

# Gravitationsphysik in Deutschland

## Vorlage zum DFG-Rundgespräch

Fachverband Gravitation und Relativitätstheorie der DPG

5. November 2005

### 1 Zur wissenschaftlichen Bedeutung der Gravitationsphysik

Die Gravitation unterscheidet sich von anderen Wechselwirkungen dadurch, dass sie in gleicher Weise auf alle Materiearten wirkt. Sie besitzt eine unendliche Reichweite und wirkt auf alle Energieformen anziehend. Sie dominiert auf großen Skalen (Kosmologie) sowie bei sehr kompakten Objekten, wie Neutronensternen oder Schwarzen Löchern. Für ein Verständnis der Vorgänge im frühen Universum ist die Vereinigung der Gravitation mit anderen Wechselwirkungen von großer Bedeutung. Wegen ihrer universellen Wirkung ist die Berücksichtigung der Gravitation bei interdisziplinären Fragestellungen unverzichtbar. Dies betrifft insbesondere das Zusammenspiel von Astrophysik, Kosmologie und Elementarteilchenphysik.

Alle gegenwärtig bekannten Erscheinungen der Gravitationsphysik werden erfolgreich durch die von Albert Einstein 1915 aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie (im folgenden mit ART abgekürzt) beschrieben. In dieser wird die Gravitation nicht als Kraft interpretiert, die im Raum und in der Zeit wirkt, sondern auf bestimmte Eigenschaften der *Geometrie* der Raumzeit selbst zurückgeführt. Dabei erzeugt jede Energieform, insbesondere Masse, eine raumzeitliche Krümmung, welche wiederum einen Einfluss auf die Bewegung von Körpern nimmt. Deren Bewegung ist dann unabhängig von ihrer Masse und tatsächlich nur durch die Geometrie der Raumzeit festgelegt. Dieses so genannte *Äquivalenzprinzip* bildet den physikalischen Kern der ART und ist eines der am präzisesten bestätigten Gesetze der gesamten Physik. Eine Krümmung der Raumzeit ist aber nicht an das Vorhandensein von Massen gebunden. Insbesondere kann sie sich in Form von *Gravitationswellen* mit Lichtgeschwindigkeit durch den materiefreien Raum bewegen. Im Gegensatz zu anderen physikalischen Theorien, in denen die Raumzeit nur die Rolle einer vorgegebenen und unveränderlichen Hintergrundstruktur spielt, sind in der ART die geometrischen Eigenschaften der Raumzeit selbst Gegenstand der physikalischen Dynamik.

Neben ihrer grundlegenden und weitreichenden Bedeutung für das Gebäude der Theoretischen Physik besitzt die ART eine hohe experimentelle Signifikanz. Dabei sei vor allem an die moderne Astrophysik und Kosmologie gedacht, sowie den geplanten direkten Nachweis von Gravitationswellen, durch den sich aller Erwartung nach ein neues Beobachtungsfenster für

Kosmologie und Astrophysik öffnen wird. Die Verleihung von Nobelpreisen an Subramanyan Chandrasekhar („for his theoretical studies of the physical processes of importance to the structure and evolution of the stars“) im Jahre 1983, sowie Russel Hulse und Joseph Taylor im Jahre 1993 („for the discovery of a new type of pulsar (1913+16), a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation“) hat unmittelbar mit diesen Bereichen zu tun. Selbst im Alltag spielt die ART mittlerweile eine unverzichtbare Rolle: Ohne ihre Berücksichtigung würde es im Rahmen des Satellitennavigationssystems GPS innerhalb von Tagen zu Fehlweisungen von einigen Kilometern kommen.

## 2 Gebiete der Gravitationsphysik

### 2.1 Experimentelle Gravitationsphysik

Bedingt durch die vergleichsweise geringe Stärke der gravitativen Wechselwirkung sind Experimente der Gravitationsphysik an besondere technologische Voraussetzungen gebunden. Oft geben diese Experimente ihrerseits Anlass zu Entwicklungen, die sogar für das praktische Leben relevant sind (z.B. die hochgenaue Laserstabilisierung zur Entwicklung optischer Uhren, die Lageregelung von Erdvermessungssatelliten, usw.). Dementsprechend sind einige moderne Alltagstechnologien nur noch mit Berücksichtigung der relativistischen Gravitationstheorie möglich, wie z.B. das GPS-Navigationssystem oder die Definition der internationalen Atomzeit. Auch die gerade abgeschlossene *Gravity-Probe-B-Mission* (GP-B) entwickelte sich aus der rein technischen Fragestellung nach einer Hochpräzisionsnavigation mit Hilfe von Kreiseln.

Umgekehrt werden natürlich auch anderweitig verfügbar gemachte Techniken für Grundagentests der Relativität und Gravitation erfolgreich eingesetzt. So kommen z.B. Atomuhren für Tests der gravitativen Rotverschiebung und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zur Anwendung, Neutroneninterferometer aus der Materialforschung werden zum Nachweis der Kopplung der Gravitation an quantenmechanische Systeme eingesetzt und Lasertechniken werden beim *Lunar Laser Ranging* (LLR) und in der Gravitationswelleninterferometrie verwendet. Gerade mit Hilfe der technologischen Entwicklung der letzten Jahre wird es in naher Zukunft möglich sein, die fundamentalen Gesetze der Gravitationsphysik auf einem erheblich gesteigerten Niveau zu testen. Weil einige theoretische Szenarien der Quantengravitation gewisse Verletzungen dieser Gesetze auf dem angestrebten Niveau prognostizieren, wird möglicherweise zum ersten Male der Blick auf Teile einer „Neuen Physik“ gerichtet, die im Bereich der Vereinheitlichung von Gravitation und Quantentheorie angesiedelt ist.

Zur Konkretisierung seien einige wichtige Experimente genannt, die sich auf die Grundlagen relativistischer Gravitationsphysik beziehen.

- *Test der Universalität des freien Falles*. Die Gültigkeit dieser Universalität wurde bisher im Labor mittels Torsionswaagen bis auf  $5 \times 10^{-13}$  genau verifiziert. Die geplanten Satellitenexperimente MICROSCOPE (Frankreich) und STEP (ESA-NASA) sollen die Genauigkeit auf  $10^{-15}$  bzw.  $10^{-18}$  steigern. Die Notwendigkeit dieser gesteigerten Präzision erwächst aus der Tatsache, dass Betrachtungen innerhalb der Quantengravitation die konkrete Möglichkeit einer Verletzung der Universalität des freien Falles schon bei

$10^{-13}$  eröffnen. Ebenso sagen einige Theorien zur Erklärung der beschleunigten Expansion des Universums eine Verletzung bei  $10^{-14}$  vorher.

- *Test der Universalität der gravitativen Rotverschiebung.* Gemäß dem Prinzip, nach dem die Kopplung von Materie an die Gravitation universell erfolgen sollte, müssten auch alle Uhren in gleicher Weise von der Gravitation beeinflusst werden. So muss etwa eine Uhr an einem Ort hohen Gravitationspotentials (z.B. auf einem Berg) schneller als eine Uhr an einem Ort niedrigeren Gravitationspotentials (z.B. in einem Tal) gehen. Diesen Effekt bezeichnet man auch als die gravitative Rotverschiebung, die man mit heutigen Uhren durchaus schon im Bereich einiger Meter nachweisen kann. Der bisher beste Wert für die gravitative Rotverschiebung wurde durch den NASA-Satellitentest GP-A erreicht, bei dem ein Wasserstoff-Maser auf 16 km Höhe gebracht und mit einer gleichartigen Uhr auf der Erde verglichen wurde. Dabei wurde die ART auf  $10^{-4}$  verifiziert.

In Zukunft soll eine Atomfontänenuhr (CNES, Frankreich) auf der Internationalen Raumstation ISS die Rotverschiebung um zwei Größenordnungen präziser nachweisen. Durch die Entwicklung neuer optischer Uhren, deren Ganggenauigkeit die herkömmlicher Atomuhren um drei Größenordnungen übersteigt, werden in naher Zukunft interessante Ergebnisse erwartet. Auch hier werden kleine Abweichungen von der Universalität des Uhrenganges durch Theorien der Quantengravitation und zur kosmischen Entwicklung vorhergesagt.

- *Test des Newtonschen  $1/r$  Potentials.* Die Form des Newtonschen Potentials wird durch die Planeten-, Kometen- und Asteroidenbahnen mit großer Genauigkeit bestätigt. Kleine Abweichungen (jenseits derer, die die ART zu verantworten hat) wurden jedoch im Rahmen effektiver Beschreibungen prognostiziert, die man im Niederenergielimes der Stringtheorie erhält. Diese Abweichungen betreffen dann sowohl das Verhalten bei kleinsten als auch bei größten Abständen. Diese Vorhersagen waren Anlass für erhebliche experimentelle Aktivitäten in Richtung einer Suche nach nicht-Newtonscher Gravitation bei Abständen im sub-mm Bereich. Zwar konnte bisher keine Abweichung nachgewiesen werden, jedoch ist die erreichte Genauigkeit so groß, dass gewisse durch die Quantengravitation motivierte Szenarien ausgeschlossen werden konnten.

Eine mögliche Abweichung des Newtonschen Gravitationsgesetzes bei großen Abständen ist aus mehreren Gründen in letzter Zeit in den Brennpunkt der Diskussionen geraten. Insbesondere hätte eine Änderung des Gravitationsgesetzes einen signifikanten Einfluss auf die Probleme der dunklen Materie und der dunklen Energie. Besonders letzteres gilt derzeit als eines der größten Rätsel der Physik. Kürzlich wurde sogar die Pioneer-Anomalie als mögliches Phänomen einer abgeänderten Gravitation diskutiert.

- *Tests zur Lorentz-Invarianz.* Dazu zählen neben den Tests der Isotropie und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sowie der Zeitdilatation, bei deren Tests sich in letzter Zeit besonders deutsche Gruppen hervorgetan haben, auch Tests des Relativitätsprinzips. Dabei wird insbesondere untersucht, ob verschiedene Uhren immer dieselbe Zeit anzeigen, unabhängig von ihrer Orientierung oder Geschwindigkeit. Auch hier werden im Rahmen gewisser Szenarien der Quantengravitation nachweisbare Effekte diskutiert.
- Experimente im Weltraum und Beobachtungen im Sonnensystem nehmen eine hervorragende Stellung ein. Als Beispiele genannt seien die Beobachtung der Periheldrehung

des Merkur, der Lichtablenkung mittels *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), sowie der gravitativen Zeitverzögerung, die mit einem Zusatzexperiment während des Fluges der Cassini-Sonde zum Saturn gemessen wurde. Auch das *Lunar Laser Ranging* (LLR) hat wesentlich zur Bestätigung der ART beigetragen. Zur Zeit werden die Daten der kürzlich beendeten GP-B-Mission ausgewertet, die die genaueste Bestätigung des Schiff-Effektes, d.h. der Mitführung eines lokalen Inertialsystems durch rotierende gravitierende Massen, liefern sollen. Einen ersten Hinweis auf solche „gravitomagnetischen“ Effekte ergab die Analyse der LAGEOS-Satelliten, die zur Vermessung des Erdgravitationsfeldes eingesetzt sind.

Innerhalb der nächsten 10 Jahre soll durch LISA (Laser Interferometer Space Antenna) Gravitationswellenastronomie im Weltraum möglich sein. Durch die riesigen Ausmaße dieses Interferometers (etwa 5 Millionen Kilometer) wird das gemessene Frequenzspektrum nach unten bis zum Millihertz-Bereich ausgedehnt und somit die Anzahl der zugänglichen Quellen erheblich erhöht. Außerdem ergibt sich daraus auch eine extrem genaue Winkelauflösung.

Effekte der Gravitation manifestieren sich oft nur über große Distanzen (z.B. die gravitative Rotverschiebung oder der Nachweis von Gravitationswellen kleiner Frequenzen) oder über lange Zeiten (z.B. im Zustand des freien Falles bei Experimenten zum Äquivalenzprinzip). Daher sind Gravitationsexperimente im Weltraum von großer Bedeutung. Dies zeigt sich auch bei der unter dem Stichwort „Cosmic Vision 2015–2025“ laufenden Diskussion um die zukünftige Programmatik der ESA (European Space Agency), bei der Experimente zur Gravitationsphysik einen Schwerpunkt bilden. Speziell geht es dabei um das Ausmessen der verschiedenen Komponenten des relativistischen Gravitationsfeldes mittels lasergekühlter Atomfontänenuhren und Atominterferometer, um Bose-Einstein-Kondensate in der Schwerelosigkeit, um ein genaueres Ausmessen der Pioneer-Anomalie sowie um eine Nachfolgemission zu LISA. Die wissenschaftliche Stoßrichtung wird dabei mit der Suche nach den Grundgesetzen der Physik (Quantengravitation, Gravitationswellen, Materie unter extremen Bedingungen) sowie mit der Frage nach dem Ursprung und dem Inhalt unseres Universums angegeben.

## 2.2 Relativistische Astrophysik und Kosmologie

Auch in diesem Bereich gab es zum Teil spektakuläre Fortschritte. Die Beobachtung des Binärpulsars 1913+16, für dessen Entdeckung und Nutzbarmachung für die Gravitationsphysik Hulse und Taylor den Nobelpreis des Jahres 1993 erhielten, ermöglichte den indirekten Nachweis von Gravitationswellen. In der Folge wurden mehrere Binärsysteme mit Pulsaren entdeckt, die ein neues Laboratorium für die Relativitätstheorie im Falle starker Felder darstellen. Herausragend ist in diesem Zusammenhang die Entdeckung des ersten Binärsystems bestehend aus zwei Pulsaren. Dieses System erlaubt die genaue Messung vieler unabhängiger Größen, die starke Konsistenzbedingungen an die Relativitätstheorie stellen. Bisher hat die ART alle Tests durch Binärsysteme mit Bravour bestanden.

Seit Einstein ist bekannt, dass Licht durch große Massen abgelenkt wird. Tatsächlich war die Lichtablenkung eine der ersten experimentellen Bestätigungen der ART. Demnach können große Massenansammlungen Licht sogar bündeln und so einen Linseneffekt hervorrufen.

Dies kann zu Mehrfachabbildungen und zu starken Bildverzerrungen führen. Beide Phänomene werden seit den 1980er Jahren regelmäßig beobachtet. Mittlerweile hat sich der Gravitationslinseneffekt als nützliches Werkzeug bei der Untersuchung der Massenverteilung in Galaxien und Galaxienhaufen sowie der Suche nach dunkler Materie erwiesen. Damit hat sich in den letzten Jahren einer der ersten experimentell getesteten Effekte der ART zu einem Beobachtungswerkzeug der Astrophysik entwickelt.

Eine weitere Vorhersage der ART ist die mögliche Existenz von Schwarzen Löchern. Zahlreiche Kandidaten konnten in den letzten Jahren indirekt identifiziert werden, was sowohl Schwarze Löcher in Röntgendoppelsternen als auch supermassive Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien betrifft. Hier sei vor allem auf die Entdeckung eines Schwarzen Loches von über zwei Millionen Sonnenmassen im Zentrum unserer eigenen Milchstraße hingewiesen. Ein deutlicher Hinweis auf dessen Existenz ist die Bestimmung der Bahn von Sternen, die das galaktische Zentrum mit relativistischen Geschwindigkeiten eng umkreisen und Rückschlüsse auf die Zentralmasse ermöglichen. Mit Hilfe vieler Teleskope auf unserer Erde sowie im Weltraum soll die Suche nach Schwarzen Löchern intensiviert und insbesondere die nähere Umgebung dieser Objekte studiert werden.

In der Kosmologie bildet die ART die theoretische Grundlage des kosmologischen Standardmodells. Aktuelle Messungen der kosmischen Parameter ergeben, dass ein Großteil (etwa 70%) der gravitativ wirksamen Energie nicht in Materie konzentriert sein kann (Problem der dunklen Energie bzw. kosmologischen Konstante), und dass der verbleibende Materieanteil (etwa 30%) nur zu etwa einem Sechstel aus der uns geläufigen Materie in Form von Baryonen (Atomkernen) besteht (Problem der dunklen Materie). Somit liegt anscheinend die extreme Situation vor, dass 95% der als gravitativ wirksam nachgewiesenen Energie und Materie in einer Form vorliegt, deren Natur uns nicht bekannt ist.

Die Aufklärung der Natur der dunklen Energie und Materie, möglicherweise im Verbund mit der Entwicklung alternativer Modelle bzw. Modifikationen der Theorie, gilt als eine der großen Herausforderungen an die fundamentale Physik der Gegenwart. Weitere Experimente wie die präzise Vermessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, der allgegenwärtigen Reststrahlung aus der Frühzeit des Kosmos, werden die Datenlage verbessern. Die Messung der Hintergrundstrahlung haben die Anwesenheit kleiner Fluktuationen enthüllt, welche die Keime für alle Strukturen im Universum – Galaxien, Sterne, Planeten – darstellen. Es ist geplant, diese Messungen in den nächsten zehn Jahren zu verbessern, insbesondere durch den europäischen Satelliten PLANCK, der in etwa fünf Jahren gestartet werden soll. Die wichtigsten kosmologischen Parameter sollen mit nie dagewesener Präzision bestimmt werden. Daraus erhofft man sich endgültige Aufschlüsse über Alter und Schicksal unseres Universums, sowie die Natur der Materie und Energie, aus der es besteht.

### **2.3 Physikalische Grundlagen und mathematische Methoden**

Die ART basiert auf den experimentell sehr gut bestätigten Annahmen, dass (i) die Geometrie von Raum und Zeit durch eine pseudo-Riemannsche Metrik mit Lorentz-Signatur beschrieben wird und (ii) diese Metrik die Einsteinsche Feldgleichung erfüllt. Dementsprechend erfordert die theoretische Gravitationsphysik die Beschäftigung mit pseudo-Riemannscher Geometrie und das Studium einer komplizierten nichtlinearen Differentialgleichung.

Die Tatsache, dass sich die pseudo-Riemannsche Geometrie in der Mathematik als ein Teilgebiet der Differentialgeometrie etabliert hat, ist zu einem großen Teil der ART zu verdanken. Eine wichtige Rolle haben hierbei die Singularitätentheoreme gespielt, die Roger Penrose und Stephen Hawking in den 1960er Jahren bewiesen haben. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Begriffsbildungen haben unsere Vorstellungen von globalen Eigenschaften der Raumzeit (Kausalstruktur, Topologie) wesentlich erweitert. Methoden der globalen Differentialgeometrie und Differentialtopologie werden in Zukunft sicher eine noch größere Rolle spielen. So galt z.B. die Vorstellung, dass unser Universum die räumliche Topologie eines dreidimensionalen Torus haben könnte, noch vor einigen Jahren als exotisch; heute wird eine solche Idee von Kosmologen durchaus ernst genommen und es wird sogar nach entsprechenden beobachtbaren Signaturen gesucht.

Im Mittelpunkt der ART steht die Einsteinsche Feldgleichung. Da es sich dabei um eine hochgradig nichtlineare partielle Differentialgleichung handelt, stößt man bei ihrer Behandlung auf große Schwierigkeiten. Dennoch ist es im Laufe der Zeit gelungen, eine beträchtliche Anzahl von exakten Lösungen anzugeben und sie zum Teil als realistische Modelle gegebener physikalischer Situationen zu interpretieren.

Die Ausführung der komplizierten Rechnungen geschieht vielfach mit Hilfe algebraischer Computerprogramme. Beim Auffinden und systematischen Katalogisieren exakter Lösungen der Einsteinschen Feldgleichung spielt seit mehreren Jahrzehnten die Arbeitsgruppe in Jena eine führende Rolle. Diese Tätigkeit wird auch in Zukunft wichtig sein, da das Studium exakter Lösungen sowohl für Anwendungen als auch für das Verständnis der allgemeinen Theorie unerlässlich ist.

Zur Behandlung realistischer Situationen, die nicht durch exakte Lösungen beschrieben werden können, ist man auf Approximationsmethoden angewiesen. Neben analytischen Methoden wie post-newtonschen Näherungen werden numerische Untersuchungen immer wichtiger. Hierbei macht man wesentlich von der Tatsache Gebrauch, dass für Lösungen der Einsteinschen Feldgleichung (jedenfalls unter bestimmten Voraussetzungen an den Materie-Inhalt) ein Existenz- und Eindeutigkeitssatz gilt, gemäß dessen die Vorgabe geeigneter Anfangsbedingungen die Metrik (d.h., das Gravitationsfeld) zu späteren und früheren Zeiten eindeutig festlegt. Die eigentliche Rechnung erfolgt nun durch numerische Integration mit Hilfe von Computern. Erstens ergänzen diese numerischen Untersuchungen die mit geometrischen oder analytischen Methoden gewonnenen Ergebnisse. So sagen z.B. die oben erwähnten Singularitätentheoreme nur die Existenz von Singularitäten voraus, machen aber keine Angaben über deren Natur; mit numerischen Methoden kann man wenigstens einige Aspekte der Raumzeit bei der Annäherung an eine solche Singularität studieren. Zweitens sind numerische Methoden unverzichtbar im Hinblick auf Anwendungen. So will man etwa die Form von Gravitationswellen berechnen, die in der Endphase der Entstehung eines Schwarzen Loches ausgestrahlt werden, um dadurch ein Schwarzes Loch *direkt* nachweisen zu können. Hier besteht eine direkte Verbindung zur Astrophysik und zur experimentellen Gravitationsphysik. Ganz allgemein wird die Forschung hier in Zukunft verstärkt den Fall *starker Gravitationsfelder* untersuchen, unabhängig von speziellen Annahmen, wie etwa der sphärischen Symmetrie. Dabei ist es wichtig, dass sich numerische Methoden auf der einen Seite und geometrisch-analytische Methoden auf der anderen Seite ergänzen und auch gegenseitig kontrollieren. Deshalb gibt es bereits eine weitreichende Zusammenarbeit zwischen „Numerikern“ und „Analytikern“, die sich in Zukunft noch verstärken wird.

## 2.4 Gravitation und Quantentheorie

Die konsistente Vereinigung der Prinzipien der Gravitationstheorie und Quantentheorie bzw. Quantenfeldtheorie zu einer Theorie der Quantengravitation gehört unbestritten zu den größten offenen Problemen der Physik, ohne dessen Lösung das Gebäude der Physik unvollendet bleibt. So stellt beispielsweise die rein klassische Behandlung der Raumzeit-Geometrie in Anwesenheit von Quantenfeldern für die Materie keine konsistente fundamentale Theorie dar und kann nur als Approximation im Sinne einer effektiven Beschreibung angesehen werden.

Die Hauptschwierigkeiten bei dem Versuch, die ART einem Quantisierungsprozess zu unterwerfen, sind einerseits die Nichtlinearität der Feldgleichungen, andererseits deren hohes Maß an Redundanz (Eichfreiheit), dass sich in der Invarianz unter der Diffeomorphismengruppe äußert. Diese Probleme treten nun in Kombination mit den üblichen Problemen von Quanten(feld)theorien auf.

Im Gegensatz zu den anderen fundamentalen Wechselwirkungen, für deren Beschreibung renormierbare Quantenfeldtheorien zur Verfügung stehen, ist eine störungstheoretische Formulierung der Quantengravitation um eine flache Raumzeit-Geometrie nicht möglich. Außerdem würde eine solche Formulierung auf der Basis eines absoluten, d.h. keiner Dynamik unterworfenen Hintergrundes nicht die entscheidende Einsicht Einsteins berücksichtigen, dass Gravitation mit der Geometrie der Raumzeit identisch ist. Die weitreichenden Entwicklungen der Quantenfeldtheorie auf einem gegebenen Raumzeit-Hintergrund stehen somit nur eingeschränkt, d.h. nur für gewisse Approximationen, zur Verfügung und müssen durch allgemeinere, oft noch zu entwickelnde Methoden ergänzt werden.

Die derzeit verfolgten Ansätze zu einer Theorie der Quantengravitation zerfallen in zwei Hauptströmungen. Diese unterscheiden sich sowohl in der Wahl der oben angesprochenen Methoden als auch grundsätzlich programmatisch: Während die *Stringtheorie* eine Quantisierung der Gravitation im Verbund mit einer Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen versucht, geht das so genannte *kanonische Quantisierungsprogramm* grundsätzlich davon aus, dass man die Gravitation auch unabhängig von anderen Wechselwirkungen einem Quantisierungsverfahren konsistent unterwerfen kann.

In der Stringtheorie wird durch die Einbettung der klassischen Gravitationsgleichungen in ein umfassenderes System die Renormierbarkeit erreicht, so dass störungstheoretische Rechnungen möglich werden. Seit einiger Zeit stehen auch nicht-störungstheoretische Techniken zur Verfügung. Letztere sind insbesondere für das Verständnis Schwarzer Löcher wichtig, bei denen in Spezialfällen (so genannte extremale Schwarze Löcher, deren Temperatur verschwindet) die Quantenzustände gezählt werden konnten. Dies wird oft als entscheidender Test angesehen, da man die Zahl der Quantenzustände, oder die Entropie Schwarzer Löcher, mit Eigenschaften der semiklassisch hergeleiteten Hawking-Strahlung vergleichen kann. Entscheidende Fragen in der Theorie der Schwarzen Löcher und in der Kosmologie erfordern aber ein Verständnis von starken Gravitationsfeldern, für die die Stringtheorie derzeit noch wenig entwickelt ist. Für weitergehende Untersuchungen und die Beantwortung wichtiger Fragen ist also ein tieferes Verständnis solcher charakteristischer Situationen der ART erforderlich.

Als wesentlicher Nachteil wird angesehen, dass die bisherigen Formulierungen der Stringtheorie stets die Wahl eines absoluten metrischen Hintergrundes verlangt, von dem die entstehende Theorie dann abhängt, wobei aber die physikalische Signifikanz einer solchen Wahl weitgehend unklar bleibt. Auch das widerspricht der bereits zitierten Einsicht Einsteins, dass die Theorie der Gravitation (und damit wohl auch die Quantengravitation) überhaupt keine nicht-dynamischen Strukturen enthalten sollte.

Die zweite Forschungsrichtung setzt genau an dieser Stelle an, indem von Anfang an eine nicht-störungstheoretische Formulierung der reinen Quantengravitation (also ohne Vereinheitlichung mit anderen Wechselwirkungen) unter Erhaltung der vollen Invarianz unter Diffeomorphismen angestrebt wird. Dieser Zugang berücksichtigt den geometrischen Gehalt der ART stärker und erlaubt die direkte Untersuchung starker Gravitationsfelder. Innerhalb dieses Zugangs gibt es wiederum unterschiedliche Ausrichtungen, die man grob in kanonische (*Quantengeometrodynamik* und *Loop-Quantengravitation*) und kovariante (*Causal Sets*, *Dynamische Triangulierungen* und *Spin-Foams*) unterteilen kann. In ersterer werden die Einsteinschen Feldgleichungen kanonisch, d.h. als Hamiltonsches dynamisches System, formuliert und die sich ergebende Hamiltonfunktion, die wegen der Invarianz unter Diffeomorphismen zu einer Zwangsbedingung wird, quantisiert. Die kovarianten Zugänge verfolgen eher Ideen einer Pfadintegral-Quantisierung. Den meisten dieser Ansätze ist gemein, dass sie eine diskrete Struktur der Raumzeit liefern oder als Annahme für die Konstruktion verwenden. In einigen Fällen kann dies als Grund für die Vermeidung von Divergenzen gesehen werden, was insbesondere in Bereichen starker Gravitationsfelder eine wichtige Rolle spielt. Dementsprechend gibt es in diesen Zugängen die derzeit stärksten Aussagen zur Vermeidung von Singularitäten in einer Theorie der Quantengravitation. Da bei diesen Formulierungen direkt Wellenfunktionen oder Analoga von Pfadintegralen benutzt werden, stehen hier auch Interpretationsfragen im Vordergrund, die fundamentale Aspekte der Quantentheorie betreffen, etwa die Entstehung klassischen Verhaltens durch Dekohärenz.

In allen erwähnten Forschungsrichtungen hat es in den letzten Jahren teilweise ganz entscheidende Fortschritte gegeben. Es wird erwartet, dass diese Entwicklung anhält und sich insbesondere auch auf die Frage der Beobachtungsmöglichkeiten fortsetzt. Dies betrifft etwa genaue Messungen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung mit dem PLANCK-Satelliten und dessen Nachfolgemissionen, von denen erheblich mehr Details über das frühe Universum erwartet werden. Das trifft ebenso für zukünftige Gravitationswellendetektoren zu. In diesem Zusammenhang ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die meisten Modelle des frühen Universums auf der Annahme einer frühen Inflationsphase beruhen und somit ähnliche Spektren für den Mikrowellen-Hintergrund liefern, sich aber im Gravitationswellen-Hintergrund entscheidend unterscheiden können.

Außerdem könnten am *Large Hadron Collider* (LHC) gefundene Ergebnisse viele Theorien auch im Bereich der Quantengravitation (hauptsächlich Stringtheorie) einschränken. Somit gibt es hier wichtige Querverbindungen zur Elementarteilchenphysik und zur Kosmologie.

### 3 Gravitationsphysik in Deutschland

Die ART wurde 1915 von Albert Einstein in Berlin vollendet. Obwohl ihre Aufstellung nach den Worten von Max Born als „die größte Leistung menschlichen Denkens über die Natur,

die erstaunlichste Vereinigung von philosophischer Tiefe, physikalischer Intuition und mathematischer Kunst“ erschien, waren die Vorhersagen der ART damals kaum experimentell überprüfbar. Für lange Zeit waren drei Effekte, nämlich Lichtablenkung, Periheldrehung des Merkur und gravitative Rotverschiebung, die einzige Bestätigung der Theorie. Der aufwändige mathematische Formalismus stand in krassem Gegensatz zu den wenigen experimentellen Resultaten.

Hinzu kam die Entwicklung der Quantentheorie, in der Experiment und Theorie Hand in Hand voranschritten und sich gegenseitig stimulierten. Auf diese Weise ergaben sich in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts nie dagewesene Erfolge bei der Erklärung der Eigenschaften der Materie. Es ist verständlich, dass sich ein Großteil der Physiker diesem spannenden Gebiet widmete und so die Relativitätstheorie in ihrer begrifflichen und mathematischen Weiterentwicklung stagnierte. Auch die Emigration vieler Physiker, nicht zuletzt Einsteins, nach der nationalsozialistischen Machtergreifung und die Verunglimpfung der ART als „undeutsche Physik“ trugen zu dieser Entwicklung bei. Nach dem Krieg bildeten sich in Deutschland nur vereinzelte Gruppen, deren Forschung sich auf Gravitationsphysik konzentrierte. Trotz ihrer zum Teil ausgezeichneten Arbeit hat sich aus den genannten Gründen nie eine wirklich gesunde und beständige wissenschaftliche Infrastruktur für dieses Gebiet etablieren können.

In der Zwischenzeit haben sich jedoch die modernen experimentellen Methoden so weit entwickelt, dass die einstige Kluft zwischen Theorie und Experiment in der Gravitationsphysik rapide schrumpft. In der Tat wird dieses Forschungsgebiet in den nächsten Jahren zu einem wesentlichen Motor für die Entwicklung neuer Technologien werden. Die Max-Planck-Gesellschaft hat die zunehmende Bedeutung der Gravitationsphysik für die moderne Wissenschaft erkannt und nach der Wiedervereinigung das *Albert-Einstein-Institut* (AEI) in Golm bei Potsdam gegründet, das sich ausschließlich dieser Thematik widmet. Dieses Institut hat sich in den vergangenen Jahren zum weltweit größten Institut auf diesem Gebiet und damit zu einem der sprichwörtlichen wissenschaftlichen „Leuchttürme“ entwickelt. Die Gründung des Instituts war auch als Signal an die Hochschulen gedacht, auf die wachsende Bedeutung der Gravitationsphysik zu reagieren und Anreize zur Entwicklung universitärer Arbeitsgruppen in diesem Bereich zu schaffen. Diese Hoffnung hat sich leider nicht verwirklicht. Im Gegenteil, dem Ruf nach Schwerpunktbildung folgend, wird gegenwärtig an den Universitäten das Etablierte gestärkt und kleineren Gruppen die Unterstützung versagt. Wegen ihrer ungewöhnlich schwachen Verankerung in der deutschen Universitätslandschaft, ist die Gravitationsphysik von dieser Dynamik im besonderen Maße nachteilig betroffen. Von einer Chancengleichheit kann hier beim besten Willen nicht gesprochen werden.

Das AEI genießt ein hohes internationales Ansehen und erhält damit eine große Zahl von Bewerbern für (Post-) Doktorandenstellen. Für die deutsche Forschungslandschaft ist der Effekt dieser Ausbildungsanstrengungen aber minimal. Teilweise wirkt das Institut wie ein „Durchlauferhitzer“, der den Nachwuchs aus dem Ausland nach Deutschland holt, ausbildet und wieder ins Ausland entlässt.

Auch die DFG hat die zunehmende Bedeutung der Gravitationsphysik erkannt und deshalb im Jahr 2002 den SFB-TR7 „Gravitationswellen-Astronomie“ ins Leben gerufen, der an den Universitäten Jena und Tübingen angesiedelt ist, unter Beteiligung der Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik in Golm/Hannover und für Astrophysik in Garching.

Leider sind diese Bemühungen nicht ausreichend. Tatsächlich hat sich die schon prekäre Lage an den deutschen Universitäten bis heute weiter verschärft. Derzeit gibt es in Deutschland nur noch drei Universitäten, an denen Gruppen für Gravitationsphysik ausgewiesen sind (nicht mitgezählt sind Stringtheoretiker):

- *Universität Jena*: Die Themen sind an den Bedürfnissen des SFB-TR7 ausgerichtet und umfassen numerische Relativitätstheorie, post-newtonsche Approximationen und Eigenschaften von rotierenden Objekten.
- *Universität Tübingen*: Die Themen sind ebenfalls am SFB-TR7 ausgerichtet. Man beschäftigt sich mit Eigenschaften von Neutronensternen, der exakten Beschreibung von Gravitationsstrahlung sowie mit numerischen und mathematischen Methoden. Zur Zeit läuft das Berufungsverfahren für die Nachfolge von Prof. Ruder. Es ist leider derzeit noch nicht absehbar, ob diese Stelle für die Gravitationsphysik gehalten werden kann.
- *Universität zu Köln*: Themen sind hauptsächlich Fragen der Quantengravitation und Quantenkosmologie sowie zur Struktur von Schwarzen Löchern. Derzeit besteht die Gruppe aus einer C3-Stelle und befristeten Stellen.

Neben diesen ausgewiesenen Gruppen gibt es noch einige Gruppen, die Teil eines anderen Bereiches sind (hauptsächlich Elementarteilchenphysik) und sich von dieser Seite mit Fragestellungen befassen, in denen *auch* die Gravitation eine Rolle spielt. Hierzu gehören die Universitäten Dresden (Geodäsie), Hamburg (Stringtheorie, Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Räumen), Heidelberg (Kosmologie und Teilchenphysik), Leipzig (Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Räumen), Mainz (Quantenfeldtheorie unter Einschluss von Gravitation), Oldenburg (nichtabelsche Schwarze Löcher) und Potsdam (Kosmologie).

Zu guter Letzt ist die Lehre zu erwähnen. Es ist eine immer wieder gemachte Erfahrung der letzten Jahre, dass Vorlesungen über Gravitationsphysik und ART in der Beliebtheitsskala der Studenten ganz oben stehen. Außerhalb der drei oben genannten Universitäten kann diese Nachfrage oft nur deshalb halbwegs gedeckt werden, weil vereinzelt im Mittelbau angesiedelte Mitarbeiter, die im Bereich der ART forschen, entsprechende Vorlesungen und/oder Seminare anbieten. Sporadisch angebotene Vorlesungen über die ART aus den Reihen nicht spezialisierter Kollegen lassen gerade die modernen Entwicklungen außen vor und lassen bei den Studenten keinen adäquaten Eindruck des hier erzielten Erkenntnisfortschritts und aktiven wissenschaftlichen Lebens entstehen.

Zusammengefasst kann man sagen, dass wir im Mittel an deutschen Universitäten zur Zeit weit davon entfernt sind, ein sowohl der studentischen Nachfrage als auch der wissenschaftlichen Bedeutung der Gravitationsphysik nur halbwegs gerecht werdendes Lehrangebot bereitzustellen.