

Badanie reakcji fuzji-rozszczepienia metodami spektroskopii γ

Krzysztof Miernik

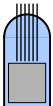


ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ
WYDZIAŁ FIZYKI

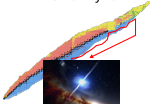
29 lutego 2024

Rozszczepienie jąder atomowych


Energetyka jądrowa




Astrofizyka




Jądra super-ciężkie




Broń jądrowa




Właściwości sił i materii jądrowej




Rozszczepienie



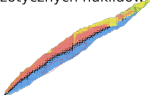
Inne zastosowania




Medycyna jądrowa



Produkcja egzotycznych nuklidów

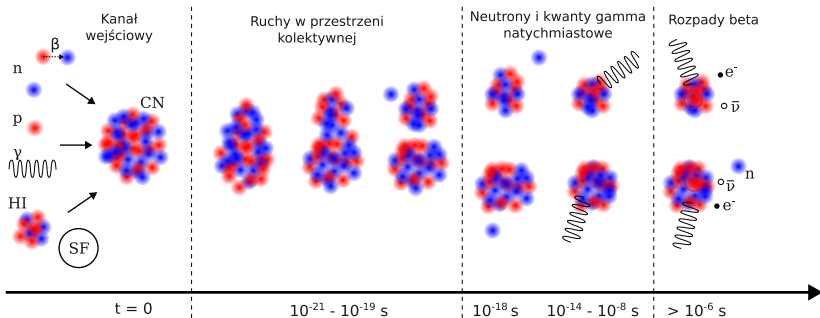


Stany wzbudzone jąder atomowych



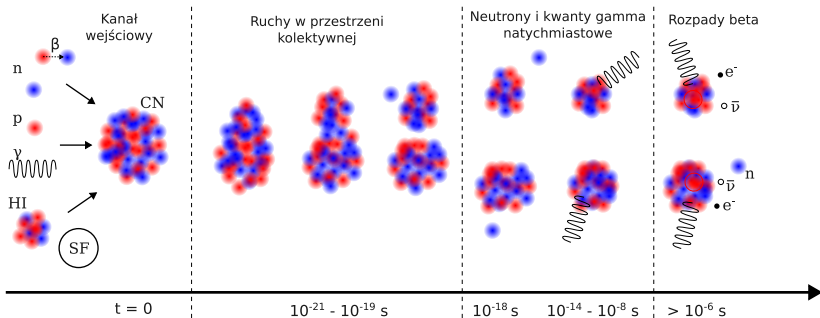
Jak przebiega rozszczepienie jądra?

- Rozszczepienie to skomplikowany proces składający się z częściowo niezależnych faz rządzonych przez różne, mniej lub bardziej zrozumiane, zjawiska fizyki jądrowej



Jak przebiega rozszczepienie jądra?

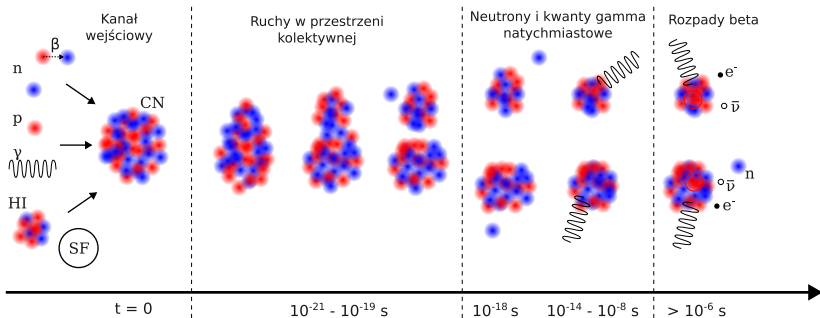
- Rozszczepienie to skomplikowany proces składający się z częściowo niezależnych faz rządzonych przez różne, mniej lub bardziej zrozumiane, zjawiska fizyki jądrowej



- Rozszczepienie jądra złożonego (CN) powinno być niezależne od kanału wejściowego (E, J)

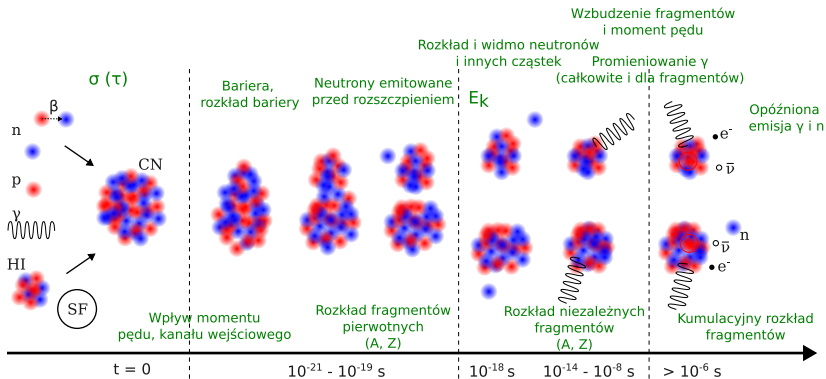
Jak przebiega rozszczepienie jądra?

- Rozszczepienie to skomplikowany proces składający się z częściowo niezależnych faz rządzonych przez różne, mniej lub bardziej zrozumiane, zjawiska fizyki jądrowej

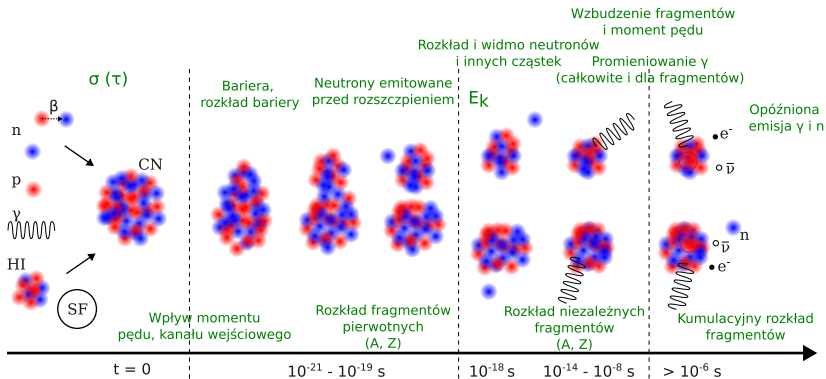


- Rozszczepienie jądra złożonego (CN) powinno być niezależne od kanału wejściowego (E, J)
- Deekscytacja fragmentów powinna zależeć tylko od E^*

Obserwable w rozszczepieniu



Obserwable w rozszczepieniu



The Mechanism of Nuclear Fission

NIELS BOHR

University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, and The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey

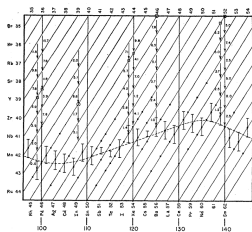
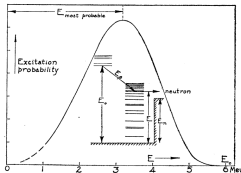
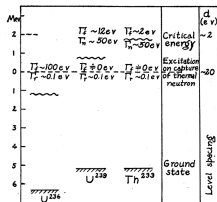
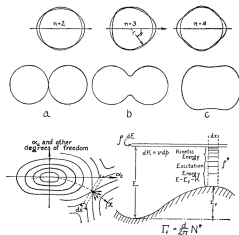
AND

JOHN ARCHIBALD WHEELER

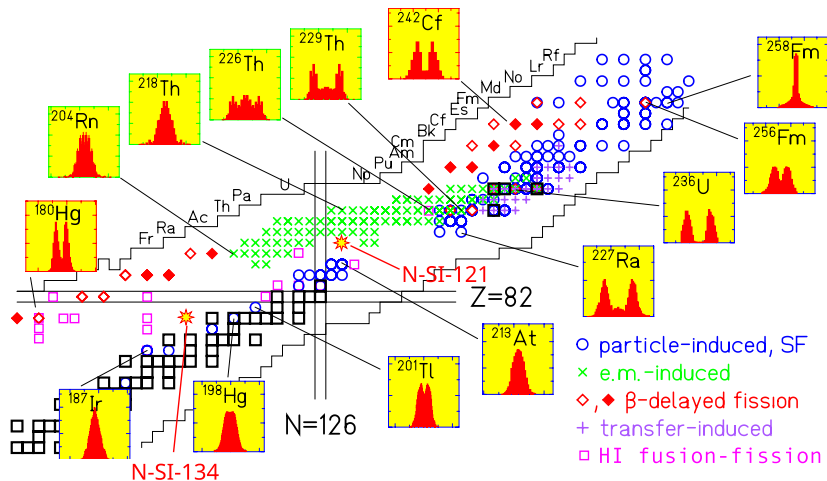
Princeton University, Princeton, New Jersey

(Received June 28, 1939)

On the basis of the liquid drop model of atomic nuclei, an account is given of the mechanism of nuclear fission. In particular, conclusions are drawn regarding the variation from nucleus to nucleus of the critical energy required for fission, and regarding the dependence of fission cross section for a given nucleus on energy of the exciting agency. A detailed discussion of the observations is presented on the basis of the theoretical considerations. Theory and experiment fit together in a reasonable way to give a satisfactory picture of nuclear fission.



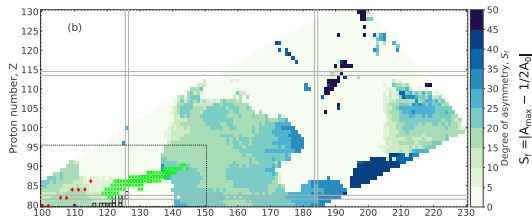
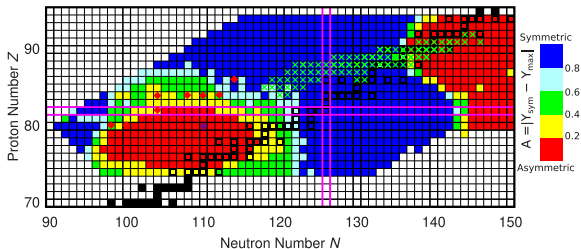
Krajobraz rozszczepienia



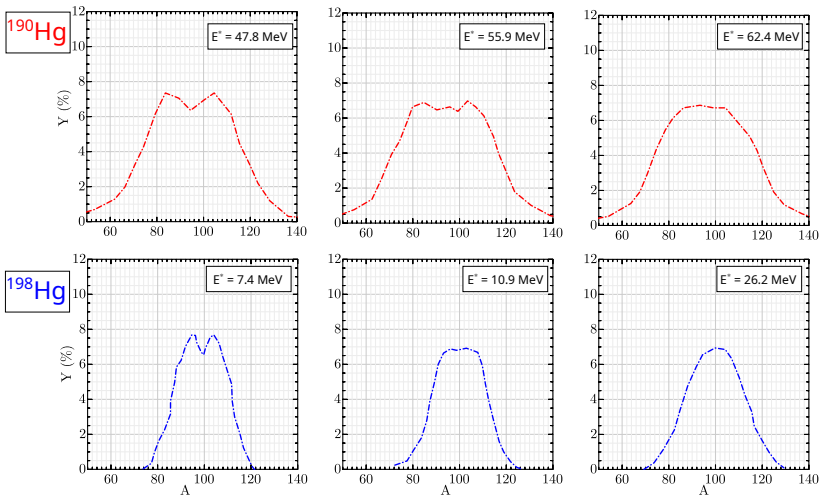
K.-H. Schmidt, B. Jurado Rep. Prog. Phys. 2018 (updated KM)

Theoretical fission fragments mass distribution

- Przed eksperymentem z ^{180}Hg uważano, że $A < 226$ - symetryczne i asymetryczne powyżej
- Po odkryciu większość modeli, różnymi metodami, wyjaśniła asymetrię ^{180}Hg
- P. Möller, J. Randrup, Phys. Rev. C (2015) oraz M.R. Mumpower et al., Phys. Rev. C (2020)



Trzeci wymiar rozkładów fragmentów



- ^{190}Hg - K. Nishio et al., *Phys. Lett. B* (2015) ($^{36}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$)
- ^{198}Hg - M.G. Itkis et al., *Yad. Fiz.* (1990) $^{197}\text{Au}(p, f)$

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia

- In contrast, in the neutron-deficient Hg region such a combined effect of magic proton and neutron shells in the observed fission fragments is completely absent, and the asymmetric split is determined by relatively small microscopic effects (...) This new mode, which should survive only in very low energy fission, (...)
A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett (2010)

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia

- In contrast, in the neutron-deficient Hg region such a combined effect of magic proton and neutron shells in the observed fission fragments is completely absent, and the asymmetric split is determined by relatively small microscopic effects (...) This new mode, which should survive only in very low energy fission, (...) *A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett (2010)*
- In our model, the dependence of the shell effects on deformations of fission fragments at scission plays the key role in the description of the asymmetry of the fission-fragment mass distribution. We predicted the evolution of the fission-fragment mass distribution from symmetric for ^{174}Hg , to asymmetric for isotopes around ^{180}Hg , and to more symmetric for $^{192,194,196}\text{Hg}$. (...) For all fissioning Hg isotopes, the influence of the excitation energy on the shape of the mass distribution was found to be rather weak. *A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. C (2013)*

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia

- In contrast, in the neutron-deficient Hg region such a combined effect of magic proton and neutron shells in the observed fission fragments is completely absent, and the asymmetric split is determined by relatively small microscopic effects (...) This new mode, which should survive only in very low energy fission, (...) *A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett (2010)*
- In our model, the dependence of the shell effects on deformations of fission fragments at scission plays the key role in the description of the asymmetry of the fission-fragment mass distribution. We predicted the evolution of the fission-fragment mass distribution from symmetric for ^{174}Hg , to asymmetric for isotopes around ^{180}Hg , and to more symmetric for $^{192,194,196}\text{Hg}$. (...) For all fissioning Hg isotopes, the influence of the excitation energy on the shape of the mass distribution was found to be rather weak. *A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. C (2013)*
- As excitation energy is increased, we see a gradual lowering of the barrier to the symmetric-fission valley. Because of relatively large macroscopic barriers (12 to 24 MeV), this trend with excitation energy is very gentle, so that we predict asymmetric fission to dominate in both isotopes [$^{174,180}\text{Hg}$] at least up to 30 MeV. *J.D. McDonnell et al., Phys. Rev. C (2014)*

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia

- In contrast, in the neutron-deficient Hg region such a combined effect of magic proton and neutron shells in the observed fission fragments is completely absent, and the asymmetric split is determined by relatively small microscopic effects (...) This new mode, which should survive only in very low energy fission, (...) *A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett (2010)*
- In our model, the dependence of the shell effects on deformations of fission fragments at scission plays the key role in the description of the asymmetry of the fission-fragment mass distribution. We predicted the evolution of the fission-fragment mass distribution from symmetric for ^{174}Hg , to asymmetric for isotopes around ^{180}Hg , and to more symmetric for $^{192,194,196}\text{Hg}$. (...) For all fissioning Hg isotopes, the influence of the excitation energy on the shape of the mass distribution was found to be rather weak. *A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. C (2013)*
- As excitation energy is increased, we see a gradual lowering of the barrier to the symmetric-fission valley. Because of relatively large macroscopic barriers (12 to 24 MeV), this trend with excitation energy is very gentle, so that we predict asymmetric fission to dominate in both isotopes [$^{174,180}\text{Hg}$] at least up to 30 MeV. *J.D. McDonnell et al., Phys. Rev. C (2014)*
- Present results from fusion–fission reactions show that the shape of the deduced FFs mass distributions [$^{180,190}\text{Hg}$] remains practically unchanged in the studied range of excitation energies and do not transit to a single-Gaussian shape: a finding which is in contrast with what is experimentally known in other mass regions. *K. Nishio et al., Phys. Lett. B (2015)*

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia (2)

- An empirical function has been deduced with a statistical approach from the widths of the measured mass distributions of the symmetric fission channel at higher excitation energies, where the shell effects are essentially washed out.
K.-H. Schmidt and B. Jurado, Rep. Prog. Phys. (2018)

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia (2)

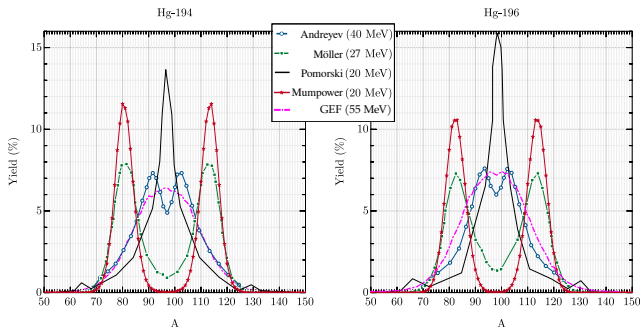
- An empirical function has been deduced with a statistical approach from the widths of the measured mass distributions of the symmetric fission channel at higher excitation energies, where the shell effects are essentially washed out.
K.-H. Schmidt and B. Jurado, Rep. Prog. Phys. (2018)
- We show that the mechanism based on octupole deformed shell effects in the fragments, which we invoked to interpret asymmetric fission in actinides, also plays an important role in the sub-lead region.
G. Scamps and C. Simenel, Phys. Rev. C (2019)

Zależność rozkładów od energii wzbudzenia (2)

- An empirical function has been deduced with a statistical approach from the widths of the measured mass distributions of the symmetric fission channel at higher excitation energies, where the shell effects are essentially washed out.
K.-H. Schmidt and B. Jurado, Rep. Prog. Phys. (2018)
- We show that the mechanism based on octupole deformed shell effects in the fragments, which we invoked to interpret asymmetric fission in actinides, also plays an important role in the sub-lead region.
G. Scamps and C. Simenel, Phys. Rev. C (2019)
- (...) an increase of the excitation energy leads to a gradual change from asymmetric to symmetric fission. This general feature is a result of the fact that the microscopic (shell and pairing) effects diminish as the temperature grows.
M.R. Mumpower et al., Phys. Rev. C (2020)

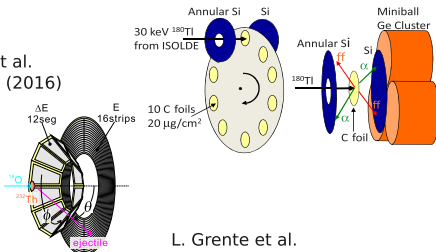
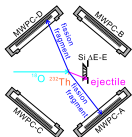
Zależność rozkładów od energii wzbudzenia (2)

- An empirical function has been deduced with a statistical approach from the widths of the measured mass distributions of the symmetric fission channel at higher excitation energies, where the shell effects are essentially washed out.
K.-H. Schmidt and B. Jurado, Rep. Prog. Phys. (2018)
- We show that the mechanism based on octupole deformed shell effects in the fragments, which we invoked to interpret asymmetric fission in actinides, also plays an important role in the sub-lead region.
G. Scamps and C. Simenel, Phys. Rev. C (2019)
- (...) an increase of the excitation energy leads to a gradual change from asymmetric to symmetric fission. This general feature is a result of the fact that the microscopic (shell and pairing) effects diminish as the temperature grows.
M.R. Mumpower et al., Phys. Rev. C (2020)



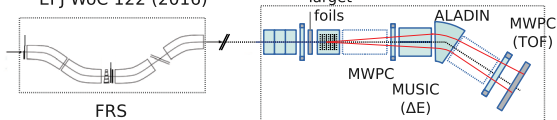
Wybrane metody eksperymentalne

R. Léguillon et al.
Phys. Lett. B 761 (2016)

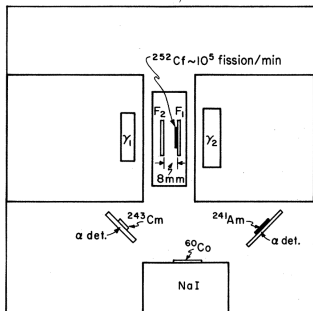


A. N. Andreyev et al.
PRL 105 (2010)

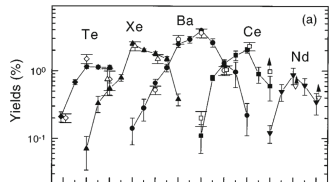
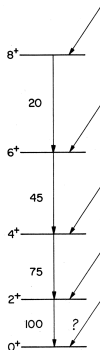
L. Grente et al.
EPJ WoC 122 (2016)



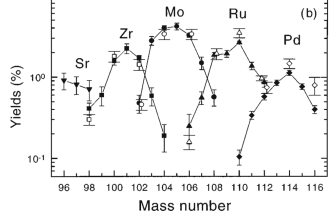
Rozkład fragmentów ze spektroskopii γ (1)



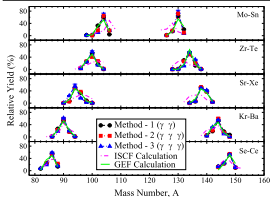
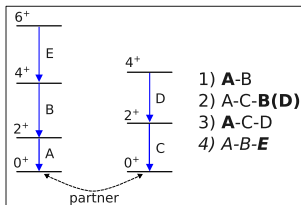
E. Cheifetz PRC 4 (1971)



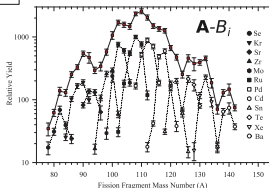
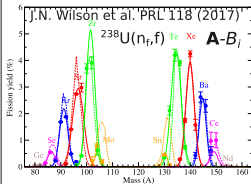
G.M. Ter-Akopian PRC55 (1997)



Rozkład fragmentów ze spektroskopii γ (2)

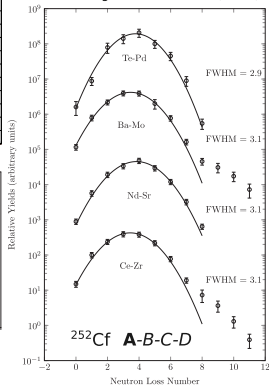


A. Dey PRC 103 (2022)
 $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$

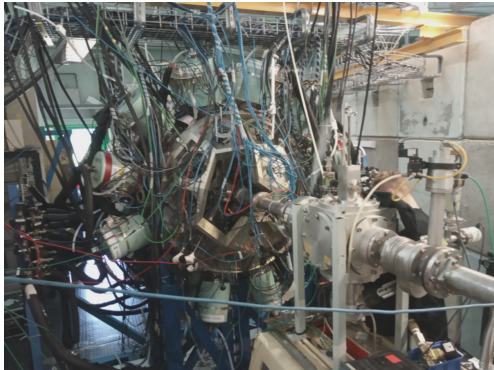
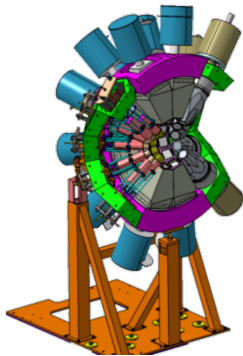


P. Banerjee et al. PRC 92 (2015)
 $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, f)$

B.M. Musangu et al. PRC 101 (2020)



Spektrometr ν -Ball



- ALTO (IPN Orsay)
- 24 \times Clover
- + 10 \times phase-I-Ge
- + 6 \times LaBr₃ (ALTO) + 6 \times LaBr₃ (Madrid) + 2 \times LaBr₃ (Warsaw)
- lub + 20 \times LaBr₃
- lub + PARIS + Warsaw DSSD (HIL)

Kampanie eksperymentalne ze spektrometrem ν -Ball

- ν -Ball (2017-2018)
 - m.in. izomery w ^{166}Dy , g-factor ^{66}Ni , GDR
 - spektroskopia fragmentów rozszczepienia $^{238}\text{U}(n_f, f)$ i $^{232}\text{Th}(n_f, f)$

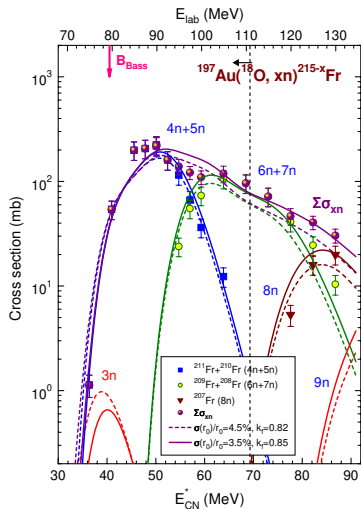
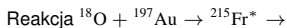
Kampanie eksperymentalne ze spektrometrem ν -Ball

- ν -Ball (2017-2018)
 - m.in. izomery w ^{166}Dy , g-factor ^{66}Ni , GDR
 - spektroskopia fragmentów rozszczepienia $^{238}\text{U}(n_f, f)$ i $^{232}\text{Th}(n_f, f)$
- ν -Ball-2 (2022-2023)
 - rezygnacja z Ge-phase-I, bliższa geometria
 - m.in. czasy życia ^{60}Ni , GDR
 - spektroskopia fragmentów rozszczepienia $^{238}\text{U}(n, f)$ i $^{232}\text{Th}(n, f)$ (statystyka $\times 10$)
 - $^{197}\text{Au}(^{18}\text{O}, f)$
 - $^{182}\text{W}(^{12}\text{C}, f)$

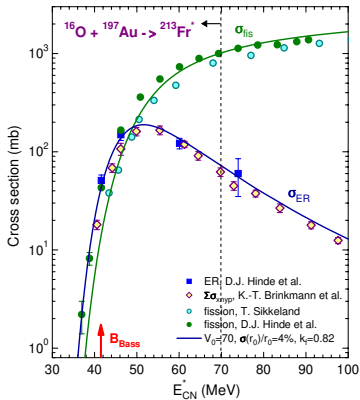
Kampanie eksperymentalne ze spektrometrem ν -Ball

- ν -Ball (2017-2018)
 - m.in. izomery w ^{166}Dy , g-factor ^{66}Ni , GDR
 - spektroskopia fragmentów rozszczepienia $^{238}\text{U}(n_f, f)$ i $^{232}\text{Th}(n_f, f)$
- ν -Ball-2 (2022-2023)
 - rezygnacja z Ge-phase-I, bliższa geometria
 - m.in. czasy życia ^{60}Ni , GDR
 - spektroskopia fragmentów rozszczepienia $^{238}\text{U}(n, f)$ i $^{232}\text{Th}(n, f)$ (statystyka $\times 10$)
 - $^{197}\text{Au}(^{18}\text{O}, f)$
 - $^{182}\text{W}(^{12}\text{C}, f)$
- Wybrane publikacje
 - R.-B. Gerst et al. PRC 102 (2020) ^{94}Kr
 - G. Hafner et al., PRC 103 (2021), ^{134}Te
 - J.N. Wilson et al., Nature 566 (2021), źródło momentu pędu w rozszczepieniu
 - D. Thisse et al., EPJA 59 (2023) ^{82}Ge
 - D. Gjestvang et al., PRC 108 (2023), stosunki zasilań izomerów w rozszczepieniu
 - K. M. et al., PRC 108 (2023) ^{215}Fr fission

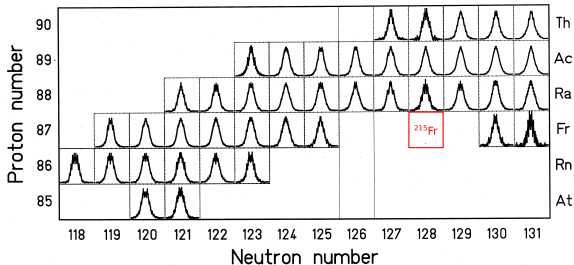
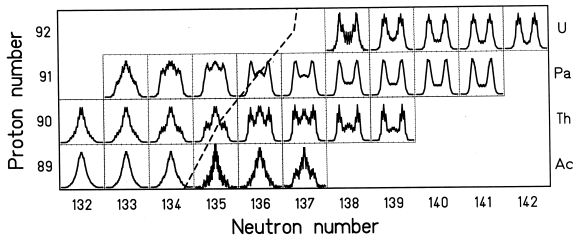
Reakcja (literatura)



L. Corradi et al. PRC 71 (2005) 014609



Rozszczepienie w okolicy (literatura)



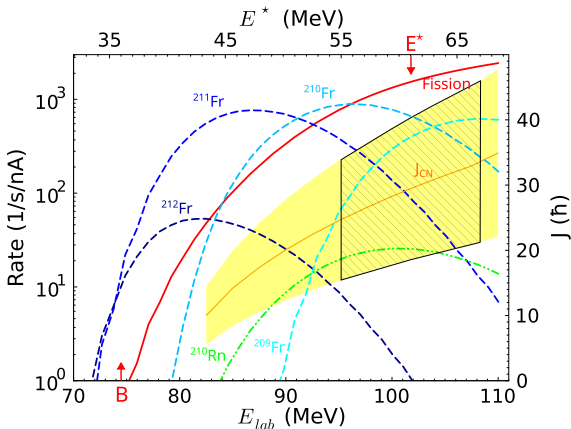
K.-H. Schmidt et al., Nucl. Phys. A 665 (2000) 221

Reakcja (HIVAP)

- $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{215}\text{Fr}^*$
- wiązka ^{18}O (111 MeV, 0.5 part. nA)
- gruba tarcza ^{197}Au (50 μm)

Reakcja (HIVAP)

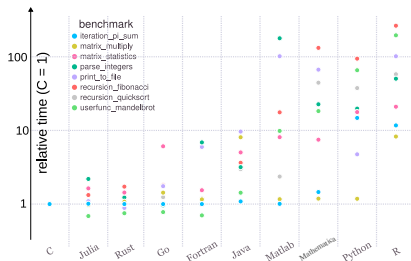
- $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{215}\text{Fr}^*$
- wiązka ^{18}O (111 MeV, 0.5 part. nA)
- gruba tarcza ^{197}Au (50 μm)



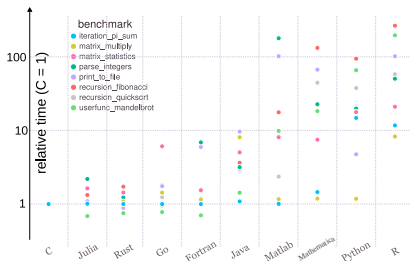
- $E^* = 61.0 \pm 6.2 \text{ MeV}, J = 30 \pm 10 \hbar$

- Program do dekodowania i analizy danych został napisany od zera w języku Julia

- Program do dekodowania i analizy danych został napisany od zera w języku Julia
- Julia to otwartyŹródłowy język ogólnego przeznaczenia, zaprojektowany z myślą o analizie numerycznej, zastosowaniach naukowych, big-data, stawiający na wydajność

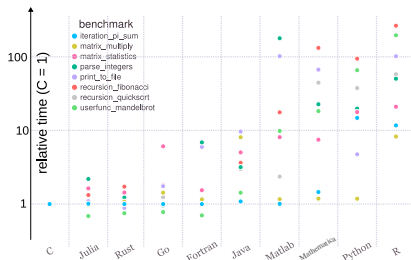


- Program do dekodowania i analizy danych został napisany od zera w języku Julia
- Julia to otwartyźródłowy język ogólnego przeznaczenia, zaprojektowany z myślą o analizie numerycznej, zastosowaniach naukowych, big-data, stawiający na wydajność



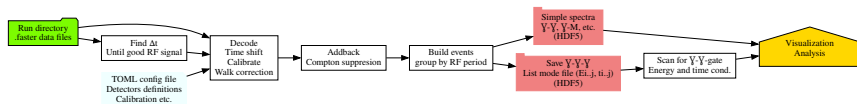
- Rozwiązuje "problem dwóch języków" poprzez połączenie języków dynamicznych (np. Python) oraz szybkich kompilowanych (C, Fortran) metodą kompilacji Just-In-Time

- Program do dekodowania i analizy danych został napisany od zera w języku Julia
- Julia to otwartyŹródłowy język ogólnego przeznaczenia, zaprojektowany z myślą o analizie numerycznej, zastosowaniach naukowych, big-data, stawiający na wydajność



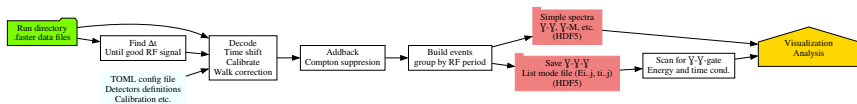
- Rozwiązuje "problem dwóch języków" poprzez połączenie języków dynamicznych (np. Python) oraz szybkich kompilowanych (C, Fortran) metodą kompilacji Just-In-Time
- Pozwala na bezpośrednie, bezkosztowe wołanie bibliotek C i Fortranowskich
- Posiada wbudowane mechanizmy przetwarzania wielowątkowego, wieloprocesorowego i rozproszonego
- Bogate biblioteki numeryczne, naukowe i wizualizacji danych

Struktura programu



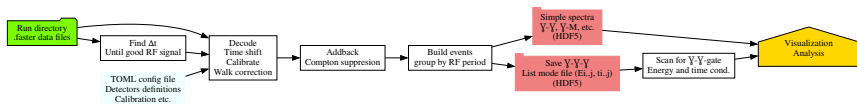
- Surowe dane (format digitizerów FASTER), około ~16 TB są obsługiwane przez bibliotekę fasterac (C)

Struktura programu



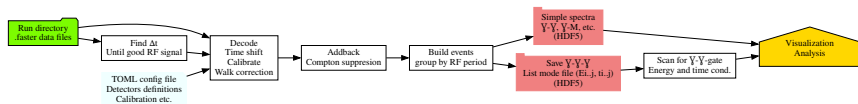
- Surowe dane (format digitizerów FASTER), około ~16 TB są obsługiwane przez bibliotekę fasterac (C)
- Kolejno wyliczane jest przesunięcie czasowe, kalibracja, korekcja czasu ("walk") i budowane są zdarzenia

Struktura programu



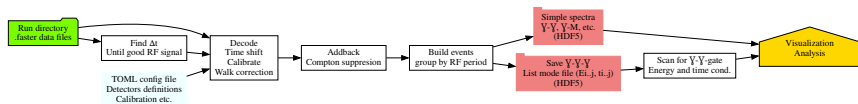
- Surowe dane (format digitizerów FASTER), około ~16 TB są obsługiwane przez bibliotekę fasterac (C)
- Kolejno wyliczane jest przesunięcie czasowe, kalibracja, korekcja czasu ("walk") i budowane są zdarzenia
- Puls wiązki (1 ns) jest wysyłany co 400 ns

Struktura programu



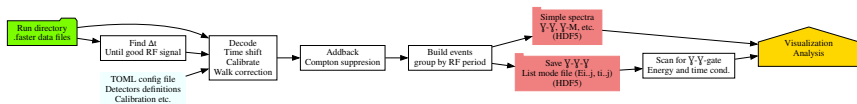
- Surowe dane (format digitizerów FASTER), około ~ 16 TB są obsługiwane przez bibliotekę fasterac (C)
- Kolejno wyliczane jest przesunięcie czasowe, kalibracja, korekcja czasu ("walk") i budowane są zdarzenia
- Puls wiązki (1 ns) jest wysyłany co 400 ns
- Tworzone są proste widma (np. $\gamma - \gamma$ natychmiastowe/opóźnione) oraz plik zawierający zdarzenie po zdarzeniu potrójne koincydencje

Struktura programu



- Surowe dane (format digitizerów FASTER), około ~ 16 TB są obsługiwane przez bibliotekę fasterac (C)
- Kolejno wyliczane jest przesunięcie czasowe, kalibracja, korekcja czasu ("walk") i budowane są zdarzenia
- Puls wiązki (1 ns) jest wysyłany co 400 ns
- Tworzone są proste widma (np. $\gamma - \gamma$ natychmiastowe/opóźnione) oraz plik zawierający zdarzenie po zdarzeniu potrójne koincydencje
- Widma $\gamma - \gamma - \gamma$ są tworzone innym kodem z dynamicznie dobieranymi warunkami na czas i energię

Struktura programu



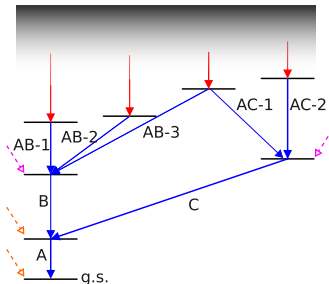
- Surowe dane (format digitizerów FASTER), około ~ 16 TB są obsługiwane przez bibliotekę fasterac (C)
- Kolejno wyliczane jest przesunięcie czasowe, kalibracja, korekcja czasu ("walk") i budowane są zdarzenia
- Puls wiązki (1 ns) jest wysyłany co 400 ns
- Tworzone są proste widma (np. $\gamma - \gamma$ natychmiastowe/opóźnione) oraz plik zawierający zdarzenie po zdarzeniu potrójne koincydencje
- Widma $\gamma - \gamma - \gamma$ są tworzone innym kodem z dynamicznie dobieranymi warunkami na czas i energię
- Budowa wszystkich zdarzeń trwa około 1 tygodnia (sam czas czytania 16 TB z dysku HDD to około 2 dni)

Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami

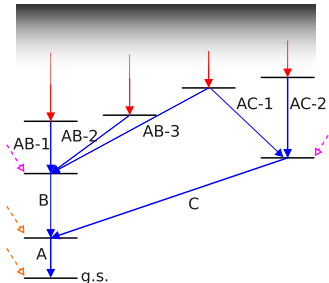
Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami



Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

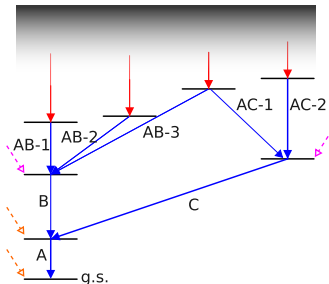
- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami



- Wyszukanie w bazie ENSDF wszystkich kaskad $\gamma - \gamma - \gamma$ prowadzących do stanu podstawowego dla oczekiwanego zakresu parzysto-parzystych fragmentów ($Z = 28 - 64, 78 - 86$) (147 izotopów)

Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

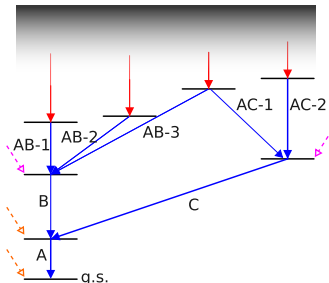
- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami



- Wyszukanie w bazie ENSDF wszystkich kaskad $\gamma - \gamma - \gamma$ prowadzących do stanu podstawowego dla oczekiwanego zakresu parzysto-parzystych fragmentów ($Z = 28 - 64, 78 - 86$) (147 izotopów)
- Bramki $\gamma - \gamma$ na promieniowaniu natychmiastowym (2561 bramek)

Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

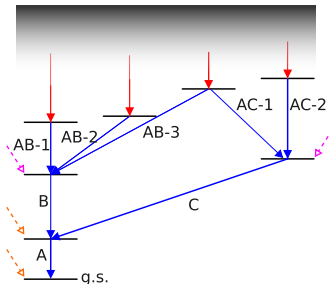
- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami



- Wyszukanie w bazie ENSDF wszystkich kaskad $\gamma - \gamma - \gamma$ prowadzących do stanu podstawowego dla oczekiwanego zakresu parzysto-parzystych fragmentów ($Z = 28 - 64, 78 - 86$) (147 izotopów)
- Bramki $\gamma - \gamma$ na promieniowaniu natychmiastowym (2561 bramek)
- Poszukiwanie i dopasowanie wszystkich możliwych przejść w widmach (13591 linii)

Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

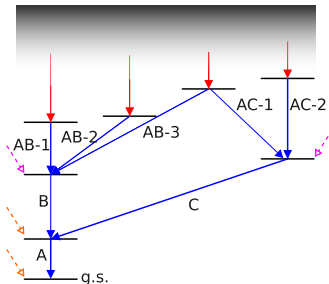
- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami



- Wyszukanie w bazie ENSDF wszystkich kaskad $\gamma - \gamma - \gamma$ prowadzących do stanu podstawowego dla oczekiwanego zakresu parzysto-parzystych fragmentów ($Z = 28 - 64, 78 - 86$) (147 izotopów)
- Bramki $\gamma - \gamma$ na promieniowaniu natychmiastowym (2561 bramek)
- Poszukiwanie i dopasowanie wszystkich możliwych przejść w widmach (13591 linii)
- Weryfikacja znalezionych przejść
- Korekcja na rozpady β (opóźnione koincydencje)
- Korekcja stanów izomerycznych (^{92}Zr , ^{106}Pd , $^{120,122}\text{Sn}$, ^{130}Xe , ^{138}Ba , ^{84}Kr)

Analiza prawdopodobieństw utworzenia fragmentów

- Analiza ograniczona do jąder parzysto-parzystych
- ^{215}Fr jest jądrem o nieparzystym Z - nie możemy użyć koincydencji z partnerami

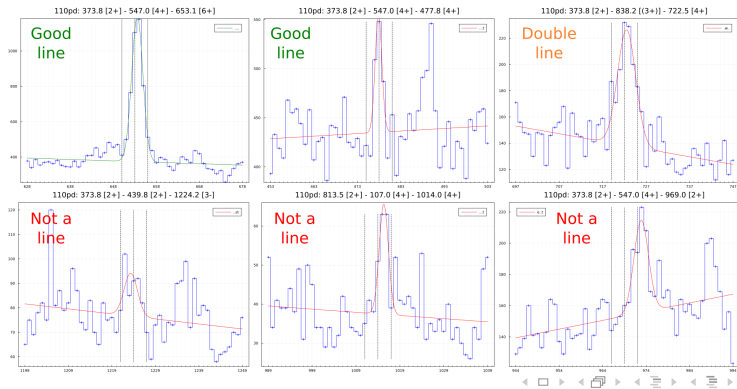


- Wyszukanie w bazie ENSDF wszystkich kaskad $\gamma - \gamma - \gamma$ prowadzących do stanu podstawowego dla oczekiwanego zakresu parzysto-parzystych fragmentów ($Z = 28 - 64, 78 - 86$) (147 izotopów)
- Bramki $\gamma - \gamma$ na promieniowaniu natychmiastowym (2561 bramek)
- Poszukiwanie i dopasowanie wszystkich możliwych przejść w widmach (13591 linii)
- Weryfikacja znalezionych przejść
- Korekcja na rozpady β (opóźnione koincydencje)
- Korekcja stanów izomerycznych ($^{92}\text{Zr}, ^{106}\text{Pd}, ^{120,122}\text{Sn}, ^{130}\text{Xe}, ^{138}\text{Ba}, ^{84}\text{Kr}$)
- Wyznaczenie zasilania poziomów
- Wyznaczenie rozkładu niezależnych fragmentów i rozkładu ładunku fragmentów

Procedura dopasowania

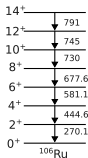
Linia jest akceptowana jeżeli

- 1 Energia jest ± 1 keV w porównaniu do bazy danych
- 2 Szerokość jest w granicach 0.5-1.5 keV
- 3 Pole powierzchni jest większe od 0 w granicach $3\sigma_A$
- 4 Rozkład liczby zliczeń w obszarze linii pochodzi z innego rozkładu niż rozkład liczby zliczeń w tle (symetrycznie po obu stronach linii), używając testu Kołmogorowa-Smirnowa na poziomie ufności 5%
- 5 W pewnych przypadkach potrzebna jest ręczna interwencja (linie w obszarze tła, linie (n, n'), dublety, itp.)

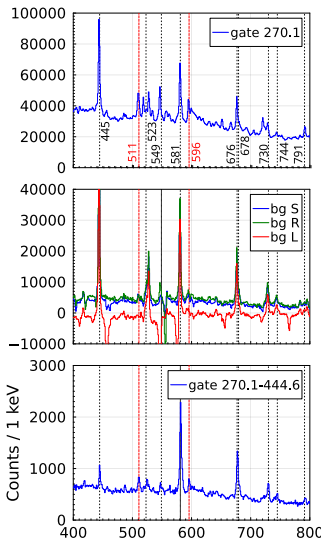


Bramki $\gamma - \gamma$ i $\gamma - \gamma - \gamma$

- Bramki w ^{106}Ru ($\dots \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$)

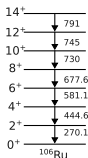


- Góra: $\gamma - \gamma$
- Środek: $\gamma - \gamma$ + odjęcie tła symetryczne (nieb.), prawe (ziel.), lewe (czer.)
- Dół: $\gamma - \gamma - \gamma$ bez odejmowania tła

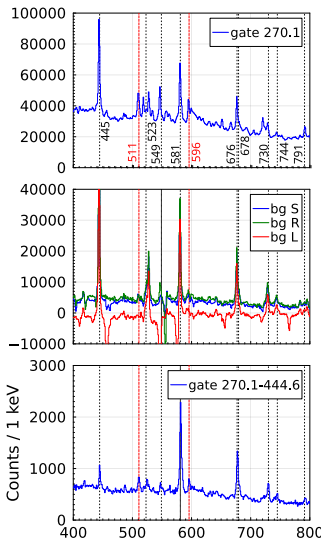


Bramki $\gamma - \gamma$ i $\gamma - \gamma - \gamma$

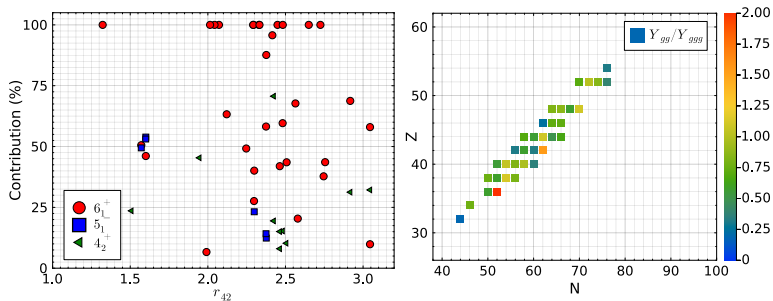
- Bramki w ^{106}Ru ($\dots \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$)



- Góra: $\gamma - \gamma$
- Środek: $\gamma - \gamma$ + odjęcie tła symetryczne (nieb.), prawe (ziel.), lewe (czer.)
- Dół: $\gamma - \gamma - \gamma$ bez odejmowania tła
- Używając widm $\gamma - \gamma$ zmierzono rozkład 38 izotopów ($\gamma - \gamma - \gamma$: 60)
- Stosunek $Y_{\gamma\gamma}/Y_{\gamma\gamma\gamma}$ wyniósł 1.0 ± 0.35
- Statystyczny test nie dał podstaw do odrzucenia hipotezy o braku korelacji tego stosunku z masą lub ładunkiem
- Systematyczne niepewności oraz zasilanie niżej leżących stanów jest poniżej niepewności statystycznej (25%)

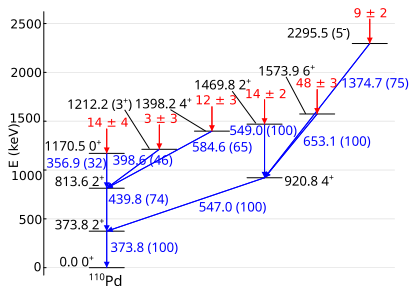
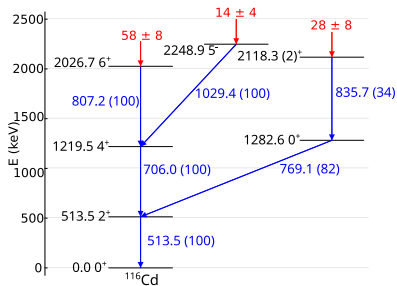
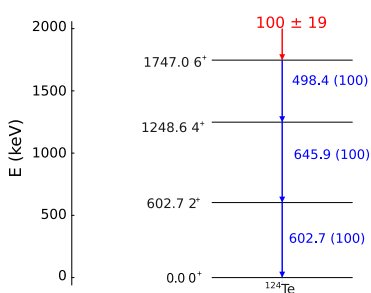


Test metody

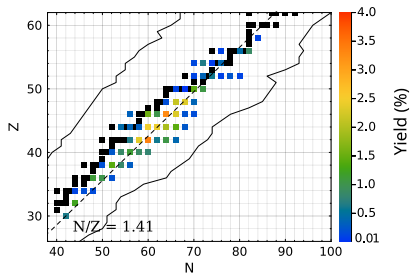


- Zależność zasilania wybranych stanów od stosunku E_{4^+}/E_{2^+}
- Zależność wyniku z metody $\gamma - \gamma$ i $\gamma - \gamma - \gamma$ od N i Z

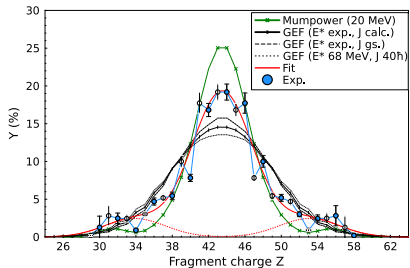
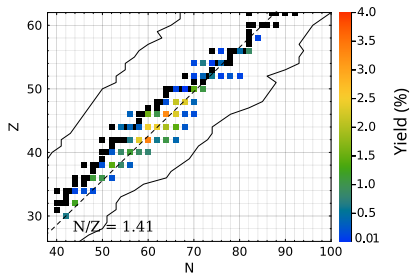
Zasilanie wybranych nuklidów

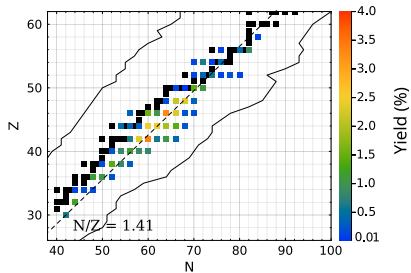


Wyniki

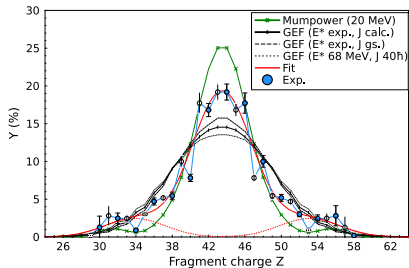


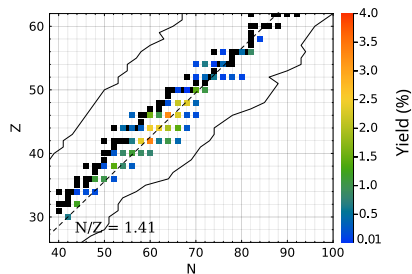
Wyniki



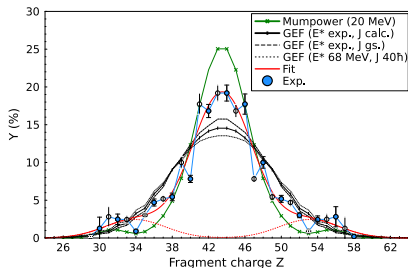


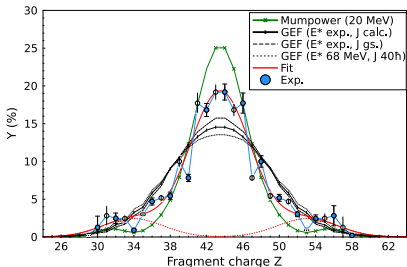
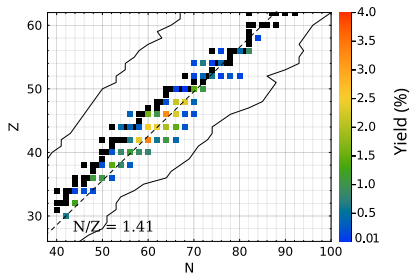
- Samozgodne, niezależna detekcja lekkich i ciężkich fragmentów
- Duży wkład asymetrycznego rozszczepienia (11.6(29)%)



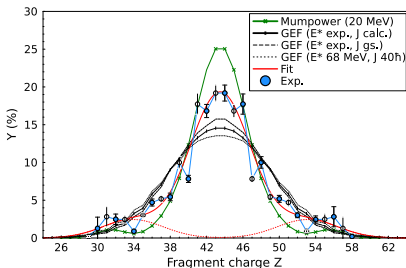
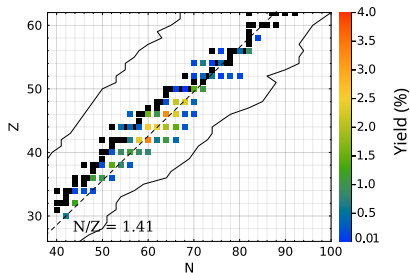


- Samozgodne, niezależna detekcja lekkich i ciężkich fragmentów
- Duży wkład asymetrycznego rozszczepienia (11.6(29)%)
- GEneral description of Fission observables - model statystyczno-fenomenologiczny, K.-H. Schmidt NDS 131 (2016)
- FRLDM + Strutinsky + BCS + 3QS, M.R. Mumpower PRC 101 (2020)





- Samozgodne, niezależna detekcja lekkich i ciężkich fragmentów
- Duży wkład asymetrycznego rozszczepienia (11.6(29)%)
- GEneral description of Fission observables - model statystyczno-fenomenologiczny, K.-H. Schmidt NDS 131 (2016)
- FRLDM + Strutinsky + BCS + 3QS, M.R. Mumpower PRC 101 (2020)
- Model GEF - tylko symetryczny kanał
- Asymetryczne maksima dla $Z_H \approx 54 - 56$ powszechne w tym rejonie
- Zgodne z modelami mikro-makro (ale dla niskich energii wzbudzenia)

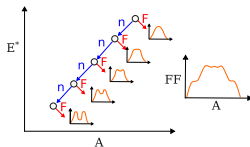


- Samozgodne, niezależna detekcja lekkich i ciężkich fragmentów
- Duży wkład asymetrycznego rozszczepienia (11.6(29)%)
- GEneral description of Fission observables - model statystyczno-fenomenologiczny, K.-H. Schmidt NDS 131 (2016)
- FRLDM + Strutinsky + BCS + 3QS, M.R. Mumpower PRC 101 (2020)
- Model GEF - tylko symetryczny kanał
- Asymetryczne maksima dla $Z_H \approx 54 - 56$ powszechne w tym rejonie
- Zgodne z modelami mikro-makro (ale dla niskich energii wzbudzenia)
- Model GEF przewiduje duży wkład MCF

	Szansa	Praw. (%)
1		24.2
2		14.3
3		27.0
4		16.5
5		14.8
6		3.0

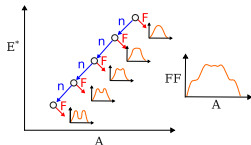
Mechanizm wielokrotnych prób rozszczepienia

- Mechanizm MCF został rozpoznany jako kluczowy w rozszczepieniu ciężkich jąder (n.p. U, Np, Pu - K. Hirose et al. PRL 119 (2017))

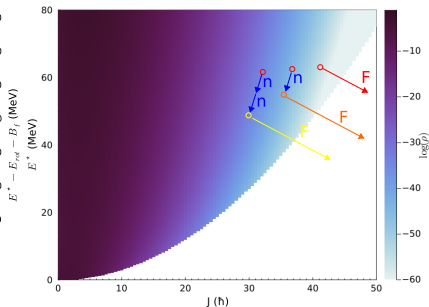
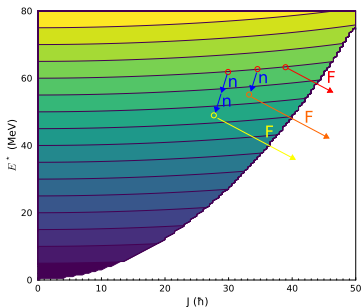


Mechanizm wielokrotnych prób rozszczepienia

- Mechanizm MCF został rozpoznany jako kluczowy w rozszczepieniu ciężkich jąder (n.p. U, Np, Pu - K. Hirose et al. PRL 119 (2017))

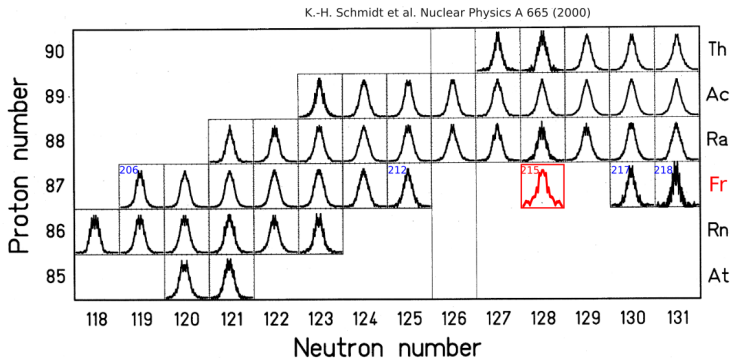


- Wpływ momentu pędu i powiązanie z MCF nie jest oczywiste



Przypadek ^{215}Fr

- W przypadku ^{215}Fr mechanizm MCF nie może wytłumaczyć asymetrycznego trybu, który musi jednak pochodzić od efektów mikroskopowych

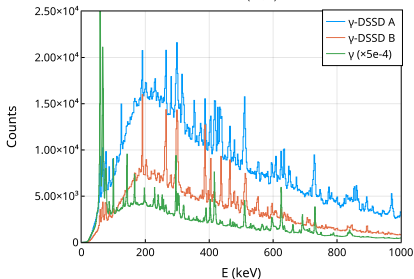
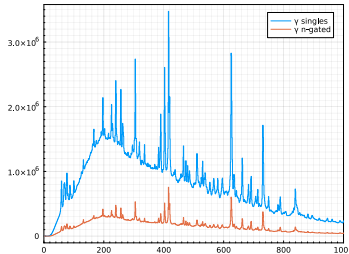
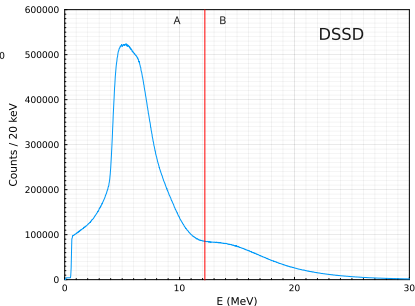
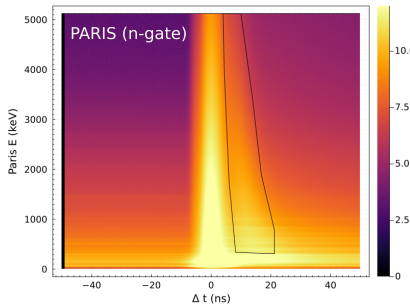


Eksperyment N-SI-134

- 24 detektory Clover
- PARIS
- Warsaw DSSD
- $1 \times \text{LaBr}_3$
- Wiązka ^{12}C (87.5 MeV) na grubej tarczy ^{182}W
- Tarcza przygotowana przez grupę z Wydziału Chemii (temperatura topnienia wolframu 3422°C , twardość 7.5)
- Jądro złożone ^{194}Hg
- 2.05.2023 - 9.05.2023 → 35 TB danych

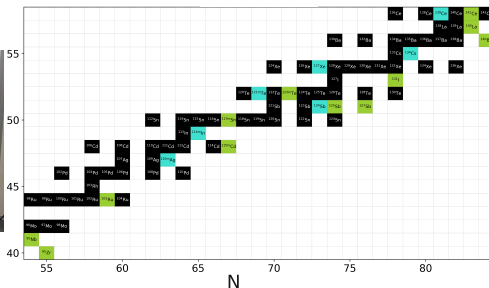


Dodatkowe możliwości - DSSD i PARIS



Długożyciowe izotopy

- Tarcze po eksperymentach, po ostudzeniu, były przewiezione do Warszawy i promieniowanie γ jest mierzone przez detektor germanowy w niskotłowych domkach ołowianych
- Tarcza ^{197}Au była mierzona przez 7 miesięcy, tarcza ^{182}W jest mierzona aktualnie
- Poprzez pomiary widma γ i czasów połowicznego zaniku udało się zidentyfikować 26 izotopów, w tym 5 takich, które mogą powstawać jedynie bezpośrednio
- Pomiary i identyfikacja stanowiły podstawę pracy licencjackiej Piotra Garczyńskiego
- Aktualnie prowadzimy dalszą analizę

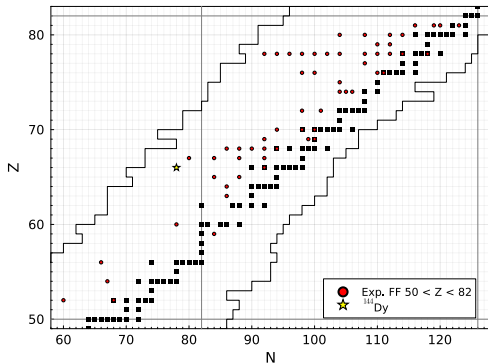


Eksperyment HIL-117

- Eksperyment odbędzie się 18-26 marca 2024
- $^{32}\text{S} + ^{112}\text{Sn} \rightarrow ^{144}\text{Dy}$
- EAGLE + DIAMANT + NEDA

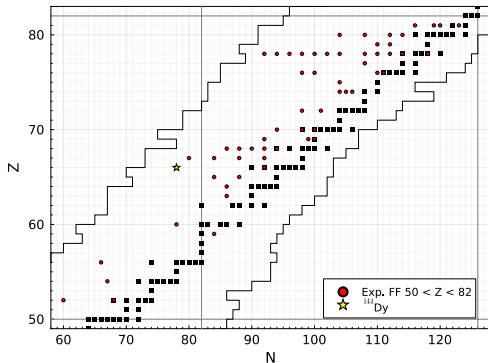
Eksperyment HIL-117

- Eksperyment odbędzie się 18-26 marca 2024
- $^{32}\text{S} + ^{112}\text{Sn} \rightarrow ^{144}\text{Dy}$
- EAGLE + DIAMANT + NEDA
- Region jąder o średnich masach ($50 < Z < 78$) jest bardzo słabo zbadany eksperymentalnie



Eksperyment HIL-117

- Eksperyment odbędzie się 18-26 marca 2024
- $^{32}\text{S} + ^{112}\text{Sn} \rightarrow ^{144}\text{Dy}$
- EAGLE + DIAMANT + NEDA
- Region jąder o średnich masach ($50 < Z < 78$) jest bardzo słabo zbadany eksperymentalnie



- Dla jąder protononadmiarowych emisja neutronów i mechanizm MCF będzie znacząco zredukowany
- Wyparowanie cząstek naładowanych (p , α) jest mniejsze i łatwiejsze do detekcji

Podsumowanie

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób

Podsumowanie

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów

Podsumowanie

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów
- W reakcji $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ zidentyfikowaliśmy 60 fragmentów rozszczepienia oraz 9 jąder po wyparowaniu lekkich cząstek

Podsumowanie

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów
- W reakcji $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ zidentyfikowaliśmy 60 fragmentów rozszczepienia oraz 9 jąder po wyparowaniu lekkich cząstek
- Kanały fuzji-wyparowania były identyfikowane i badane przez Wiktora Poklepę (praca magisterska)

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów
- W reakcji $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ zidentyfikowaliśmy 60 fragmentów rozszczepienia oraz 9 jąder po wyparowaniu lekkich cząstek
- Kanały fuzji-wyparowania były identyfikowane i badane przez Wiktora Poklepę (praca magisterska)
- Lista populowanych fragmentów jest dostępna w publikacji i mogą one teraz być analizowane pod kątem spektroskopii

Fission of ^{215}Fr studied with γ spectroscopic methods

K. Miernik^{1,4}, A. Korgul,¹ W. Poklepa,¹ J. N. Wilson,² G. Charles,² S. Czajkowski,³ P. Czyż,¹ A. Fijałkowska,¹
L. M. Fraile,⁴ P. Garczyński,¹ K. Hauschild,² C. Hiver,² T. Kurtukian-Nieto,³ M. Lebois,² M. Llanos,⁴ A. Lopez-Martens,²
K. M. Deby Treasa,³ J. Ljungvall,² I. Matea,² J. Mielczarek,¹ J. R. Murias,^{4,5} G. Pasqualato,² A. Skruch,¹ K. Solak,¹
K. Stoyachev,² and I. Tsekhanovich³

¹Faculty of Physics, University of Warsaw, 02-093 Warsaw, Poland

²Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJC Laboratory, Orsay, France

³Université Bordeaux, CNRS, LP2I Bordeaux, UMR 5797, F-33170 Gradignan, France

⁴Grupo de Física Nuclear and IPARCOS, Universidad Complutense de Madrid, CEI Moncloa, 28040 Madrid, Spain

⁵TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, British Columbia V6T 2A3, Canada

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów
- W reakcji $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ zidentyfikowaliśmy 60 fragmentów rozszczepienia oraz 9 jąder po wyparowaniu lekkich cząstek
- Kanały fuzji-wyparowania były identyfikowane i badane przez Wiktora Poklepę (praca magisterska)
- Lista populowanych fragmentów jest dostępna w publikacji i mogą one teraz być analizowane pod kątem spektroskopii

Fission of ^{215}Fr studied with γ spectroscopic methods

K. Miernik^{1,*}, A. Korgul,¹ W. Poklepa,¹ J. N. Wilson,² G. Charles,² S. Czajkowski,³ P. Czyż,¹ A. Fijałkowska,¹
L. M. Fraile,⁴ P. Garczyński,¹ K. Hauschild,² C. Hiver,² T. Kurtukian-Nieto,³ M. Lebois,² M. Llanos,⁴ A. Lopez-Martens,²
K. M. Deby Treasa,³ J. Ljungvall,² I. Matea,² J. Mielczarek,¹ J. R. Murias,^{4,5} G. Pasqualato,² A. Skruch,¹ K. Solak,¹
K. Stoyachev,² and I. Tsekhanovich³

¹Faculty of Physics, University of Warsaw, 02-093 Warsaw, Poland

²Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJC Laboratory, Orsay, France

³Université Bordeaux, CNRS, LP2I Bordeaux, UMR 5797, F-33170 Gradignan, France

⁴Grupo de Física Nuclear and IPARCOS, Universidad Complutense de Madrid, CEI Moncloa, 28040 Madrid, Spain

⁵TRIUMF, 4004 Westbrook Mall, Vancouver, British Columbia V6T 2A3, Canada

- Dane eksperymentu $^{12}\text{C} + ^{182}\text{W}$ są obecnie analizowane

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów
- W reakcji $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ zidentyfikowaliśmy 60 fragmentów rozszczepienia oraz 9 jąder po wyparowaniu lekkich cząstek
- Kanały fuzji-wyparowania były identyfikowane i badane przez Wiktora Poklepę (praca magisterska)
- Lista populowanych fragmentów jest dostępna w publikacji i mogą one teraz być analizowane pod kątem spektroskopii

Fission of ^{215}Fr studied with γ spectroscopic methods

K. Miernik^{1,4}, A. Korgul,¹ W. Poklepa,¹ J. N. Wilson,² G. Charles,² S. Czajkowski,³ P. Czyż,¹ A. Fijałkowska,¹
L. M. Fraile,⁴ P. Garczyński,¹ K. Hauschild,² C. Hiver,² T. Kurtukian-Nieto,³ M. Lebois,² M. Llanos,⁴ A. Lopez-Martens,²
K. M. Deby Treasa,³ J. Ljungvall,² I. Matea,² J. Mielczarek,¹ J. R. Murias,^{4,5} G. Pasqualato,² A. Skruch,¹ K. Solak,¹
K. Stoyachev,² and I. Tsekhanovich³

¹Faculty of Physics, University of Warsaw, 02-093 Warsaw, Poland

²Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJC Laboratory, Orsay, France

³Université Bordeaux, CNRS, LP2I Bordeaux, UMR 5797, F-33170 Gradignan, France

⁴Grupo de Física Nuclear and IPARCOS, Universidad Complutense de Madrid, CEI Moncloa, 28040 Madrid, Spain

⁵TRIUMF, 4004 Westbrook Mall, Vancouver, British Columbia V6T 2A3, Canada

- Dane eksperymentu $^{12}\text{C} + ^{182}\text{W}$ są obecnie analizowane
- Tarcze z obu eksperymentów są mierzone pod kątem długożyciowych fragmentów rozszczepienia

- Rozszczepienie jąder atomowych to szeroki temat, w którym jest wiele niewiadomych
- Reakcje fuzji-rozszczepienia są jednym ze sposobów badań tego zjawiska w rejonach niedostępnych w inny sposób
- Metody spektroskopii γ pozwalają na badanie rozkładu indywidualnych fragmentów
- W reakcji $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ zidentyfikowaliśmy 60 fragmentów rozszczepienia oraz 9 jąder po wyparowaniu lekkich cząstek
- Kanały fuzji-wyparowania były identyfikowane i badane przez Wiktora Poklepę (praca magisterska)
- Lista populowanych fragmentów jest dostępna w publikacji i mogą one teraz być analizowane pod kątem spektroskopii

Fission of ^{215}Fr studied with γ spectroscopic methods

K. Miernik^{1,*}, A. Korgul,¹ W. Poklepa,¹ J. N. Wilson,² G. Charles,² S. Czajkowski,³ P. Czyż,¹ A. Fijałkowska,¹ L. M. Fraile,⁴ P. Garczyński,¹ K. Hauschild,² C. Hiver,² T. Kurtukian-Nieto,³ M. Lebois,² M. Llanos,⁴ A. Lopez-Martens,² K. M. Deby Treasa,³ J. Ljungvall,² I. Matea,² J. Mielczarek,¹ J. R. Murias,^{4,5} G. Pasqualato,² A. Skruch,¹ K. Solak,¹ K. Stoyachev,² and I. Tsekhanovich³

¹Faculty of Physics, University of Warsaw, 02-093 Warsaw, Poland

²Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJC Laboratory, Orsay, France

³Université Bordeaux, CNRS, LP2I Bordeaux, UMR 5797, F-33170 Gradignan, France

⁴Grupo de Física Nuclear and IPARCOS, Universidad Complutense de Madrid, CEI Moncloa, 28040 Madrid, Spain

⁵TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, British Columbia V6T 2A3, Canada

- Dane eksperymentu $^{12}\text{C} + ^{182}\text{W}$ są obecnie analizowane
- Tarcze z obu eksperymentów są mierzone pod kątem długożyciowych fragmentów rozszczepienia
- Kolejny eksperyment $^{32}\text{S} + ^{112}\text{Sn}$ wkrótce (ŚLCJ)