów  
powyżej  $S_n$ ?

Tak!



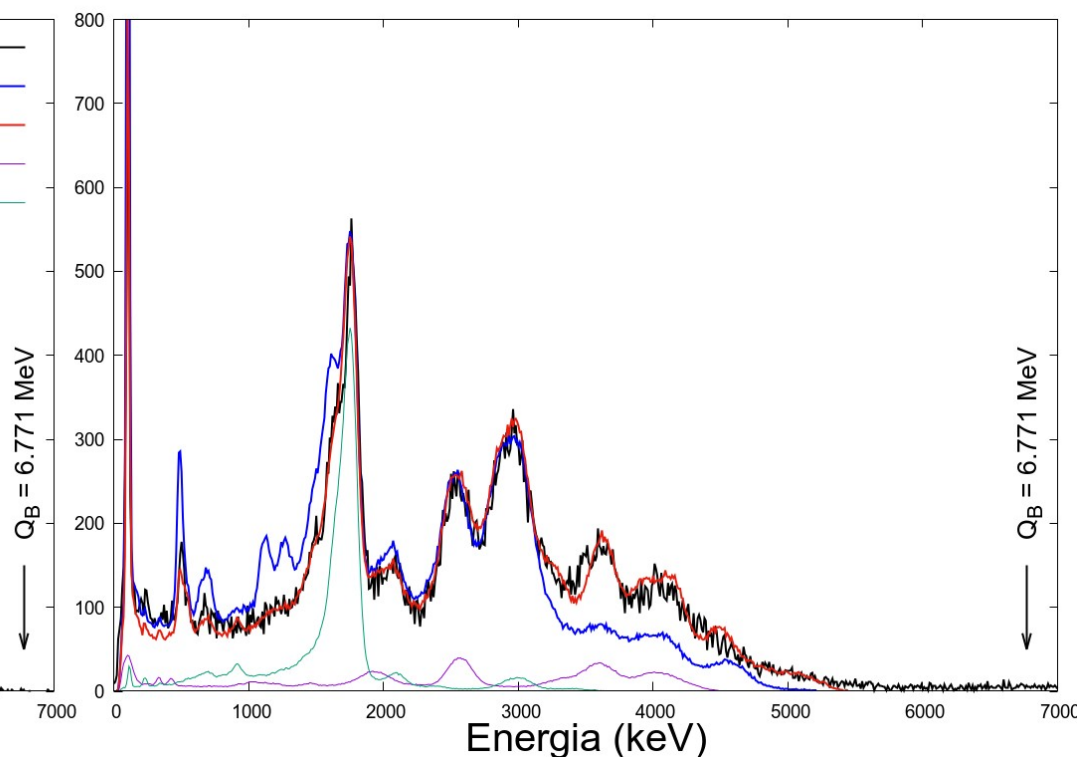
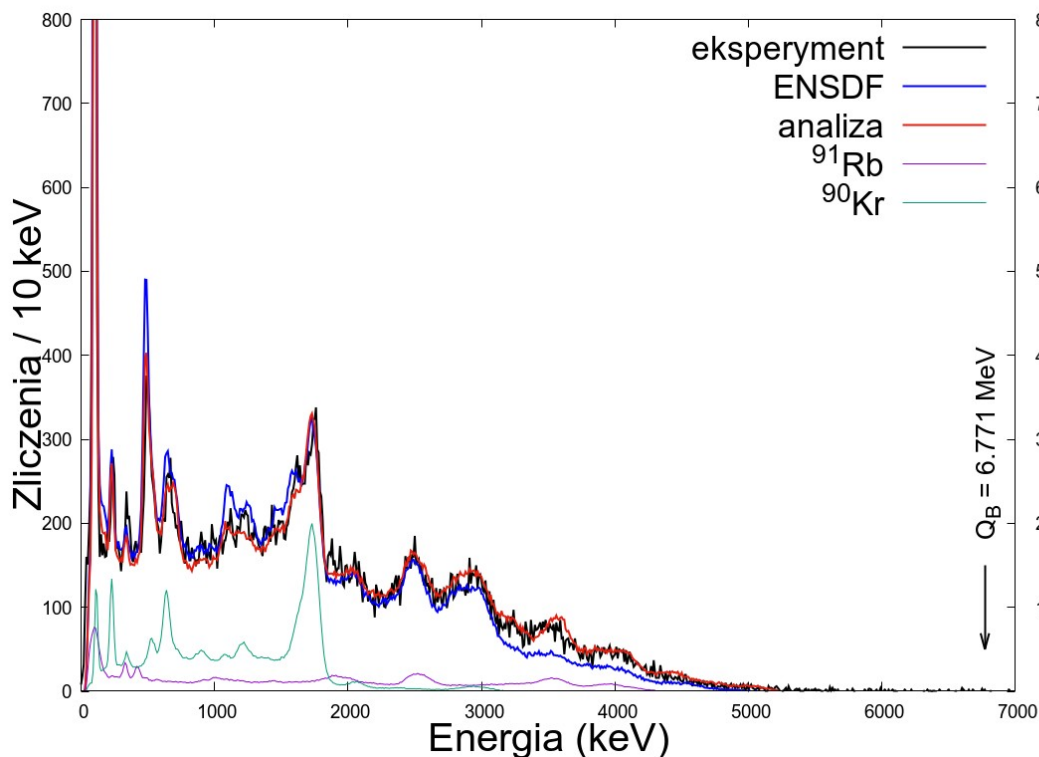
# $^{89}\text{Br}$ neutrony: Total MTAS vs Central



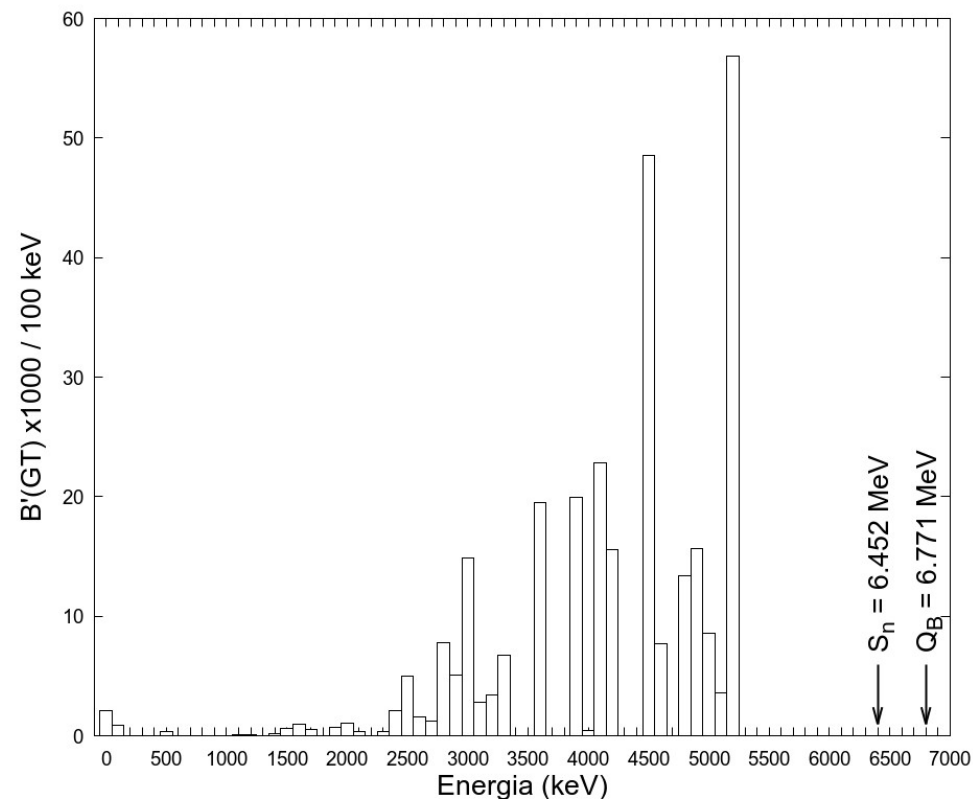
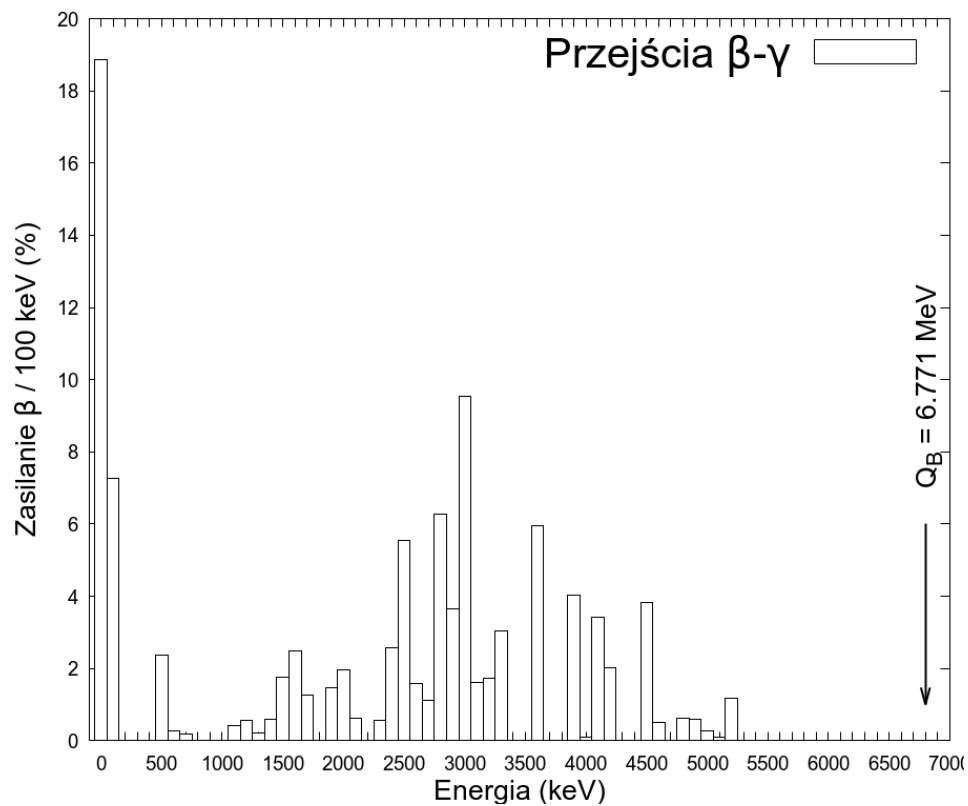
# Wyniki $^{91}\text{Kr}$

$^{91}\text{Kr}$	ENSDF	Analiza
$\overline{E}_\gamma$ (keV)	1696	2240(20)
$\overline{E}_\beta$ (keV)	2290	2037(20)
$P_n$ (%)	-	-

$$\overline{E}_\gamma \text{ 32\% } \uparrow \quad \overline{E}_\beta \text{ 11\% } \downarrow$$



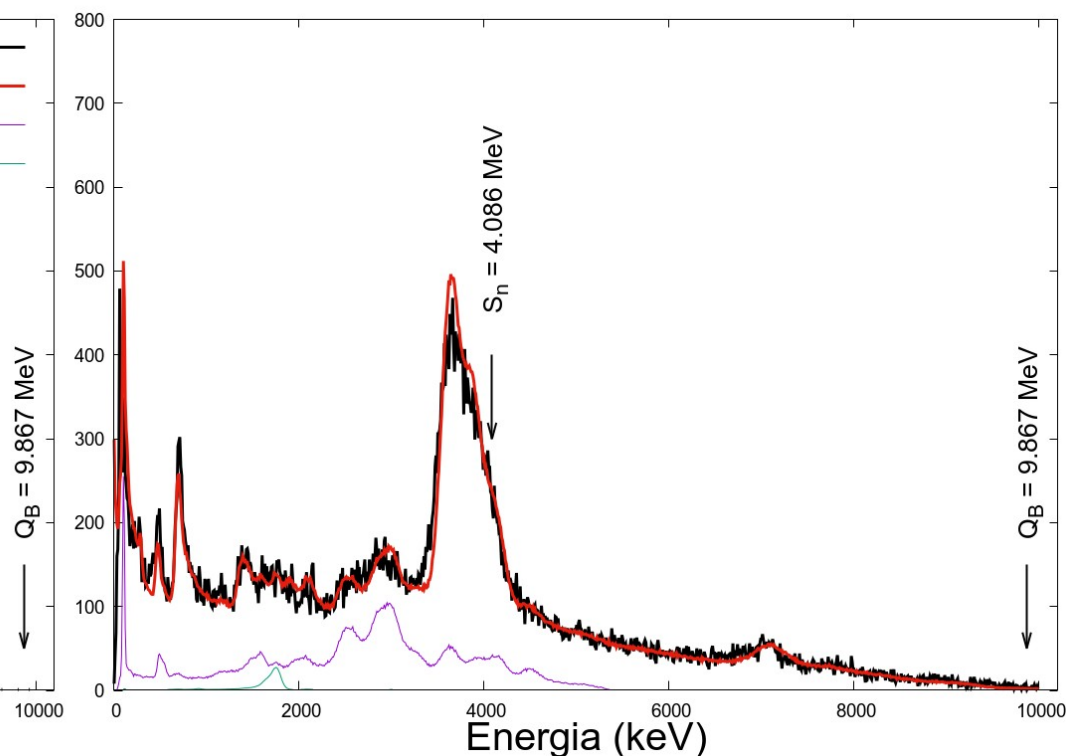
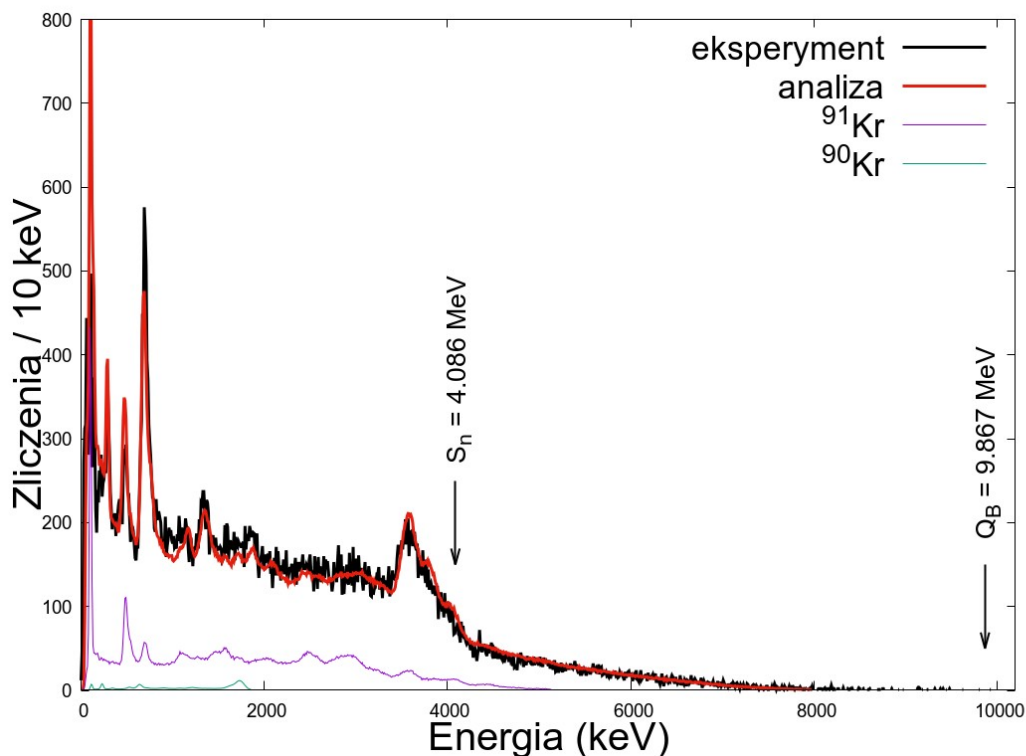
# $^{91}\text{Kr}$ - intensywności przejść $\beta$ i BGT



# Wyniki $^{91}\text{Br}$

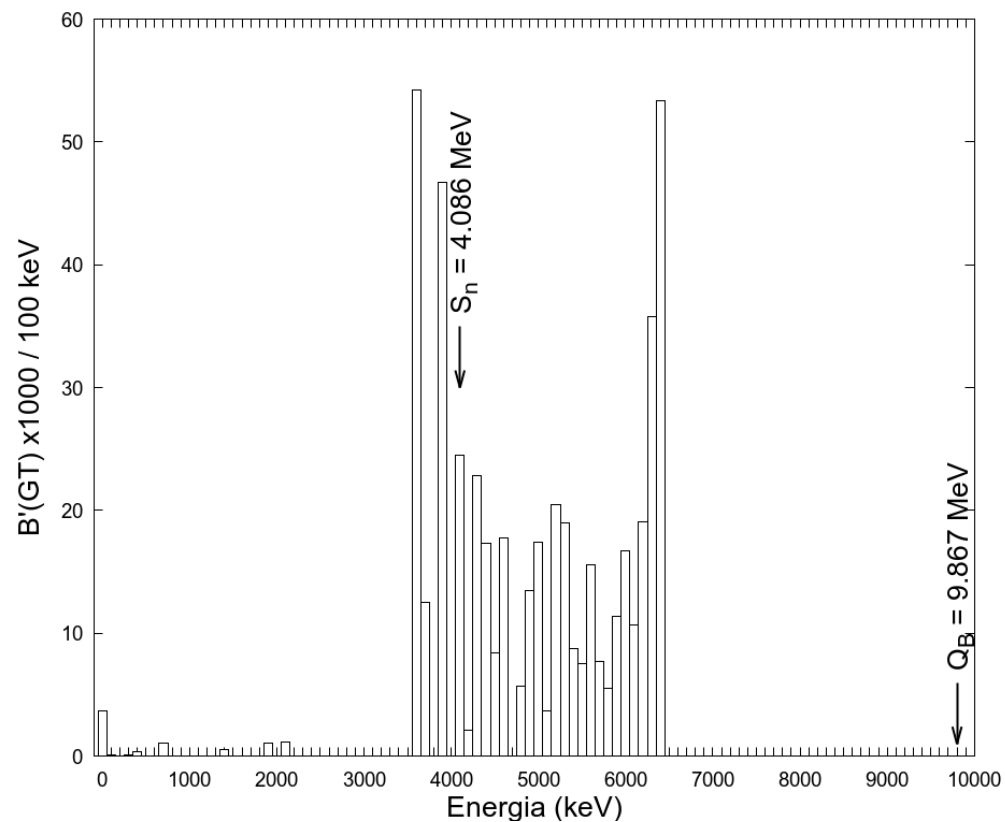
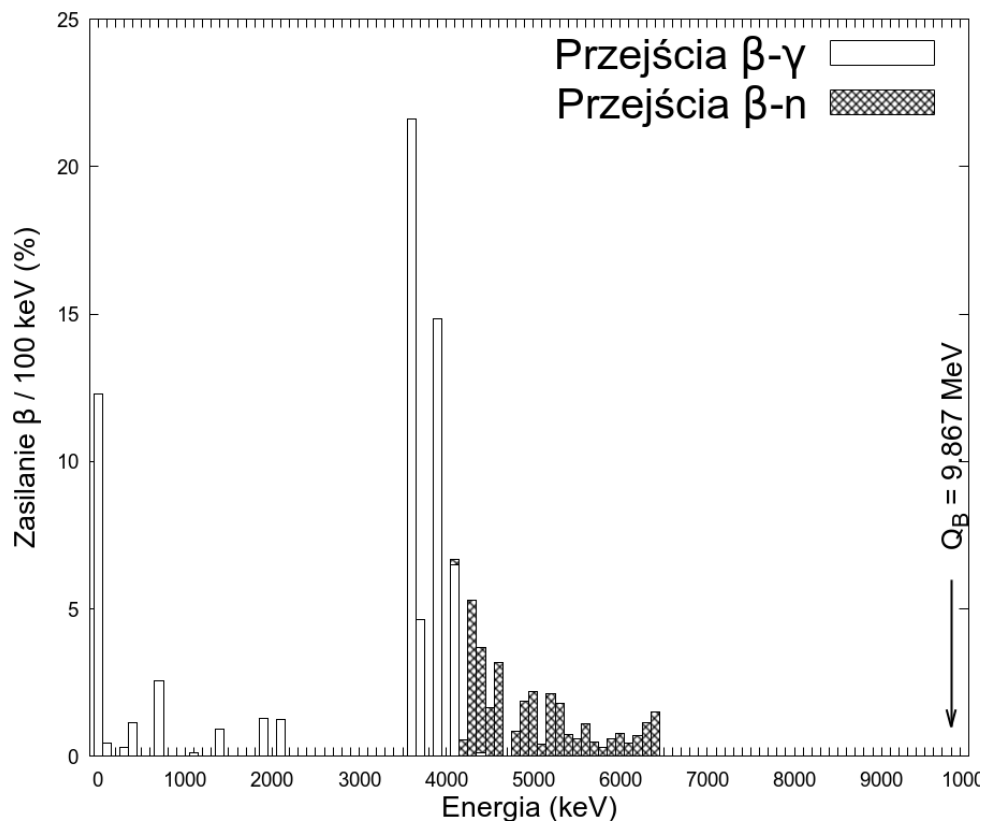
$^{91}\text{Br}$	ENSDF	Analiza
$\overline{E}_\gamma$ (keV)	-	2819(35)
$\overline{E}_\beta$ (keV)	-	2903(35)
$P_n$ (%)	19.5(4)	32(4)

Brak danych o zasilaniach w ENSDF  
→ niemożliwe obliczenie średnich energii.

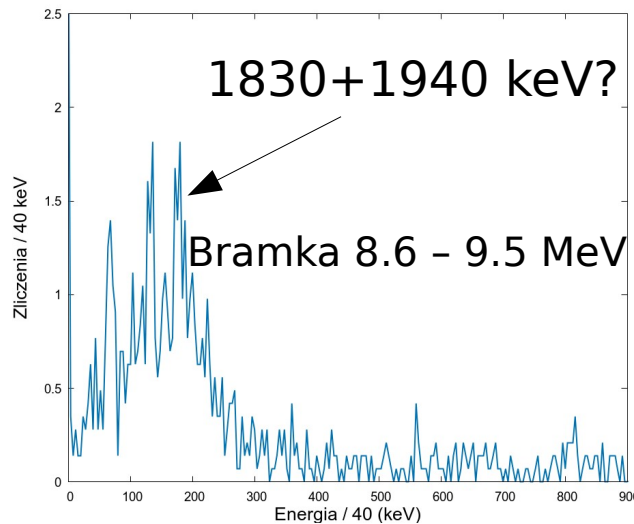
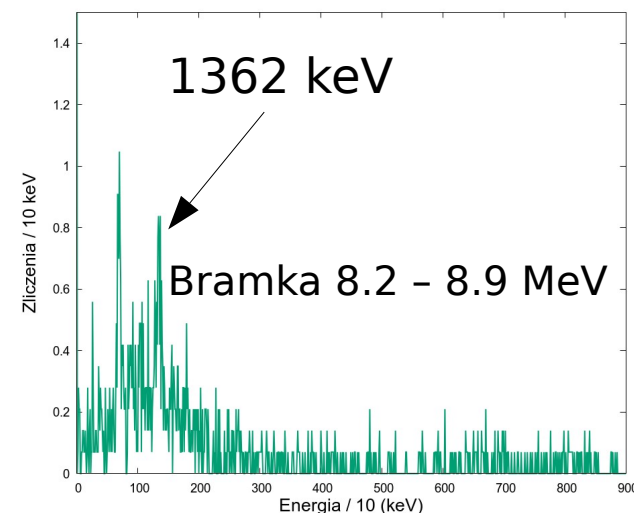
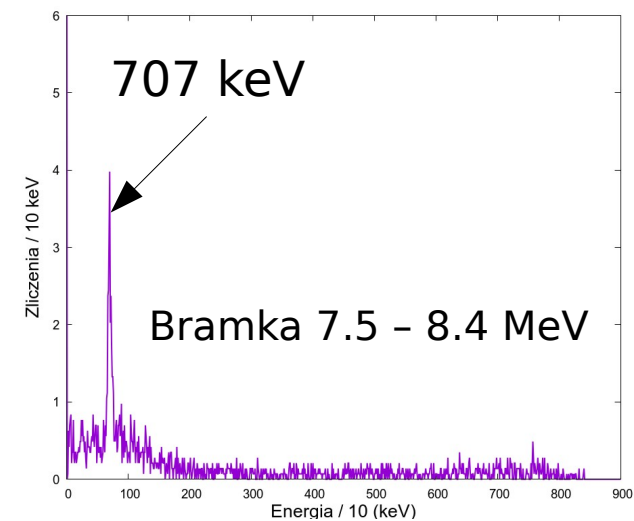
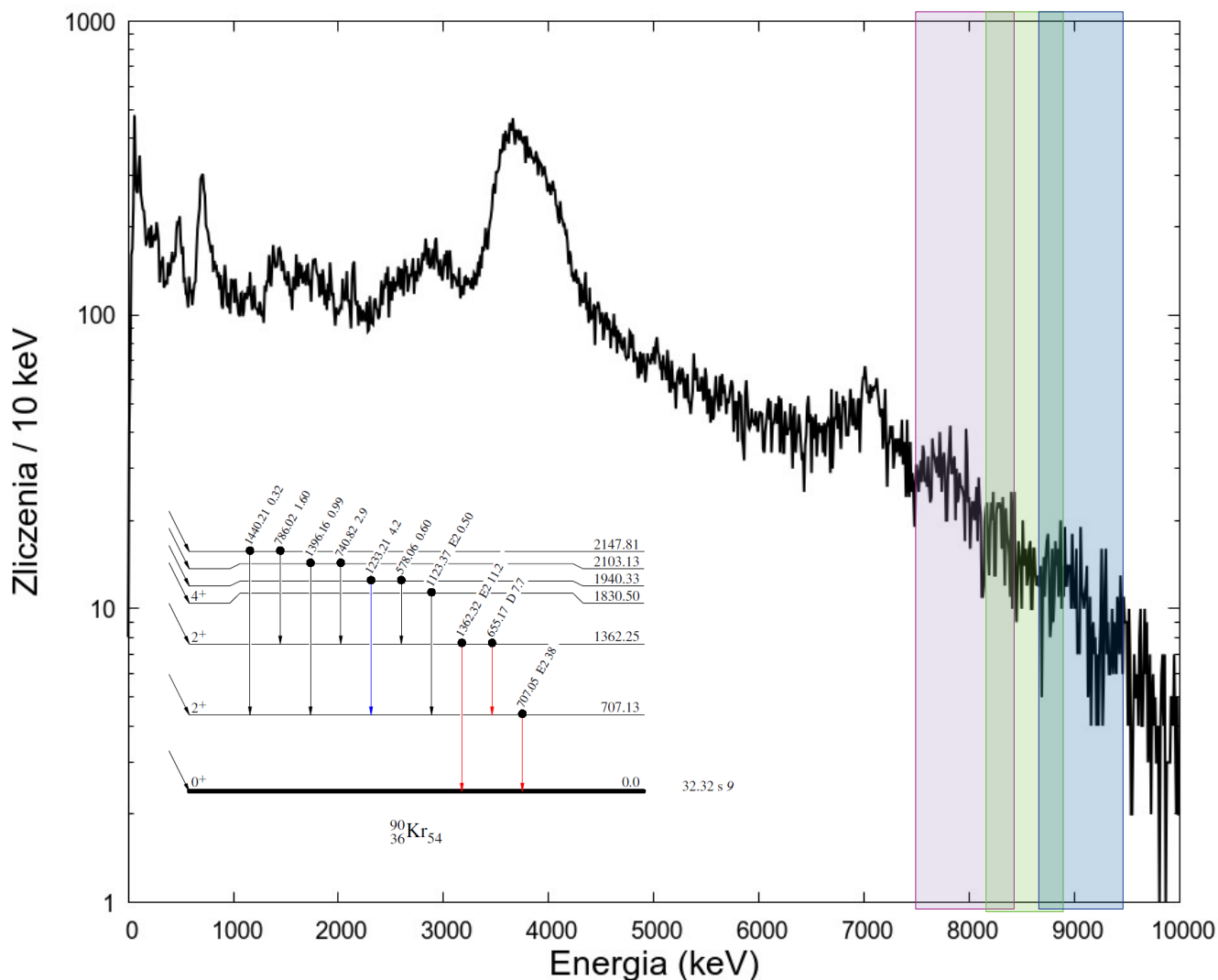




# $^{91}\text{Br}$ – intensywności przejść $\beta$ i BGT

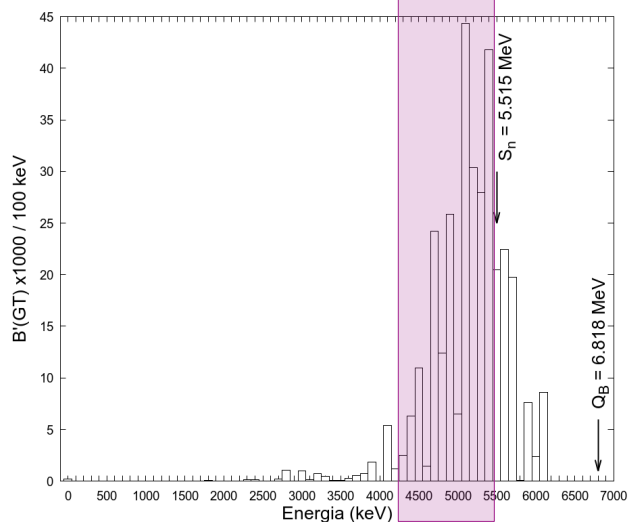


# $^{91}\text{Br}$ neutrony: Total MTAS vs Central

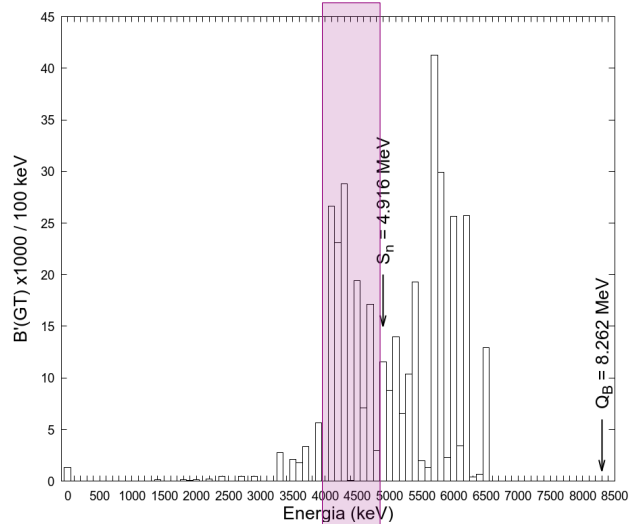


# Zmiana BGT wraz z masą

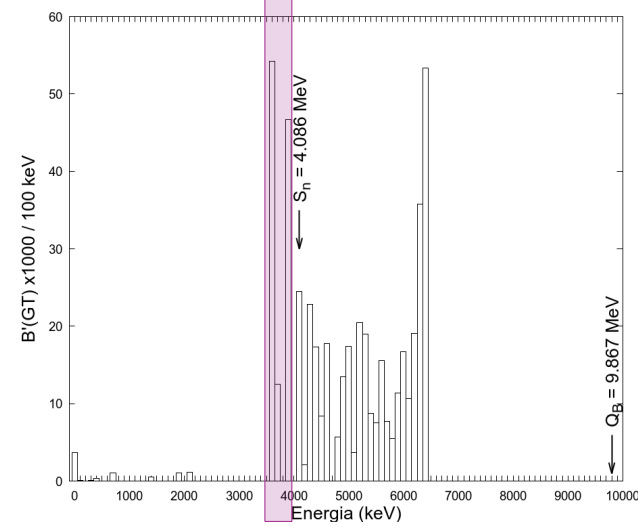
**$^{87}\text{Br}$**



**$^{89}\text{Br}$**



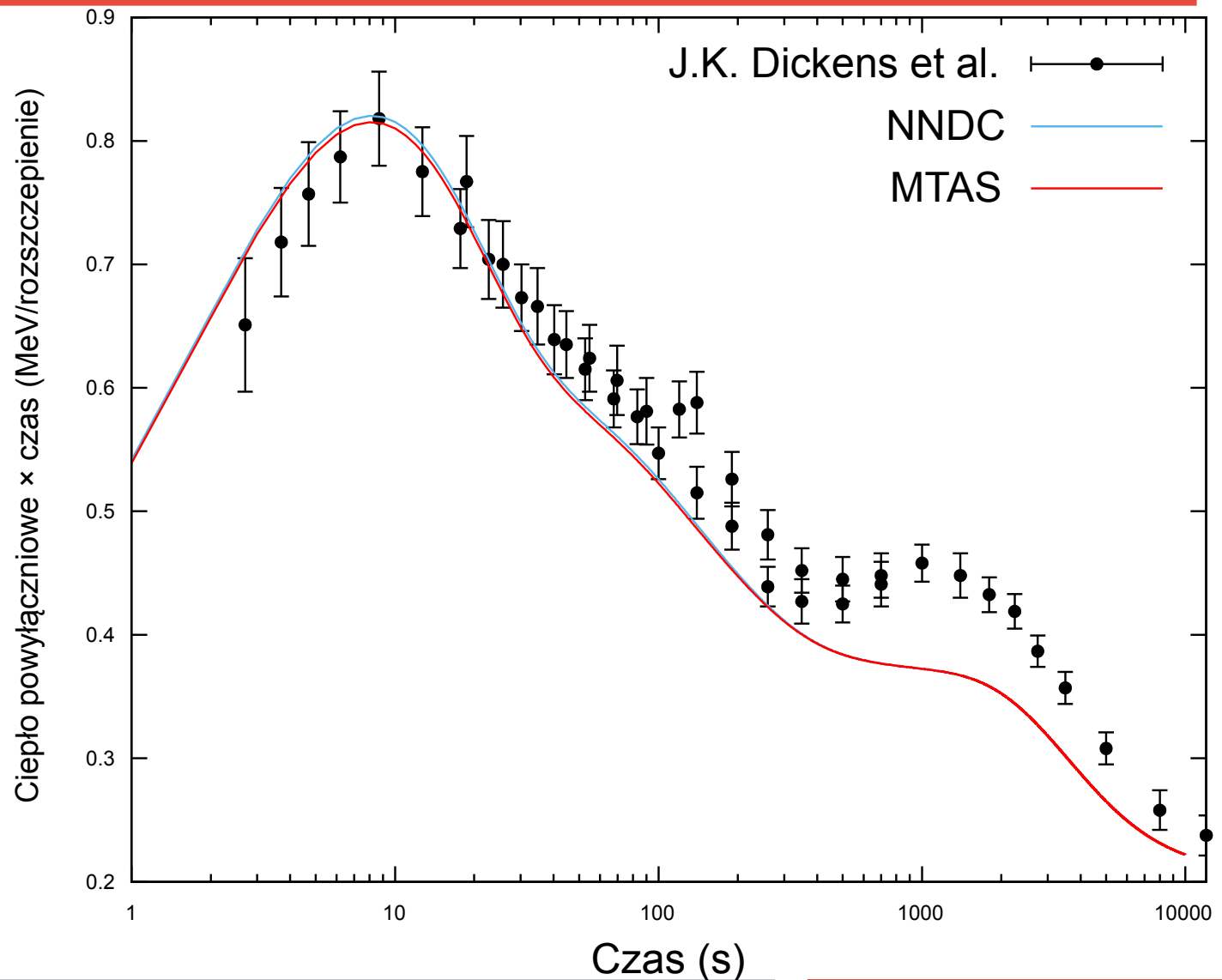
**$^{91}\text{Br}$**



Coraz węższa struktura poziomów poniżej  $S_n$  wraz ze wzrastającą masą.

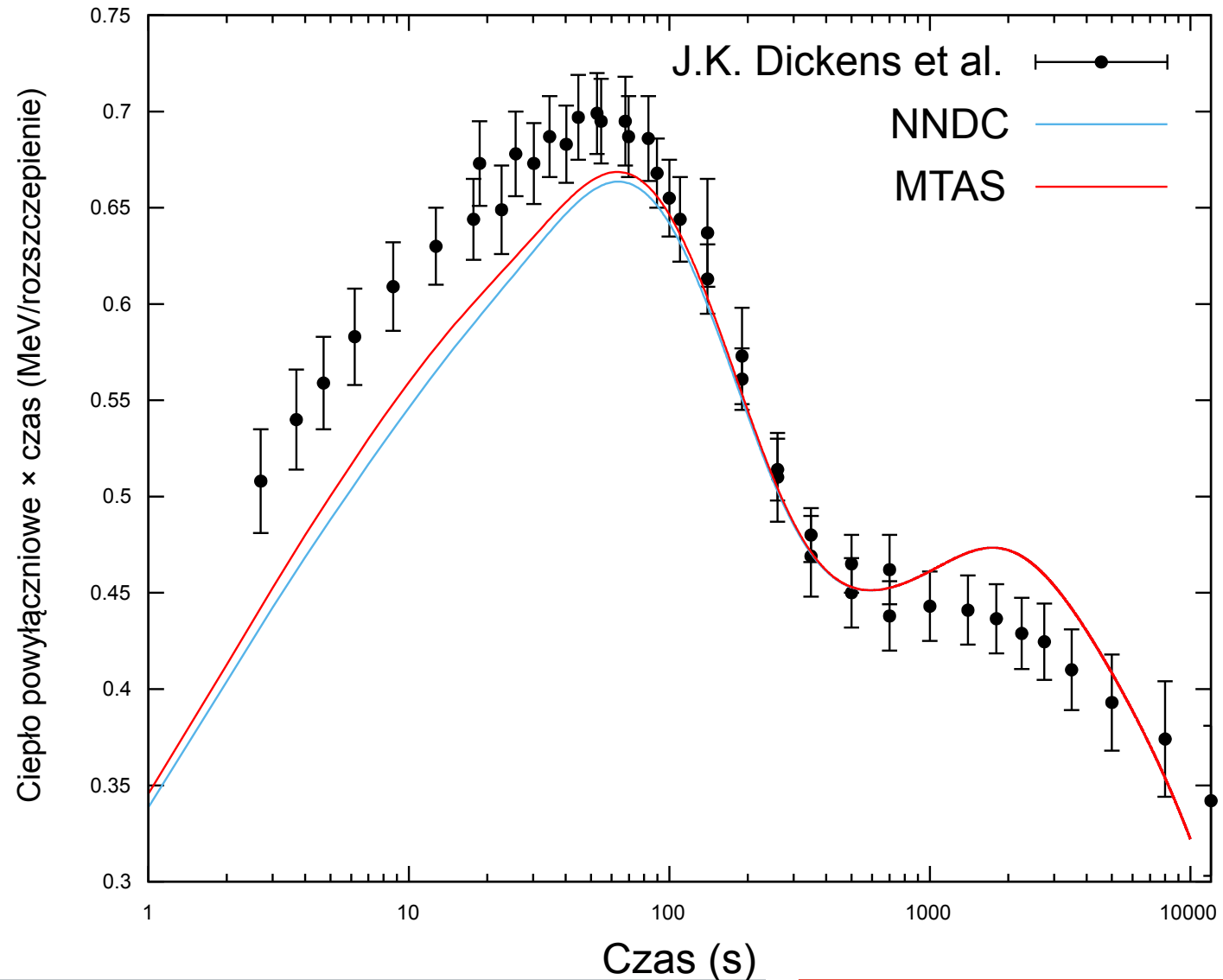
# Ciepło powyłączeniowe - wpływ elektronów

$$\overline{E}_{LP}^i = \sum_{j=1}^K \overline{E}_{\beta}^j I_{\beta}^j$$

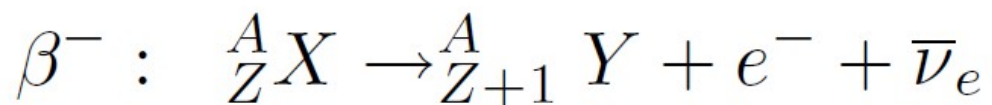


# Ciepło powyłączeniowe - wpływ komponentu elektromagnetycznego

$$\overline{E}_{EM}^i = \sum_{j=1}^K E_j I_{\beta}^j$$

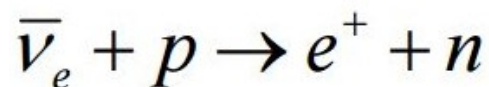


# Anomalia antyneutrin reaktorowych



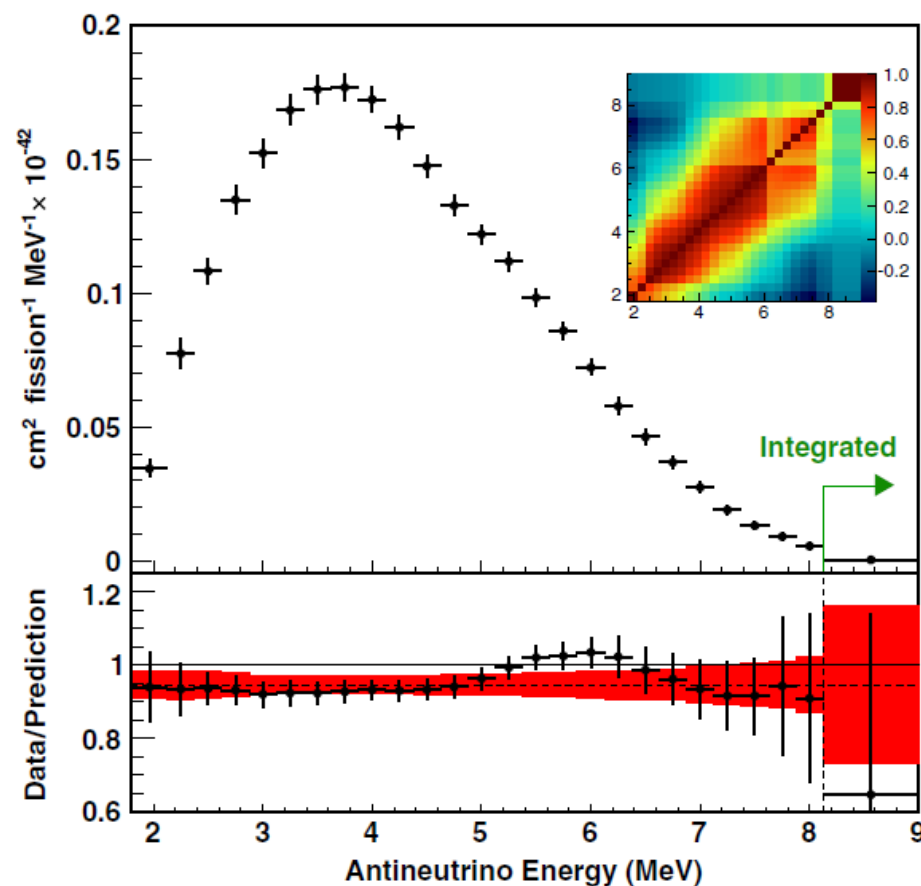
Zmierzone widmo antyneutrin elektronowych z reaktora zawiera ich ~6% mniej w porównaniu do przewidywań teoretycznych.

Antyneutrina elektronowe wykrywa się dzięki odwrotnemu rozpadowi beta. Próg na reakcję to 1.8 MeV.



1.8 MeV

$$E_{\bar{\nu}} \cong E_{e^+} + E_n + \overbrace{(M_n - M_p)} + m_{e^+}$$



Daya Bay Collaboration (2016)



# Wpływ na antyneutrino z rozpadu $^{87}\text{Br}$

**czarna przerywana** - przekrój czynny na odwrotny rozpad  $\beta$

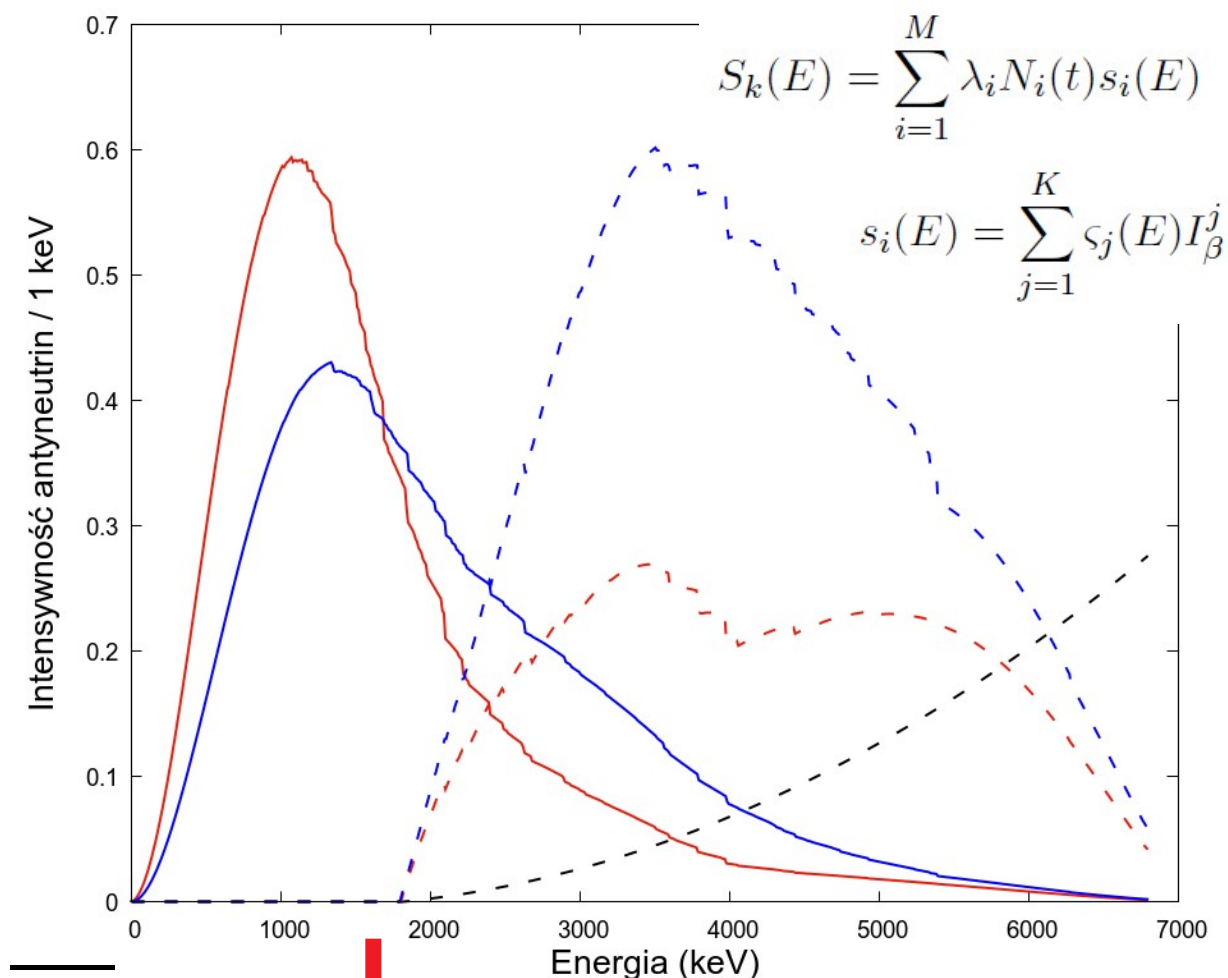
**czzerwona** - analiza, rozkład energii antyneutrino elektronowych

**niebieski** - baza danych NNDC, rozkład energii antyneutrino elektronowych

**linie przerywane** - rozkład energii \* przekrój czynny

Całkowity przekrój czynny na oddziaływanie z materią ( $10^{-43} \text{ cm}^2 \text{ rozszczepienie}^{-1}$ )

Baza danych NNDC	1.79
MTAS	0.94



$\bar{\nu}_e$  47%

# Wpływ na antyneutrino z rozpadów $^{89}\text{Br}$ i $^{91}\text{Kr}$

$\bar{\nu}_e$  50%



Całkowity przekrój czynny na oddziaływanie z materią  
( $10^{-43}$  cm<sup>2</sup> rozszczepienie<sup>-1</sup>)

$\bar{\nu}_e$  22%

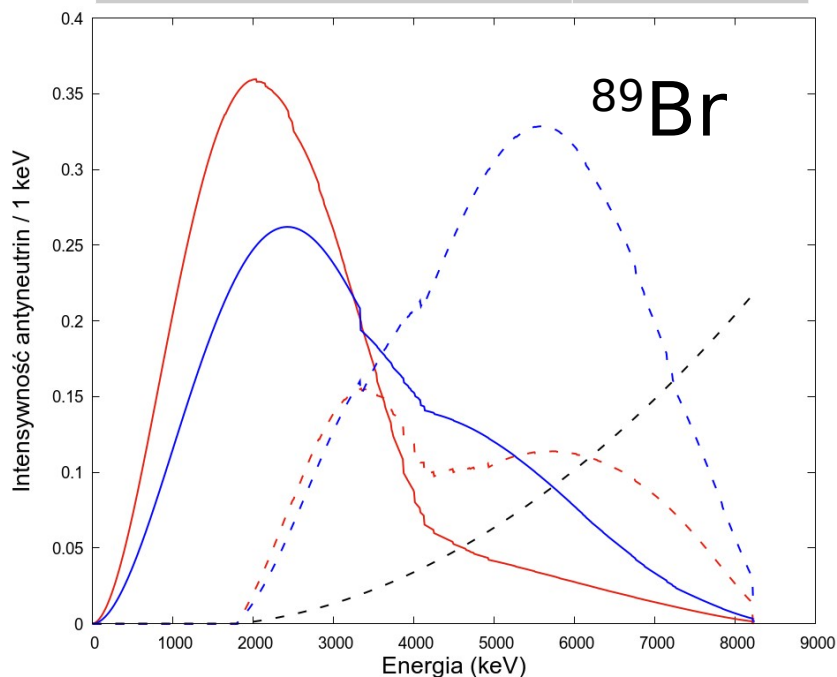


Baza danych  
NNDC

6.08

MTAS

3.03

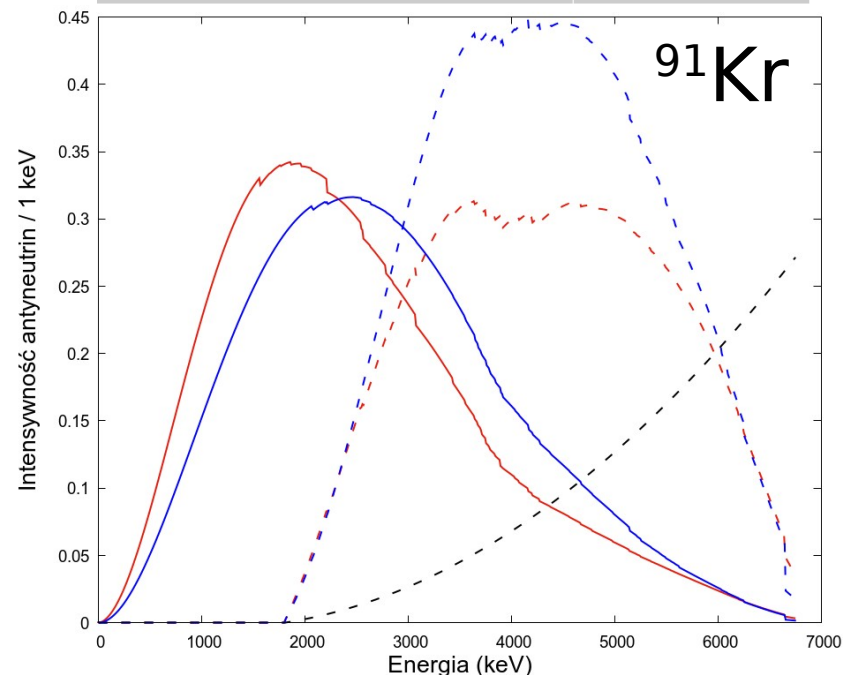


Baza danych  
NNDC

3.51

MTAS

2.75



# Dziękuję za uwagę

