

## СТАНОВИЩЕ

относно дисертационния труд „Ефекти от формата на импулса в динамиката на кубита и отвъд: изследване в квантов контрол върху процесори на IBM Quantum“

изготвен от **Иво С. Михов** под научното ръководство на **проф. Н. В. Витанов**

за придобиване на образователната и научна степен доктор на физическите науки във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“

Подготвено от **проф. Леонид Яценко**

Институт по физика, Национална академия на науките на Украйна, Киев, Украйна

### Обща оценка на научните постижения на кандидата

Научните постижения на кандидата са с висока оригиналност и международна значимост и се намират на пресечната точка между квантов контрол, спектроскопия и квантови изчисления. Изследванията му се отличават с ясен фокус върху повишаване на точността и устойчивостта на операциите в свръхпроводниковите кубити, една от водещите платформи за квантови технологии. Ефективният квантов контрол е в основата на напредъка в квантовите изчисления, сензори и високорезолуционната спектроскопия, а кандидатът е направил пионерски приноси, които значително придвижват напред тази област.

Особено важен резултат е систематичното изследване и експерименталната валидация на техники за формиране на импулси при свръхпроводникови трансмонни кубити. Чрез извеждане и проверка на аналитични модели за широк набор от форми на импулси кандидатът демонстрира забележимо, между четири и седем пъти, подобрене в точността на калибриране на резонанса в сравнение с конвенционалните лоренцианови методи. Тези резултати, публикувани в Physical Review A, предоставят строго теоретична и експериментална база за подобрен контрол и калибрация на кубити.

Също толкова въздействащо е откритието на кандидата за нови спектрални ефекти. Явлението „мощностно свиване“, публикувано в Physical Review Letters, опровергава вековното убеждение за „мощностно разширение“ в спектроскопията. Този пробив има широки последици, като позволява изключително прецизни честотно-селективни операции за квантови гейтове с висока точност и измервания с висока резолюция. Успоредно с това, последното наблюдение на „мощностно свърхразширение“ на устройства IBM Quantum отваря нови възможности в приложения, в които спектралното разширение е полезно, като например лазерното охлаждане. Тези приноси демонстрират както оригиналност, така и способност да се поставят под съмнение дългогодишни парадигми във физиката.

Кандидатът допълнително въвежда концепцията за равновероятностни модели, които показват, че различни двойки форми на Раби-честота и детюнинг могат да дадат идентични вероятности за преход. Този иновативен резултат осигурява гъвкав и мощен нов подход за проектиране на квантови гейтове, адаптирани към конкретни хардуерни платформи, с директни последици за квантови изчисления, устойчиви към грешка. Освен това демонстрациите му за комбиниране на форми на импулса с фазова модулация за постигане на динамично разкачване и потискане на изтичането към по-високи нива значително удължават оперативния живот на кубитите. Тези скоростни резултати, вече разпространени като чернови в arXiv, подчертават способността на кандидата да създава иновативни изследвания, които бързо изменят областта и се очаква да се появят във водещи списания.

Взети заедно, тези постижения представляват кохерентно и съществено количество работа, която изтласква границите на квантовия контрол. Те демонстрират не само научна креативност и оригиналност, но и способност да се постигат резултати с ясна практическа важност за квантовата технология. Изследванията на кандидата вече са придобили видимост чрез публикации в списания от най-висок клас и са на път да имат допълнително въздействие, тъй като се разширяват към многокубитни гейтове, оптимизация на импулси, базирана на машинно обучение, и приложения в квантовата метрология. Неговите приноси изпъкват като международно конкурентни и силно релевантни за централното предизвикателство по изграждане на скалируеми и резистентни към грешки квантови компютри.

## **Структура на дисертацията**

Глава 1 мотивира изучаването на квантовите изчисления и въвежда базови елементи на квантовия контрол, докато Глава 2 преглежда свързани изследвания за формите на импулса, потискане на изтичане и аналитични модели. Глава 3 разглежда теоретичната основа на контрола на кубити, включително времезависимата динамика по уравнението на Шрьодингер и адиабатични техники, с особен фокус върху свръхпроводниковите кубити. Глава 4 предоставя подробности за експерименталната платформа, а именно свръхпроводниковите квантови процесори на IBM и техния контрол на ниво импулси чрез Qiskit Pulse. Глава 5 събира стандартни модели за прехвърляне на заселеност и демонстрациите им, заедно с две нови аналитични решения на синусоидалния модел.

Основните научни приноси следват в Глави 6 и 7. Глава 6 изследва ефектите на формата на импулса върху мощностното разширение, включително първото експериментално наблюдение на мощностно свиване и предложението за мощностно свръхразширение като част от инструментариума за контрол на спектралните линии.

Глава 7 изследва равновероятностни модели, демонстрирайки еквивалентност между различни комбинации на Раби честота и детюнинг (напр. LMSZ, AEN и модифициран AEN модел) чрез експерименти на квантовите системи на IBM. Накрая, Глава 8 обобщава резултатите и очертава направления за бъдеща работа.

## Бележки и въпроси

Високото качество на дисертацията се доказва от три рецензирани публикации в водещи списания (Physical Review Letters и Physical Review A), които се очаква да бъдат допълнени от още две статии, налични в момента като препринти в arXiv. Всички тези работи са съавторски между Иво Михов и неговия научен ръководител проф. Николай Витанов, като кандидатът е водещ автор, което ясно показва основния му принос към изследванията, представени в дисертацията.

– Дисертацията е организирана ясно, но донякъде небалансирано. От общо осем глави първите пет са до голяма степен уводни и учебни по характер, предлагайки разширени прегледи на концепции, модели и експериментални инструменти. Това демонстрира солидните знания на кандидата по квантов контрол на системи с две нива. Въпреки това, макар и полезно за навлизащи в темата, това разширено въведение донякъде забавя представянето на основните научни резултати. По-кратко обобщение на добре познатия материал би могло да подобри общия фокус и поток.

– Дисертацията е написана на добър английски и е добре илюстрирана с фигури. Все пак са уместни няколко бележки относно фигурите. Фигура 1.1 е генерирана с помощта на ChatGPT и качеството ѝ е забележимо ниско, особено при изобразяването на сферата на Блох. Би било по-добре тя да бъде заменена с фигура от стандартен учебник, придружена от съответстващия цитат. Освен това би било полезно да се възприеме една и съща скала за графиките на резидуалите в различните фигури, тъй като това би направило сравнението между моделите по-ясно и по-непосредствено.

– Добре е известно, че фазовата модулация на Раби-честотата е физически еквивалентна на времезависим детюнинг, равна на времевата производна на фазата. Въпреки това, в експериментите със свръхпроводникови кубити фазовата модулация може да се реализира много по-лесно технически. Това повдига въпроса: подобренията в устойчивостта и точността на контрола, заявени в дисертацията, предимно са резултат от това техническо удобство или има и допълнителни физични причини, които допринасят за ефекта? Допълнителен коментар в този контекст: в Подраздел 1.2.5 следва да се спомене, че фазата на Раби-честотата може да се абсорбира чрез преформулиране на амплитудата на вероятността, но само ако фазата не е времезависима.

– В Раздел 3.3 кандидатът пише: „Свръхadiaбатните базиси, идея, възникнала от работата в Ref. [176], могат да се използват за сравнение на свръхadiaбатността на текущите форми на импулси.“ Тази формулировка е донякъде неясна. Означава ли тя, че самото понятие за свръхadiaбатност е възникнало в Ref. [176], или по-скоро, че конкретният подход за конструиране на свръхadiaбатни базиси, използван тук, е въведен в тази работа? Би било полезно да се направи пояснение.

– В различните модели на импулси Раби-честотите се характеризират с два параметъра: максималната Раби-честота  $\Omega_0$  и времетраенето  $\tau$ . И двата параметъра могат да бъдат скалирани с произволни числови множители, без да се променя същността на модела. Фиксираната площ на

импулса на  $\pi$  оставя един свободен параметър. Защо тогава кандидатът избира да сравнява различни модели при едно и също  $\tau$ , вместо при една и съща максимална Раби-честота, което изглежда по-естествено?

– В дисертацията авторът изследва модели на импулси с крайна продължителност, ограничавайки анализа до такива с линейни градиенти в началото и края на импулсите. Би било интересно да се проучат и по-общии класове импулси, като  $\sin^n$ , които имат нули на амплитудата и нейните производни до ред  $(n-1)$ . Защо такива форми не са разгледани? Дали защото не предлагат допълнителни интересни свойства спрямо случая  $n=1$  или просто поради ограничения във времето и ресурсите?

### **Заклучение**

Дисертацията, авторефератът и качеството на представените научни публикации на г-н Иво Михов напълно отговарят на изискванията на Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“.

Поради това твърдо подкрепям присъждането на г-н Иво Михов на образователната и научна степен „Доктор“.

**29.09.2025**

**Проф. Леонид Яценко**