

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

О некоторых успехах физики  
и астрономии за последние три года

В.Л. Гинзбург

*В 1999 г. была опубликована статья автора "Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)?" [1]. По самому характеру и замыслу этой статьи она все время должна изменяться по мере новых достижений в науке. Поскольку статья [1] оказалась востребованной читателями, а за последние три года получены важные результаты принципиального характера, они кратко освещены в настоящей заметке.*

PACS numbers: 01.55. + b, 01.90. + g

1. Опубликованная в 1999 г. статья [1] явилась этапом на пути уже 30 лет осуществляемого мной образовательного или, если угодно, педагогического "проекта": речь идет об изложении и пропаганде некоторого "физического минимума". Именно, вниманию читателей предлагается "список" проблем, которые занимают особенно важное место в физике и астрофизике на рассматриваемый момент времени. По моему мнению, каждый физик должен иметь, пусть и поверхностное, но некоторое представление об этих проблемах, знать хотя бы о чем идет речь. Совершенно очевидно, что любой такой "список" ограничен и субъективен. Очевидно и то, что далеко не все сочувственно относятся к самому подобному "проекту", не говоря уже о моих попытках его реализовать. Но ведь и не имеется в виду что-то обязательное; тем, кому это не интересно, тот и не будет читать соответствующих статей. Но вот оказалось, что число физиков и астрономов, кому это все же интересно, весьма велико. Известно сказанное потому, что УФН свободно доступен в Интернете как в России, так и за рубежом (www.ufn.ru). И оказалось, что до 1 января 2002 г. статью [1] переписало в свои компьютеры по Интернету более 3500 человек. Какое число людей прочитало в самом журнале статью в ее русском и английском вариантах — неизвестно, но, вероятно, оно тоже значительно. Между тем кое-что существенное в статье уже устарело, и мне буквально неудобно перед читателями — они не получают последней информации. Именно по этой причине, и только по ней, написана настоящая статья. Ее цель — сообщить об успехах физики и астрофизики за последние три года, т.е. после появления статьи [1]. При этом речь идет в основном

лишь о немногих особенно принципиальных вопросах, причем в весьма кратком изложении. Все это просто как бы дополнение к статье [1]. По сути дела, мне уже пришлось поступить таким образом трижды. Так, в английском переводе [2] книги [3] добавлена статья [1] с некоторыми изменениями; затем это было сделано в книге [4] и, наконец, я подготовил несколько расширенное и дополненное издание книги [4] на английском языке [5], где опять пришлось кое-что менять. В настоящей статье я, естественно, и опираюсь на это последнее изложение [5]. К сожалению, такой подход неизбежен, когда речь идет о попытках как-то угнаться за бешено мчащимся поездом — прогрессом в науке. Совершенно очевидно, что беглое перечисление отдельных задач и результатов имеет лишь ограниченное значение и ценность. Но по существу повторяю сказанное ранее: появление настоящей небольшой статьи — мера вынужденная. Без нее статья [1] не может сыграть роли, для которой она предназначена.

2. Для удобства приведу здесь "список" проблем, который положен в основу изложения в [5].

1. Управляемый ядерный синтез.
2. Высокотемпературная и комнатотемпературная сверхпроводимость (ВТСП и КТСП).
3. Металлический водород. Другие экзотические вещества.
4. Двумерная электронная жидкость (аномальный эффект Холла и некоторые другие эффекты).
5. Некоторые вопросы физики твердого тела (гетероструктуры в полупроводниках, квантовые ямы и точки, переходы металл-диэлектрик, волны зарядовой и спиновой плотности, мезоскопика).
6. Фазовые переходы второго рода и родственные им. Некоторые примеры таких переходов. Охлаждение (в частности, лазерное) до сверхнизких температур. Бозе-эйнштейновская конденсация в газах.
7. Физика поверхности. Кластеры.
8. Жидкие кристаллы. Сегнетоэлектрики. Ферротороники.
9. Фуллерены. Нанотрубки.
10. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях.
11. Нелинейная физика. Турбулентность. Солитоны. Хаос. Странные аттракторы.

В.Л. Гинзбург. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация  
Тел. (095) 135-85-70. Факс (095) 135-85-33  
E-mail: ginzburg@lpi.ru

Статья поступила 16 января 2002 г.

12. Разеры, гразеры, сверхмощные лазеры.
13. Сверхтяжелые элементы. Экзотические ядра.
14. Спектр масс. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика. Кварк-глюонная плазма.
15. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия.  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозоны. Лептоны.
16. Стандартная модель. Великое объединение. Суперобъединение. Распад протона. Масса нейтрино. Магнитные монополи.
17. Фундаментальная длина. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях. Коллайдеры.
18. Несохранение CP-инвариантности.
19. Нелинейные явления в вакууме и в сверхсильных электромагнитных полях. Фазовые переходы в вакууме.
20. Струны. М-теория.
21. Экспериментальная проверка общей теории относительности.
22. Гравитационные волны, их детектирование.
23. Космологическая проблема. Инфляция.  $A$ -член и "квинтэссенция" (темная энергия). Связь между космологией и физикой высоких энергий.
24. Нейтронные звезды и пульсары. Сверхновые звезды.
25. Черные дыры. Космические струны (?).
26. Квазары и ядра галактик. Образование галактик.
27. Проблема темной материи (скрытой массы) и ее детектирования.
28. Происхождение космических лучей со сверхвысокой энергией.
29. Гамма-всплески. Гиперновые.
30. Нейтринная физика и астрономия. Нейтринные осцилляции.

По сравнению с аналогичным списком, фигурировавшим в [1], изменения очень невелики. Так, в проблеме 5 добавлено упоминание о квантовых ямах и точках. К проблеме 8 добавлено упоминание о ферроториках. И, наконец, в формулировке проблемы 23 вместо слова  $A$ -член значится:  $A$ -член и "квинтэссенция" (темная энергия). Легко можно было бы внести и больше изменений, но я этого старался избегать — важны не названия тем, а содержание соответствующего материала. Оно в некоторых случаях изменилось достаточно существенно, об этом и пойдет речь.

3. В отношении проблемы управляемого ядерного синтеза не могу сообщить чего-либо важного и интересного по существу. Работа продолжается довольно в большом масштабе. Проект ITER в первоначальном варианте осуществляться не будет, разработан более дешевый вариант, но еще даже не выбрано место, где будет строиться установка. Мощная "машина" для осуществления "лазерного термояда" также в строй еще не вступила. Думаю, уместно здесь указать на статьи [6], в которых излагается история ранних исследований в области управляемого термоядерного синтеза в СССР.

В области исследования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) каких-либо очень важных сдвигов не произошло, но получено много существенных и, можно сказать, многообещающих результатов. Они частично перечислены в статье [7], а из более новых нужно упомянуть исследования "псевдощели" [8] и, главное, допирование в купратах не путем введения примесей кислорода, а в результате наложения электрического поля и тем самым введения полей в образец электронов и дырок [9]. Природа (механизм) ВТСП в купратах остается неясной (сошлюсь на обзор [10] и новый механизм, предложенный Ю.В. Копаевым [11]). Большое внимание уже ряд лет привлекает к себе возможность того, что в ВТСП купратах и в некоторых других веществах непригодна модель ферми-жидкости, прекрасно описывающая процессы переноса в большин-

стве металлов [12]. В этой связи особенно интересны результаты [13], опубликованные в самом конце 2001 г., и быть может свидетельствующие о том, что в купратах "элементарные возбуждения", переносящие ток и тепло, довольно существенно отличны от электронов и дырок. Мне, однако, осталась неясной роль присутствующего в этих экспериментах сильного магнитного поля. Несомненно, опыты [13] должны быть (и будут!) повторены и проанализированы. Добавлю, что при этом интересно также изучение термоэлектрических эффектов (в этой связи см. [5], статья 6, а также раздел 5 и примечание 11\* к статье 7). Главная проблема в области изучения сверхпроводимости — это, конечно, возможность создания комнатно-температурных сверхпроводников (КТСП). Но этот вопрос еще совершенно открыт. Мое интуитивное суждение состоит в том, что это возможно.

В отношении проблемы 5, помимо тривиального замечания о бурном развитии этой области, могу лишь указать на появления "спинтроники" (spintronics). Речь идет о том, что до недавнего времени в электронике (конкретно, в полупроводниках) рассматривалось, практически, лишь движение зарядов (электронов и дырок), а спиновые переменные, можно сказать, игнорировались или оставались в тени. Сегодня же и спинам носителей уделяется большое внимание, изучение их поведения служит объектом исследований [14, 15].

Что касается фазовых переходов (проблема 6), то это безбрежное море. Упомяну здесь о проигнорированных в [1] так называемых квантовых фазовых переходах, происходящих при  $T = 0$ , скажем, в результате изменений давления (см., например, [16]; об одном интересном квантовом фазовом переходе см. [66]). В [1] довольно подробно уже был охарактеризован возникший в последние годы "бум" в связи с исследованием бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) в разреженных газах. "Бум", в общем, продолжается и был подогрет присуждением Нобелевской премии по физике за 2001 год трем физикам "За получение конденсата Бозе-Эйнштейна в разреженных газах щелочных металлов и ранние фундаментальные исследования свойств этих конденсатов" (см., например, [17]). В статье [1], а также статье 20 в книге [4] (в [5] это статья 21) я уже касался вопроса о Нобелевских премиях по физике. Отдавая должное этим премиям, хочется подчеркнуть существенное изменение их характера, правда, не во всех случаях, произошедшее за последние 2–3 десятилетия. Как известно, первая Нобелевская премия по физике была присуждена в 1901 г. В. Рентгену за открытие рентгеновских лучей. В дальнейшем премии по физике также присуждались за индивидуальные достижения лауреата или лауреатов (как известно, премия присуждается не более чем трем человекам). При этом отбор лауреата или лауреатов в большинстве случаев был, вероятно, очень нелегким делом, но все же конкурс происходил между темами (теми или иными открытиями, достижениями) и немногими их авторами, а часто автором вообще был один человек. Сейчас же довольно часто выбор трех заветных лауреатов буквально напоминает спортивные соревнования на беговой дорожке или в бассейне. В последних случаях медалей также три, правда, разного достоинства (золотая, серебряная и бронзовая), Нобелевские же медали все золотые. Зато в видах спорта, о которых идет речь, решает секундомер (кстати, в реальность его отсчетов с точностью до сотой, а то и тысячной доли

секунды, мне не верится, даже если использовать фотофиниш и другие ухищрения). А как определить победителей в науке, когда исследование ведется большим коллективом ученых и инженеров (роль последних в экспериментальной работе может быть отнюдь не второстепенной)? Мы же хорошо знаем, что в ряде случаев некоторые премии и награды получают просто "по должности" начальники отделов, научные руководители и вообще "боссы". Они же нередко фигурируют в числе соавторов различных публикаций (статей), патентов и т.д., к реальному содержанию которых имеют весьма сомнительное отношение. Разумеется, было бы бесосновательно и даже оскорбительно переносить подобные подозрения на работу Нобелевских комитетов по науке в целом. Они стараются тщательно анализировать большое количество рекомендаций широкого круга представителей научного сообщества. Например, как сообщается в статье [18], при отборе лауреатов на премию 2000 г., Нобелевский комитет по физике разослал более 2000 запросов физикам многих стран с просьбой предложить кандидатов для присуждения премии. В результате было получено около 300 предложений и, обычно, респонденты знают, кого и за что они номинируют, представляют себе их роль в коллективе, если достижение получено в результате усилий многих авторов. Нужно отметить также, что предложение Нобелевского комитета номинировать кандидатов сопровождается настоятельной просьбой делать это конфиденциально и не обсуждать на каких-то собраниях, ученых советах и т.п. Другое дело, что такой призыв фактически часто игнорируется, и даже я знаю немало соответствующих примеров (конечно, просьба не проводить публичные обсуждения поневоле соблюдается). Для того чтобы читатели не сочли сказанное выше необоснованным, отмечу в качестве примера, что даже в статьях, упоминаемых в сообщении [17] о Нобелевской премии по физике за 2001 г., приводятся ссылки на две статьи (очевидно, основополагающие), в которых помимо трех лауреатов фигурируют еще 9 соавторов. Замечу также, что попытки наблюдать БЭК в разреженных газах еще раньше, чем лауреаты и их сотрудники, предпринимали другие авторы (см. [17, 19]), но они добились успеха на три года позже (в 1998 г.). Насколько понимаю, это было связано исключительно с выбором газа. Именно, "побежденные" в гонке<sup>1</sup> работали с водородом, что оказалось по ряду объективных причин менее удобным, чем использование щелочных металлов. Аналогичная ситуация имела место, например, в случае премии 1997 г., присужденной за охлаждение газов до сверхнизких температур и удержание их в ловушках [20].

Думаю, что некоторые соавторы лауреатов, не получившие премии, чувствуют себя не очень уютно, и аналогия с пробежавшими дистанцию на сотые доли секунды медленнее трех медалистов не слишком далека от реальности. Вышесказанное отнюдь не имеет своей целью набросить какую-то тень на Нобелевские премии по науке вообще. Хотелось лишь охарактеризовать сложившуюся ситуацию. Ее понимание, во всяком случае, полезно. Ну что же, такова жизнь, и было бы, конечно, абсурдно отменять награждение медалями в

спортивных соревнованиях, включая сюда Олимпийские игры, из подобных соображений. В еще большей мере это относится к Нобелевским премиям по науке, ибо по своему содержанию и смыслу они в целом весьма далеки от спортивных соревнований. Единственный вывод, который я хочу сделать из сказанного, это совет, особенно представителям средств массовой информации — не превращать Нобелевские премии и их лауреатов в объект какого-то культа.

Возвращаясь к самой науке, остановлюсь на ферротороиках, которые я впервые поместил в "списке" (пункт 8).

В физике хорошо известны вещества, обладающие спонтанным намагничиванием  $M_s$  (ферромагнетики) и спонтанной электрической поляризацией  $P_s$  (пироэлектрики, к числу которых относятся также сегнетоэлектрики, называемые также ферроэлектриками). Менее популярны, хотя и известны ряд лет, ферротороики — вещества, обладающие спонтанным тороидным моментом (точнее, плотностью тороидного момента)  $T_s$ . Как-то не к месту пояснять здесь, что такое тороидный момент<sup>2</sup>, тем более, что в *УФН* это недавно сделано в легко доступной статье [21]. Каких-то ярких результатов изучения ферротороиков до настоящего времени не принесло, но они изучаются [22]. Главное, с их исследованием связаны надежды обнаружить сверхдиамагнетики, упоминавшиеся в [1] после комментариев к проблеме 2 (ВТСП и КТСП).

Внимание к фуллеренам и нанотрубкам (проблема 9), особенно к последним, все возрастает и возрастает. Соответствующие новости мы стараемся освещать в журнале, приводить же здесь последние ссылки на литературу вряд ли целесообразно. В статье [1] как-то "в загоне" оказались успехи лазерной физики и, вообще, оптики. Не место здесь восполнять этот пробел в целом и поэтому ограничусь упоминанием о переходе к исследованию аттосекундных импульсов ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ с}$ ) [23] и о создании атомного "наноскопа" [24], позволяющего изучать с помощью света отдельные атомы. Ограничусь также лишь ссылками на новые достижения в области изучения сравнительно долгоживущего ядра с  $Z = 114$  [25], кварк-глюонной плазмы [26] и, вообще, "экзотики в мире элементарных частиц" (такова часть заголовка статьи [27]).

4. О каких-либо новых фундаментальных достижениях в области физики элементарных частиц, если не говорить о нейтринно (см. ниже), за последние годы не сообщалось. Это, очевидно, связано с тем, что "сливки" с результатов, полученных на существующих ускорителях, уже сняты, а Большой адронный ускоритель (Large Hadron Collider — LHC), как надеются, вступит в строй лишь в 2006 или 2007 году (на этом ускорителе будет достигнута полная энергия в 14 ТэВ в системе центра масс для нуклонов). Впрочем, и еще раньше возможно получение новых результатов на реконструируемых "старых" ускорителях (например, в Фермилабе).

В "списке" под номером 17 фигурирует в числе прочих фундаментальная длина. В статье [1] я почти что извиняюсь, что оставил в "списке" эту проблему, особенно

<sup>1</sup> Кстати, именно слово *race* (гонки, скачки) употребляется, например, в [17] для характеристики соревнования в получении БЭК в газах.

<sup>2</sup> Поясно все же, что именно тороидным дипольным моментом (и только им) обладает тороидальный соленоид с током, но не обладающий дипольными электрическим и магнитным моментами. В таком соленоиде магнитное поле, направленное по азимуту, полностью сосредоточено внутри соленоида.

актуальную много лет назад, когда еще не была решена проблема перенормировок в квантовой электродинамике. В последние же десятилетия чаще всего считалось, что существует лишь фундаментальная длина

$$l_g = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1,6 \times 10^{-33} \text{ см}, \quad (1)$$

фигурирующая в космологии и физике высоких энергий (здесь  $G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ см } \Gamma^{-1} \text{ с}^{-2}$  — гравитационная постоянная,  $\hbar = 1,055 \times 10^{-27} \text{ эрг } \text{ с}$  — квантовая постоянная и  $c = 3 \times 10^{10} \text{ см } \text{ с}^{-1}$  — скорость света; энергия

$$E_g = \frac{\hbar c}{l_g} \sim 10^{19} \text{ ГэВ}, \quad m_g = \frac{E_g}{c^2} \sim 10^{-5} \text{ г}.$$

Существование же какой-то еще фундаментальной длины  $l_f > l_g$  считалось маловероятным, можно сказать, ненужным (длина  $l_f < l_{f_0} \sim 10^{-17} \text{ см}$ , где  $l_{f_0}$  — характерная длина, для которой пространство "прошупано" на ускорителях, ибо  $E_{l_{f_0}} = (\hbar c/l_{f_0}) \sim 1 \text{ ТэВ}$ ). Но вот в последнее время, уже после появления статьи [1], проблема фундаментальной длины  $l_f > l_g$  снова вышла из тени и стала актуальной. Дело в том, что уже давно обсуждается возможность того, что помимо обычных для нас трех пространственных измерений  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени  $t$  в реальном мире существуют и как-то "работают" и другие измерения (см. ниже). Однако до недавнего времени обычно предполагалось, что 5-е и все другие пространственные измерения, как говорят, компактифицируются с характерным размером порядка  $l_g$  (грубо говоря, это значит, что они скручиваются в "трубки" с радиусом порядка  $l_g$ ). Сейчас же стала все шире обсуждаться возможность того, что одно (а в принципе, быть может, и не одно) из "дополнительных" измерений компактифицируется не с радиусом  $l_g$ , а с другим, возможно, и значительно большим радиусом  $l_c$ . Как ясно из сказанного в тексте, этот радиус только и будет в известном смысле играть роль фундаментальной длины  $l_f$  (т.е.  $l_c = l_f$ ). Мне пришлось видеть статьи, в которых лишь одно дополнительное измерение, по предположению, имеет "радиус"  $l_c \gg l_g$ , причем это сказывается на поведении гравитационного поля. Так, наличие длины  $l_c$  может привести к изменению зависимости силы гравитационного притяжения от расстояния между взаимодействующими телами (частицами и т.д.). Речь идет, конкретно, о том, что ньютоновский закон для гравитационной потенциальной энергии  $\varphi \propto 1/r$  при малых  $r$  станет более крутым (сейчас известно лишь, что закон  $\varphi \propto 1/r$  справедлив при  $r \gtrsim 0,01 \text{ см}$ ). Я убежден, что соответствующее направление исследований будет в центре внимания в обозримом будущем [28, 29, 69].

5. Перейду к тому, что в [1] было довольно условно отнесено к астрофизике (проблемы 21–30 в "списке"). Здесь за три года достигнуты наиболее впечатляющие результаты. Правда, еще несколько раньше (в 1997 г.) было сделано крупное открытие — установлена космологическая природа мощных гамма-всплесков. Это обстоятельство нашло отражение в [1], и здесь ограничусь упоминанием о гамма-всплеске GRB000131 с параметром красного смещения  $z = 4,5$ , что отвечает расстоянию примерно в  $11 \times 10^9$  световых лет [30]. Кроме того, нужно подчеркнуть, что излучение гамма-всплесков

скорее всего неизотропно. Более того, в последнее время это, видимо, доказано [64]. При этом анизотропия излучения, согласно [64], столь велика, что оценка энерговыделения резко снизилась по сравнению с обсуждавшейся ранее в предположении об изотропности излучения (в этом последнем случае было бы зафиксировано энерговыделение, достигающее  $W \sim 3 \times 10^{54} \text{ эрг} \sim \sim M_\odot c^2$ ). В [64] приводится для типичного энерговыделения значение  $W \sim 3 \times 10^{51} \text{ эрг}$ . Это немногим больше характерного энерговыделения при вспышках сверхновых. Однако источники космологических гамма-всплесков, называемые иногда гиперновыми, вряд ли связаны со сверхновыми. Более вероятно, например, коллапс пары нейтронных звезд, хотя вопрос еще неясен.

До 1999 г., а конкретно в 1998 г., было сделано и второе крупнейшее открытие за многие годы — обнаружены нейтринные осцилляции, и тем самым установлено, что, по крайней мере, нейтрино одного аромата (сорта) имеет массу, отличную от нуля. Об этом в [1] упомянуто, но все же нуждалось в подтверждении. Сейчас в существовании нейтринных осцилляций нет уже никаких сомнений, и выяснилось, что именно эти осцилляции ответственны за, можно сказать, загадку в области нейтринного излучения Солнца. Должен заметить, что как раз необходимость освещения вопроса о нейтринном излучении Солнца, наряду с установлением ускоряющегося расширения Вселенной и ролью "темной энергии" в космологии (об этом ниже), побудило меня написать данную статью. Без упоминания двух этих крупнейших открытий, что в [1], естественно, сделано быть не могло, картина современного положения в физике и астрономии была бы совершенно недописанной.

Как сообщалось в [1], измеряемый поток нейтрино от Солнца оказался в два-три раза меньше вычисленного, согласно так называемой Стандартной модели Солнца (в этой модели делаются определенные предположения о строении и температуре в центральной части Солнца). Попытки как-то устранить противоречие за счет изменений модели Солнца (варьирования различных параметров модели), казавшиеся особенно привлекательными теоретикам (мне, во всяком случае), с уточнением расчетов выглядели все менее правдоподобными. Поэтому на передний план вышла гипотеза о роли нейтринных осцилляций и, конкретно, о превращении части  $\nu_e$ -нейтрино на пути от центра Солнца до Земли в  $\nu_\mu$ - и (или)  $\nu_\tau$ -нейтрино.

И вот эта гипотеза в 2001 г. блестяще подтвердилась [31–34].

На подземной установке SNO (Sudbury Neutrino Observatory), содержащей 1000 тонн ультрачистой тяжелой воды ( $D_2O$ ), был измерен поток электронных нейтрино с энергией, большей 6,75 МэВ, и он оказался равным  $(1,75 \pm 0,14) \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [31]. Такой поток равен лишь 35 % потока, вычисленного по стандартной модели (см. выше). Однако комбинация этих данных с результатами, полученными на установке Супер-Камиоканде, регистрирующей нейтрино всех трех типов  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ , позволила определить полный поток нейтрино всех этих трех типов или, как говорят, ароматов (flavours), испускаемых Солнцем или, точнее, наблюдаемых на Земле, но приходящих от Солнца. Этот поток оказался равным  $(5,44 \pm 1) \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [31]. Это значение прекрасно совпадает с вычисленным потоком в  $5 \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , и таким образом подтверждает как справедливость Стан-

дартной модели Солнца, так и, главное, существование нейтринных осцилляций [31–34]. Имеющиеся данные ограничивают, по-видимому, массу всех нейтрино значением (2–3) эВ; это верхний предел, возможно, массы значительно меньше. Возможный вклад нейтрино в массу темной материи, видимо, невелик (речь идет максимум о процентах), но точных результатов еще нет. Предстоит еще немало сделать, но главная задача или, правильнее сказать, загадка в отношении нейтринного излучения Солнца, решена.

Прошло немногим более 70-ти лет после того как В. Паули в 1930 г., с несвойственной ему робостью, в письме, адресованном некоему физическому конгрессу, высказал мысль о существовании нейтрино (см., например, [35]). Сегодня же мы имеем целую область физики и астрономии, посвященную нейтрино.

6. Перейду ко второму крупнейшему достижению последних нескольких лет, не отраженному в [1]. Речь идет, как уже упоминалось, о космологии, строении и эволюции Вселенной. Еще в 1981 г. был сделан существенный шаг вперед в направлении обобщения, можно теперь уже сказать, классической релятивистской фридмановской космологии. Именно, была предложена инфляционная модель, в которой Вселенная вблизи "сингулярности", присутствующей в ряде космологических (в том числе фридмановских) моделей, базирующихся на ОТО, очень быстро "раздувается". После такой инфляции (inflation) обычно считается, что Вселенная развивается по фридмановской модели. Должен с сожалением констатировать, что количественные представления об инфляции и всю инфляционную модель я как следует не понимаю, тем более что она подвергается критике [36, 37]. Поэтому, естественно, писать об этом здесь не могу. Надеюсь, что эта важная проблема будет в УФН освещена (сейчас же сошлюсь в этой связи лишь на статьи [37–39]). В самом существовании инфляционной стадии, по-видимому, трудно сомневаться, но для нас сейчас (в рамках настоящей статьи) особенно важно, что самое новое в космологии связано, в основном, с постинфляционной стадией. В какой-то мере это было отражено уже в [1], а именно там указывалась возможная роль  $\Lambda$ -члена и "вакуумной материи". Теперь эта "вакуумная материя" чаще называется "темной энергией" (dark energy) или квинтэссенцией (quintessence).

В случае  $\Lambda$ -члена, как достаточно подробно пояснено в [1], речь идет о том, что во Вселенной везде и всюду присутствует "темная энергия" — "вакуумная материя", плотность энергии которой  $\varepsilon_v$  равна (формула (8) в [1])

$$\varepsilon_v = -p_v = \frac{c^4 \Lambda}{8\pi G}, \quad (2)$$

где  $p_v$  — давление и  $\Lambda$  — постоянная, фигурирующая в основном уравнении Эйнштейна в ОТО (это формула (7) в [1]).

В случае положительности  $\Lambda$ , а следовательно, и плотности  $\varepsilon_v$ , давление  $p_v$  — отрицательное, и это как раз отвечает гравитационному отталкиванию (антигравитации). Последний момент в [1] не был пояснен, и это необходимо сейчас сделать.

Дело в том, что в ОТО "действующая гравитационная масса" единицы объема равна  $(\varepsilon + 3p)/c^2$  (см., например, [40]). Отсюда ясно, что давление, можно сказать, имеет вес. Следовательно, для уравнения состояния (2) при  $\varepsilon_v > 0$  (это значит, что  $\Lambda > 0$ ) плот-

ность "гравитационной массы" есть  $-2\varepsilon_v/c^2$ , т.е. отрицательна ("антигравитация"). Другими словами, при отрицательном давлении  $p$  оно "работает" против обычного гравитационного притяжения (формально, в ОТО никаких "гравитационных масс" и "сил" нет, поэтому, пользуясь классическим языком, я и ставлю в соответствующих местах кавычки).

Фридмановская изотропная и однородная космологическая модель характеризуется в первую очередь плотностью всей материи  $\rho = \varepsilon/c^2$ . При этом для пространственно плоской модели Эйнштейна – де Ситтера (в этой модели пространственная метрика евклидова), которая считается сегодня отвечающей действительности (это утверждение тоже крупное завоевание последнего времени; см. [38, 39, 46, 47])

$$\rho = \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}, \quad (3)$$

где  $H$  — постоянная Хаббла, связывающая скорость  $v$  космологического расширения с расстоянием  $r$  до соответствующего объекта, в законе Хаббла  $v = Hr$ . В нашу эпоху в [1] для  $H = H_0$  было указано значение  $H_0 = 64 \pm 13 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . В [41] приводится значение  $H_0 = 71 \pm 8 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . При  $H_0 = 64 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1} = 2,07 \times 10^{-18} \text{ с}^{-1}$  критическая плотность  $\rho_c$  сейчас равна

$$\rho_{c_0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \simeq 8 \times 10^{-30} \text{ г см}^{-3}. \quad (4)$$

Вместо  $\rho$  значительно чаще используется величина  $\Omega = \rho/\rho_c$ . В плоской модели, очевидно,  $\Omega = \Omega_c = 1$ . В значение  $\Omega$  свои вклады вносят барионы (b), темная материя (d, dark matter) и, наконец, темная энергия (обозначим ее индексом  $\Lambda$ , хотя правильнее было бы использовать индекс  $v$ , см. ниже). Таким образом,

$$\Omega = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda. \quad (5)$$

Вкладами электронов и фотонов здесь пренебрегается, что для наших целей вполне законно (см. [39]). В рамках ОТО без ее каких-либо обобщений, насколько я понимаю,  $\Lambda$ -член (точнее, сама величина  $\Lambda$ ) является постоянной величиной. Эта величина (в предположении о ее постоянстве и при использовании данных для нашей эпохи) очень мала, скажем,  $\Lambda_0 \sim 10^{-56} \text{ см}^{-2}$  (это значение отвечает оценке  $\Omega_\Lambda \sim 1$  для величины  $\Omega_\Lambda$ ). Вопрос о  $\Lambda$ -члене и родственных вопросах широко обсуждался и обсуждается [42–49]. Некоторые теоретические оценки величины  $\Lambda$  приводили к огромным значениям, а фактически этот член в нашу эпоху несравненно меньше. Поэтому делались многочисленные попытки доказать или как-то обосновать, что в действительности  $\Lambda = 0$  [42]. Оказалось же, что на основе наблюдений можно сделать вывод, что  $\Lambda \neq 0$  и, более того, значение  $\Lambda$  (или, точнее,  $\Omega_\Lambda$ ) столь велико по сравнению с другими вкладками в  $\Omega$ , что в нашу эпоху происходит не замедление, а увеличение скорости расширения Вселенной [39, 43, 44, 47, 48, 50]. В этом и состоит последнее крупное открытие в космологии.

В [1] уже приводились значения  $\Omega_b$ ,  $\Omega_d$  и  $\Omega_\Lambda$  при  $\Omega \simeq 1$ , а именно  $\Omega_b = 0,03 \pm 0,015$ ,  $\Omega_d = 0,3 \pm 0,1$  и  $\Omega_\Lambda = 0,7 \pm 1$  (если  $\Omega = 1$ ). Сейчас знаю о таких уточнениях:  $\Omega = 1$ ,  $\Omega_b = 0,044 \pm 0,01$  (см. [31]; в этой статье указывается также на хорошее согласие с теорией наблюдательных данных о химическом составе вещества во Вселенной). Однако в [1] не указывалось, что приведенное большое

значение  $\Omega_\Lambda$  свидетельствует об ускорении расширения Вселенной в нашу эпоху.

Здесь нужно подчеркнуть, что существенная роль "темной энергии", по-видимому, не вызывает никаких сомнений. Однако использование в применении к ней уравнения состояния (2) находится под вопросом. Возможно и, вообще говоря, приводит к близким результатам и уравнение состояния

$$\varepsilon_v = \frac{1}{w} p_v, \quad w < 0. \quad (6)$$

Очевидно,  $\Lambda$ -члену отвечает значение  $w = -1$ . Такая "темная энергия" называется также квинтэссенцией [43, 44]. В работе [44] квинтэссенция связывается с существованием некоторого скалярного поля  $\Phi$ . Если одновременно присутствуют и  $\Lambda$ -член, и квинтэссенция, то, видимо, их вклад в  $\Omega_\Lambda$  (см. (5)) просто суммируется. В этой связи, как уже упоминалось, правильнее было бы ввести обозначение  $\Omega_v$ , имея в виду вклад в  $\Omega$  всей "вакуумной материи" (темной энергии), независимо от ее конкретизации. В принципе, значение  $w$  в (6) можно определить из наблюдений [51]. В общем, вся эта проблема находится, конечно, в ранней стадии исследований, но, несомненно, мы имеем здесь дело с одной из самых "горячих" точек современной космологии.

Астрономия, которая сегодня неотделима от так называемых космических исследований, развивается в настоящее время очень бурно. Естественно, ее успехи только за последние годы и, конкретно, после отмеченных в [1], не ограничиваются вышеизложенным. Это относится, в частности, к гамма-астрономии [30, 52, 53] и изучению космических лучей со сверхвысокой энергией. Конкретно, интересно обнаружение жесткого гамма-излучения от остатка сверхновой Cas A [53]. Вообще продолжается детектирование рентгеновских и гамма-фотонов от остатков различных сверхновых. При этом источником таких фотонов являются, по-видимому, релятивистские электроны, ускоряющиеся в результате вспышек.

На Большом адронном коллайдере (ЛHC), который должен вступить в строй в ЦЕРН'е, вероятно, в 2006 г. или 2007 г., энергия протонов в каждом из двух встречных пучков составит 7 ТэВ. Это наибольшая энергия, которая будет достигнута на ускорителях в обозримом будущем (разумеется, полная энергия в системе центра масс составляет 14 ТэВ). Протон же с энергией в  $3 \times 10^{20} \text{ эВ} = 3 \times 10^8 \text{ ТэВ}$  (такова наивысшая энергия, наблюдавшаяся в космических лучах), сталкивающийся с покоящимся нуклоном, в системе центра масс имеет энергию около 400 ТэВ. Таким образом, космические лучи, даже несмотря на их очень небольшую интенсивность при сверхвысоких энергиях, еще длительное время будут, по-видимому, представлять известный интерес для физики высоких энергий (о космических лучах сверхвысоких энергий см. обзоры [54, 55]).

Заканчивая перечисления достижений в области астрофизики, включая сюда и космологию, мне представляется неправильным проигнорировать существование некоторых неортодоксальных взглядов. Разумеется, как хорошо известно, в науке всегда шла и идет борьба идей и мнений. При этом нередко оспариваются общепринятые взгляды и теории, в том числе даже еще сегодня теория относительности и квантовая механика. В отношении этих двух великих теорий все известные мне

критические замечания представляются несерьезными. Упомянутые неортодоксальные взгляды в астрофизике принадлежат Ф. Хойлю и Г. Бербиджу, которых никак нельзя считать неинформированными дилетантами (достаточно сказать, что Г. Бербидж является редактором очень авторитетного издания "Annual Review of Astronomy and Astrophysics"). Так вот, эти авторы отрицают космологию "большого взрыва" [67] и утверждают, что существует значительное некосмологическое красное смещение в спектрах галактик [67, 68]. В отношении "большого взрыва" я как-то не могу усмотреть веских оснований для соответствующей критики, но в вопросе о красном смещении все ссылки в [68] делаются на наблюдательные данные. Судить об этих данных не могу, как и об обоснованности их отрицания или, точнее, возможности не считать убедительными. Хотелось бы, чтобы в этом вопросе была достигнута полная ясность.

7. В [1] были затронуты также три "великие" проблемы: вопрос о возрастании энтропии и "стреле времени", интерпретация и возможное совершенствование нерелятивистской квантовой механики и проблема редукционизма — возможности сведения, условно выражаясь, биологии к физике. Ни о чем новом ни в одном из этих направлений сообщить не могу. Вместе с тем, судя по литературе, интерес к интерпретации квантовой механики не иссякает. У нас же в СССР и России долгие годы свободное обсуждение этой проблемы находилось фактически под запретом, а после отмены цензуры также почти не происходило, быть может, просто по инерции. Между тем ценность дискуссий по методологическим вопросам естествознания бесспорна (по всяком случае, по моему мнению). С целью как-то активизировать соответствующую деятельность в УФН была, в частности, помещена большая статья М.Б. Менского "Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов" [56]. Затем были опубликованы [57] шесть откликов на эту статью, причем их авторы имели, разумеется, возможность излагать любые взгляды. Той же цели свободного обмена мнениями по вопросу о понимании квантовой теории послужит и сборник [58] докладов по конференции, посвященной столетнему юбилею квантовой теории. К сожалению, я из этих обсуждений мало что извлек.

Как можно думать, то обстоятельство, что задача и цель настоящей статьи весьма ограничены, было в достаточной мере подчеркнуто с самого начала. Хотелось лишь как-то дополнить и, если угодно, "осовременить" статью [1]. При этом упор делался на сообщение о новых реальных успехах и результатах. Между тем, в самой физике и в посвященной ей литературе огромное место занимают изучение и обсуждение самых различных методических и технических вопросов и, главное, новых подходов к решению многих неясных проблем. А таких проблем, причем весьма глубоких, немало, особенно в области физики элементарных частиц и космологии, хотя, впрочем, и в физике конденсированного состояния, да и в некоторых других направлениях. Но одно дело — надежды или, как любил говорить Ландау, "физнадежды", а совсем другое дело — результаты и реальные достижения. "Физнадежды", их обсуждения, часто ничуть не менее, а в каком-то смысле даже более интересны, чем уже достигнутое. Но, очевидно, в настоящей статье о "физнадеждах" сказано было сравнительно мало, и в этом отношении дополнительно лишь сошлось

на статьи [59–63]. Надеюсь, тем не менее, что настоящая статья будет полезна и в какой-то мере выполнит поставленную перед ней задачу.

Очевидно, вместе с тем, что читатели должны получить еще немало дополнительной информации по всем затронутым выше вопросам. Мы стараемся в *УФН* действовать в соответствующем направлении. Но не следует забывать, что возможности *УФН* ограничены, и этот журнал не может наряду со своими основными функциями полностью заменить журналы типа *Physics Today* и *Physics World*. Поэтому, по моему убеждению, в России срочно нужно начать публиковать журнал "Физика и астрономия сегодня", аналогичный упомянутым англоязычным ежемесячникам (подробнее об этом см. мою газетную статью [65]).

В заключении пользуюсь возможностью поблагодарить В.А. Рубакова за ценные замечания, сделанные при чтении рукописи.

### Список литературы

1. Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999)
2. Ginzburg V L *The Physics of a Lifetime. Reflections on the Problems and Personalities of 20th Century Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 2001)
3. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* 3-е изд. (М.: Бюро "Квантум", 1995)
4. Гинзбург В Л *О науке, о себе и о других* 2-е изд. (М.: Физматлит, 2001)
5. Ginzburg V L *About Science, Myself, and Others* (to be published)
6. Шафранов В Д *УФН* **171** 877 (2001); Бондаренко Б Д *УФН* **171** 886 (2001); Гончаров Г А *УФН* **171** 894–908 (2001)
7. Гинзбург В Л *УФН* **170** 619 (2000)<sup>3</sup>
8. Садовский М В *УФН* **171** 539 (2001); Loktev V M, Quick R M, Sharapov S G *Phys. Rep.* **1** 348 (2001)
9. Schön J H, Kloc Ch, Batlogg B *Nature* **408** 549 (2000); Schön J H et al. **414** 434 (2001); *Science* **293** 1570 (2001)
10. Максимов Е Г *УФН* **170** 1033 (2000)
11. Копаев Ю В *УФН* **172** (2002) (в печати)
12. Schofield A J *Contemp. Phys.* **40** 95 (1999)
13. Hill R W et al. *Nature* **414** 711 (2001)
14. Weiss D *Phys. World* **13** (2) 23 (2000)
15. Salis G et al. *Nature* **414** 619 (2001); Smet J H et al. *Nature* **415** 281 (2002); см. также Kikkawa J *Nature* **415** 273 (2002)
16. Si Q et al. *Nature* **413** 804 (2001)
17. Goss Levi V *Phys. Today* **54** (12) 14 (2001)
18. Rodgers P *Phys. World* **13** (10) 10 (2000)
19. Kleppner D *Phys. Today* **49** (8) 11 (1996)
20. Чу С *УФН* **169** 274 (1999); Коэн-Тануджи К Н *УФН* **169** 292 (1999); Филипс У Д *УФН* **169** 305 (1999)
21. Гинзбург В Л *УФН* **171** 1091 (2001)
22. Санников Д Г *Письма в ЖЭТФ* **73** 447 (2001)
23. Hentschel M et al. *Nature* **414** 509 (2001); см. также Silberberg Y *Nature* **414** 494 (2001); Hentschel M *Phys. World* **15** (1) 25 (2002)
24. Guthöhrlein G R et al. *Nature* **414** 49 (2001); см. также Steane A *Nature* **414** 24 (2001)
25. Oganessian Yu *Nature* **413** 122 (2001); Оганесян Ю Ц *Вестник РАН* **71** 590 (2001)
26. Hands S *Contemp. Phys.* **42** 209 (2001)
27. Мухин К Н, Тихонов В Н *УФН* **171** 1201 (2001)
28. Abel S, March-Russell J *Phys. World* **13** (11) 39 (2000)
29. Рубаков В А *УФН* **171** 913 (2001)
30. *Phys. World* **13** (11) 3 (2000)
31. Turner M S *Phys. Today* **54** (12) 10 (2001)
32. Pennicott K *Phys. World* **14** (7) 5 (2001)
33. Schwarzschild B *Phys. Today* **54** (8) 13 (2001)
34. Ahmad I et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 072503 (2001)
35. Райнес Ф *УФН* **166** 1352 (1996)
36. Дымникова И Г *ЖЭТФ* **90** 1900 (1986)
37. Глинер Э Б *УФН* **172** 221 (2002)
38. Silk J *Phys. World* **13** (6) 23 (2000); см. также De Bernardis P et al. *Nature* **404** 955 (2000)
39. Чернин А Д *УФН* **171** 1153 (2001)
40. Пиблс П *Физическая космология* (М.: Мир, 1975). Более позднее английское издание: Peebles P J E *Principles of Physical Cosmology* (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1993)
41. Hogan C J *Nature* **408** 47 (2000)
42. Вейнберг С *УФН* **158** 639 (1989); Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
43. Caldwell R, Steinhardt P *Phys. World* **13** (11) 31 (2000)
44. Armendariz-Picon C, Mukhanov V, Steinhardt P J *Phys. Rev. Lett.* **85** 4438 (2000)
45. Harvey A, Schucking E *Am. J. Phys.* **68** 723 (2000)
46. Taylor A, Peacock *Phys. World* **14** (3) 37 (2001); см. также Schwarzschild B *Phys. Today* **54** (6) 17 (2001)
47. Новиков И Д *Вестник РАН* **71** 886 (2001)
48. Polarski D *J. Low Temp. Phys.* **124** 17 (2001)
49. Volovik G E *J. Low Temp. Phys.* **124** 25 (2001)
50. *Gen. Relat. Gravit.* **32** (6) (2000)
51. Sarbu N, Rusin D, Ma C P *Astrophys. J. Lett.* **561** L147 (2001)
52. Hoffman C M et al. *Rev. Mod. Phys.* **71** 897 (1999)
53. Aharonian F et al. *Astron. Astrophys.* **370** 112 (2001)
54. Nagano M, Watson A A *Rev. Mod. Phys.* **72** 689 (2000)
55. Cronin J W *Rev. Mod. Phys.* **71** S165 (1999)
56. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
57. *УФН* **171** 437–462 (2001)
58. *100 лет квантовой теории (история, физика, философия)* Труды международной конференции (М.: НИИ-Природа, 2002)
59. Rivers D J *J. Low Temp. Phys.* **124** 41 (2001)
60. Smolin L *Phys. World* **14** (11) 12 (2001)
61. Wilczek F *Phys. Today* **54** (6) 12 (2001); Appelquist T, Shapiro D *Phys. Today* **54** (11) 12 (2001)
62. Rodgers P *Phys. World* **14** (12) 5 (2001)
63. Воронов Б Л *УФН* **171** 869 (2001)
64. Frail D A et al. *Astrophys. J. Lett.* **562** L55 (2001); см. также Hattori M, Taylor T D *Nature* **414** 854 (2001)
65. Гинзбург В Л "О Земле и звездах. Необходим журнал *Физика и астрономия сегодня*" Газета *Известия* (3) 11 января (2002) Раздел *Наука* (1) стр. 1
66. Greiner M et al. *Nature* **415** 39 (2002); см. также Stoof H T C *Nature* **415** 25 (2002)
67. Hoyle F, Burbidge G, Narlikar J V *A Different Approach to Cosmology* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000)
68. Burbidge G *Proc. Astron. Soc. Pacific* **113** 899 (2001)
69. Dienes K R *Phys. Rev. Lett.* **88** 011601 (2002)

<sup>3</sup> Эта статья под номером 6 помещена также в [4, 5].

### On some advances in physics and astronomy over the past three years

V.L. Ginzburg

P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences,  
Leninskiĭ prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-095) 135-85 70. Fax (7-095) 135-85 33. E-mail: ginzburg@lpi.ru

In 1999 the author published a paper "What problems of physics and astrophysics seem now to be especially important and interesting (thirty years later, already on the verge of XXI century?)" [1]. By its very nature and intention, the content of this paper should be modified on a continuous basis to keep up with advances in science. In the last three years important results of a fundamental nature have been obtained which the author finds appropriate to summarize briefly in this article — not least because of the great readers' interest generated by Ref. [1].

PACS numbers: **01.55. + b**, **01.90. + g**  
Bibliography — 69 references

Received 16 January 2002