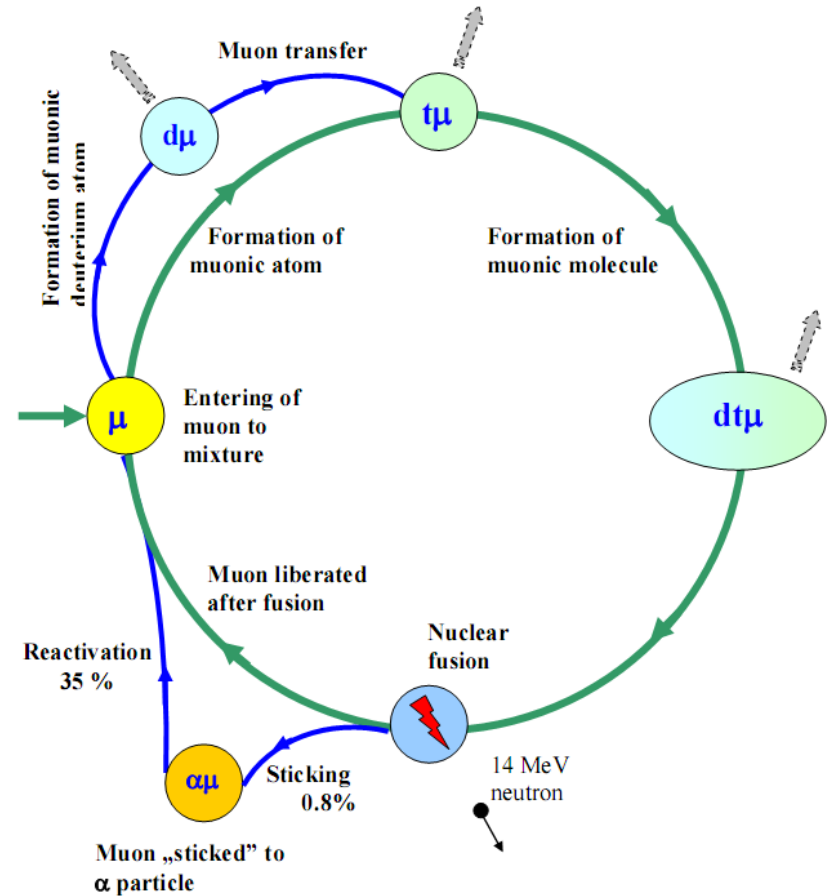
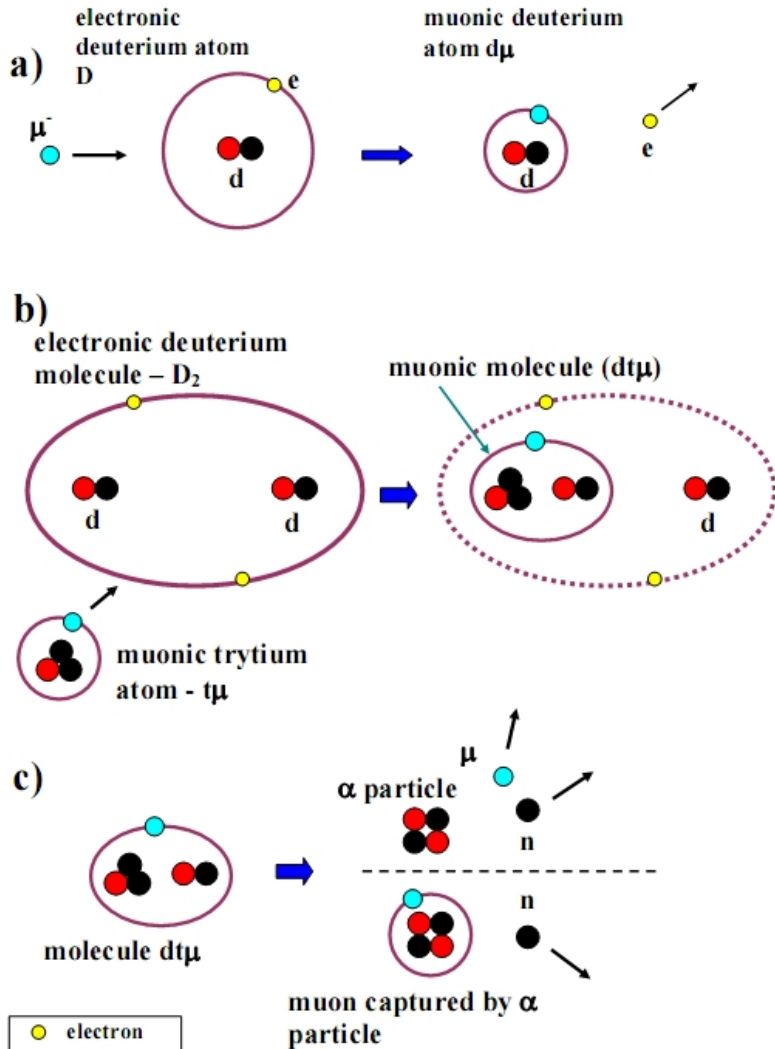


Eksperymentalne badanie procesów
 μ -atomowych i μ -molekularnych
w
katalizie mionowej reakcji syntezy
jądrowej

M. Filipowicz

Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego
Wydział Energetyki i Paliw, AGH

Idea katalizy mionowej



Cykl dla mieszaniny DT

Pozyskiwanie energii przy użyciu katalizy mionowej

- Zjawisko to jest traktowane jako jedna z koncepcji kontrolowanej syntezy jądrowej
- Molekuły mionowe są niewielkie, jądra wewnątrz nich znajdują się blisko, ich ruch powoduje penetrację bariery kulombowskiej
- Medium w którym zachodzą reakcje posiada niską (bardzo niską temperaturę), 'gorące' są atomy (molekuły) mionowe
- Niekorzystny bilans energetyczny (jeden mion to koszt 6-8 GeV, energia wydzielona w jednym cyklu to 17.6 MeV – zatem wymagana liczba cykli ok. tysiąca). Uzyskuje się ok. 150

W celu poznania zjawisk przeprowadzono szereg badań teoretycznych i eksperymentalnych wielu procesów fizycznych,

omówione zostaną badania eksperymentalne:

- procesów w mieszaninach deuteru i helu
kaskady mionowej, tworzenie molekuł mionowych,
przejścia wewnątrz molekuł, synteza
- procesów w zestalonych izotopach wodoru
rozpraszanie atomów mionowych na strukturze krystalicznej,
synteza w zestalonej mieszaninie

Plan referatu

Badania w mieszaninach deuteru i helu

- Przegląd procesów w mieszaninie D/He
- Opis stanowiska eksperymentalnego
- Badanie kaskady mionowej
- Badanie wychwytu mionu przez hel
- Tworzenie molekuly $d\mu^3\text{He}$ i przejście $1 \rightarrow 0$
- Synteza jądrowa w $d\mu^3\text{He}$

Badania w zestalonych mieszaninach izotopów wodoru

- Opis stanowiska eksperymentalnego
- Rozpraszanie atomów $p\mu$ na strukturze krystalicznej zestalonego wodoru
- Rozpraszanie $d\mu$ i $t\mu$ - efekt Ramsauera-Townsenda
- Synteza jądrowa w mieszaninie H/D i H/T

Badania w mieszaninach deuteru i helu

Zespół badawczy

Dubna-Fribourg-PSI-Kraków-Monachium

V.M. Bystritsky, V.F. Boreiko, V.V. Gerasimov, V.N. Pavlov, G. Sandukovsky, V.A. Stolupin, V.P. Volnykh, **JINR, Dubna**

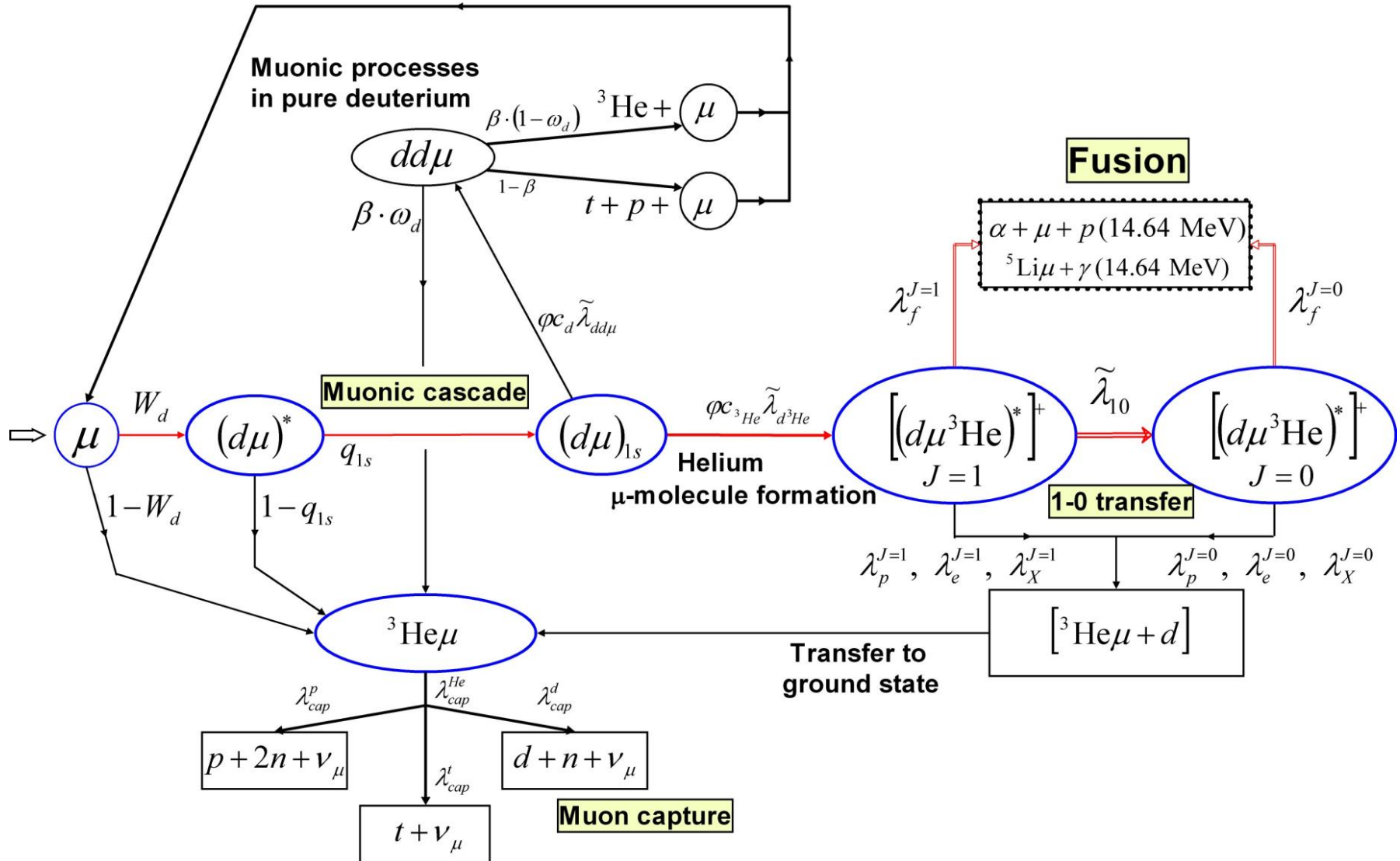
O. Huot, P.E. Knowles, F. Mulhauser, L.A. Schaller, H. Schneuwly,
University of Fribourg (Switzerland),

C. Petitjean, **PSI (Switzerland),**

W. Czapliński, M. Filipowicz, J. Woźniak, **University of Science and Technology
(Poland),**

N.P. Popov, **Munich University, Germany**

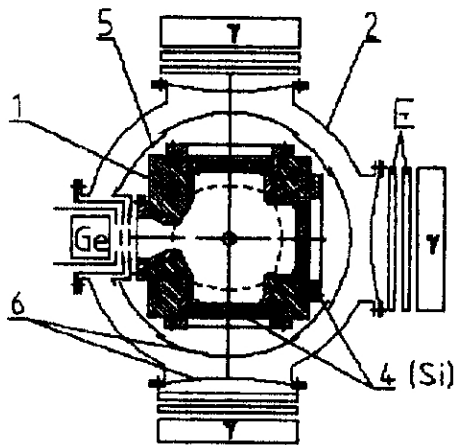
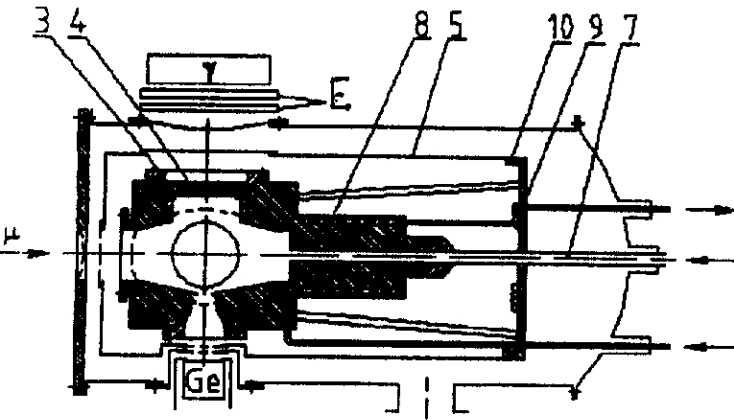
Schemat procesów w mieszaninie izotopów wodoru i helu-3



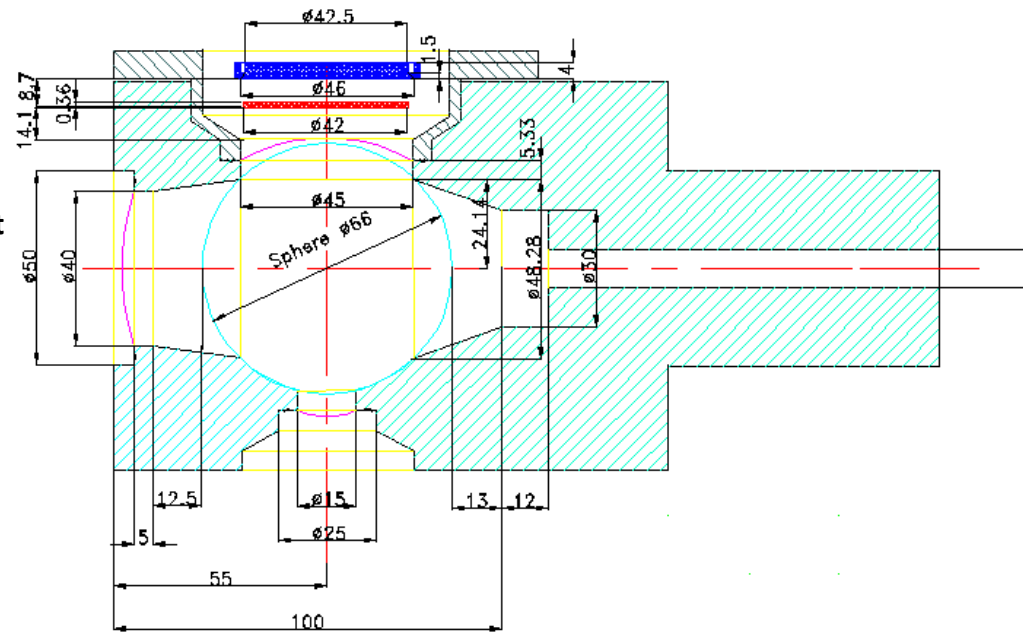
Stanowisko eksperymentalne

Gazowa tarcza, kriostat, systemem chłodzenia i napełniania, systemem detektorów i rejestracji zostały opracowane i skonstruowane w Dubnej

Układ przeznaczony jest do pracy w temperaturze ok. 30 K,

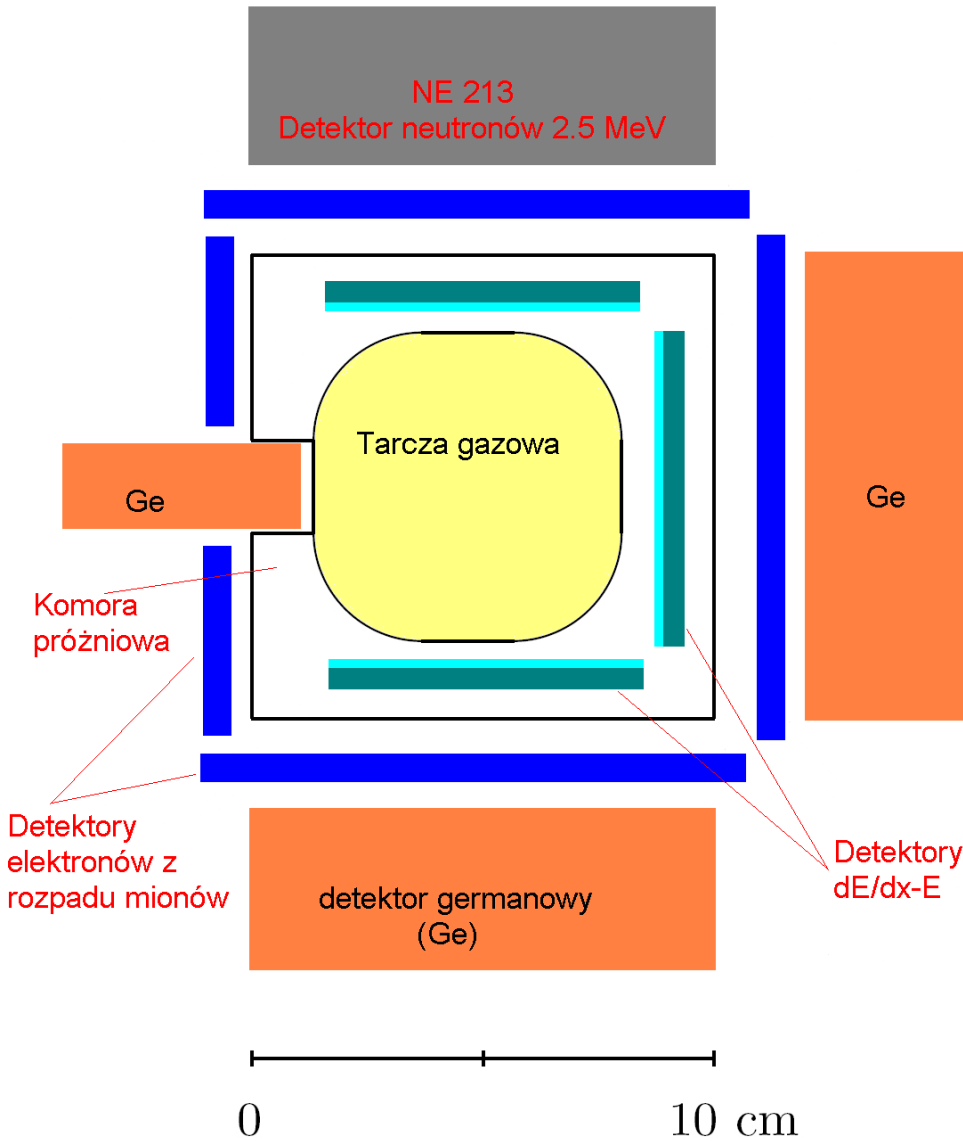


V.F. Boreiko et al.
 „New target cryostat
 for experiments
 with negative
 muons”,
 Nucl. Instr. Meth.
 A416(1998)221-228



1 – obudowa tarczy, 2 - komora próżniowa, 3 – kołnierz, 4 – detektor silikonowy, 5 – osłona cieplna, 6 – okienko aluminiowe, 7 – wlot gazu, 8 - wymiennik ciepła, 9 – doprowadzenie chłodziwa, 10 – osłona, E – plastikowe scyntylatory elektronów z rozpadu mionów, γ - detektory kwantów γ , Ge – detektor germanowy

Tarcza i detektory

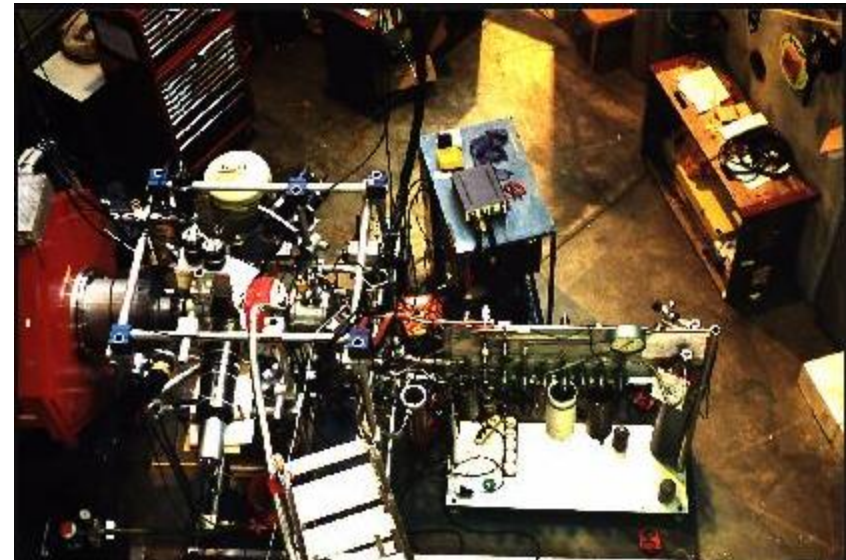


Układ tarczy i detektorów, widok z kierunku wiązki mionów

Detekcja mionów wiązki – cienki scyntylator plastikowy

Pomiary :

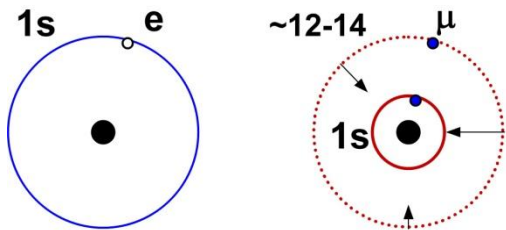
- czysty ^3He i ^4He
- $\text{D}_2 + ^3\text{He}$ dwóch gęstości:
0.0585 LHD (0.5 Mpa) i
0.1680 LHD (1.2 Mpa)
dla temperatury 32.8 K i 34.5 K
przy koncentracji helu 5%



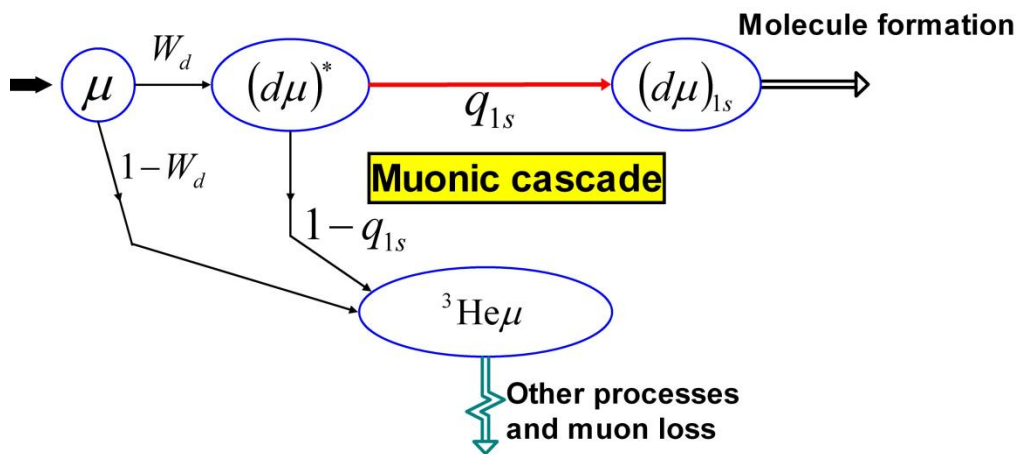
Stanowisko na kanale $\mu\text{E}4$
w PSI

Kaskada mionowa

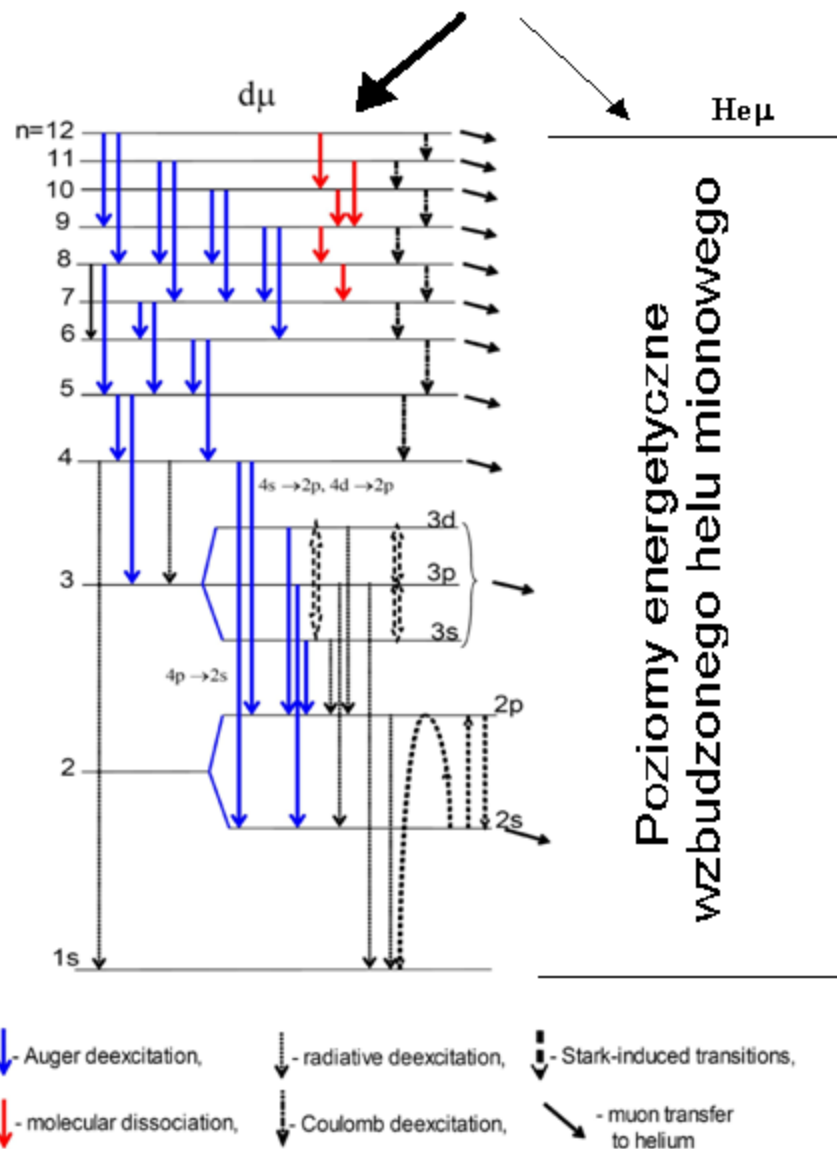
Podobieństwo geometryczne



- Pierwszy etap cyklu katalizy mionowej
- Skomplikowany etap – wiele różnych przejść
- Istotny dla dalszego przebiegu procesów

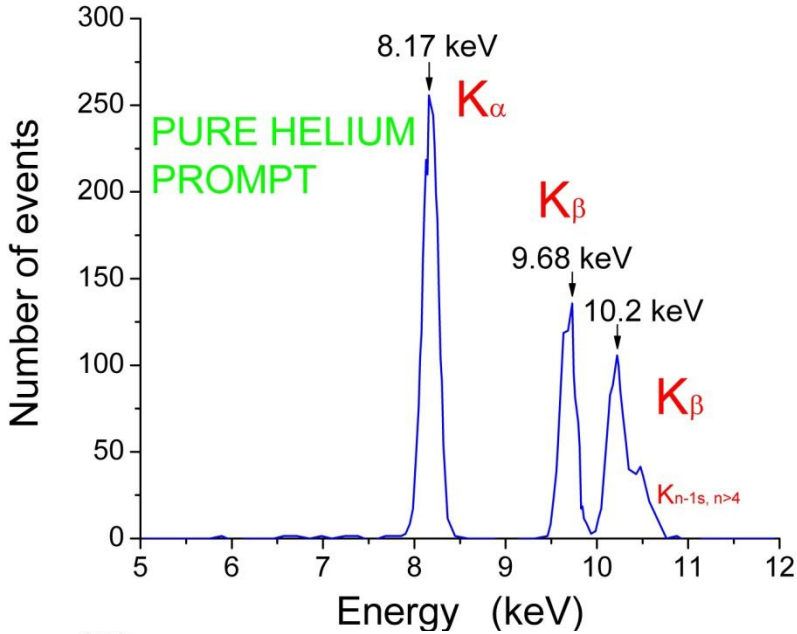


q_{1s} – prawdopodobieństwo utworzenia atomu $d\mu$ w stanie podstawowym (1s)

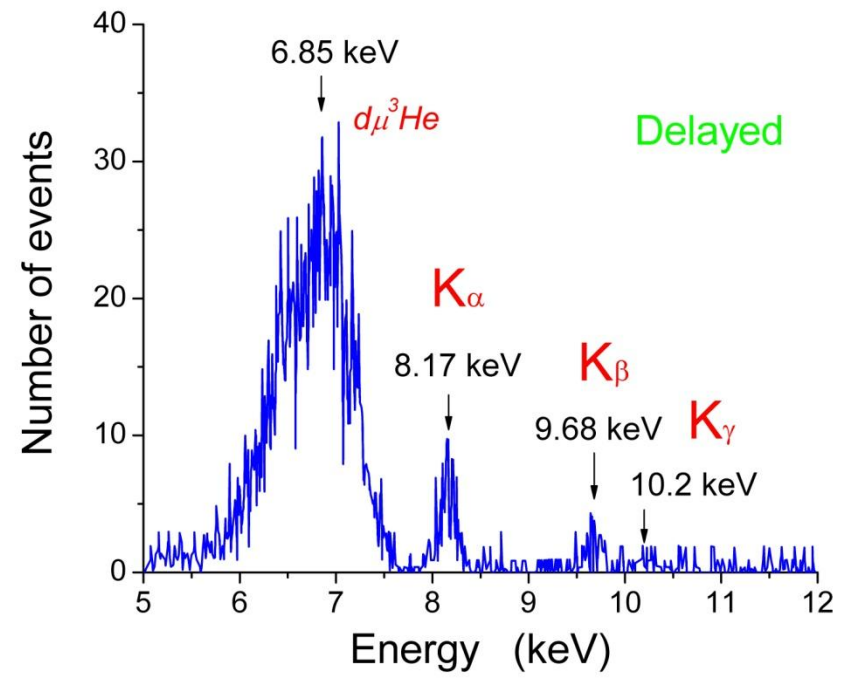
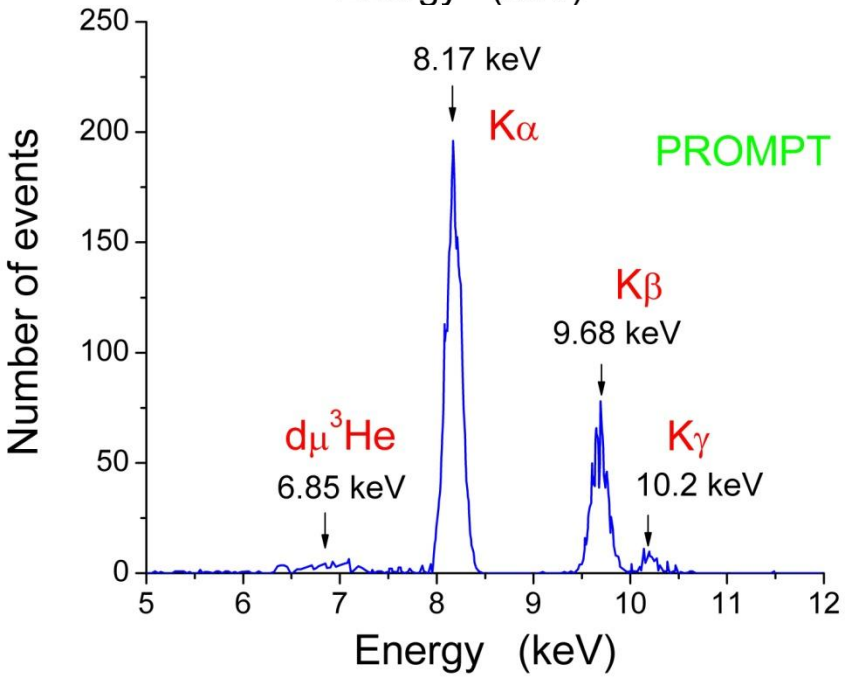


↓ - Auger deexcitation,
 - - - - radiative deexcitation,
 - · - · - - Stark-induced transitions,
↓ - molecular dissociation,
 - · - · - - Coulomb deexcitation,
 ↘ - muon transfer to helium

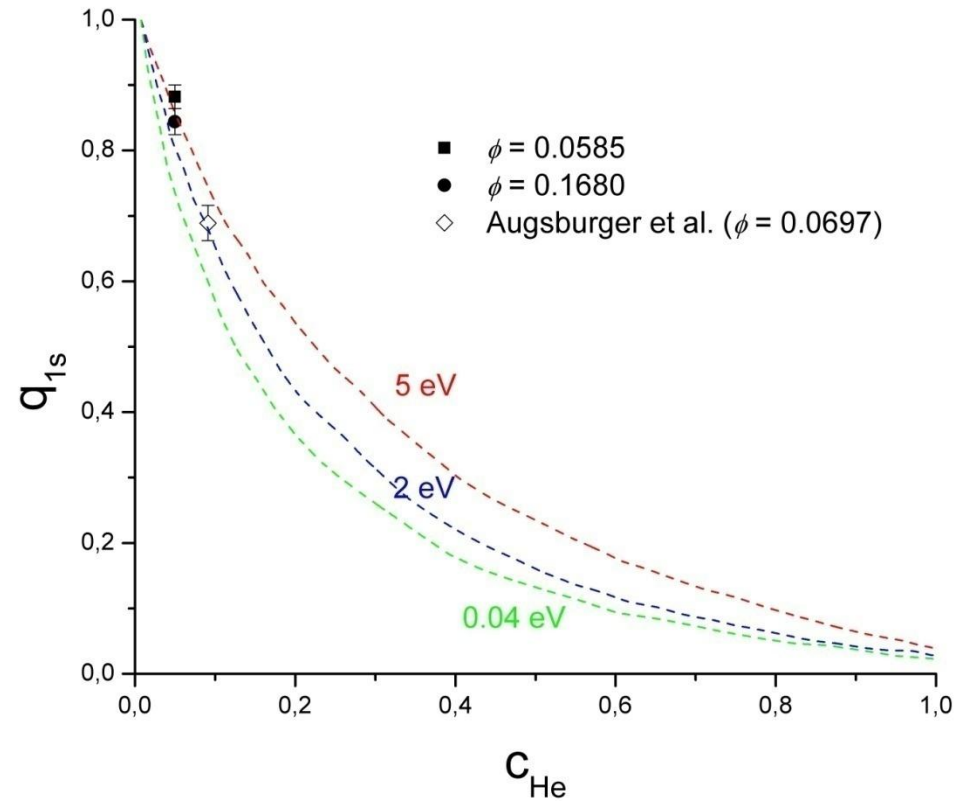
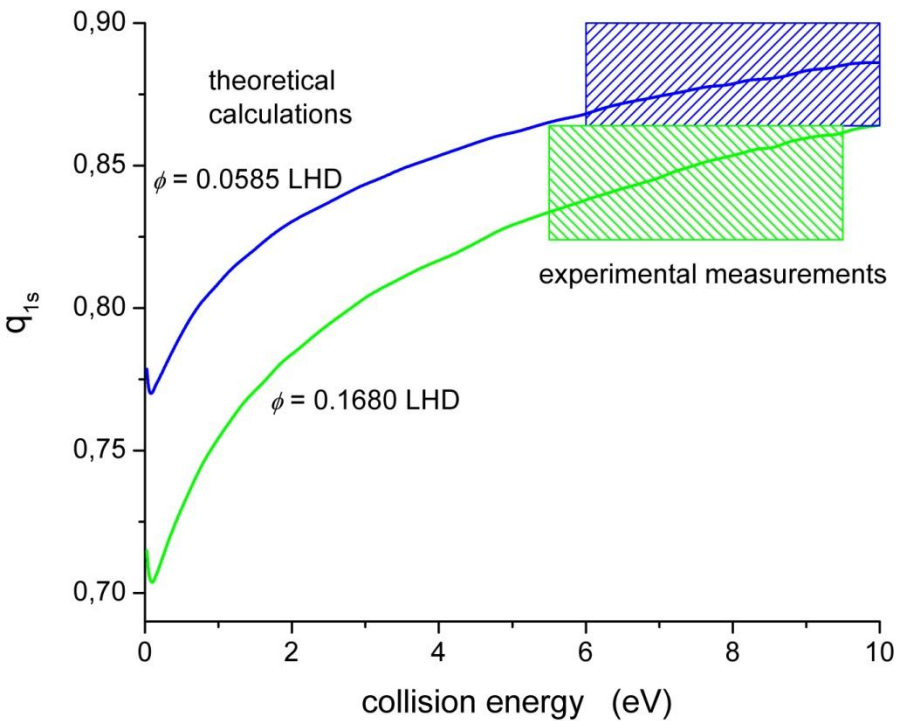
Obserwacje linii widmowych



- Czysty Hel-3
- Mieszanina, zdarzenia natychmiastowe
- Mieszanina, promieniowanie opóźnione



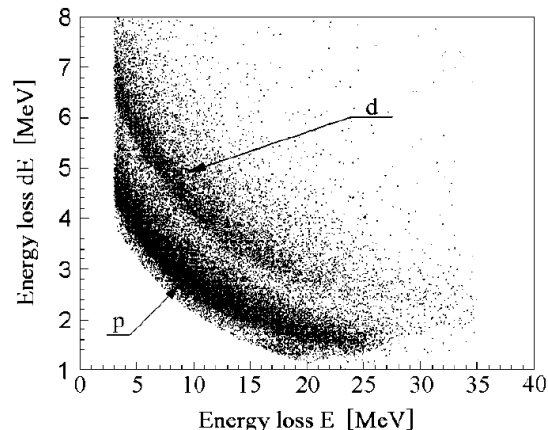
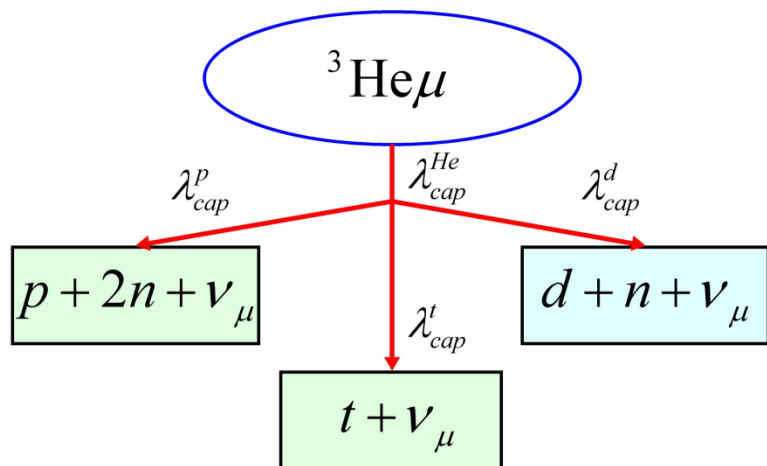
Wyznaczanie współczynnika q_{1s}



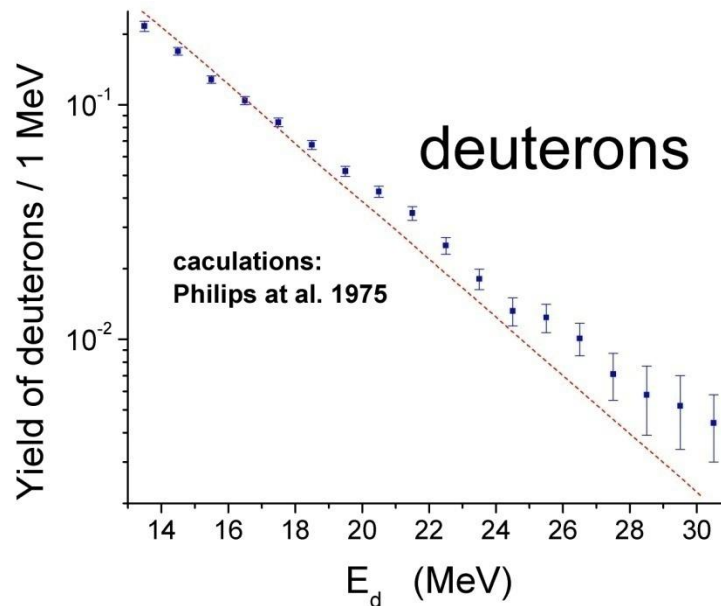
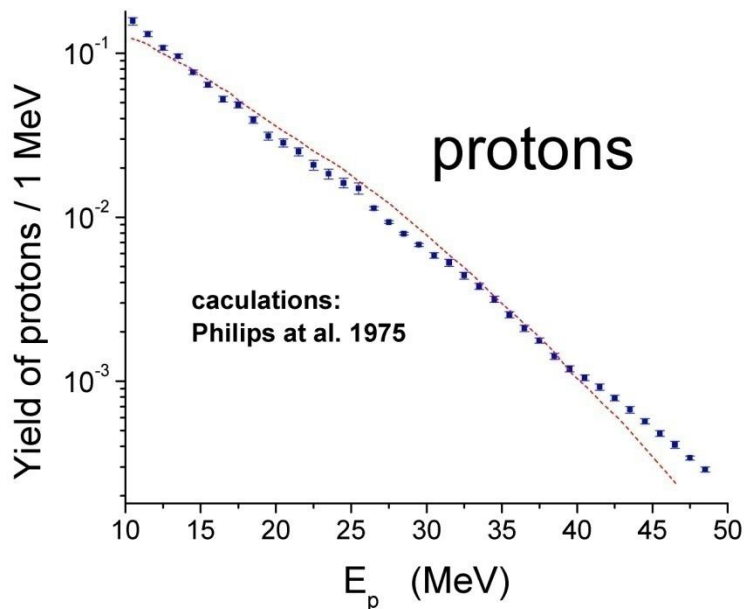
Wniosek: średnia energia atomów mionowych podczas kaskady wynosi kilka eV (~5-10 eV)

Wychwył mionu przez hel

Muon capture

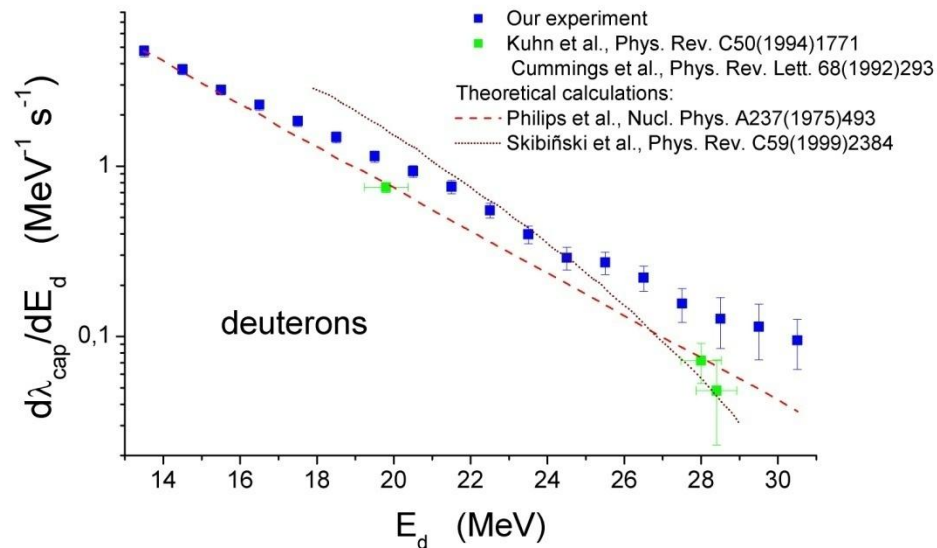
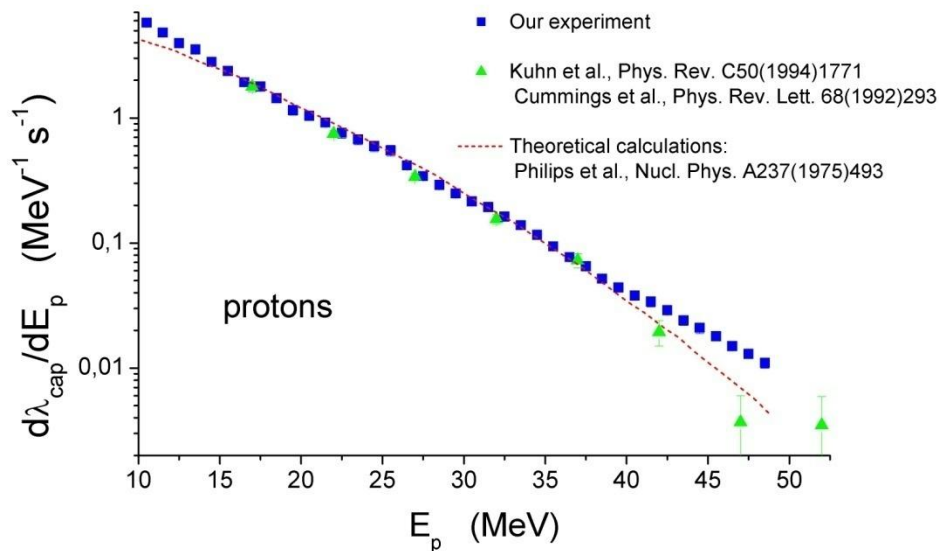


Przykład zarejestrowanych zdarzeń (0.5-6.0 μs po zatrzymaniu mionu) przez detektory $dE/dx-E$



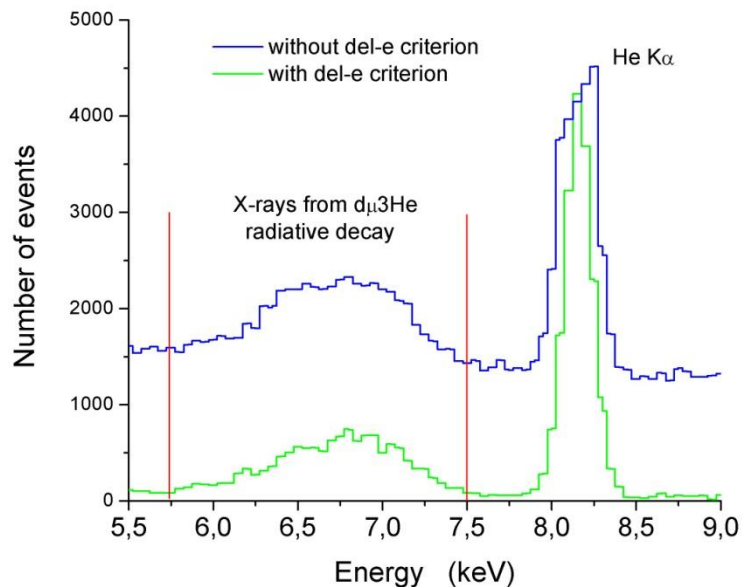
Rozkłady energetyczne zarejestrowanych protonów (a) i deuteronów (b)

Wychwył mionu – szybkości różniczkowe



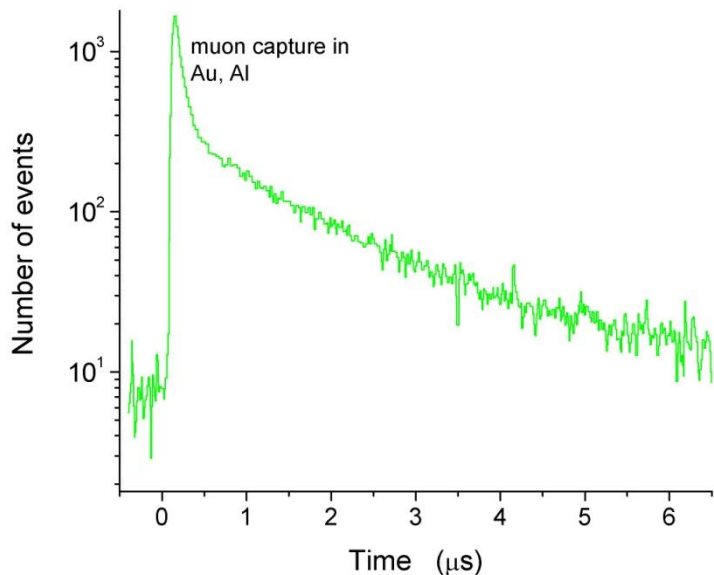
Wniosek: zgodność z istniejącymi danymi pomiarowymi i teorią oprócz części wysokoenergetycznej (ponad 40 eV dla protonów i ponad 28 eV dla deuteronów)

Szybkość tworzenia molekuły $d\mu^3\text{He}$

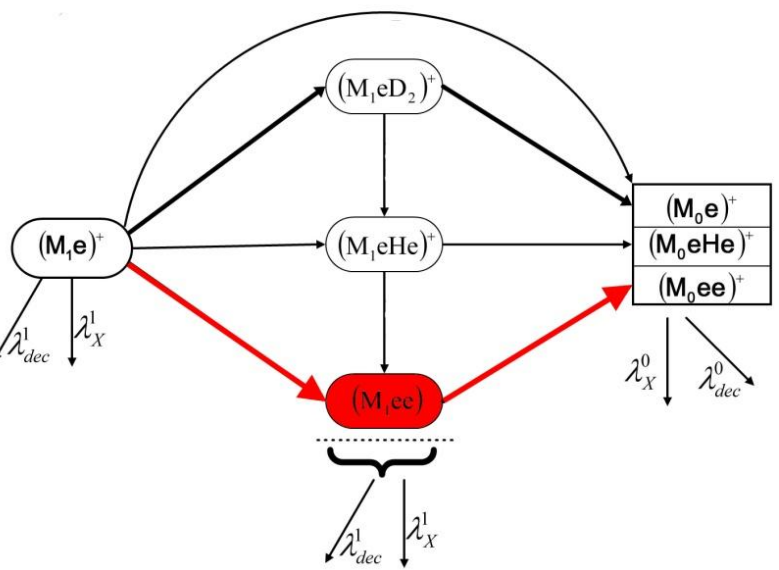
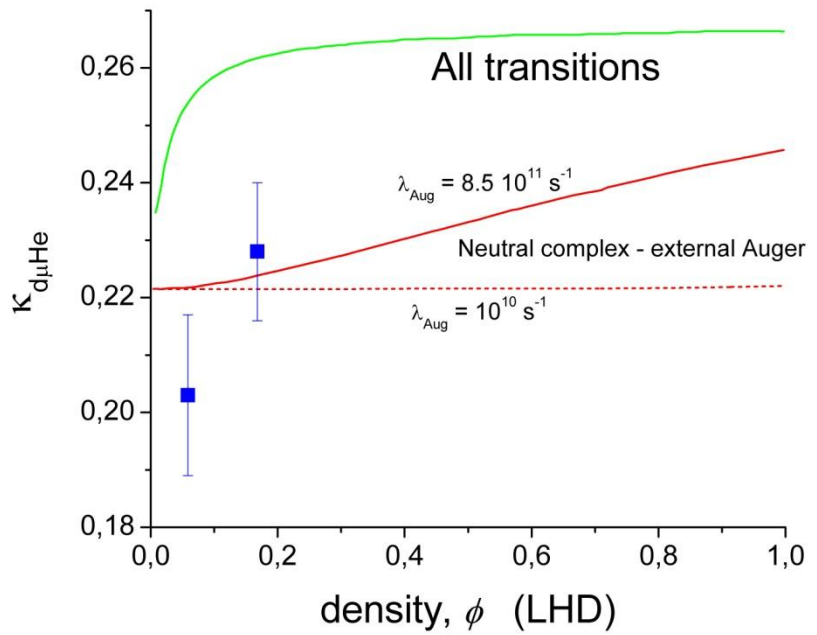
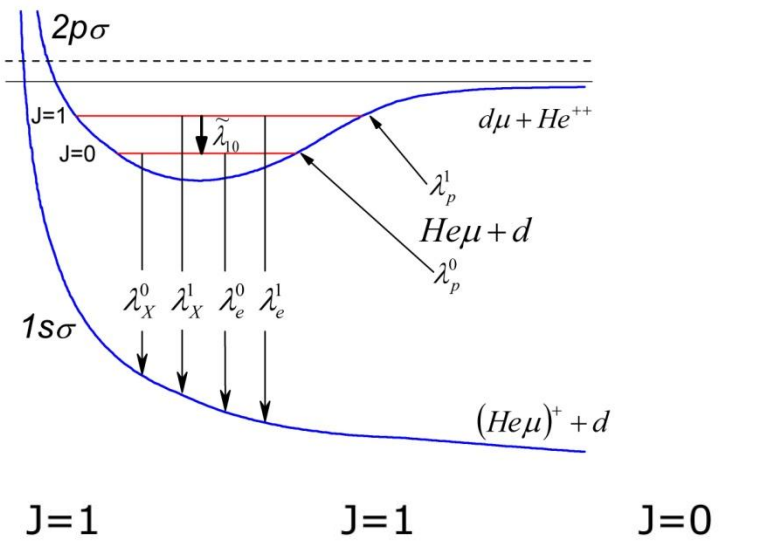


Otrzymana wartość:
 $(2.42 \pm 0.20) \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$

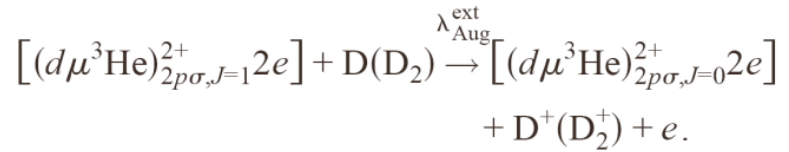
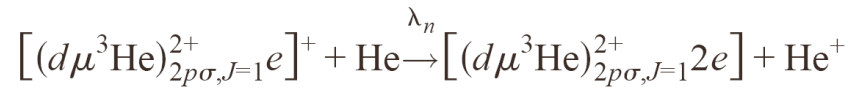
Inne wartości:
 $(2.32 \pm 0.09) \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ Maev et al.
 $(1.86 \pm 0.08) \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ Gartner et al.



Przejście rotacyjne 1 → 0

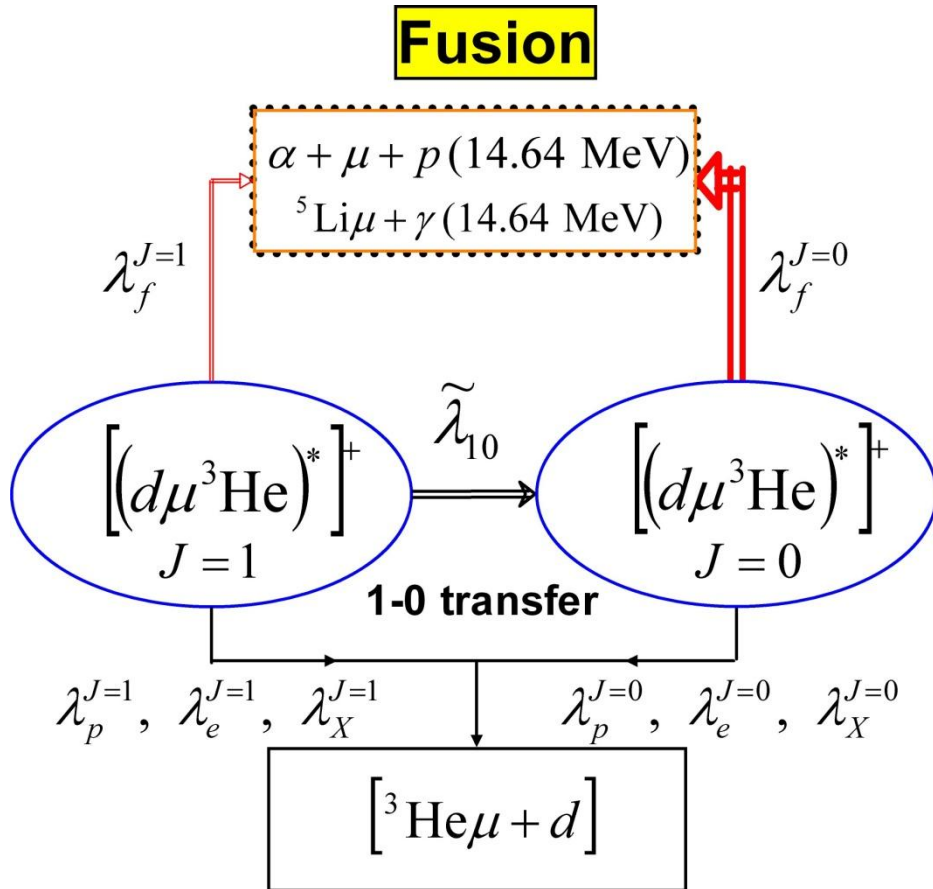


Być może do wyjaśnienia charakteru przejścia 1 → 0 wystarczy przyjęcie procesu tworzenia neutralnego kompleksu i jego deekscytacja w wyniku zewnętrznego przejścia Augera.



Szereg hipotez: zderzenia z molekułami deuteru i atomami helu, zderzenia potrójne, itp. Brak eksperymentalnych szybkości.

Synteza jądrowa



Rejestracja protonów

Zastosowanie kryterium del-e

(elektron z rozpadu mionu jest rejestrowany po pewnym czasie od rejestracji produktów syntezy co wyklucza protony z wychwytu)

Zastosowanie 'okien czasowych'

Dla określenia parcjalnych szybkości syntezy ze stanów $J=1$ i $J=0$ wymagana jest znajomość mechanizmów przejścia $1 \rightarrow 0$

Wyznaczanie szybkości syntezy jądowej

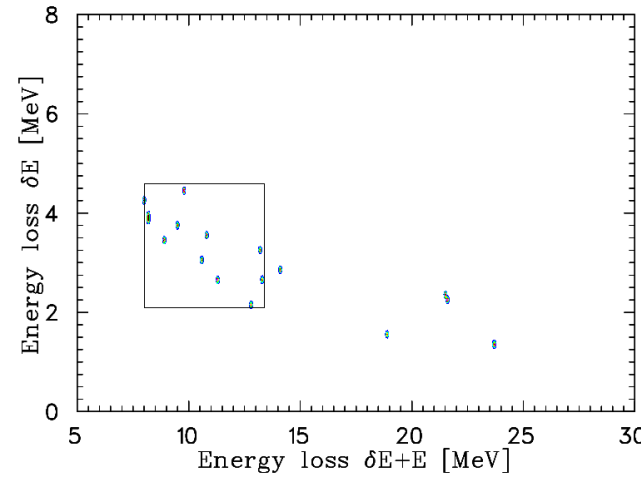
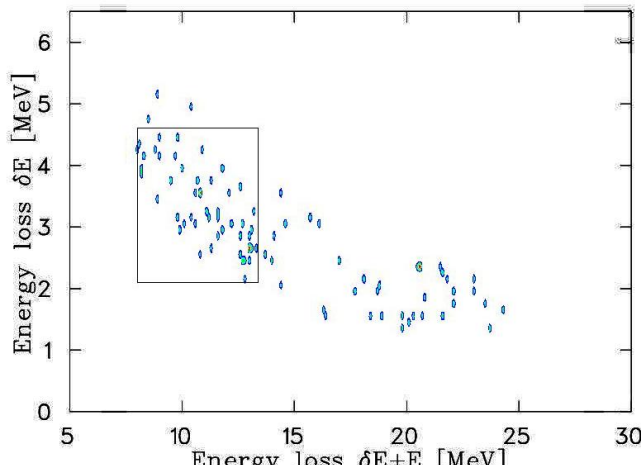
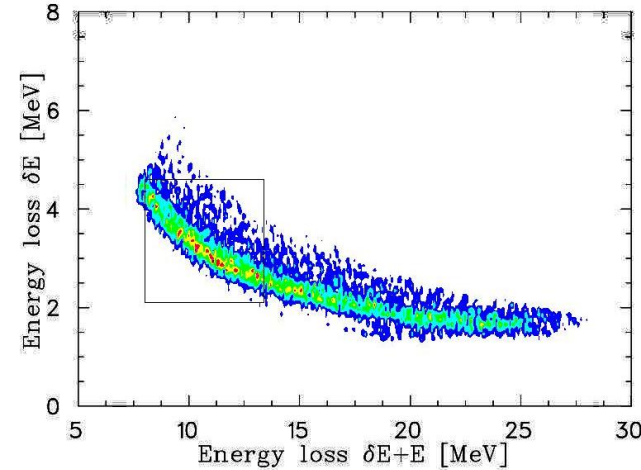
- Zarejestrowane protony
- Wyznaczenie metodą Monte-Carlo obszaru poszukiwanych zdarzeń

- zastosowanie kryterium *del-e*
- Symulacja Monte-Carlo rozkładów rejestrowanych protonów z syntezy

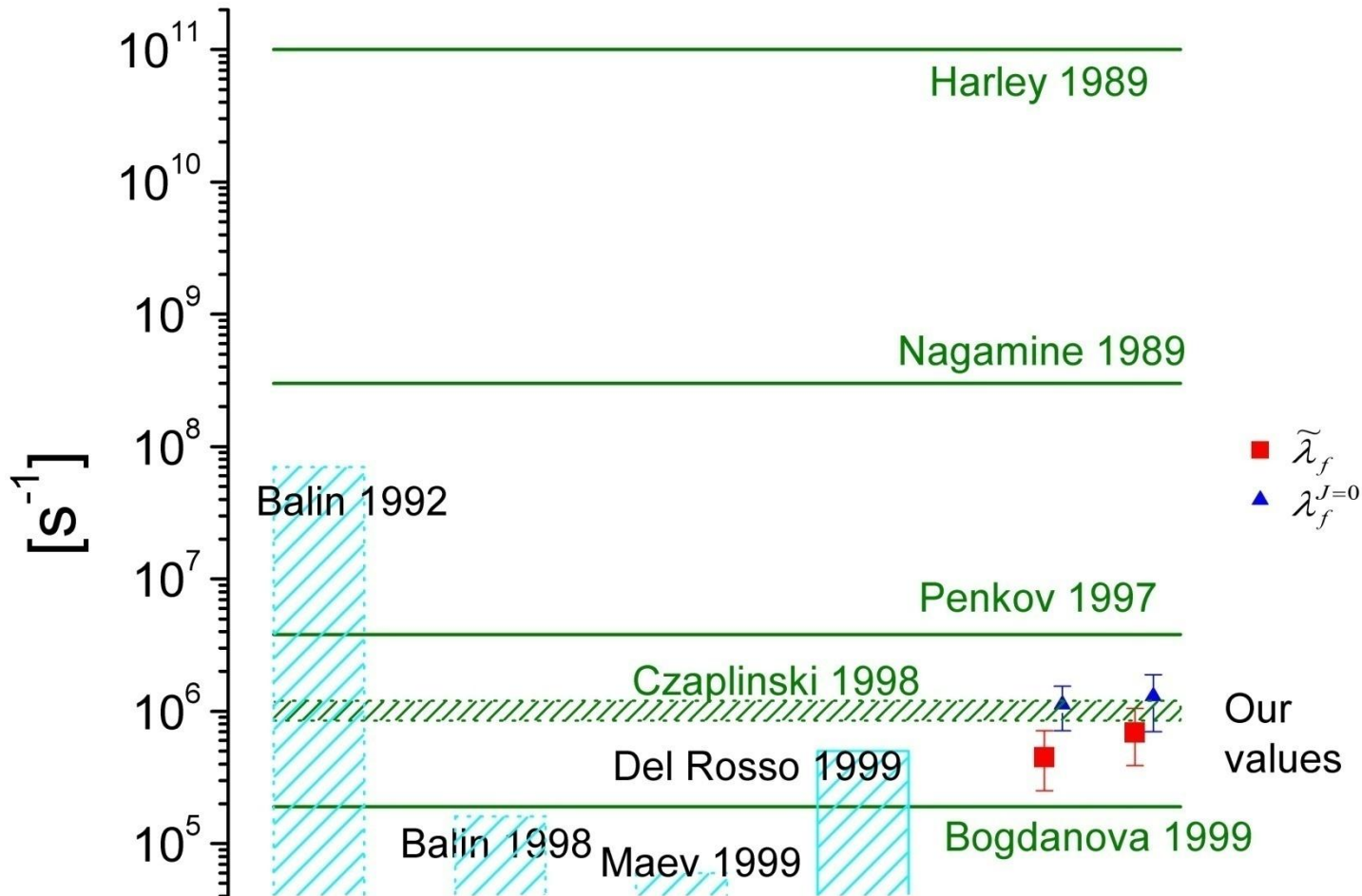
- przedział czasowy 0.4 – 1.2 μ s
- Wyznaczenie liczby zarejestrowanych protonów

Wyznaczanie tła: eksperymenty w czystym helu 3 i 4 oraz deuterze

V.M. Bystritsky et al. „Study of the nuclear fusion in a muonic $d\mu^3\text{He}$ complex”,
Eur. Phys. J. D38(2006)455-470



Podsumowanie: szybkość syntezy jądrowej

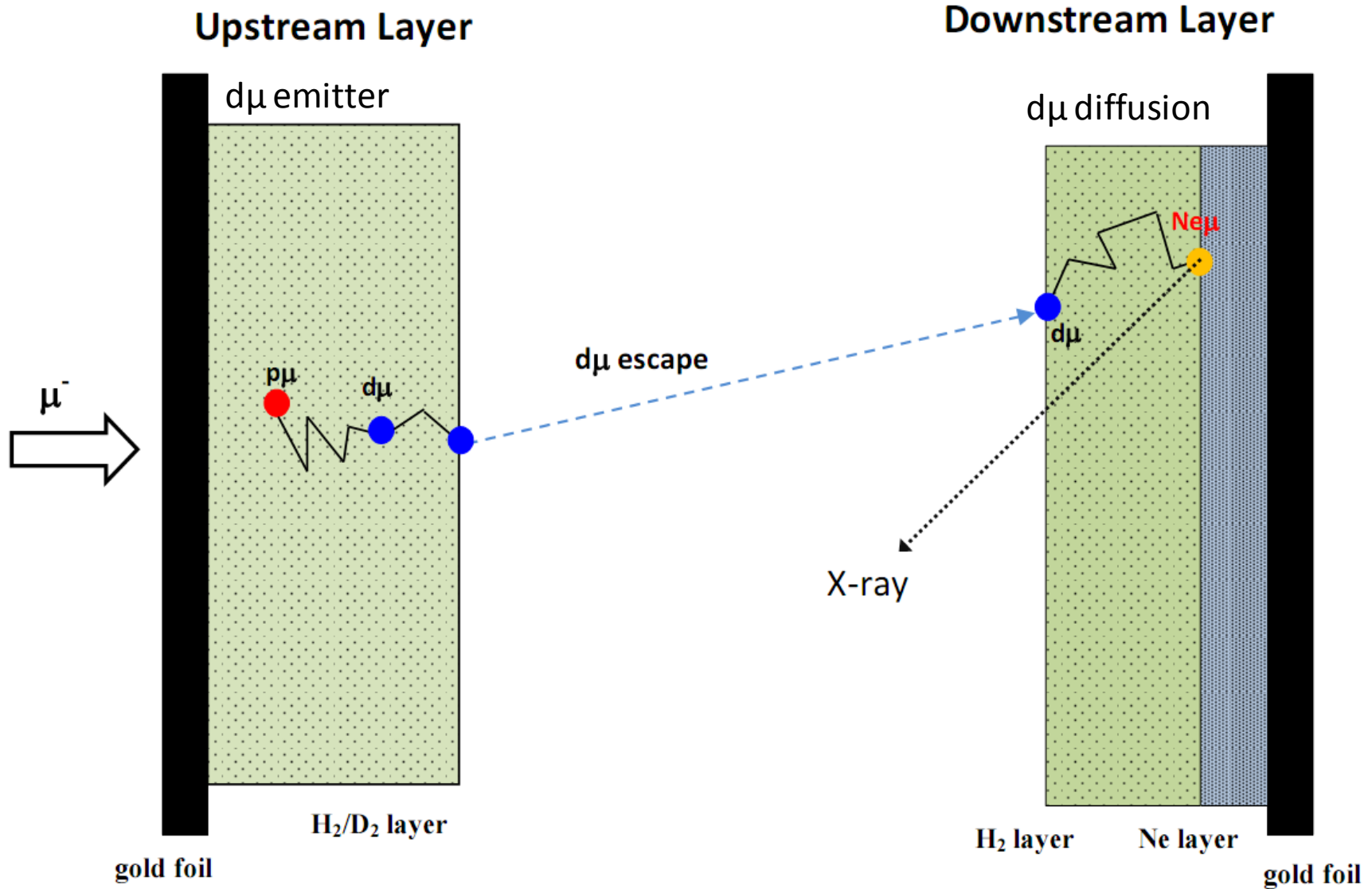


Badanie procesów w zestalonych izotopach wodoru

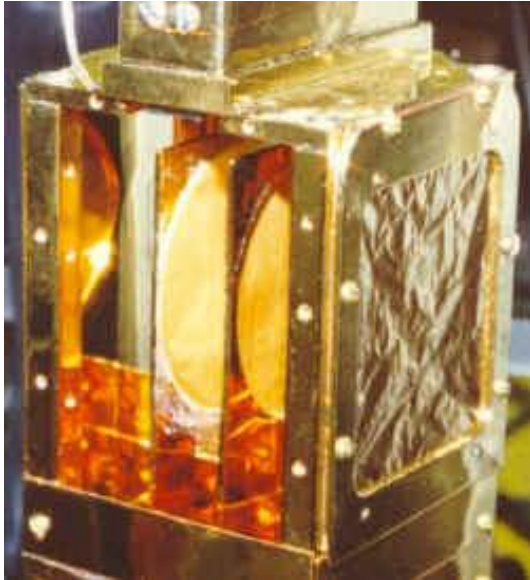
Zespół badawczy

- TRIUMF, Canada
- JINR, Dubna, Russia
- University of Fribourg Switzerland,
- University of British Columbia (Canada),
- PSI (Switzerland),
- University of Victoria (Canada),
- University of Science and Technology (Poland),
- Gustavus Adolphus College (USA),
- University of California Berkeley (USA),
- Institute for Medium Energy Physics(Wien, Austria)
- Institute of Nuclear Physics (Poland)

Idea metody czasu przelotu (TOF)

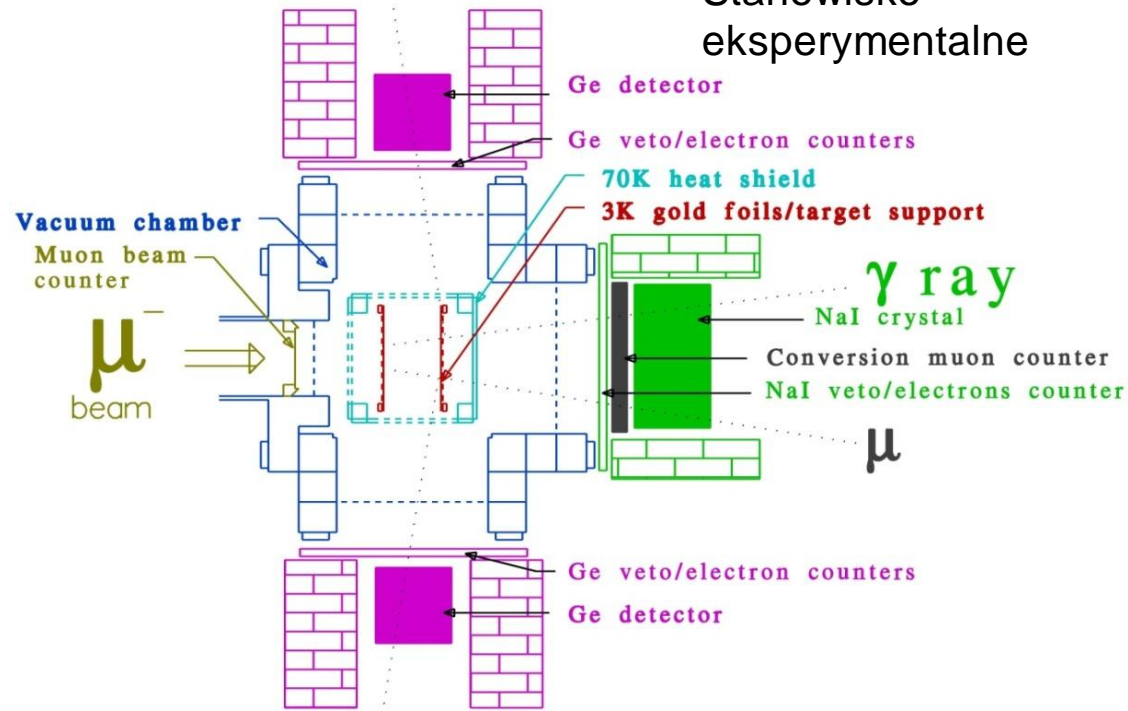


Widok tarczy



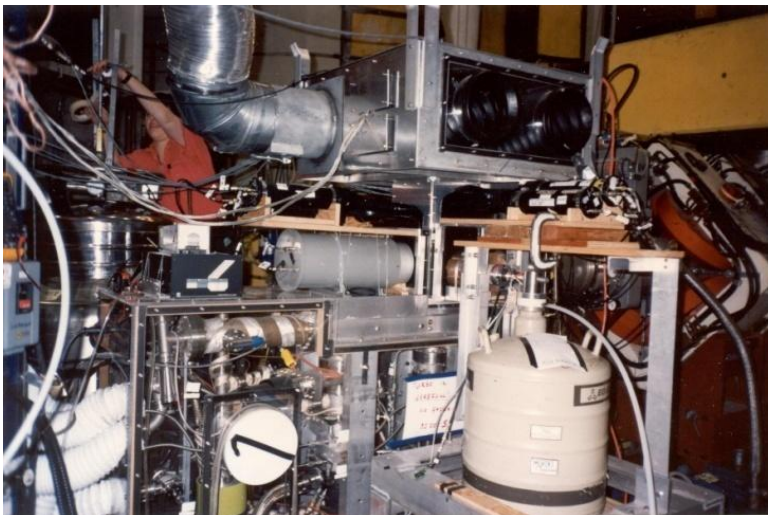
x ray

Stanowisko
eksperymentalne

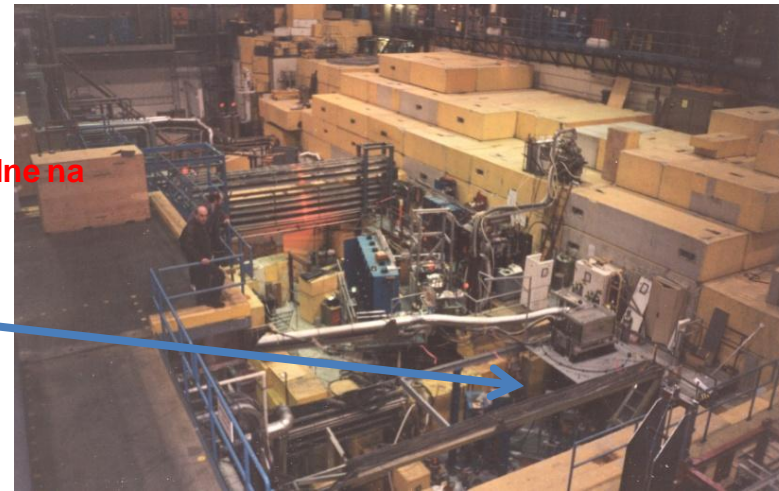


x ray

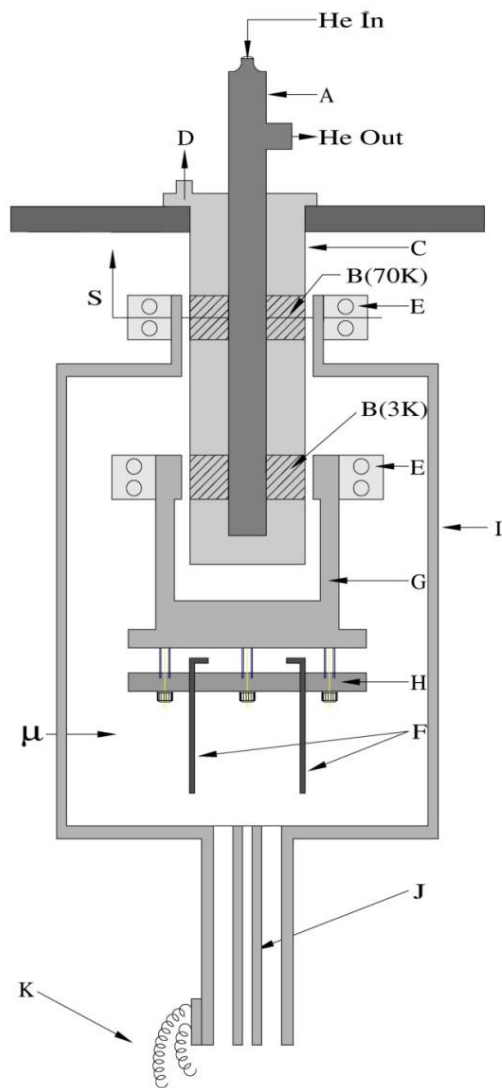
„Meson Hall” w TRIUMF-ie



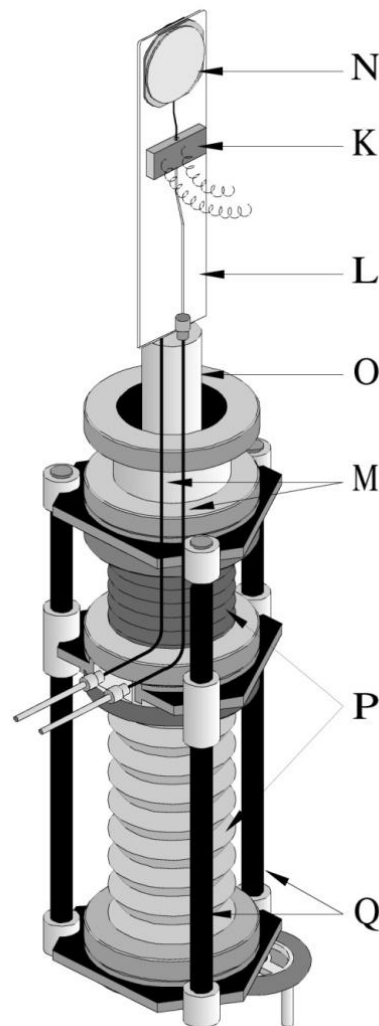
Stanowisko
eksperymentalne na
kanale M20B



Kriostat i dyfuzor

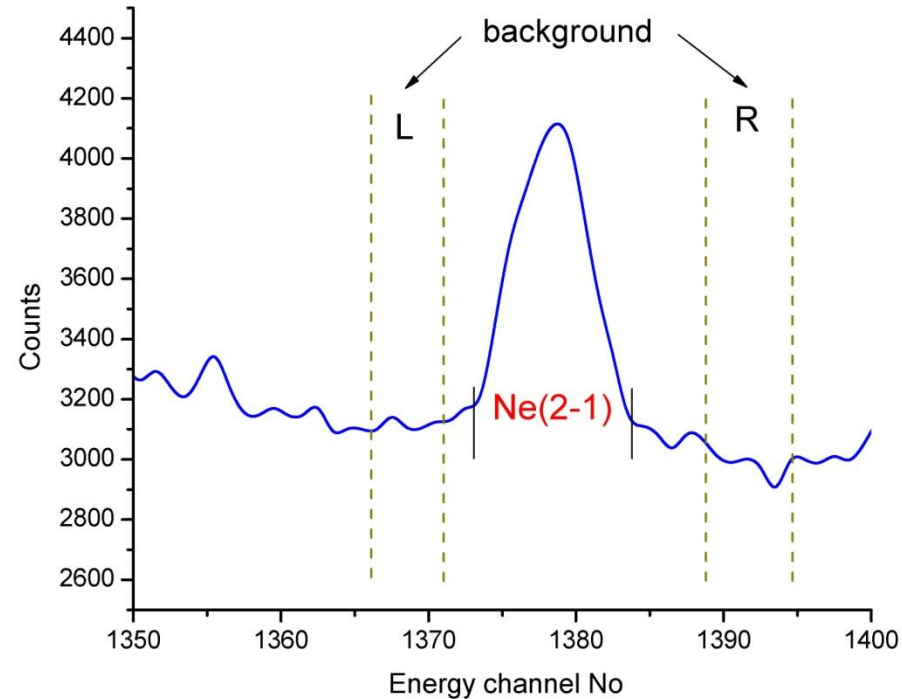
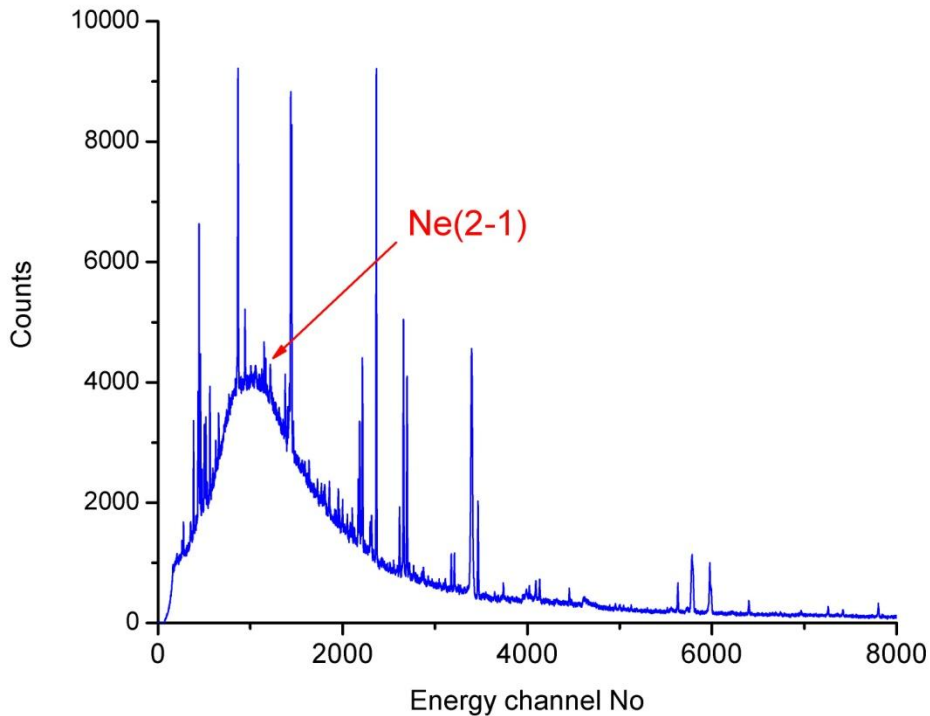


A – kriostat,
 B – wymienniki ciepła
 (cylindry miedziane),
 C – osłona,
 D – do układu
 awaryjnego usuwania
 trytu,
 E – zaciski,
 F – folie do napyłania
 tarczy (połączane),
 G – element
 utrzymywany w
 temperaturze 3K,
 H – zaciski
 przesuwane,
 I – osłona cieplna,
 J – przewodnice
 dyfuzora,
 K – połączenia do
 układu chłodzenia
 dyfuzora



K – połączenia do układu
 chłodzenia dyfuzora
 L – wspornik dyfuzora
 M – przewody z gazem
 N – komora dyfuzora
 O – osłony mechaniczne
 P, Q – przewodnice

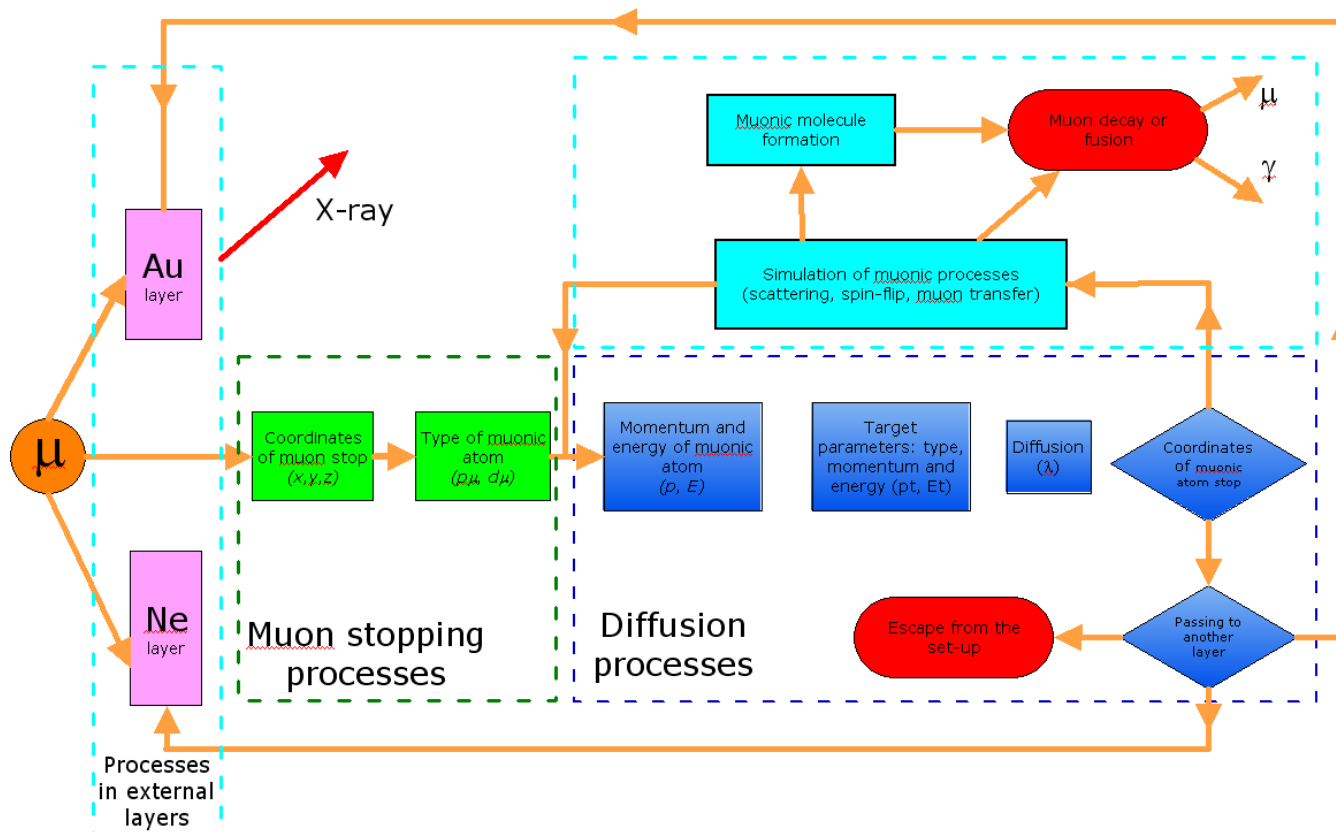
Metoda badawcza: obserwacje promieniowania X oraz (μ , γ , e)



Rejestracja promieniowania X: linia z kaskady w mionowym neonie $2p \rightarrow 1s$ o energii 207 keV .

Dwa detektory germanowe (ok. 100 cm^3).

... i symulacje Monte-Carlo: procesów fizycznych dla danej geometrii eksperymentu

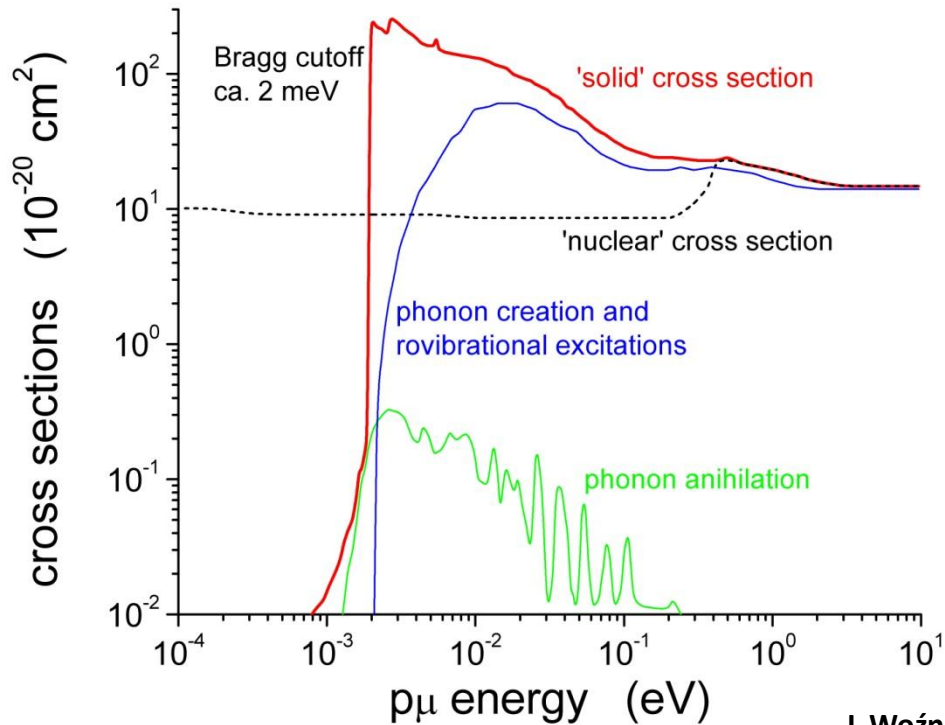
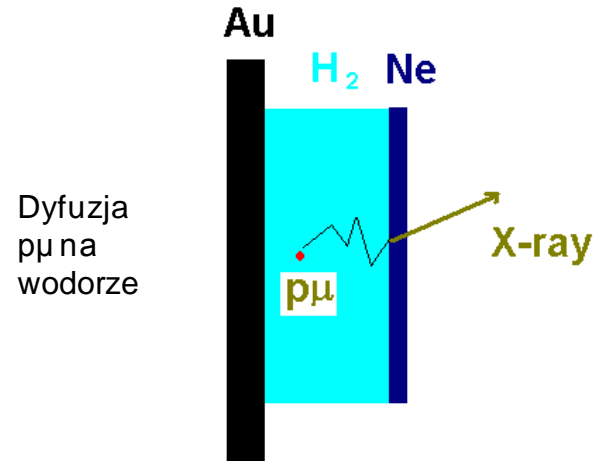
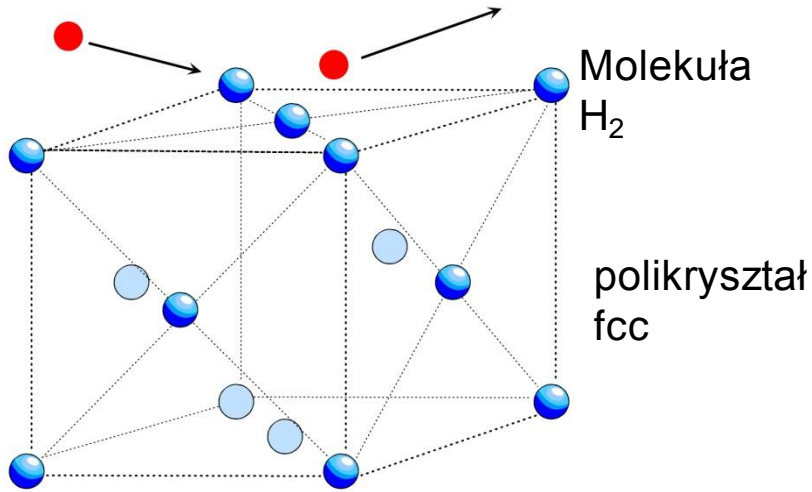


J. Woźniak et al.
„Study of muonic hydrogen transport in TRIUMF experiment 742 by the Monte Carlo method”,
Hyperfine Interactions
101/102(1996)573-582

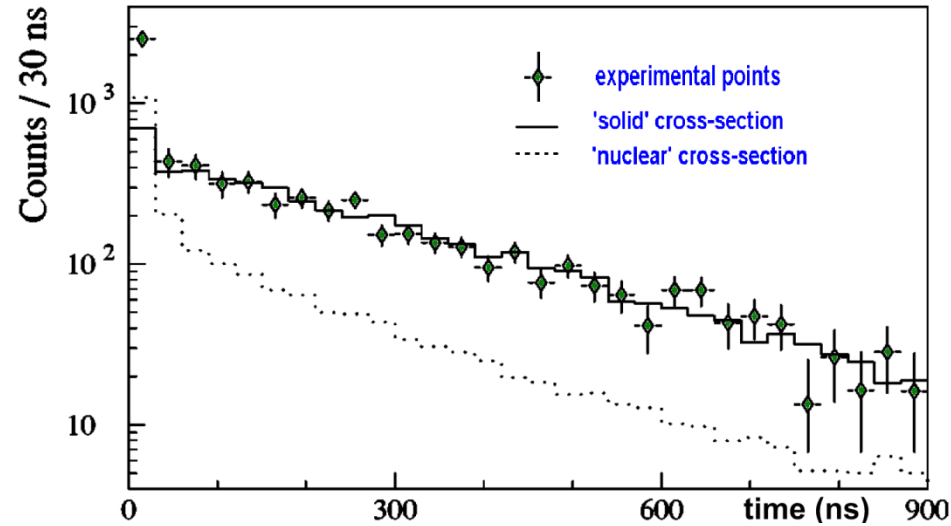
Symulowane procesy:

Zatrzymanie mionów w tarczy, dyfuzji atomów mionowych w warstwie H/D (H/T), zjawiska MCF zachodzące podczas dyfuzji atomów mionowych, emisji promieniowania X, emisji kwantów γ i mionów konwersji z syntezy w $pd\mu$ dla geometrii eksperymentu.

Rozpraszanie atomów mionowych



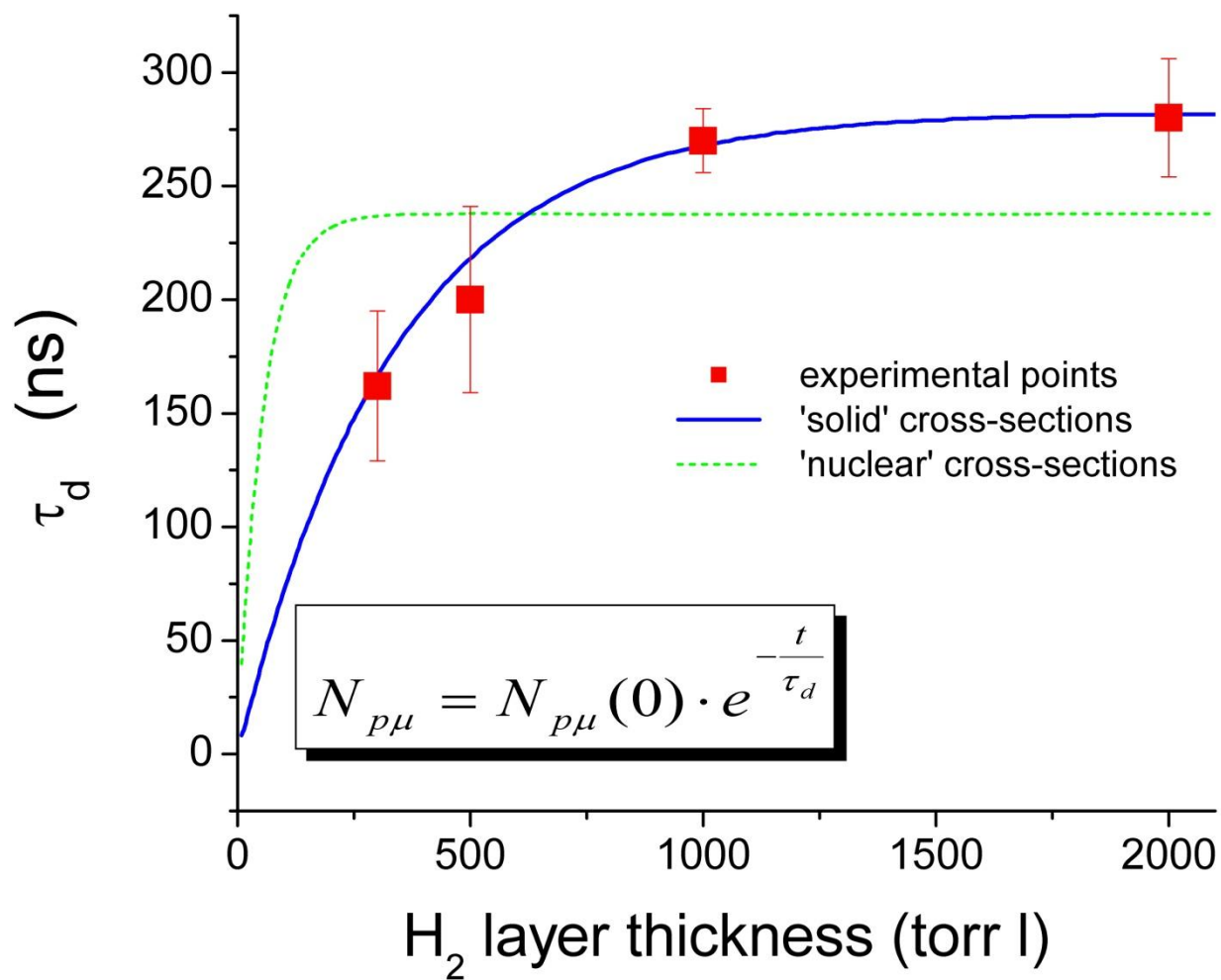
Użycie pojedynczej warstwy



Widmo X z przechwytu mionu z $p\mu$ do neonu

J. Woźniak et al. „Scattering of $p\mu$ muonic atoms in solid hydrogen”, Phys. Rev. A68(2003)062502

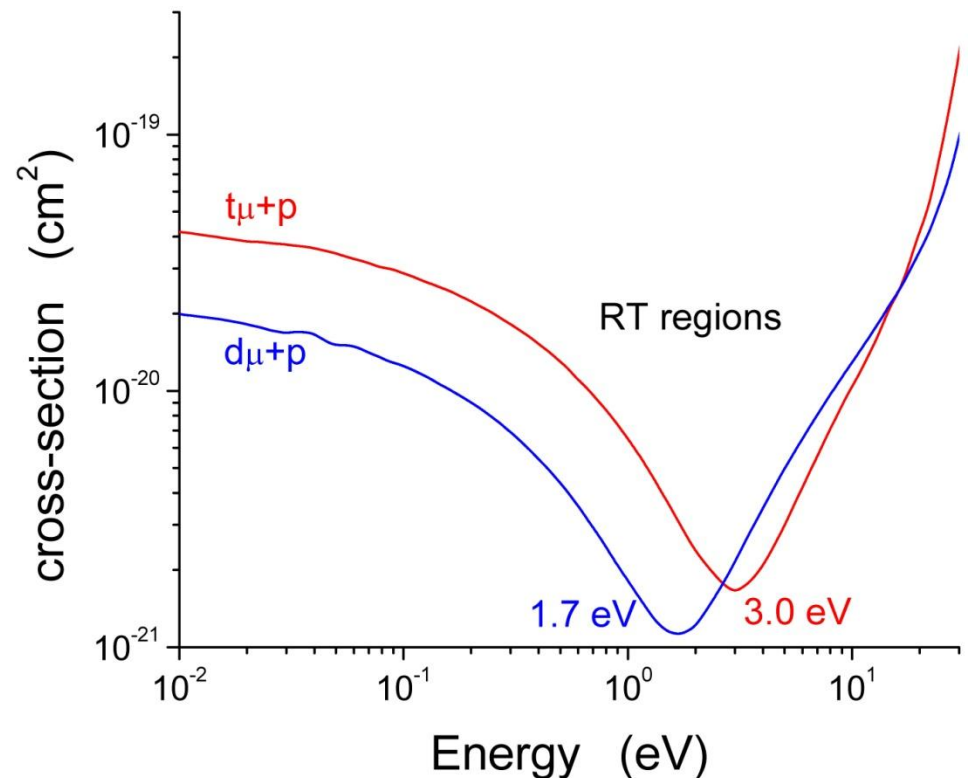
Zależność czasu dyfuzji od grubości warstwy H₂



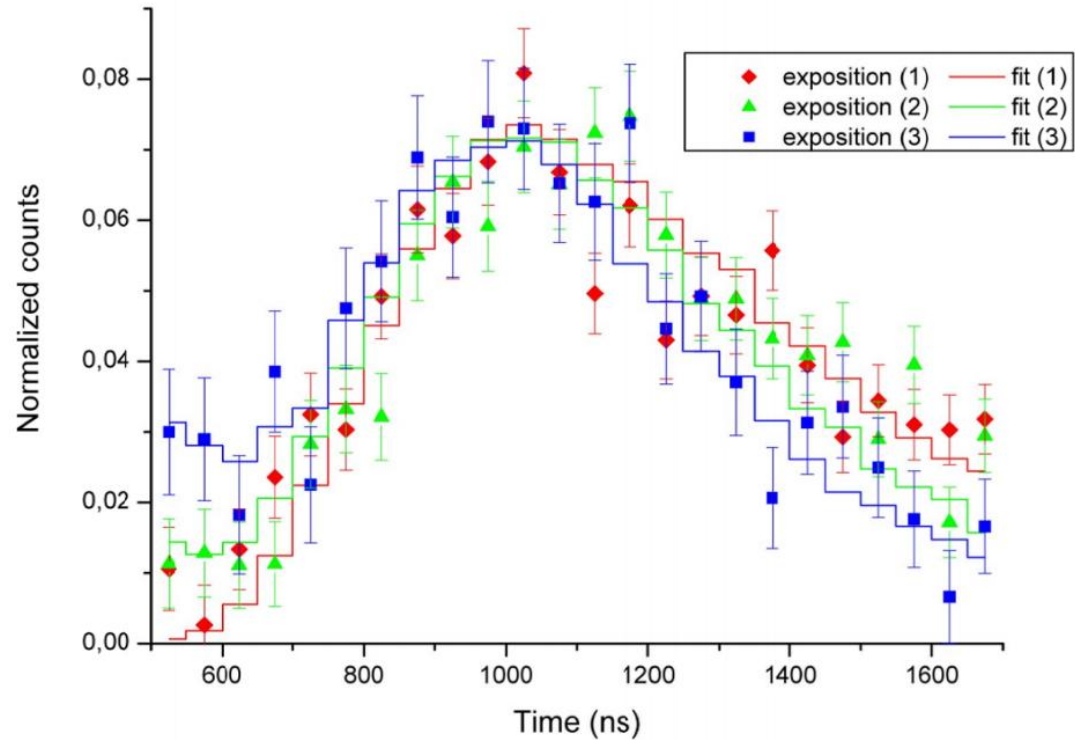
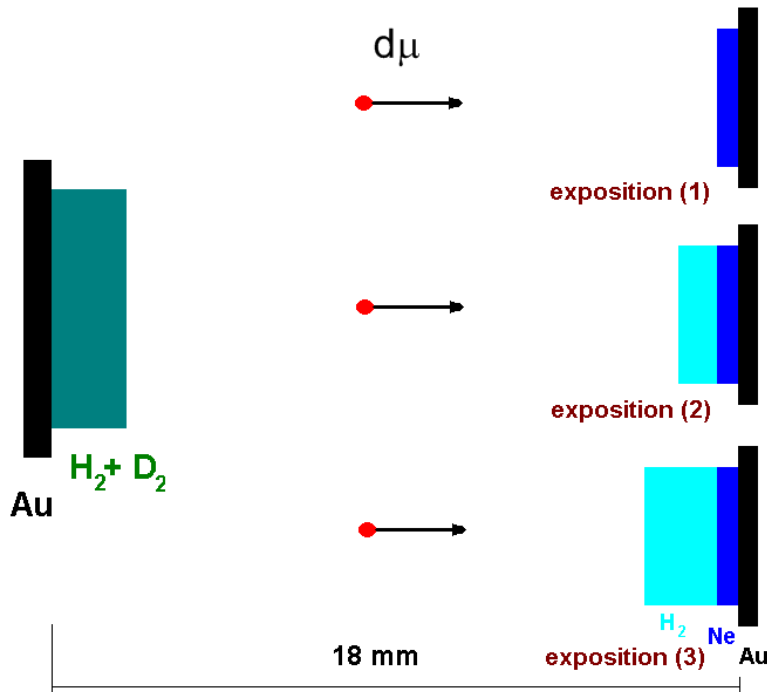
Efekt Ramsaurea-Townsenda

- W latach 20-tych zaobserwowano, że przekrój czynny na rozpraszanie elektronów na atomach gazów szlachetnych posiada minimum dla pewnej energii elektronów.
- Efekt kwantowo-mechaniczny, fizyka klasyczna nie przewiduje występowanie takiego minimum. Dokładne obliczenie wartości energii w minimum może być obarczone pewnymi niepewnościami z powodu konieczności uwzględnienia relatywistycznej wymiany elektronu i polaryzacji spinu.

Obliczenia teoretyczne: **Występuje dla elastycznego rozpraszania atomów mionowych**

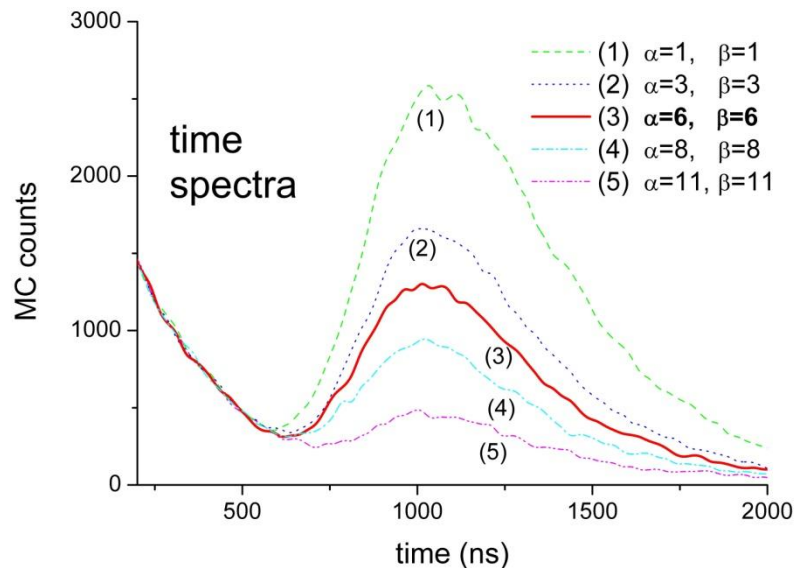
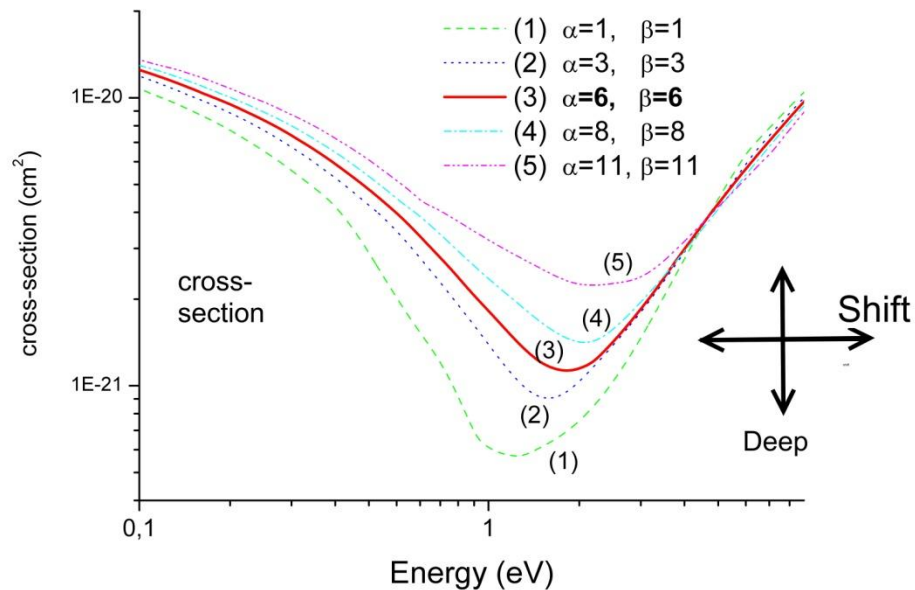
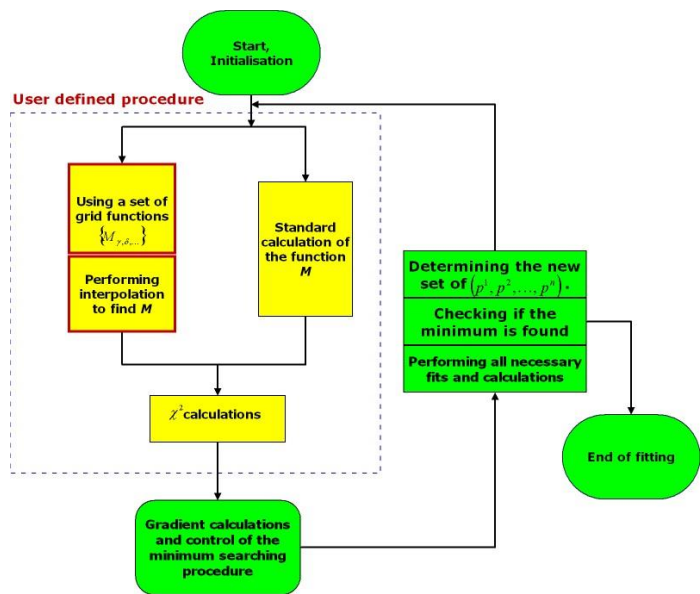


Pomiary



Dla małych czasów (< ok. 500 ns dla ekspozycji 2 i 3) widoczny efekt od niskoenergetycznych $p\mu$ tworzonych w H_2 przez miony wiązki. Te $p\mu$ docierają do Ne dzięki efektowi przedstawionemu poprzednio

Analiza danych pomiarowych



Procedura dopasowywania danych

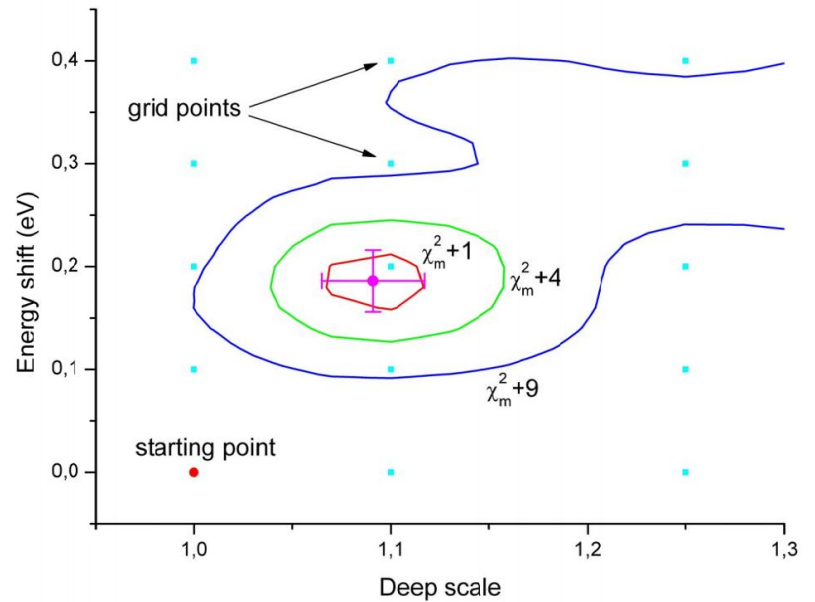
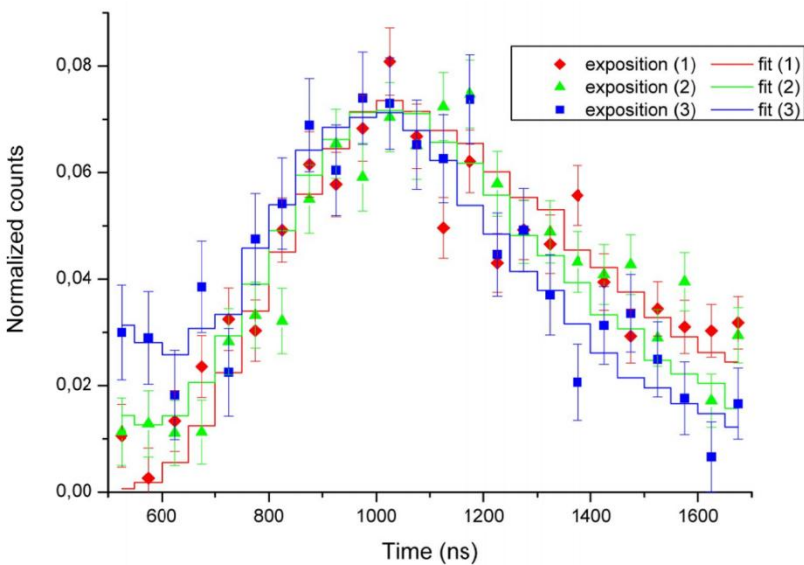
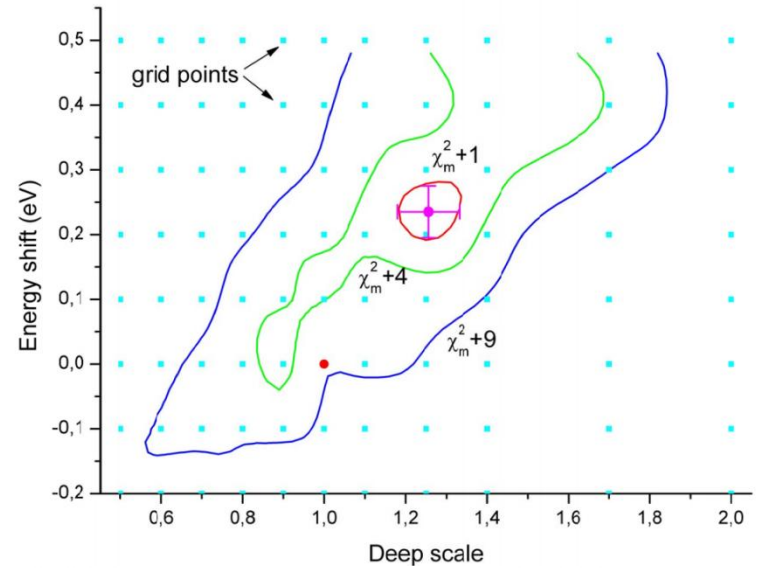
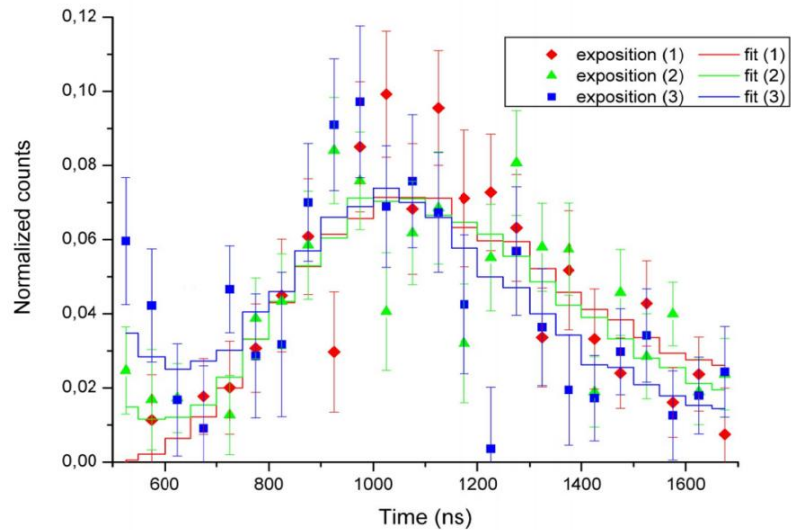
Parametryzacja przekrojów czynnych:

$$\sigma_{\alpha,\beta}(\Delta E, s).$$

Generacja widm Monte-Carlo dla tak sparymetryzowanych przekrojów:

$$M_{\alpha,\beta}(\Delta E, s).$$

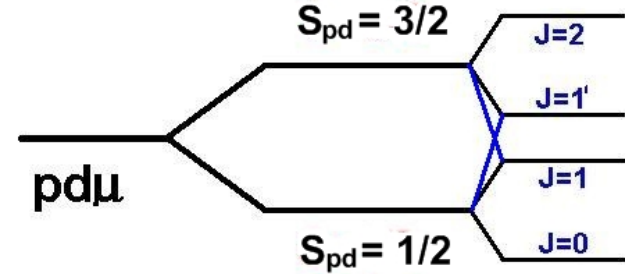
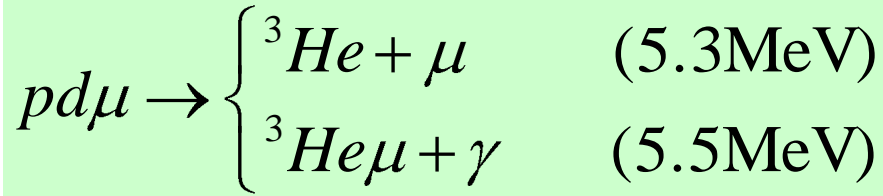
Wyniki analizy



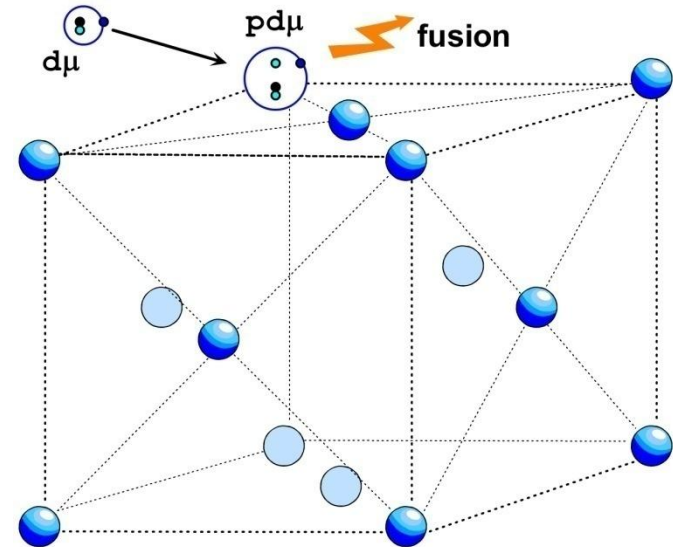
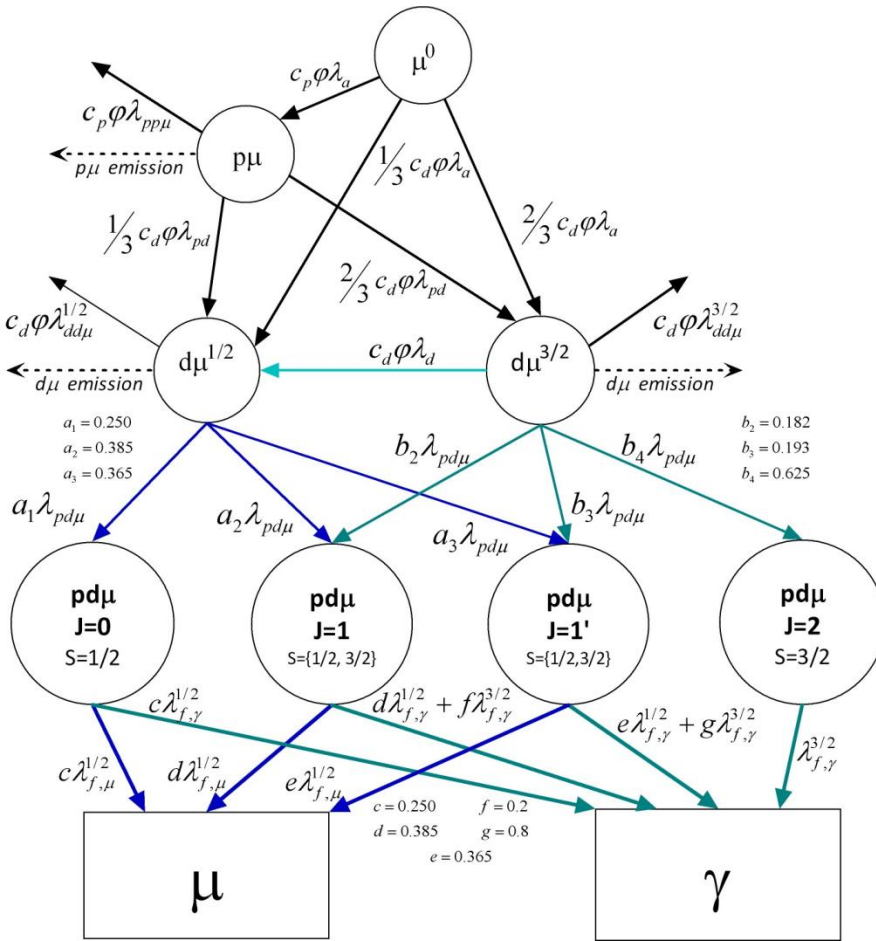
Efekt RT: wnioski

- Wynik eksperymentu to pierwsze doświadczalne potwierdzenie występowania efektu RT dla atomów mionowych
- Zmierzono:
 - przesunięcie $\Delta E = 0.17 \pm 0.13$ eV (deuter) i
 $\Delta E = -0.25 \pm 0.23$ eV (tryt)
 - głębokość $s = 1.10 \pm 0.18$ (deuter) i
 $s = 1.22 \pm 0.11$ (tryt)

Synteza jądrowa w molekułe $pd\mu$



Dwa stany spinowe jądrowe S
Cztery stany spinowe J



Obserwacja promieniowania γ i μ

Pomiary w układzie pojedynczej warstwy.

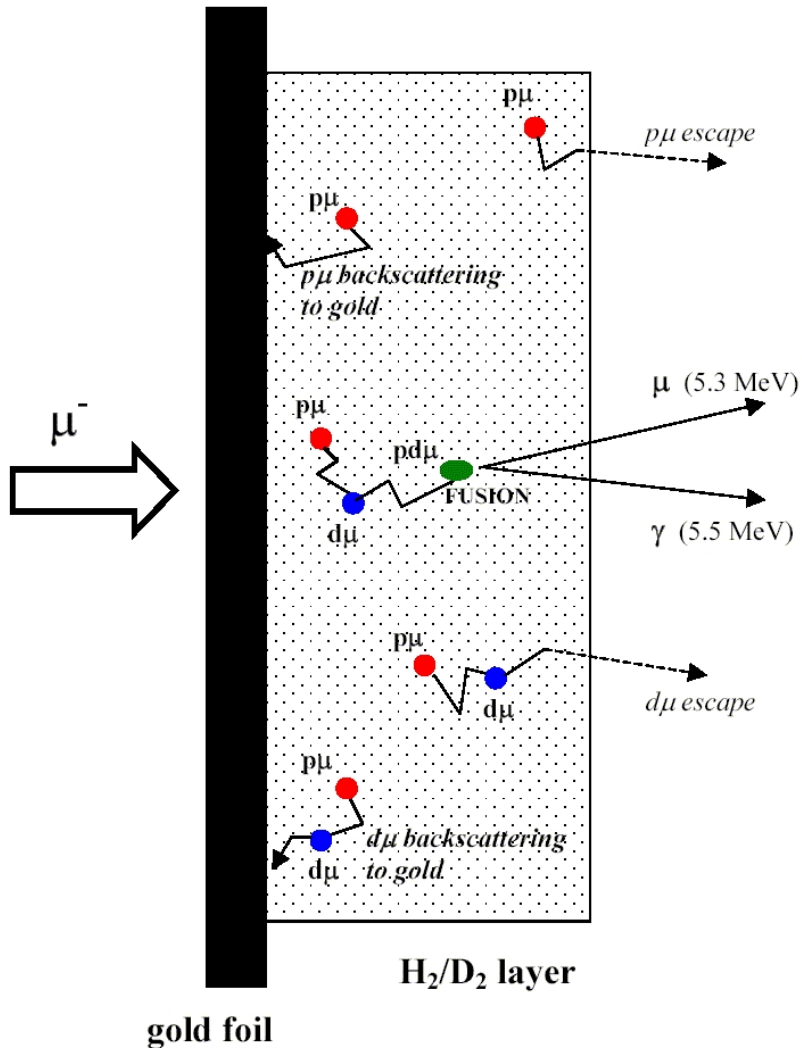
Cztery koncentracje deuteru:

- 0.05%
- 2 %
- 15 %
- 75 %

• Detekcja mionów konwersji (5.3 MeV) - scyntylatory plastikowe

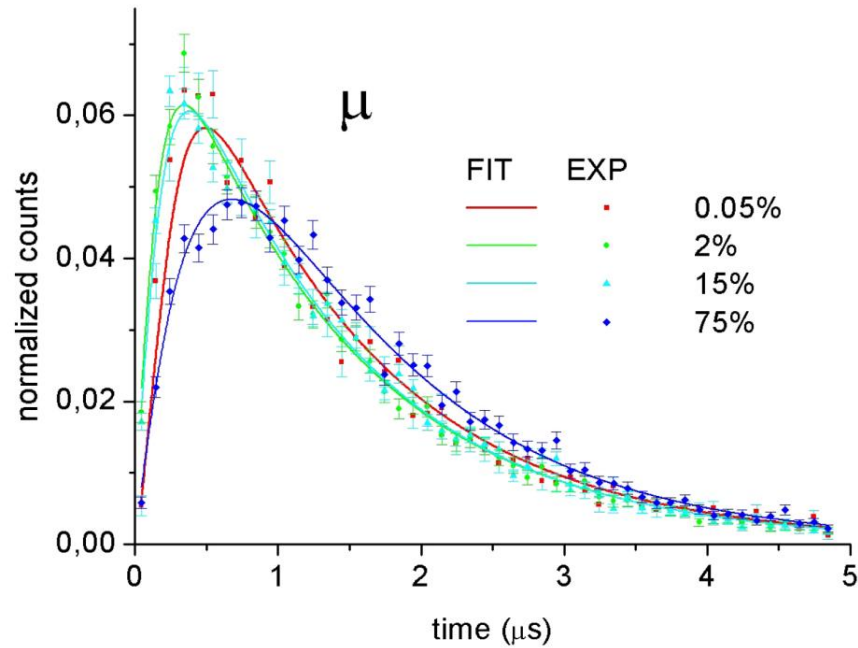
• Detekcja kwantów gamma: NaI(Tl), umieszczony na kierunku wiązki mionów (tło elektronowe z rozpadu mionów)

• Koincydencja z elektronami rozpadu mionów

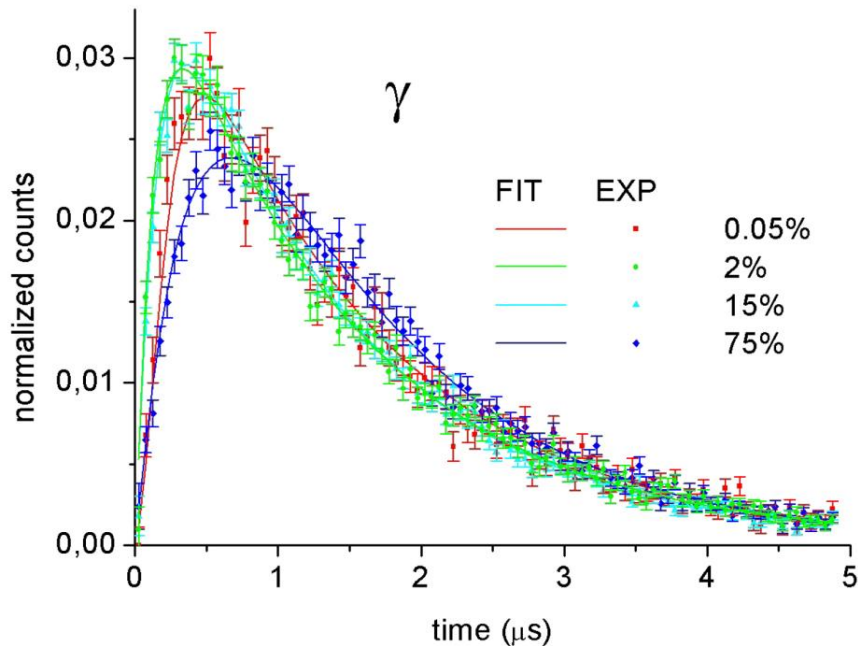


M. Filipowicz et al., „Measurements of $pd\mu$ fusion cycle parameters in the solid H/D mixture”, proceedings of International Conference, MCF07, Dubna, Russia, 2008

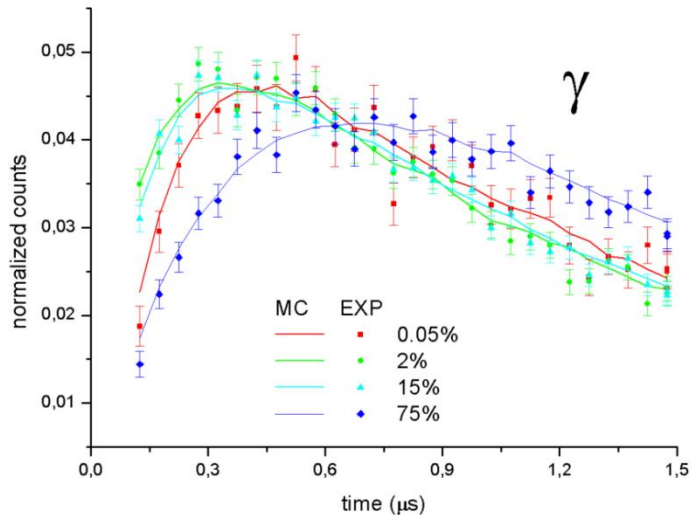
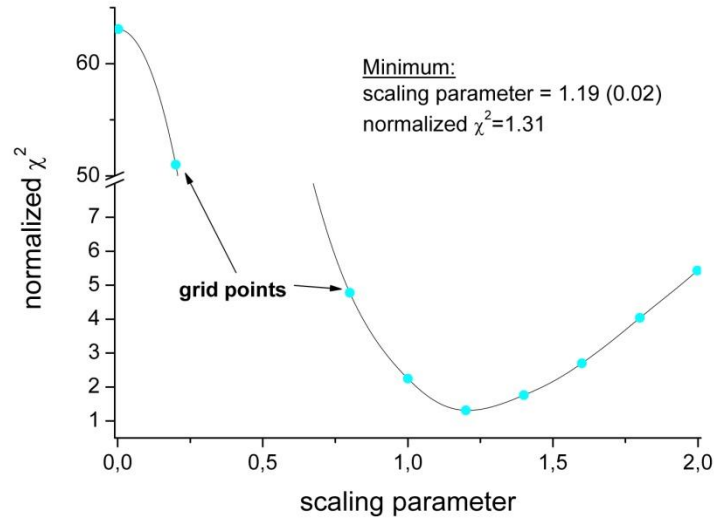
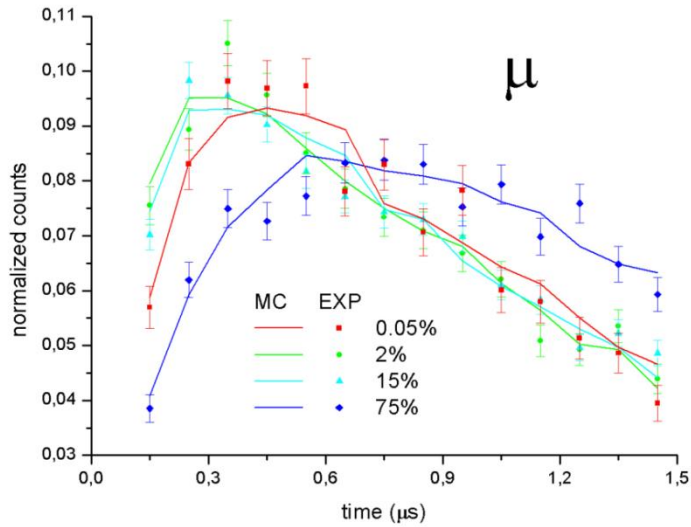
Analiza danych pomiarowych



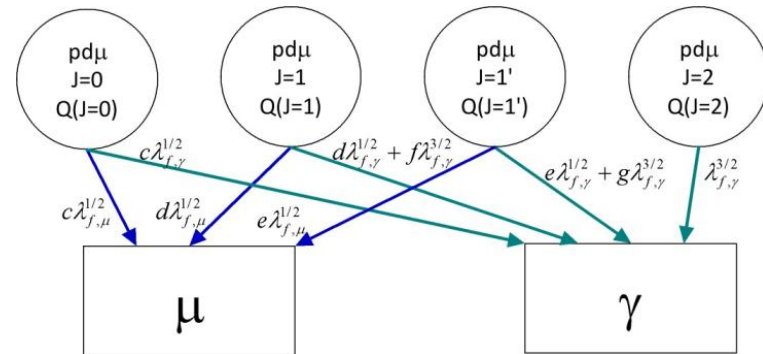
Metoda analityczna – rozwiązywanie równań różniczkowych i grafów kinetycznych



Metoda z użyciem Monte-Carlo: skalowanie jednym parametrem – wyznaczanie dla małych czasów szybkości tworzenia pdmu

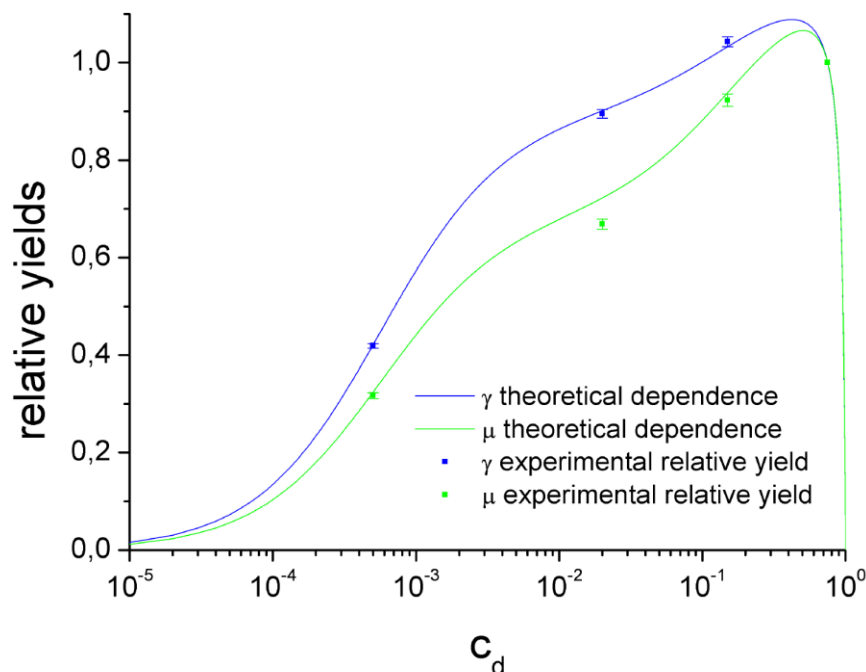


a następnie analityczne obliczenia dla grafu:

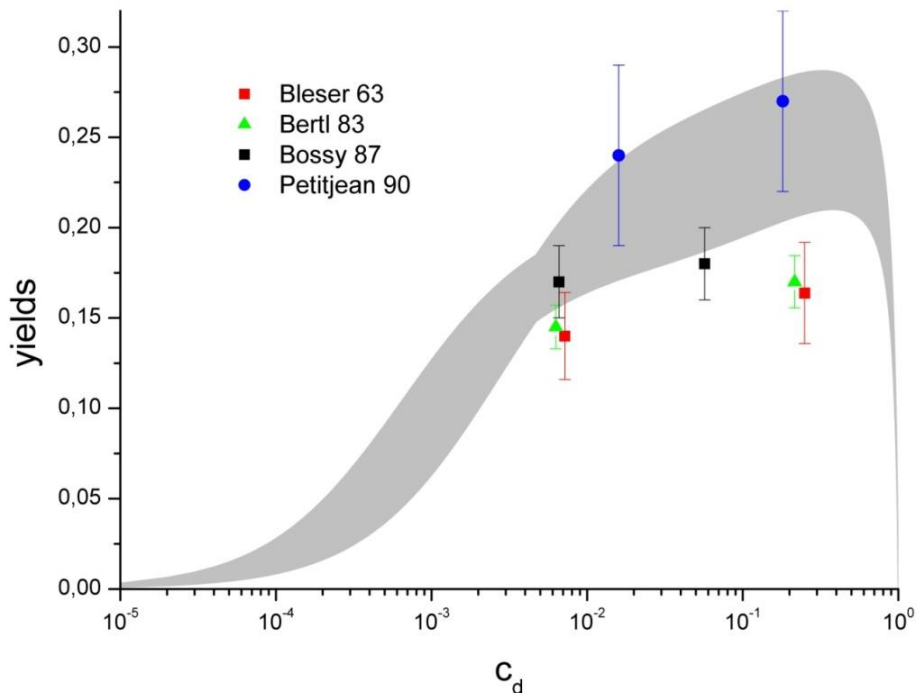


Obserwacja efektu Wolfenstaina-Gersteina

Obserwowane względne wydajności kwantów γ i mionów konwersji



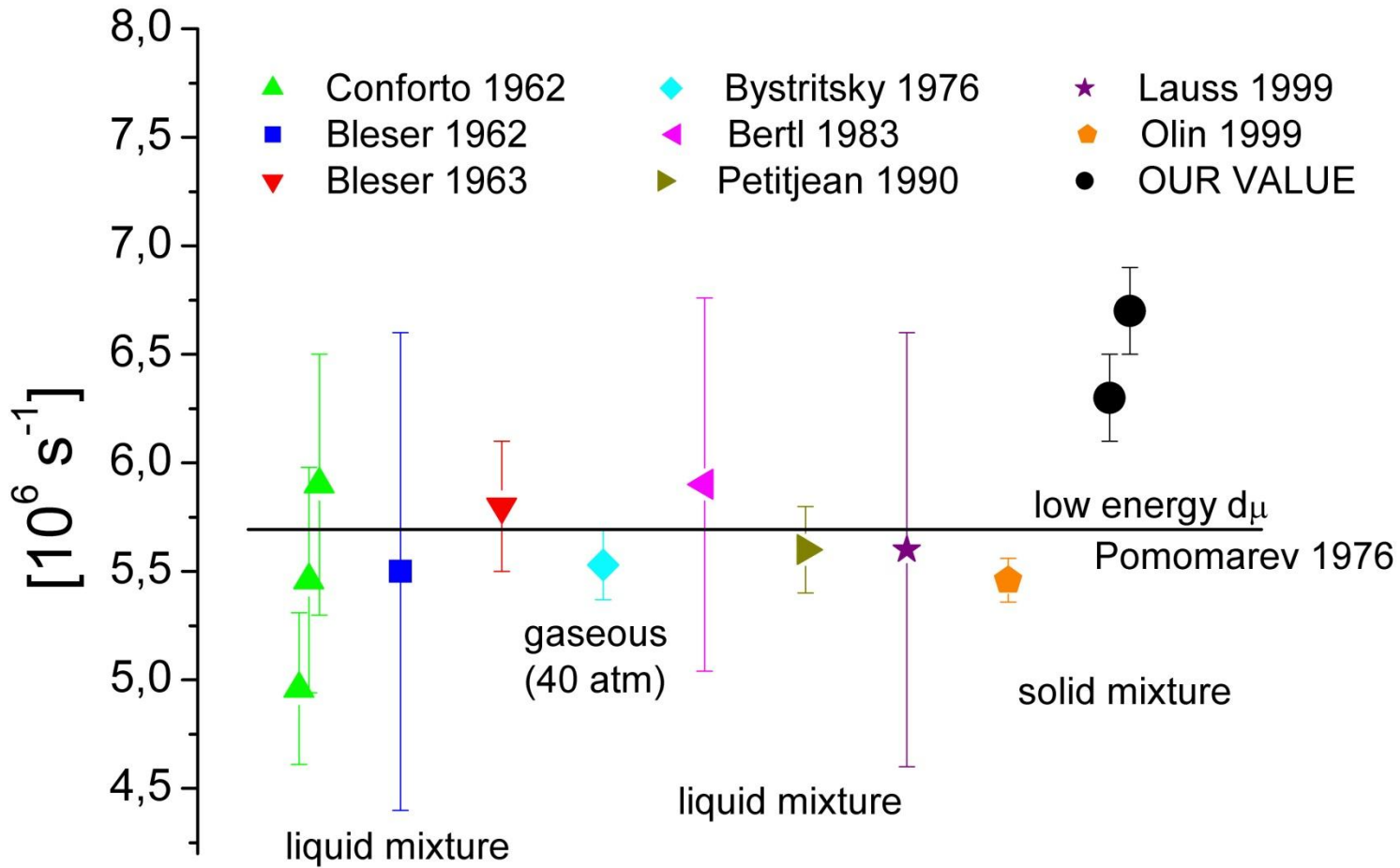
Bezwzględna wydajności kwantów γ



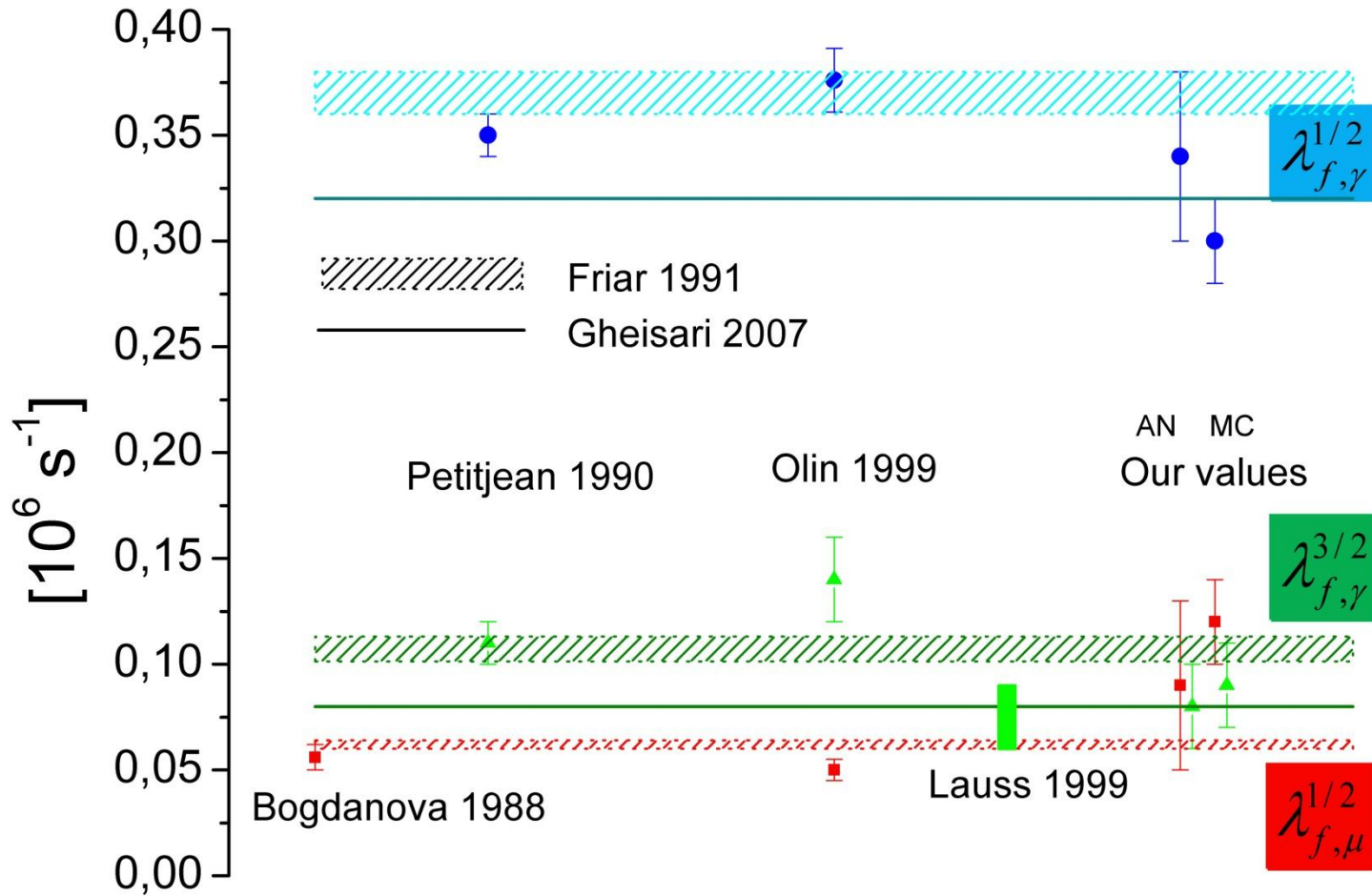
Szybkość syntezy jądrowej zwiększa się wraz ze wzrostem koncentracji deuteru, zmienia się też stosunek liczby kwantów gamma i mionów konwersji.

Wynika to z kinetyki katalizy w mieszaninie H/D: ze wzrostem koncentracji deuteru wzrasta populacja $d\mu$ o spinie $\frac{1}{2}$, co powoduje zmianę rozkładu J w tworzonych molekułach $p d\mu$

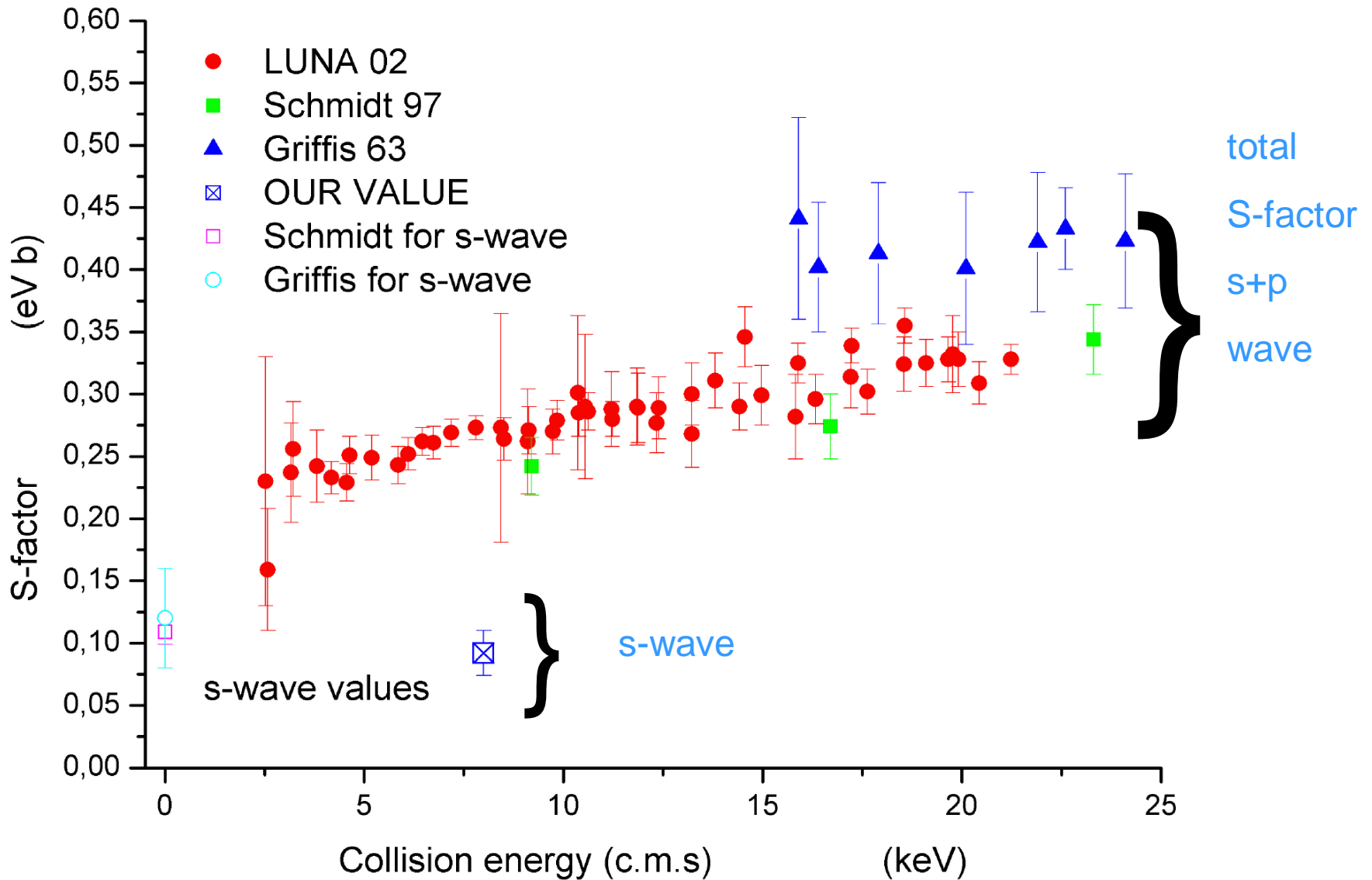
Wyniki: szybkość tworzenia molekuły



Wyniki: szybkość syntezy



S-factor determination



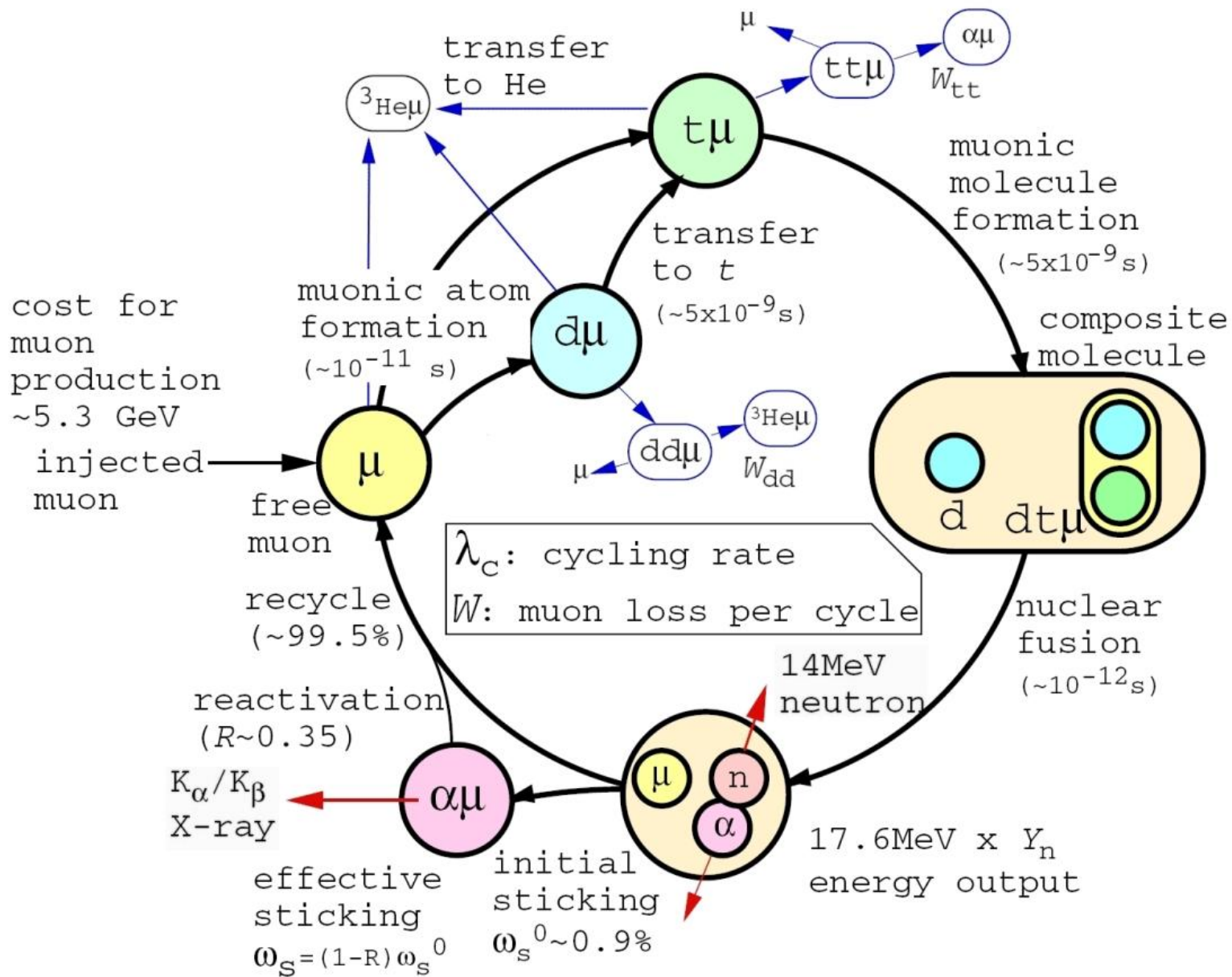
Podsumowanie

Wyniki eksperymentów przeprowadzonych w PSI i TRIUMF-ie pozwoliły na poszerzenie znajomości skomplikowanego schematu procesów μ -atomowych i μ -molekularnych zachodzących w gazowych mieszaninach deuteru i helu oraz zestalonych mieszaninach izotopów wodoru.

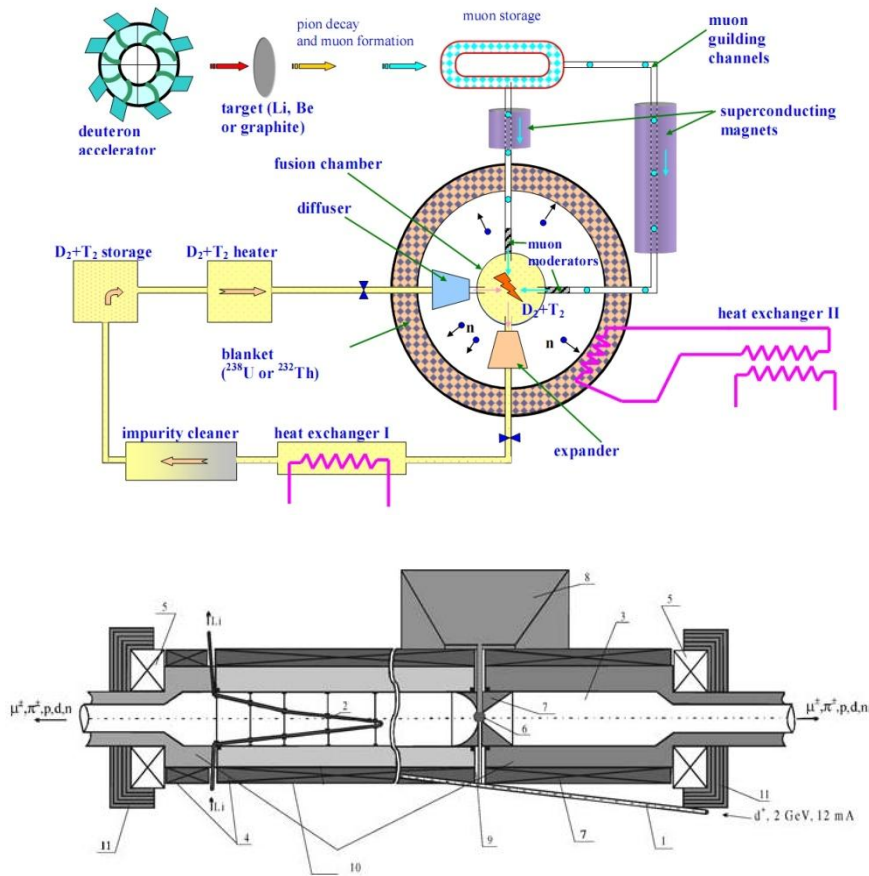
Wyznaczono:

- **Szybkość syntezy w molekułe $d\mu^3\text{He}$ i prawdopodobieństwo jej rozpadu radiacyjnego**
- **Określono charakterystyki procesu rozpraszania atomów mionowych na strukturze zestalonego wodoru oraz przebieg syntezy jądrowej w zestalonej mieszaninie wodór-deuter**

Dziękuję za uwagę



Koncepcje pozyskiwania energii z MCF



Lata 80-te – opracowano szereg koncepcji reaktorów opartych na MCF, m.in. tzw. reaktor hybrydowy MCF

Przeszkoda - niekorzystny bilans energetyczny:

- wyprodukowanie jednego mionu to koszt 6-8 GeV
- energia wydzielona w jednym cyklu (dt) to 17.6 eV
- biorąc pod uwagę sprawności konwersji wymagana liczba cykli dla praktycznych zastosowań to 1000
- w chwili obecnej uzyskuje się ok. 150 cykli

Koncepcja intensywnego źródła neutronów o energii 14 MeV

Koncepcje zastosowania MCF

- **Poprawa bilansu energetycznego:**

- zastosowanie mieszanin o wysokiej gęstości (zestalony a nawet metaliczny wodór)
- użycie lasera do przesuwania poziomów energetycznych molekuł D_2 lub DT
- użycie silnego pola magnetycznego
- użycie plazmy DT
- użycie bardzo intensywnych źródeł mionów

- **Możliwe aplikacje**

- Zastosowanie do zapłonu tarczy w Internal Confinement Fusion
- Źródło powolnych mionów
- Źródło wiązek atomów mionowych

- **Prowadzone obecnie prace**

- Badania procesów fizycznych MCF: m.in. w zestalonych mieszaninach, obliczenia teoretyczne, konstruowane są nowe źródła mionów mogące być wykorzystane do badań MCF

Przygotowanie eksperymentu

1. Wybór optymalnych warunków do przeprowadzenia eksperymentu: trzech gęstości mieszaniny i koncentracji helu
2. Rozdział czasu wiązki pomiędzy naświetlania dla poszczególnych gęstości
3. Generacja zależności wydajności rejestrowanego promieniowania X od gęstości

V.M. Bystritsky, M. Filipowicz, F.M. Penkov, „Method of investigation of nuclear reactions in charge-nonsymmetrical muonic complexes”, Nucl. Instr. Meth. A432(1999)188-194

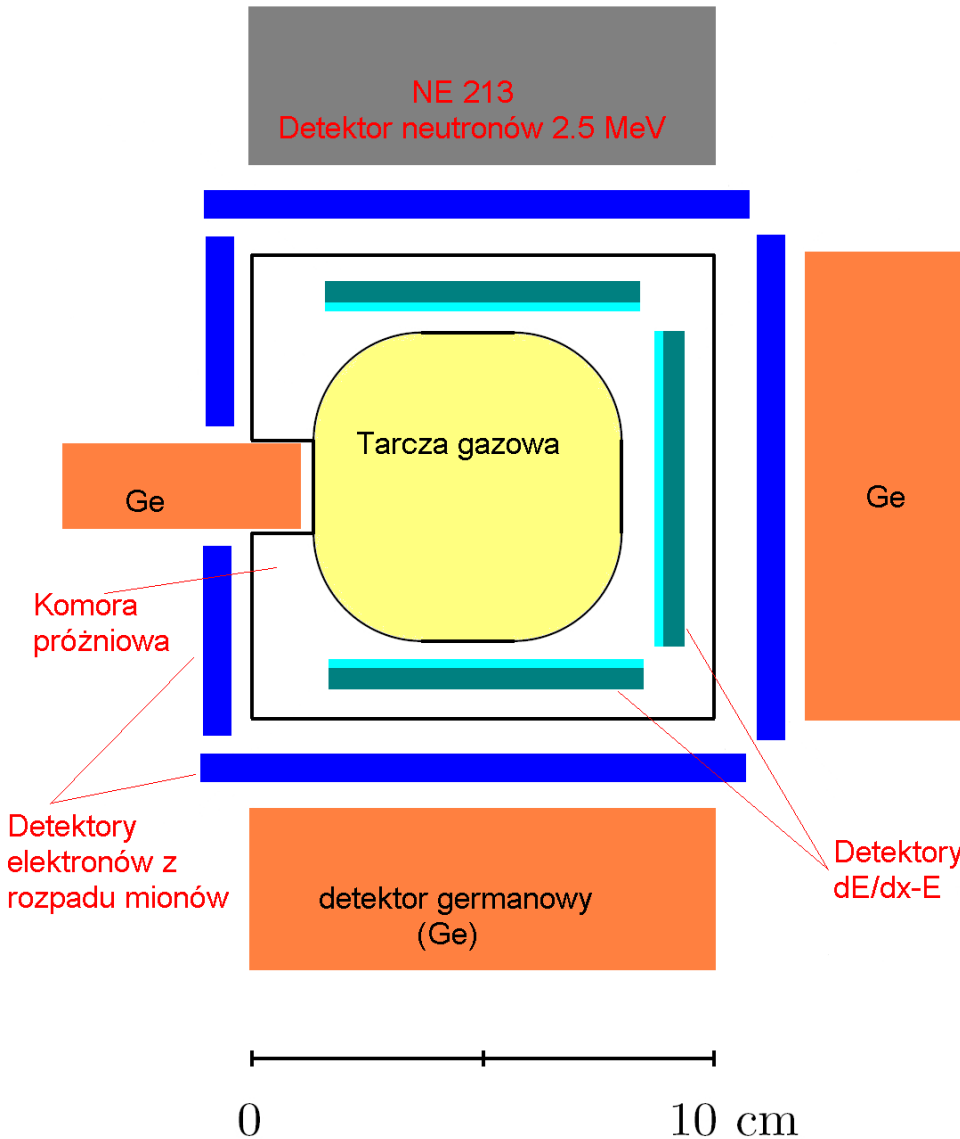
V.M. Bystritsky, M. Filipowicz, F.M. Penkov, „Medium density variation as a method for investigating properties of mesomolecular resonances”, Hyperfine Interactions 119(1999)369-371

Eksperyment testowy: dla D_2 i D_2+^3He : nie zarejestrowano protonów z syntezy, stąd :

$$\tilde{\lambda}_f \leq 5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

A. Del Rosso, „Measurement of the fusion rate in μd^3He ”, Hyperfine Interactions 118(1999)177-182

Tarcza i detektory



Układ tarczy i detektorów, widok z kierunku wiązki mionów

Detekcja mionów wiązki – cienki scyntylator plastikowy

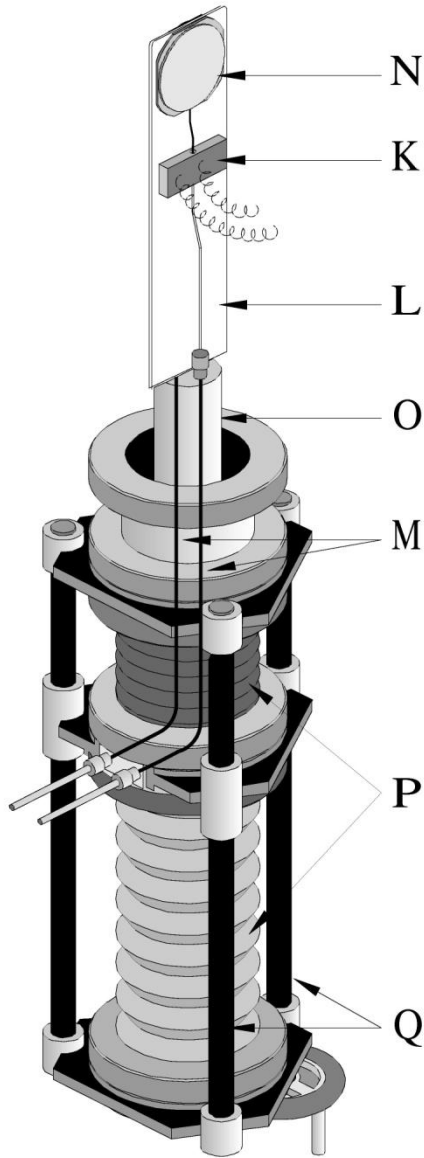
Przeprowadzono pomiary czystego ^3He , ^4He oraz dla dwóch gęstości tarczy: 0.0585 LHD (0.5 Mpa) i 0.1680 LHD (1.2 Mpa) dla temperatury 32.8 K i 34.5 K przy koncentracji helu 5%

Para detektorów krzemowych dE/dx-E (dE/dx – grubość 360 μm , E – 4 mm) pozwala na rozróżnianie protonów i deuteronów na podstawie charakteru strat energii

Monitoring czystości gazu – zewnętrzne detektory Ge

Dyfuzor

Służy do napyłania gazu, specjalna komora dyfuzora umożliwia równomierne napyłanie gazu



K – połączenia do układu chłodzenia dyfuzora
L – wspornik dyfuzora
M – przewody z gazem
N – komora dyfuzora
O – osłony mechaniczne
P, Q – przewodnice

Pozostałe układy stanowiska eksperymentalnego

- Kontrola grubości warstwy: pomiar ilości napylanego gazu
- Układ do wytwarzania mieszanki o określonym składzie
- Weryfikacja grubości warstwy i równomierności napylania: dodatkowe pomiary pochłaniania cząstek α (równomierność nie gorsza niż 15%)

Obserwacja promieniowania γ i μ

Pomiary w układzie pojedynczej warstwy.

Grubość warstwy H/D 774 μm
(581 μm dla 0.05% deuteru)

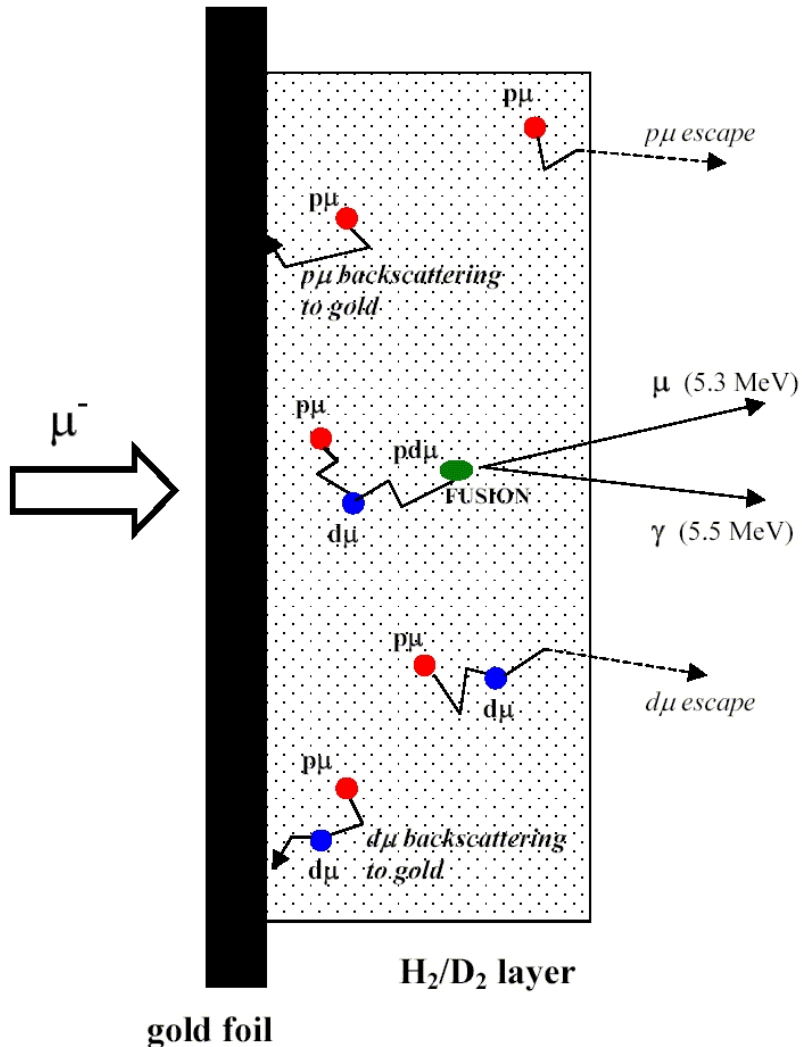
Cztery koncentracje deuteru:

- 0.05%
- 2 %
- 15 %
- 75 %

• Detekcja mionów konwersji (5.3 MeV) scyntylatory plastikowe o wymiarach 20x20 cm cali i grubości 3.2 mm umieszczone w odległości 1 mm od siebie

• Detekcja kwantów gamma: NaI(Tl), rozmiar 15x15 cm, umieszczony na kierunku wiązki mionów (tło elektronowe z rozpadu mionów)

• Koincydencja z elektronami rozpadu mionów



M. Filipowicz et al., „Measurements of $p\mu$ fusion cycle parameters in the solid H/D mixture”, proceedings of International Conference, MCF07, Dubna, Russia, 2008