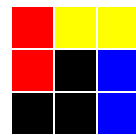


VANDLE



Spektroskopia neutronów opóźnionych po rozpadzie β

Aleksandra Fijałkowska



ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ
UNIwersytet Warszawski

Seminarium Fizyki Jądra Atomowego
18.10.2018

THE UNIVERSITY OF
TENNESSEE
KNOXVILLE



CENTER OF EXCELLENCE FOR
RADIOACTIVE ION BEAM STUDIES
FOR STEWARDSHIP SCIENCE



RUTGERS
THE STATE UNIVERSITY
OF NEW JERSEY

Plan prezentacji

Czym są neutrony opóźnione przemianą β i dlaczego ich detekcja jest ważna

Metody detekcji energii neutronów

The Versatile Array of Neutron Detectors at Low Energy (VANDLE)

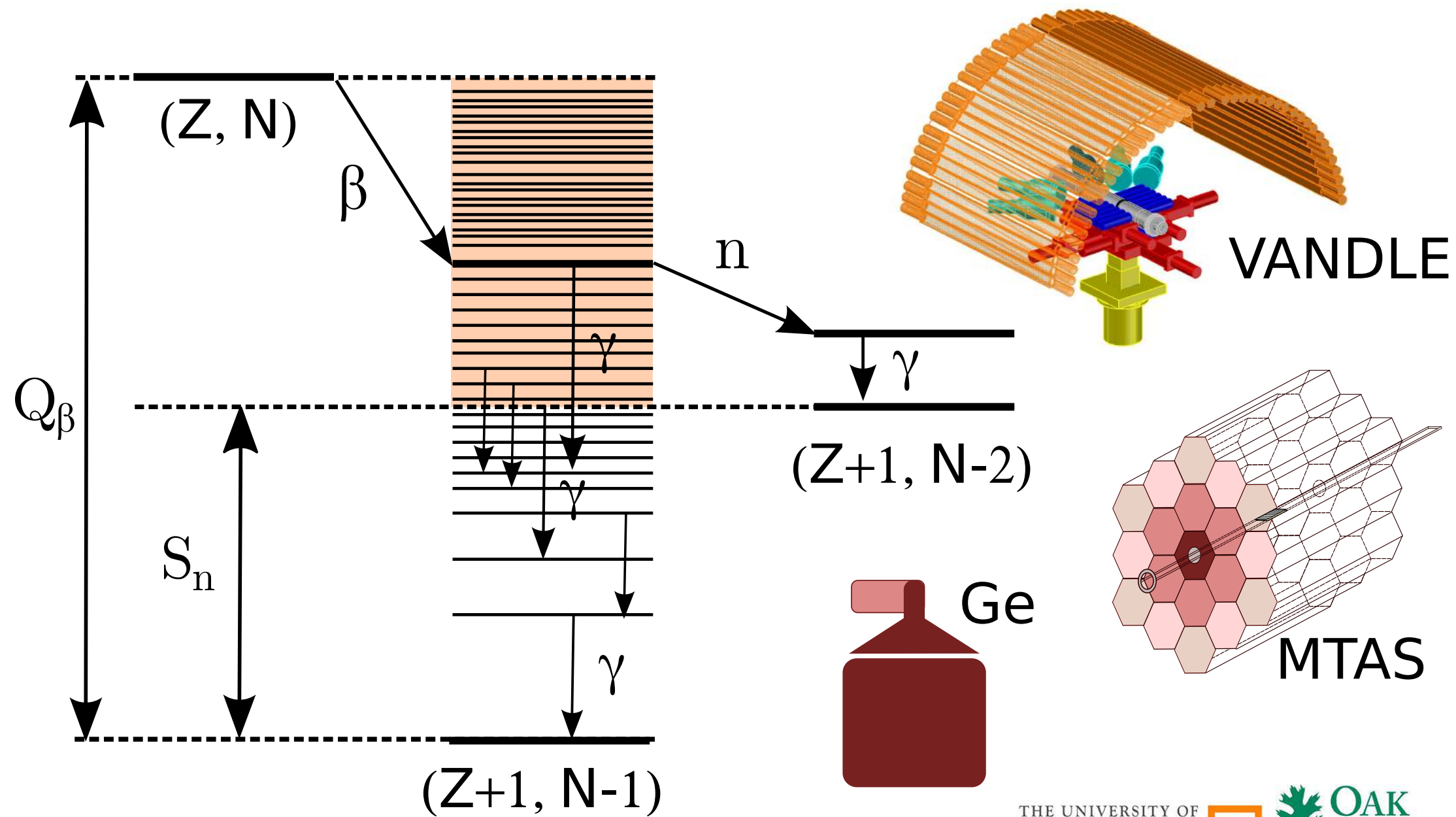
- budowa i zasada działania

Modelowanie funkcji odpowiedzi detektora

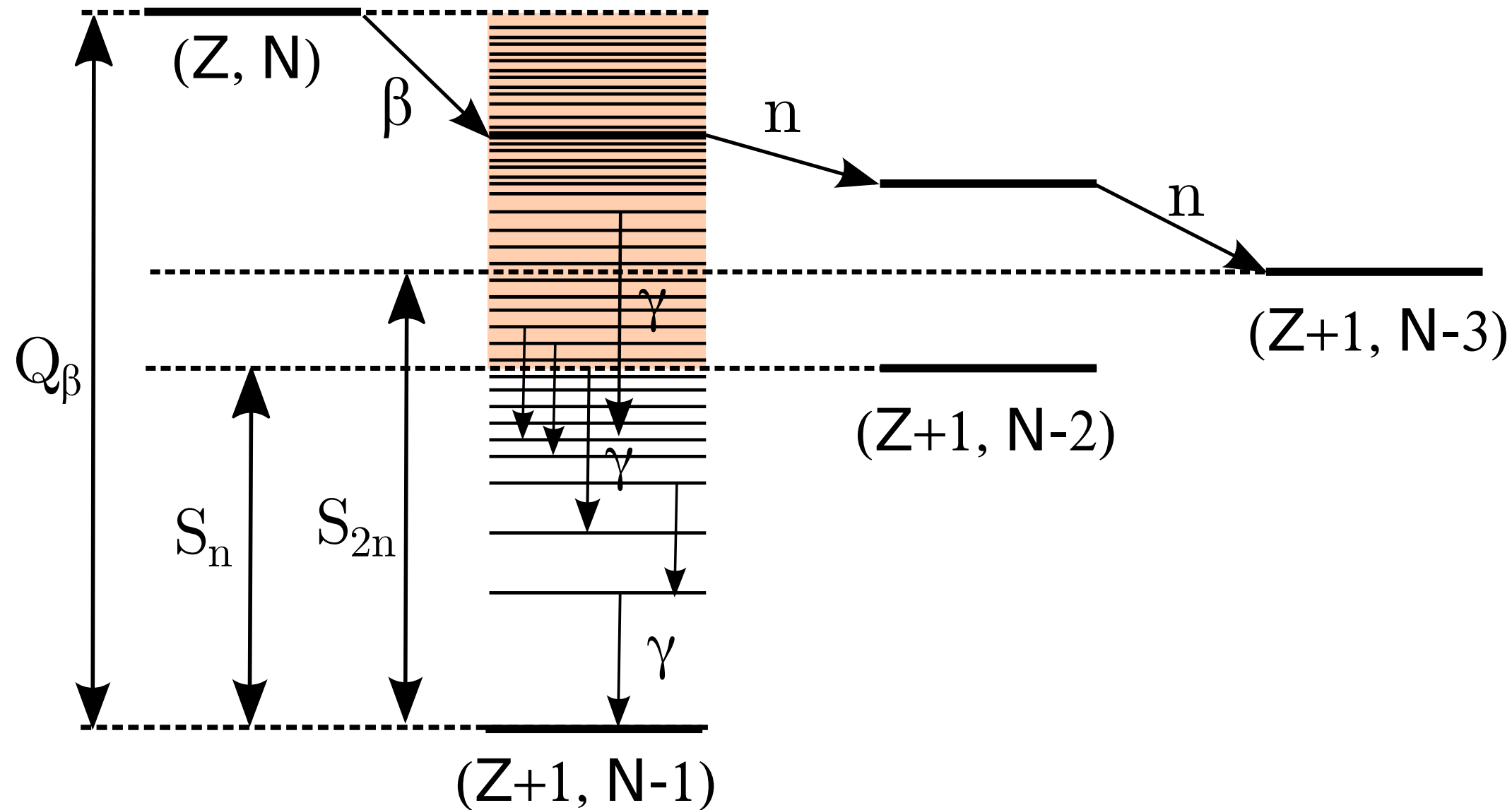
Dotychczasowe wyniki

Plany

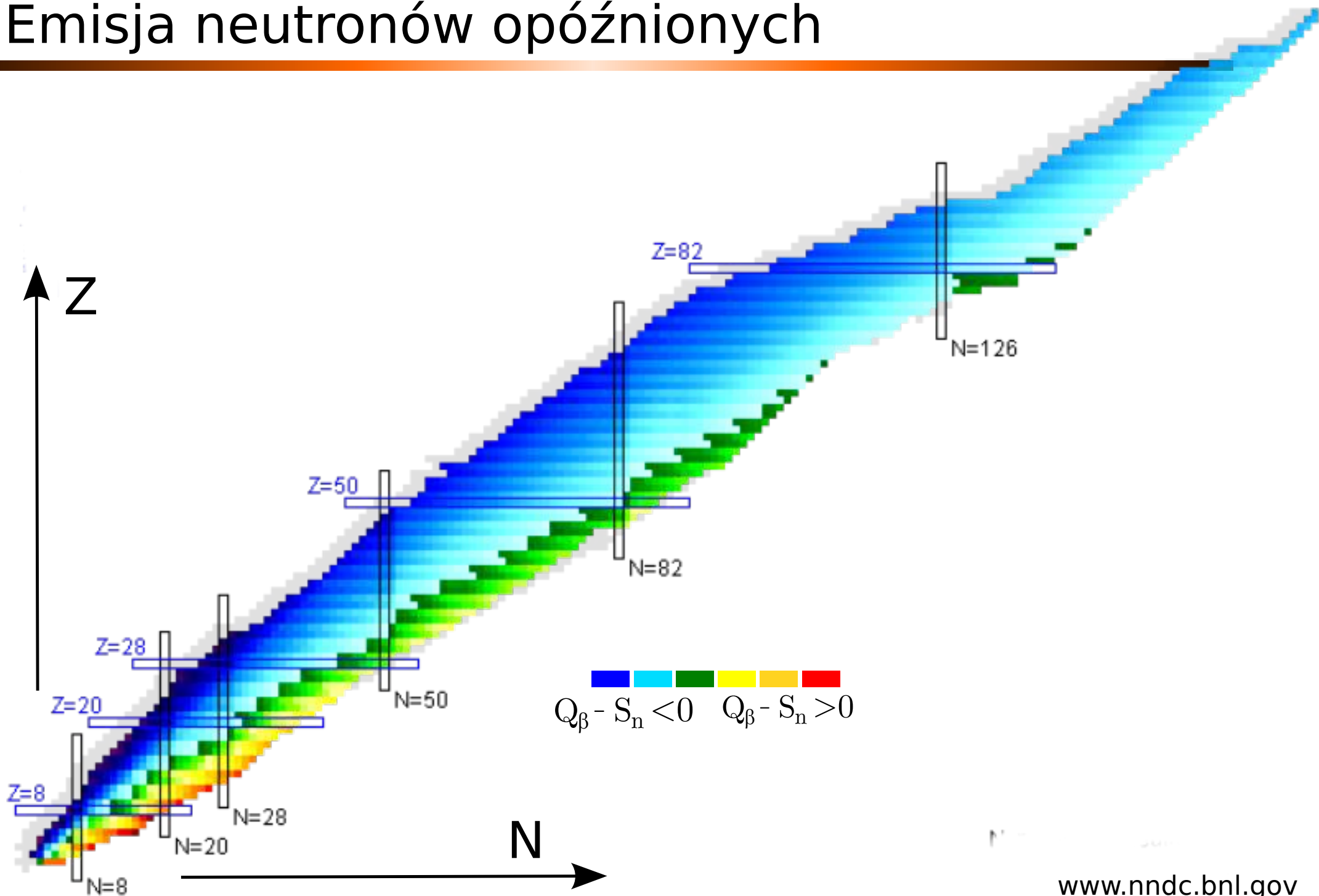
Emisja neutronów opóźnionych



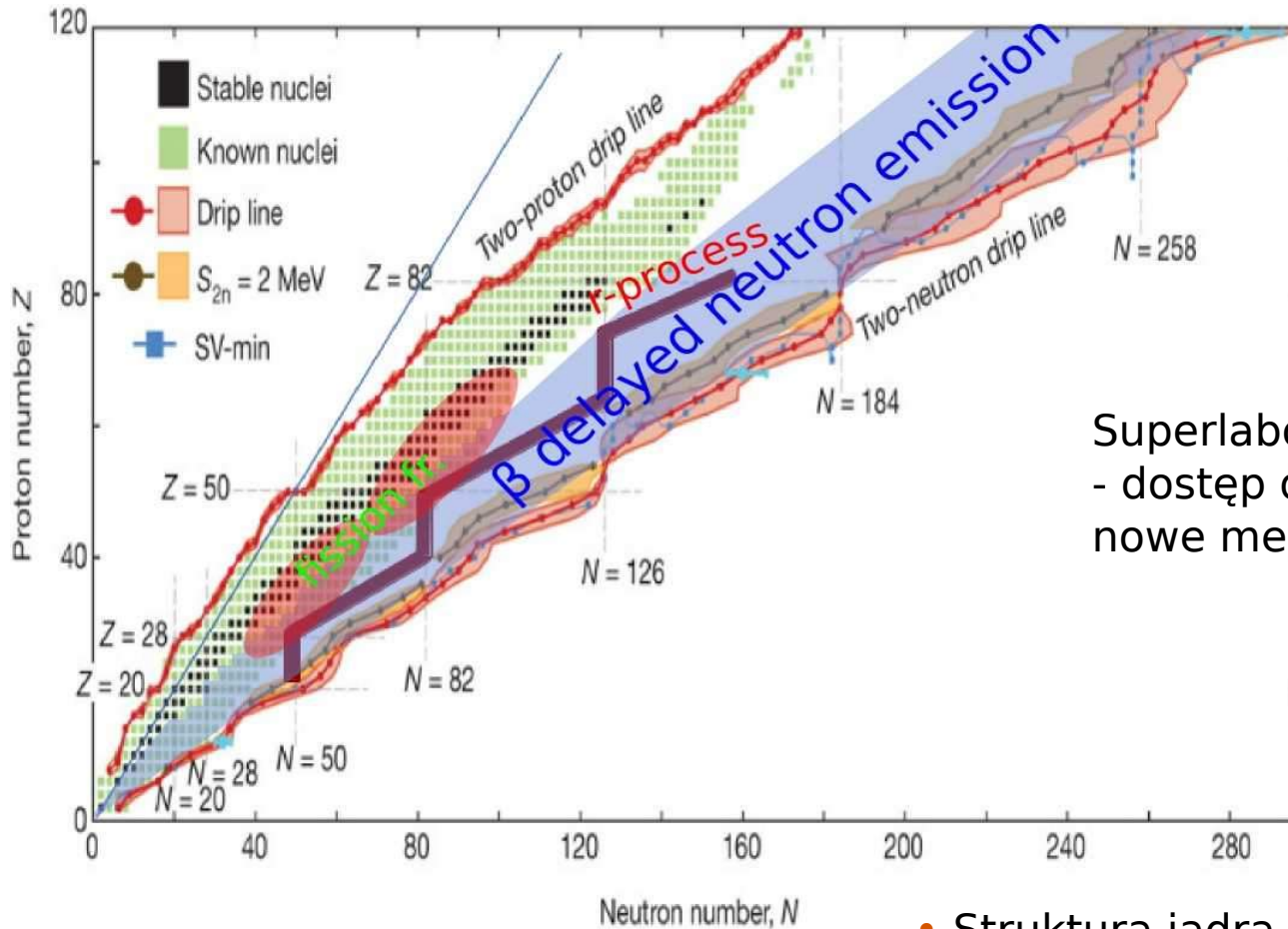
Emisja neutronów opóźnionych



Emisja neutronów opóźnionych



Detekcja neutronów opóźnionych



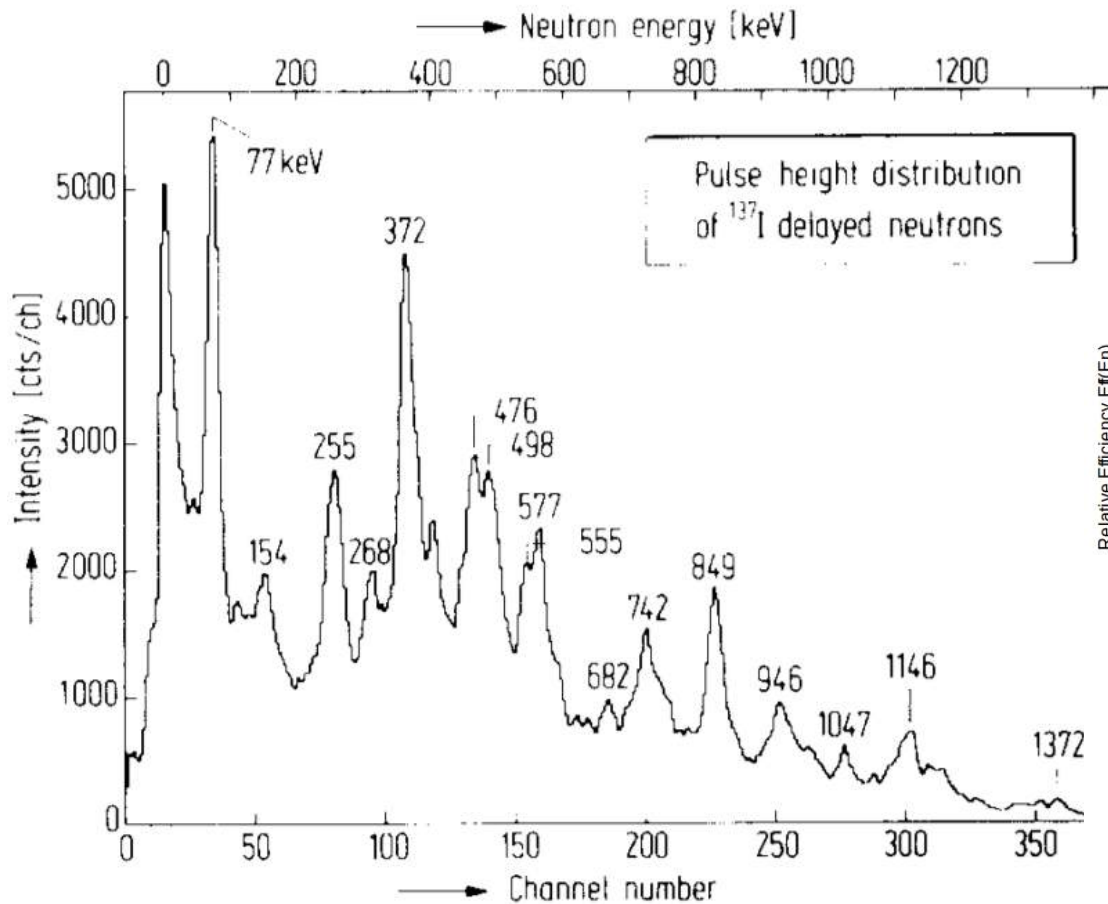
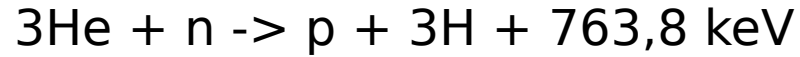
Superlaboratoria (RIKEN, FAIR, FRIB)
- dostęp do obszarów dotąd nieosiągniętych,
nowe metody detekcji

The limits of the nuclear landscape
J. Eler et al. Nature 486, 509-512, (2012)

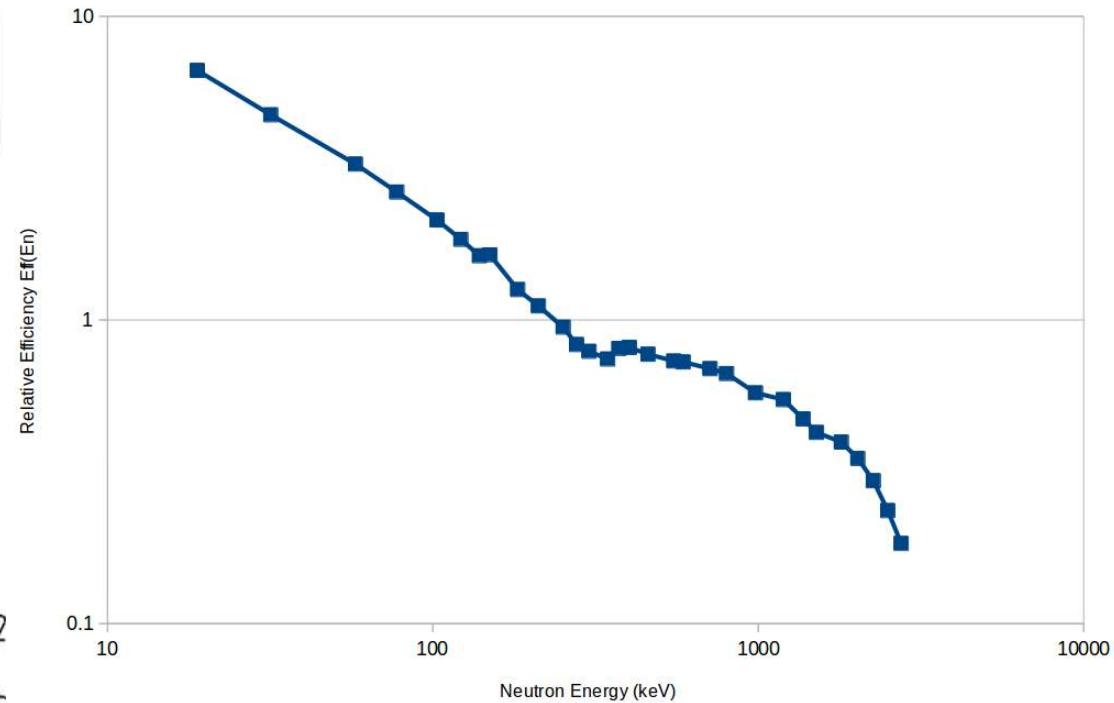
- Struktura jądra atomowego - położenie poziomów jednocząstkowych, testowanie modeli
- Badanie oddziaływań słabych
- Astrofizyczny proces szybkiego wychwyty neutronów (proces r)
- Fizyka reaktorowa

Detekcja neutronów opóźnionych

Komora jonizacyjna wypełniona ^3He



Wydajność



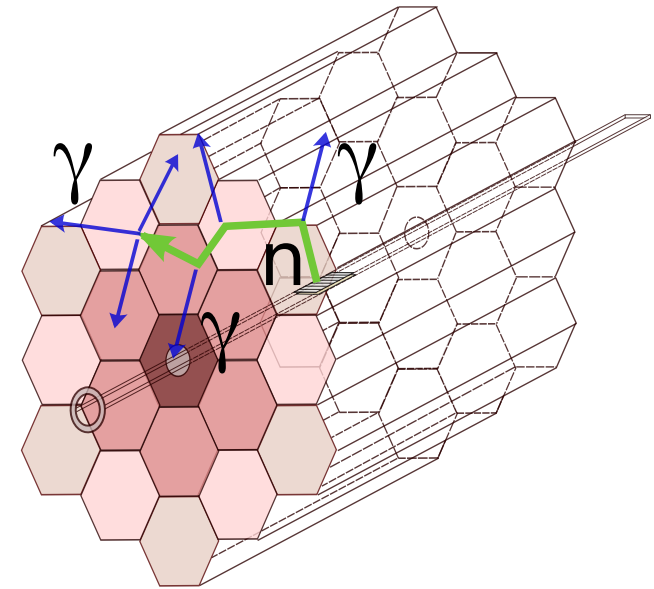
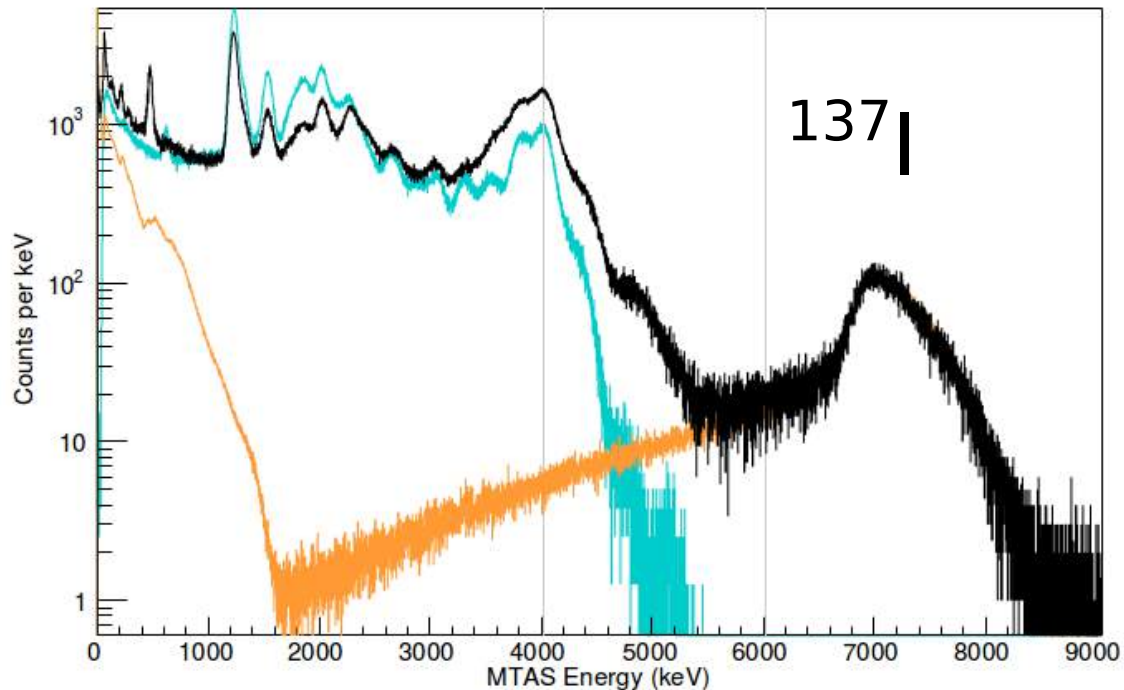
H. FRANZ et al., Nucl. Instr. 144, (1977) 253-261

Detekcja neutronów opóźnionych

MTAS, Modułarny Spektrometr Pełnej Absorpcji

B. C. Rasco, et al., PRC 95, 054328 (2017)

1. Rozpraszanie nieelastyczne na ^{24}Na oraz ^{127}I
2. Wychwył neutronu przez ^{127}I , $Q = 6.85 \text{ MeV}$



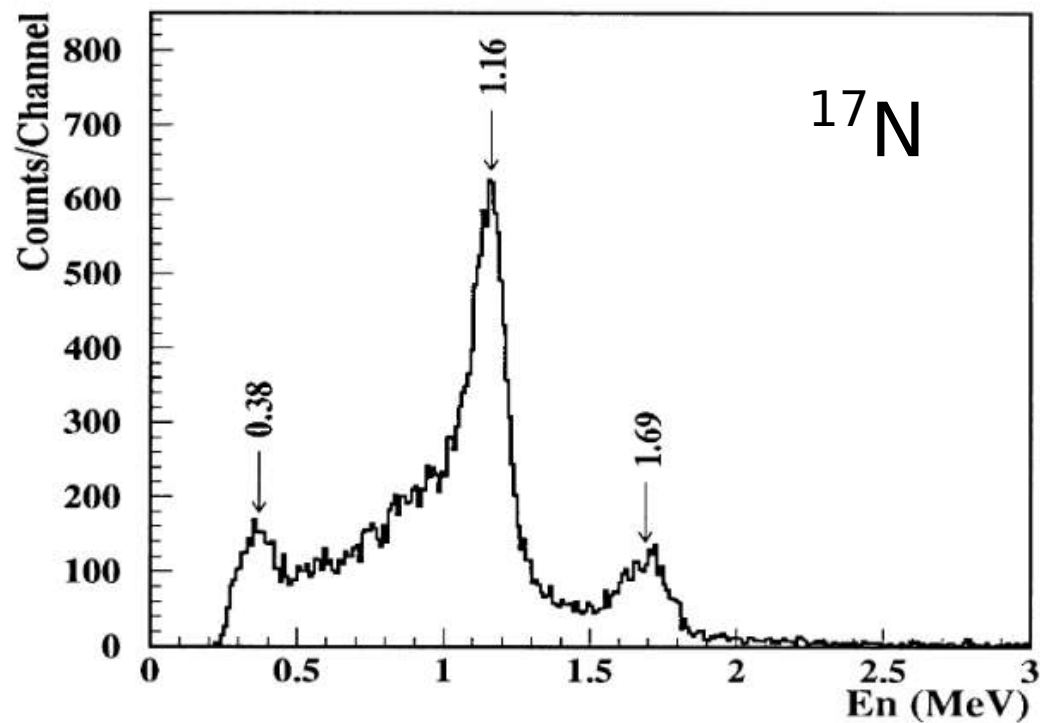
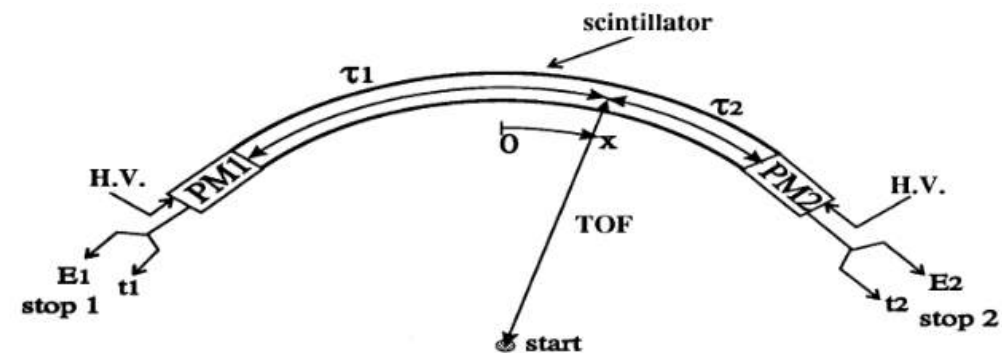
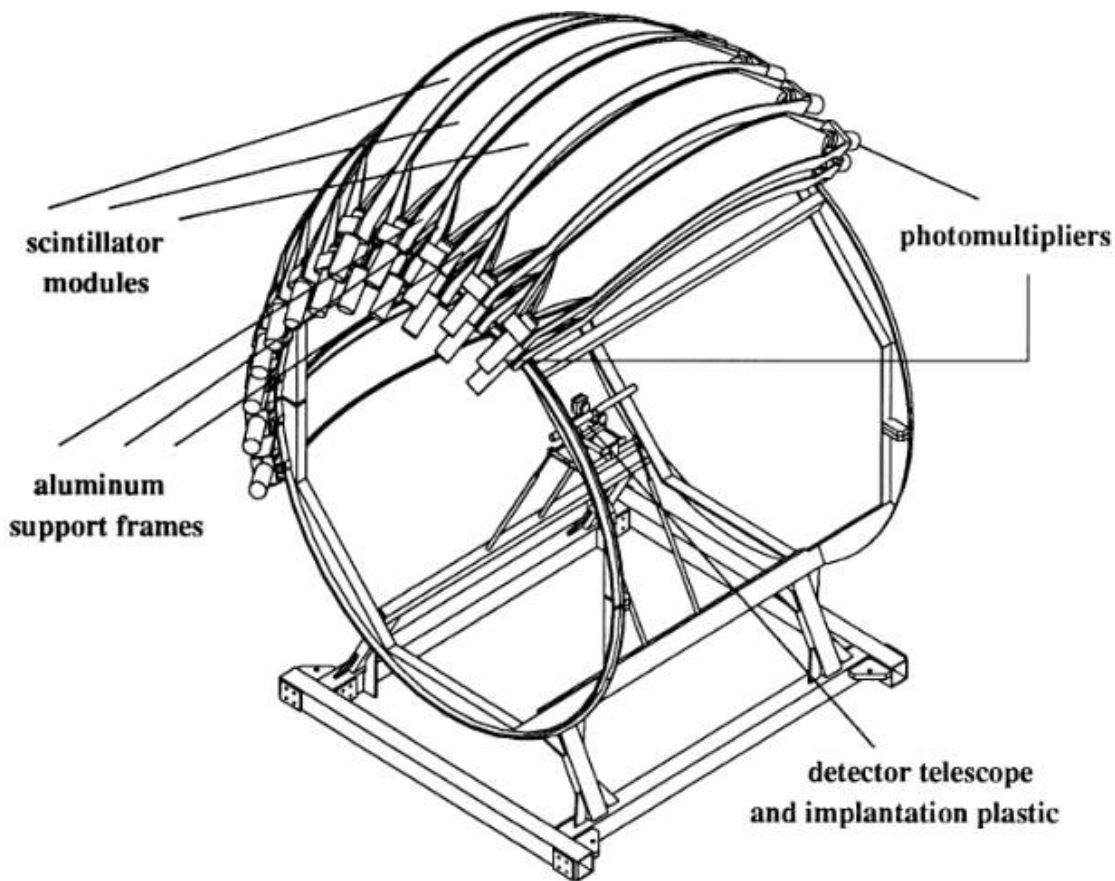
Warunek detekcji neutronów w kryształ NaI:

1. Wystarczająco duży kryształ, aby neutron spowolnić
2. Wystarczająco dużo NaI otaczającego punkt wychwył aby pochłoniąć większość z wyemitowanego promieniowania γ

Detekcja neutronów opóźnionych

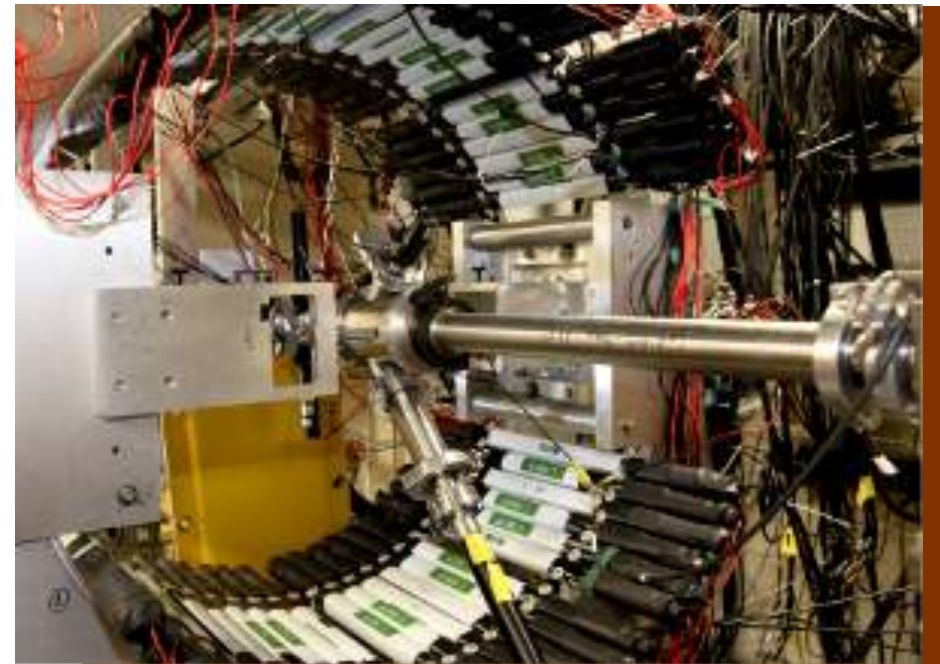
TONNERRE, Detektor energii neutronów techniką czasu przelotu

A. Buta, et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 455 (2000) 412-423



The Versatile Array of Neutron Detectors At Low Energy VANDLE

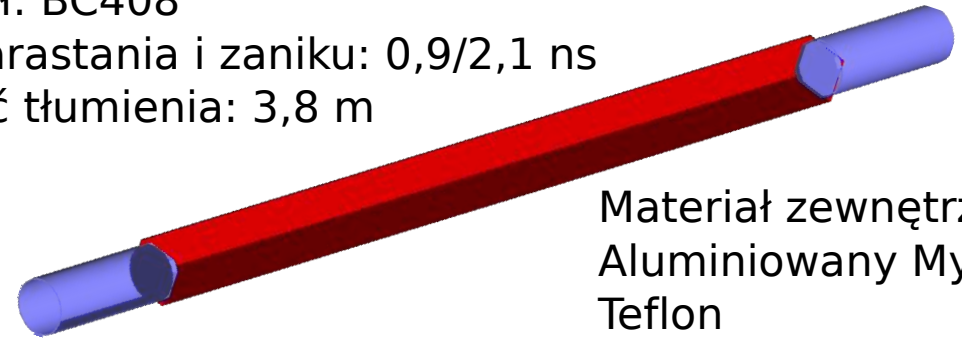
- Detektor energii neutronów techniką czasu przelotu
- Plastikowe scyntylatory (BC408) zaopatrzone w 2 fotopowielacze
 - Mały: 60x3x3 cm³, 1" PMT
 - Średni: 120x6x3 cm³, 2" PMT
 - Duży: 200x5x5 cm³, 2" PMT
- Każda z wykorzystanych konfiguracji zaopatrzona była w detektory promieniowania gamma (HPGe, LaBr3, NaI)
- Elektronika cyfrowa, XIA Pixie 16 Rev F
- Wykorzystywany zarówno w laboratoriach typu ISOL (ORNL, ARGONNE, ISOLDE), jak i fragmentacji (MSU, RIKEN)



Budowa



Materiał: BC408
Czas narastania i zaniku: 0,9/2,1 ns
Długość tłumienia: 3,8 m

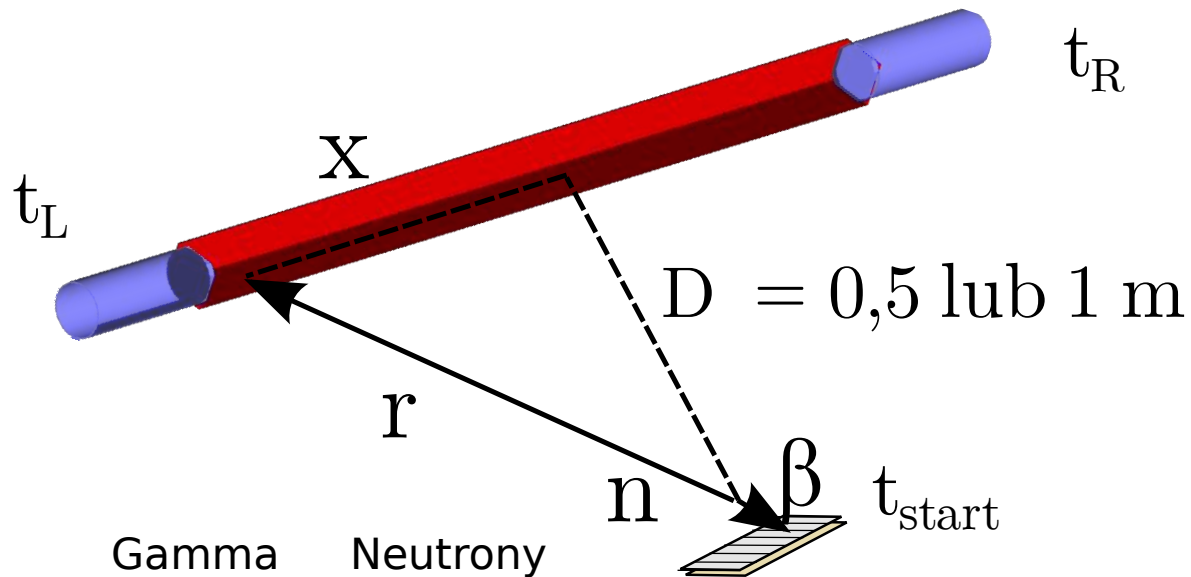


Materiał zewnętrzny:
Aluminiowany Mylar
Teflon
Papier nitrocelulozowy

Fotopowielacze (Hamamatsu):
R7724, $d = 5$ cm
R374, $d = 3$ cm



Detektor czasu przelotu



$$t_{\text{stop}} = (t_L + t_R)/2$$

$$\text{TOF} = (t_{\text{stop}} - t_{\text{start}})$$

$$X = (t_L - t_R) c_{\text{eff}}$$

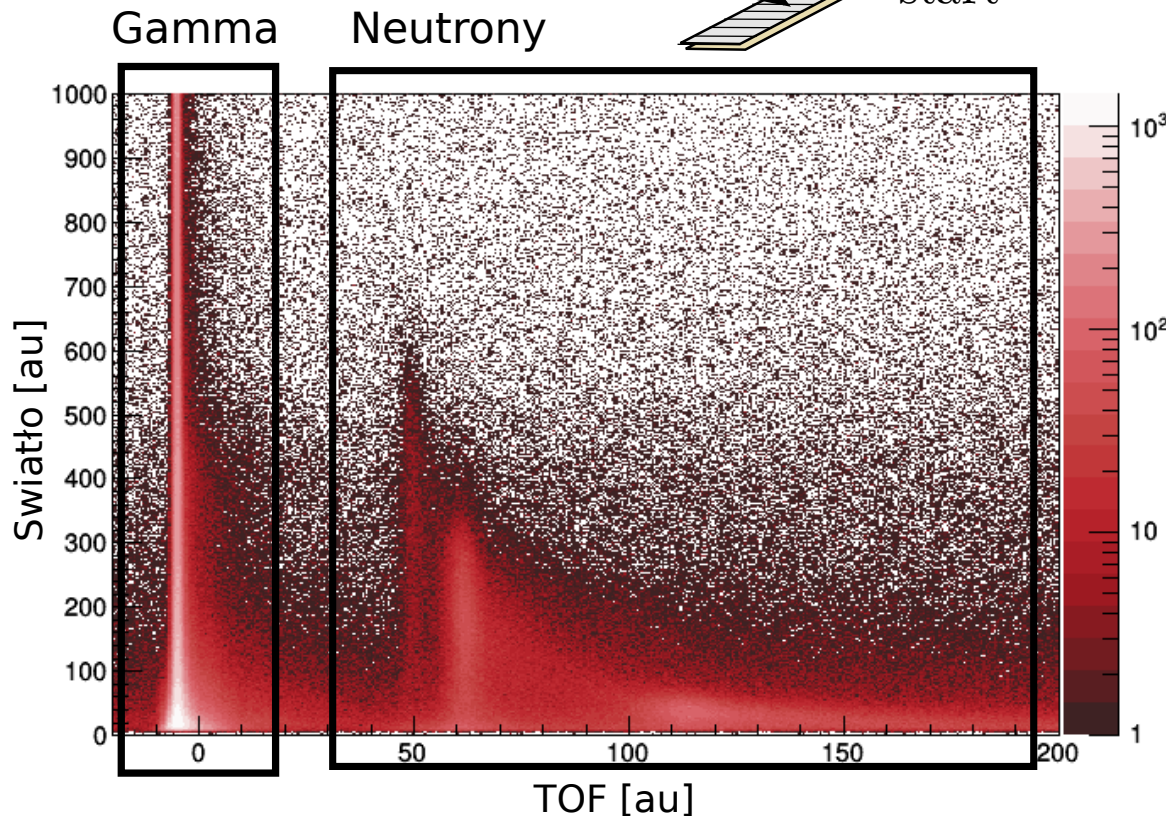
$$c_{\text{eff}} \sim 13 \text{ cm/ns}$$

$$\text{TOF}_{\text{corr}} = \text{TOF} \cdot D/r$$

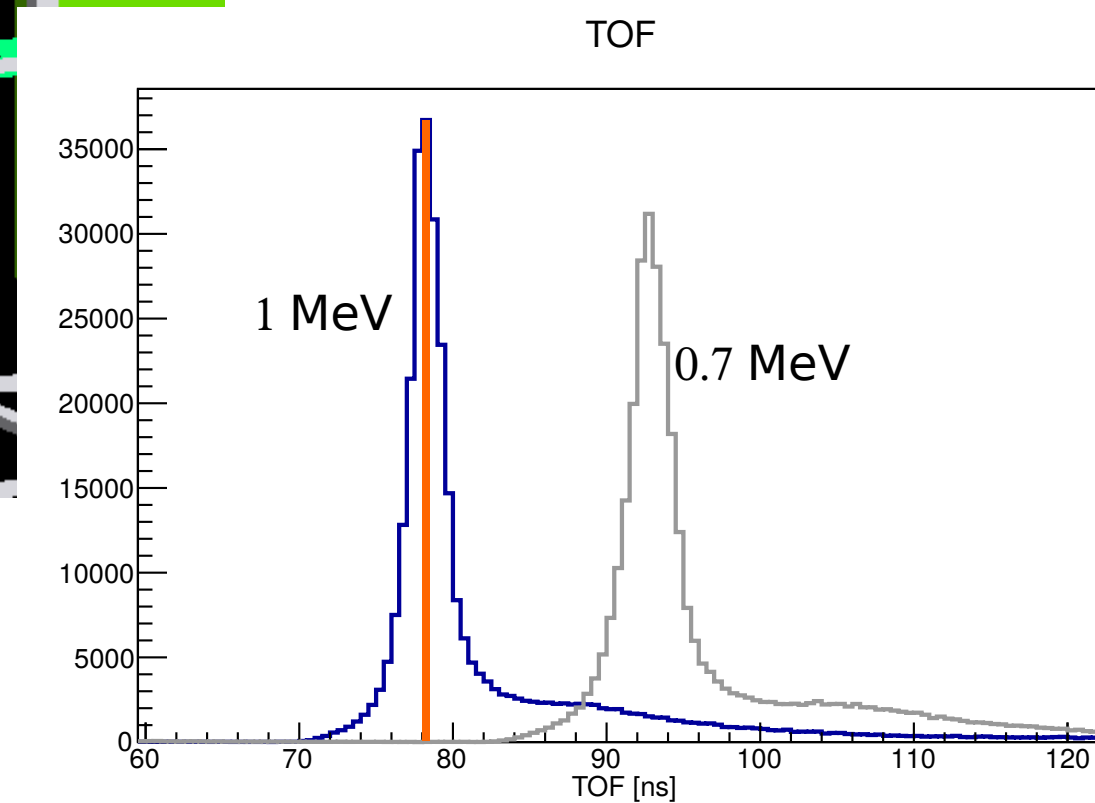
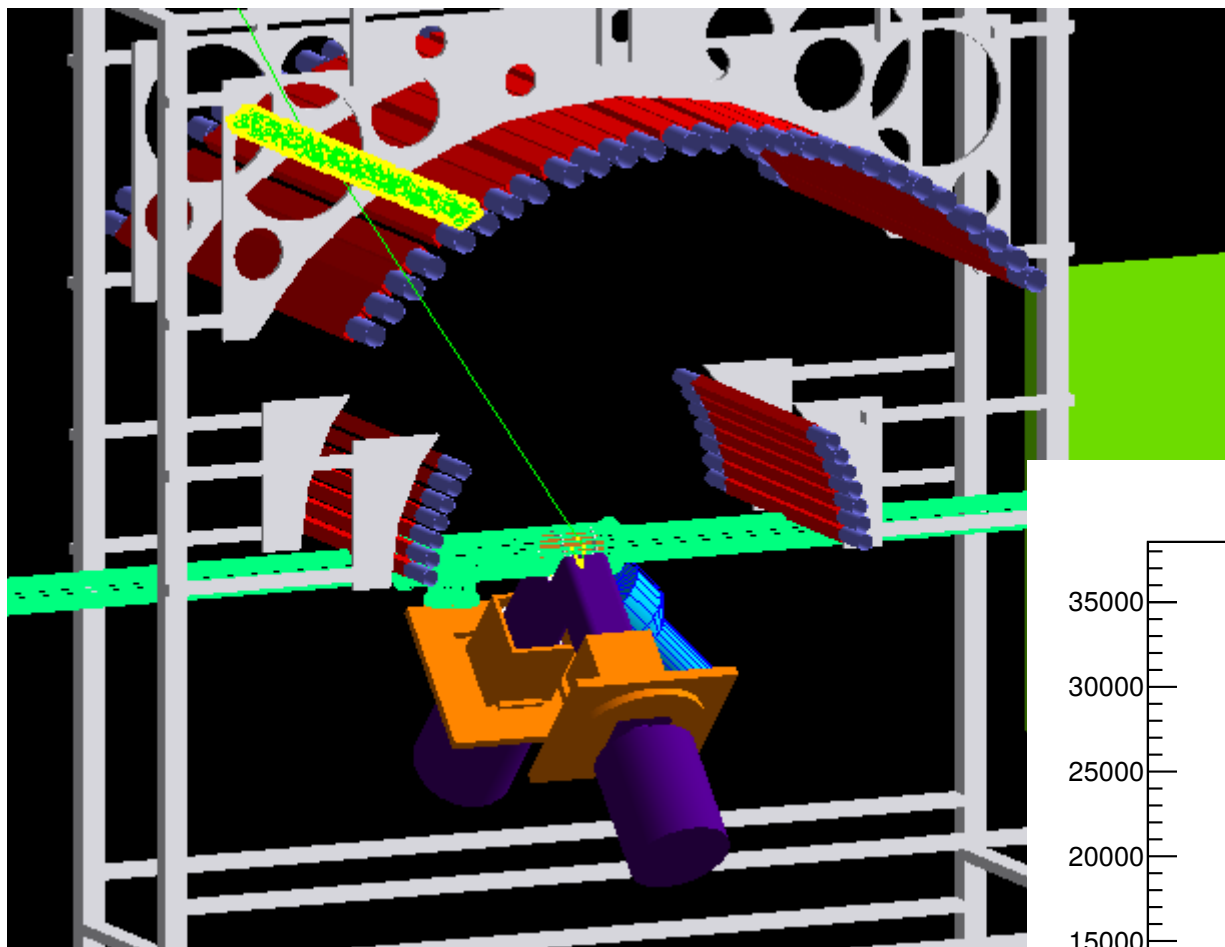
Neutrons opóźnione mają energie rzędu MeV - mogą być traktowane klasycznie. Energia kinetyczna jest wyznaczana z odległości D oraz czasu przelotu

$$E_n \sim (D/\text{TOF}_{\text{corr}})^2$$

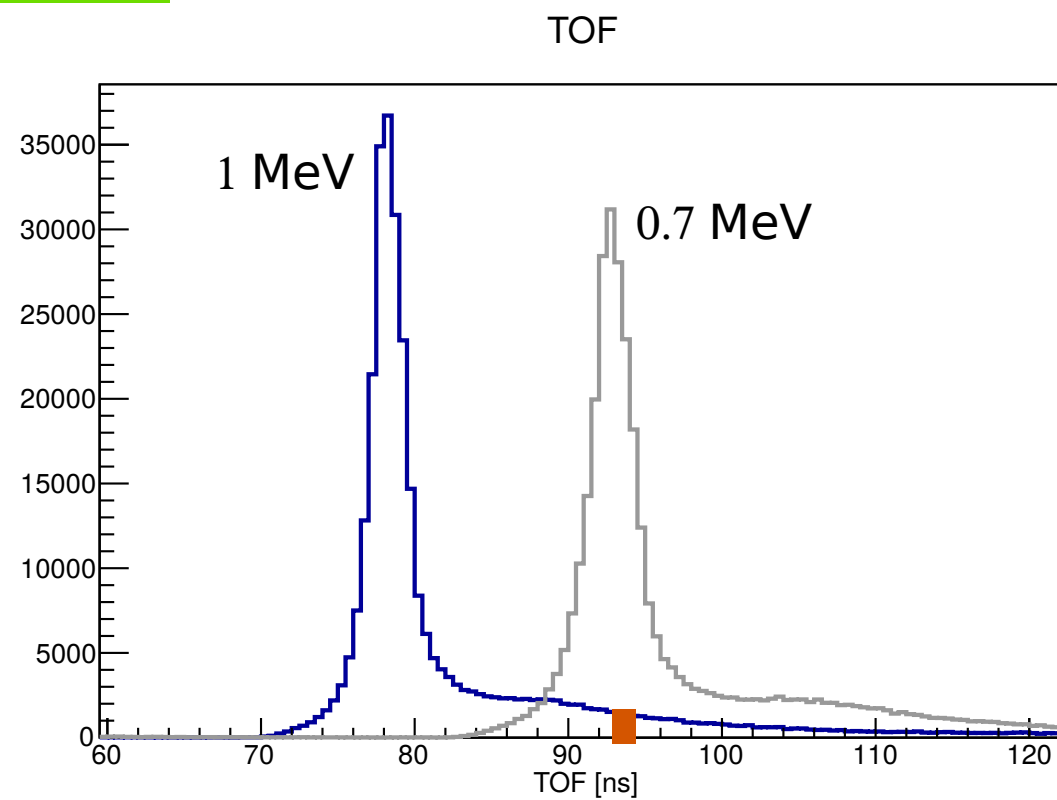
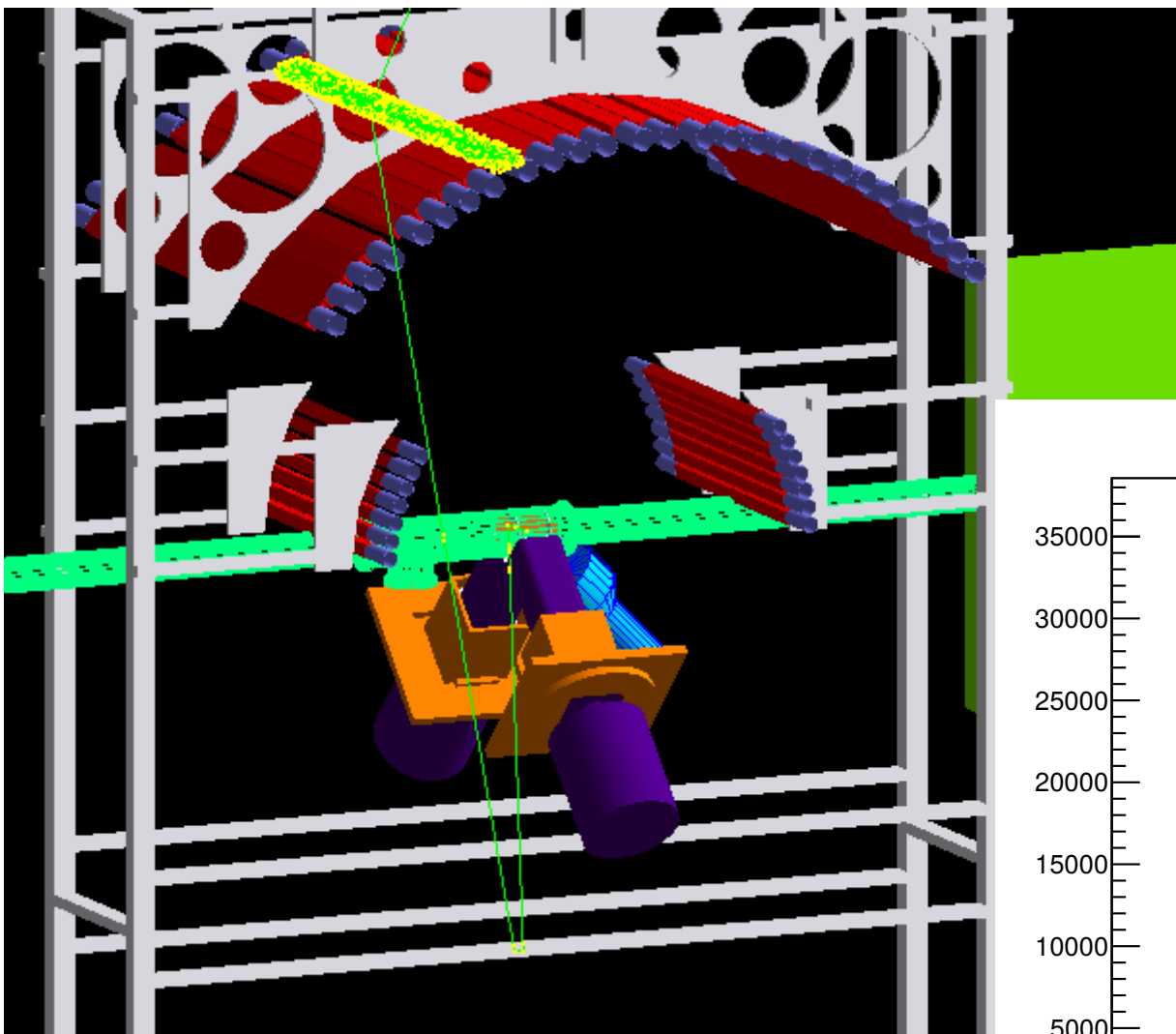
Co z czasem propagacji światła w plastiku? Sygnał pochodzący od promieniowania γ dostarcza punkt referencyjny



Dlaczego potrzeby jest model?



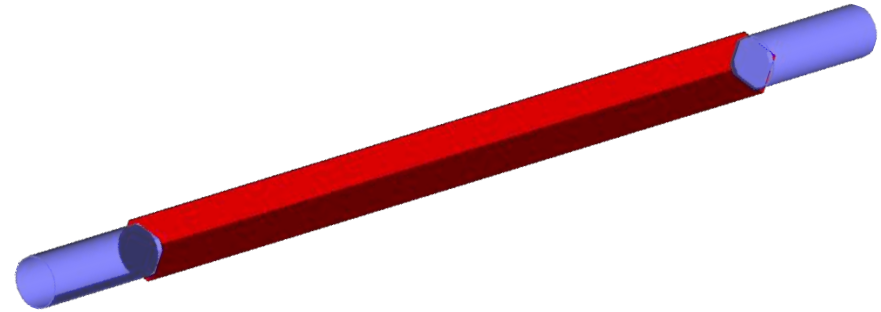
Dlaczego potrzeby jest model?



Model Geant4 10.02 i 10.04

Geometria

- Materiał - BC408, $\rho = 1,032 \text{ g/cm}^3$, H:C = 1,104
- 0,1 mm warstwy aluminium
- 4 mm szkierko fotopowielacza z borokrzemianu
- 1 mm fotokatoda (Sb-K-Cs, bialkali)
- Skorupa fotopowielacza, aluminium, 10 cm długości, 1 mm szerokości
- Dziesiątki innych elementów



Oddziaływanie neutronów:

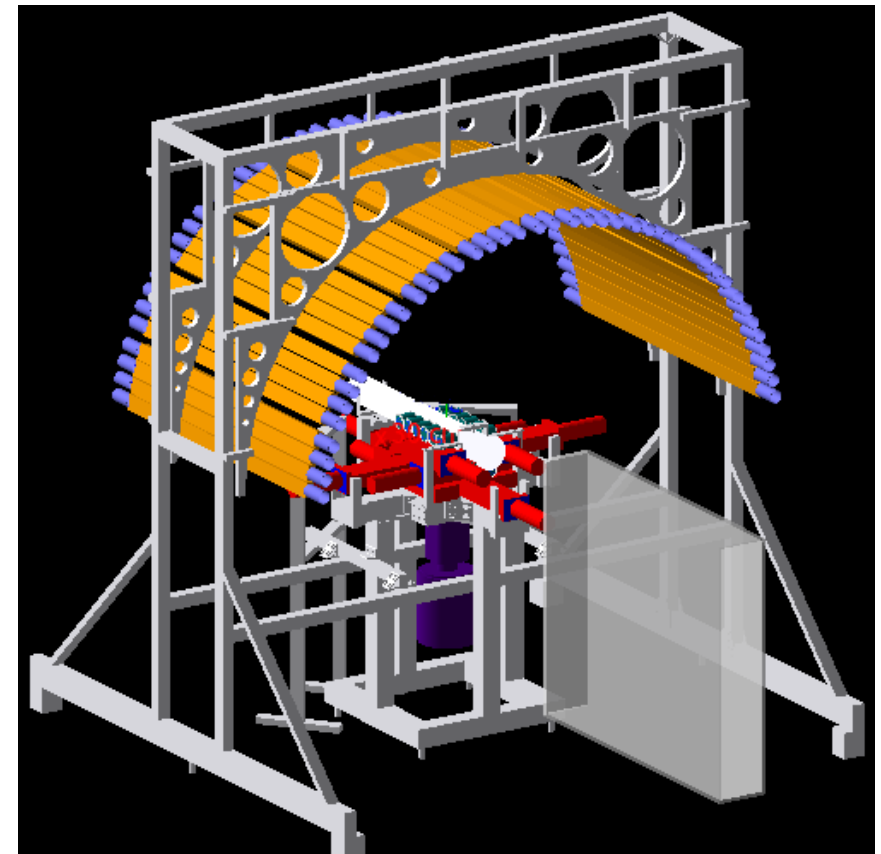
- Rozproszenie elastyczne na wodorze i węglu
- Maksymalny przekaz energii:

$$E_{R|_{max}} = \frac{4A}{(1+A)^2} E_n$$

$$E_{p|_{max}} = E_n$$

$$E_{C|_{max}} = 0.284 E_n$$

G4NeutronHP package



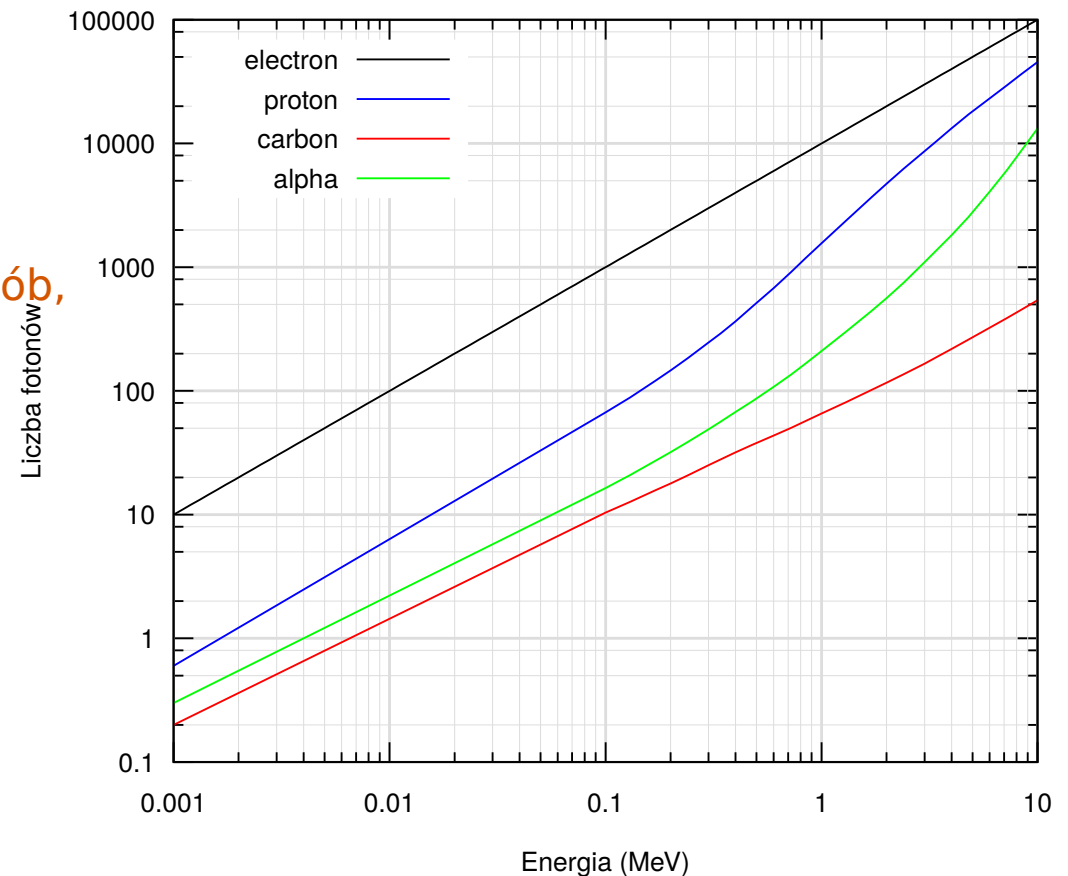
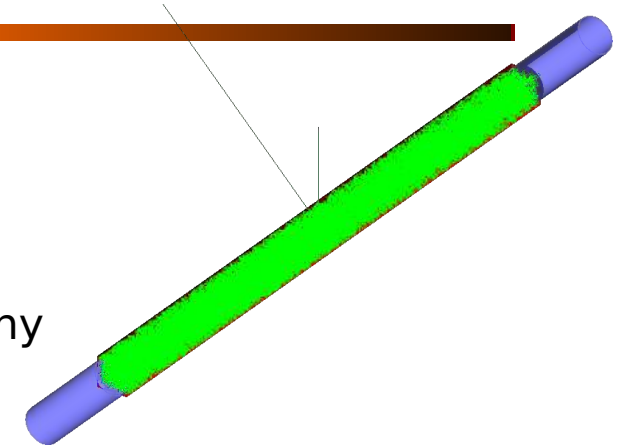
Model Geant4 10.02 i 10.04

Emisja światła

- V. V. Verbinski et al., Nucl. Instrum. Methods 65, 8-25 (1968)
- Dane zmierzone dla organicznego, ciekłego scyntylatora
- Najważniejsza jest proporcja światła wyemitowanego przez elektrony do światła emitowanego przez protony (kalibracja w keVee)
- Empiryczna formuła Birk'a

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

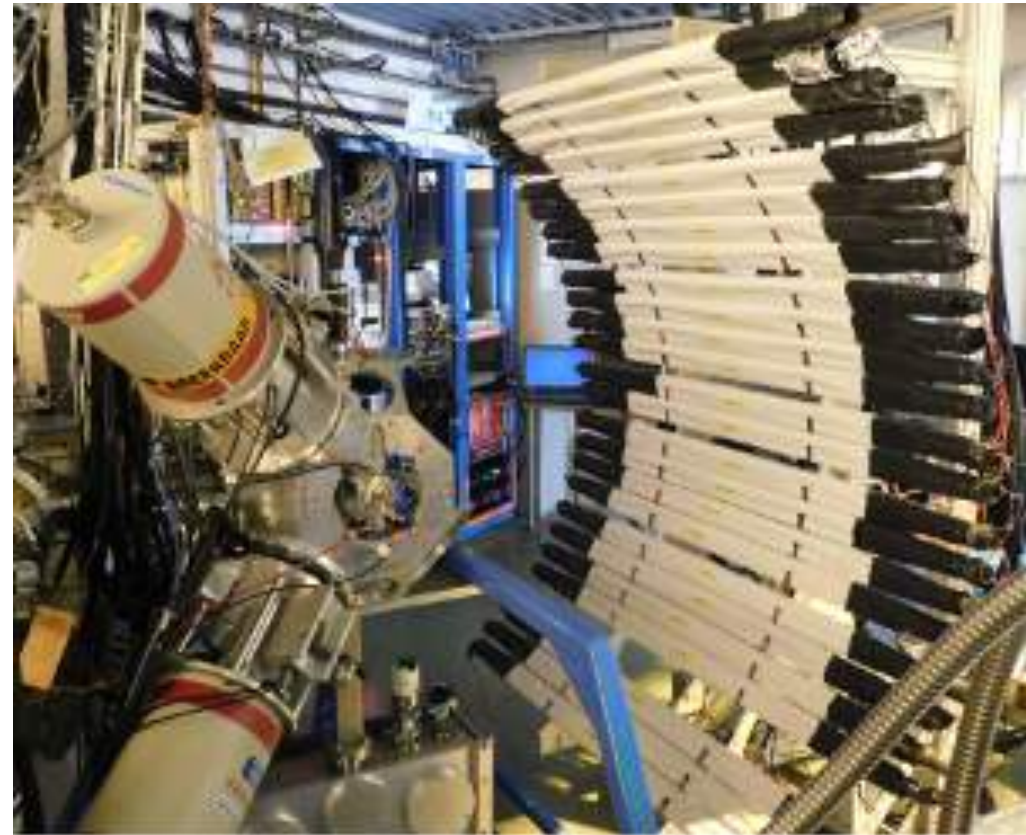
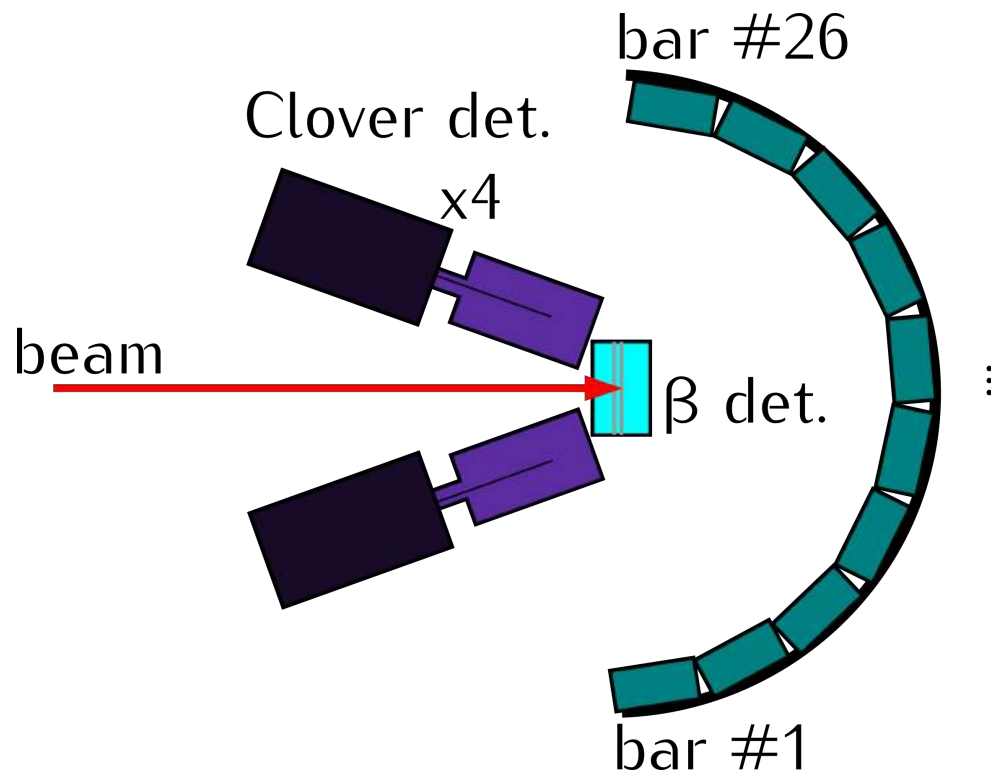
Detekcja światła oraz wyznaczanie TOF w symulacjach realizowane jest w ten sam sposób, jak w przypadku pomiarów



Weryfikacja, przemiana beta ^{17}N , ISOLDE, CERN

Układ

- Macierz 25 detektorów neutronów (120x6x3 cm) w odległości ok 100 cm
- 4 detektory HpGe
- Plastikowy detektor beta (Winylotoluen)
- Taśma mylarowa
- Aluminiowe i stalowe elementy konstrukcyjne



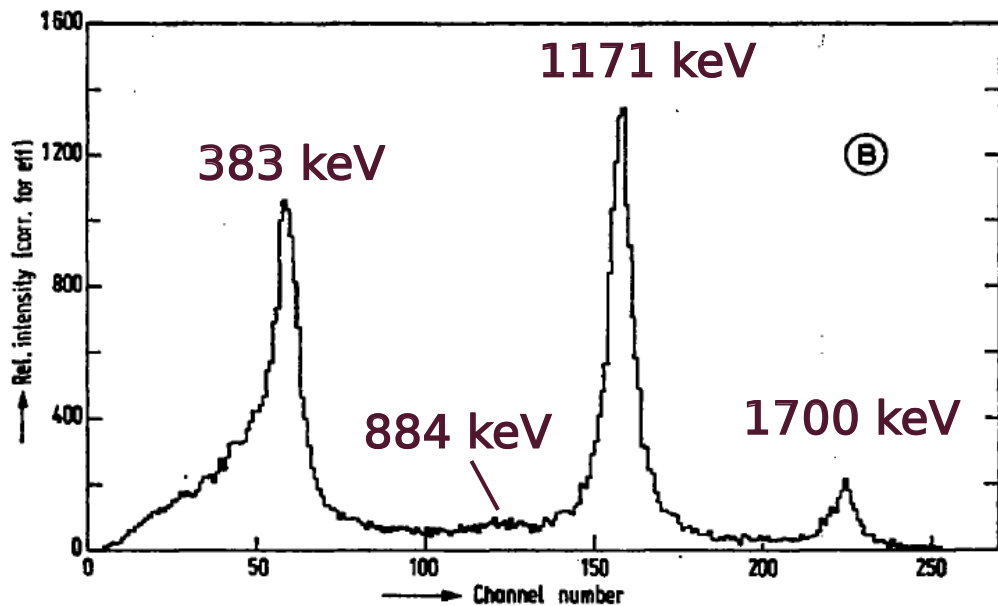
Przemiana beta ^{17}N

BETA-DELAYED NEUTRON EMISSION FOLLOWING THE DECAY OF ^{17}N

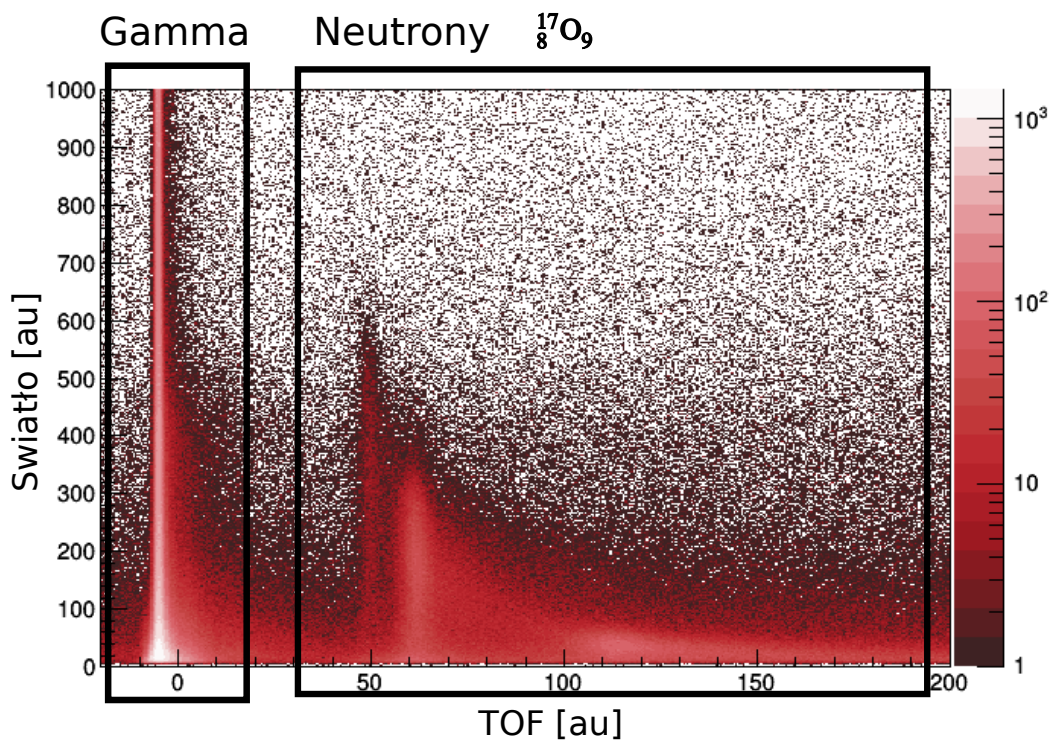
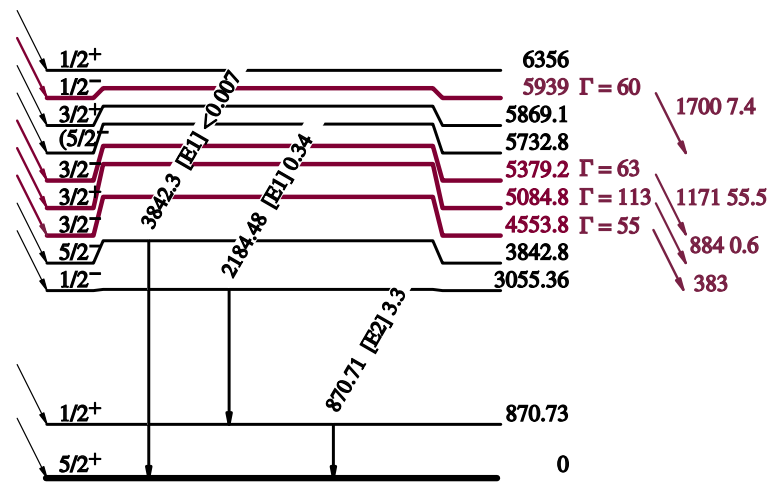
H. OHM, W. RUDOLPH and K.-L. KRATZ

Institut für Kernchemie der Universität Mainz, D-6500 Mainz, Germany

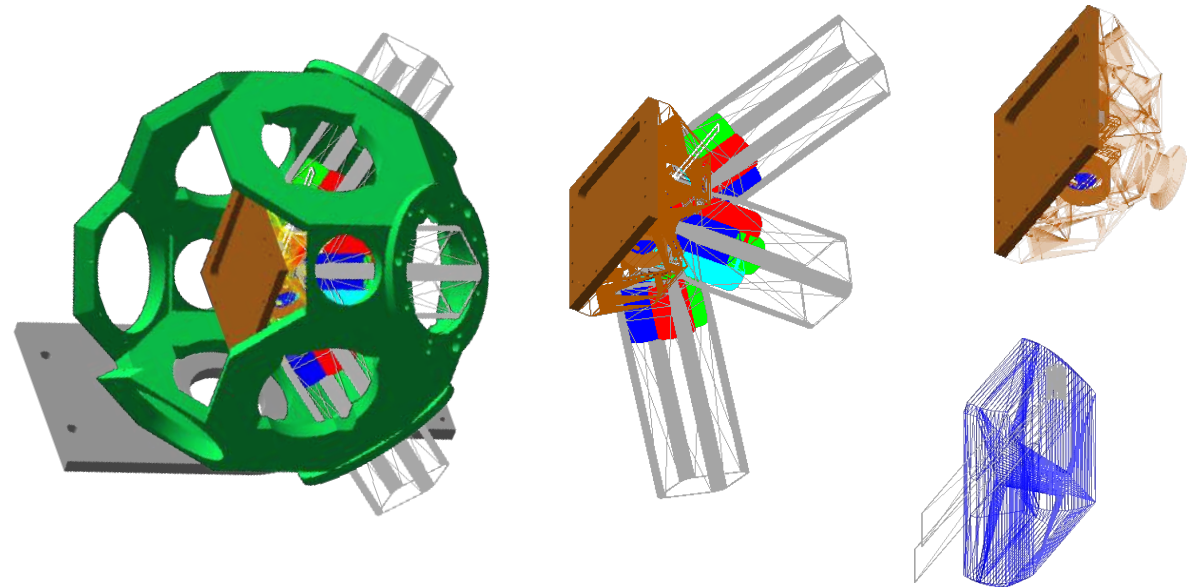
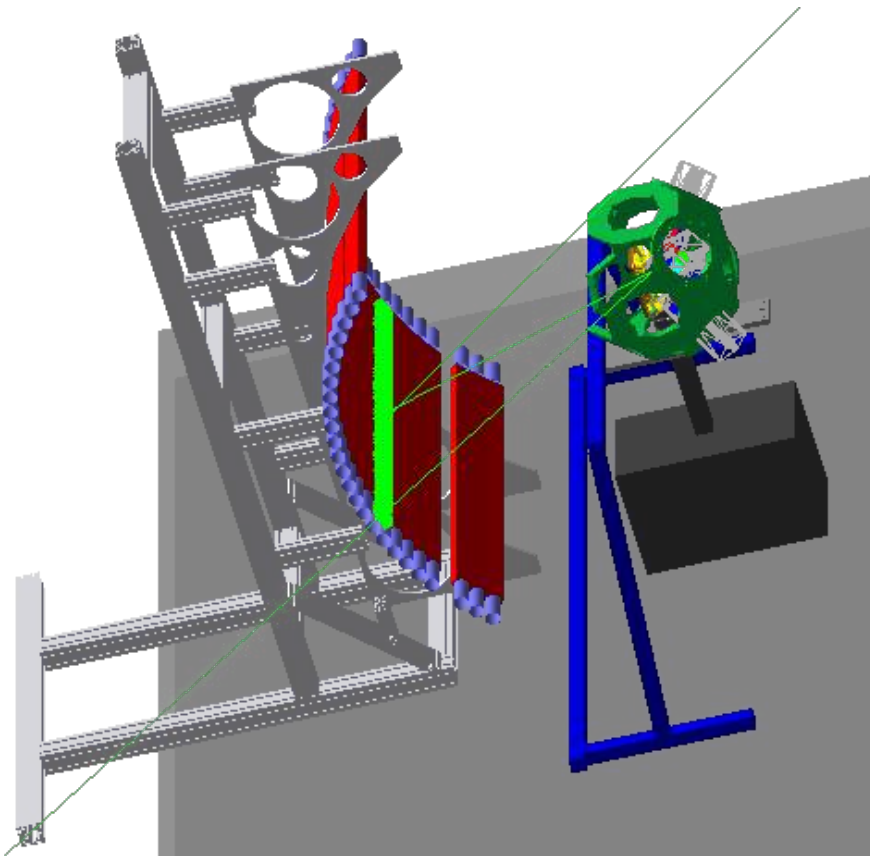
Received 8 August 1976



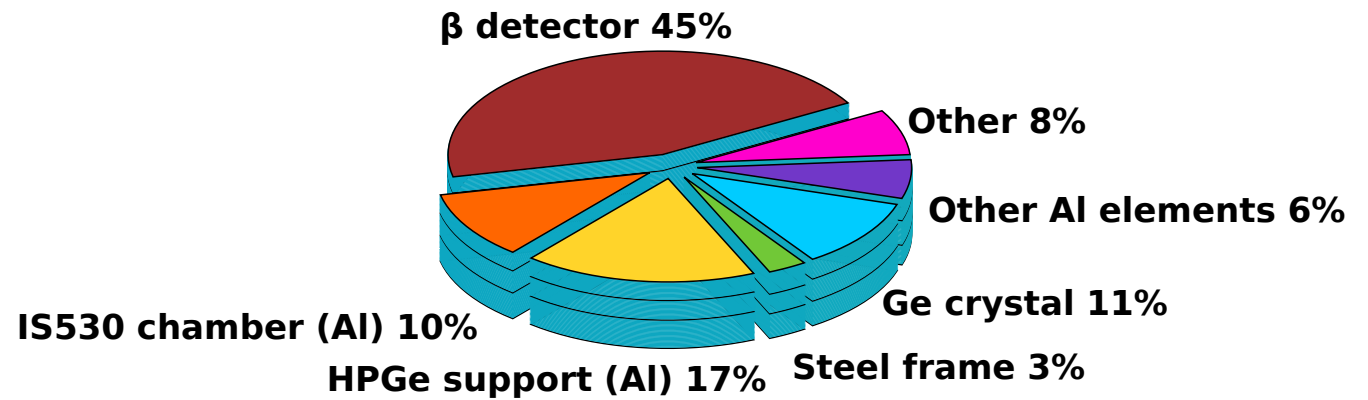
$1/2^-$ 0 $4.173 \text{ s } 4$
 $Q^- = 8680.15$ $\% \beta^- = 100$
 $^{17}\text{N}_{10}$



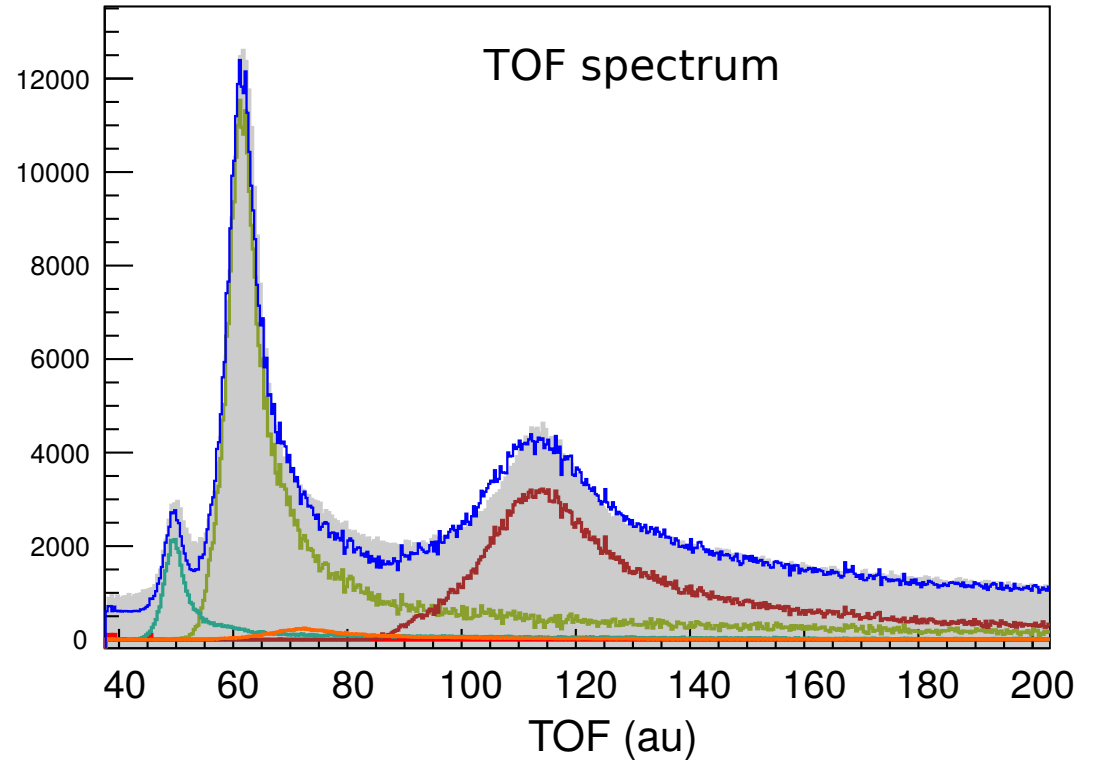
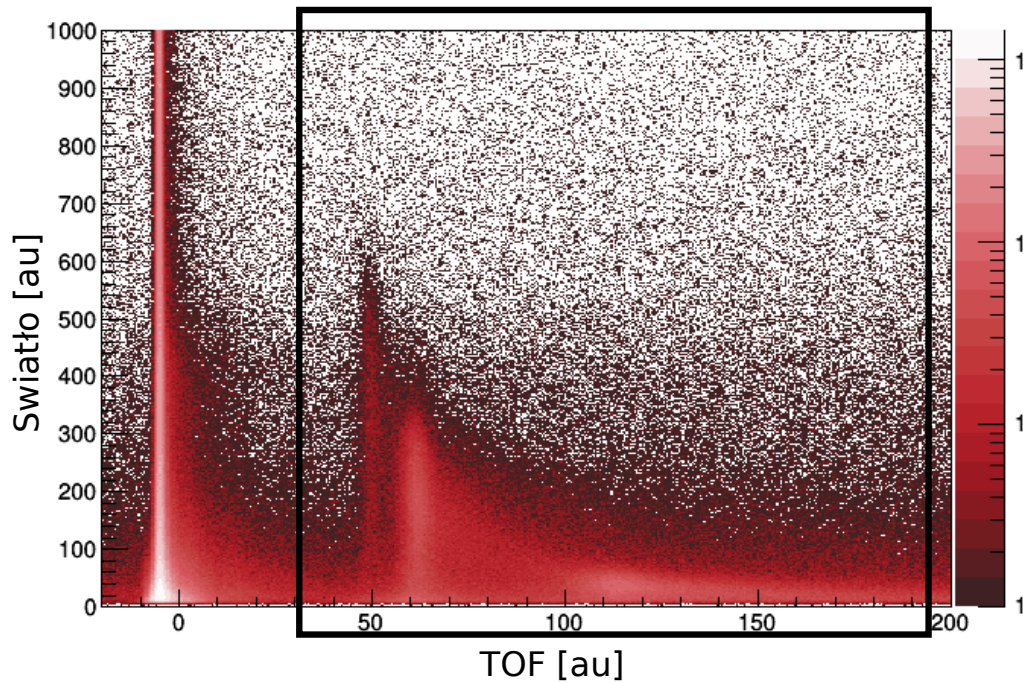
Symulacja



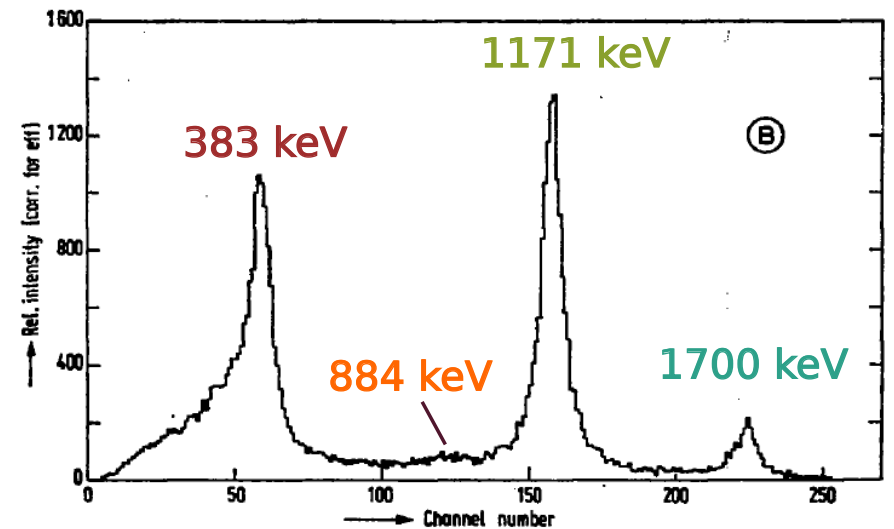
Materiały rozpraszające neutrony



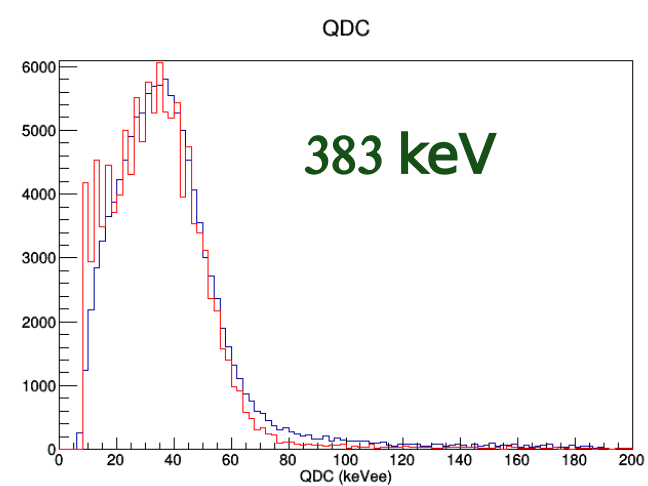
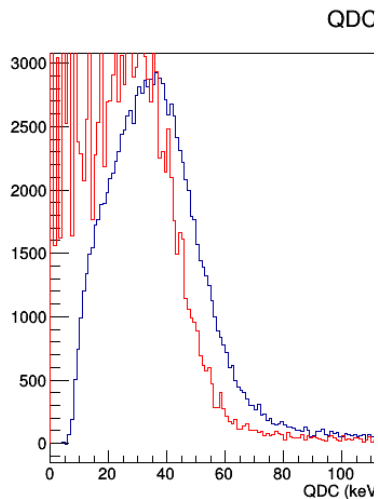
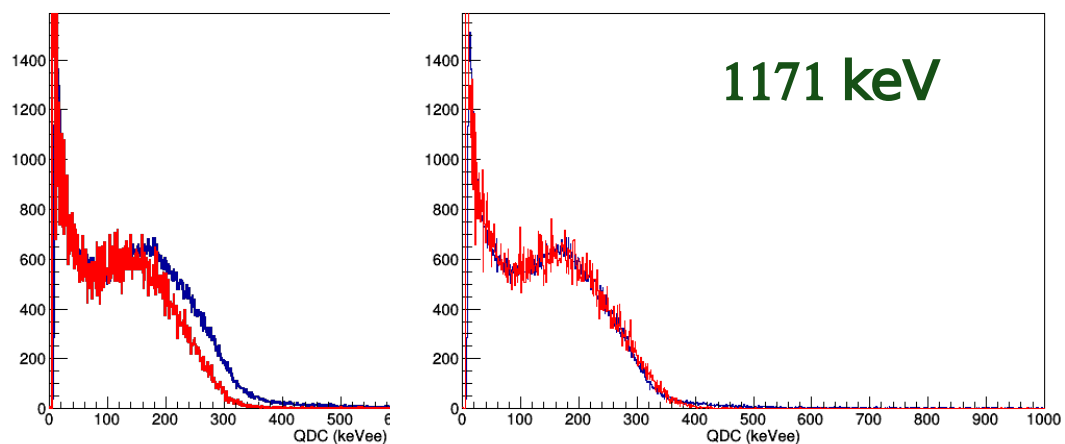
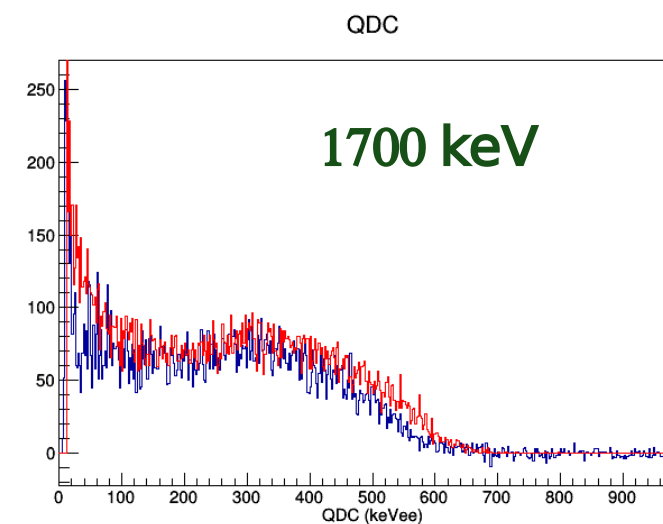
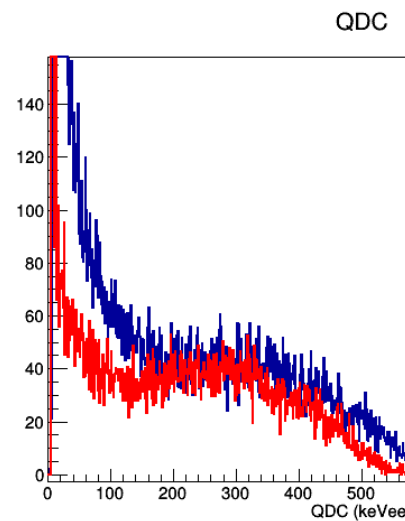
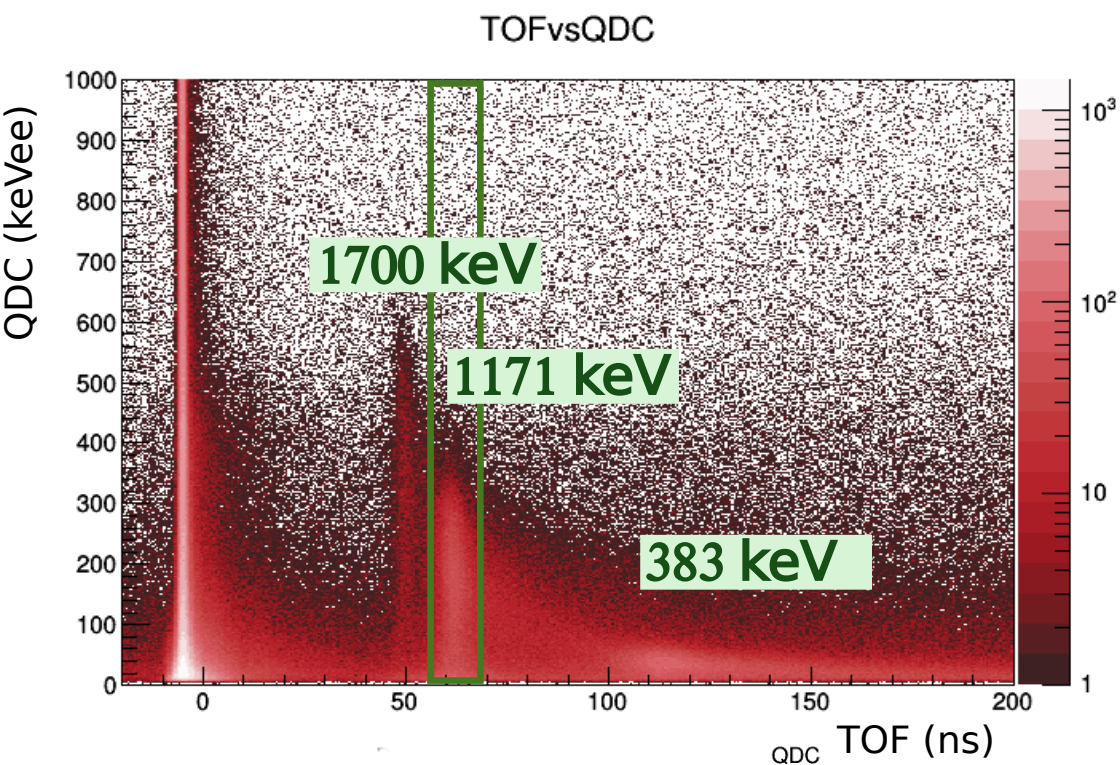
Przemiana beta ^{17}N



En (keV)	H. Ohm (%)	Vandle (%)
383	36.6(26)	39.7
884	0.6(4)	2.0
1171	55.5(35)	51.0
1700	7.4(5)	7.3



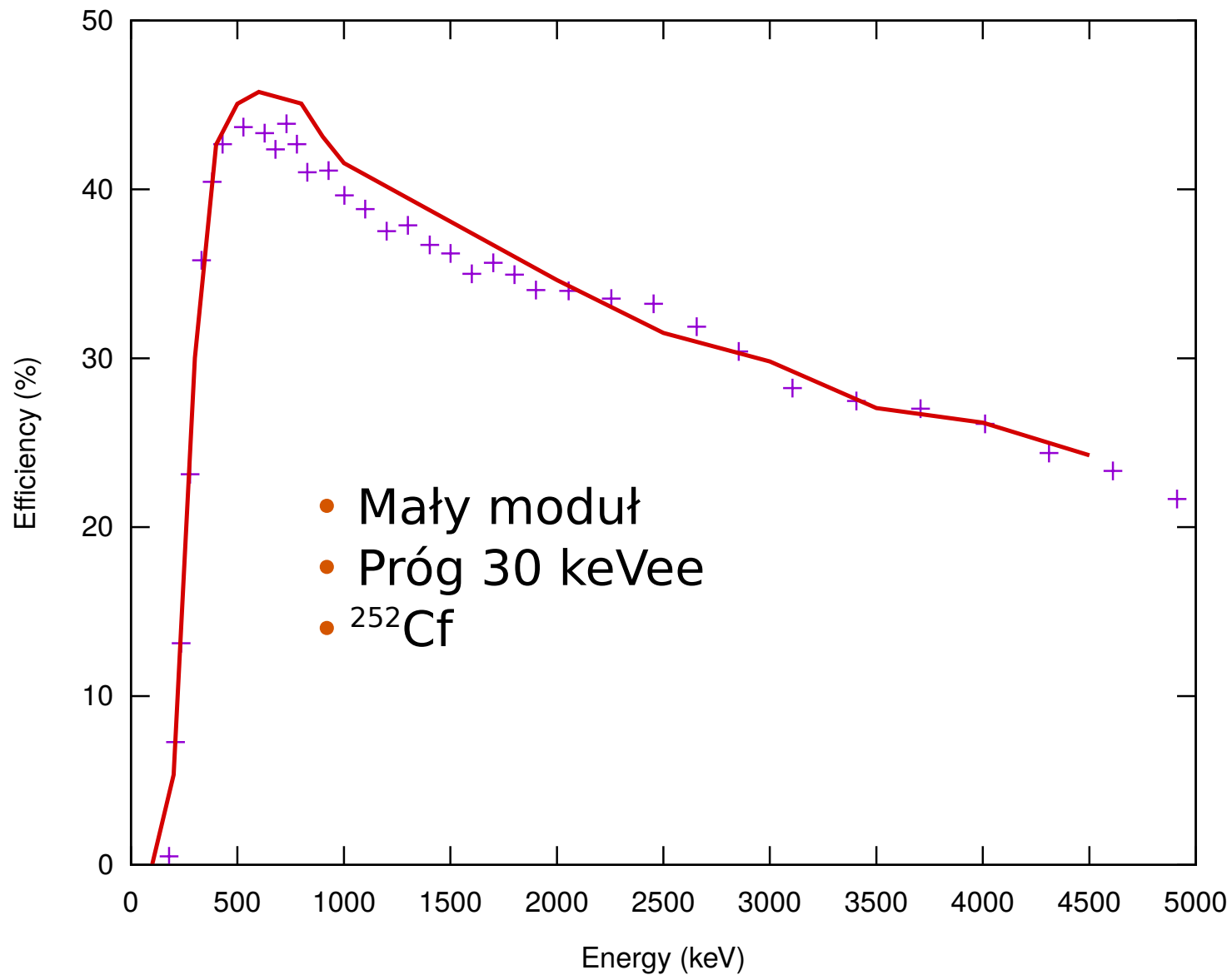
Korekta krzywej emisji światła



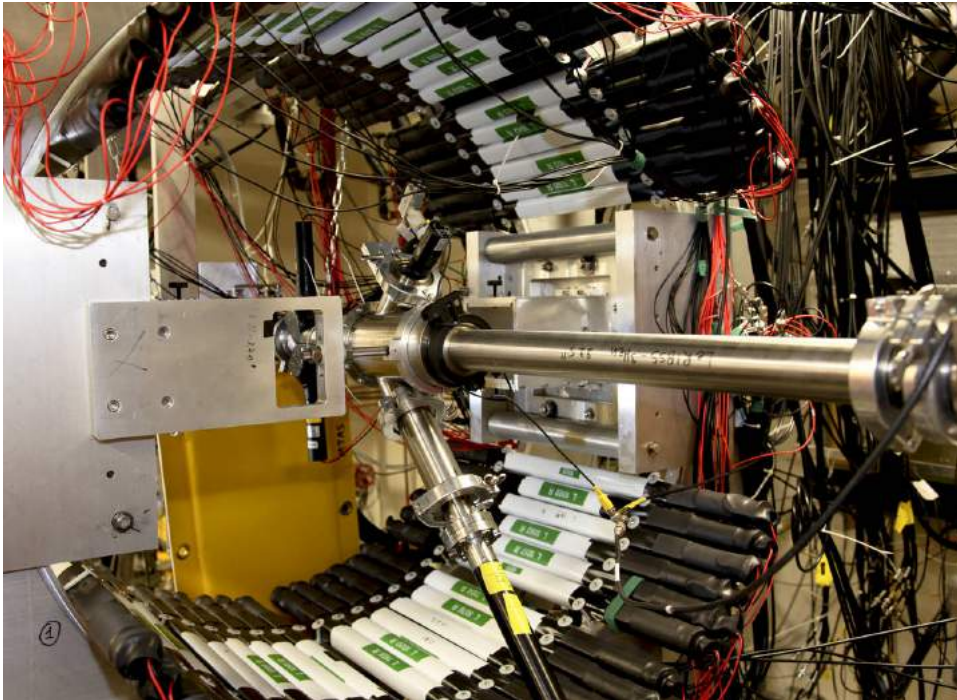
QDC (keVee)

QDC (keVee)

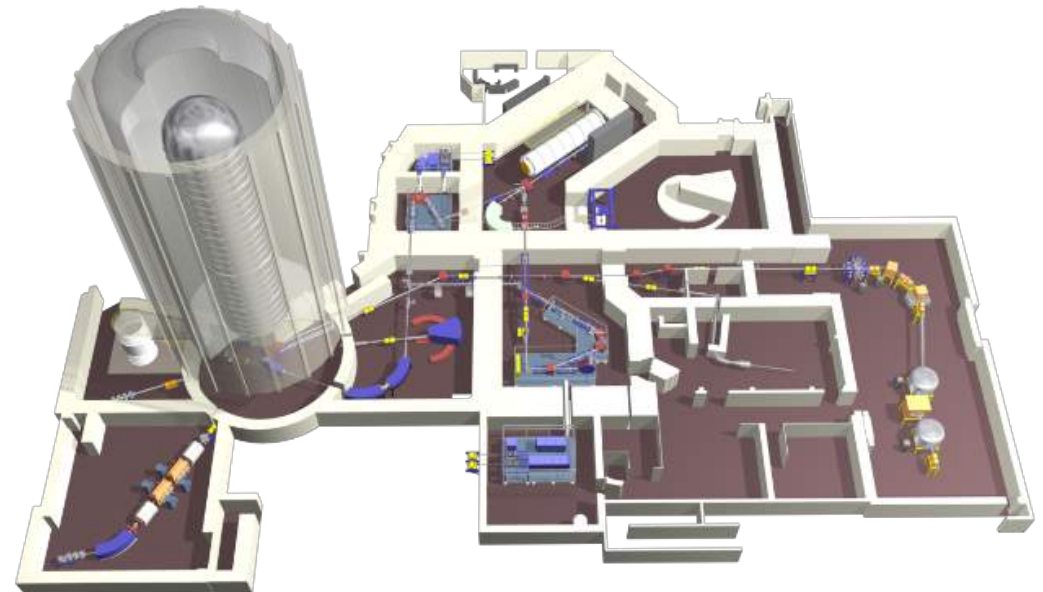
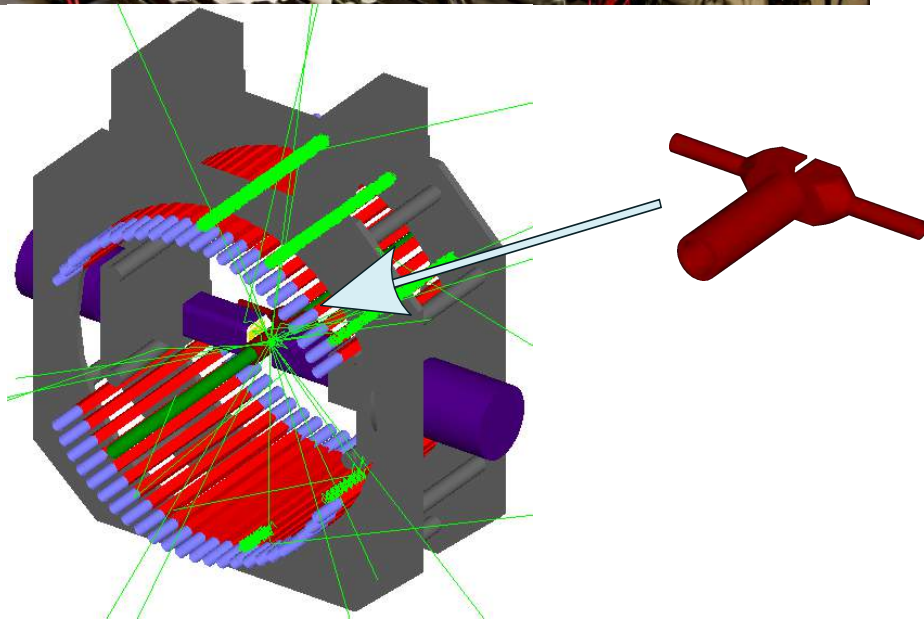
Wydajność wewnętrzna



Pierwszy pomiar z VANDLE, HRIBF, 2012

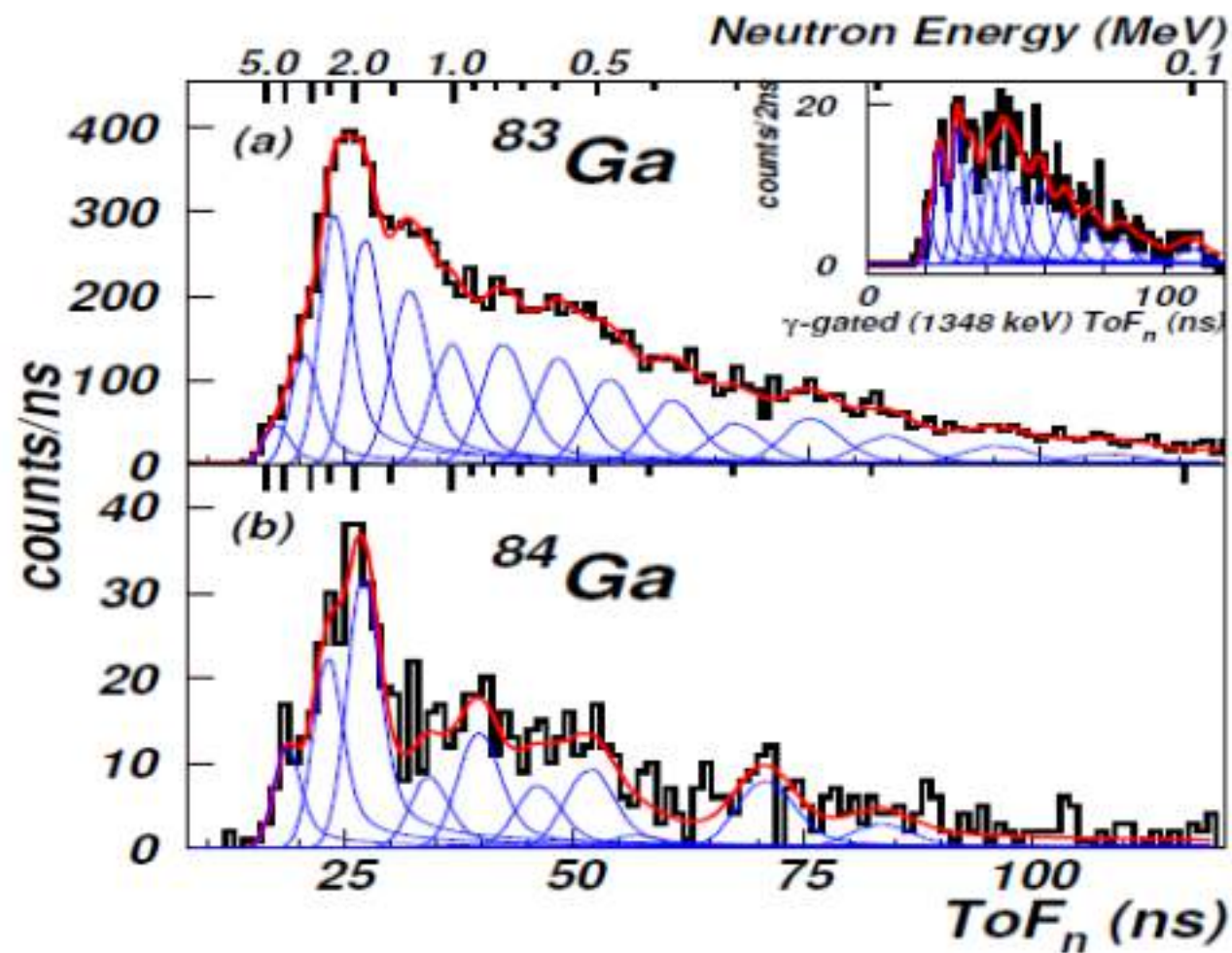
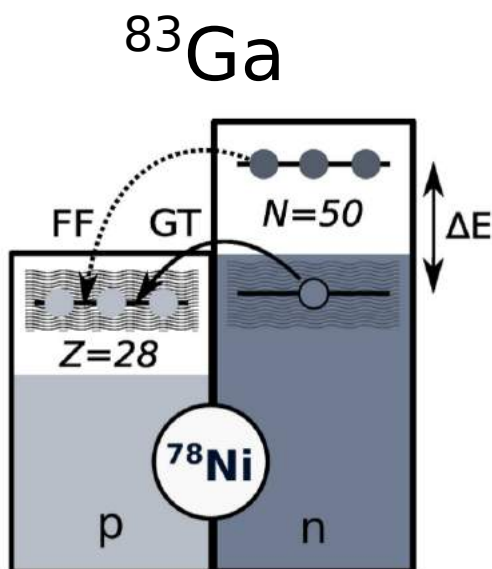


- Intensywna wiązka protonów ($\sim 10 \mu\text{A}$, 50 MeV) na tarczy UCx
- Separator izobarów ($\Delta m/m \sim 10^4$)
- 48 małych modułów macierzy VANDLE
- 2 detektory HPGe
- Plastikowy detektor beta
- Pomiar $^{82-85}\text{Ga}$, $^{75-78}\text{Cu}$, $^{80-82}\text{Zn}$,
 $^{84-85}\text{Ge}$, $^{94-98}\text{Rb}$

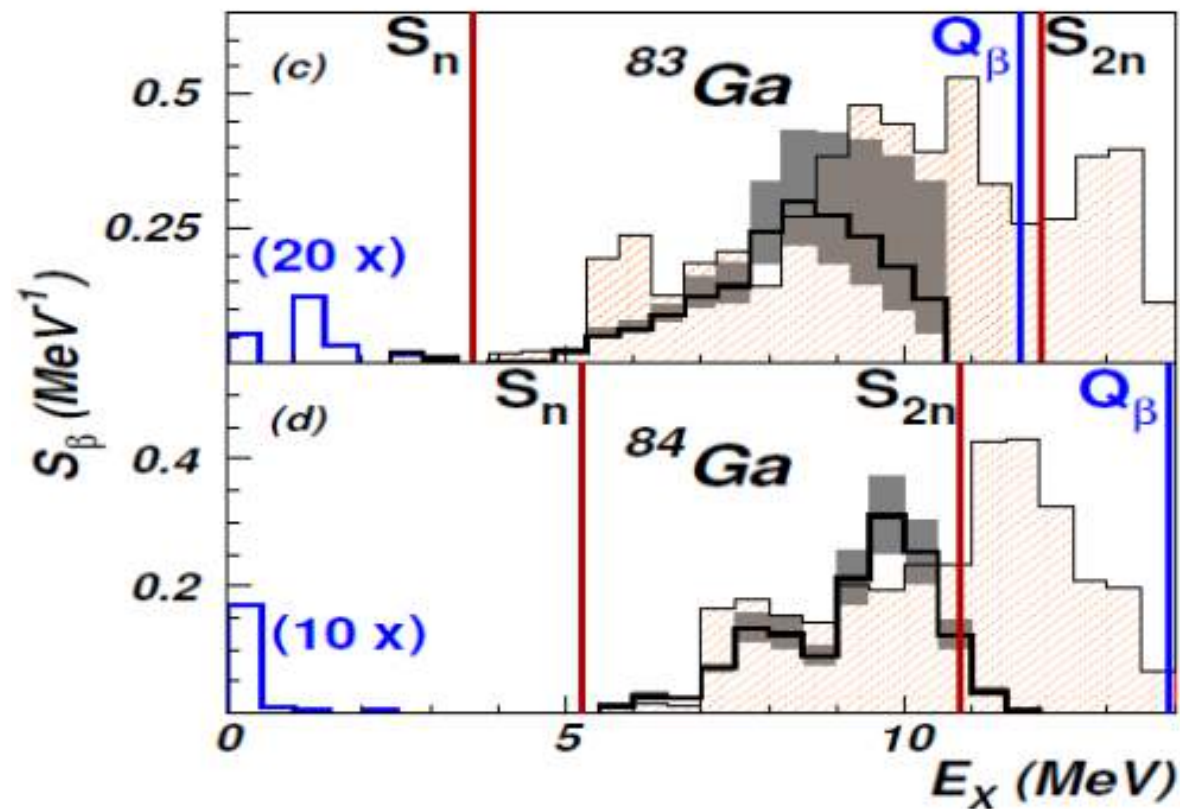


Pierwszy pomiar z VANDLE, HRIBF, 2012

81Ge	82Ge	83Ge	84Ge	85Ge	86Ge
80Ga	81Ga	82Ga	83Ga	84Ga	85Ga
79Zn	80Zn	81Zn	82Zn	83Zn	84Zn
78Cu	79Cu	80Cu	81Cu	82Cu	
77Ni	78Ni	79Ni	80Ni		
76Co	77Co				
50		52		54	

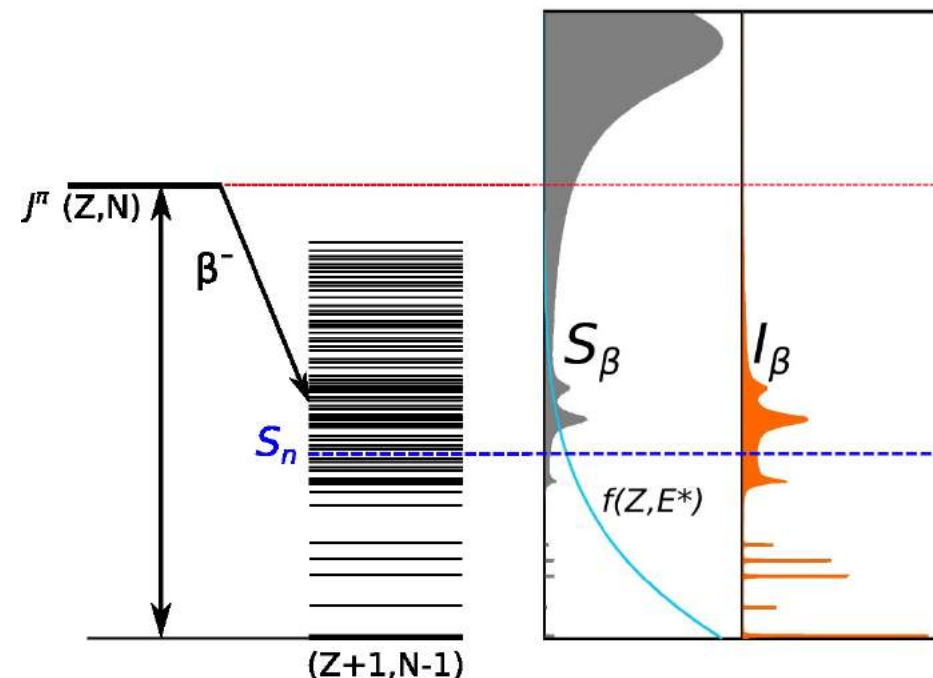


Pierwszy pomiar z VANDLE, HRIBF, 2012



funkcja nasilenia β

$$S_{\beta}(E) = \frac{I(E)}{f(Z, Q - E) \cdot T_{1/2}}$$

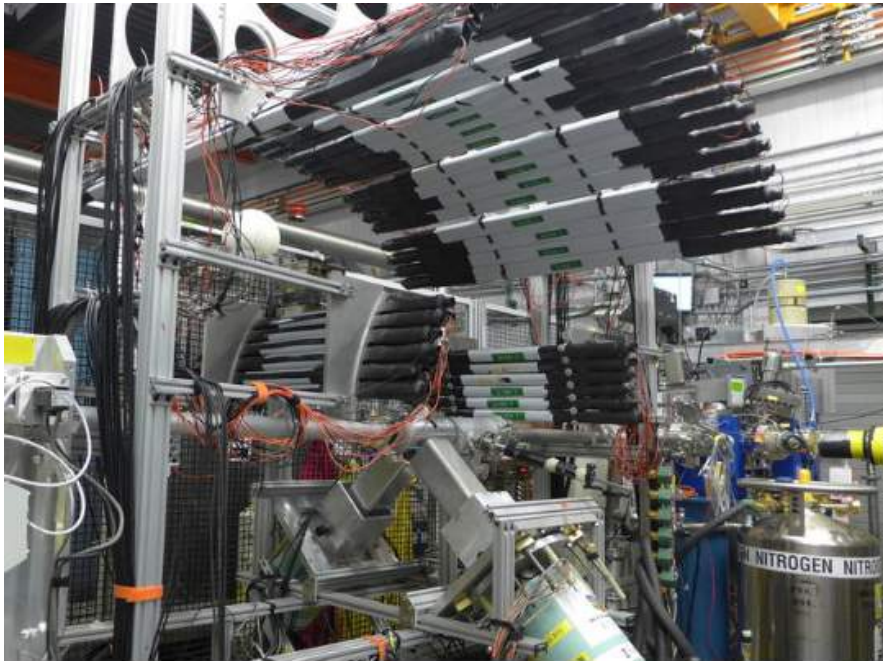


kolor czarny + szary obszar - wynik pomiaru z niepewnościami

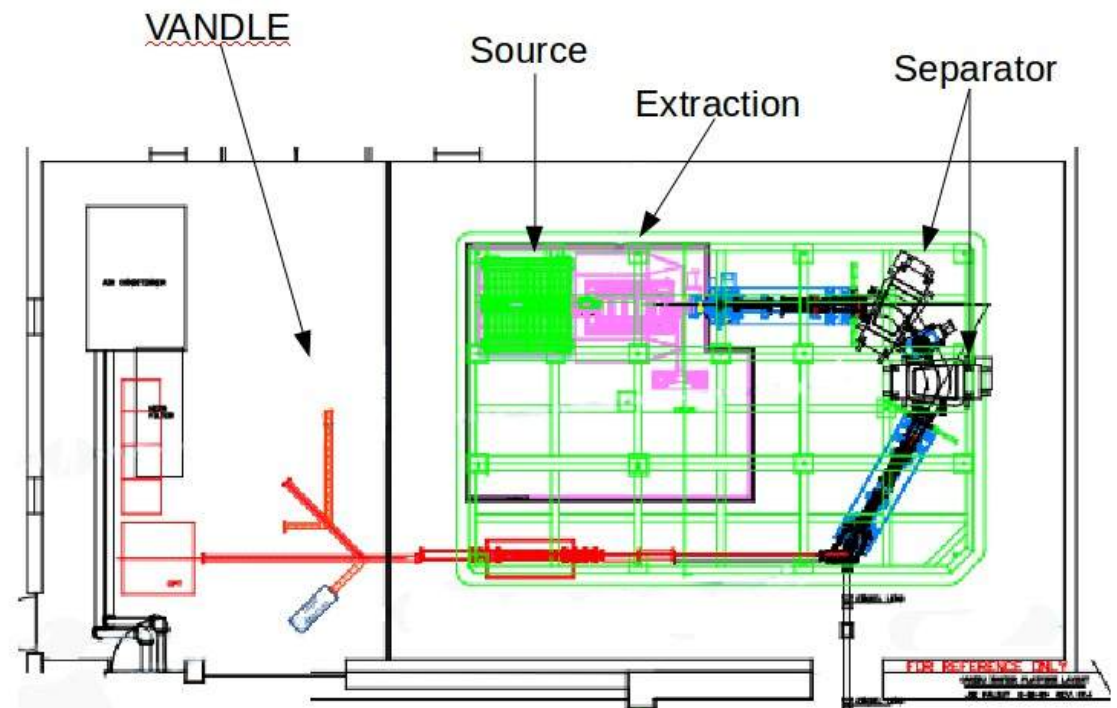
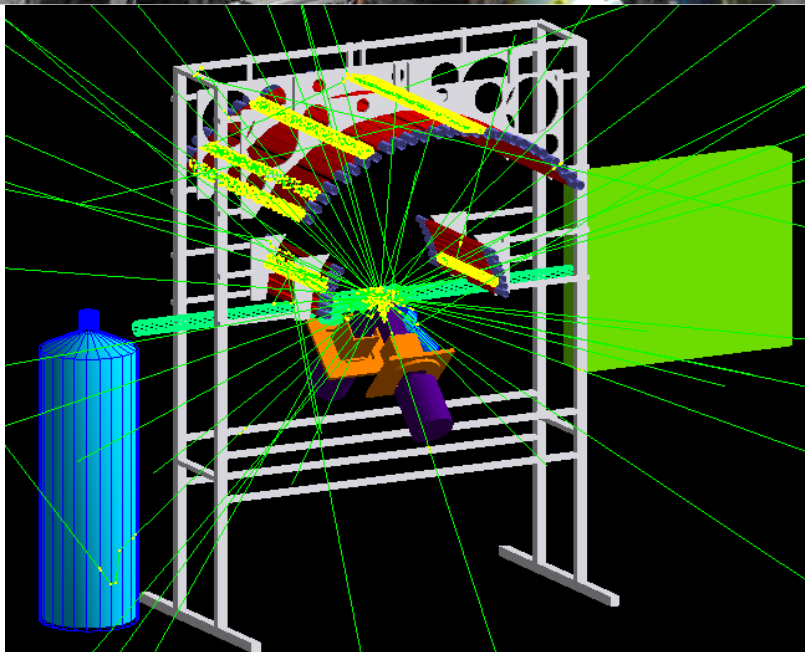
kolor niebieski - funkcja nasilenia w oparciu o wcześniejsze pomiary spektroskopii gamma
kolor pomarańczowy - wynik uzyskany z obliczeń w oparciu o model powłokowy

Kształt funkcji zasilenia β dowodzi istnienia silnych przejść dozwolonych GT ze stanów wewnątrz jądra $Z=50$

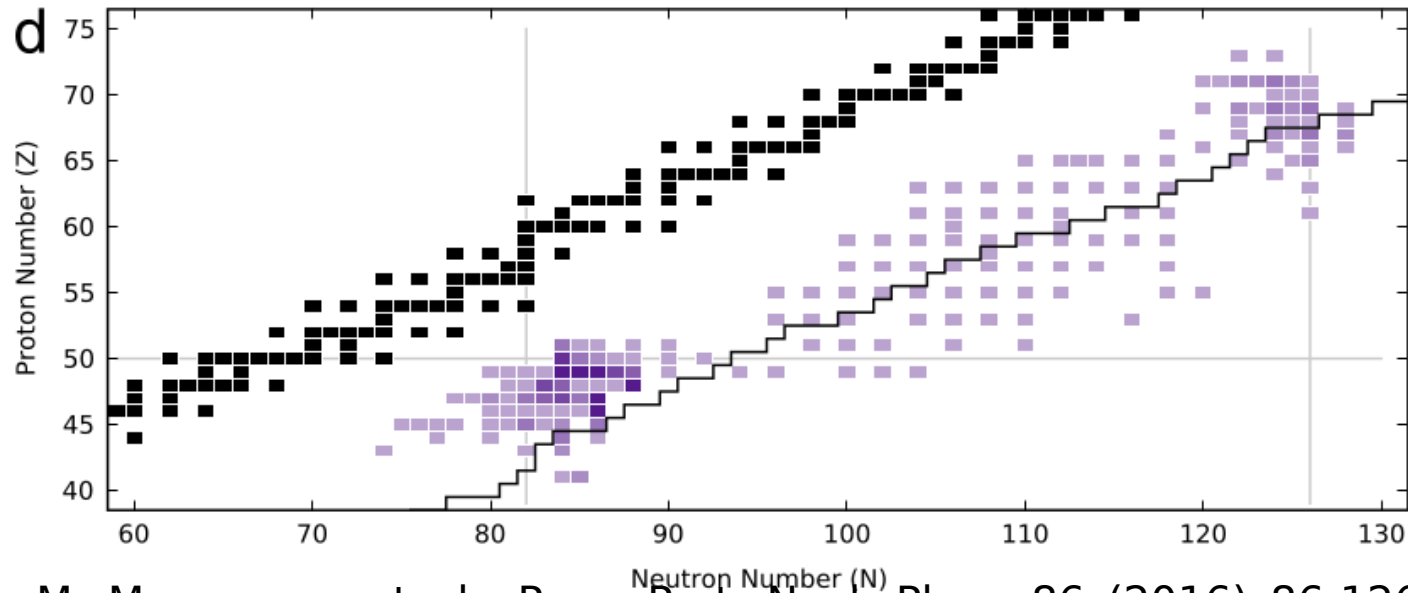
ANL, CARIBU, 2014



- ~1 Ci źródło ^{252}Cf
- Separator izobarów ($\Delta m/m \sim 10^4$)
- 12 małych i 26 średnich modułów macierzy VANDLE
- 2 detektory HPGe
- Plastikowy, cienki detektor beta
- Pomiar ^{85}As , ^{106}Nb , $^{135, 136}\text{Sb}$
- Tłó!!!!

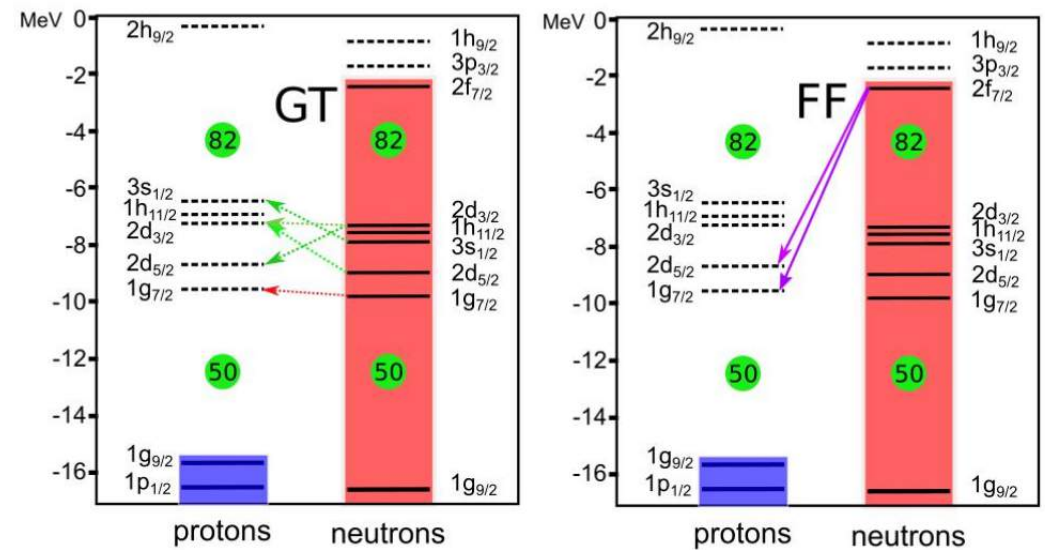


ANL, CARIBU, 2014



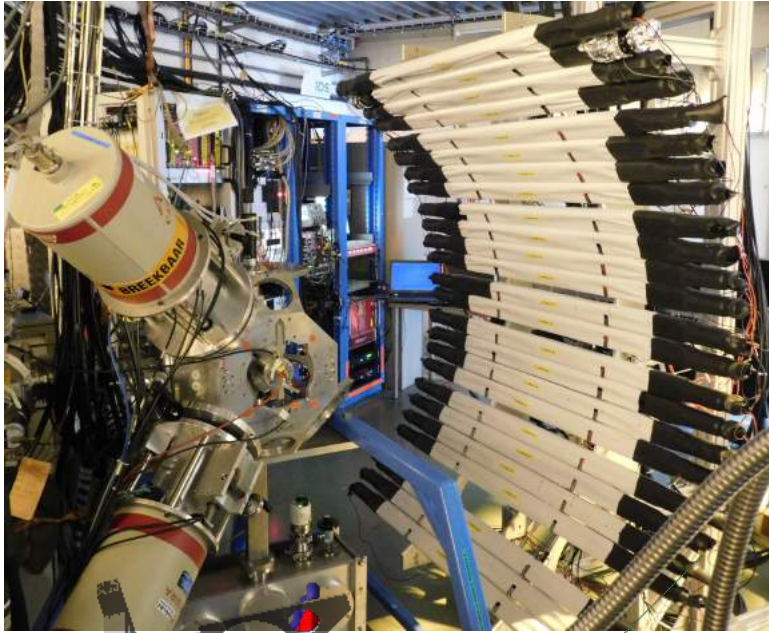
133Te	134Te	135Te	136Te	137Te	138Te
132Sb	133Sb	134Sb	135Sb	136Sb	137Sb
131Sn	132Sn	133Sn	134Sn	135Sn	136Sn
130In	131In	132In	133In	134In	135In

M. Mumpower et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 86 (2016) 86-126

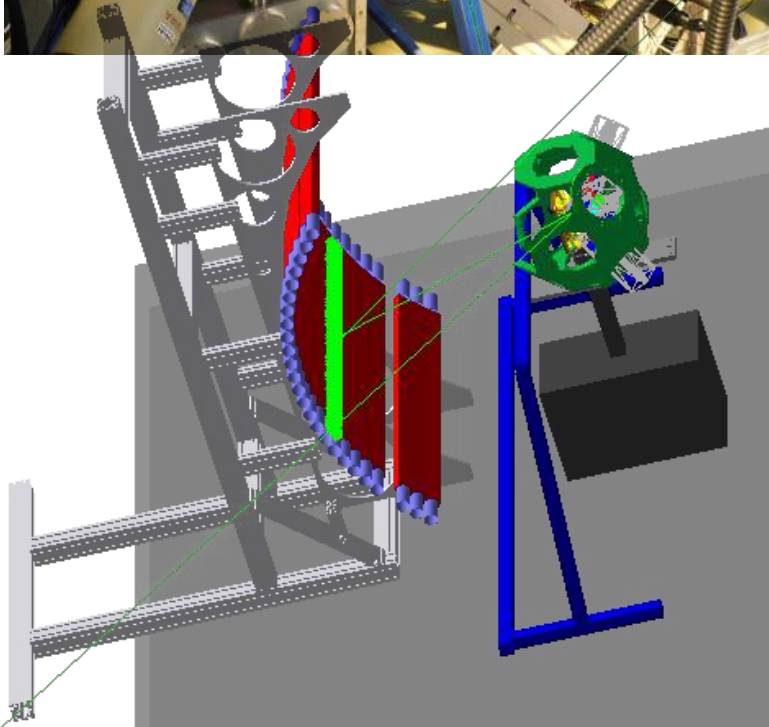


S. Taylor, UTK, rozprawa doktorska, 2018

CERN, ISOLDE, 2015 i 2017

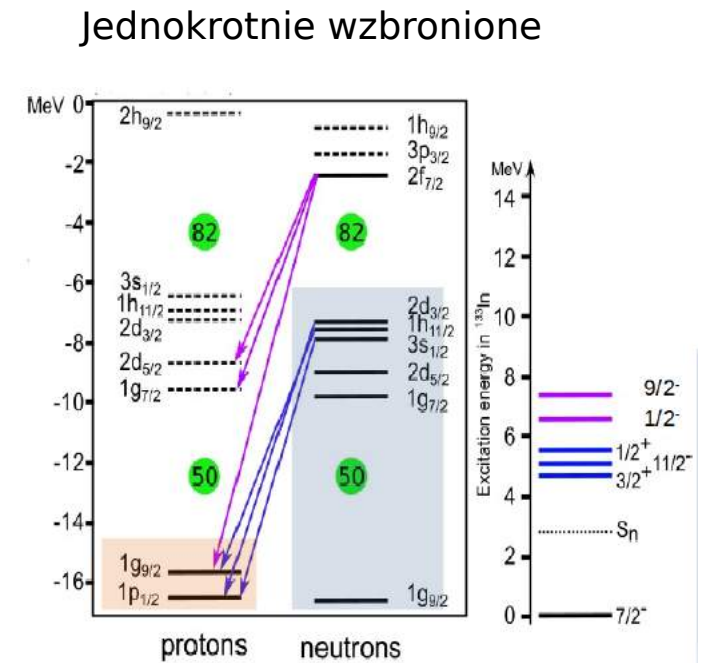
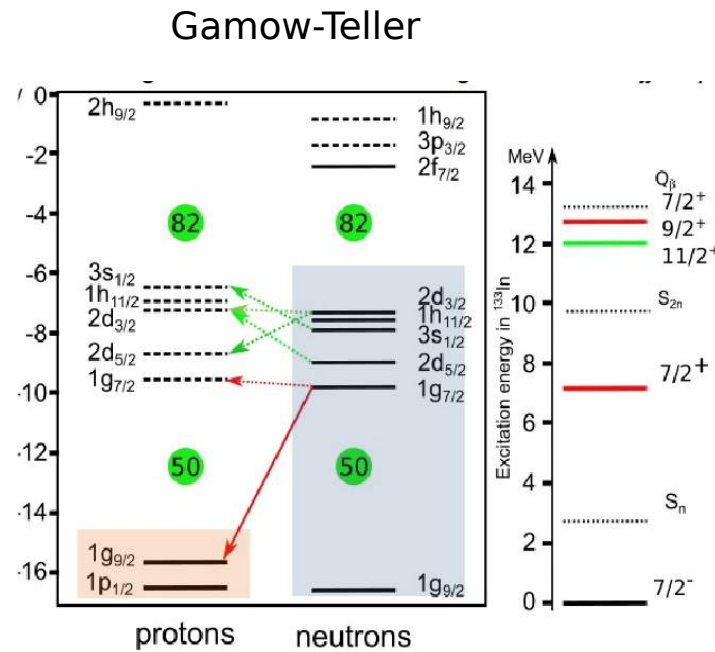


- Rozszczepienie ^{238}U indukowane protonami
- Separator
- Laserowe źródło jonów
- 26 średnich modułów macierzy VANDLE
- 4 detektory HPGe
- Plastikowy detektor beta
- Pomiar $^{130,132}\text{Cd}$, $^{52-54}\text{K}$, ^8He , $^{132,133}\text{In}$, ^{17}N



CERN, ISOLDE, ^{133}In

132Sb	133Sb	134Sb	135Sb	136Sb
131Sn	132Sn	133Sn	134Sn	135Sn
130In	131In	132In	133In	134In
129Cd	130Cd	131Cd	132Cd	133Cd



Przejścia wyłącznie ze stanów
z wnętrza rdzenia $N = 82$

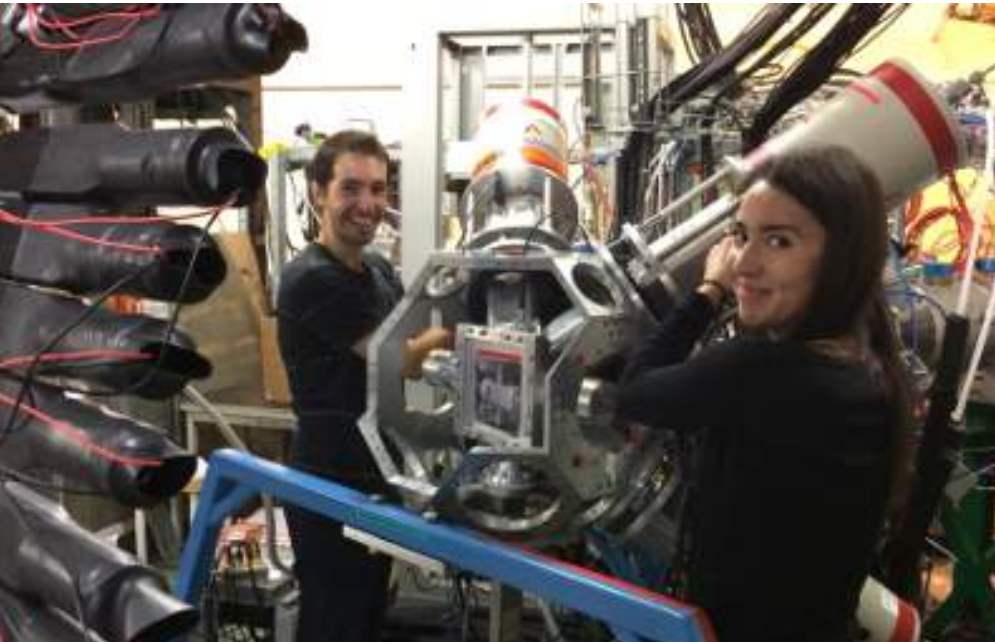
Najsilniejsze przejście $g7/2^- \rightarrow g9/2^+$
determinuje czas życia

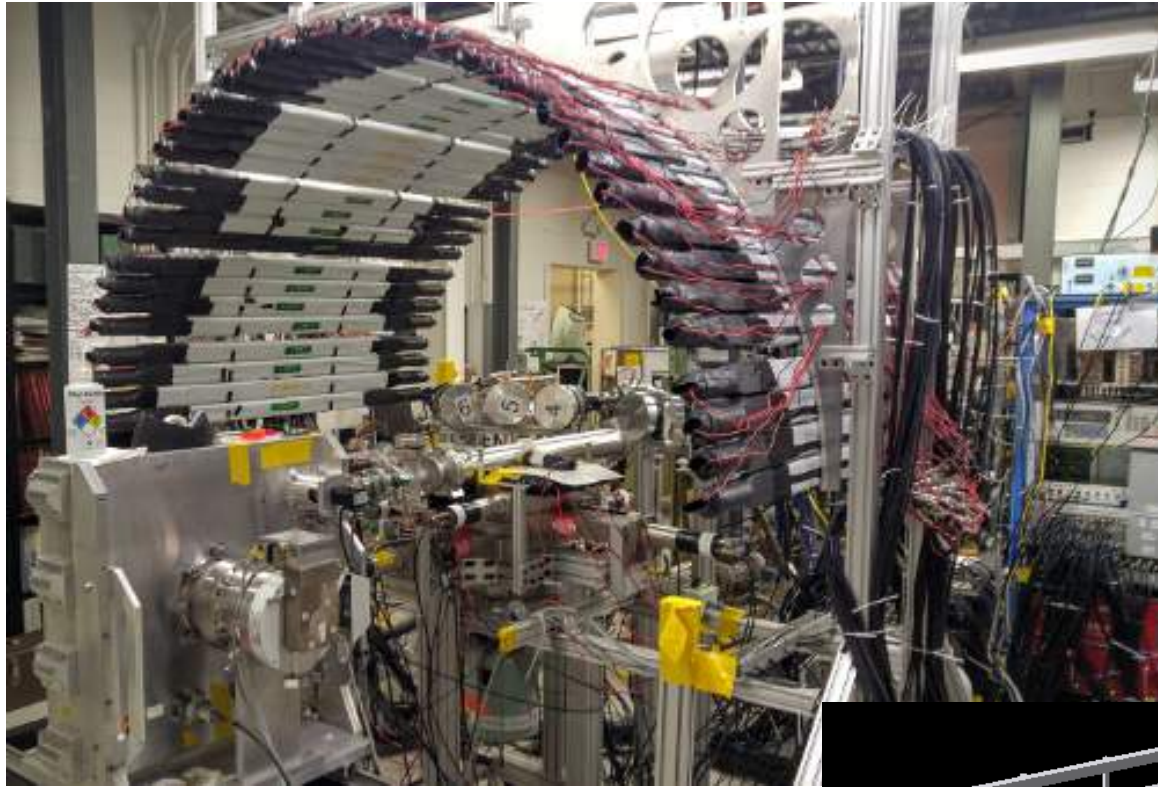
Protonowe stany jednocząstkowe
Neutronowe, dziurowe stany jednocząstkowe

Warto zajrzeć do:

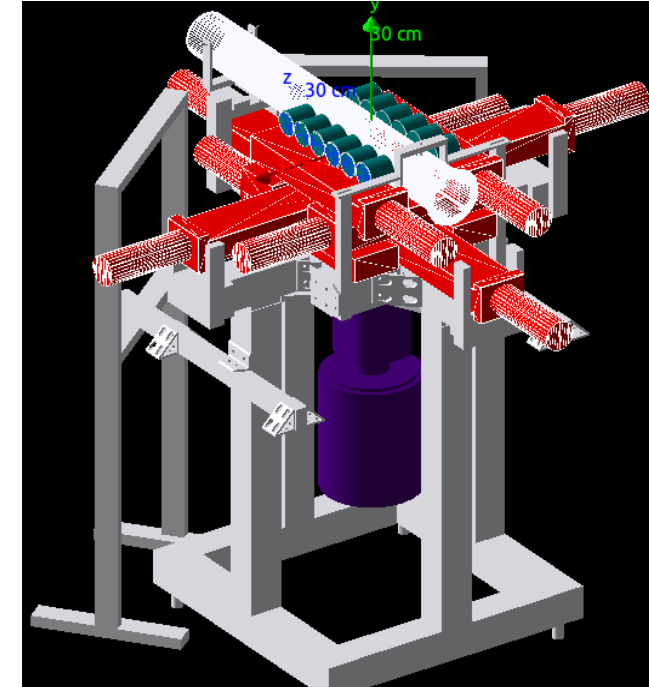
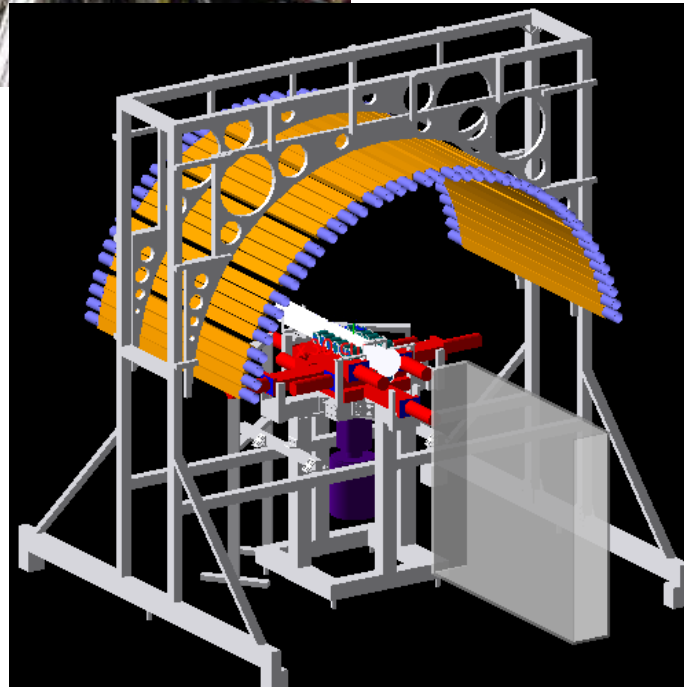
M. Piersa et al., PRC 2018, zaakceptowana

CERN, ISOLDE, znajome twarze

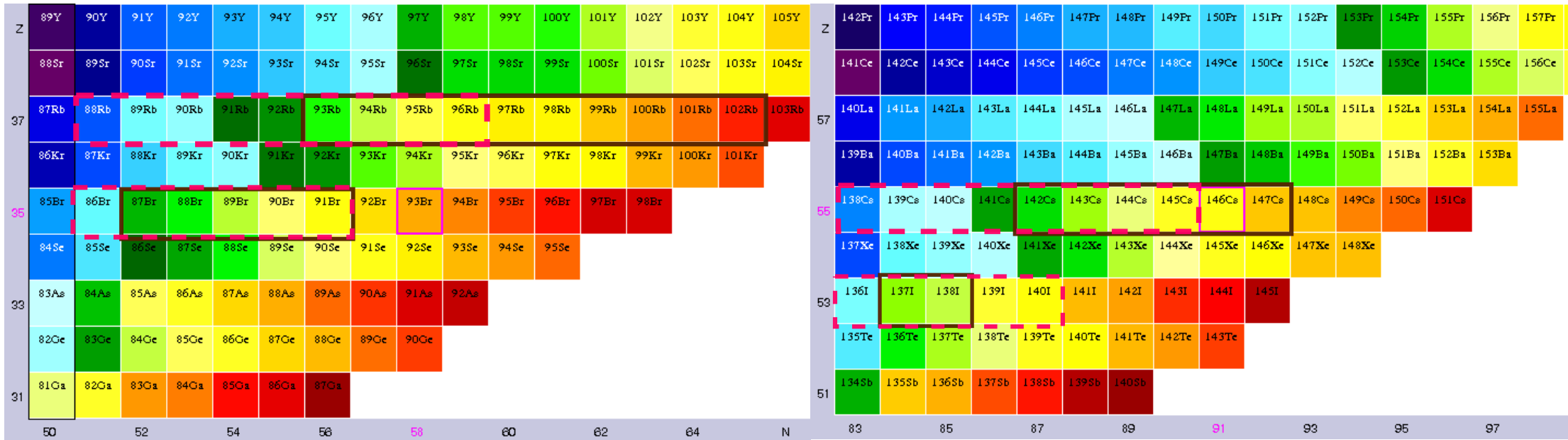
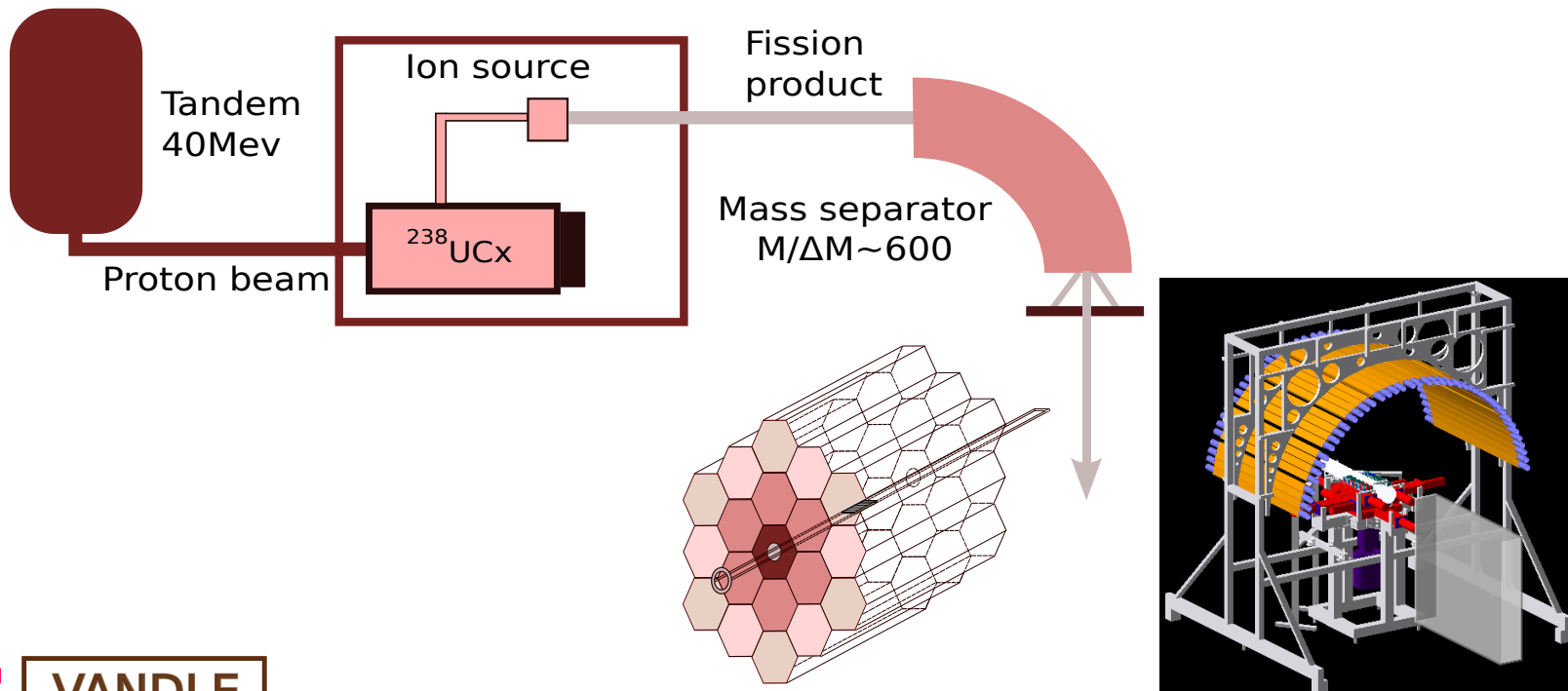




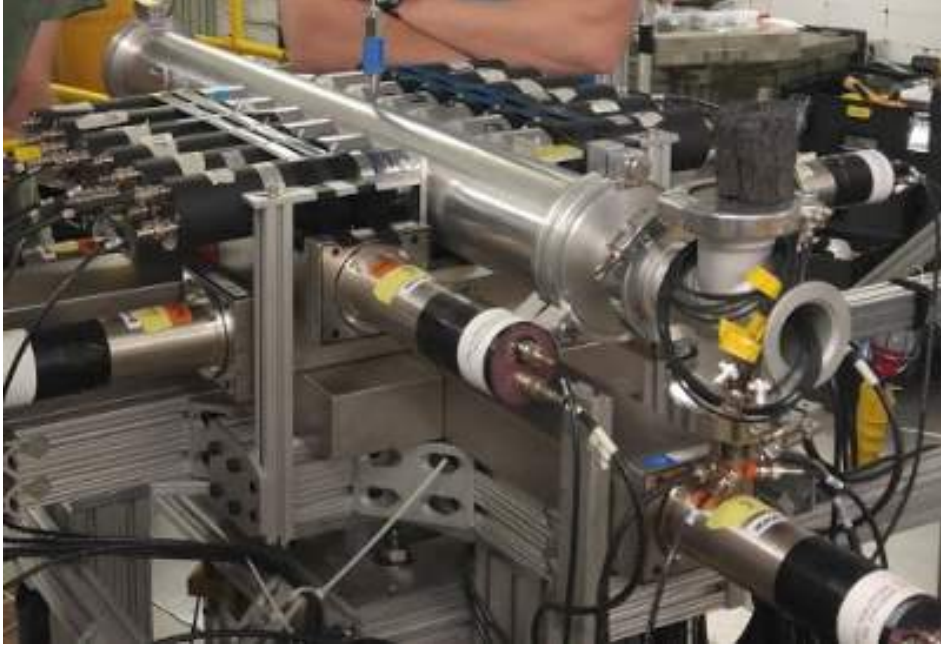
- 42 średnich modułów macierzy VANDLE
- 16 detektorów LaBr_3 (HAGRID)
- 10 kryształów NaI
- 1 HPGe
- 1 plastikowy detektor beta



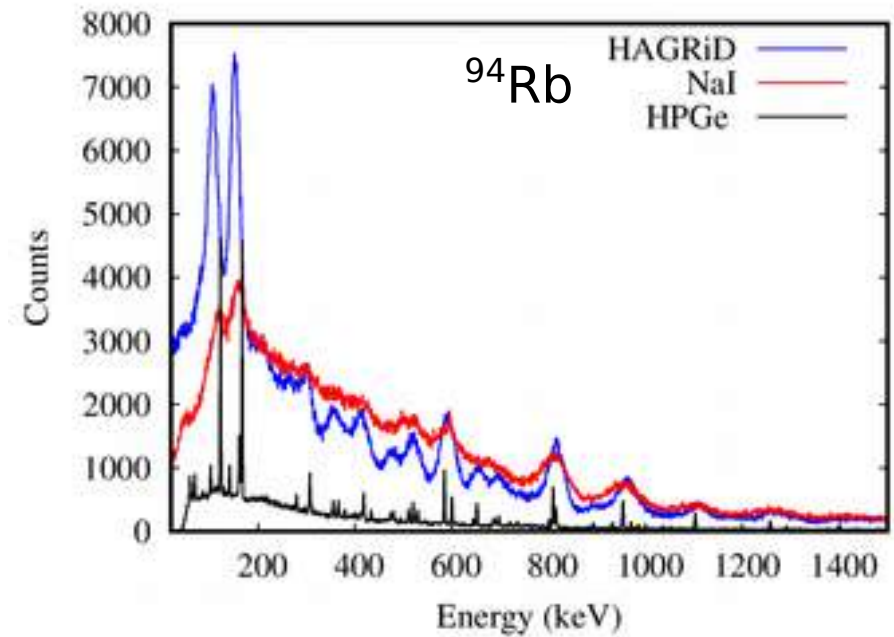
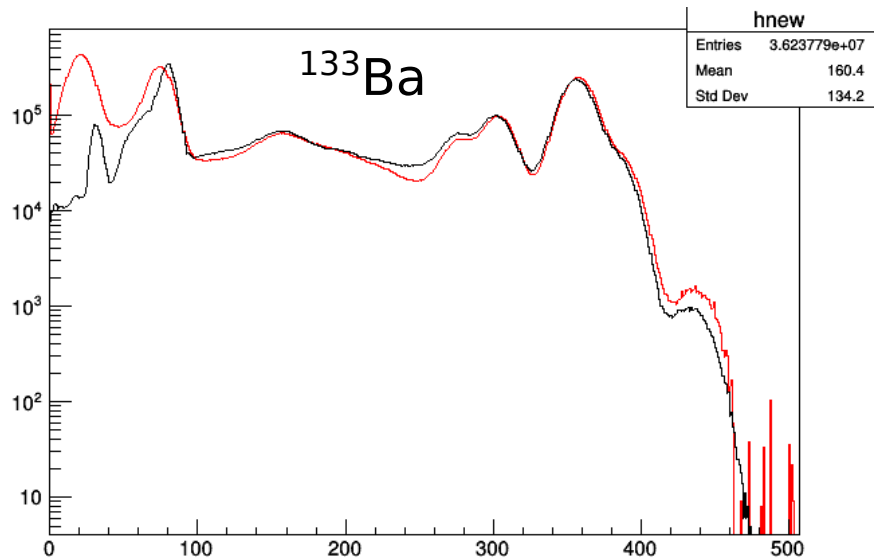
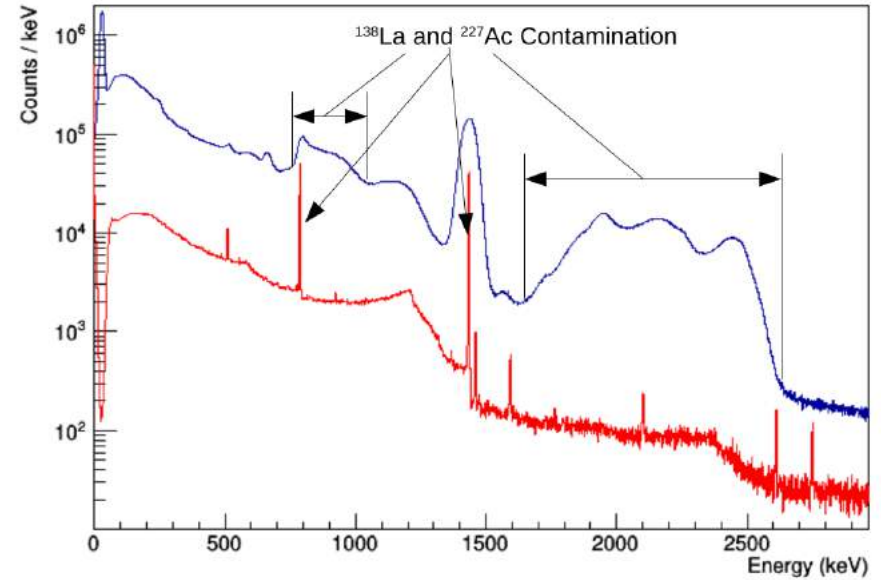
ORNL, 2016, jądra z obszaru "Pandemonium"



ORNL, 2016, HAGRID

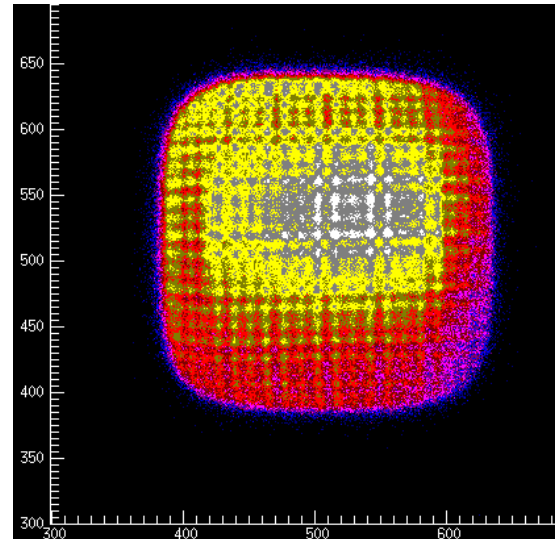
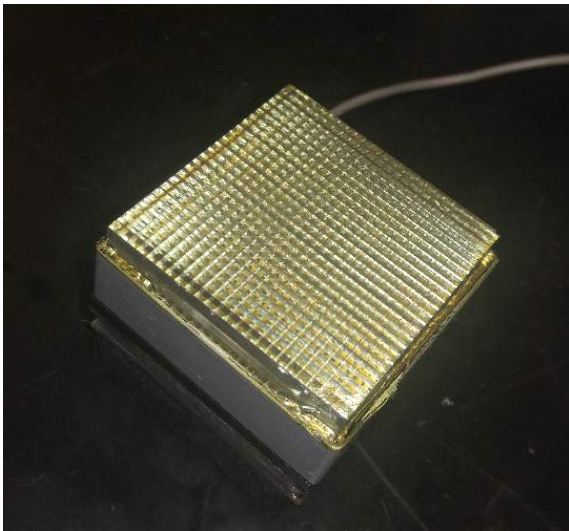
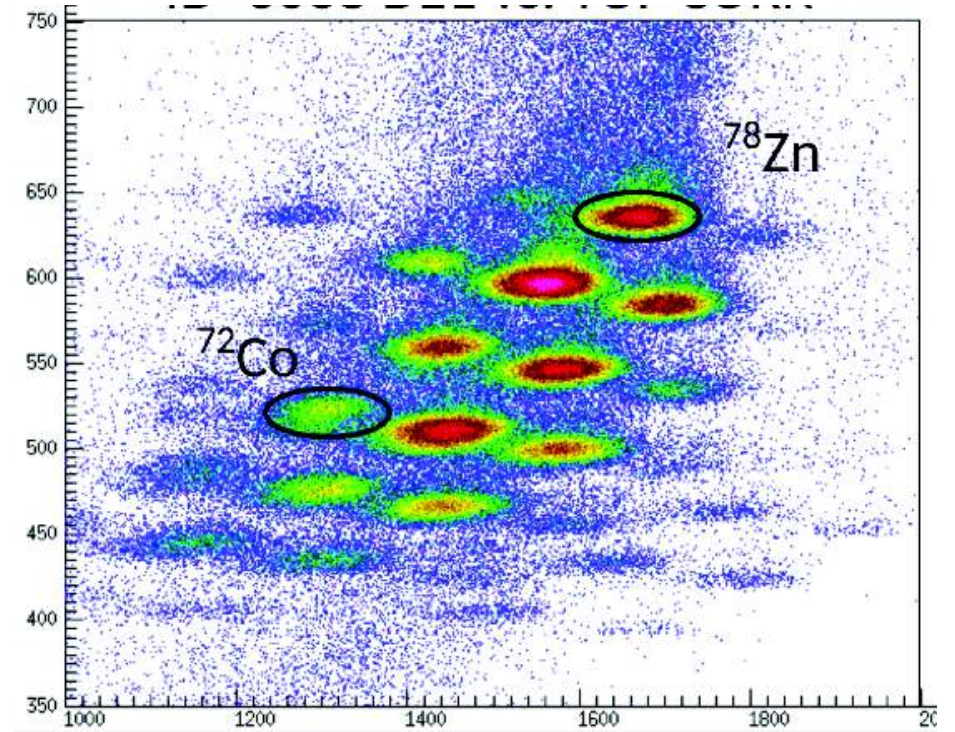
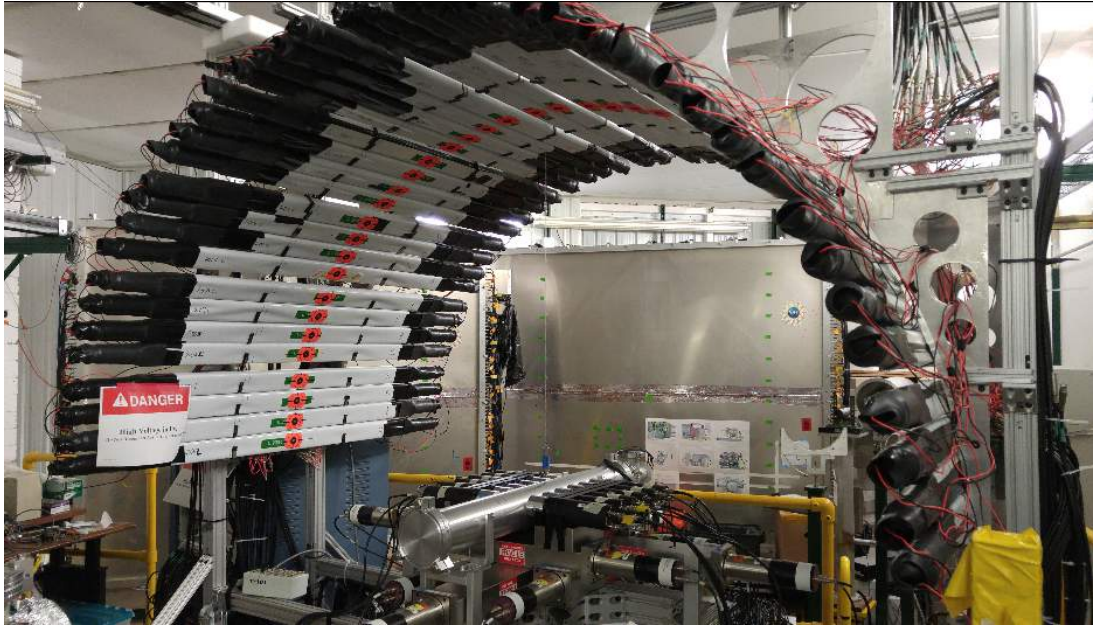


2" HAGRID vs HPGe (Room Background)

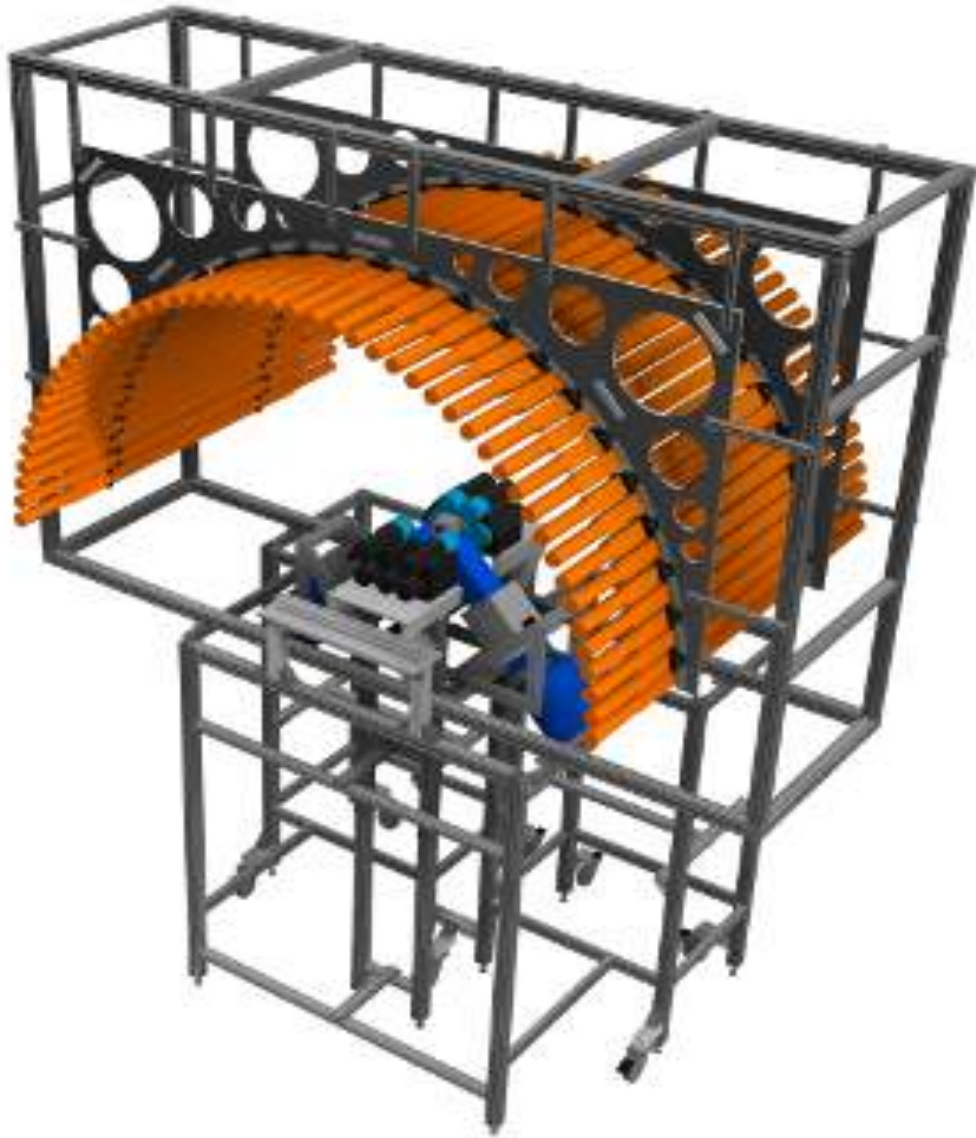


T. King, UTK, praca magisterska 2018

NSCL 2017, region ^{78}Ni

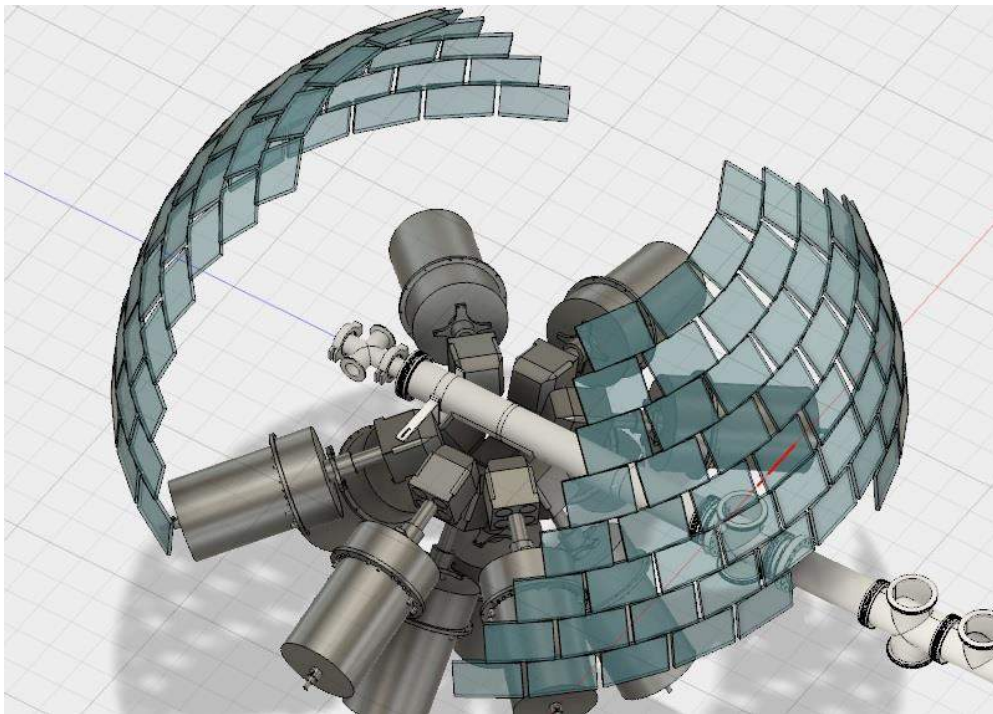


RIKEN listopad 2018, ^{78}Ni



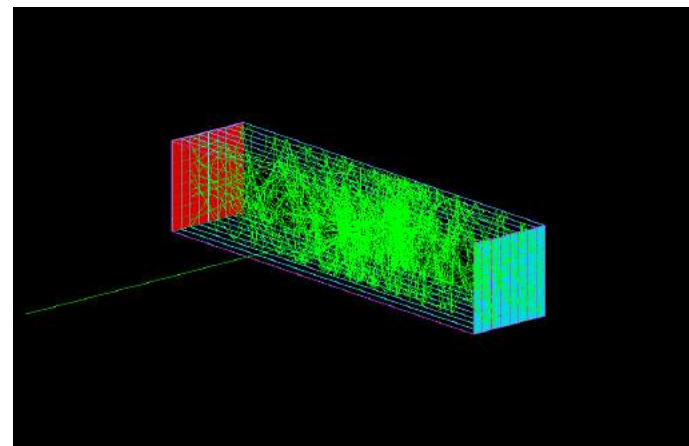
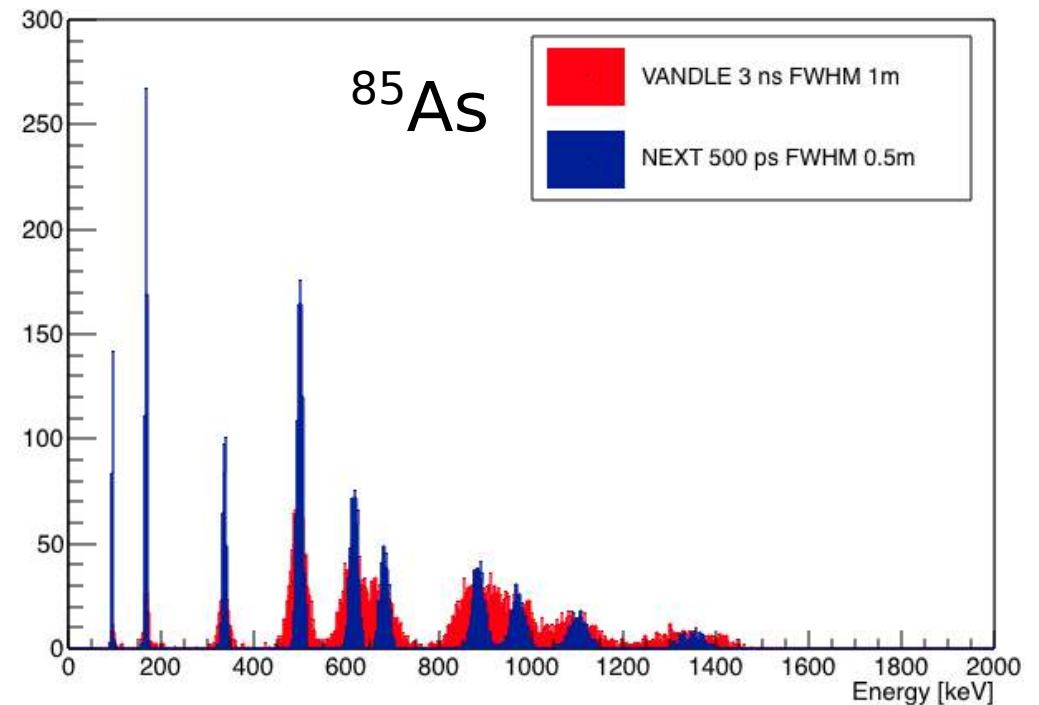
NEXT, Neutron Detector with Tracking

$$\frac{\delta E}{E} = 2 \left[\left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T} \right)^2 \right]^{1/2}$$



T. King, **D. Loureiro**

Neutron Kinetic Energy



Podsumowanie

Obserwacja wysokoenergetycznych neutronów dla jąder o dużym Q_{β} -Sn

- przejścia GT ze środka rdzenia

Rozkład funkcji zasilenia beta z powodzeniem wyjaśniony za pomocą modelu powłokowego

Pomiary w najlepszych laboratoriach, ulepszanie układu

To dopiero początek

Ludzie

VANDLE ORNL-HRIBF

M. Madurga, S. Paulauskas, K. Kolos, M. Al-Shudifat, L. Cartegni, A. Fijalkowska, D. Miller, S. Padgett, S. Taylor UTK
K. Rykaczewski, C. Gross, A. J. Mendes II, D. Stracener, C. Jost, Y. Liu, D. W. Bardayan, K. Miernik, M. Wolinska-Cichocka, ORNL
J. C. Batchelder, S. Liu, C. Matei, W. Peters and I. Spassova, ORAU
N. Brewer, J. K. Hwang, Vanderbilt
P. D. O'Malley, M. Howard, B. Manning, E. Merino, A. Ratkiewicz and J. Cizewski, Rutgers U.
C. Brune and T. Massey, Ohio U.
S. Ilyushkin, F. Raiola, D. Walter and F. Sarazin, Colorado School of Mines
J. Blackmon, E. Zganjar, Louisiana State U.
P. A. Copp, WUL

VANDLE CERN - ISOLDE

UTK : S. Go, S. Paulauskas, S. Z. Taylor
ISOLDE : M. Borge, B. C. Gonsalves, R. Lica, L. Lynch, M. Madurga-Flores, O. Tengblad
Univ. Warsaw : C. Mazzocchi, M. Piersa A. Korgul, Z. Janas
LLNL : K. Kolos
ORNL : C. Gross, W. Peters
IFIN : C. Costache, B. Dimitrov, S. Kisgov, C. G. Sotty
IPN ORSAY : A. Gottardo, S. Franchoo, D. Verney
U. Compultense : L. M. Fraile, V. Vedia
INFN : G. Benzoni, D. Mengoni, A. Morales
IEM/CSIC : I. M. Alonso, A. Perea



VANDLE ANL- CARIBU

UTK- S. Z. Taylor, R. Grzywacz, K. Kolos, S. V. Paulauskas, T. King, S. Gilliam, M. Al-Shudifat
ORNL- W. A. Peters, C. J. Gross, K. Rykaczewski, N. T. Brewer, C. Williams, J. M. Allmond
ORAU- J. C. Batchelder
CERN- M. Madurga
ANL- G. Savard, S. Zhu
NSCL- M. Hughes
ND- P. O'Malley, O. Hall
Rutgers- C. Reingold, D. Walter
TTU- M. Rajabali
Warsaw- M. Wolinska-Cichocka
Mines- S. Ilyuskin



VANDLE-NSCL

S. V. Paulauskas, S. Go, T. T. King, A. Keeler, M. Madurga, S. Z. Taylor, UTK
J. H. Hamilton, C. Zachary, E. H. Wang
Vanderbilt University
B. Crider, S. Liddick
NSCL
A. Fijalkowska, Rutgers University
N. T. Brewer ORNL
M. M. Rajabali
Tennessee Tech.
P. D. O'Malley
University of Notre Dame
M. Karny
Warsaw University

VANDLE -ORNL-OLTF

S. V. Paulauskas, T. King, S. Z. Taylor, K. Smith, S. Burcher, C. Bingham, K. L. Jones, K. T. Schmitt, M. Vostinar, S. Go, W. A. Peters, Y. Xiao (UTK)
D. W. Stracener, C. J. Gross, B. C. Rasco, J. T. Matta, K. P. Rykaczewski, N. T. Brewer ORNL
A. Lepailleur, Rutgers
D. W. Bardayan U. Notre Dame
D. Miller (Idaho Nat. Lab.)
E. H. Wang (Vanderbilt U.)
K. Kolos (LLNL)
K. Nishio (JAEA)
M. M. Rajabali (Tenn. Tech. U)
M. Wolinska-Cichocka (Warsaw. U)
Colorado School of Mines: S. Ilyushkin (Mines)
M. J. Devlin (LANL)



Ludzie

VANDLE ORNL-HRIBF

M. Madurga, S. Paulauskas, K. Kolos, M. Al-Shudifat, L. Cartegni, A. Fijalkowska, D. Miller, S. Padgett, S. Taylor UTK
 K. Rykaczewski, C. Gross, A. J. Mendes II, D. Stracener, C. Jost, Y. Liu, D. W. Bardayan, K. Miernik, M. Wolinska-Cichocka, ORNL
 J.C. Batchelder, S. Liu, C. Matei, W. Peters and J. Spasova, ORNL
 N. Brewer, J.K. Hwang, Vanderbilt
 P.D. O'Malley, M. Howard, B. Manning, E. A. Ratkiewicz and J. Cizewski, Rutgers U.
 C. Brune and T. Massey, Ohio U.
 S. Ilyushkin, F. Raiola, D. Walter and F. Sarazin, Colorado School of Mines
 J. Blackmon, E. Zganjar, Louisiana State U.
 P.A. Copp, WUL

VANDLE CERN - ISOLDE

UTK : S. Go, S. Paulauskas, S. Z. Taylor
 ISOLDE : M. Borge, B. C. Gonsalves, R. Lica
 M. Madurga-Flores, O. Tengblad
 Univ. Warsaw : C. Mazzocchi, M. Piersa A. Janas
 LLNL : K. Kolos
 ORNL : C. Gross, W. Peters
 IFIN : C. Costache, B. Dimitrov, S. Kisgov, C.
 IPN ORSAY : A. Gottardo, S. Franchoo, D.
 U. Compultense : L. M. Fraile, V. Vedia
 INFN : G. Benzoni, D. Mengoni, A. Morales
 IEM/CSIC : I. M. Alonso, A. Perea



P. D. O'Malley
 University of Notre Dame
 M. Karny
 Warsaw University

VANDLE ANL- CARIBU

UTK- S. Z. Taylor, R. Grzywacz, K. Kolos, S. V. Paulauskas, T. King, S. Gilliam, M. Al-Shudifat
 ORNL- W. A. Peters, C. J. Gross, K. Rykaczewski, N. T. Brewer, C. Williams, J. M. Allmond



ider
 nu
 Hall
 d, D. Walter
 a-Cichocka

ANL-OLTF

Paulauskas, T. King, S. Z. Taylor, K. Smith,
 C. Bingham, K. L. Jones, K. T.
 Vostinar, S. Go,
 S. Y. Xiao (UTK)
 Stracener, C. J. Gross, B. C. Rasco, J. T.
 Rykaczewski, N. T. Brewer ORNL
 Cizewski, Rutgers
 Bardayan U. Notre Dame
 (Ohio Nat. Lab.)
 Hwang, Vanderbilt U.)

K. Kolos (LLNL)
 K. Nishio (JAEA)
 M. M. Rajabali (Tenn. Tech. U)
 M. Wolinska-Cichocka (Warsaw. U)
 Colorado School of Mines: S. Ilyushkin (Mines)
 M. J. Devlin(LANL)

