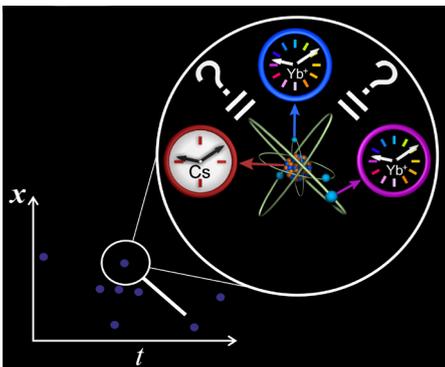


Auf der Suche nach „neuer Physik“: Tests des Standardmodells im Labor

- Es gibt klare Hinweise auf eine „neue Physik“, jenseits des sehr erfolgreichen Standardmodells der Teilchenphysik.
- Laborexperimente könnten aufgrund rasant zunehmender Präzision schon bald Spuren davon finden.
- Eines der vielversprechendsten Werkzeuge für diese Suche sind Atomuhren.

Die beeindruckende Entwicklung der Physik in der Neuzeit erreichte einen weiteren Meilenstein Mitte der 1970er Jahre, als das Standardmodell der Teilchenphysik seine endgültige Form annahm. Diese moderne Theorie beschreibt erfolgreich alle bekannten Elementarteilchen sowie drei der vier fundamentalen Kräfte der Natur: die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung. Trotz dieser Erfolge, die durch die Entdeckung des Higgs-Bosons¹ gekrönt wurden, ist das Standardmodell nicht in der Lage, einige grundlegende Eigenschaften des Universums zu erklären: zum Beispiel, warum im Universum die Materie gegenüber der Antimaterie dominiert. Die Vereinheitlichung der Gravitation mit den anderen drei fundamentalen Kräften zu einer „Theorie von allem“ sowie die Suche nach der ominösen „Dunklen Materie“² bleiben ebenfalls ungelöste Herausforderungen.

Abb. 1



Vergleiche zwischen Ytterbium- und Cäsium-Atomuhren bestätigen die Konstanz der Naturkonstanten.
(Quelle: Nils Huntemann, PTB)

Das alles deutet auf eine „neue Physik“ jenseits des Standardmodells hin! Heiße Spuren dieser neuen Physik wären Effekte oder Teilchen, die im Rahmen des Standardmodells nicht vorhergesagt werden können. Eine kostengünstige Fährtenuche, zusätzlich zur Nutzung großer Beschleunigeranlagen wie dem Large Hadron Collider, sind Experimente der atomaren, molekularen sowie optischen Physik, die bei niedrigeren Energien und mit extremer Präzision durchgeführt werden. Solche Messungen wurden erst dank der außerordentlichen Fortschritte bei der Quantenkontrolle von Materie und Licht in den vergangenen Jahren möglich und werden immer präziser.

Eines der vielversprechenden Werkzeuge für diese Suche sind Atomuhren. Die besten Instrumente haben eine solche Präzision erreicht, dass sie, wenn sie während des Urknalls vor 13,8 Milliarden Jahren gestartet worden wären, heute nur um eine Sekunde falsch gehen würden! Effekte einer neuen Physik wie Spuren von Dunkler Materie, sich verändernde Naturkonstanten oder die Verletzung grundlegender Symmetrien von Raum und Zeit könnten durch den Vergleich des „Tickens“ verschiedener Atomuhren aufgespürt werden.

So konnte in einem kürzlich abgeschlossenen Frequenzvergleich gezeigt werden, dass die Grundkonstanten der Natur³, die auch für die Definition des Internationalen Systems der Einheiten (SI) genutzt werden, tatsächlich konstant sind, bzw. sich über ein Jahr maximal in der 18ten Stelle hinter dem Komma verändern! Der Vergleich mehrerer über große Distanzen vernetzter Uhren wurde auch für die Suche nach „Klumpen“ Dunkler Materie genutzt, von denen man annimmt, dass sie an der Erde vorbeiziehen und die Uhren wegen Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie anders ticken lassen.

Auch wenn diese Experimente noch keine Signale der Dunklen Materie gefunden haben, sind sie überaus erkenntnisreich, da sie den Parametern der Theorien zur Dunklen Materie engere Grenzen setzen.



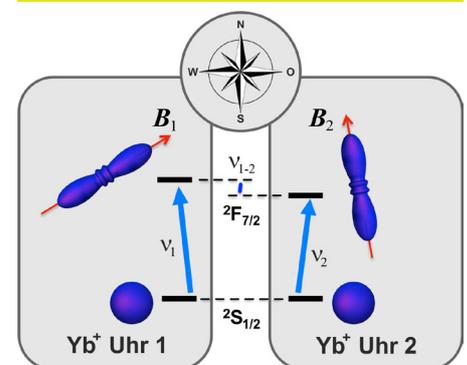
„Modernste Quantentechnologie ermöglicht Laborexperimente mit zuvor ungeahnter Präzision auf den Spuren ‚neuer Physik‘.“

Joachim Ullrich, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Lässt man die Elektronen der Atomuhren senkrecht zueinander schwingen oder schließt Licht in senkrecht zueinander ausgerichteten Resonatoren ein, gibt der Vergleich der jeweiligen Frequenzen Aufschluss darüber, ob der Raum in allen Richtungen gleich – also isotrop – ist. Dieser sogenannte Test der Lorentz-Symmetrie, wie auch die Frage nach der Konstanz von Naturkonstanten sind wichtige Prüfsteine für die Relativitätstheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik.

Die oben genannten Experimente sind nur einige Beispiele für Niedrigenergie-tests des Standardmodells. Bislang hat allerdings keine Untersuchung Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells gefunden. Dank weiter rasant zunehmender Genauigkeit erwarten die Physikerinnen und Physiker jedoch in naher Zukunft, Signale einer neuen Physik in derartigen „Table-Top“-Experimenten beobachten zu können.

Abb. 2



Tests mit zwei erdgebundenen optischen Atomuhren (Yb⁺-Uhren) zeigen, dass der Raum in allen Richtungen gleich ist. $^2S_{1/2}$ und $^2F_{7/2}$ sind Energieniveaus, v_1 , v_2 und v_{1-2} sind Spektrellinien, B_1 und B_2 sind externe Magnetfelder. (Quelle: PTB)

Deutsche **Physikalische** Gesellschaft

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG), deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste nationale und mit rund 55.000 Mitgliedern auch die größte physikalische Fachgesellschaft weltweit. Sie versteht sich als Forum und Sprachrohr der Physik und verfolgt als gemeinnütziger Verein keine wirtschaftlichen Interessen. Die DPG unterstützt den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft mit Tagungen und Publikationen. Sie engagiert sich in der gesellschaftspolitischen Diskussion zu Themen wie Nachwuchsförderung, Chancengleichheit, Klimaschutz, Energieversorgung und Rüstungskontrolle. Sie fördert den Physikunterricht und möchte darüber hinaus allen Neugierigen ein Fenster zur Physik öffnen.

In der DPG sind Wissenschaftler:innen, Studierende, Lehrkräfte, in der Industrie tätige oder einfach nur an Physik interessierte Personen ebenso vertreten wie Patentanwältinnen oder Wissenschaftsjournalisten. Gegenwärtig hat die DPG acht Nobelpreisträger in ihren Reihen. Weltberühmte Mitglieder hatte die DPG immer schon. So waren Albert Einstein, Hermann von Helmholtz und Max Planck einst Präsidenten der DPG.

Die DPG finanziert sich im Wesentlichen aus Mitgliedsbeiträgen. Ihre Aktivitäten werden außerdem von Bundes- und Landesseite sowie von gemeinnützigen Organisationen gefördert. Besonders eng kooperiert die DPG mit der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung.

Die DPG-Geschäftsstelle hat ihren Sitz im Physikzentrum Bad Honnef in unmittelbarer Nähe zur Universitäts- und Bundesstadt Bonn. Das Physikzentrum ist nicht nur ein Begegnungs- und Diskussionsforum von herausragender Bedeutung für die Physik in Deutschland, sondern auch Markenzeichen der Physik auf internationalem Niveau. Hier treffen sich Studierende und Spitzenwissenschaftler:innen bis hin zum Nobelpreisträger zum wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Auch Lehrkräfte reisen immer wieder gerne nach Bad Honnef, um sich in den Seminaren der DPG fachlich und didaktisch fortzubilden.

In der Bundeshauptstadt Berlin ist die DPG ebenfalls präsent. Denn seit ihrer Vereinigung mit der Physikalischen Gesellschaft der DDR im Jahre 1990 unterhält sie dort das Magnus-Haus. Dieses 1760 vollendete Stadtpalais, das den Namen des Naturforschers Gustav Magnus trägt, ist eng mit der Geschichte der DPG verbunden: Aus einem Gelehrntreffen, das hier regelmäßig stattfand, ging im Jahre 1845 die „Physikalische Gesellschaft zu Berlin“, später die DPG hervor. Heute finden hier Kolloquien und Vorträge zu physikalischen und gesellschaftspolitischen Themen statt. Gleichzeitig befindet sich im Magnus-Haus Berlin auch das historische Archiv der DPG.

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.

Geschäftsstelle Tel.: 02224 / 92 32 - 0
Hauptstraße 5 Fax: 02224 / 92 32 - 50
53604 Bad Honnef E-Mail: dpg@dpg-physik.de

Redaktion: Gerhard Samulat

Fußnoten

- ¹ Siehe Physikkonkret Nr. 62:
Zehn Jahre Entdeckung des Higgs-Bosons
- ² Siehe Physikkonkret Nr. 16:
Dunkle Materie in der Milchstraße
- ³ Siehe Physikkonkret Nr. 34:
Naturkonstanten als Maß aller Dinge

Zusatzinformationen

- [1] Al+ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10⁻¹⁸
S. M. Brewer, et al., Phys. Rev. Lett. 123, 033201 (2019)
- [2] Improved Limits for Violations of Local Position Invariance from Atomic Clock Comparisons
R. Lange, et al., Phys. Rev. Lett. 126, 011102 (2021)
- [3] Search for transient variations of the fine structure constant and dark matter using fiber-linked optical atomic clocks
B. M. Roberts, et al., New J. Phys. 22 093010 (2020)
- [4] Optical clock comparison for Lorentz symmetry testing
C. Sanner, et al., Nature 567, 204 (2019)
- [5] Rotating optical cavity experiment testing Lorentz invariance at the 10⁻¹⁷ level
S. Herrmann, et al., Phys. Rev. D 80, 105011 (2009)
- [6] Search for new physics with atoms and molecules
M. S. Safronova et al., Rev. Mod. Phys. 90, 025008 (2018)
- [7] Low-energy Tests of Fundamental Physics
D. Budker, European Review 26, 82 (2018)

Die DPG dankt den Autoren Andrey Surzhykov von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) und Dmitry Budker vom Exzellenzcluster PRISMA+ der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.