ностью всю сумму энергий частицы и мишени E и E'. Именно поэтому стали строить ускорители на встречных пучках. Например, при лобовом столкновении двух протонов с энергиями по 25 ГэВ энергия в системе центра масс такова же, как при столкновении неподвижного протона с протоном, ускоренным до 1250 ГэВ. Внешний вид ускорителя на встречных пучках показан на фотографии. В действительности не производят лобового столкновения, а пользуются установкой с двумя тороидальными циклотронами, пучки которых перекрещиваются под углом 15°.

Таблица 1

Характеристики лептонов

Название	Символ	Электрический заряд	Масса, МэВ	Время жизни
Электрон	e^-	-1	$0{,}5110023 \pm 0{,}0000014$	$>2\cdot10^{21}$ лет
Позитрон (античастица)	e^+	$+1$	То же	То же
Отрицательный мюон	μ^-	-1	$105{,}65948 \pm 0{,}00035$	$(2{,}1994 \pm 0{,}0006) \times 10^{-6}$ с
Положительный мюон (античастица)	μ^+	$+1$	То же	То же
Электронное нейтрино	ν_e	0	$<0{,}000006$	Стабильно
Электронное антинейтрино	ν_e	0	То же	То же
Мюонное нейтрино	ν_μ	0	$<1{,}2$	Стабильно
Мюонное антинейтрино	$\tilde{\nu}_\mu$	0	То же	То же

Примечание. В настоящее время нет единого мнения по поводу того, какой из мюонов (μ^-, μ^+) считать частицей, а какой — античастицей.

2. Электрон, мюон, нейтрино (лептоны). Частицы, образующие давно известное семейство, включающее электрон, называют лептонами. К ним относятся e^- (электрон), μ^- (μ-мезон, или мюон), ν_e (электронное нейтрино), ν_μ (мюонное нейтрино) и соответствующие античастицы. Лептоны имеют малую по сравнению с адронами (семейство нуклонов и мезонов, см. примеч. 3) массу и не участвуют в сильных взаимодействиях. Все лептоны имеют спин 1/2 (по поводу понятия *спин* см. примеч. 16) и подчиняются статистике Ферми (см. примеч. 62). Полагают, что в отличие от адронов они имеют простую структуру.

Сведения о лептонах приведены в табл. 1.

3. Странные частицы, резонансы, адроны. Было время, когда считали, что протон (p), нейтрон (n), из которых построены атомные ядра (протон и нейтрон называют нуклонами), и π-мезоны (π^+, π^0, π^-), носители сильного взаимодействия (ядерных сил) между нуклонами, образуют замкнутую систему. Но изучение реакций при высоких энергиях (в космическом излучении и на ускорителях) показало, что в нуклонах и мезонах скрыты родственные им нестабильные частицы. Одни из них получили название странных частиц; их времена жизни около 10^{-10} с, и все они распадаются в результате слабого взаимодействия. О других из этих частиц говорят, как о резонансах. Времена жизни резонансов порядка 10^{-24} с, и распадаются они из-за сильного взаимодействия.

Таблица 2а

Гипероны (ферми-частицы, или фермионы)

Название	Символ	S	Y	I	I_3	Q	Масса, МэВ	Время жизни, с
Нуклон	p n	0	+1	1/2	+1/2 −1/2	+1 0	938,2796±0,0027 939,5731±0,0027	>2·10³⁰ лет 918±14
Ламбда	Λ	−1	0	0	0	0	1115,6±0,05	(2,624±0,014)·10⁻¹⁰
Сигма	Σ^+ Σ^0 Σ^-	−1	0	1	+1 0 −1	+1 0 −1	1189,37±0,06 1192,48±0,08 1197,35±0,06	(0,800±0,06)·10⁻¹⁰ <1,0·10⁻¹⁴ (1,482±0,017)·10⁻¹⁰
Кси	Ξ_0 Ξ^-	−2	−1	1/2	+1/2 −1/2	0 −1	1314,9±0,6 1321,29±0,14	(2,96±0,12)·10⁻¹⁰ (1,652±0,023)·10⁻¹⁰
Омега	Ω^-	−3	−2	0	0	−1	1672,2±0,4	(1,3±0,3)·10⁻¹⁰
Зэт	Z^+	+2	+2	0	0	+1	1700÷1800?	10⁻²³

Примечание. Данные этой таблицы можно описать формулой $Q = I_3 + Y/2$, в которой Q принимает значения 0 и ± 1. При этом $Y \leqslant 2$, $I \leqslant 1$. Из этой формулы видно, что если Y — четное (нечетное) число, то I — целое (полуцелое).

Странные частицы различают с помощью физической величины, родственной заряду и называемой странностью (S). Нуклоны имеют изотопический спин 1/2 (изотопический спин, или изоспин, — величина, похожая на спин). Считают, что протон и нейтрон — состояния нуклона, характеризуемые третьей компонентой изоспина I_3, равной, соответственно, 1/2 и −1/2. Установлено, что странные частицы тоже имеют изотопический спин. Их можно описать, как состояния, различающиеся значением S. Семейство нуклонов и открытых до настоящего времени мезонов (частицы этого семейства называют адронами) представлено в табл. 2 а, б.

Таблица 2б

Мезоны (бозе-частицы, или бозоны)

Название	Символ	S	Y	I	I_3	Q	Масса, МэВ	Время жизни, с
π-мезон	π^+	0	0	1	+1	+1	139,57	$(2,6030\pm0,0023)\cdot10^{-8}$
	π^0				0	0	134,96	$(0,84\pm0,10)\cdot10^{-16}$
	π^-				−1	−1	139,57	$(2,6030\pm0,0023)\cdot10^{-8}$
K-мезон	K^+	+1	+1	1/2	+1/2	+1	493,71	$(1,237\pm0,0026)\cdot10^{-8}$
	K^0				−1/2	0	497,70	K_S^0: $(0,8947\pm0,0033)\cdot10^{-10}$
	$\overline{K}^0$	−1	−1	1/2	+1/2		497,70	K_L^0: $(5,197\pm0,040)\cdot10^{-8}$
	K^-				−1/2	−1	493,71	$(1,2371\pm0,0026)\cdot10^{-8}$
η-мезон	η	0	0	0	0	0	$548,8\pm0,6$	10^{-21}
η'-мезон	η'	0	0	0	0	0	958	10^{-21}

Примечание. В современном формализме $\overline{K^0}$ и K^- не являются независимыми частицами, это просто античастицы для K^0 и K^+. Тем не менее, их обычно приводят в таблицах. При распадах K^0 и $\overline{K^0}$ смешиваются и возникают два других состояния K_S^0 и K_L^0, важнейшие схемы распада которых $K_S^0 \to (\pi\pi^0$, $K_L^0 \to (\pi\pi\pi)^0$.

Физический смысл странности и изотопического спина, применяемых для классификации адронов, не очень ясен; говорят, что это — внутренние квантовые числа, и считают, что они могут оказаться полезными при описании структуры элементарных частиц. С помощью величин S, I, I_3 удается записать правила отбора при сильных и слабых взаимодействиях. Если Δ — изменение соответствующей величины при реакции, то

$$\text{в сильных взаимодействиях} \begin{cases} \Delta S = 0; \\ |\Delta I| = 0; \end{cases}$$

$$\text{в слабых взаимодействиях} \begin{cases} \Delta S = \pm 1, \ (0); \\ |\Delta I| = 1/2, \ (0). \end{cases}$$

Например,

сильные взаимодействия: $\pi^- + p \to K^0 + \Lambda$;

$S \quad 0 \quad 0 \quad +1 \quad -1$

$K^- + p \to K^+ + K^0 + \Omega^-$;

$S \quad -1 \quad 0 \quad +1 \quad +1 \quad -3$

слабые взаимодействия: $\Lambda \to p + \pi^-$;

$S \quad -1 \quad 0 \quad 0$

$\Omega \to \Xi^- + \pi_0$ (или $\Lambda + K^-$);

$S \quad -3 \quad -2 \quad 0 \quad -1 \quad -1$

По правилу Накано — Нишиджимы — Гелл-Мана квантовое число электрического заряда частицы Q выражается через третью компоненту изоспина I_3 и гиперзаряд Y:

$$Q = I_3 + Y/2.$$

При этом $Y = S + B$ (B — число гиперонов; для мезонов $B = 0$, для нуклинов $B = +1$, для антинуклонов $B = -1$).

Все странные частицы рождаются в сильных взаимодействиях. а распадаются в результате слабого взаимодействия. Для оценки относительной интенсивности слабого и сильного взаимодействий (отношения их констант связи) можно рассуждать следующим образом. Протяженность частицы массы m равна ее комптоновской длине волны $\lambda = \hbar/mc \approx 2 \cdot 10^{-14}$ см, а время, за которое частица проходит это расстояние со скоростью света (характеристическое время нуклона), $\tau_n \sim \lambda/c \approx 10^{-24}$ с. По порядку величины это — время жизни при распадах за счет сильного взаимодействия. А время жизни при слабом взаимодействии составляет около 10^{-10} с. Следовательно, отношение интенсивностей сильного и слабого взаимодействий равно примерно 10^{-14}.

При столкновениях адронов высокой энергии появляются ультракороткоживущие возбужденные состояния (резонансы). Для выявления резонанса строят зависимость от энергии числа частиц, возникающих в результате столкновения π-мезона с протоном. Оказывается, что при некоторых энергиях E_i ($i = 1, 2, \ldots$) на кривой имеются плавные пики. Эти пики связывают с испусканием резонансов — частиц с некоторым временем жизни, массу которых вычисляют по энергии E_i, соответствующей максимуму. Полуширину

пика, характеризующую неопределенность массы (энергии) резонанса, обозначают Γ_i.

По соотношению неопределенностей Гейзенберга $\Delta E \Delta t \sim \hbar$. Полагая $\Gamma_i \to \Delta E$, $\Delta t \to \tau$, получают

$$\tau = 0{,}65 \cdot 10^{-21}/\Gamma,$$

где время выражено в секундах, если Γ измерено в мегаэлектронвольтах. Например, при столкновениях π-мезонов с нуклонами сначала появляется пик при $E_1 = 1240$ МэВ с $\Gamma_1 \approx 300$ МэВ, что соответствует, согласно записанной формуле, времени жизни $2{,}16 \cdot 10^{-24}$ с. Этот пик характеризует вклад резонансов с массой 1240 МэВ. У этих частиц $I = 3/2$, $S = 0$; они имеют спин 3/2.

Оказалось, что спин резонансов увеличивается при увеличении их массы. Этим они сильно отличаются от странных частиц, спин которых такой же, как у нуклонов или π-мезонов, а странность и изоспин во всех известных опытах принимают небольшие значения ($|S| \leqslant 3$, $I \leqslant 3/2$). По сравнению со спинами странных частиц спины резонансов могут принимать довольно большие значения.

Пользуясь квантовыми числами, например четностью, резонансы можно подразделить на еще более узкие группы. Замечено, что у частиц, относящихся к одной группе, квадрат массы M прямо пропорционален их спину J, $M^2 = \alpha J$ (смысл этого эмпирического соотношения пока не понят).

Резонансы обнаружены также и в группе странных частиц. Следовательно, существование странных частиц и возникновение резонансов обусловлены взаимозависимыми причинами. Полагают, что и те, и другие равно важны для объяснения структуры и взаимодействий адронов.

4. «Математические начала натурфилософии» Ньютона. Написаны в 1685—1686 гг., опубликованы в 1687 г. Книга состоит из трех частей. Изложены основы механики, закон всемирного тяготения, приложения к движению жидкости, движению небесных тел солнечной системы и т. п. Первоисточник — на латинском языке.

5. Материальная точка. Законы движения реальных тел довольно сложны. Ради простоты рассматривают так называемую материальную точку, т. е. идеальное тело, масса которого сосредоточена в геометрической точке (в бесконечно малом объеме). Координаты материальной точки определяют, как координаты геометрической точки пространства. Ньютон обнаружил, что задача притяжения Луны к Земле решается довольно просто, если небесные тела заменить материальными точками соответствующих масс, помещенными в центрах этих тел. При преобразованиях симметрии и лоренц-преобразованиях материальными точками удобно считать элементарные частицы. Ясно, что представление о материальной точке идеализирует действительность и при формулировке правильных законов нужно учитывать протяженность тел, но все же идею материальной точки нелегко отбросить из-за ее удобства.

6. Векторы. Обозначим P и Q две точки в пространстве или на плоскости. Об отрезке, соединяющем P и Q с учетом его направления говорят, как о векторе, и обозначают его **PQ**. Векторными величинами являются, например, сила, скорость, ускорение, импульс, момент количества движения. Раздел математики, изучающий дифференцирование и интегрирование векторов, называют векторным анализом. Векторы в трехмерном евклидовом пространстве находят приложение в механике, гидродинамике, электродинамике.

законы частной теории относительности Эйнштейна можно представить геометрически, пользуясь векторами в четырехмерном псевдоевклидовом пространстве Минковского (см. примеч. 38). Приставка *псевдо* здесь означает, что если вместо вещественной четвертой координаты использовать координату $x_4 = ict$ и рассматривать x_4 как вещественное число, то в соответствующем пространстве будут справедливы аксиомы евклидовой геометрии. Общую теорию относительности невозможно изложить на языке евклидовой геометрии, при ее формулировке надо пользоваться неевклидовой геометрией с другими (чем у евклидовой) геометрическими характеристиками пространства.

7. Аксиоматика. Гильберт считал, что все теории нужно строить аналогично евклидовой геометрии на основе строгих аксиом. При этом возникает вопрос о связи между различными аксиомами. Современная математика полностью перестроена с помощью аксиоматических методов.

8. Субматерия. Этот термин употребляется в смысле возможности дальнейшего подразделения мельчайших элементарных количеств вещества.

9. Волновая теория света. Сначала, исходя из прямолинейности распространения света, полагали, что он состоит из частиц. После открытия дифракции, заключающейся в изгибании лучей света, и интерференции возникла волновая теория, уподобляющая свет волнам на воде.

10. Автобиография Гейзенберга. Опубликована в 1969 г.

11. Мировое уравнение Гейзенберга. Элементарные частицы — мельчайшие составные части вещества. Согласно современным экспериментальным данным их невозможно разделить на еще более мелкие части. Гейзенберг усмотрел в этом факте основополагающий принцип, согласно которому элементарные частицы — не что иное, как различные состояния единой материи, и надеялся вывести эти состояния из соображений симметрии и таких основных принципов, как лоренц-инвариантность, причинность и т. п. Он искал универсальное уравнение, определяющее состояния материи, и в 1959 г. опубликовал работу, в которой приводилась одна из форм записи его уравнения. Уравнение Гейзенберга согласуется с релятивистской причинностью и удовлетворяет всем мыслимым симметриям и законам сохранения. Но оно недостаточно широко: из него не удается вывести все богатство элементарных частиц, например, нельзя получить открытые позже многочисленные странные частицы, резонансы, лептоны и т. п.

12. Копенгагенская интерпретация. К 1926 г., преимущественно трудами Бора и Гейзенберга, было завершено построение квантовой механики. В качестве фундаментального результата было получено соотношение неопределенностей, смысл которого заключается в том, что значения физических величин, вообще говоря, невозможно предсказать точно. Так как соотношение неопределенностей противоречит принципу причинности доквантовой физики, строго выводимому в ее рамках, в течение многих лет против этого соотношения выдвигали возражения, в ответ на которые в Институте теоретической физики в Копенгагене разрабатывалась, в основном Бором, копенгагенская интерпретация квантовой механики. В конце концов все возражения были сняты, а боровская интерпретация квантовой механики получила повсеместное признание.

Наиболее сильным критиком был Эйнштейн. Он говорил: «Я не могу представить себе, чтобы господь бог любил играть в кости». Эйнштейн считал, что квантовая механика как способ описания природы неполна, так как не позволяет сохранить строгую причинность. Отвечая на это возражение Эйнштейна, Бор сформулировал принцип дополнительности, согласно которому такие взаимноисключающие способы описания природы, как волна и частица, дополняют друг друга.

Гейзенберг отвечал на критику, опираясь на симметрию законов природы и соотношение неопределенностей. Он указывал, что выдвигаемые критиками возражения противоречат фундаментальной симметрии квантовой механики — симметрии между волной и частицей, или соотношению между парами взаимно сопряженных величин (например, импульсом и координатой, энергией и временем). Соотношение неопределенностей не согласуется с классической причинностью. Однако можно определить квантовую причинность, согласно которой есть причинная связь между изменениями во времени амплитуды вероятности во времениподобных областях, а в пространственноподобных областях события взаимно независимы.

Гейзенберг отмечал, что если для определения положения электрона пользоваться, например, γ-излучением, импульсы которого распределены в некотором интервале, то точное указание положения электрона принципиально невозможно из-за испытываемой им отдачи. Бор говорил, что постоянная Планка h характеризует взаимодействие макроскопической измерительной установки и микроскопического объекта. Но де Бройль отвергал последнее утверждение, указывая, что возможны и микроскопические измерительные установки. Радиоактивный распад происходит стохастически независимо от того, как его измеряют. Измерительная установка, конечно, изменяет меру неопределенности (например, траектория электрона в атоме, имеющем определенную энергию, «полностью» делокализована, а неопределенность как энергии, так и траектории электрона, движущегося в камере Вильсона, «заключена в некоторых пределах»). Тем не менее приходится согласиться с тем, что квантовые явления управляются вероятностными законами.

13. Степени свободы. В механике числом степеней свободы некоторой системы называют число независимых величин, необходимых для определения ее положения. Если система состоит из N частиц, а частицы можно рассматривать как материальные точки, то число степеней свободы такой системы равно $3N$. Величины, характеризующие степени свободы, не обязательно имеют смысл координат материальных точек в прямоугольной системе. Можно пользоваться и другими системами координат, удобными для решения задачи.

Понятие степени свободы употребляется не только в классической механике, но и в других областях физики. Под числом степеней свободы при этом подразумевают число независимых параметров, необходимых для определения состояния системы. Например, в квантовой механике одной из новых степеней свободы является спин. В ядерной физике степенями свободы нуклона считают его изотопический спин и странность.

14. Эйлеровы уравнения движения. Дифференциальным уравнениям вращения волчка, написанным впервые Эйлером, присвоено его имя. Обозначим X, Y, Z координаты в неподвижной системе, а x, y, z — координаты в системе отсчета, жестко связанной с волч-

ком. Если на волчок не действуют внешние силы, то в неподвижной системе отсчета момент количества движения волчка **N** не меняется (**N**=const). Но в системе отсчета, закрепленной на волчке, значение **N** непрерывно изменяется согласно уравнению

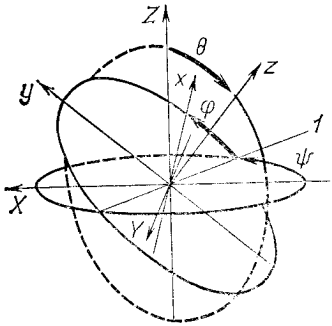
$$d\mathbf{N}/dt = \mathbf{N} \times \boldsymbol{\omega}, \tag{1}$$

называемому уравнением Эйлера. Здесь $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость вращения. По компонентам уравнение (1) записывается в виде

$$\left.\begin{aligned} dL/dt &= Mr - Nq; \\ dM/dt &= Np - Lr; \\ dN/dt &= Lq - Mp. \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Здесь L, M, N — составляющие **N**, а p, q, z — составляющие $\boldsymbol{\omega}$.

15. Эйлеровы углы. На рисунке показана система угловых координат, используемая для описания вращения твердого тела. В неподвижной системе координат направление «вверх» совпадает с положительным направлением оси Z, а сама ось Z определяет вертикаль. В качестве оси z, закрепленной на волчке, выбирают его ось симметрии. Положительное направление вдоль этой оси отсчитывается от центра масс волчка. Угол между осью z и вертикалью обозначают θ. Узловая линия перпендикулярна к направлениям Z и z, а ее положительное направление определяется по правилу правого винта: если вращать правый винт в направлении возрастания θ, то ось винта будет перемещаться в положительном направлении узловой линии. Положительное направление оси x составляет с узловой линией угол φ, а положительное направление оси X — угол ψ.



Эйлеровы углы (*1* — узловая линия)

16. Спин. Когда Бор, основываясь на своей квантовой теории, занимался объяснением регулярности атомных спектров и периодической системы элементов, он заметил, что для совпадения с опытом число состояний электрона необходимо увеличить вдвое. Ученик Бора Паули истолковал эту идею, как указание на существование новой внутренней степени свободы электрона: у электрона есть два собственных состояния, которые могут переходить друг в друга. Эту новую степень свободы назвали спином. Учитывая ее, Паули ввел так называемый принцип запрета (принцип Паули): в системе электронов в одном состоянии не может находиться более одного электрона. С помощью этого принципа Паули успешно объяснил периодическую систему элементов и регулярность атомных спектров. Уленбек и Гаудсмит предложили рассматривать электрон, как протяженное вращающееся заряженное тело. Но им не удалось построить детальную теорию спина. Логичное и математически строгое определение спина как внутренней степени свободы электрона дал Дирак, когда он в 1927 г. открыл свое релятивистское волновое

уравнение. Из уравнения Дирака вытекает правильное значение магнитного момента электрона, не находившее объяснения в модели Уленбека. В теории Дирака спин есть разновидность момента количества движения, а его значение равно $\hbar/2$, где $\hbar = h/2\pi$ (h — постоянная Планка). При рассмотрении движения электрона надо считать, что его полный момент количества движения $\mathbf{J}h$ равен векторной сумме орбитального $L\hbar$ и спинового $\mathbf{S}h$ моментов: $\mathbf{J}\hbar = (\mathbf{L}+\mathbf{S})\hbar$. Остается неясным, почему для электрона величина $\mathbf{S}$ равна не целому числу, а 1/2. Грубо говоря, можно считать, что спин связан с собственным вращением электрона; если же говорить строго, то речь идет о собственных значениях внутреннего момента количества движения. Иными словами, спин — величина, связанная с каким-то внутренним вращением электрона.

17. При вращении недеформируемого твердого тела вокруг неподвижной оси его момент количества движения L связан с моментом инерции I соотношением $L = I\omega$ (ω — угловая скорость). Здесь $I = mr^2$; следовательно, $L = mr^2\omega$. Кроме того, $r\omega = v$. Имея в виду эти соотношения, можно заключить, что при $r \to 0$ момент количества движения $L \to 0$, но если ω возрастает, то L может остаться конечным.

18. Электрон как точечная частица. При выводе уравнения движения электрона Дирак, сохранив законы частной теории относительности и квантовой механики, считал электрон геометрической точкой... Тем не менее, из теории Дирака следует, что электрон имеет внутреннюю степень свободы, называемую спином (см. примеч. 16), которая, как интуитивно представляется, соответствует моменту количества движения при его собственном вращении. Однако вращение точки, лишенной размеров, очень трудно понять с позиции здравого смысла.

19. Напряжения и деформации упругих тел. Изотропное тело под влиянием внешних сил деформируется, а при снятии внешней нагрузки оно, вообще говоря, тотчас же принимает свою первоначальную форму. Это свойство называют упругостью, а изменение формы под действием внешней силы — деформацией. Когда под влиянием внешней силы тело деформируется, в нем возникают внутренние силы, действующие между различными частями этого тела. Их называют напряжениями. По закону Гука для достаточно слабых внешних сил, не нарушающих упругость, напряжения прямо пропорциональны деформациям. Их отношение называют коэффициентом упругости.

20. Симметричный тензор. Деформации упругого тела с изотропными свойствами можно выразить математически с помощью двух независимых величин, имеющих смысл деформаций вдоль двух осей. Вместе они образуют симметричный тензор. При переходе к другой системе отсчета симметрия тензора не меняется.

21. Евклидово пространство и теорема Пифагора. Евклидова геометрия основана на обычном интуитивном восприятии форм. Аксиоматическое изложение этой геометрии впервые систематизировано Евклидом в его труде «Начала геометрии». Гильберт сформулировал ее, как полную аксиоматическую систему. Выражаясь современным языком, евклидова геометрия изучает инварианты при евклидовых метрических преобразованиях. Аксиома о параллельных и теорема Пифагора имеют место в евклидовом пространстве. Пространства, в которых они не справедливы, называют неевклидовыми (в евклидову систему аксиом входят аксиомы связности, порядка,

конгруэнтности, аксиома о параллельных, аксиомы непрерывности и др.).

22. Метрическое пространство. На Земле расстояние между двумя меридианами непостоянно, оно возрастает по мере приближения к экватору и уменьшается при приближении к полюсам. Вообще говоря, расстояния между линиями постоянных координат изменяются (пример, когда эти расстояния неизменны — система прямоугольных координат на плоскости, а противоположный пример — указанная выше система координат на сфере, образованная параллелями и меридианами). В общем случае вводят метрический тензор, имеющий смысл отношения расстояния к разности координат, а пространство, в котором задан метрический тензор, называют метрическим пространством.

23. Дискуссия Маха с Больцманом. Мах полагал, что понятие атома — не более, чем математическая модель, вспомогательное средство для объяснения явлений в химии, электромагнетизме, оптике, и мы не можем узнать, существуют ли атомы в действительности. В противоположность этому, преемник Маха на должности профессора кафедры натуральной философии Венского университета Больцман считал, что атомы — реально существующие частицы. Задаваясь значениями массы атома, его объема, числа атомов в 1 г вещества, он вывел термодинамику газов (см. примеч. 32 и 70).

В конце XIX — начале XX вв. во время лекций в Венской Академии наук по вопросу о существовании атомов велись философские дискуссии. Мах владел основами философии. Он развивал субъективистский тезис о непознаваемости мира (так называемый махизм) и критиковал взгляды Больцмана, как вульгарный материализм. В академических спорах Больцман сильно уступал Маху, но всем известно, что в ходе развития науки основанная на атомной теории Больцмана термодинамика восторжествовала, вытеснив другие точки зрения. Величина k, имеющая смысл газовой постоянной, отнесенной к одной молекуле (эта величина введена Больцманом), названа постоянной Больцмана. Она играет центральную роль в кинетической теории газов.

ЛЕКЦИЯ 2

24. Сольвеевские конгрессы. Бельгийский химик и промышленник Сольвé, владелец предприятий по производству соды, и его друг Нернст, в то время профессор университета в Бельгии, позже (1920 г.) лауреат Нобелевской премии, задумали начиная с 1911 г. с периодичностью около трех лет созывать конгрессы ведущих физиков. Темы конгрессов менялись, но каждый раз на них рассматривали новые, зарождающиеся области физики. Сольвей и сам имел вкус к занятиям новой физикой. Первый конгресс состоялся в Брюсселе (Бельгия), в отеле «Метрополь», с 30 октября по 3 ноября 1911 г. Участниками его были Резерфорд, М. Кюри, Пуанкаре, Лоренц, Планк, Эйнштейн, Вин, де Бройль. Обсуждались физика атома и существование световых квантов. Годы созыва конгрессов и их тематика приведены ниже. Доктор Юкава получал приглашения и присутствовал на нескольких конгрессах, начиная с седьмого.

1. 1911 г. Теория света и кванты.
2. 1913 г. Строение вещества.

3. 1921 г. Атомы и электроны.
4. 1924 г. Электропроводность металлов.
5. 1927 г. Электроны и фотоны.
6. 1930 г. Магнетизм.
7. 1933 г. Атомное ядро.
(Перерыв, связанный со второй мировой войной.)
8. 1948 г. Элементарные частицы.
9. 1951 г. Структура твердого тела.
10. 1954 г. Электроны в металлах.
11. 1958 г. Строение и эволюция Вселенной.
12. 1961 г. Квантовая теория поля.
13. 1964 г. Строение и эволюция Галактики.
14. 1967 г. Фундаментальные проблемы физики элементарных частиц.
15. 1970 г. Природа ядерного синтеза.
16. 1973 г. Астрофизика и гравитация.

25. Классическая теория излучения и Планк. При нагревании тела испускают свет. Это тепловое излучение. В конце XIX в. после появления молекулярной кинетической теории газов была создана статистическая механика, и излучение тоже стали исследовать, рассматривая его как ансамбль гипотетических гармонических осцилляторов. Однако выяснилось, что с помощью статистики, основанной на электромагнитной теории света и ньютоновой механике, не удается создать последовательную теорию теплового излучения. Тогда возникла гипотеза Планка о том, что энергия излучения имеет минимальную «порцию», получившую название кванта. Эта революционная мысль стала отправным пунктом квантовой теории. В своем развитии теория теплового излучения прошла несколько стадий.

1. Закон Стефана — Больцмана (1879 г.). Излучение внутри замкнутой полости является равновесным: энергия его распределена по всем колебательным степеням свободы, а плотность энергии u зависит от абсолютной температуры полости T по закону $u=\sigma T^4$.

2. Закон смещения Вина (1884 г.). Это общий закон распределения полной энергии теплового излучения по частотам колебаний. Если $u(\nu, T)$ — энергетический спектр излучения, то согласно статистической механике, отношение величин ν/T и $\nu^{-3}u$ есть величина постоянная. Это свойство можно выразить в виде

$$u(\nu, T)=\nu^3 f(\nu/T). \qquad (1)$$

То, что f является функцией ν/T, означает, что плотность излучения, зависящая от параметров ν и T, определяется всего одним параметром — отношением ν/T.

3. Формула Вина для излучения (1896 г.). Если тепловое излучение считать ансамблем гармонических осцилляторов и применить к нему статистическую механику, то можно вывести следующую формулу для плотности энергии теплового излучения:

$$u(\nu, T)=A\nu^3 \exp[(-\varepsilon(\nu)/kT]. \qquad (2)$$

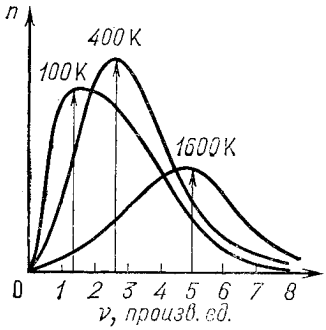
Здесь $\varepsilon(\nu)$ — энергия, приходящаяся на гармонический осциллятор с частотой ν; $k=1{,}38\cdot10^{-18}$ эрг/град — постоянная Больцмана. Эта формула основана на распределении Максвелла — Больцмана, описывающем изменение числа молекул газа в заданном объеме при изменении энергии (скорости) молекул; в определенной области частот она согласуется с экспериментальными результатами, пока-

зывающими, как меняется интенсивность теплового излучения при изменении частоты света (см. рисунки). Вин не мог объяснить, почему излучение должно вести себя подобно молекулам или осцилляторам, это одна из его гипотез. Но идея Вина очень помогла Планку при формулировке понятия кванта энергии.

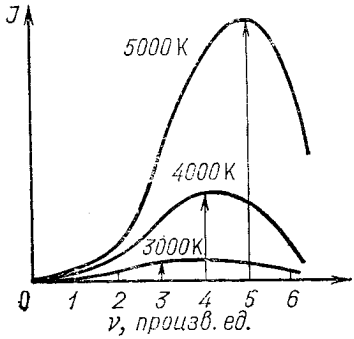
4. Формула Рэлея — Джинса (1900 г.). Пользуясь теорией электромагнетизма, Рэлей и Джинс вывели следующую формулу для спектра энергии теплового излучения:

$$u(\nu,\ T) = (8\pi kT/c^3)\nu^2 d\nu. \qquad (3)$$

Вывод основан на том, что согласно теории электромагнитных волн стоячие волны, находящиеся в равновесии внутри сосуда, могут иметь сколь угодно малую длину волны λ, или сколь угодно вы-



Зависимость числа молекул газа, имеющих заданную скорость, от скорости. По мере роста температуры T положение максимума числа молекул смещается в сторону больших u. Средняя скорость возрастает пропорционально $\sqrt{T}$



Зависимость интенсивности излучения от его частоты. При росте температуры положение максимума интенсивности смещается вправо (в сторону больших ν). Частота ν_m, при которой интенсивность максимальна, прямо пропорциональна T

сокую частоту ν. Однако при этом мы сталкиваемся со следующим затруднением: если E обозначить полную энергию излучения, то, принимая гипотезу о равномерном распределении E по всем частотам (закон равнораспределения по степеням свободы), приходим к тому, что на каждую частоту приходится бесконечно малая энергия E/∞. Формула (3) правильно описывает данные эксперимента только при малых ν/T, а формула (2) — лишь при больших ν/T.

$$L = mr^2v/r = mrv = m\hbar v/mc = \hbar v/c,$$

5. Формула Планка для излучения (1900 г.). Планк исходил из следующих предположений: а) порции энергии излучения не могут быть произвольными; б) порции энергии содержат целые

числа мельчайших единиц (световых квантов); в) энергия отдельного светового кванта пропорциональна первой степени (не квадрату!) частоты ν. Основываясь на статистической механике, он получил, что

$$u(\nu, T) = \varepsilon_0/[\exp(\varepsilon_0/kT) - 1]; \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = h\nu. \quad (5)$$

Это — формула Планка для излучения. При больших ν/T формула Планка переходит в (2), при малых — в (3) и во всей области частот дает результаты, совпадающие с экспериментальными данными. В формуле (5) h — параметр, названный постоянной Планка; $h = 6{,}6 \cdot 10^{-27}$ эрг·с. «Квантовый результат» явно отличается от «классического» при больших $h\nu/kT$. Величина $h\nu/kT$ велика при малых T, т. е. для низкотемпературных явлений (вблизи абсолютного нуля). В этой температурной области обнаружены такие явления, как низкотемпературное поведение удельной теплоемкости, сверхпроводимость, сверхтекучесть. Кроме того, величина $h\nu/kT$ велика при высоких частотах (при рассеянии рентгеновского излучения, поглощении и испускании γ-квантов). Квантованность энергии полностью подтверждена экспериментом.

26. В квантовой механике можно принять, что размер электрона равен его комптоновской длине волны $\hbar/mc$. Тогда для момента количества движения при собственном вращении L получаем

$$L = m\omega r^2 = mvr = \hbar vc.$$

так как $\omega = v/r$. Отсюда видно, что максимальное значение L равно $\hbar$ при $v = c$.

27. Радиус-вектор. Определяет положение тела; имеет длину, равную расстоянию тела от произвольно выбранного начала отсчета, и направлен вдоль прямой, соединяющей тело с началом отсчета.

28. Гамильтон (1805—1865 гг.). Ирландский математик, физик-теоретик и астроном. В 1834 г. придал каноническую форму (см. примеч. 30) уравнениям механики. Впоследствии эта форма записи уравнений механики использовалась при переходе к квантовой механике. Оператор энергии, играющий фундаментальную роль в квантовой механике, назван гамильтонианом в честь Гамильтона.

29. Лагранж (1736—1813 гг.). Французский математик. Применил в механике обобщенные координаты. Записал уравнения механики в форме, удобной для рассмотрения систем с очень большим числом частиц. Лагранжа считают основателем аналитической механики.

30. Канонический формализм. Ньютоновы уравнения движения записывают, пользуясь массой отдельной частицы m, ее скоростью v или импульсом $p = mv$ и силой F. При очень большом числе частиц получается система уравнений, работать с которой весьма сложно, поэтому, вводя относящиеся к одной степени свободы обобщенную координату q_r, обобщенный импульс p_r, переписывая с помощью принципа Даламбера задачу движения, как задачу статики, и применяя вариационный принцип в форме условий равновесия, выводят канонические уравнения Гамильтона

$$\dot{p}_r = -\partial H/\partial q_r; \quad \dot{q}_r = \partial H/\partial p_r,$$

где H — энергия системы. Теперь уравнения записаны в форме, симметричной относительно канонических переменных p_r и q_r.

31. Кватернион. Четыре переменных a, b, c, d, рассматриваемые как одна величина, в форме матрицы $\begin{pmatrix} ab \\ cd \end{pmatrix}$.

32. Статистическая механика Больцмана и Гиббса. В колоссальном ансамбле молекул, составляющих газ, практически невозможно проследить за движением каждой частицы. Но, рассматривая ансамбль в целом, удается определить его средние свойства. Например, предполагая, что молекулы непрерывно бомбардируют стенки сосуда, можно вычислить среднее значение силы, действующей на единицу поверхности стенки, т. е. давление газа. Больцман, задавшись значениями массы молекулы, ее скорости, числом молекул в 1 г вещества, выразил давление газа при некоторой температуре через скорость движения молекул, определил спектр скоростей, т. е. число молекул, имеющих заданные значения скорости движения, и в итоге показал, что можно вывести непротиворечивую количественную связь между наблюдаемыми величинами.

Тем самым, он нашел отправную точку статистической механики как учения, позволяющего с помощью рассмотрения вероятностных средних установить связь величин, определяемых на уровне обычных макроскопических масштабов, с миром механики микроскопических молекул. При этом выявилась важность идеи о том, что в ансамбле, содержащем огромное число частиц, в результате непрерывно происходящих столкновений в конце концов устанавливается равновесное состояние.

Вводя понятия теории вероятностей, Больцман заложил основы статистической механики, с помощью которой можно, исходя из механики микроскопических тел (молекул), вывести эмпирически наблюдаемые свойства макроскопических объектов. Больцман считал, что газ молекул в целом — реально существующий ансамбль, в котором каждую из невзаимодействующих молекул можно рассматривать как вероятностный объект. Гиббс, обобщив статистическую механику Больцмана, стал обращаться как с отдельным вероятностным объектом с системой в целом (например, с такой системой, в которой между молекулами есть взаимодействие). На этом пути Гиббс заложил фундамент обобщенной классической статистической механики. Ее развитие показало, что вещество, мельчайшие, невидимые глазом составные элементы которого совершают беспорядочное движение, в целом ведет себя упорядоченно; таким образом, по сравнению с ньютоновой механикой в понимании поведения вещества был сделан шаг вперед.

33. Векторные обозначения. Трехмерные векторы записывают в виде $\vec{A}$, $\vec{B}$ или в виде **A**, **B** ... Величина **A** имеет три компоненты (A_x, A_y, A_z), и при преобразовании координат новые значения компонент вектора определенным образом связываются с A_x, A_y, A_z.

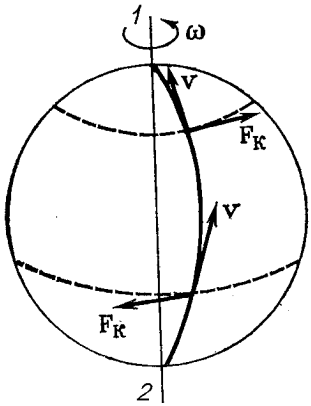
34. Сила Кориолиса. Действует на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета, например, системе, связанной с Землей. Вызывает горизонтальное отклонение (ее называют также отклоняющей силой). Пусть, например, тело движется вдоль меридиана от южного полюса к северному со скоростью **v**; масса тела m, а угловая скорость вращения Земли $\boldsymbol{\omega}$. Тогда на тело действует сила Кориолиса

$$\mathbf{F}_{\mathbf{K}} = 2m\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}.$$

В южном полушарии она направлена на запад, в северном — на восток (см. рисунок). В каждой точке F_K направлена по касательной к параллели.

35. Инерциальная система отсчета. Система отсчета, в которой справедливы ньютоновы законы движения. Так как вблизи поверхности Земли в отсутствие внешних сил тела свободно падают, систему отсчета, связанную с Землей, нельзя считать инерциальной. Инерциальной не является также система, закрепленная на вращающемся круглом диске, поскольку в отсутствие внешних сил на тело в этой системе действует сила, направленная от диска.

36. Если ньютоново уравнение движения $F=ma$ переписать в виде $F-ma=0$, то можно считать, что кроме внешней силы F на тело еще действует сила $-ma$, тогда динамическая задача превратится формально в статическую. При вращении возникает ускорение, направленное к центру и равное v^2/r, поэтому уравнение $F=mv^2/r$ можно записать в виде $F-mv/r=0$. Величину $-mv^2/r$ называют центробежной силой. Говорят, что это сила инерции. Силы инерции не являются реальными силами.



Сила Кориолиса:
1 — северный полюс Земли; *2* — южный полюс Земли

37. Преобразование Лоренца. Преобразования координат в частной теории относительности линейны относительно трех пространственных координат x, y, z и временной координаты t. Они отличаются тем, что определяют вращения и сдвиги не только в трехмерном, но и в четырехмерном пространстве, включающем время. Эйнштейн не вводил априори понятия одновременности. Вместо этого он подробно рассмотрел правила, по которым должны действовать наблюдатели при регулировке имеющихся у них часов. Время он определил с учетом относительного движения систем отсчета, в которых произошло событие и находятся наблюдатели. Преобразование Лоренца Эйнштейн вывел из двух аксиом: 1) скорость света в вакууме — постоянная величина, не зависящая от относительного движения источника света и наблюдателя (при условии, что движение происходит без ускорения); 2) физические законы в двух системах отсчета, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, имеют совершенно одинаковую форму. Эти аксиомы эквивалентны требованию инвариантности всех физических законов относительно преобразования Лоренца. Результаты Эйнштейна получили подтверждение в мире атомных и ядерных явлений.

Лоренц вывел свое преобразование в конце прошлого столетия с целью устранить с помощью созданной им электронной теории противоречие между электродинамикой движущихся сред и опытом. Согласно преобразованию Лоренца, для покоящегося наблюдателя

длина движущихся тел сокращается в направлении движения, а часы в движущейся системе отсчета отстают. Лоренцу нелегко было согласиться с таким удивительным результатом. Но после появления теории относительности эта точка зрения сначала была принята теоретически, а затем подтверждена экспериментами по движению элементарных частиц в ускорителях и по распаду элементарных частиц.

Ньютоновы законы движения имеют одинаковую форму для покоящегося наблюдателя и наблюдателя, движущегося относительно первого с постоянной скоростью. Например, если x, t обозначить координату и момент времени для самолета, наблюдаемого покоящимся служащим аэровокзала, а x', t' — то же, но для наблюдателя, сидящего в автомобиле, который движется относительно аэровокзала со скоростью v в положительном направлении оси x, то

$$x'=x-vt; \quad t'=t. \tag{1}$$

Если это преобразование (частный случай преобразования Галилея) применить к законам Ньютона, то закон, записанный с помощью x, t будет иметь такой же вид, как закон, сформулированный с помощью x', t'. Согласно частной теории относительности преобразование Лоренца для той же задачи будет иметь вид

$$x'_1=\gamma(x_1-\beta x_0); \quad x'_0=\gamma(x_0-\beta x_1). \tag{2}$$

Здесь $x_1=x$; $x'_1=x'$; $x_0=ct$; $x'_0=ct'$; $\beta=v/c$; $\gamma=1/\sqrt{1-\beta^2}$.

Формулы (2) соответствуют частному случаю преобразования Лоренца. Законы механики должны быть инвариантны относительно этого преобразования. Из написанных формул вытекает, что для покоящегося наблюдателя длина движущихся тел сокращается, а интервал времени удлиняется в γ раз (явление так называемого лоренцева сокращения). При $\gamma=\beta=1$ формулы (2) переходят в (1), что соответствует предельному переходу $v/c\to 0$. Можно сказать, что преобразование Галилея справедливо, когда скорость v достаточно мала по сравнению с c.

38. Пространство Минковского. В 1907 г. немецкий математик Минковский построил геометрию, приспособленную для записи законов частной теории относительности, заложив тем самым основу дальнейшего развития этой теории. В ньютоновой механике время и обычное трехмерное евклидово пространство независимы друг от друга, а в частной теории относительности абстрагироваться от относительного движения систем отсчета (в которых происходят события и находятся наблюдатели) нельзя. Учитывая взаимосвязь времени и обычного трехмерного пространства, Минковский построил абстрактное четырехмерное пространство, в котором время и три пространственные координаты рассматриваются равноправно.

В этом пространстве Минковский определил псевдоевклидову метрику, напоминающую метрику обычного евклидова пространства с числом измерений, увеличенным на единицу. Вместо времени t он ввел координату $x_0=ct$ (c — скорость света в вакууме; остальные координаты $x_1=x$, $x_2=y$, $x_3=z$. Событие изображается точкой этого четырехмерного пространства, траектория частицы, движущейся с постоянной скоростью — прямой линией, траектория света — парой прямых $x^2_0=x^2_1$ (см. рис. 3 основного текста книги). Физические законы, совместимые с частной теорией относительности,

в четырехмерном псевдоевклидовом пространстве Минковского сразу записываются в правильной (инвариантной) форме. Пространство Минковского нельзя представить себе наглядно, это — абстрактное пространство, конечно, можно изображать его графиками, напоминающими диаграммы движения поездов на железных дорогах, но все таки... Обычно пространство Минковского иллюстрируют рисунками, подобными рис. 3 основного текста книги, на котором ось x символизирует три x, y, z, а ось x_0 направлена вверх (вертикально).

39. Мировая линия. Мгновенное положение частицы на траектории ее движения зависит от времени. О траектории, записанной во времени и пространстве примерно так же, как вычерчивают диаграмму движения поезда, говорят как о мировой линии частицы в четырехмерном пространстве. В теории относительности скорость частицы не может превзойти скорость света, поэтому мировая линия расположена в области $v<c$.

40. Тахион. Слово, происходящее от греческого ταχοσ, означающего «быстрый». Если допустить, что тахионы существуют, то они могут иметь в одной системе отсчета положительную, а в другой — отрицательную энергию и двигаться в отрицательном направлении оси времени. Результат может предшествовать причине, т. е. нарушается причинность. Поэтому считают, что в макромире тахионы ненаблюдаемы (могут ли они существовать в микромире — другой вопрос).

41. Если поле сил консервативно, то, зная силу, можно определить потенциальную энергию. Обозначая $-dA$ работу силы X на пути dx, получаем для одномерного поля сил

$$-dA=-Xdx. \qquad (1)$$

Работу $-dA$ можно рассматривать как приращение поля V, существующего в данной точке (поле V — источник энергии), т. е. считать, что $dV=-dA$. Например, в точке, удаленной от поверхности Земли на расстояние x, существует потенциал $V=mgx$ и $dV=-dA=-mgdx$. Когда сила — трехмерный вектор F, формула (1) обобщается следующим образом:

$$dV=-dA=-(F_xdx+F_ydy+F_zdz)=-\mathbf{F}d\mathbf{s}. \qquad (2)$$

Здесь потенциальная энергия — скаляр.

ЛЕКЦИЯ 3

42. Возможно отождествление во времени... Имеется в виду ситуация, когда тело в некоторый момент времени идентично телу в другой, следующий, момент времени. Говорят, что в таком случае тело имеет «временную протяженность».

43. Опыт Майкельсона—Морли. Земля движется по орбите вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с. В XIX в. это обстоятельство часто использовали при попытках обнаружить движения Земли сквозь эфир. В эксперименте, выполненном в 1887 г. американскими учеными Майкельсоном и Морли, измерялось смещение интерференционных полос, создаваемых двумя лучами, прошедшими по взаимно перпендикулярным оптическим путям. Точность опыта

позволяла наблюдать смещение порядка $(v/c)^2$ (v — скорость Земли, c — скорость света). Тем не менее обнаружить смещение полос не удалось, и вопрос о существовании эфира экспериментально был решен отрицательно.

44. Уравнения Гамильтона. Одна из форм записи уравнений Ньютона (см. примеч. 30).

45. Канонический формализм. Формализм, позволяющий выразить аналогию классической механики с оптикой. В каноническом формализме рассматривают обобщенную координату частицы q и соответствующий ей канонический импульс p, а совокупность q, p называют каноническими переменными.

Скобки Пуассона. Если $A=A(p, q)$, $B=B(p, q)$ (q, p — координата и импульс), то

$$(A, B)\equiv\frac{\partial A}{\partial q}\frac{\partial B}{\partial p}-\frac{\partial A}{\partial p}\frac{\partial B}{\partial q}.$$

Коммутатор $[A, B]=AB-BA$ (см. примеч. 83).

46. Вероятностная интерпретация. Состоит в утверждении, что квадрат модуля $|\psi|^2$ волновой функции Шрёдингера $\psi(x)$ дает плотность вероятности нахождения электрона в точке x.

47. Гамма-лучевой микроскоп. Разрешающая способность микроскопа (в частности, электронного) определяется формулой $d=\lambda/a$. Здесь d — минимальное расстояние, которое может быть разрешено; λ — длина волны света или электрона; a — числовая апертура. Чем меньше длина волны, тем выше разрешающая способность. Разрешающая способность обычных оптических микроскопов ограничена значениями порядка 10^{-5} см, а электронных — 10^{-8} см. Если бы удалось использовать γ-излучение, длина волны которого меньше, чем у электронов (принципиально это возможно, но технически очень трудно), то можно было бы с небольшой погрешностью (10^{-13} см) определять локализацию электрона.

48. Эффект Комптона. В 1922 г. американский ученый Комптон (1892—1962 гг.) в опытах по рассеянию рентгеновского излучения парафином обнаружил, что длина волны рассеянного излучения, вообще говоря, больше длины волны падающего. Проводя детальные измерения, он дал прямое экспериментальное доказательство корпускулярной природы света. Ранее Планк (1900 г.) и Эйнштейн (1905 г.) предложили квантовую теорию света, согласно которой свет ведет себя, как частица с энергией E и импульсом p, где

$$E=h\nu;\quad p=h/\lambda \tag{1}$$

(ν — частота; λ — длина волны света). Пользуясь этой идеей, Бор (1913 г.) создал теорию атомных спектров, но это были косвенные свидетельства корпускулярной природы света. Надо отметить, что корпускулярную теорию света предлагал еще Ньютон, исходивший из фактов прямолинейного распространения, преломления и отражения света.

Применяя с учетом формул (1) законы сохранения энергии и импульса к столкновению светового кванта с электроном, можно вывести следующее соотношение между длинами волн рассеянного и падающего света λ' и λ:

$$\lambda'=\lambda[1+(\lambda_0/\lambda)(1-\cos\theta)]. \tag{2}$$

Здесь $\lambda_0 = h/mc \approx 2{,}4 \cdot 10^{-10}$ см — величина того же порядка, что и длина волны рентгеновского излучения; θ — угол между направлениями падающего и рассеянного света. Из формулы (2) видно, что при $\theta = 0$ $\lambda' = \lambda$, а при возрастании θ длина волны λ' становится больше λ. Длины волны λ видимого света гораздо больше λ_0, поэтому рассматриваемый эффект не могли обнаружить. В рентгеновской области λ меньше, и эффект можно измерить. Величина λ_0 имеет смысл протяженности электрона относительно длины волны света, ее называют комптоновской длиной волны.

Выше рассказано об открытии корпускулярных свойств света, волновая природа которого была до этого общепризнана. Однако де Бройль выдвинул утверждение (1925 г.), что электрон, корпускулярная природа которого не вызывала сомнений, обладает волновыми свойствами. Впоследствии это было подтверждено. Наличие как корпускулярных, так и волновых свойств у электронов и света явилось важным стимулом для разработки квантовой механики.

49. Соотношение неопределенностей. Обозначим $(\Delta x)^2$ среднее значение величины $(x-\bar{x})^2$, где $\bar{x}$ — среднее значение координаты, а $(\Delta p)^2$ — среднее значение $(p-\bar{p})^2$, где $\bar{p}$ — среднее значение импульса. Тогда можно доказать, что в квантовой механике

$$\Delta x \cdot \Delta p > \hbar/2.$$

50. Амплитуда вероятности. Волновая функция ψ, так как $|\psi|^2$ — плотность вероятности.

51. Работы Борна. Борн впервые рассмотрел задачу рассеяния с использованием уравнения Шрёдингера, предложил вероятностную интерпретацию волновой функции.

52. Геометрическая оптика. Геометрическая оптика сыграла важную роль в становлении современной физики. Из основного принципа геометрической оптики (свет распространяется по кратчайшему пути) возник принцип наименьшего действия, ставший инструментом перехода от ньютоновой механики к аналитической механике Лагранжа (включая канонический формализм Гамильтона) и позволивший навести мост к квантовой механике мира атомов. Корпускулярные и волновые свойства — одинаково важные «опоры» квантовой теории света. В геометрической оптике дается элементарное описание свойств света, связанных с его корпускулярностью. Приближение геометрической оптики полезно при первоначальном ознакомлении с квантовой механикой.

53. Волновой монизм. Философская концепция, согласно которой все сущее в природе представляет собой волны. Согласно де Бройлю и Шрёдингеру электрон, подобно свету, тоже является волной. Волновая функция — не что иное, как настоящая волна.

54. Расплывание электрона. Учитывая, что электрон представляет собой волну, и пользуясь уравнением Шрёдингера для свободных частиц, можно показать, что даже если в начальный момент электрон сосредоточен в одной точке, то в последующие моменты времени он будет постепнно распространяться во все стороны.

55. Интерпретация Бома. Английский физик Бом утверждает, что квантовую механику можно интерпретировать причинно. Бом выполнил ряд работ по теории колебаний многоэлектронной плазмы, занимался моделью элементарных частиц, как недеформируемых твердых тел и т. д.

56. Борн и Иордан. Эти ученые заметили, что с математической точки зрения физические величины квантовой теории Гейзенберга

являются матрицами. Иордан совместно с Вигнером и Клейном опубликовал ряд статей о вторичном квантовании.

57. Модель ДНК Крика — Уотсона. В 1953 г. Уотсон и Крик, основываясь на данных по дифракции рентгеновского излучения, полученных Уилкинсом, предложили модель структуры ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты). Согласно этой модели две цепи полинуклеотидов, соединенные между собой водородными связями, образуют так называемую двойную спираль, напоминающую катушку соленоида. Водородные связи соединяют основания четырех видов, входящие в структуру полинуклеотидов; связи могут устанавливаться только между определенными, дополнительными основаниями. Последнее обстоятельство гарантирует, что при редупликации молекулы ДНК последовательность оснований в новой молекуле в точности повторяет последовательность оснований исходной молекулы ДНК.

58. Пусть (x, y, z) — координаты некоторой частицы. Тогда волновая функция этой частицы есть $\psi(x, y, z, t)$. Далее, если (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) — координаты двух частиц, то волновая функция $\psi=\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2; t)$ кроме времени зависит еще от шести переменных. Аналогично для трех частиц с координатами (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3) волновая функция, кроме времени, зависит еще от девяти переменных.

59. Статья Иордана и Клейна, в которой они разработали метод квантования волнового поля в задаче многих тел **Jordan J., Klein O.** — Z. Phys., 1927, Bd 45, S. 751—765.

60. Вторичное квантование. Метод квантования волнового поля, т. е. метод приписывания волновому полю корпускулярных свойств

61. Квантовая электродинамика. Квантовая механика электронного и электромагнитного полей. Теория в данном случае очень хорошо согласуется с экспериментом. В квантовой электродинамике с большим успехом применен метод перенормировок Томонага — Швингера (см. примеч. 85), разработанный ими после второй мировой войны.

62. Статистики Бозе и Ферми. В квантовой теории частицы одного сорта неразличимы. Существует два типа заполнения состояний: либо в одном состоянии может находиться не более одной частицы, либо — сколько угодно частиц. Соответственно различаются и способы подсчета числа расположений большого количества одинаковых частиц по состояниям. Это обстоятельство имеет важное значение для вывода функции распределения частиц. В одном состоянии не может находиться более одного электрона или другой частицы с полуцелым спином; эти частицы подчиняются статистике Ферми (ферми-частицы, или фермионы). Частицы с целым спином, например фотоны, подчиняются статистике Бозе (бозе-частицы, или бозоны). Число бозонов в одном состоянии может быть любым.

63. Квантовая теория релятивистских локальных полей (см. примеч. 80) инвариантна относительно последовательности преобразований времени (T), пространства (P) и зарядового сопряжения (C). Это утверждение известно, как CPT-теорема.

64. Унитарность. В задаче рассеяния частиц S-матрица (см. примеч. 94) связывает состояния частиц до взаимодействия с состояниями после взаимодействия, т. е. с состояниями, в которых провзаимодействовавшие частицы уже достаточно удалились друг от друга. Унитарность — неотъемлемое свойство S-матрицы. Если

унитарности нет, то сумма вероятностей состояний, возникающих после рассеяния, не равна 1.

65. Причинность. Под причинностью обычно понимают, что следствие не может предшествовать причине. Например, в задаче рассеяния падающая на мишень волна не может достичь мишени позже, чем из нее выйдет расходящаяся волна. Испускаемая мишенью волна образуется только после того, как падающая волна достигнет мишени. В частной теории относительности воздействия, изменяющие физическое состояние, не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Отсюда вытекает, что две точки, разделенные пространственно-подобным интервалом (см. примеч. 81), полностью независимы, т. е. не могут влиять друг на друга. Об этом иногда говорят, как о микропричинности.

66. Симметрия. Этот термин почти эквивалентен термину *инвариантность*. Если в результате какой-либо операции объект полностью совмещается сам с собой, то говорят о симметрии.

67. Спинор. Различные геометрические величины, например векторы, скаляры, изменяются при лоренц-преобразованиях (или трехмерных вращениях) каждая по своему закону. Понятие *спинор* впервые вошло в физику при создании квантовой механики. Он имеет две комплексные составляющие, изменяющиеся при преобразованиях координат по закону, отличному от законов преобразования векторов или скаляров. Волновая функция электрона — спинор. Наличие двух компонент указывает на то, что электрон может иметь в пространстве не более двух ориентаций.

68. Принцип эквивалентности. Если лифт начинает свободно падать после того, как перерезали трос, на котором он висел, то люди, находящиеся в лифте, оказываются в состоянии невесомости. Но если такой человек будет наблюдать за происходящим вне лифта, то он обнаружит, что там по-прежнему действует сила тяжести, как-будто бы лифт и не падал. Следовательно, действие силы тяжести всегда можно полностью исключить, но только в ограниченной, небольшой области пространства. Это утверждение называют принципом эквивалентности.

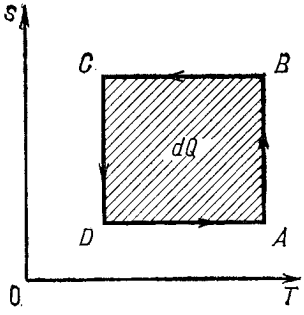
69. Риманова геометрия. В обычной евклидовой геометрии интересуются свойствами фигур на плоскости и в неискривленном трехмерном пространстве, а также характеристиками этого пространства. Риман рассмотрел свойства искривленных подобно поверхности сферы пространств и свойства фигур в таких пространствах и показал, что при этом возникает еще одна, вполне логичная геометрия. В евклидовой геометрии через точку вне прямой можно провести лишь одну прямую, параллельную данной (аксиома о параллельных), в римановой геометрии число таких прямых может быть любым.

70. Энтропия. В середине XIX в. немецкий физик-теоретик Клаузиус (1821—1888 гг.), изучавший закон превращения теплоты в работу (второй закон термодинамики), ввел термин *энтропия* для обозначения величины, характеризующей тепловое состояние тела. По гречески «энтропия» означает «круговорот», «взаимный переход». Обычно энтропию обозначают символом S. До тех пор, пока тепло, сообщенное извне газу, не распределится в нем совершенно равномерно, энтропия газа возрастает, а в равновесном состоянии она имеет некое определенное значение.

Энтропия — сложная характеристика состояния, ее нелегко понять в рамках термодинамики. Ясную интерпретацию ей впервые

дали в статистической механике. Больцман рассматривал газ, как ансамбль огромного числа беспорядочно движущихся молекул. Равновесное состояние ансамбля достигается в результате бесчисленных столкновений молекул газа, а макроскопические характеристики вещества определяются статистическим усреднением микроскопических движений молекул. Если W — число состояний беспорядочного микроскопического движения молекул, то энтропия определяется формулой $S=k \ln W$. Здесь k — постоянная Больцмана; $kT/2$ — средняя кинетическая энергия $m\bar{v}^2/2$ при температуре T, приходящаяся на одну степень свободы.

То обстоятельство, что энтропия выражается через $\ln W$, приводит к аддитивности этой величины. Число состояний в смеси двух газов определяется произведением W_1W_2. После логарифмирования получается, что энтропия смеси $S=S_1+S_2$, как и должно быть согласно термодинамике. В квантовой статистике при учете тождественности частиц способ подсчета числа состояний коренным образом изменяется, но понятие энтропии сохраняет прежний смысл.



Работа dQ, производимая при четырех движениях поршня паровой машины, дается площадью этого четырехугольника:

$A \to B$ — расширение при постоянной температуре, энтропия возрастает ($dS>0$); $B \to C$ — адиабатическое расширение, энтропия постоянна ($dS=0$); $C \to D$ — сжатие при постоянной температуре, энтропия уменьшается ($dS<0$); $D \to A$ — адиабатическое сжатие, энтропия постоянна ($dS=0$)

Так же, как энергия, энтропия — понятие, без которого невозможно обойтись при статистической интерпретации физических явлений. Особенность энергии состоит в том, что при физических изменениях она всегда сохраняется. Если кажется, что закон сохранения энергии нарушен, то значит не учтен какой-либо фактор. Энтропия характеризует степень нарушения упорядоченности физической системы, указывает направление физических изменений. Если физическая система предоставлена самой себе, то в ней, вообще говоря не происходит изменений, приводящих к уменьшению энтропии. Чем регулярнее и упорядоченнее физическая система, чем эффективнее она может совершать работу над другими физическими системами, тем ниже ее энтропия (см. рисунок). Для понижения энтропии необходимо взаимодействие системы с окружением через внешнюю границу для увеличения беспорядка в окружающей среде. Живые существа, взаимодействуя с окружающей средой, непрерывно понижают свою энтропию, можно сказать, что это — условие сохранения жизни.

71. Метрический тензор пространства. Размер физического тела и интервал времени, вообще говоря, изменяются при переходе из одной точки пространства — времени в другую. Поэтому и расстояние ds между некоторой точкой и соседними с ней точками зависит от положения этой точки в пространстве — времени. Величину

характеризующую зависимость масштаба расстояний от положения точки в пространстве, называют метрическим тензором.

72. Геодезические, большой круг. Кратчайшую среди всех линий, соединяющих две точки в некотором пространстве, называют геодезической этого пространства. В евклидовом пространстве геодезические — прямые линии, а в римановом — вообще говоря, кривые. На сфере геодезическими служат дуги большого круга. Большой круг, по определению, есть линия пересечения сферы с плоскостью, проходящей через центр сферы.

73. Урбарионы. Наиболее фундаментальные составные части, из которых, по предположению, построены наблюдаемые элементарные частицы (имеется в виду, что они составляют основу барионов).

74. Кварки. Как фундаментальные компоненты, из которых построены элементарные частицы, введены в рассмотрение в 1964 г. Их электрический заряд составляет 1/3 и 2/3 заряда электрона. Предприняты многочисленные попытки экспериментального обнаружения кварков, но никаких признаков их существования пока не найдено.

75. Уравнение Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - (1/2)\, g_{\mu\nu} R = \varkappa T_{\mu\nu}.$$

76. Для квантования физической величины ее нужно заменить подходящим оператором.

77. Гравитон. Свет представляет собой электромагнитное поле. Экспериментально установлено, что его энергия выделяется порциями и он обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Элементарную порцию света называют фотоном. Развита квантовая теория фотонов и электронов. Естественно, появился вопрос: не ведет ли себя квант гравитационного поля как частица, подобно кванту электромагнитного поля? Таким образом возникло понятие *гравитон*. В отличие от фотонов, гравитоны не обнаружены экспериментально, это — гипотетические частицы. Исходя из свойств гравитационного поля, гравитону приписывают массу 0, две компоненты, спин 2. Существует также мнение, что гравитационное поле квантовать не следует, а рассматривать его всегда как классическое поле.

78. Решение Шварцшильда. Немецкий астроном, занимавшийся математической физикой, Шварцшильд нашел (1916 г.) точное решение уравнения Эйнштейна для статического центрально-симметричного поля.

79. Черная дыра. Такая дыра, из которой не может выйти никакое тело, однажды в нее провалившееся. Согласно общей теории относительности, в окрестности черной дыры существенно изменяются структура и свойства пространства-времени. Полагают, что черными дырами являются открытые недавно нейтронные звезды.

80. Локальное поле. Описывается конечным числом функций $\psi_\alpha(x, y, z, t)$, зависящих от координат x, y, z, t только одной точки в четырехмерном пространстве — времени. Электромагнитное поле выражается антисимметричным тензором, имеющим шесть независимых компонент, а электрон представляется четырехкомпонентным дираковским спинором $\psi_\alpha(x)$ $(d = 1, 2, 3, 4)$.

81. Пространственно-подобный, времениподобный. Две точки называют пространственно-подобными, если их нельзя связать взаи-

модействием, распространяющимся со скоростью, не превышающей (или равной) скорости света. Например, на рис. 5 пространственно-подобными относительно начала отсчета являются точки в заштрихованной области. Времениподобными называют точки, которые можно связать взаимодействием, распространяющимся со скоростью, меньшей скорости света (на рис. 5 точки, времениподобные относительно начала отсчета, лежат в незаштрихованной области). Поскольку в частной теории относительности физические воздействия не могут распространяться со скоростью, большей скорости света, две пространственно-подобные точки можно совместить во времени.

82. Световой конус. Область, точки которой можно связать с данной точкой взаимодействием, распространяющимся со скоростью света, вообще говоря, является конусом (гиперконусом). Его называют световым конусом данной точки (см. рис. 5). На плоскости этот конус вырождается в пару прямых $x=\pm ct$. В четырехмерном пространстве световой конус — геометрическое место точек, удовлетворяющих уравнению

$$ct=\pm\sqrt{x^2+y^2+z^2}.$$

83. Коммутатором величин A, B называют разность $AB-BA$; $AB+BA$ — антикоммутатор. Коммутаторы используют для бозе-полей, а антикоммутаторы — для ферми-полей. Микропричинность выражается требованием, чтобы антикоммутаторы ферми-полей обращались в нуль для пар пространственно-подобных точек.

84. Гиперплоскость нулевой толщины. Поверхность в четырехмерном пространстве-времени, образованная взаимно пространственно-подобными точками (эта поверхность трехмерна), называют пространственно-подобной гиперплоскостью. Если на этой поверхности задать состояние механической системы (такое состояние называют начальными условиями), то следующие за ним состояния можно определить из уравнения Томонага — Швингера.

85. Уравнение Томонага — Швингера. Квантовомеханическое уравнение, при записи которого в каждой точке введено локальное время и которое полностью локально выражает изменения состояния движения системы. О нем говорят также, как о сверхмноговременном формализме. Уравнение записано в явно релятивистски инвариантной форме.

86. Конечные разности, уравнения в конечных разностях. Обычно физические законы формулируют с помощью дифференциальных уравнений, выражающих связь между величинами в некоторый момент времени t и близкий к нему следующий момент $t+\Delta t$ (Δt бесконечно мало). Рассмотрим только состояния в момент t и момент $t+a$, отстоящий от t на конечный интервал, и будем интересоваться изменениями за конечный промежуток времени. Так как a — конечная величина, говорят о конечной разности, а уравнение, определяющее изменения между этими моментами времени, называют уравнением в конечных разностях. Например, запись

$$\{[v(t+\Delta t)-v(t)]/\Delta t\}_{\Delta t\to 0}=0$$

означает, что в произвольный момент времени величина v постоянна, а уравнение в конечных разностях

$$v(t+a)-v(t)=0$$

означает лишь то, что величина v одинакова в моменты t и $t+a$. О том, каково v в промежуточные моменты времени, уравнение не дает информации.

87. **Katayama Y., Yukawa H.** Field Theory of Elementary Domain and Particles. I. — Progr. Theor. Phys. Supplement, 1968, № 41, p. 1—21; **Katayama Y., Umemura J., Yukawa H.** Field Theory of Elementary Domain and Particles. II. — Ibid., p. 22—55.

88. **Naka S.** — Progr. Theor. Phys., 1972, v. 48, p. 1024.

89. Дуальность. Между процессами рассеяния сильновзаимодействующих частиц при высоких энергиях и резонансами при низких энергиях есть тесная связь, убедиться в существовании которой можно, если заметить, что матрица рассеяния не изменяется при замене времениподобного направления пространственно-подобным. Поэтому говорят, что процессы при высоких энергиях и резонансы при низких энергиях дуальны.

90. Метрика гильбертова пространства. Состояние системы в квантовой механике определяется вектором в бесконечномерном векторном пространстве. Обычно длина этого вектора положительна. Но бывают случаи, когда теорию можно выразить более ясно и сжато, если рассмотреть пространство, в котором длина вектора отрицательна. Чтобы различать векторы положительной и отрицательной длины, вводят метрику векторного пространства. Поскольку длина вектора имеет вероятностную интерпретацию, непосредственно истолковать смысл векторов, имеющих отрицательную длину, очень трудно.

91. В обычной теории поля давно возникли трудности с бесконечными величинами. Например, в теории локального поля бесконечно велика собственная энергия (в электродинамике это энергия взаимодействия электрона с создаваемым им самим электромагнитным полем).

92. Индефинитная метрика. Метрика векторного пространства, в котором длина вектора может быть как положительной, так и отрицательной.

93. Длина вектора в гильбертовом пространстве имеет смысл относительной вероятности состояния, соответствующего этому вектору. Если длина вектора отрицательна, то возникает отрицательная вероятность, что противоречит основному свойству вероятности.

94. S-матрица. Матрица, связывающая начальное и конечное состояния рассеяния.

95. Обычно при вторичном квантовании пользуются операторами рождения и уничтожения частицы, действующими в точках трехмерного пространства в один и тот же момент времени. Свойства этих операторов в другие моменты времени определяются уравнениями движения Гейзенберга. А при четырехмерном квантовании применяют операторы рождения и уничтожения в каждой точке в разные моменты времени, поэтому операторы полностью независимы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию 3
Вступительное слово организатора лекций проф. Хара . . 4
Вступление 5

Лекция 1

Удивительность мира элементарных частиц 6
Что можно почерпнуть из истории науки? 7
О первоисточниках 8
Легенда о Ньютоне как человеке не от мира сего . . . 10
Взгляд Ньютона на вещество 12
Внутренние стимулы творчества 14
«Глубинный порядок» по Гейзенбергу 15
Материальная точка и твердое тело 17
О моменте количества движения 19
О деформациях и напряжениях 20
Физика: «Экономия мышления»? 22
Дальнодействие и близкодействие 25
Решение Максвелла 27

Лекция 2

Классификация ученых — одиночки, полемисты, коллективисты
О пользе конференций 28
Пространство в ньютоновой механике 30
Из истории векторов 32
«Имена» точек пространства 33
«Реальные» и «фиктивные» силы 35
Об интерпретации Маха 37
Величие Ньютона 38
Об абсолютной системе отсчета 40
О понятии поля 40
Поле в теории относительности 41
Об ограничениях, накладываемых частной теорией относительности 43
Причинность в ньютоновой механике — демон Лапласа . . 45
Лаплас и его эпоха 46
О причинности в частной теории относительности 48
50

Лекция 3

Квантовая «теория» и квантовая «механика» 54
Волны: от эфира к полю 55
Два вывода соотношения неопределенностей 57
Теория познания и физика 60
Расплывание электрона 62
Отход от классической причинности 64
Шрёдингеровский кот 66
Завершение квантовой механики — квантовая теория поля . 69
Квантовая механика и частная теория относительности . . 71
«Одинокая» и «возвышенная» теория (об общей теории относительности и общей ковариантности) 72
Отождествление физических и геометрических величин . . 74
«Вместилище» (пространство-время) и «содержимое» (вещество) 75
Верно ли, что общая теория относительности не имеет отношения к микромиру? 78
Теория элементарных частиц — локальные и нелокальные поля 81
О конечных разностях 83
О непрерывности и скачкообразности при познании внешнего мира 90
Вопросы и ответы 92
Заключение 97
Примечания 100