

transformations, «J. Stat. Phys.», 1979, v. 21, № 6, p. 669; 3) Фейгенбаум М., Универсальность в поведении нелинейных систем, пер. с англ., «УФН», 1983, т. 141, в. 2, с. 343; 4) Eckmann J.-P., Road to turbulence in dissipative dynamical systems, «Rev. of Mod. Phys.», 1981, v. 53, p. 643; 5) Вул Е. Б., Синай Я. Г., Ханин К. М., Универсальность Фейгенбаума и термодинамический формализм, «Успехи матем. наук», 1984, т. 39, в. 3, с. 3; 6) Nauenberг M., Rudnick J., Universality and the power spectrum at the onset of chaos, «Phys. Rev. B», 1981, v. 24, № 1, p. 493; 7) Crutchfield J., Nauenberг M., Rudnick J., Scaling for external noise at the onset of chaos, «Phys. Rev. Lett.», 1981, v. 46, № 14, p. 933.

К. М. Ханин.

**ФЕЙНМАНА ДИАГРАММЫ** — наглядный и эфф. способ описания взаимодействия в квантовой теории поля (КТП). Метод предложен Р. Фейнманом (R. Feynman) в 1949 для построения амплитуд рассеяния и взаимного превращения элементарных частиц (см. *Амплитуда рассеяния, Амплитуда процесса*) в рамках теории возмущений (см. *Возмущений теория*), когда из полного (эффективного) лагранжиана  $\mathcal{L}$  системы полей выделяется невозмущённая часть (свободный лагранжиан)  $\mathcal{L}_0$ , квадратичная по полям, а оставшаяся часть (лагранжиан взаимодействия)  $\mathcal{L}_I$  трактуется как возмущение.

Составными элементами Ф. д. являются *вершины*, *внутренние* и *внешние* линии. Каждая из линий подсоединяется к каким-нибудь вершинам: внутренняя к двум, а внешняя к одной. Набор вершин определяется структурой  $\mathcal{L}_I$ , а внешних и внутренних линий — структурой  $\mathcal{L}_0$ . Каждому моному по полям в  $\mathcal{L}_I$  соответствует определ. тип вершин, а каждому виду поля в  $\mathcal{L}_0$  — определ. тип линий. Если поле нейтральное (соответствующая частица совпадает со своей античастицей, см. *Истинно нейтральные частицы*), то линия считается ненаправленной, в противном случае линия направленная и на диаграмме снабжается стрелкой.

Существуют т. н. правила Фейнмана (ПФ, см. ниже), к-рые сопоставляют каждому элементу Ф. д. определ. матем. объекты (величины и операции), так что по Ф. д. можно однозначно построить аналитическое выражение, дающее вклад в амплитуду рассеяния квантованных полей. Вместе с тем Ф. д. позволяет такому вкладу дать наглядную классич. интерпретацию в виде ряда последовательных локальных превращений частиц. Каждому отд. превращению соответствует вершина, внутр. линиям — распространение промежуточной частицы от одного акта превращения до другого (*пропагатор* частицы), внеш. линиям — волновые ф-ции начальных и конечных частиц, участвующих в процессе.

В качестве примера рассмотрим Ф. д. в квантовой электродинамике (КЭД), к-рая описывает взаимодействие электронов, позитронов и фотонов между собой. В КЭД имеются всего один тип вершин (рис. 1) и два типа линий (рис. 2). Ненаправленная волнистая линия относится к фотону, а направленная прямая — к электрону и позитрону.



Рис. 1.

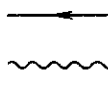


Рис. 2.

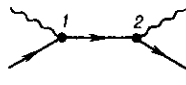


Рис. 3.

В последнем случае распространению осн. частицы (электрона) соответствует движение вдоль линии по направлению стрелки, а распространению античастицы (позитрона) — движение против стрелки.

Каждая Ф. д. имеет неск. интерпретаций в зависимости от направления движения вдоль линий этой диаграммы. Так, для Ф. д., изображённой на рис. 3, допустимы следующие варианты. Первый — движение по линиям слева направо — рассеяние фотона на электроне (*Комптона эффект*). В вершине 1 нач. электрон поглощает нач. фотон, при этом образуется промежуточный электрон, к-рый распространяется от вершины 1 к вершине 2. Здесь он излучает конечный фотон и превращается в конечный электрон. Результатом процесса является перераспределение 4-импульса (энергии и импульса) между электроном и фото-

ном. Второй вариант — движение по линиям справа налево — рассеяние фотона на позитроне. Третий вариант — движение снизу вверх — *аннигиляция* электрона и позитрона с превращением их в два фотона. Четвёртый вариант — движение сверху вниз — рождение электрон-позитронной пары при столкновении двух фотонов.

Согласно ПФ, в каждой вершине взаимопревращение частиц происходит с интенсивностью, пропорц. нек-рой константе связи (*константе взаимодействия*), и с соблюдением закона сохранения 4-импульса. Вместе с тем релятивистское соотношение между энергией и импульсом (т. н. массовая поверхность)  $\mathcal{E} = \sqrt{P^2 c^2 + m^2 c^4}$  ( $\mathcal{E}$  — энергия,  $P$  — обычный трёхмерный импульс,  $m$  — масса) выполняется только для начальных и конечных частиц, описываемых внеш. линиями (реальные частицы). Это соотношение нарушается для промежуточных частиц, описываемых внутр. линиями, в связи с чем они наз. *виртуальными частицами*. Для них  $\mathcal{E}$  и  $P$  могут независимо принимать значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Поле может быть как однокомпонентным, так и многокомпонентным. В КЭД и фотонное (векторное эл.-магн.) поле, и электрон-позитронное (спинорное) поле имеют по четыре компонента. Каждая линия в Ф. д. описывает сразу всю совокупность компонент соответствующего поля. В суперсимметричных моделях (см. *Суперсимметрия*) линия в Ф. д. описывает распространение целого мультиплета элементарных частиц, к-рые соответствуют разным компонентам одного суперполя.

Тип физ. процесса определяется только теми частицами, к-рые имеются на входе и выходе этого процесса. Поэтому все Ф. д. с одним и тем же набором внеш. линий вне зависимости от своей внутр. структуры соответствуют одному и тому же физ. процессу. Каждая из таких диаграмм вносит аддитивный вклад в амплитуду процесса. Так, помимо диаграммы, изображённой на рис. 3, эффекту Комптона соответствуют, напр., диаграммы, приведённые на рис. 4.

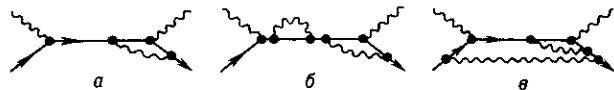


Рис. 4.

Отличит. чертой этих диаграмм является наличие в них замкнутых циклов (петель), состоящих из внутр. линий. Диаграммы типа рис. 4, а наз. *однопетлевыми*, а типа рис. 4, б и рис. 4, в — *двухпетлевыми*. Беспетлевые диаграммы типа рис. 3 наз. *древесными*. Из всех диаграмм, соответствующих данному физ. процессу, *древесные* диаграммы имеют наименьшее число вершин. Поэтому в теории возмущений, в к-рой роль малого параметра играет константа связи, *древесные* диаграммы вносят осн. вклад, а диаграммы с петлями описывают *радиационные поправки*.

Помимо разложения всех величин в ряд теории возмущений по константе связи используется разложение в ряд по константе Планка  $\hbar$ . Оказывается, что вклад Ф. д. пропорционален  $\hbar^n$  в степени  $n$ , где  $n$  — число петель в данной диаграмме. Поэтому в классич. пределе ( $\hbar \rightarrow 0$ ) вклад дают только *древесные* диаграммы.

Кроме амплитуд рассеяния Ф. д. используются для описания *Грина функций* (в КТП). В обоих случаях структуры диаграмм очень схожи, что отражает тесную связь между ф-циями Грина и амплитудами рассеяния. Существенным отличием является лишь то, что для ф-ций Грина внеш. линиям соответствует распространение виртуальных частиц (вне массовой поверхности).

Согласно ПФ, каждой петле в Ф. д. отвечает интегрирование по 4-импульсу, к-рый может циркулировать в данной петле, не нарушая законов сохранения в вершинах. Нек-рые из этих интегралов расходятся за счёт бесконечного объёма интегрирования (*ультрафиолетовые расходи-*