

$$\begin{aligned} [\psi^A(x), \psi^B(y)]_{\epsilon_{AB}} &= \delta_{AB} \delta(x-y), \\ [\psi^A(x), \psi^B(y)]_{\epsilon_{AB}} &= [\psi^{A+}(x), \psi^{B+}(y)]_{\epsilon_{AB}} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

при равных временах $x_0 = y_0$. Индекс $\epsilon_{AB} = (1 - \delta_{AB})\epsilon$ означает коммутатор, если он равен -1 , и антикоммутатор, если он равен $+1$; $\epsilon = -1$ или $+1$ соответственно для параферми- и парабозе-статистик; δ_{AB} — символ Кронекера. На основе такого представления параполей доказана теорема о том, что любая теория параполей эквивалентна теории p -кратно вырожденных совокуностей обычных полей, обладающих в общем случае глобальной внутренней симметрией $SO(p)$, а при ограниченном выборе допустимых наблюдаемых — $SU(p)$. На этой основе для конечных P доказана также обобщённая Паули теорема о связи спина со статистикой: частицы с полуцелым спином подчиняются парафермистатистике, а частицы с целым спином — парабозестатистике. Т. о., теория P и параполей приводится к случаю обычных статистик и обычных полей, вырожденных по нек-рой внутр. степени свободы. Обратное утверждение в общем случае несправедливо: не всякая внутр. симметрия может быть переформулирована на языке параполей. В особенности это относится к калибровочным симметриям (симметриям относительно калибровочных преобразований).

Теория параполей получила особое развитие в связи с созданием кварковой модели строения адронов. Для решения проблемы помещения трёх кварков в одно и то же квантовомеханич. состояние О. У. Гринберг (O. W. Greenberg, 1964) выдвинул гипотезу о подчинении кварков параферми-статистике 3-го порядка. Однако оказалось, что последоват. переход к калибровочной симметрии в рамках параполей приводит к теории, эквивалентной калибровочной симметрии $SO(3)$, к-рая отличается от квантовой хромодинамики наличием только трёх глюонов и возможностью существования бесцветных дикварковых состояний, экспериментально не обнаруженных. По этой причине гипотеза паракварков либо должна быть полностью заменена гипотезой о физ. цветовой кварковой симметрии $SU(3)$ (см. Цвет), либо для включения последней в рамки параполей их теория должна быть существенно расширена. Такое расширение достигается включением в анзац Грина произведения обычных фермионных (или бозонных) полей на элементы комплексной Клиффорда алгебры:

$$\psi(x) = \sum_{A=1}^p \psi^A(x) e_A,$$

$$e_A e_B^+ + e_B^+ e_A = \delta_{AB}, e_A e_B + e_B e_A = e_A^+ e_B^+ + e_B^+ e_A^+ = 0.$$

В силу последнего свойства (нильпотентности) в такой теории нельзя непосредственно рассматривать системы с более чем p частиц, но можно рассматривать неск. систем с числом частиц, не большим p в каждой из них. Иное обобщение параполей основывается на аналогичной конструкции, где в качестве e_A берутся элементы неассоциативной алгебры октонионов. В этом случае однозначно фиксируется порядок P . («цвет») $p = 3$, однако возникает проблема построения гильбертова пространства векторов состояний.

Лит.: Дирак П., Принципы квантовой механики, пер. с англ., 2 изд., М., 1979, с. 280—96; Говорков А. Б., Парастатистика и внутренние симметрии, «ЭЧАЯ», 1983, т. 14, в. 5, с. 1229. А. Б. Говорков.

ПАРАЭЛЕКТРИКИ — диэлектрики, для к-рых нелинейная зависимость поляризации P от электрич. поля E проявляется уже в слабых полях и является безгистерезисной. К P относятся, в частности, сегнетоэлектрики в неполярной фазе вблизи темп-ры Кюри. Электрич. уравнение состояния здесь можно представить в виде

$$E = AP + BP^3,$$

546 причём величина A аномально мала (обращается в

нуль в точке сегнетоэлектрич. перехода 2-го рода). Др. причиной сильной нелинейности P может быть структурный фазовый переход, возникающий в кристалле при наложении уже относительно небольшого электрич. поля (см. Антисегнетоэлектрики).

ПАРАЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС — резонансное поглощение радиоволн, связанное с переориентацией электрич. дипольных моментов (ЭДМ) частиц вещества во внеш. электрич. полях; электрич. аналог магнитного резонанса. Первые наблюдения относятся к 1966.

В кристалле могут существовать дефекты, обладающие ЭДМ. Это прежде всего примесные молекулы, к-рые обладают ЭДМ даже в свободном состоянии (напр., OH^- , CN^-). В кристалле они могут ориентироваться лишь в определённых (энергетически эквивалентных) направлениях в соответствии с симметрией окружения. К др. типу дефектов относятся т. н. нецентральные ионы, замещившие в кристалле более тяжёлые ионы (напр., Li^+ в KCl). Равновесные положения примесных ионов смещены относительно узлов, с чем и связано появление ЭДМ. В соответствии с симметрией кристалла может быть неск. (4, 6, 8, 12) энергетически эквивалентных равновесных положений.

Наличие у дефектов эквивалентных положений приводит к вырождению состояний, между этими состояниями происходят туннельные переходы. В результате возникает расщепление уровней. Внеш. пост. электрич. поле смещает (дополнительно расщепляет) эти уровни, появляется возможность ими управлять. Если к кристаллу дополнительно приложить ещё и перем. электрич. поле, возникают квантовые переходы с поглощением или излучением эл.-магн. волны. Переходы осуществляются резонансно, на определ. частоте, соответствующей разности энергий между двумя уровнями. Это явление и принято называть P . р. Характерная область частот P . р. — диапазон СВЧ (10^{10} — 10^{11} Гц).

Наряду с описанным выше P . р. существуют родственные этому явлению эффекты, носящие иногда то же название. Так, мн. парамагн. центры, расположенные в местах кристаллич. решётки, не являющихся центрами инверсии (напр., Fe в узле или межузлии Si), обладают отличным от нуля ЭДМ. Энергетич. структура таких дефектов чувствительна не только к внеш. магн. полям, но и к внеш. электрич. полям. Поэтому условия резонанса в них можно осуществить изменением внеш. статич. электрич. поля, а переходы между уровнями — перем. электрич. полем. Это позволяет комбинировать магн. поля с электрическими.

Открытие P . р. и связанных с ним явлений привело к созданию нового направления в физике твёрдого тела — электрической радиоспектроскопии. Её задачи совпадают с задачами магн. радиоспектроскопии: изучение диполь-решёточного и диполь-дипольного взаимодействий, ширины резонансных линий, роли внеш. воздействий, природы дефектов и их окружения и т. д. Это направление находит и практич. применение: созданы генераторы гиперзвука, низкотемпературные термометры, разработан метод параэлектрич. адиабатич. охлаждения.

Лит.: Электрические эффекты в радиоспектроскопии, М., 1981; Коппилем У. Х., Сабурова Р. В., Параэлектрический резонанс, М., 1982. А. Б. Ройцин.

ПАРНАЯ КОНВЕРСИЯ — см. в ст. Конверсия внутренней.

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ в атмосферах планет — повышение темп-ры внутр. слоёв атмосферы и поверхности планеты, обусловленное тем, что атмосфера более прозрачна для падающего солнечного излучения, чем для уходящего теплового излучения поверхности (и своего собственного). Энергия, получаемая планетой от Солнца за единицу времени, равна энергии, излучаемой в космич. пространство (если пренебречь тепловым потоком из недр планеты). Последняя характеризуется ср. эффективной температурой