



# MPIK-NEWS

Liebe Mitarbeiter\*innen, Ehemalige und Freund\*innen des MPIK,



ein ereignisreiches Jahr geht zu Ende. Auch wenn wir auf Einiges gern verzichtet hätten, so hat es uns ein-drucksvoll gezeigt, wie wichtig Wis-senschaft und For-schung sind: Vom Verständnis kleiner

Teilchen, ihrer Wirkung und Bewegung hängt eine Menge auch in unserem täg-lichen Zusammenleben ab. Wirksam wird Wissen aber nur, wenn alle mitdenken, dabei auch gewohnte Abläufe verändern und aktiv mithelfen.

Die Forschung am MPIK hat sich durch Ihre Mithilfe in verschiedensten Be-reichen auch dieses Jahr wieder entschei-dend weiterentwickelt: Lesen Sie hier von Tests unseres Verständnisses des Kosmos, präzisen Wägungen von Materiebausteinen, molekularen Uhren, kosmischen Be-schleunigern und Kämmen aus Licht.

Ein großer Dank an Sie alle für die mitdenkende Zusammenarbeit, dass wir selbst trotz kleiner Quertreiber-Teilchen auch dieses Jahr wieder so erfolgreich wis-senschaftlich ausstrahlen konnten.

Frohe, wenn vielleicht auch stillere Weihnachtsfeiertage, Gesundheit und Alles Gute für das Neue Jahr, wünscht

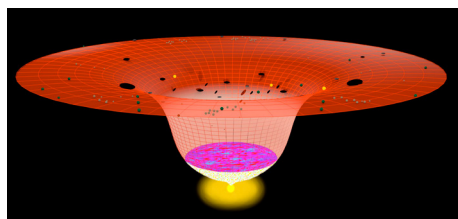
Ihr

Prof. Dr. Thomas Pfeifer  
(Geschäftsführender Direktor)

## Kosmologien auf dem Prüfstand

*Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und das darauf basierende Standardmodell der Kosmologie sind bisher extrem erfolgreich. Dennoch gibt es gute Gründe dafür, dass die Theorie ab einem gewissen Präzisionsniveau nicht mehr alles beschreibt und entsprechend erweitert werden muss.*

Das Standardmodell der Kosmologie beruht auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Es beschreibt die Entwicklung des aus normaler Materie und der mysteriösen Dunklen Materie bestehenden Universums. Es enthält auch die berühmte kosmologische Konstante, die für die beschleunigte Ausdehnung des Universums verantwortlich gemacht wird, liefert aber keine Erklärung dafür. Es gibt eine Reihe von Vorschlägen sowohl für Erweiterungen des kosmologischen Standardmodells, als auch für kosmologische Modelle, die auf fundamentalen Verallgemeinerungen der Gravitation jenseits von Einstein basieren. Das wirft die Frage auf, wie weit verfügbare Daten alternative Kosmologien testen oder eingrenzen.



*Illustration der beschleunigten Expansion des Universums. Der kosmische Mikrowellenhintergrund (pink/blau) zeugt vom Ende der auf den Urknall folgenden inflationären Expansion.*

Ein solcher Test erfolgte nun mit statistischen Methoden anhand mehrerer verfügbarer astrophysikalischer Datensätze. Diese kosmischen „Standardkerzen“ und „Standardmaßstäbe“ umfassen neben Daten zum frühen Universum und den bekannten Supernovae vom Typ I auch neuere Daten von – weiter entfernten – Quasaren. So ließen sich die Vorhersagen der kosmologischen Modelle auf einer Reihe von unterschiedlichen Rotverschiebungs- also Abstandsskalen testen und

die kosmologischen Parameter genauer bestimmen.

Zunächst erfolgte eine kombinierte Analyse sämtlicher Daten anhand des kosmologischen Standardmodells, danach dasselbe mit zwei verschiedenen Erweiterungen des Standardmodells. Ein Vergleich der Ergebnisse ergab, dass beide Erweiterungen keine statistischen Verbesserungen bringen, und die berechneten Parameter sich praktisch nicht von denen des Standardmodells unterscheiden.

In einem weiteren Schritt kamen exemplarisch zwei alternative Gravitationsmodelle auf den Prüfstand: „bimetrische Gravitation“ und „konforme Gravitation“. Erstere fügt der Einstein’schen Gravitation eine zweite Komponente hinzu, während letztere eine drastische Veränderung der Gravitationstheorie bedeutet, keine fundamentalen Längenskalen kennt und ohne Dunkle Materie auskommt. Beide Modelle bieten eine Erklärung für die kosmologische Konstante an.

Zwei auf bimetrischer Gravitation beruhende Kosmologien liefern keine statistische Verbesserung, sondern Parameter, die sich praktisch nicht von denen des kosmologischen Standardmodells unterscheiden. Noch schlechter schneidet die konforme Gravitation ab: sie erwies sich als weitgehend untauglich; dazu ergaben sich Widersprüche zu Messungen an Galaxien, die sich nur auflösen, wenn man doch die Existenz von Dunkler Materie annimmt.

Die Ergebnisse zeigen zuerst, wie gut kosmologische Modelle, die auf der Allgemeinen Relativitätstheorie basieren, die aktuellen Daten beschreiben können. Die Beispiele jenseits von Einstein zeigen, dass Erweiterungen der Allgemeinen Relativität zu Kosmologien führen, die bereits mit den existierenden Daten in Konflikt geraten können. Diese Arbeit hilft mögliche Erweiterungen der Allgemeinen Relativitätstheorie einzugrenzen.

**Kontakt:** Manfred Lindner, Jonas Rezacek  
**Publikation:** Probing alternative cosmologies through the inverse distance ladder, J. Cos. Astropart. Phys. 10 (2020) 040, DOI: 10.1088/1475-7516/2020/10/040

### In dieser Ausgabe

Kosmologien auf dem Prüfstand.....	1
Masse des Deuterons korrigiert.....	2
Rotation eines Moleküls als „innere Uhr“	2
Kurzmeldungen .....	3
Impressionen vom Rückbau des TSR.....	4
Namen & Notizen .....	4

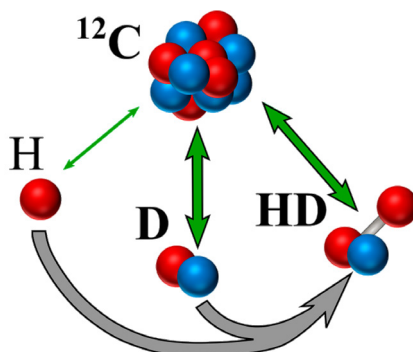
## Masse des Deuterons korrigiert

*Hochpräzise Messungen der Masse des Deuterons, des Kerns von schwerem Wasserstoff, bringen neue Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit fundamentaler Größen der Atom- und Kernphysik.*

Die Massen der Atomkerne wie auch die des Elektrons beeinflussen zahlreiche Eigenschaften von Atomen und Molekülen, beispielsweise ihre Spektren. Physiker wünschen sich möglichst genaue Werte dieser Massen, denn nur mit deren Kenntnis ist es möglich, die Spektren mit Hilfe der Atomphysik präzise zu berechnen – um sie dann mit direkten Messungen zu vergleichen und so Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der grundlegenden physikalischen Theorien zu ermöglichen.

Von besonderem Interesse sind in diesem Kontext Wasserstoff und seine Isotope, denn deren einfache Elektronenhülle mit nur einem einzigen Elektron lässt extrem präzise Berechnungen und damit sehr sensitive Tests grundlegender physikalischer Theorien zu. Darüber hinaus lässt sich aus der Masse des Deuterons auch die Masse des Neutrons – des zweiten Bestandteils der Atomkerne neben dem Proton – ableiten.

Der Massenstandard für Atome ist das Kohlenstoffisotop  $^{12}\text{C}$ , das per Definition 12 atomare Masseneinheiten schwer ist. In der LIONTRAP genannten Penningfallen-Apparatur wurde je ein Deuteron ( $\text{D}^+$ ) und ein Kohlenstoffion ( $^{12}\text{C}^{6+}$ ) präpariert, abwechselnd eines davon aus seiner Speicherfalle in die dazwischen eingebaute Präzisionsfalle transferiert und seine Bewegung genauestens vermessen. Aus dem so erhaltenen Verhältnis der Frequenzen beider Ionen ergibt sich direkt die Masse des Deuterons in atomaren Einheiten.



*Direkt gegen den atomaren Massenstandard  $^{12}\text{C}$  gemessene Wasserstoffspezies (grüne Pfeile). Die Masse von HD kann auch aus den Massen von H und D und der Bindungsenergie berechnet werden (grauer Pfeil).*

Bei der Auswertung der Messdaten galt es, eine Vielzahl an unvermeidlichen systematischen Effekten sehr sorgfältig zu berücksichtigen. Als Ergebnis resultierte die Masse des Deuterons zu 2,013553212535(17) atomaren Einheiten, wobei die Zahl in Klammern die Unsicherheit der letzten Stellen angibt. Die mit derselben Methode bestimmte Masse des Wasserstoff-Moleküls  $\text{HD}^+$  beträgt 3,021378241561(61) atomare Einheiten.

Der neue Wert für die Masse des Deuterons ist der genaueste jemals gemessene, ist aber signifikant kleiner als der tabellierte Referenzwert. Berechnet man damit und mit den früher gemessenen Massen des Protons und des Elektrons sowie der bekannten Bindungsenergie die Masse von  $\text{HD}^+$ , stimmt das Resultat hervorragend mit dem direkt gemessenen Wert überein. Die Referenzwerte sollten also korrigiert werden.

**Kontakt:** Sascha Rau, Sven Sturm  
**Publikation:** Penning-trap mass measurements of the deuteron and the  $\text{HD}^+$  molecular ion  
 Nature 585, 43-47 (2020), DOI: 10.1038/s41586-020-2628-7

## Rotation eines Moleküls als „innere Uhr“

*Wie zerbricht ein Molekül in einem intensiven Laserfeld und welche Prozesse laufen dabei nacheinander wie schnell ab?*

Setzt man ein Wasserstoffmolekül ( $\text{H}_2$ ) einem starken Infrarot-Laserblitz aus, reißt das elektrische Feld des Lasers zunächst eines der beiden Elektronen heraus, wobei mehr als 10 Photonen gleichzeitig absorbiert werden. Das verbleibende Molekülion  $\text{H}_2^+$  ist mit nur noch einem Elektron nicht mehr im Gleichgewicht und beginnt sich durch die Abstoßung der beiden Protonen zu strecken. Dabei kann es durch Absorption weiterer Photonen in ein Proton ( $\text{H}^+$ ) und ein neutrales Wasserstoffatom ( $\text{H}$ ) aufbrechen. Diese Reaktion nennt man „above threshold dissociation“, ATD. Streckt sich aber das Molekülion weiter bis auf einen Kernabstand von einigen Atomradien, so kann das verbliebene Elektron wie in einer kleinen Antenne resonant vom Laserfeld aufgeschaukelt und schließlich ebenfalls freigesetzt werden. Dieser Mechanismus wird „enhanced ionization“, EI genannt. Er führt zur „Coulomb-Explosion“ der beiden sich abstoßenden Protonen.

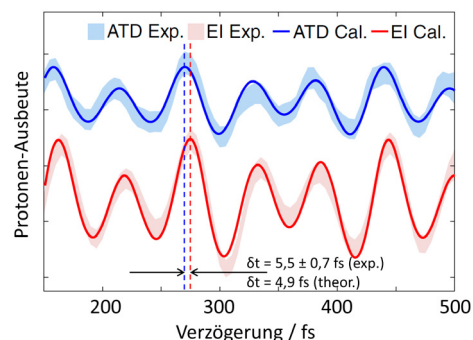
Im Reaktionsmikroskop lassen sich Protonen aus dem ATD- und EI-Prozess

anhand ihrer kinetischen Energie unterscheiden. Offensichtlich braucht EI etwas mehr Zeit als ATD, aber wieviel und lässt sich dies messen? Hier ergibt sich ein Problem mit der Dauer des Laserblitzes: Er muss lang genug sein (~25 Femtosekunden, fs), um diese Prozesse in Gang zu setzen, aber kurz genug, um eine präzise Zeitinformation zu erhalten (wenige fs). Da dies nicht erfüllbar ist, hilft folgender Trick: Im Prinzip enthält jedes Molekül eine Art „innerer Uhr“, da es rotieren kann.

Ein erster Pump-Puls regt die Rotation an, dann löst ein zweiter Probe-Puls mit zeitlich variabler Verzögerung die Fragmentation aus. Beide Prozesse hängen von der Ausrichtung der Molekülachse relativ zur Schwingungsebene des elektrischen Feldes ab – sie sind am wahrscheinlichsten, wenn beide parallel sind.

Die Ausbeute an ATD- und EI-Ereignissen zeigt ein nahezu regelmäßiges Auf und Ab, entsprechend der Rotation des Moleküls. Bei näherer Analyse ist aber eine leichte Verzögerung von ca. 5,5 fs für EI gegenüber ATD sichtbar. Dies ist die typische Zeit, welche das Molekülion zusätzlich braucht, um sich so weit zu strecken, bis das Elektron resonant an das Laserfeld

koppelt. Mittels theoretischer Modellrechnungen lassen sich weitere Details extrahieren und darüber hinaus die experimentellen Resultate in sehr guter Übereinstimmung rekonstruieren.



*Gemessene Protonen-Ausbeute der beiden Prozesse ADT und EI (blau bzw. rot schattiert) in Abhängigkeit von der Pump-Probe-Verzögerung im Vergleich mit der theoretischen Modellrechnung (Linien).*

**Kontakt:** Robert Moshhammer, Thomas Pfeifer  
**Publikation:** Clocking enhanced ionization of hydrogen molecules with rotational wavepackets,  
 PRL 125, 173201 (2020), DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.173201

## + + + Kurzmeldungen + + +

### Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?

Das GERDA-Experiment hat nach einem hypothetischen radioaktiven Zerfall gesucht: dem neutrinoselbst doppelten Betazerfall. Neutrinos können ihre eigenen Antiteilchen sein, und dann wird es diesen Zerfall geben. Den Zerfall konnte es zwar nicht beobachten, aber die untere Grenze für die Halbwertszeit um einen Faktor zwei relativ zum vorherigen Wert verbessern: diese liegt jetzt bei  $1,8 \times 10^{26}$  Jahren. GERDA hat alle angepeilten Ziele erreicht und ist – dank einer Reihe von Abschirmtechniken – der Aufbau mit der weltweit geringsten Zahl an Störsignalen im relevanten Energiebereich. Die Technologie hat sich also bewährt, weshalb das Nachfolgeprojekt LEGEND-200 gestartet wurde. Die LEGEND-Kollaboration hat den GERDA-Aufbau übernommen und bereits mit den Umbauarbeiten und Tests begonnen.

Kontakt: Bernhard Schwingenheuer, Manfred Lindner  
Meldung vom 01.07.2020

### Gewässersimulationstank

Das geplante Gammastrahlenobservatorium SWGO soll auf dem gleichen Prinzip beruhen, aber wesentlich größer und empfindlicher werden als HAWC. Bei der angepeilten Fläche von 80 000 m<sup>2</sup> braucht man rund 5000 Detektoreinheiten im Kern, dazu etwa 1000 im Außenbereich. Eine attraktive Möglichkeit dafür wäre, einen natürlichen See zu nutzen: dessen Wasser könnte man vor Ort reinigen, in eine Art Ballons füllen, diese verschließen und als Detektoreinheiten im See schweben lassen. Solche Ballons können aus dünnem Material bestehen, sollen sich aber nicht zu stark durch Wellen verformen. Außerdem müssen sie lichtdicht und zugleich innen weiß oder sogar reflektierend sein, damit der Lichtsensor darin das von durchfliegenden Schauerteilchen im Wasser erzeugte Tscherenkow-Licht möglichst verlustfrei registrieren kann. Im 11 m Durchmesser und 6 m hohen Gewässersimulationstank sollen verschiedene Ballonhüllen-Materialien auf ihre Stabilität und ihre optischen Eigenschaften getestet werden. Deshalb erhalten die Ballons Lichtsensoren – Photomultiplier von Double-Chooz.



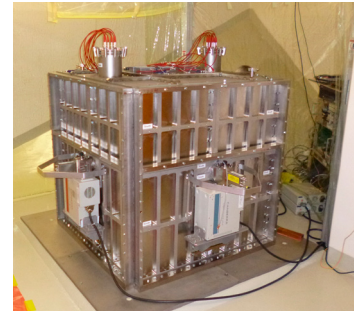
Kontakt: Felix Werner, Jim Hinton  
Meldung vom 31.07.2020

der sich an der Schockfront am Äquator befindetet, und in dem die höchstenergetischen Teilchen konzentriert sind.

Kontakt: Gwenaël Giacinti  
Meldung vom 29.10.2020

### Erste Ergebnisse von CONUS

Mit dem CONUS-Neutrinosdetektor im Kernkraftwerk Brokdorf gelang es erstmals, eine Obergrenze für vollständig kohärente Streuung von Neutrinos an Atomkernen zu bestimmen. In diesem Prozess wechselwirkt ein Neutrino mit dem Kern als Ganzes. Zum Nachweis verwendet CONUS Germanium-Detektoren mit sehr niedriger Energieschwelle. Die Resultate liefern wertvolle Informationen für die Teilchenphysik und die Suche nach Dunkler Materie. Kohärente Neutrinosstreuung bildet die Basis einer neuen Detektorgeneration im Kilogramm- statt Tonnenmaßstab. Diese können dem Nachweis von Supernova-Neutrinos und der Überwachung kerntechnischer Anlagen dienen.



Der CONUS-Neutrinosdetektor.

Kontakt: Manfred Lindner, Werner Maneschg, Christian Buck  
Meldung vom 03.11.2020

### Was verursacht das XENON1T-Signal?

Im Juni hat die XENON-Kollaboration bekanntgegeben, dass sie mit ihrem XENON1T-Detektor ein unerwartetes Signal gefunden hat (s. MPIK-NEWS Nr. 22). Die Aussicht, es könnte sich um „neue Physik“ jenseits des Standardmodells handeln, hat erwartungsgemäß zahlreiche Theoretiker auf den Plan gerufen, die diverse mögliche Erklärungen vorgeschlagen und durchgerechnet haben. Auch Mitglieder des MPIK arbeiten daran, Erweiterungen des Standardmodells mit geeigneten Parametern zu finden, die nicht nur das XENON1T-Signal erklären, sondern auch mit Daten anderer Experimente und kosmologischen Beobachtungen kompatibel sind. Dies liefert wichtige Hinweise für die Such-Strategie bei den demnächst startenden Messungen mit XENONnT.

Kontakt: Manfred Lindner, Florian Goertz  
Meldung vom 11.11.2020

### Kohärenz bei EUV-Frequenzkämmen

Über die Erzeugung hoher Harmonischer (HHG) von infraroten Pulszügen sind auch Frequenzkämme bis in den extrem-ultravioletten Bereich (EUV) zugänglich. Man geht davon aus, dass die Kohärenzeigenschaften im HHG-Prozess erhalten bleiben, EUV-Kämme mit langen Kohärenzzeiten also machbar sind. Die Bestätigung dieser Voraussage steht aber noch aus. Manche hochgeladenen Ionen haben EUV-Übergänge zu langlebigen angeregten Zuständen, was sie für die Erforschung der Kohärenzzeit geeignet macht. Numerische Simulationen zeigen, dass, während die von einem Kamm mit einer Kohärenzzeit von 1 s ausgelöste Ionendynamik deterministisch ist, chaotische Anregungsdynamik auftritt, wenn der Kamm eine deutlich kürzere Kohärenzzeit hat. Folglich könnte man die genaue Kohärenzzeit aus dem experimentellen Anregungsspektrum bestimmen.

Kontakt: Zoltán Harman, Chunhai Lyu  
Meldung vom 12.11.2020

### Teilchenbeschleunigung an Schockfront

Pulsare, also schnell rotierende Neutronensterne, sind von dünnen, stark magnetisierten, ultrarelativistischen Winden aus Elektron-Positron-Paaren umgeben. Beim Auftreffen dieser Winde auf das umgebende Medium entsteht eine Schockfront, wo der ultrarelativistische Wind gebremst wird und einen Pulsarwind-Nebel bildet. Die Emission des berühmten Krebsnebels zeigt, dass dort Elektronen bis zu extremen Energien im Bereich von PeV ( $10^{15}$  eV) beschleunigt werden. Neue ab-initio „Particle-in-cell“-Simulationen des Plasmas in der Schockregion haben einen neuen Mechanismus aufgedeckt, der Teilchen effizient auf sehr hohe Energien beschleunigen kann. Die großräumige Struktur des Magnetfelds in der Schockregion spielt eine entscheidende Rolle beim Entstehen großräumiger Turbulenz. Eine überraschende Vorhersage des numerischen Modells ist die Bildung eines Hohlraums im Plasma,

## Impressionen vom Rückbau des TSR

Start: 25.05.2020, Ende: 10.07.2020

Ralf Lackner hat die Aktion nicht nur mit seiner Kamera, sondern vor allem als Strahlenschutzler begleitet.

Der TSR – der weltweit erste Elektronenkühler-Speicherring für Schwerionen – war von 1988 bis Ende 2012 in Betrieb.



### Namen & Notizen

#### Karriere

**Prof. Dr. Klaus Blaum:** Vizepräsident der MPG

**Prof. Achim Schwenk,** Institut für Kernphysik der TU

Darmstadt: weitere fünf Jahre Max Planck Fellow am MPIK

**Dr. Oliver Fischer** und **Dr. Tommi Alanne:** Lecturer an der University of Liverpool, UK

**Dr. Yun Jiang:** Associate Professor, Sun Yat-sen Universität, China

#### Preise und Ehrungen

**Prof. Dr. Klaus Blaum:** Lise-Meitner-Preis der Europäischen Physikalischen Gesellschaft

**Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Lindner:** Fellow der American Association for the Advancement of Science (AAAS)

**Jason Mather:** Kammerieger im Leistungswettbewerb des Deutschen Handwerks

### Impressum

Herausgeber:

Redaktion:

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg · info@mpi-hd.mpg.de  
Dr. Bernold Feuerstein, Dr. Gertrud Hönes