

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗІНА

**Ю. А. Бережной**

# **ЛЕКЦІЇ З КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ**

## **Підручник**

Затверджено Міністерством освіти і науки України  
як підручник для студентів вищих навчальних закладів

Харків – 2014

УДК 530.145  
ББК 22.314  
Б 48

**Рецензенти:**

**Горобець Ю. І.** – завідувач кафедри загальної та експериментальної фізики Національного технічного університету України «КПІ», доктор фіз.-мат. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, член-кореспондент НАПН України;

**Голод П. І.** – завідувач кафедри фізико-математичних наук Національного університету «Києво-Могилянська академія», доктор фіз.-мат. наук, професор;

**Єжов С. М.** – професор Київського національного університету імені Т. Г. Шевченка, доктор фіз.-мат. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України.

*Затверджено Міністерством освіти і науки України  
як підручник для студентів вищих навчальних закладів  
(лист № 1/11-1725 від 05.02.2014 р.)*

**Бережной Ю. А.**

Б 48      Лекції з квантової механіки : підручник / Ю. А. Бережной – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 432 с.

ISBN 978-966-285-073-4

Викладено нерелятивістську квантову механіку як розділ сучасної теоретичної фізики. Докладно розглянуто ідеї та методи квантової механіки, основи її математичного апарату та застосування квантової фізики до теорії структури атомів, молекул, атомних ядер і до задач розсіяння мікрооб'єктів.

Для студентів, аспірантів і викладачів вищих навчальних закладів.

УДК 530.145  
ББК 22.314

ISBN 978-966-285-073-4

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2014  
© Бережной Ю. А., 2014  
© Літвінова О. О., макет обкладинки, 2014

## З М І С Т

|  |     |
|--|-----|
| Передмова до першого видання   | 6   |
| Передмова до другого видання   | 9   |
| Розділ 1. Фізичні та математичні основи квантової механіки           | 10  |
| 1.1. Проблема існування двох механік                                 | 10  |
| 1.2. Основні ідеї та принципи квантової механіки                     | 15  |
| 1.3. Суперпозиція станів   | 19  |
| 1.4. Фізичні величини та оператори                                   | 23  |
| 1.5. Неперервний спектр  | 29  |
| 1.6. Перехід до класичної механіки                                   | 31  |
| 1.7. Оператор Гамільтона   | 33  |
| 1.8. Фізичні величини та матриці                                     | 40  |
| 1.9. Формалізм векторів станів                                       | 47  |
| 1.10. Еволюція квантової системи                                     | 55  |
| 1.11. Матриця густини  | 59  |
| Розділ 2. Імпульс, момент імпульсу, спіні                            | 65  |
| 2.1. Оператор імпульсу   | 65  |
| 2.2. Співвідношення невизначеностей                                  | 71  |
| 2.3. Оператор моменту імпульсу                                       | 79  |
| 2.4. Власні значення та власні функції оператора<br>моменту імпульсу | 84  |
| 2.5. Додавання моментів  | 90  |
| 2.6. Парність стану  | 92  |
| 2.7. Спін  | 94  |
| 2.8. Хвильові функції частинок зі спінами                            | 99  |
| Розділ 3. Основне рівняння нерелятивістської квантової<br>механіки   | 103 |
| 3.1. Рівняння Шредінгера   | 103 |
| 3.2. Одновимірний рух  | 106 |
| 3.3. Потенціальний бар'єр  | 109 |
| 3.4. Потенціальна яма  | 114 |
| 3.5. Осцилятор (координатне зображення)                              | 120 |
| 3.6. Осцилятор (зображення чисел заповнення)                         | 127 |
| 3.7. Когерентні стани осцилятора                                     | 130 |
| 3.8. Задача двох тіл   | 134 |
| 3.9. Вільний рух у центрально-симетричному полі                      | 138 |
| 3.10. Тривимірний осцилятор  | 140 |
| 3.11. Фінітний рух зарядженої частинки в електричному<br>полі        | 144 |
| 3.12. Рух зарядженої частинки в магнітному полі                      | 151 |

|   |     |
|---|-----|
| Розділ 4. Наближені методи                              | 156 |
| 4.1. Теорія збурень Релея–Шредінгера                    | 156 |
| 4.2. Ангармонічний осцилятор                            | 160 |
| 4.3. Секулярне рівняння                                 | 162 |
| 4.4. Квазівиродження                                    | 164 |
| 4.5. Теорія збурень Бріллоена–Вігнера                   | 166 |
| 4.6. Залежні від часу збурення                          | 168 |
| 4.7. Переходи в неперервному спектрі                    | 170 |
| 4.8. Квазікласична хвильова функція                     | 172 |
| 4.9. Дискретний спектр у потенціальній ямі              | 178 |
| 4.10. Частинка в двоємному потенціалі                   | 188 |
| 4.11. Тунельний ефект                                   | 194 |
| 4.12. Холодна емісія електронів з металу                | 197 |
| 4.13. Альфа-розпад атомних ядер                         | 199 |
| 4.14. Надбар'єрне відбиття                              | 203 |
| Розділ 5. Системи тотожних частинок                     | 207 |
| 5.1. Нерозрізненність тотожних частинок                 | 207 |
| 5.2. Хвильові функції з певною симетрією                | 210 |
| 5.3. Обмінна взаємодія                                  | 212 |
| 5.4. Вторинне квантування для систем тотожних бозонів   | 213 |
| 5.5. Вторинне квантування для систем тотожних ферміонів | 219 |
| Розділ 6. Атоми   | 222 |
| 6.1. Електронна структура атомів                        | 222 |
| 6.2. Самоузгоджене поле                                 | 230 |
| 6.3. Рівняння Томаса–Фермі                              | 239 |
| 6.4. Періодична система елементів Менделєєва            | 243 |
| 6.5. Мультипольні моменти                               | 246 |
| 6.6. Атом в електричному полі                           | 250 |
| 6.7. Атом у магнітному полі                             | 253 |
| Розділ 7. Молекули                                      | 258 |
| 7.1. Структура молекул                                  | 258 |
| 7.2. Іонізована молекула водню                          | 264 |
| 7.3. Валентність  | 268 |
| 7.4. Синглетні терми двохатомної молекули               | 270 |
| 7.5. Мультиплетні терми двохатомної молекули            | 273 |
| 7.6. Сили Ван дер Ваальса                               | 278 |

|  |     |
|--|-----|
| Розділ 8. Атомні ядра  | 282 |
| 8.1. Ядерні сили   | 282 |
| 8.2. Дейтрон   | 291 |
| 8.3. Ядерні оболонки   | 295 |
| 8.4. Коливання ядерної поверхні                                  | 303 |
| 8.5. Обертання несферичних ядер                                  | 308 |
| 8.6. Мікроскопічні моделі ядра                                   | 315 |
| Розділ 9. Основні питання теорії розсіяння                       | 319 |
| 9.1. Метод парціальних хвиль для пружного розсіяння              | 319 |
| 9.2. Матриця розсіяння   | 326 |
| 9.3. Рівняння Ліппмана–Швінгера                                  | 333 |
| 9.4. Оператор переходу   | 336 |
| 9.5. Борнове наближення  | 342 |
| 9.6. Розсіяння повільних частинок                                | 345 |
| 9.7. Розсіяння повільних нейтронів протонами                     | 349 |
| 9.8. Квазістаціонарні стани та формули Брейта–Вігнера            | 352 |
| 9.9. Наближення великих енергій                                  | 361 |
| 9.10. Наближення викривлених хвиль                               | 363 |
| Розділ 10. Спеціальні питання теорії розсіяння                   | 366 |
| 10.1. Розсіяння заряджених частинок електричним полем            | 366 |
| 10.2. Розсіяння електронів великих енергій атомами               | 370 |
| 10.3. Розсіяння електронів великих енергій атомними ядрами       | 375 |
| 10.4. Розсіяння за наявності поглинання і комплексний потенціал  | 380 |
| 10.5. Ближня та дальня амплітуди розсіяння                       | 388 |
| 10.6. Квантова інтерференція в розсіянні мікрооб'єктів           | 392 |
| 10.7. Модифікації квантових інтерференційних картин              | 400 |
| 10.8. Розсіяння тотожних частинок                                | 406 |
| 10.9. Поляризація частинок при розсіянні                         | 409 |
| 10.10. Розсіяння частинок зі спінами $1/2$ безспіновими мішенями | 411 |
| Додаток 1. Деякі властивості дельта-функції                      | 418 |
| Додаток 2. Розвинення плоскої хвилі                              | 419 |
| Додаток 3. Терми основних станів атомів                          | 420 |
| Додаток 4. Формальна теорія збурень                              | 423 |
| Додаток 5. Коротка квантова хроніка                              | 425 |
| Фізичні константи  | 427 |
| Список рекомендованої літератури                                 | 428 |
| Предметний покажчик  | 429 |