

Dominik Elsässer *Hrsg.*

Urknall, Sterne, Schwarze Löcher

Vergangenheit,
Gegenwart
und Zukunft
des Universums

Spektrum
der Wissenschaft

 **Springer**

Urknall, Sterne, Schwarze Löcher

Dominik Elsässer
(Hrsg.)

Urknall, Sterne, Schwarze Löcher

Vergangenheit, Gegenwart und
Zukunft des Universums



Springer

Hrsg.
Dominik Elsässer
Experimentelle Physik Vb
Technical University of Dortmund
Dortmund, Nordrhein-Westfalen
Deutschland

ISBN 978-3-662-57912-1 ISBN 978-3-662-57913-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57913-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detailierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die in diesem Sammelband zusammengefassten Beiträge sind ursprünglich erschienen in Spektrum der Wissenschaft und Spektrum – Sterne und Weltraum.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: deblik, Berlin; Supernova 1994D in the galaxy NGC 4526 (© NASA/ESA)
Verantwortlich im Verlag: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Der Blick an den Himmel, zu Sonne, Mond, Sternen und hinaus ins fernere Universum, ist eine fundamentale Naturerfahrung, welche die Menschheit sicherlich schon seit der fernen Vergangenheit der Vorgeschichte fasziniert. In vielen Gesprächen und bei Vorträgen für ganz verschiedene Auditorien dürfen wir Astrophysikerinnen und Astrophysiker immer wieder erleben, dass der Kosmos bis heute nichts von dieser Faszination eingebüßt hat. Und im Vergleich zu vorherigen Epochen der Menschheitsgeschichte ist der Zugang zum Schatz des Wissens heute für viele von uns sehr viel einfacher geworden (was natürlich niemals darüber hinwegtäuschen darf, dass es hier auch weiterhin dramatische Unterschiede zwischen verschiedenen Teilen unserer Welt gibt). Gleichzeitig hängt der Erfolg des großen Abenteuers der Erforschung des Kosmos heute entscheidend davon ab, dass große Teile der Gesellschaft offen für wissenschaftliche Erkenntnisse sind, und dass Grundlagenforschung als Wert an sich anerkannt wird. In einer Gesellschaft leben zu dürfen, in der diese Sachverhalte anerkannt sind, und die bereit ist einen kleinen Teil der öffentlichen Ausgaben auf die Förderung der Grundlagenforschung zu verwenden, ist ein Privileg, das wir als Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler hier und heute genießen dürfen, das aber nie zu selbstverständlich werden darf. Gleichzeitig empfinden wir eine große Freude am Teilen der faszinierenden Erkenntnisse über unser Universum, die uns die modernen Methoden der Astrophysik heute zu erwerben ermöglicht. In diesem Sinne ist es vielen Kolleginnen und Kollegen nicht nur eine Aufgabe, sondern ein echtes Herzensanliegen, eine möglichst große Öffentlichkeit auf die Abenteuerreise mitzunehmen. Das geschieht im Rahmen von Lehrveranstaltungen und weiterer Bildungsarbeit

für verschiedene Auditorien, durch öffentliche Vorträge, aber ganz besonders auch durch allgemeinverständliche Publikationen. Ein ganz vorzügliches und von vielen Kolleginnen und Kollegen höchst geschätztes Forum hierfür bieten die Zeitschriften *Scientific American*, *Spektrum der Wissenschaft* und *Sterne und Weltraum*. Hier berichten namhafte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für eine interessierte Leserschaft, häufig direkt von der äußersten Grenze der menschlichen Erkenntnis, von der Kontaktfläche mit dem Unbekannten und von aktuellsten Fortschritten. Hierfür eignet sich ein periodisch erscheinendes Journal natürlich in besonderer Weise. Allerdings, mit dieser Erscheinungsweise ist manchmal auch der Effekt verbunden, dass sorgfältig recherchierte und weit über den aktuellen Jahrgang hinaus relevante Beiträge allzu schnell aus dem Fokus der Leserschaft verschwinden können. Das ist schade, und dem möchten wir mit diesem Buch entgegenwirken. Sie finden in ihm sorgfältig und dabei behutsam redigierte Artikel aus den oben genannten Journalen, die, so hoffen Verlag und Herausgeber, Ihnen gleichzeitig als Reiseführer durch Raum und Zeit, und auch als Kompendium von bleibendem Wert dienen können.

Der wissenschaftliche Fortschritt in der modernen Astrophysik findet an vielen Stellen gleichzeitig mit fast atemberaubender Geschwindigkeit statt. Es war daher keine leichte Aufgabe, eine Auswahl zu treffen und dem Buch einen Rahmen zu geben. Die Wahl fiel schließlich auf eine Reise nicht nur durch den Raum, sondern auch durch die Zeit, sind beide doch im modernen, relativistischen Bild der Welt untrennbar als „Raumzeit“ miteinander verknüpft. Ein zentraler Pfeiler dieses modernen Bildes der physikalischen Realität feierte vor kurzem den einhundertsten Geburtstag: Die Relativitätstheorie, sicher das berühmteste Werk Albert Einsteins. Neben der enormen wissenschaftshistorischen und fundamentalen Bedeutung ergibt sich aus ihr für uns Astrophysikerinnen und Astrophysiker auch eine ganz unmittelbar augenscheinliche Konsequenz: Die Relativitätstheorie setzt mit der Naturkonstante c , identisch mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum, eine absolute Obergrenze für die Ausbreitung von Information in unserem Universum. Sie beraubt uns so vielleicht auch der letzten Hoffnung, ferne Bereiche des Universums überlichtschnell bereisen und direkt erforschen zu können. Das Licht allerdings ist seit jeher ein entscheidender Informationsträger in der astronomischen Beobachtung, ein wichtiger – wenn auch heute nichtmehr der einzige – Bote aus dem frühen Kosmos. Und so macht die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit den Blick hinaus ins Universum immer auch zu einer Zeitreise zurück in die Vergangenheit. Wir können so die Entwicklung des Kosmos in einzigartiger Weise erforschen. Und wie so oft ist die Kenntnis der Vergangenheit

und der Gegenwart auch eine Gelegenheit, fundierte Überlegungen zur Zukunft anzustellen. Die Vergangenheit, die Gegenwart und die Zukunft des Universums sind also der rote Faden, entlang dessen wir herausragende Beiträge ausgewählt haben, die dabei viele aktuelle Fragestellungen der Kosmologie und Astrophysik berühren.

Auch wenn die räumlichen und zeitlichen Skalen im Universum oft weit jenseits der menschlichen Alltagserfahrung liegen, so ist die Erforschung des Kosmos doch eine zutiefst menschliche Geschichte. Moderne technologische Errungenschaften haben unseren Blick auf den Kosmos fast unermesslich erweitert. Sie haben nahezu alle Bereiche des elektromagnetischen Spektrums zugänglich gemacht, ermöglichen die Beobachtung von Teilchen und seit Kurzem auch von Gravitationswellen. Computer unterstützen uns an vielen Stellen, bei der Datenverarbeitung und auch bei Simulationsrechnungen. Die abschließende wissenschaftliche Interpretation dieser Flut an Daten aber bleibt bisher die Domäne des menschlichen Intellekts. Und so geben die Autorinnen und Autoren der hier zusammengefassten Beiträge natürlich immer auch ihre Sichtweise wieder. Nicht als passive Berichterstatter, sondern als aktive Teilnehmer, als treibende Kräfte hinter dem wissenschaftlichen Fortschritt. Dieser Fortschritt entsteht insbesondere immer dort, wo Menschen sich ein klein wenig über die Grenzen des gesicherten Wissens hinauswagen. Er entsteht dabei nicht auf fest vorgegebenen Pfaden. Ein unverzichtbares Merkmal ist das Aufstellen von Hypothesen; ein Teil davon übersteht die Konfrontation mit neuen Daten nicht. Die Geschichte der Wissenschaft ist auch eine Geschichte von Irrtümern und auch von Sackgassen. Und auch das kommt in einigen der Artikel im Buch zur Sprache: mehr und bessere Daten lassen bisherige Interpretationen in neuem, nicht immer bestärkendem, Licht erscheinen. Und wenn gerade das heute leider in manchen Kreisen fast vorwurfsvoll zu hören ist – „die Wissenschaft hat sich doch schon oft geirrt!“ – so ist es umso mehr unsere Aufgabe als Forscherinnen und Forscher, klarzumachen, dass das kein Makel, sondern eine gewaltige Stärke der wissenschaftlichen Methode ist. Wissenschaft ist selbstkorrigierend, sie merzt über die Zeit hinweg falsche Ideen aus ohne dass dies zur Schande und zum Vorwurf für die Urheber dieser Ideen wird. Die Wissenschaft beharrt nicht auf Meinungen um ihrer selbst willen, sondern sie unterwirft sich der Beobachtung und dem Experiment als Richterinnen über Hypothesen und Theorien.

Während viele Aspekte der in diesem Buch zusammengefassten Artikel gut überprüftes Wissen sind, so war und ist es doch auch unser Anspruch, den aktuellsten Stand der Forschung wiederzugeben. Einiges kann also in den kommenden Jahren durch den Fortschritt überholt werden, kann

den Test der Zeit nicht überstehen. Herausgeber und Verlag hoffen aber und sind zuversichtlich, dass diese Inhalte dennoch eine bleibende, positive Wirkung erzielen können. Denn ein noch viel wichtigerer Treiber des Fortschrittes als die Technologie ist schon immer die menschliche Neugierde gewesen. Sie ist es, die uns schon seit Anbeginn der Zivilisation begleitet, und sie ist es die uns und kommende Generationen zu immer weiteren und sicher oft revolutionären Erkenntnissen führen wird. Wenn dieses Buch einen Teil dazu beiträgt, Sie liebe Leserin und lieber Leser zu ermutigen dieser Neugierde nachzugeben und Teilnehmerin oder Teilnehmer der großen wissenschaftlichen Abenteuerreise zu werden, so ist dieses wichtigste Ziel bereits erreicht!

Dortmund
im Juli 2018

Dominik Elsässer

Inhaltsverzeichnis

Teil I Vergangenheit

Was ist Zeit? 3

Andreas Müller

Zeugen des Urknalls 17

Marek A. Abramowicz und Julia Tjus

Weiterführende Literatur 23

Kosmische Inflation auf dem Prüfstand 25

Paul J. Steinhardt

Weiterführende Literatur 35

Wellenschlag des Urknalls 37

Lawrence M. Krauss

Weiterführende Literatur 46

Der verborgene Kosmos 47

Bogdan A. Dobrescu und Don Lincoln

Weiterführende Literatur 55

Teil II Gegenwart

Giganten im All 59

Gerhard Börner

Weiterführende Literatur	72
Die ersten Sterne	73
<i>Michael D. Lemonick</i>	
Weiterführende Literatur	84
Erster Nachweis: Verschmelzende Neutronensterne	85
<i>Markus Pössel</i>	
Weiterführende Literatur	103
Das wechselhafte Leben der Sterne	105
<i>Ralf Launhardt</i>	
Weiterführende Literatur	120
Exoplaneten – eine Spurensuche	121
<i>Lisa Kaltenegger</i>	
Weiterführende Literatur	137
 Teil III Zukunft	
Die ferne Zukunft der Sterne	141
<i>Donald Goldsmith</i>	
Weiterführende Literatur	150
Brisante Dunkle Energie	151
<i>Adam G. Riess und Mario Livio</i>	
Weiterführende Literatur	161
Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie	163
<i>Michel Janssen und Jürgen Renn</i>	
Weiterführende Literatur	173
Multiversum in Beweisnot	175
<i>George F. R. Ellis</i>	
Weiterführende Literatur	184
Kann die Zeit enden?	187
<i>George Musser</i>	
Weiterführende Literatur	199

Teil I

Vergangenheit

Der Blick weit hinaus in den Kosmos führt uns mit der alltäglichen Vorstellungskraft über beinahe unfassbare Zeitspannen zurück, bis in eine Zeit kurz nach dem heißen Urknall, mit dem vor etwa 13,8 Mrd. Jahren das Universum seinen Anfang genommen hat. Raum und Zeit haben nach allem was wir heute wissen dabei ihren Ursprung genommen. Verborgен in dieser Aussage steckt aber eigentlich schon eine sehr profunde Frage: was ist eigentlich die Zeit? Auf sehr anschauliche und verständliche Weise wird genau dieses Rätsel in einem Artikel thematisiert.

Die Erforschung des frühen Kosmos ist auch ein Bereich, in dem sich Fragestellungen der klassischen Astro- und Teilchenphysik an vielen Stellen begegnen. Dies geschieht oft unter Randbedingungen, wie wir sie heute in keinem Labor oder Experiment auch nur annähernd nachbilden können. Die moderne Astroteilchenphysik beziehungsweise Teilchenkosmologie kann so vielleicht Türen zu einem völlig neuen Verständnis der fundamentalen Struktur der Welt und der Naturgesetze aufstoßen. Die Trauben hängen dabei allerdings durchaus hoch: anders als bei den Resultaten von wohl geplanten und gut überwachten Experimenten können wir die ersten Phasen des Universums nur anhand der Information, welche die Natur uns liefert, beobachten. Bis zur Rekombination von Elektronen und Protonen, etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall, unterlag das Licht häufigen Streuprozessen. Erst nach dieser Rekombination und der damit verbundenen Entstehung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes wurde das Universum im klassischen Sinne „durchsichtig“.

Die präzise Beobachtung des Mikrowellenhintergrundes ermöglicht nicht nur Rückschlüsse auf die Bedingungen zur Zeit seiner Entstehung, sondern auch über grundlegende Parameter des frühen Universums. Eine extrem spannende Frage bleibt auch, ob und in welcher Form der Urknall exotischere Relikte wie schwarze Löcher hinterlassen hat, die vielleicht heute noch nachweisbar sein könnten. Und möglicherweise bestimmt mit der dunklen Materie sogar eines dieser Relikte einen großen Teil der heutigen Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen. Selbst wenn uns also fast unvorstellbare Zeitspannen von den frühesten Epochen des Universums trennen, so ist diese Ära dennoch heute eines der spannendsten und dynamischsten Forschungsfelder überhaupt!



Was ist Zeit?

Von kosmischen Zyklen zum kosmologischen Zeitpfeil

Andreas Müller

Der Wecker klingelt. Aufstehen! Wir starten in den Tag und planen unser Programm mit einem wesentlichen Werkzeug: der Uhr. Sie zeigt uns ganz selbstverständlich die Zeit an. Doch was ist Zeit überhaupt? Die uns im Alltag geläufigen Zeitbegriffe sind mit wiederkehrenden kosmischen Vorgängen verknüpft – mit dem Auf- und Untergang der Sonne, dem Mondzyklus und der Umlaufbewegung der Erde. Es gibt aber auch eine Merkwürdigkeit: Die Zeit kennt nur eine Richtung (aus *Sterne und Weltraum* 11/2012).

In Kürze

- Bereits die antiken Philosophen um Aristoteles dachten über das Wesen der Zeit nach. Galilei und Newton sprachen von einer absoluten Zeit.
- In der Physik geht die Zeit in Bewegungsgleichungen ein. Sie beschreiben mathematisch die Dynamik von Systemen.
- Die Zeit hat nur eine Richtung. Wir erleben sie als unbeeinflussbar.

A. Müller (✉)

Redaktion Sterne und Weltraum, Haus der Astronomie,
MPIA-Campus, Heidelberg, Deutschland

E-Mail: andreas.mueller@spektrum.de

Im Alltag unterliegen wir dem Diktat der Zeit. Sie signalisiert uns, wann wir aufstehen und unsere Termine wahrnehmen müssen. Sie ist unser Hilfsmittel, das uns nicht nur bei der Gestaltung des Tages, sondern auch bei der Planung von Wochen, Monaten und Jahren, ja sogar des ganzen Lebens, unterstützt. Die Zeit ist jedoch weit mehr als ein praktisches Werkzeug, und es ist eine naturwissenschaftlich und philosophisch äußerst spannende Herausforderung, ihr Wesen zu hinterfragen: Was ist Zeit? Und warum verrinnt sie selbst dann, wenn wir nicht auf die Uhr schauen?

Wir erleben Zeit als absolut und unbeeinflussbar. Wenn wir überlegen, woran wir ihren Ablauf festmachen, dann wird sofort klar, dass wir das Verrinnen der Zeit anhand von Veränderungen bemerken: Die Bewegung von Gegenständen in unserer Umgebung, das tägliche Wandern der Sonne am Himmel, die Veränderungen der Natur während der Jahreszeiten, das Wachsen von Kindern und unser eigenes Altern – all das signalisiert uns, dass die Zeit voranschreitet. Wir nehmen dabei den Fluss der Zeit ganz bewusst wahr, denn wir haben die Fähigkeit, uns an Vergangenes zu erinnern. Daher können wir aus Fehlern und Erfolgen der Vergangenheit lernen. Wir erleben den Moment der Gegenwart – wissen wir doch, dass er schon im nächsten Moment Vergangenheit sein wird. Genauso können wir unsere Zukunft aktiv gestalten, indem wir mithilfe der Zeit planen.

Die Zeit der großen Denker

Veränderungen sind also offenbar entscheidend, oder man könnte auch sagen, Bewegungen sind wesentlich. Mit dieser Begrifflichkeit sind wir den Denkern der Antike sehr nahe gekommen, allen voran Aristoteles (384–322 v. Chr.), dessen natur- und geisteswissenschaftliches Gedankengut bis ins Mittelalter dominierte. Im aristotelischen Denken finden sich Veränderung und Bewegung im griechischen Begriff „kinesis“.

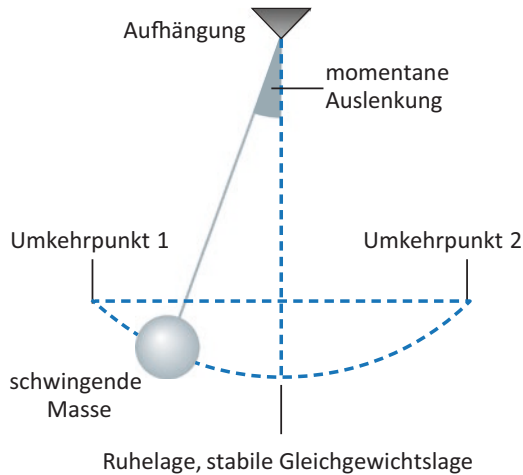
Nach Aristoteles ist alles Seiende bewegt. Er folgerte, dass es ein erstes Bewegendes geben müsse, welches das Seiende bewegt. Dabei muss das Bewegende selbst unbewegt sein, weil es sonst nicht ein erstes Bewegendes wäre. Diesen unbewegten Beweger identifiziert Aristoteles mit Gott. Er bezieht damit eine Gegenposition zu Platon, dessen Schüler er war, denn der platonische Gottesbegriff ist derjenige vom selbst bewegten Beweger. Aristoteles vollzieht damit einen Übergang von der Ontologie, der Lehre vom Sein, zur Theologie, der Lehre von Gott.

Bezogen auf den Zeitbegriff, beschrieb Aristoteles das „Jetzt“ als Übergang von der Vergangenheit, dem „Nicht-mehr-Sein“, in die Zukunft, dem „Noch-nicht-Sein“. Das „Jetzt“ verschwindet augenblicklich und wird abgelöst von einem darauf folgenden „Jetzt“, sodass die „Jetztte“ gewissermaßen ein Kontinuum bilden. Hierbei entstand die Redeweise vom „Fluss der Zeit“, weil sie von der Zukunft durch das „Jetzt“ in die Vergangenheit „fließt“.

Einen entscheidenden Durchbruch in unserem Verständnis des Zeitbegriffs verdanken wir Galileo Galilei (1564–1642) und Sir Isaac Newton (1643–1727). Die beiden Universalgelehrten haben unser Verständnis von der Natur im 16. und 17. Jahrhundert entscheidend geprägt. Hinsichtlich des Zeitbegriffs sind ihre Arbeiten auf dem Gebiet der klassischen Mechanik und der Schwerkraft bedeutend. Sowohl Galilei als auch Newton führten physikalische Experimente durch. Diese beschrieben sie durch mathematische Gleichungen, in denen die Zeit als Variable eine große Rolle spielt. Die Physiker nennen sie Bewegungsgleichungen – wir stoßen also wieder auf den aristotelischen Begriff der Bewegung: *kinesis*.

Im Allgemeinen handelt es sich bei den Bewegungsgleichungen um Differenzialgleichungen, die beschreiben, wie sich der Ort eines Körpers unter der Einwirkung einer äußeren Kraft ändert, beispielsweise beim Hin- und Herschwingen eines Pendels unter dem Einfluss der Schwerkraft. Die mathematischen Lösungen einer Bewegungsgleichung geben darüber Aufschluss, an welcher Stelle sich das Pendel zu einem beliebigen Zeitpunkt befindet, wie schnell es dann schwingt und wie stark es gerade beschleunigt wird. Dieser mathematische Formalismus ist sehr mächtig und besitzt weitreichende Anwendungen in Naturwissenschaft und Technik.

Der Zeitbegriff, der das Fundament dieser Theorie bildet, ist aus unserer alltäglich erfahrbaren Perspektive sehr plausibel, denn die Zeit gilt in der klassischen Mechanik als absolut: Sie ist unbeeinflussbar – oder, wie Newton es in seinem 1687 erschienenen Hauptwerk „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“, formulierte: „Die absolute, wahre Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.“ Ein solcher Ansatz für das Wesen der Zeit ist überaus erfolgreich, aber es sollte sich zeigen, dass mit der modernen Physik des 20. Jahrhunderts das Verständnis des Zeitbegriffs weiterentwickelt werden musste.



Beim mechanischen Pendel hängt eine Masse an einem Faden und schwingt periodisch hin und her. Die Dauer einer Schwingung vom Umkehrpunkt 1 zum Umkehrpunkt 2 und zurück definiert die Schwingungsperiode. Sie ist unabhängig von der Stärke der Auslenkung. Ein solches mechanisches System wird in Pendeluhren zur Zeitmessung genutzt. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Kosmische Taktgeber

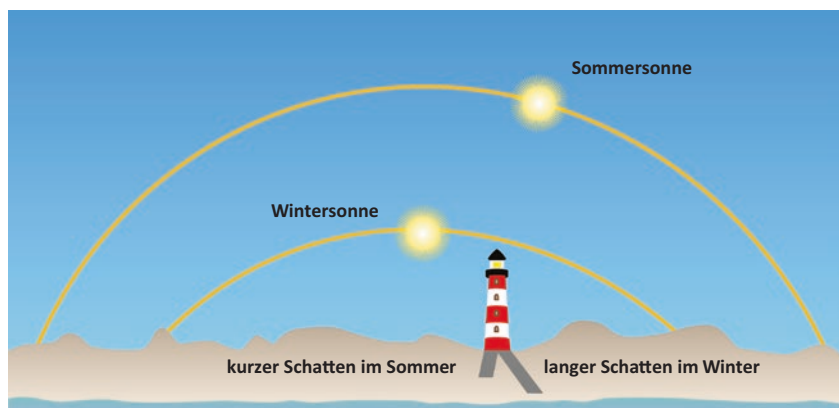
Bevor wir uns dem Wesen der Zeit zuwenden, betrachten wir sie zunächst als Alltagsphänomen. Zeiten messen wir mit Uhren, für die wir einen Taktgeber und einen Zähler benötigen. Ähnlich wie ein frei schwingendes Pendel schwingt auch eine mechanische Pendeluhr gleichmäßig mit einer konstanten Periode hin und her und gibt damit einen Takt vor. Nun benötigt man nur einen Zähler, der registriert, wie oft ein Takt, also eine ganze Periode, in die zu messende Zeitspanne hineinpasst. Die Pendeluhr ist somit eine technisch weiterentwickelte, künstliche Form einer natürlichen Uhr wie das frei schwingende Pendel.

Wir kennen eine Reihe von natürlichen Uhren, denen interessanterweise kosmische Zyklen zugrunde liegen. Zunächst gibt es den Wechsel von Tag und Nacht, ein Vorgang, der regelmäßig im Abstand von rund 24 h wiederkehrt und dessen Periode wir „Tag“ nennen. Er wird von der Rotation unseres Heimatplaneten Erde vorgegeben. Als Konsequenz dieser Drehung rotiert der Himmel scheinbar um die Erde, sodass es zum Sonnenauf- und -untergang und dem damit verbundenen Wechsel von Tag und Nacht kommt. Sieben Tage bilden den Zyklus von einer Woche, und rund vier Wochen ergeben einen Monat. Im Begriff „Monat“ steckt das Wort „Mond“. Dies ist kein Zufall, denn unser Erdrabant durchläuft einen leicht zu beobachtenden

natürlichen Zyklus von Neumond, zunehmendem Mond, Vollmond, abnehmendem Mond und wieder Neumond, der rund 28 Tage dauert.

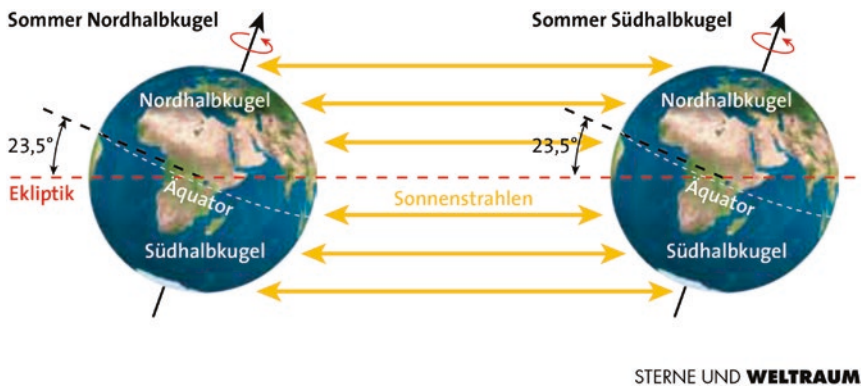
Nach Ablauf von 365 Tagen ist die Zeitspanne von einem Jahr erreicht. Auch dies ist ein natürlicher kosmischer Zyklus, der dadurch festgelegt ist, dass die Erde die Sonne nach einem Jahr vollständig umrundet hat. Während dieses Umlaufs steht die Erdachse nicht immer in der gleichen Orientierung zur Sonne, denn sie ist gegenüber der Erdbahnebene um 233,5 Grad geneigt. Astronomen bezeichnen diesen Winkel als die „Schiefe der Ekliptik“. So kommt es, dass die Sonnenstrahlen während eines Laufs der Erde um die Sonne zeitweise die Nordhalbkugel und zeitweise die Südhalbkugel senkrecht treffen (siehe Bild unten). Wenn dies geschieht, ist auf der jeweiligen Halbkugel Sommer und auf der gegenüberliegenden Halbkugel Winter. Bevor diese Extreme des Sonnenstands erreicht werden, gibt es die Jahreszeiten Frühjahr beziehungsweise Herbst.

Von der Erde aus betrachtet, variiert wegen der „Schiefe der Ekliptik“ die scheinbare Höhe der Sonne über dem Horizont. Die tägliche Bahn der Sonne am Firmament heißt Tagbogen, und dieser verändert sich von Tag zu Tag. Als Konsequenz der geneigten Erdachse haben wir im Sommer lange Tagbögen mit entsprechend langen Tagen und kurzen Nächten. Im Winter gibt es kurze Tagbögen mit entsprechend kurzen Tagen und langen Nächten. Somit verändert sich im Verlauf eines Jahres auch der Schattenwurf, beispielsweise eines Turms: Er wirft den längsten Schatten im Winter und den kürzesten im Sommer.



Wegen der geneigten Erdachse ändert sich im Jahreslauf die Länge des Tagbogens der Sonne. Deshalb sind die Tage im Sommer länger und im Winter kürzer. Basierend auf diesem Phänomen lässt sich ein einfacher Zeitmesser konstruieren: die Sonnenuhr. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Tag, Monat und Jahr sind also kosmisch bedingte Zyklen. Zur Messung längerer Zeitspannen können wir mitzählen, wie viele Tage, Monate, Jahre verstrichen sind, wobei der Uhrentakt vorgibt, für welche Zeitspannen die jeweilige Uhr zum Einsatz kommt. Kurze Zeitspannen können wir mit den kosmischen Uhren nicht mehr so leicht messen, sodass es sinnvoll ist, künstliche Uhren mit kürzeren Perioden zu bauen, wie die erwähnte Pendeluhr. In der Geschichte der Zeitmessung treten jedoch auch Sand-, Wasser- und Öluhren auf, bei denen das beständige Fließen eines Materials von einem Behälter in einen anderen gemessen wurde und als Zeitmaß diente. Moderne Uhren sind die Quarzuhr, die das Schwingungsverhalten eines Quarzkristalls zur Kontrolle der Zeitmessung nutzt, und die Atomuhr, die auf der elektromagnetischen Strahlung basiert, die bei Übergängen zwischen verschiedenen Energieniveaus des Atoms entsteht.



STERNE UND WELTRAUM

Die Erdachse ist zur Bahnebene, in der die Erde um die Sonne kreist, um 23,5 Grad geneigt. Dadurch können Sonnenstrahlen die Erdoberfläche zeitweise auf der Nordhalbkugel und ein halbes Jahr später auf der Südhalbkugel beinahe senkrecht auftreffen. Dort, wo dies geschieht, ist Sommer, auf der gegenüberliegenden Halbkugel ist dann Winter. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Schritte in eine neue Dimension

Zeitdauern werden immer relativ zu einer Startzeit gemessen, wobei die Festlegung dieses Zeitnullpunkts natürlich willkürlich ist. In unserer christianisierten, westlichen Welt ist der Bezugszeitpunkt die Geburt Jesu. Wir zählen, wie viele Jahre seither vergangen sind, und leben daher im Jahr „2012 nach Christus“. Ganz trivial ist es nicht, einen so lang zurückliegenden Zeitpunkt, der in einer Epoche liegt, in der es noch nicht so genaue Uhren gab, als Bezug zu verwenden, denn es gibt Unsicherheiten in der Überlieferung, wann genau sich die Geburt ereignete. Zudem wurde seither mehrfach der Kalender reformiert, beispielsweise bei der Umstellung vom Julianischen auf den Gregorianischen Kalender zum Ende des 16. Jahrhunderts.

Auch die Verwendung von Kalendern in unserer modernen Zeit ist keinesfalls einfach. So sind wir gezwungen, den Gang von irdischen, künstlichen Uhren immer wieder an den Gang der natürlichen, kosmischen Uhren anzugleichen, denn wir wollen ja nicht, dass es um zwölf Uhr mittags plötzlich Nacht ist oder dass es im Sommer schneit. Hierzu dienen Schaltsekunden und Schalttage, also zusätzliche Sekunden beziehungsweise Tage, die geeignet in die Kalender eingebaut werden. Solche Maßnahmen müssen national und global vereinbart werden. In Deutschland residieren die „Herren der Zeit“ in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin. Das PTB ist unser nationales Metrologie-Institut, das auch die Standards für andere Maße und Maßsysteme vorgibt und überwacht. Zur Einhaltung der gesetzlichen Zeit in Deutschland betreibt die PTB mehrere Atomuhren – die präzisesten Uhren der Welt.

Zeitnullpunkte und Zeitskalen sind allerdings vollkommen willkürlich und beruhen nur auf praktischen Vereinbarungen. Doch die Zeit als physikalisches Phänomen bleibt. Sie verstreicht, auch ohne dass eine Uhr mitzählt. Wir können sie zwar messen, aber warum schreitet die Zeit beständig, offenbar unaufhaltsam voran? Um dies zu verstehen, lohnt es sich, sie als Dimension des Universums zu betrachten und mit den drei Raumdimensionen zu vergleichen. Hierbei offenbaren sich recht auffällige Unterschiede. Es gibt nur eine Zeitdimension, aber gleich drei Raumdimensionen, nämlich Länge, Breite und Höhe. In den Raumdimensionen können wir uns im Prinzip beliebig bewegen: vor und zurück, nach links und rechts sowie nach oben und unten. Im Unterschied hierzu können wir unsere Bewegungsrichtung bei der Zeit nicht beeinflussen. Noch gravierender ist, dass die Zeit nur eine „Vorwärtsrichtung“ erlaubt und dass diese in die Zukunft weist. Insgesamt können wir also in allen drei Raumdimensionen nach Belieben vor- und zurückreisen, aber keine Zeitreise in die Vergangenheit unternehmen.

Warum ist das so? Betrachten wir dynamische Vorgänge in der Natur sehr genau, so bemerken wir, dass einige davon in der Zeit vorwärts wie rückwärts ablaufen könnten. Sehr deutlich wird das, wenn wir einen rückwärts ablaufenden Film sehen. Irgendwann bemerken wir dabei seltsame Vorgänge, die wir so noch nie in der Natur beobachten konnten: Da entmischt sich ein Milchkaffee, und die Milch formt einen Strahl, der auf wundersame Weise aus dem Kaffee in eine Milchtüte fließt; Porzellanscherben springen vom Boden auf und fügen sich zu einer Tasse zusammen, die perfekt auf einem Tisch zur Landung kommt; ein Fluss fließt stromaufwärts und bildet einen Wasserfall, der komischerweise einen Fels hinaufsteigt. Die Gemeinsamkeit dieser seltsamen, unnatürlichen Phänomene liegt darin, dass es für sie nur eine logische Reihenfolge gibt, in der sie eintreten können – nur eine Zeitrichtung. Solche Vorgänge sind eine heiße Spur zum Verständnis der Zeit!

Das Merkwürdige an ihnen ist, dass sie die Reihenfolge von Ursache und Wirkung umdrehen. Es ist nun einmal so, dass erst die Milch in den Kaffee strömt und sich dann die Flüssigkeiten mischen; erst fällt die Tasse vom Tisch, und dann kommen die Scherben; Wasser fällt natürlicherweise im Schwerfeld der Erde und kann somit nicht einfach bergauf fließen. Das dahinter liegende Prinzip „Erst die Ursache, dann die Wirkung“ wird wissenschaftlich „Kausalität“ genannt. Die seltsamen Phänomene im rückwärts laufenden Film verstoßen gegen das Gesetz der Kausalität – sie sind „akausal“. Diese Überlegungen bilden den ersten Schritt, um dem sogenannten Zeitpfeil auf die Spur zu kommen, welcher der Zeit ihre Richtung vorgibt. Der Grund für seine Existenz lässt sich mit den Mitteln der Physik verstehen.

Präzision aus dem Mikrokosmos: die Atomuhr

Wie jede Uhr, so benötigt auch eine Atomuhr einen Taktgeber. Hier ist es das Schwingen einer elektromagnetischen Welle, die ein Atom von einem energetisch niedrigeren in einen höheren Zustand anregt. Die Frequenz der vom Atom aufgenommenen Strahlung ist mit einigen Milliarden Schwingungen pro Sekunde sehr hoch – und gerade dies macht die Atomuhr zum genauesten Zeitmesser der Welt. Einem Vorschlag des Physikers Isidor Rabi (1898 – 1988) folgend, realisierte der Physiker und Chemiker Willard Frank Libby (1908 – 1980) die erste Atomuhr im Jahr 1946.

In einer Atomuhr wird zur Absorption das Element Cäsium (^{133}Cs) genutzt. Ein Cäsiumatom besteht aus einer Elektronenhülle und einem Atomkern. Diese Konfiguration von Teilchen kann zwei bestimmte Energiezustände einnehmen, die sich hinsichtlich ihres Eigendrehimpulses (Spin) unterscheiden. In der Physik heißen diese beiden Zustände »Hyperfeinstrukturniveau«. Bestrahlt man die Cäsiumatome mit Mikrowellen einer bestimmten Frequenz, so können sie die Energie der Strahlung aufnehmen und auf das energetisch höhere Hyperfeinstrukturniveau wechseln. Salopp sagt man auch: »Der Spin von Cäsium wird umgeklappt.« Dieses Umklappen geschieht nur bei passender Wellenlänge der Mikrowellen, dem Resonanzfall. Die Wellenlänge liegt dann bei 3,26 Zentimetern, was einer Frequenz von 9,19 Gigahertz, also rund 9 Milliarden Schwingungen pro Sekunde, entspricht. Präzise sind es 9 192 631 770 Schwingungen, die das Mikrowellenfeld innerhalb einer Sekun-

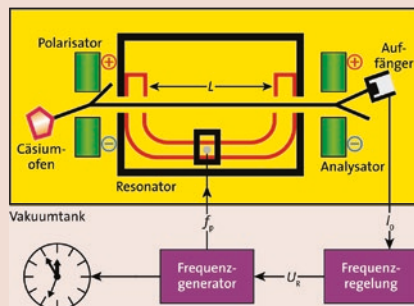
de durchführt. Dies ist der Taktgeber der Atomuhr, der die Länge der Zeiteinheit »Sekunde« definiert.

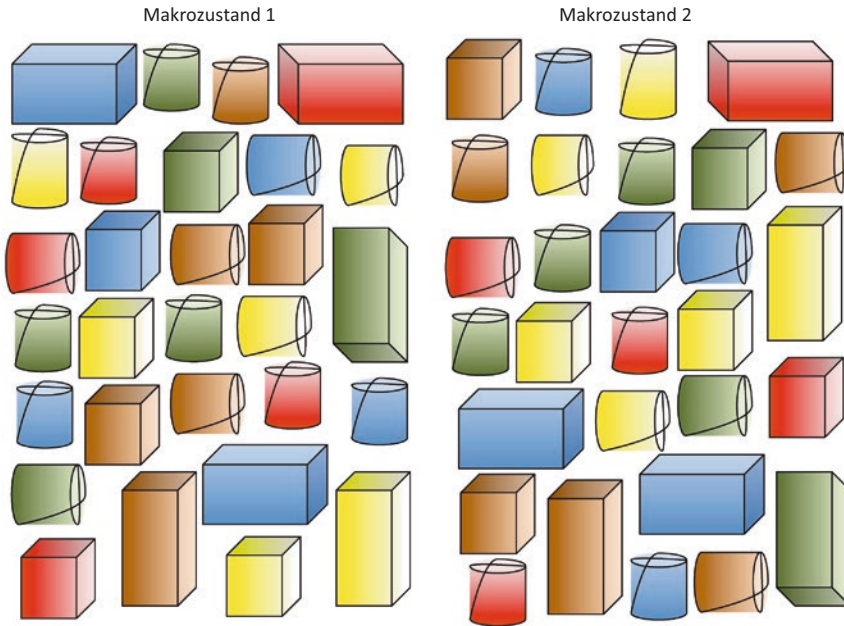
In der Praxis werden Cäsiumatome in einem Ofen verdampft und mit Hilfe eines Magnetfelds sortiert, um sicherzustellen, dass sie in einem ganz bestimmten energetischen Zustand vorliegen (siehe Grafik unten). Danach wird der Cäsiumdampf in einen Hohlraumresonator geschickt, wo er durch Mikrowellen angeregt wird. Die Zahl der angeregten Cäsiumatome ist im Resonanzfall am größten. Diese Einstellung wird von der Apparatur gehalten, und die Schwingungsperioden werden gezählt. Nach genau 9 192 631 770 Schwingungsperioden ist dann eine Sekunde verstrichen.

Cäsium-Atomuhren sind so genau, dass 1967 die Zeitsekunde über dieses »Cäsiumnormal« definiert wurde. Eine Cäsium-Atomuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig stellt die Referenz für alle Uhren in Deutschland dar. Über Funk steuert sie landesweit Uhren an, die auf diese Weise genau eingestellt, also synchronisiert, werden.

Die PTB-Physiker experimentieren auch mit anderen chemischen Elementen für die Atomuhr. Neuerdings kommt dabei Ytterbium zum Einsatz. Hierbei wird der Übergang nicht mit Mikrowellen, sondern sogar mit sichtbarem Licht bewerkstelligt. Da die Wellenlänge von Licht noch kürzer ist als diejenige von Mikrowellen, ist der »Ytterbium-Takt« kürzer. Dementsprechend genauer ist diese neue Generation von optischen Atomuhren und zwar auf 17 Stellen nach dem Komma.

Aus einem Strahl von Cäsiumatomen filtert ein Magnet diejenigen Atome heraus, die sich im Grundzustand (–) befinden. Sie werden im Resonator mit Mikrowellen bestrahlt und dadurch auf ein höheres Energieniveau (+) angeregt. Die Anzahl der im Auffänger gesammelten angeregten Atome ist am größten, wenn die Frequenz f_p der eingestrahlten Welle die für die Anregung der Cäsiumatome charakteristische Frequenz aufweist.





Die beiden Makrozustände unterscheiden sich nur durch die Anordnung der Elemente. Die Unordnung, beschrieben durch die Entropie, ist jeweils sehr hoch. In geschlossenen Systemen kann die Entropie nur zunehmen – die Ursache des Zeitpfeils. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Die Schwester der Zeit

In der Physik gibt es Größen, an denen sich ablesen lässt, ob ein Vorgang akausal und damit verboten ist – oder ob er erlaubt und natürlich ist. Die dafür zuständige Disziplin ist die Wärmelehre oder Thermodynamik, in der die Physiker Naturgesetze gefunden haben. Eines davon, der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, besagt, dass eine Größe namens Entropie, die ein physikalisches System beschreibt, entweder gleich bleibt oder zunimmt – aber sie kann niemals abnehmen! Was beschreibt aber nun diese rätselhafte Größe Entropie, und wie können wir sie anschaulich verstehen?

Stellen Sie sich vor, Sie sind glücklicher Besitzer einer Packung mit Legosteinen. Sie haben die Packung gerade geöffnet, und die Legosteine liegen verstreut am Boden. Davon machen Sie ein Foto und betiteln es mit „Makrozustand 1“. Jetzt mischen Sie einmal kräftig die verstreuten Steine mit der Hand durch. Sie machen wieder ein Foto und nennen es „Makrozustand 2“. Vergleichen Sie die Fotos von „Makrozustand 1“ und „Makrozustand 2“, wird es Ihnen schwerfallen, einen Unterschied festzustellen.

Wir könnten diese Betrachtung mit dem Begriff der Ordnung, vielmehr Unordnung, verbinden. Beide Makrozustände weisen nur ein geringes