

Forschungsschwerpunkte – Professor Roderich Moessner

Ein zentrales Ziel der Physik besteht darin, die Vielfalt in der Welt, die uns umgibt, zu verstehen. Dies ist ein schwieriges Unterfangen: Obwohl die Eigenschaften der Bausteine (Elektronen, Protonen und Neutronen) in Isolation gut bekannt sind, lässt dieses Wissen nicht unmittelbar auf das kollektive Verhalten einer Vielzahl von Teilchen schließen. Diese Vielfalt ist nicht nur deshalb von Bedeutung, weil sie viele Phänomene zur Verfügung stellt, die in unterschiedlicher Form technische Anwendungen ermöglichen; ihr systematisches Verständnis setzt voraus, dass wir die grundlegenden Mechanismen (Organisationsprinzipien) identifizieren, die unserer Welt diese Vielfalt verleihen. Das Konzept von Übergängen zwischen Phasen mit unterschiedlicher lokaler Ordnung (zum Beispiel zwischen Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern) ist ein sehr erfolgreiches Beispiel hierfür.

Roderich Moessner und seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Abteilung „Kondensierte Materie“ am Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden erforschen kollektive Phänomene, die in der Natur, der Materialphysik oder der Nanophysik auftreten. In diesem Kontext ist die Möglichkeit, im Experiment die mikroskopischen Eigenschaften physikalischer Systeme gezielt zu manipulieren, von zentraler Bedeutung. Seine theoretischen Untersuchungen an Systemen, die von Supraleitern über zweidimensionale Elektronenflüssigkeiten bis hin zu exotischen Magneten reichen, bedienen sich primär der Methoden der theoretischen Vielteilchenphysik und der statistischen Feldtheorie.

Spinflüssigkeiten, topologische Ordnungstypen und magnetische Monopole

Der Ferromagnetismus aus Stabmagneten ist aus dem täglichen Leben wohlbekannt. Nun gibt es noch eine Reihe anderer magnetischer Zustände, unter denen die exotischsten keine lokale Ordnung (überall zeigt die Magnetisierung in die gleiche Richtung) aufweisen, sondern sich vielmehr durch eine neuartige topologische Ordnungsform auszeichnen. Solche „topologischen Spinflüssigkeiten“ spielen eine große Rolle, zum Beispiel als potentieller Ausgangspunkt für Hochtemperatursupraleiter oder als Grundlage für topologische Quantencomputer.

Roderich Moessners Forschungsprogramm hat hierzu den grundlegenden Beitrag geleistet, die Existenz einer topologischen „Resonating Valence Bond“ Spinflüssigkeit in einem mikroskopischen Modell erstmals theoretisch nachzuweisen. Dies legte auch methodisch den Grundstein für weitere Entdeckungen und verhalf dem Feld des „exotischen Magnetismus“ zu einer neuen Blüte.

Für eine im Jahr 1997 entdeckte Materialklasse, das „Spineis“, entwickelte er mit seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern eine umfassende theoretische Beschreibung, die zu der Vorhersage führte, dass Anregungen des Spineises punktförmige Quasiteilchen sind, die Eigenschaften magnetischer Monopole aufweisen, wie beispielsweise eine Wechselwirkung zwischen magnetischen Ladungen. Diese wurden kurze Zeit später experimentell nachgewiesen. Die gegenwärtigen Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf eine Untersuchung der neuartigen Eigenschaften solcher magnetischer Systeme.

Quantenhallphysik, Skyrmionen und künstliche Magnetfelder

Die Quantenhalleffekte gehören gemeinsam mit Supraleitung und Suprafluidität zu den bemerkenswertesten makroskopischen Quantenphänomenen: die elektrische Leitfähigkeit von Elektronen an einer zweidimensionalen Grenzfläche nimmt in einem Magnetfeld mit phantastischer Genauigkeit einen Wert an, der nur von Fundamentalkonstanten (elektrische Ladung, Planck'sches Wirkungsquantum) abhängt.

Roderich Moessner und seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter untersuchen einerseits die Existenz konkurrierender Vielteilchenzustände. Ein Beispiel hierfür war die Vorhersage von einer Ladungsdichtewelle, deren Existenz mittlerweile experimentell verifiziert wurde. Andererseits geht es um die Eigenschaften von Anregungen der Quantenhallzustände, die zum Beispiel in Form topologischer Defekte namens „Skyrmionen“ entstehen, wenn die Elektronendichte variiert wird. Diese Skyrmionen können ein Gitter bilden, dessen dynamische Eigenschaften so aussehen, als sei ein weiteres „künstliches“ Magnetfeld vorhanden. Die zugrunde liegende mathematische Beschreibung führt zu einer Designstrategie für die Erzeugung künstlicher Magnetfelder für Systeme kalter Atome, die aufgrund ihrer Ladungsneutralität für ein konventionelles Magnetfeld fast unsichtbar sind.

Quantenkomplexitätstheorie und kohärente Quantendynamik

Mit großem Aufwand wird seit einigen Jahren ein Forschungsprogramm verfolgt, dessen Ziel der Bau eines Quantencomputers ist. Roderich Moessner und seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigen sich mit der Frage, für welche Problemklassen ein Quantencomputer verwendet werden kann, und wie dieser gegebenenfalls zu programmieren sein wird. Hierfür finden Konzepte aus der statistischen Physik korrelierter Elektronen Anwendung. Das sogenannte adiabatische Quantencomputing schlägt des Weiteren eine Brücke zu Untersuchungen der Dynamik von wechselwirkenden Quantenvielteilchensystemen, die in der Abteilung „Kondensierte Materie“ im Zusammenhang mit Experimenten an Systemen kalter Atome intensiv untersucht wird.