

НАЦИОНАЛЬНАЯ  
ПОВЕСТКА ДНЯ В  
ОБЛАСТИ **КВАНТОВЫХ**  
**ТЕХНОЛОГИЙ**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ ПОВЕСТКА ДНЯ В ОБЛАСТИ  
КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Сентябрь 2019 г.

## Предисловие

Меня зовут Роберт Дейкграаф. Я большой поклонник как науки, так и Нидерландов, которые эта Национальная программа в области квантовых технологий объединяет захватывающим образом.

Я часто говорю, что будущее уже здесь: оно в наших лабораториях и в головах наших ученых и инженеров. И квантовые технологии являются ключевой частью этого будущего. Помимо обеспечения основы для разработки фантастических новых устройств и отраслей промышленности, квантовые технологии могут позволить нам решить большие проблемы, стоящие перед нашим обществом, такие как изменение климата, здравоохранение, забота и безопасность.

Во всем мире люди инвестируют в квантовые технологии, но здесь, в

Нидерландах, нам выпала честь принять у себя ряд фантастических инициатив. Выдающиеся, ведущие в мире исследовательские институты, такие как QuTech в Делфте, QuSoft в Амстердаме и QT / e в Эйндховене, отличные исследовательские группы в Лейдене, Неймегене, Гронингене, Твенте и Утрехте, координирующие органы, такие как TNO и StartupDelta, а также ряд интересных промышленных партнерств и стартапов.

Сейчас самое время собрать все эти части воедино, принять вызов и

инвестировать в новые таланты, новых исследователей, новую инфраструктуру и промышленность -

другими словами, во всю экосистему. Этот документ устанавливает повестку дня для работы над прорывами в исследованиях и инновациях, над разработкой новых приложений и

рынков, над компетенциями, необходимыми в таких областях, как системная инженерия, и над

этическими, правовыми и социальными аспектами квантовых технологий. Если мы выполним эту программу,

к 2030 году у нас будет классная, захватывающая и новая наука, а также новая промышленность и,

возможно, новые решения для построения лучшего мира.

Поэтому я надеюсь, что вам понравится читать эту Национальную программу развития квантовых

технологий, и что вы поддержите ее. Потому что нам понадобится помощь в реализации описанных

инициатив и мероприятий, а также в создании предполагаемой голландской квантовой дельты QΔNL!

Роберт Дейкграаф

*Директор и профессор Леон Леви, Институт перспективных исследований, Принстон*



# Содержание

Предисловие .....	3
Краткое содержание .....	9
<b>1 НАЦИОНАЛЬНАЯ ПОВЕСТКА ДНЯ В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> .....	<b>13</b>
Потенциал квантовых технологий .....	13 1.1
1.2 Разработка Quantum Delta NL .....	14
1.3 Формулирование настоящей повестки дня .....	14
1.4 Требуются срочные действия .....	16
1.5 Структура повестки дня .....	17
<b>2 ЧТО ДЕЛАЕТ КВАНТОВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ ТАКОЙ ОСОБЕННОЙ?</b> .....	<b>19</b>
Ключевые принципы квантовой технологии .....	19 2.1
2.1.1 Запутанность .....	19
2.1.2 Наложение .....	19
2.2 Четыре перспективные области применения .....	21
2.2.1 Универсальные квантовые компьютеры .....	21
2.2.2 Квантовые симуляторы .....	23
2.2.3 Квантовая коммуникация .....	24 2.2.4
Квантовые датчики .....	26 2.3
Фундаментальные и технологические вызовы .....	27
2.3.1 Универсальные квантовые компьютеры .....	27
2.3.2 Квантовые симуляторы .....	30
2.3.3 Квантовая коммуникация .....	31
2.3.4 Квантовые сенсоры .....	33
2.3.5 Вызовы в других областях .....	35
2.4 Заключение .....	35
<b>3 СОЦИАЛЬНОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> .....	<b>37</b>
Краткосрочные и долгосрочные последствия .....	37 3.1
3.2 Влияние на все социальные миссии .....	39
3.2.1 Безопасность и конфиденциальность .....	40
3.2.2 Энергетика и устойчивость .....	42
3.2.3 Здравоохранение .....	43
3.2.4 Сельское хозяйство, водоснабжение и продовольственное обеспечение .....	44
3.2.5 Мобильность и логистика .....	45
3.3 Экономический эффект квантовых технологий .....	46
3.3.1 Экосистема для продуктов и услуг, основанных на квантовых технологиях .....	47
3.3.2 Рынок квантовых технологий .....	49
3.4 Этическое, юридическое и социальное воздействие .....	51
3.5 Заключение .....	53



ОБЛОЖКА ДЛЯ ФОТОГРАФИИ

Высокоскоростная система охлаждения "криостат", в которой кубиты охлаждаются до -273 °С. Для того чтобы кубиты сохраняли квантовое состояние достаточно долго, чтобы их можно было использовать для вычислений, требуются чрезвычайно низкие температуры.

# Содержание

4	ГОЛЛАНДСКИЙ КВАНТОВЫЙ ЛАНДШАФТ В МЕЖДУНАРОДНОМ КОНТЕКСТЕ	55
	Переплетение правительства, науки, промышленности и общества в целом	55
4.1	4.2 Нидерланды как "Квантовая страна"	56
4.2.1	Исследовательские центры QuTech, QuSoft и QT / e	56
4.2.2	Голландские научно-исследовательские институты и университеты	61
4.3	Глобальное игровое поле	64
4.3.1	События в Европе	65
4.3.2	События в Канаде и Соединенных Штатах	66
4.3.3	События в Китае	66
4.4	Баланс между национальной мощью и международным сотрудничеством	67
4.5	Заключение	69
5	БУДУЩАЯ ПОВЕСТКА ДНЯ QUANTUM DELTA NL	71
	Четыре направления действий и три программы CAT	71 5.1
5.2	Направление действий 1   Осуществление научных и инновационных прорывов	72
5.2.1	Квантовые вычисления	73
5.2.2	Квантовое моделирование	74
5.2.3	Квантовая коммуникация	75
5.2.4	Квантовое зондирование	75
5.2.5	Квантовые алгоритмы	76
5.2.6	Постквантовая криптография	76
5.3	Направление действий 2   Развитие экосистемы, создание рынка и инфраструктуры	
78 5.4	Направление действий 3   Человеческий капитал: образование, знания и навыки	
	82 5.5	
82 5.6	Направление действий 4   Начало социального диалога о квантовых технологиях	
5.6.1	Три программы CAT	83
	РАЗДЕЛ 1   Квантовые вычисления и моделирование	84
5.6.2	РАЗДЕЛ 2   Национальная квантовая сеть	86
5.6.3	CAT 3   Приложения для Квантового Зондирования	89
6	КРИТЕРИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОВЕСТКИ ДНЯ	93
	Организация и управление	93 6.1
6.2	Финансирование	93
	Колофон	96



## Краткие сведения

Квантовая технология - ключевая технология, которая позволяет создавать радикально новые продукты и услуги. Квантовые компьютеры, квантовые симуляторы, квантовые сети и quantum датчики скоро смогут делать то, чего не могут "классические" устройства, например, выполнять молекулярные расчеты и расчеты материалов и обеспечивать геолокацию без GPS. Таким образом, мы находимся на заре технологической революции, которая, как ожидается, внесет значительный вклад в решение социальных проблем в таких областях, как энергетика, снабжение продовольствием и здравоохранение. Нидерланды находятся в научном и технологическом авангарде разработок, и во всем мире правительства и корпорации вкладывают значительные средства в квантовые исследования и инновации.

Рынки также возлагают большие надежды на квантовые технологии. Исследователи прогнозируют, что в течение следующих двадцати через несколько лет рынок квантовых технологий вырастет до более чем 65 миллиардов долларов; к 2050 году мировой рынок, вероятно, будет стоить 300 миллиардов долларов. Были проведены параллели с полупроводниковой промышленностью: квантовые технологии находятся на той стадии развития, на которой были полупроводниковые технологии в 1950-х годах. И конечное социальное и экономическое воздействие квантовых технологий потенциально сравнимо с воздействием полупроводниковых технологий, конечно, когда принимаются во внимание последствия возможных побочных эффектов в других областях.

Эта Национальная программа в области квантовых технологий призвана позиционировать Нидерланды как ведущий мировой центр квантовых технологий: Quantum Delta NL, или сокращенно Q NL. Мы начинаем с отличной позиции: Голландские университеты и институты знаний находятся на переднем крае в областях кубитов, квантового интернета, квантовых алгоритмов и постквантовой криптографии. Следовательно, они очень привлекательны для коммерческих инвесторов и талантливых специалистов со всех уголков мира. Мы также сильны в системной инженерии и в объединении технологий для формирования операционных систем: области, жизненно важные для инноваций. Нидерланды намерены сохранить и усилить свою роль первопроходца. Так же, как Кремний

Долина была движущей силой и эпицентром полупроводниковых технологий и их приложений, Нидерланды стремятся стать центром квантовых технологий. Для привлечения талантливых людей и динамичных предприятий и, таким образом, для создания мощной квантовой экосистемы, занимающей видное место в европейском и глобальном ландшафте, необходимы передовые исследования, высококачественное образование, современное оборудование и программы вывода технологий на рынок.

### Будущая повестка дня QANL

Наращивание массы и совершенства в области знаний, талантов, инфраструктура и предпринимательство требуют новых инвестиций и приверженности. Помимо самой технологии, также очень важны социальное принятие и этические аспекты квантовой технологии. В этой повестке дня указано, что необходимо сделать. На рисунке 1 представлена структура повестки дня. Были определены четыре общесекторальных направления действий: реализация научных и инновационных прорывов; развитие экосистем, создание рынков и инфраструктуры; человеческий капитал; и начало социального диалога. Программа дополнительно определяет три амбициозные программы unifying catalyst (программы CAT), предназначенные для ускорения социального и рыночного внедрения квантовых технологий за счет использования демонстрационных средств, которые делают технологию осязаемой и дают конечным пользователям и исследователям возможность приобрести опыт ее использования. Программы также выполняют согласованную функцию, объединяя четыре направления деятельности, участников экосистемы, научные сообщества и сообщества пользователей. Будет создана национальная служба поддержки, которая будет направлять всех, кто хочет что-то сделать с помощью квантовых технологий, к соответствующим сторонам в Нидерландах.



## Три амбициозные программы CAT

### РАЗДЕЛ 1 | Квантовые вычисления и моделирование

Чтобы подготовить общество к квантовым компьютерам, quantum

приложения будут разработаны, и демо-версии будут

доступны онлайн через средства проекта CAT. Это

позволит правительству, бизнес-сообществу, разработчикам

технологий и студентам посетить квантовые компьютеры,

изучить их возможности и получить опыт реализации

на реальном оборудовании. Различные объекты

объединят институты знаний и предприятия, работающие

над квантовыми вычислениями, на национальном

уровне и по всему "стеку": от аппаратного обеспечения

до программного обеспечения и приложений.

### КАТЕГОРИЯ 2 | Национальная квантовая сеть

С целью вывода квантовых сетей и

квантового интернета на следующий этап развития,

будет создана национальная квантовая сеть, соединяющая

локальные кластеры знаний и открывающая путь для доступа

будущих пользователей. Программа позволит проводить как фундаментальные,

так и прикладные исследования и предоставит

производителям оборудования возможности для

участие путем развития компонентов инфраструктуры.

Открытая структура Национальной квантовой сети

также будет способствовать развитию мощного программного обеспечения

и индустрии безопасности. Наконец, сеть будет служить

национальным испытательным полигоном для приложений,

требующих больших объемов данных, таких как облачные

вычисления, Интернет вещей и автономное вождение.

### КАТЕГОРИЯ 3 | Приложения для квантового зондирования

Для дальнейшего стимулирования разработки и

применения квантовых датчиков будет создана междисциплинарная

платформа сотрудничества, где исследователи,

системные инженеры и разработчики смогут обмениваться

опытом, ресурсами и сотрудничать с предприятиями

и конечными пользователями в различных секторах, чтобы

определите варианты использования и разработайте соответствующие

прототипы. Также будет реализован

центр тестирования и использования квантовых датчиков для оказания

помощи предприятиям и другим организациям в области инноваций и

подготовке технологий к выходу на рынок. Также будут налажены

связи с смежными технологиями, такими как (интегрированная) фотоника

и электроника.

## Четыре направления деятельности

Национальная повестка дня в области квантовых технологий определяет четыре направления действий:

Направление действий 1 | Реализация прорывных научных исследований и

инноваций в шести областях: - Квантовые вычисления - Квантовое зондирование

- Квантовое моделирование - Квантовые алгоритмы

- Квантовая коммуникация - Постквантовая криптография

Направление действий 2 | Развитие экосистем, создание рынков и

инфраструктуры 1. Международное позиционирование QdNL и международное внедрение повестки

дня 2. Создание полевых лабораторий как практической инновационной среды

3. Расширение необходимых мощностей чистых помещений 4. Дальнейшее

развитие квантового кластера в Делфте для экосистемы Нидерландов

5. Расширение и укрепление местных центров в рамках национального ландшафта

6. Создание программы передачи технологий; поддержка стартапов

Направление действий 3 | Человеческий капитал: образование,

знания и навыки 7. Укрепление образования, сотрудничества и

обмена знаниями 8. Привлечение и удержание талантов из Нидерландов и других стран

9. Создание сообщества, конференции, летние школы и студенческие обмены

Направление действий 4 | Содействие общественному диалогу по квантовым

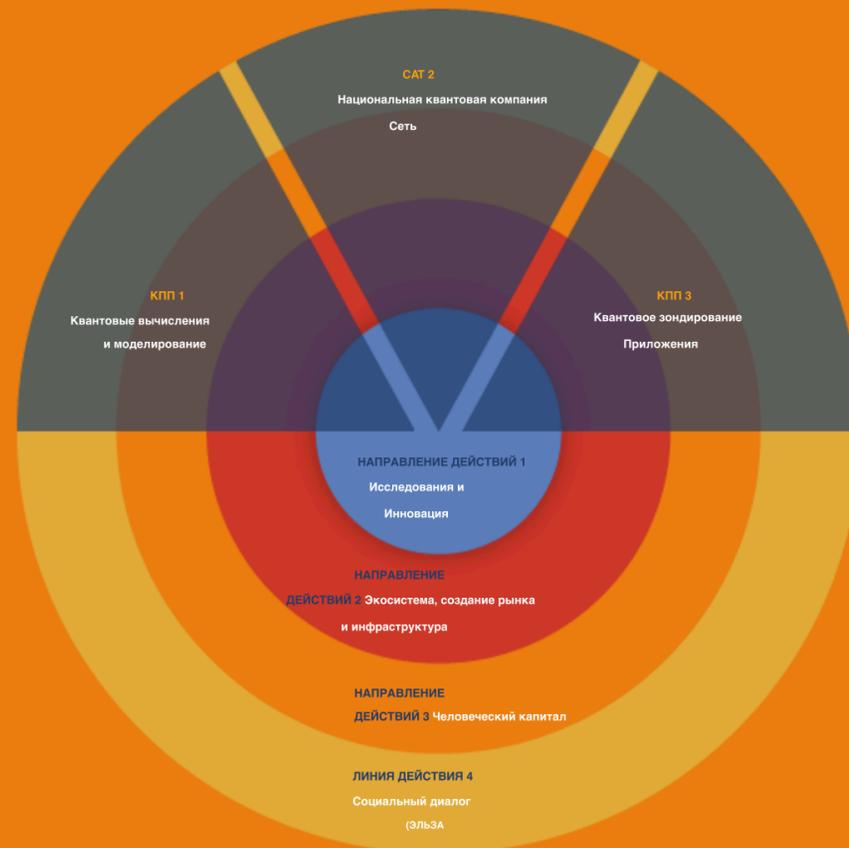
технологиям 10. Иницирование (международного) диалога по квантовым технологиям

11. Формирование национального комитета ELSA и профессорско-преподавательского

состава 12. Разработка правовых и этических основ для квантовых технологий

## РИСУНОК 1

Четыре направления действий и три амбициозные объединяющие программы CAT.



## Финансирование и организация

Общие годовые расходы на программу, включая

объем уже реализуемых программ оценивается в 102 миллиона

евро в год, из которых 69 миллионов покрываются текущими

программами. Новые направления деятельности потребуют

инвестиций в размере 34 миллионов долларов в год. Эта Программа

является результатом совместной работы основной команды людей с

разным опытом работы, но общей целью. Многочисленные члены

"золотого треугольника" были задействованы по различным каналам,

включая широко посещаемый национальный день открытых дверей в

апреле 2019 года и консультативную группу, состоящую примерно из

пятидесяти представителей научного, делового и правительственного

сообществ. Действуя как коалиция, основная команда готова

контролировать реализацию повестки дня и намерена энергично приложить все усилия

для решения этой задачи.

## Требуется срочность.

Реализацию этой программы, не следует откладывать.

Остальной мир не стоит на месте: другие страны

вкладывают значительные средства, и уже ведется ожесточенная

битва за мозги. Более того, технология стратегически

важно для нашего суверенитета. Если Нидерланды хотят сохранить

лидирующие позиции, прогресса необходимо добиваться быстро.

Должны быть выделены средства, а также должны быть определены

стратегические приоритеты и решены их задачи. Причина в том, что

развитие квантовых технологий обязательно является

международным явлением: ни одна страна не может разработать технологию

в одиночку, но многие страны стремятся максимизировать

долю усилий по развитию, которые предпринимаются в пределах

их границ. Интересам Нидерландов наилучшим образом отвечает

достижение оптимального баланса между национальной мощью

и международным сотрудничеством, что успешно реализовано в

водном секторе и, благодаря региону Brainport, в полупроводниковой

промышленности. Превосходное положение, которым

мы уже пользуемся в области квантовых технологий, означает, что у

нас есть отличная возможность повторить эти успехи.



"Сейчас мы являемся свидетелями рассвета второй квантовой революции. Следовательно, это захватывающие времена".

# 01

## НАЦИОНАЛЬНАЯ ПОВЕСТКА ДНЯ В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### 1.1 Потенциал квантовых технологий

Квантовые технологии - горячая тема во всем мире. После первой квантовой революции в двадцатом веке, которая дала нам такие изобретения, как транзистор и лазер, и, таким образом, привела к современному компьютерному и основанному на Интернете информационному обществу, мы сейчас находимся на заре второй квантовой революции. Таким образом, это захватывающие времена, потому что вторая волна квантовых технологий

позволит делать то, что невозможно сделать с помощью "классических" устройств. Например, квантовые компьютеры будут обладать потенциалом для решения определенных проблем гораздо быстрее, чем это когда-либо могло быть достигнуто с помощью обычных компьютеров, в то время как квантовое моделирование откроет путь к пониманию квантовых процессов, таких как сложное поведение молекул.

С помощью квантовой связи определенные распределенные проблемы могут быть решены более эффективно, а безопасность обмена информацией может быть повышена за счет того, что перехват сообщений становится практически невозможным - если бы кто-нибудь попытался, это было бы сразу очевидно отправителю и получателю. Между тем, квантовые датчики будут способны выполнять точные измерения в очень малом масштабе, способами, невозможными для обычных датчиков.

Квантовая технология - это "просто" технология, основанная на принципах квантовой механики, нашей самой проверенной и точной теории мира. Тем не менее, квантовая технология воспринимается многими людьми как таинственная - почти волшебная. "Если вы думаете, что понимаете квантовую механику, вы не понимаете квантовую механику".

знаменитый физик Ричард Фейнман однажды сказал. Однако, из различных крупных прорывов, сделанных за последнее десятилетие, ясно, что эти принципы могут быть применены в новаторских новых технологиях. Для будущих поколений квантовых техников, которые сейчас проходят подготовку, квантовая механика станет практической дисциплиной. Радикальные новые приложения, появившиеся благодаря второй квантовой революции, создадут многообещающие возможности для производителей и могут помочь в решении некоторых серьезных проблем, стоящих перед обществом в таких областях, как энергетика, снабжение продовольствием и здравоохранение. Поэтому неудивительно, что правительства и корпорации по всему миру вкладывают значительные средства в квантовые технологии. Хотя эти инвестиции уже приносят первые коммерческие результаты, потенциал этой области остается почти полностью неиспользованным.

Как только мы овладеем квантовой технологией, она преобразит наш мир. Объявляя о присуждении Нобелевской премии по физике за 2012 год Сержу Гарошу и Дэвиду

Вайнленду, Нобелевский комитет сказал: "Возможно, квантовый компьютер изменит нашу повседневную жизнь в этом столетии таким же радикальным образом, как это сделал классический компьютер в прошлом столетии". Привлекательная перспектива, особенно учитывая, что инвестиции в разработку квантовых компьютеров, квантовых сетей, квантовых симуляторов и квантовых датчиков, несомненно, будут иметь побочные эффекты в других областях. Можно провести параллели между стремлением к квантовым технологиям и космической программой: миссия по отправке человека на Луну привела к разработке новых легких материалов, медицинских устройств, амортизирующей обуви и бесчисленного множества других побочных продуктов.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Смотрите: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/00660main\\_ApolloFS.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/00660main_ApolloFS.pdf)

Короче говоря, квантовые технологии обладают огромным потенциалом для науки, промышленности и общества в целом. Эта повестка дня устанавливает возможности, временные рамки и инициативы для реализации этого потенциала.

## 1.2

### Разработка Quantum Delta NL

Нидерланды занимают выдающуюся стартовую позицию и поэтому идеально подходят для использования возможностей, которые предлагают квантовые технологии. Голландские университеты и научные учреждения находятся в авангарде глобального стремления к разработке квантового оборудования и программного обеспечения, а также связанных с ними систем управления, алгоритмов и приложений. Мы являемся одной из ведущих стран мира в области кубитов, квантового интернета, квантовых алгоритмов и постквантовой криптографии. Исследование Elsevier<sup>2</sup> например, было обнаружено, что голландские публикации по квантовой коммуникации, квантовым вычислениям и технологиям шифрования имели рейтинг цитируемости от 1,6 до 2,1 - лучший показатель в Европе и намного выше среднемирового показателя в 1,0. Рейтинг цитируемости является показателем влияния исследований, и такие высокие баллы являются явным свидетельством того, что в нашей стране проводятся выдающиеся исследования. Компания Delft QuTech, National Icon с 2014 года является совместным институтом знаний TUD / TNO с уникальной глобальной позицией, что недавно было подтверждено отличными оценками и отзывами в ходе международной оценки, проведенной под руководством Роберта Дейкграфа.<sup>3</sup> Другие сильные совместные предприятия также оставляют свой след, в том числе QuSoft в Амстердаме и QT / e в Эйндховене. Все эти базирующиеся в Голландии институты тесно сотрудничают с университетами, стартапами и известными предприятиями, такими как Microsoft, Intel, ABN AMRO, Delft Circuits, Qblox, Bosch и Shell. В феврале 2019 года, например, король Виллем-Александр открыл Квантовую лабораторию Microsoft в кампусе Делфтского технологического университета.

Нидерланды намерены сохранить и усилить свою новаторскую роль. Игроки, действующие в голландском следователно, экосистема направлена на превращение Нидерландов в ведущий мировой центр квантовых технологий: квантовая дельта NL, или Q Сокращенно ΔNL. И сейчас настало время воплотить эти амбиции в реальность. Квантовая технология

в настоящее время она находится на стадии развития, сравнимой с технологией производства транзисторов в 1950-х годах, и все знают, какая огромная индустрия возникла в результате этого зарождения. Точно так же, как Кремниевая долина была движущей силой и эпицентром полупроводниковых технологий и их приложений, Нидерланды хотят стать центром развития квантовых технологий. Новаторские исследования, высококачественное образование, современное оборудование для разработки и тестирования технологий и новых приложений необходимы для привлечения талантливых людей и динамичных предприятий и, таким образом, для создания мощной квантовой экосистемы в Нидерландах.

Наращивание массы и совершенства в знаниях, талантах, инфраструктура и предпринимательство требуют новых инвестиций и приверженности. Необходимо уделять внимание не только самой технологии, но и общественному признанию и этическим аспектам квантовой технологии. Эта программа обеспечивает отправную точку для достижения этих целей; она призвана привести в движение маховик, как показано на рисунке 2. Для получения доказательства того, что в Нидерландах может быть достигнут эффект маховика, нам не нужно заглядывать дальше сектора ИКТ. Благодаря ранним инвестициям в развитие интернет-технологий наша страна обеспечила себе прочные позиции на международной арене ИКТ. И выгоды были значительными: Амстердамская интернет-биржа (AMS-IX) стала одним из крупнейших в мире интернет-хабов, в страну пришли крупные центры обработки данных, а в Нидерландах появились глобальные игроки, такие как Aduen Payments и Booking.com . С помощью этой программы мы хотим проложить путь для Нидерландов, чтобы они могли играть аналогичную роль в области квантовых технологий.

## 1.3

### Формулирование этой повестки дня

Весной 2019 года по просьбе государственного секретаря по экономическим вопросам и климатической политике, а также ведущих секторов высокотехнологичных систем и материалов и ИКТ голландские институты знаний и предприятия приступили к описанию того, что требуется для реализации их амбиций в области квантовых технологий. TNO, QuTech, QuSoft, EZK, Голландский исследовательский совет (NWO), QT / e и Институт Лоренца связались с AMS-IX, StartupDelta (Techlear, n) и Microsoft, чтобы принять вызов в рамках

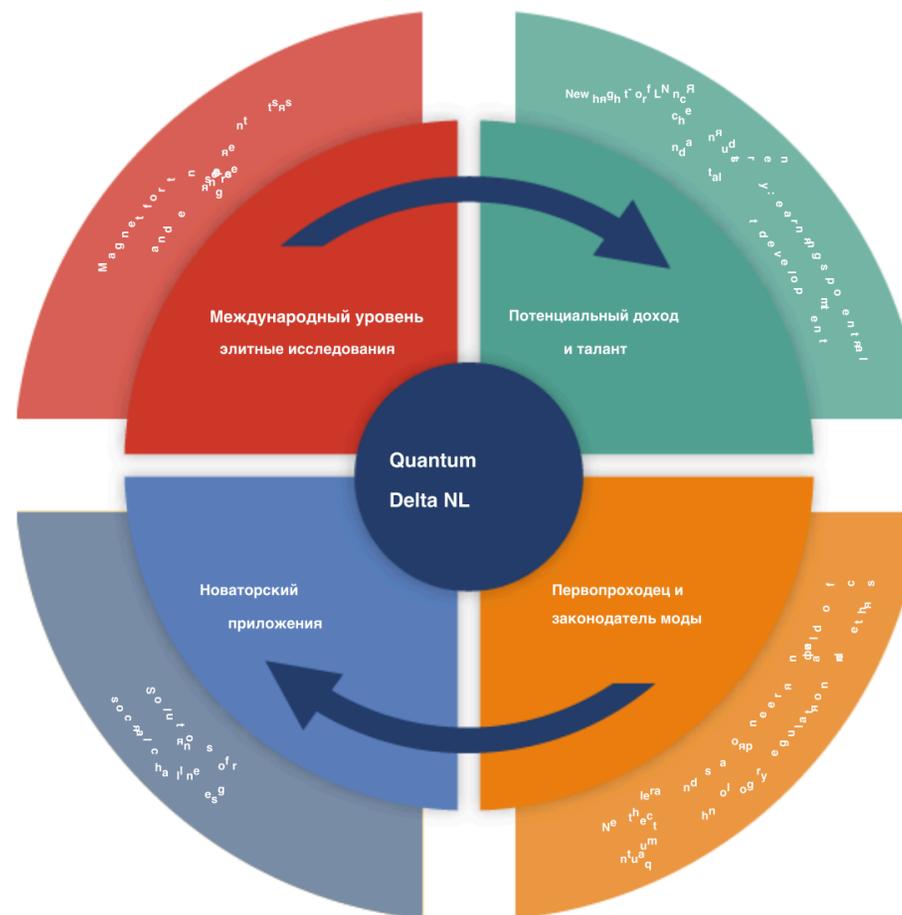


РИСУНОК 2

Стремление Нидерландов создать ведущий в мире центр квантовых технологий: Quantum Delta NL.

Четыре сектора отражают масштаб этих амбиций, в то время как стрелки в центре символизируют взаимодействие между четырьмя областями. Они также подчеркивают цель этой национальной программы: действовать в качестве маховика для разработки и применения квантовых технологий в Нидерландах.

Процесс KIA/KIC и многолетние программы для ключевых технологий в тесной консультации со всей областью. Многочисленные участники "золотого треугольника" были вовлечены в формулирование этой повестки дня, внося свой вклад, например, в проведение широко посещаемого национального дня открытых дверей и консультационной группы широкого профиля, в состав которой входили представители Министерства обороны Нидерландов и Министерства внутренних дел и по связям с королевством. Эта Национальная программа в области квантовых технологий является продуктом этого процесса.

Важность квантовых технологий признается правительствами Нидерландов и Европы, оба из которых определили квантовую технологию в качестве ключевой технологии. Политика предложения и руководящие принципы были изложены, например, в разделе

европейский Флагман Quantum<sup>4</sup> , квантовый манифест<sup>5</sup> и Манифест Quantum Software (2017), а также письмо голландского правительства парламенту от 13 июля 2018 года, озаглавленное "К инновационной политике, основанной на миссии и оказывающей влияние"<sup>6</sup> . В инновационной политике, основанной на миссии, акцент делается на экономических возможностях, связанных с социальными вызовами , и ключевых технологиях. Определены четыре центральные темы: сельское хозяйство, водоснабжение и продовольственное обеспечение; здравоохранение и социальная помощь; переход к энергоснабжению и долговечность; и безопасность. Ключевые технологии образуют пятую тему; квантовые технологии определены как один из восьми кластеров ключевых технологий. Эта политика была взята за отправную точку для этой повестки дня.

<sup>2</sup> Elsevier, "Количественный анализ исследований и инноваций в ключевых технологиях в Нидерландах", июнь 2018 г.

<sup>3</sup> Смотрите: [https://www.qanl.nl/sites/default/files/inline-files/QANUN%20Report%20Mid-Term%20Review%20QuTech%202015-2018\\_def.pdf](https://www.qanl.nl/sites/default/files/inline-files/QANUN%20Report%20Mid-Term%20Review%20QuTech%202015-2018_def.pdf)

<sup>4</sup> Смотрите: <https://qt.eu/>

<sup>5</sup> Квантовый манифест: новая эра технологий, май 2016г.

<sup>6</sup> Парламентский документ 33 009 (2017-2018), № 63.



#### 1.4

##### Требуются срочные действия.

Осуществление этой повестки дня не должно откладываться. Другие страны не стоят на месте; они вкладывают значительные средства в квантовые технологии. Китай и США объявили о планах вложить в эту область миллиарды долларов, и другие европейские страны не бездействовали. Германия, например, планирует инвестировать 650 миллионов евро, Великобритания обязалась продолжить свою первую национальную программу по квантовым технологиям, а Швеция, хотя и намного меньше, пообещала 100 миллионов евро на квантовые технологии. Европейский союз выделил миллиард евро для финансирования своего флагмана квантовых технологий и предпринял первые шаги к созданию европейской инфраструктуры квантовой связи; голландские стороны участвуют в обеих инициативах.

Если Нидерланды хотят сохранить лидирующие позиции, стране необходимо действовать быстро и инвестировать самостоятельно. Помимо выделения средств, необходимо определить и решить стратегические приоритеты. Причины для этого включают защиту нашего суверенитета. Квантовые технологии имеют

стратегическое значение. Если Нидерланды и Европа не хотят зависеть от Соединенных Штатов и Китая, нам необходимо инвестировать в эту область. Нидерланды должны использовать свои ресурсы разумно и эффективно, и мы должны согласовать нашу деятельность с деятельностью других стран ЕС и НАТО. В то время как в Китае централизован государственный контроль, а в Соединенных Штатах ведущую роль играют корпорации, европейский подход основан на тесном междисциплинарном сотрудничестве между правительством и научными и деловыми сообществами. Такой подход имеет прочные традиции в Нидерландах, о чем свидетельствует формулирование этой программы. Мы преуспеваем в совместной разработке, реализации и применении. И мы можем использовать этот потенциал в наших интересах.

#### 1.5

##### Структура повестки дня

Структура Национальной повестки дня в области квантовых технологий выглядит следующим образом: после введения

Раздел 1, ряд ключевых принципов квантовой технологии

изложены в разделе 2 и переведены в четыре наиболее

перспективных области применения. Раздел 2 также включает в себя краткое изложение текущих научных и технологических проблем.

Раздел 3 посвящен социальному и экономическому воздействию квантовых технологий. Потенциал технологии для решения социальных проблем и стимулирования экономики Нидерландов в общих чертах описан в связи с четырьмя миссиями и различными секторами экономики. Также рассматриваются этические, юридические и социальные последствия применения квантовой технологии.

В разделе 4 описывается голландский квантовый ландшафт с международной точки зрения, охватывающей исследования, образование и коммерцию. Подчеркивается, что в науке, образовании и сотрудничестве между государственным и частным секторами Нидерланды играют ведущую роль, о чем свидетельствуют многочисленные примеры, представленные во вставках. Также рассматривается международное сотрудничество, необходимое для реализации амбиций этой повестки дня.

Основываясь на разделах 3 и 4, в разделе 5 объясняется, что необходимо сделать, чтобы воспользоваться выявленными возможностями и превратить Нидерланды в ведущий мировой центр квантовых технологий. Мероприятия разделены на четыре направления деятельности:

##### Направление действий 1

Реализация научных исследований и инновационных прорывов;

##### Направление действий 2

Развитие экосистемы, создание рынка и инфраструктуры;

##### Направление действий 3

Человеческий капитал: образование, знания и навыки;

##### Направление действий 4 Начало

социального диалога о квантовых технологиях.

Повестка дня дополнительно определяет три передовые каталитические программы (CAT programs), целью которых будет продемонстрировать достижения в области квантовых технологий, чтобы они стали осозаемыми, и ускорить их социальное и промышленное внедрение. CATs представляют собой ускорение и взаимосвязь: они охватывают четыре направления деятельности повестки дня, объединяют различных игроков, действующих в экосистеме, объединяют аппаратное и программное обеспечение и связывают науку и исследования с примерами использования и приложениями. Тремя программами CAT являются:

##### РАЗДЕЛ 1

Квантовые вычисления и моделирование.

##### CAT 2 Национальная

квантовая сеть

##### CAT 3 Приложения для

квантового зондирования

Критерии для внедрения и реализации повестки дня изложены в разделе 6. Также рассматриваются организация, управление и финансирование реализации повестки дня.



"Квантовая технология позволяет делать то, что невозможно при классической технологии".

## 02

### ЧТО ДЕЛАЕТ КВАНТОВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ ТАКОЙ ОСОБЕННОЙ?

#### 2.1 Ключевые принципы квантовой технологии

Квантовая механика восходит к началу двадцатого века, когда начали появляться экспериментальные результаты, которые не могли быть объяснены с помощью устоявшихся научных теорий того времени. Соответственно, новая теория была разработана ведущими европейскими физиками, такими как Эйнштейн, Бор, Шредингер и Гейзенберг. Эта "квантовая теория" объясняет поведение энергии и вещества на атомном и субатомном уровнях: мир мельчайших "квантовых частиц". Многочисленные голландские физики, включая лауреатов Нобелевской премии Камерлинг-Оннеса, Лоренца и Зеемана, внесли важный вклад в квантовую теорию. Поведение квантовых частиц формирует основу для работы квантовых компьютеров, систем квантовой связи, квантовых датчиков и квантовых симуляторов, как объясняется в подразделе 2.2. Чтобы помочь пониманию этой темы, сначала рассматриваются два ключевых принципа квантовой механики: запутанность и суперпозиция. В значительной степени именно применение этих двух принципов лежит в основе второй квантовой революции.

##### 2.1.1 Запутанность

Запутанность - это явление, которое возникает, когда две или более квантовых частиц (например, фотоны или электроны) входят в состояние, которое не может быть описано исключительно состояниями отдельных частиц; частицы как бы образуют единую систему. Если две частицы сцеплены, измерение состояния одной частицы мгновенно дает информацию о состоянии другой, даже если две частицы находятся не рядом

вместе. Создается впечатление, что они общаются и обмениваются информацией мгновенно, то есть быстрее скорости света. Однако это не так. Это то, что мы, люди, на самом деле не можем понять. Хотя Эйнштейн впоследствии пренебрежительно относился к этому "жуткому действию на расстоянии", с тех пор было экспериментально продемонстрировано, что запутанность - это реальное явление. В 2015 году в QuTech в Делфте был проведен эксперимент, впервые убедительно показавший, что запутывание может оставаться эффективным даже на расстоянии.<sup>7</sup>

##### 2.1.2 Наложение

Квантовая частица может находиться в нескольких состояниях одновременно. Например, вращение электрона в магнитном поле может быть случайной комбинацией "вверх" и "вниз", пока мы не измерим его и не определим единственное направление движения. Это в отличие от монеты, которая, как мы знаем, находится либо орлом, либо решкой вверх; она не находится в комбинированном состоянии (как орлом, так и решкой вверх), пока мы на нее не взглянем. Этот принцип квантовой механики известен как суперпозиция, и он тоже за пределами человеческого понимания.

<sup>7</sup> "Нарушение неравенства Белла без лазеек с использованием электронных спинов, разделенных 1,3 километрами", Хенсен Б. и др., Nature 526 (2015).

Запутанность и суперпозиция проиллюстрированы во вставке во вставке со ссылкой на кота Шредингера.\* На иллюстрации кошки символизируют состояния микроскопических квантовых систем (состоящих, например, из фотонов или электронов).

В макроскопических системах (таких как настоящие кошки) явления не наблюдаемы; они как бы "усредняются".

### Кот Шредингера: наложение и запутанность

#### Наложение



Это белая кошка в состоянии суперпозиции: ее состояние одновременно "мертво" и "живо".

(Знак плюс (+) указывает на состояние суперпозиции; квадратные скобки ([ >] указывают на отдельные одновременные состояния, известные как "собственные состояния".) Как

только вы смотрите на кошку (выполняете измерение), вы замечаете, что она либо мертва, либо

жива: суперпозиция "разрушается", оставляя единственное собственное состояние.

#### Четкие суперпозиции без запутывания



Здесь у нас есть две кошки: одна белая и одна черная. Каждый из них по отдельности находится в состоянии суперпозиции, будучи одновременно мертвым и живым. Если вы посмотрите на белую кошку и таким образом определите ее состояние, вы ничего не узнаете о состоянии черной кошки. Следовательно, кошки не перепутаны.

#### Две перепутанные кошки



Опять же, у нас есть две кошки: одна белая и одна черная. Их совместное состояние представляет собой суперпозицию состояний "обе кошки мертвы" и "обе кошки живы". Если вы посмотрите на белую кошку и таким образом определите, что она мертва, состояние черной кошки тоже мгновенно станет "мертвым". Если вы заметите, что белая кошка живая, черная кошка мгновенно тоже станет "живой", даже если она находится далеко от белой. Это называется запутыванием.

РИСУНОК 3

Структура европейского флага Quantum.



## 2.2

### Четыре перспективных области применения.

В контексте этой повестки дня квантовые технологии разделены на четыре основные области применения, соответствующие европейскому квантовому фламану: квантовые вычисления, квантовая коммуникация, квантовое моделирование и квантовое зондирование и метрология. Флагман Quantum также определяет три области работы, которые имеют отношение ко всем четырем основным направлениям: инженерия и контроль, программное обеспечение и теория, а также образование и профессиональная подготовка. В основе всей структуры лежит то, что Флагманский проект называет "фундаментальной наукой". Структура флага Quantum проиллюстрирована на рисунке 3.

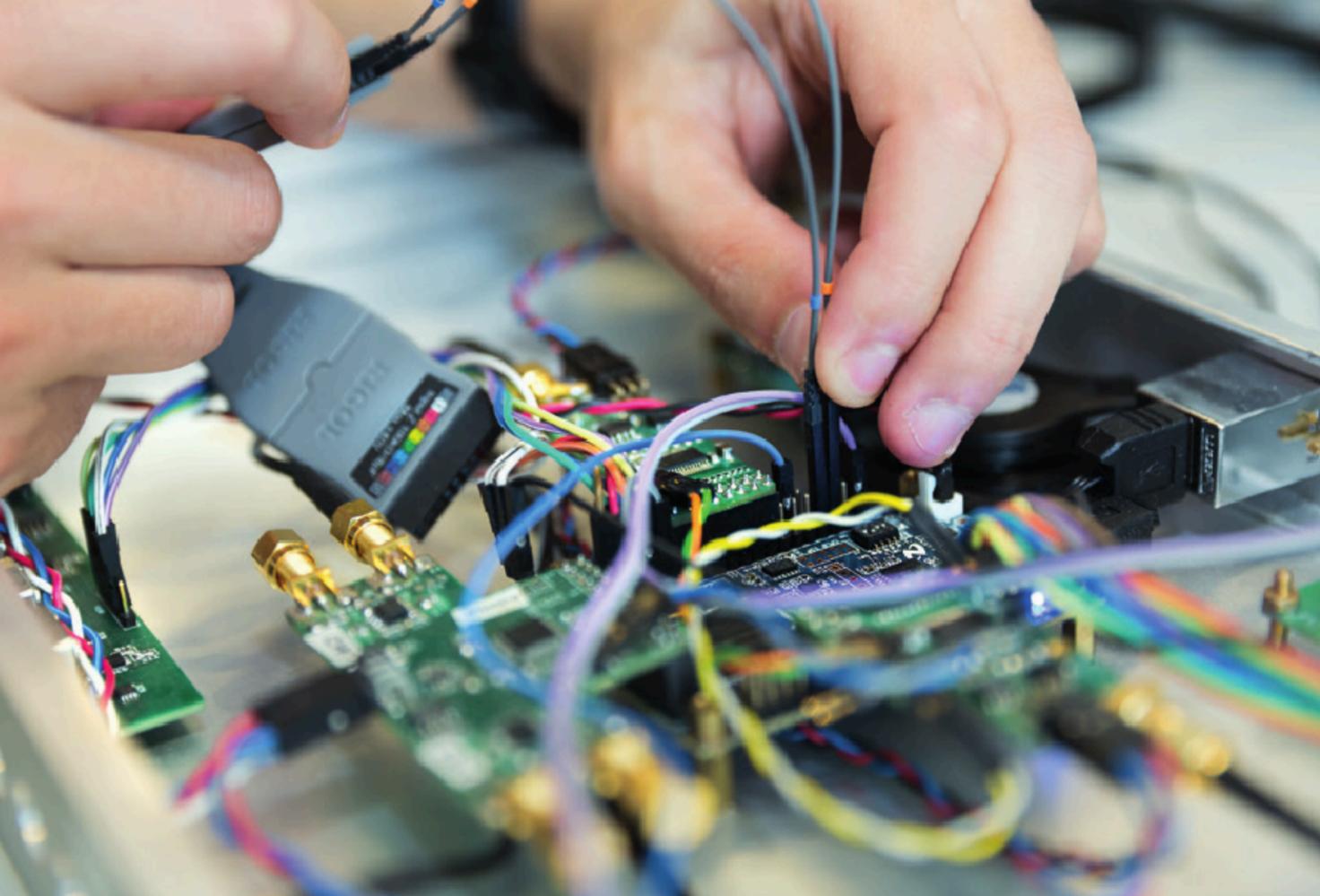
#### 2.2.1 Универсальные квантовые компьютеры

Квантовые компьютеры разумно используют квантовые механические эффекты, при этом важную роль играют суперпозиция и запутанность. В результате их работа принципиально отличается от работы классических компьютеров. Классический компьютер вычисляет, используя биты, каждый из которых может иметь значение 0 или 1. Квантовый компьютер использует кубиты (сокращение от "квантовых битов"), значение которых может одновременно быть как 0, так и 1. Другими словами, кубит может находиться в суперпозиции 0 и 1. Кубиты в квантовом компьютере могут в совокупности находиться в суперпозиции всех возможных состояний. Заставляя компьютер выполнять операции с кубитами, в принципе возможно выполнять несколько вычислений одновременно, как описано во вставке, сравнивающей квантовый компьютер и классический компьютер.

Поскольку они могут выполнять несколько операций одновременно, квантовые компьютеры потенциально могут решать задачи, которые практически невозможны для классических компьютеров из-за экспоненциально увеличивающегося неравенства во времени. Квантовые компьютеры не заменят классические компьютеры, но могут позволить выполнять определенные вычисления, требующие большей вычислительной мощности, чем когда-либо могут обладать классические компьютеры. Это открывает путь для революционных приложений, таких как решение сложных задач оптимизации, или прогнозирование, имитационное моделирование поведения молекул, катализаторов и новых материалов. Универсальные квантовые компьютеры - это цифровые машины, основанные на "гейтах". Как и классические компьютеры, их можно многократно перепрограммировать для решения новых задач.

Прогресс в области квантового оборудования был таков, что квантовые компьютеры, вероятно, станут доступны для определенных приложений в течение нескольких лет. Точно так же, как классический компьютер непригоден для использования без соответствующего программного обеспечения, квантовый компьютер не имеет никакой ценности, если также не доступно хорошее квантовое программное обеспечение. Следовательно, и квантовое оборудование, и квантовое программное обеспечение необходимы для реализации перспектив квантовых вычислений.

\* В 1930-х годах известный австрийский физик Эрвин Шредингер провел мысленный эксперимент с кошкой, который с тех пор привлек столько внимания, что теперь известен просто как "кот Шредингера".



## Сравнение квантового компьютера и классического компьютера

Классический компьютер выполняет операции с битами, каждый из которых имеет значение 0 или 1. Предположим, что мы используем классический компьютер для выполнения вычислений с битом, значение которого равно 0. Чтобы произвести то же самое вычисление с битом, значение которого равно 1, классический компьютер должен выполнить совершенно отдельную операцию. Однако квантовый компьютер, выполняющий ту же операцию над кубитом (чье значение является суперпозицией 0 и 1), одновременно получит результат, связанный с битовым значением 0, и результат, связанный с битовым значением 1, в суперпозиции. Другими словами, в то время как классическому компьютеру необходимо выполнить две отдельные операции, квантовый компьютер может получить тот же результат с помощью одной операции. Преимущество этого увеличивается экспоненциально по мере увеличения количества используемых кубитов: в то время как классический компьютер может выполнять  $n$  операций с  $n$  битами, квантовый компьютер в принципе может выполнять  $2^n$  одновременные операции с  $n$  кубитами. Таким образом, квантовый компьютер может в принципе вычислить  $2^n$  в разы быстрее, чем классический компьютер. Однако здесь есть одна загвоздка.

Как только вычисление выполнено и значения кубитов считаны, состояние суперпозиции разрушается, и все кубиты принимают одно значение. Следовательно, квантовый компьютер - это не "просто" очень быстрый компьютер, выполняющий параллельные вычисления. Измеренное значение, конечно, должно представлять правильный результат. И, в этом контексте, вмешательство<sup>4</sup> и программное обеспечение оказывают влияние. Квантовые алгоритмы должны гарантировать, что в конечном итоге мы получим "правильный" ответ (посредством конструктивного вмешательства) и что "неправильные" ответы будут устранены (деструктивное вмешательство). Таким образом, написание квантового программного обеспечения фундаментально отличается от написания классического программного обеспечения: квантовое программное обеспечение часто использует совершенно новые и часто противоречащие интуиции идеи.

<sup>4</sup> В квантовой механике частицу также можно описать как материальную волну: она одновременно обладает свойствами частицы и свойствами волны. Это явление известно как корпускулярно-волновой дуализм. Волновые явления подвержены интерференции, результатом которой может быть усиление ("конструктивная интерференция") или угасание ("деструктивная интерференция") волны.

## Стек квантовых вычислений

Как квантовое оборудование, так и квантовое программное обеспечение необходимы для реализации перспектив квантовых вычислений. Средний пользователь классического компьютера использует программное обеспечение на уровне, далеком от отдельных транзисторов машины: между пользователем и чипом находятся бесчисленные алгоритмы, которые гарантируют, что щелчок мышью генерирует последовательность электронных сигналов в нанометровом масштабе, что приводит, например, к открытию электронного письма.

Квантовые машины имеют аналогичную многоуровневую структуру, как показано на рисунке<sup>19</sup>. Стек квантовых вычислений состоит из нескольких "уровней": от взаимодействия с внешним миром с помощью алгоритмов и программного обеспечения до аппаратного контроля над отдельными кубитами на квантовом чипе. Точно так же, как квантовый компьютер или симулятор имеет стек, подобный показанному на рисунке, квантовая сеть (где команды для запутывания частиц или считывания квантового состояния отдаются на машинном уровне, в то время как пользователь ищет доступ к определенным данным через веб-интерфейс) имеет программный стек. Аналогично, требуется несколько аппаратных и программных уровней, позволяющих использовать и считывать данные квантовых датчиков. Сложность набора датчиков зависит от области применения (например, сеть квантовых датчиков в самолете для целей навигации, при этом пилот или автопилот принимают решения о корректировке курса на самом высоком уровне).

Для реализации приложений и вариантов конечного использования, необходимо будет разработать квантовые алгоритмы и квантовые приложения. Как независимая от платформы разработка на верхних уровнях стека, так и предусмотрена разработка аппаратно-ориентированных квантовых алгоритмов и квантовых приложений. Более того, разработка нового квантового оборудования на нижних уровнях стека будет стимулировать непрерывные инновации на верхних уровнях. В конечном счете, два пути развития необходимо будет интегрировать в интересах последовательных инноваций.



## 2.2.2 Квантовых симулятора

В то время как универсальный квантовый компьютер можно постоянно перепрограммировать для решения новых и отличных задач, квантовый симулятор на самом деле является квантовым компьютером, который (на сегодняшний день) обычно имеет единственное конкретное применение или назначение; это квантовый компьютер специального назначения. Например, создаются квантовые симуляторы, которые могут моделировать конкретные молекулярные взаимодействия или решать конкретные задачи оптимизации. Квантовые симуляторы также играют важную роль в компиляции и оптимизации протоколов квантового программного обеспечения ("квантовый код"). Концепция квантового симулятора восходит непосредственно к предложению Ричарда Фейнмана в 1982 году о том, что было бы гораздо лучше решать сложные квантовомеханические задачи с помощью другого

лучше использовать квантовую систему, чем классический компьютер. Успех этого подхода будет зависеть, однако, от того, будет ли строиться и управляться ли рассматриваемая квантовая система в строго контролируемых условиях. Такие квантовые симуляторы могут служить инструментами для решения многочастичных задач в физике твердого тела, квантовой химии, материаловедении и физике высоких энергий. Эта способность основана на использовании квантовомеханических явлений - в конце концов, квантовый симулятор по определению является квантовой системой. Существуют различные способы создания квантовых симуляторов, включая применение чрезвычайно холодных атомов, электронов с поляризованными фотонами и электронов, расположенных в искусственных решетках. Квантово-механические взаимодействия (включающие

<sup>19</sup> Иллюстрация: Козн Бертельс, "Архитектура полной системы", представленная во время семинара на Международной конференции по параллельной обработке (ICPP), Орегон, США, 13 августа 2018 года.

суперпозиция (или запутанность) между атомами, электронами или фотонами позволяет таким системам моделировать другие сложные квантовые системы.

Для вычислительных целей специальное квантовое устройство также может использоваться в качестве квантового сопроцессора в тандеме с классическим компьютером. Такая установка называется гибридным квантовым симулятором. Гибридный симулятор включает в себя математический "цикл" через квантовый сопроцессор, который позволяет выполнять сложные вычисления, которые были бы практически невозможны при использовании только классических процессоров. Экспериментальные результаты уже достигнуты, включая квантовое моделирование сложного квантового электродинамического расчета, описанного во вставном тексте.

### 2.2.3 Квантовая коммуникация

В квантовой коммуникации важную роль играет принцип запутанности. Кубиты могут быть переплетены друг с другом, что позволяет коррелировать квантовые состояния различных частиц на больших расстояниях. Другим свойством кубитов является то, что они не могут быть скопированы с сохранением суперпозиции. Следовательно, любая попытка перехватить, прочитать и переслать сообщение на основе кубитов обнаруживается путем сравнения

состояния принятых кубитов совпадают с состояниями отправленных кубитов. Таким образом, квантовая коммуникация потенциально невосприимчива к внешнему вмешательству при условии, что отправляющая и принимающая стороны могут надежно идентифицировать друг друга. Это открывает путь для обмена и обработки данных фундаментальным безопасным способом. Однако передача кубитов на большие расстояния не является простой. Для решения этой проблемы предпринимаются усилия по разработке специальных "квантовых повторителей".

Ожидается, что со временем различные сети квантовой связи превратятся в глобальный "квантовый интернет", обеспечивающий безопасную связь, безопасные онлайн-приложения и безопасную проверку местоположения. Другие возможные приложения включают синхронизацию атомных часов и создание большой сети квантовых вычислений путем соединения географически распределенных квантовых компьютеров. Используя запутанность, такая сеть могла бы открыть путь для выполнения вычислений на удаленных квантовых компьютерах без риска несанкционированного перехвата данных. Квантовый интернет также позволил бы объединить телескопы по всему миру в единый гигантский телескоп, способный заглядывать в космос глубже, чем когда-либо прежде.

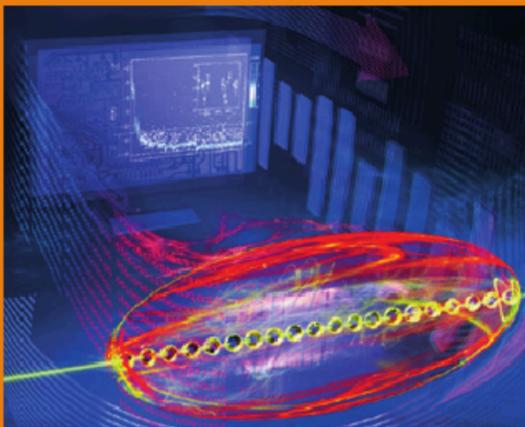
включая этап "Квантовой памяти" на рисунке 4) будет создан в ближайшие несколько лет. Нидерланды в настоящее время находятся в авангарде усилий по созданию такой сети на основе волоконно-оптических линий связи; у нас также есть превосходная классическая сетевая база знаний благодаря AMS-IX и другим средствам. Таким образом, наша страна идеально подходит для того, чтобы играть важную роль в создании и развитии глобальной квантовой интернет-индустрии.

На рисунке 4, взятом из недавней статьи о видении в Science, показаны различные этапы разработки квантового интернета и некоторые его возможные применения. В настоящее время мы находимся в самом начале этого захватывающего процесса разработки (уровень "Доверенного ретранслятора").

Ученые, базирующиеся в различных местах Нидерландов и в других странах, заняты созданием квантовых сетей. Ожидается, что первые рудиментарные сети, способные протестировать принципы и функциональные возможности, задействованные на первых четырех этапах развития квантового интернета (вплоть до

Гибридный квантовый симулятор с двадцатью ионами проверяет свои собственные ответы

Исследовательская группа в Инсбруке (включая бывшую) Докторант из Эйндховена) использовал программируемый квантовый симулятор с двадцатью ионами в качестве сопроцессора для выполнения квантово-механических вычислений, которые требуют большей вычислительной мощности, чем могут предоставить классические процессоры<sup>11</sup>. Гибридный квантовый симулятор смог решить задачу квантового электродинамического моделирования, которая ранее была возможна только с использованием цифрового квантового симулятора с 220 вентилями. Благодаря разработке интеллектуальных алгоритмов гибридный симулятор даже смог проверить свои собственные результаты. (Изображение: Университет Инсбрука, все авторские права защищены.)



<sup>11</sup> Самоподтверждающееся вариационное квантовое моделирование решеточных моделей", К. Кокал и др. Природа 569 (2019).

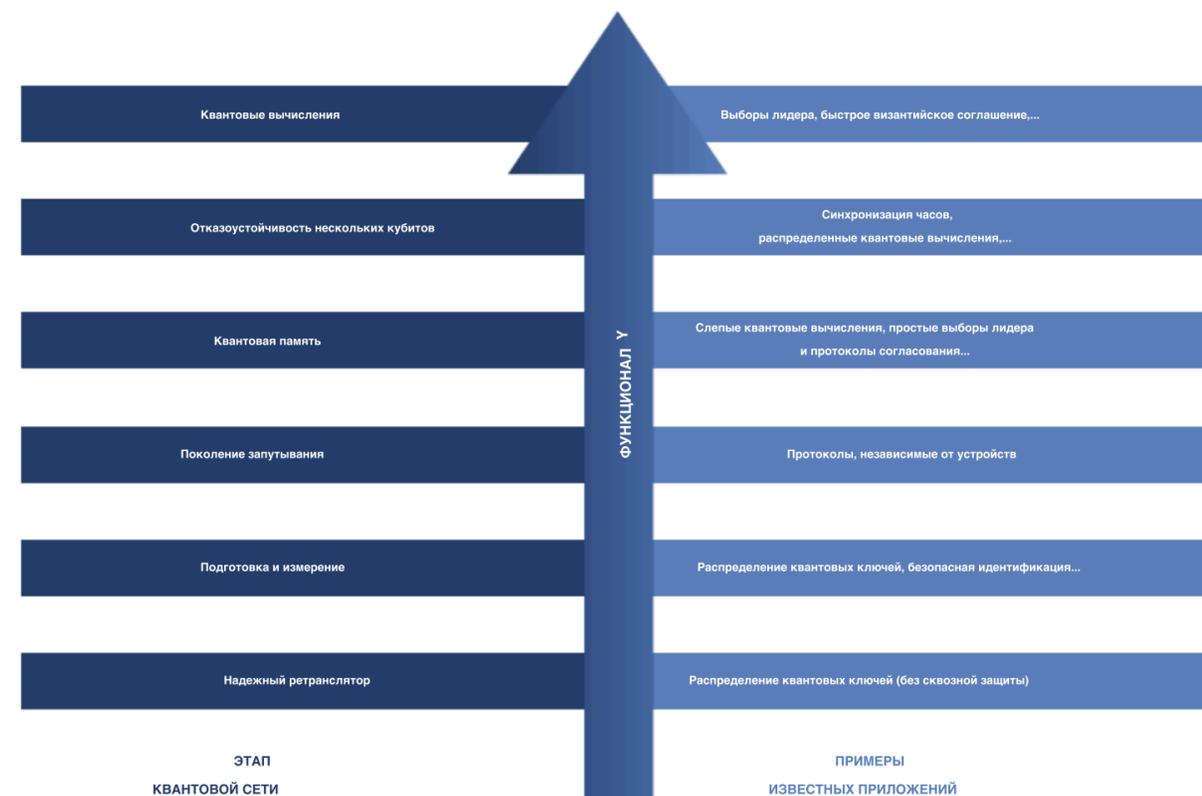


РИСУНОК 4

Этапы разработки квантовой сети (слева) и примеры возможных приложений на каждом этапе (справа). Источник: Венер и др., Science 362, 303 (2018).



Ученые из Делфта достигли первого в мире решения: квантовой запутанности по требованию

Исследовательская группа QuTech в Делфте преуспела в создании взаимосвязей между двумя квантовыми чипами быстрее, чем такие взаимосвязи теряются. Запутанность, однажды описанная Эйнштейном как "жуткое действие на расстоянии", - это явление, которое будет лежать в основе мощи (будущего) квантового интернета и фундаментальной безопасности. Используя новый протокол smart entanglement protocol и тщательную защиту от запутывания, команда впервые добилась генерации квантовых каналов связи по требованию в любом месте. Это открывает путь для взаимосвязи множества квантовых узлов и, таким образом, первой в мире настоящей квантовой сети. Их результаты опубликованы в июньском выпуске Nature за 2018 год.

Это был не первый раз, когда команда попала в заголовки газет по всему миру. «Тремя годами ранее они добились еще одного глобального успеха, создав квантовую запутанность между электронами на большом расстоянии (1,3 километра) и, таким образом, предоставив экспериментальные доказательства квантовой запутанности. Их эксперимент включал запутывание отдельных электронов во взаимно удаленных алмазных крошках с использованием легких частиц в качестве посредников. Его методология лежит в основе их нынешнего подхода к разработке квантового интернета .

2.2.4 Квантовые сенсоры

Квантовые датчики - это приборы, способные наблюдать за изменениями окружающей среды, такими как изменения температуры, излучения, ускорения, времени (часов) и электрических или магнитных полей. В отличие от классических датчиков, квантовые сенсоры полагаются на квантовые явления, такие как запутанность, для обнаружения изменений. Квантовые сенсоры чрезвычайно чувствительны и поэтому позволяют проводить более точные измерения. Они также обеспечивают чрезвычайно высокое разрешение, это означает, что можно измерить мельчайшие структуры, такие как ДНК.

Уже было показано, что лабораторные прототипы измерительных систем, основанных на квантовых датчиках, превосходят по производительности классические системы в различных отношениях. Первое поколение систем, использующих квантовые датчики, теперь доступно в продаже ; к ним относятся акселерометры и атомные часы производства французской компании Muquans<sup>14</sup> и от американской компании AOSense<sup>15</sup>. Однако большинство экспериментальных измерительных систем еще не готовы к коммерческому использованию. Для того чтобы в полной мере воспользоваться открывающимися возможностями, важно не только то, чтобы они были надежными

<sup>14</sup> Смотрите : <https://www.nytimes.com/2014/05/30/science/scientists-report-finding-reliable-way-to-teleport-data.html>

Смотрите : <https://www.nytimes.com/2015/10/22/science/quantum-theory-experiment-said-to-prove-spooky-interactions.html> и Смотрите : <https://www.muquans.com/> .

<sup>15</sup> Смотрите : <http://aosense.com/>

разрабатываются квантовые датчики и квантовые чипы, но также разрабатывается специальное аппаратное и программное обеспечение для управления такими чипами и датчиками и считывания их показаний.

Непрерывное развитие квантовых технологий делает вероятным, что в скором времени появятся больше квантовых датчиков, способных превзойти по производительности классические датчики. Например, мы можем ожидать появления атомных часов, способных обеспечивать абсолютные ориентиры для определения высоты, помогая обеспечить безопасность беспроводной связи и финансовых транзакций во время временных сбоев GPS, и значительно улучшить синхронизацию радиотелескопов . Тем временем TNO и другие компании работают над разработкой датчиков для использования в высокотехнологичном машиностроении и производстве полупроводников, где самые большие проблемы связаны с метрологией. Чуть дальше станут возможными усовершенствованные навигационные системы, радиолокационные системы и методы медицинского обнаружения . Непрерывный поток появления новых типов квантовых сенсоров с их многочисленными новыми приложениями является доказательством того, что фундаментальные и прикладные исследования в области квантовых технологий действительно приносят свои плоды.

2.3 Фундаментальные и технологические проблемы

В следующих параграфах описывается, что в настоящее время возможно и каковы основные научные и технологические проблемы в каждой из четырех областей применения, определенных в предыдущем подразделе.

2.3.1 Универсальные квантовые компьютеры

Небольшие квантовые компьютеры в настоящее время создаются различными академическими и промышленными группами; рассматриваемые системы обычно имеют двузначное количество кубитов, и их качество варьируется. Мы также наблюдаем постоянный поток объявлений о начале работ над более крупными системами, основанными на различных технологических платформах. Две платформы, которые в настоящее время способны поддерживать самые большие системы, используют "юнные ловушки" или сверхпроводящие кубиты. Крупные технологические корпорации, такие как IBM и Google, сосредоточились на сверхпроводящих кубитах и дошли до того, что сделали доступной через облако начальную тестовую версию квантового компьютера в комплекте с языком программирования. Intel реализует два направления разработок: сверхпроводящие кубиты и квантовые точки в кремнии. Последняя технология предлагает привлекательный потенциал масштабируемости , потому что ее было бы относительно легко создать на основе

существующие технологии производства микросхем: полупроводниковая промышленность в основном основана на кремниевых платформах. Microsoft поддерживает другую технологию: топологический квантовый компьютер. Хотя теоретически эта технология может дать чрезвычайно стабильную платформу, еще никому не удалось создать топологический кубит. Параллельно Microsoft разрабатывает квантовые алгоритмы, подходящие для использования на различных платформах qubit, и работает над языком программирования Q #.

Самые большие проблемы, связанные с разработкой универсального квантового компьютера, заключаются в следующем:

Разработка сложных алгоритмов исправления квантовых ошибок

Кубиты по своей природе чувствительны к шуму, поскольку суперпозиция означает, что кубитом может быть любая возможная комбинация 0 и 1. Следовательно, любой незначительный недостаток в вычислениях может дать ложный ответ. Более того, кубиты в системе часто не остаются стабильными достаточно долго, чтобы выполнить вычисления. Для решения этих проблем, были разработаны алгоритмы исправления ошибок, которые используют большее количество вспомогательных кубитов для исправления ошибок, возникающих в кубитах, используемых для выполнения вычислений; фактически система становится отказоустойчивой. Это, конечно, подразумевает необходимость в накладных расходах на подсчет кубитов: оценки количества зашумленных кубитов, необходимых для создания одного логического кубита, варьируются от ста до десяти тысяч. Такой подход должен означать, что, когда квантовые алгоритмы находят практическое применение, риск неисправного кубита снижается до одного к десяти тысячам или даже меньше.

Разработка систем NISQ с несколькими сотнями кубитов

Квантовых исправлений ошибок и отказоустойчивых квантовых вычислений жизненно важны для крупномасштабных универсальных квантовых компьютеров для работы. Однако алгоритмы исправления ошибок, доступные в настоящее время, не могут быть использованы в небольших квантовых компьютерах, разработанных на сегодняшний день. В таких машинах просто недостаточно зашумленных кубитов для формирования одного логического кубита с использованием текущих алгоритмов. Более того, кубиты недостаточно стабильны для запуска отказоустойчивых алгоритмов. Следовательно, в краткосрочной перспективе квантовые компьютеры будут оставаться "зашумленными". Следовательно, текущая фаза развития называется эпохой NISQ: шумная промежуточная эра квантовой эры (название недавно придумал Джон Прескилл, профессор Калифорнийского технологического института). Большинство наблюдателей ожидают, что не пройдет много времени, прежде чем мы увидим системы NISQ с несколькими сотнями достаточно стабильных кубитов. Хотя первая волна систем не будет отказоустойчивой, они должны быть стабильными в течение длительного времени

достаточно для выполнения ряда вычислений. Возможные приложения для таких ранних систем, вероятно, будут включать машинное обучение.

*Снижение частоты ошибок и увеличение количества кубитов.*

Создание крупномасштабного универсального квантового компьютера с полной коррекцией ошибок и отказоустойчивым программным обеспечением представляет огромную технологическую задачу. Заставляя большое количество физических кубитов работать в комбинации, универсальный квантовый компьютер можно было бы использовать для выполнения очень больших вычислений, даже если кубиты иногда допускают ошибки. Однако это подразумевает снижение частоты ошибок существующих систем в раз в десять-сто. Это также требует увеличения количества (физических) кубитов по крайней мере на сто тысяч, чтобы создать достаточное количество логических кубитов для сохранения квантовой информации в течение достаточного периода времени. Одной из самых больших проблем в этом контексте является связность: взаимосвязь кубитов. Масштабирование невозможно без значительного прогресса в этой области, как признают QuTech, Intel и другие.

*Разработка масштабируемого квантового компьютера архитектура и электроника*

Подобно классическому компьютеру, квантовый компьютер включает в себя различные уровни, в которых абстрактные алгоритмы и квантовые алгоритмы шаг за шагом переводятся в кубиты

управляющие сигналы. Пока можно сделать только предварительные и частичные выводы относительно наилучшего способа проектирования этой архитектуры, включая компиляторы, механизмы выполнения и исправления ошибок. Архитектура все еще нуждается в преобразовании в конкретную масштабируемую реализацию, дополненную электроникой по индивидуальному заказу.

*Проблемы системного проектирования.*

Сложность универсального квантового компьютера сравнима со сложностью спутника или EUV-литографической машины. Следовательно, одной из самых больших проблем, связанных с созданием универсальных квантовых компьютеров, является проектирование системы и интеграция всего аппаратного обеспечения и управляющего программного обеспечения. В настоящее время технология находится на концептуальной стадии, но по мере продвижения к увеличению количества кубитов многие аспекты, вероятно, будут оказывать взаимное влияние: что касается конструкции чипа, выбора материала и технологических этапов, то они будут влиять на время согласованности и точность кубитов. Тепловая нагрузка управляющих сигналов на квантовые чипы связана с доступной мощностью охлаждения. Сложность электроники и управляющего программного обеспечения связана с качеством микросхем, а анализ измерительных сигналов для исправления ошибок требует мощных компьютеров и сложных алгоритмов с высокой производительностью обработки данных и очень быстрой обратной связью. Проектирование и реализация такого сложного продукта требует определенной формы системного инженерного контроля, при котором компромиссы и



системный выбор осуществляется на комплексной основе, а не по компонентам. TNO и Делфтский технологический университет признали это серьезной проблемой и присоединились к проекту Quantum Inspire, чтобы начать работу над широким системным подходом.

Квантовый компьютер со 100 000 кубитами будет очень сложной машиной. Все отдельные компоненты будущего квантового компьютера должны быть интегрированы, чтобы сформировать работающую систему. И планирование компромиссов между различными уровнями квантового компьютера должно начинаться на этапе проектирования. Обычно предполагается, что у нас есть еще по крайней мере десять лет до того, как мы сможем построить большой, стабильный квантовый компьютер. Однако по всему миру доступны различные классические системы, способные имитировать небольшие квантовые компьютеры. Одной из них является Quantum Inspire от QuTech.<sup>16</sup> Платформа.

*Возможность эффективного импорта больших наборов данных.*

В квантовом компьютере использование суперпозиции означает, что небольшое количество кубитов может представлять экспоненциально увеличивающийся объем данных. Однако в настоящее время не существует эффективных средств преобразования большого классического набора данных в квантовое состояние. В контексте математических задач, требующих ввода больших объемов данных, время, необходимое для создания квантового состояния, в настоящее время превысило бы время вычисления. Таким образом, при существующем положении вещей большие наборы данных не могут быть эффективно импортированы в квантовый компьютер.

*Разработка дальнейших квантовых алгоритмов*

Как только состояние квантового компьютера считано, все, что остается от исходного сложного квантового состояния, - это единственный классический результат. Если мы хотим использовать всю мощь квантовых компьютеров, требуются специальные алгоритмы. Разработка подходящих квантовых алгоритмов является критическим процессом, требующим высокоспециализированных знаний. За последние три десятилетия были разработаны различные методы квантовой алгоритмики. Используя доступный в настоящее время квантовый алгоритмический инструментарий, квантовые компьютеры могут быть развернуты с целью более эффективного решения многих проблем. Разработка квантовых алгоритмов имеет явные параллели с разработкой программного обеспечения для классических компьютеров и требует большой изобретательности. Институт NIST в Соединенных Штатах ведет обширный онлайн-реестр квантовых методов, разработанных на сегодняшний день.<sup>17</sup> Однако,

использование всего потенциала компьютеров NISQ и более масштабных квантовых компьютеров зависит от расширения коллекции известных квантовых методов и от прогресса в применении этих методов в практических случаях использования. Это, в свою очередь, подразумевает исследования не только новых методов, но и ограничений квантовых компьютеров в определенных областях применения. Проблемы, возникающие на практике, также должны быть исследованы. В краткосрочной перспективе необходимо будет сосредоточить внимание на технологии NISQ. Вычисления с использованием компьютеров NISQ, в свою очередь, требуют набора специальных алгоритмов и, следовательно, целенаправленных исследований и разработок.

**Quantum Inspire: единая система для нескольких типов кубитов**

Команда QuTech в Делфте в настоящее время работает над прототипом quantum компьютер, использующий широкий системный подход. В проекте участвуют исследователи и инженеры из различных дисциплин, работающие вместе над системой, которая сможет как эмулировать простые квантовые алгоритмы на эмуляторе, так и запускать их на физическом аппаратном чипе. Система имеет модульную структуру, так что алгоритмы могут выполняться на чипах, использующих сверхпроводящие кубиты, спиновые кубиты или кубиты с NV-центром. Алгоритмы в настоящее время все еще эмулируются, и система расширяется для работы с физическими кубитами. Quantum Inspire использует национальный суперкомпьютер Cartesius компании SURF, который может эмулировать квантовый компьютер объемом до тридцати семи кубитов.



<sup>16</sup> Смотрите: [www.quantum-inspire.com](http://www.quantum-inspire.com)

<sup>17</sup> Смотрите: [www.quantumalgorithmzoo.org](http://www.quantumalgorithmzoo.org)

**Разработка методов верификации и тестирования квантового программного обеспечения**

Классическое программное обеспечение отлаживается путем считывания данных из памяти компьютера во время выполнения программы. Это невозможно с квантовым компьютером, потому что считывание его состояния во время выполнения алгоритма помешало бы работе.

Квантовое состояние не может быть просто скопировано для проверки ("теорема о запрете клонирования"). Проверка результата, полученного с помощью большого квантового компьютера, также является непростой задачей: часто результат не может быть воспроизведен на классическом компьютере, поскольку квантовый компьютер способен на то, что не под силу классическому компьютеру. Следовательно, новые методы отладки и тестирования квантового программного обеспечения жизненно важны для разработки больших квантовых компьютеров.

**Разработка интуитивно понятных пользовательских интерфейсов**

Для работы квантового компьютера требуется интуитивно понятный пользовательский интерфейс. Создание такого интерфейса представляет собой сложную задачу из-за парадоксальной природы квантовой физики, где квантовые биты могут одновременно иметь значения 0 и 1. На классических компьютерах ментальные модели и метафоры, такие как папки, рабочие столы и окна, оказались очень полезными. Разработка аналогичных моделей и метафор жизненно важна в отношении полезности квантовых компьютеров.

**2.3.2 Квантовые симуляторы**

В настоящее время наиболее совершенные квантовые симуляторы основаны на холодных атомах и ионах, которые относительно нечувствительны к внешнему вмешательству. Применяемые технологии имеют дополнительное преимущество, заключающееся в том, что они разрабатываются уже несколько десятилетий. Разработанные на сегодняшний день квантовые симуляторы используют от десяти до ста ионов или атомов. Однако, системы, которые мы имеем в настоящее время, не программируются и, следовательно, не могут быть использованы для решения более общих, более крупных наборов проблем. Некоторые системы работают с ионами и атомами в комбинации и, следовательно, обладают преимуществами обеих технологий. Другие системы исследуются для использования в крупномасштабных квантовых компьютерах (например, спины в квантовых

точки<sup>18</sup>, спины в алмазных сверхпроводящих цепях<sup>19</sup> и электроны в искусственных матрицах<sup>20</sup>) также могут служить платформами для квантового моделирования, где проблема заключается в определении наилучшего кубита для каждой системы. Особые характеристики различных платформ делают их подходящими для решения различных открытых вопросов.

**В рамках европейского квантового флагамена, проекта PASQuanS**

<sup>21</sup> стремится реализовать полностью программируемый квантовый симулятор с тысячей атомов или ионов в течение четырех лет. Цель команды - создать первый квантовый симулятор, который продемонстрирует "квантовую выгоду" за счет решения задач оптимизации, которые, вероятно, превысили бы возможности классических методов. Квантовые симуляторы также могут использоваться для проектирования других систем, таких как полупроводниковые структуры.

Проект QOMBS флагамена Quantum<sup>22</sup> разрабатывает квантовый симулятор на основе холодных атомов в матрице, который будет использоваться для разработки новой "частотной гребенки квантового каскадного лазера". Задействованная сложная технология может иметь важное значение

влияние на развитие квантовой связи и квантовых сенсоров.

Самые большие проблемы, связанные с разработкой квантовых симуляторов, заключаются в следующем:

**Масштабирование до тысячи кубитов**

Одним из следующих шагов является разработка и реализация квантового симулятора с тысячей кубитов. Хотя кубиты не должны быть полностью управляемыми для моделирования, выполнение этого шага представляет собой сложную задачу, не в последнюю очередь с инженерной точки зрения. Содержать такую большую систему будет далеко не просто, чтобы предотвратить чрезмерное взаимодействие с внешним миром и дать возможность прочитать и интерпретировать результаты. Также необходимо проделать большую работу по разработке, прежде чем мы сможем создавать программируемые кубиты в достаточно больших масштабах, чтобы, например, атомы и ионы можно было программировать извне с помощью электромагнитных сигналов. Платформа, основанная на электронах в искусственных матрицах, выглядит наиболее многообещающим вариантом, поскольку это позволило бы полностью автоматизировать

реализация. Проблемы, связанные с перспективными <sup>23</sup> имитационные системы на основе кубитов на чипах аналогичны системам, описанным в 2.3.1.

**Разработка новых квантовых алгоритмов.**

Параллельно с разработкой аппаратного обеспечения будет необходимо разработать квантовые алгоритмы, подходящие для крупномасштабных квантовых симуляторов. Схемы для таких алгоритмов в настоящее время разрабатываются, например, исследователями из QuSoft и QuTech. TNO и Лейденский университет также активно работают в этой области.

**Проверка и валидация**

Как только достигается точка, когда сложность квантового моделирования превышает возможности классического симуляторы, определение достоверности результата моделирования становится проблематичным. Соответственно, существует реальная потребность в методах проверки и валидации результатов квантового моделирования .

**2.3.3 Квантовая коммуникация**

Глобальному квантовому интернету обязательно будут предшествовать различные этапы развития, каждый из которых позволит создавать новые приложения (см. Рисунок 4). Простейшая форма квантовой связи предполагает использование квантовых свойств, например, частиц света для защиты классической информации, такой как передаваемая по волоконно-оптическим кабелям или спутникам: приложение, известное как квантовое распределение ключей (QKD). QKD - важная технология, которая предполагает использование отдельного информационного канала, который использует квантовые свойства света для передачи (классического) ключа шифрования. Если кто-либо попытается перехватить трафик по соответствующему каналу, то вмешательство немедленно становится очевидным для общающихся сторон. QKD полезен для защиты критически важных данных, которые должны оставаться в безопасности в течение длительного периода. Таким образом, первое применение технологии, вероятно, будет в секторе финансовых услуг и в области национальной обороны и безопасности. Также ожидается, что на более позднем этапе постквантовая криптография будет играть важную роль в защите данных от злонамеренно развернутых квантовых компьютеров. Для получения дополнительной информации по этой теме см. подраздел 3.2.1.

Европа лидирует в разработке QKD

технология, отчасти благодаря работе швейцарско-корейской компании ID Quantique, которая уже занимается маркетингом продуктов QKD первого поколения. С прицелом на развитие общеевропейской сети QKD исследователи стремятся определить другие потенциальные области применения QKD; возможности станут очевидны в течение следующих нескольких лет. Дальнейшее развитие работа также будет направлена на устранение потенциальных недостатков, таких как зависимость от характеристик фотоприемников. Недавнее изобретение и прототипирование "независимой от измерительного устройства QKD" является хорошим примером достигнутого многообещающего прогресса.

Сети связи, способные в полной мере использовать уникальные возможности, предоставляемые квантовой физикой, потребуют более сложной технологии. На рисунке 5 изображены элементы квантовой сети. Как и классический интернет, сеть состоит из различных компонентов: волоконно-оптические соединения и / или соединения в "свободном пространстве", "квантовые повторители", которые усиливают сигнал при передаче, "конечные узлы" (небольшие квантовые компьютеры для отправки сигналов и выполнения вычислений с помощью кубитов), "коммутаторы" для маршрутизации пакетов данных внутри сети и так далее. В Нидерландах уже есть основы, необходимые для разработки и масштабирования квантовых сетей и квантового интернета. Помимо аппаратных компонентов, квантовому Интернету потребуются специализированное программное обеспечение, как для управления оборудованием и интернет-трафиком, так и для запуска приложений на различных подключенных квантовых компьютерных системах.

<sup>18</sup> Nature, "Квантовое моделирование модели Ферми-Хаббарда с использованием полупроводниковой матрицы квантовых точек", Т. Хенгсон и др., Nature 548, 70-73 (2017). »

Смотрите : [www.nature.com/articles/441586-018-05979-0](http://www.nature.com/articles/441586-018-05979-0), [www.nature.com/articles/nphys2251](http://www.nature.com/articles/nphys2251) »

<sup>19</sup> [www.nature.com/articles/nphys2251](http://www.nature.com/articles/nphys2251) » [www.nature.com/articles/441567-018-0328-0](http://www.nature.com/articles/441567-018-0328-0) »

<sup>21</sup> Смотрите : [www.qombs-project.eu/index.php/Home](http://www.qombs-project.eu/index.php/Home)

<sup>22</sup> Смотрите : [www.nature.com/articles/nnano.2016.131](http://www.nature.com/articles/nnano.2016.131)



РИСУНОК 5

Схематическое представление основных элементов квантового интернета (слева: аппаратные компоненты; справа: стек квантового Интернета ). Рисунки взяты из Wehner et al., Science 362, 303 (2018).

Основные проблемы, связанные с реализацией квантового интернета, заключаются в следующем:

**Реализация взаимосвязей на больших расстояниях**

Наибольшее расстояние, на котором до сих пор была достигнута длительная запутанность между двумя квантовыми узлами (квантовым компьютером в 1 кубит), соединенными волоконно-оптическим кабелем, было достигнуто между двумя квантовыми узлами - 1,3 километра. Следующая задача - увеличить квантовую связь между двумя кубитами, соединенными стандартным волоконно-оптическим кабелем, где-то от 30 до 100 километров. Это потребует адаптации к частоте (цвету) и стабилизации фотонов. Для запутывания на еще больших расстояниях потребуются квантовые повторители. Такие устройства должны будут принципиально отличаться от классических ретрансляторов или усилителей, поскольку любая промежуточная обработка нарушит запутанность между кубитами. Следовательно, ретрансляторам необходимо будет полагаться на процесс "переменного запутывания" на каждой ретрансляционной станции: если конечная точка A запутана с ретранслятором R, который, в свою очередь, запутан с конечной точкой B, ретранслятор R может обеспечить эффективное запутывание между A и B. Чтобы сделать это возможным, ретранслятору R ненадолго потребуется квантовая память.

**Реализация сложных конечных точек: квантовые процессоры в квантовой сети**

Для первых полезных приложений квантового Интернета (например, безопасная идентификация и коммуникация), квантовая связь может функционировать с конечными точками (квантовыми процессорами), каждый из которых имеет всего один кубит. Однако, более сложная обработка и дополнительные функциональные возможности (например, "слепые квантовые вычисления" и распределенные квантовые вычисления) требуют квантовых процессоров с несколькими кубитами и квантовой памятью. Для исправления ошибок в конечных точках квантовых каналов потребуются еще большая сложность - в виде процессоров с множеством запутанных кубитов.

**Архитектура квантовой сети**

Помимо аппаратных компонентов, квантовому Интернету потребуются специализированное программное обеспечение для управления оборудованием и интернет-трафиком. Команда из Делфта написала проект IETF<sup>24</sup> первого в мире протокола канального уровня<sup>25</sup>, внедрение которого сделает реализацию запутанности в фундаментальном физическом эксперименте четко определенной сетевой услугой. Другие важные темы включают разработку комплексного дизайна квантового интернет-стека, включающего как аппаратное, так и программное обеспечение, и обеспечение взаимодействия между уровнями сети. Также потребуются метод аутентификации с квантовой защитой, чтобы внешние пользователи могли получить доступ



**Первая в мире квантовая сеть на основе запутанности**

В лабораториях QuTech в кампусе Делфтского технологического университета создается исследовательская группа

первая в мире квантовая сеть, основанная на запутанности. Сеть будет использовать дефекты алмаза ("азотно- вакантные центры") в качестве квантовых битов, которые можно запутать с помощью света (см. Диаграмму справа, ниже). Цель состоит в том, чтобы реализовать запутанность в сети из трех "квантовых узлов". Конфигурация также позволит протестировать концепцию "квантового повторителя", где запутанность фактически передается для того, чтобы

создание сетей на больших расстояниях. Проект представляет собой жизненно важный шаг на пути к реализации большого квантового интернета.



квантовая сеть, защищенная на основе квантовых принципы, а не на основе поддающихся подделке или взлому классических методов, таких как пароли, цифровые коды или классические физические объекты.

**Программное обеспечение для приложений квантового Интернета.**

Каждый этап развития квантового интернета будет требовать изобретения и разработки новых приложений. Первоначально основное внимание будет уделяться приложениям в сфере безопасности, правительственным и финансовым секторам. По мере усложнения квантового интернета приложения, использующие множество взаимосвязанных квантовых процессоров, становятся все более сложными, такие, как тактовая синхронизация и распределенные квантовые вычисления, станут возможными.

**2.3.4 Квантовые датчики**

Сложные квантовые датчики используют квантовую когерентность (суперпозицию), квантовые корреляции и запутанность между частицами в различных системах для достижения более высокой чувствительности и разрешения, чем это возможно с классическими сенсорными системами. Детекторы (и источники), основанные на определенных квантовых принципах, разрабатывались в течение нескольких десятилетий. Нидерланды - это признана одной из ведущих стран мира в этой области, благодаря таким инициативам, как разработка источников ультрахолодных атомов (например, для атомных часов). Технология, связанная с источниками ультрахолодных атомов, источниками фотонов и детекторами фотонов, уже достаточно развита, например, в отношении количественного измерения фазы и поляризации. Измерение коррелированных квантовых свойств также находится в пределах досягаемости.

<sup>24</sup> IETF - это целевая группа по разработке Интернета, орган по стандартизации Интернета.  
<sup>25</sup> "Сервис канального уровня в квантовом Интернете", А.Д. Дальберг и др. все., проект IETF, 11 марта 2019 г.



Одна из конечных точек или квантовых узлов квантовой связи между Делфтом и Гаагой, которая должна быть расширена, чтобы охватить западную 34 агломерация, а со временем, возможно, и все Нидерланды, на пути к инфраструктуре квантового интернета, основанной на запутанности. (Источник: QuTech)

Также ведется работа над методами квантовой визуализации и датчиками, использующими ультрахолодные атомы, включая чрезвычайно точные гравитационные датчики и атомные часы. Одной из важных инициатив в этой области является европейский флагманский квантовый проект под названием iqClock<sup>26</sup>, который координируется из Амстердама. Перед iqClock стоят две цели: разработать новый тип сверхточных оптических часов и разработать интегрированные, массово выпускаемые часы, которые British Telecom намерена использовать для сетевой синхронизации.

Самые большие проблемы, связанные с разработкой квантовых датчиков, заключаются в следующем:

#### Разработка новых сенсорных технологий.

Многое еще предстоит узнать о наилучших методах создания квантовых датчиков. Ожидается, что использование интеллектуальных оптимальных квантовых протоколов управления в таких областях, как селективность и чувствительность

станет плодотворным направлением развития. Например, квантовые сенсоры еще не в полной мере используют все возможности, предоставляемые второй квантовой революцией,

например, запутанные состояния. Производство и использование более тонких корреляций между различными компонентами датчика (например, ультрахолодными атомами, ионами, NV-центрами и т.д.) открывает путь для создания более надежных и точных датчиков, таких как сверхизлучающие часы, разрабатываемые в рамках программы iqClock.

#### Уменьшение занимаемой площади квантовых сенсорных систем

Хотя квантовые сенсоры сами по себе (очень) малы, связанные с ними экспериментальные измерительные системы часто значительно больше. Занимаемая площадь (размеры, вес, стоимость, потребность в электроэнергии) квантовых сенсорных систем могут быть уменьшены путем интеграции и адаптации таких измерительных систем. Это повысит полезность и масштабируемость квантовых датчиков и имеет жизненно важное значение с точки зрения готовности таких датчиков к рынку.

#### Разработка масштабируемых производственных процессов

Во многих квантовых датчиках используются уникальные материалы, такие как алмаз и сверхпроводящие материалы. Широкое внедрение квантовых датчиков будет зависеть от разработки (полу) автоматизированных процессов для равномерного, высококачественного производства таких материалов.

#### Ускорение квантовых датчиков.

Полезность современных квантовых датчиков снижается из-за скорости считывания данных. Многие датчики нынешнего поколения используют всего несколько легких частиц или электронов, и существуют значительные возможности для их оптимизации, чтобы ускорить процесс измерений и расширить их диапазон возможных применений. Например, позволяя фотонным детекторам обрабатывать большой поток фотонов, можно обеспечить доступность многих новых приложений, включая системы QKD с большим радиусом действия.

#### Разработка быстрых, высокоэффективных детекторов

Различные компании по всему миру уже продают детекторы для обнаружения отдельных фотонов. Однако необходимы значительно более высокие скорости обнаружения и эффективность - например, для реализации максимальной скорости распределения ключей в контексте квантового распределения ключей. Такие разработки идут рука об руку с разработкой быстрых и надежных источников фотонов, способных излучать отдельные или запутанные фотоны.

#### 2.3.5 Проблемы в других областях

Описанные выше технологические разработки относятся главным образом к самому кубиту и к системе, непосредственно связанной с ним. Они вызывают к воображению и, следовательно, пользуются большим спросом. Однако развитие квантовых технологий зависит от преодоления проблем и в других областях. Между кубитами и внешним миром, к примеру, существует множество технологических уровней, требующих развития. Новые решения также необходимы в таких областях, как нанотехнологии, фотоника и материаловедение, чтобы контролировать и измерять квантовые состояния при чрезвычайно низких температурах, контролировать свет в чрезвычайно малых масштабах и защищать чрезвычайно точные датчики от шума. Другой способ

#### ЧТО ДЕЛАЕТ КВАНТОВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ ТАКОЙ ОСОБЕННОЙ?

проблема заключается в том, что наиболее подходящие материалы для многих разрабатываемых в настоящее время квантовых технологий еще предстоит определить. Необходимо также решать различные нетехнологические проблемы: например, развитие талантов и социальное внедрение технологий необходимы для успеха глобальной квантовой революции.

#### 2.4

##### Заключение

Квантовая технология позволяет делать то, что невозможно при классической технологии. Ключевыми областями применения являются квантовая коммуникация, квантовые компьютеры, квантовые симуляторы и квантовые датчики. Ряд маломасштабных приложений первого поколения уже доступен, но большинство квантовых технологий требуют значительного дальнейшего развития, прежде чем они смогут принести преимущество по сравнению с классическими методами. Бесчисленные технологические и научные проблемы еще предстоит преодолеть. Таким образом, для полной реализации потенциала квантовых технологий требуется еще много лет исследований и разработок, новые продукты и побочные эффекты будут реализовываться на каждом шагу на пути, ведущем к этой цели. Действительно, ландшафт уже усеян примерами. Крупные корпорации инвестируют в исследовательские программы здесь, в Нидерландах; появляются первые стартапы и побочные продукты таких совместных инициатив, и все больше заинтересованных сторон (поставщики высокотехнологичных компонентов и т.д.) создаются вокруг институтов знаний, закладывая основы голландской квантовой экосистемы.

<sup>26</sup> Смотрите: [www.iqclock.eu/](http://www.iqclock.eu/)



"Квантовые технологии могут помочь решить все виды социальных проблем и создать возможности для всех секторов экономики".

## 03

### СОЦИАЛЬНОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

#### 3.1

##### Краткосрочные и долгосрочные последствия

Квантовая технология использует принципы квантовой физики для практических применений. Как обсуждалось в разделе 2, наиболее значимыми явлениями в квантовой физике являются

суперпозиция и запутанность. Эти явления обеспечивают основу для таких принципиально новых возможностей, что квантовая технология по праву рассматривается как ключевая технология, обладающая потенциалом изменить правила игры во многих социальных и экономических секторах.

Разработка квантовых компьютеров, систем квантовой связи, квантовых датчиков и квантовых симуляторов

может помочь решить социальные проблемы и создать возможности для всех секторов экономики. Хотя квантовая технология уже имеет различные практические применения, требуется значительное дальнейшее развитие, прежде чем мы сможем реализовать полноценный квантовый интернет или большой универсальный квантовый компьютер. Хотя горизонты развития соответственно далеки, можно ожидать, что инвестиции, сделанные в квантовые технологии сейчас, начнут приносить плоды в течение нескольких лет, как показано на рисунке 6.

Четыре горизонтальные полосы на рисунке представляют разработки в четырех областях применения квантовых технологий (связь, вычисления, моделирование, зондирование) за следующие пятнадцать лет, включая различные "промежуточные пункты" в

каждой области. Промежуточные пункты символизируют возможные области применения, продукты и услуги, которые, вероятно, станут доступны в ближайшие годы. Ниже рассматриваются некоторые из основных ожидаемых разработок.

В ближайшие пять лет: Фундаментально безопасная коммуникация, основанная на квантовом распределении ключей. Системы QKD первого поколения уже имеются в продаже, например, у швейцарской компании ID Quantique. Действительно, во время своих последних выборов Швейцария использовала технологию QKD для защиты интернет-соединений между участками для подсчета голосов и местами сбора результатов. Совсем недавно инвестиционные дома на Уолл-стрит в Нью-Йорке приобрели QKD-соединение со своими офисами в Нью-Джерси.

В ближайшие пять лет: Точно так же, как классический компьютер непригоден для использования без соответствующего программного обеспечения, квантовый компьютер не имеет ценности, если также не доступно хорошее квантовое программное обеспечение. В значительной степени необходимое программное обеспечение, алгоритмы и методы уже разрабатываются, часто в сотрудничестве с отраслями, где они будут использоваться.

В ближайшие пять лет: Квантовые симуляторы, которые могут служить маленькими, шумными аналоговыми квантовыми компьютерами для решения конкретных задач (NISQ, см. подраздел 2.3.1). Различные гиганты аппаратного и программного обеспечения, включая Google, IBM, Intel, Rigetti и китайскую Alibaba, очень заинтересованы в разработке этих машин. Исследования и разработки работа над этими квантовыми симуляторами ведется в различных центрах в Нидерландах, включая Эйндховен, Делфт и Амстердам. Ряд квантовых компьютеров первого поколения, обычно имеющих от десяти до двадцати кубитов, уже доступны в облаке исследовательскому сообществу для тестирования простых алгоритмов, некоторые на коммерческой основе. В течение пяти лет, мы также должны увидеть реализацию полностью программируемого квантового симулятора с тысячами атомов или ионов, способного впервые обеспечить "квантовую выгоду".

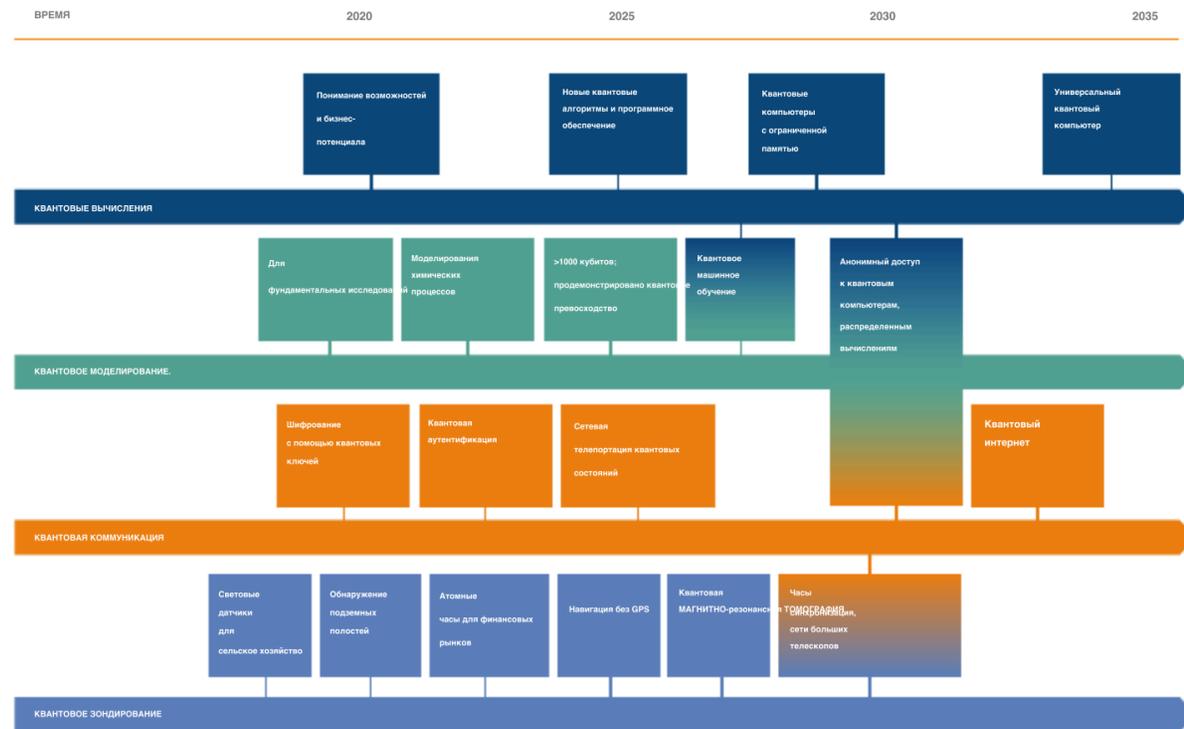


РИСУНОК 6

Прогнозируют развитие квантовых технологий и связанных с ними приложений в ближайшие десятилетия.

Через пять-десять лет: Разработано в рамках европейского флагманского квантового проекта Quantum

Дорожная карта технологий.<sup>27</sup> прогнозируется, что датчики с одинарной квантовой точностью появятся в продаже примерно через пять лет с настоящего момента. Сети квантовых датчиков, вероятно, появятся в течение десяти лет, предполагает дорожная карта, в то время как интегрированные системы на кристалле, такие как атомные часы, интегрированные в чип, займут немного больше времени. Потенциальные области применения таких квантовых датчиков существуют, например, в области здравоохранения (например, высокочувствительная МРТ), области обороны (например, сети обнаружения подводных лодок и бункеров), полупроводниковой области (например, новые метрологические приложения, основанные на сверхчувствительных квантовых датчиках высокого разрешения) и сельскохозяйственной области. Такие датчики также могут быть полезны в астрономии (LOFAR, телескоп Эйнштейна).

Через пять-десять лет: Сверхточные квантовые атомные часы уже существуют в лабораториях. Рассматриваемые системы основаны на частоте излучения при передаче энергии между группами атомов или ионов в охлаждаемых системах. Задача сейчас состоит в том, чтобы сделать такие системы синхронизации меньше по размеру и надежнее, чтобы их можно было передавать, например, со спутников. Используемые в сочетании с GPS, часы могут стать основой навигационных систем с очень высоким уровнем синхронизации, стабильности и отслеживаемости, пригодных для использования даже в местах, где GPS не может быть использован. Аналогичные решения по синхронизации также, вероятно, будут полезны в будущих интеллектуальных сетях, например, для синхронизации сигналов в энергетических и телекоммуникационных сетях.

Боле чем через десять лет: глобальный квантовый интернет, где сверхзащищенное квантовое шифрование сочетается с классическим трафиком данных, передаваемым по волоконно-оптическим кабелям и спутникам. Другой возможностью является квантовая связь между взаимно удаленными квантовыми компьютерами, создавая таким образом единый большой распределенный квантовый компьютер.

Боле чем через десять лет: Универсальные квантовые компьютеры, способные решать задачи, которые используются

принципиально неразрешимая для классических компьютеров, например, решение сложных задач оптимизации или прогнозирование, имитационное моделирование поведения молекул, катализаторов и новых материалов. Другие возможности включают взлом традиционных методов шифрования, решение сложных задач оптимизации, быстрый поиск в базе данных и сложные формы машинного обучения (искусственный интеллект).

Разработка универсального, отказоустойчивого квантового компьютера и европейского или даже глобального квантового интернета

это задачи, сложность и амбициозность которых сопоставимы с космической программой или развитием полупроводниковой промышленности. Точно так же, как эти разработки привели к бесчисленным побочным эффектам, можно ожидать, что инвестиции в квантовые технологии приведут к появлению всевозможных, пока еще невообразимых приложений. Эти приложения, в свою очередь, могут поддерживать новые отрасли промышленности и, возможно, даже новые экономические кластеры. История показывает, что чрезвычайно трудно точно предсказать, какие приложения появятся в результате прорывных технологических разработок. Мы неизбежно увидим появление продуктов и приложений в дополнение к тем, которые предусмотрены в настоящее время, и в некоторой степени отличающихся от них, даже в течение следующих нескольких лет. Следовательно, можно ожидать, что инвестиции в квантовые технологии принесут плоды не только в отдаленном будущем, но и в относительно краткосрочной перспективе.

### 3.2

#### Влияние на все социальные миссии

Квантовые технологии проникнут в общество с помощью "стрелок" на рисунке 7. В центре рисунка мы видим саму технологию и исследования, проводимые в основном в университетах и институтах (круг 1), часто в сотрудничестве с деловым сообществом. Следующий круг (2) представляет разработку и внедрение приложений, продуктов и услуг на основе квантовых технологий, основанных на этих исследованиях, самими промышленными партнерами и с ними, в основном в секторах высокотехнологичных систем и материалов и ИКТ. Процветающая экосистема, надежная инфраструктура, развитие талантов и разработка и использование смежных технологий (например, фотоники, искусственного интеллекта, блокчейна, нанопроизводства и материаловедения) будут иметь жизненно важное значение; эти стимулирующие виды деятельности обозначены третьим кругом. В конечном итоге приложения появятся в других (ведущих) секторах, представленных пятым сегментами четвертого круга, каждый из которых связан с миссиями и связанными с ней социальными проблемами. Самый дальний круг представляет собой максимальное влияние квантовых технологий на общество. Социальное влияние квантовых технологий будет заметнее всего в связи с задачами, описанными в этом подразделе.

В 1990-х годах считалось, что наибольший потенциал квантовых компьютеров и квантовых сетей лежит в области безопасности и обороны. Это убеждение было основано на разработке алгоритма квантового компьютера Шора, который рассматривался как открывающий путь для обхода обычного шифрования данных. Когда стало ясно, что до появления универсального квантового компьютера, способного выполнять алгоритм Шора, прошло более десяти лет, как показано в предыдущем подразделе на рисунке 6, и тем временем начали появляться первые "зашумленные" квантовые компьютеры (NISQ), квантовые сенсоры и приложения для квантовых сетей, участники других областей начали осознавать потенциал квантовых технологий. Потенциальные пользователи

квантовые технологии теперь также можно найти в таких секторах, как финансовые услуги, энергетика, сельское хозяйство, химическая промышленность и фармацевтика, высокие технологии (искусственный интеллект, машинное обучение, кибербезопасность) и логистика (и планирование). Потенциальные приложения и связанные с ними пользователи в каждой из пяти социальных миссий рассматриваются в следующих подразделах.

<sup>27</sup> Смотрите: <https://qt.eu/newsroom/quantum-technology-roadmap/>

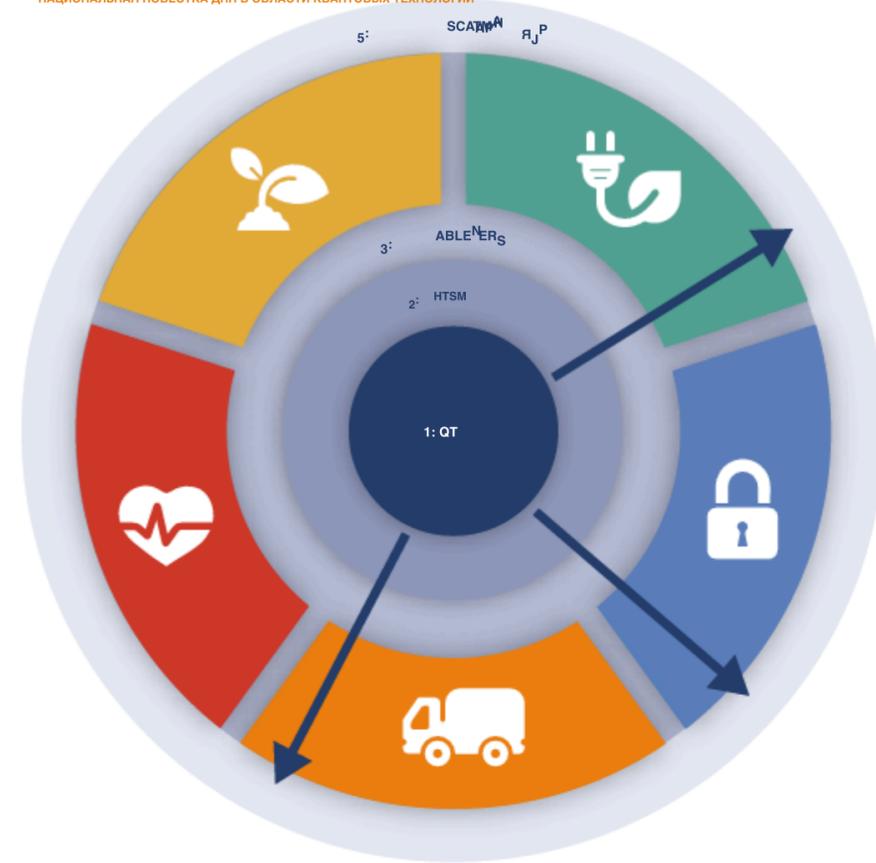


РИСУНОК 7 Проникновение квантовых технологий в общество.

- 1 Фундаментальные исследования
  - Квантовые вычисления
  - Квантовая криптография
  - Квантовые алгоритмы
  - Постквантовая криптография
- 2 Разработка и внедрение приложений, продуктов и услуг
  - Цепочка поставок
  - аппаратного программного обеспечения
- 3 Благоприятный социальный контекст
  - экосистемами, инфраструктурой
  - для развития талантов
- 4 Применение в миссиях
  - Здравоохранение
  - Сельское хозяйство, водоснабжение и снабжение продовольствием
  - Энергетика и устойчивое развитие
  - Безопасность
  - Мобильность и логистика
- 5 Социальное воздействие



3.2.1 Безопасность и конфиденциальность: постквантовый период

криптография и квантовые сети, компьютеры и сенсоры

Универсальный, исправляющий ошибки и отказоустойчивый квантовый компьютер потенциально может свести на нет методы шифрования, используемые в настоящее время для защиты данных. Многие существующие методы шифрования тогда стали бы принципиально небезопасными.

Важная и широко используемая группа методов шифрования основана на математических задачах. Одним из примеров является шифрование RSA, которое в настоящее время используется для большей части онлайн-защиты данных. Центральным моментом шифрования RSA является тот факт, что, хотя умножение двух очень больших простых чисел очень простое,

обратное вычисление - разложение очень большого числа на множители на два простых числа - чрезвычайно сложно. Для выполнения этой задачи не существует быстрых и эффективных алгоритмов, и поэтому она не может быть выполнена в реалистичные сроки

создайте кадр с помощью классического компьютера (при условии, что числа достаточно велики). Однако в 1994 году американский математик Питер Шор продемонстрировал, что, в принципе, квантовый компьютер будет способен быстро вычислять простые множители очень большого числа, тем самым делая многие существующие методы шифрования небезопасными.

Это рассматривается как серьезная угроза, даже несмотря на то, что квантового компьютера, способного выполнять такие вычисления, еще не существует. В конце концов, жизненно важную информацию (национальной) безопасности часто приходится хранить десятилетиями; вероятность того, что злонамеренная сторона получит зашифрованную конфиденциальную информацию, а затем просто подождет, пока станет доступен квантовый компьютер

следовательно, имеет серьезные последствия для безопасности. Как национальные данные безопасности, так и частные финансовые или медицинские данные потенциально уязвимы для такого сценария. Разработки в области постквантовой криптографии предназначены для противодействия связанным с ними угрозам.

Наряду с постквантовым шифрованием, квантовое шифрование также является важной дисциплиной. Разница между квантовым и постквантовым шифрованием заключается в том, что квантовое шифрование использует квантовое оборудование для защиты информации, тогда как постквантовое шифрование этого не делает. Это различие весьма фундаментально: способ, которым компьютеры в квантовых сетях безопасно подключаются, полностью отличается от всего, что могут делать обычные компьютеры. В квантовой сети используется явление квантовой запутанности, означающее, что любая попытка перехватить данные или иным образом собрать их становится очевидной сразу. Наиболее развитой технологией квантовой связи в настоящее время является квантовое распределение ключей (QKD). Например, у нас уже есть протоколы "подготовки и измерения" QKD, основанные на суперпозиции. Передаваемая квантовая информация используется для получения общего ключа, который затем используется для защиты сообщений, отправляемых через классический Интернет. Безопасность

также необходимо будет разработать метод аутентификации, чтобы гарантировать, что доступ к квантовым компьютерам и квантовой сети действительно ограничен авторизованными пользователями. Такой метод может быть основан на программном обеспечении или на физических объектах.

Квантовые датчики также имеют потенциальное применение в области безопасности. Они могут, например, использоваться в военных целях или целях безопасности, таких как навигация в условиях, когда GPS не может быть использован (например, на территории противника или под землей). Датчики квантовой гравитации также могут быть использованы для обнаружения подводных лодок. Более того, оптические атомные часы на подводных лодках, кораблях или самолетах могут использоваться для обнаружения манипулирования сигналами GPS. Другой возможностью является установка атомных часов в телекоммуникационных сетях., позволяя им продолжать работу в случае выхода из строя системы GPS. Согласно одному из недавних отчетов, отключение GPS и телекоммуникационных сетей обойдется в сотни миллионов долларов в день только в США.<sup>28</sup>

Подготовка к работе с квантовыми компьютерами путем разработки постквантовой криптографии

Самые популярные криптографические протоколы с открытым ключом, используемые в настоящее время, были бы уязвимы для атаки, запущенной с использованием квантового компьютера. Протоколы основаны на математических задачах, которые очень трудно решить с использованием классических компьютеров, таких как вычисление простых множителей (очень) большого числа. Однако такие проблемы могли бы быть быстро решены с помощью пока еще гипотетически большого, стабильного квантового компьютера. Это привело к появлению постквантовой криптографии: раздела криптографии, занимающегося разработкой современных алгоритмических методов шифрования, которые не были бы уязвимы для квантовых компьютерных атак.

Для разработки новых протоколов, которые невозможно обойти с помощью квантовых алгоритмов, потребуются гораздо больше исследований, включая сотрудничество между экспертами по квантовым алгоритмам и криптологами. Среди тех, кто активно работает в области постквантовой криптографии, KPN, QT / e и QuSoft; Microsoft и Google также проявляют большой интерес. TNO также работает над продуктами и стратегиями, помогающими организациям стать устойчивыми к квантовым воздействиям. Тем временем на международной арене наблюдается прогресс в направлении стандартизации протоколов постквантовой криптографии.

<sup>28</sup> "Экономические преимущества глобальной системы позиционирования (GPS)", RTI, Отчет № 0215471, спонсируемый Национальным институтом стандартов и технологий (NIST), США.

### Квантовое распределение ключей (QKD) делает возможной сверхзащищенную связь

Первое поколение продуктов QKD уже разработано. Имеется в продаже. Одним из недостатков этих ранних систем QKD (в которых используются волоконно-оптические линии связи) является то, что максимальное физическое расстояние между машинами в настоящее время составляет от 50 до 100 километров (хотя были проведены испытания, в которых расстояние между машинами превышало 400 километров). Более того, системы еще не полностью безопасны. Проблема в том, что обычные усилители, используемые в волоконно-оптических сетях, не работают с квантовыми коммуникациями. Поэтому различные команды, включая исследователей, связанных с Квантовым интернет-альянсом в Нидерландах, работают над разработкой специальных квантовых ретрансляторов.

Тем временем были предприняты первые шаги к преодолению межконтинентальных расстояний путем связи через космос. "QKD в свободном пространстве" использует квантовые механические свойства света в сочетании с технологией лазерной спутниковой связи для передачи ключей шифрования для сверхзащищенной связи. В 2016 году Китай запустил спутник, который использовался для исследовательских экспериментов, ведущих к передаче квантовых данных через космос,

между одним или несколькими спутниками и наземными приемными станциями. Различные другие страны, включая Канаду, Сингапур и Великобританию, также работают над полетами QKD в свободном космосе. На европейском уровне программа ESA ScyLight включает в себя несколько космических проектов QKD, в которых участвуют TNO и различные голландские компании. Недавно стартовал новый голландский проект: QuTech и ABN AMRO bank будут работать вместе над разработкой подключений с квантовой защитой для сектора финансовых услуг<sup>29</sup>



### 3.2.2 Энергетика и устойчивое развитие: квантовые симуляторы, компьютеры и датчики

Используя такие явления, как суперпозиция и запутанность, квантовые компьютеры способны к параллельной обработке экспоненциально больших объемов данных, чем могут обрабатывать классические компьютеры. Более того, используя квантовые симуляторы, квантовые системы можно моделировать на гораздо более естественной основе, открывая путь, например, к вычислению различных состояний молекул или химических соединений. Квантовый симулятор - это управляемая и управляемая квантовая система, способная предсказывать поведение другой квантовой системы, которая исследуется.

### Использование квантовых компьютеров для конструирования сложных молекул

При финансовой поддержке Shell Research в Лейденском университете была создана исследовательская группа, которая в сотрудничестве с Vrije Universiteit Amsterdam изучит возможность использования квантового компьютера для проектирования сложных молекул. Искусственный фотосинтез и экологически чистая технология производства искусственных удобрений - вот два из перспективных приложений, которые были бы невозможны даже для самых мощных обычных компьютеров. На иллюстрации (источник: Википедия) изображен сложный фермент нитрогеназа, который жизненно важен для получения экологически чистого искусственного удобрения. Моделирование молекулы слишком сложно для обычного компьютера, но должно быть возможным для квантового компьютера.



Квантовые симуляторы и квантовые компьютеры могут облегчить формулирование решений проблем энергетики и устойчивого развития. Например, они могут быть использованы для определения подходящих материалов для изготовления более совершенных батарей, для разработки новых типов солнечных панелей или для разработки новых, менее чувствительных к температуре сверхпроводников для использования в передаче энергии. Они также имеют большую потенциальную ценность в контексте задач оптимизации в области проектирования электросетей и распределения энергии. Кроме того, датчики, использующие квантовую технологию, могут отображать гравитационное поле Земли с беспрецедентной точностью, облегчая геологическую деятельность, такую как хранение углерода, вулканология и геологоразведка. Таким образом, потенциальное влияние квантовых технологий на переход к энергии значительно.

Исследовательские группы в различных голландских университетах (Эйндховен, Амстердам, Лейден, Делфт и Утрехт) работают над разработкой квантовых симуляторов. В ряде случаев в этих инициативах участвуют партнеры из частного сектора. Например, Shell и Лейденский университет начали совместный проект, который рассматривает вопросы, связанные с квантовой химией и фотосинтезом.



### 3.2.3 Здоровье и медико-санитарная помощь: квантовые компьютеры, симуляторы и датчики

Способность моделировать квантовые процессы означает, что квантовые компьютеры и симуляторы обладают большим потенциалом также в области здравоохранения. Причина в том, что все процессы и системы наноразмерного масштаба, включая те, что находятся в организме человека, управляются законами квантовой физики. Хотя мелкомасштабные процессы можно смоделировать и произвести аналитические расчеты с использованием классического компьютера, моделирование более крупных систем (более крупных молекул, сложных процессов) требует больших вычислительных мощностей. Так, например, современные суперкомпьютеры могут практически производить вычисления для молекулы кофеина, но не для молекулы пенициллина.

Молекулярные взаимодействия на (суб)атомарном уровне имеют решающее значение в контексте исследований новых лекарств. Если в будущем все белки, которые может производить человек (которых насчитывается более двадцати тысяч), можно было бы смоделировать с помощью квантовых симуляторов, включая их взаимодействие с известными или недавно разработанными лекарствами, это имело бы далеко идущие последствия для здравоохранения и фармацевтики. Хотя до этого сценария, вероятно, еще несколько десятилетий, квантовые компьютеры и симуляторы в принципе способны воплотить его в реальность.

### Квантовое зондирование для использования в больницах: нано-MPT

Используя дефекты в кристаллической матрице твердого тела, такого как алмаз, можно создавать чрезвычайно чувствительные и универсальные квантовые датчики. Как чувствительность, так и разрешающая способность таких датчиков очень высоки. Они также подходят для использования в диапазоне температур, включая комнатную. Квантовые датчики могут использоваться для измерения различных микроскопических и наноразмерных явлений, включая электрические токи, магнитные поля, электрические заряды, температура, давление и механические силы. Многочисленные приложения разрабатываются командами во многих разных странах. Они включают в себя приложения для MPT в наноразмерном масштабе для использования в материаловедении и биохимии, для определения характеристик квантовых материалов, для навигации без GPS, для контроля качества жестких дисков и батарей, а также для обнаружения пластиковых труб.

Различные консорциумы также исследуют возможные будущие медицинские применения. В MetabolIQs<sup>20</sup> Флагманский проект Quantum, например, использует дефекты на поверхности алмаза для поляризации пировиноградной кислоты (продукта распада сахаров, жиров и белков). Вырабатываемая пировиноградная кислота позволяет выявлять сосудистые заболевания с помощью MPT сканирования во много раз быстрее, чем это возможно при использовании традиционных методов. В 2018 году был начат проект NWA<sup>21</sup>, в рамках которого Делфтский технологический университет, QuTech, Лейденский университет, TNO и два стартапа (Applied Nanolayers и Leiden Spin Imaging) разрабатывают "квантовый микроскоп", в котором используется алмазный датчик магнитного поля для визуализации поведения электронов в наномасштабе, близком к абсолютному нулю, и при комнатной температуре..... , Со временем этот метод может позволить проводить MPT-сканирование в наноразмерном масштабе в условиях больницы.<sup>21</sup>



3.2.4 Сельское хозяйство, водоснабжение и продовольствие: квантовые компьютеры, симуляторы и датчики

Потенциал квантовых вычислений часто иллюстрируют ссылкой на искусственные удобрения. Искусственные удобрения жизненно важны для производства продуктов питания и, следовательно, способности прокормить огромное и растущее население мира. Одним из его основных компонентов является аммиак, но производство аммиака с помощью "процесса Хабера-Боша" чрезвычайно энергоемко, на его долю приходится примерно 3% от общего (мирового) производства энергии. Однако некоторые бактерии экспрессируют фермент, который способен производить аммиак гораздо более эффективно. Если бы можно было точно установить, как работает этот фермент, ученые, вероятно, смогли бы имитировать

сам процесс. Это, в свою очередь, привело бы к значительному сокращению спроса на энергию. К сожалению, даже самые мощные суперкомпьютеры в мире в настоящее время способны моделировать только восемь из 450 аминокислот фермента. Напротив, отказоустойчивый квантовый компьютер в конечном счете должен быть способен имитировать фермент. Полностью охарактеризовав фермент и имитируя его, можно затем сделать производство искусственных удобрений во много раз дешевле и устойчивее.

Другим возможным применением квантовой технологии в сельском хозяйстве является измерение излучения в диапазоне длин волн, связанном с фотосинтезом. Это включало бы квантовые датчики "фотосинтетического активного излучения". Используя такие датчики (которые уже продаются различными производителями), можно составить подробную картину роста урожая. Квантовые датчики также могут быть использованы для обнаружения загрязняющих веществ, переносимых водой.

В области управления водными ресурсами и расчета стока также большую ценность могут иметь квантовые компьютеры и симуляторы. Квантовое моделирование может разрешать уравнения Навье-Стокса для течений в жидкостях и газах, позволяя моделировать, например, турбулентность вокруг крыла самолета. Airbus соответственно, запустил программу challenge, которая началась недавно и должна продлиться в течение 2019 года. Компания написала: "Она открыта для всего научного сообщества.

сообщество экспертов, исследователей, стартапов, академиков и заложит основу для окончательного перехода к квантовой эре в аэрокосмической отрасли".<sup>22</sup> Другие возможные области применения включают моделирование влияния высокого кровяного давления на сердце и кровеносные сосуды, моделирование процессов в химической промышленности, и прогнозирование наводнений в низменных регионах.



3.2.5 Мобильность и логистика: квантовые компьютеры и симуляторы.

Правительства, предприятия и другие организации используют классические компьютеры для выполнения всевозможных поисковых операций и оптимизации бесчисленных процессов: сканирования больших файлов данных, поиска наиболее эффективного маршрута через оживленный город, эффективного извлечения товаров из большого хранилища, составления рабочих списков, разработки эффективных чипов для самолетов и так далее. Во многих случаях квантовые компьютеры и симуляторы вполне могут быть способны выполнять необходимые вычисления выполняются намного быстрее. Например, когда квантовая технология используется с алгоритмом Гровера (опубликованным в 1996 году), поиск в неструктурированной базе данных может осуществляться очень быстро. Другие потенциальные области применения технологии

Более того, квантовые сенсоры обладают большим диагностическим потенциалом, например, в будущих MPT-сканерах. MPT-сканеры могут визуализировать структуры молекул и белков, таким образом, например, делая видимыми опухоли. На данный момент для получения одного MPT-изображения требуется несколько сканирований относительно большой поверхности, которые впоследствии усредняются для получения одного изображения. Используя квантовые датчики, которые будут намного более чувствительными и точными, чем существующие датчики, должно быть возможно выполнять более локализованные измерения со сверхвысоким разрешением

### QuantumLab: квантовые вычисления и управление водными ресурсами в Нидерландах

Innovation Quarter, QuTech, TNO, IBM и Microsoft в настоящее время работают над созданием полевой лаборатории для разработки вариантов использования квантовых компьютеров в водном секторе. С этой целью были организованы два семинара с экспертами в области квантовой физики и потенциальными конечными пользователями из водного сектора, включая Deltares, KWR, Imhoff, Stowa, Danser и aFrogLeap. Цель состоит в том, чтобы исследовать возможные способы использования мощности квантовых вычислений в этом секторе. Также широко распространен интерес к изучению потенциала квантовых компьютеров для

ускорение разрешения уравнений Навье-Стокса, которые используются для моделирования в таких областях, как механика жидкости.<sup>23</sup> В настоящее время изучается возможность использования той же конструкции полевой лаборатории для решения других вариантов использования, для различных приложений и в различных секторах, включая сектор финансовых услуг, кибербезопасность и логистические цепочки. Примечательно, что решение уравнения Навье-Стокса является одной из семи "задач тысячелетия": любой, кто сможет решить задачу тысячелетия, выиграет миллион долларов.

<sup>20</sup> Смотрите: [www.metaboliqs.eu/en/the-project.html](http://www.metaboliqs.eu/en/the-project.html)

<sup>21</sup> See: [www.nwo.nl/onderzoek-en-resultaten/programma/nwo/nationale-wetenschapsagenda—onderzoek-op-routes-door-consortia-orc-toekenningen-2018.html](http://www.nwo.nl/onderzoek-en-resultaten/programma/nwo/nationale-wetenschapsagenda—onderzoek-op-routes-door-consortia-orc-toekenningen-2018.html)

<sup>22</sup> См.: <https://www.airbus.com/innovation/tech-challenges-and-competitions/airbus-quantum-computing-challenge.html>

<sup>23</sup> "К решению уравнения Навье-Стокса на квантовых компьютерах", <https://arxiv.org/abs/1904.09033>

Квантовые вычисления для оптимизации процессов

Bosch и QuSoft совместно изучают, как квантовые вычисления могут быть полезны для многонациональных компаний. Направления исследований включают квантовые потенциальные применения вычислительной техники в процессах проектирования и искусственном интеллекте, а также способность технологии ускорять процессы оптимизации. Один из постдокторских исследователей проекта сказал: "По мере того, как первый квантовый компьютер становится все ближе к реализации,

предприятиям важно учитывать, как квантовые алгоритмы могут помочь им - например, в оптимизации и моделировании при разработке продукта. Можно многое получить, выяснив, какие математические задачи и задачи оптимизации являются наиболее значимыми для Bosch, а затем решить эти проблемы с помощью квантовых алгоритмов".

включает определение глобального минимума или максимума данной вычислительной функции или ландшафта и установление кратчайшего маршрута между двумя точками на карте. Использование квантового компьютера для любой такой задачи, однако, зависит от возможности эффективного импорта классических данных.

Различные команды и организации уже опробовали квантовую оптимизацию на практике. Например, как упоминалось выше, Airbus экспериментировал с использованием

квантовой технологии для прогнозирования воздушных потоков над крыльями самолета посредством комплексного моделирования воздушных частиц, с целью создания более надежных и эффективных конструкций самолетов. Тем временем НАСА заключило партнерские отношения с канадской компанией D-Wave (которая производит особый тип квантового компьютера) с целью оптимизации багажа и хранения на борту космического корабля.

3.3 Экономическое влияние квантовых технологий

Ландшафт квантовых технологий сильно изменился за последние годы. Десять лет назад научные исследовательские центры и QuTech уже предвидели, что квантовая технология окажет серьезное технологическое и социальное влияние. Однако это видение в целом не разделялось широким миром; люди скептически относились в основном к его

техническая осуществимость. Сейчас преобладает совсем иная ситуация. По данным Gartner, квантовые технологии в настоящее время находятся на восходящей стороне рекламного цикла Gartner<sup>24</sup>: Ожидания высоки, правительства и предприятия вкладывают значительные средства, появляются многочисленные стартапы, и существует значительный интерес средств массовой информации. Кажется, что все принимают участие в действии. Тем не менее, ожидания еще предстоит оправдать. Теория цикла ажиотажа Gartner предсказывает сначала фазу охлаждения, когда становится ясно, что технология еще не созрела и что необходимо устранить различные недостатки и проблемы. Именно тогда необходима настойчивость: те, кто настаивает на целенаправленной разработке и экспериментировании с целью продвижения технологии и ее приложений, будут в наилучшем положении, чтобы воспользоваться преимуществами на следующем этапе, когда рынок действительно начнет развиваться и появятся коммерческие приложения, которые будут расти.

Можно ожидать, что со временем квантовые технологии создадут новые рыночные возможности для бизнес-сообщества. Эти возможности, вероятно, будут во всех секторах и будут способствовать значительному экономическому росту. На данный момент степень этого эффекта трудно оценить, поскольку требуется гораздо больше работы по разработке, прежде чем технология может быть применена и использована в больших масштабах. Тем не менее, можно сделать выводы относительно рынка, потенциально открытого для поставщиков продуктов и услуг, основанных на квантовых технологиях, и для их поставщиков. Размер и природа этого рынка рассматриваются в этом подразделе.

<sup>24</sup> Смотрите: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>. Согласно Gartner, квантовые вычисления находятся на восходящей стороне рекламного цикла Gartner. Gartner не включает квантовую коммуникацию, квантовое моделирование и квантовое зондирование в рекламный цикл, но эти технологии, вероятно, находятся в аналогичном положении.

3.3.1 Экосистема для продуктов и услуг, основанных на квантах

Квантовые технологии изначально откроют возможности для высокотехнологичных систем и материалов и секторов ИКТ. Совместно со своими поставщиками различные компании в этих секторах уже разрабатывают продукты и услуги, основанные на квантовых технологиях, с целью вывода их на рынок. Сектор высоких технологий является ключевым сектором экономики Нидерландов, с такими глобальными игроками, как ASML, ASM International, NXР Philips и Thales, а также многочисленными поставщиками (как правило, МСП) в регионе Эйндховен-Брейнпорт и в других местах. ИКТ также являются важным сектором для таких предприятий, как KPN, Microsoft, IBM, Intel, Fox-IT, SAP и ATOS. Более того, можно ожидать, что компании-разработчики программного обеспечения будут играть все более важную роль в разработке приложений как для квантовых компьютеров, так и для квантового Интернета. Многие из этих предприятий участвуют в разработке квантовых технологий и внесли свой вклад в формулирование этой повестки дня. Тем временем группа голландских стартапов работает с квантовыми технологиями, в том числе Quix из Энсхеде и Delft Circuits, Single Quantum и Qblox из Делфта.

Инвестиции в технологии приводят к созданию новых рабочих мест высокого качества. Рассмотрим следующие иллюстративные оценки. В 2018 году компания Birch Consultants изучила возможности для создания Q-кампуса в Делфте.<sup>25</sup> Последующие действия по результатам исследования, было подсчитано, что реализация Q-Campus к 2023 году может напрямую привести к созданию 675 рабочих мест FTE, все из которых будут высококлассными специалистами в области исследований и разработок. Когда косвенное влияние на занятость добавляется к картине, полной занятости эффект получается на более чем 2000 рабочих мест (в том числе примерно 25 процентов на профессиональном среднем уровне) к 2023 году. Расчеты предполагают, что общий эффект от уровня занятости к 2030 году может составить 7000 ФТЭ. Первоначальное исследование касалось исключительно региона Делфт; ясно, что при учете программ в других городах и регионах влияние квантовых технологий на общий уровень занятости в Нидерландах будет значительно больше, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

Сильно упрощенный набросок экосистемы квантовых технологий представлен на рисунке 8. В центре - сама технология и стороны, проводящие исследования и разработки по этой технологии. Вокруг этого ядра находятся поставщики: компании, поставляющие критически важные

Qblox, один из квантовых стартапов в регионе Делфт

Qblox была основана в 2018 году: дочернее предприятие QuTech деятельность в области разработки электроники. Компания фокусируется на совершенствовании "стека" электронных компонентов, необходимых для управления кубитами и построения универсального квантового компьютера.



Масштабирование существующих прототипов квантовых компьютеров, в которых всего несколько кубитов, для создания компьютеров с сотнями или тысячами кубитов зависит от соответствующего прогресса, достигнутого в области управляющей электроники. Qblox выходит на рынок, где доминируют признанные электронные гиганты, чьи стандартные продукты не отвечают существующим потребностям сообщества квантовых вычислений и, что более важно, будущим потребностям этого сообщества. Компания является хрестоматийным примером того, как может быть создан комплекс экспертных знаний (охватывающий такие области, как квантовая теория, электроника и информатика), чтобы обеспечить индивидуальный результат и надежную поддержку продукта.



<sup>25</sup> Birch, "Создание Q-кампуса: реализация квантовой экосистемы в Делфте", 2018. ПРИМЕЧАНИЕ: Q-Campus - это всего лишь рабочее название.

компоненты и полупроводники для квантовых компьютеров и датчиков, таких как (оптические) чипы, лазеры, криогенные системы охлаждения и электронное оборудование. Индустрия поставок предоставляет возможности голландским производителям полупроводников и фотоники и другим компаниям, а также привлекает поставщиков из других стран для инвестирования в голландский рынок. Примером последней группы является финская компания BlueFors Cryogenics, производящая сложное холодильное оборудование, необходимое для создания quantum

компьютеры. В конце 2018 года BlueFors объявила о планах открыть подразделение исследований и разработок в Q-Campus в Делфте.

Компании-поставщики осуществляют продажу предприятиям, которые производят и продают устройства на основе квантовых технологий, такие как оборудование QKD и квантовые компьютеры. У этих производителей есть различные бизнес-модели. Модель IBM, например, основана на "оборудовании как услуге", когда конечный пользователь получает доступ к вычислительным мощностям квантовых компьютеров IBM через облако. Другие продают свои устройства как отдельные продукты, одним из таких является канадская компания D-Wave (которая дополнительно предлагает облачный сервис). В этой области экосистемы также разрабатывается программное обеспечение, необходимое для работы устройств (например, программное обеспечение для исправления ошибок).

Далее, у нас есть компании, которые разрабатывают квантовые приложения и программное обеспечение для конечных пользователей (и продают их); затем конечные пользователи могут запускать приложения на устройствах, предоставляемых поставщиками оборудования как услуги, или на своих собственных квантовых компьютерах. Среди этих сторон такие организации, как голландский институт QuSoft, который разрабатывает квантовые приложения. В том же регионе экосистемы также находятся поставщики продуктов и услуг, использующие квантовые технологии. Примером может служить KPN, которая совместно со своими партнерами разрабатывает решения для безопасной передачи данных, для которых используются соединения с квантовым шифрованием (QKD). Такие компании предоставляют услуги конечным пользователям в различных областях, которые образуют самую внешнюю область экосистемы на диаграмме. Потенциальных конечных потребителей можно найти во всех секторах экономики. Многие из них участвовали в разработке этой повестки дня: например, в консультативной группе были представлены ABN AMRO, Shell, Agamco и Министерство обороны, в то время как организации из сектора здравоохранения, водного сектора и сферы безопасности посетили день открытых дверей, организованный для сбора материалов для повестки дня.

Нидерланды обладают значительным опытом в области развития аналогичных экосистем. Одним из очевидных примеров является высокотехнологичная экосистема, окружающая Мозговой центр Эйнховена. Нидерланды также добились успеха в области ИКТ: была создана мощная цифровая инфраструктура и связанная с ней экосистема. Такие компании, как Microsoft и Google, построили крупные центры обработки данных в Нидерландах, в то время как амстердамская Internet Exchange (AMS-IX) зарекомендовала себя как один из крупнейших в мире интернет-хабов, со статусом, аналогичным статусу логистических центров в Схипхолье

аэропорт и морской порт Роттердама. Цель этой программы состоит в том, чтобы Нидерланды стали международным центром и хабом квантовых технологий. В конце концов, квантовые технологии хорошо сочетаются с голландским полупроводниковым кластером и разработками, например, в фотонике и интеллектуальной промышленности. Квантовые технологии также дополняют позицию Нидерландов в области ИКТ и текущие разработки в области искусственного интеллекта и машинного обучения.

### 3.3.2 Рынок квантовых технологий

В ранее цитированном исследовании 2018 года Birch Consultants

подсчитали, что общий рынок квантовых технологий в 36 странах ОЭСР может вырасти примерно до 65 миллиардов долларов США в течение следующих двадцати лет. Эта цифра была основана на рыночных прогнозах Morgan Stanley и данных ОЭСР. Прогнозы Берча проиллюстрированы на рисунке 9.

В рамках рынка продуктов и услуг, основанных на квантовых технологиях, можно выделить три субрынка: квантовые компьютеры (включая квантовые симуляторы), квантовые датчики и решения для квантовых коммуникаций. Хотя небольшое количество ранних продуктов и услуг, использующих квантовую технологию, уже доступно - в том числе квантовый отжигатель D-Wave, небольшой универсальный квантовый компьютер IBM, решения QKD первого поколения швейцарской компании ID Quantique и атомные часы и акселерометры французской компании Muquans - остается неясным, насколько велики могут быть различные сегменты рынка или как они будут развиваться. Тем не менее, ниже предпринята попытка оценить потенциальный объем каждого сегмента на основе (фрагментированной) информации из различных источников.



РИСУНОК 8

Упрощенная схема экосистемы квантовых технологий. Пути показаны отдельно, но на самом деле не являются взаимно изолированными. Более того, организации, действующие по одному пути или в одном регионе, могут дополнительно быть активны по другим путям и в других регионах. Диаграмма также неполная: государственные органы, инвесторы, зонтичные организации, НПО, органы по стандартизации и другие были опущены в целях упрощения.

Оценка общего роста рынка квантовых технологий в 36 странах ОЭСР. (Источник: Birch)

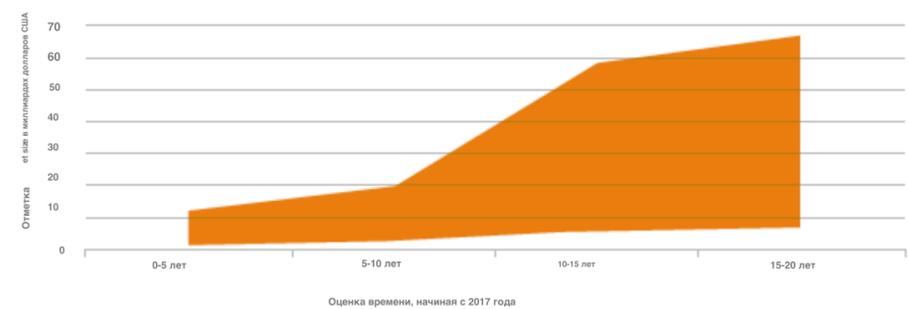


РИСУНОК 9

Оценка общего роста рынка квантовых технологий в 36 странах ОЭСР. (Источник: Birch)

**Рынок квантовых компьютеров и квантовых симуляторов**

В 2018 году BCG<sup>26</sup> по оценкам, глобальный рынок квантовых вычислений, квантового моделирования и связанных с ними услуг, вероятно, вырастет с 1-2 миллиардов долларов США в 2030 году до 263-295 миллиардов к 2050 году. Эти цифры основаны на двух сценариях: сценарии низкого роста, характеризующемся консервативными оценками (закон Мура применяется к кубитам, предполагая отсутствие ускорения в разработке квантовых алгоритмов исправления ошибок), и сценарии высокого роста (предполагая, что потребность в исправлении ошибок значительно снижается, в результате чего большие квантовые компьютеры вводятся в эксплуатацию раньше, чем ожидается в настоящее время). В любом случае, объем рынка будет очень значительным, особенно в долгосрочной перспективе. Для сравнения, по оценкам BCG, мировой рынок вычислительной техники в настоящее время составляет около 800 миллиардов долларов.

Однако два сценария BCG существенно отличаются с точки зрения скорости развития рынка. Это связано с тем, что скорость развития рынка в значительной степени зависит от того, насколько быстро появятся крупномасштабные квантовые компьютеры. BCG считает, что потенциально доступный рынок в 2030 году может быть во много раз больше (около 50 миллиардов долларов). Однако реализация этого потенциала будет зависеть от более быстрого развития квантового компьютера, чем в настоящее время предусмотрено в любом сценарии BCG. BCG также рассчитывает, что,

если бы в настоящее время было возможно выполнять квантовое моделирование сложных атомных процессов, только рынок США стоил бы от 15 до 30 миллиардов долларов. Это также может объяснить, почему некоторые другие консалтинговые компании (включая Birch) прогнозируют развитие более крупного рынка квантовых компьютеров на более ранней стадии: примерно от 2 до 10 миллиардов долларов к 2025 году.<sup>27</sup> Агентства, о которых идет речь, предполагают более быстрое развитие квантовых компьютерных технологий, чем предполагала BCG в 2018 году.

**Рынок квантовой связи и квантовых сенсоров**

Компания Tematys недавно опубликовала маркетинговое исследование, проведенное для Европейского союза с целью оценки мирового рынка квантовой связи (в частности, приложений QKD) и квантовых датчиков, таких как атомные часы.<sup>28</sup> Полученные данные свидетельствуют о том, что в период с 2020 по 2028 год рынок квантовых датчиков вырастет примерно с 30 миллионов евро до 210 миллионов, в то время как рынок атомных часов вырастет с 250 миллионов евро до 350 миллионов, а рынок квантовых коммуникаций (телеком) увеличится примерно с 10 миллионов евро до 300 миллионов. Эти прогнозы предполагают, что цены за единицу QKD упадут примерно на 80% за тот же период. Результаты исследования представлены на рисунке 10.

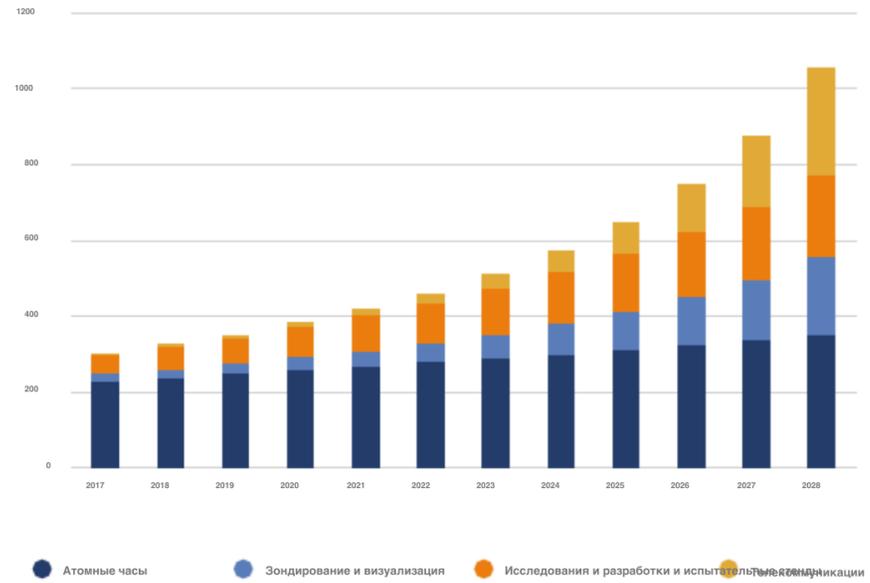


РИСУНОК 10

Общий объем мирового рынка наноразмерной квантовой оптики, в млн. евро. (Источник: Tematys)

**3.4**

**Этическое, правовое и социальное воздействие**

В большинстве статей и аналитических материалов по этой теме предполагается, что квантовые технологии окажут положительное влияние на экономику и общество. Однако, как и любая революционно новая технология, квантовая технология сама по себе не является ни хорошей, ни плохой. То, как технология повлияет на общество, будет определяться людьми, которые ее используют. Некоторые комментаторы предполагают "сценарии гибели", в которых квантовые технологии будут иметь ужасные последствия для безопасности и неприкосновенности частной жизни, баланса между гражданами, правительствами и корпорациями или международных геополитических отношений. Также были подняты вопросы относительно роли квантовых компьютеров в развитии искусственного интеллекта и систем, которые в конечном итоге могут стать умнее людей. На этом фоне ниже описан ряд потенциальных рисков, которые квантовые технологии представляют для общества.

**Риск усиления неравенства**

Весьма вероятно, что первое поколение квантовых компьютеров и симуляторов не будет одинаково доступно для всех. Это может привести к неравномерному распределению власти и богатства; например, США, Китай и Европа могут получить непропорциональную выгоду по сравнению с остальным миром, или ряд крупных технологических компаний могут получить выгоду за счет остального общества. Такие риски, возможно, могли бы быть компенсированы доступностью квантовых вычислений как услуги, о чем свидетельствует существующий сервис IBM Quantum Experience.

Чипы квантовых компьютеров могут работать только при чрезвычайно низких температурах, поэтому конечным пользователям с большей вероятностью будут предложены облачные сервисы, чем настольные компьютеры. Если облачные сервисы станут свободно доступными, каждый сможет воспользоваться преимуществами, которые дают квантовые вычисления. Другой вопрос, может ли каждый быть обеспечен знаниями и навыками, необходимыми для использования таких услуг.

**Риски для стабильности финансовой системы.**

Деньги стали цифровым "активом", и большинство банковских транзакций осуществляются онлайн. Следовательно, квантовые вычисления могут иметь серьезные негативные последствия, если они позволят киберпреступникам манипулировать финансовой системой. В конце концов, алгоритм Шора потенциально может свести на нет текущие положения о безопасности. Поэтому банкам и другим финансовым учреждениям следует уже сейчас готовиться к появлению квантовых компьютеров. К счастью, это действительно так, поскольку пост- квантовая криптография и QKD активно исследуются как пути к более безопасной коммуникации. Однако стандартизация и сертификация имеют важное значение в этой области.

**Риски для конфиденциальности и безопасности.**

В будущем квантовые компьютеры смогут взломать большинство современных методов шифрования с открытым ключом. Поэтому потенциально уязвимы как данные государственной безопасности, так и личные, финансовые или медицинские данные. Разработки в области постквантовой криптографии предназначены для противодействия связанным с ними угрозам.

<sup>26</sup> BCG, "Грядущий квантовый скачок в вычислительной технике", Массимо Руссо и др., май 2018 г. Включая будущие маркетинговые исследования, AMR и табличный анализ.

<sup>27</sup> "Чад Ригетти о гонке за квантовыми преимуществами", интервью BCG, ноябрь 2018г.

<sup>28</sup> "Маркетинговое исследование в области наноразмерной квантовой оптики", COST Action MP1403, тематический.

Юридический статус Quantum Software Consortium & Общественный резонанс

В 2017 году Голландский исследовательский совет выделил грант на программу Gravity Консорциуму Quantum Software Consortium, партнерству с участием QuSoft (в качестве координатора программы), QuTech и Лейденского университета. Финансирование в размере 18,8 миллионов евро в течение десятилетнего периода позволит консорциуму работать над программным обеспечением для квантовых компьютеров и квантовых сетей, над криптографией в квантовом мире и над

демонстраторы квантового программного обеспечения. Особое внимание будет также уделяться методам ответственного внедрения инноваций на основе рассматриваемых технологий, воздействие которых будет выходить за рамки правовых, этических и социальных границ. С этой целью был создан Юридический и общественный резонансный совет, который сосредоточился на анализе ELSA, и Правление разработало скромную исследовательскую и образовательную программу.

Риски, связанные с государственным надзором

Квантовые технологии могут позволить правительствам держать своих граждан под пристальным наблюдением. Поэтому может потребоваться законодательство для предотвращения любого негативного воздействия на личную свободу и неприкосновенность частной жизни. С другой стороны, существует также риск того, что государство окажется бесправным в случае совершения преступных действий.

организации должны были получить контроль над квантовыми технологиями, которым власти не могли противостоять.

Риски для безопасности

Страны, которые первыми получают квантовые технологии, по крайней мере временно, получат средства связи и наблюдения преимущество перед другими странами. Это могло бы изменить геополитические отношения. Помимо возможности моделирования новых фармацевтических препаратов и молекул, квантовые компьютеры также могут быть использованы для создания нового биологического и другого оружия, такого как оружие, нацеленное на людей с определенными генетическими характеристиками. Геополитические риски, связанные с квантовыми вычислениями, можно устранить, сделав технологию доступной для всех стран. Еще одна сложность заключается в том, что квантовая технология позволяет выполнять "слепые вычисления": использовать квантовый компьютер для выполнения вычислений без того, чтобы хост имел какие-либо знания о том, что делается. Следовательно, бесплатная доступность квантовых вычислений потребует регулирования.

Учитывая, насколько быстро развиваются технологии, сейчас самое время разжечь общественные дебаты относительно этических, юридических и социальных аспектов (ELSA) квантовых технологий и их интеграции в голландское (и европейское) общество. Нидерланды могут взять на себя ведущую роль в этом контексте и сыграть новаторскую роль. Начало уже положено, с публикации<sup>40</sup> о влиянии квантового интернета на общество от команды Quantum Vision из Технологического университета Делфта. В публикации рассматриваются такие вопросы, как повышенная конфиденциальность, управление квантовым Интернетом и сетевой нейтральностью, а также всеобщий доступ. Консорциум Quantum Software также организовал юридическую и общественную консультацию (см. раздел текст во вставке).

Предварительным условием для социальных дебатов о квантовой технологии является то, что все участники имеют разумное представление о технологии и ее последствиях. В конце концов, даже "инсайдеры" склонны представлять квантовую технологию как таинственное проявление парадоксальных идей и процессов. Это имеет последствия для участия в дебатах людей из других академических дисциплин, промышленности или правительства, а также для более широкого сообщества. В результате это может негативно сказаться на росте технологии и ее социальном внедрении: общество может неохотно принять квантовую технологию или даже отвергнуть ее, тем самым сдерживая, противодействие или значительная задержка интеграции. Полезно рассмотреть вопросы принятия, связанные с терапией стволовыми клетками, генетической модификацией, климатическими решениями и вакцинацией.

3.5  
Заключение

Квантовые технологии окажут значительное влияние на наше общество и экономику. Это воздействие будет ощущаться как в долгосрочной, так и в краткосрочной перспективе и затронет все секторы голландской экономики. Возможные области применения квантовых компьютеров, квантовых симуляторов, квантовых сетей и квантовых датчиков неисчислимы; мы пока не в состоянии представить и половины всего, что будет возможно. Таким образом, на данный момент невозможно с уверенностью спрогнозировать общий экономический эффект от всех приложений, продуктов и услуг, которые позволят использовать квантовые технологии. Рассмотрим рынок полупроводников: в 1943 году Томас Уотсон, тогдашний генеральный директор IBM, предсказал, что на мировом рынке появится около пяти компьютеров. Конечно, это было очень давно. Однако многие комментаторы еще много лет скептически относились к потенциалу рынка. Например, в 1977 году Кен Олсен, основатель и президент DEC (ведущей компьютерной технологической компании того периода), писал: "Нет никаких причин, по которым кто-либо хотел бы, чтобы компьютер был у него дома".<sup>41</sup> Однако сегодня компьютеры являются неотъемлемой частью повседневной жизни, а полупроводниковая промышленность является движущей силой мобильных приложений, самоуправляемых транспортных средств и так далее.

Со временем потенциал рынка, несомненно, будет очень значительным. Однако сроки реализации этого потенциала неясны, поскольку зависят от темпов технологического прогресса. Тем не менее, мы должны действовать сейчас, если Нидерланды хотят в полной мере воспользоваться экономическими возможностями, предоставляемыми квантовыми технологиями. Требуются немедленные инвестиции в исследования, образование, инфраструктуру и развитие экосистем. Развивая массовость и совершенство и опережая другие страны, мы можем занять прочные позиции на десятилетия вперед.

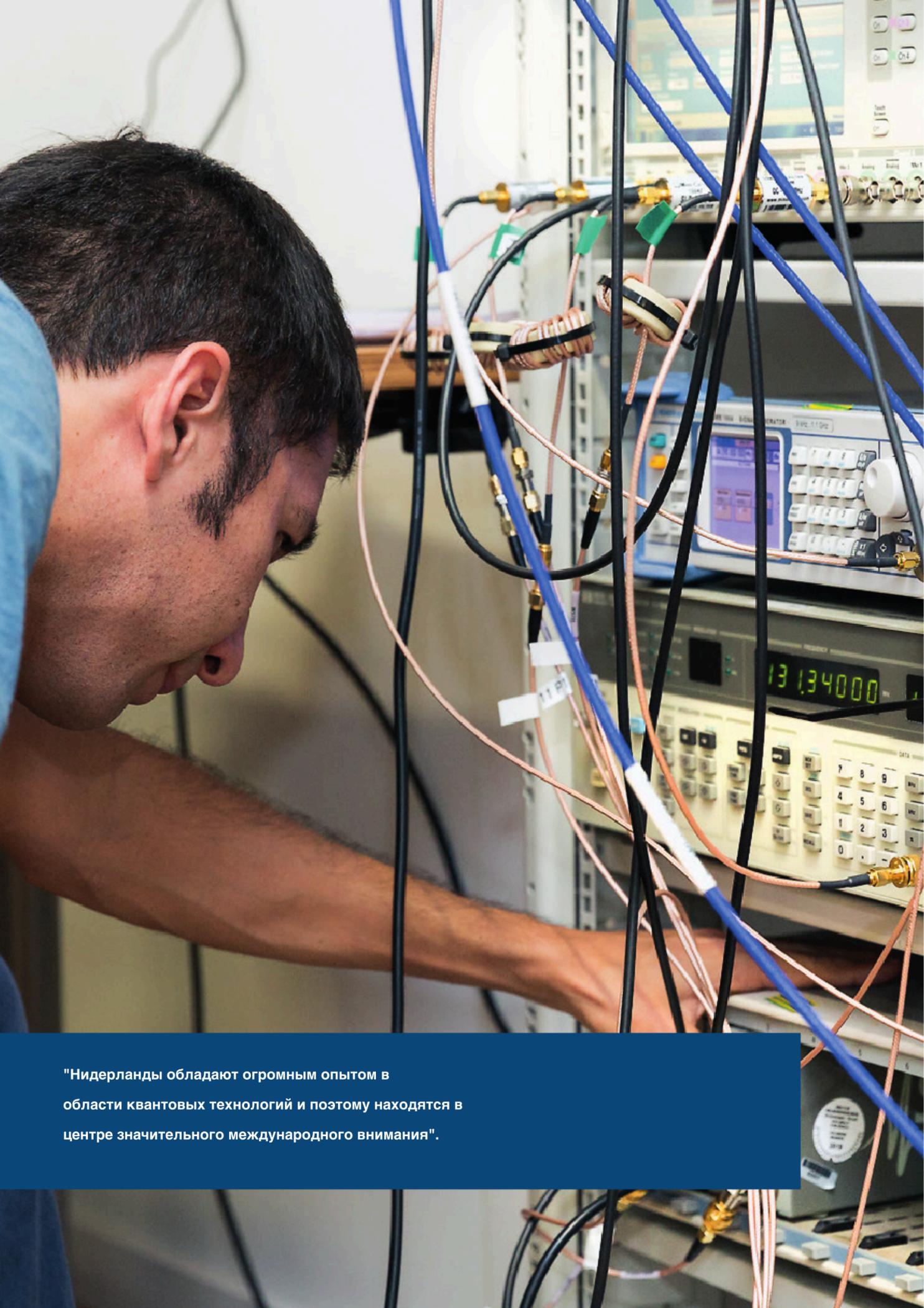
Эта стратегия ранее была успешной для

Нидерланды в таких областях, как гидротехника (опираясь на уникальные знания и навыки), ИКТ (где Нидерланды являются крупным интернет-центром) и производство полупроводников (где мы являемся одним из ведущих мировых производителей оборудования для производства чипов). Как нация, мы имеем стартовую позицию, необходимую для достижения такого же успеха в области квантовых технологий: несколько наших исследовательских институтов входят в число мировых лидеров в этой области и имеют тесные связи с предприятиями всех размеров. Сейчас самое время начать строить на этой стартовой позиции.

Однако, как и все революционно новые технологии, квантовая технология также поднимает этические, юридические и социальные вопросы. Важно не упускать из виду эти вопросы. Безопасность и конфиденциальность в настоящее время являются актуальными проблемами из-за опасений, что квантовые компьютеры в конечном итоге смогут взломать существующие типы шифрования данных. Хотя эта опасность, безусловно, существует, у нас есть две новые технологии (постквантовая криптография и QKD), которые потенциально могут обеспечить безопасность наших данных и наших коммуникаций. Нидерланды могут взять на себя ведущую роль в продвижении общественных дебатов по таким вопросам ELSA и таким образом занять прочные позиции в Европе и, возможно, во всем мире в отношении развития необходимых социальных, этических и правовых параметров. Различные голландские центры знаний уже запустили механизмы.

<sup>40</sup> Смотрите: [www.tudelft.nl/2018/tu-delft-lanceert-publicatie-over-de-impact-van-quantuminternet/](http://www.tudelft.nl/2018/tu-delft-lanceert-publicatie-over-de-impact-van-quantuminternet/)

<sup>41</sup> Смотрите: [www.pcworld.com/article/155984/worst\\_tech\\_predictions.html](http://www.pcworld.com/article/155984/worst_tech_predictions.html)



"Нидерланды обладают огромным опытом в области квантовых технологий и поэтому находятся в центре значительного международного внимания".

## 04

### ГОЛЛАНДСКИЙ КВАНТОВЫЙ ЛАНДШАФТ В МЕЖДУНАРОДНОМ КОНТЕКСТЕ

#### 4.1

Взаимодействие правительства,  
науки, промышленности и общества в целом

Успешное развитие квантовых технологий и  
инновационное применение будут чрезвычайно сложными.

Необходимо преодолеть серьезные научные  
и технологические проблемы, и потребуются интеграция различных  
технологий и дисциплин. Это потребует много  
размышлений, творческого подхода и создания инфраструктуры, и  
импульс должен быть придан в форме человеческого капитала и  
финансирования. Более того, квантовая технология концептуально  
сложна, и перевод квантовых концепций в практические приложения  
сам по себе является сложной задачей. Ни один человек или  
организация - да и вообще ни одна страна - не могут самостоятельно разрабатывать  
весь спектр квантовых технологий.

Требуется постоянное сотрудничество научного  
сообщества, деловых кругов и правительства. Требуется  
не линейный процесс, в котором эстафета  
ответственности передается от бегуна к бегуну, а длительное  
сотрудничество между различными сторонами,  
играющими параллельные роли на различных этапах.

В этом контексте правительство должно выйти за рамки  
своей традиционной роли законодателя и поставщика финансовых  
средств; правительство должно стать сетевым партнером и заинтересованной  
стороной, играющей активную роль в инновациях

процесс. Кроме того, в отличие от того, что происходит в большинстве  
других областей, бизнес-сообществу нужно будет не только  
инвестировать в исследования с высоким уровнем TRL<sup>42</sup> чьи результаты  
могут быть быстро выведены на рынок, но при этом потребуются  
сотрудничество в фундаментальных исследованиях. Предприятиям  
дополнительно потребуются работать с университетами над развитием талантов  
и укреплением их собственного исследовательского потенциала.

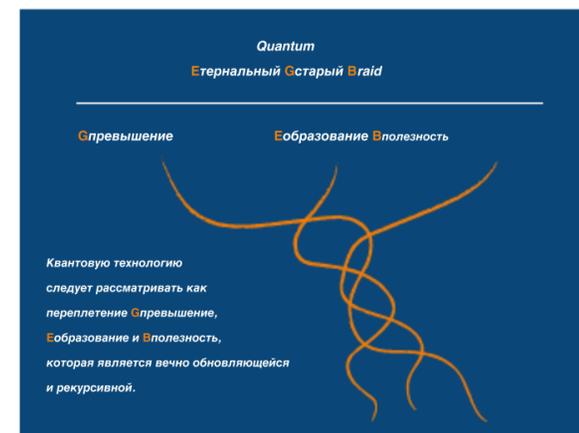


РИСУНОК 11

Инновации в науке и технике становятся все более  
сложна и требует постоянного сотрудничества с участием  
науки, промышленности, правительства и общества. Такое  
сотрудничество является основой подхода "золотого треугольника",  
который уже много лет используется в Нидерландах в так называемых "ведущих  
секторах" и в инновационной политике, основанной на миссии. Вариант этого  
подхода, проиллюстрированный здесь, был предложен ведущим  
экспертом по квантовым технологиям, которого пригласили выступить с  
основным докладом во время дня открытых дверей в Утрехте 16 апреля  
2019 года, переключаясь с названием знаменитой книги Дугласа  
Хофштадтера "Гедель, Эшер, Бах: Вечная золотая коса".

<sup>42</sup> TRL означает Уровень технологической готовности. Чем выше TRL технологии, тем ближе она к промышленному или социальному применению.

Такое переплетение науки, промышленности и правительства может предоставить Нидерландам уникальные возможности, потому что сотрудничество является неотъемлемой частью нашей культуры, и мы можем опираться на давние традиции государственно-частного партнерства, которые неоднократно позволяли нам занимать высокие позиции в рейтингах инноваций.

Нидерланды также обладают огромным опытом в области квантовых технологий, сосредоточенных на небольшой географической территории. Это привлекает международное внимание, например, со стороны крупных корпораций, стремящихся инвестировать в Нидерланды. Среда, существующая в Нидерландах, облегчает перевод научных результатов в прикладные программы и продвигает бизнес-стартапы. Очень важно, что мы сейчас опираемся на эту базу: первые партнерства в области квантовых технологий возникают на местном уровне, формируя голландскую квантовую экосистему. В развитии этой экосистемы Нидерландам поможет их способность к "системному мышлению": как нация, мы преуспеваем в системной инженерии и комбинировании очень сложных технологий для формирования операционных систем с уникальными возможностями. Яркими примерами являются регион Brainport и успех голландской полупроводниковой промышленности. Полученные знания могут быть очень полезны для осуществления важных прорывов в таких областях, как квантовый интернет и квантовые компьютеры.

#### 4.2 Нидерланды как "Квантовая страна"

Несмотря на то, что Нидерланды небольшая страна, они хорошо оснащены опытом и возможностями в области квантовых технологий. Основу уникальных знаний страны и инновационного ландшафта составляют три специализированных исследовательских центра. С севера на юг расположены три центра: QuSoft в Амстердаме, QuTech в Делфте и QT / e в Эйндховене. Другими важными игроками являются университеты Лейдена, Неймегена, Утрехта, Твенте и Гронингена, а также исследовательские институты TNO и AMOLF. Различные стороны сотрудничают в области исследований и инноваций не только друг с другом, но и с национальными и международными предприятиями.

Согласно недавнему отчету Birch, голландские научные учреждения в совокупности имеют около 70 главных исследователей (PI), работающих над квантовыми технологиями, и в 2016 году были награждены

почти 2500 степеней магистра для студентов, работающих в смежных областях.<sup>43</sup> Очевидно, что Нидерланды обладают впечатляющим опытом в этой области. Более того, результаты исследований в области квантовых технологий, проводимых в Нидерландах, значительно выше среднемировых показателей, о чем свидетельствует отчет Elsevier, цитируемый в подразделе 1.2.

#### 4.2.1 Исследовательские центры QuTech, QuSoft и QT / e

##### QuTech: Центр передовых исследований квантовых вычислений и квантового Интернета

QuTech - крупнейший в Нидерландах исследовательский центр квантовых технологий с сильной международной репутацией. Центр был создан в 2013 году как совместная инициатива Делфтского технологического университета и TNO, частично поддерживаемая государственно-частным партнерством с Microsoft и Голландским исследовательским советом. Миссия центра заключается в разработке квантовых технологий, основанных на суперпозиции и запутанности, и применении таких технологий в масштабируемых квантовых сетях и квантовых компьютерах. Для достижения этой миссии объединяются сильные стороны научных исследований, разработки технологий, инжиниринга и промышленного взаимодействия. Этот междисциплинарный подход в сочетании с интересом QuTech к "полнофункциональному" квантовому компьютеру и квантовому интернету делают институт уникальным во всем мире.

Исследования QuTech сосредоточены в четырех областях: отказоустойчивые квантовые вычисления, квантовый интернет и сетевые (квантовые) вычисления, топологические квантовые вычисления, и квантовое программное обеспечение и теория. Кроме того, у QuTech есть дорожная карта совместного развития, предусматривающая разработку междисциплинарных технологий и обмен ими. В 2014 году QuTech была признана Национальной иконой. В 2018 году в центре работало около 200 штатных сотрудников; планируется увеличить штат до 350 человек к 2023 году.

QuTech имеет различные успешные партнерские отношения с другими институтами. Основой нынешнего успеха является сотрудничество между Делфтом и Лейденом, обеспеченное целевой программой FOM / NWO (2004-2013), грантом ERC Synergy (2013-2019) и двумя программами Gravitation (одна также с участием QuSoft). QuTech работает с QT / e в Эйндховене над разработкой наноструктур для кубитов Майораны, а также с Университетом Твенте над производством Si-MOS-подложек. В партнерстве с LION в Лейдене,

#### QuTech: национальная икона

В 2014 году правительство Нидерландов назвало QuTech одной из четырех национальных икон в знак признания ее выдающегося положения в мире квантовых исследований и ее потенциала помогать решать основные социальные проблемы в таких областях, как здравоохранение и безопасность. Присвоив QuTech статус национальной иконы, правительство подчеркнуло важность центра для Нидерландов. В 2015 году это привело к государственным инвестициям в размере примерно 150 миллионов евро в течение десяти лет через Делфтский технологический университет, TNO, Голландский исследовательский совет (NWO), Министерство образования, культуры и науки и Министерство экономики.



QuTech исследует взаимодействие света и твердых тел в квантовом масштабе, а также гибридные приложения технологий сверхпроводящих и топологических квантовых вычислений.

Недавно компания QuTech разработала аппаратно-программную платформу для квантовых вычислений Quantum Inspire. Инициатива означает, что квантовые алгоритмы могут быть разработаны и протестированы в среде эмуляции на национальном суперкомпьютере Cartesius компании SURF, который может эмулировать квантовый компьютер емкостью до тридцати семи кубитов. Среда доступна для использования разработчиками квантового программного обеспечения и алгоритмов и предназначена для вывода квантовых технологий на следующий уровень. Вскоре на платформе будет добавлен настоящий квантовый чип. Таким образом, для QuTech платформа является благодатной основой для открытых инноваций, которая может послужить отправной точкой для создания национального центра квантовых вычислений. Позже в 2019 году QuTech рассматривает также предложить доступ к подлинным кубитам через платформу Quantum Inspire.

QuTech также сотрудничает с Microsoft в разработке квантового компьютера на основе так называемых топологических майорановских фермионов. В 2012 году исследователи из Делфта и Технологический университет Эйндховена опубликовал статью в журнале Science, описывающую доказательства существования до сих пор гипотетических частиц. Квантовая лаборатория Microsoft в Делфте была открыта королем Виллемом-Александром в феврале 2019 года.

В 2015 году Intel инвестировала пятьдесят миллионов долларов в эксклюзивное десятилетнее партнерство с QuTech, направленное на разработку технологии и электроники для квантовых вычислений. Intel поделится опытом в области производства передовых кубитов и электроники, способной работать при очень низких температурах.

QuTech играет роль международного первопроходца в развитии квантового интернета. Например, центр возглавляет Альянс квантового интернета европейского флага квантовых технологий, созданный для разработки плана европейского квантового интернета. В этом контексте QuTech также привлекла частных игроков. В партнерстве с KPN, ABN AMRO, AMS-IX, SURF и другими разрабатывается полигон для тестирования квантового интернета, соединяющий различные города в западной агломерации Нидерландов. В контексте европейского флага QuTech сотрудничает с двенадцатью компаниями, начиная от разработчиков оборудования (включая Tortica из Германии и Janssen Precision Engineering из Нидерландов) и заканчивая разработчиками приложений (такими как SAP).

В 2019 году промышленные компании вложили в исследования QuTech в общей сложности более десяти миллионов евро.

##### Q-Campus в Делфте

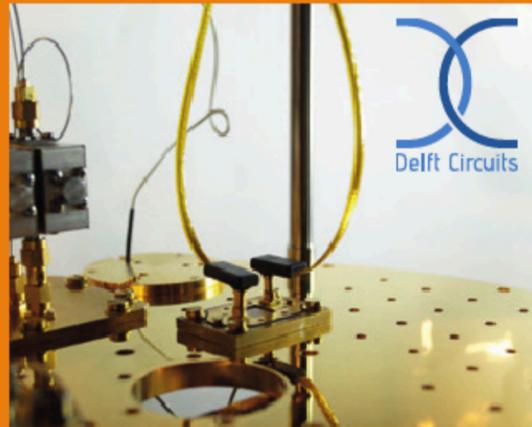
Объявление Microsoft о планах по созданию собственной лаборатории в кампусе в Делфте привело к созданию Q-Campus<sup>44</sup> инициатива, направленная на расширение местной экосистемы QuTech с участием компаний, стартапов и общие помещения. В настоящее время формируется организация Q-Campus, основными задачами которой будут приобретение персонала, управление аккаунтами и создание сообщества. Совсем недавно финская компания Bluefords объявила, что она откроет исследовательский центр на территории Q-Campus, и сейчас там также работает несколько стартапов. Например, Single Quantum с 2012 года занимается продажей сверхпроводящих однофотонных детекторов, в то время как Delft Circuits с 2017 года занимается коммерческим производством широкополосных микроволновых кабелей для криогенных сред, а QBox с 2019 года производит оборудование для управления многокубитными системами и считывания данных. В своем ранее цитированном исследовании Birch Consultants прогнозирует, что Q-Campus

<sup>43</sup> Birch, "Создание Q-кампуса: реализация квантовой экосистемы в Делфте", 2018.

<sup>44</sup> На данный момент это всего лишь рабочее название.

### Пример стартапа: Delft Circuits

Работает с 2017 года, Delft Circuits - стартап, корни которого уходят в отдел квантовой наноауки Делфтского технологического университета. Компания разрабатывает кабели управления qubit для внутренних и наружных криостатов. Это нишевый рынок, на котором в настоящее время работает всего несколько производителей. Первый продукт компании, Cri/oFlex® это гибкий тип радиочастотного кабеля с низкой тепловой нагрузкой, который обладает широкой масштабируемостью. В настоящее время в Delft Circuits работает около двенадцати человек из самых разных слоев общества.



сообщество может вырасти до 900 предпринимателей и исследователей к 2023 году, 350 из них - в самой QuTech.

#### Полевая лаборатория Quantum Applications в Южной Голландии.

Недавно на основе регионального сотрудничества (QuTech, TUD, TNO, IQ) и соглашения с потенциальными пользователями государственного и частного секторов были установлены партнерские отношения, касающиеся приложений и вариантов использования в области квантовых вычислений и квантового интернета. В контексте Национальной повестки дня в области квантовых технологий эта инициатива тесно связана с другими прикладными мероприятиями в Нидерландах, такими как мероприятия в Амстердаме и Лейдене (см. Описания, представленные ниже в этом документе).

Ценность квантовых технологий для различных секторов тестируется и оценивается совместно с проектом

партнеров путем разработки подходящих моделей и их перевода в программное обеспечение и алгоритмы. Подход основан на использовании оборудования и симуляторов производства QuTech (Quantum Inspire, Quantum Link) и других соответствующих поставщиков по всему миру. Инициатива призвана ускорить дальнейшую разработку вариантов использования, ускорить внедрение квантовых технологий голландским деловым сообществом и обеспечить согласование с соответствующими поставщиками оборудования. Основными областями применения, рассмотренными на данный момент, являются вода (см. QuantumLab в разделе 3.2.4), финансы и энергетика; тем временем, проводятся исследовательские анализы в области безопасности и биофармацевтики.

#### QuSoft: исследовательский центр квантового программного обеспечения.

QuSoft - это партнерство с участием CWI, Университета Амстердама и Vrije Universiteit Amsterdam. Начавшись в 2015 году, миссия центра заключается в разработке новых протоколов, алгоритмов и приложений, подходящих для прототипов квантовых вычислений малого и среднего размера. Ведущие в мире исследования, проводимые в центре, проводятся по четырем направлениям:

квантовое моделирование и приложения для систем с небольшим количеством кубитов, квантовая информатика, криптография в квантовом мире, а также квантовые алгоритмы и их сложность. В 2018 году в QuSoft работало 60 штатных сотрудников; институт надеется, что к 2022 году численность сотрудников составит 120 человек.

Различные партнерские отношения обеспечивают тесные отношения QuSoft с остальной частью quantum landscape. Например, в рамках Программного консорциума Quantum, QuSoft сотрудничает с QuTech и Лейденским университетом в разработке программного обеспечения и приложений quantum. Отдельные исследователи QuSoft также тесно сотрудничают с коллегами из других голландских институтов. Так обстоит дело с квантовым симулятором, работающим в рамках гранта Открытого конкурса new Physics Open Competition, финансируемого Голландским исследовательским советом. В связи с этим QuSoft сотрудничает с Утрехтским университетом, Университетом Радбуда и QT / e в Эйндховене. Аналогичное сотрудничество осуществляется в рамках Программы iqClock по созданию сверхточных атомных часов.

QuSoft тесно сотрудничает с различными промышленными партнерами. В феврале 2019 года QuSoft начала уникальное сотрудничество с Bosch Group, которое предполагает двухлетнее изучение практических применений квантовых вычислений в Bosch, особенно для инженерных разработок и в областях искусственного интеллекта и машинного обучения. QuSoft также сотрудничает с ATOS на семинарах по квантовому программированию. Наряду с этими мероприятиями QuSoft установила связь с ABN

AMRO запускает проект по банковскому обслуживанию с квантовой безопасностью. Тем временем, формируются планы по запуску дочерней компании, которая будет предлагать продукты и услуги quantum software.

#### Центр квантовых приложений и программного обеспечения в Амстердаме

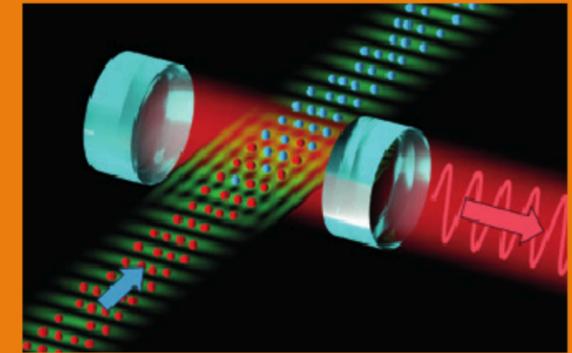
По мере того, как компании и государственные органы все больше осознают потенциальное влияние квантовых технологий, растет интерес к изучению вариантов использования и квантовой

### Флагманский европейский квантовый проект iqClock

В партнерстве с MoSaiQ training for young researchers флагманская компания iqClock Quantum руководит промышленной разработкой часов с интегрированной оптической матрицей .....

Одно из направлений работы включает разработку нового типа оптических часов: сверхзвучающих часов, которые используют непрерывный источник холодных атомов сверхвысокой интенсивности, что делает их намного более точными, чем существующие атомные часы. Вместе различные исследовательские мероприятия, проводимые по всей стране, формируют основу для разработки оптических атомных часов, при этом LioniX International, Университет Твенте и EKA объединяют усилия, например, для разработки новых упрощенных лазерных систем, но также для проведения исследований в области квантовых компьютеров и квантовых симуляторов на основе ультрахолодных атомов.

Результаты имеют потенциальное применение в таких секторах, как телекоммуникации и безопасность. (Иллюстрация: Флориан Шрек и Шейн Беннеттс, Амстердамский университет.)



применение технологий во все более широком диапазоне областей применения.

Центр квантовых приложений и программного обеспечения в Амстердаме создается для обслуживания растущего спроса на такие исследования. В Центре проблемы, с которыми сталкивается деловое сообщество, будут решаться путем объединения опыта QuSoft в области квантового программного обеспечения и прикладных программ с специфическими знаниями, которые имеются в университетах в таких областях, как бизнес и финансы. Хаб также будет служить для местных и региональных органов власти средством содействия сотрудничеству, и Амстердамская биржа инноваций (IXA) и Амстердамский научный парк (ASP) задействованы для поддержки разработки новых идей, решений, продуктов и услуг, а также для ускорения процесса вывода инноваций на рынок.

Центр будет работать с коммерческими партнерами в различных областях, включая квантовые финансы (поскольку сектор индустрии финансовых услуг Амстердама имеет естественную экосистему), квантовую химию и разработку материалов или, например, квантовые приложения в исследованиях операций. Эти области не только интересны с научной точки зрения, но и имеют прямые связи с приложениями и бизнес-сообществом.

Начнем с того, что большинство анализов можно выполнять на независимой от платформы основе. Однако внедрение на аппаратное обеспечение потребует на более позднем этапе. В центре внимания могут быть квантовые симуляторы или квантовые компьютеры, или, действительно, инфраструктура квантовой связи или квантовые датчики.

Таким образом, в значительной степени успех Хаба будет зависеть от готовности сотрудничать со всеми игроками в Quantum Delta NL и с игроками за ее пределами. Занимая видное положение и играя связующую роль, Хаб сможет заручиться поддержкой Национальной программы в области квантовых технологий со стороны дополнительных участников в Нидерландах и других странах. Таким образом, Хаб укрепит Q NL и внесет свой вклад в создание привлекательного инвестиционного климата.

#### QT / e: Центр квантовых материалов и технологий Эйндховен

QT / e началась в 2018 году как совместная инициатива факультетов

Технической физика, математика и информатика, а также электротехника в Технологическом университете Эйндховена. QT / e фокусируется на новаторских фундаментальных и прикладных исследованиях, направленных на обеспечение прорывов в разработке квантовых материалов и квантовых технологий, ведущих к разработке новых продуктов и методов, которые приносят пользу обществу. Сорок исследователей из различных отделов работают над квантовым моделированием, постквантовой криптографией, квантовыми протоколами, квантовой нанофотоникой, а также квантовыми материалами и устройствами.

QT / e и QuTech тесно сотрудничают над реализацией сложных структур в наномасштабе для топологических квантовых вычислительных приложений на основе частиц Майораны. QT / e и Университет Твенте проводят работу по разработке аутентификации с квантовой защитой, в то время как QT / e дополнительно участвует в разработке интегрированной технологии для обеспечения возможности QKD-on-a-chip в рамках европейского UNIQORN

Аутентификация с квантовой безопасностью

Исследователи QT / e работают над теорией квантово-безопасной аутентификации (QSA), используя "физически неклонированные функции" (PUF). Направление очень слабого лазерного луча на сложный рассеиватель позволяет выявить уникальный рисунок, который может быть использован для аутентификации. В сотрудничестве с QT/ e команда из Университета Твенте создала демонстратор QSA "в коробке" (см. фото). Намерение состоит в том, чтобы со временем миниатюризировать технологию, воплощая мечту о создании квантовой кредитной карты.



В рамках различных программ эйнховенский проект<sup>45</sup> опыт в области нанотехнологий, материаловедения и интегрированной фотоники применяется в квантовых технологиях. Управление холодными атомами для целей квантового моделирования является одним из основных направлений деятельности Лаборатории холодного атома Технологического университета Эйнховена . В партнерстве с QuSoft, Амстердамским университетом, Утрехтским университетом и Университетом Радбуда команда Эйнховена участвует в программе NWO, направленной на моделирование квантовых материалов с использованием холодных атомов и молекул.

криптоанализ, включая разработку новых квантовых алгоритмов криптоанализа, является неотъемлемой частью работы по анализу безопасности и обеспечивает прямую связь между QT/e и QuSoft. В настоящее время в NIST осталось всего двадцать шесть алгоритмов, участвующих в конкурсе на поиск стандарта постквантовой криптографии, и шесть из них являются сильными кандидатами, выдвинутыми QT / e. Некоторые алгоритмы-кандидаты были разработаны в партнерстве с Cisco, IBM, NXP, Philips и другими.

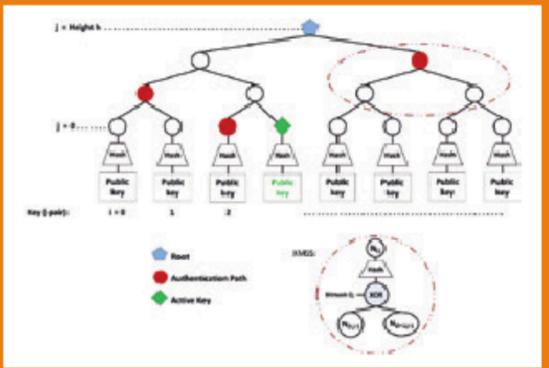
Кроме того, Microsoft и QT / e недавно объединились с целью продвижения вперед разработки передачи на языке Майораны в топологических материалах. Альянс обеспечивает финансирование нескольких должностей младших научных сотрудников. Также задействован сектор высокотехнологичных систем и материалов top. Под эгидой UNIQORN QT / e работает с различными партнерами, включая базирующуюся в Эйнховене компанию Smart Photonics. Оптические передачи QT / e с высокой пропускной способностью

Другой областью внимания QT / e является постквантовая криптография: исследователи стремятся разработать и внедрить технологию, одновременно выполняя анализ безопасности и исследуя атаки по побочным каналам на постквантовые криптосистемы. Задействованные системы спроектированы так, чтобы противостоять атакам квантовых компьютеров. Квантовые

Безопасность обновлений, рассчитанных на будущее

Обновления программного обеспечения зависят от подлинности и целостности предоставляемых исправлений. Если бы киберпреступник смог поставить под угрозу безопасность обновления, было бы возможно заразить все компьютеры, которые загрузили поддельный патч злоумышленника. На данный момент обновления защищены с помощью электронных подписей. Учитывая это, QT / e проявила инициативу в разработке

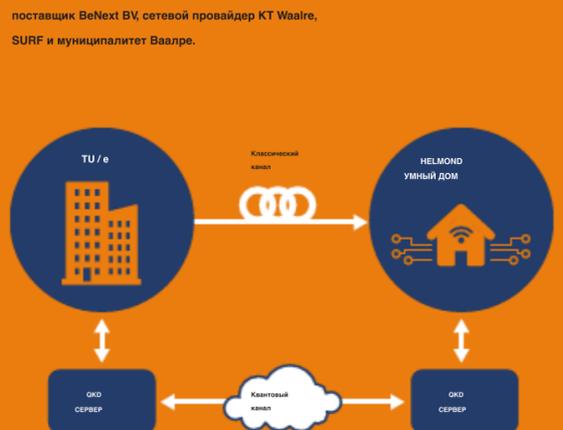
и стандартизация XMSS, новой системы электронной подписи, способной противостоять атакам квантовых компьютеров. XMSS в настоящее время является стандартом IETF и, похоже, вскоре станет стандартом NIST и ISO<sup>46</sup>. Он уже используется, например, для QRL (новой криптовалюты).



<sup>45</sup> Визуальное изображение: <https://quantum-uniqorn.eu>  
<sup>46</sup> Смотрите <https://csrc.nist.gov/projects/stateful-hash-based-signatures>

Квантово-надежно взаимосвязанные умные дома в интеллектуальном районе Брейнпорт.

В городе Хелмонд развивается интеллектуальный район Брейнпорт . Для одного из первых проектов в районе студенческая команда CASA Технологического университета Эйнховена строит дома нового типа, которые должны быть доступными, удобными и экологичными. Дом будет служить местом тестирования и разработки самых последних данных и технологий domotics . Сгенерированные данные должны быть надежно доступны из любого места. Таким образом, между домом в Хелмонде и университетским кампусом реализуется квантово-защищенное соединение . Для защиты передаваемых данных будут использоваться квантовые ключи . Второе квантово-безопасное соединение будет установлено с ратушей Ваалре . Среди партнеров проекта - domotics.



TNO За последние четыре года TNO значительно расширила свою деятельность в области квантовых технологий, которая в настоящее время приобрела критическую массу и значительный профиль в ландшафте. Экспертная группа TNO по квантовым технологиям полностью сосредоточена на квантовых технологиях. Его миссия заключается в продвижении разработки этой инновационной технологии и продвижении ее доступности, а также в реализации приложений на различных других рынках, таких как оборона, ИКТ и космические путешествия. Через QuTech департамент работает над разработкой квантовых компьютеров и квантового интернета, а также над разработкой и применением квантовых датчиков. Несколько других экспертных групп TNO - Радиолокационные технологии, акустика и гидролокаторы, распределенные сенсорные системы, Оптика, оптомеханика, разработка космических систем, наноинструменты, кибербезопасность и робастность, сети и стратегический бизнес- анализ - также вовлечены в деятельность института в области квантовых технологий . pology..... Например, Группа Optics работает над разработкой квантовых фотонных интегральных схем в партнерстве с PhotonDelta, в то время как группа кибербезопасности и надежности изучает приложения для квантовых вычислений и квантовой связи, а также переход к постквантовой криптографии. Кроме того, TNO активно работает в области нанопроизводства. Во всех своих основных областях TNO работает в партнерстве с частным сектором. В общей сложности десятки сотрудников TNO прямо или косвенно связаны с квантовыми технологиями.

Лаборатория разрабатывает испытательный стенд для квантовобезопасного соединения умных домов в умном районе Brainport в Хелмонде. Лаборатория в Эйнховене проводит тестирование

уже доступные технологии и дополнительное тестирование интеграции технологий.

Как и квантовые технологии, фотоника и интегрированная фотоника признаны ключевыми технологиями. Новое технологии для систем связи, защита данных и инновационные датчики - все это занимает видное место в национальной повестке дня в области фотоники и в планах по созданию сильной интегрированной экосистемы фотоники в Нидерландах. В свете уровня общего опыта как в (интегрированной) фотонике, так и в квантовых технологиях в Делфте, Эйнховене, Неймегене и Твенте вполне вероятно, что на стыке этих ключевых технологий разовьется большая экосистема . Европейский проект UNIQORN и квантово-безопасный подключенный дом Brainport Smart District находятся в авангарде этого развития, наряду с исследованиями квантового интернета, проводимыми в Делфте.

4.2.2 Голландские учебные заведения и университеты Помимо костяка, сформированного QuTech, QuSoft и QT / e, Нидерланды обладают обширной "нервной системой", состоящей из университетов и институтов, занятых разработкой квантовых технологий.

**CWI** проводит фундаментальную работу по квантовой вычислений, квантовой коммуникации и криптографии, в квантовом мире с 1990-х годов. Различные группы активны в этой области, и QuSoft находится в комплексе CWI complex. CWI внесла свой вклад в создание первого коммуникационного протокола, который продемонстрировал, что квантовая коммуникация может быть более эффективной, чем классическая коммуникация. Институт был также ответствен за разработку одного из первых квантовых алгоритмов, использующего широко используемую технику, позволяющую рассуждать о квантовых алгоритмах. Другое направление работы включает протоколы квантовой криптографии и постквантовую криптографию, основанную как на классических, так и на квантовых протоколах. Тесные связи также существуют с классической оптимизацией и классической теорией сложности, которые формируют отправную точку для разработки новых квантовых приложений в промышленности.

**AMOLF** является институтом NWO, базирующимся на базе Амстердамского научного парка. Группа фотонических сил института работает над квантовой нанофотоникой, где свет и материя сильно взаимодействуют в наномасштабе. Группа работает над разработкой совершенно новых методов обнаружения в фотонных оптомеханических системах. Одной из целей является использование таких систем для точного определения

квантовый статус небольших механических объектов. В рамках различных инициатив группа сотрудничает как с Делфтским технологическим университетом , так и с QTE.

**Делфтский технологический университет** Различные исследовательские группы на ряде факультетов Делфтского университета участвуют в разработке квантовых технологий. В отделе квантовой наноауки в Делфтском институте наноауки Кавли работают пятнадцать основных исследователей, изучающих и визуализирующих квантовые эффекты, возникающие в материалах, с целью использования их возможностей и управления ими контролируемым образом. Также предполагается разработать устройства, которые используют потенциал этих эффектов, тем самым оказывая социальное воздействие. Работа затрагивает темы, не охваченные дорожными картами QuTech, такие как квантовые сенсоры, новые квантовые материалы и фундаментальные исследования кубитов. На факультете электротехники, математики и информатики университета есть отдел квантовой инженерии, который изучает архитектуры и программное обеспечение, необходимые для квантовых вычислений и для перевода между классическими ИКТ и квантовыми системами. Команда сосредоточена на работе

о технических проблемах, связанных с масштабированием архитектуры квантовых компьютеров и квантового интернета, криоконсерваторов, 3D-соединений, квантового программного обеспечения и квантовой теории информации. Между тем, программное обеспечение, технологический отдел расследует, как квантовая

компьютер и квантовый интернет можно было бы запрограммировать и протестировать. Наконец, кафедра философии и этики технологий факультета технологий, контроля и менеджмента (TBM) исследует социальное воздействие и принятие квантовых технологий. Эта работа выполняется в партнерстве с факультетом промышленного дизайна. Под руководством TBM и в сотрудничестве с QuTech, Технологический университет Делфта в июне опубликовал журнал, описывающий социальное влияние квантового интернета.<sup>47</sup>

**Leiden University** В Лейдене исследования в области квантовых приложений проводятся на платформе aQa (прикладные квантовые алгоритмы), форуме для сотрудничества между

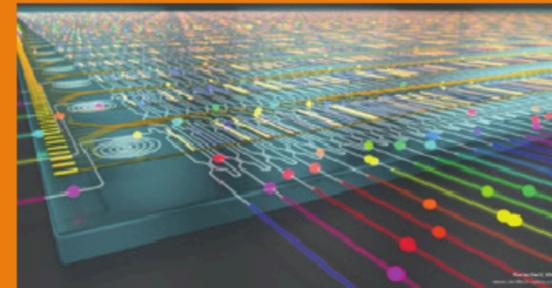
Лейденский институт физики (LION) и Лейденский институт передовых компьютерных наук (LIACS). В партнерстве с QuTech компания LION исследует взаимодействие света и материи в квантовом масштабе, а также гибридные приложения технологий сверхпроводящих и топологических квантовых вычислений . Другая команда работает над ультрамикроскопией, где используются различные методы для характеристики материалов на атомном и квантовом уровнях. Лейден также участвует в консорциуме Quantum Software Consortium, в рамках которого он координирует тему криптографии в квантовом мире. Пятнадцать ведущих исследователей работают в Лейдене в этих различных областях. Лейден также предлагает двухгодичную магистерскую программу под названием "Исследования в области физики, квантовой материи" и оптику.

**Лондонский университет** В Амстердаме квантовые технологии являются важной областью внимания в рамках темы исследований квантовой материи и квантовой информации . Участие университета в QuSoft связано с этой темой. Многочисленные исследовательские группы объединены вокруг

это направление деятельности. Некоторые занимаются экспериментальной работой (Квантовые газы и квантовая информация, квантовая электронная материя), а некоторые - теоретической работой (Теория конденсированных сред и алгебра, геометрия и математическая физика). Задействовано более тридцати основных исследователей, многие из них работают в QuSoft.

### Пример стартапа: QuiX

QuiX из Энсхеде - дочернее предприятие Университета Твенте. Компания намерена создать первый квантовый фотонный процессор, который, как ожидается, будет завершен через один-два года. Стремясь к этой цели, QuiX тесно сотрудничает с PhiX, еще одно дочернее предприятие UT, которое утверждает, что является первым производителем, способным к автоматизированному производству фотонных чипов. Это партнерство является примером тесной взаимосвязи между мирами квантовых технологий и интегрированной фотоники. Иллюстрация представляет собой изображение художником фотонного процессора, в котором кванты света интерферируют внутри сложного оптического переключателя (иллюстрация Флориана Стерла для Университета Твенте).



Амстердам координирует флагманский проект iqClock Quantum , а также недавнюю программу NWO по quantum

моделирование, в котором задействованы Утрехтский университет, Технологический университет Эйндховена и Университет Радбауда.

**Университет Твенте** В Твенте квантовая технология разрабатывается и изучается командой Quantum Transport in Matter (QTM), командой комплексных фотонных систем (COPS) и командой лазерной физики и нелинейной оптики (LPNO) . Кроме того, команда NanoElectronics (NE) изучает поведение отдельных спиновых кубитов в кремнии. В области исследований QTM одной из основных тем является сверхпроводимость, топологические материалы для физики Майораны и приложения для квантовых вычислений. Эта команда работает с квантовыми точками и сверхпроводящими нановолокнами в партнерстве с QuTech и QT / e. Премоделировав квантово-безопасную аутентификацию, COPS теперь работает над комбинацией физически неклонированных ключей с квантовыми протоколами связи. Наряду с LPNO, COPS работает над способами выполнения квантовых вычислений на основе интегрированных фотонных систем. В 2018 году исследователи Twente разработали фотонно интегрированную систему из универсальных программируемых вентилей 8X8 для реализации квантовых информационных протоколов. На основе этого прорыва университет объединился с Lionix International, чтобы сформировать компанию под названием QuiX с целью создания крупнейшего в мире квантового фотонного процессора. В Университете Твенте работает около десяти ведущих исследователей, работающих над темами, связанными с квантовыми технологиями.

**Университет Радбуда** В Неймегене исследования квантовых материалов проводятся в Институте молекул и материалов (IMM), где использование лаборатории высокопольных магнитов (HFML) является центральным элементом спектроскопии

на тему Quantum Materials. Основным направлением исследования является поведение коррелированных электронных систем внутри материалов под воздействием экстремальных магнитных полей.

поля и сверхбыстрое взаимодействие между светом и магнитными материалами. Из двадцати ИП, занимающихся этой темой, около половины работают над квантовыми технологиями. Квантовые химические исследования проводятся также в Университете Радбуда , и университет участвует в программе NWO cold атомы и молекулы наряду с Университетом Амстердама, Утрехтским университетом и Технологическим университетом Эйндховена . Кроме того, Группа цифровой безопасности в рамках Института вычислительных и информационных наук (ICIS) активно работает в области постквантовой криптографии. Например, группа тесно связана с проектом NIST PQC. Он также участвует в экспериментах, которые Google организует с целью разработки постквантовых протоколов безопасности TLS . В одном из таких экспериментов, проведенных в 2016 году, был задействован алгоритм NewHope, в разработке которого помог Университет Радбуда. В 2019 году Google и Cloudflare объявили о новом раунде экспериментов с алгоритмами NTRU-HRSS и SIKE , снова совместно разработанными Университетом Радбауд.

**Utrecht University** В Утрехте более десяти ведущих исследователей-теоретиков и экспериментаторов изучают квантовые явления и их приложения. Существует очень сильное взаимодействие между теоретической и экспериментальной областями в отношении квантовых материалов, холодных атомов и квантового моделирования; исследования способствуют пониманию таких явлений, как спинтроника, сверхпроводимость, квантовый магнетизм, топологические квантовые состояния и квантовые вычисления, а также разработке новых квантовых материалов. Например, Утрехт участвует в программе NWO "Холодные атомы" и "молекулы" совместно с университетом

Амстердама, Технологического университета Эйндховена и Университета Радбауда, в Утрехт курирует программу NWO по спинтронике. Появление исследовательских центров по таким темам, как энергетика, здоровье и устойчивое развитие, создало прекрасную возможность для приведения квантовых исследований в соответствие с пожеланиями и требованиями потенциальных конечных пользователей.

Университет Гронингена Команда Quantum Devices (QD) занимается фундаментальными исследованиями квантово-когерентной динамики в твердотельных устройствах (включая органические молекулы и полупроводники). Работа имеет четкие связи со спинтроникой и приложениями квантовой информации, что проиллюстрировано недавней экспериментальной реализацией квантового состояния ("бита") на длинах волн в телекоммуникационном диапазоне. Команда Physics of Nano-systems, а также специалисты по спинтронике и

Команда магнитооптиков из Nanomaterials (у каждого по одному ПИ) изучает взаимодействие между квантово-механическими степенями свободы "спин", "заряд", "долинная хиральность" и "фотонная хиральность" в новых 2D материалах и их гетероструктурах.

#### 4.3

##### Глобальное игровое поле

Хотя Нидерланды занимают уникальное положение, они являются лишь одним из участников крупного международного движения по развитию квантовых технологий, при этом на первый план выходят Европа, Северная Америка и Китай. Работа в области квантовых технологий, ведущаяся в каждом из этих регионов, описана ниже.

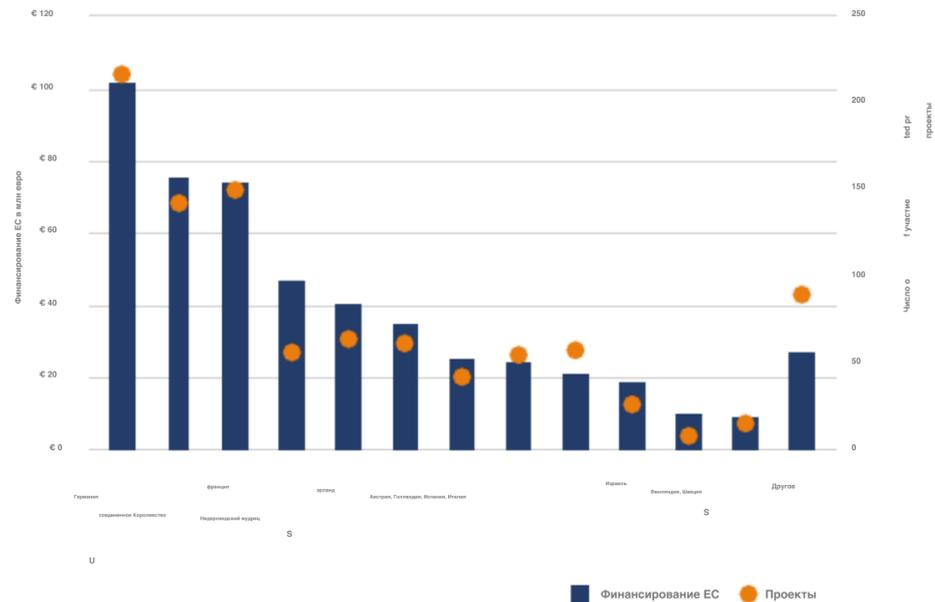


РИСУНОК 13 Европейское финансирование квантовых технологий в разбивке по странам. (Источник: Birch)

#### 4.3.1 События в Европе

Европейские ученые оказали большое влияние на появление квантовой механики в начале двадцатого века; в последние десятилетия регион также играл ведущую роль в дальнейшем развитии квантовых технологий. Основанная в ноябре 2016 года, ERA-Net QuantERA провела несколько конкурсов предложений с целью финансирования проектов с акцентом на фундаментальные исследования квантовых технологий. Первый конкурс в 2017 году, на который Голландский исследовательский совет выделил 1 миллион евро, привел к финансированию девяти проектов с участием Нидерландов. Это мероприятие прошло с беспрецедентным успехом и принесло высокую отдачу от инвестиций.

После публикации Квантового манифеста в 2016 году, Европейский союз запустил флагманскую программу в области квантовых технологий в 2017 году. Программа с бюджетом в миллиард евро предназначена для развития государственно-частного сотрудничества в Европе и превращения региона в ведущий мировой центр разработки квантовых технологий. В 2018 году двадцати проектам были предоставлены гранты на общую сумму 132 миллиона евро. Разработки в области квантовых технологий также финансируются из других источников ЕС, включая Европейский исследовательский совет (ERC). В относительном выражении Нидерланды преуспевают в этих программах ЕС, как показано на рисунке 13.

Помимо финансирования квантовых технологий со стороны ЕС, различные отдельные государства-члены, включая Францию, Швецию и Швейцарию, имеют свои собственные программы. Две национальные

программы заслуживают особого внимания, одна из которых связана с их новаторской ролью (Великобритания), а другая - с тем, что их цели тесно связаны с этой Повесткой дня (Германия).

**Великобритания** Великобритания является одной из первых европейских стран, инвестировавших в согласованную национальную программу квантовой технология. Осенью 2013 года правительство Великобритании объявило об инвестициях в размере 270 миллионов фунтов стерлингов (более 300 миллионов евро) в течение пяти лет с акцентом на вывод квантовых технологий на рынок, продвижение предпринимательства и повышение социального воздействия. Поощрялось сотрудничество между университетами, предприятиями и государственными органами, и первые средства были выделены в начале 2015 года. Таким образом, программа была одной из первых, где внедрение квантовых технологий в промышленность (и общество в целом) было основной целью, а не только инвестиции в фундаментальные исследования.

Особенностью программы стало создание четырех квантовых центров: одного для датчиков и метрологии, одного для технологии визуализации на основе квантовых технологий, одного для сетевых приложений для квантовых вычислений и одного для квантовых информационных сетей. В конце 2018 года было объявлено о дальнейших инвестициях в центры: первоначальные 80 миллионов фунтов стерлингов (93 миллиона евро), за которым последует второй транш в размере 235 миллионов фунтов стерлингов (273 миллиона евро) для продолжения и расширения национальной программы. Стимулирующие технологии и образование были среди областей, в которые были направлены инвестиции.

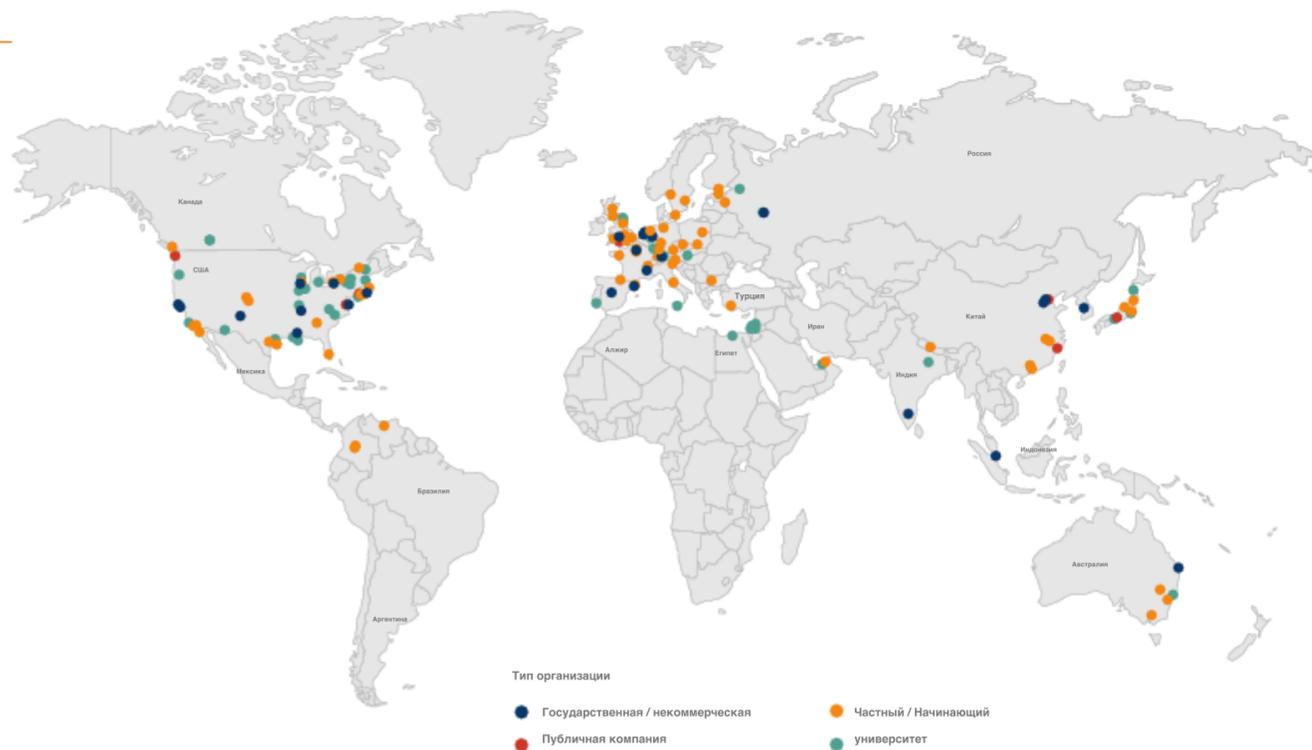


РИСУНОК 12

Северная Америка, Европа, Япония и Китай являются горячими точками для квантовых технологий. (Источник: Innovatie Attaché Network; данные: отчет о квантовых вычислениях, ситуация в августе 2019 года).

Еще одной важной особенностью программы было то, что консультации со всеми слоями общества относительно социальных и этических последствий квантовых технологий. Одним из недавних результатов такого консультативного подхода стал отчет о публичном диалоге по квантовым технологиям за 2018 год, подготовленный по заказу Британского исследовательского совета по инженерным и физическим наукам (EPSRC).

**Германия** Германия не только является одним из центральных участников флагманской программы Quantum, но и инвестирует 650 миллионов евро в свою собственную национальную программу. Немецкая программа, включающая шесть направлений деятельности, призвана укреплять и продвигать сплоченность в академическом мире, разрабатывать новые технологии для рынка, поощрять международное сотрудничество и ускорять общественное признание и внедрение квантовых технологий. The

основными затронутыми темами являются квантовый компьютер, квантовая коммуникация, квантовые датчики и базовые технологии для квантовых систем. Таким образом, программа Германии имеет четкие параллели с темами и направлениями нашей собственной национальной повестки дня.

Интерес к квантовым вычислениям и искусственному интеллекту дополнительно иллюстрируется финансированием около сотни исследовательских должностей в Научном центре Юлиха, где была начата программа с бюджетом 36 миллионов евро для исследования квантовых и нейроморфных вычислений: многообещающей комбинации технологий для таких приложений, как квантовое машинное обучение.

#### 4.3.2 События в Канаде и Соединенных Штатах

**Канада** За последние десять лет канадское правительство инвестировало 1 миллиард канадских долларов (около 660 миллионов евро) в исследования и разработки в области квантовых технологий. Особой точкой притяжения квантовых технологий является город Ватерлоо, университетский городок которого является домом для Института квантовых вычислений, Института Периметра теоретической физики и Квантового наноцентра Майка и Офелии Лазаридис , где сосредоточены исследования в области квантовой информации и квантовых вычислений, в которых работают, по-видимому, почти четыреста исследователей. В этом районе также есть инфраструктура и лабораторные помещения, учебные заведения для технологического предпринимательства и инвестиций в Квантовую долину (QVI). Следовательно, Квантовая долина Ватерлоо служит моделью экосистемы квантовых технологий. В начале 2019 года IBM объявила, что Ватерлоо станет единственным канадским университетом, который выступит партнером IBM Q-Network.

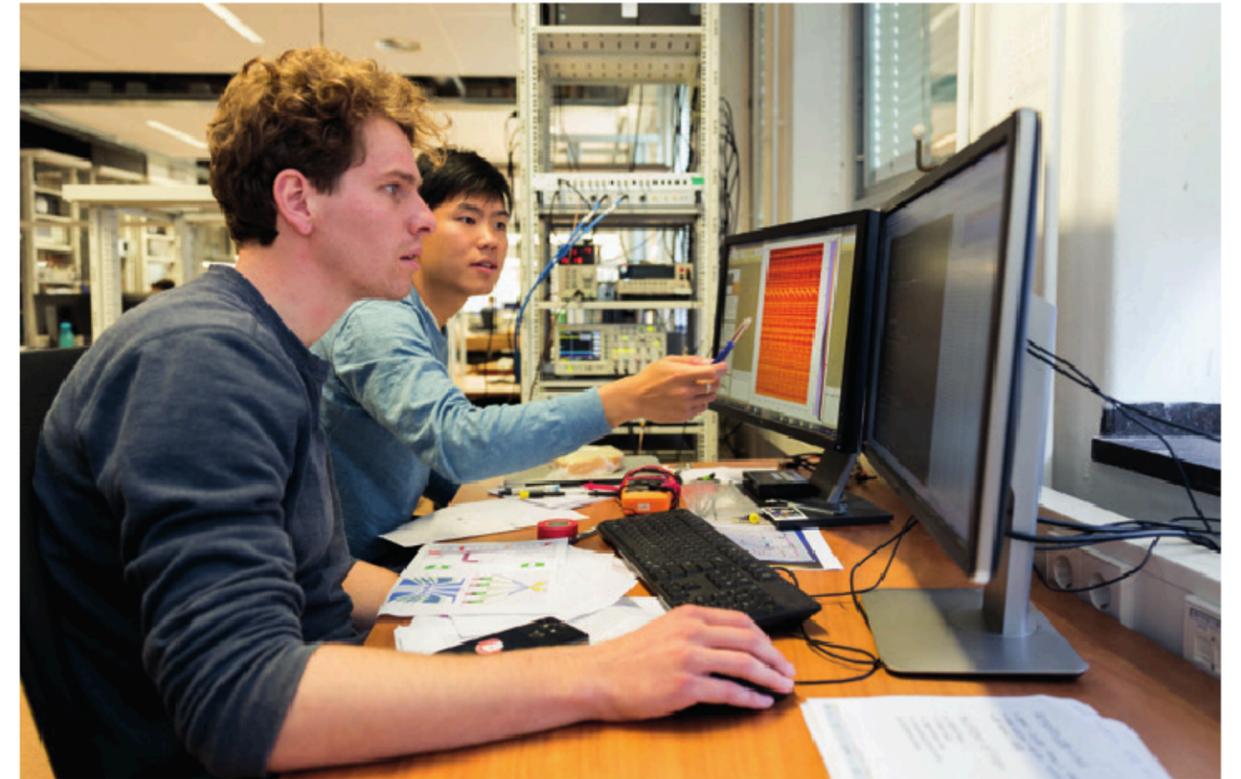
Через QVI частные инвесторы могут вносить свой вклад в исследования и разработки в области квантовых технологий. Как ни странно, исследователи, финансируемые через QVI, сохраняют права на свои результаты и на их коммерческое использование. Университет Ватерлоо запустил более 160 стартапов, доля которых работает в области квантовых технологий быстро растет. Следовательно, Канада занимает пятое место в мировом рейтинге по количеству патентных заявок, относящихся к квантовым вычислениям. Существуют тесные связи между работой, проводимой в Канаде, и исследованиями в QuSoft и CWI.

**США** Десятки известных университетов и институтов в США работают над квантовой технологией. Однако идея квантового центра или экосистемы не получила распространения. Поэтому интересно, что в ноябре 2018 года Сенат принял Закон о Национальной квантовой инициативе, который предусматривал выделение 1,2 миллиарда долларов (более 1 миллиарда евро) из существующего финансирования на исследования, связанные с квантовой информацией и квантовой коммуникацией. NIST и НАСА были назначены консультантами в плане финансирования, в то время как NIST и NSF поручено разработать программы стандартизации и исследований, а NSF и Министерству энергетики была возложена ответственность за создание ряда квантовых центров. IARPA, DARPA и ARO - организации, входящие в состав национальной разведывательной службы США и Министерства обороны - также играют важную роль в исследованиях квантовых технологий .

Многие компании, активно занимающиеся разработкой квантовых компьютеров и квантовых информационных технологий , являются североамериканскими, включая 1QBit, Atom Computing, D-Wave, Google, Honeywell, HP, HRL Labs, IBM, Intel, IonQ, Lockheed-Martin, Microsoft, Northrop Grumman, Raytheon и Rigetti. Такие компании имеют крупномасштабные национальные и международные соглашения о сотрудничестве с научными учреждениями, включая QuTech и QT / e; действительно, QuTech также получила поддержку от IARPA.

#### 4.3.3 Разработки в Китае.

В последние годы Китай обнародовал некоторые заметные достижения в области квантовых технологий. Например, исследователи из Академии наук Китая разработали спутник для квантовых экспериментов Micius в течение десяти лет. Спутник был запущен в 2016 году. Вскоре между наземной станцией и спутником возникла связь на расстоянии 1400 километров. В сотрудничестве с Университетом Граца спутник использовался в 2018 году для отправки сигнала, зашифрованного QKD, по всей СТРАНЕ



расстояние более 7600 километров. Это остается мировым рекордом по передаче квантовых сигналов. Micius также является частью квантовой связи между Пекином, Шанхаем, Цзинанем и Хафэем (где также есть самая длинная в мире подземная волоконно-оптическая квантовая сеть).

Кроме того, Китай стремится создать первый в мире квантовый компьютер. Для достижения этой цели недалеко от Хафэя планируется построить Национальную лабораторию квантовых информационных наук стоимостью в 10 миллиардов долларов США. Различные китайские компании также активны в области квантовых технологий. В 2015 году, Aliyun (подразделение облачных вычислений Alibaba Group) и Китайская академия наук объявили о совместных планах по строительству Лаборатории квантовых вычислений Alibaba в Шанхае. В феврале 2018 года был представлен первый облачный квантовый компьютерный сервис. Благодаря системе из одиннадцати кубитов, созданной в той же лаборатории, сервис был тогда вторым по мощности сервисом квантовых компьютеров в мире после IBM.

#### 4.4

##### Баланс между национальной мощью и международным сотрудничеством

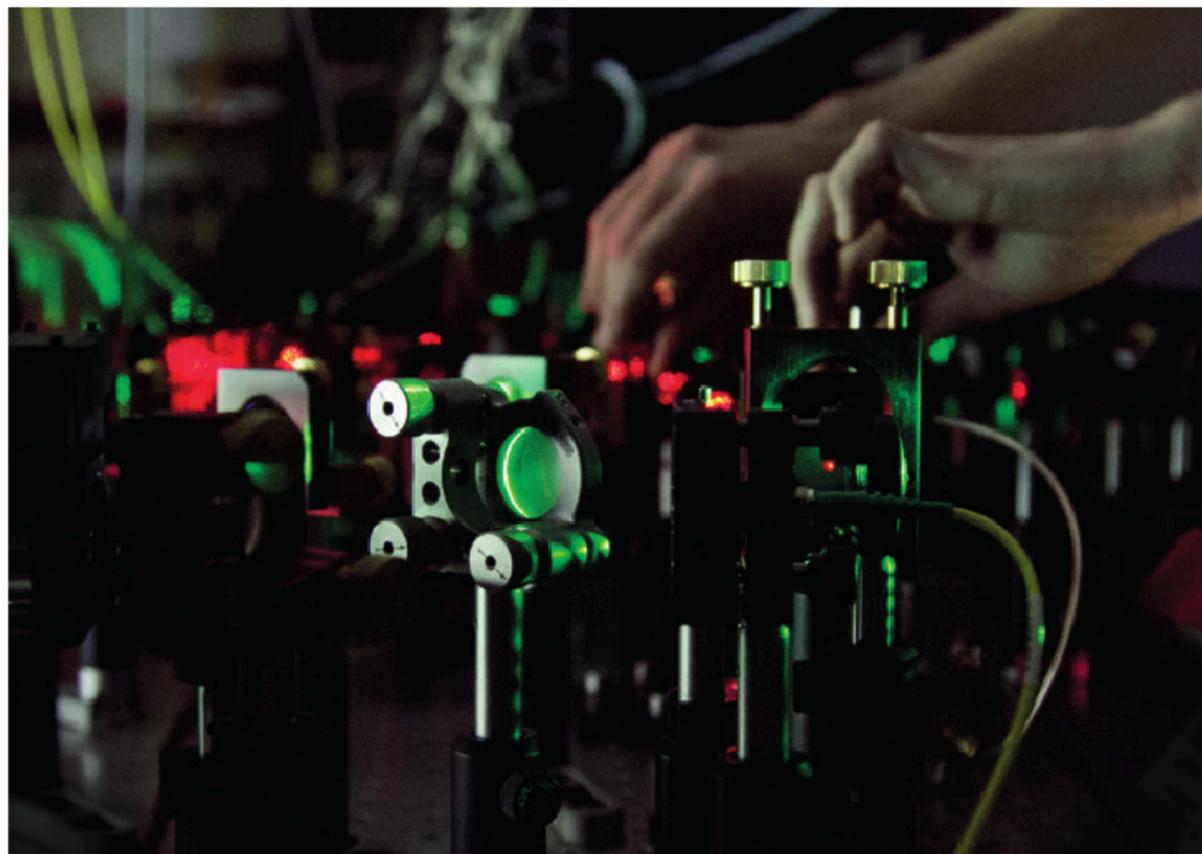
Нидерланды являются важным игроком на международном рынке квантовых технологий; многолетние инвестиции в исследования и разработки обеспечили стране прочную базу знаний и инноваций. Нидерланды являются лидером в области квантовых вычислений, квантовой коммуникации и квантового моделирования, а также разработки связанных приложений и протоколов для обеспечения безопасности данных и других вопросов. В настоящий момент закладываются предпосылки для расширения сотрудничества между научными кругами и промышленностью, разработки прототипов и первых конкретных квантовых продуктов и услуг, стартапов и побочных продуктов, а также национальной инновационной экосистемы.

Конечно, Нидерланды не одиноки в проведении такой политики; по всему миру миллиарды инвестируются как в рамках скоординированных программ континентального масштаба (ЕС, США и Канада, Китай), так и отдельными странами (например, Великобританией, Германией и Францией). В каком-то смысле это подразумевает усиление конкуренции не только для привлечения внешних инвестиций от крупных международных корпораций и из других источников, но и для привлечения и удержания талантов. Однако значение квантовых технологий для безопасности и благополучия нашего общества в значительной степени зависит от того, где они используются.

технология сначала доводится до зрелости. Следовательно, развитие квантовых технологий в демократических условиях должно предполагать сотрудничество, даже если только для достижения соглашения относительно ответственного использования квантовых технологий.

Глобальные инвестиции также создают возможности: квантовая технология чрезвычайно сложна, и ее полное развитие потребует большого количества времени, опыта, инфраструктуры и материальных ресурсов. Даже такая большая страна или блок, как США или ЕС, вряд ли смогут независимо от их текущего, относительно базового уровня внедрить все формы квантовых технологий до полного коммерческого и социального внедрения. Следовательно, игрокам по всему миру необходимо будет полагаться друг на друга и, в некоторой степени, работать сообща, делясь результатами, совместно используя инфраструктуру, привлекая таланты и наращивая рабочую силу квантовых инженеров, чтобы помочь интегрировать квантовые технологии в общество.

Таким образом, эта Повестка дня направлена на достижение надлежащего баланса между, с одной стороны, необходимостью укрепить наши национальные сильные стороны в области квантовых технологий и сделать Нидерланды как можно более (международно) привлекательными для инвестиций и в качестве базы для действующих на международном уровне институтов и предприятий, и, с другой стороны, необходимостью расширить возможности для международного сотрудничества и обмена знаниями как средства повышения квалификации в Нидерландах. Эти двойные цели преследуются, с одной стороны, путем инвестирования в направления деятельности и национальные программы стимулирования, а с другой стороны, путем налаживания двусторонних и многосторонних партнерских отношений, например, с Японией, Канадой и США, и путем более активного лоббирования национальной квантовой деятельности, например, в Брюсселе.



#### 4.5 Заключение

Географическая концентрация нидерландского опыта и оборудования в области квантовых технологий выделяет страну на мировой арене. Кроме того, эта концентрация усиливается голландской культурой сотрудничества. Нидерланды очень сильны в системной инженерии и комбинировании технологий для формирования операционных систем: областей, жизненно важных для инноваций. Поэтому страна привлекательна для международных компаний, желающих вложить значительные средства в развитие квантовых технологий будущего. Между тем, на местном уровне мы также видим первые стартапы, коммерчески использующие квантовые технологии. Наш плавильный котел знаний, технологий, промышленности и предпринимательства создает центры роста, вокруг которых начинает формироваться экосистема. Это представляет собой возможность, которой необходимо воспользоваться. Исходя из этой Повестки дня, поэтому мы инвестируем в укрепление научной базы нашей страны, в создание рыночных возможностей, основанных на технологиях, в создание и расширение национальной экосистемы, в образование и в обеспечение лидирующих позиций в социальном диалоге о квантовых технологиях. Как объясняется в разделе 5, ряд направлений действий и национальных стимулирующих программ были определены как средство использования наших сильных сторон.

Разработка квантовых технологий - это международное начинание. Необходимые инвестиции и сложность требуемого научно-технического прогресса таковы, что ни одна страна не способна разрабатывать технологию в изоляции. На этом фоне страны по всему миру вкладывают значительные средства в квантовые технологии: ЕС инвестирует миллиард евро в квантовый флагман, в то время как отдельные государства-члены вкладывают сотни миллионов в национальные программы. США инвестируют более миллиарда евро, и Китай также выделяет огромные ресурсы

к квантовым технологиям. Крупные международные инвестиции одновременно усиливают конкуренцию и создают возможности для сотрудничества. В целях полного использования этих возможностей настоящая Повестка дня также направлена на создание основы для международного сотрудничества. Ведется поиск новых двусторонних союзов с Канадой, США и Японией. В то же время Повестка Дня направлена на укрепление сплоченности и организованности национальных игроков, что позволит голландскому сообществу квантовых технологий говорить единым голосом, особенно в Брюсселе, где принимаются ключевые решения относительно исследовательских и инновационных программ будущего.

Интересам Нидерландов лучше всего отвечает поиск оптимального баланса между национальной мощью и международным сотрудничеством. Реализация наших национальных амбиций по созданию Quantum Delta NL, ведущего мирового центра и хаба квантовых технологий, представляет собой серьезную проблему, но проблему, которую мы вполне способны преодолеть с нашей отличной стартовой позицией. Однако для этого потребуются, чтобы Нидерланды и Европа соответствовали инвестициям, осуществляемым другими странами. И мы достигнем наших целей только в том случае, если все стороны поддержат эту Повестку Дня и ее амбиции, выделив необходимые ресурсы.

# 05

## БУДУЩАЯ ПОВЕСТКА ДНЯ ДЛЯ QUANTUM DELTA NL

### 5.1

#### Четыре направления действий и три программы CAT

Нидерланды способны стать Квантовой дельтой, с ролью и динамизмом, подобными Кремниевой долине во время развития транзисторных технологий. Однако это не произойдет спонтанно: потребуются целенаправленная стратегия и подход, которым все стороны экосистемы окажут согласованную поддержку. Эта программа описывает действия, необходимые для дальнейшего развития технологии и приложений в голландской Quantum Delta - живом, инновационном центре талантов, знаний и ресурсов с прочными национальными и международными связями.

Будущая повестка дня Quantum Delta NL имеет два измерения:

*Целенаправленные действия, направленные на укрепление всей экосистемы знаний и инноваций. Действия должны быть направлены на четыре ключевых фактора развития:*

#### Направление действий 1

Реализация прорывных исследований и инноваций

#### Направление действий 2

Развитие экосистем, создание рынков и инфраструктуры

#### Направление действий 3

Человеческий капитал: образование, знания и навыки

#### Направление действий 4

Начало социального диалога о квантовых технологиях

*Три программы-катализатора, разработанные для ускорения готовности к рынку и общественного признания перспективных областей применения. Амбициозные программы будут служить для опробования и обоснования технологии и позволят потенциальным конечным пользователям экспериментировать с вариантами использования. Программы выполнят согласованную функцию, объединяя различные технологии и направления деятельности, различных участников экосистемы, а также научные сообщества и сообщества пользователей. Три программы CAT - это:*

#### РАЗДЕЛ 1

Квантовые вычисления и моделирование

#### РАЗДЕЛ 2

Национальная квантовая сеть

#### РАЗДЕЛ 3

Приложения для квантового зондирования

Будет создано национальное справочное бюро для обеспечения того, чтобы заинтересованные стороны имели прямой доступ к направлениям действий, программам CAT и партнерам по повестке дня. Служба поддержки также будет действовать в качестве центрального контактного центра, направляя вопросы соответствующим участникам экосистемы. За службой поддержки будет стоять сеть, охватывающая все институты знаний и предприятия, работающие над разработкой систем, примерами использования и алгоритмами по всему стеку, от аппаратного обеспечения до программного обеспечения и приложений. Одной из функций службы поддержки будет облегчение диалога о вариантах использования между конечными пользователями и разработчиками аппаратного и программного обеспечения quantum, например, с помощью семинаров по разработке вариантов использования, рабочих визитов, информационных сессий, доступа к средствам тестирования и так далее. Взаимосвязи проиллюстрированы на рисунке 14.

"В этой программе излагается, что необходимо сделать для развития квантовой дельты в Нидерландах: QΔNL".

Четыре направления деятельности и три амбициозные объединяющие программы CAT

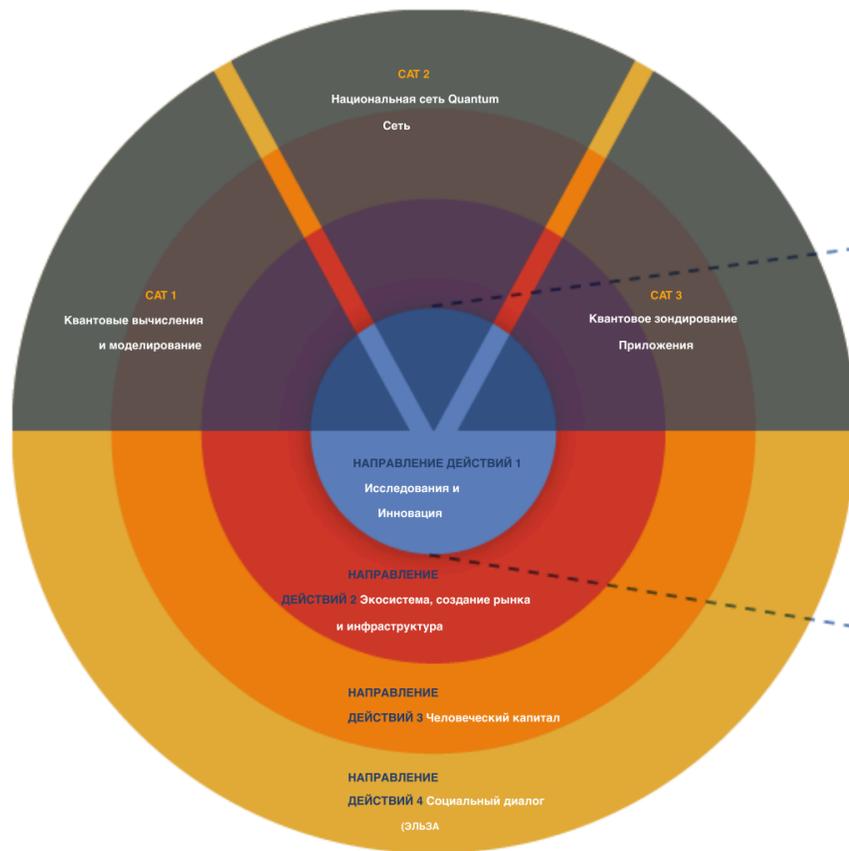


РИСУНОК 15

Направление действий 1 состоит из шести исследовательских и инновационных программ.



Первое направление действий разделено на различные технологии, охватываемые этой Повесткой дня: квантовые вычисления, квантовое моделирование, квантовая коммуникация, квантовое зондирование, квантовые алгоритмы и постквантовая криптография. Каждая из этих областей требует собственных исследований и разработок, как описано в подразделе 5.2. Направления действий 2, 3 и 4 являются общими и не зависят от технологии; подробности приведены в подразделах 5.3- 5.5.

Программы CAT описаны в подразделе 5.6. Все они являются амбициозными программами, направленными на ускорение разработки, опробование квантовой технологии в форме реальных приложений, а также на повышение ценности и индустриализацию квантовой технологии.

**5.2 Направление действий 1 | Осуществление научных исследований и инновационных прорывов**

Развитие квантовых технологий поддерживается прочной основой инновационных исследований. Предполагаемые приложения QT потребуют исследований и разработок на ранней стадии, где существующие идеи и перспективы уточняются и продвигаются вперед, и где научно-технический

реализованы прорывы и возможности, необходимые в этом контексте. Например, чтобы сделать квантовые вычисления и квантовую коммуникацию возможными в больших масштабах, необходимо улучшить спецификации кубитных систем, квантовых симуляторов и квантовых сетей и значительно масштабировать такие системы. Кроме того, остаются нерешенными важные вопросы, касающиеся разработки алгоритмов и протоколов, необходимых для полного использования потенциала квантовой информации. В рамках направления действий 1 различные пути развития сгруппированы в шесть исследовательских и инновационных программ: квантовые вычисления, квантовое моделирование, квантовые алгоритмы, квантовое зондирование, квантовая коммуникация и постквантовая криптография. Структура направления действий 1 показана на рисунке 15.

Если Нидерланды хотят продолжать играть ведущую роль в будущем, потребуется тесное сотрудничество и инвестиции в исследования и инновации. Цель состоит в том, чтобы обеспечить непрерывную реализацию жизненно важных научных и технологических достижений. Голландский исследовательский совет (NWO) призван играть важную роль в проведении исследований на ранней стадии. Необходимо будет уделить внимание созданию программ фундаментальных и междисциплинарных исследований в партнерстве с деловыми кругами, приведению их в соответствие с Национальной программой научных исследований (NWA) и европейскими исследованиями

программы (например, ERA-Net QuantERA, флагман Quantum и различные программы в области ИКТ), к выбору, направленному на сохранение фокуса внимания и предотвращение (ненужного) дублирования между различными проектами и программами.

Кроме того, программы NWO и TNO должны предусматривать возможности для (исследований) применения квантовых технологий. Таким образом, в контексте программирования инновационных достижений, ключевыми словами являются: фундаментальные исследования, мультидисциплинарный дизайн, промышленные партнерства, социальное принятие и международное сотрудничество.

**5.2.1 Квантовые вычисления.**

Создание крупномасштабного универсального квантового компьютера представляет собой огромную технологическую задачу, для решения которой будет необходимо исследовать различные платформы кубитов, исправление ошибок, архитектуру квантовых компьютеров и квантовую электронику.

Кубитные платформы: Реализация универсального квантового компьютера в течение нескольких лет потребует, чтобы существующие кубитные платформы были перенесены из лабораторных условий и масштабированы для формирования операционных систем, которые являются управляемыми и способны к надежной работе. Это подразумевает рассмотрение ряда ключевых научных вопросов. Например: - Цель состоит в том, чтобы увеличить масштаб текущего кремниевого спинового кубита

системы от двух кубитов, первоначально примерно до десяти кубитов, а затем до ста и, в конечном итоге, до тысячи кубитов. Задача состоит в разработке новых конструкций, которые отходят от классической линейной геометрии, так что создаются возможности для увеличения количества квантовых точек на устройстве.

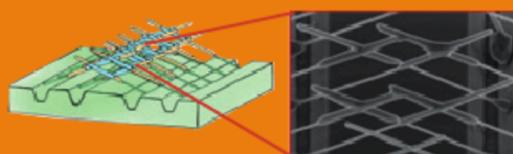
Что касается кубитов transmon, то предполагается сначала реализовать дизайн кода surface на 49-кубитной тестовой платформе, а затем масштабировать до ста тысяч кубитов. Научные проблемы, связанные с этим путем, включают управление перекрестными помехами и реализацию "межсоединений" (связей между кубитами).. С центрами NV в diamond задача состоит в создании модульных квантовых компьютеров, состоящих из множества узлов, каждый из которых содержит около десяти кубитов. В этом контексте, одним из препятствий, которое еще предстоит преодолеть, является определение эффективного способа соединения узлов по оптическим каналам.

Исправление ошибок: Заставляя большое количество физических кубитов функционировать в унисон как логические кубиты, универсальный квантовый компьютер можно было бы использовать для выполнения очень больших вычислений, даже если кубиты иногда допускают ошибки. Однако это подразумевает снижение частоты ошибок существующих систем в десять-сто раз. Это также требует, чтобы количество (физических) кубитов было увеличено по крайней мере на сто тысяч, чтобы создать достаточное количество логических кубитов, чтобы сохранять квантовую информацию в течение достаточного промежутка времени. Одной из самых больших проблем в этом контексте является "связность", реализация связей между кубитами.

Архитектура и электроника: Еще одна проблема, связанная с созданием универсальных квантовых компьютеров, - это системный дизайн и интеграция всего аппаратного обеспечения и управляющего программного обеспечения. Как и классический компьютер, квантовый компьютер

### Нанохештеги для плетения частиц Майораны

Для своей докторской диссертации аспирантка TU / e, работающая в Эйндховене и Делфте, разработала крошечную структуру из перекрещенных нановолокон в форме "хэштегов".



Структура была создана для того, чтобы соединять и оплетать частицы майораны. Наблюдение этого явления плетения дало бы убедительные доказательства существования частиц Майораны и стало бы решающим шагом в разработке квантовых компьютеров на основе Майораны.<sup>49</sup>

включает в себя различные уровни, на которых абстрактные алгоритмы и квантовые алгоритмы шаг за шагом преобразуются в управляющие сигналы кубитов. В настоящее время технология находится на концептуальной стадии, но по мере продвижения к увеличению количества кубитов многие аспекты, вероятно, будут оказывать взаимное влияние: что касается конструкции чипа, выбора материала и технологических этапов, то они будут влиять на время согласованности и точность кубитов. Тепловая нагрузка управляющих сигналов на чипы quantum связана с доступной мощностью охлаждения. Сложность электроники и управляющего программного обеспечения связана с качеством микросхем, а анализ измерительных сигналов для исправления ошибок требует мощных компьютеров и сложных алгоритмов с высокой производительностью обработки данных и очень быстрой обратной связью.

Проектирование и реализация такого сложного продукта требует определенной формы системного инженерного контроля, при которой компромиссы и системный выбор делаются на комплексной основе, а не по компонентам. Эта программа направлена на решение различных проблем, указанных выше, в рамках первой программы catalyst: Квантовые вычисления и Симуляция. CAT 1 возьмет на вооружение фундаментальные выводы, полученные в результате этого направления действий, и использует их для разработки зрелого квантового компьютера.

### 5.2.2 Квантовое моделирование

Квантовое моделирование окажет большое влияние на квантовую химию, исследования материалов и решение фундаментальных вопросов физики. Конечно, такое моделирование выполняется не на классических компьютерах, а на специализированных квантовых устройствах, называемых квантовыми симуляторами. Квантовые симуляторы используют квантово-механические взаимодействия между микроскопическими частицами, такими как холодные атомы, молекулы, ионы и легкие частицы, чтобы вызвать суперпозицию и запутанность. Затем частицы удерживаются силовыми полями, так что, манипулируя частицами (например, с помощью лазеров) и контролируя специфические взаимодействия между ними, можно моделировать другие квантовые и неквантовые материалы. В настоящее время, огромные требования к вычислительной мощности и, следовательно, стоимости моделирования квантового поведения сложных молекул и материалов означают, что можно моделировать только очень маленькие системы. Однако все чаще практические технологические приложения и системы разрабатываются на основе натуральных материалов, что подразумевает использование больших молекулярных систем. Квантовые симуляторы представляют собой уникальную возможность для моделирования и разработки таких сложных материалов, поскольку их квантовые характеристики и масштабирование соответствуют характеристикам исследуемых материалов.

Квантовый симулятор мог бы не только пролить свет на лежащую в основе физику, но и помочь объяснить фундаментальные аспекты

квантовые системы, такие как ранняя вселенная, которая существовала в сильно коррелированном квантовом режиме.

В Нидерландах исследователи работают над квантовыми симуляторами на основе холодных ридберговских атомов, дипольных молекул и холодных ионов (или комбинаций этих частиц) и оптических матриц резонаторов (Эйндховен и Амстердам), над квантовыми точками и сверхпроводящими схемами (Делфт), а также над фотонными кластерами (Лейден). В совокупности разрабатываемые системы обеспечивают большое разнообразие, необходимое для достижений в квантовой химии, разработке новых материалов и фундаментальной физике.

### 5.2.3 Квантовая коммуникация

В будущем глобальный квантовый интернет позволит использовать новые протоколы связи и, таким образом, поддерживать приложения, такие как безопасная связь и хранение данных, а также безопасная проверка местоположения. Это также откроет путь для соединения взаимно удаленных квантовых компьютеров посредством запутывания. Прежде чем квантовый интернет может быть развернут в значительных масштабах, необходимо преодолеть различные проблемы, такие как достижение запутанности на больших расстояниях и улучшение функциональности квантовых сетей.

Дистанционное запутывание: В результате затухания в оптических волокнах кубиты, состоящие из небольшого количества фотонов, могут преодолевать лишь небольшие расстояния, прежде чем они потеряют свою квантовую информацию. Следовательно, квантовая связь протяженностью более ста километров требует специальных квантовых повторителей и систем квантовой памяти: квантовые сигналы не могут быть усилены с использованием классических систем, поскольку любые манипуляции при передаче фатально скомпрометируют квантовую информацию. В настоящее время ведется значительная работа по разработке как квантовых повторителей, так и систем квантовой памяти. В предстоящий период предстоит преодолеть проблемы в области материалов, эффективного взаимодействия между системами квантовой памяти, а также модификации света и длины волны на однофотонном уровне. Будущая европейская или даже глобальная квантовая сеть, вероятно, будет состоять как из волоконно-оптических линий связи, так и из спутниковых линий связи. Поскольку кубиты, состоящие из фотонов, будут подвергаться различным воздействиям при каждом типе связи, сопряжение двух типов связи представляет собой дополнительную проблему, которую необходимо будет решить в надлежащее время.

Повышение функциональности квантовой сети:

Для первых полезных приложений квантового Интернета (например, безопасной идентификации и связи) квантовый канал связи может функционировать с конечными точками (квантовыми процессорами), каждый из которых имеет всего один кубит. Однако более сложная обработка и дополнительные функциональные возможности (например, анонимный квантовый компьютер

управление) требуют квантовых процессоров с несколькими кубитами и квантовой памяти. Еще большая сложность - в форме процессоров с множеством запутанных кубитов - будет необходима для исправления ошибок в конечных точках квантовых связей. Эффективное переплетение кубитов в системах квантовых вычислений и фотонов в квантовых сетях также потребует дальнейших исследований. Другой серьезной проблемой будет повышение надежности кубитов в процессорах во время квантовых сетевых операций.

Наконец, необходимо будет решить различные фундаментальные проблемы, касающиеся программного обеспечения, используемого для управления оборудованием и регулирования интернет-трафика. Другие важные темы включают в себя разработку комплексного дизайна стека квантового Интернета, включающего как аппаратное, так и программное обеспечение, а также обеспечение взаимодействия между уровнями сети. Поскольку квантовый интернет будет работать принципиально иначе, чем современный интернет, потребуются новая архитектура сетевого стека, которая способна взаимодействовать с текущим интернет-стеком, а также в полной мере использовать специфические преимущества квантовой связи. Эта Национальная повестка дня направлена на решение различных проблем, указанных выше, в рамках второй программы catalyst: Национальной квантовой сети. CAT 2 возьмет на вооружение научные результаты, полученные в результате этой акции Iipe, и использует их для разработки зрелого квантового интернета.

### 5.2.4 Квантовое зондирование

Квантовые сенсоры открывают путь к тому, что невозможно с классическими сенсорами. Как объясняется в подразделе 2.2.4, различные области применения технологии уже имеются в продаже. Однако продукты, о которых идет речь, относятся всего лишь к первому поколению. Существуют огромные возможности для производства новых и более совершенных типов квантовых сенсоров и выхода на новые области применения и рынки. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы полностью реализовать потенциал квантовых датчиков.

Одним из направлений таких исследований должна быть разработка новых сенсорных технологий. Многие темы, требующие внимания, включают использование альтернативных материалов, формулировку и разработку новых принципов работы (как в случае с суперизлучающими часами проекта iClock), и обнаружение оптимизированных квантовых состояний (позволяющих измерять конкретную переменную, в то время как другие переменные игнорируются). Другой важной областью внимания будет усовершенствование существующих квантовых датчиков. Многого можно добиться, например, за счет уменьшения размеров и ускорения датчиков, повышения эффективности обнаружения, интеграции аппаратного обеспечения и

<sup>49</sup> См. <https://www.nrc.nl/nieuws/2019/05/10/met-nanohekjes-bouw-je-stabiele-qbite-a3959834>

программное обеспечение, разработка нового программного обеспечения для управления квантовыми датчиками и считывания показаний, а также разработка новых и более совершенных атомных часов.

Проводимые в настоящее время исследования квантовых сенсоров в значительной степени ориентированы на приложения. Голландские исследовательские группы работают с коммерческими партнерами и другими пользователями над разработкой новых приложений для квантовых датчиков. Примеры включают атомные интерферометры для обнаружения гравитационных волн и для других фундаментальных физических экспериментов, сети атомных часов для приложений в геодезии и для синхронизации радиотелескопов, квантовые датчики для измерения ускорения и вращения объектов (позволяющие, например, определять местоположение без GPS), улучшенные характеристики глобальных навигационных спутниковых систем и использование атомных часов для обеспечения сверхточной навигации на основе сетей мобильной связи. Еще одна возможность, которая сейчас изучается, - это квантовый радар. Другие приложения, которые можно было бы улучшить, включают медицинскую МРТ: использование квантовых датчиков для обнаружения чрезвычайно слабых магнитных полей позволило бы получать гораздо более качественные изображения. Аналогичным образом, измерение очень слабых магнитных полей могло бы быть очень полезным в полупроводниковой промышленности, например, для тестирования микрочипов во время и после производства.

#### 5.2.5 Квантовых алгоритмов

В рамках акции 1, ранняя фаза исследования и программа развития должна быть создана для содействия разработке квантовых алгоритмов и приложений.

Программное обеспечение Quantum разрабатывается совсем по-другому начиная с классического программного обеспечения и заканчивая фундаментальными исследованиями, остаются вопросы, связанные с новыми методами программирования и стратегиями разработки, валидации и отладки квантового программного обеспечения. Также очень важно получить четкое представление о проблемах, которые на самом деле могут быть решены более эффективно, используя квантовые методы. В этом контексте постоянно возникают следующие вопросы:

1. Какие проблемы в принципе можно решить в большей степени эффективно использовать квантовые технологии?
2. Как можно решить эти проблемы с помощью новых и существующих алгоритмов и программного обеспечения? Как мы можем гарантировать, что разработки аппаратного и программного обеспечения будут взаимодополняющими?

Эти вопросы, безусловно, актуальны в связи с разработкой не только квантовых симуляторов и компьютеров, но и квантовых сетей. Что касается квантовых сетей, то другой важной темой являются новые криптографические функциональные возможности, которые невозможны в классических сетях,

даже используя классическую квантовую безопасную криптографию. Внимание дополнительно будет уделено применению и расширению существующих технологий, например, для оптимизации, машинного обучения, моделирования квантовых систем для новых материалов, и других знакомых технологий и областей применения.

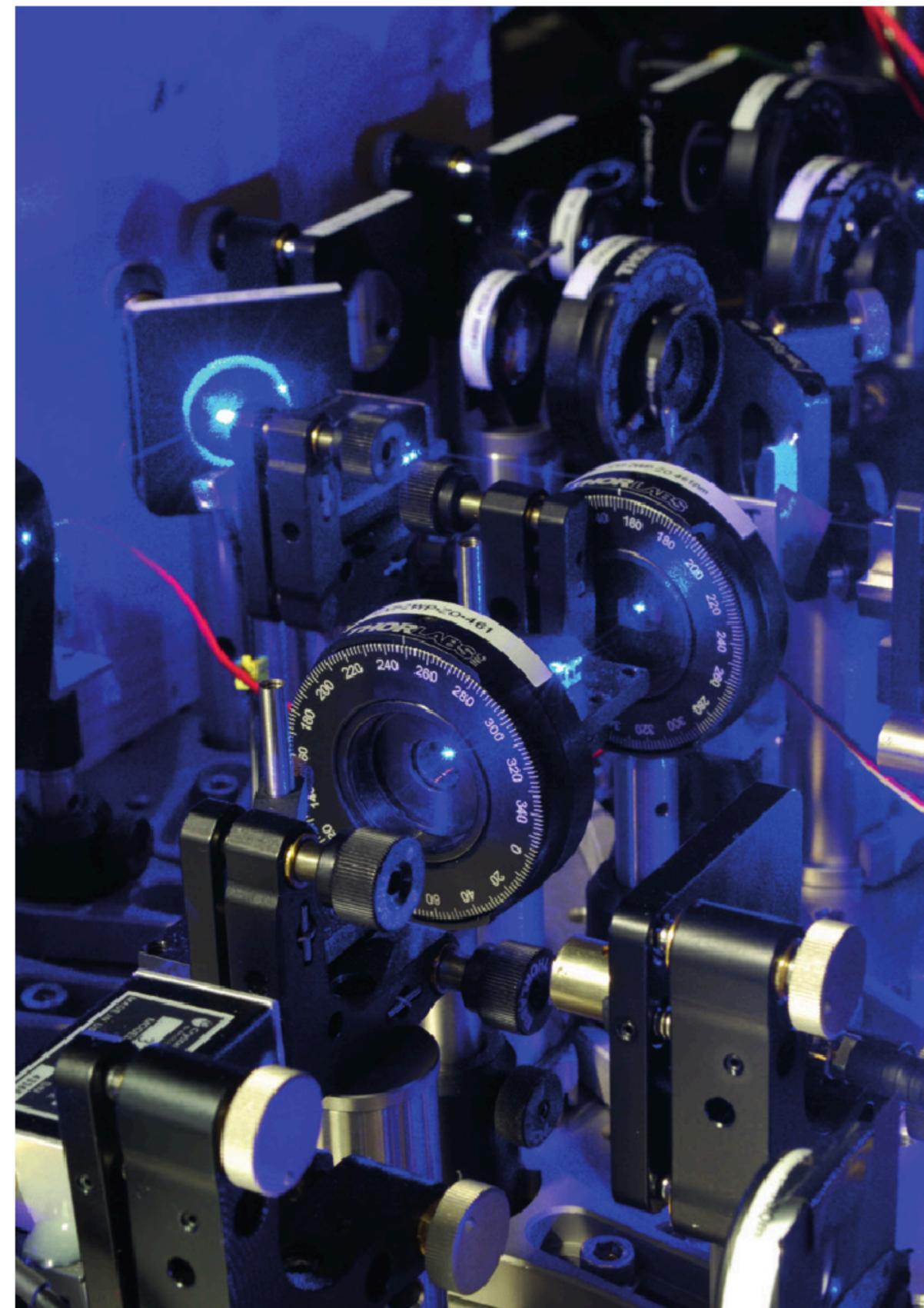
На основе этих новых возможностей будет разработан quantum toolbox. Затем инструментарий можно использовать для изучения вариантов использования и, таким образом, установить, выгодно ли конечному пользователю использование квантовой технологии по сравнению с использованием существующих классических приложений. Такой "мелкозернистый анализ" остается в зачаточном состоянии, когда, например, речь идет о квантовых компьютерах.

В дополнение к разработкам, не зависящим от платформы, описанным выше, методы программирования на основе квантовых технологий будут адаптированы специально для доступного оборудования, включая демонстраторы, разработанные в программах CAT этой Повестки дня. Вопросы, на которые необходимо ответить, включают: "Сколько доступно кубитов и какие логические процессы (квантовые вентили) возможны?" и "Насколько стабильны кубиты; требуется ли активная коррекция ошибок?"

#### 5.2.6 Постквантовая криптография

Развитие квантовых компьютеров имеет серьезные последствия для нашей цифровой безопасности. Таким образом, постквантовые исследования и разработки в области криптографии сосредоточены на проектировании и анализе криптосистем, которые являются безопасными в ситуациях, когда у злоумышленника есть квантовый компьютер, а у целевого пользователя его нет.

В настоящее время исследуются различные системы-кандидаты, которые основаны на математических вычислительных задачах, которые не могут быть эффективно решены с помощью любого доступного квантового алгоритма. Однако перевод сложной вычислительной задачи в безопасную криптосистему требует большого объема исследований и разработок. В этом контексте центральными вопросами являются:



1. Какой может быть сложная вычислительная задача преобразован в криптосистему, чтобы злоумышленник мог нарушить систему безопасности, только решив вычислительную задачу? Какие модели атак и безопасности применимы к используемым приложениям? Насколько сложна вычислительная задача и каковы 2. основные параметры, определяющие ее сложность? Необходимо приложить напряженные усилия для поиска новых способов решения лежащей в основе вычислительной проблемы, и необходимо проанализировать и понять сложность возможных алгоритмов атаки. 3. Насколько эффективно могут быть выполнены необходимые операции выполняется в криптосистеме пользователем? Каковы основные параметры, определяющие эффективность? 4. Какими могут быть необходимые криптографические алгоритмы

эффективно и надежно реализовано в программном обеспечении и на оборудовании? Сколько именно вычислительной мощности потребуется 5. для успешного обхода криптографии с использованием классического компьютера или квантового компьютера? Ответ на этот вопрос определяет, насколько большими должны быть криптографические ключи для обеспечения цифровой безопасности.

6. Какое влияние окажут новые криптографические алгоритмы о существующих коммуникационных инфраструктурах и бизнес- процессах, и как можно подготовить такие инфраструктуры к быстрому и эффективному внедрению алгоритмов?

На все эти вопросы необходимо будет найти ответы, чтобы разработать безопасную систему. Важно отметить, что актуальность криптографии, а следовательно, и постквантовой криптографии, выходит за рамки конфиденциальности двусторонних коммуникаций. Криптография дополнительно учитывает сценарии, в которых несколько, потенциально вызывающих взаимное недоверие, сторон желают совместно реализовать функциональность. Например, существуют криптографические протоколы для таких целей, как многосторонние вычисления и распределенная бухгалтерия.

В связи со вторым вопросом, постквантовым криптография выходит за рамки доквантовой криптографии, поскольку в анализ включены квантовые алгоритмы, которые могут работать на будущих квантовых компьютерах. Третий вопрос связан со вторым: свободные параметры должны быть оптимизированы таким образом, чтобы злоумышленнику было трудно взломать систему, но при этом эффективно использовать ее для пользователя. Соображения, связанные с реализацией (вопрос 4), часто приводят к изменению дизайна в интересах скорости и безопасности.

Пункты 2 и 5 различаются с точки зрения уровня детализации, с которым анализируются криптоалгоритмы. Пункт 2 связан главным образом с вопросом о том, как изменение данного параметра влияет на безопасность системы. Напротив, центральной проблемой пункта 5 является количество квантовых вентилях или объем квантовой памяти, необходимый для проведения атаки. Необходимо также учитывать возможности квантовых сопроцессоров с низким количеством кубитов, которые станут доступны задолго до создания полноценного универсального квантового компьютера. Другие интересные и актуальные вопросы включают в себя то, как можно уменьшить глубину квантовых схем и как можно построить схемы с элементами, требующими меньшего количества физических кубитов.

Исследования и разработки в области постквантовой криптографии должны привести к созданию лучших и более эффективных систем защиты данных и коммуникаций. Результаты напрямую повлияют на цифровую безопасность Нидерландов.

### 5.3 Направление действий 2 | Развитие экосистемы, создание рынка и инфраструктуры

Квантовые технологии находятся на относительно ранней стадии развития. Таким образом, ожидается, что в ближайшие пять лет рост в основном будет связан с исследованиями и разработками. В Нидерландах есть несколько сильных центров, обладающих потенциалом для развития в большую единую национальную экосистему. Под общим знаменем Quantum Delta NL будут изучены возможности партнерства с другими участниками в регионе для инвестирования в совместные инициативы, способные укрепить позиции Нидерландов в области квантовых технологий. Программы CAT будут играть важную роль в этом контексте и будут занимать центральное место в развитии экосистемы. Также будут запущены следующие мероприятия:

1. Международное позиционирование QDNL и international внедрение национального

- *Международное позиционирование Нидерландов как Quantum Delta NL*, организуя и участвуя во встречах кластера, семинарах, конференциях и днях нетворкинга. В сентябре 2019 года Нидерланды выступят на квантовой конференции в Бостоне; в следующем месяце в Гааге состоится первая в Европе конференция Inside Quantum Technology .

Также рассматривается возможность организации международного мероприятия TED quantum, а также ежегодное мероприятие для голландского квантового сообщества в целом ("Veldhoven QT Days").

- *Интеграция в Европу* | Нидерланды не могут

развивать квантовые технологии и связанный с ними рынок без посторонней помощи. Поэтому мы активно развиваем сотрудничество на европейском уровне, где квантовые технологии также являются приоритетными. В контексте европейского квантового флагамена Нидерланды играют новаторскую роль в области квантового интернета и атомных часов, а голландские научные учреждения откликнулись на запрос предложений, касающихся квантового программного обеспечения и кремниевых кубитов. ЕС привержен развитию Европейской инфраструктуры квантовой связи и вычислений . В июне Нидерланды и семь других государств-членов ЕС подписали совместную декларацию, касающуюся европейской инфраструктуры квантовой связи . Цель состоит в том, чтобы в течение десяти лет иметь действующую европейскую квантовую сеть, основанную на

на сочетании волоконно-оптических линий связи и спутниковых линий связи. Сеть будет использоваться для решения общественных задач, таких как подключение государственных служб и обеспечение безопасности критически важных инфраструктур. Как родина ESA / ESTEC, Нидерланды могут сыграть важную роль в этом контексте.

- *Глобальное внедрение* | Приверженность Нидерландов

европейскому сотрудничеству не исключает трансатлантическое сотрудничество. Экономика Нидерландов традиционно была открытой и основанной на знаниях, и у нас налажены прочные партнерские отношения как с международными компаниями, такими как Microsoft, Bosch, Shell и Intel, так и с государственными исследовательскими организациями по всему миру. Во всех случаях центральное соображение заключается в том, может ли сотрудничество устойчиво способствовать технологическому развитию и положению Нидерландов. С этой целью важно инвестировать в экосистемы, которые будут стимулировать стороны пускать корни в Нидерландах, а не просто устанавливать временные отношения. Развитие кампуса в Делфте стратегически важно в этом контексте.

- *Двустороннее сотрудничество с Северной Америкой и Японией.* |

Голландский исследовательский совет (NWO) стремится создать двусторонние программы сотрудничества с Соединенными Штатами, Канадой и Японией, в рамках которых инвестиции NWO согласовываются соответствующим органом в стране-партнере. Программы должны включать фундаментальные исследования по всему спектру тем, связанных с квантовыми технологиями. Будут объявлены конкурсы на проектные предложения с участием международных консорциумов и обмен талантами, особенно молодыми. С 16 по 18 сентября 2019 года в Делфте была проведена совместная голландско-японская научная конференция с целью определения тем для двустороннего конкурса.

2. Создание полевых лабораторий, то есть практических сред (как

стал популярным благодаря Программе действий Smart Industry), где компании и институты знаний могут разрабатывать, тестировать и внедрять целевые решения для проблем, с которыми сталкиваются различные отрасли. Основные вопросы будут вытекать из вариантов использования и совместных мероприятий, проводимых на объектах, разработанных в рамках программ CAT. Будет разработан национальный план для обеспечения заблаговременной координации и согласования. Хорошим примером предусмотренного типа объекта является лаборатория Quantum (подраздел 3.2.4), находящаяся в стадии разработки в настоящее время. Первоначально эта лаборатория будет сосредоточена на отрасли управления водными ресурсами, но со временем ее сфера деятельности будет расширена и охватит другие (возможно, национальные) области. Создание полевых лабораторий и местных партнерств студентов, исследователей, предпринимателей, а также средних школ и колледжей также может стимулировать экономическую активность на этой ранней стадии развития. Важной особенностью полевых лабораторий будет их роль в объединении людей, работающих с квантовыми технологиями, - например, на собраниях доменных кластеров, с целью изучения потенциала квантовых технологий. Будут также налажены связи с другими ключевыми технологиями (например, искусственный интеллект, фотоника и ИКТ), в которых Нидерланды преуспевают. С этой целью, например, будут организованы семинары и совместные проекты.

3. Расширение национальных объектов чистых помещений, необходимых

для реализации Повестки дня. Развитие национальной экосистемы будет зависеть от инвестиций в национальную инфраструктуру чистых помещений. Инфраструктура управляется NanoLabNL и включает центры в Делфте, Эйнховене, Гронингене, Амстердаме и Энскеде.

Требуются инвестиции для поддержания инфраструктуры и ее расширения в соответствии с ростом квантовых технологий в Нидерландах. В этой области приоритетом является предложение NanoLab3, которое предусматривает инвестиции, среди прочего, в новое оборудование для чистых помещений в TNO, Делфтском технологическом университете, MESA+ и Технологическом университете Эйндховена .

4. Дальнейшее развитие Делфтского квантового кластера

для голландской экосистемы. Являясь домом для QuTech, различных предприятий, Quantum Lab и планируемого Дома Quantum, Делфтский квантовый кластер (рабочее название "Q-campus") является крупнейшей концентрацией в национальной экосистеме. В рамках кластера компании, стартапы, исследователи и студенты со всего Quantum Delta NL и всех местных центров работают вместе над разработкой технологии, имея доступ к исследовательской инфраструктуре и национальному квантовому вычислительному центру, входящему в CAT 1. Для дальнейшего развития кластера важно инвестировать

в команду по приобретению и управлению учетными записями, жилье и общие исследовательские помещения, включая чистые помещения и рабочие места. Делфтский кластер будет работать как международный магнит, и его репутация пойдет на пользу всему сообществу Q NL, помогая сделать Делфт Нидерланды привлекательными в качестве базы для высокотехнологичной промышленности. Согласно промежуточному сценарию, ожидается, что численность персонала Q-campus вырастет с нынешних 300 человек до 650 человек к 2023 году.

Для поддержки развития Q

Δ NL, национального исследовательского центра в области технологий в Университете Твенте.

House of Quantum будет создан в Делфте: физический, открытый центр для сообщества квантовых технологий, который выполняет множество функций, предоставляя жилье для исследователей, стартапов и других предприятий, а также места для встреч и взаимодействия. Дом Quantum станет вдохновляющей обстановкой, способствующей случайным контактам между предприимчивыми людьми на стыках дисциплин и областей, местом проведения собраний, приемов, конференций и семинаров

люди, работающие с квантовыми технологиями. Для посетителей из других стран заведение послужит базой для изучения более широкой голландской квантовой экосистемы, поскольку многие "квантовые встречи" будут проходить в других частях страны. Короче говоря, House of Quantum станет местом, где всегда что-то происходит, и естественным местом для встреч. Точное место и подробный план объекта еще не определены. Примеры передовой практики в других местах, например в Торонто vectorinstitute.ai, будут изучены как часть процесса планирования.<sup>49</sup>

5. Расширение и укрепление местных центров в рамках

национального ландшафта. Эта программа предназначена для поддержки и продвижения сотрудничества в рамках различных инициатив в области квантовых технологий, реализуемых по всей территории Нидерландов. В дополнение к событиям в Делфте, описанным выше, эти инициативы включают:

- Создание качественного приложения и программного обеспечения

Отели Амстердама. Объединив интеллектуальную мощь и возможности академических институтов Амстердама, вспомогательных учреждений Амстердамского научного парка и партнеров по всему региону, будет создан Хаб, в котором различные стороны смогут взаимодействовать друг с другом для разработки вариантов использования и приложений для квантовых технологий. В рамках Хаба сотрудничество будет организовано на основе различных тем (или полевых лабораторий), таких как квантовые приложения в финансах, квантовые приложения в химии и материалах и квантовые приложения для исследования операций. Хаб будет открыт для сотрудничества между всеми сторонами в Квантовой дельте (и за ее пределами) и продвигать его с четкой целью ускорения инноваций в программном обеспечении и приложениях для квантовых технологий посредством национального и международного сотрудничества.

- Укрепление экосистемы в Брейнпорте

регион, основанный на квантово-безопасных каналах связи и системах квантово-безопасной аутентификации в интеллектуальном районе Брейнпорта. В регионе Эйндховен будет обеспечена сплоченность различных направлений квантовой деятельности и всемирно известного кластера высокотехнологичных систем и материалов.

- Разработка Лейденской платформы aQa (прикладная

Квантовые алгоритмы, см. <http://aqa.universitleiden.nl>), где теоретические квантовые алгоритмы адаптируются к реальному оборудованию с целью реализации краткосрочных и среднесрочных приложений для конечных пользователей. Платформа будет основана на успешных промышленных партнерствах с Shell (квантовая химия) и Volkswagen (квантовая оптимизация).

- Усиление и взаимосвязь quantum

Квантовый центр Университета Твенте.

. В Институте нанотехнологий MESA+ наблюдается повышенная активность, где ведутся работы в области сверхпроводящих устройств, кремниевой квантовой электроники и фотонной квантовой обработки информации. Связь между квантовыми технологиями и интегрированной фотоникой будет укрепляться с целью продвижения предпринимательства в парке знаний Твенте. Инициатива будет опираться на успешное сотрудничество между Университетом Твенте и высокотехнологичными малыми и средними предприятиями региона.

6. Создание программы передачи технологий

и поощрение стартапов. Новые бизнес-стартапы жизненно важны для развития экосистемы по двум причинам. Во-первых, они важны для роста голландской квантовой индустрии. Во-вторых, они помогают удерживать таланты: они создают рабочие места для вновь получивших квалификацию докторов наук и других специалистов, так что высококвалифицированные люди остаются в экосистеме, вместо того чтобы уезжать в поисках карьерных возможностей за границу. Поэтому будет создана программа поощрения и поддержки ученых и предпринимателей, которые хотят начать новый бизнес и таким образом вывести на рынок новые знания и технологии. Программа, вдохновленная Силиконовой долиной, имеет высокие амбиции. Цели, тем не менее, реалистичны, потому что первые части мозаики уже сформированы: опыт высокого уровня, различные стартапы, поставляющие специализированные детали для квантовых компьютеров, квантовых сетей и квантовых датчиков, а также крупные корпорации, готовые инвестировать в Нидерланды. Программа предусматривает разработку надлежащей политики запуска квантовых технологий, с соответствующими структурами интеллектуальной собственности, средствами рискованного капитала, размещением бизнеса на территории кампуса и доступом к инфраструктуре, такой как лаборатории и чистые помещения.



<sup>49</sup> Смотрите: [www.vectorinstitute.ai](http://www.vectorinstitute.ai)

5.4

**Направление действий 3 | Человеческий капитал: образование, знания и навыки**

Ожидается, что в предстоящие годы талант станет одним из факторов, ограничивающих дальнейший рост квантовых технологий и смежных отраслей. Потому что квантовая технология относительно нова и основана на противоречащих интуиции знаниях, существующие образовательные программы не могут удовлетворить растущий спрос на квантовых инженеров и системных инженеров. Пока не существует никаких академических или технических программ, относящихся конкретно к квантовой инженерии. Поэтому необходимы инвестиции в соответствующее образование и профессиональную подготовку, прежде чем квантовые технологии смогут быть должным образом внедрены в промышленность или общество. Академия QuTech в Делфте, Quantum Information Module и QuSoft Master's в Амстердаме, а также сертификат Quantum Materials & Technologies, разрабатываемый в QT / e в Эйндховене, могут послужить краугольными камнями в фундаменте.

7. Укрепление образования, сотрудничества и обмена знаниями, в контексте чего рассматриваются различные мероприятия, включая содействие внутренним и международным студенческим обменам и программам и разработку совместной учебной программы для квантовых программ в различных университетах и институтах. Охват можно расширить за счет обмена (электронными) учебными материалами и предоставления других материалов в онлайн-доступе. Промышленные стажировки для студентов также важны, как и курсы для людей, уже работающих в промышленности: "обучайте кванту инженеров, а инженерии ученых". Коммерческие партнеры могут быть тесно вовлечены в такие инициативы, например, посредством гостевых лекций по предпринимательству, программному обеспечению и аппаратному обеспечению; готовность к участию уже существует.

Кроме того, квантовые технологии (или, по крайней мере, их базовые принципы) можно сделать более доступными и привлекательными, организовав привлекательные мероприятия, такие как в виде международных хакатонов и челленджей. Другая идея заключается в создании программ с участием учителей и для них, с целью интеграции квантовых технологий в материал, преподаваемый в средних школах (и, возможно, даже в начальных школах), чтобы Нидерланды были готовы к будущему, формируемому квантовыми технологиями. Дом Quantum может служить вдохновляющей и открытой площадкой для обмена знаниями между учеными и между учеными и разработчиками промышленных продуктов.

С этой целью будет налажено сотрудничество с Академией QuTech и Комитетом по талантам и аутич-работе консорциума Quantum Software.

8. Привлечение и удержание талантов из других стран. Лучшие люди хотят работать в лучших институтах мира. Таким образом, ведущие институты и исследовательские группы Нидерландов могут служить магнитом для талантов из-за рубежа, а также для голландских исследователей, которые занимали должности постдоков в других странах, но хотели бы вернуться. Это может произойти только при наличии сильной экосистемы, а сильная экосистема, в свою очередь, привлечет новые таланты и будет стимулировать экономическую активность. Потенциально полезные стратегии привлечения международных талантов включают создание профессорских должностей для квантовых инженеров и предпринимателей, а также предоставление стипендий отличным студентам бакалавриата и докторантуры.

9. Создание сообщества, конференции и семинары, летние школы и студенческие обмены. В контексте этой повестки дня Голландский исследовательский совет (NWO) зарезервировал средства для мероприятий, способствующих сплоченности внутри квантового сообщества и организации в данной области. Наведение мостов с другими академическими дисциплинами, включая гуманитарные и социальные науки, является приоритетом. Соответствующие мероприятия включают организацию конференций и семинаров, а также проведение летних школ и программ обмена для младших исследователей и студентов.

5.5

**Направление действий 4 | Начало социального диалога о квантовых технологиях**

Квантовая технология относительно нова. Исследовательские группы соперничают за совершение новых открытий, получение патентов и победу академические награды. Некоторые правительства уже участвуют в стратегических дебатах, разрабатывая концептуальные документы (например, Европейский Квантовый манифест и Quantum Software Manifesto) и программы финансирования. Промышленность также начинает осознать потенциал и будущие экономические последствия квантовых технологий. Это, конечно, включает крупные технологические корпорации, стремящиеся создать первый квантовый компьютер, но также и компании, использующие технологии, такие как банки и авиастроители. Темпы технологического развития высоки, и, учитывая, что по всему миру инвестируются большие суммы, импульс, похоже, будет нарастать и дальше. Тем не менее, все преимущества квантовой технологии можно получить только при адекватном использовании

социальная поддержка. Поскольку квантовая технология в настоящее время имеет относительно мало практических применений, социальные, этические и юридические параметры в значительной степени еще не разработаны. Эта ситуация нуждается в исправлении, поскольку разработка таких параметров может сыграть важную роль в укреплении социальной поддержки.

Действительно, диалог с заинтересованными сторонами может принести нечто большее, чем общественное признание, о чем свидетельствуют встречи ELSA, организованные Делфтским технологическим университетом. Ценности, определяющие доступ к технологиям, такие как сетевой нейтралитет для классического Интернета, также были определены заинтересованными сторонами как социально важные. Некоторые заинтересованные стороны пошли дальше, выделив приложения квантовых технологий, которые они хотели бы иметь. Другими словами, ELSA также может привести к (открытым) инновациям и внести ценный вклад во все направления деятельности NAQT.

В рамках этого направления деятельности предусмотрены следующие мероприятия:

10. Иницирование (международного) диалога по вопросам квантовой ТЕХНОЛОГИЯ. Нидерланды идеально подходят для того, чтобы взять на себя международное лидерство и взять на себя заметную роль в разработке нормативных и этических рамок для квантовых технологий. Команда Quantum Vision из Технологического университета Делфта и Правовое и общественное мнение Консорциума Quantum Software могут стать лидерами в этой области, в то время как Дом Quantum может служить ключевой физической площадкой для диалога. Организация международной дискуссии по вопросам ELSA была бы полезной отправной точкой, а выдающиеся философы, ученые и эксперты по управлению могут помочь продвинуть квантовые технологии в международную повестку дня. Также следует стремиться к согласованию с европейскими флагманскими инициативами в области квантовой техники и поддерживать их.

11. Формирование национального комитета ELSA и должность профессора квантовой технологии. Функция национального комитета ELSA будет заключаться в иницировании и содействии национальному диалогу относительно квантовой технологии и ее последствий. Кроме того, оно могло бы разработать национальную программу с целью информирования и вовлечения в нее всех слоев общества, начиная с младших школьников. Также рассматривается вопрос о создании профессорской должности в области квантовых технологий. Такая профессорская должность могла бы иметь эффект расширения сферы деятельности соответствующего института

и дисциплина, а также представление Нидерландов в развивающейся академической сфере.

12. Разработка правовых и этических основ для квантовой технология, частично с целью получения социальной поддержки. Существующие правовые рамки для шифрования и дешифрования информации и связи необходимо будет модифицировать в соответствии с развитием квантовых технологий. Также будет необходимо решить юридические и этические вопросы, связанные с "квантовыми большими данными", поскольку огромные вычислительные мощности квантовых компьютеров могут привести к сложному массовому анализу очень больших объемов конфиденциальных данных. Другие этические и юридические вопросы, связанные с квантовыми технологиями, также потребуют внимания. Например, ограничения на разработку, производство, распространение и экспорт квантовых технологий, например торговые барьеры и экспортные ограничения, могут оказать серьезное влияние на рынок квантовых технологий, порождая новые актуальные вопросы. Обязанности поставщиков услуг облачных квантовых технологий, особенно в отношении честного и этичного поведения пользователей, также могут потребовать разъяснения. Для разработки соответствующих этических и правовых рамок предлагается подход, основанный на "ответственных инновациях". Национальная стратегия в соответствии с описанными направлениями может способствовать и ускорить общественное признание и апробацию квантовых технологий.

5.6

**Три программы CAT**

Три общесекторальные программы CAT предназначены для ускорения процесса внедрения квантовых технологий на рынок и в общество. Они будут включать в себя создание открытых тестовых сред и объектов, где университеты, институты, компании и конечные пользователи могут работать вместе на национальном уровне и экспериментировать с технологиями и ее приложениями. Системная интеграция, демонстраторы, примеры использования, информационно-разъяснительная работа и междисциплинарное сотрудничество - вот ключевые слова. Оборудование, разработанное в рамках программ CAT, предоставит существующим и новым компаниям легкий доступ к квантовым сетям, квантовым компьютерам и квантовым симуляторам. Это снизит порог для разработки и тестирования квантовых технологий и компонентов за счет устранения необходимости инвестировать в дорогостоящую инфраструктуру. Большое сообщество разработчиков и

таким образом, потенциальные пользователи могут появиться и послужить рассадником для развития динамичной и инновационной квантовой индустрии.

#### 5.6.1 КАТЕГОРИЯ 1 | Квантовые вычисления и моделирование

Целью первой программы catalyst является ускорение разработки технологий квантовых компьютеров и симуляторов и их внедрение на рынок и в общество, а также содействие исследованию и дальнейшему развитию приложений для таких технологий. Будет создана среда, в которой будут доступны все возможности Нидерландов в этой области, и где правительственные организации, бизнес-сообщество, разработчики технологий и студенты смогут изучить весь спектр возможностей, предоставляемых квантовыми вычислениями. Также будет возможно приобрести практический опыт работы с реализациями на реальном оборудовании и связанными с ними пользовательскими интерфейсами, а также на основе аппаратно-независимых реализаций. Одним из важных направлений будет разработка пользовательских средств и демонстраторов соответствующего качества (где качество зависит от количества кубитов, качества самих кубитов и систем управления), которые затем могут быть использованы для реализации инновационных социальных и промышленных приложений, ведущих к решению основных социальных и экономических проблем. Путь развития, ведущий к универсальному квантовому компьютеру, будет иметь ряд важных промежуточных этапов, включая системы малого размера ("несколько кубитов") и зашумленные квантовые системы среднего масштаба (NISQ), возможно, основанные на квантовых симуляторах.

Планируемая национальная служба поддержки может обеспечить контакт сторон в рамках тройной спирали друг с другом и, таким образом, инициировать диалог относительно практических вариантов использования и взаимодействия, необходимого для разработки аппаратных и программных решений. Это может привести к формированию широкого, национального сотрудничества в различных прикладных областях, включая квантовую химию и разработку материалов, приложения в финансовом секторе и оптимизацию процессов в производстве и логистике. Первоначально акцент будет сделан на примерах использования, в которых квантовая технология имеет очевидное преимущество перед классическими вычислительными решениями.

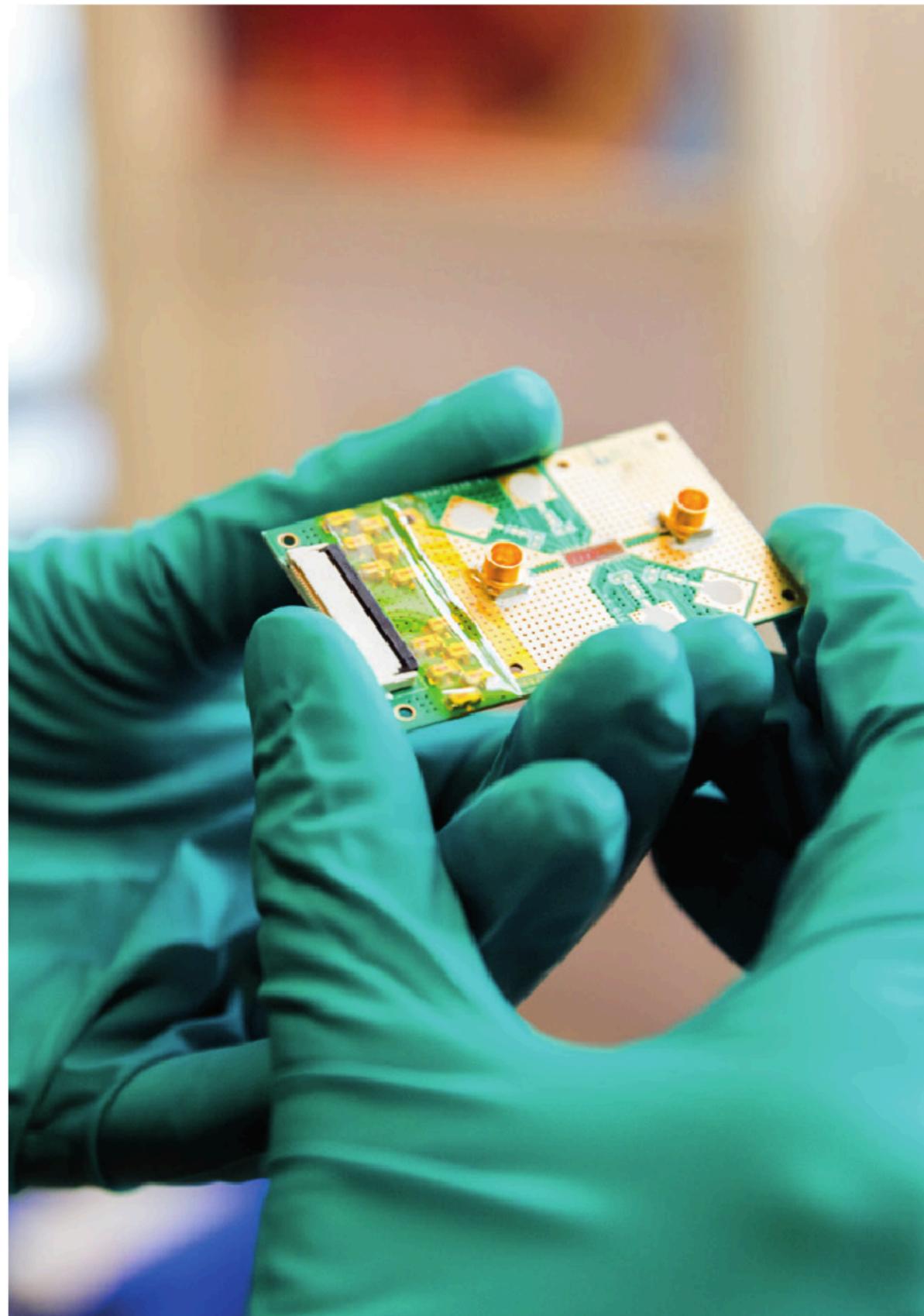
В целях ускорения технологического развития, программа будет включать следующие элементы:

#### 1. Расширение и открытие физических вычислений.

центр в Делфте, включая Quantum Inspire и разработку онлайн-платформы, которая предоставляет пользователям и разработчикам доступ к современным квантовым компьютерам и квантовым симуляторам в облаке. Через онлайн-платформу, исследователи смогут получить доступ к различным объектам в Нидерландах и других странах ЕС для разработки алгоритмов, программного обеспечения и примеров практического использования. Таким образом, это устройство может стать первым европейским квантовым компьютером, доступ к которому смогут получить пользователи, включая широкую общественность, что сделает технологию видимой и осязаемой. Этот европейский квантовый компьютер позволит получить опыт программирования на множестве прототипов квантовых компьютеров с несколькими кубитами. В течение следующих нескольких лет рассматриваемые машины будут представлять собой системы NISQ без исправления ошибок, такие как гибридные квантово-классические симуляторы, разработанные в контексте этого CAT. Можно ожидать, что параллельное развитие вычислительных возможностей в Delft и возможностей симуляторов во всей Quantum Delta NL сократит время, необходимое для перехода от систем NISQ к универсальному квантовому компьютеру. Для поддержки разработки реальных квантовых платформ будут разработаны и доступны квантовые эмуляторы. Квантовые эмуляторы - это классические компьютерные системы, способные эмулировать квантовые системы с объемом до нескольких десятков кубитов. Таким эмуляторам предстоит сыграть важную роль на ранних этапах разработки алгоритмов и протоколов для последующей реализации в реальных квантовых системах.

#### 2. Программа предусматривает разработку

возможности квантового симулятора для разработки новых материалов для широкого спектра применений, а также для сети исследований и разработок, к которой подключены различные платформы симуляторов в Quantum Delta NL. Сеть платформ в Эйндховене, Твенте, Делфте, Амстердаме и Лейдене расширит знания в области квантовых симуляторов и сделает ее доступной для конечных пользователей, частично через планируемый онлайн-пользовательский интерфейс. Платформы симуляторов будут предлагать широкий спектр систем на основе холодных атомов, ионов и молекул, а также матрицы оптических резонаторов, квантовые точки и сверхпроводящие схемы и фотонные кластеры. В Эйндховене разрабатывается демонстрационный квантово-классический симулятор, содержащий до сотни зашумленных кубитов на основе ридберговских атомов. Машина будет доступна конечным пользователям с целью обеспечения возможности решения сложных задач материаловедения.



3. В рамках этого CAT будут разработаны варианты использования на различных уровнях

местоположения и различными способами, и будет доступна конечным пользователям национальной службой поддержки. Например: а) Как часть этого CAT, приложение Quantum и

Software Hub Amsterdam внесет свой вклад в

разработка приложений и программного обеспечения для использования в системах NISQ, например, для решения задач оптимизации процессов и разработки материалов. б) Платформа Leiden aQa будет работать с конечными пользователями для

разработает ориентированные на конкретные варианты использования тесты для квантовых алгоритмов и изучит проблемы масштабируемости на симуляторах и аппаратном обеспечении. Работа предоставит конечным пользователям информацию о "моментах встречи", когда квантовый компьютер обгонит классический компьютер.

с) Полевые лаборатории будут играть важную роль в переводе

растет квантовых вычислений и симулятор возможности в конкретные решения в соответствующих

области применения. В полевой лаборатории Южной Голландии, к примеру, исследователи изучают, как квантовые вычисления могут быть успешно использованы для решения проблем управления водными ресурсами. д) Путем разумного использования квантовых эмуляторов, the

бизнес-сообщество может получить раннее представление о

потенциале и ограничениях приложений для квантовых вычислений. Это ускорит выявление жизнеспособных вариантов использования в различных секторах и послужит руководством для развития соответствующих возможностей.

4. Нарращивание цепочки создания стоимости. Разработка,

техническое обслуживание и эксплуатация оборудования будут требуют участия различных участников в сообществе научных лабораторий и за его пределами, включая поставщиков контрольной электроники, разработчиков программного обеспечения, производителей и операторов устройств, сотрудников по контактам с клиентами.

и разработчики приложений. На некоторых из этих ролей нет уже участников, а это означает, что стартапам и другим новым игрокам

нужно будет войти в цепочку. По мере этого экосистема будет постепенно эволюционировать в цепочку создания стоимости для квантовых вычислений. Лабораторную инфраструктуру необходимо будет модернизировать за счет инвестиций в платформы qubit, установку для тестирования функциональных возможностей перед их запуском в эксплуатацию и вспомогательные объекты, такие как чистые помещения и рабочие места.

Также потребуются наборы алгоритмов и прикладных инструментов, а также библиотека стандартов программных модулей quantum и средства тестирования для эмуляции на суперкомпьютерах.

Краткосрочный эффект (0-4 года):

Краткосрочный эффект этой программы CAT будет обусловлен главным образом разработкой первого европейского квантового компьютера и нового междисциплинарного сообщества вокруг этого компьютера. Разработанные варианты использования приведут к формированию новых партнерских отношений, в том числе между сторонами в секторах, которые обычно мало контактируют друг с другом. Это породит новые идеи для коммерциализации оборудования и программного обеспечения. Разработка жизнеспособной платформы будет зависеть от привлечения различных существующих поставщиков таких продуктов, как вакуумные системы, системы охлаждения, лазерные системы и магнитные системы.

Среднесрочный эффект (5-8 лет):

Ожидается, что в среднесрочной перспективе возникнет новая квантовая индустрия для разработки оборудования, необходимого квантовому сектору, и управления им. Социальный эффект будет обеспечен за счет новых химических процессов, материалов и интеллектуальных производственных систем, разработка которых будет обеспечена. Это будет ощущаться главным образом в отраслях, задействованных в биологических и химических процессах, таких как производство сырья для использования в строительстве и сельском хозяйстве, а также производство топлива, биоматериалов и фармацевтических препаратов.

Долгосрочный эффект (8 лет и более):

Модернизация оборудования в конечном итоге приведет к разработке технологии NISQ, способной обеспечить все более сложные вычисления, включая масштабируемые компоненты прототипов для всех уровней стека, такие как платформы кубитов и управляющая электроника. Это, в свою очередь, приведет к появлению приложений в различных секторах, включая химическую промышленность, логистику, ИКТ (искусственный интеллект, машинное обучение) и здравоохранение и социальную помощь. Нидерланды будут позиционировать себя как место, где задается тон для развития как квантовых технологий, так и их приложений. Таким образом, будет заложена надежная основа для окончательной разработки универсального квантового компьютера.

5.6.2 КАТЕГОРИЯ 2 | Национальная квантовая сеть

Нидерланды являются международным пионером в области сетей квантовой связи. На западе страны QUTech работает с KPN и другими компаниями над созданием первого в мире квантового интернета, основанного на запутанности. Тем временем в Эйндховене предпринимаются первые шаги к созданию сети QKD в регионе Brainport. На европейском уровне QUTech-светодиодные квантового интернета Альянс разрабатывает проект Европейского квантовой сети, а также наземные и спутниковые криптографической были

определены в качестве основных технологий для Единого цифрового рынка.

Национальная квантовая сеть будет служить испытательным полигоном для новой технологии и приложений в рамках экосистемы. Одна из причин, по которой классический Интернет смог так быстро развиваться, заключалась в том, что с самого начала доступ для сетевых инженеров, программистов и пользователей был простым и дешевым. Создание подобных обстоятельств может придать квантовому Интернету импульс, необходимый для перехода на следующий уровень. Одной из целей этой программы является создание основы для национальных квантовобезопасных соединений, включая национальный доступ для тестирования соответствующих инновационных вопросов и промышленных приложений. Кроме того, Национальная квантовая сеть обеспечивает идеальную отправную точку для развития европейской сети. В последней половине 2019 года государства ЕС разрабатывают первоначальные планы для европейской инфраструктуры квантовой связи (QCI); следовательно, это идеальное время для того, чтобы проявить инициативу и взять на себя ведущую роль.

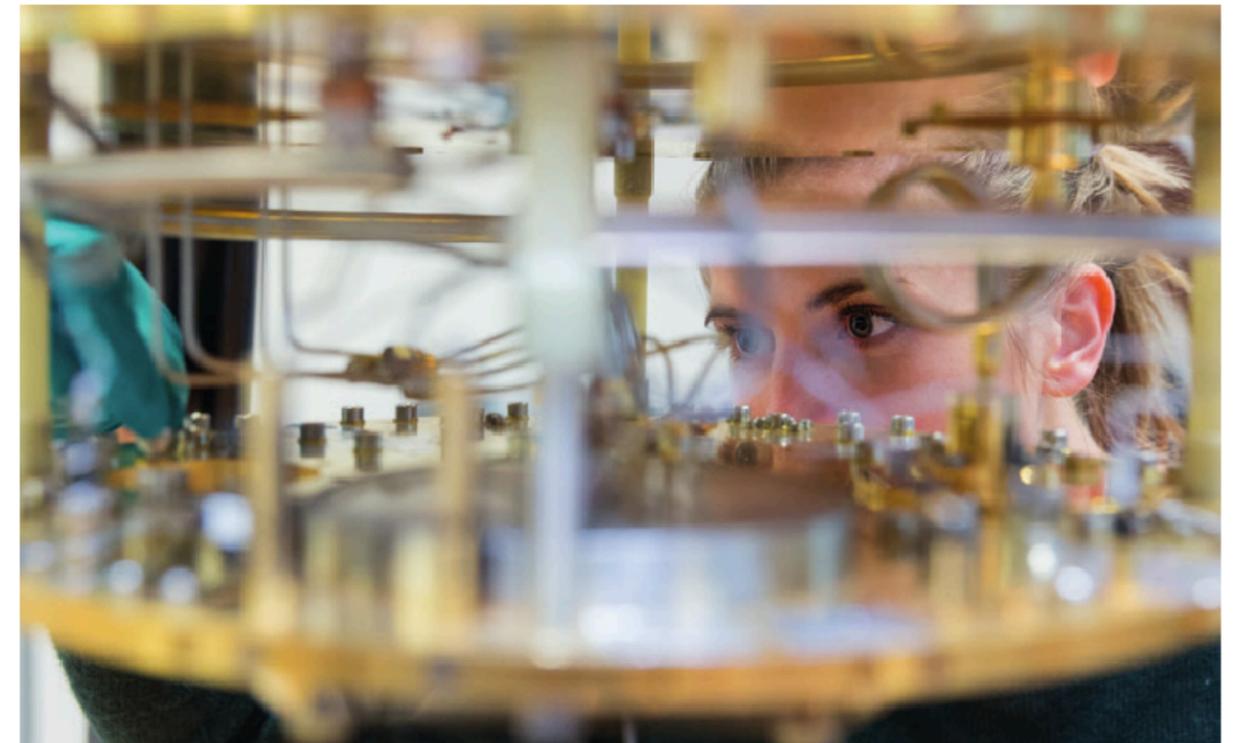
Через национальную службу поддержки, потенциальные конечные пользователи, социальные учреждения и граждане могут вступать в контакт с различными сторонами, работающими в национальной квантовой сети, и с привлеченными исследователями Quantum Delta NL.

Планируемая Национальная квантовая сеть будет иметь три основных компонента:

1. Инфраструктура квантового интернета на базе

запутанность, где первая квантовая связь между Делфтом и Гаагой будет расширена, чтобы охватить западную агломерацию и, со временем, возможно, все Нидерланды. Инициатива предоставит возможности для фундаментальных инноваций, дальнейшего технического развития и партнерских отношений с аппаратной и программной индустриями для разработки различных компонентов инфраструктуры. Это задумано как "лунный снимок", который продемонстрирует высокотехнологичные возможности, которые квантовая коммуникация принесет в Нидерланды. С этой целью у нас есть надежная база, на которой можно строить: через три года после того, как в Делфте была реализована первая в истории квантовая связь дальнего действия, та же исследовательская группа добилась "запутывания по требованию" в 2018 году. Новый протокол запутывания открывает путь для трех или более

квантовые процессоры будут подключены друг к другу на первом этапе к развертыванию квантового Интернета.



2. Испытательный стенд для разработки с открытым доступом для пользователей

и разработчикам. Открытый испытательный стенд такого рода позволит развивать динамичное и инновационное программное обеспечение и индустрию безопасности, основанную на будущем квантовом Интернете. Существующие и новые компании, занимающиеся разработкой программного обеспечения и обеспечением безопасности, будут иметь легкий доступ к квантовой сети через пользовательский интерфейс без необходимости инвестировать в (в настоящее время) дорогостоящее квантовое оборудование и волоконно-оптическую инфраструктуру. Таким образом, может возникнуть большое сообщество разработчиков и потенциальных пользователей. Первоначально тестовый стенд будет основан на эмуляции квантовой сети с использованием инструментов моделирования, недавно разработанных QITech, которые позволяют классическому суперкомпьютеру действовать как квантовая сеть. Как только технология для этой квантовой сети будет разработана до такой степени, что будет готова к пользовательскому тестированию, она будет подключена к пользовательскому интерфейсу тестового стенда через промежуточный программный стек.

3. Подключение первых пользователей (или преодоление разрыва в

цепочка создания стоимости). Некоторые аспекты технологии квантовых сетей уже достаточно развиты для тестирования первыми пользователями. Первые инициативы в Нидерландах следующие (см. Также рисунок 16): а) Сеть QKD в регионе Эйндховен, где между домом в Хелмонде и кампусом TU / e реализуются квантово-безопасные двухточечные соединения, так что передаваемые данные могут быть защищены с помощью квантовых ключей. Также начата работа над вторым квантово-безопасным соединением с ратушей Ваалре . Другой ключевой особенностью инициативы, наряду с реализацией квантово-безопасных соединений, является усовершенствование концепций квантово-безопасной аутентификации для создания масштабируемых приложений и продуктов.

б) Сеть MDI-QKD в регионе Делфт-Гаага,

представлены сети Star с квантовой безопасностью. Используя независимый от измерительного устройства QKD, несколько пользователей могут быть связаны между собой через центральный узел, устраняя необходимость в "надежных повторителях" между различными частями квантовой сети. Это приводит к большей гибкости, чем это возможно при использовании стандартных Системы QKD: центральный узел действует как коммутатор, постоянно соединяя пользователей друг с другом. Другим преимуществом этого MDI-QKD является то, что, в отличие от стандартного QKD, нет необходимости делать какие-либо предположения относительно правильной работы детекторов света: MDI-QKD нельзя взломать, нацелившись на детекторы. Используя тот же метод, в конечном итоге станет возможным соединить несколько квантовых сетей вместе, образуя таким образом квантовый интернет ("межсетевая работа" - это соединение нескольких сетей).

Реализация в соответствии с направлениями действий этой Программы:

Наряду с фундаментальными исследованиями квантовых сетей в рамках направления действий 1, как описано в подразделе 5.2, CAT 2 особенно предназначена для содействия развитию экосистемы, созданию рынка и формированию инфраструктуры. Национальная квантовая сеть сделает возможным как становление индустрии квантовых коммуникаций, так и появление поставщиков услуг, подобных тем, которые связаны с существующим Интернетом. Более того, столпы Национальной квантовой сети в буквальном и переносном смысле соединят различные университеты и институты, а также участвующие компании и поставщиков оборудования и программного обеспечения. Испытательная инфраструктура открытого квантового интернета также предоставит доступ потенциальным пользователям (таким как банки, правительственные агентства и охраняемые компании) и разработчикам. Новые пользователи смогут испытать на себе возможности квантовой технологии и, таким образом, извлечь выгоду из технологий, к которым многие другие компании пока не имеют доступа, и познакомиться с ними . Это даст компаниям, базирующимся в Нидерландах, конкурентное преимущество.

Краткосрочное воздействие (0-4 года):

Национальная квантовая сеть для демонстрации голландского опыта

квантовая индустрия. Развитие Национальной квантовой сети и связанных с ней систем безопасности и приложений продемонстрирует потенциал квантовых технологий широкой общественности. Таким образом, Национальная квантовая сеть может служить как демонстрацией голландской квантовой индустрии в целом, так и платформой для обучения будущих инженеров по программному обеспечению и безопасности.

Среднесрочный эффект (5-8 лет):

Формирование европейской квантовой сети и подключение к ней. Дизайн нашей Национальной квантовой сети может быть использован как план расширения на европейском уровне и как подключение к сетям, развертываемым в других странах. Сначала будут установлены двухточечные QKD-соединения на более высоком уровне, после чего функциональность будет увеличена за счет внедрения инноваций фундаментальных исследований.

Долгосрочный эффект (8 лет и более):

Глобальная квантовая сеть. В будущем квантовый интернет соединит множество квантовых узлов и квантовых компьютеров, используя как оптоволоконную, так и спутниковую связь. Это создаст беспрецедентные возможности для пользователей, от колоссальной вычислительной мощности до полностью безопасной инфраструктуры связи. Национальная квантовая сеть подготовит потенциальных пользователей, широкую общественность и бизнес-сообщество к наступающей квантовой эре.

Открытый испытательный стенд квантового интернета может служить ресурсом для обучения будущих квантовых инженеров и пользователей, а как демонстрация возможностей квантовых технологий. Например, сеть может быть открыта для студентов университетов, учащихся средних школ и студентов колледжей, реализующих соответствующие проекты.

Наконец, различные аспекты квантового интернета, такие как улучшенная конфиденциальность, управление, сетевой нейтралитет и доступ, важны в отношении социального диалога относительно квантовых технологий. Также потребуются диалог относительно стандартизации и протоколов (интернета). Европейский институт телекоммуникационных стандартов (ETSI) создал группу отраслевых спецификаций QKD, в то время как Целевая группа по разработке интернета (IETF) также изучает протоколы для будущего квантового Интернета. По мере роста квантового интернета будет важно, чтобы этим и другим социальным аспектам уделялось достаточное внимание, и именно это призвана обеспечить эта программа CAT.

5.6.3 CAT 3 | Приложения для квантового зондирования

Классические датчики, используемые в настоящее время, например, мобильные телефоны, автомобили, самолеты и космические корабли обычно полагаются на электрические, магнитные, пьезорезистивные или емкостные эффекты. Многие из них основаны на принципе механического генератора, который позволяет измерять различные параметры, включая давление, температуру, заряд, масса и ускорение.

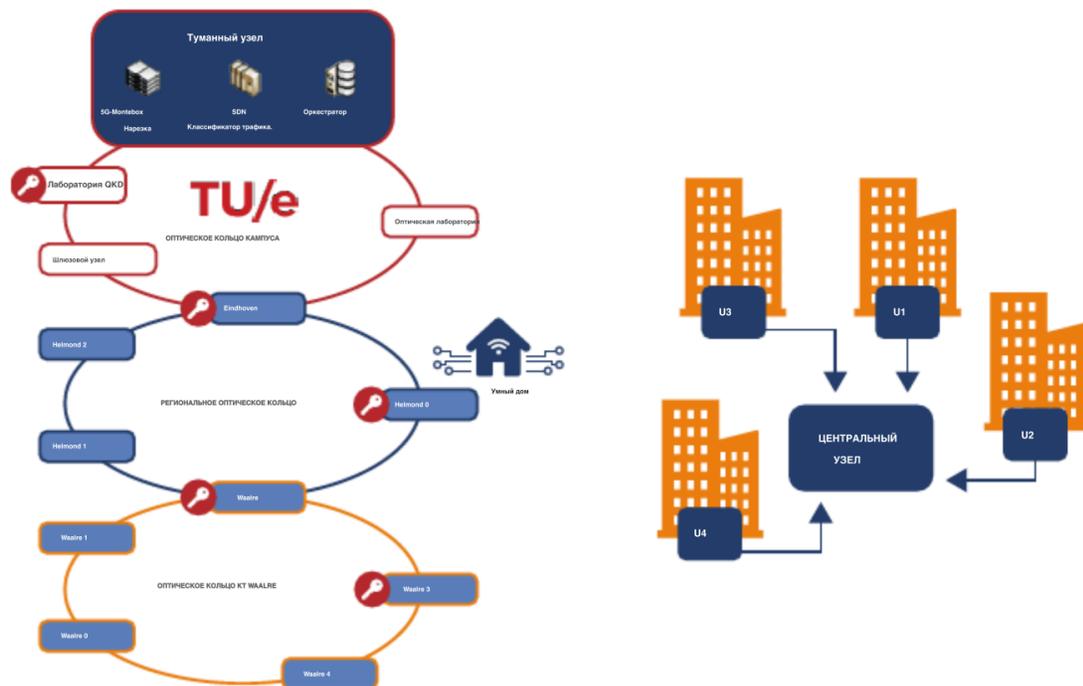


РИСУНОК 16

Первые инициативы по тестированию сети QKD в Нидерландах. Слева: сеть QKD в регионе Эйндховен. Справа: сеть MDI-QKD, подобная той, что планируется для региона Делфт-Гаага.

Хотя такие датчики очень чувствительны и эффективны, они принципиально ограничены, например, классическими и внешними шумами. Для будущих применений датчиков потребуются значительно большая чувствительность, чем может быть достигнута с помощью существующих конструкций; в идеале они должны быть ограничены только конечными параметрами квантовой механики. Кроме того, для определенных применений требуются датчики, нечувствительные к электромагнитному рассеянию, которого много в МРТ-сканерах, электромобилях и многих других устройствах и вокруг них

и бытовая техника. Квантовые датчики потенциально могут соответствовать таким возникающим требованиям.

В настоящее время область квантовых сенсоров, вероятно, является наиболее развитой из четырех областей применения квантовых технологий с точки зрения промышленного и общего применения. Тем не менее, в этой области еще предстоит провести много исследований. Помимо исследований фундаментальных аспектов (изобретение новых квантовых датчиков и усовершенствование существующих), необходимо будет определить новые области применения и спроектировать и разработать прибыльные и устойчивые приложения. Различные организации и команды в Нидерландах работают над решением таких задач, часто в партнерстве со спонсорами из деловых кругов. Однако это фрагментированный ландшафт, где переход от экспериментальной лабораторной системы к жизнеспособной коммерческой системе часто бывает долгим, и где Нидерландам, несмотря на свои превосходные исследования в области квантового зондирования, еще предстоит установить международное присутствие. Таким образом, эта программа CAT предназначена для содействия сплоченности и ускорения разработки квантовых датчиков.

Будет создана платформа междисциплинарного сотрудничества, где исследователи и разработчики смогут обмениваться опытом, делиться ресурсами и сотрудничать с предприятиями и конечными пользователями в различных секторах для определения вариантов использования и разработки соответствующих прототипов. Программа CAT будет явно ориентирована на пользователей в различных областях: оборона, космические путешествия, производство, мобильность, сельское хозяйство и так далее. Одной из важных особенностей программы станут помещения, на которых можно будет продемонстрировать новые типы квантовых сенсоров в качестве отправной точки для совместной дальнейшей разработки. В рамках этой программы CAT будут разработаны полнофункциональные прототипы на основе технологий, которыми отличаются Нидерланды, таких как системы на основе квантово-механических генераторов, ультрахолодных атомов, NV-центров в алмазе и трансионных кубитов.

Важное место в программе также будут занимать прикладные исследования, системная интеграция, экспертиза предметной области и сравнительный анализ существующих датчиков. Все эти элементы

требуются для определения того, что необходимо после этапа разработки концепции для продолжения разработки момента, когда продукт станет полезным для конечного пользователя и экономически приемлемым для (будущего) производителя датчиков. Таким образом, деятельность по разработке прототипов в рамках программы CAT также будет направлена на определение критических вспомогательных технологий, необходимых для вывода квантового зондирования на новый уровень (таких как источники фотонов и атомов и детекторы, квантово-механические резонаторы, фотоника и электроника). Компании, работающие над такими технологиями, будут привлечены к разработке прототипов с целью запуска цепочки поставок для квантового зондирования.

Программа состоит из двух основных направлений:

- 1) Создание платформы для совместных инноваций в данной области.
  - квантового зондирования, где ученые, системные инженеры, компании, занимающиеся оборудованием и программным обеспечением, а также конечные пользователи могут работать вместе над разработкой новых приложений для квантовых датчиков. Организуя семинары, сетевые встречи и ярмарки инноваций, коммерческие субъекты могут быть установлены контакты с научными группами и институтами.
  - Организации, специализирующиеся на прикладных исследованиях, такие, как TNO, помогут привлечь соответствующие стороны и познакомить их друг с другом. Платформа поможет направлять необходимые научные исследования, в то время как результаты текущих исследований послужат исходным материалом для определения новых областей применения и вариантов использования.
  - Платформа будет представлять собой сеть, где стороны вступят в контакт и будут сформированы новые партнерские отношения.
  - Образовательные институты также будут задействованы в платформе, чтобы рабочая сила будущего была оснащена для использования квантовых (сенсорных) технологий.
- 2) Создание центра тестирования и использования квантовых датчиков для оказания помощи предприятиям и другим организациям в подготовке технологий к выходу на рынок. Цель состоит в том, чтобы создать общедоступный национальный пользовательский сервис. Он может быть распространен по сайтам различных участников платформы, которые все открывают свои собственные сервисы. Платформа будет служить службой поддержки для распределенного объекта. Привлечение ученых, системных инженеров и разработчиков из бизнес-сообщества приведет к созданию оживленного сообщества, в котором возможности средства тестирования и использования постоянно расширяются в консультации с конечными пользователями.

Краткосрочный эффект (0-4 года):

В течение четырех лет должно быть создано новое междисциплинарное сообщество по квантовому зондированию. Целью будет положить конец нынешней фрагментации ландшафта и обеспечить высокий авторитет Нидерландов в области квантового зондирования с целью ускорения разработки и применения квантовых датчиков в различных областях и решения связанных с этим (технологических) проблем. Результатом должны стать новые партнерские отношения и новые идеи, а также разработка новых продуктов и услуг. В этот период будут предприняты первые шаги к созданию национального центра тестирования квантовых датчиков и пользовательского центра.

Среднесрочный эффект (5-8 лет):

В среднесрочной перспективе разрабатываемые новые сенсорные технологии найдут применение на рынке.

Существующие решения будут усовершенствованы, и будут предприняты целенаправленные усилия для содействия индустриализации производственных процессов квантовых сенсоров. Новые голландские компании будут

быть основанным и достичь зрелости. К этому этапу национальный центр тестирования и использования станет неотъемлемой частью голландской quantum delta, доступной для сторон в Нидерландах и других странах.

Долгосрочный эффект (8 лет и более):

Через восемь лет Нидерланды утвердятся в качестве одной из ведущих стран мира в области квантовых сенсоров. Голландские компании будут активны по всей цепочке, от разработки концепции до поставки сенсорных решений конечным пользователям, работая в тесном сотрудничестве с академическим сообществом.



"Если мы хотим сохранить наши лидирующие позиции и использовать возможности, предоставляемые квантовыми технологиями, необходимо придать дополнительный импульс".

## 06

### КРИТЕРИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОВЕСТКИ ДНЯ

#### 6.1 Организация и управление

Эта программа является результатом совместной работы основной команды, набранной из золотого треугольника и состоящей из людей с разным опытом работы, но общей целью. Он опирается на опыт консультативной группы, состоящей из более чем пятидесяти ведущих деятелей в этой области. Повестка дня является отправной точкой для процесса, с помощью которого планы воплощаются в практическую программу действий. Форма, которую примет эта программа, будет зависеть от решений, которые будут приняты в Гааге относительно реализации государственной политики в области ключевых технологий. Действуя как коалиция, основная команда готова осуществлять надзор за выполнением Повестки дня и намерена энергично выполнять эту задачу

#### 6.2 Финансирование

Видное положение Нидерландов в quantum мир технологий обусловлен не только научным превосходством, но и политической и управленческой смелостью предыдущих правительств и партий, таких как FOM, Голландский исследовательский совет (NWO), TNO и университеты в Делфте, Амстердаме и Эйндховене. В последние годы значительные суммы государственного и частного капитала были инвестированы в QuTech, QuSoft, Технологический университет Эйндховена и программу Gravity. В результате, Нидерланды занимают прочные позиции в европейских программах, таких как флагманский проект Quantum, запущено

во время председательства нашей страны в ЕС. Однако, как сказал Роберт Дейкграф на презентации превосходного среднесрочного обзора QuTech: у Нидерландов есть кое-что

глобально уникальный, что является одновременно привилегией и ответственностью. Если мы хотим сохранить наше лидирующее положение и использовать возможности, которые квантовые технологии открывают для науки, экономики и общества, необходимо придать дополнительный импульс определенным направлениям действий.

Общая годовая стоимость программы, включая программы, которые уже осуществляются, оценивается в 102 миллиона евро в год, из которых 69 миллионов покрываются текущими программами. Новые направления деятельности потребуют инвестиций в размере 34 миллионов в год. Что касается потенциала и воздействия Программы, это очень скромная сумма. В таблице ниже приводится ориентировочная сводка ресурсов, необходимых для различных проектов и направлений деятельности. Цифры основаны на многолетней программе "Ключевые технологии", представленной коалицией Quantum NL в связи с KIA / KIC.

CAT / Линия действий	Всего миллион евро в год
КАТЕГОРИЯ 1: Квантовые вычисления и моделирование	7.0
КАТЕГОРИЯ 2: Национальная квантовая сеть	4.5
КАТЕГОРИЯ 3: Сенсорные приложения	2.0
Направление действий 1: Реализация научно-исследовательских и инновационных прорывов	8.0
Направление действий 2: Развитие экосистемы, создание рынка и инфраструктуры	9.0
Направление действий 3: Человеческий капитал	2.5
Направление действий 4: Социальный диалог	1.5
<b>Итого</b>	<b>34.5</b>

## Колофон

Список людей и организаций, участвующих в разработке Повестки дня, в алфавитном порядке.

### Основная команда

Карло Бенаккер (Институт Лоренца), Фрике Хейман (руководитель основной группы; QuTech, EZK), Ханс Бос (Microsoft,

Нидерланды), Джесси Робберс (AMS-IX), Джоб Ниджс (StartupDelta, сейчас Techleap.nl ), Карельян Шаутенс (QuSoft),

Рогир Верберк (TNO), Рональд Хэнсон (QuTech), Серваас Коккельманс (QT/e)

### Проектная группа

Арина Шриер (Голландский исследовательский совет (NWO)), Флор ван де Паверт (QuSoft), Фрике Хейман (QuTech,

EZK), Хьюго Гелеверт (TNO), Ингрид Ромайн (QuTech), Виктор Ланд (QT/e, QuSoft), Витеке де Бур (NWO)

### Консультативная группа

Аксель Берг (SURF), Барт ван Веес (Университет Гронингена), Берри Ветьенс (TNO), Берт Каппен (Университет

Радбауда), Шарлотта Ругерс (Министерство обороны), Кор ван дер Струйфф (IBM), Даниэль Фрайтерс (ЕСР I

Платформа для информационного общества), Дмитрий ван Эш (ABN AMRO), Дирк Смит (Shell), Имон Мерфи (ESA / ESTEC),

Эрик Баккерс (Технологический университет Эйндховена , QT/e), Флориан Шрек (Амстердамский университет, QuSoft),

Франко Онгаро (ESA/ ESTEC), Фрэнк де Йонг (FEI, высший сектор HSTM), Фредерик Керлинг (ATOS),

Геррит-Ян Ценне (Лейденский университет), Ханс ван ден Влеккерт (QuiX), Гарри Берман (Амстердамский университет, QuSoft,

CWI), Инальд Лагендейк (Технологический университет Делфта), Ингмар Сварт (Утрехтский университет), Ян де Бур (NWO), Джая

Балу (KPN), Джереми Бутчер (Fox-IT), Жереми Велтин (TNO), Йорис ван Хобокен (IVIR), Йос Литтел (муниципалитет Делфта) ,

Джулия Крамер (Лейденский университет), Карин Позлс (Министерство внутренних дел и по связям с Королевством), Кис

Эйкель (QuTech), Кемо Агович (TNO), Ливен Вандерсипен (Технологический университет Делфта, QuTech), Лукас Вишер (VU

Amsterdam), Марчин Дукальский (Agamco Overseas Company BV), Мельхиор Эльманс (Juniper Networks),

Михаил Кацнельсон (Университет Радбауда), Нико ван Эйк (Амстердамский университет, IVIR ), Нильс Бултинк (Qblox),

Паола Гори-Джорджи (VU Amsterdam), Пепин Пинксе (Университет Твенте), Питер Швабе (Университет Радбауда),

Питер Вермаас (Технологический университет Делфта), Ремберт Дуайн (Утрехтский университет), Рональд Крамер (Лейденский

университет, CWI), Сал Босман (Delft Circuits), Шайреш Алго (ABN AMRO), Саймон Греблахер (Технологический университет

Делфта), Шриджит Госвами (Делфтский технологический университет, QuTech), Стейси Джеффри (Амстердамский университет,

QuSoft), Стефани Венер (QuTech), Тамалика Банерджи (Университет Гронингена), Таня Ланге (BT / QT/e),

Томас Гросфельд (VNO-NCW MKB Nederland), Wolfgang Löffler (Leiden University)

Дизайн: Raaijmakers Ontwerp, Инге

Райджмакерс Перевод: Taalcentrum-VU

Печать: Услуги Xerox Communications Service для правительства

Фотография: среди прочих, благодаря QuTech, QT/e, QuSoft, Qblox, QuiX, Delft Circuits, Марике де Лорийн, Андреа

Кейн, Флориану Шреку, Пиму Топу и Пепину Пинксу.

