



**Сергей Килин,**  
руководитель Центра  
«Квантовая оптика и  
квантовая информатика»  
Института физики  
им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси

# От квантовой оптики — к квантовой информатике



Новое направление в физике – квантовая информатика – возникло на стыке квантовой механики, оптики, теории информации, дискретной математики, лазерной физики, спектроскопии и включает в себя вопросы квантовых вычислений, квантовых компьютеров, квантовой телепортации, квантовой криптографии, проблемы декогеренции и спектроскопии одиночных молекул и примесных центров.

Становление и развитие двух важных направлений современной науки – квантовой оптики и квантовой информатики – совпало с научной историей развития лабораторий Института физики и его сотрудников. Этому предшествовал ряд замечательных открытий и событий. В 1906 г. А.А. Марков написал работу «Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга» [1] и рассмотрел случайный процесс переходов в системе, у которой имеется два состояния:  $x=0$  и  $x=1$ . На современном языке этот объект именуется двухуровневой системой, а в квантовой физике носит название кубита. Случайные переходы между этими состояниями есть пример марковской цепи. Свойство, определяющее данные процессы, кратко формулируют еще и так: «Прошлые состояния не имеют влияния на будущие при заданном нынешнем». Марковские случайные процессы – ключевые для современных исследований и широких приложений в физике, биологии, информационных технологиях. Для нас очень важно, что они имеют обобщение и на квантовую физику, где математическая трактовка состояния становится не просто номером, фиксирующим классическое свойство объекта (белый шар, черный шар), а более сложным явлением, в котором изначально заложено понятие вероятности. В 1922 г. на научном небосклоне появляется новая

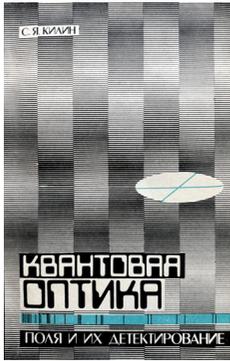
звезда – 24-летний В.А. Фок, выпускник физико-математического факультета Петроградского университета, вхождение в науку которого совпало со временем формирования квантовой механики (это событие будет отмечаться в 2025 г. как Международный год квантовой науки и технологий). Предложенное в 1900 г. М. Планком квантование энергии поля для объяснения спектра теплового излучения, поддержанное объяснением А. Эйнштейна в 1905 г. фотоэффекта на основе гипотезы о том, что свет не только излучается, но и существует в виде световых квантов, фотонов, а также представленной им же в 1916 г. теорией испускания и поглощения фотонов как случайных событий, определяемых вероятностями  $A$  и  $B$  (коэффициентами Эйнштейна), сопровождающихся переходами между состояниями атома в соответствии с идеями Н. Бора о скачках, было в основном принято физиками. Однако нельзя было просто отбросить старую волновую теорию света. Кроме того, оставался необъясненным аномальный эффект Зеемана, поскольку еще не был открыт спин электрона. Базовые положения, завершившие построение каркаса квантовой теории, были сформированы за фантастически короткий период 1925–1926 гг. [2]. Сначала Д. Бройль понял, что в основе должны быть «волны материи», В. Паули открыл принцип запрета, а Гейзенберг совместно

с М. Борном и П. Йорданом сформулировали матричную (операторную) механику, где вместо классических переменных появились операторы. Четыре сообщения Э. Шредингера, опубликованные в 1926 г. в журнале «Annalen der Physik» под общим заглавием «Квантование как проблема собственных значений», превратили идеи Бройля в квантовую волновую механику, основным объектом которой стала волновая функция, зависящая от времени и координат частиц (координатное представление). Получив с задержкой номер «Annalen der Physik» с первым сообщением Э. Шредингера, В.А. Фок обобщает его уравнение на случай сил, зависящих от скорости, и направляет в журнал «Zeitschrift für Physik» статью «О волновой механике Шредингера» [3] почти в то же время, когда вышел журнал со вторым сообщением этого автора. Как написано в аннотации работы, в ней: «Волновое уравнение Шредингера обобщено на случай наличия линейных членов (по скоростям) в функции Лагранжа и рассмотрены некоторые примеры квантования в координатном представлении». Спустя 10 лет в 1936 г. в Ленинграде под научным руководством В.А. Фока белорусский физик Ф.И. Федоров защитил кандидатскую диссертацию «Применение метода функционалов к некоторым вопросам теории излучения». А будущий основатель и директор Института физики АН БССР Б.И. Степанов в этом же году окончил Ленинградский госуниверситет и поступил в аспирантуру ГОИ, заместителем директора которого по научной части был С.И. Вавилов (в 1933 г. он впервые экспериментально подтвердил квантовый характер света, используя единственно доступный на то время детектор одиночных фотонов – человеческий глаз [4]). Работы С.И. Вавилова по люминесценции и микроструктуре света во многом сформировали направления исследований Б.И. Степанова, который после переезда в Минск получил один из фундаментальных результатов квантовой оптики: показал, что спектры поглощения и люминесценции сложных молекул связаны между собой соотношением, не зависящим от индивидуальных свойств молекул. Этот результат известен как универсальное соотношение Степанова. 1957 г. знаменателен тем, что английские физики Х. Браун и Р. Твисс впервые использовали интерферометр интенсивностей, измеряющий одну из основных величин современной квантовой оптики – корреляционную функцию для определения угловых диаметров планет и звезд. Наблюдения исследователей продемонстрировали эффект группировки фотонов для теплового излучения звезд.

## Эра квантовой оптики

Создание в 1954 г. мазера и в 1960 г. лазера поставило перед учеными принципиальный вопрос: чем отличается лазерный свет от теплового излучения? Ведь оба типа светового потока образованы фотонами. Ответ дал в своей квантовой теории когерентности в 1963 г. (именно этот год считается началом эры квантовой оптики) Р. Глаубер на основе когерентных состояний. В этом же году учеником Б.И. Степанова – П.А. Апанасевичем – был предсказан основополагающий квантово-оптический эффект: расщепление спектров резонансной флуоресценции и поглощения на триплеты (на 6 лет раньше работы Моллоу, именем которого часто называют такой триплет). В работах П.А. Апанасевича и С.Я. Килина в 1977 г. было показано, что при резонансной флуоресценции на отдельном атоме может наблюдаться как антигруппировка фотонов, так и группировка разночастотных фотонов. Антигруппировка фотонов при резонансной флуоресценции была наблюдаема впервые Г.Д. Кимблом с соавторами также в 1977 г., а группировка разночастотных фотонов – в 1980 г. А. Аспэ и К. Коэн-Таннуджи с соавторами. Квантовая теория резонансного рассеяния одиночными атомами и их ансамблями, разработанная С.Я. Килиным в 1976–1982 гг., отмечена премией Ленинского комсомола Беларуси. Во второй половине 1980-х гг. А.П. Низовцев и С.Я. Килин показали, что стохастические процессы взаимодействия квантовых систем с окружением, обычно рассматриваемые как марковские случайные процессы, под воздействием лазерного излучения становятся немарковскими, что приводит к зависимости параметров релаксации от лазерного поля. Данная теория нашла применение для описания широкого круга квантовых систем – примесных ионов в кристаллах, стеклах, а в последующем – квантовых точек в полупроводниках и люминесцирующих молекул. В эти же годы в связи с открытием нового класса неклассических состояний света, сжатых состояний, флуктуации одной из квадратурных компонент которых ниже вакуумных, в институте были проведены исследования и получены принципиальные результаты: установлен критерий сжатия многомодовых полей на основе введенного понятия аномальных корреляторов, предложен способ генерации сжатых состояний с помощью четырехфотонного рассеяния (С.Я. Килин).

Одновременно как результат развития детекторов одиночных фотонов и экспериментальных возможностей наблюдения квантовых скачков в



Монография  
С.Я. Килина «Квантовая  
оптика: поля и их  
детектирование»

одиночных излучателей, проявляющихся при излучении детектируемого фотона, была разработана теория непрерывных квантовых наблюдений (квантовых скачков) (С.Я. Килин, 1989 г.), позволяющая симулировать квантовые траектории – последовательность состояний квантовой системы, сменяемых при каждом акте наблюдения. Теория была применена для моделирования квантовых траекторий поля в открытом резонаторе при регистрации

вылетевших фотонов и атомарных квантовых скачков. Эти результаты были представлены в 1990 г. в одной из первых монографий по квантовой оптике «Квантовая оптика: поля и их детектирование» С.Я. Килина. В 1986 г. в Минске в Институте физики состоялся первый Всесоюзный семинар по квантовой оптике СКО, проводимый далее раз в два года и давший начало серии успешных международных конференций, сначала по квантовой оптике ICQO, а впоследствии – по квантовой оптике и квантовой информатике ICQOQI.

Начало 90-х было ознаменовано получением новых результатов в области квантовой оптики резонаторов, важных для развития оптических стандартов частоты и времени. Был предсказан эффект одноатомной оптической фазовой би- и мультистабильности в высокодобротном резонаторе (С.Я. Килин, Т.Б. Криницкая). Изучая модель квантового осциллятора, связанного с набором (бассейном) осцилляторов с непрерывным спектром

частот и произвольным спектром констант взаимодействий, С.Я. Килин и Д.С. Могилевцев показали, что при наличии параболического провала в спектре констант взаимодействий вместо ожидаемого заглушения выделенного осциллятора будет наблюдаться эффект замораживания распада. Одной из физических реализаций таких систем стали фотонные кристаллы, предложенные в 1987 г. Э. Яблоновичем. Одним из первых объектов квантовой оптики с макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций стало вынужденное комбинационное рассеяние, статистика которого была исследована в работах С.Я. Килина, И.И. Федчени, В.А. Орловича и А.С. Грабчикова. На основе теории непрерывных квантовых измерений разработана новая модель для описания детектирования при наличии обратной связи между излучением и детектором (С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко, 1994 г.). Это позволило объяснить наблюдавшееся парадоксальное различие в статистике фотоотчетов двух детекторов, измеряющих одно и то же излучение в разных условиях (один включен в цепь обратной связи, другой – нет), и сделать вывод о статистической неэквивалентности фотоэлектронов и фотонов в этом случае. В 1995 г. был разработан метод квантовой инженерии, позволяющий создавать фоковские и другие неклассические состояния света на основе унитарных преобразований, реализуемых методами нелинейной оптики (С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко). Рассматривая резонансную флуоресценцию атома в поле, образованном суперпозицией когерентных состояний с противоположными фазами, С.Я. Килин с В.Н. Шатохиным в 1996 г. предсказали эффект квантовой нестабильности дипольного момента атома. Вторая половина 90-х отмечена интенсивным освоением новых одиночных квантовых объектов. Своеобразным и важным



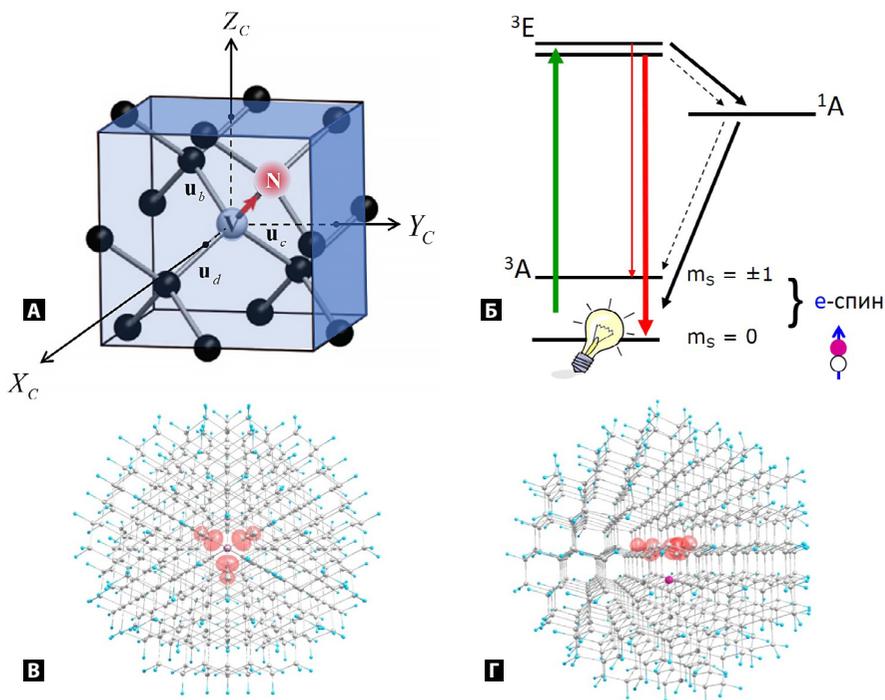
Международная  
конференция  
по квантовой оптике  
ICQO'2000. Раубичи,  
2000 г.

обобщением модели атома, локализованного в резонаторе, становится одиночная молекула, сосредоточенная естественным образом внутри кристаллического, квазикристаллического или аморфного тела. Такой объект стал экспериментально доступным благодаря развитию методов спектроскопии одиночных молекул. Отдельная молекула служит зондом локальных полей, а регистрируемые оптические спектры и задержанные корреляции фотонов позволяют получать уникальную информацию о динамике этих полей. В цикле совместных работ белорусских, немецких и американских ученых С.Я. Килина, А.П. Низовцева, В.Н. Шатохина, Т.М. Маевской, К. фон Борцисковски, Й. Врахтрупа и П. Бермана была развита теория квантовых скачков одиночных молекул хромофора в различных средах и на ее основе предложен метод контроля стохастической динамики отдельной молекулы, а также возможность подавления процесса туннелирования с помощью низкоинтенсивного когерентного излучения. В это же время получены первые результаты в успешной серии работ по квантовой томографии состояний оптических полей, благодаря которой волновая функция становится объектом измерений. В 1998 г. Д.С. Могилевцев предложил метод реконструкции состояний поля с помощью бинарных детекторов, а В.А. Запороженченко создал установку для квантовых томографических измерений волновых функций слабых, повторяющихся ультракоротких оптических полей.

## Эра квантовой информатики

Интенсивный прогресс в области квантовой оптики совпал с весьма своевременным образованием в институте в 1994 г. лаборатории квантовой оптики (ЛКвО). Новый мощный импульс развитию работ по квантовой тематике придали работы Б. Шора (1994) и Л. Гровера (1996), предложивших два алгоритма, которые, будучи реализованными с помощью двухуровневых систем, кубитов, позволяли бы решать задачи, недоступные для классических компьютеров. С этого времени начинается эра квантовой информатики.

Для создания квантового компьютера надо научиться точно управлять одиночными кубитами в суперпозиционных состояниях и их парами. Особым образом коррелированные пары кубитов образуют важнейший квантовый ресурс – перепутанные состояния. С их помощью достигаются уникальные возможности: квантовые вычисления, телепортация, высокоточные квантовые измерения, протоколы квантовой криптографии. Так, в 1997 г. А. Цайлингер с соавторами впервые экспериментально



Структура NV-центра в алмазе – важного ресурса для квантовых технологий, которым можно управлять и регистрировать оптический отклик на уровне одиночных электронных и ядерных спинов (А) благодаря основному триплетному состоянию электронного спина (Б). Рисунки (В) и (Г) демонстрируют распределение спиновой плотности, рассчитанной для кластера C510[NV]H252 квантовохимическими методами на суперкомпьютере: (В) – вид сверху параллельно оси NV, (Г) – вид сбоку. Авторы: А.Л. Пушкарчук, А.П. Низовцев, С.Я. Килин



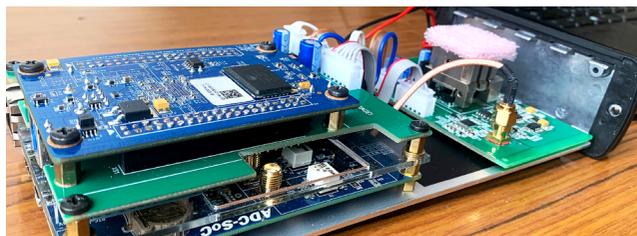
Титульная страница обзора С.Я. Килина в журнале «Успехи физических наук», 1999 г.

продемонстрировали квантовую телепортацию фотонов. Сделано это было с помощью перепутанных пар фотонов (бифотонов), генерируемых при параметрическом рассеянии света, – явления, предсказанного Д. Н. Клышко в 1967 г. Сотрудники лаборатории квантовой оптики одни из первых осознали важность задач квантовой информатики и возможностей, которые представляет квантовая оптика для их решения. Им принадлежат одни из первых обзоров этой проблемы [5], а также ряд важных результатов в области квантовой информации и квантовых компьютеров. Исследуя пути преодоления одного из основных препятствий на пути создания универсальных квантовых процессоров – явления декогерентности (потери когерентности, растущей экспоненциально с увеличением числа задействованных кубитов), С.Я. Килин и Д.Б. Хорошко в 1997 г. предложили активный метод, существенно уменьшающий декогеренцию суперпозиционных состояний оптических полей в резонаторе при использовании фазовой обратной связи. Ими также разработана в 2000 г. новая схема и протокол для квантовой телепортации сжатых состояний одномодового оптического поля, основанные на использовании перепутывания двух оптических пучков при квантовых неразрушающих измерениях.

Значительным вкладом в развитие квантовых технологий, определившим целое направление дальнейших работ, стал предложенный в 2000 г. С.Я. Килиным, А.П. Низовцевым и Й. Врахтрупом новый метод создания твердотельного квантового процессора на основе спиновых состояний ядер изотопического углерода в ближайшем окружении NV-центра в алмазе и комбинированного применения методов оптической спектроскопии одиночных молекул и магнитного резонанса. При разработке этого способа были использованы многочисленные результаты, полученные авторами ранее в области спектроскопии одиночных молекул. Белорусскими академическими учеными реализована первая в СНГ волоконно-оптическая система квантовой криптографии (С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко, В.Н. Чижевский, Д.И. Пустоход, А.С. Малоштан, 2007 г.) на основе временного кодирования однофотонных импульсов. В том же году под редакцией С. Я. Килина,



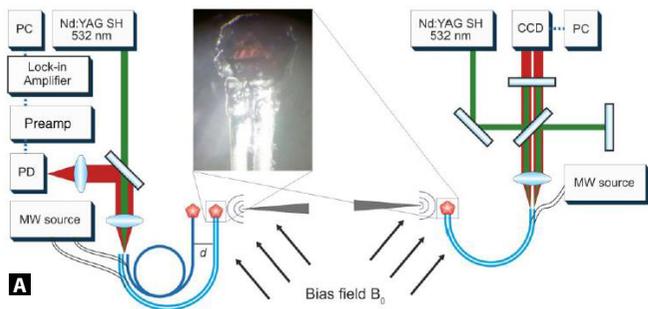
Монография «Квантовая криптография: идеи и практика», 2007 г.



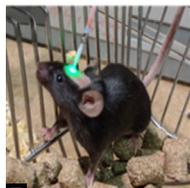
Квантово-оптический генератор случайных чисел (QRNG 100), работающий со скоростью 100 Мбит/с на одиночных фотонах и обеспечивающий гарантированное качество случайных последовательностей. Разработчики: В.Н. Чижевский, А.С. Малоштан, А.Б. Михалычев, Л.И. Редико, С.Я. Килин

Д.Б. Хорошко и А.П. Низовцева вышла первая русскоязычная монография по квантовой криптографии. Серия разработанных и созданных этим коллективом уникальных квантовых генераторов случайных чисел на одиночных фотонах (2010, 2020 гг.) используется в системах защиты информации.

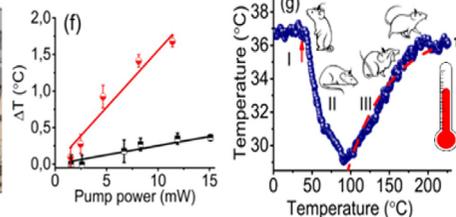
Продолжая исследования в квантово-оптической тематике, А.Б. Михалычев и С.Я. Килин показали, как с помощью слабой кросс-керровской нелинейности и определенного типа квантовых измерений увеличить ослабленную перепутанность между локально разнесенными оптическими пучками (восстановление перепутанности). Было сделано обобщение на общий квантовый метод получения заданных целевых состояний с помощью измерения. Этими авторами в 2012 г. продемонстрировано, что однокубитный лазер при некогерентной накачке генерирует обобщенные когерентные состояния. Учитывая важность исследований по квантовой информатике, в 2014 г. на базе лаборатории квантовой оптики был создан Центр «Квантовая оптика и квантовая информатика» (руководитель С.Я. Килин). Начиная с 2015 г. в Центре ведутся работы по квантовой метрологии с субдифракционным разрешением на основе коррелированных пар фотонов с обработкой данных, использующей информацию Фишера (Д.С. Могилевцев, А.Б. Михалычев), фантомным изображениям и квантовой сенсорике. Значительный прогресс достигнут в развитии методов квантовой томографии, включающей в себя способы получения



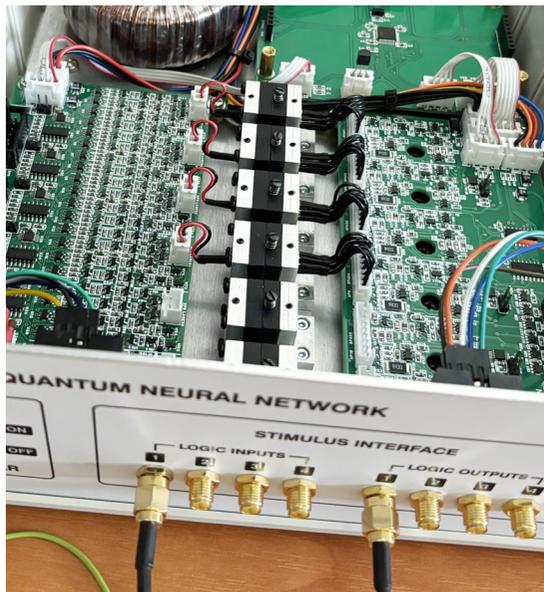
**A**



**B**



Квантовый сенсор высокочувствительной векторной градиентометрии магнитного поля на основе NV-центров в алмазе (А). Квантовый оптоэлектронный сенсор температуры мозга на основе микрокристалла алмаза с центрами окраски германий-вакансия (GeV). Использование разработанного сенсора для измерения температуры свободно перемещающейся мыши посредством имплантированного сенсора (Б). Авторы: С.Я. Килин, А.М. Желтиков (МГУ)



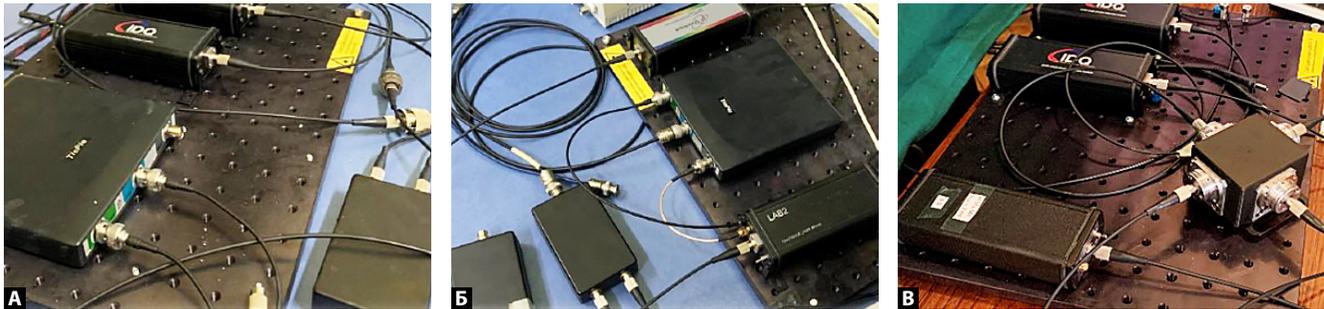
Квантовая нейронная сеть «QNN-6» с квантовой реализацией искусственных нейронов на основе вертикально-излучающих лазеров и однофотонных детекторов, предназначенная для исследований импульсных искусственных нейронных сетей и выполнения нейроморфных вычислений. Разработчики: С.Я. Килин, В.Н. Чижевский, Л.И. Ридико, Н.В. Лахмицкий

посредством измерения информации, достаточной для реконструкции, определения пространства поиска неизвестного состояния и метода оценки ошибок (Д.С. Могилевцев).

Совместно с Московским госуниверситетом создан квантовый оптоволоконный сенсор на основе примесных центров в алмазе, измеряющий локальные изменения температуры внутри мозга мыши *in vivo* с точностью 0,1 градуса по Цельсию. Были реализованы крупные международные проекты по квантовой тематике в рамках 6-й и 7-й Рамочных программ ЕС и программы «Горизонт-2020»: EQUIND «Сконструированная квантовая информация в наноструктурированном алмазе» (2007–2010 гг.), SUPERTWIN «Микроскопия сверхвысокого разрешения на перепутанных состояниях фотонов» (2016–2019 гг.), PhoG «Субпуассоновский фотонный генератор на основе когерентной диффузной фотоники» (2018–2022 гг.) От выполнения проектов суммарно получено более миллиона евро экспорта. Работы ученых Института физики по развитию квантовых технологий в 2020 г. отмечены Государственной премией Республики Беларусь (С.Я. Килин, В.Г. Барышевский и др.), в 2021 г. – Межгосударственной премией СНГ «Звезды Содружества» (С.Я. Килин) и в 2023 г. – Премией Национальной академии наук Беларуси (А.Б. Михалычев, С.В. Власенко).

В качестве ближайших важных проектов в Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси планируется развитие концепции квантовых вычислений на основе классических эмуляторов в виде создания в 2025 г. первого в стране эмулятора квантового компьютера с 30 кубитами и проведение оптимизационных квантовых вычислений на его основе, что позволит заложить фундамент для широкого использования в нашей стране квантовых вычислений как на квантовых вычислительных устройствах, так и на классических эмуляторах с адаптацией квантовых вычислительных ресурсов для применения в промышленной, финансовой, транспортной и иных сферах. Реализация проекта позволит генерировать квантово-вдохновенные постквантовые алгоритмы для обеспечения информационной безопасности, а также послужит основой для подготовки специалистов для квантовой индустрии.

В качестве другого практически важного направления, совмещающего квантовые и нейроморфные технологии, в Центре «Квантовая оптика и квантовая информатика» с 2021 г. ведутся работы по использованию квантовых технологий для нейроморфных и резервуарных компьютеров, которые



Научно-учебный электронно-оптический комплекс лабораторных работ для подготовки специалистов в сфере квантовой оптики и квантовой информатики. Лабораторные работы: А – «Основы квантовых измерений», Б – «Корреляционные свойства излучения», В – «Квантовая интерференция»

по своим характеристикам и перспективам превосходят универсальные. Сотрудниками Центра создан квантовый искусственный нейрон на основе оптоэлектронной пары «вертикально-излучающий лазер – однофотонный лавинный фотодиод» с динамическими свойствами, аналогичными реальным биологическим нейронам, он в миллион раз быстрее биологического. Искусственные импульсные нейроны, объединенные вместе, образуют физические рекуррентные импульсные нейронные сети, важные для создания нейроморфных и резервуарных компьютеров. В рамках ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» (2021–2025 гг.) в Центре создана квантовая нейронная сеть с 6 искусственными нейронами с возможностью последующего масштабирования на большее число нейронов и реализацией квантовых нейроморфных компьютеров. В развитие квантовых сенсорных технологий с 2024 г. выполняется новое задание «Разработать и изготовить квантово-оптический магнитометр на основе использования спиновых кубитов центров окраски «азот-вакансия» в алмазе», в рамках которого запланировано создание уникального устройства, позволяющего измерять слабые магнитные поля при комнатной температуре на основе регистрации интенсивности флуоресценции, испускаемой ансамблем NV-центров в алмазе. Прибор будет применяться для исследований в геофизических, технологических и биомедицинских науках (измерение аномалий магнитного поля Земли, контроль токов в интегральных микросхемах, перезаряжаемых батареях, нейронах, биомембранах и т.п.), а также поможет выпускать новые виды портативных аппаратных средств измерения магнитных полей различной архитектуры и другие квантовые устройства на основе спиновых кубитов в алмазе, не имеющих аналогов в Беларуси и странах СНГ.

Сотрудники Центра также занимаются оценкой возможностей квантового компьютера и перспектив его создания.

В Центре «Квантовая оптика и квантовая информатика» работают 5 докторов и 6 кандидатов наук, 3 аспиранта и 3 магистранта. За последние два года в Центре защищены 2 докторские и 3 кандидатские диссертации по тематике квантовых технологий. Для обеспечения непрерывности процесса подготовки кадров для квантовой индустрии в Центре в 2022 г. разработан лабораторный практикум по квантовым технологиям с соответствующим экспериментальным оборудованием. В рамках ГНТП выполняется задание по введению еще одного лабораторного практикума по квантовой диагностике и квантовым фантомным изображениям, который будет готов для внедрения в учебный процесс в 2025 г. В Центре оборудовано специальное помещение, где студенты выполняют лабораторные работы на созданном оборудовании, делая первые шаги в удивительный мир квантовых технологий, которые стали одним из основных современных трендов развития. 

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марков А.А. Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга / А.А. Марков // Известия Физико-математического общества при Казанском университете. 1906. Т. 94. С. 135–156.
2. Ельяшевич М.А. От возникновения квантовых представлений до становления квантовой механики / М.А. Ельяшевич // Успехи физических наук. 1977. Т. 122. С. 673–717.
3. Fock V.A. Zur Schrodingerschen Wellenmechanik / V.A. Fock // Zeitschrift für Physik. 1926. Bd. 38. №3. P. 242–250.
4. Брумберг Е.М., Вавилов С.И. Визуальные измерения статистических флуктуаций фотонов // Известия Академии наук СССР. 1933. №7. С. 919–941; Вавилов С.И. Микроструктура света (исследования и очерки) / С.И. Вавилов. – М., 1950.
5. Килин С.Я. Квантовая информация / С.Я. Килин // Успехи физических наук. 1999. Т. 169, №5. С. 507–526; Kilin S. Ya. Chapter 1. Quanta and information / S. Ya. Kilin // Progress in Optics. 2001. Vol. 42. P. 1–91.