

NATURGESETZE AM ENDE DER NATÜRLICHKEIT

Im Herzen des Mikrokosmos sind Physiker auf etwas gestoßen, was wie ein extremer Zufall aussieht. Ist das die lang ersehnte Fährte zur Weltformel? Oder nur der Punkt, an dem die bisherigen mathematischen Werkzeuge ihre Wirksamkeit verlieren?

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum**.

» spektrum.de/artikel/1593996

Ein Bleistift, der auf seiner Spitze stehen bleibt – das kann es eigentlich nicht geben, oder? Mit ähnlichem Unglauben blicken Physiker aktuell in den Mikrokosmos: Dort nimmt ein wichtiger Parameter einen in mancher Hinsicht sehr überraschenden Wert an.



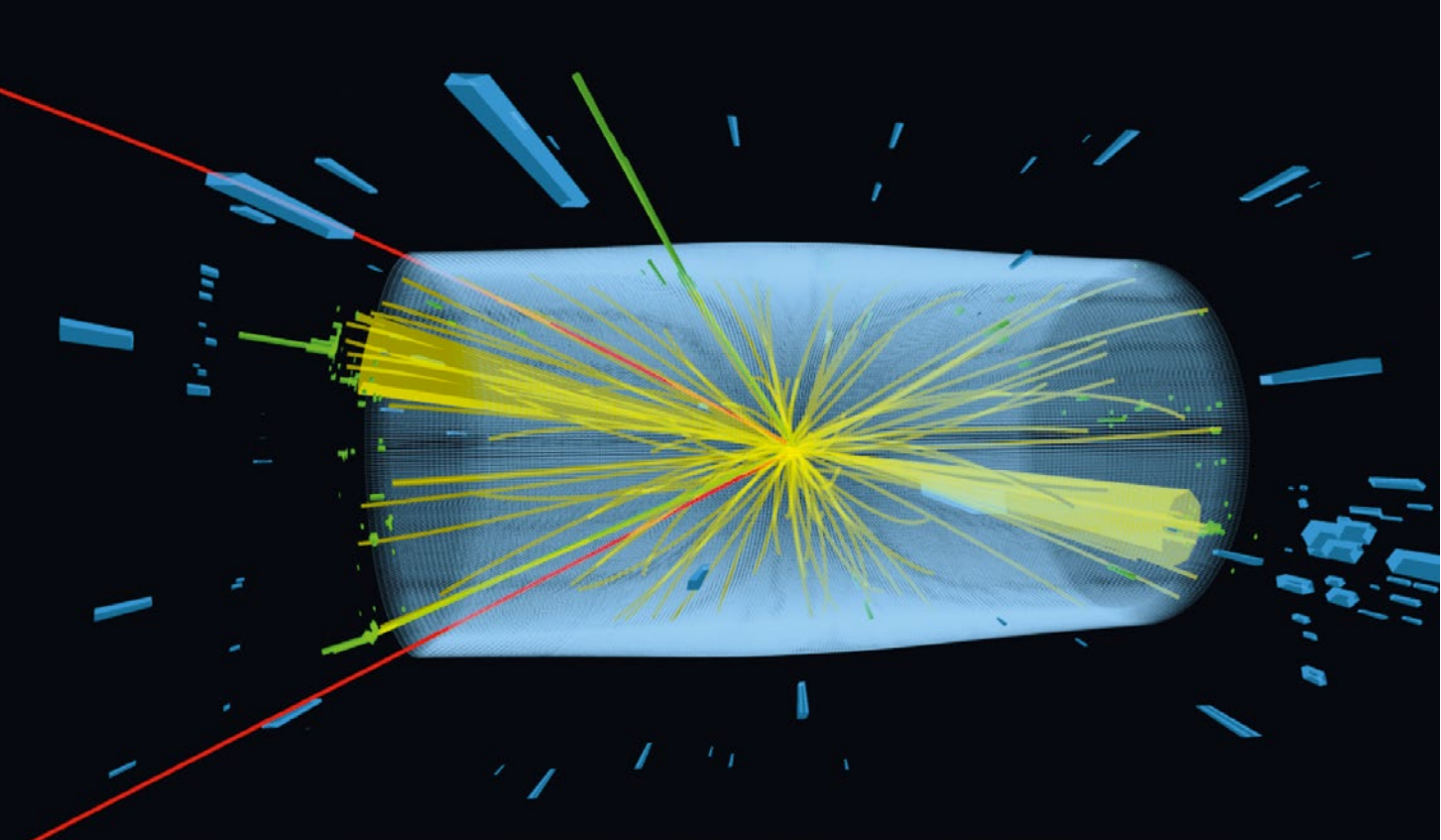
Der grüne Laserpointer kreist wie wild über dem griechischen Buchstaben. Immer wieder kehrt er zu dem Symbol zurück, das Außenstehende leicht für ein Tipi halten könnten, an dessen Spitze jemand eine kleine Zwei gemalt hat: Λ^2 . Kann sich hinter einem so harmlosen Zeichen Unheil verbergen? »Ich habe solche philosophischen Fragen lange für eher unwissenschaftlich gehalten«, sagt Holger Gies. Aber nun steht der groß gewachsene Theoretiker doch in einem Seminarraum der RWTH Aachen und spricht vor Physikern und Philosophen genau darüber: ob »Lambda« die Teilchenphysik in die Krise geführt hat.

Der griechische Buchstabe war lange Zeit ein Hoffnungsträger bei der Suche nach einer neuen Theorie für den Mikrokosmos. Λ taucht im bisherigen Regelwerk, dem Standardmodell der Teilchenphysik, an einer Schlüsselstelle auf. Das Symbol fällt dort jedoch dermaßen aus dem Rahmen, ist dermaßen »unnatürlich«, dass Wissenschaftler es jahrzehntelang für einen Hinweis auf bisher unentdeckte Naturgesetze hielten. Für eine kosmische Fügung, die viel zu unwahrscheinlich ist, um ein Zufall zu sein. Die geradezu nach einer Erklärung schreit – und die idealerweise den Weg in Richtung Weltformel weist.

Aber in den vergangenen Jahren hat sich die Lage geändert. Der Large Hadron Collider (LHC) bei Genf hat bisher wider Erwarten keine Hinweise auf ein neues Weltmodell geliefert (siehe »Trägerische Eleganz« ab S. 14). Nun ragt Lambda grotesker aus der Teilchenwelt hervor als jemals zuvor. »Es ist merkwürdig, dass ausgerechnet das Standardmodell unnatürlich sein soll«, sagt Holger Gies.

Daher hat der Physiker von der Universität Jena Anfang 2018 seinen Koffer gepackt und ist nach Aachen gefahren, zu einer Konferenz, auf der sich 40 Experten aus aller Welt über das »Natürlichkeitsproblem« ausgetauscht haben. Im Generali-Saal der Universität, hoch über dem Februardunst der Altstadt, hat Gies seine Sicht der Dinge vorgetragen, hat abends beim Bier mit Kollegen zusammengesessen und immer wieder dieselbe Frage diskutiert: Wie kommen wir weiter bei der Entschlüsselung des Mikrokosmos?

Lange Zeit sah es so aus, als hätten die Wissenschaftler den Masterplan der Natur entdeckt. Seit Jahrhunderten dringen sie immer tiefer ins Innere der Materie vor, zu-



THOMAS MCCAULEY, CERN 2016, FOR THE BENEFIT OF THE CMS COLLABORATION

nächst mit Mikroskopen, dann mit Teilchenbeschleunigern. Was die Forscher dort entdeckten, folgt einer erstaunlichen Ordnung: Die Welt scheint aus gerade einmal einem Dutzend verschiedener Elementarteilchen-Typen zu bestehen, zwischen denen vier unterschiedliche Kräfte wirken (siehe »Das Standardmodell«, S. 17).

Der Elektromagnetismus drückt gleichgepolte Elektronen auseinander, die »schwache« Kernkraft lässt Atomkerne zerfallen, die »starke« Wechselwirkung kettet Quarks aneinander – und die Gravitation hält Menschen auf dem Boden der Tatsachen. Letztere ist die schwächste aller Kräfte. Sie wirkt über riesige Strecken, lässt sich aber nicht mit demselben mathematischen Formalismus wie die anderen Kräfte fassen. Deshalb fehlt die Schwerkraft im Standardmodell – einer von mehreren Makeln der Theorie, die alle anderen Einsichten in den Mikrokosmos elegant zusammenfasst.

Die Krönung der Teilchenphysik stürzte sie gleichzeitig in die Krise

Im Jahr 2012 bestätigten tausende Forscher am LHC-Beschleuniger dann die letzte Grundannahme des Weltmodells: Sie entdeckten das Higgs-Teilchen. Es erklärt, wie Elementarteilchen ihre Masse bekommen, und brachte seinem Namenspaten Peter Higgs und dem Belgier François Englert im Jahr 2013 den Physik-Nobelpreis ein (siehe **Spektrum** Dezember 2013, S. 19).

Was im Jubel damals unterging: Das Higgs besichert der Teilchenphysik ein großes konzeptionelles Problem. »Eigentlich müsste seine Masse sehr viel größer sein«, sagt der Physiker Robert Harlander von der RWTH Aachen, einer der Organisatoren der Aachener Konferenz zum Natürlichkeitsproblem. So wirkt es zumindest, wenn Wissenschaftler das Higgs mit Hilfe der Quantenfeldtheorie beschreiben, der mathematischen Sprache des Stan-

Entsteht am Large Hadron Collider ein Higgs-Teilchen, zerfällt es sofort in zahlreiche andere Partikel. Ihre Spuren können Forscher unter anderem mit Hilfe des haushohen CMS-Detektors rekonstruieren.

dardmodells. Ihr zufolge sind nicht Elementarteilchen die grundlegenden Bausteine des Kosmos, sondern ihnen entsprechende Energiefelder. Das Higgs-Teilchen ist demnach nicht mehr als eine kurzlebige Anregung des omnipräsenten Higgs-Felds.

Quantenfelder sind jedoch nie völlig statisch, sondern werden dauernd von winzigen Schwankungen erfasst. Diese Fluktuationen gehen auf Teilchen-Antiteilchen-Paare zurück, die überall im Mikrokosmos ständig entstehen und sich nach Sekundenbruchteilen wieder auslöschen. Physiker sprechen von »virtuellen« Teilchen. Ihre Existenz ist eine kuriose Konsequenz der heisenbergschen Unschärferelation. Sie lässt zu, dass sich Teilchen Energie aus dem Vakuum leihen, sofern sie diese nach kurzer Zeit wieder zurückgeben.

Die virtuellen Partikel selbst kann man praktisch nicht messen, aber ihr Echo: Die geisterhaften Teilchen-Antiteilchen-Paare treten während ihrer kurzen Existenz mit langlebigen Partikeln – beziehungsweise deren Feldern – in Kontakt. Das verändert sämtliche Begegnungen im Mikrokosmos. Das Higgs-Feld ist dabei besonders empfindlich gegenüber Vakuumfluktuationen. Schließlich verleiht es fast allen anderen Elementarteilchen ihre (Ruhe-)Masse, wodurch es auch mit den virtuellen Partikeln der allermeisten Quantenfelder in Kontakt tritt.

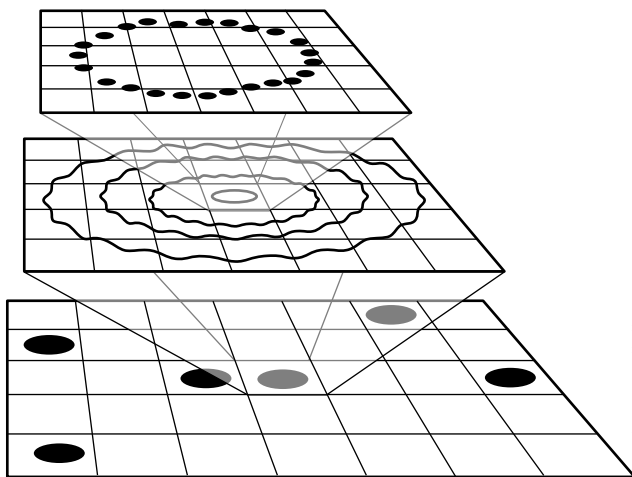
Wie die »Vakuumkorrekturen« genau ausfallen, können Forscher ausrechnen. Bereits in den 1940er Jahren, als sie eine Quantenschreibweise der Elektrodynamik entwickelten, stießen Physiker jedoch auf ein Problem. Die Experten

mussten damals klären, wie ein einzelnes Elektron in einem Magnetfeld von virtuellen Partikeln beeinflusst wird – auch von solchen, die in minimaler Entfernung vom Elektron auftauchen. Das führte jedoch zu einem Widerspruch: Je mehr man sich dem Elektron näherte, desto mehr virtuelle Teilchen kamen ins Spiel. Ihr Einfluss schien damit ins Unendliche zu wachsen – aber kein Messwert in der Physik kann unendlich groß sein.

Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger und Richard Feynman entwickelten einen Kniff, mit dem sich die Gefahr umschiffen lässt: Die Physiker klammerten alle problematischen Rechterme aus, indem sie sie in die Definition von Masse und Ladung aufnahmen. Dank dieser »Renormierung« erhielten sie eine Vorhersage für das magnetische Moment von Elektronen, die mit Präzisionsmessungen übereinstimmte.

Es war ein Rechentrick, der vielen Physikern nicht so recht behagte, jedoch alternativlos erschien. Im Jahr 1971 gelang es dem US-Physiker und späteren Nobelpreisträger Kenneth Wilson, das Verfahren zu verfeinern. Er suchte nach einer Methode, mit der man physikalische Systeme beschreiben kann (siehe **Spektrum** Oktober 1979, S. 66), die aus winzig kleinen Bausteinen bestehen, welche jedoch in bestimmten Situationen großen Einfluss auf das makroskopische Verhalten haben können. In der Natur bilden solche Systeme die Ausnahme: Normalerweise beeinflussen sich Ereignisse auf verschiedenen Größenskalen so gut wie gar nicht. So kann man das Verhalten einer Welle im Meer beschreiben, ohne dabei die molekulare Struktur der Flüssigkeit zu berücksichtigen.

Wenn man Wasser 218 Atmosphärendrücken und 374 Grad Celsius aussetzt, verschwimmt allerdings der Unterschied zwischen Flüssigkeit und Dampf. An diesem »kritischen Punkt« bilden sich Bläschen, die mal nur so groß wie ein Molekül sind, mal auf das Volumen eines ganzen Kochtopfs anwachsen können; der Mathematik zufolge können die Fluktuationen sogar unendlich groß sein.



Je näher man an etwas heranzoomt, desto mehr Details zeigen sich. Das Prinzip der Natürlichkeit besagt, dass man die Prozesse auf unterschiedlichen Größenskalen unabhängig voneinander betrachten kann.

AUF EINEN BLICK UNERTRÄGLICHE LEICHTIGKEIT

- 1 Die Entdeckung des Higgs-Teilchens hat der Physik ein großes konzeptionelles Problem beschert: Eigentlich müsste das berühmte Teilchen eine sehr viel größere Masse haben.
- 2 Energiefluktuationen aus dem Vakuum müssten das berühmte Teilchen viel schwerer machen. Mit seiner tatsächlich gemessenen Masse ist es aus Sicht vieler Physiker hochgradig »unnatürlich«.
- 3 Denkbar ist, dass ein bisher unbekannter Mechanismus die Higgs-Masse kleinhält. Vielleicht brauchen die Forscher aber auch neue mathematische Konzepte, um den Mikrokosmos zu beschreiben.

Wie sollte man damit umgehen? Im Grunde müsste man die Bläschen auf allen Größenordnungen im Blick behalten, aber das wäre selbst mit Computern zu aufwändig. Klassische Näherungsverfahren, wie Wilson sie zur Verfügung hatte, lieferten dagegen unbefriedigende Ergebnisse. Das Problem war auch deshalb relevant, weil sich etwas Ähnliches in Ferromagneten zeigte: Sie sind nur unterhalb einer charakteristischen Temperatur magnetisch. Ausschlaggebend ist hier der Spin der Elektronen, also eine mikroskopische Eigenschaft – die aber großen Einfluss auf die Magnetisierung des gesamten Körpers hat.

Wilson entwickelte ein unersetzliches Werkzeug bei der Beschreibung des Mikrokosmos

Der Amerikaner entwickelte schließlich eine elegante Strategie für solche Situationen: Als Beobachter entfernt man sich Schritt für Schritt von dem System, das man beschreiben will. Die räumliche Auflösung wird dadurch laufend geringer, wodurch Details wie die molekulare Struktur von Wasser oder die Spins der Elektronen nach und nach verschwinden.

Bei jedem dieser Zoomschritte notiert man, wie sich die Parameter des Systems verändern. Als Nächstes konstruiert man ein vereinfachtes, »renormiertes« Model mit weniger Tiefenschärfe, das zur Basis des nächsten Zoomschritts wird. Auf diese Weise verlieren Systeme, die sich über viele Größenordnungen erstrecken, plötzlich ihren Schrecken. Und vor allem erkennt man, welche Parameter über viele Größenordnungen hinweg relevant bleiben. Meist sind das nur sehr wenige, bei kritischem Wasser beispielsweise die Stärke der Wechselwirkungsenergie zwischen zwei Molekülen sowie die Temperatur. Generell kann man verschiedene Skalen mit Wilsons Verfahren aber getrennt betrachten und mit jeweils eigenen Gleichungen beschreiben.

Heute bezeichnen Experten die Technik als »Renormierungsgruppe« – und betrachten sie als unersetzliches Werkzeug bei der Beschreibung des Mikrokosmos. Denn

es hat sich gezeigt: Mit ihr lässt sich nicht nur die elektromagnetische Kraft deutlich eleganter renormieren, als das Feynman und Kollegen in den 1940er Jahren gelungen war. Physiker bekamen auch den Einfluss der Vakuumfluktuationen auf die schwache und die starke Kernkraft in den Griff.

Konkret konstruierten sie »effektive« Quantenfeldtheorien für jede der Wechselwirkungen. Sie gelten jeweils nur bis zu einem bestimmten Minimalabstand zwischen Teilchen beziehungsweise bis zu einer bestimmten kleinsten Größenordnung. Dank der Renormierungsgruppen-Technik fließen die relevanten Beiträge kleinerer Skalen dennoch mit ein, große Verfälschungen durch besonders energiereiche virtuelle Teilchen kleinerer Größenordnungen klammert man damit aber aus.

Λ markiert in Wilsons Formalismus die Grenze, ab der die Formeln einer effektiven Theorie nicht mehr gültig sind. Das griechische Symbol steht für die größtmögliche Energie, die sich virtuelle Teilchen aus dem Vakuum borgen können. Die Energie ist in der Teilchenphysik generell ein Maß für die Größenordnung beziehungsweise die Reichweite der Kräfte zwischen Teilchen; je größer die Energie, mit der Teilchen in Beschleunigern kollidieren, desto näher kommen sie sich (siehe »Die Grenzen des Messbaren«, rechts).

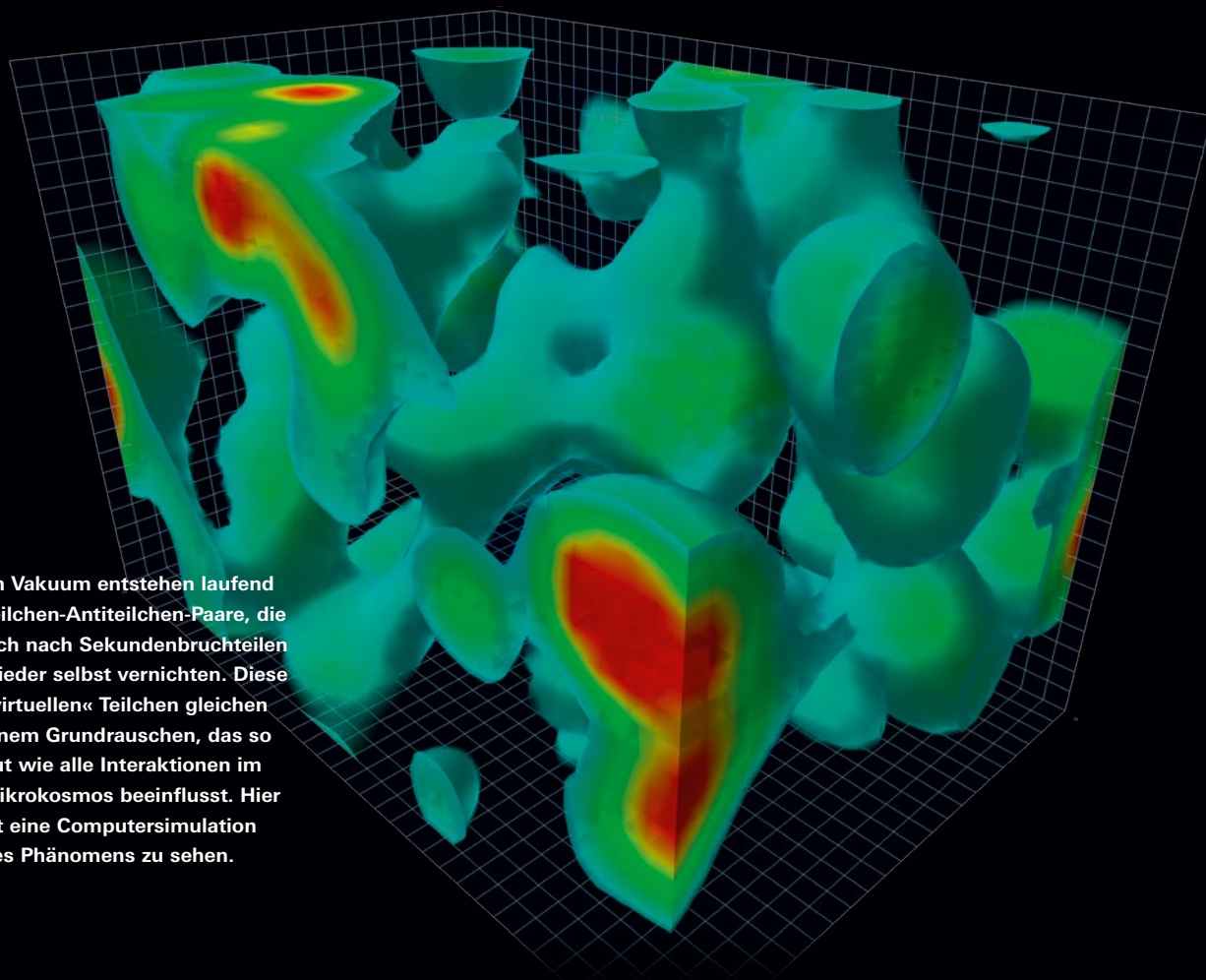
Bei der Renormierung der Wechselwirkungen im Standardmodell wurde deutlich, dass sich die Stärke der drei Grundkräfte mit dem Abstand verändert (siehe Grafik

S. 30). Daneben verändern die virtuellen Teilchen die Massen der langlebigen Partikel, und zwar um einen Wert, der von Λ abhängt. Das ist in der Regel unproblematisch, denn bei den allermeisten Teilchen fließt der Wert von Λ nur in logarithmischer Form ein. Anschaulich gesprochen: Selbst wenn sich ein virtuelles Teilchen viel Energie aus dem Vakuum leiht, bleibt der Einfluss auf die Masse des Teilchens überschaubar.

Wilson's Verfahren hatte auch in der Festkörperphysik überwältigenden Erfolg. Insgesamt hat es die Physiker in dem Glauben bestärkt, dass die Natur »emergent« ist: Demnach sollte es möglich sein, die bei großen Abständen gültigen Naturgesetze aus denen kleinerer Distanzen herzuleiten. Aus der Dynamik der Quarks sollten also im Prinzip die Eigenschaften von Protonen hervorgehen, daraus wiederum die von Atomkernen, daraus die von ganzen Atomen – und schließlich lässt sich mit Chemie und Thermodynamik die Brücke zu makroskopischen Phänomenen schlagen.

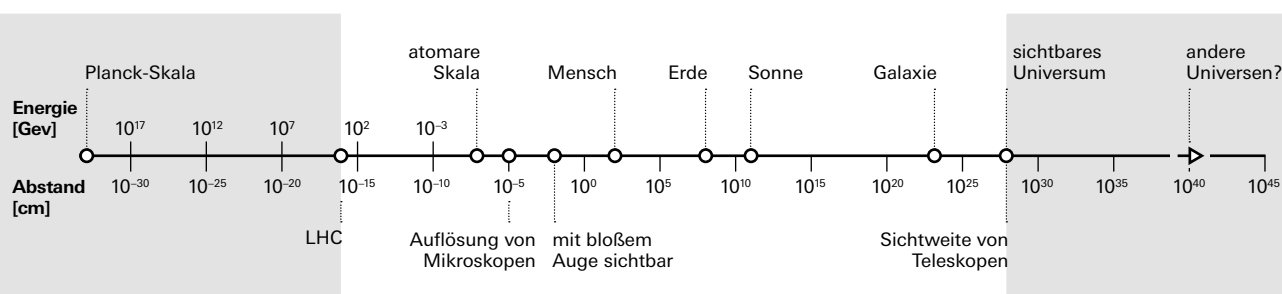
Andererseits spielen die Prozesse auf kleineren Skalen keine große Rolle mehr, wenn man aus dem Mikrokosmos herauszoomt – und hier kommt das ins Spiel, was Physiker »Natürlichkeit« nennen. Ein Modell gilt nach Auffassung der meisten Physiker dann als natürlich, wenn die Abläufe auf einer bestimmten Skala nicht allzu empfindlich auf das reagieren, was bei viel kleineren Abständen vor sich geht. »Wenn ich beschreiben will, wie sich der Mond um

Im Vakuum entstehen laufend Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich nach Sekundenbruchteilen wieder selbst vernichten. Diese »virtuellen« Teilchen gleichen einem Grundrauschen, das so gut wie alle Interaktionen im Mikrokosmos beeinflusst. Hier ist eine Computersimulation des Phänomens zu sehen.



Die Grenzen des Messbaren

Menschen können die Natur auf vielen Größenordnungen erforschen (weißer Bereich): Mit Teleskopen schauen sie weit ins Weltall hinaus. Und mit Teilchenbeschleunigern feuern sie Atomkerne mit vielen Gigaelektronvolt (GeV) aufeinander, wodurch sie die Interaktionen der Materie bei winzigen Abständen erforschen können. Viele Theorien der modernen Physik spielen sich aber auf unerreichbaren Skalen ab (grauer Bereich).



die Erde dreht, muss ich nicht im Detail wissen, wie Quarks in Atomkernen zusammenspielen«, sagt der Physiker Michael Krämer von der RWTH Aachen. Dieser Gedanke, dass weit entfernte Größenordnungen voneinander »entkoppelt« sind, ziehe sich durch die gesamte Physik.

Tatsächlich haben Thomas W. Appelquist und James J. Carazzone 1975 sogar ein Theorem bewiesen, das diese Einsicht für wilsonsche Quantenfeldtheorien zur Gesetzmäßigkeit erhebt. An und für sich steht das Standardmodell in überwältigendem Einklang mit der Forderung nach Natürlichkeit: Wenn man den Mikrokosmos als Stapel übereinandergeschichteter, effektiver Quantenfeldtheorien begreift, beschreibt das Regelwerk fast alle bisher beobachteten Begegnungen zwischen Elementarteilchen mit beeindruckender Präzision.

Beim Higgs-Teilchen liefert Wilsons Renormierung ein kurioses Ergebnis

Aber ausgerechnet beim Higgs-Teilchen, dem krönenden Abschluss des Standardmodells, führt Wilsons Renormierungsverfahren zu einem kuriosen Widerspruch. Hier hängt die Größe der erlaubten Vakuumkorrekturen, die auf die Masse einwirken, nicht vom Logarithmus von Λ ab, sondern von Λ^2 , wie die entsprechende Herleitung zeigt. Virtuelle Teilchen, die sich viel Energie aus dem Vakuum leihen, sollten daher die Masse des berühmten Partikels viel stärker nach oben treiben als bei anderen Teilchen. Sie müssten das Higgs eigentlich so schwer machen, dass es am LHC gar nicht erst auftauchen dürfte – was im Vorfeld der Experimente an dem Genfer Beschleuniger auch eine viel diskutierte Möglichkeit war.

Die Entdeckung im Jahr 2012 machte dann jedoch klar: Das Higgs bringt 125 Gigaelektronvolt (GeV) auf die Waage – das entspricht der Masse von 133 Wasserstoffatomen. Die nach Wilsons Renormierungsgruppe zulässigen Quantenkorrekturen müssten ihm jedoch eigentlich eine Masse zwischen 100 000 000 und 1 000 000 000 000 000 000 GeV geben.

Wie groß die Diskrepanz genau ist, hängt davon ab, bis zu welcher Minimallänge (beziehungsweise Maximalenergie) das Standardmodell gültig ist. Das weiß bisher niemand. Nicht wenige Physiker halten es jedoch für möglich, dass ihr Regelwerk den Mikrokosmos bis zur winzigsten aller Größenordnungen korrekt beschreibt, der so genannten Planck-Skala bei 10^{-35} Metern. Spätestens bei diesem Abstand müsste auch die Gravitationskraft so stark wie die Quantenkräfte werden, vermuten Forscher. Das spräche dann dafür, dass die in Gigaelektronvolt ausgedrückte Higgs-Masse 19 Stellen haben sollte und nicht nur drei.

Aber wieso hat sie in Wahrheit nur einen winzigen Bruchteil des Werts, den Wilsons Formalismus nahelegt? Einige Physiker glauben, dass einfach nicht jede Facette der Quantenfeldtheorie eine Entsprechung in der Wirklichkeit findet. Real ist schließlich nur das, was in Messungen auftaucht, in diesem Fall also die gemessene Higgs-Masse. Warum sollte man sich zu viele Gedanken über etwas machen, was man gar nicht beobachten kann?

Diese Haltung lässt allerdings die Frage offen, warum Quantenkorrekturen überall sonst einen messbaren Einfluss haben, nur beim Higgs-Teilchen nicht. Die meisten Forscher favorisieren daher eine andere, deutlich spannendere Erklärung: Etwas gleicht die Energieschwankungen des Vakuums, die in der Quantenfeldtheorie auftauchen, zielgenau aus – und sorgt damit dafür, dass das Higgs-Feld die am LHC gemessenen Eigenschaften hat.

Doch was könnte das sein? Und wieso kompensiert es die Fluktuationen dann gerade so, dass die Higgs-Masse in den Bereich fällt, in dem auch sämtliche anderen bekannten Teilchen und Felder liegen? Warum ist das Teilchen nicht 1000-mal oder eine Million Mal so schwer?

Für den Großteil der Experten ist diese »Feinabstimmung« (englisch: finetuning) entweder ein riesiger Zufall, in etwa so wahrscheinlich wie ein Bleistift von der Länge unseres Sonnensystems, der für alle Ewigkeit auf seiner einen Millimeter breiten Spitze balanciert. Oder aber die

Higgs-Masse ist ein Hinweis auf bisher unbekannte Naturgesetze. In jedem Fall verstößt das Standardmodell damit ganz erheblich gegen das Natürlichkeitsprinzip: Der genaue Wert der Higgs-Masse scheint sehr empfindlich von etwas abzuhängen, was auf einer viel kleineren, weit entfernten Größenordnung stattfindet.

In den vergangenen 40 Jahren hat es nicht an eleganten Ideen zur Lösung des Problems gemangelt. Ende der 1970er Jahre schlug Leonard Susskind eine Theorie namens »Technicolor« vor, die das Standardmodell ab Abständen von 10^{-19} Metern, wie sie der LHC erreicht, ablösen sollte. Ihr zufolge ist das Higgs-Teilchen aus mehreren quarkähnlichen Teilchen zusammengesetzt, welche die Masse des berühmten Partikels gegenüber Einflüssen von Vakuumkorrekturen auf kleineren Abständen abschirmen würden.

Auch die »Supersymmetrie« fand viele Anhänger, weil sie die Natürlichkeit des Standardmodells wiederherstellen würde. Das Theoriegebäude sieht zu jedem bekannten Elementarteilchen einen bisher unbekannten Partner vor. Diese Spiegelbilder würden ganz eigene Vakuumfluktuationen im Higgs-Feld auslösen, die jene der bekannten Teilchen gerade kompensieren. Die Vakuumfluktuationen sollten damit nicht mehr nennenswert zur Masse des Higgs beitragen.

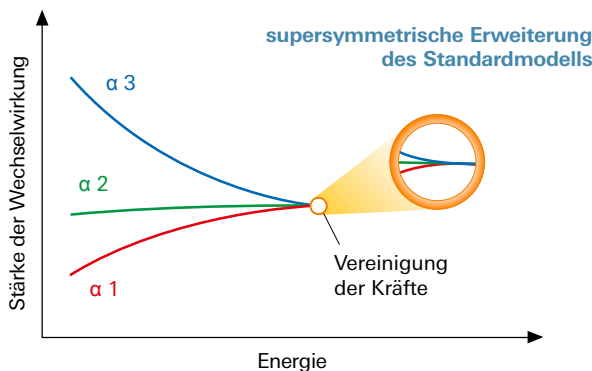
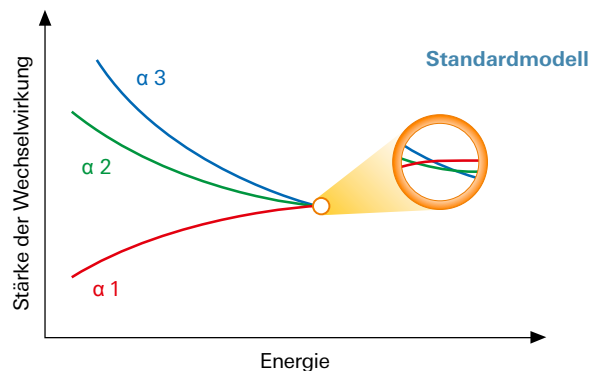
Ein netter Nebeneffekt: Die zusätzlichen virtuellen Teilchen würden die Stärke der Wechselwirkung bei kleinen Größenordnungen gerade so verändern, dass diese bei winzigen Abständen gleich stark sind (siehe Grafik rechts). Die Vorhersage galt lange als wichtiger Hinweis darauf, dass auf der kleinsten aller Größenordnungen eine »Theorie von allem« oder Weltformel gilt, die auch die Gravitation umfasst und aus der sich alle bekannten Naturgesetze ableiten lassen.

Am LHC sind allerdings bisher weder Hinweise auf die Technicolor noch auf supersymmetrische Partnerteilchen aufgetaucht. Die Technicolor ist dadurch aus Sicht der meisten Forscher so gut wie ausgeschlossen. Der Gedanke einer Supersymmetrie ist zwar so weit gefasst, dass hier noch Varianten denkbar sind. Für viele Wissenschaftler sind sie aber nicht mehr so reizvoll, wie es die bereits falsifizierten Varianten waren.

Das Morgengrauen der Nach-Natürlichkeits-Ära

Momentan sieht das Standardmodell also herzlich unnatürlich aus – und eine Lösung ist nicht in Sicht. Gian Francesco Giudice, der führende theoretische Physiker des CERN und damit eine der größten Autoritäten der Teilchenphysikergemeinschaft, rief 2017 in einem Aufsatz sogar das »Morgengrauen der Nach-Natürlichkeits-Ära« aus. Für viele Experten kam das einer Zeitenwende gleich. Nun streiten sie: Sollte man nach einem anderen Kitt à la Supersymmetrie suchen, um die Natürlichkeit doch noch zu retten? Oder haben die Natur und die Physiker einfach unterschiedliche Vorstellungen davon, was natürlich ist?

Die eingangs erwähnte Konferenz in Aachen sollte Fortschritte in diesen Fragen bringen. Sie war der erste von mehreren Workshops eines interdisziplinären DFG-Projekts namens LHC Epistemology, in dem Physiker gemeinsam mit Philosophen auf den Erkenntnisgewinn



$\alpha 3$ = starke Wechselwirkung
 $\alpha 2$ = schwache Wechselwirkung
 $\alpha 1$ = Elektromagnetismus

Wenn man Atomkerne mit höherer Energie aufeinanderfeuert, verändert sich die Stärke der Kräfte, die zwischen Materiebausteinen wirken. Laut Supersymmetrie müssten drei der Wechselwirkungen ab einer gewissen Energie gleich stark werden.

am LHC blicken und den sich abzeichnenden Wandel der Teilchenphysik analysieren wollen (siehe **Spektrum** August 2017, S. 19). Bei den Diskussionen auf der Konferenz wurde deutlich, wie orientierungslos die Wissenschaftler momentan sind – und wie weit die Meinungen auseinandergehen. »Ich bin die ganze Zeit hin- und hergerissen, wie groß das Problem wirklich ist«, sagte etwa Holger Gies nach seinem Vortrag.

Andere Teilnehmer vertraten klarere Standpunkte. Einige argumentierten, dass die Teilchenphysik im Grunde gar kein Problem hat, zumindest noch nicht. Das bisherige Ausbleiben supersymmetrischer Partikel sage wenig darüber aus, wie wahrscheinlich die verbliebenen Varianten der Supersymmetrie seien, argumentierte etwa der US-amerikanische Physiker James Wells von der University of Michigan. »Die Supersymmetrie könnte das Natürlichkeitsproblem nach wie vor mindern«, sagt er. Man solle die Lage also bitte nicht überdramatisieren und abwarten.

Allerdings können die noch nicht ausgeschlossenen Varianten der Supersymmetrie die Vakuumkorrekturen nicht mehr punktgenau aufheben. Die neuen Partikel, sofern es sie wirklich gibt, müssen deutlich schwerer als die bekannten Materiebausteine sein – sonst wären sie ja am LHC oder an anderen Teilchenbeschleunigern aufge-

taucht. Damit bleibt aber in jedem Fall ein Unterschied von ein paar Größenordnungen zwischen Erwartung und Messung der Higgs-Masse. Physiker wie Wells könnten damit wohl leben. Andere Forscher sehen hier jedoch eine zentrale Schwäche des Natürlichkeitsarguments: Wie weit dürfen sich gegenseitig beeinflussende Größenordnungen in einer Theorie auseinanderliegen, damit sie noch natürlich ist? Ist der Faktor 1000 in Ordnung? Oder wird ein Modell erst ab vier oder mehr Größenordnungen unnatürlich?

Die Entdeckung der Unnatürlichkeit

Wirklich einig sind sich die Physiker in dieser Frage nicht. Manchem dürfte noch die Aussage des einflussreichen US-Physikers Nima Arkani-Hamed in den Ohren klingen, der 2013 den Spruch prägte, eine Theorie könne genauso wenig ein »bisschen feinabgestimmt« sein, wie jemand nur ein »bisschen schwanger« sei.

Arkani-Hamed und andere Forscher sind nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens dazu übergegangen, Erweiterungen des Standardmodells zu entwerfen, die bewusst »unnatürlich« sind, also gar nicht mehr versuchen, die Vakuumkorrekturen aus der Quantenfeldtheorie zu kompensieren. »Vor einigen Jahren hätte man solche Aufsätze noch nicht wirklich ernst genommen, nun ziehen sie viel Aufmerksamkeit auf sich«, sagt Michael Krämer.

Cheftheoretiker Giudice hat sich dafür stark gemacht, nicht mehr ganz so viel Wert auf das Natürlichkeitsprinzip zu legen, es aber auch nicht völlig aus den Augen zu verlieren. Vor den LHC-Experimenten gehörte er noch zu jenen, die den unschönen Makel des Standardmodells unbedingt beseitigen wollten. »Wir sehen uns mit einer Situation konfrontiert, in der wir unsere Leitmotive überdenken müssen«, schreibt er nun. Letztlich seien Phasen der Neuorientierung fester Teil der Wissenschaft und nicht zwangsläufig etwas Schlechtes. In der Vergangenheit gingen sie oft einem Paradigmenwechsel voraus. »Uns fehlt heute einfach die historische Perspektive, um durch den Nebel der gegenwärtigen Verwirrung hindurchzuschauen.«

Das kann man für optimistisch halten. Für Sabine Hossenfelder vom Frankfurt Institute for Advanced Studies zeigt die aktuelle Situation, dass sich die Physiker jahrzehntelang in die Tasche gelogen haben: »Das Natürlichkeitsargument war von vornherein unsinnig«, sagt sie. Es habe sich in erster Linie um eine Mode gehandelt, die lange nicht hinterfragt wurde. »Dass die Higgs-Masse eine Erklärung braucht, ist eher ein Gefühl als ein Fakt.«

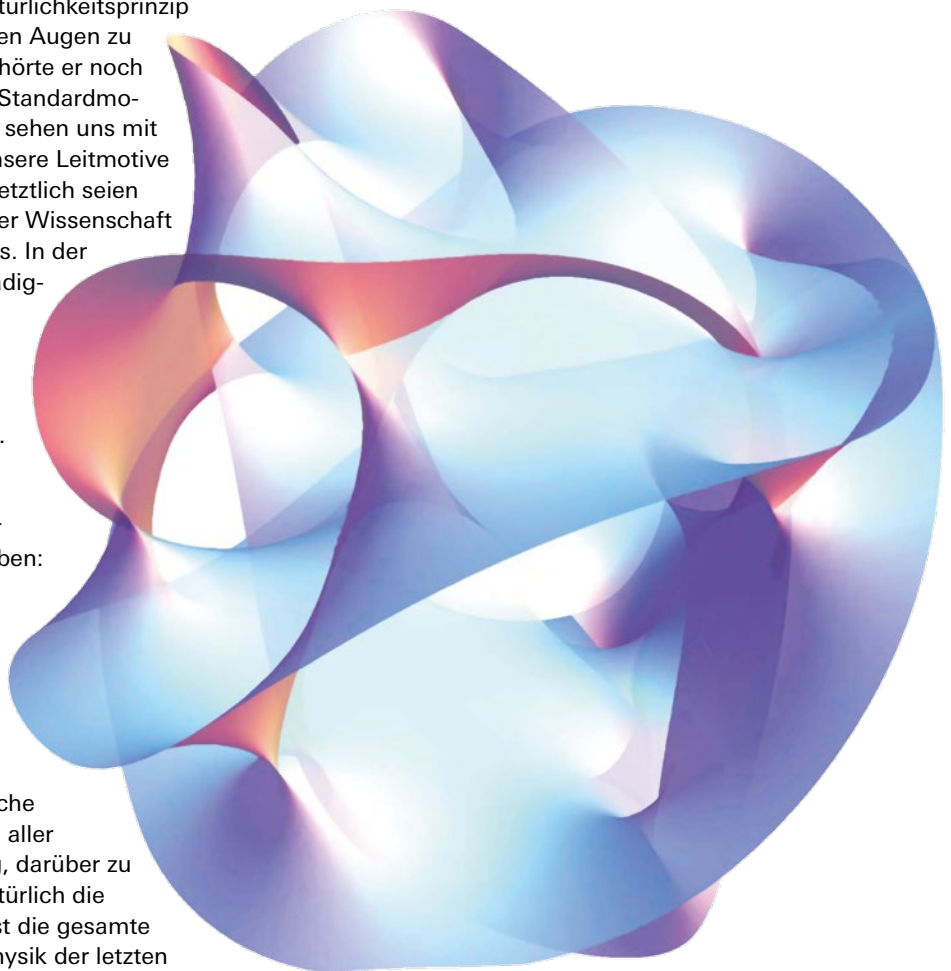
Da man schlichtweg nicht wisse, welche physikalischen Gesetze auf der kleinsten aller Größenordnungen gelten, sei es hinfällig, darüber zu spekulieren, wie wahrscheinlich oder natürlich die heute gemessene Higgs-Masse sei. »Fast die gesamte Theorieentwicklung in der Grundlagenphysik der letzten

30 Jahre basiert daher auf einem logischen Fehlschluss«, sagt die Frankfurterin.

Arthur Hebecker sieht das anders. Das Natürlichkeitsargument habe zu Recht eine große Bedeutung gehabt, sagt der Stringtheoretiker von der Universität Heidelberg. Aus seiner Sicht sollte es auch künftig eine Rolle bei der Suche nach neuer Physik spielen. »Es ist zu früh, um zu sagen, die Welt ist nicht natürlich.« So müsse man in jedem Fall die weiteren Daten des LHC abwarten. Dieser wird bis mindestens in die 2020er Jahre hinein weiter Atomkerne kollidieren lassen und kann so vielleicht doch noch Abweichungen vom Standardmodell aufspüren.

Hebecker und andere Stringtheoretiker diskutieren seit Längerem eine spektakuläre wie spekulative Lösung für das Natürlichkeitsproblem: Im Urknall könnte nicht nur unser Universum entstanden sein, sondern unvorstellbar viele Welten. Welten, in denen jeweils andere Naturgesetze gelten. So sieht es zumindest das bereits in den 1980er Jahren entwickelte Konzept der »ewigen Inflation«

Laut Stringtheorie besteht die Realität aus zehn Dimensionen, von denen jedoch sechs aufgerollt und damit »unsichtbar« sind. Mit so genannten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten können Physiker ausloten, auf wie viele Arten sich die Extra-dimensionen verknoten ließen.



JBOURJAI (COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WWW.FILECALABI_YAU.JPG) / PUBLIC DOMAIN

vor. Demnach ploppen laufend neue Universen aus dem Nichts auf, die sich zügig voneinander entfernen – wie Luftblasen in einem Wasserglas, in das jemand eine Brausetablette geworfen hat.

Seit 15 Jahren erhält dieser Gedanke Auftrieb durch die Stringtheorie, die eine schier grenzenlose Landschaft von rund 10^{500} möglichen Raumzeit-Geometrien mit jeweils eigenen Naturgesetzen vorhersagt – das legen zumindest grobe Abschätzungen nahe. Bislang ist es den Forschern jedoch nicht gelungen, unter all diesen mutmaßlichen Welten diejenige zu finden, in der wir leben, weshalb mancher Wissenschaftler den Bezug der Stringtheorie zur Realität anzweifelt.

Sollten wir tatsächlich in einem »Multiversum« leben, würde sich das Natürlichkeitsproblem in Luft auflösen: Dann wäre unser Universum gerade jenes, in dem die Higgs-Masse den von uns gemessenen Wert hat. Die Notwendigkeit für einen großen kosmischen Zufall oder eine Erklärung durch neue Naturgesetze entfiel, da letztlich alle denkbaren Higgs-Massen in irgendeinem Universum verwirklicht wären. Diese »anthropische« Sichtweise ist allerdings denkbar unbeliebt. Schließlich erhält damit gewissermaßen Beliebigkeit Einzug in das Weltbild der Forscher. Auch ist derzeit offen, inwieweit man Theorien wie die Stringtheorie und die eines Multiversums experimentell testen kann.

Schon einmal hat das Natürlichkeitsargument dabei geholfen, neue Phänomene zu entdecken

Die winzigen Fäden (englisch: »strings«), aus der die Welt im Kern bestehen soll, würden erst bei der Planck-Länge von 10^{-35} Metern in Erscheinung treten. Um diese Größenordnung sichtbar zu machen, bräuchte man einen Teilchenbeschleuniger vom Ausmaß unserer Galaxie, wie Schätzungen zeigen. Und andere Universen wären längst viel zu weit von unserer Welt entfernt, als dass wir Signale von ihnen empfangen könnten. Anhänger des Konzepts sehen darin nur bedingt eine Schwäche: Kann man es einer Theorie wirklich zum Vorwurf machen, fragen sie, dass wir Menschen sie nicht ohne Weiteres überprüfen können?

»Das Multiversum läuft jedenfalls darauf hinaus, das ursprüngliche Konzept der Natürlichkeit aufzugeben«, sagt der Wissenschaftsphilosoph Porter Williams von der University of Pittsburgh. Der junge Assistenzprofessor gehört zu einer Gruppe von physikalisch geschulten Geisteswissenschaftlern, die seit einigen Jahren mit verstärktem Interesse auf die Arbeit der Teilchenphysiker blicken.

In einem Aufsatz hat er untersucht, was Physiker eigentlich meinen, wenn sie von Natürlichkeit reden. Williams zufolge haben sich hier über die Jahrzehnte mehrere teils missverständliche Deutungen etabliert. Bei genauerer Betrachtung ließen sich jedoch alle auf das Unbehagen über die Vorstellung zurückführen, dass einige physikalische Prozesse von Details bei viel kleineren Abständen beeinflusst werden. Demnach sei die Natürlichkeit auch weit mehr als eine Mode oder ein Schönheitskriterium, argumentiert er. Sie stehe vielmehr bis heute völlig zu Recht im Zentrum der Teilchenphysik: »Ich halte es für

zwingend, sie als ein ernsthaftes physikalisches Problem zu betrachten, nach dessen Lösung man suchen sollte.«

So gebe es in der Geschichte der Disziplin mehrere Beispiele dafür, wie scheinbar unnatürliche Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größenordnungen Hinweise auf neue Naturphänomene enthielten, zumindest in der Rückschau. Und einmal diene die Natürlichkeit sogar dazu, eine Eigenschaft der Natur vorherzusagen.

Bevor 1974 das Charm-Quark entdeckt wurde, fiel Physikern bereits auf, dass die Massen von zwei Typen von Kaonen (aus Quarks zusammengesetzte Teilchen des Standardmodells) sehr viel näher beieinanderliegen, als die hier gültige effektive Quantenfeldtheorie vorhersagte. Mary K. Gaillard und Benjamin W. Lee argumentierten damals, dass die Wechselwirkung mit einer zusätzlichen Quarkvariante mit einer Masse von rund 1,5 Gigaelektronvolt den Messwert auf den unnatürlich kleinen Wert drücken könnte. Sie kamen damit der Realität sehr nahe, wie sich wenig später zeigte: Das Charm-Quark hat eine Masse von knapp 1,3 GeV, und es liefert eine elegante Erklärung für die Massendifferenz der Kaonen.

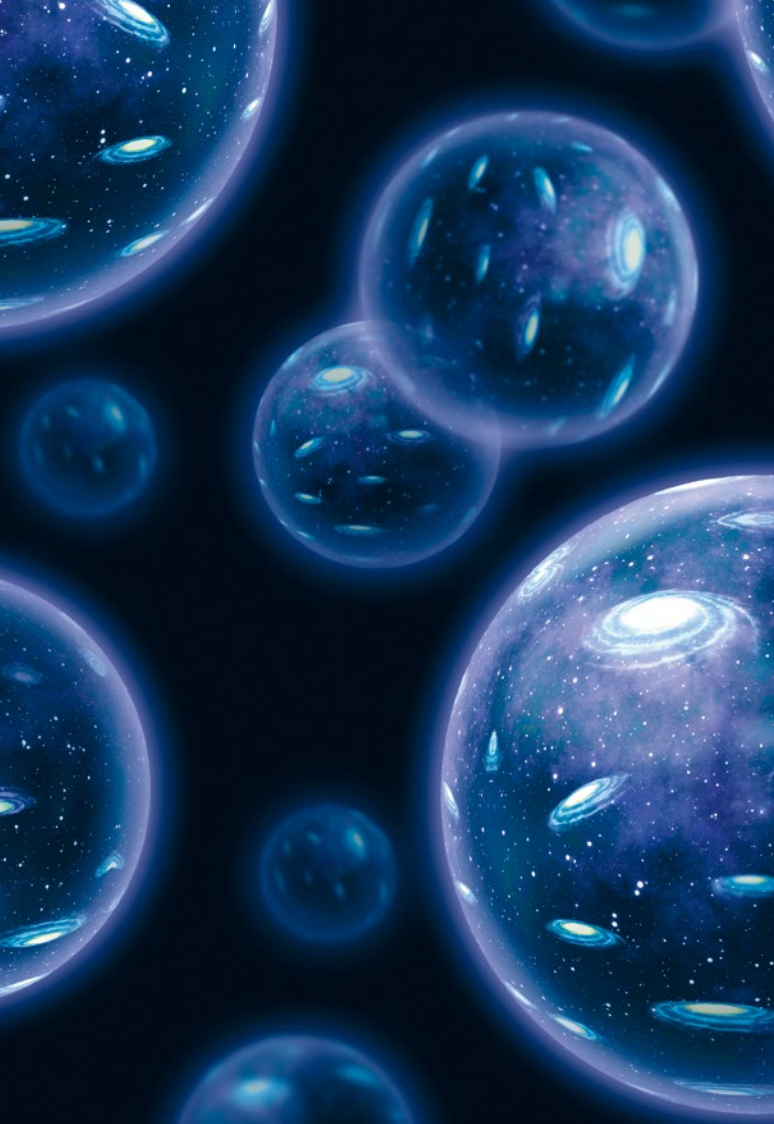
Williams hat sich bei seiner wissenschaftlichen Recherche auch darüber gewundert, wie unkritisch Physiker dem mathematischen Formalismus des Standardmodells vertrauen. Das könnte sie blind dafür machen, dass man nun neue Kniffe bei der Beschreibung des Mikrokosmos braucht, gibt der Wissenschaftsphilosoph zu bedenken: »Das Natürlichkeitsproblem ist womöglich nur eine Eigentümlichkeit von effektiven Feldtheorien.«

In ein ähnliches Horn bläst sein Kollege Alexei Grinbaum vom Kernforschungszentrum CEA in Saclay bei Paris. »Es könnte ein Signal sein, dass wir uns nach anderen mathematischen Werkzeugen umschauen sollten.« Soll heißen: Die rätselhaften Vakuumkorrekturen, welche die Masse des Higgs-Teilchens in absurde Höhen treiben sollten, könnten nicht mehr als mathematischer Abfall ohne Bezug zur Wirklichkeit sein.

Noch bis vor wenigen Jahren reagierten viele Physiker allergisch auf solche Einwände. Sie gingen in erster Linie darauf zurück, spotteten sie, dass jemand die Renormierung nicht richtig verstehe. Seit der Entdeckung des Higgs-Teilchens und dem Ausbleiben von Belegen für die Supersymmetrie sind solche Zweifel jedoch salonfähig geworden. »Vielleicht haben wir den Punkt erreicht, an dem unser Bild der Natur als Haufen effektiver Feldtheorien zusammenbricht«, schrieb CERN-Cheftheoretiker Giudice nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens.

Provokanter formulierte es jüngst der angesehene und für klare Worte bekannte Teilchenphysik-Blogger Adam Falkowski: Die Quantenfeldtheorie werde oft ähnlich gelehrt wie Magie in Hogwarts, dem Zauberer-Internat aus dem Harry-Potter-Universum. »Man folgt blind und stur den Anleitungen aus staubigen Büchern, ohne wirklich den Sinn oder die Bedeutung zu verstehen.«

Immerhin experimentieren Physiker wieder verstärkt mit mathematischen Konzepten, die lange eher in der Abstellkammer lagen, etwa einem Formalismus namens S-Matrix, der in den 1940er Jahren von Werner Heisenberg mitentwickelt wurde. Andere Forscher versuchen, Quan-



**Eine mögliche Lösung für das Natürlichkeitsproblem:
Gibt es neben unserem noch unzählige andere
Universen mit jeweils eigenen Naturgesetzen?**

tenfeldtheorien zu entwickeln, die nicht mehr auf die wilsonsche Renormierung angewiesen sind und in denen es völlig normal ist, wenn sich physikalische Prozesse über viele Skalen hinweg beeinflussen.

Über all dem schwebt die Hoffnung, die Natürlichkeit doch noch zu retten – also physikalische Mechanismen zu finden, mit denen das Universum Vakuumfluktuationen im Higgs-Feld unterdrückt. Und dafür mangelt es nicht an Ideen. Ein beliebtes Modell sieht beispielsweise vor, dass es nach dem Urknall ein weiteres unsichtbares Energiefeld gab, das direkt mit dem Higgs-Feld in Wechselwirkung trat. Dieses Relaxonen-Feld könnte anfangs wild hin und her gesprungen sein und hätte das Higgs-Feld dann auf den Wert gedrückt, den wir heute sehen, spekulierte ein Team um Peter W. Graham von der Stanford University 2015.

Holger Gies und andere Forscher versuchen dagegen eine Quantenfeldtheorie zu entwickeln, die auch die Schwerkraft mit einbindet. Eigentlich scheitern bei Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie bislang sämtliche Versuche einer Renormierung. Das ist formell einer der

Hauptgründe, warum die Suche nach einer Theorie von allem so schwierig ist. Theorien mit der Eigenschaft der »asymptotischen Sicherheit« umschiffen dieses Problem und könnten sich langfristig vielleicht zu einer Alternative zur Stringtheorie mausern. »Die Natürlichkeit wird so hart angegriffen, dass ich stark versucht bin, sie zu verteidigen«, sagte Gies zu seinen Kollegen in Aachen. »Wir schaffen es doch sicher, ein Modell zu bauen, das die bestehenden Probleme löst, oder?«

Wenn die Geschichte ein Indikator für die Zukunft ist, ist dies die Zeit, in der ein kühner Gedanke den Durchbruch bringt. Wer weiß, vielleicht ist es ja der, den der emeritierte Professor Fred Jegerlehner von der Humboldt-Universität zu Berlin auf der Tagung präsentierte und der in ähnlicher Form seit Jahren durch die Gelehrtenzimmer geistert.

Ein Phasenübergang am Anbeginn der Zeit

Demnach hätte das Higgs-Feld direkt nach dem Urknall, als Materie für einen Sekundenbruchteil so dicht zusammengeballt war, dass die Gesetze der Planck-Skala galten, ein eigentümliches Verhalten an den Tag gelegt: Dank der gewaltigen Energie aus dem Vakuum trieb es zunächst eine explosionsartige, wenige Sekundenbruchteile währende Expansion des Kosmos voran, die so genannte Inflation. Anschließend durchlief es einen Phasenübergang und fiel dadurch auf seinen heutigen Wert. In diesem Fall entfielen die Notwendigkeit für neue Teilchen oder Felder. Das Natürlichkeitsproblem wäre gar kein Problem, sondern ein Hinweis auf die Lösung – und das ganz ohne das unliebsame Multiversum.

Für manchen Besucher der Aachener Konferenz war das ein Vorschlag, der zu schön wirkte, um wahr zu sein. Aber niemand bestritt, dass Jegerlehner einen wichtigen Punkt berührte, der direkt verknüpft sein könnte mit der gegenwärtigen Krise: In der Kosmologie gibt es ebenfalls ein Natürlichkeitsproblem. Dort weicht die Expansionsgeschwindigkeit des Weltalls nicht bloß um ein gutes Dutzend Nullen von der Erwartung ab. Sie liegt um bis zu 122 Größenordnungen unter dem Wert, den man auf Basis der Energie aus allgegenwärtigen Quantenfeldern wie dem Higgs-Feld erwarten würde. Das Symbol, mit dem die Ausdehnung des Alls in den Gleichungen der Kosmologen auftaucht, ist ausgerechnet ein Λ . Auch deshalb wird der griechische Buchstabe die Physiker wohl noch eine ganze Weile beschäftigen. ◀

QUELLEN

Giudice, G. F.: The Dawn of the Post-Naturalness Era. In: Forte, S. et al. (Hg.): From My Vast Repertoire ... Guido Altarelli's Legacy. World Scientific 2018

Graham, P. W. et al.: Cosmological Relaxation of the Electroweak Scale. In: Physical Review Letters 115, 221801, 2015

Williams, P.: Naturalness, The autonomy of scales, and the 125 GeV Higgs. In: Studies in History and Philosophy of Modern Physics 51, S. 82–96, 2015

Wilson, K. G.: Renormalization Group – Critical Phenomena and Kondo Problem. In: Review of Modern Physics 47, S. 773–840, 1975