

Scott Walter

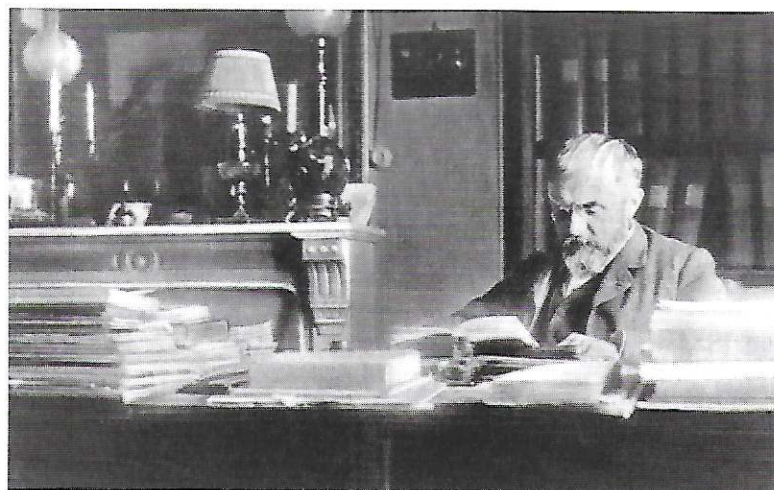
## Henri Poincaré und die Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie kam im Juni 1905 in Form zweier wissenschaftlicher Aufsätze zur Welt. Der eine stammte von dem französischen Mathematiker Henri Poincaré (1854–1912), der andere von einem jungen Patentprüfer in Bern, Albert Einstein (1879–1955). Die beiden Wissenschaftler waren

bekannt, bis er 1889 den Großen Preis von König Oskar II. von Schweden verliehen bekam, für seine Untersuchung einer vertrackten Frage der Himmelsmechanik, die als „Dreikörperproblem“ bekannt ist: Wie verhalten sich drei Massen unter dem Einfluß der Gravitation? Die überarbeitete Version seiner Studie ist ein Meilenstein in der Geschichte der Himmelsmechanik und der Dynamik, obwohl einige der darin enthaltenen tiefen Einsichten jahrzehntelang brachlagen. Beispielsweise lieferte Poincaré die erste mathematische Beschreibung dessen, was inzwischen als „chaotische“ Bewegung bekannt ist.

Andere Resultate der preisgekrönten Arbeit wurden dagegen sehr bald aufgegriffen; dazu gehört Poincarés Rekurrenztheorem, welches annähernd besagt, dass ein geschlossenes mechanisches System mit endlicher Energie – wie etwa ein System von drei Planeten, deren Bewegungen Newtons Gravitationsgesetz gehorchen – periodisch zu einem Zustand zurückkehrt, der dem Ausgangszustand sehr nahe kommt. Die Schlussfolgerungen aus diesem Theorem waren entscheidend für die molekulare Begründung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, demzufolge die Entropie jedes geschlossenen Systems mit der Zeit zunimmt. In der Lesart von Ludwig Boltzmann (1844–1906) ist dieses Gesetz konsistent mit Poincarés Theorem, muss jedoch als probabilistische Wahrheit verstanden werden, in dem Sinne, dass zeitweise die Entropie auch abnehmen kann.

Poincaré hielt Vorlesungen über alle Teilgebiete der Physik in einem eleganten, abstrakten Stil, der sich von dem damals üblichen ziemlich unterschied. Basierend auf von Studenten angefertigten Mitschriften veröffentlichte er fünfzehn Bände seiner Vorlesungen, von denen vier ins Deutsche übersetzt wurden, darunter sein Kurs über die Theorie des Elektromagnetismus von James Clerk Maxwell (1831–1879). Nach zehn Jahren gab Poincaré seinen Lehrstuhl für mathematische Physik auf zugunsten einer Professur für mathematische



Henri Poincaré,  
1912

sich nie begegnet, doch war Einstein mit einigen wissenschaftlichen und philosophischen Arbeiten Poincarés vertraut, dessen Name in wissenschaftlichen Kreisen wohlbekannt war.

Poincaré hatte wie Einstein bereits in jungen Jahren begonnen, sich wissenschaftliche Meriten zu verdienen. Im Jahre 1880 hatte er die Existenz einer großen Klasse automorpher Funktionen bewiesen, die er fuchsische Funktionen nannte. Er setzte dabei in neuartiger Weise die nichteuklidische Geometrie ein, als er darauf stieß, dass zwischen fuchsischen Funktionen und der nichteuklidischen (hyperbolischen) Geometrie dieselbe Relation besteht wie zwischen bestimmten elliptischen Funktionen und der euklidischen Geometrie.

Im darauffolgenden Jahr wurde Poincaré Assistenzprofessor für Analysis an der Universität Paris, im Jahre 1886 Professor für mathematische Physik und 1887 Mitglied der Académie des Sciences. Seine wissenschaftlichen Arbeiten waren außerhalb der Mathematik zunächst wenig

Astronomie und Himmelsmechanik, widmete sich aber auch dann noch gelegentlich physikalischen Themen.

Ein Beispiel dafür sind Poincarés Vorlesungen von 1899. Er diskutierte darin neuere Theorien, die gewisse Lücken in Maxwells Theorie zu schließen versuchten, insbesondere eine adäquate Erklärung der Elektrodynamik bewegter Körper. Während

Maxwells Theorie sich mit stetigen makroskopischen Feldern beschäftigte, stützte sich die Theorie von Hendrik A. Lorentz (1853-1928) auf das Konzept geladener Elementarteilchen, die als „Elektronen“ bezeichnet

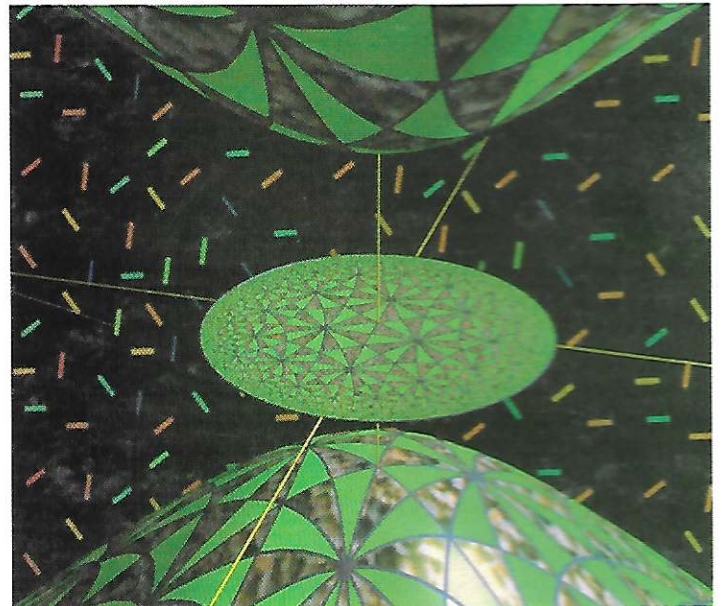
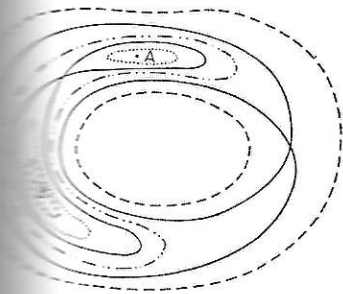
wurden und deren Existenz zwei Jahre zuvor experimentell nachgewiesen worden war.

Beeindruckt von der Fähigkeit der lorentzischen Theorie, den sogenannten Zeeman-Effekt zu erklären – eine eigentümliche Veränderung der Spektren leuchtender Substanzen in Magnetfeldern – betrachtete Poincaré sie als die beste, die derzeit zur Verfügung stand. So machte er sich ab 1900 an die Aufgabe, einem seiner Ansicht nach erheblichen Defekt der Theorie abzuhelfen: Sie stand im Widerspruch zu Newtons Drittem Gesetz, (zu jeder Kraft existiert eine gleiche und entgegengesetzt gerichtete Gegenkraft). Dabei stellte Poincaré fest, dass es zur Aufrechterhaltung des Prinzips der Relativität der Bewegung nötig ist, Zeitmessungen nicht auf die „wahre Zeit“ eines ruhenden Beobachters zu beziehen – ruhend in Bezug auf einen universellen bewegungslosen Träger elektromagnetischer Wellen, den Äther –, sondern auf eine „Ortszeit“, die von Lorentz nur als technischer Kunstgriff eingeführt worden war. Für Poincaré dagegen hatte die Ortszeit eine reale, operationale Bedeutung: Es war die Zeit, die an denlichtsynchro- nisierten Uhren von relativ zum Äther beweg-

ten Beobachtern abgelesen wurde, wobei die Zeit, die Lichtsignale zur Überwindung der jeweiligen Entfernungen brauchten, berücksichtigt wurde, nicht jedoch eine Auswirkung der Bewegung auf die Lichtausbreitung.

Mit diesem Austausch von Lichtsignalen hatte es jedoch noch mehr auf sich, als nur die praktische Synchronisierung von Uhren, wie Poincaré in seinem philosophischen Essay *Die Zeitmessung* (1898) erklärte. Poincaré übergang 25 Jahrhunderte metaphysischer Debatten mit Schweigen und schlug seinen Lesern vor, nachzuschauen, wie Wissenschaftler bei ihrer Arbeit die Gleichzeitig-

Darstellung instabiler Trajektorien des Dreikörperproblems nach Poincaré



keit zweier Ereignisse feststellen. Beispielsweise übernehmen die Astronomen einfach die Zeitdefinition, die für ihre Zwecke am bequemsten sei. Generell, schrieb Poincaré, sei „keine der vorhandenen Arten der Zeitmessung wahrer als eine andere.“ Daher, so Poincaré, sei der Begriff der Gleichzeitigkeit nicht objektiv bestimmt, sondern müsse durch eine Definition festgelegt werden. Auch einen absoluten Raum gebe es nicht, schrieb Poincaré bei anderer Gelegenheit, und es sei sinnlos, von der wirklichen Geometrie des physikalischen Raums zu sprechen. Die Astronomen waren

Farbdarstellung des Poincaréschen Kreismodells hyperbolischer Geometrie (Titelbild des Buches von J. Stillwell, *Sources of Hyperbolic Geometry*, Providence 1996)

im Gegensatz zu Poincarés Grundsätzen der Auffassung, sie könnten die Krümmung des Raumes messen, zumindest im Prinzip, und daher die Geometrie des physikalischen Raums bestimmen. Für Poincaré gehörte zu jeder physikalischen Messung notwendigerweise beides, Geometrie und Physik, weil die Objekte der Geometrie – Punkte, Linien, Flächen – abstrakt seien, und jede externe

Hermann  
Minkowski

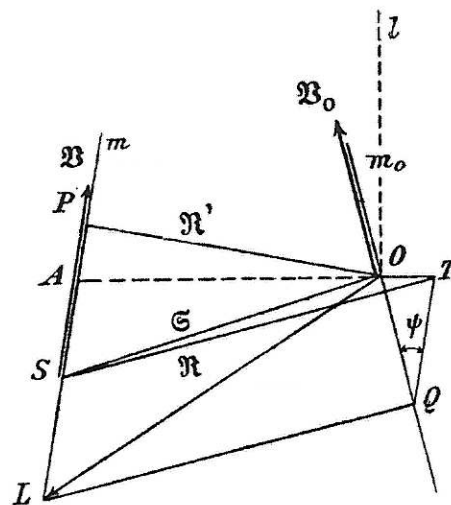


Skizze für die Darstellung des poincaréschen und minkowskischen Gravitationsgesetzes in einem Raum-Zeit-Diagramm.

Anwendung der Geometrie eine mehr oder weniger willkürliche Identifizierung dieser Objekte mit physikalischen Phänomenen verlange, beispielsweise indem man Geraden und Lichtstrahlen gleichsetzt. Nach Poincarés konventionalistischer Wissenschaftsphilosophie sind Wissenschaftler oft mit ungewissen Situationen konfrontiert, in denen sie zwischen alternativen Definitionen ihrer Untersuchungsgegenstände wählen müssen. Aufgrund dieser Wahlfreiheit, die die linguistische Wende in der Wissenschaftsphilosophie markiert, wurde Poincaré oft als Vertreter einer Spielart des Nominalismus angesehen, was er entschieden zurückwies. Die Wahl, die Wissenschaftler treffen müssen, erklärte Poincaré, ist nicht gänzlich frei: Wissenschaftler seien beim Aufstellen ihrer Konventionen „von experimentellen Tatsachen geleitet“.

Die konventionalistische Wissenschaftsphilosophie gewann größere Anerkennung, als Poincaré 1902 eine Sammlung von Essays unter dem Titel *La science et l'hypothèse* veröffentlichte, ein Werk, das sofort in mehrere Sprachen übersetzt wurde. Zu den frühen Lesern gehörten die Mitglieder der „Akademie Olympia“ in Bern, die aus Einstein und seinen Freunden Conrad Habicht und Maurice Solovine bestand. Einstein kannte auch Poincarés Abhandlung von 1900 über Lorentz' Elektronentheorie, mit der operationalen Zeitdefinition via Synchronisierung der Uhren; allerdings kann es sehr gut sein, dass er diese Arbeit erst las, nachdem er seinen ersten Aufsatz über Relativi-

tätstheorie 1905 geschrieben hatte. Einsteins Aufsatz enthält eine tiefeschürfende Analyse des Begriffs der Gleichzeitigkeit, die übereinstimmt mit der von Poincaré, einschließlich des Verfahrens der Synchronisierung von an verschiedenen Orten platzierten Uhren per Austausch von Lichtsignalen. Besonders aufgrund dieser Analyse verstärkte sich der Eindruck, Einstein habe eine kine-



mathe Theorie formuliert, die mithin grundlegender sei als die bisher vorhandenen Theorien der Mechanik oder Elektrodynamik.

Einsteins Zugang zur Relativitätstheorie unterschied sich in dieser Hinsicht grundsätzlich von dem Poincarés, in dessen Relativitätsaufsatz von 1905 die Synchronisierung von Uhren nicht vorkommt, (doch behandelte er das Thema einige Jahre später). Gleichwohl stimmen Einsteins mathematische Ergebnisse präzise mit denen von Poincaré überein. Insbesondere leiteten beide das relativistische Geschwindigkeitsadditionsgesetz von Koordinaten-Transformationen zwischen zwei Inertialsystemen ab. (Poincaré nannte sie Lorentz-Transformationen.) Ebenso sind die empirischen Konsequenzen beider Arbeiten identisch, mit einer Ausnahme.

Ein wichtiger Unterschied zwischen den Relativitätsaufsätzen von Einstein und Poincaré betrifft



Vom 30. Oktober bis zum 3. November 1911 trafen sich die führenden europäischen Physiker zur ersten Solvay-Konferenz in Brüssel. Zu den Teilnehmern zählten Poincaré und Madame Curie (sitzend: 1. von rechts und 2. von rechts) sowie Planck und Einstein (stehend: 4. von links und 2. von rechts)

den Status der Gravitationsphänomene. Das Thema wurde von Einstein übergangen, dagegen hatte Poincaré am 24. September 1904 in seiner Rede auf dem wissenschaftlichen Kongress der Weltausstellung in Saint Louis die Gravitation als möglichen Störfaktor für ein Relativitätsprinzip identifiziert. Als Professor für mathematische Astronomie und Himmelsmechanik konnte Poincaré schlecht so tun, als gäbe es keine Gravitation. Er formulierte zwei aufeinander bezogene relativistische Gravitationsgesetze, die ersten ihrer Art. In Bezug auf Beobachtungen waren die Gesetze den newtonschen gleichwertig, doch waren sie in physikalischer Hinsicht wenig überzeugend; dennoch verdienen sie Interesse, ihrer Form wegen und aufgrund der Art, wie Poincaré sie herleitete. Poincaré führte einen vierdimensionalen Raum ein, mit drei realen räumlichen Dimensionen und einer vierten zeitlichen Dimension, die imaginär ist, sodass eine Koordinaten-Rotation um den Ursprung den Lorentz-Transformationen entspricht. Drei Jahre später erweiterte der Mathematiker Hermann Minkowski (1864–1909) Poincarés geo-

metrischen Ansatz in seiner Theorie der Raumzeit und verwendete ihn, um zwei eigene relativistische Gravitationsgesetze zu formulieren.

Weder Einstein noch Poincaré waren von Minkowskis ausgeklügelter Raumzeit-Theorie besonders beeindruckt, aber kurz nachdem Poincaré gestorben war, änderte Einstein seine Ansicht. Mit Unterstützung seines Freundes Marcel Grossmann (1878–1936), der, wie er selbst, früher bei Minkowski studiert hatte, erweiterte er dessen Theorie mit dem Ziel eines radikal neuen theoretischen Zugriffs auf die Gravitation. Drei Jahre später, im November 1915, entdeckte Einstein die Feldgleichungen der allgemeinen Relativität, denen zufolge die Geometrie der Raumzeit durch Materie gekrümmt wird. Hatte sich Poincarés Theorie des Raums damit nun doch als falsch erwiesen? Poincaré, dieser „scharfsinnige und tiefe“ Denker schrieb Einstein 1921 in *Geometrie und Erfahrung*, hatte Recht, „sub specie aeterni“. Aber dennoch, fuhr Einstein fort, war sein eigener Standpunkt erforderlich für den gegenwärtigen Stand der theoretischen Physik.