

Prof. dr hab. Jarosław Zaremba
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
w Toruniu

**Ocena osiągnięcia naukowego w postaci cyklu publikacji zatytułowanego
„Procesy kreacji par elektron-pozyton w silnych polach laserowych”
oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i popularyzatorskiego
doktor Katarzyny Krajewskiej
w ramach postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

Ocena osiągnięcia naukowego

Tradycyjnym obszarem zainteresowań badawczych dotyczących oddziaływania materii ze światłem była i jest wciąż szeroko rozumiana fizyka atomowa i optyka kwantowa. Postęp technologiczny w dziedzinie konstrukcji laserów emitujących promieniowanie o coraz większej mocy pozwalał systematycznie rozszerzać ten obszar w stronę zjawisk wielofotonowych czyniąc z fizyki tych procesów dziedzinę niezwykle intensywnych i wieloaspektowych badań, szczególnie od odkrycia zjawiska jonizacji powyżej progu gdzie wyraźnie ujawniły się cechy, których wyjaśnienie wymagało wyjścia poza schemat analizy perturbacyjnej. Co ważne, badania teoretyczne przenikają się tu ze stałym postępem technik doświadczalnych. Dzisiaj istniejące i wciąż udoskonalane źródła mogą emitować krótkie, ultrasilne impulsy promieniowania o natężeniu odpowiadającym polu elektrycznemu o kilka rzędów wielkości przewyższającemu natężenie pola wewnątrzatomowego. Dało to impuls do podjęcia badań nad procesami spoza obszaru energetycznego zjawisk fizyki atomowej, w tym nad fundamentalnymi procesami z obszaru zainteresowań kwantowej elektrodynamiki w takich ultrasilnych polach promieniowania laserowego.

Stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego osiągnięcie naukowe doktor Katarzyny Krajewskiej zatytułowane „Procesy kreacji par elektron-pozyton w silnych polach laserowych” należy właśnie do nurtu badań nad fizyką podstawowych procesów elektrodynamiki kwantowej w polu ultrasilnego promieniowania laserowego. Dobrze i jasno określonym celem badawczym oraz główną osią, wokół której koncentruje się tematyka cyklu jest systematyczna i wieloaspektowa analiza teoretyczna procesów wielofotonowej kreacji par elektron-pozyton w zderzeniach jąder atomowych z wiązką takiego promieniowania opartej na nieliniowym efekcie Bethego-Heitlera. W ostatnich latach, właśnie dzięki idei wykorzystania ultrasilnych impulsów laserowych w zderzeniach z rozpędzonymi do relatywistycznych prędkości jądrami atomowymi, realizacja warunków niezbędnych do obserwacji kreacji pary mogła stać się wyobrażalna. W schemacie takiego procesu relatywistyczna prędkość jądra wzmacnia jeszcze, wskutek efektu Dopplera, efektywność „widzianego” przez nie pola i w efekcie zbliża się ono do wartości krytycznej, niezbędnej dla powstania pary elektron-pozyton. Datujące się od około dziesięciu lat prace teoretyczne nad analizą tego zjawiska pomijały jakiegokolwiek efekty odrzutu cząstek tarczy. Pierwsze próby uwzględnienia w teoretycznym modelu kreacji pary tego efektu pojawiły się w literaturze zupełnie niedawno i prace składające się na przedstawione przez doktor Krajewską osiągnięcie naukowe nie tylko do tej grupy należą, ale stanowią bardzo istotną, a nawet, ze względu na moment powstania i wieloaspektowość podjętych badań, wiodącą jej część. O aktualności i wszechstronności badań doktor Krajewskiej świadczy też drugi wątek

tematyczny prezentowanego osiągnięcia. Dotyczy on rozszerzenia analiz zjawiska kreacji par elektron-pozyton indukowanej supersilnym polem promieniowania laserowego na sytuacje, gdy to pole nie jest traktowane jako monochromatyczna fala płaska, a motywowane jest to postępowaniem w generacji silnych, krótkich impulsów o dobrze określonych charakterystykach czasowych. Otwiera to szerokie pole badań nad zjawiskami zależnymi od kształtu impulsu i fazy promieniowania, a w efekcie pozwala stawiać pytania o kontrolę przebiegu procesu co, jak wiadomo, jest podstawą wielu ciekawych zjawisk składających się na szeroko rozumianą optykę oddziaływań koherentnych i jest wykorzystywane do sterowania czy kontroli dynamiki różnych procesów fizycznych, również z dziedziny efektów silnopolowych. Rozszerzenie tej problematyki na fundamentalne procesy elektrodynamiki kwantowej jawi się więc jako naturalne i uzasadnione, ale stanowi kolejne trudne i pionierskie wyzwanie teoretyczne.

Podstawowy cel badawczy cyklu można zwięźle zawrzeć w pytaniu o możliwości zwiększenia efektywności procesu kreacji par w polu ultrasilnego promieniowania laserowego. W tym celu przedyskutowane zostały szczegółowe charakterystyki procesu w różnych, potencjalnie realizowalnych warunkach fizycznych. W szczególności zanalizowane zostały problemy związane z efektami odbicia cząstek tarczy w trakcie zderzenia z ultrasilnym impulsem promieniowania laserowego oraz z zależnością procesu kreacji od fazowych charakterystyk padającego promieniowania. Za tym zwięzłym podsumowaniem stoi ambitne, wartościowe i trudne przedsięwzięcie badawcze zadające pytania o nowe aspekty fizyczne procesu kreacji par elektron-pozyton w ekstremalnych warunkach, których realizacja staje się dziś realistyczna.

W świetle powyższego można stwierdzić, iż program badawczy zaproponowany i podjęty przez doktor Katarzynę Krajewską i sformułowany w tytule dotyczy ważnego zagadnienia należącego do najbardziej aktualnych badań fundamentalnych procesów fizycznych w warunkach, których realizacja stanowi wyzwanie z pogranicza dostępnych dziś możliwości eksperymentalnych. Warto też od razu zauważyć, że przeprowadzone badania wymagały zastosowania różnorodnych, zaawansowanych narzędzi współczesnej fizyki teoretycznej oraz analizy numerycznej i również ten aspekt stanowi o ich wartości. Uważam, że jest to dobrze postawiony, ambitny, ciekawy i obiecujący program badawczy, którego systematyczne podjęcie było uzasadnione, realizacja rzetelna i skuteczna, a uzyskane wyniki znaczące dla poszerzenia i pogłębienia wiedzy o jednym z najbardziej fundamentalnych zjawisk elektrodynamiki kwantowej.

Przedstawione jako podstawa habilitacji osiągnięcie naukowe doktor Katarzyny Krajewskiej stanowi podsumowanie wyników badań prowadzonych przez Autorkę w ciągu kilku lat i składa się na nie cykl sześciu tematycznie jednorodnych, oryginalnych artykułów opublikowanych w latach 2010-2012 w renomowanych czasopismach: pięć w *Physical Review A* (jedna jako *Rapid Communication*) i jeden w *Laser Physics*.

Z wyjątkiem jednego, wszystkie są pracami dwuautorskimi; ich współautorem jest profesor Jerzy Kamiński, przy czym nazwisko Habilitantki zawsze figuruje na pierwszym miejscu. W zestawieniu prac składających się na habilitację Autorka szacuje procentowo swój udział w powstaniu poszczególnych prac jako dominujący, a dołączone do dokumentacji przewodu oświadczenie profesora Jerzego Kamińskiego, precyzujące jego udział w poszczególnych elementach każdej z nich nie pozostawia wątpliwości, iż rola doktor Krajewskiej była w każdym wypadku zasadnicza, a wyraźnie przeważająca w przeprowadzeniu obliczeń analitycznych i redakcji tekstów publikacji.

Jak wspomniałem, prace składające się na cykl są jednorodne i spójne co do celu badań, ale dzielą się na dwie grupy tematyczne ze względu na bezpośrednią tematykę, wokół której każda z nich się koncentruje. Grupa pierwsza (prace E1-E3) to analiza efektów odbicia jądra atomowego zderzającego się z wiązką promieniowania traktowanego jako monochromatyczna fala płaska. Grupa druga (prace E4-E6) to zagadnienia związane z analizą wpływu charakterystyk impulsu pola laserowego na proces kreacji par, przy czym praca E6 bada to zjawisko w procesie zderzenia fotonów pola laserowego z innym, nielaserym fotonem. Trzeba podkreślić, że zagadnienia należące do obu grup są istotne nie tylko z perspektywy badań podstawowych, ale też, zadając pytania o wydajność procesu kreacji par w różnych warunkach, sytują się w perspektywie planowania eksperymentów nad tymi procesami.

Pierwsza praca z cyklu (E1) prezentuje model teoretyczny wielofotonowej kreacji par elektron-pozyton w wyniku zderzenia wiązki jąder atomowych z wiązką silnego monochromatycznego promieniowania laserowego w postaci fali płaskiej w reżimie nieperturbacyjnym (duża wartość charakteryzującego odpowiedni reżim kreacji parametru μ) z uwzględnieniem odbicia jądra. Wykorzystując formalizm macierzy S zbadano różniczkowe tempo powstawania pary, a głównym wynikiem była demonstracja możliwości jego wielkiego wzrostu w porównaniu do sytuacji nieuwzględniającej odrzutu, a także bardzo istotnej zależności tego tempa od polaryzacji promieniowania (duże dla polaryzacji liniowej). Również całkowite tempo kreacji bardzo rośnie przy uwzględnieniu odrzutu cząstek jądra. Zbadano też zależność rozkładów kątowych powstających cząstek od konfiguracji przestrzennej jąder. Praca E2 kontynuuje analizę procesu kreacji par w liniowo spolaryzowanym polu monochromatycznej płaskiej fali laserowej, a ważnym rezultatem jest pokazanie istnienia w tym procesie wąskich rezonansów, które Autorka interpretuje jako tzw. rezonanse Oleinika związane z biegunami w propagatorze fotonu. Praca E3, wykorzystując zaproponowane metody analizy, stanowi domknięcie dyskusji z dwóch poprzednich artykułów rozpatrując nowe aspekty procesu. Dyskutowany jest w szczególności tzw. ponadprogowy reżim wielofotonowej kreacji par, w którym dominujące stają się procesy w dalszych kanałach prowadząc do niemonotonicznego zachowania tempa kreacji ze wzrostem liczby zaabsorbowanych fotonów promieniowania laserowego. Jest to ciekawy wynik zwracający uwagę na analogię z innym, dobrze znanym efektem z dziedziny optyki silnych pól, a mianowicie jonizacją powyżej progu.

Drugi wątek tematyczny cyklu dotyczy analizy zjawiska kreacji par elektron-pozyton indukowanej supersilnym polem promieniowania w formie bardziej złożonej niż monochromatyczna fala płaska. Składają się na niego artykuły E4-E6. I tak, w pracy E4 przedstawiono opis kreacji par w polu impulsu dwukolorowego o współmiernych częstościach oraz zbadano zależność tempa tej kreacji od charakterystyk impulsu z uwzględnieniem zjawiska odrzutu cząstki tarczy obserwując m.in. istotną zależność rozkładów kątowych powstających par od względnej fazy składowych pola. Zbadano też tempo kreacji w zależności od fazy obwiedni impulsu. Praca E5 kontynuuje temat badając własności symetrii rozkładów kątowych kreowanych par elektron-pozyton w zderzeniu dwukolorowego impulsu laserowego z protonem, a ważnym wynikiem jest wskazanie zależności tych symetrii od własności potencjału wektorowego pola promieniowania laserowego. Wreszcie w pracy E6 analizowana jest kreacja par w innym procesie: w zderzeniu skończonego krótkiego impulsu laserowego z innym niż laserowy fotonem (tzw. proces Breita-Wheelera), a także ciągu takich impulsów. Badane były w szczególności

rozkłady prawdopodobieństwa powstających cząstek dla różnych czasów trwania impulsów laserowych.

W podsumowaniu należy powiedzieć, iż przedstawiony cykl prac podejmuje i rozwiązuje oryginalny, aktualny i trudny problem badawczy z obszaru kwantowej elektrodynamiki silnych pól. Celem badań była wszechstronna analiza teoretyczna zjawiska kreacji par elektron-pozyton, jednego z podstawowych elementarnych zjawisk rozpatrywanych przez elektrodynamikę kwantową, w nowych warunkach fizycznych, a mianowicie w polu promieniowania laserowego o ekstremalnie dużym natężeniu. Badania te, obok fundamentalnego znaczenia poznawczego, znajdują dziś dodatkową motywację w rozwoju technologii laserowej czyniącym realną doświadczalną realizację takich procesów. Takie właśnie studium zostało w sposób systematyczny podjęte i skutecznie zrealizowane w omawianym cyklu i uzyskane wyniki składają się na wieloaspektową panoramę fizyki tego procesu. Prace cyklu są bogate w bardzo wiele różnorodnych szczegółowych wyników i analiz, których nie sposób tu wszystkich referować. Już jednak nawet powyższe, skrótowe wskazanie niektórych tylko wyników przekonuje o ich znaczeniu i bogactwie. Prace te wskazują i szczegółowo analizują bardzo zasadniczą rolę odgrywaną przez zjawisko odbicia w procesie kreacji par podczas zderzenia poruszających się z relatywistycznymi prędkościami cząstek tarczy z wiązką silnego promieniowania laserowego, a także przez czasowe i fazowe charakterystyki impulsu pola. Nie mam wątpliwości, że wyniki te będą miały trwałe, referencyjne znaczenie dla całej dziedziny badań. Realizacja programu badawczego wymagała zaangażowania zaawansowanych metod teoretycznych, zarówno jeśli chodzi o obliczenia analityczne, jak i wymagające obliczenia numeryczne i przekonuje o eksperckiej wręcz ich znajomości przez Habilitantkę. Dodam jeszcze, iż w mej opinii prace cyklu, wymagające z natury rzeczy referowania wielu złożonych elementów technicznych i drobiazgowego omawiania szczegółowych wyników, są zredagowane w klarowny i przekonujący sposób, pokazują za każdym razem czytelne uzasadnienie podjętego tematu badań na tle dotychczasowego rozwoju i stanu istniejącej wiedzy oraz pozwalają nie utracić ani na moment zasadniczego celu, wątku prezentacji i perspektywy badawczej.

Jak wynika z powyższego, moja ogólna ocena osiągnięcia naukowego przedstawionego przez dr Katarzynę Krajewską jako podstawa postępowania habilitacyjnego jest bardzo pozytywna. Nakreślony program badawczy dotyczył ciekawej, aktualnej tematyki. Został on skutecznie zrealizowany w sposób wszechstronny i metodologicznie jednorodny, a uzyskane oryginalne wyniki nie tylko poszerzają w istotny sposób wiedzę na temat fundamentalnych aspektów fizycznych zjawiska kreacji par elektron-pozyton w polu ultrasilnego promieniowania laserowego, ale mają dla tej dziedziny pionierskie znaczenie. Ważne jest także to, iż sytuują się w perspektywie eksperymentalnego testowania procesów kwantowoelektrodynamicznych.

Ocena dorobku naukowego, dydaktycznego i popularyzatorskiego

Doktor Katarzyna Krajewska ukończyła z wyróżnieniem magisterskie studia fizyki w zakresie fizyki teoretycznej w roku 1999 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, a jej praca magisterska uzyskała nagrodę dla najlepszej pracy magisterskiej powstałej na wydziale w tym roku akademickim. Po ich ukończeniu podjęła tamże studia doktoranckie uzyskując w roku 2004 stopień doktora nauk fizycznych, a jej rozprawa doktorska, wykonana pod kierunkiem profesora Jerzego Kamińskiego, również została wyróżniona. Po obronie doktoratu rozpoczęła pracę jako adiunkt na Wydziale Fizyki UW, a w latach 2005-2007 odbyła staż podoktorski na Uniwersytecie w Nebrasce.

Wymierny dorobek naukowy doktor Katarzyny Krajewskiej liczy 24 opublikowane pozycje wymienione w bazie Journal Citation Report. Sześć z nich weszło do osiągnięcia habilitacyjnego. Dwadzieścia prac ukazało się po uzyskaniu stopnia doktora, a ponadto w momencie złożenia dokumentacji habilitacyjnej jeden artykuł był przyjęty do druku. Sumaryczny IF dla opublikowanych prac zgodnie z rokiem publikacji wynosi 61.94. Obok publikacji w czasopismach, doktor Katarzyna Krajewska przedstawiała wyniki swych badań na licznych konferencjach naukowych, prezentacji takich, w formie referatów i plakatów, było łącznie około trzydziestu. Prace te były i są w istotny sposób zauważane i odnotowywane przez społeczność fizyków: według dokumentacji przewodu liczba cytowań (bez autocytowań) wynosi 135, a indeks H jest równy 9. Zwraca uwagę rytmiczność publikacji: w każdym roku po doktoracie ukazywały się jej publikacje, w niektórych latach po kilka.

Zainteresowania naukowe i aktywność badawcza doktor Katarzyny Krajewskiej dotyczą szeroko rozumianej fizyki procesów kwantowych w silnych polach elektromagnetycznych. Można powtórzyć opinię wyrażoną w części recenzji poświęconej przedstawionemu cyklowi prac, gdyż dotyczy ona całokształtu aktywności naukowej Habilitantki. Są to zawsze badania o charakterze podstawowym w dziedzinach, które były lub są polem znacznej aktywności badawczej, teoretycznej i doświadczalnej. Wśród podejmowanych tematów wymieni należy dynamikę układów kwantowych wiązanych potencjałem kontaktowym w polach elektrycznym i magnetycznym, procesy wielofotonowe w oddziaływaniach układów atomowych z silnym polem laserowym, gdzie w szczególności badana była problematyka dotycząca fotoooderwania i fotojonizacji ze zwróceniem uwagi na efekty progowe w obu tych procesach związane z różnym charakterem potencjału wiążącego układ atomowy oddziałujący z polem w przypadku jonu ujemnego i atomu neutralnego. Osobno wymieni należy podjętą w roku 2006 i będącą do dziś zasadniczym obiektem zainteresowań naukowych Habilitantki tematykę dotyczącą fundamentalnych procesów elektrodynamiki kwantowej. Omówione w niniejszej recenzji habilitacyjne osiągnięcie naukowe plasuje się właśnie wśród badań należących do tej grupy. Są w niej jednak jeszcze inne zagadnienia, takie jak wcześniejsze badania kreacji par z pominięciem odrzutu jąder tarczy oraz badania rozpraszania Comptona w polu krótkich impulsów laserowych. We wszystkich tych tematach Autorka osiągnęła istotne wyniki opublikowane w bardzo dobrych czasopismach. Wśród publikacji z tego okresu na szczególne podkreślenie zasługuje artykuł przeglądowy opublikowany w roku 2009 w Reports on Progress in Physics (pozycja D5 w dokumentacji), którego doktor Krajewska jest jednym z trojga autorów. Artykuł ten zatytułowany „Fundamental processes of quantum electrodynamics in laser fields of relativistic power” przedstawia ówczesny stan wiedzy w tej dziedzinie, a więc w momencie poprzedzającym podjęcie badań składających się na osiągnięcie habilitacyjne i bez wątpienia stanowi przekonujący argument za uznaniem Habilitantki jako kompetentnego i dojrzałego eksperta. Doktor Krajewska podjęła też nowy temat badawczy dotyczący zagadnień kontroli dynamiki procesów kwantowych w ultrakrótkiej skali czasowej umożliwianej dzięki wykorzystaniu attosekundowych impulsów promieniowania laserowego; pierwsze wyniki były już prezentowane.

Dla pełniejszego przedstawienia sylwetki naukowej Habilitantki wspomnę jeszcze krótko o innych jej elementach. Na podkreślenie zasługuje szeroka współpraca zagraniczna Habilitantki. Oprócz wspomnianego już Uniwersytetu w Nebrasce i współpracy z grupą profesora A.F. Starace'a wymieni należy Uniwersytet w Durham i grupę profesora R.M. Potvliege'a, Instytut Maxa Plancka w Heidelbergu oraz Uniwersytet w Düsseldorfie i grupę

profesora C. Müllera oraz Uniwersytet oraz JILA w Boulder i grupę profesora A. Beckera – są to wiodące ośrodki i grupy w tematyce badań doktor Krajewskiej. Kolejnym godnym podkreślenia elementem jest udział w przedsięwzięciach związanych z pozyskiwaniem środków na badania. W chwili obecnej doktor Krajewska jest kierownikiem projektu NCN „Indukowane polem laserowym procesy kreacji par w elektrodynamice kwantowej”, była też i jest głównym wykonawcą w kilku innych projektach KBN, MNiSzW i NCN. Należy też odnotować, że współsprawuje ona opiekę naukową nad uczestnikiem Międzynarodowych Studiów Doktoranckich (MPD) na Wydziale Fizyki UW, który przygotowuje rozprawę na temat „Engineering and Control of Quantum Processes by Attosecond Laser Pulses”.

Inne obszary działalności doktor Katarzyny Krajewskiej to aktywna praca dydaktyczna na Wydziale Fizyki UW, w tym prowadzone dotąd na różnych poziomach studiów wykłady z mechaniki kwantowej. Zdobyła też doświadczenie w pracy dydaktycznej za granicą prowadząc wykład na temat kwantowej teorii pola w Instytucie Maxa Plancka w Heidelbergu w roku 2011. Spośród jej zaangażowań w popularyzację wymienię udział w akcji „Dziewczyny do ścisłych” oraz administrowanie stroną internetową projektu „Fizyka – kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy” – nie trzeba mówić, jak pożyteczna i cenna jest dziś ta działalność dla zwiększenia zainteresowania studiami na kierunkach ścisłych.

Konkluzja

Z powyższego wynika, że zdecydowanie pozytywnie oceniam osiągnięcia i dorobek doktor Katarzyny Krajewskiej. Uzyskane przez nią oryginalne wyniki przedstawione jako osiągnięcie będące podstawą procedury habilitacyjnej stanowią znaczący wkład do rozwoju bardzo aktualnej i trudnej dziedziny badań podstawowych nad fundamentalnymi procesami elektrodynamiki kwantowej. Dorobek naukowy spoza tematyki objętej habilitacją zasługuje również na wysoką ocenę, jest on obszerny i został bardzo znacząco powiększony po doktoracie. Podobnie wysoko oceniam prowadzoną przez doktor Krajewską współpracę naukową oraz udział w projektach badawczych. Nie mam wątpliwości, że osiągnięcie „Procesy kreacji par elektron-pozyton w silnych polach laserowych” oraz dotychczasowy dorobek naukowy, a także dydaktyczny i popularyzatorski doktor Katarzyny Krajewskiej spełniają wymagania niezbędne do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego. Tym samym wyrażam swą pozytywną opinię w sprawie nadania jej tego stopnia i wnoszę o dopuszczenie jej kandydatury do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Toruń, 29 listopada 2013

