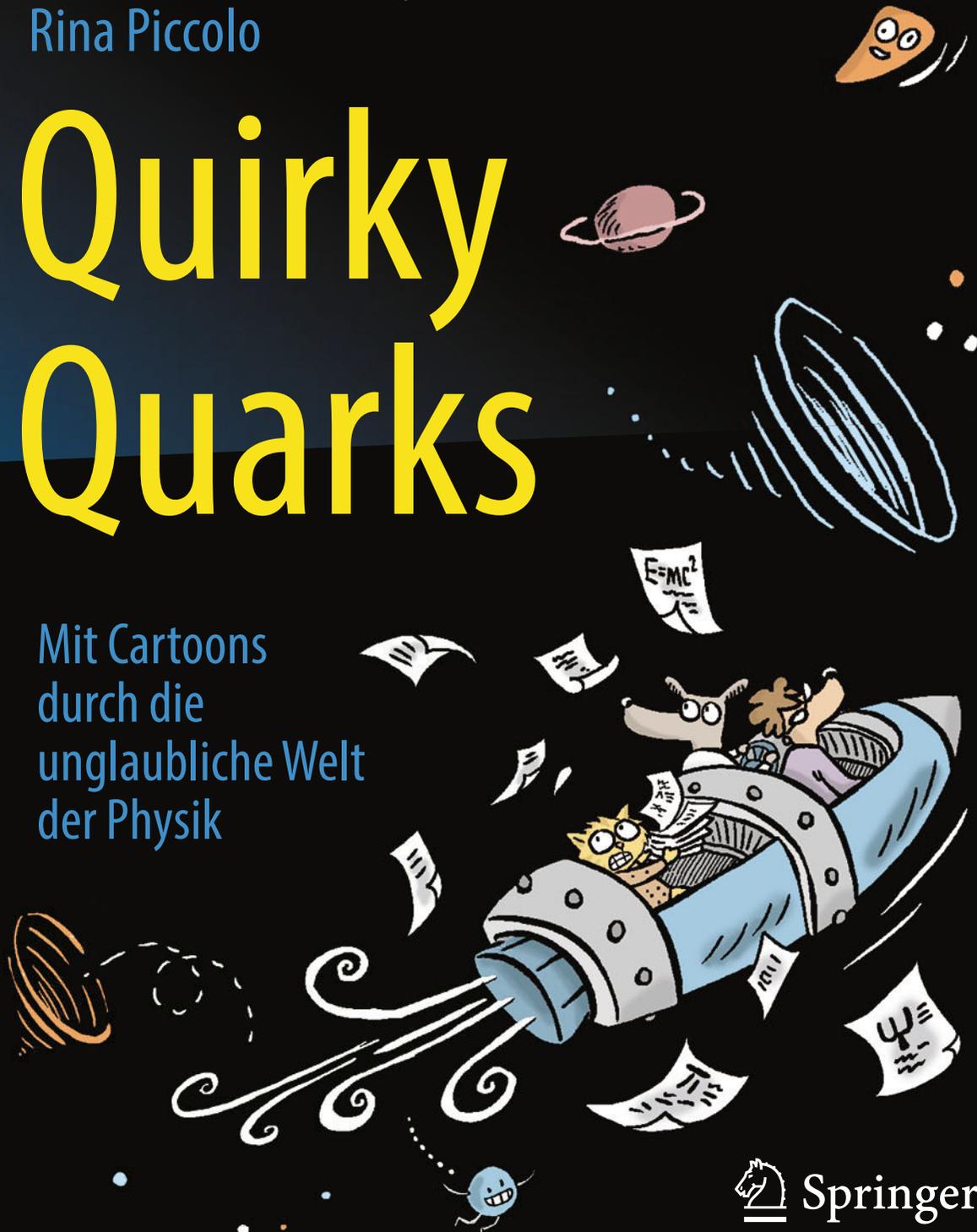


Boris Lemmer · Benjamin Bahr
Rina Piccolo

Quirky Quarks

Mit Cartoons
durch die
unglaubliche Welt
der Physik



 Springer

Quirky Quarks

Die Autoren

Boris Lemmer, Benjamin Bahr, Rina Piccolo



Dr. Boris Lemmer ist experimenteller Elementarteilchenphysiker und arbeitet an der Universität Göttingen und für das ATLAS Experiment in CERN. Bevor er seine Doktorarbeit in Göttingen geschrieben hat, studierte er Physik und Mathematik in Gießen.

Er liebt nicht nur die Naturwissenschaften, sondern erklärt diese gerne auch Laien, entweder in Büchern, Vorträgen oder auf der Bühne. 2011 gewann er die deutsche Science Slam Meisterschaft.



Dr. Benjamin Bahr forscht an der Universität Hamburg zur Quantengravitation. Gemeinsam mit seiner Arbeitsgruppe arbeitet er an der Vereinheitlichung von Einsteins Relativitätstheorie mit den Prinzipien der Quantenphysik.

Davor hat er am Max-Planck Institut für Gravitationsphysik in Potsdam promoviert und war Forschungsstipendiat an der Universität Cambridge in Großbritannien.

Wenn er nicht gerade zu berechnen versucht, was in ein schwarzes Loch hineingeht oder was beim Urknall passiert ist, erklärt er Laien gerne Physik – durch öffentliche Vorträge oder als Autor von Sachbüchern.



Rina Piccolos Karikaturen wurden schon in vielen Zeitschriften wie zum Beispiel dem *New Yorker*, *Barron's Business Magazine*, *The Reader's Digest*, dem *Parade Magazin* und vielen mehr veröffentlicht.

Ihr täglicher Comic „Tina's Groove“ erscheint in Zeitschriften und auf Webseiten weltweit.

Boris Lemmer · Benjamin Bahr ·
Rina Piccolo

Quirky Quarks

Mit Cartoons durch die unglaubliche
Welt der Physik

 Springer

Boris Lemmer
Göttingen, Deutschland

Rina Piccolo
Toronto, Ontario, Kanada

Benjamin Bahr
Hamburg, Deutschland

Übersetzung der englischen Originalausgabe: Quirky Quarks von B. Bahr, B. Lemmer und R. Piccolo, erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg, © 2016. Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-662-50258-7 ISBN 978-3-662-50259-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-50259-4

Springer

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

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.

Planung: Margit Maly

Illustrationen: Rina Piccolo

Einbandabbildung: Rina Piccolo

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Germany

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

Vorwort

Was passiert, wenn zwei Physiker und eine Cartoonistin aufeinandertreffen?

Wenn du so an dein Physik-Schulbuch zurückdenkst wie ich an meines, wirst du mir zustimmen, dass es schwer zu tragen und noch schwerer zu verstehen war.

Ein Blick in die Seiten des Buches, das du gerade in den Händen hältst, sollte dich davon überzeugen, dass dieses Buch anders ist. Es macht beim Anschauen viel zu viel Spaß. Beim Durchblättern triffst du auf zwei Hunde, eine Katze und Quarks mit drei Augen. Du findest Cartoon-Elektronen und Comics zur Speziellen Relativitätstheorie.

Ja, und wir sollten auch nicht die Wissenschaft vergessen. In einfacher Alltagssprache, die sogar eine Cartoonistin wie ich verstehen kann, werden dir meine Coautoren Boris Lemmer und Benjamin Bahr zeigen, was Antimaterie mit Bananen zu tun hat und wieso du dir in einem Flugzeug aufgebläht vorkommst (Tipp: hat nichts mit Bananen zu tun).

Die beiden Physiker knacken Atome und lassen dich die Stabilität des Bodens, auf dem du stehst, in Frage stellen. Sie erzeugen Materie aus Energie. Sie lassen dich sogar über ein mögliches anderes Ich nachdenken, in einem möglichen anderen Universum, in dem du ein anderes Buch als das hier liest.

Als Cartoonistin und Schreiberin bin ich ein geborener Fragesteller und obwohl ich wie viele andere das Zeug mit schwarzen Löchern, Wurmlöchern und subatomarer Seltsamkeit schwierig finde, hat die Physik mich immer fasziniert.

Die Möglichkeit mit Boris und Benjamin – Physikern, die sich entschlossen haben, die größten Geheimnisse der Natur zu entschlüsseln – zusammenzuarbeiten, hat mich zu einem besseren Fragesteller und ein bisschen schlauer gemacht.

Dank dieser beiden Herren verstehe ich jetzt Dinge wie Oberflächenspannung ... und finde sie genauso verrückt wie Dunkle Materie (Danke, Jungs, dass ihr den Katalog der Dinge, über die ich mich wundern kann, erweitert habt).

Wenn du wie ich begeistert deiner Neugier folgst und Spaß daran hast, dich von der bizarren Beschaffenheit der Realität verblüffen zu lassen – und wenn du Comics magst – dann hältst du genau das richtige Buch in der Hand.

Also, was bekommt man, wenn zwei Physiker und eine Cartoonistin aufeinandertreffen? Man bekommt Quirky Quarks!

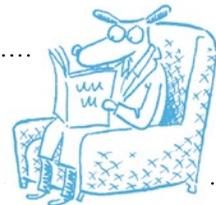
-Rina Piccolo

Inhalt

Vorwort	V
Charaktere	XIII
Teilchen	XIV
Maße zum Messen	XVI

I – Raketen und Planeten..... 1

Polarlichter Ein anregendes Leuchten für Menschen und Atome.....	3
Licht Wellen im elektromagnetischen Feld.....	7
Tarnmäntel Ungesehen durchs Leben gehen.....	11
Der Doppler-Effekt Gestreckte Wellen.....	15
Laser Hochqualitätslicht mit neuen Möglichkeiten.....	19
Vakuum und Luftdruck Moleküle in Bewegung.....	23
Strömungen und Turbulenzen Besser nicht auf der Autobahn testen.....	27
Wieso fliegt ein Flugzeug? Wie man die Luft dazu bringt, einen oben zu halten.....	31
Oberflächenspannung Minimale Oberfläche für maximalen Komfort.....	35
Nichtnewtonsches Fluid Ist es flüssig? Oder ist es fest?.....	39
Raketenmanöver Navigieren im Nichts.....	43



Die Keplerschen Gesetze	Was zur Bewegung der Planeten nötig ist.....	47
Erhaltungssätze	In der Natur geht nichts verloren.....	51
Die Voyager-Sonden	Wo noch kein Mensch zuvor gewesen ist.....	55
Die Geburt des Sonnensystems	Staub unter Hochdruck.....	59
Die Entstehung des Mondes	Ein kleiner Urknall in Erdnähe.....	63
Extrasolare Planeten	Ist jemand da draußen?.....	67



II – Der Kosmos und das Ganze..... 71

Klassifizierung der Sterne	Das Who is Who der Sterne.....	73
Rote Riesen und Planetarische Nebel	Das Ende eines Sterns der Hauptreihe.....	79
Supernovae	Es endet mit einem Knall.....	83
Weißer Zwerge und Typ Ia Supernovae	Sternenleichen und Standardkerzen.....	87
Schwarze Löcher	Wer ins Schwarze trifft, kommt nicht wieder raus.....	91
Was passiert, wenn du in ein Schwarzes Loch fällst?	93
Der Urknall	Wie auf einen Schlag alles begann.....	97
Zeitstrahl unseres Universums	Vom Urknall bis heute.....	100
Die kosmische Hintergrundstrahlung	Die ältesten Photonen des Universums.....	105
Superstrukturen des Universums	Ein Netzwerk aus Sternen.....	109
Galaxientypen	Das Aussehen zählt.....	113



Relativität von Raum und Zeit	Wieso Licht nicht schneller wird, wenn man es schiebt.....	117
Die Allgemeine Relativitätstheorie	Gekrümmter Raum und verbogene Zeit.....	121
Gekrümmte Raumzeit	Eine Frage des Blickwinkels.....	125
Gravitationslinsen	Optische Täuschungen am Nachthimmel.....	129
Gravitationswellen	Surfen auf der Raumzeit.....	133
Dunkle Materie	Scheinbar nicht da.....	137
Dunkle Energie	Einsteins größte Eiselei plötzlich wieder im Trend.....	141

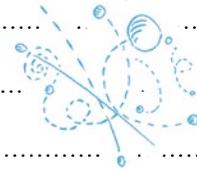


III – Geheimnisvolle Quanten..... 145

Welle-Teilchen-Dualismus	Welle oder Teilchen?.....	147
Das Doppelspalt-Experiment	Über die Verrücktheit der Quantenwelt.....	151
Heisenbergsche Unschärferelation	Man kann nicht beides haben.....	155
Schrödingers Katze	Gleichzeitig tot und lebendig.....	159
Feynman-Pfade	Realität als Summe von Wahrscheinlichkeiten.....	163
Der Tunneleffekt	Wo eine Wellenfunktion ist, ist auch ein Weg.....	167
Radioaktive Zerfälle	Über das Leben von Atomkernen und ihr Ende.....	171
Alpha-, Beta- und Gammastrahlen	Kernbausteine auf Reisen.....	175
Kernfusion	Natürliche Energiequelle, aber noch ohne Kraftwerk.....	179
Supraleiter	Super-Autobahnen für Elektronen.....	183



Suprafluidität	Die gruselige Art von Fluid.....	187
Spin	Teilchentanz in diskreten Schritten.....	191
Verschränkung	Eine spukhafte Fernwirkung?.....	195
Quantenteleportation	Hin und wieder zurück.....	199
Qubits	Wie man einen Quantencomputer baut.....	203



IV – Tatort Teilchenphysik.....207

Atome vs. Elementarteilchen	Kommt da noch was?.....	209
Das Neutrino	So leicht und doch so schwer zu fassen.....	213
Das Standardmodell	Das bisher beste Handbuch für unser Universum.....	217
Antimaterie	Mehr Science als Fiction.....	221
Teilchenzerfälle	Das kurze Leben und die interessanten Nachkommen der Teilchen.....	225
Feynman-Diagramme	Ernst gemeintes Teilchengekritzel.....	229
Die Starke Wechselwirkung	Was unsere Atomkerne zusammenhält.....	233
Die Schwache Wechselwirkung	Schwach, aber einzigartig.....	237
$E = mc^2$	Energie und Masse – fast dasselbe.....	241
Der Higgs-Mechanismus	Ursprung der Teilchenmasse.....	245
Die Struktur des Protons	Oder auch: Wie man ohne Higgs Masse bekommt.....	249
Teilchenbeschleuniger	Zeitmaschinen und Urknallsimulatoren.....	253

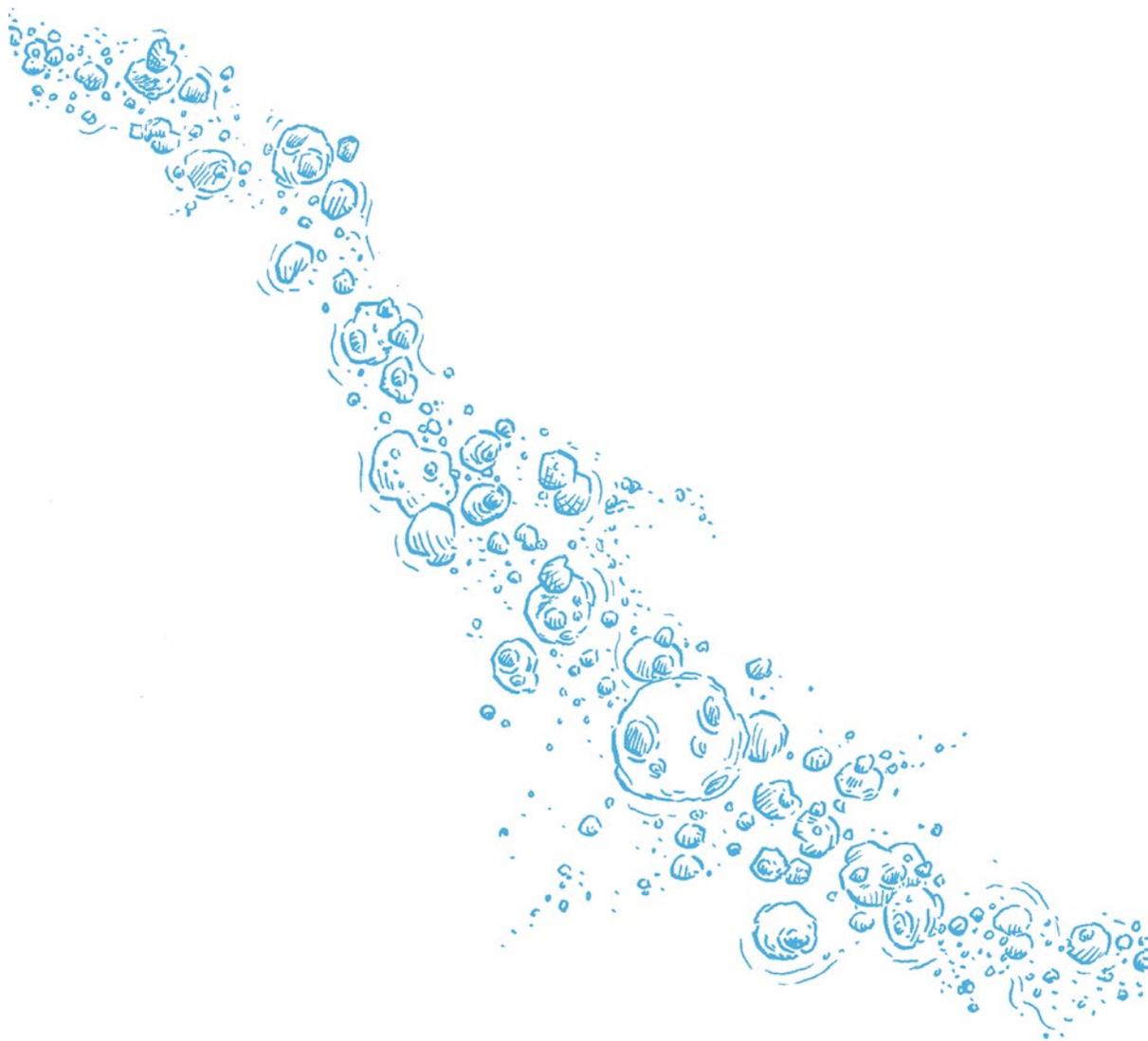


Teilchendetektoren	Das Unsichtbare sichtbar machen.....	257
Kosmische Höhenstrahlung	Ausgesendet von weit entfernten Beschleunigern.....	261
Neutrinooszillation	Teilchen, die ihre Persönlichkeit ändern.....	265
Strahlentherapie	Teilchen auf einer Mission gegen das Böse.....	269

V – Jenseits der Grenzen unseres Wissens..... 273

Exotische Materie	Anders als alles, was wir kennen.....	275
Vor dem Urknall	Ein Rückprall?.....	279
Quantengravitation	Was ist die Quantentheorie der vierten Kraft?.....	283
Verdampfung Schwarzer Löcher	Plancksterne statt Singularitäten?.....	287
Wurmlöcher	Abkürzungen durch Raum und Zeit.....	291
Tachyonen	Tatsächlich schneller als Licht.....	295
Warp-Antrieb	Ein Ritt auf der Welle der Raumzeit.....	299
Supersymmetrie	Eine schöne Lösung für viele Probleme.....	303
Stringtheorie	Ein Weg zur Weltformel™.....	307
Extradimensionen	Kleine versteckte Räume.....	311
Viele-Welten-Theorie	In einem anderen Universum ist die Katze lebendig.....	315
Das Ende des Universums	Und dann?.....	318







CHARAKTERE

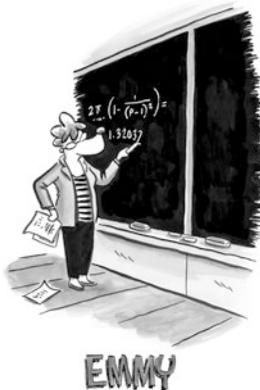


Er kann die Unschärferelation erklären, sieht aber unscharf, wenn er mal wieder seine Brille sucht. Er findet seinen Weg durch die Feynman-Pfade, ist aber schon auf dem kleinen Parkplatz am Supermarkt hoffnungslos verloren.

Das ist Erwin – unser theoretischer Physiker aus Princeton. Ein brillanter Geist wie er spart sich mit der Viele-Welten-Theorie den Waschtag. Mit seinen Worten: „Ich bin zufrieden damit, dass es irgendwo ein Paralleluniversum gibt, in dem meine Strickjacke bereits gewaschen worden ist.“

Als kleines Hündchen baute er in der Garage seines Vaters Raketen, die den Rand unserer Galaxie erreichten. Kein Wunder, dass Maxwell – seine Pfoten an Hebeln und Schaltern, seinen Kopf in den Sternen – auserwählt wurde, das Universum zu erforschen.

Heute verbringt Maxwell seine Zeit am MIT, wo er in einem Hörsaal eine inspirierende Vorlesung zur kosmischen Leere hält, im Labor an Geräten bastelt, oder in der Kneipe, wo er bei einem Bier mit Kollegen über das Reisen mittels Wurmlöcher diskutiert. In seinem Herzen gibt es übrigens einen speziellen Platz für Mathematikerinnen – vielleicht sogar für eine ganz bestimmte.



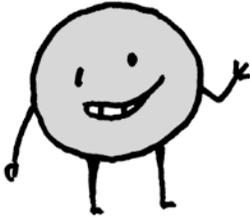
Die Schönheit des Nachthimmels ist für sie genauso wichtig wie die Präzision eines mathematischen Beweises. Hinter Emmys Leidenschaft für Zahlen steckt, so kann man sagen, eine persönliche Suche nach der rationalen Eleganz ihrer natürlichen Umgebung.

Wenn sie nicht gerade in ihrem Büro in Oxford Berechnungen durchführt, trifft man Emmy bei einem abendlichen Date mit Maxwell oder bei einer Diskussion mit Erwin über die Existenz von Gravitationswellen.

TEILCHEN

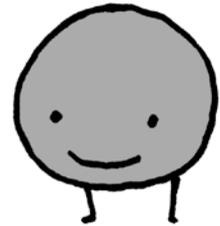
Inspiziert von www.particlezoo.net

Proton



Wenn ein Atom die Größe eines Fußballplatzes hätte, wäre dieser kleine Kerl – das Proton – kleiner als eine Spinne auf dem Spielfeld. Aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark zusammengesetzt, kann das Proton kein Elementarteilchen sein. Doch seine Rolle in der Quantenwelt ist von großer Bedeutung. Es ist dieser kleine Kerl, aus dem die Kerne jedes Atoms im Universum aufgebaut sind. Er ist ein fröhliches Teilchen, immer positiv geladen!

Elektron



Meistens trifft man dieses negativ geladene umherschwirrende Teilchen in seiner Heimatschale – oder Orbital – in einem Atom. Wir haben ihm vieles zu verdanken: Ohne das Elektron und seine Freunde gäbe es keine Elektrizität. Mit seiner wahrhaft magnetischen Persönlichkeit trifft man ein Elektron selten alleine an. Ständig ist es auf der Suche nach anderen Teilchen und Elektronen, mit denen es abhängen kann. Es ist diese Bindungsfähigkeit, die alle chemischen Reaktionen im Universum bestimmt.



Es gibt kein charmanteres Team aus Teilchen als dieses – die Quarks. Es gibt, soweit wir wissen, sechs Spieler in der Aufstellung der Quarks, nämlich Up, Down, Charm, Strange, Top und Bottom. Wegen dieser skurrilen Namen könnte man denken, die Quarks seien alberne Clowns in der subatomaren Welt – und läge damit falsch. Als Elementarteilchen, die nicht weiter aufgespalten werden können, sind diese Typen die Bausteine vieler anderer Teilchen, zum Beispiel Protonen, Neutronen und Hadronen. Alberne Clowns sind sie sicherlich nicht!

NEUTRINO



Wenn du noch nicht mit dem Neutrino und seiner Verwandtschaft bekannt gemacht wurdest, dann hast du was verpasst. Er und seine Milliarden Freunde fliegen jede Sekunde, Tag für Tag, durch deinen Körper. Aber keine Sorge – obwohl die Physiker noch nicht alles über diese aufdringlichen kleinen Zwerge wissen, tun sie dir nichts. Zum Glück sind Neutrinos fast masselos und wechselwirken kaum mit Objekten aus normaler Materie, so wie deinem Hund, deiner Katze, deiner Tante oder der Frisur deiner Tante. Neutrinos gibt es in drei Sorten: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino. Aber steck dir keines in den Mund, denn – doch halt, warte ... du kaust bestimmt gerade auf einem ganzen Batzen davon herum.

Lass dich von ihrem Namen „schwache Bosonen“ nicht täuschen. Diese dicken Brummer sind Schwergewichte im Land der Elementarteilchen. Trotzdem kann man auch Mitleid mit ihnen haben – mit einer Lebensdauer, die Millionen Mal kürzer ist als die einer Fruchtfliege, sind W und Z gerade lange genug da, um ihren Job zu verrichten, bevor sie ins Gras beißen. Ihr Job? Sie sind für eine der vier Grundkräfte der Natur verantwortlich, die schwache (Kern-) Kraft, indem sie als Austauschteilchen zwischen anderen Teilchen wirken. Es sind W und Z, denen wir dafür danken sollten, dass wir am Leben sind, denn ohne die schwache Kraft könnte die Sonne nicht brennen und ihr Licht auf uns scheinen lassen.



Erst kürzlich entdeckt, hat das Higgs-Boson weltweit Schlagzeilen gemacht und wurde zum größten Star in der Teilchenwelt. Aber das Higgs lebte nicht immer in der Glamourwelt – Jahrzehnte lang spielte es ein Versteckspiel mit den Physikern. Wieso all die Aufmerksamkeit? Sagen wir es so: Dieser kleine Kerl macht Materie massiv! Stellen wir uns für einen Moment ein Universum voller masseloser Objekte vor. Kein entspanntes Spaziergehen im Park, keine Fußballspiele, nichts. Alles würde sich einfach mit Lichtgeschwindigkeit bewegen! Und wie stellt das Higgs es an? Nun, wir wissen, dass es gerne im Higgs-Feld abhängt, mit der schwachen und elektromagnetischen Kraft rumalbert und anderen Teilchen Masse gibt. Es wäre also nicht übertrieben zu sagen, das Higgs sei mehr als ein kleiner Promi; in der Symphonie des Universums spielt es ganz groß mit.

Maße zum Messen

Über die Einheiten in der Wissenschaft

Das Universum ist voller Geheimnisse, die entdeckt werden wollen. Um die Materie in unserem Universum zu verstehen, müssen wir sie vermessen. Wie viel davon gibt es? Wie schwer ist etwas? Wo ist es? Wie groß? Wie lange hat etwas gedauert? Diese Fragen kann man durch Messungen beantworten – und manchmal nur mit dem entsprechenden Budget (↗¹). Aber ohne die richtige Einheit ist jede Messung wertlos. Und passt man nicht genau auf, verliert man auch schon mal einen Satelliten. Doch dazu später mehr. Worum geht es nun bei den Einheiten?

Die Ergebnisse unserer Messungen erscheinen immer als Zahl zusammen mit einer Einheit. Der Prozess, ein gutes Bier zu trinken, dauert z.B. 7 Minuten. In dem Fall ist die „7“ die Zahl und „Minuten“ die Einheit. Man könnte auch eine andere Einheit nehmen, etwa „Sekunden“. Da eine Minute 60 Sekunden hat, könnte man auch sagen, dass es 420 Sekunden dauert, das Bier zu trinken. Beide Aussagen sind gleichwertig und austauschbar. Für welche Einheit du dich entscheidest, bleibt dir überlassen, und hängt davon ab, was für dich – und die anderen Menschen – am bequemsten ist. Obwohl es sicherlich nicht sehr praktisch ist, zu sagen, du hättest das hier in 0,1339 Millionstel eines Jahrhunderts getrunken, wäre das genauso korrekt.

Seit Bestehen der Menschheit wurden Unmengen verschiedenster Maßeinheiten benutzt. In der Welt der Wissenschaft hat man sich dazu entschlossen, einige wenige davon als Grundlage unserer Messungen zu nutzen. Mit ihnen können wir alle phy-

sikalischen Größen beschreiben. Sie bilden das sogenannte Système International d'Unités (SI). Die drei bekanntesten SI-Einheiten sind diejenigen für Länge, Zeit und Masse: der Meter, die Sekunde und das Gramm (es gibt übrigens noch vier weitere: Candela (Cd) für Helligkeit, Mol (m) für eine Stoffmenge, Kelvin (K) für Temperaturen und Ampère (A) für elektrische Ströme, von denen aber nur Kelvin in diesem Buch eine Rolle spielen wird). Alle anderen Einheiten für Länge, Zeit und Masse lassen sich aus diesen dreien ableiten: Kilo (k) für Tausend, Mega (M) für Million, Giga (G) für Milliarde, und so weiter. Bruchteile davon bekommen ähnliche Präfixe: Milli (m) für ein Tausendstel, Mikro (μ) für ein Millionstel, Nano (n) für ein Milliardstel und so fort.

Das bedeutet, dass wir alle physikalischen Größen in ihren zugehörigen Einheiten darstellen können und dass es sehr leicht ist, zwischen den Einheiten zu wechseln – einfach die Nachkommastelle verschieben: 625 Nanometer sind dasselbe wie 0,625 Mikrometer, und so weiter. Es könnte aber – und jetzt kommt es darauf an, wo du herkommst – sein, dass das nicht die Einheiten sind, die du gewohnt bist. Wie viel ist das nochmal in Zoll oder Unzen?

Wenn man ein Buch über Physik schreibt, wird das zu einem Problem: Verwenden wir die wissenschaftlich üblichen Einheiten? Oder lieber solche, die die Leute gewohnt sind? Letzten Endes haben wir versucht, einen Mittelweg zu finden. Für die meisten physikalischen Größen verwenden wir die SI-Einheiten. Es sei denn ... wir tun es nicht. Selbst europäische Wissenschaftler und Verfechter

↗¹: „Teilchenbeschleuniger“ auf Seite 253



des metrischen Systems (zu denen sich die Autoren zählen) benutzen ab und an Nicht-SI-Einheiten in ihren physikalischen Artikeln. Verwenden wir etwa Mega- und Gigasekunden? Natürlich nicht, wir verwenden stattdessen Jahre und Jahrhunderte in unserer Forschung. Statt Peta- und Exametern nutzen wir Lichtjahre und Parsec. Und in der Atomphysik spricht jeder von Ångström, was 0,1 Nanometern entspricht (wenn wir ehrlich sind: Schwedische Umlaute sind einfach der Knaller!).

Teilchenphysiker bedienen sich gerne Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (^{↗2}) und machen Gebrauch von $E = mc^2$. Und weil sie die Lichtgeschwindigkeit dabei nur stört, setzen sie $c = 1$ und geben Massen die Einheiten von Energien. Schlimmer noch, statt Energie in Joule (aus den SI-Einheiten abgeleitet) anzugeben, rechnen sie sie auch noch in Elektronenvolt (eV) um. Das hat für Teilchen-

physiker den Vorteil, dass diese Einheit unter anderem bei Teilchenbeschleunigern super praktisch ist: „Beschleunige ich ein Proton mit einer Spannung von 1.000.000 Volt, hat es danach 1 Megaelektronenvolt Energie und kann in einer Kollision Teilchen mit einer Gesamtmasse von bis zu 1 MeV erzeugen, echt stark!“

Ach ja, was war denn nun mit dem verlorenen Satelliten? Der „Mars Climate Orbiter“ (^{↗3}) stürzte 1999 versehentlich auf den Mars, weil die NASA und einer der Softwarehersteller unterschiedliche Einheiten für den Impuls der Sonde verwendet hatten. Ups. Also aufgepasst, wenn es um Einheiten geht!

Viel Spaß mit der Wissenschaft – egal, welche Einheit du am liebsten hast. Und wenn du mal verwirrt bist, nimm einfach einen der vielen Einheiten-Umrechner, wie z.B. bei ^{↗4}.

^{↗2}: „Relativität von Raum und Zeit“ auf Seite 117

^{↗3}: https://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter

^{↗4}: <http://www.metric-conversions.org/de/>



I – Raketen und Planeten

„Wissenschaft ist großartig! Dank der Wissenschaft können wir fliegen, Krankheiten heilen, Erdbeben und Sonnenfinsternisse vorhersagen und den Sprudel in die Limo bringen. Ab und an explodiert vielleicht etwas, aber hey – was ist schon dabei, spontan ein kleines pyrotechnisches Experiment durchzuführen. Das ist Wissenschaft in Action!

Und die Wissenschaft, die man allein mit Physik betreiben kann – einfach wunderbar! Ich könnte den ganzen Tag arbeiten und basteln, bis ich ein neues, großartiges Stück Technologie entwickelt habe. Ich liebe es! Es gibt einfach soviel, was man mit Hilfe

der Physik herstellen kann: Laser, Flugmaschinen, Tarnkappen und Raketen! Die mag ich am liebsten! Immer wieder verbringe ich damit meine Zeit. Es ist ein alter Traum von mir: mit einer Rakete durch das Weltall zu reisen, andere Planeten besuchen, Nahaufnahmen von Asteroiden machen, die Grenze unseres Sonnensystems erreichen ... ach ja.

Auf den nächsten paar Seiten zeige ich euch ein paar Sahnestücke der Physik! Wie Flugzeuge fliegen, Laser funktionieren und wie es die Voyager Sonden durch das Sonnensystem geschafft haben. Ich hoffe, ihr findet das genauso irre wie ich.“



Polarlichter

Ein anregendes Leuchten für Menschen und Atome

Videospiele und Filme haben sich schnell weiterentwickelt und können uns mit ihren visuellen Effekten ganz schön beeindrucken. Aber zum Glück ist die Natur, was Special Effects angeht, immer noch die unangefochtene Nummer eins. Um sich davon zu überzeugen, kann man zum Beispiel ganz weit in den Norden oder Süden fahren, eine dunkle Nacht abwarten und in den Himmel hinaufschauen. Hat man Glück, sieht man eines der beeindruckendsten Phänomene der Natur: Polarlichter. Sie treten in verschiedenen Formen auf, sehen aber alle mehr oder weniger so aus, als hätte jemand den schwarzen Himmel in eine grüne Suppe verwandelt und würde mit einem großen Löffel darin herumrühren.



Es sieht tatsächlich wie ein übernatürlicher Effekt aus. Die Wikinger dachten, Polarlichter seien ein Zeichen für eine große Schlacht, die gerade irgendwo auf der Welt tobt. Auch andere Kulturen interpretierten sie als ein Zeichen übernatürlicher Wesen. Aber was ist dort oben eigentlich los? Wieso sind sie grün, tauchen nur ab und zu auf und sind nur weit oben im Norden oder weit unten im Süden zu sehen?

Wind von der Sonne

Einen ersten Hinweis liefert die Tatsache, dass man gutes Wetter braucht, um sie zu sehen. Zum einen muss der Himmel klar sein, zum anderen muss noch eine andere Art von Wetter genau passen. Es ist das sogenannte „Weltraumwetter“ und hängt mit den ständig wechselnden Bedingungen im Weltall

zusammen, etwa sich bewegende Teilchen und Magnetfelder^(↗¹). Wenn man Weltraumwetterberichte und -vorhersagen anschaut, sieht man, dass die Sonnenaktivität hierbei ein wichtiger Faktor.

Schaut man sich die Sonne an (bitte nicht direkt hinein sehen!), kann man dunkle Flecken auf ihrer Oberfläche erkennen. Das sind Orte mit einem sehr starken Magnetfeld. Von Zeit zu Zeit schleudert die

Sonne eine große Menge Teilchen aus diesen dunklen Flecken heraus: Protonen, Heliumkerne (als Fusionsprodukt, ↗³) und Elektronen. Dieses Phänomen nennt man „koronaren Massenauswurf“. Dessen Häufigkeit hängt von der Sonnenaktivität ab, die in Zyklen ab- und zunimmt (↗⁴). Man kann sagen: je mehr dunkle Flecken, desto mehr Massenauswürfe. Die ausgeworfenen Teilchen fliegen dann durchs Weltall, manche vielleicht sogar in



↗¹: „Licht“ auf Seite 7

↗²: <http://www.swpc.noaa.gov>

↗³: „Kernfusion“ auf Seite 179

↗⁴: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfleck>

Richtung Erde. Wir nennen das den „Sonnenwind“, der sowohl aus den Auswürfen als auch aus einem konstanten Strom von Teilchen aus der Sonne besteht und der unaufhörlich von der Sonne abgeht.

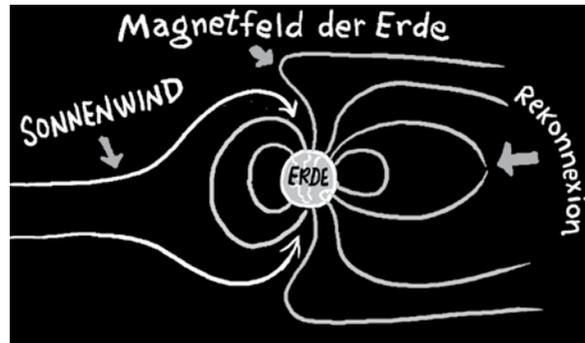
Dieser Sonnenwind ist Teil des Weltraumwetters. Wann immer man über das Wetter redet, will man auch gleich Vorhersagen bekommen. Während diese auf der Erde oft einen Grund zum Meckern geben, sind die Vorhersagen für das Weltraumwetter ziemlich zuverlässig. Der Grund ist, dass man genau weiß, wann etwas von der Sonne an der Erde ankommt, da man den

Teilchenfluss schon bei der Entstehung an der Sonne sieht, während die Teilchen noch unterwegs sind. Das geht, weil die sichtbaren Informationen von der Sonne mit Lichtgeschwindigkeit zu uns gelangen (ca. 1.079.000.000 km/h), während der Sonnenwind mit seinen massiven Teilchen viel langsamer ist (ca. 1.448.410 km/h).

Magnetische Feldzusammenstöße

Stell dir vor, wie ein starker Sonnenwind die Erde erreicht. Wir können froh sein, dass die gute alte Erde sowohl eine Atmosphäre als auch ein Magnetfeld hat. Solch ein Sonnenwind ist nämlich nichts anderes als Strahlung, die uns ernsthaft schädigen würde, wenn wir ihr direkt ausgesetzt wären. Zum Glück kann unsere Atmosphäre diese Strahlung absorbieren. Noch besser: Das Magnetfeld der Erde lenkt den Sonnenwind ab! Das geschieht entlang

der magnetischen Feldlinien, die so geformt sind, wie in der Abbildung dargestellt. Der Sonnenwind selbst ändert wiederum die Form des Magnetfeldes. Als Haufen geladener Teilchen ist er nichts anderes als ein elektrischer Strom, und Ströme erzeugen Magnetfelder. So wird das Magnetfeld der Erde an der Sonnenseite gequetscht und auf der anderen



gestreckt. Es gibt mehrere Wege, wie Teilchen vom Sonnenwind die Atmosphäre der Erde erreichen können. Eine ist über offene Feldlinien an den „Polarhöckern“, wo uns das Magnetfeld der Erde nicht schützen kann. Eine andere Art ist über den „Schwanz“ auf der rechten Seite: Wenn

das Magnetfeld von oben und unten zusammengedrückt wird, können sich die Feldlinien verbinden („Rekonnexion“) und zur Erde zurückschlagen. Starke Änderungen des Erdmagnetfeldes nennt man auch einen „Geomagnetischen Sturm“ (↗⁵). Nachdem sie sich wieder vereinigt haben, nehmen die Feldlinien eine große Menge geladener Teilchen mit zur Erde. Diese Teilchen können andere aus dem sogenannten „Van Allen Strahlungsgürtel“ (↗⁶) heraus in die Atmosphäre drücken. Dieser Gürtel ist ein Ort, an dem geladene Teilchen im Magnetfeld der Erde gefangen sind und ständig von Sonnenwinden und anderen intergalaktischen Quellen nachgeliefert werden.

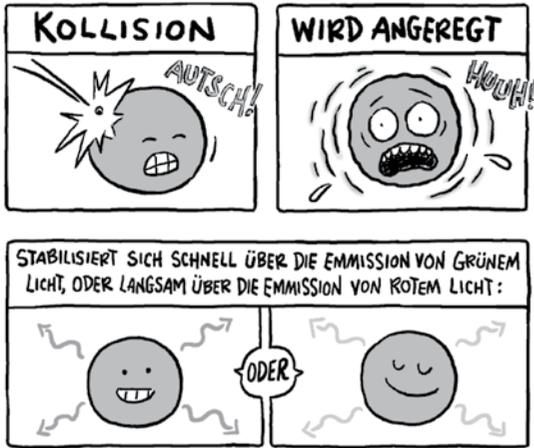
Teilchenregen und Leuchtatome

Wir haben also geladene Teilchen, die in der Nähe des Nord- und Südpols in die Atmosphäre gelangen.

↗⁵: https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetischer_Sturm

↗⁶: <https://de.wikipedia.org/wiki/Van-Allen-Gürtel>

Ein SAUERSTOFF-ATOM wird von einem Elektron getroffen:



Während sich die Teilchen bewegen, treffen sie auf Atome in der Atmosphäre. Bei diesen Zusammenstößen übertragen sie Energie auf die Atome und bringen sie in einen „angeregten Zustand“. Von diesem Zustand können sie sich wieder abregen, indem sie Licht aussenden. Abhängig vom Energieunterschied dieser Zustände kann die Wellenlänge des Lichts zwischen rot (wenig Energie) und blau (viel Energie) unterschiedlich sein (↗⁷). Sauerstoffatome senden Licht im sichtbaren Bereich aus, was im Wesentlichen auf zwei Arten geschieht, im einen Fall rot, im anderen grün. Die Zeit, die ein Elektron braucht, um sich abzuregen, ist dabei

unterschiedlich: der grüne Übergang geschieht in weniger als einer Sekunde, der rote dauert länger. Weit oben am Himmel ist die Atomdichte gering. Sauerstoffatome haben Platz und haben Zeit, rotes Licht auszusenden. Rote Übergänge passieren wesentlich häufiger als grüne. Näher an der Erdoberfläche nimmt die Atomdichte zu und Atome stoßen aneinander. Dabei übertragen sie Energie, statt zu leuchten. Das Rote Licht ist unterdrückt. Was bleibt ist das „schnelle“ grüne Licht. Weiter unten ist die Dichte des atomaren Sauerstoffs so gering (nicht zu verwechseln mit Sauerstoffmolekülen, deren Dichte in Bodennähe zunimmt), dass man gar kein Licht mehr sieht. Das ist der Grund, wieso Polarlichter ganz weit oben rot (sieht man nicht immer) und weiter unten dann grün leuchten.

Nun, nimm dir die Zeit und schau ein Polarlicht an. Ist es nicht schön? Sicher eine Erfahrung, die man teilen möchte, so wie Erwin und Maxwell.



↗⁷: „Licht“ auf Seite 7

Foto: Hugo Löhre / NASA



Licht

Wellen im elektromagnetischen Feld

Was genau ist eigentlich Licht? Nun, Licht ist eine bestimmte Art von elektromagnetischer Strahlung. Oder auch: „Wellen im elektromagnetischen Feld“

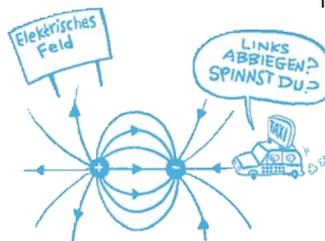
Zunächst zum elektrischen Feld: Du weißt sicher, dass Dinge elektrisch geladen sein können. Entweder positiv oder negativ. Dinge mit gleicher Ladung stoßen sich ab, während solche mit unterschiedlicher Ladung sich anziehen. Elektrisch geladene Teilchen erfahren also immer eine Kraft, die insgesamt von allen anderen geladenen Dingen im Universum ausgeht. Dieses „Kraftfeld“ (Physiker nennen es „Feld“, weil es überall ist) nennt man „elektrisches Feld“. Man kann sich das wie ein Navi für geladene Teilchen vorstellen – es sagt ihnen, wohin sie gehen müssen.

Das magnetische Feld ist nicht ganz so leicht zu verstehen. Dinge können auch eine magnetische Ladung tragen. Wir nennen sie dann „magnetisiert“. Aber magnetische Ladung ist nicht bloß eine Zahl wie die elektrische. Vielmehr hat sie sowohl eine Größe, als auch eine Richtung. Man kann sich das Ganze wie einen Pfeil vorstellen, der auf dem Magnet sitzt. Er zeigt von dessen Nord- zum Südpol. Je länger er ist, desto stärker der Magnet. So wie die elektrische Ladung geladene Dinge durch die Gegend schieben will, möchte das auch die magnetische. Doch während es bei der elektrischen Kraft ausreicht, dass die Objekte geladen sind, müssen sie sich bei der magnetischen Kraft (der sogenannten „Lorentzkraft“) bewegen. Solange ein Proton einfach nur da liegt, kann es von ei-

nem Magneten nicht herumgeschubst werden. Nur wenn das Proton anfängt sich zu bewegen, kann der Magnet dessen Richtung ändern.

Zwei Seiten einer Medaille: die elektromagnetische Kraft

Man kennt die magnetische Kraft schon seit Jahrtausenden. Damals erkannte man, dass Nadeln aus bestimmten Materialien immer in die gleiche Richtung zeigen (zum Nordpol). Die alten Griechen wussten auch schon von der elektrischen Kraft. Sie beobachteten, dass kleine knisternde Funken (die wir heute „elektrische Entladungen“ nennen) entstehen, wenn man Bernstein auf Tierfellen reibt. Das Wort $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$, bzw. „Elektron“, ist Altgriechisch und bedeutet „Bernstein“.



Doch es dauerte bis zum Ende des 19. Jahrhunderts, bis der Wissenschaftler James Clerk Maxwell herausfand, dass die beiden zusammengehören. Sie sind einfach zwei Phänomene derselben physikalischen Wechselwirkung, die wir heute über das „elektromagnetische Feld“ beschreiben. Die elektrische und die magnetische Kraft gehören untrennbar zusammen. Die berühmten Gleichungen, die J.C. Maxwell unsterblich machten, besagen, dass Änderungen eines elektrischen Feldes ein magnetisches Feld erzeugen – was der Grund dafür ist, dass sich drehende Ladungen wie Magnete verhalten (↻¹). Umgekehrt erzeugt ein sich änderndes

↻¹: „Spin“ auf Seite 191

Magnetfeld ein elektrisches Feld – was der Grund dafür ist, weshalb drehende Magneten in den Generatoren von Kraftwerken eingesetzt werden, um Elektronen durch die Leitungen zu drücken (das heißt, Elektrizität zu erzeugen).

Wenn man ein elektrisches Feld stört, erzeugt dies eine Änderung des Magnetfeldes, die wiederum eine Änderung des elektrischen Feldes zur Folge hat – in entgegengesetzter Richtung zur ursprünglichen Änderung. Das ist die sogenannte „Lenzsche Regel“. Beim Magnetfeld geschieht genau dasselbe. Daher vergleicht man das elektromagnetische Feld auch gerne mit einem elastischen Gummiband. Zerrt man daran, möchte es – wenn möglich – wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Das passiert aber nicht sofort, sondern dauert etwas. Daher wird sich eine Störung im elektromagnetischen Feld – so wie auch eine Störung im Gummiband – ausbreiten und dabei hin und her schwingen. Diese Wellen breiten sich in alle Richtungen mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit aus. Man nennt sie „elektromagnetische Wellen“ und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die allseits bekannte Lichtgeschwindigkeit.

Das elektromagnetische Spektrum: auf die Länge kommt es an

Obwohl die Geschwindigkeit dieser Wellen immer die gleiche ist, kann die Frequenz, mit der die Wel-

len hin und her schwingen, verschieden sein. Je schneller sie das tun (je kürzer also ihre Wellenlänge ist), desto mehr Energie ist in ihnen gespeichert.

Die längsten Wellen sind lange Radiowellen. Ihre Wellenlänge beträgt über einen Kilometer. Die kürzesten dieser Sorte nutzen wir in unseren Radios: AM-Wellen sind einen Kilometer bis einhundert Meter lang, während FM-Wellen ein bis zehn Meter lang sind. Die nächst kürzeren Wellen sind Mikrowellen. Ihre Wellenlänge reicht von einem Millimeter bis hin

zu einem Meter. Diejenigen, die in unseren Mikrowellen-Öfen zum Einsatz kommen, haben eine Länge von 12 cm. Das ist nicht besonders hochenergetisch, aber ist zufällig genau die Energie eines Quantenübergangs der Wassermoleküle. Das ist der Grund, warum Mikrowellen Dinge, die Wasser enthalten, gut erhitzen können.

Elektromagnetische Wellen von einem bis ca. 100 Mikrometern nennt man infrarote (IR) Strahlung. Sie ist für das

menschliche Auge nicht sichtbar, aber wir können sie als Wärme wahrnehmen. Halte deine Hand neben einen warmen Ofen und du kannst sie „aus erster Hand“ spüren. Der IR Bereich endet dort, wo der sichtbare beginnt: das ist die elektromagnetische Strahlung von 700 Nanometern (Rot) bis 390 Nanometern (Violett). Unser Auge ist so eingerichtet, dass es diese Strahlung sehen kann. Das ist, was wir „Licht“ nennen. Das gesamte Spektrum kann man wunderbar in einem Regenbogen beobachten.



Wir kommen nun zu Wellen mit immer mehr Energie. Jenseits der Farbe Violett beginnt die ultraviolette (UV) Strahlung. Ihre Wellenlängen reichen hinunter bis ca. 10 Nanometer. Dort beginnen die Röntgenstrahlen mit Wellenlängen bis zu 10 Picometern (ein billionstel Meter). Obwohl Röntgenstrahlung für medizinische Zwecke sehr nützlich sein kann, ist sie so hochenergetisch, dass eine Überdosierung schädlich ist. Gehen wir weiter zu noch kürzeren Wellenlängen, sind wir bei den γ -Strahlen. Diese extrem hochenergetische Strahlung erreicht uns aus den Tiefen des Weltalls, wenn Sterne explodieren (↗²), oder beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen (↗³).

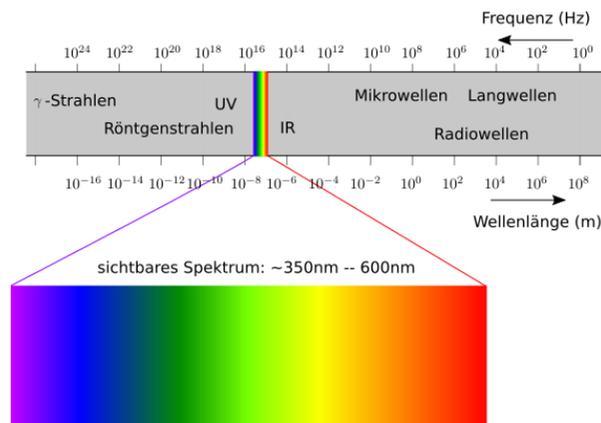
Es ist also eine Welle – oder nicht?!

Seit jeher fragen sich Philosophen, wie die Natur des Lichts ist. Lange Zeit hatten Menschen die Vorstellung, dass Licht aus kleinen Teilchen besteht, die von den Objekten in unsere Augen fliegen. Später, im 18. Jahrhundert, sprach man Licht jedoch eher einen Wellencharakter zu. Damals fand man heraus, dass man Licht, genau wie Wasserwellen, brechen, ablenken und streuen kann. Und durch J.C.Maxwell im 19.

Jahrhundert wurde endlich klar, dass Licht eine bestimmte Art von elektromagnetischer Welle ist. Die Frage nach der Natur des Lichts schien geklärt und die Idee der „Lichtteilchen“ wurde verworfen.



Doch ca. 50 Jahre nach Maxwells Überlegungen machte ein junger Wissenschaftler eine bemerkenswerte Entdeckung: er fand heraus, dass man nicht beliebig wenig Energie in eine elektromagnetische Welle stecken konnte. Normalerweise ergibt sich die Energie einer elektromagnetischen Welle aus zwei Faktoren: ihrer Wellenlänge und ihrer Intensität (also Helligkeit). Der junge Wissenschaftler – sein Name war Albert Einstein – fand heraus, dass diese Energie nicht beliebig klein sein kann. Mehr noch: Die Energie einer Welle konnte nur in Paketen mit bestimmten Größen, den Quanten, zu anderen Systemen übertragen werden. Diese Quanten sind energetischer, je kleiner die Wellenlängen sind. Mit anderen Worten: Es kann zwei elektromagnetische Wellen mit der gleichen Energie geben – eine sehr helle mit großer Wellenlänge und eine dunkle mit kleiner Wellenlänge. Bei der ersten gibt es viele Energiepakete mit wenig Energie, bei der zweiten wenige mit viel Energie.



Diese Pakete nennen wir Photonen. Man kann sie sich als kleine Teilchen vorstellen, aus denen Licht (oder jede andere elektromagnetische Strahlung) besteht. Einstein bekam für diese Entdeckung später den Nobelpreis. Das war der erste Beweis dafür, dass

sich ein physikalisches System sowohl wie ein Teilchen, als auch wie eine Welle verhalten kann. Daher wird Einstein oft auch als einer der Begründer der Quantenmechanik bezeichnet (↗⁴).

↗²: „Supernovae“ auf Seite 83

↗³: „Alpha-, Beta- und Gammastrahlen“ auf Seite 175

↗⁴: „Welle-Teilchen-Dualismus“ auf Seite 147



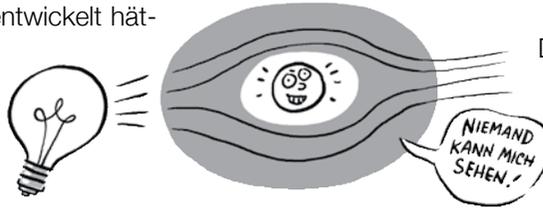
Tarnmäntel

Ungesehen durchs Leben gehen

Wer hat nicht schon einmal davon geträumt: Man läuft durch die Straßen, ohne dabei gesehen zu werden. Einfach einen magischen Umhang anziehen, und schon ist man unsichtbar. Die tollsten Streiche könnte man spielen! Obwohl die meisten Dinge, die man mit einem Tarnmantel tun könnte, bestimmt nicht besonders nett sind, hat sicher jeder von uns schon einmal daran gedacht.

Jetzt siehst du mich – jetzt nicht

Daher wurden die Menschen auch plötzlich ganz hellhörig, als Forscher der Universität von North Carolina im Jahr 2006 verkündeten, dass sie ein funktionierendes Tarngerät entwickelt hätten! Die erste Begeisterung wurde aber schnell wieder gedämpft, als die Forscher zugeben mussten, dass das Ding nur für kleine Objekte, nur mit Mikrowellen und nur bei einem Blick aus einer bestimmten Richtung funktionieren würde. Für das menschliche Auge wäre ein Objekt mit diesem Tarngerät also immer noch sichtbar. Aber man könnte es in eine eingeschaltete Mikrowelle legen, ohne dass es heiß werden würde. Immerhin. Aber wie funktioniert eigentlich so ein „Tarnmantel“?



darüber sein, wie wir Dinge sehen. Die alten Griechen dachten, dass unsere Augen ständig kleine Sensorstrahlen aussenden würden. Und sobald diese auf ein Objekt trafen, könnten wir es sehen. Heute wissen wir, dass es im Wesentlichen genau anders herum funktioniert: Ein Lichtstrahl von der Sonne (oder einer anderen Lichtquelle) trifft auf ein Objekt. Von all den Strahlen, die das Objekt treffen, werden einige absorbiert (und heizen es auf) und einige werden reflektiert, je nach Wellenlänge des Lichts (↗¹). Wann immer ein reflektierter Lichtstrahl in unser Auge trifft, gibt er uns den Eindruck einer bestimmten Farbe (je nach Wellenlänge), die aus dieser Richtung kommt.

Die Theorie ist also ganz einfach: Um ein Objekt unsichtbar zu machen, müssen wir es einfach davor bewahren, von Lichtstrahlen getroffen zu werden! Ein solcher Tarnmantel würde

die Lichtstrahlen einfach um das Objekt, das unsichtbar gemacht werden soll, herumleiten. Sobald ein Lichtstrahl auf den Mantel trafe, würde er von diesem nicht reflektiert, sondern an die andere Seite des Objekts gelenkt. Dort würde der Lichtstrahl einfach weiterlaufen, als wäre nie ein Hindernis im Weg gewesen.

Licht verbiegen – der erste Schritt zur Unsichtbarkeit

Bevor wir verstehen können, wie Unsichtbarkeit funktioniert, müssen wir uns erst einmal im Klaren

Kann Lichtbrechung helfen?

Alles klar. Damit ein Tarnmantel funktionieren kann, müssen wir also nur das Licht umlenken. Es gibt

↗¹: „Die Keplerschen Gesetze“ auf Seite 47