

Raum und Vakuum

Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie verwenden diese Grundbegriffe der Physik in inkompatibler Weise

Übersicht

Schon die Physik Newtons enthielt eine subtile Inkonsistenz in den Definitionen der Begriffe Raum und Vakuum. Dies wird in den Abschnitten [1](#) und [2](#) geschildert.

Im 20. Jahrhundert wurden die Unzulänglichkeiten der Newton'schen Physik durch die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie überwunden. Jede der beiden Theorien beschreibt – für sich allein genommen – die Natur mit phantastischer Genauigkeit. Aber ART und QT verwenden inkompatible Definitionen von Raum und Vakuum. Die Abschnitte [3](#) bis [6](#) befassen sich mit den gigantischen Inkonsistenzen, die aus den inkompatiblen Definitionen erwachsen sind. Diese Entwicklung lässt Zweifel aufkommen, ob eine konsistente Physik überhaupt möglich ist.

Inhalt

1. Newtons Raum	2
2. Newtons Vakuum	6
3. Der Raum der ART	9
4. Der Raum der Quantentheorie	11
5. Das Vakuum der Quantentheorie	15
6. Das Vakuum der ART	19
7. Hat die Inkonsistenz System?	22
7. Nachtrag 2016	25
Literatur	25

1. Newtons Raum

Zwei einfache Gesetze bilden den Kern von Newtons Mechanik, die er 1687 in den *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* [1] veröffentlichte: Das Bewegungsgesetz und das Gravitationsgesetz.

Das Bewegungsgesetz für einen Körper mit der Masse m und der Geschwindigkeit \mathbf{u} besagt, dass die Änderung des Impulses gleich der einwirkenden Kraft \mathbf{F} ist.

$$\text{Bewegungsgesetz: } m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F} \quad (1)$$

Das Gravitationsgesetz beschreibt die Kraft, die an der Stelle \mathbf{x} auf einen Körper mit der Masse m wirkt, wenn sich an der Stelle \mathbf{X} ein zweiter Körper mit der Masse M befindet.

$$\text{Gravitationsgesetz: } \mathbf{F} = -G \cdot \frac{mM}{(\mathbf{x} - \mathbf{X})^2} \cdot \frac{\mathbf{x} - \mathbf{X}}{|\mathbf{x} - \mathbf{X}|} \quad (2)$$

Die auf m wirkende Kraft \mathbf{F} ist (wegen des negativen Vorzeichens) anziehend. Sie ist proportional zum Produkt mM der beiden Massen, und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands. Der Proportionalitätsfaktor G ist eine Naturkonstante.

Erstes Anwendungsgebiet der neuen Mechanik war die Astronomie. Kepler [2] hatte die Bahnen der Planeten um die Sonne als Ellipsen beschrieben, und festgestellt dass ihre wechselnden Bahngeschwindigkeiten durch den Flächensatz bestimmt werden. Zufolge der Newton'schen Gesetze hatte die Bahn eines Planeten oder Kometen dann und nur dann die Form eines Kegelschnitts (im Spezialfall einer gebundenen Bahn die Form einer Ellipse), wenn es außer der Sonne und diesem einen Himmelskörper keinen dritten Körper in der Nähe gab. Tatsächlich gab aber immer mehrere andere Planeten in der Nähe, so dass die Bahn eines Planeten allenfalls näherungsweise die Gestalt einer Ellipse haben konnte.

Die Störungen, die die Planeten wechselseitig auf ihre Bahnbewegungen ausübten, konnten mithilfe von Newtons Gesetzen berechnet werden. Die Rechnungen ergaben gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Theorie bei allen Planeten, mit Ausnahme des innersten und des äußersten.

Der äußerste Planet war, als die Unstimmigkeit bemerkt wurde, nicht mehr Saturn, sondern der 1781 von Friedrich Wilhelm Herschel entdeckte¹ Uranus. Statt die Diskrepanz einem Versagen der Theorie anzukreiden, berechnete LeVerrier aus den Bahnstörungen des Uranus die Bahnparameter eines weiteren, bis dahin unbekanntem Planeten, der Verursacher dieser Störungen sein sollte. Tatsächlich wurde daraufhin Neptun als unscheinbares Objekt 8. Größe weniger als 1° neben der von LeVerrier berechneten Position entdeckt. Dieser Vorgang wurde – völlig zu Recht – als Triumph

¹ Genauer gesagt: Uranus wurde von Herschel als Planet identifiziert. Gesehen, aber irrtümlich für einen Stern gehalten, hatten dieses Objekt zuvor schon andere Beobachter.

der Newton'schen Physik empfunden.

Angespornt von seinem Erfolg machte LeVerrier sich daran, die Bahnstörung des Merkur auf gleiche Weise zu erklären. Verursacher sollte ein unbekannter Himmelskörper sein, der der Sonne noch näher war als Merkur selbst. Mit „Vulkan“ war ein passender Name für den neuen Planeten bereits gefunden, aber allen Anstrengungen zum Trotz konnten die beobachtenden Astronomen nichts von ihm sehen.

Weil es nichts zu sehen gab. Vulkan war ein Artefakt der Theorie. Es liegt darin eine gewisse Ironie: Die Bahnstörung des äußersten Planeten führte zum spektakulärsten Erfolg der Theorie Newtons, die Bahnstörung des innersten Planeten führte zu ihrer Widerlegung.

Newton's Theorie hatte einen kleinen Geburtsfehler, eine unscheinbare Inkonsistenz, deren Tragweite lange übersehen wurde. In den *Leges Motus* der *Principia* schreibt er als Lex III: „Zu jeder Kraft existiert immer eine gleiche Gegenkraft, oder: Die Kräfte zweier Körper auf einander sind immer gleich, und haben entgegengesetzte Richtung. Was auch immer etwas anderes drückt oder zieht, wird gleichstark von dem anderen gedrückt oder gezogen. Wenn jemand einen Stein mit dem Finger drückt, dann wird auch sein Finger von dem Stein gedrückt. Wenn ein Pferd einen Stein, der an ein Seil gebunden ist, zieht, dann wird das Pferd (wenn ich so sagen darf) gleichstark zum Stein zurück gezogen.“

Das muss so sein, und ist für die Konsistenz der Newton'schen Mechanik unverzichtbar. Die Lex III besagt, dass Baron von Münchhausen sich nicht am eigenen Schopf aus dem Sumpf ziehen kann. Aber der *vis insita*², der allen Körpern eingewurzelt

² Newton definiert die „eingepflanzte Kraft“, *vis insita*, in den *Principia*, Definition III: „Die *vis insita* der Materie ist eine Widerstandskraft, durch die jeder Körper [...] versucht, seinen gegenwärtigen Zustand beizubehalten, sei es den Zustand der Ruhe, oder den Zustand der gleichförmigen Bewe-

Trägheitskraft, gelingt der Münchhausentrick doch. Besser gesagt: Er würde ihr gelingen, wenn Newton's Konzept der Trägheitskraft korrekt wäre. Denn die Trägheitskraft ist die einzige Kraft, die in Newtons Physik keine Gegenkraft kennt.

Woher kommt eigentlich die Trägheitskraft? Wer übt sie aus? Offenbar weder Finger, noch Pferd, noch Seil. Allenfalls kann man sagen: Es ist der Raum selbst, der die Trägheitskraft ausübt. Der Raum übt diese Kraft auf jeden Körper aus, der sich relativ zu ihm beschleunigt bewegt. Per Trägheitskraft versucht der Raum, die Beschleunigung zu verhindern, und die Körper in einem Zustand „der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung“ zu stabilisieren.

Das Versagen der Newton'schen Mechanik lässt sich also zurückverfolgen zu einem Fehler in der Theorie des Raumes. Im Scholium II der Principia schreibt Newton: „Der absolute Raum, gemäß seiner eigenen Natur ohne Bezug auf irgend etwas äußerliches, bleibt immer gleich und unbeweglich.“ Das war unvereinbar mit der Lex III. Wenn der Raum eine Trägheitskraft auf die Körper ausübte, dann mussten die Körper eine gleich große Gegenkraft auf den Raum ausüben. Erst im 20. Jahrhundert gelang es Einstein, mit der Allgemeinen Relativitätstheorie diese Inkonsistenz des Newton'schen Raumbegriffs zu überwinden.

gung auf einer geraden Linie. Diese Kraft [...] unterscheidet sich von der Trägheit der Masse allenfalls in der Weise, wie wir sie wahrnehmen. Aufgrund der Trägheit der Materie kann ein Körper nur mit Mühe aus seinem Zustand der Ruhe oder Bewegung entfernt werden. Deshalb kann die vis insita am passendsten Trägheitskraft genannt werden.“

Die äußere, „eingepresste Kraft“, *vis impressa*, charakterisiert Newton in Definition IV: „Die vis impressa wirkt auf den Körper ein, um seinen Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung längs einer geraden Linie zu verändern. Diese Kraft existiert nur, solange sie wirkt. Sobald ihre Einwirkung aufhört, bleibt sie nicht mehr im Körper. Denn der Körper hält den [durch Einwirkung der vis impressa] erworbenen Zustand allein durch die Trägheitskraft aufrecht.“

2. Newtons Vakuum

Ob es einen leeren Raum geben kann, das war und blieb immer umstritten. Es geht bei dieser Frage nicht um ein technisches, sondern ein begriffliches Problem. Wir haben uns so daran gewöhnt, Punkte oder Bereiche im Raum durch Koordinaten zu definieren, dass uns oft kaum noch bewusst ist, wie abstrakt diese Begriffsbildung wirklich ist. Das Problem wird sofort klarer, wenn man Christian Morgensterns Gedicht vom Lattenzaun mit Zwischenraum liest.³ Es erscheint uns selbstverständlich, dass der Zwischenraum durch das definiert wird, zwischen dem er sich befindet, und nicht getrennt davon gedacht werden kann. Ebenso selbstverständlich und denknotwendig erschien es einer bis in die Neuzeit einflussreichen Schule in der Tradition des Aristoteles, dass der Raum sinnvoll nur durch das definiert werden könne, was sich in ihm befindet, und dass die Vorstellung von einem Raum ohne Inhalt schon in sich selbst widersinnig und begrifflicher Unfug sei.

Das Vakuum Newtons war das Vakuum Torricelli's: Nicht wie bei Aristoteles mit irgendwelchen ätherischen Fluida oder dergleichen gefüllt, sondern total leer. Torricelli hatte es 1644 demonstriert: Er tauchte eine einseitig verschlossene Glasröhre in ein Quecksilberbad und hob, nachdem die Röhre vollständig von Luft entleert und mit Quecksilber gefüllt war, das verschlossene Ende aus dem Bad empor, während das offene Ende unter der Oberfläche blieb. Die Quecksilbersäule im Rohr sank aufgrund ihres Gewichts nach unten, so dass der obere Teil der Glasröhre

³ Es war einmal ein Lattenzaun, mit Zwischenraum, hindurchzuschauen.
Ein Architekt, der dieses sah, stand eines Abends plötzlich da –
und nahm den Zwischenraum heraus und baute drauß ein großes Haus.
Der Zaun indessen stand ganz dumm, mit Latten ohne was herum.
Ein Anblick grässlich und gemein. Drum zog ihn der Senat auch ein.
Der Architekt jedoch entfloh nach Afri- od- Ameriko.

Aus den Galgenliedern von Christian Morgenstern [3]

offensichtlich frei von Quecksilber war. Er enthielt nach Torricellis Überzeugung auch keinen Dampf, keine Luft, oder was auch immer, sondern war einfach leer.

Diese Demonstration konnte nicht jeden überzeugen. Descartes soll bemerkt haben: „Wenn es irgendwo ein Vakuum gibt, dann in Toricelli’s Kopf.“ Descartes und Torricelli definierten das Vakuum als ein Raumgebiet, das buchstäblich leer ist, absolut nichts enthält. Wir verwenden in diesem Aufsatz den Begriff Vakuum so, wie er sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts in der Physik durchgesetzt hat. Demnach ist das Vakuum ein Raum, der so leer ist wie mit den Naturgesetzen verträglich. Also nach dem Verständnis der Quantentheorie nicht leer, sondern erfüllt von Vakuum-Fluktuationen, von Nullpunktsschwingungen, und evtl. auch von Higgs-Feldern.

Interessanterweise war nach Einsteins Verständnis aber auch das Vakuum der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht so leer wie das Vakuum Torricellis. Deshalb meinte er, dass die ART die widerstreitenden Auffassungen des Vakuums versöhnen könnte. In seinem Aufsatz „Relativität und Raumproblem“, der in [4] als Anhang 5 abgedruckt ist, schreibt er: „Die Idee [der Newton’schen Physik von] der unabhängigen Existenz von Raum und Zeit kann man drastisch so aussprechen: Wenn die Materie verschwände, so würden Raum und Zeit allein übrig bleiben als eine Art Bühne für physikalisches Geschehen. [...]

Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie dagegen hat der Raum gegenüber dem ‚Raum-Erfüllenden‘, von den Koordinaten Abhängigen, keine Sonderexistenz. Man habe z. B. ein reines Gravitationsfeld durch die g_{ik} (als Funktionen der Koordinaten) beschrieben durch Lösung der Gravitationsgleichungen. Wenn man das Gravitationsfeld, d. h. die Funktionen g_{ik} weggenommen denkt, so bleibt nicht etwa ein [„flacher“] Raum, sondern überhaupt nichts übrig, auch kein ‚topologischer Raum‘. Denn die Funktio-

nen g_{ik} beschreiben nicht nur das Feld, sondern gleichzeitig auch die topologische und metrische Struktur-Eigenschaften der Mannigfaltigkeit. Ein [„flacher“] Raum ist im Sinne der allgemeinen Relativitätstheorie nicht etwa ein Raum ohne Feld, sondern ein Spezialfall des g_{ik} -Feldes, für welchen die g_{ik} [...] Werte haben, die nicht von den Koordinaten abhängen; einen leeren Raum, d.h. einen Raum ohne Feld, gibt es nicht.

Descartes hatte demnach nicht so unrecht, wenn er die Existenz eines leeren Raumes ausschließen zu müssen glaubte. Die Meinung erscheint zwar absurd, solange man das physikalische Reale ausschließlich in den ponderablen Körpern sieht. Erst die Idee des Feldes als Darsteller des Realen in Verbindung mit dem allgemeinen Relativitätsprinzip zeigt den wahren Kern von Descartes' Idee: es gibt keinen ‚feldleeren‘ Raum.“

Hätten Einsteins Worte Descartes zum Glauben an den leeren Raum bekehrt? Es erscheint mir unwahrscheinlich. Das metrische Feld g_{ik} ist ja nicht etwas *im* Raum, sondern es ist der Raum selbst. Einsteins Erklärungen laufen also auf die Behauptung hinaus, dass der Raum nicht leer sei, da er ja Raum enthalte – eher eine Tautologie als ein Argument. Descartes verlangte einen Inhalt des Raumes, der den Ort definieren konnte. Der Inhalt musste dazu als „Ding“ ansprechbar, identifizierbar, wiedererkennbar sein. Das metrische Feld des leeren Raumes kann eine derartige Ortsbestimmung nicht leisten, allein schon aus dem Grund den Einstein selbst genannt hat: Wenn der Raum leer ist, dann hängen die g_{ik} nicht von den Koordinaten ab. Das Feld ist überall exakt gleich, und bietet deshalb keinerlei Anhaltspunkt, durch den eine bestimmte Stelle identifiziert werden könnte.

Das gleiche gilt übrigens auch für das Inventar, mit dem die Quantentheorie das Vakuum bevölkert hat: Quantenobjekte sind als Orientierungsmarken für eine Ortsbestimmung vollkommen ungeeignet. Sie haben eben nicht die Eigenschaft der Identifizierbar-

keit und Wiedererkennbarkeit, sie sind keine „Dinge“ . Man erkennt das beispielsweise daran, dass Dinge – deshalb und nur deshalb weil sie als Dinge identifizierbar sind – einer anderen Statistik genügen als Quantenobjekte.

Stellen wir uns trotz aller Skepsis versuchsweise auf den Einstein'schen Standpunkt, dass das vom Metrischen Feld „erfüllte“ Vakuum nicht leer sei, dann kann man Newtons fehlerhaften Raumbegriff allerdings auch als einen fehlerhaften Begriff des Vakuums interpretieren. Sein Versäumnis war ja, dass in seiner Mechanik der Raum Trägheitskräfte ausübte, aber keine Gegenkräfte auf ihn zurück wirkten. Damit man so eine Rückwirkung beschreiben kann, muss man das Vakuum mit einem metrischen Feld „füllen“ , so wie es Einstein dann in der ART tat.

Die Inkonsistenz in Newtons Physik bestand in dieser Sichtweise darin, einen Raum der Trägheitskräfte ausübte zu kombinieren mit einem Vakuum das völlig leer war, nicht einmal ein metrisches Feld „enthielt“ . Ein vollkommen leeres Torricelli'sches Vakuum hätte mit einem Raum zusammengepasst, der keine Trägheitskräfte ausübt. Wenn aber der Raum Trägheitskräfte ausübt, dann durfte das Vakuum nicht völlig leer sein.

Dass diese Inkonsistenz sich einschleichen konnte lag letztlich daran, dass Newton die Gravitation als Fernwirkung konzipiert, und die Frage nach ihrem Wirkungsmechanismus mit den bekannten Worten „hypotheses non fingo“ zurückgewiesen hatte. Hätte er versucht diese Frage zu beantworten, dann wäre er vielleicht doch auf die Idee verfallen dass im vermeintlich leeren Vakuum Torricelli's irgendetwas sein musste, das eine Kraft übertragen konnte.

3. Der Raum der Allgemeinen Relativitätstheorie

Einstein publizierte 1915 die Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie [5], in der die träge Masse auf den Raum zu-

rückwirkt, und behob damit die Inkonsistenz der Newton'schen Raumtheorie:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (3)$$

Die Indizes μ und ν können jeweils vier Werte annehmen, d.h. (3) sind 16 Gleichungen, die allerdings nicht alle unabhängig voneinander sind. (3) beschreibt, wie der Raum durch seinen Inhalt an Energie (bzw. Masse, das ist in der ART gleichwertig) und Impuls deformiert wird. Energie und Impuls werden durch den Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ repräsentiert, die Deformation des Raumes durch den Krümmungstensor $R_{\mu\nu}$ und seine kontrahierte Form R . $R_{\mu\nu}$ und R enthalten Produkte des Metrischen Tensors $g_{\mu\nu}$ und seiner ersten und zweiten Ableitungen $\partial g_{\mu\nu}/\partial x^\lambda$ und $\partial^2 g_{\mu\nu}/\partial x^\kappa \partial x^\lambda$. Wenn $T_{\mu\nu}$ sehr klein oder gleich Null ist, dann sind laut (3) auch die Ableitungen des Metrischen Tensors sehr klein oder gleich Null, d.h. der Raum ist (fast) flach. Umgekehrt bewirkt grosser Energie- und Impulsinhalt eine starke Krümmung des Raumes.

Die Bewegungsgleichung eines Körpers mit Geschwindigkeit u im gekrümmten Raum ist

$$\frac{du^\kappa}{d\tau} = -u^\lambda u^\mu \frac{g^{\kappa\nu}}{2} \left(\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda} + \frac{\partial g_{\lambda\nu}}{\partial x^\mu} - \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\nu} \right) \quad (4)$$

Auch die hochgestellten griechischen Buchstaben sind – ebenso wie die tiefgestellten – Indizes mit vier möglichen Werten, nicht etwa Exponenten. Auf der linken Seite von (4) steht die Geschwindigkeitsänderung $du^\kappa/d\tau$, auf der Rechten Seite steht die Trägheitskraft, die diese Geschwindigkeitsänderung bewirkt. Die Trägheitskraft ist also proportional zur Krümmung des Raumes, die in den Ableitungen $\partial g_{\lambda\nu}/\partial x^\mu$ zum Ausdruck kommt. Die Trägheitsbahn ist eine kürzeste Linie (Geodäte), wie bei Newton. Aber weil der Raum deformiert ist, sind Geodäten in der ART nicht Euklidische Geraden, sondern können – je nach Art und Ausmaß der

Raumkrümmung – krumme Linien oder auch geschlossene Kurven sein.

Mit dem neuen Konzept des Raumes und der Wechselwirkung zwischen Raum und Materie konnte Einstein die Bahnstörung des Merkur quantitativ genau erklären. Dies war nur der erste einer langen Reihe von Erfolgen seiner Theorie. Bis heute (Anfang 2010) ist keine experimentelle Beobachtung bekannt geworden, die die Allgemeine Relativitätstheorie falsifiziert hätte.

Newtons Gravitationsgesetz (2) beschreibt eine Fernwirkung, die ohne Zeitverzögerung die Gravitationswirkung der Masse M , die sich am Ort \mathbf{X} befindet, zur Masse m am Ort \mathbf{x} überträgt, und umgekehrt.

In Einsteins Theorie gibt es dagegen immer nur lokale Wechselwirkungen: M deformiert an der Stelle \mathbf{X} – wie in (3) beschrieben – den Raum. Diese Wirkung breitet sich im Metrischen Feld $g_{\lambda\nu}$ mit endlicher Geschwindigkeit – nämlich Lichtgeschwindigkeit – aus. An der Stelle \mathbf{x} wechselwirkt dann schließlich das Metrische Feld gemäß (4) mit m . Die ART ist eine streng lokale Feldtheorie. Die lokale Beschreibung aller physikalischen Vorgänge, nicht nur der Gravitation, hielt Einstein für eine absolut unverzichtbare Grundbedingung, der jede vernünftige Naturbeschreibung zu genügen hatte.

4. Der Raum der Quantentheorie

Einsteins Überzeugung, alle physikalischen Phänomene könnten und müssten lokal beschrieben werden, wurde durch Experimente widerlegt, zu denen ironischerweise Albert Einstein selbst, in einer gemeinsamen Arbeit mit Nathan Rosen und Boris Podolski, 1935 den Anstoß gegeben hatte [6].

In dieser Arbeit wiesen EPR auf einen sehr merkwürdigen Zug der Quantentheorie hin: Wenn man an einer Stelle eines Quante-

nobjekts, das über einen großen Raumbereich ausgedehnt ist, eine Messung durchführt, dann hat dies zufolge der Quantentheorie instantan, ohne die geringste Zeitverzögerung, Auswirkungen auf das *gesamte* Objekt. Eine zweite Messung an einer anderen Stelle des gleichen Quantenobjekts wird von der ersten Messung beeinflusst. Die Korrelation zwischen den Messergebnissen besteht auch dann, wenn die Messungen „raumartig“ getrennt sind, wenn also vor Abschluss der zweiten Messung nicht einmal mit Lichtgeschwindigkeit eine Information über die erste Messung eingetroffen sein könnte. Einstein nannte das eine „gespenstische Fernwirkung“, die widersinnig und unmöglich sei.

Die Quantentheorie beschreibt zwar die Korrelationen der Messergebnisse, die an verschiedenen Stellen eines Quantenobjekts gewonnen werden, sie macht aber keinerlei Aussage darüber, wie sie zustande kommen. Nach Überzeugung von EPR mussten die Korrelationen durch irgendeinen Mechanismus bewirkt werden, der höchstens mit Lichtgeschwindigkeit funktioniert, und eine vollständige Theorie musste eine Erklärung des Korrelationsmechanismus enthalten. Die Quantentheorie leistete das nicht, also war sie zwar nicht falsch, aber offensichtlich unvollständig.

Erst drei Jahrzehnte später erkannte John Steward Bell [7], dass der Artikel von Einstein und Mitarbeitern, wenn man ihn konsequent zu Ende dachte, tatsächlich zwei ganz andere Schlussfolgerungen erzwang:

A: Die Quantentheorie ist entweder vollständig, oder sie ist falsch.

B: Die Alternative A kann experimentell entschieden werden.

Bell konnte nämlich beweisen, dass jeder Korrelationsmechanismus, egal wie er konstruiert und auf welche Weise er in die Theorie eingefügt wurde, schwächere Korrelation zwischen Messungen an verschiedenen Stellen eines Quantenobjekts erzeugen würde als von der Quantentheorie vorhergesagt. Aufgabe der Experimentatoren war also, Messungen an verschiedenen Stellen ausgedehnter

Quantenobjekte durchzuführen, und die Korrelationen der Messergebnisse festzustellen. Waren die Korrelationen schwächer als von der Quantentheorie vorhergesagt, dann war sie falsch. Stimmt die Stärke der Korrelationen aber mit der Quantentheorie überein, dann konnte der Versuch einer Vervollständigung die Theorie nur verschlechtern.

Die Experimentatoren nahmen die Herausforderung an, mit dem Ergebnis [8]: Die Stärke der Korrelationen stimmt mit der Quantentheorie überein, also ist die Quantentheorie vollständig, also war der Einwand von Einstein & Co. unberechtigt.

Gibt es demnach die „gespenstische Fernwirkung“ tatsächlich? Man kann es so sehen, meist wird der Sachverhalt aber unter dem von Bohr bevorzugten Begriff der *Individualität* der Quantenphänomene diskutiert. Bohr verstand diesen Begriff im wörtlichen Sinne, als Unteilbarkeit. Er meinte, dass man ein Quantenphänomen nicht gedanklich in Teile zerlegen dürfe, ohne in unauflöselichen Widersprüchen zu enden. In Teile aufgetrennt werden kann ein Quantenphänomen nach seiner Ansicht nur durch – tatsächlich durchgeführte, nicht nur gedachte! – Anwendung klassisch zu beschreibender Messgeräte. Wenn man das Quantenphänomen auf diese Weise zerlegt, dann hat man es mit neuen Phänomenen zu tun, deren Eigenschaften durch die Messgeräte geprägt werden. Zerlegt man es nicht, dann ist das Quantenphänomen als Einheit zu betrachten, egal wie groß es ist. Welche Größe ein Quantenphänomen erreichen kann, das hängt nur von der Kunst der Experimentatoren ab, eine prinzipielle Grenze gibt es nicht. Die in [8] untersuchten Quantenphänomene bestanden aus Photonenpaaren, die in verschränkten Zuständen erzeugt und dann mithilfe von Glasfasern als Wellenleitern auf mehr als 400 m gestreckt wurden.

Verwenden wir den Raumbegriff der ART, so kann jedes endliche Gebiet des Raumes in Teile zerlegt gedacht werden. Umgekehrt: Ein Raumgebiet, das nicht in Teile zerlegt vorstellbar ist,

hat keine endliche Grösse sondern ist ein Punkt. Wenn ein Quantenphänomen nicht in Teile zerlegt gedacht werden kann, dann muss man es also – um es mit dem Raumbegriff der ART zu fassen – als Punkt bezeichnen. Es ist in keiner Weise erstaunlich, wenn alle Teile eines Systems, das nur die Ausdehnung eines Punktes hat, jederzeit perfekte Korrelation zeigen. Die spukhafte Fernwirkung ist überflüssig. Zwar haben wir mit dieser Überlegung die Angelegenheit buchstäblich „auf den Punkt gebracht“, verständlich ist sie dadurch allerdings nicht geworden. Punkte, die auch mal 400 m groß sein können, lassen sich einfach nicht ins Begriffsgebäude der ART zwängen.

Bohr scheint einen Raumbegriff zu verwenden, der mit dem Raumbegriff der ART inkompatibel ist. Wenn er betont, dass ein Quantensystem nur durch Anwendung Klassischer Messgeräte aufgetrennt werden könne, dann greift er damit im Grunde den Raumbegriff des Aristoteles wieder auf. Die Messgeräte definieren, von wo bis wo sich das Quantenphänomen erstreckt. Werden Ort und Ausdehnung von Teilen des Quantenphänomens mithilfe von Koordinaten beschrieben, dann ist das eine „nur gedachte“, also laut Bohr unzulässige Zerlegung. Nur durch die tatsächliche Anwendung von Messgeräten kann der „rechte Teil“ vom „linken Teil“ des Quantenphänomens unterschieden werden.

Nicht Koordinaten sondern Messgeräte definieren den Ort eines Quantenphänomens und seiner Teile im Raum, und die Anwendung räumlicher Begriffe ist sinnvoll nur dort, wo Messgeräte anwesend sind. Widersinnig ist eine Vorstellung räumlicher Verhältnisse oder Vorgänge – beispielsweise des Korrelationsmechanismus im Inneren eines ausgedehnten Quantenphänomens –, wo kein Messgerät diese Vorstellung mit greifbarer Realität unterfüttert. Der Raum wird durch seinen Inhalt an Messgeräten definiert, nicht durch Koordinaten (und auch nicht durch seinen Inhalt an Metrischen oder anderen Feldern). Die Vorstellung eines Raumes,

der keine Messgeräte enthält, ist nach dieser Sichtweise unsinnig.

5. Das Vakuum der Quantentheorie

„Die Philosophie [damit ist die Physik gemeint] steht in jenem allergrößten Buch geschrieben, das jederzeit offen vor unseren Augen liegt – ich spreche vom Universum. Aber man kann es nicht verstehen, wenn man sich nicht zuerst darin übt, die Sprache zu verstehen und die Buchstaben kennenzulernen, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und seine Buchstaben sind Dreiecke, Kreise, und andere geometrische Figuren. Ohne diese Hilfsmittel kann man kein einziges Wort davon verstehen.“ [9] Diese Feststellung Galilei's im *Saggiatore* wurde in vier Jahrhunderten neuzeitlicher Physik eindrucksvoll bestätigt. Vorteil der mathematischen Sprache für die Physik ist erstens, dass die Konsistenz einer mathematisch formulierten Theorie leichter überprüft werden kann als die einer Naturbeschreibung in Prosa, und zweitens, dass Vorhersagen der Theorie quantitativ direkt mit Messergebnissen verglichen werden können. Das bedeutet nicht, dass die beschriebenen Dinge und Vorgänge ihrem Wesen nach mathematische Elemente wären. Sondern die mathematischen Elemente sind Repräsentanten der Beobachtungsgrößen, und die Zusammenhänge, die die Theorie zwischen ihnen herstellt, repräsentieren die natürlichen Zusammenhänge zwischen den untersuchten Objekten.

Zweimal hat die Physik seit Galilei's Tagen die Art der mathematischen Elemente gewechselt, die als Repräsentanten der Beobachtungsgrößen geeignet erschienen. Schon im Verlauf des 17. Jahrhunderts trat die Bedeutung der „Dreiecke, Kreise, und anderen geometrische Figuren“ zurück. Die Klassische Physik bevorzugte als mathematische Repräsentanten Zahlen. Zahlen haben die Eigenschaft der Kommutativität. Für beliebige Zahlen a und b gilt

immer

$$[a, b] \equiv a \cdot b - b \cdot a = 0. \quad (5)$$

$[a, b]$ wird als Kommutator von a und b bezeichnet.

Ein zweiter Wechsel der mathematischen Repräsentanten begann im Sommer 1925. Damals entdeckte Heisenberg, dass die Beobachtungsgrößen atomarer Systeme mathematisch durch Matrizen repräsentiert werden können. Manche Matrizen kommutieren, aber nicht alle. Insbesondere gilt für die Matrizen Q und P , die Ort und Impuls eines Objekts repräsentieren:

$$[Q, P] \equiv Q \cdot P - P \cdot Q = i\hbar \quad (6)$$

\hbar ist die durch 2π geteilte Planck'sche Konstante. i ist die imaginäre Zahl $\sqrt{-1}$.

1926 publizierte Schrödinger eine weitere Methode zur Berechnung atomarer Systeme. In seiner Theorie waren die mathematischen Repräsentanten der Beobachtungsgrößen Operatoren, die auf Funktionen ψ wirken. Manche Operatoren kommutieren, aber nicht alle. Die Operatoren q und p , die Ort und Impuls repräsentieren, kommutieren nicht:

$$[q, p] \psi \equiv (q \cdot p - p \cdot q) \psi = i\hbar \psi \quad (7)$$

Es stellte sich heraus, dass es egal ist, wodurch genau man Beobachtungsgrößen mathematisch repräsentiert, solange die Repräsentanten nur der durch (6) oder (7) definierten nichtkommutativen Algebra folgen. Der nichtkommutativen Algebra der Theorie entspricht die physikalische Erkenntnis, dass nicht alle Beobachtungsgrößen eines Objekts gleichzeitig wohlbestimmte Werte haben. Insbesondere gilt für die Unbestimmtheit Δp des Impulses und die Unbestimmtheit Δq des Ortes:

$$\Delta q \cdot \Delta p \approx \hbar/2 \quad (8)$$

Damit die Quantentheorie mit der Speziellen Relativitätstheorie kompatibel ist, müssen alle ihre Objekte als Quantenfelder beschrieben werden. Der Operator ρ , der die Energiedichte eines Quantenfeldes repräsentiert, ist ein Integral der Form

$$\rho = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} c\hbar k (a_k^+ a_k + \frac{1}{2}[a_k, a_k^+]) . \quad (9)$$

k ist die Wellenzahl eines Quants, c die Lichtgeschwindigkeit, a_k und a_k^+ sind Operatoren. $a_k^+ a_k$ repräsentiert die Anzahl der angeregten Quanten des Feldes mit der Wellenzahl k . Der Vakuum-Zustand, für den wir uns interessieren, ist gerade dadurch ausgezeichnet dass überhaupt kein Quant angeregt ist:

$$\text{Vakuum: } a_k^+ a_k = 0 \quad (10)$$

Die Energiedichte des Vakuums wird also nur durch den zweiten Summanden in (9) festgelegt. Alle Vorbemerkungen über Kommutatoren dienen eigentlich nur dazu, den Leser behutsam auf die fürchterliche Mitteilung vorzubereiten, die jetzt fällig ist: Der Kommutator $[a_k^+, a_k]$ ist nicht Null. Sondern:

$$[a_k, a_k^+] = 1 \quad (11)$$

Die Energiedichte ρ_o eines Quantenfeldes im Vakuum-Zustand ist demnach

$$\rho_o = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} c\hbar k \frac{1}{2} = \frac{c\hbar}{(2\pi)^2} \int_0^{\infty} dk k^3 \quad (12)$$

Dies Integral divergiert, die Energiedichte des Feldes ist unendlich groß. Solange man nur Vorgänge berechnet, die durch die elektroschwache oder die starke Wechselwirkung bestimmt werden, ist

die unendlich große Vakuum-Energie zwar etwas befremdlich, hat aber keine Folgen. Denn für diese Wechselwirkungen spielen nur Energiedifferenzen eine Rolle. Ein unendlich großer, aber konstanter Energiesockel des Vakuums stört lediglich die Ästhetik. Anders bei der Gravitation: Wenn die Krümmung des Raumes mit den Einstein'schen Feldgleichungen (3) berechnet wird, dann ist in den Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ der Gesamtbetrag des Energieinhalts des Raumes einzusetzen. Die divergierende Vakuumenergie der Quantenfelder bewirkt eine unendlich starke Krümmung des Raumes. Offensichtlich Unsinn.

Was kann man tun? Den lästigen Kommutator $[a_k, a_k^+]$ wegdiskutieren? $[a_k, a_k^+]$ folgt auf ziemlich kurzem Herleitungsweg aus dem Kommutator $[\phi(x, t), \chi(x, t)]$ der Feldamplitude $\phi(x, t)$ und ihres konjugierten Impulses $\chi(x, t)$. Dass dieser Kommutator nicht Null ist, gehört zum unverzichtbaren Fundament der Quantentheorie. Wenn wir daran rütteln, bleibt von der Quantentheorie nichts übrig.

Eher kann man die Integrationsgrenze von (12) in Frage stellen. Unendlich große Wellenzahl k bedeutet unendlich große Energie der Feldquanten. Vielleicht gilt die Quantentheorie nur für kleine Energie, wird aber zunehmend ungenauer und falscher bei höherer Energie? Genau überprüft und für gut befunden wurde sie bisher nur bis zu Wellenzahlen von etwa 10^{18} m^{-1} . Wir schneiden versuchsweise die Integration (12) bei einer endlichen Wellenzahl k_{\max} ab:

$$\rho_o = \frac{c\hbar}{(2\pi)^2} \int_0^{k_{\max}} dk k^3 = \frac{c\hbar}{(4\pi)^2} k_{\max}^4 \quad (13)$$

Was könnte der Wert von k_{\max} sein? Häufig wird $k_{\max} = (L_P)^{-1}$ vorgeschlagen, mit der Planck-Länge $L_P = 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$. Man muss aber betonen, dass es sich dabei um eine völlig freie Spekulation

handelt. Weder aus der Theorie noch aus Experimenten ergibt sich ein positiver Hinweis auf diesen Wert. Sicher wissen wir nur: k_{\max} muss deutlich größer als 10^{18}m^{-1} sein. Wir berechnen ρ_o für L_P^{-1} und für 10^{19}m^{-1} :

$$\rho_o \approx 10^{109}\text{J/m}^3 \quad \text{mit } k_{\max} = L_P^{-1} = 1.6 \cdot 10^{34}\text{m}^{-1} \quad (14a)$$

$$\rho_o \approx 10^{48}\text{J/m}^3 \quad \text{mit } k_{\max} = 10^{19}\text{m}^{-1} \quad (14b)$$

$$\rho_o \gg 10^{48}\text{J/m}^3 \quad \text{ist alles, was wir wissen.} \quad (14c)$$

6. Das Vakuum der Allgemeinen Relativitätstheorie

Anders als die Quantentheorie macht die ART keine direkte Aussage über das Vakuum. Auch ein Vakuum, das überhaupt nichts⁴ enthält, wäre mit ihr kompatibel. Wir können aber geeignete Daten für einen Vergleich zwischen ART und Quantentheorie gewinnen, indem wir die durchschnittliche Energiedichte des Universums berechnen. Mit Einsteins Feldgleichungen (3) kann man ja bei bekanntem Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ die Krümmung des Raumes berechnen. Kann man die Rechnung umdrehen, also aus der beobachteten Krümmung des Raumes den Energie-Impuls-Tensor ermitteln? In voller Allgemeinheit kann man es nicht, dazu ist ein einfacher Parameter wie die Krümmung des Raumes viel zu unspezifisch. Damit die Rechnung möglich wird, muss man die Messdaten mit Modellannahmen ergänzen.

Das Λ CDM-Modell ist unter den Kosmologischen Modellen, die bisher (Ende 2009) mit allen Beobachtungsdaten verträglich sind, das einfachste. Eine der wichtigsten Annahmen des Λ CDM-Modells ist, dass das Universum im großräumigen Mittel (also auf einer Skala, deren Grobkörnigkeit durch den typischen Abstand

⁴ außer natürlich dem Metrischen Feld, das Einstein ja auch als Inhalt des Raumes betrachtete, siehe Abschnitt 2

zwischen Galaxienhaufen definiert ist) homogen und isotrop ist. Eine plausible, aber nicht bewiesene (und vielleicht auch nicht beweisbare) Annahme, die den Metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ so stark einschränkt, dass man auf der Basis von nur wenigen gemessenen Parametern viele weitreichende Schlussfolgerungen ziehen kann.

Das Modell stellt die Energiedichte ρ_{gesamt} des Universums als Summe eines Anteils ρ_m und eines Anteils ρ_Λ dar. Darauf werden wir gleich zurückkommen. ρ_{gesamt} ist der großräumige Mittelwert der Energiedichte, der sowohl die Sterne, Schwarzen Löcher, Gaswolken und anderen kosmischen Objekte enthält, als auch den weitgehend leeren Raum zwischen ihnen. Aus dem Modell folgt eine relativ einfache Beziehung zwischen drei Parametern Ω_m , Ω_Λ , und Ω_k :

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1 \quad (15a)$$

$$\text{mit } \Omega_m + \Omega_\Lambda \equiv (\rho_m + \rho_\Lambda) \cdot \frac{8\pi G}{3H^2 c^2} \quad (15b)$$

$$\text{und } \Omega_k \equiv -k \cdot \frac{c^2}{R^2 H^2} \quad (15c)$$

H ist die Hubblekonstante, R ein Längenparameter, k ein Krümmungsparameter, c die Lichtgeschwindigkeit, G die Gravitationskonstante. Aus den astronomischen Messungen werden derzeit folgende Werte von Ω_k , Ω_Λ und H abgeleitet [10]:

$$-0.0133 < \Omega_k < 0.0084 \quad (16a)$$

$$\Omega_\Lambda = 0.728_{-0.016}^{+0.015} \quad (16b)$$

$$H = (74.2 \pm 3.6) \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \quad (16c)$$

Das Universum ist also im großräumigen Mittel fast flach, vielleicht ein perfekt flacher ($\Omega_k = 0$) Euklidischer Raum. Auf jeden Fall ist Ω_k so klein, dass man wegen (15a) $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ setzen

darf. Damit folgt aus (15b):

$$\rho_m = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3 \quad (17a)$$

$$\rho_\Lambda = 6.8 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3 \quad (17b)$$

$$\rho_{\text{gesamt}} = 9.3 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3 \quad (17c)$$

Diese Energiedichten entsprechen einigen wenigen Wasserstoffatomen pro Kubikmeter. Und das als Mittelwert inklusive aller Sterne und Schwarzen Löcher. Das All ist unglaublich leer! Wir haben das auf der ART beruhende Λ CDM-Modell verwendet, um die Energiedichte aus den Astronomischen Beobachtungsdaten zu erschließen. Jetzt vergleichen wir diesen Wert mit der Vorhersage der Quantentheorie für die Energiedichte des Vakuums:

$$\frac{\text{Energiedichte}_{\text{Quantentheorie}}}{\text{Energiedichte}_{\Lambda\text{CDM}}} = \frac{(14)}{(17c)} \gg 10^{57} \quad (18)$$

Die Astronomen sind gewohnt, mit großen Zahlen zu hantieren, aber diese Diskrepanz schlägt alle Rekorde!

Bemerkenswerterweise kennt die ART schon seit ihren Anfangsjahren ein Mittel, die Unstimmigkeit zu beseitigen: Die Kosmologische Konstante Λ , die Einstein 1917 [11] in die Feldgleichung eingefügt hatte um zu verhindern, dass das Universum aufgrund der Gravitation zusammenstürzt:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} \quad (19)$$

Der Summand $\Lambda g_{\mu\nu}$ auf der rechten Seite der Feldgleichung wirkt als zusätzliche Quelle des Gravitationsfeldes. Die Konstante Λ kann einen beliebigen positiven oder negativen Wert haben, und damit die Wirkung von $T_{\mu\nu}$ ausgleichen.

Einstein hatte nicht lange Freude an dieser Konstruktion. Erstens war das erreichbare Gleichgewicht im Kosmos nur ein labiles. Zweitens entdeckten Vesto Melvin Slipher und Edwin Hubble

nicht lange danach die kosmische Expansion (einen schönen Bericht über diese Entdeckung findet man in [12]), so dass für das weltstabilisierende Λ kein Bedarf mehr zu bestehen schien. Einstein soll daraufhin die Einführung der kosmologischen Konstante als größte Eiselei seines Lebens bezeichnet haben.⁵

Die astronomischen Beobachtungen legen aber seit 1999 doch wieder die Annahme einer von Null verschiedenen Kosmologischen Konstante nahe. Ihre Energiedichte ρ_Λ scheint heute sogar größer zu sein als die Energiedichte ρ_m der manifesten Materie einschließlich der rätselhaften Dunklen Materie, siehe (17).

Da Λ frei gewählt werden darf, können wir als Gegengewicht zur Vakuum-Energiedichte ρ_o der Quantentheorie eine negative Kompensations-Energiedichte ρ_{komp} durch folgende Gleichung definieren:

$$\rho_o + \rho_{\text{komp}} = \rho_\Lambda = 6.8 \cdot 10^{-10} \text{J/m}^3 \quad (20)$$

Damit ist die Welt wieder in Ordnung. Zumindest formal. Aber niemand hat ein gutes Gefühl dabei. Einen derart gigantischen Korrekturfaktor wie ρ_{komp} , der noch dazu auf weit mehr als 57 Stellen genau auf das erforderliche ρ_Λ feinabgestimmt sein muss, ohne plausible Begründung einfach aus dem Hut zu zaubern wäre ein Ausmaß von Willkür, wie es in der neuzeitlichen Physik noch nicht vorgekommen ist.

7. Hat die Inkonsistenz System?

Newtons Physik enthielt eine subtile Inkonsistenz in der Definition des Raumes. Wir haben beschrieben, dass Einstein hierin zugleich eine Inkonsistenz der Definition des Vakuums sah.

⁵ Dies Zitat darf in keinem Artikel fehlen, in dem die kosmologische Konstante auftaucht. Es ist mir allerdings nicht gelungen, einen seriösen Quellenbeleg dafür zu finden. *Se non e vero, e ben trovato.*

Das 20. Jahrhundert brachte zwei wesentlich verbesserte physikalische Theorien hervor. Die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie bilden die Natur mit phantastischer Genauigkeit ab. – Aber die beiden Theorien widersprechen sich massiv. Die Inkonsistenzen im physikalischen Weltbild sind von subtilen Unstimmigkeiten in der frühen Neuzeit zu gigantischen Inkonsistenzen in der Physik des 20. Jahrhunderts angewachsen. Woran liegt das? Warum haben wir ein Nebeneinander zweier teilweise richtiger Theorien, statt eine komplett richtige?

Da bisher niemand die Unvermeidlichkeit des Nebeneinanders bewiesen hat, haben viele Forscher die Suche nach der komplett richtigen Einheitstheorie, der Quantengravitationstheorie, aufgenommen. Und es fehlt nicht an weiteren Ansätzen, das Problem der Vakuumenergie-Differenz mathematisch-technisch in den Griff zu bekommen. Eine schöne Übersicht dazu gibt [13]. Betrachtet man aber, wie das Problem sich über Jahrzehnte und Jahrhunderte angebahnt hat, dann drängt sich der Eindruck auf, dass es sich hier nicht um technische Detail-Schwierigkeiten wie mangelnde Renormierbarkeit des Gravitationsfeldes und dergleichen handelt, die durch geschicktes Basteln mit Wurmlöchern, Superstrings, oder weiteren 25 Raumdimensionen behoben werden können. Ursache der unfriedlichen Koexistenz der beiden Theorien scheinen eher tiefliegende Inkonsistenzen in der Bildung und Benutzung grundlegender Begriffe der Physik zu sein. Inkonsistenzen, die sich schon vor langer Zeit eingeschlichen haben, deren Folgen aber erst jetzt massiv in Erscheinung treten.

Schon einmal, vor knapp hundert Jahren, erlebte die Physik eine ähnliche Krise ihrer Begriffsbildung. Diese Phase führte zu Bohrs Komplementaritätsprinzip. Wenn die menschliche Sprache nicht über einen angemessenen Begriff für einen bestimmten Sachverhalt verfügte, dann empfahl er, ersatzweise zwei komplementäre Begriffe zu verwenden. Die komplementären Begriffe – das

Standardbeispiel war Welle und Teilchen – vermitteln in ihrem Zusammenspiel einen zutreffenden Eindruck vom umschriebenen Sachverhalt, und lassen in ihrem Widerspruch zugleich die Grenzen ihrer Anwendbarkeit erkennen.

Das war freilich eine Empfehlung, mit der sich nicht jeder anfreunden konnte – und auch nicht musste. Denn die Widersprüche gab es ja nur in den anschaulichen Bildern, mit denen der mathematische Formalismus der Quantentheorie untermalt wurde. Wer bereit war auf Anschauung zu verzichten, der konnte sich dem Formalismus anvertrauen, dessen Erfolgsgeheimnis zwar rätselhaft war und blieb, der aber – zuverlässig und ausnahmslos – richtige Ergebnisse produzierte.

Das ist bei der Diskrepanz zwischen ART und Quantentheorie anders. Keine Mathematik verrät uns, ob die Energiedichte des Universums 10^{-9}J/m^3 oder $\gg 10^{48}\text{J/m}^3$ ist. Trotzdem ist es keineswegs sicher, dass eine der beiden Theorien – oder gar beide – falsch sind. Im Gegenteil. Möglicherweise stellt jede von ihnen einen Aspekt der Welt korrekt dar, und beide Theorien, obwohl – oder gerade weil – sie sich widersprechen, ergänzen sich in ihrem komplementären Zusammenspiel zu einem getreuen Abbild der Welt.

Vielleicht gibt es eine letztlich nicht behebbare Inkompatibilität zwischen der Natur und dem menschlichen Denken? Vielleicht passt eine hypothetische einheitliche Theorie der Quantengravitation einfach nicht zusammen mit den Strukturen menschlicher Gehirne, wie sie sich in den Jahrmillionen der Evolution ausgebildet haben? Vielleicht müssen wir die Inkonsistenzen zwischen beiden Theorien positiv sehen, weil nur durch die (richtige!) Kombination inkompatibler Begriffe eine insgesamt vollständige Weltbeschreibung gelingen kann? Vielleicht ist nur die Verwendung zweier komplementärer physikalischer Theorien dem menschlichen Erkenntnisvermögen angemessen? Sehr viel vielleicht.

Wenn es so sein sollte, dann wäre das Ziel nicht die vereinheitlichte „Theorie von Allem“ . Stattdessen wäre herauszufinden, wo genau die Grenzen zwischen den komplementären Begriffssystemen liegen, und wie sie sinnvoll kombiniert werden können. Diese Klärung würde helfen, jede der beiden Theorien besser zu verstehen. Und aus der unfriedlichen Koexistenz von ART und Quantentheorie könnte eine fruchtbare Kooperation entstehen.

8. Nachtrag 2016

Meine Ansicht über die in den Abschnitten 5 und 6 diskutierte Unstimmigkeit zwischen der gigantisch großen Vakuum-Energie der elementaren Felder auf der einen Seite, und der nur winzigen Krümmung des intergalaktischen Raumes andererseits, hat sich inzwischen wesentlich verändert. Meine aktuelle Ansicht zu diesem Thema kann man in [14] nachlesen.

Und die Quelle des Einstein-Zitats „die kosmologischen Konstante war die größte Eselei meines Lebens“, das auf Seite 6 abgedruckt wurde, hat sich inzwischen gefunden: Das Zitat stammt aus der Autobiographie[15] von George Gamow.

Literatur

- [1] Isaac Newton : *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Guil. & Joh. Innys, London, 3rd ed. 1726)
<http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-1235> , english translation: [https://en.wikisource.org/wiki/The_Mathematical_Principles_of_Natural_Philosophy_\(1846\)](https://en.wikisource.org/wiki/The_Mathematical_Principles_of_Natural_Philosophy_(1846))
deutsche Übersetzung:
<https://archive.org/details/mathematischepr00newtgoog>

- [2] Johannes Kepler: *Astronomia Nova*
(Verlag Gotthard Vögelin, Heidelberg, 1609)
Nachdruck in Kepler: *Gesammelte Werke Band 3*
(Verlag C. H. Beck, München, 1938)
- [3] Christian Morgenstern: *Alle Galgenlieder*
(Insel Verlag, Frankfurt am Main, 1972)
- [4] Albert Einstein: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (Springer Verlag, Heidelberg, 1988)
- [5] Albert Einstein: *Die Feldgleichungen der Gravitation*,
Sitzungsber. Preuß. Akad. Wiss. Berlin **47**, 844–847 (1915)
<http://nausikaa2.mpiwg-berlin.mpg.de/cgi-bin/toc/toc.x.cgi?dir=6E3MAXK4&step=thumb>
- [6] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen:
Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, Phys. Rev. **47**, 777–780 (1935)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- [7] J. S. Bell: *On the Einstein Podolski Rosen Paradox*,
Physics **1**, 195–200 (1964) https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200_001.pdf
- [8] G. Weihs, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter,
A. Zeilinger: *Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions*,
Phys. Rev. Lett. **81**, 5039–5043 (1998),
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5039>
or: <http://www.univie.ac.at/qfp/publications3/pdffiles/1998-04.pdf>

- [9] Galileo Galilei: *Il Saggiatore* (1623) http://www.libreriaeditrice.it/mediateca/libri/g/galilei/il_saggiatore/pdf/il_saggiatore_p.pdf english translation (parts only): <http://www.princeton.edu/~hos/h291/assayer.htm>
- [10] E.Komatsu et.al.: *Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation*, *Astrophys. J. Supp.* **192:18**, 47pp, (2011) http://iopscience.iop.org/0067-0049/192/2/18/pdf/0067-0049_192_2_18.pdf
- [11] A. Einstein: *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, S. Preuß. Akad. Wiss. Berlin, 142–152 (1917), <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/MPIWG:H428RSAN>
- [12] R. P. Kirshner: *Hubble's diagram and cosmic expansion* *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101**, 8–13 (2004) <http://www.pnas.org/content/101/1/8.full.pdf>
- [13] S. Weinberg: *The cosmological constant problem*, *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1–23 (1989) <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.61.1> http://www-itp.particle.uni-karlsruhe.de/~sahlmann/gr+c_seminarII/pdfs/T3.pdf
- [14] G. Gründler: *Canonical quantization of elementary fields*, APIN Circular se86311 (2015) <http://www.astrophys-neunhof.de/mtlg/se86311.pdf>
- [15] George Gamow: *My Worldline* (Viking Press, New York, USA, 1970)