

Aktuelle Probleme der Gravitationsphysik

Gravitationslinsen wurden in den vergangenen zwanzig Jahren vielfach beobachtet. Der direkte Nachweis von Gravitationswellen wird in den nächsten Jahren erwartet.

Jürgen Ehlers

Während Einsteins Gravitationstheorie, die Allgemeine Relativitätstheorie, nach spektakulären Anfangserfolgen zwischen 1915 und 1919 für lange Zeit ein vom Hauptstrom der physikalischen Forschung getrenntes Gebiet blieb, gelang es ab 1960, mehrere ihrer Voraussagen durch Beobachtungen und Experimente mit wachsender Genauigkeit zu überprüfen. In den letzten 30 Jahren ist die Allgemeine Relativitätstheorie zu einem integralen Bestandteil der Astrophysik geworden. Ein aktuelles Forschungsgebiet betrifft Gravitationslinsen, und der direkte Nachweis von Gravitationswellen wird mit Spannung erwartet.

Ich freue mich sehr darüber, dass die Deutsche Physikalische Gesellschaft mir die Max-Planck-Medaille verliehen hat, und möchte insbesondere den Kollegen danken, die sich dafür eingesetzt haben. Zwar habe ich mit nicht geringer Beklommenheit die Liste der bisherigen Preisträger sozusagen mit Andacht angesehen und bin mir allzu bewusst, nicht zu den großen Baumeistern der Physik, sondern eher zu den Raumpflegerinnen im Gebäude unserer Wissenschaft zu gehören, aber: Über Geschenke soll man sich freuen statt darüber zu grübeln, ob oder womit man sie verdient hat. Auch betrachte ich diese Auszeichnung als ein Zeichen dafür, dass die Bedeutung der Gravitationsphysik von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft gesehen und gewürdigt wird. Dies ist wohl das erste Mal, dass diese Auszeichnung ausdrücklich für Arbeiten über Allgemeine Relativitätstheorie vergeben worden ist.

Von den vielen Lehrern und Kollegen, die mich in die Physik eingeführt und mir später ermöglicht haben, auf diesem Gebiet zu arbeiten, möchte ich dankbar erwähnen: Pascual Jordan, der 1942 mit der Max-Planck-Medaille geehrt wurde und in dessen Hamburger Seminar – etwa 1956 – meine Forschung begann, sodann Peter Bergmann, Ivor Robinson und Alfred Schild, denen ich anregende Jahre (1962–63 und 1964–1971) in den Vereinigten Staaten verdanke, weiterhin Ludwig Biermann, der mich 1971 an das Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in München und damit nach Deutschland zurückholte, und schließlich Hans Zacher, der sich als Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Zeit der deutschen Vereinigung für die Gründung des Instituts für Gravitationsphysik einsetzte und mir 1995 die schöne Aufgabe übertrug, dieses

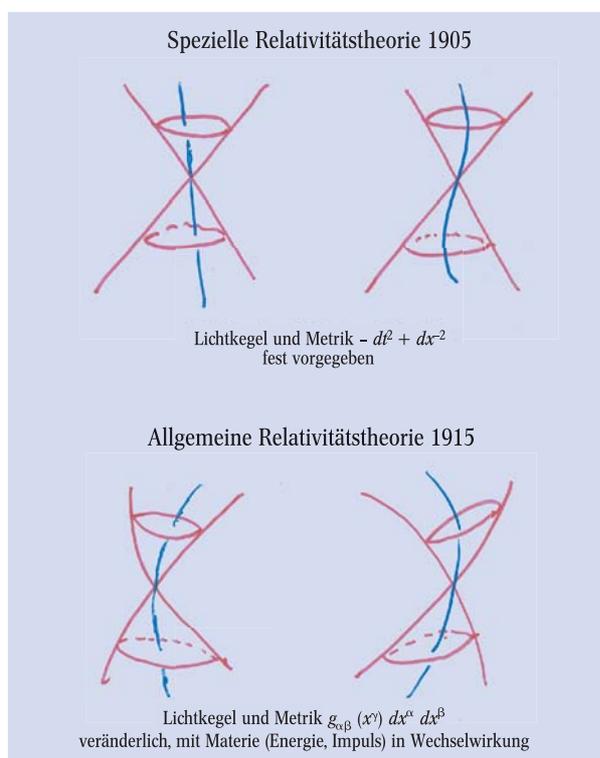


Abb. 1: Im Gegensatz zur Speziellen Relativitätstheorie, in der die Metrik fest vorgegeben ist, ist die Metrik in der Allgemeinen Relativitätstheorie ein dynamisches Feld.

Institut einzurichten und damit diesem von unseren deutschen Universitäten stark vernachlässigten Teilgebiet der Physik ein Heim zu geben. Meiner Familie danke ich dafür, dass sie ein ereignisreiches Leben unter nicht immer einfachen Umständen mit mir geteilt hat und meiner Frau dafür, dass sie es noch immer auf sich nimmt, mit einem Physiker verheiratet zu sein.

Nun zur Physik. Die Schwerkraft, über die ich hier ein wenig berichten möchte, spielt unter den fundamentalen Kräften zwischen Teilchen und Körpern in mehrerer Hinsicht eine Sonderrolle. Sie ist die einzige Wechselwirkung, die gleichermaßen auf *alle* Teilchen und Felder wirkt, lässt sich nicht abschirmen und hat eine unendliche Reichweite. Diesen Eigenschaften entsprechend werden die Erscheinungen der Gravitation in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (AR) als Auswirkungen der mit der Materie in Wechselwirkung stehenden, dynamischen *Raumzeit-Metrik* dargestellt. Im Gegensatz zur Newtonschen Physik und zur Speziellen Relativitätstheorie wird die Raumzeit-Metrik nicht als ein für allemal fest vorgegeben behandelt, sondern Energie und Impuls der Materie verzerren und

Prof. Dr. Jürgen Ehlers, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Am Mühlenberg 1, 14476 Golm – Festvortrag anlässlich der Verleihung der Max-Planck-Medaille 2002 auf der 66. Physikertagung in Leipzig

krümmen die räumlichen und zeitlichen Maßverhältnisse, und umgekehrt bestimmt der Krümmungsverlauf die Bewegungen der Materie einschließlich der Ausbreitung elektromagnetischer Felder und anderer Wirkungen; siehe Abb. 1.

Die Allgemeine Relativitätstheorie berücksichtigt nicht die diskrete, durch die Quantentheorie erfasste Feinstruktur der Materie, und trotz vieler früherer und jetziger Bemühungen ist es bisher nicht gelungen, die Gravitationstheorie mit der Quantentheorie zu vereinigen. Das Haupthindernis, das dieser Vereinigung im Wege steht, ist zugleich die Hauptstärke der AR, nämlich der dynamische Charakter der Raumzeit-Metrik und damit das Fehlen eines vorgegebenen kinematischen Rahmens mit starren Bezugssystemen und hoher (Poincaré-)Symmetrie.

Für die Beschreibung vieler Vorgänge im Bereich der Astrophysik und Kosmologie stört dieses Nebeneinander zweier fundamentaler Theorien nicht; denn weil die Gravitation bei den experimentell zugänglichen bzw. relevanten Energien die mit Abstand schwächste Wechselwirkung ist, zeigen sich ihre Effekte erst bei dem Zusammenwirken vieler Teilchen, also bei massereichen Körpern und auf großen raumzeitlichen Skalen, bei denen sich im Allgemeinen globale Korrelationen (wie sie z. B. das Pauli-Prinzip enthält oder wie sie im Aspect-Experiment vorkommen) und Zustandsverschränkungen herausmitteln bzw. makroskopisch nicht in Erscheinung treten. So kommt es, dass bis jetzt *alle* beobachteten Gravitati-

onserscheinungen erfolgreich mit der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie erfasst werden können.

Vorhersagen der AR konnten zum größten Teil erst ab etwa 1965, zehn Jahre nach Einsteins Tod, durch Messungen zuverlässig geprüft werden [1]. Seitdem haben Laborexperimente und astronomische Beobachtungen im erdnahen Weltraum und im Planetensystem unserer Sonne die Theorie ausnahmslos bestätigt, mit relativen Messunsicherheiten zwischen 10^{-2} und 10^{-4} . Dazu gehören Experimente, die zur Identifikation lokaler Inertialsysteme und damit zum Nachweis der lokalen näherungsweisen Geltung der Speziellen Relativitätstheorie dienen können. Weiterhin nenne ich als Stichworte: gravitative Zeitdilatation bzw. Frequenzverschiebung, Lichtablenkung, Laufzeitverzögerung von

Radarsignalen, geodätische Präzession der Mondbahn, Periheldrehungen der Planetenbahnen, Lense-Thirring-Effekt bei Erdsatelliten. Als technische Anwendung der AR sei auch das globale Positionierungssystem (GPS) erwähnt.

Bei den soeben aufgezählten Effekten handelt es sich um kleine Korrekturen zur Newtonschen Theorie, die sich auf langsam bewegte Körper und schwache, langsam veränderliche Gravitationsfelder beziehen, deren Metriken nur sehr wenig von derjenigen der Speziellen Relativitätstheorie abweichen. Die Allgemeine Relativitätstheorie macht aber darüber hinaus auch qualitativ neue, zum Teil überraschende Vorhersagen, insbesondere über den Aufbau und die Entwicklung der Welt im Großen (Kosmologie), über die Existenz und Eigenschaften Schwarzer Löcher, über so genannte Gravitationslinsenphänomene und Gravitationswellen. Ich werde hier nur über die beiden zuletzt genannten Erscheinungen etwas berichten.

Gravitationslinsen

Die Ausbreitung des Lichtes und anderer elektromagnetischer Wellen lässt sich in der AR wie in der klassischen (geometrischen) Optik mit den Begriffen „Lichtstrahl“ und „Wellenfront“ (gleich Fläche konstanter Phase) beschreiben [2]. In jedem lokalen Inertialsystem schneiden die Lichtstrahlen die Wellenfronten senkrecht, und ein Punkt konstanter Phase, den man sich als ein Photon vorstellen kann, bewegt sich im Vakuum mit der universellen Geschwindigkeit c . Die aufgrund der Einsteinschen Feldgleichung mit Energie und Impuls gesetzmäßig verknüpfte Raumzeit-Krümmung zeigt sich darin, dass sich die lokalen Inertialsysteme nicht zu endlich ausgedehnten Inertial-Bezugssystemen zusammenfügen lassen, sondern relativ zueinander beschleunigt sind. In Folge dessen verlaufen die Lichtstrahlen und Wellenfronten, im Großen betrachtet, gekrümmt. Das Gravitationsfeld wirkt, auch im materiefreien Raum, wie ein Medium mit raumzeitlich veränderlichem, von der Wellenlänge unabhängigen Brechungsindex. Dieser ist umso größer, je niedriger das (Newtonsche berechnete, negative) Gravita-

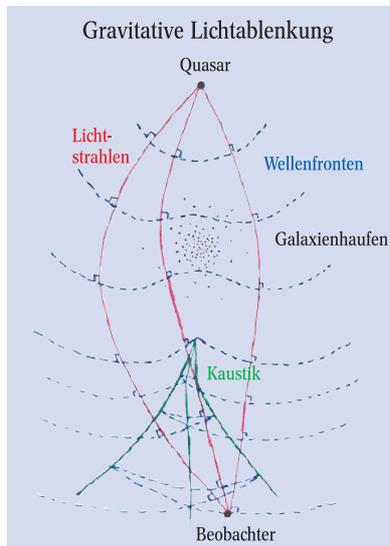


Abb. 2: Ein Galaxienhaufen zwischen einem Quasar und einem Beobachter kann als Gravitationslinse wirken, sodass der Beobachter mehrere Bilder des Quasars sieht.

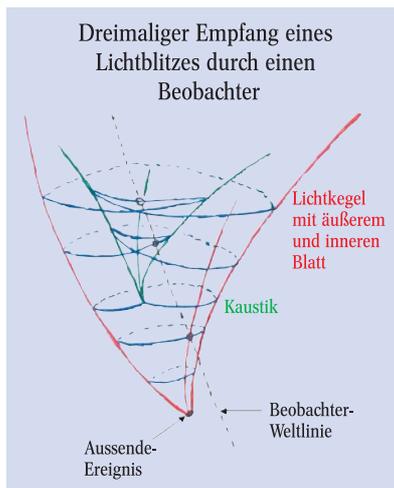


Abb. 3: In dieser Darstellung kommen die Mehrfachbilder beim Gravitationslinseneffekt dadurch zustande, dass die Weltlinie des Beobachters den Lichtkegel des Aussendeereignisses mehrfach schneidet.

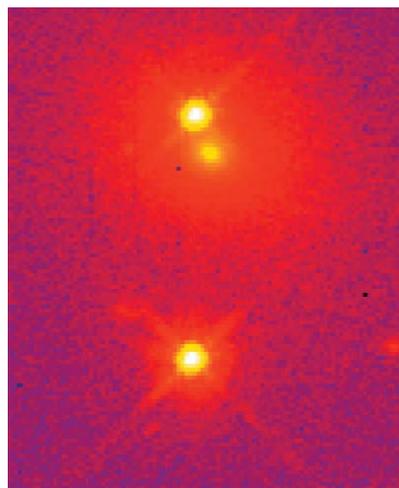


Abb. 4: Der Doppelquasar, aufgenommen mit dem Hubble-Space-Teleskop. Man sieht die beiden Bilder, die einen Winkelabstand von $6,1''$ haben, und unterhalb des oberen Bildes die zentrale Galaxie des ablenkenden Galaxienhaufens. Die Rotverschiebung des Quasars beträgt 1,41, die der „Linse“ 0,36. Die Zeitverzögerung des oberen relativ zum unteren Bild beträgt (417 ± 3) Tage. Die Energieflussdichte des unteren Bildes ist um den Faktor 1,114 größer als die des oberen (Abb.: E. E. Falco).

tionspotential ist; $n = 1 - 2U/c^2$. Diese Sachverhalte wurden theoretisch schon zwischen 1911 und 1920 erkannt. Die einzige experimentelle Bestätigung blieb aber für lange Zeit die (ziemlich ungenaue) Lichtablenkungsmessung anlässlich der Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919, durch die Einstein berühmt wurde. Wesentlich genauere Messungen wurden erst ab 1970 radioastronomisch möglich. Sie bestätigten Einsteins Formel mit hoher Genauigkeit.

Abbildung 2 veranschaulicht, wie die Lichtablenkung durch einen linsenähnlich wirkenden Galaxienhaufen mehrere Bilder eines Quasars hervorbringen kann. In der Nähe des Quasars sind die Wellenfronten nahezu Kugelflächen. Im Bereich des Gravitationsfeldes des Haufens entwickelt die vorrückende Wellenfront zunächst eine Einbuchtung, später eine Spitze. Das weitere Vorrücken der Wellenfront, die nicht abreißt, führt zur Ausbildung eines inneren Teils der Front, der längs einer Brennfläche (Kauistik) mit einer Kante beiderseits an das äußere Blatt der Wellenfront anstößt. Die von beiden Seiten kommenden Teile des äußeren Blattes schneiden einander. (Die Schnittmenge ist nur im axisymmetrischen Fall Teil der Kauistik, die dann als *Brennlinie* an die Stelle des *Brennpunktes* einer Glaslinse tritt.)

Wie die Abbildung zeigt, führt diese Verformung und Aufteilung der Wellenfront dazu, dass ein Beobachter den Quasar in drei Richtungen, drei Bildern, sieht. Von den zu einer Zeit vom Quasar emittierten Photonen, die sich längs der Strahlen mit der Wellenfront bewegen, gelangen die auf den eingezeichneten drei Strahlen laufenden nacheinander – entsprechend „ihrem“ Teil der Wellenfront – zum Beobachter. Veränderungen der Helligkeit des Quasars werden also vom Beobachter zu verschiedenen Zeiten registriert.

Abbildung 2 veranschaulicht die Lichtausbreitung durch eine *räumliche* Figur, die durch Projektion der raumzeitlichen Konfiguration in einen Raumschnitt zustande kommt. Vom Standpunkt der Relativitätstheorie ist der Vorgang aber primär durch den von der Wahl eines Raumschnittes oder „Zeitpunktes“ unabhängigen *Lichtkegel* des Aussendeereignisses darzustellen. Diese leider kaum verwendete Darstellung zeigt Abb. 3. Der Lichtkegel ist zwar in der Nähe des Aussendeereignisses eine kegelartige Fläche (wie in Abb. 1), bildet später aber eine Kauistik, ein inneres Blatt und eine Schnittkurve [5]. Die zeitartige *Weltlinie* eines Beobachters schneidet den Lichtkegel dreimal nacheinander, also zu drei Eigenzeiten des Beobachters, wie bereits oben anhand von Abb. 2 besprochen wurde. (In Abb. 3 sind die den Beobachter erreichenden Lichtstrahlen der Übersichtlichkeit wegen nicht gezeichnet. Außerdem ist eine Raumdimension unterdrückt. In Wirklichkeit ist der Lichtkegel dreidimensional, und die Wellenfronten sowie die Kauistik sind nicht Kurven, sondern Flächen.)

Nebenbemerkung: Die Bildung von Kaustiken von Lichtkegeln bedeutet eine Komplikation der Kausalstruktur, deren Auswirkung auf die Quantengravitation (Lokalität) wohl nicht untersucht worden ist.

Wie die beiden Abbildungen andeuten, ergeben sich aus der AR-Optik eine Reihe von Folgerungen [4–6]. Ferne Lichtquellen sollten unter Umständen in mehreren, verschieden hellen Bildern sichtbar sein, diese Bilder sollten bei ausgedehnten, auflösbaren Quellen wie Galaxien verzerrt und verschieden groß sein, und die Lichtkurven der Bilder sollten relativ zueinander zeit-

lich versetzt sein. Außerdem macht die Theorie Aussagen über die relativen Orientierungen (Händigkeiten) und Polarisationsrichtungen in den Bildern. Diese Vorhersagen, die alle, zum Teil lange vor der Entdeckung eines Linseneffekts durch Walsh, Carswell und Weymann 1979 gemacht wurden, sind in den letzten 20 Jahren in Beobachtungen verifiziert worden. Vielseitige Anwendungen haben Gravitationslinsenphänomene im Zusammenhang von Theorie und Beobachtung zu ei-

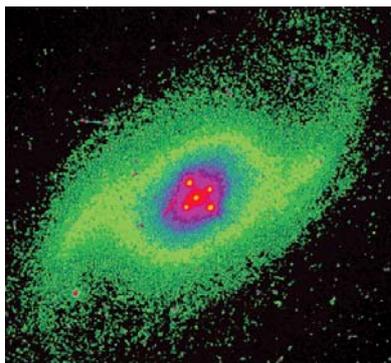


Abb. 5: Vier Bilder eines Quasars (Rotverschiebung 1,695), die den Kern der ablenkenden Balken-Spiralgalaxie (Rotverschiebung 0,039) symmetrisch in Abständen von etwas weniger als 2'' umgeben. Das System wird Einstein-Kreuz genannt. (Foto: NASA, HST Archiv)

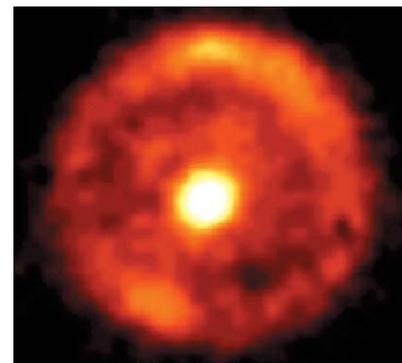


Abb. 6: Ein nahezu vollständiger „Einstein-Ring“. Wenn Beobachter, Linse und Quelle hintereinander stehen, wird die Quelle wegen der Rotationssymmetrie bezüglich der Verbindungslinie als Ring abgebildet. In der Mitte sieht man die ablenkende Galaxie. (Foto: L. J. King, NASA)

nem rasch wachsenden Teilgebiet der Astrophysik werden lassen. Zu den Anwendungen gehören Bestimmungen von Massen und Massenverteilungen in Galaxien und Galaxienhaufen, wobei dunkle ebenso wie leuchtende Materie erfasst wird, außerdem Messungen bzw. Abschätzungen der Werte kosmologischer Parameter wie der Hubble-Konstante und der kosmologischen Konstante, Spektroskopie sehr entfernter, nur durch die linsenartige Verstärkung auflösbarer Galaxienbilder und anderes.

Am Schluss dieser Skizze der Gravitationslinsentheorie möchte ich Peter Schneider danken, der mich vor 16 Jahren in dies reizvolle Forschungsgebiet eingeführt hat.

Die Abbildungen 4–7 zeigen einige der Gravitationslinsenerscheinungen, die unsere Kenntnis vom Kosmos bereichern haben.

Gravitationswellen

Gravitationswellen sind Störungen des metrischen Feldes, die sich wie das Licht mit der Fundamentalschwindigkeit c ausbreiten. Sie lassen sich anschaulich als flächentreue Verzerrungen in der zur Ausbreitungsrichtung senkrechten Wellenfront beschreiben; eine Dehnung in einer Richtung innerhalb der Front erfolgt gleichzeitig mit einer Stauchung in der dazu senkrechten Richtung. Solche Wellen haben zwei unabhängige Polarisationszustände und können gekennzeichnet werden durch zwei dimensionslose Amplituden, die die relativen Längenänderungen in der Wellenfront angeben.

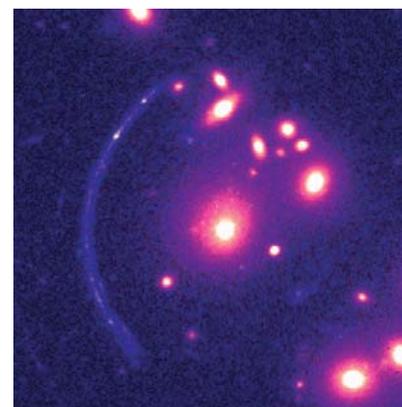
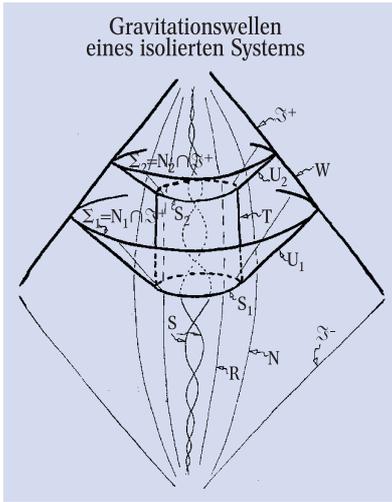


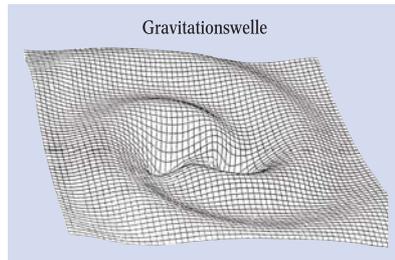
Abb. 7: Ein besonders eindrucksvolles Zerrbild einer weit entfernten Galaxie, die als ein „großer Bogen“ erscheint.

Erzeugt werden Gravitationswellen durch Veränderungen der räumlichen Verteilung von Masse, Energie und Impuls, also z. B. durch die Bewegungen der Komponenten eines Doppelsternsystems oder durch einen in sich zusammenstürzenden, rotierenden oder schwingenden Stern. Dabei verliert das Wellen ausstrahlende System Energie und Impuls. Umgekehrt absorbiert ein Körper oder System auch Energie aus einer ihn treffenden Gravitationswelle.



◄ **Abb. 8:** Schema der Raumzeit eines Gravitationswellen aussendenden Systems (s. Text, aus [9]).

▼ **Abb. 9:** Zwei einander umlaufende Sterne erzeugen durch die begleitende Raumkrümmung Gravitationswellen.



Alle diese Aussagen und dazu gehörende Formeln fand Einstein sehr bald nach der Aufstellung seiner AR in den Jahren 1916–1918. Dabei legte er seinen Rechnungen die Annahme zugrunde, die die Wellen darstellende Raumzeit-Metrik weiche nur so wenig von der ungestörten Metrik der Speziellen Relativitätstheorie ab, dass nur die in diesen Abweichungen linearen Terme bei der Lösung seiner komplizierten, nichtlinearen Gravitationsfeldgleichung berücksichtigt zu werden brauchten. Die Frage, wie man ohne diese erhebliche Vereinfachung Gravitationswellen und ihre Wechselwirkung mit Materie mathematisch darstellen kann, beschäftigt die Gravitationstheoretiker bis heute.

Schon 1922 erkannte Eddington, dass Einsteins „lineare Näherung“ nicht ausreicht, um die Bewegung eines Systems durch Schwerkraft wechselwirkender Körper und die dabei erzeugten Gravitationswellen zu beschreiben. Die damit aufgeworfene Schwierigkeit ist

nächst nachweisbaren Gravitationswellen angesehen werden, können wohl nur mit Methoden der Numerischen Relativitätstheorie berechnet und simuliert werden. Solche Arbeiten werden auch am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik ausgeführt.

Die Probleme der Gravitationswellentheorie lassen sich mithilfe der Abb. 8 erläutern. Das Diagramm (entnommen aus [9]) soll schematisch die Raumzeit eines isolierten, Gravitationswellen aussendenden Systems, z. B. eines Doppelsternsystems, darstellen. Darin ist die Zeit von unten nach oben wachsend dargestellt, Raumschnitte zu jeweils einer Zeit sind horizontal angedeutet, und die Flächen U_1 , U_2 bedeuten auslaufende Gravitations-Wellenfronten. Die spiralförmigen Kurven symbolisieren die Weltlinien S zweier Körper, die zylinderförmige Fläche T trennt die „Nahzone“ des Systems von seiner „Wellenzone“.

Die typischen Eigenschaften, durch die sich eine Gravitationswelle von dem die Körper umgebenden, nahezu Newtonschen Nahfeld unterscheidet, werden erst allmählich, in großem Abstand von den Körpern, deutlich erkennbar. Um dies mathematisch übersichtlich darstellen und außerdem einlaufende Wellen, deren Existenz man meistens ausschließen möchte, klar von auslaufenden unterscheiden zu können, hat R. Penrose 1963 einen genialen mathematischen Kunstgriff eingeführt [10]: Er verkleinert die wahren physikalischen Abstände und Zeitintervalle unter Erhaltung der Lichtkegel so, dass die physikalische Raumzeit mit einem fiktiven Rand versehen werden kann, der in der Abbildung mit \mathfrak{I}^+ markiert ist. Die in der physikalischen Raumzeit ins Unendliche laufenden Wellenfronten erhalten dadurch je einen Rand, und die zwischen U_1 und U_2 ins Unendliche laufende Gravitationsstrahlung kann durch geeignete mathematische Größen auf dem Stück W des Randes quantitativ beschrieben werden. (Die schwierige mathematische Frage, ob diese geometrische Darstellung eines strahlenden, isolierten Systems mit Einsteins Feldgleichung verträglich ist, wurde von H. Friedrich positiv beantwortet, siehe [11].)

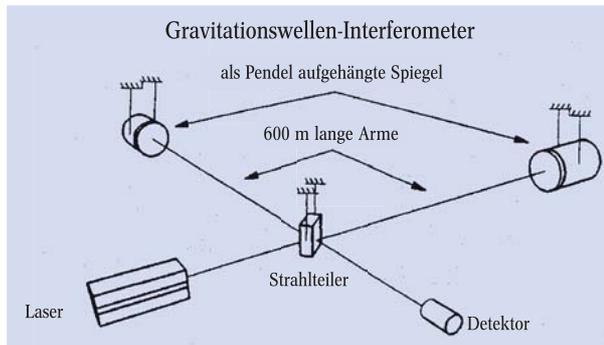
Die Grundaufgabe der Gravitationswellentheorie besteht im Prinzip darin, Raumzeit-Modelle zu konstruieren, die die im Diagramm angedeuteten Eigenschaften haben. Solche Modelle sollten enthalten die Bewegungen der Körper, das von ihnen erzeugte, auf die Körper zurückwirkende Nahfeld und das sich ins Unendliche erstreckende Strahlungsfeld. Teile dieser komplexen Aufgabe konnten exakt ausgeführt werden, andere sind mit analytischen oder numerischen Näherungsverfahren behandelt worden. Auf diesem Gebiet bleibt noch viel zu tun.

Abbildung 9 veranschaulicht, wie zwei einander umlaufende Sterne durch die von ihnen hervorgerufene, sie begleitende Raumkrümmung Wellen erzeugen.

Zwei wichtige Fragen habe ich noch nicht angeschnitten: Gibt es aus Beobachtungen bzw. Messungen einen Hinweis darauf, dass tatsächlich Gravitationswellen in der Natur vorkommen? Wie können solche Wellen experimentell nachgewiesen werden [12]?

Die erste Frage lässt sich mit Ja beantworten. Im Jahr 1974 wurde von Hulse und Taylor ein Pulsar entdeckt, der, wie sich bald aus der Analyse seiner Strahlungsstöße ergab, Mitglied eines Neutronen-Doppelsternsystems ist. Nach langjähriger Vermessung und theoretischer Interpretation der zeitlichen Abfolge der Pulsarsignale ergab sich, dass die Umlaufperiode dieses Systems mit bemerkenswerter Genauigkeit so ab-

Abb. 10: Gravitationswellen lassen sich mit einem Michelson-Interferometer wie dem Detektor GEO600 bei Hannover nachweisen.



erst zwischen 1965 und 1985 nach großen Anstrengungen und kontroversen Diskussionen (s. z. B. [7]) für Systeme kompakter, weit voneinander getrennter Körper in einem jedenfalls formal konsistenten Näherungsverfahren überwunden worden (s. z. B. die Zusammenfassung [8]). Kompliziertere Vorgänge, z. B. auf Spiralbahnen einander näherkommende und schließlich verschmelzende Neutronensterne oder Schwarze Löcher, die als realistische Quellen von vielleicht dem-

nimmt, wie es aufgrund der Ausstrahlung von Gravitationswellen nach der AR zu erwarten ist. Die Periode ändert sich pro Jahr um etwa zwei 0,0002 Sekunden. Für dieses wichtige Ergebnis, den bisher größten Erfolg der AR, erhielten Hulse und Taylor den Physik-Nobelpreis für 1993.

Die zweite Frage möchte ich unter Zuhilfenahme von Abb. 10 beantworten. Es zeigt ein Michelson-Interferometer. Ein Laserstrahl wird durch einen Strahl-



Abb. 11: Blick auf den Gravitationswellendetektor GEO600 mit den beiden Interferometerarmen und dem Haus mit Strahlteiler und Laser. (Foto: MPI für Gravitationsphysik und U Hannover)

teiler in zwei kohärente Teilstrahlen zerlegt, die an Spiegeln reflektiert werden und nach ihrer Wiedervereinigung zum Detektor gelangen. Wenn nun eine Gravitationswelle das Interferometer von oben kommend so durchläuft, dass die Arme des Interferometers in den Wellenfronten liegen, so bewirken die im ersten Absatz dieses Abschnittes diskutierten Deformationen der Wellenfront relative Phasenverschiebungen der beiden Teilwellen, sodass wegen der Interferenz die Intensität des in den Detektor gelangenden Strahls durch die Gravitationswelle verändert wird und so zu deren Nachweis dienen kann. Nach diesem Prinzip konstruierte, in der Ausführung allerdings viel raffiniertere Gravitationswelleninterferometer sind in jahrelanger Arbeit jetzt fertiggestellt worden. Zwei große Gravitationswellen-Antennen, mit Armlängen von 3 bzw. 4 km, befinden sich in den USA, eine kleinere, aber wohl ebenso empfindliche Anlage, mit Armlängen von 600 m, wurde in britisch-deutscher Zusammenarbeit im Zentrum für Gravitationsphysik des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik und der Universität Hannover in Ruthe gebaut. Diese Geräte sind jetzt soweit eingerichtet und erprobt worden, dass wohl innerhalb eines Jahres mit Messungen begonnen werden wird. Abbildung 11 zeigt eine Aufnahme der Anlage GEO600, mit dem Strahlteiler und Laser enthaltenden Haus und den beiden „Armen“. Meine Kollegen und ich sehen der Zukunft gespannt entgegen.

Eine Sorge und eine Bitte

Zum Abschluss möchte ich auf etwas aufmerksam machen, was meinen Relativitätskollegen und mir seit langem Sorgen bereitet, nämlich die schon eingangs erwähnte Vernachlässigung der Gravitationsphysik an unseren Universitäten, zumindest was Stellen betrifft. Um das zu verdeutlichen, erwähne ich: Von vier tüchtigen, international beachteten jungen Physikern, die in unserem Institut arbeiteten und sich zwischen 1996 und 1998 an der Universität Potsdam habilitiert haben, ist es keinem gelungen, an einer deutschen Universität

eine Stelle zu bekommen. Eine Dame hat eine Dauerstelle in den Niederlanden angenommen, ein junger Mann eine in England, ein Dritter geht demnächst in die USA, den vierten versuchen wir zu halten, er könnte auch in die USA gehen. Ich könnte andere Beispiele nennen. Ich appelliere an die Universitätskollegen, bei Berufungen auch jungen Leuten aus der Gravitationsphysik eine Chance zu geben. Es gibt genügend viele interessante Fragen, von der mathematischen Physik über astrophysikalisch orientierte Probleme bis zu experimentellen Aufgaben.

Die Gravitationsphysik hat eine reiche Zukunft. Es fragt sich aber, ob unsere Nachwuchswissenschaftler diese – außer am Max-Planck-Institut – auch an deutschen Universitäten mitgestalten können oder dazu auswandern müssen.

Literatur

- [1] C. M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge University Press, 3. Auflage, Cambridge 1993
- [2] V. Perlick, *Ray Optics, Fermat's Principle and Applications in General Relativity*, Springer Verl., Berlin 2000
- [3] J. Ehlers, E. T. Newman, *The Theory of Caustics and Wavefront Singularities and Physical Applications*, J. Math. Phys. 41, 3344 (2000)
- [4] P. Schneider, J. Ehlers, E. E. Falco, *Gravitational Lenses*, Springer Verl., NY 1992
- [5] J. Ehlers, *Gravitationslinsen*, Carl-Friedrich-von Siemens Stiftung, München 1999
- [6] A. O. Petters, H. Levine und J. Wambsganz, *Singularity Theory and Gravitational Lensing*, Birkhäuser, Boston. 2001
- [7] J. Ehlers, A. Rosenblum, J. N. Goldberg, P. Havas, *Ap. J.* **208**, L7 – L81 (1976)
- [8] L. Blanchet, S. 225-267 in „Einstein's Field Equations and Their Physical Implications“, *Lecture Notes in Physics* 540, B.G. Schmidt (Hrsg.), Springer, Berlin 2000
- [9] J. Ehlers, in *Proceedings of the Ninth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, Ann. NY Acad. Sci. **336**, S. 279–294 (1980)
- [10] R. Penrose, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 66 (1963)
- [11] H. Friedrich, S. 153–176 in „Gravitation and Relativity“, *Proceedings of GR 15*, N. Dhadich and J. Narlikar (Hrsg.), IUCAA, Pune 1998
- [12] K. S. Thorne, *Reviews in Modern Astronomy* 10, S. 1–28, R. Schieelecke (Hrsg.), Astron. Gesellsch., Hamburg 1997

Der Autor

Jürgen Ehlers (Jg. 1929) studierte Mathematik und Physik in Hamburg, wo ihm Pascual Jordan, bei dem er promovierte, die theoretische Physik nahebrachte. Seine 1961 erschienene Habilitationsschrift über eine systematische relativistische Hydrodynamik hat Generationen von Relativisten und Kosmologen in dieses Gebiet eingeführt. Nach einem achtjährigen Aufenthalt in den USA, in Syracuse und Austin, wurde Ehlers 1971 an das MPI für Astrophysik in Garching berufen. Auf seine Anregung hin beschloss die Max-Planck-Gesellschaft 1994 die Gründung des MPI für Gravitationsphysik in Golm, dessen Gründungsdirektor er 1995 wurde. Ende 1998 wurde er emeritiert, arbeitet aber nach wie vor intensiv an Fragen der Gravitationslinsen und damit zusammen hängenden Fragen der Kosmologie. Darüber hinaus widmet er sich auch wissenschaftshistorischen Themen.

