

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

фізичний
(назва факультету)

Кафедра теоретичної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹
СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ 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
(молодший 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, англійська
Форма заключного контролю іспит

Викладач: Семенов А.О.

Пролонговано: на 2012/2020 н.р. _____ «12» 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 Решетняк В.Ю.

Решетняк В.Ю.

(Решетняк В.Ю.)

(підпис)

(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 О.Я. (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 (радї 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).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – Курс «Сучасні проблеми квантової інформатики та квантової оптики» покликаний ознайомити студентів з базовими поняттями цієї дисципліни такими, як неklasичні кореляції (квантова заплутаність та нелокальність Белла), квантова інформація на дискретних та неперервних змінних, основи квантових алгоритмів, квантова телепортація та розповсюдження квантового криптографічного ключа.

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 «Сучасні проблеми 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 вивченні розділів сучасної квантової оптики та теорії квантової інформації (квантова заплутаність, нелокальність Белла, кодування квантової інформації неперервними та дискретними змінними, схеми квантових алгоритмів, квантова комунікація). Методи викладання: лекції, консультації. Методи оцінювання: модульні контрольні роботи та екзамен. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та екзамену (40%).

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 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).

5. Результати навчання за дисципліною:

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

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

			робота	
	2.9 Аналізувати безпеку протоколу пасткових станів	Лекція	Модульна контрольна робота	4

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (РН):

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.	+	+
РН06. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та інновацій в області фізики.	+	+
РН07. Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики, оприлюднених у формі публікацій чи усної доповіді.	+	+
РН08. Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.	+	+
РН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись із колегами.	+	+
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.	+	+
РН12. Розробляти та застосовувати ефективні алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для дослідження моделей фізичних та астрономічних об'єктів і процесів, обробки результатів експериментів і спостережень.	+	+
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.	+	+
РН16. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та теоретичних досліджень в області фізики.	+	+
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. Модульна контрольна робота РН 2.1-2.4 (30 балів).

2. Модульна контрольна робота РН 2.5-2.9 (30 балів).

- підсумкове оцінювання у формі іспиту.

	ЗМ1	ЗМ2	іспит	Підсумкова оцінка
<i>Мінімум</i>	<u>18</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

Студент не допускається до іспиту, якщо під час семестру отримав менше **36 балів**.

Оцінка за іспит не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

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 модульних контрольних робіт. Студент може отримати максимально 60 балів за модульні контрольні роботи та 40 балів на іспиті. Підсумковий контроль проводиться у формі іспиту (40 балів). Білет включає теоретичні питання (20 балів) та задачі (20 балів).

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно / Fail	0-59

Тематичний план лекцій, практичних занять та самостійних робіт

I СЕМЕСТР

№ теми	Назва лекції	Кількість годин		
		лекції	Практичні заняття	самост. робота
<i>Змістовий модуль 1</i>				
1	Квантова теорія в представлені фазового простору	2		3
2	Дворівневі системи. Стани кубітів.	1		2
3	Фізичні імплементації кубітів.	1		1
4	Теорема про неможливість клонування.	1		1
5	Аргументи Ейнштейна-Подольського-Розена.	1		1
6	Сепарабельні та несепарабельні стани.	1		3
7	Умова Переса-Городецького.	1		5
9	Переплутування систем з неперервними змінними.	1		6
10	Гаусівські стани.	2		4
11	Нерівності Белла в формі Клаузера-Хорна-Шімоні-Хольта.	1		2
12	Експериментальна перевірка нерівностей Белла.	1		1
13	Ієрархія квантових кореляцій.	1		1
14	Модульна контрольна робота 1	1		
<i>Змістовий модуль 2</i>				
15	Квантова телепортація систем з неперервними змінними	1		2
16	Близькість квантових станів	1		2
17	Телепортація кубіта	1		2
18	Протокол обміну заплутаністю	1		2
19	Класична інформація	1		2
20	Квантова інформація	1		3
21	Вступ до криптографії	1		1
22	Основні протоколи квантового розповсюдження ключа	1		2
23	Аналіз безпеки базових протоколів розповсюдження криптографічного ключа	2		5

24	Практичні аспекти протоколів розповсюдження криптографічного ключа	2		5
25	Протоколи, що не залежать від приладів	1		2
26	Протоколи, що не залежать від вимірювальних приладів	1		2
27	Модульна контрольна робота 2	1		
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 \[quant-ph\]](#).
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 \(2020\)](#).