

году открытого К. Д. Андерсоном (C. D. Anderson) в космич. лучах.

Квантовая статистика. Подобно тому как на основе классич. законов движения отд. частиц была построена теория поведения большой их совокупности — классич. статистика, на основе квантовых законов движения частиц была построена квантовая статистика. Последняя описывает поведение макроскопич. объектов в том случае, когда классич. механика неприменима для описания движения слагающих их частиц. В этом случае квантовые свойства микрообъектов отчётливо проявляются в свойствах обычных макроскопич. тел.

Матем. аппарат квантовой статистики существенно отличается от аппарата классич. статистики, т. к. нек-рые параметры микрообъектов могут принимать дискретные значения. Однако содержание самой статистич. теории равновесных состояний не претерпело глубоких изменений. Был выдвинут лишь один новый фундам. квантово-механич. принцип — принцип тождественности одинаковых частиц. В классич. статистике перестановка двух одинаковых частиц меняет состояние системы; в квантовой статистике при перестановке одинаковых, т. е. имеющих одинаковые физ. свойства, частиц состояние системы не меняется. Если частицы имеют целый спин (кратный постоянной Планка $\hbar = h/2\pi$), то в одном и том же квантовом состоянии может находиться любое число частиц. Системы таких частиц описываются *Бозе — Эйнштейна статистикой*. Для любых частиц с полуцелым спином выполняется принцип Паули (согласно к-рому в данном квантовом состоянии не может находиться более одной частицы), и системы этих частиц описываются *Ферми — Дирака статистикой*.

Особенно большую роль сыграла квантовая статистика в построении Ф. твёрдого тела. *Зонная теория* твёрдого тела позволила объяснить деление твёрдых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики, а также их осн. свойства (электропроводность, теплоёмкость и т. д.). Получило объяснение явление *ферромагнетизма* и *антиферромагнетизма*, а в 1957 создана теория *сверхпроводимости*, обнаруженной ещё в 1911. Открытое в 1938 П. Л. Капицей явление *сверхтекучести* жидкого гелия также получило объяснение в рамках квантовой статистики.

Квантовая статистич. теория равновесных процессов построена в столь же законченной форме, как и классическая. Заложены также основы квантовой статистич. теории неравновесных процессов. Ур-ние, описывающее неравновесные процессы в квантовой системе и называемое осн. кинетич. ур-нием, позволяет в принципе проследить за эволюцией во времени вероятности распределения по квантовым состояниям системы.

Квантовая теория поля (КТП). Следующий этап в развитии квантовой теории — распространение квантовых принципов на системы с бесконечным числом степеней свободы (*поля физические*) и описание процессов с рождением и превращением частиц — привёл к КТП, наиб. полно отражающей фундам. свойство природы — корпускулярно-волновой дуализм.

В КТП частицы описываются с помощью квантованных полей, представляющих собой совокупность операторов рождения и уничтожения частиц в разл. квантовых состояниях. Взаимодействие квантованных полей приводит к разл. процессам испускания, поглощения и превращения частиц. Любой процесс в КТП рассматривается как уничтожение одних частиц в определ. состояниях и появление других в новых состояниях. Напр., испускание фотона атомом при переходе электрона из нек-рого нач. состояния в нек-рое конечное на языке КТП представляет процесс исчезновения электрона в нач. состоянии и рождение электрона в конечном состоянии с одноврем. рождением фотона, происходящий в результате взаимодействия квантованных полей электронов и фотонов.

Первоначально была построена КТП применительно к взаимодействию электронов, позитронов и фотонов — квантовая электродинамика (Дирак, 1929). Взаимодействие между заряж. частицами, согласно квантовой электродинамике, осуществляется путём обмена фотонами, при-

чём электрич. заряд частицы представляет константу, характеризующую связь поля заряж. частиц с эл.-магн. полем (полем фотонов).

Идеи, положенные в основу квантовой электродинамики, были в 1934 использованы Э. Ферми (E. Fermi) для описания процессов *бета-распада* атомных ядер с помощью нового типа взаимодействия (к-рый, как выяснилось впоследствии, представляет частный случай т. н. слабых взаимодействий). В процессах бета-распада один из нейтронов ядра превращается в протон и одноврем. происходит испускание электрона и электронного антинейтрино.

Дальнейшим плодотворным применением идей КТП явилась работа Х. Юкавы (1935), к-рый, развивая идеи И. Е. Тамма и Д. Д. Иваненко, предположил существование взаимодействия между полем нуклонов (протонов и нейтронов) и полем новых частиц — мезонов. Ядерные силы между нуклонами, согласно этой гипотезе, возникают в результате обмена нуклонов мезонами, а короткодействующий характер ядерных сил объясняется наличием у мезонов сравнительно большой массы покоя. Мезоны с предсказанными свойствами (пионы) были обнаружены в 1947, а взаимодействие их с нуклонами оказалось частным проявлением т. н. *сильных взаимодействий*.

КТП является, т. о., основой для описания фундам. взаимодействий природы: эл.-магнитных, сильных и слабых. Наряду с этим методы КТП нашли широкое применение и в теории твёрдого тела, теории плазмы, теории ядра, поскольку мн. процессы в этих средах связаны с испусканием и поглощением разл. рода элементарных возбуждений — *квазичастиц* (фононов, спиновых волн и др.).

Очень важную роль играет состояние поля с наименьшей энергией, к-рое наз. вакуумным (см. *Вакуум*). Число частиц, напр. фотонов, в вакуумном состоянии поля равно нулю. Однако существуют нулевые колебания поля флуктуац. характера, энергия к-рых бесконечна, т. к. число степеней свободы поля бесконечно велико. Взаимодействие заряж. частиц с флуктуациями вакуумного поля приводит к эффектам, наблюдаемым экспериментально: *лямбовскому сдвигу* уровней, аномальному значению собственного (спинового) магн. момента электрона и др.

Из-за бесконечного числа степеней свободы у поля взаимодействие частиц — квантов поля — приводит к ур-ням, неразрешимым точно. Однако в теории эл.-магн. взаимодействий любую задачу можно решить приближённо, т. к. взаимодействие можно рассматривать как малое возмущение свободного состояния частиц (вследствие малости безразмерной константы $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$, характеризующей интенсивность эл.-магн. взаимодействий).

Осн. процесс в квантовой электродинамике — испускание свободным электроном (или позитроном) фотона с последующим его поглощением другим или тем же электроном. Время этого процесса — характерное время эл.-магн. процессов — $\sim 10^{-21}$ с. Этот процесс наз. виртуальным. В классич. Ф. такой процесс невозможен, т. к. противоречит закону сохранения энергии. Согласно квантовой теории, этот процесс протекать может, т. к., согласно соотношению неопределённостей для энергии и времени, неопределённость в энергии пропорц. постоянной Планка, делённой на длительность процесса. Фотоны, испускаемые при виртуальном процессе, также наз. виртуальными.

Теория всех эффектов в квантовой электродинамике находится в полном согласии с опытом. Тем не менее положение в этой теории нельзя считать благополучным, т. к. для нек-рых физ. величин (массы, электрич. заряда) при вычислениях по теории возмущений получаются бесконечные выражения (расходимости). Их исключают, используя технику т. н. перенормировок, позволяющую выделять из бесконечно больших величин конечные составляющие, учёт к-рых приводит к количеств. согласию с экспериментом.

В кон. 60-х гг. С. Вайнберг (S. Weinberg), Ш. Глэшоу (S. Glashow) и А. Салам (A. Salam) построили перенормируемую теорию слабых взаимодействий на основе т. н. калибровочных теорий, в основе к-рых лежит принцип