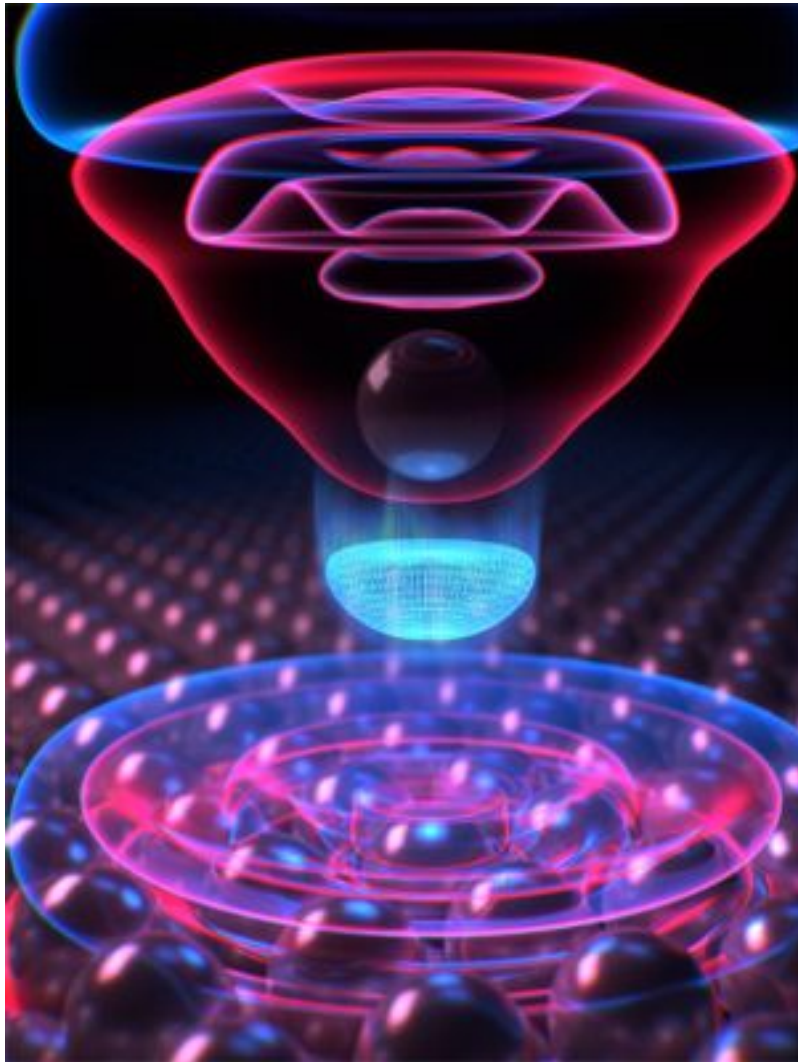


Mikroskopie am Raum-Zeit-Limit

03.07.2026, 11:00 | Wissenschaft, Forschung, Bildung

Pressemitteilung von: *idw - Informationsdienst Wissenschaft*



Das berühmte Unbestimmtheitsprinzip von Werner Heisenberg beschreibt eine der merkwürdigsten Eigenheiten der Quantenphysik: Bestimmte Paare physikalischer Eigenschaften eines Teilchens, wie Ort und Impuls, sind nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmbar – und zwar nicht als Folge ungenauer Messgeräte, sondern weil die Natur es verbietet. Zwischen Ort und Zeit hingegen gibt es keine Heisenbergsche Unschärferelation. Ein Forscherteam aus mehreren Arbeitsgruppen des RUN um Profs. Jascha Repp, Rupert Huber, Franz Giessibl und Klaus Richter sowie des Max-Planck-Instituts Hamburg um Angel Rubio hat nun erstmals beobachtet, dass man Aufenthaltsort und Zeitentwicklung eines Elektrons trotzdem nicht gleichzeitig beliebig genau messen kann. Diese sogenannte Raum-Zeit-Grenze hat wichtige Konsequenzen für künftige Anwendungen.

Viele Zukunftstechnologien – von Green Tech über Quantentechnologien bis hin zu leistungs-starker Elektronik für künstliche Intelligenz – erfordern ein genaues Verständnis davon, wie Materie mikroskopisch funktioniert; wie chemische Reaktionen ablaufen, wie Licht mit Materie interagiert oder wie sich Elektronen durch Bauelemente bewegen. Höchstauflösende Standbilder von den mikroskopischen Bausteinen der Materie reichen hierfür nicht aus; man

braucht vielmehr bewegte Zeitlupenfilme aus dem Nanokosmos.

Am Regensburg Center for Ultrafast Nanoscopy (RUN) werden ultraschnelle Mikroskope entwickelt und eingesetzt, um die Bewegung von Elektronen, Atomen und Molekülen mit möglichst hoher Orts- und Zeitauflösung direkt in mikroskopischen Zeitlupenfilmen abzubilden. So konnte in Regensburg bereits vor zehn Jahren erstmals die Bewegung eines einzelnen Moleküls in Raum und Zeit mittels ultraschneller Rastertunnelmikroskopie aufgelöst werden. Im Vergleich zu Atomen und Molekülen bewegen sich Elektronen auf dieser Längenskala nochmals tausendfach schneller – nämlich in Zeiträumen von Attosekunden. Die Größenordnungen sind extrem: Ein Atom ist etwa zehn Millionen Mal kleiner als ein Millimeter, und eine Attosekunde ist der Milliardstel Teil einer Milliardstel Sekunden. Damit verhält sich eine Attosekunde zu einer Sekunde wie eine Sekunde zum Alter des Universums. Besonders spannend: Die Elektronenbewegung gehorcht nicht den Gesetzen der klassischen Mechanik, sondern den seltsamen Regeln der Quantenphysik.

Um die Zeitauflösung gegenüber den früheren Experimenten entsprechend zu steigern und die Quantendynamik einzelner Elektronen direkt abzubilden und zu kontrollieren, entwickelten die Forschenden ein neues Lasersystem. Mit dessen Lichtblitzen können sie die Elektronenbewegung auf diesen extremen Zeitskalen so kontrollieren, dass die Elektronen von einer atomar scharfen Metallspitze über einen Abstand von nur wenigen Atomdurchmessern auf eine Silberoberfläche übergehen. Gemessen werden diese Elektronenbewegungen als Strom und die zeitliche Information erhält man durch die Verwendung zweier Lichtblitze.

Simon Maier, Erstautor der Veröffentlichung, beschreibt: „Indem wir den zeitlichen Abstand zwischen den zwei Laserimpulsen variieren, können wir direkt beobachten, wie die Elektronen darauf reagieren.“ Die so beobachtete Elektronenbewegung zeigt Signaturen auf Attosekunden-Zeitskalen – was bedeutet, dass die Lichtblitze Elektronen auf diesen Zeitskalen transferieren können, und man ihnen gewissermaßen dabei zusehen kann. Das Besondere dabei: Die Elektronen bewegen sich dabei nicht wie ein klassisches Teilchen. Als quantenmechanische Wellen durchdringen die Elektronen vielmehr die Energiebarriere zwischen Spitze und Probe, für die sie nach den Gesetzen der klassischen Physik eigentlich nicht genug Energie besitzen. Sie „tunneln“ hindurch, als würden sie durch eine massive Wand gehen, ohne sie zu zerstören. „Unsere Messung lässt sich wie eine Hochgeschwindigkeitskamera für die Elektronen-Wellenpakete verstehen, da man sieht, zu welcher Zeit der Tunnelprozess stattfindet“, führt Katharina Glöckl, Promovierende und Koautorin der Veröffentlichung, weiter aus.

Um die mikroskopische Elektronendynamik am „Raum-Zeit-Limit“ noch besser zu verstehen, führte die Gruppe von Prof. Dr. Angel Rubio aufwändige Quantensimulationen durch. Die Berechnungen erklären die experimentellen Ergebnisse mit bemerkenswerter Genauigkeit. Zudem zeigen sie: Das Elektron folgt dem Lichtfeld nicht sofort, sondern mit einer winzigen Verzögerung von 500 Attosekunden.

In diesem Grenzbereich von kleinsten räumlichen und zeitlichen Skalen treten fundamentale physikalische Grenzen der Quantenphysik gleich auf mehreren Ebenen zutage. Die Wirkung der Laserimpulse beispielsweise lässt sich nicht eindeutig dem Wellen- oder dem Photonenbild von Licht zuordnen, sondern trägt Züge beider Bilder – und genau das ist es, was es den Forschern ermöglichte, so tief in das „Raum-Zeit-Limit“ vorzudringen. Wenn Elektronen mittels Lichtblitzen auf so kurzen Zeitskalen bewegt werden, hat das komplexe Konsequenzen für die räumliche Verteilung der Elektronen, die quantenmechanisch als Wellenpakete beschrieben werden.

Dazu erklärt Raffael Spachtholz, ebenfalls Koautor der Veröffentlichung: „Je genauer wir das Elektron zeitlich festnageln wollen, desto mehr Energie müssen wir hineinstecken. Und dadurch breitet sich das Elektronenpaket räumlich wieder stärker aus.“ Diesen Zusammenhang untersuchte das Team anhand eines einzelnen, auf der Oberfläche platzierten Atoms, um die Elektronen-Wellenpakete jeweils vor den Lichtblitzen atomar einzuschränken. Damit ließ sich der Zusammenhang zwischen räumlicher und zeitlicher Ausdehnung der Elektronenwellenpakete direkt bestimmen. Erfreulicherweise bleiben die Elektronen-Wellenpakete trotz starker Anregung dennoch räumlich scharf genug definiert, um damit atomar auflösende Mikroskopie auf Attosekunden-Zeitskalen zu betreiben.

Mit dem aktuellen Durchbruch dringt das Team zu einer bislang eher vage vermuteten Raum-Zeit-Grenze quantenmechanischer Elektronen-Wellenfunktionen vor, um erstmals systematisch zu erforschen, wie die zeitliche Dynamik von Elektronen die räumliche Struktur ihrer Wellenfunktion prägt. Damit eröffnen sich auch völlig neuartige

Anwendungsmöglichkeiten. Wenn man ein Elektron etwa auf ein Molekül überträgt, entspricht dies zwar dem kleinstmöglichen Ladungsübertrag; wenn das Elektron aber auf ein winziges Raum-Zeit-Volumen begrenzt ist, sind damit extrem hohe lokale Spitzenstromdichten von bis zu 1 Billion Ampere pro Quadratzentimeter möglich. „In Zukunft wollen wir mit solchen Wellenpaketen gezielt chemische Reaktionen auslösen und auf den relevanten Längen- und Zeitskalen beobachten, wie chemische Bindungen aufgebrochen oder verändert werden können“, erläutert Prof. Jascha Repp begeistert. „Auf lange Sicht könnten die gewonnenen Erkenntnisse auch dazu beitragen, Elektronik und Quanteninformationsverarbeitung an der intrinsischen Geschwindigkeitsgrenze der Elektronenbewegung selbst zu betreiben – hunderttausendfach schneller als die derzeit vorherrschende CMOS-Technologie“, ergänzt Prof. Rupert Huber. Die beiden Projektleiter sind sich einig, dass die Anwendungsmöglichkeiten von Elektronen an der Raum-Zeit-Grenze eher durch die menschliche Vorstellungskraft als durch die Natur begrenzt sind.

Bildunterschrift: Künstlerische Darstellung eines extrem kurzen Elektronwellenpakets (blau) an der Grenze von Raum und Zeit. Der nur Attosekunden kurze Elektronenblitz entsteht zwischen der Spitze eines speziellen Mikroskops und einer Materialprobe. Ausgelöst wird er durch präzise gesteuerte Infrarot-Lichtimpulse (nicht dargestellt). Eine Wolke aus Elektronen umgibt dabei das System, sichtbar gemacht durch Computersimulationen. Abbildung: Brad Baxley (parttowhole.com)

© Zur ausschließlichen Verwendung im Rahmen der Berichterstattung zu dieser Pressemitteilung.

wissenschaftliche Ansprechpartner:

Prof. Dr. Rupert Huber
Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Universität Regensburg
Tel.: 0941 943-2071
E-Mail: rupert.huber@ur.de

Prof. Dr. Jascha Repp
Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Universität Regensburg
Tel.: 0941 943-4201
E-Mail: jascha.repp@ur.de

Originalpublikation:

Originalpublikation:

S. Maier, R. Spachtholz, K. Glöckl, C. M. Bustamante, S. Lingl, M. Maczejka, J. Schön, A. Riedel, K. Richter, F. J. Giessibl, F. P. Bonafé, M. A. Huber, A. Rubio, J. Repp, and R. Huber, „Tracking electrons at the space-time-limit“, Nature Photonics (2026), DOI: 10.1038/s41566-026-01932-0

Universität Regensburg

Karoline Stürmer (Mitarbeiter in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit)

karoline.stuermer@ur.de

Link zur Pressemitteilung:

<https://www.openpr.de/news/1316945/Mikroskopie-am-Raum-Zeit-Limit-idw.html>