Sprawozdanie z realizacji grantu UMK 442-F

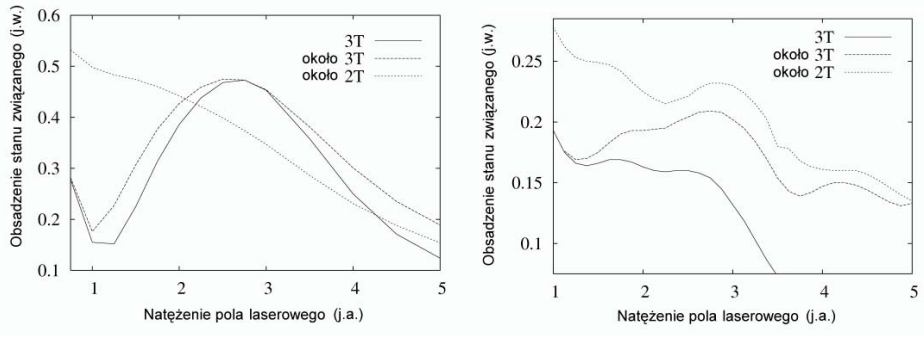
Tematem grantu **UMK 442-F** było:
1) Badanie zjawiska rekombinacji w silnym polu lasera,
2) Przygotowanie podręczników „Delphi 2005" oraz „Microsoft Visual C# 2005" w ramach rozwoju dydaktyki informatyki stosowanej na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Jego kierownikiem był dr **Jacek Matulewski**, adiunkt w Instytucie Fizyki UMK (Zakład Mechaniki Kwantowej).
Zespół badawczy składał się z dwóch grup. Pierwsza zajmowała się badaniem rekombinacji w polu silnego promieniowania laserowego i tworzyli ją: prof. Andrzej Raczyński, prof. Jarosław Zaremba oraz kierownik grantu (wszyscy zatrudnieni w Instytucie Fizyki). Drugą grupę zajmującą się przygotowaniem podręczników stanowili Jacek Matulewski („Delphi 2005" i „Visual C# 2005"), Sławomir Orłowski („Delphi 2005") i Michał Zieliński („Delphi 2005"). Dwaj ostatni zostali dołączeni do grupy w zamian za dr hab. Piotra Pepłowskiego, który ze względu na obowiązki prodziekana Instytutu Fizyki nie mógł wziąć udziału w projekcie.
Grant został zrealizowany w miesiącach od lipca do października 2005.

Wyniki badania rekombinacji w silnym polu lasera

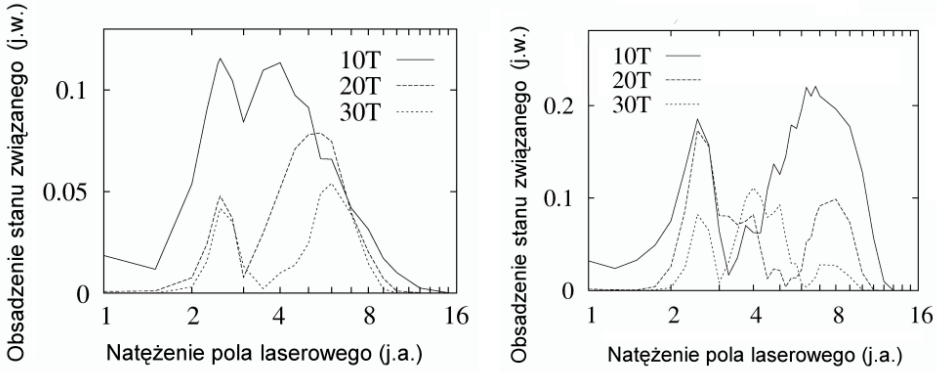
Jonizacja atomu w bardzo silnym polu lasera (tj. większym od pola, którego źródłem jest jądro atomu) przebiega niezgodnie z intuicją uzyskaną dla słabszych pól – w pewnym przedziale natężeń pola lasera wydajność jonizacji maleje pomimo zwiększania mocy lasera. Zjawisko to, zwykle nazywa się je „stabilizacją w silnym polu lasera", pozostaje w centrum zainteresowania optyki kwantowej od co najmniej dwóch dekad. Można je zaobserwować zarówno w układach z potencjałem dalekozasięgowym (np. potencjał kulombowski odpowiadający potencjałowi atomów wodoropodobnych), jak i krótkozasięgowym (np. studnia potencjału odpowiadająca jonowi ujemnemu). Zjawisko to zostało dość dobrze poznane i wydaje się, że możemy je jakościowo zrozumieć w ramach modelu studni Kramersa-Hennebergera. Zespół Optyki Kwantowej, w którego skład wchodzą prof. Andrzej Raczyński, prof. Jarosław Zaremba i dr Jacek Matulewski uzyskali interesujące wyniki dotyczące stabilizacji, przeprowadzając jedno- i dwuwymiarowe symulacje, w których rozwiązywano czasowe równanie Schroedingera.
Procesem odwrotnym do jonizacji jest rekombinacja. W zjawisku tym początkowo swobodny elektron pod wpływem działania pola lasera jest wiązany w stanie dyskretnym układu. Dynamika rekombinacji elektronu w ultra-silnym polu lasera została zbadana metodami numerycznymi przez bezpośrednie całkowanie zależnego od czasu równania Schrödingera w jednym wymiarze przestrzennym. Obliczenia przeprowadzano wykorzystując dwa modele opisujące układ atomowy. W pierwszym wykorzystano potencjał atomowy z miękkim rdzeniem, w drugim – prostokątna studnia potencjału. W obliczeniach zmieniane było zarówno natężenie pola lasera (od 1 do 15 j.a.), jak i jego częstość (od 0.5 do 2 j.a.). W chwili początkowej pakiet falowy elektronu opisany był funkcją Gaussa. Jego pozycja została dobrana w taki sposób, aby punkt zwrotu po połowie okresu optycznego wypadał nad centrum potencjału.
Wyniki obliczeń dla obu typów potencjału uzyskane dla częstości $\omega = 1$ widoczne są na rys. 1. Przedstawia on obsadzenie stanów podstawowych w funkcji natężenia zewnętrznego pola lasera. Wykresy dotyczą trzech różnych okresów, po których wyłączano pole lasera. Linia ciągła odpowiada sytuacji, gdy impuls laserowy został wyłączony dokładnie po czasie

odpowiadającemu trzem okresom optycznym (3T). Linią przerywaną wykreślono zależność dla sytuacji, gdy impuls wyłączony zostaje po czasie bliskim 3T w momencie, w którym obsadzenie zależne od czasu ma lokalne maksimum, natomiast linia kropkowana odpowiada analogicznej chwili dla 2T. Prezentowana zależność ujawnia charakter niemonotoniczny dla obu wykresów odpowiadających długości impulsu 3T, natomiast w przypadku 2T maksimum nie zdążyło powstać, gdyż czas potrzebny na wynikające z zjawiska nazywanego wolnym dryfem przesunięcie się lewego punktu zwrotu pakietu z pozycji początkowej w kierunku studni trwa w przypadku wykorzystanych parametrów mniej więcej trzy okresy. Widoczne na rys. 1 (lewy, potencjał atomowy) szerokie maksimum dla pola o wartości $\varepsilon_0 \approx 2.5$ j.a. obecne jest bez względu na to czy impuls wyłączony był dokładnie po czasie 3T czy w momencie osiągnięcia lokalnego maksimum. Podobną niemonotoniczną zależność zaobserwować można dla prostokątnej symetrycznej studni potencjału (rys. 1, prawy). Wykres ten sugeruje istnienie nawet większej ilości maksimów w tym przypadku, choć słabiej widocznych.



Rys. 1. Obsadzenie stanu związanego w funkcji natężenia pola lasera w trzech różnych momentach czasu dla modeli potencjału atomowego (a) i studni potencjału (b).

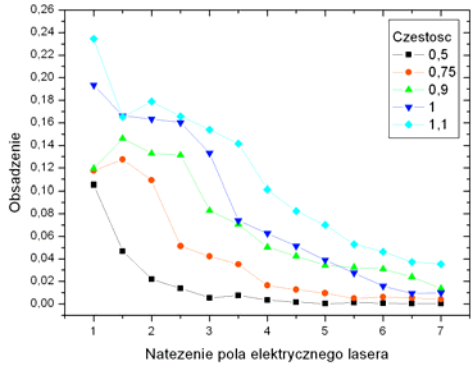
Podobne zachowanie obsadzenia stanu związanego w zależności od natężenia zewnętrznego pola można również zaobserwować dla dłuższych czasów trwania impulsu (10T, 20T, 30T), co ilustruje rysunek 2, lewy.



Rys. 2. Obsadzenie stanu związanego w funkcji natężenia pola lasera dla czasów trwania impulsu 10T, 20T i 30T. Porównanie rekombinacji (lewy) i jonizacji (prawy).

Można zauważyć tu dwa wyraźnie rozdzielone maksima, z których jedno występuje dla $\varepsilon_0 \approx 2.5$ j.a. i widoczne jest niezależnie od czasu trwania impulsu laserowego natomiast drugie poszerza się oraz przesuwa wraz z wydłużaniem impulsu. Pierwszy pik może mieć związek z długim czasem życia stanu własnego studni Kramers'a – Henneberger'a, a drugie maksimum związane jest z wolnym dryfem pakietu falowego. Pik ten jest widoczny, jeżeli w

momencie wyłączenia główna część pakietu przemieszczana w wyniku wolnego dryfu znajduje się w pobliżu studni oraz ma zerową prędkość.
Podobna zależność obsadzenia stanu związanego od pola występuje dla zjawiska jonizacji (rys. 5.3, prawy). W tym przypadku można również zaobserwować główny pik dla natężenia pola $\varepsilon_0 \approx 2.5$ j.a. przy dowolnym czasie trwania impulsu oraz drugi pik o zmieniającej się pozycji.
Na rys. 3 przedstawione są wyniki symulacji przeprowadzone dla różnych częstości. Wykresy prezentują zależności obsadzenia stanu związanego od natężenia pola zewnętrznego po czasie 3T dla częstości ω należących do zakresu od 0.5 do 1.1 j.a.



Rys. 3. Zależność obsadzenia stanu związanego od natężenia pola zewnętrznego dla częstości od 0.5 do 1.1.

Te obliczenia wykonano dla modelu prostokątnej studni potencjału. Przy najniższej częstości (ω = 0.5) obsadzenie maleje dość szybko ze wzrostem natężenia pola i dla wyższych natężeń wykazuje jedynie niewielkie fluktuacje. Odmienne zachowanie obserwujemy dla częstości z przedziału od 0.75 do 1.1. Wyraźnie widoczne jest wówczas maksimum, które wraz ze wzrostem częstości poszerza się i jednocześnie przesuwa w kierunku wyższych natężeń pola. Wydaje się to odpowiadać wynikom uzyskanym przez Volkova i in.. Zgodnie z jej obliczeniami analitycznymi pierwsze maksimum powinna wypada dla pola równego $\varepsilon = 3.83\omega^2 / \sqrt{2\omega}$
Przewidywana pozycja maksimum dla ω = 0.5 znajduje poniżej badanego przez nas zakresu natężeń, dlatego nie obserwujemy w tym przypadku niemonotoniczności. Obliczone za pomocą powyższego wzoru natężenia pola odpowiadają pozycjom maksimów uzyskanym w efekcie symulacji. Zupełnie niewidoczne, poza przypadkiem ω=0.75, są natomiast kolejne maksima dla wyższych natężeń pola.

Szczególnie wyraźnie niemonotoniczny charakter zależności obsadzenia od natężenia pola widoczny jest dla przypadków ω = 0.9, 1 i 1.1. Z kolei przy częstościach ω ≥1.25 j.a. zależność widoczna na wykresach staje się znowu monotoniczna wykazując jedynie charakterystyczne przegięcie dla wartości natężenia pola, które odpowiadają wartościom widocznym w tabeli 5.1 (dla ω=1.25 jest to ok. 3.7, natomiast dla ω=1 jest to ok. 5).

Charakterystyczną cechą wykreślonych zależności jest też fakt, że wartość obsadzenia stanu związanego dla danego natężenia pola lasera rośnie wraz ze wzrostem częstości. Choć zależność obsadzenia od częstości zachowuje monotoniczność, widoczne są jej „zawahania" dla częstości od 0.75 do 1.1, tj. dla tych, w których obserwujemy najwyraźniejsze maksima na rysunku 3.

Publikacje

- J. Matulewski, Andrzej Raczyński, Jarosław Zaremba, *On recombination in strong laser fields: effect of a slow drift*, quant-ph/0506220.
- J. Matulewski, Andrzej Raczyński, Łukasz Rębarz, Jarosław Zaremba, *On recombination in strong laser fields: manifestation of a slow drift*, Phys. Rev. [wysłana do druku]
- J. Matulewski, S. Orłowski, M. Zieliński *Delphi 2005. 303 gotowe rozwiązania* Wydawnictwo Helion, Gliwice 2005 (648 stron, ISBN 83-7361-923-2)
- J. Matulewski, *Visual C# 2005 Express Edition. Od podstaw*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2005 (215 stron, ISBN 83-246-0334-4)
- Seria artykułów dotycząca języka C# i platformy .NET przygotowana na podstawie powyższej książki:
    - J. Matulewski, PC World 08/2005, s. 142-143
    - J. Matulewski, PC World 08/2005, s. 144-149
    - J. Matulewski, PC World 09/2005, s. 155-157
    - J. Matulewski, PC World 09/2005, s. 158-163
    - J. Matulewski, PC World 10/2005, s. 179-181
    - J. Matulewski, PC World 10/2005, s. 182-185
    - J. Matulewski, PC World 11/2005, s. 178-182
    - J. Matulewski, PC World 12/2005, s. 168-171

Kolejne artykuły przygotowane są do druku i ukażą się w kolejnych numerach czasopisma PC World.

W ramach badania rekombinacji w silnym polu lasera ukończona została praca inżynierska przygotowana przez Łukasza Rębarza w roku 2005 pod kierunkiem dra Jacka Matulewskiego pt. *Zjawisko rekombinacji w silnym polu lasera. Projekt QViso*. W tym samym roku ukończona została również praca inżynierska napisana przez Błażeja Lutkowskiego (również pod kierunkiem Jacka Matulewskiego) opisująca rozwijane przez studenta oprogramowanie pomagające w przygotowywaniu parametrów symulacji dla programu wykorzystywanego przy badaniu rekombinacji.