

Auf der Rennbahn ticken Uhren langsamer

Wenn Guido Saathoff und sein Doktorand Sascha Reinhardt am Montagmorgen das enge Labor im Keller der Beschleunigerhalle betreten, schalten sie ihren Laser ein und schauen, wie es ihm geht. An schlechten Tagen läuft das empfindliche Instrument nicht stabil genug und muss mit viel Geschick und Erfahrung eingestellt werden. Das kann leicht einen ganzen Vormittag in Anspruch nehmen, bevor die beiden Physiker an ihr eigentliches Vorhaben gehen können: die Überprüfung der Speziellen Relativitätstheorie mit bisher unerreichter Genauigkeit.

Saathoff und Reinhardt messen die wohl verblüffendste Vorhersage der Relativitätstheorie, die Zeitdilatation. Sie besagt, dass die Zeit in einem relativ zum Beobachter schnell bewegten System langsamer vergeht als in einem ruhenden. Dieses Phänomen testeten die beiden Forscher an Lithium-Ionen, die über ihren Köpfen in einem Teilchenring des Max-Planck-Instituts für Kernphysik mit 19 000 Kilometer pro Sekunde herumlaufen. Mit dieser Geschwindigkeit, die 6,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit entspricht, könnten die Ionen innerhalb von etwas mehr als zwei Sekunden die Erde umkreisen. Besäßen die Teilchen Uhren, so gingen diese

nach Einstein etwa zwei Promille langsamer als Guido Saathoffs Armbanduhr. Und so seltsam es klingt, genau diesen Effekt konnte das Heidelberger Team überprüfen. Mit ihrer erst kürzlich erschienenen Arbeit stießen die Wissenschaftler damit weltweit auf großes Interesse.

DIE „MAGISCHE KONSTANTE“ DER NEUEN PHYSIK

Die Ursprünge des Heidelberger Experiments lassen sich bis zu Einstein selbst zurückverfolgen, der 1907 erstmals einen ähnlichen Test seiner Speziellen Relativitätstheorie vorschlug. Das war zwei Jahre nach seinem so genannten *annus mirabilis*, dem „Wunderjahr“: 1905 hatte der damals 26-jährige Angestellte im Berner Patentamt innerhalb eines Vierteljahres drei Arbeiten veröffentlicht, von denen zwei die Physik revolutionieren sollten. Eine beschrieb Licht als Partikelstrom. Für diese Veröffentlichung, die der Quantentheorie den Weg bahnte, wurde Albert Einstein 1922 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet; für die zweite Veröffentlichung „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, die Spezielle Relativitätstheorie, wurde er berühmt.

Eine zentrale Aussage der Speziellen Relativitätstheorie besagt, dass

Eine Theorie gilt nur so lange, bis sie widerlegt wird. Und so testen Physiker seit fast hundert Jahren Einsteins Relativitätstheorie – bisher ohne Anzeichen von Schwachstellen. Forscher um DIRK SCHWALM, Direktor am MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KERNPHYSIK in Heidelberg, haben kürzlich die von Einstein postulierte Verlangsamung der Zeit („Zeitdilatation“) mit bisher unerreichter Genauigkeit gemessen. Ergebnis: Die Relativitätstheorie bleibt weiter ohne Makel.

die Lichtgeschwindigkeit immer denselben Wert von 300 000 Kilometer pro Sekunde besitzt – egal, von welchem System aus man sie misst. Dies widerspricht unserer Alltagserfahrung, die jeder schon gemacht hat. Hierzu setze man sich in sein Auto, fahre mit 120 Kilometer pro Stunde auf der linken Spur einer Autobahn und überhole einen 90 Kilometer pro Stunde fahrenden LKW. Diese beiden Geschwindigkeiten würde beispielsweise eine Radarkontrolle am Straßenrand messen. Aus unserer Sicht bewegt sich unser Auto relativ zu uns gar nicht, wir sitzen schließlich fest in unseren Sitzen. Gleichzeitig ist es 30 Kilometer pro Stunde schneller als der LKW. Umgekehrt würde ein entgegenkommender LKW von uns aus gemessen mit 210 Kilometer pro Stunde an uns vorbeirasen. Die Geschwindigkeiten werden also je nach Fahrtrichtung einfach subtra-

hiert oder addiert – so jedenfalls sieht es die klassische Physik Isaac Newtons vor.

Dieses einfache Gesetz gilt nach der Speziellen Relativitätstheorie nicht mehr. Hier werden die Relativgeschwindigkeiten nach einer komplizierteren Formel berechnet. Die Abweichungen vom klassischen Fall wachsen mit zunehmender Geschwindigkeit und erreichen bei der Lichtgeschwindigkeit eine seltsame Konsequenz: Egal, wie schnell und aus welcher Richtung man sich einem Lichtstrahl nähert, er bewegt sich zu uns immer mit 300 000 Kilometer pro Sekunde. Setzt man diese physikalische Annahme konsequent fort, wie es Einstein im Jahr 1905 getan hat, so bekommen Zeit und Raum völlig neue Eigenschaften. Eine Folge ist die so genannte Längenkontraktion, wonach schnell bewegte Körper in Bewegungsrichtung kürzer sind als

„Rennbahn“ für Teilchen: Im Heidelberger Testspeicherring laufen Lithium-Ionen mit einer Geschwindigkeit von 19 000 Kilometer pro Sekunde. Forscher messen damit den Effekt der Zeitdilatation.

ruhende. Eine andere ist die Äquivalenz von Masse und Energie, die sich in der wohl berühmtesten Formel aller Zeiten $E = mc^2$ äußert. Die dritte Vorhersage der Speziellen Relativitätstheorie betrifft die bereits erwähnte Zeitdilatation.

VON DER THEORIE ZUM EXPERIMENT

Nun ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zunächst einmal nur eine Hypothese. Einstein wagte sie, weil er damit Probleme lösen konnte, die im damaligen Fundament der physikalischen Grundtheorien aufgetreten waren. Deshalb war es für ihn wichtig, dass die Vorhersagen seiner Theorie experimentell bestätigt würden. Dass dies nicht mit normalen Uhren funktionieren kann, war ihm klar – nachweisbare Effekte treten erst bei extrem hohen Geschwindigkeiten auf.

Im Jahr 1907 schlug Albert Einstein ein trickreiches Experiment vor, um die Zeitdilatation mit Atomen zu messen. Er bezog sich dabei auf einen Versuch, den kurz zuvor Johannes Stark ausgeführt hatte. (Ironischerweise profilierte sich in den 1920er-Jahren ausgerechnet Stark als ausgesprochener Anti-Relativist und eifriger Verfechter einer „Deutschen Physik“). Johannes Stark hatte in seinem Labor an der Universität Greifswald positiv geladene Atome, so genannte Ionen, in elektrischen Feldern beschleunigt und untersucht. Diese Ionen senden Licht einer ganz bestimmten Wellenlänge aus, die sich genau messen lässt. Stellt man sich Licht als schwingende Welle vor, so kann man die Schwingungsdauer (Frequenz) auch als Zeitmetronom auffassen, oder wie Einstein schreibt: „So können wir ein solches Ion als eine Uhr von bestimmter Frequenz-



FOTOS: MPI FÜR KERNPHYSIK



Teamarbeit: Guido Saathoff (links) vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik und sein Kollege Sergej Karpuk von der Universität Mainz stimmen in ihrem engen Labor die Laser ab.



Blick in die Röhre: Durch ein Fenster im Strahlrohr des Heidelberger Ringspeichers registriert das Photometer die leuchtenden Ionen.

zahl ansehen.“ Hierauf basieren heutige Atomuhren.

Einsteins Idee war nun: Wenn die Ionen in den Kanalstrahlen sehr schnell fliegen, vergeht bei ihnen die Zeit langsamer als im Labor. Das von ihnen ausgesandte Licht müsste daher langsamer schwingen, was sich in einer vergrößerten Wellenlänge und einer verringerten Frequenz äußern sollte. Damals reichte jedoch die Messgenauigkeit nicht aus, um die Formel der Speziellen Relativitätstheorie zu testen. Dies gelang erstmals zwei amerikanischen Physikern im Jahr 1938, indem sie eine Spektrallinie von Wasserstoff vermaßen, der sich in Form eines Kanalstrahls mit etwa 1500 Kilometer pro Sekunde bewegte. Die damaligen Messwerte bestätigten die Relativitätstheorie bis auf etwa zwei Prozent genau.

Bis heute ist das historische Experiment mehrfach mit wachsender Genauigkeit und mit unterschiedlichen Messverfahren wiederholt worden. Bislang bestätigten alle Ergebnisse die Spezielle Relativitätstheorie. Ist es dann überhaupt noch nötig, weitere Anstrengungen zu unternehmen? Muss man mittlerweile nicht davon ausgehen, dass Einsteins Theorie stimmt? „Man kann nie letztendlich beweisen, dass eine Theorie richtig ist“, sagt Guido Saathoff. „Sie gilt immer nur so lange, bis ein experimentelles Ergebnis ihr widerspricht.“

KÜHLES BAD IM ELEKTRONENSEE

Doch die Spezielle Relativitätstheorie widersteht seit nunmehr 99 Jahren allen Angriffen. Dass man weiterhin nach einer Lücke forscht, hat gute Gründe. Theoretische Physiker suchen schon lange nach einer Theorie, welche die Schwerkraft (Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie) mit den atomaren Kräften (Quantentheorie) in einer Urkraft zusammenfasst. Das Bemühen blieb bisher erfolglos; es gibt jedoch Ansätze zu einer solchen „Großen Vereinheitlichung“. Einige von ihnen sagen voraus, dass die Spezielle Relativitätstheorie nicht genau stimmt. „Zwar gibt es keine quantitativen Voraussagen, in welchem Größenbereich wir auf eine Abweichung stoßen sollten“, kommentiert Saathoff den Stand der Dinge, „aber schon der kleinste Hinweis würde die Theorie enorm beflügeln.“

Am Heidelberger Max-Planck-Institut laufen die Tests der Speziellen Relativitätstheorie schon seit Ende der 1980er-Jahre, als man dort den Testspeicherring aufgebaut hatte. Die Idee dazu kam von Gerhard Huber, Professor am Institut für Physik der Universität Mainz, von dessen Gruppe nach wie vor ein Physiker an dem Experiment mitarbeitet. Der Testspeicherring gleicht einer „Rennbahn“ mit 55 Meter Umfang, auf der Magneten geladene Teilchen in der Spur halten – in Saathoffs Experiment po-

sitiv geladene Lithium-Ionen, die in einem Nachbargebäude erzeugt werden. Dort werden sie in den starken elektrischen Feldern eines so genannten Tandem-Beschleunigers auf ihre Endgeschwindigkeit von 19 000 Kilometer pro Sekunde gebracht, bevor sie in den Speicherring gelangen. Sobald einige Millionen Teilchen den Ring bevölkern, wird dieser für weitere Ionen gesperrt; denn bevor das Experiment beginnt, müssen die Forscher den umlaufenden Ionenstrahl optimieren – hierin liegt der Erfolg des Experiments.

Zunächst einmal haben die Lithium-Ionen noch sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten, die Physiker sprechen von einem „heißen“ Strahl. Den kühlen die Forscher ab, indem sie die Ionen auf einer Teilstrecke des Rings durch „kalte“ Elektronen hindurchfliegen lassen. Kalt bedeutet, dass die Geschwindigkeiten der Elektronen von der Sollgeschwindigkeit im Mittel nur sehr wenig abweichen. Läuft der Lithium-Strahl durch das Elektronenbad hindurch, so stoßen die Teilchen zusammen und beeinflussen sich durch ihre elektrischen Kräfte. In der Folge werden zu schnelle Ionen abgebremst und zu langsame beschleunigt. Rund 345 000 Mal pro Sekunde schießt der Lithium-Strahl durch den Elektronensee hindurch, und nach etwa fünf Sekunden sind die Geschwindigkeitsunterschiede so weit ausgeglichen, dass die Messung beginnen kann.

Im Prinzip könnte man nun die Laborfrequenz bestimmen, die ein Laser haben muss, um die bewegten Ionen zum Leuchten anzuregen und diese mit der Lichtfrequenz des ruhenden Ions vergleichen. Das Verfahren ist jedoch zu ungenau, denn die Teilchen besitzen selbst nach dem ausgiebigen Bad im Elektronensee immer noch nicht alle exakt dieselbe Geschwindigkeit: Die „Uhren“ gehen unterschiedlich schnell.

Ein weiteres Problem bereitet der klassische Doppler-Effekt, wonach die Frequenz einer Welle höher erscheint, wenn man sich auf sie zu bewegt und tiefer, wenn man sich

von ihr entfernt. In der Alltagswelt kennt man das von akustischen Wellen: Die Sirene eines vorbeifahrenden Feuerwehrwagens klingt zuerst höher und dann tiefer als der tatsächliche (und vom Fahrer wahrgenommene) Ton. Dieser Doppler-Effekt überlagert sich der Zeitdilatation und verhindert eine einfache Präzisionsmessung.

Diese beiden Probleme lösen die Heidelberger Physiker, indem sie zwei Laserstrahlen in den Speicherring hineinschießen. Der eine verläuft genau parallel zum Ionenstrahl, der andere läuft ihm entgegen. Die Frequenzen dieser beiden Laser sind so eingestellt, dass sie Ionen mit einer bestimmten Geschwindigkeit zum Leuchten anregen. Sie picken sich gewissermaßen zwei verschiedene Geschwindigkeitsklassen heraus. Die Lichtausbeute dieser beiden Gruppen misst ein Photodetektor, der seitlich ins Strahlrohr schaut.

NOCH GILT EINSTEIN AUF EIN MILLIONSTEL

Variiert man nun die Frequenz des einen Lasers so lange, bis er dieselben Ionen anregt wie der andere Laser, so sinkt die Lichtausbeute, weil nur noch eine Geschwindigkeitsklasse leuchtet: Die beiden Laser müssen sich die Ionen dieser Geschwindigkeit teilen. Im Experiment bricht dann in dieser Situation plötzlich die Lichtausbeute ein – was sich sehr genau messen lässt. Glücklicherweise fügt es sich nun so, dass sich an diesem Punkt die Doppler-Effekte der antiparallelen Laserstrahlen genau aufheben und nur die Frequenzverschiebung durch die Relativitätstheorie übrig bleibt. Das Messergebnis hängt dann erstaunlicherweise nicht mehr von der Geschwindigkeit der Ionen ab. Nun müssen die Physiker noch die gemessene Lichtfrequenz der kreisenden Lithium-Ionen mit derjenigen von ruhenden vergleichen.

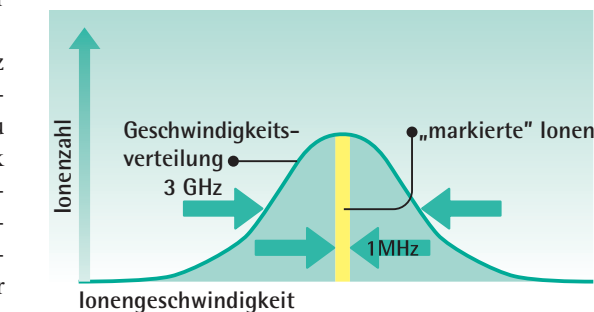
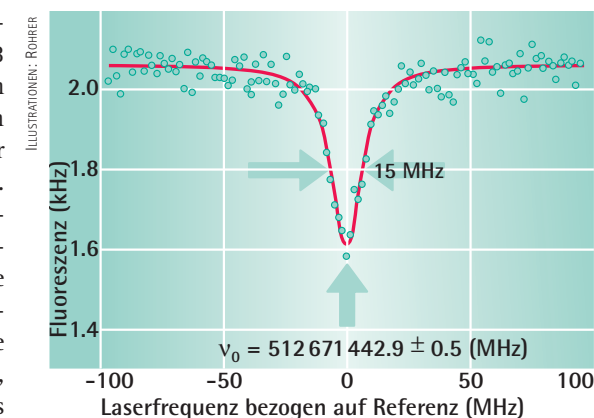
Auf diese Weise gelang es Guido Saathoff und seinen Kollegen, die Einsteinsche Formel für die Zeitdilatation bis auf weniger als ein Millionstel genau zu bestätigen. Dies ent-

spricht einer Verbesserung des ursprünglichen Experiments von 1938 um das Zehntausendfache. Und noch immer scheinen die Möglichkeiten der Heidelberger Wissenschaftler nicht gänzlich ausgeschöpft zu sein. „Im Moment ist die Genauigkeit unseres Wertes nicht durch unsere Messungen begrenzt, sondern durch die Kenntnis der Frequenz, die das Lithium-Ion im Labor aussendet, also die Ganggenauigkeit der ruhenden Uhr“, sagt Sascha Reinhardt. Er will das Problem deshalb im Rahmen seiner Doktorarbeit angehen.

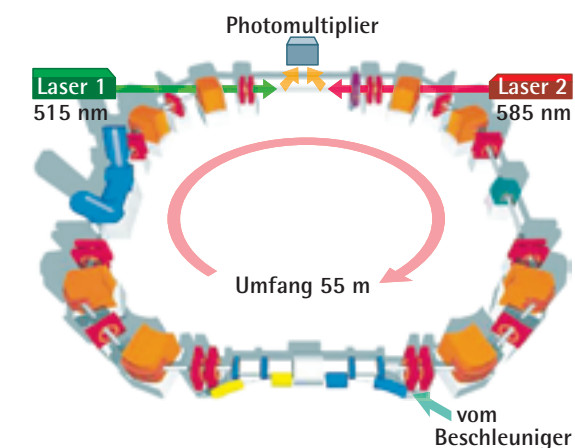
Da die Messung der Ruhfrequenz auch wieder mit einem Laser geschieht, wird es nötig sein, diesen zu kalibrieren. Wie so oft in der Physik werden Instrumente an einem gut bekannten und möglichst exakt gemessenen Standard geeicht. Die im Einstein-Experiment verwendeten Laser beispielsweise richten sich nach einer bestimmten Lichtfrequenz, die ein Jod-Molekül ausstrahlt. Um die Laser noch exakter zu kalibrieren, wird Reinhardt mit ihnen nach Garching fahren. Am dortigen Max-Planck-Institut für Quantenoptik betreibt die Gruppe um Theodor Hänsch einen so genannten Frequenzkamm, mit dem sich die Jod-Emission mit höchster Präzision vermessen lässt.

Wenn das Team aus Heidelberg vielleicht bis zum Ende des Jahres das Letzte aus seiner Apparatur herausgeholt hat, kann es die Genauigkeit seiner Messung noch einmal auf das Fünffache erhöhen. Danach müssen die Forscher andere Wege gehen, und einer führt eventuell zur Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Dort ließen sich Ionen auf größere Geschwindigkeiten bringen als im Heidelberger Beschleuniger. Der Effekt der Zeitdilatation wäre stärker ausgeprägt und somit auch exakter messbar. „Damit könnten wir noch einmal um das Zehnfache genauer werden“, sagt Sascha Reinhardt. Wird die Relativitätstheorie dann, hundert Jahre nach Einsteins „Wunderjahr“, erstmals Schwächen zeigen?

THOMAS BÜHRKE



Die Lithium-Ionen bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, angedeutet durch die grüne Glockenkurve. Hierin markieren die Laser einen schmalen Bereich. Wenn beide Laser genau dieselbe Frequenz haben (gelber Strich), bricht die Intensität des von den Ionen ausgesandten Lichts ein (oben).



Schema des Heidelberger Testspeicherrings, in den die Physiker zwei gegenläufige Laserstrahlen hineinschießen und die Ionen dadurch zum Leuchten anregen.