

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

§ 1. Главное об элементарных частицах

1. Физика элементарных частиц занимает особое место не только в ядерной физике и даже не только в физике вообще, но и в науке в целом. Эта выделенность состоит в том, что в других областях физики, таких как физика плазмы, физика твердого тела, ядерная спектроскопия и т. д., основные фундаментальные законы уже установлены. Это не значит, конечно, что развитие этих наук приблизилось к завершению. Напротив, в этих областях открывается большое количество новых и интересных явлений, находящихся в важных технических приложениях: полупроводники, лазеры, эффект Мёссбауэра и др. В физике элементарных частиц изучаются явления, фундаментальные законы которых не установлены.

Работа в этой области в какой-то мере подобна мероприятию Колумба, который, не имея понятия о карте мира, руководствовался гипотезой о том, что плывет в Индию. И хотя в Индию он не попал, но совершил важное открытие. Таким же движением наощупь в неизведанную область является развитие физики элементарных частиц. Аналогия с Колумбом есть также в том, что Колумб пытался понять, что происходит на расстояниях, на которые его современники проникать не отваживались. Точно так же главной целью физики элементарных частиц является изучение свойств вещества на сверхмалых расстояниях, в течение сверхмалых промежутков времени и при сверхвысоких концентрациях энергии.

Малые расстояния и большие концентрации энергии тесно связаны соотношениями неопределенностей координата-импульс и энергия-время (см. гл. I, § 3, п. 3). В ультрарелятивистской области для всех частиц энергия пропорциональна импульсу, $E = cp$, и соотношение неопределенностей принимает вид

$$\Delta E \cdot \Delta x \geq \hbar c / 2,$$

так что

$$\Delta E \geq 10^{-14} / \Delta x, \tag{7.1}$$

где ΔE выражено в ГэВ, а Δx — в см. Этим соотношением определяется, какая энергия необходима для достижения расстояний определенного порядка малости. Таким образом, для проникновения на расстояния 10^{-14} см и меньше нужны частицы с энергией, большей 1 ГэВ.

Изучаемые в физике элементарных частиц процессы сейчас почти не имеют каких-либо технических применений. Более того, при существующем уровне знаний неясны даже возможные принципы использования этих процессов в ближайшем будущем. Однако человечество на своем опыте уже не раз убеждалось, что фундаментальные исследования необходимы как для гармоничности развития науки в целом, так и для создания задела для развития принципиально новой техники.

В этом параграфе мы рассмотрим главные и наиболее общие свойства элементарных частиц, а в следующих параграфах перейдем к более детальному изложению.

2. Пожалуй, самым главным свойством элементарных частиц надо считать их способность рождаться при столкновениях других частиц. Возможность рождения новых частиц — релятивистский эффект, обусловленный соотношением Эйнштейна (1.4):

$$E_{\text{рел}} = Mc^2.$$

Согласно этому соотношению в баланс энергии при столкновении входят как кинетическая энергия сталкивающихся частиц, так и энергия, соответствующая их массам покоя. При столкновениях эти энергии могут переходить друг в друга. Так, два протона с кинетическими энергиями, превышающими энергию 150 МэВ, соответствующую массе покоя пиона, столкнувшись, могут породить пион:



Конечно, не все реакции рождения частиц возможны даже при достаточно большой кинетической энергии столкновения. Многие из них запрещены законом сохранения электрического заряда и другими законами сохранения, подробно рассматриваемыми в следующих параграфах. Несмотря на это, можно утверждать, что при достаточно высокой энергии любого столкновения возможно рождение каких угодно частиц. Например, из-за сохранения электрического и барионного (см. гл. II, § 2, а также § 2 этой главы) зарядов при столкновении двух протонов не может родиться третий протон. Но у протона есть двойник — антипротон \bar{p} , у которого оба заряда равны по абсолютной величине и противоположны по знаку зарядам протона. Поэтому рождение пары протон — антипротон законами сохранения зарядов не запрещено. Как образно выразился Д. И. Блохинцев, при столкновении протон — протон может породиться хоть вся Вселенная, была бы достаточно велика энергия столкновения.

3. Из симметрии законов микромира относительно направления течения времени (см. гл. IV, § 3) следует, что если частицы могут рождаться, то они могут и поглощаться, т. е. исчезать при столкновениях. Более того, в одном и том же столкновении может иметь место комбинация поглощений и рождений, т. е., другими словами, взаимопревращение одних частиц в другие. Например, γ -квант и

протон, столкнувшись, могут превратиться в две совершенно другие частицы — положительный пион и нейтрон:



В последующих параграфах (§§ 3—5) мы встретимся с многочисленными примерами различных взаимопревращений элементарных частиц.

4. Существование процессов рождения и поглощения элементарных частиц приводит к тому, что для них в значительной мере теряет смысл понятие «состоит из».

Поясним это обстоятельство подробнее, так как с ним тесно связан вызывающий много споров вопрос об определении понятия элементарности частицы. В макроскопическом мире мы просто видим, что дом состоит из кирпичей. Структуру и составные части микрообъектов непосредственно наблюдать нельзя. Тем не менее мы считаем, что в состав атомов входят электроны, а в состав ядер — протоны и нейтроны, потому что все эти частицы выбиваются из атомов и ядер при бомбардировке последних пучками γ -квантов и других частиц. Но если при столкновении может происходить не только развал сложной частицы на составные части, но и рождение, а также поглощение частиц, то уже непонятно, как отличить частицу, входившую в состав сложной, от вновь родившейся, поскольку прибору все равно, какую частицу он регистрирует.

Тем не менее можно привести экспериментально проверяемый критерий, по которому элементарные частицы отличаются от остальных. Для этого надо учесть, что само понятие частицы существует, лишь пока эта частица свободна или по крайней мере слабо связана, так что ее энергия связи намного меньше энергии, соответствующей массе покоя. Фраза «частица X состоит из частиц X_1, X_2, \dots, X_n » может иметь четкий смысл лишь при одновременном соблюдении двух условий:

а) частица X может быть раздроблена на частицы X_1, X_2, \dots, X_n при каких-либо столкновениях;

б) энергия связи $E_{i\text{св}}$ любой частицы X_i намного меньше ее энергии покоя $M_i c^2$:

$$E_{i\text{св}} \ll M_i c^2. \quad (7.4)$$

Только при соблюдении обоих этих условий существует область энергий столкновений $M_i c^2 > E > E_{i\text{св}}$, в которой уже происходит раздробление составных частиц, но еще не происходит рождение частиц-составляющих.

Теперь мы можем дать определение элементарной частицы: *микрочастица называется элементарной, если для нее не соблюдается хотя бы одно из условий а), б).* Все остальные частицы называются составными. Следует подчеркнуть, что выполнение сформулированных выше условий элементарности вовсе не означает, что элементарные частицы не имеют внутренней структуры, т. е. ни в каком смысле ни из чего не «состоят».

В § 7 мы убедимся, что у большинства элементарных частиц экспериментально обнаруживается сложная внутренняя структура.

Тем самым и элементарные частицы состоят из каких-то «частей», но уже не в том смысле, в каком ядра состоят из нуклонов.

Например, на интуитивном уровне представляется возможным существование составных систем с релятивистскими энергиями связи, когда масса M составной системы намного меньше массы каждой из составляющих («муха», состоящая из «слонов»). Гипотезы такого рода неоднократно выдвигались и обсуждались. Так, еще в 1949 г. Э. Ферми и С. Н. Янг высказали гипотезу о том, что пион является связанным состоянием нуклона и антинуклона.

Для связанных систем с релятивистскими энергиями условия а), б) уже соблюдаться не будут, так что их надо будет считать достаточными, но не необходимыми. К сожалению, все предлагавшиеся критерии, позволяющие экспериментально отличать такие релятивистские связанные системы от «истинно элементарных» частиц, не были достаточно последовательными и убедительными. Отсутствие таких четких критериев является слабым местом всех гипотез о составном характере существующих элементарных частиц.

За последнее десятилетие укрепилось убеждение в составном характере нуклонов и многих других частиц, основанное не на выполнении одного четкого критерия, а на обширной совокупности экспериментальных фактов, допускающих единое (хотя и не единственное для каждого отдельного факта!) объяснение (см. § 7).

Составные части элементарных частиц (не удовлетворяющие условиям а), б)) будут называться *субчастицами* *).

Интересное определение элементарной частицы дано М. А. Марковым (1965). Согласно этому определению частица является элементарной в том и только в том случае, если ее размеры R не превышают ее комптоновской длины волны: $R \leq \hbar/Mc$. Все известные элементарные частицы удовлетворяют этому определению. Из этого определения следует ограничение на максимально возможную массу элементарной частицы. Именно, оказывается, что максимально возможное значение массы элементарной частицы составляет 10^{-5} г при радиусе 10^{-33} см. Частица такой массы постулирована М. А. Марковым и названа максимомом (см. также гл. XII, § 1).

5. Другим важнейшим свойством элементарных частиц является их многочисленность.

Термин «элементарная частица» в момент его появления отражал всегда существовавшую в науке тенденцию стараться усмотреть во многих и разных физических явлениях действие небольшого числа неких элементарных сущностей. И действительно, в двадцатые годы физикам казалось, что весь мир состоит из элементарных частиц трех сортов — электронов, протонов и квантов электромагнитного излучения. В тридцатые годы число элементарных частиц увеличилось, но не намного. Появились нейтрон, позитрон, мюон, нейтрино. Тогда открытие каждой новой частицы воспринималось физиками как большое праздничное событие. В конце сороковых годов, к удовлетворению теоретиков, были открыты предсказанные ими пионы. Но уже в пятидесятые годы было открыто около десятка новых, так называемых «странных» частиц, существование которых оказалось для теоретиков полнейшей неожиданностью. В шестидесятые годы рост числа вновь открываемых частиц принял угрожающие размеры.

*) В литературе «составные части» элементарных частиц (кварки, глюоны, партоны) обычно также называются частицами. Введение для этих «составных частей» термина субчастица продиктовано стремлением подчеркнуть как их фундаментальное отличие от обычных элементарных частиц, так и качественно новый смысл понятия «состоит из» в применении к структуре элементарных частиц,

Количество известных частиц уже далеко перевалило за сотню, т. е. значительно превышает, например, число элементов, известных к моменту открытия Д. И. Менделеевым его периодической системы элементов.

При таком обилии частиц, конечно, уже нет надежды получить сколько-нибудь простое объяснение микроструктуры вещества, принимая на существующем этапе развития физики, т. е. когда доступны измерению расстояния примерно до 10^{-14} — 10^{-15} см, за фундаментальные первичные сущности сами элементарные частицы. Да и сам термин «элементарная частица» становится таким же анахронизмом, как и «атом» (по-гречески — «неделимый»).

Но если не сами элементарные частицы, то что же принимать за первичные сущности сейчас? Ведь на каждом этапе развития физики такие сущности находились.

Обратное движение в сторону уменьшения числа первичных сущностей началось в 1957 г. Первый этап этого движения завершился тем, что силы или, как чаще говорят, взаимодействия между частицами свелись всего лишь к четырем фундаментальным типам взаимодействий.

Следующий этап начался в 1963 г. и привел к тому, что большинство элементарных частиц стало трактоваться как составленные из более первичных субчастиц — кварков и глюонов. Этот этап будет рассмотрен в § 7. Параллельно этому с конца шестидесятих годов стали выдвигаться теории, в которых уменьшалось не только число элементарных частиц, но и число фундаментальных взаимодействий. Этих вопросов мы коротко коснемся в § 8.

Таблица 7.1. Типы взаимодействий элементарных частиц

№	Тип взаимодействия	Относительная интенсивность взаимодействия	Радиус действия сил, см
1	Сильные	1	10^{-13}
2	Электромагнитные	10^{-4}	∞
3	Слабые	10^{-24} (10^{-12} ?)	10^{-11}
4	Гравитационные	10^{-40}	∞

6. Основные фундаментальные взаимодействия приведены в табл. 7.1. В этой таблице мы указали порядок интенсивности каждого взаимодействия, условно приняв интенсивность сильных взаимодействий за единицу. Эти порядки интенсивности в какой-то мере условны (и поэтому различны у разных авторов), так как однозначного метода сравнения интенсивностей разных взаимодействий не существует. Принятое нами определение интенсивности

взаимодействия соответствует сравнению вызываемых разными взаимодействиями сил при фиксированном расстоянии между частицами. Например, сила гравитационного взаимодействия между двумя протонами равна

$$F_{\text{гр}} \approx \frac{\kappa M_{\text{p}}^2}{r^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-8} (2 \cdot 10^{-24})^2}{r^2} = \frac{2,7 \cdot 10^{-55}}{r^2} \text{ дин,}$$

где κ — постоянная всемирного тяготения, равная $6,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \text{ с}^{-2}$, в то время как кулоновская электростатическая сила по абсолютной величине равна

$$F_{\text{эл}} = \frac{e^2}{r^2} = \frac{(5 \cdot 10^{-10})^2}{r^2} \text{ дин.}$$

Отношение этих сил в соответствии с нашей таблицей равно

$$\frac{F_{\text{гр}}}{F_{\text{эл}}} = 10^{-36}. \quad (7.5)$$

Разумеется, частицы надо выбирать так, чтобы они были подвержены обоим сравниваемым взаимодействиям, а расстояния — в пределах радиусов действия сил обоих типов. Конечно, придирчивый (или вдумчивый) читатель, вероятно, скажет, что и это определение относительной интенсивности взаимодействий неоднозначно, так как, взяв вместо двух протонов два электрона, мы получили бы для того же самого отношения значение $2 \cdot 10^{-43}$, а не 10^{-36} . Однако это обстоятельство не так существенно, поскольку, говоря об интенсивности взаимодействий, мы здесь стремимся не столько к точности, сколько к наглядности. Существуют и точные формулировки понятия интенсивности каждого взаимодействия, позволяющие определить его интенсивность в каждой конкретной ситуации.

У слабых взаимодействий в скобках поставлена вторая, на много порядков большая интенсивность (которая, однако, все же далеко не так велика, чтобы переместить эти взаимодействия на другое место в общей иерархии). Происхождение этой второй интенсивности таково. Из теории следует, что за счет слабых взаимодействий между нуклонами будут возникать силы, в 10^{24} раз более слабые, чем силы, обусловленные сильными взаимодействиями. Существуют указания, что, кроме этого, слабые взаимодействия способны создавать и такие нуклон-нуклонные силы, которые не более чем на 10 порядков слабее сил, возникающих за счет сильных взаимодействий.

Выясним теперь, в каких областях явлений существенны те или иные силы. Самыми интенсивными являются сильные взаимодействия. Именно они создают ядерные силы, т. е. обеспечивают высокую стабильность атомных ядер. Сильные взаимодействия создают высокоинтенсивные силы не только между нуклонами, но и между многими другими частицами — пионами, каонами, гиперонами и т. д. Кроме того, сильные взаимодействия приводят к интен-

сивному рождению новых частиц при столкновениях частиц высоких энергий.

Но у сильных взаимодействий есть и слабые стороны, позволяющие в ряде ситуаций выдвигаться на первый план другим взаимодействиям. Во-первых, сильные взаимодействия — самые короткодействующие в природе. Их роль быстро становится ничтожной при переходе к расстояниям, превышающим 10^{-13} см. Поэтому, обеспечивая стабильность ядер, эти силы практически не влияют на атомные явления (см. гл. II, § 1). Другим «слабым местом» сильных взаимодействий является их неуниверсальность. Существуют частицы (фотон, электрон, мюон, нейтрино), которые не подвержены действию сил, обусловленных сильными взаимодействиями, и не могут рождаться за счет сильных взаимодействий при столкновениях. Частицы, подверженные сильным взаимодействиям, называются *адронами* (термин Л. Б. Окуня). К адронам принадлежит большинство известных элементарных частиц. Наконец, третьим ограничительным свойством сильных взаимодействий является то, что для них существует ряд законов сохранения, не выполняющихся по отношению к другим взаимодействиям. Ограничения такого рода мы подробно рассмотрим в последующих трех параграфах, а в § 7 поясним, как это связано с симметриями различных взаимодействий.

Следующими по интенсивности являются электромагнитные взаимодействия. Их интенсивность значительно ниже сильных, но на много порядков выше, чем остальных. В отдельных случаях электромагнитные взаимодействия оказываются конкурентоспособными по отношению к сильным даже в области действия последних. Например, ниже, в гл. X, мы увидим, что именно кулоновскими силами объясняется процесс деления ядер. Но главной областью деятельности электромагнитных сил являются расстояния от 10^{-12} см и до сантиметров. Тут и структура атомов, молекул, кристаллов, а также химические реакции, термические, механические свойства тел, силы трения, радиоволны, словом, подавляющее большинство физических явлений, с которыми имеет дело человек. Часто электромагнитные взаимодействия играют роль и на расстояниях вплоть до космических. Достаточно упомянуть об излучении Солнца и звезд.

Подобно сильным электромагнитные взаимодействия имеют ряд свойств, ограничивающих проявление их мощи. Во-первых, электромагнитные взаимодействия у разных частиц проявляются с различной интенсивностью. Наиболее велики эти взаимодействия у электрически заряженных частиц. Слабее проявляются электромагнитные взаимодействия у нейтральных частиц с ненулевыми массой и спином. Такие частицы обладают магнитными моментами, имеющими порядок $e\hbar/2Mc$, где M — масса частицы. Через этот момент они в основном и взаимодействуют с электромагнитным полем.

Еще слабее электромагнитные взаимодействия проявляются у нейтральных бесспиновых частиц, например у нейтрального пиона. Наконец, нейтрино практически не подвержены электромагнитным взаимодействиям. Во-вторых, для электромагнитных взаимодействий соблюдаются некоторые из законов сохранения, которые нарушаются в слабых (но не в сильных) взаимодействиях (см. следующие три параграфа). Наконец, исключительно важным свойством электромагнитных взаимодействий является наличие как отталкивания, так и притяжения в законе Кулона. Из-за этого, например, взаимодействие между атомами и вообще между любыми двумя телами с нулевыми суммарными зарядами имеет короткий радиус действия, несмотря на длиннодействующий характер кулоновских сил.

Силы между частицами, вызываемые слабыми взаимодействиями, на всех доступных исследованию расстояниях безнадежно малы по сравнению с силами, обусловленными сильными и электромагнитными взаимодействиями. Правда, слабые взаимодействия так быстро нарастают с уменьшением расстояний, что в масштабах порядка 10^{-17} — 10^{-18} см они могут стать сравнимыми с сильными. Но исследования на таких расстояниях пока лежат вне технических возможностей. Слабые взаимодействия порождают не только силы, но и процессы взаимопревращений частиц. И здесь эти взаимодействия, оказывается, способны делать многое, недоступное как сильным, так и электромагнитным взаимодействиям. Так, только под влиянием слабых взаимодействий частица сигма-плюс-гиперон распадается на протон и нейтральный пион:



Многие другие частицы (гипероны, каоны, мюоны) были бы стабильными при отсутствии слабых взаимодействий. Только благодаря слабым взаимодействиям идет β -распад.

И уже совсем слабое взаимодействие — гравитационное — находит свое место во Вселенной за счет трех его свойств: дальности действия, абсолютной универсальности и одинаковости знака сил между любой парой частиц. Последнее свойство приводит к тому, что гравитационные силы всегда растут с увеличением гравитирующих тел. Поэтому гравитация, несмотря на ее ничтожную относительную интенсивность, всегда проявляется для достаточно больших тел. В мире элементарных частиц роль гравитации ничтожна. И универсальность, и одинаковость знака гравитационных сил, как показал А. Эйнштейн, связаны с их геометрической природой. Гравитационные силы представляют собой не что иное, как проявление искривления четырехмерного пространства-времени.

7. Разделение всех взаимодействий на 4 типа считалось абсолютным лишь на некотором этапе изучения элементарных частиц. По мере накопления и уточ-

нения опытных данных у взаимодействий различных типов обнаруживались глубокие («не лежащие на поверхности») родственные свойства. На основе этих родственных свойств выдвигались гипотезы о сближении и даже объединении взаимодействий различных типов. Две такие гипотезы получили широкое признание и позволили сделать ряд оправдавшихся предсказаний, т. е. стали теориями. Это — теория Вайнберга — Салама (1967), в которой объединены слабые и электромагнитные взаимодействия, а также теория, получившая название квантовой хромодинамики, в которой различные проявления сильных взаимодействий сводятся к взаимодействию так называемых кварковых и глюонных полей. При этом обе теории имеют почти одинаковые математические формулировки (см. §§ 7, 8).

8. Почти все элементарные частицы нестабильны. Частиц, стабильных в свободном состоянии, существует всего девять: протон, электрон, фотон, а также антипротон, позитрон и четыре сорта нейтрино. Многие частицы имеют времена жизни, колоссальные по сравнению с характерным временем пролета 10^{-23} с. Так, нейтрон живет 11,7 мин, мюон — 10^{-6} с, заряженный пион — 10^{-8} с, гипероны и каоны — 10^{-10} с. Как мы увидим ниже, все эти частицы распадаются только за счет слабых взаимодействий, т. е. были бы стабильными, если бы слабых взаимодействий не существовало. Еще меньшее время (порядка 10^{-16} с) существуют нейтральный пион и эта-мезон. Распад этих частиц обусловлен электромагнитными взаимодействиями. Наконец, существует большое количество частиц, времена жизни которых столь близки к времени пролета, что многие из них частицами можно считать с большой натяжкой. Эти частицы называются *резонансами*, так как они регистрируются не непосредственно, а по резонансам на кривых зависимости различных сечений от энергии, примерно так же, как, например, уровни ядер идентифицируются по резонансам в сечениях ядерных реакций. Многие резонансные состояния часто трактуются как возбужденные состояния нуклонов и некоторых других частиц.

§ 2. Законы сохранения

1. По трем причинам законы сохранения играют в физике элементарных частиц несравненно большую роль, чем в любом другом разделе физики.

Первая причина состоит в том, что для элементарных частиц сейчас не существует сколько-нибудь последовательной теории, но хорошо соблюдаются законы сохранения.

Представим себе, что мы не знаем ни уравнений Ньютона, ни даже (что еще более сблизит эту ситуацию с той, которая имеет место в теории элементарных частиц) дифференциального и интегрального исчисления, но знаем законы сохранения энергии, импульса, момента и центра инерции. Ясно, что при таком состоянии теории тяготения в работах по небесной механике законы сохранения занимали бы главенствующее положение.

Второй причиной является обилие законов сохранения в мире элементарных частиц. Как мы увидим дальше, существует целый