

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Вектор состояния квантовой системы: математическая абстракция или физическая реальность?А. В. Белинский^{1,a}, А. К. Жуковский^{2,b}*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,*¹*кафедра математического моделирования и информатики;* ²*кафедра физики Земли.**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^a belinsky@inbox.ru, ^b andrez@rambler.ru*

Статья поступила 02.12.2015, подписана в печать 26.01.2016.

Предложен вариант эксперимента с коррелированной парой частиц в запутанном (entangled) состоянии, который демонстрирует эффект изменения поляризации запутанного фотона, показывающий реальность всех различных состояний суперпозиции и соответствующего им вектора состояния квантовой системы. Анализируются возможные последствия этого факта.

Ключевые слова: вектор квантового состояния, запутанность, нелокальность, копенгагенская интерпретация, скрытые параметры.

УДК: 530.145.1. PACS: 03.65.Ud, 42.65.Lm.

Квантовые измерения, в отличие от обычных классических измерений, обладают тем характерным свойством, что до момента измерения физическая величина априори не обладает каким-либо конкретным значением, если она не находится в собственном состоянии измеряемой величины (см., напр., [1] и цитируемую там литературу). Именно это свойство, а не статистичность измерений выделяет квантовую теорию в самостоятельный раздел современной науки. В противном случае она была бы просто подразделом статистической физики. И именно это свойство находится в полном соответствии с копенгагенской интерпретацией квантовой теории.

Согласно проекционному постулату фон Неймана [2] в момент измерения происходит редукция вектора состояния, т.е. уменьшение его размерности до измеренного диапазона значений измеряемой величины (см., напр., [1, 3] и цитируемую там литературу). Особый интерес обычно вызывает редукция квантового состояния у пары или более коррелированных частиц, находящихся в запутанном (entangled) состоянии, поскольку измерение, произведенное над одной частицей, ведет к мгновенному изменению квантового состояния другой (или остальных), улетевших от первой на произвольное, возможно и значительное расстояние. Проекционный постулат фон Неймана, строго говоря, не описывает такую редукцию. Его обобщение на перепутанные состояния предложил Ф. Я. Халили [4]. Но принципиальный вывод о мгновенной редукции остается в силе. Именно поэтому до сих пор не прекращаются попытки создания сверхсветовых линий связи, основанных на этом явлении (см., напр., [5] и цит. лит.). Нам же представляется, что детальное исследование этого явления неоспоримо свидетельствует о нелокальном характере квантовых процессов. Для одиночных фотонов этот факт до-

казан экспериментально [6]. Однако в случае пары запутанных частиц, как представляется, для доказательства достаточно и описанного далее мысленного эксперимента.

На рис. 1 представлена схема исследования коррелированных пар фотонов. В нелинейном кристалле с квадратичной нелинейностью (обычно пьезокристалле) под действием лазерной накачки генерируются пары фотонов в запутанном состоянии. Сигнальный a и холостой b фотоны имеют взаимно ортогональные плоскости поляризации. Они направляются соответственно к наблюдателям А и В, у каждого из которых есть призма Волластона, разделяющая взаимно ортогональные поляризации, и два детектора: x и y . Угловая ориентация призм у наблюдателей одинакова и определяется, соответственно, углами поворота $\alpha = \beta$ вокруг направления распространения фотонов. Внизу нарисована временная ось эксперимента. На ней показаны моменты регистрации (измерения) поляризации фотона b — t_1 и t_2 , который всегда измеряется раньше a . На траектории фотона a также отмечены условные точки, в которых он будет находиться в момент этих измерений, — T_1 и T_2 . Важно, что измерения b должны быть выполнены так, чтобы в первом случае a находился до пластины $\lambda/2$, а во втором — после нее.

Возьмем два антикоррелированных по поляризации фотона в запутанном состоянии:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_x^a |1\rangle_x^b |1\rangle_y^a |0\rangle_y^b + |1\rangle_x^a |0\rangle_x^b |0\rangle_y^a |1\rangle_y^b). \quad (1)$$

Здесь индексы a и b относятся соответственно к первому и второму фотону запутанной пары, а взаимно ортогональные поперечные направления x и y определяют ортогональные направления поляризации. Структура этого вектора состояния такова,

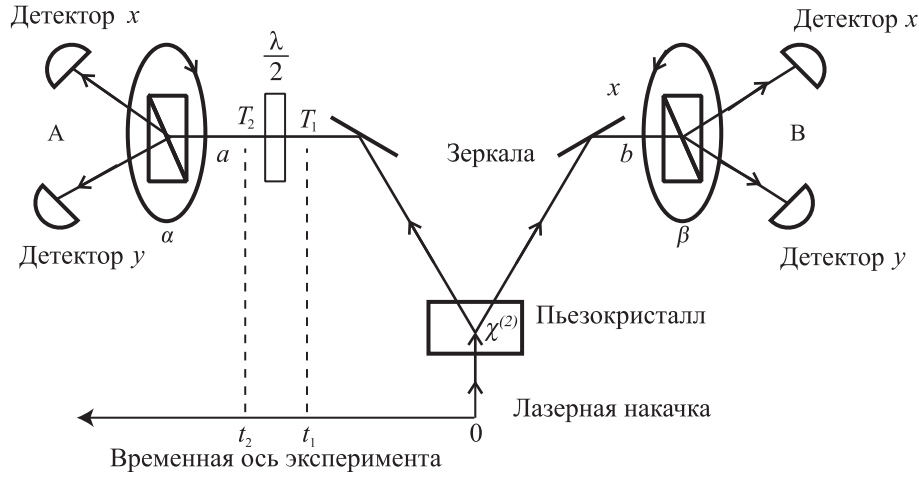


Рис. 1. Схема исследования коррелированных пар фотонов

что, хотя направление поляризации x и y каждого из фотонов пары a или b равновероятны, между собой они строго коррелированы, точнее антикоррелированы, поскольку их плоскости поляризации взаимно ортогональны.

Такие состояния обычно приготавливают с помощью параметрического рассеяния света при нелинейном взаимодействии второго типа (см., напр., [7] и цит. лит.).

Установим в одном канале, скажем в a , фазовую полуволновую поляризационную пластину, которая ориентирована так, что плоскости поляризации ее обыкновенного и необыкновенного лучей составляют угол $\pi/4$ с соответствующими плоскостями пьезокристалла. Пластина использована для того, чтобы повернуть плоскость поляризации на $\pi/2$. Изменение поляризации на плоских зеркалах мы не учитываем, поскольку в реальном эксперименте можно обойтись и без них. Итак, фазовая пластина изменит вектор состояния (1) следующим образом:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_x^a |1\rangle_y^b |0\rangle_y^a |0\rangle_y^b + |0\rangle_x^a |0\rangle_x^b |1\rangle_y^a |1\rangle_y^b). \quad (2)$$

После того как фотон a пройдет фазовую пластину, произведем измерение в канале b . Пусть, например, фотон b после призмы Волластона оказался в канале с y -поляризацией. Тогда после измерения вектор (2) редуцирует до

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_y^a + |1\rangle_y^b) \quad (3)$$

или просто до $|1\rangle_y^a$ и фотон a окажется в канале с поляризацией y после поляризационной призмы. Если же, напротив, фотон b в результате измерения окажется в канале с x -поляризацией, то все будет наоборот.

Нет никаких сомнений, что реальный эксперимент подтвердит эти простые рассуждения. Назовем результаты измерения поляризаций, полученные в этом эксперименте, базовым сценарием произведенных измерений.

Но попытаемся теперь исходить из, казалось бы, твердо установленного факта о том, что на-

блюдаемой измеряемой квантовой величины априори не существует [8]. В этом случае в зависимости от существующих трактовок данного утверждения у нас появляются две возможности.

1. Если исходить из трактовки, в соответствии с которой квантовой величины априори, т.е. до измерения, реально *нет* (вектор состояния при этом начинает выступать в роли математического приема для описания ее движения), то поляризация фотона a не будет существовать до ее измерения (в лучшем случае она будет естественной).

2. Если исходить из трактовки, в соответствии с которой квантовой величины до измерения нет только в «классическом смысле», (т.е. она *реально* существует, но находится в состоянии суперпозиции всех своих возможных состояний), то поляризация фотона a до момента измерения будет *реально* находиться в суперпозиции двух возможных состояний (1). В этом случае его вектор состояния начнет выступать в роли элемента *реальности*, которая будет *действительно отображать реальные* параметры фотона a .

Разберем эти возможности более подробно.

В первом случае пластина $\lambda/2$ никак не может изменить поляризацию фотона a , ведь ее нет, а изменить то, чего нет, невозможно. Следовательно, эта пластина не должна оказывать никакого воздействия на его поляризацию. Тем не менее эксперимент, конечно же, покажет, что это будет не так.

Действительно, представим, что в случае измерения поляризации фотона b в момент времени t_1 (в тот момент, когда фотон a находится в точке T_1), его поляризация оказалась равной x . В этом случае поляризация фотона a в результате действия нелокальной связи должна сразу же принять ортогональное значение y . Далее на фотон a должна действовать полуволновая пластина, которая должна развернуть его поляризацию в положение x . В итоге поляризация обоих фотонов окажется одинаковой.

Пока все идет в полном соответствии с «нелокальной» логикой и результатами эксперимента, который, несомненно, подтвердил бы это на практике.

Однако давайте теперь представим, что мы провели аналогичное измерение в момент времени t_2 (т.е. в тот момент, когда фотон a уже прошел пластину $\lambda/2$ и находится в точке T_2). Пусть полученное значение поляризации фотона b оказалось таким же, как и в первом случае, т.е. равным x . Тогда поляризация фотона a , казалось бы, должна равняться y . Ведь на пути от точки T_2 до детектора больше нет устройств, которые могли бы его «развернуть». Однако проведенные измерения, вне всякого сомнения, покажут, что ее поляризация все равно будет x .

Полученное значение поляризации фотона a в этом случае можно объяснить только тем, что пластина $\lambda/2$, «не зная» о значении поляризации фотона (и есть ли она вообще), все равно изменила ее на противоположную. Пластина изменила то, чего в соответствии с данной трактовкой нет и не может быть. Очевидно, что такой вариант трактовки копенгагенской интерпретации, в соответствии с которой квантовая величина реально не существует, приводит к логическому парадоксу: реальная пластина «разворачивает» то, чего нет, — и это можно определить опытным путем.

Что же будет происходить в нашем опыте при рассмотрении второго варианта трактовки существования квантовой частицы? В этом случае пластина $\lambda/2$ будет действовать на фотон a , который будет реально находиться в суперпозиции всех своих возможных состояний. Если мы так же, как и в предыдущем примере, произведем измерение фотона b в момент времени t_2 и зарегистрируем фотон a в состоянии x (что, несомненно, произойдет в результате эксперимента), это будет означать, что пластина $\lambda/2$ изменит оба возможных состояния фотона a , находящегося в состоянии суперпозиции, т.е. все возможные (оба) состояния поляризации поменяются местами точно так же, как при переходе от формулы (1) к формуле (2).

На адекватность последнего соображения также указывают результаты эксперимента по наблюдению трехлучевой интерференции [8], в котором доказывается одновременное присутствие и одно- и двухфотонного состояний в их суперпозиции.

Конечно, чисто теоретически возможен и третий вариант объяснения результатов описанного эксперимента, при котором нам придется согласиться, что измеряемые величины до измерения все же обладают определенными значениями в их классическом смысле. Подобная трактовка будет противоречить копенгагенской интерпретации квантовой механики, однако теоретически она остается возможной. Фактически это нелокальная теория скрытых параметров. Здесь будет уместным напомнить, что указанная интерпретация, несмотря на допущение

наличия скрытых параметров, не противоречит ни теореме Белла, ни опытам Аспекта [9, 10, 11]. Подобное объяснение реальности, например, содержится в интерпретации де Бройля–Бома [12]. Все это оказывается возможным благодаря тому, что она допускает большую степень нелокальности в поведении квантовых объектов.

Все три указанные альтернативы, несомненно, интересны и не оставляют места для простых локальных моделей. Первая входит в противоречие с реальным экспериментом и, в связи с этим, приводит к выводу о том, что квантовая величина, вероятно, все-таки должна существовать (пусть и в состоянии суперпозиции) до момента своего измерения. Во всяком случае, она ставит под явное сомнение обратное утверждение, связанное с тем, что квантовая величина в этот период времени вообще не существует.

Вторая альтернатива показывает реальность квантовой величины, находящейся в состоянии суперпозиции, а значит, в некотором смысле и характеризующего ее вектора состояния. Выводы, следующие и из первой, и из второй альтернативы, несомненно, должны продвинуть вперед дискуссию о том, что в действительности представляют собой квантово-механические векторы состояния квантовых объектов.

Третья альтернатива еще более сближает подходы к реальности, существующие в квантовом и «обычном» мире, поскольку говорит о реальности квантовых величин до их измерения в классическом смысле и фактически представляет собой нелокальную теорию скрытых параметров.

На последней альтернативе хотелось бы остановиться немного подробнее, поскольку нелокальная теория скрытых параметров может привести к совершенно неожиданным и парадоксальным выводам. Рассмотрим, например, интерферометр Маха–Цендера, на вход которого подается одиночный фотон в фоковском состоянии (рис. 2). Уберем вначале второй светоделитель, расположенный перед фотодетекторами. В этом случае детекторы начнут регистрировать одиночные фотоотсчеты либо в одном, либо в другом канале. В обоих каналах одновременно они зарегистрированы не будут никогда, поскольку на входе в систему у нас всегда присутствует только один фотон.

Что произойдет после того, как мы вернем второй светоделитель на место? Вероятность фотоотсчетов на детекторах будет описываться гармонической функцией $\frac{1}{2}[1 \pm \cos(\Phi_1 - \Phi_2)]$, где Φ_1 и Φ_2 — фазовые задержки в плечах интерферометра [13]. Знак в этом выражении зависит от того, какой детектор осуществляет регистрацию. Эту гармоническую функцию нельзя представить в виде суммы вероятностей $P(\Phi_1) + P(\Phi_2)$. Следовательно, после первого светоделителя фотон будет присутствовать как бы в обоих плечах интерферометра одновременно, хотя в первом акте эксперимента он находился только

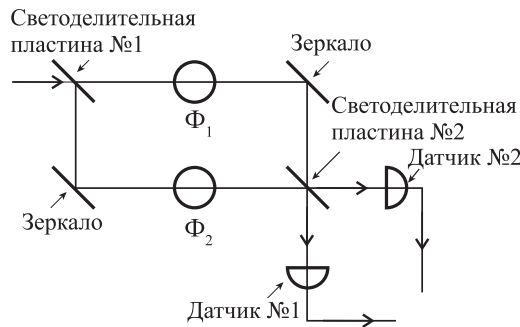


Рис. 2. Интерферометр Маха-Цендера

в одном плече. Эту парадоксальную ситуацию трудно объяснить с позиций привычных пространственных интуиций здравого смысла, обычно присутствующих в макромире. Исходя из выводов, сделанных в результате анализа первой и второй альтернатив, можно сделать предположение о том, что фотон *реально* находится в обоих плечах в состоянии суперпозиции. Причина подобного поведения квантовых объектов, возможно, состоит в том, что векторы квантовых состояний принадлежат гильбертову векторному пространству, для которого пространственная локальность вовсе не является обязательной.

Но значит ли это, что эксперименты с интерферометром Маха-Цендера сами по себе могут доказать необходимый характер нелокальности квантовой теории? Другими словами, может ли какая-либо локальная модель описать интерференцию одиночного фотона, будь то в интерферометре Маха-Цендера, Юнга или Майкельсона? Оказывается, что может. С этой задачей, например, прекрасно справляется интерпретация «волны-пилота». Действительно, пусть одиночную квантовую частицу направляют по той или иной траектории вакуумные флуктуации частоты, соответствующей дебройлевской частоте этой частицы. Разумеется, эти квазимонохроматические вакуумные моды будут интерферировать и направлять эту частицу в интерференционные максимумы. Такая модель может объяснить интерференцию одиночных квантовых частиц. Но она фактически представляет собой локальную теорию скрытых параметров, которую, как известно, надежно опровергли эксперименты по проверке неравенств Белла [9, 10], см. также [12–14].

Как же в таком случае можно трактовать этот эксперимент с точки зрения нелокальной теории скрытых параметров? В этом случае получается, что фотон «нелокально» заранее знает, что с ним будет дальше: следует ли ему интерферировать, разделившись на два канала, или же целиком идти в один канал и далее оказаться зарегистрированным одним из детекторов (детекторы при этом должны быть установлены во всех возможных каналах, т. е. перекрывать все альтернативные траектории фотона, необходимые для его последующей интерференции).

Принимая такую интерпретацию, мы должны отчетливо понимать, что эта парадоксальная и кажу-

щаяся не имеющей физического смысла и нарушающей принцип причинности ситуация представляет собой еще полбеды. Ведь в каналах мы можем установить быстродействующие (например, электрооптические) затворы, которые «обманут» уже прошедший первый светоделитель фотон. В этом случае, проходя светоделитель и «рассчитывая» интерферировать, фотон столкнется с тем, что затвор внезапно перекроет ему такую возможность и вместо интерференции направит его на фотодетектор. Однако, как мы понимаем, «обмануть» фотон таким образом все равно не удастся: он прекрасно приспособится к изменившейся ситуации так, как будто бы он заранее «знал» о будущем действии затвора. Следовательно, либо фотон находится вне пространства-времени [15], либо он должен непрерывно и мгновенно «скакать» из одного плеча интерферометра в другое, чтобы всегда быть готовым и к интерференции, и к детектированию. И совсем уже фантастическая гипотеза: все материальные объекты должны быть связаны друг с другом какой-то неизвестной нелокальной связью, которая и будет, в зависимости от окружающих событий (в частности, состояния затвора), менять последующее поведение фотона.

Все представленные варианты объяснения интерференции одиночного фотона в схеме Маха-Цендера выглядят весьма экзотическими. Оставляя вне рамок данного обсуждения первое предположение, прокомментируем второе. Если представить, что мы видоизменим наш эксперимент на рис. 2, добавив в него непрозрачную стенку, которая надежно разделяет оба плеча интерферометра друг от друга, то, очевидно, мы увидим, что поведение фотона все равно не изменится. Следовательно, мы приходим к новому, неизвестному до сих пор виду нелокального взаимодействия. Говоря о варианте взаимодействия, приводящем к непрерывным «скачкам» фотона, следует упомянуть, что если оно существует, то параллельно мы решаем задачу о мгновенной редукции вектора состояния квантовой системы при измерениях: ведь там тоже информация о произведенном измерении может мгновенно пройти сквозь непрозрачные стенки посредством неизвестного нам носителя.

Выглядит это так: пусть, скажем, одиночный фотон рождается в центре сферы, на которой сплошь установлены фотодетекторы, отделенные друг от друга непрозрачными секторами, направленными в центр (рис. 3). Ясно, что в результате измерения сработает только один из детекторов, при этом волновая функция коллапсирует как бы «сквозь» эти непрозрачные стенки.

Возвращаясь к первоначальному опыту на рис. 1 и поставленным в связи с этим вопросам, следует сделать следующие выводы: либо квантовые величины *действительно* существуют в суперпозиции всех своих состояний, причем эти состояния являются действительно *реальными*, поскольку мы можем

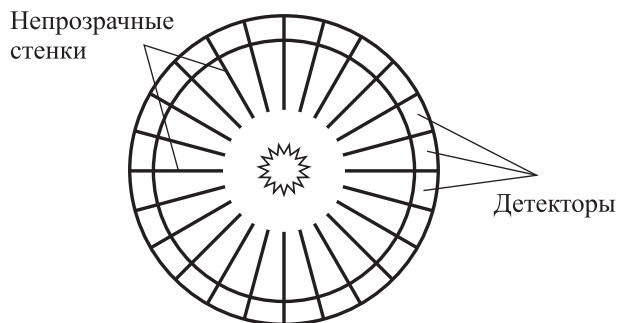


Рис. 3. В центре сферы, со сплошь уставленными по ее внутренней поверхности фотодетекторами, рождается одиночный фотон, который следует к этим детекторам по выделенным непрозрачными стенками секторам. Непосредственно перед фотодетектированием волновая функция фотона занимает всю поверхность сферы, но после детектирования она стягивается лишь в один сектор, как бы проходя «сквозь» непрозрачные стенки

не только видеть жесткую корреляцию между такими состояниями у связанных запутанных частиц, но и менять их с помощью реальных макрообъектов; либо квантовые объекты все-таки имеют скрытые параметры и тогда их поведение должно объясняться на основе неизвестной пока нелокальной теории, использующей неизвестное нам взаимодействие. Какое заключение можно сделать на основании этих результатов? Во-первых, обе перечисленные альтернативы неоспоримо свидетельствуют о нелокальном характере поведения квантовых объектов. Во-вторых, и это, пожалуй, самое главное, вектор состояния имеет статус реального физического существования, а не какого-то искусственного математического приема, находящегося в области виртуальной реальности и позволяющего производить вычисления, совпадающие с экспериментальными результатами, подобно, например, отрицательной абсолютной температуре, формально описывающей инверсию населенностей активных сред лазеров или фиктивного неэрмитова гамильтониана, также пригодного

для удачного аналитического расчета трехуровневых квантовых систем (см., напр., [1, с. 47; 3] и цит. лит.). А реальное существование вектора состояния квантовых систем, впрочем, как и альтернативная гипотеза нелокальной теории скрытых параметров в свою очередь подтверждают реальность существования квантовых объектов не только в момент их регистрации, но и до измерений (априори).

Список литературы

1. Белинский А.В. Квантовые измерения. М., 2008.
2. фон Нейман И. Математические основы квантовой механики. М., 1964.
3. Менский М.Б. Квантовые измерения и декогеренция. М., 2001.
4. Халили Ф.Я. Предельные чувствительности в линейных и нелинейных квантовых измерениях: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1996.
5. Малинецкий Г.Г., Ахромеева Т.С. // Материалы 13 Всеросс. конф. «Состояние и проблемы измерений». МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 22–24 апр. 2015. С. 10.
6. Fuwa M., Takeda S., Zwierz M. et al. // *Nature Communications*. 2015.
7. Белинский А.В. // *Вестн. Московского ун-та. Физ. Астрон.* 1999. № 3. С. 34.
8. Belinsky A.V., Klyshko D.N. // *Laser Physics* 1996. **6**. P. 1082.
9. Aspect A., Grangier P., Roger G. // *Phys. Rev. Lett.* 1981. **47**. P. 460; 1982. **49**. P. 91.
10. Aspect A., Dalibard J., Roger G. // *Phys. Rev. Lett.* 1982. **49**. P. 1804.
11. Грин Б. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. М., 2009.
12. Maudlin T. Quantum Non-Locality and Relativity. Malden, Mass.: Blackwell, 2002.
13. Белинский А.В. // *УФН*. 2003. **173**, № 8. С. 905. (Belinsky A.V. // *Physics Uspekhi*. 2003. **46**. P. 877.)
14. Белинский А.В. // *Оптика и спектр*. 2004. **96**. С. 732. (Belinsky A.V. // *Optics and Spectroscopy*. 2004. **96**, N 5. P. 665.)
15. Belinskii A.V. // *Laser Physics*. 2002. **12**. P. 939.

The state vector of a quantum system: mathematical fiction or physical reality?

A. V. Belinsky^{1,a}, A. K. Zhukovsky^{2,b}

¹ Department of Computer Modeling and Informatics;

² Department of Physics of the Earth,

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a belinsky@inbox.ru, ^b andrez@rambler.ru.

A version of an experiment with a correlated pair of entangled particles is considered. This experiment demonstrates an interesting effect of variations in the entangled photon polarization that shows the reality of all of the various superposition components and the corresponding state vector of the quantum system. The possible consequences of this are analyzed.

Keywords: quantum state vector, entanglement, nonlocality, Copenhagen interpretation, hidden variables.

PACS: 03.65.Ud, 42.65.Lm.

Received 2 December 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 3. Pp. 253–257.

Сведения об авторах

1. Белинский Александр Витальевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, профессор; тел.: (495) 939-41-78, e-mail: belinsky@inbox.ru.

2. Жуковский Андрей Кузьмич — физик; тел.: (495) 925-04-33, e-mail: andrez@rambler.ru.