

Wie genau trennt sich ein Elektron vom Atom?

Ultrapräzise COLTRIMS-Messungen weisen $1/c$ -Effekte bei der laserinduzierten Ionisation nach.

Christoph H. Keitel

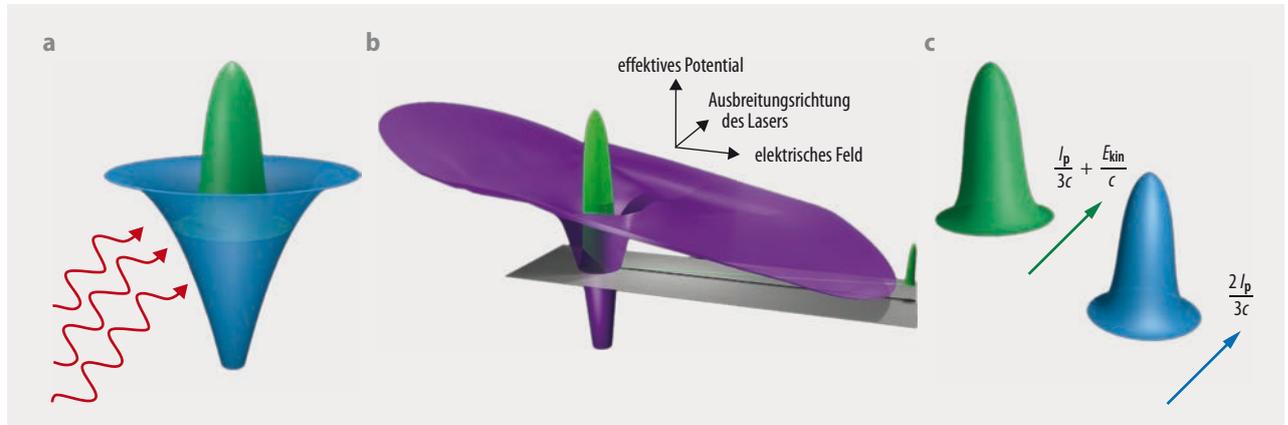


Abb. 1 Ein gebundenes Elektron (a, grün) lässt sich schematisch als Wellenpaket im Coulomb-Potential eines Atomkerns (blau) vor der Einstrahlung von Laserlicht (rot) darstellen. Unter Einwirkung des Laserlichts sieht das Elektron ein effektives Potential (b, lila), wobei der Laser bei maximaler Feldstärke eine Barriere erzeugt, durch die das Elektron beeinflusst durch das Lasermagnetfeld hindurchtunneln kann. Nach der Ionisation sind Elektron (c, grün) und positives Ion (blau) getrennt und bewegen sich nach neuesten Erkenntnissen jeweils mit den gemittelten Impulsen $I_p/3c + E_{kin}/c$ und $2I_p/3c$ in Propagationsrichtung des Lasers.

Trifft ein Laserpuls auf ein Atom (Abb. 1a), kann es zur Ionisation kommen. Dies geschieht selbst dann, wenn die Kräfte des Laserfeldes auf das Elektron etwas schwächer sind als die des verbleibenden bindenden Ions. In diesem Fall wird das attraktive Potential des Ions durch die Anwesenheit des Lasers so verformt, dass sich eine Potential-Barriere bildet (Abb. 1b), durch die das Elektron hindurchtunneln kann. Was in diesem klassisch verbotenen „Quantentunnel“ genau passiert, ist noch immer Gegenstand aktueller Forschung. Von experimenteller Seite

kann man nur durch Zurückverfolgung der Teilchentrajektorien genaue Schlüsse ziehen, weil sich Elektron und Ion erst vermessen lassen, nachdem sie sich bereits getrennt haben (Abb. 1c).

Nach einem vereinfachten Modell tritt das Elektron quasi instantan durch den Tunnel und nimmt dann aus dem Ruhezustand kinetische Energie E_{kin} und den zugehörigen Impuls E_{kin}/c durch den Laser auf. Der Impuls I_p/c , der für die Ionisation des Atoms erforderlich ist, würde demnach vollständig auf das Ion übergehen. Dies wäre auch der Fall, wenn der Laser nur

so intensiv ist, dass Geschwindigkeiten auftreten, die vernachlässigbar sind im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit c . Der vollständige Impulsübertrag I_p/c auf das Ion wurde auch im Rahmen der damals vorliegenden experimentellen Genauigkeit so bestätigt [1].

Aus einer vollständig relativistischen theoretischen Untersuchung der Dynamik im Quantentunnel ließ sich allerdings vor einigen Jahren berechnen, dass der Impuls abhängig vom Ionisationspotential zu einem Drittel auf das Elektron übergeht [2]. Eine andere theoretische Gruppe bestätigte dies ein Jahr darauf und schloss mittels Energieerhaltung, dass der Restimpuls des Ions damit $2I_p/3c$ ist [3]. Von theoretischer Seite werden weitere Aspekte der Dynamik im Quantentunnel kontrovers diskutiert, beispielsweise die Frage ob und wie viel Zeit ein Teilchen im Quantentunnel verbringt. Eine experimentelle Bestätigung des zuvor beschriebenen Impulsübertrags wäre somit für das fundamentale Verständnis wichtig, aber auch für Anwendungen in der Attosekundenphysik, wo selbst Abweichungen der übertragenden Impulse in der Größenordnung von $I_p/3c$ von erheblicher Bedeutung sind.

Kurzgefasst

Neutrinomassenskala limitiert

Die Daten nach vier Wochen Experimentierzeit mit KATRIN haben der internationalen Kollaboration ausgereicht, um eine Obergrenze von 1,1 eV für die absolute Massenskala der Neutrinos zu bestimmen (Konfidenzniveau: 90 %). Der Wert verbessert die bisher gültige Grenze aus mehrjährigen Messkampagnen der Vorgängerexperimente um einen Faktor 2. Das Ergebnis bestätigt die Sensitivität von KATRIN und ist ein modellunabhängiger Input für kosmologische Studien zur Strukturbildung.

M. Aker et al., Phys. Rev. Lett. accepted

Uralte Gaswolke identifiziert

Eine uralte Gaswolke liefert Informationen aus der Frühphase von Galaxien- und Sternentstehung: 850 Millionen Jahre nach dem Urknall. Die Wolke sieht aus wie ein Vorläufer einer modernen Zwerggalaxie und hat sich durch die Absorption des Lichts eines weiter entfernt liegenden Quasars verraten. Trotz ihres Alters ist die chemische Zusammensetzung so modern, dass Astronomen nun vermuten, dass sich die ersten Sterne früher als bisher angenommen gebildet haben, nämlich direkt nach dem Urknall.

E. Bañados et al., ApJ 885, 59 (2019)

Die COLTRIMS-Methode wurde entwickelt, um mit außerordentlich großer Genauigkeit insbesondere die Impulse bei der Ionisation von Atomen zu messen [4]. Hierfür werden die Auftrefforte und Flugzeiten der atomaren Fragmente präzise vermessen, sodass ein vollständiges Bild der Reaktion im Impulsraum vorliegt. Dies ergibt die Flugbahnen der involvierten geladenen Teilchen und erlaubt es, den Impuls des ionisierten Elektrons bis zum Quantentunnel zurückzuverfolgen. Für Untersuchungen der Dynamik innerhalb des Quantentunnels ließ sich eine beachtliche Auflösung der Impulse von 0,01 atomaren Einheiten erreichen. Dies entspricht einer Energieauflösung für die Ionen von etwa 10 neV, was durch ein gegenseitiges Aufheben von systematischen Fehlern bei Verwendung von zwei Gasen mit ähnlicher Ionisationsenergie gelang [5]. Um den obigen Impuls von $I_p/3c$ auflösen zu können, reicht diese Genauigkeit aber nicht aus. Dazu ist es nötig, die Energieauflösung der

Ionen um etwa zwei weitere Größenordnungen zu verbessern.

Eine Kollaboration von Gruppen aus Frankfurt und Hannover erreichte diese herausragende Genauigkeit und wies damit den winzigen, aber fundamental so wichtigen Impulsübertrag von $I_p/3c$ nach [6]. Dazu bestrahlten die Physiker das Edelgas Argon mit 25 fs-Pulsen hoher Stabilität der Wellenlänge 800 nm. Um die Impulse der emittierten Elektronen und Ionen zu vermessen, nutzten sie die COLTRIMS-Methode. Mit dem Trick, die Messungen zweimal mit Laserstrahlen aus entgegengesetzten Richtungen zu vollziehen, konnten sie besonders effizient systematische Fehler eliminieren. Auf diese Weise gelang es außerdem, den Null-Impuls präzise zu definieren, weil es bei gleichzeitiger Anwendung beider Laserstrahlen bei gleicher Intensität exakt keinen Impulsübertrag geben soll. Im Vergleich mit ebenso genauen theoretischen Rechnungen unter Einbezug des Lasermagnetfelds wurde der obige voll

relativistisch vorhergesagte Impuls einwandfrei und unabhängig von der Laserintensität nachgewiesen. Damit ist man dem fundamentalen Verständnis der komplexen relativistischen Dynamik im Quantentunnel einen wesentlichen Schritt näher gekommen und hat eine signifikant verbesserte Genauigkeit für die damit assoziierten Anwendungen ermöglicht.

- [1] C. T. L. Smeenk et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 193002 (2011)
- [2] M. Klaiber et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 153004 (2013)
- [3] S. Chelkowski et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 263005 (2014)
- [4] R. Moshhammer und R. Dörner, Physik Journal, August/September 2015, S. 61
- [5] N. Camus et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 023201 (2017)
- [6] A. Hartung et al., Nat. Physics (2019), doi.org/10.1038/s41567-019-0653-y

Autor

Honorarprofessor Dr. Christoph H. Keitel,
Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercher-
eckweg 1, 69117 Heidelberg



Berechtigte Autoren an deutschen Institutionen können Open Access (OA) veröffentlichen und profitieren vom vollen Lesezugriff auf die Zeitschriften von Wiley.

Projekt DEAL und Wiley haben vertraglich vereinbart Open Research für Institutionen und Forscher zu fördern. Wissenschaftliche Erkenntnisse werden so einfacher zugänglich, Austausch und neue Entdeckungen dadurch beschleunigt.

- Berechtigte Autoren an teilnehmenden deutschen Institutionen können OA veröffentlichen und profitieren dabei vom Lesezugriff auf die Zeitschriften von Wiley.
- Autoren von Projekt-DEAL-Institutionen können Forschungs- und Übersichtsartikel OA in Wiley-Zeitschriften veröffentlichen, das Urheberrecht an ihren Werken behalten ohne Kosten für den Autor.
- Alle Projekt-DEAL-Institutionen haben Lesezugriff auf die Artikel der wissenschaftlichen Zeitschriften von Wiley, die bis ins Jahr 1997 zurückgehen.

Haupt-Korrespondenzautoren der teilnehmenden Projekt-DEAL-Institutionen können ohne Autorenggebühr ihre Forschungsartikel

- in Wiley-Gold-OA-Zeitschriften veröffentlichen (ab 2019) oder
- OA in Wiley-Hybridzeitschriften veröffentlichen (ab 1. Juli 2019)

Ihr akzeptierter OA-Artikel wird unter einer Creative Commons-Lizenz in der Wiley Online Library veröffentlicht.



Ausführlichere Informationen erhalten Sie hier:
bit.ly/DEALAuthor



Wenn Sie Fragen zu Ihrer OA-Publikationsberechtigung haben, wenden Sie sich bitte an uns: cs-openaccess@wiley.com

WILEY

Need ultimate precision?



FC1500-ULN^{plus} Ultralow Noise Optical Frequency Comb

10⁻¹⁸ accuracy and stability –
unprecedented performance for optical clocks

www.menlosystems.com



MenloSystems