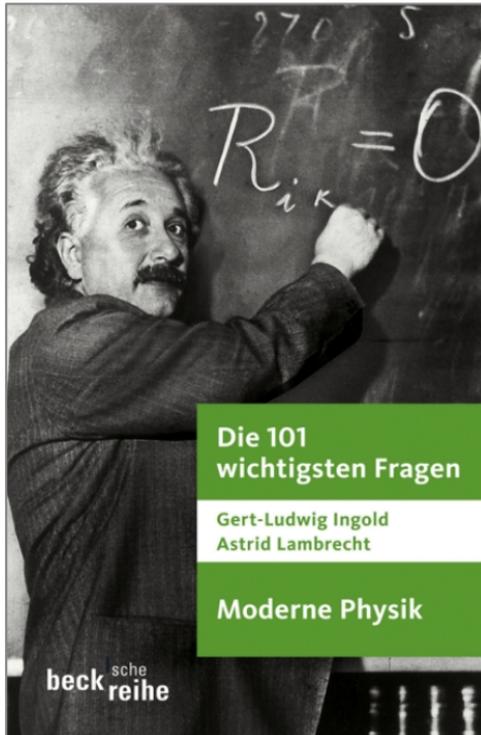


Unverkäufliche Leseprobe



Gert-Ludwig Ingold, Astrid Lambrecht
Die 101 wichtigsten Fragen – Moderne Physik

158 Seiten, Paperback
ISBN: 978-3-406-56803-9

Vorwort

Als Albert Einstein im Frühjahr 1955 starb, nahm William Miller dies zum Anlass, in dem Magazin *Life* über einen Besuch zu berichten, den er dem großen Physiker ein paar Monate zuvor abgestattet hatte. Millers Sohn, der mit nach Princeton gefahren war, bekam von Einstein den Rat mit auf den Weg: «The important thing is not to stop questioning.» – Wichtig ist es, nicht mit dem Fragen aufzuhören.

Diesen Rat möchten wir auch dem Leser auf seinen Weg durch die 101 Fragen mitgeben, deren Antworten einen Einblick in die moderne Physik geben sollen. Erschöpfend kann dieser Einblick nicht sein, da aus Platzgründen eine, natürlich subjektive, Auswahl getroffen werden musste. Zu einigen der Fragen ist die Antwort noch nicht bekannt, und so haben auch die Physiker noch längst nicht aufgehört, Fragen zu stellen.

Dabei hatte man schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts gedacht, die Physik sei im Wesentlichen zu einem Abschluss gekommen, und außer ein bisschen Detailarbeit sei eigentlich nichts mehr zu tun. Obwohl in den 300 Jahren seit Galileo Galilei Beeindruckendes geleistet worden war, täuschte man sich jedoch gewaltig. Im ersten Viertel des letzten Jahrhunderts fanden mehrere umwälzende Entwicklungen statt, die es rechtfertigen, ab diesem Zeitpunkt von der «modernen Physik» zu sprechen. Von ihr soll in diesem Band die Rede sein.

Die moderne Physik entführt uns in Welten jenseits unserer alltäglichen Erfahrung, in den Mikrokosmos, zu extremen Geschwindigkeiten und in die Weiten des Universums. Dass dort die eine oder andere Überraschung auf uns wartet, macht die Entdeckungsreise manchmal zu einer Herausforderung, dafür aber auch umso interessanter.

Zunächst werden wir uns der Quantenphysik zuwenden, die sich mit der Welt im Kleinen beschäftigt. Sie bricht mit grundlegenden Vorstellungen wie der, dass sich Objekte entlang von bestimmten Bahnen bewegen. Gleichzeitig bildet sie die Grundlage vieler technischer Anwendungen, die heute aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken sind. Einige werden in den Abschnitten «Quan-

tenphysik» und «Anwendungen in der Festkörperphysik» angesprochen. In die Zukunft weisen die Fragen der Abschnitte «Nanophysik» und «Quanteninformation». Gerade Letztere zeigt, wie eine recht exotische Eigenschaft von Quantensystemen, die Verschränkung, vielleicht einmal nutzbar gemacht werden kann.

Einsteins spezielle und allgemeine Relativitätstheorie bescheren uns eine neue Vorstellung von Raum und Zeit. Das Tempolimit der speziellen Relativitätstheorie zwingt uns, die beiden zu einer vierdimensionalen Raumzeit zu vereinigen. Die allgemeine Relativitätstheorie führt die Gravitation auf eine Krümmung dieser Raumzeit zurück und gibt uns Gelegenheit, so exotische Objekte wie die schwarzen Löcher näher zu betrachten.

Der Abschnitt «Elementarteilchenphysik» führt gleich zu mehreren Extremen: den kleinsten Längen und den größten Energien, die sich im Labor untersuchen lassen. Zudem ist dies eine Reise in die Vergangenheit hin zu den Anfängen unseres Universums. Dieses ist auch Gegenstand des Abschnitts mit Fragen zur «Kosmologie».

Auf immerhin die Hälfte der Fragen im Abschnitt «Quantengravitation» werden wir keine abschließende Antwort geben. Niemand kann derzeit wirklich sagen, wie Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie zusammengeführt werden können und was in den allerersten Momenten unseres Universums geschah.

Aber nicht nur in exotischen Gefilden hat die Physik im 20. Jahrhundert Neuland betreten, und so kommen wir im letzten Abschnitt wieder im alltäglichen «Chaos» an, dessen Verständnis unter anderem durch die Entwicklung moderner Computer vorangekommen ist. Die alte, mechanistische Vorstellung, dass die Entwicklung der Welt im Grunde genommen vorausberechenbar ist, muss sich nun den Erkenntnissen der Chaostheorie stellen.

Zwischen den einzelnen Themenbereichen gibt es immer wieder Verknüpfungen. Damit Sie einen individuellen Weg durch die moderne Physik einschlagen können, haben wir im Text Wegweiser in Form von mit Fragennummern versehenen Pfeilen untergebracht. Wir wünschen Ihnen nun eine anregende Reise in die Welt der modernen Physik.

Paris und Augsburg, im September 2008

*Gert-Ludwig Ingold
Astrid Lambrecht*



Grundbausteine

1. Worin liegt die Schönheit der Physik? Vor allem in den vielen Symmetrien, die an den verschiedensten Stellen in der Physik auftreten. Allgemein

werden symmetrische Objekte, zum Beispiel eine Schneeflocke mit ihrer sechszähligen Symmetrie, wie sie in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist, als schön empfunden. Kristalle und Edelsteine verdanken ihre Schönheit mindestens zum Teil der Symmetrie ihrer Facetten. Auch ihr mikroskopischer Aufbau, also die Anordnung der Atome, gehorcht Symmetrieprinzipien. Abbildung 2 zeigt einen Blick in das Innere eines Kristalls.

Für die Schneeflocke in Abbildung 1 gibt es eine ganze Reihe von geometrischen Operationen, deren Resultat sich nicht von dem ursprünglichen Bild unterscheiden lässt. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn man die Schneeflocke einmal oder mehrmals um sechzig Grad um ihren Mittelpunkt dreht. Eine zweite Gruppe von Symmetrieoperationen besteht aus den Spiegelungen an den gestrichelten Linien. Dabei führt die Spiegelung an der senkrechten Linie den linken Teil der Schneeflocke genau in den ursprünglich rechten Teil über und umgekehrt. Schließlich kann man auch eine Punktspiegelung am Mittelpunkt der Flocke durchführen.

Doch nicht alle Symmetrieoperationen in der Physik finden im Ortsraum statt. Man kann zum Beispiel eine Spiegelung in der Zeit durchführen, wobei nicht links auf rechts abgebildet wird, sondern die Vergangenheit auf die Zukunft und umgekehrt. Damit wird allerdings nicht eine Reise in die Vergangenheit möglich. Physikalische



Abb. 1: Eine Schneeflocke besitzt eine ganze Reihe diskreter Symmetrien.

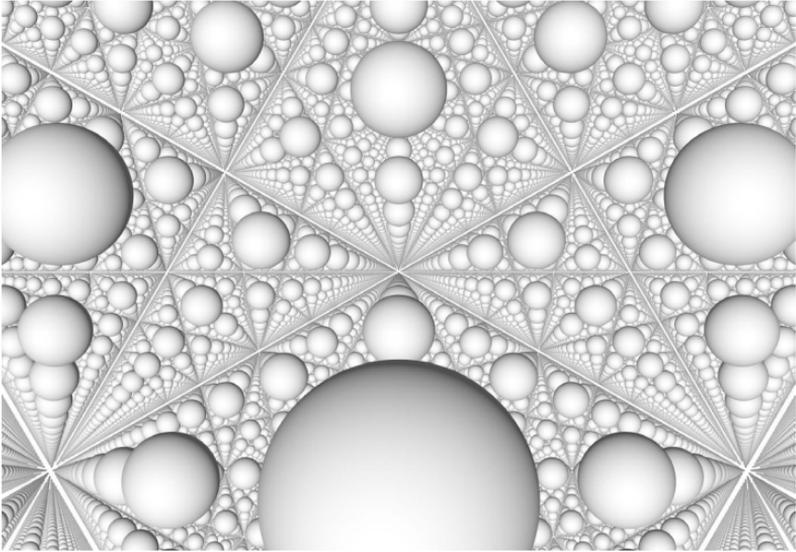


Abb. 2: Blick in das Innere eines Kristalls

Gesetze, die sich bei einer Zeitumkehr nicht ändern, lassen neben möglichen physikalischen Vorgängen auch deren umgekehrten Ablauf zu. Filmt man einen solchen Vorgang, so kann man beim Ansehen des Films nicht entscheiden, ob er vorwärts oder rückwärts läuft.

Neben Spiegelungen in Raum und Zeit gibt es auch Spiegelungen in abstrakten Räumen. In der Elementarteilchenphysik spielt die sogenannte Ladungskonjugation eine wichtige Rolle, bei der die Ladung eines Teilchens in das Negative dieser Ladung überführt wird. Damit wird aus einem Teilchen sein Antiteilchen.

Alle bis jetzt genannten Symmetrieoperationen nennt man diskret. Damit ist nicht der Gegensatz zu indiskret gemeint, sondern dass diese Symmetrieoperationen gegeneinander abgegrenzt sind. Man kann nicht ein klein bisschen mehr oder weniger spiegeln. Bei den Drehungen ist das anders. Man kann die Schneeflocke um mehr oder weniger als sechzig Grad drehen. Allerdings entsteht dabei ein anderes Bild.

Es gibt aber auch Fälle, in denen Drehungen eine kontinuierliche Symmetrie darstellen. Stellen wir uns eine Eisläuferin vor, die eine Pirouette dreht und von einer Kamera gefilmt wird, die auf einem Kreis um die Eisläuferin herum bewegt werden kann. An dem fil-

mischen Ergebnis kann man nicht entscheiden, wo auf dem Kreis die Kamera stand. Man kann den Standort der Kamera also um einen beliebigen Winkel um den Kreismittelpunkt drehen, auch um winzig kleine Winkel, ohne dass dies beim Ansehen des Films feststellbar wäre. Natürlich funktioniert dies nur bei einer idealisierten Eisfläche ohne Bande und Publikum.

Warum interessiert sich der Physiker nun so sehr für Symmetrien? Wenn es für einen physikalischen Vorgang gleichgültig ist, von welchem Ort oder aus welcher Richtung und zu welchem Zeitpunkt man ihn betrachtet, so muss die Form der mathematischen Gleichungen, die den Vorgang beschreiben, gewisse Anforderungen erfüllen, die benutzt werden können, um zu entscheiden, ob eine bestimmte Theorie richtig sein kann. Dies ist gerade bei der Entwicklung neuer Theorien wichtig.

Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass zu kontinuierlichen Symmetrien Erhaltungssätze gehören, wie die Mathematikerin Emmy Noether 1918 gezeigt hat. Dabei wird die Erhaltung der Energie, des Impulses und des Drehimpulses mit dem Verhalten unter kleinen zeitlichen und räumlichen Verschiebungen bzw. kleinen Drehungen verknüpft. Der Zusammenhang gilt auch in abstrakteren Räumen und ist dort besonders interessant, weil er in Bereichen wie der Elementarteilchenphysik, in denen unsere Alltagsanschauung versagt, die Verknüpfung von mathematischen Strukturen mit experimentell untersuchbaren Aussagen erlaubt. Symmetrien spielten und spielen daher unter anderem eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Theorie der Elementarteilchen.

2. Warum fällt eine Katze immer auf ihre Pfoten? Katzen können bekanntlich von Bäumen herunterfallen, ohne sich ein Haar zu krümmen. Selbst wenn eine Katze mit dem Rücken voraus fällt, schafft sie es, sich in der Luft herumzudrehen und auf ihren vier Pfoten zu landen und nicht auf dem Rücken, welches fatale Folgen hätte. Wir Menschen stellen uns meistens nicht so geschickt an. Aber wie macht die Katze das eigentlich? Sie kann sich ja schließlich nicht an der Luft festhalten, um sich herumzudrehen. Klar ist auch, dass eine Plüschkatze, die man an den Pfoten hält und dann auf den Boden fallen lässt, auf den Rücken fällt und keineswegs auf ihre Pfoten. Offenbar hat es also damit zu tun, dass eine lebende Katze ein beweglicher und kein starrer Körper ist.

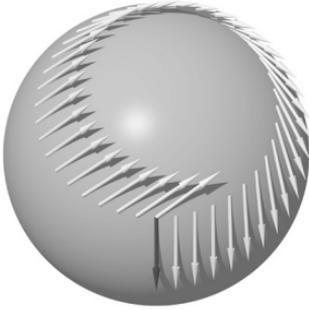


Abb. 3: Ein Pfeil, der auf einer Kugel parallel verschoben wird, kann am Ende in eine andere Richtung zeigen als zu Beginn.

Tatsächlich verändert die Katze ihren Körper während des Fluges auf beeindruckende Weise. Durch geschickte Ruder- und Drehbewegungen, bei denen ihre Wirbelsäule extrem verbogen wird, erreicht sie eine Horizontallage. Das erklärt auch, warum wir Menschen nicht ohne Weiteres einen solchen Sprung ausführen können. Untersucht hat dieses Phänomen unter anderem die NASA, die herausbekommen wollte, wie sich Astronauten in der Schwerelosigkeit herumdrehen können.

Auch wenn es sich hier um ein recht altes Problem handelt, hat die moderne Physik hierfür neue Betrachtungsweisen entwickelt. Um die Bewegung der Katze zu beschreiben, kann man Gesetzmäßigkeiten ausnutzen. Zum Beispiel ist es bemerkenswert, dass die Katze bei Absprung und Landung ungefähr die gleiche Körperhaltung hat, nur um 180 Grad verdreht. Macht man in beiden Situationen Fotos und mischt sie, kann man nicht mehr sagen, welches Foto den Absprung und welches die Landung zeigt. Eine solche Gesamtverdrehung, die keine weitere Veränderung verursacht und nur durch die Bewegung im Raum zustande kommt, nennt man Phase und unter bestimmten Bedingungen auch geometrische Phase.

Diese kann man sich mit Hilfe eines Pfeils veranschaulichen, den man auf einer Kugeloberfläche parallel verschiebt, so wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Hierbei wird die Phase durch die Richtung des Pfeils symbolisiert. Nach einem Umlauf um die Kugel kommt der Pfeil wieder an seine Ausgangsposition zurück, aber er hat sich beim Umlauf gedreht. Der Unterschied zwischen den beiden Pfeilausrichtungen ist eine geometrische Phase und entspricht dem Unterschied zwischen der Katze und der Plüschkatze bei ihrer Landung.

Geometrische Phasen kann man in der Quantenphysik direkt messen. Hierbei lässt man zwei Teilchen, zum Beispiel Elektronen oder Atome, unterschiedliche Wege durchlaufen, bei denen nur eines der Teilchen eine geometrische Phase erhält. Im Katzenbeispiel würde also ein Teilchen der lebenden Katze, das andere der Plüschkatze entsprechen. Bei der «Landung» lässt man beide Teilchen miteinander interferieren, das heißt, man überlagert sie. Bei diesem direkten Vergleich kann der Phasenunterschied sichtbar gemacht werden, zum Beispiel in Form von Interferenzmustern, wie sie auch bei Wasserwellen auftreten, wenn man zwei Steine an benachbarten Stellen ins Wasser wirft ¹⁶.

3. Was ist eigentlich megagroß? Wenn man sich für physikalische Phänomene jenseits unserer Alltagswelt interessiert, also in den Mikrokosmos oder aber in die Weiten des Weltalls vorstoßen möchte, so hat man es schnell mit Größen zu tun, die vom unvorstellbar Kleinen bis zum ebenso unvorstellbar Großen reichen. Der Physiker muss jedoch auch unvorstellbare Größen in Zahlen fassen und benutzt dazu gerne Zehnerpotenzen.

Wir wollen dies am Beispiel von Längen erläutern und betrachten dazu das Verhältnis von Meter, Kilometer und Zentimeter. Unter Verwendung von Zehnerpotenzen kann man sagen, dass ein Kilometer gleich 10^3 Meter ist. Der Exponent, also die 3, gibt an, wie viele Faktoren 10 man benötigt, um das Verhältnis Kilometer zu Meter zu erhalten. In unserem Beispiel ist ein Kilometer also zehn mal zehn mal zehn Meter oder tausend Meter. Oder anders gesagt: Der Exponent gibt die Zahl der Nullen an, die der Faktor enthält. Ein Kilometer ist also gleich 1000 Meter. Ein Zentimeter ist gleich 10^{-2} Meter, wobei das Minus jetzt andeutet, dass durch Zehnerfaktoren zu teilen ist. Ein Zentimeter ist demnach ein Zehntel von einem zehntel Meter, also ein hundertstel Meter. Während man im Alltag einfach geeignete Einheiten wie Zentimeter oder Kilometer verwendet, werden Zehnerpotenzen sehr praktisch, wenn die Längen sehr klein oder sehr groß sind. In der Physik gibt es immerhin Längen von der winzigen Plancklänge ⁹³, etwa 10^{-35} Meter, bis hin zum Durchmesser des beobachtbaren Universums von gigantischen 10^{27} Metern. In Abbildung 4 wird ein Überblick über typische Längenskalen gegeben. Auch wenn es auf den ersten Blick so scheint, als sei der Mount Everest nicht wesentlich größer als ein Mensch, so muss man sich nur



Abb. 4: Längenskalen im Universum

vergegenwärtigen, dass zwischen den Teilstrichen an der senkrechten Linie jeweils ein Faktor 10^6 liegt, also eine Million. Dieser Faktor entspricht genau der Vorsilbe Mega. Mega ist also eigentlich eine Million.

Zehnerpotenzen sind natürlich nicht nur im Zusammenhang mit Längen nützlich, sondern vielfach einsetzbar. Um noch eine weitere unvorstellbare Zahl zu nennen, die man ohne Zehnerpotenzen kaum ausdrücken kann: In unserem Universum gibt es etwa 10^{80} Baryonen⁷¹.

4. Wie kalt kann es werden? Der Nullpunkt der bei uns üblichen Celsiusskala ist durch den Gefrierpunkt von Wasser bei Normaldruck bestimmt. Bekanntlich kann die Temperatur auch unter diesen Gefrierpunkt sinken, und in der Antarktis wurden bereits Temperaturen von -90 Grad Celsius gemessen. Kann man sich nun beliebig tiefe Temperaturen vorstellen oder gibt es einen absoluten Nullpunkt? Es stellt sich heraus, dass Letzteres der Fall ist. Im 20. Jahrhundert wurden immer ausgeklügeltere Methoden entwickelt, um den absoluten Nullpunkt zu erreichen. Dabei wurden interessante

Phänomene wie Supraleitung^{↑41} und Suprafluidität^{↑43} oder die Bose-Einstein-Kondensation^{↑29} gefunden, zu deren Erklärung die Quantentheorie benötigt wird. Während gemäß der klassischen Physik am absoluten Temperaturnullpunkt nämlich jede Bewegung zum Stillstand kommen sollte, können Quantenfluktuationen die Physik bei tiefen Temperaturen dominieren.

Der absolute Nullpunkt der Temperatur liegt bei $-273,15$ Grad Celsius. Diese Temperatur markiert den Startpunkt der Kelvinskala für die Temperatur, wobei ein Temperaturunterschied von einem Grad Celsius einem Kelvin entspricht. Demnach liegt der absolute Nullpunkt bei 0 Kelvin und der Nullpunkt der Celsiusskala bei $273,15$ Kelvin. Negative Temperaturen gibt es auf der Kelvinskala nicht.

Geht man vom Nullpunkt der Celsiusskala zum absoluten Nullpunkt, so passiert man zwei Fixpunkte, die für Kühlungstechniken von Bedeutung sind. Dabei handelt es sich um die Siedepunkte von Stickstoff bei etwas über 77 Kelvin und von Helium bei $4,2$ Kelvin. Inzwischen ist es gelungen, durch Abkühlen eines Atomgases^{↑25} bis auf ein halbes Milliardstel Kelvin an den absoluten Nullpunkt heranzukommen. Auch wenn diese Grenze in der Zukunft noch weiter nach unten verschoben wird, bleibt der absolute Nullpunkt doch unerreichbar.