



Manche Symmetrien wie diese sind höchst instabil – eine kleine Störung genügt, um das System aus dem Gleichgewicht zu bringen.

SHOJI OSHIMARU

Verborgene Symmetrien

Physiker schätzen Symmetrien nicht nur wegen ihrer Schönheit, sondern auch wegen ihrer Nützlichkeit. Wahrhaft faszinieren kann aber ihre – scheinbare – Abwesenheit. Denn dann befinden sich die Forscher möglicherweise auf dem Weg, tiefere Strukturen der Wirklichkeit zu erkennen.

Von Frank Close

Nicht nur für Physiker sind Symmetrien etwas ganz besonderes. Menschen nehmen sie generell als harmonisch und ästhetisch befriedigend wahr; Symmetrien fühlen sich einfach richtig an. Auch in der Natur spielen sie eine herausragende Rolle, weshalb sie Forschern oft als Wegweiser zu neuen Theorien dienen. Dabei ist die Natur häufiger asymmetrisch als symmetrisch, und oftmals sind es gerade Asymmetrien, die uns Hinweise auf die wahre Natur der Realität liefern. Genau das widerfuhr Peter Higgs und François Englert, als sie vor 50 Jahren auf eine mögliche Erklärung dafür stießen, warum Elementarteilchen Masse besitzen. Dieses Phänomen, das wir heute Higgs-Mechanismus nennen, brachte den beiden Physikern im vergangenen Jahr sogar den Nobelpreis ein.

Mitunter geht Symmetrie sogar aus Asymmetrie hervor. Wir und unsere Umwelt bestehen aus Atomen, die von der Anziehungskraft entgegengesetzter elektrischer Ladungen zusammengehalten werden. Das einfachste Atom, Wasserstoff, enthält nur ein positiv geladenes Proton und ein negatives Elektron. Deren elektrische Ladungen gleichen sich dabei so exakt aus, dass ein Atom aus der Ferne gesehen praktisch nur noch auf die Schwerkraft reagiert.

Dieses perfekte Gleichgewicht der Ladungen kommt allerdings auf vollkommen asymmetrische Weise zu Stande. Nach allem, was wir heute wissen, ist das Elektron ein fundamentaler, nicht aus weiteren Elementen zusammengesetzter Bau-

stein der Materie. Das Proton dagegen nicht: Es besteht aus drei Quarks. Ordnen wir dem Elektron die Ladung -1 zu, tragen die Quarks die Ladungen $+2/3$ und $-1/3$. So sind Kombinationen möglich, in denen sich die Ladung der drei Quarks in einem Proton zu $+1$ summiert und die der drei Quarks in einem Neutron zur Ladung null führen. Obwohl also Protonen komplex aufgebaut, Elektronen jedoch sehr einfache Objekte sind, entsprechen die Ladungen der Teilchen einander exakt so, dass das Atom insgesamt elektrisch neutral ist. Das deutet auf eine tiefere Symmetrie, die Elektronen und Quarks miteinander verbindet, auch wenn wir noch nicht wissen, um welche es sich handeln könnte.

Warum weisen schnelle Leichtgewichte und ein ruhender schwerer Kern exakt dieselbe Ladung auf?

Dass sich Quarks zu Protonen oder Neutronen zusammenschließen, sorgt auch für Merkwürdigkeiten bei der Addition der Massen. Damit ein Quark in dem winzigen Raum lokalisiert bleibt, den ein Proton bietet – dieses durchmisst gerade einmal 10^{15} Meter –, muss seine Energie immens hoch sein; das ergibt sich aus der Unschärferelation der Quantenmechanik. Wie die berühmte Formel $E = mc^2$ zeigt, wobei E die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit ist, entspricht dieser Energie eine Masse. Die aufsummierten Quarkenergien verschaffen dem Proton so die nahezu 2000-fache Masse eines Elektrons. In jedem Atom sausen also schnelle Leichtgewichte um einen statischen und sehr schweren Kern herum, und trotz ihrer Unterschiedlichkeit schaffen es beide doch, die entgegengesetzte Ladung des jeweils anderen genau auszugleichen.

Leicht stößt man in der Welt der Elementarteilchen auf weitere Asymmetrien. Warum gibt es in unserer Umwelt keine Atome aus negativ geladenen Protonen und positiv geladenen Elektronen? Schließlich funktionieren die Regeln der elektrischen Anziehung und der Quantenmechanik für diese so genannte Antimaterie genauso wie für normale Materie. Doch es gibt da ein Problem.

Wenn das Universum in einem heißen Urknall aus dem Nichts entstanden ist, dann sollte die Energie dieses Ereignisses unseren Theorien zufolge genau gleiche Mengen an Ma-

AUF EINEN BLICK

WIE SYMMETRISCH IST DIE NATUR?

- 1 Symmetrien spielen in der Physik eine große Rolle, weil sie den **Weg zu völlig neuen Erkenntnissen** bahnen können.
- 2 Manche Phänomene wirken allerdings völlig unsymmetrisch, wie etwa die Dominanz von Materie gegenüber Antimaterie. Verbirgt sich dahinter eine **Asymmetrie der Naturgesetze**?
- 3 Möglicherweise ist die tiefere Symmetrie eines solchen Phänomens aber nur **verborgen**. Gegenüber dem instabilen Ursprungszustand hätte die Natur dann ein **asymmetrisches, aber stabiles System** bevorzugt.

terie und Antimaterie erzeugt haben. Doch beim Kontakt miteinander verwandeln sich Materie und Antimaterie in Strahlungsenergie. Kurz nach dem Urknall hätten sie sich also einfach gegenseitig wieder vollständig zerstört.

Diese schöne Symmetrie beobachten wir allerdings nicht: Das uns bekannte Universum besteht ausschließlich aus Materie und enthält fast keine Antimaterie – es weist also eine fundamentale Asymmetrie auf. Ihre Ursache kennen wir nicht. Vielleicht liegt die Lösung dieses großen Rätsels in einer Asymmetrie der Naturgesetze, die wir noch nicht entdeckt haben. Vielleicht handelt es sich aber auch um ein Beispiel dafür, dass uns eine grundlegende Symmetrie der Natur verborgen bleibt – dass die physikalische Welt uns also radikal anders erscheint, als ihre tiefere Struktur es erwarten ließe.

Auch das Leben selbst liefert ein Beispiel für eine verborgene Symmetrie. Auf den ersten Blick erscheint der menschliche Körper im Großen und Ganzen spiegelsymmetrisch, doch unsere inneren Organe bilden Ausnahmen. Eine der Ursachen dafür ist die asymmetrische Funktion des Herzens. Die linke Herzkammer pumpt mit Sauerstoff angereichertes Blut in den Körper – dafür muss sie stark sein. Die andere Herzkammer schickt das Blut zur Sauerstoffanreicherung in die Lungen – die aber liegen direkt neben dem Herzen, sie muss folglich viel weniger leisten. Da die linke Seite des Herzens entsprechend kräftiger ist als die rechte und das Herz ohnehin leicht nach links versetzt ist, haben wir das Gefühl, es sitze links; lediglich bei einem von 20 000 Menschen sind die Organe spiegelverkehrt angeordnet. Aus dieser Asymmetrie des Herzens ergibt sich schließlich auch eine asymmetrische Anordnung der anderen inneren Organe.

Auf einer noch tieferen Ebene, bei den Molekülen des Lebens, stoßen wir ebenfalls auf eine Asymmetrie. Louis Pasteur (1822–1895), der französische Chemiker und Mikrobiologe, fragte sich sogar, ob »die Existenz des Lebens selbst eine Folge kosmischer Asymmetrie« ist. Die Gesetze der Quantenmechanik sorgen dafür, dass das Kohlenstoffatom, das Ba-

siselement des Lebens, vier Bindungen besitzt, an die andere Atome andocken können. Ein einfaches Beispiel ist Methan, CH_4 , das die Form eines symmetrischen Tetraeders aufweist, mit dem Kohlenstoffatom im Zentrum und den vier Wasserstoffatomen in den Ecken.

Auch das Leben selbst ist auf molekularer Ebene asymmetrisch

Ganz anders sieht es aus, wenn an den vier Bindungsstellen je unterschiedliche Atome oder Moleküle andocken. In Milch findet sich beispielsweise das nicht rotationsymmetrische Molekül der Milchsäure, dessen Spiegelbild sich biochemisch anders verhält als das Original. In Lewis Carrolls »Alice hinter den Spiegeln« fragt sich die Titelheldin, ob Spiegelmilch wohl trinkbar sei. Sicher ist: Mit der einen Molekülvariante kommt der menschliche Stoffwechsel besser zurecht als mit der anderen.

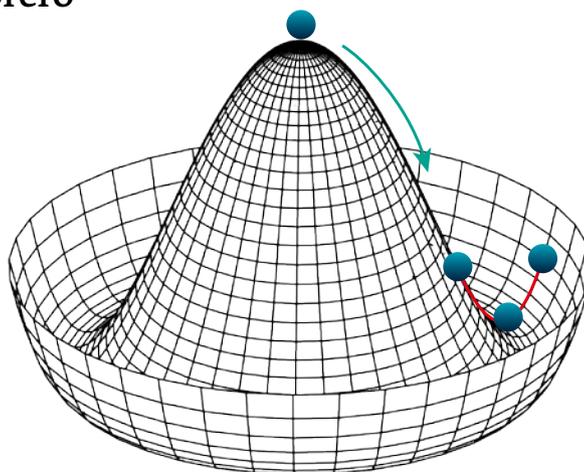
Zu den komplexeren Lebensbausteinen zählen die Aminosäuren. Auch sie besitzen eine Tetraederstruktur und können als Isomere auftreten, also in Form zweier zueinander spiegelbildlicher Versionen. Jeweils nur eine dieser Versionen ist mit Leben verträglich, jedenfalls mit den uns bekannten Lebensformen. Anders gesagt: Während die Naturgesetze beide Molekülformen erlauben, nutzt das irdische Leben ausschließlich eine davon. Das Leben verbirgt also eine fundamentale Symmetrie auf molekularer Ebene.

Eng mit der Symmetrie verknüpft ist die Stabilität. Schiebt man einen Einkaufswagen mit beiden Händen exakt in der Mitte des Griffs, so scheint er ein Eigenleben zu entwickeln. Er bricht aus, mal nach rechts und mal nach links, die Situation ist hochgradig instabil. Schon eine geringe Abweichung von der perfekten Symmetrie – wenn die eine Hand ein wenig stärker als die andere drückt – zerstört sofort das Gleichgewicht und lenkt den Wagen von der geraden Bahn ab.

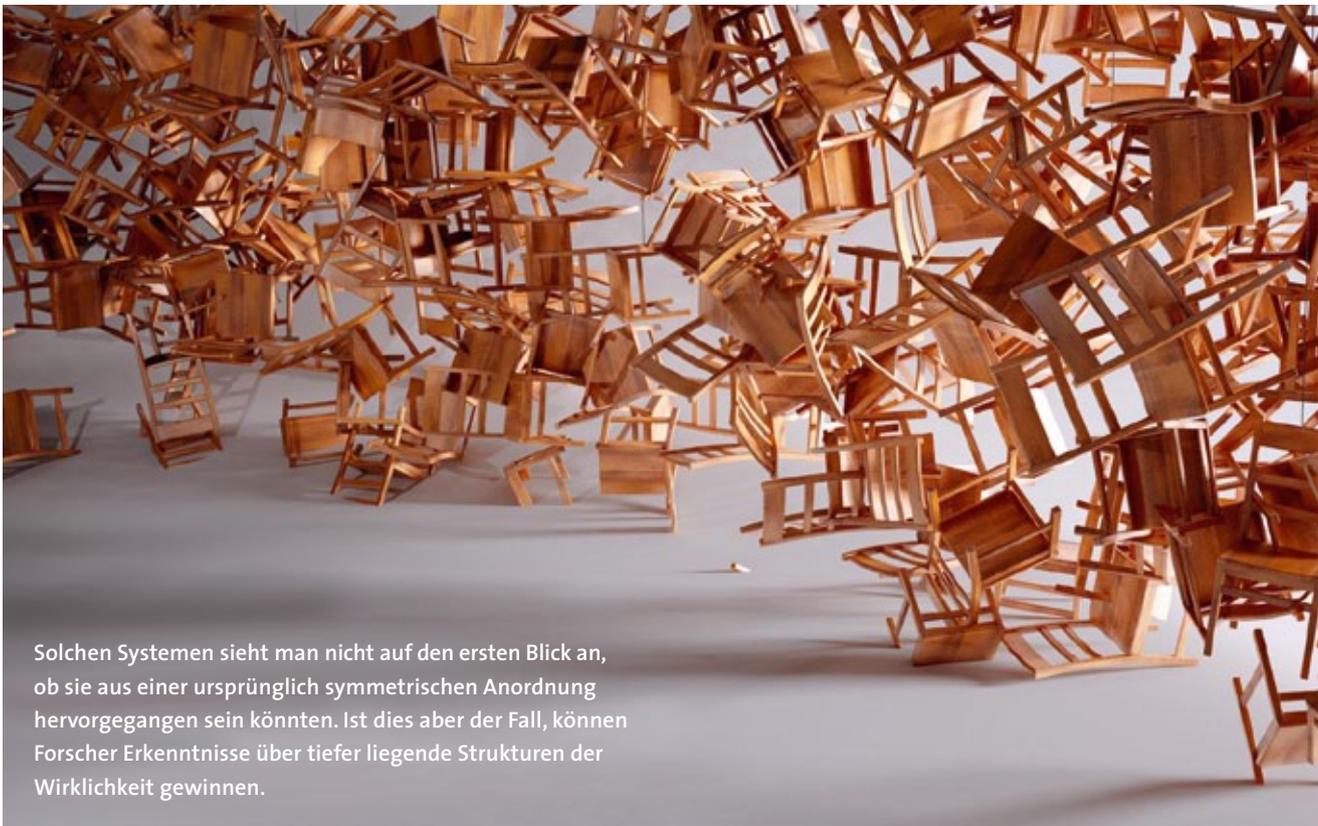
Wie sieht es bei Systemen aus, in denen lediglich eine einzige Kraft am Werk ist, die Gravitation? Newton hat uns ge-

Das Higgs im Sombbrero

Befindet sich ein Ball exakt auf der Spitze eines Sombros, ist diese Situation zwar symmetrisch, aber instabil: Die kleinste Störung lässt ihn herabrollen. Dabei geht zwar die Symmetrie verloren, dafür erreicht der Ball einen stabilen Zustand. Dieser neue Gleichgewichtszustand »verbirgt« die ursprüngliche symmetrische Konfiguration.



Das Higgs-Feld (blaue Kugel) befindet sich in einer Energielandschaft, die wie ein Sombro geformt ist. Von einem ursprünglichen instabilen Zustand hoher Energie wandert es in einen energetisch niedrigeren, stabilen Zustand. Dort oszilliert es infolge der Unschärfere-lation der Quantenmechanik, wodurch Higgs-Teilchen entstehen.



SIMON DANAEHER

Solchen Systemen sieht man nicht auf den ersten Blick an, ob sie aus einer ursprünglich symmetrischen Anordnung hervorgegangen sein könnten. Ist dies aber der Fall, können Forscher Erkenntnisse über tiefer liegende Strukturen der Wirklichkeit gewinnen.

lehrt, dass die von einem Körper ausgehende Schwerkraft sich nicht um Richtungen schert; sie wirkt kugelsymmetrisch. Man würde also erwarten, dass ihre Wirkung zu kugelartigen Formen führt. Dafür gibt es schöne Beispiele wie Mond und Sonne, ebenso manche Galaxien. Doch die meisten Galaxien sind gerade nicht kugelsymmetrisch: Spiralgalaxien erscheinen abgeflacht und erstrecken sich vorzugsweise entlang einer ganz bestimmten Ebene. Würden wir lediglich die Andromedagalaxie kennen, würden wir vielleicht vermuten, dass die Schwerkraft nur in zwei Dimensionen symmetrisch ist.

Tatsächlich ist eine sphärische Galaxie extrem instabil. Wenn sich nicht alle ihre Sterne von vornherein an genau der richtigen Position befinden, während sie unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen, kugelsymmetrischen Anziehung aufeinanderzufallen, werden einige von ihnen über ihr Ziel hinauschießen und später wieder zurückkehren. So oszillieren sie hin und her, bis sich eine stabile Konfiguration einstellt. Doch jede kleine Störung von außen – etwa die Gravitation einer anderen Galaxie – kann das fragile Gleichgewicht zerstören. In einer solchen Situation zieht die Natur Stabilität der Symmetrie vor: Ein symmetrisches, aber instabiles System wandelt sich in ein stabiles, dessen Symmetrie aber verborgen bleibt. Aus instabiler Symmetrie wird stabile Asymmetrie.

Für die Gesamtheit aller Galaxien im Kosmos bleibt die dreidimensionale Symmetrie jedoch erhalten, da die Ebenen der Spiralgalaxien zufällig im Raum orientiert sind. Die Symmetrie ist also nur individuell verborgen, im Universum als Ganzem besteht sie fort.

Das Prinzip der verborgenen Symmetrie lässt sich auch an einem Sombrero demonstrieren (Grafik links). Dreht man ihn so, dass die Hutspitze nach unten zeigt, kommt eine kleine Kugel darin sofort zur Ruhe. Dieser Zustand ist stabil und rotationssymmetrisch. Dreht man den Sombrero wieder um, ist das Ergebnis ebenfalls rotationssymmetrisch. Doch nun befindet sich ein auf der Hutspitze ruhender Ball in einem labilen Gleichgewicht; schon eine winzige Störung lässt ihn in die Hutkrempe hinunterrollen. Die Symmetrie ist noch immer da, aber jetzt ist sie verborgen.

Was passiert, wenn ein Photon auf ein Plasma trifft?

Damit kommen wir zurück zum Higgs-Mechanismus. Die Annahme einer bestimmten Symmetrie, der Eichsymmetrie, führt dazu, dass die Quantenfeldtheorie masselose Teilchen vorhersagt. Im Zusammenhang mit dem Elektromagnetismus ist das unproblematisch, da das Trägerteilchen dieser Wechselwirkung, das Photon, tatsächlich keine Ruhemasse besitzt. Doch die Träger der schwachen Wechselwirkung, das W- und das Z-Boson, haben nachweislich Ruhemassen. In diesem Fall ist die grundlegende Symmetrie also verborgen – die Frage ist: auf welche Weise?

Es gibt eine Situation, in der Photonen eben doch eine Masse besitzen. Sie war es auch, die Higgs, Englert und andere auf die richtige Spur gebracht hat. Was passiert, wenn ein Photon auf ein Plasma trifft? Das Photon kann nur dann in ein solches Gas aus ionisierten Teilchen eindringen, wenn seine Frequenz oberhalb der so genannten Plasmafrequenz liegt; liegt sie darunter, wird es reflektiert. Ein Beispiel sind Radiowellen, die

von der Ionosphäre – einer hochgelegenen, plasmaartigen Schicht der Atmosphäre – reflektiert werden, weil sie eine entsprechend niedrige Frequenz haben. Die Frequenz von Licht ist viel höher, weshalb die Strahlung der Sonne und der Sterne die Ionosphäre ungehindert durchquert.

Stellen wir uns vor, in diesem Plasma lebten intelligente Wesen. Sie würden nur Photonen registrieren, deren Energie größer ist als ein bestimmtes Minimum. Aus der Relation $E=mc^2$ schließen sie dann, dass Photonen, die eine Mindestenergie haben, auch eine Mindestmasse besitzen. Nehmen wir weiter an, ein Plasmaphysiker hätte trotzdem seine Zweifel an dieser Feststellung. Sowohl das elektrische und das magnetische Feld eines Photons schwingt senkrecht zur Bewegungsrichtung; longitudinale Vibrationen, also solche in Bewegungsrichtung, kommen hingegen nicht vor. Die Gesetze der Quantenmechanik verlangen jedoch, dass ein Teilchen mit Ruhemasse solche longitudinalen Wellen erzeugt. Könnte der Plasmaphysiker also nachweisen, dass es solche longitudinalen Wellen nicht gibt, würde sich sein Verdacht bestätigen. Doch das kann er nicht. Bewegt sich nämlich ein Photon durch ein Plasma, versetzt es dieses entlang seiner Bewegungsrichtung in Schwingungen. Kurzum: Innerhalb des Plasmas scheint das Photon wirklich alle Eigenschaften eines massebehafteten Teilchens zu haben. Aus der Perspektive der Plasmabewohner erscheint die grundlegende Symmetrie, die Photonen masselos macht, darum verborgen.

Wir leben in einem allgegenwärtigen »Plasma«

Higgs, Englert und andere haben diese Idee verallgemeinert und stellten sich vor, der gesamte Raum sei von einer Art Plasma erfüllt. Photonen würden das nicht bemerken, W- und Z-Bosonen dagegen schon – und dadurch eine Ruhemasse erhalten. In diesem Szenario sind wir selbst die Wesen, deren einzige Erfahrung das Leben innerhalb eines seltsamen, allgegenwärtigen Plasmas ist.

Physiker bezeichnen dieses Plasma als Higgs-Feld. Bei seiner mathematischen Beschreibung symbolisiert eine sombreroartige Form (Grafik S. 50) die erwähnte Eichsymmetrie der Quantenfeldtheorie. Ist das Higgs-Feld gleich null, liegt es wie ein Ball auf der Spitze des Sombreros, wo die Energie hoch ist. In dieser symmetrischen Konfiguration sind nicht nur Photonen masselos, auch W- und Z-Bosonen verleiht das Feld dann keine Masse. Doch die Lage des Balls ist höchst instabil, und er rollt schon bald in einen stabilen Gleichgewichtszustand niedriger Energie, also in die Krempe des Sombreros. Hier ist das Higgs-Feld nicht mehr null, so dass es Teilchen nun doch mit Masse ausstattet. Die nach wie vor herrschende Eichsymmetrie erscheint uns ab diesem Zeitpunkt aber verborgen, denn ihre Konsequenz bleibt aus: Die Elementarteilchen sind nicht mehr masselos.

Wie mehrere Forscher 1964 bemerkten, muss der Ball in der Krempe nicht liegen bleiben, sondern kann ihr entlang im Kreis rollen; es gibt also einen zusätzlichen Freiheitsgrad für Schwingungen eines massebehafteten Teilchens wie etwa des W-Bosons. Dieser Umstand entspricht den oben er-

wähnten longitudinalen Vibrationen im Plasma. Higgs war jedoch der Einzige, der auf die Möglichkeit hinwies, dass der Ball auch quer zu dieser Kreisbahn schwingen kann, nämlich die Talwände herauf und wieder herunter. Solche Schwingungen sind eine unvermeidliche Folge der Unschärferelation und entsprechen der Existenz eines weiteren masse-reichen Teilchens, des Higgs-Bosons. Tom Kibble vervollständigte 1967 das Bild, indem er zeigte, wie W- und Z-Bosonen durch Wechselwirkungen mit dem Higgs-Feld ihre Masse erhalten, Photonen aber trotzdem masselos bleiben.

Diese aus einer instabilen Symmetrie geborene stabile Asymmetrie ist weit mehr als ein Kuriosum. Wären W- und Z-Bosonen masselos, wäre die schwache Wechselwirkung genauso stark wie die elektromagnetische. Erstere kontrolliert aber die Fusion von Wasserstoff zu Helium im Inneren der Sonne, und sie hätte in diesem Fall dafür gesorgt, dass unser Zentralgestirn seinen nuklearen Energievorrat bereits lang vor dem Auftauchen der ersten Menschen verbraucht hätte. Erst der Higgs-Mechanismus, so die Schlussfolgerung, macht eine Evolution wie die auf der Erde möglich, die sich über sehr lange Zeiträume erstreckt.

Die Entstehung einer stabilen Asymmetrie aus einer instabilen Symmetrie könnte also der Schlüssel zum Leben, zum Universum und zu nahezu allem sein. Dass es überhaupt ein Sonnensystem gibt, das nicht von Antimaterie zerstört wird, verdanken wir der Abwesenheit Letzterer. Vielleicht stoßen wir eines Tages darauf, dass lokale Überschüsse an Materie oder Antimaterie eine tiefere, globale Symmetrie verbergen. Zwar befinden wir uns in einer sehr großen Region hoher Materiedichte. Aber das Universum ist noch viel größer und könnte ganze Galaxienhaufen aus Antimaterie beherbergen. Die instabile globale Symmetrie wäre auch in diesem Fall hinter einer lokalen stabilen Asymmetrie verborgen.

Vielleicht ist die Dominanz bestimmter Varianten von Aminosäuren ein weiteres Beispiel für dieses Phänomen. Natürliche Auslese könnte einem kleinen Überschuss, der sich auf der jungen Erde einstellte, zu seiner heutigen Dominanz verholfen haben. Obwohl Pasteur noch nicht über unseren Wissensstand verfügte, hatte er möglicherweise Recht: Es gibt uns dank einer kosmischen Asymmetrie. ∞

DER AUTOR



Frank Close ist Professor für Physik an der University of Oxford und Autor zahlreicher Sachbücher, zuletzt »The Infinity Puzzle: Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe« (Oxford University Press, 2011) und »Neutrino« (auf Deutsch bei Springer Spektrum, Heidelberg, Berlin 2012).

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1309285

© New Scientist
www.newscientist.com

„Meine Energiewende ist einfach und spart bares Geld!“

Macht den Kühlschrank zum Sparschrank:
Die Sparkassen gratulieren der
Gewinnerin des Energiewendepreises.



Großes Finale beim Energiewendepreis der Sparkassen: Cathrin Eichbaum aus Dortmund holt den ersten Platz. Ihr Tipp: Mit Luft gefüllte Frischhaltedosen reduzieren beim Öffnen der Kühlschranktür das neue Eindringen von Warmluft – so kann jeder kinderleicht Energie sparen. Noch weiter herunterkühlen lässt sich die Temperatur übrigens mit Coolpacks. Eine von vielen Ideen, die zeigen, dass die Energiewende zu Hause anfängt. Alle Ideen auf: www.meine-energiewende.de/projekte/