

## Рецензия

на

дисертацията за присъждане на научната степен “Доктор на науките” на  
**доц. д-р Венцислав Русанов Янков**

Тема на дисертацията:

**“Някои приложения на Мьосбауеровата спектроскопия като  
изследователски метод в естествените науки”**

Рецензент: Димитър Иванов Колев, доцент д-р,  
Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски”

### 1) Данни за кандидата

Д-р Венцислав Русанов Янков завършва през 1982 год. Физическия факултет на Софийския Университет “Св. Кл. Охридски” като „Магистър по физика”, специалност „Инженерна физика – Ядрена техника”. През 1988 год. защитава дисертация на тема „Мьосбауерови изследвания на някои физически явления в ултрадиперсни среди” с ръководител проф. дфн Цветан Бончев и получава образователната и научна степен „доктор”. В катедра Атомна физика на Физическия факултет д-р Русанов последователно е докторант (1984-1986 год.), физик (1986-1988 год.), асистент (1988-1996 год.) и доцент от 1996 год.

Д-р Русанов поддържа активно сътрудничество с изследователски групи в Германия. За времето от 1990 до 2009 год. е бил стипендиант на DAAD в Кьолн, на фондация Александър фон Хумболт в Кьолн и Любек, на DFG Мюнстер и Любек, на Volkswagen в Мюнстер и гостуващ професор в Университета Любек.

Научната продукция на д-р Русанов възлиза на около 80 статии предимно в международни списания и около 50 участия в международни конференции с доклади и постери.

### 2) Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем

Мьосбауерова спектроскопия, основана на ефекта на Мьосбауер, е относително нов изследователски метод. Основна характеристика на метода е неговата висока разделителна способност по енергия. По тази причина Мьосбауеровата спектроскопия е намерила и намира широко приложение в естествените науки за изучаване на различни фини, трудно наблюдаеми явления, в каквито обикновено се съдържа новото знание. Кръгът на приложение на Мьосбауеровата спектроскопия се разширява непрекъснато, което е резултат на сериозния интерес към метода в приложен и фундаментален план. Модерните

направления в ядрените гама-резонансни изследователски подходи са базирани на ефектите, породени във взаимодействия със синхротронно лъчение. Разработени са нови изследователски техники, основани на наблюдаване на резонансно ядрено разсейване в посока напред, както и на резонансно ядрено нееластично разсейване. Нова възможност е изследване на смутени ъглови корелации. Експериментите с използване на синхротронно лъчение изискват сложно комплексно оборудване и са достъпни само в големи изследователски центрове, каквито са на разположение единствено в Германия, Франция, Япония и САЩ.

В изследванията на автора са използвани като традиционните, така и изброените модерни изследователски техники, което ясно определя тематиката на представения труд като напълно актуална.

### 3) Познава ли дисертанта състоянието на проблема

Авторът показва подробни ретроспективни познания по появата и развитието на Мьосбауеровата спектроскопия, както се вижда в уводната част на дисертацията. Оценявам високо предложената хронология на библиографията по ефекта на Мьосбауер и Мьосбауеровата спектроскопия. Цитираната литература е в достатъчен обем и е тематично разпределена след всяка глава в дисертацията.

В дисертацията авторът представя оригинални лични методически приноси. Показани и обсъдени са резултати от приложни и фундаментални изследвания в няколко научни направления. Получени са интересни резултати в нетипични приложения на изследователския метод. Високото качество на резултатите и тяхната дискусия, показват всеотдайни и задълбочени познания по същността на Мьосбауеровата спектроскопия и нейните приложения.

Русанов работи по Мьосбауеровата тематика от дипломирането си до момента. Под негово ръководство успешно са защитени 3 дисертации за образователната и научна степен Доктор. Поддържа активно дългогодишно сътрудничество с авторитетни чуждестранни специалисти и лаборатории.

Изброеното показва, че Русанов е изграден високо компетентен специалист по темата на дисертационния му труд.

### 4) Методика за решаване на поставените в дисертацията проблеми

Изследванията, представени в дисертацията са експериментални. Наред с основния метод на Мьосбауеровата спектроскопия са извършвани допълнителни рентгенофлуоресцентни и електронно-дифракционни измервания с използване на сканиращи и трансмисионни електронни микроскопи. Един съвременен подход е използването на Хамбургския електронен синхротрон (DESY) и ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) в Гренобъл като източник на високо интензивно синхротронно лъчение, генериращо резонансно възбуждане с последвало

излъчване в изследваната проба. Ефектите, възникващи при взаимодействие на синхротронното лъчение с веществото на мишената, позволяват резонансната методика да се прилага освен за типичните енергийни, така и за времеви измервания. За анализ на получените спектрални и времеви данни са привлечени или разработени подходящи програмни продукти. За определени физически и методически цели за извършени някои нетривиални аналитични изчисления.

##### 5) Аналитична характеристика на дисертационния труд

Дисертацията е написана на български език. Изпълнена е в обем от 410 последователно номерирани страници, в които се съдържат 136 фигури и 13 таблици. Нетипично големият обем на дисертацията се дължи на техническото решение на автора да обедини собствено текста на дисертацията с копия на статиите, в които материалът на дисертацията е публикуван. Така на текста на дисертацията се падат 195 страници, а копията на авторските публикации заемат 215 страници. Предвид разнообразието на темите, разисквани в дисертацията, възприетото редуване на тематично единни секции текст със съответните авторски публикации създава удобство при четенето на труда. Цитираната литература обхваща 269 заглавия, основно от 1958 год. до момента, но има и няколко от началото на 20 век. Спазвайки възприетия стил на техническо подреждане на труда, цитираната литература е също разпределена тематично и поместена в края на всяка секция. Авторът разделя материала на дисертацията на три части. Първата съдържа Увод и Обзорна част, втората е посветена на експерименталните методи, а третата представя получените резултати със съответните обсъждания. Всъщност редуването на текст със съответни авторски публикации се отнася за тази трета част на дисертацията. В края на труда са включени 5 приложения, списък с научните приноси, списък с авторските публикации и текст с благодарности.

Авторефератът е написан на български език. Отразява правилно съдържанието на дисертацията. Обемът на автореферата е 147 страници, което не е малко, би било добре да е написан по-пестеливо. От друга страна, при настоящото си оформление авторефератът има повишена информативност, което не е недостатък.

Обзорната част на дисертацията съдържа сведения, необходими за разбиране резултатите от изследванията на докторанта. Разгледани са специфичните особености на спектралната информация, получена от резонансни взаимодействия. Показано е как различни характерни физически и химически свойства на изследваното вещество се проявяват във формата на Мьосбауеровата линия и в параметрите на получените спектри. Разисквани са възможностите за

изследвания на широк кръг желязо-съдържащи съединения и минерали и интерпретирането на измерените данни. Във връзка с изследвания, посветени на периодичността на климатичните промени в достатъчен обем са представени сведения от астрономическата теория на климата в комбинация с влиянието на слънчевата активност.

Втората част дисертацията е озаглавена Експерименталните методи. В тази част компетентно са разгледани традиционните експерименталните методи на Мьосбауеровата спектроскопия, както и новите с използване на синхротронно лъчение. Описани са методи на рентгенофлуоресцентен анализ, извършван със сканиращ електронен микроскоп, основно Energy Dispersive Analysis of X-rays (EDAX). За изследване на фази със субмикрометрични размери е използван метода Selected Area Electron Diffraction (SAED). По международни проекти в комплекса DESY рентгенофлуоресцентни изследвания са правени с интензивен сноп синхротронно лъчение. Получените спектри са с висока статистика, т.е. много малка статистическа неопределеност, голяма разделителна способност и кратко време на натрупване. Рентгенофлуоресцентни изследвания са провеждани и с нискоенергетично  $\gamma$ -излъчване на високо активен  $\gamma$ -източник, както и специализирана рентгенова тръба и съответен дифрактометър. За определени цели е използвана и  $\gamma$ -спектроскопия с висока разделителна способност.

В третата част на дисертацията авторът представя резултатите от своите изследвания, групирани тематично. В една основна група са резултатите от приложението на резонансната методика за времеви изследвания със заселване на резонансните състояния със синхротронно лъчение. Разгледани са методите, познати като Nuclear Inelastic Scattering (NIS) и Nuclear Forward Scattering (NFS). За определяне на реалните възможности за приложение на NIS метода и разбиране на експерименталните данни, е необходимо формулиране на модел на механизма на възбуждане на резонансните състояния. Със същественото участие на Русанов такъв модел е формулиран. Пресметнатите моделни резултати показват отлично съвпадение с измерените спектри, с което е доказана достоверността на модела и демонстрирана приложимостта на метода. При изследвания с NFS метода се наблюдават ефекти от напълно поляризиран сноп синхротронно лъчение. Тези ефекти разкриват възможности за поляризационни и ъгловозависими изследвания, които са трудно осъществими за традиционната трансмисионна Мьосбауерова спектроскопия. Направена е количествена оценка на влиянието на поляризационните ефекти при определяне на вероятността за безоткатно поглъщане  $f'$  за избран клас монокристални поглъщатели, представляващи желязо-съдържащи съединения и познати като нитропрусици. Показно е, че пренебрегването на поляризационните ефекти поражда завишена  $f'$

и внася неопределеност до 40% в стойността на  $f'$ . Формулирана е разширена теория на ъглово-зависимата Мьосбауеровата спектроскопия за случая монокристални поглътители, като са предложени обобщени аналитични изрази за сеченията за резонансно поглъщане в произволно направление. Развитият и съответно програмиран алгоритъм е приложен към комплексно изследване на нитропрусида. Проведени са температурно зависими изследвания и е установена анизотропия на  $f'$  за всички кристалографски направления. Наблюдавано е наличието два типа вибрационни честоти: нискоенергийни акустични вибрации на решетката с енергия  $\sim 30$  meV и по-високоенергийни (60÷100 meV) молекулни вибрации. Получените резултати са с принос към изясняване природата на метастабилните състояния на нитропрусида.

Изследването на метастабилните състояния на нитропрусида са част от серия изследвания за прецизно определяне на структурата на нитропрусида. В монокристал на натриев нитропрурид напр. метастабилните състояния се заселват с лазерна светлина, като в резултат се наблюдава фотохроматичен ефект и поява на нови компоненти в Мьосбауеровия спектър. Известни са две състояния MSI и MSII с време на живот, нарастващо при понижаване на температурата. Авторът разработва съществено опростена експерименталната методика, в която лазерния източник на светлина е заменен с комплект светодиоди. Посредством комбиниране на методите на светлинно заселване и NIS на  $\gamma$ -кванти синхротронно лъчение авторът постига прецизното определяне на структурата на MSI за гуанидиновия нитропрурид и го препоръчва като подходящ за фотохроматични изследвания. Друг материал, подходящ за изучаване на фотохроматични ефекти, се оказва бариевият нитропрурид, подробно изследван от автора във вид на монокристал и прахова проба чрез ъглово-зависима Мьосбауерова спектроскопия. Получена е пълна Мьосбауерова характеристика, съчетана с резултати за вибрационната анизотропия на материала. Посредством ъглово-зависима Мьосбауерова спектроскопия за монокристал натриев нитропрурид допълнително са определени пълните характеристики на основното GS и MSII. В критичен анализ на систематизираните собствени данни за основното и двете метастабилни състояния авторът изяснява причините за съществуващите различията с други автори и експериментални методики. За окончателно изясняване на природата на MSII на основата на вече съществуващи данни за структурни особености на състоянието и потвърдени от достоверни теоретични изчисления, авторът приема MSII като резултат на смесване на трикомпонентна съставна структура, описвана от вибрационно-ротационен модел. Експериментално потвърждение е търсено с комбинирано трансмисионно Мьосбауерово измерване и по метода NIS, с което е

определена степента на заселеност на MSII. В резултат е установена ниска повърхностна и висока обемна концентрация на MSII.

Авторът изследва редкоземни нитропрусиди, т.е. нитропрусиди, в химическия състав на които се съдържа елемент от групата на редките земи. Получени са Мьосбауерови данни за голям брой редкоземни нитропрусиди, в които при облъчване на със синя светлина се заселват MSI и MSII, наред с които в повърхностния слой се формира ново метастабилно състояние. Авторът предлага механизъм за образуване на това ново метастабилно състояние, при който електронната конфигурация на съединението търпи известно пренареждане и възникване на молекулен магнетизъм. Състоянието е наречено LIMES (Light Induced Magnetic Excited State) и се наблюдава само в редкоземните нитропрусиди.

Русанов извършва оригинални изследвания по няколко интересни приложни направления на Мьосбауеровата спектроскопия. Чрез съответни измервания доказва запазването на естествената остатъчна намагнитеност на хематит при ниски температури и като следствие, възможността за използване на хематит за получаване на данни за палеомагнитната ориентация на земното магнитно поле. Във връзка с отлаганията, последвали Чернобилската авария, авторът представя резултати, потвърждаващи повишено съдържание на желязо-съдържащото съединение магнетит в аерозоли. Предложена е методика за идентифициране на метеорити, основана на регистрацията на определени желязни съединения в образците, като индикатор за извънземния произход на изследвания материал. Друга тема, към която е приложена техниката на Мьосбауеровата спектроскопия, е търсене на следи на палеоклиматични промени, за съществуването и характера на които има данни, както и астрономическа теория, предназначена за обяснение на тяхната периодичност. Обект на Мьосбауерово изследване са океанските Fe-Mn седименти, познати като конкреции и кори. Изследванията са при хелиеви температури и магнитно поле 7 T, а получените резултатите се отнасят за структурата, размера и магнитните свойства на финодисперсните минерални компоненти, изграждащи изследваните седименти. Предложено е слоестата структура на седиментите да се използва като индикатор за палеоклиматичните промени или локални геологически събития, предизвикали глобални климатически промени. Установена е връзка между слоестата структура на конкреции и квазипериодичните промени в орбиталното движение на Земята. От седиментите тип кори на изследване са подложени образци с хидротермален произход, от слоестата структура на които се очаква информация за промени в условията на хидротермална активност за време 1000-2000 години. Образците са били изследвани с рентгенова топография, рентгенова дифракция и

рентгенофлуоресцентен анализ. Чрез Мьосбауерови изследвания при азотни и хелиеви температури и са определени съединенията на желязото, които присъстват в образците. Намерена е връзка между слоестата структура на хидротермалните отлагания и интензитета на слънчевия вятър за последните 1000 години. Авторът определя този резултат като неокончателен и счита, че е необходимо да се прецизира в следващи изследвания. На изследване са подложени и друг тип кори – водородогенерични, представляващи, подобно на конкрециите, дълбоководни отлагания непосредствено от океанската вода и с голяма продължителност на образуване. Мьосбауеровите изследвания са много подробни. Проведени са при ниски и свръхниски температури, идентифицирани са главните желязо-съдържащи минерални компоненти. Авторът приема, че измененията в минераложкия състав и слоестата структура са резултат на дългопериодичните вариации на орбиталното движение на Земята и наклона на земната ос. Това твърдение е убедително обосновано с представения анализ на получените Мьосбауерови резултати.

Друго направление, по което авторът работи, е изследване на кобалтов ферит чрез Мьосбауерова спектроскопия. Кобалтовите ферити притежават шпинелна структура. Техните свойства се определят от катионното разпределение на техните йони в кристалната решетка. Подготвени проби кобалтов ферит са изследвани чрез Мьосбауерова спектроскопия при азотни и хелиеви температури и външно магнитно поле 7 Т, в комбинация на рентгенодифракционни, магнитометрични измервания и електронна микроскопия. Резултатите са интерпретирани в рамките на обичайния бинаомен модел, в който се отчитат взаимодействия само с най-близките съседи на даден желязен йон. Авторът разширява изчисления и по полиномния модел, в който се отчитат значително по-слабите взаимодействия със следващите съседи. Този нов подход позволява прецизно определяне на разпределението на йоните в решетка и коректни изводи за магнитните свойства на ферита със субмикронни размери на частиците.

Авторът е определил като „екзотично” приложението на Мьосбауеровата спектроскопия за изследване на желязо-съдържащи пигменти, използвани при отпечатване на банкноти. Цели се по Мьосбауерови спектри на мастила и бои, с които са отпечатват парични единици да са разпознаят фалшиви банкноти. Изследват се зелен и черен пигменти от доларови банкноти. Фалшивите банкноти се разпознават по разлики в измерените спектри, които не се дължат на естествено стареене или нестабилност на мастилото. Предложената методика представлява недеструктивен метод на изследване и може да намери приложение за идентификация на фалшификати в други валутни системи, за изследване произведения на изобразителното изкуство, в археологията, за целите на

криминалистиката, автомобилната индустрия и в други области, в които се използват желязо-съдържащи пигменти. Следва да се подчертае, че Русанов е един от първите, предложили и осъществили експертни изследвания с предложената методика. Предмет на изследване е и хартията, използвана в долларите банкноти, в която съдържането на желязо е много ниско и Мьосбауеровата спектроскопия не е подходяща. Авторът прилага рентгенофлуоресцентен анализ (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence, EDXRF) със синхротронно възбуждане на характеристично лъчение. Установени са различия в съдържанието на микроелементи в изследваните образци, които са съответно обсъдени.

Последната тема, представена в дисертацията, засяга фундаментални аспекти. Авторът ни запознава с изследванията си предназначени за наблюдаване на електричен диполен момент на фотона. Идеята е изменение на началната енергия на  $\gamma$ -квант, настъпило поради взаимодействие на ЕДМ на кванта със силните вътрешномолекулни полета в подходящо структуриран кристал да се регистрира с Мьосбауеров спектрометър. Проведен е съответен експеримент в трансмисионна геометрия с източник  $^{57}\text{Fe}$  и поглъtitел монокристал гуанидинов нитропрусид, подробно изследван и напълно познат като кристалография и химическа чистота. Наблюдаван е ефект, по който е оценена стойността на хипотетичния ЕДМ. Авторът предлага критична, компетентна и изчерпателна дискусия, засягаща самата хипотеза за ЕДМ на фотона по същество, така и интерпретирането на експерименталните резултати. Интересен е и аргументираният опит за обяснение на някои общоприети схващания на космологията и по-специално за червеното отместване и на реликтовото излъчване с възможния ЕДМ на фотона.

В полемичен стил е разгледан и въпросът за разширението на резонансната линия на Мьосбауеров източник  $^{57}\text{Fe}$  поради самопоглъщане в източника. Обект на критичен анализ е статия в NIM, авторите на която посредством квантово-механично приближение изчисляват разширението на резонансната линия за този източник. Естествената ширина на линията на  $^{57}\text{Fe}$ , като и разширението ѝ са много малки и не подлежат на непосредствено измерване. Ефектът на разширение на линията в резултата на „стареене“ на източника е известен и се дължи на нарастване на броя ядра  $^{57}\text{Fe}$  в основно състояние в източника, които предизвикат нарастване на самопоглъщането. По четири различни модели и в комбинация с допълнителни измервания с много стари източници авторът показва, че два от публикуваните резултати са погрешни. Авторът представя свои достоверни стойности на разширението на линията от самопоглъщане със стареенето на източниците. Пресметнатата в NIM форма на линията с локален минимум около



нулата на енергията, наречен „hole burning”, дисертантът определя като евентуално наблюдаема само за много висока активност на източника.

#### б) Научни приноси

Приемам научните приноси, заявени от дисертанта. За определеност, с незначителна редакция, те са както следва.

##### 1. Приноси към:

а) теорията и методиката на NIS (Ядрено нееластично разсейване) изследванията със синхротронно лъчение, както и проверка на разработените компютърни програми за монокристални разсейватели от гуанидинов нитропрусид.

б) теорията и практиката на конвенционалната Мьосбауерова спектроскопия, допълване на теорията на ъглово-зависимата Мьосбауерова спектроскопия с изрази за сеченията за абсорбция за всички главни кристалографски равнини и тяхната експериментална проверка. Адаптацията на метода  $\Gamma(d)$  за случая на монокристални поглътители, чрез въвеждане на поляризационно зависима константа.

2. Със синхротронно лъчение е проведен решаващ NIS експеримент, в който с резонансен метод, чувствителен само към вибрационни състояния, в които участва железният атом, еднозначно е определена структурата на новото метастабилно състояние MSI. Чрез ъглово-зависима Мьосбауерова спектроскопия е извършено пълно характеризиране на основното, първото и второ нови метастабилни състояния в монокристален натриев нитропрусид. Определена е структурата на MSII и молекулната динамика на това състояние е описана с вибрационно-ротационен модел.

3. Приноси към приложението на Мьосбауеровата спектроскопия за изследване на различни геоложки и минераложки обекти. Хидротермалните слоести манганово оксидни седименти са потвърдени като индикатори на промени в местата на тяхното формиране, свързани със сеизмичната, геологическа и хидротермална активност на океанското дъно. Изказана е хипотезата, че структурните промени на седиментите са свързани със слънчевата активност, интензитета на слънчевия вятър и неговото магнитно поле. Доказана е връзката между слоестата структура на хидрогенетичните желязно-манганови конкреции и кори и палеоклиматичните изменения. Посочена е възможност за самодатиране и определяне на скоростите на нарастване на тези седименти.

4. Напълно са характеризирани, с поредица от твърдотелни изследователски методи, наноразмерни системи от частици кобалтов ферит с размер в супер-парамагнитната област. Доказано е остатъчно суперпарамагнитно влияние дори и

при най-едрите изследвани частици. Проведено е детайлното теоретично и експериментално изследване на катионното разпределение в  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ферити. При теоретичните пресмятания на разпределенията на свръхфините магнитни полета по стойности е отчетено влиянието на вторите и третите съседи.

5. Мьосбауеровата спектроскопия в комбинация с други методи е наложена като успешен недеструктивен метод за разпознаване на фалшиви банкноти. В конкретен пример е доказано, че ако не фалшификатите, то поне използваните бои имат общ произход. За отпечатването на всяка нова банкнота е използвано различно руло хартия. Методът лесно може да се приложи в изобразителното изкуство, археологията, автомобилно- и самолетостроенето.

6. Проведен е, при стайна температура, оригинален експеримент за търсене на хипотетичния електричен диполен момент на фотона с Мьосбауеровия изотоп  $^{57}\text{Fe}$ . Средната стойност, определена за индуцирания електричен диполен момент на  $\gamma$ -кванта, е  $\mathbf{d} = 7(3) \cdot 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ , която е около двадесет пъти по-малка от горната граница, определена за статичния електричен диполен момент на фотона. Детайлно критично теоретично и експериментално изследване показва, че разширението на резонансната линия на Мьосбауеровите източници при тяхното “стареене”, е в интервала  $0.0004 \div 0.0003 \text{ mm}/(s.mCi)$ .

#### 7) Публикации по дисертационния труд и лични приноси на дисертанта

Дисертацията се основава на 25 журнални публикации, една от които е изпратена за публикуване. Всички статии са публикувани в рецензируеми списания, между които Physical Review B (ИФ 3.6), Journal of American Chemical Society (ИФ 10.7), Journal of Solid State Chemistry (ИФ 2.3), Dyes and Pigments (ИФ 3.4), Solid State Communications (ИФ 1.9), NIM B и др. 9 статии са публикувани в Hyperfine Interactions. Средният брой съавтори на статия е приблизително 5, а максималният - 11. По данни от SCOPUS, 23 статии от отпечатаните 24, имат общо 384 цитирания. Независимите цитирания са 311. Най-голям брой цитирания, 174, са забелязани за статията A1 от представения списък на публикации. Статията A8, отпечатана в Годишник на СУ и на която Русанов е самостоятелен автор, не се отчита от SCOPUS. Личният принос на Русанов в изследванията, представени в дисертацията, е водещ или съществен. Неговото име е на първо място в авторския списък на 18 от представените публикации и на второ в 5 статии, които обикновено са в съавторство с неговите докторанти. По тематиката на дисертацията Русанов е ръководил трима успешно защитили докторанти.

#### 8) Настоящо и бъдещо приложения на резултатите, получени в дисертационния труд

Методическите и теоретични разработки, осъществени от автора и детайлно описани в дисертацията, значително разширяват приложимостта на изследванията, основани на ефекта на Мьосбауер в приложен и фундаментален план. Разработен е метод за изследване със синхротронно лъчение, разработени са техники за прецизно изследване на структурата на нитропрусиди и желязо-съдържащи кристали с шпинелна структура. Разработен е метод за контрол на замърсяване на околната среда и изследвания в минералогията с цел на краткосрочно и дългосрочно палеонтологично датиране. Предложен е Мьосбауеров метод за анализ, подходящ за целите на криминалистиката, изобразителното изкуство и археологията. Идеята за наблюдаване и измерване на хипотетичния диполен момент на фотона буди особен интерес.

#### 9) Други въпроси и забележки

Дисертацията е отлично оформена. Може да се ползва, както от тесни специалисти, така и от всички, които имат интерес и обща подготовка по физика.

Единствената препоръка е статията А8, засягаща изследванията за диполен момент на фотона, от Годишника на СУ, след известна актуализация да се насочи към списание с ИФ, където може да получи подобаваща публичност. Едно бързо решение е изпращането на статията в <http://arxiv.org/> на Корнелския университет, САЩ.

#### 10) Заключение

Предлаганият дисертационен труд напълно отговаря на изискванията за придобиване на научна степен „доктор на науките”. Убедено препоръчвам на уважаемото жури да присъди на доц. д-р **ВЕНЦИСЛАВ РУСАНОВ ЯНКОВ** научната степен „ДОКТОР НА НАУКИТЕ”.

София  
26.01.2016 год.

Рецензент:  
/Д. Колев/