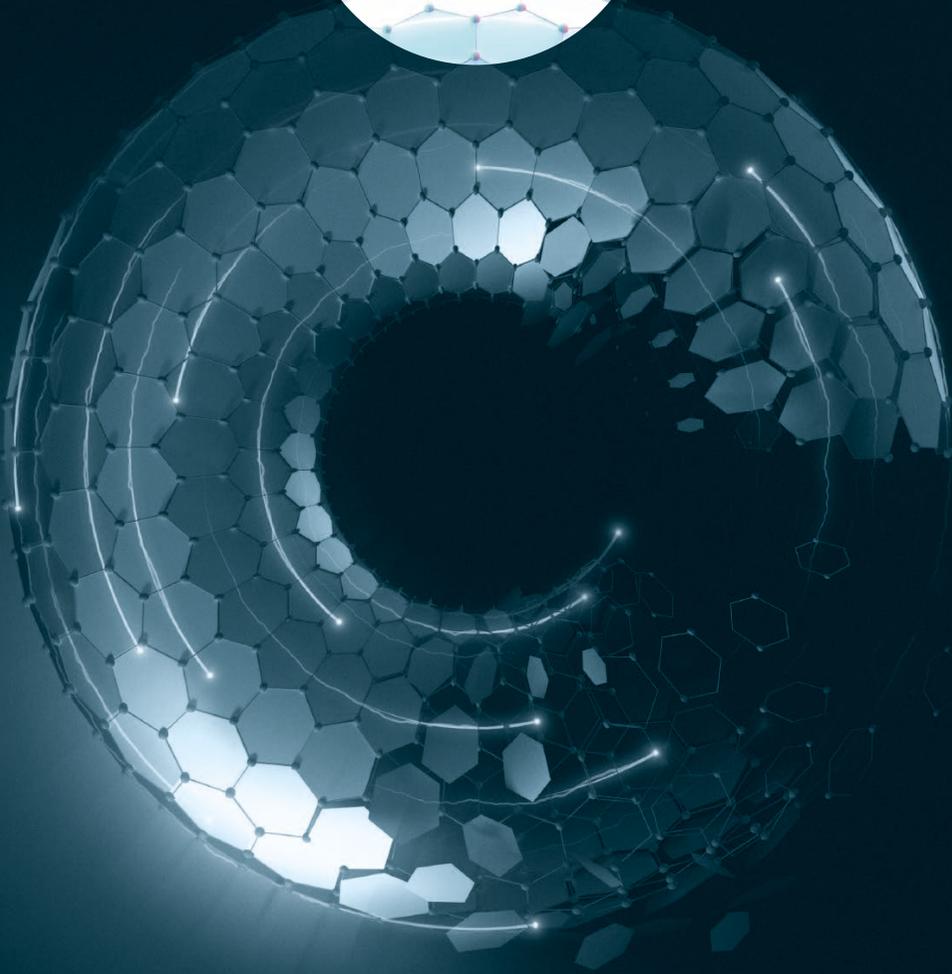
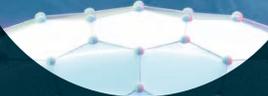




ct.qmat

Complexity and Topology
in Quantum Matter

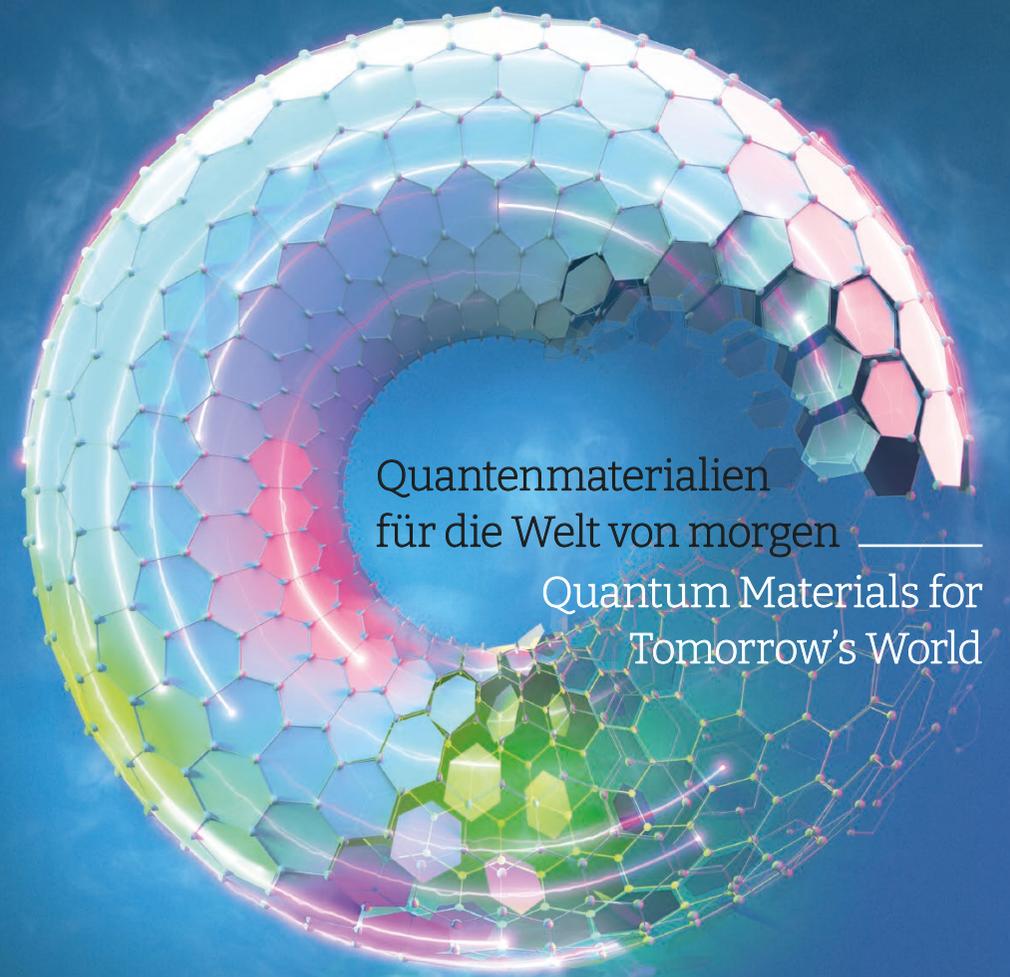


Wissenschaft im Zeichen des Donuts:

Der süße Lochkrapfen gleicht einem geometrischen Gebilde namens Torus, mit dessen Hilfe sich die Besonderheiten von Quantenmaterialien theoretisch beschreiben lassen. Dabei trifft Physik auf Topologie, einen Teilbereich der Mathematik. Diese Verbindung ist ein revolutionärer Forschungsansatz, der mit dem Nobelpreis gekrönt und von **ct.qmat** angewendet wird. Ziel ist, das Fundament für bahnbrechende Technologien wie megaschnelle Quantenchips oder extrem leistungsstarke topologische Laser zu schaffen.

Quantum Research and Donuts:

*In the realm of geometry, the familiar shape of a ring donut is known as a torus. It can be used to theoretically describe quantum materials' distinct characteristics. This is where the worlds of physics and topology, a branch of mathematics, converge. This synergy has forged a revolutionary path in research, one that not long ago culminated in a Nobel Prize. Now, **ct.qmat** is pushing these boundaries even further. Its aim is to lay the foundations for disruptive technologies, including ultra-fast quantum chips and exceptionally powerful topological lasers.*



Quantenmaterialien
für die Welt von morgen
Quantum Materials for
Tomorrow's World

Mission

Das bundeslandübergreifende Exzellenzcluster **ct.qmat** – Complexity and Topology in Quantum Matter erforscht und entwickelt neuartige topologische Quantenmaterialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften und untersucht deren Nutzung unter Alltagsbedingungen.

ct.qmat entwirft damit Grundlagen für die Technologien der Zukunft und etabliert fundamental neue Materialkonzepte, die weit über das Siliziumzeitalter hinausreichen.

*The Cluster of Excellence **ct.qmat** – Complexity and Topology in Quantum Matter – explores and develops new types of topological quantum materials with specially tailored properties, and also studies their use under everyday conditions.*

***ct.qmat** is thus forging the foundations for tomorrow's technologies and establishing fundamentally new materials concepts going far beyond the Silicon Age.*



ct.qmat is based at two universities in Germany – Julius-Maximilians-Universität (JMU) Würzburg and Technische Universität (TU) Dresden – and connects research institutions from Dresden, Würzburg, and elsewhere in the world.

ct.qmat brings together leading minds in condensed matter physics, photonics, materials science, chemistry, and nanoscience.

ct.qmat nurtures both scientific talent and a broad public understanding of quantum technologies. It's a source of creative stimulus for a rising generation of researchers around the world.

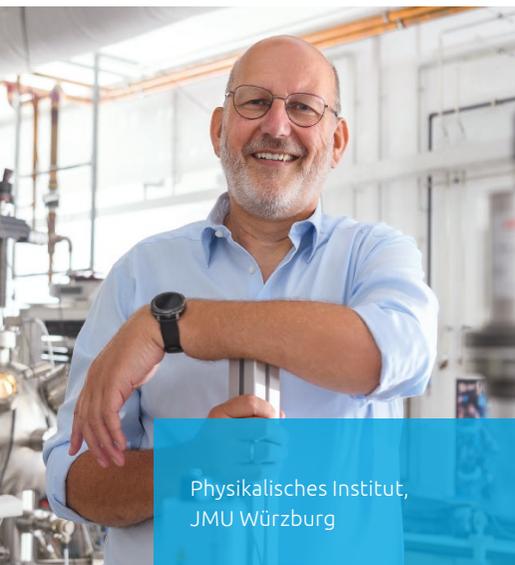
ct.qmat ist an der Julius-Maximilians-Universität (JMU) Würzburg sowie der Technischen Universität (TU) Dresden angesiedelt und vernetzt herausragende Forschungsinstitutionen aus Dresden, Würzburg und weltweit auf eine nachhaltige Weise.

ct.qmat bringt führende Köpfe der Physik der kondensierten Materie, Photonik, Materialwissenschaften, Chemie und Nanowissenschaften zusammen.

ct.qmat fördert wissenschaftliche Talente und ein breites gesellschaftliches Verständnis für Quantentechnologien. Das Exzellenzcluster liefert kreative Impulse für eine nachwachsende Generation von Forschenden rund um den Globus.

ct.qmat in a Nutshell

Starkes Netzwerk für Spitzenforschung – Würzburger ct.qmat-Sprecher Claessen zieht positive Bilanz:



Physikalisches Institut,
JMU Würzburg

Ralph Claessen

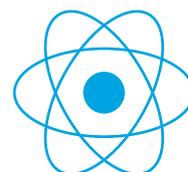
ct.qmat verbindet mit Dresden und Würzburg zwei führende Forschungsumgebungen für kondensierte Materie.

ct.qmat unites two of the leading research hubs in condensed matter physics: Dresden and Würzburg.

“Komplexität und Topologie stehen bei uns im Fokus und sind faszinierende Leitthemen in der modernen Physik der kondensierten Materie. Wir haben topologische Quantenmaterialien wie Mangan-Bismut-Tellurid mit völlig neuen Funktionalitäten entwickelt. Zu unseren Highlights zählen die Fortschritte bei Supraleitung, topologischen Isolatoren und topologischen Lasern. Aus zwei Universitäten und unseren externen Partnern ist ein Netzwerk gewachsen, das gemeinsam mehr ist als die Summe seiner Teile.“

Powerful Network for Cutting-Edge Research. ct.qmat's Würzburg spokesperson Claessen highlights its remarkable achievements:

“At the heart of our research are complexity and topology, two exciting key areas in modern condensed matter physics. We've developed quantum materials with unprecedented features, such as manganese bismuth telluride. Our team has made significant strides in superconductivity, topological insulators, and topological lasers. From two universities and our external partners, a network has grown that's truly greater than the sum of its parts.”



4

Forschungsbereiche
Research Areas

AREA A

Topologische Elektronen
Topological Electrons

12

AREA B

Quantenmagnetismus
Quantum Magnetism

16

AREA C

Topologische Photonik
Topological Photonics

20

AREA D

Topologische Funktionalität
Tailoring Topological Functionality

24

ct.qmat in a Nutshell



1.100

Publikationen 2019 – 2023
Publications in 2019 – 2023



300

Wissenschaftler:innen
Scientists



7

Jahre Laufzeit
Years of funding

34

Länder
Countries



Unser Booster für deine Karriere:
Doktorandenstelle gesucht?

*Take your career to quantum heights:
Discover PhD opportunities here!*

Quantum Matter Academy

28



Mehr Frauenpower für die Quantenphysik:
Werde Teil unseres Netzwerks!

*Boost female influence in quantum physics:
Join our network now!*

Grete Hermann Network

30



↘ Quantenphysik mit Katze:
Quantenwelt erleben mit der Spiele-App „Katze Q“,
QUANTube und dem neuen Escape Room!

*Embark on quantum adventures:
Play the Kitty Q app, watch QUANTube, and explore
our brand new escape room!*



500.000

Downloads 10/2021 – 01/2024

Reichweite | Outreach

32

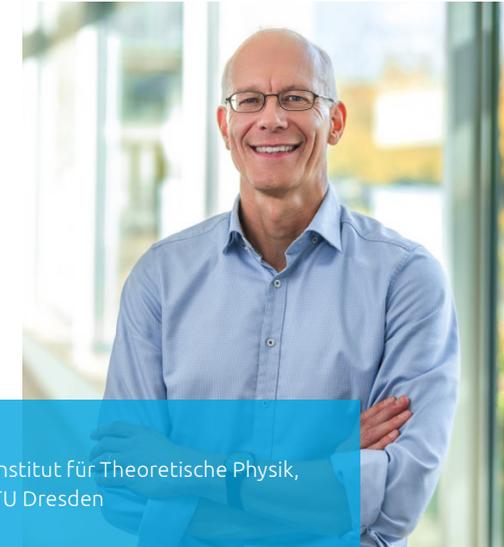
ct.qmat in a Nutshell

**Weiterforschen für die Quantenrevolution –
Dresdner Cluster-Sprecher Vojta sieht
ct.qmat weit vorn:**

“ Mit unseren Entdeckungen spielen wir in der Topliga. Wir stellen eine breite Materialbasis mit State-of-the-Art-Syntheseverfahren bereit – und haben Würzburg und Dresden als DIE deutschen Standorte für topologische Materialphysik etabliert. Auf dem Weg zum systematischen Verständnis der topologischen Physik treiben uns Neugier und Forschergeist an. In der Öffentlichkeit sind wir ebenfalls sehr sichtbar, ab 2024 auch mit einem Escape Room für Kinder. Unsere Herzensangelegenheit!“

Continuing the Quantum Revolution. ct.qmat is leading the way, says its Dresden spokesperson Matthias Vojta:

“ We’re leading the field with our discoveries. Developing a wide variety of materials using state-of-the-art synthesis techniques, we’ve firmly established Würzburg and Dresden as Germany’s premier centers of topological materials physics. We’re driven by curiosity and a commitment to systematically understanding topological →



Institut für Theoretische Physik,
TU Dresden

Matthias Vojta

physics. We also reach out to the public, including by launching an escape room for kids in 2024. That’s something we’re really passionate about!”

Seit 2019 wird das Exzellenzcluster **ct.qmat** durch die Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder gefördert.

Since 2019, **ct.qmat** has been funded through the German Excellence Strategy of the Federal and State Governments.

Topologische Elektronen

Topological Electrons

Atom für Atom: MnBi_2Te_4 heißt die Zauberformel, die 2019 in Dresden das Licht der Welt erblickte. Wissenschaftler:innen des Exzellenzclusters **ct.qmat** entwickelten das Quantenmaterial namens Mangan-Bismut-Tellurid und stellten es erstmals im Labor her. Der maßgeschneiderte Kristall ist ein magnetischer topologischer Isolator und vereint eigentlich gegensätzliche Eigenschaften: Im Inneren isolierend, kann er an seinen Rändern Strom verlustfrei leiten. Außerdem bringt MnBi_2Te_4 sein Magnetfeld selbst mit und besitzt daher Eigenschaften, die bei anderen Materialien erst in starken äußeren Magnetfeldern auftreten. Dies

erweitert die Chancen für neuartige elektronische Bauelemente, die Informationen magnetisch kodieren sowie schnell und energiesparend transportieren. Spintronik nennt sich dieser Ansatz.

Präzision zählt: Damit das Quantenmaterial sein außergewöhnliches Potenzial entfalten kann, muss dessen atomare Zusammensetzung sehr präzise kontrolliert werden. Molekularstrahlepitaxie heißt das Verfahren, mit dem superdünne Atom-schichten übereinandergestapelt werden. In Würzburg steht eine der größten Anlagen, die das bis auf einen Nanometer = ein Millionstel Millimeter genau schafft.

#Mangan-Bismut-Tellurid:

Made in Dresden, optimiert in Würzburg, ist dieser maßgeschneiderte Kristall der Vorbote einer Materialrevolution, die verlustarmen Quantenchips den Weg bereiten soll.

#Manganese bismuth telluride:

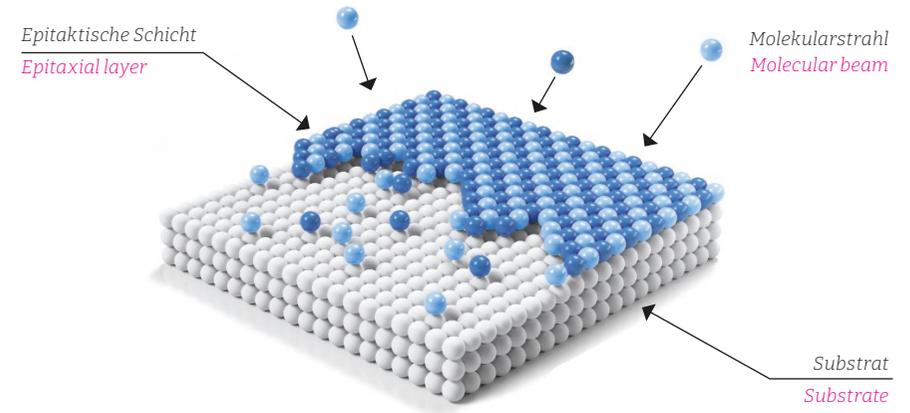
Made in Dresden, perfected in Würzburg. This bespoke crystal is spearheading a revolution in materials science that's set to pave the way for low-loss quantum chips.

Kristallines MnBi_2Te_4 – in Würzburg und Dresden werden Zukunftswerkstoffe designt.

Crystalline MnBi_2Te_4 – future materials are designed in Würzburg and Dresden.

Geburt eines Quantenmaterials

A Quantum Material is Born



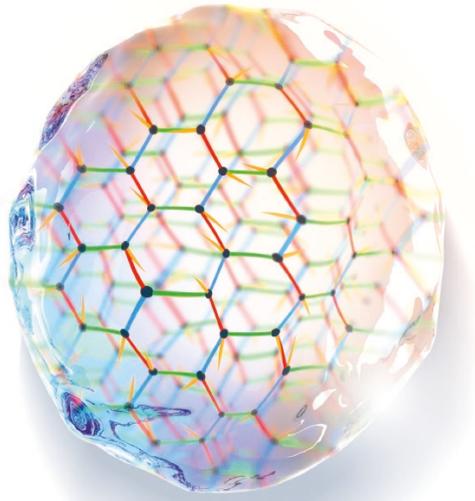
Atom by atom: MnBi_2Te_4 is a magic formula that first saw the light of day in Dresden in 2019. Manganese bismuth telluride is a quantum material that was first produced in the laboratory by scientists from **ct.qmat**. This specially tailored crystal is a magnetic topological insulator that, intriguingly, combines properties that don't normally mix. Whereas its interior acts like an electrical insulator, the edges can conduct electricity without loss. Moreover, it has its own magnetic field, giving it properties that other materials only exhibit in strong external magnetic fields. This is an important step towards

creating next-generation electronic components that can encode and transport information magnetically – a field known as spintronics, which promises faster, more energy-efficient data processing.

Precision counts: To harness this quantum material's extraordinary potential, its atomic composition needs to be precisely controlled. The process employed to stack ultrathin layers of atoms on top of each other is known as molecular beam epitaxy. Würzburg is home to one of the largest MBE systems that can do this with nanometer precision – that's a millionth of a millimeter.

Quanten- magnetismus

Quantum Magnetism



Neuartige Zustände im Fokus: Die Wissenschaftler:innen von ct.qmat fahnden nach magnetischen Verbindungen, die überraschende Phänomene aufweisen und nach noch unbekanntem Prinzipien funktionieren. Ein Beispiel sind Spinflüssigkeiten. Das sind grundlegend neue Materiezustände von topologischen Quantenmagneten, die keine offensichtliche Ordnung aufweisen. Möglicherweise eröffnen sie andersartige Wege, elektrische Felder an Magnetismus zu koppeln – dies wäre ein Ansatzpunkt für Zukunftstechnologien. Bevor konkrete Anwendungen entstehen können, ist aber viel Grundlagenforschung nötig. Zunächst müssen die Forschenden die Gesetzmäßigkeiten ermitteln, nach denen sich solche komplexen physikalischen Systeme organisieren.

Wissenschaft vom Papierfalten: Eine Verallgemeinerung der Spinflüssigkeit wird mathematisch durch die gleiche Theorie

#Grundlagen erweitern:
Das Exzellenzcluster ct.qmat forscht nach exotischen Materiezuständen für noch unbekannte Anwendungen.

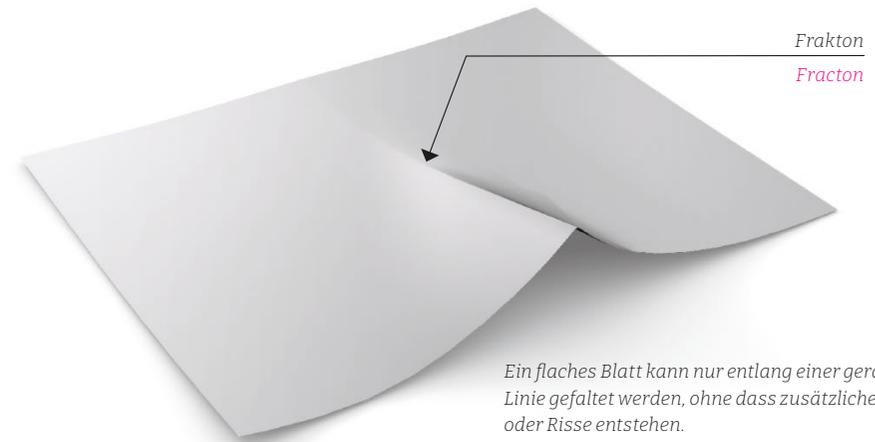
#Expanding theoretical fundamentals:
ct.qmat delves into exotic states of matter for yet-to-be-discovered applications.

beschrieben wie gefaltetes Papier. So stellt man beim Basteln eines Papierfliegers fest, dass sich ein Blatt nur entlang einer geraden Linie sauber falten lässt. Versuche, entlang einer Kurve zu falten, führen schlimmstenfalls zum Riss. Analog dazu gibt es Teilchen – sogenannte Fraktonen – die sich im dreidimensionalen Raum nicht frei, sondern nur in eine Richtung bewegen können. Eine solche eingeschränkte Bewegung existiert auch bei Spinflüssigkeiten höherer Ordnung.

Focus on novel states: At ct.qmat, researchers are on a quest to identify magnetic compounds that exhibit unexpected phenomena and operate based on previously undiscovered principles. One example is spin liquids – radically new states of matter in topological magnets, seemingly devoid of any discernible order. Spin liquids could revolutionize the way we link electric fields to magnetism, laying the groundwork for new technologies. Yet, there's a significant amount of fundamental research to be done before tangible applications can be developed. First of all, researchers must decipher the laws governing such intricate physical systems.

Auf der Suche nach „neuer Physik“
In Search of
“New Physics”

Science from folding a piece of paper: Spin liquidity, in a broader sense, is mathematically analogous to folding paper. When making a paper airplane, a sheet of paper can only be folded neatly along a straight line. Attempting a curved fold results in creasing or even tears. Similarly, certain particles known as fractons are restricted in their movement in three-dimensional space and can only move in one direction. Such limited mobility is also a characteristic of higher-order spin liquids.



Ein flaches Blatt kann nur entlang einer geraden Linie gefaltet werden, ohne dass zusätzliche Knicke oder Risse entstehen.

A flat sheet of paper can only be folded along a straight line without creating additional creases or tears.

Praxistest für Quantentheorien

Practical Tests for Quantum Theories

Brückenschlag zwischen Theorie und Experiment: Bei ct.qmat verbindet sich das Knowhow aus zwei Physikwelten – und Giorgio Sangiovanni ist einer der Brückenbauer. Der internationale Theorie-Experte berechnet die außergewöhnlichen Effekte, die ein Quantenmaterial durch die Wechselwirkung von Elektronen in seinem Inneren zeigen kann. Dabei arbeitet er Hand in Hand mit seinen experimentellen Kolleg:innen, die solche Werkstoffe Atom für Atom im Labor zusammensetzen.

„Häufig kann ich etwas vorhersagen, das anschließend im Labor bestätigt wird. Manchmal entwickelt sich im Experiment allerdings auch etwas vollkommen Neues, für das ich dann eine Erklärung suche“, sagt der Wissenschaftler. „Ich bin jedes Mal neugierig, ob eine theoretische Voraussage den Praxistest besteht.“ Für die Entwicklung neuer Modelle schaut er sich Systeme an, die aus sehr vielen wechselwirkenden Teilchen bestehen. Mithilfe von numerischen Methoden und Künstlicher Intelligenz (KI) erforscht er die Muster in den Bewegungen der Elektronen. Sangiovanni ist immer auf der Suche nach neuen Arten topologischer Quantenmaterialien wie frustrierten Magneten oder Kagome-Metallen sowie den Gesetzmäßigkeiten, nach denen sie sich organisieren: „Irgendwann stecken diese Materialien vielleicht in Quantentechnologien, die neue IT-Systeme energiesparender und leistungsfähiger machen.“

#Physikwelten vereint:

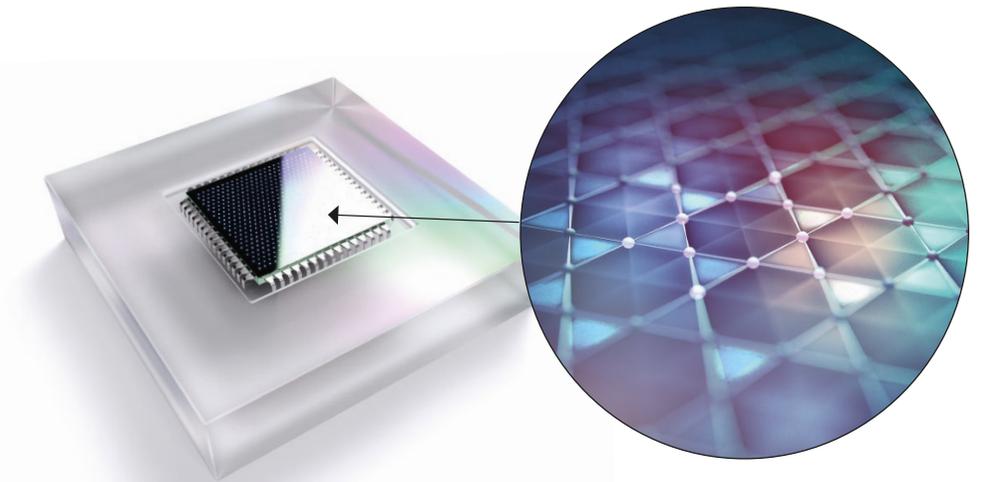
ct.qmat-Professor Sangiovanni entwickelt faszinierende Quantentheorien, seine experimentellen Cluster-Kolleg:innen prüfen sie im Labor.

#Uniting the worlds of physics:

At ct.qmat, fascinating new quantum phenomena are described theoretically and designed experimentally.

Computational Quantum Materials,
Institut für Theoretische Physik und
Astrophysik, JMU Würzburg

Giorgio
Sangiovanni



Bei der Suche nach außergewöhnlichen Quanteneffekten simulieren die Forscher:innen von ct.qmat auf dem Computer Kagome-Materialien. Deren Kristallstruktur ähnelt dem Muster eines japanischen Korbgeflechts.

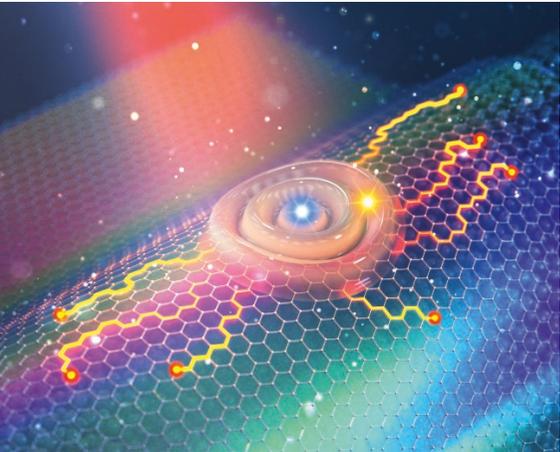
In their search for extraordinary quantum effects, researchers at ct.qmat produce computer simulations of kagome materials, whose crystal structure resembles the pattern of a Japanese basket weave.

Bridging the gap between theory and experiment: ct.qmat combines expertise from two distinct realms of physics, with Giorgio Sangiovanni being one of the key intermediaries. As an internationally renowned theory expert, he calculates the extraordinary effects a quantum material can exhibit due to the interactions of electrons within. He works hand in hand with his experimental colleagues, who construct these materials atom by atom in the laboratory.

“I often make predictions that are later validated in the lab. But sometimes, an experiment leads to something entirely unexpected, and that’s where I step in to find an explanation,” says Sangiovanni. “I’m always eager to see whether a theoretical hypothesis passes the practical test.” To forge new models, he scrutinizes systems consisting of a multitude of interacting particles, using quantum many-body algorithms and artificial intelligence (AI) to study the patterns in electron movements. Sangiovanni is always on the lookout for novel types of topological quantum materials such as frustrated magnets or kagome metals, and the principles governing their organization: “These materials could one day play a vital role in quantum technologies, leading to more energy-efficient and powerful IT systems.”

Topologische Photonik

Topological Photonics



Eine atomar-dünne Materialschicht wird über einen Nanodraht gespannt, ein Energiekanal für elektronische Quasiteilchen entsteht.

Angeregt durch Laserlicht bewegen sie sich entlang des Kanals. Ein Quasiteilchen besteht aus mehreren Elektronen, die sich gemeinsam als neues, eigenständiges Objekt verhalten.

A layer of material just a few atoms thick is stretched over a nanowire. This creates an energy conduit for electronic quasiparticles. When excited by laser light, these quasiparticles – each consisting of several electrons acting as a new, distinct entity – travel along this conduit.

Alexey Chernikov bringt Licht ins Dunkel der geheimnisvollen Quantenwelt. Er macht quantenmechanische Quasiteilchen in Nanokristallen sichtbar, die nur wenige Atome dick sind. In solchen superdünnen Kristallen sind die Quasiteilchen besonders robust, wechselwirken stark miteinander und können durch elektrische und magnetische Felder präzise gesteuert werden. Chernikovs Ziel ist, diese exotischen Teilchen zu verstehen und deren ultraschnelle Bewegung zu beeinflussen. Dafür nimmt er sie mit speziellen Mikroskopen in Echtzeit als Video auf. Seine Technik erfasst den Billionsten Teil einer Sekunde, eine Pikosekunde.

Als Werkzeug nutzen der Wissenschaftler und sein Team Licht: „Wir aktivieren das Material mit ultrakurzen Lichtimpulsen eines starken Lasers und nehmen dann mit superschnellen Detektoren auf, wann das Licht wo und wie abgestrahlt wird.“ Diese Aufnahmen zeigen ein spektakuläres Quantenphänomen: Demnach lässt sich das Tieftemperatur-Verhalten der elektronischen Quasiteilchen, der Exzitonen, in den atomar-dünnen Halbleitern nur durch die gleichzeitige Bewegung in entgegengesetzte Richtungen erklären – also durch einen Überlagerungszustand. „Unsere Forschung könnte ein wichtiger Schritt von der Elektronik zur Quantentechnologie sein.“

Leuchtende Quasiteilchen für „Quantech“

Luminous Quasiparticles for “Quantech”

Alexey Chernikov is illuminating the enigmatic world of quantum physics. He reveals quantum mechanical quasiparticles within nanocrystals with a thickness of just a few atoms. In these ultrathin crystals, quasiparticles are not only robust, but also exhibit strong interactions, and can be precisely controlled with electric and magnetic fields. Chernikov's goal is to decode these exotic particles and influence their motion. To resolve their ultrafast dynamics, he captures them in real time using specialized microscopes with picosecond resolution (one-trillionth of a second).

The key tool he and his team use is light: “We excite the material with ultrashort light pulses from a high-intensity laser, then track the emitted light using ultra-fast detectors.” These reveal a spectacular quantum phenomenon: The low-temperature behaviour of the electronic quasiparticles, known as excitons, in these atomically thin semiconductor samples can only be rationalized by their simultaneous movement in opposite directions, i.e., a state of quantum superposition. “Our research could mark a significant milestone in transitioning from electronics to quantum technology.”



Ultraschnelle Mikroskopie und Photonik, Institut für Angewandte Physik, TU Dresden

Alexey Chernikov

#Ungewöhnlich:

ct.qmat-Professor Chernikov beweist experimentell, dass sich elektronische Quasiteilchen gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen bewegen können. Dies ebnet neuen topologischen Phänomenen den Weg.

#Unusual ways:

Professor Alexey Chernikov's groundbreaking experiments at ct.qmat show how electronic quasiparticles can move simultaneously in opposite directions, opening the door to novel topological phenomena.

Fokus Quantenoptik

Focus on Quantum Optics



Theoretische Quanteninformation und Quantenoptik, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, JMU Würzburg

Adriana Pálffy-Buß

#Zusammenspiel:

ct.qmat-Professorin Pálffy-Buß untersucht Effekte, die sich im Atomkern durch die Wechselwirkung mit Röntgenstrahlen ergeben.

#The X factor:

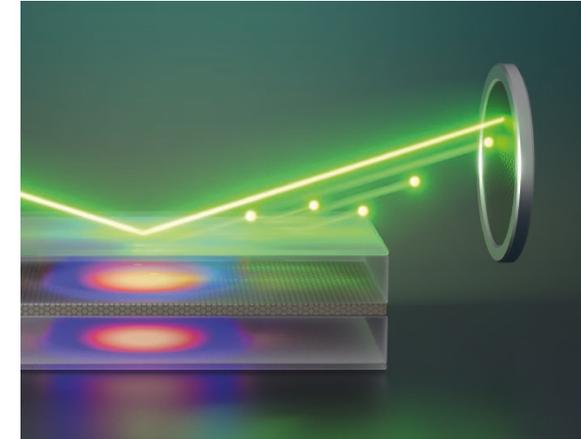
Professor Pálffy-Buß at ct.qmat investigates effects in the atomic nucleus induced by X-ray interactions.

Adriana Pálffy-Buß nutzt extrem kurzwellige Röntgenstrahlung statt sichtbarem Licht, um winzigste Teilchen zu erforschen. Die Wechselwirkung von Röntgenquanten mit Atomkernen soll der Materialforschung ganz neue Optionen eröffnen. Die Expertin auf dem jungen Forschungsfeld der Röntgenquantenoptik schreibt somit die Würzburger Röntgentradition in eine neue Quantenrichtung fort. Denn am Physikalischen Institut der Universität Würzburg entdeckte

Wilhelm Conrad Röntgen 1895 die „X-Strahlen“. „Würzburg ist nicht nur die Heimat der Röntgenstrahlung, sondern durch das Exzellenzcluster ct.qmat auch eine unglaublich spannende Forschungsumgebung für die Quantenphysik“, erklärt die Röntgenphysikerin.

Sie entwickelt theoretische Modelle für die Wechselwirkung von Licht und Materie, die Röntgenstrahlung bzw. -photonen anstelle des Laserlichts in den Mittelpunkt stellen. →

Denn um das Verhalten und die Struktur von Atomkernen zu erforschen, braucht es hochenergetische Lichtteilchen. Während die Elektronen der Atomhülle durch optisches Laserlicht angeregt werden, sind zur Anregung von Atomkernen Röntgenphotonen mit bis zu 150.000-fach größerer Energie notwendig. „Eine spannende Perspektive ist, die Streuung der Röntgenphotonen durch topologische Effekte gezielt zu kontrollieren und dadurch neuartige Möglichkeiten für die Materialanalyse zu erschaffen“, so Pálffy-Buß, deren theoretische Überlegungen zur „starken Kopplung“ von Röntgenstrahlen und Atomkernen experimentell bestätigt wurden.



Röntgenstrahlen werden von einem Quantenmaterial reflektiert.

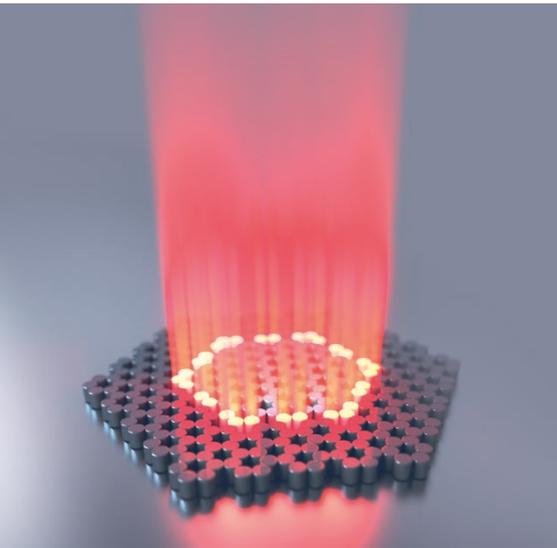
X-rays being reflected by a quantum material.

Instead of using visible light, Adriana Pálffy-Buß employs ultrashort-wavelength X-rays to study extremely tiny particles. The interaction between X-ray quanta and atomic nuclei holds promise for novel approaches in materials science. As a leading figure in the nascent field of X-ray quantum optics, Pálffy-Buß is steering Würzburg's X-ray legacy towards new quantum boundaries. After all, it was in Würzburg that Wilhelm Conrad Röntgen first discovered X-rays in 1895 at the Physikalisches Institut of Universität Würzburg. “As well as being the birthplace of X-rays, Würzburg is also an incredibly exciting research environment for quantum physics research thanks to ct.qmat,” says Pálffy-Buß.

She develops theoretical models focusing on the interactions between light and matter, specifically with X-rays and X-ray photons, rather than laser light. The study of atomic nuclei's behavior and structure necessitates high-energy light particles. While optical laser light can excite the electrons in an atomic shell, it takes X-ray photons – with up to 150,000 times more energy – to stimulate atomic nuclei. “One fascinating prospect is to use topological effects to specifically control the scattering of X-ray photons, thus paving the way for new material analysis methods,” elaborates Pálffy-Buß, whose theoretical work on the “strong coupling” of X-rays with atomic nuclei has already been experimentally validated.

Topologische Funktionalität

Tailoring Topological Functionality



Die Arbeit zum topologischen Laser war unter den Top-Ten-Nominierungen für den „Physics World 2021 Breakthrough of the Year“-Award. Die Illustration zeigt 30 topologisch gekoppelte vertikale Mikrolaser, die sich wie ein einziger, stärkerer Laser verhalten. Gemeinsam strahlen sie kohärentes Laserlicht aus.

The topological laser project was shortlisted among the top ten nominees for the Physics World 2021 Breakthrough of the Year Award. This illustration depicts 30 topologically coupled vertical microlasers functioning in unison as a single, more powerful laser. Collectively, they emit coherent laser light.

Mit einem hocheffektiven Laser-Netzwerk in Sandkorngroße hat ein israelisch-deutsches **ct.qmat**-Forschungsteam international für Aufsehen gesorgt. Unter Leitung von Sebastian Klembt aus Würzburg und dem externen Cluster-Mitglied Mordechai Segev vom Technion in Haifa wurde erstmals ein Netzwerk oberflächenemittierender Laser dazu gebracht, gemeinsam wie ein einziger Laser zu agieren. Dieser topologische Superlaser verbindet vertikale Resonatoren, also extrem kleine optische Systeme, um maximale Leistung auf minimalem Raum zu erreichen. Schon heute werden Mikrolaser – Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) genannt – unter anderem für Mobiltelefone oder Autosensoren genutzt. Doch die Ausgangsleistung, die diese Bauelemente erzeugen können, war bislang sehr eingeschränkt. „Unser Projekt verspricht hier neues Potenzial“, so Klembt. Die Zahl der winzigen VCSEL-Komponenten ist nicht begrenzt, weder Defekte noch Temperaturschwankungen beeinträchtigen die Leistung des Netzwerks. „Dieses Konzept ebnet den Weg für eine Reihe künftiger Technologien im Bereich der medizinischen Geräte, der Kommunikation und für eine Vielzahl praktischer Anwendungen.“

Superlaser für neue Technologien

Superlaser Powering New Technology

#Fortschrittlich:

ct.qmat-Professor Klembt überträgt topologische Konzepte auf photonische Systeme und hat dabei künftige technologische Anwendungen im Blick.

#Progressive:

Professor Klembt from **ct.qmat** applies topological concepts to photonic systems, keeping a keen eye on their potential future technological applications.

By developing a highly effective laser array the size of a grain of sand, an Israeli-German research team from **ct.qmat** has caused a stir internationally. Led by Sebastian Klembt from Würzburg and Mordechai Segev (an external member of **ct.qmat**) from the Technion in Haifa, an array of surface-emitting lasers has been engineered to function cohesively like a single laser for the first time. This innovation transforms these compact, industry-compatible surface emitters into a formidable topological laser. This “superlaser” combines minuscule optical systems known as vertical resonators, optimizing their power output in an exceptionally small footprint. VCSELs (vertical-cavity surface-emitting lasers) are microlasers already integral to everyday devices like smartphones and car



Licht-Materie-Wechselwirkung und Topologische Photonik, Physikalisches Institut, JMU Würzburg

Sebastian Klembt

sensors. Until recently, the output of these tiny components was very limited, but, as Klembt notes: “Our project unlocks new potential in this realm.” The number of VCSELs that can be used is virtually unlimited, and the array’s efficiency remains unimpeded by flaws or temperature variations. “Our approach paves the way for a raft of future technologies, ranging from medical and communication applications to various practical implementations.”

Topologischer Drucksensor mit Potenzial

Game-Changing Topological Pressure Sensor

Kompakte, zuverlässige und kostengünstige Sensoren sind zunehmend gefragt. Bei der automatisierten Datenerfassung – unter anderem durch Industrieroboter oder in der Ermüdungsüberwachung – spielen speziell kraftempfindliche elektronische Komponenten eine wichtige Rolle. Oft ist die Miniaturisierung bei der Drucksensorik jedoch mit größerer Fertigungskomplexität verbunden, was wiederum die Herstellungskosten deutlich erhöht.

Hier setzt ein neuartiger topologischer Drucksensor an, den **ct.qmat**-Forschende in Dresden entwickelt haben und der vergleichsweise einfach herstellbar ist. Denn bei diesem optoelektronischen Bauteil werden zum Beispiel organische Materialien verwendet, die sich mit etablierten Dünnschichttechniken verarbeiten lassen. Das Bauelement kann auf fast jedem Substrat aufgebracht werden. Der neue Sensor ermöglicht, die Belastung von Brücken, in Flugzeugtriebwerken oder tragenden Maschinenteilen kostengünstig und einfach zu überwachen. Durch sein modulares Aufbauprinzip lässt er sich an älteren Anlagen nachrüsten sowie an verschiedene Belastungsszenarien anpassen.

*Doktorand Jakob Lindenthal, der für **ct.qmat** an der TU Dresden forscht, präsentiert den topologischen Drucksensor.*

*PhD student Jakob Lindenthal, currently conducting research for **ct.qmat** at TU Dresden, presenting the new topological pressure sensor.*

#Clever:

*Kompakter topologischer Drucksensor aus dem **ct.qmat**-Labor eignet sich für smarte, vernetzte Messsysteme in vielen Bereichen der Technik.*

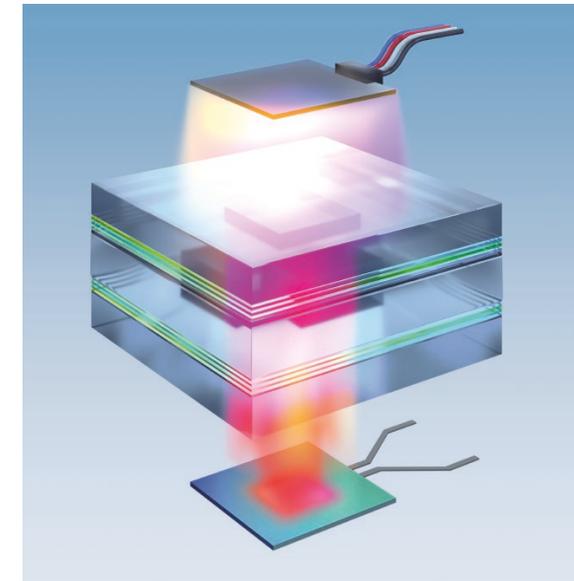
#Ingenious:

*The compact topological pressure sensor developed in **ct.qmat**'s laboratories is ideal for smart, networked measuring systems.*

The demand for compact, reliable, and cost-effective sensors, especially those sensitive to pressure, is growing. These components are crucial in automated data collection, for example by industrial robots or in fatigue monitoring. However, the miniaturization of pressure sensors often leads to increased complexity and cost in their production.

Enter the novel topological pressure sensor being developed by **ct.qmat** researchers in Dresden. This innovative optoelectronic device incorporates organic materials, which can be processed using established thin-film techniques. The sensor's versatile design allows it to be implemented on almost any substrate, and it can be used, for example, to easily and cost-effectively monitor the strain on bridges, in aircraft engines, and on load-bearing components in machinery. Thanks to its modular design, the sensor can also be retrofitted to existing systems and adapted to various load scenarios.

Der Aufbau des topologischen Drucksensors in einer schematischen Darstellung. Zwischen zwei Spiegeln schwingt Licht, dessen Wellenlänge vom Spiegelabstand abhängt. Der Raum zwischen den Spiegeln enthält ein Material, das wiederum abhängig von der Wellenlänge Licht absorbiert. Bei Druck ändert sich der Abstand zwischen den Spiegeln und die Änderung der Lichtdurchlässigkeit wird durch eine Photodiode gemessen. Indem für die beiden Spiegel eine spezielle topologische Geometrie verwendet wird, lässt sich die Messgenauigkeit des Sensors deutlich verbessern.



Schematic illustration of the topological pressure sensor. Light oscillates between two mirrors, its wavelength varying based on the distance between them. The gap between the mirrors contains a light-absorbing material responsive to different wavelengths. When pressure is applied, the gap alters. The resulting change in light transmission is measured by a photodiode. The sensor's precision is further enhanced by employing a unique topological geometry for the mirrors.

Quantum Matter Academy

Beste Startbedingungen für die nächste Wissenschaftsgeneration hat **ct.qmat** mit der Quantum Matter Academy (QMA) geschaffen. Das auf Doktorand:innen ausgerichtete Programm bietet clusterbezogene Lehre und eine strukturierte Betreuung bei der wissenschaftlichen Arbeit. Die jungen Leute kommen aus aller Welt, zum Beispiel aus der Europäischen Union, Indien oder Brasilien. In der QMA lernen sie die gesamte Bandbreite der Forschung kennen und entwickeln Gemeinschaftsgeist. Damit sie auf ihrem Karriereweg schneller vorankommen, werden ebenfalls Softskills wie Business-

Etikette oder Teamfähigkeit vermittelt. Ein Qualitätsmanagement sorgt dafür, dass Promotionen im Zeitrahmen bleiben. Das Mitspracherecht des akademischen Nachwuchses ist durch gewählte QMA-Präsident:innen in den Cluster-Gremien gesichert. Zu den Highlights gehören die QMA-Klausurtagungen, von Doktorand:innen organisierte Networking-Events. Ein weiteres **ct.qmat**-Flaggschiff ist das Hallwachs-Röntgen-Postdoc-Programm, das außergewöhnlichen Talenten exzellente Arbeitsbedingungen an der JMU Würzburg, der TU Dresden bzw. den Cluster-Partnerinstitutionen bietet.

#Starthilfe:

In der Quantum Matter Academy wird der Forschungsnachwuchs von **ct.qmat** auf eine erfolgreiche Laufbahn vorbereitet. Herausragende Postdocs unterstützen das Hallwachs-Röntgen-Programm.

#Jump start:

At the Quantum Matter Academy, young researchers from **ct.qmat** are prepared for successful scientific careers. Outstanding postdocs are supported under the Hallwachs-Röntgen Program.

The QMA, set up primarily for doctoral students by **ct.qmat**, sets the stage for the next wave of scientific pioneers. This program combines cluster-based education with structured guidance for research endeavors. It attracts a diverse group of young talents from around the globe, including the European Union, India, and Brazil. At the QMA, they're immersed in a comprehensive research spectrum and a community-centric environment. →

Booster für weltweite Karrieren — Fostering Future Leaders in Quantum Research



Mehr über die QMA erfahren?
Want to find out more about the QMA?
ctqmat.de/quantum-matter-academy

The curriculum goes beyond technical skills, incorporating essential soft skills like business etiquette and teamwork, thus accelerating participants' career progression. A robust quality management system is in place to ensure the timely completion of doctoral studies. Moreover, elected QMA representatives on cluster committees give a voice to the academic aspirations of these young scholars. The QMA retreats, networking events organized by doctoral candidates, stand out as key experiences. Another flagship initiative is the Hallwachs-Röntgen Postdoc Program, offering top-tier postdoctoral talents exceptional working conditions at JMU Würzburg, TU Dresden, and **ct.qmat**'s partner institutions.



In der QMA gibt es Hilfe beim Karrierestart und ein tolles Team (im Bild rechts: QMA-Koordinatorin Kerstin Brankatschk).

Discover the career-boosting opportunities at the QMA, backed by a supportive team (right: QMA coordinator Kerstin Brankatschk).

Grete Hermann Network



Frauen bringen die Forschung voran, auch in der Quantenphysik! Deshalb setzt sich das Grete-Hermann-Netzwerk (GHN) für Vielfalt und Chancengleichheit in der Wissenschaft ein. Der internationale Zusammenschluss von Forscherinnen auf dem Gebiet der Physik kondensierter Materie wurde vom Exzellenzcluster **ct.qmat** ins Leben gerufen. Namensgeberin ist die herausragende deutsche Mathematikerin, Physikerin, Philosophin und Pädagogin Grete Hermann (1901 – 1984). Das Netzwerk fördert und verbindet Wissenschaftlerinnen auf allen Karrierestufen, um deren Sichtbarkeit und Bekanntheitsgrad zu erhöhen. Es unterstützt sie in ihrer akademischen Laufbahn, zum Beispiel durch Mentorinnen oder mit verschiedenen Austauschformaten. Zu den GHN-Treffen versammelt sich die weibliche Forschungselite der Quantenphysik, Teilnehmerinnen kamen bisher unter anderem aus Australien, Frankreich, Japan, Schweden und den USA. Nicht zuletzt präsentiert das Netzwerk durch seine Arbeit erfolgreiche Rollenvorbilder, um speziell Mädchen und jungen Frauen den Weg in die Physik zu ebnen und so einen Pool neuer Talente zu erschließen.

Frauenpower für die Quantenphysik! _____ Superwomen for Quantum Physics!

#researchHER:

Das einzigartige Grete-Hermann-Netzwerk verbindet Forscherinnen weltweit. Die Professorinnen, Postdoktorandinnen und Doktorandinnen arbeiten an zukunftsweisenden Fragen der Quantenphysik.

#researchHER:

The Grete Hermann Network is an exceptional initiative connecting female professors, postdocs, and PhD students dedicated to pioneering work in quantum physics.

Women push the research envelope, and that goes for quantum physics, too! The Grete Hermann Network embodies this spirit of diversity and equality in the scientific community. Established by **ct.qmat**, this international network of women in condensed matter physics honors the legacy of Grete Hermann (1901–1984), a remarkable German mathematician, physicist, philosopher, and educator. The GHN is committed to supporting and elevating women scientists across various stages of their careers, enhancing their visibility in the field. Through mentoring, a range of exchange formats, and collaborative opportunities, the network fosters a supportive environment for its members' professional growth. The GHN's gatherings attract the *crème de la crème*

of female quantum physics researchers, drawing participants from countries like Australia, France, Japan, Sweden, the USA, and beyond. A key focus of the GHN is to showcase successful female role models in physics, particularly inspiring girls and young women to enter the field and thus tapping into a reservoir of emerging talent.



Teil des Grete-Hermann-Netzwerks werden?

How about joining the Grete Hermann Network?"

ctqmat.de/grete-hermann-network

Reichweite Outreach

Mehr als eine halbe Million Mal hat's in der Kiste gerappelt: So oft wurde die App „Katz Q – Ein Quanten-Adventure“ seit ihrer Veröffentlichung weltweit heruntergeladen. **ct.qmat** hat das Spiel für Handy und Tablet gemeinsam mit dem preisgekrönten App-Designer Philipp Stollenmayer entwickelt. Hauptfigur ist eine süße, halb tote Katze, mit der sich Kinder und Jugendliche durch die verrückte Quantenwelt rätseln. Der Fokus richtet sich besonders auf Schüler:innen ab elf Jahren – speziell Mädchen. Denn viel zu wenige entdecken bisher den Spaß an der Physik, in den Studiengängen des Fachs sind junge Frauen unterrepräsentiert.



Mit der App traf **ct.qmat** ins Schwarze: „Katz Q“ wurde mit internationalen Preisen überhäuft – und die Begeisterung für das Schmusetier ist ungebrochen. Es hat sogar einen eigenen deutschen Wikipedia-

Eintrag. Doch das Quantenabenteuer geht weiter! Die erste Fortsetzung erlebte es mit der zwölfteiligen Serie „QUANTube – Kurze Pause Wissenschaft“: In witzigen YouTube-Videos beantworten junge Forschende Physikfragen aus der ganzen Welt.

Das Konzept wurde ebenfalls ausgezeichnet. 2024 folgt mit dem „Katz Q“-Escape Room in Dresden das nächste Highlight. Und **ct.qmat** arbeitet mit Lehrkräften weiterhin engagiert daran, den Spaß an der Quantenphysik in die Schulen zu tragen.



Quantenkatze streicheln?
katzeq.app



Ready to join Kitty Q on a quantum escapade?
kittyq.app



Quantenwohnung betreten?
Ever wondered what a quantum apartment looks like?
schule.katzeq.app

Eine Katze begeistert für Physik _____ A Quantum Adventure with Kitty Q

#Quantenwelt erleben:

Wie viel Spaß Forschung macht, zeigt **ct.qmat** mit der verspielten Katze Q, der Videoreihe QUANTube – und 2024 mit dem ersten Escape Room zur Quantenphysik in Deutschland für Kinder.

#Diving into the quantum realm:

ct.qmat turns research into a delightful adventure with the engaging Kitty Q, the QUANTube video series, and in 2024, by launching Germany's first quantum physics escape room for kids.



Since its launch, the app Kitty Q – A Quantum Adventure has been a global hit, amassing over half a million downloads. Developed by **ct.qmat** in collaboration with acclaimed app designer Philipp Stollenmayer, this mobile game captivates children and teens with its adorable protagonist – a cute, half-dead cat. Players are drawn into the crazy quantum universe, solving puzzles and unraveling mysteries. The game is particularly tailored for school students aged eleven up, with a special focus on engaging girls – who are underrepresented in physics and related academic fields. The success of the Kitty Q app speaks for itself, having garnered multiple international accolades. The charming feline even boasts

its own German Wikipedia page. But the quantum journey doesn't stop there! The adventure continues with the award-winning 12-part series QUANTube – Science Break, where young researchers humorously tackle physics queries from around the globe in entertaining YouTube videos. And the next big thing? The Kitty Q Escape Room set to open in Dresden in 2024! Meanwhile, **ct.qmat** is actively collaborating with teachers to bring the fun and excitement of quantum physics into classrooms.



Mehr Quantenwissen?
Eager for more quantum insights?
youtube.com/ctqmat



Exzellentes Team

Neben den Principal Investigators als wissenschaftlichem Kernteam von **ct.qmat** stehen ebenfalls die assoziierten Mitglieder für hohe wissenschaftliche Exzellenz, thematische Bandbreite sowie herausragende Forschungsergebnisse.

Excellent Team

Alongside the Principal Investigators – **ct.qmat**'s scientific core team – the Associated Members also deliver scientific excellence and outstanding findings in a wide range of fields.

- 1 Carsten Timm
- 2 Michael Ruck
- 3 Martin Stehno
- 4 Sebastian Klemmt

- 5 Michael Sing
- 6 Tobias Meng
- 7 Ronny Thomale
- 8 Giorgio Sangiovanni

- 9 René Meyer
- 10 Björn Trauzettel
- 11 Matthias Vojta
- 12 Johanna Erdmenger

- 13 Jan Carl Budich
- 14 Ion Cosma Fulga
- 15 Adriana Pálffy-Buß
- 16 Tobias Kießling

- 17 Matthias Bode
- 18 Ralph Claessen
- 19 Jeroen van den Brink
- 20 Fakher Assaad

- 21 Louis Veyrat
- 22 Georgy Astakhov
- 23 Lukas Janssen
- 24 Friedrich Reinert

Impressum

Herausgeber | **Published by**

Exzellenzcluster **ct.qmat** – Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien

Cluster of Excellence **ct.qmat** – Complexity and Topology in Quantum Matter

Das Exzellenzcluster wird im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder gefördert.

The Cluster of Excellence is funded through the German Excellence Strategy of the Federal and State Governments.

Inhaltliche Verantwortung |

Responsible for content

Ralph Claessen & Matthias Voita,
Sprecher | Spokespersons of **ct.qmat**

Redaktion | **Edited by**

Katja Lesser, Referentin für
Wissenschaftskommunikation,
Science Communication Officer, **ct.qmat**

Text | **Written by**

Cathrin Günzel

Übersetzung | **Translated into English by**

Chris Abbey

Gestaltung | **Layout by**

Jörg Bandmann, pixelwg

Druck | **Printed by**

addprint AG, Bannewitz

Fotos | **Photos by**

Tobias Ritz

außer | **except**

Daniel Peter (6, 34), Bkfofilm (25),
Bilderstolz (22), Robert Emmerich (18)

Illustration | **Illustrations by**

Jörg Bandmann, pixelwg

außer | **except**

Philipp Stollenmayer, kamibox (10, 32)
Tamschick Media+Space GmbH/
Philipp Stollenmayer, kamibox (10)

Auflage | **Print run**

10.000 | 01/2024



MAX - PLANCK - INSTITUT
FÜR CHEMISCHE PHYSIK FESTER STOFFE



Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Exzellenzcluster **ct.qmat**
Physikalisches Institut
Am Hubland
97074 Würzburg, Germany
Fon +49 931 31-88951
Fax +49 931 31-88951-0
ao.ct.qmat@listserv.dfn.de



Technische Universität Dresden

Exzellenzcluster **ct.qmat**
Institut für Theoretische Physik
01062 Dresden, Germany
Fon +49 351 463-33851
Fax +49 351 463-37258
ao.ct.qmat@listserv.dfn.de

ctqmat.de

Mehr Quantenphysik?

Der Zwischenbericht des Exzellenzclusters **ct.qmat** steht auf **ctqmat.de/report** zum Download zur Verfügung.

More quantum physics?

The Mid-Term Report of the Cluster of Excellence **ct.qmat** can be downloaded from: **ctqmat.de/report**



