

Schwarze Löcher in Bewegung

Numerische Simulationen zeigen, wie zwei Schwarze Löcher einander umkreisen und dabei Gravitationswellen abstrahlen.

Das klassische Zwei-Körper-Problem zweier Punktmassen besitzt in der Newtonschen Physik die wohl-

Spiralbahnen erst langsam, dann immer schneller näher kommen, kollidieren und verschmelzen. Dieser Verlust an Stabilität ist jedoch keineswegs bedauerlich: Da er zur Emission von Gravitationswellen führt, hoffen die Astrophysiker auf einen gänzlich neuen Zweig der beobachtenden Astronomie, die Gravitationswellenastronomie.

Verschmelzung zu beschreiben, führt kein Weg daran vorbei, die vollen Einstein-Gleichungen im Rahmen der Numerischen Relativitätstheorie auf dem Computer zu simulieren. Dabei ergeben sich eine Vielzahl von faszinierenden theoretischen und technischen Problemen. Zum einen sind die Gleichungen komplizierte, nicht-lineare partielle Differentialgleichungen, die auch 90 Jahre nach ihrer Formulierung noch Gegenstand der aktuellen Forschung sind. So lassen sich z. B. die vierdimensionalen Einstein-Gleichungen nicht eindeutig in hyperbolische (wohldefinierte) Zeitentwicklungsgleichungen in drei Dimensionen zerlegen, und verschiedene Varianten unterscheiden sich sehr in ihrer numerischen Stabilität. Desweiteren erfordert die Raum-Zeit-Singularität im Inneren Schwarzer Löcher besondere Maßnahmen, die wiederum die Stabilität der Simulationen beeinträchtigen. Zwischen der Skylla der numerischen Instabilität und der Charybdis der physikalischen Singularität war es erst ab 1995 möglich, die Zeitentwicklung eines einzelnen, statischen Schwarzen Lochs in nicht-trivialen Koordinaten in drei Dimensionen zu simulieren.

Ein gemeinsamer Aspekt der aktuellen Arbeiten [1–3] sind Methoden, mit denen sich zwei Schwarze Löcher recht problemlos im numerischen Gitter bewegen lassen. Bei der sog. Exzisionsmethode wird das Innere des Schwarzen Loches aus dem Gitter herausgeschnitten und ist nicht Teil des Rechenbereichs. Kausal ist der Außenbereich vom Innenbereich vollständig entkoppelt, aber die Herausforderung ist die numerisch stabile Implementierung eines solchen Randes im Bereich starker nichtlinearer Felder. Dies wurde unter anderem durch eine verallgemeinerte harmonische Eichung erzielt [1].

Die Methode in [2, 3] beruht auf der sog. Brill-Lindquist-Topologie, die Schwarze Löcher als „Wurmlöcher“ darstellt, also als Raum-Zeit-Tunnel in ein inneres Universum. Mathematisch basiert die Methode auf einer Kompaktifizierung des räumlich Unendlichen am inneren Ende des Wurmloches derart, dass die physikalische Singularität vermieden wird und letztlich auf einem regulären R^3 mit zeitabhängigen Feldern gerechnet werden kann [5]. Das Überbleibsel der Wurmlöcher sind sog. Punktturen, an denen bis auf den bei der Kompaktifizierung

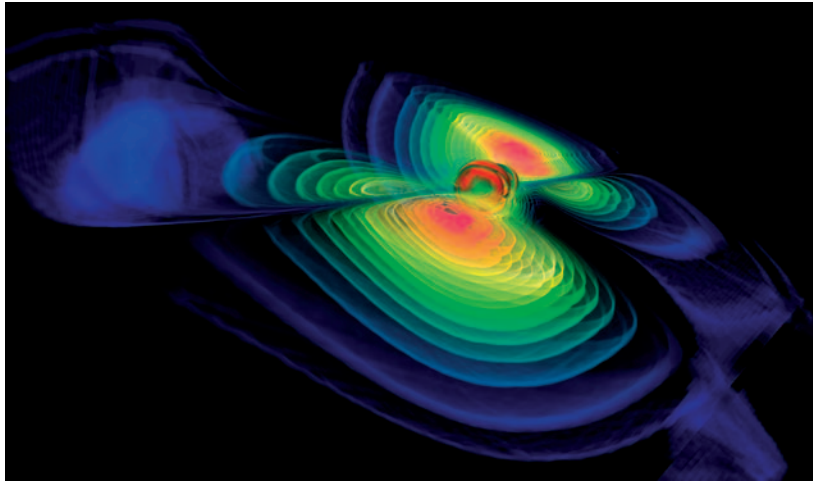


Abb. 1: Zwei Schwarze Löcher verschmelzen und strahlen Gravitationswellen ab. (Computersimulation: MPI für Gravitationsphysik, Visualisierung: W. Benger, ZIB)

bekannte Lösung der Kepler-Bahnen. Aber verstehen wir wirklich, wie sich zwei Massen im gegenseitigen Gravitationsfeld bewegen? So überraschend es vielleicht klingt, die Antwort auf diese Frage steht noch aus, selbst wenn man sich auf die klassische, nicht-quantenmechanische Physik und auf nicht mehr als zwei Körper beschränkt.

Eine aktuelle Behandlung des Zwei-Körper-Problems muss von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART) ausgehen, die im Grenzfall alltäglicher Geschwindigkeiten $v \ll c$ und für schwache Gravitationsfelder in die ausgezeichnete Näherung der Newtonschen Physik übergeht. Mit post-Newtonschen Näherungen lässt sich das Zwei-Körper-Problem sogar bis zu $v/c \approx 0,1$ und bis zur Ordnung $(v/c)^7$ analytisch explizit lösen. Wie bewegen sich aber z. B. zwei Schwarze Löcher als Paradebeispiel extremer Gravitation, wenn sie sich bei relativistischen Geschwindigkeiten sehr nahe kommen? Gibt es womöglich – analog zu den Kepler-Bahnen – ähnlich einfache und zugleich astrophysikalisch relevante Lösungen?

Die Antwort lautet „nein“, denn bei der Bewegung zweier Massen werden Gravitationswellen erzeugt, die dem System Energie und Impuls entziehen, sodass keine stabile Lösung analog einer Kepler-Ellipse existieren kann. Vielmehr werden sich zwei Schwarze Löcher auf

Derzeit sind Detektoren in Betrieb und in Entwicklung, die die erforderliche extreme Empfindlichkeit für den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen erreichen sollen. Zugleich sollen Vorhersagen über ihre Quellen gemacht werden. Binärsysteme Schwarzer Löcher gehören zu den vielversprechendsten Kandidaten.

Die Frage nach dem Zwei-Körper-Problem in der ART lässt sich also wie folgt präzisieren: Wie bewegen sich zwei Schwarze Löcher in einem Binärsystem, d. h. wie verlaufen die Spiralen und die zwangsläufig folgende Kollision und Verschmelzung der Schwarzen Löcher, und welche Eigenschaften haben die dabei abgestrahlten Gravitationswellen? In diesem Zusammenhang sind im Laufe des letzten Jahres große und womöglich entscheidende Fortschritte erzielt worden. Die von Pretorius [1] sowie in den letzten Monaten von Campanelli et al. [2] und von Baker et al. [3] unabhängig voneinander entwickelten Methoden erlauben zum ersten Mal die numerische Simulation von rund vier Orbits zweier Schwarzer Löcher und die Berechnung von Gravitationswellen mit hoher Genauigkeit (z. B. [4]). Bisherige Simulationen beschrieben aufgrund numerischer Instabilitäten wesentlich kürzere Zeiten und waren auch ungenauer.

Um Schwarze Löcher und ihre

*) Mit Arbeitsgruppen an den Universitäten in Jena, Tübingen und Hannover, sowie am MPI für Gravitationsphysik in Hannover und Potsdam und am MPI für Astrophysik in Garching.

Prof. Bernd Brügmann ist Sprecher des SFB/TR 7 „Gravitationswellenastronomie“. Anschrift: Theoretisch-Physikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

verwendeten konformen Faktor alle Variablen regulär sind. Diese Punkturmethode führte zur ersten Simulation eines kompletten Orbits zweier Löcher, was zuvor aufgrund der vielfältigen Instabilitäten nicht möglich war [6]. Allerdings wurden dazu mitbewegte Koordinaten eingeführt, um die Problematik der bewegten Schwarzen Löcher zu umgehen, was die analytische Behandlung des konformen Faktors als zeitlich konstanter Funktion ermöglichte. In [2, 3] wird gezeigt, wie sich die Bewegungsgleichungen derart ändern lassen, dass sich die Schwarzen Löcher bei zeitlich veränderlichem konformen Faktor frei im numerischen Gitter bewegen können. Dies hat zu einem beträchtlichem Stabilitätsgewinn geführt.

Diese Ergebnisse sind besonders wichtig, weil sie einen „Phasenübergang“ in unserem Verständnis des für die Gravitationswellenastronomie so bedeutsamen Zwei-Körper-Problems Schwarzer Löcher markieren. Bis vor kurzem lag in dieser Disziplin das Hauptaugenmerk noch auf der Bewältigung grundlegender, aber doch im Wesentlichen technischer Probleme. Ohne die Möglichkeit, routinemäßig Simulationen von mehreren Orbits bis zur Verschmelzung durchzuführen, lassen sich natürlich keine Vorhersagen zu den Gravitationswellen machen.

Den ersten Orbitsimulationen folgen jetzt physikalische Studien mit direkten Konsequenzen für die Gravitationswellenforschung. So wird z. B. untersucht, wie sich Binärsysteme mit unterschiedlichen Massen verhalten. Die durch die ungleichen Massen bedingte Asymmetrie führt zu einem „Kick“, der dem bei der Verschmelzung entstehenden Schwarzen Loch eine zusätzliche Geschwindigkeit verleiht. Diese könnte zum Verlassen des umgebenden Sternhaufens ausreichen,

ist aber bisher nur näherungsweise bekannt. Ein weiteres Beispiel ist das Verhalten Schwarzer Löcher mit Spin, was zu interessanten Koppelungseffekten in der ART führt, die aber noch nicht untersucht werden konnten. Typische Binärsysteme bewegen sich womöglich auf fast kreisförmigen Spiralbahnen, weil die Abstrahlung von Gravitationswellen zur Zirkularisierung von elliptischen Orbits führt. Es sind aber auch exzentrische Orbits denkbar, deren charakteristische Wellenformen noch zu berechnen sind.

Diese Fragen werden in Deutschland insbesondere im Rahmen des SFB/Transregio 7 „Gravitationswellenastronomie“ behandelt.^{*)} Der SFB verfolgt verschiedene Projekte in der Numerischen Relativitätstheorie (siehe z. B. die Orbitsimulationen in [7]), aber auch in den meisten anderen für Gravitationswellen relevanten Bereichen der Gravitationstheorie. Zugleich gibt es die Verbindung zu experimentellen Projekten im Umfeld des deutschen Gravitationswellendetektors GEO600 bei Hannover.

Die vielversprechenden ersten Ergebnisse der neuen Methoden lassen in den nächsten Jahren ein neues, weites Forschungsgebiet in der relativistischen Himmelsmechanik Schwarzer Löcher erwarten.

BERND BRÜGMANN

- [1] *F. Pretorius*, Phys. Rev. Lett. **95**, 121101 (2005)
- [2] *M. Campanelli et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 111101 (2006)
- [3] *J. G. Baker et al.*, Phys. Rev. Lett., **96**, 111102 (2006)
- [4] *J. G. Baker et al.*, Phys. Rev. **D73**, 104002 (2006)
- [5] *S. Brandt und B. Brügmann*, Phys. Rev. Lett. **78**, 3606 (1997)
- [6] *B. Brügmann, W. Tichy und N. Jansen*, Phys. Rev. Lett. **92**, 211101 (2004)
- [7] *P. Diener et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 121101 (2006)

KURZGEFASST...

■ Massenverhältnis variabel?

Physiker haben Hinweise dafür entdeckt, dass sich das Verhältnis von Protonen- zu Elektronenmasse mit der Zeit verändert. Der Quotient, der derzeit mit $\mu = 1836,15267261(85)$ angegeben wird und als Naturkonstante gilt, hat sich demnach möglicherweise in 12 Milliarden Jahren um 0,02 Promille verkleinert. Die Resultate wurden durch Vergleich von Wasserstoffspektren im Labor mit Spektren von Wasserstoffwolken um weit entfernte Quasare erzielt.

E. Reinhold et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 151101 (2006)

■ Lasern ohne Inversion

Festkörper-Medien, die sich für Laser eignen, müssen nicht unbedingt eine Besetzungsinversion zeigen. Physikern vom Londoner Imperial College zufolge lässt sich die nötige Verstärkung auch mit einem Prozess namens „elektromagnetisch induzierte Transparenz“ erreichen, bei dem die Elektronen von Atomen im Grundzustand kohärent manipuliert werden. Ihnen gelang es erstmals, den Effekt an einem Festkörper, einem nanostrukturierten Halbleiter, zu zeigen.

M. Frogley et al., Nature Materials **5**, 175 (2006)