

локальной калибровочной симметрии. Они создали объединённую модель слабых и эл.-магн. взаимодействий (модель эл.-слабых взаимодействий), согласно к-рой, наряду с фотоном — переносчиком эл.-магн. взаимодействий — должны существовать переносчики слабых взаимодействий — промежуточные векторные бозоны с массами в неск. десятков протонных масс. Наряду с заряж. ( $W^+$  и  $W^-$ ) бозонами должны существовать и нейтральные ( $Z^0$ ). В 1973 впервые экспериментально наблюдались процессы, к-рые можно объяснить существованием нейтральных бозонов (*нейтральные токи*), а в 1983 все промежуточные бозоны были открыты экспериментально. Эти открытия были сделаны на ускорителях со встречными протон-антипротонными пучками, а также на ускорителях со встречными электрон-позитронными пучками.

Теория сильных взаимодействий получила интенсивное развитие после успехов, достигнутых в систематике сильно взаимодействующих частиц (*адронов*). Эта систематика позволила предсказать существование неск. элементарных частиц, впоследствии открытых экспериментально. Систематику адронов оказалось возможным сделать наглядной, если предположить, что все адроны «построены» из небольшого числа (в первонач. варианте — из трёх) фундам. частиц — кварков и соответствующих антикварков — с дробными электрич. зарядами. Открытие в 1975—76 нового класса частиц ( $J/\psi$ -мезонов) потребовало введения ещё одного кварка (*c-кварка*).

В 70-х гг. построена калибровочная теория межкварковых сильных взаимодействий — *квантовая хромодинамика*. Эти взаимодействия осуществляются посредством 8 безмассовых частиц — глюонов. Глюоны взаимодействуют между собой, и поэтому поле сильных взаимодействий нелинейно. Построение квантовой хромодинамики оказалось возможным после введения нового квантового числа — т. н. цвета. Кварки и глюоны в свободном виде не существуют, но их реальность косвенно доказана в экспериментах по рассеянию электронов и нейтрино высоких энергий на нуклонах.

Несмотря на то что нелинейные ур-ния, описывающие сильные взаимодействия кварков, известны, их удаётся приближённо решать только при малых расстояниях между кварками, когда взаимодействие относительно мало. Вычисление же энергии взаимодействий нуклонов в рамках квантовой хромодинамики — пока далёкая от решения задача.

**Принципы симметрии и законы сохранения.** Фундам. физ. теории позволяют по нач. состоянию объекта определить его поведение в будущем. Принципы симметрии, или инвариантности, носят более общий характер, им подчинены все физ. теории. *Симметрия* законов Ф. относительно некого преобразования означает, что эти законы не меняются при проведении данного преобразования. Поэтому принципы симметрии можно установить на основании известных физ. законов. С др. стороны, если теория к.-л. физ. явлений ещё не создана, открытия на опыте симметрии играют эвристич. роль при построении теории. Отсюда особая важность экспериментально установленных симметрий сильно взаимодействующих элементарных частиц — адронов. Существуют общие симметрии, справедливые для всех физ. законов, для всех видов взаимодействий, и приближённые симметрии, область выполнения к-рых ограничена определ. кругом взаимодействий или даже одним видом взаимодействий. Т. о., существует определ. иерархия принципов симметрии.

Симметрии делятся на пространственно-временные, или геометрические, и внутренние симметрии, описывающие специфич. свойства элементарных частиц.

С симметриями связаны законы сохранения. Для непрерывных преобразований эта связь была установлена на основе самых общих предположений о матем. аппарате теории (см. *Нётер теорема*).

Справедливыми для всех типов взаимодействий являются симметрии законов Ф. относительно следующих непрерывных пространственно-временных преобразований: сдвига и поворота физ. системы как целого в пространстве,

сдвига во времени (изменение начала отсчёта времени). Инвариантность (неизменность) всех физ. законов относительно этих преобразований означает соответственно однородность и изотропию пространства и однородность времени. С этими симметриями связаны соответственно законы сохранения импульса, момента импульса и энергии. К общим симметриям относятся также инвариантность по отношению к преобразованиям Лоренца и к т. н. калибровочным преобразованиям (1-го рода) — умножению волновой ф-ции на пост. фазовый множитель, не меняющий квадрата её модуля (последняя симметрия связана с законами сохранения электрич., барионного и лептонного зарядов), и принцип локальной калибровочной симметрии.

Существуют также симметрии, отвечающие дискретным преобразованиям: изменению знака времени (*обращению времени*), *пространственной инверсии* (т. н. зеркальная симметрия природы), *зарядовому сопряжению* (замене всех участвующих в к.-л. процессе частиц на соответствующие античастицы). Фундам. законы природы, описывающие микропроцессы, обратимы во времени (о единств. исключении см. ниже); необратимость в макромире имеет статистич. происхождение и связана с неравновесным состоянием Вселенной. Зеркальной симметрии в квантовой теории соответствует сохранение квантового числа — *пространственной чётности*.

Симметрии относительно пространственной инверсии и зарядового сопряжения не носят абс. характера: в процессах слабого взаимодействия они нарушаются (экспериментально подтверждено в 1956 опытами Ву Цзянсун с сотрудниками). При этом сохраняется симметрия по отношению к *комбинированной инверсии* — одновременно проведению зеркального отражения и замены всех частиц на античастицы. Однако в 1964 при исследованиях распада т. н. долгоживущего нейтрального К-мезона было обнаружено нарушение симметрии и при комбинированной инверсии. Т. к. в совр. квантовой теории поля любой процесс должен быть инвариантен по отношению к одновременно проведению всех трёх перечисленных дискретных преобразований (*теорема CPT*), то нарушение симметрии при комбинированной инверсии в распаде  $K_L^0$  означает, что в этом распаде нарушается также симметрия по отношению к обращению времени. Причина этого нарушения не выяснена.

Сильные взаимодействия обладают ещё рядом дополнит. внутр. симметрий, в частности *изотопической инвариантностью* и более широкой симметрией — т. н.  $SU(3)$ -симметрией (см. *Сильное взаимодействие*). На основе этих симметрий М. Гелл-Ман (M. Gell-Mann) и К. Нишиджима (K. Nishijima) создали систематику адронов, позволившую предсказать существование неск. элементарных частиц, открытых позднее экспериментально, и ввести кварковую модель строения адронов (см. выше).

Большим достижением явл. установление кварк-лептонной симметрии, согласно к-рой в природе встречается 6 лептонов (частиц, не участвующих в сильных взаимодействиях), а все сильно взаимодействующие частицы состоят из 6 кварков. Эти частицы делят на 3 поколения по паре лептонов и кварков в каждом поколении. Массы частиц возрастают от поколения к поколению. Стабильное вещество Вселенной, все атомы построены из частиц первого поколения: электронов, *u*- и *d*-кварков.

Успехи в классификации адронов на основе принципов симметрии и иерархии этих принципов очень велики, хотя причины существования приближённых симметрий неизвестны.

#### 4. Современная экспериментальная физика

Ещё в нач. 20 в. мн. фундам. открытия (атомного ядра, радиоактивности и др.) были сделаны с помощью сравнительно простой аппаратуры. В дальнейшем эксперимент стал быстро усложняться и эксперим. установки стали сравнимы по масштабу с промышл. предприятиями. Совр. эксперим. исследования в области ядра и элементарных