

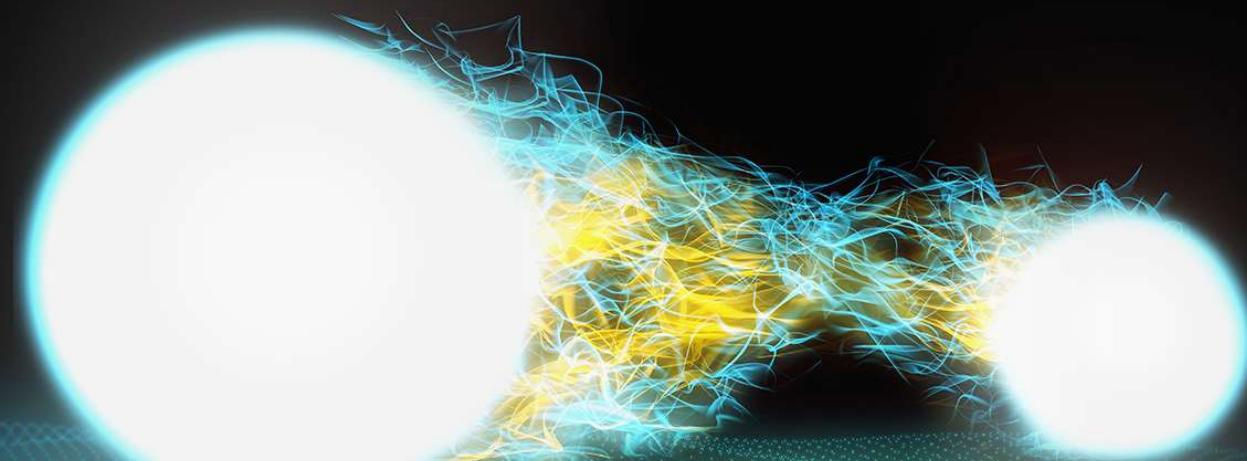
15. Erfurter TechnologieDialog | 24. April 2023

Quantentechnologien:

wissenschaftliche Spielerei oder volkswirtschaftlich relevant?

Prof. Andreas Tünnermann

fiz Forschungs- und
Industriezentrum Erfurt e.V.



HERZLICH WILLKOMMEN

Mit Unterstützung von:



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft



Landesentwicklungsgesellschaft
Thüringen mbH



Quantum technologies

The German Press 2020 - 2021

Wer baut den Quantencomputer „Made in Germany“?

Die politischen Weichen für einen deutschen Quantencomputer sind gestellt. Die Fördermittel von zwei Milliarden Euro stehen bereit. Nun bringen sich die Forschungsstandorte in Startstellung. Wer wird das Rennen machen?

Jetzt kommt die Quantentechnik in die Industrie

Der weltweit erste Quantensensor hat seine Tauglichkeit für die Großserie bewiesen. Die Mittelständler Trumpf und Sick gehen jetzt den Markt an.

QUANTENCOMPUTER IN DEUTSCHLAND

„In fünf Jahren wollen wir einen wettbewerbsfähigen Rechner“ Deutschland stellt zwei Milliarden Euro bereit für Quantencomputer. Regierungs-Berater Peter Leibinger erklärt, was damit geschehen soll.

QUANTENTECHNOLOGIE IM AUFWIND

Mehr Mut für Europas Entscheidungsträger - die Quantenkryptographie ist die erste wirklich breite und weltweite Anwendung der Quantentechnologie.

FAZ - Schlagzeilen

Quantum technologies - quo vadis

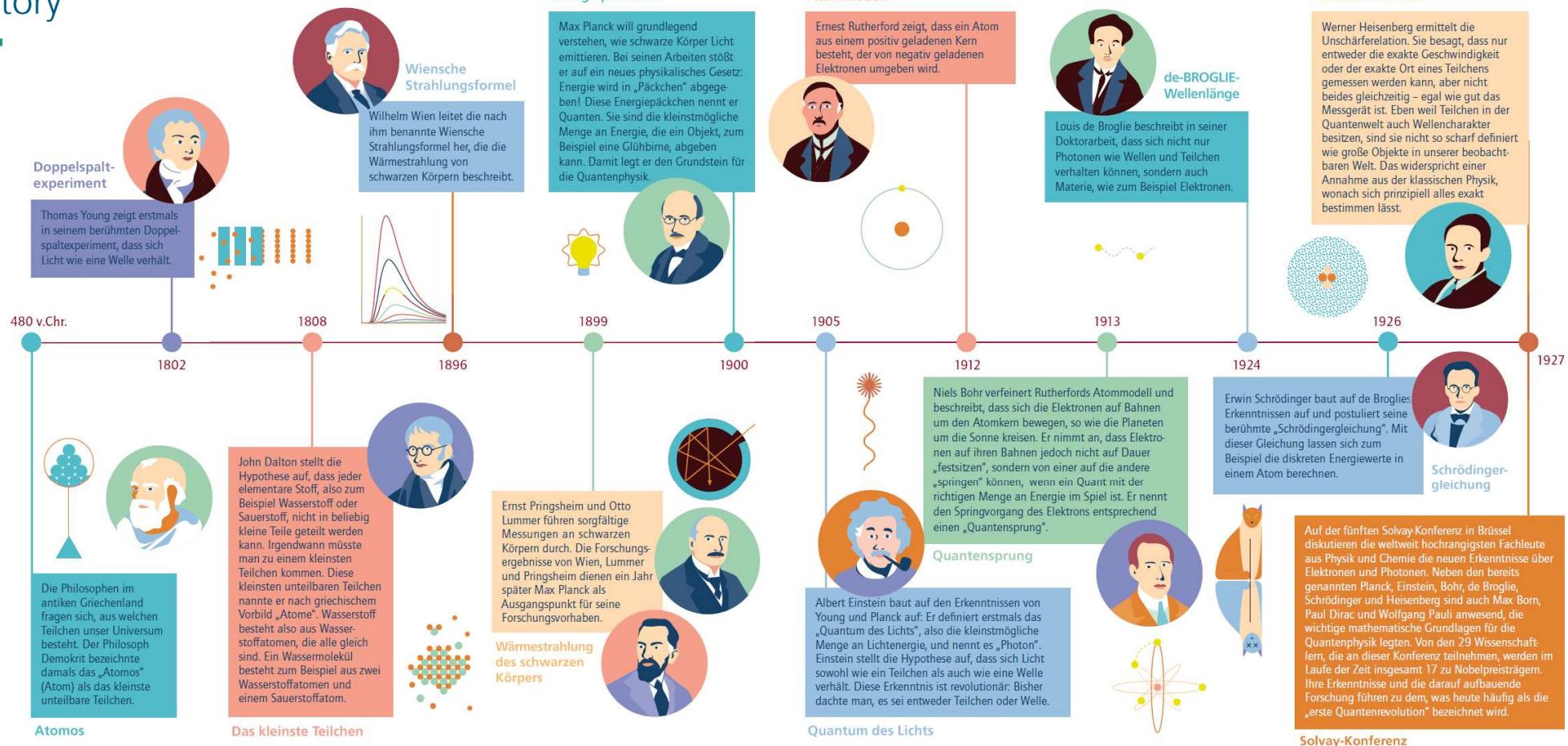
Agenda

- a brief historical outline
- phenomena of quantum physics
- the 1st quantum revolution
- the 2nd quantum revolution
- quantum-hub Thüringen
- what's next?!



Quantum technologies

History



Quantum technologies

History

480 v.Chr.

The philosophers of ancient Greece wondered what particles the world was made of. Demokrit called the smallest indivisible particle "atomos"

48



Energiepäckchen

Max Planck will grundlegend verstehen, wie schwarze Körper Licht emittieren. Bei seinen Arbeiten stößt er auf ein neues physikalisches Gesetz: Energie wird in „Päckchen“ abgegeben! Diese Energiepäckchen nennt er Quanten. Sie sind die kleinstmögliche Menge an Energie, die ein Objekt, zum Beispiel eine Glühlampe, abgeben kann. Damit legt er den Grundstein für die Quantenphysik.

1896

1899

Atommodell

Ernest Rutherford zeigt, dass ein Atom aus einem positiv geladenen Kern besteht, der von negativ geladenen Elektronen umgeben wird.



1900

1905



Louis de Broglie beschreibt in seiner Doktorarbeit, dass sich nicht nur Photonen wie Wellen und Teilchen verhalten können, sondern auch Materie, wie zum Beispiel Elektronen.

1913

1912

Niels Bohr verfeinert Rutherfords Atommodell und beschreibt, dass sich die Elektronen auf Bahnen um den Atomkern bewegen, so wie die Planeten um die Sonne kreisen. Er nimmt an, dass Elektronen auf ihren Bahnen jedoch nicht auf Dauer „festsitzen“, sondern von einer auf die andere „springen“ können, wenn ein Quant mit der richtigen Menge an Energie im Spiel ist. Er nennt den Sprungvorgang des Elektrons entsprechend einen „Quantensprung“.

Quantensprung

Albert Einstein baut auf den Erkenntnissen von Young und Planck auf. Er definiert erstmals das „Quantum des Lichts“, also die kleinstmögliche Menge an Lichtennergie, und nennt es „Photon“. Einstein stellt die Hypothese auf, dass sich Licht sowohl wie ein Teilchen als auch wie eine Welle verhält. Diese Erkenntnis ist revolutionär: Bisher dachte man, es sei entweder Teilchen oder Welle.

Quantum des Lichts

Unschärferelation

Werner Heisenberg ermittelt die Unschärferelation. Sie besagt, dass nur entweder die exakte Geschwindigkeit oder der exakte Ort eines Teilchens gemessen werden kann, aber nicht beides gleichzeitig – egal wie gut das Messgerät ist. Eben weil Teilchen in der Quantenwelt auch Wellencharakter besitzen, sind sie nicht so scharf definiert wie große Objekte in unserer beobachtbaren Welt. Das widerspricht einer Annahme aus der klassischen Physik, wonach sich prinzipiell alles exakt bestimmen lässt.



1924

1926

Erwin Schrödinger baut auf de Broglies Erkenntnissen auf und postuliert seine berühmte „Schrödingergleichung“. Mit dieser Gleichung lassen sich zum Beispiel die diskreten Energiewerte in einem Atom berechnen.



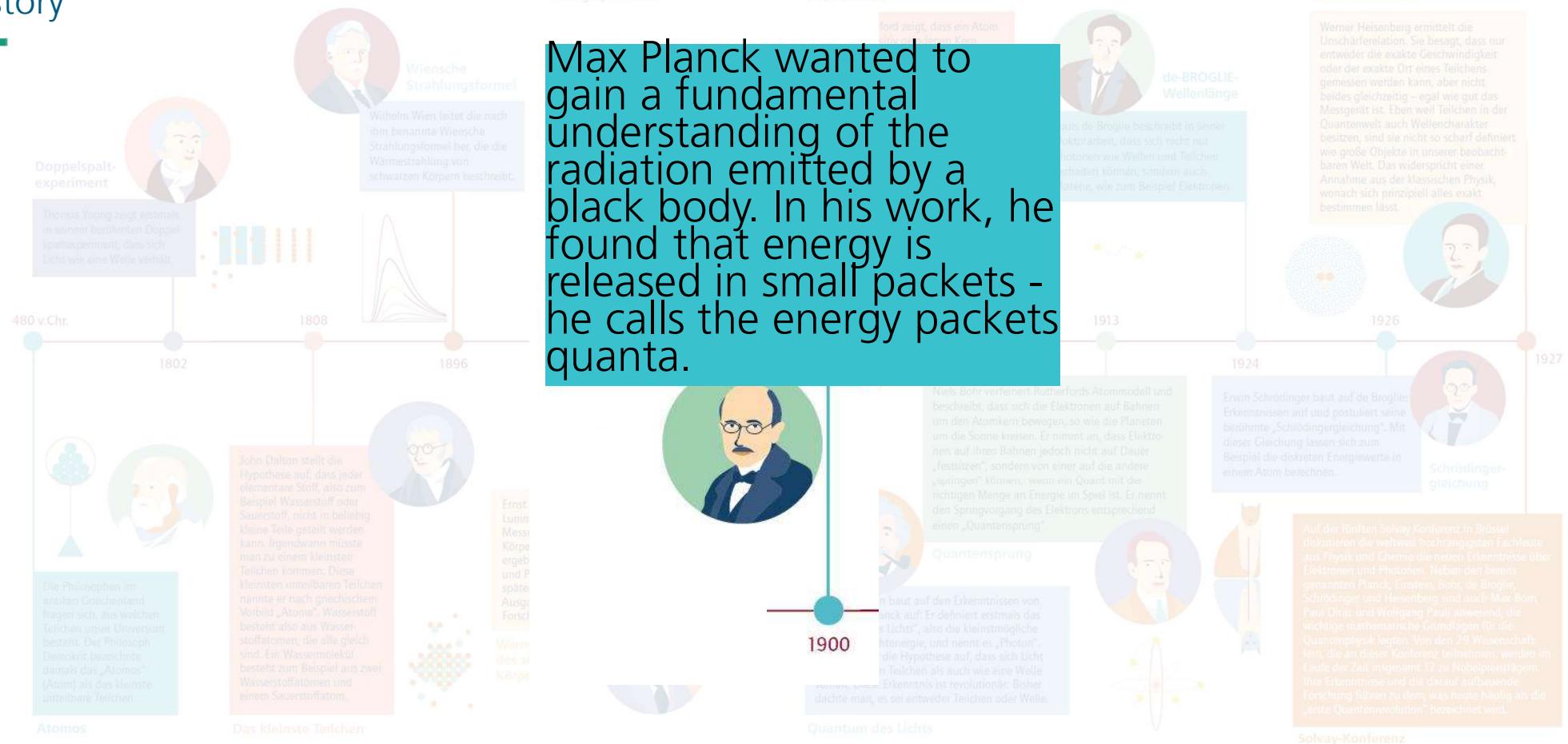
Schrödinger-Gleichung

Auf der fünften Solvay-Konferenz in Brüssel diskutieren die weltweit hochrangigsten Fachleute aus Physik und Chemie die neuen Erkenntnisse über Elektronen und Photonen. Neben den bereits genannten Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Schrödinger und Heisenberg sind auch Max Born, Paul Dirac und Wolfgang Pauli anwesend, die wichtige mathematische Grundlagen für die Quantenphysik legten. Von den 29 Wissenschaftlern, die an dieser Konferenz teilnahmen, werden im Laufe der Zeit insgesamt 17 zu Nobelpreisträgern: Ihre Erkenntnisse und die darauf aufbauende Forschung führen zu dem, was heute häufig als „jede Quantentechnologie“ bezeichnet wird.

Solvay-Konferenz

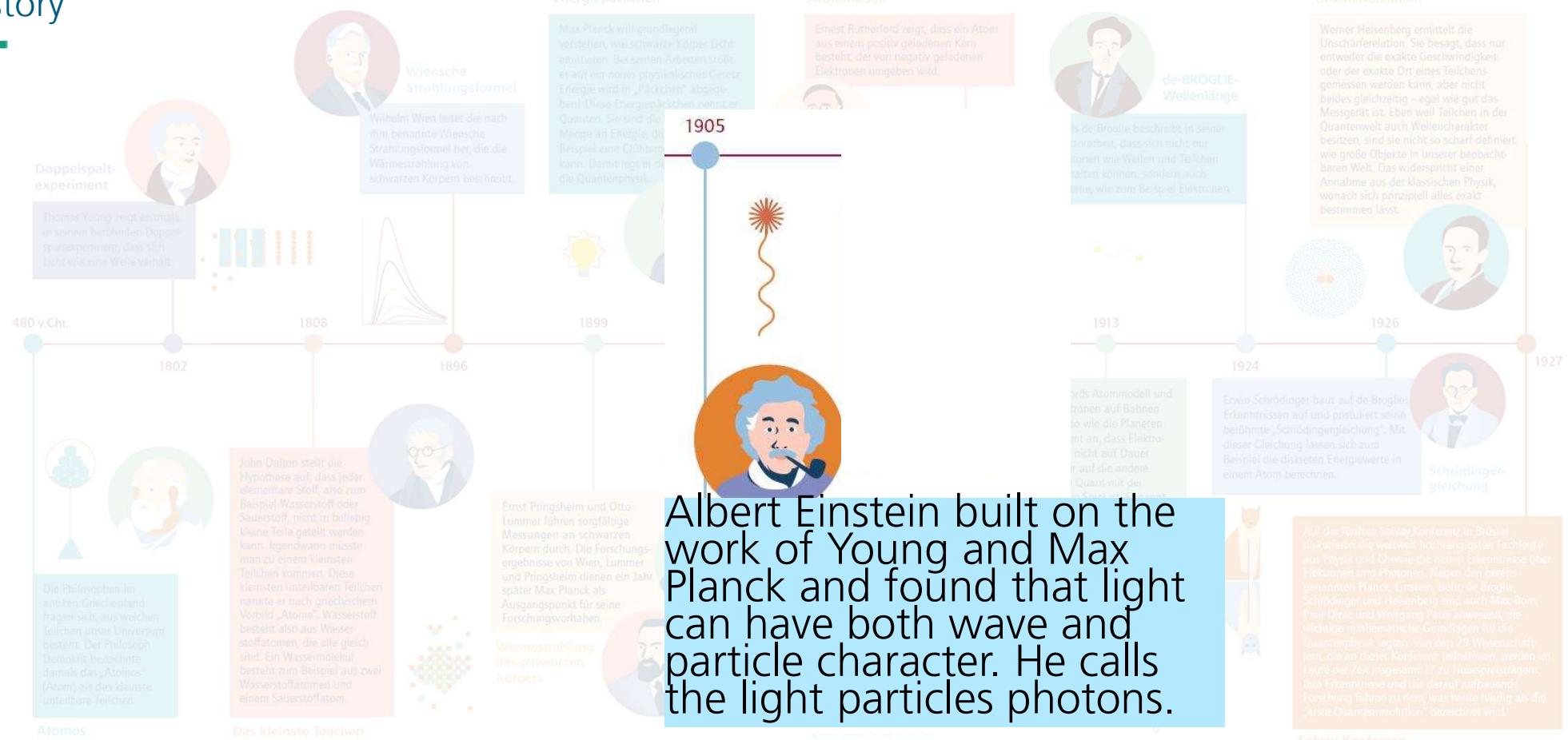
Quantum technologies

History



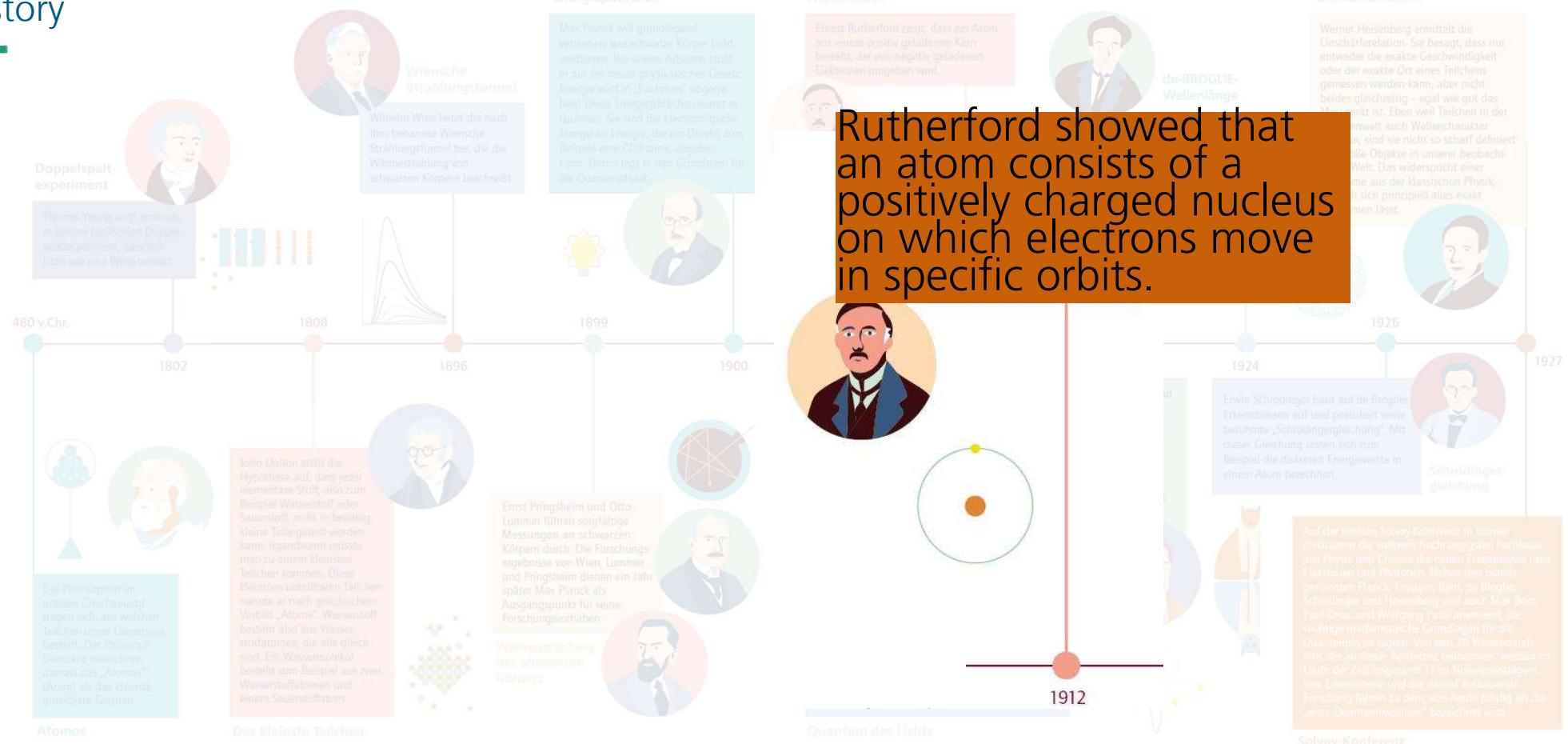
Quantum technologies

History



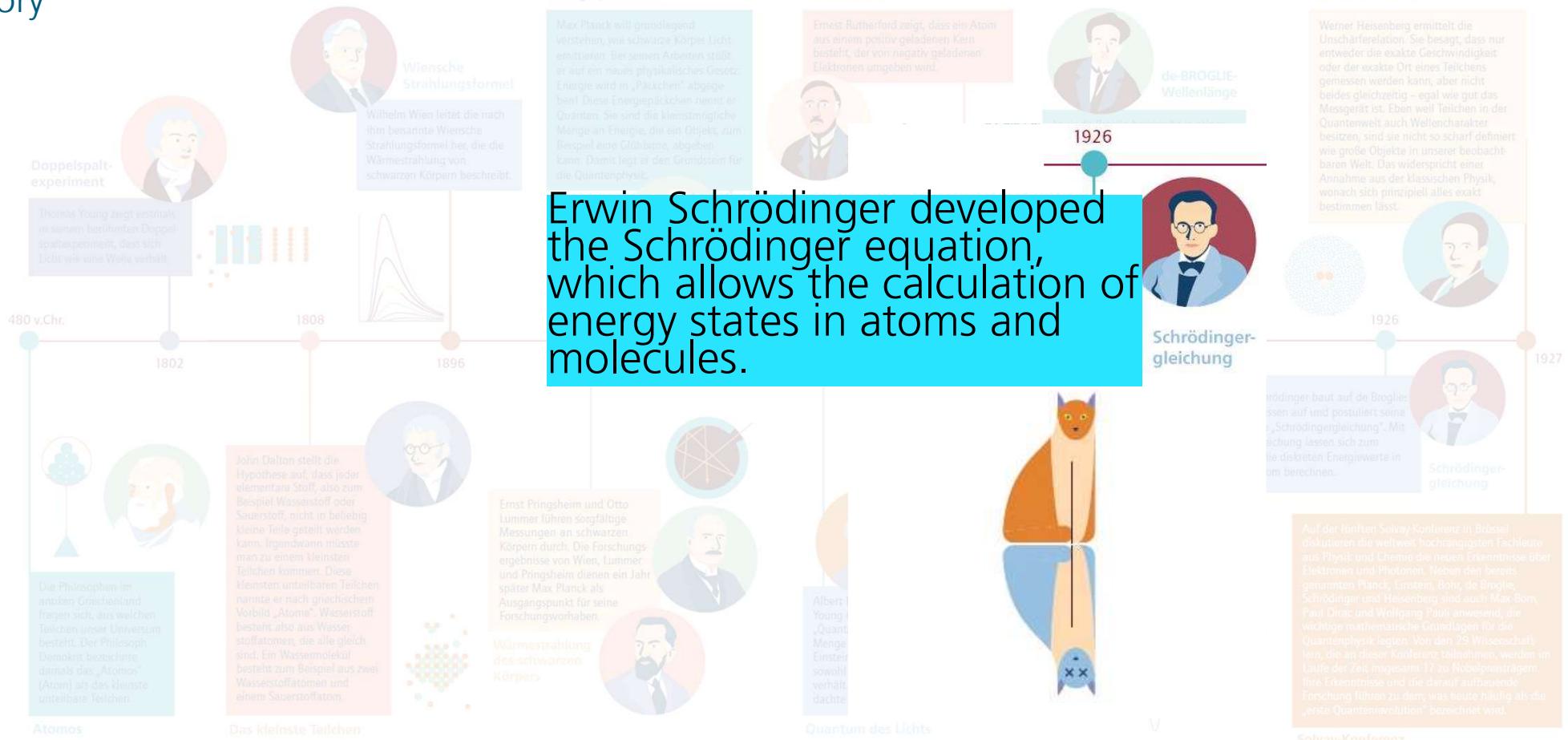
Quantum technologies

History



Quantum technologies

History



Quantum technologies

History



Werner Heisenberg determined the uncertainty principle. It states that the position and speed of an object can never be precisely determined at the same time - a contradiction to classical physics.

Quantum technologies

History

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

23. Jahrgang 29. November 1935 Heft 48

Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik.
Von E. SCHRÖDINGER, Oxford.

Inhaltsübersicht.

§ 1. Die Physik der Modelle.

§ 2. Die Statistik der Modellvariablen in der Quantenmechanik.

§ 3. Beispiele für Wahrscheinlichkeitsvoraussagen.

§ 4. Kann man der Theorie ideale Gesamtheiten unterlegen?

§ 5. Sind die Variablen wirklich verwaschen?

§ 6. Der bewußte Wechsel des erkenntnistheoretischen Standpunktes.

Gebilde, das sich mit der Zeit verändert, das verschiedene *Zustände* annehmen kann; und wenn ein Zustand durch die nötige Zahl von Bestimmungsstücken bekannt gemacht ist, so sind nicht nur alle anderen Stücke in diesem Augenblick mit gegeben (wie oben am Dreieck erläutert), sondern ganz ebenso alle Stücke, der genaue Zustand, zu jeder bestimmten späteren Zeit; ähnlich wie die Beschaffenheit eines Dreiecks an der Basis seine

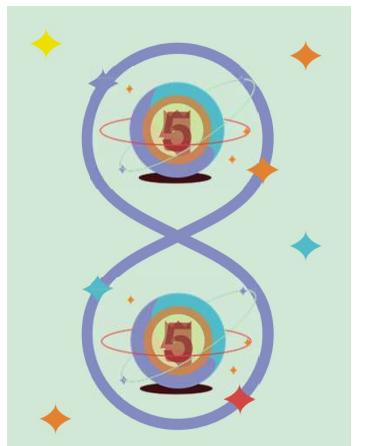
Quantum physics

Explained

- **Superposition** is like a spinning coin:
as long as we don't "measure" it, we cannot tell if it is head or tail.



- **Entanglement** is like two spinning coins:
once, one coin's side is determined, the other one will show the opposite result.



Quantum Physics

Superposition



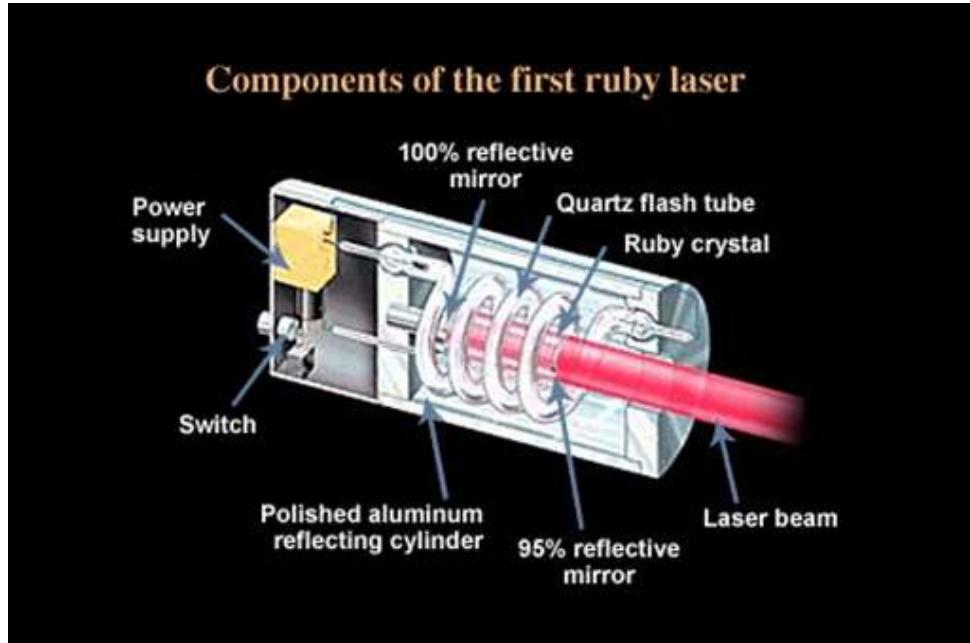
$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{alive}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{dead}\rangle$$

First quantum revolution

The sixties



Theodore Maiman



utilization of collective quantum phenomena

But what to do with a laser?



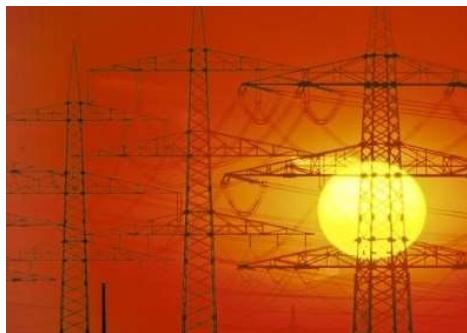
Arthur Schawlow

But what to do with a laser?



Markets

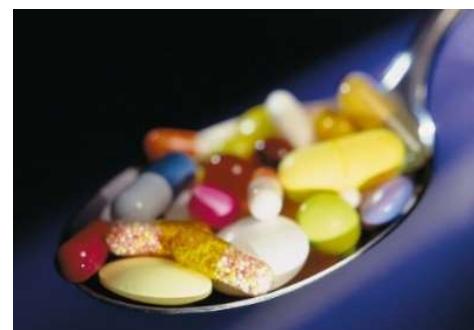
energy



mobility



environment

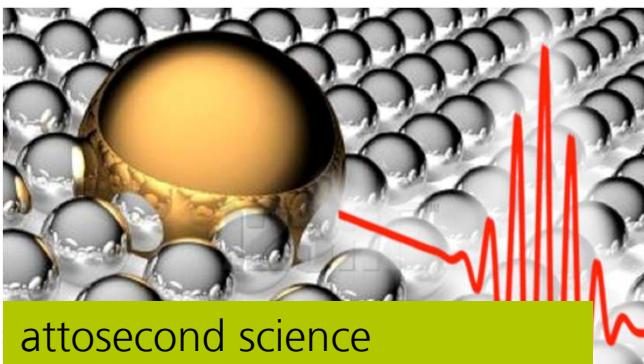


medical

communication

security

Challenges in fundamental sciences



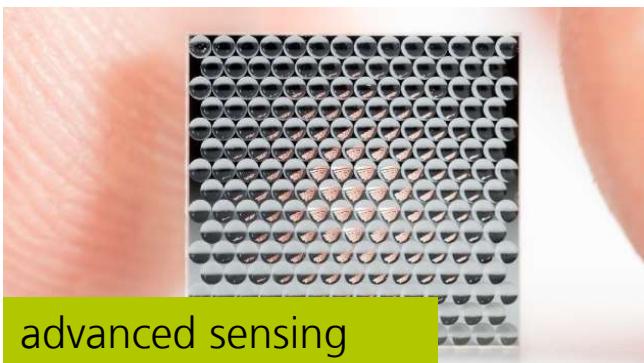
attosecond science



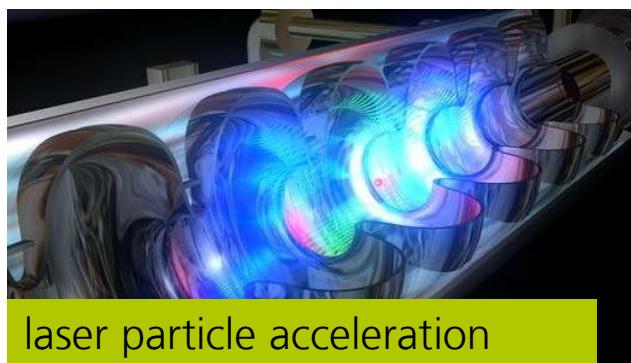
molecular scale imaging



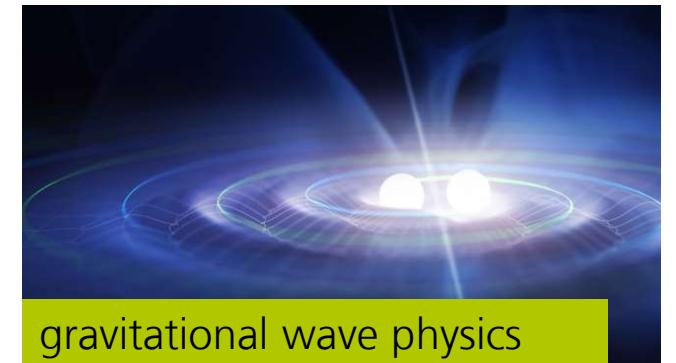
quantum computing



advanced sensing

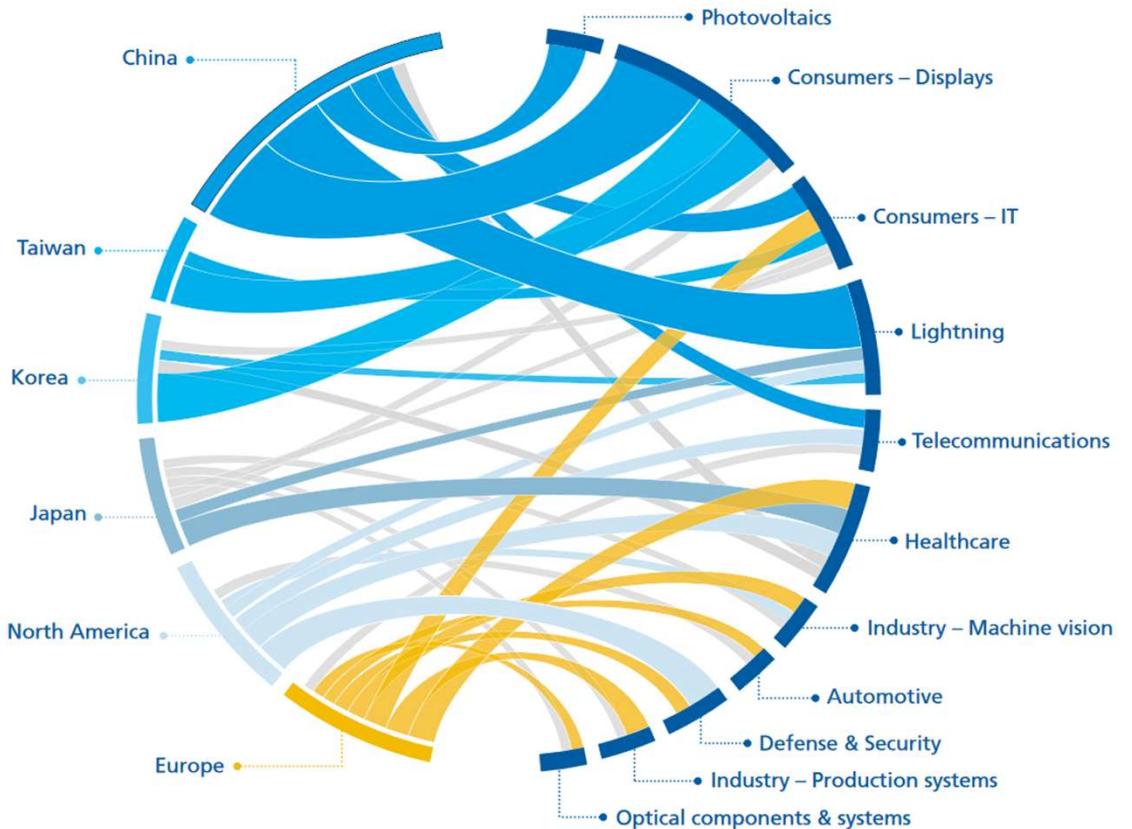
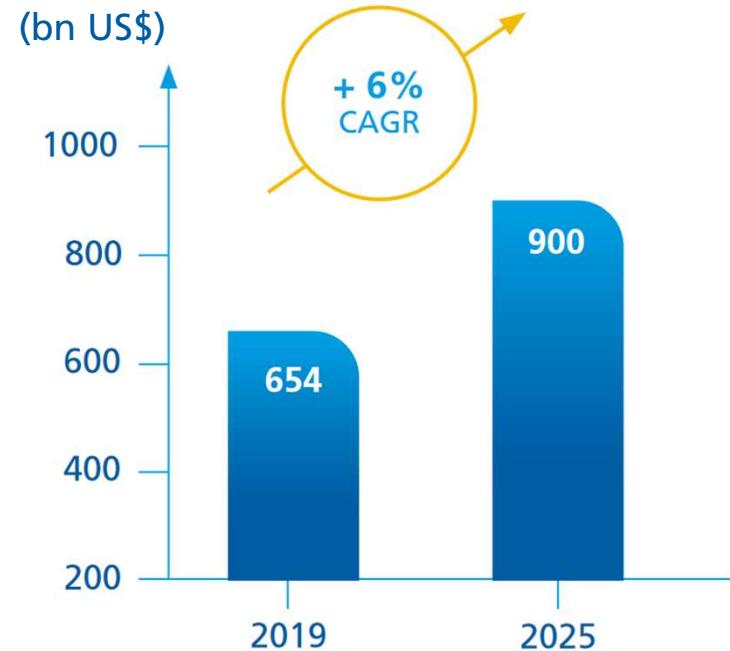


laser particle acceleration



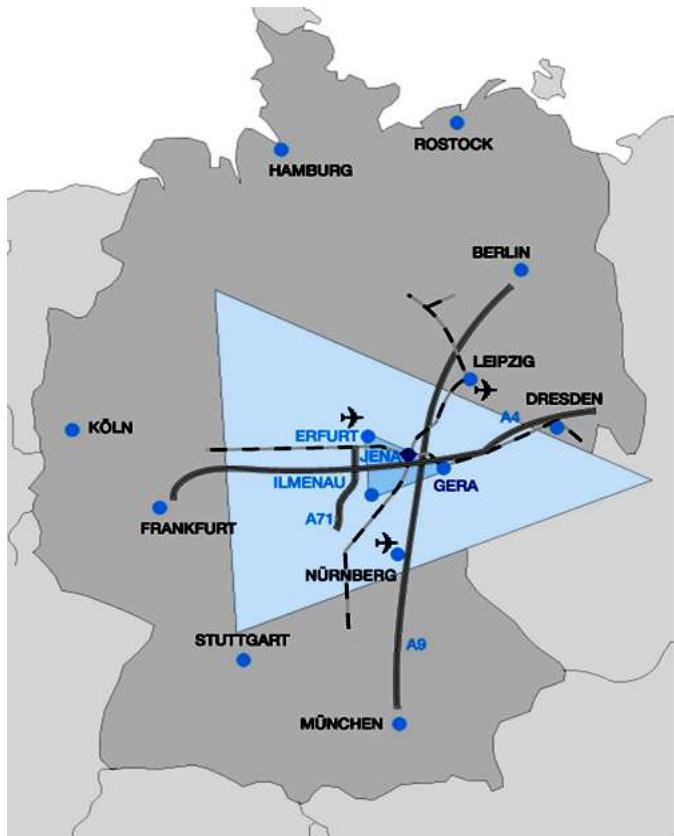
gravitational wave physics

World market photonics



Optics and photonics region

Economic data in the field of optical technologies



Enterprises	180
Turnover	~ 3,3 B€
R&D rate	12%
Export rate	67 %
Employees of which in research institutes	14,600 1,600
Turnover development since 2008	+ 6 % p.a.

© OptoNet e.V. 2020

...more consequences from the 1st quantum revolution



Quantum Technologies

Moving towards the 2nd quantum revolution

"**Schrödinger's cat is now fat**", G. Blatter, Nature **406**, 25–26 (2000), <https://www.nature.com/articles/35017670>



"Reincarnation can save Schrödinger's cat", Z. Merali, Nature **454**, 8-9 (2008), <https://www.nature.com/news/2008/080702/full/454008a.html>

"Ultrafast creation of **large Schrödinger cat states** of an atom", K. G. Johnson, et al., Nature Comm. **8**, 697 (2017), <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00682-6>

**utilization of isolated quantum systems
(entanglement / superposition)
for macroscopic applications**

Quantum Technologies

Moving towards the 2nd Quantum Revolution

Understanding [...] the physical laws of the microscopic realm – resulted in ground-breaking technologies such as the transistor and the laser. Now, our growing ability to manipulate quantum effects [...] is paving the way for a second quantum revolution.

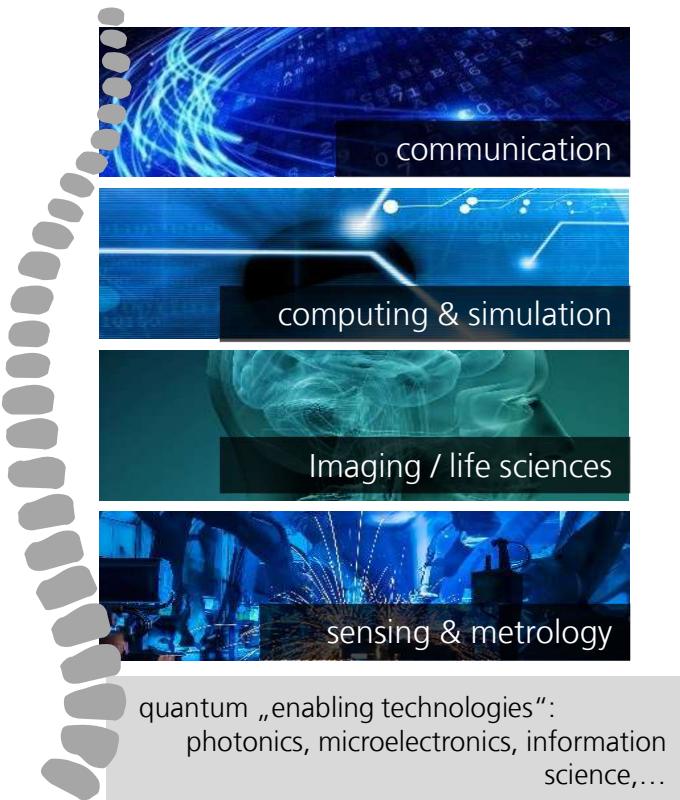
European Quantum Manifesto

Quantum technologies [...] will lead to a wave of new technologies that will create many new businesses [...] including secure communication networks, sensitive sensors for biomedical imaging and fundamentally new paradigms of computation [...] and will be the decisive factor for success in many industries and markets.

Quantum Technologies Flagship Intermediate Report

New markets

Applications of quantum technologies of the 2nd generation



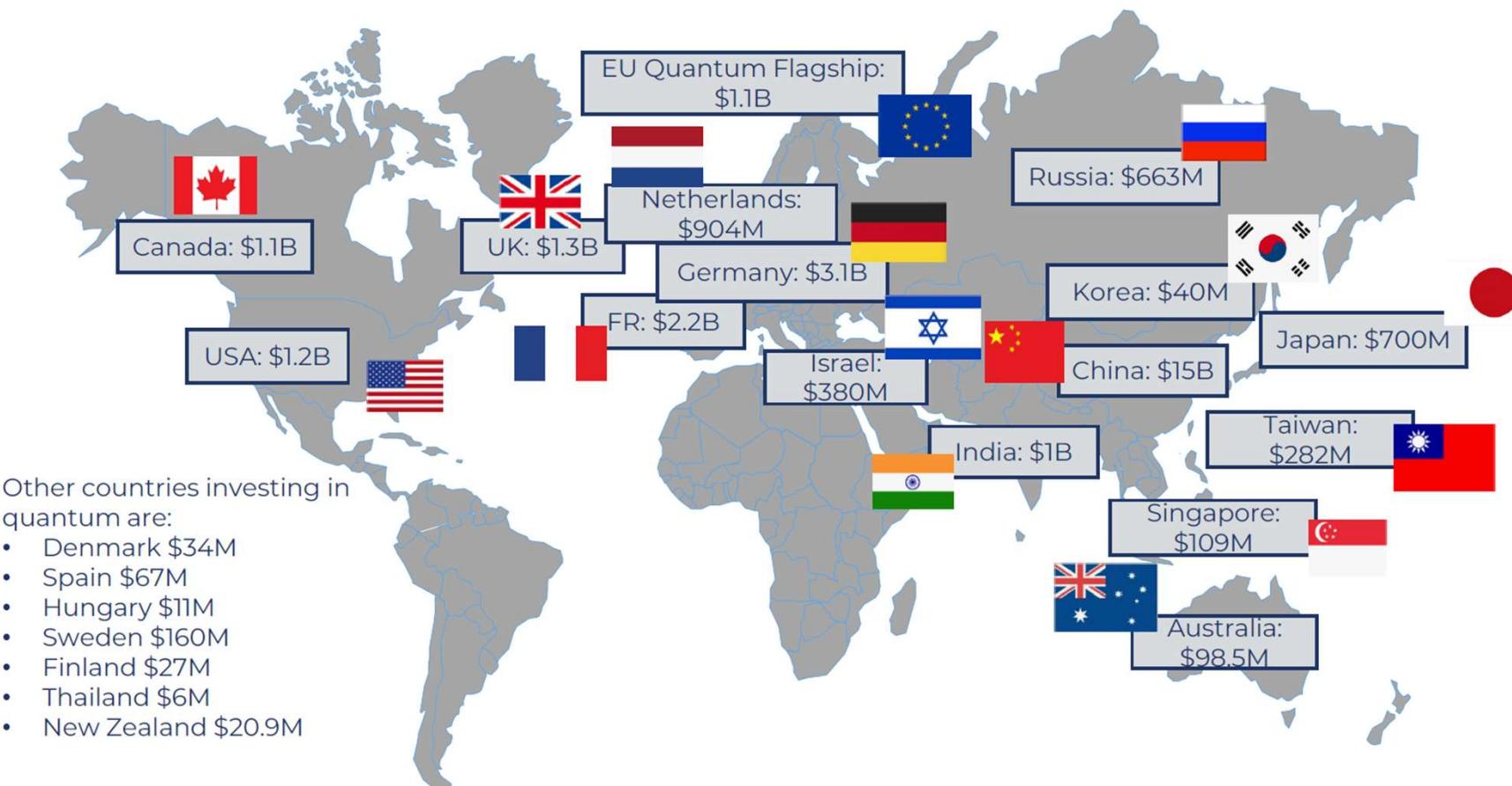
quantum „enabling technologies“:
photonics, microelectronics, information
science,...



<https://www.bmbf.de/de/quantentechnologien-7012.html>, <https://qt.eu/> / https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf , New J. Phys. 20 (2018) 080201, https://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie_bf.pdf, China's XIII. 5-year plan: <http://en.ndrc.gov.cn/newsrelease/201612/P020161207645765233498.pdf>

Quantum technologies

Public funding – current worldwide investments reaching almost \$30billion



Source: Yole – Quantum Technologies 2023

Quantum technologies

Market forecast 2022 - 2030



Source: Yole – Quantum Technologies 2023

Seite 27

ACP and quantum technologies

Quantum technology in Germany



Forschungslandschaft Quantentechnologien

In Deutschland arbeiten 85 der insgesamt 457 europäischen Forschungsgruppen.

- Quantencomputer und -simulation
- Quantenkryptografie und -kommunikation
- Quantensorik und -metrologie

Mehr Informationen zu den Forschungsgruppen unter
<http://europe.eu/db/groups/map>



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Technologiezentrum

* Quelle: VDI Technologiezentrum GmbH, bzw. <http://europe.eu/db/groups/map> /
www.quantentechnologien.de/qt-in-deutschland.html

Quantum technologies in Thüringen

Core activities



Communication



Computing & Simulation



Imaging

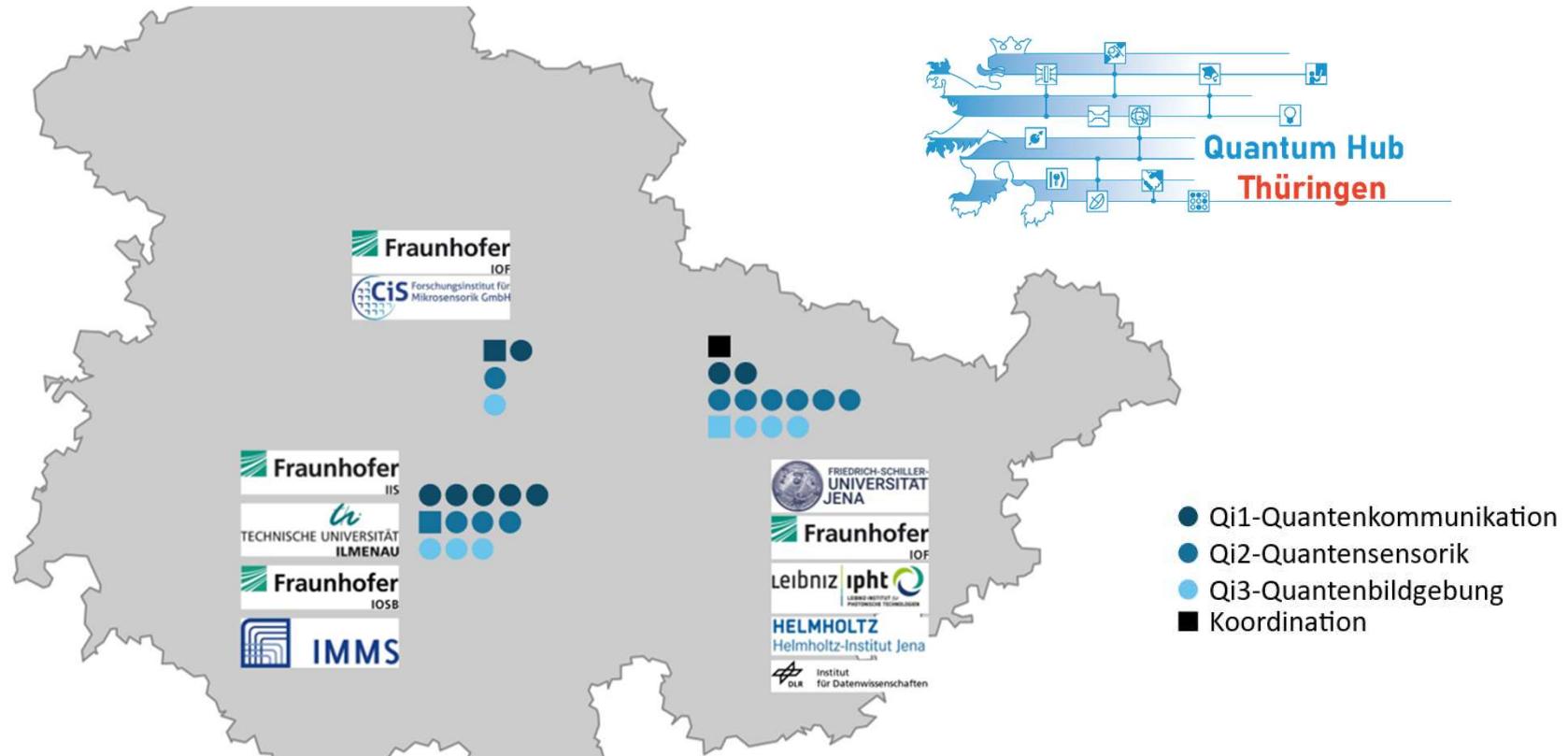


Sensors & Metrology

photonics:
an enabling technology for QT



Quantum Hub Thüringen



Quantum technologies in Jena

People...



Stefanie Gräfe
Quantum optics (theory)



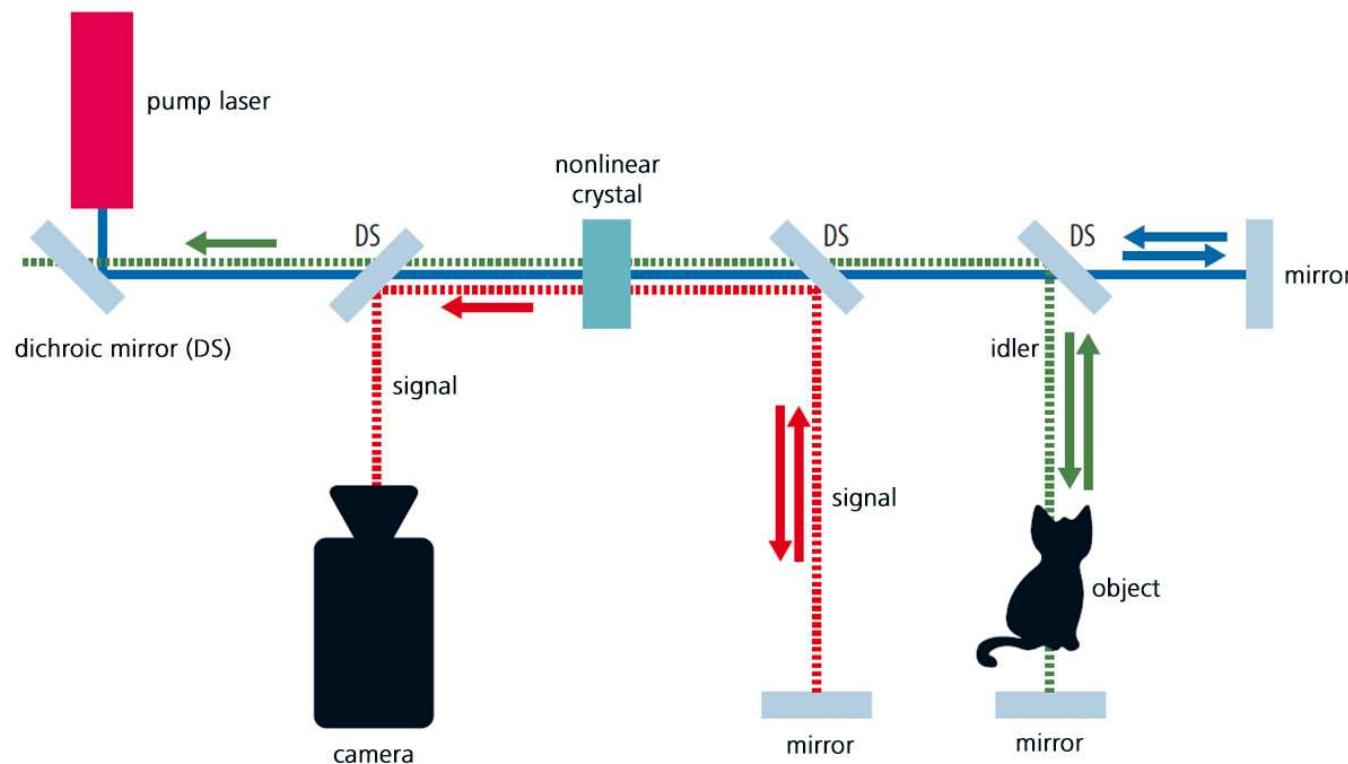
Uwe Zeitner
micro structure technology



Thomas Pertsch
nano & quantum optics

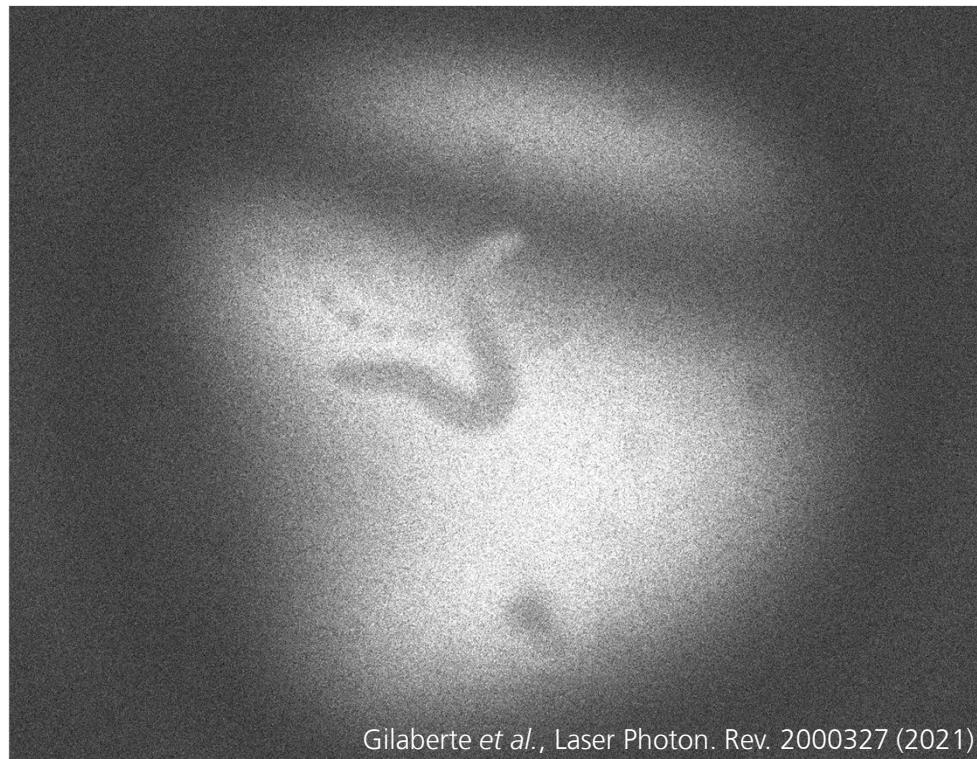
Quantum imaging

imaging with undetected photons



Quantum imaging

Video rate recording



Gilaberte et al., Laser Photon. Rev. 2000327 (2021)

Quantum Communication

Why?

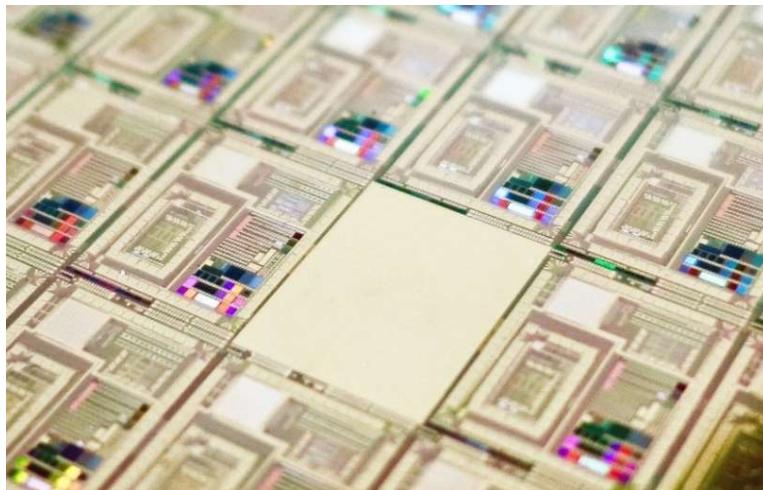


Reestablishment of
SECURE Communication
and **TRUST**

Quantum Communication

Why?

Increasingly clever quantum-algorithms on increasingly powerful quantum computers bring quantum hacking of classical encryption within reach



**MIT
Technology
Review**

Computing

How a quantum computer could break 2048-bit RSA encryption in 8 hours

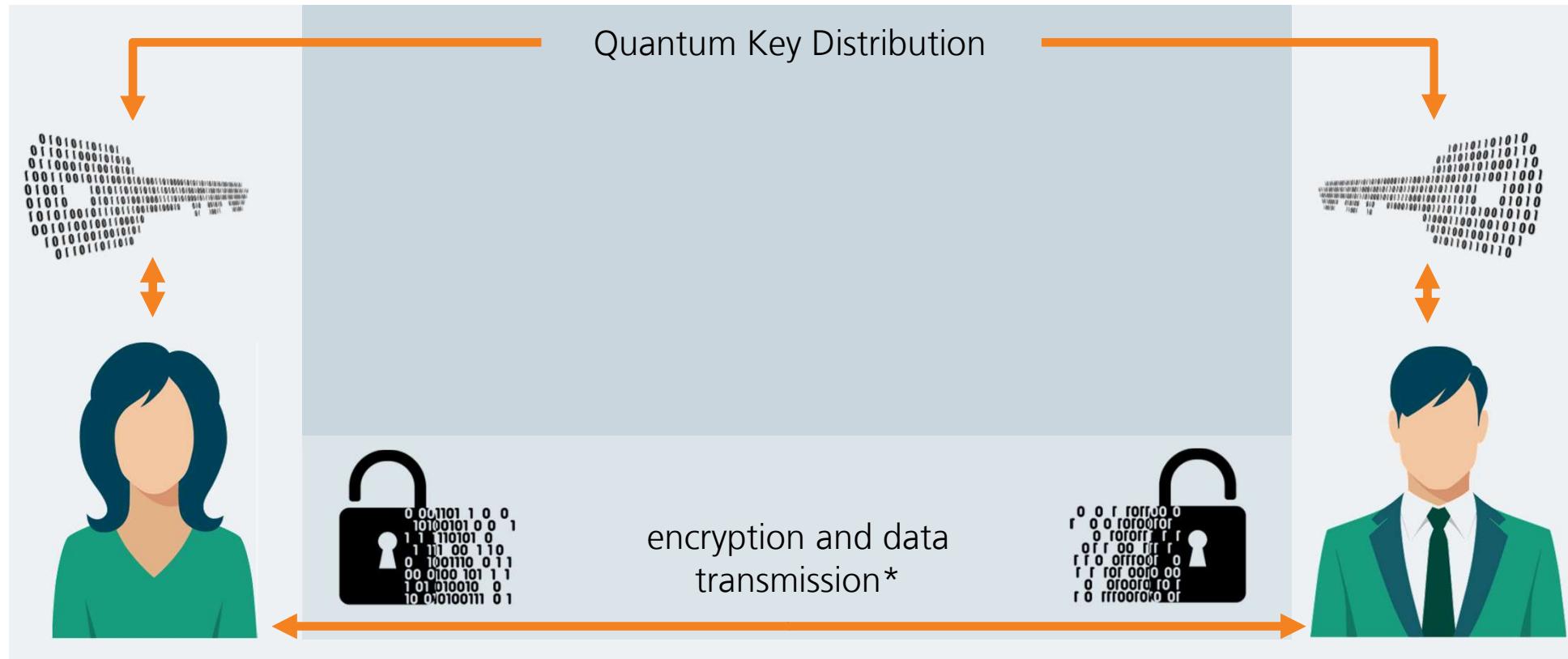
A new study shows that quantum technology will catch up with today's encryption standards much sooner than expected. That should worry anybody who needs to store data securely for 25 years or so.

by Emerging Technology from the arXiv

May 30, 2019

Quantum Communication

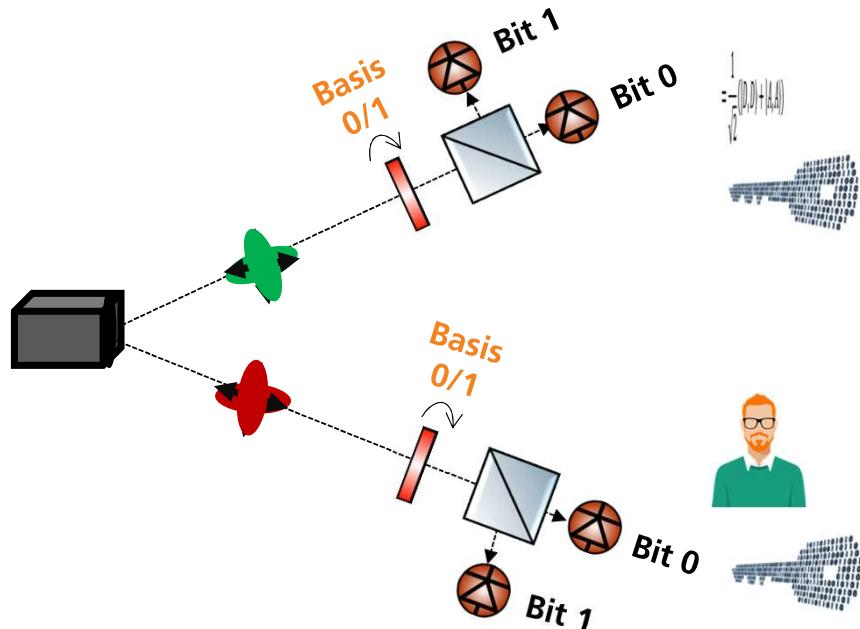
Quantum key distribution (QKD)



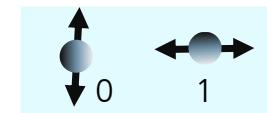
Entanglement-Based Quantum Key Distribution (QKD)

BBM92 protocol

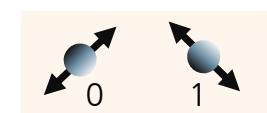
$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H,H\rangle + |V,V\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|D,D\rangle + |A,A\rangle)$$



0: HV basis

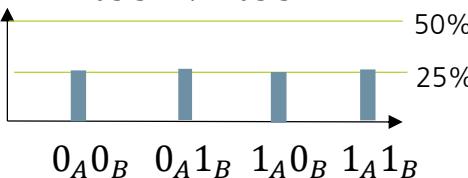


1: DA basis

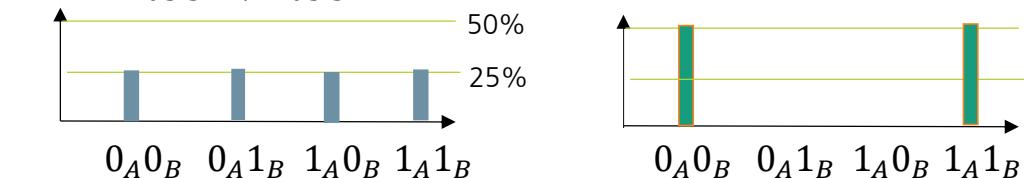


Basis A	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Bitvalue	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1

Basis A \neq Basis B



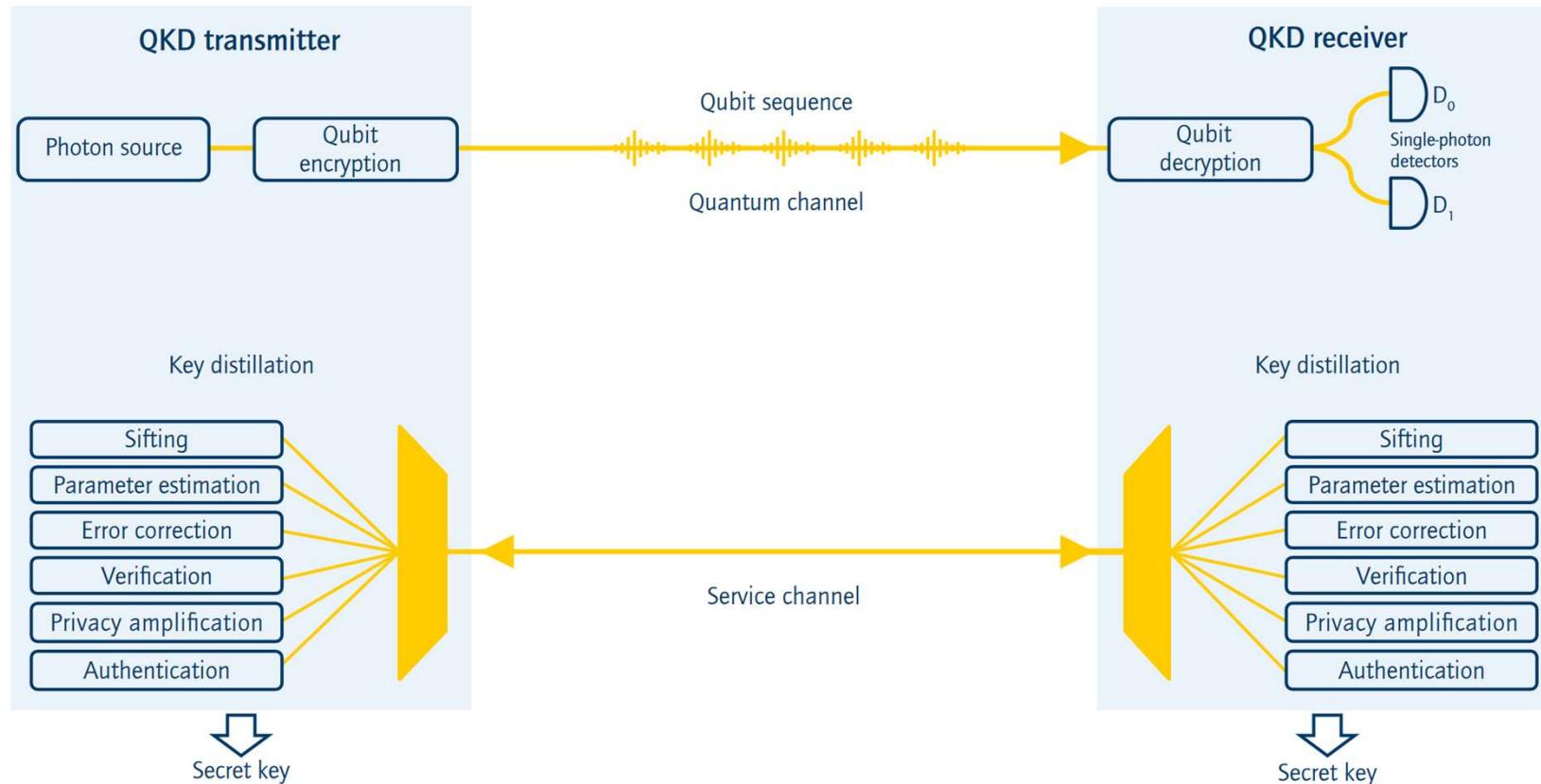
Basis A = Basis B



Basis B	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Bitvalue	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0

Quantum communication

Quantum key distribution (QKD)



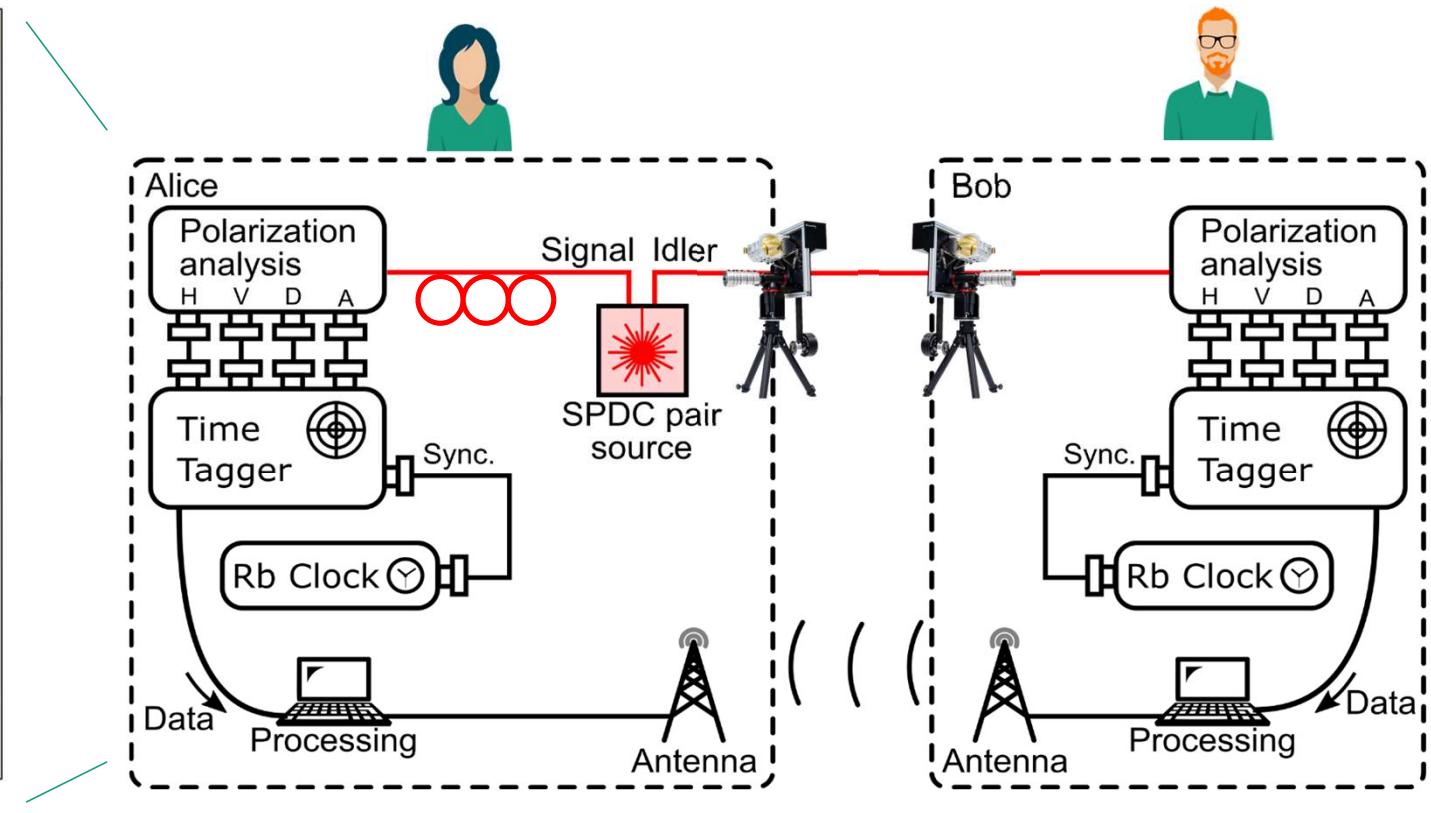
Quantum communication

Project QuNET



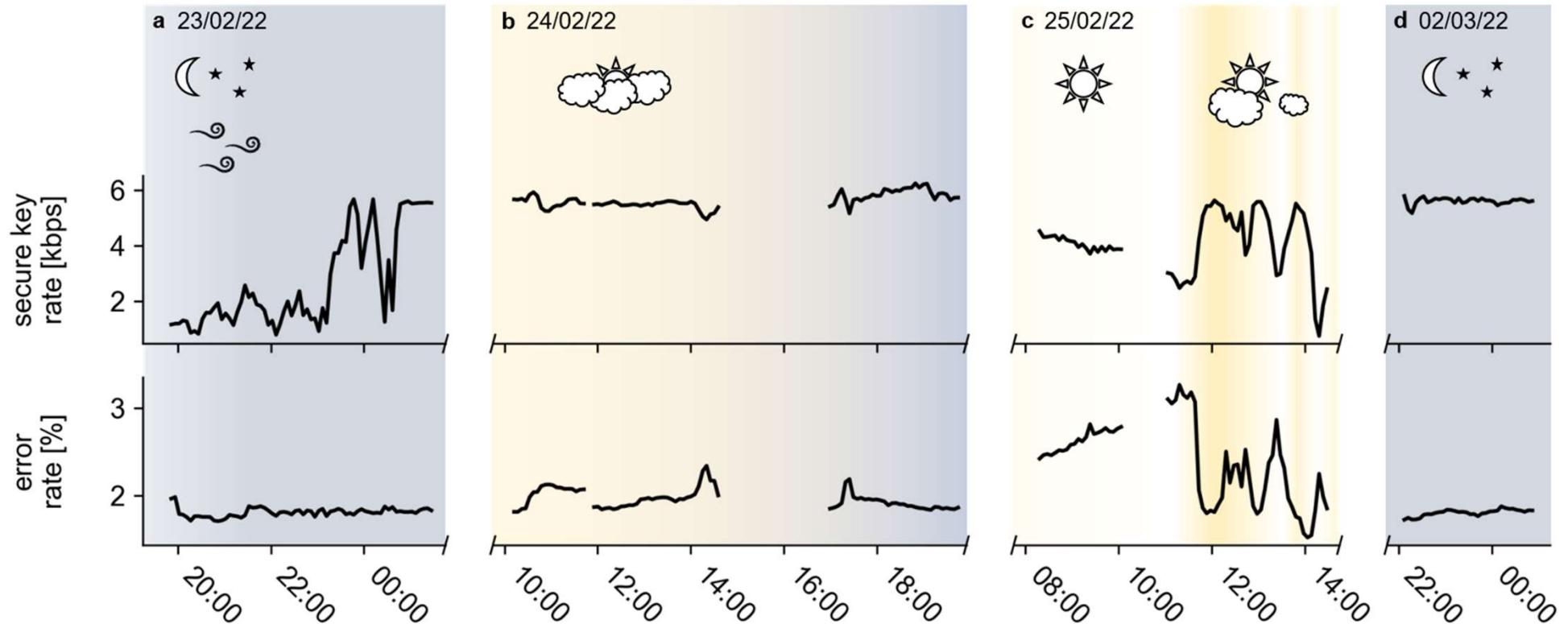
QKD in the Field

QuNet-Alpha Demo Experiment in Bonn



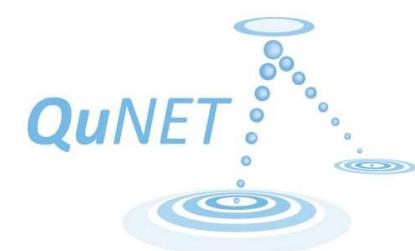
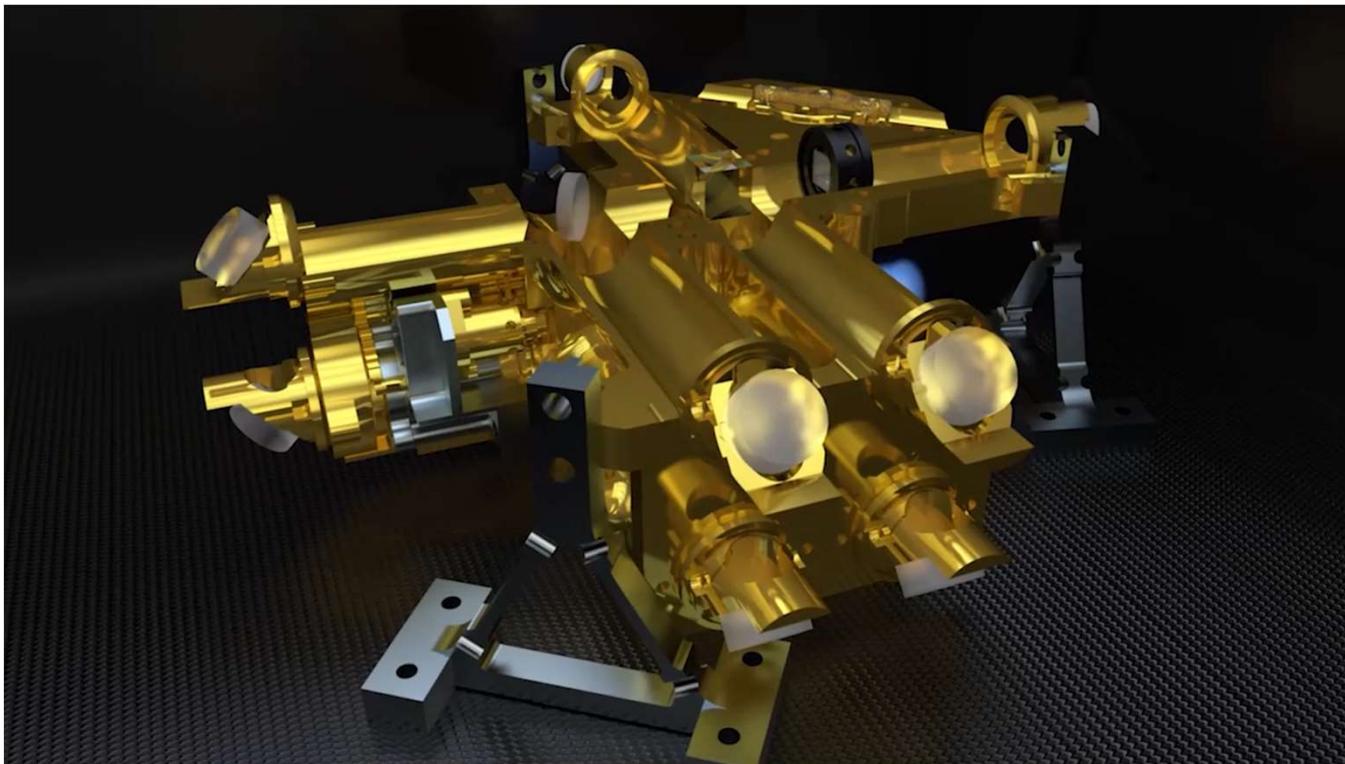
Quantum communication

Entanglement-based QKD in daylight



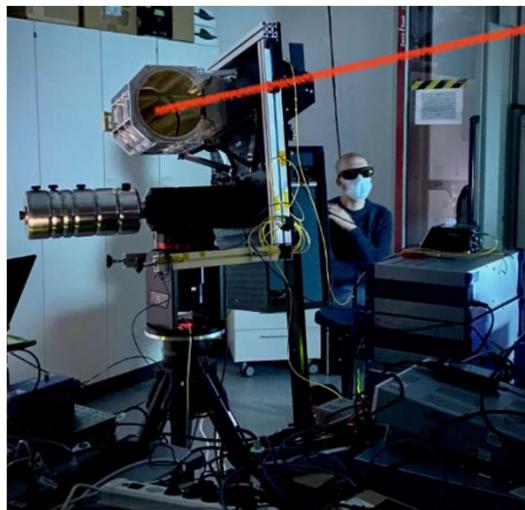
Quantum communication

Entangled photon sources



Quantum communication

Hybrid quantum communication via free beam and fiber link



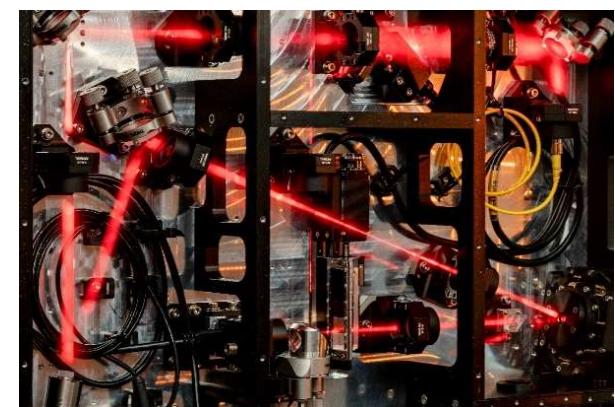
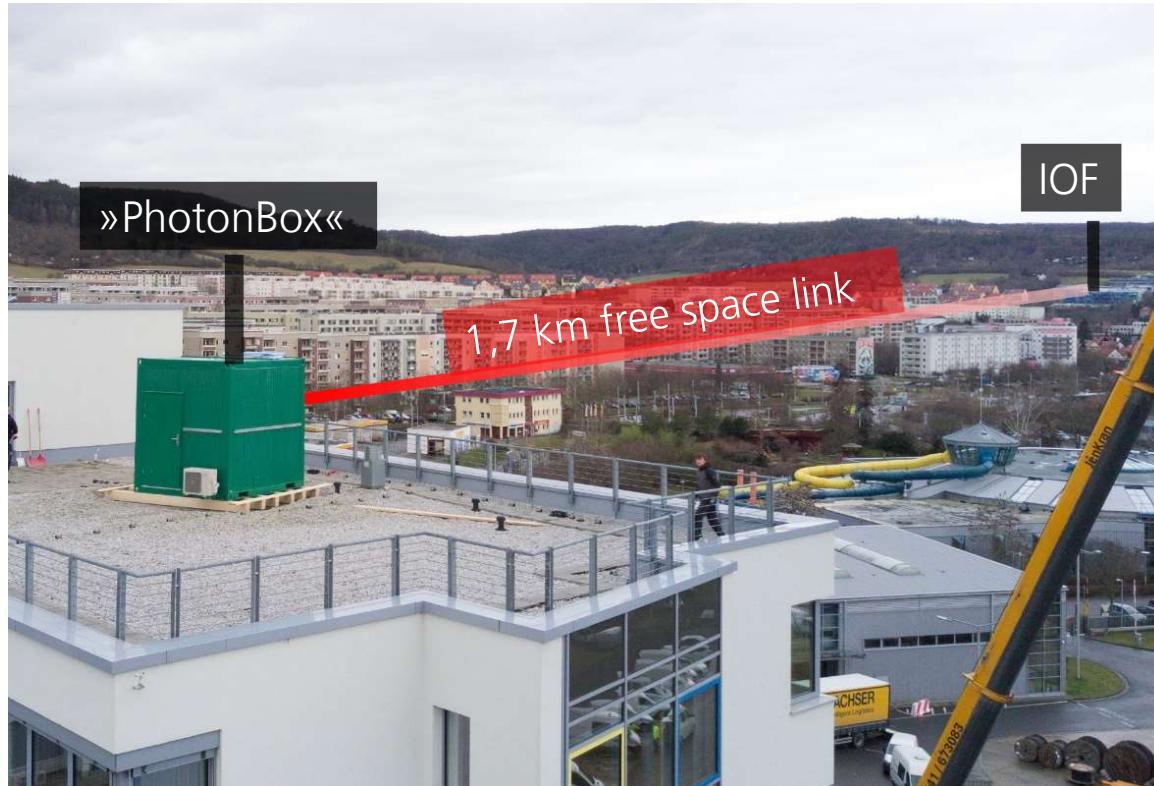
Free beam and fiber QKD technologies were presented digitally to the Federal Minister of Education Anja Karliczek at the QuNET press conference on Dec. 2, 2020.



Chancellor Merkel inspects Fraunhofer IOF's entangled photon source at the Digital Summit 2020 on Dec. 1.

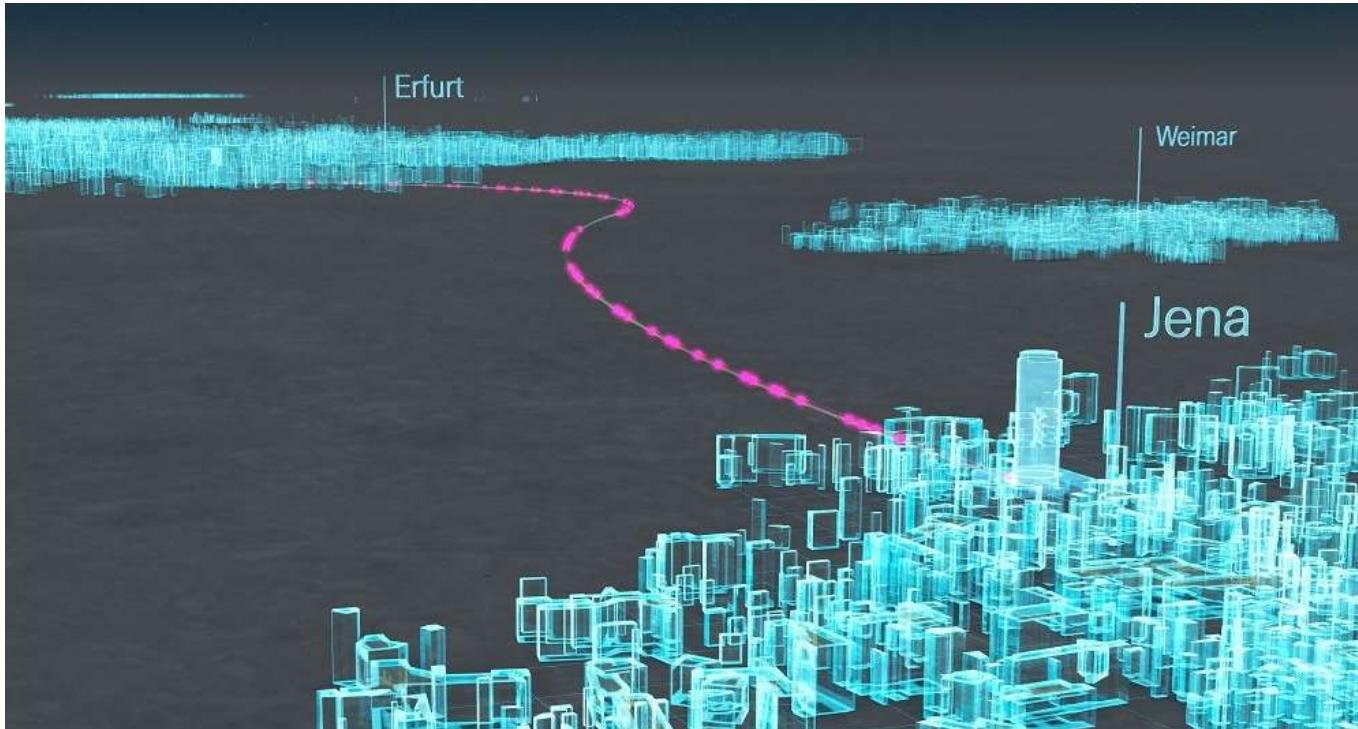
Free-space link for field trials

Active and adaptive optics for quantum communication



Quantum Hub Thüringen

First successful exchange of quantum keys between Erfurt and Jena via optical fiber



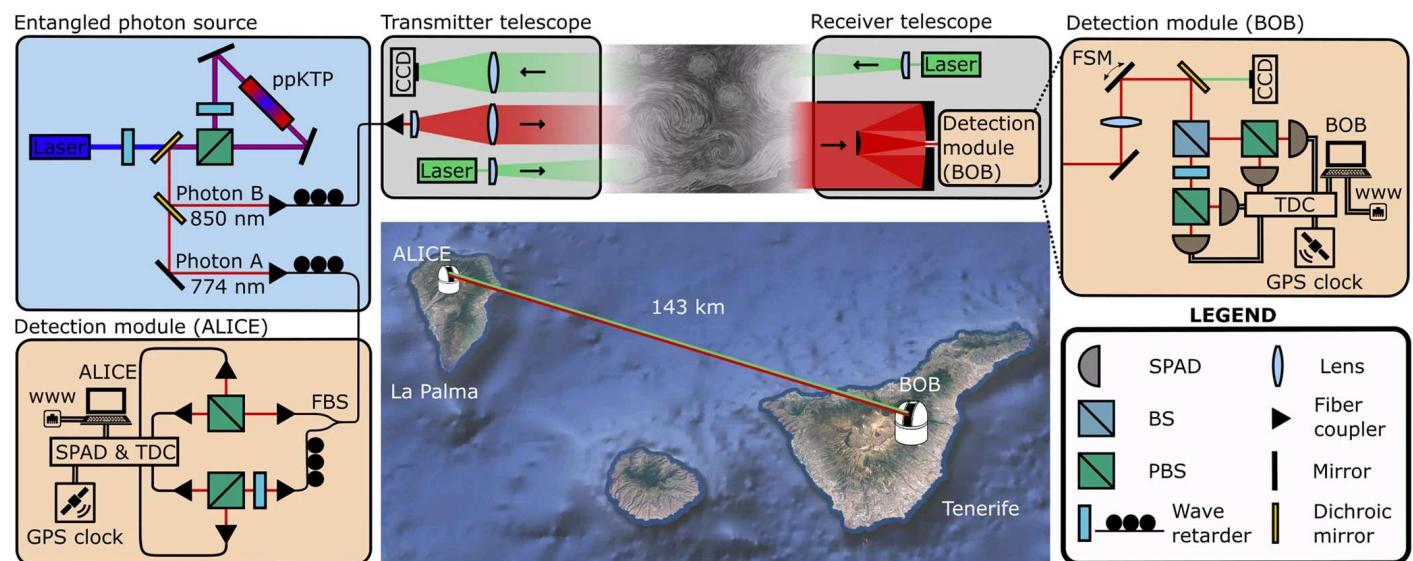
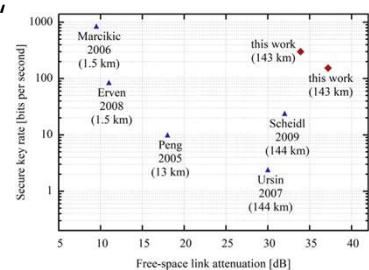
Q-net-Q Deployments

Hochschule Nordhausen
University of Applied Sciences

Quantum communication

- „Strategies for achieving high key rates in satellite-based QKD“, S. Ecker, B. Liu, J. Handsteiner, M. Fink, D. Rauch, **F. Steinlechner**, T. Scheidl, Anton Zeilinger, Rupert Ursin, npj Quantum Inf. 7(1), 1-7 (2021).

“This model and our field test will prove helpful in the design and operation of future satellite missions and advance the distribution of secret keys at high rates on a global scale.”



Start-up Quantum Optics Jena

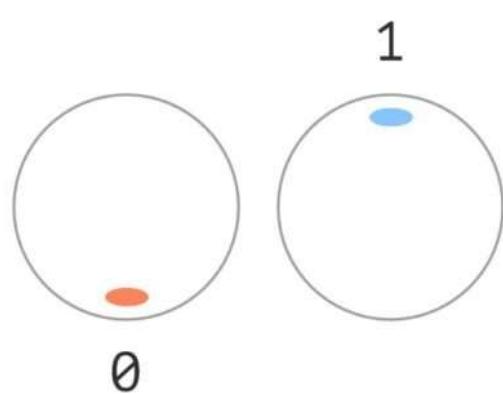
QKD-Systems with Entangled Photons



Quantum Computers

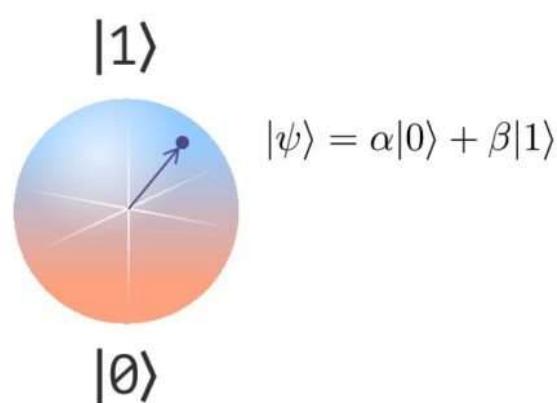
From bits to qubits

Bit



1 bit = 1 operation
N bits = N operations in parallel

Qubit



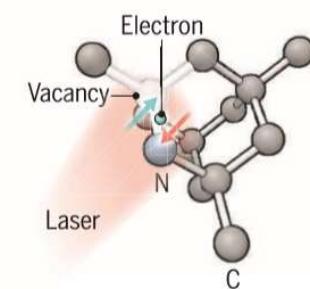
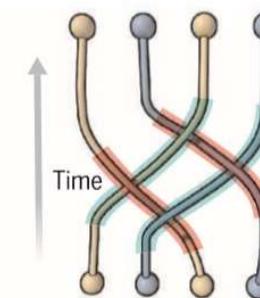
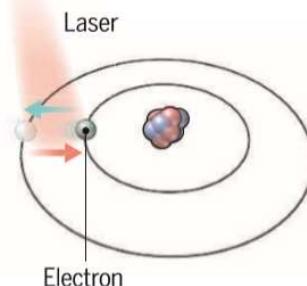
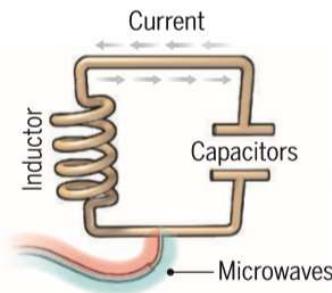
1 qubit = 2 operations
N qubits = 2^N operations in parallel.

- 2 qubits → 4 possible states $(0,0)$, $(0,1)$, $(1,0)$, $(1,1)$
- 3 qubits → 8 possible states $(0,0,0)$, $(0,0,1)$, $(0,1,0)$, $(0,1,1)$, $(1,0,0)$, $(1,0,1)$, $(1,1,0)$, $(1,1,1)$ etc ..

Quantum Computers

Open race: base technologies / hardware stacks (excerpt)

„Tech giants Intel, Microsoft, IBM, and Google are all plowing tens of millions of dollars into quantum computing. Yet the contenders are betting on *different technological horses*: No one yet knows what type of quantum logic bit, or qubit, will power a practical quantum computer.“



Superconducting loops

Company support

Google, IBM, Quantum Circuits

Trapped ions /add: neutral atoms

ionQ

Silicon quantum dots

Intel

Topological qubits /photonic Q-Comp.

Microsoft,
Bell Labs

Diamond vacancies /add: spins/NMR

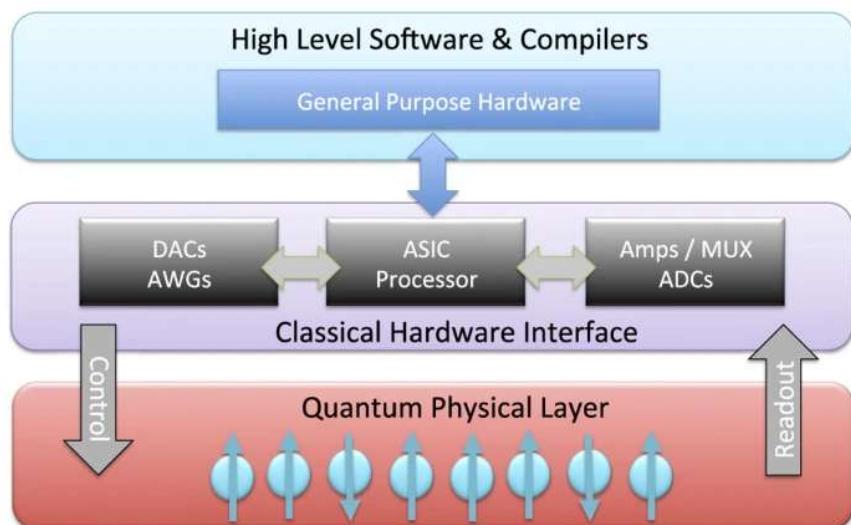
Quantum Diamond
Technologies

→ sub-types: e.g. JJ-cQED-based qubits: Phase qubit, rf-SQUID, Flux qubit, Fluxonium, C-shunt, Charge qubit, Quantronium, Transmon, Xmon, Gatemon, ...

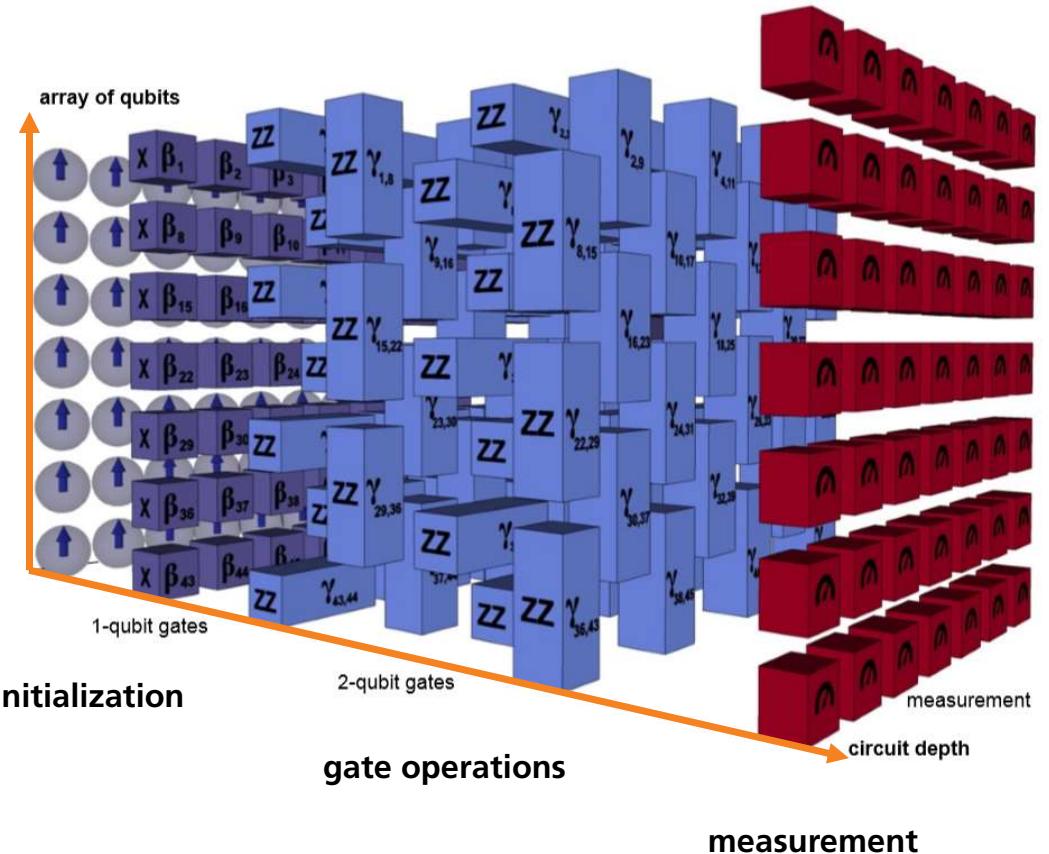
Quantum Computers

qubits and gates, hybrid systems

- "In practice, a quantum computer (QC) is always embedded in a classical computer (CC), surrounded by several classical shells of hardware (HW) and software (SW)"



Space-time volume of a quantum circuit computation
(qubit register, gate operations)



Quantum Computers

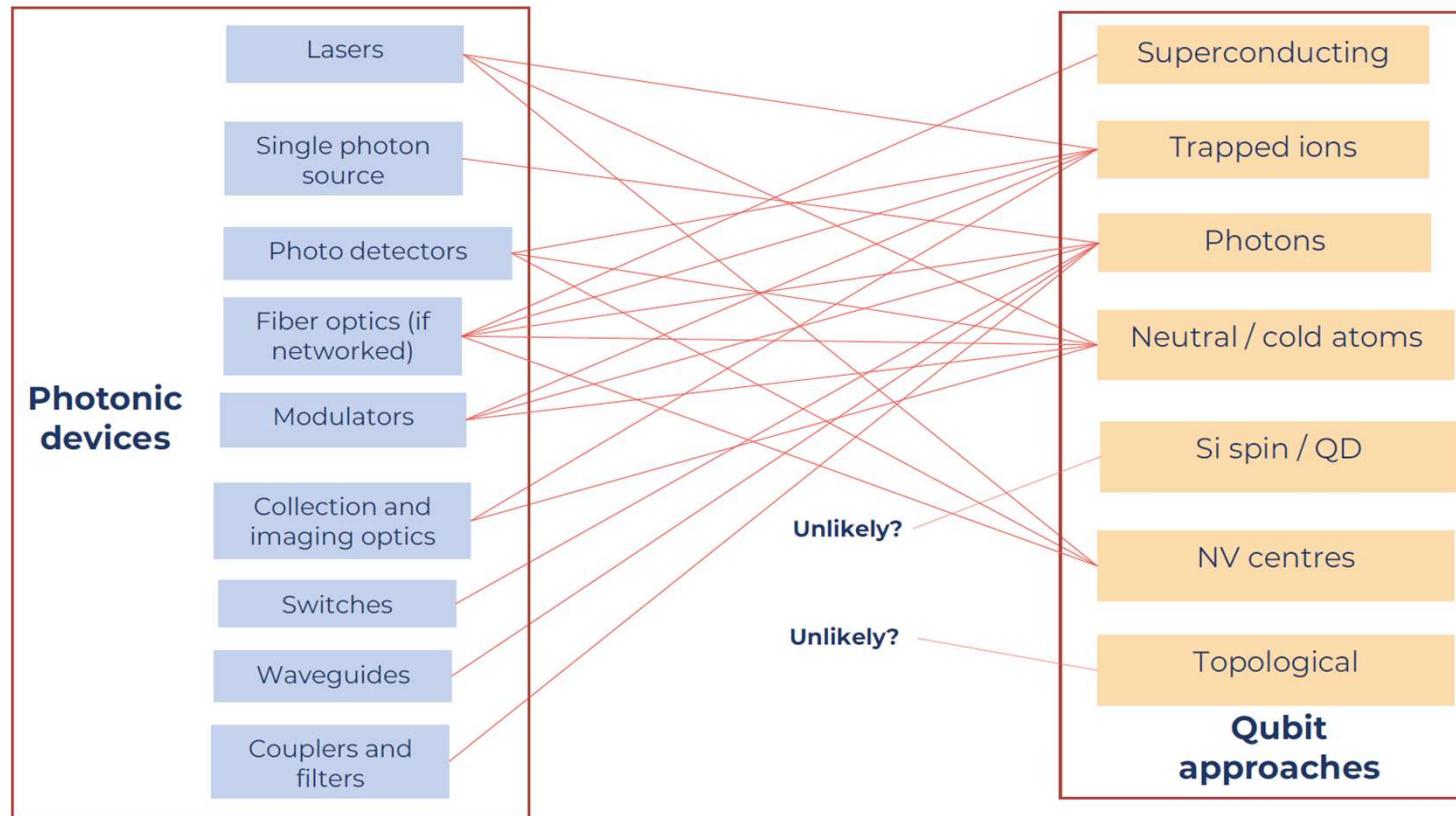
Potential Q-benefits in a nutshell

- Superior scaling behavior (different!) and thus potentially higher computational power in certain categories
 - Prime factorization of integers (Shor)
 - Search in unsorted databases (Grover)
 - Linear systems of equations (HHL)
 - Traveling salesmen
 - Optimization (Annealing)
 - 3-SAT, **& more to discover!**
- Simulation of quantum matter (Feynman)
 - Medical development
 - Physics at low temperatures
 - Entangled many-body systems
- Quantum Machine Learning / AI



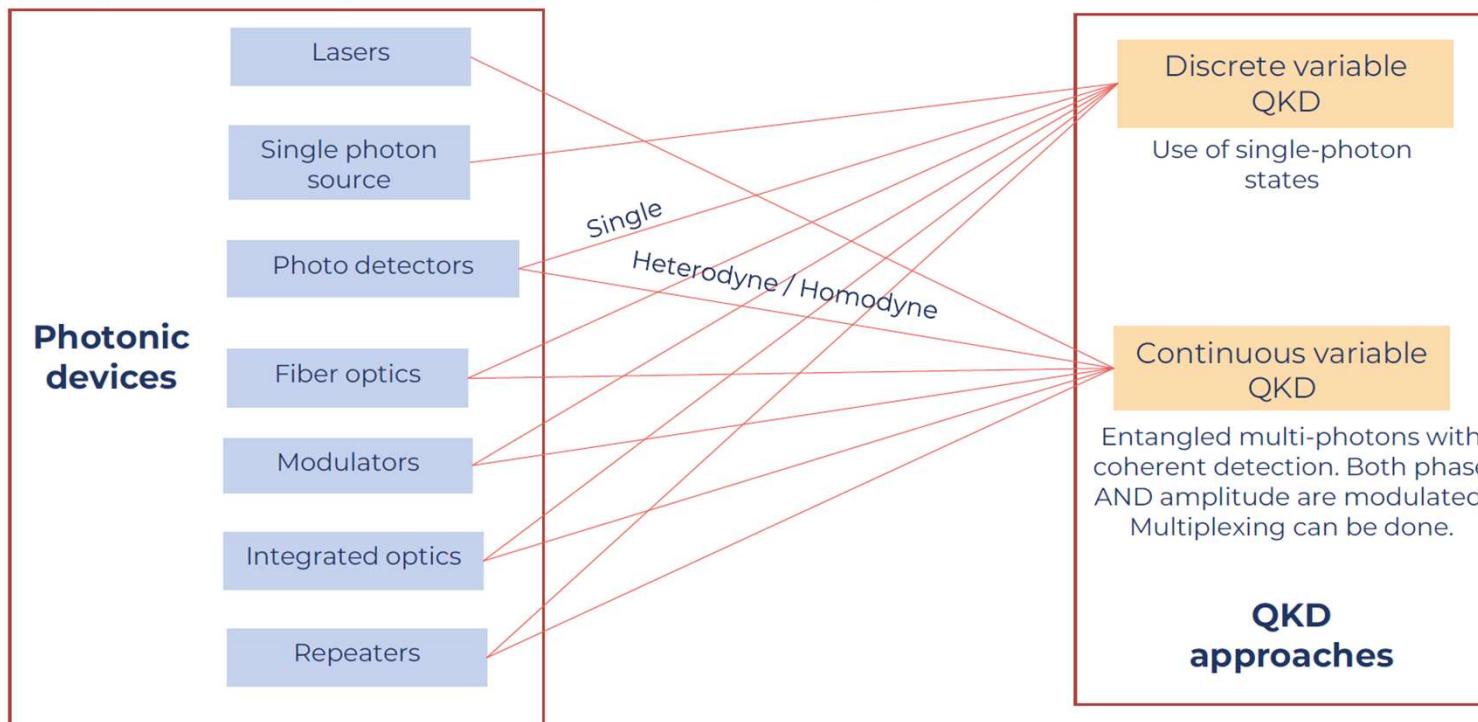
in medias res...

Photonics and quantum computing need each other



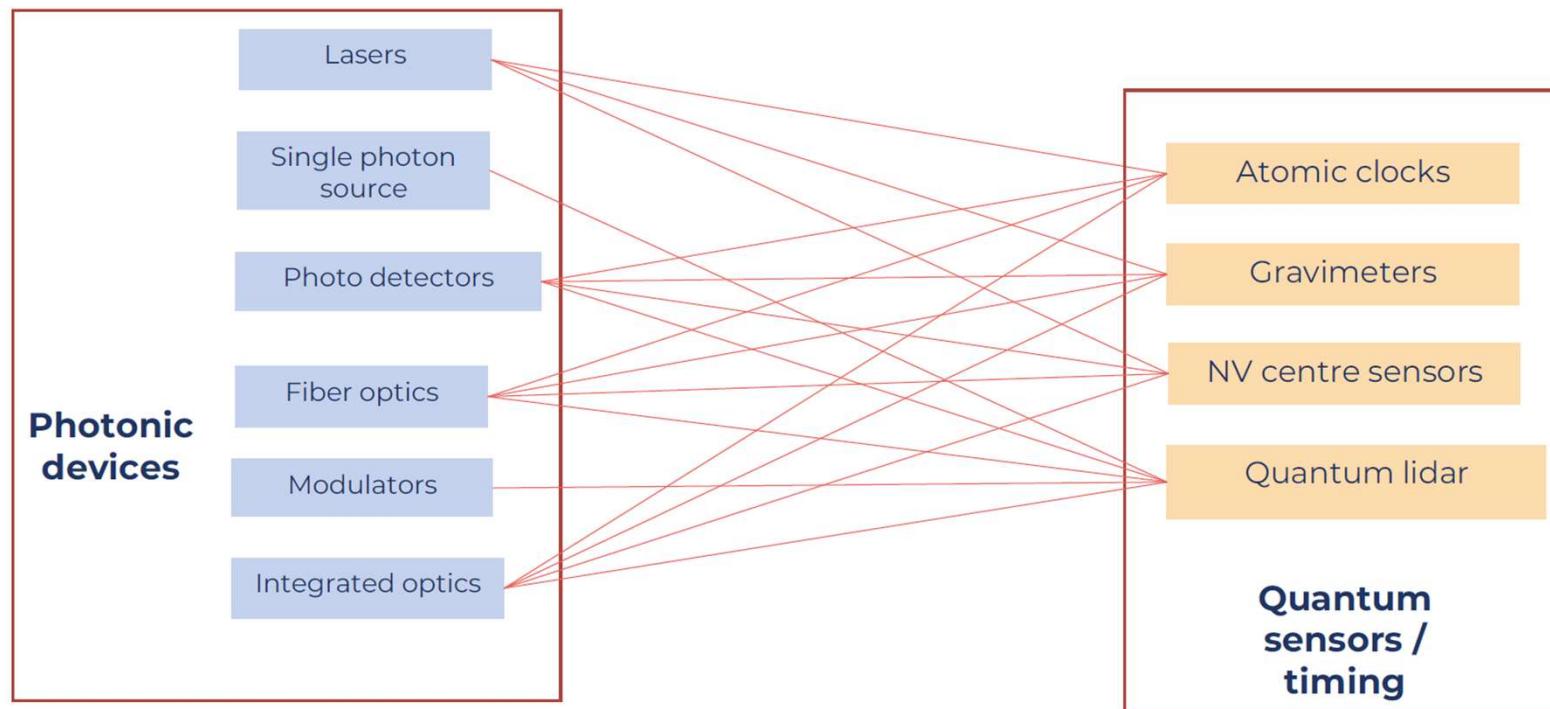
in medias res...

Photonics and quantum communication need each other

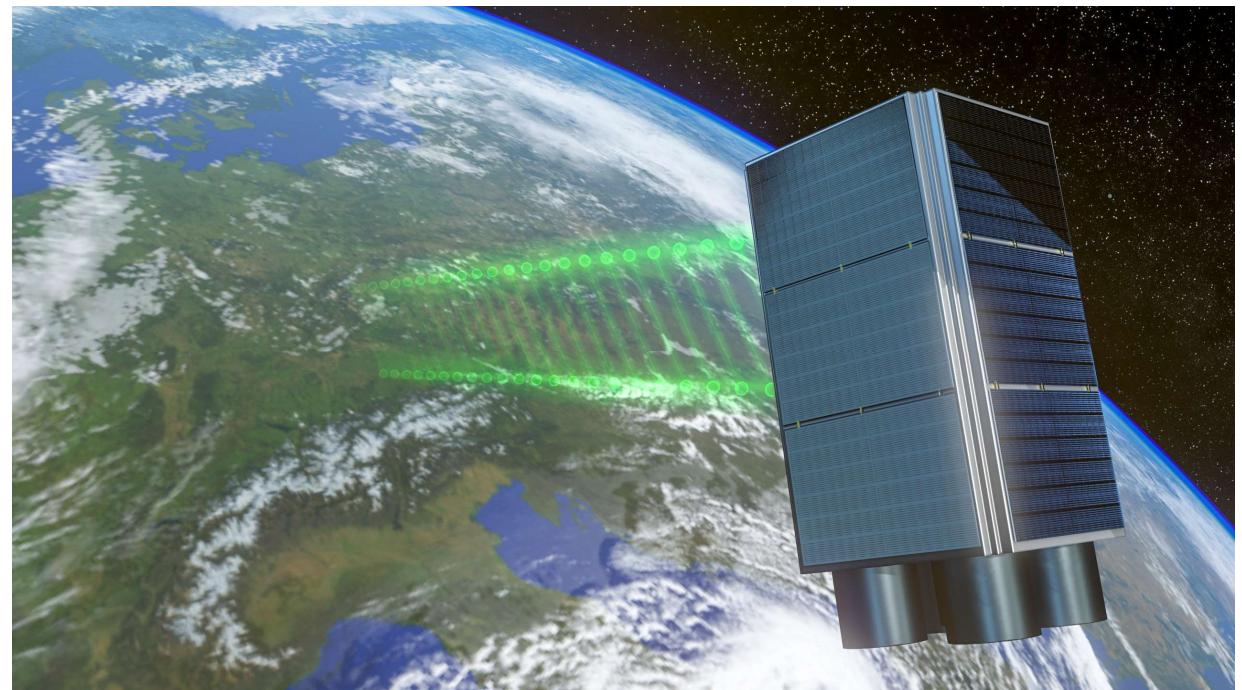


in medias res...

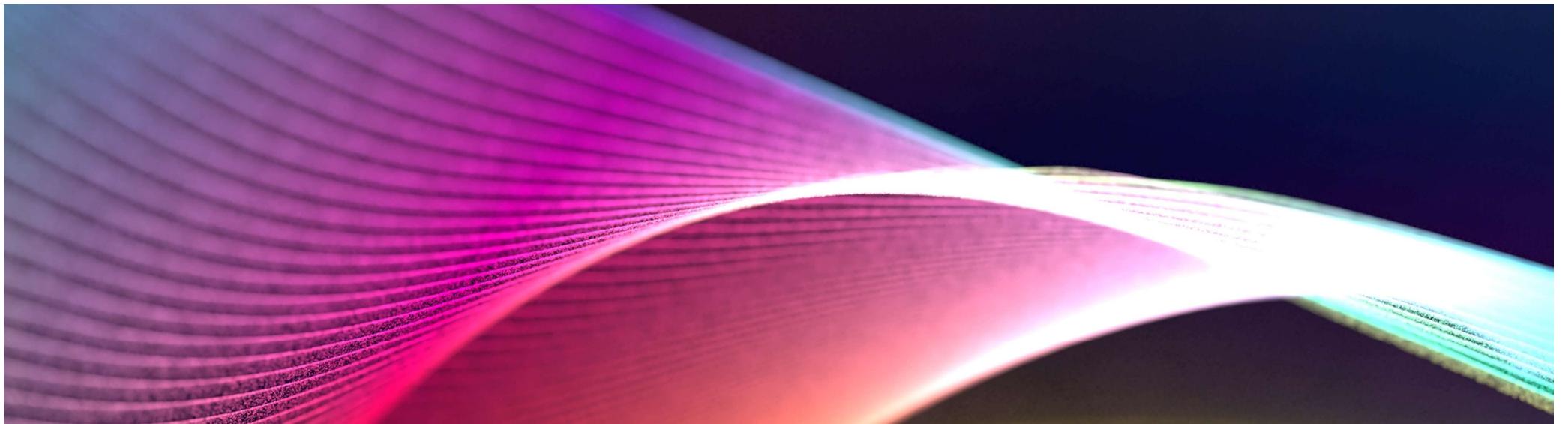
Photonics and quantum sensing need each other



Thüringen goes space



Cubenik



Photonics & Quantum Manager Compact

June 12-16, 2023 | Jena | Germany

Discover current research and trends of photonics

exclusive small group | top speaker | networking events

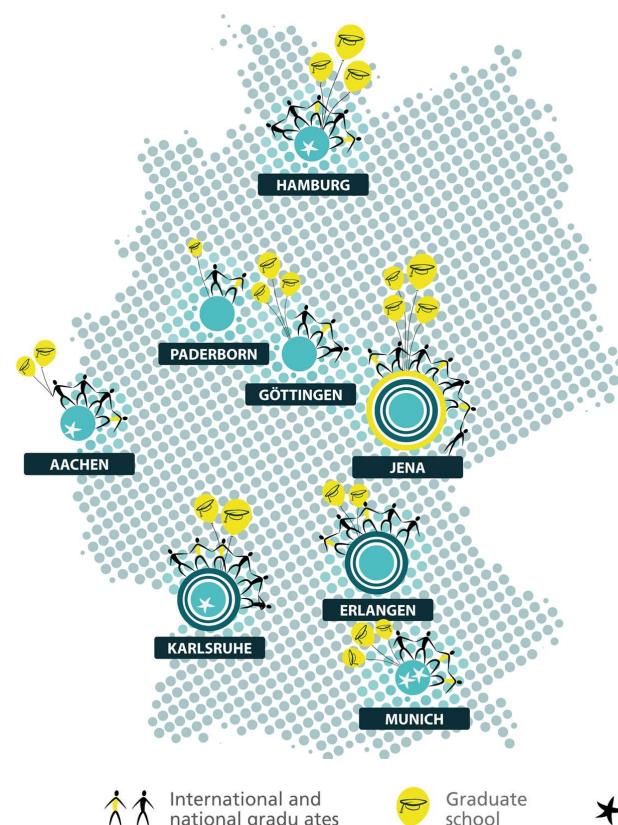


SCAN ME

Register until May, 13th

Max Planck School of Photonics

Connecting Science, Research, and Teaching



HAMBURG



PADERBORN



GÖTTINGEN



JENA



AACHEN



ERLANGEN



KARLSRUHE



MUNICH



International Master's degree courses Photonics

MPSP Office



15. Erfurter TechnologieDialog

24. April 2023 | COMCENTER Brühl

fiz Forschungs- und
Industriezentrum Erfurt e.V.

Vielen Dank an unsere Sponsoren!

