

The book cover features a vibrant, abstract illustration of a proton's internal structure. At the center is a bright, fiery orange and yellow sphere, representing the quark core. This core is surrounded by a complex web of swirling, translucent blue and red lines that represent the gluon field. The background is a deep, dark blue space filled with numerous small, distant stars and nebulae, creating a cosmic and scientific atmosphere.

БОРИС КРИГЕР

**ВНУТРЕННИЙ
МИР ПРОТОНА:
КВАРКИ
И ГЛЮОНЫ**

БОРИС КРИГЕР

ВНУТРЕННИЙ
МИР
ПРОТОНА:
*КВАРКИ
И ГЛЮОНЫ*



© 2025 Boris Kriger

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from both the copyright owner and the publisher.

Requests for permission to make copies of any part of this work should be e-mailed to krigerbruce@gmail.com

Published in Canada by Altaspera Publishing & Literary Agency Inc.

Внутренний мир протона. кварки и глюоны

Эта книга раскрывает перед читателем захватывающий мир субатомных частиц, показывая, как фундаментальные элементы реальности — кварки и глюоны — формируют материю, окружающую нас. Углубляясь в сложные механизмы сильного взаимодействия, автор объясняет, почему протоны столь стабильны, как рождаются и исчезают виртуальные частицы, и каким образом энергия глюонов создает основную массу вещества. Читатель не только знакомится с ключевыми открытиями физики элементарных частиц, но и осознает, что за видимой простотой атомов скрывается динамическая система, управляемая квантовыми законами. Эта книга ценна тем, что дает возможность взглянуть на материю с новой перспективы, показывая, что привычный мир — это результат взаимодействий невидимых сил, определяющих структуру Вселенной.

ВНУТРЕННИЙ МИР ПРОТОНА: КВАРКИ И ГЛЮОНЫ

Представьте себе Вселенную как бесконечную мозаичную картину, где каждый объект, от далекой звезды до песчинки под ногами, сложен из мельчайших фрагментов, невидимых глазу. Эти крошечные частицы, словно коды в основе реальности, определяют всё: почему железо твердое, вода текучая, а воздух невидим. За пределами привычного мира молекул и атомов простирается еще более глубокий уровень устройства материи, где действуют законы, отличные от всего, что можно представить на интуитивном уровне. Именно туда, в этот скрытый фундамент мироздания, мы и заглянем.

В каждом атоме, а значит, и в каждом объекте Вселенной, есть ядро — центральная часть, которая определяет, каким будет сам атом. Одним из главных строительных элементов ядра является протон. Эта частица неразрывно связана с понятием материи, ведь именно количество протонов определяет, каким химическим элементом окажется атом.

Название "протон" ввел в 1920 году Эрнест Резерфорд, взяв греческое слово "первый" ("prōton"), поскольку ядро водорода — самое простое и фундаментальное, а протоны входят в состав всех атомных ядер. Хотя позже стало известно, что протон сам состоит из кварков, его название осталось, так как оно отражает его важную роль в строении материи.

Кварки — это самые крохотные строительные частички, которые пока невозможно разделить на более мелкие части. Протон собирается из трех кварков: двух верхних

и одного нижнего. Но сами по себе они не удержались бы вместе — потребовалась неведомая сила, скрепляющая их в единое целое. Здесь вступают в игру глюоны, которые можно сравнить с невидимыми нитями, которые оплетают кварки и удерживают их в прочном сцеплении. Без них не существовало бы не только протонов, но и самих атомов, а значит, и всей привычной реальности. Эта сила настолько велика, что кварки никогда не могут разлететься в стороны, оставаясь неразрывно связанными внутри протона.

Размышляя о таких мельчайших деталях мироздания, можно увидеть, насколько грандиозна и сложна сама структура реальности. Знание о кварках, глюонах и протонах — это не просто теория, а ключ к пониманию основ материи. Осознавая это, легко взглянуть на мир по-новому, словно приоткрывая завесу тайны, скрытой за привычными вещами. Каждый предмет, каждая молекула — это сложнейшая система, удерживаемая в гармонии невидимыми силами. Погружаясь в этот удивительный мир, можно не просто узнать больше, но и почувствовать, насколько прекрасна сама природа существования.

История открытия этих мельчайших строительных блоков Вселенной — это поразительное путешествие через века научных исследований, смелых гипотез и удивительных экспериментов, благодаря которым невидимый мир частиц стал зримым. Когда в начале XX века ученые пытались понять, из чего состоят атомы, они и представить не могли, насколько сложной окажется эта структура.

В 1917 году Эрнест Резерфорд провел серию

экспериментов, облучая атомы азота альфа-частицами, которые сами являются ядрами атома гелия 4, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. В результате этих столкновений появлялись другие частицы, а среди них оказалось нечто, обладающее положительным зарядом, но меньшее по массе, чем атом. Так был открыт протон — основа атомного ядра. Это открытие стало отправной точкой для понимания структуры материи, но, как оказалось, сам протон был далеко не последним кирпичиком в фундаменте реальности.

Прошло несколько десятилетий, и в 1964 году физик Мюррей Гелл-Манн предложил теоретическую модель, согласно которой протоны и нейтроны на самом деле состоят из еще более мелких частиц, которые он назвал кварками. На тот момент кварки были лишь математической идеей, элегантным объяснением свойств частиц, но их существование предстояло еще доказать. Это потребовало создания мощных ускорителей, способных заглянуть внутрь протонов, сталкивая их на огромных скоростях и изучая, какие обломки разлетаются в результате таких ударов. В 1970-х годах серии экспериментов в Стэнфордском центре линейного ускорителя показали, что внутри протонов действительно есть более мелкие компоненты, ведущие себя так, как предсказывала теория кварков.

Но оставался еще один вопрос: если кварки внутри протона удерживаются какой-то силой, то что именно связывает их? Ответ пришел вскоре. Исследуя взаимодействия частиц, физики предположили существование особых переносчиков силы — глюонов. Эта гипотеза оставалась лишь догадкой до 1979 года, когда в ускорителе DESY в Германии ученые увидели

характерные следы, которые можно было объяснить только присутствием глюонов. Эти частицы не просто склеивали кварки, а постоянно обменивались между ними, создавая одну из самых мощных сил во Вселенной — сильное ядерное взаимодействие.

Понимание строения материи стало возможным благодаря ускорителям частиц — гигантским машинам, разгоняющим частицы до околосветовых скоростей и сталкивающим их друг с другом. Подобно тому как можно понять устройство механизма, разбирая его на детали, ученые "разбивали" протоны, фиксируя мельчайшие частицы, появляющиеся в результате. Эти столкновения оставляют характерные следы, по которым можно определить природу частиц, даже если они существуют лишь доли секунды.

Открытие кварков и глюонов не просто изменило представление о материи, но и привело к созданию новых технологий, включая медицинскую диагностику, ускорители для лечения рака и мощные компьютеры, моделирующие сложные процессы. Каждое новое открытие в физике частиц — это шаг к пониманию устройства Вселенной, который приближает нас к ответу на фундаментальные вопросы о природе всего сущего.

Несмотря на то что кварки и глюоны нельзя увидеть напрямую, их существование давно перестало быть лишь теорией — это подтвержденный научный факт. Современная физика опирается не только на математические модели, но и на тысячи экспериментов, проведенных в крупнейших лабораториях мира, где изучают поведение частиц на фундаментальном уровне.

Квантовая хромодинамика, которая описывает взаимодействие кварков и глюонов, проверена настолько точно, что ее предсказания совпадают с результатами экспериментов до мельчайших деталей. Если бы этих частиц не существовало, не работала бы вся физика элементарных частиц, а значит, пришлось бы пересмотреть все фундаментальные законы, которыми объясняется строение материи.

Хотя кварки никогда не наблюдались в свободном состоянии — они всегда связаны внутри протонов, нейтронов и других частиц, — их присутствие проявляется в поведении частиц при столкновениях. Подобно тому как невозможно увидеть ветер, но можно наблюдать, как он раскачивает деревья, так и кварки обнаруживают себя через свои эффекты. В экспериментах на ускорителях частиц исследователи фиксируют именно эти эффекты: импульсы, распределение энергии, углы разлета частиц — все это согласуется с предсказаниями теории.

Глюоны, в свою очередь, не просто связывают кварки — они участвуют в сложнейших процессах, обмениваясь между собой и создавая силу, которая не дает кваркам разлететься. Именно благодаря этим взаимодействиям протоны и нейтроны сохраняют свою структуру.

Более того, предсказания квантовой хромодинамики используются в ядерной физике, в исследованиях свойств вещества при экстремальных условиях, например в изучении плазмы, которая существовала в первые мгновения после Большого взрыва. В ходе экспериментов на Большом адронном коллайдере удалось создать такие состояния вещества, при которых кварки и глюоны перестают быть связанными в

привычные частицы — это так называемая кварк-глюонная плазма, еще одно доказательство верности теории.

Очевидным образом, кварки и глюоны — это не просто гипотеза, а часть современной науки, проверенная и подтвержденная многократно. Без этих частиц мир не мог бы существовать в том виде, в каком мы его знаем, а вся материя распалась бы, не имея сил, удерживающих ее элементы вместе.

Таблица Менделеева, знакомая всем со школы, на квантовом уровне представляет собой систему, в которой элементы расположены в зависимости от количества протонов в их ядре, что определяет их электронную структуру и химические свойства. Хотя на уроках химии акцент делают на связях между атомами и свойствах веществ, вся логика этой таблицы определяется законами квантовой механики.

В центре всего — число протонов. Каждый элемент имеет свое уникальное число протонов в ядре, и именно это определяет, сколько электронов будет у атома. Например, у водорода один протон, у гелия — два, у лития — три и так далее. Электроны в атоме располагаются не хаотично, а по четко определенным квантовым уровням, которые образуют энергетические оболочки. Эти уровни соответствуют определенным разрешенным энергиям, которые может иметь электрон в атоме, а их заполнение следует строгим квантовым правилам.

На самых низких уровнях электроны находятся ближе к

ядру и обладают наименьшей энергией, а чем выше уровень, тем дальше электрон от ядра и тем больше его энергия. Каждый уровень делится на подуровни, связанные с квантовыми числами, а электроны заполняют их в порядке минимальной энергии. Именно из-за этого атомы элементов одной группы таблицы Менделеева, например, щелочные металлы или инертные газы, ведут себя похоже: у них похожее распределение внешних электронов, которые определяют химические свойства.

Ключевую роль в формировании таблицы играют принцип запрета Паули и правило Хунда. Первый запрещает двум электронам в атоме находиться в одном и том же квантовом состоянии, поэтому уровни заполняются строго определенным образом. Второй определяет, что электроны сначала занимают орбитали по отдельности, а потом начинают "спариваться". Эти правила влияют на строение оболочек и объясняют, почему элементы в одной группе обладают схожими свойствами.

Например, инертные газы, такие как гелий, неон или аргон, имеют полностью заполненные внешние уровни, что делает их химически пассивными. А вот щелочные металлы, вроде лития или натрия, имеют один слабо связанный внешний электрон, который легко отдается в химических реакциях, из-за чего они крайне активны.

Определённым образом, таблица Менделеева — это не просто список элементов, а отражение глубинных

квантовых закономерностей природы, где каждое свойство атома можно объяснить через квантовые уровни, правила заполнения электронных оболочек и фундаментальные принципы взаимодействия частиц.

Основное правило квантовой физики - принцип неопределенности Гейзенберга говорит о том, что невозможно одновременно точно знать и координату, и импульс электрона. Это означает, что электрон в атоме не движется по фиксированной орбите, как планета вокруг Солнца, а представляет собой размытое облако вероятности — так называемую электронную орбиталь.

Однако возникает вопрос: если положение электрона описывается вероятностью, что случится, если он окажется в точности в ядре? На квантовом уровне этот процесс возможен, но связан с несколькими важными эффектами.

Во-первых, если бы электрон точно находился в координате ядра, это означало бы, что его положение известно с абсолютной точностью. Тогда, по принципу неопределенности, его импульс стал бы бесконечно большим, что физически невозможно. Поэтому электрон не может "застрять" в одной точке, а остается распределенным в виде волновой функции.

Во-вторых, в реальных атомах вероятность обнаружить электрон внутри ядра не равна нулю, особенно для орбиталей с низким значением углового момента,

например, для s-орбиталей. Это приводит к эффекту, называемому проникновением волновой функции: электрон иногда оказывается в ядре, но при этом он не остается там, а лишь периодически "заглядывает". Это важное явление, потому что оно влияет на химические и ядерные процессы.

Если электрон оказывается внутри ядра, могут происходить особые явления, связанные с ядерными силами. Одним из таких процессов является электронный захват, при котором протон в ядре поглощает электрон, превращаясь в нейтрон, а атомный номер элемента уменьшается на единицу. Например, в ядре бериллия с атомным номером четыре может произойти захват электрона, и он превратится в литий с атомным номером три. Этот процесс играет важную роль в звездах и радиоактивном распаде некоторых элементов.

Современная физика считает кварки фундаментальными частицами, что означает: они не состоят ни из чего более мелкого, по крайней мере, в рамках тех знаний, которыми обладает человечество. Их нельзя разбить на части, как атомы, протоны или нейтроны, — это конечные кирпичики материи, самые базовые строительные блоки, из которых складывается наш мир. Однако история науки показывает, что каждая новая истина со временем может стать лишь частью более глубокой картины реальности.

Когда-то считалось, что атомы неделимы, но затем оказалось, что они состоят из ядра и электронов. Позже

открыли, что ядро, в свою очередь, собрано из протонов и нейтронов, а затем выяснилось, что и эти частицы не являются окончательными — внутри них скрываются кварки. Возникает естественный вопрос: а вдруг и кварки на самом деле не предел?

Существует несколько гипотез, предлагающих возможное объяснение того, из чего могут состоять кварки, если они не являются истинно фундаментальными. Одна из самых известных — теория струн. Согласно ей, все частицы, включая кварки и глюоны, не являются точечными объектами, а состоят из крошечных вибрирующих "струн". Эти струны могут колебаться с разными частотами, что и определяет, какую частицу мы наблюдаем. Если эта теория верна, то кварки — это лишь проявления более глубокой структуры, пока недоступной нашему наблюдению.

Другие гипотезы, например теория преонов, предполагают, что кварки могут быть сложными объектами, состоящими из еще более мелких частиц. Однако пока никакие эксперименты не дали доказательств в пользу этих идей, и кварки остаются самыми маленькими известными частицами.

Наука постоянно развивается, и то, что кажется фундаментальным сегодня, завтра может оказаться лишь частью более сложной системы. Новые технологии, еще более мощные ускорители частиц и свежие идеи в теоретической физике могут в будущем привести к открытиям, которые снова изменят представление о строении материи. Кто знает, возможно, через столетие вопрос "из чего состоят кварки?" будет таким же привычным, как когда-то вопрос "из чего состоит атом?".

Внутренний мир протона оказывается куда сложнее, чем

представляется на первый взгляд. Хотя его структура обычно описывается как сочетание трех кварков — двух верхних и одного нижнего, — внутри него постоянно рождаются и исчезают виртуальные частицы, возникающие благодаря квантовым флуктуациям. Эти частицы существуют лишь на ничтожные доли секунды, не выходя за пределы протона, но при этом оказывают значительное влияние на его поведение. Пространство внутри не является пустым — оно наполнено постоянными процессами появления и исчезновения частиц, что связано с фундаментальными законами квантовой механики. Согласно принципу неопределенности, даже в абсолютном вакууме могут спонтанно появляться пары частиц и античастиц, существующих столь краткое время, что их невозможно зафиксировать напрямую, но их присутствие можно обнаружить по их влиянию на другие частицы. В результате внутри протона непрерывно формируются дополнительные пары кварков и антикварков, создавая сложную структуру, известную как кварк-глюонное море. Помимо них, в этом движении участвуют и глюоны — переносчики сильного взаимодействия, которые не только связывают кварки между собой, но и порождают новые пары частиц, делая всю картину еще сложнее.

Понять, что именно скрывается внутри, помогли эксперименты, проведенные в крупнейших ускорителях частиц. В середине двадцатого века в результате рассеяния электронов на протонах ученые обнаружили, что внутри них присутствуют дополнительные источники рассеяния, что нельзя было объяснить только

тремя кварками. Более поздние исследования в крупнейших лабораториях мира подтвердили, что вся масса протона и его внутреннее устройство определяются не только тремя основными кварками, но и бесконечными процессами появления и исчезновения виртуальных частиц. Это стало возможным благодаря изучению взаимодействий элементарных частиц на таких коллайдерах, как Большой адронный ускоритель, где сталкиваются частицы с огромной энергией, позволяя заглянуть в самые глубины материи.

Квантовые флуктуации, ответственные за возникновение виртуальных частиц, проявляют себя не только в строении протона, но и в более масштабных явлениях, таких как эффект Казимира. Это явление можно наблюдать, если расположить две металлические пластины на очень малом расстоянии друг от друга в полном вакууме. Оказывается, между ними возникает притягивающая сила, которая объясняется тем, что спектр возможных виртуальных частиц между пластинами ограничен, что создает разницу давления. Аналогичные процессы происходят и внутри протона, где вакуумные флуктуации влияют на структуру и свойства материи.

Сами кварки, составляющие материю, обладают особыми характеристиками, отличающими их от всех других частиц. Они имеют дробный электрический заряд, который не встречается ни у одной другой известной частицы. Верхний кварк обладает зарядом, равным двум третьим, а нижний кварк — минус одной третьей. Хотя привычные заряды, как у электрона или

протона, выражаются целыми числами, кварковые заряды складываются таким образом, что в результате образуются частицы с целочисленным зарядом. Например, у протона сумма зарядов двух верхних и одного нижнего кварка дает единицу, а у нейтрона, содержащего один верхний и два нижних кварка, в сумме получается ноль.

Термин "валентные кварки" используется по аналогии с валентными электронами в атомах, хотя их природа различна. В химии валентными называют электроны, которые определяют способность атома образовывать химические связи. В физике частиц валентные кварки — это те, которые составляют базовую структуру адрона, например, три кварка в протоне или нейтроне. Они определяют заряд и другие свойства частицы, тогда как внутри нее дополнительно присутствует так называемое кварк-глюонное море, состоящее из виртуальных кварков и глюонов, возникающих из-за квантовых флуктуаций. Эти виртуальные частицы существуют лишь на краткие мгновения и не входят в основную "каркасную" структуру адрона, поэтому понятие валентных кварков выделяет именно те, что остаются неизменными в рамках его состава.

Помимо электрического заряда кварки обладают еще одной важной характеристикой — цветным зарядом. Этот термин не имеет отношения к привычным цветам, но был введен для удобства, чтобы описывать взаимодействие кварков через сильное взаимодействие. В отличие от электрического притяжения, где есть только положительные и отрицательные заряды, здесь существуют три вида взаимодействий, условно названные красным, зеленым и синим. Эти свойства

определяют, как кварки связываются друг с другом. Они никогда не встречаются в одиночку, поскольку сильное взаимодействие обладает уникальной особенностью: если пытаться разорвать связь между кварками, сила их притяжения только возрастает. Если продолжать их разделять, энергия, затрачиваемая на это, становится настолько большой, что в определенный момент из вакуума появляются новые кварки, которые сразу же формируют новые частицы, не позволяя кваркам существовать поодиночке. Именно поэтому в природе никогда не наблюдаются отдельные кварки — их всегда можно найти только в составе более сложных частиц.

Кроме двух наиболее распространенных разновидностей кварков существуют еще четыре, которые встречаются лишь в условиях огромных энергий. Среди них выделяют очарованный, странный, истинный и прелестный кварки. Эти частицы обладают значительно большей массой и появляются только в высокоэнергетических процессах, таких как столкновения частиц в ускорителях или мощные взрывы в космосе. Самым тяжелым среди них считается истинный кварк, масса которого сопоставима с целым атомом золота, хотя он существует лишь доли секунды, прежде чем распадается.

Таким образом, кварки — это фундаментальные кирпичики, из которых состоит материя, но, несмотря на свою простоту, они скрывают за собой богатый и сложный мир взаимодействий. Они никогда не существуют поодиночке, их связывают силы, которые становятся только мощнее при попытке их разорвать, а

их свойства объясняют, почему материя в том виде, в каком она нам известна, остается устойчивой. И хотя сегодня они считаются неделимыми, никто не может сказать наверняка, не найдется ли в будущем нечто еще более фундаментальное, что изменит наше представление о структуре Вселенной.

Название "кварк" было предложено физиком Мюрреем Гелл-Манном в середине двадцатого века. Оно вдохновлено строкой из книги ирландского писателя Джеймса Джойса Поминки по Финнегану, где встречается загадочная фраза: "Three quarks for Muster Mark!". Гелл-Манн выбрал это слово, поскольку его теория предсказывала существование трех основных кварков в составе адронов, что совпадало с числом в строке из книги. Изначально ученый произносил это слово как "кварк", но позже обнаружил, что в тексте Джойса оно рифмуется с "bark" (в английском — "лай"), и изменил его произношение.

Термин "глюон" происходит от английского слова glue, что означает "клей". Название отражает суть этих частиц: глюоны служат связующим звеном между кварками, удерживая их вместе с помощью сильного взаимодействия. Эта сила настолько мощная, что кварки не могут существовать в свободном состоянии, оставаясь связанными внутри адронов.

Название "адрон" происходит от древнегреческого слова ἄδρῶς (hadros), что означает "плотный", "массивный". Это связано с тем, что адроны, такие как протоны и нейтроны, значительно тяжелее других элементарных

частиц, например, электронов или нейтрино. Термин был предложен в середине двадцатого века для объединения частиц, взаимодействующих через сильное ядерное взаимодействие.

Глюоны играют ключевую роль в удержании кварков внутри протона, выступая переносчиками сильного взаимодействия. В отличие от фотонов, ответственных за электромагнитное взаимодействие, они обладают цветным зарядом и способны взаимодействовать друг с другом, что приводит к сложной динамике внутри адронов. Этот процесс описывается квантовой хромодинамикой, согласно которой сила сцепления кварков не ослабевает с расстоянием, а наоборот, растет, что исключает возможность существования кварков в свободном состоянии. На малых масштабах проявляется эффект асимптотической свободы: кварки при очень малых расстояниях ведут себя как почти свободные частицы, но при попытке их раздвинуть притяжение только усиливается. Помимо трех валентных кварков, определяющих базовую структуру протона, внутри него непрерывно рождаются и исчезают виртуальные кварк-антикварковые пары, образующие так называемое кварковое море. Глюоны не просто связывают кварки, но и порождают дополнительные кварковые пары, в результате чего внутренняя структура протона оказывается гораздо сложнее, чем простая модель трех частиц. Более того, основную часть его массы составляет вовсе не сумма масс кварков, а энергия взаимодействий глюонов, подтверждая, что большая часть массы материи возникает из движения и взаимодействий, а не из массы отдельных частиц. Исследования этих процессов ведутся в крупнейших ускорителях частиц, таких как Большой адронный коллайдер, где изучается

глубоконеупругое рассеяние, позволяющее заглянуть внутрь протонов и уточнить распределение глюонов и кварков. Эти эксперименты не только помогают понять фундаментальные силы природы, но и находят применение в таких областях, как ядерная энергетика и технологии высоких энергий, способствуя развитию новых направлений в физике и инженерии.

Нейтрон — это электрически нейтральная частица, входящая в состав атомного ядра наряду с протоном. Их массы практически равны, но ключевое различие заключается в электрическом заряде: у протона он положительный, а у нейтрона отсутствует. Это различие влияет на взаимодействие этих частиц с электрическими и магнитными полями, но, что важнее, именно протоны определяют, к какому химическому элементу относится атом.

Количество протонов в ядре называется атомным номером, и именно оно определяет свойства элемента. Если изменить число нейтронов, состав ядра поменяется, но химические свойства останутся прежними, хотя сам атом может стать радиоактивным изотопом. Однако если изменить число протонов, то ядро превращается в ядро другого элемента, так как изменяется его заряд и, следовательно, структура электронной оболочки. Электроны в атоме удерживаются электромагнитными силами, и их расположение зависит от заряда ядра, а значит, от числа протонов. Поэтому, когда протонное число меняется, химическая природа вещества становится иной.

Хотя многие считают, что новые элементы могут появляться только в ходе термоядерных реакций, на самом деле превращение одного элемента в другой возможно и без этого, благодаря слабому взаимодействию, которое позволяет нейтронам превращаться в протоны и наоборот. Этот процесс лежит в основе радиоактивного распада и естественного превращения элементов. Например, если в ядре нестабильного изотопа нейтрон превращается в протон, ядро получает дополнительный положительный заряд и превращается в атом нового элемента с большим атомным номером. Так происходит, например, при бета-распаде, когда ядро испускает электрон и антинейтрино, а нейтрон внутри него становится протоном.

Обратный процесс, при котором протон превращается в нейтрон, также приводит к изменению атомного номера, но в сторону уменьшения. Это может происходить при электронном захвате, когда ядро поглощает один из своих электронов, или при так называемом позитронном распаде, когда протон испускает позитрон и нейтрино, превращаясь в нейтрон. Оба механизма могут изменять состав ядра без участия высокотемпературных процессов, таких как термоядерный синтез.

Таким образом, превращение химических элементов — это не всегда результат экстремальных условий в звездах. Оно может происходить даже при комнатной температуре, если ядро нестабильно и подвержено радиоактивному распаду. Именно эти процессы лежат в основе естественного превращения элементов, происходящего в природе, а также используются в таких

технологиях, как ядерная энергетика и радиационная медицина.

Химические свойства вещества определяются не самими протонами, а их электрическим зарядом, поскольку именно он определяет структуру электронной оболочки атома. В основе всех химических реакций лежат взаимодействия электронов, а количество электронов в нейтральном атоме всегда равно числу протонов в его ядре. Именно поэтому изменение числа протонов ведет к образованию нового элемента: изменяется заряд ядра, а вместе с ним — сила притяжения электронов и их конфигурация.

Когда ядро содержит, например, один протон, оно притягивает один электрон, формируя атом водорода. Если к ядру добавить еще один протон, заряд увеличится, что заставит атом удерживать уже два электрона, превращая его в атом гелия. Если же убрать один протон, сила притяжения ослабнет, и атом потеряет один электрон, изменив свою химическую природу. Таким образом, не сам факт наличия протонов определяет химические свойства, а именно их заряд, который задает число электронов, участвующих в химических реакциях.

Нейтроны, в отличие от протонов, не имеют заряда и поэтому не влияют на распределение электронов вокруг атома. Они могут изменять только массу атома, превращая его в другой изотоп того же элемента, но не в новое вещество. Именно поэтому химия определяется числом протонов, а не нейтронов: даже если атом

углерода и атом азота имеют почти одинаковую массу, их химические свойства совершенно различны, потому что у углерода шесть протонов и шесть электронов, а у азота — семь.

Итак, протон и нейтрон способны превращаться друг в друга благодаря слабому взаимодействию, которое изменяет состав их кварков. Эти превращения играют важнейшую роль в процессах радиоактивного распада, реакциях, происходящих в недрах звезд, и в эволюции материи во Вселенной. Основу этих трансформаций составляет изменение типа одного из кварков внутри частицы, что сопровождается испусканием или поглощением других элементарных частиц.

Когда протон превращается в нейтрон, один из его верхних кварков изменяет свое состояние, становясь нижним. В результате меняется баланс зарядов, и частица, которая раньше имела положительный заряд, становится электрически нейтральной. Это сопровождается испусканием позитрона — частицы, являющейся антиподом электрона, — а также нейтрино, обладающего крайне малой массой и почти не взаимодействующего с веществом. Такой процесс встречается, например, при распаде нестабильных атомных ядер, когда один из протонов внутри них превращается в нейтрон, что меняет состав ядра и приводит к образованию нового элемента. Кроме того, аналогичное превращение может происходить при электронном захвате — явлении, при котором ядро поглощает электрон с одной из внутренних орбит, что приводит к преобразованию протона в нейтрон. Эти механизмы играют ключевую роль в процессах,

происходящих внутри звезд, особенно в тех, где идет активный синтез элементов.

Обратное превращение, при котором нейтрон становится протоном, происходит, когда один из нижних кварков внутри нейтрона меняет свой тип, превращаясь в верхний. Это приводит к появлению заряда, и нейтральная частица превращается в положительно заряженный протон. Одновременно с этим рождаются электрон и антинейтрино, которое, подобно нейтрино, почти не взаимодействует с веществом. Этот процесс наблюдается, например, при естественном распаде свободных нейтронов. Если нейтрон не связан внутри атомного ядра, он остается нестабильным и в среднем через пятнадцать минут самопроизвольно превращается в протон, испуская электрон и антинейтрино. Подобные превращения происходят и в ядерных реакторах, где играет роль избыточное количество нейтронов, а также в звездах, где слабое взаимодействие участвует в формировании новых химических элементов, влияя на эволюцию небесных светил и распространение вещества в космосе.

Спин — это фундаментальная характеристика элементарных частиц, отражающая их внутренний угловой момент. В отличие от классического вращения, которое можно наблюдать у макроскопических объектов, спин не связан с физическим вращением частицы вокруг своей оси, а является чисто квантовым свойством, которое описывает, как частица ведет себя в магнитных и других полях. Значение спина измеряется в единицах постоянной Планка, деленной на два пи, и

может быть целым или полуцелым числом.

Кварки обладают спином, равным одной второй, что означает, что они относятся к классу фермионов — частиц, подчиняющихся принципу Паули. Это принцип запрещает двум фермионам находиться в одном и том же квантовом состоянии одновременно, что играет ключевую роль в формировании структуры материи.

Протон и нейтрон также имеют спин, равный одной второй, но их собственный угловой момент складывается не только из спинов трех валентных кварков, но и из вклада глюонов, виртуальных кварков и движения всех этих частиц внутри ядра. Долгое время считалось, что спин протона полностью определяется суммой спинов его валентных кварков, но эксперименты показали, что вклад этих кварков составляет лишь малую часть от общего значения. Остальную часть обеспечивают орбитальное движение кварков, спины виртуальных кварк-антикварковых пар, а также угловой момент глюонов, которые участвуют в сильном взаимодействии.

Таким образом, спин кварков — это лишь одна составляющая сложной системы, которая формирует спин адронов. Исследование этого явления продолжается в современных экспериментах, поскольку понимание структуры спина протона и нейтрона может пролить свет на фундаментальные механизмы квантовой хромодинамики.

Нейтрино возникают в результате слабого взаимодействия — одного из фундаментальных типов взаимодействий в природе, отвечающего за процессы, при которых элементарные частицы могут превращаться друг в друга. Одним из самых распространенных источников нейтрино является бета-распад, когда нейтрон превращается в протон, испуская электрон и антинейтрино, или наоборот, когда протон превращается в нейтрон, сопровождаясь испусканием позитрона и нейтрино. Поскольку эти частицы не имеют электрического заряда и обладают крайне малой массой, они почти не взаимодействуют с веществом, что позволяет им проходить сквозь гигантские расстояния, не встречая препятствий.

Наиболее мощные потоки нейтрино приходят от Солнца и других звезд, где в термоядерных реакциях происходят превращения водорода в более тяжелые элементы. Внутри солнечного ядра в ходе синтеза гелия из водорода рождаются колоссальные количества нейтрино, которые мгновенно покидают звезду, устремляясь в космическое пространство. За одну секунду через каждое живое существо на Земле проходят миллиарды этих частиц, но из-за их слабого взаимодействия с материей они остаются практически незамеченными. Помимо звезд, нейтрино рождаются в сверхновых, при столкновении космических лучей с атмосферой, в ядерных реакторах и даже в недрах нашей планеты, где радиоактивный распад элементов производит слабые потоки этих призрачных частиц.

Хотя нейтрино почти не взаимодействуют с обычной

материей, их изучение играет важную роль в современной науке. Они помогают исследовать процессы внутри звезд, проверять законы физики за пределами нашей планеты и даже заглядывать в прошлое Вселенной, поскольку эти частицы могут нести информацию о событиях, произошедших миллиарды лет назад. Превращения протонов и нейтронов, сопровождающиеся испусканием нейтрино, являются ключевыми процессами, определяющими не только радиоактивные свойства атомов, но и эволюцию звезд, формирование химических элементов и структуру материи в масштабах всей Вселенной.

Нейтрино, несмотря на свою ненулевую массу, могут проходить сквозь плотное вещество почти без взаимодействия, тогда как фотоны, не имеющие массы и заряда, сталкиваются с атомами и поглощаются. Это связано не с массой частиц, а с тем, какие силы управляют их взаимодействием с материей.

Фотон, будучи переносчиком электромагнитного взаимодействия, активно взаимодействует с заряженными частицами, такими как электроны и ядра атомов. Когда свет проходит через вещество, фотоны могут поглощаться электронами, возбуждая их, или рассеиваться, изменяя направление движения. В плотных материалах фотоны многократно сталкиваются с атомами, что приводит к ослаблению их потока — именно поэтому свет не проходит через непрозрачные вещества, например, металл или стену.

Нейтрино же участвуют только в слабом взаимодействии и не имеют электрического заряда, поэтому не ощущают электромагнитного воздействия со стороны атомов. Слабое взаимодействие в миллиарды раз слабее электромагнитного, и для того чтобы нейтрино столкнулось с чем-то, оно должно приблизиться к частице на невероятно малое расстояние. Вещество на макроскопическом уровне состоит в основном из пустоты: ядра атомов занимают ничтожную часть объема, а электроны, даже если нейтрино их "заметит", не могут повлиять на его движение из-за отсутствия заряда у самой частицы.

В результате вероятность того, что нейтрино столкнется с чем-то на своем пути, крайне мала. Для примера, нейтрино могло бы пройти толщу свинца размером со всю Солнечную систему, прежде чем столкнется с чем-либо. Только в редких случаях, пролетая через невероятно плотные среды, например, недра звезды или ядро нейтронной звезды, эти частицы могут взаимодействовать с веществом и быть поглощенными. Именно поэтому нейтрино без труда пролетает через всю Землю, а фотоны света не могут пройти даже через тонкий лист металла.

Даже в ядрах звезд, где плотность вещества достигает невероятных значений, остается огромное количество пустого пространства на субатомном уровне. Атомы состоят в основном из пустоты: ядро занимает лишь крошечную часть их объема, а электроны движутся вокруг него на расстояниях, во много раз превышающих размер самого ядра. В плотной среде, такой как центр звезды, атомы могут сближаться, их электронные

оболочки могут деформироваться или даже исчезать под давлением, но сами ядра все равно занимают лишь малую долю общего объема.

В нейтронных звездах вещество еще более сжато: электроны и протоны сливаются в нейтроны, образуя вещество, состоящее почти целиком из нейтронов, упакованных в плотнейшую структуру. Однако даже там остаются крошечные промежутки, так как нейтроны, будучи фермионами, не могут занимать одно и то же квантовое состояние, что создает определенное распределение плотности. Тем не менее, даже в таких экстремальных условиях нейтрино все еще могут проходить через вещество, поскольку их взаимодействие со средой остается слабым.

Что касается черных дыр, то здесь ситуация совсем иная. Внутри горизонта событий понятие «пустоты» теряет смысл, поскольку вся материя сжимается в область с бесконечной кривизной пространства-времени, а гравитация становится настолько сильной, что никакие частицы, включая нейтрино, не могут ее покинуть. Вблизи горизонта событий нейтрино, если оно движется наружу, еще может покинуть черную дыру, но если оно оказывается внутри, то становится пленником гравитационного притяжения, как и все остальные частицы. Таким образом, хотя плотность вещества в обычных звездах или нейтронных звездах все еще допускает существование микроскопических промежутков, внутри черной дыры материя перестает существовать в привычной форме, и пустота приобретает совершенно другой смысл, определяемый законами общей теории относительности.

кварки по своей массе и квантовым свойствам относятся

к фермионам, но при этом их масса значительно варьируется в зависимости от типа. Фермионы — это частицы с полуцелым спином, подчиняющиеся принципу запрета Паули, что означает, что две одинаковые частицы не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. К этой категории относятся лептоны, такие как электроны и нейтрино, а также кварки, которые участвуют в сильном взаимодействии.

Масса кварков различается в очень широких пределах. Легчайшие из них — верхний и нижний — обладают массами, сравнимыми с электронами, тогда как самые тяжелые, такие как истинный кварк, весят больше, чем целый атом золота. Для сравнения, масса электрона составляет менее одной тысячной атомной единицы массы, в то время как масса верхнего и нижнего кварков выражается в долях атомной единицы, а масса истинного кварка превышает сотню таких единиц.

Однако в отличие от других фермионов, таких как электрон или нейтрино, кварки никогда не существуют в свободном состоянии из-за конфайнмента, который удерживает их внутри адронов. Это делает их особыми среди всех фермионов, поскольку их масса не просто определяется их внутренними характеристиками, но также сильно зависит от энергии взаимодействий, происходящих внутри адронов, что усложняет прямое измерение их массы.

На сегодняшний день бозон Хиггса считается элементарной частицей, то есть не имеющей внутренней структуры и не состоящей из чего-то более

фундаментального. Он описывается в рамках Стандартной модели физики элементарных частиц как квант возбуждения хиггсовского поля — особой среды, пронизывающей всю Вселенную и отвечающей за механизм приобретения массы частицами.

В отличие от кварков и лептонов, которые являются фермионами и подчиняются принципу запрета Паули, бозон Хиггса относится к бозонам — частицам с целым спином, которые могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Среди всех известных элементарных частиц он уникален тем, что является единственным скалярным бозоном, имеющим нулевой спин.

Однако в некоторых гипотетических теориях, расширяющих Стандартную модель, допускается возможность того, что бозон Хиггса может быть не фундаментальной, а составной частицей, состоящей из еще более фундаментальных объектов, например, связанных кварков или других неизвестных частиц. Некоторые модели предполагают, что он может быть аналогом композитных частиц, подобных пи-мезонам, которые состоят из кварк-антикварковых пар. Однако пока нет экспериментальных данных, подтверждающих эту гипотезу, и все наблюдения, проведенные в Большом адронном коллайдере, соответствуют тому, что бозон Хиггса является точечной, неразложимой частицей. Если в будущем окажется, что он имеет более сложную структуру, это станет революционным открытием, указывающим на существование новой физики за пределами Стандартной модели.

На первый взгляд может показаться, что мир элементарных частиц устроен слишком сложно: множество частиц, сил, взаимодействий, квантовых свойств — все это кажется избыточным. Однако природа не обязана быть простой с точки зрения человеческого восприятия. Возможно, наша интуиция, сформированная в макром мире, просто не приспособлена к пониманию истинной структуры реальности.

Одна из гипотез, объясняющих такое разнообразие, заключается в том, что все известные частицы могут быть не фундаментальными объектами, а лишь различными проявлениями чего-то более глубинного. В этом смысле частицы можно сравнить с волнами на поверхности воды — они кажутся отдельными объектами, но на самом деле представляют собой разные состояния одной и той же среды. В современной физике существуют теории, предлагающие подобное объяснение.

Одна из таких идей — теория струн. В ней предполагается, что все частицы — это лишь разные вибрации крошечных одномерных струн, которые колеблются в многомерном пространстве. Разные способы колебаний порождают различные свойства частиц: одна конфигурация дает электрон, другая — кварк, третья — бозон Хиггса. Если эта теория верна, то в основе всей Вселенной лежит всего один объект — струна, а разнообразие частиц возникает только из-за различных способов ее возбуждения.

Другая гипотеза, связанная с полями, предполагает, что все известные частицы — это просто рябь на квантовых полях, заполняющих пространство. Например, фотон — это волновое возмущение электромагнитного поля,

кварк — это возбуждение соответствующего квантового поля, а бозон Хиггса — рябь на поле Хиггса. В этом случае фундаментальными оказываются не сами частицы, а поля, в которых они существуют.

Но остается главный вопрос: существует ли нечто абсолютно фундаментальное, не зависящее ни от полей, ни от колебаний? Современная наука пока не дает ответа, но многие физики полагают, что с развитием новых теорий мы можем прийти к более простому и глубинному описанию реальности. Возможно, вся материя, все взаимодействия и даже само пространство-время можно свести к одной-единственной структуре, из которой рождается все остальное. Пока что путь к такому пониманию остается открытым, и, возможно, самые важные открытия впереди.

При термоядерной реакции выделяется энергия за счет превращения части массы участвующих частиц в энергию, согласно знаменитому уравнению Эйнштейна: энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Этот процесс происходит, когда легкие атомные ядра сливаются, образуя более тяжелые. Ключевым моментом является то, что суммарная масса исходных частиц до реакции оказывается больше, чем масса образовавшихся в результате слияния частиц. Разница в массе превращается в энергию, которая высвобождается в форме излучения и кинетической энергии новых частиц.

Но откуда берется эта "лишняя" масса и кому она принадлежит? Внутри атомных ядер масса связана не только с массой протонов и нейтронов, но и с энергией их взаимодействия. Основной вклад в массу протонов и нейтронов дают не сами кварки, а энергия глюонов,

которые связывают кварки внутри этих частиц. Когда ядра сливаются, меняется конфигурация взаимодействий между протонами и нейтронами, и часть энергии, связанной с удерживающими их силами, высвобождается наружу. В этом смысле можно сказать, что высвобождается энергия, которая прежде находилась в форме глюонных взаимодействий внутри нуклонов и между ними.

На примере реакции синтеза водорода в гелий, происходящей в Солнце, это выглядит так: четыре ядра водорода, состоящие из одиночных протонов, сливаются, образуя одно ядро гелия. Однако масса четырех протонов больше, чем масса итогового гелиевого ядра. Разница в массе превращается в свет и поток частиц, который питает энергию Солнца. При этом выделяется колоссальное количество энергии, поскольку даже небольшая потеря массы дает огромную энергию из-за квадратичного множителя в уравнении Эйнштейна.

Таким образом, энергия термоядерного синтеза — это не "энергия кварков" или "энергия глюонов" в чистом виде, а перераспределение энергии взаимодействий, удерживающих частицы внутри ядер. Когда ядра перестраиваются в более устойчивую конфигурацию, часть связанной энергии высвобождается, и именно она нагревает звезды и дает энергию, на которой основана жизнь во Вселенной.

Процесс обратный термоядерному синтезу возможен — это так называемый фоторасщепление, или диссоциация ядра, при котором тяжелые ядра, такие как гелий, распадаются обратно на более легкие частицы, включая протоны. Однако для этого требуется подвести к ядру колоссальное количество энергии, чтобы преодолеть

силы, удерживающие его компоненты вместе.

В отличие от термоядерного синтеза, где при слиянии ядер энергия выделяется, расщепление гелия на отдельные протоны потребует затраты энергии, поскольку образовавшиеся частицы будут иметь большую суммарную массу, чем исходное ядро. Это связано с тем, что при слиянии часть массы превращается в энергию, а при обратном процессе необходимо вернуть эту потерянную массу за счет внешней энергии.

Такой процесс действительно наблюдается в экстремальных условиях, например, внутри массивных звезд, где высокоэнергетическое гамма-излучение может разрушать ядра гелия и других элементов, выбивая из них протоны и нейтроны. Это явление играет важную роль в так называемом противораспаде, который происходит в самых горячих фазах жизни звезд или при мощных вспышках сверхновых.

Кроме того, искусственные методы расщепления ядер используются в экспериментальной физике. Например, ускорители частиц способны разгонять протоны или другие частицы до высоких энергий и сталкивать их с ядрами, вызывая их разрушение. В лабораторных условиях расщепление гелия на отдельные протоны можно осуществить, бомбардируя его интенсивными пучками высокоэнергетических фотонов или частиц, что приведет к разрыву связей внутри ядра.

Таким образом, хотя распад гелия на протоны возможен, это энергоемкий процесс, который происходит только при очень высоких температурах, сильном излучении или в условиях мощных ядерных взаимодействий, например, в звездах или на ускорителях.

Протон считается практически вечной частицей, потому что в рамках Стандартной модели физики он не имеет известных механизмов распада. Все наблюдения показывают, что его время жизни превышает возраст Вселенной, что делает его одной из самых стабильных частиц в природе.

Главная причина такой устойчивости связана с законом сохранения барионного числа — фундаментальной симметрией, согласно которой количество барионов (частиц, состоящих из трех кварков, таких как протоны и нейтроны) не изменяется в обычных ядерных и слабых взаимодействиях. В известных процессах, включая радиоактивный распад, протоны не распадаются, потому что нет механизма, который позволил бы им нарушить этот закон.

Однако некоторые теории, выходящие за рамки Стандартной модели, такие как Великие объединенные теории, предсказывают, что протон все же может распадаться, но с невероятно большим временем жизни — порядка десяти в тридцатой или даже в тридцать пятой степени лет. Это означает, что вероятность распада одного конкретного протона за время существования Вселенной ничтожно мала. Если такие распады действительно происходят, то они крайне редки и требуют сложнейших экспериментов для их обнаружения.

В современных экспериментах, таких как наблюдения в детекторах глубоко под землей, ученые ищут признаки распада протона на более легкие частицы, например, позитрон и нейтральный пи-мезон. Однако пока подобных событий не зафиксировано, что говорит либо о еще большей стабильности протона, чем предсказывают альтернативные теории, либо о необходимости пересмотра наших представлений о фундаментальных законах природы.

Один из наиболее популярных вариантов распада протона — это его превращение в позитрон и нейтральный пи-мезон. В этом случае три кварка внутри протона взаимодействуют через гипотетические тяжелые частицы, предсказываемые теориями Великого объединения, что приводит к следующему процессу:

Один из возможных сценариев распада протона заключается в его превращении в позитрон и нейтральный пи-мезон. Позитрон представляет собой античастицу электрона, обладающую таким же зарядом, но противоположным знаком. Пи-мезон, который в этом случае не несет электрического заряда, нестабилен и практически мгновенно распадается, испуская два кванта света — фотоны. Эти фотоны можно зафиксировать с помощью детекторов, что позволяет учёным искать редкие признаки возможного распада протона.

Среди других гипотетических вариантов его распада рассматриваются такие процессы, как превращение протона в мюон и нейтральный пи-мезон, что приводит к образованию более тяжелого аналога электрона. Еще один сценарий предполагает появление антинейтрино и пи-мезона в результате распада, а в некоторых теориях

допускается, что протон может исчезнуть, оставив после себя только три нейтрино — практически неуловимые частицы, которые почти не взаимодействуют с веществом. Все эти процессы остаются пока лишь гипотетическими, так как ни один из них не был зафиксирован экспериментально, но их изучение может пролить свет на фундаментальные законы природы.

Эти распады нарушают сохранение барионного числа, но в некоторых теориях предполагается, что оно может заменяться на более общий закон, например, сохранение разности между барионным и лептонным числом.

Экспериментально пока не удалось зафиксировать ни одного события распада протона. Современные установки, такие как детектор Супер-Камиоканде в Японии, установили нижний предел на время жизни протона — более десяти в тридцать четвертой степени лет. Если распад действительно возможен, он происходит настолько редко, что поймать его напрямую — крайне сложная задача.

Если когда-нибудь удастся обнаружить распад протона, это станет одним из важнейших открытий в физике, указывающим на существование новой, более глубокой теории, объединяющей все фундаментальные взаимодействия.

Строение материи, каким его представляет современная физика, оказалось гораздо сложнее, чем могли предположить первые исследователи атомов. За привычными формами вещества скрывается мир элементарных частиц, чьи свойства определяют не только химические и физические характеристики

окружающего мира, но и фундаментальные законы, управляющие Вселенной. Кварки, глюоны, нейтрино, бозон Хиггса — все эти частицы являются неотъемлемой частью реальности, а их взаимодействия порождают те силы и явления, благодаря которым существуют звезды, планеты и сама жизнь.

Мы выяснили, что протон, который долгое время считался элементарной частицей, на самом деле имеет сложную внутреннюю структуру. Он состоит не только из трех валентных кварков, но и из виртуальных кварков и глюонов, которые постоянно рождаются и исчезают в результате квантовых флуктуаций. Сильное взаимодействие, удерживающее кварки внутри протона, делает его одной из самых устойчивых частиц во Вселенной, а сам феномен конфайнмента не позволяет кваркам существовать в свободном состоянии. Несмотря на свою стабильность, протон в некоторых теоретических моделях может распадаться, но время его жизни настолько велико, что ни один эксперимент пока не смог зафиксировать этот процесс.

Мы также разобрали превращения протонов и нейтронов, происходящие под действием слабого взаимодействия. Эти трансформации лежат в основе радиоактивного распада и формирования новых химических элементов без необходимости термоядерного синтеза. Именно слабое взаимодействие позволяет атомным ядрам менять свою структуру, что влияет на эволюцию звезд и приводит к появлению стабильных элементов, из которых состоит материя.

Еще одним важным аспектом стало обсуждение нейтрино — загадочных частиц, почти не взаимодействующих с веществом. Они рождаются в

ходе ядерных реакций, при бета-распаде и в недрах звезд, проходя через гигантские толщи материи без препятствий. В отличие от фотонов, которые активно взаимодействуют с заряженными частицами, нейтрино практически не подвержены этим силам, что делает их одними из самых трудных для обнаружения, но в то же время крайне важными для понимания процессов во Вселенной.

Мы также затронули вопрос о природе массы и энергии, выяснив, что большая часть массы протонов и нейтронов не принадлежит самим кваркам, а является результатом сложного взаимодействия глюонов, чьи энергии формируют устойчивую структуру материи. Именно этот механизм объясняет, почему при термоядерных реакциях выделяется колоссальное количество энергии: при слиянии ядер изменяется конфигурация этих взаимодействий, и часть связанной энергии превращается в излучение.

Все эти открытия показывают, что мир элементарных частиц — это не просто набор крошечных кирпичиков, а динамическая система, управляемая квантовыми законами, которые во многом остаются загадкой. Вопрос о том, являются ли кварки и бозон Хиггса действительно фундаментальными, или же существуют еще более глубокие уровни реальности, остается открытым. Теория струн, предположения о существовании преонов, гипотезы о скрытых измерениях — все это возможные пути, которые могут привести к новому пониманию природы материи.

Возможно, когда-нибудь будет найдена еще более простая и элегантная теория, объясняющая, почему Вселенная устроена именно так. А пока исследования

продолжаются, каждый эксперимент, каждое новое открытие приближает нас к разгадке, скрытой в самой основе мироздания.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3), 172–198.
2. Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*, 79(4), 361–376.
3. Ellis, C. D., & Wooster, W. A. (1927). The average energy of disintegration of radium E. *Proceedings of the Royal Society A*, 117(776), 109–123.
4. Ashman, J., et al. (1988). A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function g_1 in deep inelastic muon-proton scattering. *Nuclear Physics B*, 328(1), 1–35.
5. Durr, S., et al. (2008). Ab-initio determination of light hadron masses. *Science*, 322(5905), 1224–1227.
6. Friedman, J. I., Kendall, H. W., & Taylor, R. E. (1972). Deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons. *Physical Review D*, 6(10), 2953–2965.
7. Cowan, C. L., & Reines, F. (1956). Detection of the Free Neutrino. *Science*, 124(3212), 103–104.
8. Fermi, E. (1934). Versuch einer Theorie der β -Strahlen. *Zeitschrift für Physik*, 88(3–4), 161–177.
9. Pauli, W. (1930). Letter to the Tübingen Conference on Beta Decay. Unpublished Manuscript.
10. Glashow, S. L., Salam, A., & Weinberg, S. (1979). Weak and Electromagnetic Interactions. Nobel Prize Lecture in Physics.
11. Higgs, P. W. (1964). Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. *Physical Review Letters*, 13(16), 508–509.
12. Clayton, D. D. (1983). *Principles of Stellar Evolution and*

- Nucleosynthesis. University of Chicago Press.
13. Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. (1983). *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*. Wiley.
 14. Rauscher, T., & Thielemann, F. K. (2000). Astrophysical reaction rates from statistical model calculations. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 75(1–2), 1–351.
 15. Adams, F. C., Kane, G. L., Mbonye, M., & Perry, M. J. (2001). Proton decay, black holes, and large extra dimensions. *International Journal of Modern Physics A*, 16(12), 2399–2410.
 16. Bajc, B., Hisano, J., Kuwahara, T., & Omura, Y. (2016). Threshold corrections to dimension-six proton decay operators in non-minimal SUSY SU(5) GUTs. *Nuclear Physics B*, 910, 1–22.
 17. Bhattiprolu, P. N., Martin, S. P., & Wells, J. D. (2022). Statistical significances and projections for proton decay experiments. *arXiv preprint arXiv:2210.07735*.
 18. Bueno, A., Melgarejo, A. J., Navas, S., Dai, Z., & Ge, Y. (2007). Nucleon decay searches with large liquid Argon TPC detectors at shallow depths: atmospheric neutrinos and cosmogenic backgrounds. *Journal of High Energy Physics*, 2007(04), 041.
 19. Fileviez Pérez, P., Murgui, C., & Plascencia, A. D. (2019). Axion dark matter, proton decay, and unification. *arXiv preprint arXiv:1911.05738*.
 20. Giddings, S. B. (2007). Black hole information, unitarity, and nonlocality. *Physical Review D*, 74(10), 106005.
 21. Langacker, P. (1981). Grand unified theories and proton decay. *Physics Reports*, 72(4), 185–385.
 22. Machacek, M. (1980). Proton decay in grand unified theories. SLAC-PUB-2544.
 23. Nath, P., & Pérez, P. F. (2007). Proton stability in grand unified theories, in strings and in branes. *Physics Reports*, 441(3), 191–317.
 24. Raby, S. (2006). Grand unified theories. *arXiv preprint hep-ph/0608183*.
 25. Tye, S. H. H., & Wong, S. S. C. (2015). Bloch wave function for the periodic sphaleron potential and unsuppressed baryon

- and lepton number violating processes. *Physical Review D*, 92(4), 045005.
26. Kriger, B. (2023). Quantum uncertainty and electron-nucleus interactions: Implications for atomic and nuclear physics. *Global Science News*.
 27. Kriger, B. (2024). Fundamental nature of particles: String theory, quantum fields, and the search for a deeper reality. *Global Science News*.
 28. Kriger, B. (2024). Element transmutation through weak interaction: The role of beta decay and electron capture. *Global Science News*.
 29. Kriger, B. (2024). The complex internal structure of the proton: Quantum fluctuations and the quark-gluon sea. *Global Science News*.
 30. Kriger, B. (2025). Photodisintegration and nuclear dissociation: The energy-intensive reverse of fusion. *Global Science News*.
 31. Kriger, B. (2025). Proton stability and the search for proton decay: Implications for fundamental physics. *Global Science News*.