



# Иметь значение

В классической физике и общей химии , **материя** - это любая субстанция, которая имеет массу и занимает пространство, имея объем . <sup>[ 1 ]</sup> Все повседневные предметы, которых можно потрогать, в конечном счете состоят из атомов , которые состоят из взаимодействующих субатомных частиц . В повседневном, а также в научном использовании *материя* обычно включает атомы и все, что из них состоит, а также любые частицы (или комбинации частиц ), которые действуют так, как будто они имеют как массу покоя , так и объем . Однако она не включает безмассовые частицы , такие как фотоны , или другие энергетические явления или волны, такие как свет или тепло . <sup>[ 1 ]</sup> : 21 <sup>[ 2 ]</sup> Материя существует в различных состояниях (также известных как фазы ). К ним относятся классические повседневные фазы, такие как твердое тело , жидкость и газ - например , вода существует в виде льда , жидкой воды и газообразного пара - но возможны и другие состояния, включая плазму , конденсаты Бозе-Эйнштейна , фермионные конденсаты и кварк-глюонную плазму . <sup>[ 3 ]</sup>



Водород в состоянии плазмы является наиболее распространенной обычной материей во Вселенной.

Обычно атомы можно представить себе как ядро из протонов и нейтронов и окружающее их «облако» вращающихся электронов , которые «занимают пространство». <sup>[ 4 ]</sup> <sup>[ 5 ]</sup> Однако это верно лишь отчасти, поскольку субатомные частицы и их свойства определяются их квантовой природой , а это означает, что они не действуют так, как кажутся повседневные объекты — они могут действовать как волны, а также как частицы , и у них нет четко определенных размеров или положений. В Стандартной модели физики элементарных частиц материя не является фундаментальной концепцией, поскольку элементарные составляющие атомов являются квантовыми сущностями, которые не имеют собственного «размера» или «объема» в каком-либо повседневном смысле этого слова. Из-за принципа исключения и других фундаментальных взаимодействий некоторые «точечные частицы», известные как фермионы ( кварки , лептоны ), и многие композиты и атомы фактически вынуждены сохранять дистанцию от других частиц в повседневных условиях; это создает свойство материи, которое кажется нам материей, занимающей пространство.

На протяжении большей части истории естественных наук люди размышляли о точной природе материи. Идея о том, что материя состоит из дискретных строительных блоков, так называемая корпускулярная теория материи , появилась как в Древней Греции , так и в Древней Индии . <sup>[ 6 ]</sup> Среди ранних философов , предложивших корпускулярную теорию материи, были индийский философ Канада ( ок. VI в. до н. э. ) <sup>[ 7 ]</sup> и греческие философы -досократики Левкипп ( ок. 490 г. до н. э. ) и Демокрит ( ок. 470–380 гг. до н. э. ) <sup>[ 8 ]</sup>

# Связанные концепции

## Сравнение с массой

*Материя* — это общий термин, описывающий любую физическую субстанцию, которая иногда определяется несовместимыми способами в разных областях науки. Некоторые определения основаны на историческом использовании, существовавшем в то время, когда не было причин отличать массу от простого количества материи . В отличие от этого, масса — это не субстанция, а чётко определённое, обширное свойство материи и других субстанций или систем. В физике определены различные типы массы , включая массу покоя , инертную массу и релятивистскую массу .

В физике материю иногда отождествляют с частицами, обладающими массой покоя (т.е. неспособными двигаться со скоростью света), такими как кварки и лептоны. Однако и в физике, и в химии материя проявляет как волновые , так и корпускулярные свойства (так называемый корпускулярно-волновой дуализм ). <sup>[9][10][11]</sup>

## Связь с химическим веществом

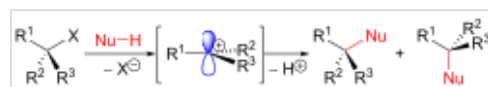
Химическое вещество — это уникальная форма материи с постоянным химическим составом и характерными свойствами . <sup>[12][13]</sup> Химические вещества могут принимать форму одного элемента или химических соединений . Если два или более химических веществ могут быть объединены без реакции , они могут образовать химическую смесь . <sup>[14]</sup> Если смесь разделяется для выделения одного химического вещества в желаемой степени, полученное вещество называется химически чистым . <sup>[15]</sup>

Химические вещества могут существовать в нескольких различных физических состояниях или фазах (например , твёрдых , жидких , газообразных или плазменных ) без изменения своего химического состава. Вещества переходят между этими состояниями под действием температуры или давления . Некоторые химические вещества могут соединяться или преобразовываться в новые вещества посредством химических реакций . Химические вещества, не обладающие такой способностью, называются инертными .

Чистая вода — пример химического вещества с постоянным составом из двух атомов водорода, связанных с одним атомом кислорода (т.е.  $\text{H}_2\text{O}$  ) . Атомное соотношение водорода и кислорода в каждой молекуле воды всегда составляет 2:1. Чистая вода имеет тенденцию к кипению при температуре около 100 °C (212 °F), что является примером одного из характерных свойств, определяющих её. Другие известные химические вещества включают алмаз ( форма элемента углерода ) , поваренную соль (NaCl; ионное соединение ) и рафинированный сахар ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$  ; органическое соединение ).



Пар и жидкая вода — это две разные формы одного и того же чистого химического вещества — воды.



Изображение сформировавшейся молекулы

# Определение

---

## На основе атомов

Определение «материи», основанное на её физической и химической структуре, таково: *материя состоит из атомов* . <sup>[ 16 ]</sup> Такую *атомарную материю* иногда также называют *обычной материей* . Например, молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) подпадают под это определение, поскольку состоят из атомов. Это определение можно расширить, включив в него заряженные атомы и молекулы, например, плазму (газообразные ионы) и электролиты (ионные растворы), которые, очевидно, не входят в определение атомов. В качестве альтернативы можно принять определение *протонов, нейтронов и электронов* .

## На основе протонов, нейтронов и электронов

Определение «материи» более тонкое, чем определение атомов и молекул: *материя состоит из того, из чего сделаны атомы и молекулы* , то есть все, что состоит из положительно заряженных протонов , нейтральных нейтронов и отрицательно заряженных электронов . <sup>[ 17 ]</sup> Однако это определение выходит за рамки атомов и молекул и включает в себя вещества, состоящие из этих строительных блоков, которые *не* являются просто атомами или молекулами, например, электронные лучи в старом телевизоре с электронно-лучевой трубкой или вещество белого карлика — как правило, ядра углерода и кислорода в море вырожденных электронов. На микроскопическом уровне составляющие «частицы» материи, такие как протоны, нейтроны и электроны, подчиняются законам квантовой механики и проявляют корпускулярно-волновой дуализм. На еще более глубоком уровне протоны и нейтроны состоят из кварков и силовых полей ( глюонов ), которые связывают их вместе, что приводит к следующему определению.

## На основе кварков и лептонов

Как видно из вышеизложенного, многие ранние определения того, что можно назвать «обычной материей», основывались на её структуре или «строительных блоках». В масштабе элементарных частиц определение, следующее этой традиции, можно сформулировать следующим образом: «обычная материя — это всё, что состоит из кварков и лептонов » или «обычная материя — это всё, что состоит из любых элементарных фермионов, кроме антикварков и антилептонов». <sup>[ 18 ] [ 19 ] [ 20 ]</sup> Связь между этими формулировками следующая.

Лептоны (самый известный из которых — электрон ) и кварки (из которых состоят барионы , такие как протоны и нейтроны ) объединяются, образуя атомы , которые, в свою очередь, образуют молекулы . Поскольку атомы и молекулы считаются материей, естественно сформулировать определение следующим образом: «обычная материя — это всё, что состоит из того же, из чего состоят атомы и молекулы». (Однако следует отметить, что из этих строительных блоков можно создать и материю, которая *не* является атомами или молекулами.) Далее, поскольку электроны — это лептоны, а протоны и нейтроны состоят из кварков, это определение, в свою очередь, приводит к определению материи как «кварков и лептонов», которые являются двумя из четырёх типов элементарных фермионов (два других — антикварки и антилептоны, которые можно считать антиматерией, как описано ниже). Кэртерс и Грэннис утверждают: «Обычная материя состоит исключительно из частиц первого

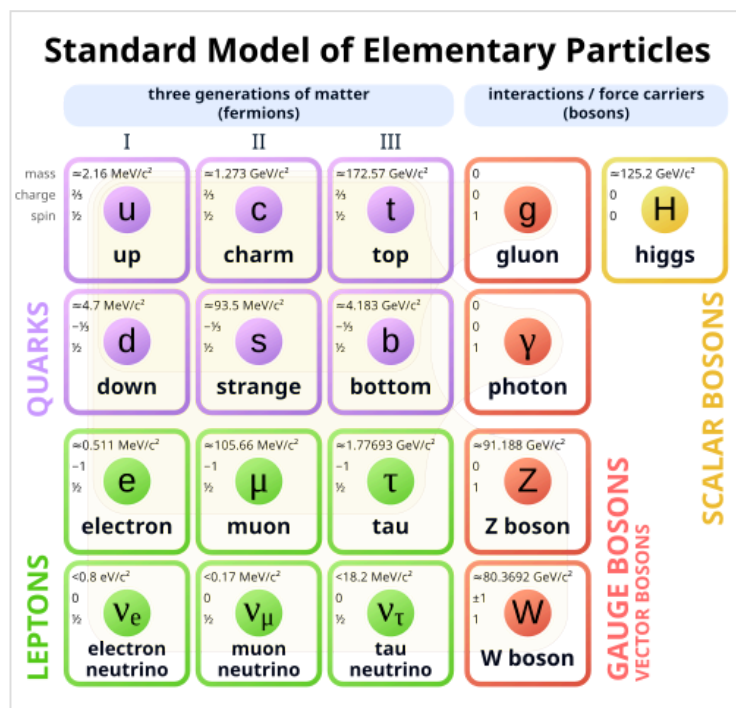
поколения , а именно [верхних] и [нижних] кварков, а также электрона и его нейтрино». [ 19 ] (Частицы более высокого поколения быстро распадаются на частицы первого поколения, поэтому они встречаются нечасто. [ 21 ])

Это определение обычной материи более тонкое, чем кажется на первый взгляд. Все частицы, составляющие обычную материю (лептоны и кварки), являются элементарными фермионами, а все переносчики взаимодействия — элементарными бозонами. [ 22 ] Бозоны  $W$  и  $Z$ , являющиеся переносчиками слабого взаимодействия, не состоят из кварков или лептонов и, следовательно, не являются обычной материей, даже если у них есть масса. [ 23 ] Другими словами, масса не является чем-то, присущим только обычной материи.

Однако кварк-лептонное определение обычной материи выделяет не только элементарные строительные блоки материи, но и включает в себя композиты, состоящие из этих компонентов (например, атомы и молекулы). Такие композиты содержат энергию взаимодействия, которая удерживает компоненты вместе, и могут составлять основную часть массы композита. Например, в значительной степени масса атома представляет собой просто сумму масс его составляющих протонов, нейтронов и электронов. Однако, если копнуть глубже, протоны и нейтроны состоят из кварков, связанных вместе глюонными полями (см. динамику квантовой хромодинамики ), и эти глюонные поля вносят значительный вклад в массу адронов. [ 24 ] Другими словами, большая часть того, что составляет «массу» обычной материи, обусловлена энергией связи кварков внутри протонов и нейтронов. [ 25 ] Например, сумма масс трёх кварков в нуклоне приблизительно равна  $12,5 \text{ МэВ}/c^2$  , что мало по сравнению с массой нуклона ( примерно  $938 \text{ МэВ}/c^2$  ). [ 26 ] [ 27 ] Суть в том, что большая часть массы повседневных предметов возникает из энергии взаимодействия их элементарных компонентов .

Стандартная модель группирует частицы материи в три поколения, каждое из которых состоит из двух кварков и двух лептонов. Первое поколение — это верхние и нижние кварки, электрон и электронное нейтрино ; второе включает очарованные и странные кварки, мюон и мюонное нейтрино ; третье поколение состоит из верхних и нижних кварков, а также тау и тау-нейтрино . [ 28 ] Наиболее естественным объяснением этого было бы то, что кварки и лептоны более высоких поколений являются возбужденными состояниями первых поколений. Если это окажется так, то это будет означать, что кварки и лептоны являются составными частицами , а не элементарными частицами . [ 29 ]

Это кварк-лептонное определение материи также приводит к тому, что можно назвать законами «сохранения (чистой) материи», которые будут рассмотрены ниже. В качестве альтернативы можно вернуться к концепции материи «масса–объем–пространство», что



Согласно определению «кварки и лептоны», элементарные и составные частицы, состоящие из кварков (фиолетового цвета) и лептонов (зелёного цвета), являются материей, тогда как калибровочные бозоны (красного цвета) к материи не относятся. Однако энергия взаимодействия, присущая составным частицам (например, глюонам, входящим в состав нейтронов и протонов), вносит вклад в массу обычной материи.

приводит к следующему определению, в котором антиматерия включается в качестве подкласса материи.

## На основе элементарных фермионов (масса, объем и пространство)

Распространенное или традиционное определение материи — «все, что имеет массу и объем (занимает пространство )». <sup>[ 30 ] [ 31 ]</sup> Например, можно сказать, что автомобиль состоит из материи, поскольку он имеет массу и объем (занимает пространство).

Наблюдение о том, что материя занимает пространство, восходит к глубокой древности. Однако объяснение того, почему материя занимает пространство, появилось недавно, и, как утверждается, оно является результатом явления, описанного в принципе исключения Паули <sup>[ 32 ] [ 33 ]</sup> , применимого к фермионам . Двумя конкретными примерами, где принцип исключения чётко связывает материю с занятостью пространства , являются белые карлики и нейтронные звёзды, которые обсуждаются ниже.

Таким образом, материю можно определить как всё, что состоит из элементарных фермионов. Хотя мы не сталкиваемся с ними в повседневной жизни, антикварки (например, антипротон ) и антилептоны (например, позитрон ) являются античастицами кварка и лептона, также являются элементарными фермионами и обладают, по сути, теми же свойствами, что и кварки и лептоны, включая применимость принципа Паули, который, можно сказать, препятствует двум частицам находиться в одном и том же месте в одно и то же время (в одном и том же состоянии), то есть заставляет каждую частицу «занимать место». Это конкретное определение приводит к тому, что материя определяется как включающая всё, состоящее из этих частиц антиматерии , а также обычные кварк и лептон, и, следовательно, также всё, состоящее из мезонов , которые являются нестабильными частицами, состоящими из кварка и антикварка.

## В общей теории относительности и космологии

В контексте теории относительности масса не является аддитивной величиной в том смысле, что нельзя сложить массы покоя частиц в системе, чтобы получить общую массу покоя системы. <sup>[ 1 ]</sup><sup>: 21</sup> В теории относительности обычно более общее представление состоит в том, что это не сумма масс покоя , а тензор энергии-импульса , который количественно определяет количество материи. Этот тензор дает массу покоя для всей системы. Поэтому материей иногда считают все, что вносит вклад в энергию-импульс системы, то есть все, что не является чистой гравитацией. <sup>[ 34 ] [ 35 ]</sup> Эта точка зрения обычно поддерживается в областях, которые имеют дело с общей теорией относительности, таких как космология . Согласно этой точке зрения, свет и другие безмассовые частицы и поля являются частью материи.

## Структура

В физике элементарных частиц фермионы — это частицы, подчиняющиеся статистике Ферми–Дирака . Фермионы могут быть элементарными, как электрон, или составными, как протон и нейтрон. В Стандартной модели существует два типа элементарных фермионов: кварки и лептоны, которые обсуждаются далее.



Кварки

Кварки — массивные частицы со спином  $-1/2$  , что означает, что они являются фермионами . Они несут электрический заряд  $-1/3\ e$  (кварки нижнего типа) или  $+2/3\ e$  (кварки верхнего типа). Для сравнения, заряд электрона составляет  $-1\ e$  . Они также несут цветовой заряд , эквивалентный электрическому заряду для сильного взаимодействия . Кварки также подвержены радиоактивному распаду , то есть они подвержены слабому взаимодействию .

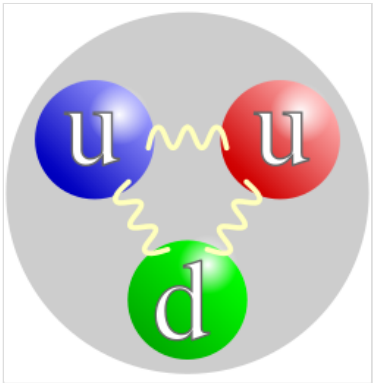
Свойства кварка [36]

имя	символ	вращаться	электрический заряд ( $e$ )	масса ( $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$ )	масса, сравнимая с	античастица	символ античастицы
кварки верхнего типа							
<u>вверх</u>	ты	$1/2$	$+2/3$	1,5–3,3	~ 5 электронов	антиап	$\overline{\text{ты}}$
<u>очарование</u>	с	$1/2$	$+2/3$	1160-1340	~ 1 протон	античары	$\overline{\text{с}}$
<u>вершина</u>	т	$1/2$	$+2/3$	169 100–173 300	~ 180 протонов или ~1 атом вольфрама	антитоп	$\overline{\text{т}}$
кварки нижнего типа							
<u>вниз</u>	д	$1/2$	$-1/3$	3,5–6,0	~10 электронов	антидаун	$\overline{\text{д}}$
<u>странный</u>	с	$1/2$	$-1/3$	70-130	~ 200 электронов	антистранный	$\overline{\text{с}}$
<u>нижний</u>	б	$1/2$	$-1/3$	4130-4370	~ 5 протонов	антидно	$\overline{\text{б}}$

Барионный

Барионы — это сильно взаимодействующие фермионы, поэтому они подчиняются статистике Ферми–Дирака. К барионам относятся протоны и нейтроны, входящие в состав атомных ядер, но существует также множество других нестабильных барионов. Термин «барион» обычно относится к трикваркам — частицам, состоящим из трёх кварков. Также известны «экзотические» барионы, состоящие из четырёх кварков и одного антикварка, называемые пентакварками , но их существование не является общепринятым.

Барионная материя — это часть Вселенной, состоящая из барионов (включая все атомы). Эта часть Вселенной не включает в себя тёмную энергию , тёмную материю , чёрные дыры или различные формы вырожденной материи, такие как те, что составляют белые карлики и нейтронные звёзды . Микроволновое излучение, наблюдаемое зондом микроволновой анизотропии Уилкинсона (WMAP), позволяет предположить, что лишь около 4,6% той части Вселенной, которая находится в пределах досягаемости лучших телескопов (то есть материи, которая может быть видима, поскольку свет от неё может дойти до нас), состоит из барионной материи. Около 26,8% — тёмная материя, а около 68,3% — тёмная энергия. [37]



Кварковая структура протона: 2 верхних кварка и 1 нижний кварк.

Подавляющее большинство обычной материи во Вселенной невидимо, поскольку видимые звезды и газ внутри галактик и скоплений составляют менее 10 процентов вклада обычной материи в плотность массы и энергии Вселенной. <sup>[38]</sup>

## Адронный

Адронная материя может относиться к «обычной» барионной материи, состоящей из адронов (барионов и мезонов ), или кварковой материи (обобщение атомных ядер), т.е. к «низкотемпературной» КХД-материи . <sup>[39]</sup> Она включает в себя вырожденную материю и результат столкновений тяжелых ядер высокой энергии. <sup>[40]</sup>

## Дегенерат

В физике *вырожденная материя* относится к основному состоянию газа фермионов при температуре, близкой к абсолютному нулю. <sup>[41]</sup> Принцип исключения Паули требует, чтобы только два фермиона могли занимать квантовое состояние: один со спином вверх, а другой со спином вниз. Следовательно, при нулевой температуре фермионы заполняют достаточное количество уровней для размещения всех доступных фермионов, а в случае большого количества фермионов максимальная кинетическая энергия (называемая *энергией Ферми* ) и давление газа становятся очень большими и зависят от числа фермионов, а не от температуры, в отличие от обычных состояний материи.

Предполагается, что вырожденная материя возникает в процессе эволюции тяжелых звезд. <sup>[42]</sup> Демонстрация Субрахманьяном Чандрасекаром того, что белые карлики имеют максимально допустимую массу из-за принципа исключения, вызвала революцию в теории эволюции звезд. <sup>[43]</sup>

Вырожденная материя включает часть Вселенной, состоящую из нейтронных звезд и белых карликов.

## Странный

*Странная материя* — это особая форма кварковой материи , обычно рассматриваемая как *жидкость* из верхних , нижних и странных кварков. Она противопоставляется ядерной материи , которая представляет собой жидкость из нейтронов и протонов (которые, в свою очередь, состоят из верхних и нижних кварков), и нестранный кварковой материи, которая представляет собой кварковую жидкость, содержащую только верхние и нижние кварки. При достаточно высокой плотности ожидается, что странная материя будет обладать цветовой сверхпроводимостью . Предполагается, что странная материя находится в ядре нейтронных звезд или, более спекулятивно, в виде изолированных капель, размеры которых могут варьироваться от фемтометров ( странгелеты ) до километров ( кварковые звезды ).

## Два значения

В физике элементарных частиц и астрофизике этот термин используется в двух значениях: одно более широкое, а другое более конкретное.

1. Более широкое определение — это просто кварковая материя, содержащая три разновидности кварков: верхний, нижний и странный. В этом определении существует критическое давление и связанная с ним критическая плотность, и когда ядерная материя (состоящая из протонов и нейтронов ) сжимается сверх этой плотности, протоны и нейтроны диссоциируют на кварки, образуя кварковую материю (вероятно, странную материю).

2. Более узкое значение – кварковая материя, *более стабильная, чем ядерная* . Идея о том, что это возможно, лежит в основе «гипотезы странной материи» Бодмера <sup>[44]</sup> и Виттена <sup>[45]</sup> . В этом определении критическое давление равно нулю: истинное основное состояние материи *всегда* – кварковая материя. Ядра, которые мы видим в окружающей нас материи, представляющие собой капли ядерной материи, на самом деле метастабильны и при достаточном времени (или подходящем внешнем воздействии) распадаются на капли странной материи, то есть стрпельки .

## Лептоны

Лептоны — это частицы со спином  $1/2$  , что означает, что они являются фермионами . Они несут электрический заряд  $-1\ e$  (заряженные лептоны) или  $0\ e$  (нейтрино). В отличие от кварков, лептоны не несут цветового заряда , а значит, не участвуют в сильном взаимодействии . Лептоны также подвержены радиоактивному распаду, то есть они подвержены слабому взаимодействию . Лептоны — массивные частицы, поэтому подвержены гравитации.

Свойства лептона

имя	символ	вращаться	электрический заряд ( $e$ )	масса ( $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$ )	масса, сравнимая с	античастица	символ античастицы
заряженные лептоны <sup>[46]</sup>							
<u>электрон</u>	$e^-$	$1/2$	$-1$	0,5110	1 электрон	<u>антиэлектрон</u>	$e^+$
<u>мюон</u>	$\mu^-$	$1/2$	$-1$	105.7	$\sim 200$ электронов	антимюон	$\mu^+$
<u>тау</u>	$\tau^-$	$1/2$	$-1$	1,777	$\sim 2$ протона	антитау	$\tau^+$
нейтрино <sup>[47]</sup>							
<u>электронное нейтрино</u>	$\nu_e$	$1/2$	0	$< 0,000460$	$< 1/1000$ электронов	электронное антинейтрино	$\bar{\nu}_e$
<u>мюонное нейтрино</u>	$\nu_\mu$	$1/2$	0	$< 0,19$	$< 1/2$ электрона	мюонное антинейтрино	$\bar{\nu}_\mu$
<u>тау-нейтрино</u>	$\nu_\tau$	$1/2$	0	$< 18,2$	$< 40$ электронов	тау-антинейтрино	$\bar{\nu}_\tau$

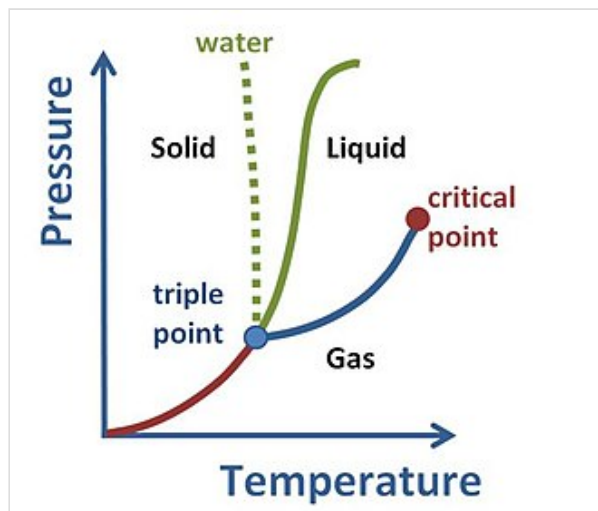
## Фазы

В массе вещество может существовать в нескольких различных формах или агрегатных состояниях, известных как *фазы* <sup>[48]</sup> в зависимости от окружающего давления , температуры и объема . <sup>[49]</sup> Фаза — это форма вещества, которая имеет относительно однородный химический состав и физические свойства (такие как плотность , удельная теплоемкость , показатель преломления и т. д.). Эти фазы включают три знакомые ( твёрдые тела , жидкости и газы ), а также более экзотические состояния вещества (такие как плазма , сверхтекучие жидкости , сверхтвёрдые тела , конденсаты Бозе-Эйнштейна и т. д.). *Жидкость* может быть жидкостью, газом или плазмой. Существуют также парамагнитные и ферромагнитные фазы магнитных материалов . При изменении условий вещество может переходить из одной фазы в другую. Эти явления называются фазовыми переходами и изучаются в области термодинамики . В наноматериалах значительное увеличение отношения площади поверхности к объёму приводит



к тому, что вещество может проявлять свойства, совершенно отличные от свойств объемного материала, и не поддающиеся описанию какой-либо объемной фазой ( более подробную информацию см. в разделе наноматериалы ).

Фазы иногда называют *состояниями вещества* , но этот термин может привести к путанице с термодинамическими состояниями . Например, два газа, находящиеся при разных давлениях, находятся в разных *термодинамических состояниях* (разных давлениях), но в одной и той же фазе (оба являются газами).



Фазовая диаграмма для типичного вещества при фиксированном объеме

## Антиматерия

### Нерешенная проблема в физике

*Барионная асимметрия . Почему в наблюдаемой Вселенной материи гораздо больше, чем антиматерии?*

Еще нерешенные проблемы в физике

*Антиматерия* — это материя, состоящая из античастиц тех, что составляют обычную материю. Если частица и её античастица вступают в контакт друг с другом, они <sup>аннигилируют</sup> ; то есть они обе могут быть преобразованы в другие частицы с равной энергией в соответствии с уравнением Альберта Эйнштейна  $E = mc^2$  . Эти новые частицы могут быть высокоэнергетическими фотонами ( гамма-лучами ) или другими парами частица-античастица. Образовавшиеся частицы наделены количеством кинетической энергии, равным разнице между массой покоя продуктов аннигиляции и массой покоя исходной пары частица-античастица, которая часто довольно велика. В зависимости от принятого определения «материи», антиматерию можно назвать особым подклассом материи или противоположностью материи.

Антиматерия не встречается на Земле в естественном виде, за исключением очень коротких периодов и исчезающе малых количеств (в результате радиоактивного распада , молний или космических лучей ). Это связано с тем, что антиматерия, появившаяся на Земле вне пределов подходящей физической лаборатории, практически мгновенно встретила бы с обычной материей, из которой состоит Земля, и аннигилировала бы. Античастицы и некоторые стабильные формы антиматерии (например, антиводород ) можно синтезировать в микроскопических количествах, но их количества недостаточны для проверки лишь некоторых её теоретических свойств.

Существует множество спекуляций как в науке , так и в научной фантастике относительно того, почему наблюдаемая Вселенная, по-видимому, почти полностью состоит из материи (в смысле кварков и лептонов, но не антикварков или антилептонов), и состоят ли другие места почти полностью из антиматерии (антикварков и антилептонов). Считается, что в ранней Вселенной материя и антиматерия были представлены в равной степени, а исчезновение антиматерии требует асимметрии в физических законах, называемой нарушением симметрии CP (заряд-четность) , которое можно получить из Стандартной модели, <sup>[ 50 ]</sup> но в настоящее время

очевидная асимметрия материи и антиматерии в видимой Вселенной является одной из величайших нерешенных проблем в физике . Возможные процессы, посредством которых это произошло, более подробно изучаются в разделе о бариогенезисе .

Формально частицы антиматерии можно определить по их отрицательному барионному или лептонному числу , в то время как частицы «нормальной» (не антиматерии) материи имеют положительное барионное или лептонное число. <sup>[ 51 ]</sup> Эти два класса частиц являются античастицами-партнерами друг друга.

В октябре 2017 года ученые сообщили о новых доказательствах того, что материя и антиматерия , в равной степени созданные при Большом взрыве , идентичны, должны полностью уничтожить друг друга и, как следствие, Вселенная не должна существовать. <sup>[ 52 ]</sup> Это подразумевает, что должно быть что-то, пока неизвестное ученым, что либо остановило полное взаимное уничтожение материи и антиматерии на ранней стадии формирования Вселенной, либо привело к дисбалансу между этими двумя формами.

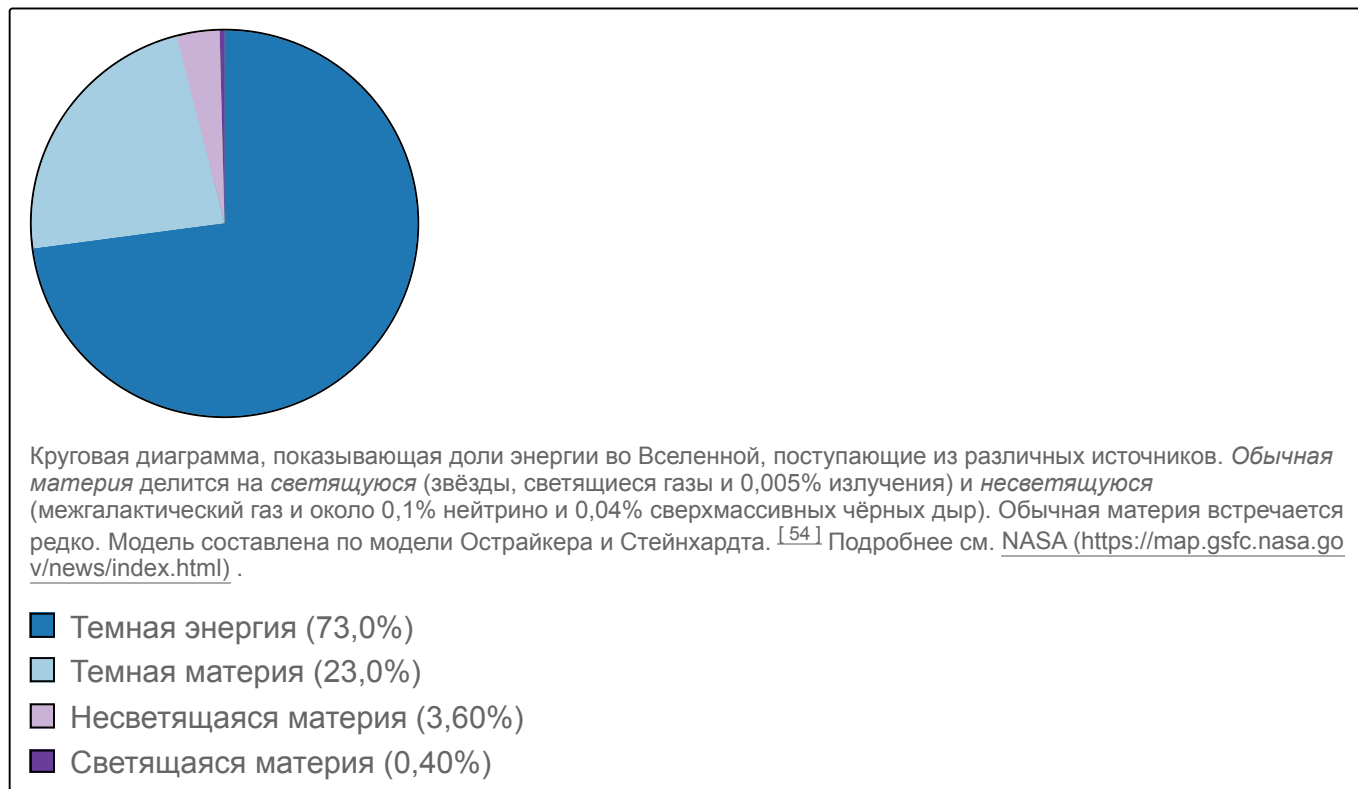
## Сохранение

---

Две величины, определяющие количество материи в кварк-лептонном смысле (и антиматерии в антикварк-антилептонном смысле), барионное число и лептонное число , сохраняются в Стандартной модели. Барион , такой как протон или нейтрон, имеет барионное число, равное единице, а кварку, поскольку в барионе их три, присваивается барионное число, равное  $1/3$ . Таким образом, чистое количество материи, измеряемое числом кварков (за вычетом числа антикварков, каждый из которых имеет барионное число, равное  $-1/3$ ), которое пропорционально барионному числу, и числом лептонов (за вычетом антилептонов), которое называется лептонным числом, практически невозможно изменить ни в каком процессе. Даже в ядерной бомбе ни один из барионов (протонов и нейтронов, из которых состоят атомные ядра) не уничтожается — после реакции остается столько же барионов, сколько и до нее, поэтому ни одна из этих частиц материи фактически не уничтожается и даже не превращается в частицы нематериальной природы (вроде фотонов света или излучения). Вместо этого высвобождается ядерная (и, возможно, хромодинамическая) энергия связи , поскольку эти барионы связываются в ядра среднего размера, имеющие меньшую энергию (и, что эквивалентно , меньшую массу) на нуклон по сравнению с исходными малыми (водород) и большими (плутоний и т. д.) ядрами. Даже при электрон-позитронной аннигиляции не уничтожается чистая материя, потому что изначально до аннигиляции была нулевая чистая материя (нулевое общее лептонное число и барионное число) — один лептон минус один антилептон равен нулю чистого лептонного числа — и это чистое количество материи не меняется, поскольку оно просто остается равным нулю после аннигиляции. <sup>[ 53 ]</sup>

Короче говоря, материя, как она определена в физике, относится к барионам и лептонам. Количество материи определяется в терминах барионного и лептонного числа. Барионы и лептоны могут быть созданы, но их создание сопровождается антибарионами или антилептонами; и они могут быть уничтожены путем аннигиляции с антибарионами или антилептонами. Поскольку антибарионы/антилептоны имеют отрицательное барионное/лептонное число, общее барионное/лептонное число не изменяется, поэтому материя сохраняется. Однако барионы/лептоны и антибарионы/антилептоны все имеют положительную массу, поэтому общее количество массы не сохраняется. Кроме того, за исключением естественных или искусственных ядерных реакций, во Вселенной практически нет антиматерии, доступной в целом (см. барионную асимметрию и лептогенез ), поэтому аннигиляция частиц в нормальных обстоятельствах редка.

# Темный



Обычная материя, согласно определению кварков и лептонов, составляет около 4% энергии наблюдаемой Вселенной . Оставшаяся энергия, как предполагается, обусловлена экзотическими формами, из которых 23% приходится на тёмную материю <sup>[55]</sup><sup>[56]</sup> и 73% — на тёмную энергию <sup>[57]</sup><sup>[58]</sup> .

В астрофизике и космологии *темная материя* — это материя неизвестного состава, которая не испускает и не отражает достаточного количества электромагнитного излучения для непосредственного наблюдения, но присутствие которой можно вывести из гравитационных эффектов на видимую материю. <sup>[62]</sup><sup>[63]</sup> Наблюдательные свидетельства ранней Вселенной и теория Большого взрыва требуют, чтобы эта материя имела энергию и массу, но не состояла из обычных барионов (протонов и нейтронов). Общепринятая точка зрения заключается в том, что большая часть темной материи имеет небарионную природу . <sup>[62]</sup> Как таковая, она состоит из частиц, пока не наблюдавшихся в лабораторных условиях. Возможно, это суперсимметричные частицы , <sup>[64]</sup> которые не являются частицами Стандартной модели , а реликтами, образовавшимися при очень высоких энергиях на ранней стадии развития Вселенной и все еще циркулирующими. <sup>[62]</sup>

## Энергия

В космологии *тёмная энергия* — это название источника отталкивающего воздействия, ускоряющего расширение Вселенной . Её точная природа в настоящее время остаётся загадкой, хотя её эффекты можно разумно моделировать, приписывая вакууму свойства, подобные свойствам материи, такие как плотность энергии и давление . <sup>[65]</sup><sup>[66]</sup>

По всей видимости, целых 70% плотности материи во Вселенной находится в форме тёмной энергии. 26% приходится на тёмную материю. Только 4% — на обычную материю. Таким образом, менее одной двадцатой её части состоит из материи, которую