

# Von Theorien und Experimenten

Wenn wir älter werden,  
Wird die Welt immer fremder, verworrener das Gefüge  
Von Totem und Lebendem. Nicht der gesteigerte  
Augenblick, losgelöst, frei. von Gewesenem und  
Künftigem, sondern das ganze Leben, glühend in  
Jedem Augenblick.

T.S Elliot

Ich möchte nun zwei Geschichten über Fortschritt in der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts erzählen. In diesen Geschichten wird eine merkwürdige Tatsache deutlich. Immer wieder haben Physiker sich von ihrem Schönheitssinn leiten lassen, nicht nur, wenn sie neue Theorien erarbeiteten, sondern auch wenn sie die Gültigkeit bereits entwickelter physikalischer Theorien beurteilten. Anscheinend lernen wir, die Schönheit der Natur auf ihrem grundlegendsten Niveau vorwegzunehmen. Nichts könnte uns mehr in der Zuversicht bestärken, dass wir uns tatsächlich auf dem Wege zur Entdeckung der endgültigen Gesetze der Natur befinden.

In meiner ersten Geschichte geht es um die Allgemeine Relativitätstheorie, Einsteins Theorie der Gravitation. Einstein entwickelte diese Theorie in den Jahren 1907 bis 1915 und veröffentlichte sie in einer Reihe von Aufsätzen in den Jahren 1915 und 1916. Während Newton die Gravitation als Anziehungskraft zwischen allen massereichen Körpern definiert hatte, so beschreibt die allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation, ganz kurz gesagt, als einen Effekt der Krümmung der Raumzeit, der sowohl durch Materie als auch durch Energie hervorgerufen wird. Diese revolutionäre Theorie hatte Mitte der zwanziger Jahre allgemeine Anerkennung als zutreffende Theorie der Gravitation gefunden und diesen Anspruch seither behauptet. Wie kam es dazu?

Einstein erkannte 1915 sofort, dass seine Theorie einen alten Widerspruch zwischen bestimmten Beobachtungen des Sonnensystems und der Theorie Newtons löste. Seit 1859 hatte es Schwierigkeiten gegeben, die Bahn des Planeten Merkur mit der Theorie Newtons in Einklang zu bringen. Gäbe es im Universum nichts anderes als die Sonne und einen einzigen Planeten, so würde sich der Planet gemäß der Newtonschen Mechanik und Gravitationstheorie auf einer vollkommenen Ellipse um die Sonne bewegen. Die Orientierung der Ellipse - die Richtung, in die seine Haupt- und Nebenachse weisen - würde sich niemals ändern; es wäre so, als ob die Bahn des Planeten im Raum fixiert sei. Da nun das Sonnensystem einige Planeten enthält, die das Gravitationsfeld der Sonne geringfügig stören, präzessionieren die elliptischen Bahnen der Planeten, sie beschreiben also eine langsame Drehung im Raum.<sup>1</sup> Im neunzehnten Jahrhundert erkannte man, dass die Bahn des Planeten Merkur sich in einem Jahrhundert um einen Winkel von etwa 575 Sekunden ändert. (Ein Grad gleich 3600 Sekunden.) Nach der Theorie Newtons würde die Bahn des Merkur dagegen um 532 Sekunden pro Jahrhundert präzessionieren, ein Unterschied von dreiundvierzig Sekunden pro Jahrhundert. Man kann dies auch so ausdrücken, dass die elliptische Bahn, nachdem sie einmal die volle Drehung von 360 Grad durchlaufen hat, in 225 000 Jahren wieder ihre ursprüngliche Richtung annehmen wird, wohingegen es nach der Newtonschen Theorie 244000 Jahre dauern würde - keine sehr dramatische Diskrepanz, sie hatte aber dennoch den Astronomen über ein halbes Jahrhundert lang Kopfzerbrechen bereitet. Als sich Einstein 1915 mit den Konsequenzen seiner neuen Theorie befasste, stellte er fest, dass sie die um dreiundvierzig Sekunden pro Jahrhundert größere Präzession in der Bahn des Merkur unmittelbar erklärte. (Einer der Effekte, der in Einsteins Theorie zu dieser zusätzlichen Präzession beiträgt, ist das zusätzliche Gravitationsfeld, das von der Energie im Gravitationsfeld selbst erzeugt wird. In Newtons Theorie wird Gravitation nur durch Masse, nicht durch Energie erzeugt, und sie berücksichtigt daher nicht ein solches zusätzliches Gravitationsfeld.) Nachdem es Einstein gelungen war, dies zu klären, war er mehrere Tage lang außer sich vor Freude, wie er sich später erinnerte.

Nach dem Ersten Weltkrieg wurde die allgemeine Relativitätstheorie von den Astronomen einer weiteren experimentellen Prüfung unterzogen; während der Sonnenfinsternis des Jahres 1919 maßen sie die Ablenkung von Lichtstrahlen durch die Sonne. Nach Einsteins Theorie werden die Photonen in

einem Lichtstrahl durch Gravitationsfelder genauso abgelenkt, wie ein Komet, der aus weiter Ferne in das Sonnensystem gerät, durch das Gravitationsfeld der Sonne abgelenkt wird und einen Bogen um die Sonne beschreibt, bevor er wieder im Weltraum verschwindet. Licht wird natürlich sehr viel weniger stark abgelenkt als ein Komet, weil es eine größere Geschwindigkeit besitzt, so wie ein schneller Komet weniger stark abgelenkt wird als ein langsamer. Wenn die allgemeine Relativitätstheorie zutraf, musste ein Lichtstrahl, der nahe an der Sonne vorbeigeht, um 1,75 Bogensekunden abgelenkt werden. (Um diese Ablenkung zu messen, müssen Astronomen eine Sonnenfinsternis abwarten, denn die Lichtstrahlen eines fernen Sterns, deren Ablenkung sie beobachten wollen, laufen dicht am Sonnenrand vorbei, und dort sind Sterne natürlich nur schwer zu erkennen, wenn das Licht der Sonne nicht wie bei einer Finsternis durch den Mond verdeckt ist. Zunächst wird die Stellung mehrerer Sterne sechs Monate vor der Finsternis gemessen, wenn die Sonne sich auf der anderen Seite des Himmels befindet, und wenn dann nach sechs Monaten die Finsternis eintritt, misst man die Ablenkung des dicht an der Sonne vorbeilaufenden Sternenlichts, die sich darin zeigt, dass die scheinbare Position dieser Sterne am Himmel sich verschiebt.) Um eine Sonnenfinsternis zu beobachten, begaben sich britische Astronomen 1919 auf eine Insel im Atlantik, die im Golf von Guinea liegt, und in eine kleine Stadt im Nordosten Brasiliens. Sie fanden heraus, dass die Ablenkung der Lichtstrahlen von mehreren Sternen unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit exakt Einsteins Vorhersage entsprach. Dies verschaffte der allgemeinen Relativitätstheorie weltweite Anerkennung und machte sie zum Thema von Partygesprächen.

Verstand es sich daher nicht von selbst, dass die allgemeine Relativitätstheorie Newtons Gravitationstheorie verdrängte? Die allgemeine Relativitätstheorie hatte eine alte Anomalie erklärt, das Übermaß an Präzession der Merkurbahn, und sie hatte einen auffälligen neuen Effekt, die Ablenkung des Lichts durch die Sonne, vorhergesagt. War das nicht mehr als genug?

Die Anomalie der Merkurbahn und die Lichtablenkung spielten natürlich eine Rolle, und zwar eine nicht unwichtige. Doch wie sich in der Geschichte der Wissenschaft (und in der Geschichte überhaupt, wie ich vermute) bei näherem Hinsehen zeigt, liegen die Dinge nicht ganz so einfach wie vermutet.

Nehmen wir den Widerspruch zwischen Newtons Theorie und der beobachteten Bahn des Merkur. War das nicht, auch ohne die allgemeine Relativitätstheorie, ein klarer Beweis, dass mit Newtons Gravitationstheorie etwas nicht stimmte? Nicht unbedingt. Bei einer Theorie wie Newtons Gravitationstheorie, die einen riesigen Anwendungsbereich hat, gibt es immer experimentelle Anomalien. Es gibt keine Theorie, der nicht irgendeinem Experiment widerspricht. Seit es Newtons Theorie des Sonnensystems gab, haben ihr immer wieder verschiedene astronomische Beobachtungen widersprochen. Zu diesen Diskrepanzen gehörten 1916 nicht nur die Anomalie der Merkurbahn, sondern auch Anomalien in der Bahn des Halleyschen und des Enckeschen Kometen sowie in der Bahn des Mondes. Sie alle verhielten sich nicht, wie es Newtons Theorie erwarten ließ. Dabei berühren, wie wir heute wissen, die Bahnanomalien der Kometen und des Mondes die Grundlagen der Gravitationstheorie nicht im Geringsten. Dass der Halleysche und Enckesche Komet sich nicht so verhalten, wie man es aufgrund von Newtons Theorie vorausberechnet hatte, liegt daran, dass man den Druck der Gase, die den rotierenden Kometen entweichen, wenn diese in Sonnennähe aufgeheizt werden, bei den Berechnungen nicht korrekt einbezogen hatte. Ähnlich verhält es sich beim Mond, dessen Bahn sehr kompliziert ist, weil er als ein ziemlich großes Objekt allen möglichen Gezeitenkräften ausgesetzt ist. Dass bei der Anwendung der Theorie Newtons auf diese Phänomene Diskrepanzen auftraten, ist aus heutiger Sicht nicht überraschend. Es gab denn auch verschiedene Vorschläge, wie sich die Anomalie der Merkurbahn im Rahmen der Newtonschen Theorie erklären ließe. Eine zu Beginn unseres Jahrhunderts ernsthaft erwogene Möglichkeit bestand darin, dass das Gravitationsfeld der Sonne geringfügig durch Materie gestört wird, die sich zwischen Merkur und der Sonne befindet. Eine Diskrepanz, die zwischen Theorie und Experiment auftaucht, meldet sich nicht fahnenschwenkend: „Ich bin eine bedeutsame Anomalie.“ Ein Wissenschaftler, der sich am Ende des neunzehnten Jahrhunderts und im ersten Jahrzehnt des zwanzigsten Jahrhunderts die Daten kritisch vornahm, hatte keinen Anhaltspunkt, der ihm sofort verraten hätte, dass irgendetwas an diesen Anomalien des Sonnensystems bedeutsam war. Allein die Theorie konnte Klarheit darüber schaffen, auf welche Beobachtungen es ankam.

Dass Einstein 1915 aus der allgemeinen Relativitätstheorie eine übermäßige Präzession der

Merkurbahn ableiten konnte, die dem beobachteten Wert von dreiundvierzig Sekunden pro Jahrhundert genau entsprach, war natürlich ein wichtiger Beweis für seine Theorie. Man hätte, wie ich später begründen werde, diese Tatsache sogar noch ernster nehmen können, als es tatsächlich geschah. Vielleicht lag es daran, dass es eine Vielzahl weiterer möglicher Störungen der Merkurbahn gab; vielleicht lag es an dem Vorurteil, Theorien nicht durch bereits vorhandene Daten zu validieren, vielleicht lag es aber auch nur an der Kriegszeit - jedenfalls machte die Tatsache, dass es Einstein gelungen war, die Präzession des Merkur zu erklären, bei weitem nicht so großen Eindruck wie der Bericht über die Beobachtungen während der Sonnenfinsternis von 1919, die Einsteins Vorhersage über die Lichtablenkung durch die Sonne bestätigten.

Wenden wir uns nun also der Lichtablenkung durch die Sonne. Auch nach 1919 haben Astronomen Einsteins Vorhersage verschiedentlich während einer Sonnenfinsternis überprüft, so 1922 in Australien, 1929 in Sumatra, 1936 in der Sowjetunion und 1947 in Brasilien. Tatsächlich wurde in einigen Fällen eine Lichtablenkung beobachtet, die mit Einsteins Theorie übereinstimmte, doch in mehreren Fällen wich die Beobachtung erheblich von Einsteins Vorhersage ab. Ferner wurde, anders als bei der Messung von 1919, die, an einem Dutzend Sternen vorgenommen wurde, eine Messungsgenauigkeit von zehn Prozent verzeichnete und mit Einsteins Vorhersage bis auf eine Abweichung von ebenfalls etwa zehn Prozent übereinstimmte, bei mehreren oder späteren Messungen nicht wieder eine so gute Übereinstimmung erreicht, obwohl sehr viel mehr Sterne beobachtet wurden. Es mag sein, dass die Sonnenfinsternis von 1919 für Beobachtungen dieser Art ungewöhnlich günstige Voraussetzungen bot, doch neige ich gleichwohl zu der Ansicht, dass die beteiligten Astronomen sich bei der Analyse ihrer Messergebnisse von ihrer Begeisterung für die allgemeine Relativitätstheorie haben mitreißen lassen.

Tatsächlich haben Wissenschaftler damals Einwände gegen die Messergebnisse von 1919 vorgebracht. Svante Arrhenius erwähnte in einem Gutachten für das Nobelkomitee von 1921 mehrere kritische Stimmen zu den Angaben über die Lichtablenkung.<sup>2</sup> Ich habe einmal in Jerusalem einen älteren Herrn kennengelernt, Professor Sambursky, der 1919 ein Kollege Einsteins in Berlin gewesen war. Nach seinem Bericht haben es die Astronomen und Physiker in Berlin bezweifelt, dass es den britischen Astronomen gelungen sein sollte, Einsteins Theorie mit einer solchen Genauigkeit zu überprüfen.

Ich will damit durchaus nicht suggerieren, dass es bei diesen Beobachtungen unredlich zugegangen sei. Man kann sich sehr gut all die Fehlerquellen vorstellen, die einem zu schaffen machen, wenn man die Lichtablenkung durch die Sonne messen will. Man betrachtet einen Stern, der am Himmel dicht bei der Sonnenscheibe zu stehen scheint, während die Sonne vom Mond verdeckt ist. Wenn der Lichtstrahl in den Schatten des Mondes fällt und damit in der Erdatmosphäre aus wärmerer in kühlere Luft übergeht, wird er gebeugt. Man vergleicht die Position des Sterns auf Phototafeln, wobei zwischen den Aufnahmen sechs Monate liegen. Es ist denkbar, dass das Fernrohr bei den Beobachtungen unterschiedlich eingestellt war. Möglich ist auch, dass die Phototafel sich in der Zwischenzeit ausgedehnt oder zusammengezogen hat **usw.**

Wie bei jedem Experiment bedarf es aller möglichen Fehlerkorrekturen. Der Astronom nimmt diese Korrekturen mit bestem Wissen und Gewissen vor. Wenn man aber das Ergebnis schon kennt, ist man verständlicherweise geneigt, mit diesen Korrekturen so lange fortzufahren, bis man die »richtige« Antwort hat, und dann **mit** der Suche nach weiteren Fehlerquellen aufzuhören.

Tatsächlich ist den Astronomen von 1919 denn auch vorgeworfen worden, sie hätten aus Befangenheit die Daten einer der Phototafeln, die mit Einsteins Vorhersage nicht übereingestimmt hätten, verworfen und das Ergebnis mit einer Brennweitenänderung des Teleskops erklärt.<sup>3</sup> Heute können wir sagen, dass die britischen Astronomen tatsächlich recht hatten, aber ich wäre nicht überrascht, wenn sie die Fehlerkorrektur so lange fortgesetzt hätten, bis das Ergebnis einschließlich all der Korrekturen mit Einsteins Theorie übereingestimmt hätte.

Nach verbreiteter Meinung besteht die eigentliche Bewährungsprobe für eine Theorie im Vergleich ihrer Vorhersagen mit den Ergebnissen von Experimenten. Doch wie wir heute feststellen können, war die Erklärung, die Einstein 1915 für die zuvor gemessene Anomalie in der Bahn des Merkur lieferte, eine sehr viel solidere Bewährungsprobe für die allgemeine Relativitätstheorie als die Bestätigung der von ihm errechneten Lichtablenkung durch die Sonne bei Beobachtungen der Sonnenfinsternis von 1919 oder in späteren Jahren. Für die allgemeine Relativitätstheorie war also

eine *rückwirkende Vorhersage*, nämlich die Berechnung der bereits bekannten anomalen Bahnen des Merkur eine verlässlichere Bewährung der Theorie als eine echte **Vorhersage** eines neuen Effekts der Lichtablenkung durch Gravitationsfelder.

Die große Bedeutung die der Vorhersage für die Validierung wissenschaftlicher Theorien beigemessen wird, ist wohl darauf zurückzuführen, dass diejenigen die sich zu wissenschaftlichen Ergebnissen äußern, dem Theoretiker normalerweise nicht trauen. Der Theoretiker, so befürchtet man, passt seine Theorie den bereits bekannten experimentellen Tatsachen an, und daher kann es nicht als eine verlässliche Prüfung der Theorie gelten, wenn diese den Tatsachen entspricht. Einstein war das Übermaß der Präzession der Merkurbahn schon 1907 bekannt, aber wer auch nur ein wenig darüber weiß, wie Einstein die allgemeine Relativitätstheorie entwickelte, und sich in seine Denkweise einzufühlen vermag, kann unmöglich auf den Gedanken kommen, Einstein habe die allgemeine Relativitätstheorie entwickelt, um diese Präzession zu erklären (Ich komme in Kürze darauf zurück, wie Einsteins Gedankengang tatsächlich verlief.) Oft sollte man gerade einer erfolgreichen Vorhersage misstrauen. Bei einer echten Vorhersage wie im Falle Einsteins bei der Lichtablenkung durch die Sonne kennt der Theoretiker zwar nicht das Ergebnis des Experiments, wenn er die Theorie entwickelt, doch derjenige, der das Experiment durchführt, kennt das theoretische Ergebnis. Das aber kann ebenso zu falschen Ergebnissen führen - und in der Geschichte hat es dazu geführt - wie allzu großes Vertrauen auf erfolgreiche rückwirkende Vorhersagen. Das soll, um es nochmals zu betonen, nicht heißen, dass die Forscher bei ihren Experimenten ihre Daten fälschen. In der Physik hat es, soweit mir bekannt ist, keinen nennenswerten Fall einer direkten Fälschung der Versuchsergebnisse gegeben. Wenn Experimentatoren aber das Ergebnis kennen, das sie theoretisch erreichen sollen, suchen sie verständlicherweise eifrig nach Beobachtungsfehlern, solange sie dieses Resultat nicht erreicht haben, und sobald sie zu diesem Ergebnis gelangen, fällt es ihnen verständlicherweise schwer, die Fehlersuche fortzusetzen. Dass Experimentatoren nicht immer die erwarteten Resultate erreichen, ist ein Zeichen für ihre Charakterstärke.

Die ersten experimentellen Belege für die allgemeine Relativitätstheorie, um die Geschichte bis hierher zusammenzufassen, bestanden letztlich in einer erfolgreichen rückwirkenden Vorhersage, nämlich der Bahnanomalie des Merkur, die wohl nicht so ernst genommen wurde, wie sie es verdient hätte, und einer Vorhersage eines neuen Effekts, der Lichtablenkung durch die Sonne, einer Vorhersage, deren scheinbarer Erfolg riesigen Eindruck machte, die tatsächlich aber nicht so schlüssig war, wie man seinerzeit allgemein annahm, und die zumindest von einigen Wissenschaftlern mit Skepsis aufgenommen wurde. Eine erheblich verbesserte Genauigkeit bei der experimentellen Überprüfung der allgemeinen Relativitätstheorie wurde erst nach dem Zweiten Weltkrieg mit neuen Verfahren der Radarmessung und der Radioastronomie erreicht.<sup>6</sup> Heute kann man feststellen, dass die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie bezüglich der Ablenkung (und auch der Verzögerung) von Licht, das an der Sonne vorbeiläuft, und bezüglich der Bahnbewegung nicht nur des Merkur, sondern auch des Asteroiden Ikarus und anderer natürlicher und künstlicher Himmelskörper mit einem Messfehler von unter einem Prozent bestätigt worden sind. Aber das war damals noch Zukunftsmusik. Obwohl die ersten experimentellen Belege für die allgemeine Relativitätstheorie dünn waren, wurde Einsteins Theorie in den zwanziger Jahren zur maßgebenden Lehrbuchtheorie der Gravitation und blieb es ungeachtet dessen, dass die Beobachtungen von Sonnenfinsternissen in den zwanziger und dreißiger Jahren bestenfalls fragwürdige Belege für die Theorie erbrachten. Ich lernte die allgemeine Relativitätstheorie in den fünfziger Jahren kennen noch bevor die moderne Radar- und Radioastronomie neue eindrucksvolle Belege für sie zu liefern begann. Und ich weiß noch, dass es für mich feststand, dass die allgemeine Relativitätstheorie im Großen und Ganzen zutrifft. Vielleicht waren wir alle nur unkritisch und leichtgläubig, aber ich denke nicht, dass die Sache damit zu erklären ist. Dass die allgemeine Relativitätstheorie allgemein anerkannt wurde, lag, glaube ich, zum großen Teil an der Attraktivität der Theorie selbst, mit einem Wort: an ihrer Schönheit.

Einstein war bei der Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie einem Gedankengang gefolgt, der von späteren Physikergenerationen, die sich daranmachten, diese Theorie zu verstehen, leicht nachzuvollziehen war und sie jedes Mal in den Bann zog so wie es Einstein selbst ergangen war. Alles begann im Jahre 1905 Einsteins *annus mirabilis*. In jenem Jahr, in dem Einstein auch die Quantentheorie des Lichts und eine Theorie der Bewegung kleiner Teilchen in Flüssigkeiten<sup>7</sup>

formulierte, entwickelte er eine neue Auffassung von Raum und Zeit, die wir heute als spezielle Relativitätstheorie kennen. Diese Theorie stimmte mit der anerkannten Theorie der Elektrizität und des Magnetismus, der Maxwellschen Elektrodynamik, nahtlos überein. Nach ihr wird ein Beobachter, der sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, feststellen, dass Raum- und Zeitintervalle sowie elektrische und magnetische Felder durch seine Bewegung genau in der Weise modifiziert werden, dass die Maxwellschen Gleichungen trotz der Bewegung gültig bleiben (was nicht erstaunlich ist, weil die spezielle Relativitätstheorie gerade entwickelt wurde, um diese Forderung zu erfüllen.) Mit Newtons Gravitationstheorie ließ sich die spezielle Relativitätstheorie aber überhaupt nicht vereinbaren. In Newtons Theorie hängt nämlich die Gravitationskraft zwischen der Sonne und einem Planeten von der Entfernung zwischen den Orten ab, die sie *zur gleichen* Zeit einnehmen; der Gleichzeitigkeit kommt aber in der speziellen Relativitätstheorie keine absolute Bedeutung zu - verschiedene Beobachter werden abhängig von ihren Bewegungen unterschiedlicher Meinung darüber sein, ob ein Ereignis vor, nach oder zur gleichen Zeit wie ein anderes Ereignis stattfindet.

Nun gab es mehrere Möglichkeiten, Newtons Theorie so zurechtzustutzen, dass sie mit der speziellen Relativitätstheorie übereinstimmte, und Einstein hat mindestens eine davon ausprobiert, bevor er zur allgemeinen Relativitätstheorie gelangte.<sup>8</sup> Was ihn im Jahre 1907 auf den Weg zu allgemeinen Relativitätstheorie brachte, war eine bekannte, charakteristische Eigenschaft der Gravitation:

Die Schwerkraft verhält sich proportional zur Masse des Körpers, auf den sie einwirkt. Einstein überlegte, dass das genauso bei den sogenannten Inertialkräften der Fall ist, die auf uns einwirken, wenn wir uns mit einer nicht gleichförmigen Geschwindigkeit bewegen oder die Richtung ändern. Es ist eine Inertialkraft, die die Passagiere in den Sitz drückt, wenn ein Flugzeug auf der Startbahn beschleunigt. Die Fliehkraft, die die Erde davor bewahrt, in die Sonne zu stürzen, ist ebenfalls eine Inertialkraft. All diese Inertialkräfte sind, wie die Gravitationskräfte, der Masse des Körpers, auf den sie einwirken, proportional. Wir auf der Erde bemerken weder das Gravitationsfeld der Sonne noch die durch den Umlauf der Erde um die Sonne erzeugte Fliehkraft, weil beide Kräfte sich gegenseitig aufheben, doch dieses Gleichgewicht ginge verloren, falls eine Kraft hinsichtlich der Masse der Objekte, auf die sie einwirkt, proportional wäre und die andere nicht; manche Dinge könnten dann von der Erde in die Sonne stürzen, andere könnten von der Erde in den Weltraum hinausgeschleudert werden. Die Tatsache, dass Gravitations- und Inertialkräfte beide der Masse des Körpers, auf den sie einwirken, proportional sind, aber von keiner sonstigen Eigenschaft des Körpers abhängen, macht es im allgemeinen möglich, an irgendeiner Stelle in einem Gravitationsfeld ein »frei fallendes Bezugssystem« zu definieren, in dem weder Gravitations- noch Inertialkräfte verspürt werden, weil sie sich für alle Körper vollkommen im Gleichgewicht befinden. Verspüren wir doch Gravitations- oder Inertialkräfte, dann befinden wir uns nicht in einem frei fallenden Bezugssystem. Auf der Erdoberfläche erfahren frei fallende Körper beispielsweise eine Beschleunigung in Richtung Erdmittelpunkt von 9,81 Metern pro Sekunde pro Sekunde, und wir verspüren eine Gravitationskraft, es sei denn, wir erfahren dieselbe Abwärtsbeschleunigung. Einstein machte nun einen logischen Sprung und vermutete, dass Gravitations- und Inertialkräfte im Grunde ein und dasselbe seien. Er nannte dies das Prinzip der Äquivalenz von Gravitation und Trägheit oder kurz Äquivalenzprinzip. Nach diesem Prinzip ist ein Gravitationsfeld vollständig charakterisiert durch die Angabe, welches Bezugssystem sich an einem Punkt in Raum und Zeit im freien Fall befindet.

Einstein suchte nach 1907 fast zehn Jahre lang nach einem geeigneten mathematischen Rahmen für diese Ideen. Schließlich fand er genau, was er brauchte, in einer profunden Analogie zwischen der Rolle der Gravitation in der Physik und jener der Krümmung in der Geometrie. Die Tatsache, dass man durch Wahl eines geeigneten frei fallenden Bezugssystems die Schwerkraft kurzzeitig über einem kleinen Gebiet um irgendeinen Punkt in einem Gravitationsfeld verschwinden lassen kann, entspricht genau der Eigenschaft von gekrümmten Oberflächen. Wir können eine Karte herstellen, die trotz der Krümmung der Oberfläche Entfernungen und Richtungen in der unmittelbaren Nachbarschaft eines beliebig gewählten Punktes korrekt wiedergibt. Bei einer gekrümmten Oberfläche wird keine Karte an allen Stellen die Entfernungen und Richtungen korrekt wiedergeben; jede Karte einer größeren Region ist ein Kompromiss, denn sie verzerrt Entfernungen und Richtungen in der einen oder anderen Weise. Die bei Erdkarten gebräuchliche Mercatorprojektion gibt Entfernungen und Richtungen in Nähe des Äquators leidlich getreu wieder, führt aber in der Nähe der Pole zu schrecklichen Verzerrungen und stellt Grönland um ein Vielfaches größer dar, als es

wirklich ist. So ist es auch ein Zeichen dafür, dass man sich in einem Gravitationsfeld befindet, dass es *kein* frei fallendes Bezugssystem gibt, in dem Gravitations- und Inertialwirkungen sich überall gegenseitig aufheben.<sup>9</sup>

Ausgehend von dieser Analogie zwischen Gravitation und Krümmung, gelangte Einstein zu dem Schluss, dass die Gravitation nicht mehr und nicht weniger ist als eine Folge der Krümmung von Raum und Zeit. Um diese Idee umzusetzen, benötigte er eine mathematische Theorie gekrümmter Räume, die über die vertraute Geometrie der zweidimensionalen sphärischen Erdoberfläche hinausging. Einstein war der größte Physiker, den die Welt seit Newton gesehen hat, und er verstand von Mathematik ebensoviel wie die meisten Physiker seiner Zeit, aber er war selbst kein Mathematiker. Schließlich fand er genau, was er brauchte, fertig vor in Gestalt einer Theorie des gekrümmten Raumes, die im neunzehnten Jahrhundert von Riemann und anderen Mathematikern entwickelt worden war.

In ihrer endgültigen Form war die allgemeine Relativitätstheorie nichts als eine Uminterpretation der bestehenden Mathematik gekrümmter Räume im Sinne der Gravitation, wobei eine *Feldgleichung* angab, wie stark die durch eine gegebene Materie und Energie erzeugte Krümmung ist. Bemerkenswerterweise führte die allgemeine Relativitätstheorie für die geringen Dichten und niedrigen Geschwindigkeiten des Sonnensystems zu den gleichen Resultaten wie Newtons Gravitationstheorie, und der Unterschied zwischen beiden Theorien bestand lediglich in winzigen Effekten wie der Präzession von Bahnen und der Ablenkung des Lichts.

Über die Schönheit der allgemeinen Relativitätstheorie werde ich später noch einiges sagen. Im Augenblick hoffe ich, einen ausreichenden Eindruck von der Attraktivität der Ideen vermittelt zu haben. Ich glaube, diese der Idee selbst innewohnende Attraktivität ließ die Physiker auch in den Jahrzehnten, in denen bei wiederholten Beobachtungen von Sonnenfinsternissen immer wieder enttäuschende Ergebnisse zu verzeichnen waren, an der allgemeinen Relativitätstheorie festhalten. Dieser Eindruck verstärkt sich, wenn wir berücksichtigen, wie die allgemeine Relativitätstheorie in den ersten Jahren, noch vor der Beobachtung der Sonnenfinsternis von 1919, aufgenommen wurde. Hier kommt es vor allem darauf an, wie Einstein selbst sie aufnahm. Auf einer Postkarte, die er am 8. Februar 1916, drei Jahre vor der Sonnenfinsternis, an den älteren Theoretiker Arnold Sommerfeld richtete, bemerkte Einstein: »Von der allgemeinen Relativitätstheorie werden Sie überzeugt sein, wenn Sie dieselbe studiert haben. Deshalb verteidige ich sie Ihnen mit keinem Wort.« Es ist mir nicht bekannt, inwieweit die erfolgreiche Berechnung der Präzession der Merkurbahn Einstein im Jahre 1916 in seinem Glauben an die allgemeine Relativitätstheorie bestärkte, aber lange vorher, noch vor dieser Berechnung, muss etwas ihn so sehr darin bestärkt haben, an die Ideen, die der allgemeinen Relativitätstheorie zugrunde liegen, zu glauben, dass er weiter daran arbeitete, und das kann nur die Attraktivität der Ideen selbst gewesen sein.

Wir sollten diese frühe Überzeugung nicht unterschätzen. In der Geschichte der Wissenschaft kommt es immer wieder vor, dass Wissenschaftler gute Ideen haben, die sie aber nicht weiterverfolgen, und Jahre später wird dann (oft von anderen) entdeckt, dass diese Ideen zu bedeutenden Fortschritten führen. Es ist ein verbreiteter Irrtum zu glauben, Wissenschaftler seien notwendigerweise eifrige Verfechter ihrer eigenen Ideen. Ein Wissenschaftler, der auf eine neue Idee kommt, setzt diese sehr oft unbegründeter oder maßloser Kritik aus, denn es würde lange, mühselige Arbeit bedeuten und er müsste, was noch wichtiger ist, andere Forschungen aufgeben, wenn er dieser Idee ernsthaft nachgehen wollte.

Was nun die allgemeine Relativitätstheorie angeht, waren die Physiker durchaus von ihr beeindruckt. Kenner in Deutschland und anderen Ländern, die von dieser Theorie hörten, fanden sie lange vor der Sonnenfinsternis von 1919 vielversprechend und wichtig. Unter ihnen waren nicht nur Arnold Sommerfeld in München, Max Born und David Hilbert in Göttingen und Hendrick Lorentz in Leiden, mit denen Einstein während des Ersten Weltkriegs in Verbindung stand, sondern auch Paul Langevin in Frankreich und Arthur Eddington in England, der die Beobachtung der Sonnenfinsternis von 1919 anregte. Aufschlussreich sind die Nominierungen Einsteins für den Nobelpreis von 1916 an. 1916 nominierte ihn Felix Ehrenhaft wegen seiner Theorie der Brownschen Bewegung sowie wegen der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie. 1917 nominierte ihn Arthur Haas wegen der allgemeinen Relativitätstheorie (und führte als Beweis die erfolgreiche Berechnung der Präzession der Merkurbahn an). Ebenfalls 1917 nominierte Emil Warburg Einstein wegen einer Vielzahl von

Beiträgen, darunter die allgemeine Relativitätstheorie. 1918 gingen weitere Nominierungen mit ähnlichen Begründungen ein.

Im Jahre 1919 schließlich, vier Monate vor der Beobachtung der Sonnenfinsternis, nominierte Max Planck, einer der Väter der modernen Physik, Einstein wegen der allgemeinen Relativitätstheorie und bemerkte dazu, dass Einstein »den ersten Schritt über Newton hinaus gemacht« habe.

Dies soll nicht heißen, dass die Weltgemeinschaft der Physiker von Anfang an einhellig und vorbehaltlos von der Gültigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie überzeugt gewesen wäre. So hieß es beispielsweise 1919 im Bericht des Nobelkomitees, man solle vor einer Entscheidung über die allgemeine Relativitätstheorie die Sonnenfinsternis vom 29. Mai abwarten, und auch als Einstein schließlich im Jahre 1921 den Nobelpreis zugesprochen erhielt, geschah dies nicht ausdrücklich wegen der speziellen oder der allgemeinen Relativitätstheorie, sondern »in Würdigung seiner Beiträge zur theoretischen Physik und insbesondere seiner Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts«.

Es ist eigentlich nicht so wichtig, ganz genau festzustellen, wann sich die Physiker zu fünfundsiebzig Prozent, zu neunzig Prozent oder zu neunundneunzig Prozent von der Korrektheit der allgemeinen Relativitätstheorie überzeugen ließen. Für den Fortschritt der Physik kommt es nicht so sehr auf die Entscheidung an, dass eine Theorie wahr ist, sondern vielmehr auf die Entscheidung, dass sie ernst genommen zu werden verdient, dass sie es also verdient, den Studenten vermittelt, in Lehrbüchern dargestellt und vor allem in der eigenen Forschung berücksichtigt zu werden. Die entscheidenden ersten Konvertiten, welche die allgemeine Relativitätstheorie (nach Einstein selbst) für sich gewann, waren in diesem Sinne die britischen Astronomen, die nicht etwa zu der Überzeugung gelangten, dass die allgemeine Relativitätstheorie wahr sei, sondern vielmehr fanden, dass sie hinreichend plausibel und hinreichend schön sei, um es zu rechtfertigen, dass man einen ansehnlichen Teil der eigenen Forschungstätigkeit dafür aufwandte, ihre Vorhersagen zu überprüfen, und die daraufhin Tausende von Meilen reisten, um 1919 die Sonnenfinsternis fern von Großbritannien zu beobachten. Noch früher sogar, noch ehe die allgemeine Relativitätstheorie vollendet und die Präzession der Merkurbahn berechnet war, hatte die Schönheit von Einsteins Ideen Erwin Freundlich vom Königlichen Observatorium in Berlin dazu bewogen, eine von Krupp finanzierte Expedition auf die Krim zu unternehmen, um dort die Sonnenfinsternis von 1914 zu studieren. (Die Beobachtungen wurden durch den Krieg vereitelt, und zu allem Überfluss wurde Freundlich auch noch für kurze Zeit im Ausland interniert.)

Die Rezeption der allgemeinen Relativitätstheorie hing weder allein von experimentellen Daten noch allein von den inneren Vorzügen der Theorie ab, sondern von einem unentwirrbaren Geflecht aus Theorie und Experiment. Ich habe hier den theoretischen Aspekt besonders betont, um der naiven Überbewertung des Experiments entgegenzuwirken. Die alte Auffassung von Francis Bacon, nach der wissenschaftliche Hypothesen aufgrund geduldiger und unvoreingenommener Naturbeobachtung entwickelt werden sollten, ist von Wissenschaftlern und Wissenschaftshistorikern längst aufgegeben worden. Offenkundig hat Einstein nicht dadurch zur allgemeinen Relativitätstheorie gefunden, dass er über astronomische Daten grübelte. Gleichwohl ist die Auffassung von John Stuart Mill, nach der wir unsere Theorien allein durch Beobachtung *überprüfen* können, noch immer weit verbreitet.

Maßgebend für die Akzeptanz der allgemeinen Relativitätstheorie war aber, wie wir gesehen haben, ein unentwirrbares Gemisch aus ästhetischen Urteilen und Beobachtungsdaten.

Wenn man es genau nimmt, lag von Anfang an eine ungeheure Menge von Beobachtungsdaten vor, die für die allgemeine Relativitätstheorie sprachen, nämlich Beobachtungen über den Umlauf der Erde um die Sonne, den Umlauf des Mondes um die Erde und all die anderen detaillierten Beobachtungen des Sonnensystems, die auf Tycho Brahe und seine Vorläufer zurückgingen und bereits durch Newtons Theorie erklärt worden waren. Eine sonderbare Art von Beweis, wird man vielleicht auf den ersten Blick finden. Nicht nur, dass wir als Beweis für die allgemeine Relativitätstheorie jetzt eine rückwirkende Vorhersage anführen, eine Berechnung von Planetenbahnen, die zu der Zeit, als die Theorie entwickelt wurde, bereits vermessen waren - wir sprechen jetzt auch noch von astronomischen Beobachtungen, die nicht nur durchgeführt worden waren, bevor Einstein seine Theorie entwickelte, sondern außerdem auch schon eine Erklärung durch eine andere Theorie gefunden hatten, nämlich durch die Theorie Newtons. Wieso konnte eine erfolgreiche Vorhersage beziehungsweise rückwirkende Vorhersage derartiger Beobachtungen als Triumph für die allgemeine

Relativitätstheorie gelten?

Um das zu verstehen, müssen wir uns eingehender mit den Theorien Newtons und Einsteins befassen. Tatsächlich hat die Newtonsche Physik praktisch sämtliche beobachteten Bewegungen des Sonnensystems erklärt, musste dafür aber eine Reihe von ziemlich willkürlichen Annahmen einführen. Nehmen wir zum Beispiel das Gesetz, nach dem die Gravitationskraft, die ein Körper erzeugt, mit dem umgekehrten Quadrat der Entfernung von dem Körper abnimmt. Allzu zwingend ist dieser Kehrwert des Quadrats in Newtons Theorie nicht. Newton entwickelte die Idee dieses Gesetzes, um bekannte Tatsachen über das Sonnensystem zu erklären, etwa Keplers Beziehung zwischen der Größe von Planetenbahnen und der Dauer eines Planetenumlaufs um die Sonne. Sieht man einmal von diesen Beobachtungstatsachen ab, so hätte man den Kehrwert des Quadrats in Newtons Theorie ohne weiteres durch den Kehrwert der dritten Potenz oder den Kehrwert der Potenz 2,01 ersetzen können, ohne am begrifflichen Schema der Theorie auch nur das geringste zu ändern.<sup>10</sup> Für die Theorie hatte sich nur ein untergeordnetes Detail geändert. Sehr viel weniger willkürlich, sehr viel strenger war dagegen Einsteins Theorie. Soweit es um sich langsam bewegende Körper in schwachen Gravitationsfeldern geht, bei denen man von einer normalen Gravitationskraft sprechen darf, schreibt die allgemeine Relativitätstheorie *zwingend* vor, dass die Kraft proportional zum Kehrwert des Quadrats abnimmt. Die allgemeine Relativitätstheorie kann nicht dahingehend abgeändert werden, dass man ein anderes Verhältnis bekommt, ohne den grundlegenden Annahmen der Theorie Gewalt anzutun.

Auch die Tatsache, dass die auf ein kleines Objekt einwirkende Schwerkraft der Klasse des Objekts proportional ist, aber von keiner weiteren Eigenschaft des Objekts abhängt, ist, wie Einstein besonders hervorhob, ein recht willkürlicher Bestandteil von Newtons Theorie. Newton hätte die Gravitationskraft zum Beispiel auch von der Größe, der Gestalt oder der chemischen Zusammensetzung des Körpers abhängig machen können, ohne den begrifflichen Rahmen seiner Theorie zu sprengen. In Einsteins Theorie muss die auf ein Objekt einwirkende Schwerkraft sowohl der Masse des Objekts proportional als auch von allen übrigen Eigenschaften dieses Objekts unabhängig sein;\* anderenfalls käme für unterschiedliche Körper ein unterschiedliches Verhältnis zwischen Gravitations- und Inertialkräften zustande, und man könnte nicht von einem frei fallenden Bezugssystem sprechen, in dem kein Körper die Auswirkungen der Gravitation verspürt. Damit wäre es nicht mehr möglich, die Gravitation als eine geometrische Auswirkung der Krümmung der Raumzeit zu interpretieren. Einsteins Theorie besaß also eine Strenge, die Newtons Theorie abging, und aus diesem Grunde durfte Einstein überzeugt sein, die normalen Abläufe im Sonnensystem in einer Weise erklärt zu haben, wie es Newton nicht vermocht hatte.

Leider ist es sehr schwierig, exakt zu definieren, was man unter der Strenge physikalischer Theorien zu verstehen hat. Newton und Einstein wussten, bevor sie ihre Theorien formulierten, beide in groben Zügen über die Planetenbewegung Bescheid, und Einstein wusste, dass seine Theorie bezüglich der Gravitationskraft so etwas wie den Kehrwert des Quadrats enthalten musste, wenn sie an die Erfolge von Newtons Theorie anknüpfen wollte. (Er wusste ferner, dass er letztlich zu einer Gravitationskraft kommen musste, die der Klasse proportional ist.) Wir können erst nachträglich, im Blick auf die ganze Theorie in ihrer endgültigen Formulierung sagen, dass Einsteins Theorie die Abnahme der Gravitationskraft mit dem Quadrat der Entfernung beziehungsweise die Proportionalität von Gravitationskraft und Klasse erklärte, doch ist dieses Urteil eine Frage des Geschmacks und der Intuition - man legt damit genaugenommen fest, dass Einsteins Theorie unerträglich hässlich werden würde, wenn man sie in dem Sinne modifizierte, dass sie eine Alternative zum Kehrwert des Quadrats oder eine Nicht-Proportionalität von Schwerkraft und Klasse zuließe. Es sind also wiederum unsere ästhetischen Urteile und unser ganzes Erbe an Theorien mit im Spiel, wenn wir darüber befinden, welche Implikationen sich aus den Beobachtungen ergeben.

\* \* \*

In meiner nächsten Geschichte geht es um die Quantenelektrodynamik, die quantenmechanische Theorie der Elektronen und des Lichts. Sie stellt in einem gewissen Sinne das Spiegelbild der ersten Geschichte dar. Die allgemeine Relativitätstheorie galt vierzig Jahre lang ungeachtet der Dürftigkeit der Beweise für sie weithin als die korrekte Theorie der Gravitation, weil die Theorie von unwiderstehlicher Schönheit war. Die Quantenelektrodynamik wurde dagegen schon sehr früh von einer Fülle von Beobachtungsdaten gestützt, und dennoch begegnete man ihr zwanzig Jahre lang mit Misstrauen, weil sie an einem theoretischen inneren Widerspruch litt, der, so schien es, nur auf hässliche Weise gelöst, werden konnte

\*Genaugenommen ist dies nur für kleine Objekte gültig, die sich langsam bewegen. Bei einem sich schnell bewegenden Objekt hängt die Schwerkraft auch von dessen Impuls ab. Deshalb kann das Gravitationsfeld der Sonne Lichtstrahlen ablenken, die einen Impuls, aber keine Masse haben.

Die Quantenmechanik wurde 1926 in einem der ersten Aufsätze zur Quantenmechanik, dem *Drei-Männer-Papier* von Max Born, Werner Heisenberg und Pascual Jordan, auf elektrische und magnetische Felder angewandt. Die drei konnten rechnerisch zeigen, dass Energie und Impuls der elektrischen und magnetischen Felder in einem Lichtstrahl in Bündeln auftreten, die sich wie Teilchen verhalten, und auf diese Weise rechtfertigen, dass Einstein 1905 die Lichtteilchen, die sogenannten Photonen, eingeführt hatte.<sup>1</sup> Das andere Hauptelement der Quantenelektrodynamik lieferte Paul Dirac im Jahre 1928. In ihrer ursprünglichen Form zeigte Diracs Theorie, wie die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen im Sinne von Wellenfunktionen sich mit der speziellen Relativitätstheorie in Einklang bringen ließ. Eine der wichtigsten Folgerungen aus Diracs Theorie war, dass es für jede Spezies eines geladenen Teilchens, wie etwa das Elektron, eine andere Spezies geben muss, die die gleiche Masse, aber die entgegengesetzte elektrische Ladung hat und als sein Antiteilchen bezeichnet wird. Das Antiteilchen des Elektrons wurde 1932 entdeckt und wird heute als Positron bezeichnet. In den späten zwanziger und frühen dreißiger Jahren benutzte man die Quantenelektrodynamik zur Berechnung einer Vielzahl physikalischer Prozesse (wie etwa die Streuung eines Photons an einem Elektron, die Streuung eines Elektrons an einem anderen und die Vernichtung beziehungsweise Erzeugung eines Elektrons und eines Positrons), mit Ergebnissen, die im allgemeinen eine glänzende Übereinstimmung zum Experiment zeigten.

Dennoch war man Mitte der dreißiger Jahre weithin der Ansicht, dass man die Quantenelektrodynamik allenfalls als eine Näherung ernst nehmen dürfe, deren Gültigkeit sich nur auf Reaktionen erstreckt, an denen Photonen, Elektronen und Positronen von entsprechend niedriger Energie beteiligt sind. Die Schwierigkeit bestand nicht, wie es in populärwissenschaftlichen Darstellungen der Wissenschaftsgeschichte gemeinhin dargestellt wird, in einem Konflikt zwischen theoretischen Erwartungen und experimentellen Ergebnissen, sondern vielmehr in einem hartnäckigen Widerspruch innerhalb der physikalischen Theorie selbst. Es ging um das Problem der unendlichen Größen.

In der einen oder anderen Form hatten schon Heisenberg und Pauli sowie der schwedische Physiker Ivar Waller auf dieses Problem aufmerksam gemacht, doch besonders klar und aufsehenerregend wurde es von dem jungen amerikanischen Theoretiker Julius Robert Oppenheimer 1930 in einem Artikel dargestellt. Oppenheimer versuchte, mit Hilfe der Quantenelektrodynamik einen kaum feststellbaren Effekt zu berechnen, der die Energieniveaus von Atomen betrifft. Es kann vorkommen, dass in einem Atom ein Elektron ein Lichtteilchen, ein Photon, emittiert, dann seine Bahn eine Weile fortsetzt und schließlich das Photon wieder absorbiert, wie ein Fußballspieler, der seinen eigenen Vorwärtspass wieder einfängt. Das Photon, das das Atom nicht verlässt verrät seine Anwesenheit nur indirekt durch seine Auswirkungen auf Eigenschaften des Atoms wie seine Energie und sein magnetisches Feld (Man nennt solche Photonen virtuell) Dieser Vorgang löst nach den Regeln der Quantenelektrodynamik eine Veränderung im energetischen Zustand des Atoms aus, die sich dadurch berechnen lässt dass man eine unendliche Anzahl von Beiträgen addiert, wobei auf jeden möglichen Wert der Energie, die dem virtuellen Photon zugeschrieben werden kann, ein Beitrag kommt und der Energie des Photons keine Grenze gesetzt wird.<sup>12</sup> Oppenheimer entdeckte bei seiner Berechnung, dass die Summe, da sie Beiträge von Photonen mit unbegrenzt hoher Energie enthält, unendlich ist und zu einer unendlichen Veränderung in der Energie des Atoms führt.\* Weil

hohe Energie kurzen Wellenlängen entspricht und ultraviolettes Licht eine kürzere Wellenlänge hat als sichtbares Licht, bezeichnete man das Auftreten dieser unendlichen Größe als Ultraviolettkatastrophe.

Während der dreißiger und in den frühen vierziger Jahren waren sich die Physiker darüber einig, dass das Auftreten der Ultraviolettkatastrophe in Oppenheimers Berechnung und ähnlichen Berechnungen zeigen würde, dass bei Teilchen mit Energien von mehr als einigen Millionen Volt der bestehenden Theorie der Elektronen und Photonen einfach nicht zu trauen sei. Oppenheimer selbst vertrat diese Ansicht zuallererst. Dies hing auch damit zusammen,

\* Nicht jede Summe einer unendlichen Anzahl von Dingen ist unendlich. So ist die Summe  $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots$  in der Tat unendlich, doch die Summe  $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots$  hat den ganz und gar endlichen Wert 2.

dass Oppenheimer führend in der Erforschung der Höhenstrahlung war, jener hochenergetischen Teilchen, die aus dem Weltall in die Erdatmosphäre eindringen, und dass seine Forschungen darauf hin deuteten, dass bei der Wechselwirkung dieser Höhenstrahlungsteilchen mit der Atmosphäre etwas Merkwürdiges passierte. Tatsächlich geschah dort Merkwürdiges, doch von einem Versagen der Quantentheorie der Elektronen und Photonen konnte keine Rede sein; es schien vielmehr, als würden Teilchen neuer Art erzeugt werden, jene Teilchen, die man heute Myonen nennt. Doch selbst nach der Entdeckung von Myonen im Jahre 1937, mit der diese Frage geklärt wurde, blieb man der Meinung, dass die Anwendung der Quantenelektrodynamik auf Elektronen und Photonen von hoher Energie nicht funktioniere.

Man hätte das Problem der unendlichen Größen mit roher Gewalt lösen und einfach festlegen können, dass eine Emission und Absorption von Photonen durch Elektronen nur bis zu einem Grenzwert der Energie möglich sei. Die Erfolge, welche die Quantenelektrodynamik in den dreißiger Jahren bei der Erklärung der Wechselwirkungen von Elektronen und Photonen verzeichnete, betrafen Photonen von niedriger Energie, und so hätte man diese Erfolge dadurch bewahren können, dass man den Grenzwert der Photonenenergie als hinreichend hoch annahm, zum Beispiel mit zehn Millionen Volt. Setzt man der Energie der virtuellen Photonen eine solche Grenze, so sagte die Quantenelektrodynamik eine sehr geringe Veränderung der Energie von Atomen voraus. Nun hatte damals noch niemand die Energie von Atomen so exakt gemessen, um entscheiden zu können, ob diese winzige Energieveränderung tatsächlich vorlag, und deshalb konnte von einer Nichtübereinstimmung mit dem Experiment keine Rede sein. (Man begegnete der Quantenelektrodynamik sogar mit einem solchen Pessimismus, dass niemand auch nur versuchte, die zu erwartende Energieveränderung zu berechnen.) Das Schwierige dieser Lösung des Problems der unendlichen Größen bestand nicht darin, dass sie im Experiment versagte, sondern dass sie zu willkürlich erschien und zu unattraktiv für eine nähere Beschäftigung

In der physikalischen Literatur der dreißiger und vierziger Jahre findet man eine Fülle weiterer möglicher Lösungen für das Problem der unerwünschten unendlichen Größen, darunter sogar Theorien, in denen die durch Emission und Reabsorption hochenergetischer Photonen verursachte unendliche Größe aufgehoben wird durch andere Prozesse mit negativer Wahrscheinlichkeit. Natürlich ist die negative Wahrscheinlichkeit ein sinnloses Konzept, daran dass sie überhaupt in die Physik eingeführt wurde, lässt sich ablesen, wie groß die Verzweiflung über das Problem der unendlichen Größen war.

In den späten vierziger Jahren ergab sich schließlich eine Lösung für das Problem der unendlichen Größen, die sehr viel naheliegender und nicht so revolutionär erschien. Die Entscheidung brachte ein berühmt gewordenes Treffen, das Anfang Juni 1947 im »Ram's Head Inn« auf Shelter Island, vor der Küste von Long Island gelegen, stattfand. Man hatte es organisiert, um Physiker zusammenzubringen, die nach den Kriegsjahren bereit waren, noch einmal neu über die Grundprobleme der Physik nachzudenken. Es wurde zum wichtigsten physikalischen Treffen seit der Solvay Konferenz in Brüssel, auf der Einstein und Bohr fünfzehn Jahre zuvor über die Zukunft der Quantenmechanik gestritten hatten.

Unter den Teilnehmern auf Shelter Island war W. Lamb ein junger Physiker an der Columbia Universität. Lamb war es kurz zuvor gelungen, mit Hilfe der während des Krieges entwickelten

Mikrowellen-Radartechnik genau jenen Effekt zu messen, den Oppenheimer 1930 zu berechnen versucht hatte, nämlich eine Änderung in der Energie des Wasserstoffatoms, die auf Emissionen und Reabsorption von Photonen beruhte. Sie wird seither als Lamb-Verschiebung bezeichnet. Die Messung allein änderte noch nichts am Problem der unendlichen Größen, zwang aber die Physiker, sich wieder ernsthaft mit diesem Problem auseinanderzusetzen, um den gemessenen Wert der Lamb Verschiebung zu erklären. Die Lösung, die sie fanden, sollte den weiteren Gang der Physik bestimmen.

Einige der Theoretiker, die an der Shelter Island Konferenz teilnahmen, hatten vorher schon von Lambs Resultat gehört und sich Gedanken darüber gemacht, wie man ungeachtet des Problems der unendlichen Größen mit Hilfe der Prinzipien der Quantenelektrodynamik die Lamb-Verschiebung berechnen könnte. Sie verwiesen darauf, dass die auf der Emission und Reabsorption von Photonen beruhende Änderung in der Energie eines Atoms in Wirklichkeit nicht beobachtbar sei; beobachtbar sei nur die Gesamtenergie des Atoms, die man erhält, indem man zu dieser Energieänderung die 1928 von Dirac berechnete Energie addiert. Diese Gesamtenergie beruht auf der *nackten Masse* und der *nackten Ladung* des Elektrons, jener Masse und Ladung, die in den Gleichungen der Theorie auftritt, bevor wir beginnen, uns über Photonenemissionen und -reabsorptionen Gedanken zu machen. Nun werden aber von freien Elektronen ebenso wie von Elektronen in Atomen ständig Photonen emittiert und reabsorbiert, die die Masse und die elektrische Ladung des Elektrons beeinflussen, und folglich sind die nackte Masse und die nackte Ladung nicht identisch mit der gemessenen Masse und Ladung des Elektrons, die man in Elementarteilchentabellen angegeben findet. Um die beobachteten (und natürlich endlichen) Werte der Masse und Ladung des Elektrons erklären zu können, müssen nackte Masse und nackte Ladung unendlich sein. Die Gesamtenergie des Atoms ist somit die Summe zweier Terme, die beide unendlich sind: der nackten Energie, die unendlich ist, weil sie auf der unendlichen nackten Masse und Ladung beruht, und der von Oppenheimer errechneten Energieänderung, die unendlich ist, weil sie Beiträge von virtuellen Photonen von unbegrenzter Energie enthält. Es stellte sich die Frage, ob es möglich sei, dass diese beiden unendlichen Größen sich gegenseitig aufheben, so dass eine endliche Gesamtenergie übrigbleibt.

Auf den ersten Blick schien die Antwort ein entmutigendes Nein zu sein. Doch Oppenheimer hatte bei seiner Berechnung etwas unberücksichtigt gelassen. Die Energieänderung erhält Beiträge nicht nur von Prozessen, in denen ein Elektron ein Photon emittiert und dann ein Photon reabsorbiert, sondern auch von Prozessen, bei denen aus dem leeren Raum spontan ein Positron, ein Photon und ein zweites Elektron erzeugt werden können, wobei das Photon dann bei der Vernichtung des Positrons und des ursprünglichen Elektrons absorbiert wird. Dieser bizarre Prozess muss in die Berechnung aufgenommen werden, damit die Energie des Atoms in der Weise von seiner Geschwindigkeit abhängt, wie es die spezielle Relativitätstheorie verlangt. (Dies ist ein Beispiel für das lange zuvor von Dirac gefundene Resultat, dass eine quantenmechanische Theorie des Elektrons mit der speziellen Relativitätstheorie nur dann im Einklang ist, wenn die Theorie auch das Positron, das Antiteilchen des Elektrons, enthält.) Unter den Theoretikern auf Shelter Island war auch Victor Weißkopf, der schon 1936 die aus diesem Positronerzeugungsprozess resultierende Energieänderung berechnet und herausgefunden hatte, dass sie die von Oppenheimer gefundene unendliche Größe nahezu aufhebt. Es war nicht schwer, darauf zu kommen, dass bei Berücksichtigung des Positronerzeugungsprozesses und der Differenz zwischen der nackten Masse und Ladung des Elektrons Lind deren Beobachtungswerten die unendlichen Größen in den Energieänderungen gänzlich aufgehoben werden würden.

Zwar waren Oppenheimer und Weißkopf bei dem Treffen auf Shelter Island dabei, doch der erste Theoretiker, der die Lamb-Verschiebung berechnete, war Hans Bethe, der schon durch seine kernphysikalischen Forschungen berühmt war und in den dreißiger Jahren die Ketten aufeinanderfolgender Kernreaktionen beschrieben hatte, die die Sterne zum Leuchten bringen. Bethe griff die Ideen, die auf Shelter Island diskutiert worden waren, auf und entwickelte während der Heimfahrt im Zug eine grobe Berechnung der Energieverschiebung, die Lamb gemessen hatte. Wirklich brauchbare Verfahren, um die Positronen Lind andere Effekte der speziellen Relativitätstheorie in diese Art von Berechnung einzubeziehen, standen ihm noch nicht zur Verfügung, und so ähnelte das, was er während der Zugfahrt erhielt, ziemlich genau dem, was Oppenheimer siebzehn Jahre zuvor erreicht hatte. Mit einem Unterschied: Als Bethe auf eine unendliche Größe

stieß, warf er die Beiträge zur Energieverschiebung, die auf der Emission und Absorption von Photonen hoher Energie beruhen, einfach hinaus (Bethe setzte die Grenze der Photonenenergien ziemlich willkürlich bei der Energie an, die in der Masse des Elektrons enthalten ist) und erhielt so ein endliches Resultat, das recht gut mit Lambs Messung übereinstimmte. Diese Berechnung hätte Oppenheimer auch schon 1930 machen können, doch bedurfte es offenbar erst der Dringlichkeit einer erklärungsbedürftigen Messung und der Ermutigung

Um es ein wenig genauer zu sagen, sorgt die Einbeziehung der Positronerzeugung dafür dass die Summe der Energien sich nicht wie  $1 + 2 + 3 + 4..$  verhält, sondern wie  $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} *$  Beide Summen sind zwar unendlich, doch nicht im gleichen Maße. Deshalb kann man schließlich trotzdem mit ihnen rechnen.

durch die Ideen, die auf Shelter Island in der Luft lagen, damit jemand die Berechnung zu Ende führte.

Bald darauf unternahmen Physiker genauere Berechnungen der Lamb-Verschiebung unter Einbeziehung von Positronen und anderen relativistischen Effekten. Die Bedeutung dieser Berechnungen beruhte nicht so sehr auf dem genaueren Resultat, das sie erzielten, sondern darauf, dass das Problem der **unendlichen** Größen gebändigt worden war; wie sich herausstellte, hoben sich die unendlichen Größen auf, ohne dass man die Beiträge von hochenergetischen virtuellen Photonen willkürlich hinauswerfen musste.

Wie Nietzsche sagt: Was uns nicht umbringt, macht uns stärker.« Die Quantenelektrodynamik war von dem Problem der unendlichen Größen fast umgebracht worden, wurde aber gerettet durch die Idee, die unendlichen Größen durch eine Neudefinition oder »Renormierung« der Elektronenmasse und -ladung zum Verschwinden zu bringen. Damit aber das Problem der unendlichen Größen auf diese Weise gelöst werden kann, dürfen die unendlichen Größen nur auf eine bestimmte, sehr begrenzte Weise in Berechnungen auftreten, was nur in einer begrenzten Klasse von besonders einfachen Quantenfeldtheorien der Fall ist. Man nennt solche Theorien *renormierbar*. Die einfachste Version der Quantenelektrodynamik ist in diesem Sinne renormierbar, doch jede geringste Änderung in dieser Theorie würde diese Eigenschaft zunichte machen und zu einer Theorie **mit** unendlichen Größen führen, die nicht durch eine Neudefinition der Konstanten der Theorie zum Verschwinden gebracht werden könnten. Diese Theorie war also nicht nur mathematisch befriedigend und in Übereinstimmung mit dem Experiment, sondern schien in sich eine Erklärung dafür zu enthalten, warum sie so war, wie sie war; jede geringste Änderung einer Theorie würde nicht nur zu einer Nichtübereinstimmung mit dem Experiment führen, sondern zu Ergebnissen, die völlig absurd waren - unendliche Antworten auf vollkommen vernünftige Fragen.

Die 1948 durchgeführten Berechnungen der Lamb-Verschiebung waren immer noch ungeheuer kompliziert, denn wenn die Positronen jetzt auch berücksichtigt waren, so wurde die Lamb-Verschiebung doch als eine Summe von Beiträgen beschrieben, die im einzelnen die spezielle Relativitätstheorie verletzen und nur das Endergebnis war im Einklang mit der Relativitätstheorie. Unter dessen waren Richard Feynman, Julian Schwinger und Sin Itiro Tomonaga unabhängig voneinander dabei sehr viel einfachere Rechenverfahren zu entwickeln, die bei jedem Schritt mit der Relativitätstheorie im Einklang stehen. Mit diesen Verfahren führten sie weitere Berechnungen durch, die teilweise spektakulär mit dem Experiment übereinstimmten. So hat zum Beispiel das Elektron ein winziges magnetisches Feld, das erstmals 1928 von Dirac auf der Grundlage seiner relativistischen Quantentheorie des Elektrons berechnet worden war. Unmittelbar nach der Shelter-Island-Konferenz veröffentlichte Schwinger die Ergebnisse einer approximativen Berechnung der Veränderung in der Stärke des magnetischen Feldes des Elektrons, die verursacht wird durch Prozesse, bei denen virtuelle Photonen emittiert und reabsorbiert werden. Diese Berechnung ist seither ständig verbessert worden, mit dem aktuellen Ergebnis, dass das magnetische Feld des Elektrons durch Emissionen, Reabsorptionen von Photonen und ähnliche Effekte gegenüber der alten Dirac-Vorhersage, in der diese Photonenemissionen und -reabsorptionen ignoriert worden waren, um einen Faktor 1,00115965214 (mit einer Ungenauigkeit von etwa 3 in der letzten Ziffer) größer wird.<sup>1</sup> Fast zur gleichen Zeit, in der Schwinger seine Berechnung durchführte, ergaben Experimente von 1.1. Rabi Lind seiner Gruppe an der Columbia-Universität, dass das magnetische Feld des Elektrons tatsächlich

ein wenig größer ist als der alte Dirac-Wert, und zwar fast genau um den von Schwinger errechneten Betrag. Nach einer neueren Messung ist das magnetische Feld des Elektrons gegenüber dem Dirac-Wert um einen Faktor 1,001159652188 größer, mit einer Ungenauigkeit von etwa 4 in der letzten Ziffer. Die hier ermittelte numerische Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment gehört zum Eindrucksvollsten in der gesamten Naturwissenschaft.

Es ist nach derartigen Erfolgen nicht erstaunlich, dass die Quantenelektrodynamik in ihrer einfachen, renormierbaren Version allgemeine Anerkennung als die korrekte Theorie der Photonen und Elektronen gefunden hat. Doch ungeachtet des experimentellen Erfolges der Theorie und trotz der Tatsache, dass die unendlichen Größen in dieser Theorie bei geschickter Handhabung alle verschwinden, sorgt schon der Umstand, dass überhaupt unendliche Größen vorkommen, für Unbehagen an der Quantenelektrodynamik und ähnlichen Theorien. Besonders Dirac hat immer wieder davon gesprochen, dass mit der Renormierung die unendlichen Größen unter den Teppich gekehrt würden. Ich war in diesem Punkt anderer Meinung als Dirac und habe darüber mit ihm auf Konferenzen in Coral Gables und am Bodensee diskutiert. Dass die Differenz zwischen der nackten Ladung beziehungsweise der nackten Masse des Elektrons und den gemessenen Werten berücksichtigt wird, ist nicht bloß ein Trick, den man sich einfallen lässt, um die unendlichen Größen loszuwerden; wir müssten dies auch dann tun, wenn alles endlich wäre. Es handelt sich durchaus nicht um ein willkürliches oder Ad-hoc-Verfahren; es geht einfach darum, korrekt anzugeben, was wir bei Labormessungen der Masse und Ladung des Elektrons tatsächlich messen. Für mich war eine unendliche Größe in der nackten Masse und Ladung nichts Schlimmes, solange sich unter dem Strich ergibt, dass die physikalischen Größen endlich, eindeutig und in Übereinstimmung mit dem Experiment sind. Ich fand, dass eine Theorie, die so spektakuläre Erfolge erzielte wie die Quantenelektrodynamik, im Großen und Ganzen korrekt sein muss, auch wenn wir sie vielleicht nicht ganz richtig formuliert haben. Dirac ließ sich jedoch von diesen Argumenten nicht beeindrucken. Seine Haltung zur Quantenelektrodynamik, mit der ich nicht übereinstimme, ist aber wohl nicht bloß auf Sturheit zurückzuführen; die Forderung nach einer vollkommen endlichen Theorie ähnelt einer Vielzahl von anderen ästhetischen Urteilen, um die theoretische Physiker nicht herumkommen.

\* \* \*