

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

фізичний
(назва факультету)

Кафедра теоретичної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹
ТЕОРІЯ КВАНТОВОЇ ІНФОРМАТИКИ ТА КВАНТОВОЇ ОПТИКИ

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10. Природничі науки

(шифр і назва)

спеціальність 104. Фізика та астрономія

(шифр і назва спеціальності)

освітній рівень магістр

(молодий бакалавр, бакалавр, магістр)

освітня програма квантові комп'ютери, обчислення та інформація

(назва освітньої програми)

спеціалізація

(за наявності)

(назва спеціалізації)

вид дисципліни обов'язкова

Форма навчання

очна

Навчальний рік

2021/2022

Семестр

1

Кількість кредитів ECTS

3

Мова викладання, навчання

та оцінювання

українська

Форма заключного контролю

залік

Викладач: Гнатівський В.О.

Пролонговано: на 20 2021 н.р. С.В. Савченко «28» 12 2020 р.

(підпис, ПІБ, дата)

на 20 /20 н.р. () « » 20 р.

(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2020

¹ Робоча програма навчальної дисципліни є нормативним документом вищого навчального закладу і містить виклад конкретного змісту навчальної дисципліни, послідовність, організаційні форми її вивчення та їх обсяг, визначає форми та засоби поточного і підсумкового контролю.

Розробники ²: Семенов А.О., провідний науковий співробітник Інституту теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова НАН України, доктор наук з галузі «Природничі науки» (спеціальність Фізика та астрономія), старший дослідник; Гнатовський В.О., канд. фіз.-мат. наук, асистент кафедри теоретичної фізики

(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри теоретичної фізики

Решетняк
(підпис)

(Решетняк В.Ю.)

(прізвище та ініціали)

Протокол № 7 від «24» 12 2020 р.

Схвалено науково - методичною комісією факультету/інституту (педагогічною радою коледжу)

Протокол від «24» 12 2020 року № 36

Голова науково-методичної комісії Оліх (Оліх О.Я.)
(підпис) (прізвище та ініціали)

« » 20 року

² Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (раді навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

1. Мета дисципліни – Курс «Теорія квантової інформатики та квантової оптики» покликаний надати студентам практичних навичок у роботі з базовими задачами, що зустрічаються у цій дисципліні такими, як аналіз квантових систем на предмет наявності неklasичних кореляцій, аналіз схем квантових алгоритмів для дискретних та неперервних змінних, аналіз квантових комунікаційних протоколів.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

- Знати базові принципи класичної механіки, електродинаміки, квантової механіки, термодинаміки та статистичної фізики, теорії ймовірності та математичної статистики, лінійної алгебри, квантової оптики включно із представленням квантового фазового простору та теорією квантових оптичних вимірювань (фотодетектування, гомодинне та восьмипортове детектування).
- Вміти застосовувати попередні знання з курсів математичного аналізу, теорії ймовірності, квантової механіки та квантової оптики для розрахунку розподілів квазіймовірностей на фазовому просторі для типових квантових станів оптичних полів.
- Володіти навичками аналізу квантово-оптичних експериментальних схем.

3. Анотація навчальної дисципліни: / референс:

Нормативна дисципліна «Теорія квантової інформатики та квантової оптики» є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр фізики». Програма курсу орієнтована на студентів, які вже знайомі з курсами теоретичної фізики, математичного аналізу, лінійної алгебри, теорії ймовірності та математичної статистики, квантової оптики та математичних методів квантової оптики та інформатики. Результати навчання полягають у набутті студентами практичних навичок для роботи із задачами, що зустрічаються у квантовій оптиці та квантовій теорії інформації (аналіз неklasичних кореляцій, аналіз схем квантових алгоритмів, аналіз протоколів квантової телепортації та обміну заплутаністю за реалістичних умов, аналіз безпеки протоколів квантового розповсюдження криптографічного ключа). Методи викладання: лекції, консультації. Методи оцінювання: опитування в процесі лекцій, домашні роботи та залік. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (80%) та заліку (20%).

4. Завдання (навчальні цілі) - освоєння студентами методів сучасної квантової оптики та теорії квантової інформації. Також здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями з даного курсу, здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел, в тому числі, електронних ресурсів, та здатність студентів до абстрактного мислення, аналізу та синтезу матеріалу з всіх фізичних дисциплін.

Згідно вимог проекту Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти (восьмий рівень НРК України), галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП "Квантові комп'ютери, обчислення та інформація", дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних *компетентностей*:

інтегральної:

- Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики і характеризується складністю та невизначеністю умов.

загальних:

- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК01).
- Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК02).
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (ЗК03).
- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК04).
- Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології (ЗК05).

спеціальних (фахових):

- Здатність використовувати закони та принципи фізики та астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ (СК01).
- Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики (СК02).
- Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції фізики фахівцям і нефахівцям (СК03).
- Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики (СК04).
- Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики й дотичних до них міждисциплінарних областях (СК05).
- Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси (СК08).

5. Результати навчання за дисципліною:

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1	1.1 Представлення стану кубіта на сфері Блоха, фізичні імплементації кубітів.	Лекція	Домашні завдання	3
	1.2 Теорему про неможливість клонування та протокол розрізнення станів кубіта.	Лекція	Домашні завдання	3
	1.3 Означення сепарабельних та несепарабельних станів, умову Переса-Городецького, поняття показника заплутаності, критерії Щукіна-Фогеля, Дуана-Гідке-Цірака-Цоллера та Саймона.	Лекція	Домашні завдання	6
	1.4 Означення гаусівських станів, декомпозицію Блоха-Мессіа, узагальнене співвідношення невизначеностей.	Лекція	Домашні завдання	4
	1.5 Нерівності Белла в формі Клаузера-Хорна-Шімоні-Хольта, методи оптичної перевірки нерівностей Белла, несигнальні кореляції.	Лекція	Домашні завдання	3
	1.6 Поняття локальних реалістичних теорій, ієрархію квантових кореляцій (квантова заплутаність, керованість за Ейнштейном-Подольським-Розеном, нелокальність Белла.)	Лекція	Домашні завдання	3
	1.7 Представлення стану кубіта на сфері Блоха, фізичні імплементації кубітів.	Лекція	Домашні завдання	3

	1.8 Теорему про неможливість клонування та протокол розрізнення станів кубіта.	Лекція	Домашні завдання	3
	1.9 Означення сепарабельних та несепарабельних станів, умову Переса-Городецького, поняття показника заплутаності, критерії Щукіна-Фогеля, Дуана-Гідке-Цірака-Цоллера та Саймона.	Лекція	Домашні завдання	6
	1.10 Протокол Браунштайна-Кимбле телепортації квантових систем з неперервними змінними.	Лекція	Домашні завдання	3
	1.11 Поняття близькості квантових станів.	Лекція	Домашні завдання	3
	1.12 Протокол телепортації кубіта	Лекція	Домашні завдання	4
	1.13 Протокол обміну заплутаністю для дискретних та неперервних змінних	Лекція	Домашні завдання	3
	1.14 Основні задачі криптографії	Лекція	Домашні завдання	3
	1.15 Протоколи BB84, E91, B92.	Лекція	Домашні завдання	4
	1.16 Протокол пасткових станів	Лекція	Домашні завдання	4
	1.17 Принцип роботи протоколів, що не залежать від приладів	Лекція	Домашні завдання	3
	1.18 Принцип роботи протоколів, що не залежать від вимірювальних приладів	Лекція	Домашні завдання	4
2	2.1 Аналізувати стани кубіта з точки зору його квантово-статистичної чистоти.	Лекція	Домашні завдання	3
	2.2 Застосовувати критерії Переса-Городецького, Дуана-Гідке-Цірака-Цоллера та Саймона для верифікації несепарабельності квантових станів.	Лекція	Домашні завдання	6
	2.3 Працювати з матрицею кореляцій, аналізувати гаусівські стани.	Лекція	Домашні завдання	4
	2.4 Аналізувати стани на предмет порушення ними нерівностей Белла.	Лекція	Домашні завдання	3
	2.5 Аналізувати ефективність протоколів квантової телепортації за різних умов	Лекція	Домашні завдання	4
	2.6 Аналізувати ефективність протоколів обміну заплутаністю за різних умов	Лекція	Домашні завдання	3
	2.7 Розраховувати значення інформації Холево для різних протоколів	Лекція	Домашні завдання	4
	2.8 Аналізувати безпеку протоколів B92 та BB84	Лекція	Домашні завдання	4

2.9 Аналізувати безпеку протоколу пасткових станів	Лекція	Домашні завдання	4
--	--------	------------------	---

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання:

Результати навчання дисципліни	1	2
Програмні результати навчання		
РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики для розв'язання складних задач і практичних проблем.	+	+
РН04. Вибирати та використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних в фізичних дослідженнях і оцінювання їх достовірності.	+	+
РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та астрономічних явищ, об'єктів та процесів.	+	+
РН06. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та інновацій в області фізики.	+	+
РН10. Відшукувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та астрономії, використовуючи різні джерела, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані.	+	+
РН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.	+	+
РН13. Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.	+	+
РН17. Проводити теоретичні та експериментальні дослідження оптичних та електричних властивостей кристалів, напівпровідникових та металевих наночастинок.		

7. Структура курсу:

Курс складається з двох змістових модулів у першому семестрі (15 лекцій).

8. Схема формування оцінки.

8.1 Форми оцінювання студентів:

- семестрове оцінювання (1 семестр)
- 1. Домашні роботи РН 2.1-2.4 (40 балів).
- 2. Домашні роботи РН 2.5-2.9 (40 балів).
- підсумкове оцінювання у формі заліку.

	ЗМ1	ЗМ2	залік	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>24</u>	<u>24</u>	<u>12</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>40</u>	<u>40</u>	<u>20</u>	<u>100</u>

Студент не допускається до заліку, якщо під час семестрового оцінювання отримав менше 48 балів.

Оцінка за залік не може бути меншою **12 балів**.

Залікова робота не є обов'язковою, якщо під час семестрового оцінювання студент отримав більше **60 балів**.

8.2 Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням орієнтовного графіку оцінювання).

Контроль здійснюється за модульно-рейтинговою системою, яка складається із 2 змістових модулів (2 модулі в першому семестрі). Система оцінювання знань включає поточний та модульний контроль знань. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою. Форми поточного контролю: усні відповіді, оцінювання домашніх робіт. Студент може отримати максимально 80 балів за домашні роботи та 20 балів на заліку. Підсумковий контроль проводиться у формі заліку (20 балів).

Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Тематичний план лекцій, практичних занять та самостійних робіт

I СЕМЕСТР

№ теми	Назва лекції	Кількість годин		
		лекції	Практичні заняття	самост. робота
Змістовий модуль 1				
1	Дворівневі системи. Стани кубітів.	2		2
2	Фізичні імплементації кубітів.	1		2
3	Теорема про неможливість клонування.	1		2
4	Протокол розділення квантових станів.	1		2
5	Сепарабельні та несепарабельні стани.	2		5
6	Умова Переса-Городецького.	2		5
7	Переплутування систем з неперервними змінними.	1		2
8	Гаусівські стани.	2		4
9	Нерівності Белла в формі Клаузера-Хорна-Шімоні-Хольта.	2		6
Змістовий модуль 2				

10	Квантова телепортація систем з неперервними змінними	1		2
11	Близькість квантових станів	1		2
12	Телепортація кубіта	1		2
13	Протокол обміну заплутаністю	1		2
14	Класична інформація	1		2
15	Квантова інформація	1		3
16	Вступ до криптографії	1		1
17	Основні протоколи квантового розповсюдження ключа	1		2
18	Аналіз безпеки базових протоколів розповсюдження криптографічного ключа	2		5
19	Практичні аспекти протоколів розповсюдження криптографічного ключа	2		5
20	Протоколи, що не залежать від приладів	1		2
21	Протоколи, що не залежать від вимірювальних приладів	1		2
22	Залікова робота	2		
Всього		30		60

Загальний обсяг 90 год, в тому числі:

Лекцій – **30 год**.

Семінари – **год**.

Практичні заняття - ____ год.

Лабораторні заняття - ____ год.

Тренінги - ____ год.

Консультації - ____ год.

Самостійна робота – **60 год**.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:

1. W. Vogel and D.-G. Welsch, Quantum Optics, (Wiley VCH, Berlin, 2006).
2. W.P. Schleich, Quantum optics in phase space, (Wiley WCH, Berlin, 2001).
3. M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
4. A. Perelomov, Generalized coherent states and their applications, (Springer, Berlin, 1986).
5. G. Adesso, S. Ragy, and A. R. Lee, Continuous Variable Quantum Information: Gaussian States and Beyond, [Open Syst. Inf. Dyn. 21, 1440001 \(2014\)](#); see also [arXiv:1401.4679 \[quant-ph\]](#).
6. R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, Quantum entanglement, [Rev. Mod. Phys. 81, 865 \(2009\)](#); see also [arXiv:quant-ph/0702225](#).

7. N. Brunner, D. Cavalcanti, S. Pironio, V. Scarani, and S. Wehner, Bell Nonlocality, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 419 (2014); see also [arXiv:1303.2849 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/1303.2849).
8. A. A. Semenov, V. K. Usenko, E. V. Shchukin, and B. I. Lev, Nonclassicality of quantum states and its application in quantum cryptography, *Ukr. J. Phys. Reviews* **3**, 151 (2006).
9. N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, Quantum Cryptography, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 145 (2002).
10. F. Xu, X. Ma, Q. Zhang, H.-K. Lo, and J.-W. Pan, Secure quantum key distribution with realistic devices, *Rev. Mod. Phys.* **92**, 025002 (2020).