

## ЧАСТИЦЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

## 15.1. Стабильные и нестабильные частицы

Все известные нам виды материи состоят из частиц. Пожалуй, из основных открытий физиков, касающихся Вселенной, самым важным было выяснение зернистого характера строения материи. Это — ключ к пониманию поведения и строения газов, жидкостей и твердых тел, к пониманию химических реакций и к теориям, способным объяснять явления не только атомной физики, но и макрофизики. Уже в 1756 г. Франклин отдавал себе отчет о зернистости материи, несущей электрические заряды. Рассмотрев явление

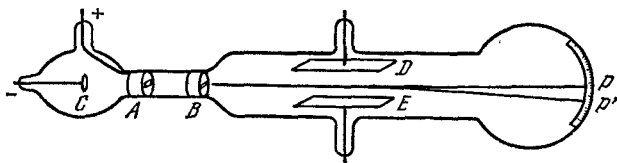


Рис. 15.1. Прибор Дж. Дж. Томсона (1897 г.) для измерения  $e/m$ .

электростатической индукции, он с поразительной прозорливостью писал: «Электрическая материя состоит из чрезвычайно мелких частиц, так как даже через самую плотную обычную материю она способна проникать с такой легкостью, как если бы не существовало никакого заметного сопротивления». В 1897 г. Дж. Дж. Томсон показал, что катодные лучи способны отклоняться электростатическим и магнитным полями (рис. 15.1). Затем он вычислил массу частиц (электронов), образующих эти лучи, которая по порядку величины оказалась равной  $10^{-3}$  массы атома водорода. Эта работа, вместе с одновременным открытием эффекта Зеемана (расщепления спектральных линий магнитным полем), ознаменовала начало эпохи широкого признания электрического строения материи. В 1911—1913 гг. последовало открытие ядра Резерфордом. Он показал, что атом состоит из положительно заряженного ядра, окруженного

системой электронов, удерживаемых кулоновскими силами притяжения к ядру. Было также показано, что суммарный отрицательный заряд электронов атома равен положительному заряду ядра. Ядро является носителем большей части массы атома; однако линейные размеры ядра чрезвычайно малы по сравнению с линейными размерами всего атома. Как сказал в 1913 г. Бор, «эта модель атома заслуживает большого внимания».

После появления в 1913 г. модели строения атома Резерфорда — Бора из элементарных частиц были известны электрон, фотон и около 95 различных ядер.

(Элементарной можно практически считать всякую частицу, которую трудно себе представить как состоящую из других частиц.) Открытие в 1932 г. нейтрона (нейтральной частицы с массой, слегка превышающей массу протона) привело к представлению о ядрах как комбинациях из нейтронов и протонов; к этому времени были известны четыре элементарные частицы: нейтрон ( $n$ ), протон ( $p$ ), электрон ( $e$ ) и фотон ( $\gamma$ ). С того времени число открытых элементарных частиц непрерывно росло. В 1932 г. был открыт позитрон ( $e^+$ ) — положительно заряженный аналог электрона. В тридцатых же годах с большой достоверностью было установлено существование нейтрино ( $\nu$ ) — нейтральных частиц, лишенных массы покоя и характеризующихся весьма слабым взаимодействием со всеми прочими частицами. В 1936 г. были



Рис 15.2. Лаборатория имени Кэвендиша в Кембриджском университете. Здесь Дж. Дж. Томсон открыл электрон. Здесь же Резерфордом было осуществлено первое искусственное ядерное превращение. (Фотоснимок Британской информационной службы.)

открыты положительно и отрицательно заряженные частицы ( $\mu^+$  и  $\mu^-$ ), названные мюонами (или мю-мезонами); их масса приблизительно в 208 раз больше массы электрона. Затем темпы открытия новых частиц ускорились: в 1947 г. была открыта новая пара заряженных частиц ( $\pi^+$  и  $\pi^-$ ), названных пионами (или пи-мезонами \*)); в 1950 г. был обнаружен нейтральный аналог пионов ( $\pi^0$ ); в 1955 г. — отрицательно заряженный аналог протона (антипротон,  $\bar{p}$ ); затем — антинейтрон ( $\bar{n}$ ); новое семейство заряженных и нейтральных ме-

\* Слово мезон дословно означает «промежуточный» — в том смысле, что его масса занимает промежуточное положение между массами электрона и протона.

зонов ( $K^+$ ,  $K^0$ ,  $K^-$ ) и более тяжелых частиц ( $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ); античастицы ко всем перечисленным частицам; десятки очень короткоживущих ( $< 10^{-20}$  сек) мезонов и тяжелых частиц и даже новое семейство частиц типа нейтрино.

Действительно ли все эти частицы элементарны? Не могут ли некоторые из них, а может быть и все, рассматриваться как сочетания других частиц, как связанные состояния двух или большего числа частиц? Не могут ли эти частицы представлять собой возбужденные состояния одной частицы, подобно тому как атом водорода может иметь многие различные возбужденные состояния? Весьма вероятно, что значительная часть элементарных частиц

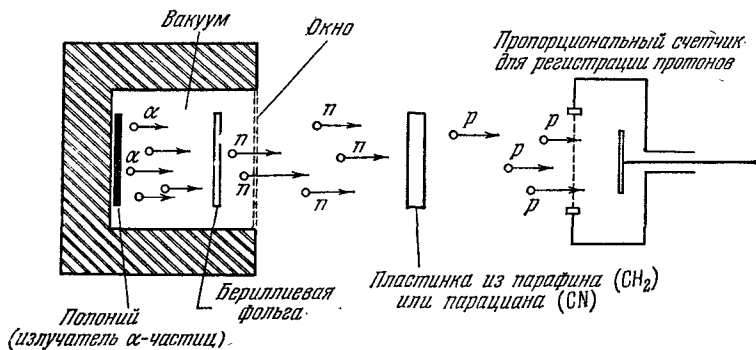
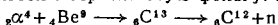


Рис. 15.3. Схема прибора Чадвика для наблюдения нейтронов (1932 г.). В этих опытах альфа-лучи из полония ударяются о бериллиевую фольгу. В результате ядерной реакции



выделяются нейтроны, которые в свою очередь ударяются о парафиновую пластинку. В процессе упругих столкновений нейтроны отдают свою энергию протонам; последние обнаруживаются посредством пропорционального счетчика, который позволил также обнаруживать ядра азота в тех случаях, когда вместо  $CH_2$  применялся CN. Эти опыты показали, что масса нейтрона приблизительно равна массе протона.

является отражением нашего незнания ответов на эти вопросы. Стабильны только две из заряженных частиц — электрон и протон (по крайней мере в нашей части Вселенной). Во Вселенной из античастиц стабильными были бы позитрон и антипротон. Все остальные заряженные частицы либо быстро и самопроизвольно распадаются (обычно менее чем за  $10^{-6}$  сек), либо испытывают почти мгновенную аннигиляцию (позитроны, антипротоны) при соприкосновении с нормальным веществом. Из нейтральных (незаряженных) частиц только фотоны и нейтрино не испытывают самопроизвольного распада. Свободные нейтроны распадаются по реакции  $n = p + e + \bar{\nu}$  при среднем времени жизни 15 мин, но нейтроны, связанные в ядре, не обязательно распадаются. Связанные нейтроны и протоны способны образовывать устойчивые ядра.

Таким образом, несмотря на обилие разнообразных элементарных частиц, только некоторые из них играют очевидную роль в строении нормального вещества. Нейтроны и протоны вступают

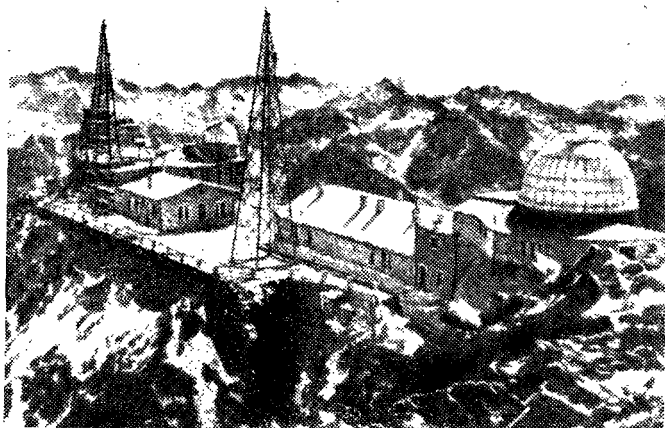


Рис. 15.4. Обсерватория на Пик дю Миди во французских Пиренеях. Высота 2840 м. В левом здании с куполом находится коронограф. Лаборатория для исследования космических лучей расположена непосредственно за этим куполом. По линии горизонта проходит граница с Испанией.

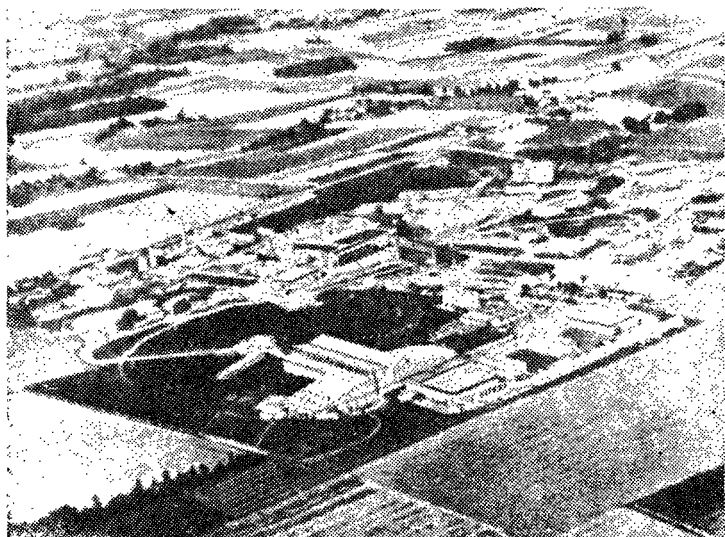


Рис. 15.5. Аэрофотоснимок ядерных лабораторий ЦЕРНа в Женеве. Слева расположен утопленный в грунт протонный синхротрон со знакопеременным градиентом магнитного поля на 28 Гэв диаметром 200 м, ускоряющий протоны до 0,9994 скорости света. Эта установка построена совместными усилиями четырнадцати европейских стран, состоящих членами ЦЕРНа.

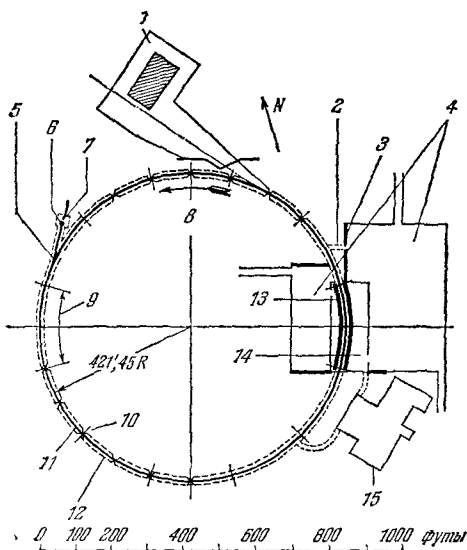


Рис. 15.6. Вид в плане протонного синхротрона на 33 Гэв Национальной лаборатории в Брукхейвене. Ускорители частиц на высокие энергии, расположенные в Брукхейвене, Женеве, Дубне и Беркли, являются наиболее внушительными средствами научного исследования во всем мире. В настоящее время строятся и другие крупные ускорители 1—помещение с водородной камерой; 2—входной канал; 3—ограничительная стенка; 4—экспериментальная площадка; 5—линейный ускоритель; 6—генератор Кокрофта—Уолтона; 7—источник ионов; 8—направление протонного пучка; 9— $30^\circ$ -ный суперпериод; 10—символом X обозначены положения, где имеет место ускорение на высокой частоте; 11—орбита через 240 магнитов; 12—подземный магнитный туннель; 13—экранирование; 14—помещение для мишеней; 15—подсобные помещения (администрация, машинный зал, центр управления, лаборатории, механическая мастерская и т. п.).

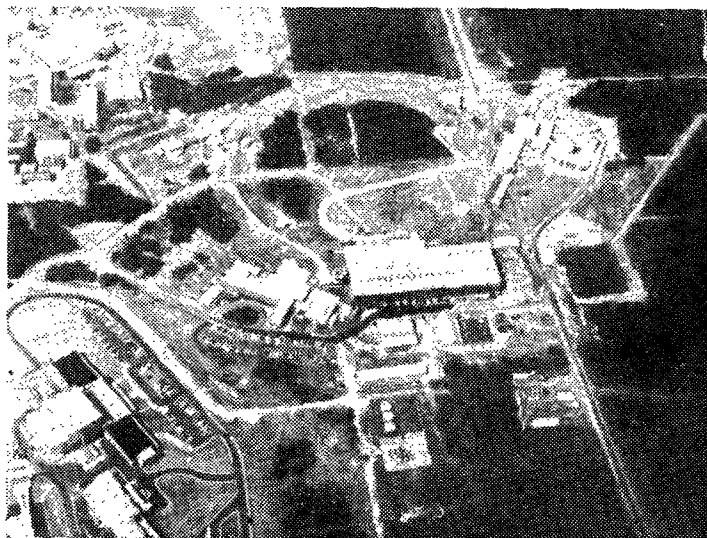
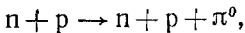


Рис. 15.7. Аэрофотоснимок брукхейвеновского синхротрона со знакопеременным градиентом магнитного поля и подсобных зданий: справа от магнитного кольца—здание с 80-дюймовой пузырьковой камерой; на жидком водороде; слева сверху—здание космотрона; слева внизу—здание графитового исследовательского реактора. (Национальная лаборатория в Брукхейвене).

в связь между собой с образованием заряженных ядер. Вокруг ядра движется электронное облако, и все это вместе составляет атом. Атомы соединяются в молекулы. Большие совокупности молекул образуют макроскопические тела: газы, жидкости, кристаллы... Ускоряемые электроны излучают или поглощают фотоны. Средством исследования переходов между стационарными атомными состояниями является спектроскопия, которая, в совокупности с электронным и ядерным резонансом, играет роль главного инструмента для исследования строения атомов и молекул.

За исключением четырех частиц:  $p$ ,  $n$ ,  $e$  и  $\gamma$ -кванта — природа скрывает роль всех остальных элементарных частиц в строении обычного, стабильного вещества. Нам известно, что протоны и нейтроны сами по себе не являются простыми материальными точками, а имеют конечные размеры и структуру. В этой структуре участвуют другие элементарные частицы, но они настолько прочно связаны (энергии связи сравнимы с массой покоя, умноженной на квадрат скорости света), что требуется относительно огромная энергия для отделения этих частиц от протона (или нейтрона). В случае протона нужно подвести энергию, достаточную для образования энергетического эквивалента массы покоя и кинетической энергии образующихся частиц.

При столкновении нейтрона и протона больших энергий можно получить нейтральные  $\pi^0$ -мезоны:



при условии достаточно большой энергии налетающего нейтрона. Эта энергия должна быть достаточной, чтобы составить сумму кинетических энергий конечных частиц  $n$ ,  $p$  и  $\pi^0$  плюс энергия покоя  $\pi^0$ -мезона, которая равна

$$M(\pi^0)c^2 \cong 140 \text{ Мэв.}$$

С точки зрения сохранения энергии и импульса  $\pi^0$ -мезон был создан в этом акте столкновения; до этого столкновения он не существовал. Энергия для катализации создания  $\pi^0$ -мезона была доставлена

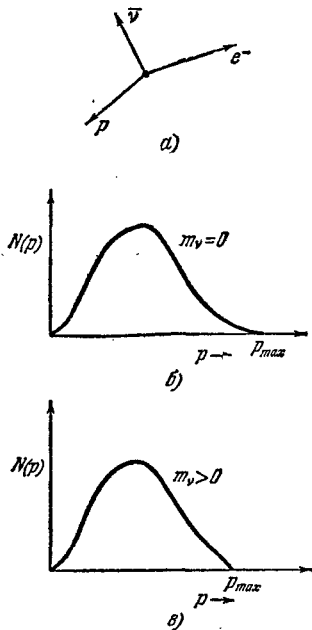


Рис. 15.8. а) Свободный нейтрон распадается на протон и электрон (которые можно наблюдать) и на нейтрино, которое практически невозможно наблюдать. О наличии нейтрино мы узнаем по тому признаку, что векторная сумма импульсов протона и электрона в общем случае не равна импульсу исходного нейтрона. б) Число электронов, приходящееся на единичный интервал импульсов  $N(p)$ , отложено как функция импульса электрона. Если бы масса нейтрино была больше нуля, то получилась бы кривая, показанная на рис. в); в действительности распределение вида а) никогда не наблюдается.

нейтроном и протоном.  $\pi^0$ -мезон может рассматриваться как созданный из вакуума — совершенно аналогично тому, как электронно-позитронная пара создается гамма-лучом. Подробное описание механизма такого рода процессов возможно только на языке релятивистской квантовой теории. Взаимодействие между пионами ( $\pi$ -мезонами) и нуклонами (протонами и нейтронами) таково, что, если бы, пользуясь идеальным микроскопом и очень коротковолновым излучением, можно было наблюдать внутренность нуклона, мы обнаружили бы там присутствие  $\pi^0$ -мезонов; но, если бы из протона или нейтрона один из таких мезонов был выбит, его нехватка была бы быстро восполнена образованием в нуклоне нового мезона. Конечный протон или нейтрон был бы во всех отношениях идентичен нуклону, не катализировавшему образования мезона. Поскольку создание свободного мезона (выбитого из нуклона) является *единственным* результатом, условие сохранения энергии требует, чтобы была подведена энергия, эквивалентная массе покоя мезона.

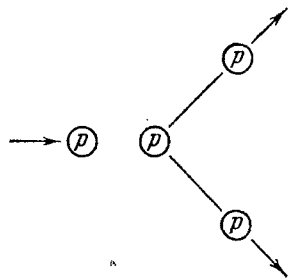


Рис. 15.9. Столкновение двух протонов малой энергии приводит просто к упругому рассеянию. Оба протона ведут себя почти как бильярдные шары.

Для наблюдения большинства элементарных частиц, т. е. всех, за исключением некоторых стабильных (электронов, протонов, связанных в ядрах нейтронов, фотонов), необходимо создавать их при столкновениях частиц высоких энергий. Даже здесь эти частицы могут рас-

падаться настолько быстро, что для исследования их свойств необходимо непрерывно создавать новые такие же частицы. До 1949 г., когда начали работать крупные ускорители, создание нестабильных частиц могло наблюдаться только при столкновениях компонентов космических лучей высоких энергий (обычно протонов и атомных ядер) с ядрами атомов атмосферы или каких-либо плотных материалов, поставленных в виде мишени. К сожалению, малочисленность налетающих частиц и неконтролируемость их энергии создавали огромные трудности в получении точных данных о свойствах образующихся нестабильных частиц. Тем не менее опыты с космическими лучами доставили много ценных данных.

Создание элементарной частицы массы  $M$  требует затраты энергии, по меньшей мере достаточной для того, чтобы несколько превысить энергию  $Mc^2$ , эквивалентную массе покоя. Это не так уж много; самые тяжелые из известных в настоящее время элементарных частиц только в 4000 раз тяжелее электрона, так что их энергия покоя составляет не более нескольких тысячных эрга. Батарейка для карманного фонаря поставляет энергию, достаточную для создания тысяч частиц в секунду. Задача заключается в концентрации этой энергии с тем, чтобы необходимая энергия приходилась

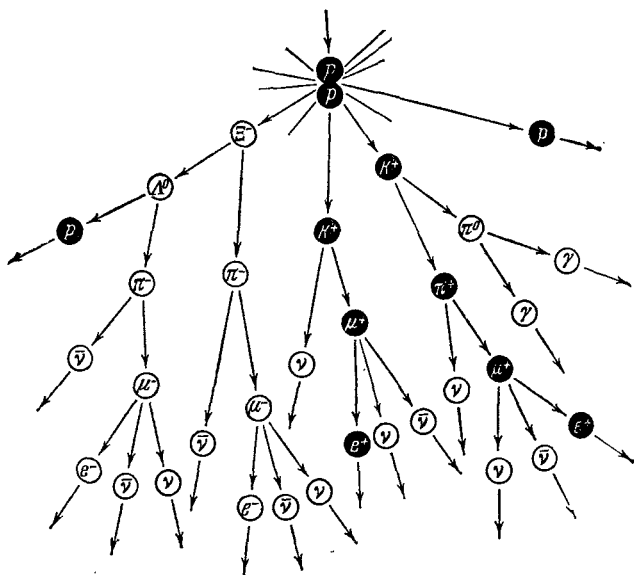


Рис. 15.10. Столкновение двух протонов высокой энергии порождает ливень частиц. Один из исходных протонов отскакивает прочь, не претерпев никаких изменений (*вверху справа*). Другой порождает отрицательный Э-бариион и два положительных К-мезона. Будучи нестабильными, эти частицы затем распадаются на другие частицы, некоторые из которых в свою очередь распадаются. Под конец остаются только стабильные частицы — в описанном процессе около двадцати. (S. V. Treiman, *The Weak Interactions*, *Sci. American* 200, 77, March (1959))

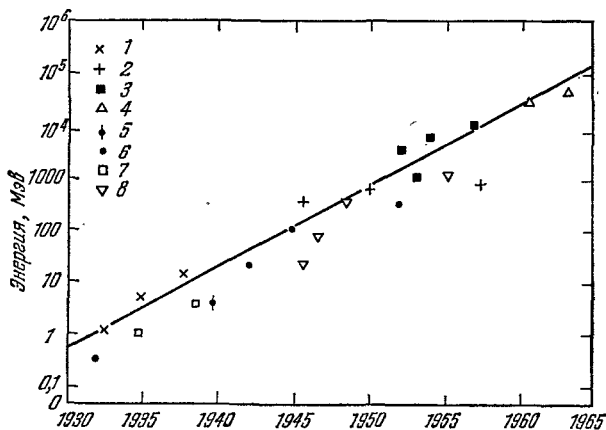


Рис. 15.11. Энергии, достигаемые в ускорителях частиц на высокие энергии, возрастали во всем мире приблизительно в 10 раз за каждое пятилетие, начиная с 1932 г. Каждый крупный скачок следовал за появлением какой-либо принципиально новой идеи, реализуемой в конструкциях ускорителей. Первый циклотрон с фиксированной частотой (1) был построен Лоуренсом в 1932 г.; первым циклотроном с модуляцией частоты (2) был 184-дюймовый циклотрон, построенный в Беркли в 1946 г.; первый протонный слабофокусирующий синхротрон (3), получивший название космотрона, был реализован в 1952 г.; синхротроны с знакопеременным градиентом магнитного поля (4) начали действовать в ЦЕРНе и Брукхэвене соответственно в 1959 и 1960 гг. (R. D. Hill, *Tracking Down Particles*, W. A. Benjamin Inc., New York, 1963) (С 1968 г. работает серпуховский ускоритель протонов на 76 Гэв. (Прим. ред.)); 5—бетатрон, 6—ускоритель Коккрфта—Уолтона, 7—ускоритель Ван-де-Граафа, 8—электронный синхротрон.



## Массы и средние времена жизни частиц

(Насколько нам известно, античастицы имеют такие же спины, массы и средние времена жизни, как и перечисленные частицы, но противоположный заряд.)

Частица	Спин	Масса, $M_{\text{эв}}$		Среднее время жизни, сек
Фотон $\gamma$	1	0		Устойчив
Лептоны $\nu$ (два вида)	1/2	0		Устойчивы
$e^{\mp}$	1/2	$0,511006 \pm 0,000005$		Устойчивы
$\mu^{\mp}$	1/2	$105,655 \pm 0,010$		$2,212 \cdot 10^{-6}$
Мезоны				
$\pi^+$	0	139,59	$\pm 0,05$	$2,55 \cdot 10^{-8}$
$\pi^0$	0	135,00	$\pm 0,05$	$(2,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-16}$
$K^{\pm}$	0	493,9	$\pm 0,2$	$1,22 \cdot 10^{-8}$
$K^0$	0	497,8	$\pm 0,6$	50% $K_1$ , 50% $K_2$
$K_1$				$1,00 \cdot 10^{-10}$
$K_2$				$6 \cdot 10^{-8}$
Барионы				
$P$	1/2	938,256	$\pm 0,015$	Устойчив
$n$	1/2	939,550	$\pm 0,015$	$1,01 \cdot 10^3$
$\Delta$	1/2	1115,36	$\pm 0,14$	$2,5 \cdot 10^{-10}$
$\Sigma^+$	1/2	1189,40	$\pm 0,20$	$0,8 \cdot 10^{-10}$
$\Sigma^-$	1/2	1197,4	$\pm 0,30$	$1,6 \cdot 10^{-10}$
$\Sigma^0$	1/2	1193,0	$\pm 0,5$	$< 0,1 \cdot 10^{-10}$
$\Xi^-$	?	1318,4	$\pm 1,2$	$1,3 \cdot 10^{-10}$
$\Xi^0$	?	1311	$\pm 8$	$1,5 \cdot 10^{-10}$ (1 превращ.)
$\Omega^-$		1676		

на весьма малый объем ( $\sim 10^{-40}$  см<sup>3</sup>), занимаемый одной частицей. Это достигается в крупном ускорителе, способном инициировать столкновение, при котором одиночная налетающая частица является носителем энергии, достаточной, чтобы начать нужную реакцию или создать одну или несколько элементарных частиц. Ускорители на высокие энергии применяются главным образом для ускорения протонов, но для исследования структуры протонов и нейтронов используются современные ускорители электронов на высокие энергии.

Мир элементарных частиц был в значительной части создан физиками, занимавшимися их исследованием. При исследовании нестабильной частицы она должна обнаруживаться быстро, и результаты соответствующих измерений должны регистрироваться раньше, чем она распадется или будет поглощена. В прилагаемой таблице (частично составленной У. Баркасом и А. Розенфельдом) приведены массы и средние времена жизни многих из наиболее устойчивых элементарных частиц.