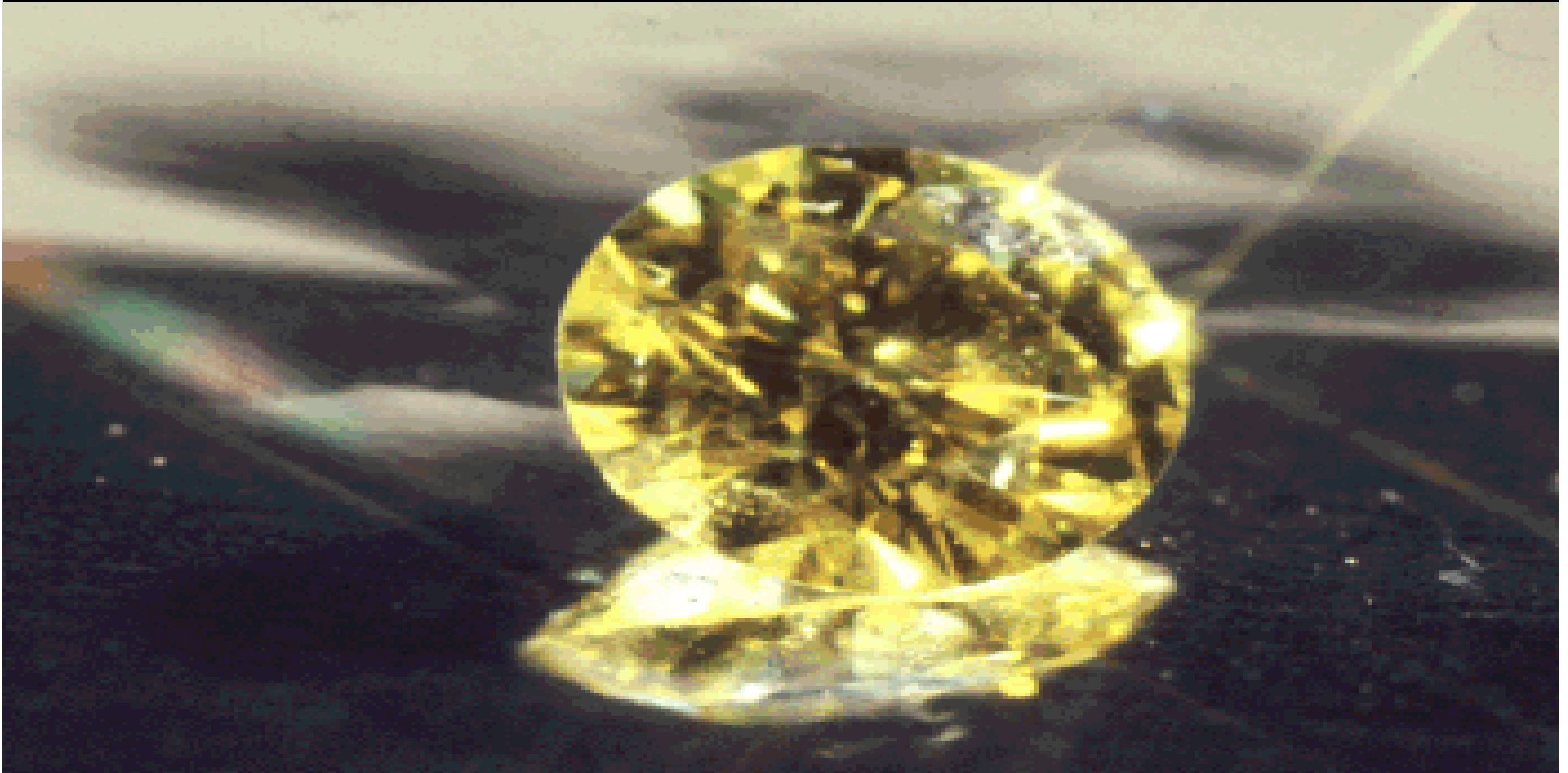


# Спинтроника – основа развития квантовых информационных технологий



**Килин С.Я.**

**Лаборатория квантовой оптики,  
Институт физики им. Б.И.Степанова, НАН Беларуси**

**Квантовые информационные технологии –  
перспективное направление,  
поддерживаемое в мире**

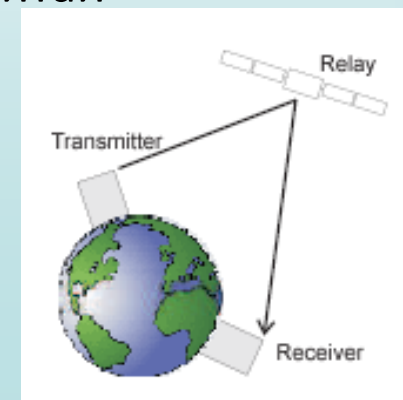
**Цифры и факты**

# Финансирование исследований по КИ в мире

■ Финансирование КИ, млн. евро в год



+ Европейское космическое агентство - 500 млн.евро



# Финансирование исследований по КИ

## Европа: 6-я рамочная программа (РП6)

<b>Основные проекты</b> (FET QIPC Proactive Initiative)	<b>Объем финансирования,</b> (млн. евро)
<b>Размерно-инвариантные КВ со светом и атомами (SCALA)</b> <small>(Scalable Quantum Computing with Light and Atoms) Philippe Grangier</small>	<b>9.4</b>
<b>Применения кубитов (QAP)</b> <small>Ian Walmsley and Martin Plenio</small>	<b>9.9</b>
<b>Европейский сверхпроводящий квантово-информационный процессор (EuroSQIP)</b> <small>European Superconducting Quantum Information Processor</small>	<b>6</b>

## Финансирование дополнительных проектов (FET Open Scheme ) по КИ в РПБ (13.6 млн. евро)

- Квантовая информация на непрерывных переменных со светом и атомами
- Контроль кубитов на джозефсоновских контактах
- Оптические решетки и квантовая информация
- Акустоэлектронный однофотонный детектор
- Технологии микроловушек для использования ионов в ловушках в квантовой информатике
- Основы квантовой информатики и вычислений
- **С 2007 года – проект EQUIND (Конструируемая квантовая информация в наноструктурированном алмазе) [2.34 млн. евро] – участвует Институт физики им. Б.И.Степанова**

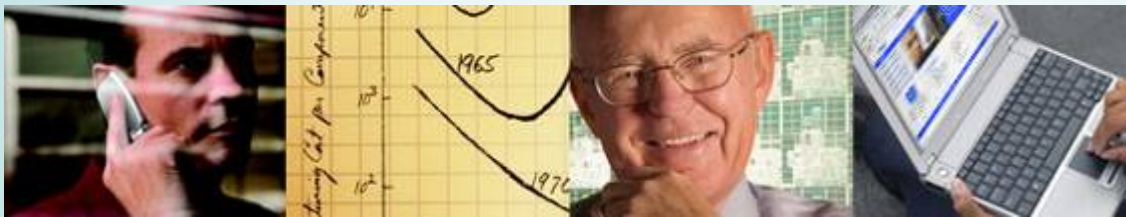
**Квантовые информационные технологии –  
перспективное направление,  
поддерживаемое в мире**

**Причины, цели  
и способы достижения**

# КВАНТОВАЯ ФИЗИКА – ОСНОВА БУДУЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

## Квантовые нанотехнологии



## Квантовые компьютеры

Мур, 1965

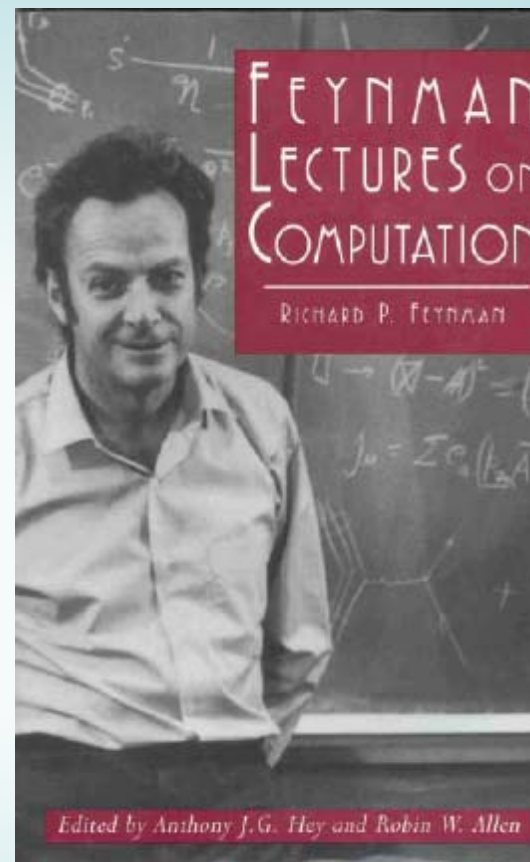
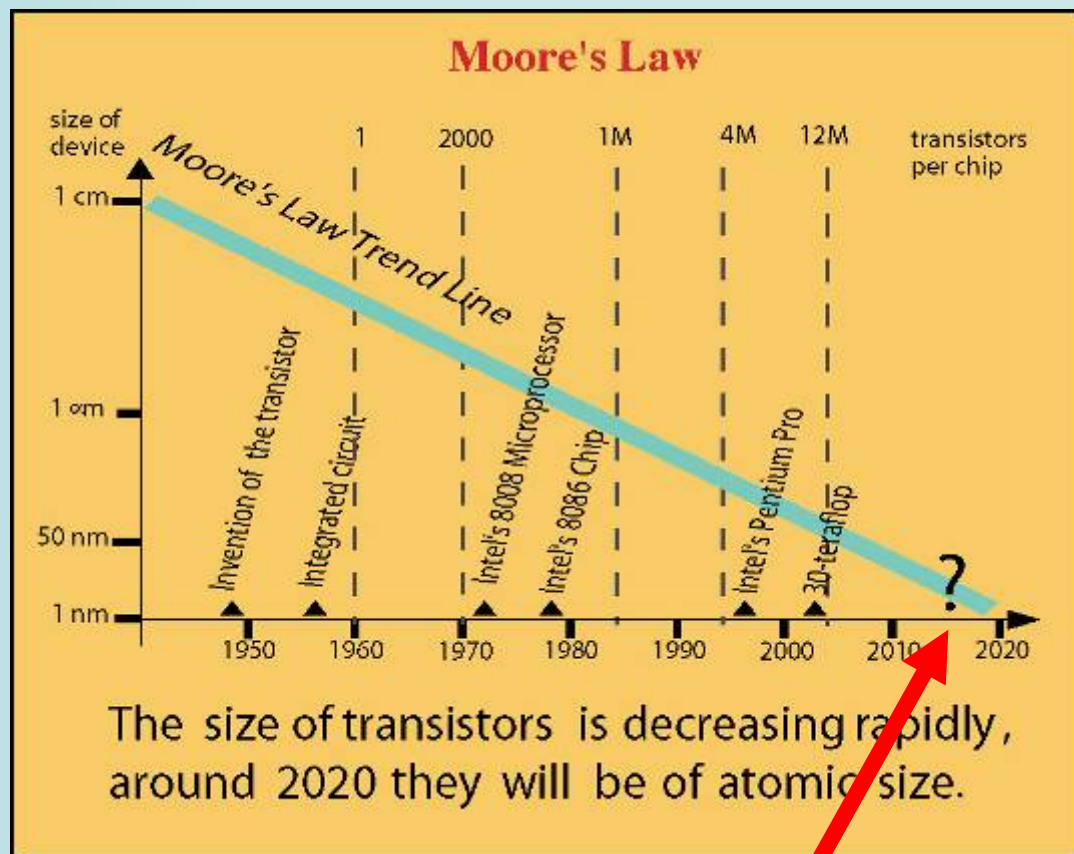


2015-20

45нм → 10нм

## Квантовая криптография

# Квантовые компьютеры



**Конец закона Мура ?**

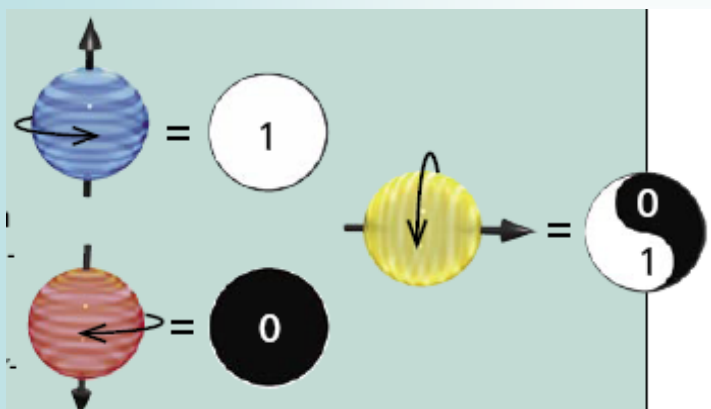
“... законы физики не препятствуют уменьшению размера элементов компьютеров до размеров атомов и тогда особенности квантового поведения становятся принципиально важными...”

Р. Фейнман (1985)



## Квантовая информация, квантовые компьютеры, кубиты, спины...

Квантовая механика обеспечивает возможность параллельной обработки информации со скоростями, недоступными в классических компьютерах, и, за счет этого, - продолжение закона Мура



$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

ЭЛЕКТРОНИКА → классический компьютер

Квантовый компьютер → СПИНТРОНИКА  
(с одиночными спинами)

**Квантовые информационные технологии –  
перспективное направление,  
поддерживаемое в мире**

**Междисциплинарный характер  
исследований в области КИ.  
Прогнозы развития  
(Road maps)**

**Кластер проектов в области КИ**  
**QIPC**  
**(Quantum Information Processing  
& Communications)**

---

**Собрания (конференции) кластерных  
проектов: (QIPC → Март 3-7, 2008, Париж )**

**Прогнозы развития:**  
**Strategic report on current status,  
vision and goals for research in Europe  
(version 1.3 March 2007)**  
**ARDA -04 (США)**

**Квантовые информационные технологии –  
перспективное направление,  
поддерживаемое в мире**

**EQUIND: старт  
в алмазную эру в спинтронике**



# THE DIAMOND AGE OF SPINTRONICS

Quantum electronic devices that harness the spins of electrons might one day enable room-temperature quantum computers—made of diamond

By David D. Awschalom,  
Ryan Epstein  
and Ronald Hanson







## SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME

**Раздел:** Information Society Technologies

**Тип проекта:** SPECIFIC TARGETED RESEARCH  
OR INNOVATION PROJECT (STREP)

**Полное название проекта:**

**E**ngineered  
**Q**uantum  
**I**nformation in  
**N**anostructured  
**D**iamond

(Конструируемая квантовая информация в  
наноструктурированном алмазе)

Proposal/Contract no.: IST-034368

6-я ЕВРОПЕЙСКАЯ  
РАМОЧНАЯ ПРОГРАММА



ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО  
ОБЩЕСТВА



ПРОЕКТ :  
КВАНТОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ В  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОМ АЛМАЗЕ



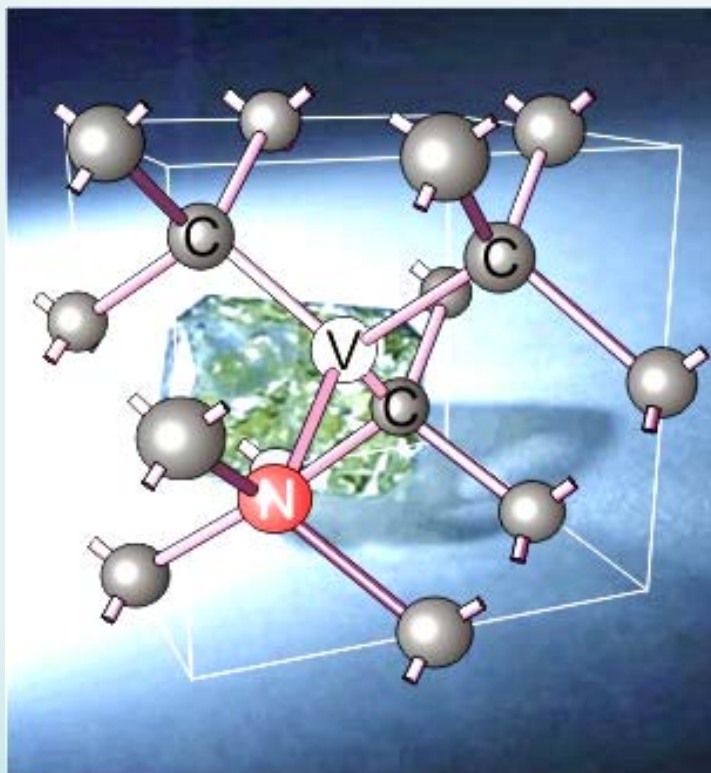
UNIVERSITY



STUTTGART



University of  
Bristol



КВАНТОВЫЙ ПРОЦЕССОР НА СПИНОВЫХ  
СОСТОЯНИЯХ NV- ЦЕНТРА В АЛМАЗЕ

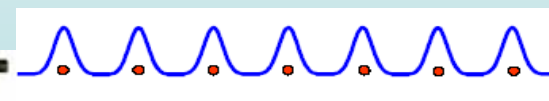
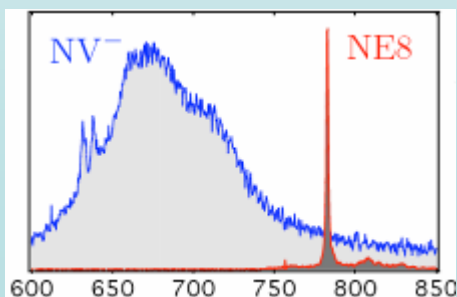




# Цели проекта



- РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МАСШТАБИРУЕМОГО ПРОЦЕССОРА КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНЫХ ЦЕНТРОВ (ДЕФЕКТОВ) В НАНОСТРУКТУРИРОВАННОМ АЛМАЗЕ С ОПТИЧЕСКИМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ И СЧИТЫВАНИЕМ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОРА
- РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНЫХ ЦЕНТРОВ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННОМ АЛМАЗЕ



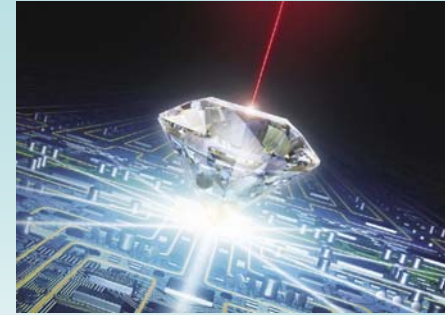
Фотонный  
пистолет

2001 год – предложена идея квантового компьютера на одиночных спинах NV центров в алмазе

[С.Я.Килин, А.П.Низовцев, Й.Врахтруп, Оптика и Спектроскопия, 91 (2001) 429]

- Почему?
- Что явилось основой?
- Что мы знали о возможностях алмаза для КК в 2001 году?





- Почему NV?

- Твердотельный вариант КК

- Доступность одиночных электронных и ядерных спинов

- Комнатные температуры

- Фотостабильность

- Что мы знали о NV в 2001?

- Детектирование одиночного NV центра ( $g^{(2)}$ )

- Спектры ФЛ (теория & эксперимент)

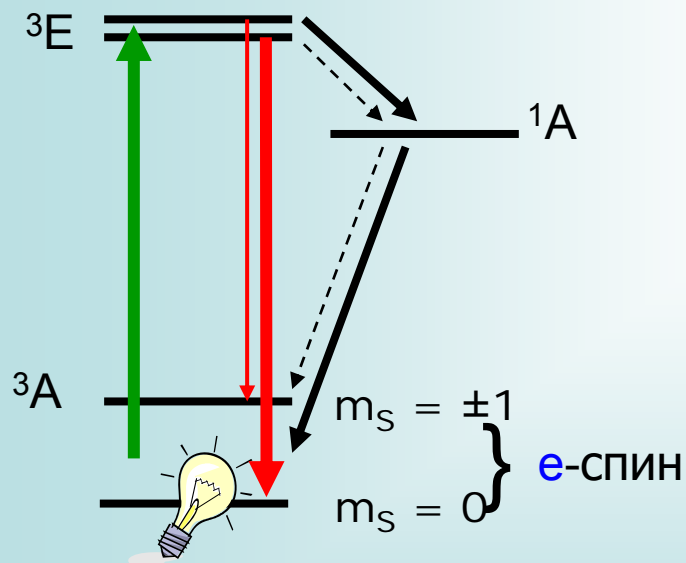
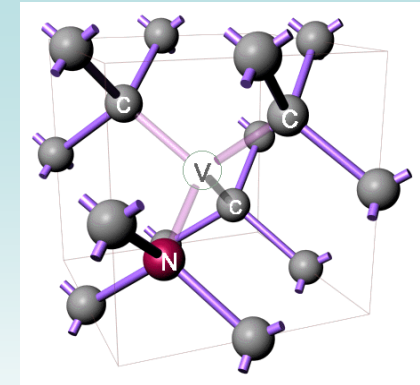
- Основное электронное состояние -- триплет

- ЭПР спектры для  $^{13}\text{C} + \text{NV}$

- Время когерентности ( $T_2 \sim 1 \mu\text{s}$ )

## • Что мы предложили?

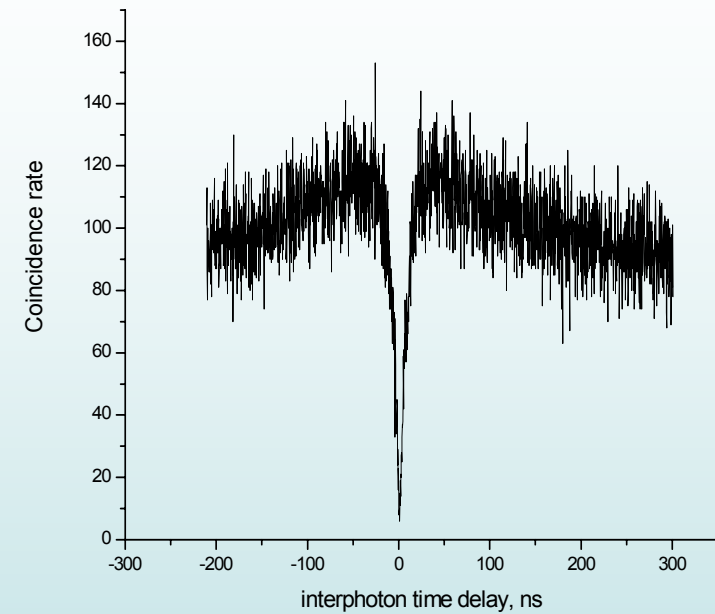
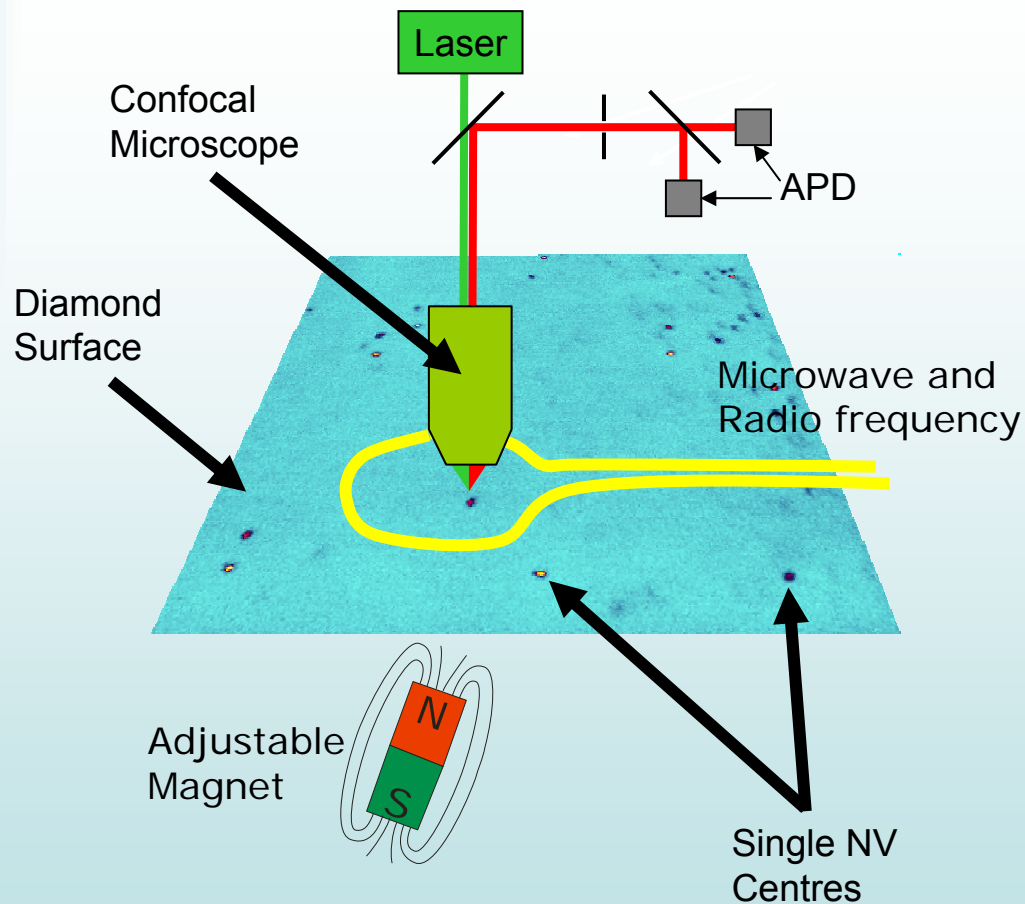
Реализовать квантовый вентиль на отдельном электронном спине NV центра и отдельном ядерном спине  $^{13}\text{C}$  в первой координационной сфере NV



## Как реализовать?

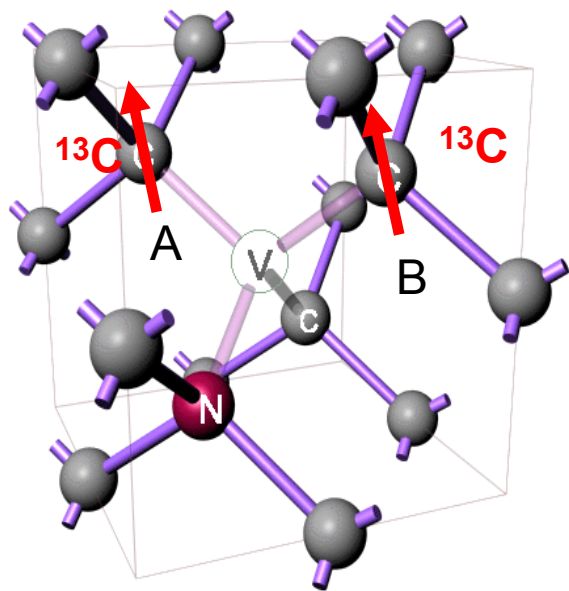
1. Выбрать одиночный NV центр методами СМС
2. Оптически поляризовать центр в одном из подуровней сверхтонкой структуры
3. С помощью РЧ и МВ полей осуществить квантовые логические операции
4. Наблюдая фотоны ФЛ осуществить квантовую томографию конечного состояния двух кубитов.

# Детектирование одиночных спинов – конфокальная микроскопия + МВ и РЧ поля

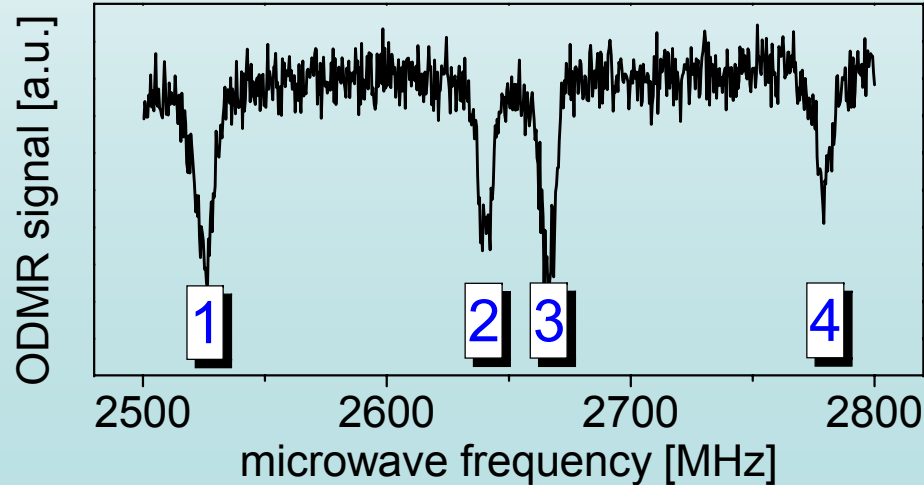
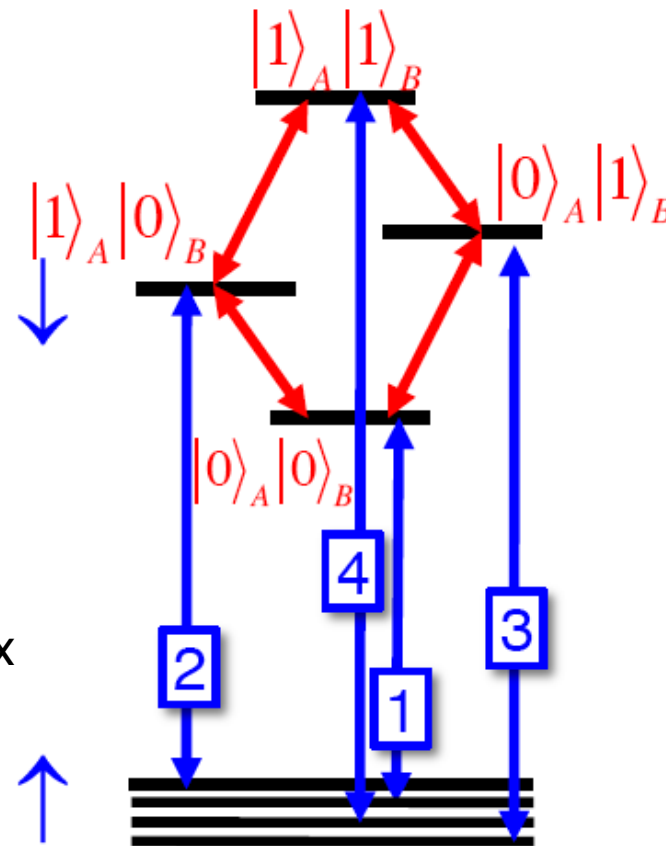


University of Stuttgart

# Квантовый регистр из NV-спина и двух ядерных спинов $^{13}\text{C}$

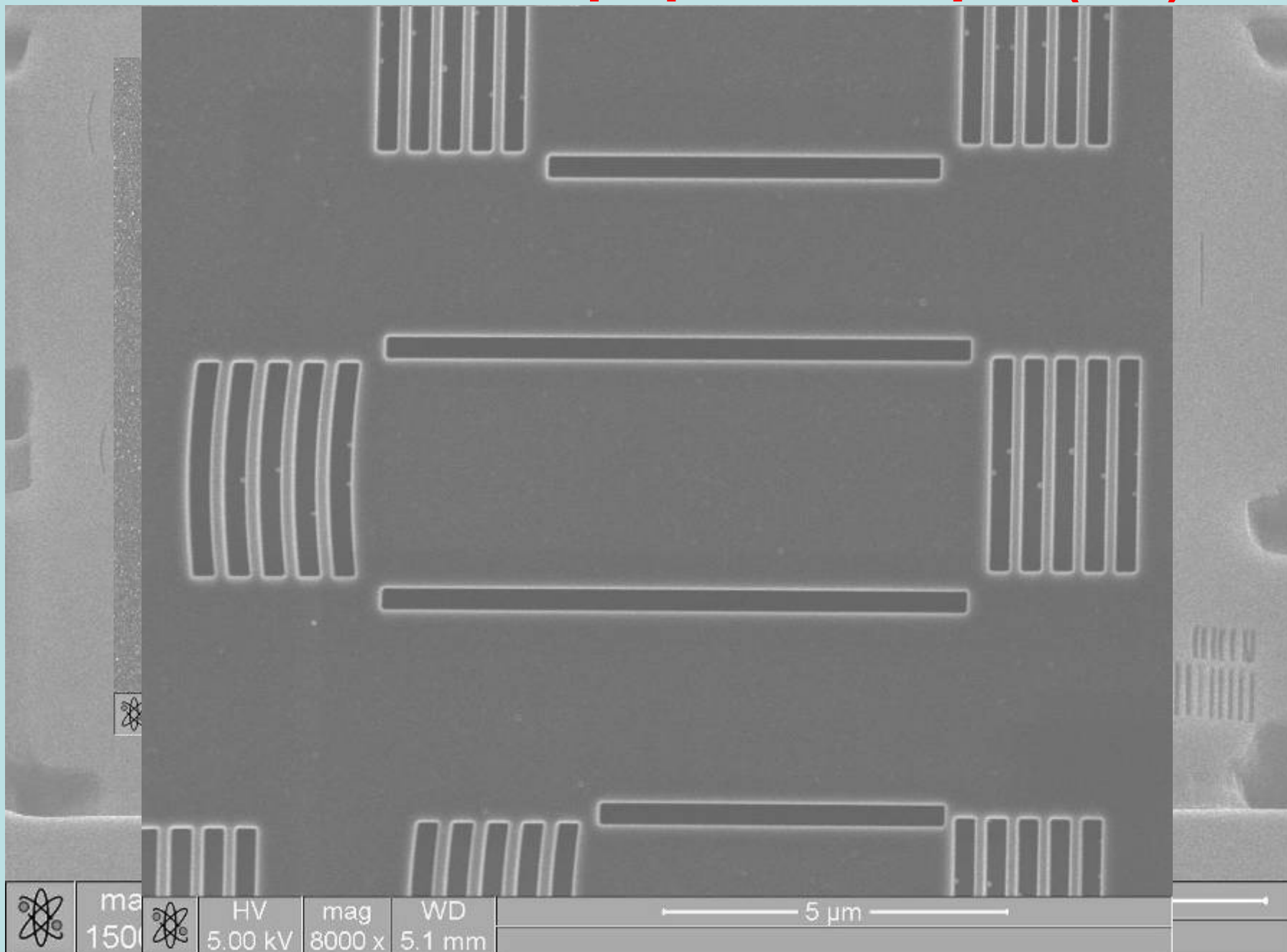


- 2 ядерных кубита
- 4 селективно адресуемых электронных и ядерных спиновых переходов кубитов



$T_2 \approx 3\text{ms}$

# Алмазные микрорезонаторы (АУ)

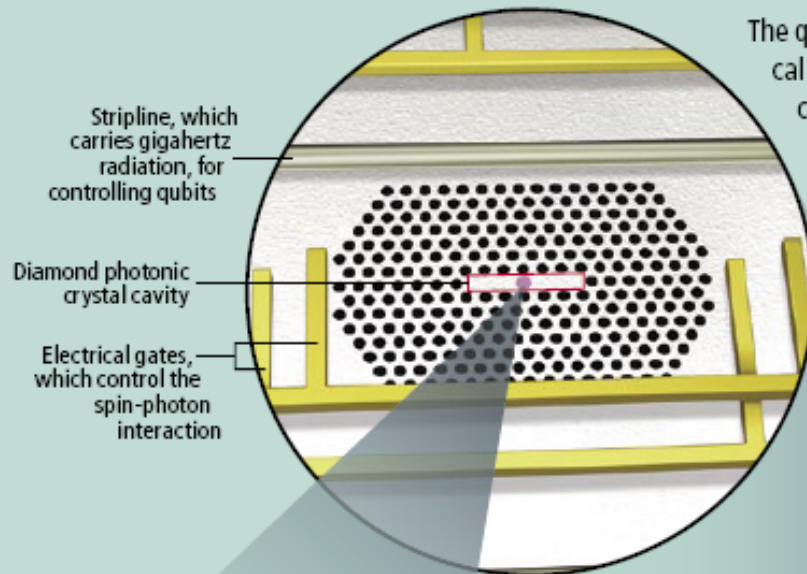




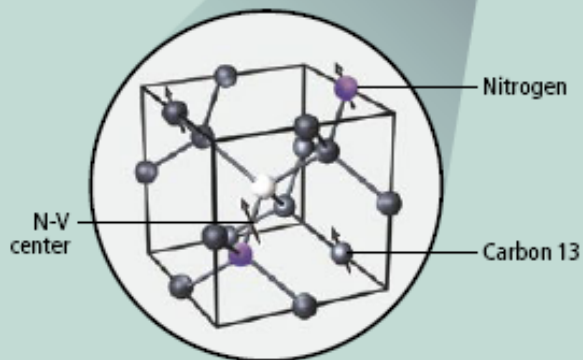
# БУДУЩЕЕ КВАНТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – СИНЕРГИЯ КВАНТОВЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

## DIAMOND MICROPROCESSOR

In the future, people wishing to carry out certain specialized tasks may use quantum computers based on diamond spintronics.



The quantum chip that drives the computer's unique abilities contains millions of optical cavities, each one consisting of an array of holes etched into the diamond. These cavities enhance the interaction between spins implanted at the center of the cavity (purple dot) and photons that carry quantum information to elsewhere on the chip. Voltages on electrodes control this interaction. Gigahertz radio waves sent along "striplines" manipulate individual spin states (qubits).



A variety of spins in each cavity perform different functions: N-V centers and nitrogen spins process data, the N-V centers interact with photons, and carbon 13 spins store data for as long as seconds.





**Квантовые информационные технологии –  
перспективное направление,  
поддерживаемое в мире**

**Апостериорный взгляд на историю  
развития исследований по КИ в РБ**

# История

---

1991 г. – первые работы по спектроскопии одиночных молекул

## Наше участие

- 1994-1996 гг. - Проект «Квантовая оптика одиночных молекул и изолированных атомов и молекулярная компьютерная память», грант БРФФИ Ф18-203;
- 1995-1996 гг. - Проект «Спектроскопия одиночных молекул», грант ННФ США РНУ-9414515, проф. П.Берман, университет Мичигана, Анн-Арбор, США;
- 1996-1997 гг. – Проект «Двухуровневые системы в спектроскопии одиночных молекул: экспериментальные и теоретические аспекты», грант Фонда «Фольксваген» проф. Фон Борцисковски, Технический Университет Кемниц, Германия; (объект – эталонная система СОМ – примесные молекулы Пц в ПТФ )

1997 г. – в Кемнице впервые в мире были выполнены эксперименты на одиночных NV центрах в алмазе!!!

1999 г. -- в фонд Фольксвагена был заявлен совместный проект «Квантовые вычисления с одиночными ядерными спинами», который не прошел...

2001 г. – Предложена идея квантового компьютера на одиночных спинах NV центров в алмазе [Й.Врахтруп, С.Я.Килин, А.П.Низовцев, Оптика и Спектроскопия, 91 (2001) 429]

Позже - совместные гранты НАТО, ИНТАС...

*Организация или участие в организации  
международных конференций*

*ICQO'2006*

*Minsk 2006*



©2006 Vadim Makarov [www.vad1.com](http://www.vad1.com)

*ICQO - серия международных конференций по квантовой оптике,  
организуемых и проводимых в Минске вот уже 20 лет.*





А.П.Низовцев  
(Минск)

С.Я.Килин  
(Минск)

J.Roch  
(Кэшон, Франция)

J.Wrachtrup  
(Штутгарт, Германия)

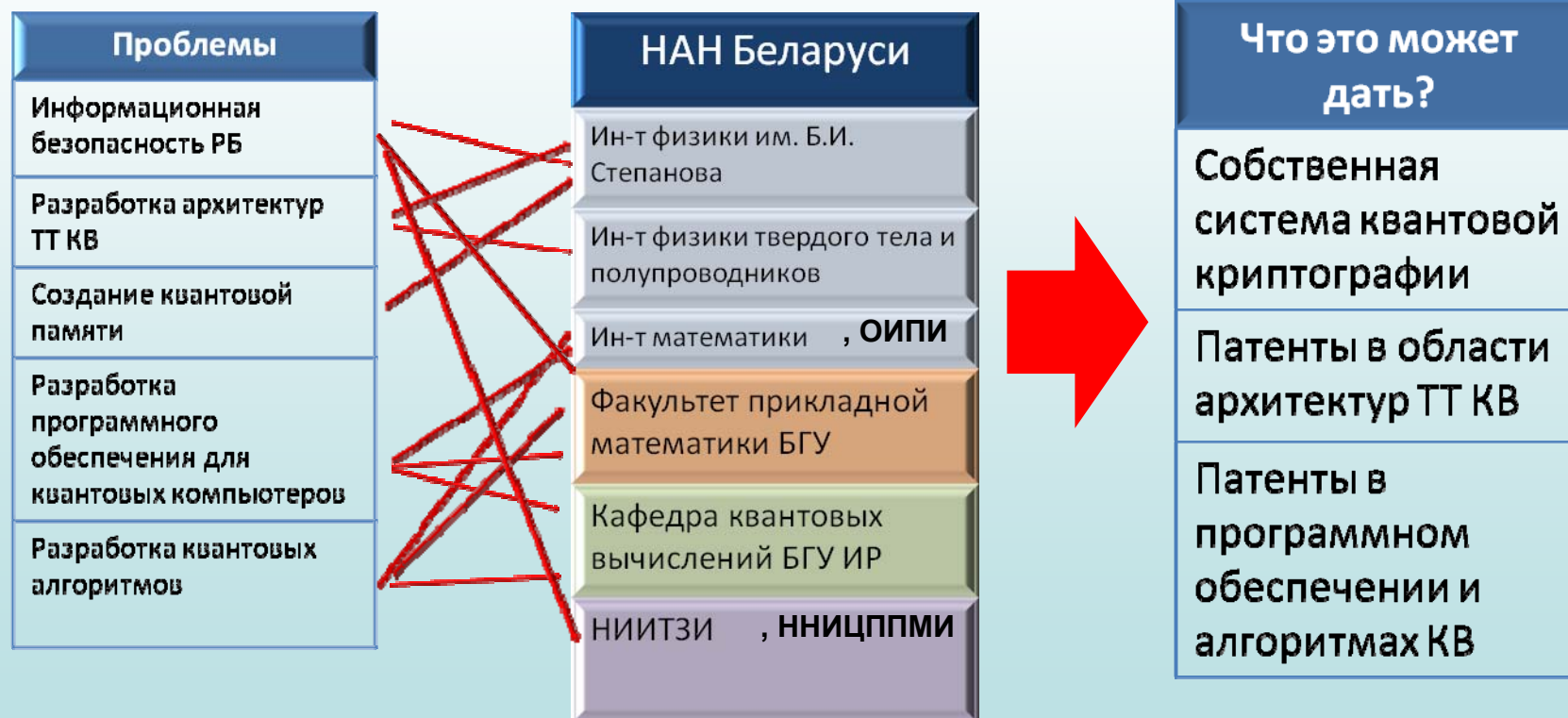
Минск, Международная конференция по квантовой оптике (ICQO'2006) 26-31 Мая 2006

ICQO'2008, VILNIUS



# Поддержка и перспективы развития квантовой информатики в Беларуси

В настоящее время по квантово-информационной тематике выполняется 8 проектов, финансируемых из бюджета союзного государства, республиканского бюджета, БРФФИ



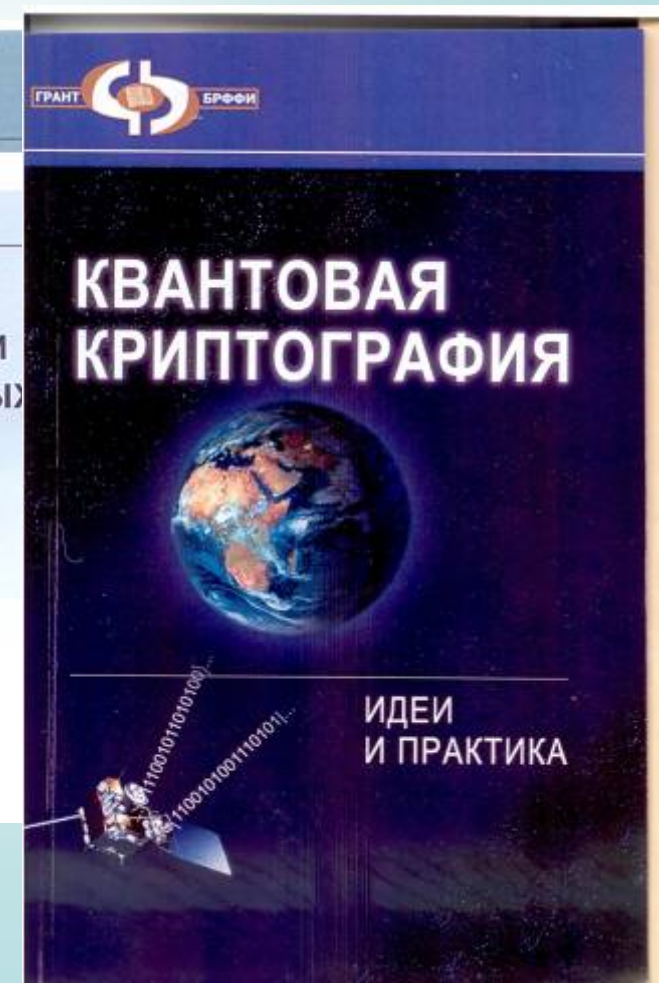
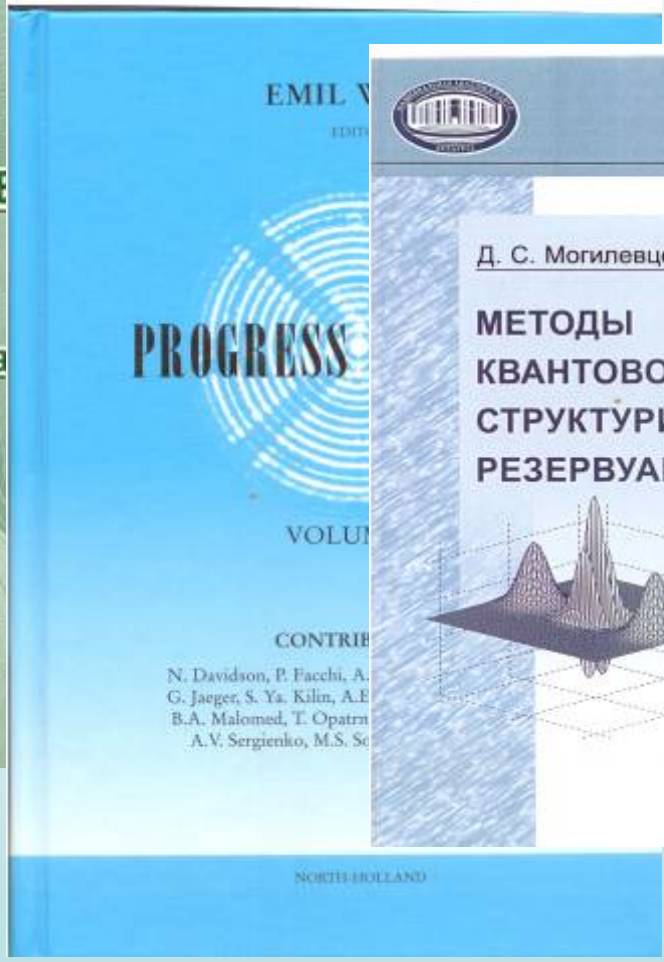


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# Успехи физических наук

Информационное сопровождение  
направления исследований в РБ

С. Я. Килин 18 г.



# Резюме

- Квантовая информатика – перспективное направление исследований с выходом на новые квантовые нанотехнологии, в т.ч. спинтронику с одиночными спинами.
- Создание квантовых компьютеров сделает прозрачной современную систему защиты информации.
- Единственный способ обеспечить информационную безопасность в условиях наличия квантовых компьютеров – развитие квантовой криптографии .
- В РБ есть кадры и база для развития квантовых информационных технологий.
- Исследования в области квантовой криптографии вышли на коммерческий уровень.
- Поддержка данной тематики в Беларуси (финансовая и информационная) – необходимость, связанная с обеспечением собственной информационной безопасности.



**Спасибо за внимание!**

