

Warszawa, 28 stycznia 2025 r.

Prof. dr hab. Jan Mostowski
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

**Recenzja Pracy Doktorskiej pt. „Radiative Recombination in Strong Laser Pulses”,
autor: mgr Deeksha Kanti, promotor dr hab. Katarzyna Krajewska, prof. UW**

Praca doktorska mgr Deeksha Kanti ma formę pracy pisemnej, liczy 117 stron, podzielona jest na cztery rozdziały oraz dwa dodatki zawierające materiały uzupełniające. Spis literatury liczy 131 pozycji. Całość napisana jest w języku angielskim.

Praca doktorska oparta jest o dwie publikacje:

1. Deeksha Kanti, J. Z. Kamiński, Liang-You Peng, and K. Krajewska, Laser-assisted electron-atom radiative recombination in short laser pulses, *Physical Review A* 104, 033112 (2021),
2. D. Kanti, M. M. Majczak, J. Z. Kamiński, Liang-You Peng, and K. Krajewska, Laser-assisted radiative recombination beyond the dipole approximation, *Phys. Rev. A* 110, 043112 (2024).

W tym wypadku użyty zwrot „praca doktorska jest oparta o publikacje” oznacza, że wszystkie wyniki opisane w pracy doktorskiej zawarte są też w wymienionych publikacjach. Maszynopis pracy doktorskiej nie wnosi nowych elementów. Powstaje więc pytanie o rolę pozostałych autorów, w szczególności M.M. Majczaka oraz Liang-You Penga, w uzyskanie przedstawionych wyników, jak również o ich prawa autorskie.

Praca doktorska poświęcona jest procesom rekombinacji elektronów z emisją fotonów w obecności pola laserowego. Procesy rekombinacji były badane od dawna, współczesne techniki doświadczalne pozwalają na precyzyjne badanie tych procesów, co powoduje konieczność ich szczegółowego opisu teoretycznego.

Proces rekombinacji jest w pewnym sensie odwrotny do procesu jonizacji, bardzo intensywnie badanego w ostatnich latach. Jonizacja w silnych polach laserowych jest procesem wielofotonowym, absorbowanych jest wiele fotonów z wiązki laserowej, a widmo fotoelektronów może zawierać szereg maksimów. W procesie rekombinacji natomiast silne

pole laserowe wpływa jedynie na stan początkowy swobodnego elektronu oraz na stan końcowy, czyli stan związany elektronu z jonem. Przejście między tymi stanami związane jest ze spontaniczną emisją fotonu. Wielkością mierzoną w tym procesie jest rozkład energetyczny i kątowy oraz stan polaryzacji emitowanych fotonów. Ze względu na emisję fotonu proces rekombinacji nie jest dokładnie odwrotnością jonizacji

Praca składa się z czterech rozdziałów. Pierwszy, Wstęp (Introduction), to ładnie napisany przegląd dotychczasowych badań nad rekombinacją, również w polu laserowym. Podany jest związek rekombinacji z wielofotonową jonizacją. Podany jest też, co cenne, opis doświadczeń dotyczących rekombinacji. Podane jest też krótkie streszczenie wyników.

Zasadnicze wyniki pracy przedstawione są w rozdziałach 2 i 3. Rozdział 2 poświęcony jest procesom rekombinacji, lub raczej dołączania elektronu, w przybliżeniu dipolowym, a rozdział 3 – procesom rekombinacji poza przybliżeniem dipolowym. Być może lepszym sformułowaniem byłby podział na rekombinacji elektronów niskoenergetycznych (co prowadzi do przybliżenia dipolowego) oraz rekombinacji elektronów o większej energii.

Opis teoretyczny procesów rekombinacji w pracy doktorskiej zakłada, że stanem początkowym układu jest elektron w zewnętrznym polu laserowym oraz próżnia fotonowa. Stan końcowy to stan związany elektronu z zadaną funkcją falową oraz jeden spontanicznie emitowany foton. Przejście między stanami opisuje się w linowym przybliżeniu opisującym sprzężenie elektronów z fotonami, jest to więc pierwszy rząd rachunku zaburzeń w sprzężeniu elektronów z fotonami.

Rozdział 2 opisuje rekombinację (dołączanie) elektronów w polu laserowym w przybliżeniu dipolowym. Rozpatrywany jest przypadek monochromatycznych elektronów oraz przypadek krótkich pulsów elektronowych. Wyznaczona została amplituda prawdopodobieństwa rekombinacji z emisją fotonu w tych przypadkach. Dość zawiłe wzory opisujące prawdopodobieństwo przejścia zostały przybliżone i doprowadzone do prostszej postaci, która umożliwia (do pewnego stopnia) zrozumienie procesu.

Bardzo istotnym elementem opisu rekombinacji są ilustracje numeryczne. Podane są wyznaczone numerycznie prawdopodobieństwa rekombinacji w przypadku dość realistycznie dobranych wartości parametrów. Z rachunkowego punktu widzenia najprostszy jest przypadek monochromatycznego pola laserowego oraz mono-energetycznych elektronów. Ważnym elementem pracy jest rozszerzenie analizy na krótkie impulsy laserowe i elektronowe. Ilustracje numeryczne przeprowadzone są dla elektronów o kilku różnych

średnich energiach: 1 eV, 30 eV, czas ich trwania to około dwóch pełnych cykli, są to więc impulsy femtosekundowe. Impulsy laserowe mają średnią długość fali równą 4000 nm, lub 10600 nm, są również ultrakrótkie, o dwóch pełnych cyklach, czyli o femtosekundowym czasie trwania.

Ciekawa jest dyskusja zjawiska rekombinacji w polu „optycznego grzebienia”, czyli ciągu impulsów laserowych. Emitowane fotony również mają wówczas strukturę „grzebienia”, ale o innej centralnej częstotliwości.

W pracy podana jest też analiza „widma zależnego od czasu” emitowanych fotonów, czyli częstotliwości fotonów w funkcji okna czasowego, w którym dokonuje się analizy. To ciekawa wielkość, nazywana w pracy spektrogramem, która pokazuje częściowo przebieg czasowy omawianego zjawiska rekombinacji.

Ciekawym pomysłem jest przedstawiona możliwość odtworzenia przebiegu czasowego impulsu laserowego na podstawie analizy spektrogramu. Nie bardzo widzę jednak sens stosowania tej metody w badaniu impulsów laserowych, są inne prostsze możliwości analizy kształtu impulsu.

Zaletą tej części pracy jest przeprowadzenie bardzo precyzyjnych rachunków dotyczących rekombinacji elektronów w zewnętrznym polu laserowym. Na uwagę zasługuje wszechstronna analiza fizyczna, częściowo oparta o rachunki przybliżone, a częściowo o rachunki numeryczne.

Chcę jednak zwrócić uwagę, że procesy wychwytu elektronów w zewnętrznym polu laserowym są dość egzotyczne. W omawianych procesach wytwarza się ujemne jony w wyniku dołączenia elektronu do neutralnego atomu, na przykład atomu wodoru. Ponadto rozpatrywane femtosekundowe impulsy laserowe oraz ultrakrótkie impulsy elektronowe, w szczególności o rozpatrywanych w pracy niskich energiach, są trudne do uzyskania i właściwego skorelowania. W pracy zresztą nie ma odniesień do realnych doświadczeń. Szkoda też, że dyskusja fizyczna nie obejmuje nieco dłuższych impulsów, można by wtedy zaobserwować przejście do sytuacji monochromatycznej, jak na przykład do stanów o określonej kwazi-energii.

Rozdział 3 poświęcony jest analizie procesów rekombinacji w przypadku elektronów o większych energiach, wymaga to wyjścia poza przybliżenie dipolowe. W tym przypadku stanem początkowym jest elektron w polu kulombowskim oraz polu laserowym, dlatego autorka używa konsekwentnie słowa „rekombinacja” a nie „przyłączenie”, jak w poprzednim

rozdziale. Pozostałe elementy, czyli impulsy laserowe są podobne do rozważanych poprzednio. W tym przypadku zastosowane zostało rozwinięcie wszystkich wielkości fizycznych z dokładnością do wyrazów rzędu $1/c$. Rozdział zaczyna się od znalezienia funkcji falowej elektronu o danej energii w polu kulombowskim. Można ją otrzymać ze ścisłego rozwiązania równania Diraca, autorka nie zajmuje się jednak spinem elektronu i wykorzystwała rozwiązanie równania Kleina-Gordona. Uzyskana relatywistyczna funkcja falowa została rozwinięta w $1/c$. W ten sposób autorka uzyskała przybliżoną funkcję falową stanu początkowego. W dalszym ciągu autorka znalazła rozwinięcie fazy funkcji falowej uwzględniającej potencjał wektorowy pola lasera, jest to istotne w dalszej części. Autorka wprowadziła trzy typy wyrazów rzędu $1/c$: członu związanego z cechowaniem pola elektromagnetycznego, członu związanego z odrzutem atomu, oraz członu związanego z retardacją.

Nasuwa się tu następująca uwaga. Nie znalazłem argumentów, że rozwinięcie wszystkich wielkości na szereg w $1/c$ jest uzasadnione. W numerycznych przykładach rozpatrywane są fotony o energii rzędu 10 keV, czyli o długości fali rzędu promienia atomu, a więc wydaje się, że wyższe powinno się rozpatrzyć również wyrazy wyższego rzędu, lub w ogóle nie stosować rozwinięcia. Mam też uwagę terminologiczną. To co w pracy nazwane jest „efektem opóźnienia” (retardation effect), w fizyce atomowej jest raczej nazywane „przybliżenie kwadrupolowe i magnetyczne dipolowe”.

Dalsza część tego rozdziału ma strukturę podobną do poprzedniego. Przedyskutowany jest dokładnie rozkład energetyczny emitowanych spontanicznie fotonów. Rozpatrywany jest przypadek mono-energetycznych elektronów, krótkich impulsów elektronowych elektronów podobnych do tych z poprzedniego rozdziału. Rachunki są koncepcyjnie zbliżone do poprzednich, wymagają jednak znacznie większego nakładu pracy, a rezultaty są dość trudne do interpretacji. Bardzo istotną częścią tego rozdziału są więc przykłady numeryczne, które ilustrują i ułatwiają zrozumienie otrzymanych wyników. Oprócz widma emitowanych fotonów wyznaczone zostało widmo zależne od czasu, czyli spektrogramy.

Na uwagę zasługuje szczegółowa dyskusja niebanalnej roli zjawiska odrzutu w widmie fotonów. Ciekawym pomysłem było zbadanie widma fotonów w obecności impulsów laserowych z modulacją częstotliwości (chirpem). Przy odpowiednio dobranym impulsie elektrony w oddziaływaniu z polem laserowym przez wydłużony czas co prowadzi do zwiększenia

prawdopodobieństwa emisji fotonów. W ten sposób można uzyskać zwiększenie liczby fotonów o wysokich częstotliwościach.

Kolejnym wynikiem było wykazanie, że w amplitudzie prawdopodobieństwa emitowanych fotonów można uzyskać wiry. Jest to moim zdaniem ciekawy wynik, ale nie znalazłem omówienia, jak wirowa struktura amplitudy przekłada się na obserwowalne wielkości.

Rozdział 4 pracy zawiera streszczenie i podsumowanie wyników.

Pracę uzupełniają matematyczne dodatki wyjaśniające niektóre matematyczne elementy używane w pracy. Są one bardzo szczegółowe i szczerze mówiąc miejscami trudne do zrozumienia.

Podsumowując stwierdzam, że praca zawiera bardzo szczegółową i dogłębnie przeprowadzoną analizę procesów rekombinacji elektronów w obecności pola laserowego. Duże wrażenie robi biegłość rachunkowa autorki, jak również umiejętność wytłumaczenia fizycznych procesów wynikających z tych rachunków, co zasługuje na szczególne uznanie. Uważam, że autorka wykazała się głęboką znajomością fizyki teoretycznej, w szczególności w zakresie procesów elektromagnetycznych w atomach.

Praca jest napisana bardzo dobrym i precyzyjnym językiem. Nie znalazłem błędów formalnych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Radiative Recombination in Strong Laser Pulses” mgr Deeksha Kanti spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z Artykułem 192 ust. 2 i 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z późn. zm. (tekst jednolity: Dz. U. 2023 r. poz. 742). Stawiam wniosek o dopuszczenie autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jan Mostowski