

531 5+539,12.01

**ТЯГОТЕНИЕ, ЗАРЯДЫ, КОСМОЛОГИЯ И КОГЕРЕНТНОСТЬ****Я. Б. Зельдович****СОДЕРЖАНИЕ**

1. Введение . . . . .	487
2. Космология и черные дыры . . . . .	493
3. Термодинамическое равновесие, когерентность, вакуум . . . . .	496
4. Послесловие. Теория тяготения, элементарные частицы и большие числа Дирака . . . . .	500
Цитированная литература . . . . .	503

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время, особенно в связи с теоретическим открытием квантового испарения черных дыр (Хоукинг, 1974 <sup>1</sup>) (прекрасный обзор в «Успехах» опубликован Фроловым <sup>2</sup>), необычайный интерес вызывают принципиальные изменения физических законов при учете сильных гравитационных полей. Объявлено, что в черных дырах не сохраняется барионный заряд и нарушаются основные принципы квантовой механики — детерминированность, «предсказуемость» волновой функции (Хоукинг, 1975, 1976 <sup>3, 4</sup>). Под названием «несохранение барионного заряда» выступают два направления.

1) Предположим, что с барионным зарядом связано некоторое мезонное векторное поле, как с электрическим зарядом связано электромагнитное поле (4-вектор потенциала). Предположим далее, что соответствующий мезон имеет массу покоя, в отличие от фотона. В плоском пространстве, в отсутствие тяготения статический потенциал  $N$  барионов удовлетворяет неравенству

$$A_{4N} > Nq \frac{e^{-ar}}{r}, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд одного бариона. Это неравенство заменяет электростатическое выражение  $A_{4E} = Nq_e/r$ ,  $E_E = Nq_e/r^2$ . В пространстве, окружающем черную дыру, — в метрике Шварцшильда — оказывается, что  $A_{4N} \equiv 0$  при  $r > r_g$  (этот результат получается из условия конечности  $A_{4N}$  при  $r = r_g$ ;  $r_g$  — гравитационный «шварцшильдовский» радиус тела), тогда как для безмассового электромагнитного поля закон Кулона  $E = Q/r^2$  не изменяется. Следовательно, мезонное векторное поле не дает возможности определить барионный заряд, находящийся внутри черной дыры. Сначала «несохранением барионного заряда» было названо именно исчезновение внешнего мезонного поля. Позже — в связи с испарением черных дыр, к которому мы переходим в следующем пункте, — было отмечено, что исчезновение внешнего мезонного поля необходимо для возможности полного испарения черной дыры; электрически заряженная черная дыра имеет метрику, отличную от шварцшильдовской (метрика Рейсснера-Нордстрема), и до конца не испаряется, пока не освободится от заряда.

2) Второе направление и второй смысл, вкладываемый в понятие несохранения барионного заряда, связаны с теорией испарения черных дыр. Черная дыра теряет массу по определенному закону,  $dM/dt = -k/M^2$ . Из предыдущего следует, что закон этот не зависит от барионного заряда черной дыры. На определенной стадии испарения при температуре излучения порядка и выше энергии покоя протона черная дыра излучает также барионы и антибарионы, но в первом приближении поровну.

Испарение бариона сопровождается падением антибариона внутрь черной дыры, испарение антибариона сопровождается падением бариона. Однако, как видно из предыдущего, в среднем барионный заряд черной дыры остается постоянным во время испарения. Пусть черная дыра образовалась путем коллапса «вещества» (в отличие от «антивещества») и имеет положительный барионный заряд. В таком случае она в среднем сохранит этот барионный заряд вплоть до конца испарения. Но конец испарения наступает резко, за вполне определенное время  $t = M^3/3k$ , после которого черная дыра полностью исчезает из нашего пространства. В нашем пространстве не остается ничего, кроме разлетающихся продуктов испарения; на месте, где находилась черная дыра, не остается (после ее испарения) никаких возмущений метрики, никакая пуповина не соединяет наше пространство с той областью внутри черной дыры, где находятся коллапсировавшие барионы. Эти барионы исчезли полностью из нашего пространства, и в этом смысле можно говорить о несохранении барионного заряда в нашем пространстве.

При этом остается открытым вопрос о судьбе барионов внутри черной дыры. В классической (не квантовой) теории тяготения, т. е. в общей теории относительности, неизбежно появление истинной сингулярности внутри черной дыры. Поведение барионов, падающих в эту истинную сингулярность, неизвестно. Однако исчезновение барионов из нашего пространства не связано с сингулярностью. Нет необходимости отказываться от непрерывности мировой линии бариона, т. е. от микроскопической формулировки закона сохранения барионного заряда.

Наблюдаемое несохранение барионов зависит от появления в ходе коллапса поверхности горизонта (в простейшем случае — шварцшильдовской сферы  $r = r_g$ ) и связанного с этим испарения черной дыры.

Проследим теперь за историей вопроса и наметим вероятные этапы дальнейшего развития теории. Доказательство исчезновения массивного векторного поля вне черной дыры вполне аналогично доказательству исчезновения внешнего магнитного поля в известной работе Гинзбурга и Озерного (1964 <sup>5</sup>). При исследовании несферических составляющих гравитационного поля метрики черной дыры очень рано (Дорошкевич, Зельдович, Новиков, 1965 <sup>6</sup>) был сформулирован общий принцип: все величины, которые могут быть наблюдаемы вне черной дыры, зависят только от сохраняющихся величин, характеризующих черную дыру: от ее массы, вращательного момента и электрического заряда. Напомним, что квантовое испарение черной дыры при этом еще не рассматривалось. Позже это утверждение развивалось в ряде работ и формулировалось кратко: «черная дыра не имеет волос» (Уилер). Эта формулировка подразумевает, что в процессе коллапса внешнее поле «забывает» обо всех особенностях строения коллапсирующей массы; остается лишь информация о сохраняющихся величинах. Барионный заряд при этом не попадал в категорию сохраняющихся величин. Однако следует самокритично признать, что в работе <sup>6</sup> отсюда не делался вывод о несохранении барионов \*).

\*) Пока мы имеем дело с евклидовым пространством, знак неравенства (1) такой, что снаружи поле не исчезает, хотя теоремы Гаусса и нет. Однако при массе мезона отличной от нуля, переход к шварцшильдовской метрике пространства вокруг черной

Вопрос об испарении черной дыры также имеет предысторию. Ретроспективно следует отметить работу <sup>7</sup> (Зельдович, 1962), в которой показано, что любое количество барионов с любой энтропией может быть сжато таким образом, что масса покоя образовавшегося тела окажется сколь угодно малой — за счет того, что гравитационный дефект массы почти компенсирует массу покоя и внутреннюю энергию сжатого вещества. Принципиальное значение этого результата заключается в том, что любое тело от пылинки до звезды или пульсара, которое раньше предполагалось находящимся в состоянии устойчивого равновесия, в действительности оказывается метастабильным, неустойчивым относительно превращения в новое сверхсжатое состояние с одновременным превращением избытка массы в излучение (фотоны, пары  $e^+e^-$ ,  $\nu\bar{\nu}$ , . . .), уходящее на бесконечность.

Длительное, практически стабильное, существование вещества в обычном состоянии оказывается связанным с энергетическим барьером, отделяющим обычное состояние вещества от сверхсжатого. При детальном рассмотрении оказывается, что барьер (величина  $A$  в выражении  $e^{-2A}$  для вероятности спонтанного процесса) тем меньше, чем меньше рассматриваемая начальная масса. Однако некантовая теория тяготения применима лишь при  $M \gg \sqrt{G}$  (система единиц  $\hbar = c = 1$ ;  $G$  — постоянная тяготения; в этой системе единиц массе  $M_{Pl} = (\sqrt{G})^{-1}$  соответствует «планковская» единица массы  $10^{-5}$  г). На границе применимости теории  $A \sim (GM_p^2/\hbar c)^{-5/8} = 10^{30}$ , что с избытком достаточно для практической устойчивости обычного вещества и даже вещества, сжатого в нейтронных звездах. Однако в принципе метастабильность остается. Этот результат (последний научный результат, о котором мне удалось рассказать Льву Давидовичу Ландау незадолго до катастрофы) был получен для такого распределения вещества, которое не изменяет качественно топологии пространства Минковского. Заметим, что можно было бы пойти еще дальше вспять по времени. Давно известно, что масса замкнутого мира тождественно равна нулю (Ландау, Лифшиц <sup>8</sup>). При этом электрический заряд замкнутого мира также тождественно равен нулю, но барионный заряд его отнюдь не обязан равняться нулю \*)!

Значит, энергетически возможен процесс превращения группы барионов в нашем пространстве в группу барионов, находящихся в отдельном от нашего замкнутом пространстве. При этом по закону сохранения энергии (являющемуся составной частью ОТО или, лучше сказать, выводом из общей теории относительности) в нашем пространстве должны появиться частицы, в среднем нейтральные, которые наследуют энергию исчезнувшей из нашего пространства группы барионов.

дыры меняет дело, наружное поле исчезает. Само исчезновение статического наружного решения не зависит от величины массы покоя, но при уменьшении массы увеличивается время исчезновения (Старобинский) <sup>12</sup>. Таким образом, при любом конечном времени зависимость наружного поля от массы гладкая, разрыв в стационарном решении при  $m = 0$  имеет место только при  $t = \infty$ .

Отметим, наконец, что безмассовое поле, которое взаимодействовало бы с барионным зарядом, не существует в природе. Точнее, можно сказать, что такое поле нарушило бы принцип эквивалентности: далекие тела взаимодействовали бы не только гравитационно пропорционально массе, но и через гипотетическое поле, пропорционально числу барионов. Опыт показывает, что такое взаимодействие если и есть, то не менее чем в  $10^{60}$  раз слабее электромагнитного.

\*) Для электрического заряда из  $\text{div } E = 4\pi e(n_p - n_e)$  и сведения объемного интеграла к интегралу по поверхности следует  $(n_p - n_e) = 0$  для замкнутого мира. Аналогично, 4-импульс, а следовательно, и масса, может быть выражена как интеграл по поверхности, которая в случае замкнутого мира стягивается в точку. Физический смысл нулевой массы прояснился при рассмотрении полужамкнутых миров (Зельдович, Новиков <sup>21</sup>).

Итак, возможность видимого несохранения барионов и превращения их массы в энергию была в ОТО много лет назад. Огромная заслуга Хоукинга состоит в том, что он нашел конкретный процесс, осуществляющий эту возможность. Процесс заключается после того, как произойдет коллапс вещества с образованием черной дыры.

Для процесса существенна принципиальная нестационарность черной дыры, т. е. существенно то, что приближение коллапсирующего вещества к гравитационному радиусу идет асимптотически; расстояние края вещества от гравитационного радиуса  $(r - r_g)$  уменьшается вдвое за время порядка  $r_g/c$ , — и именно таков период колебаний фотонов и других частиц, испаряющихся с поверхности черной дыры, согласно Хоукингу. Работа Хоукинга появилась после ряда работ по рождению частиц в других, более простых, однородных полях; инициатором этого направления \*) был Паркер<sup>9</sup>. Наряду с испарением частиц черная дыра создает поляризацию вакуума. Принципиальное значение поляризации вакуума для рождения частиц в гравитационном поле было выяснено в работе Зельдовича и Питаевского<sup>10</sup>. В случае черной дыры поляризационная плотность энергии отрицательна и растет по абсолютной величине как  $\varepsilon = -\text{const}/(r - r_g)$ <sup>11, 12</sup>. Можно сказать, что испаряющиеся частицы, улетая, оставляют все большую отрицательную массу поляризованного вакуума, компенсирующую (уменьшающую) начальную массу коллапсирующего тела. Дальнейшее развитие теории наталкивается на две очень различные группы вопросов и трудностей.

При радиусе черной дыры, характерном для сильного взаимодействия ( $2 \cdot 10^{14}$  см  $= \hbar/Mc$ ), возникают вопросы, связанные со структурой протона, нейтрона, мезонов. Должны ли мы рассматривать все эти частицы как элементарные? Существенна ли кварковая структура адронов? Существуют ли массивные мезоны или глюоны, связанные с барионами и барионным зарядом, или существуют лишь глюонные поля, связанные с цветом кварков? Глюонное поле, вероятно, запретит гравитационную аннигиляцию кварков иначе, чем в виде бесцветных троек, т. е. в виде одного или нескольких барионов. Имеют ли глюоны массу, является ли их масса «первичной», или эта масса сама зависит от какого-то взаимодействия (Хиггс), и в этом случае остается ли справедливым вывод о том, что массивное поле втягивается тяготением и исчезает при  $r > r_g$ ? При несколько меньшем радиусе порядка  $10^{-17}$  см энергия вылетающих частиц становится порядка нескольких  $T_{\text{эв}}$  (1 тераэлектрон-вольт  $= 10^{12}$  эв). Здесь стираются грани между сильным и слабым взаимодействием: на это обстоятельство давно указал Марков<sup>13</sup>. Следовательно, можно ожидать и нарушения четности, и зарядовой симметрии частиц и античастиц.

В частности, возможно, что черная дыра будет испускать чуть больше барионов по сравнению с антибарионами, которые она преимущественно будет поглощать. На такую принципиальную возможность указал Хоукинг<sup>3, 4</sup>, затем частную конкретную модель рассмотрел Зельдович<sup>14</sup>. В принципе, может быть, на этом пути удастся объяснить наблюдаемую зарядовую асимметрию Вселенной и найти теоретически характерное для современного состояния Вселенной отношение плотности барионов к плотности фотонов, равное  $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ .

При радиусе  $r_g = 2 \cdot 10^{-14}$  см масса черной дыры равна  $10^{18}$  г, при  $r_g = 10^{-17}$  см масса равна  $6 \cdot 10^{10}$  г. Следовательно, принципы теории Хоукинга еще полностью применимы: гравитационное поле и метрику можно описывать классической ОТО, масса отдельных испаряющихся

\*) Впрочем, первое упоминание об этом есть еще в довоенной работе Шрёдингера<sup>31</sup>. Космологические следствия рождения частиц см. 32-34.

частиц ничтожна по сравнению с массой черной дыры, испарение частицы можно рассматривать на фоне заданной метрики без учета обратного влияния отдельной частицы на массу, изменение массы можно рассматривать как непрерывный процесс \*).

Однако, когда мы хотим рассмотреть вопрос о целенаправленном (на ускорителе) или спонтанном рождении черной дыры, естественно рассматривать черные дыры по возможности меньшей массы. К рассмотрению черных дыр малой массы приводит и детализация конечных стадий испарения любой черной дыры.

Теория Хоукинга сама определяет предел своей применимости. Опуская все безразмерные множители, напишем условие того, что масса испаряющейся частицы  $M_{ev}$  равна массе самой черной дыры  $M_{BH}$  \*\*):

$$M_{ev} = \frac{\hbar\omega}{c^2} = \frac{\hbar}{c^2} \frac{c}{r_g} = \frac{\hbar}{c^2} \frac{c \cdot c^2}{GM_{BH}}.$$

Условие  $M_{ev} = M_{BH}$  дает  $M_{BH} = \sqrt{\hbar c/G} = M_{Pl} = 10^{-5}$  г,  $r = r_{Pl} = 10^{-33}$  см. Получается характерная «планковская» масса. Итак, границы применимости теории Хоукинга, основанной на ОТО, совпадают с предполагаемыми границами применимости самой классической (не квантовой) ОТО.

Но на этом нельзя поставить точку. Жизненно важен (в частности, для космологии) ответ на вопрос: что происходит при меньших массах, да и существуют ли черные дыры с малыми массами? Существуют ли они в природе и могут ли принципиально существовать?

Строго обоснованного ответа на все эти вопросы нет, существуют различные мнения и разногласия.

Не вдаваясь в дискуссию, изложу свои предположения.

1) Черная дыра с массой  $10^{-5}$  г или меньше распадается мгновенно, испуская, как правило, пару частиц. Этот процесс следует рассматривать как отдельный квантовый скачок, наравне, например, с распадом  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ .

Характерное время распада порядка «планковского», т. е. порядка  $10^{-43}$  сек, поэтому неопределенность массы черной дыры порядка самой массы.

2) Черная дыра, испустив частицы, превращается в замкнутое пространство, не связанное с нашим, т. е. полностью исчезает из нашего пространства.

3) Запрет на количественное применение теории Хоукинга не есть запрет на распад. Стабильные образования с массой  $10^{-5}$  г и радиусом  $10^{-33}$  см (или меньше), сдерживаемые гравитацией, не существуют в природе.

Будущая теория должна дать время распада нестабильных состояний с малой массой.

В области совсем малых масс,  $M \ll M_{Pl}$ , необходим полностью квантовый язык. Время жизни черной дыры становится столь малым, что обязательно нужно рассматривать оба процесса — рождение и испарение — вместе.

Итак, если верно все предыдущее, возможен, например, процесс

$$N + N = BH = \nu + \nu + CW,$$

\*) Отметим, впрочем, что Гинзбург и Фролов<sup>15</sup> полагают, что уже на расстоянии порядка  $10^{-17}$  см могут возникнуть принципиально новые физические явления и все современные теории, включая теорию испарения черных дыр, окажутся недействительными.

\*\*) Индексы: ev — от evaporation — испарение, BH — от Black Hole — черная дыра (англ.).

где CW — сокращение от «Closed World» — «замкнутый мир», в данном случае — замкнутый мир, содержащий два нейтрона и два антинейтрино (т. е. CW с барионным зарядом  $+2$  и лептонным зарядом  $-2$ ).

Для того чтобы избавиться от вопросов, связанных с мезонными полями, сформулируем гипотезу более четко.

Будем рассматривать мир, в котором существуют только гравитация и дираковские массивные частицы со спином  $1/2$ . Эти частицы, по предположению, обладают лишь гравитационным взаимодействием. Рассматриваемый мир похож (может быть, как карикатура на оригинал) на квантовую электродинамику 1948—1960 гг., рассматривавшую систему уравнений Максвелла и уравнение Дирака для электронов и позитронов. Хорошо известны блестящие результаты, полученные в этот период: сдвиг атомных уровней, аномальный магнитный момент электрона и, наконец, хотя по значению это не на последнем месте (ср. английское *last but not least*), принципиальная возможность ренормализации, т. е. получения точных конечных результатов путем вычислений, в которых на промежуточных этапах фигурируют расходящиеся интегралы.

Хотелось бы провести подобную программу, заменяя электромагнитное поле гравитационным. Хоукинг справедливо подчеркивает трудность гравитационной задачи по сравнению с электромагнитной (ср. также более раннюю работу Фейнмана<sup>16</sup> и многие др.).

Константа электромагнитного взаимодействия безразмерна,  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ , и ряд теории возмущений расположен по возрастающим степеням  $\alpha$ ,  $\alpha^2$ , ... Константа гравитационного взаимодействия  $G$  имеет размерность  $см^2$  или  $г^{-2}$ , или  $эрг^{-2}$  (при  $\hbar = c = 1$ ) и поэтому с увеличением степени  $G$  увеличивается и степень, в которой входит максимальный импульс обрезания, т. е. усиливается расходимость.

Большая сложность гравитации по сравнению с электродинамикой возникает еще потому, что фотон сам не заряжен, тогда как гравитон имеет энергию и импульс и является источником гравитационного поля. Электродинамика эффективно нелинейна лишь после включения электрон-позитронного поля, гравитационная теория нелинейна сама, даже без поля дираковских частиц.

Хоукинг подчеркивает, что решение типа черной дыры не может быть получено в теории возмущений с конечным числом членов.

Наконец, все мыслимые гравитационные эксперименты в лаборатории не выходят за рамки линейной неквантовой теории, да и в этих рамках очень многое еще не сделано, например генерирование и детектирование коротких гравитационных волн.

По всем высказанным причинам гравитационная теория продвинута в гораздо меньшей степени, чем электродинамика. В дальнейшем будут высказаны утверждения, вероятные, правдоподобные — но не доказанные, — не результаты теории, а гипотезы.

Основную из них назовем гипотезой нуль-частиц. Предполагается, что существуют решения, описывающие 2 дираковские частицы, связавшие друг друга гравитацией так, что образовалась система с нулевой массой. Однако гипотеза состоит в том, что получается частица с  $E \equiv p \equiv 0$ , в отличие от того, что обычно понимают под словом «безмассовая частица»,  $E \neq 0$ ,  $p \neq 0$ ,  $E^2 - p^2 = m_0^2 = 0$ .

Представляется, что именно нуль-частица с  $E \equiv p \equiv 0$  является естественным квантовым обобщением понятия о замкнутом мире, отделившемся от нашего пространства. «Существует» ли нуль-частица, если она не имеет ни энергии, ни импульса? На привычном языке теории, в которой имеет место сохранение фермионов, не все квантовые числа частицы равны нулю: ее фермионный заряд равен  $+2$ . Напомним, что

в теории Дирака свободные, ни с чем не взаимодействующие частицы сохраняются тривиально (сохраняются отдельно и число частиц, и число античастиц).

При включении гравитационного взаимодействия уже в линейном приближении появляется возможность рождения и аннигиляции пар: частица — античастица.

К понятию нуль-частицы непосредственно подводит хоукинговская теория испарения черных дыр, если это испарение не останавливается ни на какой конечной массе покоя \*).

Можно ли считать в такой теории, что сохраняется фермионный заряд — разность числа частиц и античастиц? Это свойство сохранения имеет место для отдельной вершины, в которой сходятся две фермионные линии и бозонная линия гравитационного поля. Но это же свойство имеет место и для любой конечной совокупности вершин, и для любого реального процесса в гравитационном поле в любом конечном порядке теории возмущений. Отсюда следует закон сохранения фермионного заряда и понятие фермионного заряда как квантового числа состояния; в этой системе понятий можно говорить о нуль-частицах с различными квантовыми числами \*\*).

Однако, если гипотеза нуль-частиц верна, то ее можно изложить иначе. Можно объявить нуль-частицы несуществующими в нашем пространстве и затем — для краткости — не повторять каждый раз сакрентальные слова «в нашем пространстве». Будем считать, что всякое иное существование — не в нашем пространстве — не является существованием. Итак, нуль-частицы не существуют. В частности, откажемся от формулировки «нуль-частица имеет фермионный заряд» или «фермионы находятся (после реакции) в нуль-частице». Вместо всего этого будем говорить просто, что фермионный заряд не сохраняется в теории, включающей полную нелинейную теорию тяготения, хотя в каждом члене теории возмущений сохранение имело место. Итак, возможны реакции

$$f + f \rightleftharpoons g + g,$$

где  $f$  — фермион,  $g$  — гравитон. Раньше мы сказали бы, что  $f + f$  могут образовать черную дыру, которая испаряется, давая нейтральную систему — два гравитона.

Раньше мы сказали бы, что при этом еще образуется и нуль-частица, теперь мы об этом умалчиваем.

## 2. КОСМОЛОГИЯ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Вся проблематика квантового испарения черных дыр, образования нуль-частиц и несохранения фермионного заряда связана с рассмотрением черных дыр малого радиуса и малой массы.

Напомним, что черные дыры впервые появились в теоретической физике в связи с рассмотрением массивных звезд. В 1939 г. Оппенгеймер и Волков<sup>17</sup> количественно в рамках ОТО (хотя и с упрощениями) рассмотрели нейтронные звезды; выяснилось, что существует строгий верхний предел массы холодного вещества, способного противостоять тяготению. Современные оценки дают с большой надежностью верхний предел около 2—3 масс Солнца. Обычные горячие звезды имеют массы вплоть

\*) В следующем разделе, посвященном космологии, будут приведены аргументы в пользу полного распада.

\*\*) Нечетные барионные числа связаны с отличным от нуля полуцелым спином и по этой же причине, вероятно, недопустимы для нуль-частицы.

до 30—50 масс Солнца. В ходе эволюции (которая у таких звезд происходит быстро, за несколько миллионов лет) в центре звезды может возникнуть железное ядро, в котором ядерные реакции с выделением тепла закончатся. Такое ядро, если масса его превысит критическую (составляющую всего 10% или меньше массы всей звезды), коллапсирует, превращаясь в черную дыру. При массе больше критической нет барьеров на всем пути от обычной плотности в несколько грамм в кубическом сантиметре до плотности порядка  $10^{15}$ — $10^{16}$  г/см<sup>3</sup>, характерной для черной дыры указанной выше массы  $M \sim 2M_{\odot}$ . Однако квантовое излучение такой черной дыры ничтожно: она излучает как тело с эффективной температурой  $10^{-7}$  градусов. Следовательно, захват вещества и излучения из окружающей среды на много порядков превосходит собственное излучение черной дыры.

Все характерные явления испарения черной дыры происходят с черными дырами, масса которых не превышает  $10^{15}$ — $10^{16}$  г (т. е. меньше  $10^{-18}M_{\odot}$ ).

В настоящее время образование таких черных дыр исключено, так как для того, чтобы изготовить такое тело, нужно преодолеть гигантский энергетический барьер.

Практическая возможность образования легких черных дыр целиком связана с космологией, со сценарием эволюции Вселенной, предусматривающим бесконечную плотность вещества в начале расширения вблизи сингулярности.

Идея первичных черных дыр космологического происхождения была впервые высказана Зельдовичем и Новиковым<sup>18</sup>. Было отмечено, что при большой плотности вещества возможно образование черных дыр малой массы в том случае, если начальный закон расширения и соответствующая ему метрика локально отличаются от фридмановского решения.

В больших масштабах, как известно, Вселенная однородна и расширяется одинаково во всех направлениях.

Тем не менее можно предполагать, что возмущения — отклонения от фридмановского решения — имеют место в малом масштабе. Можно представить себе гладкий, не смятый лист бумаги, который под микроскопом оказывается усеянным горами и ущельями. Представление о неоднородностях малого масштаба, сглаживающихся при усреднении по большим объемам, кажется очень естественным. Малые области с повышенной плотностью и с пониженной (по сравнению со средней) скоростью расширения могут превратиться в черные дыры. По порядку величины можно ожидать (с учетом связи  $\rho = k_1/Gt^2$ , где  $k_1$  и вводимые дальше  $k_2, k_3, \dots$  — безразмерные множители порядка единицы), что в момент  $t$  после начала расширения может обособиться в черные дыры вещество, занимавшее шар радиусом  $R = k_2 ct$ , его масса  $k_3 \rho R^3 = k_4 c^3 t/G$ , при этом шварцшильдовский радиус черной дыры  $R_g = 2GM/c^2 = k_5 ct$ . Образование черной дыры из вещества, находящегося внутри горизонта  $R_h = ct$ , связано с начальными возмущениями метрики порядка единицы в этом масштабе. Процесс не требует особо сильного изменения размера и плотности коллапсирующего вещества.

Подчеркнем, что на ранней стадии мы имеем дело с ультрарелятивистским веществом, так что надо полагать, что по порядку величины  $p = k_6 \varepsilon$ , например,  $p = \varepsilon/3$ , где  $p$  — давление,  $\varepsilon = \rho c^2$  — плотность энергии. При таком давлении нужно значительное — порядка единицы — возмущение начальной метрики для того, чтобы образовалась черная дыра. Известно (Лифшиц, 1946<sup>19</sup>), что малые возмущения метрики в ультрарелятивистском газе дадут лишь малые возмущения плотности к моменту, когда  $R \sim ct$ , а при  $R \ll ct$  возмущения плотности и возмущения метрики



перейдут в колебательный режим и угаснут \*). Образование черной дыры и в космологии является сугубо нелинейным эффектом. Существование галактик и скоплений галактик свидетельствует о том, что в большом масштабе существуют некоторые отклонения метрики от фридмановской \*\*). По оценке Новикова <sup>20</sup>, они характеризуются безразмерным возмущением порядка  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  (например, длина окружности  $l$  равна  $2\pi(1 - 0,01)R$  или  $2\pi(1 - 0,001)R$ ).

Чтобы образовалась черная дыра с массой  $10^{15}$  г, нужно, чтобы возмущение метрики было порядка единицы ( $l = 2\pi \cdot 0,5r$  или  $2\pi \cdot 0,3r$ ) в масштабе, который в  $10^{17}$  раз меньше масштаба скопления галактик.

В работах Зельдовича и Новикова <sup>18, 21</sup> была отмечена важная особенность гипотетических первичных черных дыр. Они образуются очень рано: например, при  $M = 10^{16}$  г:  $R_g = 10^{-13}$  см, значит,  $t = R_g/c = 3 \cdot 10^{-24}$  сек, из вещества высокой плотности  $\rho = 5 \cdot 10^{52}$  г/см<sup>3</sup>, которое является ультрарелятивистским. Вещество, вошедшее в черную дыру, после этого не расширяется. Окружающее вещество, не вошедшее в черную дыру, расширяется, и при этом давление совершает работу. Пусть в момент образования черных дыр определенная доля вещества  $\alpha$  вошла в черные дыры, а доля  $(1 - \alpha)$  осталась в нормальном состоянии \*\*\*), так что  $\rho_{ВН} = \bar{\alpha}\rho = \alpha k_1/Gt^2$ ,  $\rho_{НМ} = (1 - \alpha) k_1/Gt^2$ .

После того как радиус мира увеличится в  $n$  раз, средняя плотность черных дыр упадет обратно пропорционально объему в  $n^3$  раз, тогда как плотность окружающего вещества упадет в  $n^4$  раз. Соотношение изменится — вместо  $\alpha$ :  $(1 - \alpha)$  получим отношение плотности  $n\alpha$ :  $(1 - \alpha)$ . Если в начальный момент 0,01 массы превращается в черные дыры, то после стократного расширения эти черные дыры уже составляют 50%, а после расширения в 10 000 раз — 99% общей массы.

Из этих соображений был сделан вывод, что в действительности Вселенная была достаточно гладкой и в малом масштабе — иначе образующиеся рано черные дыры в настоящее время после расширения привели бы к недопустимой плотности вещества во Вселенной.

Открытие испарения черных дыр изменило ситуацию. Если масса черных дыр порядка  $10^{15}$  г, то они, испаряясь, дают рентгеновское и  $\gamma$ -излучение. Чувствительность аппаратуры такова, что эти черные дыры были бы обнаружены при плотности в  $10^8$  раз меньше той, при которой можно обнаружить пассивные черные дыры.

Открытие испарения усилило вывод о гладкости метрики Вселенной в начальном сингулярном состоянии в масштабе  $10^{-13}$  см в момент  $10^{-24}$  сек, что соответствует сегодня (после расширения) масштабу порядка 1000 км.

Более тонкие соображения позволяют исключить обильное образование черных дыр с массой больше  $10^9$  г: испаряясь, они искажали бы спектр реликтового ( $2,7^\circ\text{K}$ ) излучения, нарушали бы нуклеосинтез.

С другой стороны, с учетом испарения становится возможным обильное образование самых малых черных дыр с массой от  $10^{-5}$  г (квантовый предел, планковская масса) и до, например,  $\sim 1$  г. Такие черные дыры испарялись бы рано, в период, когда температура столь высока, что термодинамическое равновесие полностью устанавливается и «залечивает» все локальные возмущения, вызванные испарением черных дыр. С новой точки зрения, вдумываясь в ситуацию, мы привыкаем к мысли, что обиль-

\*) Заметим, что при  $p = \epsilon/3$ :  $R \sim \sqrt{t}$ , поэтому  $R/ct$  растет с течением времени.

\*\*) В теории энтропийных возмущений, приводящих к образованию галактик, начальные возмущения метрики вблизи сингулярности могут отсутствовать. Об этом, со ссылками на оригинальные работы, см. монографию Зельдовича, Новикова <sup>25</sup>.

\*\*\*)) Ниже индекс NM — от Normal Matter, материя в «обычном» — впрочем, весьма высокотемпературном — состоянии, но не в черной дыре!

ное образование черных дыр предельно малой массы,  $\sim 10^{-5}$  г, вероятно, неизбежно, так как в соответствующий характерный момент  $10^{-43}$  сек все флуктуации порядка единицы.

Если бы мы имели дело с небольшим числом сортов невзаимодействующих частиц, энергия каждой частицы в момент  $t \sim 10^{-43}$  сек была бы того же порядка,  $10^{-5}$  г, и черные дыры образовывались бы в заметной доле попарных столкновений.

Теория Хоукинга становится необходимой! Только идея испарения черных дыр спасает нас от кошмара микрочерных дыр, сохранившихся до сегодняшнего момента, и от утопического требования абсолютной гладкости Вселенной во всех масштабах, вплоть до квантового планковского масштаба  $10^{-33}$  см при планковской плотности вещества  $10^{93}$  г/см<sup>3</sup>.

Итак, единственно приемлемой картиной кажется образование и быстрое испарение микрочерных дыр сразу после сингулярного состояния. К такому выводу приводит физика. Но дальше слово берет космология и навязывает ответ на вопрос, который физика еще не умеет решать. С точки зрения космологии такая картина возможна и приемлема лишь в том случае, если испарение черных дыр *доходит до конца*, до  $M \equiv 0$ . Выше говорилось о том, что теория и приближения Хоукинга (медленно меняющееся, классическое гравитационное поле) становятся неприменимыми при  $M \leq 10^{-5}$  г.

Если бы неприменимость теории означала прекращение испарения, то сегодня Вселенная была бы заполнена остановившимися в испарении частицами («максимоны», «планкеоны»). Если это не произошло, значит, там, где расчет Хоукинга неприменим, испарение не останавливается. Может быть, испарение теперь следует рассматривать как скачок (ср. выше).

Итак, вывод космологии — полное испарение черных дыр — говорит в пользу гипотез, высказанных выше. Значит, косвенно подтверждается, что возможен и спонтанный процесс превращения барионов или бариона в лептон, например  $P = \bar{N} + e^+ = \bar{C}W + 2\gamma + e^+$  или  $2N = \bar{N} + \bar{C}W + 2\gamma$ , где  $P$  — протон,  $N$  — нейтрон,  $\bar{C}W$ , как и раньше, — ненаблюдаемый в нашем пространстве замкнутый мир. Первая попытка оценить вероятность такого процесса, без учета кварковой структуры бариона и глюонных полей, сделана в заметке автора<sup>22</sup>. Даже эта, скорее завышающая вероятность, оценка приводит к вероятности аннигиляции 2 нейтронов в ядре порядка  $10^{-33}$  сек<sup>-1</sup> или меньше, практически недоступной для наблюдения. Учет кварковой структуры барионов, вероятно, еще понизит оценку.

### 3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ, КОГЕРЕНТНОСТЬ, ВАКУУМ

Испарение черных дыр позволяет поставить новые вопросы термодинамики. Представим себе сосуд с теплонепроницаемыми стенками, т. е. термостат, или, кратко, «баню», заполненную равновесным излучением — электромагнитным, парами  $e^+e^-$  и другими (если температура достаточно высока), нейтрино и антинейтрино, гравитонами. Заметим, что создать стенку, непроницаемую для нейтрино и гравитонов, нелегко.

При данной температуре бани существует равновесная масса черной дыры такая, что количество поглощаемой энергии в единицу времени равно количеству испускаемой. Связь  $T$  и  $M$  дается формулой  $T = \hbar c^3 / 8\pi G M$ . Хоукинг<sup>23</sup> исследовал вопрос об устойчивости этого равновесия. Если масса черной дыры немного увеличится, то температура ее понизится; при постоянной температуре «бани» пойдет дальнейшее уве-

личение массы черной дыры, равновесие неустойчиво. Однако при постоянном объеме «бани», изолированной от внешнего мира, увеличение массы черной дыры и понижение ее температуры сопровождается также уменьшением энергии излучения в бане и падением его температуры. При малом объеме «бани» падение температуры бани сильнее падения температуры черной дыры, испарение черной дыры восстанавливает начальное состояние, равновесие устойчиво. Таким образом, при данной температуре в устойчивости играет роль также объем «бани».

При наличии энергетического баланса, т. е. при равенстве поглощения и испускания энергии, необходимо, чтобы спектр и состав излучения (соотношение между фотонами, нейтрино и всеми остальными частицами) не нарушал термодинамического равновесия в «бане». В противном случае можно было бы построить вечный двигатель второго рода, извлекая работу из неравновесного излучения черной дыры. Хоукинг<sup>23</sup>, тщательно рассматривая квантовый процесс испарения, доказал чисто термический характер излучения во всех деталях, включая отношение вероятности испустить то или иное число фотонов данной частоты и поляризации.

Отметим, что полное термодинамическое равновесие достигается лишь при нейтральном составе вещества в «бане», при равной плотности барионов и антибарионов, нейтрино и антинейтрино. Это следует из отсутствия у черной дыры внешних полей, которые бы зависели от числа барионов или числа нейтрино, погребенных в черной дыре.

Иначе можно сказать, что при наличии черной дыры нарушаются законы сохранения барионов и лептонов и поэтому полное термодинамическое равновесие достигается в симметричной системе. Хоукинг обращает особенное внимание на термодинамически равновесный характер излучения черной дыры. Неравновесная система, содержащая черную дыру, увеличивает свою энтропию, стремится с течением времени к равновесию, т. е. к состоянию, наиболее вероятному при данной полной энергии. Забывается, т. е. теряется информация о начальном состоянии системы.

В известной статье Хоукинг<sup>4</sup> делает вывод о том, что при наличии (точнее, при учете принципиальной возможности существования) черных дыр должна измениться общая логическая схема квантовой теории.

Напомним, что в квантовой теории уравнение для волновой функции однозначно, не содержит вероятностных элементов.

Вероятностный характер имеют ответы, связанные с измерениями, включающими классические приборы. Уравнение Шрёдингера для электрона в атоме позволяет точно вычислить  $\psi(x, t_2)$ , если известно  $\psi(x, t_1)$ , но на вопрос, находится ли электрон в объеме  $dv$  вокруг точки  $x_0$ , ответ дается в вероятностном виде  $dP = |\psi(x_0, t)|^2 dv$ .

Вероятностная трактовка квантовой механики с трудом и борьбой внедрялась в сознание физиков. Но точка зрения Гейзенберга, Борна, Бора выдержала испытание временем и является единственно возможной и правильной.

По мнению Хоукинга, в будущей полной теории, включающей всю нелинейную и квантовую гравитацию, неопределенной и вероятностной станет сама эволюция волновой функции: проявление этой неопределенности он видит в картине испарения черной дыры. Хоукинг подчеркивает отличие ожидаемой картины от общепринятой следующим сравнением:

«Вывод данной работы состоит в том, что гравитация вводит новый уровень неопределенности или случайности в физику, сверх и кроме неопределенности, обычным образом связанной с квантовой механикой. Эйнштейн очень огорчился по поводу непредсказуемости квантовой механики, потому что он чувствовал, что «бог не играет в кости». Однако результаты, полученные здесь (в статье Хоукинга), указывают на то, что

«бог не только играет в кости. Он иногда бросает кости туда, где их нельзя увидеть».

Вывод Хоукинга весьма радикален. Но не связан ли этот вывод с тем, что рассматривается макроскопическая черная дыра? Испарение такой черной дыры можно рассматривать — об этом уже говорилось выше — полуклассически, рассматривая квантованные электромагнитные, нейтринные и другие поля на фоне классической метрики пространства и времени, асимптотически приближающейся к шварцшильдовскому решению. Не возникает ли новая высшая неопределенность как результат этой макроскопичности и полуклассичности? Частица сажи, состоящая из  $10^{15}$  или  $10^{18}$  атомов углерода, поглощает любой монохроматический когерентный свет и испускает некогерентное тепловое излучение, соответствующее температуре частицы. Но отдельный атом углерода когерентно рассеивает излучение. Нельзя ли рассмотреть излучение черной дыры на квантовом уровне, нужно ли и можно ли при этом сформулировать теорию с черными дырами так, чтобы не возникала дополнительная неопределенность и некогерентность?

Уверенного ответа на этот вопрос нет, поскольку нет полной квантово-гравитационной теории. Соображения, которые будут приведены ниже, должны рассматриваться как гипотезы. С этой оговоркой приступим к сути. Для простоты вернемся к теории, в которой существуют только гравитационное поле и фермионы. В этой теории должны существовать черные дыры, которые при испарении, при  $T > 2m$  ( $m$  — масса фермиона) практически с одинаковой вероятностью дают фермионы  $F$ , антифермионы  $\bar{F}$  и гравитоны  $g$ . По достижении черной дырой ВН планковской массы  $m \lesssim \sqrt{G} = m_{\text{Pl}}$  происходит квантовый скачок,  $\text{ВН} \rightarrow 2F$ , или  $\text{ВН} \rightarrow 2\bar{F}$ , или  $\text{ВН} \rightarrow F + \bar{F}$ , или  $\text{ВН} \rightarrow 2g$ . При уменьшении массы уменьшается число частиц, на которые должна распасться ВН, поэтому выше мы ограничились двухчастичными распадами. В силу обратимости должны иметь место обратные процессы образования черных дыр при двухчастичных столкновениях:

$$2F \rightarrow \text{ВН}, \quad 2\bar{F} \rightarrow \text{ВН}, \quad F + \bar{F} \rightarrow \text{ВН}, \quad g + g \rightarrow \text{ВН}.$$

Поскольку черные дыры нестабильны, мы должны рассматривать оба процесса образования и распада черной дыры вместе. В таком случае мы получим матрицу из 16 вероятностей перехода в таблице.

Исходное состояние \ Конечное состояние				
	$F + F$	$F + \bar{F}$	$\bar{F} + \bar{F}$	$g + g$
$F + F$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$
$F + \bar{F}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$
$\bar{F} + \bar{F}$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$a_{34}$
$g + g$	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$	$a_{44}$

В чем же отличие этой таблицы от любой другой матрицы рассеяния при наличии нескольких каналов? Внешнее отличие заключается в том, что в таблице фигурируют процессы, нарушающие закон сохранения фермионов, несмотря на то, что исходный лагранжиан, а также теория возмущений подчиняются этому закону сохранения.

В свою очередь это внешнее отличие связано с глубокой внутренней причиной: образование черной дыры и последующее ее испарение связано с отъединением от нашего пространства некоего отдельного, топологически несвязанного замкнутого мира. Этот замкнутый мир уносит фермионный заряд — положительный или отрицательный, разный для разных каналов. В классической теории этот замкнутый мир нестационарен, в нем обязательно за конечное его собственное время возникают сингулярности. О свойствах квантового замкнутого мира мы судим только по аналогии и по косвенным соображениям, обобщающим космологические наблюдения и теорию. Мы сохраняем в квантовом случае главное свойство замкнутого мира: тождественное равенство нулю его энергии и импульса.

Что зависит от того, будем ли мы рассматривать образование замкнутого мира  $CW$  как реальное событие?

Среди процессов, перечисленных в квадратной таблице, те, которые не нарушают сохранения фермионов, могут идти и без образования  $VH$  и  $CW$ , например  $F + \bar{F} \rightleftharpoons g + g$ , или все рассеяния, например  $F + F = F + F$ . Должны ли мы складывать *амплитуду* или *вероятность* для двух путей: 1) прямого и 2) с образованием  $VH$  и  $CW$ ?

Высказывания Хоукинга соответствуют предположению о сложении вероятностей, так как на пути 2) остается неизвестным, неопределенным состояние замкнутого мира, отпочковавшегося от нашего пространства. Однако, быть может, не исключено, что можно будет развить последовательную теорию, в которой состояние  $CW$  никак не влияет ни на что происходящее в нашем пространстве, т. е. теорию, которую удастся переформулировать так, чтобы замкнутые миры в ней в явном виде не упоминать. Одним из следствий этой теории будет вычисление *амплитуды* процессов, идущих «в действительности» через  $VH$  и  $CW$ , и сложение амплитуд для процесса с  $CW$  и без  $CW$ . В такой теории нарушение когерентности останется лишь для процессов, носящих макроскопический характер, и не будет носить столь принципиальный характер.

Заметим, что отказ от рассмотрения  $CW$  важен для формулировки самого понятия о термодинамическом равновесии. При высокой температуре нельзя исключить обильное образование  $VH$  и  $CW$  за счет термических флуктуаций плотности. Испарение  $VH$  восстанавливает энергетический баланс, но должны ли мы учитывать меняющееся со временем число  $CW$  и обратные реакции  $CW$  (подплывающих из других измерений — в картине 4-мерия  $x, y, z, t$ , вложенного в пространство с большим числом измерений) к нам?

Фомин<sup>24</sup> отметил, что вакуум при нулевой температуре нестабилен относительно образования  $CW$ ; это перекликается с идеями Уилера<sup>25</sup>, согласно которым метрика вакуума содержит не только нулевые колебания поперечных свободных степеней свободы — гравитационных волн, но и спонтанные вариации топологии, типа образования и исчезновения ручек. Вместе с тем ясно, что все эти экзотические процессы в природе и в будущей истинной теории в каком-то смысле исключены или перенормированы как раз так, что состояние вакуума при нулевой температуре единственно и плотность энергии  $\epsilon$  вакуума тождественно равна нулю.

Последний факт —  $\epsilon = 0$  — есть надежное следствие физических и астрономических наблюдений (с наибольшей точностью — космологических,  $|\epsilon| < 10^{-8}$  эрг/см<sup>3</sup>), так же как менее уверенное, высказанное выше утверждение о полном испарении черных дыр.

Роль наблюдений тем больше, чем дальше от нас (пока) находится идеал построения полной теории.

Наблюдения в настоящее время не отвергают принципиальную возможность построения теории, включающей тяготение с единым вакуумом,

без сохранения фермионного заряда, но с сохранением когерентности и общих принципов квантовой механики.

Более узко, технически, возможность построения такой теории связана с тем, не будет ли нарушаться унитарность теории при отказе от рассмотрения испарившихся черных дыр. Альтернативой, которую, по-видимому, предпочитает Хоукинг (частное письмо автору, июль 1977 г.), является теория с бесконечно вырожденным вакуумом, содержащим в среднем по одной черной дыре с планковской массой на каждый объем, равный кубу планковской длины \*). Требование  $\varepsilon = 0$  или  $|\varepsilon| < 10^{-8}$  эрг/см<sup>3</sup>, или, в планковских единицах  $|\varepsilon| < 10^{-113}$ , остается в силе для вакуума и в этой теории. Чтобы предупредить злоупотребления, отметим сразу: ни в каких условиях вакуум не станет источником энергии.

Отметим, наконец, что возможность несохранения барионов и переходов между различными состояниями вакуума (инстантонов) обсуждается в настоящее время и в теориях полей, вложенных в плоское пространство Минковского (Поляков<sup>26</sup>, Белафин и др.<sup>27</sup>, т'Хоофт<sup>28</sup>). Возможно, что методы, развитые этими авторами, окажутся полезными и в теории тяготения.

#### 4. ПОСЛЕСЛОВИЕ. ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ, ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И БОЛЬШИЕ ЧИСЛА ДИРАКА

В ходе написания статьи о черных дырах и несохранении барионного заряда все более ясно становилось, что тема статьи представляет собой только часть большей проблемы. Заголовок послесловия должен кратко охарактеризовать вопросы, составляющие суть проблемы. Черные дыры, может быть, представляют собой частный случай сильных изменений структуры пространства и времени<sup>29</sup>, существенных для свойств элементарных частиц. Подходит время, когда на повестку дня ставится вопрос о создании единой теории всех взаимодействий, включая тяготение всех частиц, гравитоны. Вряд ли среди читателей УФН найдутся такие наивные люди, которые решат, что на ближайших страницах будет изложена единая теория, да еще к тому же одного автора. Однако будут высказаны некоторые соображения, какой, возможно, будет эта теория, будет показано, как можно устранить некоторые предубеждения, которые существуют уже сорок лет.

Итак, стремление к объединению теорий различных явлений представляет собой важнейший принцип познания. Классические примеры — ньютоновская теория тяготения, объединившая земное притяжение и небесную механику, фарадей-максвелловское объединение электричества и магнетизма. В последнее десятилетие получены успехи на пути объединения слабого взаимодействия и электромагнетизма. Естественно и все более настойчиво ставится вопрос об объединении теорий, относящихся к элементарным частицам (включая электродинамику), с теорией тяготения. В сущности, именно этой проблеме посвятил половину своей жизни Эйнштейн — и не добился успеха. Простые соображения размерности указывают и на перспективы, и на трудности проблемы.

Константы  $c$ ,  $\hbar$ ,  $G$  (скорость света, квант действия, постоянная тяготения) имеют независимые размерности, число констант как раз такое, что через них можно выразить единицы длины, времени, массы, а следовательно, и все количественные свойства всех элементарных частиц.

Так, например, в объединенной теории масса протона и масса электрона будут выражаться через  $G$ ,  $\hbar$ ,  $c$  с определенными, следующими из

\*) Эта точка зрения развивается в докладе Хоукинга на 8-й конференции по ОТО в Канаде, в августе 1977 г.

теории численными коэффициентами. На эту заманчивую возможность Планк обратил внимание немедленно после своего открытия квантования света и введения  $h = 2\pi\hbar$ .

После этого прошло около тридцати лет без ощутимых успехов, а следовательно (психология имеет свои законы), с нарастающим разочарованием.

Дирак<sup>30</sup>, занявшись этим вопросом, обратил внимание на то, что безразмерные величины, которые фигурировали бы в единой теории, очень сильно отличаются от единицы. Так, например, масса протона  $m_p = 10^{-19} m_{\text{пл}} = 10^{-19} \sqrt{\hbar c/G}$ . Иначе можно сказать, что безразмерное отношение  $Gm_p^2/\hbar c \approx 10^{-38}$ . Дирак выразил убеждение, что такие числа не могут быть получены теоретически. Обычно в теорию входят множители 2, 3,  $\pi$ ,  $e$  в разных целых степенях, положительных и отрицательных, но очень трудно набрать такое число множителей, которое дало бы  $10^{38}$  или  $10^{-38}$ . Дирак сделал далеко идущие выводы из своего наблюдения. С большими числами мы встречаемся в космологии. Так, например, возраст Вселенной, определенный как  $H^{-1}$ , где  $H$  — константа Хаббла, равен около  $2 \cdot 10^{10}$  лет  $= 6 \cdot 10^{17}$  сек. Но эта величина размерна. Сравним ее с величиной размерности времени, характерной для нуклона,  $\hbar/m_p c^2 = 6 \cdot 10^{-24}$  сек. Их отношение равно  $10^{41}$ ; если  $10^{38}$  и  $10^{41}$  и отличаются в 1000 раз, то сами показатели (т. е. логарифмы безразмерных чисел) 38 и 41 отличаются мало, меньше чем на 10%.

Дирак рассматривал число нуклонов во всей Вселенной (предполагая, что она замкнутая) или в наблюдаемой части Вселенной, если она открытая, порядка  $N = (c/H)^3 n$ . При  $n \approx 10^{-6} \text{ см}^{-3}$   $N$  получается порядка  $10^{79}$ , значит, приблизительно  $GM^2/\hbar c = N^{-1/2}$ . Дирак полагает, что эти совпадения не случайны! В буквах первое соотношение имеет вид  $Gm_p^2/\hbar c = \hbar H/m_p c^2$ ,  $Gm_p^2 c/\hbar^2 H \sim 1$ . Второе соотношение — космологическая плотность порядка критической:

$$\rho_c = nm = \frac{1}{6\pi G t^2} \sim \frac{H^2}{G}, \quad N \sim \frac{c^3}{H^3} \frac{H^2}{Gm}.$$

Сопоставляя, получим  $c^3/HGm = (\hbar c/gm^2)^2$ , т. е. снова то же соотношение  $Gm^3 c/\hbar^2 H \approx 1$ . Если бы соображения Дирака были бесспорными, то следствия имели бы огромное значение. Формулы, объединяющие космологические величины ( $H$ ) с локальными ( $G$ ,  $m$ ), означают конец локальной физики, приводят к идее некоего дальнего действия: масса (данного) протона зависит от общего числа протонов во Вселенной — значит другие протоны действуют на (данный) протон. Кроме того, в эволюционной космологии с течением времени постоянная Хаббла убывает, возраст мира увеличивается — значит  $G$ ,  $m$ ,  $\hbar$  и  $c$  не могут оставаться постоянными, с течением времени по крайней мере одна из этих величин должна изменяться\*).

Однако в последние годы в теории элементарных частиц появились новые задачи и новые результаты, позволяющие совсем по-другому подойти к проблеме больших чисел.

В теории взаимодействующих между собой так называемых калибровочных векторных мезонных полей можно найти комбинации потенциалов, которым соответствует отсутствие полей. Сама по себе такая ситуация прекрасно известна в теории электромагнетизма: если  $A_\mu = \partial\phi/\partial x^\mu$ , то

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu} - \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^\mu \partial x^\nu} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^\nu \partial x^\mu} \equiv 0.$$

\*) Приводим ссылку<sup>35</sup> на одну из последних теоретических работ. Наблюдения не дают и намека на изменение указанных величин<sup>36</sup>.

Однако в случае нескольких взаимодействующих полей различные комбинации  $A_\mu^{(n)}$  (нижний индекс — координатный, верхний — номер или цвет поля) с нулевыми полями, описывающие вакуум, можно разделить на классы, между которыми нет непрерывных переходов. Здесь не место подробно и, главное, понятно описывать возникающую ситуацию. Ограничимся словесным утверждением, что эти комбинации потенциалов отличаются топологической структурой в изотопическом пространстве. «Sapienti sat», — говорили римляне: «Знающий пусть знает», или, в вольном переводе Ходжи Наср'Эддина: «Пусть те, кто знает, расскажут тем, кто не знает».

Переход от одной комбинации потенциалов без полей к другой возможен только через пространственно-временную область с полями, отличными от нуля. Это есть туннельный переход, невозможный в классической теории, но возможный в квантовой теории поля. Такой переход рассматривает А. М. Поляков и его коллеги<sup>26, 27</sup>; позже он был назван «инстантон». В отличие от частицы, движущейся вдоль мировой линии, инстантон — малая область, ограниченная не только в пространстве, но и во времени. Вероятность появления инстантона в вакууме содержит множитель  $\exp(-16\pi^2/g^2)$ , где  $g^2$  — заряд поля, — вероятно, равен  $\sim 0,17$ , так что численно получается  $\exp(-10^3) = 10^{-430}$ .

Все это рассказано здесь для того только, чтобы показать, что в современных теориях подчас получаются числа, очень сильно отличающиеся от единицы. Более того, можно сформулировать закономерность: в теории возмущений получаются множители типа  $2^n$ ,  $\pi^k$ ,  $g^m$ , где степени связаны с порядком процесса. Однако существуют процессы, принципиально не описываемые никаким порядком теории возмущений. К ним относится спонтанное изменение топологии, связанное с туннельным переходом. Здесь натуральные числа и безразмерный заряд оказываются в экспоненте.

Теперь уже нетрудно догадаться, какого рода теория частиц и тяготения могла бы разрешить парадокс больших чисел: необходимо, чтобы масса частиц выражалась через планковскую массу с участием вероятности туннельного перехода<sup>\*)</sup>.

Так, например, можно представить себе формулу вида

$$m_p = \beta \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} e^{-4\pi^2},$$

где  $\beta$  — безразмерный множитель; численно оказывается, что  $\beta = 0,011$ ;  $e^{-4\pi^2} = 7 \cdot 10^{-18}$ .

Как могла бы получиться такая или аналогичная формула? Представим себе, что в пространстве Минковского существуют несколько сортов безмассовых частиц со спином  $1/2$ . Такие частицы имеют определенную (правую или левую) спиральность. Примером таких частиц являются нейтрино.

В искривленном (римановом) пространстве-времени по-прежнему можно различать правые и левые спиральные частицы, поскольку пространство является топологически подобным пространству Минковского.

Представим себе, однако, что с определенной вероятностью в вакууме возможны возмущения, меняющие его топологию. Наглядно представим себе «ручки» такие, что в них входит правая частица, а выходит — левая.

Тогда возникает определенная вероятность перехода правые — левые частицы, что эффективно соответствует наличию массы покоя у частиц.

В такой теории по размерности масса частиц зависит от квантовых флуктуаций пространства-времени, а следовательно, должна быть порядка

<sup>\*)</sup> Иной подход к данному вопросу см. в статье М. А. Маркова<sup>37</sup>.



планковской,  $10^{-5} g = \sqrt{\hbar c/G}$ . Однако связь с изменением топологии заставляет ожидать появления экспоненциального безразмерного параметра малости. Величина  $e^{-4\pi^2}$  написана просто как пример такого параметра; автору не известны конкретные расчеты образования таких «ручек», так же как и неизвестна теория величин  $\beta$  для разных частиц. Может быть, понять существование безмассовых нейтрино окажется труднее, чем описать массы барионов.

Не будем затягивать высказывания о неразработанных теориях. Есть одно существенное общее замечание: высказывание Дирака было правильным применительно к теориям типа теории возмущений; это высказывание не имеет силы для теорий, в которых рассматриваются туннельные переходы и изменение топологии. Таким образом, устраняется хотя бы одно, может быть не самое главное, препятствие на пути развития единой теории частиц и тяготения.

Институт прикладной математики  
АН СССР

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. S. W. Hawking, Nature 248, 30 (1974).
2. В. П. Фролов, УФН 118, 473 (1976).
3. S. W. Hawking, Preprint OAP-420, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1975.
4. S. W. Hawking, Phys. Rev. D14, 2460 (1975).
5. В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, ЖЭТФ 47, 1030 (1964).
6. А. Г. Дорошкевич, Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, ЖЭТФ 49, 170 (1965).
7. Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ 42, 641 (1962).
8. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теория поля, М., «Наука», 1973.
9. L. Parker, Phys. Rev. Lett. 21, 562 (1968).
10. Ya. B. Zeldovich, L. P. Pitaevskiy, Comm. Math. Phys. 23, 185 (1971).
11. И. Д. Новиков, ЖЭТФ 71, 393 (1976).
12. А. А. Старобинский, частное сообщение (1976).
13. М. А. Марков, Гипероны и К-мезоны, М., Физматгиз, 1958.
14. Я. Б. Зельдович, Препринт ИПМ АН СССР № 57, Москва, 1976; Письма ЖЭТФ 24, 29 (1976).
15. В. Л. Гинзбург, В. П. Фролов, Письма Астрон. ж. 2, 474 (1976).
16. R. R. Feynman, Acta Phys. Polon. 24, 697 (1963).
17. J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff, Phys. Rev. 55, 374 (1939).
18. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, Астрон. ж. 43, 758 (1966); Теория тяготения и эволюция звезд, М., «Наука», 1971, с. 458; в кн. Нестационарные явления в галактиках (конференция 1966 г.), Ереван, 1968, с. 280.
19. Е. М. Лифшиц, ЖЭТФ 16, 587 (1946).
20. И. Д. Новиков, ЖЭТФ 46, 686 (1964).
21. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, Релятивистская астрофизика, М., «Наука», 1967.
22. Я. Б. Зельдович, Препринт ИПМ АН СССР № 98, Москва, 1976; ЖЭТФ 72, 18 (1977).
23. S. W. Hawking, Phys. Rev. D13, 191 (1976).
24. П. И. Фомин, ДАН УССР, сер. А, 831 (1975).
25. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, Строение и эволюция Вселенной, М., Изд-во АН СССР, 1975.
26. A. M. Polyakov, Phys. Lett. B59, 75 (1975).
27. A. A. Belavin et al., ibid., p. 85.
28. G. 'tHooft, Phys. Rev. Lett. 37, 8 (1976).
29. Дж. Уилер, Предвидение Эйнштейна, М., «Мир», 1975.
30. P. A. M. Dirac, Nature 139, 323 (1937).
31. E. Schroedinger, Physica 6, 899 (1939); Proc. Roy. Irish. Acad. 46, 25 (1940).
32. Я. Б. Зельдович, А. А. Старобинский, ЖЭТФ 61, 2161 (1971).
33. В. Н. Лукаш, А. А. Старобинский, ЖЭТФ 66, 1515 (1974).
34. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, А. А. Старобинский, ibid., с. 1897.
35. I. W. Roxburgh, Nature 268, 504 (1977).
36. W. Eichendorf, M. Reinhardt, Zs. Naturforsch. 32a, 532 (1977).
37. М. А. Марков, ЖЭТФ 51, 878 (1966).