

**Nr umowy:** UMO-2018/29/N/ST2/02804

**Tytuł:** Zbadanie zjawiska kompresji radiacyjnej plazmy przy pomocy urządzenia plasma-focus PF-24 oraz kodu modelu Lee

### **Cel projektu**

Główne badania w zakresie fizyki plazmy i energetyki termojądrowej zaczęły się w latach 50-tych 20-tego wieku. Siłami napędowymi były: kluczowe odkrycia w zakresie fizyki jądrowej, znaczący skok technologiczny, stale rosnące zapotrzebowanie na energię i potencjalne wykorzystanie do zastosowań militarnych. Doprowadziło to, na przykład, do zbudowania pierwszych reaktorów jądrowych. Pomimo ważnych osiągnięć ubiegłego wieku, nadal poszukuje się nowych, doskonalszych źródeł energii. W naturze, Słońce jest takim źródłem. Słońce to gigantyczny reaktor termojądrowy, który wytwarza energię w wyniku fuzji lekkich jąder pierwiastków. Problem skonstruowania urządzenia, które działałoby w podobny sposób jak Słońce, stał się jednym z najważniejszych problemów współczesnej fizyki i inżynierii. W 20-tym wieku, powstały cztery główne typy urządzeń, które w obecnym czasie były uważane za dobrą podstawę do zaprojektowania i budowy przyszłego reaktora termojądrowego: tokamaki, stellaratory, laboratoria mikrofuzji laserowej i urządzenia z-pinch w tym plasma-focus. Obecnie te ostatnie są wykorzystywane głównie w badaniach podstawowych z zakresu fizyki plazmy elektronowo-jonowej oraz stają się coraz bardziej popularne, jako wydajne impulsowe źródła promieniowania.

Urządzenie plasma-focus PF-24 jest przykładem dynamicznego, nie cylindrycznego generatora i koncentratora plazmy typu z-pinch z komorą eksperymentalną typu Mathera. Znajduje się ono w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Urządzenie PF-24 wytwarza plazmę w postaci, promieniowo symetrycznej warstwy prądowej, powstałej w wyniku przebicia elektrycznego w gazie roboczym, po powierzchni izolatora między współosiowymi elektrodami. Powstała warstwa plazmowa szybko odrywa się od izolatora i jest przyspieszana wzdłuż anody siłą Ampera. Na końcu anody warstwa jest ściskana w kierunku osi Z (kierunek promieniowy); powstaje tzw. ognisko plazmowe (plasma focus) zwane inaczej ściskiem plazmy (plasma pinch). Ognisko plazmowe jest obiektem stosunkowo krótko-życiowym (do około 100 ns w PF-24) i małym (kilka centymetrów sześciennych

objętości w PF-24) w kształcie lejka lub kolumny. Jest również źródłem różnego rodzaju promieniowania: promieniowania elektromagnetycznego (głównie z zakresu ultrafioletu próżniowego i miękkiego promieniowania X), jonów, elektronów, fal i jetów plazmy oraz neutronów prędkich powstających w wyniku syntezy jądrowej np. synteza jąder deuteru (gdy gazem roboczym wypełniającym komorę jest deuter).

Procesy fizyczne związane z wyładowaniem elektrycznym w urządzeniu plasma-focus, nadal nie są w pełni zbadane i rozumiane. Jednym z takich procesów jest kompresja radiacyjna plazmy. Kompresja radiacyjna plazmy jest zjawiskiem, w którym gęstość plazmy powinna znacznie wzrosnąć, podczas gdy objętość plazmy powinna znacznie zmaleć w wyniku silnej emisji promieniowania elektromagnetycznego, która chłodzi plazmę. Zjawisko to powinno teoretycznie prowadzić do uzyskania wysokich koncentracji plazmy (nawet do  $10^{28}$  cząstek/cm<sup>3</sup>) i małego promienia ścisku (nawet do  $10^{-6}$  cm). Jednak zachodzenie tego zjawiska podczas wyładowań w układach z-pinch nie zostało odpowiednio potwierdzone w tym nie została potwierdzona możliwość uzyskania wysokiego stopnia kompresji plazmy. Ogólnie można przyjąć, że kompresja radiacyjna plazmy jest, co najwyżej dostatecznie zbadana tylko w przypadku wyładowań micro-pinch (rodzaj wyładowania typu z-pinch). W przypadku innych urządzeń typu z-pinch wyniki zarówno teoretycznie, jak i eksperymentalnie są kontrowersyjne, niejednoznaczne i niewystarczające. Stąd proponowany projekt koncentruje się głównie na weryfikacji zachodzenia zjawiska kompresji radiacyjnej plazmy.

Projekt obejmuje badanie kompresji radiacyjnej plazmy z wykorzystaniem połączonych metod eksperymentalnych i teoretycznych. Eksperymenty są przeprowadzane przy użyciu urządzenia PF-24 i kilku systemów diagnostycznych jednocześnie. Podstawowymi trzema układami diagnostycznymi, wykorzystywanymi są cewka Rogowskiego i sonda magnetyczna oraz ultraszybki 4-kadrowy układ do obrazowania plazmy w zakresie ultrafioletu próżniowego i miękkiego promieniowania X. Wyładowania elektryczne są wykonywane w deuterze, gazach szlachetnych i mieszaninach deuteru z gazami szlachetnymi (podczas wyładowań w obecności gazów szlachetnych emisja promieniowania elektromagnetycznego powinna znacznie wzrosnąć). Obliczenia teoretyczne są przeprowadzane przy użyciu 5-fazowego kodu modelu Lee. Metody eksperymentalne i teoretyczne są połączone przy użyciu specjalnej procedury dopasowywania obliczonych przebiegów prądu wyładowania do mierzonych. Otrzymane, przybliżone wyładowania teoretyczne są komplementarne,

dostarczając zestaw parametrów opisujących plazmę i wyładowanie w funkcji czasu. Ostatecznie niektóre teoretyczne parametry plazmy można porównać z odpowiadającymi parametrami eksperymentalnymi, wyznaczonymi niezależnie – np. promień ścisku plazmy.

Projekt ma charakter badań podstawowych gorącej i gęstej plazmy elektronowo-jonowej generowanej w urządzeniach z-pinch. Uzyskane parametry plazmy umożliwią: weryfikację zachodzenia zjawiska kompresji radiacyjnej oraz określenie warunków, w których kompresja radiacyjna może się rozwijać (i nie może się rozwijać) podczas wyładowania. Realizacja projektu powinna wyjaśnić kontrowersje związane z badanym zjawiskiem i umożliwić zdobycie sprawdzonej wiedzy. Badania te są również ważne, dla lepszego poznania innych efektów towarzyszących wyładowaniom z-pinch, na przykład zjawiska produkcji i emisji neutronów fuzyjnych – zwiększona koncentracja jonów deuteru w ognisku plazmowym może potencjalnie prowadzić do zwiększenia całkowitej emisji neutronów z syntezy jądrowej podczas wyładowań w plasma-focus. Potwierdzenie zwiększonej emisji promieniowania może umożliwić lepsze wykorzystanie urządzeń, jako silnych, pulsacyjnych źródeł promieniowania różnego typu. Zwiększone promieniowanie elektromagnetyczne i neutronowe może być potencjalnie wykorzystywane w testach materiałów i ich własności, dynamicznej, nie destrukcyjnej kontroli jakości, mikrolitografii promieniowania X, wykrywaniu nielegalnych obiektów, itd.