

Immer und überall konstant

Naturkonstanten – ein Erklärungsversuch

Wer nach Unveränderlichem sucht, wird im normalen Leben nicht fündig. Alles verändert sich, nichts bleibt, wie es ist, und keine zwei Dinge sind wirklich in allen Details gleich. Zwei Dinge können sich zwar sprichwörtlich wie ein Ei dem anderen ähneln – aber eben nur ähneln, exakt gleich sind sie sicher nicht. Ideale, unterschiedslose Zwillinge gibt es nicht. Und dann die Zeit, die ohnehin an allem nagt und alles und jeden verändert. Kurzum: Dem Sucher nach absoluter Gleichheit und Unveränderlichkeit sollte man besser zurufen: Gib´s auf! Oder man schickt ihn in eine Vorlesung über die Grundlagen unseres physikalischen Weltverständnisses. Denn dort scheint es beides zu geben: wirkliche Identität und absolute Unveränderlichkeit.

Was identisch ist, ist ununterscheidbar

Wenn wir in unsere große, makroskopische Welt hinein zoomen, gelangen wir etwa nach zehnmilliardenfacher Vergrößerung in die Welt der Atome. Gucken wir mit noch stärkerem Zoom in diese hinein, finden sich Elektronen, Protonen und Neutronen. Die beiden Letzteren haben noch eine innere Struktur aus zwei Sorten sogenannter Quarks (von denen es insgesamt sechs Sorten gibt). Aber damit ist man – nach heutigem Wissen – auf dem Boden angekommen. Der Baukasten, aus dem die Welt besteht, hat ein übersichtliches Sortiment weniger elementarer Teilchen. Was man aus diesem Baukasten alles „bauen“ kann, liegt natürlich in den Eigenschaften dieser Teilchen begründet. Und eine vielleicht zunächst befremdlich anmutende Eigenschaft der Teilchen ist es – ob man die Teilchen innerhalb einer Sorte unterscheiden kann oder nicht. Für den Baumeister Natur ist dies tatsächlich außerordentlich wichtig, weil sich die Zahl der Baumöglichkeiten drastisch von einem zum anderen Fall ändert. Sind zwei Teilchen unterscheidbar, dann gibt es eine zweite Konfiguration, wenn die Teilchen ihre Plätze tauschen. Sind die Teilchen dagegen ununterscheidbar, hat die Natur nur eine Möglichkeit, die beiden Teilchen anzuordnen. Ein Vertauschen ändert bei Ununterscheidbarkeit nichts.

Nun etwas konkreter: Wir könnten uns alle Elektronen dieser Welt, um ein Beispiel zu nehmen, wie eine große Anzahl (eine wirklich große Anzahl) kleiner Erbsen vorstellen, die wir prinzipiell auch durchnummerieren könnten. Natürlich können wir das nicht praktisch, aber wir können es uns ja vorstellen. Und dann könnten wir uns etwa sechs Elektronen aussuchen und ihnen die Aufgabe geben, die Elektronenhülle eines Kohlenstoffatoms zu bilden. (Den Kern haben wir entweder geschenkt bekommen oder schon vorher zusammengebaut. Das tut jetzt nichts zur Sache.) Wenn wir tatsächlich jedes Elektron mit einer Nummer versehen hätten, dann dürften sich die Elektronen – nach den Regeln, die in dieser Mikrowelt für unterscheidbare Teilchen herrschen – alle auf dem untersten Energielevel tummeln. Aber dann würde das Atom komplett verklumpen, und die Materie, wie wir sie kennen, gäbe es nicht (und uns Kohlenstoffwesen dann natürlich auch nicht). Also war die Annahme, wir könnten die Elektronen individualisieren, falsch. Unsere Rettung (ganz wörtlich) liegt vielmehr in der Ununterscheidbarkeit der Teilchen. Denn in diesem Fall besagt die Quantenmechanik, dass je zwei Elektronen nicht in allen Details ihres Zustands übereinstimmen und sich also auch nicht auf demselben Energielevel aufhalten dürfen. Eben das verhindert das Verklumpen der Welt und sichert unser Dasein. Der Ununterscheidbarkeit sei Dank! (Das Ganze hat übrigens auch zur Folge, dass wir alle aus uralten Atomen bestehen, mit denen man sowohl Dinosaurier, Streifenhörnchen, Apfelgriepsche und auch uns selbst bauen kann. Ein Kohlenstoffatom ist wie das andere und passt in jedes Bauschema.)

Wirklich unveränderlich

Nicht nur mit der Ununterscheidbarkeit der Elementarteilchen hat die Welt und mit ihr auch wir sehr viel Glück. Auch die Tatsache, dass es gewisse Dinge gibt, auf die man sich in der Physik verlassen kann, trägt zu unserem Dasein bei. Wir sollten daher alle ein Loblied darauf anstimmen, dass jedes Elektron auf dieser Welt die gleiche elektrische Ladung trägt (und immer schon getragen hat und für alle Zeiten tragen wird). Ebenso glücklich sollten wir darüber sein, dass die Masse eines Protons immer dieselbe bleibt, dass das Licht immer und immer mit derselben Geschwindigkeit durchs Vakuum rast oder dass es in der Welt eine mit dem Buchstaben h bezeichnete kleinste, nicht zu unterbietende Wirkung gibt. Diese Naturkonstanten sorgen dafür, dass die Welt, wie wir sie kennen, überhaupt möglich ist. Hätten die Naturkonstanten etwas andere Werte (also wäre Licht vielleicht etwas langsamer und das Neutron etwas leichter), dann wären wir gar nicht da. Naturkonstanten sind so etwas wie die Spielregeln der Natur. Sie tauchen in den grundlegenden physikalischen Gleichungen als etwas auf, was sich nicht aus anderen Prinzipien herleiten lässt. Die Physik muss ihre Existenz und ihre jeweiligen Größen schlicht hinnehmen.

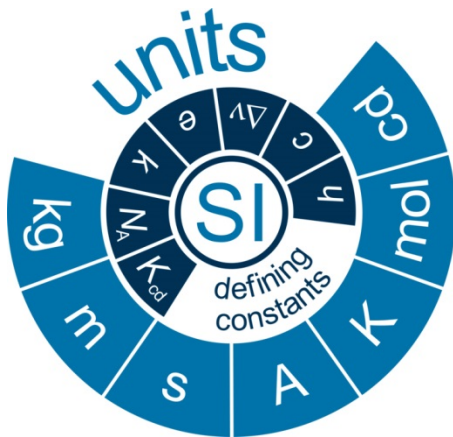
Ob sich diese Konstanten über Jahrmilliarden hinweg, seit dem Urknall, vielleicht doch ein wenig verändert haben oder ob es Gegenden im Universum fern der Erde mit anderen Werten der Naturkonstanten gibt, wird zwar unter Astronomen und Theoretikern heiß diskutiert, aber den irdischen Alltag dürften diese Diskussionen kalt lassen. Im hiesigen Maßstab gelten Naturkonstanten ganz sicher als konstant. Und eben dies macht sie zu den begehrtesten Kandidaten auch unter den sehr praxisnah denkenden und arbeitenden Metrologen.

Für alle Zeiten und Kulturen

Wer Maße und Einheiten definieren möchte, die für alle Zeiten Bestand haben und die an jedem Ort gelten können, der darf sich nicht an Ur-Meterstäbe und Ur-Kilogrammklötzchen binden, denn diese Dinge sind veränderlich. Das Unveränderliche liegt nur in der mikroskopischen Welt der Atome und in der abstrakten Welt der physikalischen Theorien. Dieser Gedanke ist auch gar nicht neu: Gedacht haben ihn schon James Clerk Maxwell um 1870 und Max Planck um 1900. Aber die Umsetzung im messenden Alltag dauerte dann eine ganze Weile: Mit den Atomuhren kam in den 1960er Jahren eine bestimmte Frequenz eines Elektronenübergangs in einem Cäsiumatom auf die Bühne. Mit ihr wurde die Sekunde definiert. Dann wurde 1983 auch der Meter über die Laufzeit von Licht im Vakuum festgelegt – die Lichtgeschwindigkeit eroberte die Metrologie. Und nun steht das Internationale Einheitensystem vor seinem vollständigen Umbau. Eine ausgewählte Menge von Naturkonstanten wird in Zukunft (die übrigens formal am 20. Mai 2019 beginnt) der Welt die Maße sagen.

Vorhang auf für die Stars am Himmel der Einheiten

Sieben Naturkonstanten erhalten im neuen SI festgelegte Werte; die Zahlenwerte entstammen den Ausgleichsrechnungen von CODATA im Sommer 2017 (CODATA 2017 special adjustment).



- Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im ^{133}Cs -Atom
 $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$
- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
 $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
- Planck-Konstante
 $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s (J s = kg m}^2\text{ s}^{-1}\text{)}$
- Elementarladung
 $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C (C = A s)}$
- Boltzmann-Konstante
 $k = 1,380\,649 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}\text{ (J K}^{-1} = \text{kg m}^2\text{ s}^{-2}\text{ K}^{-1}\text{)}$
- Avogadro-Konstante
 $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
- Photometrisches Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$
 $K_{\text{cd}} = 683\text{ lm W}^{-1}$