

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
АСТРОНОМИЧЕСКИЙ СОВЕТ

ВОПРОСЫ
КОСМОГОНИИ

ТОМ
IX



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва 1963

P998
9

Редакционная коллегия:

Доктор физ.-матем. наук **В. В. КУКАРКИН** (отв. редактор),
доктор физ.-матем. наук **Н. Н. ПАРИЙСКИЙ** (зам. отв. редактора),
доктор физ.-матем. наук **А. Г. МАСЕВИЧ**,
доктор физ.-матем. наук **Б. Ю. ЛЕВИН**,
доктор физ.-матем. наук **В. И. БАРАНОВ**,
член-корр. АН СССР **В. В. БЕЛОУСОВ**,
канд. физ.-матем. наук **В. С. САФРОНОВ** (ученый секретарь)

**МАТЕРИАЛЫ
ТЕОРЕТИЧЕСКОГО СЕМИНАРА
ПО ВАЖНЕЙШИМ ПРОБЛЕМАМ
АСТРОФИЗИКИ**

Тарту, 7—13 июля 1962 г.

ГЕНТЫ СЭАН СССР
Гос. Публ. Науч.-техн.
библиотека

523.1

484
—
64

Свердло

Свердло
1961 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этом разделе публикуются обзорные лекции и доклады, прочитанные на теоретическом семинаре по важнейшим проблемам астрофизики, состоявшемся 7—13 июля 1962 г. в г. Тарту. Семинар был первым опытом организации летней школы для молодых астрофизиков, прибывших почти из всех обсерваторий страны. Обзорные лекции по наиболее актуальным проблемам в области, смежной между физикой и астрофизикой, были прочитаны нашими ведущими учеными. По единодушному признанию участников опыт оказался вполне удачным.

Публикуемые ниже статьи не являются точной стенограммой выступлений на семинаре. Они подверглись некоторой последующей переработке авторами и частично были дополнены.

В настоящий том не включены лекции и доклады, основное содержание которых уже опубликовано в других изданиях. К ним относятся следующие лекции и доклады:

А. Я. К и п п е р. О скорости эволюции звезд и звездных систем;
И. С. Ш к л о в с к и й. Внегалактические источники космического радиоизлучения;

С. А. Ж е в а к и н. Теория звездных пульсаций;

А. Г. М а с е в и ч. Теория внутреннего строения и эволюции звезд;

Р. Э. С а г д е е в. Ударные волны в разреженной плазме.

ОБЗОРНЫЕ ЛЕКЦИИ

Я. В. Зельдович

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

Часть I

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

§ 1. История открытия частиц	7
1.1. Частицы и античастицы. 1.2. Мезоны. 1.3. Нейтрино и антинейтрино; два сорта нейтрино. 1.4. Странные частицы. 1.5. Новые короткоживущие частицы	
§ 2. Таблицы частиц и комментариев к ним	11
2.1. Кванты, лептоны, мезоны. 2.2. Зарядовое сопряжение 2.3. Сильно взаимодействующие мезоны 2.4. Барions	
§ 3. Точные законы превращения частиц	17
3.1. Закон сохранения электрического заряда. 3.2. Сохранение барионов. 3.3. Лептонные числа	
§ 4. Электромагнитное взаимодействие	19
4.1. Взаимодействие электромагнитного поля с частицами 4.2. Динамический принцип зарядового сопряжения	
§ 5. Сильное взаимодействие и странность	21
5.1. Общие свойства. 5.2. Странные частицы. 5.3. Схема трех фундаментальных частиц. 5.4. Нейтральные каоны. 5.5. Изотопические мультиплеты. 5.6. Вектоны. 5.7. Современные тенденции	
§ 6. Слабое взаимодействие	27
6.1. Четырехфермионное взаимодействие (превращение). 6.2. Универсальность взаимодействия. 6.3. X-мезон. 6.4. Три векторных поля. Трудности	
§ 7. Нейтрино и четность	32
7.1. Спиральность нейтрино и нулевая масса покоя. 7.2. Слабое взаимодействие и четность. 7.3. Зарядовое сопряжение и четность. 7.4. Нейтрино в космосе	

§ 1.	Введение	36
1.1.	Специальная и общая теория относительности. 1.2. Космологические теории	
§ 2.	Экспериментальные подтверждения ОТО за последние годы	39
2.1.	Равенство инертной и весовой масс. 2.2. Изменение частоты кванта в поле тяжести	
§ 3.	Необходимость ОТО	41
3.1.	Изменение течения времени. 3.2. Принцип эквивалентности	
§ 4.	Решения уравнений ОТО	43
4.1.	Пустота и принцип Маха. 4.2. Решение Фридмана; однородная Вселенная	
§ 5.	Гравитационные волны, гравитоны и частицы	45
5.1.	Гравитационные волны. 5.2. Гравитоны. 5.3. Гравитация и превращение частиц	
§ 6.	Гипотеза рождения вещества	47
6.1.	Два варианта гипотезы. Рождение в веществе. 6.2. Рождение в пустоте	
§ 7.	Сохранение энергии в замкнутом мире	50
7.1.	Масса замкнутого мира. 7.2. Локальный закон сохранения энергии	
§ 8.	Гипотезы изменения констант	54
8.1.	Принцип Маха и изменение констант. 8.2. Влияние локальной кривизны. 8.3. Теория Иордана	
§ 9.	Общие замечания; два подхода к развитию науки	57

Дан обзор современных сведений об элементарных частицах. Рассмотрены опыты, лежащие в основе общей теории относительности. Критически рассмотрены космологические теории, противоречащие общей теории относительности — теории рождения вещества, изменения физических констант, совершенный космологический принцип и принцип Маха.

Modern Physics and Astronomy, by J. B. Zeldovič.—A short review of modern status in the physics of elementary particles is given. The experiments underlying the theory of general relativity are considered.

A critical review is given of cosmological theories which violate the general relativity: the theory of creation, the hypothesis of varying constants, the perfect cosmological principle and the Mach principle.

Предлагаемая статья касается двух вопросов — теории элементарных частиц и общей теории относительности.

Статья представляет собой переработанный текст вступительного доклада, прочитанного в летней астрофизической школе в Тарту в июле 1962 г. В несколько ином плане, с более подробным обзором состояния исследований в области частиц и с сокращенным рассмотрением вопросов тяготения и космогонии, данный материал изложен в статье, помещенной в «Успехах физических наук»*. Предлагаемая статья не предназначена для углубленного изучения вопроса, поэтому в ней нет ни формул, ни библиографии к I части. Теория расширяющейся Вселенной рассмотрена автором подробно в УФН, 80, 353, 1962.

* УФН, 78, 549, 1962.

§ 1. История открытия частиц

1.1. Частицы и античастицы

Уже более 30 лет известны и хорошо изучены такие «старые», «классические» частицы, как протон p , нейтрон n , электрон e , гамма-квант γ . К этому списку можно добавить нейтрино ν , о существовании которого догадались примерно в то же время, когда был открыт нейтрон, однако свойства нейтрино были полностью изучены лишь в последние 5 лет. Далее, известно, что все заряженные частицы и многие нейтральные частицы существуют парами; в этих парах одну частицу называют «частицей», другую «античастицей». Примером такой пары являются электрон e^- и позитрон e^+ .

Позитрон был открыт в 1934 г. в космических лучах. Антипротон* \bar{p} и антинейтрон \bar{n} удалось открыть только в 1956 г. при помощи опытов на огромных ускорителях, построенных специально для этой цели. Трудность задачи была связана с большой энергией, необходимой для рождения пары протон-антипротон или нейтрон-антинейтрон. Во время такого затянувшегося ожидания, в период между открытием позитрона и открытием антипротона, у некоторых теоретиков не выдерживали нервы, и они высказывали сомнения в принципе симметрии законов природы относительно частиц и античастиц.

На этом примере стоит остановиться подробнее еще и в плане вопроса о симметрии уравнений и симметрии решений этих уравнений.

Утверждается, что *уравнения* симметричны относительно частиц и античастиц. Например, один антипротон в пустоте так же стабилен, как и один протон; то же относится к сравнению антиатома, например антиатома дейтерия (ядро из \bar{p} и \bar{n} и на орбите e^+) с обычным атомом дейтерия.

Состояние вещества, с которым мы обычно имеем дело, явно несимметрично — вещество состоит из частиц. В таких условиях для рождения античастицы нужно затратить энергию; античастица, извне попавшая в систему, аннигилирует с одной из частиц системы и выделяет энергию. На 1 г антивещества, аннигилирующего с обычным веществом, приходится выделение энергии, равное $2c^2 = 18 \cdot 10^{20}$ эрг; эта величина в 3000 раз больше выделения энергии при делении 1 г урана. Подчеркнем, что такая несимметрия решения не противоречит симметрии уравнений; когда говорится, что частицы существуют парами, то имеется в

* Античастицы принято отличать от частиц чертой сверху.

виду лишь возможность существования частиц и античастиц и симметрия их свойств, но отнюдь не равное их число в той или иной физической системе. С этим различием между симметрией уравнений и решений мы встретимся еще не раз ниже.

1.2. Мезоны

Вернемся к истории частиц. В 30—40-х годах были открыты π -мезоны (теперь принято название пионы) и μ -мезоны (мюоны), а именно π^+ , π^- , π^0 и μ^+ , μ^- ; значок сверху обозначает заряд, так что π^0 , например, — нейтральный пион.

Пионы были открыты на кончике пера теоретика; их, исходя из представлений о взаимодействии протонов и нейтронов в ядрах, предсказал японский физик Юкава. Согласно его гипотезе, та роль, которую γ -кванты играют в электромагнитном взаимодействии заряженных частиц, в ядерном взаимодействии принадлежит π -мезонам.

Напомним, что ядерное взаимодействие не сводится ни к гравитационному (последнее в 10^{45} раз слабее), ни к электромагнитному. В нем заряженные протоны взаимодействуют с нейтральными нейтронами и за счет ядерных сил одноименно заряженные протоны притягиваются. Следовательно, есть особые ядерные силы и пионы, которые как раз являются квантами этих ядерных сил. На основании сведений о ядерных силах удалось предсказать основные свойства пионов еще раньше, чем они были открыты на опыте. Так, можно было предвидеть, что пионы в 200—300 раз тяжелее электронов, что наряду с заряженными пионами должны существовать и нейтральные пионы, что нейтральные пионы могут распадаться на два γ -кванта.

Наконец, что с необходимостью следует из большой величины ядерных сил, неотъемлемым свойством пионов является сильное взаимодействие с нуклонами — протоном и нейтроном. Пионы с большой вероятностью образуются при столкновениях нуклонов (если хватает энергии) и с большой вероятностью захватываются атомными ядрами.

Курьезна история экспериментального открытия пионов: вскоре после предсказания Юкавы экспериментаторы нашли в космических лучах заряженные мезоны с подходящей массой. Однако выяснилось, что эти мезоны почти не захватываются легкими ядрами, а следовательно, слабо взаимодействуют с нуклонами и не могут играть роль квантов ядерных сил.

Так были открыты мюоны μ^+ и μ^- с массой в 207 раз больше массы электрона. Мюоны нестабильны и со временем жизни $2 \cdot 10^{-8}$ сек распадаются на электроны, нейтрино и антинейтрино.

Оставалось загадкой, каким образом в космических лучах образуется большое число мюонов, так как малая вероятность поглощения означала и малую вероятность рождения.

Лишь позже выяснилось, что при действии космических лучей сначала образуются пионы π^+ и π^- с массой $273 m_e$ и π^0 с массой $266 m_e$. Заряженные пионы распадаются со временем жизни $2 \cdot 10^{-8}$ сек по схемам $\pi^- = \mu^- + \nu$ и $\pi^+ = \mu^+ + \nu$, что и объясняет обилие мюонов в космических лучах. Нейтральные пионы со временем жизни около 10^{-16} сек распадаются по закону $\pi^0 = 2\gamma$ и изредка (1% случаев) по закону $\pi^0 = \gamma + e^+ + e^-$.

1.3. Нейтрино и антинейтрино; два сорта нейтрино

Отступая от исторической последовательности, отметим, что в последнее время удалось наблюдать процессы, вызванные действием нейтрино. Раньше о существовании нейтрино можно было догадываться лишь косвенно: когда в процессе наблюдалось кажущееся несохранение энергии и импульса, то недостача приписывалась невидимой частице, унесшей энергию и импульс. В настоящее время наблюдаются реакции типа

$$\bar{\nu} + p = n + e^+$$

Источником нейтрино в этом случае является атомный реактор, внутри которого в осколках деления идет β -распад

$$[A, Z] = [A, Z + 1] + e^- + \bar{\nu},$$

где $[A, Z]$ — ядро с атомным весом A и зарядом Z , а $[A, Z + 1]$ — ядро с тем же атомным весом и зарядом $Z + 1$.

При этом выяснилось, что нейтрино — частицы без массы и без заряда — также делятся на различные виды. Реакция определенного типа приводит к образованию всегда одного и того же вида нейтрино, которое в свою очередь может вызывать лишь определенный процесс.

Частица, образующаяся при β -распаде, называется электронным антинейтрино и обозначается $\bar{\nu}_e$. Для него характерны реакции

$$n = p + e^- + \bar{\nu}_e \quad \text{и} \quad \bar{\nu}_e + p = n + e^+$$

Однако, как показывает опыт, реакция $\bar{\nu}_e + n = p + e^-$ невозможна.

При позитронном распаде образуется электронное нейтрино

$$p = n + e^+ + \nu_e$$

Из теории следует, что эта частица может вызвать процесс

$$\nu_e + n = p + e^-$$

Нейтрино, рождающееся в процессах вместе с мюоном

$$\pi^+ = \mu^+ + \nu_\mu; \quad \pi^- = \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

оказывается иным и обозначается ν_μ (мюонное нейтрино). В 1962 г. в США было показано, что это нейтрино дает процесс

$$\bar{\nu}_\mu + p = n + \mu^+.$$

Однако не наблюдается реакция

$$\bar{\nu}_\mu + p = n + e^+,$$

чем и доказывалось отличие $\bar{\nu}_\mu$ от $\bar{\nu}_e$.

1.4. Странные частицы

В последние 10 лет открыта и подробно исследована группа «странных частиц» — гиперонов и K -мезонов (каонов). Такое название было связано с тем парадоксом, что эти частицы с большой вероятностью образуются при взаимодействии нуклонов и пионов, а распад их на пионы и нуклоны идет сравнительно медленно и характеризуется временем жизни, равным 10^{-10} — 10^{-8} сек, которое следует считать большим по ядерным масштабам.

Гипероны — частицы тяжелее протона — можно считать разновидностью нуклонов. Они образуются из нуклонов с затратой одного нуклона на один гиперон и при распаде снова дают нуклон. Каоны суть частицы типа пионов, их масса — около 900 электронных масс — больше массы пиона, но меньше массы протона.

Приведем несколько примеров реакций распада гиперонов:

$$\Lambda = p + \pi^-; \quad \Lambda = n + \pi^0; \quad \Sigma^- = n + \pi^-; \\ \Xi^- = \Lambda + \pi^-; \quad \Xi^0 = \Sigma^- + \pi^+.$$

Гипероны делятся на две группы. Первая группа (Λ , Σ^+ , Σ^0 , Σ^-), распадаясь, дает нуклоны*. Вторая группа гиперонов (Ξ^- , Ξ^0) при распаде дает гипероны первой группы, которые после этого превращаются в нуклоны. Таким образом, гипероны второй группы превращаются в нуклоны лишь в два этапа и поэтому они называются каскадными гиперонами.

1.5. Новые короткоживущие частицы

В самое последнее время открыт ряд частиц, время жизни которых вполне соответствует сильному взаимодействию (порядка 10^{-21} сек). В отличие от странных частиц, в данном случае нет никакого парадокса.

* Здесь есть одно исключение — распад $\Sigma^0 = \Lambda^0 + \gamma$; этот распад идет весьма быстро со временем порядка 10^{-19} сек; теория дает уверенность в том, что возможен процесс $\Sigma^0 = n + \pi^0$ или $\Sigma^0 = p + \pi^-$ с обычной для гиперонов вероятностью, соответствующей времени жизни порядка 10^{-10} сек; он не наблюдается лишь из-за конкуренции упомянутого выше процесса. Поэтому не следует причислять Σ^0 к каскадным гиперонам.

Среди этих частиц есть и такие, которые можно назвать возбужденными нуклонами, есть и мезоны. При столь малом времени жизни даже при скорости, близкой к скорости света, частицы за время жизни не успевают выйти даже за пределы атома, в ядре которого они родились при ударе быстрого нуклона или пиона. Поэтому здесь не может быть и речи о наблюдении следа частицы в камере Вильсона или в фотоэмульсии. Эти частицы открыты по кинематическим соотношениям в частицах, образующихся при их распаде. Пусть, например, процесс

$$\bar{p} + p = 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0$$

на самом деле идет в два этапа:

$$\bar{p} + p = \pi^+ + \pi^- + \omega \quad \text{и} \quad \omega = \pi^+ + \pi^- + \pi^0.$$

Соответствующие три частицы ($\pi^+ + \pi^- + \pi^0$), образовавшиеся из ω , отличаются тем, что в системе координат, в которой их центр тяжести покоится, они должны иметь всегда вполне определенную энергию, равную $M_\omega c^2$. Очевидно, что если допустить независимое образование трех пионов, то их энергия в системе центра тяжести может иметь любое значение в пределах от $3M_\pi c^2$ до какой-то верхней границы, зависящей от полной энергии реакции.

§ 2. Таблицы частиц и комментариев к ним

Ниже приведены таблицы известных в настоящее время частиц.

По предложению, заимствованному у М. М. Рожкова (Пензенский педагогический институт), расположим частицы так, что их масса возрастает сверху вниз. Вдоль строки слева располагаются частицы, заряженные отрицательно, в середине — электро-нейтральные частицы, справа — заряженные положительно.

2.1. Кванты, лептоны, мезоны

В табл. 1 собраны кванты гравитационного и электромагнитного поля, лептоны и мезоны.

В каждой клетке приведен символ частицы, название, масса покоя в миллионах электроновольт, время жизни в секундах (не распадающиеся отмечены сокращением «стаб» — стабильная) и спин, т. е. момент вращения в единицах, равных планковской константе \hbar .

2.2. Зарядовое сопряжение

Таблица обладает симметрией: каждой частице слева (отрицательной) соответствует частица справа (положительная) с той же массой, спином, временем жизни. Это есть проявление общего принципа зарядового сопряжения, устанавливающего симметрию между частицами и античастицами. Такая симметрично расположенная в таблице пара представляет собой частицу и античастицу.

При этом среди пар встречаются не только частицы со спином $1/2$ (e^+ , e^- ; μ^+ , μ^-), для которых существование античастиц

Таблица 1

Кванты, лептоны и мезоны

Отрицательные, $-e$	Нейтральные	Положительные, $+e$
	γ гамма-квант (квант эл. магн. поля) 0; стаб; 1	
	гравитон (квант гравитационного поля) 0; стаб; 2	
	ν_e нейтрино электронное 0; стаб; $1/2$	$\bar{\nu}_e$ антинейтрино электронное 0; стаб; $1/2$
	ν_μ нейтрино мюонное 0; стаб; $1/2$	$\bar{\nu}_\mu$ антинейтрино мюонное 0; стаб; $1/2$
e^- электрон 0,51; стаб; $1/2$		e^+ позитрон 0,51; стаб; $1/2$
μ^- мюон 105,6; $2,2 \cdot 10^{-6}$; $1/2$		μ^+ мюон 105,6; $2,2 \cdot 10^{-6}$; $1/2$
π^- пион 139,6; $2,6 \cdot 10^{-8}$; 0	π^0 пион 135; $2,2 \cdot 10^{-16}$; 0	π^+ пион 139,6; $2,6 \cdot 10^{-8}$; 0
K^- каон 494; $1,2 \cdot 10^{-8}$; 0	K^0 498; —; 0 \swarrow K_1^0 498; 10^{-10} ; 0 \searrow K_2^0 498; $6 \cdot 10^{-8}$; 0	\bar{K}^0 498; —; 0 \swarrow K_1^0 498; 10^{-10} ; 0 \searrow K_2^0 498; $6 \cdot 10^{-8}$; 0
	η^0 550; 10^{-20} ; 0	

Таблица 1 (продолжение)

Отрицательные, $-e$	Нейтральные	Положительные, $+e$
ζ^- 550; 10^{-21} ; 1; ?	ζ^0 550; 10^{-21} ; 1; ?	ζ^+ 550; 10^{-21} ; 1; ?
ρ^- 750; 10^{-23} ; 1	ρ^0 750; 10^{-23} ; 1	ρ^+ 750; 10^{-23} ; 1
	ω^0 780; 10^{-23} ; 1	
K^{*-} 885; $2 \cdot 10^{-23}$; 1	K^{0*} 885; $2 \cdot 10^{-23}$; 1	\bar{K}^{0*} 885; $2 \cdot 10^{-23}$; 1
		K^{+*} 885; $2 \cdot 10^{-23}$; 1

было предсказано Дираком, но и пары π^+ , π^- ; K^+ , K^- (спин 0); ζ^- , ζ^+ ; ρ^- , ρ^+ ; K^{*-} , K^{+*} (спин 1).

Среди расположенных в среднем столбце электронейтральных частиц имеются два типа. К первому типу, которому в таблице соответствует целая клетка, принадлежат такие истинно нейтральные частицы, как, например, γ и π^0 . Вторым типом являются пары электронейтральных частиц, например ν_e и $\bar{\nu}_e$, которые образуют частицу и античастицу.

Рассмотрим сначала частицы второго типа. Несмотря на то, что и нейтрино, и антинейтрино строго электронейтральны, они отличаются одно от другого, в частности, по тем реакциям, которые они вызывают в обычном веществе, состоящем из протонов и нейтронов:

$$\nu_e + n = p + e^-; \quad \bar{\nu}_e + p = n + e^+.$$

Левая реакция, которую вызывает ν_e , не может быть вызвана действием $\bar{\nu}_e$ и, наоборот, правая реакция не может быть вызвана действием ν_e . Таким образом, ν_e не зарядово симметричен, так как хотя ν_e и $\bar{\nu}_e$ оба электронейтральны, они находятся в различных отношениях к заряженной частице — электрону: ν_e может «сделать» электрон, а $\bar{\nu}_e$ не может.

Нейтральные частицы первого типа вполне зарядово симметричны в том смысле, что, например, γ , одинаково взаимодействует с электроном и позитроном, π^0 одинаково взаимодействует с нуклонами и антинуклонами.

Общая формулировка принципа зарядового сопряжения заключается в том, что есть такое преобразование, при котором частицы превращаются в античастицы. У заряженных частиц при этом меняется знак заряда так, что античастицы обязательно отличаются от частицы. Среди нейтральных частиц есть такие частицы, которые при зарядовом сопряжении переходят сами в себя. Но есть и пары нейтральных частиц, переходящих одна в другую наподобие заряженных.

2.3. Сильно взаимодействующие мезоны

Начиная с пионов, идут частицы, сильно взаимодействующие с нуклонами. Каждая строка представляет собой так называемый изотопический мультиплет, т. е. группу частиц, свойства которых в отношении сильного взаимодействия практически одинаковы.

Классический пример такой группы — тройка π^+ , π^0 , π^- . Они похожи в том же смысле, в каком походят друг на друга протон и нейтрон или такие ядра, как $\text{He}^3 (2p + n)$ и $\text{T}^3 (2n + p)$. Ясно, что сходство не распространяется на электромагнитные силы.

Можно предполагать, что масса частиц существенно зависит от сильного взаимодействия, а электромагнитное взаимодействие дает малую поправку, в результате чего массы π^+ , π^0 и π^- хотя и близки между собой, но в точности не совпадают, — π^0 легче на $4,5 \text{ Мэв}$ (на $9 m_e$). Это отличие того же порядка, что и в паре протон — нейтрон, где нейтрон тяжелее на $1,3 \text{ Мэв}$ (на $2,6 m_e$). Не следует удивляться большому различию времени жизни π^+ , π^- , с одной стороны, и π^0 , с другой. Распад π^+ и π^- идет по слабому взаимодействию ($\pi^+ = \mu^+ + \nu_\mu$), а распад π^0 зависит от электромагнитного взаимодействия ($\pi^0 = 2\gamma$) и разница в распаде не противоречит одинаковости свойств в отношении сильного взаимодействия. Отметим, что π^+ и π^- не только два члена изотопического мультиплета, объединяющего три частицы (π^+ , π^- , π^0); пара π^+ , π^- , как уже говорилось, является парой частица — античастица. Поэтому массы и времена жизни π^+ и π^- в точности одинаковы.

Начиная с η^0 , идут частицы, распад которых происходит по сильному взаимодействию*. Частицы эти открыты недавно и исследованы гораздо хуже и эта часть таблицы, возможно в ближайшее время, будет нуждаться в дополнении или изменении.

Малое время жизни частиц по принципу неопределенности означает большую неопределенность энергии частицы. Время жизни 10^{-22} сек соответствует размытости энергии около 10 Мэв . Именно по размытости энергии и судят о времени жизни и вероятности распада новых тяжелых частиц.

Время жизни их так мало, что не исключена и другая точка зрения, согласно которой это не частицы, а «резонансные состояния». Это значит, что, например ω , распадающаяся на $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$, представляет собой совокупность этих трех пионов, которые взаимодействуют между собой и при определенном значении кинетической энергии могут «попасть на орбиту один к другому» и сделать несколько оборотов раньше, чем система снова распадется.

Следует иметь в виду, что сейчас под вопросом находится и сама возможность в принципе отличить элементарную частицу от связанной системы. Такое различие тривиально для слабосвязанной системы. Можно с уверенностью утверждать, что, например,

* Возможно, что некоторым исключением является η .

атом водорода состоит из протона и электрона, так как достаточно $13,5 \text{ эв}$, чтобы оторвать электрон, а чтобы «сделать» электрон, надо было бы $m_e c^2 = 0,51 \text{ Мэв}$. Поэтому ясно, что электрон был заранее в атоме водорода. Затратив 140 Мэв , можно оторвать пион от протона, $p = n + \pi^+$; но 140 Мэв — это приблизительно $m_\pi c^2$. «Были ли заранее» π^+ в протоне? Как быть в промежуточных случаях?

Современная теория ищет таких способов описания природы, в которых не нужно было бы различать частицы и состояния*. Однако все эти вопросы выходят за рамки того общего обзора, который является целью предлагаемой статьи.

Специфика каонов (читатель, вероятно, обратил внимание на необычную ситуацию в клетке нейтральных каонов) будет разъяснена отдельно в § 5.4.

2.4. Барионы

В табл. 2 приведены сведения о барионах.

Прежде всего подчеркнем, что все частицы, приведенные в таблице, — барионы, т. е. все они при распаде в конце концов превращаются в протоны. Антибарионы в таблице не приведены. Ясно, что таблица антибарионов получится из табл. 2 элементарно — прибавлением черточки сверху у символа, прибавлением приставки *анти* у названия и изменением знака заряда. При этом не надо менять ни массу, ни спин, ни время жизни. Поскольку такую таблицу легко составить, то ее незачем и приводить.

Пара барионов с противоположными зарядами, например Σ^+ и Σ^- , не является парой в смысле частицы и античастицы, именно потому, что оба являются барионами. Соответственно и массы Σ^+ и Σ^- заметно отличаются; главное же заключается в том, что Σ^+ и Σ^- не могут аннигилировать ни друг с другом, ни с обычным веществом, состоящим из протонов и нейтронов. В этом их отличие от антибарионов. Антисигма минус гиперон $\bar{\Sigma}^-$, открытый в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, имеет положительный заряд и массу 1196 Мэв . Однако главным его отличием от Σ^+ является не различие масс ($\bar{\Sigma}^- 1196 \text{ Мэв}$; $\Sigma^+ 1189,4 \text{ Мэв}$ при одинаковом электрическом заряде), а тот факт, что $\bar{\Sigma}^+$ распадается на $\bar{n} + \pi^+$, а \bar{n} способен аннигилировать с нуклонами, например, по реакции

$$\bar{n} + n = 2\pi^+ + 2\pi^-.$$

* Примечание при корректуре. В самое последнее время, по-видимому, открыта частица $f^0 (1250, 10^{-23}, 2)$, особенно интересная потому, что ее существование было предсказано на основании общих идей И. Я. Померанчука, В. Н. Грибова и других властителей дум современной физики частиц, а также ϕ -мезон ($1020, 10^{-21}, 1$), распадающийся преимущественно на K^+ и K^- или \bar{K}^0 и K^0 . Кроме того, получены дополнительные данные в пользу существования $X^\pm (1400, 10^{-19}, 1)$, описанного ниже, в § 6.3.

Таблица 2

Барions

Отрицательные, $-e$	Нейтральные	Положительные, $+e$	Двухзарядные, $+2e$
	N нейтрон 939,5; $1000; 1/2$	P протон 938,2; стаб; $1/2$	
	Λ^0 лямбда-гиперон $1115,4; 2,5 \cdot 10^{-10}; 1/2$		
Σ^- сигма-гиперон $1196; 1,7 \cdot 10^{-10}; 1/2$	Σ^0 сигма-гиперон $1191,5 \sim 10^{-10}; 1/2$	Σ^+ сигма-гиперон $1189,4; 0,8 \cdot 10^{-10}; 1/2$	
Ξ^- каскадный кси-гиперон $1318,4; 1,3 \cdot 10^{-10}; 1/2$	Ξ^0 каскадный кси-гиперон $1311; 1,5 \cdot 10^{-10}; 1/2$		
Δ^- «3—3 резонанс» $1240; 10^{-23}; 3/2$	Δ^0 «3—3 резонанс» $1240; 10^{-23}; 3/2$	Δ^+ «3—3 резонанс» $1240; 10^{-23}; 3/2$	Δ^{++} «3—3 резонанс» $1240; 10^{-23}; 3/2$
Σ^{*-} $1385; 3 \cdot 10^{-23}; 3/2?$	Σ^{*0} $1385; 3 \cdot 10^{-23}; 3/2?$	Σ^{*+} $1385; 3 \cdot 10^{-23}; 3/2?$	
	Λ^{*0} $1405; 2 \cdot 10^{-23}; ?$		
	N^* $1510; 10^{-23}; 3/2$	P^* $1510; 10^{-23}; 3/2$	
	Λ^{*0**} $1520; 10^{-22}; ?$		
Ξ^{*-} $1540; ? ?$	Ξ^{*0} $1540; ? ?$		
	N^{**} $1670; 10^{-23}; 5/2$	P^{**} $1670; 10^{-23}; 5/2$	
	Λ^{*0***} $1820; 10^{-22}; ?$		
Δ^{*-} $1920; 0,5 \cdot 10^{-23}; ?$	Δ^{*0} $1920; 0,5 \cdot 10^{-23}; ?$	Δ^{*+} $1920; 0,5 \cdot 10^{-23}; ?$	Δ^{*++} $1920; 0,5 \cdot 10^{-23}; ?$

В отдельных строках таблицы помещены частицы с одинаковым сильным взаимодействием — члены одного изотопического мультиплета. Так же как и для мезонов, такие частицы имеют одинаковый спин и близкие массы.

За каскадными кси-гиперонами следуют «новые» частицы, распадающиеся весьма быстро по сильному взаимодействию. Чтобы в таблице они были вместе, мы даже в одном месте поступились принципом расположения частиц по возрастающей массе (Δ легче, чем Ξ^-). К «новым» барионам относится все сказанное о «новых» мезонах: они менее изучены, могут рассматриваться как «резонансные состояния», о времени их жизни судят по размытости массы.

Поскольку распад их зависит от сильного взаимодействия, а сильное взаимодействие в строке одинаково, то у «новых» частиц массы и время жизни в строке можно считать одинаковым, различие лежит за пределами точности опыта.

Наряду с массой и зарядом, для характеристики барионов нужна еще одна величина — «странность», но о ней будет сказано позже, в § 5.1, 5.2.

§ 3. Точные законы превращения частиц

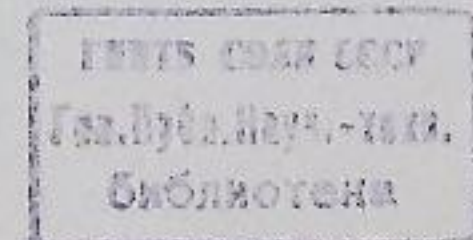
Обилие различных частиц подчеркивает необходимость формулировки минимального количества законов, управляющих их взаимными превращениями.

3.1. Закон сохранения электрического заряда

В XIX в. казалось, что закон сохранения электрического заряда вытекает из самого факта существования частиц — электронов и атомных ядер; казалось, что эти частицы никогда не рождаются, не уничтожаются и не превращаются в другие; следствием их стабильности и является сохранение заряда. Сейчас, когда известно большое число различных взаимно превращающихся частиц, сохранение электрического заряда является ограничением числа возможных процессов превращения. Непосредственно, экспериментально сохранение заряда для частиц установлено лишь с определенной степенью точности. Можно сказать, например, что вероятность процесса

$$e^- = 2\nu_e + \bar{\nu}_e$$

меньше $10^{-20} \text{ сек}^{-1}$; для нестабильных частиц экспериментальная точность еще меньше. Однако существует стройная, восходящая к Максвеллу, теория электромагнитного поля. Эта теория не допускает никакого несохранения заряда. Поэтому, несмотря на ограниченную точность прямого опыта, мы полагаем, что этот закон является абсолютным.



3.2. Сохранение барионов

При всех ядерных и радиоактивных процессах происходит только превращение одних барионов в другие, общее же их число при этом остается неизменным.

С учетом существования антибарионов надо несколько изменить эту формулировку: сохраняется величина, равная числу барионов минус число антибарионов. Можно ввести понятие «барионный заряд» (иногда его называют «нуклонное число»): всем барионам табл. 2 приписывается заряд $+1$ (не путать с электрическим зарядом!), всем квантам, лептонам и мезонам — заряд 0 и всем антибарионам — заряд -1 . Тогда сохранение барионов означает, что в каждом процессе сохраняется суммарный барионный заряд. Именно сохранение барионов приводит к тому, что нет реакций, в которых вся масса обычного вещества превращалась бы в энергию. Например, не существует реакции $p + e^- = 2\gamma$ или $n + n = 2\gamma$. По этой причине в ядерных реакциях энергия выделяется лишь за счет перегруппировки нуклонов, причем выделяющаяся энергия составляет лишь малую долю (до 1%) энергии покоя Mc^2 . Тот факт, что нуклоны, не аннигилируют один с другим в условиях обычных ядер, проверяется экспериментально, и установлен лишь с определенной точностью — время жизни больше 10^{20} лет. Этот факт не следует в настоящее время из какой-либо теории, а напротив, сам кладется в ее основу. Однако экспериментальные доказательства того, что нуклоны, сталкивающиеся с большой энергией, не могут аннигилировать или того, что, например, нет процесса $\Lambda = \bar{n} + \pi^0$, гораздо менее определены. Сейчас во всем мире, вероятно, прослежено 10^5 или 10^6 случаев Λ -распада и если не наблюдался ни один случай превращения бариона Λ в антинейтрон, то формально это значит лишь, что вероятность этого процесса меньше по крайней мере в 10^6 раз вероятности нормального распада, что соответствует времени жизни относительно этого распада больше $\frac{2,5 \cdot 10^{-10}}{10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ сек. Однако здесь на помощь приходит квантовая механика. Если бы несохранение барионного заряда имело место в каких-нибудь экзотических условиях (большая энергия, гипероны), то хотя бы с малой вероятностью эти условия реализовались бы и в обычных ядрах. Действительно, ведь в ядре сохраняется полная энергия, но это не исключает возможности двум мысленно выбранным нейтронам иметь большую энергию относительного движения в течение малого времени (ср. с принципом неопределенности Гейзенберга для энергии). Таким образом, несохранение барионного заряда в экзотических условиях обязательно привело бы и к несохранению его (хотя бы с малой вероятностью) и в обычных ядрах. Поэтому большая точность, с которой констатируется сохранение в случае обычных ядер, является убедительным доказательством универсальности закона сохранения барионного заряда.

3.3. Лептонные числа

Все наблюдаемые до настоящего времени лептонные процессы удовлетворяют двум законам, в которых сохраняются величины l_e и l_μ , где $l_e = (e^-) + (\nu_e) - (e^+) - (\bar{\nu}_e)$; $l_\mu = (\mu^-) + (\nu_\mu) - (\mu^+) - (\bar{\nu}_\mu)$, а величины в скобках равны числам соответствующих частиц в системе. (Число l_e называется «электронное лептонное число», число l_μ — «мюонное лептонное число».)

Как и в предыдущих случаях, на опыте констатировать отсутствие процессов, в которых изменились бы величины l_e или l_μ (или обе сразу), можно лишь с определенной точностью и точность эта в действительности невелика. О вероятности запрещенных процессов (меняющих l_e или l_μ) можно лишь утверждать, что она меньше, чем $0,01$ или $0,001$ вероятности аналогичных, разрешенных процессов (при прочих равных условиях, т. е. в частности, при равном выделении энергии). Поэтому предположение об абсолютных точных законах сохранения чисел l_e и l_μ есть гипотеза или экстраполяция данных опыта.

Эта гипотеза основана отчасти на аналогии с законами сохранения электрического и барионного зарядов.

Другим основанием гипотезы являются общие свойства всех разрешенных процессов, в которых участвуют лептоны (подробнее о них см. ниже, § 6 и 7), стройность и красота теории которых была бы нарушена, если бы оказалось, что есть процессы с изменением l_e и l_μ , идущие с относительно малой вероятностью.

§ 4. Электромагнитное взаимодействие

4.1. Взаимодействие электромагнитного поля с частицами

Основной характерный для электромагнитного взаимодействия закон сформулирован уже в школьном определении электрического поля как поля, которое создает силу, действующую на заряженные частицы. В этом определении нужно подчеркнуть два момента: а) поле вызывает лишь ускорение или в общем случае изменение движения частиц, но не вызывает превращения одних частиц в другие; б) поле не действует на нейтральные частицы.

Заметим, что свойства квантов электромагнитного поля, т. е., например, световых, рентгеновских и γ -квантов, определяются общими свойствами поля. Поэтому сделанное выше утверждение, что поле не вызывает превращения частиц и не действует на нейтральные частицы, должно относиться и к квантам.

Хорошо известно, что есть многочисленные опыты, противоречащие сделанным утверждениям. К их числу относятся, например, распад $\pi^0 = 2\gamma$, фоторождение мезонов $\gamma + p = n + \pi^+$ или влияние поля на нейтроны за счет магнитного момента нейтрона.

В действительности, однако, во всех таких случаях наряду с электромагнитным взаимодействием вмешиваются другие силы. Распад π^0 можно представить себе так, что π^0 на мгновение («виртуально», с нарушением сохранения энергии, но на очень малое время) превращается в пару $p + \bar{p}$, а γ -кванты испускаются при движении заряженных частиц p и \bar{p} в соответствии с высказанными правилами. Затем p и \bar{p} аннигилируют и в результате π^0 превращается в 2γ ; при сравнении начального и конечного состояний энергия в точности сохраняется. Во втором случае γ -квант действует сперва на протон, а после встряски протон распадается на $n + \pi^+$. Другой вариант процесса — сперва протон виртуально распадается на n и π^+ , они не могут разлететься без добавки энергии извне, а затем квант действует на нейтрон или на π^+ .

Как может квант действовать на нейтральную частицу? Откуда берется магнитный момент нейтрона? Ответ заключается в том, что нейтрон часть времени проводит в состоянии $p + \pi^-$ и в это время кванты поля, или статическое магнитное поле, могут действовать на заряженные частицы. Виртуальный распад n на $p + \pi^-$ идет за счет сильного взаимодействия. Кванты могут на малую часть времени превращаться в электронно-позитронные пары и за счет этого теория предсказывает взаимодействие квантов один с другим и рассеяние квантов на квантах. Предсказанное теорией рассеяние квантов на электростатическом поле, окружающем атомные ядра, недавно было с достоверностью проверено на опыте. Теория предсказывает, что даже нейтрино обладают определенным, правда весьма слабым, и своеобразным электромагнитным взаимодействием.

Однако все эти исключения имеют естественное объяснение и не подрывают сам принцип, что первичное взаимодействие поля с частицами всегда сводится к изменению движения заряженных частиц. Этот принцип имеет большое значение, так как он приводит к вполне определенному математическому выражению закона взаимодействия. В частности, для электрона и мюона этот принцип позволил Дираку предсказать теоретически магнитный момент, связанный со спином частицы. Этот принцип носит специальное название — принцип «минимального» или «наиболее экономного» электромагнитного взаимодействия.

4.2. Динамический принцип зарядового сопряжения

К данной в предыдущем пункте формулировке принципа нужно сделать одно существенное добавление: рождение пары частица-античастица или аннигиляция такой пары приравнивается к изменению движения одной частицы.

Таким образом, принцип зарядового сопряжения — это не только утверждение о симметрии таблицы частиц, но и определенное утверждение о динамике частиц.

Первоначально в теории Дирака рассматривались электроны, заполняющие уровни с отрицательной энергией, а позитрон представлялся как незаполненное место среди таких электронов. Переход электрона из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией описывал рождение пары и переход из одного состояния с положительной энергией в другое как изменение движения электрона; аналогия между двумя процессами в интерпретации Дирака очевидна. Эти представления сейчас не нужны и их убирают из аппарата теории, как убирают строительные леса, когда здание окончено. Частицы и античастицы есть и среди пионов со спином ноль, для которых неприменимы понятия заполненных уровней. Однако сам принцип, подчеркивающий глубокую связь частиц и античастиц, полностью сохранился. Он относится не только к электромагнитному, но и к любому взаимодействию. Всякое изменение движения частицы можно описывать как исчезновение частицы в начальном и последующее рождение частицы в конечном состоянии.

Принцип заключается в том, что везде к словам «рождение частицы» добавляем «или исчезновение античастицы» и к словам «уничтожение частицы» добавляем «или рождение античастицы». Более наглядно эти соображения можно проиллюстрировать следующим образом: если мы символически «перемножим» две скобки («уничтожение e^- или рождение e^+ ») и («рождение e^- или уничтожение e^+ »), соответствующие воздействию некоторого, в данном случае электромагнитного, поля, то получим четыре возможных варианта, которые могут быть вызваны действием поля:

- а) уничтожение e^- и рождение e^- ;
- б) уничтожение e^- и уничтожение e^+ ;
- в) рождение e^+ и рождение e^- ;
- г) рождение e^+ и уничтожение e^+ .

Эти варианты означают:

- а) изменение движения e^- ;
- б) аннигиляция пары e^-, e^+ ;
- в) рождение пары e^-, e^+ ;
- г) изменение движения e^+ .

Все четыре процесса тесно связаны между собой; зная один процесс, можно вычислить все свойства и вероятность всех остальных процессов.

§ 5. Сильное взаимодействие и странность

5.1. Общие свойства

Все барионы (см. табл. 2), а также пионы и более тяжелые мезоны (нижняя часть табл. 1) образуют группу сильно взаимодействующих частиц. Для этих частиц характерно, что сечения рассеяния и реакций порядка квадрата длины волны сталкивающихся частиц, вероятности распадов с превращением одних сильно взаимодей-

ствующих частиц в другие соответствуют времени жизни 10^{-21} — 10^{-23} сек. Все это указывает на взаимодействие гораздо более сильное, чем электромагнитное. Наглядным примером являются ядерные силы, связывающие нейтроны и протоны в ядрах. Очевидно, эти силы значительно больше электростатических, так как, несмотря на электростатическое отталкивание протонов, стремящееся разрушить ядро, ядерные силы обуславливают притяжение и обеспечивают его устойчивость.

5.2. Странные частицы

Достаточно беглого взгляда на таблицы, чтобы убедиться в наличии исключений из сказанного. Дело в том, что распады K на 2π или Λ на $n + \pi^0$ идут со временем 10^{-8} — 10^{-10} сек., т. е. гораздо медленнее, чем следовало бы ждать от сильно взаимодействующих частиц (ср. с ω - или ρ -мезонами, с Δ - или N^* -барионами).

Назовем Λ и Σ частицами со странностью $S = -1$, Ξ с $S = -2$, K^+ и K^0 припишем $S = +1$, K^- и \bar{K}^0 соответственно $S = -1$. Странность нуклонов и пионов равна нулю. Оказывается, что тогда можно сформулировать такое правило: процессы, в которых сумма S всех частиц не изменяется, идут как настоящие процессы сильного взаимодействия со свойствами, описанными в 5.1. Однако такой процесс как распад $\Lambda = n + \pi^0$, сопровождается изменением странности от $S = -1$ у Λ до $S = 0$ у $n + \pi^0$, а поэтому он идет в 10^{10} — 10^{12} раз медленнее, чем по сильному взаимодействию. В этом параграфе, посвященном сильному взаимодействию, мы в первом приближении будем считать, что процессы с изменением странности не идут вовсе. Тогда можно сказать, что в процессах сильного взаимодействия имеют место три закона сохранения: сохраняется электрический заряд, барионный заряд и странность (сохранение лептонных чисел l_e и l_μ можно специально не оговаривать, так как эти числа равны нулю для всех сильно взаимодействующих частиц).

5.3. Схема трех фундаментальных частиц

Японский физик Саката предложил необычайно наглядное объяснение приведенных выше закономерностей. Три закона сохранения можно понять так, что существуют три типа фундаментальных частиц — кирпичиков, из которых построены все сильно взаимодействующие частицы. Тогда законы сохранения сводятся к тому, что эти кирпичики не уничтожаются, не рождаются, не превращаются один в другой, а только по-разному складываются, по-разному движутся.

От обычных вполне наглядных кирпичиков наши фундаментальные частицы (фундаментоны) отличаются только тем, что у каждого сорта фундаментонов есть свои античастицы. По общему

принципу (§ 4.2) рождение и уничтожение пар частица-античастица приравнивается к движению*.

Итак, приступим к «сотворению» мира сильно взаимодействующих частиц, выбрав в качестве кирпичиков p , n , Λ — три самых легких бариона.

Запишем, например, $\pi^+ = (p, \bar{n})$; $\pi^0 = (p, \bar{p})$, а также (n, \bar{n}) ; $\pi^- = (n, \bar{p})$; $K^+ = (p, \bar{\Lambda})$; $K^0 = (n, \bar{\Lambda})$; $\bar{K}^0 = (\Lambda, \bar{n})$; $K^- = (\Lambda, \bar{p})$; $\Sigma^+ = (\Lambda, p, \bar{n})$; $\Sigma^0 = (\Lambda, n, \bar{n})$, а также (Λ, p, \bar{p}) ; $\Sigma^- = (\Lambda, n, \bar{p})$; $\Xi^- = (\Lambda, \Lambda, \bar{p})$; $\Xi^0 = (\Lambda, \Lambda, \bar{n})$.

Список можно легко продолжить, так как принцип его построения прост. Всякая положительно заряженная частица содержит один протон, отрицательная — один антипротон. Частицы со странностью $S = -1$ содержат один Λ -гиперон, со странностью $S = -2$ — два Λ -гиперона, со странностью $S = +1$ — один $\bar{\Lambda}$ -гиперон. Мезоны, не имеющие барионного заряда, состоят из равного числа частиц и античастиц.

Закон сохранения электрического заряда сводится к тому, что протоны не рождаются и не уничтожаются кроме как в паре $p + \bar{p}$. Последнюю оговорку следует делать везде. Сохранение странности свелось к тому, что не рождаются и не уничтожаются Λ -гипероны (или рождаются пары и уничтожаются пары $\Lambda + \bar{\Lambda}$). Наконец, так как не рождаются и не уничтожаются ни протоны, ни Λ -гипероны, ни нейтроны, то сохраняется и суммарное их число, т. е. барионный заряд.

Покажем на нескольких примерах, как при помощи такой схемы можно наглядно представить разрешенные процессы.

$$1) \pi^- + p = n + \pi^0.$$

Если расписать в виде $(n, p) + p = n + (p, \bar{p})$, то этот разрешенный процесс можно представить как перегруппировку.

$$2) K^- + p = \Sigma^+ + \pi^-.$$

Раскрывая структуру K^- и Σ^+ : $(\Lambda, \bar{p}) + p = (\Lambda, p, \bar{n}) + (n, p)$, получим перегруппировку плюс рождение пары n, \bar{n} , что также приравнивается к движению (перегруппировке).

$$3) \Sigma^0 = \Lambda^0 + \gamma.$$

Заметим, что излучение γ -кванта в этом процессе можно рассматривать как результат движения (аннигиляции) частиц, без превращения одних частиц в другие. Поэтому теоретическая оценка дает для этого процесса весьма малое время (см. табл. 2) в отличие от распадов с превращением $\bar{\Lambda}$ в p или n .

$$4) K^+ + p \neq \Sigma^+ + \pi^+.$$

Этот процесс, хотя и разрешен по электрическому и барионному зарядам, запрещен по странности.

* Этот принцип, впервые изученный на примере электромагнитного взаимодействия, относится к любому взаимодействию, к любым процессам.

Раскрываем левую и правую часть: $(p, \bar{\Lambda}) + p \neq (\Lambda, p, \bar{n}) + (p, \bar{n})$. Чтобы провести процесс, нужно было бы $\bar{\Lambda}$ превратить в $\Lambda + 2\bar{n}$, что эквивалентно превращению $2\bar{\Lambda} \rightarrow 2\bar{n}$. Но так как в сильном взаимодействии Λ и n , $\bar{\Lambda}$ и \bar{n} — это разные, не превращающиеся один в другой кирпичики, этот процесс невозможен.

Отметим в заключение, что выбор трех основных частиц неоднозначен; можно было бы объявить основными Ξ^- , Ξ^0 и Λ . Не подлежит изменению число основных частиц (три), соответствующее числу законов сохранения.

5.4. Нейтральные каоны

Заметим, что с точки зрения сильного взаимодействия, т. е. в теории, в которой Λ -гиперон считается непревращающейся частицей, следует ожидать существования двух нейтральных каонов, один из которых является античастицей другого $K^0 = (n\bar{\Lambda})$, $\bar{K}^0 = (\Lambda\bar{n})$. Их массы в точности одинаковы, но они образуются при различных реакциях и вызывают, например, при взаимодействии с нуклонами различные реакции. Но мы знаем, что в действительности, с малой вероятностью возможно превращение Λ в n ; значит возможно и превращение $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$.

Из квантовой механики следует, что если у какой-либо системы есть два состояния, энергия которых в первом приближении одинакова, то в следующем приближении, с учетом возможности перехода из одного в другое, уровень расщепляется.

Собственными состояниями оказываются суперпозиции

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0) = K_1^0 \text{ и } \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0) = K_2^0.$$

Энергии их отличаются на ничтожную величину порядка 10^{-5} эв , что составляет около 10^{-14} долю массы K^0 . Отметим, что K^0 есть нестабильная частица; у нее есть несколько путей распада:

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-; K^0 \rightarrow \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu; K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0.$$

Аналогично (производим зарядовое сопряжение) можно написать:

$$\bar{K}^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+; \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}_\mu; \bar{K}^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^0.$$

В состоянии суперпозиции $K_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{K}^0 + K^0)$ частица K_1^0 может перейти, например, в $\pi^+ + \pi^-$ двумя путями — «по каналу» K^0 или по каналу \bar{K}^0 ; вклад этих двух каналов в одних случаях складывается, в других вычитается. В квантовой механике ведь складываются не вероятности (которые всегда положительны), а амплитуды, квадрат которых дает вероятность.

В результате K_1^0 распадается на $\pi^+ + \pi^-$, но не на $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$, а K_2^0 распадается на $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$, но не на $\pi^+ + \pi^-$. Время жизни K_1^0 и K_2^0 оказывается существенно различным. Ситуация с нейтральными каонами приводит ко многим интересным следствиям. Пусть, например, K^0 рождается около ядра, а затем и летит в пустоте. Мы должны рассматривать его как смесь частиц K_1^0 и K_2^0 . Через некоторое время K_1^0 распалось и осталось K_2^0 . Но с точки зрения реакции с ядрами K_2^0 содержит K^0 и \bar{K}^0 . В пучке частиц, родившихся как K^0 , появились \bar{K}^0 ! Но они появляются не только в результате распада K_1^0 .

Ведь решая уравнения, мы должны представить себе K^0 как суперпозицию двух состояний с разной энергией K_1^0 и K_2^0 .

$$K^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K_1^0 + K_2^0).$$

Разная энергия означает, что волновые функции K_1^0 и K_2^0 имеют разную частоту. Когда разность фаз изменится на полпериода, относительный знак внутри скобки из плюса перейдет в минус и мы получим $\frac{1}{\sqrt{2}}(K_1^0 - K_2^0) = \bar{K}^0$. Теория предсказывает, что превращение K^0 в \bar{K}^0 в пучке будет носить колебательный характер и опыт подтверждает этот вывод!

Фейнман не без оснований отмечает принципиальное значение этого прямого применения основных принципов квантовой механики к превращению элементарных частиц. Дело в том, что среди физиков есть течение, неприемлющее квантовую механику. К сожалению, его вдохновителем был А. Эйнштейн и к нему примкнул де Бройль. Сторонники этого направления строят другую теорию и вынуждены тщательно следить за тем, чтобы для атома, который хорошо изучен, эта теория давала в точности те же результаты, что и обычная квантовая механика. Но так как получать известные результаты явно не интересно, то из среды этой группы физиков раздаются обещания, что де в области элементарных частиц получатся новые результаты, отличные от квантовомеханических. Пример каонов показывает, как блестяще работает существующая квантовая механика, в частности, и в области элементарных частиц.

5.5. Изотопические мультиплеты

В рамках схемы трех фундаментальных частиц заметим, что две из них — протон и нейтрон — очень похожи во всем, кроме электрического заряда.

Этим объясняется такая же большая степень сходства между тремя пионами π^+ , π^0 , π^- или между тремя Σ -частицами, отличающимися одна от другой заменой p на n и \bar{p} на \bar{n} .

Таким образом, вся теория изотопического спина и изотопических мультиплетов на языке схемы трех частиц является следствием предположения об одинаковости двух частиц из трех*.

5.6. Вектоны

Попытаемся конкретнее разобраться в утверждении, что, например, π^+ состоит из p и \bar{n} .

Прежде всего, масса p и \bar{n} порядка 939 Мэв у каждого, масса π^+ равна 135 Мэв , а значит связь в данном случае необычайно прочная. Дефект массы, т. е. энергия, выделяющаяся при соединении p и \bar{n} в π^+ , равен 1743 Мэв , что в 13 раз больше массы самого π^+ ; для сравнения заметим, что дефект массы водородного атома порядка 10^{-8} его массы и дефект массы ядра дейтерия равен 10^{-3} его массы. Ситуация в случае каонов практически такая же, как и в случае пионов. Таким образом, наглядные представления приводят к выводу, что между барионами и антибарионами действует необычайно сильное притяжение.

Можно предположить, что существует поле, похожее в ряде отношений на электромагнитное поле, только роль заряда играет барионный заряд. Разноименные частицы притягиваются и барионы и антибарионы могут соединяться в мезоны.

Одноименные частицы отталкиваются и опыт, действительно, показывает, что при больших энергиях сталкивающихся нуклонов проявляется отталкивание.

Однако, в отличие от закона Кулона, это предполагаемое взаимодействие между барионами должно весьма быстро убывать с расстоянием. В противном случае между любыми двумя кусками вещества действовали бы огромные силы, так как обычное электронейтральное вещество в смысле барионного заряда отнюдь не нейтрально. Даже на расстоянии порядка среднего расстояния нуклонов в ядре (10^{-13} см — единица длины, которая теперь называется один ферми) силы отталкивания уже мало заметны и уступают место ядерным силам притяжения. Ядерные силы с этой точки зрения носят вторичный характер, как, например, Ван-дер-Ваальсовы силы между нейтральными молекулами.

Быстрое спадание сил отталкивания барионов и сил притяжения барионов к антибарионам означает, что кванты соответствующего поля должны быть тяжелее пионов; может быть роль таких квантов (названных вектонами) играет ω^0 -мезон (см. табл. 1, стр. 13).

5.7. Современные тенденции

В заключение отметим, что количественная разработка теории сильного взаимодействия, которая сейчас приносит первые плоды,

* В самое последнее время усиленно разрабатываются следствия еще более глубокого предположения об одинаковости свойств всех трех частиц. В этом приближении равны массы пионов и каонов.

пошла по совершенно иному пути. Для нее характерен полный отказ от наглядных моделей, от различения элементарных и составных частиц. Вместе с тем современная теория полностью использует общие принципы — три закона сохранения; симметрию между протоном и нейтроном и соответствующую «изотопическую инвариантность» других частиц; принцип зарядового сопряжения и связь между частицами и античастицами. Полностью используют общие физические принципы: инвариантность относительно Лоренцовского преобразования, принцип причинности, принцип локальности взаимодействия, общие принципы квантовой механики, относящиеся к суперпозиции состояний и сложению амплитуд (но отнюдь не какое-либо конкретное уравнение Шредингера или Дирака!). Применяется изощренная математическая техника рассмотрения наблюдаемых величин как аналитических функций энергии и импульса, т. е. исследуются эти функции и при несуществующих комплексных значениях, например, энергии.

Таким образом, вложив минимум бесспорных конкретных сведений (три закона сохранения, зарядовое сопряжение), удается получить очень многое, а может быть и все. Когда в области сильного взаимодействия таким путем будет получено все, то просто нельзя будет спрашивать, элементарна ли та или иная частица, например Δ или N^{**} (см. табл. 2).

Тогда, пользуясь для рассуждений кремневым топором схемы трех частиц, не забудьте плюнуть через левое плечо и сказать: «Чур меня, это только для личного пользования, в мнемонических целях. Верую в аналитичность, верую, что ни одна частица не элементарнее другой».

§ 6. Слабое взаимодействие

6.1. Четырехфермионное взаимодействие (превращение)

В настоящее время изучен целый ряд процессов, которые относятся к слабому взаимодействию.

Это прежде всего β -распад

$$n = p + e^- + \bar{\nu}_e; \quad (1)$$

распад μ -мезона

$$\mu^- = e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu; \quad (2)$$

захват μ -мезона ядром

$$\mu^- + p = n + \nu_\mu. \quad (3)$$

Мы здесь не пишем всех тех разновидностей процессов, которые получатся из написанных, если их читать справа налево или переносить отдельные частицы с одной стороны на другую, заменяя их там античастицами. (Например, реакция $n = p + e^- + \bar{\nu}_e$ дает $e^- + p = n + \nu_e$, т. е. описывает захват электрона ядром.)

Характерно, что в этих процессах в совокупности участвуют по четыре частицы со спином $1/2$, т. е. четыре фермиона.

Целый ряд процессов внешне иного типа можно свести к последовательности сильного взаимодействия и четырехфермионного.

Например, процесс $\pi^+ = \mu^+ + \nu_\mu$ можно записать следующим образом:

а) $\pi^+ = p + \bar{n}$ (сильное взаимодействие);

б) $p + \bar{n} = \mu^+ + \nu_\mu$ (разновидность процесса (3)).

В связи с открытием странных частиц, коллекцию основных процессов надо пополнить еще двумя лептонными процессами:

$$\Lambda = p + e^- + \bar{\nu}_e; \quad (4)$$

$$\Lambda = p + \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (5)$$

После этого наблюдаемый на опыте распад каонов можно описать так же, как распад пионов:

$$K^+ \rightarrow p + \bar{\Lambda} \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

(первый шаг — сильное взаимодействие, второй — разновидность (5)) или для другого распада

$$K^+ \rightarrow p + \pi^0 + \bar{\Lambda} \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e$$

(сильное + разновидность (4)).

Странные частицы распадаются также и без образования лептонов. Например

$$\Lambda = p + \pi^-.$$

Оказывается, что качественно все безлептонные распады можно получить из элементарного четырехфермионного процесса

$$\Lambda + \bar{p} = n + \bar{p}. \quad (6)$$

Так, например, перенося в (6) \bar{p} слева направо и объединяя $n + \bar{p} = \pi^-$, получим упомянутый распад.

6.2. Универсальность взаимодействия

На первый взгляд в предыдущем пункте по формальному признаку объединены очень различные процессы — распад нейтрона с периодом 1000 сек и распад мюона с периодом $2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$. В действительности массы частиц и энергетические соотношения мы должны рассматривать как нечто заданное извне по отношению к теории β -распада.

Так, например, свободный нейтрон тяжелее протона, значит энергия нейтрона больше и нейтрон распадается.

Сравним ядра N_{13} и C_{13} . Их можно представить себе так: $N_{13} = C_{12} + p$; $C_{13} = C_{12} + n$. При этом окажется, что около ядра C_{12} энергия протона больше, чем энергия нейтрона. На опыте наблюдается процесс

$$N_{13} = C_{13} + e^+ + \nu_e,$$

который и показывает, что в этом случае протон превращается в нейтрон. Таким образом, направление процесса и выделяющаяся энергия зависят от внешних обстоятельств. От них же зависит и скорость процесса. При изменении энергии меняется число отдельных квантованных состояний, которые могут быть заняты в результате реакции. Поэтому при превращении одной частицы в три вероятность распада пропорциональна E^5 , а при столкновении двух частиц сечение пропорционально E^2 , где E — энергия, выделяющаяся при реакции.

Характеристикой самого процесса превращения частиц (или, как говорят, «взаимодействия, вызывающего превращение частиц») является вероятность превращения, отнесенная к одному квантовому состоянию.

Замечательный факт заключается в том, что эта характерная величина весьма близка для всех шести (1—6) процессов; для первых трех из них точность совпадения достигает нескольких процентов. Как объяснить такое совпадение, нельзя ли свести его к совпадению меньшего числа независимых величин?

6.3. X-мезоны

Предположим, что все эти процессы идут в две стадии через нового типа заряженные мезоны X^\pm (их иногда обозначают W^\pm).

Предположим, что имеют место четыре процесса:

$$X^- = e^- + \bar{\nu}_e;$$

$$X^- = \mu^- + \bar{\nu}_\mu;$$

$$X^- = \bar{p} + n;$$

$$X^- = \bar{p} + \Lambda.$$

Все шесть процессов четырехфермионного типа сведутся к комбинациям этих четырех процессов (вместе с их «разновидностями» в смысле переноса с одной стороны равенства в другую).

Запишем, например, процесс $n = p + e^- + \nu_e$ в виде $n = p + X^-$; $X^- = e^- + \bar{\nu}_e$.

Близкое совпадение шести констант четырехфермионных процессов заменится совпадением четырех констант для процессов с X-мезонами. Из гипотезы существования X-мезона вытекает ряд новых следствий, предсказываются новые процессы. Например, предсказывается рассеяние антинейтрино на электроны

$$\bar{\nu}_e + e^- = X^- = \bar{\nu}_e + e^-.$$

Важнейшим процессом такого рода является

$$e^- = X^- + \nu_e = e^- + \bar{\nu}_e + \nu_e.$$

Для того чтобы этот процесс мог произойти реально, нужно, чтобы энергия электрона справа была меньше, чем слева. С учетом сохранения импульса оказывается, что процесс должен идти в поле ядра. Этот процесс был предсказан несколько лет назад Б. М. Понтекорво. Излучению нейтрино в звездах посвящены статьи Б. М. Понтекорво и В. С. Пинаева в этом сборнике, что позволяет здесь не останавливаться подробнее на данном вопросе.

Выше предполагалось, что X -мезон образуется только виртуально — на краткое время и с нарушением сохранения энергии — и тут же распадается. Однако при достаточной энергии можно ожидать и появления свободного X -мезона. В опытах с нейтрино большой энергии наблюдались случаи, которые можно интерпретировать, как

$$\nu_{\mu} = X^{+} + \mu^{-}; \quad X^{+} \begin{cases} \mu^{+} + \nu_{\mu} \\ e^{+} + \nu_e \end{cases}$$

Подразумевается, что первый процесс идет в поле ядра, так как иначе нельзя было бы удовлетворить сохранению энергии и импульса. Второй процесс происходит налету со свободным X -мезоном. По грубой оценке, масса X -мезона лежит между массой каонов и массой нуклонов, а время жизни порядка 10^{-10} сек исключает возможность его прямого наблюдения*.

Экспериментальный материал еще далеко недостаточен для уверенного утверждения, что X -мезоны существуют; сами авторы экспериментальной работы воздерживаются от категорического утверждения.

6.4. Три векторных поля. Трудности

В случае подтверждения существования X -мезона выявится замечательная картина сходства взаимодействий. Тогда электромагнитное взаимодействие можно представить себе как передаваемое γ -квантами с элементарным актом

$$A^{\pm} = A^{\pm} + \gamma,$$

где A — любая заряженная частица.

В основе ядерного взаимодействия лежит векторное поле ω^0 (отождествление с ω^0 из табл. 1 следует считать условным, недоказанным):

$$B = B + \omega^0,$$

где B — любой барион.

Для слабого взаимодействия характерно

$$C \rightarrow D + X,$$

где C, D — любые фермионы, барионы или лептоны.

* Примечание при корректуре. Последние сообщения (сентябрь 1963 г.) подтверждают существование X и уточняют его массу — порядка $1400 M_{\pi}$, т. е. больше массы нуклона. Спин X равен 1.

Поля γ , ω и X должны обладать общими свойствами, в частности спин γ , ω , X одинаков и равен 1. Этому соответствует классическое поле, получающееся из вектор-потенциала (отсюда названия вектон и векторный X -мезон).

Различие полей связано прежде всего с тем, что масса покоя γ -квантов равна нулю, масса покоя ω и X велика. Далее γ и ω нейтральны, поэтому, испуская γ или ω , частица сама не изменяется. Поле X заряженное, X -мезоны несут заряд, испускание X обязательно сопровождается изменением заряда частицы, испускающей X , т. е. превращением ее в другую частицу, например, $p = n + X^{+}$, $\mu^{-} = X^{-} + \nu_{\mu}$. Переход заряженного фермиона из одного состояния в другое с испусканием кванта зависит от электрического заряда. Переход нуклона (например, нейтрона) из одного состояния в другое с испусканием ω^0 зависит от константы взаимодействия, имеющей ту же размерность, что и электрический заряд. Такую же размерность имеет константа, входящая в вероятность превращения протона в нейтрон с испусканием X^{+} -мезона. Квадрат этой константы имеет размерность скорости света, умноженной на постоянную Планка. Отсюда получается знаменитая безразмерная величина, характеризующая электромагнитное взаимодействие, $\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$. Для векторного взаимодействия барионов соответствующая величина $\frac{g_{\omega}^2}{\hbar c} \sim 1$. Для слабого X -взаимодействия с изменением

заряда, если подтвердятся предположения о массе X , $\frac{g_X^2}{\hbar c} \sim 10^{-5}$.

Малая величина $e^2/\hbar c$ позволила описать атомную физику при помощи уравнения Шредингера; поправки высокого порядка по e^2 оказалось возможным вычислить по теории возмущений. Удалось показать, что экспериментально наблюдаемые поправки не зависят от применимости теории к сверхвысоким энергиям. Тем более просто применение теории к слабому взаимодействию, где $g_X^2/\hbar c$ еще меньше. Большая величина $g_{\omega}^2/\hbar c$ делает совершенно неприменимым аппарат обычной квантовой механики. Переход к другому аппарату, в котором учитывается аналитичность функций и используются только общие понятия квантовой механики, ведет к изменению понятий, к отказу от понятия элементарной частицы.

Замечательная стройность концепции заключается в том, что все внешне очень непохожие типы взаимодействия сводятся к одному и тому же основному типу взаимодействия двух фермионов с векторным полем.

Это напоминает живую природу*: когда в ходе бесчисленных

* Читателю не следует принимать всерьез аналогию и не следует делать из нее дальнейшие выводы!

проб был найден принцип построения живого вещества из белков и управления белками при помощи нуклеиновых кислот (ДНК, РНК), то этот принцип распространился на все живое от одноклеточных водорослей до человека.

Несколько слов о трудностях. Общие трудности формулировки теории и недостаточность опытов по обнаружению X -мезонов были указаны выше.

Но, кроме того, есть одна конкретная «неприятность»: наблюден 1 (прописью: *один*) случай распада $\Sigma^+ = n + \mu^+ + \nu_\mu$.

В схеме трех частиц превращение Σ в нуклон—всегда превращение одной Λ частицы («входящей в состав» Σ) в нуклон, т. е. в нейтрон или протон, и не может сопровождаться испусканием e^+ или μ^+ . Указанный процесс мог бы идти лишь во втором порядке

$$\Sigma^+ = (\Lambda, p, \bar{n}) \rightarrow (n, p, \bar{n}) \rightarrow (n, n, \bar{n}) + \mu^+ + \nu_\mu = n + \mu^+ + \nu_\mu.$$

Здесь обе стрелки соответствуют слабому взаимодействию. Вероятность такого процесса ничтожна.

Аналогичные нарушения наблюдаются при распаде

$$K^0 \rightarrow \mu^+ + \pi^- + \nu_\mu.$$

В этом случае интерпретация опыта затруднена спонтанным превращением K^0 в \bar{K}^0 , так как для \bar{K}^0 распад $\bar{K}^0 = \mu^+ + \pi^- + \nu_\mu$ разрешен. На первый взгляд только несколько наблюдений противостоят большой массе фактов, укладывающихся в стройную картину схемы трех частиц и векторного взаимодействия. Возможно, что эти несколько наблюдений окажутся ошибочными. Но в физике бывало и так, что несколько упрямых наблюдений переворачивали устоявшиеся концепции*.

§ 7. Нейтрино и четность

7.1. Спиральность нейтрино и нулевая масса покоя

Экспериментальные определения массы нейтрино до настоящего времени давали только неравенство: установлено, что масса нейтрино во всяком случае меньше 0,001 массы электрона**.

Естественно предположить, что масса нейтрино в точности, тождественно, равна нулю. При этом оказывается возможным построить теорию нейтрино с таким свойством. В этой теории нейтрино ν испускаются только со скоростью света, причем скорость ν в вакууме равна c в любой системе координат и эти свойства являются точными, справедливыми в любом приближении.

* Примечание при корректуре. Последние сведения (сентябрь 1963 г.) не подтверждают этих опасений и согласуются с моделью трех частиц.

** Везде под «массой» мы подразумеваем массу покоя.

Примером теории, описывающей частицы с массой, тождественно равной нулю, является электродинамика. Классическая теория Максвелла автоматически обладает этим свойством, поскольку она предусматривает существование радиоволн с любой малой частотой. Значит, энергия кванта, равная $\hbar\omega$, может быть сколь угодно малой, что и означает равенство нулю массы покоя кванта.

Нейтрино имеют спин $1/2$, подчиняются принципу Паули и статистике Ферми. Поэтому для нейтрино не может существовать классическая теория*.

Теория таких частиц с массой ноль была предложена Вейлем вскоре после появления дираковской теории релятивистского электрона. Однако по причинам, которые будут объяснены ниже, эта теория оставалась под спудом до 1957 г.

По Вейлю, нейтрино описывается уравнением, предусматривающим, что энергия равна импульсу, умноженному на скорость света (что соответствует массе покоя, равной нулю), со спином, равным $1/2$ и всегда направленным противоположно вектору импульса. Если наглядно представить себе вращение и движение нейтрино, то можно сравнить его с движением болта с левой нарезкой, ввинчивающегося в гайку,— у такого болта направление движения и направление вращения всегда связаны между собой.

Ясно, что утверждение «спин нейтрино всегда направлен против импульса» может быть верным только для частицы, движущейся со скоростью света. Если бы частица двигалась медленнее, то можно было бы выбрать систему координат, движущуюся в том же направлении, но быстрее данной частицы. В такой системе импульс частицы изменил бы свое направление, а ее направление вращения и направление момента остались бы прежними. Следовательно, изменилось бы соотношение между направлением импульса и направлением момента.

Таким образом, утверждение, что у частицы направление импульса и направление момента однозначно связаны, возможно лишь для частицы с нулевой массой покоя, т. е. движущейся со скоростью света.

В 1957 г. Л. Д. Ландау первый выдвинул предположение, что природа нейтрино именно такова.

Почему же прошло почти 30 лет от математической работы Вейля до физической идеи Ландау? Дело в том, что все законы физики до 1957 г. обладали свойством оставаться в силе после зеркального отражения. Левый болт или перчатка на левую руку при отражении в зеркале превращаются в правый болт, в перчатку для правой руки. И действительно, можно с одинаковым успехом изготавливать и левые и правые болты и перчатки на обе руки.

* Классическая электродинамика описывает ситуацию, когда каждое состояние занято многими квантами. Очевидно, что это невозможно для частиц, подчиняющихся принципу Паули.

Но в теории нейтрино предполагается, что существуют только нейтрино, похожие на левые болты, в результате чего теория нейтрино не допускает зеркального отражения. Поэтому такая теория нейтрино была выдвинута лишь после того, как было показано, что действительно не все законы природы остаются в силе после зеркального отражения. В частности, как раз β -распад, т. е. процесс с участием нейтрино, инвариантен относительно зеркального отражения или, как иначе выражаются, нарушает четность.

7.2. Слабое взаимодействие и четность

В слабом взаимодействии, наряду с нейтрино, всегда участвуют и другие частицы, обладающие массой покоя.

Частицу с массой покоя можно представить как суперпозицию двух частиц с массой ноль. Наблюдая частицу с определенным направлением спина, движущуюся со скоростью меньше скорости света по направлению спина, можно представить себе, что она то движется со скоростью света вперед, то движется также со скоростью света назад, против направления спина; от массы зависит частота перемены направления движения. Такой подход напоминает ситуацию с нейтральными каонами (см. § 5.3).

Эта схема осталась бы математическим курьезом, если бы неожиданно не оказалось, что именно при помощи таких представлений наиболее естественно описывается слабое взаимодействие.

Раньше, в § 6.1 и 6.2, рассматривалась вероятность β -распада и других процессов. Однако о процессах со слабым взаимодействием имеется еще много других сведений — угловое распределение частиц, поляризация частиц и т. д. Описание всех этих свойств процесса наиболее естественно формулируется при помощи представления о частицах, движущихся по или против направления спина.

Оказалось, что в закон слабого взаимодействия входят нейтрино, электрон, отрицательный мюон, протон и нейтрон как частицы со спином, направленным против импульса, а их античастицы ($\bar{\nu}$, e^+ , $\bar{\mu}$, \bar{n} , μ^+), как частицы со спином по импульсу.

Для нейтрино тривиально, что в закон взаимодействия входит частица со спином против импульса — никакого другого нейтрино вообще нет в природе*. Но у электрона спин может быть направлен и по импульсу и против импульса; электрон есть суперпозиция двух состояний. Утверждение, что первично при β -распаде рождается именно одно из них, не тривиально.

Отсюда, в частности, сразу получается, что электрон, образующийся при β -распаде, обладает продольной поляризацией, пропорциональной v/c , т. е. стремящейся к единице (к полной поляризации) при $v \rightarrow c$.

* У антинейтрино спин направлен по импульсу. Но антинейтрино и нейтрино — это разные частицы

Отсюда следует далее, что поляризованные β -активные ядра испускают электроны с разной вероятностью в двух противоположных направлениях по оси вращения ядра. Этот классический опыт как раз и доказал нарушение четности в природе.

Итак, возможно описание β -распада при помощи представления о частицах с массой как о суперпозиции двух сортов нейтрино-подобных частиц, правых и левых, из которых только один сорт участвует в β -распаде. Этот факт и придает реальность описанию частиц с массой как суперпозиции правых и левых частиц.

7.3. Зарядовое сопряжение и четность

В рассмотренной выше теории нейтрино уравнения сами приводят к выводу, что антинейтрино имеет, как говорят, спиральность, противоположную спиральности нейтрино. Если нейтрино похоже на левый болт, то в смысле соотношения вращения и поступательного движения антинейтрино похоже на правый болт.

Л. Д. Ландау высказал общий принцип, что законы природы инвариантны относительно совокупности зарядового сопряжения и зеркального отражения. Этот принцип полностью подтверждается конкретным исследованием распада μ^+ - и μ^- -мезонов, а также целым рядом косвенных опытов.

Не останавливаясь на частностях, хочется отметить общефизическое значение принципа Ландау. После открытия несохранения четности стало ясно, что любое вещество является несимметричным относительно правой и левой систем координат, относительно зеркального отражения. Это относится не только к радиоактивно распадающимся веществам. В принципе за счет малых эффектов слабого взаимодействия даже стабильные вещества должны, например, вращать плоскость поляризации, хотя этот эффект и лежит за пределами возможности обнаружения.

Принцип Ландау показывает, что это есть свойство именно вещества. Вакуум, пустота, само пространство полностью симметричны относительно зеркального отражения именно потому, что вакуум симметричен также относительно частиц и античастиц.

7.4. Нейтрино в космосе

Какова концентрация нейтрино в космосе?

Нейтрино с энергией порядка нескольких Mev имеют сечение реакции порядка 10^{-44} см^2 , чему соответствует длина пробега в обычном веществе больше 10^{20} см . Поэтому их обнаружение весьма затруднительно. По оценкам, поток энергии нейтрино от Солнца составляет величину порядка 5% энергии солнечного света, т. е. около $10^{10} \text{ нейтрино/см}^2 \cdot \text{сек}$. Такому потоку соответствует плотность энергии 10^{-6} эрг/см^3 ; после деления на c^2 это дает 10^{-27} г/см^3 , что в 10^3 раз больше средней по Вселенной плотности вещества.

И вот даже эти большие плотности и потоки до настоящего времени не зарегистрированы на опыте; впрочем это дело ближайшего будущего. Сечение взаимодействия нейтрино с ядрами растет пропорционально квадрату энергии нейтрино. Поэтому нейтрино с большой энергией (~ 100 Мэв и более), которые могут, в частности, образовываться в реакциях космических лучей, вероятно, также удастся изучать ядерными способами. Однако о количестве нейтрино с малой энергией, по-видимому, можно будет судить лишь по их гравитационному действию [1—3]. Будучи практически инертными в смысле ядерных взаимодействий, эти нейтрино (и антинейтрино), как и всякая другая материя, должны создавать поле силы тяжести, притягиваться к небесным телам и в свою очередь притягивать их, искривлять пространство и влиять на возраст Вселенной. Таким образом, можно установить, что общая плотность их не превышает 10^{-28} г/см³. Если эти нейтрино образуют вырожденный Ферми-газ, то его граничная энергия не превышает 0,02 эв [4]. Поэтому даже предельно допустимое с астрономической точки зрения количество нейтрино малой энергии не может быть замечено по влиянию на явления β -распада*.

Часть II

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

§ 1. Введение

1.1. Специальная и общая теория относительности

В начале века, в период с 1905 по 1917 г. Альбертом Эйнштейном были созданы специальная теория относительности и общая теория относительности.

Суть специальной теории относительности (СТО) выражена в преобразованиях Лоренца координат и времени и соответствующих законах преобразования таких физических величин, как энергия, импульс и т. д. СТО в настоящее время широко применяется. Все предпосылки и выводы СТО — постоянство скорости света, зависимость массы от скорости, дефект массы и его связь с энер-

* Примечание при корректуре. Расчет автора показывает малость энергии, испускаемой в виде ν — $\bar{\nu}$ в процессе катастрофического коллапса звезды (см. «Астрономический циркуляр» № 250, 1.VII. 1963 г.)

гией реакций, растяжение времени при быстром движении на примере распада мезонов — подтверждены опытом.

Поэтому в правильности СТО нет никаких сомнений и в дальнейшем при оценке различных теорий аргументы, основанные на СТО, мы будем применять как «большую логическую дубинку».

Общая теория относительности (ОТО) находится в совершенно другом положении. Опыты, специфически подтверждающие ОТО, до сих пор немногочисленны. К ним относятся движение перигелия Меркурия, отклонение света в поле тяжести Солнца, изменение частоты света в поле тяжести. По существу главным аргументом в пользу ОТО является тот исходный известный каждому школьнику факт, который вдохновил Эйнштейна — пропорциональность веса и масс, т. е. одинаковость ускорения различных тел в поле тяжести. Ниже будут обсуждены новые опыты, подтверждающие ОТО.

Закон тяготения Ньютона $F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}$ очень похож на за-

кон Кулона $\bar{F} = \frac{e_1e_2}{r^2}$. Естественно, возникает вопрос, почему так различны по своему содержанию теория электромагнитного поля, которое рассматривается в евклидовом пространстве, и ОТО с понятием кривизны пространства; нельзя ли поле тяготения также описывать как какое-то поле в евклидовом пространстве?

Ниже будет показано, что СТО и квантовая механика делают логически неизбежным характерное для ОТО искривление пространства.

Важнейшим следствием ОТО является научная постановка вопросов космологии, возможность последовательного рассмотрения Вселенной как целого. В классической ньютоновской теории рассмотрение бесконечной однородной Вселенной наталкивается на парадоксы.

В области космологии лежит и величайший триумф ОТО: из ОТО следует, что не существует стационарное космологическое решение; наш соотечественник А. А. Фридман нашел нестационарные решения для однородной Вселенной*. Вскоре после этого астрономы нашли, что Вселенная действительно находится в состоянии расширения.

1.2. Космологические теории

Пожалуй, ни в одной области науки, кроме космологии, нет такого количества произвольных и заведомо ошибочных теорий, сосуществующих во времени с правильной теорией.

* Истории открытия Фридмана и современному состоянию вопроса посвящен юбилейный выпуск «Успехов физических наук», т. 80, № 3, июль 1963 г., в частности, статья автора, стр. 357—390.

В области космологии не только невозможен эксперимент в духе физической лаборатории, что является общим свойством астрономии, но к тому же и объект изучения — Вселенная — является единственным.

С другой стороны, в космологии особенно часто происходит навязывание природе тех или иных предвзятых точек зрения. На уровне космологии, опирающейся на ОТО, Эйнштейн искал решение, которое было бы стационарным; требование стационарности накладывалось им из общих соображений. Поскольку такого решения нет, Эйнштейн произвольно изменил уравнения, введя космологическую постоянную (по существу, — отрицательную плотность массы в пустоте). Как известно, после работ Фридмана и наблюдений Хаббла Эйнштейн отказался от этого изменения теории*.

В 30-х годах последовал период, когда при правильных качественных представлениях о расширении Вселенной имели место существенные ошибки в абсолютной величине константы Хаббла, характеризующей скорость расширения. Для времени, прошедшего с момента высокой плотности вещества, получались оценки порядка $1-1,5 \cdot 10^9$ лет, что существенно меньше времени существования твердой оболочки Земли и времени существования радиоактивных элементов.

Это тяжелое противоречие вызвало появление теорий спонтанного рождения вещества [5—8, 29]. Наблюдаемое разбегание туманностей компенсируется в них рождением вещества, и Вселенная существует в состоянии, близком к современному, неограниченно долго. Теории спонтанного рождения противоречат всем принципам физики: закону сохранения энергии, закону сохранения барионов, специальной и общей теории относительности. Поскольку в большинстве стран проекты вечных двигателей не принимаются к рассмотрению, публикация работ, связанных с теорией рождения, представляет собой непоследовательность. Подробнее критика этих теорий дана ниже, в § 6. Здесь же достаточно отметить, что за последние 10 лет практически полностью рассосалось противоречие между возрастом Земли и радиоактивных элементов, с одной стороны, и (кратко говоря) возрастом Вселенной. Вместо величины $1-1,5 \cdot 10^9$ лет возраст Вселенной оценивается в 10^{10} лет, в связи с чем исчезла необходимость в теории рождения вещества.

Наблюдаемая в настоящее время эволюция Вселенной породила ряд работ, в которых предполагается, что с течением времени изменяются такие константы, как электрический заряд и гравитационная постоянная, и что соответственно общему изменению мас-

* Введение космологической постоянной в действительности не решало и той произвольной задачи, которую ставил Эйнштейн, так как стационарное решение оказывалось неустойчивым по отношению к малым возмущениям.

штаба Вселенной меняются и все размеры, например размер земного шара [9—12].

Эти работы находятся в противоречии с ОТО, что в ряде случаев (не всегда) отмечается их авторами. Их общей ошибкой является смешение свойств уравнений и свойств решений этих уравнений.

Расширяющаяся Вселенная представляет собой решение с определенной преимущественной скоростью в каждой точке пространства, с определенным характерным временем в данный момент. Но эти величины характерны именно для решения, а не для самих уравнений ОТО, решением которых является картина расширяющейся Вселенной.

Гипотезы изменчивости констант обосновываются примерно так: «Вселенная расширяется; это не может не влиять...» и т. д. В данном примере логика столь же сильная, как в известном «это не бывает, потому что это не бывает никогда».

Идея влияния расширения Вселенной на физические константы, определяемые локально, является разновидностью идеи Маха, согласно которым сама инерция вещества определяется влиянием всей Вселенной как целого, влиянием далеких звезд.

Физики никогда не вспоминают эти идеи, так как уже давно, в свете теории относительности, очевидна вся неосновательность и никчемность идеи Маха. В виде курьеза можно отметить, что прямые опыты начисто опровергают идеи Маха.

Тем более странно читать в астрономической литературе пожелания о совмещении принципа Маха с ОТО [13].

§ 2. Экспериментальные подтверждения ОТО за последние годы

2.1. Равенство инертной и весовой масс

За последние 2—3 года в США Дике [14] повторил опыты Этвеша, увеличив точность по крайней мере на 2 порядка. Показано, что для различных веществ (в частности, для меди и свинца) отношение инертной массы и весовой отличается менее чем на 10^{-10} своей величины. Высокая точность опыта существенна.

Инертная масса тела зависит от его энергии — это вывод СТО.

Из СТО мы знаем, что когда два атома дейтерия соединяются в один атом гелия, то инертная масса уменьшается приблизительно на $6 \cdot 10^{-3}$ своей величины в соответствии с дефектом масс гелия. Точные определения массы при помощи масс-спектрографа, с одной стороны, и прямые измерения энергии ядерных реакций — с другой, подтверждают этот вывод СТО.

Отчего же зависит весовая масса тела, сила его притяжения? Зависит ли она от числа барионов или от энергии тела? Для обычных веществ (не мезонов, не антивещества) число барионов и

инертная масса приблизительно пропорциональны друг другу с расхождением около 10^{-3} . Поэтому при малой точности опыт типа Этвеша не мог бы решить вопрос. Однако точность опыта 10^{-10} приводит к категорическому выводу о том, что сила тяжести пропорциональна именно энергии тела. Такая точность означает прочность фундамента ОТО.

Как частный вывод, отметим, что полностью исключается возможность того, что на античастицы сила тяжести действует в сторону, противоположную силе тяжести частиц. Поэтому лишена оснований и гипотеза [15], что в начальном состоянии имелась смесь частиц и античастиц, а потом взаимное притяжение частиц и гравитационное отталкивание частиц от античастиц будто бы могло разделить частицы от античастиц.

Очевидно, что опыт Этвеша следует проводить с незаряженными электронейтральными телами, иначе на силу тяжести наложится кулоновское взаимодействие. Но обычное вещество обладает барионным зарядом. Результат опыта Этвеша означает, что нет такого поля, которое зависело бы от барионного заряда таким же образом, как от электрического заряда зависит электростатическое поле [16, 17].

2.2. Изменение частоты кванта в поле тяжести

В 1960—1961 гг. в лабораторных условиях удалось наблюдать изменение частоты кванта в поле тяжести [18].

В этих опытах возбужденное ядро железа Fe_{57}^* испускает γ -квант со строго определенной энергией. Ядра железа, находящиеся в основном (невозбужденном) состоянии, резонансно поглощают такой γ -квант. Однако если испускающее ядро находится выше или ниже поглощающего, то, как показывает опыт, условие резонанса нарушается. При падении кванта сверху вниз его энергия несколько увеличивается и, наоборот, при подъеме кванта снизу вверх его энергия уменьшается. В опыте для компенсации изменения энергии кванта придавалось колебательное движение по вертикальной оси мишени, содержащей ядра, которые поглощают квант.

Сравнивалось поглощение кванта при движении мишени вверх (навстречу кванту) и вниз в течение каждого полупериода. Другими словами, изменение частоты кванта в гравитационном поле компенсировалось продольным эффектом Доплера. При испускании кванта наверху поглощение сильнее при удаляющемся поглотителе. Когда же испускающее ядро находится внизу, а мишень наверху, максимум поглощения достигается при поглотителе, движущемся навстречу кванту.

Альберт Эйнштейн предсказал результат этого опыта еще в 1911 г. (об этом напомнил Моррисон [15]) на основе СТО из усло-

вия, чтобы в постоянном поле тяжести нельзя было построить вечный двигатель и тем самым нарушить закон сохранения энергии.

В самом деле, возбужденное ядро Fe_{57}^* весит больше, чем нормальное ядро Fe_{57} на величину $\Delta E/c^2$, где ΔE — энергия возбуждения. Значит, поднимая на высоту h нормальные ядра и опуская возбужденные, мы зарабатываем на каждом цикле энергию $gh\Delta E/c^2$. Если бы энергия кванта не менялась в поле тяжести, то этот цикл был бы возможен: возбужденное ядро внизу испускает квант, а нормальное ядро наверху его поглощает. Для спасения закона сохранения энергии необходимо, чтобы квант, идущий снизу вверх, тоже терял часть энергии и поэтому выходил бы из резонанса. При $h = 20$ м эта часть равна

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{gh}{c^2} = \frac{10^3 \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{20}} = 2,5 \cdot 10^{-15}.$$

Такое изменение и было обнаружено на опыте.

§ 3. Необходимость ОТО

3.1. Изменение течения времени

Продолжим обсуждение опыта, в котором наблюдается изменение энергии кванта в поле тяжести.

Напомним, что энергия кванта связана с его частотой формулой $E = \hbar\omega$ и, таким образом, изменение энергии кванта означает изменение его частоты.

Пусть радиопередатчик испускает в точке A сигналы с определенной частотой ω_0 . Принятые на другой высоте в поле тяжести в точке B (т. е. при другом значении гравитационного потенциала) эти сигналы имеют другую частоту ω_1 .

Но время прохождения сигнала от A до B одинаково для каждого сигнала. Значит, «по здравому смыслу» интервал времени между двумя последовательными сигналами в A должен быть таким же, как и в B ; с этой точки зрения изменение частоты непонятно. Его можно понять лишь приняв, что в A и B время течет по-разному.

Наблюдатель, расположенный в произвольной третьей точке C , констатирует, что идентичные события — колебания одинаковых радиосхем или любые другие процессы в двух строго одинаковых системах, находящихся в точках A и B , — происходят с разной частотой, занимают разный интервал времени с точки зрения наблюдателя в C .

Уже из СТО мы знаем, что время и пространство связаны между собой преобразованиями Лоренца. Поэтому признание того, что гравитационный потенциал влияет на течение времени, предопределяет вывод, что гравитационный потенциал влияет и на метрику пространства.

Иногда говорят, что опыты по изменению частоты кванта в поле тяжести подтверждают только СТО, но не ОТО. Правильнее было

бы сказать, что из специальной теории относительности вместе с основным свойством гравитационного поля (пропорциональностью весомой и инертной массы) уже вытекает, как логическая необходимость, общая теория относительности.

3.2. Принцип эквивалентности

Вернемся к основному факту равенства весомой и инертной массы. Иначе он может быть выражен в виде утверждения, что ускорение всех свободных тел в данном гравитационном поле одинаково. Следовательно, возможен выбор такой движущейся ускоренно системы координат, относительно которой свободные тела движутся без ускорения, а в частности, могут и покоиться.

Это утверждение возводится в ОТО в ранг принципа. Утверждается, что в такой системе координат все явления происходят совершенно так же, как и в инерциальной системе в пустоте. Из СТО мы знаем, что инерциальная система в пустоте не единственна, возможны ∞^6 инерциальных систем, получаемых одна из другой преобразованиями Лоренца*. Точно так же не единственна и та система, которую мы ввели в гравитационном поле и в которой свободные тела движутся без ускорения. Эту систему также можно подвергнуть поворотам и преобразованиям Лоренца, не нарушая ее свойства.

Часто подчеркивают то обстоятельство, что истинное гравитационное поле, созданное какой-либо массой, отличается от поля, возникающего в ускоренно движущейся системе координат [19]. Описанная выше система координат устраняет, компенсирует, например, гравитационное поле какой-либо массы только в одной точке, так как истинное гравитационное поле изолированной массы убывает на бесконечности.

Однако этот факт не лишает содержания принцип эквивалентности. Если действие гравитационного поля можно локально устранить, значит любое возможное влияние гравитационного поля, например на частицы или атомы, может зависеть лишь от производных поля, а не от величины самого поля. Эту ситуацию можно сравнить с электродинамикой, где физическое действие оказывает не потенциал (выбор потенциала условен), а поле, т. е. производная потенциала.

В теории тяготения действует не потенциал, и не поле, а действуют только производные поля, т. е. вторые производные потенциала**. В таком виде этот принцип весьма важен, так как в космологии и в звездах потенциал может быть порядка c^2 , но именно

* Степень, в которую возводится бесконечность, соответствует числу параметров, определяющих группу Лоренца: три компоненты скорости и три угла.

** С этим можно сопоставить тот факт, что в электродинамике возможно дипольное излучение и электромагнитные кванты имеют спин 1. Излучение гравитационных волн зависит от квадрупольного момента и спин гравитонов равен 2.

в силу большого масштаба явлений, вторые производные потенциала весьма малы.

Все опыты по проверке СТО проводились в поле тяжести Земли и Солнца; потенциал Солнца порядка квадрата скорости орбитального движения Земли. Следовательно, опыты показывают именно существование лоренц-инвариантности в потенциале и в поле тяготения. Роль потенциала в ОТО играют компоненты метрического тензора. Вторые производные метрического тензора характеризуют кривизну пространства. Согласно ОТО, кривизна зависит от распределения масс. Кривизна есть объективное свойство пространства, которое не может быть устранено никаким преобразованием координат. Поэтому и не удивительно, что принцип эквивалентности не распространяется на вторые производные потенциала.



Рис. 1

Наглядным школьным примером для выяснения того, что именно оказывает наблюдаемое воздействие на свободно движущееся тело, является теория приливов. Известно, что прилив не имеет дипольного характера и только naive люди полагают, что в приливной волне океан смещен в сторону тела, вызывающего прилив (см. рисунок 1, а).

На самом деле прилив имеет квадрупольный характер, океан вытянут в обе стороны в том направлении, в котором наиболее быстро меняется сила притяжения (см. рисунок 1, б), а высота приливной волны пропорциональна не силе GM/r^2 , а ее производной GM/r^3 , где M — масса тела, вызывающего прилив; r — его расстояние от Земли и G — ньютоновская постоянная тяготения.

§ 4. Решения уравнений ОТО

4.1. Пустота и принцип Маха

Согласно уравнениям ОТО, в пустоте при полном отсутствии масс где бы то ни было, можно ввести систему координат с плоским эвклидовым пространством и с везде одинаковой скоростью течения времени. В этой системе координат свободная частица движется по прямой с постоянной скоростью, т. е. ее координаты линейно зависят от времени.

Такая система координат не единственная, но это для нас сейчас не существенно.

Перейдем к системе координат, вращающейся относительно первой в этой системе координат. Координаты частицы зависят от времени более сложно, так как появляются центробежная и кориолисова силы. Эти силы появились в решении без масс.

Говоря наглядно, теория предсказывает, что из двух ведер с водой, вращающихся друг относительно друга, в одном «покоящемся» вода будет иметь плоскую поверхность, а в другом вода растечется по стенкам.

Теория предсказывает такое различие в решении, в котором нигде, ни на конечном расстоянии, ни на бесконечности нет никаких масс. Это и значит, что теория относительности не нуждается в принципе Маха, согласно которому только далекие массы вызывают различие в поведении воды в двух ведрах*.

4.2. Решение Фрийдмана; однородная Вселенная

Как известно, уравнения ОТО с постоянной по пространству плотностью материи имеют решения, в которых плотность определенным образом зависит от времени.

В этих решениях в каждой точке пространства вещество имеет определенную скорость движения. Иначе говоря, в каждой точке можно выбрать такую (инерциальную) преимущественную, единственную систему координат, в которой покоится вещество, находящееся в этой точке, — так называемую сопутствующую систему. Закон изменения плотности вещества в данной точке в данный момент таков, что существует характерное время, которое можно определить, например, как $\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{T}$ (величина T не постоянна, она растет с течением времени).

Согласно основному уравнению ОТО, определенной средней плотности вещества в данный момент отвечает определенная величина размерности длины L , характеризующая кривизну пространства.

Эта величина L по порядку величины равна $L = cT$ (она пропорциональна, но не равна так называемому радиусу мира и, в частности, не равна бесконечности в плоской модели).

Наличие преимущественной сопутствующей системы и характерных длины L и времени T в решении Фрийдмана вызвало ряд недоразумений. Надо отчетливо понимать, что это есть свойства определенного решения уравнений ОТО; сами уравнения ОТО не содержат ни преимущественной системы координат, ни характерной длины или времени.

* Примечание при корректуре. Экспериментальное доказательство того, что эффекты вращения не зависят от направления оси, несмотря на неточную однородность распределения масс, дано в [25—26]. Возражения Дике [27], основанные на пользовании ОТО, неубедительны.

Такое соотношение между свойствами решения и свойствами уравнений является чрезвычайно распространенным. Свойства решения являются более специализированными, более узкими, так как решение зависит не только от уравнения, но и от начальных условий. Вот пример из ньютоновской механики: поле тяготения Солнца сферически симметрично, а значит и уравнения движения планеты (Земли) таковы, что они не выделяют какого-либо направления или плоскости. Однако решение этих уравнений характеризуется определенной плоскостью орбиты Земли, а также (так как орбита не круговая) направлением перигелия. Решение не обладает сферической симметрией.

Сферическая симметрия уравнений проявляется в том, что какое-то другое малое тело может двигаться в поле Солнца по орбите, любым способом ориентированной в пространстве и, в частности, любым образом повернутой относительно орбиты Земли. Только учет возмущений со стороны Земли делает орбиты не эквивалентными.

Точно так же в решении Фрийдмана выделенная система координат и характерные длина и время зависят от начальных условий, характеризуют среднее движение вещества (галактик). Однако те явления или движения, которые физически не зависят от окружающих звезд и галактик, согласно уравнениям ОТО, характеризуются лоренц-инвариантностью (т. е. отсутствием преимущественной системы координат), отсутствием характерного размера или времени.

Именно это утверждение было проверено в опыте Майкельсона и в других опытах, подтверждающих СТО. Это утверждение мы используем в дальнейшем как критерий для суждения о правильности некоторых новых гипотез.

§ 5. Гравитационные волны, гравитоны и частицы

5.1. Гравитационные волны

В общей теории относительности, в соответствии с принципами специальной теории, гравитационное взаимодействие распространяется не мгновенно, а со скоростью света. При изменении взаимного расположения тел создаваемое ими гравитационное поле на большом расстоянии изменяется лишь через время, равное расстоянию, деленному на скорость света. Уравнения ОТО приводят к выводу, что поле двойной звезды представляет собой совокупность статического поля (соответствующего полной массе двойной звезды, помещенной в центре тяжести двух звезд), равного GM/r^2 , и поля гравитационной волны, спадающего с расстоянием как r^{-1} и равного по порядку величины $GMa^2/r(cT)^3$, где a — расстояние между двумя звездами; T — период обращения звезд; такое разложение имеет место на большом расстоянии при $r > cT$.

Поле гравитационной волны поперечное, с периодом волны, равным половине периода обращения звезд.

Как отмечалось выше, по принципу эквивалентности наблюдаемой является только производная поля гравитационной волны по координате, равная по порядку величине $GMa^2/r(cT)^4$. Умножая ее на радиус Земли, найдем ускорение g' свободно подвешенного в лаборатории тела относительно Земли, которое в принципе может быть измерено.

Подставим $M = M_{\odot}$, $a \approx 2R_{\odot} = 10^{11}$ см; такому расстоянию соответствует период обращения двойной звезды порядка 10 час = $3 \cdot 10^4$ сек. Характерное время T в 2π раза меньше периода, $\sim 5 \cdot 10^3$ сек. Расстояние r примем за 10 световых лет, получим дополнительное ускорение в гравитационной волне $g' = 10^{-21}$ см/сек², в 10^{24} раз меньше ускорения земного тяготения, откуда видна вся трудность обнаружения гравитационных волн. К тому же, отмечалось выше, наблюдаемой является лишь производная dg'/dx , а не само g' , что в 10^{31} раз меньше значения dg'/dx на Земле.

Существование гравитационных волн приводит к тому, что система двух звезд постепенно теряет энергию. Потеря энергии пропорциональна квадрату амплитуды волны, т. е. $\sim T^{-6}$. Потеря энергии за один оборот $\sim T^{-6}T = T^{-5}$.

Звезды удерживаются на своей орбите за счет тяготения. Поэтому* при расчете потери энергии двойной звездой после ряда сокращений получается легко запоминающийся результат: энергия, излучаемая за один оборот, порядка $(v/c)^5 \cdot |E|$, где E — энергия системы и v — орбитальная скорость. Для звезды с периодом в 1 год, радиусом орбиты порядка радиуса земной орбиты, $v \sim 30$ км/сек, $(v/c)^5 \sim 10^{-20}$, т. е. за год теряется порядка 10^{-20} энергии обращения. Таким образом, существенное изменение орбиты за счет гравитационного излучения потребует времени $\sim 10^{20}$ лет.

Однако для близкой двойной звезды с $a = 2R_{\odot} \sim 10^{11}$ см изменение энергии за год достигло бы 10^{-12} своей величины, его может быть можно было бы наблюдать, если бы не было других причин, влияющих на вращение двойной звезды.

5.2. Гравитоны

Квантование гравитационного поля связано с принципиальными трудностями, так как до сих пор квантовая теория рассматривала частицы и поля в евклидовом пространстве, а в случае гравитационного поля само поле представляет собой изменение метрики пространства. Однако применительно к слабым полям;

* Эта оценка неприменима к вращению электрона в ускорителе или вокруг протона в атоме, где силы, удерживающие электрон на орбите, не гравитационные. Гравитационное излучение ничтожно мало по сравнению с электромагнитным.

которые можно рассматривать как малые возмущения на фоне евклидовой метрики, эти трудности не существуют. Поэтому нет сомнения и в том, что гравитационные волны можно квантовать, вводя понятие кванта гравитационной волны — гравитона. Энергия его связана с частотой, как обычно, формулой $E = \hbar\omega$ и, так как ω может быть как угодно мало, отсюда следует, что масса покоя гравитона равна нулю, а значит его энергия и импульс связаны, как и у кванта света, соотношением $E = c|p|$. Спин гравитона равен 2, проекция спина на направление распространения может принимать значения ± 2 .

Для излучения двойной звезды квантование так же бесцельно, как квантование электромагнитного поля мощной радиостанции: ведь когда число квантов одной частоты велико, теория автоматически в пределе переходит в классическую.

На уровне элементарных частиц в принципе возможно испускание гравитонов большой частоты, например, при переходе электрона из возбужденного состояния в основное, при полете электрона мимо ядра или при аннигиляции пары электрон-позитрон. Однако вероятность такого процесса ничтожна по сравнению с вероятностью испускания электромагнитного кванта. Более того, вероятность испускания гравитонов ничтожна и по сравнению с вероятностью испускания пар нейтрино-антинейтрино (см. замечание в конце [20]). Естественно, что мала и вероятность поглощения гравитона, и поэтому все образовавшиеся гравитоны беспрепятственно покидают звезду. Несмотря на это, испусканием гравитонов можно пренебречь и для тех плотных горячих звезд, в которых вероятность выхода кванта мала и играет роль потеря энергии парами $\nu, \bar{\nu}$.

5.3. Гравитация и превращение частиц

Не может ли с малой вероятностью, зависящей от гравитационной константы, происходить аннигиляция барионов или какая-нибудь другая специфическая реакция?

Принцип эквивалентности утверждает, что гравитационное поле эквивалентно ускорению. На уровне частиц это значит, что поле тяготения только меняет движение частиц, но не вызывает их превращения — сравните с принципом минимального электромагнитного действия, § 4.1.

Следовательно, непосредственно гравитация не вызывает превращения частиц. В поле тяготения или с испусканием гравитонов могут идти лишь те процессы, которые в принципе (по законам сохранения) могут идти без тяготения и гравитонов: поле тяготения будет при этом лишь менять импульс и энергию. Таким образом, на вопрос, поставленный в начале параграфа, можно дать определенный отрицательный ответ.

§ 6. Гипотеза рождения вещества

6.1. Два варианта гипотезы.

Рождение в веществе

Условия, в которых возникла гипотеза спонтанного рождения вещества, были обрисованы во введении. Движущей силой являлось расхождение между короткой шкалой времени для возраста Вселенной (порядка $1-2 \cdot 10^9$ лет вместо принятого сейчас значения 10^{10} лет) и временем существования Земли и радиоактивных элементов.

Выдвинув идею, что наблюдаемый хаббловский разлет компенсируется рождением нового вещества, авторы потребовали точной компенсации, такой, чтобы средняя плотность во Вселенной сохранялась. Это условие получило название «Совершенный (perfect) космологический принцип» [13] и формулируется в виде утверждения, что Вселенная не только бесконечна и однородна в пространстве, но также и бесконечно давно пребывает и бесконечно долго будет пребывать в одном и том же состоянии. Таким образом, постулируется изотропия по времени от $t = -\infty$ до $t = +\infty$.

В своей первой статье по этому поводу [5] Бонди и Голд рассматривают две возможности: а) вещество рождается в пустоте, б) вещество рождается там, где уже есть вещество, причем скорость рождения вещества пропорциональна плотности наличного вещества.

Второй вариант авторы сразу отвергают, основываясь на астрономических соображениях, так как масса каждой звезды, в частности Солнца, в этом варианте удваивается за время порядка возраста Вселенной, что недопустимо уже по геологическим данным, на основании которых можно сказать, что температура поверхности Земли мало изменилась за 10^9 лет.

Однако есть и гораздо более сильные аргументы против предположения о таком локальном рождении.

В самом деле, в какой форме могло бы рождаться вещество? Если рождающиеся нуклоны присоединяются к ядрам вещества, то при этом должны вылетать γ -кванты и образовываться радиоактивные ядра. Но современными методами можно было бы констатировать радиоактивность с периодом полураспада больше 10^{20} лет, т. е. в 10^{10} раз меньшую, чем ожидаемая по теории рождения.

Если же вещество рождается в виде атомов водорода и не присоединяется к ядрам, то в любом образце породы, пролежавшем в земной коре, например, 500 млн. лет, должно быть не менее 5% водорода по весу. Таким образом, вариант рождения вещества со скоростью, пропорциональной плотности наличного вещества, решительно противоречит нашим сведениям.

6.2. Рождение в пустоте

Обратимся к первому варианту — к предположению о рождении вещества в пустоте. От прямого экспериментального опровержения этот вариант забронирован надежно, так как весьма мала скорость рождения вещества, необходимая для поддержания стационарного состояния.

В самом деле, при средней плотности материи в настоящее время меньше 10^{-29} г/см³ (т. е. в среднем 1 нуклон на 10^5 см³) и характерном времени расширения 10^{10} лет, очевидно, нужно постулировать скорость рождения около 1 нуклона в 10^5 см³ в 10^{10} лет или 1 нуклон в год в объеме 10^{15} см³ = 1 км³. Исключить такую возможность экспериментально нельзя, даже если предположить, что рождается не водород, а нейтрон, который может радиоактивно распадаться или присоединяться к другим ядрам, образуя радиоактивные изотопы.

Очевидно, что предположение о спонтанном рождении атомов водорода или нейтронов в пустоте противоречит закону сохранения барионов* и противоречит закону сохранения энергии, который является частью ОТО. Но даже если пойти на все это, то останется противоречие со специальной теорией относительности.

Дело в том, что в теории рождения нужно сделать какое-то предположение о скорости движения рождающихся частиц. Предполагается, что частицы рождаются покоящимися в той системе координат, в которой в среднем покоятся окружающие звезды или галактики. Но в варианте рождения в пустоте предполагается, что рождение не связано причинно со звездами, а идет с одинаковой вероятностью и вблизи звезд и в межгалактическом пространстве. Значит, в пустоте оказывается выделенной определенная система координат, «наинерциальнейшая система» по выражению известного физика, обычно признающего теорию относительности, система, в которой покоятся рождающиеся частицы.

Закон рождения не инвариантен относительно преобразования Лоренца: если в одной системе частицы покоятся, то в другой они движутся**.

В этой связи любопытна недавняя работа Хойла [8]. В первой части он признает, что ранее теория рождения формулировалась им нековариантно. В оправдание этого Хойл подчеркивает, что наблюдаемое в природе движение туманностей действительно выделяет в каждой точке пространства преимущественную сопутствующую систему координат. Эта часть работы полезна в том отношении, что многие читатели не разглядели нековариантности ранней теории [6], хотя Хойл вводил 4-вектор, выделяющий сопут-

* О варианте рождения нуклон-антинуклонных пар см. ниже.

** Отметим, что не существует никакого распределения скоростей, которое было бы одинаковым в любой системе координат (движущихся одна относительно другой при конечной плотности).

ствующую систему s_r (направленный по оси времени этой системы). Дальше формулы строились из величин с должным числом индексов и внешне все было похоже на расчеты по ОТО.

По существу же, конечно, в ОТО не может быть рождения, а рождение вещества, покоящегося в определенной системе, противоречит не только ОТО, но и СТО. Сопутствующая система выделена для конкретного решения, в ней покоятся галактики, расположенные в данной точке. Но законы природы, согласно СТО, остаются инвариантными относительно преобразования Лоренца от сопутствующей системы к другой, движущейся относительно нее. Опыт Майкельсона подтвердил именно такую инвариантность. СТО распространяет эту инвариантность на все явления природы.

Во второй части [8] Хойл предлагает ковариантную версию теории рождения, в которой вводится скалярное поле ϕ , зависящее от распределения наличной материи; скорость рождения вещества принимается зависящей от производных $\phi_{\mu\nu}$.

Последовательное проведение этой схемы приведет к тому, что скорость рождения будет максимальна там, где максимальна плотность материи*. Другими словами, Хойл фактически возвращается к тому варианту, который уже давно — и справедливо — был отброшен Бонди и Голдом [5] по чисто экспериментальным причинам (см. § 6. 1.)

Отметим, наконец, что в 1956 г. Бербидж и Хойл [7] выдвигали предположение о спонтанном рождении пар барион-антибарион. Если вся Вселенная (все галактики) состоит из барионов, то рождение пар не позволяет добиться ее стационарности. Пары вносят только энергию, их рождение не устраняет уменьшения барионного числа в единице объема со временем, являющегося следствием расширения.

Любопытно, что в 1962 г. было проведено на спутнике измерение космических жестких γ -квантов [21]. Авторы отмечают, что измеренный поток γ -квантов в 1000 раз меньше того потока, который получился бы за счет аннигиляции в галактике антибарионов, рождающихся по Бербиджу и Хойлу.

Физику может показаться странным приведенный выше подробный разбор теории рождения, так резко противоречащей основным законам. Однако в астрономической литературе теория рождения занимает заметное место, ее развивают и сравнивают с наблюдениями.

Приведенная здесь критика составляет, вероятно, не больше 1% всей литературы, посвященной данному вопросу.

* Это произойдет, несмотря на утверждение Хойла о зависимости ϕ от средней плотности далекой материи, так как скорость рождения по Хойлу зависит от производных $\phi_{\mu\nu}$, которые имеют особенности там, где есть материя.

§ 7. Сохранение энергии в замкнутом мире

7.1. Масса замкнутого мира

Ниже будут рассмотрены свойства определенного варианта однородной нестационарной Вселенной, а именно — свойства закрытой модели (так называемого замкнутого мира). Хаббловская постоянная H , характеризующая скорость удаления галактик друг от друга, в настоящий момент может считаться приближенно известной. При данном значении H Вселенная замкнута, если средняя плотность всех видов материи (в том числе электромагнитного излучения, нейтрино и т. п.) в настоящий момент превосходит определенное критическое значение

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Численное значение ρ_c приведено для $H = 100$ км/сек на мегапарсек ($\sim 3 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1}$).

Современные оценки фактической плотности очень не надежны и дают значения значительно меньшие ρ_c . Однако при этом надо еще иметь в виду возможность наличия заметной плотности трудно наблюдаемых форм материи (в частности, в виде нейтрино и погасших звезд). Поэтому не исключено предположение, что $\rho > \rho_c$ и мир замкнут.

Основное свойство замкнутого мира заключается в его конечном объеме. Электрический заряд, находящийся внутри заданного объема, может быть выражен через интеграл электрического поля по поверхности, окружающей этот объем (теорема Гаусса-Остроградского).

В случае замкнутого мира при увеличении того объема, заряд которого мы хотим определить, окружающая его поверхность сперва увеличивается, а затем, когда объем приближается к полному объему замкнутого мира, уменьшается и в конце концов стягивается в точку; соответственно обращается в нуль интеграл по поверхности*. Отсюда следует известный вывод, что электрический заряд замкнутого мира тождественно равен нулю. По существу, мы утверждаем, что $\int \rho dV = 0$ (ρ — плотность заряда, dV — элемент объема), потому что в противном случае уравнение $\Delta\phi = -4\pi\rho$ не имеет решения на замкнутом трехмерном многообразии (здесь ϕ — потенциал электрического поля).

Энергия и импульс внутри заданного объема могут быть выражены через интегралы соответствующих величин по поверхно-

* Хорошей аналогией является линия, ограничивающая часть поверхности обычного шара в трехмерном пространстве, например параллель, окружающая северный полюс на Земле. Когда часть поверхности больше половины всей поверхности, параллель расположена южнее экватора, она стягивается в точку (южный полюс) при стремлении части поверхности ко всей поверхности.

сти, ограничивающей данный объем. Поэтому из того факта, что поверхность стягивается в точку, когда рассматриваемый объем стремится ко всему объему замкнутого мира, следует равенство нулю полной энергии (т. е. массы) замкнутого мира и его импульса.

Как наглядно понять равенство нулю массы замкнутого мира?

Дело в том, что в ОТО масса не аддитивна. Масса совокупности двух звезд меньше суммы масс каждой звезды в отдельности. Это уменьшение массы соответствует тому, что энергия гравитационного взаимодействия отрицательна*. Уменьшение массы равно $\frac{\Delta E}{c^2} = -\frac{GM_1M_2}{rc^2}$ — в точности такое же, как при взаимодействии притяжения другой (не гравитационной) природы.

В замкнутом мире гравитационное взаимодействие его частей так велико, что соответствующий дефект массы в точности равен сумме масс всех отдельных частей мира. В замкнутом мире гравитационное взаимодействие достигает наибольшего возможного значения.

7.2. Локальный закон сохранения энергии

Поскольку масса (энергия) замкнутого мира тождественно равна нулю, закон сохранения энергии для мира, как целого, выполняется тождественно ($0 = 0$).

Сохранению энергии не противоречило бы увеличение числа барионов, так как при добавлении каких-то масс одновременно увеличилось бы и гравитационное взаимодействие и дополнительный дефект массы скомпенсировал бы увеличение суммы масс отдельных частей мира.

Поэтому были высказывания [22], что рождение вещества в случае замкнутого мира не противоречит закону сохранения энергии.

Однако в действительности в ОТО закон сохранения энергии имеет два лица: а) сохранение энергии системы в целом (о чем уже говорилось выше) и б) сохранение энергии для отдельной малой части системы.

Малую часть системы рассмотрим в системе координат, в которой ее центр тяжести покоится.

Рассмотрим шар малого радиуса r , плотность сохраняющихся частиц (барионов) внутри которого равна n , а полное их число в рассматриваемом объеме $N = n \frac{4}{3} \pi r^3$. Удельная энергия на один барион E_1 , плотность энергии $\varepsilon = nE_1$ (так что плотность массы равна ε/c^2) и внутренняя энергия всего шара $E = \varepsilon V = NE_1$.

Согласно ОТО, для такого отдельно взятого малого объема существует закон сохранения энергии: изменение энергии в

* Было бы совершенно неправильно говорить в этой связи о какой-то акранировке поля тяготения [23].

объеме равно сумме работы сил давления и энергии, втекающей через поверхность, ограничивающую данный объем.

Кинетическую энергию вещества можно не рассматривать, так как для малого объема скорости движения относительно центра тяжести невелики. Считая радиус r малым, заметим, что внутренняя энергия $\sim r^3$, а кинетическая энергия $\sim r^5$, т. е. является малой более высокого порядка*. Гравитационная энергия взаимодействия масс, находящихся внутри объема $\sim M^2/r \sim r^5$, как и кинетическая энергия, пропорциональна r^5 **. Наконец, гравитационное взаимодействие рассматриваемого объема с окружающим его веществом влияет на движение центра тяжести рассматриваемого объема, но не на его внутреннюю энергию***.

Закон сохранения энергии в эйлеровой системе координат можно записать в виде

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\operatorname{div} [v(p + \varepsilon)].$$

Для однородного мира p и ε не зависят от координаты. По Хабблу $v = Hr$ и $\operatorname{div} v = 3H$, так что

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -3H(p + \varepsilon).$$

В лагранжевой системе координат рассматриваем объем, образованный всегда одними и теми же сохраняющимися частицами. Радиус шара $r(t)$ пропорционален радиусу мира $R(t)$.

Очевидно,

$$\frac{dr}{dt} = v = Hr; \quad \frac{dR}{dt} = HR.$$

Через поверхность шара, движущуюся вместе с частицами, вещество не проходит. Изменение энергии внутри шара зависит только от работы сил давления:

$$dE = -p dV; \\ \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4\pi}{3} \varepsilon r^3 \right) = -p 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} = -p 4\pi r^3 H.$$

В частном случае $p = 0$ (пылевидная материя) $\frac{dE}{dt} = 0$. С точки зрения локального закона сохранения энергии очевидно, что рож-

* Мы принимаем, что в соответствии с наблюдениями Хаббла скорость $v = Hr$, так что кинетическая энергия единицы массы порядка $H^2 r^2$.

** Заметим, что для этих величин, пропорциональных r^5 , есть свой закон сохранения, определяющий динамику изменения всех расстояний, а следовательно, и радиуса замкнутого мира.

*** Все эти соображения относятся не только к объему, выделенному внутри изотропного замкнутого мира, но и к малому объему, мысленно выделенному внутри звезды.

дение пар в замкнутом мире также затруднено и требует такой же высокой температуры, как и в лабораторных условиях на Земле или около любой звезды.

Гравитационное взаимодействие частиц, находящихся в данном объеме с окружающим веществом, никак не меняет условий протекания физических процессов в данном объеме. Напомним, что ведь и все наши лабораторные опыты на Земле тоже осуществляются внутри замкнутого мира.

Сторонники теории рождения вещества рассуждают так: в ОТО постоянна энергия E в объеме, составляющем постоянную долю всего замкнутого мира (r пропорционально R); в теории рождения постоянна энергия в объеме постоянного радиуса $r' = \text{const}$ и рождение компенсирует убыль вытекающей энергии, так что $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$. Не правда ли, две сходные, равновероятные формулировки, выбор между которыми может дать только эксперимент или астрономические наблюдения?

В действительности утверждение $\frac{dE}{dt} = 0$ получилось выше, как частный случай (при $p = 0$) общего закона сохранения энергии, применимого везде, в любых лабораторных опытах. Утверждение теории рождения $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ явно не является общим: когда расширяется газ под поршнем двигателя, то ясно, что ε — плотность энергии — не остается постоянной. Поэтому и переход от $\frac{dE}{dt} = -p \frac{dV}{dt} = 0$ при $p = 0$ к $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ вовсе не является безобидным «другим вариантом теории», как это может показаться на первый взгляд.

Уравнение $dE = -pdV$ иногда называют уравнением сохранения энтропии, так как в равновесии действительно $dE = -pdV + TdS$. Однако в силу различных диссипативных процессов* в процессе расширения давление может быть ниже равновесного, а в ходе сжатия — выше равновесного. Тогда и расширение и сжатие сопровождаются ростом энтропии. При расширении, сменяющемся сжатием, мы вернемся к начальному значению плотности n с увеличенной энтропией S ; значит, возрастет и плотность энергии ε , а при том же объеме мира, как целого, возрастет и внутренняя энергия всего мира. Увеличение внутренней энергии компенсируется увеличением (по модулю) гравитационной энергии; здесь как раз проявляется тот факт, что полная энергия (и масса) замкнутого мира тождественно равна нулю.

* По замечанию А. А. Овчинникова (дипломная работа, МГУ, физ. ф-т, 1961), такая ситуация возникает, когда вещество состоит из элементарных частиц разных типов и скорость их взаимного превращения сравнима со скоростью изменения плотности.

§ 8. Гипотезы изменения констант

8.1. Принцип Маха и изменение констант

Экспериментальное доказательство нестационарности Вселенной произвело огромное впечатление на широкий круг физиков и астрономов.

Теоретическое предсказание этого эффекта из ОТО, сделанное Фридманом задолго до наблюдений Хаббла, осталось менее заметным.

Теория рождения пытается отрицать нестационарность Вселенной, пытается сохранить стационарность Вселенной, несмотря на разбегание туманностей.

Другое направление мысли, вызванное открытием нестационарности Вселенной, заключается в предположении, что нестационарны, меняются со временем не только такие величины, как плотность материи и расстояние между звездами, но и константы, входящие в уравнения, — гравитационная постоянная, электрический заряд элементарной частицы и т. п.

Дирак — один из основателей этого направления — прямо признает [9], что такие идеи идут вразрез с общей и специальной теорией относительности. По существу, они основываются на представлении взаимозависимости всех явлений природы: электростатическое и гравитационное взаимодействие двух элементарных частиц, например, электрона и протона в атоме водорода зависит от всей материи во всем мире. В такой общей форме эти представления, очевидно, сродни идеям Маха о том, что только материя, далекие массы определяют такие механические свойства тел в данной точке, как инерция тел, различие между вращающейся и невращающейся системой координат.

К такой общей установке добавляется еще мистика больших чисел, восходящая к Эддингтону. Отношение электростатического взаимодействия к гравитационному в атоме водорода равно $2 \cdot 10^{39}$. Это число весьма велико, оно нуждается в специальном объяснении.

Радиус мира R порядка 10^{10} световых лет и равен 10^{28} см, классический радиус электрона $r_e = \frac{e^2}{mc^2} = 3 \cdot 10^{-13}$ см, отношение $\frac{R}{r_e} = 3 \cdot 10^{40}$.

Предположим, что близость чисел $2 \cdot 10^{39}$ и $3 \cdot 10^{40}$ не случайна. Так как R зависит от времени, то должно зависеть от времени и отношение гравитационной постоянной к заряду.

В настоящее время мир находится в стадии расширения. Полагая заряд частиц постоянным, авторы приходят к выводу, что с течением времени ньютоновская константа тяготения уменьшается.

Размеры небесных тел — планет, звезд — зависят от соотношения между кинетической энергией, электрическими и гравитационными силами. Земля сжата силой тяжести, которой противостоят силы упругости вещества, зависящие от квантовой постоянной (от нее зависит кинетическая энергия электронов) и электрического заряда. Уменьшение гравитационной постоянной должно приводить к распуханию Земли, к увеличению ее радиуса.

Другой вариант таких взглядов [11] заключается в том, чтобы, не анализируя отдельно влияние постоянной тяготения, заряда и т. д., прямо предположить, что линейные размеры небесного тела увеличиваются прямо пропорционально радиусу мира, т. е. на 10^{-10} своей величины в год (для радиуса Земли это составит $6 \cdot 10^8 \times 10^{-10} = 0,06$ см в год), потому что обе величины имеют размерность длины*.

Против этих точек зрения есть сильные возражения: если бы гравитационная константа уменьшалась с течением времени, то раньше она была больше и 10^9 лет назад Земля была бы ближе к Солнцу. Более того, Солнце светило бы ярче, так как от гравитационной постоянной зависит плотность вещества и скорость ядерных реакций в звезде. Все эти следствия указанных взглядов резко противоречат геологическим данным.

Однако с точки зрения физика главным возражением остается отсутствие какой-либо физической идеи о возможном механизме влияния радиуса мира и далеких масс на явления в данной точке.

Предположение о таком влиянии противоречит локальному характеру всех уравнений физики, прекрасно оправдывающихся на опыте. Гравитационное влияние далеких масс, как мы хорошо знаем, не влияет на взаимное притяжение Земли и Солнца или электрона и протона. Теория зависимости констант от радиуса мира не только не имеет оснований, но и противоречит всему духу современной физики с конечной скоростью распространения всех влияний, с локальным (полевым) описанием явлений.

8.2. Влияние локальной кривизны

Нельзя ли спасти теорию уменьшающейся гравитационной константы**, полагая, что за такое изменение ответствен не радиус мира как целого, а такая локальная величина, как кривизна пространства? Тогда отпадут упреки предыдущего параграфа, связанные с влиянием далеких масс.

Легко убедиться в том, что такая теория не приемлема.

* Впрочем, надо иметь в виду, что увеличение радиуса Земли приведет к сдвигу материков и другим геологическим следствиям лишь в том случае, если размеры атомов не будут меняться пропорционально.

** Автор сознает грамматическую неправомерность и противоречивость выражения «уменьшающаяся константа». Но, право же, это не самое худшее свойство данной теории.

В самом деле, кривизна пространства равна $1/R(T)$ в модели изотропного мира и плавно уменьшается с течением времени. В среднем, рассматривая области, содержащие много галактик, но малые по сравнению с радиусом мира, действительно можно считать плотность вещества приблизительно постоянной, а Вселенную — приблизительно изотропной.

Однако очевидно, что от этой изотропии ничего не остается при переходе к масштабам солнечной системы: в объеме шара, радиус которого равен радиусу орбиты Земли, средняя плотность в 10^{20} раз больше средней плотности во Вселенной. Локальная кривизна пространства во много раз превосходит среднюю кривизну в однородной модели, влияние локальной кривизны привело бы к различию констант на Земле и на высоте 1000 км над Землей, но отнюдь не к плавному изменению констант со временем.

8.3. Теория Иордана

Немецкий физик-теоретик Паскуаль Иордан развил [10] довольно сложную в математическом отношении теорию, локальную, инвариантную по отношению к преобразованиям Лоренца и включающую переменность гравитационной постоянной G . Для расширяющейся Вселенной G уменьшается с течением времени.

Уравнения Иордана приводят к следствию, что произведение ρG^2 должно оставаться постоянным.

Это значит, что уменьшение G сопровождается спонтанным увеличением плотности, т. е. рождением материи.

Рождение материи в этой теории пропорционально наличной плотности и никак не описано с атомной точки зрения. Трудности, связанные с идеей рождения материи, были подробно рассмотрены выше. Как уже отмечалось, ядерные методы позволяют исключить рождение материи, во много раз меньшее, чем то, которое следует из теории Хойла и Иордана.

В заключение своей книги Иордан пишет, что теория предварительна, что вывод о рождении относится к зародышевым звездам, но не должен применяться к уже существующим сравнительно холодным звездам. Однако этот вывод снова применим к Вселенной, как целому.

Спрашивается, что остается от теории, если к ней добавлено столько произвольных ограничений и гипотез?!

Общая теория относительности не нуждается в ограничении объектами определенного типа, одинаково относится и к горячим и к холодным звездам.

По существу, тот факт, что теория Иордана приводит к необходимости рождения, достаточен для того, чтобы отбросить эту теорию.

§ 9. Общие замечания; два подхода к развитию науки

В исследовании природы всегда имеют место две противоположных тенденции. Одна тенденция заключается в попытке вывести максимум следствий, объяснить максимальное число явлений на основе известных в данный момент законов физики.

Другая тенденция заключается в поисках новых законов, в поисках отклонений от известных законов. Поскольку каждый закон физики в последнем счете основан на опыте, точность которого по необходимости ограничена, то всегда можно предполагать, что закон является лишь приближенным. Так появляется целая серия работ — по крайней мере по одной работе на каждое утверждение физики. Например, хотя всегда предполагается равенство заряда протона и электрона, Бонди и Литлтон [24] полагают, что они не в точности равны. Обычно предполагается постоянство G , e и h , но можно предположить, что они медленно меняются. По закону тяготения Ньютона сила притяжения $\sim r^{-2}$, но может быть показатель степени не в точности равен 2.

Число примеров такого рода можно увеличивать неограниченно. Однако соотношение между представителями этих двух тенденций исподволь изменилось по сравнению с концом XIX — началом XX века, когда Оствальд делил ученых на классиков и романтиков.

Дело в том, что появилась современная теоретическая физика; отдельные экспериментальные утверждения оказались связанными между собой стройными теориями. Уверенность в правильности этих теорий так велика, что выдвинут принцип соответствия: новая теория возможна лишь в том случае, если в области применимости старых теорий (ньютоновской механики, максвелловской электродинамики, квантовой теории) новая теория совпадет со старой.

Таким образом, резко сузилась возможность романтических скачков, изменяющих установленные законы. Но и сами «классики» не те, что прежде; все мы ждем принципиально новой теории там, где такая теория действительно необходима, и прежде всего в области теории элементарных частиц. Однако нельзя согласиться с произвольными изменениями основных теорий для объяснения каждого наблюдаемого явления. Вдохновляющими примерами последних лет являются теория сверхпроводимости и раскрытие генетического кода, в которых качественно новые явления объяснены на основе хорошо установленных теорий физики и химии.

Но и в такой области, как астрономия и космогония, роль «классика» не сводится только к тому, чтобы подобно держимордам не «пущать», не допускать изменения физических теорий.

Есть огромный пафос в задаче описания всего разнообразия наблюдаемых явлений и общих закономерностей Вселенной на

основе существующих законов физики, установленных лабораторным экспериментом и теоретическим анализом.

Добавление при корректуре. Приводим ссылки на работу, доказывающую равенство заряда электрона и протона [28] и, наконец, последний вариант теории рождения, в котором вводится поле с отрицательной плотностью энергии и нет ни слова о механизме рождения [29].

ЛИТЕРАТУРА

1. J. A. Wheeler. Proc. Solv. Congr., 1958; Уилер. Гравитация, нейтрино, космогония, ИЛ, 1962.
2. A. Peres. Prog. Theor. Phys., 24, 149, 1960.
3. Я. Б. Зельдович, Я. А. Смородицкий. ЖЭТФ, 39, 809, 1961.
4. S. Weinberg. Phys. Rev., 128, 1457, 1962.
5. H. Bondi, T. Gold. Month. Not., 108, 252, 1949.
6. F. Hoyle. Month. Not., 108, 372, 1948; 109, 355, 1949.
7. G. R. Burbidge, F. Hoyle. Nuovo sim., 4, 558, 1956.
8. F. Hoyle. Month. Not., 120, 256, 1960.
9. P. A. M. Dirac. Proc. Roy. Soc., A 165, 199, 1938.
10. P. Jordan. Schwerkraft u. Weltall. Vieweg, 1955. Zs. Phys., 157, 112, 1959.
11. Д. Д. Иваненко, М. У. Сагитов. Вестник МГУ, физ. астрон., № 6, 83, 1961.
12. R. H. Dicke. Rev. Mod. Phys., 34, 110, 1962.
13. H. Bondi. Cosmology, 2 ed, 1961.
14. R. H. Dicke. Scientific American, 205, (12), 84, Dec. 1961.
15. Morrison. Americ. Journ. Phys., 26, 358, 1958. УФН, февраль-март 1963 г.
16. T. D. Lee, C. N. Yang. Phys. Rev., 98, 1501, 1955.
17. R. H. Dicke. Phys. Rev., 126, 1580, 1962.
18. V. R. Pound, G. A. Rebka. Phys. Rev. Lett., 4, 337, 1960.
19. В. А. Фок. Теория пространства, времени и тяготения, 2-е изд. Физматгиз, 1961.
20. Г. М. Гандельман, В. С. Пинаев, ЖЭТФ, 37, 1072, 1959.
21. M. L. Kraushaar, G. W. Clark. Phys. Rev. Lett., 8, 106, 1962.
22. R. Fowler. The origin of nuclear species, S. 188, Physics for the Engineer (edit. by Ridenour). New York, McGraw, 1961.
23. В. Б. Брагинский, В. П. Руденко, Г. И. Рукман. ЖЭТФ, 43, 51, 1962.
24. H. Bondi, K. A. Littleton. Proc. Roy. Soc., A 252, 313, 1959.
25. V. W. Hughes, H. G. Robinson, V. Beltran-Lopez. Phys. Rev. Lett., 4, 342, 1960.
26. R. W. P. Drever. Phil. Mag., 6, 683, 1962.
27. R. H. Dicke. Phys. Rev. Lett., 7, 359, 1961.
28. J. C. Zorn, G. E. Chamberlain, V. W. Hughes. Phys. Rev., 129, 2566, 1963.
29. F. Hoyle, J. V. Narlikar. Proc. Roy. Soc., 273, 1, 1963.

Поступила 28 XI 1962 г.