

координат (или только спинов) одинаковых частиц (см. Юнга схемы).

Внутренние симметрии

Под внутренними С. понимают С. между частицами (в квантовой теории поля — между полями) с различными внутренними квантовыми числами. Среди различных внутр. С. можно выделить глобальные С. и локальные С.

Глобальные С. Примером такой С. является инвариантность лагранжиана относительно следующих калибровочных преобразований входящих в него полей:

$$\psi_i \rightarrow \psi'_i = \exp(i\alpha Q_i) \psi_i, \quad \psi_i^* \rightarrow (\psi'_i)^* = (\psi_i^*)^* \exp(-i\alpha Q_i), \quad (1)$$

где α — произвольное число, а числа Q_i фиксированы для каждого поля ψ_i . Эта инвариантность приводит к аддитивному закону сохранения заряда $\sum Q_i =$

$= \text{const}$. Наряду с электрическим в качестве зарядов могут выступать и др. заряды: барионный, лептонный, странность и т. д. Инвариантность относительно преобразования (1) выполняется, когда в лагранжиан симметрично в виде комбинации $(\psi_{i1}^2 + \psi_{i2}^2)$ входят два действительных поля ψ_{i1} и ψ_{i2} (с одинаковыми массами). В этом случае они могут быть заменены комплексными полями

$$\psi_i = 1/\sqrt{2}(\psi_{i1} + i\psi_{i2}) \quad \text{и} \quad \psi_i^* = 1/\sqrt{2}(\psi_{i1}^* - i\psi_{i2}^*).$$

Преобразование (1) отвечает преобразованию «поворота» полей вокруг фиксиров. оси:

$$\begin{aligned} \psi'_{i1} &= \psi_{i1} \cos Q\alpha - \psi_{i2} \sin Q\alpha, \\ \psi'_{i2} &= \psi_{i1} \sin Q\alpha + \psi_{i2} \cos Q\alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Симметрия (1) наз. глобальной С., если параметр преобразования α не зависит от пространственно-временных координат точки, в к-рой рассматривается поле. Преобразования (1) с разл. параметрами α коммутируют между собой и составляют абелеву группу $U(1)$ [см. Симметрия $U(1)$]. Если лагранжиан симметричен относительно преобразований «поворотов» неск. комплексных полей, то возникают более сложные, неабелевы группы С. с неск. параметрами, напр. группа $SU(2)$ для изотопического спина [см. Симметрия $SU(2)$], группа $SU(3)$ для цветовой С. [$SU_c(3)$, см. Цвет, Симметрия $SU(3)$] или С. между ароматами кварков [$SU_f(3)$]. Во всех случаях С. наз. глобальной, если параметры преобразований не зависят от пространственно-временных координат.

Дополнительная, т. н. киральная симметрия возникает для частиц нулевой массы. Поскольку для безмассовых частиц сохраняется их спиральность, наличие к.-л. внутр. С. для них приводит к тому, что она может выполняться независимо для левых и правых частиц (с положит. и отрицат. спиральностью). Так, для безмассовых u -, d -кварков должна быть группа С. $SU_L(2) \times SU_R(2)$.

Локальные С. Если параметры преобразований для глобальных С. можно рассматривать как произвольные ф-ции пространственно-временных координат, то говорят, что соответствующие С. выполняются локально. Предположение о существовании локальной С. позволяет построить теорию, в к-рой сохраняющиеся (благодаря наличию глобальной С.) величины (заряды) выступают в качестве источников особых калибровочных полей, переносящих взаимодействие между частицами, обладающими соответствующими зарядами. Поскольку во всякую динамич. теорию входит обобщенный импульс, оператор к-рого $\hat{P}_\mu = i\partial/\partial x^\mu$ при дейст-

вии на преобразованное поле приводит в случае локальной С. к появлению произвольных ф-ций [напр., $iQ\partial\alpha/\partial x^\mu$ для преобразования (1)], то инвариантность теории возможна лишь при условии, когда возникающей произвол каким-то образом компенсируется. Такая компенсация оказывается возможной, если обобщенный импульс входит в теорию в комбинации с нек-рыми векторным полем, соответственно изменяющимся при калибровочных преобразованиях. Т. о., локальная С. может осуществляться только при наличии компенсирующих (калибровочных) полей. Для локальной $U(1)$ -симметрии обобщенный импульс должен входить в комбинации $\hat{P}_\mu - QA_\mu$ с векторным полем A_μ , к-рое при преобразовании (1) изменяется по закону $A'_\mu = A_\mu - \partial\alpha/\partial x^\mu$.

Произвол, существующий в определении поля A_μ (произвольная ф-ция $\partial\alpha/\partial x^\mu$), устраняется в тензоре

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu}.$$

Поэтому физ. величинами являются компоненты тензора $F_{\mu\nu}$, из к-рого однозначно строится лагранжиан поля A_μ .

Для локальных неабелевых С. необходимо существование неск. векторных калибровочных полей, к-рые в этом случае будут сами обладать «зарядами» и взаимодействовать между собой. Требование отсутствия калибровочного произвола в физ. величинах позволяет однозначно установить закон взаимодействия этих полей. Впервые модель с локальной изотопической $SU(2)$ -симметрией была рассмотрена Ч. Янгом (Ch. Yang) и Р. Л. Миллсом (R. L. Mills) в 1954. Успех квантовой хромодинамики, построенной на основе локальной цветовой $SU_c(3)$ -симметрии и теории электрослабых взаимодействий, позволяет предположить, что требование локальной С. является общим принципом построения теории фундаментальных взаимодействий. Исходя из этих принципов строятся разл. модели Великого объединения, в к-рых пытаются учесть наблюдаемую в электрослабом взаимодействии С. между лептонами и кварками, С. между разл. поколениями лептонов и кварков, а также использовать предполагаемую суперсимметрию, связывающую частицы с целым и полудцельным спином (см. Суперсимметрия, Супергравитация).

Нарушение симметрии

Многие из С. природы являются приближенными или нарушенными. Следует различать при этом явное и спонтанное нарушение симметрии. Явное нарушение С. обусловлено нарушением С. эффективного гамильтониана системы [напр., нарушение изотопич. инвариантности и $SU_f(3)$ -симметрии по ароматам кварков связано с различием их масс]. Спонтанное нарушение С. происходит из-за нарушения С. вакуума, к-рый при симметричном гамильтониане может быть вырожденным (см. Вырождение вакуума). Спонтанное нарушение глобальных С. приводит к появлению безмассовых (голдстоуновских) частиц (см. Голдстоуна теорема, Голдстоуновские бозоны). Спонтанное нарушение калибровочных С. может, наоборот, приводить к тому, что безмассовые частицы, отвечающие калибровочным полям (какими являются, напр., поля промежуточных W_\pm и Z^0 -бозонов), приобретают массу (см. Хиггса бозоны). Спонтанное нарушение дискретных С. может быть в принципе причиной появления P - или CP -несимметричных вакуумов в определенных частях Вселенной и объяснять наблюдаемые явления нарушения P - или CP -чётности.

При достаточно высоких энергиях, когда становятся возможными переходы между различными физ. вакуумами, спонтанно нарушенная С. может восстанавливаться.