

ПРИРОДА СИММЕТРИИ

Лёля Пинхасик

Законы управляют явлениями природы.
Симметрии - это фундамент из которого законы вырастают.
Brian Greene

Наша Вселенная - бездонный источник примеров симметрии от структуры атома до спиралей Галактики. Научный подход к пониманию природы симметрии основан на двух современных теориях - теории относительности и квантовой теории микромира.

Симметрия проявляется в неизменности (инвариантности) тела или системы по отношению к какой-либо операции, преобразованию.

В 1918 году немецкий математик Амали Нётер сформулировала теорему, согласно которой каждому виду симметрии должен соответствовать определенный закон сохранения. **Закон сохранения энергии** является следствием инвариантности физических процессов относительно времени - однородности времени. **Закон сохранения импульса** является следствием инвариантности физических процессов относительно сдвигов в пространстве - однородности пространства. **Закон сохранения момента импульса** является следствием инвариантности физических процессов относительно поворотов в пространстве - изотропности пространства.

Любой процесс, при котором нарушается хотя бы один из законов сохранения, невозможен, т.е. эти законы работают как принципы запрета. В этом качестве законы сохранения играют важную методологическую роль в естествознании.

Эти законы и симметрия взаимодействия частиц на самом элементарном уровне позволяют понять природу симметрии в целом.

Существует две группы симметрий:

- Геометрическая - симметрия положений, форм, структур, т.е. симметрия видимая. Эта симметрия означает неизменность явлений при отражениях, сдвигах, поворотах в пространстве.
- Динамическая, которая означает неизменность явлений при изменении некоторых внутренних свойств полей или частиц, т.е. симметрия невидимая, внутренняя.

Внутренние симметрии

Вся Вселенная состоит из огромного числа идентичных частиц. Существуют особые силы природы, обеспечивающие взаимодействие этих частиц. Внутренние симметрии - это симметрии микромира: элементарных частиц, фундаментальных сил природы и их полей.

Элементарные частицы отличаются друг от друга:

по массе:

- безмассовые частицы — частицы с нулевой массой (фотон, глюон),
- частицы с ненулевой массой (все остальные частицы и их античастицы),

по электрическому заряду:

- заряженные (электрон, протон),
- нейтральные (нейтрон, нейтрино),

по спину:

- бозоны - частицы с целым спином (фотон, глюон, мезоны, бозон Хиггса);
- фермионы — частицы с полуцелым спином (электрон, протон, нейтрон, нейтрино).

Фундаментальные частицы - бесструктурные элементарные частицы. В настоящее

время термин применяется преимущественно для лептонов, кварков и переносчиков фундаментальных взаимодействий (глюонов и фотонов).

Кварк — фундаментальная частица, обладающая электрическим зарядом, кратным $1/3$ заряда электрона и не наблюдающаяся в свободном состоянии, но входящая в состав элементарных частиц.



Кварк	Заряд
u или p (верхний или протонный)	+ 2/3
d или n (нижний или нейтронный)	- 1/3
c (очарованный)	+ 2/3
s (странный)	- 1/3
b (красивый)	+ 2/3
t (истинный)	- 1/3

Фундаментальные силы природы

Всего в природе известно четыре вида сил или взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое.

Гравитационное взаимодействие проявляется во взаимном притяжении любых материальных объектов, имеющих массу, передается посредством гравитационного поля и определяется законом всемирного тяготения. Гравитационное взаимодействие – наиболее слабое из всех известных современной науке взаимодействий и определяет строение всей Вселенной: образование всех космических систем; существование планет, звёзд и галактик. Гравитационное взаимодействие универсально: все тела, частицы и поля участвуют в нём. Переносчиками гравитационного взаимодействия являются гравитоны – кванты гравитационного поля.

Электромагнитное взаимодействие обусловлено электрическими зарядами и передается с помощью электрического и магнитного полей. Благодаря электромагнитному взаимодействию возникают атомы, молекулы и происходят химические реакции. Различные агрегатные состояния вещества, силы упругости, трения и т. д. определяются электромагнитным взаимодействием. Переносчиками электромагнитного взаимодействия являются фотоны – кванты электромагнитного поля с нулевой массой покоя.

Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре, удерживает нуклоны (протоны и нейтроны) в ядре и кварки внутри нуклонов и отвечает за стабильность атомных ядер. Определяется короткодействием. Сильное взаимодействие передается глюонами – частицами, «склеивающими» кварки, которые входят в состав протонов, нейтронов и других частиц.

Слабое взаимодействие также действует только в микромире. В этом взаимодействии участвуют все элементарные частицы, кроме фотона. Оно обуславливает большинство распадов элементарных частиц, поэтому его открытие произошло вслед за открытием радиоактивности. Переносчиками слабого взаимодействия принято считать частицы с массой в 100 раз больше массы протонов – промежуточные векторные бозоны.

Калибровочные симметрии

Все фундаментальные взаимодействия описываются особым типом внутренней симметрии - **калибровочной**. Этот факт отражает единство всех фундаментальных взаимодействий. Калибровочные симметрии связаны с изменением масштаба. Некоторые

величины, характеризующие силовые действия поля (работа, энергия), инвариантны, не меняются при изменении некоторых характеристик поля в отдельных его точках.

В **гравитационном поле** потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту, не зависит от траектории подъёма, координат начальной и конечной точек, а только от разности координат т.е. от абсолютной высоты. Гравитон - переносчик гравитационного поля - обладает нулевой массой.

В **электромагнитном поле** никакие электродинамические свойства поля (напряжённость, работа, энергия) не изменяются, инвариантны при изменении потенциала в отдельных точках поля. Эти свойства зависят только от разности потенциалов, т.е. от напряжения.

Следствия калибровочной симметрии в электромагнитном поле:

- Сохранение электрического заряда - заряды могут только перетекать из одной области пространства в другую (**закон Кулона**).
- Изменение заряда всех частиц во Вселенной на противоположный не изменит первоначальное электромагнитное поле (**зарядовая симметрия**).
- Уравнения движения частиц и полей, описываемых волновыми функциями, остаются неизменными при изменении потенциалов (**фазовая симметрия**).
- Фотон - частица-переносчик - обладает нулевой массой.

В **поле сильного взаимодействия** кварков, т.е. в поле цветовых зарядов, калибровочная симметрия проявляется в том, что в любой момент времени суммарный цвет кварков должен давать белый цвет, т.е. цветовой заряд элементарных частиц, состоящих из кварков (протонов, нейтронов) инвариантен относительно изменения цветового заряда отдельного кварка внутри нуклона (**цветовая симметрия**).

Следствия калибровочной симметрии в поле сильного взаимодействия:

- Изотопическая инвариантность, т.е. ядерное взаимодействие не зависит от типа нуклона.
- Зарядовая инвариантность, т.е. ядерное взаимодействие не зависит от электрического заряда нуклона.
- Глюон - частица-переносчик - обладает нулевой массой.

Калибровочная симметрия **слабого взаимодействия** носит более сложный характер:

- Во взаимодействии участвуют частицы четырёх типов (протон, нейтрон, электрон, нейтрино).
- Происходит изменение природы частиц.
- Происходит спонтанное нарушение некоторых симметрий: зарядовой (с) и чётности (левое-правое, р)
- Слабое взаимодействие инвариантно относительно одновременной комбинации трёх преобразований - заряда, чётности, времени (**СРТ симметрия**).

Следствие нарушения симметрии: переносчиками сил слабого взаимодействия являются три частицы - векторные бозоны, которые обладают массой, живут недолго.

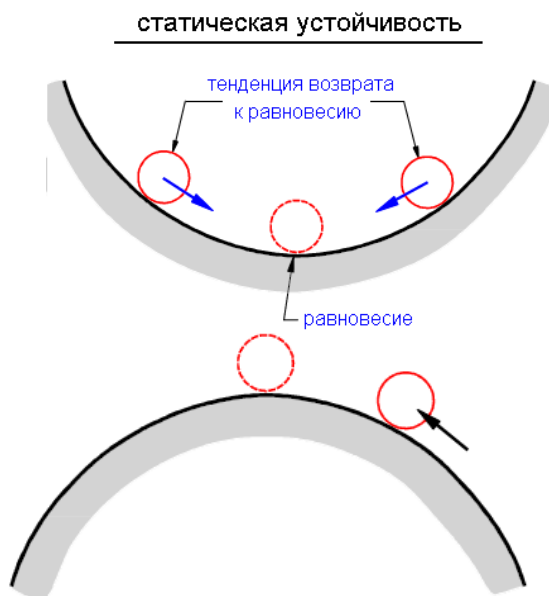
Общие принципы возникновения симметрий

Системы произвольно нарушают свою симметрию в силу энергетической выгоды.

Принцип минимизации энергии: любые системы стремятся занять положение с минимальной энергией, что обеспечивает устойчивость, стабильность и приводит к образованию структур и форм.

Процесс нарушения симметрии систем происходит за счёт их внутренних сил при отклонении системы от положения равновесия и возможности обмена энергией с окружающей средой.

Теплота, фазовые переходы, симметрия



Процессы нарушения симметрии мы наблюдаем в повседневной жизни. Речь идёт об изменении агрегатного состояния вещества при нагревании.

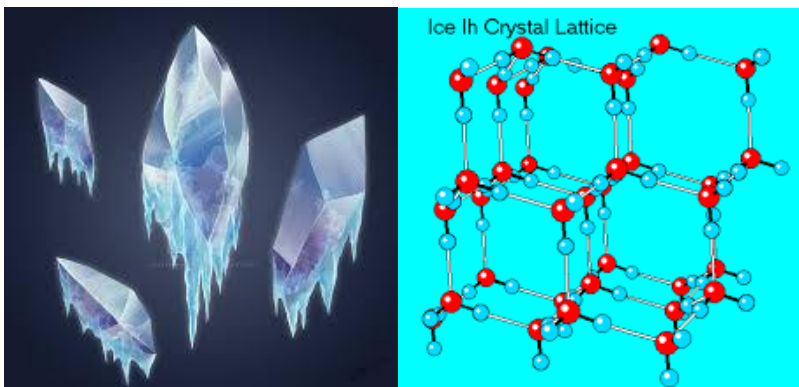
Вещество может находиться в 4 агрегатных (фазовых) состояниях: твёрдое, жидкое, газообразное, плазменное. При изменении температуры, давления происходит скачкообразное изменение структуры вещества, его объёма, количества внутренней энергии.

Примеры фазовых переходов:

- кристаллизация - плавление,
- испарение - конденсация,
- парамагнетик - ферромагнетик.

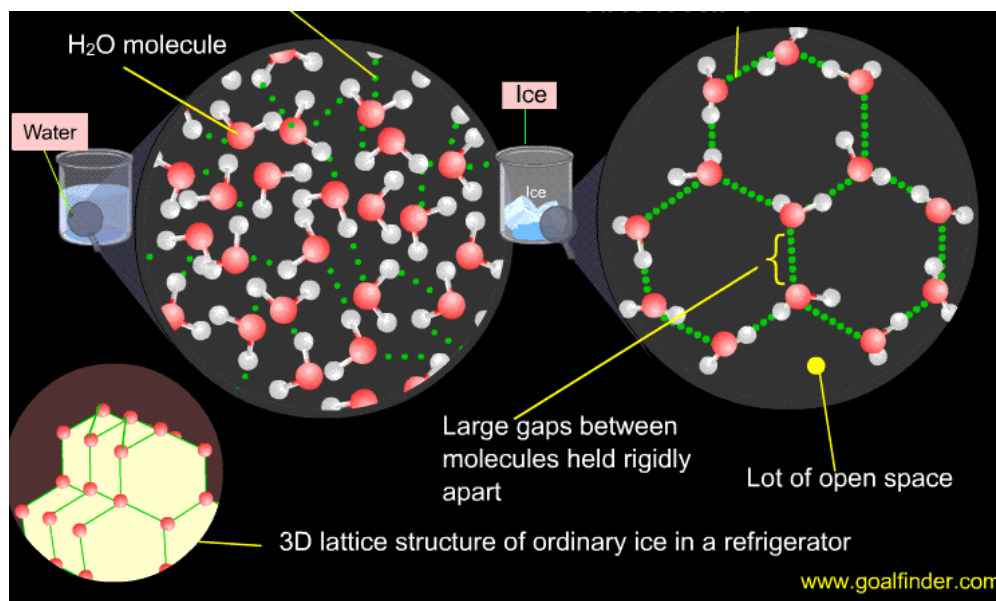
При любых фазовых переходах наблюдается изменение симметрии - её спонтанное нарушение.

Рассмотрим переход лёд-вода. Лёд имеет кристаллическую форму, в которой молекулы H_2O расположены упорядочено в узлах гексагональной решетки.



Гексагональная симметрия инвариантна относительно вращения на угол 60 градусов.

Жидкая вода более симметрична, так как остаётся неизменной, инвариантной при вращениях на любой угол относительно любой оси (некто является более



симметричным, если оно может быть подвергнуто большому числу преобразований, при которых его облик остаётся неизменным).

При достижении температуры 100 градусов вода переходит в газообразное состояние. Определённая ориентация молекул воды нарушена. Фазовый переход вода-пар приводит к росту симметрии. Аналогично, при понижении температуры происходят скачкообразно процессы конденсации пара в жидкость и отвердевания жидкой воды (лёд). Оба из этих фазовых переходов сопровождаются снижением симметрии.

Большинство из веществ ведут себя сходным образом: испытывают повышение симметрии при фазовых переходах из твёрдого состояния в жидкое и газообразное.

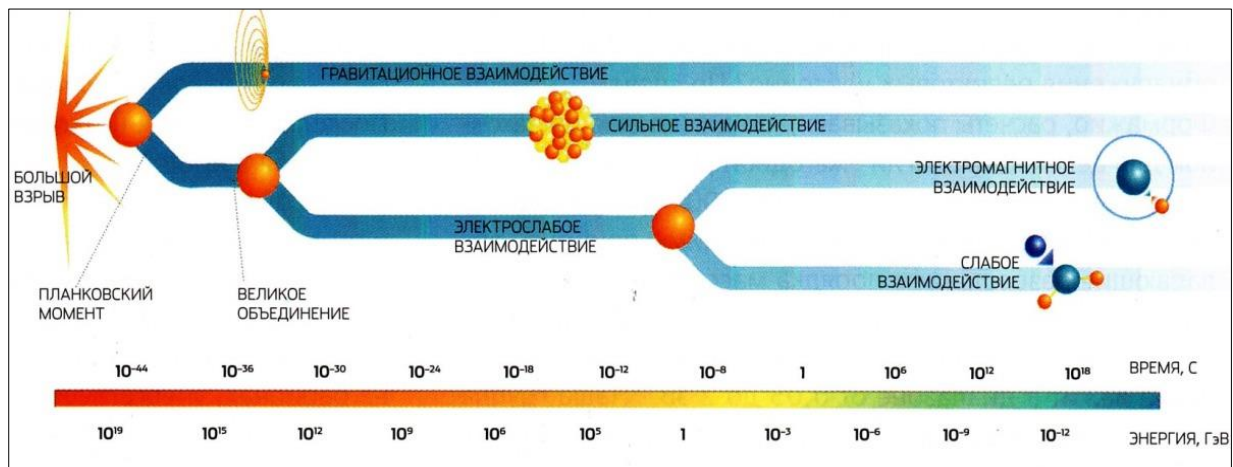
Таким же образом обстоит дело и с материей нашей Вселенной.

Фазовые переходы и спонтанное нарушение симметрии во Вселенной

Согласно современной теории Большого взрыва, наша Вселенная родилась 13,7 млрд лет тому назад и представляла собой сгусток энергии огромной плотности и температуры. Это состояние длилось примерно от 0 до 10^{-44} сек. Этот временной промежуток носит название Планковского времени. После этого начались периоды расширения и охлаждения.

Вселенная расширяется, её температура падает, плотность материи уменьшается. Базовая структура материи, силы, которые отвечают за поведение материи, - это результат взаимоотношений между теплотой и симметрией.

Все объекты космоса испытывают фазовые переходы при достижении определённых температур, испытывая радикальные изменения и радикальное уменьшение симметрии.



При $t=10^{-44}$ секунд мир абсолютно симметричен.

При $t=10^{-36}$ секунд $T=10^{28}$ К, произошло первое фазовое нарушение симметрии - отделилось гравитационное взаимодействие.

При $t=10^{-35}$ секунд и $T=10^{27}$ К отделилось сильное взаимодействие.

При $t=10^{-12}$ секунд и $T=10^{15}$ К происходит рождение фундаментальных частиц, кварков, электронов.

При $T=10^{13}$ К кварко-глюонная смесь (жидкая фаза) превращается в смесь элементарных частиц (твёрдая фаза). Кварки как бы выморозились из кваркового бульона.

При $T=10^{10}$ К и $t=1$ секунде после большого взрыва открывается прямой путь для первичного нуклеосинтеза, т.е. образования ядер лёгких элементов - водорода, дейтерия, гелия.

При достижении $T=10^4$ К прошло 300 тысяч лет, ядра стали окружаться электронами. Вселенная стала прозрачной, видимой.

Барионная асимметрия Вселенной

Наличие вещества и отсутствие антивещества, наблюдаемое в окружающей нас части Вселенной, называют барионной асимметрией Вселенной. Объясняется это слабым нарушением симметрии на ранней стадии ($T=10^{13}$ К): на каждый миллиард античастиц рождался миллиард плюс одна частица т.е. асимметрия между веществом и антивеществом характеризуется отношением $(10^9 + 1) / 10^9$. Несмотря на малость этого эффекта, он сыграл решающую роль. В дальнейшем при охлаждении все антивещество и почти все вещество исчезло, каждый миллиард частиц проаннигилировал со своим антипартнером (именно этот остаток - результат нарушения симметрии - и послужил материалом, из которого построено всё, в т.ч. и мы с вами), образовав 1 миллиард гамма-квантов излучения на каждый уцелевший протон. К настоящему времени это излучение остыло до $T=2,7$ К, заполняет всю Вселенную. Это и есть так называемое реликтовое фоновое, тепловое радиоизлучение (обнаружено в 1964 году).

Итак, всё вещество Вселенной - реликт эры великого объединения, когда все фундаментальные силы природы были еще неразделимы.

Суперсимметрия

Суперсимметрия - это симметрия между двумя классами частиц, которые отличаются таким свойством как спин. Спин - это особое свойство, присущее только частицам микромира. Частицы вращаются дискретно, а спин, характеризующий это вращение, может принимать только определённые, квантовые значения.

Частицы с целочисленным спином относятся к типу бозонов. Это переносчики фундаментальных взаимодействий (фотон, глюон). Их спин равен 1.

Частицы с полуцелым спином относятся к типу фермионов. Это частицы из которых состоит материя (кварки, электрон, нейтрино, протон, нейтрон). Их спин равен 1/2. Спин частицы определяет способность частиц сосуществовать друг с другом, образуя ядра, атомы, молекулы, и способность взаимодействовать, обмениваясь фотонами и глюонами.

Теория суперсимметрии предполагает существование у каждой известной частицы суперпартнера, только большей массы:

Частица	Спин	Супер-партнёр	Спин
кварк	1/2	скварк	0
лептон	1/2	слептон	0
нейтрино	1/2	снейтрино	0
фотон	1	фотино	1/2
глюон	1	глюино	1/2
W-бозон	1	вино	1/2
Z-бозон	1	зино	1/2
хиггс	0	хиггсино	1/2
гравитон	2	гравитино	3/2

Из теории следует, что у каждого бозона есть партнер-фермион и наоборот. Таким образом должно существовать огромное количество ещё не открытых массивных частиц - в миллиарды раз тяжелее протона. В природе встретить такие частицы невозможно - ни космические процессы, ни современные ускорители не могут породить частицы такой большой массы. Для подтверждения теории суперсимметрии их придётся создать с помощью очень мощных ускорителей. Если суперсимметричные частицы будут обнаружены, теория суперсимметрии позволит решить нерешенные современной физикой проблемы:

- объединение трёх сил взаимодействий с силой гравитации,
- природу тёмной материи,
- построение единой теории поля.

Теория суперсимметрии - ключ к пониманию всех процессов взаимного преобразования материи и энергии, а также к процессам, протекавшим в ходе большого взрыва и ранней эволюции Вселенной.

Источники

1. Brian Green, The Fabric of The Cosmos (Vintage Books, N.Y. 2005).
2. Ian Stewart, Fearful Symmetry (Is God a Geometer?), (Blackwell publishers, UK,1992).
3. John Gribbin, The Search for Superstring, Symmetry and Theory of Everything (Little, Brown and Company, N.Y. 1998).
4. Lawrence M. Krauss, The Greatest Story Ever Told So Far. (Atria Books, N.Y. 2017).
5. David Deutsch, The Beginning of Infinity (Alpina, UK,2011).
6. Richard Feynman, The Character of Physical Law (BBC Publications,1965).