

НАЙ-ВАЖНИ НАУЧНИ ПОСТИЖЕНИЯ

на проф. д-р Николай Витанов Витанов

кандидат в конкурса за избор на член-кореспонденти на БАН

в област **Природоматематически науки**, научно направление **Физически науки**
Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучър“ 5, 1164 София
vitanov@phys.uni-sofia.bg, +359-2-8161652, +359-898-666658

Приносителите на кандидата са основно в създаването на редица техники за прецизен и устойчив (на експериментални неточности и нежелани външни въздействия) контрол на квантовите състояния на атоми, йони, молекули и ансамбли от такива частици. Областите на приложения са основно квантовата оптика и квантовата информатика. В последните години кандидатът прилага много от тези техники в класическата поляризационна, вълноводна и нелинейна оптика, както и в нанотехнологиите. Редица от теоретичните предложения на кандидата вече са демонстрирани успешно от водещи експериментални групи от цял свят, някои от които в директно сътрудничество с него и неговата група.

Кандидатът има редица пионерски приноси в разработването на адиабатни техники за кохерентен контрол на квантовата динамика на електронните състояния на атоми, йони и молекули. Те включват два основни типа: техники с пресичане на нивата (level crossing) и такива с последователни, но припокриващи се импулси (STIRAP, stimulated Raman adiabatic passage), описани в детайли по-долу. Н.В. Витанов е водещ автор на 2 високоцитирани обзора по такива адиабатни квантови техники (статии [38] и [39] от списъка с публикации, цитирани според Web of Knowledge съответно 460 и 279 пъти, а според Google Scholar 652 и 364 пъти, <http://scholar.google.bg/citations?user=jveAnmcAAAAJ> (независимите цитирания, намерени от кандидата само в журнални статии с импакт фактор са съответно 358 и 207). Първият обзор [38] в списанието Annual Reviews of Physical Chemistry е сред 20-те най-цитирани обзора в това списание.

1. АДИАБАТНИ ТЕХНИКИ С ПРЕСИЧАНЕ НА НИВАТА

Пресичането на нивата е добре известен ефект в квантовата физика, използван още от създаването на квантовата механика. В режима на адиабатна еволюция преминаването на пресечната точка на нивата води до пълен пренос на заселеност от едното ниво към другото. Стандартен модел, описващ динамиката на този процес, е моделът на Ландау-Зинер, който предполага линейно пресичане на нивата и константно взаимодействие с безкрайна продължителност. Н.В. Витанов има редица приноси в обобщението на този модел до крайна продължителност [15], нелинейно пресичане [30], Гаусово [58] и експоненциално поле [112], еволюция на кохерентна квантова суперпозиция от състояния [131], некохерентни процеси [19,55,80,130], както и в пресмятането на времето на прехода [28]. Намерени са интересни интерференчни ефекти при периодично пресичане на нивата [17], напр. динамична забрана на прехода. Важни приноси включват разширението на модела на Ландау-Зинер до три [61,88] и произволен брой нива [23,40,43,50,65,75,86,92], приложени за динамиката на атомен лазер [23], създаване на сплетени многочастични състояния [40,43,86], ротационно дисоцииране на молекули и създаване на супер-ротори [50], създаване на фононни Фок състояния в йонни капани [92] и др. В съвместни изследвания с учени от Касел в Германия [107,118] и Вайцмановия

институт в Израел [119] са разработени ефикасни схеми за кохерентен контрол с пресичане на нивата в атомите на натрия [107], калия [118] и рубидия [119], всичките *демонстрирани експериментално*. Разработена е техника, обединяваща пресичането на нивата с композитните импулси (виж по-надолу) [128], която осигурява почти нулева грешка при пренос на заселеност; тази техника е *демонстрирана експериментално* съвместно с немски учени в Дармщат [158]. Предложени са потенциално важни приложения на пресичането на нивата в оптични вълноводи [155], смесване на честоти в нелинейни кристали [137] и безжичен пренос на енергия между намотки [124,141].

Освен тези приноси е предложена нова техника SCRAP (Stark-chirped rapid adiabatic passage) за генериране на пресичащи се нива в система с две нива чрез прилагане на интензивен нерезонансен импулс, който е отместен спрямо основния импулс, управляващ прехода, която е *демонстрирана експериментално* в сътрудничество с немски учени [37]. Показано е, че тази техника може да се използва за създаване на кохерентни суперпозиции [42]. Тази техника е разширена до системи с три нива [60], която впоследствие също е *демонстрирана експериментално* от немски учени [Oberst et al., Phys. Rev. A 78, 033409 (2008)]. Предложена е друга техника RIBAP (retro-reflection induced bichromatic adiabatic passage) [47], която симулира пресичане на нивата с отразяване на възбуждащия лазерен сноп; тази техника е *демонстрирана експериментално* от същата група [A.P. Conde et al., Phys. Rev. A 72, 053808 (2005)]. Предложена и още една техника SAP (superadiabatic passage) [46], при която има скрито пресичане на нивата, което се разкрива в адиабатния базис.

Използвайки концепцията за адиабатна еволюция при *непресичане* на нивата, Н.В. Витанов предсказва липсата на разширяване на спектралните линии с нарастване на интензивността на полето при възбуждане с гладки експоненциални импулси, което е *потвърдено експериментално* в сътрудничество с немски учени [41,44], както и от американски учен [C.W.S. Conover, Phys. Rev. A 84, 063416 (2011)]. Н.В. Витанов предсказва и особено интригуващия и неинтуитивен ефект на стесняване на спектралните линии при възбуждане с Лоренцови импулси [144].

Заедно с обзорната статия по техники с пресичане на нивата [38], в която Н.В. Витанов е първи автор, тези приноси са публикувани в 41 статии, които са получили 1030 независими цитирания.

2. ТЕХНИКА STIRAP

STIRAP позволява да се прехвърли заселеност в квантова система (атом, йон, молекула) с вероятност близка до 100% от ниво 1 на ниво 3, през междинно ниво 2, но без да се заселва ниво 2 по време на преноса. Понеже нивата 1 и 2 обикновено са основно/метастабилно, а ниво 2 е възбудено, тази техника може да работи при времеви скали, надвишаващи значително времето на живот на ниво 2, което определя голямото практическо значение на тази техника. STIRAP е изобретена от Проф. Клаас Бергман в Кайзерслаутерн (Германия) през 1990 г. при манипулиране на вибрационни състояния на двуатомни молекули. Към днешна дата тази техника се използва в повече от 30 области на квантовата и класическата физика, отразени в повече от 2000 публикации. Кандидатът Н.В. Витанов има редица приноси, много от които в сътрудничество с Клаас Бергман (който е експериментатор), в теоретичното разбиране на тази техника, както и в разширяването ѝ към повече от 3 нива и към други физични системи извън атоми и

молекули. Те включват неадиабатни ефекти [16], bright-STIRAP [18], влияние на честотни разстройки [20] и загуби извън системата [22], ниво 2 или ниво 3 заместено с континуум [21,24,34,56,67,84] или с много нива [26,27,33], влияние на некохерентни процеси (дефазирание и спонтанно излъчване) [56,63,121] и квантов шум [117,123,168,169], влияние на израждането на нивата [51,57], големи асиметрии в интензивностите на полетата [122], генериране на суперпозиции от квантови състояния [31,48,66], приложения в квантовата информатика [91] и класическата физика [97,150], минимизиране на енергията на полето [103] и максимизиране на ефективността [153], както и някои други свойства [32,111,122].

Много от теоретичните резултати описани по-горе, вече са *демонстрирани експериментално* в десетки публикации от групи от цял свят. Само през последните години STIRAP в легирани кристали е демонстриран от японски [H. Goto and K. Ishimura, Phys. Rev. A 74, 053410 (2006)], френски [A.L. Alexander et al., Phys. Rev. B 78, 144407 (2007)] и немски учени [Klein et al., Phys. Rev. Lett. 99, 113003 (2007)]. В йонни капани STIRAP е демонстриран от датски учени [Sorensen et al., New J. Phys. 8, 261 (2006); Moller et al., Phys. Rev. A 76, 062321 (2007)]. Модифицираната версия b-STIRAP е демонстрирана експериментално от немски учени [J. Klein et al., Phys. Rev. A 78, 033416 (2008)]. STIRAP е демонстриран в три оптични вълноводи от израелски учени [Y. Lahini et al., Phys. Rev. Lett. 101, 193901 (2008)] и в повече от три вълновода от френски учени [C. Ciret et al., Phys. Rev. A 87, 013806 (2013)]. Техниката за генериране на кохерентни суперпозиции в статия [66] е демонстрирана експериментално от японски учени [Yamasaki et al., Phys. Rev. A 78, 023808 (2008)]. Това са само част от многобройните експериментални демонстрации на STIRAP и неговите обобщения в литературата.

Заедно с два обзора на STIRAP [38,39], в които Н.В. Витанов е първи автор, тези приноси, обхващащи 36 публикации, са получили общо 1209 независими цитирания. За отбелязване е и това, че Н.В. Витанов е съорганизатор, заедно с пионерите в STIRAP Клаас Бергман и Брус Шор, на голяма международна конференция през 2015 г. в Кайзерслаутерн, която ще чества 25-годишния юбилей на тази техника, <http://stirap.quantum-bg.org>.

3. КОМПОЗИТНИ ИМПУЛСИ

През последните години (след 2011 г.) Н.В. Витанов, заедно с групата си, има важни пионерски приноси в приложението на техниката на композитните импулси (известни от ядрения магнитен резонанс) в квантовата оптика и квантовата информатика. Композитният импулс представлява всъщност последователност от импулси с добре дефинирани относителни фазови разлики между тях. Тези фази се използват като контролни параметри, с които профилът на възбуждане може да се манипулира по произволно желан начин. Така се конструират широколентови (broadband) композитни импулси, които възбуждат ефективно в значително по-широк интервал от стойности на даден параметър в сравнение с единичен импулс (напр. честотна разстройка, интензивност и продължителност на импулса), тяснолентови (narrowband) композитни импулси, които стесняват интервала на възбуждане, както и комбинация от двата вида с правоъгълен профил на възбуждане (passband). Композитните импулси осигуряват много висока ефективност (практически 100%, с произволно малка грешка), което е много важно в квантовата информатика. Приносът на Н.В. Витанов е в разработването на нов метод, използващ $SU(2)$ симетрията на проблема вместо досега използваните интуитивни

методи, с които са получени голям брой композитни импулси, със значително по-добри свойства от известните преди това. Резултатите включват нови, по-ефективни широколентови [127], тяснолентови [125,133] и комбинирани [159] композитни импулси, композитен адиабатен пренос на заселеност (комбинация на адиабатен пренос при пресичане на нивата с композитни импулси) [128,158], композитен STIRAP [153], системи с много нива [132], елиминирание (динамична забрана) на нежелани преходи [151], създаване на сплетени многочастични състояния [149] и квантови гейтове [129,167] в квантовата информатика, универсални композитни импулси, които компенсират флуктуации в произволни параметри, дори неизвестни такива [166].

Композитният адиабатен пренос и универсалните композитни импулси са *демонстрирани експериментално* в сътрудничество с немски учени [158,166]. Тяснолентовите композитни импулси са *демонстрирани експериментално* от американски учени [Phys. Rev. A 90, 040301 (2014)].

Композитните идеи са приложени в поляризационната и нелинейната оптика, като е предложено конструирането на широколентови композитни вълнови пластини и честотно настойваеми поляризационни филтри [134]. Тези идеи са *демонстрирани експериментално* в сътрудничество с учени от Германия [142] и ИФТТ-БАН [161]. Предложен е широколентов Фарадеев изолатор [156], който е *демонстриран експериментално* след това в ИФТТ-БАН [157]. Композитните идеи са приложени и в нелинейната оптика, като са предложени композитни кристали за смесване на честоти [163,164].

Композитните техники в квантовата и класическата оптика са публикувани в 20 статии от 2011 г. досега, които, независимо от този кратък срок, вече са получили 49 независими цитирания.

4. МНОГОМЕРНИ КВАНТОВИ СИСТЕМИ

Н.В. Витанов има редица пионерски приноси в изучаването на квантови системи с три и повече нива, прилагайки разнообразни методи, използващи вътрешната симетрия на системата, която позволява редуцирането ѝ до по-прости системи (с две и три нива). Той извежда едно от първите точни решения за динамиката на система с три нива във външно поле [25], което по-късно е приложено за поредица от импулси [136]. Това решение е обобщено до системи с произволен брой състояния в две конфигурации: когато едно състояние взаимодейства с всички останали (т.нар. N-под система) [65] и когато тези състояния са поднива на две изродени нива [49,82]. В частност, изведено е точното решение на модела на Ландау-Зенер в случая на две изродени нива [75]. Н.В. Витанов открива, че пропагаторът на N-под системата има формата на оператора на Хаусхолдер (квантово отражение) [65,70], който е широко използван в класическите алгоритми за обработка на информацията. Използвайки този оператор, са предложени физични реализации на произволни унитарни операции $SU(N)$ на квантови системи с N нива [70,74,87]. С помощта на Хаусхолдеровата факторизация за пръв път е конструирана произволна $SU(3)$ трансформация на атом с три [135] и повече нива [150] и са намерени скрити факторизации на Хилбертовото пространство на такъв атом [89]. Предложен е метод за томография на кохерентна суперпозиция от N състояния [36]. Използваният при тези решения метод на Морис-Шор за редуциране на динамиката на система от две

изродени нива до набор от системи с две неизродени нива е обобщен до произволен брой изродени нива [71].

Разработен е нов математичен формализъм, който позволява една квантова система с много нива да се редуцира до ефективна система с по-малко нива чрез адиабатно елиминирание на състояния, дори когато те са близо до резонанс (класическата адиабатна елиминация се прилага за състояния далече от резонанс) [139]; тази публикация е избрана за една от статиите в „Highlights of 2012“ на британското списание Journal of Physics B, <http://iopscience.iop.org/0953-4075/page/Highlights%20of%202012>.

Н.В. Витанов има редица пионерски приноси в прилагането на адиабатни техники към квантови системи с много нива, вкл. системи с пресичане на нивата [23], обобщения на техниката STIRAP [26,27,33,34,51,57,138], композитни импулси [132,151] и многочастични системи [40,43]. Една от тези техники [26] е *демонстрирана експериментално* от френски учени [C. Ciret et al., Phys. Rev. A 87, 013806 (2013)].

Тези приноси са публикувани в 27 статии, които са получили 340 независими цитирания.

5. КВАНТОВА ИНФОРМАТИКА

Н.В. Витанов е пионер в изследванията по квантова информатика в България и създател на първата научна школа в тази област, обучавайки 6 успешно защитили докторанти досега (Петър Иванов, Елица Кьосева, Светослав Иванов, Боян Торосов, Тихомир Тенев, Генко Генов). Квантовата информатика работи с ансамбли от взаимодействащи си кубити (системи с две нива) и изисква прецизен контрол на състоянието на тези кубити. Това състояние, което обикновено е кохерентна суперпозиция от кубитните състояния 0 и 1, трябва да се създава, манипулира и измерва с много висока прецизност (с допустима грешка < 0.01%).

Постиженията на Н.В. Витанов в тази силно конкурентна област на квантовата физика включват приноси като предлагане на методи за създаване [31,57,68,76] и измерване [35,36,69] на кохерентни суперпозиции от две, три и повече квантови състояния, някои от които са *демонстрирани експериментално* в сътрудничество с немска група [48]. Н.В. Витанов е съавтор в статии, в които за пръв път е предложено използването на адиабатни техники за създаване на сплетени състояния (т.нар. entanglement) на два [40] и повече кубита [43], както и на предложения за създаване на други важни сплетени многочастични състояния: Дике [86,91], Фок [92], клъстер [93], NooN [140] състояния. Н.В. Витанов е пионер в използването на оператора на Хаусхолдер (квантово отражение) за ефикасно синтезиране на произволни унитарни операции $SU(N)$ на квантови системи с N нива [70,74,87]. Показано е, че при определени условия този оператор възниква като пропагатор на квантова система с $N+1$ нива, едно от които взаимодейства с всички останали [65,71,82]. Хаусхолдеровата факторизация позволява, за пръв път, намирането на физична реализация на конструирането на произволна $SU(3)$ трансформация на атомен кютрит (система с три нива) [135]. Физичната реализация на оператора на Хаусхолдър позволява намирането на оптимизирани реализации на един от основните квантови алгоритми - квантовото търсене на Гровър - в различни бази данни с кубити [94,96,115] и кютрити [140]. Друг оригинален принос е откритието, че Хамилтониани с циркулантна симетрия позволяват генерирането на дискретната трансформация на Фурие по естествен начин [105]. Най-накрая, използвайки различни техники от квантовата динамика, са

предложени реализации на различни квантови гейтове, превъзхождащи известните преди това по простота, бързина и точност [129,150,160,167].

Заедно с групата си, проф. Витанов има редица приноси и в наскоро възникналата област на квантово симулиране на ефекти от физиката на кондензираната материя (фазови преходи, магнетизъм и др.) [109,165], както и симулирането на ефекти, предсказани от релативистичната квантова механика (спиново разцепване, zitterbewegung и др.) [143,147,148,152].

За отбелязване е, че предложенията за конструиране на сплетени Дике състояния [86,91] са *реализирани експериментално*. Методът с пресичане на нивата [86] е демонстриран от групата на *Нобеловия лауреат Дейвид Уайнланд* в САЩ [D.V. Hume et al., Phys. Rev. A **80**, 052302 (2009)], както и от групата на Shinji Urabe в Япония [K. Toyoda et al., Phys. Rev. A **83**, 022315 (2011)]. Групата на Urabe демонстрира и метода, използващ STIRAP [91] [A. Noguchi et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 260502 (2012)], както и квантовото симулиране на фазовия преход между изолатор и суперфлуид [109] [K. Toyoda et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 160501 (2013)].

Като принос в квантовата информация може да се разглеждат и приносите в техниката на композитните импулси, разгледани отделно по-горе, понеже те осигуряват непостижима с други техники точност на операциите.

Приносите на кандидата в областта на квантовата информатика са публикувани в 37 статии, които са получили 409 независими цитирания.

6. КЛАСИЧЕСКА ПОЛЯРИЗАЦИОННА, ВЪЛНОВОДНА И НЕЛИНЕЙНА ОПТИКА

През последните 4-5 години, заедно с групата си, Н.В. Витанов има редица пионерски приноси в прилагането на методи от квантовата физика в класическата поляризационна, вълноводна и нелинейна оптика въз основа на формалните аналогии между уравненията, описващи съответните ефекти [97,126]. По аналогия със STIRAP са предложени ахроматични (широколентови) ламбда-пластини [120]. По аналогия с композитните импулси е предложено конструирането на ахроматични (широколентови) композитни вълнови пластини и честотно настойваеми поляризационни филтри [134]. Тези идеи са *демонстрирани експериментално* в сътрудничество с учени от Германия [142] и ИФТТ-БАН [161]. Предложени са две реализации на ахроматичен Фарадеев изолатор [145,156], едната от които е *демонстрирана експериментално* в ИФТТ-БАН [157]. Предложени са техники за пренос на светлина между вълноводи [155] и мултиканален светлинен делител [138], които вече са *демонстрирани експериментално* в Мец (Франция) [C. Ciret et al., Opt. Lett. **37**, 3789 (2012); C. Ciret et al., Phys. Rev. A **87**, 013806 (2013)]. В нелинейната оптика са предложени техники за смесване на честоти и генериране на хармоники, базирани на аналогии на пресичането на нивата [137] и композитни кристали [163,164]. Аналогични идеи са използвани в предложения за безжичен пренос на енергия между две намотки без [124] или посредством [141] друга намотка.

Композитните техники в квантовата и класическата оптика са публикувани в 16 статии през последните 4 години, които вече са получили 31 независими цитирания.

7. НАНОТЕХНОЛОГИИ

В сътрудничество с д-р Василис Янопапас от Техническия университет в Атина и д-р Емануел Паспалакис от Университета в Патра, Гърция, са извършени детайлни теоретични изследвания на оптичните свойства на структури от метални и диелектрични наночастици. Тези структури имат значителен потенциал като бъдещи платформи за реализиране на квантовата информатика и квантовите симулации. Развит е числен метод, базиран на флукуационната електродинамика и теорията на множественото разсейване, за пресмятане на локалната плътност на фотонните моди в различни конфигурации от нано- и микрочастици [72]. Пресметната е плътността на състоянията и промяната на вероятността за спонтанна емисия на атом с две състояния сред метални наночастици [77] и сферични разсейватели [79] и е развита теорията на флукуационната електродинамика в присъствието на крайни термични източници [81]. В друга статия е пресметната силата на ван дер Ваалс въз основата на първи принципи (first-principles методи), използвайки теорията на Лифшиц, т.е. без никакви приближения, като са показани значителни отклонения от стандартните теории, особено в случая на близко поле [83]. Предложен е качествено нов метод за създаване на наноуловки за атоми, основан на фокусиращите свойства на метаматериалите с адсорбиран дефект [95,99]. За пръв път е предложена схема за демонстриране на ефекта на електромагнитно-индуцирана прозрачност в плазмонните вълни на съвкупност от метални наносфери [101] (тази статия е получила вече 73 независими цитирания). Бяха изследвани степента на кохерентност и поляризация на термично излъчване от наносфери в близко поле [102]. В друга една работа е изследвано изменението на времето на живот на възбудено атомно състояние близо до решетка от наносфери [104]. С помощта на теорията на множественото разсейване са изследвани големината и знака на силата на Казимир, която се проявява вследствие от вакуумните флукуации на нанометрични разстояния между две наноструктури [106] и между атом и наноструктура [114]. Показано е, че силата на привличане на Казимир между две повърхности може да се неутрализира на нанометрични разстояния чрез отлагането на периодични решетки от наночастици или нанопилони върху повърхностите [110]. Показано е и че може да се осъществи пространствено-времеви контрол на повърхностните екситон-поларитонни възбуждания в полупроводникови наночастици с подходящ избор на чирпа на лазерен импулс [170]. Най-накрая, демонстрирано е, че с помощта на кохерентно лазерно поле може да се контролира пространственото и времевото разпределение на температурата в наноструктури [146].

Изследванията на наноструктури са публикувани в 15 статии (4 от които във Physical Review Letters), които са получили 207 независими цитирания.

8. МАТЕМАТИЧНА ФИЗИКА

Приносите на кандидата в тази област включват намирането на нови свойства на някои специални функции, както и нови точни и приблизителни решения на уравнението на Шрьодингер. Така например, намерени са нови асимптотични развития на функцията на Бесел от първи род [6] и изродената хипергеометрична функция на Кумер [9].

Намерените нови точни решения на уравнението на Шрьодингер включват модели с поле с асиметрична времева зависимост [8], с фазов скок на полето [78,85], с линейно нарастващо поле [90] и с поле, изменящо се като хиперболичен тангенс [162]. Изведено е

точно решение на обобщение на модела на Ландау-Зинер с изродени нива [75] и са намерени следствия от разходимостите в този модел [131]. С помощта на метода на Дихне-Дейвис-Печукас, използващ концепцията за комплексно време, са изведени прецизни приближени решения за нелинейно пресичане на нивата [30] и за Гаусово поле с константна честота [52] и линеен чирп [58].

Н.В. Витанов е пионер в използването на оператора на Хаусхолдер (квантово отражение) за ефикасно синтезиране на произволни унитарни операции $SU(N)$ на квантови системи с N нива [70,74,87]. Хаусхолдеровата факторизация позволява намирането на физична реализация на конструирането на произволна $SU(3)$ трансформация на атомен кютрит (система с три нива) [135] посредством свързани квантови огледала [82]. Показано е, че операторът на Хаусхолдер е мощно средство за факторизиране на Хилбертовото пространство [89]. Друг един принос е обобщението на мощната трансформация на Морис-Шор до повече от две изродени нива [71]. Намерена е и важна връзка между дискретната трансформация на Фурие и Хамилтониани с циркулантна симетрия [76,105].

Въведена е нова функция на квазиразпределение в квантовата оптика, наречена *ambiguity*, която е дефинирана като двойната Фурие трансформация на функцията на Вигнер [29]. Подробно за изследвани математичните свойства на тази функция [100,108]. Изследвана е нестационарната динамика на квантовите усилватели [59].

Изследванията по математична физика са публикувани в 25 статии, които са получили 113 независими цитирания.