

М., 1985; Мория Т., Последние достижения теории магнетизма коллективизированных электронов, «УФН», 1981, т. 135, с. 117. И. В. Свечкарёв.

ПАУЛИ ПРИНЦИП — фундам. закон природы, заключающийся в том, что в квантовой системе две тождественные частицы с полуцелым спином не могут одновременно находиться в одном состоянии. Сформулирован в 1925 В. Паули для электронов в атоме и назван им *принципом запрета*, затем распространён на любые фермионы. В 1940 Паули показал, что принцип запрета — следствие существующей в квантовой теории поля связи спина и статистики; частицы с полуцелым спином подчиняются *Ферми — Дирака статистике*, поэтому волновая ф-ция системы одинаковых фермионов должна быть антисимметричной относительно перестановки любых двух фермионов; отсюда и следует, что в одном состоянии может находиться не более одного фермиона.

П. п. сыграл решающую роль в понимании закономерностей заполнения электронных оболочек атома, послужил исходным пунктом для объяснения атомных и молекулярных спектров. Фундаментальна роль П. п. в квантовой теории твёрдого тела и атомного ядра, а также в теории ядерных реакций и реакций между элементарными частицами.

Естественный для физики вопрос о том, с какой точностью П. п. подтверждается опытом, для самой своей постановки требует пересмотра ряда осн. положений квантовой теории. Такой альтернативной непротиворечивой схемы построить не удалось, и поэтому вообще нельзя говорить о количеств. характеристике отклонений от П. п. В рамках совр. представлений физики вынуждены считать, что П. п. является абсолютно строгим.

Лит.: Lüders G., Zumino B., Connection between spin and statistics, «Phys. Rev.», 1958, v. 110, p. 1450; Теоретическая физика 20 века. Памяти В. Паули. Переводы, М., 1962; Стритер Р., Вайтман А. С., РСТ, спин и статистика и всё такое, пер. с англ., М., 1966; Паули В., Физические очерки, Сб. ст., [пер. с англ.], М., 1975, с. 65; егo же, Труды по квантовой теории, [пер. с нем.], т. 1—2, М., 1975—77; Фейнман Р., Почему существуют античастицы, пер. с англ., «УФН», 1969, т. 157, с. 163. Л. В. Окунь, В. П. Павлов.

ПАУЛИ ТЕОРЕМА — устанавливает связь спина со статистикой (В. Паули, 1940) и утверждает, что поля, описывающие частицы с целым спином, квантуются по Бозе — Эйнштейну, а с полуцелым — по Ферми — Дираку. Соответственно все частицы подразделяются на бозоны и фермионы. П. т. фиксирует характер перестановочных соотношений между операторами рождения и уничтожения частиц: бозонные операторы связаны отношениями коммутации, фермионные — антикоммутируют. Из-за возможности взаимного превращения частиц операторы рождения и уничтожения разл. фермионов также следует считать антикоммутирующими. П. т. обосновывает принцип запрета Паули нерелятивистской квантовой механики — невозможность нахождения двух электронов в одном и том же квантовом состоянии. Доказательство П. т. основывается на условиях *микропричинности*, а именно: использует независимость операторов полей в точках, разделённых пространственноподобным интервалом. При этом важна локальность квантовой теории поля (КТП). При формулировке КТП с помощью *функционального интеграла* П. т. заставляет описывать поля с полуцелым спином грассмановыми (антикоммутирующими) числами (см. *Грассмана алгебра*).

На первый взгляд П. т. делает невозможным симметричное описание частиц с целыми и полуцелыми спинами. Такое описание становится, однако, возможным при введении наряду с обычной пространственно-временной координатой x_μ ($\mu = 0, 1, 2, 3$) грассмановых координат θ . Коэф. разложения поля (*суперполя*) $S(x, \theta)$ в ряд по θ являются бозонными и фермионными полями. Простейший пример отвечает одной грассмановой переменной. При этом суперполе $S(x, \theta)$ имеет вид $S(x, \theta) = \varphi(x) + \theta\psi(x)$. Ряд по θ обрывается, т. к. $\theta^2 = 0$. Компоненты суперполя φ и ψ описыва-

ют соответственно бозон и фермион. Бозонно-фермионная симметрия получила назв. *суперсимметрии*.

Лит.: Паули В., Релятивистская теория элементарных частиц, пер. с англ., М., 1947; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию квантованных полей, 4 изд., М., 1984. М. И. Высоцкий.

ПАУЛИ УРАВНЕНИЕ — ур-ние нерелятивистской квантовой механики, описывающее движение заряж. частицы со спином $1/2$ (напр., электрона) во внеш. эл.-магн. поле. Предложено В. Паули в 1927.

П. у. является обобщением *Шрёдингера уравнения*, учитывающим наличие у частицы собственного механич. момента импульса — *спина*. Частица со спином $1/2$ может находиться в двух разл. спиновых состояниях с проекциями спина $+1/2$ и $-1/2$ на нек-рое (произвольно выбранное) направление, принимаемое обычно за ось z . В соответствии с этим *волновая функция* частицы $\psi(r, t)$ (где r — координата частицы, t — время) является двухкомпонентной:

$$\psi(r, t) = \begin{pmatrix} \psi_1(r, t) \\ \psi_2(r, t) \end{pmatrix}.$$

При поворотах координатных осей ψ_1 и ψ_2 преобразуются как компоненты *спинора*. В пространстве спиновых волновых ф-ций скалярное произведение ψ и ψ' имеет вид

$$(\psi', \psi) = \int (\psi_1'^* \psi_1 + \psi_2'^* \psi_2) dr,$$

операторы физ. величин являются матрицами 2×2 , к-рые для величин (наблюдаемых), не зависящих от спина, кратны единичной матрице.

В силу общих законов электродинамики электрически заряженная система с отличным от нуля спиновым моментом s обладает и магн. моментом, пропорциональным s : $\mu = gs$ (g — гиромагн. отношение). Для орбитального момента $g = e/2mc$, где e — заряд, m — масса частицы; спиновое гиромагн. отношение оказывается в два раза большим: $g = e/mc$. Во внеш. магн. поле напряжённости B магн. момент обладает потенц. энергией $U = -\mu B$, добавление к-рой в гамильтониан H электрона во внеш. эл.-магн. поле с потенциалами φ и A приводит к П. у.:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi; \quad H = \left(\mathbf{p} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right)^2 I - \frac{e\hbar}{2mc} (\boldsymbol{\sigma} B) + e\varphi I, \quad (1)$$

где \mathbf{p} — оператор импульса, $\boldsymbol{\sigma}$ — Паули матрицы [оператор спина $s = (\hbar/2)\boldsymbol{\sigma}$].

Предложенное первоначально на основе эвристич. соображений П. у. оказалось естеств. следствием релятивистски-инвариантного *Дирака уравнения* в слабо-релятивистском приближении, в к-ром учитываются лишь первые члены разложения по обратным степеням скорости света.

Если напряжённость внеш. магн. поля не зависит от пространства координат, то орбитальное движение частицы и изменение ориентации её спина происходят независимо. Волновая ф-ция при этом имеет вид $\psi(r, t) = \Phi(r, t)\chi(t)$, где $\Phi(r, t)$ — скалярная ф-ция, подчиняющаяся ур-нию Шрёдингера, а спинор $\chi = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{pmatrix}$ удовлетворяет ур-нию

$$i\hbar \frac{\partial \chi}{\partial t} = -\frac{e\hbar}{2mc} (\boldsymbol{\sigma} B)\chi.$$

Из этого ур-ния следует, что ср. значение спина $\langle s \rangle = \frac{\hbar}{2} (\chi^\dagger \boldsymbol{\sigma} \chi)$ прецессирует вокруг направления магн. поля:

$$\frac{d}{dt} \langle s \rangle = -\omega_B \mathbf{n} \langle s \rangle.$$

Здесь $\omega_B = eB/mc$ — циклотронная частота, \mathbf{n} — единичный вектор вдоль магн. поля.

На основе П. у. может быть рассчитано расщепление уровней энергии электронов в атоме во внеш. магн. по-