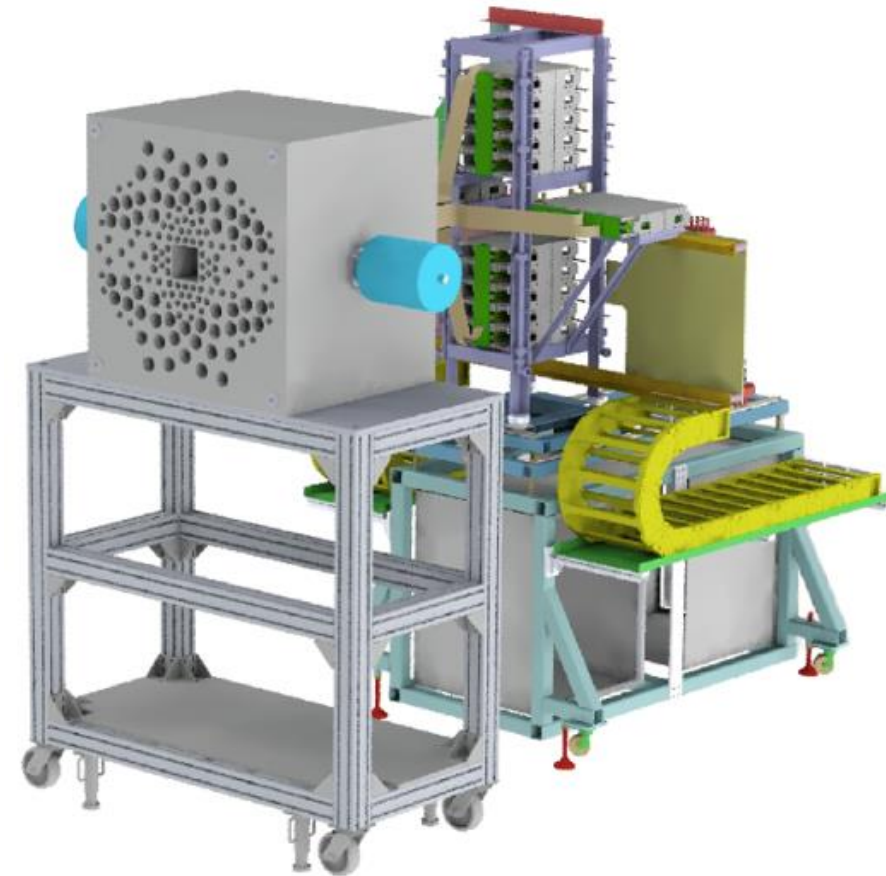


BRIKEN

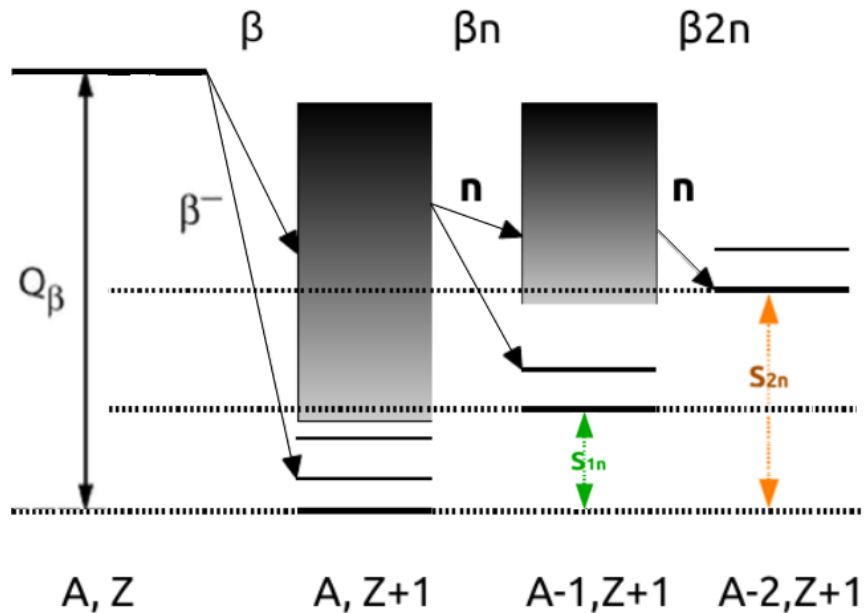
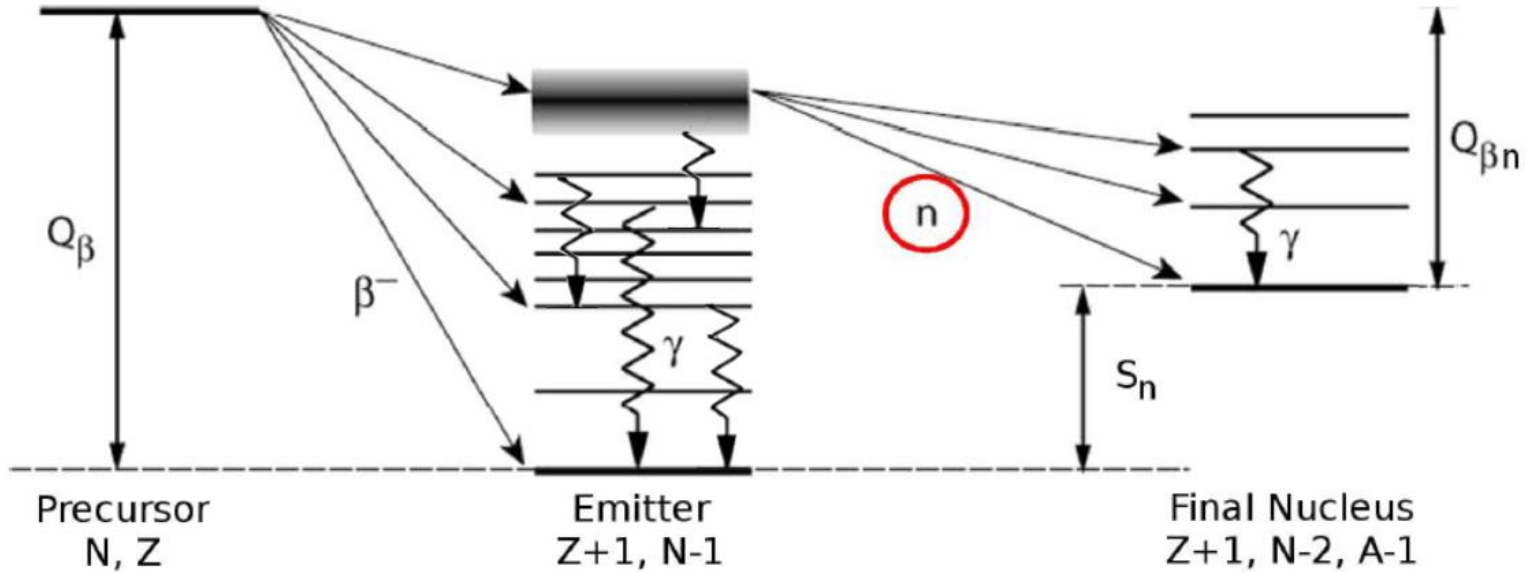
Badania własności rozpadów β z emisją opóźnionych neutronów



Plan prezentacji

- *emisja neutronów opóźnionych po rozpadzie β*
- *motywacja i główne kierunki badań*
- *laboratorium RIBF-RIKEN*
- *współpraca BRIKEN*
- *układ pomiarowy BRIKEN*
- *przeprowadzone i planowane pomiary*
- *wstępne wyniki*
- *podsumowanie*

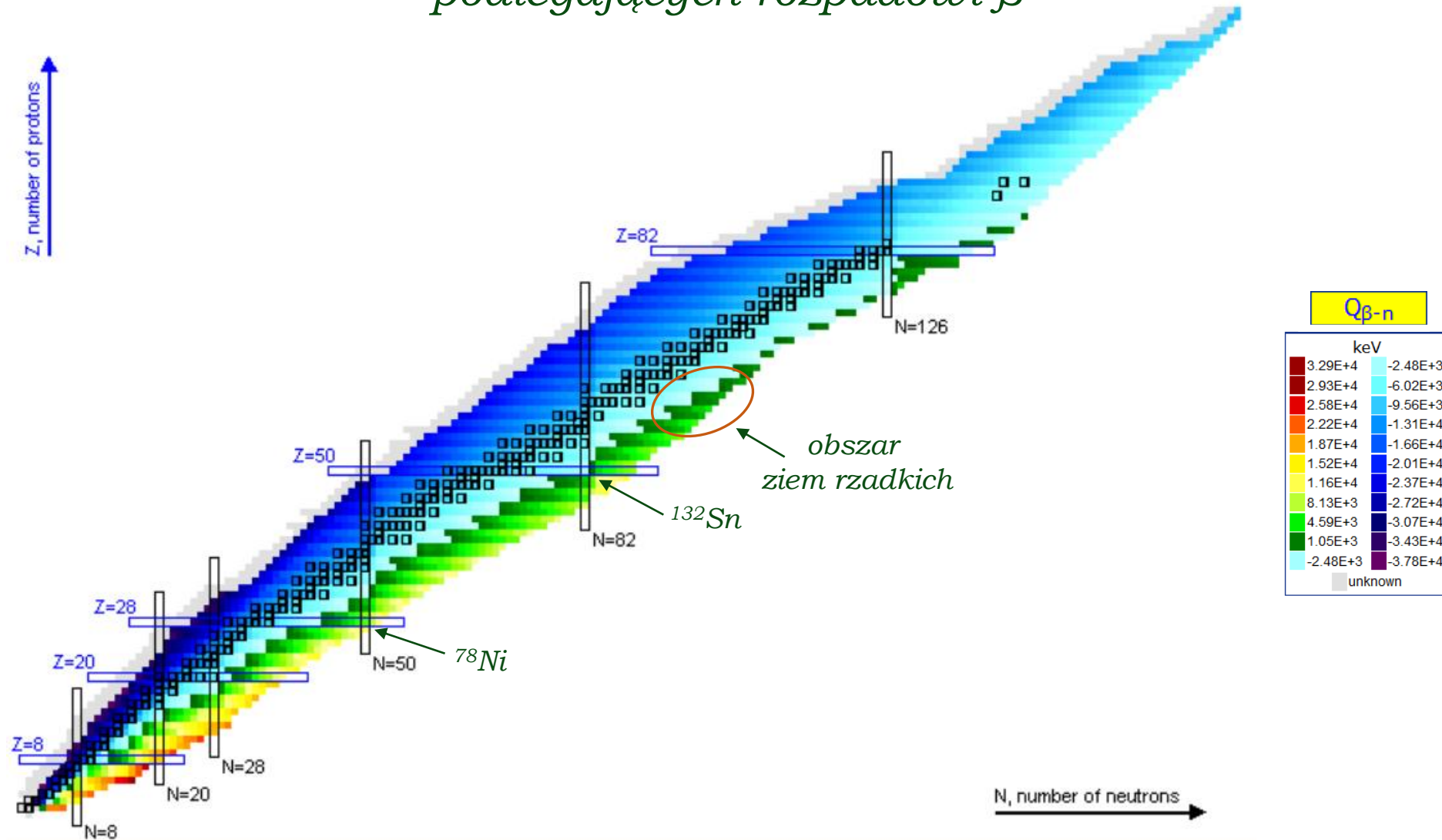
Emisja neutronów opóźnionych po rozpadzie β



Dla jąder neutrono-nadmiarowych oddalonych od ścieżki stabilności głównym kanałem rozpadu po przemianie β staje się emisja neutronów opóźnionych ($S_n < Q_\beta$).

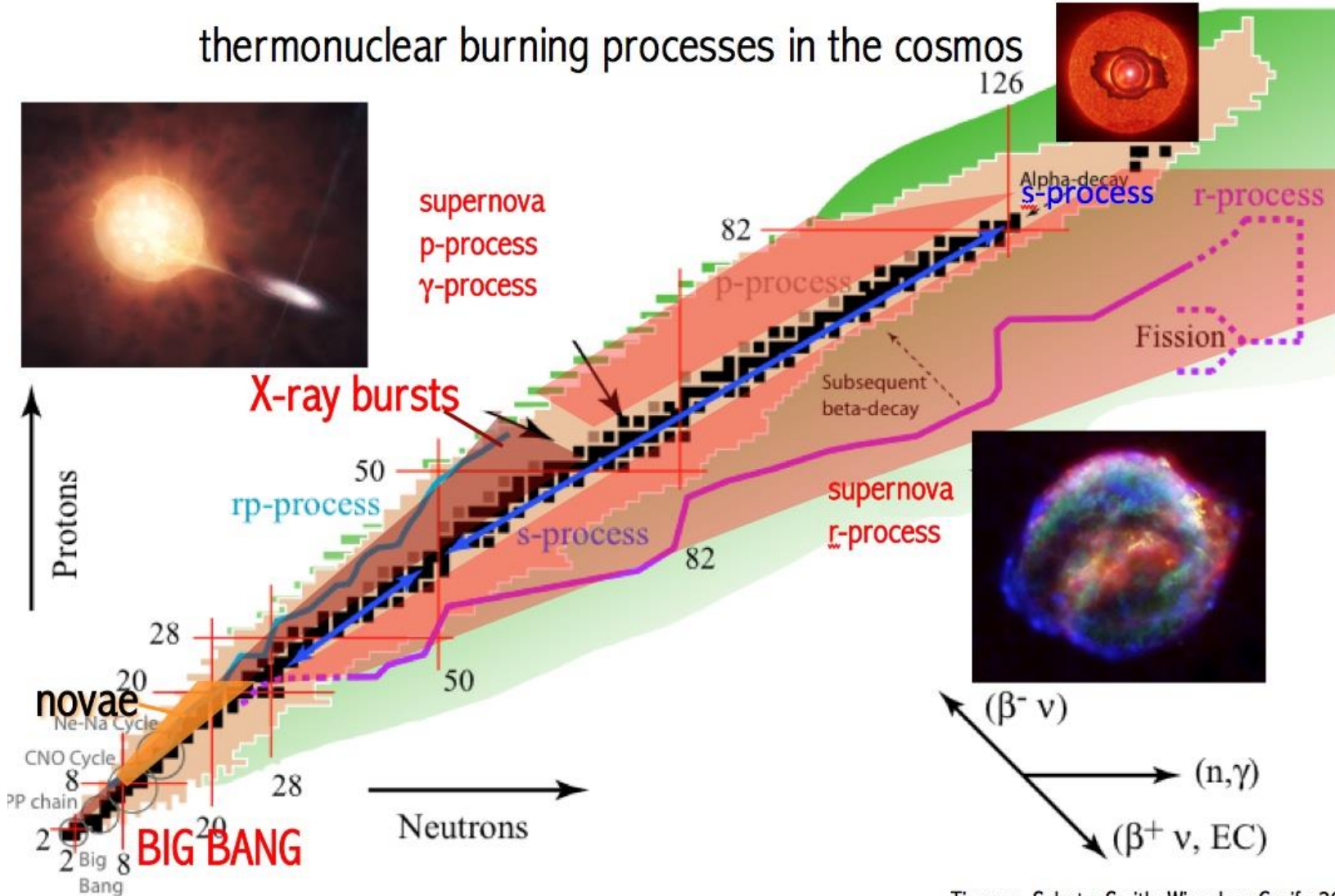
Motywacja i główne kierunki badań

Identyfikacja i badanie nowych jąder neutrono-nadmiarowych podlegających rozpadowi β



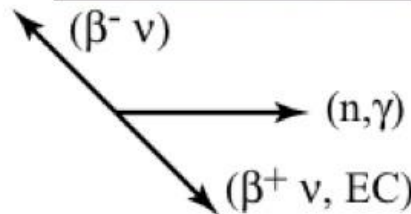
*Pomiar prawdopodobieństwa emisji neutronów opóźnionych po rozpadzie β (P_{xn})
ważnych dla procesu r (szybkiego wychwytu neutronów w gwiazdach)*

thermonuclear burning processes in the cosmos



Proces r - proces jądrowy polegający na wychwycie przez nuklidy neutronów i kolejnych rozpadach beta, w wyniku czego powstają nuklidy cięższe od żelaza.

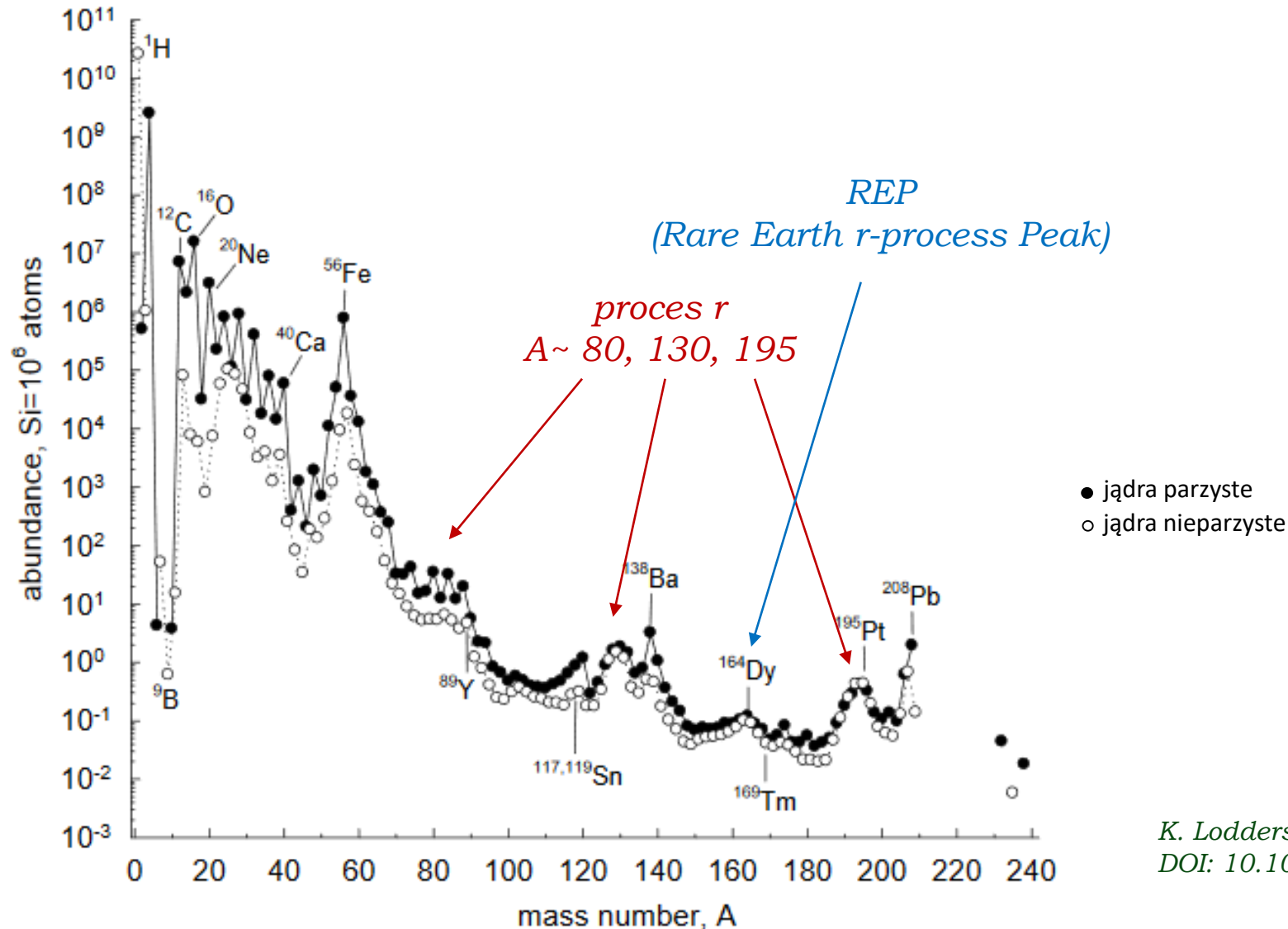
Proces r może zachodzić w masywnych gwiazdach jak i podczas zlewania się dwóch gwiazd neutronowych.



Motywacja i główne kierunki badań

Proces r

Rozpowszechnienie izotopów w Układzie Słonecznym

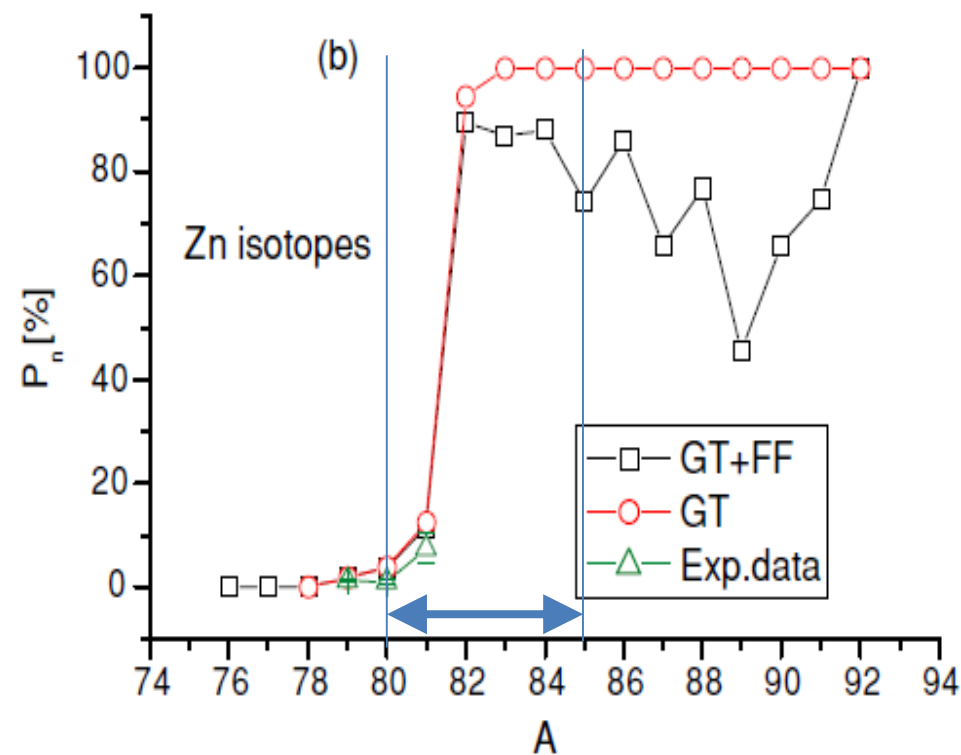
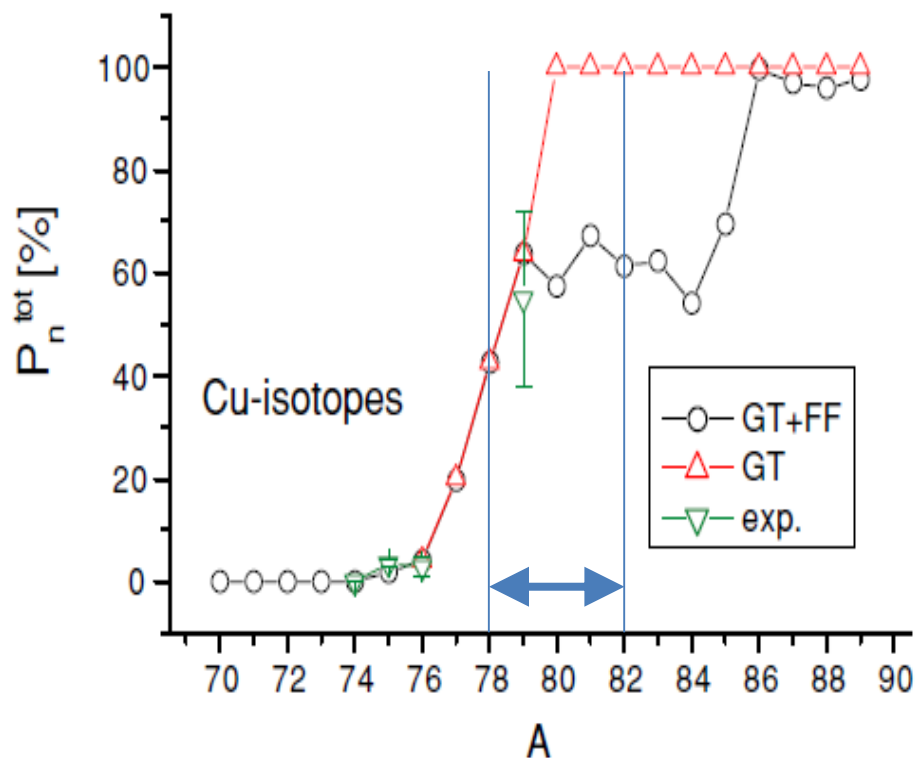


K. Lodders (2010)

DOI: 10.1007/978-3-642-10352-0_8

Wyznaczanie własności rozpadu β jąder egzotycznych takich jak:

- czasy połowicznego zaniku ($T_{1/2}$)
- prawdopodobieństwa emisji x neutronów po rozpadzie β (P_{xn}) pomocnych w zrozumieniu ewolucji struktury jąder neutrono-nadmiarowych

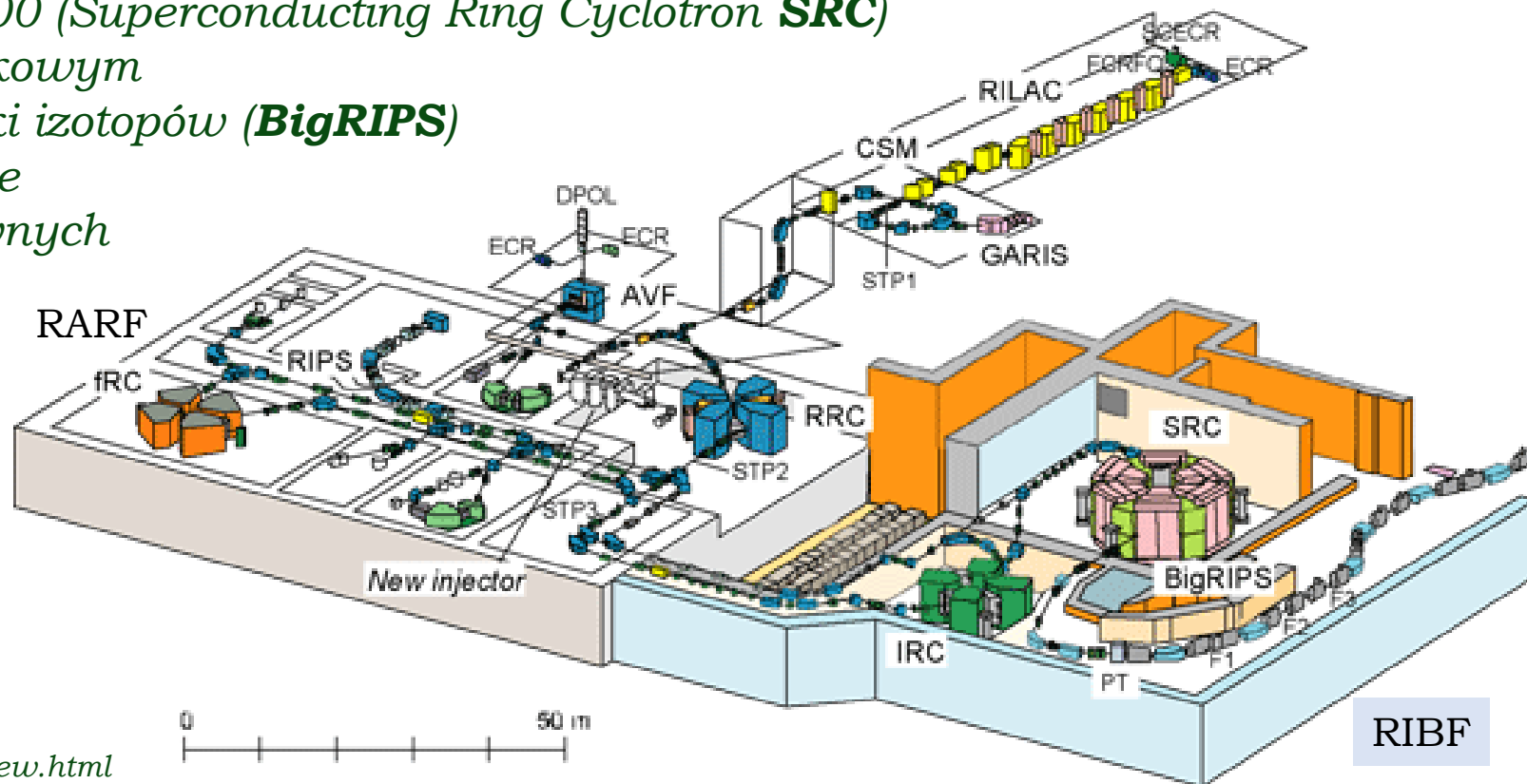


The examples of the effects of GT to FF competition on P_n values in Cu and Zn isotopes [Borzov 2005].

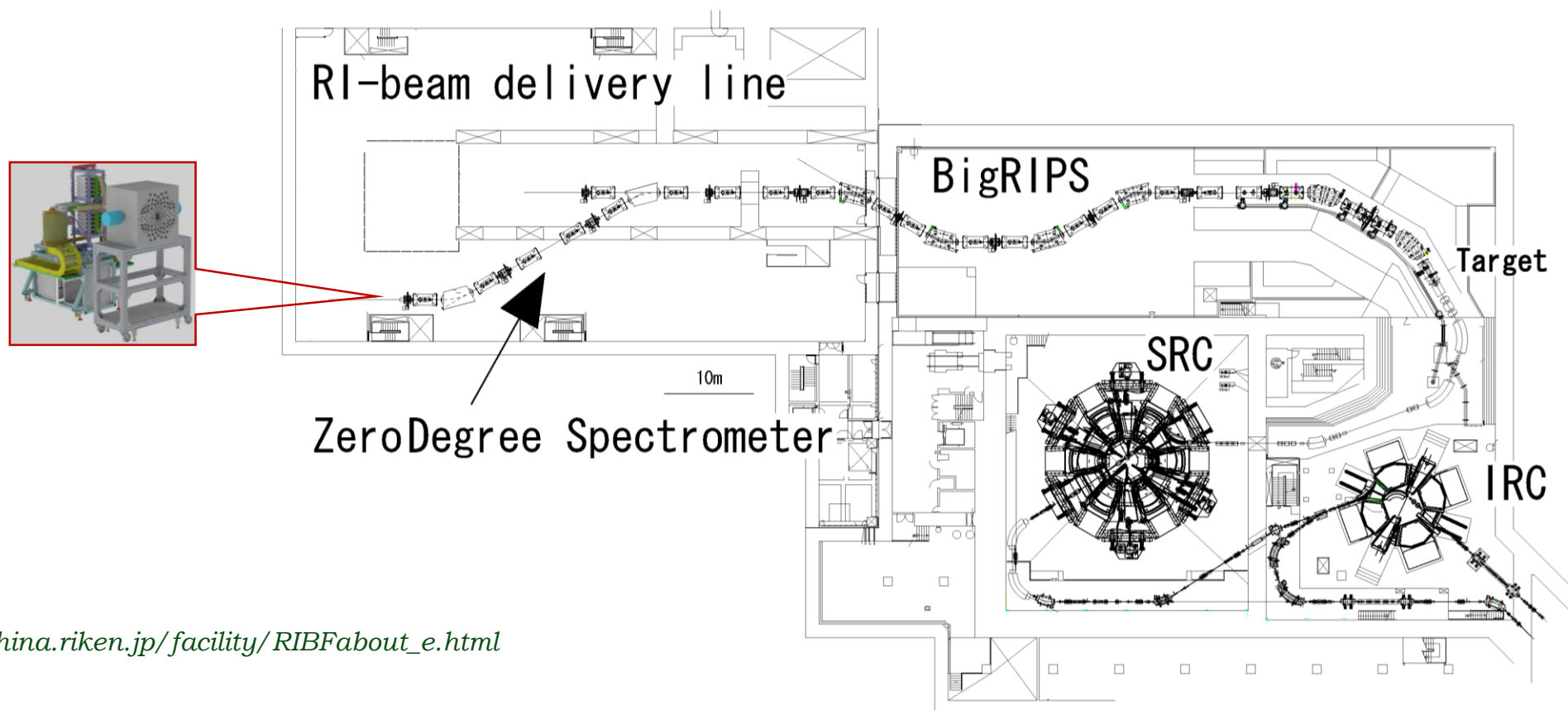
Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) w RIKEN Nishina Center, Wako, Japonia

- wytwarza niestabilne jądra większości pierwiastków aż do uranu, w reakcjach fragmentacji
- jest to kompleks akceleratorów:
 - * cyklotron K540 Riken Ring Cyclotron (**RRC**) (działa już 31 lat)
 - * cyklotron K570 o stałej częstotliwości (fixed frequency Ring Cyclotron **fRC**)
 - * cyklotron pośredni K980 (Intermediate stage Ring Cyclotron **IRC**)
 - * cyklotron nadprzewodzący K2500 (Superconducting Ring Cyclotron **SRC**)
- zintegrowane są z nadprzewodnikowym separatorem radioaktywnej wiązki izotopów (**BigRIPS**)
- **RIBF** zapewnia obecnie najwyższe intensywności wiązek radioaktywnych jąder egzotycznych

RIBF Accelerators



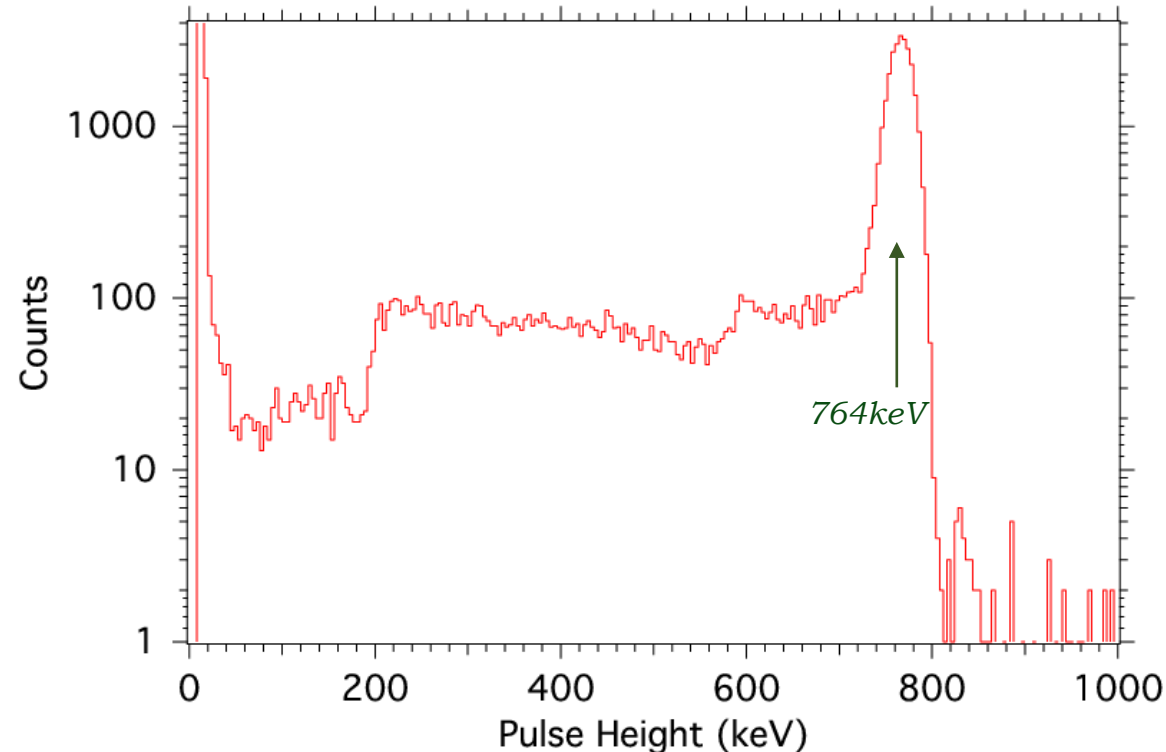
- wiązka $^{238}\text{U}^{+86}$ o energii **345 MeV na nukleon** uderza w **tarcze ^9Be (~4 mm)**
- neutrono-nadmiarowe produkty tej reakcji są filtrowane przez separator **BigRIPS** dwustopniowo:
 - * etap I – wstępna separacja, oddzielenie wiązki pierwotnej ^{238}U
 - * etap II- dalsza separacja zgodnie z liczbą atomową, ładunkiem, masą i pędem odpowiednich cząstek
- ostatni etap separacji radioaktywnej wiązki jest w spektrometrze **Zero Degree**
- identyfikacja jonów w BigRIPS jest na podstawie czasu przelotu oraz strat energii



- *Powstanie kolaboracji - lata 2012-2013*
- *Zatwierdzenie wniosku o budowie detektora BRIKEN w laboratorium RIBF-RIKEN - grudzień 2013*
- *Pierwsze testy na wiązce (commissioning) – listopad 2016*
- *Obecnie zrzesza przedstawicieli 12 państw (Japonia, USA, Hiszpania, Wielka Brytania, Kanada, Polska, Węgry, Korea Południowa, Chile, Chiny, Hong Kong, Wietnam)*
- *Skąd są elementy układu BRIKEN?*
 - * *liczniki ^3He do detekcji neutronów – USA (87%), Hiszpania, Japonia*
 - * *HPGe typu clover do detekcji promieniowania gamma - USA*
 - * *detektory do detekcji jonów i elektronów z rozpadu β*
 - *AIDA - Wielka Brytania*
 - *WAS3ABi - Japonia*
 - *YSO - USA*

Dlaczego ^3He detektory do rejestracji neutronów?

^3He wychwytuje neutrony termiczne i przekształca się w proton (H) i tryt (^3H), które następnie jonizują gaz $^3\text{He}/\text{CF}_4$ pozostawiając sygnał w detektorze ^3He .



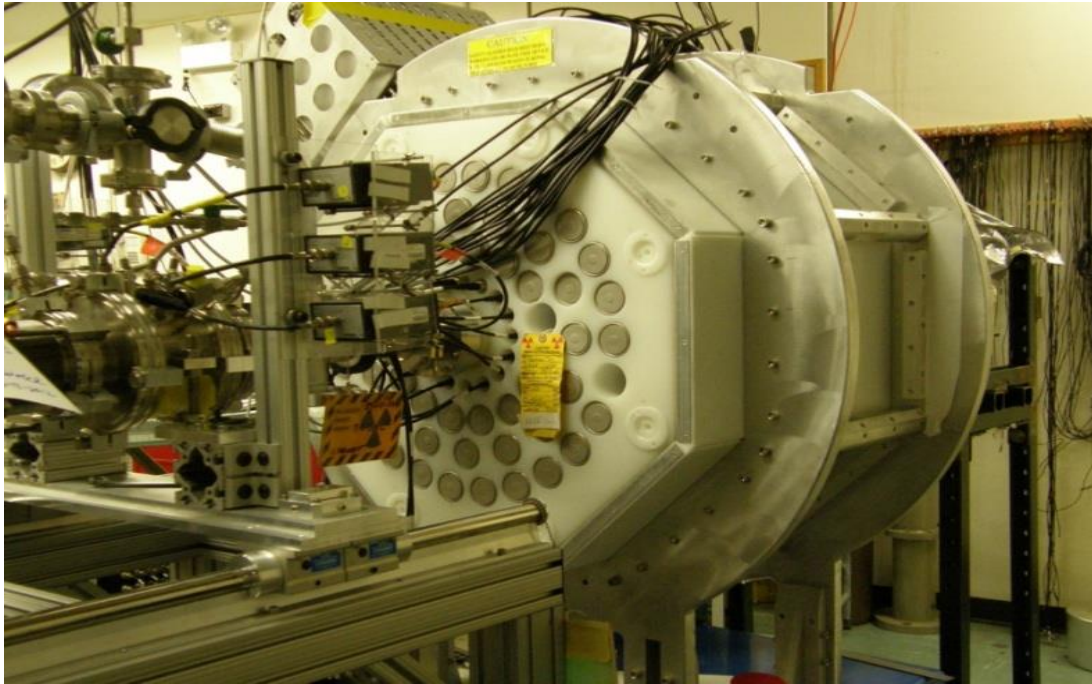
Langford, T.J., et al.,
NIMA **717** (2013) 51-57
arXiv:1212.474

Przekrój czynny na reakcję $^3\text{He}+n\rightarrow\text{H} + ^3\text{H}$ jest ogromny (5330 barnów), ale neutrony muszą być termiczne (0.025 eV).

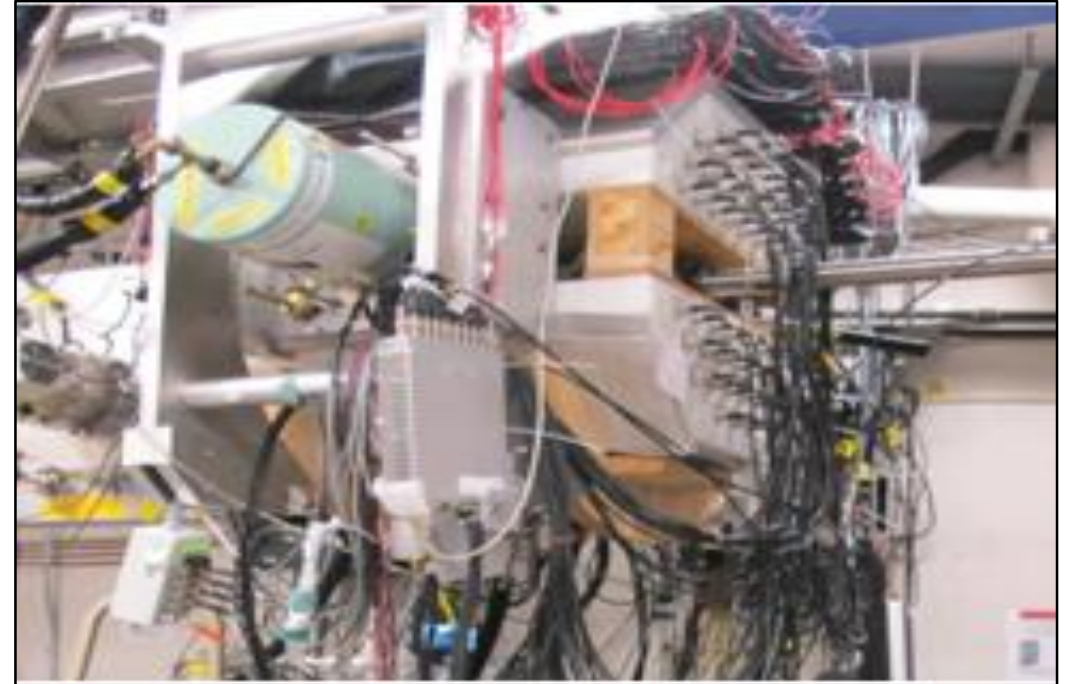
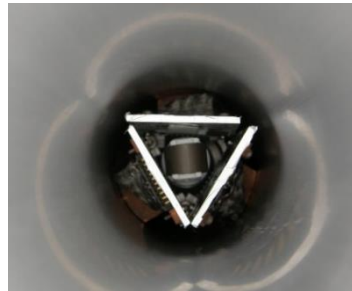
Aby spowolnić szybkie (\sim kilka MeV) neutrony do małych energii należy użyć lekkich jąder np. H jako moderatora (np. wysokiej gęstości polietylen HDPE $[\text{C}_2\text{H}_4]_n$).

układ 3He w ORNL – podstawowa część układu BRIKEN

W **BRIKEN** ok. 87% ^3He oraz 2 det. HPGe typu clover jest z układu 3He z ORNL.
Detektory mają 61 cm długości i 10 atm ^3He , duża- 5 cm, mała- 2.5 cm średnicy.



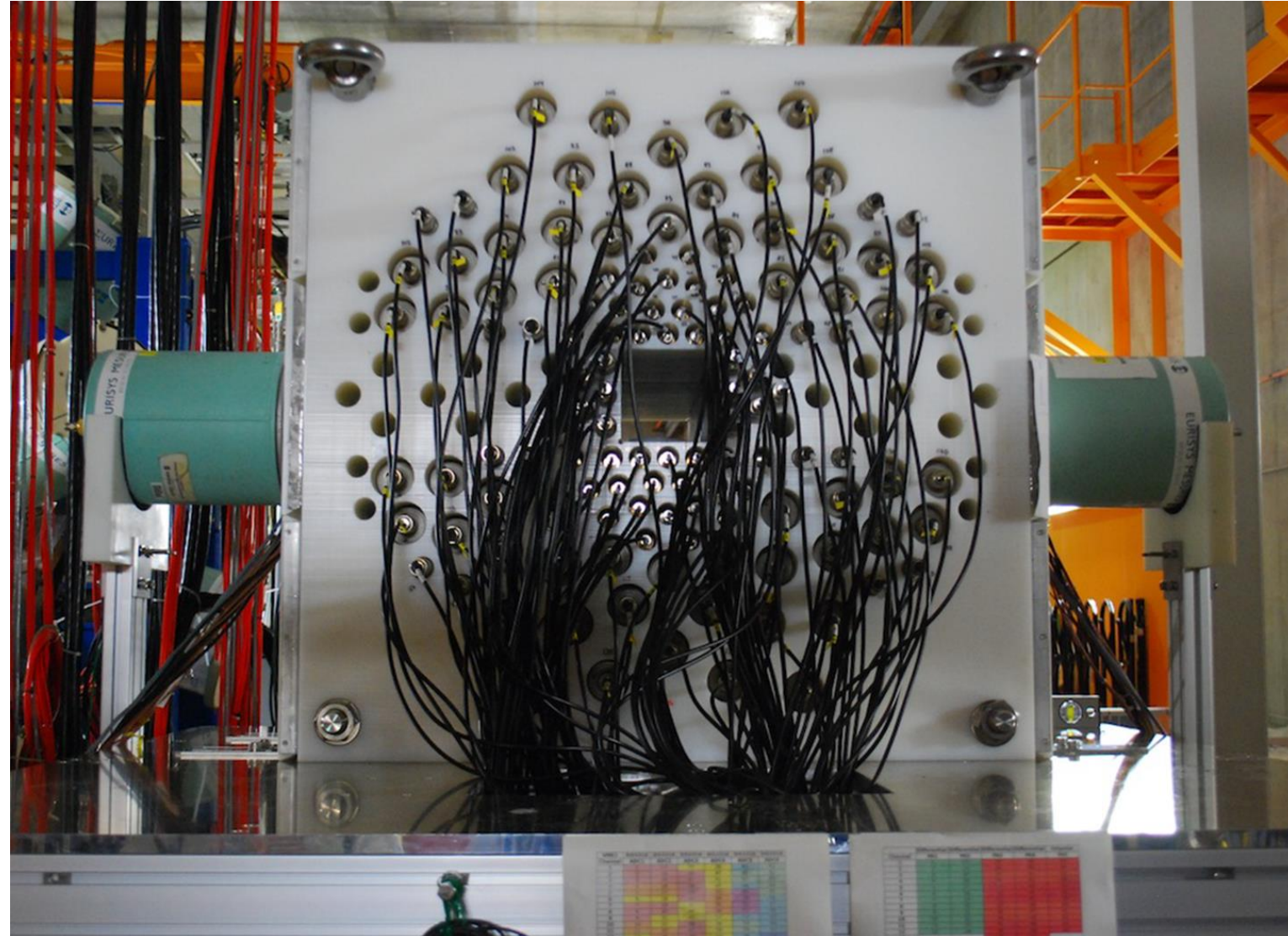
wersja I - pełny 3He: 74 (58d + 16m) ^3He , Si det. β



wersja II - Hybrid 3He: 48d ^3He ,
plastikowy det. β , 2 HPGe clovery

W HRIBF przy użyciu hybrid-3He zmierzono m.in.
kanały rozpadu $\beta 1n$ i $\beta 2n$ z ^{86}Ga .

(Miernik et al., PRL 111, 132502 2013)



Wersja **Hybrid BRIKEN**

- * 140 liczników ^3He
- * 2 detektory **HPGe typu clover**
 oraz różnego typu detektory
 do implantacji jonów i elektronów
- * **AIDA**
Advanced Implantation Detector Array
- * **WAS3ABi**
*Widerange Active Silicon-Strip Stopper
 Array for Beta and ion detection*
- * **YSO**
Yttrium Silicon Oxide - Y_2SiO_5

Wydajność tej wersji, dla neutronów
 o energiach do kilku MeV, to ~62%.

MUSIC - segmentowany detektor do pomiaru strat energii jonu (informacja o Z jonu)

F11 - det. plastikowy do liczenia jonów i lekkich cząstek dolatujących do układu

Degrader - do ustawienia profilu implantacji, żeby cząstki o wybranej masie były w centrum detektora implantacji

PE shielding - dodatkowa osłona z polietylenu od dolatujących neutronów tła

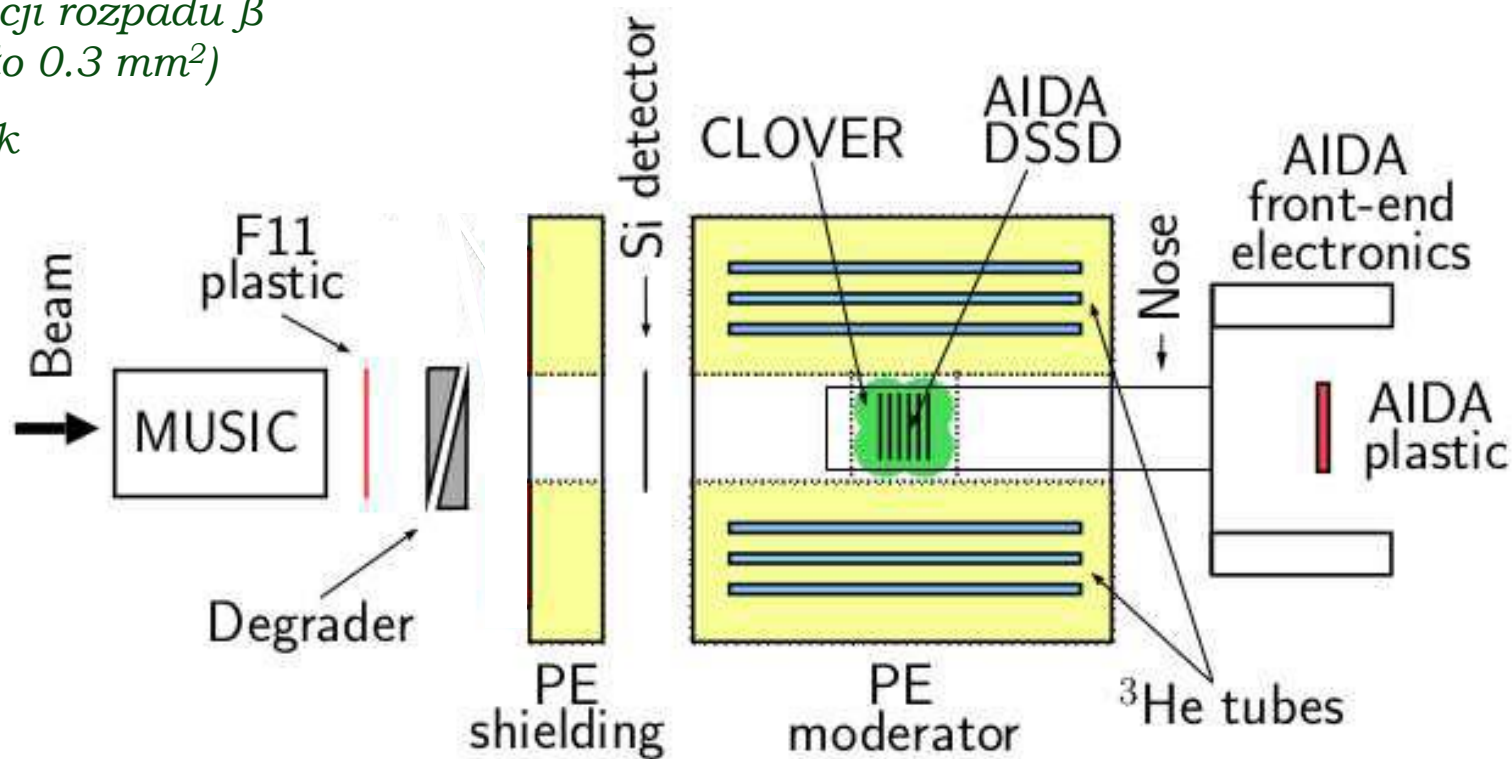
Si detektor - do ostatecznego sprawdzania liczby atomowej (Z) dolatujących cząstek

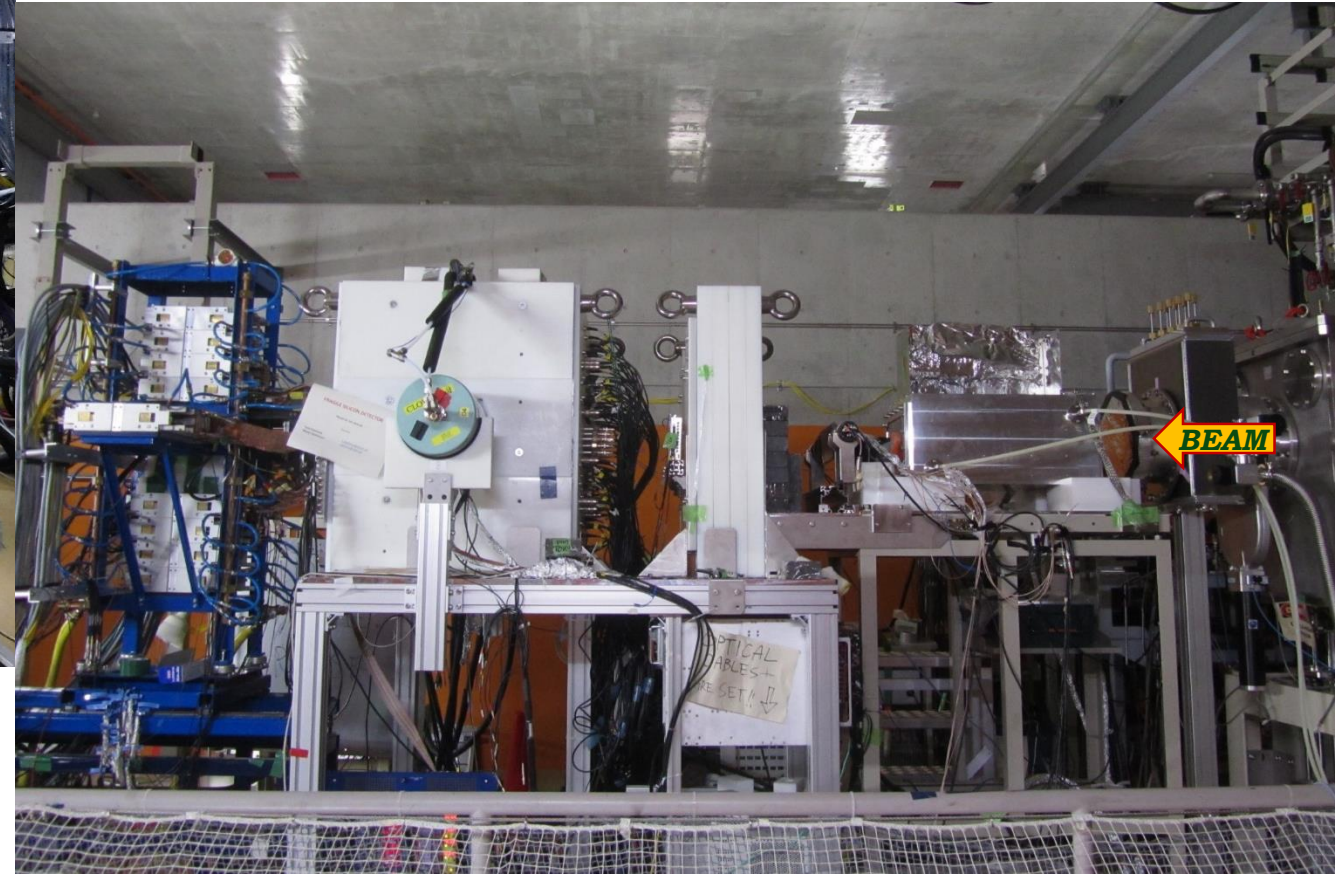
AIDA DSSD - do implantacji jonu i rejestracji rozpadu β w tym samym "pixelu" (około 0.3 mm^2)

AIDA plastik - do rejestracji lekkich cząstek

BRIKEN - do rejestracji neutronów

HPGe clover - do rejestracji γ

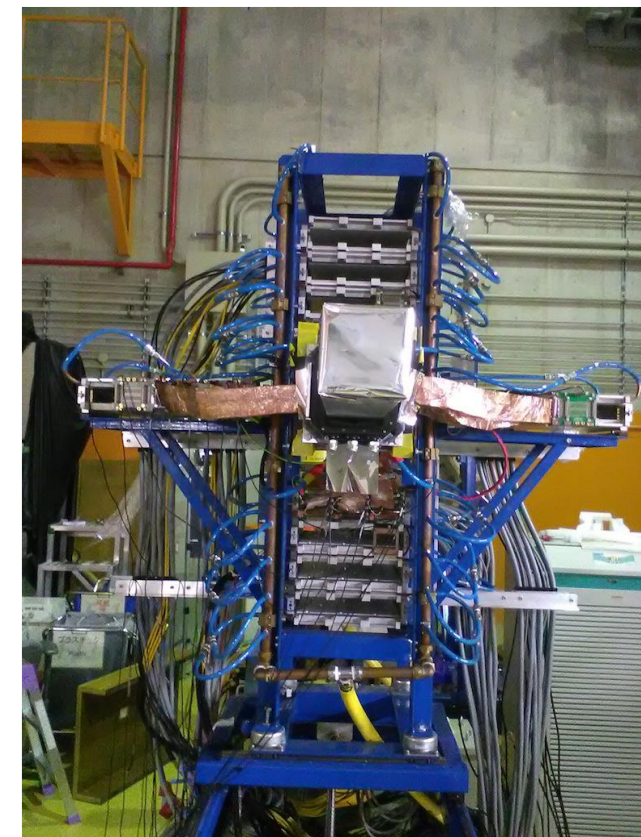
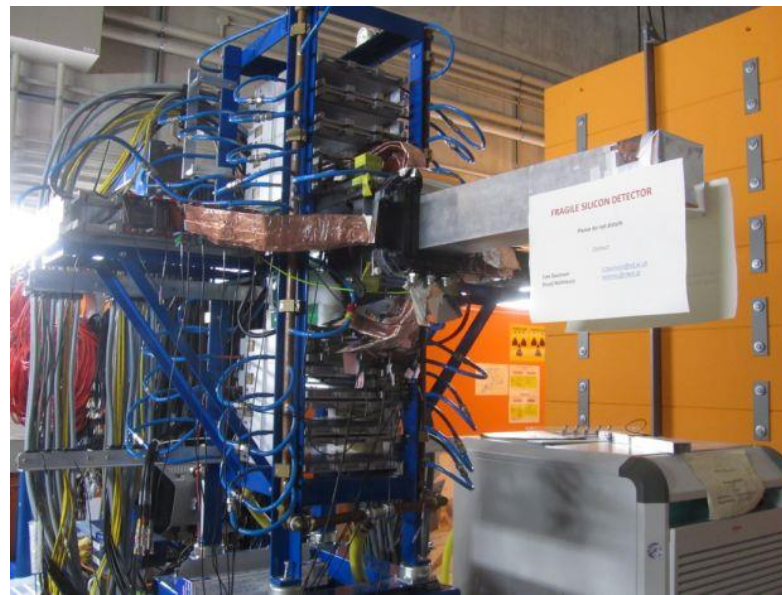
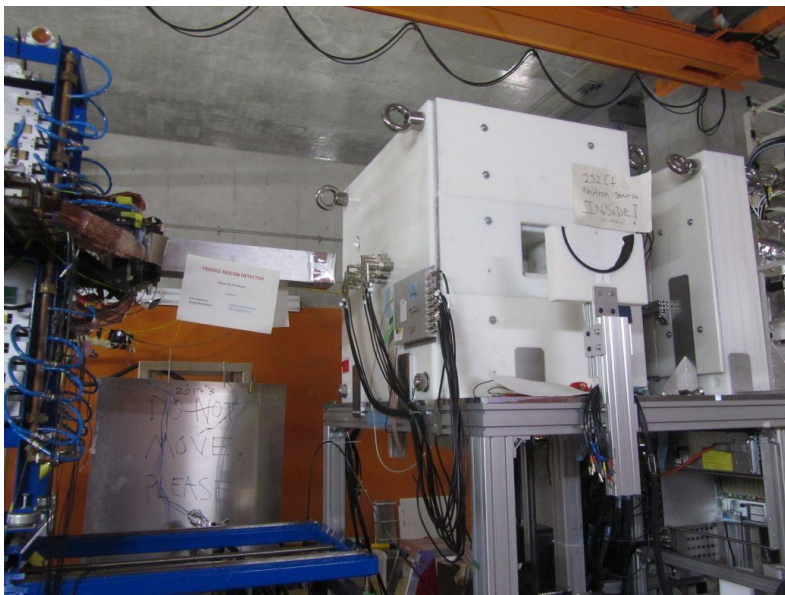




AIDA w układzie BRIKEN

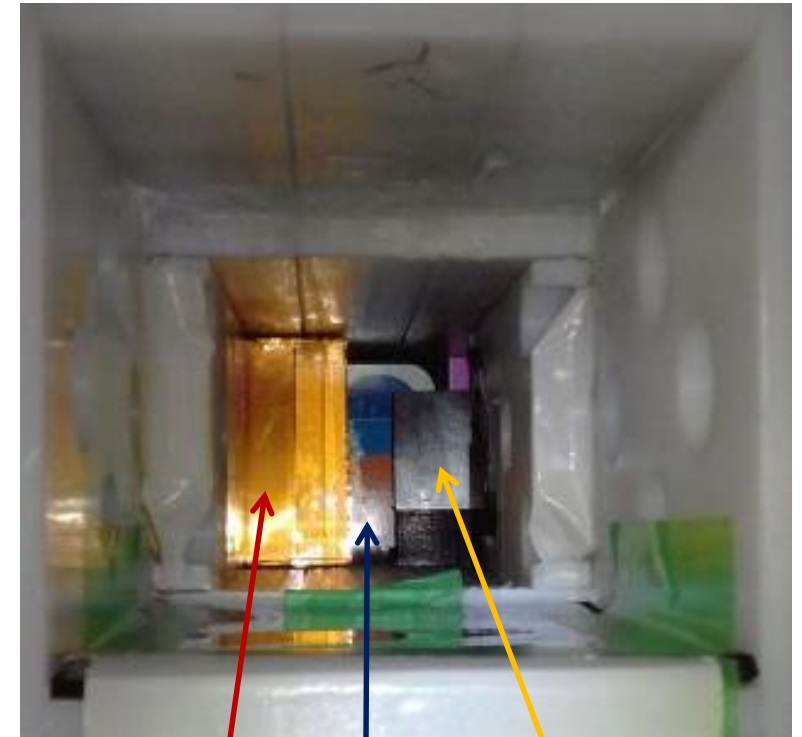
Advanced Implantation Detector Array

- * 6 detektorów DSSSDs (Double Sided Silicon Strip Detectors) 8cm x 8cm, 128x128 pasków o szerokości 0.56 mm służących do implantacji jonów oraz rejestracji elektronów z rozpadu β
- * plastikowy scyntylator do implantacji/liczenia cząstek lekkich
- * elektronika analogowa z układami scalonymi zaprojektowanymi dla AIDA
- * det.DSSSDs generują sygnał wyzwania po rozpadzie β (β -decay trigger) oraz informację czasową zgraną z resztą akwizycji BigRIPS/BRIKEN
- * det. plastikowy generuje sygnał veto





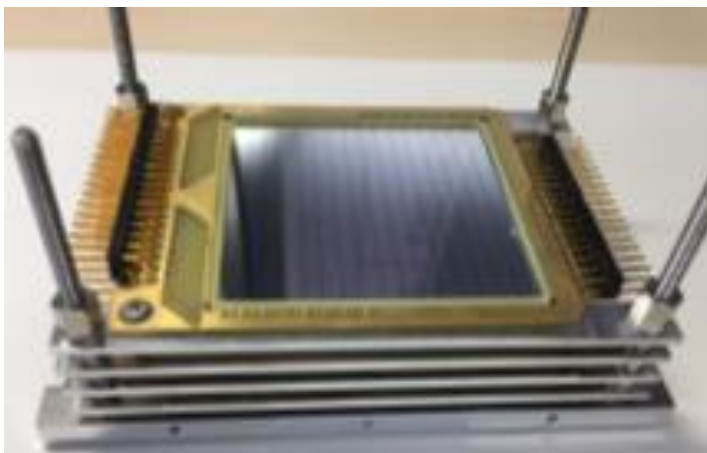
Widok z boku na WAS3ABi, YSO
oraz od przodu na CLOVER



WAS3ABi
CLOVER
YSO

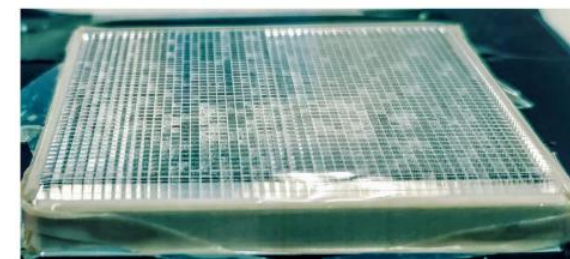
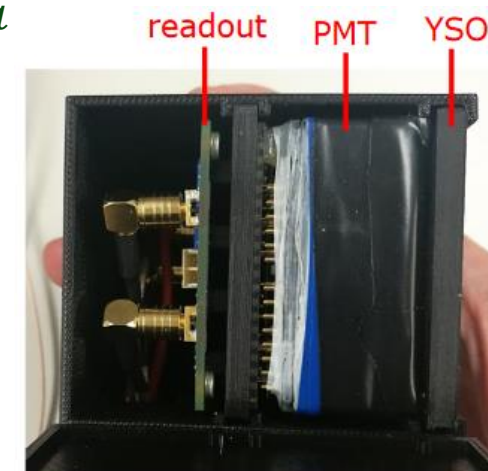
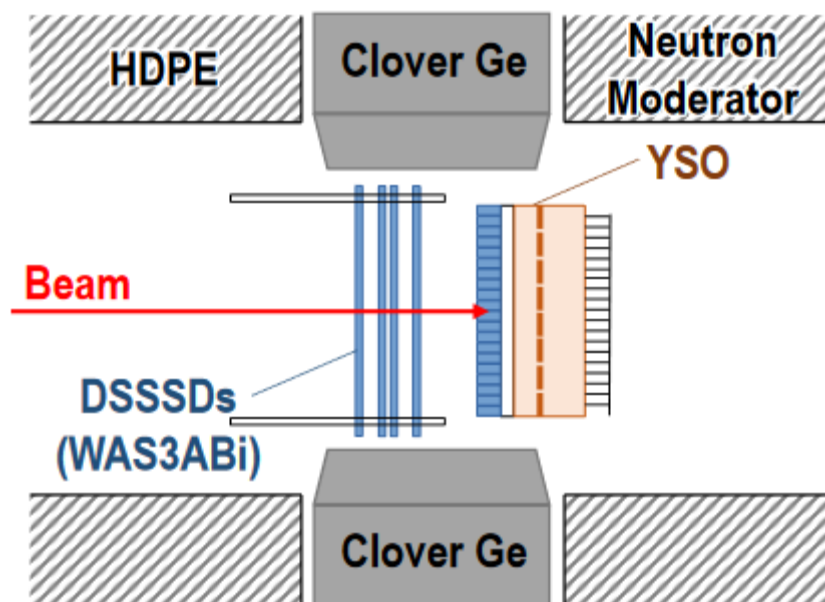
Widerange **A**ctive **S**ilicon-**S**trip **S**topper **A**rray for **B**eta and **i**on detection

- * 4 detektory DSSSDs (Double Sided Silicon Strip Detectors), 16 x 16 pasków o szerokości 3 mm służących do implantacji jonów oraz rejestracji elektronów z rozpadu β
- * elektronika cyfrowa
- * det. DSSSDs generują sygnał po rozpadzie β (β -decay trigger) z informacją czasową



Yttrium **S**ilicon **O**xide - Y_2SiO_5
(Fast Dense High Z Scintillator)

- * kryształ z 48 x 48 pasków połączony z czułym na pozycję fotopowielaczem krzemowym (PS-SiPMT) do rejestracji elektronów z rozpadu β oraz implantacji jonów (głównie tych lżejszych)
- * elektronika cyfrowa



| Experiment | Spokespersons |
|---|--|
| Measurement of beta-delayed neutron emission probabilities relevant to the $A = 130$ r-process abundance peak | A. Estrade, G. Lorusso, F. Montes |
| Measurements of new beta-delayed neutron emission properties around doubly-magic ^{78}Ni | K. P. Rykaczewski, J. L. Tain, R. K. Grzywacz, I. Dillmann |
| Half-lives and beta delayed neutron emission probabilities relevant to understand the formation of the Rare Earth r-process Peak(REP) | G. Kiss, A. I. Morales, A. Tarifeño-Saldivia, A. Estrade |
| Decay properties of r-process nuclei in deformed region around $A = 100 \sim 125$ | S. Nishimura, A. Algora |
| Study of light beta-delayed multi-neutron emitters between $Z=9$ and 16 with BRIKEN | I. Dillmann, G. Kiss |
| β -decay spectroscopy in the vicinity of the $N=126$ closed shell | J. Wu, S. Nishimura, J.L. Tain, N. Fukuda, T. Davinson |

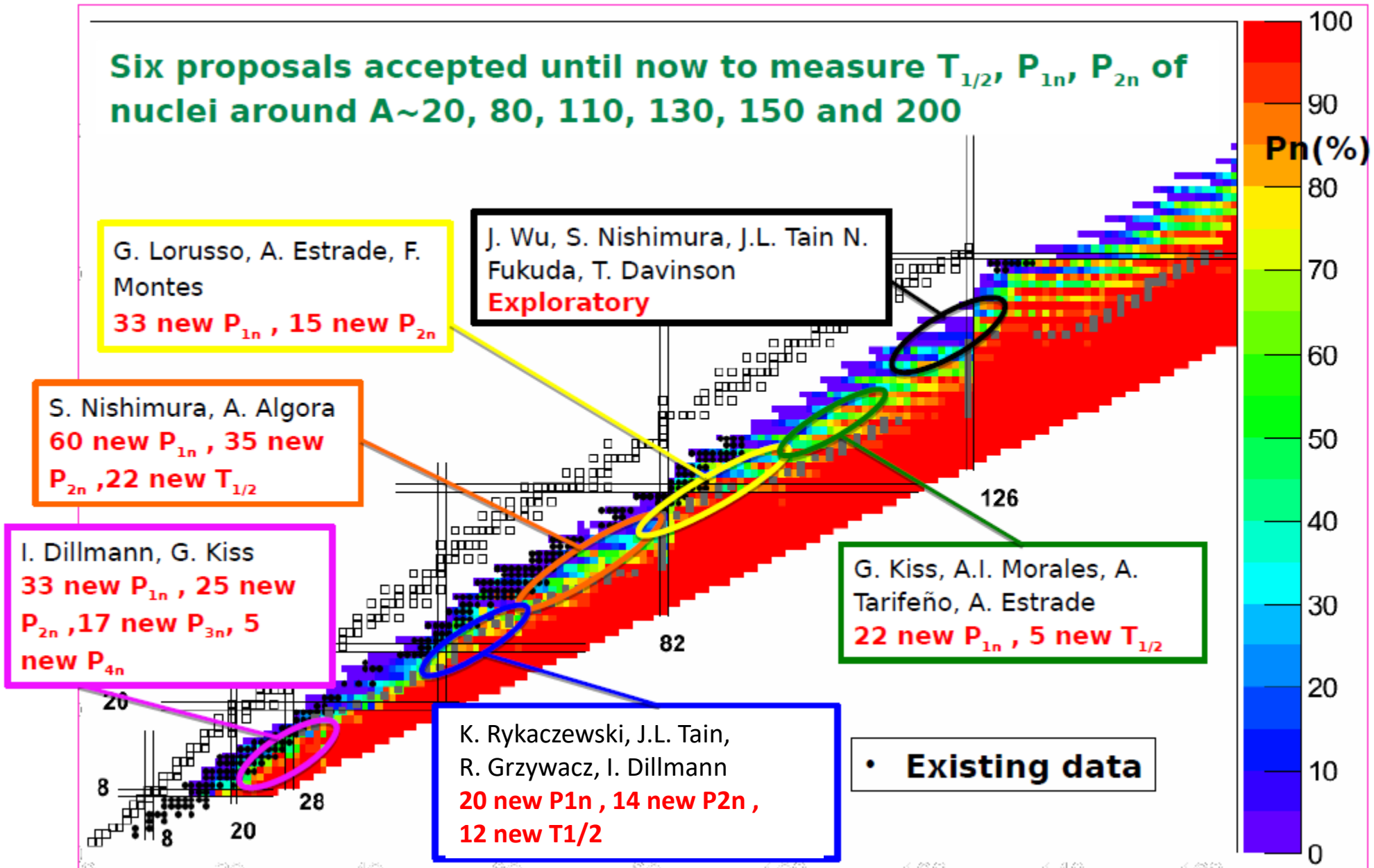
RIBF 128

RIBF 127

RIBF 148

RIBF 139

Przeprowadzone i planowane pomiary

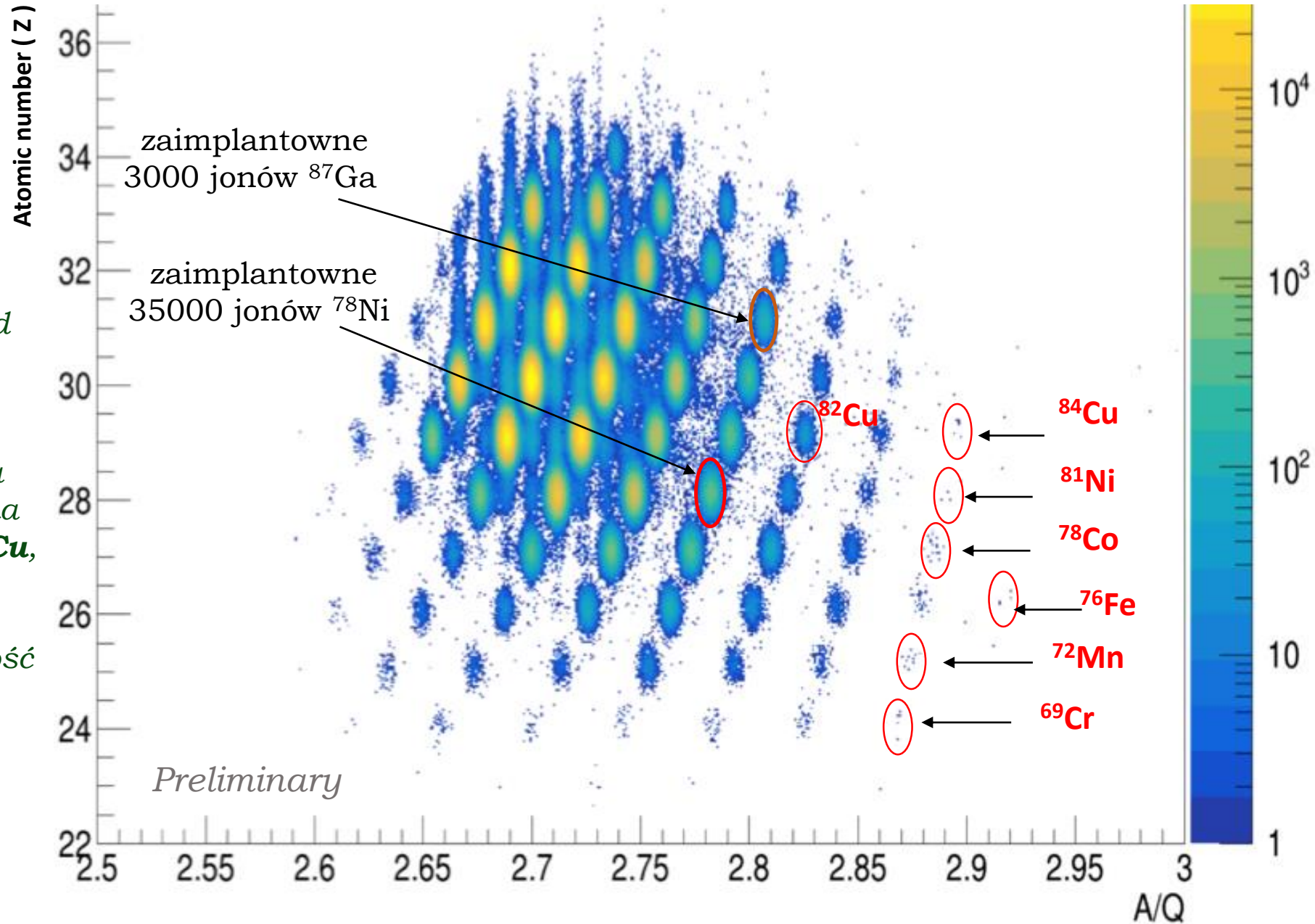


Wstępne wyniki (RIBF 127)

RIBF 127
Measurement of new beta-delayed
neutron emission properties around
doubly-magic ^{78}Ni

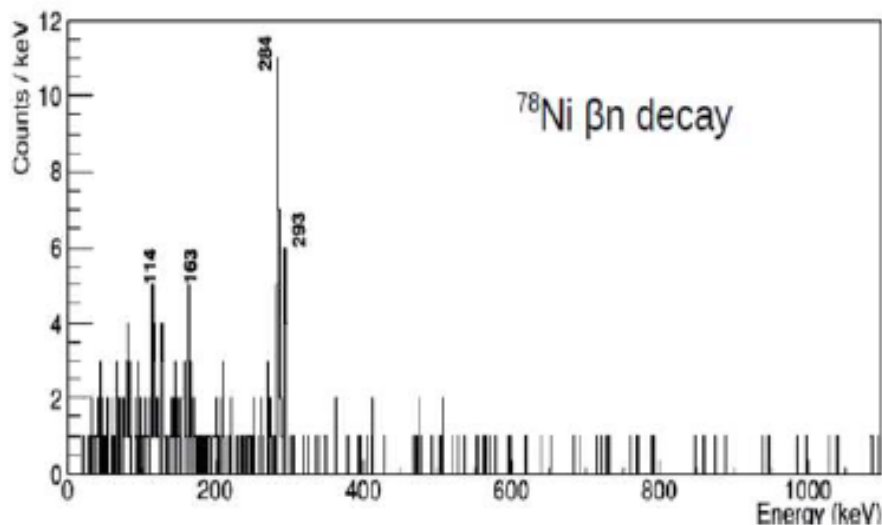
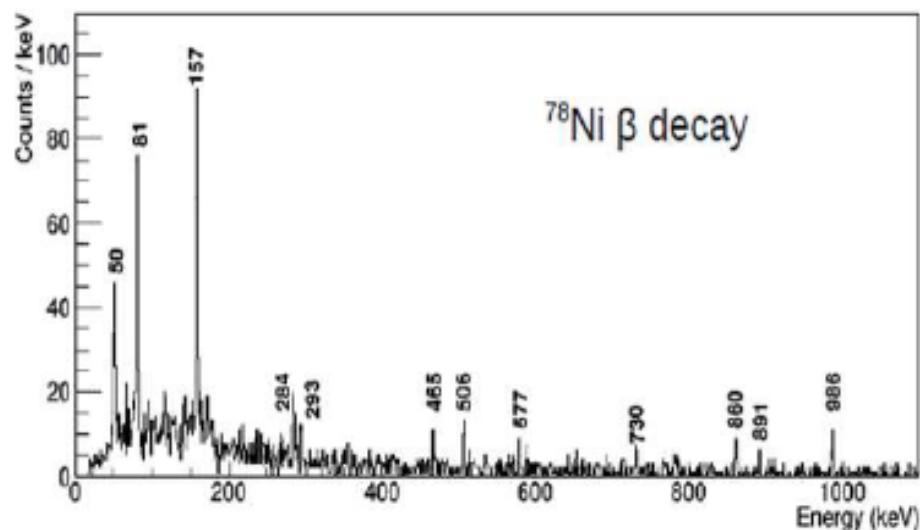
Zestawienie danych zebranych dla
separatora BigRIPS ustawionego na
maksymalną transmisję dla ^{82}Cu ,
po 9 dniach pomiaru.

Wiązka ^{238}U osiągnęła intensywność
*bliską **70pA**.*



Niskoenergetyczna część widma gamma,
uzyskana w trakcie pomiarów,
po rozpadzie zaimplantowanych jąder ^{78}Ni .

Wartości $T_{1/2}$, P_{1n} i P_{2n}
oraz Q_{β} , $Q_{\beta 1n}$, $Q_{\beta 2n}$
dla ^{86}Ga i ^{87}Ga



Widmo uzyskane dla koincydencji β - γ
(^{78}Cu i ^{77}Cu)

Widmo uzyskane dla koincydencji β - $1n$ - γ
(^{77}Cu)
linia 284 keV zaobserwowana po raz pierwszy

| | ^{86}Ga | ^{87}Ga |
|----------------------|------------------|------------------|
| $T_{1/2}$ (ms) | 48 | 29 |
| P_{1n} (%) | 63 | 69 |
| P_{2n} (%) | 17 | 11 |
| Q_{β} (MeV) | 15 | 14 |
| $Q_{\beta 1n}$ (MeV) | 11 | 12 |
| $Q_{\beta 2n}$ (MeV) | 8 | 8 |

Wartości P_{1n} i P_{2n}
dla ^{86}Ga są
zgodne z opublikowanymi
w pracy
Miernik et al.
PRL 111, 132502 (2013)

K. P. Rykaczewski et al.,
RIKEN Accelerator Progress Report vol.51 (2018) p.52

R. Yokoyama et al.,
wysłane do druku

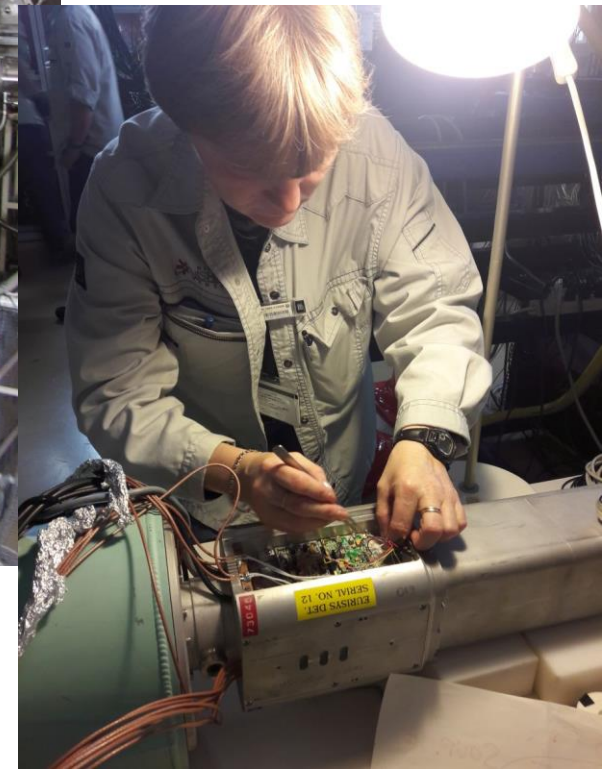
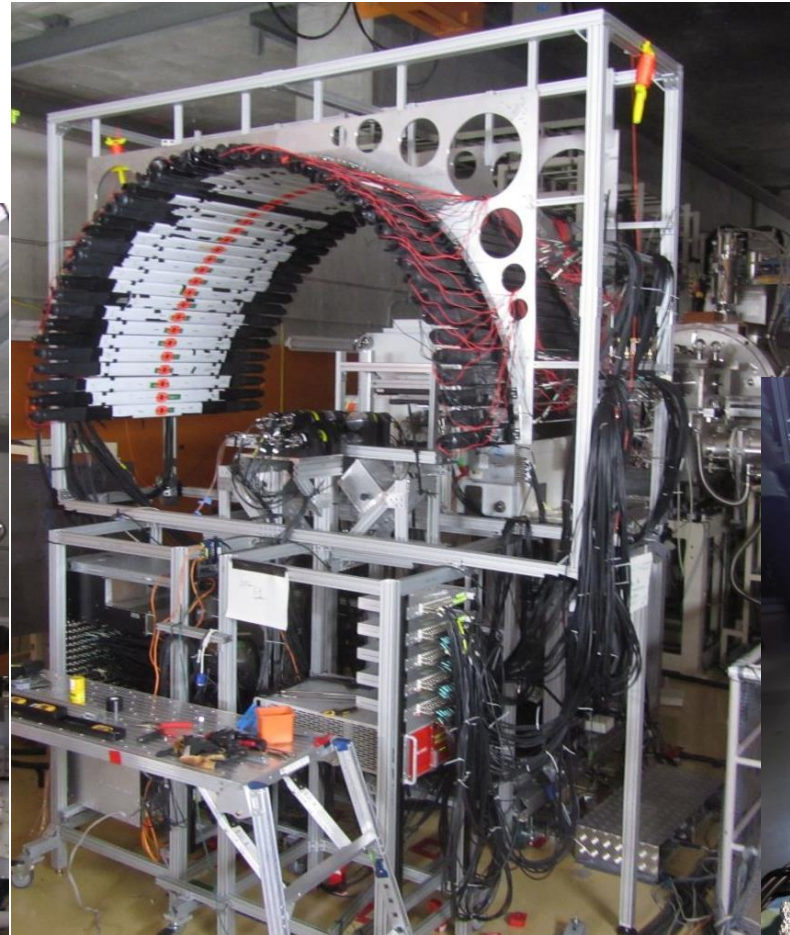
- *Hybrid BRIKEN wraz z detektorami dodatkowymi to obecnie najwydajniejszy układ do pomiaru neutronów opóźnionych po rozpadzie β*
- *możliwości laboratorium RIBF-RIKEN pozwalają na pomiary bardzo egzotycznych jąder neutrono-nadmiarowych daleko od ścieżki stabilności*
- *przeprowadzone 4 eksperymenty*
- *zatwierdzone kolejne 2 eksperymenty*
- *zmierzone ponad 250 jąder, z tego wiele po raz pierwszy*
- *wyznaczenie nowych wartości: ponad 100 P_{1n} , ponad 20 P_{2n} oraz ponad 40 $T_{1/2}$*

Referencje:

- S. Nishimura, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. vol.51 (2018), p.2*
K.P. Rykaczewski, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. vol.51 (2018), p.51, p.52
V.H. Phong, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. vol.51 (2018), p. 53
B.C. Rasco et. al., NIM A, Vol. 911 (2018)
J. Liu, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. vol.51 (2018), p.54
A. Tolosa-Delgado et. al., arXiv:1808.00732v1 (2018)
A. Tarifeño-Saldivia et al., <https://arxiv.org/abs/1606.05544>
J.L. Tain et. al, Acta Physica Polonica B, 49 (2018)
A. Tarifeño-Saldivia, et al., Journal of Instrumentation, Vol. 12 (2017)
T. Davinson et al. , <http://www2.ph.ed.ac.uk/~td/AIDA/welcome.html>
i inne

i jeszcze ...

VANDLE w RIBF-RIKEN



BRIKEN

c
o
l
l
a
b
o
r
a
t
i
o
n



β -delayed
neutrons
at RIKEN



BILLIKEN

The God of Things
As They Ought to Be

Dziękuję współpracownikom za pomoc w zebraniu materiałów.

GRANT MINIATURA NCN Nr 2017/01/X/ST2/01144 i BST



W
E
S
O
Ł
Y
C
H

Ś
W
I
Ą
T

