

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт физики
Кафедра оптики и нанофотоники

Краткий конспект ЭОР

Название дисциплины (модуля): Квантовая физика

Направление подготовки (специальность): 03.04.02 - Физика

Форма обучения: очное

Курс: первый

Авторы:

д.ф.-м.н., проф. Гайнутдинов Р.Х.

к.ф.-м.н., доц. Мутыгуллина А.А.

к.ф.-м.н. Хамадеев М.А.

Казань, 2016 год

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	2
ОБЩИЙ СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ ПО ЭОР.....	3
ТЕМА 1. СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ.....	4
ТЕМА 2. ЯВЛЕНИЕ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ.	5
ТЕМА 3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМУЛИРОВКИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ.....	6
ТЕМА 4. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ПРИРОДА КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.....	7
ТЕМА 5. НАБЛЮДАЕМЫЕ. ОПЕРАТОРНЫЙ ФОРМАЛИЗМ.	8
ТЕМА 6. ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОСТУЛАТ.....	9
ТЕМА 7. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФЕЙНМАНОВСКОЙ ФОРМУЛИРОВКИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.....	10
ТЕМА 8. ИНТЕГРАЛЫ ПО ТРАЕКТОРИЯМ.....	11
ТЕМА 9. НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ.....	12
ТЕМА 10. ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ ЯДЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ.....	13
ТЕМА 11. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ И ОБОБЩЕННАЯ КВАНТОВАЯ ДИНАМИКА.....	14
ТЕМА 12. ФИЗИКА КВАНТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	15
ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ.....	16
ОБЩИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ	17

ОБЩИЙ СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ ПО ЭОР.

- эффект АБ – эффект Ааронова-Бома
- парадокс ЭПР – парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена
- УШ – уравнение Шрёдингера
- ГП – Гильбертово пространство
- ПП – проекционный постулат
- НГ – неопределенность Гейзенберга
- ОЭ – оператор эволюции
- АВ – амплитуда вероятности
- ИТ – интегралы по траекториям
- КЭД – квантовая электродинамика
- УФ – ультрафиолетовые
- КТВ – киральная теория возмущений
- NN – нуклон-нуклонный
- УЛШ – уравнение Липпмана-Швингера
- ПС – принцип суперпозиции

ТЕМА 1. СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ.

Вопросы для изучения по теме: Квантовая физика и научно-техническая революция начала XX века. Нерешенные проблемы и перспективы дальнейшего развития.

Аннотация темы: Развитие квантовой механики натолкнулось на ряд парадоксов, таких как парадоксы Эйнштейна-Подольского-Розена, Ааронова-Бома и так называемый квантовый парадокс Зенона. Открытие этих парадоксов разделило физиков на два лагеря. Одни считали, что парадоксы свидетельствуют о неполноте и даже противоречивости квантовой механики. Другая группа физиков считали квантовую неопределенность неотъемлемой чертой природы. Исследования и дискуссии, связанных с парадоксами квантовой теории, могут оказаться чрезвычайно полезными, поскольку многие идеи, имеющие отношения к этим парадоксам на сегодняшний день находят практическое приложение. Кроме того, развитие технологий в области прецизионной лазерной спектроскопии позволило обнаружить проблему, известную как загадка радиуса протона, которую не удается решить на протяжении нескольких лет.

Ключевые слова: квантовый парадокс Зенона, эффект Ааронова-Бома, парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

Список сокращений:

- эффект АБ – эффект Ааронова-Бома
- парадокс ЭПР – парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1341557413/Zeno.paradox.pdf>
2. Pohl, R. The size of the proton / R. Pohl, et. al. // Nature. – 2010. – V. 466. – P. 213–217.

ТЕМА 2. ЯВЛЕНИЕ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ.

Вопросы для изучения по теме: Амплитуда вероятности. Принцип суперпозиции амплитуд вероятности. Канонический и фейнмановский подходы к квантовой теории.

Аннотация темы: Два первоначальных пути развития квантовой механики – дифференциальное уравнение Шредингера и матричная алгебра Гейзенберга – оказались математически эквивалентными и дополняющими друг друга. Впоследствии они были полностью объединены в построенном Дираком формализме (каноническом формализме), в котором квантовая механика строилась на языке векторов гильбертова пространства и линейных операторов, действующих в этом пространстве. В основу канонического формализма положены общие принципы квантовой механики, формулирующие утверждения о физическом смысле векторов состояний и о том, как они связаны со свойствами системы, находящейся в данном состоянии. Другой метод формулировки квантовой теории был предложен Фейнманом, который показал, что динамика квантовой системы может быть описана без обращения к уравнению Шредингера. В основе фейнмановской теории лежит анализ феномена квантовой интерференции, который приводит к концепции суперпозиции амплитуд вероятности.

Ключевые слова: уравнение Шредингера, алгебра Гейзенберга, постулаты квантовой механики

Список сокращений:

- УШ – уравнение Шрёдингера

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-04-quantum-physics-i-spring-2006/lecture-notes/lecture3.pdf>
2. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qmech/Quantum/node22.html>

ТЕМА 3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМУЛИРОВКИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ.

Вопросы для изучения по теме: Пространство состояний квантовой системы. Пространства состояний простой частицы и поляризации фотонов.

Аннотация темы: Каноническая формулировка квантовой теории базируется на нескольких постулатах. Первый постулат утверждает, что физическое состояние системы представляется вектором (лучом) Гильбертова пространства. Второй постулат описывает математическую природу наблюдаемых и результатов её измерений, а также задаёт выражение для вычисления вероятностей измерений. Третий постулат утверждает, что эволюция квантовой системы во времени описывается уравнением Шрёдингера.

Ключевые слова: постулаты канонической квантовой теории, Гильбертово пространство, наблюдаемая, уравнение Шрёдингера.

Список сокращений:

- ГП – Гильбертово пространство
- УШ – уравнение Шрёдингера

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node5.html>
2. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node6.html>
3. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node7.html>
4. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node8.html>

ТЕМА 4. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ПРИРОДА КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.

Вопросы для изучения по теме: Связь векторов состояний с результатами экспериментов. Проекционный постулат.

Аннотация темы: Проекционный постулат описывает вероятность того, что в результате измерения мы будем наблюдать то или значение наблюдаемой. Если результат – вырожденный, значит, существует как минимум два собственных состояния, для которых мы можем этот результат получить. В этом случае формула для вероятности того, что в результате измерения мы получим данное значение, должна быть модифицирована добавлением суммирования по вырожденным состояниям.

Ключевые слова: проекционный постулат, наблюдаемая, вырожденные состояния

Список сокращений:

- ПП – проекционный постулат

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node14.html>
2. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node35.html>

ТЕМА 5. НАБЛЮДАЕМЫЕ. ОПЕРАТОРНЫЙ ФОРМАЛИЗМ.

Вопросы для изучения по теме: Совместность наблюдаемых. Полная система совместных наблюдаемых. Формализм Дирака. Оснащенное гильбертово пространство состояний.

Аннотация темы: Наблюдаемые A и B совместны, если результат измерения одной наблюдаемой не влияет на результат измерения другой. Существует теорема, которая утверждает, что наблюдаемые A и B совместны тогда и только тогда, когда соответствующие операторы коммутируют. Если операторам соответствуют некоторые наблюдаемые, то комбинации этих операторов также может соответствовать наблюдаемая. Коммутатор – это антиэрмитов оператор. Поэтому лишь коммутатору, умноженному на мнимую единицу, будет соответствовать наблюдаемая, называемая мерой несовместности.

Ключевые слова: наблюдаемые, коммутатор, соотношение неопределенностей, неопределенность Гейзенберга

Список сокращений:

- НГ – неопределенность Гейзенберга

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node16.html>
2. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node17.html>

ТЕМА 6. ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОСТУЛАТ.

Вопросы для изучения по теме: Оператор эволюции. Уравнение Шредингера. Связь характера динамики со свойствами непрерывности оператора эволюции. Теорема Стоуна. Возможность выхода за рамки гамильтоновой динамики.

Аннотация темы: Оператор эволюции – это оператор в квантовой механике, заданный на гильбертовом пространстве, который переводит состояние системы из начального момента времени в любой другой. Вектор, описывающий состояние физической системы в момент времени t , получается, если подействовать оператором эволюции $U(t, t_0)$ на вектор, описывающий состояние в момент времени t_0 при условии, что система не была возмущена каким-либо экспериментом. В каноническом подходе квантовой теории постулируется, что оператор эволюции должен быть унитарным и удовлетворять групповым свойствам.

Ключевые слова: оператор эволюции, унитарность, вектор состояния

Список сокращений:

- ОЭ – оператор эволюции

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node28.html>
2. https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-02-introduction-to-applied-nuclear-physics-spring-2012/lecture-notes/MIT22_02S12_lec_ch6.pdf

ТЕМА 7. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФЕЙНМАНОВСКОЙ ФОРМУЛИРОВКИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.

Вопросы для изучения по теме: Интерферирующие альтернативы. Структура амплитуды вероятности.

Аннотация темы: Фейнмановская формулировка квантовой механики использует язык не операторов и векторов, а амплитуд вероятности и основана непосредственно на анализе явления квантовой интерференции. Первый постулат утверждает, что вероятность события есть квадрат от модуля некоторого комплексного числа, которое называется амплитудой вероятности. Амплитуда вероятности события, которое может произойти несколькими альтернативными способами, равна сумме амплитуд вероятности для каждого способа. Второй постулат утверждает, что вклад от каждой траектории есть экспонента, чья мнимая фаза есть классическое действие в единицах \hbar .

Ключевые слова: фейнмановская формулировка, амплитуда вероятности, постулаты квантовой механики

Список сокращений:

- АВ – амплитуда вероятности

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_03.html
2. <http://www.johnboccio.com/research/quantum/notes/Feynman-Prob.pdf>

ТЕМА 8. ИНТЕГРАЛЫ ПО ТРАЕКТОРИЯМ.

Вопросы для изучения по теме: Теория возмущений и S-матрица. Интерпретация членов ряда теории возмущений. Правила Фейнмана. Интегральное уравнение для пропагатора. Доказательство эквивалентности фейнмановской и канонической формулировок квантовой механики.

Аннотация темы: Использование двух постулатов в квантовой механике приводит к фейнмановскому формализму "Интегралы по траекториям". Вклад от каждой траектории связан с классическим действием, которое представляет собой интеграл по времени от классической функции Лагранжа, взятый вдоль рассматриваемого пути. Квазиклассическому движению отвечают значения фазы $|i / \hbar \cdot S_{ab}| \gg 1$, поэтому множество траекторий, лежащих вблизи данной, имеют заметно отличающиеся фазы (>1) и сильно компенсируются. Исключением является экспериментальная траектория, для которой вариация действия равна нулю. Несмотря на столь принципиальное различие, канонический и фейнмановский подходы эквивалентны и дополняют друг друга в решении различных проблем квантовой физики.

Ключевые слова: интегралы по траекториям, классическое действие, фейнмановский подход

Список сокращений:

- ИТ – интегралы по траекториям

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-323-relativistic-quantum-field-theory-i-spring-2008/lecture-notes/ft1ln05_08.pdf
2. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-323-relativistic-quantum-field-theory-i-spring-2008/lecture-notes/ft1ln06_08.pdf

ТЕМА 9. НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ.

Вопросы для изучения по теме: Проблема ультрафиолетовых (УФ) расходимостей в квантовой теории поля. Локальность во времени уравнения Шредингера как причина УФ расходимостей. Нелокальность во времени взаимодействия, генерирующего динамику открытых квантовых систем. Проблема последовательного учета такой нелокальности.

Аннотация темы: В КЭД УФ расходимости можно устранить в S -матрице и функциях Грина, но не в величинах, характеризующих временную эволюцию квантовых систем. Следствием этого являются неперенормируемые УФ расходимости, с которыми сопряжено последовательное КЭД описание естественного уширения спектральных линий атомных систем. Это означает, что для решения таких задач необходимо развить методы описания временной эволюции квантовых систем, свободные от УФ расходимостей. Поскольку основной причиной УФ расходимостей является локальность теории, представляется естественным попытаться решить эту проблему путем введения нелокального формфактора в плотность гамильтониана взаимодействия, однако это приводит, либо к нарушению Лоренц-инвариантности, либо причинности.

Ключевые слова: квантовый парадокс Зенона, эффект Ааронова-Бома, парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

Список сокращений:

- КЭД – квантовая электродинамика
- УФ – ультрафиолетовые

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-324-relativistic-quantum-field-theory-ii-fall-2010/lecture-notes/MIT8_324F10_Lecture7.pdf
2. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-324-relativistic-quantum-field-theory-ii-fall-2010/lecture-notes/MIT8_324F10_Lecture9.pdf

ТЕМА 10. ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ ЯДЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ.

Вопросы для изучения по теме: Программа Вайнберга построения теории ядерных сил. Несовместность гамильтоновой динамики с симметриями квантовой хромодинамики.

Аннотация темы: Пытаясь отыскать NN потенциал, С. Вайнберг предложил программу, в которой планировалось строить его из анализа диаграмм для двух нуклонной T-матрицы в киральной теории возмущений, а затем с помощью уравнения Липпмана-Швингера с этим потенциалом определять полную T-матрицу. При этом предполагается, что в нерелятивистском пределе КТВ приводит к низкоэнергетической динамике нуклонов, которая является гамильтоновой и удовлетворяет уравнению Шредингера. Однако получаемый из анализа фейнмановских диаграмм, описывающих контактные взаимодействия между нуклонами и их производные, потенциал оказывается сингулярным. В частности, мы не можем воспользоваться уравнением Липпмана-Швингера, поскольку интеграл, который оно содержит, будет расходиться. Это, в свою очередь, означает, что предположение Вайнберга о гамильтоновом характере низкоэнергетической динамики не оправдывается.

Ключевые слова: нуклон-нуклонный потенциал, уравнение Липпмана-Швингера

Список сокращений:

- КТВ – киральная теория возмущений
- NN – нуклон-нуклонный
- УЛШ – уравнение Липпмана-Швингера

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-02-introduction-to-applied-nuclear-physics-spring-2012/lecture-notes/MIT22_02S12_lec_ch5.pdf
2. http://www.int.washington.edu/PROGRAMS/talent13/notes/T1a_Nuclear_Forces_1_furnstahl.pdf

ТЕМА 11. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ И ОБОБЩЕННАЯ КВАНТОВАЯ ДИНАМИКА.

Вопросы для изучения по теме: Нелокальное во времени взаимодействие. Обобщенное динамическое уравнение. Уравнение для T-матрицы. Представление Фейнмана-Дайсона.

Аннотация темы: Вместо процессов, в которых частицы системы имеют определенные траектории, в качестве альтернатив для первого фейнмановского постулата можно использовать процессы с определенными временами начала и конца взаимодействия в системе. Используя этот класс альтернатив и фейнмановский принцип суперпозиции, оператор эволюции может быть построен в виде интеграла от вкладов с определенными временами начала и конца взаимодействия в системе. Из условия унитарности оператора эволюции следует обобщенное динамическое уравнение. Замечательная особенность этого уравнения заключается в том, что оно работает как рекуррентное соотношение и позволяет определить оператор эволюции, если известен вклад в этот оператор от процессов, ассоциируемых с бесконечно малым интервалом времени длительности взаимодействия.

Ключевые слова: нелокальность взаимодействия, принцип суперпозиции, оператор эволюции.

Список сокращений:

- ПС – принцип суперпозиции

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. R. Gainutdinov, Nonlocal interactions and quantum dynamics / J. Phys. A: Math. Gen. 32 (1999) 5657–5677
2. <http://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1341557413/Zeno.paradox.pdf>

ТЕМА 12. ФИЗИКА КВАНТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Вопросы для изучения по теме: Кубиты. Перепутывание и квантовая неразличимость. Аргументы Эйнштейна Подольского и Розена. Неравенство Белла.

Аннотация темы: Законы квантовой механики открывают возможности при работе с квантовой информацией. В отличие от классического бита кубит способен хранить в себе информацию о суперпозиции двух состояний, что используется при квантовых вычислениях. Помимо этого решение парадокса ЭПР позволило экспериментально обнаружить принципиально новое физическое явление – квантовую телепортацию. Квантовая телепортация может быть использована для квантовой криптографии и создания абсолютно защищённых каналов связи.

Ключевые слова: кубит, парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена, неравенства Белла

Список сокращений:

- парадокс ЭПР – парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

Рекомендуемые информационные ресурсы:

1. <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/notes/chap1.pdf> (стр. 1-10)
2. http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-51-quantum-theory-of-radiation-interactions-fall-2012/lecture-notes/MIT22_51F12_epr_bell.pdf

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ.

1. Явление квантовой интерференции.
2. Амплитуда вероятности. Принцип суперпозиции амплитуд вероятности.
3. Канонический и фейнмановский подходы к квантовой теории.
4. Основные принципы канонической формулировки квантовой теории. Пространство состояний.
5. Пространства состояний простой частицы и поляризации фотонов.
6. Связь векторов состояний с результатами экспериментов. Проекционный постулат.
7. Наблюдаемые. Операторный формализм.
8. Совместность наблюдаемых.
9. Полная система совместных наблюдаемых.
10. Формализм Дирака. Оснащенное гильбертово пространство состояний.
11. Динамический постулат. Оператор эволюции. Уравнение Шредингера.
12. Свойства непрерывности оператора эволюции. Теорема Стоуна. Возможность выхода за рамки гамильтоновой динамики.
13. Основные принципы фейнмановской формулировки квантовой механики.
14. Интегралы по траекториям.
15. Теория возмущений и S-матрица.
16. Интерпретация членов ряда теории возмущений. Правила Фейнмана.
17. Интегральное уравнение для пропагатора.
18. Доказательство эквивалентности фейнмановской и канонической формулировок квантовой механики.
19. Проблема УФ расходимостей в квантовой теории поля.
20. Локальность во времени уравнения Шредингера как причина УФ расходимостей.
21. Нелокальность во времени взаимодействия, генерирующего динамику открытых квантовых систем.
22. Проблемы квантовой механики ядерных явлений.
23. Программа Вайнберга построения теории ядерных сил.
24. Несовместность гамильтоновой динамики с симметриями квантовой хромодинамики.
25. Обобщенная квантовая динамика.
26. Нелокальное во времени взаимодействие и обобщенное динамическое уравнение.
27. Уравнение для T-матрицы.
28. Модель с сепарабельным взаимодействием.
29. Представление Фейнмана-Дайсона.
30. Физика квантовой информации. Кубиты.
31. Перепутывание и квантовая неразличимость.
32. Аргументы Эйнштейна Подольского и Розена. Неравенство Белла.

ОБЩИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

1. <http://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1341557413/Zeno.paradox.pdf>
2. Pohl, R. The size of the proton / R. Pohl, et. al. // Nature. – 2010. – V. 466. – P. 213–217.
3. <http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-04-quantum-physics-i-spring-2006/lecture-notes/lecture3.pdf>
4. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qmech/Quantum/node22.html>
5. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node5.html>
6. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node6.html>
7. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node7.html>
8. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node8.html>
9. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node14.html>
10. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node35.html>
11. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node16.html>
12. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node17.html>
13. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qm/Quantumhtml/node28.html>
14. https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-02-introduction-to-applied-nuclear-physics-spring-2012/lecture-notes/MIT22_02S12_lec_ch6.pdf
15. http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_03.html
16. <http://www.johnboccio.com/research/quantum/notes/Feynman-Prob.pdf>
17. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-323-relativistic-quantum-field-theory-i-spring-2008/lecture-notes/ft1ln05_08.pdf
18. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-323-relativistic-quantum-field-theory-i-spring-2008/lecture-notes/ft1ln06_08.pdf
19. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-324-relativistic-quantum-field-theory-ii-fall-2010/lecture-notes/MIT8_324F10_Lecture7.pdf
20. http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-324-relativistic-quantum-field-theory-ii-fall-2010/lecture-notes/MIT8_324F10_Lecture9.pdf
21. http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-02-introduction-to-applied-nuclear-physics-spring-2012/lecture-notes/MIT22_02S12_lec_ch5.pdf
22. http://www.int.washington.edu/PROGRAMS/talent13/notes/T1a_Nuclear_Forces_1_furnstahl.pdf
23. R. Gainutdinov, Nonlocal interactions and quantum dynamics / J. Phys. A: Math. Gen. 32 (1999) 5657–5677
24. <http://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1341557413/Zeno.paradox.pdf>

25. <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/notes/chap1.pdf> (стр. 1-10)
26. http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-51-quantum-theory-of-radiation-interactions-fall-2012/lecture-notes/MIT22_51F12_epr_bell.pdf