



Pressemitteilung Nr. 1/2017

Redaktion Medien und Aktuelles
Universitätsstraße 10
D-78464 Konstanz
+49 7531 88-3603
Fax +49 7531 88-3766

kum@uni-konstanz.de
www.uni-konstanz.de

11.01.2017

Verkehrsstau im Nichts

Konstanzer Physiker verbuchen neue Erfolge bei der Vermessung des Quanten-Vakuums

An der Universität Konstanz ist ein weiterer bedeutender Schritt hin zu einem völlig neuen experimentellen Zugang zur Quantenphysik gelungen. Das Team um Prof. Dr. Alfred Leitenstorfer kann das elektrische Vakuumfeld manipulieren und somit Abweichungen vom Grundzustand des leeren Raumes hervorrufen, die nur im Rahmen der Quantentheorie des Lichts verstanden werden können. Damit liefern die Forscher aus dem Bereich der Ultrakurzzeitphysik und Photonik einen weiteren Beweis für die Korrektheit ihrer ersten Ergebnisse, die bereits im Oktober 2015 im Wissenschaftsjournal „Science“ veröffentlicht wurden: Die direkte Vermessbarkeit des Nichts. Mit diesem grundlegenden wissenschaftlichen Fortschritt sind entscheidende Beiträge zu lang ausstehenden Problemlösungen denkbar. Diese erstrecken sich über einen breiten Bereich vom vertieften Verständnis der Quantennatur der Strahlung bis zur Erforschung attraktiver Materialeigenschaften wie zum Beispiel der Hochtemperatur-Supraleitung. Die neuen Ergebnisse sind in der aktuellen Online-Ausgabe der Wissenschaftszeitschrift „Nature“ vom 19. Januar 2017 nachzulesen: DOI: 10.1038/nature21024.

Möglich wurden diese fundamentalen Einblicke mit einer weltweit führenden Technologie, die im Arbeitsbereich von Alfred Leitenstorfer entwickelt wurde. Spezielle Lasersysteme erzeugen ultrakurze Lichtimpulse, die nur wenige Femtosekunden lang sind und damit kürzer als eine halbe Lichtschwingung im abgetasteten Spektralbereich. Eine Femtosekunde entspricht dem Millionstel einer Milliardstel Sekunde. Die extreme Empfindlichkeit der Methode erlaubt es, elektromagnetische Fluktuationen selbst in Abwesenheit von Intensität aufzuspüren, also in vollkommener Dunkelheit. Die Existenz dieser „Vakuum-Fluktuationen“ folgt theoretisch aus der Heisenbergschen Unschärferelation. Alfred Leitenstorfer und sein Team konnten sie erstmals direkt nachweisen – und zwar im mittleren infraroten Frequenzbereich, wo selbst die konventionellen Zugänge zur Quantenphysik bislang nicht funktionieren.

Die Experimente sind vom Grundkonzept her neuartig: Anstatt der bisher üblichen sogenannten Frequenzdomänen-Ansätze nutzen die Konstanzer Physiker einen Zugang, der direkt in der Zeitdomäne arbeitet. Anstelle der Analyse von Licht in einem schmalen Frequenzband werden hier zu einem bestimmten Zeitpunkt elektrische Feldamplituden gemessen. Untersucht man verschiedene Punkte in der Zeit, so ergeben sich charakteristische Rauschmuster, die eine detaillierte Aussage über den dort vorliegenden Quantenzustand des Lichts erlauben. Indem sich der Messimpuls mit dem zu untersuchenden Quantenfeld gemeinsam bei Lichtgeschwindigkeit durch den Raum ausbreitet, können die Konstanzer Physiker quasi die Zeit anhalten. Letztlich verhalten sich Raum und

Zeit, also die „Raumzeit“, in diesen Experimenten vollkommen äquivalent – ein Hinweis auf die inhärent relativistische Natur elektromagnetischer Strahlung.

Weil der neue Zugang die zu messenden Photonen weder absorbieren noch verstärken muss, ist es möglich, das elektromagnetische Grundrauschen des Vakuums und somit auch die von den Experimentatoren herbeigeführten Abweichungen von diesem Grundzustand direkt zu detektieren. „Wir können den Quantenzustand analysieren, ohne dass wir ihn in erster Näherung verändern“, stellt Alfred Leitenstorfer fest. Die Quantenmessungen beruhen nicht zuletzt auf der hohen Stabilität der Konstanzer Technologie, bei der das Eigenrauschen der ultrakurzen Laserimpulse extrem gering ist.

Für die Manipulation des Vakuumfeldes nutzen die Forscher eine neue Strategie zur Herstellung „gequetschten Lichts“, englisch „squeezed light“. Mit einem intensiven Impuls des Femtosekundenlasers wird die Lichtgeschwindigkeit in einem bestimmten Bereich der Raumzeit gezielt verändert. Durch diese lokale Modulation der Ausbreitungsgeschwindigkeit wird das Vakuumfeld „gequetscht“, was gleichbedeutend ist mit einer Umverteilung der Vakuum-Fluktuationen. Alfred Leitenstorfer vergleicht das quantenphysikalische Geschehen anschaulich mit einem Verkehrsstau auf der Autobahn: Ab einem bestimmten Punkt fahren Autos langsamer. In der Folge wird sich dahinter der Verkehr anstauen, davor wird er weniger werden. Das heißt: Werden die Fluktuationsamplituden an einem Ort geringer, werden sie an anderer Stelle mehr.

Während bei zeitlich ansteigender Lichtgeschwindigkeit die Fluktuationsamplituden eine positive Abweichung vom Vakuum-Rauschen aufweisen, kommt es bei ihrer Verzögerung zu einem erstaunlichen Phänomen: Das gemessene Rauschniveau ist geringer als im Vakuum-Zustand – geringer als im absoluten Nichts. Mit den bisher bekannten Methoden wäre eine solche direkte Messung nicht möglich, da sie bei der Analyse entweder die Photonen absorbieren, den Quantenzustand somit zerstören, oder ihn verstärken müssten, um überhaupt Signale zu erhalten.

Das einfache Bild mit dem Verkehrsaufkommen auf einer Autobahn stößt allerdings sehr schnell an seine Grenzen: Im Gegensatz zur Situation auf der Autobahn, wo es immer bei derselben Anzahl an Autos bleibt, verändern sich die Rauschamplituden mit zunehmender Stärke der Beschleunigung und Abbremsung der Raumzeit auf ganz andere Weise. Ist das Rauschmuster bei geringer „Quetschung“ noch einigermaßen symmetrisch um das Vakuum-Niveau herum verteilt, ergibt sich bei zunehmender Stärke eine Abnahme, die zwangsläufig gegen Null hin sättigt. Im Gegensatz dazu steigt das wenige Femtosekunden später angehäuften Überschussrauschen nichtlinear an – eine direkte Konsequenz aus dem Produktcharakter der Unschärferelation. Dieses Phänomen ist gleichzusetzen mit der Erzeugung eines hoch nichtklassischen Zustandes des Lichtfeldes, bei dem beispielsweise immer zwei Photonen gleichzeitig im selben Volumen von Raum und Zeit auftreten.

Das Konstanzer Experiment wirft viele neue Fragen auf und verspricht spannende Studien auch für die Zukunft. Als nächstes wollen die Physiker die Grenzen des anscheinend nicht-destruktiven Charakters der Methode verstehen. An sich sollte jede experimentelle Analyse eines Quantensystems dieses verändern. Möglicherweise liegt der Schlüssel zu diesem Kontext in der Tatsache begründet, dass derzeit noch viele Einzelmessungen gemacht werden müssen, um eine Aussage zu erhalten: 20 Millionen Wiederholungen in der Sekunde. Ob es sich dabei um eine sogenannte „schwache Messung“ nach konventioneller Sprechweise der Quantentheorie handelt, können die Physiker noch nicht mit Bestimmtheit sagen.

Der neue experimentelle Zugang zur Quantenelektrodynamik stellt erst die dritte Methode überhaupt dar für das Studium des Quantenzustands von Licht. Grundsätzliche Fragen stellen sich: Was genau ist der Quantencharakter des Lichts? Was ist eigentlich ein „Photon“? So viel steht für die Konstanzer Physiker fest: Auf jeden Fall kein quantisiertes Energiepaket, sondern eher ein Maß für die lokale Quantenstatistik in der Raumzeit.

Originalpublikation:

C. Riek, P. Sulzer, M. Seeger, A.S. Moskalenko, G. Burkard, D.V. Seletskiy, A. Leitenstorfer: „Sub-cycle Quantum Electrodynamics“. Nature, Advance online publication. DOI: 10.1038/nature21024

Faktenübersicht:

- Förderung im Rahmen eines ERC Advanced Grant
- Kooperation unter dem Dach des Center for Applied Photonics (CAP) und des SFB 767

Hinweis an die Redaktionen:

Fotos können im Folgenden heruntergeladen werden:

Abbildung 1:

https://cms.uni-konstanz.de/fileadmin/pi/filesserver/2017/Leitenstorfer/Leitenstorfer-Squeezing_Abb_01.JPG

Bildunterschrift:

Das Team der Physiker in ihrem Laserlabor (von links nach rechts): Philipp Sulzer, Dr. Andrey Moskalenko, Dr. Denis Seletskiy, Maximilian Seeger, Dr. Claudius Riek, Prof. Dr. Alfred Leitenstorfer und Prof. Dr. Guido Burkard.

Abbildung 2:

https://cms.uni-konstanz.de/fileadmin/pi/filesserver/2017/Leitenstorfer/Leitenstorfer-Squeezing_Abb_02.jpg

Bildunterschrift:

Detailansicht des Experiments zur Subzyklen-Quantenelektrodynamik. Rechts ist zwischen zwei Parabolspiegeln der dunkelrote Emitterkristall aus Galliumselenid zu sehen, in dem ein ultrakurzer Lichtimpuls eine lokale Änderung der Lichtgeschwindigkeit hervorruft und damit das Quantenvakuum quetscht. Nach links schließen sich ein Galliumantimonid-Filter und ein Siliziumspiegel an, mit dem die Abtastimpulse eingekoppelt werden. Ganz links befindet sich schließlich der gelbliche Silberthiogallat-Kristall zur Detektion der erzeugten Abweichungen vom Vakuum-Rauschen. Der hintere Parabolspiegel fokussiert sowohl den Abtaststrahl als auch die gequetschten Vakuumfelder in den Detektorkristall. Der vordere Parabolspiegel dient der Kollimation des Abtaststrahls, dessen Polarisationszustand nun Informationen über die Quantenfluktuationen des elektrischen Feldes im abgetasteten Raumzeit-Segment trägt.

Abbildung 3:

https://cms.uni-konstanz.de/fileadmin/pi/filesserver/2017/Leitenstorfer/Leitenstorfer-Squeezing_Abb_03.png

Bildunterschrift:

Schematische Darstellung der raum-zeitlichen Abweichungen vom Niveau der nackten Vakuumfluktuationen des elektrischen Feldes, welche durch Deformation der Raumzeit erzeugt und in der Zeitdomäne abgetastet werden. Die farbige Hyperfläche kombiniert eine longitudinale Zeitspur (rote Linie) mit der transversalen Modenfunktion.

Kontakt:

Universität Konstanz
Kommunikation und Marketing
Telefon: + 49 7531 88-3603
E-Mail: kum@uni-konstanz.de

- uni.kn