



J. Dunkel, Universität Augsburg

Abb. 2 Die Trajektorie eines relativistischen Brownschen Teilchens im Vorwärtslichtkegel: Die Teilchengeschwindigkeit ist stets kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.

Gültigkeit Hänggi und seine Kollegen mit molekulardynamischen Simulationen bestätigen konnten. Demnach lässt sich die Temperatur eines Gases Lorentz-invariant definieren. Sie ist unabhängig davon, wie schnell sich das Gas relativ zum Beobachter bewegt, also ein Lorentz-Skalar. Darauf aufbauend sind verschiedene Modelle für die relativistische Brownsche Bewegung entwickelt worden, bei denen die Teilchengeschwindigkeit stets kleiner als c ist (**Abb. 2**).

Das zumeist störende Brownsche Rauschen kann auch nützliche Folgen haben, wie Hänggi am Beispiel der stochastischen Resonanz (SR) erläuterte. Die Verstärkung eines schwachen Signals mithilfe eines nichtlinearen Systems lässt sich optimieren, wenn man dem Signal wohldosiert Rauschen hinzufügt. Dadurch lässt sich z. B. die visuelle wie auch die taktile Wahrnehmung verbessern. Das nutzt die SR-Therapie aus, die mit abwechselnd periodisch und stochastisch vibrierenden Fußmatten das Koordinationsvermögen von Patienten verbessert. Auch Brownsche Motoren nutzen das Rauschen, indem sie es in gerichtete Bewegung umwandeln. Ein Beispiel dafür ist ein periodisch an- und abgeschaltetes „Ratschenpotential“, in dem sich Teilchen befinden. Die durch Brownsches Rauschen angetriebenen Teilchen laufen in diesem Potential überwiegend in eine Richtung. Brownsche Motoren spielen beim gerichteten Transport in der lebenden Zelle eine wichtige Rolle. Künstliche Brownsche Motoren können Ionen, Atome, magnetische Flussquanten, Spins oder Nanopartikel transportieren.

Angeregte Kooperation

Ultrakurze Pulse lassen sich für einen großen Bereich des elektromagnetischen Spektrums herstellen, von der Terahertzstrahlung bis zur harten Röntgenstrahlung. Damit wird es möglich, sehr schnelle Vorgänge in Festkörpern z. B. mit Laserpulsen auszulösen und ihren weiteren Verlauf mit gepulster Laser- oder Röntgenstrahlung schnappschussartig zu verfolgen.

Andrea Cavalleri und seine Mitarbeiter vom Center for Free Electron Laser Science (CFEL) der Universität Hamburg untersuchen auf diese Weise verschiedene photoinduzierte Phasenübergänge in komplexen Festkörpern, deren Elektronen stark korreliert sind. Mit einem fs-Laserpuls werden etwa 10^{21} Elektron-Loch-Paare pro cm^3 erzeugt, und es entsteht eine metastabile Phase. Durch Kooperation der Anregungen findet auf der Zeitskala der atomaren Schwingungen, also innerhalb von Femtosekunden, ein Phasenübergang statt. Je nachdem, ob es sich um einen elektronischen oder strukturellen Phasenübergang handelt, verfolgen ihn die Forscher mit ultrakurzen Laserpulsen oder gepulsten kohärenten Röntgenstrahlen, wie sie der Freie-Elektronen-Laser FLASH am DESY in Hamburg liefert.

So haben Cavalleri und seine Kollegen das photoinduzierte „Schmelzen“ eines Mott-Isolators untersucht, das nur einige Femtosekunden dauert. In einem Mott-Isolator ist die lokale, abstoßende Wechselwirkung zwischen den Elektronen größer als deren kinetische Energie. Da keine unbesetzten Gitterplätze vorhanden sind, können sich die Elektronen nicht im Kristall umherbewegen. Wenn jedoch durch Anregung des Isolators mit einem ultrakurzen Laserpuls plötzlich unbesetzte Gitterplätze entstehen, können die Elektronen in sie hinein tunneln und sich auf diese Weise fortbewegen. Dadurch wandelt sich der Mott-Isolator innerhalb der Tunnelzeit der Elektronen in einen elektrischen Leiter um. An dem eindimensionalen organischen

Mott-Isolator $\text{ET-F}_2\text{TCNQ}$ konnten die Forscher diesen Übergang verfolgen. Dazu haben sie mit einem zweiten ultrakurzen Laserpuls, der eine variable Zeitverzögerung hatte, die Änderung der Reflektivität des Materials mit hoher Zeitaufösung gemessen. Es zeigte sich, dass der Mott-Isolator innerhalb von 20 fs geschmolzen war.

Sehr komplexe Phasenübergänge treten in Übergangsmetalloxiden auf, wobei außer den Ladungen und Spins der Elektronen auch ihre Orbitale sowie die Gitterfreiheitsgrade beteiligt sind. So lassen sich in Manganiten Metall-Isolator-Übergänge sowohl durch Temperaturänderung als auch durch Magnetfelder, Druck oder Bestrahlung mit Licht auslösen. Besonders interessant ist das Perowskit-Manganit $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (PCMO), das für alle chemischen Zusammensetzungen x ein Isolator ist, doch für $x = 0,3$ einen „versteckten“ metastabilen metallischen Zustand aufweist. Durch direkte Anregung einer bestimmten Phononmode mit fs-IR-Pulsen gelang es, den Übergang vom Isolator zum Metall innerhalb von 200 fs auszulösen. Durch die Mode wurde eine orthorhombische Verzerrung der Kristallstruktur aufgehoben, die zur Lokalisierung der Elektronen geführt hatte. Darüber hinaus fanden die Forscher Hinweise auf kollektive elektronische Anregungen oder „Orbitonen“, bei denen die d-Orbitale der Manganatome eine kohärente Welle bilden. Mit ultrakurzen Röntgenpulsen wollen die Forscher diese orbitale Ordnung zeitaufgelöst beobachten und der angeregten Kooperation der verschiedenen Freiheitsgrade auf den Grund gehen.

Multiferroische Spinspiralen

Multiferroika sind Materialien, die gleichzeitig elektrische und magnetische Ordnung zeigen. Dabei können sich ihre elektrischen und magnetischen Eigenschaften gegenseitig beeinflussen. Das macht Multiferroika auch in praktischer Hinsicht interessant, da sich aus ihnen möglicherweise magnetische