

ПРИМЉЕНО: 07.05.2014.			
Орг. јед.	Број	ПРИЛОГ	ВРЕДНОСТ
02	460/16	-	-

07/05/2014.  
Institut za fiziku  
Mikowicz  
НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

**Предмет:** Извештај комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Татјане Миладиновић, дипл. физичара-информатичара.

Одлуком Наставно-научног већа Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу, број 290/VII-1, одржаној дана 26.03.2014., одређени смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације под насловом

**„УКЉУЧИВАЊЕ НЕНУЛТОГ ИМПУЛСА ЕЛЕКТРОНА У ПРОЦЕНУ БРЗИНЕ  
ПРЕЛАЗА У АМОСОВ-ДЕЛОНЕ-КРАЈНОВ ТЕОРИЈИ ЗА СЛУЧАЈ  
НИСКОФРЕКВЕНТНОГ ЛИНЕАРНО И ЦИРКУЛАРНО ПОЛАРИЗОВАНОГ  
ЛАСЕРСКОГ ПОЉА“**

кандидата Татјане Миладиновић, истраживача сарадника на Природно-математичком факултету у Крагујевцу. Након прегледа докторске дисертације, а у складу са Статутом Факултета, чл. 51, и Статутом Универзитета, чл. 48, подносимо Наставно-научном већу Природно-математичког факултета следећи

## ИЗВЕШТАЈ

Докторска дисертација кандидата Татјане Миладиновић изложена је на 136 страна, а у оквиру текста приказано је 47 слика, 2 табеле и 368 једначина. Укупно је цитирано 96 литературних јединица.

Поднети рад се састоји из три дела (поглавља). Поглавље 1 и Поглавље 2 су општа, без оригиналног научног доприноса кандидата, дају преглед стања у овој научној области. Поглавље 3 представља истраживачки рад кандидата.

### Преглед садржаја урађене дисертације

У Поглављу 1 дат је сажет приказ појмова неопходних за разумевање рада. Дат је кратак осврт на развој ласерске технологије као и подела ласера. Описане су основне карактеристике ласерског снопа са посебним акцентом на врсту поларизације и дужину трајања ласерског пулса. Укратко је приказан опис могућих интеракција фотона са атомом. Различити механизми јонизације као што су: мултифотонска, јонизација изнад прага, јонизација потискивањем баријере и тунелна јонизација представљени су у Поглављу 1. За довољно високе интензитете ласерског поља може доћи до двоструке или вишеструке јонизације вишеелектронског атомског система, чије су основне карактеристике и поделе представљене у овом поглављу такође.

У сврху разграничавања различитих механизма јонизације погодно је користити Келдишов параметар, чија вредност зависи од јачине ласерског поља и његове фреквенције, као и од енергије јонизације посматраног атома. Добијање Келдишовог параметра је такође приказано у Поглављу 1.

У овом раду за описивање процеса тунеловања електрона кроз потенцијалну баријеру коришћен је модел квазикласичне апроксимације, у којој се атом третира као квантни објекат

док се ласерско поље третира класично. У Поглављу 1 приказани су класични опис електромагнетног поља, као и класични и квантни опис кретања наелектрисане честице у овом пољу.

У Поглављу 2 је представљен најзначајнији апроксимативни метод којим се описује интеракција јаког ласерског поља и атомских и молекулских система - апроксимација јаког поља. Ову апроксимацију је развио Келдиш и њен значај лежи у чињеници да је због врло високих интензитета ласерског поља примена теорије пертурбације, као најчешће коришћеног апроксимативног метода у физици, немогућа. У апроксимацији јаког поља јонизациони процес се описује као прелазак почетног стања без присуства поља у коначно Волковљево стање (у континууму).

Келдиш је први дао теоријски оквир заснован на овом приступу а затим су његову теорију проширили Переломов, Попов и Терент`ев који су извели формулу за брзину прелаза атома водоника у јаком ласерском пољу из основног стања у јонизовано. Шири домен примене ове формуле дали су Амосов, Делоне и Крајнов, који је унапређују што доводи до настанка АДК теорије. У овом поглављу је представљена проширена теорија тунелне јонизације Амосов-Делоне-Крајнов (АДК) која описује јонизацију атома у јаком ласерском пољу и заснована је на тунеловању електрона кроз пригушену потенцијалну баријеру која представља суперпозицију атомског потенцијала и спољашњег електричног поља

Изведена је брзина прелаза решавањем временски зависне Шредингерове једначине и применом Ландау-Дихне адијабатске апроксимације. При извођењу брзине прелаза коришћењем метода Ланда-Дихне адијабатске апроксимације анализирана су два случаја, када је вредност почетног импулса избаченог електрона једнака нули и различита од нуле.

Користећи основне концепте и методе теоријског описивања датих у овој области физике у Поглављу 2. су представљене неке од фундаменталних и најважнијих информација о атомским прелазима проузрокованих спољашњим пољем. Такође, приказана је разлика између брзина прелаза у статичком и променљивом спољашњем пољу. Константни напредак ласерске технологије и могућност добијања ласерског зрака великих интензитета усмерио је истраживања у правцу у коме се при проучавању јонизационих процеса морају узети релативистички ефекти. У Поглављу 2 су описани основни појмови и величине везане за процес тунеловања електрона у релативистичком режиму.

Систематска истраживања процеса тунелне јонизације почела су тако што су извођени бројни експерименти у којима су мерене величине као што је принос јона и ефикасни пресек у гасовима који су изложени деловању ласерског зрачења. Ове величине су укратко представљене у Поглављу 2. Јонизација молекула се такође може описати АДК теоријом која је проширена на двоатомске молекуле. У овом раду дат је само коначан израз за вероватноћу јонизације молекула.

Поглавље 3 представља оригиналан истраживачки рад аутора и базирано је на проучавању утицаја ненулног почетног импулса избаченог валентног електрона атома калијума (К),  $Z=1$ , на брзину прелаза. Закључено је да се на почетку деловања ласера сва енергија ласерског пулса користи за тунеловање електрона и брзина прелаза је велика док је вредност почетног импулса електрона мала. Након тога, даљим деловањем ласерског поља вероватноћа јонизације опада зато што се део енергије ласерског пулса користи за повећање импулса избаченог електрона, остављајући на располагању мање количине енергије за

јонизацију преосталих електрона. Исти резултати су добијени рачунањем брзине прелаза у линеарно и циркуларно поларизованом пољу.

У Поглављу 3 посматрано је и понашање брзине прелаза електрона који се налазе у првој, попуњеној љусци, када је  $Z=2,3,4,5$ . Закључак је да са порастом  $Z$  утицај импулса избаченог електрона на брзину прелаза опада зато што је неопходан већи број фотона да би се савладала енергија везе јона већих степена јонизације  $Z$ , тако да је преостао много мањи број фотона који може бити искоришћен на повећање импулса електрона.

Ради добијања потпуније слике истраживање је проширено на анализу брзине прелаза и принос јона при тунелној јонизацији атома племенитих гасова, односно на једноструку и двоструку тунелну јонизацију племенитих гасова који су изложени линеарно и циркуларно поларизованом ласерском пољу. Уочено је да постоји разлика између брзине прелаза при чијем су рачунању укључени ненулти почетни импулс избаченог електрона и пондеромоторни потенцијал и брзине прелаза рачунате без укључивања ових корекција. Разлог оваквом понашању лежи у томе да се део енергије фотона „потроши“ на почетни импулс избаченог електрона и пондеромоторни потенцијал а не само на савладавање енергије јонизације, због тога је вероватноћа јонизације мања. Исти приступ је коришћен при анализи јонизације атома племенитог гаса у циркуларно поларизованом ласерском пољу.

Посматране су промене у вредностима приноса јона у зависности од интензитета ласерског поља. Запажено је да је принос јона који се рачуна користећи кориговане формуле мањи у поређењу са приносом који је рачунат користећи основну формулу за брзину прелаза. Овакво понашање је још уочљивије када долази до двоструке јонизације.

У Поглављу 3 мали део је посвећен анализи параметра  $\gamma$ , и закључено је да су за случај  $\gamma \approx 1$  заступљена оба механизма јонизације. Имајући ово у виду проширена су истраживања и на област мултифотонске јонизације. Теоријски су анализирана брзина прелаза и генерализовани ефикасни пресек атома у случају мултифотонског јонизационог процеса у линеарно поларизованом ласерском пољу са посебним освртом на утицај пондеромоторног потенцијала и ненулног почетног импулса избаченог електрона на поменуте физичке величине.

Веома сажето у овом поглављу је дато како број апсорбованих фотона утиче на брзину прелаза и како се брзина прелаза мења у функцији броја апсорбованих фотона и интензитета ласерског поља. Када расте број апсорбованих фотона расте и брзина прелаза све до неке максималне вредности, након чега опада и асимптотски се приближава нули.

У циљу детаљнијег проучавања процеса тунелне јонизације атома у јаким ласерским пољима Поглављу 3 рачунато је на којој енергији је примећен максималан број фотоелектрона.

У закључку је дат сажет преглед резултата докторске дисертације.

### **Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

У докторској дисертацији кандидата Татјане Миладиновић укључивањем додатних чланова, ненулног почетног импулса и пондеромоторног потенцијала избаченог електрона, добијен је кориговани израз за брзину прелаза електрона при тунелној јонизацији. Приказан је утицај ових корекција и на величине као што су принос једноструко и вишеструко јонизованих атома, ефикасни пресек и енергетска расподела фотоелектрона. Такође,

разматран је утицај поларизације ласерског поља на поменуте величине. Резултати истраживања су представљени применом АДК теорије.

#### **Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

Имајући увид у актуелно стање у изучавању интеракције ласерског поља и атома, Комисија закључује да докторска дисертација кандидата Татјане Миладиновић садржи оригиналне научне резултате који нису били предмет ниједног до сада објављеног истраживања у овој области.

#### **Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области**

Кандидат Татјана Миладиновић бави се научним радом у области атомске, молекулске и оптичке физике дужи низ година, о чему сведоче објављени радови: два рада у часопису категорије М22; седам радова у часопису категорије М23.

#### **Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему**

Предати рукопис “Укључивање ненулног импулса електрона у процену брзине прелаза у Амосов–Делоне–Крајнов теорији за случај нискофреквентног линеарно и циркуларно поларизованог ласерског поља” кандидата Татјане Миладиновић у потпуности и по обиму и по квалитету испуњава првобитно постављене захтеве приликом пријављивања теме докторске дисертације.

#### **Научни резултати докторске дисертације**

Комисија истиче да је из области докторске дисертације кандидат Татјана Миладиновић публиковала шест радова у часописима са листе цитираних часописа (SCI).

1. V.M. Ristić, T.B. Miladinović and M.M. Radulović, **Transition Rate Dependence on the Non-Zero Initial Momentum in the ADK-Theory**, *Acta Physica Polonica A*, **112**, No. 5, 909- 914 (2007) ISSN: 0587-4246  
(IF = 0.340 за 2007. годину; 60/69; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]
2. V.M. Ristić, T.B. Miladinović and M.M. Radulović, **Analyzing the Transition Rates of the Ionization of Atoms by Strong Fields of a CO<sub>2</sub> Laser Including Nonzero Initial Momenta**, *Laser Physics*, **18**, No.10, 1183-1187 (2008) ISSN: 1054-660X  
(IF = 0.777 за 2008. годину; 78/96; област: Physics, Applied), [M23]
3. V.M. Ristić, T.B. Miladinović and M.M. Radulović, **Calculating Ionization Transition Rate for Circularly Polarized Fields, Including Non-Zero Initial Momentum**, *Acta Physica Polonica A*, **116**, No. 4, 504- 506 (2009) ISSN: 0587-4246  
(IF = 0.433 за 2009. годину; 60/71; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]
4. V.M. Ristić, T.B. Miladinović, J.M. Stevanović, **Circularly polarized laser fields, with different Z, including non-zero initial momentum**, *Acta Physica Polonica A*, **119**, No. 6 (2011) 761-763; ISSN: 0587-4246  
(IF = 0.467 за 2010. годину; 63/80; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]

5. T.B. Miladinović, J.M. Stevanović, M.M. Radulović, V.M. Ristić, **The energy at which the maximum number of photoelectrons are observed during the ionization of potassium and xenon atoms**, *Physica Scripta*, T149 014047, (2012), ISSN: 0031-8949; DOI:10.1088/0031-8949/2012/T149/014047  
(IF = 1.204 за 2011. годину; 35/84; област: Physics, Multidisciplinary), [M22]
6. T.B. Miladinović, V.M. Petrović and V.M. Ristić, **Influence of ponderomotive potential and non-zero initial momentum of ejected electron on transition rate in multiphoton ionization**, *Acta Physica Polonica A*, 124, No. 4, (2013) 658 – 660, ISSN: 0587-4246; DOI:10.12693-APhysPolA.124.658  
(IF = 0.531 за 2012. годину; 67/83; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]

#### **Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Резултати добијени у овој дисертацији могу наћи примену у тренутно актуелним проучавањима интеракције јаких поља са атомима. Могу се користити при поређењу теоријских и експерименталних резултата. Како се као извор јаких поља користе ласери ова истраживања могу наћи и практичну примену. Да би примена била ефикаснија приказане анализе могу бити искоришћене при развоју нових теоријских модела.

#### **Начин презентирања резултата научној јавности**

Резултати до којих је кандидат дошао представљени су научној јавности кроз шест публикованих радова у часописима који се налазе на листи цитираних часописа (SCI): један рад у часопису категорије M22 и пет радова у часопису категорије M23.

После детаљног прегледа докторске дисертације, као и на основу свега што је констатовано и написано у овом извештају, Комисија доноси следећи

### **ЗАКЉУЧАК**

Комисија сматра да приложени текст докторске дисертације кандидата Татјане Миладиновић под називом “Укључивање ненулног импулса електрона у процену брзине прелаза у Амосов–Делоне-Крајнов теорији за случај нискофреквентног линеарно и циркуларно поларизованог ласерског поља” у потпуности испуњава циљеве постављене у теми коју је прихватило Наставно-научно веће Природно-математичког факултета у Крагујевцу. Комисија истиче да је поднети текст самосталан рад кандидата и да постоје нови и оригинални резултати. На основу анализе научних радова Татјане Миладиновић може се закључити да је испољила запажену научну активност, и смисао за анализу и решавање научних проблема из области атомске, молекулске и оптичке физике. Системски приступ и свестрана анализа указују да је кандидат овладао научном облашћу под коју потпада тема докторске дисертације и да поседује одговарајућу специфичну стручност и оспособљеност. Ова дисертација представља значајан допринос физици, и по квалитету, обиму и оствареним резултатима задовољава законске и друге специфичне услове одређене за израду докторске дисертације.

На основу горе изнетих резултата и података о раду “Укључивање ненулног импулса електрона у процену брзине прелаза у Амосов–Делоне-Крајнов теорији за случај

нискофреквентног линеарно и циркуларно поларизованог ласерског поља”, кандидата Татјане Миладиновић, Комисија предлаже Научно-наставном већу Природно-математичког факултета у Крагујевцу да прихвати понуђени текст као докторску дисертацију, те да омогући њену јавну одбрану у складу са Законом и нормативним актима Природно математичког факултета у Крагујевцу и Универзитета у Крагујевцу.

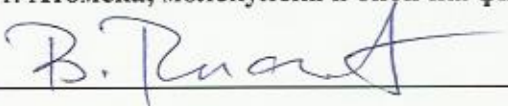
У Крагујевцу

23.04.2014. год.

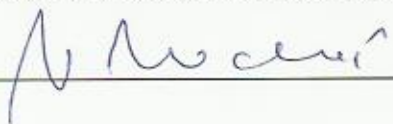
**Чланови Комисије:**

**др Владимир Ристић, ментор, редовни професор,**  
Природно-математички факултет,  
Универзитет у Крагујевцу

Ужа научна област: **Атомска, молекулска и оптичка физика**


  
\_\_\_\_\_

**др Наташа Недељковић, редовни професор**  
Физички факултет, Универзитет у Београду  
Ужа научна област: **Физика атома и молекула**

  
\_\_\_\_\_

**др Виолета Петровић, доцент,**  
Природно-математички факултет,  
Универзитет у Крагујевцу

Ужа научна област: **Атомска, молекулска и оптичка физика**

  
\_\_\_\_\_

## ПРИЛОГ: Листа објављених радова кандидата

### Радови на којима се заснива докторска дисертација:

1. V.M. Ristić, T.B. Miladinović and M.M. Radulović, **Transition Rate Dependence on the Non-Zero Initial Momentum in the ADK-Theory**, *Acta Physica Polonica A*, **112**, No. 5, 909- 914 (2007) ISSN: 0587-4246  
(IF = 0.340 за 2007. годину; 60/69; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]
2. V.M. Ristić, T.B. Miladinović and M.M. Radulović, **Analyzing the Transition Rates of the Ionization of Atoms by Strong Fields of a CO<sub>2</sub> Laser Including Nonzero Initial Momenta**, *Laser Physics*, **18**, No.10, 1183-1187 (2008) ISSN: 1054-660X  
(IF = 0.777 за 2008. годину; 78/96; област: Physics, Applied), [M23]
3. V.M. Ristić, T.B. Miladinović and M.M. Radulović, **Calculating Ionization Transition Rate for Circularly Polarized Fields, Including Non-Zero Initial Momentum**, *Acta Physica Polonica A*, **116**, No. 4, 504- 506 (2009) ISSN: 0587-4246  
(IF = 0.433 за 2009. годину; 60/71; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]
4. V.M. Ristić, T.B. Miladinović, J.M. Stevanović, **Circularly polarized laser fields, with different Z, including non-zero initial momentum**, *Acta Physica Polonica A*, **119**, No. 6 (2011) 761-763; ISSN: 0587-4246  
(IF = 0.467 за 2010. годину; 63/80; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]
5. T.B. Miladinović, J.M. Stevanović, M.M. Radulović, V.M. Ristić, **The energy at which the maximum number of photoelectrons are observed during the ionization of potassium and xenon atoms**, *Physica Scripta*, **T149** 014047, (2012), ISSN: 0031-8949; DOI:10.1088/0031-8949/2012/T149/014047  
(IF = 1.204 за 2011. годину; 35/84; област: Physics, Multidisciplinary), [M22]
6. T.B. Miladinović, V.M. Petrović and V.M. Ristić, **Influence of ponderomotive potential and non-zero initial momentum of ejected electron on transition rate in multiphoton ionization**, *Acta Physica Polonica A*, **124**, No. 4, (2013) 658 – 660, ISSN: 0587-4246; DOI:10.12693-APhysPolA.124.658  
(IF = 0.531 за 2012. годину; 67/83; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]

### Остали радови кандидата:

7. V.M. Ristić, M.M. Radulović, T.B. Miladinović, **Stern-Gerlach Experiment's Interpretations and Noether's Theorem**, *Int. J. Theor. Phys.*, **50**, No.11, (2011) 3602-3609, ISSN: 0020-7748; DOI: 10.1007/s10773-011-0867-y  
(IF = 0.845 за 2011. годину; 48/84; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]
8. J.M. Stevanović, T.B. Miladinović, M.M. Radulović and V.M Ristić, **Ionization rate for circularly polarized laser fields with modified ionization poential included**, *Physica Scripta*, **T149** 014046, (2012), ISSN: 0031-8949; DOI:10.1088/0031-8949/2012/T149/014046  
(IF = 1.204 за 2011. годину; 35/84; област: Physics, Multidisciplinary), [M22]
9. M.M. Radulović, J.M. Stevanović, T.B. Miladinović and V.M Ristić, **The Role of the Non-Zero Initial Momentum and Modified Ionization Potential in the Corrected Ammosov-Delone-Krainov Theory** *Romanian Journal of Physics*, **58** 127-135, (2013), ISSN: 1221-146X  
(IF = 0.526 за 2012. годину; 68/83; област: Physics, Multidisciplinary), [M23]