

Dr hab. Krzysztof Dzierżęga, prof. UJ
Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego
z tytułem:**

***Urządzenia do wytwarzania impulsowych tarcz klasterowych oraz aerozolowych na
potrzeby badań oddziaływania impulsów laserowych z materią***

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego z tytułem „Urządzenia do wytwarzania impulsowych tarcz klasterowych oraz aerozolowych na potrzeby badań oddziaływania impulsów laserowych z materią” została wykonana w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) pod kierunkiem dr. hab. inż. Andrzeja Bartnika, profesora WAT.

Rozprawa ma charakter w pełni doświadczalny, a jej głównym osiągnięciem są dwa nowatorskie systemy do produkcji tzw. tarcz laserowych, wytwarzających tarcze w formie koloidów gazowo-klasterowych i aerozoli, które pracują w warunkach próżniowych. Opracowane systemy zostały z powodzeniem zastosowane w kilku eksperymentach pilotażowych. Celem tych eksperymentów była generacja promieniowania z zakresu miękkiego promieniowania rentgenowskiego (ang. *soft X-ray*, SXR) oraz skrajnego promieniowania ultrafioletowego (ang. *extreme ultraviolet*, EUV) z użyciem nano- i femtosekundowych impulsów laserowych. Pierwszy system – wytwarzający tarcze gazowo-klasterowe – składa się z odpowiedniego zaworu elektromagnetycznego, dyszy dwustrumieniowej, układu chłodzenia termoelektrycznego i sterownika. Taka kompaktowa konstrukcja, bez konieczności stosowania wysokich ciśnień gazów czy złożonych i niewygodnych układów do chłodzenia kriogenicznego, pozwoliła na wytworzenie struktur klastrów o odpowiednio wysokiej koncentracji, nieodzownej do wydajnej generacji promieniowania XRF czy EUV. Drugi system – dedykowany wytwarzaniu tarcz aerozolowych – łączy impulsową tarczę gazową z ultradźwiękowym generowaniem aerozolu z cieczy. Wytwarzanie aerozolu odbywa się bezpośrednio w komorze próżniowej, bez potrzeby stosowania wysokiego ciśnienia gazu, dysz naddźwiękowych ani elementów grzejnych. Oba systemy zostały zaprojektowane, skonstruowane i przetestowane przez doktoranta.

Nowatorski charakter pracy świadczy o wysokich kompetencjach doktoranta w zakresie techniki próżniowej, kriogeniki oraz budowy i działania układów do detekcji promieniowania XRF i EUV. Należy jednak podkreślić, że kluczową rolę w realizacji pracy odegrały jego kompetencje z zakresu elektroniki, będącej jego macierzystą dziedziną nauki.

W kontekście badań prowadzonych przez grupę badawczą, której członkiem jest doktorant, tarcze laserowe odgrywają kluczową rolę, jeśli chodzi o generowanie miękkiego promieniowania rentgenowskiego (XRF) czy skrajnego ultrafioletu (EUV). Promieniowanie to znajduje zastosowania np. w litografii EUV do produkcji następnej generacji układów scalonych, tomografii XCT, w obrazowaniu w skali atomowej czy w spektroskopii absorpcyjnej typu NEXAFS i EXAFS. Podstawowa zasada jego generacji polega na wykorzystaniu impulsów laserowych o

dużym natężeniu do oddziaływania z materiałem tarczy, co prowadzi do powstania plazmy o wysokiej temperaturze, emitującej promieniowanie w pożądanym zakresie długości fal.

Z tarczami laserowymi wykorzystywanymi do generacji XRF i EUV wiąże się jednak wiele problemów, które ograniczają ich praktyczne zastosowanie. W przypadku tarcz z ciała stałego lub cieczy, charakteryzujących się dużą gęstością, dochodzi do produkcji dużej ilości odłamków (ang. *debris*), które mogą uszkadzać elementy optyczne oraz aparaturę. Ponadto, jedynie mały ułamek (około 4%) energii promieniowania laserowego jest zamieniany na pożądaną promieniowanie XRF i/lub EUV. Oddziaływanie laser-materia generuje również ekstremalne temperatury, co prowadzi do naprężeń termicznych w układzie tarczy i otaczających ją komponentach, a to z kolei wymaga odpowiedniego chłodzenia, by zapewnić stabilne działanie systemu, szczególnie w przypadku układów o dużych częstościach repetycji. W przypadku używania systemów laserowych o dużej mocy tarcze muszą być dostarczane przy wysokich częstościach repetycji, co wymaga olbrzymiej precyzji generowania np. kropeł cieczy oraz niezawodnych układów dozowania strumieni gazu. Te i inne wyzwania zostały podjęte przez doktoranta w jego pracy, a same problemy stanowią aktualny temat badawczy wielu ośrodków naukowych na świecie.

Wyniki pracy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego zostały opisane w czterech publikacjach w czasopismach z listy filadelfijskiej oraz w trzech publikacjach pokonferencyjnych (SPIE) i niewątpliwie stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny fizyki, jaką jest generacja promieniowania w zakresie XRF i EUV z wykorzystaniem impulsów laserowych.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Węgrzyńskiego została napisana w języku polskim i liczy, wraz z dodatkami i rysunkami technicznymi, 229 stron. Zawiera 88 rysunków, 5 tabel i 40 rysunków technicznych oraz schematów układów elektronicznych. Praca rozpoczyna się spisem treści, po którym mamy część zasadniczą obejmującą 6 rozdziałów. Rozprawę kończą 3 dodatki, spisy ilustracji i tabel oraz bibliografia.

W rozdziale 1: **Wprowadzenie do tematyki pracy**, liczącym 9 stron, w pierwszej jego części, autor stara się bardzo skrótowo przedstawić historię rozwoju techniki laserowej, szczególnie w odniesieniu do generacji krótkich (nanosekundowych) i ultrakrótkich (femtosekundowych) impulsów światła. Niestety, w tekście pojawia się kilka nieścisłości. Przede wszystkim, autorem terminu *foton* nie był Albert Einstein, lecz amerykański chemik Gilbert Newton Lewis. Einstein posługiwał się terminem *kwanty światła*. Ponadto, w przypadku pierwszego lasera rubinowego, Theodore Maimann nie używał komórki Kerra, jak twierdzi autor, a jedynie układu zwierciadeł. Komórki Kerra i Pockelsa zostały wprowadzone później jako elementy przełącznikowe, stosowane zarówno do przełączania wzmocnienia ośrodka, jak i dobroci rezonatora.

W drugiej części tego rozdziału autor wprowadza pojęcie plazmy jako zjonizowanego gazu, składającego się z elektronów swobodnych i jonów, który jest elektrycznie obojętny w skali makroskopowej. Jednak autor pomija fakt, że w skład plazmy wchodzi również cząstki neutralne, takie jak atomy i molekuly, a także fotony, które odgrywają istotną rolę w redystrybucji energii. Podział plazmy na zimną i gorącą oraz o wysokim i niskim stopniu jonizacji byłby dla czytelnika bardziej przejrzysty, gdyby został uzupełniony odpowiednim rysunkiem. Na takim schemacie można by sklasyfikować omawiane rodzaje plazmy, w tym plazmę laserową, w zależności od ich podstawowych parametrów, takich jak koncentracja elektronów i temperatura elektronowa.

Uważam również, że w tym rozdziale powinny zostać wprowadzone definicje innych parametrów plazmy, takich jak częstotliwość plazmowa, zamiast umieszczać je dopiero w kolejnym rozdziale. Ponadto w tej części należało również opisać procesy radiacyjne z uwzględnieniem podziału na przejścia typu *free-free* (f-f), *free-bound* (f-b) i *bound-bound* (b-b). Są to procesy będące wynikiem jonizacji i wzbudzenia a następnie rekombinacji i deekscytacji, które prowadzą do charakterystycznych widm promieniowania w zakresie XRF i EUV – będących zasadniczym celem badań doktoranta. Takiego opisu nie znalazłem niestety w żadnej części tej rozprawy.

Dalej, nie ulega wątpliwości, że wprowadzenie schematycznych rysunków ilustrujących sekwencje czasowe procesów zachodzących w trakcie i po oddziaływaniu laser-tarcza znacząco ułatwiłoby ich zrozumienie i prześledzenie postronnemu czytelnikowi.

Rozdział 2: **Aktualny stan wiedzy na temat tarcz laserowych**, liczący 9 stron, autor poświęca opisowi 3 typów tarcz: stałych, ciekłych i gazowych. Kluczowym aspektem, na który zwraca uwagę, jest konieczność prowadzenia wszystkich badań w warunkach próżniowych, co wynika z analizowanego zakresu promieniowania, tj. XRF i EUV. Na początku, autor przedstawia widma transmisji dla różnych gazów obecnych w atmosferze, jednak pomija istotny szczegół – brak informacji na temat grubości ośrodka, dla której te widma zostały określone. Następnie dokonuje klasyfikacji tarcz laserowych w zależności od ich potencjalnej gęstości, w porównaniu do tzw. gęstości krytycznej, która jest definiowana przez długość fali użytego lasera.

Pewne wątpliwości budzi przyjęte przez autora podejście do szacowania gęstości tarczy, rozumianej jako maksymalna koncentracja swobodnych elektronów jaką można uzyskać oświetlając daną tarczę wiązką laserową. W szczególności, o ile dobrze zrozumiałem, autor zakłada jedynie możliwość jednokrotnej jonizacji, co prowadzi do zaniżenia szacowanych gęstości.

W podrozdziale 2.1: **Tarcze stałe**, autor stwierdza: *Plazma laserowa powstaje w wyniku dominacji zmian wielu procesów nierównowagowych nad procesami termicznymi zachodzącymi w materiale tarczy*. Trudno zrozumieć co autor miał tutaj na myśli?

Z mojego punktu widzenia, plazma laserowa to efekt szeregu procesów fizycznych, takich jak absorpcja promieniowania laserowego, jonizacja – zarówno zderzeniowa, jak i jedno- oraz wielofotonowa, rekombinacja, wzbudzenie atomów i jonów, a także absorpcja i emisja promieniowania. Warto zauważyć, że procesy odwrotne do siebie na różnych etapach ewolucji plazmy, mogą pozostawać ze sobą w równowadze lub od niej odbiegać. Dodatkowo, istotnym elementem zjawiska jest hydrodynamiczna ekspansja obłoku plazmowego, która także wpływa na jego ewolucję. Sformułowanie użyte przez autora wydaje się zbyt ogólne i niejasne w kontekście tak złożonego układu. Które konkretnie procesy uważa autor za nierównowagowe, a które jako termiczne?

W ostatniej części tego rozdziału autor precyzuje cele swojej pracy, jednak przedstawia je jako tezy. Do głównych zadań, które zostały postawione, zalicza:

- opracowanie projektów konstrukcyjnych nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych, przeznaczonych do pracy w warunkach próżniowych,
- zaprojektowanie i wykonanie kontrolera elektronicznego do sterowania opracowanymi urządzeniami,
- budowę zaprojektowanych urządzeń oraz, jak sądzę, charakteryzację wytwarzanych tarcz,
- realizację eksperymentów pilotażowych z wykorzystaniem nowo opracowanych systemów do wytwarzania tarcz laserowych.

Rozdział 3: **Realizacja impulsowych tarcz nowego typu**, liczy 82 strony i stanowi zasadniczą część rozprawy. Koncentruje się na szczegółowym opisie powstałego dzieła, czyli opracowanych przez autora systemach do wytwarzania gęstych impulsowych tarcz laserowych w postaci klastrow i aerozoli, które działają w warunkach próżniowych.

Jak podkreśla autor, opracowane rozwiązania stanowią odpowiedź na brak komercyjnie dostępnych urządzeń tego typu, jednocześnie rozwiązując – przynajmniej częściowo – problemy związane z funkcjonowaniem i użytkowaniem istniejących systemów tarcz gazowych.

Do najważniejszych zalet opracowanych systemów należy wyeliminowanie konieczności stosowania skomplikowanych i potencjalnie niebezpiecznych układów kriogenicznych do chłodzenia zaworów gazowych, możliwość pracy przy niższych ciśnieniach gazów roboczych oraz kompaktowość. Dzięki temu zmniejszono zapotrzebowanie na wydajne systemy pomp próżniowych, co znacząco obniża koszty eksploatacji. Jednak najistotniejszym osiągnięciem jest zdolność nowych systemów do generowania plazmy o zdecydowanie większej jasności w interesujących zakresach widmowych (SXR/EUV). Co więcej, dają one możliwość wykorzystania znacznie szerszej gamy substancji i pierwiastków do formowania tarcz, co otwiera nowe perspektywy zastosowań.

Oba systemy opracowane przez doktoranta bazują na wcześniej stworzonym w Instytucie Optoelektroniki WAT systemie wytwarzania podwójnej tarczy gazowej, w rozwój której, jak przypuszczam, doktorant również wniósł istotny wkład. Nowe systemy, będące dziełem Pana mgr. inż. Węgrzyńskiego, wprowadzają innowacyjne rozwiązania, takie jak dedykowane impulsowe zawory elektromagnetyczne z termoelektrycznymi układami chłodzenia, system ultradźwiękowej nebulizacji cieczy zintegrowany z zaworem gazowym oraz elektroniczny układ sterowania wytwarzanych tarcz i ich synchronizacji z systemami laserowymi.

Szczegółowy opis konstrukcji, działania oraz parametrów pracy tych urządzeń znajduje się w dalszych częściach tego rozdziału oraz w dodatkach. Należy podkreślić, że systemy te były tworzone od podstaw, a cały proces ich konstrukcji miał charakter iteracyjny, co czyniło go niezwykle czasochłonnym. Autor musiał zmierzyć się z wieloma wyzwaniem technicznymi, obejmującymi nie tylko projektowanie i budowę, ale również dobór odpowiednich elementów i materiałów konstrukcyjnych. Dotyczyło to m.in. wyboru odpowiednich uszczelek próżniowych, elektromagnesów do zaworów dozowania gazów, ogniów Peltiera o wymaganej sprawności chłodzenia oraz przetworników piezoelektrycznych wykorzystywanych w procesie ultradźwiękowej nebulizacji.

Ostatni podrozdział tego rozdziału zawiera opis konstrukcji i działania elektronicznego układu kontrolera zaprojektowanego dla opracowanych systemów tarcz laserowych. Cały ten rozdział jest dowodem na olbrzymie kompetencje doktoranta w zakresie elektroniki, mechaniki precyzyjnej i fizyki doświadczalnej.

Po lekturze tej części pracy mam następujące pytania i uwagi:

1. **Powtarzalność tarcz laserowych:** Jak wygląda powtarzalność wytwarzanych tarcz laserowych od impulsu do impulsu, szczególnie biorąc pod uwagę ich gęstości i skład? Czy autor dokonał pomiaru tzw. *jittera*, czyli rozrzutu różnicy czasowej między impulsem laserowym a otwarciem zaworu gazowego?
2. **Parametry plazmy:** Autor wielokrotnie odnosi się do "lepszyc parametrów plazmy", jednak brak jest precyzyjnego określenia, o jakie parametry tutaj chodzi. Przypusz-

czam, że chodzi przede wszystkim o większą intensywność generowanych widm w zakresie SRX. Czy autor mógłby to doprecyzować?

3. **Porównanie rozmiarów kropeł:** W podrozdziale 3.3 przedstawiono empiryczne równania (12)-(16) służące do obliczania rozmiarów generowanych kropeł. Uważam, że pomocnym byłoby graficzne porównanie tych teoretycznych rozmiarów z wynikami uzyskanymi dla tarcz generowanych w eksperymencie. Czy autor mógłby rozważyć taką prezentację?

Rozdział 4: **Wybrane metody badań nowo opracowanych tarcz laserowych**, liczący 30 stron, koncentruje się na charakteryzacji tarcz gazowo-klastrowych i aerozolowych wytworzonych przy użyciu opracowanych systemów. Autor wykorzystuje do tego celu standardową technikę radiografii cieniowej, metodę rozpraszania wiązki laserowej oraz, po raz pierwszy w odniesieniu do tego typu obiektów, opracowany przez siebie układ do mikroskopii optycznej.

Otrzymane obrazy cieniowe jednoznacznie wskazują na formowanie się tarcz cząstek, które są podatne na parametry zewnętrzne, takie jak ciśnienie gazu roboczego i buforowego czy temperatura zaworu. Moje wątpliwości budzą jednak zbliżone wartości gęstości wytworzonych tarcz przedstawione na rysunkach 62 i 63. Na rysunku 62 prezentowane są wartości cięciwowe, czyli zsumowane wzdłuż całego kierunku detekcji, a ich jednostką powinien być cm^{-2} . Zresztą na rysunku tym nie podano jednostki wyznaczonej wielkości. Ciekawym wynikiem jest obserwacja pozaosiowych maksimów w rozkładzie radialnym gęstości tarczy w przypadku tarczy aerozolowej. Fakt ten nie został jednak skomentowany przez autora, mimo że może istotnie wpływać na efekty oddziaływania tarczy z impulsami laserowymi.

Na podstawie zmierzonych rozkładów kątowych rozproszonego światła drugiej harmonicznej lasera Nd:YAG udało się oszacować wielkości cząstek formujących tarcze laserowe, które według autora wynoszą około 1-2 μm . Wydaje się jednak, że cząstki tarczy generowanej na bazie fluorku siarki (SF_6) są znacznie mniejsze, sądząc po większej szerokości rozkładu kąтового światła rozproszonego. Szkoda, że autor nie przeprowadził odpowiednich symulacji i dopasowania wyników doświadczalnych, zakładając w swoim modelu pewien rozkład rozmiarów cząstek formujących tarcze.

Nieprawdą jest stwierdzenie, że rozkłady kątowe otrzymywane w ramach teorii rozpraszania Rayleigha mają charakter quasi-izotropowy. W rzeczywistości rozkłady te mają charakter dipolowy.

W celu weryfikacji wyników uzyskanych metodą rozpraszania światła laserowego autor skonstruował układ mikroskopu optycznego działającego w warunkach próżni, umożliwiający bezpośrednie obrazowanie cząstek formujących tarcze. Wyniki uzyskane za pomocą tej oryginalnej metody pomiarowej potwierdziły rezultaty uzyskane techniką rozpraszania światła.

Badania opisane w tym oraz poprzednim rozdziale świadczą o nieprzeciętnym talencie eksperymentatorskim autora i jego szerokich kompetencjach obejmujących wiele dziedzin techniki i fizyki.

Rozdział 5 zatytułowany: **Zastosowanie opracowanych urządzeń do wytwarzania plazmy laserowej**, liczy 15 stron i opisuje eksperymenty potwierdzające użyteczność systemów opracowanych przez doktoranta systemów do wytwarzania gazowo-klastrowych i aerozolowych tarcz laserowych.

W pierwszym eksperymencie, przeprowadzonym w Instytucie Optyki i Elektroniki Kwantowej Uniwersytetu Friedricha Schillera w Jenie, do generacji plazmy z tarczy gazowo-klastrowej wykorzystano laser femtosekundowy Ti:szafir o maksymalnej energii impulsu 700 mJ, częstotliwości repetycji 10 Hz i czasie trwania impulsu 40 fs. Na podstawie wyników tego eksperymentu stwierdzono, że dla obu badanych układów gazów, tj. CO₂/He i Xe/He powstała plazma emituje promieniowanie w zakresie tzw. okna wodnego. W przypadku tarczy CO₂/He promieniowanie ma charakter bardziej liniowy, natomiast dla tarczy Xe/He ma charakter ciągły i jest dodatkowo stosunkowo jednorodny. Co bardzo istotne, zaobserwowano wzrost intensywności widm w sytuacji, gdy zawór wlotowy systemu wytwarzania tarcz był chłodzony. Wyniki tego eksperymentu zostały szczegółowo opisane w artykule opublikowanym w czasopiśmie Optics Express.

W drugim eksperymencie, przeprowadzonym w Instytucie Optoelektroniki WAT, badano widma plazmy laserowej w zakresie SXR/EUV uzyskane przy użyciu systemu do wytwarzania tarcz aerozolowych i systemu lasera nanosekundowego o maksymalnej energii 10 J. Stwierdzono, że dla obu badanych tarcz aerozolowych, tj. helowo-metanolowej i helowo-metanolowej wzbogaconej solami NaBr, widma SXR miały charakter liniowy, składając się z linii emisyjnych jonów węgla i tlenu. Dodatkowo w przypadku tarczy wzbogaconej solami NaBr zarejestrowano linie spektralne jonów bromu. Wyniki te jednoznacznie pokazują, że możliwe jest generowanie plazmy laserowej w oparciu o związki rozpuszczalne w cieczach. Rezultaty tych badań zostały opublikowane m.in. w czasopiśmie Physics of Plasmas.

Podsumowanie i wnioski płynące z realizacji pracy zostały zawarte w ostatnim 6. rozdziale, który liczy 3 strony.

Chociaż merytoryczna zawartość rozprawy nie budzi zastrzeżeń, to jej strona edytorska znacząco wpływa na obniżenie mojej oceny. Tekst wymagałby wcześniejszej, dokładnej korekty stylistycznej i językowej. Poniżej przedstawiam listę wybranych, najbardziej rażących błędów i nieścisłości, które zauważyłem podczas lektury pracy. Pozostałe uwagi, celem zaoszczędzenia czasu słuchaczy, zamieściłem w załączniku do niniejszej recenzji.

1. Jednostki różnych wielkości są zapisywane kursywą, a powinny być zapisywane czcionką normalną zgodnie z zasadami edytorskimi.
2. Słowo „klastry” pochodzi z języka angielskiego clusters, ale w języku polskim poprawna forma to właśnie „klastry”, a nie „klastery”.
3. Str. 10: Zamiast „moc impulsowa” powinno być „moc chwilowa” lub „moc szczytowa”.
4. W tekście autor używa zamiennie pojęć: „natężenie”, „intensywność” oraz „gęstość mocy lasera”. Dla większej precyzji i przejrzystości należałoby zdecydować się na jedno określenie.
5. Str. 12: Brakuje źródeł odniesienia dla dwóch referencji.
6. Str. 19: Zamiast „przenikalność elektromagnetyczna” powinno być „przenikalność elektryczna”.
7. W tekście nagminnie używany jest zapis ułamkowy jednostek, np. $\frac{V}{cm}$, podczas gdy należy używać zapisu liniowego, np. V/cm lub V cm⁻¹.
8. Sformułowanie „w poniższej pracy” pojawia się często, podczas gdy powinno być: „w tej pracy”.

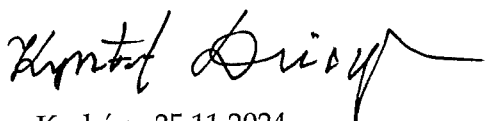
9. Zamiast „eksperymenty demonstracyjne” należałoby użyć określenia „eksperymenty wstępne” lub „eksperymenty pilotażowe”.
10. Str. 37: Autor pisze: „W głównym wymiarze, prace te skupiły się na...” a zapewne miało być „W głównej mierze, prace te skupiły się na...”.
11. Bardzo często autor używa pojęcia „materiał masowy”. Sformułowanie to jest tłumaczeniem angielskiego „bulk material”, które w naukach fizycznych tłumaczymy jako „materiał objętościowy”.
12. Tytuł podrozdziału 3.1 „Uzasadnienie szukania nowych rozwiązań” powinno się zmienić na „Uzasadnienie poszukiwania nowych rozwiązań”.

Podsumowując, chciałbym podkreślić, iż pomimo ogromnej liczby niedociągnięć edytorskich i językowych przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska jest napisana w sposób stosunkowo jasny i zrozumiały. Ma ona w dużej części nowatorski charakter, a jej efektem jest powstałe dzieło: *nowe systemy do wytwarzania tarcz laserowych zawierających klastry oraz aerozole*, które niewątpliwie posiadają duży potencjał aplikacyjny i mogą wpłynąć na dalszy rozwój całej dziedziny badań związanej z oddziaływaniem silnych wiązek laserowych z materią.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Załączniki (1)

1. Skan wszystkich uwag edytorskich zaznaczonych na tekście rozprawy



Kraków, 25.11.2024

