

Физика атома и атомного ядра

6.9. Элементарные частицы

Существование *элементарных частиц* ученые обнаружили при исследовании ядерных процессов, поэтому вплоть до середины XX века физика элементарных частиц была разделом ядерной физики. В настоящее время эти разделы физики являются близкими, но самостоятельными, объединенными общностью многих рассматриваемых проблем и применяемыми методами исследования. **Главная задача физики элементарных частиц – это исследование природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.**

Представление о том, что мир состоит из *фундаментальных частиц*, имеет долгую историю. Впервые мысль о существовании мельчайших невидимых частиц, из которых состоят все окружающие предметы, была высказана за 400 лет до нашей эры греческим философом Демокритом. Он назвал эти частицы атомами, т. е. неделимыми частицами. Наука начала использовать представление об атомах только в начале XIX века, когда на этой основе удалось объяснить целый ряд химических явлений. В 30-е годы XIX века в теории электролиза, развитой М. Фарадеем, появилось понятие иона и было выполнено измерение элементарного заряда. Конец XIX века ознаменовался открытием явления радиоактивности (1896 г., А. Беккерель), а также открытиями электронов (1897 г., Дж. Томсон) и α -частиц (1899 г., Э. Резерфорд). В 1905 году в физике возникло представление о квантах электромагнитного поля – фотонах (А. Эйнштейн).

В 1911 году было открыто атомное ядро (Э. Резерфорд) и окончательно было доказано, что атомы имеют сложное строение. В 1919 году Резерфорд в продуктах расщепления ядер атомов ряда элементов обнаружил протоны. В 1932 году Дж. Чедвик открыл нейтрон. Стало ясно, что ядра атомов, как и сами атомы, имеют сложное строение. Возникла протон-нейтронная теория строения ядер (Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг). В том же 1932 году в космических лучах был открыт позитрон (К. Андерсон). Позитрон – положительно заряженная частица, имеющая ту же массу и тот же (по модулю) заряд, что и электрон. Существование позитрона было предсказано П. Дираком в 1928 году. В эти годы были обнаружены и исследованы взаимные превращения протонов и нейтронов и стало ясно, что эти частицы также не являются неизменными элементарными «кирпичиками» природы. В 1937 году в космических лучах были обнаружены частицы с массой в 207 электронных масс, названные *мюонами* (μ -мезонами). Затем в 1947–1950 годах были открыты *пионы* (т. е. π -мезоны), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между нуклонами в ядре. В последующие годы число вновь открываемых частиц стало быстро расти. Этому способствовали исследования космических лучей, развитие ускорительной техники и изучение ядерных реакций.

В настоящее время известно около 400 субъядерных частиц, которые принято называть элементарными. Подавляющее большинство этих частиц **являются нестабильными**. Исключение составляют лишь фотон, электрон,

протон и нейтрино. Все остальные частицы через определенные промежутки времени испытывают **самопроизвольные** превращения в другие частицы. Нестабильные элементарные частицы сильно отличаются друг от друга по временам жизни. Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон. Время жизни нейтрона порядка 15 мин. Другие частицы «живут» гораздо меньшее время. Например, среднее время жизни μ -мезона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, нейтрального π -мезона – $0,87 \cdot 10^{-16}$ с. Многие массивные частицы – гипероны – имеют среднее время жизни порядка 10^{-10} с.

Существует несколько десятков частиц со временем жизни, превосходящим 10^{-17} с. По масштабам микромира это значительное время. Такие частицы называют **относительно стабильными**. Большинство **короткоживущих** элементарных частиц имеют времена жизни порядка 10^{-22} – 10^{-23} с.

Способность к взаимным превращениям – это наиболее важное свойство всех элементарных частиц. Они способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться). Это относится также и к стабильным частицам с той только разницей, что превращения стабильных частиц происходят не самопроизвольно, а при взаимодействии с другими частицами. Примером может служить **аннигиляция** (т. е. **исчезновение**) электрона и позитрона, сопровождающаяся рождением фотонов большой энергии. Может протекать и обратный процесс – **рождение** электронно-позитронной пары, например, при столкновении фотона достаточно большой энергии с ядром. Такой опасный двойник, каким для электрона является позитрон, есть и у протона. Он называется **антипротоном**. Электрический заряд антипротона отрицателен. В настоящее время **античастицы** найдены у всех частиц. Античастицы противопоставляются частицам потому, что при встрече любой частицы со своей античастицей происходит их аннигиляция, т. е. обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.

Античастица обнаружена даже у нейтрона. Нейтрон и антинейтрон отличаются только знаками магнитного момента и так называемого барионного заряда. Возможно существование атомов **антивещества**, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка – из позитронов. При аннигиляции антивещества с веществом энергия покоя превращается в энергию квантов излучения. Это огромная энергия, значительно превосходящая ту, которая выделяется при ядерных и термоядерных реакциях.

В многообразии элементарных частиц, известных к настоящему времени, обнаруживается более или менее стройная система классификации. В табл. 1 представлены некоторые сведения о свойствах элементарных частиц со временем жизни более 10^{-20} с. Из многих свойств, характеризующих элементарную частицу, в таблице указаны только масса частицы (в электронных массах), электрический заряд (в единицах элементарного заряда) и момент импульса (так называемый **спин**) в единицах постоянной Планка $\hbar = h / 2\pi$. В таблице указано также среднее время жизни частицы.

Группа		Название частицы	Символ		Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)
			Частица	Античастица				
Фотоны		Фотон	γ		0	0	1	Стабилен
Лептоны		Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1 / 2	Стабильно
		Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1 / 2	Стабильно
		Электрон	e^-	e^+	1	-1 1	1 / 2	Стабилен
		Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8	-1 1	1 / 2	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Адроны	Мезоны	Пи-мезоны	π^0		264,1	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$
			π^+	π^-	273,1	1 -1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
		К-мезоны	K^+	K^-	966,4	1 -1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$
			K^0	$\bar{K}^0$	974,1	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$
		Эта-нуль-мезон	η^0		1074	0	0	$\approx 10^{-18}$
	Барionsы	Протон	p	$\bar{p}$	1836,1	1 -1	1 / 2	Стабилен
		Нейтрон	n	$\bar{n}$	1838,6	0	1 / 2	898
		Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1 / 2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1 -1	1 / 2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1 / 2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1 1	1 / 2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1 / 2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1 1	1 / 2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
	Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1 1	1 / 2	$0,82 \cdot 10^{-11}$	

Таблица 1

Элементарные частицы объединяются в три группы: **фотоны**, **лептоны** и **адроны**.

К группе **фотонов** относится единственная частица – фотон, которая является носителем электромагнитного взаимодействия.

Следующая группа состоит из легких частиц – **лептонов**. В эту группу входят два сорта нейтрино (электронное и мюонное), электрон и μ -мезон. К лептонам относятся еще ряд частиц, не указанных в таблице. Все лептоны имеют спин $J = 1/2$, они являются фермионами.

Третью большую группу составляют тяжелые частицы, называемые **адронами**. Эта группа делится на две части. Более легкие частицы составляют подгруппу **мезонов**. Наиболее легкие из них – положительно и отрицательно заряженные, а также нейтральные π -мезоны с массами порядка 250 электронных масс (табл. 1). Пионы являются квантами ядерного поля,

подобно тому, как фотоны являются квантами электромагнитного поля. В эту подгруппу входят также четыре К-мезона и один η^0 -мезон. Все мезоны имеют спин, равный нулю.

Вторая подгруппа – **барионы** – включает более тяжелые частицы. Она является наиболее обширной. Самыми легкими из барионов являются нуклоны – протоны и нейтроны. За ними следуют так называемые гипероны. Замыкает таблицу омега-минус-гиперон, открытый в 1964 г. Это тяжелая частица с массой в 3273 электронных масс. Все барионы имеют спин $1/2$, т.е. являются фермионами/

Обилие открытых и вновь открываемых адронов навела ученых на мысль, что все они построены из каких-то других более фундаментальных частиц. В 1964 г. американским физиком М. Гелл-Маном была выдвинута гипотеза, подтвержденная последующими исследованиями, что все тяжелые частицы – адроны – построены из более фундаментальных частиц, названных **кварками**. На основе кварковой гипотезы не только была понята структура уже известных адронов, но и предсказано существование новых. Теория Гелл-Мана предполагала существование трех кварков и трех антикварков, соединяющихся между собой в различных комбинациях. Так, каждый барион состоит из трех кварков, антибарион – из трех антикварков. Мезоны состоят из пар кварк–антикварк.

С принятием гипотезы кварков удалось создать стройную систему элементарных частиц. Однако предсказанные свойства этих гипотетических частиц оказались довольно неожиданными. Электрический заряд кварков должен выражаться дробными числами, равными $2/3$ и $1/3$ элементарного заряда.

Многочисленные поиски кварков в свободном состоянии, производившиеся на ускорителях высоких энергий и в космических лучах, оказались безуспешными. Ученые считают, что одной из причин ненаблюдаемости свободных кварков являются, возможно, их очень большие массы. Это препятствует рождению кварков при тех энергиях, которые достигаются на современных ускорителях. Тем не менее, большинство специалистов сейчас уверены в том, что кварки существуют внутри тяжелых частиц – адронов.

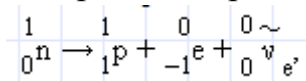
Фундаментальные взаимодействия. Процессы, в которых участвуют различные элементарные частицы, сильно различаются по энергиям и характерным временам их протекания. Согласно современным представлениям, в природе осуществляется четыре вида взаимодействий, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам: **сильное**, **электромагнитное**, **слабое** и **гравитационное**. Эти виды взаимодействий называют **фундаментальными**.

Сильное (или ядерное) взаимодействие – наиболее интенсивное. Оно обуславливает исключительно прочную связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов. В сильном взаимодействии могут принимать

участие только тяжелые частицы – адроны (мезоны и барионы). Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях порядка 10^{-15} м и менее. Поэтому его называют короткодействующим.

Электромагнитное взаимодействие. В нем могут принимать участие любые электрически заряженные частицы, а так же фотоны – кванты электромагнитного поля. Электромагнитное взаимодействие ответственно, в частности, за существование атомов и молекул. Оно определяет многие свойства веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях. Кулоновское отталкивание протонов приводит к неустойчивости ядер с большими массовыми числами. Электромагнитное взаимодействие обуславливает процессы поглощения и излучения фотонов атомами и молекулами вещества и многие другие процессы физики микро- и макромира.

Слабое взаимодействие – определяет ход наиболее медленных процессов, протекающих в микромире. В нем могут принимать участие любые элементарные частицы, кроме фотонов. Слабое взаимодействие ответственно за протекание процессов с участием нейтрино или антинейтрино, например, β -распад нейтрона



а также безнейтринные процессы распада частиц с большим временем жизни ($\tau \geq 10^{-10}$ с).

Гравитационное взаимодействие присуще всем без исключения частицам, однако из-за малости масс элементарных частиц силы гравитационного взаимодействия между ними пренебрежимо малы и в процессах микромира их роль незначительна. Гравитационные силы играют решающую роль при взаимодействии космических объектов (звезд, планет и т. п.) с их огромными массами.

В 30-е годы XX века возникла гипотеза о том, что в мире элементарных частиц взаимодействия осуществляются посредством обмена квантами какого-либо поля. Эта гипотеза первоначально была выдвинута нашими соотечественниками И. Е. Таммом и Д. Д. Иваненко. Они предположили, что фундаментальные взаимодействия возникают в результате обмена частицами, подобно тому, как ковалентная химическая связь атомов возникает при обмене валентными электронами, которые объединяются на незаполненных электронных оболочках.

Взаимодействие, осуществляемое путем обмена частицами, получило в физике название **обменного взаимодействия**. Так, например, электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами, возникает вследствие обмена фотонами – квантами электромагнитного поля.

Теория обменного взаимодействия получила признание после того, как в 1935 г. японский физик Х. Юкава теоретически показал, что сильное взаимодействие между нуклонами в ядрах атомов может быть объяснено, если предположить, что нуклоны обмениваются гипотетическими частицами, получившими название мезонов. Юкава вычислил массу этих частиц, которая оказалась приблизительно равной 300 электронным массам. Частицы с такой

массой были впоследствии действительно обнаружены. Эти частицы получили название π -мезонов (пионов). В настоящее время известны три вида пионов: π^+ , π^- и π^0 (см. табл. 1).

В 1957 году было теоретически предсказано существование тяжелых частиц, так называемых **векторных бозонов** W^+ , W^- и Z^0 , обуславливающих обменный механизм слабого взаимодействия. Эти частицы были обнаружены в 1983 году в экспериментах на ускорителе на встречных пучках протонов и антипротонов с высокой энергией. Открытие векторных бозонов явилось очень важным достижением физики элементарных частиц. Это открытие ознаменовало успех теории, объединившей электромагнитное и слабое взаимодействия в единое так называемое **электрослабое взаимодействие**. Эта новая теория рассматривает электромагнитное поле и поле слабого взаимодействия как разные компоненты одного поля, в котором наряду с квантом участвуют векторные бозоны.

После этого открытия в современной физике значительно возросла уверенность в том, что все виды взаимодействий тесно связаны между собой и, по существу, являются различными проявлениями некоторого единого поля. Однако объединение всех взаимодействий остается пока лишь привлекательной научной гипотезой.

Физики-теоретики прилагают значительные усилия, чтобы рассмотреть на единой основе не только электромагнитное и слабое, но и сильное взаимодействие. Эта теория получила название **Великого объединения**. Ученые предполагают, что и у гравитационного взаимодействия должен быть свой переносчик – гипотетическая частица, названная **гравитоном**. Однако эта частица до сих пор не обнаружена.

В настоящее время считается доказанным, что единое поле, объединяющее все виды взаимодействия, может существовать только при чрезвычайно больших энергиях частиц, недостижимых на современных ускорителях. Такими большими энергиями частицы могли обладать только на самых ранних этапах существования Вселенной, которая возникла в результате так называемого **Большого взрыва** (Big Bang). Космология – наука об эволюции Вселенной – предполагает, что Большой взрыв произошел 18 миллиардов лет тому назад. В стандартной модели эволюции Вселенной предполагается, что в первый период после взрыва температура могла достигать 10^{32} К, а энергия частиц $E = kT$ достигать значений 10^{19} ГэВ. В этот период материя существовала в форме кварков и нейтрино, при этом все виды взаимодействий были объединены в единое силовое поле. Постепенно по мере расширения Вселенной энергия частиц уменьшалась, и из единого поля взаимодействий сначала выделилось гравитационное взаимодействие (при энергиях частиц $\leq 10^{19}$ ГэВ), а затем сильное взаимодействие отделилось от электрослабого (при энергиях порядка 10^{14} ГэВ). При энергиях порядка 10^3 ГэВ все четыре вида фундаментальных взаимодействий оказались разделенными. Одновременно с этими процессами шло формирование более сложных форм материи – нуклонов, легких ядер, ионов, атомов и т. д.

Космология в своей модели пытается проследить эволюцию Вселенной на разных этапах ее развития от Большого взрыва до наших дней, опираясь на законы физики элементарных частиц, а также ядерной и атомной физики.