

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕСПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ**

**БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Физико-математический факультет

**Кафедры «Физики»**

**Ата-Курбоновой Ферангизы Бахтиёровны**

**«Квантовая интерпретация законов сохранения в физике»**

На соискание степени бакалавра по направлению образования  
**5140200- «Физика»**

**КВАЛИФИКАЦИОННАЯ ВЫПУСКНАЯ РАБОТА**

«Работа рассмотрена и  
разрешена к защите»

Заведующий кафедрой:

\_\_\_\_\_ доц. Б.Э. Ниязханова

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Научный руководитель:

\_\_\_\_\_ ст. преп. Н.К. Насырова

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Рецензент: \_\_\_\_\_ доц. БухИТИ

М.Р. Жумаев

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018г.

**«Разрешено к защите»**

Декан факультета \_\_\_\_\_ проф. Ш.М. Мирзаев

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

**Бухара – 2018**

## Оглавление

Введение.....	3
<b>Глава I . Законы сохранения в классической физике.....</b>	<b>6</b>
1.1. Масса и закон её сохранения.....	6
1.2.Закон сохранения и превращения энергии.....	17
1.3.Роль закона сохранения и превращения энергии в термодинамике.	22
1.4.Законы сохранения импульса и момента количества движения.....	26
1.5.Закон сохранения энергии в электродинамике. Сохранение заряда..	29
1.6.Закон взаимосвязи массы и энергии .....	33
I Выводы.....	38
<b>Глава II . Законы сохранения в квантовой механике.....</b>	<b>40</b>
2.1.Закон сохранения четности и другие законы симметрии .....	40
2.2. Интегралы движения.....	50
Заключение.....	57
<b>Литература.....</b>	<b>62</b>

## **Введение**

20 апреля 2017 года Президент Республики Узбекистан Шавкат Мирзиязев подписал Постановление "О мерах по дальнейшему развитию системы высшего образования". Документ принят в целях кардинального совершенствования системы высшего образования, коренного пересмотра содержания подготовки кадров в соответствии с приоритетными задачами социально-экономического развития страны, обеспечения необходимых условий для подготовки специалистов с высшим образованием на уровне международных стандартов.

8 октября 2016 года, по распоряжению Президента, была создана Рабочая группа, деятельность которой была направлена на изучение состояния системы высшего образования. По официально представленной информации известно, что в процессе выполнения поручения Президента, Рабочей группой выявлено, что в ряде ВУЗов страны не соответствует современным требованиям научно-педагогический потенциал, учебно-методическое и информационное обеспечение образовательного процесса, нуждается в системном обновлении материально-техническая база. В системе высшего образования не осуществляется должным образом работа по широкому внедрению в учебный процесс передового международного опыта, повышению квалификации педагогических и научных кадров за счёт налаживания тесных партнёрских связей с ведущими профильными зарубежными научно-образовательными учреждениями.

**Президентом определены важнейшие задачи дальнейшего комплексного развития системы высшего образования :**

- установление каждым ВУЗом партнёрских отношений с ведущими профильными зарубежными учреждениями;
- формирование целевых параметров подготовки кадров, оптимизация направлений с учётом перспектив развития регионов и отраслей экономики;

- создание и внедрение учебных пособий нового поколения, обеспечение высших образовательных заведений профильной литературой, в том числе на основе переводов новейших зарубежных материалов, регулярное обновление фондов информационно-ресурсных центров;
- неуклонное повышение уровня и качества профессионального мастерства педагогов;
- укрепление научного потенциала высших образовательных учреждений, усиление интеграции вузовской науки с академической с повышением её эффективности и результативности; - усиление духовно-нравственного содержания высшего образования;
- дальнейшее укрепление материально-технической базы ВУЗов;
- оснащение высших образовательных учреждений средствами современных информационно-коммуникационных технологий.

Реализация Программы предусмотрена на период 2017-2021 г.г. и призвана кардинально совершенствовать и повысить уровень высшего образования, укрепить и модернизировать материально-техническую базу ВУЗов, оснастить их современными лабораториями и средствами информационно-коммуникационных технологий.

Высокую значимость Постановления подчёркивает тот факт, что впервые на уровне законодательного акта Президента страны утверждены отдельно по каждому высшему образовательному учреждению адресные программы развития, предусматривающие конкретные параметры и показатели.

Принятое Постановление является важным шагом совершенствования учебно-образовательной системы Узбекистана в целом.

**Актуальность выпускной квалификационной работы:** В квантовой механике объекты всегда имеют квантовые флуктуации, поэтому

невозможно описать квантовую систему распределением вероятности координаты и сопряженного ей импульса, так как этого не позволяет принцип неопределенности Гейзенберга — основной принцип квантовой механики, содержащий в себе постоянную Планка. Таким образом, принцип описания состояния квантовой системы кардинально отличается от принятого в классической механике и классической статистической механике.

Знание законов сохранения в квантовой механике даёт возможность изучению более сложных вопросов квантовой механики.

**Предмет и объект:** квантовые объекты, применение математического аппарата квантовой механики к квантовым системам.

**Цель и задачи работы:** Изучение законов сохранения в квантомеханических системах и сопоставление законов классической механики и нерелятивистской квантовой механики.

**Метод и методика исследования:** При выполнении выпускной квалификационной работы были использованы методы теоретической физики.

**Научная новизна:** В ВКР изучены интегралы движения с точки зрения классической механики и нерелятивистской квантовой механики. Приведены общие похожие черты и различия к подходу некоторых законов сохранения в физике.

## **Глава I . Законы сохранения в классической физике.**

### **1.1. Масса и закон её сохранения.**

Закон сохранения массы является исторически первым из законов сохранения, познанных человеком. Это и понятно, так как прежде всего человек имеет дело непосредственно с различными видами вещества, а свойства его движения требуют для своего познания уже более высокого уровня общественной практики; как говорит Гегель, "то, что есть первое в науке, должно было оказаться и исторически первым"

Догадки о существовании некоего всеобщего принципа сохранения вещества как синонима материи восходят еще к философам Древней Индии, Китая, откуда они проникли в античный мир. Так, Эмпедокл считал, что ничто не может происходить из ничего и ничто не может быть уничтожено. Эту же идею высказывал Демокрит. По Аристотелю, материя не происходит из ничего, не подлежит умножению или уменьшению, не создается и не исчезает, а лишь изменяется. Идеи о вечности материи излагаются у Лукреция Кара в его знаменитом произведении "О природе вещей". Такие же представления лежат в основе всех атомистических учений (Демокрит, Эпикур, Лукреций Кар, Гассенди, Ломоносов, Дальтон).

Практические потребности привели к необходимости сопоставления предметов друг с другом, к избранию в качестве эталонов, с которыми можно было бы их сравнить, тел наиболее постоянных, устойчивых, сохраняющихся. Со временем были изобретены весы, которыми пользовались как в быту, торговле, так и для научных исследований.

Еще при зарождении ремесел в Древнем Египте пользовались весами. Все дальнейшее развитие химических знаний было неразрывно связано с их применением. В основе использования весов лежит допущение о

сохранении веса (понятие массы еще отсутствовало) *эталона*. Здесь мы видим пример того, как на протяжении многих веков стихийно, неосознанно используются законы природы, существо которых еще не стало достоянием науки.

К началу нового времени в результате накопления большого количества опытных фактов были сделаны определенные выводы о существовании некоей величины, которая сохраняется при химических превращениях. Сначала в качестве такой величины фигурировал вес. Так, Парацельс (1493-1541) советует пользоваться весами в физических и химических экспериментах, так как "вес не обманывает". По выражению Ван-Гельмонта (1577-1644), "вещество ничего не теряет, но только принимает другую форму". Бэкон в 1620 г. высказывает мысль о том, что ничто из ничего не делается, ничто не уничтожается. Истинное количество вещества или полная его сумма остается постоянной, не увеличиваясь и не уменьшаясь. Химик Жан Рей в 1630 г. пишет: "Вес так тесно связан с первоначальной материей элемента, что при всех превращениях всегда остается тем же самым". Мариотт в 1680 г. указывал: "Природа ничего не производит из ничего, материя не теряется". Мы видим, как постепенно складывается понятие о том, что вес есть лишь внешнее проявление сущности вещества, и внимание переносится на более существенное - на количество вещества. Так исторически подготавливаются условия для возникновения понятия массы.

Формирование понятия массы и формулирование закона ее сохранения становится необходимым не только на основании непосредственного изучения свойств вещества, но также из общих философских соображений о неуничтожимости всего сущего, являющихся результатом обобщения всей суммы положительных знаний, подтвержденных общественной практикой.

Сохранение массы при химических реакциях впервые в истории было экспериментально доказано в 1755 г. М. В. Ломоносовым.

Долгое время этому закону сохранения не придавали особого значения, его считали самоочевидным, само собой разумеющимся. В 1789 г. Лавуазье пишет: "Ничто не творится ни в искусственных процессах, ни в природных, и можно выставить положение, что при всякой операции имеется одинаковое количество материи до и после операции, что качество и количество начал те же самые, что произошли лишь изменения, перемены. На этом основано все искусство делать опыты в химии...".

Работы Ломоносова и Лавуазье положили начало сознательному применению закона сохранения вещества во всех химических и физических экспериментах, а также в теоретических исследованиях. Этот закон сохранения становится фундаментом всей классической механики и основным законом химии.

Количественный анализ, а также атомистическая гипотеза Хиггинса, а затем Дальтона целиком построены на законе сохранения всего вещества, ибо вес атомов Дальтона не изменяется при химических реакциях, как и их число. В то же время продолжается своеобразное "игнорирование" этого основного закона химии вплоть до 60-х годов XIX в., когда Стае произвел тончайшие химические анализы для проверки гипотезы Праута о том, что все элементы образованы из водорода. Наконец, в 1910 г. вышел труд Ландольта "О сохранении массы в химических взаимодействиях", где указывалось, что в пределах точности эксперимента не наблюдалось ни одного случая изменения массы в процессе химического превращения.

Однако абсолютность этого закона сохранения нарушается в процессах, описываемых в специальной теории относительности. Абсолютным и всеобщим оказывается объединенный закон сохранения массы и энергии, который с определенной степенью точности отражает неуничтожимость материи и движения.



Рассмотрим более обстоятельно вопрос о содержании понятия массы. В конце XVII в. Ньютон открыл закон всемирного тяготения. Он сформулировал закон тяготения не только благодаря своему математическому гению, но и благодаря своим стихийно-материалистическим философским воззрениям на природу материи. Атомистические представления дали ему возможность ввести понятие массы.

Ньютон не сводил понятие материи к понятию массы. Для Ньютона понятие материи, несомненно, более широкое, более всеобщее, чем масса, которая есть лишь одна из характеристик материи.

В нашей физической и частично в философской литературе распространено убеждение, что Ньютон отождествлял понятие массы, т. е. физической характеристики, и материи. Источник этого мнения в неточном переводе ряда мест из основного научного труда Ньютона "Математические начала натуральной философии".

В 1957 г. В. Г. Фридман показал эту неточность, допущенную академиком А. Н. Крыловым при переводе некоторых мест из работы Ньютона, детально проанализировал первоисточники и сформулировал подлинно ньютоновское определение массы следующим образом: масса есть мера материи, возникающая совместно из ее плотности и объема. Отсюда следует, что Ньютон рассматривал массу как специфическую общую меру материи, связанную лишь с пространственными размерами тела и его плотностью, и что нет оснований для утверждений о том, что Ньютон отождествлял массу и материю.

Рассматривая взаимодействие астрономических объектов, Ньютон показал, что сила взаимодействия между ними

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

где  $G$  - постоянная тяготения,  $m_1$  и  $m_2$  - массы взаимодействующих тел,  $r$  - расстояние между ними. Массы  $m_1$  и  $m_2$  называются гравитационными массами.

Теперь мы знаем, что закон всемирного тяготения Ньютона явился первым, но достаточно хорошим приближением в отражении гравитационных взаимодействий. Он дает количественную интерпретацию гравитационных процессов, что и привело к понятию гравитационной массы. Это понятие включает в себя качественную и количественную характеристики тел, находящихся в поле тяготения, и его глубокое содержание будет раскрыто при дальнейшем изучении тяготения.

Следующий шаг в развитии понятия массы был сделан также Ньютоном, когда он, анализируя процесс движения макроскопических тел, открыл три основных закона механики: всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние; изменение количества движения пропорционально приложенной действующей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует; действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе говоря, действия двух тел друг на друга равны между собой и направлены в противоположные стороны.

Раскрывая смысл инерционного движения по прямой линии, необходимо показать связь этого закона с законом сохранения количества движения ( $mv$ , где  $m$  - масса, а  $v$  - скорость). При неизменной массе (она называется инерционной массой) это означает, что если на тело не действуют внешние силы, то имеет место сохранение скорости. Второй закон можно сформулировать следующим образом:

$$\Delta(mv) = F\Delta t,$$

где  $\Delta(mv)$  - изменение количества движения;  $F$  - сила;  $\Delta t$  - время, в течение которого происходит изменение данного количества движения. Для сравнительно малых скоростей, когда  $m \approx \text{const}$ , можно записать:

$$F = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} m \frac{\Delta v}{\Delta t} = ma,$$

где  $a$  - ускорение, т. е. дать количественное выражение для массы движущегося тела, зная величину движущей силы и полученного телом ускорения. Действие второго закона механики Ньютона основано на том, что сила связана с инертными свойствами, присущими любому телу,

$$F = ma$$

часто трактуется как пример того, что масса есть лишь коэффициент между силой и ускорением. Конечно, величину массы можно определить исходя из этой формулы, но за математическими отношениями надо искать реальные физические свойства материальных объектов и реальные физические связи, отображаемые понятием массы.

В конце XIX в. Мах пытался критиковать ньютоновское определение массы, стараясь устранить из него материалистическое содержание. В науке Мах видел лишь экономную запись опыта. Он отрицал связь массы с понятием материи и понятием инерции. Инерция, по его мнению, лишь словесное выражение опытного факта пропорциональности силы и ускорения. Отождествив инерцию с определенной связью силы и ускорения, взятой из опыта, Мах отрицает возможность раскрыть физическое содержание понятия массы и истолковывает массу как коэффициент пропорциональности. Однако махистские представления не встретили поддержки физиков, в подавляющем своем большинстве стоявших на стихийно-материалистических позициях.

Изучая явления инерции, физики пришли к выводу, что каждое физическое тело обладает свойством определенным образом изменять

свою скорость под влиянием данного воздействия, что выражается некоторой физической величиной, называемой инертной массой. Тщательные исследования показали, что инертная и гравитационная массы численно равны друг другу и являются как бы двумя проявлениями одного и того же свойства тел. Как известно, тождественность инерционной и гравитационной масс положена в основу общей теории относительности Эйнштейна, в которой геометрические свойства пространства связаны с распределением наличных масс.

К концу XIX в. на основе опытных данных у ряда физиков начало складываться представление о том, что масса тела при его движении не остается постоянной, а зависит от скорости движения. В 1881 г. Д. Томсон впервые высказал и попытался теоретически обосновать мысль о том, что вся масса электрона электромагнитного происхождения. Его предположения основывались на следующем: покоящийся электрон обладает лишь электростатическим полем - если его привести в движение, то возникает магнитное поле, на создание которого надо затратить дополнительную работу. Если затормозить электрон, то, по правилу, установленному русским ученым Ленцем, возникает дополнительное электрическое поле, которое будет стремиться ускорить тормозящийся электрон. Происходит так, как если бы с полем электрона была бы связана дополнительная инерция. Поэтому импульс электрона можно рассматривать как сумму механического ( $P_m$ ) импульса и импульса ( $P_e$ ), обусловленного реакцией поля:

$$P = P_m + P_e.$$

По второму закону Ньютона

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{dp_m}{dt} + \frac{dp_e}{dt} = (m_m + m_e)v = mv,$$

где  $m = m_m + m_e$ ; если мы представим  $p_e$  как произведение  $m_e v$ , то те будет электромагнитной массой.

Рассмотрим электрон, двигающийся со скоростью  $v$ . Его можно рассматривать как элементарный ток плотностью  $ev$ . Он будет создавать магнитное поле:

$$H = \frac{ev \sin\theta}{cr^2}$$

на расстоянии  $r$ . Плотность энергии этого поля есть  $H^2/8\pi$ , а энергия в элементе  $d\tau$ :

$$dE = \frac{H^2}{8\pi} d\tau = \frac{e^2 v^2 \sin^2 \theta}{c^2 r^2} dr \sin \theta d\theta d\varphi.$$

Если считать, что электрон - шарик радиуса  $r_0$  с поверхностным равномерно распределенным зарядом  $e$ , то можно отыскать полную энергию магнитного поля:

$$E = \frac{e^2 v^2}{8\pi c^2} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin^3 \theta d\theta = \frac{1}{3} \frac{e^2 v^2}{r_0 c^2}.$$

Добавочная масса определится из условия

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{3} \frac{e^2}{r_0 c^2} v^2;$$

$$m_e = \frac{2}{3} \frac{e^2}{r_0 c^2}.$$

Если предположить другое распределение заряда, то изменится только численный коэффициент:

$$m = m_m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{r_0 c^2}.$$

Если предположить, что  $m_m = 0$ , то получается, что вся масса электромагнитного происхождения. Это предположение, казалось бы, подтверждалось тем, что формула для зависимости массы от скорости, где  $m_0$ - масса покоя;  $v$  - скорость;  $c$  - скорость света в вакууме:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где  $\beta = v/c$ , найденная Лоренцем на основании гипотезы о чисто электромагнитной природе массы, дает хорошее соответствие опыту. Созданная в начале XX в. Эйнштейном теория относительности показала, что зависимость от скорости имеет масса любого происхождения, а не только электромагнитного.

В дальнейшем выяснилось, что все частицы по массе можно разбить на две группы: имеющие и не имеющие массы покоя; причем последние обладают специфически отличным свойством: они могут двигаться только с максимально возможной скоростью - скоростью света в вакууме. Пусть частица движется со скоростью, значительно меньшей, чем скорость света  $v \ll c$ ; произведя разложение в ряд, мы получим

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx m_0 \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) = m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2}.$$

Это означает, что полная масса  $m$  частицы состоит из  $m_0$ , т. е. массы покоя, и некоей малой добавки, связанной с движением частицы. Во всех процессах, происходящих с сохранением числа свободных частиц, меняется лишь малый второй член. Это дало повод академику В. А. Фоку ввести понятие "пассивной" ( $m_0$ ) и "активной"  $m_0 v^2 / (2c^2)$  масс. Однако он сразу подчеркивает, что это разделение условно, носит относительный характер, так как при одних процессах  $m_0$  ведет себя пассивно, но при других процессах, скажем, внутриядерного характера, она ведет себя так

активно, что определяет собой весь процесс. Нам думается, что подобная классификация массы на пассивную и активную не раскрывает существа физического процесса и не является вполне корректной с философской точки зрения. Ведь изменения массы с необходимостью осуществляются при возникновении соответствующих условий. Несомненно, что масса покоя и масса движения тела физически различны. Можно предположить, что масса покоя характеризует не только связи между телами, находящимися в относительном покое, но и внутренние связи частиц, определяет его внутреннее состояние. Масса же движения определяет наряду с внутренними связями частицы и ее внешние связи, характеризующие ее новое физическое состояние, т. е. движение.

Масса является одним из решающих критериев устойчивости атомных ядер: они являются устойчивыми, если разность между массовым числом и зарядом ядра не выходит за узкие границы. Устойчивость ядра характеризует энергию связи нуклонов (ядерных частиц - протонов и нейтронов) в ядре. Энергия связи определяется тем, насколько отлична масса ядра от суммы масс изолированных нуклонов до их соединения в ядро. Следует также указать на то, что если кванты поля, обмен которыми обеспечивает соответствующие взаимодействия, обладают массой покоя, то радиус действия сил конечен, в случае же обмена частиц с  $m_0 = 0$  радиус действия сил  $= \infty$ .

Из этого следует еще одно качественное различие между частицами, обладающими  $m_0$ , и частицами (фотоны и нейтрино), масса покоя которых равна нулю. Все это свидетельствует о том, что масса - не случайный, малозначительный признак природных материальных объектов, а одно из их фундаментальных свойств, связанное с существенными особенностями их движения и относительной устойчивостью. Современная физика пришла к выводу, что массы различных физических объектов качественно различны; она стремится понять физическую природу массы на основе

раскрытия сущности связи вещественных объектов с окружающими их полями.

В физической и философской литературе мы еще встречаемся с утверждениями о том, что масса есть адекватное выражение материи, что масса есть количество материи и т. д.

Такие утверждения, на наш взгляд, возрождают стремление отождествить материю с одним из ее свойств, что было характерно для метафизического материализма.

### **1.2. Закон сохранения и превращения энергии**

Очень важным для теории и практики, для материалистического мировоззрения является закон сохранения и превращения энергии. Этот закон занимает особое место среди законов сохранения, потому что энергия является одной из важнейших характеристик движения. Сама история его открытия, применения и дальнейшего развития своеобразна и поучительна.

Тысячи людей на протяжении веков пытались создать так называемый *perpetuum mobile* - вечный двигатель, который давал бы возможность получать движение "из ничего". Но все их попытки были тщетны. Опыт привел к выводу о невозможности создания такого "вечного двигателя". На этой стадии своего познания закон сохранения и превращения энергии выступал в отрицательной форме.

Пользуясь этим принципом, Стевин выводит условия равновесия в механике и возводит здание статики. Количественная формулировка закона становится возможной лишь после работ Галилея, Кеплера и Гюйгенса. Из открытых ими правил движения падающих тел, планет, маятника можно было получить "закон сохранения силы". В 1668 г. Гюйгенс впервые указал, что произведение веса на квадрат его скорости сохраняет неизменную величину при столкновении двух тел. Затем Ньютон в знаменитом трактате "Математические начала натуральной



философии" (1687) впервые четко определил понятия массы, веса, силы, сформулировал основные законы механического движения и ввел во втором законе движения "величину движения". Лейбниц дал этой величине название "живая сила".

Даниил Бернулли в "Гидродинамике" принимает за "главный принцип" сохранение живых сил, или равенство между ""действительным опусканием и возможным поднятием". В то же время Рене Декарт вводит иную характеристику движения - произведение массы на скорость, называет ее количеством движения и провозглашает философский принцип, гласящий, что количество имеющегося в мире движения остается всегда одним и тем же.

Возникает знаменитый спор между сторонниками лейбницев-ской меры движения и декартовой относительно того, какая из них является истинной. Ф. Энгельс высоко оценил подвиг Декарта за 200 лет до открытия закона сохранения и превращения энергии, высказавшего философскую мысль о несотворимости и неуничтожимое™ движения, о том, что движение не может быть создано, оно может быть только перенесено.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов в 1748 г. высказал в весьма общей форме идею сохранения материи и движения. В письме к Л. Эйлеру он писал: "Все изменения, совершающиеся в природе, происходят таким образом, что сколько к чему прибавилось, столько же отнимется от другого. Так, сколько к одному телу прибавится вещества, столько же отнимется от другого, сколько часов я употреблю на сон, столько же отнимаю от бдения и т. д. Этот закон природы является настолько всеобщим, что простирается и на правила движения: тело, возбуждающее толчком к движению другое, столько же теряет своего движения, сколько отдает от себя этого движения другому телу". Пользуясь этим законом сохранения, Ломоносов первым высказывает идеи, положенные им в

основу кинетической теории теплоты. Однако механистичность господствовавшего в то время мировоззрения ограничивала дальнейшее развитие этой плодотворной идеи.

Несмотря на великое значение высказанной Ломоносовым идеи сохранения материи и движения, нам кажется неправильным поднимать его гениальную догадку на уровень диалектико-материалистического обобщения в вопросе о сохранении материи и движения. Можно согласиться с утверждением академика С. И. Вавилова, что "Ломоносов на век вперед как бы (подчеркнуто мною.- В. Г.) взял в общие скобки все виды сохранения свойств материи. Глубочайшее содержание великого начала природы, усмотренного Ломоносовым, раскрывалось постепенно и продолжает раскрываться в прогрессивном историческом процессе развития науки о природе". Ломоносов использует скорее качественную сторону этого закона, поскольку как мера движения у него фигурирует в основном декартово количество движения. Все это свидетельствует о том, что высказанные им соображения о сохранении движения являются скорее гениальной догадкой, нежели открытием основного закона природы.

Вплоть до середины XIX в. большинство высказываний о неуничтожимое<sup>TM</sup> движения относится, по существу, к его механической форме и "закон сохранения силы" формулируется в применении к механическим явлениям. В то же время к середине XIX в. был накоплен большой опыт промышленного развития. Изобретение паровой машины революционизировало все производство. Интенсивно изучались электрические и магнитные явления. Это не могло не привести к революционному скачку и в науке. Таким истинно величайшим открытием было открытие закона сохранения энергии.

Честь открытия закона сохранения и превращения энергии принадлежит ряду ученых, и среди них прежде всего Майеру, Джоулю и Гельмгольцу, которые пришли к этому открытию независимо друг от друга. Здесь

следует также отметить работы русских академиков Э. Ленца и Г. Гесса, которые явились ярким выражением не только сохранения, но и превращения энергии.

Р. Майер выводит закон сохранения и превращения "силы" из опытных наблюдений и с помощью рассуждений о причинной связи явлений. У него отчетливо выражена мысль о возможности превращения механического движения в тепло, причем количество его считается пропорциональным исчезнувшему движению. "Причина равна действию" (*causa aequat effectum*) - вот основной постулат Майера. Сохранение силы прямо вытекает из неразрушимости причины. Силы могут проявляться в различных формах - теплоты, "химической резкости", органических процессов, и каждая из них может превратиться в любую другую в строгом количественном отношении. Таким образом, заслуга Майера состоит не только в открытии превращения сил, но и в идее механического эквивалента тепла и в вычислении его.

У него отдельно существуют закон сохранения массы и закон сохранения силы; "если причиной является вещество, то в качестве действия получается также таковое же, если причиной является некоторая сила, то в качестве действия будет также некоторая сила".

Майер первый четко различил "физическую силу"- энергию и "математическую силу"- силу в современном смысле. Он признавал фундаментальный характер понятия энергии ("сила") по сравнению с понятием силы ("свойства"). Из фактов "неорганического образования тепла при затрате механической работы" следует, что "не существует никаких нематериальных материй вроде теплорода, флогистона... мы хотим вместе с невесомыми жидкостями,- писал Р. Майер,- изгнать из учения о природе все, что осталось от богов Греции, однако мы знаем также, что природа в ее простой истине является более великой и прекрасной, чем любое создание человеческих рук, чем все иллюзии

современного духа". Майер уже заметил разницу между кинетической и потенциальной энергией.

Работы Джоуля носили по преимуществу экспериментальный характер. В 1843 г. он писал, что из его опытов по определению количества теплоты, выделяющегося в цепи электрического генератора, "вытекал совершенно ясный вывод, что теплота и механическая сила обратимы одна в другую, и, следовательно, столь очевидно, что теплота является либо живой силой, либо некоторым состоянием притяжения или отталкивания, способным породить живую силу". Далее последовали опыты по нагреванию различных жидкостей трением, по изменению температуры газа при разрежении и сжатии.

В конце июля 1847 г. в Берлине с докладом "О сохранении силы" выступил Гельмгольц. Основываясь на принципе невозможности *perpetuum mobile*, он доказывает сохранение всех "сил", а отсюда делает вывод о том, что все силы сводятся к центральным силам притяжения и отталкивания. Рассматривая переход (механический) системы взаимодействующих тел из одного состояния в другое, он показывает, что количество работы при прямом и обратном переходе одно и то же и не зависит от пути перехода. Отсюда следует, что запас живых сил  $L$  равен работе  $A$ , произведенной действующими силами плюс некоторое постоянное количество работы. Заменяя работу силами напряжения  $U = -A$ , получаем обобщенный закон сохранения

$$L + U = \text{const.}$$

Он указывал, что во всех случаях движения свободных материальных точек под влиянием сил притяжения и отталкивания, интенсивность которых зависит только от расстояния, потеря в количестве силы напряжения всегда равна приращению живой силы, а приращение первой - потере второй. Следовательно, сумма всех живых сил и сил напряжения

является всегда величиной постоянной. Таким образом, здесь вводится понятие потенциальной энергии, таящее в себе возможность перехода к механическим силам взаимодействия и входящее как составная часть в величину энергии (энергия - термин, введенный в 1807 г. Т. Юнгом, но вошедший во всеобщее употребление в 1853 г. благодаря У. Рейнкину и особенно после работ Р.Клаузиуса), которая сохраняется при всех превращениях, происходящих с замкнутой системой. Следовательно, механическая, по существу, концепция Гельмгольца содержала в себе начало конца механистической физики.

Закон сохранения и превращения энергии был как бы итогом развития механики. Благодаря практике, экспериментальным и теоретическим исследованиям все больше и больше раскрывалось его глубокое содержание как "всеобщего закона природы. Это позволило быстрыми темпами развить теорию тепловых процессов, что привело к появлению термодинамики. Но особо важную роль закон сохранения и превращения энергии сыграл в изучении электрических и магнитных явлений. Благодаря работам Клаузиуса, Томсона, Максвелла, Больцмана, Гиббса и других начиная с 60-х годов прошлого столетия закон сохранения и превращения энергии стал признанным орудием научного исследования. Вставала необходимость более полного физического, а также философского осмысления этого фундаментального закона природы. Физический анализ его был блестяще осуществлен М. Планком в вышедшей в 1887 г. книге "Принцип сохранения энергии", а философская трактовка его была дана Ф. Энгельсом в работах "Анти-Дюринг" и "Диалектика природы".

Остановимся сначала на анализе, проведенном Планком. Прежде всего он дает определение понятия энергии, не включающее в себя факт ее сохранения (впервые эта идея была высказана Томсоном): "Определим энергию (способность производить работу) материальной системы в

некотором определенном состоянии как измеряемую в механических единицах работы величину всех действий, которые совершаются вне системы, когда последняя переходит любым образом из своего состояния в произвольно фиксированное нулевое состояние". Далее закон сохранения энергии формулируется в следующей форме: "Энергия материальной системы в определенном состоянии, взятая в отношении к другому определенному "нулевому" состоянию, имеет однозначное значение", т. е. является независимой от способа перехода.

Из этой формулировки видно, что закон сохранения и превращения энергии представляет собой опытный закон, ибо он непосредственно может быть проверен сравнением работы всех внешних действий при различных способах перехода системы из одного определенного состояния в другое. Заметим, что именно определение энергии как функции состояния системы, т. е. величины, не зависящей от пути перехода из одного состояния в другое, лежит в основе термодинамики.

Сформулированный закон выводится из экспериментального факта невозможности создания работы из ничего (*perpetuum mobile*) и ее уничтожения - из того, что "положительная работа не может ни возникать из ничего, ни исчезать в ничто".

Затем закон представляется в форме сохранения энергии: "Энергия материальной системы, определенная в отношении к произвольному нулевому состоянию, не изменяется, если при выполнении какого-либо процесса не совершаются никакие внешние действия, или, другими словами, если в системе имеют место только внутренние действия". Это дает возможность трактовать энергию, содержащуюся в системе, уже "как величину, которая по своему смыслу независима от внешних действий. Система обладает известным количеством энергии, которая при фиксированном нулевом состоянии полностью определяется мгновенным состоянием... Это количество остается постоянным, будет сохраняться,

пока система не передаст вовне и соответственно не получит извне никаких действий, внутренние же действия изменяют только ее форму, но не величину". Это понимание чрезвычайно удобно для непосредственного представления благодаря своей аналогии с сохранением массы, которая также может превращаться в различные формы, но не изменяется по своему количеству.

Такое определение энергии заставляет находить конкретные формы ее проявления в различных элементах системы, т. е. стимулирует конкретные физические исследования: "Всякий процесс, происходящий в природе, можно рассматривать как превращение отдельных видов энергии друг в друга".

Уточняя понятие внутренних действий в системе, М. Планк подчеркивает условный характер различия "внутренних" и "внешних" факторов. Оно зависит от границ системы. Абсолютно точное выражение сохранения энергии справедливо, строго говоря, по отношению ко всей Вселенной. Однако практически часто внешние воздействия на систему настолько малы, что от них можно отвлечься. Значительно позже Эддингтон сформулировал эту мысль в виде принципа сходимости: сохранение энергии приближенно осуществляется во всякой приближенно изолированной системе. При этом по мере бесконечного приближения к идеальной изоляции растет точность утверждения о сохранении энергии в системе: расширяя рассматриваемую систему, мы получаем сходящийся ряд.

М. Планк, анализируя работу Майера, приводит из нее отрывок: "Всякая причина в природе переходит в свойственное ей действие, и наоборот, в действии не содержится ничего, чего бы не было в какой-либо форме в причине. Поэтому все изменения, происходящие в природе, состоят не в создании, а только в превращении сил в определенных, постоянных отношениях мер; таким образом, разнообразные силы в определенных

отношениях эквивалентны друг другу, стало быть, они все могут быть измерены общей мерой, и сумма всех сил, существующих в природе, выраженная в этой общей мере, остается постоянной во времени". По этому поводу Планк писал: "Этот вывод несколько соблазнителен, ибо закон причины и действия составляет исходный постулат всего нашего познания природы. Но очарование, которое производит на нас майеровская дедукция, очень значительно потеряло бы в силе, если бы интенсивность закона не была уже известна нам из других оснований и если бы благодаря многолетней практике мы не привыкли к тем мыслям, которые он высказывает. Это превосходное объяснение принципа сохранения a posteriori, но никак не доказательство его. Само же значение термина "aequat" слишком неопределенно: если бы действительная причина была равна действию, то в природе вообще не происходило бы никакого изменения.

Первой действительно физической дедукцией принципа энергии была дедукция Гельмгольца. Она основана на механическом миропонимании".

Физические рассуждения и выводы Планка тесно переплетены с общефилософскими утверждениями. Так, он видит в принципе сохранения энергии не только констатацию неизменности суммарной энергии системы (отрицательное и количественное утверждение), но и указание на необходимость изменений, перехода энергии из одной формы в другую (положительная, качественная сторона), ибо одно уравнение постоянства полной энергии можно разложить на несколько уравнений, описывающих изменение энергии в частях системы, т. е. таким образом можно описывать временный ход изменений в системе.

Кроме того, Планк, в отличие, например, от Гельмгольца, не был сторонником универсального механического описания всех явлений природы и утверждал, что этот механический принцип никоим образом не



вытекает из закона сохранения энергии, зато последний должен быть исходным принципом физики.

Дальнейшее развитие науки показало, что мера движения имеет более сложную природу и включает в себя как энергию, так и импульс, которые часто проявляются как независимые характеристики отдельных форм движения и процессов перехода от одних форм к другим (например, электромагнитное поле обладает импульсом). Это тем более замечательно, что в то время многие физики еще не имели достаточной четкости в понимании роли энергии (чаще употреблялось вносившее путаницу понятие "сила"), а сам закон сохранения и превращения энергии рассматривали лишь с его количественной стороны, подчеркивая только факт сохранения.

### **1.3. Роль закона сохранения и превращения энергии в термодинамике**

Закон сохранения и превращения энергии в самом общем его понимании находит свое выражение в термодинамике.

Записанный в дифференциальной форме, он принимается за первое начало термодинамики:

$$dE = dQ - dA.$$

Здесь  $dQ$  - бесконечно малое изменение количества тепла в системе;  $dA$  - бесконечно малое приращение работы, совершаемой системой против внешних сил;  $dE$  - дифференциал энергии. В силу закона сохранения энергии  $dE$  есть полный дифференциал (интеграл от него, взятый между двумя состояниями системы, не зависит от пути перехода), т. е. сама энергия есть функция состояния - зависит лишь от состояния системы, определяемого парой из трех возможных параметров ( $P$  - давление,  $V$  - объем,  $T$  - температура, если это газ), характеризующих систему, и не зависит от пути, по которому система пришла в данное состояние.

Подразумевается, что все эти величины в вышеприведенном равенстве измерены в одних единицах. Работа  $dA$  записывается в тех переменных, которые характеризуют систему, в качестве которой можно рассматривать самые разнообразные объекты, например: газ, диэлектрик в электрическом поле, парамагнетик в магнитном поле и т. д.

Величины  $dQ$  и  $dA$  в общем случае не являются полными дифференциалами. Кроме  $dE$ , существует еще один полный дифференциал - это дифференциал энтропии, определяемый как

$$dS = \frac{dQ}{T}.$$

Утверждение "S есть функция состояния" является следствием второго начала термодинамики, основанного на факте невозможности создания *perpetuum mobile* второго рода, т. е. такого устройства, которое позволило бы получать работу за счет перехода тепла от менее нагретого тела к более нагретому при неизменных внешних условиях.

Понятие энтропии ввел Клаузиус; им же было сформулировано второе начало термодинамики в виде закона возрастания энтропии. Оба начала термодинамики являются самостоятельными утверждениями. Принцип энтропии определяет возможные направления процессов, на необходимость которых указывает закон сохранения и превращения энергии. Очевидно, что между обоими принципами существует связь.

"Теперь движение превращается в теплоту. Формула предполагает, что это - процесс, не имеющий никаких коррективов, что он всегда шел непрерывно и будет непрерывно идти до полного превращения всего движения в теплоту. Из того факта, что конец еще не настал, очевидно, что ход процесса прерывался бесчисленное множество раз действием процесса, имеющего обратное направление, превращающего теплоту в движение, так что существование вселенной - ряд бесчисленных периодов, из которых каждый имеет две половины: в одну половину уменьшается

сумма движения, превращающегося в теплоту, и растет сумма теплоты, в другую половину уменьшается сумма теплоты, превращаясь в движение, и сумма движения растет. В целом это безначальная смена колебаний, не могущая иметь конца".

Русские ученые К. П. Станюкович, И. Р. Плоткин, Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц и многие другие выдвинули существенные аргументы, опровергающие идею тепловой смерти Вселенной.

На наш взгляд, наиболее обоснованными выглядят доводы Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, которые считают, что представление о неизбежности теплового равновесия Вселенной ненаучно, так как оно игнорирует незамкнутость количественных систем, излучающих гравитационные поля: "...существенно, что гравитационное поле не может быть само включено в состав замкнутой системы ввиду того, что при этом обратились бы в тождество законы сохранения, являющиеся... основой статистики. Благодаря этому в общей теории относительности мир как целое должен рассматриваться не как замкнутая система, а как система, находящаяся в переменном гравитационном поле; в связи с этим применение закона возрастания энтропии не приводит к выводу о необходимости статистического равновесия".

Принцип энтропии есть выражение необратимости теплового движения. Объединяя первое и второе начала термодинамики, можно написать

$$dE = TdS - dA.$$

Отсюда вытекают все соотношения термодинамики для любой конкретной физической системы.

Поскольку они получаются с помощью строгих математических операций из объединенного первого и второго начал термодинамики, всесторонне проверенных на опыте (в ограниченной части мира), им должны удовлетворять соответствующие экспериментальные результаты.

И наоборот, подтверждение каждого из частных термодинамических соотношений является новым подтверждением справедливости закона сохранения и превращения энергии; противоречие же результатам термодинамики означало бы невыполнение закона сохранения и превращения энергии (или ограниченность термодинамического подхода).

Большой физический и философский интерес вызывает вопрос о связи закона возрастания энтропии с направлением времени. Хорошо известно, что уравнения классической механики симметричны по отношению к замене времени  $t$  на  $-t$ , и естественно предположить, что в основанной на классической механике статистике такая симметрия должна сохраняться. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц показывают, что это не так. Они приходят к выводу, что "в квантовой механике имеется физическая неэквивалентность обоих направлений времени, и, возможно, ее "макроскопическим" выражением и является закон возрастания энтропии. Однако до настоящего времени не удалось сколько-нибудь убедительным образом проследить эту связь и показать, что она действительно имеет место".

#### **1.4. Законы сохранения импульса и момента количества движения**

В классической механике, кроме скалярного интеграла движения - энергии, возможны два векторных: импульс и момент количества движения. Импульс, или количество движения  $P$ , есть произведение массы  $m$  на скорость тела  $v$ ; импульс системы материальных точек равен сумме их импульсов; момент количества движения определяется как

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{P}],$$

где  $r$  - радиус-вектор точки;  $P$  - ее импульс.

Закон сохранения импульса (или какой-либо его проекции) справедлив для изолированной системы (или при наличии направления, в котором слагающая поля равна нулю). Так, при движении заряженной частицы в

однородном электрическом поле будут сохраняться две проекции ее импульса в плоскости, перпендикулярной полю.

Закон сохранения момента количества движения справедлив для изолированной системы или для системы в поле центральной силы (т. е. если момент сил, действующих на систему, равен нулю).

История открытия этих законов механики и развития соответствующих им понятий, как и история закона сохранения и превращения энергии, неразрывно связана с развитием материально-технической вооруженности человеческого общества и общего уровня естественнонаучных знаний. Однако оба они имеют более ограниченную сферу макроскопического проявления, чем закон сохранения энергии, и поэтому представление об их всеобщности стало возможным лишь с развитием электродинамики, кинетической теории и статистической физики, теории относительности и, наконец, квантовой механики.

Теория относительности показала, что как энергия, так и импульс суть проявления единой четырехмерной меры движения, которой является четырехмерный вектор энергии-импульса. Она же окончательно установила необходимость понятия импульса в применении к электромагнитному полю, хотя и раньше это вытекало как из теории Максвелла, так и из опытов Лебедева со световым давлением.

Наиболее ранним проявлением закона сохранения момента количества движения в статическом смысле можно считать "золотое правило механики" древних. Кеплеровский закон площадей есть уже закон сохранения момента количества движения как динамической величины. В аналитической механике Лагранжа нашли свое законченное механическое выражение оба векторных закона сохранения.

Распространение понятия момента количества движения на немеханические формы движения стало возможным лишь с

возникновением понятия спина элементарной частицы и применением его в квантовой механике.

Применение понятия момента количества движения в статистической физике к атому дало возможность объяснить поведение теплоемкости двух- и многоатомных газов.

Чем же объясняется столь существенное значение, которое имеют именно перечисленные интегралы движения механики? Действительно, у механической системы с  $n$ -степенями свободы всегда имеется  $2n-1$  интегралов движения. Однако не все из них равнозначны. Среди них имеются величины, которые обладают тем свойством, что их сумма по всем свободно движущимся телам, как до их взаимодействия, так и после, одна и та же и не зависит от конкретной природы имевшего место взаимодействия.

Таких независимых интегралов всего семь: это и есть энергия, три компоненты импульса и три компоненты момента.

В статистической физике основным понятием является функция распределения, показывающая, как распределены частицы по возможным состояниям. Теорема Лиувилля требует, чтобы она выражалась через интегралы движения. Причем в силу мультипликативности функций распределения ( $\rho_{AB} = \rho_A * \rho_B$ ,  $A$  и  $B$  - отдельные системы,  $AB$  - система из  $A$  и  $B$ ) ее логарифм должен быть аддитивным интегралом движения. Таким образом, оказывается возможным полное статистическое описание с помощью одних лишь аддитивных механических инвариантов, "заменяющих собой то невообразимое множество данных (начальных условий), которое требовалось бы при механическом подходе".

Дальнейшее развитие теории механических интегралов движения в терминах скобок Пуассона в известном смысле подготовило переход к квантовой механике.

### **1.5. Закон сохранения энергии в электродинамике. Сохранение заряда.**

В результате обобщения всех известных в то время опытных фактов, относящихся к электромагнитным взаимодействиям, а также использования идеи эквивалентности переменного электрического тока току смещения Максвелла были получены уравнения, явившиеся мощным теоретическим фундаментом дальнейшего развития науки. Подобно тому как уравнения Ньютона приводили к механическим законам сохранения, из уравнений Максвелла непосредственно получается закон сохранения энергии в электродинамике - так называемая теорема Пойнтинга; при этом впервые были введены важные понятия плотности энергии и потока энергии.

Заметим, что под потоком энергии следует понимать не механическое перемещение какого-то особенного энергетического флюида, а изменение энергетического состояния среды, поля, отображаемое в математической аналогии потока энергии.

Исходя в своих исследованиях из общего закона сохранения энергии и из уравнений Максвелла, Умов и Пойнтинг пришли к закону сохранения энергии в электродинамике. Этот вывод в свою очередь означал, что уравнения Максвелла правильно отражают объективные закономерности действительности. Вскоре на электромагнитное поле было распространено понятие импульса. Это был шаг, непосредственно предшествовавший созданию теории относительности.

Однако в изучении электрических явлений с самого начала ведущее место принадлежало понятию заряда. С открытием электрохимического эквивалента (закон Фарадея) устанавливается дискретная структура электричества и начинается познание нового фундаментального закона природы - закона сохранения заряда. В современных условиях он выглядит так: при всех превращениях частиц их суммарный электрический заряд не меняется.

В теории Максвелла непосредственным следствием из его уравнений является так называемое уравнение непрерывности:

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0,$$

математически выражающее факт несотворимости и неуничтожимости этой особой и важной характеристики определенных видов материи. Открытие электрона Томсоном в конце XIX в. и измерение заряда электрона Милликенем в 1916 г. подтвердили дискретность структуры любого заряда. До настоящего времени в природе еще не обнаружены заряды меньше заряда электрона, хотя в теории элементарных частиц высказываются предположения о возможности их существования (дробные заряды кварков).

В прошлом экспериментальные попытки обнаружения субэлектронного заряда (например, работы Эренгафта) не увенчались успехом.

По современным представлениям электрический заряд - не самостоятельное образование, а особое свойство материальных частиц. Материальная частица, несущая элементарный отрицательный электрический заряд, как мы уже знаем, получила название "электрон". Количественное выражение для силы взаимодействия зарядов было получено Кулоном:

$$F = \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2},$$

где  $e_1, e_2$  - заряды, а  $r$  - расстояние между ними. Всякое изменение положения электрических зарядов приводит к изменению силы взаимодействия, т. е. при перемещении кулоновские силы совершают работу. Величина этой работы определяет энергию электрического поля

$$E = \frac{e_1 \cdot e_2}{r},$$



здесь  $e_1, e_2$  - заряды, а  $r$  - расстояние между ними. Подробное исследование взаимодействия электрических зарядов привело к выводам, что заряды взаимодействуют через поле. Энергия электромагнитного поля равна

$$E = \frac{1}{8\pi} \int_v (\epsilon E^2 + \mu H^2) dv,$$

где  $E$  и  $H$  - напряженности электрических и магнитных полей;  $\epsilon$  и  $\mu$  - постоянные, характеризующие среду. Поле, как всякий физический материальный объект, характеризуется энергией, импульсом, моментом количества движения и т. д.

Полевая гипотеза массы приблизительно верно отражает сущность инертных свойств движущегося электрона, но если попробовать подсчитать энергию электрона в поле, то мы с неизбежностью должны задавать "мистическую" (пока неизвестную) величину, называемую радиусом электрона  $r_0$ , чтобы избежать бесконечностей:

$$E = \frac{1}{8\pi} \int_{r_0}^{\infty} 4\pi E^2 r^2 dr = \frac{e^2}{2r_0};$$

$$r_0 = \frac{e^2}{2me^2} \approx 10^{-13} \text{ см.}$$

Присутствие в теории лишенных физического смысла бесконечностей и искусственное их устранение показывает несовершенство теории, наличие в ней противоречий. В самом деле, взаимодействие зарядов рассматривается как взаимодействие безразмерных точек, но представление о безразмерности, точности электрона ведет к бесконечному значению его энергии.

Очевидно, что в будущей теории элементарных частиц, когда мы на основе новых экспериментальных данных сможем понять природу

электрического заряда, отпадает и необходимость в искусственных приемах "спасения" от бесконечностей.

Закон сохранения заряда играет исключительную роль в физике элементарных частиц. Как мы увидим дальше, уже удалось "нащупать" его связь с другими характеристиками материи. Наличие заряженных, а также лишенных заряда частиц ставит вопрос: чем можно объяснить ненаблюдающиеся во Вселенной симметрию и асимметрию в распределении зарядов?

### **1.6. Закон взаимосвязи массы и энергии**

В начале XX в. фундаментальными основами физики и всего естествознания являлись два самостоятельных закона сохранения: массы и энергии. Это не соответствует действительности, но сохранение массы в какой-то мере отражало неуничтожимость и несотворимость материи, а сохранение энергии - вечность движения. Раздельное существование этих законов сохранения недостаточно адекватно отражало единство и неразрывность материи и движения. Диалектический материализм, рассматривая материю и движение в неразрывном единстве, тем самым отвергал метафизический отрыв их друг от друга, имевший место в естествознании, предсказывал существование неизвестной закономерности, более правильно отражающей объективные процессы в природе. Открытый А. Эйнштейном закон взаимосвязи массы и энергии

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

явился одним из конкретных выражений этого единства, стал новым естественнонаучным подтверждением диалектического материализма. Хорошо известно, что эта связь массы и энергии является основой современной ядерной энергетики, открывает новую страницу в истории развития человеческих знаний о природе и ее законах. Установление взаимосвязи между массой и энергией привело к расширению содержания

понятий как массы, так и энергии, к превращению их в более общие понятия, включающие в себя старые в виде предельного случая. Опытные факты, систематизированные и объясненные специальной теорией относительности, показывали, что масса  $m_v$  зависит от скорости движения тела по закону:

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \beta = \frac{v}{c},$$

где  $m_0$  - масса покоя, измеряемая в системе координат, связанной с движущимся как единое целое объектом. Массе покоя соответствует энергия покоящегося тела:

$$E_0 = m_0 c^2;$$

полная же энергия имеет характерную зависимость от скорости:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Если это выражение разложить в ряд, считая  $v/c \ll 1$ , то мы получим

$$E = E_0 + \frac{m_0 v^2}{2},$$

т. е. к обычной кинематической энергии добавляется энергия покоя. Этим однозначно устанавливается бывшая до сих пор произвольной аддитивная постоянная, входившая в выражение энергии. Теперь уже не только разность энергии является фактически наблюдаемой величиной, но и сама энергия, хотя проявление скрытой энергии покоя становится возможным лишь в ядерных процессах, в процессах так называемой аннигиляции (превращения пар  $e^+ + e^-$  в  $\gamma$ -кванты, фотоны) и рождения пар.

В случае малых скоростей, как мы это уже видели, получаем выражение для массы

$$m = m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2},$$

или так как

$$\frac{m_0 v^2}{2} \approx \frac{mv^2}{2} = T,$$

где  $T$  - кинетическая энергия, то

$$m_0 + \frac{T}{c^2}.$$

До Эйнштейна второе слагаемое не учитывалось вовсе, так как не знали таких явлений, в которых эта добавка проявляла бы себя заметным образом (из-за огромной величины квадрата скорости света в вакууме, на которую делится кинетическая энергия). Понятие массы было, по существу, статическим. Теперь оказалось, что это динамическая величина, зависящая от скорости движения, и лишь при скоростях, малых по сравнению со скоростью света, масса практически сводится к величине статической - к массе покоя  $m_0$ .

Таким образом, дальнейшее развитие наших знаний о природе привело как к развитию основных понятий физики (масса и энергия), так и к синтезу двух отдельных законов сохранения (массы и энергии) в новый, единый закон сохранения, который может быть выражен в терминах: либо закон сохранения полной массы изолированной системы (массы в новом смысле), либо закон сохранения полной энергии ускоренной системы (энергии в новом смысле). Тем самым был нанесен еще один удар метафизическому взгляду на закономерности природы, требовавшему резкого разграничения и наличия непроходимой пропасти между материей и движением, а следовательно, и их характеристиками - массой и энергией.

Законы сохранения релятивистской механики применяются при изучении космических частиц для определения их массы при

идентификации случаев распада и рождения. Этот метод незаменим в исследовании новых частиц, ибо он позволяет анализировать подобные явления независимо от характера взаимодействий, лежащих в их основе.

Все прогрессивное развитие физики в XX в. проходит под знаком утверждения всеобщности фундаментальных законов сохранения, под знаком превращения их в мощное, орудие познания процессов рождения и превращения элементарных частиц, позволяющее сделать выводы о существовании новых, неизвестных еще частиц.

На протяжении многих лет существования закона сохранения и превращения энергии вокруг него шла, да и сейчас продолжается, борьба его сторонников и противников.

В физике, как об этом свидетельствуют приведенные ранее данные, отдельные ученые не раз пытались доказать неприменимость и ограниченность закона сохранения энергии и старались низвести этот закон до положения второстепенного вывода из специальных уравнений движения и из свойств пространства-времени.

Исследования как в микромире, так и в космосе приносят новые подтверждения закона сохранения и превращения энергии, углубляют и расширяют его содержание, превращают его в еще более мощное орудие познания окружающей действительности.

Вопрос о существовании и значении закона сохранения и превращения энергии в настоящее время приобретает еще большую актуальность. И вот почему. Сейчас существуют возможности открытия новых видов энергии как в микромире, так и в мегамире. Вполне возможно, что будут обнаружены новые виды энергии, обуславливающие излучение астрофизических объектов (ядер галактик, квазаров и др.), наряду с энергией, имеющей свой источник в термоядерных реакциях. Не исключено открытие новых видов энергии и во внегалактических взаимодействиях.

Открытие новых видов энергии, особым образом связанных с известными видами энергии и превращающихся в них какими-то новыми способами, может привести к противоречию с современным пониманием закона сохранения и превращения энергии.

Поэтому возникает необходимость в дальнейшем обобщении этого закона на основе новых форм его проявления. Имея в виду возможности открытия новых видов энергии, известный советский астрофизик академик Амбарцумян пишет: «Уже имеющиеся скудные факты говорят о том, что эти данные могут привести к противоречию с законом сохранения энергии (и вещества) в его современной форме, ограниченной известными нам формами энергии».

Важнейшей предпосылкой для дальнейшего обобщения закона сохранения и превращения энергии является конкретный анализ присущей ему всеобщности.

Всеобщность закона сохранения и превращения энергии необходимо рассматривать как конкретную всеобщность, т. е. прежде всего в его связи с другими физическими принципами. Поэтому существенное значение приобретает анализ связи закона сохранения и превращения энергии с принципами наименьшего действия и законами симметрии и асимметрии.

### **Выводы**

В первой главе ВКР рассмотрены вопросы законов сохранения в классической механике. Из общих положений классической механики следует, что бесконечно малая сила вызывает бесконечно малое изменение состояния системы. Поэтому, все механические величины, зависящие от состояния системы, как, например, энергия, импульс и т.п. являются непрерывными функциями состояния. Дискретность состояний и скачкообразное изменение состояний микрочастиц непосредственно противоречит общему принципу.

В первой главе ВКР рассмотрены следующие законы и по ним получены выводы:

### 1. Масса и закон её сохранения.

Исследования показали, что инертная и гравитационная массы численно равны друг другу и являются как бы двумя проявлениями одного и того же свойства тел. Как известно, тождественность инерционной и гравитационной масс положена в основу общей теории относительности Эйнштейна, в которой геометрические свойства пространства связаны с распределением наличных масс.

### 2. Закон сохранения и превращения энергии.

Закон сохранения и превращения энергии представляет собой опытный закон, ибо он непосредственно может быть проверен сравнением работы всех внешних действий при различных способах перехода системы из одного определенного состояния в другое.

### 3. Законы сохранения импульса и момента количества движения.

В классической механике, кроме скалярного интеграла движения - энергии, возможны два векторных: импульс и момент количества движения. Импульс, или количество движения  $P$ , есть произведение массы  $m$  на скорость тела  $v$ ; импульс системы материальных точек равен сумме их импульсов; момент количества движения определяется как

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{P}],$$

где  $r$  - радиус-вектор точки;  $P$  - ее импульс.

Закон сохранения импульса (или какой-либо его проекции) справедлив для изолированной системы (или при наличии направления, в котором слагающая поля равна нулю). Так, при движении заряженной частицы в однородном электрическом поле будут сохраняться две проекции ее импульса в плоскости, перпендикулярной полю.

## **Глава II. Законы сохранения в квантовой механике.**

### **2.1. Закон сохранения четности и другие законы симметрии**

Является большой честью и истинным удовольствием такая возможность обсуждения вопроса о сохранении четности и других законах симметрии. Сначала мы коснемся общей роли законов симметрии в физике. Затем познакомимся с теми обстоятельствами, которые привели к опровержению закона сохранения четности. И, наконец, мы обсудим некоторые другие законы симметрии, которые установлены физиками экспериментальным путем, но которые все еще не образуют идейно простого и цельного. Существование законов симметрии находится в полном соответствии с нашим жизненным опытом. Понятия о простейших симметриях—изотропности и однородности пространства—появились на заре человеческого сознания.

Инвариантность законов механики при переходе к равномерно движущейся системе координат (известная также как инвариантность относительно преобразования Галилея) явилась примером первой лишенной простоты симметрии. Эта симметрия является одним из исходных принципов ньютоновской механики. Следствия, вытекающие из этого принципа симметрии, интенсивно разрабатывались физиками в прошлом веке и привели к ряду важных результатов. Хорошим примером из этой области служит теорема, гласящая, что в изотропном твердом теле могут быть только два модуля упругости.

Другого типа следствиями из законов симметрии являются законы сохранения. В настоящее время общеизвестно, что, вообще говоря, принцип симметрии (или, что то же самое, принцип инвариантности) приводит к



закону сохранения. Например, инвариантность физических законов относительно пространственных трансляций приводит к закону сохранения импульса, а инвариантность относительно пространственных вращений приводит к сохранению момента. В то время как важность этих законов сохранения была полностью понята, их тесная связь с законами симметрии .

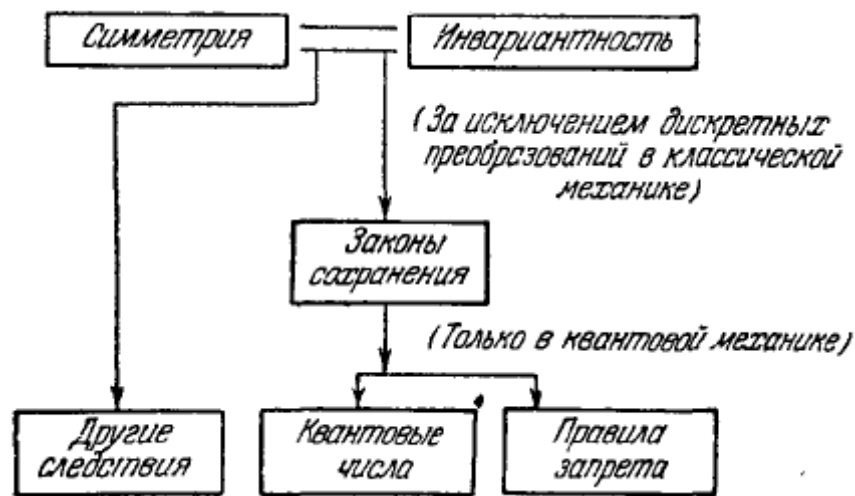


Рис. 2.1.1. Соотношение между законами сохранения и симметрией.

В связи с созданием специальной и общей теории относительности законы симметрии приобрели новое значение: между законами симметрии и динамическими законами физики связь оказалась значительно более тесной и взаимоопределяющей, чем в классической механике, где, по существу, законы симметрии явились только следствиями динамических законов, случайно обладавших симметрией. В релятивистской теории также

было существенно расширено число законов симметрии путем включения таких законов, которые на основе обыденных представлений явились отнюдь не очевидными: скорее их справедливость выводилась на основании сложных экспериментов (или в дальнейшем подтверждалась сложными экспериментами).

Позвольте мне подчеркнуть, что для физиков являлась могучим источником вдохновения идейная простота и внутренняя красота симметрии, обнаруживаемой в сложных экспериментах. Появлялась надежда, что природа таит в себе определенную упорядоченность, которую можно постигнуть.

Однако вплоть до появления квантовой механики принципы симметрии были распространены в физике не очень широко. Квантовые числа, которые определяют состояния системы, часто совпадают с квантовыми числами, определяющими симметрию системы. Действительно, трудно переоценить ту роль, которую играют принципы симметрии в квантовой механике. Сошлемся на два примера: общее строение периодической системы элементов по существу является прямым следствием изотропности закона Кулона; существование античастиц—а именно позитрона, анти-протона и антинейтрона—теоретически предсказывалось как следствие инвариантности физических законов по отношению к преобразованию Лоренца. В обоих случаях кажется, что природа использует преимущество простоты математического представления законов симметрии. Чувство глубочайшего уважения к мощи законов симметрии никогда не ослабевает у того, кто обдумывал изящество и красоту безупречных математических доказательств и сопоставлял это со сложными и далеко идущими физическими следствиями. Один из принципов симметрии—симметрия между левым и правым—так же стар, как и человеческая цивилизация. Вопрос о том, проявляется ли в природе подобная симметрия, подробно обсуждался философами в прошлом. Конечно, в повседневной жизни левое и правое совершенно различны. Наше сердце, например, всегда с левой стороны. В языке, употребляемом народами Востока и Запада, «правое» одновременно означает «хорошо», а «левое»—«плохо». Однако в физических законах всегда проявляется полная симметрия между левым и

правым. Асимметрия в повседневной жизни приписывается случайной асимметрии окружающей среды или асимметрии условий, при которых зародилась органическая жизнь. Чтобы пояснить это, я упомяну о том, что если существует «зеркально отраженный человек» с сердцем с правой стороны и с внутренними органами, являющимися зеркальным отражением наших внутренних органов, и если в действительности молекулы, составляющие тело такого человека (например, молекулы сахарозы), зеркальны относительно наших и пища, которой питается этот человек, является зеркальным отражением нашей пищи, то на основании физических законов этот человек будет функционировать так же, как функционируем мы с вами.

Хотя, в классической физике и использовался закон симметрии между правым и левым, однако большого практического значения эта симметрия не играла. Единственная причина этого заключается в том, что в отличие от симметрии относительно вращения, которая порождает непрерывное преобразование, симметрия между правым и левым порождает дискретное преобразование. В то время как непрерывное преобразование в классической механике всегда приводит к закону сохранения, дискретное преобразование к закону сохранения не приводит. Однако в рамках квантовой механики это различие между непрерывным и дискретным преобразованиями исчезает. Закон симметрии правого и левого также приводит к закону сохранения—закону сохранения четности.

Открытие этого закона сохранения восходит к 1924 г., когда Лапорт нашел, что в сложных атомах энергетические уровни могут быть разбиты на два класса: «штрихованные» уровни и «нештрихованные» уровни, или, говоря современным языком, четные и нечетные уровни. Лапорт обнаружил, что испускание или поглощение фотона всегда приводит к такого типа переходам между уровнями, при которых нечетный уровень переходит в четный и наоборот. Предвосхитив дальнейшее развитие, мы отметим, что

обнаруженная Лапортом «штрихованность» или «нештрихованность» уровней позже стала рассматриваться нами как четность уровней. Четные уровни определяются как уровни, имеющие четность  $+1$ , а нечетные уровни—как уровни, имеющие четность  $-1$ . При этом испущенному или поглощенному в атомных переходах фотону приписывается четность, равная  $-1$ . Тогда правило Лапорта может быть сформулировано в виде следующего утверждения: в атомных переходах, сопровождающихся испусканием фотонов, четность начального состояния совпадает с полной четностью конечного состояния (при этом полная четность конечного состояния определяется как произведение четности уровня атома, находящегося в конечном состоянии, на четность испущенного фотона). Другими словами, четность сохраняется—или же не изменяется—при переходах.

В 1927 г. Вигнер сделал решающий шаг в доказательстве, что эмпирическое правило Лапорта является следствием инвариантности электромагнитных сил в атомах относительно зеркального отражения (или, что то же самое, относительно симметрии правого и левого). Эта фундаментальная идея быстро вошла в плоть и кровь физики. Так как наличие и в других взаимодействиях симметрии между правым и левым не вызывало сомнения, то эта идея была распространена на другие области физики: на

ядерные реакции,  $\beta$ -распад, взаимодействие мезонов и взаимодействие странных частиц. К идее ядерной четности привыкли в такой же степени, как к идее четности атомных уровней; обсуждалась и измерялась внутренняя четность мезонов. При этом всюду понятие четности и закон сохранения четности оказались крайне плодотворными. Этот успех в свою очередь служил указанием на справедливость симметрии между правым и левым.

ЗАГАДКА «ТЕТА—ТАУ»

В такой обстановке несколько лет тому назад появилась так называемая «загадка  $\theta$ — $\tau$ ». Прежде чем я объясню смысл этой загадки, будет полезно коснуться классификации сил, действующих между элементарными частицами. Эту классификацию физики установили на основании многочисленных экспериментов, проведенных за последние 50 лет.

Сильными взаимодействиями являются ядерные взаимодействия, которые включают в себя силы, связывающие нуклоны в ядро, и взаимодействия между ядрами и  $\pi$ -мезонами. Сильные взаимодействия также включают в себя взаимодействия, приводящие к наблюдаемому образованию странных частиц. Во второй класс входят электромагнитные взаимодействия, о которых физики знают много. В самом деле, венцом достижений физиков XIX века было детальное изучение электромагнитных сил. С развитием квантовой механики наше знание природы электромагнитных сил в принципе привело к точному, полному и подробному описанию окружающих нас физических и химических явлений. Третий класс сил—слабые взаимодействия—был впервые открыт в начале этого века в виде  $\beta$ -радиоактивности ядер—явления, которое особенно упорно изучалось экспериментально в последние 25 лет.

После открытия  $\pi$ — $i$ -распада,  $\mu$ — $e$ -распада и  $\mu$ -захвата независимо Кляйном;

Тиомно и Уиллером; Ли, Розенблатом было установлено, что эти взаимодействия имеют примерно такую же силу, что и  $\beta$ -взаимодействие. Эти взаимодействия были названы «слабыми взаимодействиями», и за несколько последних лет они то и дело пополнялись за счет открытия многих новых взаимодействий, ответственных за распады странных частиц. Поразительно устойчивая картина всегда одинаковой силы слабых взаимодействий и сегодня дразнит ложными надеждами—тема, к которой мы в дальнейшем вернемся. Относительно последнего класса сил—сил гравитации—мы только отметим, что в атомных и ядерных явлениях дни так

малы, что могут не приниматься в расчет при всех измерениях, осуществляемых существующей аппаратурой.

Теперь вернемся к «загадке  $\theta-\chi$ ». В 1953 г. Далиц и Фабри обратили внимание на то, что из распадов  $\Theta$ - и  $\chi$ -мезонов:}

$$\theta \rightarrow \pi + \pi,$$

$$\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi,$$

можно получить некоторые данные о спинах и четлостях  $\Theta$ - и  $\tau$ -мезонов.

Грубо говоря, аргументация заключалась в следующем. Еще раньше было установлено, что  $\pi$ -мезон является нечетным (т. е. четность  $\pi$ -мезона равна  $-1$ ). Для начала пренебрежем эффектами, связанными с движением  $\pi$ -мезонов друг относительно друга. Для того чтобы при распаде четность сохранялась,  $\theta$ -мезон должен иметь четность, совпадающую с полной четностью двух  $\pi$ -мезонов (другими словами, четность  $\theta$ -мезона должна равняться произведению четностей двух  $\chi$ -мезонов). Два  $\pi$ -мезона являются четной системой (т. е. четность системы из двух  $\pi$ -мезонов равна  $+1$ ). Аналогично  $\tau$ -мезон должен иметь четность, равную четности системы из трех  $\pi$ -мезонов (а система из трех  $\pi$ -мезонов является нечетной). В действительности из-за относительного движения  $\pi$ -мезонов рассуждения не столь просты и однозначны, как это было выше представлено. Чтобы сделать аргументацию более определенной и позволяющей делать выводы, необходимо было экспериментально изучить импульсы и угловое распределение образующихся  $\pi$ -мезонов. Эти исследования проводились во многих лабораториях, и к весне 1956 г. накопившиеся экспериментальные данные, казалось, однозначно указывали (при рассуждениях, аналогичных приведенным выше) на то, что  $\Theta$ - и  $\chi$ -мезоны имеют разные четности и, следовательно, являются разными частицами. Этот вывод, однако, резко противоречил другим экспериментальным результатам, которые также были

установлены к этому времени. Это противоречие было известно, как «загадка  $\theta$ — $\tau$ » и широко обсуждалось.

«Однако не следует делать поспешных выводов. Ибо экспериментально известно, что все  $K$ -мезоны (т. е.  $\Theta$ - и  $\tau$ -мезоны) имеют одинаковые массы и времена жизни. Массы известны с точностью примерно от 2 до 10 электронных масс, т. е. до долей процента, а времена жизни известны примерно с точностью до 20 процентов.

Так как нельзя ожидать, чтобы массы и времена жизни у частиц, имеющих различное значение спина и четности и сильно взаимодействующих с нуклонами и  $\pi$ -мезонами, оказались одинаковыми, мы вынуждены оставить нерешенным вопрос, является ли окончательным упоминавшийся вывод о том, что  $\Theta$ - и  $\tau$ -мезоны—различные частицы. Положение, в котором очутились физики в то время, подобно положению человека, нащупывающего выход из темной комнаты: он знает, что где-то должна быть дверь, ведущая наружу; но в каком направлении эта дверь?

Оказалось, что это направление заключалось в том, что закон сохранения четности был несправедлив для слабых взаимодействий. Но для того, чтобы опровергнуть принятые ранее идеи, сначала надо было показать, почему опрометчивая очевидность этих идей несостоятельна. Ли и Янг подробно исследовали этот вопрос и в мае 1956 г. пришли к следующим выводам:

а) известные эксперименты по слабым взаимодействиям на самом деле не имеют никакого отношения к вопросу о сохранении четности;

б) при сильных взаимодействиях—т. е. взаимодействиях класса 1 и класса 2 (таблица)—действительно имеется много экспериментов, которые доказывают с большой степенью точности, что четность сохраняется. Однако эта степень точности недостаточна, чтобы обнаружить нарушение закона сохранения четности в слабых взаимодействиях.

Очень удивительным оказался тот факт, что без экспериментального, подтверждения в течение очень долгого времени считалось, что в слабых взаимодействиях справедлив закон сохранения четности. Но еще более удивительной казалась надежда на то, что так хорошо изученный физиками закон пространственно-временной симметрии может оказаться нарушенным. Как раз эта надежда не привлекала нас. Скорее, так сказать, мы пришли к ней в результате крушения надежд на раскрытие «загадки  $\theta$ — $\tau$ » в многочисленных попытках другого рода.

В физике известен закон сохранения—сохранение изотопического спина, —который выполняется для взаимодействий класса 1, но оказывается несправедливым, если включаются более слабые взаимодействия. Однако на такую возможность приближенно выполняющегося закона симметрии нельзя было надеяться для симметрии, связанной с пространством и временем. В самом деле, и сейчас заманчивыми кажутся предположения, что в слабых взаимодействиях обнаружено нарушение закона сохранения четности и не обнаружено, что описание слабых взаимодействий в рамках обычных представлений о пространстве и времени является несправедливым.

Почему так случилось, что среди множества экспериментов по  $\beta$ -распаду—наиболее исчерпывающе исследованному процессу из числа слабых взаимодействий—не было указаний на сохранение четности в слабых взаимодействиях? Это случилось благодаря комбинации двух причин.

Во-первых, потому, что у нейтрино отсутствует масса, что приводит к неопределенности, не позволяющей  $I_2$  получить косвенных указаний о выполнении закона сохранения четности из таких простых экспериментов, как изучение  $\beta$ -спектра. Во-вторых, чтобы непосредственно проверить выполнение закона сохранения четности в  $\beta$ -распаде, недостаточно изучать только четности ядерных уровней, как это всегда делалось. Надо изучать сохранение четности в целом во всем процессе распада. Другими словами,



надо было предложить эксперимент, который бы проверил симметрию правого и левого в  $\beta$ -распаде. Такие эксперименты не были сделаны.

После того как стали ясны эти положения, легко было указать эксперименты, в которых однозначно можно было проверить ранее не проверенные предположения о том, что четность сохраняется в слабых взаимодействиях. Ряд таких экспериментов, включающих  $\beta$ -распад,  $\pi$ — $\mu$ -распад,  $\mu$ — $e$ -распад и распады странных частиц, были предложены летом 1956 г. Ли. Основные принципы, лежащие в основе этих экспериментов, были следующие: конструировалось два экспериментальных устройства, одно из которых являлось зеркальным отражением другого; экспериментальные устройства включали в себя слабые взаимодействия; далее определялось, всегда ли дают эти два устройства одни и те же результаты (результаты снимались со шкалы или счетчика). Если результаты не одни и те же, то симметрии между правым и левым (в том смысле, в каком мы ее всегда понимали) не существует.

Техника совмещения измерений по  $\beta$ -распаду с использованием низких температур прежде не была известна и таила в себе большие трудности, которые успешно были разрешены авторами экспериментальной работы. Научная отвага и искусство, проявленные при осуществлении этого эксперимента, открыли ясный путь для проведенных за истекший год замечательных исследований вопроса о сохранении четности.

Результатом эксперимента Ву, Амблера и их сотрудников явилось обнаружение, что имеется большая разница в показаниях двух счетных устройств. Обнаруженная асимметрия обуславливалась  $\beta$ -распадом кобальта, так как все прочее экспериментальное оборудование обладало симметрией между правым и левым.

Вслед за тем, как эти результаты стали известны, вскоре было проведено большое количество экспериментов, которые указали на

нарушение закона сохранения четности в различных слабых взаимодействиях.

Крушение закона сохранения четности поставило в центр внимания физиков целый ряд вопросов, связанных с законами симметрии.

1. Эксперименты Ву, Амблера и сотрудников также показали, что в  $\beta$ -распаде нарушается инвариантность относительно зарядового сопряжения. Другая симметрия, называемая инвариантностью относительно отражения времени, до сих пор экспериментально изучается для случая слабых взаимодействий.

Три дискретных преобразования—преобразование зеркального отражения, преобразование зарядового сопряжения и преобразование отражения времени—связаны между собой важной теоремой, называемой CPT-теоремой. Используя эту теорему, можно получить 13 ряд общих результатов, касающихся возможности экспериментально обнаружить в слабых взаимодействиях нарушение трех упомянутых симметрии. Особый интерес представляет возможность, что слабые взаимодействия сохраняют инвариантность относительно обращения времени.

В этом случае из CPT-теоремы следует, что хотя закон сохранения четности и нарушается, но симметрия между правым и левым остается, если только переводить при зеркальном отражении частицы в античастицы.

Важно отметить, что при обычно принятом определении отражения электрическое поле есть вектор, а магнитное поле—псевдовектор. В рассмотренном же случае инвариантности относительно отражения времени электрическое поле есть псевдовектор, а магнитное—вектор.

2. Другим широко обсуждающимся законом симметрии является закон , приводящий к сохранению изотопического спина. В последние годы применение этого закона симметрии привело к замечательному эмпирическому упорядочению явлений, связанных со странными частицами.

Однако этот закон—наименее понятный из всех законов симметрии. В отличие от преобразования Лоренца и преобразования отражения этот закон не является законом «геометрической» симметрии, связанной с инвариантными свойствами пространства—времени. В отличие от преобразования зарядового сопряжения он не возникает из алгебраических свойств комплексных чисел, появляющихся в квантовой механике. В этом смысле он похож на законы сохранения заряда и тяжелых частиц. Однако последние законы являются точными, в то время как закон сохранения изотопического спина нарушается под действием электромагнитных взаимодействий и слабых взаимодействий. Несомненно, что на сегодня одной из важнейших задач в области физики высоких энергий является выяснение вопроса об обосновании закона сохранения изотопического спина и выяснение связи этого закона с прочими законами симметрии. 3. Мы уже отмечали, что для всех типов слабых процессов величины силы взаимодействия примерно одинаковы.

Проведенные за последний год экспериментальные исследования по не сохранению четности указывают с большой вероятностью также на то, что для различных слабых процессов свойства, относящиеся к не сохранению четности и к нарушению инвариантности относительно зарядового сопряжения, близки. Таким образом, слабые процессы годятся для того, чтобы отличать правое от левого (если только как-то определена разница между веществом и антивеществом). Слабые процессы также могут быть использованы для того, чтобы отличить вещество от антивещества (если только определена разница между правым и левым). Если нарушается инвариантность относительно обращения времени, то слабые процессы могут служить даже для независимого разделения правого от левого и вещества от антивещества. Здесь чувствуется, что происхождение слабых взаимодействий тесно связано с вопросом о возможности отличить правое от левого и вещество от антивещества.

## 2.2. Интегралы движения

Предположим, что оператор  $F$  не зависит от времени явно и

коммутирует с оператором Гамильтона  $\hat{H}$ . В этом случае, оператор производной по времени равен нулю, и среднее значение величины  $F$  не изменяется во времени

$$\dot{\bar{F}} = 0.$$

Постоянна во времени также вероятность того, что при измерении  $F$  мы получим какое-то возможное значение  $F_n$  этой величины. Действительно, эта вероятность дается квадратом модуля  $|c_n(t)|^2$  коэффициента разложения волновой функции  $\psi(x, t)$ , описывающей состояние системы в момент времени  $t$ , по собственным функциям оператора  $\hat{F}$ . Поскольку, однако,

оператор  $\hat{F}$  коммутирует с оператором  $\hat{H}$ , оба оператора имеют общие собственные функции  $\psi_n(x, t) = \psi_n(x) e^{-\frac{i}{\hbar} E_n t}$  (см. § 23). Разложение  $\psi(x, t)$  по собственным функциям оператора  $F$  можно представить в виде

$$\psi(x, t) = \sum_n c_n(0) e^{-\frac{i}{\hbar} E_n t} \psi_n(x) = \sum_n c_n(t) \psi_n(x).$$

Следовательно,

$$|c_n(t)|^2 = |c_n(0)|^2 = \text{const.}$$

Такие величины в квантовой механике, так же как и в механике классической, принято именовать интегралами движения. Из сказанного ясно, что квантомеханическая величина является интегралом движения, если:

- 1) ее оператор не зависит от времени явно;
- 2) этот оператор коммутирует с оператором Гамильтона.

Зная операторы различных квантомеханических величин и оператор Гамильтона, можно найти законы сохранения.

Нахождение законов сохранения в квантовой механике столь же существенно для исследования движения системы, как и в классической механике. Как и в классической механике, законы сохранения импульса и момента количества движения тесно связаны со свойствами однородности и изотропии пространства. Так, из изотропии пространства следует, что гамильтониан замкнутой системы или системы в поле сил с центральной симметрией не должен изменяться при произвольном бесконечно малом

повороте. Математически это выражается в том, что гамильтониан должен коммутировать с оператором поворота  $\hat{W}$ . Но оператор поворота на малый угол вокруг некоторой оси (например оси  $z$ ), как мы знаем, связан простым образом с оператором проекции момента количества движения на эту ось. Поэтому следствием коммутации оператора  $\hat{W}_z$  с гамильтонианом

является коммутация с гамильтонианом оператора  $\hat{L}_z$ , откуда, и вытекает закон сохранения этой величины. То обстоятельство, что мы рассматривали поворот лишь на малый угол, несущественно, поскольку поворот на конечный угол можно разбить на совокупность малых поворотов.

Итак, мы видим, что сохранение момента количества движения связано с изотропией пространства. Аналогичным образом легко видеть, что сохранение импульса связано с однородностью пространства. Действительно, из однородности пространства следует, что оператор сдвига не должен изменять гамильтониан замкнутой системы, т. е. должен коммутировать с ним. Но так как оператор сдвига  $R$  связан с оператором соответствующей проекции импульса, то мы сразу приходим к закону сохранения импульса.

Закон сохранения энергии замкнутой системы или системы в стационарных внешних полях можно связать с произвольностью выбора начала отсчета времени (однородность во времени). Это означает, что законы движения системы не должны зависеть от выбора начала отсчета времени.

Введем оператор трансляции на малый интервал времени  $\delta t$ ,  $\hat{\mathcal{Y}}(\delta t)$ , определяемый соотношением

$$\hat{\mathcal{Y}}(\delta t) \psi(x, t) = \psi(x, t + \delta t).$$

Раскладывая функцию  $\psi(x, t + \delta t)$  в ряд по малому интервалу  $\delta t$  и ограничиваясь членами первого порядка малости, получим

$$\hat{\mathcal{Y}}(\delta t) \psi(x, t) = \left( 1 + \delta t \frac{\partial}{\partial t} \right) \psi(x, t).$$

Отсюда следует, что оператор  $\hat{\mathcal{Y}}(\delta t)$  имеет вид

$$\hat{\mathcal{Y}}(\delta t) = 1 + \delta t \frac{\partial}{\partial t}$$

Требование независимости законов движения системы от выбора начала отсчета времени выражается коммутацией оператора  $\hat{\mathcal{Y}}(\delta t)$  с гамильтонианом системы

$$\hat{\mathcal{Y}}(\delta t) \hat{H} = \hat{H} \hat{\mathcal{Y}}(\delta t).$$

Используя для  $\hat{\mathcal{Y}}(\delta t)$  выражение, мы можем переписать это соотношение в виде

$$\frac{\partial \hat{H}}{\partial t} = 0.$$

Это равенство и выражает закон сохранения энергии. Действительно,

оператор  $\hat{\mathcal{Y}}(\delta t)$  заведомо коммутирует сам с собой и условие, означающее закон сохранения энергии, сводится к этому уравнению.

Существованию интеграла движения отвечает простое свойство волновой функции. Если оператор  $\hat{I}$  отвечает некоторой сохраняющейся величине, то наряду с волновой функцией  $\psi$  уравнению Шредингера будет удовлетворять и волновая функция

$$\psi' = e^{i\alpha\hat{I}}\psi,$$

где  $\alpha$  — произвольное вещественное число, а оператор  $e^{i\alpha\hat{I}}$  понимается в смысле разложения в степенной ряд

$$e^{i\alpha\hat{I}} = 1 + i\alpha\hat{I} + \frac{(i\alpha)^2}{2}\hat{I}^2 + \dots$$

Действительно, подставляя  $\psi'$  в уравнение Шредингера, находим

$$i\hbar \frac{\partial \psi'}{\partial t} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} e^{i\alpha\hat{I}} \psi = \hat{H} e^{i\alpha\hat{I}} \psi.$$

Но поскольку  $\psi$ , как оператор сохраняющейся величины, удовлетворяет условию коммутации

$$\hat{I}\hat{H} - \hat{H}\hat{I} = 0, \quad \frac{\partial \hat{I}}{\partial t} = 0,$$

имеем

$$\frac{\partial}{\partial t} (e^{i\alpha\hat{I}} \psi) = e^{i\alpha\hat{I}} \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad \hat{H} e^{i\alpha\hat{I}} \psi = e^{i\alpha\hat{I}} \hat{H} \psi$$

и это уравнение удовлетворяется непосредственно. Рассмотрим некоторые простые примеры. Начнем со случая свободной частицы. Гамильтониан при этом будет иметь вид

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} (\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2).$$

Очевидно, что

$$[\hat{H}, \hat{p}_x] = [\hat{H}, \hat{p}_y] = [\hat{H}, \hat{p}_z] = 0.$$

Следовательно,

$$\hat{p}_x = \hat{p}_y = \hat{p}_z = 0.$$

Если свободная частица в какой-то начальный момент находилась в состоянии с заданным импульсом, то это значение импульса сохраняется во времени.

В качестве другого примера рассмотрим частицу, движущуюся в поле, создаваемом бесконечной однородной плоскостью (плоскость  $xy$ ). Потенциальная энергия частицы в таком поле зависит только от расстояния до плоскости  $U=U(|z|)$ , так что гамильтониан имеет вид

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(|z|).$$

С таким гамильтонианом коммутируют операторы  $\hat{p}_x$  и  $\hat{p}_y$ . Это означает, что при движении в поле однородной плоскости ( $xy$ ) сохраняются компоненты импульса частицы  $p_x$  и  $p_y$  и  $z$ -я компонента момента количества движения  $l_z$ .

Рассмотренные выше законы сохранения — закон сохранения энергии, импульса и момента количества движения являются квантово механическими аналогами законов сохранения классической механики. Оказывается, однако, что в квантовой механике существуют и законы сохранения, не имеющие классического аналога. Один из таких законов тесно связан со свойствами пространства и имеет весьма общий характер. Именно, гамильтониан замкнутой системы не должен изменяться при следующих преобразованиях координат:

- 1) трансляции начала координат на произвольный отрезок;
- 2) повороте на произвольный угол;
- 3) преобразовании инверсии в начале координат, т. е. замене  $x_i \rightarrow -x_i$ , при которой знаки всех координат изменяются на обратные.

С первыми двумя преобразованиями, как мы видели в предыдущем параграфе, были связаны закон сохранения импульса и момента количества движения. С преобразованием инверсии в квантовой механике оказывается связанным еще один общий закон сохранения. Подобно введенным ранее



операторам пере- носа и поворота можно ввести и соответствующий оператор инверсии  $\hat{I}$

$$\hat{I}\psi(\mathbf{r}, t) = a\psi(-\mathbf{r}, t),$$

где  $a$  — некоторая постоянная.

При двухкратном применении оператора инверсии  $\hat{I}$  мы приходим к исходному состоянию. Отсюда следует, что  $a^2 = 1$ , т. е.  $a = \pm 1$ . Таким образом, вообще, выполняется условие

$$\hat{I}\psi(\mathbf{r}, t) = \pm \psi(-\mathbf{r}, t),$$

т. е. при инверсии может менять знак непосредственно сама волновая функция, а не только аргумент  $\mathbf{r}$ , от которого она зависит. Свойство волновой функции преобразовываться при инверсии с  $a = +1$  или  $a = -1$  зависит от внутренних свойств частиц, описываемых этой волновой функцией.

О частицах, которые описываются волновыми функциями, удовлетворяющими условию

$$\hat{I}\psi(\mathbf{r}, t) = \psi(-\mathbf{r}, t),$$

говорят, что они обладают положительной внутренней четностью. Наоборот, частицы, которые описываются волновыми функциями, удовлетворяющими условию

$$\hat{I}\psi(\mathbf{r}, t) = -\psi(-\mathbf{r}, t),$$

имеют отрицательную внутреннюю четность.

Предположим, что гамильтониан замкнутой системы имеет Вид

$$\hat{H} = \sum_i -\frac{\hbar^2}{2m_i} \Delta_i + \frac{1}{2} \sum_{i \neq k} U_{ik}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|).$$

Легко видеть, что этот гамильтониан не изменяется при замене  $\mathbf{r}_i \rightarrow -\mathbf{r}_i$ , т. е. он удовлетворяет условию

$$\hat{I}\hat{H}\psi = \hat{H}\hat{I}\psi.$$

Это означает, что оператор  $\hat{I}$  коммутирует с гамильтонианом

$$\hat{I} \hat{H} = \hat{H} \hat{I}.$$

Определим собственные значения К оператора инверсии

$$\hat{I} \psi_\lambda(x) = \lambda \psi_\lambda(x).$$

Применим к этому уравнению оператор инверсии еще раз. Так как при двукратном отражении мы возвращаемся к исходному значению координат, то это преобразование является тождественным

$$\hat{I}^2 \psi_\lambda = \psi_\lambda = \lambda \hat{I} \psi_\lambda = \lambda^2 \psi_\lambda.$$

Отсюда получаем, что собственные значения  $\lambda$  равны  $\pm 1$ . О состоянии, которому отвечает  $\lambda = +1$ , говорят, что оно имеет положительную четность или является четным. Наоборот, состояние с  $\lambda = -1$  имеет отрицательную четность или является нечетным. Если оператор четности коммутирует с оператором Гамильтона, то имеет место закон сохранения четности. Закон сохранения четности, как и другие законы сохранения, накладывает определенные ограничения на возможные изменения состояний системы. Именно, если система была в четном состоянии, то она будет оставаться в этом состоянии, не переходя в нечетное состояние. Аналогично дело обстоит, естественно, и с системой, находящейся в нечетном состоянии.

Определим четность состояния частицы с моментом количества движения, равным 1. То обстоятельство, что момент количества движения и четность могут быть определены одновременно, следует из коммутации соответствующих операторов:

$$\{\hat{I}, l_x\} = 0; \quad \{\hat{I}, l_y\} = 0; \quad \{\hat{I}, l_z\} = 0; \quad \{\hat{I}, \hat{l}^2\} = 0.$$

Из самих выражений для операторов момента  $\bar{l}_x, \bar{l}_y, \bar{l}_z$  ясно, что они не изменяются при преобразовании инверсии. В сферической системе координат преобразование инверсии имеет вид

$$r \rightarrow r; \quad \vartheta \rightarrow \pi - \vartheta; \quad \varphi \rightarrow \varphi + \pi.$$

Зависимость волновой функции частицы с определенным моментом  $l$  от углов  $\vartheta, \varphi$  дается сферической функцией  $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ . При преобразовании инверсии имеем  $\cos \vartheta \rightarrow \cos \vartheta$  и  $e^{im\varphi} \rightarrow (-1)^m e^{im\varphi}$ . Как преобразуется присоединенный полином Лежандра  $P_l^m(\xi)$  при изменении знака его аргумента, легко определить из формулы (30,17). Так как  $P_l(-\xi) = (-1)^l P_l(\xi)$ , то мы получаем, что  $P_l^m(-\xi) = (-1)^{l+m} P_l^m(\xi)$ . Учитывая также множитель  $(-1)^l$ , который Дает функция  $e^{im\varphi}$ , находим, что при инверсии волновая функция в целом умножается на множитель  $(-1)^l$ . Принимая во внимание также множитель  $a = \pm 1$ , связанный с внутренними свойствами частиц, получаем:

$$\lambda = (-1)^l a.$$

Таким образом, состояния с четными  $l$  имеют положительную четность, если  $a = 1$ , и отрицательную, если  $a = -1$ . Состояния с нечетными  $l$  имеют соответственно отрицательную четность при  $a = 1$  и положительную, если  $a = -1$ . Если мы имеем систему невзаимодействующих частиц, то четность системы определяется произведением четностей отдельных частиц. Действительно, волновая функция системы невзаимодействующих частиц может быть записана в виде произведения волновых функций отдельных частиц. Но отсюда сразу следует, что при преобразовании инверсии четности, относящиеся к отдельным частицам, перемножаются. Если каждая из частиц находится в состоянии с определенным моментом количества движения (движение в центральном поле), то четность всей системы может быть записана в виде

$$\lambda = (-1)^{\sum l_k} \prod_k a_k,$$

где второй множитель определяется произведением внутренних четностей частиц.

Наряду с другими законами сохранения закон сохранения четности является одним из наиболее общих законов природы. Невозможность переходов замкнутой квантовомеханической системы из состояний с одной четностью в состояния с другой четностью— так называемых запрещенных переходов, подтверждается обширным экспериментальным материалом как атомной, так и ядерной физики. Однако в последнее время было установлено, что закон сохранения четности не является универсальным физическим законом. При некоторых процессах, происходящих с элементарными частицами, закон сохранения четности нарушается.

### **Выводы**

Во второй главе ВКР рассмотрены вопросы квантовой механики относительно законов сохранения.

Такие величины в квантовой механике, так же как и в механике классической, принято именовать интегралами движения. Из сказанного ясно, что квантомеханическая величина является интегралом движения, если:

- 1) ее оператор не зависит от времени явно;
- 2) этот оператор коммутирует с оператором Гамильтона.

Зная операторы различных квантомеханических величин и оператор Гамильтона, можно найти законы сохранения.

В данной главе ВКР рассмотрены следующие законы сохранения:

1. Закон сохранения энергии.
2. Закон сохранения импульса.
3. Закон сохранения момента количества движения и его проекции на ось  $z$ .
4. Закон сохранения четности.

Как видно из вышеизложенного в квантовой механике существует закон сохранения, не имеющего классического аналога. Это закон сохранения четности. Наряду с другими законами сохранения закон

сохранения четности является одним из наиболее общих законов природы. Невозможность переходов замкнутой квантовомеханической системы из состояний с одной четностью в состояния с другой четностью— так называемых запрещенных переходов, подтверждается обширным экспериментальным материалом как атомной, так и ядерной физики. Однако в последнее время было установлено, что закон сохранения четности не является универсальным физическим законом. При некоторых процессах, происходящих с элементарными частицами, закон сохранения четности нарушается.

### **Заключение**

В первой главе ВКР рассмотрены вопросы законов сохранения в классической механике. Из общих положений классической механики следует, что бесконечно малая сила вызывает бесконечно малое изменение состояния системы. Поэтому, все механические величины, зависящие от состояния системы, как, например, энергия, импульс и т.п. являются непрерывными функциями состояния. Дискретность состояний и скачкообразное изменение состояний микрочастиц непосредственно противоречит общему принципу.

В первой главе ВКР рассмотрены следующие законы и по ним получены выводы:

1. Масса и закон её сохранения.

Исследования показали, что инертная и гравитационная массы численно равны друг другу и являются как бы двумя проявлениями одного и того же свойства тел. Как известно, тождественность инерционной и гравитационной масс положена в основу общей теории относительности Эйнштейна, в которой геометрические свойства пространства связаны с распределением наличных масс.

## 2. Закон сохранения и превращения энергии.

Закон сохранения и превращения энергии представляет собой опытный закон, ибо он непосредственно может быть проверен сравнением работы всех внешних действий при различных способах перехода системы из одного определенного состояния в другое.

## 3. Законы сохранения импульса и момента количества движения.

В классической механике, кроме скалярного интеграла движения - энергии, возможны два векторных: импульс и момент количества движения. Импульс, или количество движения  $P$ , есть произведение массы  $m$  на скорость тела  $v$ ; импульс системы материальных точек равен сумме их импульсов; момент количества движения определяется как

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{P}],$$

где  $r$  - радиус-вектор точки;  $P$  - ее импульс.

Закон сохранения импульса (или какой-либо его проекции) справедлив для изолированной системы (или при наличии направления, в котором слагающая поля равна нулю). Так, при движении заряженной частицы в однородном электрическом поле будут сохраняться две проекции ее импульса в плоскости, перпендикулярной полю.

Во второй главе ВКР рассмотрены вопросы квантовой механики относительно законов сохранения.

Такие величины в квантовой механике, так же как и в механике классической, принято именовать интегралами движения. Из сказанного ясно, что квантомеханическая величина является интегралом движения, если:

- 1) ее оператор не зависит от времени явно;
- 2) этот оператор коммутирует с оператором Гамильтона.

Зная операторы различных квантомеханических величин и оператор Гамильтона, можно найти законы сохранения.

В данной главе ВКР рассмотрены следующие законы сохранения:

1. Закон сохранения энергии.
2. Закон сохранения импульса.
3. Закон сохранения момента количества движения и его проекции на ось  $z$ .
4. Закон сохранения четности.

Как видно из вышеизложенного в квантовой механике существует закон сохранения, не имеющего классического аналога. Это закон сохранения четности. Наряду с другими законами сохранения закон сохранения четности является одним из наиболее общих законов природы. Невозможность переходов замкнутой квантовомеханической системы из состояний с одной четностью в состояния с другой четностью— так называемых запрещенных переходов, подтверждается обширным экспериментальным материалом как атомной, так и ядерной физики. Однако в последнее время было установлено, что закон сохранения четности не является универсальным физическим законом. При некоторых процессах, происходящих с элементарными частицами, закон сохранения четности нарушается.

## Литература

1. Постановление Президента Республики Узбекистан Шавката Мирзияева "О мерах по дальнейшему развитию системы высшего образования" от 20 апреля 2017 года.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. (Серия: Теоретическая физика, том 3). 4-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.
3. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Физматгиз. т.2, 1982, 333-380 стр.
4. Шпольский Э.В.. Атомная физика, т.1,2. М.: Наука, 1974. 368-420 стр.



5. Матвеев А.Н. Атомная физика, М.: Высшая школа, 1989. 16-52 стр.
6. Гольдин Л.Л. и др. Введения в квантовую физику, М.: Наука, 1989.
7. Гольдин Л.Л. и Г.И.Новикова. Квантовая физика. Вводный курс, М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 163-177 стр.
8. LD Didactic GmbH . Leyboldstrasse 1 . D-50354 Huerth / Germany.

### **Интернет ресурсы**

[www.alleng.ru/d/phys/phys709.htm](http://www.alleng.ru/d/phys/phys709.htm)

[www.newlibrary.ru](http://www.newlibrary.ru) › НАУКА › ФИЗИКА › ОБЩИЕ КУРСЫ

[https://radfiz.org.ua/files/k2/s3/TeopMex/Landau,Lifshic/Landay\\_II.pdf](https://radfiz.org.ua/files/k2/s3/TeopMex/Landau,Lifshic/Landay_II.pdf)