

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ ФИЗИКИ*Л.Б. Окунь*

(Институт теоретической и экспериментальной физики)

*(Статья основана на докладе, сделанном на Первой Сахаровской конференции.
Москва, май 1991 г.)***1. Введение**

Эта статья посвящена вопросу о фундаментальных константах физики. Хорошо известно, что адекватный выбор физических единиц является одной из важнейших предпосылок решения любой конкретной физической задачи. Тем более это справедливо в отношении фундаментальных вопросов физики. Обсуждение вопроса о выборе фундаментальных физических единиц дает возможность с большим пониманием судить не только об истории фундаментальной физики, но и о прогнозах ее развития. Такое обсуждение увязывает физику элементарных частиц и космологию и неизбежно затрагивает самые разноплановые вопросы: от научно-политических (Нужно ли строить гигантские коллайдеры, или весь план строения физического мира можно увидеть усилием чистого разума?) до философских (Почему физический мир так хорошо приспособлен для существования жизни и единствен ли он?).

2. Поиграем со скоростью света

Обсуждение фундаментальных физических констант имеет смысл начать с несколько неожиданного вопроса: что изменилось бы в окружающем нас мире, если бы скорость света была иной, чем на самом деле, скажем, на десять порядков **большой**, т.е. $3 \cdot 10^{20}$ см/с? Чтобы этот вопрос имел смысл, необходимо оговорить, что при этом происходит с другими физическими константами. Так вот, пусть постоянная Планка $\hbar$, электрический заряд e , масса электрона m_e и протона m_p остаются неизменными, а скорость света становится иной.

Три величины $\hbar$, e , m_e позволяют получить размерности всех физических величин. Так, в качестве единицы длины удобно выбрать боровский радиус — радиус атома водорода:

$$r_B = \hbar^2 / m_e e^2,$$

в качестве единицы энергии — боровскую энергию

$$E_B = e^2/r_B = e^4 m_e / \hbar^2,$$

в качестве единицы времени

$$t_B = \hbar / E_B = \hbar^3 / e^4 m_e$$

и в качестве единицы скорости

$$v_B = r_B / t_B = e^2 / \hbar.$$

Таким образом, атом представляет собой и часы (t_B) и линейку (r_B). Поэтому вопрос об изменении скорости света не пустой, не вопрос переобозначения и выбора единиц.

Поскольку химические реакции обусловлены в основном обменом электронами, то ни химия, ни биохимия серьезно не изменились бы. И, тем не менее, мир изменился бы радикально. Дело в том, что радикально изменились бы свойства фотона. При той же энергии E , определяемой энергиями атомных уровней, фотон, излученный атомом, имел бы импульс k на десять порядков меньше:

$$k = E/c,$$

а длину волны

$$\lambda = \hbar/k = \hbar c/E$$

на десять порядков больше. Заметим, что его частота ω осталась бы неизменной: $\omega = E/\hbar$.

Вероятность испускания фотона возбужденным атомом пропорциональна фазовому объему и, следовательно, $k^2 dk$. Но

$$k^2 dk = E^2 dE / c^3,$$

и время оптического высвечивания возбужденного атома превысило бы возраст вселенной. (Атомы переходили бы в основное состояние за счет столкновений друг с другом.) На 40 порядков уменьшилось бы томсоновское сечение рассеяния фотонов свободными электронами [1]:

$$\sigma_T = (8\pi/3)r_0^2,$$

где $r_0 = e^2/m_e c^2$, и рэлеевское нерезонансное рассеяние света атомами [2]:

$$\sigma_R \sim (e^2 r_B^2 / E_B)^2 (\omega/c)^4 \sim r_B^2 (v_B/c)^4.$$

Так что фотоны практически отключились бы от вещества. Не было бы ни Солнца, ни электрической лампочки, чтобы светить, ни глаза, чтобы видеть^(1*). Все остальные изменения в мире были бы, возможно, менее драматичны. Так, например, в силу уравнения Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}/c$$

"расцепились" бы магнитное поле $\mathbf{H}$ и электрический ток $\mathbf{j}$. Так что не было бы ни динамомашин, ни электромоторов. Но химические источники тока остались бы, хотя вопрос о том, можно ли было бы купить батарейку в магазине, определенного ответа не имеет.

На первый взгляд, то обстоятельство, что фотоны при $c \rightarrow \infty$ отключаются

от зарядов, а кулоновское взаимодействие между зарядами остается неизменным, находится в противоречии с широко известным теоретическим утверждением о том, что взаимодействие между зарядами обусловлено обменом виртуальными фотонами. Однако это утверждение, безусловно правильное в рамках четырехмерного формализма, следует все же воспринимать "с крупницей соли". Проще всего это увидеть, если вспомнить, как выглядит действие, характеризующее взаимодействие 4-мерного потенциала A_i с электрическим зарядом: $-(e/c) \int A_i dx^i$, и учесть, что $A_i = (A, \varphi)$, а $x_i = (x, ct)$ (см. [1]).

Пример со скоростью света показывает, насколько релятивистским является наш мир: в галилеевом пределе он становится неузнаваемо иным.

Фотон является релятивистской частицей. Это проявляется не только в кинематике, но, как мы видим, и в его динамических свойствах, в его взаимодействиях. Это обстоятельство почему-то не подчеркивается в научно-популярной литературе. А жаль. Ведь если бы читатели научно-популярных книг по теории относительности сознавали это, то, возможно, из их рядов вышло бы меньше опровергателей и улучшателей этой теории.

Рассмотрев случай очень большой скорости света, поучительно обратиться к случаю малой скорости света. Эффекты типа замедления хода движущихся часов при езде в автомобиле были рассмотрены О.А. Вольбергом [3], написавшим приложение "Занимательная прогулка в страну Эйнштейна" к книге Я.И. Перельмана "Занимательная механика" 1935 г. Чтобы сделать изложение доходчивым, Вольберг предполагал, что скорость света раза в два больше скорости автомобиля. В 1939 г. в книге "Мистер Томпкинс в стране чудес" [4] Георгий Гамов посадил героя на велосипед и еще уменьшил воображаемую скорость света. При этом и у Вольберга, и у Гамова вся повседневная жизнь, за исключением замедления часов и сокращения масштабов, оставалась неизменной. Нетрудно проверить, однако, что никакими сопутствующими изменениями постоянных $\hbar$, e , m_e , m_p этого добиться нельзя. Если держать эти постоянные фиксированными, а уменьшить c , то мир изменится задолго до того, как скорость света приблизится к скорости автомобиля.

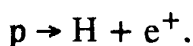
Действительно, параметром, характеризующим роль релятивистских эффектов в атоме водорода, является величина так называемой постоянной тонкой структуры α :

$$\alpha = e^2/\hbar c.$$

На опыте $\alpha \approx 1/137$. Нетрудно проверить, что $\alpha = v_B/c$. Таким образом, при уменьшении скорости света всего на два порядка она приблизилась бы к скорости электрона в атоме водорода.

Здесь следует подчеркнуть, что энергия связи электрона в атоме водорода была бы по-прежнему порядка $E_B = m_e e^4/\hbar^2$, но сравнимой с этой величиной стала бы энергия покоя электрона $m_e c^2$. В этом смысле обычное кулоновское взаимодействие в атоме стало бы сильным.

При дальнейшем уменьшении c величина $2m_e c^2$ стала бы меньше энергии связи электрона в атоме водорода, и атом водорода Н стал бы настолько легче голого протона p , что стал бы энергетически выгоден распад протона на атом водорода и позитрон e^+ :



Можно сказать, что в этом случае электрон в водороде сверхсвязан.

До сих пор мы обсуждали лишь самый легкий атом. Но гораздо раньше сверхсвязанные электроны появились бы в тяжелых атомах, на их внутренних оболочках. Соответствующий параметр здесь $0,8Ze^2/\hbar c$, где Z — заряд ядра, а численный коэффициент 0,8 учитывает, что радиусом тяжелого ядра нельзя пренебречь при сравнении с радиусом внутренней электронной орбиты. В результате, скажем, при $c = 3 \cdot 10^9$ см/с все атомы, более тяжелые, чем кремний, содержали бы сверхсвязанные электроны, а при $c = 3 \cdot 10^8$ см/с сверхсвязанные электроны, как сказано выше, появились бы и в водороде.

Дальнейшее возрастание величины $\alpha = e^2/\hbar c$ по сравнению с единицей должно было бы привести к очень сильному взаимодействию электронов с позитронами. Неясно, могут ли вообще в этих условиях существовать свободные электроны или для них наступит конфайнмент — пожизненное заключение в электрически нейтральных атомах позитрония подобно тому, как имеет место конфайнмент цветных кварков и глюонов в белых адронах. Может быть, свободные электрические заряды стали бы столь же невозможны, как и свободные цветовые заряды. Я пишу "неясно", поскольку электродинамика с $\alpha \gg 1$ пока не поддается последовательному теоретическому анализу.

3. Три фундаментальные константы

Пример, рассмотренный в предыдущем разделе, был основан на предположении, что самыми фундаментальными размерными постоянными являются $\hbar$, e , m_e , а скорость света как бы менее фундаментальна. В действительности же мы знаем, что кроме электромагнитного есть еще, по крайней мере, два калибровочных взаимодействия: слабое и сильное, характеризующихся зарядами g_w и g_s , имеющими ту же размерность, что и e . Кроме электрона, существует еще 15 частиц (5 лептонов, 6 кварков, 1 фотон, 1 глюон и 2 слабых бозона, если не считать античастиц и цветовых разновидностей). При взгляде на это разнообразие зарядов и масс e и m_e уже не кажутся выделенными константами на роль самых фундаментальных констант.

Каждый, кто хоть немного знаком с физикой элементарных частиц, не сомневается, что такими константами безусловно являются $\hbar$ и c , ибо каждая из них в своем роде уникальна и универсальна. Скорость c является предельной скоростью распространения физических сигналов. Константа $\hbar$ является квантом углового момента и, что не менее важно, фундаментальной квантовой единицей действия. Что же касается третьей фундаментальной константы, то среди специалистов постепенно сложилось мнение (консенсус, как принято теперь говорить), что наилучшим кандидатом на эту вакансию является постоянная универсального гравитационного взаимодействия — ньютоновская константа G или какая-то комбинация величин G , $\hbar$ и c . Самая популярная из этих комбинаций называется массой Планка и обозначается m_P .

Как известно, V_g — потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух тел с массами m , находящихся на расстоянии r друг от друга, равна

$$V_g = -Gm^2/r.$$

Если вспомнить, что потенциальная энергия кулоновского взаимодействия

двух зарядов равна

$$V_e = -e^2/r,$$

и учесть, что $\alpha = e^2/\hbar c$ — безразмерная величина, то легко понять, что G естественно представить в виде

$$G = \hbar c/m_p^2,$$

где m_p — так называемая масса Планка, введенная Планком [5] в самом конце прошлого столетия путем комбинаций констант G , $\hbar$ и c . В той же статье были введены планковская длина $l_p = \hbar/m_p c$ и планковское время $t_p = \hbar/m_p c^2$. Исходя из известной величины G , легко получить, что

$$m_p \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}/c^2,$$

$$l_p \approx 10^{-33} \text{ см},$$

$$t_p \approx 10^{-43} \text{ с}.$$

Часто говорят о планковской энергии $E_p = m_p c^2$ и планковском импульсе $k_p = m_p c$. Физический смысл шкалы Планка стал проясняться гораздо позднее.

Первая подробная статья, посвященная системе $cG\hbar$, "Мировые постоянные и предельный переход" была опубликована в начале 1928 г. Г. Гамовым, Д. Иваненко и Л. Ландау [6]. (Первым двум было тогда 24 года, а последнему 20 лет. По свидетельству одного из авторов, статья была написана в виде шуточного подарка ко дню рождения одной знакомой студентке. Ни один из них в дальнейшем не ссылался на эту статью^(2*), хотя в ней имеется ряд глубоких мыслей.)

В начале 30-х годов М.П. Бронштейн дал подробную классификацию физических теорий на основе $cG\hbar$ -единиц и использовал их при квантовании гравитации. Он ввел термин $gG\hbar$ -физика. (М.П. Бронштейн был расстрелян в 1938 г. на 32-м году жизни.) Затем в середине 50-х годов о роли массы Планка заговорили Л. Ландау [7] и Дж. Уилер [8, 9]. На этот раз речь шла о том, что при приближении к планковским расстояниям, l_p , или импульсам, k_p , гравитационное взаимодействие должно стать сравнимым по силе с другими взаимодействиями и для него должны стать существенными квантовые флуктуации. (Более подробно историю вопроса изложил Г. Горелик [10 — 12].)

В настоящее время масса Планка m_p , наряду с константами $\hbar$ и c , рассматривается как фундаментальная физическая величина, характеризующая энергетический масштаб теорий суперобъединения всех взаимодействий, включая гравитационное. Как известно, наиболее перспективным направлением создания теории суперобъединения считается теория суперструн (см. книги А. Полякова [13] и М. Грина, Дж. Шварца и Э. Виттена [14]). Фундаментальными объектами этой теории являются не точечные частицы, а протяженные одномерные объекты — "струны", имеющие характерные планковские размеры l_p .

Вместе с тем планковская шкала с ее характерным временем t_p лежит в основе квантовой космологии, фундаментальным объектом которой является

волновая функция вселенной (см., например, книги Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера [15] и С. Хокинга [16], статьи С. Коулмена [17], С. Вайнберга [18], доклады М. Гелл-Манна и Дж. Хартля [19, 20], книгу и обзор А. Линде [21, 22], а также популярный обзор Халливелла [23]). Одна из целей квантовой космологии — понять, как в процессе эволюции ранней вселенной фиксируются свойства частиц и вакуума.

Размерность любой физической величины можно выразить через размерности длины L , времени T и массы M . Исходя из нашего житейского опыта, можно было бы ожидать, что в качестве трех естественных независимых единиц природа выберет фундаментальные длину, время и массу. Но Природа решила иначе: фундаментальный смысл приобрели предельная скорость распространения сигналов c ($[c] = [L/T]$) и квант действия $\hbar$ ($[\hbar] = [ET] = [ML^2/T]$).

Чтобы представить идеи М. Бронштейна в наглядном виде, А. Зельманов [24, 25] в 60-х годах нарисовал "куб физических теорий", построенный на трех ортогональных осях $1/c$, G , $\hbar$ (рис. 1). Когда одна из единиц обращается в нуль, происходит предельный переход в плоскость. При фиксированных $\hbar$ и c уже не важно, что является третьей фундаментальной единицей: масса, длина или сама ньютоновская константа G .

Сегодня обычно заменяют G на $1/m_P$ и говорят о физике на планковских масштабах.

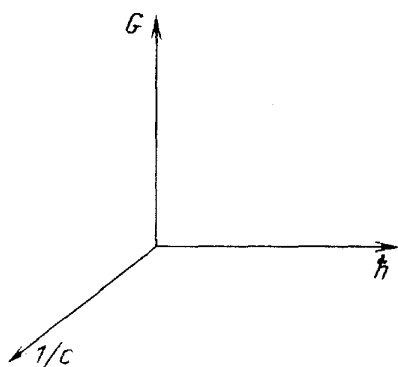


Рис. 1. Оси $1/c$, G , $\hbar$

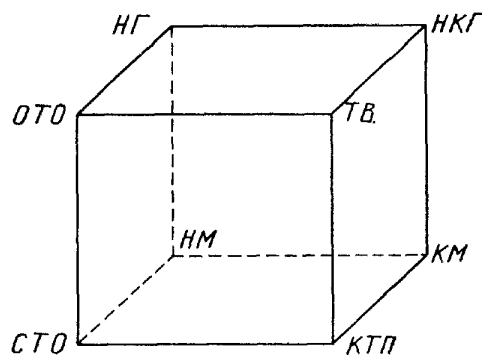


Рис. 2. Куб теорий

Куб физических теорий, являющийся неотъемлемой частью современного физического фольклора, изображен на рис. 2. В начале координат находится ньютонова механика, или вернее та часть ее, которая не учитывает гравитации (НМ). Над ней находится нерелятивистская (ньютонова) гравитация (НГ), справа — квантовая механика (КМ), впереди — специальная теория относительности (СТО). Синтез СТО и КМ дает квантовую теорию поля (КТП). Синтез НГ и СТО дает общую теорию относительности (ОТО). Синтез КМ и НГ дает нерелятивистскую квантовую гравитацию (НКГ), теорию, относительно которой неясно, существуют ли объекты, которые она описывает (см. об этом ниже). И, наконец, синтез всех теорий в будущем может привести к всеобъемлющей теории всего (ТВ). Английский акроним этой теории — ТОЕ ("Theory of Everything").

Основные достижения физики XX столетия, приведшие к радикальным изменениям во всем образе жизни человечества, лежат в плоскости $\hbar c$. И хотя по оси энергии мы прошли путь от 10^{-8} до 10^2 ГэВ, от массы Планка нас все еще отделяет 17 порядков. Так что исследованный энергетический слой выглядит в планковском масштабе исчезающе тонким.

Очевидно, что в единицах $c\hbar$ известные заряды e, g_w, g_s являются безразмерными величинами. Обычно их характеризуют безразмерными значениями квадратов:

$$\alpha = e^2/\hbar c, \quad \alpha_w = g_w^2/\hbar c, \quad \alpha_s = g_s^2/\hbar c.$$

Согласно квантовой теории поля заряды взаимодействующих частиц меняются в зависимости от расстояния между частицами (переданного импульса или энергии). Мы знаем, что в интервале импульсов от 0 до 100 ГэВ α **немного** возрастает: от 1/137 до 1/128, а α_s сильно убывает: от величины порядка единицы (на масштабах конфайнмента ($E \leq 1$ ГэВ) до $\sim 0,1$ при $E \sim 100$ ГэВ. Что касается α_w , то она в этом интервале примерно постоянна, $\sim 1/30$, но должна, в принципе, меняться при больших энергиях. Экстраполяция траекторий трех "бегущих" констант указывает на то, что все они "нацелены" на общие значения, примерно 1/40 при энергиях $10^{13} - 10^{16}$ ГэВ. Близость энергии этого великого объединения к массе Планка служит еще одним аргументом в пользу того, что последняя является естественной фундаментальной единицей энергии в физике.

Обратимся теперь к массам. Масштаб масс адронов, состоящих из легких кварков u, d, s , в основном (но не только) определяется характерным радиусом конфайнмента. Массы адронов, состоящих из тяжелых кварков (c, b), в основном определяются массами этих кварков. В свою очередь, массы кварков, так же как и массы лептонов, согласно гипотезе о хиггсовых бозонах определяются величиной η — вакуумного конденсата хиггсовского поля, составляющей примерно 250 ГэВ. В простейшем варианте каждая из масс является произведением величин η и одной из констант, характеризующей взаимодействие того или иного лептона или кварка с хиггсовским полем. Такие константы, называемые юкавскими, имеют ту же размерность, что и заряды e, g_w, g_s , и, следовательно, в единицах $\hbar, c$ — безразмерны. (Заметим попутно, что масса W-бозона определяется произведением η и $g_w/2$, а для Z-бозона g_w заменяется $g_w^2/\sqrt{g_w^2 - e^2}$.)

Очерченная здесь схема возникновения масс является самой простейшей. Существуют и другие, более изощренные, схемы. В некоторых из них юкавские взаимодействия вообще отсутствуют и заменяются сложными калибровочными неабелевыми конструкциями (техницвет).

Но что является несомненным фактом, так это то, что пока теория элементарных частиц содержит свыше двух десятков безразмерных параметров, которые сегодня выглядят как произвольные. (К произвольным параметрам относятся также три угла и фаза матрицы Кобаяши—Маскавы, определяющей взаимодействие слабых кварковых токов и нарушение CP-инвариантности в слабых взаимодействиях. Возможно, что аналогичная, но еще более сложная матрица описывает заряженные лептонные токи с участием нейтрино. Более сложный характер слабых взаимодействий нейтрино может быть обусловлен тем, что для них возможны не только дираковские, но и майорановские массы.) На современном уровне знаний кажется, что, изменив тот или иной из этих параметров, мы ничего не разрушим в структуре теории, хотя, конечно, при этом радикально изменится облик описываемого ею мира.

С точки зрения фундаментальной физики чисто кинематические упражнения со скоростью света а ля мистер Томпкинс — крайне легкомысленное

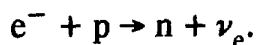
занятие. (Недаром, по свидетельству Х. Казимира [26], это занятие "казалось Бору скорее глупым, чем смешным".) С точки зрения системы $cG\hbar$ "скорее глупым" является и обсуждение динамических свойств воображаемого мира, в котором $c \rightarrow \infty$, а $\hbar$, e , m_e остаются неизменными. Но с этой же точки зрения заведомо обреченными на неудачу представляются и многолетние усилия построить единую теорию гравитационного и электромагнитного полей, не учитывая константы $\hbar$. Ведь фундаментальным параметром электродинамики является не размерное e , а безразмерная α . (Классическая электродинамика, как известно, становится внутренне противоречивой на расстояниях, характеризующихся классическим радиусом электрона $r_0 = e^2/m_e c^2 \sim 10^{-13}$ см, которые на 20 порядков больше планковских $l_P \sim \hbar/m_P c \sim 10^{-33}$ см.) Задача построения единой фундаментальной теории в одной отдаленно взятой плоскости, будь то $1/c \rightarrow 0$, или $\hbar \rightarrow 0$, или $G \rightarrow 0$, утопична.

4. Антропность физического мира

Вопрос о том, будут ли в окончательной физической теории фиксированы условием непротиворечивости теории все безразмерные параметры или некоторые из них останутся произвольными, сегодня является вопросом веры. Научного ответа он пока не имеет. Слово "произвольный" означает в данном контексте, что данный безразмерный параметр принял свое значение в процессе космологической эволюции вселенной на ее ранней стадии. При этом с большей или меньшей вероятностью он мог бы принять и другие значения.

Даже беглого взгляда на произвольные, "свободные", параметры достаточно, чтобы поразиться тому, насколько их значения благоприятны для нашего существования. В планковском масштабе особенно удивительно выглядят массы элементарных частиц.

Например, разность масс нейтрона и протона $m_n \sim -m_p$ составляет $1,33 \text{ МэВ} \sim 10^{-22} m_P$. Но если бы эта разность была, скажем, на 1 МэВ меньше, нейтрон стал бы стабилен, а атом водорода, как подчеркнул И.Л. Розенталь [27 — 30], был бы нестабилен:



Совокупность реакций $\nu_e p \leftrightarrow n e^+$ и $e^- p \leftrightarrow n \nu_e$, определяющих соотношение между числом нейтронов и протонов, оставленных нам в наследство первичным нуклеосинтезом, в этих условиях сместила бы баланс в сторону равной распространенности протонов и нейтронов. В результате основным веществом в мире были бы не атомы водорода, а атомы гелия. И вся эволюция образования и горения звезд радикально изменилась бы. Они бы быстро взрывались. Жизнь была бы невозможна по многим причинам. К аналогично радикальным последствиям приводит небольшое ($\sim 1 \text{ МэВ}$) утяжеление массы электрона.

Итак, все строение вселенной крайне чувствительно к небольшому "шевелению" величины массы электрона и/или разности масс протона и нейтрона, а по существу разности масс u - и d -кварков. Ведь нейтрон тяжелее протона из-за того, что d -кварк тяжелее u -кварка ($m_d \sim 7 \text{ МэВ}$, $m_u \sim 5 \text{ МэВ}$). Заметим, что в двух других поколениях кварков, в отличие от первого поколения, нижние кварки (s , b) значительно легче своих верхних партнеров (c , t).

До сих пор мы обсудили чувствительность нашего мира к величинам масс

фундаментальных фермионов: m_e, m_u, m_d . Еще более поразительной является чувствительность к менее фундаментальным величинам, таким, как энергия связи нуклонов в дейтоне ϵ_d [28]. На опыте $\epsilon_d \sim 2,2$ МэВ. Уменьшение этой энергии связи всего на 0,4 МэВ привело бы к тому, что основная реакция горения водорода в Солнце $pp \rightarrow de^+\nu_e$ оказалась бы запрещенной и могла идти только гораздо менее вероятная реакция $pe^-p \rightarrow d\nu_e$. По-существу, все зависит от деталей ядерных сил между нуклонами, которые с точки зрения квантовой хромодинамики являются чем-то вроде "химии сильных взаимодействий".

Другой, еще более тонкий пример — это детали в расположении энергетических уровней ядер ^{12}C и ^{16}O . Знаменитый уровень ядра углерода с энергией возбуждения 7,65 МэВ лежит всего на 0,3 МэВ выше суммы масс ядер $^4\text{He} + ^8\text{Be}$. Ядро ^8Be нестабильно, и потому без этого уровня, резонансно усиливающего сечение реакции $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$, углерод образовывался бы гораздо менее эффективно, чем сжигался в реакции $^{12}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$, и вселенная была бы настолько бедна углеродом, что вряд ли возникла бы жизнь. Именно такого рода соображения привели Фреда Хойла к тому, что в начале 1953 г. он предсказал существование уровня 7,65 МэВ и примерно через неделю открыл его совместно с экспериментаторами Калифорнийского технологического института. (История этого открытия очень ярко описана Хойлом в сборнике "Ядерная астрофизика", посвященном 70-летию В. Фаулера [31], а астрофизическая роль уровней ^{12}C и ^{16}O — в книге Хойла "Галактики, ядра и квазары" [32].) Когда смотришь на диаграмму энергетических уровней ядра ^{12}C (их около тридцати в интервале порядка 30 МэВ; см. [33]) и видишь первые три уровня 4,43 МэВ, 7,65 МэВ и 9,64 МэВ, то душу охватывает чувство глубокой благодарности к уровню 7,65 МэВ за то, что он не спустился на 0,5 МэВ ниже. Какой малый запас прочности у всего, что нам так дорого!

Еще один пример был указан Ф. Дайсоном [34], который отметил, что наличие даже слабо связанного состояния двух протонов, т.е. ядра ^2He , также резко сказалось бы на всем развитии мира. Примеры эти можно множить и множить. Но что значат с планковской точки зрения небольшие изменения ядерных сил?

Если справедлива теория великого объединения, то характерный импульс конфайнмента Λ_{QCD} (обратный радиус конфайнмента) связан с характерным импульсом великого объединения Λ_{GUT} соотношением

$$\frac{1}{\alpha_s(\Lambda_{\text{GUT}})} - \frac{1}{\alpha_s(\Lambda_{\text{QCD}})} \approx \ln \frac{\Lambda_{\text{GUT}}}{\Lambda_{\text{QCD}}}.$$

(Недостающий коэффициент, порядка единицы, перед логарифмом определяется вкладом цветных частиц. Если не принимать во внимание суперчастиц и других гипотетических частиц, а учесть лишь обычные глюоны и кварки, то он равен $7/2\pi$.) Если мы теперь пренебрежем $1/\alpha_s(\Lambda_{\text{QCD}})$, которая порядка единицы, по сравнению с $1/\alpha_s(\Lambda_{\text{GUT}})$, которая, как уже говорилось выше, порядка 40, то получается простое соотношение

$$\Lambda_{\text{QCD}} \sim \Lambda_{\text{GUT}} e^{-1/\alpha_s(\Lambda_{\text{GUT}})}.$$

Мы видим, что уменьшение $\alpha_s(\Lambda_{\text{GUT}})$ в два раза, с 0,02 до 0,01, уменьшает Λ_{QCD} на 17 порядков. Достаточно уменьшить $\alpha_s(\Lambda_{\text{GUT}})$ всего на 10%, чтобы Λ_{QCD} уменьшилась в 10 раз и массы нуклонов определялись бы уже не Λ_{QCD} , а токовыми массами легких кварков. Учитывая, что $m_u \sim 5$ МэВ, а $m_d \sim 7$ МэВ, мы имели бы $m_p \sim 17$ МэВ, $m_n \sim 19$ МэВ.

Тут, может быть, подошло время сказать о замечании Дж. Сальвини, который обратил внимание на то, что если бы массы ядер и электронов были сравнимы, то могло не быть ни кристаллов, ни твердых тел, а следовательно, и классических приборов квантовой механики. При этом вопрос о ее вероятностной интерпретации даже не возникает, хотя все динамические следствия квантовой механики остаются. Небольшое шевеление "свободных" параметров привело бы к тому, что в тартарары провалились бы не только физики, не только все живые существа, какими мы их знаем, но и отдельные главы физических учебников^(3*).

5. Антропные принципы

Наряду с уже упомянутыми "счастливыми случайностями" имеется много других, которые относятся к эволюции галактики и звезд [36 — 39]. Так, грубые размерные оценки показывают, что время жизни обычной звезды, в недрах которой создаются необходимые для жизни углерод, азот, кислород и более тяжелые элементы, должно быть порядка $(\hbar/m_p c^2)(\hbar c/Gm_p^2)^2$. Это время чувствительно к отношению $Gm_p^2/\hbar c = m_p^2/m_p^2$, которое в литературе часто обозначают α_G по аналогии с α_e , α_w и α_s . (Заметим, что обозначение α_G не кажется удачным, поскольку в данном случае речь идет не о величине гравитационного заряда, а о величине массы протона. Ведь в единицах $c\hbar$ величина G является фундаментальной размерной единицей. Использование же обозначения α_G подразумевает, что фундаментальной единицей размерности массы является масса протона m_p , а не масса Планка m_p .)

Антропности вселенной посвящена обширная литература. Хорошим популярным введением может служить книга П. Дэвиса "Случайная Вселенная" [40]. Наиболее полная книга на эту тему — Дж. Бэрроу и Ф. Типлер "Антропный космологический принцип" [41] — содержит свыше семисот страниц, свыше полутора тысяч ссылок и охватывает многообразные аспекты от физики, астрофизики, космологии, биохимии, биологии, науки о компьютерах до истории, философии, проблемы внеземных цивилизаций и религии.

Антропные свойства вселенной привели к формулировке ряда гипотетических (спекулятивных) принципов.

Слабый антропный принцип исходит из представления об ансамбле, содержащем бесконечно большое число вселенных. Априорная вероятность создания антропной вселенной исчезающе мала. Но эта малость не имеет отношения к делу, так как существенна апостериорная вероятность. Из факта нашего существования следует, что мы не можем не жить в одном из "самых лучших из миров".

Теоретической реализацией этого статистического ансамбля вселенных является бесконечная сеть вселенных, каждая из которых на своей ранней инфляционной стадии порождает бесчисленные дочерние вселенные. В каждой из них могут реализовываться не только различные схемы нарушенной симметрии, но и различные числа измерений пространства-времени. Однако даже

при данном числе пространственно-временных измерений и данной схеме нарушений симметрии возможным оказывается бесконечное разнообразие значений безразмерных свободных параметров. Отдал дань антропному принципу в его слабой форме Я.Б. Зельдович [42]. Неоднократно возвращался к нему в своем творчестве А.Д. Сахаров. Так, в статье [43] он писал: "Некоторые авторы считают антропологический принцип неплодотворным и даже не соответствующим научному методу. Я с этим не согласен. Замечу, в частности, что требование применимости фундаментальных законов природы в существенно иных, чем в нашей Вселенной, условиях может иметь эвристическое значение для нахождения этих законов".

Обсуждение антропного принципа в рамках инфляционной вселенной содержится в работах А. Линде [21, 22].

При бесконечном изобилии вариантов не кажется уже столь удивительным, что нашелся, по крайней мере, один, в котором возможна разумная жизнь, способная познавать вселенную.

Важно подчеркнуть, что, несмотря на принципиальную невозможность передачи информации из одной вселенной в другую, все они (на бумаге) являются "детьми" одного "первичного лагранжиана" с одними и теми же размерными фундаментальными единицами: $c, G, \hbar^{(4*)}$.

В противоположность слабому, сильный антропный принцип утверждает, что вселенная обязательно должна быть устроена так, чтобы обеспечить возможность самопознания. Существует ряд различных формулировок сильного принципа, подробно обсуждаемых в книге Бэрроу и Типлера. Возможно, что все ее нарушенные симметрии и все значения свободных безразмерных параметров фиксированы условием самосогласованности этой невообразимо сложной нелинейной системы. (Эту точку зрения высказал Л. Майани.)

6. В чем надежда?

Вопросы, возникающие в связи с антропными принципами, безмерно сложнее вопросов, решаемых современной физикой элементарных частиц. Сила физики вообще, и фундаментальной физики в частности — будь то физика высоких энергий на коллайдерах или физика подземных низкофоновых лабораторий, — заключается в способности находить и решать вопросы, поддающиеся решению. Как сказал когда-то И. Померанчук в мастерской скульптора Вадима Сидура: и при создании скульптуры, и при решении физической задачи важно понять, почувствовать, чем можно пренебречь.

Можно ли, делая конечные локальные шаги, прийти к постижению глубочайших глобальных (или более точно) вселенских истин, в которых ничем пренебречь нельзя? Особенно сильный приступ пессимизма может вызвать сравнение доступной экспериментальному исследованию части энергетической шкалы (в реалистической перспективе $\lesssim 10^5$ ГэВ) с планковской шкалой энергий $\sim 10^{19}$ ГэВ, являющейся естественной для Теории Всего и как бы символизирующей трагический разрыв между идеалом и реальностью в физике XX века. Растерянность вызывает и то, что количество частиц, которое предстоит открыть в Тэвной области, не меньше, чем уже известное число фундаментальных частиц. Так что кажется, что по крайней мере в ближайшем будущем мы будем двигаться ко все большему разнообразию фундаментальных блоков материи.

Однако прогресс в создании единой картины в современной фундаментальной физике характеризуется не столько уменьшением числа фундамен-

тальных частиц, сколько уменьшением числа свободных параметров. Установление теоретической количественной связи между безразмерными параметрами, которые до того были независимыми, подымает физику на новый, более высокий уровень единства. При этом резко расширяется круг явлений, описываемых с единой точки зрения. Последним таким этапом было создание современной стандартной модели электрослабого и сильного взаимодействий.

Интересно сравнить теоретическую физику с математикой. В математике, наряду с кажущимся неограниченным процессом роста и ветвления, происходит и процесс синтеза, когда усилием чистого разума устанавливаются глубокие связи между на первый взгляд далекими областями и понятиями.

В теоретической физике тоже есть процессы дифференциации и интеграции. Но здесь важнейшую роль играет также эксперимент и наблюдение за природой. Они бросают в почву семена новых теоретических ростков, стимулируют рост одних теоретических фантазий и безжалостно выпалывают другие.

Мы очень много ждем от экспериментов на будущих Тэвнских коллайдерах. Конечно, многое может быть открыто на уже работающих машинах: t -кварк, легкие хиггсовы бозоны, легчайшие из суперсимметричных частиц. Но только Тэвнские коллайдеры могут раскрыть все богатство скалярных и суперсимметричных частиц, могут подсказать, как устроены массы частиц, и резко снизить число свободных параметров фундаментальной физики.

Ярким примером того, как Тэвнская физика могла бы послужить стартовой площадкой для очень далеких экстраполяции по энергии, являются данные о бегущих константах α_s , α_w и α_1 (последняя является комбинацией α и α_w). Как подчеркнул недавно Уго Амальди [44], данные, полученные на ЛЭП, указывают на то, что с известным набором частиц эти бегущие константы встречаются не в одной "тройной" точке, а в трех "двойных" при 10^{13} ГэВ, 10^{14} ГэВ и 10^{16} ГэВ. Вместе с тем, как заметили Дж. Эллис, С. Келли и Д. Нанопулос [45], учет суперсимметричных партнеров обычных частиц фокусирует все три траектории в одной точке при 10^{16} ГэВ. У этого результата сразу два следствия. Первое относится к тому, что упомянутые суперсимметричные частицы должны быть легкими с массами, не сильно превышающими 1 ТэВ. В противном случае траектории бегущих констант приобретут изломы и фокусировка нарушится. И второе, нужны новые детекторы для поисков распада протона с массами, на порядки превышающими массы прежних детекторов.

Другим бесценным источником фундаментальных данных могут оказаться опыты с нейтрино, особенно с солнечными нейтрино, поскольку именно они особенно чувствительны к малым разностям масс и малым углам смешивания различных типов нейтрино.

Неожиданным подарком может разрешиться проблема темного вещества во вселенной.

Разумеется, никакие мыслимые ускорители не позволят ни нам, ни нашим потомкам добраться до планковских энергий. Но не исключено (а учитывая только что рассмотренный пример экстраполяции трех бегущих констант, даже правдоподобно!), что экспоненциальная недоступность для экспериментаторов является одной стороной медали, на другой стороне которой логарифмическая близость для теоретиков. Ведь теоретикам, может быть, окажется достаточным проанализировать и понять лишь показатели экспонент, исчисляемые всего двузначными числами.

Если в ближайшие десятилетия мы разберемся с физикой до Тэвнских энергий, то это может оказаться достаточно широкой базовой площадкой для того, чтобы умственным взором рассмотреть многие детали физики при планковских энергиях. Ведь не помешали астрономические расстояния до небесных тел изучить их детальней, чем внутренность нашей собственной планеты. Да и гелий впервые был открыт на Солнце, а не на Земле.

Говоря о теоретическом "прозрении", не следует забывать об интенсивном процессе синтеза теоретической физики и математики, в результате которого создаются новые области математики. Идеи красоты или просто красивые идеи также могут сыграть важную роль (см. выше замечания о математике).

Уместно закончить эту главу следующим замечанием. Многие годы ранняя вселенная рассматривалась физиками-теоретиками как естественная планковская лаборатория. Если, однако, температура вселенной после инфляции никогда не превосходила величин порядка 1 ТэВ , как склонны считать многие космологи^(5*), то "планковская лаборатория" ушла в результате инфляции экспоненциально далеко за горизонт. И следующее поколение суперколлайдеров может рассказать о ранней вселенной больше, чем астрофизические наблюдательные данные. А обнаружение распада протона следующим поколением подземных детекторов дало бы сведения об энергиях, абсолютно недоступных наблюдательной космологии.

7. Мысленные эксперименты. Не мираж ли шкала Планка?

Из определения массы Планка следует, что гравитационное взаимодействие между двумя частицами, каждая из которых имеет массу Планка и единичный электрический заряд e , в 137 раз сильнее электромагнитного взаимодействия между ними. Но само по себе это еще не означает, что для таких частиц гравитационное взаимодействие становится по-настоящему сильным: ведь они могут находиться друг от друга достаточно далеко.

По-настоящему сильным гравитационное притяжение станет, когда расстояние между частицами уменьшится настолько, что потенциал взаимодействия станет сравним с их энергией покоя:

$$Gm_P^2/l_P = m_P c^2.$$

Учитывая $G = \hbar c/m_P^2$, для планковской длины получаем $l_P = \hbar/m_P c$. В этом случае квантовые флуктуации гравитационного поля порядка самого поля. Мы попадаем в область квантовой гравитации. Для того чтобы такая ситуация реализовалась, необходимо, чтобы размеры самих частиц были не больше l_P .

Дифференциальное сечение упругого гравитационного рассеяния $d\sigma/dq^2$ двух энергичных точечных частиц порядка

$$d\sigma/dq^2 \sim G^2 E^4/q^4,$$

где E — их энергия в системе центра масс, а q — переданный импульс (использованы единицы $c, \hbar = 1$). При $E \sim q \sim m_P$ сечение $d\sigma/dq^2 \sim 1/m_P^4$ и насыщается унитарность амплитуды в s -волне. Однако при таких энергиях и переданных импульсах становится существенным образование черной дыры. О черных дырах говорили еще Джон Мичел [51] (1784 г.) и Пьер Лаплас [52] (1796 г.)^(6*). При $r < r_g = 2Gm/c^2$ потенциальная энергия гравитацион-

ного притяжения фотона, "пытающегося" улететь от тела с массой m и с радиусом, меньшим r_g , больше его кинетической энергии.

Чем меньше масса тела, тем меньше его гравитационный радиус r_g . Для таких астрономических объектов, как обычные звезды, $r_g \ll R$, где R — радиус звезды (для нашего Солнца, например, $r_g \approx 3$ км). Если в результате эволюции масса порядка солнечной сконцентрируется в области с радиусом, меньшим r_g , то возникает черная дыра. Такие черные дыры возникают при взрыве сверхновых звезд.

Если представить себе систему, состоящую из двух одинаковых черных дыр, находящихся друг от друга на расстоянии порядка r_g , то потенциальная энергия их притяжения равнялась бы

$$\frac{Gm^2}{r_g} \sim \frac{Gm^2c^2}{Gm} \sim mc^2,$$

а напряженность гравитационного поля (сила)

$$\frac{Gm^2}{r_g^2} \sim \frac{Gm^2c^4}{G^2m^2} \sim \frac{c^4}{G} \sim \frac{c^3m_p^2}{\hbar},$$

т.е. была бы характерно планковской. Таким образом, планковскую напряженность гравитационного поля можно получить в мысленном опыте с двумя макроскопическими черными дырами. Однако это поле было бы классическим: его флуктуации в планковском масштабе были бы еще малы.

Если бы существовали частицы с $m \sim (0,01 - 0,1)m_p$, то гравитационное притяжение между ними приводило бы к образованию атомоподобных квантовых систем, в которых их движение было бы нерелятивистским. Эти системы описывались бы нерелятивистской квантовой гравитацией (см. рис. 2). Современная концентрация таких частиц не должна существенно превышать — 10^{-16} от концентрации обычного водорода. В противном случае они дали бы уже недопустимо большой вклад в массу темного вещества. Обнаружение таких частиц представляет собой очень трудную задачу.

В физике частиц планковская шкала могла бы превратиться в мираж, если бы частицы (включая гравитон?) имели собственные размеры l такие, что $l \gg l_p$. В этом случае планковские размеры были бы даже в принципе недостижимы при взаимодействиях частиц. Попыткам построения нелокальной теории поля посвящено большое число работ (см. книги [53], научно-популярную статью А.Д. Сахарова [54] и несколько недавних теоретических статей [55]). Однако последовательной фундаментальной нелокальной теории поля (истинно нелокальной, а не феноменологически) построить не удастся: нарушается причинность. В этом смысле на планковские расстояния нас загоняет стремление к внутренней непротиворечивости теории.

Хороший мысленный эксперимент для продумывания того, как нелокальность сказалась бы на гравитационном взаимодействии: столкновение двух частиц с заданным прицельным расстоянием $l \gg l_p$ и столь высокими (сверхпланковскими $E \gg m_p c^2$) энергиями в системе центра масс, что $G(E/c^2)^2/l \sim E$. Сблизившись на расстояние l , эти частицы образовали бы черную дыру.

В статье [54] А.Д. Сахаров писал: "Сейчас все больше физиков склоняется к тому, что именно грань L_0 определит наиболее существенные перемены в наших представлениях.

Все же очень важно убедиться, что никакая промежуточная между $r = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см и $L_0 = 1,61 \cdot 10^{-33}$ см характерная длина не играет столь же фундаментальной роли."

8. Заключение

На парадной лестничной площадке физического факультета университета Падуи, университета, в котором в свое время читал лекции Галилео Галилей, висит мраморная доска с его словами, которые в переводе на русский звучат примерно так:

"По мне, лучше найти истину хотя бы в небольшом деле, чем длинно рассуждать о величайших вопросах, не достигнув никакой истины".

Эти слова Галилея [56] выражают кредо каждого физика-профессионала. Что же, кроме чисто субъективных причин, побудило меня нарушить заповедь Галилея? Я думаю, что прежде всего то, что экспериментально недостижимая масса Планка с каждым годом занимает все большее место в физике. Это заставляет искать для физической картины мира в каком-то смысле метафизическую раму.

В 1918 г. А. Эддингтон [57], вслед за Планком подчеркивая, что из всех физических систем единиц система *сГћ* является абсолютно выделенной, отметил, что планковская длина "должна служить ключом к некоторой весьма существенной структуре". Через несколько лет в своей во всех остальных отношениях прекрасной книге "Анализ размерностей" [58] П. Бриджмен, высмеяв это утверждение, заявил, что к реальной физике эти единицы отношения не имеют. Кстати, первое и последнее русское издание этой книги вышло почти 60 лет тому назад, и ее было бы очень полезно переиздать. Но что касается полемики с Эддингтоном и Планком, то чаша весов неуклонно движется в их сторону. Даже в рамках обычной астрофизики планковские единицы воспринимаются в наше время как естественные (см. книгу Э. Дибая и С. Каплана [59]).

За время работы над этой статьей (август 1990 г. — май 1991 г.) я обнаружил, что целый ряд соображений, которые у меня были в начале или появились по ходу работы, были ранее опубликованы другими авторами. Так что собственно моими являются лишь некоторые детали, акценты, замечания и сопоставления.

В научной литературе идея множественности миров обсуждается с тех пор, как появилась сама научная литература [60]. О ней было сказано много ярких слов. Мне хотелось бы привести слова, которыми заканчивается Нобелевская лекция Андрея Дмитриевича Сахарова [61]:

"Я защищаю также космологическую гипотезу, согласно которой космологическое развитие Вселенной повторяется в основных своих чертах бесконечное число раз. При этом другие цивилизации, в том числе более "удачные", должны существовать бесконечное число раз на "предыдущих" и "последующих" к нашему миру листах книги Вселенной. Но все это не должно умалить нашего священного стремления именно в этом мире, где мы, как вспышка во мраке, возникли на одно мгновение из черного небытия бессознательного существования материи, осуществить требования Разума и создать жизнь, достойную нас самих и смутно угадываемой нами Цели".

Благодарности. Я благодарю за полезные замечания и/или указания на неизвестные мне ранее литературные источники М. Балдо-Чеолин, Р. Барбиери, В.И. Гольданского, Г.Е. Горелика, Ю.А. Данилова, Д.Д. Иваненко, Г.М. Иддиса, В.И. Кисина, В.И. Когана, Л. Майани, А.Ю. Морозова, Д.К. Надежина, Н.А. Некрасова, Ю.Ф. Орлова, И.Л. Розенталя, Дж. Сальвини, С.Г. Тиходеева, Э. Шугинга^(7*).

ПРИМЕЧАНИЯ

^(1*) На первый взгляд, утверждению об исчезновении взаимодействия фотонов с веществом противоречит то обстоятельство, что сечение резонансного рассеяния света растет как λ^2 . Однако при гигантском времени жизни и исчезающе малой ширине резонансной линии попасть в резонанс практически невозможно.

^(2*) Если не считать косвенной ссылкой инициалы Томпкинса: С.Г.Н.

^(3*) Заметим, что энергия связи электрона в ионе позитрония $\sim 0,2$ эВ, а энергия связи молекулы, состоящей из двух атомов позитрония, $\sim 0,1$ эВ (см., например, [35]). Так что при сверхнизких температурах конденсированное состояние могло бы существовать и в том случае, когда $m_c = m_p$.

^(4*) Впрочем, в случае абсолютно изолированных друг от друга вселенных, утверждение об общности размерных единиц **c**, **G**, **h** операционного смысла не имеет. Бели представить себе вселенную, в которой значения **c**, **G**, **h**, выраженные в наших граммах, сантиметрах и секундах, иные, чем у нас, но все безразмерные параметры, о которых речь шла выше, те же, что у нас, то вся физика в той и в нашей вселенных будет неотличима. Конечно, их грамм, сантиметр и секунда будут иными, чем у нас, но численные значения **c**, **G**, **h**, выраженные в их г., см., сек., будут теми же, что у нас.

^(5*) При температуре порядка нескольких ТэВ произошел фазовый переход, в котором, по-видимому, окончательно сформировалась барионная асимметрия вселенной [46 — 50].

^(6*) В приложении к русскому переводу книги Пьера-Симона Лапласа "Изложение системы мира" [52] переводчик цитирует следующее высказывание Лапласа: "Светящаяся звезда с плотностью, равной плотности Земли, и с диаметром в 250 раз больше диаметра Солнца не даст ни одному световому лучу достичь нас из-за своего тяготения; поэтому возможно, что самые яркие небесные тела во Вселенной оказываются по этой причине невидимыми". Странно только, что цитата дается с несколько необычной ссылкой: газ. "Ленинская правда", 1980, 21 декабря.

^(7*) Список литературы, разумеется, не претендует не только на полноту, но даже на продуманность отбора. Просто это те книги и статьи, которые я использовал, читал или просматривал при работе над данной статьей. В некоторых ссылках отмечены те страницы или параграфы, которые имеют непосредственное отношение к обсуждаемым мной вопросам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: Наука, 1988. — § 16, 27, 26, 30, 78.
2. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. — М.: Наука, 1989. — § 45, 56, 59.
3. Вольберг О.А. Занимательная прогулка в страну Эйнштейна//Перельман Я.И. Занимательная механика. — Л.; М.: ГРН-ПЮЛ, 1935. — Гл. 11. С. 188.
4. Gamov G. Mr. Tompkins in Paperback. Containing Mr. Tompkins in Wonderland and Mr. Tompkins Explores the Atom. — Cambridge University Press, 1988.
5. Планк М. Избранные труды. — М.: Наука, 1975. — С. 232.
6. Гамов Г., Иваненко Д., Ландау Л.//ЖРФХО. Ч. физ. 1928. Т. 60, № 1. С. 13.
7. Ландау Л.Д.//Нильс Бор и развитие физики/Под ред. В. Паули. — М.: ИЛ, 1958. — С. 85.
8. Wheeler J.//Phys. Rev. 1955. V. 97. P. 511.
9. Уилер Дж. Гравитация, нейтрино и Вселенная. — М.: ИЛ, 1962.
10. Горелик Г.Е. Эйнштейновский сборник. 1978 — 1979. — М.: Наука, 1983. — С. 334.
- [11] Горелик Г.Е. Размерность пространства. Историко-методологический анализ. — М.; Изд-во Моск. ун-та, 1983.
12. Горелик Г.Е., Френкель В.Я. Матвей Петрович Бронштейн. — М.: Наука, 1990.
13. Polyakov A.M. Gauge Fields and Strings. — Harwood Acad. Publ., 1987.
14. Green M.B., Schwartz J., Witten E. Superstring Theory. — Cambridge University Press, 1987.
15. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. — М.: Мир, 1977. — Т. 3. § 44.
16. Hawking S. A Brief History of Time. — Bantam Press. 1958.
17. Coleman S.//Nucl. Phys. B. 1988. V. 310. P. 643.

18. Вайнберг С.//УФН. 1989. Т. 158. С. 639.
19. Gell-Mann M., Hartle J. Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology. — Preprint CALT-68-1647, UCSB TH 89-36//Proceedings of the Santa Fe Institute Workshop on Complexity, Entropy and the Physics of Information. May 1989; Proceedings of the 3rd International Symposium on the Foundation of Quantum Mechanics in the Light of New Technology. Tokyo, August, 1989.
20. Gell-Mann M. *Invited Talk*//Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics. August 1990. — Singapore: World Scientific, 1991.
- [21] Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. — М.: Наука, 1990.
22. Linde A. Inflation and Quantum Cosmology. — Stanford University Preprint ITP-878. — September 1990.
23. Halliwell J.J. Quantum Cosmology in the Creation of the Universe. — CTP preprint 1928 (MIT). — December 1990, Submitted to Scientific American.
24. Зельманов А.Л.//Бесконечность и Вселенная. — М.: Мысль, 1960. — С. 274.
25. Зельманов А.Л. Развитие астрономии в СССР. — М.: Наука, 1967. — С. 320.
26. Казимир З.//Нильс Бор. Жизнь и творчество. — М.: Мысль, 1967. — С. 190.
27. Розенталь И.Л.//УФН. 1980. Т. 131. С. 239.
28. Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. — М.: Наука, 1984.
29. Розенталь И.Л. Геометрия, динамика, вселенная. — М.: Наука, 1987.
30. Розенталь И.Л. Интерпретация проблем физики элементарных частиц. — Препринт ИКИ П-1671. — Москва, 1990.
- [31] Ядерная астрофизика/Под ред. Ч. Барна, Д. Клейтона, Д. Шрамма. — М.: Мир, 1986.
32. Хойл Ф. Галактики, ядра, квазары. — М.: Мир, 1968.
33. Ajzenberg-Selove F.//Nucl. Phys. A. 1985. V. 33. P. 55.
34. Dyson F.//Sci. American. September 1971. V. 22. № 3. P. 50.
35. Гольданский В.И. Физическая химия позитрона и позитрония. — М.: Наука, 1968. — С. 20.
36. Идлис Г.М.//Изв. Астрофиз. ин-та АН КазССР. 1958. Т. 7. С. 39.
37. Dicke R.H.//Nature, London. 1961. V. 192. P. 440.
38. Карпер Б.//Космология. Теории и наблюдения. — М.: Мир, 1978. — С. 369.
39. Carr B.J., Rees M.J.//Nature, London. 1979. V. 278. P. 605.
40. Дэвис П. Случайная Вселенная. — М.: Мир, 1985.
- [41] Barrow J.D., Tipler F.J. The Anthropic Cosmological Principles. — Oxford: Clarendon Press, 1986.
42. Зельдович Я.Б.//Письма Астрон. ж. 1981. Т. 7. С. 579.
43. Сахаров А.Д.//ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 375.
44. CERN Courier. 1991. V. 21, № 2. P. 1; № 3. P. 3.
45. Ellis J., Kelley S., Nanopoulos D.V.//Phys. Lett. B. 1990. V. 249. P. 441.
См. также:
Einhorn M., Jones D.R.T.//Nucl. Phys. B. 1982. V. 196. P. 475.
Ellis J., Nanopoulos D., Rudaz S.//Ibidem. V. 202. P. 43.
Marciano W., Senjanovich G.//Phys. Rev. D. 1982. V. 25. P. 3092.
46. Manton N.S.//Ibidem. 1983. V. 28. P. 2019.
47. Klinkhamer F.R., Manton N.S.//Ibidem. 1984. V. 30. P. 2212.
48. Kuzmin V.A., Rudakov V.A., Shaposhnikov M.E.//Phys. Lett. B. 1985. V. 155. P. 36.
49. Rudakov V.A.//Nucl. Phys. B. 1985. V. 256. P. 509.
50. Arnold P., McLerran L.//Phys. Rev. D. 1987. V. 36. P. 581; 1988. V. 37. P. 1020.
- [51] Michell J.//Phil. Trans. Roy. Soc., London. 1784. V. 74. P. 35.
См. также:
Israel W.//Three Hundred Years of Gravitation/Eds. S. Hawking, W. Israel. — Cambridge: Univ. Press, 1987. — P. 199.
52. Laplace P.S. Exposition du Systems du Monde. — Paris: Ed. J.B.M. Duprat, 1976. — Т. 2. P. 305; перевод: Лаплас П.С. Изложение системы мира. — М.: Наука, 1982.
См. Приложение: Васильев В.М.//Ibidem. С. 368.
Hawking S.W., Ellis G.F.R. The Large Scale Structure of Space-Time. — Cambridge: Univ. Press. 1973. P. 365.
53. Проблемы теоретической физики. — Сборник Памяти Игоря Евгеньевича Тамма. — М.: Наука, 1972.
Ефимов Г.В. Нелокальные взаимодействия квантованных полей. — М.: Наука, 1977; Проблемы квантовой теории нелокальных взаимодействий. — М.: Наука, 1985.
54. Сахаров А.Д. Существует ли элементарная длина?//Физика в школе. 1968. № 2. С. 6; также://Сахаров А.Д. Этюды к научному портрету. Глазами друзей и коллег. Вольномыслие. — М.: Физическое общество СССР, Мир, 1991.
55. Moffat J.M.//Phys. Rev. D. 1990. V. 41. P. 1177.

- Evens D., Moffat J.W., Kleppe G., Woodard R.P.*//*Ibidem.* 1991. V. 43. P. 499.
Moffat J.W.//*Mod. Phys. Lett. A.* 1991. V. 6. P. 1011.
56. *Le Opere di Galileo Galilei*./Ed. A. Favaro. — V. IV. P. 738. Note 2.
57. *Edington A.S.* Report on Gravitation//*Proc. Lond. Phys. Soc.* V. 30. 1918. P. 91.
58. *Бриджмен П.В.* Анализ размерностей. — Перевод со второго английского издания под ред. С.И. Вавилова. — Л.М.: 1934, Глава 8, стр. 105 — ПО.
59. *Дибай Э.А., Каплан С.А.* Размерности и подобие астрофизических величин. — М.: Наука, 1976.
60. *Визгин В.П.* Идея множественности миров. — М.: Наука, 1988.
- [61] *Сахаров А.Д.* Мир, прогресс, права человека. — Нобелевская лекция. — Прочитана Е. Боннэр в Шведской Академии наук 11 декабря 1975 г.//Досье. Приложение к "Литературной газете". Январь 1990.

Статья поступила 20.05.91 г.