

8. Penrose R *Shadows of the Mind* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1994)
9. DeWitt B S *Phys. Today* **23** (9) 30 (1970); **24** (4) 36 (1971)
10. Барвинский А О, Каменщик А Ю, Пономарев В Н *Фундаментальные проблемы интерпретации квантовой механики. Современный подход* (М.: МГПИ, 1988)
11. Фок В А "Критика взглядов Бора на квантовую механику", в сб. *Философские вопросы современной физики* (Под ред. И В Кузнецова, М Э Омеляновского) (М.: Госполитиздат, 1958) с. 61
12. Гейзенберг В *Физика и философия. Часть и целое* (М.: Наука, 1989) [Heisenberg W *Physik und Philosophie* (Frankfurt am Main: Ullstein Taschenbücher-Verlag, 1959); Heisenberg W *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik* (München: R. Piper, 1969)]
13. Margenau H *Philos. Sci.* **30** (1) 138 (1963)
14. Compton A H, Simon A W *Phys. Rev.* **26** 289 (1925)
15. Шифф Л И *Квантовая механика* 2-е изд. (М.: ИИЛ, 1959) [Schiff L I *Quantum Mechanics* 2nd ed. (New York: McGraw-Hill Book Co., 1955)]
16. Садбери А *Квантовая механика и физика элементарных частиц* (М.: Мир 1989) [Sudbery A *Quantum Mechanics and the Particles of Nature* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1986)]
17. Margenau H *Ann. Phys.* (New York) **23** 469 (1963)
18. Home D, Whittaker M A B *Phys. Lett. A* **128** 1 (1988)
19. Ballentine L E *Int. J. Theor. Phys.* **27** 211 (1988)
20. Pascazio S, Namiki M, in *Fundamental Problems in Quantum Theory* (Ann. New York Acad. Sci., Vol. 755, Eds D M Greenberger, A Zeilinger) (New York: The New York Acad. Sci., 1995) p. 335; Namiki M, Pascazio S *Phys. Rev. A* **44** 39 (1991)
21. Sini M, Levy-Leblond J (Eds) *Quantum Mechanics without Reduction* (Bristol: Hilger, 1990)
22. Hirota O, Holevo A S, Caves C M (Eds) *Quantum Communication, Computing, and Measurement* (New York: Plenum Press, 1997)
23. Воронцов Ю И *Теория и методы макроскопических измерений* (М.: Наука, 1989)
24. Wigner E P *Am. J. Phys.* **31** 6 (1963)
25. Braginsky V B, Khalili F Ya *Quantum Measurement* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992)
26. Boschi D et al. *Phys. Rev. Lett.* **80** 1121 (1998)
27. Bennett C H et al. *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895 (1993)
28. Weinfurter H *Europhys. Lett.* **25** 559 (1994)
29. Davidovich L et al. *Phys. Rev. A* **50** R895 (1994)
30. Cirac J I, Parkins A S *Phys. Rev. A* **50** R4441 (1994)
31. Braunstein S L, Mann A *Phys. Rev. A* **51** R1727 (1995); **53** 630 (1996)
32. Braunstein S L, Kimble H J *Phys. Rev. Lett.* **80** 869 (1998)
33. Bouwmeester D et al. *Nature* **390** 575 (1997)
34. Клышко Д Н *ЖЭТФ* **144** 1171 (1998)
35. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998)

## Физическая интерпретация квантовой механики

Р.С. Нахмансон

Этот текст написан в связи с появлением статьи М.Б. Менского [1] и пожеланием Редколлегии *УФН* продолжить на страницах журнала свободное обсуждение фундаментальных физико-философских проблем квантовой механики в разделе "Письма в редакцию". Эти начальные и граничные условия предопределяют дискуссионную и конспективную форму изложения: в первой части я критически рассматриваю некоторые положения статьи Менского, а во второй кратко излагаю основы альтернатив-

ной интерпретации квантовой механики (КМ), отсылая за подробностями к оригинальным статьям.

### 1. Статья М.Б. Менского

В разделе 2.1 своей статьи Менский соглашается с распространенным мнением о том, что эксперимент, проведенный группой Аспекта [2] по проверке неравенства Белла [3], окончательно закрывает путь локально-реалистическим моделям. Это, однако, не так, и сам Аспект это знал. Новым в [2] по сравнению с экспериментами, проведенными в предыдущие 10 лет, было быстрое переключение условий детектирования фотонов, что исключало возможность релятивистской информационной связи между частицами ЭПР-пары. Так родилась легенда о нелокальности КМ, о "мгновенной" корреляции поведения ЭПР-пары, даже если частицы разнесены на сотни световых лет. Как справедливо отмечалось, в том числе в [1], это противоречит нашей "интуиции", "здоровому смыслу", "common sense", воспитанных на повседневном окружении, но тут уж, как говорится, что поделать.

Однако посмотрим, что пишет Аспект в конце своей статьи [2]: "Переключение света осуществлялось за счет акусто-оптического взаимодействия света с 25-мегагерцевой ультразвуковой стоячей волной, что обеспечивает 50-мегагерцевое переключение, т.е. изменение ориентации каждые 10 наносекунд. Это время мало по сравнению с  $L/c$  (40 нс), но, к сожалению, с этими устройствами было невозможно получить случайное переключение. В этом отношении эксперимент был далек от задуманного".

Другой "experimentum crucis" — так называемый "задержанный выбор" ("delayed choice") — был выполнен группой Аллея [4]. Особенность состояла в том, что эта группа использовала случайное переключение ячейки Керра в одном из плеч интерферометра Маха–Цендера.

В чем тут дело, почему Аспект и Аллей стремились к случайности? Сами они об этом не распространялись. В 1993 г. на конференции в Олимпии я сказал Аллею: "Особенностью случайного ряда является непредсказуемость его членов. Значит ли это, что Вы подозревали способность частиц предсказывать ситуацию и хотели им помешать?" — "Пожалуй, Вы правы", — ответил он.

В явном виде идея предсказания, насколько мне известно, была впервые высказана в 1992 г. [5]. В недавней работе группы Цайлингера [6] такая возможность также подразумевается. Эта идея ведет к сознанию и его связи с материей, чему посвящена вторая половина статьи Менского. Есть, правда, существенная разница: в [5] и, в неявной форме, в [2, 4, 6] предполагается, что сама материя наделена сознанием, тогда как Менский, вслед за фон Нейманом и Вигнером, рассматривает только человеческое сознание.

К этому вопросу мы вернемся позже, а пока заметим, что если материя наделена способностью предсказывать, то теорема Белла теряет силу, локально-реалистические модели микромира возможны, а нелокальность изгоняется. Все это, включая сознание материи, может быть принято нашей интуицией и здравым смыслом. Если бы наш далекий предок-язычник, одушевлявший природу, или сегодняшний маленький ребенок могли бы использовать современную экспериментальную аппаратуру, поведение элементарных частиц не вызвало бы у них удивления.

В разделе 3 Менский рассматривает проблему суперпозиции волновых функций и ее трансформацию при переходе к макроскопическим системам ("шрёдингеровский кот"). Типичная ошибка, которую он, к сожалению, тоже делает, состоит в слишком далеко заходящем отождествлении математического конструкта — волновой функции — и материального объекта, будь то элементарная

Р.С. Нахмансон (R. Nakhmanson). Frankfurt am Main, Germany  
E-mail: Nakhmanson@t-online.de

Статья поступила 14 августа 2000 г.,  
после доработки 25 октября 2000 г.

частица или кот. Говоря о пространстве состояний, он забывает, что это пространство волновых функций, а не реальное пространство, и что суперпозиция функций не означает суперпозицию объектов. Цитирую начало раздела 3:

"Всем известно, что пространство состояний квантовомеханической системы линейно. Это значит, что наряду с любыми двумя ее состояниями  $|\psi_1\rangle$ ,  $|\psi_2\rangle$  возможным состоянием является также и их линейная комбинация (суперпозиция)  $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$  с любыми (комплексными) коэффициентами  $c_1$ ,  $c_2$ . Например, если точечная частица может находиться в одной из двух точек, то она может находиться и "одновременно в обеих точках". В классической механике ничего подобного нет... Более наглядно: камень может находиться либо в одной точке, либо в другой, но не в обеих".

Последнее наблюдение Менского, конечно, верно, но в отношении элементарной частицы он неправ: до сих пор никто не наблюдал одну и ту же частицу одновременно в двух точках и вряд ли это удастся кому-либо в будущем. Да, в микромире есть интерференция амплитуд, и распределение вероятностей в плоскости регистрации двухщелевого эксперимента не равно сумме однощелевых вероятностей. Да, картина выглядит так, как будто из волны, порожденной источником частиц, экран вырезает две когерентные волны, которые, интерферируя, дают осциллирующее распределение в плоскости регистрации. Но это все относится к волновой функции, а не к самой частице, да и разыгрывается не в реальном, а в конфигурационном пространстве, которое, по всей вероятности, находится в сознании самой частицы и там влияет на выбор угла рассеяния при взаимодействии частицы с краями щели. Что же касается самой частицы, то она не "раздваивается" согласно двум возможностям, а проходит только через одну щель. То же относится и к шрёдингеровскому коту. Сколько бы и каких волн, в том числе интерферирующих, не описывало состояние радиоактивного атома и кота, это относится только к вероятности распада атома и смерти кота, тогда как сам атом или распался, или еще нет, а кот, соответственно, или мертв, или еще жив, причем независимо от того, знаем ли мы состояние радиоактивного атома или нет, видим ли мы кота или нет. Тот же, кто разделяет так называемую "копенгагенскую" интерпретацию КМ и заявляет, что вопрос о том, через какую щель прошел электрон, не имеет смысла, если это не зарегистрировано, и в случае с котом не будет утруждать себя "бессмысленными" вопросами.

Особое место в статье Менского занимает раздел 4 как по объему (почти половина статьи), так и по содержанию. Речь идет о физической интерпретации столь успешно зарекомендовавшего себя математического формализма квантовой механики, проблемы столь же древней, как и сама КМ, и обсуждаемой до сих пор. Свой вклад в решение этой проблемы Менский видит в комбинации многомировой интерпретации Эверетта–Уилера и идеи фон Неймана–Вигнера о роли сознания наблюдателя.

Выбор Менского нельзя назвать удачным. Согласно многомировой интерпретации каждую секунду рождаются мириады *реальных* миров, и лишь ничтожная часть их успевает рекомбинировать со своими близнецами-братьями. Эта интерпретация неконструктивна, не поддается экспериментальной проверке, противоречит здравому смыслу. Не удивительно поэтому, что многомировая интерпретация рассматривается большинством как педагогический курьез, и сам Уилер от нее давно отказался.

Вторым компонентом интерпретации КМ у Менского является человеческое сознание, которое, по его мнению, осуществляет выбор альтернатив на квантовом уровне,

приводящий далее к макроскопическим следствиям, и теперь уже не только, например, к отклонению стрелки прибора: "*Функция сознания состоит в том, чтобы выбрать один из альтернативных эвереттовских миров*".

Предположение о решающей роли человеческого сознания в процессе измерения (фон Нейман, Вигнер, Лондон и Байер) вызывает ряд вопросов. Например, о чем сознание идет речь, когда рассматривается не спланированный эксперимент, а нечто, происходящее "само по себе", где человек является лишь посторонним наблюдателем, или его вообще нет поблизости? В конце статьи Менский пишет, что сознание есть фундаментальное физическое свойство, "... которым тем не менее обладает лишь живая материя", т.е. уже не только человек, но не договаривает, как можно было бы ожидать из контекста, имеется ли в виду также выбор альтернатив. Но достаточно ли быть живым, чтобы обладать сознанием? И где граница между живым и неживым? А что было, когда "живой" материи еще не было? Космология учит нас, что законы движения "неживой" материи были тогда практически те же, хотя на нее вроде никакая "живая" материя не смотрела.

Есть две возможности выйти из этого тупика. Первая возможность — предположить, что представления космологов иллюзорны по примеру разговора атеиста со священником:

*Атеист:* "Вот Вы говорите, что Бог сотворил Вселенную 6 тысяч лет назад, а наука доказала, что ей уже минимум 10 миллиардов лет!"

*Священник:* "Бог сотворил ее 6 тысяч лет назад такой, что она выглядит на все 15 миллиардов".

Вторая возможность — предположить, что сознанием наделена вся материя, как "живая", так и "неживая", причем именно сознание последней играет решающую роль в физических процессах. Это имеющее давнюю традицию предположение освобождает нас от человеческого солипсизма и многомирового кошмара, и позволяет естественно объяснить кажущуюся "нелокальность" и другие парадоксы квантового мира.

## 2. Информационная интерпретация КМ

Элементарные частицы сами обладают сознанием. Места в них достаточно: в типичном размере  $10^{-18}$  м поместится порядка  $10^{50}$  планковских ячеек, что много больше не только числа нейронов в мозгу человека, но и суммарного числа атомов всех известных нам биологических объектов. Поведение частиц целенаправленно, что отражено в телеологическом характере физических законов (вариационные принципы). При взаимодействиях частицы обмениваются информацией. Они должны иметь коррелированные представления о пространстве и времени, и в этом смысле можно говорить о выделенной системе (подобно Гринвичской). Единство ("holism") мира имеет информационную природу, Интернет материи существует, вероятно, со времен "Большого Взрыва". С тех пор прошло много времени, которое к тому же, если считать не на часы, а на события, в микромире течет быстрее. Можно ожидать, что цивилизация частиц прошла длинный путь эволюции. Может быть, ее лучшие времена уже позади, и сейчас она находится в состоянии застоя или упадка.

Волновая функция — это стратегия частицы. Она находится в сознании частицы и является результатом работы этого сознания над известной информацией о мире. При этом частица решает квантовомеханическую задачу. Многие правила решения люди уже угадали и изложили в статьях и книгах по КМ.

При получении новой информации частица корректирует свою стратегию, т.е. свою волновую функцию. Так

происходит так называемый коллапс волновой функции. Он происходит не в реальном пространстве, как часто принято думать, а в сознании частицы, т.е. по обыденным масштабам локально и мгновенно. Вопреки мнению фон Неймана, Вигнера и др., человеческое сознание в общем случае не имеет к коллапсу никакого отношения.

Две и более частиц могут иметь общую стратегию. В этом случае они будут "entangled" (повязаны, запутаны, скрещены), их общая волновая функция не разлагается на произведение частных функций. Будучи разделены, они, тем не менее, действуют согласованно.

Информация, имеющаяся в распоряжении частицы, — это информация о прошлом. При решении вариационной задачи частица должна уметь предвидеть, где и что ожидает ее в будущем. Предвидение — это обязательное свойство любого сознания. Сознание, обладающее предвидением, это тот немеханический скрытый параметр, которым обладают частицы и который Белл упустил из виду при выводе своей теоремы. В эксперименте группы Аспекта [2] частицы ЭПР-пары в момент разделения могли с достаточной точностью предугадать условия регистрации, поскольку они изменялись периодически. В эксперименте группы Цайлингера [6] условия регистрации задавались генератором случайных чисел, основанном на "случайной" эмиссии светодиода и последующем "случайном" взаимодействии фотонов с полупрозрачным зеркалом, т.е. "случайность" была взята из самого объекта исследования (квантового мира), что нельзя признать корректным. По-видимому, сами авторы понимают это, так как не настаивают на подтверждении нелокальности и обещают продолжить эксперименты.

Волновая функция расставляет только приоритеты альтернатив. С их учетом частица делает случайный выбор. Такая тактика позволяет "справедливо" исследовать все альтернативы.

Как можно экспериментально проверить изложенную гипотезу? Здесь опять есть две возможности. Первая — как-то помешать частицам правильно предсказывать будущее, что должно привести к результатам, отличным от стандартных. Примеры таких попыток — работы [2, 4, 6].

Вторая возможность состоит в воздействии на частицы информацией. Поясним на примерах, о чем идет речь. На рисунке 1 импульс поляризованного света от источника S

пропускается через "черный ящик", в том смысле, что наблюдатель-физик знает, что на входе, и может измерить то, что на выходе, но не знает, что внутри. В случае рис. 1а свет, вышедший из ящика, может быть отклонен направо введением на его пути зеркала M или оставлен продолжать свое распространение вперед. Такое управление лучом, подобное переводу стрелки на железной дороге, мы назовем силовым.

Если мы поставим в ящик на пути света толстую прозрачную стеклянную пластину, расположенную по отношению к лучу под углом Брюстера (уже стоит на рис. 1а), мы не внесем поглощения и отражения, однако, используя измерительную аппаратуру, физик может заметить, что:

1) (ввиду преломления в пластине) луч света на выходе ящика параллельно сместится направо на расстояние  $\Delta z$  (уже показано на рис. 1а);

2) (ввиду меньшей скорости света в стекле, а также удлинения пути) импульс света выйдет из ящика с некоторым запозданием  $\Delta t$ .

И это все, что может узнать сегодня физик, не заглядывая в ящик.

На рисунке 1б и 1в вместо подвижного зеркала стоят неподвижные полупрозрачные зеркала, а толстая стеклянная пластина разделена на 8 тонких пластинок, две из которых толще, чем остальные шесть. Наш физик не заметит изменения, происшедшего в ящике, поскольку измерит те же самые  $\Delta z$  и  $\Delta t$ . Однако фотоны, если они разумны и знакомы с английским и азбукой Морзе, могут прочесть адресованные им инструкции:

• — • — • = REF (reflect, отразись) на рис. 1б,

— ••••• • — • = THR (through, пройди сквозь) на

рис. 1в,

и, соответственно, выполнить их, в случае рис. 1б отражаясь, а в случае рис. 1в проходя сквозь полупрозрачное зеркало. Такое управление лучом, аналогичное установке знака дорожного движения на перекрестке, с полным правом можно назвать информационным.

Подчеркнем, что постановка подобных "информационных" экспериментов с элементарными частицами отличается от всего, что было до сих пор сделано в физике.

Может быть частицы действительно знают все земные языки и коды. Но надежнее предположить, что мы имеем дело с совершенно иной цивилизацией, о нас ничего не знающей, и при установлении контакта встретимся с трудностями. Проблема эта не новая, и в наше время серьезно рассматривалась в рамках комплексного проекта SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence). Его эксперты разрабатывают "космические" языки, способные развить общение "от нуля" до высокого семантического уровня. На начальной стадии можно рекомендовать и такие универсальные языки, как математика и музыка. Исходным пунктом для обнаружения сознания, даже весьма отличного от нашего, и установления с ним информационного контакта должно служить какое-то очень общее свойство, предположительно присущее любому сознанию. Хорошим кандидатом на эту роль является любознательность.

На рисунке 2 показана схема эксперимента "бинарное дерево", который не предполагает у частиц какого-либо знакомства с нашей культурой. Первоначальный пучок фотонов входит в ствол дерева (снизу на рис. 2) и далее разводится по ветвям с помощью 50%-ных полупрозрачных зеркал, показанных на рисунке кружками. Схема рис. 2 содержит только пять рядов зеркал, но, в принципе, чем их больше, тем лучше.

Согласно современной теории и экспериментальной практике все выходные пучки (вверху на рис. 2) имеют

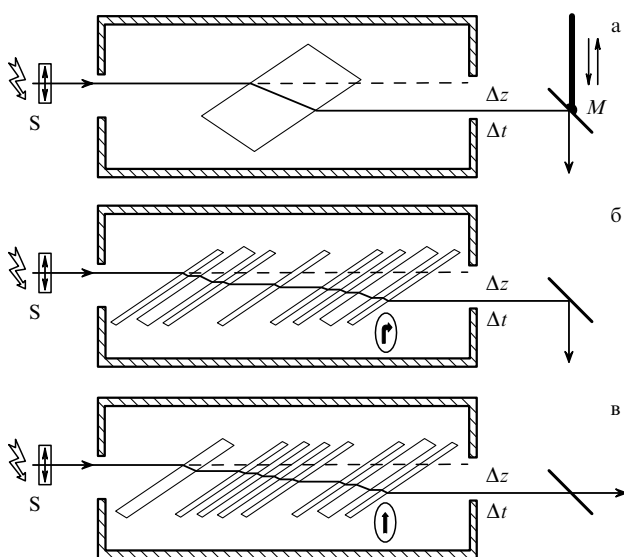


Рис. 1. Силовое (а) и информационное (б, в) управление.

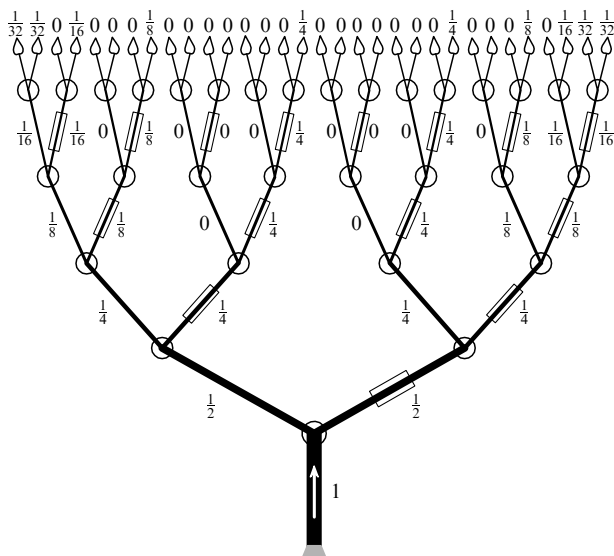


Рис. 2. Бинарное дерево. Цифрами показана вероятность нахождения частицы в различных ветвях дерева в случае моментального образования консервативного условного рефлекса.

одну и ту же интенсивность, а именно  $1/32$  от интенсивности первоначального пучка (реальные зеркала делят пучок не строго поровну и имеют поглощение, но это не принципиально).

Введем теперь во все правые ветви (соответствующие, например, отражению от зеркал) "информационные ячейки" (на рисунке они показаны прямоугольниками), предъявляющие частицам некоторую информацию. Например, это опять могут быть наборы стеклянных пластинок, где информация закодирована через толщину пластинок и расстояние между ними. Информация, предъявляемая в каждом следующем ряду ячеек, является продолжением предыдущей.

Реальные ячейки будут вносить некоторое поглощение, но оно может быть учтено при обработке результатов или скомпенсировано введением во все левые ветви аналогичных ячеек, несущих, однако, "менее интересную" информацию. Например, если каждой букве нашего алфавита соответствует пластинка определенной толщины, то во всех компенсационных ячейках эти пластинки стоят в алфавитном порядке.

Согласно современной теории и практике введение информационных и компенсационных ячеек не нарушит равномерное распределение интенсивности между выходными ветвями. Но если частицы обладают сознанием, они могут заинтересоваться предлагаемой информацией. Пробуя различные направления ветвления, они обнаружат, что правые ветви более информативны, и начнут их предпочитать. Другими словами, у частиц выработается условный рефлекс. Это нарушит равномерное распределение частиц в выходных каналах. На рисунке 2 в качестве примера цифрами показана вероятность нахождения частицы в различных ветвях дерева в случае моментального образования консервативного условного рефлекса, т.е. когда частица после первого же сравнения левых и правых ветвей делает окончательный выбор в пользу последних.

Неравномерное распределение частиц в выходных каналах будет замечено экспериментатором и может быть справедливо интерпретировано как интерес частиц к информации и указание на их сознание. Этот важный результат даже не требует от частиц умения расшифровывать информацию, достаточно их любознательность. Точно так же

археологи отправлялись в дальние путешествия из интереса к древним иероглифическим письменам задолго до того, как научились их расшифровывать.

Суммарная информация, респределенная по ячейкам, в целом может составлять курс обучения некоему языку, на котором мы в дальнейшем будем общаться с частицами. Чтобы узнать, как далеко продвинулось обучение, экспериментатор время от времени может предъявлять частицам, например, такой текст: "Поверните, пожалуйста, налево". Так как частицы, стараясь не пропускать уроков, как правило, будут выбирать правые ветви, выполнение этой просьбы будет означать, что ее текст был расшифрован, и мы вышли на более высокий уровень информационного контакта.

Этим, однако, возможности схемы рис. 2 не ограничиваются. Сознательно выбирая направления ветвления, частица может в коде "лево"–"право" ("0"–"1") сама передать нам сообщение. Поскольку регистрация частицы в какой-либо выходной ветви однозначно определяет весь ее путь в дереве, мы сможем прочесть это сообщение. Например, самая левая выходная ветвь на рис. 2 соответствует сообщению "00000", а самая правая — "11111".

Изложенной интерпретации КМ посвящены также работы [7–8].

## Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
2. Aspect A, Dalibard J, Roger G *Phys. Rev. Lett.* **49** 1804 (1982)
3. Bell J S *Physics* **1** 195 (1964)
4. Alley C O et al., in *Proc. 2nd Int. Symposium on Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1987* (Eds M Namiki et al.) (Tokyo: Phys. Soc. Jpn, 1987) p. 36
5. Nakhmanson R, in *Waves and Particles of Light and Matter* (Eds A van der Merwe, A Garuccio) (New York: Plenum Press, 1994) p. 571
6. Weihs G et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 5039 (1998)
7. Nakhmanson R, in *Frontiers of Fundamental Physics* (Eds M Barone, F Selleri) (New York: Plenum Press, 1994) p. 591. (Можно найти по адресу: <http://arXiv.org/pdf/physics/0103006>)
8. Nakhmanson R, <http://arXiv.org/pdf/physics/0004047>
9. Nakhmanson R, <http://arXiv.org/pdf/physics/0005042>

## Действительность и главный вопрос о квантовой информации

А.М. Пилан

На самом деле главный вопрос статьи М.Б. Менского "Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов" состоит в том, какая информация существует в природе для (пред-)определения квантовых историй.

После 75 лет споров многие практики не верят в полезность обсуждения как квантовых парадоксов, так и понятия информации для физики. Вот на стр. 13 и 15 февральского номера *Phys. Today* 1999: "после своего успеха в демонстрации эйнштейнглмента (наличие запутан-

А.М. Пилан. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера РАН, 63090 г. Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева 11, Российская Федерация  
E-mail: A.M.Pilan@inp.nsk.su

Статья поступила 14 августа 2000 г.,  
после доработки 20 октября 2000 г.