

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr-a inż. Tomasza Fornala**

**„Impurity behavior study in Wendelstein 7-X  
plasmas by the use of the C/O monitor system”**

Dlaczego na Ziemi wciąż nie ma reaktorów termojądrowych, które mogłyby definitywnie rozwiązać problem dostarczania człowiekowi energii elektrycznej? Wiemy jak to działa na Słońcu, znamy mechanizmy fuzji jądrowej, a jednak ciągle nie udaje się tego celu osiągnąć. Jedną z odpowiedzi może być znane wszystkim powiedzenie, że „*diabeł tkwi w szczegółach*”.

Do tych szczegółów należą niewątpliwie zanieczyszczenia fuzyjnej plazmy jonami, pierwiastków, których obecność wynika z technicznych uwarunkowań np. materiałów ścian komory plazmowej, a które swą obecnością oraz emitowanym promieniowaniem wywołują niepożądane efekty mogące zakłócić formowanie się plazmy i powodują zmniejszenie jej energii. Jak monitorować ilość i skład zanieczyszczeń w plazmie stellaratora Wendelstein 7-X? Temu zagadnieniu poświęcona jest recenzowana tu rozprawa doktorska.

Układem pomiarowym systemu monitorowania o nazwie „*C/O monitor*” jest optyczny system spektroskopowy, składający się z dwóch niezależnych komór próżniowych; każda z nich do pomiaru dwóch linii spektralnych wodoropodobnych jonów lekkich pierwiastków: pierwsza – linii C oraz O, druga - linii B oraz N. Układ pomiarowy rejestruje na bieżąco intensywności promieniowania tych linii, jednak nie to jest finalnym celem pomiaru. Jak już wspomniano, jest nim ilość i pochodzenie zanieczyszczeń w plazmie. Niewątpliwie istnieje związek pomiędzy wielkością mierzoną (intensywność rejestrowanego promieniowania) a badaną (poziom zanieczyszczeń). Jaki jednak jest to związek, od czego i jak zależy, skąd i w jakiej ilości docierają z objętości plazmy sygnały do detektorów? „*Oto jest pytanie*” – chciałoby się powiedzieć. Na to właśnie pytanie stara się odpowiedzieć autor recenzowanej tu rozprawy.

Tekst rozprawy składa się z czterech dużych rozdziałów, każdy z podwójnym systemem podrozdziałów. Rozpoczyna ją wydzielona informacja o motywacji i celu pracy, a kończy podsumowanie i wnioski na przyszłość. Bibliografia zawiera 80 pozycji, ostatnie z roku 2022. Rozprawa napisana jest w języku angielskim, co pozwala na uniknięcie często nieprecyzyjnego tłumaczenia specjalistycznych terminów na język polski.

W tekście dotyczącym motywacji i celu pracy doprecyzowane jest przeznaczenie układu „*C/O-monitor*”. Jest nim, jak już wspomniano, monitorowanie poziomu zanieczyszczeń plazmy czterema pierwiastkami o małych Z tj: B, C, N, O, a realizowane jest przez pomiar intensywności linii Lyman-a wodoropodobnych jonów tych pierwiastków. Jest to układ o wysokiej wydajności, rozdzielczości czasowej i kątowej akceptacji. Jednakże fakt, że układ zbiera dane z dużej objętości plazmy sprawia, że interpretacja otrzymanych wyników jest trudna i niejednoznaczna, bowiem wiele zmieniających się w czasie czynników

ma na nie wpływ, np. zmiana rozkładu radialnego zanieczyszczeń czy fluktuacje temperatury i gęstości elektronowej plazmy. Co więcej, jeden z czynników może kompensować wpływ drugiego, co jeszcze bardziej komplikuje prawidłową interpretację.

Dlatego zdecydowano się na opracowanie dedykowanego kodu komputerowego, odtwarzającego wiernie całą geometrię układu wraz z wprowadzeniem, kinetycznych parametrów plazmy: temperatury i gęstości elektronowej, oraz przestrzennego rozkładu zanieczyszczeń i ich transportu w plazmie. Kod ten posłużył do modelowania zachodzących w plazmie procesów i ich wpływu na intensywności fotonów rejestrowanych przez detektory układu pomiarowego. Przeprowadzono też „studium przypadku” w którym porównano wyniki symulacji komputerowych w rezultatach pomiarowych.

Prace te stały się podstawą prezentowanej przez doktoranta dysertacji.

Rozdział pierwszy zaczyna się od krótkiego przeglądu źródeł energii elektrycznej: paliwa kopalne, energia wodna i wiatrowa, panele słoneczne, reaktory jądrowe. Na tym tle bardzo pozytywnie jawi się energia fuzji termojądrowej: zeroemisyjna, bezpieczna i o praktycznie niewyczerpalnych zasobach paliwa.

Dalej przedstawiony jest opis plazmy jako czwartego stanu materii i wymienione są ważniejsze własności plazmy. Następnie podany jest opis reakcji fuzji jądrowej jako procesu fizycznego uwarunkowanego różnicami w energiach wiązania z wyróżnieniem reakcji D-T jako najbardziej nadającej się do praktycznego wykorzystania. Podane jest kryterium Lawsona dla uzyskania samopodtrzymującej się reakcji. Krótki przegląd sposobów utrzymania plazmy: grawitacyjny, inercyjny i magnetyczny, stanowi treść następnego podrozdziału, po czym przedstawione jest dokładniej utrzymanie magnetyczne i porównany Tokamak ze stellaratorem. Zakończeniem jest szczegółowy opis stellaratora W7-X.

Zanieczyszczenia plazmy w stellaratorze stanowią treść następnego podrozdziału. Omówiono efekty związane z zanieczyszczeniami o dużym oraz i małym  $Z$ . Pokazano jakie informacje o pracy stellaratora można uzyskać kontrolując poziom zanieczyszczeń pochodzących od poszczególnych pierwiastków: węgla (oddziaływanie plazmy ze ścianą), tlenu (ogólny stan wewnętrznej ściany), boru (stan wewnętrznej ściany po procedurze boronizacji) i azotu (nieszczelności układu próżniowego).

Na zakończenie rozdziału omówione są zachodzące w plazmie procesy jonizacji i rekombinacji oraz procesy radiacyjne. Przedstawiono trzy modele: równowagi termodynamicznej, równowagi „koronowej” oraz model kolizyjno-radiacyjny. Podano też podstawy modelowania procesów transportu zanieczyszczeń z wykorzystaniem kodu pySTRAHL.

Rozdział drugi poświęcony jest konstrukcji i działaniu układu diagnostycznego „C/O Monitor” dla stellaratora Wendelstein 7-X. Na początku wymieniono i krótko opisano istniejące już układy do wyznaczania zanieczyszczeń plazmy w stellaratorze. Pokrywają one różne zakresy długości fal, ale służą głównie do wyznaczania zanieczyszczeń o stosunkowo dużym  $Z$ , podczas gdy prezentowany tu układ pomiarowy ma za zadanie monitorować zanieczyszczenia lekkimi pierwiastkami poprzez pomiar linii spektralnych: C i O oraz B i N.

Konstrukcja spektrometru bazuje na geometrii Johanna z cylindrycznie zakrzywionymi elementami dyspersyjnymi. Zastosowano polichromator, co umożliwiło pomiar nie tylko linii spektralnych ale także tła promieniowania ciągłego. Układ pomiarowy stanowią dwie komory umieszczone poziomo jedna nad drugą. Jedna służy do pomiaru linii spektralnych: C oraz O, druga: B oraz N. Autor opisuje dalej szczegóły całej konstrukcji spektrometru i układów współpracujących dla zapewnienia jej prawidłowego działania. Układ geometryczny pozwala na obserwację różnych obszarów plazmy z różnymi zakresami temperatur i gęstości. Dla rejestracji fotonów rozważano różne typy detektorów. Ostatecznie



zdecydowano się na użycie kamer CCD ze względu na ich wysoką czułość w zakresie mierzonych energii oraz dostępność na rynku.

W rozdziale trzecim opisany jest kod komputerowy służący do modelowania sygnału monitora C/O. Celem modelowania jest lepsze zrozumienie mechanizmów prowadzących do obserwowanych eksperymentalnie wyników. Dla realizacji tego celu kod zawiera w sobie zapisany cały pomiarowy układ geometryczny, a analizuje sygnały pochodzące z poszczególnych punktów w objętości plazmy.

Kod zawiera trzy zasadnicze moduły, które służą do: 1) zdefiniowanie geometrii układu pomiarowego, 2) wyznaczenia strumienia fotonów emitowanego z jednostkowej objętości plazmy, 3) wyznaczenia sumarycznego strumienia fotonów docierających do detektorów. Realizacja tych zadań powinna następować w podanej tu kolejności, chociaż możliwe jest także uruchomienie oddzielnych modułów, pod warunkiem dostarczenia odpowiednich danych wejściowych.

W dalszej części Autor opisuje szczegółowo strukturę i pracę kolejnych modułów. Warto zwrócić uwagę, że każdy z nich zawiera wiele elementów dotyczących zarówno jego „anatomii”, jak i „fizjologii”. Chodzi tu bowiem nie tylko rozkład miejsc emisji sygnałów w skomplikowanej geometrii układu pomiarowego i samego stellaratora (anatomia) ale także o proces ich transmisji przez cały układ (fizjologia), prowadząc finalnie do milionów kombinacji, które zawierają informacje o transmisji sygnałów od poszczególnych miejsc emisji do detektora z uwzględnieniem rozpraszania w kryształach. Aby znaleźć optymalne rozwiązanie umożliwiające wymaganą precyzję obliczeń i rozsądną ilość potrzebnych zasobów komputerowych, (pamięć operacyjną i dyskową oraz czas obliczeń) należało wprowadzić pewne założenia upraszczające oraz zastosować obliczenia równoległe w układzie multiprocessorowym.

Rozdział czwarty jest uwieńczeniem całej pracy przedstawionej w rozdziałach wcześniejszych. Zawiera bowiem informacje pokazujące jak na bazie skonstruowanego kodu można znaleźć związki pomiędzy badanymi zanieczyszczeniami w plazmie, a rejestrowanymi w detektorach sygnałami. Nie jest to zadanie łatwe, co zaznaczone jest na wstępie. Wymienia się kilka najważniejszych przyczyn, które muszą być uwzględnione przy interpretacji wyników pomiarów: konieczność sumowania/całkowania sygnałów pochodzących z dużej i unikalnej geometrii obserwowanego obszaru plazmy, monitorowanie w każdym kanale pomiarowym tylko jednej linii spektralnej, wpływ parametrów kinetycznych (temperatury i gęstości elektronowej) na profil emisyjności, wpływ radialnego rozkładu zanieczyszczeń oraz związanego z tym ich transportu na wielkość rejestrowanych sygnałów. Opracowany kod komputerowy, zawierający, jak już tu wspomniano, całą „anatomię i fizjologię” układu pomiarowego, ma stanowić „pomost” pomiędzy strukturą zanieczyszczeń w momencie pomiaru, a zmierzonym z pomocą detektorów sygnałem. W rozdziale tym pokazano jak można rozwikłać istniejące, ale mocno zawikłane zależności.

Autor szczegółowo opisuje jakie własności przypisuje modelowanemu punktowi plazmy (współrzędne przestrzenne, temperatura i gęstość elektronowa, gęstość domieszek...) aby wyznaczyć emisyjność każdego punktu, na tej podstawie skonstruować rozkład emisyjności i ostatecznie, poprzez całkowanie po całej objętości określić intensywność sygnału na powierzchni detektora.

Rozważa dwa profile radialnego rozkładu zanieczyszczeń: płaski („flat”) oraz zakumulowany („peaked”). Dla obu przypadków analizuje wpływ temperatury i gęstości elektronowej oraz domieszki zanieczyszczeń na zmiany rejestrowanych sygnałów. Do analizy wykorzystał zmierzone rozkłady dla dużych i małych temperatur i gęstości. Wartości pośrednie uzyskał metodą interpolacji.

Wyniki analiz prezentuje seria wykresów oraz map pokazujących zależność intensywności emitowanych fotonów dla danego typu jonów w funkcji temperatury, gęstości elektronowej oraz radialnego profilu zanieczyszczeń (płaski i z akumulacją zanieczyszczeń). Autor omawia widoczne na wykresach zależności. Jest ich wiele, bo samo zagadnienie jest wielowymiarowe. Prezentując więc zależność od jednej wielkości, np. gęstości elektronowej, ustala się wartości dwóch pozostałych, tu: temperatury i profilu zanieczyszczeń. Ciekawą informację zawierają dwuwymiarowe zależności prezentowane w postaci map. Pozwalają one zrozumieć zależności niewidoczne przy analizie w funkcji jednej zmiennej.

Dla przykładu, prezentowana na rysunku 4.13 zależność intensywności emisji fotonów od temperatury, która posiada lokalne maksimum dla niewielkich temperatur pokazuje także wzrost intensywności dla dużych temperatur. Wyjaśnienie tej zależności widoczne jest na trójwymiarowej mapie, pokazanej na rysunku 4.14. Jest tam radialny rozkład emisyjności w funkcji temperatury. Widać na nim korelację pomiędzy kształtem i położeniem rozkładu radialnego i wartościami temperatury. W zakresie dużych temperatur następuje przesunięcie obszaru emisji od obszaru centralnego ku krawędzi plazmy, co wiąże się ze wzrostem emitującego obszaru, a w konsekwencji ze wzrostu intensywności emisji fotonów.

W zakończeniu opisano „studium przypadku” („*case study*”) dla wykonanych już pomiarów, w których zaobserwowano akumulację domieszek węgla w centralnej części plazmy. Wykonano pomiary radialnych rozkładów zanieczyszczeń linii  $C^{6+}$ , a całkowitą ilość domieszki i rozkłady radialne jej składowych wyznaczono z pomocą kodu pySTRAHL. Z tymi wynikami porównano, uzyskany z pomocą opracowanego kodu numerycznego, przebieg czasowy sygnałów, które zostałyby uzyskane, gdyby C/O monitor działał w czasie trwania tych pomiarów. Uzyskano zgodność wyników otrzymanych dwoma metodami.

Całość pracy wykonanej i zaprezentowanej przez Autora stanowi dobry przykład rozwoju naukowego adepta współczesnej fizyki. Zaczął od uczestnictwa w zaprojektowaniu i wykonaniu nowego urządzenia badawczego. W ramach tej pracy opracował dokumentację techniczną niezbędną do wykonania elementów systemu. Brał udział w pomiarach testowych, gdzie miał za zadanie regulację układu optycznego. Można powiedzieć, że zaliczył obowiązkowy kurs fizyka eksperymentatora.

Było to jednak tylko „preludium” do zasadniczego dzieła jakim stało się opracowanie kodu numerycznego pozwalającego na podstawie wyników wykonanych pomiarów, uzyskać poszukiwane informacje. Przy czym nie tylko opracował sam kod, ale wykorzystał go do sformułowania procedury systematycznego badania wpływu parametrów kinetycznych plazmy, geometrii układu pomiarowego oraz transportu zanieczyszczeń, na strumień fotonów rejestrowanych w detektorach. Píše o tym tak w streszczeniu rozprawy: *„jest niezwykle istotnym, aby dokładnie zrozumieć zależności pomiędzy zmierzonym sygnałem, a parametrami kinetycznymi plazmy tj. temperatury ( $T_e$ ) i gęstości elektronowej ( $n_e$ ), poziomem zanieczyszczeń czy wpływem ich transportu (zachowania się w plazmie) na strumień fotonów docierających do powierzchni detektorów.”*

Zgodnie z tą procedurą wykonał dogłębną wielowymiarową analizę, uzyskując szereg rezultatów i wniosków, trudnych do przewidzenia bez precyzyjnego modelowania procesów zachodzących w układzie pomiarowym. Wyposażył wielkie urządzenie badawcze jakim jest stellarator W7-X w nowe narzędzie analizy danych, a sam stał się ekspertem w tej dosyć ekskluzywnej dziedzinie wiedzy jaką jest fizyka plazmy i energetyka termojądrowa. (W rozprawie nie ma informacji o objętości opracowanego kodu, a jedynie, że jest w języku Python. Ciekawe ile linii zawiera?)

Oczywiście, lektura rozprawy mobilizuje czytającego do postawienia Autorowi kilku pytań. Wymieńmy je.

1. Jak wspomniano, autor wykonał ogromną pracę kodując informacje o strukturze i działaniu układu pomiarowego. W fizyce jądrowej wysokich energii do tego celu stosuje się na ogół program komputerowy *GEANT*, <https://geant4.web.cern.ch/>. Użycie tego programu mogłoby znacznie uprościć skomplikowane obliczenia numeryczne wykonane w tej pracy. Czy Autor celowo zrezygnował z tej możliwości?
2. Podpis pod Rys. 4.4 informuje "*Examples of experimentally measured plasma kinetic profiles...*" Na rysunku widać ciągle krzywe, ale bez niepewności pomiarowych. Czy pomiary były tak precyzyjne, czy niepewności pomiarowe zignorowano?
3. Problem rozważany w tej dysertacji nosi znamiona znanego w matematyce „zagadnienia odwrotnego”, kiedy znamy skutek, a poszukujemy przyczyny. Typowym przykładem jest rekonstrukcja obrazu w tomografii komputerowej. W tym przypadku mierzymy intensywności linii widmowych będących skutkiem istnienia w plazmie określonych zanieczyszczeń. Czy autor rozpatrywał swe zadanie z tego punktu widzenia?
4. Autor zaznacza, że uzyskane w rozprawie wyniki mają raczej charakter jakościowy, niż ilościowy. Czy dla zwiększenia precyzji wystarczy zastosowanie zaawansowanych metod obliczeniowych jak: „*machine learning*”, czy metod opartych na twierdzeniu Bayesa? Czy zdaniem Autora wszystkie efekty fizyczne występujące w badanym procesie zostały już wzięte pod uwagę?

**Podsumowując**, rozprawa prezentuje ważne wyniki naukowe, demonstrując równocześnie wysoki poziom naukowy jej Autora oraz ogrom wykonanej pracy. Wyniki te są nowym narzędziem analizy danych, kluczowym dla eksploatacji stellaratora W7-X.

**Stwierdzam, że rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Fornala do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Jan Pluta

