

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

**О.А. Барсуков**

# **Основы физики атомного ядра Ядерные технологии**



УДК 539.12  
ББК 22.382  
Б 26

Барсуков О.А. **Основы физики атомного ядра. Ядерные технологии.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 560 с. — ISBN 978-5-9221-1306-9.

Обобщена информация о фундаментальных проблемах физики атомного ядра. Теория процессов на ядерном уровне излагается в сочетании с данными наблюдений, в значительной мере получаемых с помощью ядерных спектроскопических методов. Рассматриваются технологии, применяемые в ядерной энергетике и экспериментальной физике микрочастиц. Большое внимание уделяется вопросам, связанным с использованием ядерно-физических представлений в космологии, в частности при изучении нуклеосинтеза в дозвездный и звездный периоды эволюции Вселенной. Обсуждается современное состояние радиационной экологии.

Монография предназначена специалистам, работа которых связана не только с физикой микрочастиц, но и с ядерными технологиями и их разнообразными приложениями, а также студентам, обучающимся по специальности «инженер-физик».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                       |    |
|-----------------------|----|
| Предисловие . . . . . | 12 |
|-----------------------|----|

### Часть I. Мир субатомных частиц

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Глава 1. Начальные сведения о субатомных частицах. . . . .                                                                                                                                                                | 13 |
| § 1.1. Определение субатомных частиц. . . . .                                                                                                                                                                             | 13 |
| § 1.2. Представление о фундаментальных взаимодействиях. . . . .                                                                                                                                                           | 14 |
| § 1.3. Важнейшие отличительные черты субатомных систем. . . . .                                                                                                                                                           | 14 |
| 1.3.1. О внесистемной единице электронвольт и ее производных (14).                                                                                                                                                        |    |
| 1.3.2. Сравнение свойств атомных и субатомных систем (15).                                                                                                                                                                |    |
| 1.3.3. О состоянии теории микрочастиц (15). 1.3.4. Роль законов сохранения в субатомной физике (16). 1.3.5. Характерные значения энергий, расстояний и времен жизни в субатомной физике (17).                             |    |
| Глава 2. Физические характеристики элементарных частиц . . . . .                                                                                                                                                          | 20 |
| § 2.1. Классификация элементарных частиц . . . . .                                                                                                                                                                        | 20 |
| § 2.2. Дуализм элементарных частиц . . . . .                                                                                                                                                                              | 22 |
| § 2.3. Стабильные элементарные частицы . . . . .                                                                                                                                                                          | 23 |
| § 2.4. Распады элементарных частиц . . . . .                                                                                                                                                                              | 23 |
| § 2.5. Виртуальные переходы и виртуальные частицы . . . . .                                                                                                                                                               | 24 |
| § 2.6. О «первейших сущностях» вещества. . . . .                                                                                                                                                                          | 25 |
| 2.6.1. Взаимопревращаемость элементарных частиц (25). 2.6.2. Кварковая модель адронов (27). 2.6.3. Представление о фундаментальных фермионах и калибровочных бозонах (29). 2.6.4. Понятие о микровибраторах-струнах (30). |    |
| Литература к части I . . . . .                                                                                                                                                                                            | 32 |

### Часть II. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом, их источники и методы наблюдения

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Глава 3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. . . . .                                                                                                                  | 33 |
| § 3.1. Начальные сведения об ионизирующих излучениях и их источниках. .                                                                                                              | 33 |
| § 3.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом . . . . .                                                                                                                        | 34 |
| 3.2.1. Особенности взаимодействий заряженных частиц со средой. Оценка энергий, при которых частицы могут считаться релятивистскими (34). 3.2.2. Ионизационные потери энергии тяжелых |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| заряженных частиц (35). 3.2.3. Пробеги заряженных частиц (38). 3.2.4. Кулоновское взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом (41). 3.2.5. Ядерные взаимодействия ядерноактивных частиц (42).                                                                                                                                                                                    |           |
| § 3.3. Взаимодействие электронов ( $\beta$ -частиц) с веществом . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 42        |
| 3.3.1. Ионизационные потери энергии электронов (42). 3.3.2. Радиационные потери энергии электронов (43). 3.3.3. Характер движения электронов в веществе (45). 3.3.4. Пробеги электронов (46).                                                                                                                                                                                             |           |
| § 3.4. Взаимодействие гамма-квантов с веществом . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 47        |
| 3.4.1. Классификация видов взаимодействия гамма-излучения с веществом (47). 3.4.2. Фотоэффект (49). 3.4.3. Эффект Комптона (49). 3.4.4. Образование пар (50). 3.4.5. Общий характер взаимодействия $\gamma$ -квантов со средой (51). 3.4.6. Пробеги $\gamma$ -квантов (51).                                                                                                               |           |
| § 3.5. Излучение Вавилова–Черенкова и переходное излучение. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 53        |
| § 3.6. Взаимодействие нейтронов с веществом . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 55        |
| 3.6.1. Закон ослабления нейтронного потока в веществе (55). 3.6.2. Характер взаимодействия нейтронов различных энергий с веществом (57). 3.6.3. Рассеяние и замедление нейтронов (62).                                                                                                                                                                                                    |           |
| <b>Глава 4. Обзор источников ионизирующих излучений . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>67</b> |
| § 4.1. Классификация источников ионизирующих излучений и представление о «поколениях» генерируемых частиц . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                       | 67        |
| § 4.2. Источники радионуклидов естественного и искусственного происхождения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 68        |
| 4.2.1. Естественные радионуклиды (68). 4.2.2. Искусственные радионуклиды (71).                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |           |
| § 4.3. Ядерные реакторы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 73        |
| § 4.4. Космические лучи . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 75        |
| <b>Глава 5. Ускорители заряженных частиц . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>77</b> |
| § 5.1. Физические принципы работы ускорителей и их классификация . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 77        |
| § 5.2. Проблема устойчивого движения ускоряемых частиц. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 79        |
| 5.2.1. Принцип автофазировки. Слабая фокусировка (79). 5.2.2. Сильная фокусировка (81).                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |           |
| § 5.3. Устройство ускорителей различных типов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 83        |
| 5.3.1. Ускоритель Ван-де-Граафа (83). 5.3.2. Линейный ускоритель со стоячей волной (84). 5.3.3. Линейный ускоритель с бегущей волной (85). 5.3.4. Циклотрон (86). 5.3.5. Мезонные фабрики. Изохронные циклотроны (88). 5.3.6. Синхроциклотрон (фазотрон) (90). 5.3.7. Бетатрон (90). 5.3.8. Микротрон (93). 5.3.9. Синхротрон (94). 5.3.10. Синхрофазотрон (94). 5.3.11. Коллайдеры (95). |           |
| <b>Глава 6. Методы регистрации ионизирующих излучений . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>97</b> |
| § 6.1. Классификация и основные характеристики детекторов ионизирующих излучений. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 97        |
| § 6.2. Газовые ионизационные счетчики . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 99        |
| 6.2.1. Ионизационная камера (99). 6.2.2. Газоразрядные счетчики (102).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 6.3. Сцинтилляционный счетчик . . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 106 |
| § 6.4. Полупроводниковый счетчик . . . . .                                                                                                                                                                                                                          | 111 |
| § 6.5. Черенковский счетчик и счетчик переходного излучения . . . . .                                                                                                                                                                                               | 113 |
| § 6.6. Трековые детекторы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                 | 114 |
| 6.6.1. Представление о пересыщенном паре и перегретой жидкости (114). 6.6.2. Камера Вильсона (115). 6.6.3. Пузырьковая камера (117). 6.6.4. Искровая камера (119). 6.6.5. Метод ядерных эмульсий. Эмульсионная камера (120). 6.6.6. Диэлектрический детектор (122). |     |
| § 6.7. Методы регистрации нейтронов . . . . .                                                                                                                                                                                                                       | 123 |
| 6.7.1. Общие представления о методах регистрации нейтронов (123). 6.7.2. Счетчики тепловых и медленных нейтронов (123). 6.7.3. Счетчики быстрых нейтронов (125).                                                                                                    |     |
| Литература к части II . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 126 |

### Часть III. Экспериментальные и модельные исследования структуры атомных ядер. Свойства ядерных сил

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 7. Физические характеристики ядерных систем в стационарных и квазистационарных состояниях . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                           | 127 |
| § 7.1. Вводные представления о статических свойствах ядер и ядерных моделах . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                               | 127 |
| § 7.2. Электрический и барионный заряды ядер . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 129 |
| § 7.3. Изучение размеров атомных ядер и распределение в их объеме электрического заряда . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                   | 129 |
| 7.3.1. Понятие радиуса ядра (129). 7.3.2. Методы определения радиусов ядер по данным о рассеянии быстрых электронов (130). 7.3.3. Метод определения радиусов ядер по данным о нейтронном эффективном сечении (131). 7.3.4. Изучение распределения электрического заряда в опытах Хофштандера (133). 7.3.5. Распределение протонов и нейтронов по объему ядра (136). |     |
| § 7.4. Методы измерения масс атомных ядер . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 136 |
| 7.4.1. Методы, используемые для определения масс микрочастиц (136). 7.4.2. Единица измерения масс нуклидов (138). 7.4.3. Масс-спектрометрический метод (138). 7.4.4. Метод ядерных превращений (141). 7.4.5. Изотопный состав элементов (144).                                                                                                                      |     |
| § 7.5. Энергия связи ядер . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 146 |
| 7.5.1. Энергия связи, дефект массы ядер (146). 7.5.2. Капельная модель ядра. Полуэмпирическая формула Вайцзеккера (146). 7.5.3. Энергия связи как мера устойчивости изобар (150). 7.5.4. Удельная энергия связи (150).                                                                                                                                              |     |
| § 7.6. Моменты ядер . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 152 |
| 7.6.1. Моменты импульса ядер (152). 7.6.2. Магнитный и квадрупольный моменты ядер (153). 7.6.3. Сравнительный анализ экспериментальных значений ядерных спинов и магнитных моментов (155).                                                                                                                                                                          |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 7.7. Статистика атомных ядер . . . . .                                                                                                                                                                                                          | 156        |
| 7.7.1. Классическая и квантовая статистика (156). 7.7.2. Статистика и моменты ядер (157).                                                                                                                                                         |            |
| § 7.8. Четность ядер. . . . .                                                                                                                                                                                                                     | 158        |
| <b>Глава 8. Оболочечная и обобщенная модели ядер. Элементы ядерной спектроскопии. . . . .</b>                                                                                                                                                     | <b>161</b> |
| § 8.1. Оболочечная модель ядра . . . . .                                                                                                                                                                                                          | 161        |
| 8.1.1. Доказательства оболочечной структуры ядра (161). 8.1.2. Принципы построения оболочечной модели (162). 8.1.3. Конкретные варианты оболочек (163). 8.1.4. Гиперядра и их использование для изучения оболочечной структуры ядер (169).        |            |
| § 8.2. Обобщенная модель ядра . . . . .                                                                                                                                                                                                           | 170        |
| 8.2.1. Вводные замечания (170). 8.2.2. Модель ядра деформированной формы (172).                                                                                                                                                                   |            |
| § 8.3. Использование представлений оболочечной и обобщенной моделей в ядерной спектроскопии. . . . .                                                                                                                                              | 175        |
| <b>Глава 9. Ядерные силы . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>179</b> |
| § 9.1. Феноменологическая и мезонная теории ядерных сил . . . . .                                                                                                                                                                                 | 179        |
| § 9.2. Экспериментальные методы изучения ядерных сил . . . . .                                                                                                                                                                                    | 182        |
| § 9.3. Изотопический спин . . . . .                                                                                                                                                                                                               | 183        |
| 9.3.1. Зарядовая симметрия ядерных сил. Изотопическая инвариантность (183). 9.3.2. Аналоговые состояния (186).                                                                                                                                    |            |
| § 9.4. Классификация состояний двухнуклонной системы . . . . .                                                                                                                                                                                    | 187        |
| § 9.5. Дейтрон . . . . .                                                                                                                                                                                                                          | 191        |
| 9.5.1. Обзор свойств дейтрона (191). 9.5.2. Нерелятивистская теория дейтрона (192). 9.5.3. Радиус дейтрона (195). 9.5.4. Энергетический спектр дейтрона (195).                                                                                    |            |
| § 9.6. Элементы теории упругого рассеяния частиц . . . . .                                                                                                                                                                                        | 196        |
| 9.6.1. Лабораторная система координат и система центра инерции (196). 9.6.2. Связь дифференциального сечения с амплитудой волны (198). 9.6.3. Основные формулы теории упругих столкновений (201). 9.6.4. Фазовый анализ в теории рассеяния (202). |            |
| § 9.7. Рассеяние нуклонов на нуклонах при низкой энергии . . . . .                                                                                                                                                                                | 203        |
| § 9.8. Рассеяние нуклонов на нуклонах при высокой энергии . . . . .                                                                                                                                                                               | 206        |
| § 9.9. Опыты с поляризованными пучками и мишенями . . . . .                                                                                                                                                                                       | 212        |
| § 9.10. Обобщение свойств ядерных сил. . . . .                                                                                                                                                                                                    | 214        |
| Литература к части III . . . . .                                                                                                                                                                                                                  | 216        |

## Часть IV. Ядерные превращения

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 10. Важнейшие закономерности радиоактивного распада ядер. . .</b>                                                   | <b>217</b> |
| § 10.1. Определение радиоактивности. Закон радиоактивного распада и основные величины, характеризующие это явление . . . . . | 217        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 10.2. Классификация типов радиоактивных ядер. Причины задержки распадов неустойчивых ядер . . . . .                                                                                                                                                                                         | 222        |
| § 10.3. Состав ядра и радиоактивность. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 224        |
| § 10.4. Радиоактивные ряды. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                           | 227        |
| § 10.5. Изображение схем распада радиоактивных ядер . . . . .                                                                                                                                                                                                                                 | 229        |
| <b>Глава 11. Альфа-распад. Протонный и кластерный распады . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                       | <b>231</b> |
| § 11.1. Энергия $\alpha$ -распада . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                   | 231        |
| § 11.2. Элементы теории $\alpha$ -распада . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 233        |
| § 11.3. Элементы $\alpha$ -спектроскопии . . . . .                                                                                                                                                                                                                                            | 239        |
| § 11.4. Протонный и кластерный распады . . . . .                                                                                                                                                                                                                                              | 242        |
| <b>Глава 12. Бета-распад. Проблема нейтрино . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                     | <b>246</b> |
| § 12.1. Особенности $\beta$ -спектров. Энергия $\beta$ -распада . . . . .                                                                                                                                                                                                                     | 246        |
| § 12.2. Могут ли существовать $\beta$ -частицы в ядрах? . . . . .                                                                                                                                                                                                                             | 248        |
| § 12.3. Энергетические условия $\beta$ -распада и процесс возникновения устойчивых ядер при $\beta$ -распаде. . . . .                                                                                                                                                                         | 249        |
| § 12.4. Опыты по обнаружению нейтрино. Изучение их свойств . . . . .                                                                                                                                                                                                                          | 252        |
| 12.4.1. О специфических особенностях опытов по изучению нейтрино (252). 12.4.2. Опыты Лейпунского и Аллена (253). 12.4.3. Опыт Рейнеса и Коуэна (254). 12.4.4. Опыт Дэвиса (255). 12.4.5. Двойной $\beta$ -распад (256). 12.4.6. Поиски солнечных нейтрино (258). 12.4.7. Опыт Спивака (259). |            |
| § 12.5. Элементы теории $\beta$ -распада Ферми . . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 259        |
| § 12.6. Разрешенные и запрещенные переходы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 265        |
| § 12.7. Правила отбора для $\beta$ -переходов. . . . .                                                                                                                                                                                                                                        | 266        |
| § 12.8. Связь между оболочечной структурой ядра и $\beta$ -распадом . . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 266        |
| § 12.9. Элементы $\beta$ -спектроскопии . . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 267        |
| § 12.10. Проблема несохранения четности в слабых взаимодействиях. . . . .                                                                                                                                                                                                                     | 270        |
| 12.10.1. Доказательства несохранения четности в слабых взаимодействиях (270). 12.10.2. Комбинированная четность (272). 12.10.3. Нарушение $CP$ -четности (274).                                                                                                                               |            |
| <b>Глава 13. Гамма-излучение ядер. . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                | <b>276</b> |
| § 13.1. Энергия $\gamma$ -излучения и его некоторые особенности . . . . .                                                                                                                                                                                                                     | 276        |
| § 13.2. Элементы теории $\gamma$ -излучения. . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 276        |
| § 13.3. Ядерная изомерия. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                             | 279        |
| § 13.4. Внутренняя конверсия . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                        | 283        |
| § 13.5. Корреляционные измерения в ядерной спектроскопии . . . . .                                                                                                                                                                                                                            | 286        |
| 13.5.1. Представление об угловых корреляциях (286). 13.5.2. Методика выполнения корреляционных измерений (287). 13.5.3. Определение моментов возбужденных состояний атомов ядер (288).                                                                                                        |            |
| § 13.6. Эффект Мёссбауэра . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                           | 289        |
| 13.6.1. Резонансное поглощение фотонов атомами и ядрами (289). 13.6.2. Ядерное резонансное поглощение без отдачи (292).                                                                                                                                                                       |            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 14. Ядерные реакции</b> .....                                                                                                                                                                                                                                         | 295 |
| § 14.1. Механизмы ядерных реакций .....                                                                                                                                                                                                                                        | 295 |
| § 14.2. Основные характеристики ядерных реакций .....                                                                                                                                                                                                                          | 296 |
| § 14.3. Составное ядро. ....                                                                                                                                                                                                                                                   | 300 |
| 14.3.1. Общие представления о компаунд-ядре (300). 14.3.2. Энергетические уровни составного ядра (305).                                                                                                                                                                        |     |
| § 14.4. Модель испарения .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 306 |
| § 14.5. Фотоядерные и электроядерные реакции .....                                                                                                                                                                                                                             | 307 |
| § 14.6. Оптическая модель .....                                                                                                                                                                                                                                                | 309 |
| § 14.7. Прямые ядерные реакции .....                                                                                                                                                                                                                                           | 310 |
| § 14.8. Внутриядерные процессы, идущие под действием частиц высокой энергии .....                                                                                                                                                                                              | 315 |
| <b>Глава 15. Деление атомных ядер. Трансурановые элементы</b> .....                                                                                                                                                                                                            | 320 |
| § 15.1. Деление ядер .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 320 |
| 15.1.1. Открытие деления ядер (320). 15.1.2. Основные закономерности реакции деления (322). 15.1.3. Интерпретация процесса деления на основе капельной модели ядра (326). 15.1.4. Свойства продуктов деления (329). 15.1.5. Механизм испускания запаздывающих нейтронов (330). |     |
| § 15.2. Трансурановые элементы .....                                                                                                                                                                                                                                           | 331 |
| 15.2.1. Об оболочечной структуре делящихся ядер (331). 15.2.2. Методы синтеза трансурановых элементов и некоторые их свойства (336).                                                                                                                                           |     |
| Литература к части IV .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 340 |

## **Часть V. Ядерная энергетика. Ядерное оружие**

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 16. Вводные сведения о современной ядерной энергетике, базирующейся на использовании делящихся изотопов</b> .....           | 341 |
| § 16.1. Проблемы развития мировой энергетики .....                                                                                   | 341 |
| § 16.2. Начальные стадии ядерного топливного цикла .....                                                                             | 343 |
| 16.2.1. Разведка, добыча и химическая переработка ядерного сырья (343). 16.2.2. Промышленные методы разделения изотопов урана (346). |     |
| § 16.3. Цепная реакция деления. ....                                                                                                 | 350 |
| <b>Глава 17. Ядерные реакторы</b> .....                                                                                              | 355 |
| § 17.1. Типы ядерных реакторов и особенности их работы .....                                                                         | 355 |
| § 17.2. Критический размер и критическая масса активной зоны. Влияние отражателя. ....                                               | 358 |
| § 17.3. Негативные явления, возникающие в процессе работы реактора .....                                                             | 360 |
| § 17.4. Ядерные реакторы базовой энергетики России .....                                                                             | 361 |
| 17.4.1. Реактор РБМК (361). 17.4.2. Реактор ВВЭР (361). 17.4.3. Реакторы на быстрых нейтронах (363).                                 |     |



|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 18. Термоядерные реакторы . . . . .                                                                        | 367 |
| § 18.1. Основные сведения о термоядерном синтезе . . . . .                                                       | 367 |
| § 18.2. Термоядерные реакторы, основанные на магнитном удержании плазмы . . . . .                                | 369 |
| § 18.3. Инерционные термоядерные реакторы . . . . .                                                              | 372 |
| Глава 19. Ядерное оружие . . . . .                                                                               | 376 |
| § 19.1. Предварительные замечания . . . . .                                                                      | 376 |
| § 19.2. Ядерные бомбы . . . . .                                                                                  | 376 |
| § 19.3. Водородные бомбы . . . . .                                                                               | 377 |
| § 19.4. Экологические последствия ядерной войны . . . . .                                                        | 379 |
| Литература к части V . . . . .                                                                                   | 382 |
| <br><b>Часть VI. Эволюция вселенной. Процессы образования ядер<br/>во внеземных условиях и в атмосфере Земли</b> |     |
| Глава 20. Космология — учение о Вселенной . . . . .                                                              | 383 |
| § 20.1. Структура Вселенной . . . . .                                                                            | 383 |
| § 20.2. Представление о космологии. Краткая история ее развития . . . . .                                        | 385 |
| § 20.3. Теоретические исследования Эйнштейна и Фридмана . . . . .                                                | 386 |
| § 20.4. Закон Хаббла . . . . .                                                                                   | 389 |
| § 20.5. Реликтовое излучение . . . . .                                                                           | 392 |
| § 20.6. О геометрии Вселенной . . . . .                                                                          | 393 |
| § 20.7. Суперсимметрия . . . . .                                                                                 | 395 |
| § 20.8. Теория струн . . . . .                                                                                   | 397 |
| § 20.9. Что мы знаем о темной материи и темной энергии? . . . . .                                                | 399 |
| 20.9.1. Темная материя (399). 20.9.2. Темная энергия (400).                                                      |     |
| § 20.10. О связи дополнительных измерений с темной энергией . . . . .                                            | 403 |
| Глава 21. Большой взрыв и эволюция ранней (горячей) Вселенной . . . . .                                          | 408 |
| § 21.1. Начальный период эволюции Вселенной . . . . .                                                            | 408 |
| § 21.2. Инфляционная стадия состояния Вселенной . . . . .                                                        | 409 |
| § 21.3. Электрослабая, адронная и лептонная эры. Дозвездный нуклеосинтез . . . . .                               | 411 |
| § 21.4. Образование атомов. Разделение вещества и излучения . . . . .                                            | 414 |
| § 21.5. О рождении Миров . . . . .                                                                               | 415 |
| Глава 22. Звездный период эволюции Вселенной. Нуклеосинтез в звездах . . . . .                                   | 416 |
| § 22.1. Протозвезды . . . . .                                                                                    | 416 |
| § 22.2. Диаграмма Герцшпрунга–Ресселя . . . . .                                                                  | 417 |
| § 22.3. Отрицательная теплоемкость звезд . . . . .                                                               | 418 |
| § 22.4. Солнце . . . . .                                                                                         | 419 |
| § 22.5. Белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры . . . . .                                                  | 423 |

|                                                                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 22.6. Массивные звезды . . . . .                                                                                                                       | 428        |
| § 22.7. Распространенность химических элементов в природе. Их происхождение. . . . .                                                                     | 431        |
| § 22.8. Возможная конечная судьба Вселенной. . . . .                                                                                                     | 438        |
| <b>Глава 23. Физические свойства космических лучей и процессы их трансформации в атмосфере . . . . .</b>                                                 | <b>440</b> |
| § 23.1. Важнейшие свойства первичного космического галактического излучения. . . . .                                                                     | 440        |
| § 23.2. Магнитное поле Земли и геомагнитные явления . . . . .                                                                                            | 444        |
| § 23.3. Качественное представление о процессах взаимодействия первичного космического галактического излучения (ГКЛ) в атмосфере Земли . . . . .         | 449        |
| § 23.4. Моделирование процессов прохождения космического излучения через атмосферу Земли . . . . .                                                       | 453        |
| 23.4.1. Исходные предпосылки расчета компонент космического излучения в атмосфере (453). 23.4.2. Моделирование процессов распространения нуклонов (454). |            |
| § 23.5. Моделирование процесса распространения ядер с $Z \geq 2$ . . . . .                                                                               | 458        |
| § 23.6. Энергетические, пространственные и угловые распределения нуклонов и ядер с $Z \geq 2$ космического происхождения в атмосфере Земли . . . . .     | 459        |
| 23.6.1. Протоны и нейтроны галактического происхождения (459).                                                                                           |            |
| 23.6.2. Протоны солнечного происхождения (464).                                                                                                          |            |
| Литература к части VI . . . . .                                                                                                                          | 471        |

## Часть VII. Элементы радиационной экологии

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 24. Воздействие ионизирующего излучения на организм человека</b>                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>473</b> |
| § 24.1. Эффекты воздействия радиации на человека . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                     | 473        |
| § 24.2. Величины, используемые для количественного описания радиационных эффектов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                    | 475        |
| 24.2.1. Поглощенная доза (475). 24.2.2. Линейная передача энергии и относительная биологическая эффективность (475). 24.2.3. Коэффициент качества и весовой множитель (476). 24.2.4. Эффективная и эквивалентная дозы. Тканевый весовой множитель (477). 24.2.5. Экспозиционная доза (478). 24.2.6. Коллективная доза (479).   |            |
| § 24.3. Последствия облучения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 481        |
| § 24.4. Рекомендуемые пределы дозы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 484        |
| <b>Глава 25. Аппаратура для дозиметрического контроля и методы защиты от ионизирующего излучения . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>486</b> |
| § 25.1. Дозиметрическая аппаратура . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 486        |
| 25.1.1. Классификация дозиметрических приборов (486). 25.1.2. Понятие электронного равновесия. Воздухоэквивалентные вещества (486). 25.1.3. Ионизационные газовые дозиметры (487). 25.1.4. Сцинтилляционные дозиметры (490). 25.1.5. Полупроводниковые дозиметры (492). 25.1.6. Использование фотоэмульсий в дозиметрии (493). |            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 25.2. Защита от ионизирующего излучения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 493        |
| 25.2.1. Рекомендации общего характера. Простейшие способы защиты (493). 25.2.2. Защита от $\gamma$ -излучения (493). 25.2.3. Защита от нейтронов (495). 25.2.4. Оптимизация двуслойной защиты от изотопных источников нейтронов (495). 25.2.5. Защита, основанная на введении в организм препаратов (497).                                                                                                                        |            |
| <b>Глава 26. Уровни облучения, создаваемые ионизирующим излучением различного происхождения. . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>499</b> |
| § 26.1. Исходные замечания об уровнях радиации различного происхождения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 499        |
| § 26.2. Дозное поле, создаваемое на поверхности Земли естественными источниками ионизирующего излучения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 499        |
| § 26.3. Дозное поле в тропосфере и нижней стратосфере . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 501        |
| § 26.4. Проблема радона . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 504        |
| § 26.5. Технологически повышенный естественный радиационный фон . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 506        |
| 26.5.1. Угольные тепловые электростанции (506). 26.5.2. Промышленное использование продуктов переработки фосфоритов (507). 26.5.3. Строительные материалы (507). 26.5.4. Предметы широкого потребления (508). 26.5.5. Радон в домах (509). 26.5.6. Дозовые нагрузки, получаемые человеком при авиационных перевозках (509).                                                                                                       |            |
| § 26.6. Искусственные источники ионизирующего излучения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 515        |
| 26.6.1. Общие представления об искусственных источниках ионизирующего излучения (515). 26.6.2. Профессиональное облучение на различных стадиях ядерного топливного цикла (516). 26.6.3. Радиоактивное загрязнение внешней среды при производстве ядерной энергии (517). 26.6.4. Облучение населения в медицинских целях (517). 26.6.5. Радиоактивное загрязнение окружающей среды в результате ядерных взрывов в атмосфере (518). |            |
| § 26.7. Сводные данные о масштабах радиоактивных воздействий на человека                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 520        |
| § 26.8. Радиационный контроль воздушного пространства, связанный с испытаниями ядерного оружия в атмосфере . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 520        |
| Литература к части VII. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 526        |
| <br>Приложение А. Краткий обзор работ по созданию атомного и термоядерного оружия в некоторых технологически развитых странах. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <br>528    |
| Приложение Б. Соотношение между высотой $H$ и глубиной остаточной атмосферы $h$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 541        |
| Приложение В. $\delta$ -функция Дирака. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 543        |
| Приложение Г. Расчет нуклонной компоненты . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 545        |
| Приложение Д. Расчет ядерной компоненты. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 549        |
| Приложение Е. Примерные значения некоторых физических констант и единиц . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 551        |
| Приложение Ж. Карта расположения зон проведения ядерных взрывов . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 552        |
| Литература к приложениям. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 553        |
| <br>Заключение. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <br>554    |
| Предметный указатель . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 556        |

# Часть I

## МИР СУБАТОМНЫХ ЧАСТИЦ

---

### Глава 1

#### НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СУБАТОМНЫХ ЧАСТИЦАХ

##### § 1.1. Определение субатомных частиц

Субатомные частицы подразделяются на атомные ядра и элементарные частицы [8]. Атомное ядро представляет собой систему из связанных между собой ядерными силами протонов и нейтронов, обобщенно называемых нуклонами<sup>1)</sup> (о свойствах ядерных сил речь пойдет ниже). Протон обладает положительным электрическим зарядом  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл  $= 4,80 \cdot 10^{-10}$  ед. СГСЭ и массой равной  $1836m_e$  ( $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг  $= 9,11 \cdot 10^{-28}$  г. Нейтрон электрически нейтрален и имеет массу  $1839m_e$ , т.е. массы протона и нейтрона очень близки между собой. Число протонов в ядре совпадает с порядковым (атомным) номером соответствующего элемента  $Z$ . Величина  $Ze$  равна заряду атомного ядра. Суммарное число протонов и нейтронов в атомном ядре  $A = N + Z$  ( $N$  — число нейтронов) называется *массовым числом*. Число электронов в нейтральном атоме равно  $Z$ . Химические свойства атома, принадлежащего к данному химическому элементу, определяются не атомной массой (или массовым числом), а именно атомным номером  $Z$ . Поскольку масса протона и нейтрона значительно превышает массу электрона, подавляющая часть атома приходится на массу ядра.

Согласно общепринятой терминологии конкретный атом с данным числом протонов и нейтронов в ядре называют *нуклидом*<sup>2)</sup>. Нуклиды с одинаковым  $Z$ , но разными  $A$ , называются *изотопами*. Из понятий «нуклид» и «атом» первое является более «узким» в том смысле, что в многоизотопном элементе оно относится лишь к одному определенному изотопу. Нуклид (или ядро) обозначается записью вида  ${}_Z^AX$ , где  $X$  — химический символ элемента с данным  $Z$ . Поскольку атомный номер однозначно определяется названием элемента, то индекс  $Z$  не является необходимым. Например, нуклид углерода с  $A = 12$  обозначается  ${}^{12}_6\text{C}$  или  ${}^{12}\text{C}$  (или в строчном варианте — углерод-12).

---

<sup>1)</sup> Нуклон — производное от английского слова «nucleus» — ядро.

<sup>2)</sup> В литературе встречается и следующее определение: нуклид — ядро с определенными значениями  $A$  и  $Z$ . Мы будем придерживаться первого определения.

Элементарная частица может быть определена как микрообъект, который невозможно расщепить на более элементарные микрообъекты (это определение нуждается в дальнейших уточнениях, которые будут даны ниже). Элементарная частица выступает в качестве единого целого, сохраняя свою индивидуальность в составе любых сложных микросистем — атомов, молекул и пр.

## § 1.2. Представление о фундаментальных взаимодействиях

В мире существует четыре фундаментальных взаимодействия: электромагнитное, гравитационное, сильное (ядерное) и слабое. В явлениях, изучаемых в атомной физике, доминирующую роль играют силы электромагнитной природы, тогда как в субатомной физике исследуются явления, в которых проявляются также силы, обусловленные ядерными и слабыми взаимодействиями. В отличие от дальнедействующих электромагнитных и гравитационных сил, действие которых проявляется на любом расстоянии от источника силы, ядерные и слабые силы являются близкодействующими; первые проявляются на расстоянии  $R$  порядка  $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ , а вторые —  $10^{-18} \text{ м} = 10^{-16} \text{ см}$ . Впервые о существовании близкодействующих ядерных сил стало известно из опытов Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц на тонких фольгах.

Характеристикой фундаментального взаимодействия является безразмерная константа взаимодействия  $\alpha$ . Для сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий приближенные значения константы  $\alpha$  равны соответственно  $1$ ,  $3,7 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-38}$ . По причине чрезвычайной малости константы гравитационных взаимодействий в субатомной физике последними обычно пренебрегают. Роль гравитационных сил начинает играть заметную роль лишь в процессах при ультравысоких энергиях.

## § 1.3. Важнейшие отличительные черты субатомных систем

### 1.3.1. О внесистемной единице электронвольт и ее производных.

В дальнейшем мы будем широко применять общепринятую в микрофизике внесистемную единицу энергии — электронвольт (эВ). 1 эВ равен энергии, которую приобретает частица, обладающая элементарным зарядом  $e$ , пройдя ускоряющую разность потенциалов в 1 В:  $1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,60 \times 10^{-12} \text{ эрг}$ .

Используются и большие единицы энергии, кратные электронвольту:

$$1 \text{ килоэлектронвольт (кэВ)} = 10^3 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-16} \text{ Дж} = 1,60 \cdot 10^{-9} \text{ эрг};$$

$$1 \text{ Мегаэлектронвольт (МэВ)} = 10^6 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,60 \cdot 10^{-6} \text{ эрг};$$

$$1 \text{ Гигаэлектронвольт (ГэВ)} = 10^9 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ эрг};$$

$$1 \text{ Тераэлектронвольт (ТэВ)} = 10^{12} \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 1,60 \cdot 10^0 \text{ эрг}.$$

**1.3.2. Сравнение свойств атомных и субатомных систем.** Между субатомными и атомными объектами существует много общих черт. Так, те и другие обладают двойственной корпускулярно-волновой природой, т. е. являются частицами с квантовыми свойствами. Поэтому многие идеи и методы квантовой механики с успехом используются как в физике атомного ядра, так и в физике элементарных частиц.

При анализе состояний субатомных объектов используются приемы, символика и терминология, заимствованные из атомной спектроскопии.

Подобно атомным системам атомные ядра обладают дискретным энергетическим спектром, их состояния характеризуются определенными наборами квантовых чисел. Для описания ряда свойств элементарных частиц вводятся аналогичные безразмерные наборы чисел.

С методологической точки зрения атомные и субатомные системы объединяет то, что свойства микрочастиц одного типа в некоторых случаях можно определить по свойствам микрочастиц другого типа. Например, разработаны методы определения магнитных моментов ядер по спектрам атомов или молекул; зная точную массу атома можно определить энергию связи его ядра и пр.

Однако имеются и существенные различия между атомными и субатомными системами. В атоме ядро является источником кулоновского поля, удерживающего атомные электроны. В ядре нет подобного физически выделенного центра — источника поля, действующего на нуклоны.

Известно также, что изолированный атом устойчив и самопроизвольно не распадается. С другой стороны, известно огромное количество нестабильных ядер и элементарных частиц.

Энергии связи нуклонов в атомных ядрах на много порядков превышают энергии связи электронов атома. Например, энергия связи легкого ядра  ${}^7_3\text{Li}$  равна 39,2 МэВ, а тяжелого ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$  составляет 1801,7 МэВ, что приблизительно в 4500 раз больше энергии связи электронов атома урана. Средняя энергия связи нуклона в ядре равна 8 МэВ. Сравнивая это значение с энергией связи внешнего электрона атома (1–10 эВ) видно, что возможное энерговыделение в ядерных реакциях по крайней мере на шесть порядков должно превышать энерговыделение в химических реакциях.

**1.3.3. О состоянии теории микрочастиц.** На атомном уровне определяющую роль играют, как мы знаем, электромагнитные взаимодействия. Поэтому в атомной физике широко применяется квантовая электродинамика. В настоящее время квантовая электродинамика является наиболее точной теорией явлений, происходящих в мире атомов. Она позволяет описывать строение атомных систем и процессы испускания и поглощения ими электромагнитного излучения. Точность предсказания этой теории является рекордной (порядка  $10^{-9}$ – $10^{-10}$ ). Справедливость квантовой электродинамики подтверждается огромным наблюдательным материалом [6].

Существенно сложнее обстоит дело с теоретическим описанием явлений и процессов в мире ядер и элементарных частиц, так как при создании теорий на субатомном уровне необходимо учитывать все три перечисленных

выше типа фундаментальных взаимодействий — электромагнитного, сильного и слабого.

Одна из трудностей создания полноценной теории связанных состояний системы нуклонов — теории атомного ядра — состоит в том, что потенциал поля ядерных сил до сих пор неизвестен. Эта трудность преодолевается путем введения различных модельных представлений.

В физике элементарных частиц существуют еще большие теоретические трудности, связанные в определенной степени с многочисленностью их превращений. Единой теории, охватывающей все аспекты физики элементарных частиц, не существует. Теоретические разработки идут в нескольких направлениях.

Так, следует отметить как большое достижение создание теории электро-слабого взаимодействия, объединившей описания слабого и электромагнитного взаимодействий. Ее составной частью является квантовая электродинамика. Многие предсказания теории электрослабого взаимодействия получили экспериментальное подтверждение.

Наиболее успешной на сегодня теорией, описывающей структуру частиц, участвующих в сильных взаимодействиях, является квантовая хромодинамика, построенная в значительной степени по образцу квантовой электродинамики. Квантовая хромодинамика позволила с единой точки зрения объяснить практически все эмпирические наблюдения, связанные с сильными взаимодействиями. Многие ее предсказания были подтверждены экспериментально. Однако все конкретные расчеты, выполненные в рамках этой теории, содержат многочисленные модельные допущения. Квантовая хромодинамика, находящаяся в стадии развития, пока является по существу феноменологической теорией.

Предпринимаются попытки создания так называемого Великого объединения — Grand Unification (GU) — теории, объединяющей сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия. Исходное предположение Великого объединения состоит в том, что все три вида перечисленных взаимодействий имеют единую природу. Установлено, что с ростом энергии различие констант  $\alpha$  сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий уменьшается и при энергиях  $10^{15}$ – $10^{16}$  ГэВ их значения «сбегаются» к общей константе  $\alpha_{GU} \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$ . К настоящему времени создано несколько теоретических моделей Великого объединения. Наконец, следует упомянуть о суперструнной теории и ее модификации, М-теории, разрабатываемой в настоящее время, которой многие теоретики пророчат статус всеобъемлющей единой теории [2, 5].

Согласно приведенному краткому обзору создание полноценной теории субатомных систем — дело будущего.

**1.3.4. Роль законов сохранения в субатомной физике.** При рассмотрении взаимодействий между субатомными частицами наряду с точными законами сохранения (энергии, импульса, момента импульса и пр.) применяют всевозможные приближенные, или вернее сказать, ограниченные определенными видами взаимодействия, законы сохранения, играющие в субатом-

ной физике исключительно важную роль. Это связано в первую очередь с отсутствием, как указывалось, удовлетворительных теорий атомного ядра и элементарных частиц; использование многочисленных законов сохранения как бы «компенсирует» отсутствие таких теорий.

Вспомним также, что многие субатомные частицы неустойчивы. Однако рассматривать превращения систем удобно, опираясь на нечто, не подверженное изменениям. Такую «опорную точку» в мире субатомной физики часто и обеспечивают законы сохранения.

Законы сохранения тесно связаны с симметрией того или иного вида (см. текст петитом). В микрофизике законы сохранения связываются с симметрией определенного типа, что облегчает интерпретацию и осмысливание явлений. Все объединенные теории микрочастиц используют раздел математики — теорию групп, которая описывает операции симметрии.

Между симметрией физических систем и законами сохранения существует тесная связь. Согласно весьма общей теореме Непер, если свойства системы не меняются от какого-либо преобразования переменных, то этому соответствует некоторый закон сохранения. Отсюда следует, что наличие симметрии в системе обуславливает существование для нее сохраняющихся физических величин, поэтому, зная свойства симметрии системы, можно отыскать для этой системы соответствующие им законы сохранения.

Так, инвариантность действия для системы относительно сдвигов времени (что соответствует представлению о его однородности) обуславливает согласно теореме Непер закон сохранения энергии. Из инвариантности действия по отношению к пространственным сдвигам (что отвечает представлению об однородности пространства) следует закон сохранения импульса. Аналогично из равноценности всех пространственных направлений и связанной с этим инвариантности действия относительно вращения системы координат в пространстве (т. е. из изотропии пространства) вытекает закон сохранения момента импульса.

Если в системе существуют симметрии, не связанные с пространством — времени, то теорема Непер позволяет установить и другие сохраняющиеся величины. Примером является электрический заряд, с которым можно связать так называемое зарядовое преобразование симметрии.

**1.3.5. Характерные значения энергий, расстояний и времен жизни в субатомной физике.** Нижняя граница энергии некоторых частиц, рассматриваемых в субатомной физике, может быть сравнительно низкой. Например, согласно существующей в нейтронной физике классификации нейтронов по энергиям, минимальной энергией обладают холодные нейтроны ( $W < 0,01$  эВ). Для сравнения напомним, что энергии связи внешних атомных электронов имеют порядки 1–10 эВ (а скорости этих частиц приближенно равны  $\alpha c \ll c$ )<sup>1)</sup>. Поскольку случаи, когда скорости ядер и элементарных

---

<sup>1)</sup> В § 4.3 [1] показано, что между постоянной тонкой структуры (константой электромагнитного взаимодействия)  $\alpha = e/\hbar c$  и скоростью орбитального движения электрона атома водорода  $v$  существует простая связь  $\alpha = v/c$  (формула 4.20), где  $c$  — скорость света в пустоте. Численное значение  $\alpha$  равно  $1/137$ , т. е.  $\alpha \ll 1$ . Следовательно,  $v = \alpha c \ll c$ . Это неравенство выполняется и для скорости внешних электронов более сложных атомов.



частиц значительно меньше  $c$ , достаточно многочисленны, то в субатомной физике находит применение нерелятивистская квантовая механика. Так, теория простейшего многонуклонного ядра — дейтрона основана на решении уравнения Шредингера.

Однако для субатомной физики более типичны скорости частиц, существенно превышающие значение  $\alpha c$ . Например, скорость нуклонов в ядре имеет порядок  $10^9$  см/с  $\gg \alpha c$ . Взаимодействия элементарных частиц в большом числе случаев происходят при релятивистских скоростях. По отмеченным причинам теория относительности играет в субатомной физике выдающуюся роль.

Естественный верхний предел энергии в субатомной физике не известен. По мере развития экспериментальной техники устанавливаются все более высокие значения энергии, приходящейся на одну микрочастицу. Наиболее высокоэнергичные частицы зарегистрированы в составе космического излучения. Их энергия достигает  $10^{18}$ – $10^{21}$  эВ. Существенно меньше максимальная энергия на частицу, полученная человеком. Например, на ускорителе LHC (CERN, Швейцария) максимальная энергия ускоренных протонов равна  $7000 \text{ ГэВ} = 7 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ <sup>1)</sup>.

Явления, рассматриваемые в субатомной физике, происходят на расстояниях, не превосходящих размера атома, имеющего, как известно, порядок  $10^{-8}$  см. Каких-либо естественных значений нижней границы расстояний в субатомной физике до сих пор не установлено. По мере совершенствования техники эксперимента минимальные расстояния, доступные измерению, становятся все меньше. В настоящее время такие расстояния имеют порядок  $10^{-16}$  см.

В субатомной физике широко применяется внесистемная единица расстояний — ферми (Фм).

$$1 \text{ Фм} = 10^{-13} \text{ см},$$

близкая по порядку величины к размерам ядер, равным  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  см (§ 7.3). Размеры нуклонов также равны приблизительно  $10^{-13}$  см. Длина 1 Фм может считаться наиболее характерным расстоянием для мира субатомной физики.

Шкала расстояний тесно связана со шкалой времени. Важное масштабное понятие субатомной физики *характерное время (время пролета)* определяется как время, необходимое для пролета одной частицы определенной энергии сквозь другую. Полагая скорость нуклона в ядре  $v = 10^9$  см/с, а размер ядра  $R \sim 10^{-13}$  см, получим, что характерное ядерное время имеет порядок

$$\tau_{\text{ядерн}} = R/v = 10^{-22} \text{ с}.$$

---

<sup>1)</sup> Ускоритель LHC является коллайдером, т.е. ускорителем на встречных пучках. Приведенное значение энергии протонов относится лишь к одному из сталкивающихся пучков (подробнее этот вопрос рассматривается в гл. 5).

Для процессов, связанных с превращением ядер, большими могут считаться времена  $t \gg \tau_{\text{ядерн}} = 10^{-22}$  с и малыми  $t < \tau_{\text{ядерн}}$ .

Для релятивистских элементарных частиц ( $v \sim c$ ), имеющих размер порядка  $10^{-13}$  см, характерное время равно

$$\tau_{\text{эле}} = 3 \cdot 10^{-24} \text{ с.}$$

В физике элементарных частиц естественный масштаб времени определяется обычно временем  $\tau_{\text{эле}}$ .

Принято подразделять ядра на легкие ( $A < 50$ ), средние  $50 < A < 100$  и тяжелые ( $A > 100$ ), хотя границы соответствующих интервалов весьма условны.

## Глава 2

# ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### § 2.1. Классификация элементарных частиц

В табл. 2.1 приведена сводка ряда важных физических характеристик элементарных частиц, включающая массу  $m$ , электрический заряд  $Q$ , спин  $I$  и среднее время жизни  $\tau$  [5, 7].

Первая группа представлена фотоном — частицей с нулевой массой покоя, которая согласно квантовой электродинамике является квантом электромагнитного поля. Спин фотона равен 1, поэтому он является бозоном.

Напомним, что атомные ядра и элементарные частицы подразделяются на так называемые бозоны и фермионы. Первые описываются квантовой статистикой Бозе–Эйнштейна, их волновые функции симметричны; вторые описываются квантовой статистикой Ферми–Дирака, их волновые функции антисимметричны. У бозонов спины целые (включая 0), у фермионов — полуцелые (см. § 7.7, табл. 7.3).

Вторая группа представлена лептонами<sup>1)</sup>. У нейтрино трех видов, входящих в эту группу, масса покоя, по-видимому, равна нулю (или очень невелика), у остальных она меняется в энергетической шкале от 0,511 МэВ (электрон) до  $\approx 1800$  МэВ (тау-мезон). Электрический заряд всех нейтрино равен нулю, у остальных лептонов по абсолютной величине — единице. Все лептоны обладают спином 1/2, поэтому они являются фермионами. Лептоны и фотоны не участвуют в сильных взаимодействиях.

В состав третьей группы входят частицы, называемые адронами<sup>2)</sup>, они участвуют в сильных взаимодействиях и подразделяются на два класса: барионов<sup>3)</sup> и мезонов<sup>4)</sup>. Барионам приписывается квантовое число  $B$ , называемое также *барионным зарядом*. Для барионов  $B = 1$ , для антибарионов  $B = -1$ , для мезонов (и для всех остальных частиц) барионный заряд равен нулю. Более подробно представление о барионном заряде рассматривается в § 7.2.

---

<sup>1)</sup> Термин «лептон» происходит от греческого слова «лертос» — легкий.

<sup>2)</sup> Термин «адрон» происходит от греческого слова «адрос», означающий «крепкий» или «сильный».

<sup>3)</sup> Термин «барион» происходит от греческого слова «барис», означающий тяжелый.

<sup>4)</sup> Термин «мезон» происходит от греческого слова «мезо» — средний, промежуточный.

Таблица 2.1

Классификация элементарных частиц

| Группа  | Название       | Символ      |                   | Масса в единицах массы покоя электрона $m_e$ | Энергия покоя $E$ , МэВ | Электрический заряд в единицах $ e $ | Спин $I$ в единицах $\hbar$ | Среднее время жизни $\tau$ , в секундах |
|---------|----------------|-------------|-------------------|----------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
|         |                | Частица     | Античастица       |                                              |                         |                                      |                             |                                         |
| Лептоны | Фотон          | $\gamma$    |                   | 0                                            | 0                       | 0                                    | 1                           | Стабилен                                |
|         |                | $\nu_e$     | $\bar{\nu}_e$     | $\sim 0$                                     | $\sim 14$ эВ            | 0                                    | 1/2                         | Стабильны                               |
|         |                | $e^-$       | $e^+$             | 1                                            | 0,511                   | 1                                    | 1/2                         | «                                       |
|         |                | $\nu_\mu$   | $\bar{\nu}_\mu$   | $\sim 0$                                     | $\sim 0$                | $\sim 0$                             | 1/2                         | «                                       |
|         |                | $\mu^-$     | $\mu^+$           | 206,8                                        | 105,7                   | 1                                    | 1/2                         | $2,20 \cdot 10^{-6}$                    |
|         |                | $\nu_\tau$  | $\bar{\nu}_\tau$  | $\sim 0$                                     | $\sim 0$                | 0                                    | 1/2                         | Стабильны                               |
| Мезоны  | Тау-мезоны     | $\tau^-$    | $\tau^+$          | 3491                                         | 1784                    | 1                                    | 1/2                         | $3,5 \cdot 10^{-12}$                    |
|         |                | $\pi^0$     |                   | 264,1                                        | 135,0                   | 0                                    | 0                           | $0,83 \cdot 10^{-16}$                   |
|         | Пионы          | $\pi^-$     | $\pi^+$           | 273,1                                        | 139,6                   | 1                                    | 0                           | $2,60 \cdot 10^{-8}$                    |
|         |                | $K^+$       | $K^-$             | 966,1                                        | 493,7                   | 1                                    | 0                           | $1,24 \cdot 10^{-8}$                    |
|         |                | $K^0$       | $\bar{K}^0$       | 973,9                                        | 497,7                   | 0                                    | 0                           | $5,8 \cdot 10^{-8}$                     |
|         | Эта-ноль-мезон | $\eta^0$    |                   | 1074                                         | 548,8                   | 0                                    | 0                           | $2,4 \cdot 10^{-19}$                    |
|         |                | $B^+$       | $B^-$             | 5279                                         | —                       | 1                                    | 0                           | $1,6 \cdot 10^{-12}$                    |
|         | $B$ -мезоны    | $B^0$       | $\bar{B}^0$       | 5279                                         | —                       | 0                                    | 0                           | $1,5 \cdot 10^{-12}$                    |
|         |                | $p$         | $p^-$             | 1836,15                                      | 938,28                  | 1                                    | 1/2                         | Стабильны                               |
|         | Нейтроны       | $n$         | $\bar{n}$         | 1838,68                                      | 939,55                  | 0                                    | 1/2                         | 886                                     |
|         |                | $\Lambda^0$ | $\bar{\Lambda}^0$ | 2183,2                                       | 1115,6                  | 0                                    | 1/2                         | $2,63 \cdot 10^{-10}$                   |
| Адроны  | Протоны        | $\Sigma^+$  | $\bar{\Sigma}^+$  | 2327,5                                       | 1189,4                  | 1                                    | 1/2                         | $0,80 \cdot 10^{-10}$                   |
|         |                | $\Sigma^0$  | $\bar{\Sigma}^0$  | 2333,6                                       | 1192,5                  | 0                                    | 1/2                         | $5,8 \cdot 10^{-20}$                    |
|         |                | $\Sigma^-$  | $\bar{\Sigma}^-$  | 2343,1                                       | 1197,3                  | 1                                    | 1/2                         | $1,48 \cdot 10^{-10}$                   |
|         |                | $\Xi^0$     | $\bar{\Xi}^0$     | 2573,2                                       | 1314,9                  | 0                                    | 1/2                         | $2,9 \cdot 10^{-10}$                    |
|         |                | $\Xi^-$     | $\bar{\Xi}^-$     | 2585,7                                       | 1321,3                  | 1                                    | 1/2                         | $1,65 \cdot 10^{-10}$                   |
|         | Гипероны       | $\Omega^-$  | $\bar{\Omega}^+$  | 3272,7                                       | 1672                    | 1                                    | 3/2                         | $1,32 \cdot 10^{-10}$                   |