

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет  
(назва факультету)

Кафедра теоретичної фізики



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ<sup>1</sup>**  
**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ІНФОРМАТИКИ**  
(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 бакалавр  
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)

освітня програма фізика  
(назва освітньої програми)

спеціалізований  
вибірковий блок квантові комп'ютери, обчислення та інформація  
(за наявності) (назва)

вид дисципліни вибіркова

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2022/2023</u>
Семестр	<u>8</u>
Кількість кредитів ECTS	<u>3</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська, англійська</u>
Форма заключного контролю	<u>залік</u>

Викладач: Семенов А.О.

Пролонговано: на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2022

<sup>1</sup> 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<sup>2</sup>: 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; Гнатівський 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 № 19 від «29» травня 2022 р.

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

Протокол від «10» червня 2022 року № 16

Голова науково-методичної комісії

Оліх  
(підпис)

(Оліх О.Я.)

(прізвище та ініціали)

«    »      20     року

<sup>2</sup> 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 «Фізичні основи квантової інформатики» покликаний ознайомити студентів з базовими поняттями цієї дисципліни такими, як класична та квантова інформація, квантова теорія в представленнях гільбертового та фазового просторів, квантове електромагнітне поле, вимірювання в квантовій оптиці, лінійні квантово-оптичні операції, неklasичні явища в квантовій оптиці та їх найпростіші застосування в квантових неуніверсальних обчисленнях та квантовій метрології.

## **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.
- Вміти застосовувати попередні знання з курсів математичного аналізу та теорії ймовірності для розкладу функцій в степеневий ряд, обчислення інтегралів за допомогою методу диференціювання по параметру та твірної функції, обчислення моментів випадкових величин.
- Володіти навичками обчислення середніх значень операторів за допомогою оператора густини та алгебраїчними діями з матрицями.

## **3. Анотація навчальної дисципліни / референс:**

Нормативна дисципліна «Фізичні основи квантової інформатики» є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр фізики». Програма курсу орієнтована на студентів, які вже знайомі з курсами теоретичної фізики, математичного аналізу, лінійної алгебри, теорії ймовірності та математичної статистики. Результати навчання полягають у вивченні додаткових розділів сучасної квантової теорії, пов'язаних з прикладними та теоретичними аспектами квантової фізики (POVM-вимірювання, збалансоване гомодинне детектування, восьмипортове гомодинне детектування, теорія фотодетектування, квадратурне стиснення, когерентні стани світла, s-параметризовані розподіли у фазовому просторі, класичні та квантові стани). Методи викладання: лекції, консультації. Методи оцінювання: опитування в процесі лекцій, контрольні роботи після основних розділів курсу та залік. Підсумкова оцінка виставляється на основі семестрового оцінювання (80%) та заліку (20%).

**4. Завдання (навчальні цілі)** - освоєння студентами методів сучасної квантової фізики та теоретичного опису задач, пов'язаних з квантовими вимірюваннями. 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 (перший (бакалаврський) рівень вищої освіти (сьомий рівень НРК України), галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОПП "Фізика", дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних *компетентностей*:

*інтегральної:*

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

*загальних:*

- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК3).
- Здатність приймати обґрунтовані рішення (ЗК5).
- Навички міжособистісної взаємодії (ЗК6).

- Навички здійснення безпечної діяльності (ЗК7).

*фахових:*

- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії (ФК1).
- Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів (ФК2).
- Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем (ФК5).
- Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси (ФК6).
- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту (ФК7).
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей (ФК10).
- Здатність аналізувати світові тренди розвитку фізики та астрономії для вибору власної освітньої траєкторії навчання та тематики майбутніх наукових досліджень (ФК15).

## 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>
<b>Код</b>	<b>Результат навчання</b>			
<b>1</b>	1.1 Теорія квантових вимірювань (проекційних та узагальнених), чисті та змішані стани, ентропія фон Неймана.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
	1.2 Квантування електромагнітного поля, представлення чисел заповнення, оператори знищення та народження, стани Фока, когерентні стани.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	7
	1.3 Збалансоване гомодинне детектування, квадратура поля, метод квантової томографії, функція Вігнера.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
	1.4 Теорія фотодетектування (квазі-класична та квантова), рівняння фотодетектування у представленнях гільбертового та фазового просторів, функція Глаубера-Сударшана.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	3
	1.5 Восьмипортове гомодинне детектування. Функція Хусімі-Кано.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні	2

			завдання	
	1.6 s-параметризовані розподіли на фазовому просторі.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	11
	1.7 Елементи лінійної квантової оптики, співвідношення входу-виходу для операторів та для розподілів квазі-ймовірностей, квантово-оптичні канали з лінійними втратами, квантова ефективність фотодетектування..	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
	1.8 Двофотонна інтерференція, неуніверсальні квантові обчислення, бозонна вибірка.		Усні відповіді.	6
	1.9 Некласичні явища в квантовій оптиці: субпуасонівська статистика фотовідліків (стиснення за числом фотонів), квадратурне стиснення, неklasичність квантових станів.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
<b>2</b>	2.1 Оперувати з діраківськими позначеннями у квантовій фізиці, розраховувати розподіли ймовірностей для заданих вимірювань та станів, розраховувати ентропію фон Неймана для заданих станів.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
	2.2 Робити розрахунки, що використовують техніку станів Фока та когерентних станів.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	7
	2.3 Аналізувати вимірювання квадратур поля за допомогою збалансованого гомодинного детектування у реалістичних умовах, вміти розраховувати функцію Вігнера для різних станів квантового випромінювання.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
	2.4 Розраховувати статистику фотовідліків для різних станів квантового випромінювання, розраховувати характеристичну функцію для розподілу Глаубера-Сударшана, вміти використовувати метод узагальнених функцій.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	3
	2.5 Розраховувати функцію Хусімі-Кано за допомогою усереднення по когерентних станах.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	2

2.6 Застосовувати правило Борна у представленні фазового простору для різних квантових станів, розраховувати s-параметризовані розподіли, символи операторів та їхні характеристичні функції.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	11
2.7 Аналізувати стани квантового поля на виході з пасивних лінійних приладів, вміти розраховувати результати фотодетектування, гомодинного та восьмипортного детектувань за наявності лінійних втрат та шуму.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6
2.8 Аналізувати квантові стани світла з метою виявлення наявності квадратурного стиснення або стиснення за числом фотонів. Робити відповідні розрахунки для випадку наявності лінійних втрат та шуму.	Лекція	Модульна контрольна робота, усні відповіді, домашні завдання	6

**6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)**

Результати навчання дисципліни		
Програмні результати навчання	1	2
1.ПРН1. Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та астрономії	+	+
2.ПРН3. Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій	+	+
3.ПРН4. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання	+	+
4.ПРН5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії	+	+
5.ПРН8. Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань	+	+
6.ПРН13. Розуміти зв'язок фізики та астрономії з іншими	+	+

природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень		
7.ПРН15. Знати, аналізувати, прогнозувати та оцінювати основні екологічні аспекти загального впливу промислово-технологічної діяльності людства, а також окремих фізичних і астрономічних явищ, наукових досліджень та процесів (природних і штучних) на навколишнє природне середовище та на здоров'я людини	+	+
8.ПРН16. Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів	+	+
9.ПРН24. Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій	+	+
10.ПРН25. Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітніх траєкторій та професійного розвитку	+	+
11.ПРН26. Мати базові навички самостійної оцінки рівня освітніх програм з фізики та астрономії у глобальному освітньому просторі для вибору цілеспрямованих візитів по програмі академічної мобільності	+	+
12.ПРН27. Мати базові навички самостійної оцінки рівня освітніх програм із природничих наук в Україні і світі для їх вибіркового опанування в рамках міждисциплінарного шляху розвитку науки	+	+
13.ПРН28. Мати уявлення про трансдисциплінарний шлях розвитку науки та його значення для вибору майбутньої освітньої траєкторії	+	+

## 7. Структура курсу:

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

## 8. Схема формування оцінки.

### 8.1 Форми оцінювання студентів:

- семестрове оцінювання (8 семестр)

1. Модульна контрольна робота РН 2.1-2.6 (20 балів).

2. Модульна контрольна робота РН 2.7-2.8 (20 балів).

3. Домашні завдання та усні відповіді (40 балів).

- підсумкове оцінювання у формі заліку.

	ЗМ1	ЗМ2	залік	Підсумкова оцінка
<i>Мінімум</i>	<u>24</u>	<u>24</u>	<u>12</u>	<u>60</u>
<b>Максимум</b>	<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 у восьмому семестрі). Система оцінювання знань включає поточний та модульний контроль знань. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою. Форми поточного контролю: усні відповіді, домашні завдання, оцінювання модульних контрольних робіт. Студент може отримати максимально 80 балів за усні відповіді, домашні завдання та модульні контрольні роботи (семестрове оцінювання), а також 20 балів на заліку. Підсумковий контроль проводиться у формі заліку (20 балів). Білет включає теоретичне питання (10 балів) та задачу (10 балів).

<b>Зараховано / Passed</b>	60-100
<b>Не зараховано / Fail</b>	0-59

## СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Тематичний план лекцій, практичних занять та самостійних робіт

### VIII СЕМЕСТР

№ теми	Назва лекції	Кількість годин		
		лекції	Практичні заняття	самост. робота
<b>Змістовий модуль 1</b>				
1	Класична та квантова інформація.	1		2
2	Квантова теорія в гільбертовому просторі.	2		4
3	Квантові оптичні поля.	2		5
4	Збалансоване гомодинне детектування.	2		5
5	Теорія фотодетектування.	2		4
6	Восьмипортове гомодинне детектування.	1		2
7	Представлення фазового простору.	4		8
8	<b>Модульна контрольна робота 1</b>	1		
<b>Змістовий модуль 2</b>				
9	Лінійна квантова оптика.	3		7
10	Двофотонна інтерференція.	1		3
11	Неуніверсальні квантові обчислення.	1		3
12	Стиснення за числом фотонів.	3		8



13	Квадратурне стиснення.	2		7
14	Квантова метрологія	1		1
15	Некласичність квантових станів.	1		1
16	<b>Модульна контрольна робота 2</b>	1		
17	<b>Залік</b>	<b>2</b>		
<b>Всього</b>		30		60

**Загальний обсяг 90 год**, в тому числі (вибрати необхідне):

Лекцій – **30 год**.

Семінари – *год*.

Практичні заняття - \_\_\_\_ *год*.

Лабораторні заняття - \_\_\_\_ *год*.

Тренінги - \_\_\_\_ *год*.

Консультації - \_\_\_\_ *год*.

Самостійна робота – **60 год**.

### **РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:**

1. L. Mandel, E. Wolf, Optical coherence and quantum optics, (Cambridge University Press, 1995).
2. D. F. Walls and G. J. Milburn, Quantum Optics, (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
3. W. Vogel and D.-G. Welsch, Quantum Optics, (Wiley VCH, Berlin, 2006).
4. W. P. Schleich, Quantum optics in phase space, (Wiley WCH, Berlin, 2001).
5. M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
6. A. Perelomov, Generalized coherent states and their applications, (Springer, Berlin, 1986).
7. 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 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/1401.4679).
8. R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, Quantum entanglement, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 865 (2009); see also [arXiv:quant-ph/0702225](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0702225).
9. 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).
10. 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).