КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет

кафедра експериментальної фізики

Укладач: докт. фіз.-мат. наук, доц. Єщенко О.А.

КВАНТОВА ОПТИКА

РОБОЧА НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА

для студентів спеціальності 6.070100 – фізика

Затверджено
на засіданні кафедри
Протокол №
від "____" _____ 20__ р.
Завідувач кафедри
_____ *Яцук В.М.*
підпис

Декан факультету
_____ *Макарець М.В.*
підпис

КИЇВ - 2013

Робоча навчальна програма з дисципліни «Квантова оптика»

Укладач: доктор фізико-математичних наук, доцент Єщенко Олег Анатолійович

Лектор: *д.ф-м.н., доц. Єщенко Олег Анатолійович*

Погоджено

з науково-методичною комісією
«____» _____ 20__р.

_____
Підпис голови НМК факультету

ВСТУП

Спецкурс ***"Квантова оптика"*** є вибірковою дисципліною циклу дисциплін вільного вибору студентів, що читається у 7-му семестрі (лекції – 36 год, керування самостійною роботою студентів – 36 год; загальний обсяг – 72 год). Закінчується заліком у 7-му семестрі.

Метою і завданням навчальної дисципліни

"Квантова оптика" є ознайомити студентів з елементами квантової електродинаміки; перекинути в свідомості студентів, що вивчають фотоніку та оптику, фізично обгрунтований місток через прірву між хвильовим і корпускулярним підходами, логічно замкнувши доступну їм фізичну картину взаємодії світла з речовиною.

Предмет навчальної дисципліни

"Квантова оптика" включає такі основні розділи: співвідношення невизнаностей для електромагнітного поля (ЕМП), рівняння Шредінгера для ЕМП, квантування вільного ЕМП, квантова теорія взаємодії ЕМП з речовиною, квантові стани ЕМП, статистична теорія змішаних станів ЕМП, квантові обмеження точності оптичних вимірювань.

Вимоги до знань та вмінь.

Студент повинен знати:

Нерелятивістську квантову механіку, класичну оптику, основи вимірювань характеристик оптичних полів.

Студент повинен вміти*:*

користуватися методами класичної електродинаміки, хвильової оптики та нерелятивістської квантової механіки.

Місце в структурно-логічній схемі спеціальності. Спеціальна навчальна дисципліна ***"Квантова оптика"*** є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр".

Система контролю знань та умови складання заліку. Навчальна дисципліна ***"Квантова оптика"*** оцінюється за модульно-рейтинговою системою. Вона складається з 2 модулів.

Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою в семестрі.

Форми поточного контролю: оцінювання модульних контрольних робіт. Студент може отримати максимально 100 балів за модульні контрольні роботи.

Модульний контроль*: 2* модульні контрольні роботи. Студент може отримати максимально 50 балів за модульну контрольну роботу 1 і 50 балів за модульну контрольну роботу 2.

Шкала відповідності

<table>
<tr><td>За 100-бальною шкалою</td><td colspan="3">Оцінка за національною шкалою</td></tr>
<tr><td>90-100</td><td>5</td><td>відмінно</td><td rowspan="5">зараховано</td></tr>
<tr><td>85-89</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">добре</td></tr>
<tr><td>75-84</td></tr>
<tr><td>65-74</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">задовільно</td></tr>
<tr><td>60-64</td></tr>
<tr><td>35-59</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">незадовільно</td><td rowspan="2">незараховано</td></tr>
<tr><td>1-34</td></tr>
</table>

НАВЧАЛЬНО-ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І КЕРУВАННЯ САМОСТІЙНОЮ РОБОТОЮ

№ лекції	Назва лекції	Кількість годин	
		Лекції	Самостійна робота
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1			
1	Вступ. Класичний, напівкласичний та послідовно квантовий підходи до взаємодії електромагнітного поля з речовиною. Співвідношення невизначеності у випадку релятивістських частинок.	**2**	
2	Квантування електромагнітного поля. Розклад поля по плоским хвилям. Густина станів поля на інтервал частот. Перехід до канонічних змінних. Електромагнітне поле як сукупність осциляторів.	**2**	**4**
3	Перехід до операторів. Властивості операторів народження та знищення. Вторинне квантування та представлення поля числами заповнення.	**2**	
4	Модель фотонного газу. Рівноважний фотонний газ.	**2**	**5**
5	Поглинання та випромінювання фотонів атомом в електромагнітному полі. Гамільтоніан атома в представленні вторинного квантування.	**2**	
6	Гамільтоніан взаємодії атома з електромагнітним полем в представленні вторинного квантування. Чотири процеси переходів між двома рівнями в електромагнітному полі, їх діаграми та можливі реалізації.	**2**	**5**

	Вимушене та спонтанне випромінювання.		
7	Відхилення атомів світлом, охолодження та захоплення атомів світлом.	**2**	**7**
8	Оператор числа частинок та оператор фази фотонів, їх не комутативність та неможливість одночасного точного вимірювання амплітуди та фази електромагнітної хвилі.	**2**	
9	Стани квантового поля випромінювання. Одномодові стани з точно визначеною фазою фотонів та з точно визначеною кількістю фотонів, порівняння їх властивостей (обчислення середніх значення та середньоквадратичних відхилень кількості частинок (амплітуди) та фази електромагнітного поля).	**2**	
10	Когерентні стани. Когерентні стани як лінійні суперпозиції власних станів оператора кількості частинок і як власні стани оператора знищення фотонів. Властивості одномодових когерентних станів. Наближення властивостей електромагнітного поля в когерентному стані при великих числах заповнення до властивостей класичної плоскої електромагнітної хвилі.	**2**	
Модульна контрольна робота 1			
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2			
11	Поняття про чисті та змішані стани поля випромінювання. Приклади чистих та змішаних станів: стаціонарна класична плоска хвиля, хаотичний (гаусівський) світловий	**2**	**5**

	пучок та теплове збудження фотонів в моді порожнини.		
12	Введення оператора густини, його властивості та обчислення середніх. Оператори густини для чистих станів електромагнітного поля.	**2**	
13	Оператор густини, що описує теплове збудження фотонів в одній моді порожнини: різні форми запису, обчислення середнього поля та середньої кількості фотонів. Оператор густини для теплового збудження всіх мод порожнини.	**2**	
14	Фотодетектування. Підрахунок фотонів. Розподіл фотовідліків у випадку когерентного та хаотичного світла.	**2**	**5**
15	Вплив тривалості часу вимірювання на форму розподілу та величину середньоквадратичної похибки кількості підрахованих фотонів для хаотичного світла. Квантовомеханічний розподіл фотовідліків. Спектроскопія часового розділення.	**2**	
16	Хвильова функція фотона в імпульсному представленні. Фотон з визначеним імпульсом. Можливі стани поляризації.	**2**	
17	Момент імпульсу фотона. Оператор моменту імпульсу та його структура. Поняття про спін фотона та спіральність.	**2**	
18	Хвильова функція фотона з визначеними значеннями моменту імпульсу. Парність станів фотона. Стани фотонів електричного та магнітного типів.	**2**	**5**

Модульна контрольна робота 2			
	ВСЬОГО	**36**	**36**

Загальний обсяг **72 год (2 кредити)**, в тому числі: лекції **– 36 год**, керування самостійною роботою – **36 год**.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1

Лекція 1.

Вступ. Класичний, напівкласичний та послідовно квантовий підходи до взаємодії електромагнітного поля з речовиною. Співвідношення невизначеності у випадку релятивістських частинок.

Лекція 2.

Квантування електромагнітного поля. Розклад поля по плоским хвилям. Густина станів поля на інтервал частот. Перехід до канонічних змінних. Електромагнітне поле як сукупність осциляторів.

Лекція 3.

Перехід до операторів. Властивості операторів народження та знищення. Вторинне квантування та представлення поля числами заповнення.

Лекція 4.

Модель фотонного газу. Рівноважний фотонний газ.

Лекція 5.

Поглинання та випромінювання фотонів атомом в електромагнітному полі. Гамільтоніан атома в представленні вторинного квантування.

Лекція 6.

Гамільтоніан взаємодії атома з електромагнітним полем в представленні вторинного квантування. Чотири процеси переходів між двома рівнями в електромагнітному полі, їх діаграми та можливі реалізації. Вимушене та спонтанне випромінювання.

Лекція 7.

Відхилення атомів світлом, охолодження та захоплення атомів світлом.

Лекція 8.

Оператор числа частинок та оператор фази фотонів, їх не комутативність та неможливість одночасного точного вимірювання амплітуди та фази електромагнітної хвилі.

Лекція 9.

Стани квантового поля випромінювання. Одномодові стани з точно визначеною фазою фотонів та з точно визначеною кількістю фотонів, порівняння їх властивостей (обчислення середніх значення т середньоквадратичних відхилень кількості частинок (амплітуди) та фази електромагнітного поля).

Лекція 10.

Когерентні стани. Когерентні стани як лінійні суперпозиції власних станів оператора кількості частинок і як власні стани оператора знищення фотонів. Властивості одномодових когерентних станів. Наближення властивостей електромагнітного поля в когерентному стані при великих числах заповнення до властивостей класичної плоскої електромагнітної хвилі.

Питання, які виносяться для самостійної роботи студентів

Заняття 1 (4 год).

Виведення співвідношень для густини станів для системах, відмінних від вільного ЕМП: електрони у кристалах, елементарні збуджень у рідкому гелії, плазмони, оптичні та акустичні фонони. (Література: [1] гл.2, [2] гл.2, [3] гл.3).

Заняття 2 (5 год).

Квантові статистики Бозе-Ейнтштейна та Фермі-Дірака. Формула Планка та закони випромінювання. (Література: [1] гл.2).

Заняття 3 (5 год).

Когерентність фотонів при вимушених випромінювальних переходах. Лазери. Квантовомеханічна природа спонтанних передів. Коефіцієнти Ейнштейна. (Література: [1] гл.5, [2] гл.3, [3] гл.4).

Заняття 4 (7 год).

Ефекти взаємодії світла з дворівневими атомами. Осциляції Рабі. Явище Бозе-конденсації для бозонів. Резонансна флюоресценція. Експериментальне спостереження явища Бозе-конденсації для атомів, полонених в оптичних пастках. (Література: [4] гл.7).

МОДУЛЬНА КОНТРОЛЬНА РОБОТА 1

ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДЛЯ МОДУЛЬНОЇ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ 1

1. Чому не можна ввести хвильову функцію фотона в координатному представленні?
2. Що таке енергетична густина станів електромагнітного поля? Як вона залежить від енергії фотона?
3. Нехай $\hat{C}$ та $\hat{C}^{+}$ – оператори знищення та народження фотона відповідно, $\hat{H}$ – гамільтоніан електромагнітного поля у представленні вторинного квантування, $\hat{n}$ – оператор кількості фотонів. Завершіть формули: $\hat{C}|n\rangle = \ldots$; $\hat{C}^{+}|n\rangle = \ldots$; $\hat{n}|n\rangle = \ldots$; $\hat{H}|n\rangle = \ldots$.
4. Запишіть гамільтоніан електромагнітного поля через оператори знищення та народження фотонів.
5. Які переходи називаються спонтанними, а які вимушеними? Імовірність яких переходів залежить від кількості фотонів у моді, а імовірність яких не залежить?
6. Яким чином залежить від частоти фотона імовірність спонтанних випромінювальних переходів?
7. Нехай n_L та n_S – числа заповнення лазерної та стоксової моди відповідно. Яким чином від цих чисел залежить швидкість генерації стоксових фотонів у режимах спонтанного КР та вимушеного КР відповідно?
8. Чому фотони пучки можуть відхиляти атомні пучки?
9. Коротко поясніть суть ефекту охолодження атомів фотонами.
10. У стані поля з точно визначеною фазою : $\Delta\cos\varphi = \ldots$? У стані поля з точно визначеною кількістю фотонів: $\Delta n = \ldots$?
11. Що таке когерентні стани?
12. Чому дорівнює абсолютна та відносна середньоквадратичні невизначеності кількості фотонів у когерентному стані?
13. Як залежить від середньої кількості фотонів середньоквадратична невизначеність напруженості електричного поля у когерентному стані?
14. Дайте визначення явищ групування та антигрупування фотонів? Дайте визначення пуасонівських, субпуасонівських та суперпуасонівських фотонних полів.
15. Що таке біфотон?
16. Що таке стиснуті стани поля з придушеними флуктуаціями кількості фотонів та фази?
17. Когерентний стан поля – це чистий чи змішаний стан? Стан теплового поля випромінювання – це чистий чи змішаний стан?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

Лекція 11.

Поняття про чисті та змішані стани поля випромінювання. Приклади чистих та змішаних станів: стаціонарна класична плоска хвиля, хаотичний (гаусівський) світловий пучок та теплове збудження фотонів в моді порожнини.

Лекція 12.

Введення оператора густини, його властивості та обчислення середніх. Оператори густини для чистих станів електромагнітного поля.

Лекція 13.

Оператор густини, що описує теплове збудження фотонів в одній моді порожнини: різні форми запису, обчислення середнього поля та середньої кількості фотонів. Оператор густини для теплового збудження всіх мод порожнини.

Лекція 14.

Фотодетектування. Підрахунок фотонів. Розподіл фотовідліків у випадку когерентного та хаотичного світла.

Лекція 15.

Вплив тривалості часу вимірювання на форму розподілу та величину середньоквадратичної похибки кількості підрахованих фотонів для хаотичного світла. Квантовомеханічний розподіл фотовідліків. Спектроскопія часового розділення.

Лекція 16.

Хвильова функція фотона в імпульсному представленні. Фотон з визначеним імпульсом. Можливі стани поляризації.

Лекція 17.

Момент імпульсу фотона. Оператор моменту імпульсу та його структура. Поняття про спін фотона та спіральність.

Лекція 18.

Хвильова функція фотона з визначеними значеннями моменту імпульсу. Парність станів фотона. Стани фотонів електричного та магнітного типів.

Питання, які виносяться для самостійної роботи студентів

Заняття 5 (5 год).

Параметри Стокса для частково поляризованого світла та їх експериментальне визначення. Використання сфери Пуанкаре для аналізу поляризації світла. (Література: [1] гл.7, [3] гл.5).

Заняття 6 (5 год).

Дробовий шуму фотодетекторів як результат неможливості точного визначення середньої кількості фотонів. (Література: [1] гл.8, [4] гл.5).

Заняття 7 (5 год).

Правила відбору при оптичних переходах Правило Лаппорта як наслідок закону збереження закону збереження моменту імпульсу. Оптична орієнтація парамагнітних атомів. Закон Садовського. (Література: [3] гл.2,3).

МОДУЛЬНА КОНТРОЛЬНА РОБОТА 2

ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДЛЯ МОДУЛЬНОЇ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ 2

1. Електромагнітна хвиля з яким фронтом відповідає фотонам у стані з визначеним імпульсом?
2. Електромагнітна хвиля з яким фронтом відповідає фотонам у стані з визначеним моментом імпульсу?
3. Які стани називаються спіральними? Що таке спіральність фотона?
4. Пояснити, чому електродипольні переходи дозволені між станами різної парності, а магнітодипольні та електроквадрупольні – між станами однакової парності.
5. У чому полягає ефект оптичної орієнтації атомів?
6. Ефект Садовського.
7. Поляризаційна матриця густини.
8. Абсолютна ті відносна невизначеності кількості фотонів у ролі теплового випромінювання.
9. Поясніть, яким чином експериментально виміряти параметри Стокса.

10. Якою є природа дробового шуму фотодетектора? Як залежить абсолютна величина дробового шуму від середньої кількості фотонів, що реєструються?
11. Як експериментально виміряти часову кореляційну функцію другого порядку?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основні джерела

1. Р. Лоудон, «Квантовая теория света» // М., Мир, 1976.
2. А. Мандель, Э. Вольф, «Оптическая когерентность и квантовая оптика» // М., Физматлит, 2000.
3. М.О. Скалли, М.С. Зубайри, «Квантовая оптика» // М., Физматлит, 2003.
4. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, «Квантовая электродинамика» (Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, «Теоретическая физика», т. IV) // М., Наука, 1980.
5. А.Н. Ахиезер, В.Б. Берестецкий, «Квантовая электродинамика» // М., Наука, 1969.

Додаткові джерела

1. M.S. Albert et al. //Nature, 1994, Vol.370, p.199.
2. E.W. Otten // Europhysics News, 2004, Vol.35, No.1, p.16
3. А.В.Слободянюк, „Эффекты пространственной дисперсии в комбинационном рассеянии света в гиротропных кристаллах ZnP_2“ // Физика твердого тела, 1986, Т.28, с.3275.
4. S.G.Garasevich,A.V.Slobodyanyuk, and Z.Z.Yanchuk “Anomalous angular dependence of E-modes splitting in Raman spectra of ZnP_2 and CdP_2 uniaxial gyrotropic crystals caused by spatial dispersion” // Physics Letters A, 1995, Vol.197, p.238.
5. L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // Physical Review A, 1992, Vol.45, p.8185.
6. M. Padgett, Courtial, L. Allen // Physics Today, 2004, No.5, p.35.
7. J.-L. Picque, J.-L. Vialle // Optics Communications, 1972, Vol.5, p.402.
8. T.W. Hansch, A.L. Schawlow // Optics Communications, 1975, Vol.13, p.68.
9. W.D. Phillips, H. Metcalf // Physical Review Letters, 1982, Vol. 48, pp.596.
10. E.L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, D.E. Pritchard // Physical Review Letters, 1987, Vol. 59, pp.2631.
11. S. Chu, L. Hollberg, J. Bjorkholm, A. Cable, A. Ashkin // Physical Review Letters, 1985, Vol. 55, pp.48.
12. P.D. Lett, W.D. Phillips, S.L. Rolston, C.E. Tanner, R.N. Watts, C.I. Westbrook //Journal of Optical Society of America, 1989, Vol. 6, pp.2084.
13. J. Dalibard, C. Cohen-Tannoudji //Journal of Optical Society of America, 1989, Vol. 6, pp.2023.

14. R.J. Glauber, Photon correlations // Physical Review Letters, 1963, Vol.10, p.84.
15. E.J.S. Fonseca, C.H. Monken, S. Padua, “Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet” // Physical Review Letters, 1999, Vol. 82, No. 14, pp. 2868-2871.
16. R. Edamatsu, R. Shimizu, T. Itoh, “Measurement of the photonic de Broglie wavelength of biphotons generated by spontaneous parametric down-conversion” // http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0109005.
17. M. Dagaines, L. Mandel // Physical Review A, 1978, Vol.18, p.2217.
18. F. Schuda, C.R. Stroud, M. Hercher // Journal of Physics B, 1974, Vol.7, p.L198.
F.Y. Wu, R.E. Grove, S. Ezekiel // Physical Review Letters, 1975, Vol. 35, pp.1426.