

# Von Ereignissen zu Strukturen

HANS J. PIRNER

Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg

## Abstract

A single event is not sufficient, to identify a structure. Only the repetition of similar events can lead to an understanding of the underlying structure. A historical event can never be fully explained by its supposed structure, conversely a structure cannot only be explained by events. In physics, explanation is a necessary condition to understand an event. In this essay, I give examples of structures on various natural scales: In the world around us, we experience matter in solid, liquid or gaseous states, which mirror their structure. At the level of individual atoms, we encounter the slow-down of the thermal dance of the molecules at very low temperature. The elementary particles have intricate family structures that are just as complicated as family structures in anthropology. The universe presents events that can illuminate the long dark night from 1 million years to 1 billion years after the big bang. I show how the researcher inductively derives physical structures from events, but I will also indicate that there are metastructures found by mathematical deduction.

## Einleitung

Ein Ereignis ist etwas Singuläres, Einmaliges. Alle Erfahrungswissenschaften beruhen auf dem Studium von Ereignissen, die sie in zweierlei Hinsicht sammeln und ordnen. Vertikal in der Zeit, ist jedes Ereignis eingebettet in einen zeitlichen Ablauf, es ist Teil einer Kette von Ereignissen vorher und nachher. Horizontal in

der Zeit finden parallel zu jedem Ereignis unzählige andere statt, von denen einige die Entwicklung des Ereignisses beeinflussen können.

Die ungestellte Beobachtung der Natur kann nur schwer Zusammenhänge herstellen. Eine Lawine donnert ins Tal und bricht die Ruhe, die danach zurückkehrt. Es hatte viel geschneit und war sehr kalt. Ein einzelnes Ereignis genügt nicht, die Strukturen von Lawinen zu verstehen. Wenn man versucht das singuläre Ereignis zu verstehen, muss man den Prozess studieren, dessen Teil es ist. Nur die Wiederholung ähnlicher oder „gleicher“ Ereignisse hilft das Phänomen „Lawine“ besser zu durchschauen. Im Vergleich kann man dann Schneebrettlawinen mit einem klaren linearen Abrissbereich von Lockerschneelawinen mit einem punktförmigen Anriss und Staublawinen mit viel aufgewirbeltem Schnee unterscheiden. Die Naturwissenschaft erzielte den Durchbruch, als sie anfangs gezielt mit gleichartigen Ereignissen zu experimentieren. Der Experimentator teilt die Mitwelt in den Versuchsaufbau und die Umgebung des Versuchs. Er minimiert den Einfluss der unkontrollierbaren Umgebung auf das Experiment, in dem er den Versuch von ihr isoliert, so gut es geht. Idealerweise kann er allein die Bedingungen des Versuchs bestimmen und die Antwort der so gestellten Natur aufzeichnen. Nachdem er die Daten vieler Ereignisse statistisch aufbereitet hat, kann er sie phänomenologisch analysieren. Oft deutet der Initiator des Versuchs seine Erfahrungen am besten. Er kann sie logisch verbinden, weil er schon mit einer gewissen Vorstellung und Hypothese das Experiment aufgebaut hat. Man spricht dann oft von einem Effekt, den er entdeckt hat.

Rudolf Mößbauer hat 1958 die Resonanzfluoreszenz von Gamma Strahlung in Iridium 191 entdeckt<sup>1</sup> und für diesen „Mößbauereffekt“ drei Jahre später den Nobelpreis erhalten. Bei typischen Kernzerfällen ist die Linienbreite wesentlich kleiner als die Rückstoßenergie des Atomkerns, so dass die Emissions- und Absorptionslinien nicht überlappen. Als Mößbauer seine Probe kühlte, fand er einen großen Anteil von Photonen, bei denen das Kristallgitter den Rückstoß auffing, so dass beide Linien gut überlappten und in Resonanz gingen. Im Allgemeinen muss man die Probe dazu kühlen. In Eisen 57 ist dies schon bei Zimmertemperatur möglich. Durch einen Antrieb kann man das radioaktive Präparat, welches die Gammastrahlung emittiert, mit kleinen Geschwindigkeiten von mm/sec bewegen.

---

<sup>1</sup> Rudolf L. Mössbauer, Nuclear resonance fluorescence of gamma radiation in  $^{191}\text{Ir}$ , Z. Phys. 151 (1958) no. 2, 124–143

Der Dopplereffekt verschiebt die Emissionslinie des bewegten Kerns und tastet damit die Linie im Absorber desselben Kerns ab. Nach dem Durchgang weist man die Intensität der Gamma Linie mit einem Photon-Verstärker nach. Als Quelle wird Co 57 verwendet, das in Fe 57 zerfällt und eine unaufgespaltene Emissionslinie ( $\frac{3^-}{2} \rightarrow \frac{1^-}{2}$ ) aussendet. Wenn man als Absorber natürliches Eisen verwendet, sieht man, dass das Absorptionsspektrum eine *Struktur* aufweist.

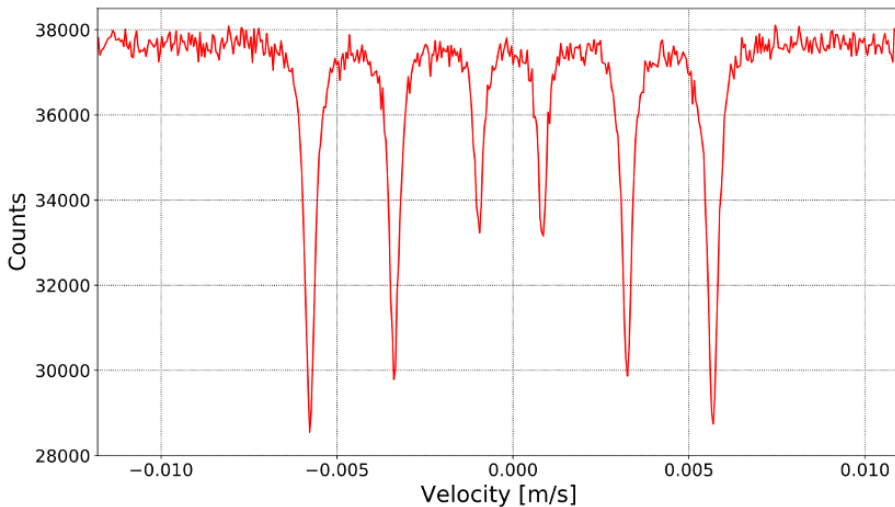
Struktur heißt hier eine Regelmäßigkeit, die man verstehen will. Es ergeben sich 6 Linien, bei denen die Zählrate (Counts = Ereignisse) vermindert ist. Diskrete Strukturen sind charakteristisch für die Quantenmechanik, welche die Energieniveaus von Atomen und Kernen quantisiert und folglich auch die Übergänge zwischen verschiedenen Zuständen diskretisiert.

Der magnetische Dipol des Atomkerns will sich parallel zum Magnetfeld der Elektronenhülle im Eisen ausrichten und vermindert dadurch seine Energie. Der Grundzustand  $\frac{1^-}{2}$  und der angeregte Zustand  $\frac{3^-}{2}$  des Atomkerns spalten durch diese (magnetische Hyperfein-) Wechselwirkung zweifach und vierfach auf. Wegen des Drehimpuls des Photons sind aber nur 6 der  $8 = 2 \times 4$  Übergänge möglich, wie man im Experiment sieht (Abb. 1). Die Regelmäßigkeit der Struktur ist somit ein charakteristisches Merkmal der Quantendynamik.

Während in der Geschichte Ereignisse nie gänzlich durch die vorausgesetzten Strukturen erklärbar sind, und man umgekehrt Strukturen nicht nur durch Ereignisse erläutern kann<sup>2</sup>, ist in der Physik die exakte Erklärung eine notwendige Bedingung, um ein Ereignis zu verstehen. Die obige Struktur eines Spektrums ist nur eine von vielen Möglichkeiten wie sich Strukturen in der Physik zeigen können. In diesem Aufsatz will ich Beispiele für Strukturen auf verschiedenen Größenskalen der Natur geben. In der Lebenswelt erfahren wir die Materie in charakteristischen Zuständen, nämlich als fest, flüssig oder gasförmig. Auf dem Niveau der einzelnen Atome begegnen wir dem thermischen Tanz der Moleküle und Atome. Bei den Elementarteilchen treten verzwickte Familienstrukturen auf, die ebenso kompliziert sind wie ethnologische Strukturen. Das Universum präsentiert Ereignisse, welche die lange dunkle Nacht der Astronomen erhellen. Ich werde darstellen, wie der Forscher induktiv aus Ereignissen physikalische Strukturen erschließt, aber es gibt auch Metastrukturen, welche durch mathematische Deduktion gefunden wurden. Sie sind anfänglich nur logische Möglichkeiten, die

---

<sup>2</sup> Reinhart Kosellek, Zeitschichten, Frankfurt a/M 2000, S. 329

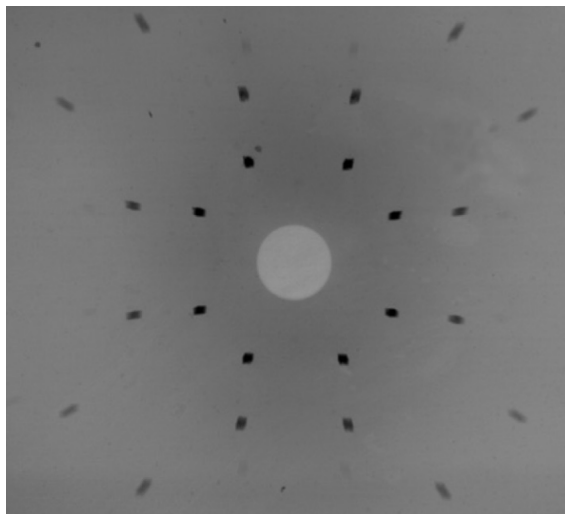


**Abbildung 1:** Mössbauer Absorptionsspektrum von natürlichem Eisen bei Zimmertemperatur als Funktion der Geschwindigkeit der Quelle in m/s. Die Anzahl der Ereignisse entspricht der Zählrate = Counts. Die Geschwindigkeit 0.001 m/s entspricht einer Energieverschiebung von  $4.8 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$ . Die natürliche Linienbreite ist  $4.66 \cdot 10^{-9} \text{ eV}$ . Die Abbildung ist von <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M%C3%B6ssbauerSpectrum57Fe.svg> übernommen.

sich jedoch oft später im Experiment bestätigen. Hier findet man z. B. die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, die zu den spektakulärsten Entdeckungen der Physik gehören. Einige andere harren noch ihrem erfolgreichen Nachweis.

## 1 Feste und flüssige – gasförmige Strukturen

Die Materie besteht aus Atomen, deren Anordnung zu Strukturen führt, die man mit dem bloßen Auge unterscheiden kann. Die Festkörperphysik oder die Physik der kondensierten Materie befasst sich mit Systemen aus extrem vielen Teilchen, die stark miteinander wechselwirken. Diese Systeme können sich in den Phasenzuständen fest, flüssig oder gasförmig anordnen. Der Diamant besteht aus Kohlenstoffatomen und ist ganz verschieden von Graphit, der aus dem gleichen Material aufgebaut ist. Diamant ist sehr hart und hat eine große Brillanz, die ihn zu einem begehrten Schmuckobjekt macht. Graphit ist weich und hinterlässt im Bleistift durch Abreibung eine graue Ablagerung. Diamant kann nur bei sehr



**Abbildung 2:** „Weiße“ Synchrotronstrahlung generiert diese Laue Aufnahme von Diamant. Die einlaufende Strahlung ist in Richtung einer der vier Symmetrieachsen der Tetraeder Struktur des Diamants ausgerichtet.<sup>3</sup>

hohen Temperaturen zum Schmelzen gebracht werden ( $>3000\text{ °C}$ ). Welche Struktur macht Diamant so widerstandsfähig? Durch Bestrahlung mit Röntgenlicht findet man wohl definierte (Laue-) Punkte (Abb. 2), die durch die Reflexion an zueinander parallelen Kristallebenen entstehen.

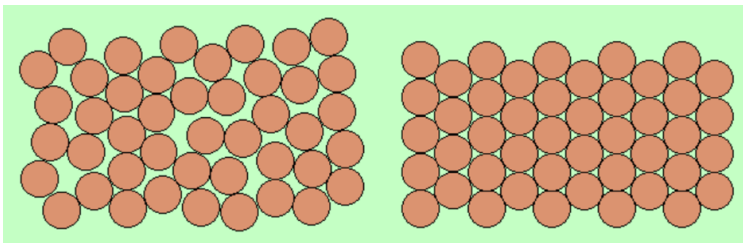
Da das weiße Synchrotron Licht verschiedene Frequenzen enthält, erfüllen mehrere Gitterschichten die Bedingung für konstruktive Überlagerung. Die charakteristische Struktur im Diamant ist eine Tetraeder Struktur, bei der jedes Kohlenstoffatom von vier Nachbaratomen im gleichen Abstand umgeben ist. Man kann sich eine Pyramide vorstellen mit einem C-Atom in der Mitte. Die räumlich kurze Bindung ist die Ursache der extrem harten Struktur des Diamants. Ein besonders spannendes Kapitel der Röntgenstrukturanalyse haben James D. Watson<sup>4</sup> und Francis Crick geschrieben, als sie mit ihrer Hilfe die Spiralstruktur der DNS entdeckten.

<sup>3</sup> Moreton Moore, J. Phys. Cond. Matter, 21 (2009) 364217

<sup>4</sup> James D. Watson, Die Doppel-Helix, Hamburg 1973

Das weite Meer, der springende Bach, das perlende Wasser aus dem Hahn sind alles Flüssigkeiten. Flüssigkeiten können jede beliebige Form annehmen, je nach dem Behälter, in dem man sie gießt. Sind sie deshalb ohne Struktur? Die molekularen Wechselwirkungen sind in Flüssigkeiten weniger stark ausgeprägt als in Festkörpern. Wenn man versucht Strukturanalyse in Flüssigkeiten zu machen, dann sind die Beugungsbilder verwaschen. Obwohl die Umgebung in der Nähe eines Teilchens noch ziemlich regelmäßig ist, wird sie immer ungeordneter, je weiter man sich vom Teilchen entfernt (siehe Abb. 3). Die Flüssigkeit zeigt, dass die Längenskala auf der man Struktur sucht eine wichtige Rolle spielt. Besondere Probleme treten auf, wenn sich auf verschiedenen Längenskalen die Strukturen ändern.

Wenn man Gase, auch solche mit geladenen Teilchen (Plasmen) mit zu den Flüssigkeiten zählt, dann ist 99 % der sichtbaren Materie in flüssigem Zustand. Ihre Dynamik bildet die Grundlage für viele technische Anwendungen, von der Aerodynamik, Hydraulik, Meteorologie bis zu Verbrennungsprozessen. Bewegte Flüssigkeiten faszinieren durch ihre verschiedenen Erscheinungsformen. Laminarer geordneter Fluss ist charakteristisch für langsam fließende zähe Flüssigkeiten. Turbulenzen setzen ein, wenn die Geschwindigkeit zunimmt. Das Wasser vor dem tiefen Fall mag träge und klar dahinfließen. Nach der Kante am Wasserfall wird es schäumen und zahlreiche Wirbel aufweisen. Wirbel sind eine wichtige Komponente in Turbulenzen. Die hohe kinetische Energie in gewissen Teilen der Flüssigkeit dominiert über die dämpfenden Effekte der niederen Viskosität. Die turbulente, nichtlineare Flüssigkeitsdynamik ist komplex und kann für spezielle Probleme nur in aufwendigen Computerrechnungen simuliert werden.



**Abbildung 3:** Die Nahordnung in Flüssigkeiten (links) im Vergleich zur Kristallstruktur (rechts). [https://www.cumschmidt.de/s\\_aggr\\_fluessig.htm](https://www.cumschmidt.de/s_aggr_fluessig.htm).

Wenn man bei einem Druck von 1 atm Wasser über 100 °C erhitzt, entsteht Wasserdampf. Wasser ändert seine Struktur, es macht einen Übergang in die Gas Phase. Durch die zugeführte Energie erhöht man die Geschwindigkeit der Moleküle und erlaubt ihnen aus der Flüssigkeit in die gasförmige Phase auszutreten. In einem abgeschlossenen Topf füllt der Dampf das ganze freie Volumen über der Flüssigkeit aus. Wenn der Druck in dem Gas zunimmt, fliegt der Deckel vom Topf. Bei hohen Temperaturen werden die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen im Vergleich zu ihrer kinetischen Energie vernachlässigbar. Sie breiten sich aus und zwischen den Teilchen gibt es viel Platz, in dem sich nichts befindet. Oberhalb eines kritischen Punktes mit wohl definiertem Druck und Temperatur ist es unmöglich zwischen Dampf und Flüssigkeit zu unterscheiden.

Die Struktur des Wassers wird durch ein Phasendiagramm beschrieben, das bei ansteigenden Temperaturen zuerst das Schmelzen von Eis in Wasser, und dann das Verdampfen von Wasser in Dampf enthält. Bei niedrigem Druck kann Eis in Dampf sublimieren. Es sind kritischen Ereignisse, wenn eine Struktur in eine andere übergeht. Grenzen trennen die einzelnen Phasen voneinander. Eis kann bei hohen Drucken sogar in acht verschiedenen Phasen existieren.

Helium-4 besitzt bei tiefen Temperaturen eine zweite Flüssigkeitsphase, die mit dem Spin = 0 der He-4 Atome verbunden ist. Das elektronisch gleichartige He-3 (mit nur 3 Nukleonen) und dem Spin =  $\frac{1}{2}$  zeigt diese Eigenschaft nicht. Die Bildung des superflüssigen He-4 ähnelt der Kondensation, wenn Flüssigkeitstropfen aus einem Gas gebildet werden. Dieses Kondensat von He-4 wird als Bose Einstein Kondensat bezeichnet, weil es nur bei Quantenteilchen mit ganzzahligem Spin, d. h. Bosonen auftritt. Bosonen können einen gemeinsamen Quantenzustand einnehmen, während Fermionen mit halbzahligem Spin nur jeweils allein einen Quantenzustand besetzen können, wie Fermi und Dirac es theoretisch postuliert haben.

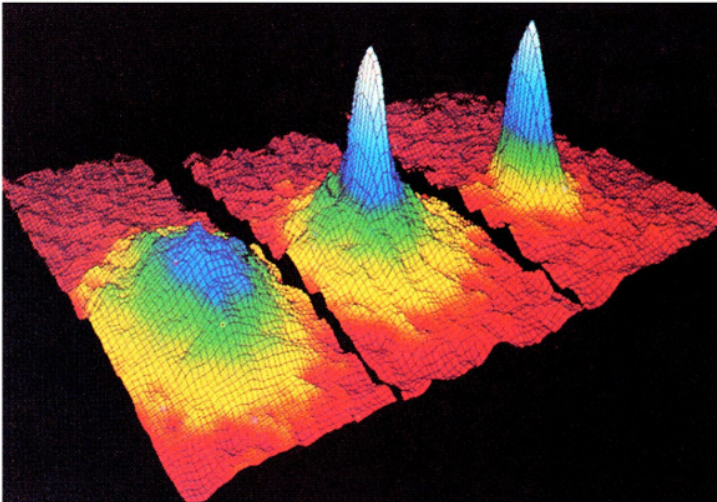
## 2 Den Tanz der Atome stoppen

Man stelle sich ein Tanzparkett mit Paaren vor, die sich im Rhythmus der Musik über das Parkett bewegen. Wenn die Musik langsamer wird, werden sie ihr Tempo vermindern, um den Takt zu halten. Soweit sehen wir vor unseren Augen eine klassische Szene, wie sie in jedem Film vorkommen kann. Wir würden allerdings sehr überrascht sein, wenn auf einmal in der Mitte der Tanzfläche eine ganze

Gruppe von Tanzenden in der Bewegung erstarrt und sich nicht mehr rührt. Ein solches Verhalten zeigen Atome bei tiefen Temperaturen.

Der Takt der Musik wird durch die Temperatur vorgegeben, die der Experimentator systematisch erniedrigen kann. Dafür gibt es moderne Techniken, wie die Laserkühlung. Gasatome haben bei Zimmertemperatur Geschwindigkeiten von 300 m/s oder 900 km/h wie Flugzeuge. Die Kühlung reduziert ihre Geschwindigkeit auf langsame 1mm/s. Dabei sprechen wir von kälteren Temperaturen als die Temperaturen, bei denen He superflüssig (2 °K) wird, nämlich von Temperaturen im Bereich von Nano Kelvin<sup>5</sup>, d. h.  $10^{-9}$  °K.

Die Quantenmechanik übernimmt das Kommando über den Tanz der Atome, wenn die thermische Wellenlänge  $\lambda$  der Teilchen vergleichbar zum Abstand



**Abbildung 4:** Beobachtung eines Bose-Einstein Kondensats in Rubidium durch Cornell und Wiemann. Im ersten Bild, links sieht man die Situation vor der Kondensation, die rot-gelben Atome bewegen sich. Im mittleren und rechten Bild bildet sieht man, wie sich das Kondensat (blau dargestellt) ausbildet und wächst. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman and E. A. Cornell, Science 269, 198 (1995).

<sup>5</sup> Der Nullpunkt 0 °K der Kelvinskala ist die kleinstmögliche Temperatur. Sie entspricht einer Temperatur von  $-273.15$  °C auf der Celsiuskala.



zwischen den Teilchen wird. Da  $\lambda \approx h/\sqrt{2\pi mkT}$ , muss die Temperatur umso kleiner sein je größer die Masse  $m$  des Atoms ist. 1995 erzeugten Eric A. Cornell und Carl E. Wieman ein reines Kondensat von ca. 2 000 Rubidiumatomen bei 20 nK über dem absoluten Nullpunkt (siehe Abb. 4). Die Atome werden in einem künstlichen Behälter gehalten, der durch elektromagnetische Felder geformt wird, also keine festen Wände hat. Wenn man unterhalb der kritischen Temperatur den Behälter wegnimmt, dann tanzen die angeregten Atome aus der Falle, während die Atome im Kondensat erstarrt sitzen bleibt. Die verbleibenden Atome bewegen sich nicht, weil sie alle den gleichen Quantenzustand mit Impuls = 0 haben. Sie bilden das Bose-Einstein Kondensat (blau in Abb. 4). Wolfgang Ketterle hat ein paar Monate später mittels zwei separater BECs von Natriumatomen gezeigt, dass die beiden Kondensate interferieren können, weil sie jeweils eine quantenmechanische Wellenfunktion besitzen. Wenn die beiden Wellenfunktionen sich auslöschen, gilt die Gleichung „Atom + Atom  $\rightarrow$  Nichts“, salopp ausgedrückt. Rührt man das Bose-Einstein Kondensat mit einem Laserstrahl um, bilden sich Wirbel, wie man sie von turbulenten Flüssigkeiten und beim superflüssigen He-4 kennt.

Von Gottfried Wilhelm Leibniz gibt es das Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren (*principium identitatis indiscernibilium*): Wenn alles, was von  $x$  gilt, auch von  $y$  gilt, so ist  $x = y$ . Die Atome im Bose-Einstein Kondensat befinden sich ununterscheidbar in dem gleichen Quantenzustand, ein Atom  $x$  ist ununterscheidbar vom Atom  $y$  im Kondensat. Trotzdem sind beide Atome nicht ununterscheidbar gleich, ihre Zahl kann durch Anregung objektiv gemessen werden. In dem Atom Kondensat befinden sich bis zu einer Million Atome. Das Prinzip der Nichtunterscheidbarkeit kann „gerettet“ werden, weil das Bose-Einstein-Kondensat eine gemeinsame Wellenfunktion mit einer gemeinsamen Phase besitzt, insofern ist es eine Einheit und keine Vielheit.

Kalte Quantengase sind extrem dünne Systeme, eine Million Mal dünner als Luft. Während die Atome in Flüssigkeiten und Festkörpern durch ihre Nähe ihre individuellen Eigenschaften verlieren und Bindungen eingehen, sind im Quantengas die Atome von der Größe eines Nanometers weit voneinander getrennt in Abständen von 100 nm. Sie bleiben deshalb gut kontrollierbar und eignen sich als Quantensimulatoren, d. h. Analog-Computer um komplizierte quantenmechanische Rechnungen durchzuführen. Durch raffinierte Lasereinstellungen kann man künstlich eine regelmäßige Anordnung von Fallen herstellen, in denen die Atome nur teilweise gefangen sind, weil sie quantenmechanisch von einer Falle in

die andere tunneln können. Besonders interessant sind Probleme mit Fermionen, weil diese mit konventionellen Monte Carlo Methoden nicht simulierbar sind. Ein bekanntes Modell ist das Hubbard Modell, welches Tunnel Prozesse und eine Coulomb Abstoßung an einem Gitterpunkt einschließt. Dieses Modell beschreibt die Dynamik von Hochtemperatursupraleitern, die sich wie die Kuprate in zweidimensionalen Ebenen anordnen. Damit können sogenannte Quanten Phasen Übergänge studiert werden, die am absoluten Nullpunkt nur auf Grund der Quantenfluktuationen auftreten. Bei den obigen Supraleitern ist es die Veränderung der Dotierung der Elektronen, die den Übergang antreibt.

Ein anderes Problem ist die Zustandsgleichung von stark wechselwirkenden Nucleonen in Kernmaterie. Die Materie in Neutronensternen und kalte Fermi Gase haben ähnliche thermodynamischen Eigenschaften, wenn die Wechselwirkung der Fermionen eine maximale Stärke annimmt. Dadurch wird es mögliche astrophysikalische Phänomene in der kontrollierten Umgebung des Labors mit ultrakalten Atomen zu studieren. Als Funktion der Dichte und Temperatur möchte man die Energie/Teilchen finden.

Man beachte, in beiden obigen Fällen ist die Struktur durch ein theoretisches Modell vorgegeben, das dann mit einem physikalischen Versuchsaufbau simuliert wird. Der Hauptvorteil dieser Methode ist, dass die physikalischen Parameter wie die Spins, die Wechselwirkung, die Potentiale präzise veränderbar sind. Außerdem kann man am physikalischen System einzelne Atome beobachten, d. h. Größen messen, die komplementär zu Beobachtungen in Festkörpern sind. In der klassischen Vielteilchenphysik wird oft von einem idealisierten System mit unendlich vielen Teilchen ausgegangen, mit den kalten Atomen kann man studieren, wie viele einzelne Atome notwendig sind, um ein solches kollektives Verhalten zu sehen.

Im Gegensatz zu induktiven Schlüssen aus dem Studium experimenteller Ereignisse, werden in diesem Zugang die Ereignisse physisch konstruiert. Die physische Rekonstruktion von theoretischen Artefakten unterscheidet sich von der bekannten deduktiven Methode, die mit mathematischen Strukturen (siehe Abschnitt 5) physikalische Probleme löst, wie es z. B. die allgemeine Relativitätstheorie erfolgreich machte. In diesem modernen Zugang zeigt sich eine gewisse Leichtigkeit mit Theorien umzugehen, nämlich kritisch zu hinterfragen, was sie beinhalten. Der Physiker ist nicht mehr damit zufrieden, dass er die „Wirklichkeit“ als Modell

beschreibt, er möchte sich überzeugen, dass die Lösungen des Modells auch im Detail richtig sind.

### 3 Familienstrukturen der Elementarteilchen

Zu den Anfängen des Strukturalismus gehört die ethnologische Studie von Claude Levi-Strauss über die elementaren Strukturen der Verwandtschaft. Beim Studium primitiver Gesellschaften fand er ein komplexes Schema des Tausches, das die Verheiratung eines Nachkommen regelt. Wenn ein Sohn eine Frau sucht, dann muss der Bruder seiner Mutter ihm eine Tochter als Frau anbieten. Diese Kreuzkusinenheirat soll den Inzest begrenzen und gleichzeitig die gesellschaftliche Ordnung festigen. Der Ethnologe betonte, dass diese Heiratsregeln Teil von „kalten“ Gesellschaften seien, die noch nicht die Komplexität moderner Gesellschaften erreicht haben.

Der Strukturalismus kann als ein Projekt verstanden werden, in dem die Kulturwissenschaften Methoden der Naturwissenschaften nachahmen. Claude Levi-Strauss war nie von einem großen Unterschied zwischen der Natur und der Kultur überzeugt, für ihn waren sie wie das „Rohe und das Gekochte“ nur eine andere Zubereitungsart. Für alle Nichtspezialisten bitte ich also um Geduld, wenn ich jetzt die Strukturen der Verwandtschaften bei den Elementarteilchen darstelle. Sie sind nicht viel komplizierter als die ethnologischen.

Bei den kleinsten Teilchen gibt es bis jetzt drei Generationen. In der bekanntesten Generation befinden sich die Bestandteile der Atomkerne, d. h. die Bestandteile des Neutrons und Protons, die jeweils aus drei Quarks bestehen. Man unterscheidet u-Quarks mit der Ladung  $+2/3$  und d-Quarks<sup>6</sup> mit der Ladung  $-1/3$ . Ein positiv geladenes Proton hat die Struktur (uud) und ein neutrales Neutron die Struktur (ddu) (siehe Abb. 5). Das Neutron<sup>7</sup> mit der Masse von 939,5 MeV ist etwas schwerer als das Proton mit der Masse von 938,3 MeV. Die zugehörigen Massen der Quarks spiegeln diese Unterschiede wieder, obwohl die Quarks sehr kleine Massen haben, und die Masse der Nukleonen hauptsächlich durch die Energie der Gluonwolken um die Quarks erzeugt wird. Die up- und down-Quarks haben

---

<sup>6</sup> Die u-Quarks werden auch als up-Quarks und die d-Quarks als down-Quarks bezeichnet.

<sup>7</sup> Wir verwenden Energieeinheiten  $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV}$ , d. h. wir benutzen die Einstein Formel  $E = mc^2$ , welche Energie mit der Masse über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  verbindet (siehe auch Abb. 5).

ungefähr gleiche Massen, dadurch gehören sie zusammen zur gleichen ersten Generation von Quarks. Das freie Neutron lebt eine Zeit von ungefähr 886 s, es zerfällt schwach in ein Proton und ein Elektron und das zugehörige Neutrino.

In der Teilchenphysik sind es zwei mathematische Gruppen, welche die Struktur der schwachen Übergänge in den Generationen und von Generation zu Generation widerspiegeln. Dies sind die Gruppen SU(2) und U(1). Die elektroschwache Wechselwirkung mit der Symmetrie SU(2)×U(1) vereinigt die fundamentale schwache Wechselwirkung und die elektromagnetische Wechselwirkung.

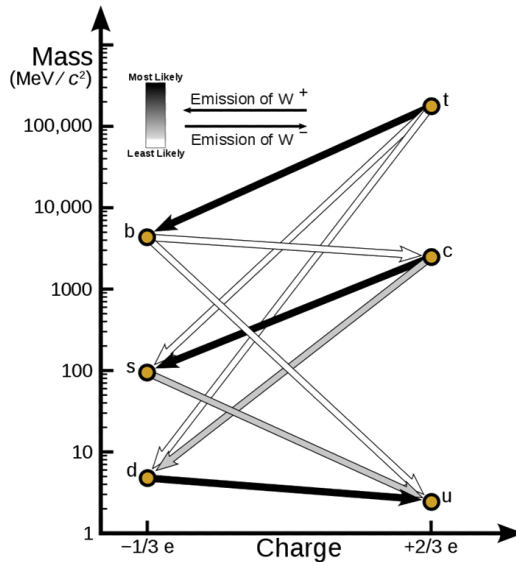
Eine Gruppe G ist ein mathematisches Gebilde, das aus Gruppenelementen {a,b,c,..} und einer Verknüpfung  $\circ$  besteht. Es gelten folgende Gesetze:

- (i) Wenn  $a, b \in G$  dann ist auch  $a \circ b \in G$ , d. h. ein Element von G
- (ii)  $a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c$
- (iii) Es existiert ein Einselement  $e$ :  $a \circ e = a$  und  $e \circ a = a$  für alle  $a \in G$
- (iv) Zu jedem  $a$  gibt es ein inverses Element  $a^{-1} \in G$ , so dass  $a \circ a^{-1} = e$

Bei den Verwandtschaftsbeziehungen von Levi-Strauss gibt es eine Kleinsche Vierergruppe, welche in kompakter Form die Verhältnisse zusammenfasst. Gruppenstrukturen sind in der Physik immer dann anzutreffen, wenn Symmetrien

| Generation 1   |         |                | Generation 2  |           |                | Generation 3 |            |                |
|--|---------|----------------|---------------|-----------|----------------|--------------|------------|----------------|
| Fermion  | Symbol  | Weak isospin   | Fermion       | Symbol    | Weak isospin   | Fermion      | Symbol     | Weak isospin   |
| Electron neutrino  | $\nu_e$ | $+\frac{1}{2}$ | Muon neutrino | $\nu_\mu$ | $+\frac{1}{2}$ | Tau neutrino | $\nu_\tau$ | $+\frac{1}{2}$ |
| Electron   | $e^-$   | $-\frac{1}{2}$ | Muon          | $\mu^-$   | $-\frac{1}{2}$ | Tau          | $\tau^-$   | $-\frac{1}{2}$ |
| Up quark   | $u$     | $+\frac{1}{2}$ | Charm quark   | $c$       | $+\frac{1}{2}$ | Top quark    | $t$        | $+\frac{1}{2}$ |
| Down quark   | $d$     | $-\frac{1}{2}$ | Strange quark | $s$       | $-\frac{1}{2}$ | Bottom quark | $b$        | $-\frac{1}{2}$ |
| All of the above left-handed ( <i>regular</i> ) particles have corresponding right-handed <i>anti</i> -particles with equal and opposite weak isospin. |         |                |               |           |                |              |            |                |
| All right-handed ( <i>regular</i> ) particles and left-handed antiparticles have weak isospin of 0.  |         |                |               |           |                |              |            |                |

**Tabelle 1:** Die drei Generationen von Elementarteilchen und der zugehörige schwache Isospin der (linkshändigen) Basiszustände von Quarks und Leptonen (Elektron, Muon, Tau).



**Abbildung 5:** Das Bild zeigt die verschiedenen Quarks mit ihren Ladungen auf der horizontalen Achse und ihren Massen auf der vertikalen Achse. Die drei Familien oder Generationen sind (d,u), (s,c) und (b,t), wobei (d,u) für (up,down), (s,c) für (strange,charm) und (b,t) für (bottom,top) Quarks stehen. Die schwachen Zerfälle sind durch Pfeile dargestellt. Die Dicke der Pfeile gibt die Stärke der Übergänge innerhalb und zwischen den Generationen an. [https://en.wikipedia.org/wiki/Weak\\_interaction#/media/File:Weak\\_Decay\\_\(flipped\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Weak_interaction#/media/File:Weak_Decay_(flipped).svg).

aufzutreten. Die mit der Symmetrie assoziierten Transformationen bilden eine Gruppe. Für das Standardmodell gibt es jeweils zwei Elemente in jeder Generation als Basiszustände der schwachen Isospin (Weak Isospin) Symmetrie  $SU(2)$ . Diese Verdopplung ist sowohl bei den Quarks als auch bei den Leptonen (Elektron, Muon, Tau und ihren Neutrinos) anzutreffen (siehe Tabelle 1). Zusätzlich besitzen die Teilchen eine schwache Ladung, die mit der Gruppe  $U(1)$  verbunden ist.

Beschleuniger können in hochenergetischen Kollisionen Teilchen erzeugen, die es in unserer natürlichen Mitwelt nicht gibt. So findet man in der zweiten Generation z. B. das  $\Lambda$ -Baryon welches aus einem up, down und strange Quark (u,d,s) besteht. Das zugehörige strange Quark s ist schwerer als die Quarks in der ersten Generation und der Übergang ( $s \rightarrow u$ ) ist ungefähr fünfmal schwächer als der Übergang ( $d \rightarrow u$ ) (siehe Abb. 5).

Wenn man einen Übergang von der dritten Generation mit den top und bottom Quarks zu den leichten Quarks betrachtet, dann sieht man, dass der Übergang ( $b \rightarrow u$ ) nur 3 Promille des Übergangs in der ersten Generation beträgt. Universalität besteht jedoch in der Art des Elementareignisses, welches die verschiedenen Materieteilchen miteinander koppelt. Für die schwache geladene Wechselwirkung sind dafür die geladenen W-Bosonen zuständig. Beim schwachen Zerfall des Neutrons (ddu) in ein Proton (duu) wird der Übergang vom down-Quark zum up Quark durch die Emission eines  $W^-$ -Bosons erreicht



Am Anfang des Universums bei sehr hohen Temperaturen waren die W-Bosonen, das Photon und das Higgs-Feld alle masselos, die  $SU(2) \times U(1)$  Symmetrie war exakt. Erst mit dem Erkalten des Universums ist das Higgs-Feld kondensiert und hat einen endlichen Wert im Vakuum bekommen, durch den die W-Bosonen, das Higgs-Boson und die Materieteilchen eine Masse bekommen haben. Bis jetzt gibt es keine theoretische Erklärung für die Hierarchie der Massen, die sich für die Quarks über 5 Größenordnungen erstreckt. Auch die Größe der schwachen Kopplungen zwischen den Generationen ist nicht erklärt.

Bevor Kepler die Gesetze der Planetenbahnen entdeckt hatte, versuchte er in seinem Buch „Mysterium Cosmographicum“ die Radien der Bahnen zu erklären, indem er sie mit der Oberfläche der platonischen Körper (Würfel, Tetraeder, Oktaeder, Dodekaeder, Ikosaeder) in Beziehung brachte. Neuere Forschungen<sup>8</sup> deuten darauf hin, dass einige der Planeten wie der Jupiter zuerst in Richtung der Sonne gewandert sind und dann umgekehrt sind, um weiter entfernt, hinter dem Asteroiden Gürtel sich zu stabilisieren. Wie die Geschichte der Verwandtschaften der Elementarteilchen ausgeht ist noch ungewiss, aber gewiss ist es auch eine spannende Geschichte, in der sich die Strukturen und Ereignisse gegenseitig unterstützen müssen.

---

<sup>8</sup> Alessandro Morbidelli and Sean N. Raymond, Challenges in planet formation , JGR Planets, Volume 121, 2016, Issue 10, p. 1827–2192, <https://doi.org/10.1002/2016JE005088>

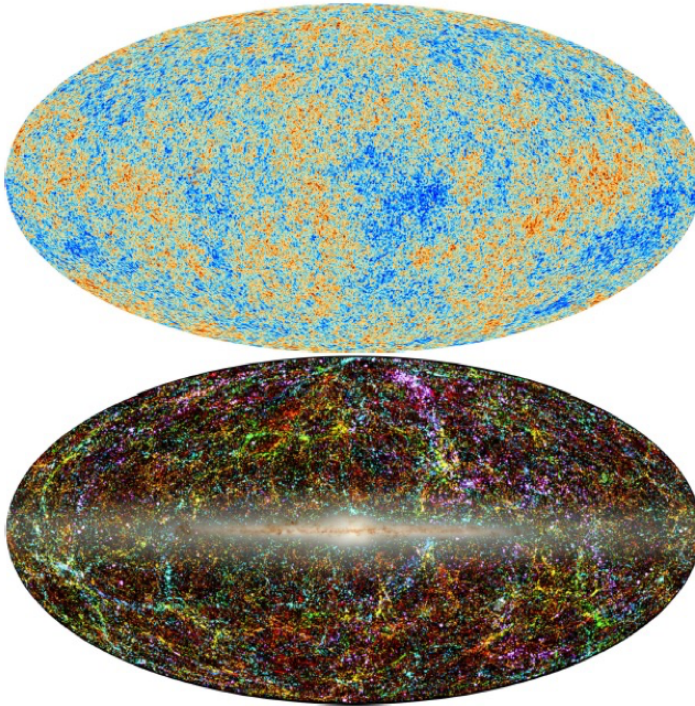
## 4 Die lange dunkle Nacht des Universums

Ungefähr 400 000 Jahre nach dem Big Bang vereinigen sich die Elektronen und Protonen im heißen Plasma bei einer Temperatur von 3000 °K. Dabei bildet sich neutraler Wasserstoff und Photonen, die uns heute ungestört erreichen, da sie nicht mehr an den Elektronen streuen können. Sie sind von verschiedenen Satelliten sehr präzise gemessen worden. Wegen der Expansion des Universums wird allerdings die ursprüngliche Wellenlänge der Photonen nach längeren Wellenlängen verschoben. Die Ergebnisse zeigen ein ziemlich kaltes Photon Spektrum mit einer Temperatur von 2.7 °K, das in allen Richtungen gleich ist, wenn verschiedene Effekte wie die Bewegung und Lokalisierung unserer Galaxie entfernt werden.

Da diese kosmische Hintergrundstrahlung sich im cm-Bereich befindet, wird sie auch als kosmischer Mikrowellenhintergrund bezeichnet. Das Spektrum entspricht einem thermischen Planck Spektrum von Photonen mit winzigen Temperatur Fluktuationen von  $\Delta T/T = 0.00001$ . Diese Fluktuation sind im obigen Teil der Abb. 6 farbkodiert wiedergegeben. Zum heutigen Zeitpunkt also  $14 \cdot 10^9$  Jahre nach dem Big Bang beobachten wir ein System von Galaxienhaufen, welches im unteren Teil derselben Abb. 6 zu sehen ist. Die hellen Fäden zeigen weiträumige Strukturen von Galaxienhaufen mit Millionen von Galaxien so groß wie unsere Milchstraße, die oft fantasievolle Namen wie die „Große Mauer“ tragen. Dazwischen befinden sich leere Flecken von ebensolcher Größe.

Astrophysiker möchten die Ereignisse finden, welche zwischen diesen beiden Momentaufnahmen unseres Universums liegen. Sie wollen verstehen, wie die großräumigen Strukturen im jetzigen Universum zustande gekommen sind. Wie pflanzen sich die Dichtefluktuationen fort, die sich in den Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung manifestieren? Wie werden aus ihnen die Galaxien und Sterne, die wir beobachten?

Die Kosmologie benutzt neben der Zeit auch die Rotverschiebung  $z$ , um die verschiedenen Zeitalter des Universums zu beschreiben. Der Faktor  $(1 + z)$  gibt an um wie viel größer das Universum jetzt ist verglichen mit dem Universum zu jener Zeit. Die Rekombination in der Hintergrundstrahlung mit  $z \approx 1200$  besagt, dass das jetzige Universum 1200 Mal größer ist als zur Zeit der Entstehung der Mikrowellenstrahlung.



**Abbildung 6:** Vollständige Abbildung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch den Planck Satelliten<sup>9</sup>(oben) und Verteilung der Galaxien im 2-Mass Survey<sup>10</sup>(unten). Die Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung im cm-Wellenlängen Bereich sind farbkodiert wiedergegeben, die 2-Mass Untersuchung befindet sich im Infrarot Bereich (Mikrometer). Matthias Bartelmann et al., *Annalen Phys.* 531 (2019) no. 11, 1800446.

Der gleiche Faktor gibt die Verschiebung zu größeren Wellenlängen der beobachteten Strahlung. Mit der Expansion ist die ursprüngliche Strahlung im sichtbaren Licht zu längeren Wellenlängen verschoben worden, wodurch sie für das menschliche Auge unsichtbar wird. Die Astronomen bezeichnen deswegen die Zeit von ungefähr 0.5-1 Million Jahre ( $z \approx 1200$ ) nach dem Big Bang bis zu 1

<sup>9</sup> Planck- Collaboration, R. Adam et al. *Astronomy & Astrophysics* 594, A9 (2016)

<sup>10</sup> M.E. Skrutskie et al. *Astronomical Journal*, 131, 11632–1183 (2006)



Milliarde Jahre ( $z \approx 10$ ) nach dem Big Bang als „*dark age*“ oder *dunkles Zeitalter des Universums*. Dann nämlich erst formierten sich die ersten Galaxien mit sichtbarem Licht. Da diese Objekte<sup>11</sup> sehr weit weg sind, sind sie auch extrem lichtschwach und schwer zu beobachten. Was ist während dieser langen dunklen Zeit passiert?

Im Standard Modell der Kosmologie wird angenommen, dass die ursprünglichen Temperatur- und Dichte-Fluktuationen hauptsächlich durch die dunkle Materie bestimmt sind, die sechsmal häufiger ist als die sichtbare (baryonische) Materie. Es wird angenommen, dass die Gravitation diese Strukturen im Lauf der Zeit verstärkt hat. Wenn man vereinfacht annimmt, dass die Fluktuationen eine Gauss-Verteilung besitzen, dann sind sie nur durch einen Parameter charakterisiert. Man kann dazu die mittlere Fluktuation der Massen  $\sigma = \langle \sqrt{(\Delta M/M)^2} \rangle$  verwenden. Kleine Fluktuationen entwickeln sich durch die Gravitation linear, wenn aber die Größe  $\sigma > 1$  wird, kollabiert das massereiche System. Fluktuationen bei kleinen Massenskalen sind am stärksten, sie werden sich deshalb als erste von der homogenen Expansion des Weltalls abkoppeln. Am Ende entsteht aus Baryonen und dunkler Materie etwas ungefähr Kugelförmiges, das die Astronomen Halo nennen. Diese Halos wachsen dann an, indem sie mit benachbarten Halos verschmelzen und umliegende Materie aufsammeln. Die treibende Kraft ist dabei die dunkle Materie, die allein der Gravitation unterliegt.

Bei der Entstehung von Galaxien verdichtet sich die baryonische Materie und erhitzt sich dabei, bis der thermische Druck der Schwerkraft die Waage hält. Wenn es dabeigeblichen wäre, wäre die dunkle Nacht nie zu Ende gegangen. Wann oder wie hörte sie auf? Wann sind die ersten Sterne und Galaxien entstanden, die die Verwandlung des Universums vorangetrieben haben. Um den thermischen Druck zu vermindern, muss das heiße Gas abkühlen. Wie wir bei den anderen Betrachtungen gesehen haben, ist für die Entstehung von Strukturen ein kühles Medium wichtig. Wenn Elektronen in diesen Halos aus atomaren Wasserstoff kollidieren, so regen sie den Wasserstoff an oder ionisieren ihn ganz. Diese Epoche wird als Reionisation bezeichnet, weil sie das Plasma aus Protonen und Elektronen wiederherstellt. Die Anregungsenergie wird dann mit großer Wahrscheinlichkeit als Photon abgestrahlt und kann der Gaswolke entkommen und sie kühlen. Ereig-

---

<sup>11</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_the\\_most\\_distant\\_astronomical\\_objects](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_the_most_distant_astronomical_objects)

nisse<sup>12</sup> im Sloan Digital Sky Survey dokumentieren die Reionisation bei  $z \approx 6$ . Während man bei  $z \approx 6.28$  noch die Absorption der Lyman  $\alpha$ - Linie sieht, die vom Übergang des Grundzustands von H in den ersten angeregten Zustand herührt, sieht man bei  $z \approx 5.8$  keine solche Absorption. Also muss der neutrale Wasserstoff im intergalaktischen Medium um diese Zeit ionisiert worden sein. Die Details dieser Reionisation sind Gegenstand aktiver Forschungsprojekte, weil sie uns einen Einblick in die Entstehung der Galaxien liefern. Extensive Computersimulationen wie die Illustris TNG Galaxy Formation<sup>13</sup> Studie dienen dazu diese komplexen Fragestellungen zu untersuchen. Es erscheint wichtig, dass diese Dichtefluktuationen nicht homogen verteilt sind, sondern selbst wieder gehäuft in Gebieten mit Überdichten auftreten. Das Ende der Dunkelheit verlief dann lokalisiert in gewissen weit voneinander liegenden Gebieten, die im Laufe der Zeit anwuchsen. Wie die Reionisation exakt verlief, muss durch weitere Beobachtungen z. B. der Polarisation der kosmischen Mikrowellenstrahlung und der Beobachtung der 21-cm Hyperfeinstruktur Linie des Wasserstoffs geklärt werden. Das Experiment Edges (Experiment to Detect the Global Epoch of Reionisation Signature) in Australien 2018 hat ein breites Absorptionsband entdeckt. Das Signal stammt möglicherweise vom Licht der ersten Sterne ( $z = 17$ ), welches die lokale Temperatur des Wasserstoffs erniedrigte im Vergleich zur Umgebung. Analytische Rechnungen sind durch die sehr unterschiedlichen räumlichen Skalen und lange Zeitdauer sehr schwierig. Sie sind notwendig, um die numerischen Simulationen besser zu verstehen.

## 5 Metastrukturen

Die Überschrift drückt aus, dass Strukturen in zwei paradoxe Situationen auftreten können: Einmal kann sich eine Überzahl von Ereignissen schwer auf einfache Strukturen zurückführen lassen (Überbestimmtheit), zum anderen ist es auch möglich, dass eine mathematische Struktur kein physikalisches Ereignis findet (Unterbestimmtheit), das sie als Baustein einer physikalischen Theorie rechtfertigt.

---

<sup>12</sup> X. Fan et al. *Astronomical Journal* 122, 2833 (2001) und 25, 1649 (2003)

<sup>13</sup> *Simulating Galaxy Formation with the IllustrisTNG Model*, Annalisa Pillepich, Volker Springel, Dylan Nelson, Shy Genel, Jill Naiman, Ruediger Pakmor, Lars Hernquist, Paul Torrey, Mark Vogelsberger, Rainer Weinberger, Federico Marinacci, arXiv: 1703.02970

Beide Erscheinungen sind Teile von Metastrukturen, bei denen kein Zusammenhang zwischen Ereignissen und Strukturen hergestellt werden kann.

Lassen Sie mich ein Beispiel für die erste Situation nennen. In einem gemeinsamen Aufsatz<sup>14</sup> haben Physiker und Philosophen untersucht, wie man künstliche Intelligenz benutzen kann, um experimentelle Daten auf Strukturen zurückzuführen. Die Strukturen sollen repräsentativ sein, d. h. sie sollen die notwendigen Schlüsselbegriffe des Systems enthalten. Die Daten des obigen Aufsatzes betreffen zwei Massenpunkte mit den Massen  $m_1, m_2$  und den Ladungen  $q_1, q_2$ , die sich unter dem Einfluss der Schwerkraft und elektrostatischen Wechselwirkung bewegen. Die Daten für verschiedene Kombinationen der Parameter bei gegebenen Anfangswerten werden in verschiedenen Durchgängen ähnlichen neuronalen Netzen (Agenten) vorgelegt. Das gesamte neuronale Netz soll dann herausfinden, dass die Schlüsselbegriffe des Systems die Massen und die Ladungen der Objekte sind. Das neuronale Netz ist ein System von Synapsen, die eingehende Signale mit adjustierbaren Gewichten in ein Ausgangssignal verwandeln. Diese Synapsen sind in verschiedenen Ebenen hintereinandergeschaltet, um dadurch ein adäquates Ausgangssignal zu produzieren. Netzwerke lernen aus Eingangsbeispielen, wie z. B. Bildern von Katzen, Hunden und anderen Haustieren, diese zu kategorisieren. In unserem Beispiel wurde das Netzwerk von verschiedenen Agenten trainiert, die Massen und Ladungen zu identifizieren. Die Erfolgsrate des Netzwerks wurde maximiert, indem die Gewichtung der Synapsen angepasst wurde. Im obigen Beispiel ist es besonders wichtig, dass die Agenten zusammenarbeiten und ihre unterschiedlichen Informationen koordinieren. So mag ein Agent nur Trajektorien von ungeladenen Teilchen, ein anderer einen elastischen Stoß zwischen den Teilchen vorgelegt bekommen. In der Tat finden die Autoren des Projekts, dass es ihren Netzwerken gelang, als richtigen Parameter die Masse  $m$  und nicht die Summe von Masse und Ladung als physikalischen Parameter zu identifizieren. Ähnliche Analysen wurden mit stark verrauschten Zeitreihen von neuronalen elektrischen Anregungen (Spikes) gemacht. In der Physik kann man auf diese Weise numerische Simulationen mit Phasenübergängen untersuchen, um die relevanten Ordnungsparameter zu identifizieren.

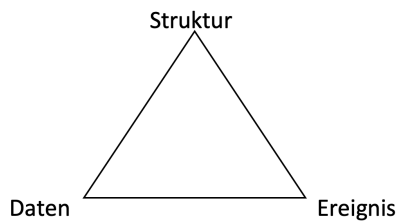
---

<sup>14</sup> Hendrik Poulsen Nautrup et al., Operationally meaningful representations of physical systems in neural networks, arXiv:2001.00593 vom 2. Januar 2020

Ich nenne diese Methode „Dekonstruktion“ in Analogie zu dem Begriff, der in den Geisteswissenschaften verwendet wird. Dort bezeichnet er den Versuch eine philosophische Position mit den Begriffen zu hinterfragen, die dem System eigen sind. Die Dekonstruktion entkleidet das System und seine Ereignisse von allen unnötigen Details. Sie ist der umgekehrte Prozess zu der im Kap. 2 beschriebenen Methode, mit Hilfe von kalten Quantengasen ein wohldefiniertes quantenmechanisches Energiefunktional (Hamiltonsfunktion) nachzubauen. Im Allgemeinen muss der Physiker mit seiner Intuition erraten, wie er die Fülle der Informationen in den Daten reduzieren und die relevanten Aspekte des Problems isolieren kann. Ein externes Analyseinstrument hat den Vorteil, die persönlichen Vorlieben des Forschers zu unterdrücken und vorurteilsfrei Strukturen erkennen.

Die Struktur ist Teil einer Zeichensprache, welche in den physikalischen Wissenschaften die Mathematik ist. Im Idealfall erklärt die mathematische Theorie die Daten des Ereignisses. Die minimale Erklärung enthält keine zusätzlichen Begriffe außerhalb der Daten, z. B. keine Informationen über die Temperatur des Objekts, wenn Orte und Geschwindigkeiten des Objekts als Funktion der Zeit gegeben sind.

Eine Triade aus Ereignis, Messdaten und mathematischer Struktur definiert gut die verschiedenen Aspekte im Prozess der Strukturbildung. Ein Ereignis ist der Auslöser für die Betrachtung eines unbekanntes Phänomens. Durch ein Experiment versucht der Physiker die charakteristischen Eigenschaften dieses Ereignisses nachzubilden. Mathematische Konzepte komprimieren die experimentelle Erfahrung in einer theoretischen Struktur (Abb. 7). Diese Dreiheit hat eine gewisse



**Abbildung 7:** Die Triade aus Ereignis, Messdaten und mathematischer Struktur.

Ähnlichkeit mit dem „Zeichen“ von Charles S. Peirce<sup>15</sup>, das die Grundlage des Strukturalismus in den Geisteswissenschaften bildet.

Allgemein gilt, dass die Messung der experimentellen Daten der Begründung der Struktur vorausgeht. Aber die Reihenfolge kann auch umgekehrt sein. Ein mathematisches Modell überzeugt besonders, wenn es Daten vorhersagen kann. Mit der Superstringtheorie ist in den letzten 35 Jahren eine vielfältige Theorie entwickelt worden, die bis jetzt wenig mit physikalisch messbaren Ereignissen in Verbindung gebracht werden kann. Hier sind also die Theoretiker auf der Suche nach Ereignissen, die ihre Theorie unterstützen. Der String stellt eine Verallgemeinerung des quantisierten punktförmigen Teilchens dar. Ein Teilchen ist ein „Punkt“, der sich in der Raum-Zeit auf einer Weltlinie bewegt. Der String ist ein eindimensionaler „Faden“, der in der Raum-Zeit eine teppichartige Fläche beschreibt. Nichtkritische Strings beschreiben in der Quantenchromodynamik die starke Attraktion zwischen Quarks und Antiquarks, die durch ein linear anwachsendes Potential daran gehindert werden, sich voneinander zu trennen. Die Quarks sind in den Mesonen gefangen, keine isolierten freien Quarks wurden je gesehen. In den letzten Jahren ist durch die Vermutung von Juan Maldacena die Korrespondenz einer speziellen Stringtheorie mit Anti-de-Sitter-Geometrie und einer Yang-Mills-Theorie postuliert worden, welche der Quantendynamik der Quarks, d. h. hadronischer Elementarteilchen, sehr ähnlich ist.<sup>16</sup> Diese Theorie hat sich nicht induktiv, sondern deduktiv aus rein mathematischen Prinzipien entwickelt und zu einigen schönen Anwendungen geführt.<sup>17</sup> Die eigentliche kritische Superstringtheorie lebt in 10 Dimensionen und zielt darauf ab, die Gravitation mit den Wechselwirkungen des Standardmodells zu vereinigen. Sie enthält zu allen Teilchen des Standardmodells Superpartner, d. h. Partner deren Spin sich um  $\frac{1}{2}$  von dem der Teilchen des Standardmodells unterscheidet. Fermionen mit halbzahligen Spin haben supersymmetrische Partner mit ganzzahligem Spin, zu Bosonen mit ganzzahligem Spin existieren supersymmetrische Teilchen mit halbzahligen

---

<sup>15</sup> Charles Sanders Peirce, Syllabus of Certain Topics of Logic, dt. Phänomen und Logik der Zeichen, hg. Und übersetzt von Helmut Pape, Frankfurt am Main 1983

<sup>16</sup> Juan Martin Maldacena, The Large N limit of Superconformal field theories and supergravity, 1997, Adv.Theor.Math.Phys.2:231-252,1998, Int.J.Theor.Phys.38:1113-1133,1999, e-Print: hep-th/9711200.

<sup>17</sup> E. Megias and H.J. Pirner, QCD thermodynamics using five-dimensional gravity, Phys.Rev. D83 (2011) 056003, arXiv:1009.2953

Spin. Die Teilchenphysiker hofften am Large Hadron Collider in Genf solche Superteilchen zu finden. Unter diesen gäbe es auch solche, welche Kandidaten für die bis jetzt unbekannte dunkle Materie wären. Bis jetzt ist allerdings keiner dieser Superpartner gesehen worden.

Ursprünglich wandten sich die Philosophen dagegen, die Natur mathematisch zu erklären. Besonders Aristoteles argumentierte, dass die Bewegung eine Veränderung der Natur darstellt und deshalb inkompatibel mit den statischen Strukturen der Mathematik sei. Er widersprach damit Platon, der die Elemente Feuer, Luft und Wasser aus den idealen mathematischen Formen des Tetraeders, Oktaeders und Ikosaeders konstruierte. Die Differentialrechnung von Leibniz und Newton machte es jedoch möglich die zeitliche Veränderung der Bewegung mathematisch zu formulieren. Neu in der mathematischen Physik ist, dass man das Problem der Evolution modelliert. Man kann berechnen, wie sich die elementaren Bausteine verändern, wenn man Quantenfluktuationen auf kleineren Skalen summiert. Aus einer Theorie von Quarks auf mikroskopischer Skala, wird auf einer größeren Längenskala eine Theorie von Nukleonen. Simulationen in der Kosmologie oder kondensierten Materiephysik rekonstruieren komplexe zeitliche Entwicklungen. Der Exzellenzcluster STRUKTUREN in Heidelberg untersucht solche Themen, wie Struktur, kollektive Phänomene und Komplexität aus den Grundgesetzen der Physik entstehen. Für Details zu diesem Projekt verweise ich auf den Artikel von Manfred Salmhofer im gleichen Jahrbuch.

## 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 drei Bücher publiziert. Das letzte Buch befasste sich mit der Untersuchung physikalischer Welten im Vergleich zu möglichen Welten. In seinem gegenwärtigen Projekt versucht er zu zeigen, dass Ereignisse die fundamentalen Bausteine der Wirklichkeit sind.

### **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/>