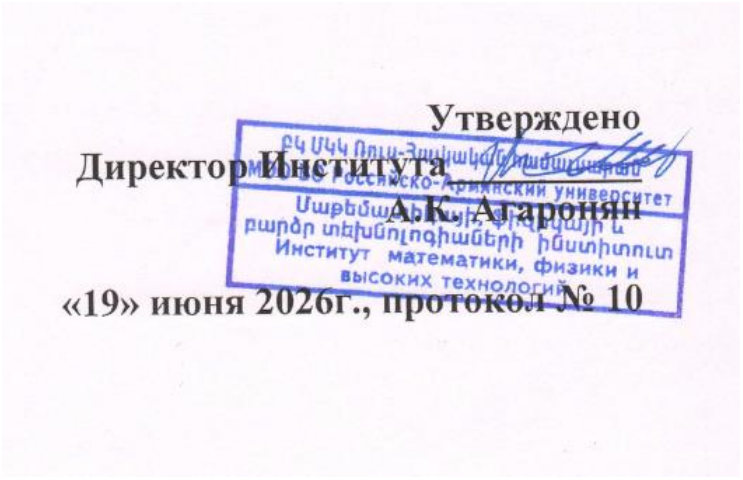
Межгосударственная образовательная организация высшего образования
«Российско-Армянский университет»



Утверждено
Директор Института А.К. Агаронян
«19» июня 2026г., протокол № 10

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины: Б1.В.05 Квантовая коммуникация и квантовый интернет

Автор (ы) **Айрапетян Давид Борисович, д.ф.-м.н., доцент**
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и наноэлектроника
Наименование образовательной программы: Квантовая информатика

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.



(подпись)

1. АННОТАЦИЯ

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

Курс **"Квантовая телекоммуникация"** посвящен изучению принципов передачи информации с использованием квантовых эффектов, таких как суперпозиция, запутанность и квантовая телепортация. Он охватывает теоретические основы квантовой механики, основы квантовой криптографии, методы квантового распределения ключей (QKD), квантовые коммуникационные сети и их архитектуру, а также технологии аппаратной реализации квантовой связи.

Основное внимание уделяется безопасности квантовых систем, защите информации с помощью квантовых методов и перспективам развития квантового интернета. В ходе изучения дисциплины рассматриваются как фундаментальные аспекты, так и практические применения квантовых коммуникаций, включая современные технологии квантовой криптографии и существующие глобальные квантовые сети.

1.2. Трудоемкость в академических кредитах и часах, формы итогового контроля (экзамен/зачет);

4 з.е. (144ч.), зачет

1.3. Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)

Теоретическая механика, Введение в квантовую кеханику, Углубленный курс квантовой механики, Квантовая информатика.

1.4. Результаты освоения программы дисциплины:

Код компетенции *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Наименование компетенции** *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Код индикатора достижения компетенций** *(в соответствии рабочим с*	**Наименование индикатора достижений компетенций***(в соответствии рабочим с учебным планом)*

		учебным планом)	
УК-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде	УК-3.1	Знает основные приемы и нормы социального взаимодействия и основные понятия и методы конфликтологии, технологии межличностной и групповой коммуникации в деловом взаимодействии
		УК-3.2	Умеет устанавливать и поддерживать контакты, обеспечивающие успешную работу в коллективе; применять основные методы и нормы социального взаимодействия для реализации своей роли и взаимодействия внутри команды
		УК-3.3	Владеет простейшими методами и приемами социального взаимодействия и работы в команде

2. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

2.1. Цели и задачи дисциплины

Цель – формирование у студентов фундаментальных знаний и практических навыков в области передачи, защиты и обработки информации с использованием принципов квантовой механики.

Задачи:

1. **Ознакомление с основами квантовой механики**, необходимыми для понимания принципов квантовой связи (суперпозиция, запутанность, измерения, декогеренция).
2. **Изучение квантовой информации и криптографии**, включая квантовое распределение ключей (QKD) и протоколы (BB84, E91, B92 и др.).

3. **Анализ уязвимостей квантовых коммуникационных систем** и методов их защиты от потенциальных атак.
4. **Изучение архитектуры квантовых сетей**, включая принципы работы квантовых повторителей, квантовой телепортации и спутниковых квантовых каналов.
5. **Рассмотрение аппаратных решений для реализации квантовой связи**, включая генераторы одиночных фотонов, детекторы и квантовые памяти.
6. **Ознакомление с существующими квантовыми коммуникационными системами** и проектами (Micius, EuroQCI, NASA QComm и др.).
7. **Изучение перспектив развития квантового интернета** и его интеграции с классическими коммуникационными системами.
8. **Развитие навыков работы с квантовыми коммуникационными системами** и анализа их практического применения в области информационной безопасности.

Выполнение этих задач позволит студентам овладеть теоретическими и практическими аспектами квантовой связи, а также подготовиться к работе в данной области.

2.2. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и зачетных единицах) ***(удалить строки, которые не будут применены в рамках дисциплины)***

Виды учебной работы	**Всего, в акад. часах**	**Распределение по семестрам**
		1 сем
1	**2**	**3**
1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	**144**	**144**
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	**32**	
1.1.1. Лекции	**16**	**16**
1.1.2. Практические занятия, в т. ч.	**16**	**16**
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	**112**	**112**
1.3. Консультации		
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	**Зачет**	

2.3. Содержание дисциплины

2.3.1. Тематический план и трудоемкость аудиторных занятий (модули, разделы дисциплины и виды занятий) по рабочему учебному плану

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции (ак. часов)	Практ. Занятия (ак. часов)
1	**2=3+4+5+6+7**	**3**	**4**
Основные концепции. Основы квантовой механики для квантовой связи	**2**	1	1
Квантовые состояния и операции	**2**	1	1
Квантовые измерения	**2**	1	1
Квантовая телепортация и сверхплотное кодирование	**2**	1	1
Основы квантовой криптографии	**2**	1	1
Квантовое распределение ключей (QKD)	**2**	1	1
Атаки на квантовые криптографические системы	**2**	1	1
Квантовые повторители и расширение дальности связи	**2**	1	1
Глобальные квантовые сети	**2**	1	1
Квантовые алгоритмы для коммуникационных систем	**2**	1	1
Генерация и детектирование одиночных фотонов	**2**	1	1
Технологии передачи квантовой информации	**2**	1	1
Детекторы квантовых состояний	**2**	1	1
Квантовый интернет	**2**	1	1
Интеграция квантовой связи с классическими системами	**2**	1	1
Выход за пределы криптографии: квантовые сенсоры и вычисления	**2**	1	1
ИТОГО	**32**	**16**	**16**

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

Раздел 1 Основные концепции

- Развитие классической и квантовой коммуникации
- Принципы работы квантовой связи
- Сравнение классической и квантовой передачи информации

- Обзор современных квантовых коммуникационных технологий

Раздел 2 Основы квантовой механики для квантовой связи

- Принцип суперпозиции
- Принцип неопределенности Гейзенберга
- Квантовая запутанность
- Теоремы Белла и неравенства Белла

Раздел 3 Квантовые состояния и операции

- Кубиты и многокубитные системы
- Операции с квантовыми состояниями
- Квантовые каналы и шум

Раздел 4 Квантовые измерения

- Ортогональные и неортогональные измерения
- Коллапс волновой функции
- Декогеренция и ее влияние на квантовые системы

Раздел 5 Квантовая телепортация и сверхплотное кодирование

- Принципы квантовой телепортации
- Экспериментальные реализации
- Применение сверхплотного кодирования

Раздел 6 Основы квантовой криптографии

- Принципы безопасности квантовой криптографии
- Различие между классическими и квантовыми криптографическими методами

Раздел 7 Квантовое распределение ключей (QKD)

- BB84 — базовый протокол квантового распределения ключей
- E91 — протокол на основе запутанных состояний
- Другие методы квантового распределения ключей (SARG04, B92)

Раздел 8 Атаки на квантовые криптографические системы

- Физические уязвимости
- Атаки на детекторы (blinding attacks)
- Методы повышения устойчивости к атакам

Раздел 9 Квантовые повторители и расширение дальности связи

- Ограничения дальности квантовой связи
- Квантовые повторители и запутывание

- Квантовые памяти

Раздел 10 Глобальные квантовые сети

- Архитектура квантового интернета
- Спутниковая квантовая связь
- Реальные проекты (China Micius, EuroQCI, NASA QComm)

Раздел 11 Квантовые алгоритмы для коммуникационных систем

- Алгоритм Шора и квантовая угроза шифрованию
- Алгоритм Гровера и его применение

Раздел 12 Генерация и детектирование одиночных фотонов

- Источники одиночных фотонов
- Квантовые точки и нелинейные кристаллы

Раздел 13 Технологии передачи квантовой информации

- Оптические волокна и атмосфера
- Спутниковые системы квантовой связи

Раздел 14 Детекторы квантовых состояний

- Фотонные детекторы (SPAD, TES, SNSPD)
- Поляризационные и временные кодировки

Раздел 15 Квантовый интернет

- Концепция глобальной квантовой сети
- Архитектура и ключевые технологии
- Возможные применения

Раздел 16 Интеграция квантовой связи с классическими системами

- Гибридные сети (классическая + квантовая криптография)
- Реальные примеры коммерческих решений

Раздел 17 Выход за пределы криптографии: квантовые сенсоры и вычисления

- Квантовые сенсоры в связи
- Квантовые вычисления и их влияние на коммуникации

Список Литературы

А) Основные

1. Nielsen M.A., Chuang I.L. – *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2010).

2. Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A. – *The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation* (Springer, 2000).
3. Barnett S.M. – *Quantum Information* (Oxford University Press, 2009).
4. Benenti G., Casati G., Strini G. – *Principles of Quantum Computation and Information, Vol. 1: Basic Concepts* (World Scientific, 2004).
5. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. – *Quantum Cryptography* (Reviews of Modern Physics, 2002).

Б) Монографии и специализированные издания:

6. Scarani V. – *Quantum Physics: A First Encounter – Interference, Entanglement, and Reality* (Oxford University Press, 2006).
7. Pirandola S., Braunstein S.L. – *Quantum Teleportation and Beyond* (Nature Physics, 2015).
8. Shor P.W. – *Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer* (SIAM Journal on Computing, 1997).
9. Lo H.-K., Curty M., Tamaki K. – *Secure Quantum Key Distribution* (Nature Photonics, 2014).
10. Diamanti E., Leverrier A. – *Quantum Cryptography with Continuous Variables* (Entropy, 2015).

В) Статьи и современные исследования:

11. Bennett C.H., Brassard G. – *Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing* (Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, 1984).
12. Ekert A.K. – *Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem* (Physical Review Letters, 1991).
13. Briegel H.J., Dür W., Cirac J.I., Zoller P. – *Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication* (Physical Review Letters, 1998).
14. Kimble H.J. – *The Quantum Internet* (Nature, 2008).
15. Wehner S., Elkouss D., Hanson R. – *Quantum Internet: A Vision for the Road Ahead* (Science, 2018).

Г) Дополнительные ресурсы:

16. Vedral V. – *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information* (Oxford University Press, 2010).
17. Hughes R.J. et al. – *Quantum Teleportation and Quantum Cryptography for Secure Communication* (Los Alamos Science, 1996).
18. Preskill J. – *Lecture Notes on Quantum Computation* (Caltech, доступно онлайн: http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/).
19. Northup T., Blatt R. – *Quantum Information Processing with Trapped Ions* (Nature Photonics, 2014).
20. Zeilinger A. – *Dance of the Photons: From Einstein to Quantum Teleportation* (Farrar, Straus and Giroux, 2010).

2.3.3. Материально-техническое обеспечение дисциплины

(Кратко представить перечень материально-технического оснащения, информационно-технических средств).

Для успешного освоения дисциплины необходимо соответствующее материально-техническое обеспечение. Это включает в себя следующие компоненты:

1. Компьютерные классы
2. Программное обеспечение
3. Учебные материалы
4. Дополнительные ресурсы**:** Электронная библиотека с доступом к книгам по программированию и физике.

2.4. Модульная структура дисциплины с распределением весов по формам контролей

Формы контролей	**Вес формы (форм) текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля (по модулям)**		**Вес формы промежуточного контроля в итоговой оценке промежуточного контроля**		**Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей**		**Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей (семестровой оценке)**	**Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля**
Вид учебной работы/контроля	**М1**[1]	**М2**	**М1**	**М2**	**М1**	**М2**		
Контрольная работа *(при наличии)*			0.5	0.5				
Устный опрос *(при наличии)*								
Тест *(при наличии)*								
Лабораторные работы *(при наличии)*	0.5	0.5						
Письменные домашние задания *(при наличии)*								
Реферат *(при наличии)*								
Эссе *(при наличии)*								
Проект *(при наличии)*								
Решение задач	0.5	0.5						
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках промежуточных контролей					0.5	0.5		
Веса оценок промежуточных контролей в итоговых оценках промежуточных контролей								
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	

[1] Учебный Модуль

Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	∑ = 1	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**

3. Теоретический блок ***(указываются материалы, необходимые для освоения учебной программы дисциплины)***

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебник(и)

А) Основные

6. Nielsen M.A., Chuang I.L. – *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2010).
7. Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A. – *The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation* (Springer, 2000).
8. Barnett S.M. – *Quantum Information* (Oxford University Press, 2009).
9. Benenti G., Casati G., Strini G. – *Principles of Quantum Computation and Information, Vol. 1: Basic Concepts* (World Scientific, 2004).
10. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. – *Quantum Cryptography* (Reviews of Modern Physics, 2002).

Б) Монографии и специализированные издания:

11. Scarani V. – *Quantum Physics: A First Encounter – Interference, Entanglement, and Reality* (Oxford University Press, 2006).
12. Pirandola S., Braunstein S.L. – *Quantum Teleportation and Beyond* (Nature Physics, 2015).
13. Shor P.W. – *Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer* (SIAM Journal on Computing, 1997).
14. Lo H.-K., Curty M., Tamaki K. – *Secure Quantum Key Distribution* (Nature Photonics, 2014).
15. Diamanti E., Leverrier A. – *Quantum Cryptography with Continuous Variables* (Entropy, 2015).

В) Статьи и современные исследования:

16. Bennett C.H., Brassard G. – *Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing* (Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, 1984).

17. Ekert A.K. – *Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem* (Physical Review Letters, 1991).
18. Briegel H.J., Dür W., Cirac J.I., Zoller P. – *Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication* (Physical Review Letters, 1998).
19. Kimble H.J. – *The Quantum Internet* (Nature, 2008).
20. Wehner S., Elkouss D., Hanson R. – *Quantum Internet: A Vision for the Road Ahead* (Science, 2018).

Г) Дополнительные ресурсы:

21. Vedral V. – *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information* (Oxford University Press, 2010).
22. Hughes R.J. et al. – *Quantum Teleportation and Quantum Cryptography for Secure Communication* (Los Alamos Science, 1996).
23. Preskill J. – *Lecture Notes on Quantum Computation* (Caltech, доступно онлайн: http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/).
24. Northup T., Blatt R. – *Quantum Information Processing with Trapped Ions* (Nature Photonics, 2014).
25. Zeilinger A. – *Dance of the Photons: From Einstein to Quantum Teleportation* (Farrar, Straus and Giroux, 2010).

4. Фонды оценочных средств *(указываются материалы, необходимые для проверки уровня знаний в соответствии с содержанием учебной программы дисциплины).*

4.1. Планы практических занятий

1. Развитие классической и квантовой коммуникации
2. Принципы работы квантовой связи
3. Сравнение классической и квантовой передачи информации
4. Обзор современных квантовых коммуникационных технологий
5. Принцип суперпозиции
6. Принцип неопределенности Гейзенберга
7. Квантовая запутанность
8. Теоремы Белла и неравенства Белла
9. Кубиты и многокубитные системы
10. Операции с квантовыми состояниями
11. Квантовые каналы и шум
12. Ортогональные и неортогональные измерения
13. Коллапс волновой функции
14. Декогеренция и ее влияние на квантовые системы
15. Принципы квантовой телепортации
16. Экспериментальные реализации
17. Применение сверхплотного кодирования
18. Принципы безопасности квантовой криптографии
19. Различие между классическими и квантовыми криптографическими методами
20. BB84 — базовый протокол квантового распределения ключей
21. E91 — протокол на основе запутанных состояний
22. Другие методы квантового распределения ключей (SARG04, B92)

23. Физические уязвимости
24. Атаки на детекторы (blinding attacks)
25. Методы повышения устойчивости к атакам
26. Ограничения дальности квантовой связи
27. Квантовые повторители и запутывание
28. Квантовые памяти
29. Архитектура квантового интернета
30. Спутниковая квантовая связь
31. Реальные проекты (China Micius, EuroQCI, NASA QComm)
32. Алгоритм Шора и квантовая угроза шифрованию
33. Алгоритм Гровера и его применение
34. Источники одиночных фотонов
35. Квантовые точки и нелинейные кристаллы
36. Оптические волокна и атмосфера
37. Спутниковые системы квантовой связи
38. Фотонные детекторы (SPAD, TES, SNSPD)
39. Поляризационные и временные кодировки
40. Концепция глобальной квантовой сети
41. Архитектура и ключевые технологии
42. Возможные применения
43. Гибридные сети (классическая + квантовая криптография)
44. Реальные примеры коммерческих решений
45. Квантовые сенсоры в связи
46. Квантовые вычисления и их влияние на коммуникации

4.2. Материалы по практической части курса

4.2.1. Задачники (практикумы);

Для закрепления теоретических знаний и развития навыков решения задач по квантовой коммуникации рекомендуется использовать следующие задачники:

1. Основные задачники по квантовой механике и квантовой информации:

1. **Sakurai J.J., Napolitano J.** – *Modern Quantum Mechanics: Problems and Solutions* (Cambridge University Press, 2020).
    - Разделы по квантовой запутанности, измерениям и суперпозиции, необходимые для понимания квантовой связи.
2. **Peres A.** – *Quantum Theory: Concepts and Methods* (Springer, 1993).
    - Включает задачи по основам квантовой теории, квантовой криптографии и неравенствам Белла.
3. **Benenti G., Casati G., Strini G.** – *Principles of Quantum Computation and Information, Vol. 2: Basic Tools and Special Topics* (World Scientific, 2007).
    - Содержит задачи по квантовому распределению ключей (QKD) и защите квантовой информации.

2. Специализированные задачники по квантовой криптографии и квантовой связи:

5. **Scarani V.** – *Six Quantum Pieces: A First Course in Quantum Information* (World Scientific, 2010).
    - Разделы с задачами по квантовой телепортации, протоколу BB84 и квантовым сетям.
6. **Brassard G., Lütkenhaus N., Mor T., Sanders B.C.** – *Quantum Cryptography: Practice and Theory* (Cambridge University Press, 2005).
    - Практические задачи по атакам на квантовые криптографические системы.

4.3. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

I. Теоретические вопросы

1. Основные принципы квантовой механики в коммуникации.
2. Протоколы квантовой криптографии (BB84, E91).
3. Квантовая телепортация и ее применение.
4. Квантовые сети и их архитектура.
5. Влияние шума и декогеренции на квантовую связь.

II. Практические задания

1. Вычисление вероятности успешного измерения кубита.
2. Анализ безопасности квантовых протоколов.
3. Оценка потерь в квантовом канале связи.
4. Программирование квантовой телепортации в Qiskit.
5. Моделирование работы квантового повторителя.

III. Анализ научных публикаций

1. Обзор современных квантовых сетей (Micius, EuroQCI).
2. Будущее квантового интернета и его вызовы.
3. Сравнение классического и квантового шифрования.
4. Анализ статей по квантовой криптографии.
5. Перспективы развития квантовой связи.

Эти вопросы и задания помогут студентам освоить ключевые аспекты квантовой коммуникации и применять знания на практике.

4.4. Перечень вопросов для зачета

1. Что такое кубит и как он отличается от классического бита?
2. Опишите принцип суперпозиции и его роль в квантовых системах.
3. Что такое квантовая запутанность? Приведите примеры ее использования.
4. В чем состоит теорема о запрете клонирования квантовых состояний?
5. Какие принципы лежат в основе квантовой криптографии?

6. Объясните работу протокола BB84. Как он обеспечивает безопасность передачи данных?
7. Опишите основные этапы квантовой телепортации.
8. Как работают квантовые повторители и почему они важны для квантовых сетей?
9. В чем заключаются преимущества и ограничения квантового шифрования по сравнению с классическим?
10. Какие методы защиты квантовых криптосистем от атак существуют?
11. Объясните принципы работы квантового распределения ключей (QKD).
12. Какие современные технологии используются для реализации квантовой связи?
13. Что такое квантовая ошибка и как она влияет на передачу информации по квантовому каналу?
14. Как современные квантовые сети (например, Micius, EuroQCI) способствуют развитию квантовой связи?
15. Какие основные проблемы и вызовы стоят перед развитием квантового интернета?
16. В чем заключается роль квантовых спутников в глобальных квантовых коммуникациях?
17. Как квантовая криптография может использоваться для защиты данных в облачных вычислениях?
18. Объясните, как используется квантовая информация в задачах симуляции и моделирования.
19. Какие перспективы у квантовых вычислений в контексте квантовой коммуникации?
20. Сравните реализацию квантовой криптографии в теории и практике.

4.5. Образцы экзаменационных билетов

МОО ВО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ, ФИЗИКИ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра общей физики и квантовых наноструктур

Направление: Электроника и наноэлектроника
Дисциплина: Квантовая телекоммуникация и квантовый интернет
(бакалавриат III-ий курс, II-ой семестр)

Экзаменационный билет № **

1. Что такое кубит и как он отличается от классического бита?
2. Объясните принципы работы квантового распределения ключей (QKD).
3. Сравните реализацию квантовой криптографии в теории и практике.

Зав. кафедрой ОФКН _____ Д.Б. Айрапетян
20__г.