

Die verborgene Schönheit der Natur: die Sicht des Physikers

HANS J. PIRNER

Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

The article “The hidden beauty of nature” starts with a differentiation of beauty in art and science. The view of a physicist defines scientific aesthetics as a beautiful combination of intuition visualized in tables, graphs and pictures with simple explanations of the underlying laws of nature. Examples come from different subjects: Time, space, time-space and space-time, matter and forces. Physics makes time become visible by uniform oscillations. Decay curves of elements allow us to go back into the prehistory of the earth. Euclidean and curved spaces define our earth. Satellites built according to modern science present us with a magnificent picture of our earth from outside. Light propagating with finite speed confines the past and future of any event. The beautiful pattern of cosmic (microwave) radiation from space lets us go back to the big bang. Atomic structure shows up in macroscopic crystals, and modern tunnelling microscopes depict even single atoms, whereas the smaller elementary particles need modern detectors to map out their tracks and underlying symmetries.

1 Einleitung

Die liebliche Aussicht auf das Flusstal, der freie Blick über die Hügelkette, der leere Meeresstrand am frühen Morgen; die Natur ist schön anzuschauen. Aber kann auch Wissenschaft über die Natur „schön“ sein? Sollte sie nicht vielmehr

richtig sein, Experimente machen, Theorien testen und sich der Wahrheit verpflichten? Die Physiker selbst haben darüber unterschiedliche Meinungen. Es gibt die Meinung¹, das Universum sei hässlich und unsere Suche nach Schönheit führe die Physik in eine Sackgasse. Andere² wiederum bezeugen dem Universum Eleganz, welche sich in Superstrings, verborgenen Dimensionen und der daraus resultierenden Weltformel zeige.

Naiv könnte man sagen: Schön ist was gefällt. Doch der Philosoph³ drückt sich gewählter aus: „Schönheit ist eine Form der Zweckmäßigkeit eines Gegenstandes sofern sie ohne Vorstellung eines Zweckes in ihm wahrgenommen wird.“ Die Theorie der Ästhetik will die Qualität des Objekts vorstellen, um Schönheit verständlich zu machen. Aber gerade hier haben es die Physiker schwer mit den modernen Entwicklungen. Im 18. Jahrhundert konnte Johann Georg Sulzer⁴ die Natur als Garten der Physik mit allen ihren Schönheiten vorzeigen. „Für den Liebhaber, nämlich nicht für den kuriosen Liebhaber, oder den Dilettanten, der ein Spiel und einen Zeitvertreib aus den schönen Künsten macht, sondern für den, der den wahren Genuss von den Werken des Geschmacks haben soll, habe ich dadurch gesorgt, dass ich ihm viel Vorurteile über die Natur und die Anwendung der schönen Künste benehme; dass ich ihm zeige, was für großen Nutzen er aus denselben ziehen könne; dass ich ihm sein Urteil und seinen Geschmack über das wahrhaftig Schöne und Große schärfe.“ Wenn sich bei Kälte Wassertröpfchen zu Schneeflocken⁵ an winzigen Staubkörnchen formen, haben sie alle eine wunderbare sechsfache Symmetrie, und jedes einzelne hat eine andere Gestalt. Die Objekte der modernen Physik sind immer abstrakter geworden. In der Symmetrie der Schneeflocken spiegelt sich die Struktur der Wassermoleküle, deren H-O-H Atome in einem Winkel von ungefähr 104° angeordnet sind. Man sieht: In die wissenschaftliche Ästhetik schmuggelt sich eine Erklärung ein.

Ästhetik heißt wörtlich im altgriechischen die Lehre von der Wahrnehmung. Der Gegenstand spielt dabei die aktive Rolle, das Wahrnehmungsorgan die passive

¹ Sabine Hossenfelder und Gabriele Gockel, Das hässliche Universum, Frankfurt a/M, 2018

² Brian Green, Das elegante Universum: Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel, München 2006

³ Immanuel Kant, Kritik der ästhetischen Urteilskraft, S. 93 Leipzig 1921.

⁴ Johann Georg Sulzer, Allgemeine Theorie der Schönen Künste. Bd. 1. Leipzig, 1771, S. 7

⁵ <http://www.bbc.com/earth/story/20170221-the-stunning-beauty-of-snowflakes>

Rolle. Das Objekt zeigt sich. In der Naturschönheit erscheint die Natur in reiner Form, nicht als Stoff von Arbeit und Notwendigkeit, auch nicht als Stoff der Wissenschaft. Sie lässt sich nicht abbilden, sie ist schon Bild der wunderbaren Gesetzmäßigkeiten der Natur. Jede Art der versuchten Reproduktion kann sie nur verunzieren, man denke an mittelmäßige Bergbilder. Wenn ein aufmerksamer Wanderer vor dem Berg steht, dann stellt sich eine Beziehung zu ihm her, die Natur offenbart sich und wirkt direkt auf ihn. Die Naturschönheit ist nicht vom Menschen gemacht. Im Gegensatz zur Technik mit ihren Apparaten, die in der modernen Physik eine wichtige Rolle spielen, erscheint sie uns unvermittelt. Die Dichter⁶ schreiben Hymnen auf sie: „Schöne Sonne! Menschen hatten mich es nicht gelehrt, mich trieb unsterblich liebend mein heilig Herz Unsterblichen entgegen, entgegen dir!“ Sie erkennen ihre Vollkommenheit als Chiffre von etwas Höherem.

Kunstschönheit unterscheidet sich von der reinen Nachahmung der Natur. Die Kunst kann aus vielen Vorbildern wählen, deshalb können gemalte Personen wirkliche Menschen an Anmut übertreffen. Der Künstler ist frei seine Vorstellungen ins Werk zu übersetzen. Er kann auch andere Themen wie die antike Mythologie oder die Wolkenkratzer von Manhattan darstellen. Seine handwerklichen Fertigkeiten sind die Instrumente seines gewitzten Geistes, der eine Idee verfolgt. Die Kunst der Moderne hat sich teilweise vom Gegenstand abgewendet und konstruiert eine Gegenwelt, die dem realen Erscheinungsbild widerspricht. Sie zieht die Grenzen zwischen dem Ich und der Welt jeweils neu, so dass ungeklärt bleibt, ob man die Schönheit objektiv oder subjektiv bewerten kann. Ohne Zweifel erfordert die moderne Kunst einen aufmerksamen und kritischen Interpreten. Schönheit lässt uns über den Grund der Dinge nachdenken, sie kann also auch ein Gegenstand des Verstandes sein.

Die Schönheit der Physik ist ohne Hilfe des Verstandes schwer zu erkennen. Sie liegt im Zusammenspiel zwischen der experimentellen Beobachtung und den zugehörigen theoretischen Konzepten. Wenn die erste Tätigkeit sich in komplexen Apparaturen und langen Datensätzen niederschlägt, ist das Ergebnis sicher eindrucksvoll, aber für den Laien weniger erhebend. Geschickte Darstellung der Resultate oder – modern ausgedrückt – ihre Visualisierung können die Intuition anleiten, verborgene Regelmäßigkeiten zu entdecken. Tabellen und Schemata sind

⁶ Christoph Friedrich Hölderlin, Empedokles - Kapitel 2, <http://gutenberg.spiegel.de/buch/empedokles-261/2>

andere Mittel, Ordnung und Übersichtlichkeit zu erzeugen. Am Ende ist es die symbolische Sprache der Mathematik, welche die tiefsten Naturgesetze in ihrer großen Schönheit darstellt. Naturgesetze beweisen universelle Gültigkeit, von der subatomaren Welt bis zum astrophysikalischen Kosmos.

Als Physiker hegen wir die Hoffnung dem Nichtfachmann die physikalischen Muster und Strukturen ohne komplizierte Mathematik zu zeigen, so dass er Gefallen daran findet. „Die ganze Philosophie, sagte ich ihr, beruht nur auf zwei Tatsachen, dass wir einen neugierigen Geist haben und schlechte Augen. Hätten wir bessere Augen als wir sie haben, würden wir wohl sehen, ob die Sterne Sonnen sind, die andere Welten beleuchten, oder ob sie es nicht sind.“ Dies sagt Bernard Le Bouyer de Fontenelles⁷, wenn er einer Marquise in ihrem Schlossgarten die Schönheiten des Sonnensystems erklärt. Fontenelles Text ist äußerst vergnüglich zu lesen, weil er die Materie leicht verständlich darlegt. Er soll unterhalten, den Kenner durch Details erfreuen und der Laiin die Schönheit der Landschaft eröffnen, welche die Physik vor uns ausbreitet.⁸

In den folgenden vier Kapiteln habe ich schöne Eindrücke aus der Physik gesammelt. Wie kann man die Zeit sehen? Was macht sie harmonisch? Die regelmäßigen Pendelschläge füllen den Zeitraum zwischen den Sekunden. Wir haben keine Kontrolle über die Zeit, aber im Raum können wir uns frei bewegen. Die Physik hat ungeheure Fortschritte erzielt, einen immer größer werdenden Raum sichtbar zu machen. Sie erlaubt es uns, die Erde von außen zu sehen. Die Satelliten-Astronomie präsentiert uns die Schönheit unseres Planetensystems und die Geheimnisse weit entfernter Galaxien. Indem wir Zeit und Raum in der Raum-Zeit zusammenfassen, erscheinen Ereignisse in einem neuen Licht. Lichtstrahlen begrenzen den zeit-räumlichen Bereich, in dem vergangene Ursachen und zukünftige Wirkungen liegen. Das Licht vom Big Bang lässt uns tief in die Entstehung unseres Universums hineinblicken, als Materie und Kräfte in einem kontinuierlichen Prozess entstanden, der von mathematischen Symmetrien bestimmt ist. Die physikalischen Symmetrien sind allerdings meistens gebrochen, was die begrenzte Macht der Mathematik in der realen Welt zeigt, aber die Schönheit vermehrt. Bei vielen gotischen Kirchen sind die beiden Türme nicht gleich, so z. B. bei der Kathedrale Notre Dame de Chartres. Dies hat historische Gründe; Feuersbrünste

⁷ Bernard Le Bouyer de Fontenelle, *Entretiens sur la pluralite des mondes*, 1686. Paris.

⁸ Hans J. Pirner, *Virtuelle und Mögliche Welten in Physik und Philosophie*, Heidelberg, 2018.

zerstörten das Bauwerk, und die Baumeister meinten, sie könnten ihren Stil bei der Konstruktion des neuen Turms verbessern.

2 Wie kann man Zeit sehen?

Die Zeit ist unsichtbar. Eine Umwelt, in der sich nichts bewegt, erscheint zeitlos. „Time happens when nothing happens“, ist ein Ausspruch des Physikers Richard Feynman. Er will damit sagen, dass wir nicht so recht verstehen, was die Zeit macht. Ohne Veränderungen können wir nicht von einer zeitlichen Entwicklung sprechen. Änderungen allein würden jedoch nicht genügen, um einem Prozess als Funktion der Zeit zu beschreiben. Es braucht die regelmäßige Wiederkehr spezifischer Ereignisse, damit man im Vergleich mit diesen sagen kann, der Prozess dauert so viele Elementarereignisse. Die Schönheit der Natur entfaltet sich in der Wiederholung der Jahreszeiten, welche abhängig vom Stand der Erde zur Sonne in den gemäßigten Zonen der nördlichen Halbkugel auftreten

Physikalisch drückt sich die periodische Bewegung in einfachen Systemen aus, die deswegen eine besondere Stellung einnehmen. Beim ebenen Pendel hängt eine schwere Masse im Abstand von ungefähr einem Meter vom Drehpunkt. Wenn man es in einem endlichen Winkel aus seiner Ruhelage ausgelenkt hat, schwingt es zu einem ebenso großen Winkel auf der anderen Seite. Die Schwingungszeit dauert eine Sekunde, bestimmt durch die Erdbeschleunigung und die Länge des Pendels. Die Bewegungsgleichung des Pendels kann elementar für kleine Winkel gelöst werden und ergibt die trigonometrische Cosinus-Funktion mit der oben beschriebenen Frequenz, siehe Abb. 1.

Nach zwei Sekunden befindet sich das Pendel wieder in der gleichen Lage wie am Anfang. Man bezeichnet diese Schwingung als harmonische Schwingung, die durch eine Cosinus-Funktion darstellbar ist. In Wirklichkeit wird das Pendel nach einiger Zeit durch die Reibung mit der Luft weniger weit schwingen. Für Uhren stößt ein Zahnrad das Pendel über einen Anker an, damit es regelmäßig weiterschwingt. Die mathematische Lösung für endliche Winkel ist eine etwas kompliziertere elliptische Funktion, die eine leicht veränderte Periode ergibt. Die mathematisch schönste und einfachste Lösung entspricht oft nicht der Wirklichkeit. In der Musik würde der Cosinus-Funktion ein Konzert mit nur einem Ton entsprechen. Die Kunstschönheit eines Musikstücks dieser Art kann man bei John Cage nachhören, der angewiesen hat das Orgel-Stück „As SLOW as Possible“ so

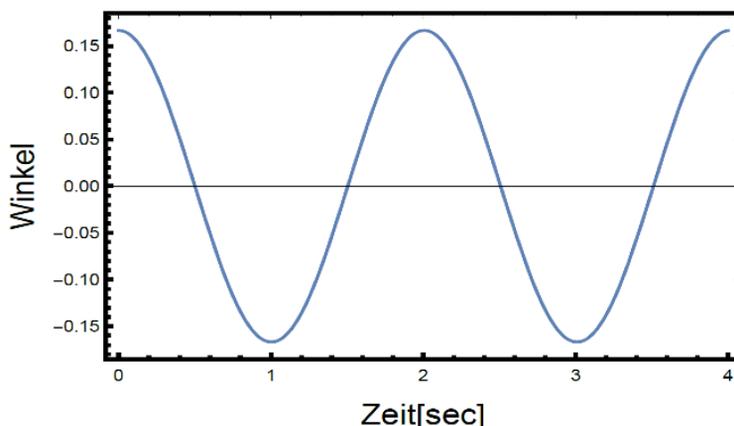


Abbildung 1: Die dargestellte Cosinus-Funktion zeigt den Auslenkwinkel in Radiant (rad) als Funktion der Zeit in Sekunden. 0.15 rad entsprechen 8.6° .

langsam wie möglich zu spielen, so dass bei der Aufführung in der Burchardikirche in Halberstadt der Ton⁹ nur jedes Jahr wechselt. Ich habe eine kurze Version des Stücks gehört, die 29 Minuten dauert. Die Eintönigkeit lässt ahnen, wie lang die Ewigkeit dauert.

Moderne Uhren sind Quarzuhren. Hier wird ein Schwingkreis aus einer Induktivität und einer Kapazität aufgebaut, der durch seine Spannung einen Quarzkristall zu schwingen anregt. Die typischen Frequenzen sind hier 300 000 Schwingungen pro Sekunde. Die Gitterschwingungen des Quarzes kontrollieren die Frequenz sehr genau. Bei Atomuhren wird der Übergang zwischen zwei atomaren Zuständen als Frequenzmaß genommen. Die typischen Frequenzen dafür sind 9 000 000 000 Schwingungen pro Sekunde, welche die Präzision auf 10^{-12} Sekunden begrenzen. Die besten Frequenzmessungen erlauben diese Genauigkeit noch um drei Größenordnungen zu verbessern.

Indem man zwei solcher harmonischen Schwingungen von Licht überlagert und die resultierende Schwebung untersucht, erreicht man noch eine höhere Genauigkeit. Die Schwebung hat eine 20-fach längere Periode und ist deswegen gut

⁹ Um exakt zu berichten: Am 5. September 2020 wird der Wechsel zum Akkord gis, e' stattfinden. <https://de.wikipedia.org/wiki/ORGAN%C2%B2/ASLSP>

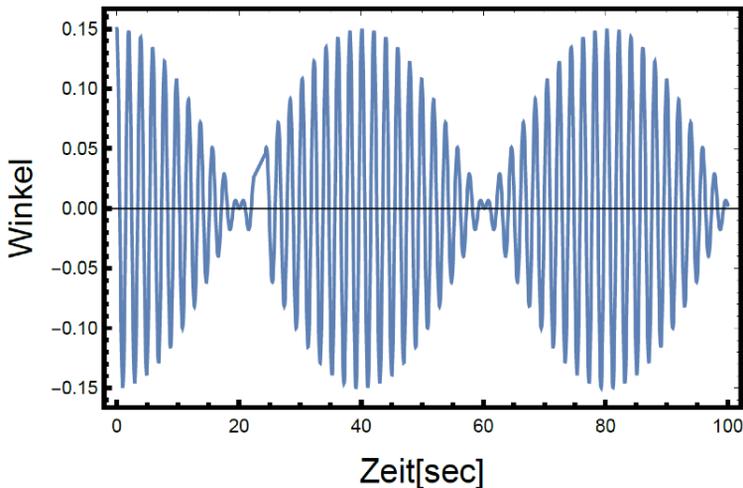


Abbildung 2: Überlagerung der Grundschwingung des Pendels mit einer zweiten Schwingung, die eine um 5% höhere Frequenz hat. Der Winkel ist in Radian (rad) dargestellt.

zu messen. Abb. 2 zeigt das Resultat der Überlagerung der Grundschwingung des Pendels mit einer zweiten, die eine um 5% höhere Frequenz hat. Die Vergleichsfrequenz haben Theodor Hänsch und Mitarbeiter aus einem äquidistanten Frequenzkamm genommen, dessen Herstellung eine technische und wissenschaftliche Leistung war, für die er 2005 den Nobelpreis bekam. Mit Hilfe dieser Methode konnte er zeigen, dass die relative zeitliche Änderung der elektrischen Ladung nur $(-0.9 + / - 2.9) 10^{(-15)}/\text{Jahr}$ beträgt¹⁰. Sie ist bis auf Messfehler konstant. Die elektromagnetische Wechselwirkung ist also über weite Zeiten des Universums unveränderlich.

Um ganz lange Zeiten zu überbrücken muss man den Zerfall eines Atomkerns studieren, der eine sehr lange Lebensdauer hat, wie z. B. U^{238} . Abb. 3 zeigt, wie viele Atomkerne beim Zerfall $U^{238} \rightarrow Pb^{206}$ als Funktion der Zeit nach Millionen

¹⁰ Siehe: M. Fischer, N. Kolachevsky, M. Zimmermann, R. Holzwarth, Th. Udem, T. W. Hänsch, M. Abgrall, J. Grünert, I. Maksimovic, S. Bize, H. Marion, F. Pereira Dos Santos, P. Lemonde, G. Santarelli, P. Laurent, A. Clairon, C. Salomon, M. Haas, U. D. Jentschura, and C. H. Keitel: *New Limits on the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements*, in: *Physical Review Letters* 92 (2004), 230802.

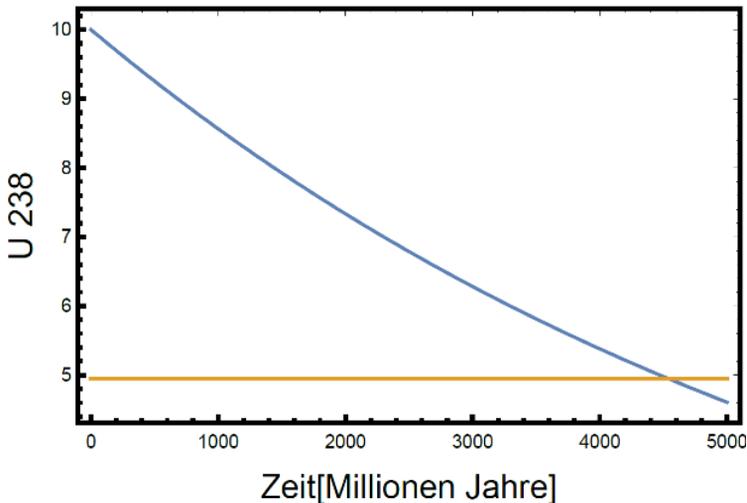


Abbildung 3: Anzahl von U^{238} Atomkernen, die von 10 U-Kernen nach langer Zeit (in Millionen Jahren) übrigbleiben. Ungefähr die Hälfte der Atomkerne ist seit der Entstehung der Erde zerfallen (roter Strich).

Jahren übrigbleiben. Die horizontale Linie entspricht der Anzahl der Kerne, die von anfänglich 10 U-Kernen nach der Entstehung der Erde vor 4540 ± 50 Millionen Jahren übrigbleiben (der Anfangswert ist willkürlich auf 10 Kerne gesetzt). Mit diesem Zerfall wurde das Alter der Erde bestimmt. Neben den trigonometrischen Funktionen ist die exponentielle Zerfallskurve die andere Standardschönheit der Physik. Sie ist allgegenwärtig. Die frühe Vorgeschichte zeigt, dass die Natur sich allein entwickelt und nicht den Menschen als Beobachter braucht. Die Erde ist ohne uns entstanden und hat objektive Realität. Schönheit der Natur ist für den Physiker kein Produkt unserer Vernunft, die wir der Natur hinzufügen, sondern sie liegt in ihr selbst, und wir entdecken sie.

3 Den Raum erschließen

„Es hatte eine Ewigkeit gedauert bis seine Helfer den störrischen Stamm durchgesägt hatten und er Eugens Leuchtsignal mit dem Theodoliten anpeilen konnte. ... Morgen würden sie sich treffen, und er musste sich darum kümmern, wie man von dort in höchstens zwei Geraden zum nächsten Knotenpunkt kam.“

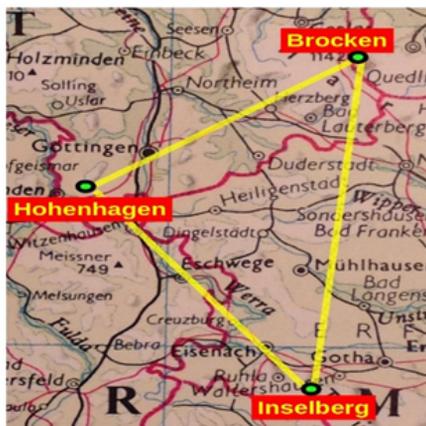


Abbildung 4: Die Triangulierung von Carl Friedrich Gauss zwischen Brocken, Hohenhagen und Inselberg im Herzogtum Hannover. <https://thatsmaths.files.wordpress.com/2014/07/dreieck-03.jpg>

So beschreibt Daniel Kehlmann¹¹ die Vermessungsarbeit von Carl Friedrich Gauss. Zwischen 1821 und 1825 machte Gauss extensive Feldarbeit im Herzogtum Hannover (Abb. 4). Er leistete bodenständige Arbeit. Seine Ergebnisse über die Winkelsumme im sphärischen Dreieck waren ungenau, sie waren mit 180° verträglich. Die physikalische Korrektur, die er bei unendlicher Genauigkeit hätte messen können, ist unmessbar klein¹². Sie berechnet sich aus der Krümmung der Lichtstrahlen im Schwerfeld der Erde und der Größe der vermessenen Fläche zu 10^{-13} .

In seinen mathematischen Schriften hatte Gauss den Grundstein für die nicht-euklidische Geometrie gelegt, die später von János Bolyai, Nikolai Ivanovich Lobachevsky und Bernhard Riemann weiter entwickelt wurde. Auf der Kugel der Erde ist einfach bei großen Abständen zu sehen, dass die Winkelsumme größer als 180° ist (siehe Abb. 5). Gauss aber hat seine Messungen mit geradlinigen Lichtstrahlen gemacht.

¹¹ Daniel Kehlmann, Die Vermessung der Welt, 2005, Hamburg, S. 184

¹² <https://thatsmaths.com/2014/07/10/gauss-s-great-triangle-and-the-shape-of-space/>

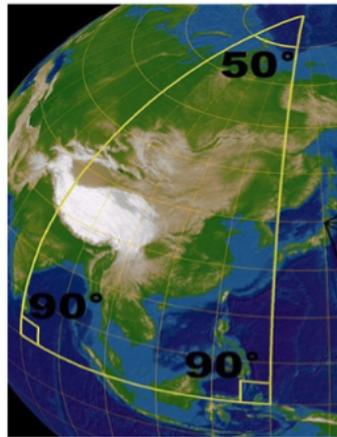


Abbildung 5: Die Winkelsumme eines Dreiecks auf der Erdkugel. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triangles_\(spherical_geometry\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triangles_(spherical_geometry).jpg)

Die Physik des zwanzigsten Jahrhunderts erlaubt es, die Erde in ihrer vollen Gestalt zu fotografieren, und produziert damit ein Bild von außergewöhnlicher Schönheit, das bei allen Astronauten Anlass zu großer Freude war. Abb. 6 zeigt ein Bild Nordamerikas, das vom Wettersatelliten Suomi NPP aus 826 km Höhe aufgenommen wurde. Die Erde erscheint als blauer Planet, weil die Oberfläche zu $\frac{2}{3}$ aus Ozeanen besteht. Dieses Bild sieht der Astronaut, wenn er die Erde verlassen hat und sich im Weltall befindet. In der Physik geht es um die schöne Außenansicht. Die Metapher des räumlich Äußeren stellt ein Gegenbild zur modernen Verinnerlichung dar, die sich in der schönen Literatur in inneren Monologen und endlosen Bewusstseins-Strömen manifestiert. Der Philosoph Michel Foucault hat diese Erfahrung des schönen Außen so charakterisiert¹³: „Das Denken hält sich außerhalb jeder Subjektivität, um ihre Grenzen wie von außen hervortreten zu lassen, um ihr Ende zu verkünden, ihre Zerstreuung aufsprühen zu lassen, und ihre endgültige Abwesenheit festzustellen.“

¹³ Michel Foucault, Das Denken des Außen in „Von der Subversion des Wissens“, Frankfurt/Berlin, 1978, S. 57



Abbildung 6: Nordamerika aus 826 km Höhe vom Wettersatelliten Suomi NPP aufgenommen. https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:North_America_from_low_orbiting_satellite_Suomi_NPP.jpg

Der Blick von außen auf die Erde schließt uns nicht aus. Zusammen mit den anderen 7.6 Milliarden Bewohnern gehören wir zu dieser Erde und sind verantwortlich für ihre Zukunft.

Ebenso herrliche Bilder existieren von den anderen Planeten unseres Sonnensystems. Unser Sonnensystem befindet sich in der Milchstraße. Es ist aber schwierig, ein direktes Bild unserer Milchstraßen Galaxie zu bekommen. Man muss sich das so vorstellen, wenn man mitten im Wald steht, ist es schwer sich ein Bild vom Wald zu machen, weil die vielen Bäume uns den Blick verstellen. Teleskope haben jedoch Profile der Milchstraßenscheibe für verschiedene Wellenlängen¹⁴ aufgezeichnet, die in Abb. 7 zu sehen sind. Die Farben im Radio- und Infrarot-Spektrum sind sogenannte Falschfarben, die dazu dienen die verschiedenen Wellenlängen in diesen Teilen des Spektrums zu unterscheiden.

¹⁴ Lee, Hyunju & E. Schneider, Stephen, (2015). Using Astronomical Photographs to Investigate Misconceptions about Galaxies and Spectra: Question Development for Clicker Use, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. 11, 020101.

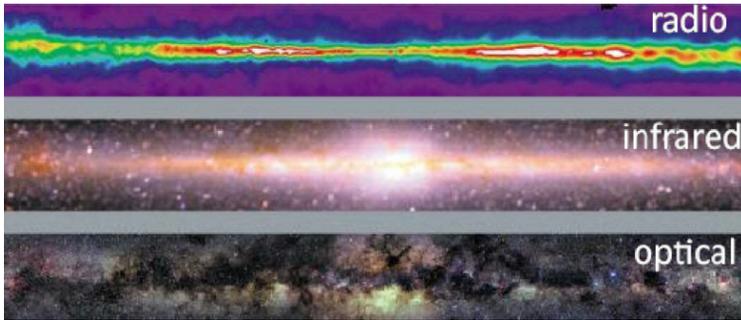


Abbildung 7: Profile der Milchstraßenscheibe, wie sie Teleskope bei verschiedenen Wellenlängen sehen. Der Radiobereich (radio) umfasst Wellenlängen zwischen Kilometern und Metern, der infrarote Bereich (infrared) um die 0.3 Millimeter und der sichtbare Bereich (optical) zwischen 0.7 und 0.4 Mikrometer. Abbildung aus Ref. 14.

Die Radioteleskope messen die elektromagnetische Strahlung von beschleunigten Elektronen, die teilweise vom intergalaktischen Magnetfeld oder von Protonen mitgerissen werden. Die infraroten Teleskope können tiefer in die Ebene der Galaxie hineinschauen als die optischen Teleskope. Das infrarote Spektrum stammt von Sternen (helle Flecken) oder vom interstellaren Staub. Das optische Licht stammt von nicht so weit entfernten Sternen in bis zu 1000 Lichtjahren Entfernung, weil es sonst stark absorbiert würde. Wenn wir an die Milchstraße denken, sehen wir das Bild einer Spiralgalaxie vor uns. Diese Bilder gibt es von anderen Galaxien wie dem Andromeda-Nebel. Für die Milchstraße aber ist die Spiralgestalt nur rekonstruierbar. Der Satellit Gaia zeichnet eine dreidimensionale Karte unserer Galaxie auf, die die Zusammensetzung, Bildung und Evolution der Galaxie entschlüsseln hilft. Er misst die Positionen von ungefähr 1 Milliarde galaktischer Sterne.

4 Zeit-Raum versus Raum-Zeit

Gewisse Philosophen kritisieren, dass die Naturwissenschaft den Zeitraum ignoriere. Nur das Bewusstsein könne die Dauer wahrnehmen. Der Physiker registriere nur die extremen Ausschläge des Pendels, die für die Definition der Sekunde wichtig sind. Aber dazwischen, in dem Zeitraum zwischen den maximalen Winkeln existieren beliebig viele andere Pendelpositionen, die den Raum zwischen den Sekunden ausfüllen. In jedem Intervall dieses Zeit-Raums ereignet sich ein

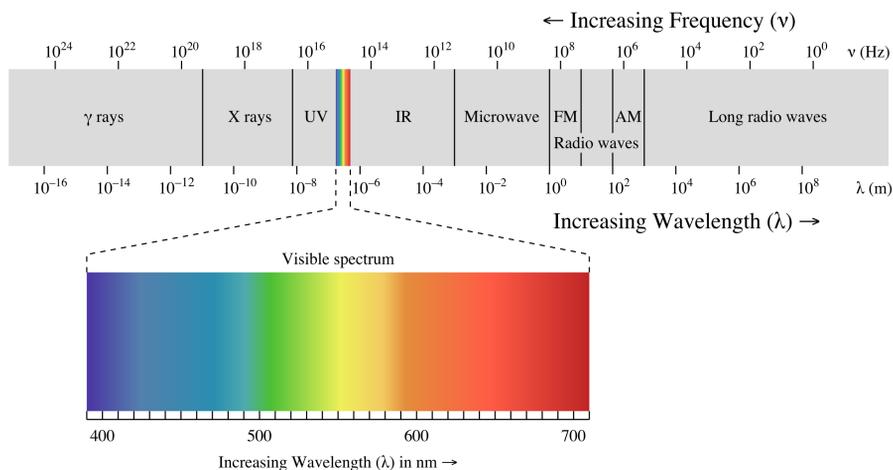


Abbildung 8: Spektrum des sichtbaren Lichts zwischen 400 Nanometer (= 0.4 Mikrometer) für blaues Licht und 700 Nanometer (= 0.7 Mikrometer) für rotes Licht. https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication#/media/File:EM_spectrum.svg

spezieller Winkel. Die Physik vereinigt Zeit und Raum im Begriff der Raum-Zeit. Das Ereignis als wohldefinierter Punkt in der Raum-Zeit ist Ausgangspunkt eines Systems schöner physikalischer Begriffe. Wie ist es dazu gekommen und wie sollen wir die Raum-Zeit verstehen? Am Anfang steht die Beobachtung der elektromagnetischen Wellen, die sich im Sichtbaren als Spektrum mit verschiedenen Farben zeigen (siehe Abb. 8).

Vom extrem kurzwelligen Blau bis zum langwelligen Rot sieht unser Auge gerade den Teil des Spektrums, der am intensivsten im Licht der Sonne ist. Johann Wolfgang von Goethe¹⁵ hat diese Eigenschaft so kommentiert:

*Wär nicht das Auge sonnenhaft,
die Sonne könnt es nie erblicken.*

¹⁵ Die Naturphilosophie Goethes weicht von der Idee der Wahrnehmung ab, die ich in der Einleitung skizziere und sich an Gernot Böhme „Eine ästhetische Theorie der Natur“, Frankfurt a/M 1992, S. 125 ff., orientiert.

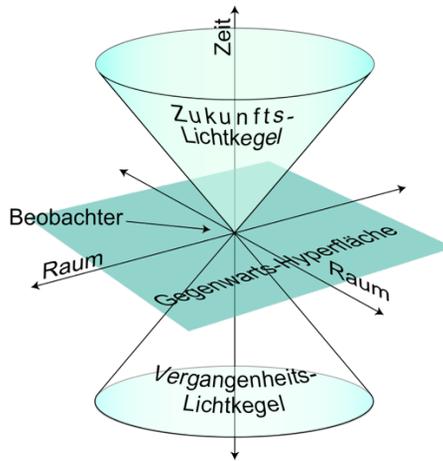


Abbildung 9: Darstellung der Raum-Zeit für einen Beobachter, der sich im Ursprung der Gegenwarts-Fläche befindet. Zukunft und Vergangenheit liegen innerhalb des Zukunfts-Lichtkegels und Vergangenheits-Lichtkegels. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34298557>

Wenn man zur Abb. 1 zurückgeht, kann man die elektromagnetische Welle als eine Oszillation im Ort verstehen, die sich in der Zeit mit der Lichtgeschwindigkeit von 299 792 458 Metern pro Sekunde fortbewegt. In Abb. 9 ist eine aufblitzende Lichtquelle im Ursprung dargestellt, welche den ihr zugehörigen Lichtkegel erhellt. Da die Lichtgeschwindigkeit die höchste Grenzgeschwindigkeit ist, können nur Ereignisse innerhalb des Vergangenheits-Lichtkegels oder auf seinem Mantel den Beobachter im Ursprung beeinflussen. Ebenso kann der Beobachter im Ursprung der Abb. 9 nur Ereignisse innerhalb des Zukunfts-Lichtkegels beeinflussen. Die Vereinigung von Raum und Zeit zu der Raum-Zeit geht von der Unveränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen aus, die sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit gegeneinander bewegen.

Die Konstruktion der speziellen Relativität ist abstrakt, da wir kein Gefühl für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit haben. Ihre Wichtigkeit zeigt sich z. B. in der Höhenstrahlung, die einen Schauer von vielen schnellen Teilchen enthält, die sich mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Instabile Teilchen wie z. B. die Myonen haben eine sehr kurze Lebensdauer $d\tau \approx 2 * 10^{(-6)}$ sec in ihrem Ruhesystem. In dieser Zeit würden sie nur 600 Meter weit fliegen. Wenn sie aber mit großer Geschwindigkeit in dem Luftschauer zur



Abbildung 10: Polarlicht produziert von geladenen Elektronen und Protonen durch Anregung der Atome in der Atmosphäre. https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Polarlicht_2.jpg.

Erde kommen, haben sie eine verlängerte Lebensdauer dt , die es ihnen erlaubt, die Erde zu erreichen. In Funkenkammern kann man sie gut nachweisen. Spektakulärer für das bloße Auge sind die Polarlichter, die von langsameren Elektronen oder Protonen der kosmischen Strahlung produziert werden, welche auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre in den Polarregionen treffen. Durch das Magnetfeld der Erde werden die langsamen Teilchen zu den magnetischen Polen hingelenkt. Sie produzieren schöne leuchtende Polarlichter, indem sie die Luftmoleküle zum Leuchten anregen (siehe Abb. 10).

Wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit kommen die Nachrichten aus dem Kosmos zu uns aus längst vergangenen Zeiten. In der kosmischen Mikrowellenstrahlung ist ein wichtiges Ereignis der Kosmologie kodiert, welches 300 000 Jahre nach dem Big Bang stattfand, als sich die Elektronen und Protonen des heißen Plasmas zu Wasserstoff vereinigten. Satelliten haben diese Hintergrundstrahlung im Gebiet der cm-Wellen immer genauer gemessen. Ihr Spektrum folgt sehr genau dem Planckschen Strahlungsspektrum eines Körpers, der mit 270°C unter dem

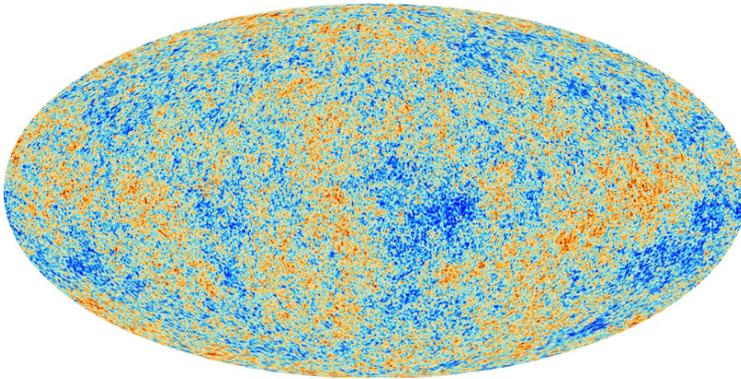


Abbildung 11: Das Bild zeigt die Anisotropie der kosmischen Mikrowellenstrahlung im Weltall (CMB=cosmic background radiation), wie sie der Planck-Satellit beobachtet hat. Die winzigen Temperaturunterschiede definieren Gebiete mit leicht unterschiedlichen Dichten, welche die Keime der Sterne und Galaxien von heute bilden. Diese Momentaufnahme stellt unser Universums 380 000 Jahre nach dem Big Bang dar. <https://phys.org/news/2013-03-planck-reveals-universe.html>.

Nullpunkt der Celsius Skala sehr kalt ist. Die beobachtete Temperatur ist tausendmal kleiner als die Temperatur $T = 0.3 \text{ eV} \approx 3500 \text{ K}$ ¹⁶, bei der sich nach dem Big Bang aus Elektronen und Protonen Wasserstoff bildete. Durch die Expansion des Weltalls hat sich die Wellenlänge des ursprünglichen Lichts zu 1000 Mal längeren Wellenlängen vergrößert. Das heiße Plasma war vollkommen undurchsichtig, erst nach der Rekombination der geladenen Elektronen und Protonen ist das Universum für Photonen transparent geworden.

Die kosmische Mikrowellenstrahlung zeigt als Funktion der Richtung nur sehr kleine Temperaturschwankungen von 0.001%, die in verschiedenen Farben auf Abb. 11 dargestellt sind. Auf diesem Bild sind die Strahlung von der Milchstraße (siehe Abb. 7) und der Dipol-Anteil der Strahlung entfernt, der davon herrührt, dass unsere Galaxie sich mit 300 km/sec in Bezug auf den Strahlungshintergrund bewegt. Temperaturschwankungen durchziehen wie akustische Wellen das frühe Universum. Gravitationsfelder komprimieren die baryonische Materie und erhitzen

¹⁶ Null auf der Celsius-Skala (0°C) entspricht 273,15 K, mit einer Temperaturdifferenz von 1°C äquivalent zu einer Differenz von 1 K. Die Energieskala (eV) und die absolute Temperaturskala ($^\circ \text{K}$) sind miteinander verknüpft, 1 K entspricht $8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$.

sie, so dass sie sich wegen der erhöhten Temperatur ausdehnt. Dadurch wird sie wieder kühler, was dazu führt, dass die anziehende Gravitation wieder an Stärke gewinnt und die Dichte erhöht. So wechseln sich Verdünnung und Kompression ab, was wellenartige Anregungen auslöst.

Auf Grund der Analyse dieses Bildes ist das Standardmodell der Kosmologie mit 4.8% baryonischer Materie, 69% dunkler Energie und 26.2% dunkler Materie entstanden. Davon verstehen wir nur den sichtbaren Anteil von 4.8%, der dunkle Rest ist notwendig, um die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie zu erfüllen. Damit der Mikrowellenhintergrund so homogen ist, muss das sehr frühe Universum sich extrem schnell ausgedehnt haben. Dieser inflationäre Vorgang nach dem Big Bang sollte auch einen großen Ausbruch von Gravitationswellen ausgelöst haben. Die kürzlich erstmals beobachteten Gravitationswellen bei der Vereinigung zweier schwarzer Löcher lassen hoffen, dass wir bald auch Gravitationswellen beobachten können, welche die inflationäre Phase des Universums bezeugen.

5 Materie und Kräfte

Wenn man einen Faden in eine Salzlösung hält, dann bilden sich daran innerhalb von Wochen dreidimensionale Kristalle. Die kubische Struktur des Kristallgitters aus Natrium- und Chloratomen ist gut an der makroskopischen Gestalt des Kristalls (Abb. 12) zu erkennen. Im Gitter wechseln sich in jeder Raumrichtung Natriumatome mit Chloratomen ab.



Abbildung 12: Dreidimensionale Kochsalz-Kristalle. Die kubische Struktur spiegelt das Kristallgitter aus Na- und Cl-Ionen wieder. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rock_salt_crystal.jpg

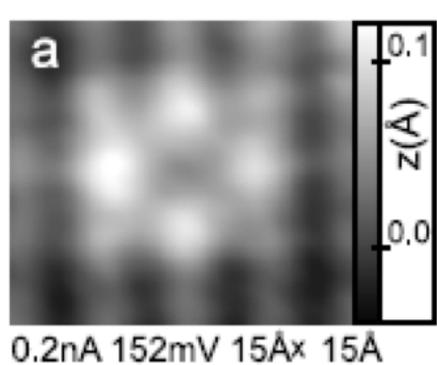


Abbildung 13: Experimentelles Ergebnis für das Bild, welches das Raster-Tunnelmikroskop von einer Cl-Leerstelle umgeben von Natriumatomen auf einem Kupfergitter erzeugt. Die Abbildung stammt von der Ref.17. Das Mikroskop benutzt den quantenmechanischen Tunneleffekt, um mittels einer Spannung zwischen einer feinen Spitze und einer Oberfläche einen Tunnelstrom zu erzeugen.

Mit dem Rastertunnelmikroskop¹⁷ kann man eine Schicht von NaCl-Atomen auf einer Kupferschicht sehen. Man kann erkennen, dass ein Cl-Atom inmitten der umgebenden Na-Atome fehlt. Das Mikroskop bildet die Dichte der Elektronen in den Hüllen der Atome ab. Man kann mit dem Tunnelmikroskop einzelne Atome quasi sehen (siehe Abb. 13).

Im Jahr 2019 feiern wir den 150. Geburtstag des Periodensystems. Im Prinzip ist das periodische System der Elemente ganz einfach, weil es die Zentralsymmetrie¹⁸ der elektrischen Wechselwirkung zwischen dem Atomkern und den Elektronen widerspiegelt. Die Wechselwirkung hängt nur vom Abstand und nicht von der Richtung der Elektronen vom Kern ab. Sie führt dazu, dass sich die Elektronen in der Atomhülle in Schalen anordnen, die in Perioden und Gruppen angeordnet sind (siehe Abb. 14). Das Alkalimetall Na befindet sich in der dritten Periode und 1. Hauptgruppe, d.h. es besitzt ein Elektron mit dem Drehimpuls Null in der

¹⁷ Jascha Repp, Gerhard Meyer, Sami Paavilainen, Fredrik E. Olsson and Mats Persson, PRL95,225503 (2005)

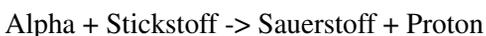
¹⁸ Außer der Zentralsymmetrie bestimmt das Pauli-Prinzip für die Elektronen die Besetzung der Orbitale. Jeder Quantenzustand kann nur einfach von einem Elektron besetzt werden. Orbitale zu einem Drehimpuls l können wegen des halbzahligen Spin des Elektrons deswegen $2 \cdot (2l+1)$ mal besetzt werden, z.B. im p - ($l=1$) Orbital im Cl können sich maximal 6 Elektronen aufhalten.

	6,9	9,0	10,8	12,0	14,0	16,0	19,0		20,2	
3	Na 23,0	Mg 24,3	Al 27,0	Si 28,1	P 31,0	S 32,1	Cl 35,5		Ar 39,9	
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni

Abbildung 14: Ein Ausschnitt aus dem Periodensystem der Elemente. Die Elektron-Wellenfunktionen der Elemente in der dritten Periode haben Aufenthaltswahrscheinlichkeiten mit drei (s-Orbitale) und zwei (p-Orbitale) Knoten. Na in der ersten Hauptgruppe hat ein Elektron in der 3s-Schale, während Cl zwei Elektronen in der s-Schale und fünf Elektronen in der p-Schale besitzt. Die obige Abbildung ist ein Teil der Abbildung http://www.imn.htwk-leipzig.de/~stich/Bilder_VH/II.IV.pdf.

äußersten 3s Schale. Sein Partner Cl gehört zur Gruppe der Halogene (7. Hauptgruppe) und hat die Konfiguration der äußersten Schale $3s^2 3p^5$. Ihm fehlt ein Elektron in der p-Schale mit Drehimpuls Eins. Dies erklärt die Affinität zwischen dem Natrium und dem Chlor. Das Natriumatom gibt ein Elektron dem Chloratom. Dadurch baut sich eine elektrische Bindung zwischen dem positiv geladenen Ion Na^+ und dem negativ geladenen Cl^- auf.

Die entsprechende Liste der Atomkerne wird als Funktion der Anzahl der Protonen und Neutronen in den Kernen dargestellt. Auch in Atomkernen gibt es ein Schalenmodell, welches aber keine räumliche Anordnung auszeichnet. Für die tausendmal kleineren Kerne ist man auf Streuexperimente angewiesen, um ihren Aufbau zu studieren. Die älteste Aufnahme eines solchen Experiments stammt von Rutherford aus dem Jahr 1919, der eine mit Stickstoff gefüllte Nebelkammer mit Alphateilchen (He-Kerne) beschoss und die Reaktion



nachwies, wobei das Proton eine lange dünne Spur und der Sauerstoffkern eine kurze dicke Spur hinterlässt. Die Kammer enthielt keinen Wasserstoff (Proton + Elektron), also musste das Proton in der Reaktion erzeugt werden. Blaskammeraufnahmen haben in der frühen Elementarteilchenphysik eine wichtige Rolle gespielt.

In Abb. 15 ist eine Blaskammer Aufnahme von der Wechselwirkung eines Gammaquants mit dem virtuellen Photon des Coulombfelds eines Atomkerns dargestellt. Die beiden Photonen produzieren ein negativ geladenes Elektron und ein positiv geladenes Positron, das Antiteilchen des Elektrons. Diese entgegengesetzt

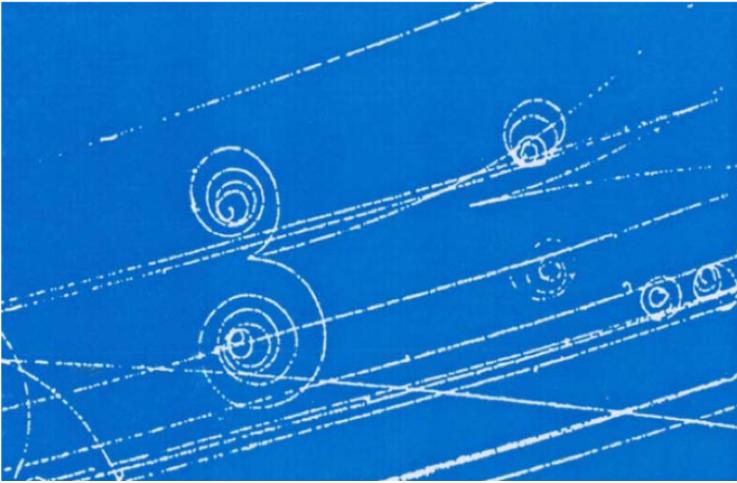


Abbildung 15: Blasenkammer-Aufnahme der Produktion eines Positron-Elektron-Paares im Coulombfeld eines Atomkerns <https://arxiv.org/vc/physics/papers/0604/0604152v1.pdf>.

geladenen Teilchen werden im Magnetfeld der Blasenkammer in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt und beschreiben spiralenartige Bahnen.

Die Beobachtung einer Blasenkammeraufnahme ist schöner als die Beobachtung eines Kondensstreifens am Himmel, den wir auf ein Düsenflugzeug zurückführen, weil sie uns einen Blick auf Objekte eröffnet, die so winzig sind, dass wir sie nicht mehr mit unseren Händen begreifen können. Die Reaktionsprodukte, die wir in unseren Detektoren sehen können, verbergen eine tiefere Schicht darunter. Die hadronischen Protonen, Neutronen oder Kaonen sind zusammengesetzte Strukturen aus Quarks, die die verrückte Eigenschaft haben, sich immer nur als Quark-Antiquark-Paare oder als Baryonen mit 3 Quarks zu zeigen. Murray Gell-Mann hat für sie den Namen Quarks aus James Joyces ‚Finnegans Wake‘ adoptiert.

In Abb. 16 ist der ganze Teilchenzoo der Materieteilchen als Kugeln dargestellt. Die Materieteilchen genügen Erhaltungsgesetzen, d.h. Teilchen und Antiteilchen werden immer nur zusammen erzeugt. Die Kraftteilchen (Gluonen, Photonen, W, Z – Bosonen) vermitteln die Wechselwirkung und sind auf den Stufen angegeben. Das Higgs-Teilchen (nicht im Bild) thront sozusagen über allen Teilchen und gibt ihnen ihre Masse. Die Kraftteilchen sind zusammen mit ihren hauptsächlichen

Akteuren zu sehen, d.h. die Quarks mit den Gluonen, die Leptonen e , μ , π mit der elektromagnetischen Wechselwirkung und die Neutrinos mit den W- und Z-Bosonen. Wobei anzumerken ist, dass natürlich auch die Quarks die schwache Wechselwirkung der W- und Z-Bosonen spüren, genauso wie sie als geladene Teilchen an die Photonen koppeln.

Die Antiteilchen muss man sich hinzudenken. Die theoretische Grundlage des Bildes ist die Symmetrie $SU_3 \times SU_2 \times U_1$, welche die starke Wechselwirkung der Quarks und Gluonen in der SU_3 beinhaltet und die schwache Wechselwirkung der W- und Z-Bosonen mit der elektrischen Wechselwirkung der Photonen in der Gruppe $SU_2 \times U_1$ vereinigt. Die $SU_2 \times U_1$ ist auf komplizierte Weise durch den Erwartungswert des Higgsfelds gebrochen. Auch die Rechts-Links-Symmetrie und die Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie sind durch die schwache Wechselwirkung gebrochen. Die Schönheiten der mathematischen Symmetrien dominieren das Geschehen, aber sie sind gebrochen, als wollte die Natur eine Korrektur anbringen.

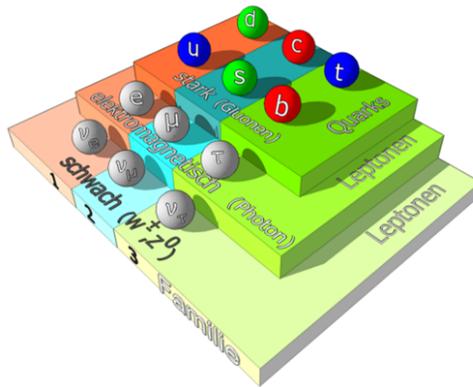


Abbildung 16: Schematisches Bild des Standardmodells der Elementarteilchen. Die einzelnen Stufen unterscheiden die verschiedenen Wechselwirkungen. Die Quarks mit den Geschmacksrichtungen (up,down), (strange,charm) und (bottom,top) unterliegen der starken Wechselwirkung, die Leptonen Elektron, Myon und Tau-Lepton der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die restlichen Leptonen sind ungeladene Neutrinos, die nur schwach wechselwirken. Die Abbildung stammt von <https://psi.physik.kit.edu/97.php>

Die ästhetische Diskussion des Standardmodells bezieht sich auf verschiedene Aspekte. Das Modell besticht durch seine große Symmetrie und die Wiederholung in drei Familien (siehe Abb. 16). Es enthält jedoch viele Parameter, die nicht

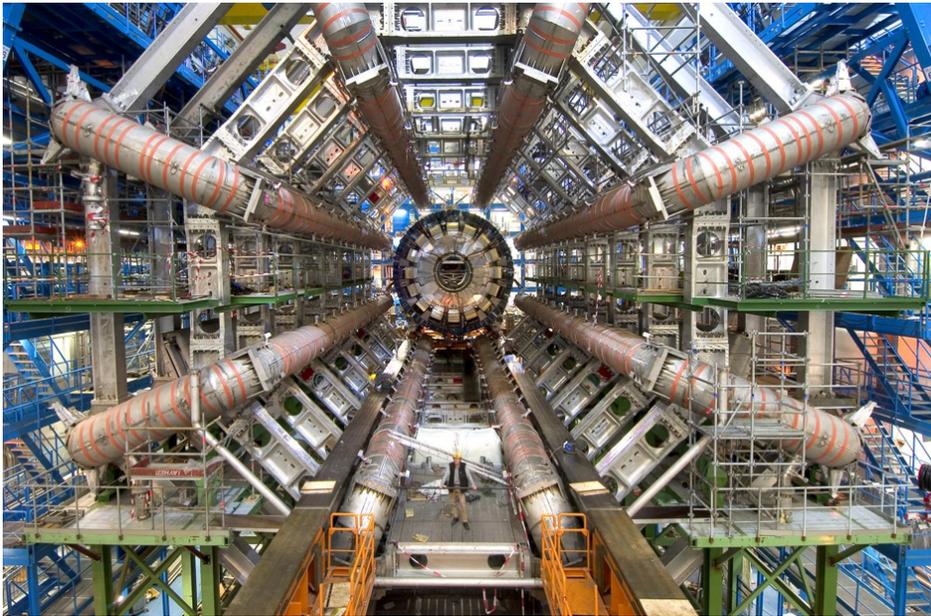


Abbildung 17: Das Foto zeigt den ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) Detektor am Large Hadron Collider im CERN. https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/experimente_am_lhc/atlas

verstanden sind. Die Massen der Teilchen ohne Neutrinos variieren über 6 Größenordnungen, die Massen der Neutrinos (noch nicht genau bekannt) sind noch viel kleiner. Die Wiederholung der Spezies in drei Familien ist geheimnisvoll. Die Quantenkorrekturen zur Higgs-Masse sind überraschend klein sein, wofür es keine Erklärung gibt. Teilchenphysiker gehen von der Annahme aus, dass die Materie auf kleinerer Skala immer einfacher wird. Diese Annahme ist zum Teil bestätigt, aber eben nicht vollständig. Wie aus den Gesprächen mit Theoretikern¹⁹ hervorgeht, sehen viele Teilchenphysiker das Attribut schön als identisch mit natürlich, ökonomisch, effizient oder einfach an. Dann kann man verstehen, dass sie das Standardmodell als „hässlich“ bezeichnen.

Die Schönheiten der Physik kommen mit einem hohen Preis an persönlichem und materiellem Einsatz. Besonders in der Elementarteilchen- und Astrophysik

¹⁹ Sabine Hossenfelder und Gabriele Gockel, Das hässliche Universum, Frankfurt a/M, 2018

werden die Instrumente für die Beobachtung und Experimente immer aufwendiger. Der in Abb. 17 gezeigte ATLAS-Detektor ist so groß wie ein fünfstöckiges Haus. Im Innern des Detektors werden die Impulse aller in der Kollision entstandenen geladenen Teilchen vermessen. Ein Magnetfeld lenkt die in der Kollision entstandenen Myonen im äußeren Bereich des Detektors ab.

ATLAS liest die Daten von über 100 Millionen elektronischen Kanälen 40 Millionen Mal pro Sekunde aus. Mehr als 3200 Wissenschaftler von 177 Instituten aus 38 Ländern arbeiten an diesem Experiment. Die Physik in Heidelberg ist sowohl am ATLAS-Experiment als auch an den ALICE- und LHCb-Experimenten am CERN beteiligt. Die Ästhetik dieser modernen Experimente ist offensichtlich. Die elektronische Datenverarbeitung und die industrielle Technik schaffen Strukturen, deren Organisation, Symmetrie und Vielfältigkeit auch das Auge des Laien beeindruckt.

Die Entdeckung der verborgenen Schönheiten der Natur in der Physik ist ein Geschenk der Technik. Sie ist es, die uns in den Kosmos der kleinsten und der größten Welt hineinblicken lässt. „Die ästhetische Theorie der Natur ist diejenige Theorie der Natur, die ihren Grundzug des Hervortretens bzw. des Aussch-heraustretens der Naturdinge herausarbeitet und zum Leitprinzip der Naturentdeckung macht.“ Dieses Zitat von Gernot Böhme²⁰ fragt nach der Schönheit der vermittelnden Technik. Ist die Technik nicht ein Hindernis, direkt mit der Natur in Kontakt zu kommen? Ist die verborgene Schönheit der Natur ein Kunstprodukt menschlicher Konstruktion? Ich habe in diesem Aufsatz versucht zu zeigen, dass die Schönheit der Physik in ihren mathematischen Symmetrien und Strukturen liegt, aber erst durch die technischen Hilfsmittel sichtbar wird, die wir als Physiker benutzen. Sie ist nicht ein Korrelat unseres a-priori Verständnisses von Raum und Zeit und Materie. Die Frühgeschichte unseres Universums hat sich ohne uns ereignet, die kleinsten Teilchen gibt es ohne uns, und was wir über sie erfahren, ist nicht von uns erfunden. Die Natur überrascht uns mit ihrer verborgenen Schönheit, solange wir sie intensiv befragen.

²⁰ Gernot Böhme, Eine ästhetische Theorie der Natur in „Natürlich Natur“, Frankfurt a/M, 1992, S. 132

Über den Autor

Hans J. Pirner ist theoretischer Physiker. Er hat in USA an der State University of New York at Stony Brook promoviert. Nach Aufhalten am Niels Bohr Institut in Kopenhagen, im CEA Saclay in Paris and am CERN in Genf wurde er 1988 Professor für Physik in Heidelberg mit den Fachgebieten Teilchen- und Kernphysik. Im Marsilius-Kolleg, dem Zentrum für interdisziplinäre Forschung, befasste er sich mit Problemen der Unsicherheit, Unbestimmtheit und Vagheit. Er ist Autor/Coautor von über 200 wissenschaftliche Veröffentlichungen in theoretischer Physik und hat zwei Bücher publiziert. Sein gegenwärtiges Projekt ist die Untersuchung physikalischer Welten im Vergleich zu möglichen Welten.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Hans J. Pirner

Institut für Theoretische Physik

Universität Heidelberg

Philosophenweg 19

69120 Heidelberg

E-Mail: H.J.Pirner@tphys.uni-heidelberg.de

Homepage: <http://www.tphys.uni-heidelberg.de/~pir/>