

## ГЛАВА VIII

# СПИН И ТОЖДЕСТВЕННОСТЬ ЧАСТИЦ

### § 59. Спин элементарных частиц

До сих пор мы предполагали, что состояние отдельной микрочастицы задано, если известны три ее координаты или три проекции импульса или вообще три величины, образующие полный набор. Оказалось, что целый ряд экспериментальных фактов указывает на существование у ряда микрочастиц, например у электронов, протонов, нейтронов, специфической внутренней степени свободы. С этой внутренней степенью свободы, связан некоторый собственный механический момент частицы, не зависящий от ее орбитального движения. Этот механический момент частицы получил название спина (от английского слова *to spin* — вращаться). Существование у электрона спина было установлено еще до создания квантовой механики. Были сделаны попытки интерпретировать спин как проявление вращения частицы вокруг собственной оси (отсюда и его название). Однако такая классическая трактовка оказалась несостоятельной. Все попытки получить правильное значение отношения между механическим и магнитным моментом для системы распределенного вращающегося заряда, оказались безуспешными. Что же касается модели твердого вращающегося шарика (для которой можно получить любое значение этого отношения), то, как было пояснено в § 13 ч. II, такая модель противоречит общим положениям теории относительности. Разрешение этого противоречия было найдено в квантовой механике. Как мы увидим ниже, внутренняя степень свободы и связанный с ней спин имеют специфически квантовый характер. При переходе к классической механике  $\hbar \rightarrow 0$  спин обращается в нуль. Поэтому спин не имеет никаких классических аналогов и не допускает интерпретации классического характера. Первоначально гипотеза о существовании спина была выдвинута в связи с расшифровкой спектров щелочных металлов. Позднее был установлен целый ряд фактов, позволивших однозначно установить правильность этой гипотезы.

В опытах Штерна и Герлаха непосредственно наблюдался магнитный момент, не связанный с орбитальным движением

электронов. Именно в этих опытах было установлено, что если через неоднородное магнитное поле пропускать пучок атомов водорода, находящихся в  $S$ -состоянии, то этот пучок расщепляется на два. Между тем в  $S$ -состоянии орбитальный механический момент, а следовательно и орбитальный магнитный момент, отсутствует, и пучок должен был бы проходить магнитное поле, не испытывая никакого отклонения.

Двукратное расщепление свидетельствует о двух возможных ориентациях магнитного момента электрона. По величине расщепления можно определить значение спинового магнитного момента.

Прямые опыты, проведенные Эйнштейном и де Гаазом, позволили определить отношение собственного механического и магнитного моментов.

Спин электрона (собственный механический момент) обладает общими свойствами квантовомеханического момента, которые были разобраны в § 51. Строго это было доказано с помощью аппарата теории групп. В частности, собственное значение оператора квадрата спинового момента  $\hat{s}^2 = \hat{s}_x^2 + \hat{s}_y^2 + \hat{s}_z^2$  выражается формулой

$$s(s+1)\hbar^2, \quad (59,1)$$

где через  $s$  мы обозначили соответствующее квантовое число — внутреннее или спиновое квантовое число частицы. Часто это квантовое число кратко именуют величиной спина частицы.

Число возможных проекций спина на произвольно ориентированную ось  $z$  равно  $2s + 1$ . Значение внутреннего числа  $s$  для той или иной элементарной частицы должно быть определено на опыте. Для электрона существование и величина спина строго вытекают из релятивистской квантовой механики (теории Дирака), изложению которой будет посвящена гл. XV.

Спин наиболее часто встречающихся элементарных частиц равен: электронов  $s = \frac{1}{2}$ , протонов и нейтронов  $s = \frac{1}{2}$ ,  $\pi$ -мезонов  $s = 0$ ,  $\mu$ -мезонов  $s = \frac{1}{2}$ . Это означает, что возможные значения проекций спинового момента на произвольно ориентированную в пространстве ось равны, например, для электрона и других частиц со спином  $1/2$

$$s_z = \pm \frac{\hbar}{2}. \quad (59,2)$$

Соответствующие проекции собственного магнитного момента электрона, как следует из опыта Штерна и Герлаха, равны по абсолютной величине магнетону Бора  $\mu_0$

$$\mu_z = \mp \frac{|e|\hbar}{2mc} = \mp \mu_0. \quad (59,3)$$

Весьма существенно, что отношение собственного магнитного момента к спиновому механическому моменту равно  $e/mc$

$$\mu = \frac{e}{mc} s, \quad (59,4)$$

в то время как для орбитального движения это отношение вдвое меньше (см. § 63).

В § 118 мы покажем, что такая величина собственного магнитного момента также может быть выведена теоретически из релятивистского волнового уравнения Дирака.

Спиновые свойства элементарных частиц играют огромную роль как в области микроявлений, так и в поведении макроскопических тел. Последнее обстоятельство связано с тем, что спин непосредственно определяет статистические свойства систем, построенных из квантовых частиц.

## § 60. Операторы спина

Хотя, как мы увидим ниже, существование у электрона спина и все связанные с ним свойства могут быть установлены теоретически из положений релятивистской квантовой механики, ряд свойств частиц со спином может быть получен и без привлечения релятивистской теории, на основании общих квантовомеханических соображений и сравнительно небольшого числа экспериментальных фактов. Поскольку такая полуэмпирическая теория частиц со спином имеет достаточно простой характер и позволяет получить важные результаты, мы остановимся ниже на ее изложении.

Волновая функция частицы со спином будет зависеть не только от ее трех пространственных координат, но и от четвертой координаты, характеризующей внутреннее состояние частицы. В качестве последней можно выбрать величину проекции спина на произвольно ориентированную в пространстве ось  $z$ . Тогда волновую функцию можно написать в виде

$$\psi = \psi(x, s_z, t). \quad (60,1)$$

В отличие от пространственных координат  $x$ , «спиновая координата»  $s_z$  принимает лишь дискретный ряд значений. Число возможных значений  $s_z$  определяется свойствами данной элементарной частицы. Как было упомянуто выше, спин большинства элементарных частиц равен половине. Поскольку проекция спина при этом может принимать только два значения, волновую функцию (60,1) удобно записать в виде столбца с двумя