

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

фізичний факультет

(назва факультету, інституту, центру, коледжу)

Кафедра теоретичної фізики



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник
декана/директора з
навчальної роботи

30 » серпня 2022 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
ФОТОФІЗИКА ФУЛЕРЕНІВ, ГРАФЕНІВ ТА НАНОТРУБОК

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(цифр і назва)
спеціальність 104 Фізика та астрономія
(цифр і назва спеціальності)
освітній рівень магістр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма Квантові комп'ютери, обчислення та інформація
(назва освітньої програми)
(назва спеціалізації)
вид дисципліни обов'язкова

Форма навчання денна
Навчальний рік 2022/2023
Семестр 4
Кількість кредитів ЕСТ8 6
Мова викладання, навчання
та оцінювання українська
Форма заключного контролю залік

Викладачі: Ледней М.Ф.

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. (_____) «__» ____ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. (_____) «__» ____ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

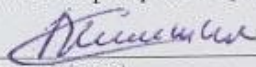
КИЇВ-2022

Розробник(и): Ледней М.Ф., доцент, докт. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної фізики

(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри теоретичної фізики


(підпис)

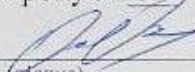
(Решетняк В.Ю.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № 19 від « 27 » травня 2022 р.

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

Протокол від « 10 » серпня 2022 року № 11

Голова науково-методичної комісії _____


(підпис)

(Олійко В.)
(прізвище та ініціали)

Голова педагогічної ради *(для коледжів)*

« _____ » _____ 20 ____ року

1. Мета дисципліни — отримання студентами систематичних на сучасному рівні знань про відкриті і розроблені в останнє десятиріччя новітні розділи фізики таких алотропних форм вуглецю, як фулерени, одно- та багат шарові графени та напівпровідникові та металічні вуглецеві нанотрубки, оптичні властивості цих систем, методи їх спектроскопічних досліджень та їх практичне застосування в приладах наноелектроніки та фотоніки. Перевага надається вивченню симетрійних аспектів енергетичної структури коливальних та електронних елементарних збуджень в цих системах та теоретико-груповому аналізу електронно-коливальних процесів, що в них реалізуються і визначають функціональне призначення нанопристроїв на їх основі.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни (за наявності)¹:

1. *Знати:*
 - 1.1. Основні положення розділів «Оптика», «Електрика та магнетизм», «Квантова механіка», «Фізика атома», «Квантова фізика» загального курсу фізики.
 - 1.2. Основні положення спеціальних курсів «Фізика твердого тіла», «Спектроскопія кристалів та періодичних наноструктур», «Методи теорії груп в фізиці».
 - 1.3. Основні методи розв'язування задач за курсами фізики «Механіка», «Електрика та магнетизм», «Оптика», «Квантова фізика» та основні терміни і моделі, які використовуються при формулюванні задач та їх розв'язанні.
 - 1.4. Методи розв'язування диференціальних рівнянь, в тому числі рівняння Шредінгера.
 - 1.5. Теорію проєктивних представлень точкових і просторових груп симетрії, квантову теорію кутового моменту, експериментальні методи оптичної спектроскопії.
2. *Вміти:*
 - 2.1. Логічно і послідовно формулювати основні принципи і закони оптики та квантової механіки
 - 2.2. Застосовувати основні принципи теорії множин, теорії груп, спираючись на основні закони і формули фізики твердого тіла та квантової механіки
 - 2.3. Обґрунтовувати і коректно робити наближення при розв'язуванні рівнянь квантової механіки та аналізі результатів розв'язків
 - 2.4. Подавати результати досліджень та розв'язки задач у вигляді графіків і застосовувати їх для аналізу
 - 2.5. Складати таблиці незвідних та проєктивних представлень груп симетрії та використовувати їх для аналізу енергетичних спектрів елементарних збуджень кристалів та періодичних наноструктур
 - 2.6. Самостійно працювати з фізичною літературою, володіти системами позначень, прийнятими у фізичній та математичній літературі.

3. Анотація навчальної дисципліни:

Нормативна дисципліна «Фізика фулеренів, графенів і нанотрубок» є обов'язковою компонентою освітньо-наукової програми «Квантові комп'ютери, обчислення та інформація» циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр фізики» та необхідною для вивчення інших фізичних дисциплін. У навчальному курсі розглядаються основи сучасного рівня знань про фізику таких алотропних форм вуглецю, як фулерени, одно- та багат шарові графени, напівпровідникові та металічні вуглецеві нанотрубки та кристали графіту, методи їх спектроскопічних досліджень та їх практичне застосування в приладах наноелектроніки

¹ альтернативний варіант :

Успішне опанування курсу _____

Знання теоретичних основ _____

та фотоніки. Симетрична класифікація елементарних збуджень, що беруть участь в електронно-коливальних процесах в таких структурах, надається на основі проєктивних представлень точкових та просторових груп симетрії, вивчаються методи побудови таких представлень та методи їх залучення для інтерпретації енергетичних спектрів та дисперсії збуджень в кристалах та періодичних наноструктурах.

Методи викладання: лекції, самостійна робота студентів.

Методи оцінювання: опитування в процесі занять, контрольні роботи після основних розділів курсу, захист написаних рефератів, іспит. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (40%) та іспиту (60%). Викладається на фізичному факультеті в 2 семестрі на 2 курсі магістратури в обсязі 180 годин (6 кредитів ECTS), з них 36 годин лекцій і 144 години самостійної роботи студентів. Складається з 2 змістових модулів (ЗМ); форма підсумкового контролю — іспит.

4. Завдання (навчальні цілі): оволодіння студентами фундаментальними знаннями про фотофізику електрон-фононних процесів, що відбуваються при взаємодії світла з фулеренами, одно- та багатошаровими графенами, напівпровідниковими та металічними вуглецевими нанотрубками та кристалами, а також знаннями про можливість використання таких процесів та їх резонансного підсилення в наноелектроніці та сенсориці.

Згідно вимог проєкту Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти (восьмий рівень НРК України), галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП "Квантові комп'ютери, обчислення та інформація", дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних *компетентностей*:

інтегральної:

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

загальних:

- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК01).
- Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК02).
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (ЗК03).
- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК04).
- Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології (ЗК05).
- Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми (ЗК06).

фахових:

- Здатність використовувати закони та принципи фізики та астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ (СК01).
- Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики (СК02).
- Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції фізики фахівцям і нефахівцям (СК03).
- Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики (СК04).
- Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики й дотичних до них міждисциплінарних областях (СК05).
- Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси (СК08).
- Здатність ефективно використовувати на практиці сучасні теорії та методи управління наукою та ділового адміністрування (СК09).
- Вміти використовувати математичний апарат теоретичної фізики, фізичні моделі, прийоми аналізу достовірності фізичних моделей для розв'язання фізичних задач у фотоніці,

теоретичній фізиці, комп'ютерних технологіях та для опрацювання квантової інформації (СК10).

- Вміти досліджувати на експерименті та теоретично моделювати взаємодію фотонів з квантовими об'єктами та наночастинками для використання у квантовій інформатиці та розбудові теорії квантових комп'ютерів (СК13).

5. Результати навчання за дисципліною:

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність)		Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності)	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1	1.1. Методику побудови незвідних представлень груп симетрії фулеренів, зокрема, груп симетрії фулеренів C_{20} і C_{60} , що мають симетрію ікосаедра	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
	1.2. Методику побудови незвідних представлень груп симетрії періодичних наноструктур: графенів і нанотрубок	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
	1.3. Методику побудови незвідних двозначних (спінорних) представлень для фулеренів, графенів і нанотрубок	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
	1.4. Енергетичні спектри та симетрію коливальних та електронних збуджень фулеренів, графенів та нанотрубок.	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
2	2.1 Проводити теоретичне дослідження енергетичних спектрів коливальних та електронних станів фулеренів, графенів та нанотрубок	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
	2.2. Застосувати методи теорії груп для симетрійного аналізу енергетичних спектрів коливальних та електронних збуджень фулеренів, графенів та нанотрубок	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
	2.3. Використовувати отримані знання для визначення структури електронних станів фулеренів та структури електронних зон в графенах, нанотрубках і інших періодичних наноструктурах	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5
	2.4 Проводити оцінку числа носіїв струму в фулеренах, графенах та нанотрубках	Лекція, самостійна робота	Домашні завдання, усні відповіді, контрольна робота	12,5

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін які не входять до блоків спеціалізації)

Результати навчання дисципліни (код)											
	1.1	1.1	2.1	2.1	3.3	1.4	2.5	2.1	2.2	2.3	2.4
Програмні результати навчання (назва)											
РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики для розв'язання складних задач і практичних проблем.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН02. Проводити експериментальні та теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН03. Застосовувати сучасні теорії наукового менеджменту та ділового адміністрування для організації наукових та прикладних досліджень в області фізики та астрономії.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН04. Вибирати та використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних в фізичних дослідженнях і оцінювання їх достовірності.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН06. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та інновацій в області фізики.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН08. Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.	+	/	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН12. Розробляти та застосовувати ефективні алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для дослідження моделей фізичних та астрономічних об'єктів і процесів, обробки результатів експериментів і спостережень.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН16. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та теоретичних досліджень в області фізики.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН17. Проводити теоретичні та експериментальні дослідження оптичних та електричних властивостей кристалів, напівпровідникових та металевих наночастинок	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
РН20. Проводити комп'ютерні розрахунки при дослідженні фізичних явищ квантової інформатики у фотоніці та наноелектроніці.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

7. Схема формування оцінки:

7.1 Форми оцінювання студентів: (азначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання

Під час **поточного** контролю (ПК) розуміння матеріалу дисципліни перевірятиметься шляхом розв'язування задач, які будуть задані на самостійну роботу. Розв'язки цих задач будуть обговорюватися, аналізуватися та перевірятися на лекційних заняттях. Виконання завдань повинно бути свідомим, копіювання робіт інших студентів не зараховується. За виконання всіх завдань змістових модулів протягом семестру студент може отримати наступні бали:

1. Модульна контрольна робота №1 — 10 балів.
2. Модульна контрольна робота № 2 — 10 балів.
3. Самостійна робота над задачами протягом семестру — 15 балів.
4. Реферати, доповіді, усні відповіді — 5 балів.

- підсумкове оцінювання у формі іспиту

Підсумковий семестровий контроль проводиться у формі **іспиту**. Оцінка виставляється за результатами письмових робіт. Під час іспиту оцінюються загальні результати вивчення всього навчального курсу.

	ЗМ1	ЗМ2	іспит	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>36</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>20</u>	<u>20</u>	<u>60</u>	<u>100</u>

На іспиті студент може максимально отримати **60 балів**. Оцінка за іспит не може бути меншою **36 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

Студент не допускається до іспиту, якщо під час семестру набрав менше **24 балів**. Умови допуску до іспиту наступні:

- здати розв'язок не менше 50 % обов'язкових задач, що виносяться на самостійну роботу;
- пройти письмову перевірку знань та розуміння основних означень та формул.

7.2 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. Система оцінювання знань включає поточний, модульний та семестровий контроль знань. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою. Форми поточного контролю: оцінювання домашніх робіт, письмових самостійних завдань, тестів та контрольних робіт, виконаних студентами під час самостійної роботи. Студент може отримати максимально 20 балів за виконання домашніх робіт, самостійних завдань, усні відповіді, тести, реферати, доповіді, доповнення на практичних заняттях. Модульний контроль включає 2 модульні контрольні роботи. Студент може отримати максимально за модульні контрольні роботи 20 балів (по 10 балів за кожен модульну контрольну роботу). Підсумковий семестровий контроль проводиться у формі іспиту в другому семестрі (60 балів). Екзаменаційний білет включає 2 теоретичних питання (по 20 балів кожне) та 1 завдання (20 балів).

7.3 Шкала відповідності оцінок

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно / Fail	0-59

8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекцій, практичних занять та самостійних робіт

II СЕМЕСТР

№ п/п	Номер і назва теми*	Кількість годин		
		лекції	семінари/ практичні/ лабораторні <i>вибрати необхідне</i>	Самостійна робота
Змістовий модуль 1				
1	Вступ. Структура вуглецевих матеріалів та їх фізичні властивості. Типи гібридизації хвильових функцій зовнішньої електронної оболонки атома вуглецю (sp^3 , sp^2 та sp). Алотропні форми вуглецю (алмаз, графіт, карбін, фулерени, графени та нанотрубки).	2		8
2	Фізика фулеренів. Структура фулеренів та їх симетрія. Енергетичні спектри та симетрія коливальних та електронних збуджень фулеренів.	2		8
3	Ендофулерени. Кристалічні фулерити, їх пластична фаза.	2		8
4	Фулериди та їх надпровідність.	2		8
5	Вуглецеві нанотрубки. Енергетичні спектри їх коливальних станів та структура електронних зон.	2		8
6	Нанотрубки напівпровідникові та металічні. Густина електронних станів одностінних нанотрубок.	2		8
7	Нанотрубки неуглецевого походження, їх властивості. Фулерени та нанотрубки в біології.	2		8
	Модульна контрольна робота № 1			2
Змістовий модуль 2				
8	Графени та графани, їх структура та просторові групи симетрії. Енергетичні спектри коливальних та електронних збуджень одношарового графену.	2		8
9	Кристалічна структура одношарового графену та його просторова симетрія Структура π -електронних зон одношарового графену.	2		8
10	Точки Дірака в структурі електронних зон одношарового графена.	1		4
11	Оцінка структури π -електронних зон графену поблизу точок Дірака в наближенні сильного зв'язку.	2		8
12	Спектр π -електронних зон графену поблизу точок Дірака в наближенні найближчих сусідів.	2		8
13	Керування кількістю електронів та положенням рівня Фермі π -електронів одношарового графену.	2		8
14	Спінорне представлення рівняння для визначення π -електронних зон графену поблизу	1		4

	точок Дірака. Релятивістські властивості одношарового графену.			
15	Циклотронний резонанс.	1		4
16	Енергетичний спектр носіїв струму в графені при наявності магнітного поля та пов'язані з ним ефекти. Діраківські рівні Ландау.	3		8
17	Теоретико-груповий аналіз π -електронних зон та коливань ґратки одношарового графену.	2		8
18	Дисперсія електрон-фононних резонансів в одношаровому графені та її прояв у мікроскопічному розсіянні світла. Явище подвійного електрон-фононного резонансу.	2		8
19	Клейнівське тунелювання.	2		8
	Модульна контрольна робота 2			2
	Всього	36		144

*Примітка: слід зазначити також теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 180 год.², в тому числі (вибрати необхідне):

Лекцій – **36 год.**

Семінари – **год.**

Практичні заняття - **год.**

Лабораторні заняття - _____ **год.**

Тренінги - _____ **год.**

Консультації - **год.**

Самостійна робота - **144 год.**

9. Рекомендовані джерела³:

Основні

1. M.S.Dresselhaus, G.Dresselhaus, P.C.Eklund. Science of fullerenes and carbon nanotubes. Academic Press, Inc. San Diego, Boston, New York, London, Sydney, Tokyo, Toronto, 1996.
2. P.J.F.Harris. Carbon nanotube science. Synthesis, properties and applications. Cambridge University Press, New York, 2009.
3. A.Jorio, G.Dresselhaus, M.S.Dresselhaus. Carbon nanotubes. Advanced topics in the synthesis, structure, properties and applications (Topics in Applied Physics, vol.111) Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
4. E.Burstein, M.L.Cohen, D.L.Miles, P.J.Stiles. Series: Contemporary concepts of condensed matter science. S.Saito, A.Zettle. Carbon nanotubes: quantum cylinders of graphene. Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo, 2008.
5. R.Saito, G.Dresselhaus, M.S.Dresselhaus. Physical properties of carbon nanotubes. Imperial College Press, London, 1998.
6. V.V.Strelchuk, A.S.Nikolenko, V.O.Gubanov, M.M.Biliy, L.A.Bulavin. Dispersion of Electron-Phonon Resonances in One-Layer Graphene and its Demonstration in Micro-Raman Scattering. J.Nanosci. Nanotechnol., Vol.12, No.1 1, P.8671-8675, 2012.

² Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

³ В тому числі Інтернет ресурси

7. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morosov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature* 438, 197 (2005).
8. Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, *Nature* 438, 201 (2005).
9. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morosov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* 306, 666 (2004).
10. Kekulé, *Bulletin de la Societe Chimique de Paris* 3 (2), 98 (1865); *Annalen der Chemie und Pharmazie* 137 (2), 129 (1866).
11. L. Pauling, *The Nature of Chemical Bonds*, Cornell UP (1960).
12. H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, *Nature* 318, 162 (1985).
13. Original paper in Japanese, translated in: E. Ozawa, H. W. Kroto, P. W. Fowler, E. Wassermann, *Phil. Trans. R. Soc. (London) A* 343, 1 (1993).
14. S. Iijima, *Nature* 354, 56 (1991).
15. M. Monthieux and V. L. Kuznetsov, *Carbon* 44, 1621 (2006).
16. L. V. Radushkevich and V. M. Lukyanovich, *Zurn. Fisic. Chim.* 26, 88 (1952).
17. Е. В. Горбар, С. Г. Шарапов. *Основи фізики графену. Навчальний посібник.* – Київ, 2013. – 118 с.

Додаткові

1. R. Saito, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press (1998).
2. K. S. Novoselov, D. Jiang, T. Booth, V. V. Khotkevich, S. M. Morozov, and A. K. Geim, *PNAS* 102, 10451 (2005).
3. C. Berger, Z. M. Zong, T. B. Li, X. B. Li, A. Y. Ogbazghi, R. Feng, Z. T. Dai, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P. N. First, and W. A. de Heer, *J. Phys. Chem. B*, 108, 19912 (2004); for a review on the fabrication technique see: W. A. de Heer, C. Berger, X. Wu, P. N. First, E. H. Conrad, X. B. Li, T. B. Li, M. Sprinkle, J. Hass, M. Sadowski, M. Potemski, and G. Martinez, *Solid State Comm.* 143, 92 (2007).
4. F. Varchon, R. Feng, J. Hass, X. Li, B. Ngoc Nguyen, C. Naud, P. Mallet, J.-Y. Veuille, C. Berger, E. H. Conrad, and L. Magaud, *Phys. Rev. Lett.* 99, 126805 (2007)
5. J. Hass, F. Varchon, J. E. Millan-Otoya, M. Sprinkle, W. A. de Heer, C. Berger, P. N. First, L. Magaud, and E. H. Conrad, *arXiv:0706.2134*.
6. P. R. Wallace, *Phys. Rev.* 71, 622 (1947).
7. C. Bena and G. Montambaux, *arXiv:0712.0765*.
8. P. Dietl, F. Piéchon, and G. Montambaux, *arXiv:0707.0219*; M.O. Goerbig, J.-N. Fuchs, G. Montambaux, and F. Piéchon, *arXiv:0803.0912*.
9. J. P. Hobson and W. A. Nierenberger, *Phys. Rev.* 89, 662 (1953).
10. A. Damascelli, *Physica Scripta T109*, 61 (2004).
11. A. Bostwick, T. Ohta, Th. Seyller, K. Horn, and E. Rotenberg, *Nature Physics* 3, 36 (2007).
12. S. Y. Zhou, G.-H. Gweon, J. Graf, A. V. Fedorov, C. D. Spataru, R. D. Diehl, K. Kopelevich, D.-H. Lee, S. G. Louie, A. Lanzara, *Nature Phys.* 2, 595-599 (2006).
13. C. Itzykson and J.-B. Zuber, *Quantum Field Theory*, McGraw-Hill (1985).
14. S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields I*, Cambridge UP (1995).
15. В.И.Трефилов, Д.В.Щур, Б.П.Тарасов, Ю.М.Шульга, А.В.Черногоренко, В.К.Пищук, С.Ю.Загинайченко. *Фуллерены - основа материалов будущего.* Изд.АДЕФ - Украина, Киев, 2001.
16. S.Reich, C.Thomsen, J.Maultzsch. *Carbon nanotubes. Basic concepts and physical properties.*
17. M.S.Dresselhaus, G.Dresselhaus, A.Jorio. *Group theory application to the physics of condensed matter.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
18. Л.Н.Сидоров, М.А.Юровская, А.Я.Борщевский, И.В.Трушков, И.Н.Иоффе. *Фуллерены.* Изд. МГУ им. М.В.Ломоносова «Экзамен», Москва, 2005.