

Struktura jąder z okolic podwójnie magicznego rdzenia ^{208}Pb badana przy pomocy koincydencji gamma-gamma

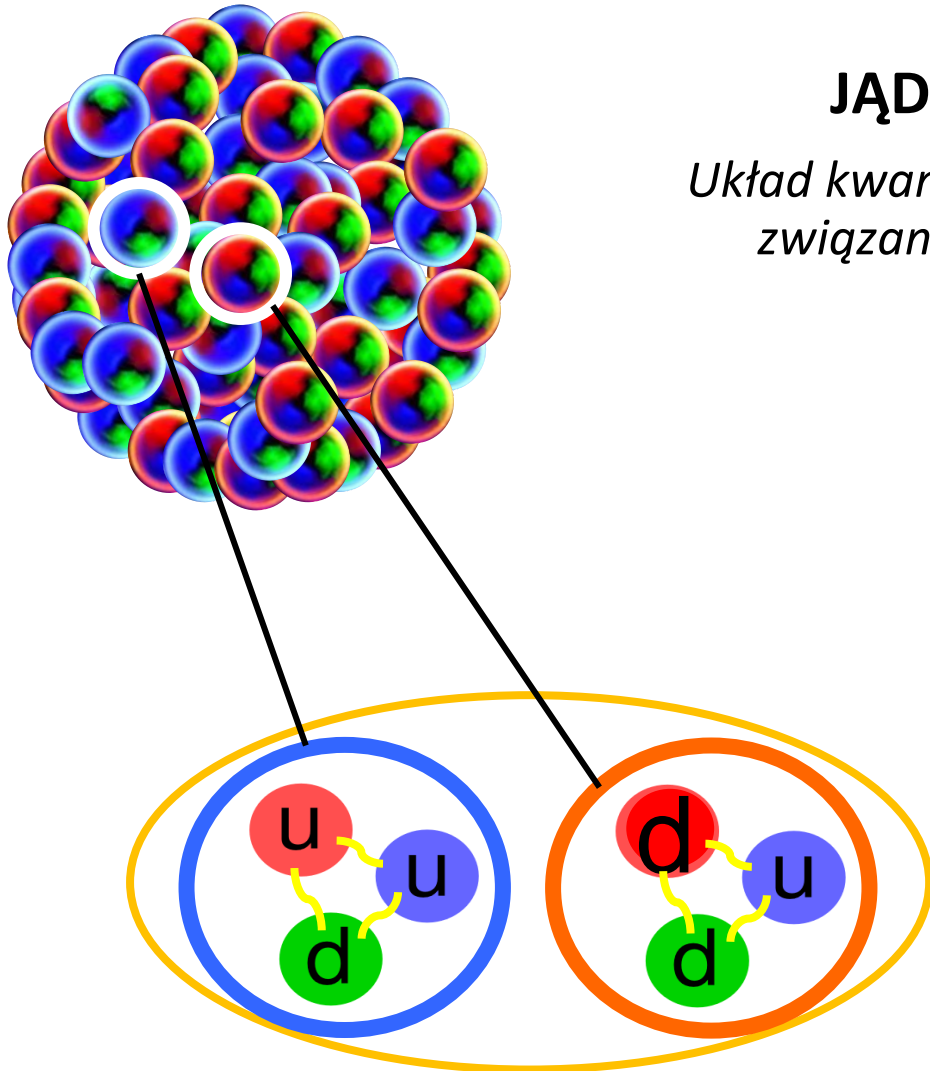
Natalia Cieplicka-Oryńczak
Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, Polska



Motywacja badań: **pozyskanie informacji na temat sił jądrowych**

JĄDRO ATOMOWE

Układ kwantowy złożony z wielu ciał związanych siłami jądrowymi

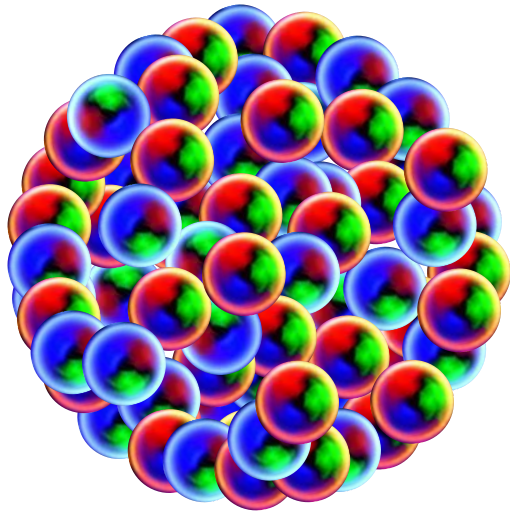


Jak możemy dowiedzieć się czegoś o efektywnych oddziaływaniach pomiędzy nukleonami?

Oddziaływanie pomiędzy swobodnymi nukleonami jest wyprowadzane na gruncie chromodynamiki kwantowej : *KWARKI i GLUONY* są podstawowymi składnikami

...ale obecność innych nukleonów modyfikuje oddziaływanie:
efektywne oddziaływania dwuciałowe

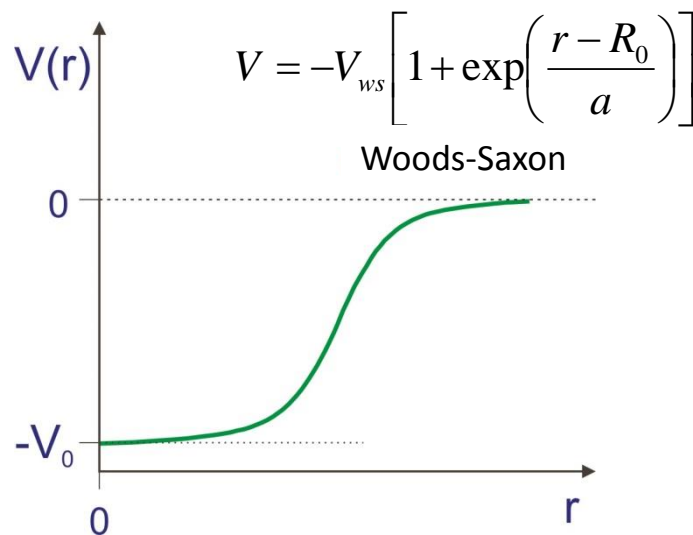
Motywacja badań: **pozyskanie informacji na temat sił jądrowych**



JĄDRO ATOMOWE

Układ kwantowy złożony z wielu ciał
związanych **siłami jądrowymi**

Nukleony podlegają działaniu
uśrednionego potencjału jądrowego



$$V = -V_{ws} \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right) \right] + V_{ls} R_0^2 \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr} \hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}}$$

Woods-Saxon Spin-orbit

r – odległość od centrum jądra
 R_0 – promień jądra
 a – stała
 V_{ws}, V_{ls} – stałe
 L – operator momentu pędu nukleonu
 S – operator spinu nukleonu

12	1i _{11/2}	
10	2g _{9/2}	
2	3p _{1/2}	126
14	1i _{13/2}	124
4	3p _{3/2}	110
6	2f _{5/2}	106
8	2f _{7/2}	100
10	1h _{9/2}	92
4	2d _{3/2}	82
2	3s _{1/2}	78
12	1h _{11/2}	76
8	1g _{7/2}	64
6	2d _{5/2}	56
10	1g _{9/2}	50
2	2p _{1/2}	40
6	1f _{5/2}	38
4	2p _{3/2}	32
8	1f _{7/2}	28
4	1d _{3/2}	20
2	2s _{1/2}	16
6	1d _{5/2}	14
2	1p _{1/2}	8
4	1p _{3/2}	6
2	1s _{1/2}	2
$N_i = 2j + 1 \quad n l j$		ΣN_i

Motywacja badań: **pozyskanie informacji na temat sił jądrowych**

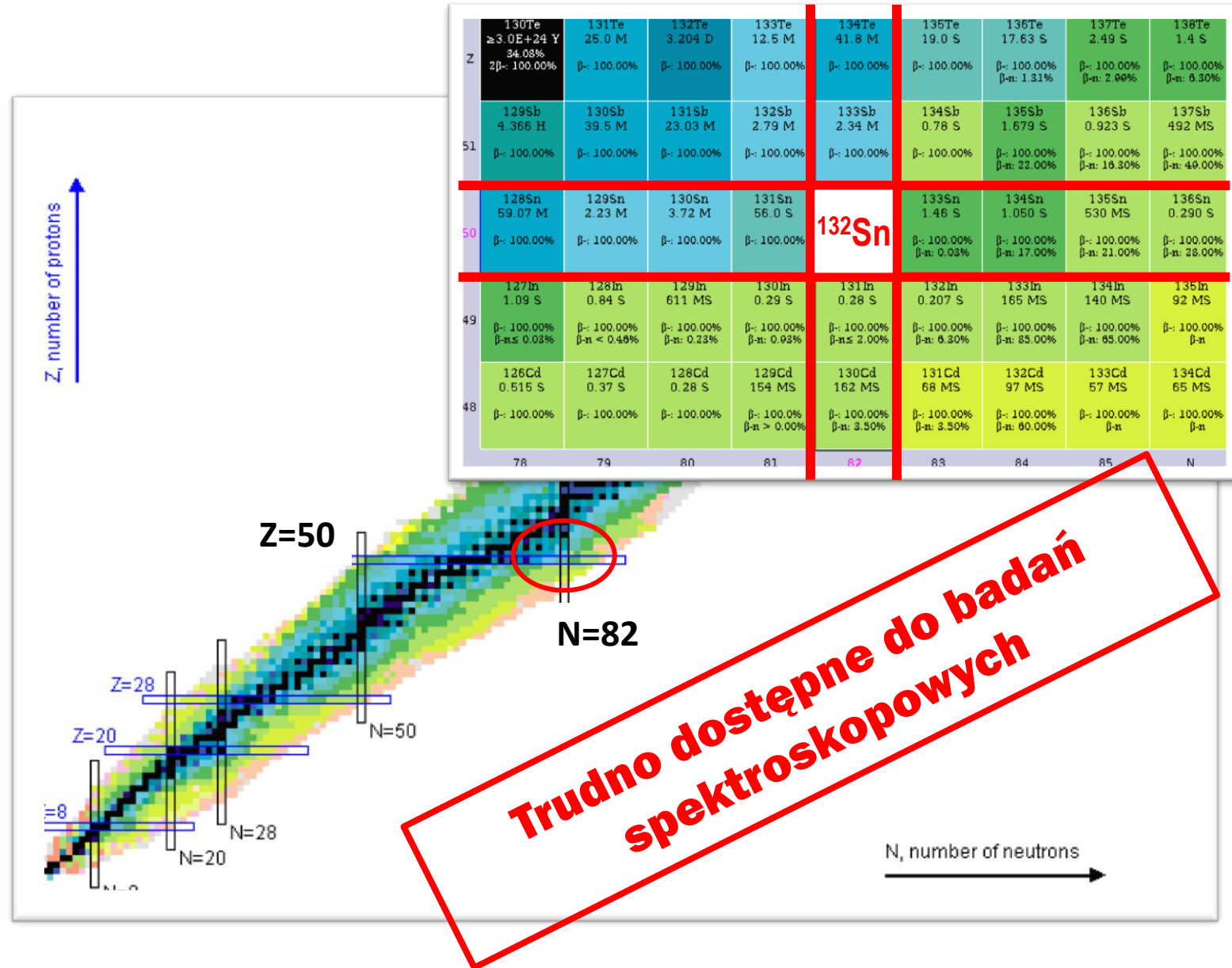


Idealny system:

2 NUKLEONY WALENCYJNE

+

PODWÓJNIE MAGICZNY RDZEŃ



Motywacja badań: pozyskanie informacji na temat sił jądrowych

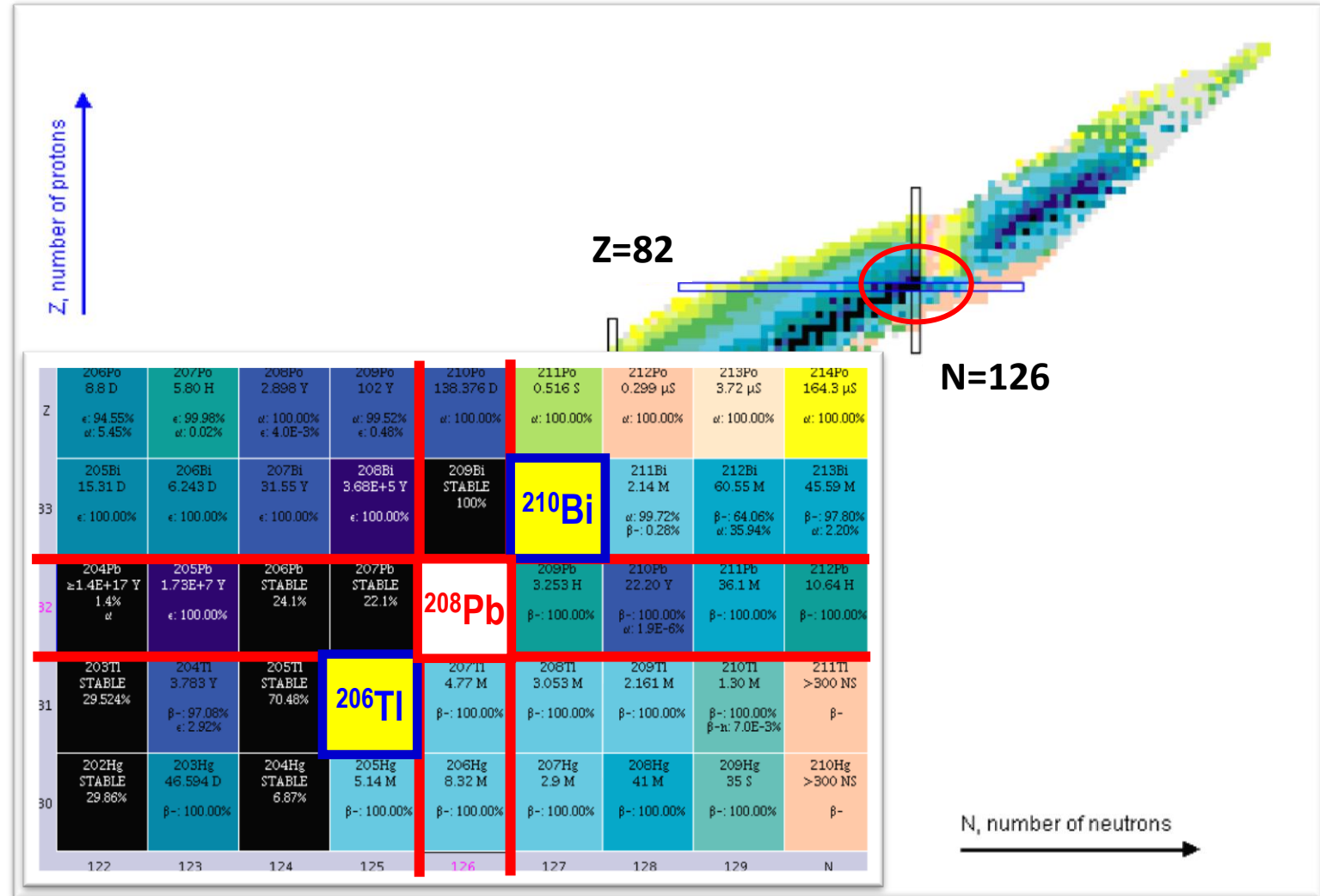


Idealny system:

2 NUKLEONY WALENCYJNE

+

PODWÓJNIE MAGICZNY RDZEŃ



Motywacja badań: **pozyskanie informacji na temat sił jądrowych**



Idealny system:

2 NUKLEONY WALENCYJNE

+

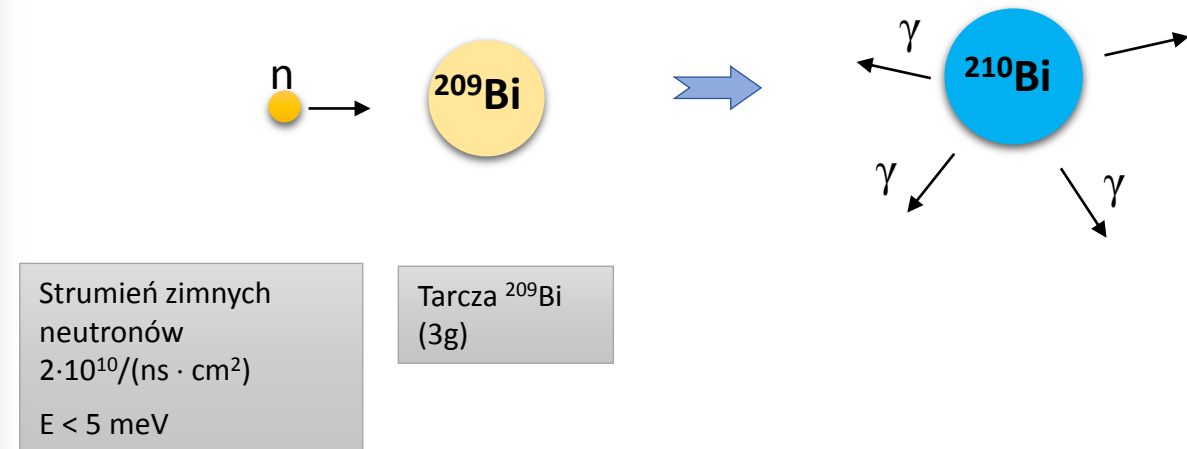
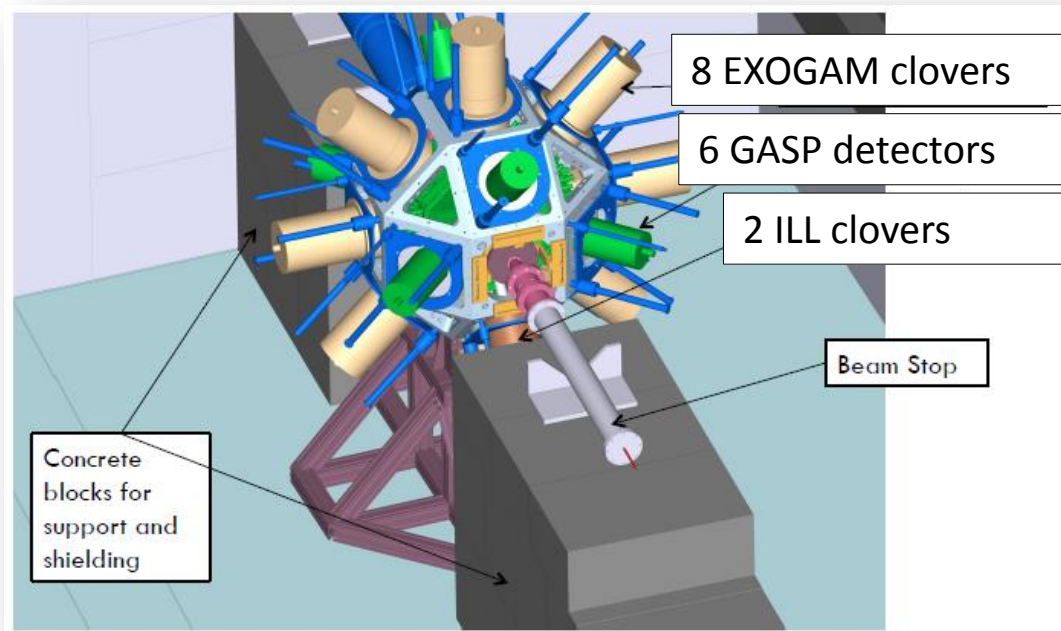
PODWÓJNIE MAGICZNY RDZEŃ

	²⁰⁶ Pb 8.8 D α: 94.55% α: 5.45%	²⁰⁷ Pb 5.80 H α: 99.98% α: 0.02%	²⁰⁸ Pb 2.898 Y α: 100.00% α: 4.0E-3%	²⁰⁹ Pb 102 Y α: 99.52% α: 0.48%	²¹⁰ Pb 138.376 D α: 100.00%	²¹¹ Pb 0.516 S α: 100.00%	²¹² Pb 0.299 μS α: 100.00%	²¹³ Pb 3.72 μS α: 100.00%	²¹⁴ Pb 164.3 μS α: 100.00%
82	²⁰⁵ Bi 15.31 D α: 100.00%	²⁰⁶ Bi 6.243 D α: 100.00%	²⁰⁷ Bi 31.55 Y α: 100.00%	²⁰⁸ Bi 3.68E+5 Y α: 100.00%	²⁰⁹ Bi STABLE 100%	²¹⁰Bi α: 99.72% β: 0.28%	²¹¹ Bi 2.14 M α: 99.72% β: 0.28%	²¹² Bi 60.55 M β: 64.06% α: 35.94%	²¹³ Bi 45.59 M β: 97.80% α: 2.20%
84	²⁰⁴ Pb ≈1.4E+17 Y α: 1.4%	²⁰⁵ Pb 1.73E+7 Y α: 100.00%	²⁰⁶ Pb STABLE 24.1%	²⁰⁷ Pb STABLE 22.1%	²⁰⁸Pb β: 100.00%	²⁰⁹ Pb 3.253 H β: 100.00%	²¹⁰ Pb 22.20 Y β: 100.00%	²¹¹ Pb 15.7 M β: 100.00%	²¹² Pb 10.64 H β: 100.00%
83	²⁰³ Tl STABLE 29.524%	²⁰⁴ Tl 3.783 Y β: 97.08% α: 2.92%	²⁰⁵ Tl STABLE 70.48%	²⁰⁶Tl α: 100.00%	²⁰⁷ Tl 4.773 Y α: 100.00%	²⁰⁸ Tl 3.053 Y α: 100.00%	²⁰⁹ Tl 15.28 Y α: 100.00%	²¹⁰ Tl 5.012 Y α: 100.00%	²¹¹ Tl >300 NS β: 100.00%
80	²⁰² Hg STABLE 29.86%	²⁰³ Hg 46.01 D α: 100.00%	²⁰⁴ Hg 9.788 Y α: 100.00%	²⁰⁵ Hg 8.269 Y α: 100.00%	²⁰⁶ Hg 8.377 Y α: 100.00%	²⁰⁷ Hg 2.9 M β: 100.00%	²⁰⁸ Hg 41 M β: 100.00%	²⁰⁹ Hg 35 S β: 100.00%	²¹⁰ Hg >300 NS β: 100.00%
	122		125	126	127	128	129		N

Potrzebne są szczegółowe dane!

^{210}Bi : eksperyment w Institut Laue-Langevin (Grenoble, 2012)

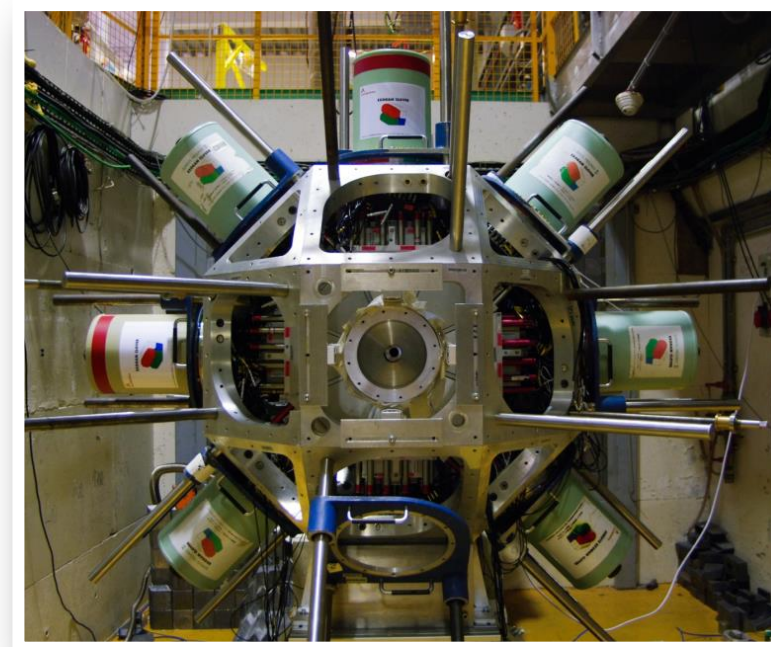
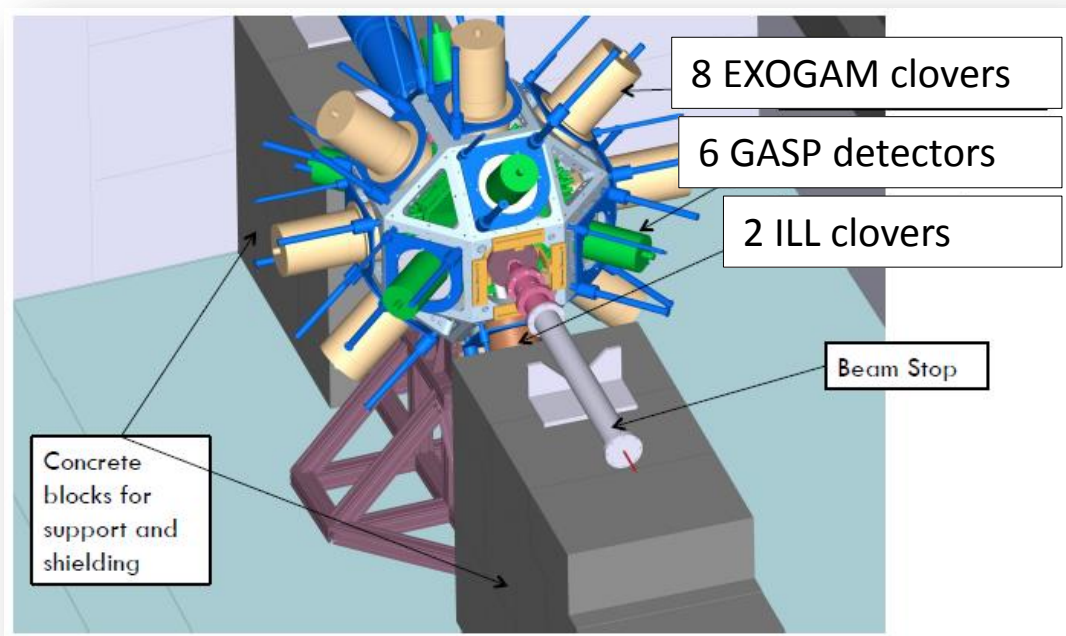
^{208}Po 2.898 Y α - 100.00% ϵ - 4.0E-3%	^{209}Po 102 Y α - 99.52% ϵ - 0.48%	^{210}Po 138.376 D α - 100.00%	^{211}Po 0.516 s α - 100.00%	^{212}Po 0.299 μs α - 100.00%
^{207}Bi 31.55 Y α - 100.00%	^{208}Bi 3.68E+5 Y α - 100.00%	^{209}Bi STABLE 100%	^{210}Bi 5.012 Y α - 99.72% β - 0.28%	^{211}Bi 2.14 M α - 99.72% β - 0.28%
^{209}Pb STABLE 24.1%	^{210}Pb STABLE 22.1%	^{208}Pb STABLE 100%	^{209}Pb 3.253 H β - 100.00%	^{210}Pb 22.20 Y β - 100.00% α - 1.5E-6%
^{208}Tl STABLE 70.48%	^{209}Tl 4.202 M β - 100.00%	^{210}Tl 4.77 M β - 100.00%	^{208}Tl 3.053 M β - 100.00%	^{209}Tl 2.161 M β - 100.00%
^{204}Hg STABLE 6.87%	^{205}Hg 5.14 M β - 100.00%	^{206}Hg 8.32 M β - 100.00%	^{207}Hg 2.9 M β - 100.00%	^{208}Hg 41 M β - 100.00%



- 16 detektorów HPGe układu EXILL:
- * 8 detektorów EXOGAM,
 - * 6 detektorów GASP
 - * 2 detektory z ILL

^{210}Bi : eksperyment w Institut Laue-Langevin (Grenoble, 2012)

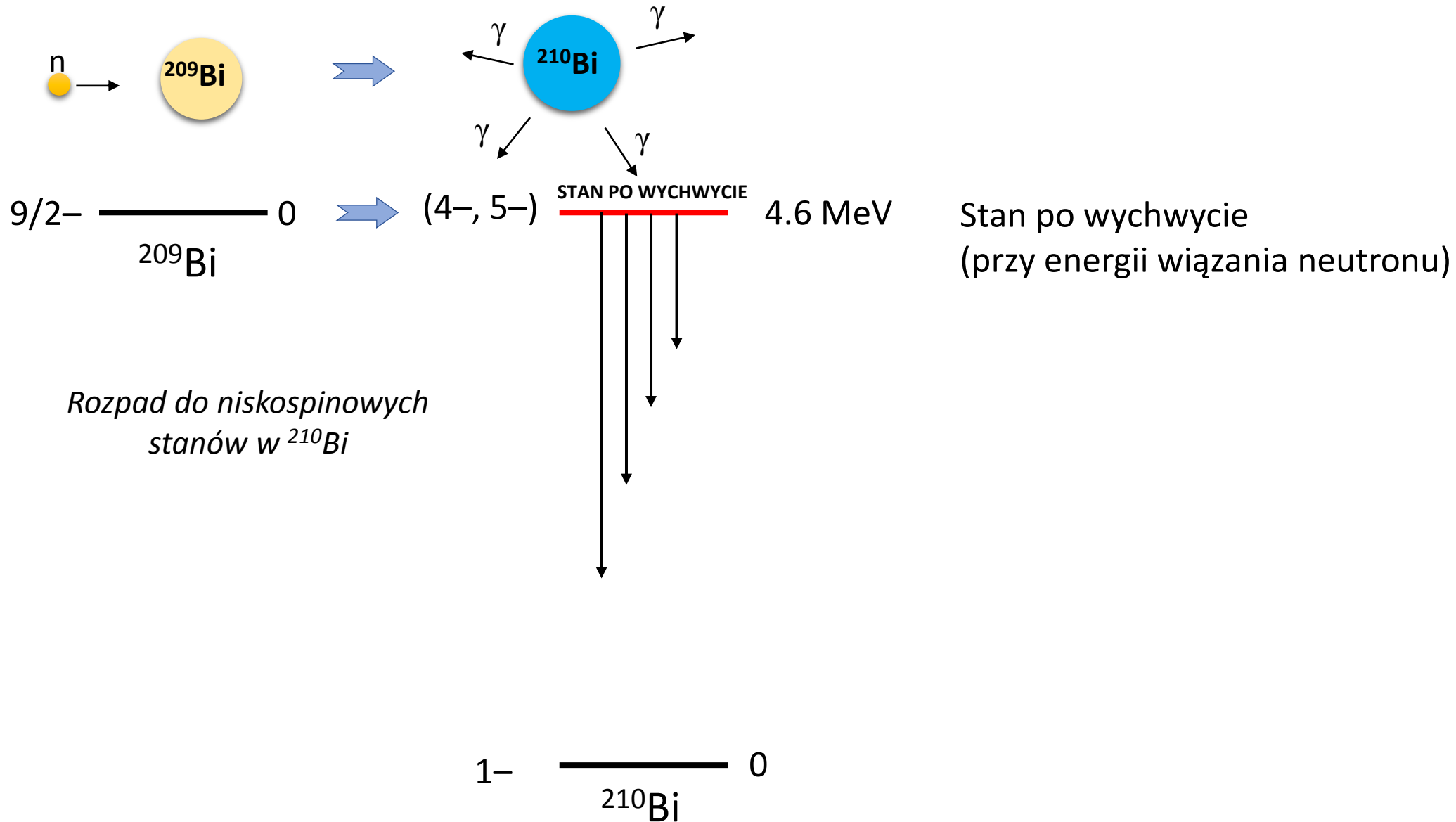
^{208}Po 2.898 Y α - 100.00% ϵ - 4.0E-3%	^{209}Po 102 Y α - 99.52% ϵ - 0.48%	^{210}Po 138.376 D α - 100.00%	^{211}Po 0.516 s α - 100.00%	^{212}Po 0.299 μs α - 100.00%
^{207}Bi 31.55 Y α - 100.00%	^{208}Bi 3.68E+5 Y α - 100.00%	^{209}Bi STABLE 100%	^{210}Bi 5.012 Y α - 99.72% β - 0.28%	^{211}Bi 2.14 M α - 99.72% β - 0.28%
^{209}Pb STABLE 24.1%	^{210}Pb STABLE 22.1%	^{210}Pb STABLE 100%	^{211}Pb 9.253 H β - 100.00%	^{212}Pb 10.64 H β - 100.00% α - 1.5E-6%
^{208}Tl STABLE 70.48%	^{208}Tl 4.202 M β - 100.00%	^{209}Tl 4.77 M β - 100.00%	^{210}Tl 3.053 M β - 100.00%	^{211}Tl 2.161 M β - 100.00%
^{204}Hg STABLE 6.87%	^{205}Hg 5.14 M β - 100.00%	^{206}Hg 8.32 M β - 100.00%	^{207}Hg 2.9 M β - 100.00%	^{208}Hg 41 M β - 100.00%

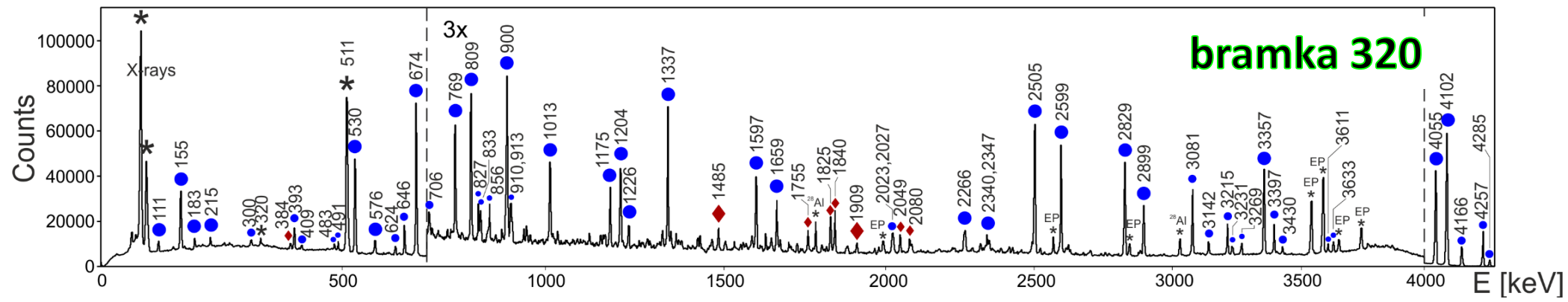


- 16 detektorów HPGe układu EXILL:
- * 8 detektorów EXOGAM,
 - * 6 detektorów GASP
 - * 2 detektory z ILL

8 detektorów EXOGAM ustawiono wokół tarczy (co 45°) – umożliwiło to pomiary korelacji kątowych kwantów gamma

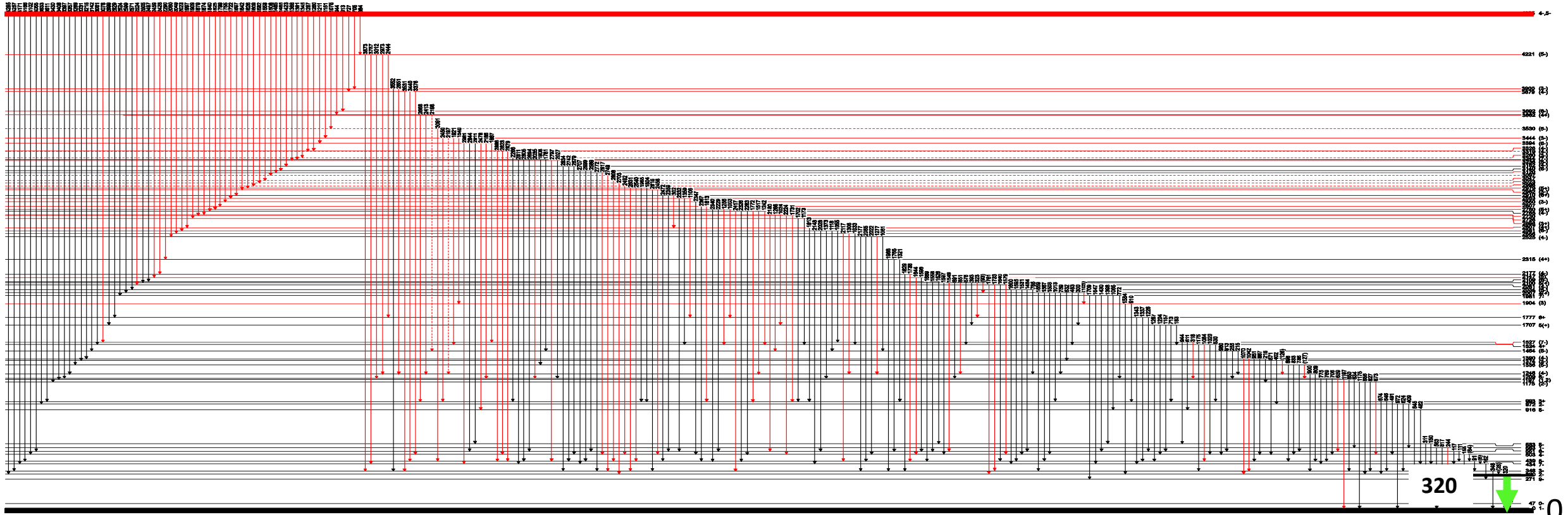
^{210}Bi : eksperyment w Institut Laue-Langevin (Grenoble, 2012)





208Po 2.808 Y α- 100.00% ε- 4.0E-3%	209Po 102 Y α- 99.52% ε- 0.48%	210Po 138.376 D α- 100.00%	211Po 0.516 s α- 100.00%	212Po 0.299 μs α- 100.00%
207Bi 31.55 Y α- 100.00%	208Bi 3.68E+5 Y α- 100.00%	209Bi STABLE 100%	210Bi 5.012 Y α- 100.00%	211Bi 2.14 M α- 99.72% β- 0.28%
209Pb STABLE 24.1%	207Pb STABLE 22.1%	208Pb STABLE 100%	209Pb 3.253 H β- 100.00%	210Pb 5.41 M β- 100.00%
205Tl STABLE 70.48%	206Tl 4.202 M β- 100.00%	207Tl 4.77 M β- 100.00%	208Tl 3.053 M β- 100.00%	209Tl 2.161 M β- 100.00%
204Hg STABLE 6.87%	205Hg 5.14 M β- 100.00%	206Hg 8.32 M β- 100.00%	207Hg 2.9 M β- 100.00%	208Hg 41 M β- 100.00%

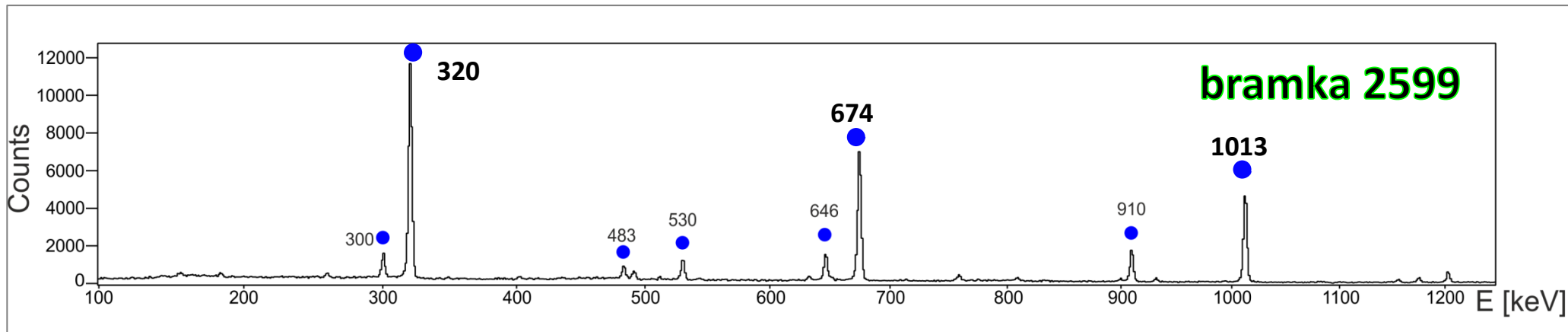
4605



^{210}Bi

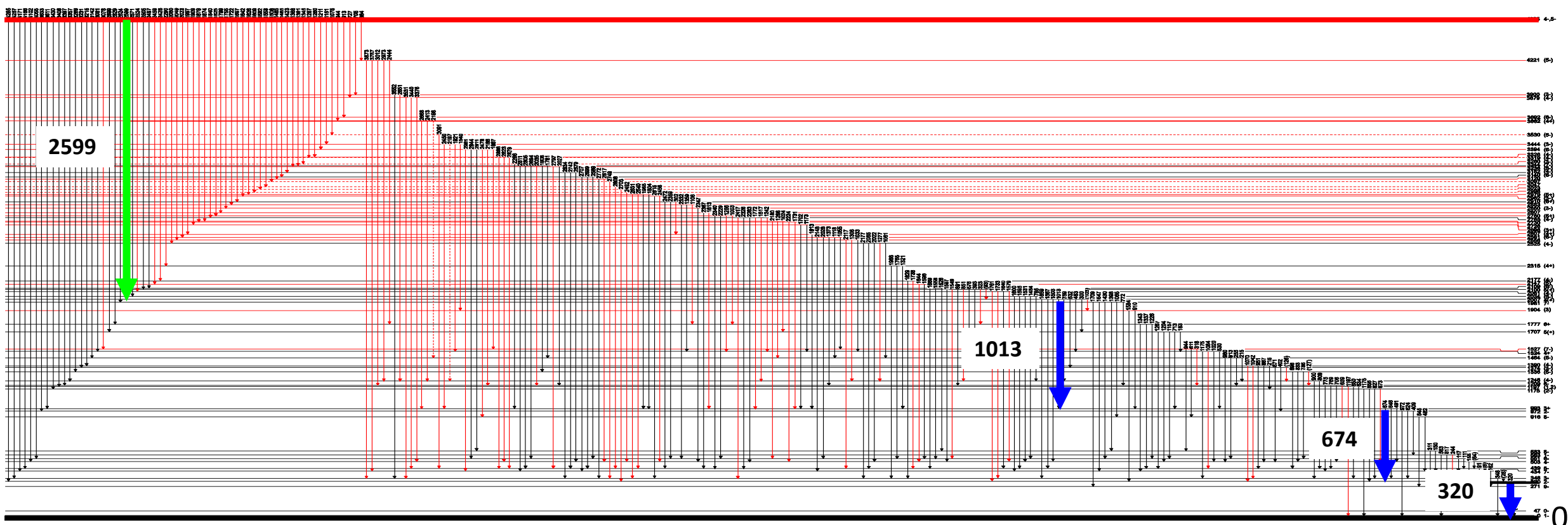
320

0

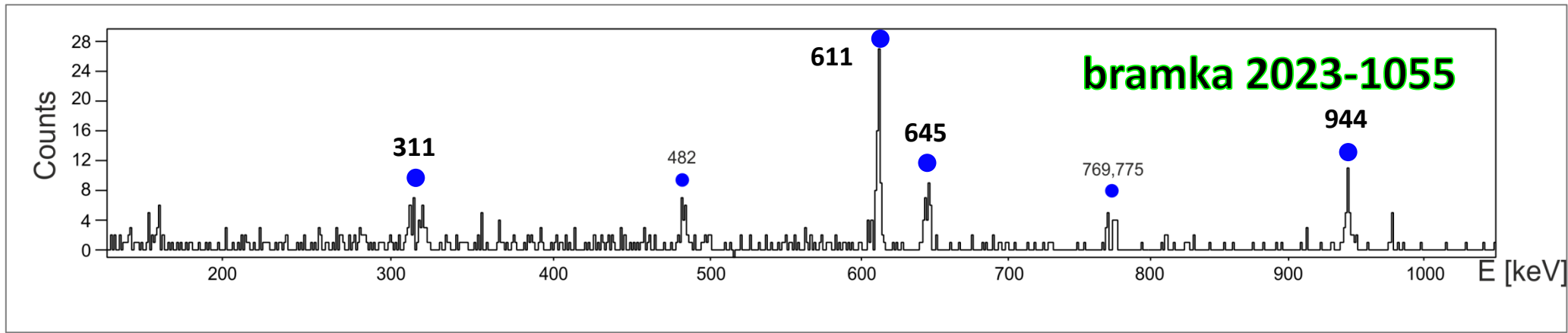


208Po 2.898 Y α- 100.00% ε- 4.0E-3%	209Po 102 Y α- 99.52% ε- 0.48%	210Po 138.376 D α- 100.00%	211Po 0.516 s α- 100.00%	212Po 0.299 μs α- 100.00%
207Bi 31.55 Y α- 100.00%	208Bi 3.68E+5 Y α- 100.00%	209Bi STABLE 100%	210Bi	211Bi 2.14 M α- 99.72% β- 0.28%
204Pb STABLE 24.1%	207Pb STABLE 22.1%	208Pb		209Pb 3.253 H β- 100.00%
205Tl STABLE 70.48%	206Tl 4.202 M β- 100.00%	207Tl 4.77 M β- 100.00%	208Tl 3.053 M β- 100.00%	209Tl 2.161 M β- 100.00%
204Hg STABLE 6.87%	205Hg 5.14 M β- 100.00%	206Hg 8.32 M β- 100.00%	207Hg 2.9 M β- 100.00%	208Hg 41 M β- 100.00%

4605

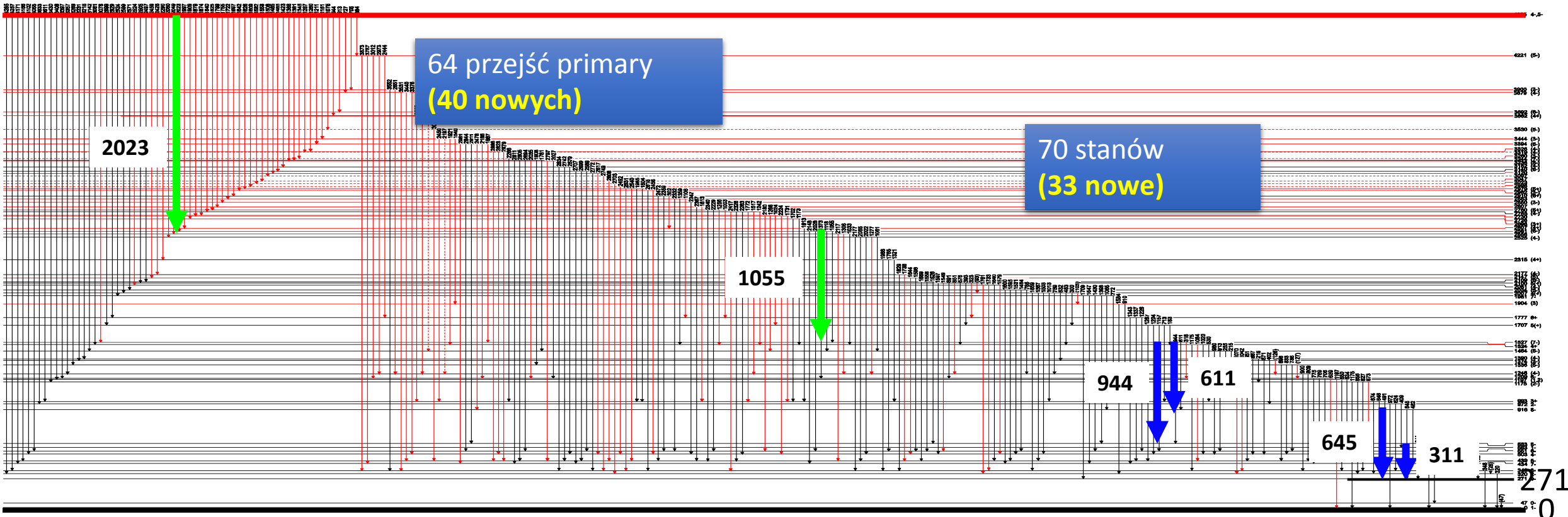


^{210}Bi



208Po 2.808 Y α- 100.00% ε- 4.0E-3%	209Po 102 Y α- 99.52% ε- 0.48%	210Po 138.376 D α- 100.00%	211Po 0.516 s α- 100.00%	212Po 0.299 μs α- 100.00%
207Bi 31.55 Y α- 100.00%	208Bi 3.68E+5 Y α- 100.00%	209Bi STABLE 100%	210Bi	211Bi 2.14 M α- 99.72% β- 0.28%
204Pb STABLE 24.1%	207Pb STABLE 22.1%	208Pb		209Pb 3.253 H β- 100.00%
205Tl STABLE 70.48%	206Tl 4.202 M β- 100.00%	207Tl 4.77 M β- 100.00%	208Tl 3.053 M β- 100.00%	209Tl 2.161 M β- 100.00%
204Hg STABLE 6.87%	205Hg 5.14 M β- 100.00%	206Hg 8.32 M β- 100.00%	207Hg 2.9 M β- 100.00%	208Hg 41 M β- 100.00%

4605



Korelacje kątowe kwantów γ w ^{210}Bi

Funkcja korelacji kątowych pary kwantów γ będących w koincydencji ze sobą i łączących stany o spinach $J_i \rightarrow J \rightarrow J_f$ jest wyrażana jako:

$$W(\Theta) = 1 + A_2 P_2(\cos \Theta) + A_4 P_4(\cos \Theta)$$

Θ – kąt pomiędzy kierunkami emisji dwóch kwantów γ

$P_n(\cos \Theta)$ – wielomiany Legendre'a

$A_n = q_n A(1)A(2)$ – współczynniki zależące od współczynnika atenuacji q_n , multipolowości przejść γ oraz spinów stanów wzbudzonych

$$A_n(k) = \frac{1}{1 + \delta_k^2} [F_n(j_i L_i L_i j) + 2\delta_k F_n(j_i L_i L'_i j) + \delta_k^2 F_n(j_i L'_i L'_i j)]$$

Współczynnik zmieszania: $\delta^2 \equiv \frac{I_{L'_1}}{I_{L_1}}$

Współczynniki atenuacji:

$$q_2 = 0.86(2)$$

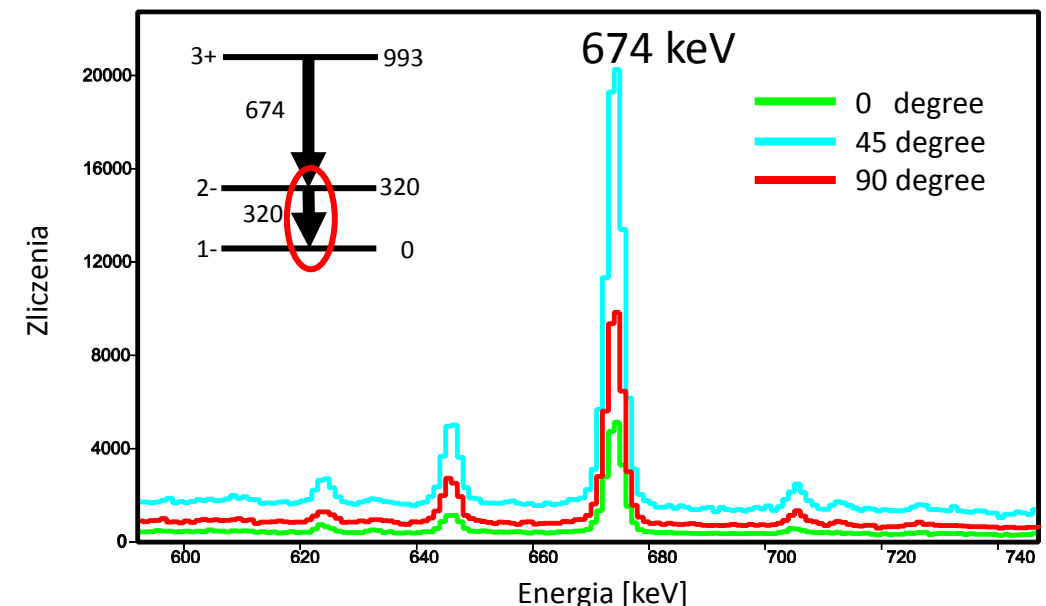
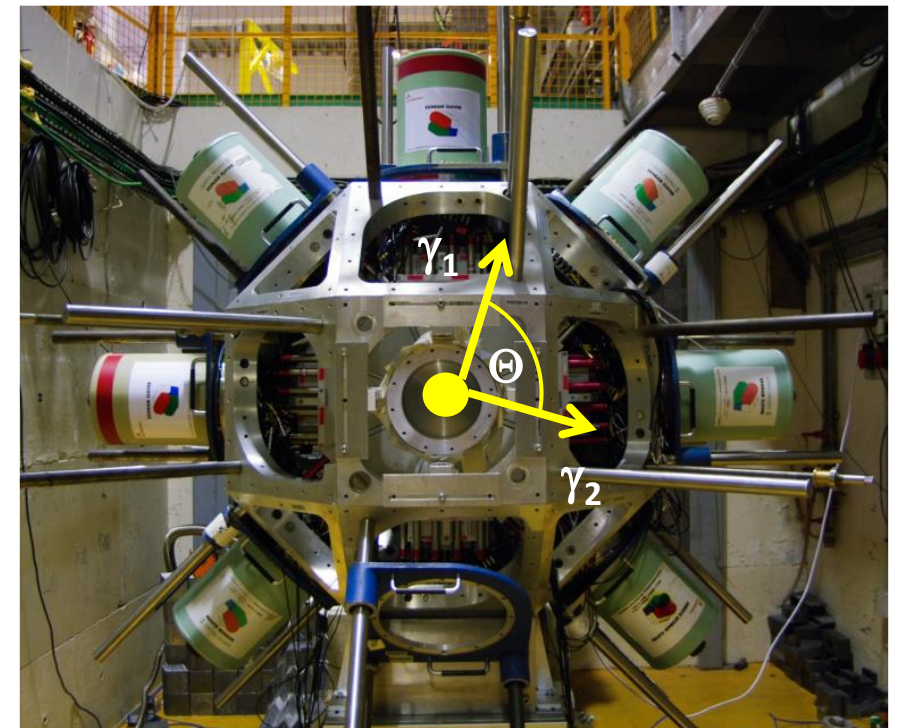
$$q_4 = 0.60(3)$$

Normalizacja: liczba par detektorów, wydajność

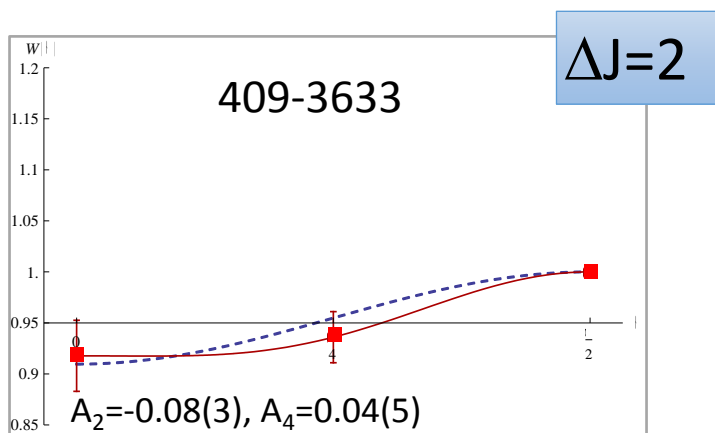
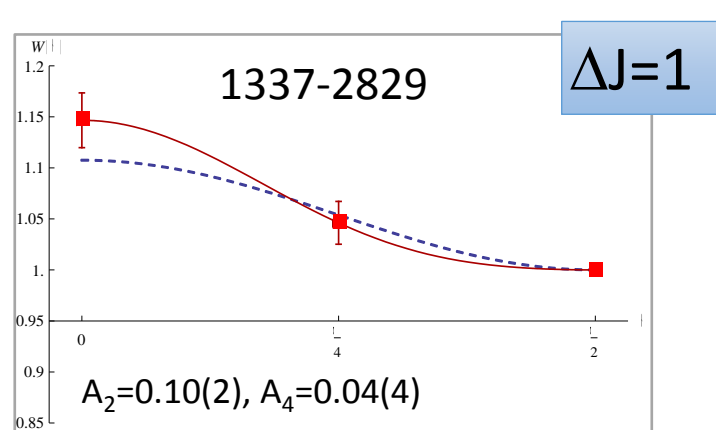
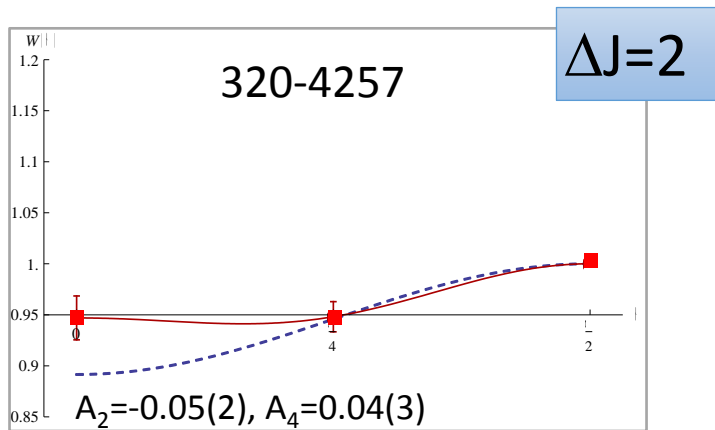
$$\text{norm0} = 0.495(5) \quad (4 \text{ kombinacje})$$

$$\text{norm45} = 2.020(12) \quad (16 \text{ kombinacji})$$

$$\text{norm90} = 1 \quad (8 \text{ kombinacji})$$

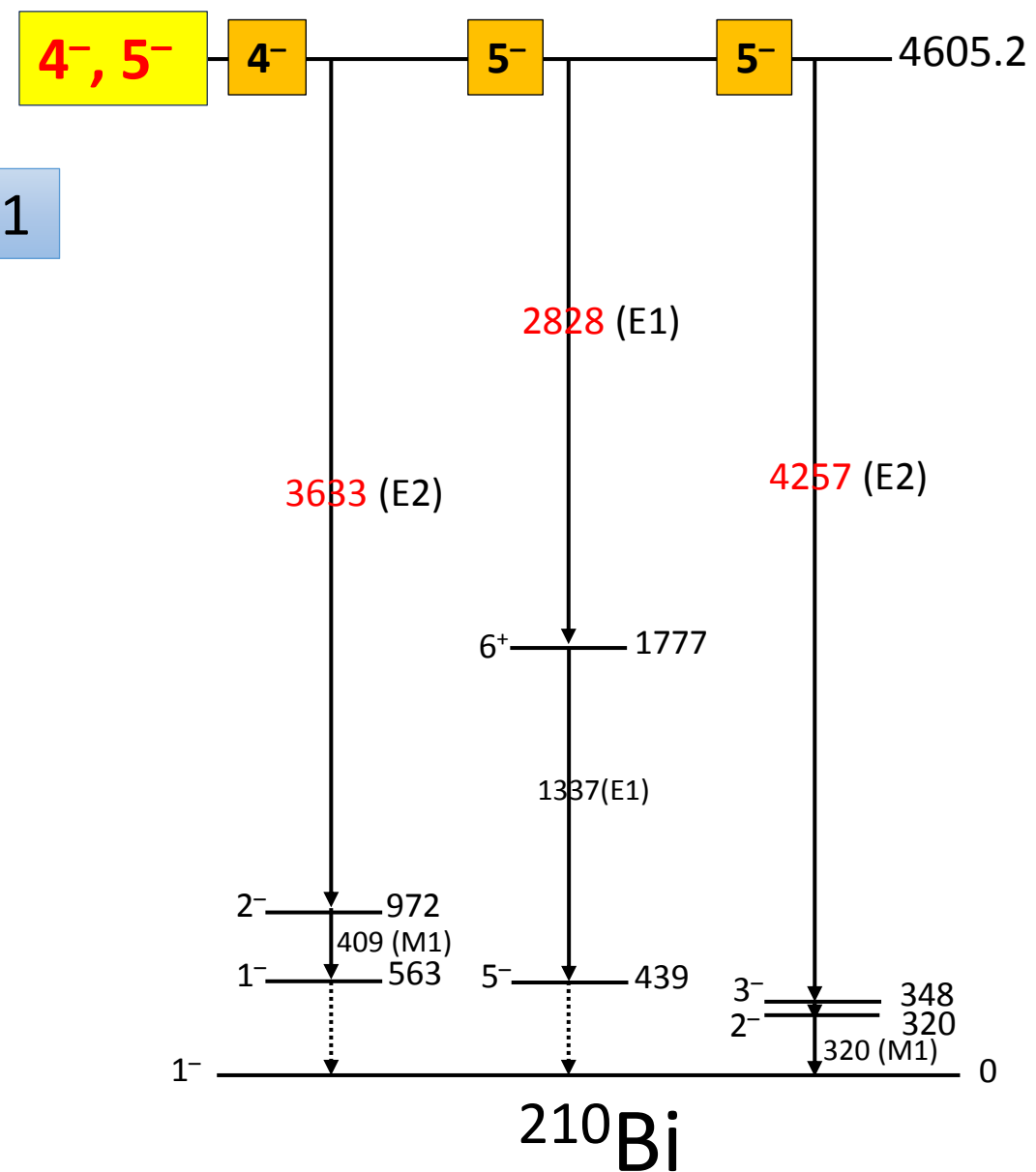


Korelacje kątowe kwantów γ w ^{210}Bi – spin stanu po wychwycie



eksperyment

teoria



Multipolowość głównego przejścia do stanu podstawowego w ^{210}Bi

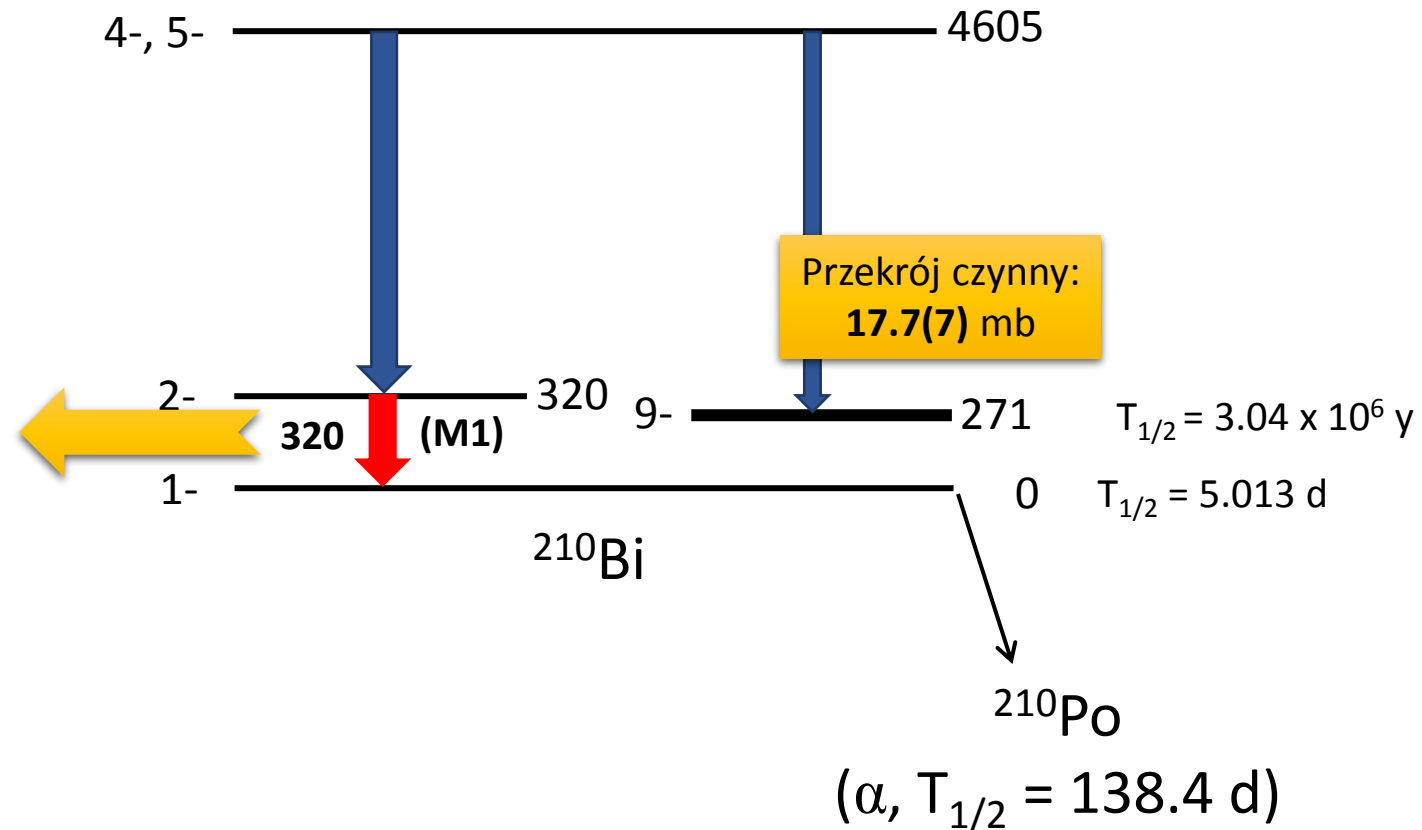
Nie potwierdzona eksperymentalnie multipolowość M1 linii **320 keV**

A. Borella et al., Nucl. Phys. A 850, 1 (2011)

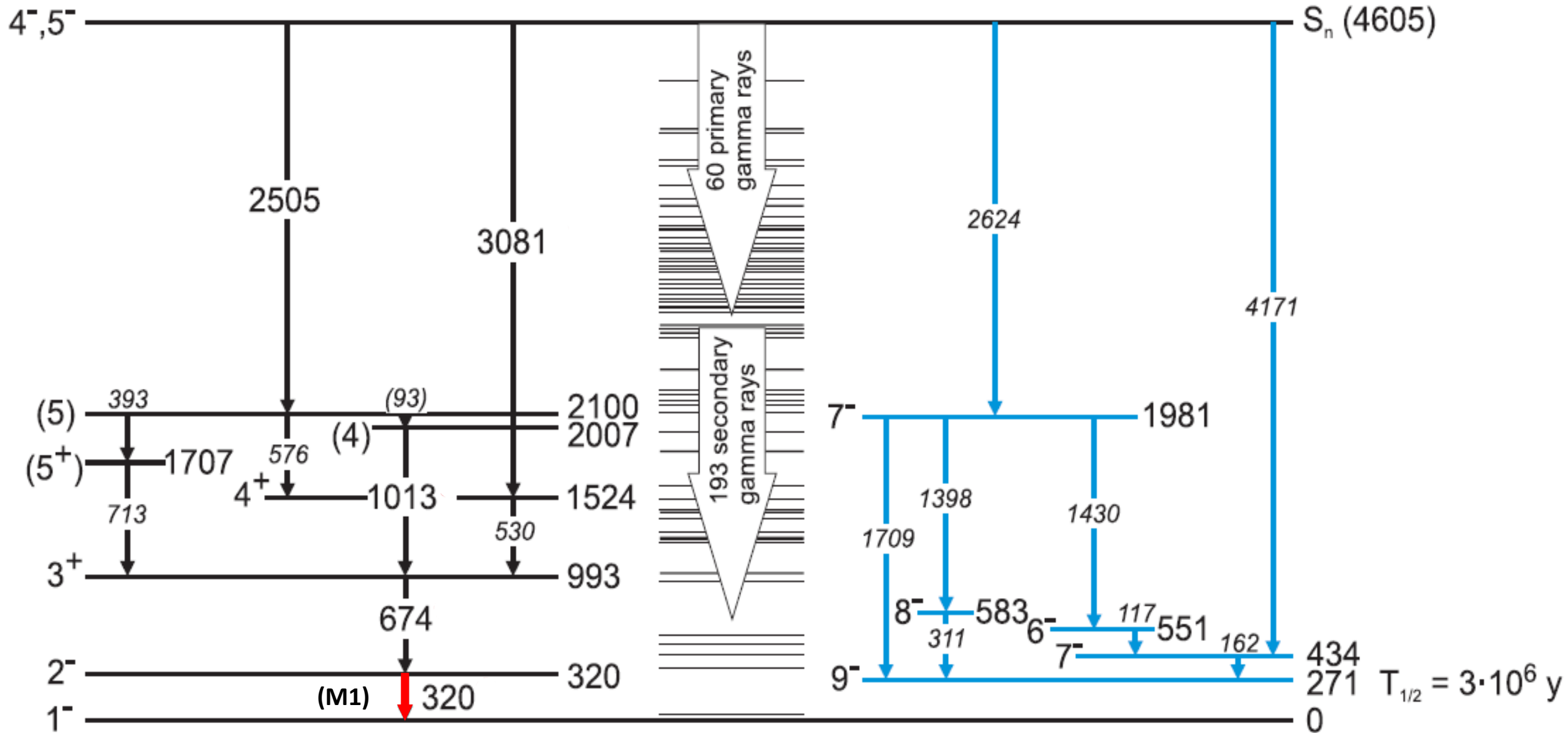
A. Borella et al., AIP Conf. Proc. 769, 648 (2005)

Przekrój czynny reakcji $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ do stanu podstawowego [mb]		
100% M1	50% M1+50 % E2	100% E2
21.5(9)	19.3(8)	17.2(7)

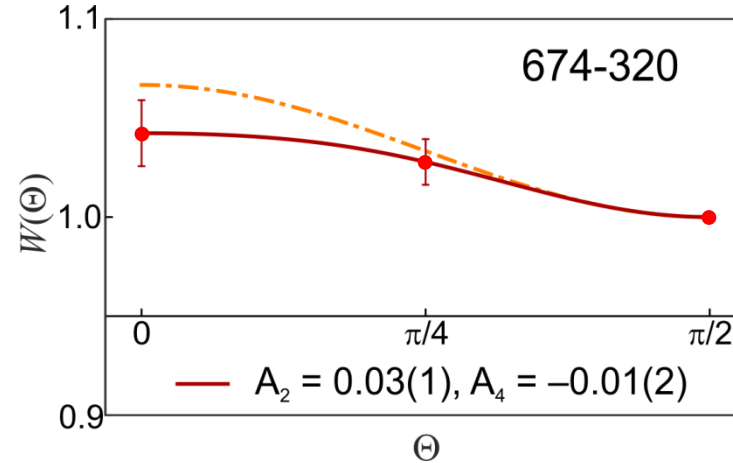
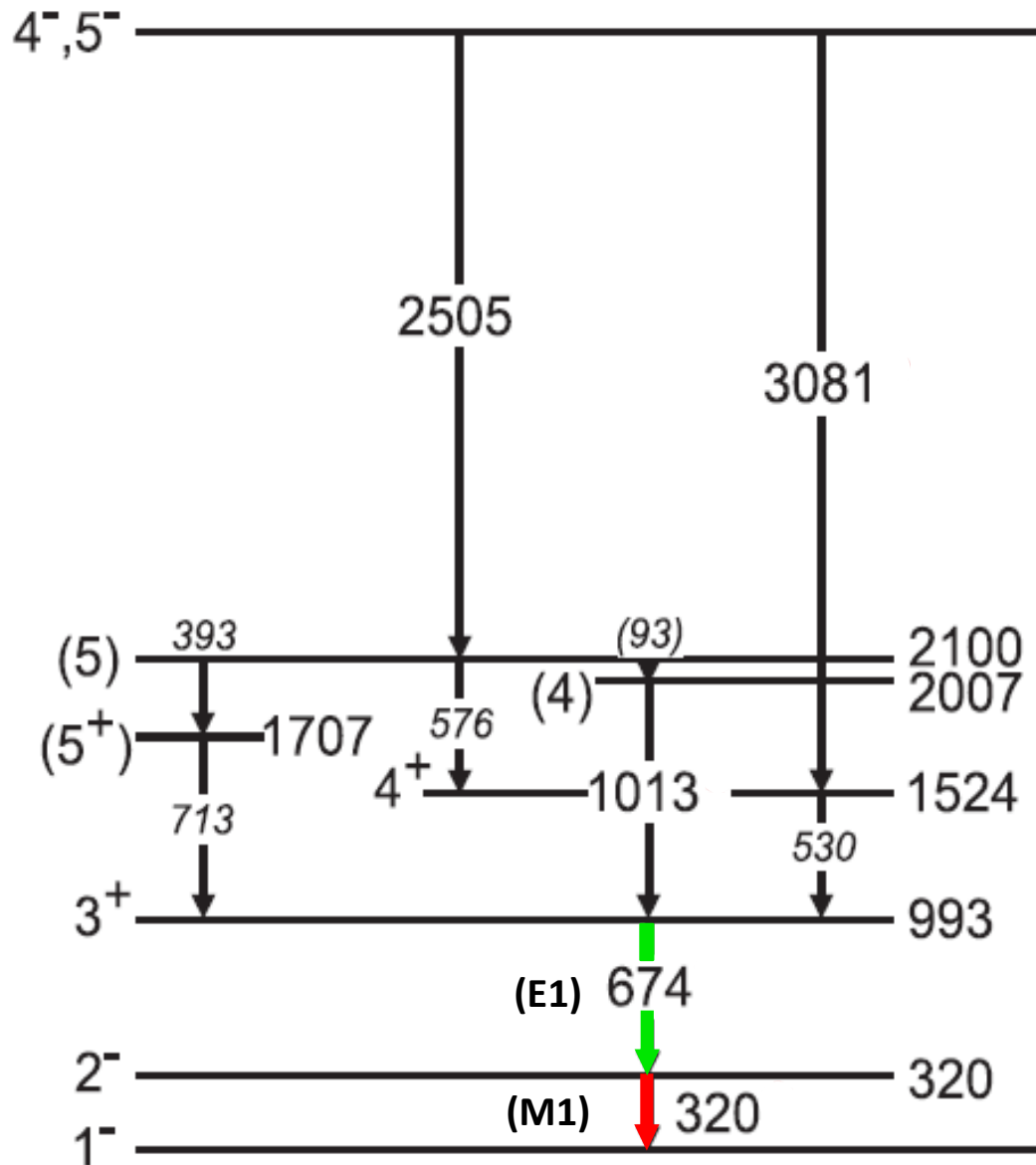
Przekrój czynny na wychwyty neutronów termicznych prowadzący do stanu podstawowego w ^{210}Bi zależy od współczynnika konwersji przejścia 320 keV



Multipolowość głównego przejścia do stanu podstawowego w ^{210}Bi

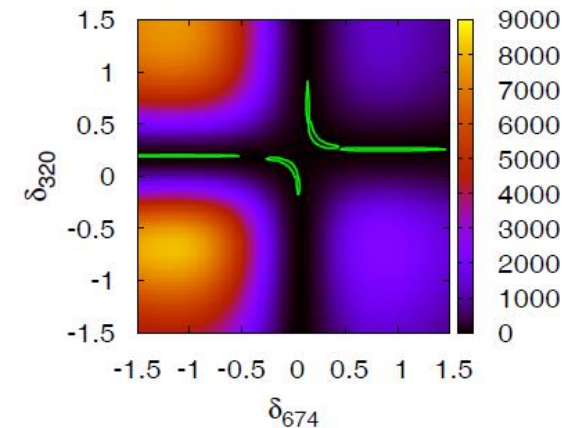
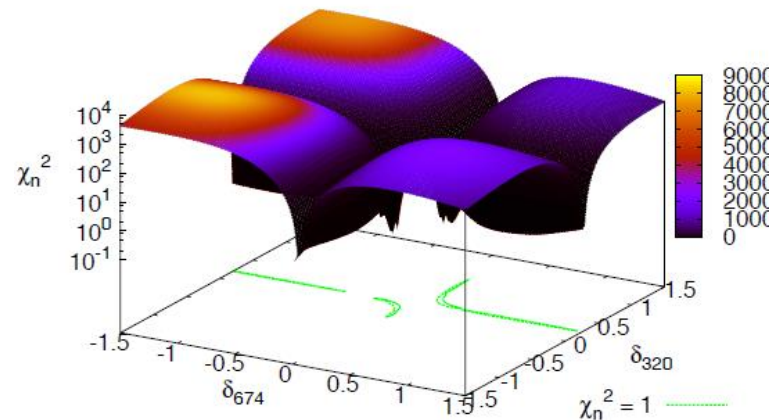


Multipolowość głównego przejścia do stanu podstawowego w ^{210}Bi

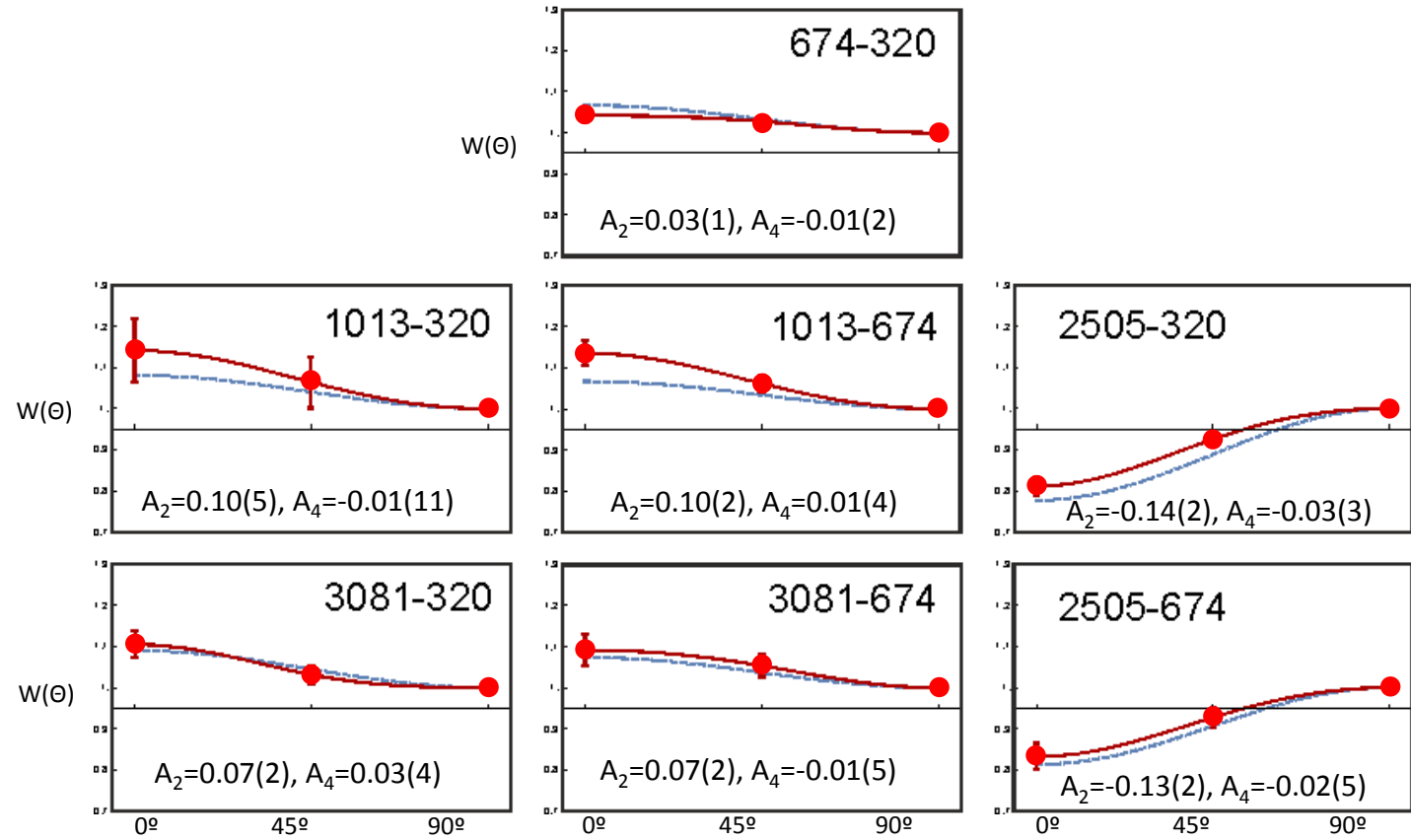
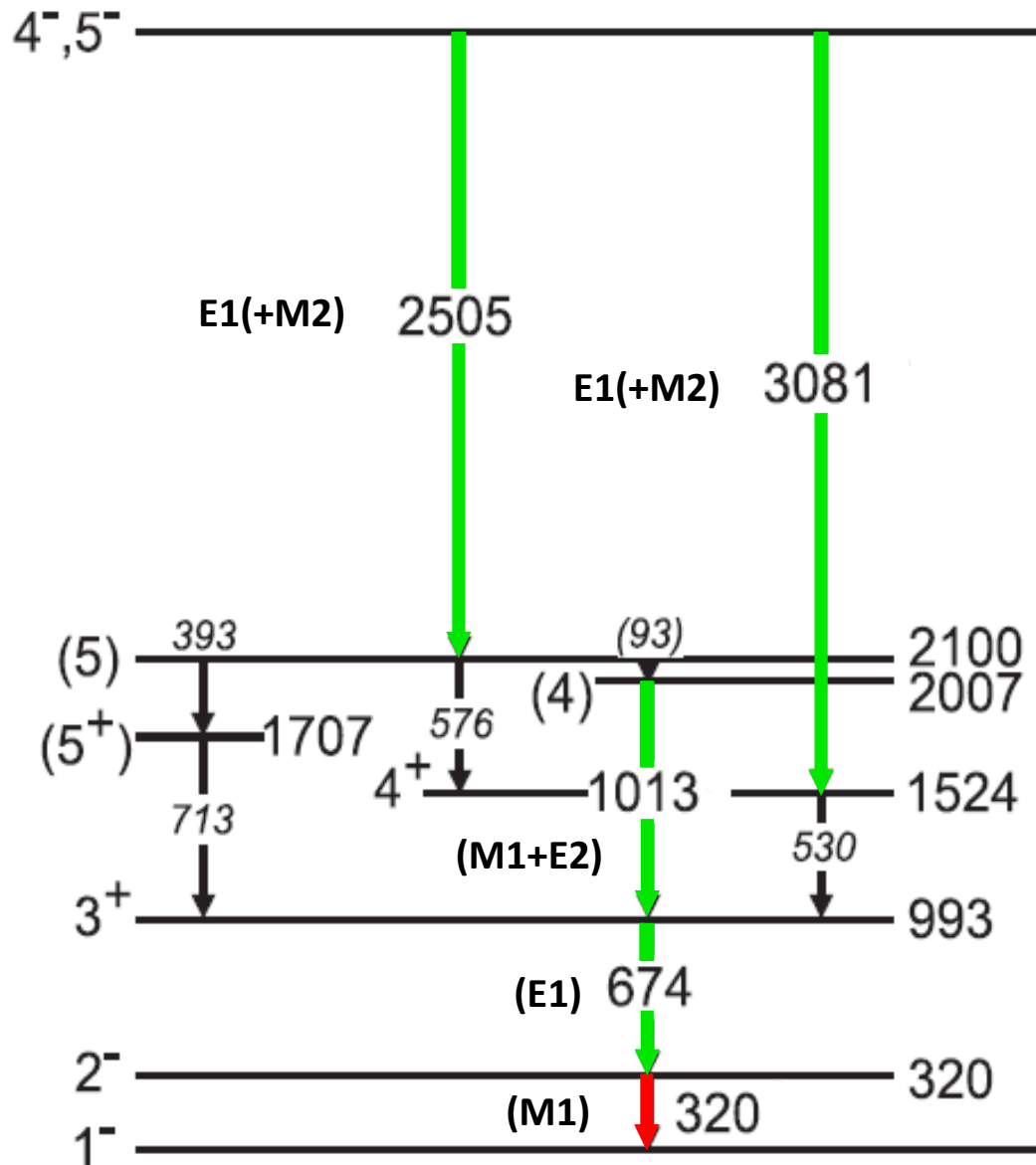


- Fit do punktów eksperymentalnych
- - - Teoria dla czystych przejść E1-M1

$$\chi^2 = \left(\frac{A_2 - A_2^{th}(\delta_1, \delta_2)}{\Delta A_2} \right)^2 + \left(\frac{A_4 - A_4^{th}(\delta_1, \delta_2)}{\Delta A_4} \right)^2$$



Multipolowość głównego przejścia do stanu podstawowego w ^{210}Bi



$$\chi_n^2 = \left(\frac{A_{n2} - A_{n2}^{th}(\delta_{n1}, \delta_{n2})}{\Delta A_{n2}} \right)^2 + \left(\frac{A_{n4} - A_{n4}^{th}(\delta_{n1}, \delta_{n2})}{\Delta A_{n4}} \right)^2$$

$$\chi_{\Sigma}^2 = \sum_n \chi_n^2$$

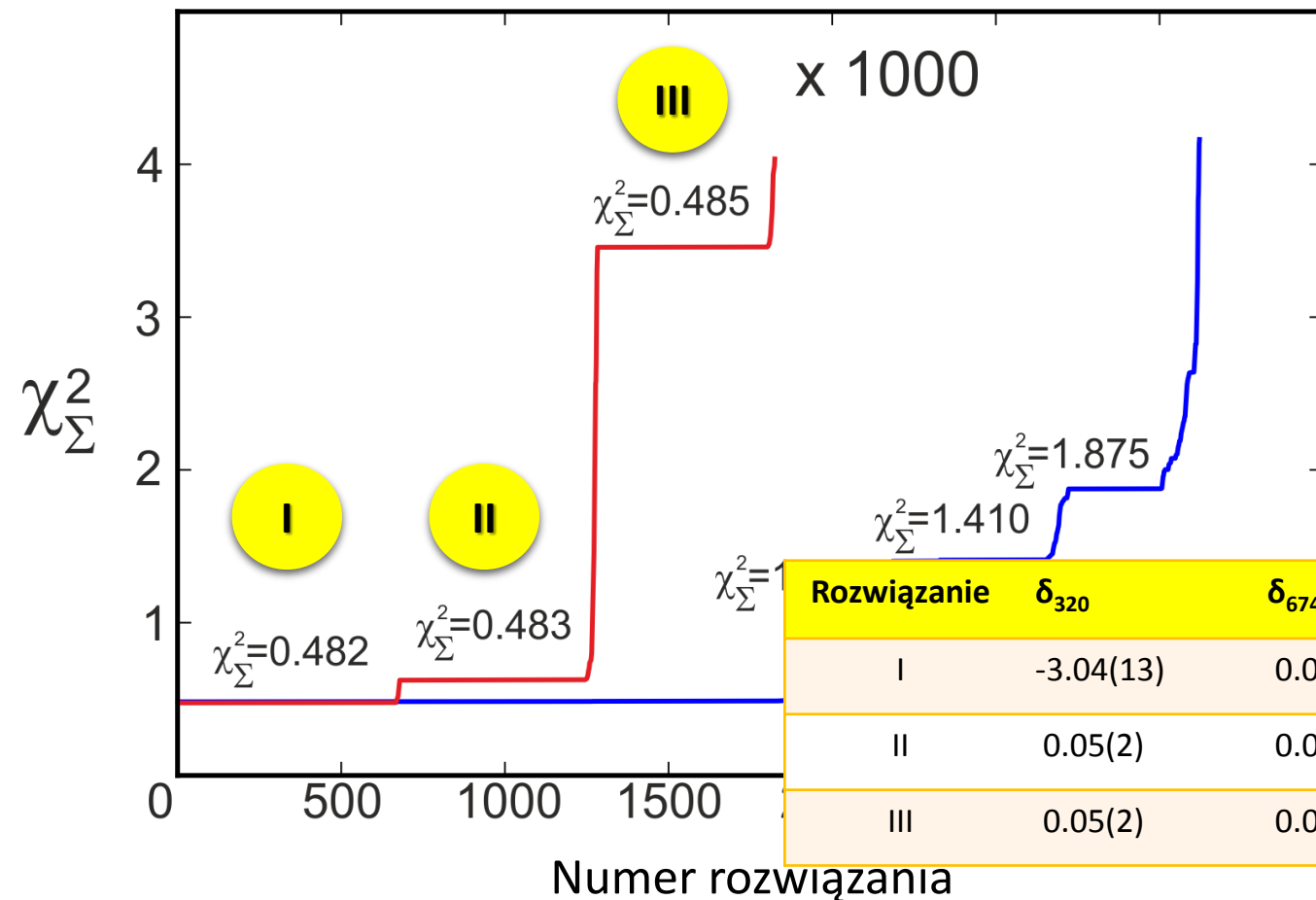
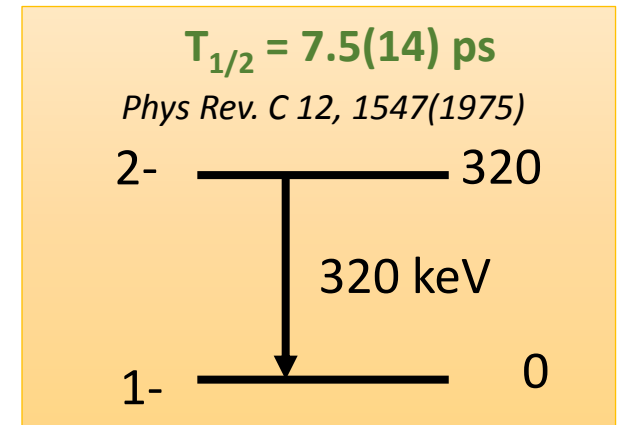
Multipolowość głównego przejścia do stanu podstawowego w ^{210}Bi

$$\chi_{\Sigma}^2 = \sum_n \chi_n^2 = \sum_n \left(\frac{A_{n2} - A_{n2}^{th}(\delta_{n1}, \delta_{n2})}{\Delta A_{n2}} \right)^2 + \left(\frac{A_{n4} - A_{n4}^{th}(\delta_{n1}, \delta_{n2})}{\Delta A_{n4}} \right)^2$$

☐ Zastosowanie Downhill Simplex Algorithm do minimalizacji χ_{Σ}^2 funkcji

☐ 5000 powtórzeń

☐ $|\delta_i| < 10$



Rozwiązanie	δ_{320}	δ_{674}	δ_{1013}	δ_{2505}	δ_{3081}	χ_{Σ}^2
I	-3.04(13)	0.02(1)	-0.12(3)	0.03(5)	-0.04(2)	0.482
II	0.05(2)	0.02(1)	-0.12(3)	-0.79(9)	-0.04(2)	0.483
III	0.05(2)	0.02(1)	-0.12(3)	0.02(6)	-0.04(2)	0.485

Multipolowość głównego przejścia do stanu podstawowego w ^{210}Bi

Obliczenia modelu powłokowego:

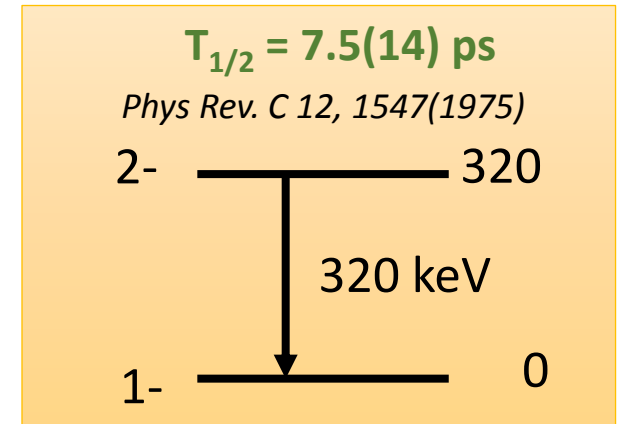
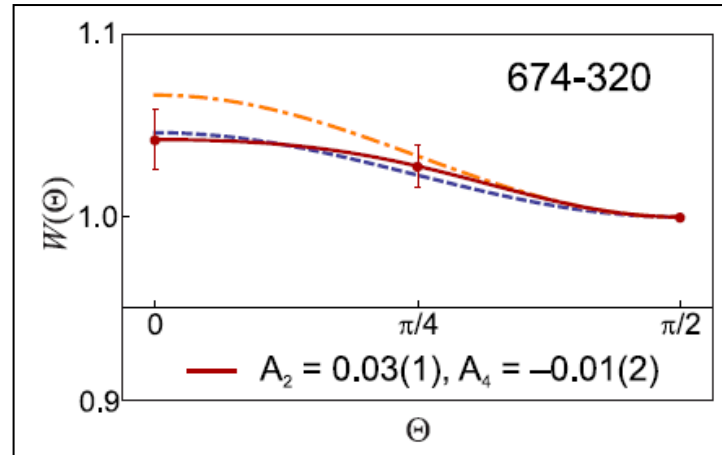
$$B(E2) = 0.17 \text{ e}^2\text{fm}^4$$

$$B(E2) = 18 \times 10^3 \text{ e}^2\text{fm}^4$$

$$B(E2) = 41 \text{ e}^2\text{fm}^4$$

90% E2

0.25% E2



Rozwiązanie	δ_{320}	δ_{674}	δ_{1013}	δ_{2505}	δ_{3081}	χ^2_{Σ}
I	-3.04(13)	0.02(1)	-0.12(3)	0.03(5)	-0.04(2)	0.482
II	0.05(2)	0.02(1)	-0.12(3)	-0.79(9)	-0.04(2)	0.483
III	0.05(2)	0.02(1)	-0.12(3)	0.02(6)	-0.04(2)	0.485

Multipolowość przejścia 320 keV w ^{210}Bi

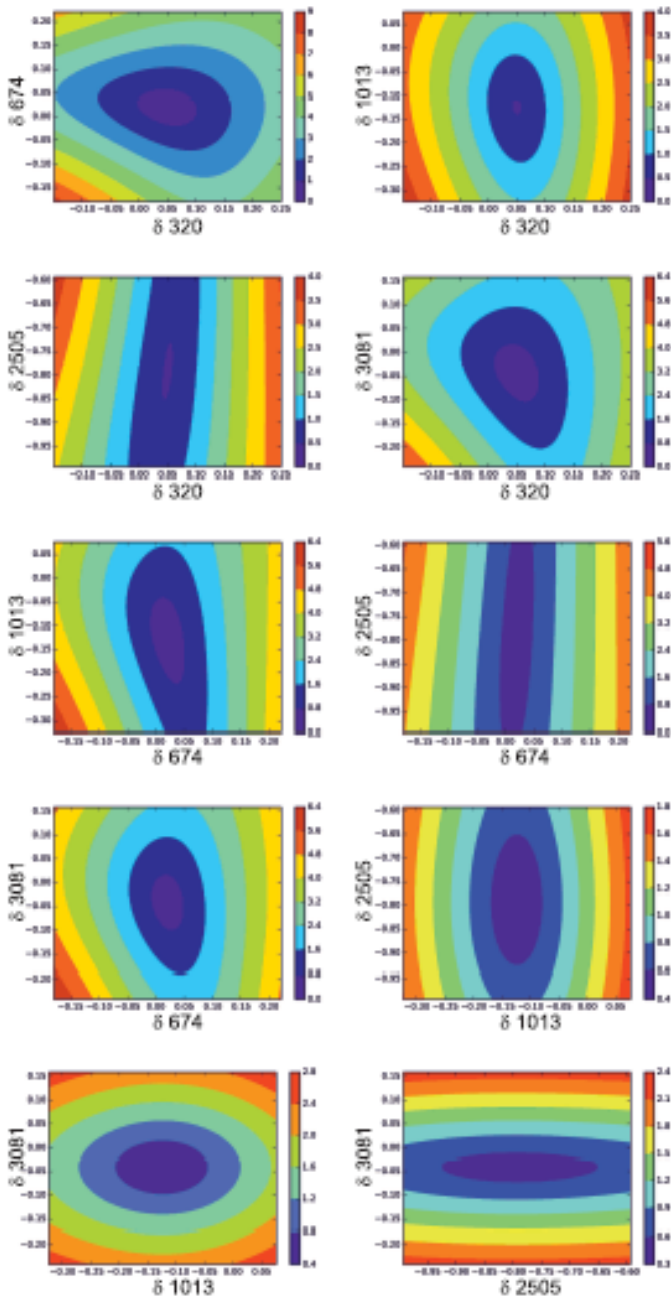
$$\delta^2 = \frac{I_{L'}}{I_L} \Rightarrow I(L') = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 1}$$

$\delta_{320} = 0.05 \longrightarrow 0.25\% \text{ E2}$

95 % przedział ufności: $0.024 < \delta_{320} < 0.076$

GÓRNY LIMIT

Niewykluczona atenuacja spowodowana istnieniem przejść pośrednich...
Prowadziłoby to do obniżenia wartości współczynnika zmieszania dla linii 320 keV.



Rzuty wokół II minimum

Rozwiązanie	δ_{320}	δ_{674}	δ_{1013}	δ_{2505}	δ_{3081}	χ^2_{Σ}
I	-3.04(13)	0.02(1)	-0.12(3)	0.03(5)	-0.04(2)	0.482
II	0.05(2)	0.02(1)	-0.12(3)	-0.79(9)	-0.04(2)	0.483
III	0.05(2)	0.02(1)	-0.12(3)	0.02(6)	-0.04(2)	0.485

Multipolowość przejścia 320 keV w ^{210}Bi

$$\delta^2 = \frac{I_{L'}}{I_L} \Rightarrow I(L') = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 1}$$

$$\delta_{320} = 0.05 \longrightarrow 0.25\% \text{ E2}$$

95 % przedział ufności: $0.024 < \delta_{320} < 0.076$

GÓRNY LIMIT

wkluczona atenuacja spowodowana
 tnieniem przejść pośrednich...
 y to do obniżenia wartości współczynnika
 mieszania dla linii 320 keV.

A. Borella et al., AIP Conf. Proc. 769, 648 (2005)

Przekrój czynny reakcji $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$
 do stanu podstawowego [mb]

100% M1	50% M1+50 % E2	100% E2
21.5(9)	19.3(8)	17.2(7)

$$\sigma_{gs} = \frac{\sum_i I_i}{I_{4055}} \sigma_{4055}$$

A. Borella et al. Nucl. Phys. A 850, 1 (2011)

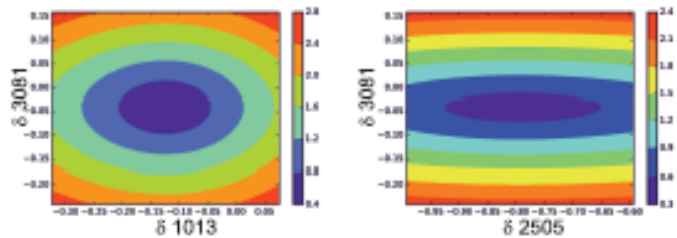
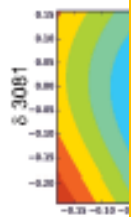
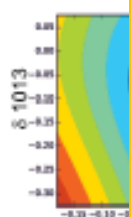
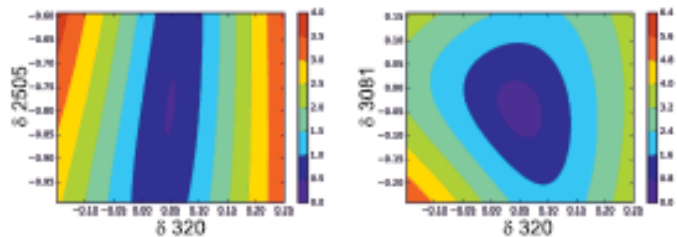
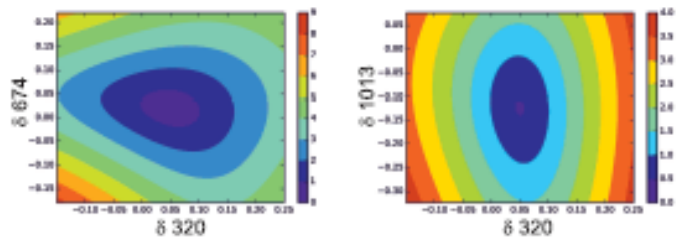
górnny limit
 mieszania z E2

21.3(9) mb

czyste M1

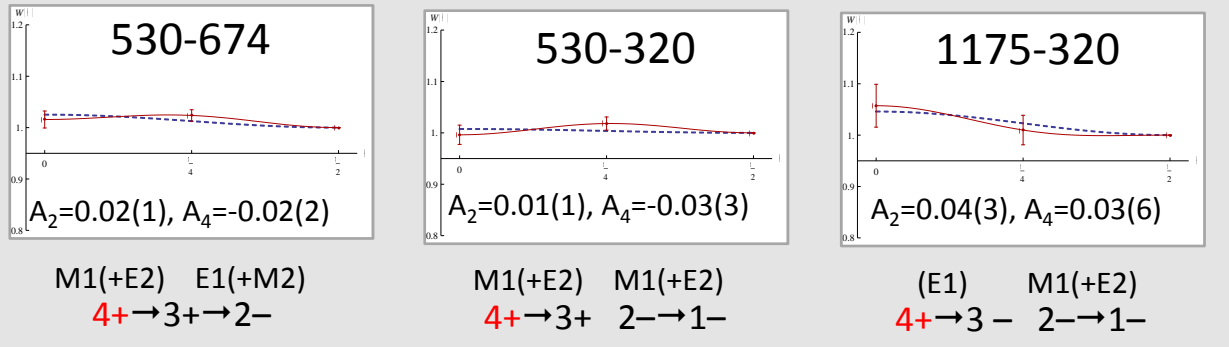
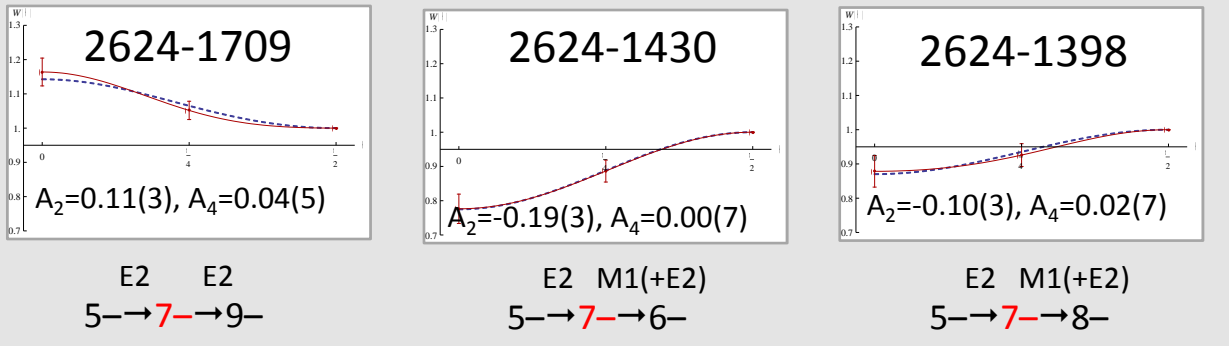
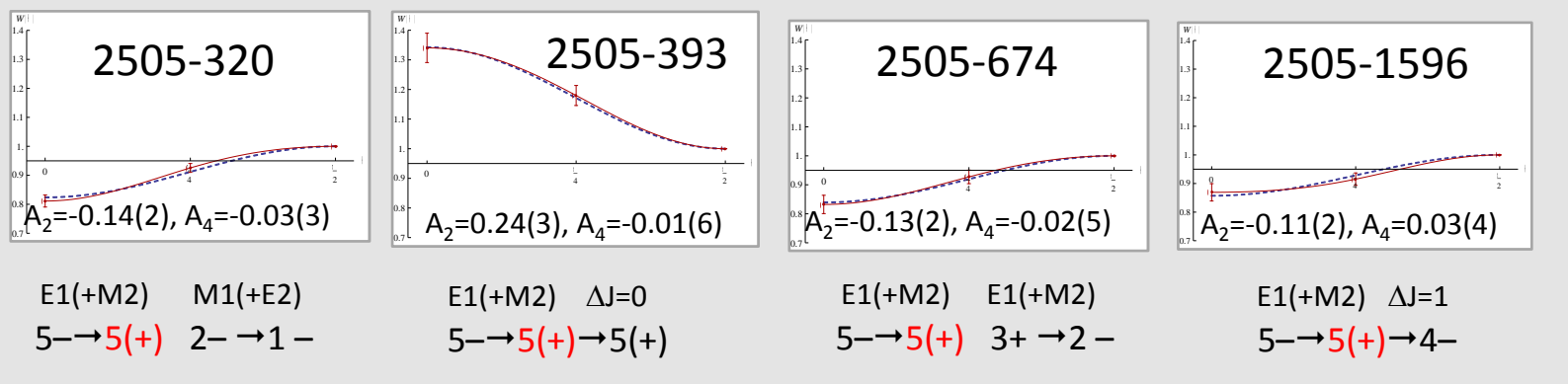
21.5(9) mb

N. Cieplicka-Oryńczak, et al., PRC93, 014311(2016)

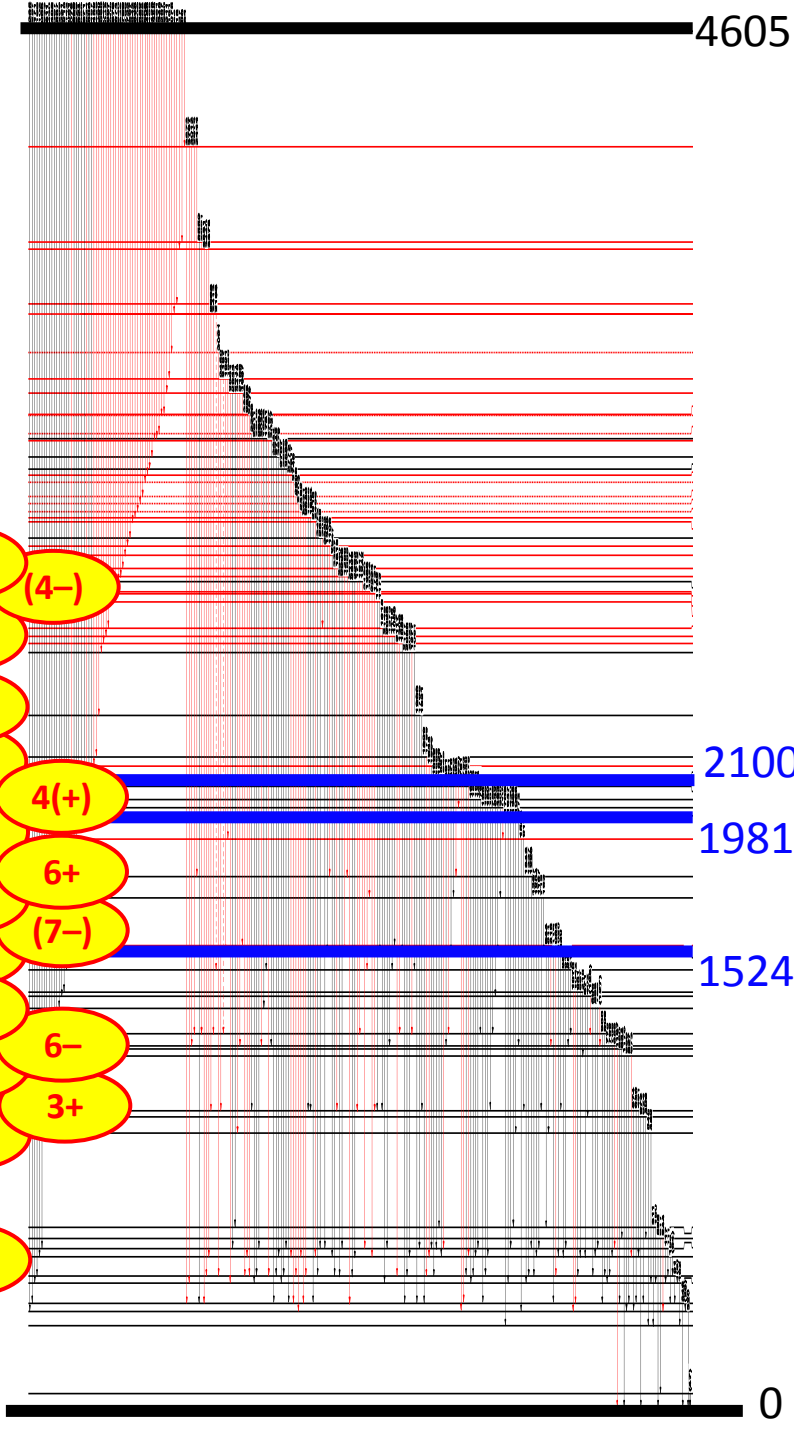


Rzuty wokół II minimum

Przyporządkowania spinów i parzystości

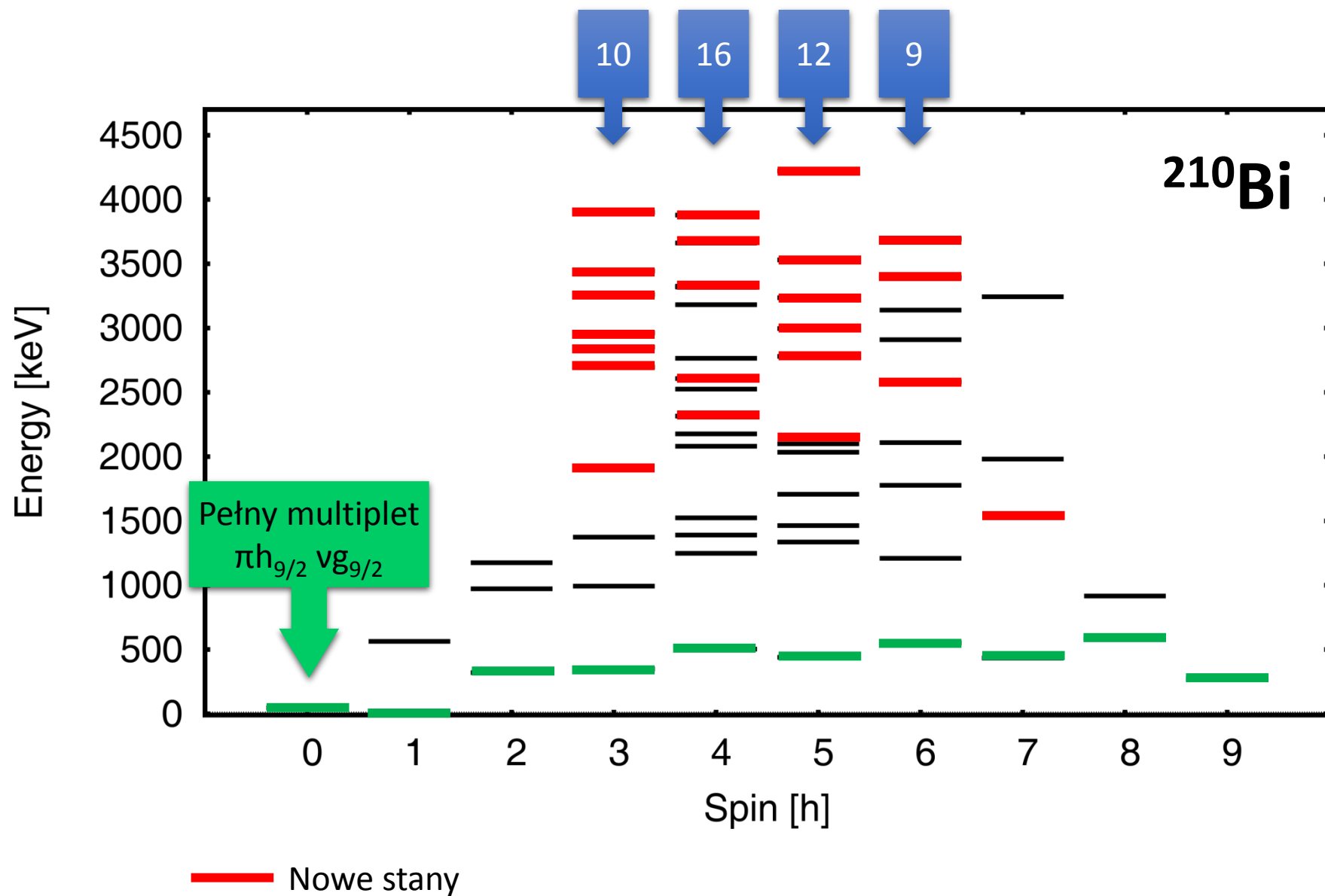


- (5)
- (4-)
- (4,5)
- (4)
- 5(+)
- 4(+)
- 7-
- 6+
- 5(+)
- 7-
- 4+
- 4-
- (2)
- 6-
- 2-
- 3+
- 1-

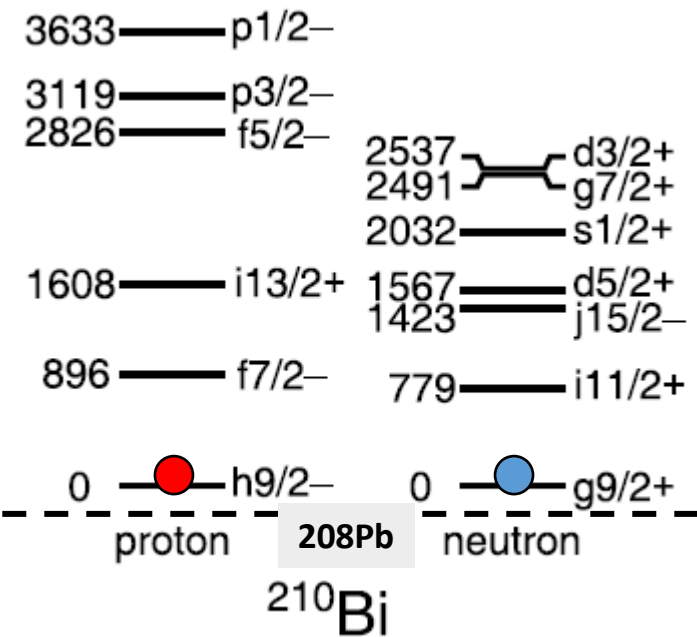


^{210}Bi

Rozkład spinów populowanych w reakcji $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ – wyniki eksperymentalne



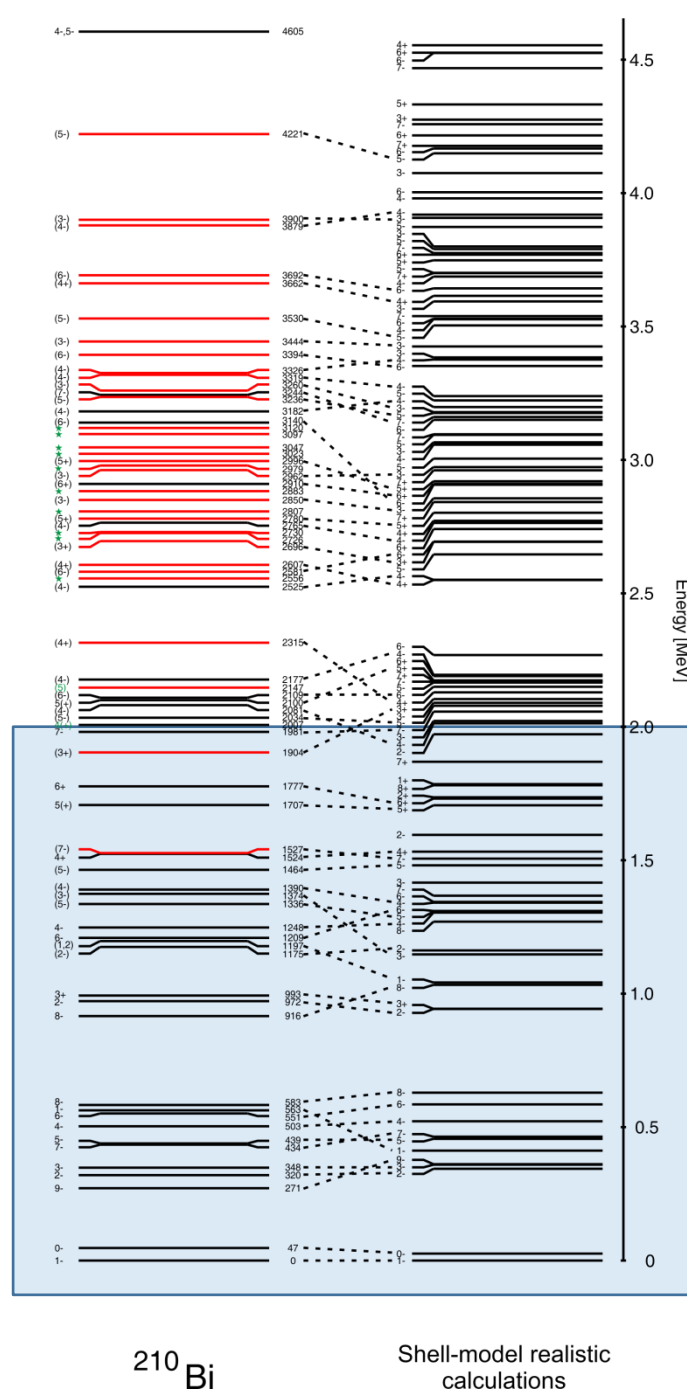
Obliczenia modelu powłokowego dla ^{210}Bi



Oddziaływania realistyczne
wyprowadzone z potencjału
nukleon-nukleon.
(prof. Angela Gargano, INFN Napoli)

Średnia różnica energii
pomiędzy wartościami
eksperymentalnymi i
obliczonymi: ~ 80 keV

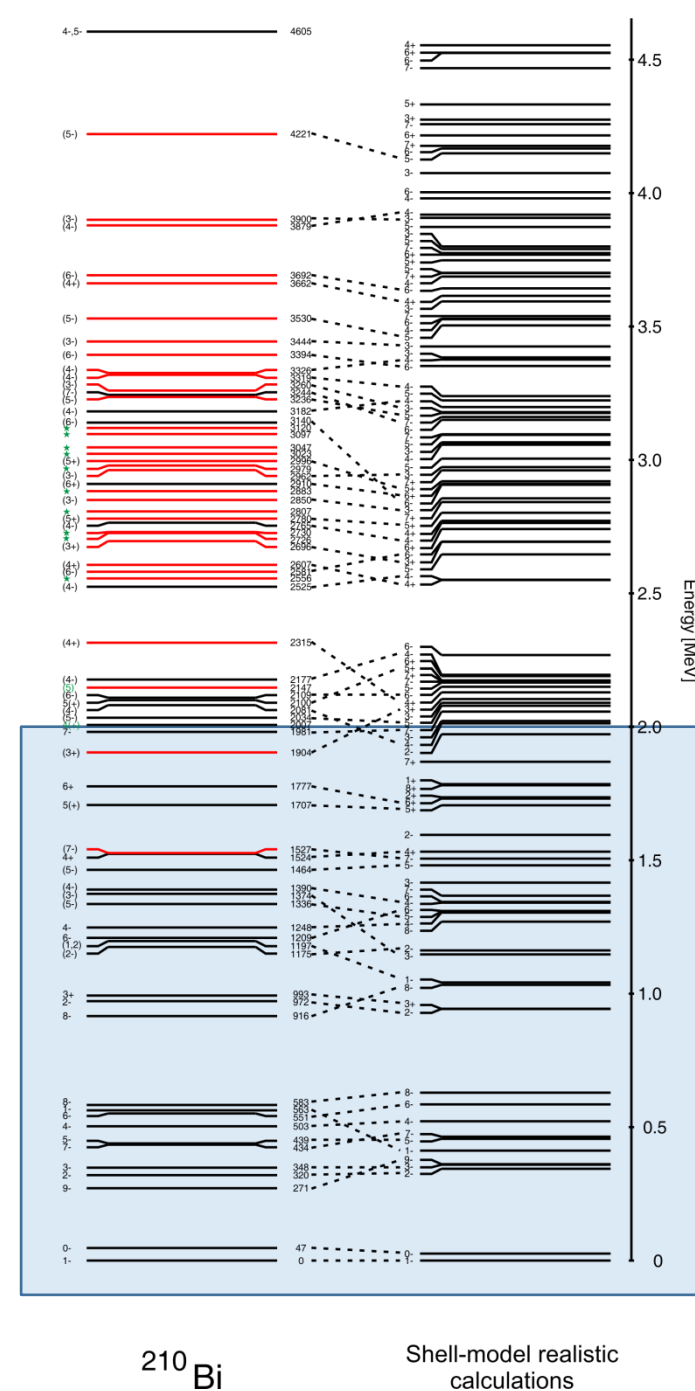
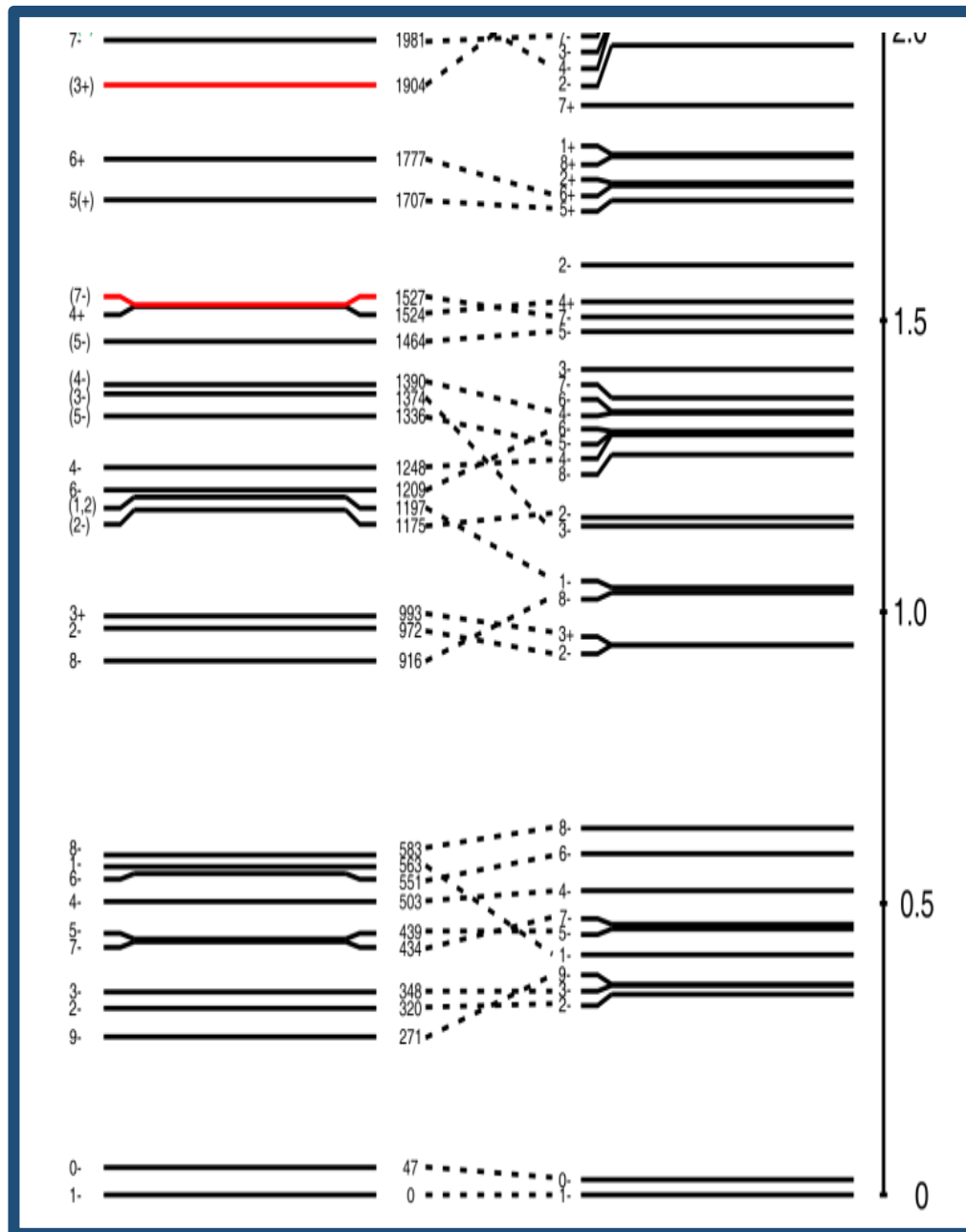
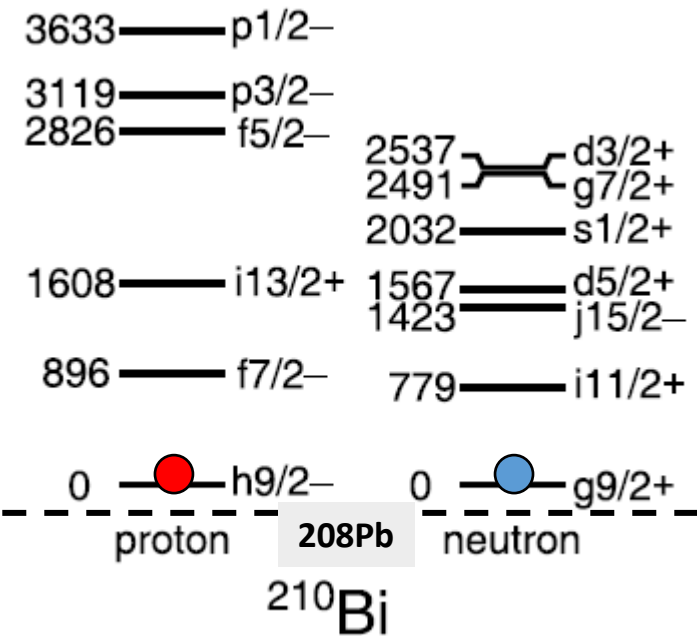
- Przestrzeń konfiguracyjna:
1 powłoka protonowa i 1 neutronowa
powyżej rdzenia ^{208}Pb
- Zastosowano potencjał $V_{\text{low-k}}$ [PRC 65,
051301(R)(2002)]
- Obliczenia zostały przeprowadzone z
użyciem **realistycznych oddziaływań**
efektywnych (bez fitowania elementów
macierzowych)



^{210}Bi

Shell-model realistic
calculations

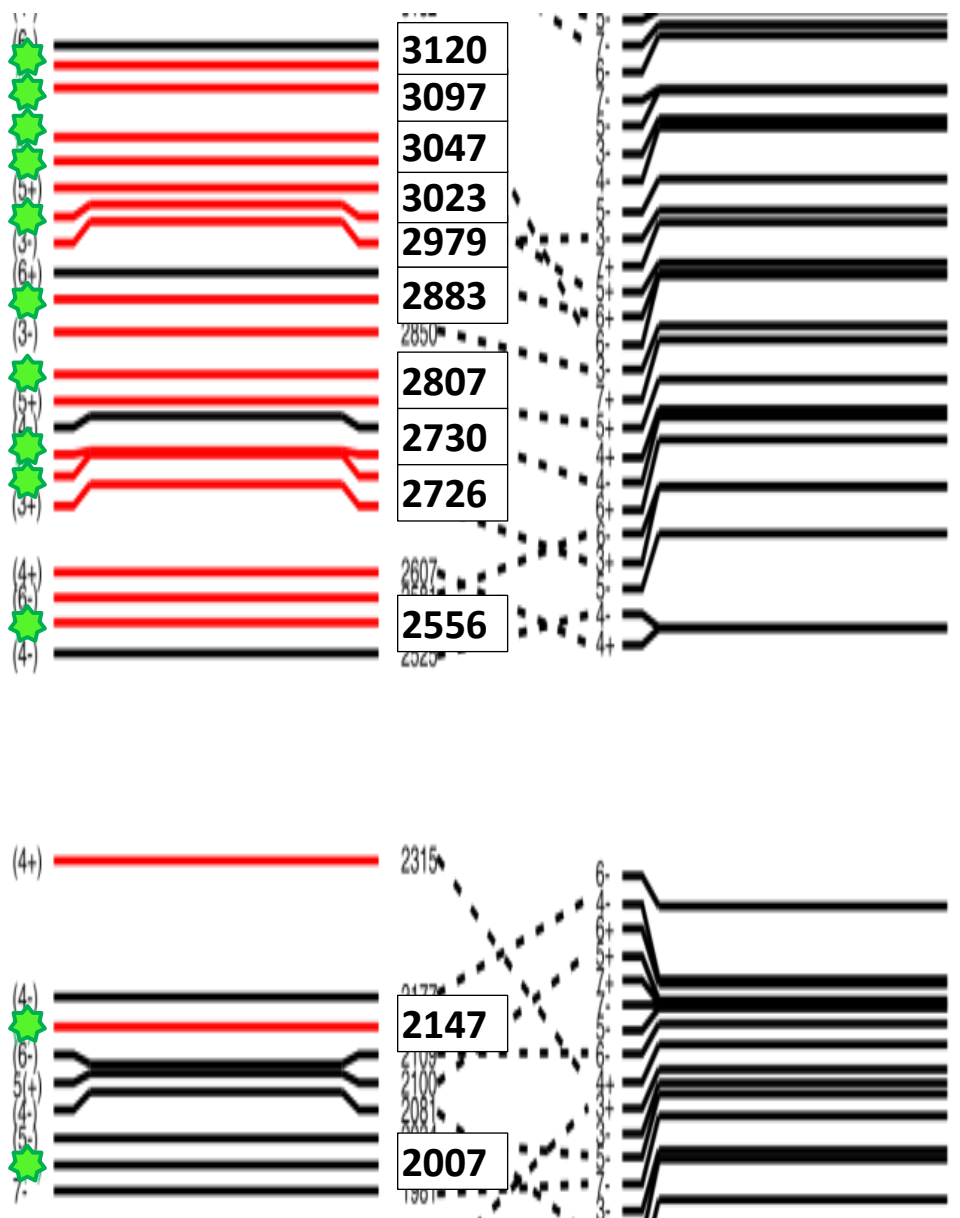
Obliczenia modelu powłokowego dla ^{210}Bi



Oddziaływania realistyczne
wyprowadzone z potencjału
nukleon-nukleon.
(prof. Angela Gargano, INFN Napoli)

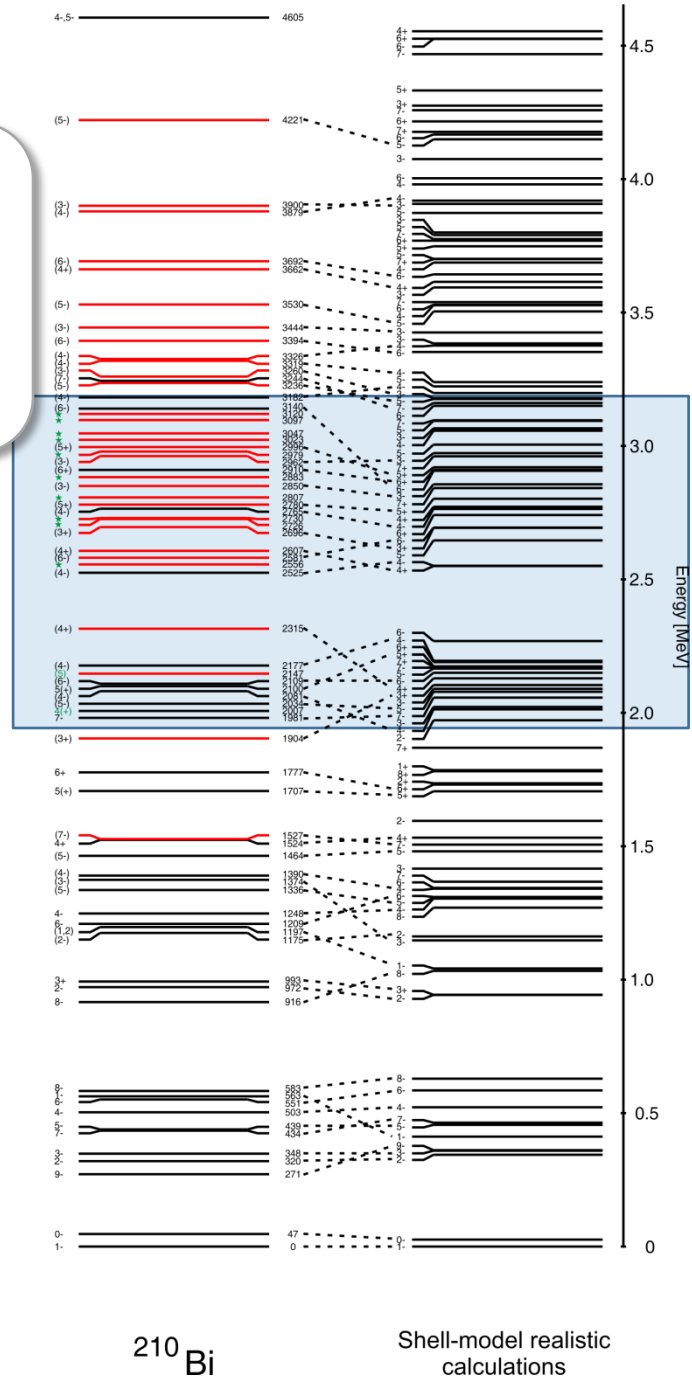
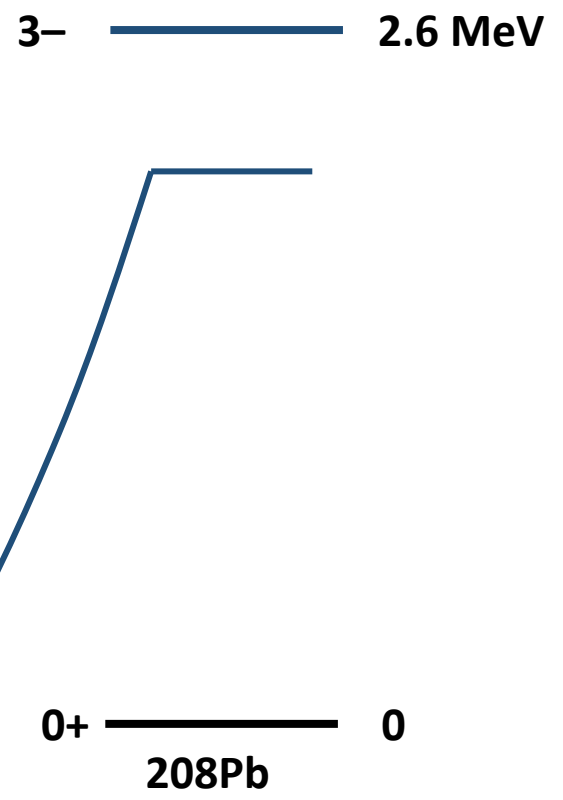
Średnia różnica energii
pomiędzy wartościami
eksperymentalnymi i
obliczonymi: ~ 80 keV

Obliczenia modelu powłokowego dla ^{210}Bi



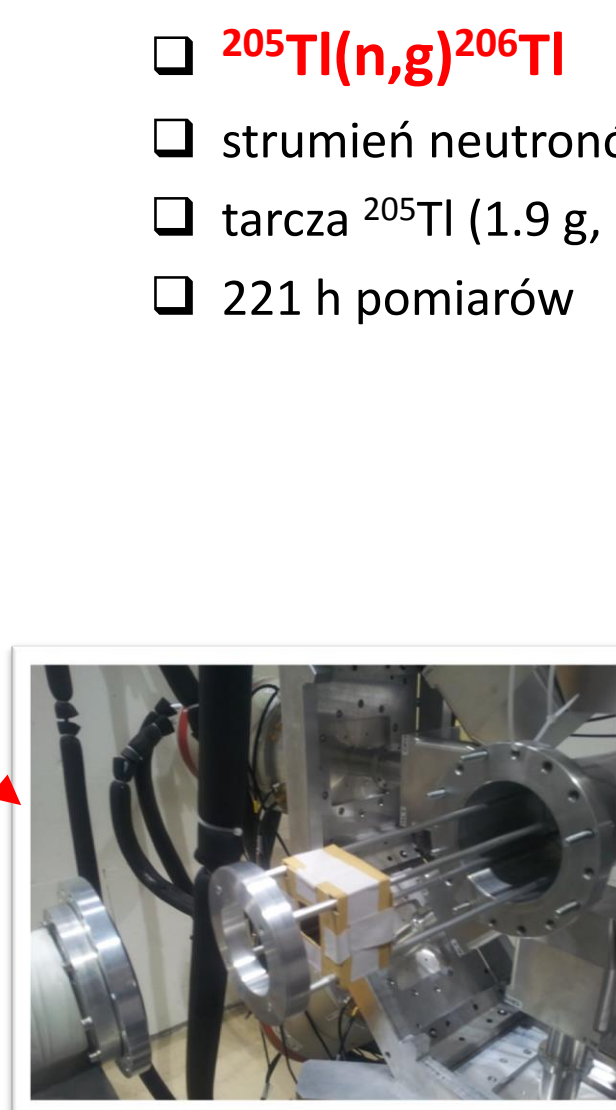
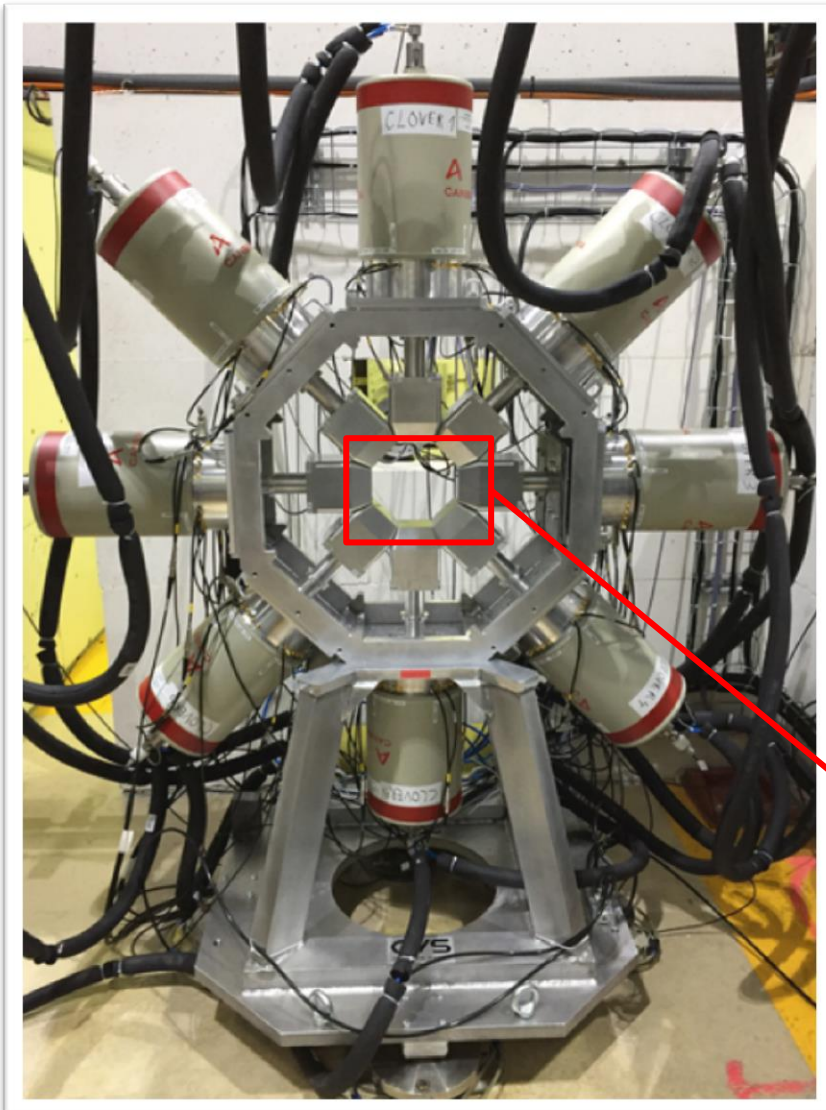
**SPRĘŻENIA WZBUDZEŃ NUKLEONÓW
WALENCYJNYCH Z PIERWSZYM STANEM
WZBUDZONYM RDZENIA ^{208}Pb : $3^- \times (\pi h_{9/2} \nu g_{9/2})$**

$3^- \times 0^- \rightarrow 3^+$
 $3^- \times 1^- \rightarrow 2^+, 3^+, 4^+$
 $3^- \times 9^- \rightarrow 6^+, 7^+, 8^+, (9^+, 10^+, 11^+, 12^+)$



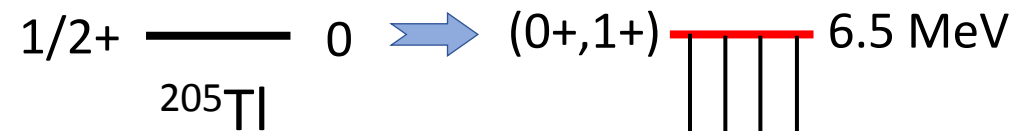
^{206}Tl : eksperyment w Institut Laue-Langevin (Grenoble, 2017)

^{208}Po 2.898 Y α - 100.00% ϵ - 4.0E-3%	^{209}Po 102 Y α - 99.52% ϵ - 0.48%	^{210}Po 138.376 D α - 100.00%	^{211}Po 0.516 s α - 100.00%	^{212}Po 0.299 μs α - 100.00%
^{207}Bi 31.55 Y α - 100.00%	^{208}Bi 3.68E+5 Y α - 100.00%	^{209}Bi STABLE 100%	^{210}Bi 5.012 D β - 100.00% α - 1.3E-4%	^{211}Bi 2.14 M α - 99.72% β - 0.28%
^{209}Pb STABLE 24.1%	^{210}Pb STABLE 22.1%	^{208}Pb	^{209}Pb 3.253 H β - 100.00%	^{210}Pb 22.20 Y β - 100.00% α - 1.5E-6%
^{208}Tl STABLE 70.48%	^{206}Tl	^{207}Tl 4.77 M β - 100.00%	^{208}Tl 3.053 M β - 100.00%	^{209}Tl 2.161 M β - 100.00%
^{204}Hg STABLE 6.87%	^{205}Hg 5.14 M β - 100.00%	^{206}Hg 8.32 M β - 100.00%	^{207}Hg 2.9 M β - 100.00%	^{208}Hg 41 M β - 100.00%

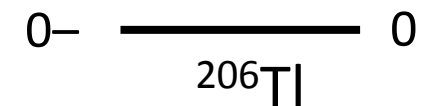


- $^{205}\text{Tl}(n,g)^{206}\text{Tl}$
- strumień neutronów $10^8 \text{n}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$
- tarcza ^{205}Tl (1.9 g, 99.9%)
- 221 h pomiarów

Stan po wychwycie przy energii wiązania neutronu

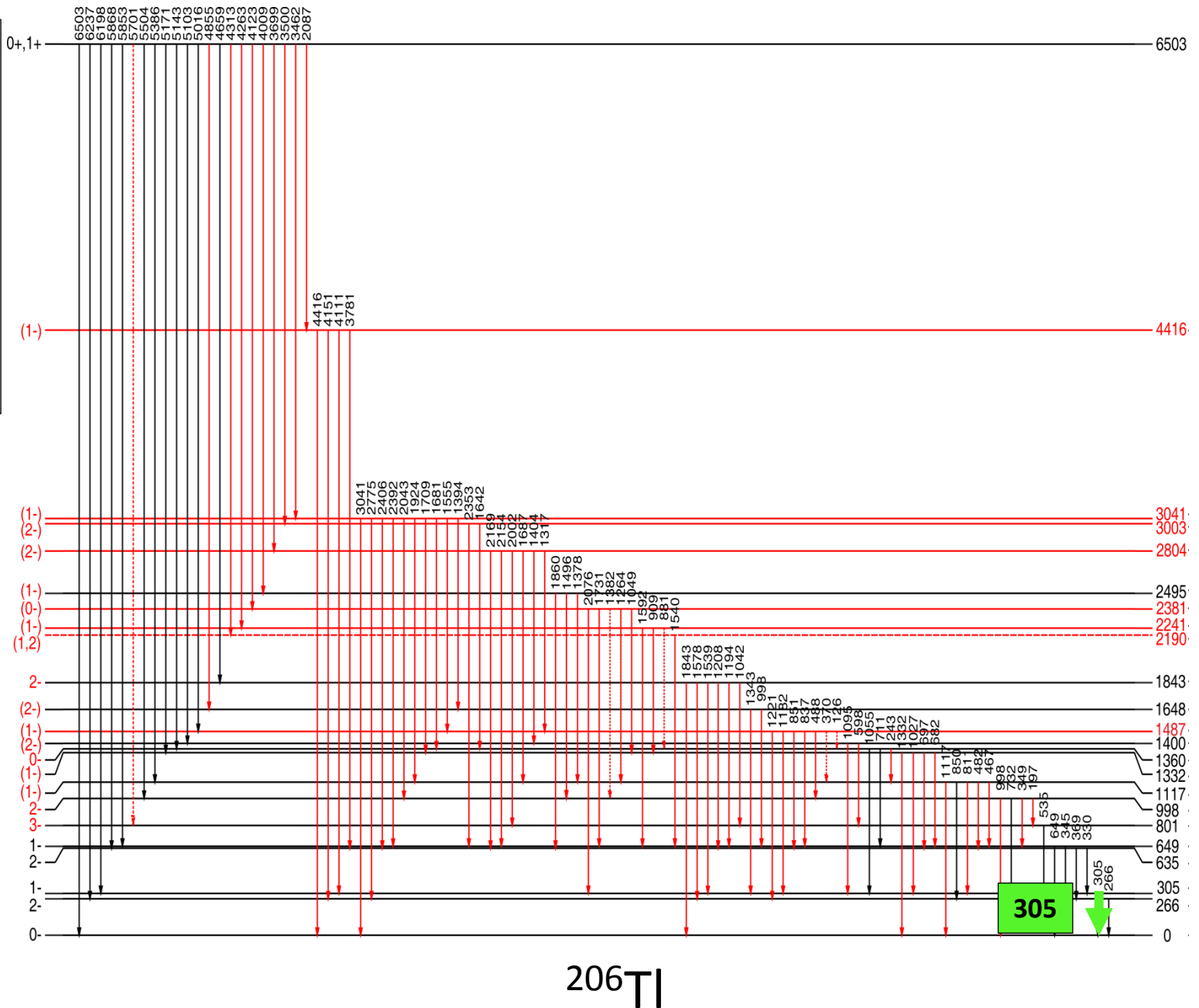
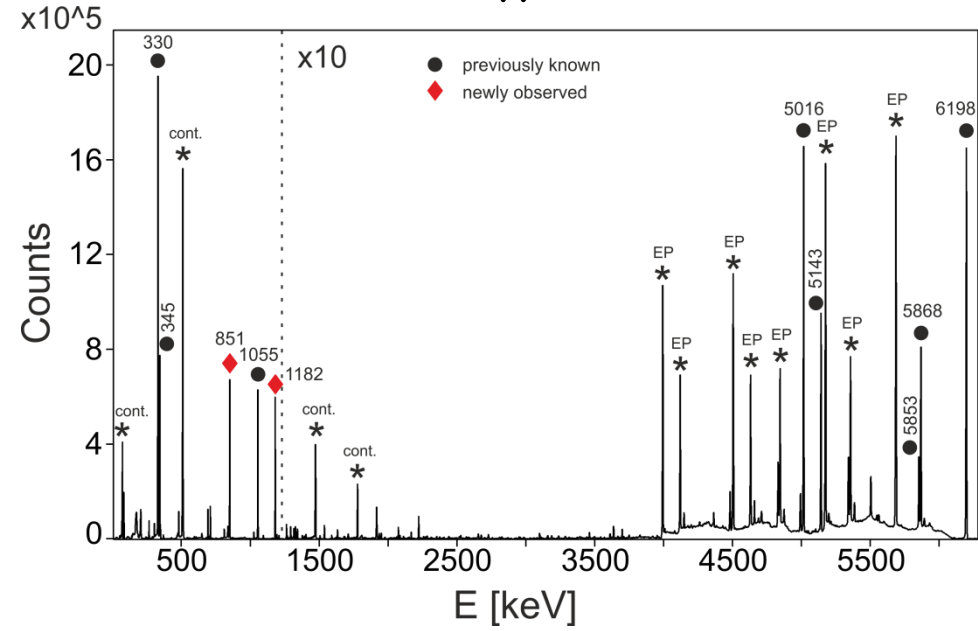


Rozpad do niskospinowych (od 0 do 3) stanów w ^{206}Tl



8 HPGe detektorów układu FIPPS (32 kryształy) – pomiary koincydencji gamma-gamma

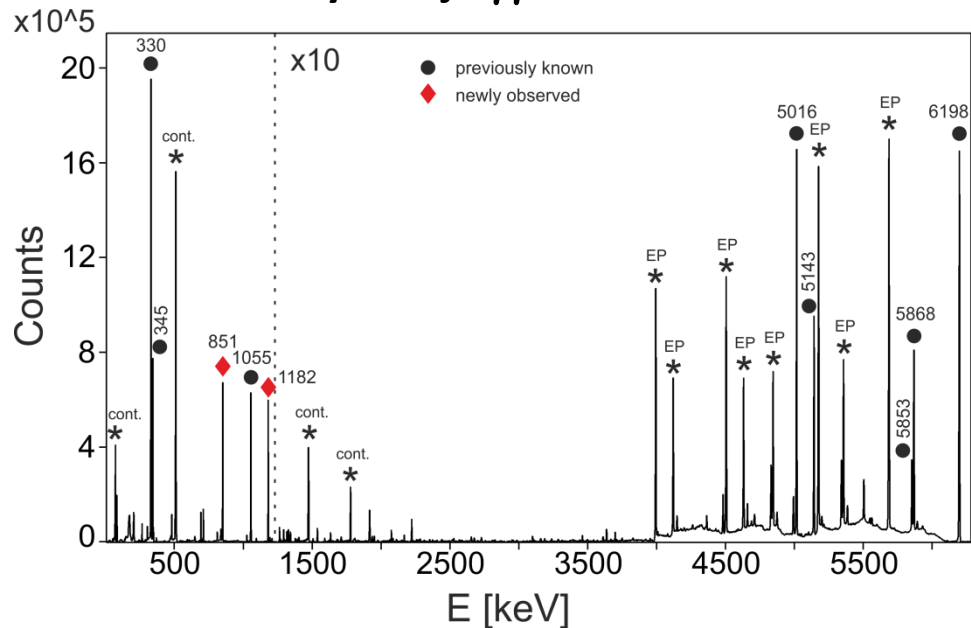
Koincydencje $\gamma\gamma$: bramka 305 keV



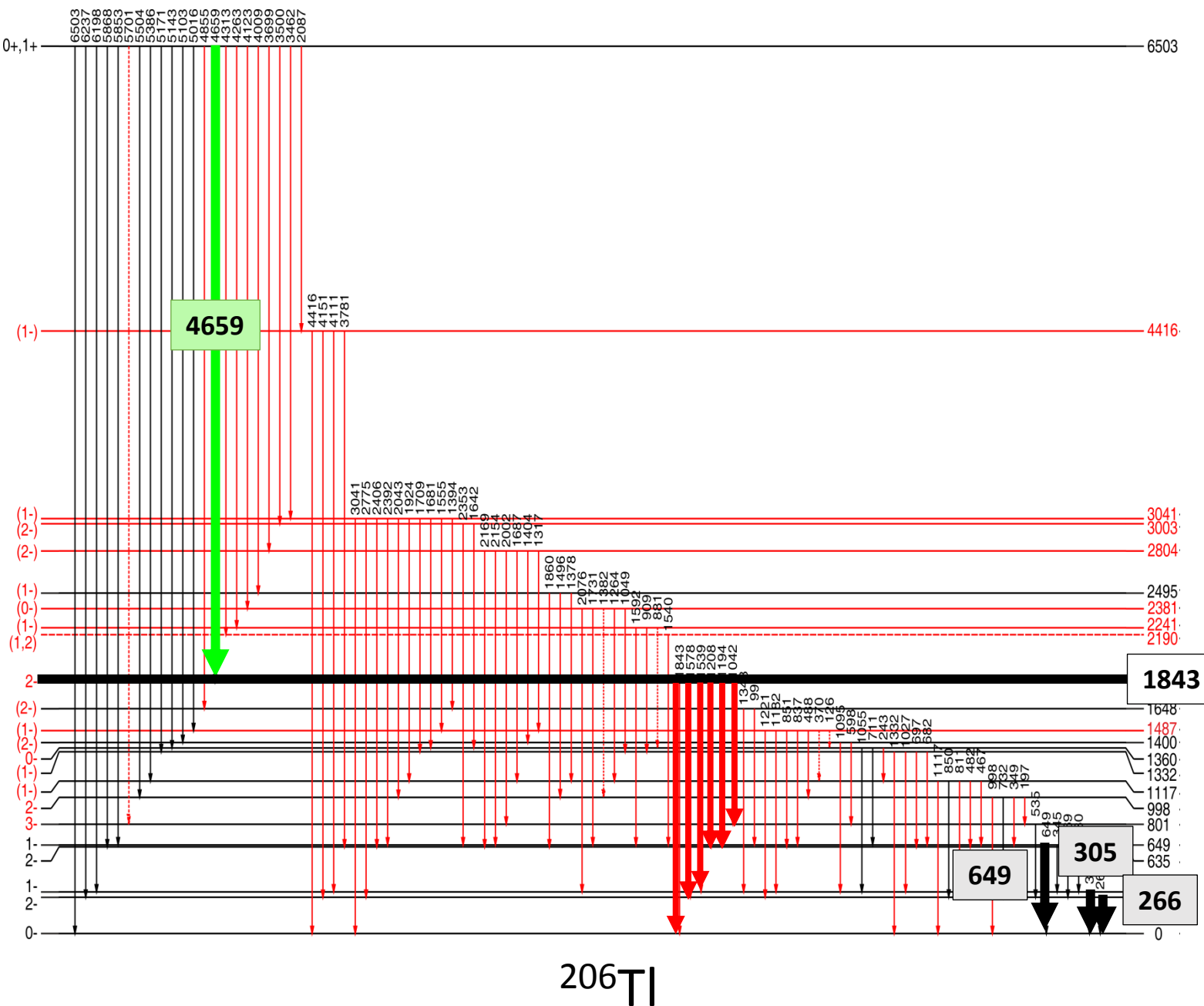
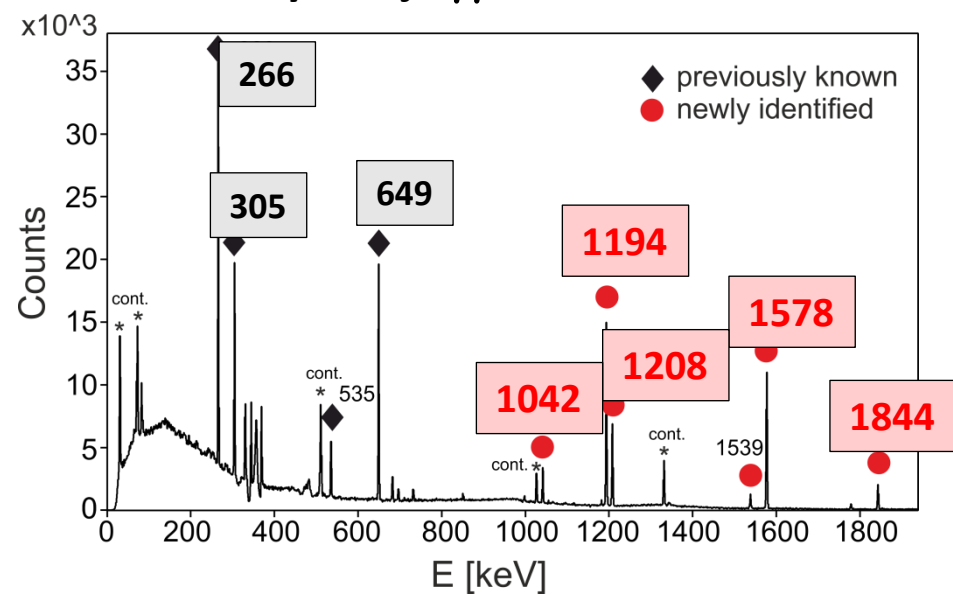
^{206}Tl

305

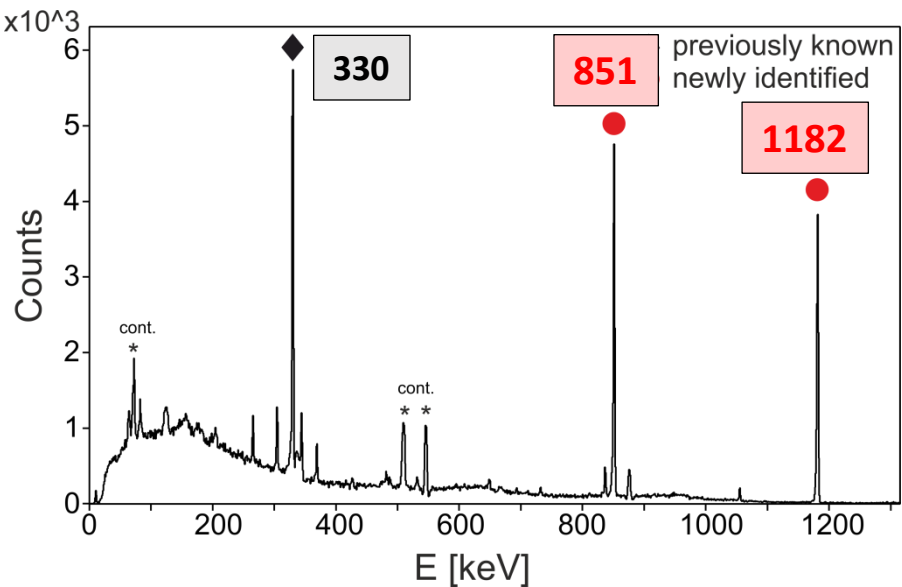
Koincydencje $\gamma\gamma$: bramka 305 keV



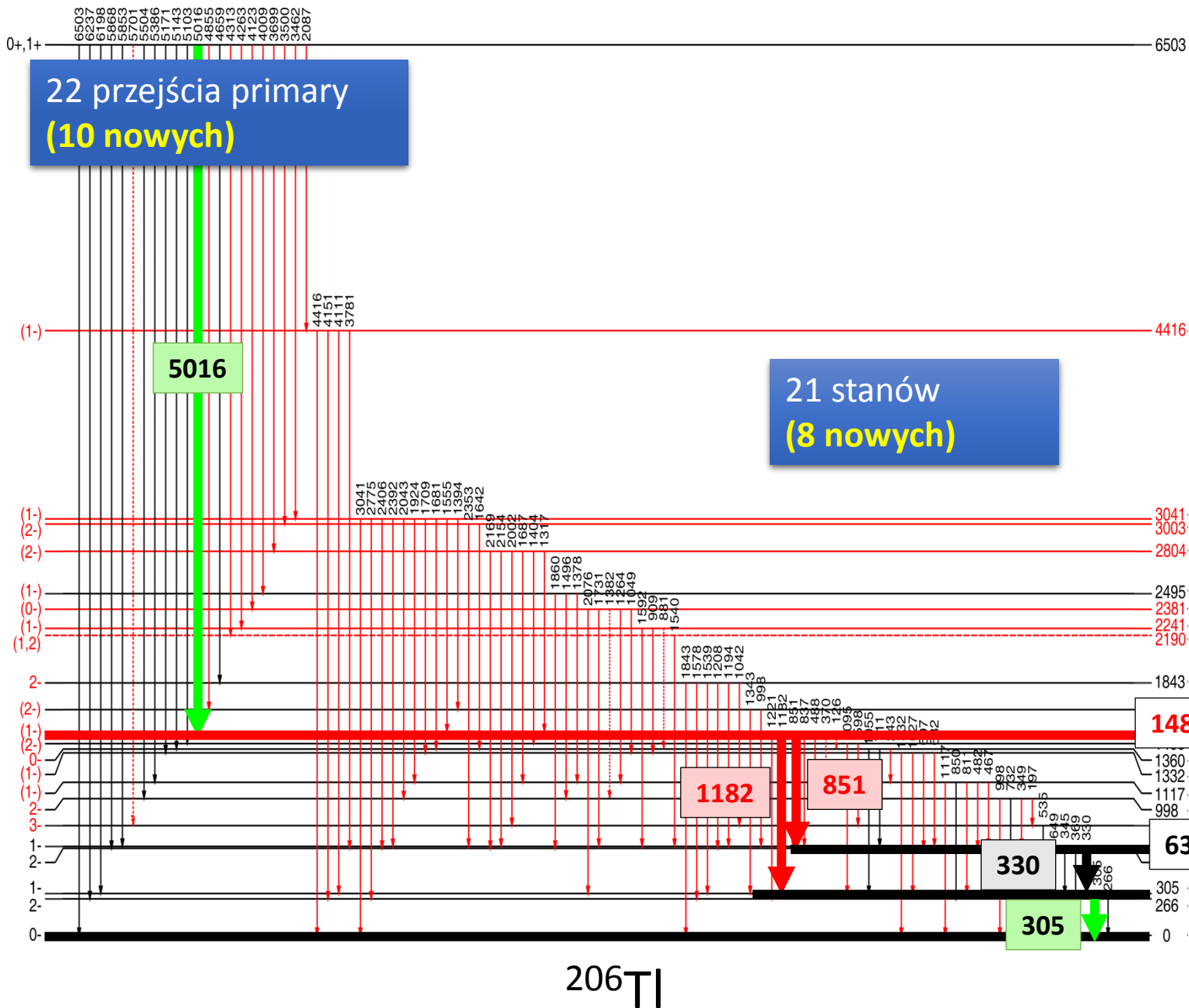
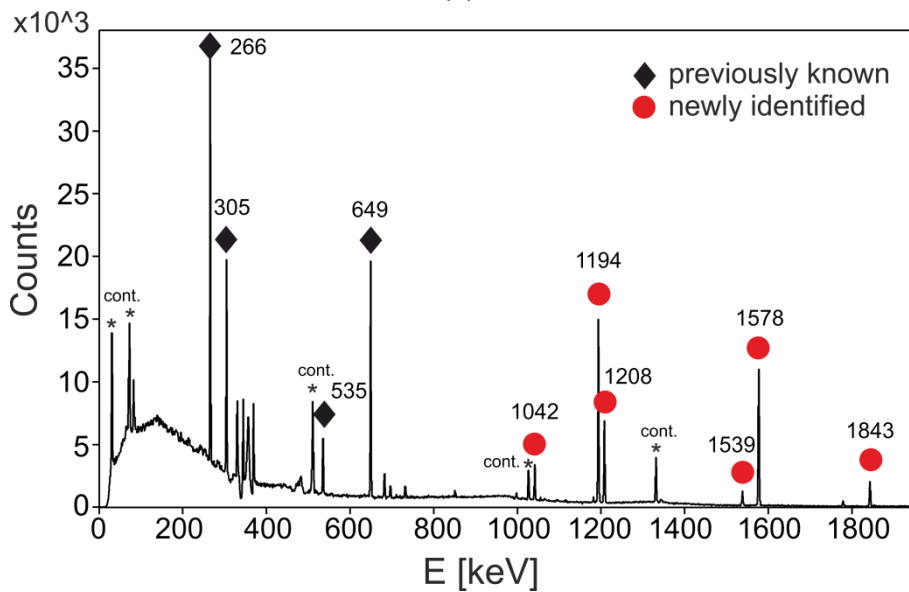
Koincydencje $\gamma\gamma$: bramka 4659 keV



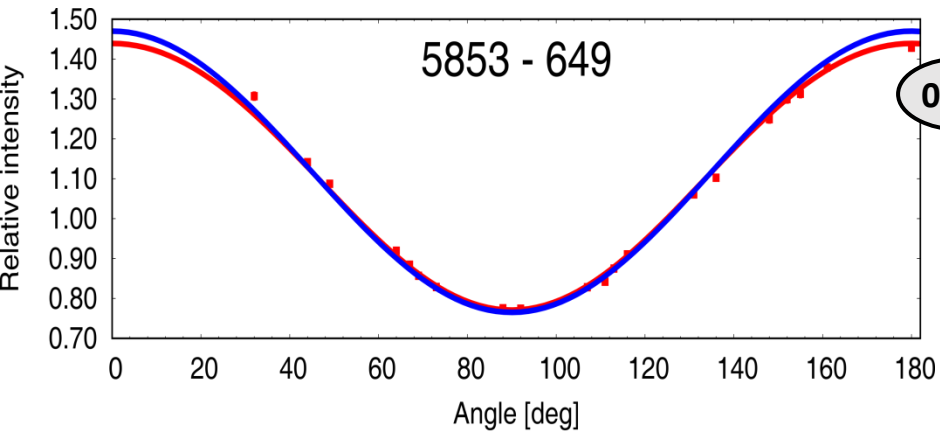
Koincydencje $\gamma\gamma$: bramka 5016-305 keV



Koincydencje $\gamma\gamma$: bramka 4659 keV

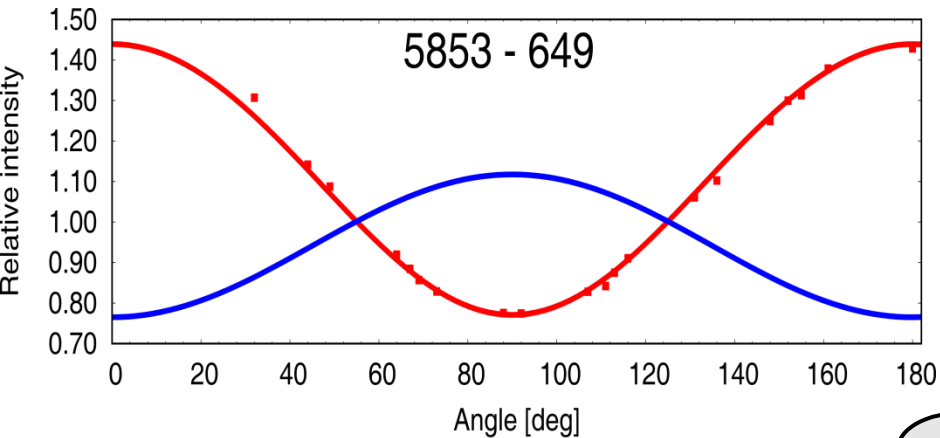


Korelacje kątowe kwantów γ



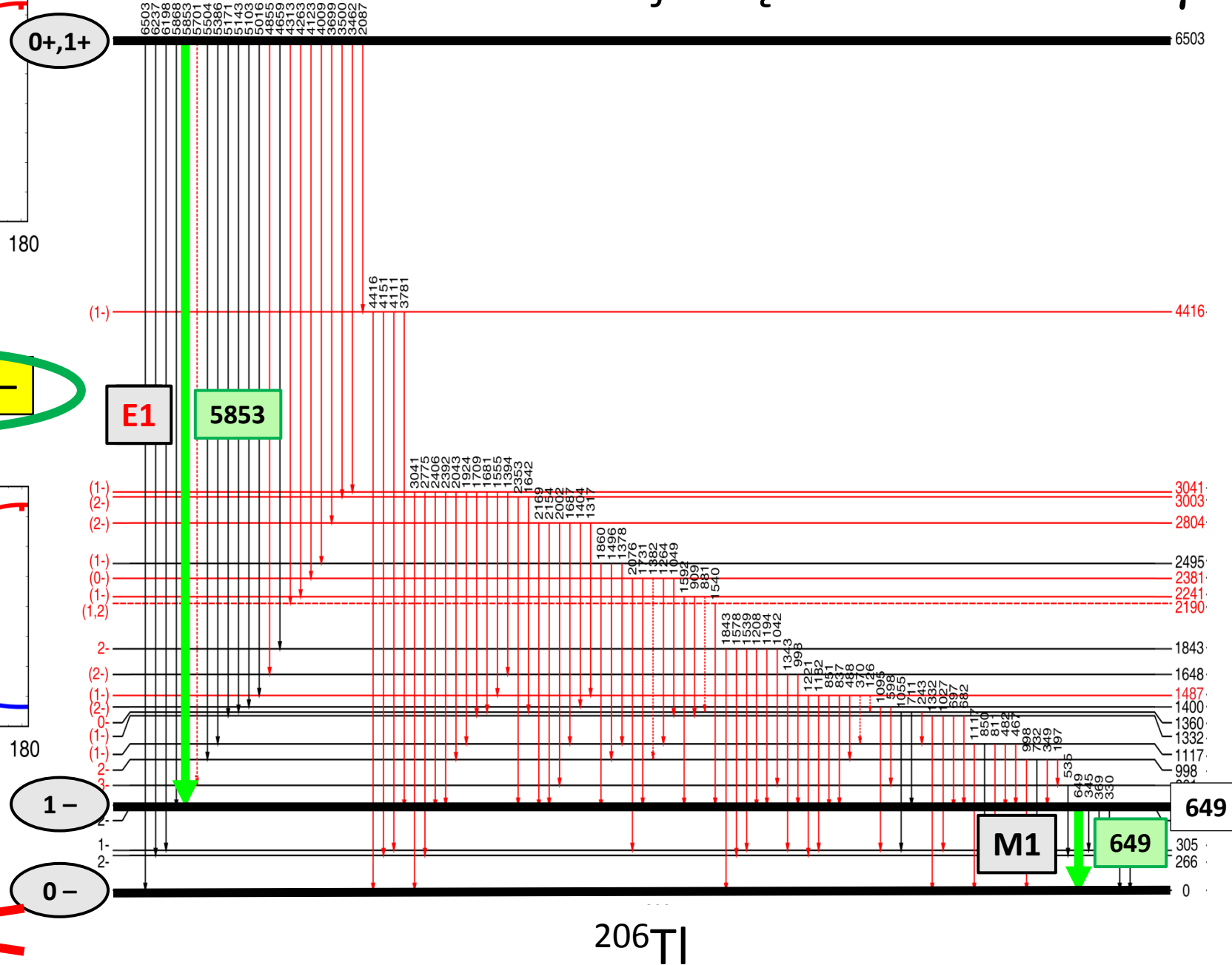
— EXPERIMENT: $A_2=0.48(1)$, $A_4=-0.01(1)$
— THEORY: $A_2=0.50$, $A_4=0.00$

E1 $0^+ \rightarrow 1^-$

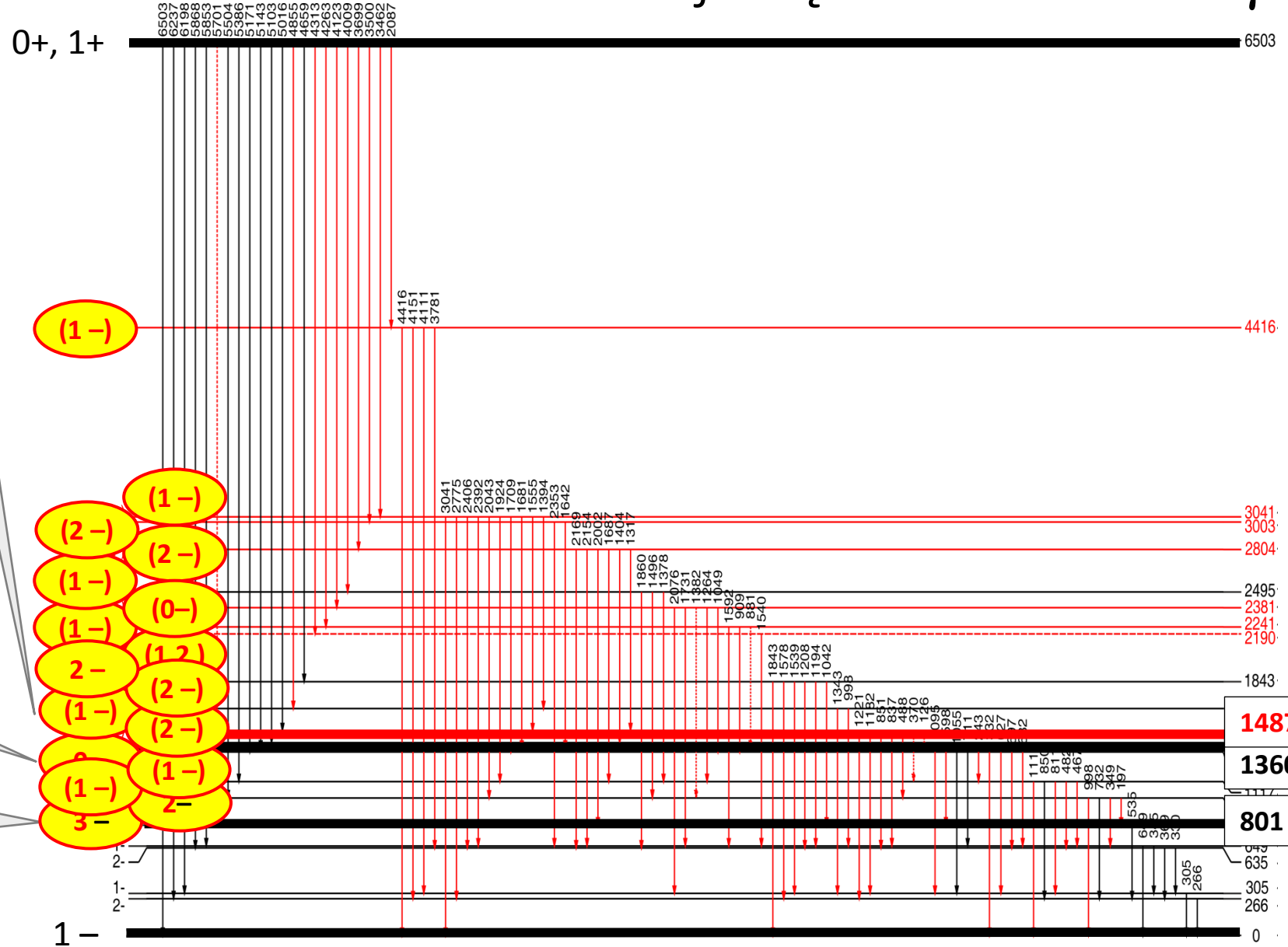
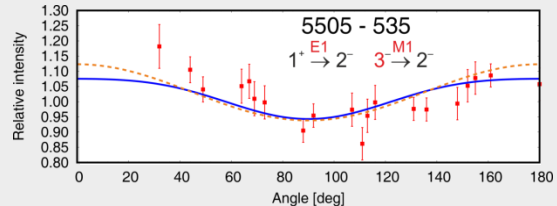
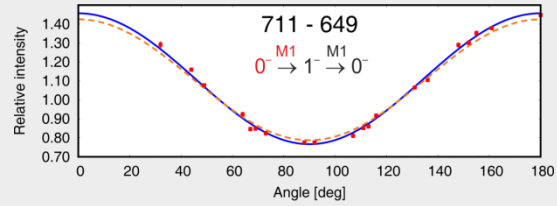
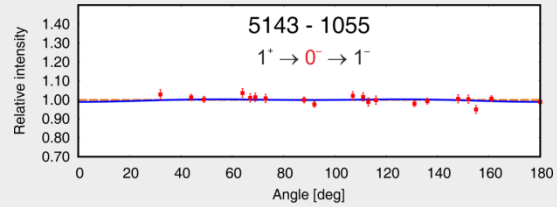
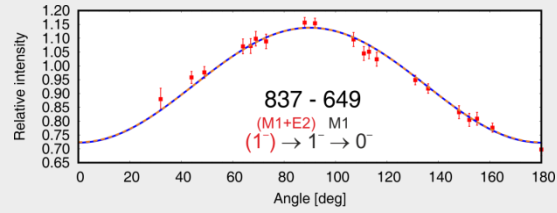


— EXPERIMENT: $A_2=0.48(1)$, $A_4=-0.01(1)$
— THEORY: $A_2=-0.25$, $A_4=0.00$

~~E1 $0^+ \rightarrow 1^-$~~

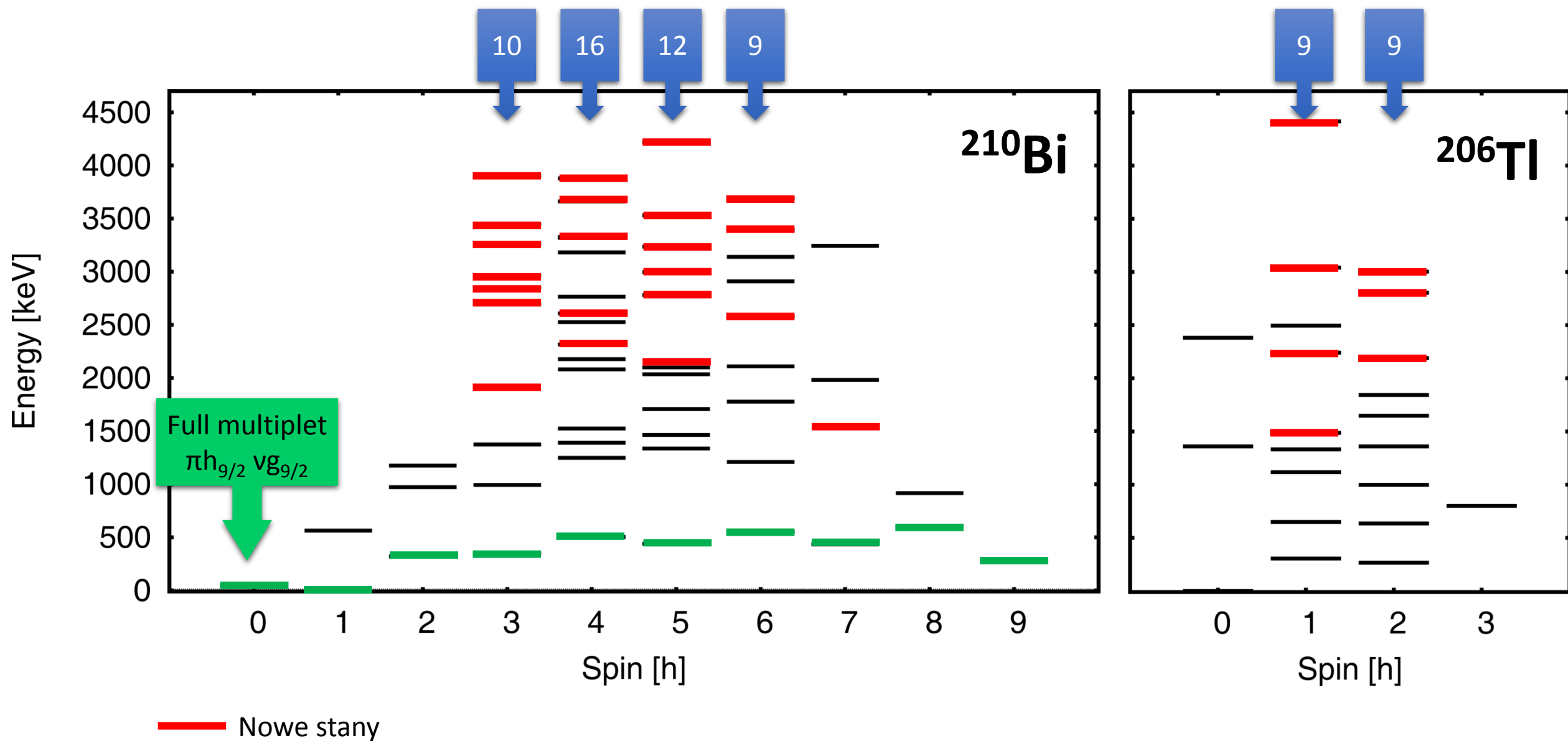


Korelacje kątowe kwantów γ

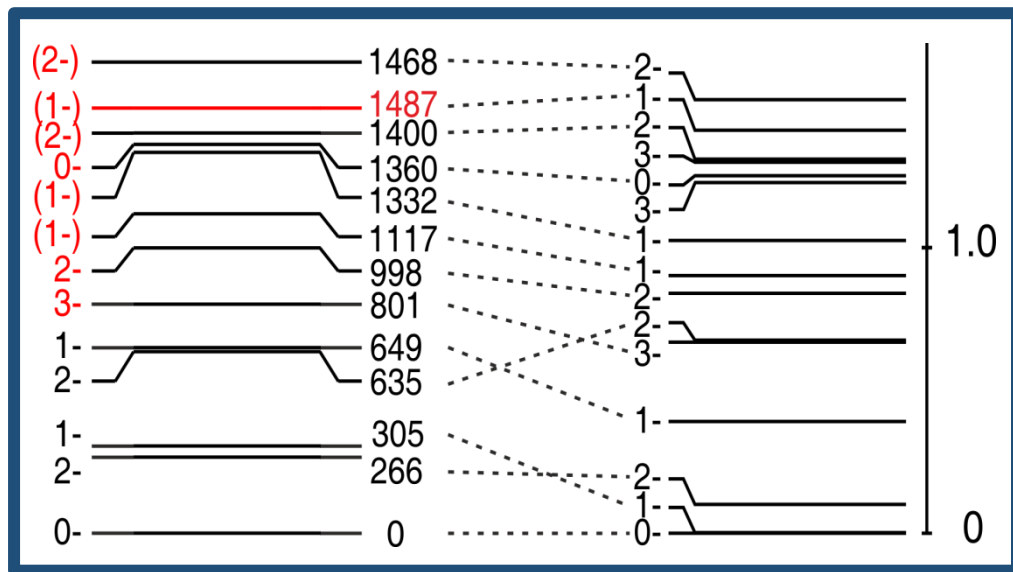
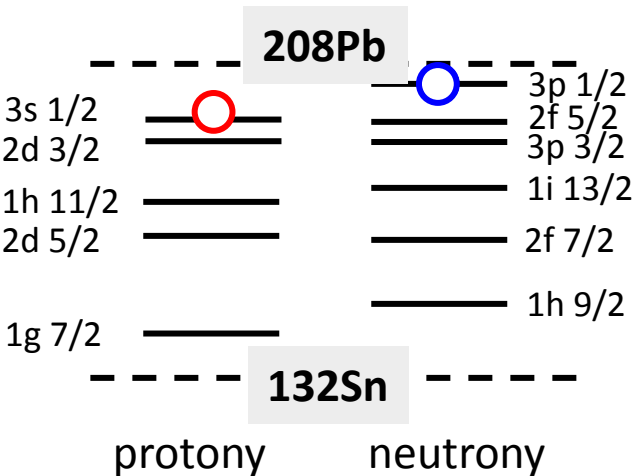
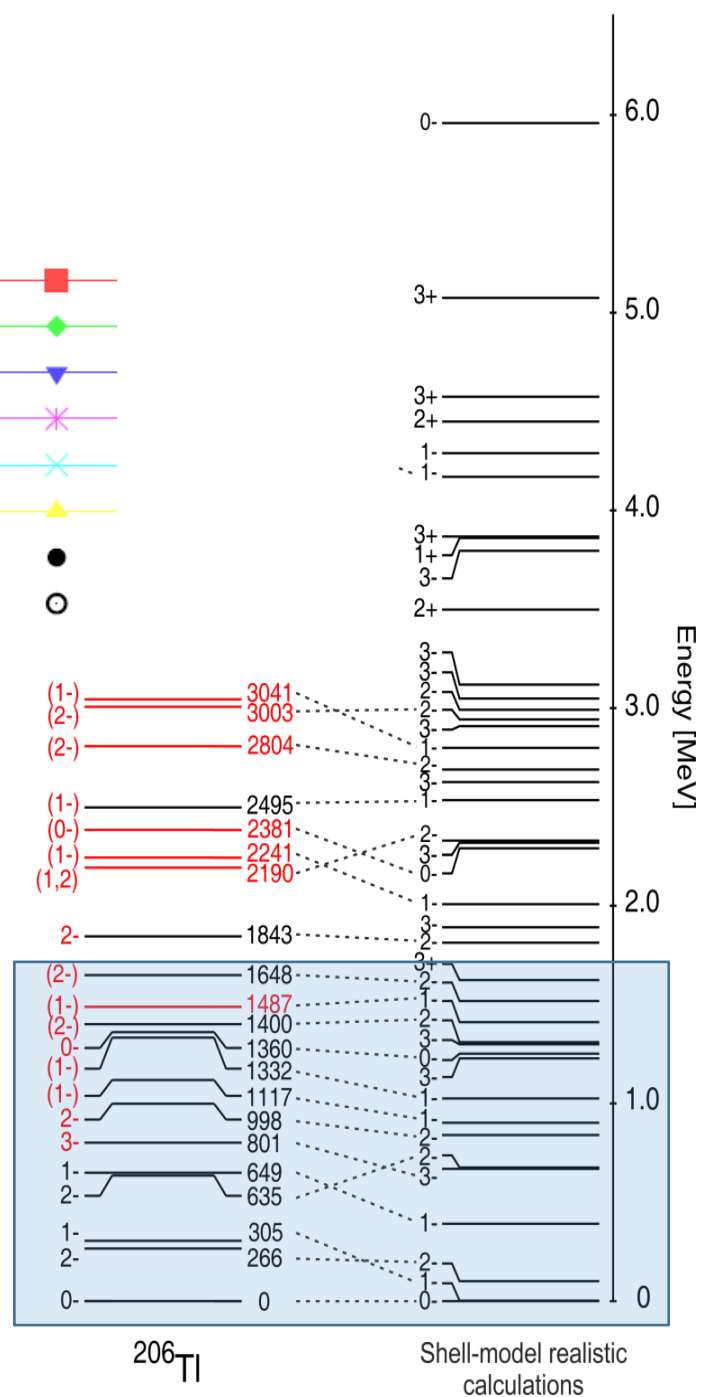
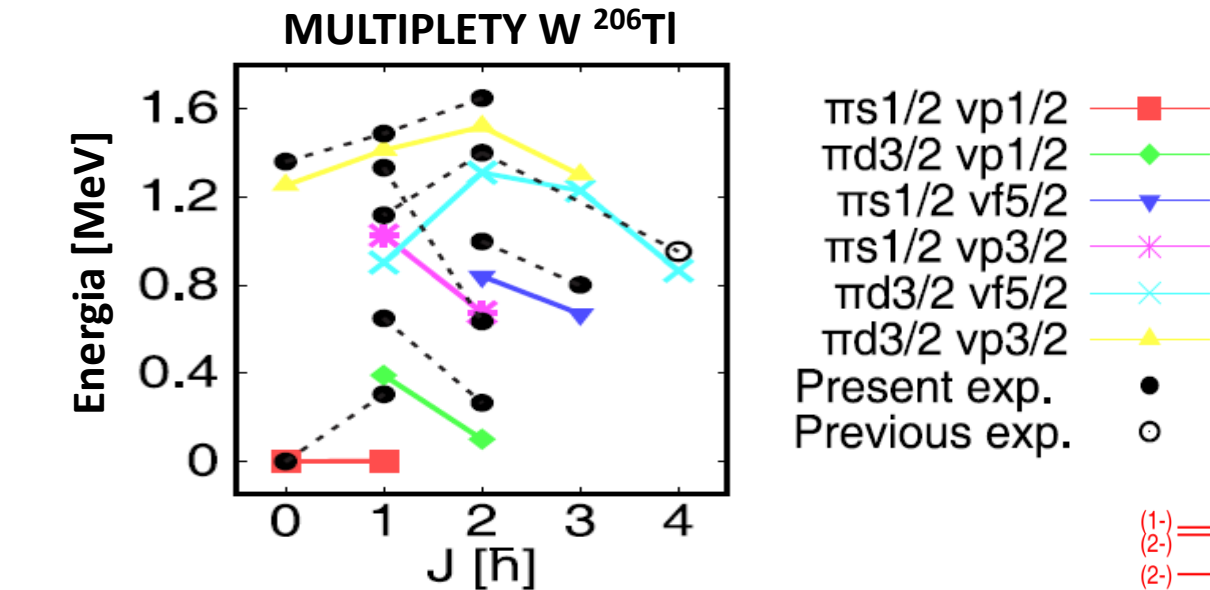
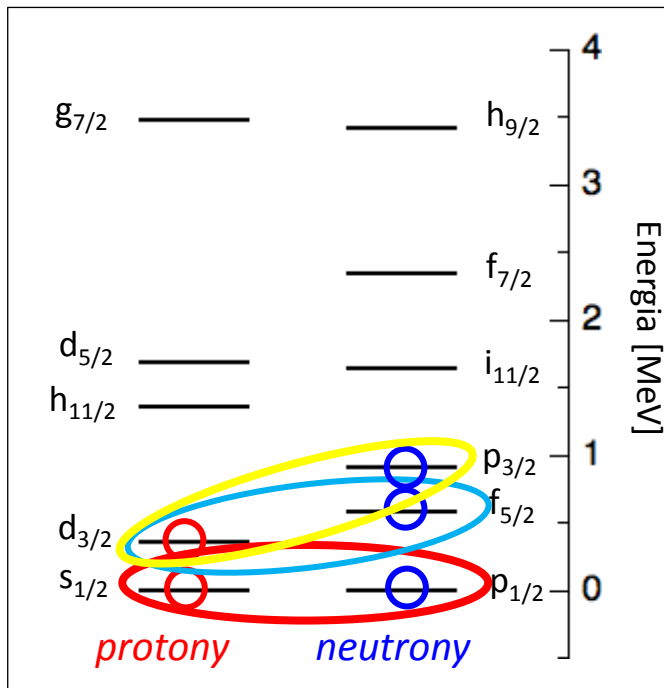


^{206}Tl

Rozkład spinów populowanych w reakcjach $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ oraz $^{205}\text{Tl}(n,\gamma)^{206}\text{Tl}$



Obliczenia modelu powłokowego dla ^{206}Tl



Obliczenia modelu powłokowego dla ^{206}Tl

4-,1+ ————— 6503

0 ————— 6.0

3+ ————— 5.0

4.0

3.0

2.0

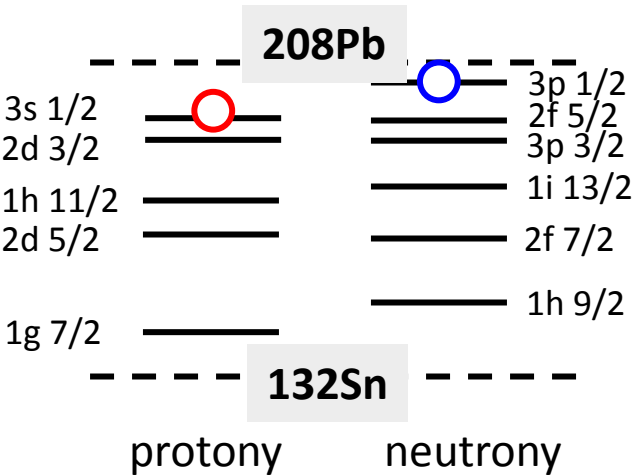
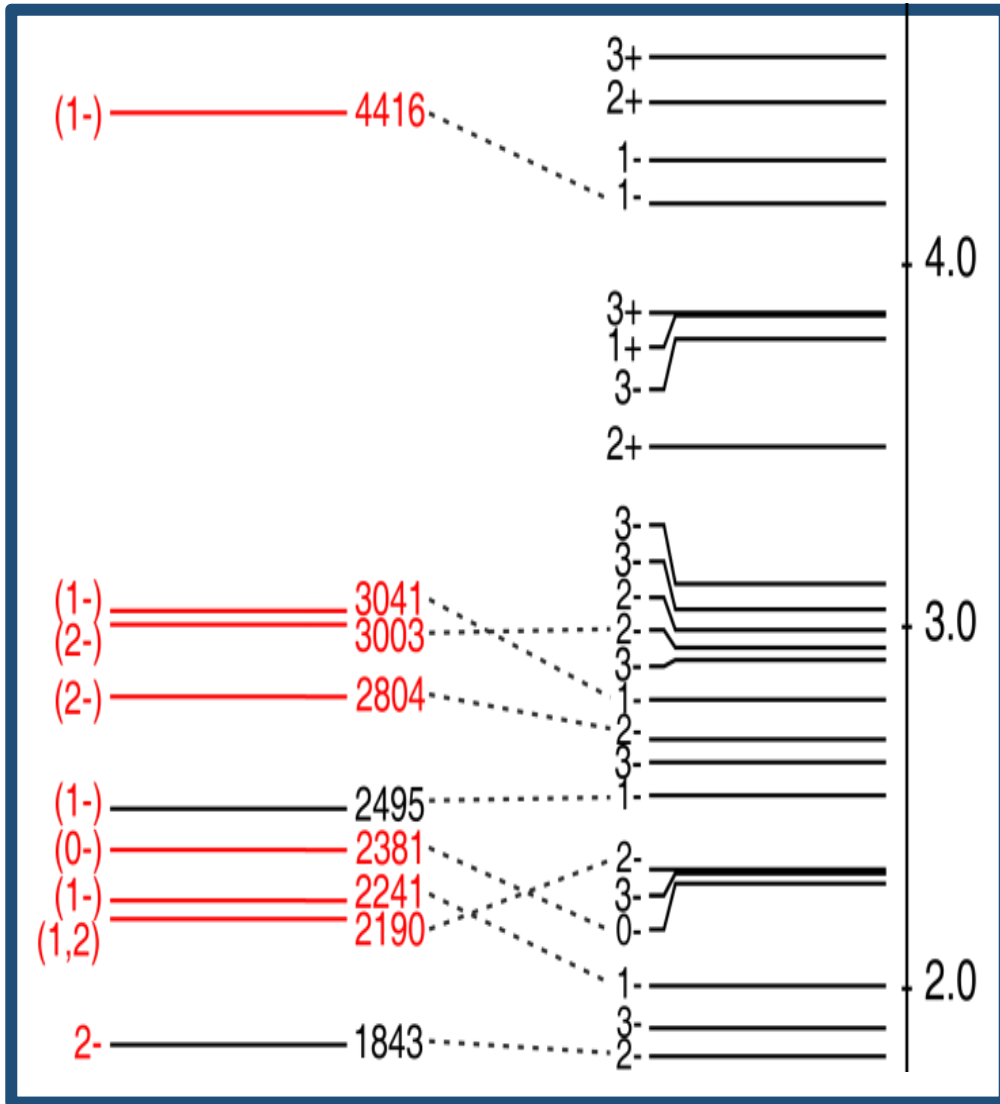
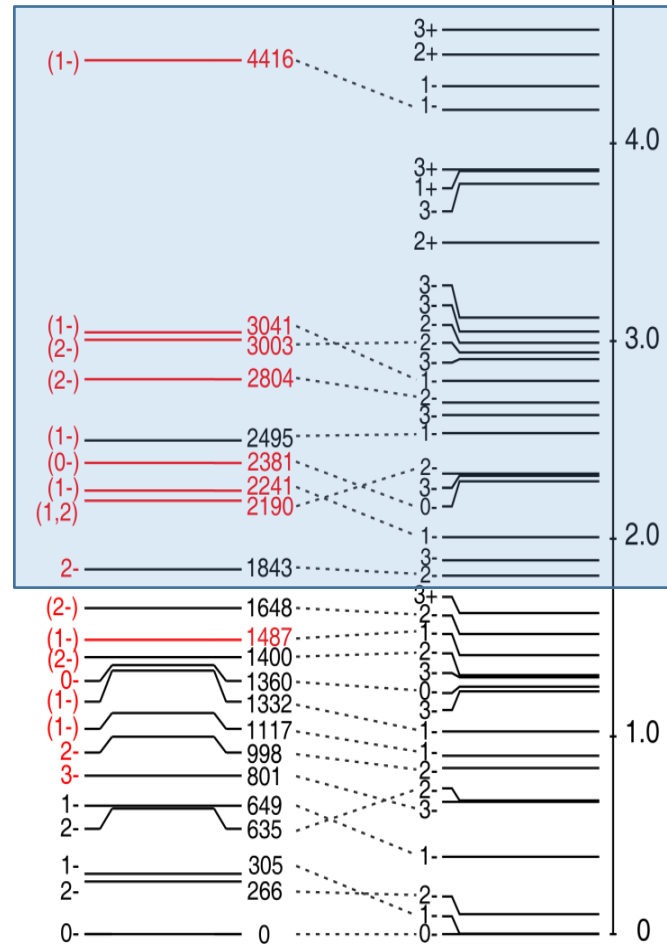
1.0

0

Energy [MeV]

^{206}Tl

Shell-model realistic calculations

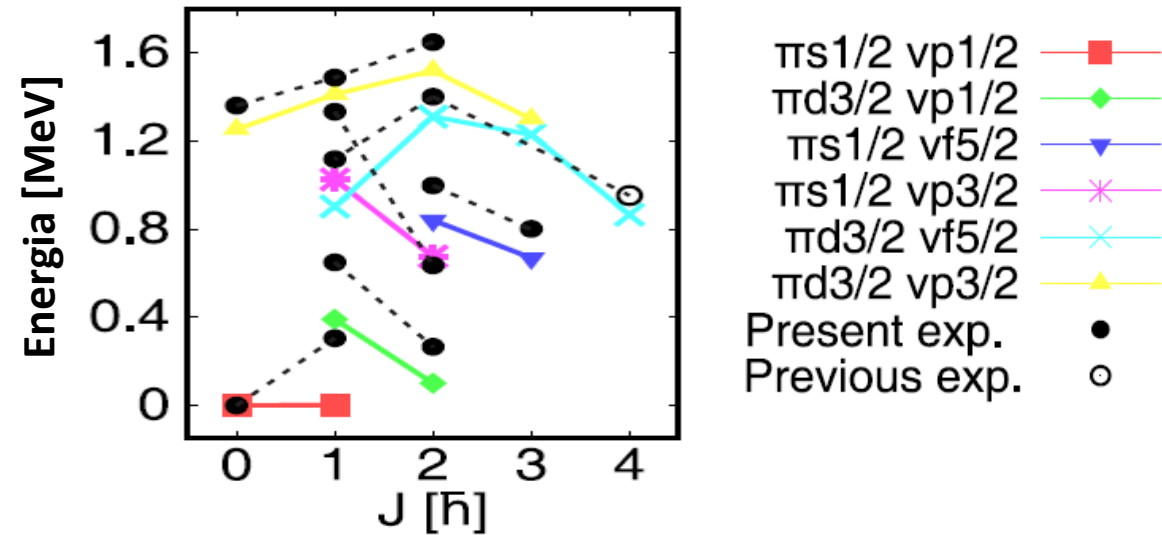


Oddziaływania realistyczne wyprowadzone z potencjału nukleon-nukleon, przy użyciu podejścia $V_{\text{low-k}}$
 (prof. Angela Gargano, INFN Napoli)

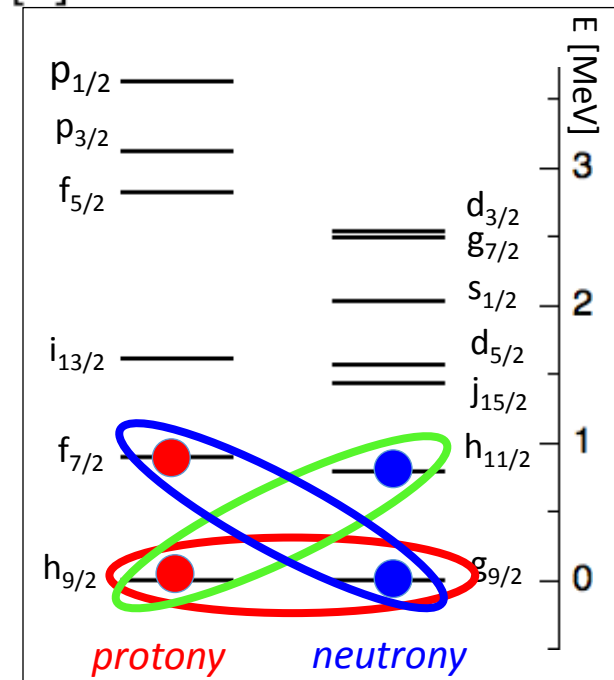
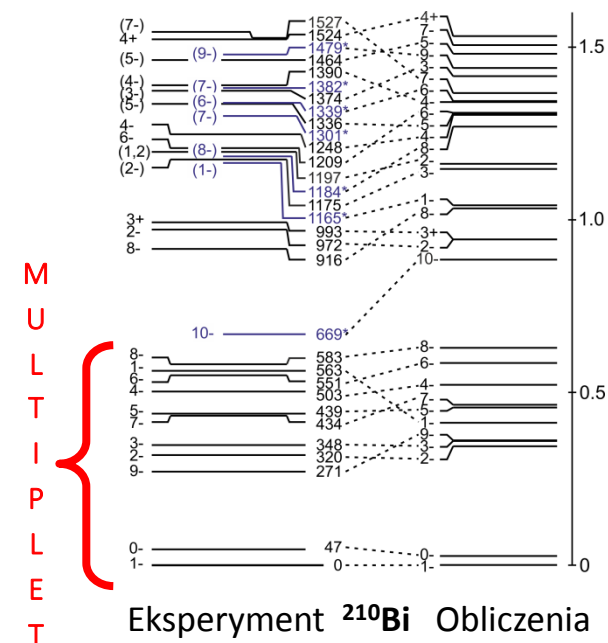
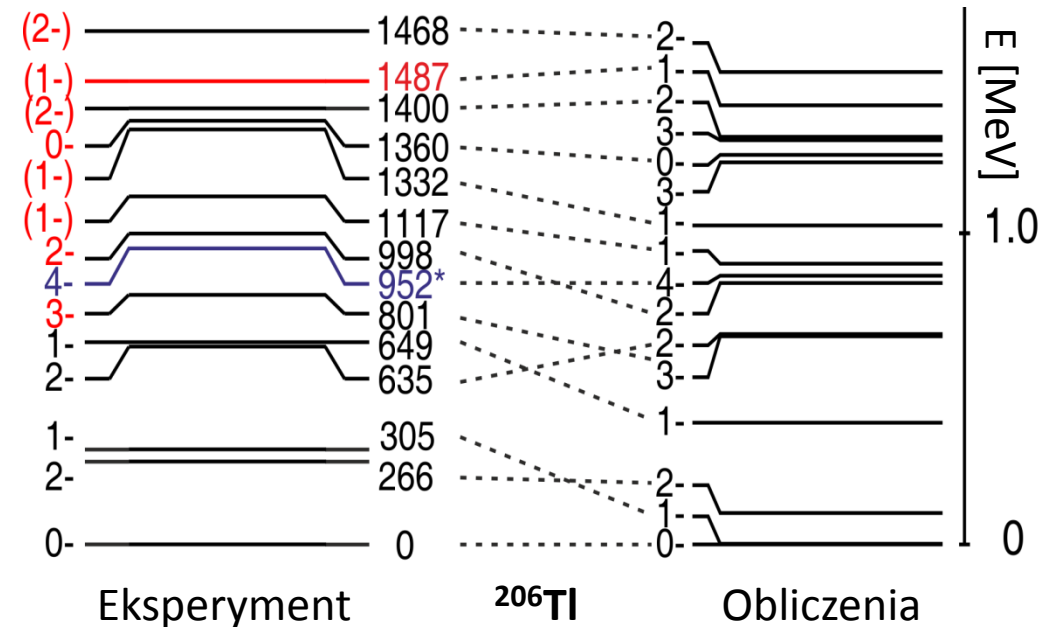
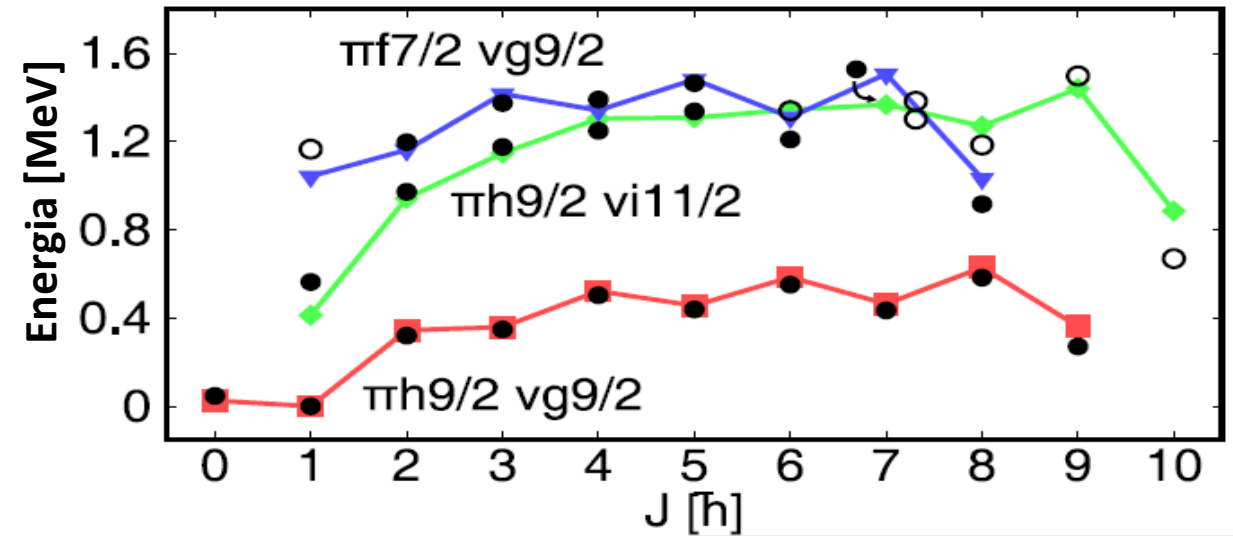
Średnia różnica energii pomiędzy wartościami eksperymentalnymi i obliczonymi: ~180 keV

Obliczenia modelu powłokowego dla jąder ^{206}Tl oraz ^{210}Bi

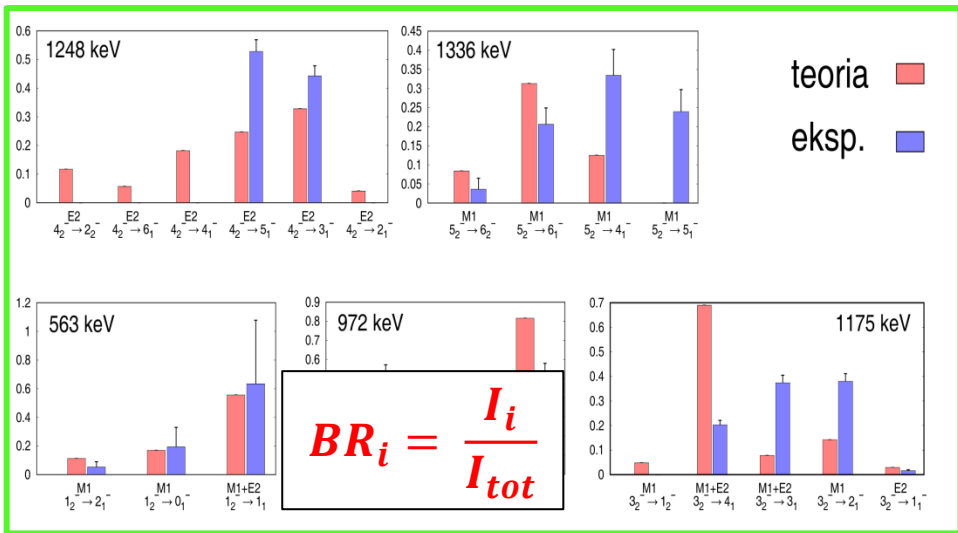
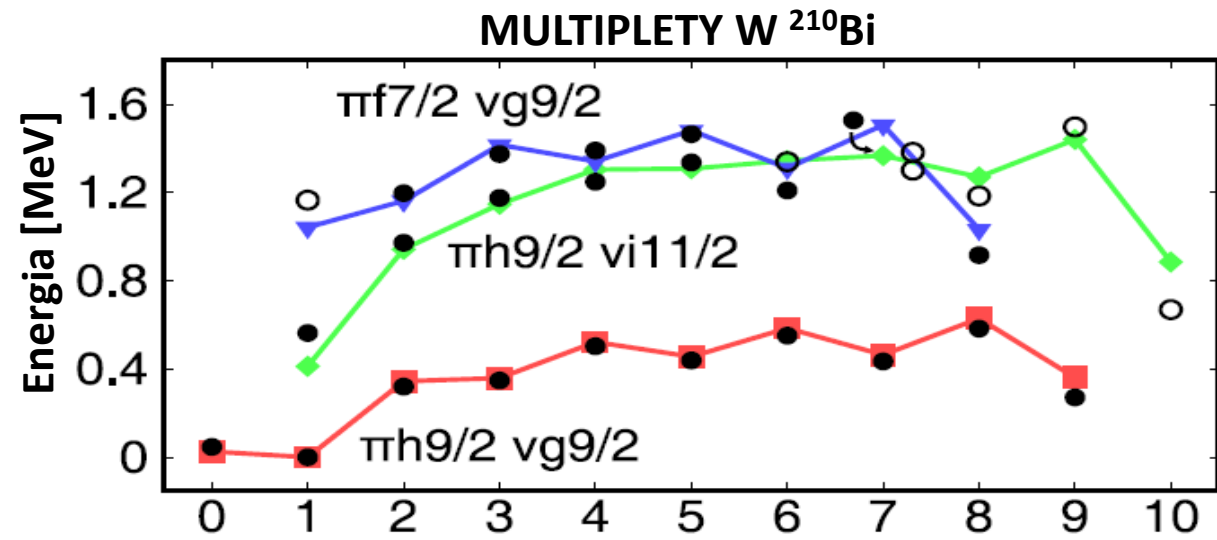
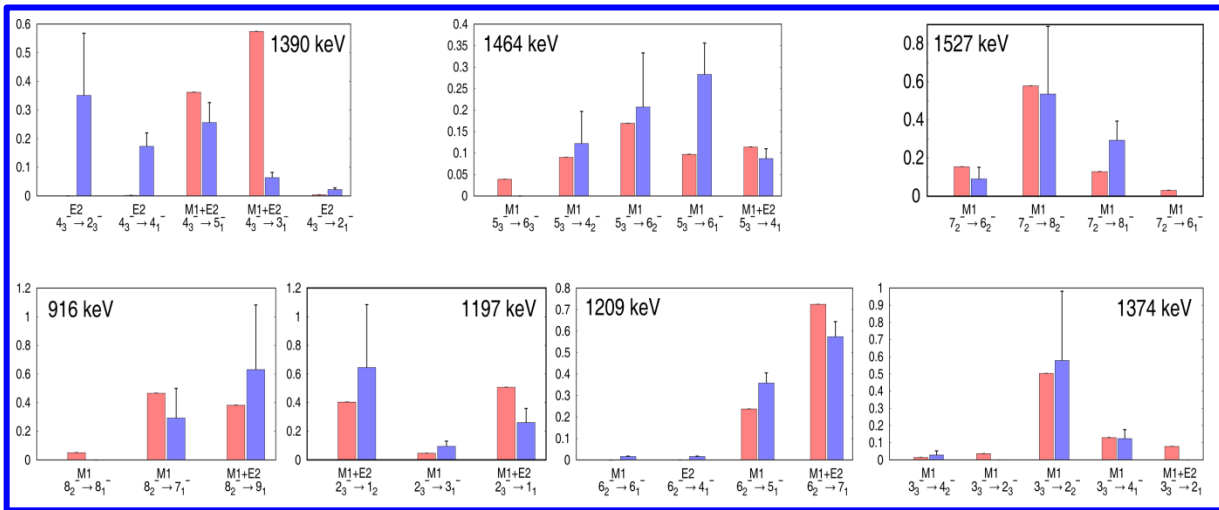
MULTIPLETY W ^{206}Tl



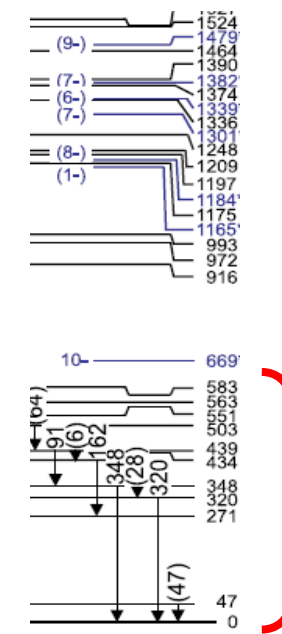
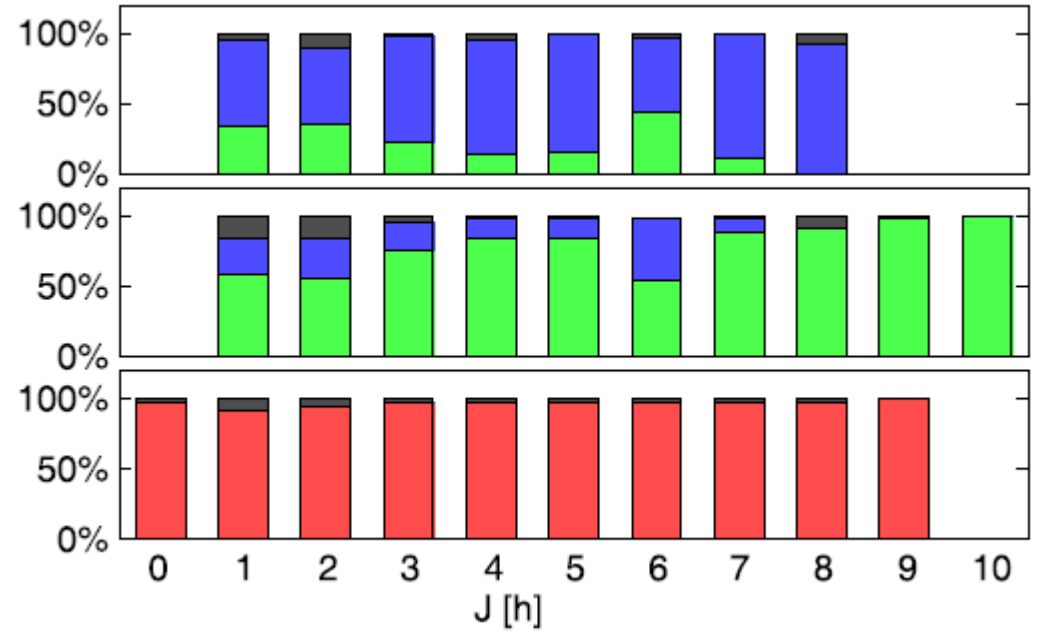
MULTIPLETY W ^{210}Bi



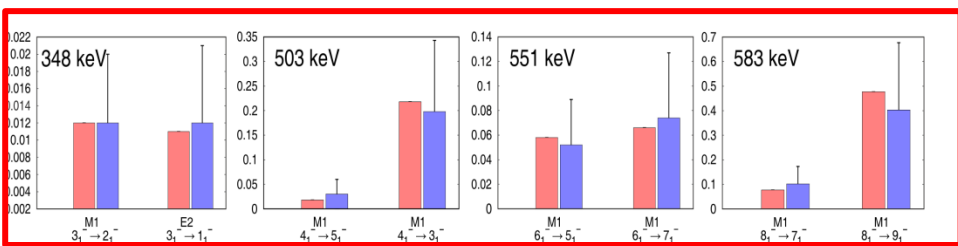
Porównanie stosunków rozgałęzień (Branching Ratios) w ^{210}Bi z obliczeniami modelu powłokowego



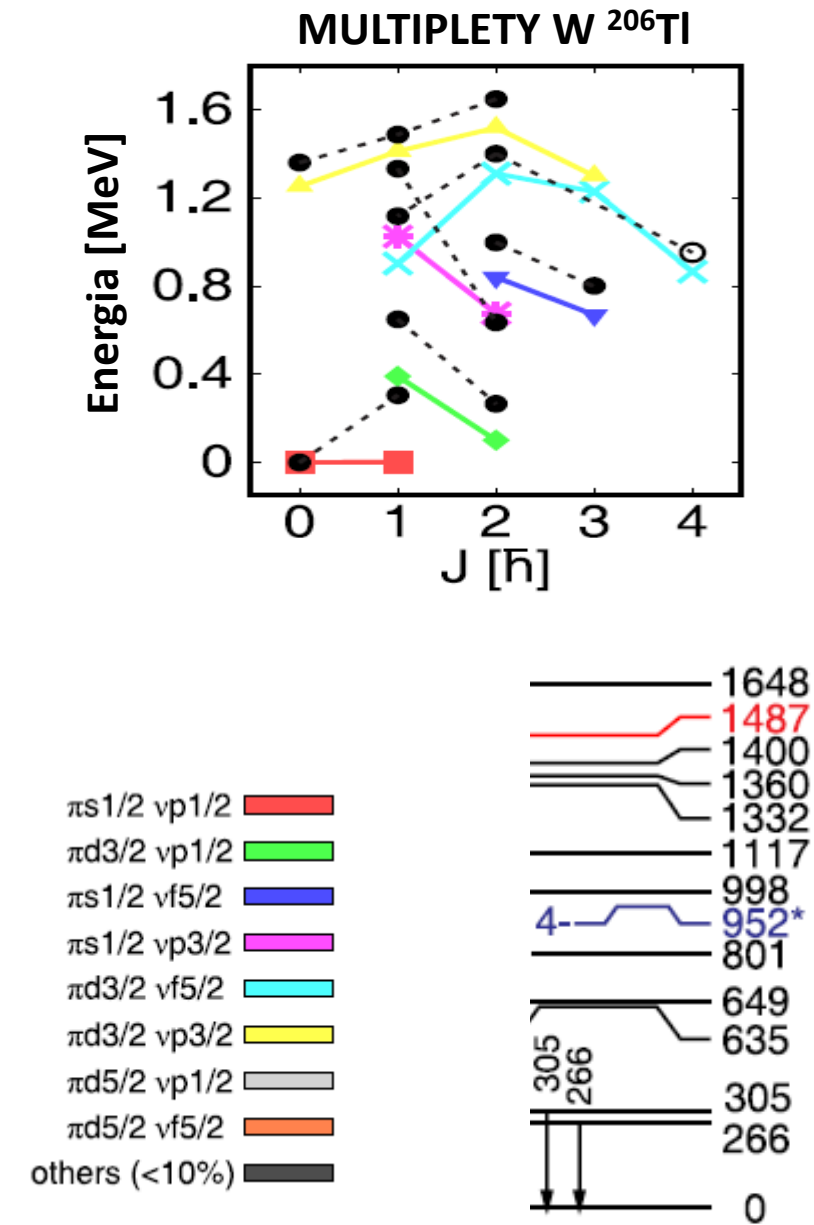
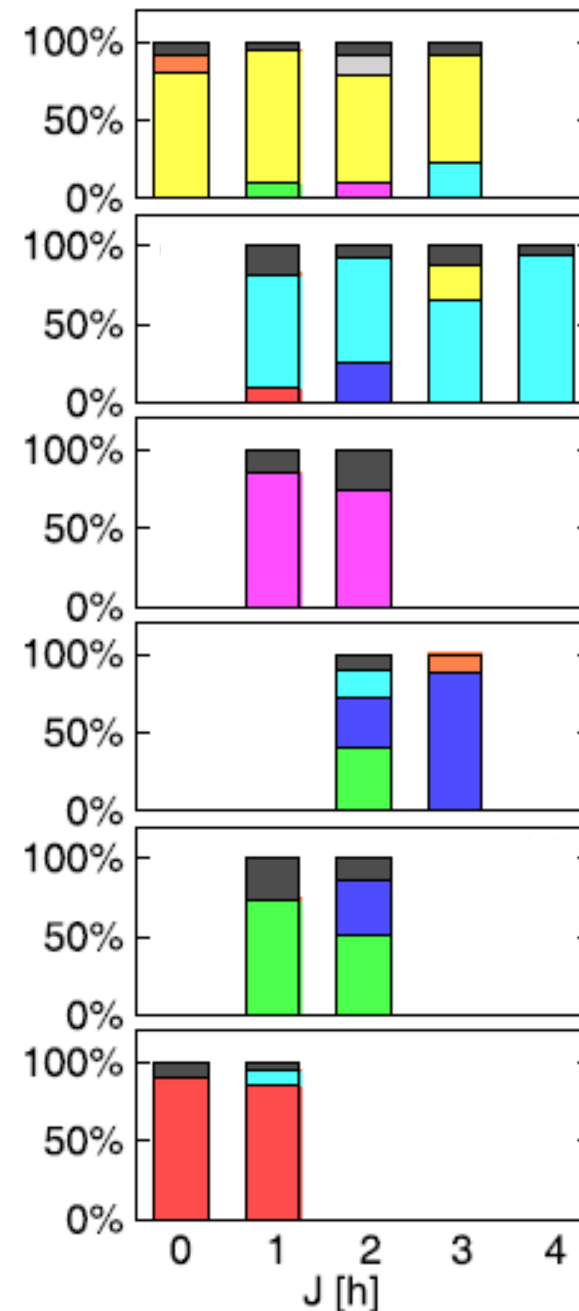
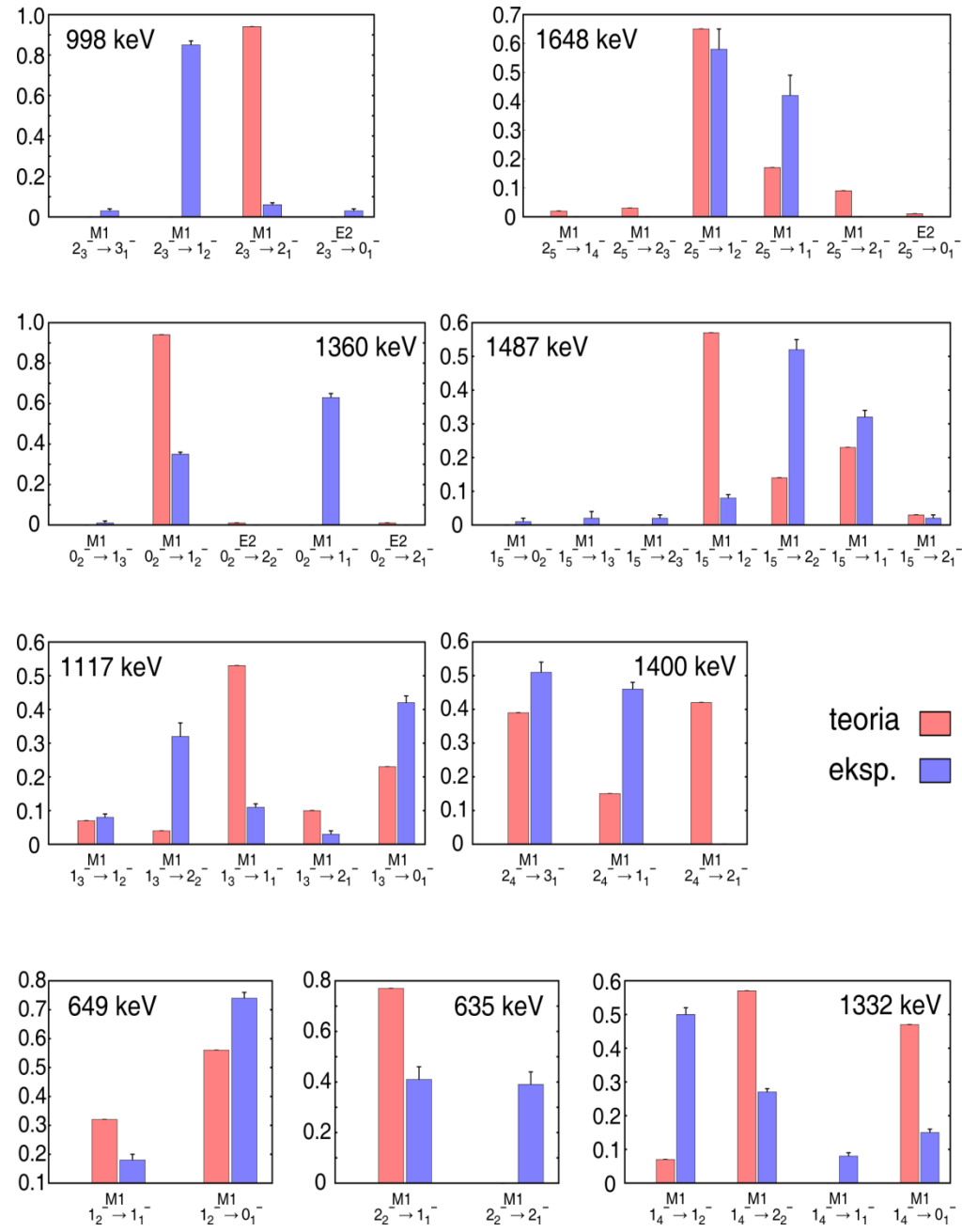
UDZIAŁ KONFIGURACJI



MULTIPLY



Porównanie stosunków rozgałęzień (**Branching Ratios**) w ^{206}Tl z obliczeniami modelu powłokowego



Zmieszanie konfiguracji

Hamiltonian w modelu powłokowym:

$$H = H_0 + V_R$$

Niezależny ruch A nukleonów
w uśrednionym potencjale

Oddziaływania nieuśrednione
dla poszczególnych par nukleonów

$$V_R = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^A V_{ij}$$

$$|\Psi_n\rangle = \sum_l a_{ln} |\phi_l\rangle$$

$$H|\Psi_n\rangle = E_n |\Psi_n\rangle$$

$$\begin{pmatrix} H_{11} & \cdots & H_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1} & \cdots & H_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{Nn} \end{pmatrix} = E_n \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{Nn} \end{pmatrix}$$



$$\langle \phi_k | V_R | \phi_l \rangle$$

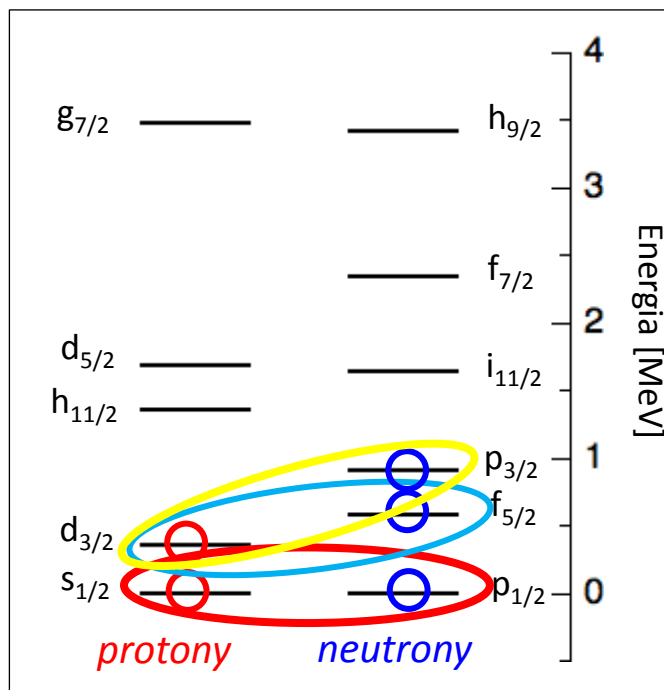
Macierz oddziaływań

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

Zmieszanie konfiguracji

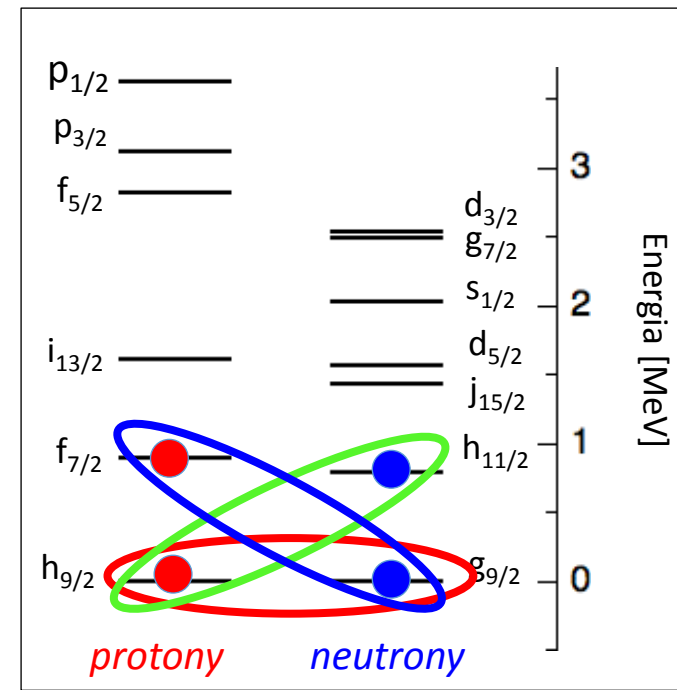
opisywane jest przez
pozadiagonalne elementy
macierzowe

Oddziaływania cząstka-cząstka i dziura-dziura względem rdzenia ^{208}Pb

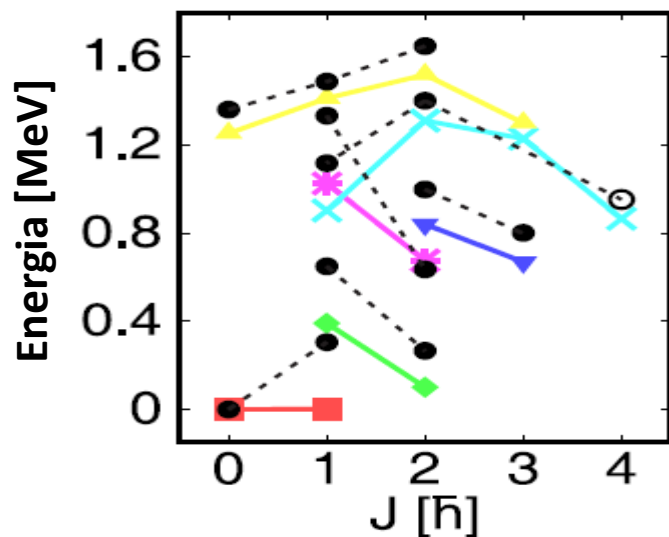


Macierz oddziaływań

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \dots \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \dots \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

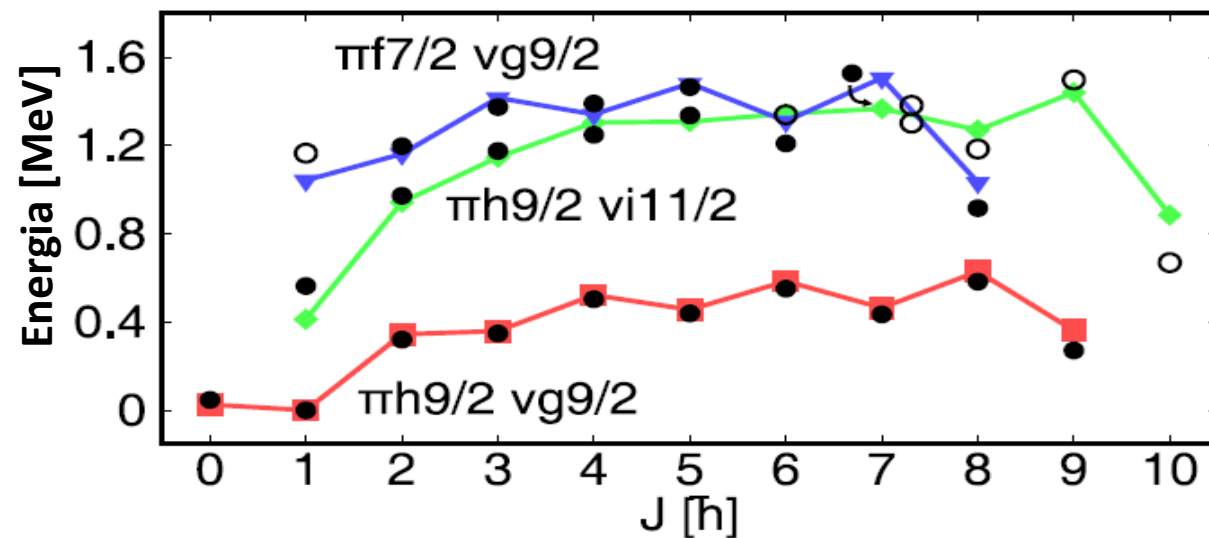


MULTIPLYTY W ^{206}Tl



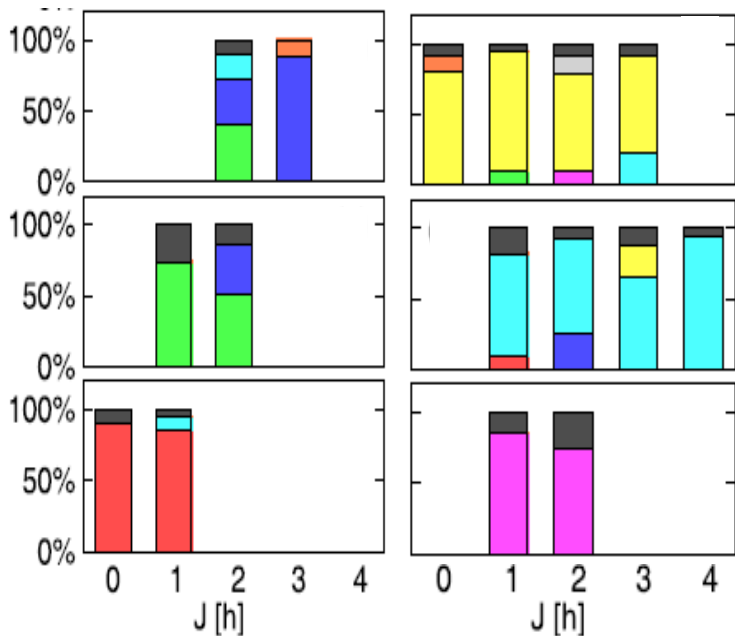
- $\pi s_{1/2} \nu p_{1/2}$ —■—
- $\pi d_{3/2} \nu p_{1/2}$ —◆—
- $\pi s_{1/2} \nu f_{5/2}$ —▼—
- $\pi s_{1/2} \nu p_{3/2}$ —*—
- $\pi d_{3/2} \nu f_{5/2}$ —×—
- $\pi d_{3/2} \nu p_{3/2}$ —▲—
- Present exp. ●
- Previous exp. ○

MULTIPLYTY W ^{210}Bi



Oddziaływania cząstka-cząstka i dziura-dziura względem rdzenia ^{208}Pb

UDZIAŁ KONFIGURACJI W ^{206}Tl

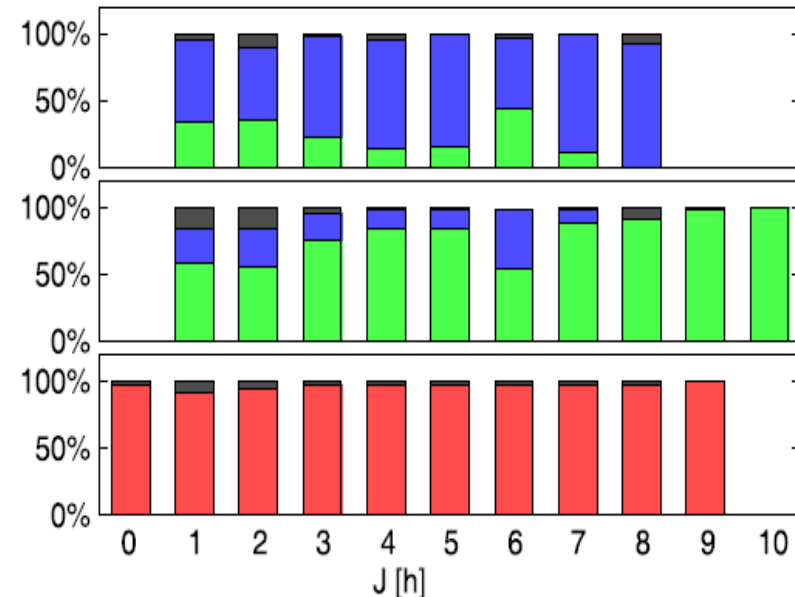


Macierz oddziaływań

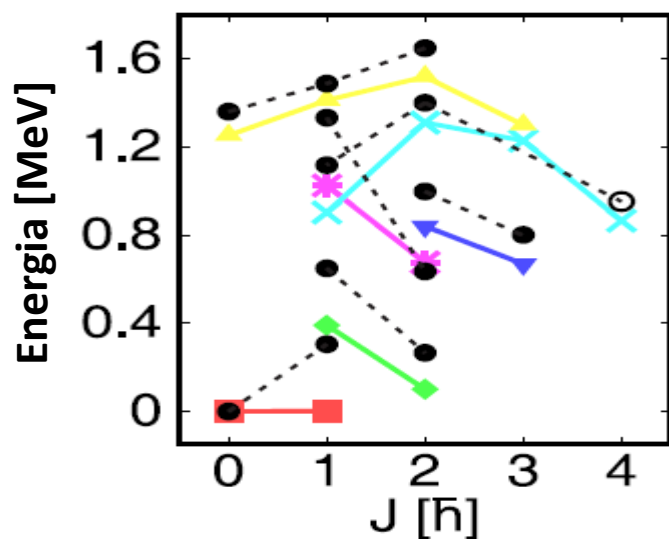
$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \dots \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \dots \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

- $\pi s_{1/2} \nu p_{1/2}$ (red)
- $\pi d_{3/2} \nu p_{1/2}$ (green)
- $\pi s_{1/2} \nu f_{5/2}$ (blue)
- $\pi s_{1/2} \nu p_{3/2}$ (magenta)
- $\pi d_{3/2} \nu f_{5/2}$ (cyan)
- $\pi d_{3/2} \nu p_{3/2}$ (yellow)
- $\pi d_{5/2} \nu p_{1/2}$ (grey)
- $\pi d_{5/2} \nu f_{5/2}$ (orange)
- others (<10%) (black)

UDZIAŁ KONFIGURACJI W ^{210}Bi

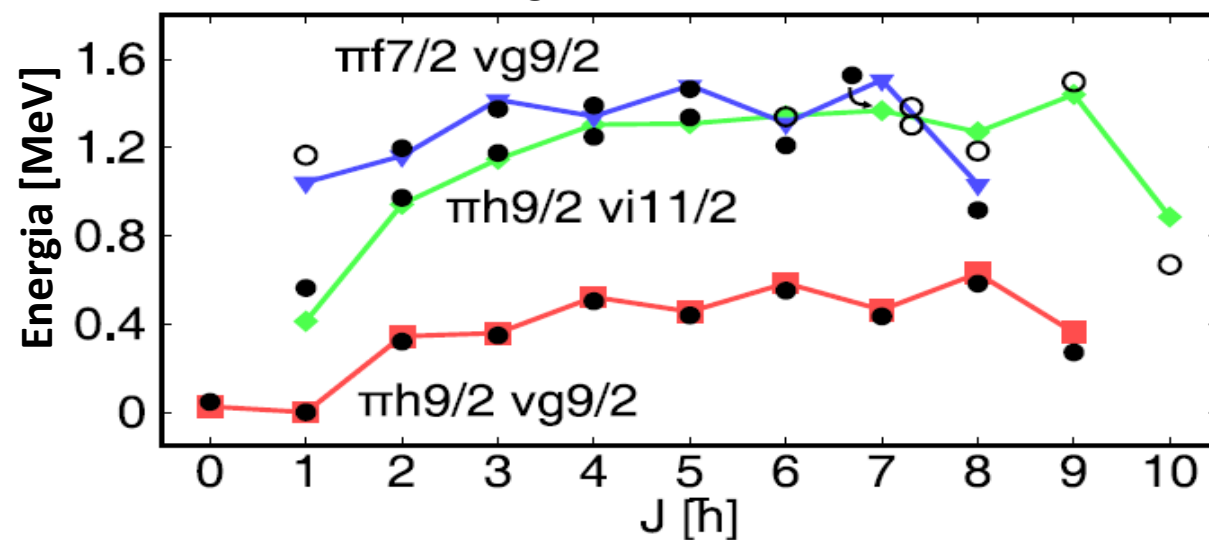


MULTIPLYTY W ^{206}Tl



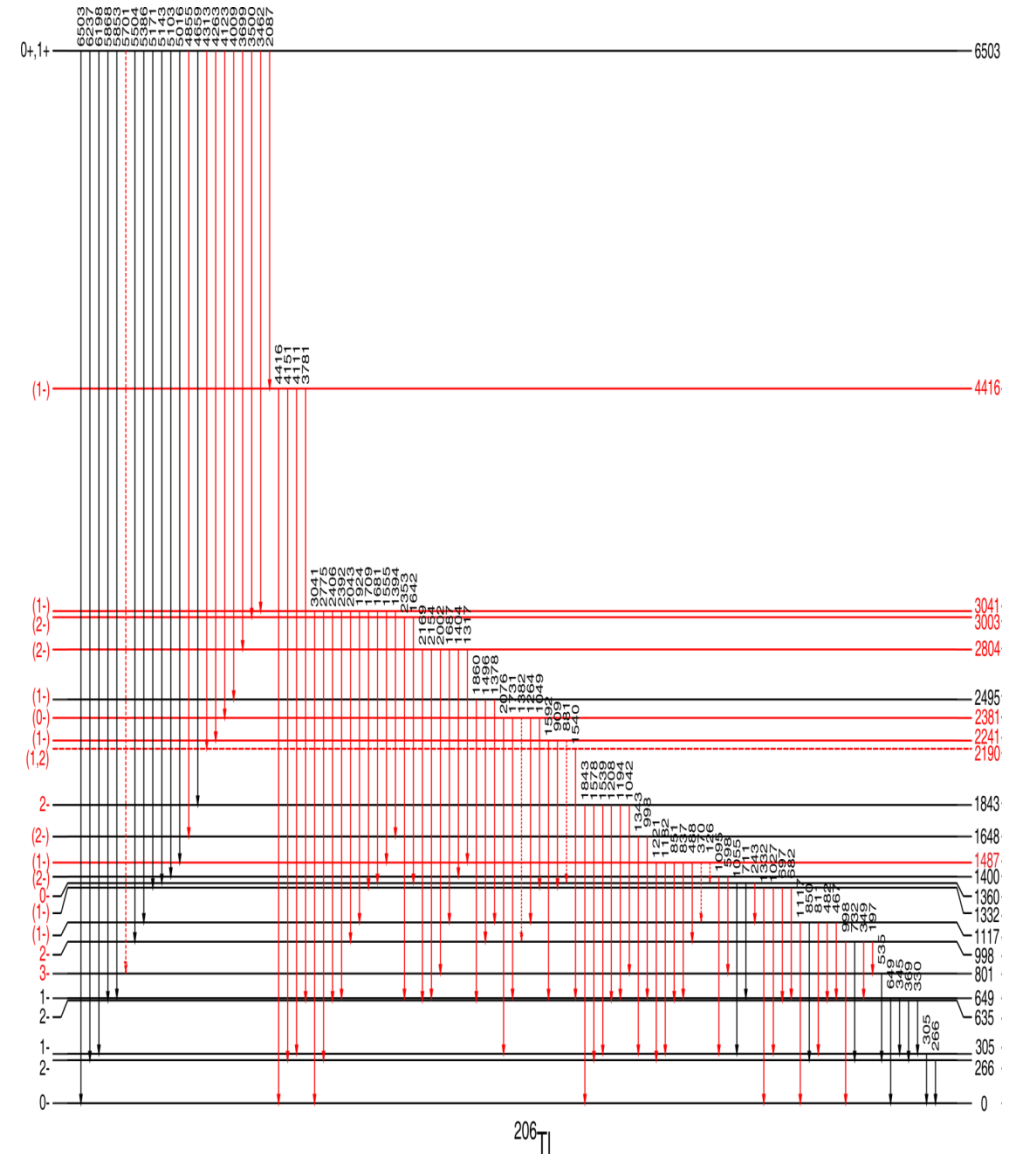
- $\pi s_{1/2} \nu p_{1/2}$ (red square)
- $\pi d_{3/2} \nu p_{1/2}$ (green diamond)
- $\pi s_{1/2} \nu f_{5/2}$ (blue triangle down)
- $\pi s_{1/2} \nu p_{3/2}$ (magenta asterisk)
- $\pi d_{3/2} \nu f_{5/2}$ (cyan cross)
- $\pi d_{3/2} \nu p_{3/2}$ (yellow triangle up)
- Present exp. (black dot)
- Previous exp. (open circle)

MULTIPLYTY W ^{210}Bi



Podsumowanie

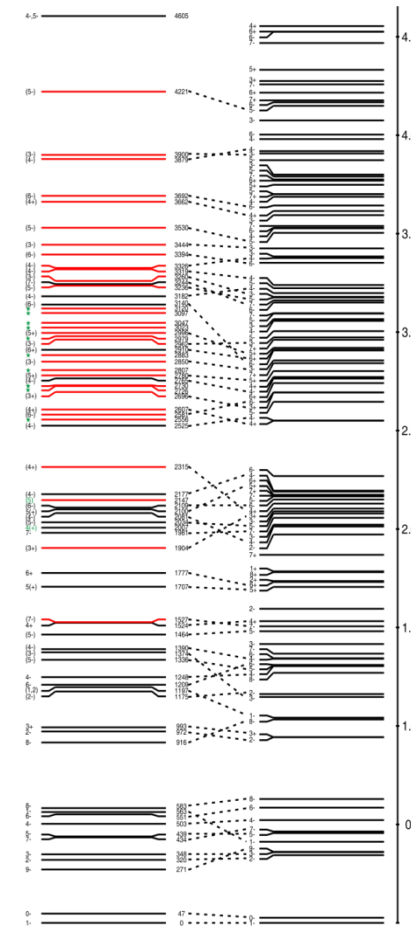
❖ Niezwykle bogate wyniki otrzymane z pomiarów $^{205}\text{Tl}(n,\gamma)^{206}\text{Tl}$ oraz $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ stanowią świetny materiał do sprawdzenia opisu stanów przy pomocy różnego typu obliczeń teoretycznych.



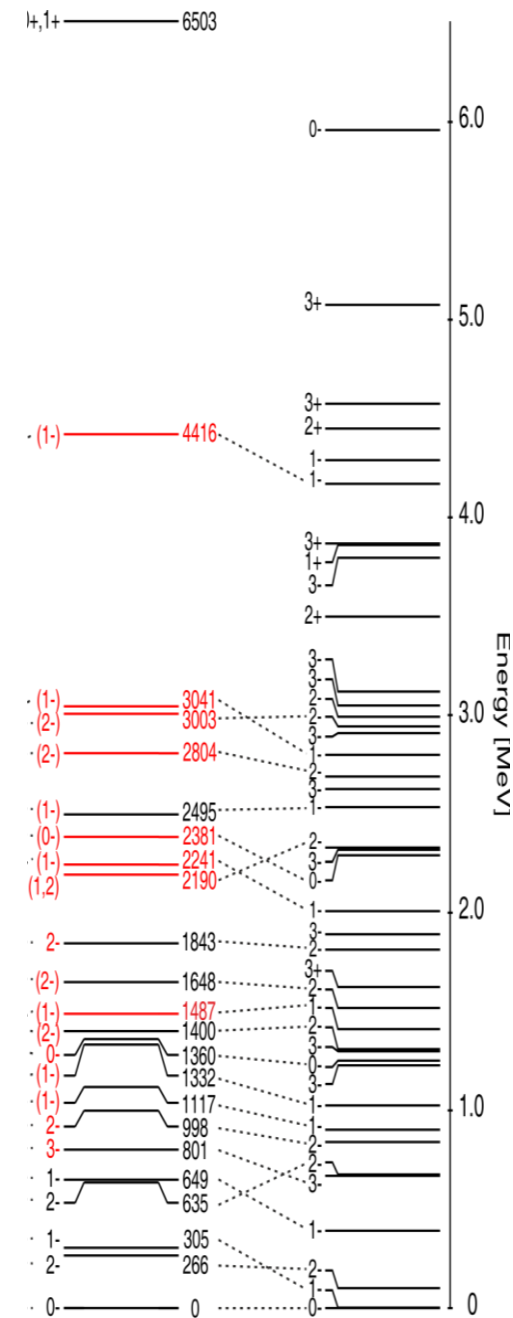
Podsumowanie

❖ Niezwykle bogate wyniki otrzymane z pomiarów $^{205}\text{Tl}(n,\gamma)^{206}\text{Tl}$ oraz $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ stanowią świetny materiał do sprawdzenia opisu stanów przy pomocy różnego typu obliczeń teoretycznych.

❖ Przewidywania modelu powłokowego z użyciem **realistycznych oddziaływań nukleon-nukleon** zostały przetestowane dla systemów o 2 cząstkach i 2 dziurach względem podwójnie magicznego rdzenia ^{208}Pb .



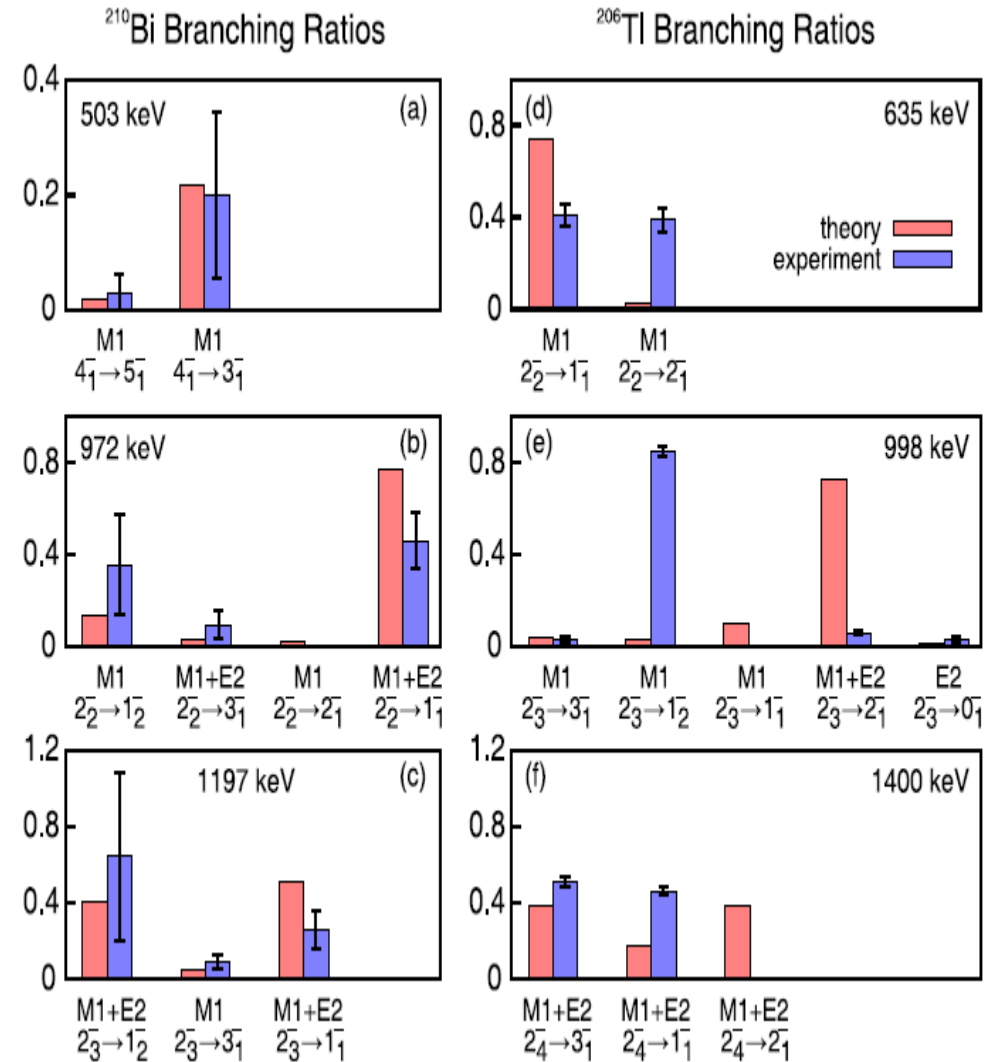
210Bi



206Tl

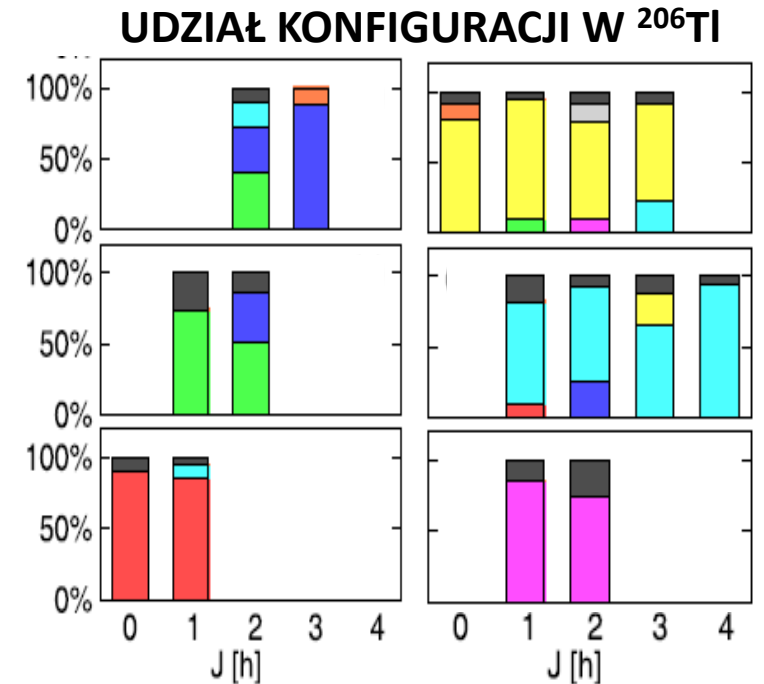
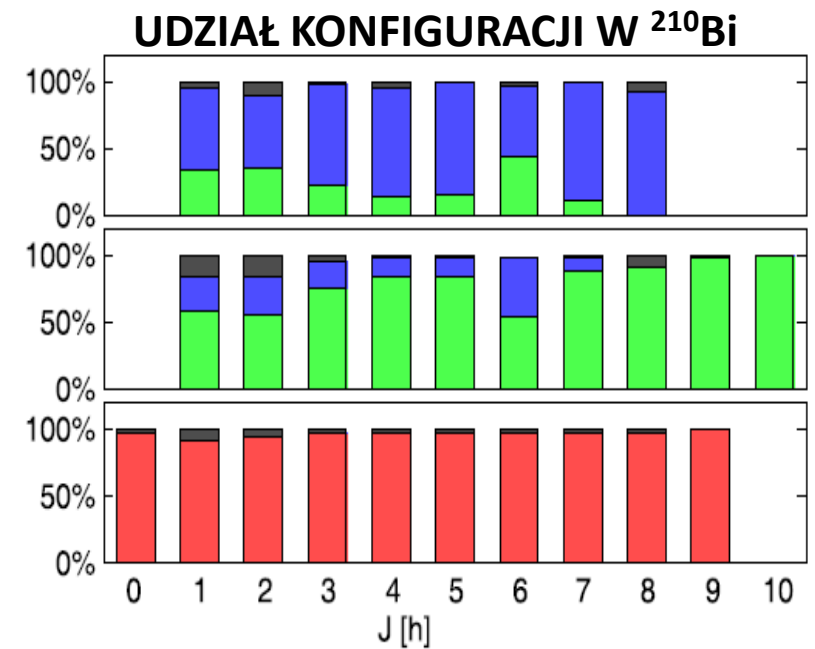
Podsumowanie

- ❖ Niezwykle bogate wyniki otrzymane z pomiarów $^{205}\text{Tl}(n,\gamma)^{206}\text{Tl}$ oraz $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ stanowią świetny materiał do sprawdzenia opisu stanów przy pomocy różnego typu obliczeń teoretycznych.
- ❖ Przewidywania modelu powłokowego z użyciem **realistycznych oddziaływań nukleon-nukleon** zostały przetestowane dla systemów o 2 cząstkach i 2 dziurach względem podwójnie magicznego rdzenia ^{208}Pb .
- ❖ Po raz pierwszy porównane zostały nie tylko energie stanów wzbudzonych ale także **stosunki rozgałęzień kwantów gamma**



Podsumowanie

- ❖ Niezwykle bogate wyniki otrzymane z pomiarów $^{205}\text{Tl}(n,\gamma)^{206}\text{Tl}$ oraz $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ stanowią świetny materiał do sprawdzenia opisu stanów przy pomocy różnego typu obliczeń teoretycznych.
- ❖ Przewidywania modelu powłokowego z użyciem **realistycznych oddziaływań nukleon-nukleon** zostały przetestowane dla systemów o 2 cząstkach i 2 dziurach względem podwójnie magicznego rdzenia ^{208}Pb .
- ❖ Po raz pierwszy porównane zostały nie tylko energie stanów wzbudzonych ale także **stosunki rozgałęzień kwantów gamma**
- ❖ Gorsza zgodność z obliczeniami w przypadku ^{206}Tl wskazuje na mniejszą dokładność wyznaczenia pozadiagonalnych elementów macierzowych
- ❖ Konieczność dalszego rozwijania metod konstrukcji oddziaływań realistycznych



N. Cieplicka-Oryńczak, B. Fornal, Ł. Iskra (*Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, Polska*)

S. Leoni, A. Bracco, G. Bocchi, S. Bottoni, G. Benzoni, F. Crespi
(*INFN Sezione di Milano and Università degli Studi di Milano, Mediolan, Włochy*)

A. Gargano (*INFN Sezione di Napoli, Neapol, Włochy*)

D. Bazzacco (*INFN Sezione di Padova, Padwa, Włochy*)

C. Michelagnoli, A. Blanc, M. Jentschel, U. Köster, P. Mutti, E. Ruiz-Martinez, T. Soldner
(*Institut Laue-Langevin, Grenoble, Francja*)

G. De France (*GANIL, Caen, Francja*)

C. Ur (*ELI-NP, Bukareszt-Magurele, Rumunia*)

W. Urban (*Uniwersytet Warszawski, Warszawa, Polska*)

N. Pietralla, V. Werner (*Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Niemcy*)

Serdecznie dziękuję za uwagę!