МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І.МЕЧНИКОВА
Кафедра фізики та астрономії

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Проректор з науково-педагогічної роботи
Олександр ЗАПОРОЖЧЕНКО
"____" жовтня 2023 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇДИСЦИПЛІНИ

ОК 6 «Квантова інформатика»

Рівень вищої освіти	**другий (магістерський)**
Галузь знань	**10 – Природничі науки**
Спеціальність	**104 - Фізика та астрономія**
Освітньо-професійна програма	**Фізика та астрономія**

ОНУ
Одеса
2023

Робоча програма навчальної дисципліни «Квантова інформатика». – Одеса: ОНУ, 2023. – 9 с.

Розробник: Кулінський Володимир Леонідович, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та астрономії

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри фізики та астрономії ФМФІТ

Протокол № 3 від «17» жовтня 2023 р.

Завідувач кафедри _____ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Погоджено із гарантом ОПП «Фізика та астрономія» _____ Олена ПАНЬКО

Схвалено навчально-методичною комісією (НМК) факультету математики, фізики та інформаційних технологій

Протокол № 2 від «19» жовтня 2023 р.

Голова НМК _____ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № ___від «___» _____20___ р.

Завідувач кафедри _____ (_____)

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № ___від «___» _____20___ р.

Завідувач кафедри _____ (_____)

1. **Опис навчальної дисципліни**

Найменування показників	Галузь знань, Спеціальність, спеціалізація, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни
		Очна (денна) форма навчання
Загальна кількість	Галузь знань	Обов'язкова дисципліна
кредитів – 3	10 – Природничі науки	**Рік підготовки**:
годин – 90	Спеціальність:	1-й
змістовних модулів - 1	104 – Фізика та астрономія	**Семестр**
	Рівень вищої освіти:	1-й
	Другий (освітньо-професійний)	**Лекції**
		30 год.
		Практичні, семінарські
		-.
		Лабораторні
		-
		Самостійна робота
		60 год.
		Форма підсумкового контролю: залік

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни є: підготовка фахівців, які здібні розуміти, поєднувати і застосовувати в їх майбутній професійній діяльності ідеї і прикладні методи квантової механіки, що виходять зараз на передній план внаслідок поєднання досягнень нанофізики та інформаційних технологій.

Завдання: формування у студентів наступної системи компетентностей, що включає:

Інтегральна компетентність. Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

Загальні компетентності: ЗК 01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК 02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

ЗК 04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК 06. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.

Спеціальні (фахові) компетентності:

СК 03. Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефахівцям.

СК 04. Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики та/або астрономії.

Заплановані результати навчання: по проходженні курсу студенти будуть

знати: нові уявлення, поняття і методи, які на протязі останніх двадцяти років тривко вкоренилися у інформатиці і нанофізиці і зараз становлять фундамент для подальшого розвитку інформаційних технологій на основі квантових логічних схем і алгоритмів ;

вміти: застосовувати принципи квантової теорії у інформатиці і інформаційних технологіях, розв'язувати простіші задачі аналізу-синтезу схем для квантових обчислень та оцінювати можливості та ефективність їх фізичної імплементації,

що забезпечуєься **програмними результатами навчання**

РН07. Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.

РН10. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.

РН13. Розробляти та викладати фізичні та/або астрономічні навчальні дисципліни в закладах вищої, фахової передвищої, професійної (професійно-технічної), застосовувати сучасні освітні технології та методики, здійснювати необхідну консультативну та методичну підтримку здобувачів освіти.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Елементи квантової інформатики. Класичні обчислювальні елементи і схеми (біти, регістри, логічні елементи). Квантові біти(кубіти). Однокубітні гейти (вентилі). Багатокубітні гейти. Переплутані стани. Керовані гейти для квантових обчислень. Фізичні моделі кубітів. Спіни і поляризовані фотони.

Тема 2. Фундаментальні основи квантової інформатики. Вимірювання стану кубіту. Теорема про неклонування. Квантова телепортація. ЕПР (Ейнштейна-Подольського-Розена) – стани. Приховані параметри. Нерівність Белла. Порушення нерівності Белла.

Тема 3. Квантові алгоритми та протоколи. Алгоритми Дойча і Дойча-Йожі. Пошук у невпорядкованій базі даних. Алгоритм Гровера. Алгоритм Саймона. Швидке перетворення Фур'є. Алгоритм Шора. Елементи квантової криптографії. Щільне кодування. Одноразовий блокнот. Протоколи передачі таємних ключей.

Тема 4. Шляхи реалізації квантових обчислень. Квантові комп'ютери на рідбергових атомах. Квантові комп'ютери на іонах у лазерних пастках. Комп'ютери на масивах квантових точок, надпровідних елементах.

3. Структура навчальної дисципліни

Тема	Кількість годин					
	Усього	Лек.	Пр.	Лаб.	Інд.	СР
1	2	3	4	5	6	7
Тема 1. Елементи квантової інформатики.	24	8	-	-		16
Тема 2. Фундаментальні основи квантової інформатики.	20	8	-	-		12
Тема 3. Квантові алгоритми та протоколи	28	8	-	-		20
Тема 4. Шляхи реалізації квантових обчислень.	18	6	-	-	-	12
Усього годин	**90**	**30**		-		**60**

4. Теми практичних занять

Практичні заняття не передбачені навчальним планом

5. Теми лабораторних занять

Лабораторні заняття не передбачені навчальним планом

6. Теми семінарських занять

Семінарські заняття не передбачені навчальним планом

7. Завдання для самостійної роботи

№	Назва теми	Кількість годин
1	Класичні обчислення: біти, регістри, гейти, ресурси, оборотні обчислення	6
2	Стани кубітів. Двовимірний гільбертів простір. Прямий добуток двомірних гільбертових просторів. Унітарні оператори.	4
3	Квантові гейти. Переплутані стани.	6
4	Теорема про неклонування. Вимір стану регістру	2
5	Перетворення станів регістру.	4
6	Парадокс Ейнштейна-Подольского -Розена.	2
7	Нерівність Белла. Експериментальна перевірка.	2

8	Щільне кодування.	2
9	Алгоритми для квантових комп’ютерів	8
10	.Виправлення помилок квантових комп’ютерів	4
11	Коди і протоколи квантової кріптографії	6
12	Комп’ютери на рідбергових атомах	2
13	Іони у лазерних пастках	4
14	Комп’ютери на масивах квантових точок	4
15	Комп’ютери на надпровідних елементах і кристалі алмазу	4
РАЗОМ		**60**

8. Теми індивідуальних занять

1. Оператори проектування. Спектральна теорема для операторів спостережних величин.
2. Декогеренція переплутаних станів.
3. Швидке Фур’є перетворення

9. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються інтерактивні методи навчання, наочні методи навчання. Базовим методом навчання є поєднання лекції та самостійної роботи. Під час проведення лекцій використовуються наступні методи навчання:
пояснювально-ілюстративний метод або інформаційно-рецептивний; метод проблемного викладу; частково-пошуковий, або евристичний метод. Під час самостійної роботи використовується дослідницький метод.

10. Форми контролю та методи оцінювання

Поточний контроль здійснюється за результатами виконання самостійних контрольних робіт студентів, захисту індивідуального завдання.

Критерії оцінювання виконання самостійної роботи

Критеріями оцінювання є: повнота виконання завдання, структура і якість відповідей та на додаткові запитання викладача.

Критерії оцінювання контрольних робіт

Критеріями оцінювання є правильність та повнота відповіді на тестові питання, обгрунтування правильних та виправлення помилок в результаті особистого захисту роботи. Кількість балів визначається за сумою правильних відповідей з урахуванням логічних зв'язків між завданнями при комп'ютерній обробці результатів тесту. Оцінюється також активність студента в процесі занять: усне опитування, виконання самостійних робіт; розв’язання задач.

При оцінюванні в балах рівня засвоєння матеріалу використовуються загальні критерії оцінювання навчальних досягнень здобувачів вищої освіти згідно положення ОНУ імені І.І. Мечникова. Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою, що наведена нижче.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90-100	**A**	відмінно	зараховано
85-89	**B**	добре	
75-84	**C**		
70-74	**D**	задовільно	
60-69	**E**		
35-59	**FX**	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	**F**	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

11. Питання для поточного та підсумкового контролю.

Для кожної теми формами контролю навчальних здобутків студентів поточний контроль здійснюється шляхом виконання завдань і контрольного теста. Питання поточного контролю публікуються у відповідному G-class (https://classroom.google.com/c/MTQxNDcwMTYyODg3?cjc=tbzij5q) і можуть варіюватись в залежності від рівня аудиторії. Приклад питань

1.1. Яке найбільше ціле достатнє число може бути записане у 8, 16 та 32-бітному регістрі?

1.2. Яке найменше дійсне додатне число може зберігатися у 8, 16 та 32-бітному регістрі?

1.3. Оцініть число операцій ділення, які необхідно виконати для факторизації 12-значного десяткового числа.

1.4. Складіть таблиці істинності для всіх основних видів гейтів.

1.5. Складіть таблиці істинності для напівсуматора та суматора.

2.1. Нехай кубіт знаходиться у деякому стані, що описується вектором $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, де α та β – дійсні числа. Визначте можливі вектори $|\psi\rangle$ цього стану, якщо відомо, що при вимірюванні значення кубіту в базисі $|0\rangle; |1\rangle$ ймовірність його виявлення в стані $|1\rangle$ дорівнює 0.36.

Відповідь: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ з $\alpha = \pm 0.8$, $\beta = \pm 0.6$.

2.2. Кубіт знаходиться у стані, що описується вектором $|\psi\rangle = \frac{1}{2}|0\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|1\rangle$.

Якщо ми визначатимемо стан цього кубіту в базисі $|\varphi\rangle_0 = \frac{\sqrt{3}}{2}|0\rangle + \frac{1}{2}|1\rangle$, $|\varphi\rangle_1 = -\frac{1}{2}|0\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|1\rangle$, з якою ймовірністю ми виявимо його у стані $|\varphi\rangle_0$?

2.3. Покажіть, що оператор $\hat{A}$ є ермітовим тоді і тільки тоді, коли для будь-яких двох векторів $|\psi\rangle, |\psi'\rangle$ простору H справедлива рівність $\langle\psi'|\hat{A}|\psi\rangle = \overline{\langle\psi|\hat{A}|\psi'\rangle}$.

Підказка: Розгляньте квадратичні форми оператора $\hat{A}$ на векторах $|\psi\rangle + |\psi'\rangle$, $|\psi\rangle + i|\psi'\rangle$ і скористайтесь тим, що уявні частини цих форм дорівнюють нулю.

2.4. Пересвідчиться в тому, що операторам спостережних величин відповідають ермітові матриці.

2.5. Знайдіть нормовані власні вектори матриць

$$\tilde{X} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{Y} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{Z} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{H} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix},$$

які визначають логічні гейти $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$ та логічний гейт Адамара $\hat{H}$.

Відповіді: $\hat{X}: \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ \pm 1 \end{pmatrix}$; $\hat{Y}: \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} \pm 1 \\ i \end{pmatrix}$; $\hat{Z}: \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$; $\hat{H}: \frac{1}{\sqrt{4 \pm 2\sqrt{2}}}\begin{pmatrix} 1 \pm \sqrt{2} \\ 1 \end{pmatrix}$.

12. Розподіл балів, які отримують студенти

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання									Сума балів
Поточний контроль на лекціях				Контрольна робота	Індивідуальні завдання	Виконання і захист лабораторних робіт	Практичне завдання	Разом	
T1	T2	T3	T4	4x15	20	-	-	100	100
5	5	5	5						

13. Навчально-методичне забезпечення

Робоча програма навчальної дисципліни, силабус https://onu.edu.ua/uk/structure/faculty/fmfit/dystsypliny , конспект лекцій, контрольні питання і завдання до тем, роздаткові матеріали лекцій, матеріали у G-class https://classroom.google.com/c/NTg1MjE3Mjc4Mzc5?cjc=nnvqys7)

14. Рекомендована література

Основна

1. Адамян В.М., Завальнюк В.В. Вступ до квантової теорії інформації (конспект лекцій), Одеса 2019 (наукова бібліотека ОНУ).
2. Остапов С.Е., Добровольський Ю.Г. Квантова інформатика та квантові обчислення - Чернівці: ЧНУ, 2021. - 99 с.
3. Лебедь О. О., Дейнека О. Ю., Рибалко А. В., Гаращенко В. І. Основи квантового комп'ютера та квантової інформатики : навч. посіб. /. - Рівне : НУВГП, 2014. - 151 с.
4. Kitaev A., Shen A., Vyalyi M. Classical and Quantum Computation, AMS 2002 (https://www.ams.org/books/gsm/047/gsm047-endmatter.pdf)
5. Stig Stenholm, Kalle-Antti Suominen. Quantum approach to informatics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005, 238 p. (https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471739367)

Допоміжна

1. Вакарчук І.О.. Квантова механіка, 3-тє видання, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2007, 848 с. (наукова бібліотека ОНУ)
2. Ткачук В.М.. Фундаментальні проблеми квантової механіки, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2011, 143 с. (наукова бібліотека ОНУ)

15. Електронні інформаційні ресурси

1. http:// www.theory.caltech.edu/~preskill/ph219/ph219_2015-16
2. IBM Quantum Experience
3. http://theorphys.onu.edu.ua/uk/textbooks