

© ФОНД "РАЗВИТИЕ ЧЕРЕЗ ОБРАЗОВАНИЕ" АВТЗАВОДСКОГО РАЙОНА ГОРОДА ТОЛЬЯТТИ

1994

Е.Ю.Банюлис, В.И.Скиданенко

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

22.3073
5.23

Е.Ю.Банюлис, В.И.Скиданенко

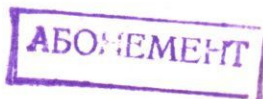
СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Методическое пособие

Издательство Фонда Автозаводского района
«Развитие через образование»

Тольятти

1995



ББК 22.3я73

Б 236

Рецензенты:

Выбойщик М.А. - д.ф.-м.н., проф.ТолПИ

Егоров В.М. - к.ф.-м.н., доц.Тольяттинского ВВКИСУ

Банюлис Е.Ю., Скиданенко В.И.

Б236 Современная физическая картина мира: Методическое пособие. -
Тольятти.: Изд-во Фонда «Развитие через образование», 1995. -
96 с.

ISBN 5 - 88299 - 013 - 0

Пособие окажет помощь в освоении важнейшего понятия в физике, вобравшего в себя все достижения фундаментальных физических теорий - современной физической картины мира. Физическая картина мира является методологическим и мировоззренческим базисом всего естествознания.

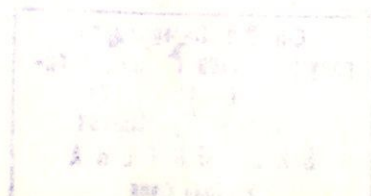
Предназначено учителям, студентам и учащимся старших классов.

Б $\frac{1601000000 - 013}{44Б(03) - 95}$ 012 - 95

ББК 22.3я73

БІ 5 - 88299 - 013 - 0

© Изд-во Фонда «Развитие
через образование», 1995



С о д е р ж а н и е

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Введение	- 4
I. Физическая картина мира	- 5
I.1. Понятие физической картины мира	- 5
I.2. Эволюция физической картины мира	- 6
I.3. Механическая картина мира	- 7
I.4. Электродинамическая картина мира	- 10
I.5. Квантово-полевая картина мира	- 12
2. Особенности современной картины мира	- 16
2.1. Материальное единство мира	- 16
2.2. Обменный характер взаимодействий	- 16
2.3. Роль взаимодействий в природе	- 19
2.4. Элементарные частицы	- 21
2.5. Горячая Вселенная	- 28
3. Связь законов сохранения в механике с симметрией пространства-времени	- 33
4. Теория относительности	- 39
4.1. Представления о специальной теории относительности (СТО)	- 39
4.2. Понятие об общей теории относительности	- 46
5. Эволюция Вселенной	- 57
5.1. <u>Нестационарная Вселенная</u>	- 57
5.2. Реликтовое излучение	- 61
5.3. Эра нуклеосинтеза	- 63
5.4. Барийная асимметрия Вселенной	- 67
6. Элементарные частицы	- 69
6.1. Основные характеристики элементарных частиц	- 69
6.2. Классификация элементарных частиц	- 74
7. Некоторые представления квантовой механики	- 83
7.1. Соотношение неопределенностей	- 83
7.2. Волновая функция	- 91
Литература	- 95

Формирование понятия физической картины мира (ФКМ) является важнейшей задачей физики. Однако в методическом плане оно является одним из наименее разработанных. В вузовских учебниках о ФКМ в целом почти не упоминается, а в школьных учебниках содержится только план-конспект заключительной лекции по ФКМ. Научно-популярная литература по рассматриваемой проблеме издается редко и не задерживается на прилавках магазинов. Поэтому авторы стремились дать основные представления о ФКМ, ее современном состоянии и о важнейших физических теориях, которые являются ее фундаментом.

Этим определяется построение всего пособия. В первой главе дан краткий анализ основных элементов ФКМ и ее эволюции. Вторая глава посвящена особенностям современной физической картины мира. Обе главы тесно связаны между собой и изложены на понятийном уровне без привлечения математического аппарата, что позволяет получить представления об окружающем мире в рамках эволюции ФКМ читателям любого уровня. Материал этих глав может послужить учителю в качестве основы для заключительной лекции по ФКМ, а также базой для формирования основных понятий в процессе изучения физики.

Остальные главы пособия в какой-то мере можно рассматривать как приложение к первым двум главам, с помощью которых авторы попытались решить несколько задач: во-первых, более детально изложить некоторые вопросы, во-вторых, показать, как на базе фундаментальных теорий с минимальным привлечением математики решаются частные проблемы ФКМ, и, в-третьих, предостеречь читателя от упрощенчества, характерного для некоторых популярных изданий.

Путь от идеи, высказанной в виде нескольких предложений, до ее экспериментальной проверки очень сложен и иногда растягивается на десятилетия. Идея, обрастая математическими выкладками, становится рабочей гипотезой, а после экспериментальной проверки — теорией. Поэтому читателю, начинающему знакомство с проблемами физики, необходимо четко осознать, что стоящая перед ним задача сложна и потребует упорной работы и специальной подготовки.

Авторы надеются, что каждый читатель найдет в предлагаемом пособии доступный для себя уровень изложения материала и получит представление о путях его углубления.

I. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

I.1. Понятие физической картины мира

Термин "физическая картина мира" (ФКМ) широко использовали в своих работах М.Планк, А.Эйнштейн, М.Борн и другие выдающиеся физики. На первых порах он чаще встречался как синоним понятия обобщенных физических теорий. С течением времени происходит неуклонный сдвиг понятия в сторону усиления его мировоззренческого, философского аспекта. В.Ф.Ефименко [1] отмечает, что "наиболее важной в мировоззренческом отношении задачей преподавания физики является анализ всего изучаемого материала в свете идей эволюции ФКМ и формирование представлений учащихся о современной ФКМ".

В настоящее время можно предложить следующее определение физической картины мира: ФКМ представляет собой философски осмысленную, идеализированную модель природы, отражающую наивысшую степень систематизации знаний о ней и отвечающую определенному историческому этапу развития.

Выделим наиболее существенные моменты определения.

1. В понятии ФКМ наиболее полно осуществляется взаимосвязь физики и философии. Этот момент очень ярко отмечен Ф.Энгельсом [2]: "Естественноиспытатели воображают, что они освобождаются от философии, когда игнорируют или бранят ее. Но так как они без мышления не могут двинуться ни на шаг, для мышления же необходимы логические категории, а эти категории они некритически заимствуют... из обыденного сознания так называемых образованных людей, над которыми господствуют остатки давно умерших философских систем... то в итоге они все-таки оказываются в подчинении у философии, но, к сожалению, по большей части самой скверной, и те, кто больше всех ругает философию, является рабами как раз наихудших вульгаризованных остатков наихудших философских учений".

История развития физики дает огромное число подтверждений этого глубокого высказывания: кризис естествознания в начале нашего века был обусловлен непониманием физиками диалектики природы, а стихийный выход к ней был трудным и мучительным процессом.

2. ФКМ – идеализированная модель природы. Необходимо помнить, что идеализация здесь имеет две стороны: объективную и субъективную. Объективная идеализация обусловлена тем, что человеческое познание только приближается к абсолютной истине, не охватывая ее целиком, следовательно, мы в настоящее время не знаем многих взаимосвязей в природе и поневоле идеализируем ее.

Субъективность идеализации определяется тем, что из всего многообразия известных взаимосвязей в природе выделяются только те, которые считаются существенными на данном этапе развития.

3. ФКМ – наивысшая степень систематизации наших знаний о природе. ФКМ включает в себя наиболее фундаментальные достижения современных физических теорий, определяет не только уровень современных знаний, но "одновременно задает и способ мышления физика, способ теоретического видения и понимания мира, преобладающие логические формы анализа" [3] .

4. Эволюционный характер ФКМ. Поскольку ФКМ соответствует определенному историческому этапу развития, то она отражает процесс зарождения, становления, развития и смены представлений о природе. Новая картина мира не зачеркивает достигнутого на предыдущем этапе, а уточняет область применимости предыдущей ФКМ, включает ее как свой предельный случай.

Наконец, в последних философских анализах ФКМ, например [3] , все отчетливее проявляется тенденция к рассмотрению ФКМ не только как самостоятельных представлений о природе, но и как идейного базиса самих физических теорий на мировоззренческом, философском уровне.

1.2. Эволюция физической картины мира

В настоящее время выделяются три основных этапа эволюции ФКМ, которые представлены в таблице 1. В пособии использована идея таблиц, которая предложена В.Ф.Ефименко в работах [1,4] , хотя содержание таблиц совпадает далеко не всегда.

Таблица I. Основные этапы эволюции ФКМ

Название ФКМ	Ученые, внесшие основной вклад в создание ФКМ	Время возникновения
Механическая (МКМ)	Г.Галилей, Р.Декарт, Р.Гук, Х.Гюйгенс, И.Ньютон, Ж.Л.Лагранж, П.Лаплас	XVI-XVII вв.
Электродинамическая (ЭДМ)	М.Фарадей, Д.К.Максвелл, Г.Лоренц, А.Эйнштейн	Конец XIX-начало XX вв.
Квантово-полевая (КПКМ)	М.Пленк, Н.Бор, Луи де Бройль, В.Гейзенберг, Э.Шредингер, М.Гелл-Ман, Дж.Цвейг	Первая треть XX в.

Без детального анализа отметим, что основными элементами ФКМ являются: исходные философские идеи, основные физические понятия, основные физические принципы, способ описания и теоретические идеализации, с помощью которых физические объекты и процессы отражаются в теории.

1.3. Механическая картина мира

МКМ Галилея - Ньютона складывалась под непосредственным философским влиянием античного атомизма и метафизического материализма XVI-XVII вв. Необходимо выделить ту огромную роль, которую сыграл Галилей в становлении МКМ. Он впервые выдвинул идею постижения "плана мироздания" в своих исследованиях: т.е. идея научной картины мира, первым ввел необходимость мысленного эксперимента, пришел к невозможности создания фундаментальных идеализаций и использовал их в построении теоретических моделей с привлечением математики, ввел "разработку и конструктивное использование общих представлений о принципах строения мироздания, научной картины мира на теоретическом уровне" [3]. Таким образом, Галилей гениально предвосхитил основные черты современного теоретического уровня познания.

Для Галилея и Ньютона было необычайно важно отождествление небесного и земного в физических явлениях.

Первая теоретическая идеализация - материальная точка - утвердилась после того, когда стало ясно, что поле тяготения сферического тела имеет такой же вид, какой имело бы оно для массы, сосредоточенной в центре сферы.

Следующим важным достижением была идеализация основного состояния движения, которое не требует объяснения с помощью теоретических моделей, - равномерное прямолинейное движение, закон инерции, существование инерциальных систем отсчета.

Введение системы координат и использование интегрального и дифференциального исчисления потребовало строгих представлений о пространстве и времени. И.Ньютон вводит представление об абсолютном пространстве и абсолютном времени как о пустомместилище тел и о чистой длительности процессов.

Отражая фундаментальные законы изменения состояния движения тел и взаимодействия, Ньютон ввел понятие силы как причины изменения состояния движения - идеализацию, отражающую внешнюю сторону взаимодействий, их количественное проявление.

Огромной заслугой Ньютона являлось открытие закона всемирного тяготения. Явный вид действующей силы гравитационного взаимодействия позволил ему объединить земную и небесную механику и завершить построение первого "плана мироздания", начатого Галилеем.

Принципиально важный этап развития МММ связан с учением о теплоте в XIX в., когда почти на протяжении века шла упорная борьба между сторонниками молекулярно-кинетической теории теплоты (Р.Клаузиус, Д.К.Максвелл, Л.Больцман) и сторонниками аксиоматической термодинамики, описывавшей тепловые явления без объяснения их природы.

Победа молекулярно-кинетической теории была достигнута ценой существенного изменения представлений МММ о детерминизме. На смену механическому детерминизму пришел детерминизм статистический, который существенно изменил представления о характере связей между материальными точками.

Молекулярно-кинетическая теория была последней частной теорией, на которую МММ оказала в целом благотворное влияние.

Но уже все попытки объединить в рамках МКМ разрозненные сведения об электромагнитных явлениях оказались безуспешными. МКМ ставилась тормозом развития новых теорий.

Характеристика основных элементов МКМ приведена в таблице:

Таблица 2. Основные элементы МКМ

Исходные философские идеи	Основные понятия	Основные физические принципы
Античный атомизм и механицизм	<p>Материя – вещество, состоящее из неделимых частиц – атомов</p> <p>Движение – механическое перемещение частиц</p> <p>Пространство и время – абсолютны</p> <p>Масса – мера инертности и тяготения</p> <p>Сила – причина изменения состояния движения</p> <p>Взаимодействие – гравитационное</p>	<p>Относительность Галилея, принцип инерции, равенство действия и противодействия, дальное действие, механический детерминизм, причинность</p>
Способ описания	Классический – система дифференциальных уравнений, отражающих состояние движения	
Теоретические идеализации	Материальная точка – образ материального тела; инерциальная система отсчета – идеализация основного состояния движения; сила – идеализация взаимодействия	

В МКМ абсолютизация дискретности – идеализация материальной точки – привела к отказу от анализе роли промежуточной среды между объектами, что и привело к идее дальнего действия, хотя сам Ньютон был последовательным противником дальнего действия.

В заключение отметим, что в рамках МКМ природа представляется в виде однажды запущенного механизма – машины, которая движется затем самостоятельно, подчиняясь законам Ньютона и закону всемирного тяготения. Все явления природы в рамках МКМ объяснялись чисто механическим перемещением тел или частиц в абсолютном пространстве и абсолютном времени.

1.4. Электродинамическая картина мира

С опытов Эрстеда началось установление связи между электрическими и магнитными явлениями и переосмысление идеи дальнего действия.

В 1831г. М.Фарадей, открывший закон электромагнитной индукции и впервые указавший на необходимость изучения свойств среды, окружающей проводник с током или движущийся магнит, завершил переход от дальнего действия к близкодействию.

Вторым важным фактом была замена представлений о постоянном воздействии одного тела на другое представлениями о передаче импульсов или волн в момент изменения состояния движения одного из них. Динамический характер процессов передачи воздействия одного тела на другое принял в работах Фарадея вид силовых линий, которые являлись прообразами поля – нового типа физической реальности.

Дальнейшее развитие идей ЭДМ связано с работами Д.К.Максвелла, которому удалось развить и углубить идеи Фарадея и выразить их на языке математики. Характеризуя его вклад в развитие картины мира, Эйнштейн писал: "После Максвелла физическая реальность мыслилась в виде непрерывных, не поддающихся механическому объяснению полей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Это изменение понятия реальности является наиболее глубоким и плодотворным из тех, которые испытала физика со времен Ньютона" [5].

Завершение ЭДМ нашла в трудах Эйнштейна, посвященных теории относительности. Он не только изменял ньютоновские представления об абсолютности пространства и времени, но и ввел новый образ пространственно-временного физического события как отражение окружающего мира в теоретических моделях. "Специальная

теория относительности предполагает существование материальных полей и частиц, но изображает в теоретических моделях не частицы и поля непосредственно, а отношения между происходящими с ними событиями" [3].

Характеристика основных элементов ЭДМ приведена в таблице 3.

Таблица 3. Характеристика основных элементов ЭДМ

Исходные философские идеи	Основные физические понятия	Основные физические принципы
Естественно-научный материализм; философский континуализм (непрерывность) и динамизм	<p>Материя непрерывна и существует в двух видах: вещества, имеющего атомно-молекулярное или плазменной строение, и поля, которое заполняет пространство между веществом</p> <p>Движение - непрерывно</p> <p>Пространство и время относительны и связаны с материей и движением</p> <p>Масса - мерз инертности, гравитации и полной энергии тела</p> <p>Взаимодействия - гравитационное и электромагнитное</p> <p>Законы сохранения - основные законы природы, законы дозволениа</p>	Относительность Эйнштейна, близкое действие, постоянство скорости света, эквивалентность инерции и гравитации, соответствие между механикой и электродинамикой
Способ описания	Релятивистский: система дифференциальных уравнений движения с учетом влияния скорости движения и наличия гравитационных полей	
Теоретические идеализации	Точечное пространственно-временное физическое событие. Мировая линия - совокупность связанных точечных пространственно-временных событий	

Основные трудности ЭДМ связаны с абсолютизацией континуальных представлений о материи – полный отказ от дискретности мировоззренческом аспекте.

В рамках ЭДМ Фарадея – Максвелла природа выступает перед нами в виде системы электрических зарядов, связанных полями и находящихся в динамическом равновесии. Противоречие между непрерывностью всех рассматриваемых явлений и дискретностью электрических зарядов свидетельствовало о незавершенности картины мира.

В рамках ЭДМ Эйнштейна природа предстает в виде взаимосвязанных пространственно-временных событий.

1.5. Квантово-полевая картина мира

У.Томсон (Кельвин), выражая свой взгляд на теоретическую физику, соответствующую ЭДМ Фарадея – Максвелла, отмечал, что на ее горизонте остаются два небольших облачка: теплоемкость многоатомных молекул и законы теплового излучения. К ним скоро добавились новые: фотоэффект, радиоактивный распад и т.д. Облачка – то предвещали бурю!

Первый шаг в развитии нового взгляда на природу сделал немецкий физик М.Планк в 1900г., выдвинул идею о квантовом характере излучения. В 1905г. Эйнштейн, объясняя явление внешнего фотоэффекта, распространил идею о квантах энергии на поглощение. В 1913г. Н.Бор на основе опытов Э.Резерфорда теоретически обосновал планетарную модель атома водорода. В 1926г. Луи де Бройль выдвинул идею корпускулярно-волнового дуализма вещества.

В 1923г. В.Гейзенберг и в 1926г. Э.Шредингер создали первые варианты квантовой механики, а к 1927г. она приобрела относительно завершенную форму.

Здесь необходимо снова отметить ту огромную роль, которую сыграли в очередной раз философские идеи в смене картины мира. смену философскому континуализму, характерному для ЭДМ, пришел стихийный диалектический материализм. Его идеи: синтез новых и корпускулярных представлений, материальное единство всеобщность движения и т.д. неуловимо прокладывали себе

дорогу в физику, несмотря на яростное сопротивление многих крупных ученых, которые расплачивались годами мучительных поисков и раздумий за незнание диалектики в теории познания.

В последовавших за созданием основ квантовой механики дискуссиях господствовала "копенгагенская интерпретация", развита Бором и Гейзенбергом. Почти единственным последовательным противником идеализма в трактовке основ квантовой механики долгие годы оставался Эйнштейн, который, к сожалению, сам вопросами квантовой механики не занимался.

Дальнейшее расширение КПКМ произошло на основе работ П. Дирака, который нашел волновое уравнение, удовлетворяющее принципу относительности Эйнштейна. Картину мира Дирака часто называют квантово-релятивистской. Современная картина мира остается по-прежнему квантово-релятивистской, однако, чаще за ней сохраняют термин КПКМ, как более отвечающий ее особенностям. Тем более, что теория относительности настолько прочно вошла в физику и ФКМ, что любые современные теории прежде всего проверяются на соответствие ее основным принципам.

Расширение современной картины мира идет за счет дальнейшего познания глубинных свойств материи в виде элементарных частиц и поиска великого объединения, позволяющего объяснить все известные взаимодействия с единых позиций.

В КПКМ волновое уравнение Шредингера или Дирака играет примерно ту же роль, что и второй закон Ньютона в МКМ. Волновая функция, являющаяся решением волнового уравнения, описывает состояние квантового объекта в пространстве и времени.

Реально существующие квантовые объекты (чаще всего элементарные частицы) отражаются в квантовой теории и КПКМ в виде носителя потенциальных возможностей превращения во всевозможных взаимодействиях и отображаются в формальном аппарате теории в виде непрерывной волновой функции, полученной в результате решения волнового уравнения для данных физических условий (значений энергии).

Само взаимодействие квантовых объектов отражается в картине мира квантовым событием — переходом квантовых объектов в процессе взаимодействия от одних потенциальных возможностей к другим. Это изменение соответствует в теории редукции скачко-

образному изменению волновой функции, так как фактически имеет место переход от одной физической задачи к другой. Квадрат волновой функции (комплексно-сопряженное произведение) позволяет определить вероятность тех или иных квантовых событий.

Таким образом, потенциальные возможности квантовых объектов в превращениях в процессе взаимодействий и квантовые события отражают диалектическое единство противоположных сторон взаимодействия, которое является всеобщей формой связи в природе, источником всех видов движения материи.

Роль взаимодействий в природе была предвосхищена Ф.Энгельсом: "Взаимодействие - вот первое, что выступает перед нами, когда мы рассматриваем движущуюся материю в целом с точки зрения теперешнего естествознания... Мы не можем пойти дальше познания этого взаимодействия именно потому, что позади его нечего больше познавать" [2].

В рамках КПКМ природа выступает в виде совокупности квантовых объектов (элементарных частиц), характеризующихся потенциальными превращениями во всевозможных взаимодействиях, и квантовых событий, в которых эти потенциальные возможности реализуются.

В заключение отметим, что ожидавшейся, в связи с огромным числом открытий в мире элементарных частиц, смены картины мира не произошло. Своеобразие калибровочных симметрий, механизмов их нарушения не потребовали выхода за пределы КПКМ, а только углубили ее содержание. Объединение электро-слабых взаимодействий, развитие кварково-глюонной хромодинамики, решение задач Великого объединения идет в рамках современной картины мира.

В первой части пособия дан краткий анализ исторических и философско-гносеологических аспектов понятий ФКМ, показана его сложность и многоплановость. Следующий раздел посвящен особенностям современной картины мира, которые с точки зрения авторов недостаточно отражены в методической литературе.

Таблица 4. Характеристика основных элементов КПКМ

Исходные философские идеи	Основные физические понятия	Основные принципы
<p>Стихийный диалектический материализм (синтез корпускулярных и волновых представлений)</p>	<p>Материя - вещество, имеющее атомно-молекулярное или плазменное строение, и поле, связывающее частицы вещества в системы, отличные на макроуровне; на микроуровне вещество и поле состоят из различных элементарных частиц, у которых больше сходства, чем различия</p> <p>Движение - квантовано, наименьший квант действия - постоянная Планка</p> <p>Пространство и время - относительны и связаны с материей и движением (ЭДКМ)</p> <p>Масса - мера инертности, гравитации и полной энергии - неразрывно связана с носителями - элементарными частицами</p> <p>Взаимодействия - сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное - носят обменный характер</p> <p>Законы сохранения - законы запретов</p>	<p>Квантование, соотношение неопределенности, принцип дополнительности, квантово-механической причинности, ЭДКМ: все принципы теории относительности, симметрии</p>
<p>Способ описания</p>	<p>Квантовый - решение волнового уравнения для данных условий</p>	
<p>Теоретические идеализации</p>	<p>Потенциальные возможности превращения квантовых объектов в результате возможных взаимодействий</p> <p>Квантовое событие - переход квантовых объектов в процессе взаимодействия от одних потенциальных возможностей к другим</p>	

2. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ КАРТИНЫ МИРА

2.1. Материальное единство мира

В таблицах 2,3,4 отражено развитие представлений о материи в рамках ФКМ. В МКМ под материей подразумевалось вещество, состоящее из неделимых частиц - атомов. В рамках ЭДКМ материя существует в двух видах: вещество, имеющее атомно-молекулярное или плазменное строение, и поле, связывающее частицы вещества в системы. В КПКМ различие между веществом и полем сохраняется только на макроуровне. На микроуровне на первое место выступает их материальное единство: вещество и поле состоят из различных элементарных частиц, которые могут превращаться друг в друга. Например, при аннигиляции электрона и позитрона (частицы вещества) образуется не менее двух гамма-квантов (фотоны- кванты электромагнитного поля, переносчики электромагнитного взаимодействия), и наоборот, гамма-кванты достаточно большой энергии вблизи ядра могут порождать электронно-позитронные пары.

С дальнейшим развитием физики будут углубляться и наши представления о структуре материи. В методологическом плане чрезвычайно важную роль играет выделение философской категории материи, детально проанализированное в работах В.И.Ленина, и ее современная научная конкретизация в рамках ФКМ и физических теорий.

Отметим, что с точки зрения теорий великого и супервеликого объединений, материальное единство мира, единство всех движений и взаимодействий обусловлено тем, что все известные сейчас взаимодействия (основа основ) являются различными сторонами единого взаимодействия эпохи Большого Взрыва.

2.2. Обменный характер взаимодействий

Согласно современной ФКМ, все фундаментальные взаимодействия - сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное - носят обменный характер, т.е. взаимодействие между любыми двумя микро-частицами осуществляется путем обмена третьей промежуточной частицей - квантом соответствующего поля.

Отметим еще, что все обменные частицы являются виртуальными, а вот виртуальные частицы не обязательно обменные: виртуальными могут быть любые из известных элементарных частиц, например, электроны и позитроны.

В современной ФКМ утвердилось убеждение в познаваемости ненаблюдаемых непосредственно на опыте частиц (виртуальные частицы, кварки) путем построения конструктивных моделей и последующей проверки их следствий.

В таблице 5 приведены основные характеристики четырех фундаментальных взаимодействий, обусловленные различием обменных частиц.

Таблица 5. Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

Тип взаимодействия	Обменные частицы	Радиус действия, м	Интенсивность взаимодействия
Сильное	Глюоны (8 видов)	10^{-15}	I
Электромагнитное	Фотон	Бесконечность	10^{-2}
Слабое	Промежуточные бозоны (3 вида)	10^{-17}	10^{-13}
Гравитационное	Гравитон	Бесконечность	10^{-39}

Под интенсивность взаимодействия можно понимать отношение энергии данного взаимодействия к энергии сильного. Например, энергия гравитационного взаимодействия между двумя элементарными частицами, находящимися на расстоянии порядка 10^{-15} м, в 10^{-39} раз меньше энергии сильного взаимодействия, если они в нем участвуют.

Промежуточные бозоны, предсказанные теорией электро-слабого объединения, были экспериментально обнаружены в ЦЕРНе в

1983-1984 гг. и послужили блестящим подтверждением теории объединения.

В настоящее время большинство ученых почти не сомневаются в существовании гравитона. Теоретически предсказаны его свойства: нулевая масса покоя, спин, скорость - равная скорости света и т.д. Однако, уровень экспериментальной техники пока недостаточен даже для регистрации гравитационных волн.

В заключение следует обратить внимание на то, что относительная интенсивность взаимодействий существенным образом зависит от энергии взаимодействующих частиц.

При энергии порядка 10^3 ГэВ электромагнитные и слабые взаимодействия теряют свою индивидуальность и становятся разными сторонами единого электро-слабого взаимодействия.

В области энергий 10^{14} ГэВ произойдет, по-видимому, великое объединение уже трех взаимодействий: сильного, электромагнитного и слабого.

И, наконец, при фантастических энергиях, соответствующих началу расширения нашей Вселенной, порядка 10^{19} ГэВ, все четыре фундаментальные взаимодействия объединяются в одно единое универсальное взаимодействие - супергравитацию.

2.3. Роль взаимодействий в природе

Весь окружающий нас мир, его природа и свойства определяются фундаментальными взаимодействиями. Роль различных взаимодействий существенным образом меняется при переходе от одной уровневой природы к другим. В таблице 6 указана роль различных взаимодействий на разных уровнях градаций материи.

При анализе роли взаимодействий в природе ограничимся антропным подходом, т.е. будем рассматривать их с точки зрения существования жизни, существования человека.

С этих позиций сильные взаимодействия ответственны за устойчивость атомных ядер, как основы будущих химических элементов.

Таблица 6. Структурная градация материи и основные взаимодействия

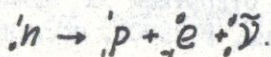
Область пространства	Структурные единицы материи	Состав структурных единиц материи	Основные взаимодействия
Мегамир	Галактики	Звезды	Гравитационное
Макромир	Планетные системы	Планеты	Гравитационное, электромагнитное
	Окружающие тела	Молекулы и атомы	Электромагнитное, гравитационное
Микромир	Молекулы и атомы	Ядра и электроны	Электромагнитное
	Ядра атомов	Нуклоны и пионы	Сильное, электромагнитное, частично слабое
	Элементарные частицы	Лептоны, кварки, глюоны	Сильное, электромагнитное, слабое

Электромагнитные взаимодействия определяют устойчивость атомов и молекул, твердых и жидких тел; создают предпосылки органической жизни, обеспечивают перенос энергии от центрального светила в виде электромагнитного излучения и потока заряженных частиц.

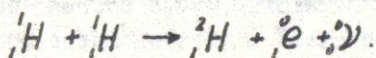
Гравитационные взаимодействия обуславливают существование планет, планетных систем, звезд, звездных скоплений, галактик и структуру нашей Метагалактики в целом.

На вопросе о роли слабого взаимодействия в существовании жизни на Земле необходимо остановиться несколько подробнее. Слабое взаимодействие иногда трактуется только как распадное,

например, [I] . Но это не совсем верно, так как отражает только одну сторону слабых взаимодействий, которая наиболее изучена в земных условиях. Примером может служить β -распад свободных нейтронов:



Однако роль слабых взаимодействий неизмеримо шире. Не останавливаясь на ряде существенных деталей, отметим, что слабые взаимодействия фактически определяют существование звезд как источников энергии. Энергия, выделяемая в звездах, обусловлена процессом "сгорания" водорода: превращением четырех атомов водорода в ядро гелия. И первый этап этого процесса в простейшей интерпретации обусловлен образованием ядер дейтерия:



Интенсивность этой реакции определяется целиком слабым взаимодействием. Следовательно, только благодаря слабому взаимодействию звезды не сгорают мгновенно, а светят миллиарды лет. Существование жизни на Земле столь же обязано слабому взаимодействию, сколько каждому из остальных.

И еще необходимо заметить, что, говоря об основной роли гравитационного взаимодействия в мегамире, мы, как всегда, идеализируем реальные явления, так как даже эволюцию звезд нельзя понять, не привлекая все фундаментальные взаимодействия.

2.4. Элементарные частицы

В настоящее время передний край науки о природе находится в области физики элементарных частиц [7,9,10] .

В начале 30-х годов нашего столетия было известно три составляющих вещества: p - протон, n - нейтрон и e - электрон, которые, наряду с γ - фотоном, были отнесены к элементарным частицам.

В 1936г. к ним добавился μ - мюон, похожий по своим свойствам на электрон, но в 200 раз тяжелее его. В 1947г. были открыты заряженные π^{\pm} - мезоны. В 1959г. - нейтральный π^0 - мезон. В 1949-1951гг. открыты заряженные и нейтральные K - мезоны

с массой в 1000 раз больше массы электрона, а также Λ, Σ, Ξ - гипероны, которые имели различные заряды и были несколько тяжелее протона.

1964г. ознаменовался открытием Ω -гиперона, который почти вдвое тяжелее протона. В 1970г. последовало открытие ψ -частицы и семейства "очарованных частиц", γ -частицы и семейства "красивых" частиц.

Понятие элементарных частиц включает в себя и античастицы. Существование античастиц было постулировано в 1928г. Дираком. Частицы и античастицы рождаются и аннигилируют парами, при этом поглощается или рождается γ - квант, энергия которого больше или равна $2m_0c^2$. На рис. I приведена схема рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар.

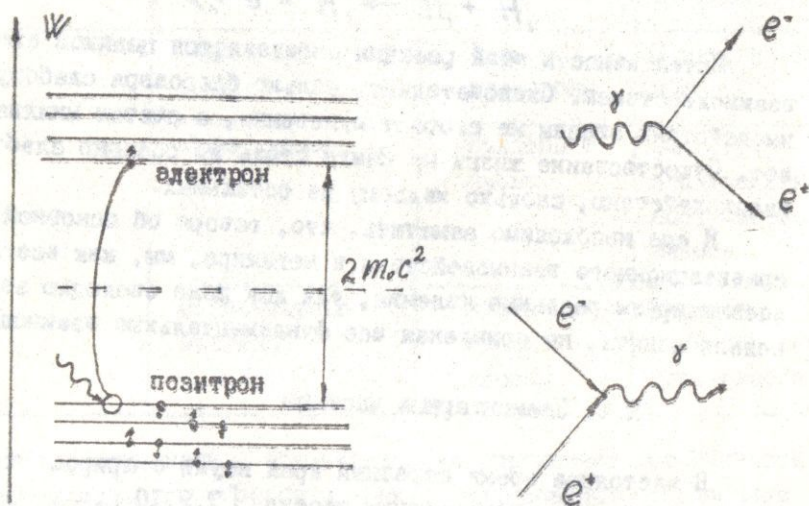


Рис. I. Рождение и аннигиляция электронно-позитронных пар

В 1964г. М.Гелл-Ман и Дж.Цвейг выдвинули идею о кварках, которая сейчас стала общепринятой. Большинство физиков не сомневаются в существовании кварков, хотя, по всей вероятности, получить кварки в "чистом" виде так и не удастся. Использование идеи о кварках и обменных глюонах позволило навести порядок в мире элементарных частиц и резко сократить их общее число. Все

истинно элементарные частицы можно разбить на три класса: лептоны, кварки и переносчики взаимодействий.

К классу лептонов относятся: e - электрон, μ - мюон, τ - таон и три нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ - электронное, мюонное и таонное соответственно. Плюс шесть античастиц. Всего двенадцать лептонов.

Класс кварков образуют шесть кварков, которые могут иметь один из трех цветов: R - красный, G - зеленый, B - синий, то есть восемнадцать кварков. Плюс восемнадцать антикварков различных цветов. Всего тридцать шесть кварков.

В класс переносчиков взаимодействия входят: восемь бесцветных глюонов - переносчиков сильного взаимодействия, фотон - переносчик электромагнитного взаимодействия, три промежуточных бозона - переносчиков слабого взаимодействия, гравитон - переносчик гравитационного взаимодействия. Всего тринадцать частиц.

Таким образом, к фундаментальным элементарным частицам относится пока шестьдесят одна частица из более чем 500 известных.

Состав фундаментальных частиц отражен на схеме I без учета античастиц в классе лептонов и кварков [?].

Названия кварков - "ароматы": U - верхний, D - нижний, S - странный, C - очарованный, T - истинный, B - красивый.

Остальные частицы строятся из кварков. Все мезоны могут быть построены из кварка и антикварка по общей схеме:

$$\text{мезон} = Q \bar{Q}$$

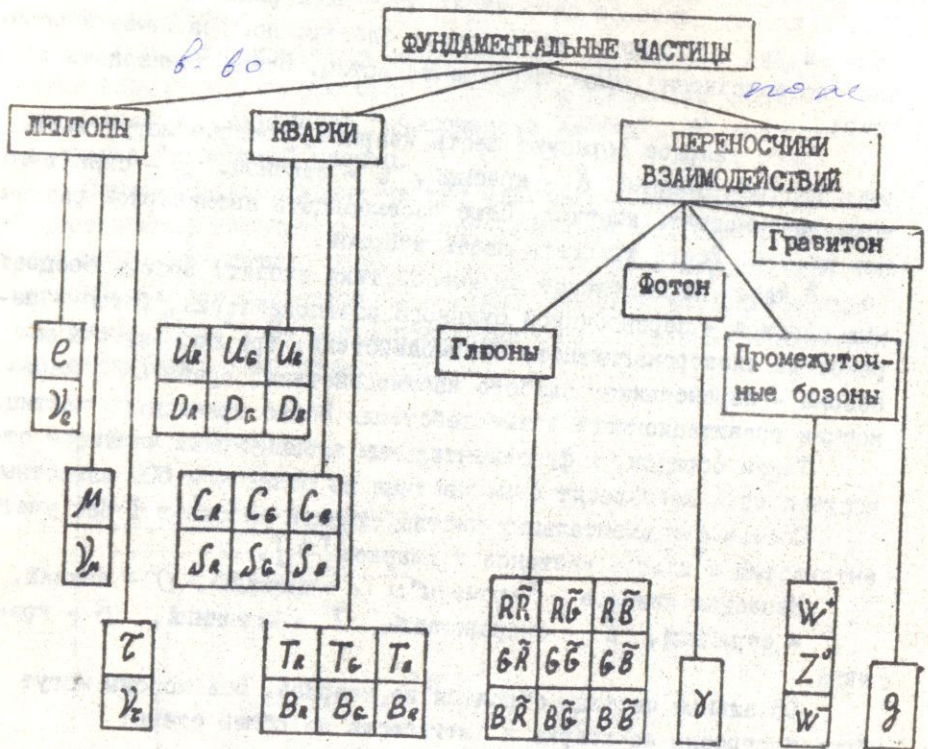
Барions - из трех кварков разных цветов, чтобы получилась бесцветная частица

$$\text{барion} = Q_R Q_G Q_B$$

В качестве примера приведем состав некоторых нуклонов и мезонов:

$$n = UDD, p = UUD, \pi^- = D\bar{U}, \pi^+ = U\bar{D}$$

Схема I. Фундаментальные частицы



Понимание основных идей физики элементарных частиц осложняется необычностью терминологии: "цвет", "аромат", "странность" и т.д. В обзорной лекции в школе нет необходимости владеть в анализ этой терминологии. Важно просто отметить, что под "ароматом" понимается сорт частиц, которых всего шесть, а "цвет" кварков характеризует величину, в некоторой мере аналогичную электрическому заряду. И также как атомы, состоящие из заряженных частиц, в целом нейтральны, элементарные частицы, состоящие из цветных кварков, должны быть в целом бесцветными. Поэтому можно утверждать, что кварк и антикварк, образующие мезоны, должны обладать: один - цветом, а другой обязательно тем же антицветом. Точно также три кварка, входящие в состав барионов, должны иметь

различные цвета: красный, зеленый, синий.

Согласно хромодинамике, каждый кварк должен быть источником особых векторных полей. Взаимодействие векторных полей с кварками должно определяться единой для всех кварков константой - "цветовым зарядом". Частицы, отвечающие этим полям, должны иметь, подобно фотонам, спин, равный 1, и нулевую массу покоя. Однако в отличие от фотонов, не имеющих электрического заряда, они должны сами обладать цветовым зарядом и взаимодействовать друг с другом. Предполагая, что именно эти частицы могут связывать или, образно говоря, склеивать кварки в обычные адроны, их назвали глюонами (от английского *glue* - клей).

Глюоны должны обладать цветом и антицветом. Действительно, чтобы переход, скажем, красного кварка в синий не менял суммарного цвета системы, он обязательно должен сопровождаться излучением красно-"антисинего" глюона (или поглощением сине-"антикрасного"). Из трех цветов и трех антицветов можно образовать девять различных двухцветных комбинаций. Одна из них, полностью симметричная по цвету и антицвету, не имеет цветового заряда и не может быть переносчиком сильного взаимодействия. Поэтому должно остаться 8 различных типов глюонов.

Внутри протона кварки связаны относительно слабо, т.е. адроны - рыхлые образования. Это проявляется при возникновении адронных струй, которые образуются в столкновениях высокоэнергетических частиц, вызываемых космическими лучами. Образующиеся адроны как бы "помнят" о направлении начальных частиц (рис.2). При большой энергии связи кварков в адронах распределение адронов по направлениям было бы однородным.

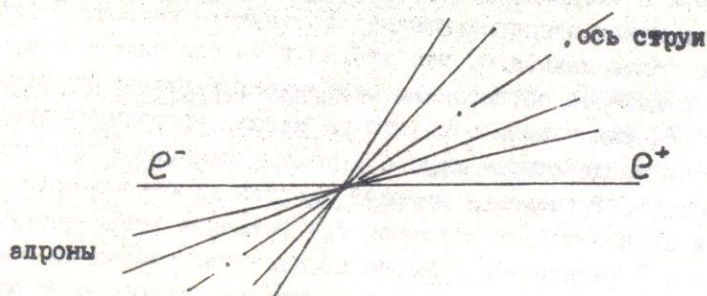


Рис.2. Образование струй адронов

Ядерное взаимодействие, то есть взаимодействие между нуклонами в ядре, является остатком сильного взаимодействия между цветными кварками.

Понятие "нуклон состоит из трех кварков" нельзя воспринимать механистически. Для иллюстрации этого положения приведен рисунок 3, взятый из работы [5], на котором даны три "изображения" протона при исследовании его с помощью излучения, обеспечивающего разное разрешение: а) $4 \cdot 10^{-15}$ м, б) 10^{-16} м, в) 10^{-17} м

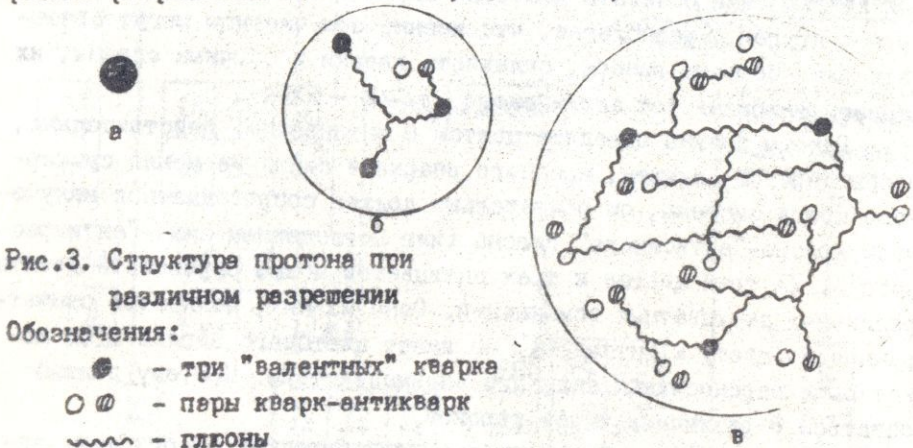


Рис.3. Структура протона при различном разрешении

Обозначения:

- - три "валентных" кварка
- ⊗ - пары кварк-антикварк
- ~~~~ - глюоны

При небольших разрешениях (малые энергии) протон воспринимается бесструктурным шариком. При больших энергиях внутри протона обнаруживается "кипучая активность" рождения кварк-антикварковых пар и глюонов, так как валентные кварки теряются на этом фоне.

Говоря о кварках, нельзя не сказать несколько слов о бесплодных попытках экспериментально обнаружить кварки. В настоящее время почти доказано, что кварки в чистом виде в природе не существуют. Это обусловлено особенностью глюонного взаимодействия. Теория показывает, что на малых расстояниях кварки почти не взаимодействуют друг с другом - принцип асимптотической свободы. При удалении кварков энергия глюонного поля возрастает и становится достаточной для рождения кварк-антикварковой пары. В результате вместо образования свободных кварков образуются бесцветные элементарные частицы. Таково одно из

объяснений конфайнмента, то есть удержания, пленения кварков внутри адронов или мезонов.

На рисунке 4 показаны силовые линии глюонного поля. На малых расстояниях глюонное поле аналогично кулоновскому; на больших расстояниях силовые линии собираются в трубку, при этом сила постоянна, а энергия взаимодействия увеличивается пропорционально расстоянию между кварками. Если один из кварков получает в результате столкновения частиц большой импульс и начинает удаляться от остальных, "глюонная струна" натягивается, а затем может разорваться. Это происходит, когда под действием глюонных полей из вакуума рождается новая пара, состоящая из кварка и антикварка. Антикварк соединяется с первичным кварком в мезон и улетает, а оставшийся кварк притягивается обратно к исходному адрону (рис. 5). Если разрыв струны происходит в нескольких местах, то при больших энергиях возникнет целая группа "бесцветных" адронов (струй), летящих в направлении кварка, получившего большой импульс.

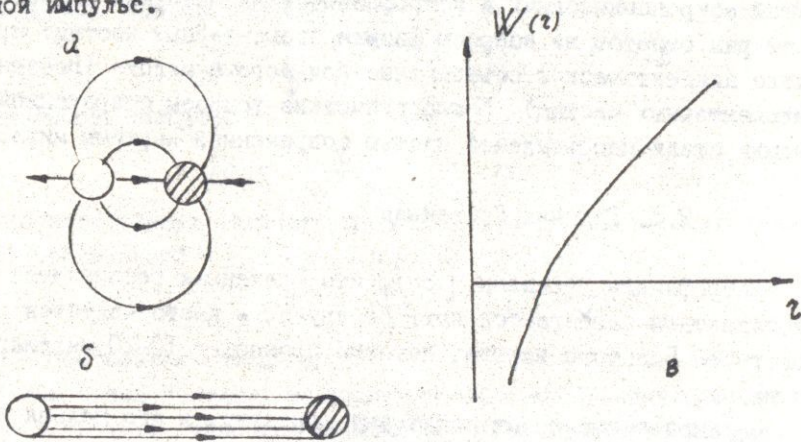


Рис. 4. Взаимодействие кварков: а - силовые линии поля на очень близком расстоянии, б - образование глюонной струны на больших расстояниях, в - зависимость энергии взаимодействия кварков от расстояния. \circ - кварк, \otimes - антикварк.

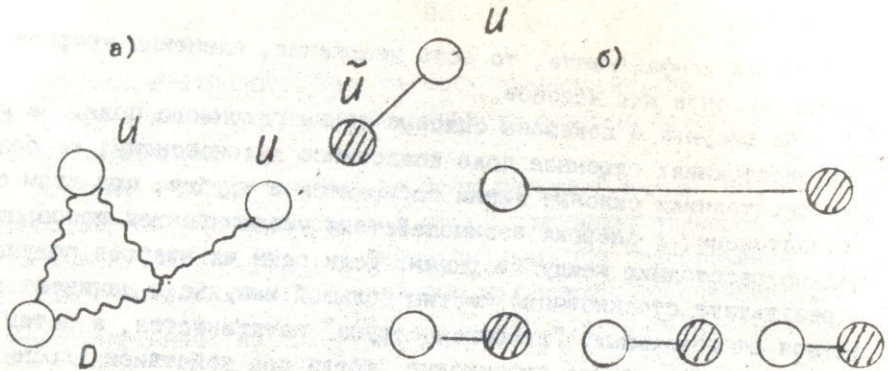


Рис. 5. Образование вторичных частиц: а) протон "порождает" мезон, б) образование трех мезонов из струны

В заключение следует отметить, что развитие теорий великого объединения и супергравитации позволило прояснить некоторые вопросы эволюции Вселенной, и наоборот, изучение эволюции Вселенной астрономическими и астрофизическими методами позволило найти ряд ответов на вопросы физики элементарных частиц: произошло диалектическое объединение большого и малого (Вселенной и элементарных частиц). Космологические вопросы современной астрономии стали неотъемлемой частью современной картины мира.

2.5. Горячая Вселенная

Астрофизики убеждены [8], что Вселенная расширяется - все галактики разбегаются друг от друга, - и это является следствием Большого взрыва, который произошел 10-20 миллиардов лет назад.

Большой взрыв носит квантовый характер, и его нельзя воспринимать как взрыв бомбы или снаряда. При обычном взрыве разлетающиеся осколки или газы движутся за счет разности давлений в центре взрыва и вне его. При взрыве Вселенной происходит расширение самого пространства между галактиками, т.е. рождается наше пространство и время.

Оценим, о каких величинах кривизны пространства, времени и энергии может идти речь в момент Большого взрыва на базе существующих теорий. Для этого воспользуемся методом размерности,

так как других путей сейчас просто нет. Составим выражения из трех основных констант, характеризующих гравитацию (G - гравитационная постоянная), квантование (\hbar - постоянная Планка) и теорию относительности (c - скорость света в вакууме), имеющих соответственно размерности длины, времени, энергии и т.д. По порядку величины они будут соответствовать искомым значениям величин для начала Большого взрыва, когда существенную роль играли гравитация, квантование и относительность. Эту область часто называют планковской, а ее характеристики - планковскими характеристиками.

Планковский размер Вселенной:

$$r_n = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^3}} ; \quad r_n \approx 10^{-35} \text{ м.}$$

Время, за которое Вселенная достигла таких размеров:

$$t_n = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^5}} ; \quad t_n \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

Величине энергии частиц:

$$W_n = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} ; \quad W_n \approx 10^{19} \text{ ГэВ.}$$

Плотность энергии:

$$\omega = \frac{c^7}{G^2 \hbar} ; \quad \omega \approx 10^{113} \text{ Дж/м.}$$

Соответствующую температуру можно оценить из термодинамических соображений:

$$W_n = k T_n , \quad T_n = \frac{W_n}{k} , \quad T_n \approx 10^{32} \text{ К.}$$

где k - постоянная Больцмана.

Когда время достигло планковских величин, гравитация ослабила свою хватку: произошло отделение гравитационного взаимодействия от сильного и электро-слабого, которые еще выступают в виде единого Великого объединения. Вселенная стала прозрачной для гравитонов. Наблюдаемым отзвуком Большого взрыва является продолжающееся по инерции разбегание галактик.

Ослабление роли гравитации привело к экспоненциальному расширению Вселенной - инфляции. За 10^5 - 10^9 планковских единиц времени разбухшая Вселенная простирается на гигантские расстояния, по сравнению с которыми видимая сегодня метagalaktika

является идеальной материальной точкой. Температура в результате инфляционного расширения уменьшается почти до абсолютного нуля.

Вакуумоподобное состояние, образовавшееся в результате Большого взрыва, является неустойчивым, и ко времени порядка 10^{-35} с происходит его фазовое превращение: конденсация хиггсовских скалярных полей. Вселенная, остывшая при инфляции, снова разогревается: температура в ней достигает величин порядка 10^{27} К.

Начинаются реакции с X - и Y -бозонами и тяжелыми хиггсовскими частицами, которые приводят к барионной асимметрии Вселенной: возникает небольшой избыток вещества над антивеществом. До этого момента времени число частиц и античастиц любого сорта было одинаковым. X - и Y -бозоны можно считать лептокварками, так как они могут превращать кварки в лептоны и наоборот, причем в этих реакциях образуются не сами барионы (протоны и нейтроны) и мезоны, а их "составные" части - кварки и лептоны.

Примерно в это же время происходит расщепление сильного и электро-слабого взаимодействий. Инфляционный этап завершается, и дальше идет расширение Вселенной по законам стандартной горячей модели.

Наблюдаемым следствием рассмотренного этапа является барионная асимметрия и нестабильность протона, который с периодом полураспада 10^{31+2} лет должен превращаться в лептон. В последнее время поиску этой реакции уделяется большое внимание, т.к. она подтвердила бы правильность приведенных выше рассуждений.

В момент времени порядка 10^{-10} с происходит еще одно фазовое превращение вакуума, в результате которого промежуточные бозоны приобретают массу, в то время как фотон остается безмассовым. Происходит разделение электромагнитного и слабого взаимодействий. С этого момента все четыре взаимодействия кажутся независимыми, самостоятельными. Завершается очередной этап эволюции Вселенной.

Выделим еще несколько интересных моментов.

Когда время достигло 10^{-4} с от Большого взрыва и температура упала до 10^{12} К, начинается синтез привычных нам мезонов и барионов из кварков.

Таблица 7. Основные этапы эволюции Вселенной

t - время, прошедшее после Большого взрыва; T - температура в К; W - характерная энергия.

t	Событие	T	W
10^{-45} с	Сильные эффекты квантовой гравитации. Пространственно-временная пена		
10^{-43} с	Отделение гравитационного взаимодействия. Начало инфляционного расширения Вселенной	10^{32}	10^{19} ГэВ
10^{-35} с	Первое фазовое превращение вакуума. Отделение сильного взаимодействия. Синтез кварков - установилось преобладание вещества над антивеществом	10^{27}	10^{14} ГэВ
10^{-10} с	Второе фазовое превращение вакуума. Разделение электромагнитного и слабого взаимодействий	10^{15}	10^2 ГэВ
$t=200$ с	Ядерный синтез - образование гелия и дейтерия	10^{10}	10^{-4} ГэВ
10^6 лет	Разделение фотонов и вещества - возникновение реликтового излучения и появление атомов	10^3	0,1 эВ
10^{10} лет	Возникновения галактик, звезд, планет	3 - только для реликтового излучения	
$10^{31 \pm 2}$ лет	Распад барионов? Лептонная плазма?		

Время 10^{-6} - 0,2 с. Вселенная стала прозрачной для различных видов нейтрино. Возникло реликтовое нейтринное излучение, энер-

гия которого в настоящее время сравнима с энергией фотонов при условии, что их масса покоя равна нулю. К сожалению, нейтрино таких энергий пока регистрировать невозможно.

Следующий этап можно назвать этапом синтеза ядер гелия и дейтерия (время — 1с после взрыва; температура порядка 10^{10} К). Из-за различия в массах покоя число протонов начинает преобладать над числом нейтронов. Относительное содержание нейтронов "застывает" на значении 0,15, то есть нейтронов остается 15% от общего числа нуклонов. Каждый нейтрон входит в состав ядра гелия в паре с протоном, поэтому доля ядер гелия по весу будет равна удвоенной застывшей концентрации нейтронов $2 \cdot 0,15 = 0,3$. Итак, по истечении трех минут вещество во Вселенной состоит на 30% из ядер гелия и на 70% из протонов — ядер водорода. Масса лептонов ничтожна. Этот вывод прекрасно согласуется с данными наблюдательной астрономии.

Эпоха возникновения атомов. На протяжении 10 миллионов лет значительных изменений не происходит: энергия частиц слишком велика для того, чтобы могли образоваться устойчивые атомы. И только миллион лет спустя после взрыва, когда температура упала до 1000 К, происходит разделение фотонов и вещества: ядра "обрастают" электронами, и Вселенная становится прозрачной для излучения. Возникает реликтовое излучение. Его эффективная температура к нашим дням должна составлять 3 К. Фоновое излучение именно с такими свойствами было обнаружено Пензиасом и Гильсоном в 1964-1965 гг.

Далее начинается этап формирования галактик, звезд, планет и самого человечества, который продолжается и в наши дни, то есть десять-двадцать миллиардов лет спустя после Великого взрыва. Основные этапы эволюции Вселенной приведены в таблице 7.

3. СВЯЗЬ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ С СИММЕТРИЕЙ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Работы Ньютона по классической механике были пропущены и развиты Лагранжем, Гамильтоном, Якоби и другими учеными. Теория получается наиболее эффективной, если исходить из общих принципов, в частности, из принципа наименьшего действия. В этом случае уравнение второго закона Ньютона возникает как следствие этого принципа в формулировке Лагранжа. Очевидной становится связь законов сохранения с симметрией пространства и времени. Для понимания вопроса необходимы элементарные представления из математического анализа. Заметим, что без представления о бесконечно малых величинах и дифференциальном исчислении нельзя глубоко осознать значение законов Ньютона. В дальнейшем будем предполагать, что читатель хотя бы в общем виде знаком с понятием производной и интеграла.

В соответствии с принципом наименьшего действия (в формулировке Гамильтона) при движении механической системы вдоль реальной траектории интеграл от функции Лагранжа L имеет минимум, который называется действием \mathcal{A} . Зная вид функции Лагранжа для конкретной системы, можно получить уравнения движения. Функция Лагранжа является функцией координат, скоростей частиц и времени. Ее можно записать в виде:

$$L = W_k - W_n, \quad (1)$$

где W_k и W_n - кинетическая и потенциальная энергии соответственно. Причем кинетическая энергия зависит только от скоростей частиц, а потенциальная - от их координат и времени

$$W_k = \sum_i \frac{m_i v_i^2}{2}, \quad W_n = W_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t), \quad (2)$$

здесь x_i - совокупность координат i -ой частицы, v_i - совокупность проекций ее скорости;

$$x_i = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad v_i = \{v_x, v_y, v_z\}$$

Суммирование ведется по $3N$ переменным, если система состоит из N частиц.

Строго говоря, в теории вводятся так называемые обобщенные координаты, импульсы и силы. Например, при вращении обобщенной координатой является угол поворота вокруг оси, обобщенным импульсом — момент импульса, обобщенной силой — момент силы; обобщенными координатами могут выступать комбинации координат частиц и т.п. В нашем случае это не суть важно и мы считаем x_i и v_i обычными координатами и скоростями.

Легко получить с учетом выше приведенных выражений, что проекции импульсов i -ой частицы и проекции силы, на нее действующей, определяются по формулам

$$P_i = m_i v_i = \frac{\partial W_k}{\partial v_i} \quad \text{или} \quad P_i = \frac{\partial L}{\partial v_i}$$

$$F_i = - \frac{\partial W_{in}}{\partial x_i} \quad \text{или} \quad F_i = \frac{\partial L}{\partial x_i} \quad (3)$$

Здесь $\frac{\partial}{\partial x_i}$, $\frac{\partial}{\partial v_i}$ — символы производной по соответствующей переменной.

Из (3) следует, что так называемое уравнение Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial v_i} - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

не что иное, как второй закон Ньютона

$$\frac{dP_i}{dt} = F_i.$$

Преимущество математической формулировки Лагранжа для уравнений движения проявляется для более или менее сложных систем — за счет введения обобщенных координат уравнения движения решаются проще.

Что касается свойств пространства и времени, то оказывается, что в инерциальной системе отсчета пространство однородно и изотропно, а время однородно. Однородность пространства означает, что все его точки эквивалентны, т.е. параллельный перенос системы как целого в пространстве не влияет на ее свойства. Изотропность пространства означает, что все направления эквивалентны, т.е., что поворот системы как целого вокруг произвольной оси

не влияет на ее поведение. Однородность времени означает, что все моменты времени эквивалентны, т.е. начало отсчета времени не имеет значения. Такие представления вполне естественны.

Закон сохранения энергии связан с однородностью времени. Покажем это.

Очевидно, что функция Лагранжа, определяющая поведение системы, не может явно зависеть от времени для замкнутой системы, так как все моменты времени равноправны. Тогда частная (явная) производная от функции Лагранжа по времени равна нулю и полная производная по времени находится как производная от сложной функции $L(x_i(t), v_i(t))$:

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} + \frac{\partial L}{\partial v_i} \frac{\partial v_i}{\partial t} \right). \quad (5)$$

Для тех, кто мало знаком с частными производными от функций, зависящих от времени неявно, поясним, что если

$$L = L(x(t)), \quad \text{то} \quad \frac{\Delta L}{\Delta t} \equiv \frac{\Delta L}{\Delta x} \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

где ΔL , Δx , Δt означают очень малые и конечные изменения величин. Переход к дифференцированию формально сводится к замене малых конечных величин на бесконечно малые ∂L , ∂x , ∂t и т.п. Символ ∂ означает взятие частной производной, т.е. если функция зависит от двух переменных x и v , то $\frac{\partial}{\partial x}$ означает производную по x при постоянном значении v , $\frac{\partial}{\partial v}$ - производную по v при постоянном значении x .

Из (5) следует $\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial v_i}$, кроме того,

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = v_i, \quad \text{следовательно} \quad \frac{dL}{dt} = \sum \frac{d}{dt} \left(v_i \frac{\partial L}{\partial v_i} \right),$$

или, перенося сумму в левую часть, получим:

$$\frac{d}{dt} \left(\sum v_i \frac{\partial L}{\partial v_i} - L \right) = 0. \quad (6)$$

Легко показать, что $v_i \frac{\partial L}{\partial v_i} = m_i v_i^2 = 2W_k$, тогда с учетом выражения для функции Лагранжа (I) получим

$$\frac{d}{dt} (W_k + W_{II}) = 0, \quad (7)$$

т.е. полная энергия замкнутой системы сохраняется:

$$W = const.$$

Заметим, что для закона сохранения механической энергии системы достаточно условия консервативности, т.е. независимости от времени потенциальной энергии поля, в котором находится система. При выводе мы использовали лишь условие, что функция Лагранжа от времени явно не зависит.

Закон сохранения импульса связан с однородностью пространства. При параллельном переносе все точки системы смещаются на один и тот же отрезок, т.е. их радиус-векторы

$$\vec{r}_i \rightarrow \vec{r}_i + \vec{a},$$

где \vec{a} - вектор, характеризующий параллельный перенос. Для простоты можно направить одну из осей вдоль \vec{a} , например, x .

Изменение функции Лагранжа в результате бесконечно малого изменения координат при неизменных скоростях частиц находится по формуле

$$\delta L = \varepsilon \sum \frac{\partial L}{\partial x_i}, \quad (8)$$

производные по осям y и z несущественны.

Очевидно, что для однородного пространства необходимо, чтобы $\delta L = 0$, следовательно, при произвольном значении \vec{a}

$$\sum_i \frac{\partial L}{\partial x_i} \equiv \sum_i \vec{F}_i, \quad (9)$$

т.е. сумма сил, действующих на систему, равна нулю. Из (9) и второго закона Ньютона следует, что полный импульс замкнутой системы сохраняется

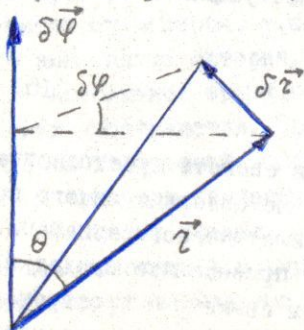
$$\frac{d}{dt} \sum_i \vec{P}_i = 0, \quad \sum_i \vec{P}_i = const. \quad (10)$$

Заметим, что условие (10) (равенство нулю результирующей силы, действующей на систему) слабее условия замкнутости

системы, так как последнее предполагает равенство нулю и результирующего момента сил.

Закон сохранения момента импульса связан с изотропностью пространства. При повороте системы как целого на угол $\delta\varphi$ относительно произвольной оси должно быть $\delta L = 0$.

Рассмотрим изменение $\delta \vec{r}$ радиус-вектора \vec{r} при повороте на угол $\delta\varphi$. Из рис. I видно, что модуль изменения радиуса-вектора



$$|\delta \vec{r}| = r \sin \theta \delta \varphi,$$

а направление $\delta \vec{r}$ перпендикулярно вектору \vec{r} , следовательно, в векторной форме:

$$\delta \vec{r} = \delta \varphi \times \vec{r}.$$

Рис. I

При повороте системы меняются не только радиус-векторы, но и скорости всех частиц системы, причем все векторы преобразуются по одинаковому закону:

$$\delta \vec{v} = \delta \varphi \times \vec{v}.$$

Условие неизменности функции Лагранжа

$$\delta L = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} \delta \vec{r}_i + \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \delta \vec{v}_i \right) = 0. \quad (II)$$

Подставим сюда выражение для $\delta \vec{r}_i$ и $\delta \vec{v}_i$ и учтем соотношение (3), тогда

$$\delta L = \sum_i \left[\frac{dP_i}{dt} (\delta \varphi \times \vec{r}_i) + \vec{P}_i (\delta \varphi \times \vec{v}_i) \right]. \quad (I2)$$

Сделаем в смешанных произведениях векторов циклическую перестановку: $\vec{a} (\vec{b} \times \vec{c}) = \vec{b} (\vec{c} \times \vec{a})$, вынесем общий множитель

$\delta \varphi$ и получим

$$\delta \varphi \sum_i \left(\vec{r}_i \times \frac{dP_i}{dt} + \vec{v}_i \times \vec{P}_i \right) = \delta \varphi \frac{d}{dt} \sum_i \vec{r}_i \times P_i. \quad (I3)$$

Следовательно, в замкнутой системе сохраняется полный импульс системы, величина

$$\sum_i \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \text{const.} \quad (14)$$

Фактически же для выполнения закона сохранения импульса достаточно, что сумма моментов сил, действующих на систему, равнялась нулю, т.е.

$$\sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i = 0. \quad (15)$$

Более строгое доказательство связи свойств пространства-времени (их симметрии) в иллейном плане не содержит ничего нового, кроме корректного применения математического аппарата. Конечно, нет необходимости "заучивать" приведенные выкладки. Важно усвоить, что те или иные элементы симметрии пространства-времени с неизбежностью ведут к выполнению законов сохранения некоторых физических величин. Справедливо и обратное: если в эксперименте обнаружено, что какая-то физическая величина сохраняется, то это обязательно связано с наличием симметрии в свойствах исследуемых взаимодействий.

4. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

4.1. Представления о специальной теории относительности (СТО)

В классической ньютоновской механике используются представления об абсолютном пространстве и абсолютном времени. Абсолютное пространство, его свойства по самому своему определению не зависят от материи, т.е. пространство рассматривается как простоеместилище материи.

Абсолютное время, по определению, течет одинаково во всех точках пространства. Пространственные отношения описываются евклидовой геометрией. Система, связанная с абсолютным пространством и временем, является инерциальной.

В физике представления об абсолютном пространстве и времени использованы в формулировке-принципе относительности Галилея: никакими механическими опытами нельзя установить, покоится система отсчета относительно абсолютной или движется с постоянной скоростью.

Во второй половине XIX века в связи с созданием электромагнитной теории абсолютное пространство связывали с эфиром — гипотетической средой, в которой распространяются электромагнитные волны, подобно тому как механические волны распространяются в обычной среде. Появилась возможность установить движение тел относительно эфира, используя распространения света.

Пусть инерциальная система отсчета (например, ракета) движется со скоростью $v = 100000 \text{ км/с}$. В направлении движения и в противоположном испускаются световые сигналы (скорость света $c = 300000 \text{ км/с}$).

Тогда в первом случае скорость света относительно эфира составит $c+v = 4 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, во втором $c-v = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Легко установить, что суммарное распространение светового сигнала между двумя зеркалами в двух направлениях по и против движения движущейся ракеты будет больше, чем в покоящейся:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Земля представляет собой систему отсчета, движущуюся относительно эфира, поэтому естественно поставить опыт по

определению скорости этого движения.

Майкельсон (1881г.), а затем Майкельсон и Морли (1887г.) провели эксперимент по определению движения Земли относительно эфира. (В этом опыте определялась разница во времени между скоростью света в направлении движения Земли и в перпендикулярном направлении). Результат опыта оказался отрицательным.

Создалась кризисная ситуация в физике: следовало сделать выбор — либо основные положения классической физики неприменимы к электромагнитному полю, либо неверны уравнения Максвелла. Тщательная проверка уравнений Максвелла показала, что они правильные. Был сделан ряд попыток объяснить указанный выше феномен, оставаясь в рамках классической теории. В частности, Лоренц, исходя из факта, что уравнения Максвелла не позволяют различить две инерциальные системы отсчета, получил преобразования Лоренца, которые оставляют эти уравнения инвариантными при переходе от одной инерциальной системы к другой. Фактически допускалось, что уравнения механики инвариантны относительно преобразований Галилея, а электромагнитное поле инвариантно относительно преобразований Лоренца.

В 1905г. Эйнштейн опубликовал работу "К электродинамике движущихся сред", которая ознаменовала начало революции в физике. Он отказался от представления об абсолютном пространстве и абсолютном времени. Принцип относительности по Эйнштейну можно сформулировать следующим образом: никакими физическими экспериментами нельзя определить, движется система отсчета с постоянной скоростью относительно инерциальной системы отсчета или покоится, т.е. все инерциальные системы отсчета эквивалентны.

Скорость света в вакууме является мировой постоянной, т.е. одинакова во всех системах отсчета — принцип постоянства скорости света. Последовательное применение принципов относительности и постоянства скорости света в вакууме с неизбежностью приводит к тому, что пространство и время становятся относительными, т.е. зависят от скорости движения системы отсчета.

Теория относительности настолько противоречила традиционным (можно сказать бытовым) представлениям о свойствах пространства и времени, что потребовалось от 20 до 30 лет, чтобы она стала общепризнанной.

Из постулатов Эйнштейна можно получить преобразования координат и времени при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Мы выберем самый простой в математическом отношении путь.

Рассмотрим две системы координат:

систему K - условно неподвижную (оси координат x, y, z и время t); и систему K' - условно движущуюся (оси координат x', y', z' и время t'), которая движется со скоростью \vec{V} относительно первой. Так как время однородно, а пространство однородно и изотропно, то, не теряя общности, будем считать, что в начальный момент $t = t' = 0$ оси координат совпадали; кроме того, \vec{V} направлена вдоль оси x , как показано на рис. I.

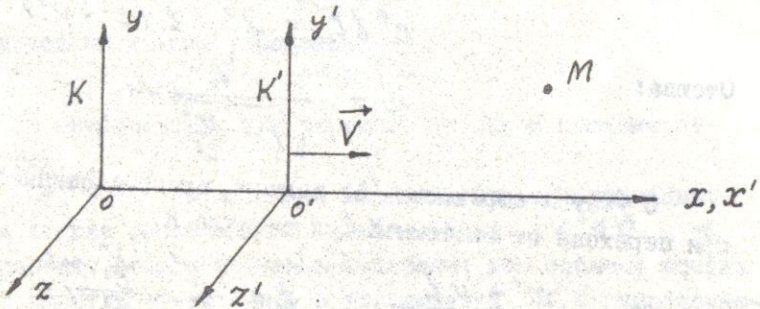


Рис. I

Тогда очевидно, что преобразования затрагивают только координаты x, x' и время t, t' . Пространство и время оказываются связанными: говорят о четырехмерном пространстве-времени. Точку в системе отсчета называют событием. Например, точка M означает событие: в системе K она характеризуется величинами x, y, z, t , в системе K' - величинами x', y', z', t' . Как уже отмечалось выше, в нашем случае $y = y', z = z'$.

Рассмотрим вначале события, относящиеся к началам координат. Точка O имеет координаты:

$$x = 0 \quad x' + v t' = 0.$$

Точка O' имеет координаты:

$$x - v t = 0 \quad x' = 0$$

в системах K и K' соответственно.

Естественно полагать, что в нуль одновременно обращаются величины одного порядка малости, т.е.

$$x = \alpha (x' + vt') , \quad x' = \alpha (x - vt) , \quad (1)$$

где α - некоторая постоянная, она должна быть одинакова в обеих системах отсчета на основании принципа относительности. Чтобы определить α , рассмотрим событие, которое состоит в том, что в начальный момент $t = t' = 0$ из начала координат, которые для обеих систем совпадали, испускается луч света. Тогда на основании принципа постоянства скорости света:

$$x = ct , \quad x' = ct' . \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и перемножим оба уравнения, получим:

$$c^2 t t' = \alpha^2 t t' (c^2 - v^2) \quad (3)$$

Отсюда:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (4)$$

С учетом выражения (4) получим преобразования Лоренца при переходе от системы K' к системе K .

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} , \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (5)$$

Второе из равенств получим, если подставим выражение для x из первого равенства (I) во второе.

Обратные преобразования Лоренца имеют вид:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} , \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (6)$$

Легко видеть, что два одновременных события, происходящие в разных точках в системе K' ($x'_1 \neq x'_2$, $t'_1 = t'_2$), будут неодновременными в системе K :

$$t_2 - t_1 = \frac{\frac{v}{c^2} (x'_2 - x'_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \neq 0 .$$

Два события, которые происходят в одной точке в разное время в системе K' ($x'_1 = x'_2$, $t'_1 \neq t'_2$), будут происходить в разных точках в системе K .

$$x_2 - x_1 = \frac{v(t_2' - t_1')}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \neq 0.$$

Так, если мы последовательно бросаем два шарика и они падают в одну точку с точки зрения неподвижного наблюдателя, то для движущегося наблюдателя шарики падают в разные точки. Если с точки зрения неподвижного наблюдателя часы в разных городах показывают одинаковое время, то с точки зрения движущегося наблюдателя время на часах будет разным. Разумеется, что при этом не нарушается причинно-следственная связь.

Легко видеть, что так называемый интервал между событиями:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2, \quad (7)$$

или в наших условиях (для упрощения)

$$s^2 = c^2 t^2 - x^2 = c^2 t'^2 - x'^2,$$

Остается инвариантным при переходе от одной системы отсчета к другой.

Если $ds^2 > 0$, то интервал называют времени-подобным: два события всегда разделены во времени. Если $ds^2 < 0$, то интервал называют пространственно-подобным: два события всегда разделены в пространстве. Линии в координатах x, t , определяемые из условия

$$ds = 0, \quad x = \pm ct \quad (8)$$

разделяют различные по характеру события, как показано на рис.2.

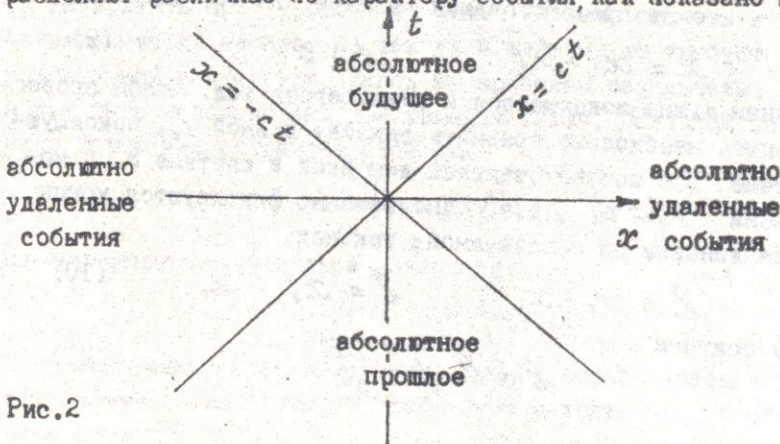


Рис.2

Эйнштейн первым указал на принципиальное значение физических измерений. Так, например, чтобы убедиться, что часы идут одинаково, необходимо их синхронизировать. Это можно сделать с помощью световых сигналов (или радиоволн, как это делается при сверке часов с сигналами точного времени).

Классическая теория фактически предполагает мгновенное распространение взаимодействия (теория дальнодействия), поэтому время считается абсолютным. На практике мы так и считаем: например, если на экране телевизора часы показывают ровно 12 часов, то и наши часы, показывающие такое же время, идут по житейским представлениям так же.

На самом же деле взаимодействия распространяются с конечной скоростью, причем скорость света — максимальная скорость распространения взаимодействий. Например, свет от Солнца до Земли идет 12 минут, следовательно, часы для наблюдателя, находящегося вблизи Солнца, будут идти одновременно с часами в Москве, если опережают последние на 12 минут. Приведенный пример показывает, что из-за конечной скорости распространения взаимодействия и проявляются эффекты теории относительности, что для того чтобы говорить о соотношениях между событиями, необходимо сравнивать часы и отрезки длин.

Очевидно, что если

$$v \ll c,$$

т.е. когда скорость движения тела много меньше скорости света, или формально $c \rightarrow \infty$, то преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея: из (5) получим

$$x = x' + vt' \quad , \quad t = t'. \quad (9)$$

Сравним длины покоящегося и движущегося тел. Чтобы провести измерение, необходимо сравнить линейку длиной l_0 , покоящуюся в системе K , с соответствующей линейкой в системе K' в момент времени $t'_1 = t'_2$, т.е. одновременно фиксируются концы движущейся линейки по неподвижной; так как

$$l_0 = x_2 - x_1 \quad , \quad l = x'_2 - x'_1 \quad (10)$$

то из (5) получим

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (11)$$

Движущиеся тела сокращаются в направлении движения.

Время в системе отсчета, относительно которой часы покоятся, называют собственным временем. Например, если часы покоятся в системе K , то интервал собственного времени

$$\tau_0 = t_2 - t_1.$$

Чтобы определить, как идут часы, которые движутся (в системе K'), необходимо одни неподвижные часы ($x_2 = x_1$) сравнить с двумя часами в системе K' , последовательно проходящими мимо неподвижных ($x'_2 = x'_1$). Тогда из (6) получим, что интервал времени для движущихся часов

$$\tilde{\tau} = t'_2 - t'_1 = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (12)$$

т.е. собственное время идет медленнее.

Так собственное время жизни мезонов очень мало: $\tau_0 = 10^{-8}$ с. Мезоны в космических лучах имеют скорость, очень близкую к скорости света, и пролетают до распада путь порядка 30 км. Следовательно, для мезонов в данном случае время жизни

$$\tilde{\tau} = \frac{l}{c}, \quad \tau = \frac{3 \cdot 10^4 \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 10^{-4} \text{ с},$$

т.е. время течет в десять тысяч раз медленнее.

Заметим, что для построения динамики в теории относительности необходимо перейти к четырехмерному математическому пространству-времени и ввести четырехмерные величины, которые были бы инварианты при переходе от одной системы отсчета к другой. Математический аппарат не так уж и сложен, но требует некоторой специальной подготовки. Здесь мы приведем результаты, которые могут быть использованы при решении задач. Основной закон динамики формально сохраняет свой вид

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum \vec{F}_i, \quad (13)$$

но выражение для импульса изменится:

$$\vec{P} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (14)$$

Кинетическая энергия, как обычно, определяется через работу внешних сил, которую необходимо затратить, чтобы увеличить скорость от 0 до v . Используя формулу для работы перемен-

ной силы и уравнение (13), после интегрирования получим

$$W_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right). \quad (15)$$

Видно, что кинетическую энергию можно записать

$$W_k = W - W_0, \quad (16)$$

где W - полная энергия, W_0 - энергия покоящегося тела. Сравнивая (15) и (16), получим известную формулу Эйнштейна:

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (17)$$

которая связывает массу и энергию.

Часто инвариантную величину m называют массой покоя. Так как энергия покоя $W_0 = mc^2$, то это дает возможность массу и энергию измерять в одинаковых единицах, например, в электронвольтах. Из этих соображений величину

$$m_0 = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (18)$$

называют массой движущегося тела.

Из (14), (17) можно получить полезную формулу, связывающую энергию и импульс частицы:

$$W^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (19)$$

Дальнейшим развитием специальной теории относительности стала общая теория относительности или теория тяготения.

4.2. Понятие об общей теории относительности

Общая теория относительности, или теория тяготения, является обобщением специальной теории относительности. Основные положения этой теории были сформулированы Эйнштейном в 1916 году. Он подверг критическому рассмотрению тот факт, что инерциальные системы отсчета обладают преимуществами перед неинерциальными системами отсчета (в последних не выполняется закон инерции). С идеологической (в научном смысле) точки зрения это почти то же, что понятие об абсолютном пространстве-времени, введенное Ньютоном.

Парадигмой теории Эйнштейна является снятие этого противоречия, т.е. утверждение, что законы движения должны записываться в инвариантной форме в любой системе отсчета. В этом смысле все системы отсчета эквивалентны.

Важно подчеркнуть, что Эйнштейн исходил не из чисто умозрительных представлений, как это иногда отмечается в популярной литературе, чтобы указать на дедуктивный характер общей теории относительности. Он исходил из известного в классической механике принципа эквивалентности инертной и гравитационной масс.

Гравитационное поле обладает следующим основным свойством: все тела вне зависимости от их массы движутся в нем (при заданных начальных условиях) одинаковым образом. Написанное полностью уравнение Ньютона для движения в гравитационном поле имеет вид:

$$(Инертная\ масса) \times (ускорение) = (гравитационная\ масса) \times (ускорение\ свободного\ падения).$$

Это уравнение не зависит от природы тел только в случае численного равенства инертной и гравитационной масс.

Это свойство гравитационных полей дает возможность установить существенную аналогию между движением тел в гравитационном поле и движением тел, не находящихся в каком-либо внешнем поле, но рассматриваемом с точки зрения неинерциальной системы отсчета. Действительно, в инерциальной системе отсчета свободное движение всех тел происходит с одинаковой скоростью — прямолинейно и равномерно. Очевидно поэтому, что если рассматривать это движение в заданной неинерциальной системе отсчета, то и относительно нее все тела будут двигаться одинаковым образом, что равносильно введению гравитационного поля.

Рассмотрим, например, движение в равномерно-ускоренной системе отсчета. Свободно движущиеся в инерциальной системе отсчета тела будут, очевидно, обладать относительно неинерциальной системы отсчета одинаковым постоянным ускорением, равным и противоположным ускорению самой системы отсчета. Таким же является движение в однородном постоянном гравитационном поле.

Однако поля, которым эквивалентны неинерциальные системы отсчета, все же не вполне тождественны с истинными гравитационными полями, существующими и в инерциальных системах. Между ними

имеется весьма существенное различие в отношении их свойств на бесконечности. Так, например, возникающие во вращающейся системе отсчета центробежные силы неограниченно растут при удалении от оси вращения; реальное поле, которому эквивалентна система отсчета, обращается в нуль на бесконечности.

Поэтому о полной эквивалентности можно говорить только для локальной системы отсчета, на участке пространства достаточно малом, чтобы в нем поле можно было считать однородным.

Такие области пространства называют "галилеевыми областями". То, что можно ввести "галилеевы области" пространства, следует из того, что закон инерции с большой точностью выполняется в Солнечной системе. Рассмотрим такую область пространства.

Если в неподвижной системе отсчета K свободная материальная точка движется прямолинейно по радиусу (кривая 1), то во вращающейся системе отсчета K' она будет двигаться по кривой 2 (рис. 2).

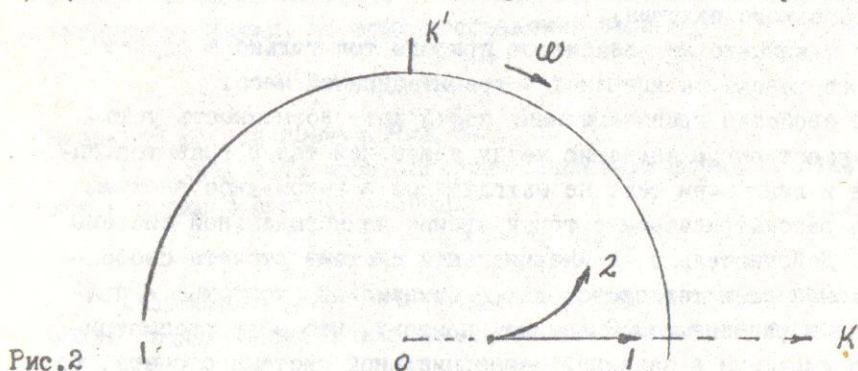


Рис. 2

1 - траектория движения в неподвижной системе отсчета
 2 - траектория движения во вращающейся системе отсчета
 ω - угловая скорость вращения

Если движение свободной частицы происходит в реальном гравитационном поле (напряженность поля в данном случае равна центробежному ускорению), то мы должны принять, что пространство искривляется, т.е. геометрия пространства неевклидова. Следует сделать небольшое пояснение по этому вопросу.

Евклидова геометрия, т.е. геометрия плоского пространства является частным случаем более общей Римановой геометрии, в которой кратчайшее расстояние между точками (геодезическая линия)

является кривая, определяемая метрикой пространства.

Это легко представить на примере двумерного пространства. Так для сферы геодезическая линия - дуга большого круга (рис.3.1), для более "сложной" поверхности геодезические линии будут соответственно более сложными (рис.3.2). Иногда и для криволинейной поверхности некоторые геодезические линии могут быть прямыми, - например, для гиперболического параболоида (седло), изображенного на рис.3.3.

Изменяются и метрические соотношения. Так сумма углов сферического треугольника больше π , через точку можно провести несколько параллельных геодезических линий и т.д. Криволинейное пространство трех и более измерений наглядно представить нельзя, но аналитическая теория таких пространств - Риманова геометрия - была разработана еще в XIX веке. Первые шаги в этом направлении были сделаны одновременно Лобачевским, венгерским математиком Больяйи и Гауссом в 1826-29гг.

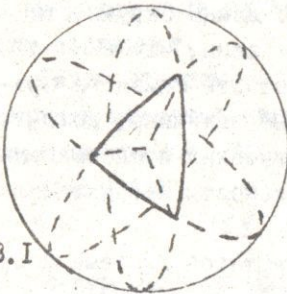


Рис.3.1

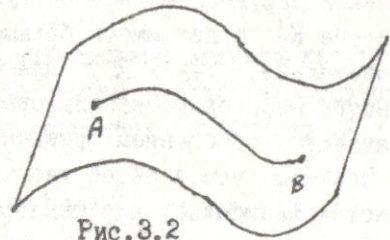


Рис.3.2

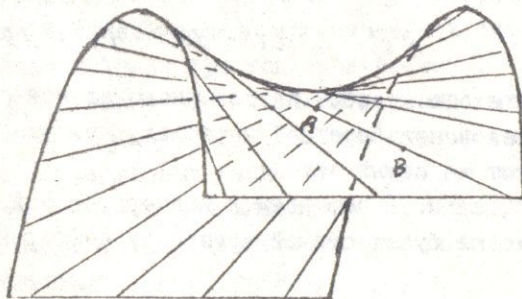


Рис.3.3

Нет никаких логических посылок для выбора той или иной геометрии в качестве геометрии реального пространства. Это можно

было решить только экспериментально. Но в малых областях пространства его кривизне практически не проявляется. Еще Лобачевский проводил измерения суммы углов треугольника, сторонами которого были межзвездные расстояния, но безуспешно.

Отметим, что в классической механике говорить о кривизне пространства абсурдно, так как оно по определению плоское.

На самом деле, как следует из специальной теории относительности, время является равноправной четвертой координатой и рассматривать следует искривление 4-х мерного пространства-времени. Изменение метрических соотношений, т.е. неизбежность возникновения неевклидовости пространства можно проиллюстрировать на упомянутом выше примере (рис.2), используя результаты специальной теории относительности. В неподвижной системе отсчета K отношение длины окружности к диаметру $\frac{L}{D} = \pi$. При измерении длин во вращающейся системе отсчета K' учтем, что масштаб длины при измерении диаметра не изменяется, а при изменении окружности масштаб уменьшается. Длина окружности в системе K' будет иметь больше единичных длин, чем в K ; следовательно, $\frac{L}{D} > \pi$. Для описания свойств Риманова пространства необходимо использовать тензорные величины, которые являются обобщением привычных геометрических представлений.

Покажем, что в общей теории относительности метрика пространства записывается в тензорной форме.

В инерциальной системе отсчета в декартовой системе координат интервал dS определяется формулой

$$dS^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (20)$$

При переходе к любой другой инерциальной системе отсчета (при преобразовании Лоренца) интервал, как указывалось раньше, сохраняет тот же самый вид.

Однако, если мы перейдем к неинерциальной системе отсчета, то dS^2 уже не будет суммой квадратов дифференциалов четырех координат.

Так при переходе к равномерно вращающейся системе координат (рис.4) интервал приобретает вид

$$ds^2 = [c^2 - \omega^2(x'^2 + y'^2)] dt^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2 + 2\omega y' dx' dt - 2\omega x' dy' dt \quad (21)$$

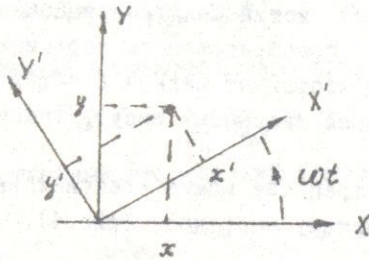


Рис. 4

$$x = x' \cos \omega t - y' \sin \omega t$$

$$y = x' \sin \omega t + y' \cos \omega t$$

$$z = z'$$

По какому бы закону не преобразовывалось время, это выражение не может быть приведено к сумме квадратов дифференциалов четырех координат.

Таким образом, в неинерциальной системе отсчета квадрат интервала является некоторой квадратичной формой пространственных координат x^1, x^2, x^3 и временной координаты $x^0 = ct$, т.е. имеет вид

$$ds^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx^i dx^k, \quad i,k=0,1,2,3 \quad (22)$$

Четырехмерная система координат является в неинерциальной системе отсчета криволинейной. Величины g_{ik} определяют все свойства геометрии в каждой данной криволинейной системе координат, устанавливая метрику пространства-времени.

Величины g_{ik} можно всегда считать симметричными по индексам i и k ($g_{ik} = g_{ki}$). В общем случае имеется, следовательно, всего 10 различных величин: g_{ik} — четыре с одинаковыми и $4 \cdot 3/2 = 6$ с различными индексами. В инерциальной системе отсчета при пользовании декартовыми координатами и временем $x = ct$ величины g_{ik} равны

$$g_{00} = 1, \quad g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1, \quad g_{ik} = 0 \text{ при } i \neq k. \quad (23)$$

Систему координат (четырёхмерную) с этими значениями g_{ik} мы будем называть галилеевой.

Как и в нерелятивистской механике существует коренное различие между "истинными" гравитационными полями и полями, эквивалентными неинерциальной системе отсчета. При переходе от неинерциальной системы отсчета к инерциальной можно получить галилееву метрику (плоское пространство), истинное гравитационное поле не может быть исключено никаким преобразованием координат (преобразованием всего лишь четырех координат нельзя в общем случае привести 10 величин g_{ik} к наперед заданному виду). Такое пространство-время называют кривым.

Заметим, что в кривом пространстве можно ввести локальную галилееву систему координат (рис.4).

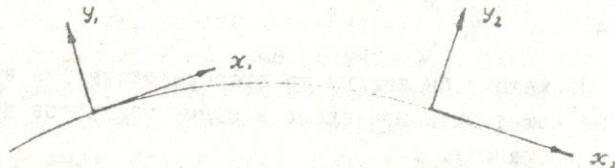


Рис.4. Введение локальной галилеевой системы координат для двухмерного случая.

В специальной теории относительности под системой отсчета понималась совокупность покоящихся друг относительно друга, неизменным образом расположенных тел. При наличии гравитационного поля таких систем тел не существует и для точного определения положения частиц в пространстве необходимо иметь совокупность бесконечного числа тел, заполняющих пространство наподобие некоторой "среды". Такая система тел вместе со связанными с каждым из них произвольным образом идущими часами и является системой отсчета в общей теории относительности.

Конкретный вид физических явлений, в том числе свойства движения тел, во всех системах отсчета становится различным, но в любой четырехмерной системе координат они записываются в ковариантной форме. При этом уравнения записываются в тензорном виде. Формулы имеют достаточно сложный вид, но это необходимая цена за ковариантную форму уравнений.

Приведем некоторые результаты.

Так как в общей теории относительности выбор системы отсчета ничем не ограничен, то возникает вопрос о том, каким образом по значениям величин x^0, x^1, x^2, x^3 можно определить истинные расстояния и промежутки времени. Можно показать, что промежуток истинного (собственного) времени

$$d\tau = \frac{1}{c} \sqrt{g_{00}} dx^0, \quad \tau = \frac{1}{c} \int \sqrt{g_{00}} dx^0, \quad (24)$$

а элемент пространственного расстояния

$$d\ell = \sum_{\alpha, \beta} \gamma_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta, \quad \alpha, \beta = 1, 2, 3, \quad (25)$$

где трехмерный метрический тензор

$$\gamma_{\alpha\beta} = -g_{\alpha\beta} + \frac{g_{0\alpha} g_{0\beta}}{g_{00}}. \quad (26)$$

Соотношение (26) устанавливает связь между метрикой реального пространства и метрикой четырехмерного пространства времени.

Необходимо помнить, что g_{ik} зависят вообще говоря от x^0 , так что и собственное время, и пространственная метрика изменятся со временем.

Формулы, конечно, упрощаются в случае постоянного гравитационного поля, когда все компоненты метрического тензора не зависят от временной координаты x^0 ; последнюю в этом случае называют мировым временем. Строго говоря, постоянным может быть поле, создаваемое только одним телом. В системе нескольких тел их взаимное гравитационное притяжение приводит к возникновению движения, в результате чего создаваемое ими поле не может быть постоянным.

Мировое время можно синхронизировать во всем пространстве, и тогда формулу (24) можно записать для конечных промежутков собственного времени

$$\tau = \frac{1}{c} \sqrt{g_{00}} x^0. \quad (27)$$

В слабом гравитационном поле

$$g_{00} = 1 + \frac{\varphi}{c^2}, \quad \varphi < 0 \quad (28)$$

где φ - гравитационный потенциал.

Таким образом, собственное время течет тем медленнее, чем меньше гравитационный потенциал в данной точке. Для частоты, измеренной в собственном времени, получим

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{\varphi}{c^2}\right). \quad (29)$$

где ω_0 - частота, измеренная в мировом времени.

Мы видим, что частота света возрастает с увеличением абсолютной величины гравитационного поля ($\varphi < 0$), т.е. при приближении к создающим поле телам; и наоборот, при удалении луча от этих тел частота света уменьшается. Линейчатый спектр, испускаемый какими-либо атомами, находящимися, например, на Солнце, выглядит точно также, как выглядит на Земле спектр, испускаемый находящимися на ней такими же атомами.

Если же на Земле наблюдается спектр, испускаемый атомами, находящимися на Солнце, то его линии окажутся смещенными по сравнению с линиями спектра, испускаемого на Земле, в красную сторону на величину

$$\Delta\omega = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2} \omega_0.$$

Поясним, как получаются уравнения гравитационного поля. Важным понятием в кривом пространстве является параллельный перенос вектора. В общем случае кривого пространства бесконечно малый параллельный перенос определяется как перенос, при котором компоненты вектора не меняются в системе координат, галилеевой в данном пространстве. При перемещении вдоль геодезической линии вектор касательной переносится параллельно самому себе, угол же между произвольным вектором и вектором касательной остается неизменным (рис. 5).

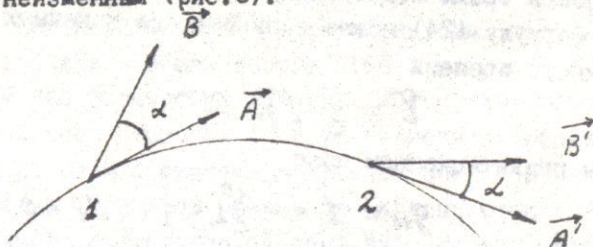


Рис. 5 Параллельный перенос векторов \vec{A} (вектор касательной) и \vec{B} вдоль геодезической линии,

Весьма существенно, что в кривом пространстве результат параллельного переноса зависит от пути. В частности, если переносить вектор параллельно самому себе по замкнутому контуру, то он не совпадет с самим собой.

Для того, чтобы уяснить это, рассмотрим двухмерное искривленное пространство. На рис. 6 изображен кусок такой поверхности, ограниченной тремя геодезическими линиями. Показан результат последовательного переноса вдоль контура ABC.

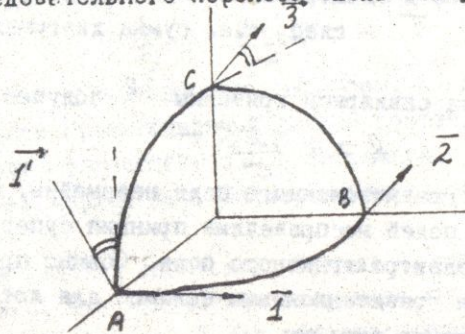


Рис. 6 При параллельном переносе вектор претерпевает последовательные изменения $\bar{I} \rightarrow \bar{I}' \rightarrow \bar{I}''$.

Изменение вектора при параллельном переносе по замкнутому контуру выражается через тензор кривизны 4-го ранга, который можно определить через метрический тензор и его производные.

Сама математика сложна, но вообще-то очевидно, что результат параллельного переноса зависит от метрики пространства.

Дальше используются стандартные представления тензорного анализа и основных принципов получения уравнений движения в механике (принцип наименьшего действия). При движении по истинной траектории должна иметь минимум определенным образом построенная функция, называемая действием \mathcal{S}' . (Так называемый метод Гамильтона - Якоби).

В нашем случае

$$\mathcal{S}' = \mathcal{S}_g + \mathcal{S}_m, \quad (30)$$

где \mathcal{S}_g - часть действия, обусловленная гравитационным полем, \mathcal{S}_m - часть действия, обусловленная материальными телами. \mathcal{S}_g зависит от тензора кривизны, \mathcal{S}_m - от тензора энергии-импульса, который вводится в специальной теории относительности.

В конечном счете уравнения поля можно записать в виде

$$R_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} T \right). \quad (31)$$

Здесь R_{ik} - тензор кривизны 2-го ранга, который выражается через метрический тензор и его производные, T_{ik} - тензор энергии импульса вещества и электромагнитного поля. G - гравитационная постоянная, T - след, т.е. сумма диагональных элементов тензора.

Из (31) для скалярной кривизны R получим

$$R = - \frac{8\pi G}{c^4} T. \quad (32)$$

Уравнения гравитационного поля нелинейны. Поэтому для гравитационных полей несправедлив принцип суперпозиции в отличие от случая электромагнитного поля. Обычно приходится иметь дело со слабыми гравитационными полями, для которых уравнения (31, 32) приближенно линейны.

В пустом пространстве $T_{ik} = 0$ и, следовательно, $R_{ik} = 0$. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля обладает тем свойством, что его след $T = 0$, отсюда следует, что при наличии одного только электромагнитного поля без каких-либо масс скалярная кривизна пространства-времени $R = 0$.

В заключение отметим, что уравнения гравитационного поля содержат как уравнения поля, так и уравнения для самой материи, которая создает это поле. Поэтому распределение и движение материи отнюдь не могут быть заданы произвольным образом. Напротив, они должны быть определены (посредством решения уравнений поля при заданных начальных условиях) одновременно с самим создаваемым этой материей полем.

5. ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

5.1. Нестационарная Вселенная

В общей теории относительности закон всемирного тяготения имеет вид:

$$F = \frac{G M m}{R^2 \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}} \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что при некотором радиусе

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}, \quad (2)$$

который называется гравитационным радиусом, сила тяготения $F \rightarrow \infty$. Для Земли гравитационный радиус составляет всего 0,9 см. Даже свет не может преодолеть этого тяготения. Такие объекты получили название черных дыр. Экспериментально пока не обнаружены.

В 1922 г. в работах советского физика А. Фридмана на основе ОТО было показано, что однородная Вселенная не может быть стационарной. Она расширяется. Вывод об однородности Вселенной является одним из достижений наблюдательной астрономии: на расстояниях порядка 10^{24} м Вселенная однородна.

В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл экспериментально обнаружил расширение Вселенной. Он установил, что все галактики разбегаются друг от друга со скоростями, которые пропорциональны расстоянию между ними. Закон Хаббла:

$$v = H \cdot R, \quad (3)$$

К сожалению, точность определения постоянной Хаббла H остается пока еще очень низкой. Мы при оценках будем пользоваться значением

$$H_0 = 75 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпс}} \approx 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}.$$

В 1934 г. английские астрофизики Э. Милн и В. Маккри показали, что современная космология с достаточной точностью может быть основана на теории тяготения Ньютона. Говоря о динамике Вселенной, мы используем именно этот путь, как наиболее доступный для читателя [8, 10].

Выделим в однородной Вселенной шар радиусом R . Радиус шара должен быть достаточно большим, чтобы его можно было тоже считать

однородным, т.е. $R \approx 10^{24}$ м. Материя, которая находится вне выбранного шара - Вселенной, не влияет на его гравитационные свойства. Запишем второй закон Ньютона - уравнение движения - для галактики массой m_i , расположенной на поверхности шара. Рис. 6.

$$m_i \alpha = -G \frac{M m_i}{R^2} \quad (4)$$

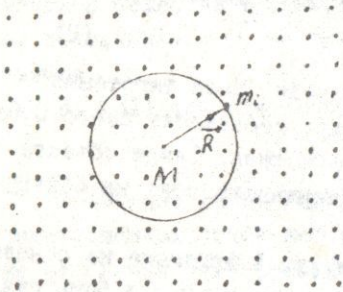


Рис. 6

где M - масса однородного шара - Вселенной, G - гравитационная постоянная. Знак "минус" указывает, что ускорение имеет знак, противоположный направлению отсчета расстояния R .

Модуль ускорения

$$\alpha = \frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dR}{dt} \quad (5)$$

Заменяем ускорение в формуле (4) его значением (5) и умножим обе части полученного равенства на dR/dt

$$\frac{d}{dt} \frac{dR}{dt} \cdot \frac{dR}{dt} = -G \frac{M}{R^2} \frac{dR}{dt}$$

Вспомним, что с дифференциалами можно обращаться, как с числами, и запишем

$$d \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = -GM \frac{dR}{R^2}$$

Проинтегрируем полученное выражение (все интегралы табличные)

$$\frac{1}{2} v^2 = GM + A'$$

Преобразуем:

$$v^2 = 2GM + A \quad (6)$$

где $A = 2A'$ - постоянная интегрирования.

Полученная формула (6) содержит очень важный вывод (Фридман): однородная Вселенная-шар не может быть стационарной. Она

расширяется в соответствии с данными астрономии. Если $A > 0$, то расширение будет происходить до бесконечности - открытая Вселенная; если $A < 0$, то расширение рано или поздно сменится сжатием.

Для нахождения постоянной интегрирования используем граничные условия. Вселенная однородна, следовательно, ее массу можно выразить через среднюю плотность ρ_0 и радиус шара-Вселенной R_0 в настоящий момент времени:

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_0 R_0^3. \quad (7)$$

Скорость пробной галактики найдем по закону Хаббла тоже для нашего времени

$$v = H_0 R_0.$$

В результате получим

$$A = H_0^2 R_0^2 - \frac{8}{3} \pi G R_0^2 \rho_0 = \frac{8}{3} \pi G R_0^2 \left(\frac{3}{8} \frac{H_0^2}{\pi G} - \rho_0 \right). \quad (8)$$

Полученное выражение позволяет ввести понятие критической плотности $\rho = \rho_{кр}$, при котором $A=0$, и выразить ее через мировые постоянные

$$\rho_{кр} = \frac{3}{8} \frac{H_0^2}{\pi G}. \quad (9)$$

Оценим значение критической плотности

$$\rho_{кр} = \frac{3 \cdot 5,86 \cdot 10^{-36} \frac{г^2}{см^2}}{8 \cdot 3,14 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{г^2}{кг \cdot см^3}} \approx 10^{-26} \frac{кг}{м^3} = 10^{-29} \frac{г}{см^3}.$$

Средняя плотность вещества излучающих областей Вселенной составляет

$$\rho_{ср} = 10^{-30} \frac{г}{см^3} = 10^{-27} \frac{кг}{м^3}.$$

Однако часть вещества находится в неизлучающем состоянии: нейтронные звезды, черные дыры, масса нейтрино и т.д. - проблема скрытой массы в астрономии. Наиболее вероятное значение плотности всех видов материи во Вселенной полагается

$$\rho_0 = (0,1 \div 1) \rho_{кр}. \quad (10)$$

По всей видимости наша Вселенная будет расширяться бесконечно!?

Предположение о равенстве нулю постоянной интегрирования A близко к реальному положению вещей и позволяет упростить

формулу (6)

$$v = \sqrt{2G \frac{M}{R}} \quad \text{или} \quad \frac{dR}{dt} = \sqrt{2G \frac{M}{R}} \quad (II)$$

Сейчас можно оценить максимальный радиус шара-Вселенной, который мы можем рассматривать без привлечения ОТО. Средняя плотность вещества во Вселенной близка к критической. Скорость "пробной галактики", находящейся на границе шара, не может быть больше скорости света. Тогда на основании (II) получаем:

$$c^2 > 2G \frac{M}{R} = \frac{8}{3} G \pi R^2 \rho_{кр} \quad \text{или}$$

$$R < c \sqrt{\frac{3}{8\pi \rho_{кр} G}}.$$

Оценим максимальный радиус

$$R < 3 \cdot 10^8 \frac{m}{c} \sqrt{\frac{3}{8 \cdot 3,14 \cdot 10^{-26} \frac{kg}{m^3} \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}}} \approx 10^{26} m.$$

Радиус шара может быть всего раз в десять меньше видимой Вселенной.

Разделим переменные в формуле (II) и найдем закон изменения радиуса Вселенной со временем:

$$\sqrt{R} \cdot dR = \sqrt{2GM} \cdot dt.$$

После интегрирования получим:

$$\frac{2}{3} R^{\frac{3}{2}} = \sqrt{2GM} \cdot t \quad \text{или} \quad R = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} GM} \cdot t^{\frac{2}{3}} \quad (I2)$$

Используя формулы (I2,5) и (7), получаем, что радиус Вселенной, ее средняя плотность и постоянная Хаббла меняются с течением времени:

$$R = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} GM} \cdot t^{\frac{2}{3}}, \quad \rho = \frac{1}{66\pi t^2}, \quad H = \frac{2}{3t} \quad (I3)$$

Формулы (I3) позволяют сделать ряд интересных выводов:

Радиус Вселенной в начальный момент времени $t=0$ был равен нулю, а ее плотность бесконечна. Проблема сингулярности, которая пока не имеет убедительного решения.

Можно оценить время, прошедшее от начала расширения Вселенной до наших дней. Сделаем это:

$$t_0 = \frac{2}{3H_0} ; t_0 = \frac{2}{3 \cdot 2,4 \cdot 10^{-18} \text{с}^{-1}} \approx 2,8 \cdot 10^{17} \text{с} \approx 8 \cdot 10^9 \text{лет.}$$

Возраст Вселенной и Земли по данным астрономии и геологии

$$t_0 = (10 \div 20) \cdot 10^9 \text{лет.}$$

Поразительная точность предсказания и эксперимента. Оценивая это Время, даже Фридман страховался от нападок: "Если подсчитать реди курьеза время, прошедшее от момента, когда Вселенная создавалась из точки, до теперешнего ее состояния, начать определять, следовательно, время, прошедшее от создания мира, то получается число в десятки миллиардов лет".

Более точные расчеты, выполненные на основе общей теории относительности, приводят примерно к тем же оценкам.

Таким образом, наблюдаемое разбегание галактик является отзвуком Большого Взрыва, в котором возникло наше пространство, наше Время и наша Вселенная.

5.2. Реликтовое излучение

На начальной стадии образования Вселенная была горячей. При расширении температура падала, и в настоящее время она должна соответствовать нескольким градусам Кельвина. Такое излучение было случайно открыто американскими учеными Пензиасом и Вильсоном и названо реликтовым.

Найдем связь между температурой реликтового (равновесного теплового) излучения и временем существования Вселенной.

Из термодинамики известно, что плотность энергии излучения определяется температурой

$$\epsilon_\nu = \alpha T^4, \quad (14)$$

где $\alpha = 7,6 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}}$.

Плотность реликтового излучения можно определить также из формулы Эйнштейна:

$$\varepsilon_{\nu} = \frac{m c^2}{V} = \rho_{\text{мат.}} \cdot c^2. \quad \text{Тогда } \rho_{\text{мат.}} = \frac{\varepsilon_{\nu}}{c^2} = \frac{\alpha T^4}{c^2} \quad (15)$$

Сейчас плотность вещества во Вселенной в 1000 раз больше, чем плотность излучения. Но плотность вещества меняется в процессе расширения

$$\rho_{\text{в}} \sim \frac{1}{R^3}. \quad (16)$$

Плотность же излучения

$$\rho_{\text{изл.}} \sim \frac{1}{R^4}. \quad (17)$$

Это обусловлено тем, что в расширяющейся Вселенной происходит увеличение длины волны фотона в результате эффекта Доплера.

Отношение плотности вещества к плотности излучения пропорционально радиусу Вселенной

$$\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{изл.}}} = R. \quad (18)$$

В прошлом, когда размеры Вселенной были в 1000 раз меньше, плотность вещества равнялась плотности излучения. На более ранних стадиях плотность излучения была немного больше плотности вещества. Поэтому в формулу (13) для плотности мы можем подставить плотность реликтового излучения (15)

$$\frac{\alpha T^4}{c^2} = \frac{1}{626 t^2}. \quad (19)$$

Подставив числовые значения постоянных, получим

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}. \quad (20)$$

В формуле (20) время измеряется в секундах, температура в Кельвинах.

Зная связь между температурой и временем существования Вселенной, оценим время возникновения реликтового излучения, т.е. время возникновения нейтральных атомов.

Согласно распределению Больцмана, число ионизированных атомов определяется их энергией ионизации ΔW и средней тепловой энергией излучения kT .

$$N_{\text{ион}} = N_0 e^{-\frac{\Delta W}{kT}} \quad (21)$$

При энергии $kT > \Delta W$ вещество представляет собой плазму, которая непрозрачна для излучения и находится с ним в термодинамическом равновесии.

Когда температура расширяющейся Вселенной уменьшается до 4000 К, протоны активно захватывают электроны, превращаясь в нейтральные атомы водорода. Вселенная становится прозрачной для излучения, т.е. излучение перестает активно взаимодействовать с веществом. Начинается новая эра - эра образования галактических туманностей, в которых формируются звезды первого поколения.

По формуле (20) оценим время, прошедшее от Большого Взрыва до возникновения реликтового излучения:

$$t = \frac{10^{20}}{1,6 \cdot 10^7} \text{ с} \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ с} \approx 10^6 \text{ лет.}$$

Примерно ^{через} миллион лет после Большого взрыва Вселенная стала прозрачной для излучения. Реликтовое излучение несет в себе информацию об этом событии так же, как и разбегание галактик.

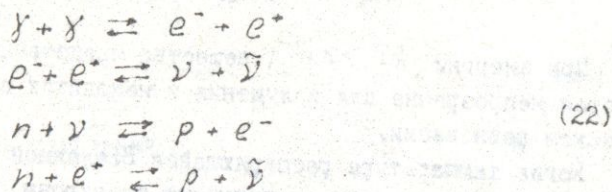
После возникновения нейтральных атомов началась эра образования галактик и звезд первого поколения - эра вещества. Поскольку физические процессы эры вещества только косвенно связаны с расширением Вселенной, мы вернемся к более ранней стадии расширения Вселенной - эре образования вещества - эре нуклеосинтеза, которая несет информацию о еще более ранних физических процессах во Вселенной.

5.3. Эра нуклеосинтеза

Эра образования ядер во Вселенной началась спустя сотые доли секунды после Большого Взрыва. К этому времени Вселенная

была заполнена фотонами γ , электронами и позитронами e^-, e^+ , нейтрино и антинейтрино $\nu, \bar{\nu}$, протонами и нейтронами p, n , которые находились в термодинамическом равновесии.

Свободно происходят реакции рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар, нейтрино и антинейтрино, превращения протонов в нейтроны и наоборот:



Разница в энергиях покоя нейтрона и протона составляет

$$\Delta m \cdot c^2 = 1,3 \text{ МэВ.}$$

Следовательно, различие между числом протонов и нейтронов при равновесном состоянии будет определяться температурой этого состояния

$$\frac{N_n}{N_p} \sim e^{-\frac{\Delta m c^2}{kT}} \quad (23)$$

Температура Вселенной в момент времени $t = 0,01$ с определяется формулой (20)

$$T = \sqrt{\frac{10^{20}}{0,01}} \text{ К} = 10^{11} \text{ К.}$$

Средняя тепловая энергия при этом равна

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 10^{11} \text{ К} = 1,38 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} \approx 9 \text{ МэВ.}$$

При этом число нейтронов легко оценить:

$$N_n = N_p e^{-\frac{1,3 \text{ МэВ}}{9 \text{ МэВ}}} = N_p e^{-0,16} \approx 0,86 N_p.$$

То есть число протонов и нейтронов почти одинаково. При дальнейшем охлаждении число протонов будет увеличиваться за счет уменьшения числа нейтронов.

Стабилизация относительного числа нейтронов $\frac{N_n}{N_p}$ произойдет, когда время расширения Вселенной t сравняется с характерным временем реакций. При этом нейтрино перестанут

взаимодействовать с нуклонами. Другими словами, происходит за-
калка нейтронов.

Характерное время реакций сравнительно точно определено
экспериментально из анализа ядерных реакций и выражается через
температуру

$$\tau = \frac{10^{51}}{T^5} \quad (24)$$

Оценим температуру закалки нейтронов, т.е. приравняем возраст
Вселенной к характерному времени закалки: $\tau = t$.

$$\frac{10^{20}}{T^2} = \frac{10^{51}}{T^5}. \text{ Тогда } T = \sqrt[3]{10^{31}} \approx 10^{10} \text{ К.}$$

При этом средняя энергия $kT \approx 0,9 \text{ МэВ}$.

Тогда на основании (23) получим

$$N_n = e^{-\frac{1,38 \text{ МэВ}}{0,9 \text{ МэВ}}}. N_p \approx e^{-1,5}. N_p \approx 0,2 N_p.$$

В момент отключения нейтрино ($t \approx 0,25 \text{ с}$) число нейтронов
в 5 раз меньше числа протонов, т.е. на каждые 10 протонов при-
ходится 2 нейтрона.

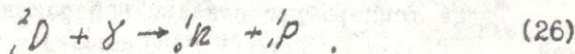
Начинается процесс синтеза ядер дейтерия



Энергия связи ядра дейтерия составляет

$$\Delta m_0 \cdot c^2 \approx 2,2 \text{ МэВ}.$$

Это больше, чем средняя тепловая энергия. Но в смеси еще
велико число фотонов, энергия которых больше, чем 2,2 МэВ. Эти
фотоны разбивают образующиеся ядра дейтерия:



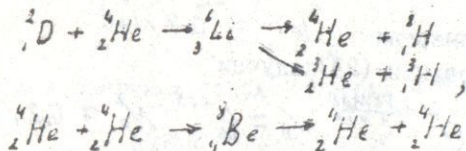
При дальнейшем охлаждении число фотонов с энергией
 $W \geq 2,2 \text{ МэВ}$ уменьшается. При $t = 100 \text{ с}$ ядра дейтерия живут
достаточно долго и становится возможным синтез ядер гелия:



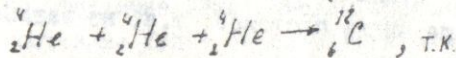
которые при данной температуре ($t \approx 100 \text{ с}$, $T = 10^9 \text{ К}$, $kT = 0,1 \text{ МэВ}$)
практически стабильны.

В результате к концу пятой минуты все нейтроны войдут в состав ядер гелия. Во Вселенной на каждые восемь протонов будет приходиться примерно одно ядро гелия, то есть в первоначальной Вселенной протоны - ядра водорода - составят по массе 70%, а ядра гелия - 30%. Полученные значения удовлетворительно совпадают с имеющимися экспериментальными результатами. Это большое достижение теории горячей расширяющейся Вселенной (Фридман).

Хочется подчеркнуть важную особенность: в первоначальной Вселенной практически нет ядер тяжелее гелия, так как нет устойчивых ядер с массовыми числами 5 и 8 (${}^5\text{X}$ и ${}^8\text{X}$). Например,



Реакции же тройного синтеза маловероятны -



требует слишком большого времени - миллиардов лет - и могут протекать только в звездах первого поколения.

Вывод: Все современные тяжелые элементы могли образоваться в результате сгорания звезд первого поколения.

Отметим, что все приведенные расчеты очень чувствительны к скорости расширения Вселенной.

Предположим, что расширение происходило в 100 раз медленнее, т.е.

$$t \approx \frac{10^{18}}{T^2}$$

Тогда температура заковки нейтронов $t = \bar{t}$ получится равной

$$\frac{10^{18}}{T^2} = \frac{10^{51}}{T^2}, \quad T = \sqrt[3]{10^{33}} \text{ К} \approx 10^{11} \text{ К}.$$

Средняя энергия $kT = 9 \text{ МэВ}$. Относительное число замороженных нейтронов

$$N_n = e^{-\frac{9.3}{kT}} N_p \approx e^{-0.215} N_p \approx N_p.$$

Число нейтронов примерно равно числу протонов. При дальнейшем охлаждении протоны и нейтроны объединяются в ядра

нейтрона, а затем в ядра гелия. Начальная Вселенная будет практически состоять из гелия, что резко противоречит экспериментальным данным.

Предположим теперь, что расширение происходило в сто раз быстрее, т.е.

$$\dot{t} = \frac{10^{22}}{T^2}$$

Это приводит к температуре закалики

$$\frac{10^{22}}{T^2} = \frac{10^{51}}{T^3}, \quad T = \sqrt[3]{10^{29}} \text{ К} = 4,6 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

Средняя энергия

$$kT = 0,4 \text{ МэВ.}$$

Относительное число закаленных нейтронов

$$N_n = e^{-\frac{0,4 \cdot 10^6}{kT}} N_p = e^{-2,5} N_p = 0,04 N_p.$$

В итоге первоначальная Вселенная в основном состояла бы из водорода, что явно противоречит эксперименту.

Таким образом, приходим к выводу, что фридмановская модель расширения горячей Вселенной, начиная с сотых долей секунды, наиболее точно соответствует данным о первоначальном составе Вселенной.

Это еще один достаточно убедительный ответ Большого Взрыва.

5.4. Барийная асимметрия Вселенной

Наблюдательные данные астрономии довольно убедительно свидетельствуют о том, что в нашей Вселенной нет антивещества.

Кроме того, отношение плотности реликтовых фотонов n_γ к плотности барионов n_p (в основном это протоны), представляющее собой удельную энтропию, очень велико:

$$\frac{n_\gamma}{n_p} \approx 10^9$$

и практически не меняется в процессе эволюции Вселенной.

Можно было бы предположить, что избыток вещества над антивеществом существовал изначально. Но для большинства физиков

такое допущение кажется противоестественным.

В настоящее время предпринимаются попытки объяснить барионную асимметрию и большую удельную энтропию как естественный результат объединения взаимодействий.

До возникновения теории великого объединения считалось, что барионное число точно сохраняется при любых физических процессах. Однако для того, чтобы могли объединиться электрослабое и сильное взаимодействия, должно существовать хотя бы одна сверхмассивная частица - хиггсовская частица, которая может превращать лептоны в кварки и кварки в лептоны - своеобразный лепто-кварк, который обычно называют X -бозоном. Энергия покоя $m_0 c^2$ X -бозона равна энергии великого объединения: 10^{12} ГэВ, что соответствует температуре великого объединения 10^{28} К и времени существования Вселенной $t \approx 10^{-36}$ с.

При температуре 10^{28} К и выше Вселенная представляла собой термодинамически равновесную смесь всех фундаментальных частиц. Никакого барионного числа не было. Барисоны и лептоны свободно превращались друг в друга. В физике элементарных частиц установлено, что темпы реакций с частицами и соответствующие реакции с античастицами несколько отличаются. При температурах ниже 10^{28} К X и \bar{X} -бозоны распадаются на барионы и антибарионы с различными вероятностями. В результате образуется небольшой избыток частиц над античастицами. Частицы и античастицы аннигилируют между собой, образуя фотоны реликтового излучения, а избыток барионов приводит к образованию вещества. Один барион вещества приходится на 10^9 проаннигилировавших барионов и антибарионов.

Таким образом, барионная асимметрия Вселенной позволяет заглянуть в ее первые мгновения. Доверительная точность результатов здесь значительно меньше, чем в рассмотренных ранее случаях, так как мы слишком мало знаем о свойствах частиц при энергиях великого объединения.

6. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

6.1. Основные характеристики элементарных частиц

Все характеристики элементарных частиц можно разбить на две группы: геометрические характеристики, определяющиеся свойствами симметрии пространстве-времени, и внутренние квантовые числа, отражающие симметрии фундаментальных взаимодействий. [7,9]. Рассмотрим основные из них.

1. Масса - релятивистски - инвариантная величина, характеризующая частицу или систему частиц. Масса m выражается через энергию W и импульс тела \vec{p} с помощью соотношения специальной теории относительности:

$$m^2 c^4 = W^2 - p^2 c^2,$$

где c - скорость света в вакууме.

В системе отсчета, в которой частица покоится,

$$m c^2 = W,$$

для частицы, движущейся со скоростью света (фотон)

$$m = 0.$$

От попытки классифицировать частицы по массе ведут происхождение такие термины, как лептоны (легкие), мезоны (средние) и адроны (тяжелые) частицы. Термины сохранились, стали привычными, но потеряли первоначальный смысл. Они просто характеризуют классы частиц.

Таон (тау-лептон τ) имеет массу большую, чем ряд мезонов, например, пионы (пи-мезоны $\tilde{\pi}$), и адронов, например, барионы (нуклоны p, n).

2. Спин - собственный момент импульса частицы - является неотъемлемым свойством квантовых объектов - элементарных частиц. Измеряется в единицах \hbar , $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Фермионы - элементарные или составные частицы, обладающие полуцелым спином ($-\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$). Они подчиняются статистике Ферми-Дирака. Согласно принципу Паули в данном квантовом состоянии может находиться только один фермион данного типа. Фермионами являются электрон и все остальные лептоны, кварки, барионы (протон и нейтрон).

Бозоны - элементарные или составные частицы, обладающие целым спином. Они подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Бозонами являются фотон, мезоны, ядра ${}^4_2\text{He}$ и т.д. К бозонам относятся фотон (спин 1), гравитон (спин 2), мезоны и бозонные резонансы, промежуточные векторные бозоны и глюоны.

3. Четность - квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции частицы или системы частиц относительно некоторых дискретных преобразований.

Пространственная четность (P -четность) - зеркальное отражение относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей, проходящих через начало координат.

В случае зарядной четности (C -четности) речь идет о зарядовом сопряжении - замене частиц соответствующими античастицами.

P - и C -четность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и нарушается в слабых.

Комбинированная четность (CP -четность) является произведением P - и C -четностей. Обнаружены слабые эффекты нарушения комбинированной четности.

У всех стабильных бозонов, кроме гравитона, пространственная четность отрицательна ($P = -1$), так же как и у соответствующих античастиц.

У барионов пространственная четность положительна ($P = +1$), а у антибарионов - отрицательна ($P = -1$).

4. Электрический заряд - источник электромагнитного поля - внутренняя характеристика элементарной частицы, определяющая ее роль в электромагнитном взаимодействии. Выражается через элементарный электрический заряд, равный по модулю заряду электрона e . Полный электрический заряд замкнутой системы сохраняется во всех взаимодействиях и превращениях частиц этой системы. У большинства частиц электрический заряд по модулю равен 0 или 1, хотя имеет большие значения для некоторых гиперонов и резонансов.

5. Лептонный заряд (L) - особое квантовое число, характеризующее лептоны. Опыт показывает, что при всех превращениях разность между числом лептонов и антилептонов остается постоянной: число лептонов сохраняется. Экспериментальные данные

свидетельствуют о существовании трех лептонных зарядов.

Обычно принимают $L_e = +1$ для электрона e и нейтрино электронного ν_e и $L_e = -1$ для соответствующих античастиц; $L_\mu = +1$ для мюона μ^- и мюонного нейтрино ν_μ и $L_\mu = -1$ для μ^+ и $\bar{\nu}_\mu$; $L_\tau = +1$ для таона τ^- и таонного нейтрино ν_τ и $L_\tau = -1$ для τ^+ и $\bar{\nu}_\tau$.

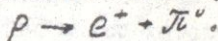
Существуют теоретические основания для гипотезы о приближенном характере закона сохранения лептонного заряда. Экспериментально отклонения от закона сохранения лептонного заряда пока не обнаружены.

Лептонный заряд для всех остальных частиц равен нулю $L_{ост} = 0$.

6. Барийонный заряд B - квантовое число, отличное от нуля для барионов и равное нулю для всех остальных частиц $B_{ост} = 0$.

$B = 1$ для барионов и $B = -1$ для антибарионов. Барийонный заряд системы частиц равен алгебраической разности между числом барионов и антибарионов. Для атомных ядер барийонный заряд равен массовому числу.

Существуют теоретические основания для гипотезы о приближенном характере закона сохранения барийонного заряда. Согласно теории великого объединения возможно превращение барионов в лептоны, например,



7. Изотопический спин (изоспин I) - внутренняя характеристика адронов, определяющая число зарядовых состояний или число частиц в изотопическом мультиплете.

Изотопический мультиплет - группа "похожих" адронов с примерно равными массами и одинаковыми внутренними характеристиками (спином, внутренней четностью, барийонным зарядом B , странностью S , очарованием C , красотой B') за исключением электрического заряда. Изотопическим мультиплетом является дуплет барионов ($N=2$, две частицы: протон и нейтрон), триплет пионов ($N=3$, три частицы: π^- , π^0 , π^+).

Изотопический спин вычисляется по формуле

$$2I = N - 1$$

Для нуклонов $I = \frac{1}{2}$; для пионов $I = 1$.

8. Проекция изоспина I_z , разделяет отдельные члены изомультиплета и пробегает значения от $-I$ до $+I$ в порядке

возрастания электрического заряда частиц.

Проекция изоспина I_3 , вычисляется по формуле

$$2Q = 2I_3 - B,$$

где Q - электрический заряд члена мультиплета, а B - барионный заряд.

Для протона $Q_p = 1$, $B_p = 1$, тогда $I_3 = \frac{3}{2}$; для нейтрона $Q_n = 0$, $B_n = 1$, $I_3 = \frac{1}{2}$. В абстрактном изотопическом пространстве протон и нейтрон отличаются только значением проекции изоспина.

Изотриплету пионов соответствует $I_3 = +1$ для π^+ , $I_3 = 0$ для π^0 и $I_3 = -1$ для π^- .

Частицы с изотопическим спином ($I=0$) не имеют изотопических партнеров и являются изотопическими синглетами (одиночными), например, лямбда-нуль-гиперон.

9. Странность S - аддитивное квантовое число, характеризующее адроны и кварки. Частицы с отличной от нуля странностью $S \neq 0$ называют странными частицами. Странность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и меняется на единицу за счет слабого взаимодействия. Исторически странность была введена для объяснения парного рождения странных частиц и их одиночного распада в слабых взаимодействиях, в которых странность не сохраняется.

Странность S вводится так, чтобы электрический заряд странных частиц удовлетворял соотношению Гелл-Манна-Нишиджимы:

$$Q = I_3 + \frac{1}{2} (B + S).$$

Странность равна нулю у "обычных" частиц: пионов, нуклонов и т.д., фотона и лептонов; $S = +1$ у каоне K ; $S = -1$ у гиперонов Λ , Σ ; $S = -2$ у каскадного ксигиперона, $S = -3$ у гиперона Ω .

10. Гиперзаряд Y - одна из характеристик адронов, который равен удвоенному среднему арифметическому электрического заряда данного изомупллета

$$Y = 2 \langle Q \rangle.$$

В такой формулировке понятие гиперзаряда применимо и для лептонов - "Слабый гиперзаряд".

Гиперзаряд вводится на основании формулы Гелл-Манна-Нишиджимы:

$$Q = I_3 + \frac{1}{2} Y.$$

Для обычных частиц гиперзаряд $Y = B$, для обычных и странных частиц $Y = B + S$. Для нуклонов $Y = 1$, для пионов $Y = 0$.

11. "Очарование" (чарм) C - аддитивное квантовое число, характеризующее адроны и кварки. Частицы с ненулевым значением очарования ($C \neq 0$) называются очарованными частицами. Очарование сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и меняется на единицу за счет слабого взаимодействия.

12. Красота, прелесть b - аддитивное квантовое число, характеризующее адроны, носителями которого являются b -кварки. Сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействии, но не сохраняется в слабом. Введено для объяснения распада ипсилон-частиц ψ . По современным представлениям ипсилон-мезоны состоят из очарованного кварка и его антикварка $b\bar{b}$ и имеют нулевую красоту ($b = 0$), скрытую красоту.

13. "Истина" t - аддитивное квантовое число для характеристики t -кварка. Экспериментально пока не обнаружено.

14. Цвет - квантовое число, характеризующее кварки и глюоны. Каждый тип кварка (d, u, s, c, b, t) может находиться в трех физически неразличимых цветовых состояниях, а каждый из глюонов в восьми двухцветных состояниях. В квантовой хромодинамике цветные частицы обладают цветовым зарядом, который определяет их взаимодействие. Обычно цветовые заряды обозначают буквами: R - красный, G - зеленый и B - синий. Квантовая хромодинамика строится по аналогии с электродинамикой.

15. Время жизни - средняя продолжительность жизни нестабильных (радиоактивных) атомных ядер и элементарных частиц - связана с их периодом полураспада соотношением:

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}.$$

Период полураспада ($T_{1/2}$) - время, за которое распадается половина всех частиц данного сорта.

Среднее время жизни элементарных частиц неразрывно связано с взаимодействием, в котором они участвуют. Время жизни частиц, распадающихся за счет слабого взаимодействия $\sim 10^{-12}$ с,

за счет электромагнитного $\sim 10^{-13}$ с, за счет сильного $\sim 10^{-23}$ с.

16. Аромат - характеристика типа кварка (u, d, s, c, b, t), включающая в себя всю совокупность квантовых чисел (за исключением цвета). Часто аромат рассматривается как квантовое число, определяющее тип кварка. Аромат сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и не сохраняется в слабых. Такие квантовые числа, как странность, очарование (чарм), красота (бьюти), истина, представляют собой различные ароматы. В этой трактовке говорят и об аромате лептонов, которых тоже шесть ($e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$).

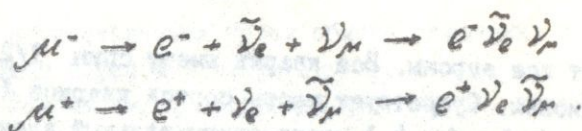
6.2. Классификация элементарных частиц

Классификацию элементарных частиц можно проводить по их различным характеристикам. От деления частиц по массам отказались уже давно, хотя от этого периода остались термины, в которые вкладывается смысл, отличный от первоначального: мезоны, адроны, гипероны. По типу статистики все элементарные частицы делятся на фермионы и бозоны. Время жизни частиц существенным образом зависит от типов взаимодействий, в которых они участвуют.

В последнее время все отчетливее проступает деление фундаментальных частиц на три класса: лептоны, кварки - частицы вещества и переносчики взаимодействия. В такой классификации адроны, составляющие основную часть элементарных частиц, имеют кварковую структуру, т.е. не являются истинно элементарными частицами.

I. Лептоны - класс элементарных частиц, не участвующих в сильных взаимодействиях. Все лептоны имеют спин: $\frac{1}{2}$ (в единицах \hbar) и относятся к группе фермионов. Известны три поколения лептонов: электрон e и электронное нейтрино ν_e ; мюон μ и мюонное нейтрино ν_μ , тауи τ и тауиное нейтрино ν_τ и их античастицы. Всего двенадцать лептонов. Все лептоны обладают лептонным зарядом L . Для каждого поколения лептонов характерно свое лептонное число: L_e, L_μ, L_τ .

Мюон и τ -лептон распадаются за счет слабого взаимодействия. Электрон стабилен. Реакции распада мюонов



Основные характеристики лептонов приведены в таблице № 6.1.

Таблица 6.1. Характеристика лептонов

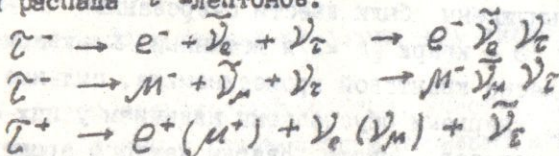
Частица	Масса, МэВ	Спин	Электр. заряд	Лепт. заряд			Время жизни	Участие во взаимодей.			
				L_e	L_μ	L_τ		Сильное	Эл. магн.	Слабое	Гравит.
e^-	0,511	$\frac{1}{2}$	-1	1	0	0	стаб. 10^{21} лет	-	+	+	+
ν_e	0?	$\frac{1}{2}$	0	1	0	0	стаб.	-	-	+	+
μ^-	105,7	$\frac{1}{2}$	-1	0	1	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$ с	-	+	+	+
ν_μ	0?	$\frac{1}{2}$	0	0	1	0	стаб.	-	-	+	+
τ^-	1784	$\frac{1}{2}$	-1	0	0	1	$3,4 \cdot 10^{-13}$ с	+	+	+	+
ν_τ	0?	$\frac{1}{2}$	0	0	0	1	9	-	-	+	+

Четность лептонов не рассмотрена.

Электрон открыт Дж. Дж. Томсоном в 1897 году. Античастица электрона (позитрон) теоретически была предсказана П. Дираком в 1928 году и открыта К. Андерсоном и С. Нидермейером в 1936-37 гг.

Таон, τ -лептон открыт в 1975 году в опытах на встречных электронно-позитронных пучках в Станфорде (США) группой экспериментаторов во главе с М. Перлом.

Реакция распада τ -лептонов:



2. Кварки - класс элементарных частиц с дробным электрическим зарядом, из которых, по современным представлениям,

состоят все адроны. Все кварки имеют спин $1/2$ и относятся к фермионам. Существует шесть сортов кварков (ароматов), из них три (d, s, b) имеют отрицательный электрический заряд, равный $-1/3$, а три (u, c, t) - положительный: $+2/3$.

Гипотеза о кварках была высказана в 1964г. М.Гелл-Маном и Г.Цвейгом для объяснения свойств адронов. Согласно кварковой теории, все барионы состоят из трех кварков (антибарионы из трех антикварков), мезоны - из кварка и антикварка. Кварки обладают не только дробным электрическим зарядом, но и дробным барионным зарядом $B = 1/3$.

Существование кварков в адронах можно считать экспериментально доказанным. Косвенным доказательством является успешная классификация адронов на базе кварковой модели. В экспериментах по глубоко-неупругому взаимодействию лептонов с адронами были зарегистрированы простые столкновения лептонов с отдельными кварками. Эти столкновения длятся столь короткое время, что кварк не успевает обменяться глюоном с другими кварками и взаимодействует почти как свободная частица. Чем меньше расстояние, на котором происходит взаимодействие лептона с кварком, тем свободней выглядит кварк. Это свойство получило название асимптотической свободы. Возможная неэлементарность кварков, как и лептонов, может быть обнаружена лишь при еще более глубоком проникновении внутрь этих частиц, т.е. при еще больших переданных импульсах. Обозначения u, d, s, c, b, t соответствуют английским словам: *up* - верхний, *down* - нижний, *strange* - странный, *charm* - очарование, *bottom* - дно (*beauty* - красота), *top* - верх (*truth* - истина).

Открытие странных частиц привело к введению s -кварка, которому приписали странность, равную единице $S = 1$. В дальнейшем вынуждены были ввести очарованный c -кварк ($C = 1$), красивый b -кварк ($b = 1$) и истинный t -кварк ($t = 1$).

Согласно квантовой хромодинамике, сильные взаимодействия между кварками обусловлены наличием у них специфических цветовых зарядов - цвета. Кварки каждого аромата (сорта) существуют в виде трех цветовых разновидностей: красного, желтого, синего (красного, зеленого, синего). Взаимодействие

между кварками осуществляется путем обмена глюонами: кварк одного цвета может перейти в кварк другого цвета, испустив цветной глюон. Все частицы, состоящие из кварков, должны быть в целом бесцветными, т.е. "белыми".

В рамках квантовой хромодинамики существует гипотеза о конфайнменте (справедливость ее пока не доказана), согласно которой цветные частицы (кварки и глюоны) и их цветные комбинации в принципе не могут существовать в свободном состоянии. Характеристика кварков приведена в таблице №6.2.

Таблица 6.2. Характеристика кварков

Кварк	Масса МэВ	Заряды			Изо- спин I_3	Про- ек. изо- спина I_2	Стрен- ность S	Оча- рова- ние c	Кра- сота b	Ис- ти- на t	Гипер- заряд Y
		лепт.	элек.	бар.							
u_i	4	0	+2/3	1/3	1/2	1/2	0	0	0	0	1/3
d_i	8	0	-1/3	1/3	1/2	-1/2	0	0	0	0	1/3
s_i	1350	0	-1/3	1/3	0	0	-1	0	0	0	-2/3
c_i	1500	0	+2/3	1/3	0	0	0	1	0	0	-2/3
b_i	2200	0	-1/3	1/3	0	0	0	0	-1	0	-2/3
t_i	4700	0	+2/3	1/3	0	0	0	0	0	1	-2/3

Примечание: $i = 1, 2, 3$ - цветовой заряд (красный $i = 1$, синий $i = 2$, зеленый $i = 3$).

Участвуют во всех взаимодействиях.

Четность опущена.

Применим кварковую теорию к обоснованию систематики адронов.

Адроны - класс элементарных частиц, участвующих в сильных взаимодействиях. Адроны с целым спином называют мезонами, с полуцелым - барионами.

Самые легкие барионы (протон и нейтрон) называют нуклонами, а более тяжелые барионы называют гиперонами.

Мезоны с точки зрения кварковой модели строятся из кварка и антикварка. Поскольку спин кварка $1/2$, то спин мезонов целый: 0 или 1 в полном соответствии с экспериментом, который подтверждает существование мезонов со спином 0 (псевдоскалярные мезоны) и со спином 1 (векторные мезоны). Меняя аромат кварка и антикварка, можно получить возможные мезоны. В таблице №6.3 приведены все возможные комбинации псевдоскалярных мезонов. В скобках указаны примерные массы мезонов в МэВ. Спины кварка и антикварка противоположны, и результирующий спин мезонов равен нулю. π^0 -мезон входит в две клетки, так как является суперпозицией состояний $\frac{1}{2}(u\bar{u} + d\bar{d})$. Вопрос о смешанных состояниях требует более глубокого знакомства с квантовой механикой, поэтому в дальнейшем не обсуждается. π^- -мезон состоит из d -кварка и \bar{u} -антикварка; $K^- \rightarrow s\bar{u}$, $D^0 \rightarrow u\bar{c}$ и т.д.

Аналогично строится семейство векторных бозонов, у которых спин равен единице.

Таблица 6.3. Псевдоскалярные мезоны ($0^+ \bar{q} q$), спин: 0

Анти-кварк	к в а р к					
	$u (\frac{2}{3})$	$d (-\frac{1}{3})$	$s (-\frac{1}{3})$	$c (\frac{2}{3})$	$b (-\frac{1}{3})$	$t (\frac{2}{3})$
$\bar{u} (-\frac{2}{3})$	π^0 (135) η (549)	π^- (140)	K^- (494)	D_s^- (1863)	B^- (5255)	?
$\bar{d} (-\frac{1}{3})$	π^+ (140)	π^0 (135) η (549)	K^0 (498)	D^+ (1868)	B_0 (5255)	?
$\bar{s} (-\frac{1}{3})$	K^+ (494)	K^0 (498)	?	F^+ (2020)	?	?
$\bar{c} (-\frac{2}{3})$	D^0 (1863)	D^- (1868)	F^- (2020)	\tilde{D}_c (2930)	?	?
$\bar{b} (-\frac{1}{3})$	B^+ (5255)	B_0 (5255)	?	?	?	?
$\bar{t} (-\frac{2}{3})$?	?	?	?	?	?

? - еще не обнаружены экспериментально.

Среди векторных мезонов (спин 1) можно отметить ρ (3097) - ризи-мезон и γ^* (9430) - ипсилон-мезон, которые являются одними из самых тяжелых мезонов, свойства которых

исследуются. Отметим их кварковый состав: $\rho \rightarrow c\bar{c}$, $\rho \rightarrow b\bar{b}$, т.е. это мезоны со скрытым очарованием и скрытой красотой. Экзотические мезоны - мезоны, содержащие два разных кварка и два антикварка. Теория предсказывает возможность их существования.

Барions - адроны, обладающие полуцелым спином. Согласно кварковой модели, каждый барион состоит из трех кварков с различным цветом.

Барions, у которых все три кварка принадлежат первому поколению (u, d), обозначают буквой N , если их изотопический спин равен $1/2$ и буквой Δ (дельта), если их изотопический спин равен $3/2$.

Барions, в которых два кварка принадлежат первому поколению, а третий более тяжелый, обозначаются Λ (лямбда), если их изоспин равен нулю и Σ (сигма), если он равен единице.

Если третий кварк странный ($s \neq 0$), то Λ и Σ не имеют индексов Λ (2585). Если третий кварк c, b или t , то его символ указывается в виде нижнего индекса, например, Λ_c^+ (2282). Верхний индекс возле указывает электрический заряд.

Барions, в которых только один кварк принадлежит первому поколению, а два других более тяжелые, обозначаются Ξ - (кси), их изотопический спин $1/2$. При этом присутствии s -кварков не отмечается индексами. Наличие более тяжелых кварков отмечается нижними индексами.

Барions, не содержащие кварков первого поколения, называются Ω (омега)-барionsами. Самый легкий из омега-барionsов - Ω (1672) - состоит из трех s -кварков.

Барions, в состав которых входит s' -кварк, называют гиперонами. Для иллюстрации в таблице №6.4 приведен кварковый состав барionsов ($s' = \frac{1}{2}^+$).

Таблица 6.4. Кварковый состав барионов

Частица	Кварковый состав	Масса, МэВ	! Время жизни, с	Название
p	uud	938,28	стабил. 10^{32} лет	протон, p -барион
n	udd	939,57	920с	нейтрон, n -барион
Λ^0	uds	1115,6	$2,6 \cdot 10^{-10}$	лямбда-нуль-гиперон
Σ^0	uds	1192,5	$5 \cdot 10^{-20}$	сигма-нуль-гиперон
Σ^+	uus	1189,4	$0,8 \cdot 10^{-10}$	сигма-плюс-гиперон
Σ^-	dds	1197,3	$1,48 \cdot 10^{-10}$	сигма-минус-гиперон
Ξ^0	uss	1315	$2,9 \cdot 10^{-10}$	кси-нуль-гиперон
Ξ^-	dss	1321,5	$1,64 \cdot 10^{-10}$	кси-минус-гиперон
Ω^-	sss	1672,5	$0,8 \cdot 10^{-10}$	омега-минус-барион
Λ_c^+	uac	2282	$1-2 \cdot 10^{-13}$	лямбда-минус-барион
Σ_c^+	ddc	2450	?	сигма-нуль-барион

Последние два бариона относятся к очарованным барионам, т.е. содержащим c -кварк.

Экзотические барионы - барионы, содержащие кроме трех кварков, еще кварк-антикварковую пару. Предсказываются теорией. Должны иметь огромную массу.

3. Переносчики взаимодействий - элементарные частицы, являющиеся квантами соответствующих полей.

В современных теориях предполагается существование четырех типов переносчиков взаимодействий, соответствующих известным полям: сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному.

Все переносчики взаимодействий (глюоны, фотон, промежуточные векторные бозоны, гравитон) являются бозонами и имеют спин, равный единице, кроме гравитона со спином 2.

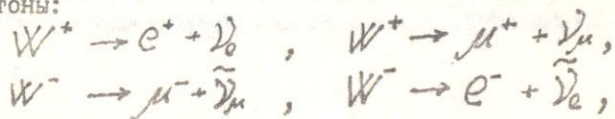
Характерным для них является равенство нулю специфических квантовых чисел (L, B, S, C, b, t, I, I_3). Электрический заряд отличен от нуля только для промежуточных векторных бозонов W^+ и W^- . Отличной от нуля массой обладает только переносчики слабого взаимодействия: W^\pm, Z^0 и предполагаемый бозон Хиггса H^0 . Дадим краткую характеристику переносчикам взаимодействий.

Глюоны (g) - восемь элементарных безмассовых частиц со спином, равным единице, несущих цветовой заряд. Обмен глюонами между кварками меняет цвет кварка, но оставляет неизменными все остальные квантовые числа. Обладая цветовым зарядом, глюон может испустить и поглотить другой глюон и при этом изменить свой цвет. Это свойство глюонов приводит к тому, что с уменьшением расстояний (увеличением передаваемого импульса) эффективные цветовые заряды глюонов и кварков уменьшаются и сильное взаимодействие ослабевает (асимптотическая свобода).

Каждый глюон характеризуется цветом $i = 1, 2, 3$ (красный, зеленый, синий) и антицветом $\bar{j} = \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}$ (антикрасный, антизеленый, антисиний). Из трех цветов и трех антицветов можно образовать девять двухцветных комбинаций $g_{i\bar{j}}$. Однако одна из них, полностью симметричная по цвету и антицвету, не будет иметь цветового заряда и не сможет быть переносчиком сильного взаимодействия. Теория допускает существование связанных глюонов-глюоболов. Экспериментально глюболы пока не обнаружены.

Фотон (γ) - квант электромагнитного поля, переносчик электромагнитного взаимодействия, безмассовая частица со спином, равным единице. Фотон является истинно нейтральной частицей, так как все его заряды равны нулю, и совпадает со своей античастицей: и в антимире фотон останется фотоном. Появился фотон благодаря работам М.Планка по тепловому излучению в 1900г., утвердился в результате теории А.Эйнштейна о фотоэффекте в 1905г., перешел в разряд элементарных частиц после опытов А.Комптона по рассеянию рентгеновских лучей. Является одной из наиболее хорошо изученных частиц и таит в себе массу загадок.

Промежуточные векторные бозоны (W^+, Z^0, W^-) - три элементарные частицы со спином, равным единице, являются переносчиками слабого взаимодействия. Бозоны W^+ и W^- являются частицей и античастицей. Радиус слабого взаимодействия оценивается очень грубо: $r > 10^{-18}$ м. Каналы распада W^+ -бозонов и Z^0 -бозона на лептоны:



$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^- , \quad Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+$$

В теории необходим как минимум один хиггсовский бозон для спонтанного нарушения симметрии. Он включен в таблицу № 6.5 с обозначением H^0 .

Таблица 6.5. Переносчики взаимодействий

Частица	Масса, МэВ	Четность J^P	Электр. заряд Q	$L, B, S, C, b, t, \bar{L}, \bar{S}$	Участие во взаимодействиях			
					сильное	эл. - магн.	слабое	гравит.
g_{ij}	0	1^-	0	0	+	-	-	+
γ	0	1^-	0	0	-	+	-	+
W^+	8×10^4	1	+1	0	-	+	+	+
W^-	8×10^4	1	-1	0	-	+	+	+
Z^0	9×10^4	1	0	0	-	-	+	+
$H_0?$?	0^+	0	0	-	-	+	+
G	0	2^+	0	0	-	-	-	+
$\nu_6?$	0	$3/2$	0	0	-	-	-	+

Гравитон (G) - квант гравитационного поля, безмассовая нейтральная частица со спином 2. Является аналогом фотона для гравитационных полей. Стабилен. Экспериментальное обнаружение выходит далеко за пределы современной лабораторной техники. Данные о переносчиках взаимодействий приведены в таблице № 6.5.

7. НЕКОТОРЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

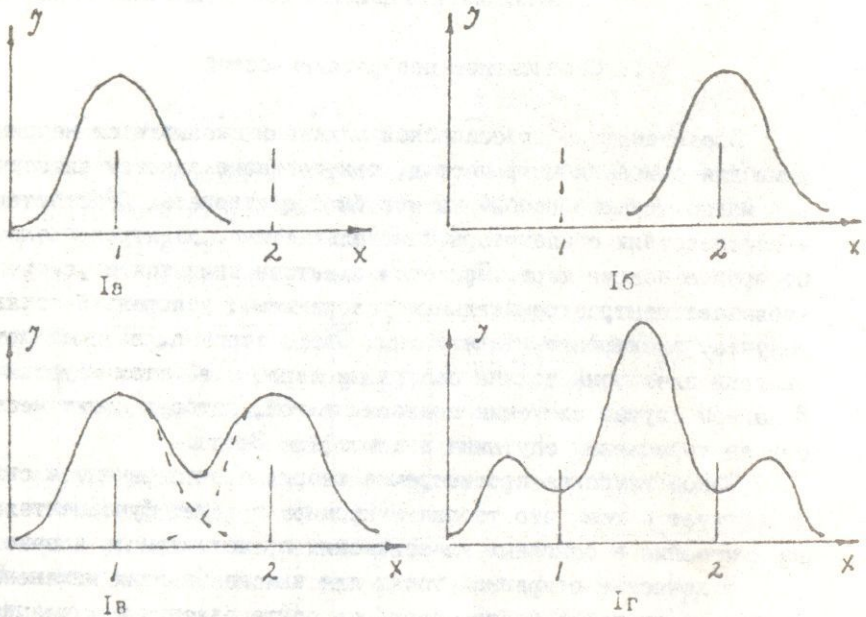
7.1. Соотношение неопределенностей

Представления классической механики оказываются неприменимыми для описания микрочастиц, так, согласно законам классической механики, атом вообще не мог бы существовать. Действительно, в соответствии с планетарной моделью атома, электрон вращается по орбите вокруг ядра. При этом электрон движется с ускорением (обладает центростремительным ускорением); ускоренный заряд излучает электромагнитные волны. Следовательно, за счет потери энергии электроны должны падать на ядра, т.е. атом неустойчив. В данном случае ситуация аналогична той, которая имеет место в случае торможения спутника в атмосфере Земли.

Такое глубокое противоречие теории с экспериментом свидетельствует о том, что теория микромира требует фундаментального изменения в основных классических представлениях и законах.

В качестве отправной точки для выяснения этих изменений удобно исходить из наблюдаемого на опыте явления так называемой дифракции электронов. При пропускании пучка электронов через кристалл в прошедшем пучке обнаруживается картина чередующихся максимумов и минимумов интенсивности (это явление используется в электронных микроскопах), аналогичная дифракции электромагнитных волн. Таким образом, при некоторых условиях в поведении частиц обнаруживаются черты, свойственные волновым процессам.

Насколько глубоко это противоречит обычным представлениям, легко понять из следующего мысленного эксперимента. Представим себе непроницаемый для электронов экран, в котором прорезаны две щели. Закроем поочередно одну из щелей, тогда мы будем наблюдать некоторое распределение интенсивности на поставленном за щелями экране (рис. Iа, Б). Естественно ожидать, что если открыты обе щели, то мы получим картину, являющуюся простым наложением обеих предыдущих (рис. Iв). Аналогом является стрельба по мишени из двух винтовок. На самом же деле мы получим дифракционную картину (рис. I.2), которая отнюдь не сводится к сумме картин, даваемых каждой из щелей.



Фиг. I. Распределение интенсивностей при прохождении электронов через две щели: Ia - закрыта щель 2, Ib - закрыта щель 1; если открыты обе щели: Ia - предполагаемая картина, Ia - реальная картина.

Следовательно, так называемая квантовая или волновая механика, которая описывает атомные явления, должна исходить из представлений, принципиально отличных от представлений классической механики. Это обстоятельство составляет содержание так называемого принципа неопределенности - одного из основных принципов квантовой механики, открытого В. Гейзенбергом в 1927 г. Математическую запись этого принципа обычно называют соотношением неопределенности. Соотношение неопределенности можно записать в виде:

$$\Delta X \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (I)$$

где ΔX - неопределенность в определении координаты,

Δp - неопределенность в определении импульса,

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ - приведенная постоянная Планка.

Подчеркнем, что ΔX и Δp не связаны с техническими

возможностями приборов, а обусловлены природой микромира.

В соответствии с соотношением неопределенности в квантовой механике теряет смысл понятие траектории частицы. Чтобы определить траекторию движения, необходимо точно определить координату и импульс (скорость) частицы в любой момент времени. Но, если мы точно измерим координату ($\Delta X = 0$), то ничего не сможем узнать о направлении движения электрона ($\Delta p \rightarrow \infty$); аналогично, если точно измерить импульс частицы ($\Delta p = 0$), то положение электрона будет неизвестным ($\Delta X \rightarrow \infty$). Для краткости ниже микрочастицы мы будем называть электронами.

Отвергая обычные представления классической механики, принцип неопределенности обладает, можно сказать, отрицательным содержанием, что недостаточно для построения квантовой теории.

Выход из затруднительного положения был найден Н. Бором, который ввел принцип дополнительности. Содержание принципа дополнительности, если опустить формальную сторону вопроса, можно свести к признанию корпускулярно-волнового дуализма материи. Нет противоречия между корпускулярными и волновыми свойствами материи, потому что установки, предназначенные для определения волновых свойств, только их и обнаруживают, тогда как другие установки обнаруживают только корпускулярные свойства. Другими словами, в одних явлениях проявляются волновые свойства материи (таких, как интерференция и дифракция света и электронов), в других – корпускулярные (таких, как фотоэффект, рассеяние света на электроны и т.д.).

Переход от корпускулярных характеристик к волновым и обратно дается соотношениями

$$W = h\nu \quad , \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

где W, p – энергия и импульс частицы, ν и λ – частота и длина волны.

Отметим, что волновая функция, приписываемая электрону (о волнах де Бройля будет сказано ниже) – это волна вероятности, а не обычная механическая или электромагнитная волна. Поведение электрона принципиально носит вероятностный характер, описание же поведения электрона с помощью волновой функции – это прием, удобный с математической точки зрения.

Соотношение неопределенности можно представить в другом виде

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

где ΔW - неопределенность в определении энергии,
 Δt - неопределенность в определении времени взаимодействия.

Из соотношения (3) видно, что мы не можем полностью устранить влияние микрообъектов (среды) на поведение микрочастиц. Чтобы $\Delta W = 0$, нужно, чтобы время взаимодействия $\Delta t \rightarrow \infty$.

В такой форме отличие квантовых объектов от классических, на наш взгляд, легче понять.

Обычно при описании какого-либо явления необходимо отвлекаться от несущественных деталей, выделить часть из общей взаимосвязи в природе. В классической механике это можно сделать.

В микромире принципиально невозможно полностью изолировать электрон от неконтролируемого воздействия. Что воздействует в указанном смысле на электрон - классические объекты или вакуум - для основ теории несущественно. Следует сказать об особом характере взаимоотношения между квантовой и классической теориями. Обычно более общая теория может быть сформулирована логически замкнутым образом независимо от менее общей теории, являющейся ее предельным случаем. Так релятивистская механика может быть построена из основных принципов без всяких ссылок на ньютоновскую механику. Формулировка же основных принципов квантовой механики принципиально невозможна без привлечения классической.

Возможность количественного описания движения электрона требует наличия физических объектов, которые с достаточной точностью подчиняются классической механике. О состоянии электрона мы можем судить только по его действию на классический объект. О состоянии атома мы судим по спектрам его излучения, которое воздействует на приборы.

Таким образом, с одной стороны, понятия классической механики необходимы для построения квантовой теории, с другой - классическая механика является предельным случаем последней: из формул квантовой механики должны получаться соответствующие формулы классической механики, если $\hbar \rightarrow 0$.

Соотношение неопределенностей можно применять непосредственно для того, чтобы наиболее просто получить оценочные формулы. Рассмотрим несколько примеров.

I. С соотношением неопределенности связано понятие о виртуальных частицах. Виртуальные (как бы существующие) частицы — это частицы, для которых нарушается соотношение неопределенностей (3).

Очевидно, что виртуальные частицы становятся реальными, как только соотношение неопределенности выполняется. Следовательно, граница между виртуальными и реальными частицами определяется условием

$$\Delta W \cdot \Delta t = \frac{\hbar}{2} \quad (4)$$

Обменное взаимодействие осуществляется виртуальными частицами в соответствии с общепринятой теорией. Из граничного условия можно определить энергию и массу покоя виртуальных частиц ($W = mc^2$).

Время взаимодействия связано с радиусом действия рассматриваемых сил. Максимальная скорость взаимодействия равна c . Так электромагнитное и гравитационное взаимодействия имеют бесконечный радиус действия, следовательно, для них

$$\Delta t = \frac{R}{c} \rightarrow \infty, \quad \Delta W = W \rightarrow 0,$$

масса покоя

$$m = \frac{W}{c^2} \rightarrow 0.$$

В соответствии с этим фотоны и гравитоны имеют массу покоя, равную нулю и движутся со скоростью, равной скорости света. Последнее обстоятельство связано с формулой Эйнштейна для энергии

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Это выражение имеет смысл при $m = 0$ только при $v = c$.

Для сильного взаимодействия радиус действия $R \approx 10^{-15}$ м, т.е. порядок размера нуклонов. Следовательно, энергия носителей сильного взаимодействия

$$\Delta W = \frac{\hbar}{2\Delta t} = \frac{\hbar c}{2R}, \quad \Delta W = \frac{10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-15}} \approx 10^{11} \text{ (эВ)}$$

Частицы с такой энергией должны иметь массу покоя примерно в 200 раз большую, чем электрон. Якава, который предложил обменную модель взаимодействия между нуклонами в ядре, назвал эти частицы мезонами (от греческого слова "средний"). Позднее такие частицы были открыты в космических лучах; по современной классификации они являются пионами.

2. Рассмотрим некоторые различия между классическими и квантовыми объектами на примере гармонического осциллятора (материальная точка, совершающая гармонические колебания).

Энергия гармонического осциллятора

$$W = W_k + W_p = \frac{p^2}{2m} + \frac{kx^2}{2} \quad (5)$$

где m - масса частицы, k - коэффициент жесткости.

В классической механике значения энергии непрерывны, ее минимальное значение равно нулю при $x = 0$ и $p = 0$ (материальная точка покоится).

В квантовой механике из соотношения (2) следует, что электрон не может находиться в состоянии покоя. Наименьшие значения координаты и импульса $x \approx \Delta x$, $p \approx \Delta p$ удовлетворяют соотношению неопределенности

$$x \cdot p = \frac{\hbar}{2} \quad (6)$$

Выразим из (6) p и подставим в (5), получим

$$W = \frac{\hbar^2}{8mx^2} + \frac{kx^2}{2} \quad (7)$$

Функция $W(x^2)$ имеет минимум, если ее производная по x^2 равна нулю.

Тогда из (7) находим значение x_0 , при котором энергия минимальна:

$$\frac{dW}{d(x^2)} = -\frac{\hbar^2}{8mx^3} + \frac{k}{2} = 0,$$

$$x_0^2 = \frac{\hbar}{2\sqrt{mk}}, \quad p_0^2 = \frac{\hbar}{2}\sqrt{mk}, \quad W = \frac{\hbar\omega}{2} \quad (8)$$

Здесь мы учли, что циклическая частота колебаний $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Точное решение задачи для квантового гармонического осциллятора дает минимальное значение энергии, совпадающее с выражением (8).

Кроме того, уровни энергии квантовой частицы, движущейся в ограниченном пространстве, как следует из теории, должны быть дискретны. Дискретность не является неизбежной в квантовой механике. Если движение не ограничено в пространстве, то энергия электрона непрерывна. Для гармонического осциллятора

$$W = \hbar \omega \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

где n - квантовое число. При $n = 0$ получим $W_0 = \frac{\hbar \omega}{2}$. Эта величина называется энергией нулевых колебаний. В частности, можно сделать вывод, что абсолютный нуль температуры недостижим из-за энергии нулевых колебаний.

3. Рассмотрим частицу, находящуюся в одномерной потенциальной яме (рис. 2). U_0 - глубина потенциальной ямы, a - ее линейный размер, W - энергия частицы.

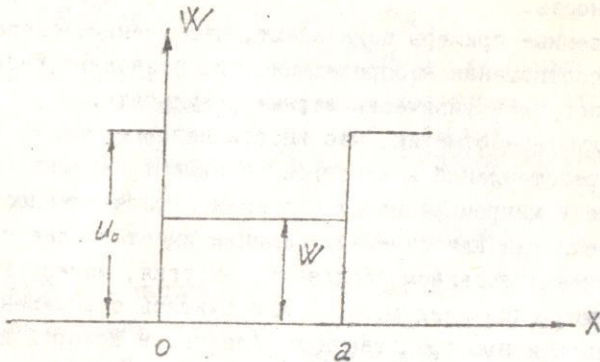


Рис. 2

Если $W < U_0$, то в классической механике частица не может покинуть яму, так как кинетическая энергия в этом случае

$$W_k = \frac{p^2}{2m} = W - U_0$$

была бы отрицательной. В квантовой механике вероятность того,

что частица покинет яму, не равна нулю. Положим в соотношении неопределенности (3) время взаимодействия частицы с барьером:

$$\Delta t = \frac{a}{v} = \frac{a m}{p}, \quad (10)$$

но внутри ямы:

$$W = \frac{p^2}{2m}, \quad p = \sqrt{2mW}. \quad (11)$$

Тогда с учетом (10) и (11) получим, что неопределенность в энергии

$$\Delta W \geq \frac{\hbar}{2\Delta t} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{W}{2m}} \quad (12)$$

Очевидно, что частица выйдет из ямы, если

$$W + \Delta W \geq 0. \quad (13)$$

Выражение в правой части формулы (12) определяет лишь минимальную неопределенность в энергии. Можно утверждать, что всегда есть отличная от нуля вероятность того, что частица покинет яму. Причем, чем уже потенциальная яма, тем больше эта вероятность.

Приведенные примеры показывают, что оценки, сделанные с помощью соотношения неопределенности, позволяют весьма простым путем получать физически верные результаты.

В заключение отметим, что иногда неприменимость классических представлений к электрону понимают неверно, в том смысле, что в микромире царит сплошная неопределенность. Но в то же время ряд классических величин имеет вполне определенные значения в данном состоянии: энергия, момент количества движения, спин электрона. Можно считать определенным модуль импульса и пространственную область, в которой движется электрон.

Таким образом, принципиальное отличие состоит не в том, что в квантовой механике нельзя использовать классические определения физических величин — другие мы не можем ввести (если, конечно, не говорить о внутренней структуре частиц), а в том, что поведение электрона (квантовой частицы) принципиально имеет вероятностный характер.

7.2. Волновая функция

Квантовую теорию справедливо называют волновой механикой. Волновая функция электрона с математической точки зрения хорошо описывает вероятностный характер поведения электрона (возможны и другие способы описания, например, с помощью матрицы плотности вероятности). Впервые волновая функция электрона была введена де Бройлем в 1925 году, прижилось и его обозначение волновой функции Ψ (пси).

Де Бройль исходил из необходимости объяснить условия квантования Бора для орбит атома водорода:

$$m v_n r_n = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

где m - масса, v_n - скорость, r_n - радиус орбиты электрона, n - главное квантовое число.

Из волновой теории было известно, что если на ограниченном отрезке укладывается целое число длин волн, то образуется стоячая волна, энергия которой не распространяется в пространстве.

Так как длина орбиты $2\pi r_n$, то условия образования стоячей волны можно записать в виде:

$$\frac{2\pi r_n}{\lambda} = n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Сравнивая (15) с условием квантования Бора, де Бройль получил, что длина волны связана с импульсом электрона соотношением

$$\lambda = h/p, \quad (h = 2\pi \hbar, \quad p = mv) \quad (15')$$

Уравнение обычной плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , имеет вид:

$$u = u_0 \cos(\omega t - kx), \quad (16)$$

где $\omega = 2\pi \nu$ - циклическая частота, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число. Связь между частотой и энергией была установлена еще Планком. С учетом сказанного выше можно записать:

$$\omega = \frac{W}{\hbar}, \quad k = \frac{p}{\hbar}. \quad (17)$$

Конечно, электрон не может быть плоской волной. Но гипотеза де Бройля оказалась плодотворной - вопрос стоял за ее правильной физической интерпретацией.

Эту волну де Бройль назвал ψ - волной и записал в комплексной форме:

$$\psi = \psi_0 e^{-\frac{i}{\hbar}(\omega t - p x)} \quad (18)$$

где i - мнимая единица.

Комплексная форма записи очень удобна при решении уравнений, физический смысл имеют только действительные величины, переход к которым в итоге легко сделать по формуле

$$A = \text{Re } \hat{A},$$

где A - физическая величина, \hat{A} - ее комплексный образ, Re - операция выделения действительной части. Например, $\text{Re } e^{i\alpha} = \cos \alpha$, что позволяет (16) представить в виде (18).

Как выяснилось позже, плоские волны де Бройля описывают свободные электроны, в атоме ψ имеет сложный вид.

Из гипотезы де Бройля следует непосредственно дифракция электронов, что было позже подтверждено экспериментом Дэвисона и Джермера. Так была введена волновая функция, которая сразу же стала объектом теоретических исследований. Отметим ряд моментов.

ψ - функция - это волна вероятности: квадрат ее модуля равен вероятности обнаружить электрон в данной точке пространства

$$\omega^2(x_n, y_n, z_n, t) = |\psi|^2 = \psi \psi^* \quad (19)$$

Волновая функция принципиально имеет комплексный характер (может быть в частном случае и вещественной): во многих важных задачах ее мнимая часть необходима для описания электрона.

Основная задача квантовой механики на языке волновых функций формулируется так: необходимо найти волновую функцию для системы с заданными параметрами. Уравнение для волновой функции было получено Шредингером. В символической форме оно имеет вид:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi, \quad (20)$$

где \hat{H} - так называемый оператор Гамильтона, разговор о котором требует специальной подготовки.

Уравнение Шредингера играет в квантовой механике ту же роль, что и второй закон Ньютона в классической. Принцип детерминизма в квантовой механике формулируется следующим образом: если известна волновая функция в заданный момент времени, то, решив уравнение Шредингера, можно найти волновую функцию для любого другого момента времени. (В классической механике – если известны координаты и скорость частицы в заданный момент времени, то, решив уравнение динамики, можно найти ее координаты и скорость для любого другого момента времени).

Уравнение Шредингера – это дифференциальное уравнение в частных производных. Его решение найти сложнее, чем решить соответствующую задачу в классической физике, но это уже математические проблемы, не носящие принципиального значения.

Если известна волновая функция, то физические величины вычисляются методами теории вероятности.

Выражение (15) для длины волны де Бройля используется, чтобы определить границы применимости классической механики. Если

$$\lambda_b \ll L, \quad (21)$$

где L – характерные размеры объектов в задаче, то волновые свойства частиц не обнаруживаются. В этом случае применима классическая механика.

Например, длина волны де Бройля для электрона в атоме сравнима с размерами последнего – классическая механика здесь не применима: проявляются волновые свойства электрона. При рассеянии света на электронах в атоме длина волны фотона ($\lambda \sim 5 \cdot 10^{-7}$ м) много больше размеров атома, здесь фотон ведет себя как частица.

Если взять макроскопическую частицу, скажем, пылинку массой 10^{-9} кг, которая движется со скоростью 10^{-2} м/с, то получим

$$\lambda_b = \frac{h}{mv}, \quad \lambda_b = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{10^{-9} \cdot 10^{-2}} \text{ м} \approx 6,6 \cdot 10^{-23} \text{ м}.$$

Очевидно, что волновые свойства нельзя обнаружить. Даже большие молекулы, например, органические, ведут себя как хорошие

классические объекты.

Глубину проникновения в микромир можно представить, оценив длину волны де Бройля для соответствующих "снарядов", которыми бомбардируются частицы. В случае больших энергий следует применять формулы теории относительности. В этом случае вместо выражения для импульса

$$p = \sqrt{2mW}$$

следует использовать формулу

$$p = \sqrt{\frac{W^2}{c^2} - m^2 c^2}$$

Тогда

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\sqrt{W^2 - m^2 c^4}}$$

Современные электронные микроскопы имеют разрешающую способность до $0,1 \text{ \AA} = 10^{-11} \text{ м}$ (соответственно $\lambda = 10^{-12} \text{ м}$).

Частицы, которые разгоняются на самых мощных ускорителях, имеют длину волны $\lambda_0 > 10^{-16} \text{ м}$, что дает возможность экспериментальной проверки справедливости кварковой модели.

Литература

- Ефименко В.Ф., Методологические вопросы школьного курса физики.-М., 1976 .
- Энгельс Ф., Диалектика природы,-М., 1965 .
- Пехомов Б.Я., Становление современной физической картины мира,-М., 1985 .
- Ефименко В.Ф., Физическая картина мира // Физика в школе, 3, 1973 .
- Фундаментальная структура материи, сб. -М., 1984 .
- Мултановский В.В., Фундаментальные взаимодействия и картина мира в школьном курсе,-М., 1977 .
- Наумов А.И., Физика атомного ядра и элементарных частиц, М., 1988 .
- Новиков И.Д., Как взорвалась Вселенная,-М., 1988 .
- Новиков И.Д., Эволюция Вселенной,-М., 1990 .
- Окунь Л.Б., Физика элементарных частиц,-М., 1988 .
- Спиридонов О.П., Фундаментальные физические постоянные,-М.: ВШ, 1991 .

Учебное издание

Евгений Орьевич Банюлис

Валентин Иванович Скиданенко

Современная физическая картина мира

Редактор С.И.Банюлис

Технический редактор

Корректор О.В.Панова

ЛР N 030590 от 18.01.94.

Подписано в печать 10.09.95. Формат 60x84/16.

Бумага писчая Печать оперативная Усл.печ.л. 5,58.

Тираж 1000 экз. Зак. N 44

Издательство Фонда Автозаводского района

«Развитие через образование»

ГСП, Тольятти, С.Разина, 99

Отпечатано на предприятии «ОПТИМА»

