Hintergrundinformationen über das Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Phänomene im Wechselspiel zwischen Licht und Materie

Am Anfang war das Licht

Ende des 19. Jahrhunderts war zweifelsfrei belegt, dass sich Licht als elektromagnetische Welle im Raum ausbreitet. Doch kaum schien das Rätsel um das Wesen dieses flüchtigen Mediums vollständig gelöst zu sein, da offenbarte es den Physikern eine ganz andere Seite: Aus experimentellen Beobachtungen schlossen zunächst Max Planck (1900) und ein paar Jahre später Albert Einstein (1905), dass sich Licht unter bestimmten Bedingungen wie ein Schauer aus Teilchen, den Lichtquanten oder auch „Photonen", verhält.

Mit der Entdeckung der Quanteneigenschaften des Lichts nahm die Quantenrevolution ihren Lauf. Zunächst von Louis de Broglie (1924) kühn konzipiert, ließ sich alsbald experimentell nachweisen, dass sich dieser Welle-Teilchen-Dualismus auch auf alle elementaren Bausteine der Materie, wie etwa die Elektronen und Atome, erstreckt. Wellen- und Teilchencharakter eines Quantenobjekts gehören zusammen und ergänzen sich, wie die zwei Seiten einer Medaille, sie sind zueinander komplementär.

Die Konsequenzen aus diesem Dualismus formuliert die Theorie der Quantenmechanik. Danach können zwei sich ergänzende Größen wie etwa der Ort und der Impuls eines Quantenteilchens nicht gleichzeitig scharf, sondern nur mit einer durch die Heisenbergsche Unschärferelation begrenzten Genauigkeit gemessen werden. Quantenteilchen befinden sich ferner in einer „Superposition" aus mehreren Zuständen, und ihr zukünftiges Verhalten kann nicht mehr mit Gewissheit, sondern nur mit einer durch die Quantenmechanik festgelegten Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden.

Diese Regeln stellen einen Bruch mit der deterministischen klassischen Mechanik dar, die offenbar im Reich der Quantenteilchen, dem Mikrokosmos, nicht mehr gilt. Dennoch hat sich die Quantenmechanik als außerordentlich erfolgreiche Theorie erwiesen. Sie erklärt die Struktur der Atome und ihre Spektren und beschreibt, wie sich die Elektronen um den Atomkern bewegen. Die Kenntnis der quantenmechanischen Regeln ermöglichte unter anderem auch die Entwicklung des Lasers.

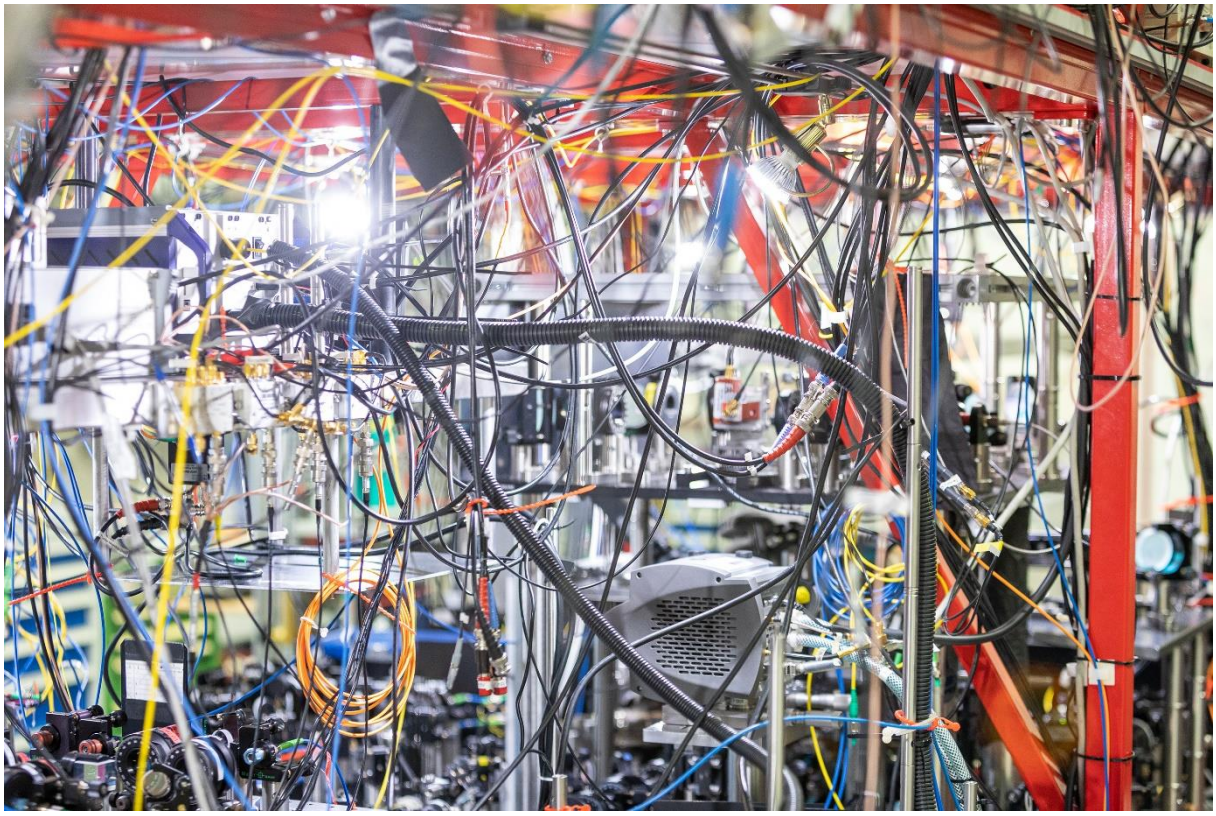
Die paradoxe Welt der Quantenteilchen

Auf größere Ensembles von Quantenteilchen angewandt führen die Gesetze der Quantenmechanik zu statistischen Aussagen, die mit unseren Alltagserfahrungen durchaus im Einklang stehen. Doppelspaltexperimente mit sehr dünnen Elektronen- oder Photonenstrahlen, bei denen die Teilchen die Spalte einzeln passieren, führen dagegen zu seltsamen Ergebnissen. Hier baut sich allmählich, Punkt für Punkt, auf dem Bildschirm ein Interferenzmuster auf, ganz so, als ob die Teilchen voneinander wüssten.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Geradezu paradox und anscheinend in Konflikt mit der Realität aber sind die Szenarien, die sich in letzter Konsequenz für das Verhalten eines einzelnen Teilchens ergeben. Folgt etwa aus der Unschärferelation, dass ein Elektron gleichzeitig durch zwei Gitterspalte fliegen kann? Bei der Suche nach Antworten auf solche Fragen entwarfen Wissenschaftler „Gedankenexperimente“, einige mit dem Ziel, die Quantentheorie aufgrund ihrer paradoxen Konsequenzen zu widerlegen oder ihre Unvollständigkeit zu demonstrieren. Seit rund 20 Jahren werden Techniken entwickelt und verfeinert, mit denen sich einzelne Quantenteilchen isolieren, beobachten und manipulieren lassen. Dass diese Experimente das von der Theorie vorhergesagte ungewöhnliche Verhalten der Quantenteilchen bestätigen, bezeichnen Wissenschaftler auch als zweite Quantenrevolution. So können z. B. zwei Quantenteilchen, etwa zwei von einem Atom ausgesandte Photonen, in einem „verschränkten“ Zustand sein. Ihre Eigenschaften sind dann streng korreliert, und zwar unabhängig davon, wie weit die Teilchen voneinander entfernt sind. Diese nichtlokale, von Albert Einstein auch als „spukhaft“ bezeichnete Fernwirkung ist von zentraler Bedeutung für die Quanteninformationsverarbeitung und eine Voraussetzung für die „Teleportation“ von Quantenzuständen.

Die Erforschung und Nutzung der seltsamen Eigenschaften von Quantenteilchen zählen heute zu den wichtigsten Themen in der experimentellen und theoretischen Quantenoptik. Im Kontext dieser Grundlagenforschung entstehen neuartige Messinstrumente und Lichtquellen, die schon in vielen Bereichen praktisch angewendet werden.



Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Forschen an den Grenzen des Möglichen - Vom Quantencomputer zu medizinischen Röntgengeräten

Licht spielt eine Schlüsselrolle in der Forschung des MPQ, sowohl für das tiefere Verständnis von Quantenmaterie als auch für die Entwicklung neuer Konzepte, Messtechniken und Lichtquellen, die Auswirkungen auf viele Anwendungsbereiche haben, von der Kommunikation bis hin zu neuen Diagnosegeräten.

Quantenteilchen unter Kontrolle

Ein Schwerpunkt ist dabei die Kontrolle der Quantenmaterie, die sich mittlerweile stetig der durch die Heisenbergsche Unschärferelation gesetzten Grenze nähert. Denn die Wissenschaftler sind in der Lage, mit Laserlicht oder elektromagnetischen Feldern einzelne Atome oder Moleküle einzufangen und in Wechselwirkung mit einzelnen Photonen zu bringen. Solche isolierten Teilchen ließen sich als Quanten-Bits in zukünftigen Quantencomputern einsetzen. Während ein klassisches Bit entweder den Zustand 0 oder den Zustand 1 repräsentiert, kann sich ein Quanten-Bit gleichzeitig in allen möglichen Überlagerungen von zwei Zuständen – z. B. zwei verschiedenen elektronischen Anregungs- oder Polarisationszuständen – befinden. Ein Quantencomputer aus einem Netz solcher Quanten-Bits würde alle Überlagerungen parallel bearbeiten und könnte daher bestimmte Probleme weit effizienter lösen als ein klassischer Rechner. Über weite Strecken könnten Quanten-Bits z. B. über einzelne Lichtquanten kommunizieren. Die dafür notwendigen Verfahren ermöglichen es unter anderem auch, Daten abhörsicher auszutauschen. In diesem Kontext entwickeln die Theoretiker neue Algorithmen und Konzepte, die einen wichtigen Beitrag zu einer auf der Quantenmechanik beruhenden Informationstheorie leisten.

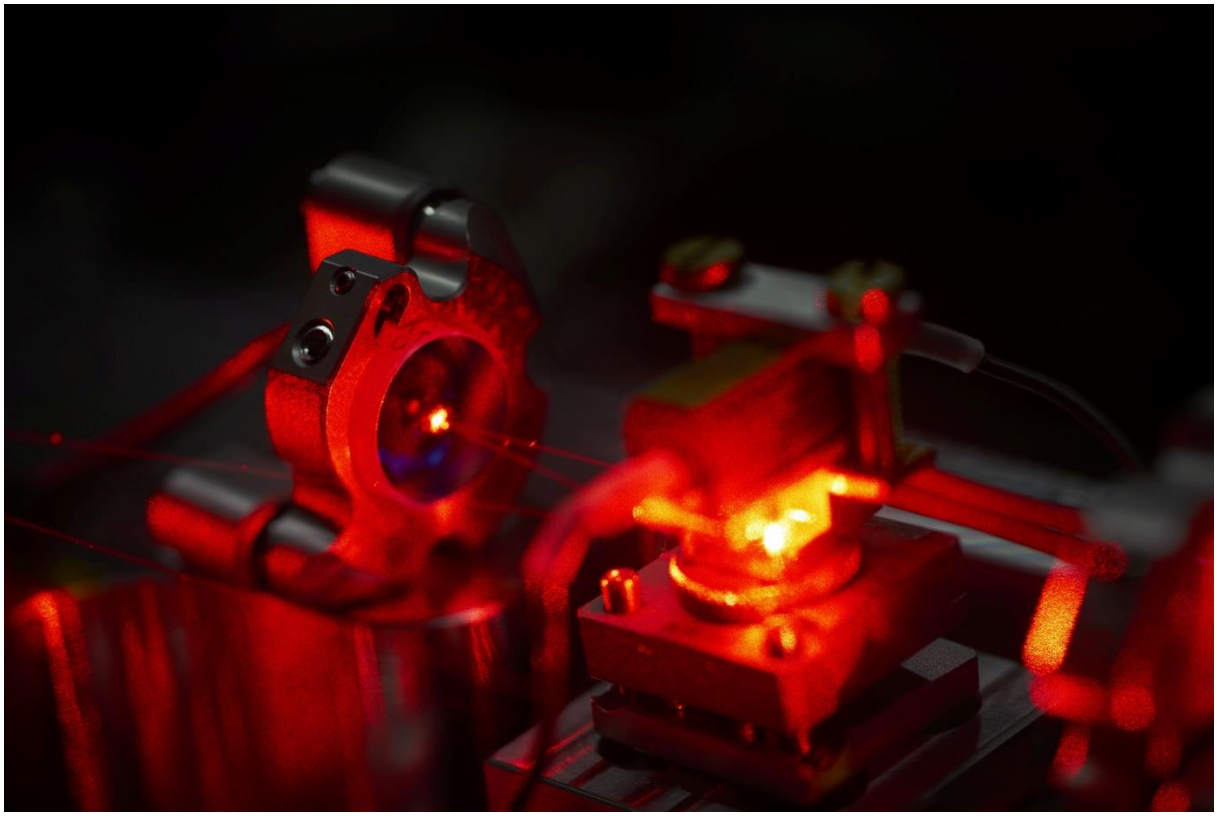
In anderen Versuchen werden Quantengase auf extrem tiefe Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt. Hier wirkt sich die Wellennatur der Teilchen zunehmend stärker aus, was zu vielfältigen Korrelationen innerhalb des Vielteilchensystems und schließlich zu der Entstehung neuartiger Materiezustände führt. Die dabei aufgeworfenen Fragestellungen werden auch theoretisch untersucht und vertiefen das Verständnis vom kollektiven Zusammenspiel der Quantenteilchen, das z. B. für die elektrischen und magnetischen Eigenschaften von Festkörpern verantwortlich ist. Diese Forschung könnte zu neuen „maßgeschneiderten“ Materialien führen.

Neue Werkzeuge der Photonik

Pionierarbeiten leisten die MPQ-Wissenschaftler bei der Entwicklung neuartiger Lichtquellen und Messinstrumente, die sowohl große Bedeutung für die Grundlagenforschung als auch weit reichende Anwendungsmöglichkeiten haben. So wurde der nobelpreisgekrönte Frequenzkamm – ein „Lichtlineal“ aus (bis zu) einigen Millionen äquidistanter Spektrallinien – ursprünglich entwickelt, um anhand der hochpräzisen Spektroskopie von Wasserstoff die Naturkonstanten zu überprüfen. Mittlerweile hat er eine ganze Palette von Anwendungen gefunden, von der Metrologie, bei der er völlig neue Standards gesetzt hat, über den Bau präziser Atomuhren bis zur Spurengasanalyse. Vollkommene Kontrolle über die Schwingungen von Licht wird auch in den Experimenten mit Hochleistungslasern erzielt. Diese Arbeiten stehen ganz im Zeichen der Beobachtung und Steuerung von Elektronen, die bei vielen fundamentalen

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Prozessen eine wichtige Rolle spielen, ob in Atomen, Molekülen, Festkörpern oder elektronischen Bauteilen. Mit Lichtblitzen von nur Attosekunden-Dauer (1as = 10-18 sec), die in aufwendigen Lasersystemen erzeugt werden, kann die Bewegung der Elektronen direkt „gefilmt“ werden. Auf diese Weise werden erstmals sogar quantenmechanische Vorgänge einer direkten Beobachtung zugänglich. Hochintensive Laserpulse aus nur wenigen Schwingungen mit perfekt kontrollierter, „maßgeschneiderter“ Wellenform können die Elektronen in komplexen Molekülen direkt steuern und so z.B. chemische Reaktionen beeinflussen. In anderen Lasersystemen reißen starke Lichtpulse die Elektronen aus heißen Gasatomen und beschleunigen sie auf beinahe Lichtgeschwindigkeit. Diese Arbeiten führen zu Röntgenquellen höchster Qualität und zu kompakten lasergetriebenen Teilchenquellen, welche unter anderem die Diagnose und die Therapie von Krebserkrankungen verbessern könnten.



Die Geschichte des MPQ

Mit der Erfindung des Lasers im Jahr 1960 stand Wissenschaftlern ein Instrument zur Verfügung, das Strahlung einer völlig neuen Qualität lieferte: Licht, das streng gebündelt, monochromatisch und vor allem kohärent ist.

Das große Potential dieser neuen Lichtquelle erkannten Anfang der 70er Jahre auch zwei Mitarbeiter des Max- Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP), Prof. Karl-Ludwig Kompa und Dr. Siegbert Witkowski. Die

von ihnen beim Bundesforschungsministerium beantragte „Projektgruppe für Laserforschung“ wurde 1976 am IPP gegründet. Dritter im Bunde war Prof. Herbert Walther, der 1976 eine Doppelberufung als Lehrstuhlinhaber für Experimentalphysik an der Ludwig- Maximilians-Universität München (LMU) und als Max-Planck-Direktor erhielt.

Von Anfang an verlief die Forschung der Projektgruppe, die 1981 in das Max-Planck-Institut für Quantenoptik umgewandelt wurde, zweigleisig. Zum einen ging es um die Entwicklung von Hochleistungslasern, die 1986 in die Betriebnahme des photochemischen Jodlasers Asterix mündete. Doch auch die Nutzung von Laserlicht für die Erforschung der Quantenwelt gewann in zunehmendem Maße an Bedeutung. Während Prof. Kompa die Reaktionsdynamik komplexer Moleküle mit Laserpulsen von Femtosekunden-Dauer untersuchte, hantierte Prof. Walther mit einzelnen Atomen und Ionen und studierte deren Wechselwirkung mit einzelnen Lichtquanten. Seine Arbeiten zeigten unter anderem den Weg zu besonders präzisen Atomuhren auf.

Die vielen Facetten der Quantenoptik finden sich auch im gegenwärtigen Forschungsprogramm des MPQ wieder. So hat die 1986 gegründete Abteilung Laserspektroskopie von Prof. Theodor W. Hänsch einerseits die Überprüfung der Naturkonstanten mit Hilfe der hochpräzisen Spektroskopie im Fokus. Andererseits dient der in diesem Kontext entwickelte Frequenzkamm, für den Prof. Hänsch 2005 den Nobelpreis für Physik erhielt, weltweit als Werkzeug in der Laserentwicklung. Aber auch das Verhalten extrem kalter Quantenmaterie wird in seiner Abteilung untersucht. Die Quantenphysik steht ebenfalls im Mittelpunkt der Abteilungen Quantendynamik (gegr. 1999 von Prof. Gerhard Rempe), Theorie (gegr. 2001 von Prof. Ignacio Cirac) und Quanten-Vielteilchensysteme (gegr. 2008 von Prof. Immanuel Bloch). Hier geht es um die Kontrolle und Steuerung einzelner Atome und deren Wechselwirkung mit einzelnen Photonen, sowie um die Manipulation dünner, extrem kalter Quantengase. Vor allem die Abteilung Theorie erforscht die Möglichkeiten, Quanteninformation zu verarbeiten und zu kommunizieren. Der Schwerpunkt Laserentwicklung wird heute vor allem in der Abteilung Attosekundenphysik von Prof. Ferenc Krausz (gegr. 2003) verfolgt. Seine Lasersysteme liefern ultrakurze Pulse mit Leistungen von bis zu 100 Terawatt. Ein Petawatt-Laser, der noch zehnmal höhere Leistungen erreichen soll, ist im Aufbau. Doch auch die Forschung von Prof. Krausz hat engen Bezug zur Quantenwelt. Die in seiner Abteilung erzeugten ultrakurzen Lichtblitze ermöglichen die direkte Beobachtung quantenmechanischer Zustände und Übergänge. Gleichzeitig dienen die Hochleistungslaser der Entwicklung neuer Strahlung und Teilchenquellen für Anwendungen in der Medizin und Industrie.

Die fünf wissenschaftlichen Abteilungen

… sind die tragenden Säulen des Instituts. An der Spitze jeder Abteilung steht ein von der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) berufener Direktor. Im Unterschied zu anderen Forschungsorganisationen lässt die MPG den Direktoren freie Hand bei der Wahl ihrer Forschungsthemen und Mitarbeiter. Diese Strategie geht zurück auf Adolf von Harnack, den ersten Präsidenten der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Sie war Vorläufer der

1948 ins Leben gerufenen MPG. Im Mittelpunkt von Max-Planck-Instituten stehen herausragende, autonome Forscher mit internationalem Renommee.

Quantenvielteilchensysteme

Die Wechselwirkungen in Quanten-Vielteilchensystemen zu verstehen und für die Verarbeitung von Quanteninformation gezielt zu gestalten, zählt zu den größten Herausforderungen der Quantenphysik. Die Forschung der Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme hat den Schwerpunkt, solche steuerbaren Systeme mit ultrakalten atomaren und molekularen Quantengasen zu verwirklichen.

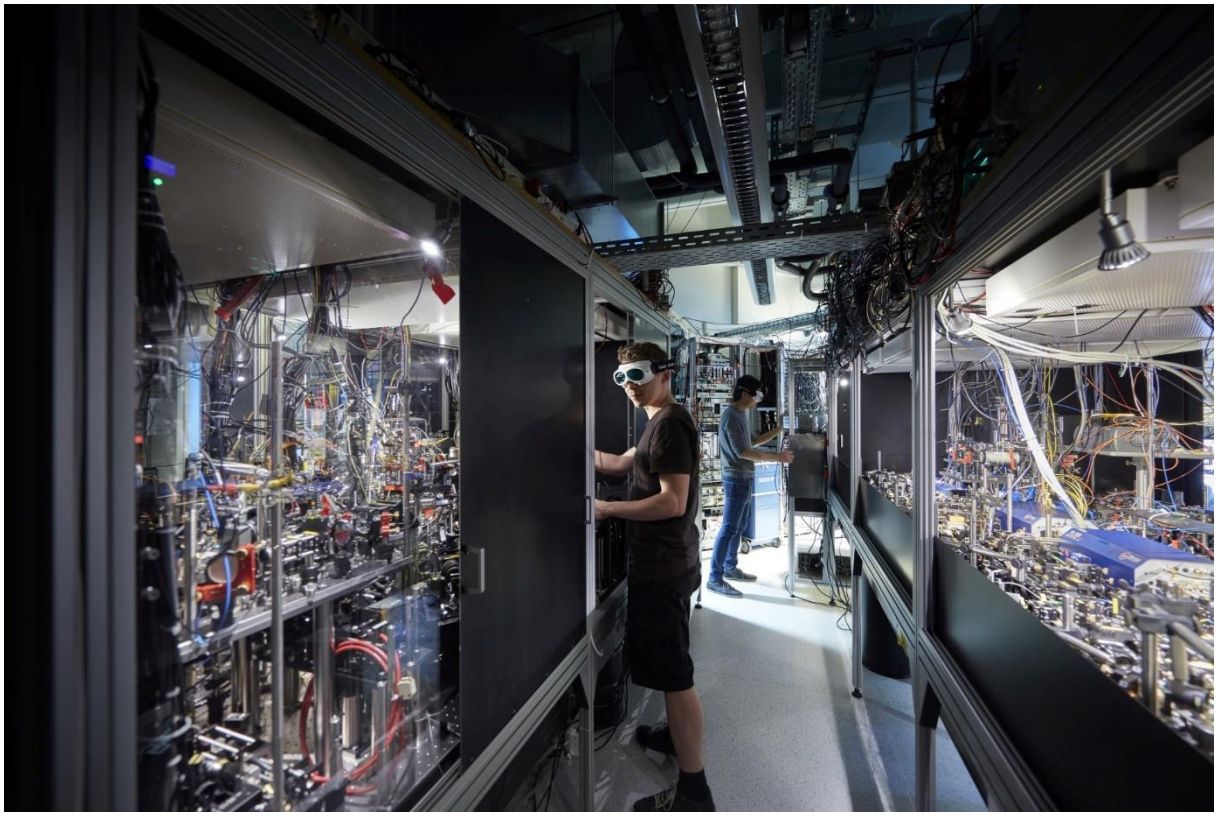
Quantengase als Modelle für Festkörper, Hilfsmittel zur Präzisionsspektroskopie und neuartige Systeme zur Quanteninformation

Ausgangspunkt für die Experimente der Arbeitsgruppe sind ultrakalte Quantengase aus Bosonen oder Fermionen, die in optischen und magnetischen Fallen gespeichert werden. Diesen atomaren oder molekularen Gasen wird z. B. ein Kristallgitter aus Licht überlagert, das die Teilchen in periodischen Potentialen festhält. So strukturierte Quantengase lassen sich als vielseitige Modelle in der Festkörperphysik nutzen, sie können aber auch als brauchbare Prozessoren von Quanteninformation dienen. Jedes einzelne von den mehreren hunderttausend Atomen im Lichtgitter muss dabei an der Grenze der Quantenmechanik kontrolliert und die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen müssen gezielt eingestellt werden. Es lassen sich so Quantenphasen realisieren, die bisher nur theoretisch vorausgesagt wurden und deren Herstellung in realen Festkörpern nahezu unmöglich ist. Gleichzeitig lässt sich das kollektive dynamische Verhalten der Teilchen studieren und so das Entstehen von grundlegenden Quantenkorrelationen untersuchen, die die Eigenschaften des Gesamtsystems bestimmen. Mit Hilfe ultrakalter Quantengase können so gezielt z. B. fundamentale Fragen zur Supraleitung, Suprafluidität und dem Quantenmagnetismus in Vielteilchensystemen erforscht werden, die sowohl von grundlegendem als auch von angewandtem Interesse sind. Überdies eignen sich ultrakalte Atome und Moleküle in optischen Gittern hervorragend für Präzisionsmessungen in der Atom- und Molekülphysik. So können z. B. chemische Reaktionen auf der Quantenskala gezielt gesteuert und Moleküle in genau definierte Quantenzuständen erzeugt werden, bei denen alle quantenmechanischen Freiheitsgrade perfekt kontrolliert sind.

Neuartige Materie-Licht-Schnittstellen

Des Weiteren arbeitet die Abteilung an Techniken, eine neue Schnittstelle zwischen diesen Vielteilchensystemen und Licht zu entwickeln. So lassen sich z. B. neuartige Quantenspeicher für Licht realisieren, die grundlegend für die Kommunikation zwischen mehreren Quantensystemen sind. Außerdem eignen sich atomare Vielteilchensysteme sehr gut als neuartige Lichtquellen für nichtklassische Strahlung, bei denen die hohe Kontrolle über die Atome zur Erzeugung komplexer Quantenzustände des Lichts ausgenutzt werden kann.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de



Theorie

Die Quantenwelt der Atome, Moleküle und Photonen weist merkwürdige und paradoxe Eigenschaften auf, die unserer Intuition zuwiderlaufen. So schaffen es die mikroskopischen Teilchen scheinbar an verschiedenen Orten gleichzeitig zu sein, oder sie entwickeln zueinander seltsame Beziehungen, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind und eigentlich überhaupt nicht miteinander in Wechselwirkung treten. Keines dieser Phänomene macht sich in der makroskopischen Welt bemerkbar.

In den Laboren dagegen, die sich der Untersuchung mikroskopischer Objekte widmen, gehören diese seltsamen Erscheinungen mittlerweile zum Alltag. Könnte man diese Objekte gezielt steuern und manipulieren, dann ließen sich Geräte konstruieren, die bislang unmögliche Aufgaben vollbringen.

Ein neues Zeitalter der Informationstechnologie

Genauer gesagt, das wäre der Beginn einer neuen Ära in der Informationstechnologie. Denn die hier für die Verarbeitung und Übertragung von Informationen verwendeten Techniken haben mit klassischen Computern nur noch wenig gemein. Ein Schritt in diese Richtung ist die Suche nach neuen Wegen, die Welt der Atome, Moleküle und Photonen vollkommen unter Kontrolle zu bekommen. In Kooperation mit

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

anderen internationalen Forschungsgruppen hat die Abteilung Theorie z. B. Konzepte für Quantencomputer, die auf gefangenen Ionen oder neutralen Atomen beruhen, oder Quanten-Verstärker, die mit einzelnen Photonen arbeiten, vorgeschlagen. Diese einzelnen Photonen werden entweder von einzelnen Atomen in Resonatoren oder von atomaren Ensembles bei Raumtemperatur ausgesandt und absorbiert. Viele der heutigen Experimente zu Quantensimulationen mit Hilfe von optischen Gittern oder mit Ionen in verschiedenen Arten von Teilchenfallen gehen auf Konzepte von Prof. Ignacio Cirac und seinen Mitarbeitern zurück.

Quantenmechanische Methoden und Werkzeuge

Gleichzeitig geht die Abteilung Theorie der Frage nach, wie sich die quantenmechanischen Eigenschaften der Teilchen nutzen lassen, um Informationen mit größerer Effizienz und Sicherheit zu übertragen. In diesem Kontext entwickelt sie neue theoretische Werkzeuge, um die Verschränkung – eine wichtige Eigenschaft der Quantenmechanik, die für die meisten ihrer faszinierenden Phänomene und Anwendungen verantwortlich ist – zu charakterisieren und zu quantifizieren. Die hierbei entwickelten Methoden erlauben auch eine völlig neue Beschreibung von Vielteilchensystemen und ermöglichen es z. B., den Übergang von Materie in die Quantenphase zu untersuchen. Diese Methoden haben aber nicht nur sehr leistungsfähige numerische Algorithmen für die Untersuchung von Quanten-Vielteilchensystemen hervorgebracht, sondern lassen sich auch in anderen Zweigen der Physik anwenden. Ein weiterer Schwerpunkt der Gruppe sind neue Verfahren, Atome abzukühlen oder Kernspins in Quantenpunkten zu polarisieren, um deren Quantenverhalten auszunutzen.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Laserspektroskopie

Die Wechselwirkung von Licht mit atomarer Materie öffnet ein faszinierendes Fenster in die mikroskopische Quantenwelt. Sind die Naturkonstanten wirklich konstant? Gibt es nachweisbare Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie?

Wie gut beschreibt die Quantenmechanik wasserstoffähnliche Atome und Ionen? Gibt es prinzipielle Grenzen für die Genauigkeit von optischen Atomuhren? Könnte man eine Atomuhr für Strahlung im Röntgenbereich bauen? Inwieweit kann die präzise Laserspektroskopie von kalten gefangenen Ionen ins extreme Ultraviolett ausgedehnt werden? Können Experimente mit ultrakalten atomaren Bosonen und Fermionen zu unerwarteten neuen Zuständen korrelierter Quantenmaterie führen? Was können wir mit einem Quantenlabor auf einem Mikrochip anfangen? Dies sind einige der Fragen, denen die Abteilung Laserspektroskopie nachgeht.

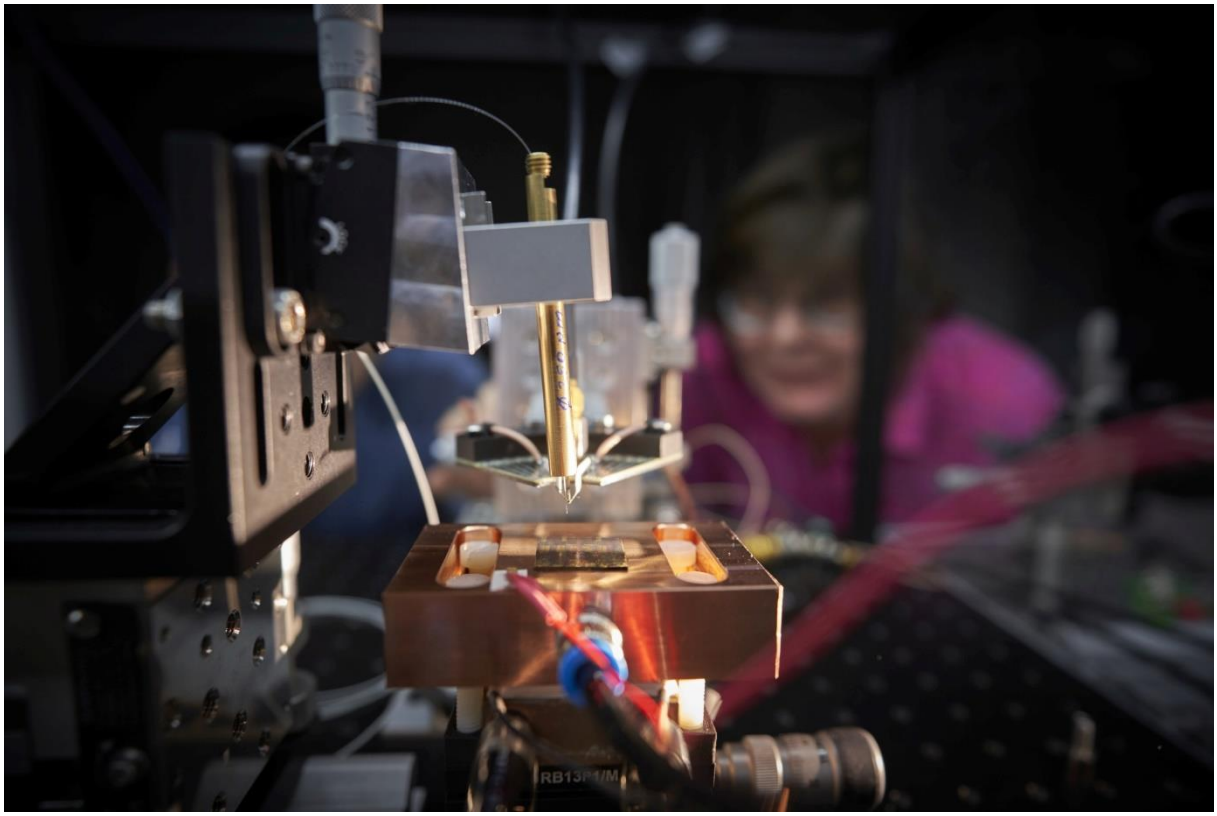
Ein Fenster in den Mikrokosmos

Ein Schwerpunkt der gegenwärtigen Forschung ist die präzise Laserspektroskopie einfacher atomarer Systeme wie zum Beispiel Wasserstoff. Sie berührt die Grundlagen der Physik, denn sie gibt Auskunft über die fundamentalen Naturkonstanten und mögliche Grenzen heutiger physikalischer Theorien. Die Entwicklung des Frequenzkamms, für die Prof. Theodor W. Hänsch 2005 den Nobelpreis für Physik erhielt, vermochte die Präzision der Frequenzbestimmung im optischen Bereich um den Faktor 104 zu steigern. Mittlerweile gehört dieses Instrument zu den Standardwerkzeugen der Laserspektroskopie und Metrologie. Es liefert den Schlüssel für extrem genaue optische Atomuhren und findet immer weitere Anwendungen, von der Weltraumforschung und Astrophysik bis hin zur medizinischen Spurengasanalyse.

Ultrakalte Materie, Atom-Chips und verschränkte Photonen

Ein weiterer Schwerpunkt der Abteilung Laserspektroskopie ist die Arbeit mit kalten Quantengasen, die z. B. bei extrem tiefen Temperaturen in ein sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat (BEC) übergehen, einen Zustand, in dem sich ein Ensemble aus etwa einer Million Atomen wie eine kohärente Welle verhält. Einer Gruppe um Prof. Hänsch gelang es erstmals 1999, solch ein BEC auf einem Mikrochip zu erzeugen und zu manipulieren. Mit diesen „Atom-Chips“ lassen sich beispielsweise portable hochpräzise Atomuhren bauen. Die Chips können aber auch als hochempfindliche Sensoren für schwache elektromagnetische Felder oder kleine Änderungen in der Gravitationskraft dienen. Die mit der Abteilung Laserspektroskopie assoziierte experimentelle Quantenphysikgruppe von Prof. Harald Weinfurter an der Ludwig-Maximilians-Universität erforscht neuartige Systeme aus mehreren verschränkten Photonen und untersucht sie auf praktische Anwendungen z. B. in der Quantenkryptographie.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de



Attosekundenphysik

Die Wechselwirkung zwischen Licht und Elektronen steht im Mittelpunkt der Forschung des Labors für Attosekundenphysik. Tief im Mikrokosmos sind Zeitdimensionen extrem kurz. Nur wenige Attosekunden dauern die Bewegungen von Elektronen in Atomen und Molekülen. Eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer Milliardstel Sekunde (10-18 Sekunden). Will man die Bewegungen von Elektronen sichtbar machen, muss man ein Werkzeug haben, das ebenso schnell ist. Die Lichtblitze, die Laserphysiker im Labor für Attosekundenphysik (LAP) erzeugen, erfüllen diese Anforderung. Sie dauern nur wenige Attosekunden.

Elektronen haben eine elementare Bedeutung. Sie binden Atome zu Molekülen. Sie läuten chemische Reaktionen sowie die Strukturveränderungen von Molekülen ein. Dadurch initiieren sie grundlegende biologische Vorgänge, einschließlich der Entstehung von Krankheiten. Elektronen spielen zudem eine zentrale Rolle bei der Informations- und Reizübertragung. Die Informationstechnologie nutzt die Elektronen zur Verarbeitung und Übertragung von Daten. Die kürzesten Lichtpulse der Welt erlauben den LAP-Wissenschaftlern, den Kosmos der Elektronen zu erschließen, um ihn noch besser in den Dienst technologischer Entwicklungen zu stellen und fundamentale Vorgänge der Natur zu verstehen. Ähnlich wie bei der konventionellen Fotografie werden die Bilder aus dem Mikrokosmos umso schärfer, je kürzer die Lichtpulse werden. Mit ihren Attosekunden-Röntgenblitzen können die LAP-Forscher erstmals die Bewegung von Elektronen innerhalb von Atomen und Molekülen sichtbar machen. Das kontrollierte

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

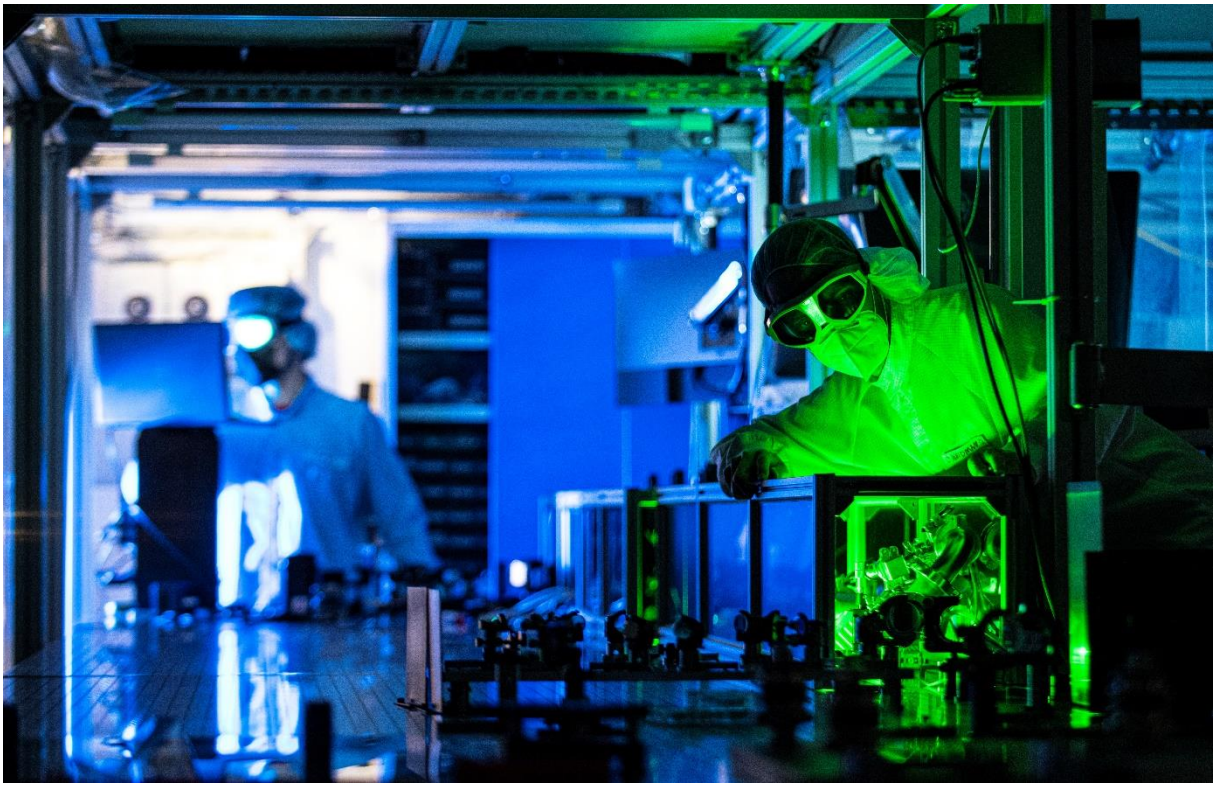
elektrische Feld von sichtbarem Laserlicht erlaubt ihnen die zunehmende Kontrolle über diese Bewegungen.

Hochintensive Laserpulse

Das LAP-Team arbeitet auch mit hochintensiven Laserpulsen, die wenige Femtosekunden (10-15 Sekunden) dauern. In dieser Zeit kann man einen Lichtpuls mit einer Leistung ausstatten, die alle Atomkraftwerke. der Erde zusammen erzeugen. Diese Lichtpulse können Elektronen aus Atomen lösen und auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Anschließend werden die Teilchen in einem kleinen Undulator hin und her beschleunigt und senden Röntgenstrahlung aus. Das LAP-Team konnte bereits zeigen, dass diese Technologie das Potential besitzt, auch so genannte brillante Röntgenstrahlung zu produzieren, wofür heute kilometerlange und teure Beschleunigeranlagen notwendig sind. Die lasergetriebene Röntgenstrahlung wird eine neue Bildqualität für biologische und medizinische Anwendungen erreichen und helfen, kleinste Strukturen sichtbar zu machen.

Licht für die Zukunft

Neben der Erforschung der Grundlagen des Lebens wird das Wissen um die Elektronen-Phänomene in der Medizin dazu beitragen, innovative Technologien, wie etwa zur Diagnostik und Therapie von teilweise heute noch unheilbaren Krankheiten, zu entwickeln. Die Attosekundenphysik schafft die Möglichkeit, die Informationsverarbeitung bis zu ihrer ultimativen Grenze zu beschleunigen. Rechenoperationen könnten mit der Frequenz von Lichtschwingungen erfolgen. Das wäre Millionen Mal schneller, als es die heutige Elektronik erlaubt.



Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Quantendynamik

Selbst ein Jahrhundert nach ihrer Entdeckung wird die Quantenphysik immer faszinierender. Wodurch unterscheidet sich die Welt der Quanten von der klassischen, aus dem Alltag bekannten Welt? Ist es der viel zitierte Welle-Teilchen-Dualismus oder die Heisenbergsche Unschärferelation?

Nicht ganz, da die zugrunde liegenden Bilder weitgehend der klassischen Physik entnommen sind. Der entscheidende Unterschied besteht vielmehr darin, dass in Quantensystemen die Teilchen viel enger miteinander verknüpft sein können, als es die klassische Physik erlaubt. Im Lichte dieser Verschränkung erhalten Begriffe wie Information und Wechselwirkung – Einsteins „spukhafte Fernwirkung" – eine völlig neue Bedeutung.

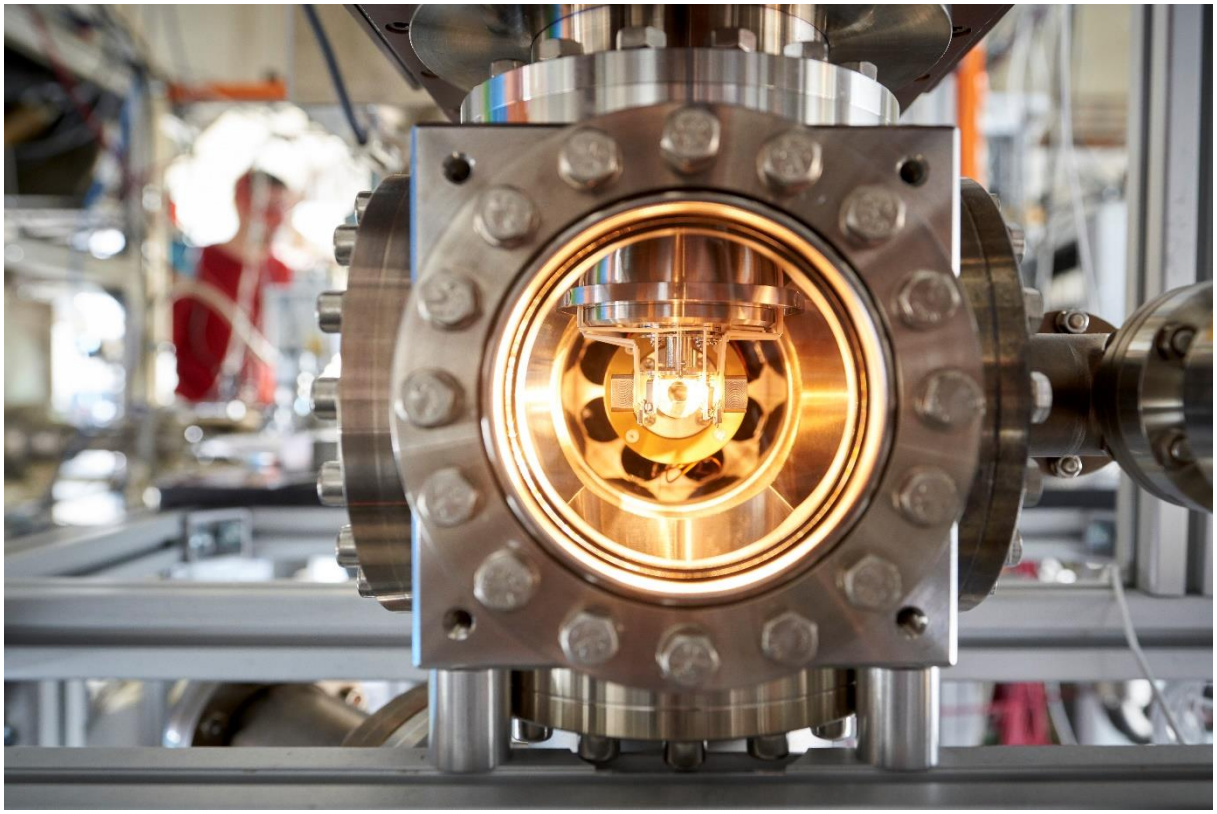
Schnittstellen zur Quantenwelt

Ein Schwerpunkt der Abteilung Quantendynamik ist die Erforschung grundlegender Phänomene der Quantenwelt und deren Anwendung für die Verarbeitung von Information. Dabei werden Schnittstellen zwischen der klassischen Welt und der Quantenwelt entwickelt. Arbeitspferde sind individuell adressierbare Atome in optischen Resonatoren allerhöchster Güte. Damit lassen sich neuartige Lichtquellen bauen, die auf Knopfdruck einen Bit-Strom einzelner oder verschränkter Photonen emittieren. Die Einzel-Atome können auch als optisch nichtlineares Medium zur Kopplung von zwei Einzel-Photonen verwendet werden. Ziel ist es, die Atome mit Hilfe von maßgeschneiderten Photonen zu einem Quantennetzwerk oder gar einem Quanten-Internet zu verschachteln. Durch Hinzufügen weiterer Atome lässt sich solch ein Quantensystem schrittweise vergrößern.

Kalte Quantengase als gigantische Materiewellen

Komplementär dazu ist die Strategie, mit einem großen System anzufangen und die Kontrolle über die einzelnen Bestandteile immer weiter zu verbessern. Diese Arbeiten werden einerseits mit atomaren Gasen nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt durchgeführt, in denen, ganz anders als in klassischen Gasen, alle Atome zusammen eine gigantische Materiewelle bilden. Solche Gase eignen sich in idealer Weise für Quantensimulationen, mit denen sich offene Fragen der Vielteilchenphysik – zum Beispiel das Verhalten von Elektronen in Festkörperkristallen – beantworten lassen. Mit polaren Molekülgasen wie Wasserdampf andererseits sollen neue Klassen von chemischen Reaktionen bei Temperaturen unterhalb von einem Kelvin untersucht werden. Die derzeit größte Herausforderung dabei ist es, Verfahren zur Kühlung von Molekülgasen zu finden.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de



Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Die Direktoren

Prof. Dr. Immanuel Bloch

seit August 2008 Leiter der Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme, seit Mai 2009 Lehrstuhlinhaber für Experimentalphysik an der LMU München

aktuell Geschäftsführender Direktor am MPQ

Wichtige Preise & Auszeichnungen (Auswahl): Leibniz-Preis (2005), Academia Leopoldina (2011), Körber-Preis (2013), Hector-Wissenschaftspreis (2013), Preis für gute Lehre des STMWK (2018), Mitglied in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Leopoldina

Prof. Dr. Ignacio Cirac

seit 2001 Leiter der Abteilung Theorie, seit 2002 Honorarprofessor an der TU München

Prof. Cirac Mitentwickler des ersten konkreten Vorschlags zur Entwicklung eines Quantencomputers unter Verwendung von Ionen-Fallen (1995)

wichtige Preise & Auszeichnungen (Auswahl): Prinz von Asturien-Preis (2006), BBV-Preis (2009), Benjamin-Franklin-Medaille (2010), Wolf-Preis in Physik (2013), Mitglied in der deutschen und spanischen Leopoldina, Träger von insgesamt sieben Ehrendoktorwürden

Prof. Dr. Theodor Hänsch

seit 1986 Leiter der Abteilung Laserspektroskopie (seit 2016 Emeritus) sowie Lehrstuhlinhaber für Experimentalphysik an der LMU München

von 1975 bis 1986 war Prof. Hänsch Lehrstuhlinhaber an der University of Stanford

wichtige Preise & Auszeichnungen (Auswahl): Leibniz-Preis (1988), Stern-Gerlach-Medaille (2002), Nobelpreis Physik (2005), Frederic-Ives-Medaille (2006), Großes Bundesverdienstkreuz (2006), Orden Pour Le Mérite für Wissenschaft und Künste (2009), Mitglied in der amerikanischen, bayerischen, Berlin-Brandenburgischen und deutschen Leopoldina

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de

Prof. Dr. Ferenc Krausz

seit 2003 Leiter der Abteilung Attosekundenphysik, seit 2004 Lehrstuhlinhaber für Experimentalphysik an der LMU München

wichtige Preise & Auszeichnungen (Auswahl): Wittgenstein-Preis (2002), Leibniz-Preis (2006), King-Faisal-Preis (2013), Letokhov-Preis (2019), Otto-Hahn-Preis (2019), Mitgliedschaft in der ungarischen, österreichischen, russischen, deutschen (Leopoldina) sowie europäischen Akademien (Salzburg & London)

Ausgründungen: Femtolasers GmbH, Ultrafast Innovations GmbH und Trumpf Scientific Lasers

Prof. Dr. Gerhard Rempe

seit 1999 Leiter der Abteilung Quantendynamik und Honorarprofessur an der TU München

Prof. Rempe hat in seiner wissenschaftlichen Karriere unterschiedliche Forschungsfelder maßgeblich geprägt, darunter Quantengase, Quanteninformation sowie Quantenoptik mit Atomen, Photonen und Molekülen. Heute leistet er vor allem im Bereich der Quantennetzwerke international bedeutende Pionierarbeit.

von 2008 bis 2016 war er Vorsitzender des Physik-Panels beim Europäischen Forschungsrat (ERC)

Wissenschaftliches Umfeld und Vernetzung (Auszüge)

Das Max-Planck-Institut für Quantenoptik ist weltweit vernetzt mit Forschergruppen von Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen.

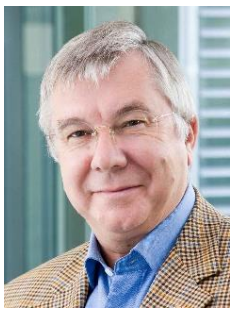
Munich Quantum Valley

Die neu entstandene Initiative des Munich Quantum Valley (MQV) ist ein europaweit einzigartiges Zentrum für Quantenwissenschaften und Quantentechnologien. Sie verfolgt das Ziel, den Forschungs- und Industriestandort Bayern und Deutschland in diesem wichtigen Zukunftsfeld an der Weltspitze zu etablieren. Zu diesem Zweck haben sich fünf Partner-Institutionen (Max-Planck-Gesellschaft (vertreten durch das MPQ und das MPL), Fraunhofer Gesellschaft, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität, Technische Universität München) zu einem Verbund zusammengeschlossen. Die Initiative verfolgt drei Haupt-Ziele:

1. Der Aufbau eines die Wissenschaft und Wirtschaft umfassenden Zentrums für Quantencomputing & Quantentechnologien, das die Forschung in allen Bereichen der Quantenwissenschaften und -technologien vorantreibt, und insbesondere Quantencomputer auf verschiedenen Plattformen entwickelt. Gleichzeitig sollen dabei die wissenschaftlichen Ergebnisse in die Wirtschaft transferiert und Start-Ups im Bereich der QWT gezielt gefördert werden.
2. Die Errichtung eines Quantentechnologieparks, der die technische Infrastruktur für die Entwicklung und Fertigung modernster Komponenten zur Verfügung stellt.
3. Die wissenschaftliche Qualifizierung und Weiterbildung einer neuen Generation von Naturwissenschaftlern, Ingenieuren und Informatikern in den Quantenwissenschaften und die Rekrutierung von Spitzenforscherinnen und Spitzenforschern.

Dem MPQ kommt in diesem Verbund eine Schlüsselrolle zu: Nicht nur ist das Institut einer der Initiatoren des MQVs, es rangiert in den betreffenden Kernkompetenzen international auf allerhöchstem Niveau, so z.B. im Bereich Quantensimulationen & Quantencomputing, Quantenalgorithmen, Quantenkryptographie und Quantenkommunikation zum Aufbau von Quantennetzwerken und der sicheren Übertragung von Quanteninformation. Aufgrund seiner wissenschaftlichen Exzellenz kann das MPQ einen besonderen Beitrag dazu leisten, die wissenschaftliche Expertise in Anwendungen zu überführen und die Gründung von neuen Start-Ups zu fördern.

Prof. Dr. Rainer Blatt (Leiter des MQV)



Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Rainer Blatt gehört zu den Pionieren in der Quantenoptik und hat mit seinem Team als Erster eine Quantenteleportation mit Atomen durchgeführt.

Auswärtiges wissenschaftliches Mitglied des MPQ

Exzellenz-Cluster Munich Center for Quantum Science & Technology (MCQST)

Im Rahmen der Exzellenzstrategie der DFG nimmt das MPQ seit Januar 2019 am Exzellenzcluster MCQST teil. Von 2006 bis 2017 war das Institut außerdem an den 2012 verlängerten Exzellenzclustern Munich-Center for Advanced Photonics (MAP) und Nanosystems Initiative Munich (NIM) beteiligt.

PASQuanS - EU Quantum Flagship Projekt

Im Rahmen des Europäischen Quantenflaggschiffs ist auch das PASQuans-Projekt entstanden. Ein europäisches interdisziplinäres Team aus Wissenschaft und Industrie arbeitet im Rahmen des Projektes an der Entwicklung eines Quantensimulators der nächsten Generation auf Basis ultrakalter Atome. Das Projekt wird u.a. von Prof. Immanuel Bloch vom MPQ aus koordiniert. Das Projekt ist 2018 gestartet und hat aktuell noch eine Laufzeit bis 2022.

Quantum Internet Alliance - EU Quantum Flagship Projekt

Ebenfalls unter dem Dach des EU Flagships angesiedelt ist das Projekt der Quantum Internet Alliance (QIA) zur Entwicklung einer tragfähigen Technologie für den Aufbau eines stabilen und skalierbaren Quanten-Netzwerkes. Auch dieser Verbund umfasst Wissenschaft und Wirtschaft mit insgesamt 23 Projektpartnern, darunter auch Prof. Gerhard Rempe. Die Quantum Internet Alliance hat ebenfalls eine Laufzeit von 2018 bis 2022.

Max Planck Harvard Research Center for Quantum Optics (MPHQ)

Das zwischen dem MPQ und der Harvard University eingerichtete Max Planck Harvard Research Center for Quantum Optics ist eine gemeinsame Forschungs- und Lehreinrichtung, mit dem Ziel gemeinsam neue wegweisende wissenschaftliche Entdeckungen zu machen sowie die Karriereentwicklung erstklassiger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zu fördern. Die Zusammenarbeit startete im Jahr 2017.

International Max Planck Research School - IMPRS-QST

Ebenfalls am MPQ angesiedelt ist die International Max Planck Research School Quantum Science and Technology – kurz IMPRS-QST, die vom MPQ, der LMU und der TUM 2016 gegründet wurde. Das Graduiertenprogramm bündelt die Kompetenzen von über 20 experimentellen und theoretischen Forschungsgruppen in Münchner Raum zu einer gemeinsamen Forschungs- und Lehrplattform. Für Doktorandinnen und Doktoranden bietet die IMPRS eine Plattform für gemeinsame Aktivitäten, die eine bessere Vernetzung und den wissenschaftlichen Austausch als integralen Bestandteil der Doktorandenausbildung fördern.

Wissenschaftliche Qualifizierung und Nachwuchsförderung

Die wissenschaftliche Ausbildung und Förderung von Nachwuchstalenten ist ein elementarer Bestandteil in der Arbeit und im Selbstverständnis des MPQs. Jeden Monat starten neue Doktorandinnen und Doktoranden am MPQ, die über rund fünf Jahre hinweg ihr wissenschaftliches Profil am MPQ entwickeln können. Im Jahr 2020 begann zudem gemeinsam mit LMU und TUM der interdisziplinäre Masterstudiengang „Quantum Science and Technology“ in dem Masterstudierende ihre Forschungsphase am MPQ durchführen können. Besonders erfolgreich ist das MPQ- auch bei der Bewerbung von hochdatierten Ausschreibungen für Nachwuchsgruppen. So gewannen junge Nachwuchsforscherinnen und -forscher allein in den vergangenen fünf Jahren acht renommierte ERC-Starting Grants.

Struktur

Aktuell sind rund 350 Personen am MPQ angestellt, davon rund 250 in der Wissenschaft und ca. 100 in den Verwaltungs- und Service-Bereichen sowie der hauseigenen Werkstatt. In den wissenschaftlichen Abteilungen sind derzeit rund 150 Doktorandinnen und Doktoranden und ca. 40 internationale Gastwissenschaftler und -wissenschaftlerinnen beschäftigt.

An die wissenschaftlichen Abteilungen angegliedert sind seit 2004 auch selbstständige Forschungsgruppen. Sie finanzieren sich über den Erwerb zentraler Mittel der MPG, aus Drittmitteln, z.B.

der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem European Research Council (ERC). Die Leiter der Forschungsgruppen haben die Möglichkeit, über einen Zeitraum von ca. fünf Jahren eigenverantwortlich Forschungsprojekte zu konzipieren und mit eigenen Doktoranden und Diplomanden voranzutreiben. Zurzeit sind zwei unabhängige Forschungsgruppen am MPQ etabliert.

Publikationen, Preise und aktuelle Erfolge

Beinahe monatlich gehen wissenschaftliche Preise und Auszeichnungen an unsere wissenschaftlichen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen. In diesem Jahr erhielt zum Beispiel Nathalie Picqué, Forschungsgruppenleiterin und langjährige Wissenschaftlerin am MPQ, den angesehen Gentner-Kastler-Preis der Deutsch-Physikalischen Gesellschaft (DPG) und unser Gastwissenschaftler Philip Walther wurde mit dem Friedrich-Wilhelm-Bessel-Preis der Humboldt-Stiftung ausgezeichnet. Außerdem ging kürzlich erst eine weitere Otto-Hahn-Medaille an einen MPQ-Nachwuchsforscher aus der Theorie-Abteilung und auch in diesem Jahr wieder wurde eine MPQ-Forscherin von der DPG zur „Physikerin der Woche“ gekürt.

Das MPQ veröffentlicht jährlich im Schnitt 180 wissenschaftliche Arbeiten in Fachzeitschriften, davon eine beträchtliche Zahl (knapp 50) in renommierten Zeitschriften mit hohem wissenschaftlichem Impact wie Nature oder Science. Jüngste wissenschaftliche Erfolge innerhalb des Instituts umfassen zum Beispiel die weltweit erstmalige Quantenteleportation mit nur einem einzigen Photon, die Entwicklung des weltweit ersten Prototypen eines verteilt rechnenden Quantencomputers oder die Entwicklung einer neuartigen und zuverlässigen Nachweismethode für Sendungen von Quanteninformation.

Des Weiteren steht ein neues Projekt mit dem Namen FermiQP, kurz für Fermion-Quantenprozessor, in den Startlöchern, das eine neue, universelle und skalierbare Plattform für sowohl analoge Quantensimulation als auch digitales Quantenrechnen entwickeln soll und somit die Vorteile beider Konzepte in einer Maschine vereint.

Weitere Informationen und Bildmaterial

Katharina Jarrah
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Hans-Kopfermann-Straße 1
D-85748 Garching
Telefon: 089 - 32905 213
E-Mail: katharina.jarrah@mpq.mpg.de

Für die Aufnahme in unseren Medienverteiler schreiben Sie bitte eine kurze E-Mail an presse@mpq.mpg.de.

ÜBER DAS MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK

Die Erforschung der Quantenwelt mit Laserlicht ist das zentrale Thema am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, die zum Teil unter extremen Bedingungen wie den kältesten im Universum möglichen Temperaturen stattfindet. Mit revolutionären Konzepten und neuartigen Apparaturen ebnen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den Weg zu leistungsfähigen Quantencomputern, Quantensimulatoren und Quantennetzwerken. Auch bei der Entwicklung moderner Lichtquellen und Messinstrumente im Bereich der Quantensensorik leisten sie Pionierarbeit. Wichtiges Beispiel ist der optische Frequenzkamm, für den Prof. Theodor Hänsch im Jahr 2005 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching
Prof. Dr. Immanuel Bloch • Tel: +49 89 32905 138 • Fax: +49 89 32905 313 • Immanuel.bloch@mpq.mpg.de
www.mpq.mpg.de