

Wenn Neutronensterne verschmelzen

Frankfurter Astrophysiker liefert Computersimulationen zur Überprüfung von Einsteins Relativitätstheorie

Weltweit arbeiten Astrophysiker noch immer mit einer Theorie, die bereits vor rund 100 Jahren aufgestellt wurde – die Einsteinsche Relativitätstheorie. Nahezu jeder hat den genialen Kopf dahinter vor Augen: Albert Einstein. Was aber ist der von Einstein prognostizierte gekrümmte Raum, was sind schwarze Löcher und Neutronensterne und wer sind die Menschen, die auf diesen Gebieten forschen? Luciano Rezzolla, seit Oktober 2013 Professor für Theoretische Astrophysik an der Goethe-Universität sowie Leiter einer Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam, ist einer dieser Forscher.

Vor Albert Einstein war Gravitation relativ einfach zu verstehen – es war die Kraft zwischen zwei Körpern. Mit Einstein änderte sich das grundlegend. Denn bei Einstein ist Gravitation eine Eigenschaft des Raumes und der Zeit. Er postulierte die Krümmung der Raumzeit. Das kann man sich nicht vorstellen, denn Raumzeit ist vierdimensional. „Nehmen wir ein dreidimensionales Beispiel – ein frisch bezogenes Bett. Das Laken ist ganz eben. Jetzt legen Sie einen schweren Stein auf das Bett. Es bildet sich eine Kuhle, das Laken ist ‚gekrümmt‘“, erklärt Rezzolla. „Wenn jetzt ein kleiner Stein über das Bett rollt, wird er durch diese Kuhle von seiner Bahn abgelenkt oder sogar in diese Kuhle fallen. Newton hätte angenommen, er wäre von der Masse des großen Steins angezogen worden. In Wirklichkeit – beziehungsweise nach der Relativitätstheorie – ist er aber durch die Krümmung, also durch die Auswirkung der schweren Masse auf das Laken, in diese Situation gekommen. Das war Anfang des letzten Jahrhunderts eine völlig neue Idee von Gravitation.“

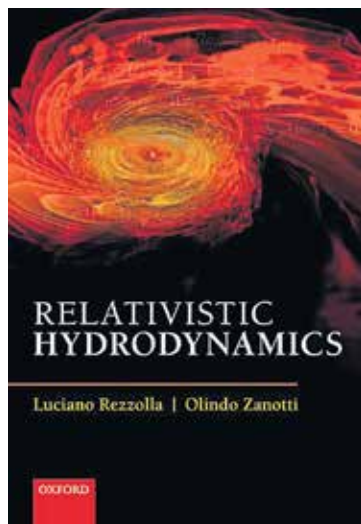
Überall beeinflusst Masse den Raum, auch im Weltraum – und das hat Konsequenzen. Durch die von Masse erzeugte Gravitation kann sogar Licht abgelenkt werden. Denn jede Form von Energie bekommt die Wirkung der Gravitation zu spüren. Und je größer eine Masse – also der Stein auf dem frischbezogenen Bett – desto größer ist die Gravitationskraft.

Was ist ein schwarzes Loch?

„Man stelle sich vor“, erklärt der in Mailand geborene Forscher, „unsere Sonne mit ihrem Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern könnten wir auf einen Durchmesser von 10 Kilometern zusammenpressen – dann würde sie zu einem Neutronenstern. Mit einer sehr starken Gravitation. So stark, dass wir Menschen, die das ohnehin nicht überleben würden, durch die

Gravitationskraft auf die Größe eines Kubikmillimeters zusammengepresst würden. Ein Stück dieses Neutronensterns in der Größe eines Zuckerwürfels entspräche der Masse der gesamten Alpen.“

Verkleinert man in unserem Gedankenexperiment den Durchmesser der Sonne weiter bis auf einen Kilometer, dann hat man ein schwarzes Loch. Also eine immense Masse, die sich auf einen einzigen winzigen Punkt konzentriert. Alles was sich diesem schwarzen Loch bis auf eine bestimmte



In dem September 2013 erschienen, in Fachkreisen viel beachteten Buch „Relativistic Hydrodynamics“ befasst sich Prof. Rezzolla mit den hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten, mit deren Hilfe man die Dynamik vieler kosmischer Quellen nachvollziehen kann. Das Anwendungsgebiet der Gesetze der Fluidynamik ist vielfältig und reicht von der Ausbreitung von Schockwellen bei Supernovae, der Aufsammlung von Materie durch Schwarze Löcher bis zur Bildung der ersten großräumigen Strukturen im Universum.

Entfernung, den Ereignishorizont, nähert, wird verschluckt. Diese für Astrophysiker hochinteressante Grenze läge beim Beispiel unserer Sonne bei 1,5 Kilometern. Nicht einmal das Licht könnte nach Pas-

sieren dieser Grenze jemals wieder aus dem schwarzen Loch heraus. Deshalb können wir diese „Mini-Sterne“ auch nicht sehen.

Wie entstehen schwarze Löcher?

In den meisten Sternen verschmelzen Wasserstoffatome zu Heliumatomen und erzeugen dabei Energie. Das Sterben eines Sterns beginnt, wenn der Wasserstoff verbraucht ist. Das entstandene Helium fusioniert zum nächst schwereren Element, wobei neue Energie entsteht. Dies setzt sich fort, bis sich Eisen gebildet hat. Wenn das gebildete Eisen ein bestimmtes Gewicht überschreitet, fällt der Stern innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde in sich zusammen. Durch den dabei entstehenden Druck werden die äußeren Schichten mit Geschwindigkeiten von einigen zehntausend Kilometern pro Sekunde weggeschleudert. Der kollabierende Stern leuchtet als Supernova Milliarden Mal heller als unsere Sonne. Und übrig bleibt ein schwarzes Loch, sofern der Ursprungstern schwerer als zwanzig Sonnen war. War der Ursprungstern leichter als zwanzig Sonnen wird er zu einem Neutronenstern.

„Wir können inzwischen sehr präzise berechnen, wie Raum und Zeit durch das immense Gravitationsfeld eines schwarzen Loches gekrümmt werden und wie Licht und Materie sich in dessen Umfeld bewegen“, erklärt Rezzolla. Für den Aufbau eines Beobachtungssystems, mit dem erstmals exakte Bilder eines schwarzen Lochs aufgenommen werden können, hat der Europäische Forschungsrat (ERC) 14 Millionen Euro bewilligt. Ein Team unter der Leitung von Rezzolla sowie Professor Heino Falcke, Radboud-Universität Nijmegen, und Professor Michael Kramer, Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, wird damit Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins überprüfen.

Sterne sind gerne zu zweit

Rezzollas besonderes Interesse gilt so genannten binären Sternen. „Die meisten Sterne sind gerne zu zweit – das ist wie bei uns Menschen“, vermerkt der dreifache Familienvater lächelnd. Manchmal sind es zwei Neutronensterne, die man sehr genau vermessen kann. Die beiden Sterne kreisen umeinander, kommen sich immer näher, werden dabei immer schneller und verschmelzen schließlich zu einem schwarzen Loch.

„Nebenbei bemerkt wenden wir“, so der Physiker, „in unserem Alltag Effekte der Relativitätstheorie viel öfter an, als es uns bewusst ist – auch wenn diese Effekte sehr schwach sind.“ Jedes GPS-gesteuerte Navigationssystem nutzt Einsteins Erkenntnis, dass Zeit abhängig ist von der Krümmung des Raumes. Da das Gravitationsfeld auf der Erde größer ist als bei Satelliten, die die Erde umkreisen, gehen dort oben die Uhren – minimal – schneller. Nur Dank dieser Zeitdifferenz ist es möglich, die genaue Position auf der Erde über zwei Satelliten zu bestimmen. „Das ist ein wunderbares Beispiel, wie Grundlagenforschung zu einer allgemeinen Anwendung geführt hat, auch wenn keiner zunächst daran gedacht hat“, merkt Rezzolla an. „Man weiß nie, wozu Wissen gebraucht werden wird – nur dass es gebraucht werden wird.“

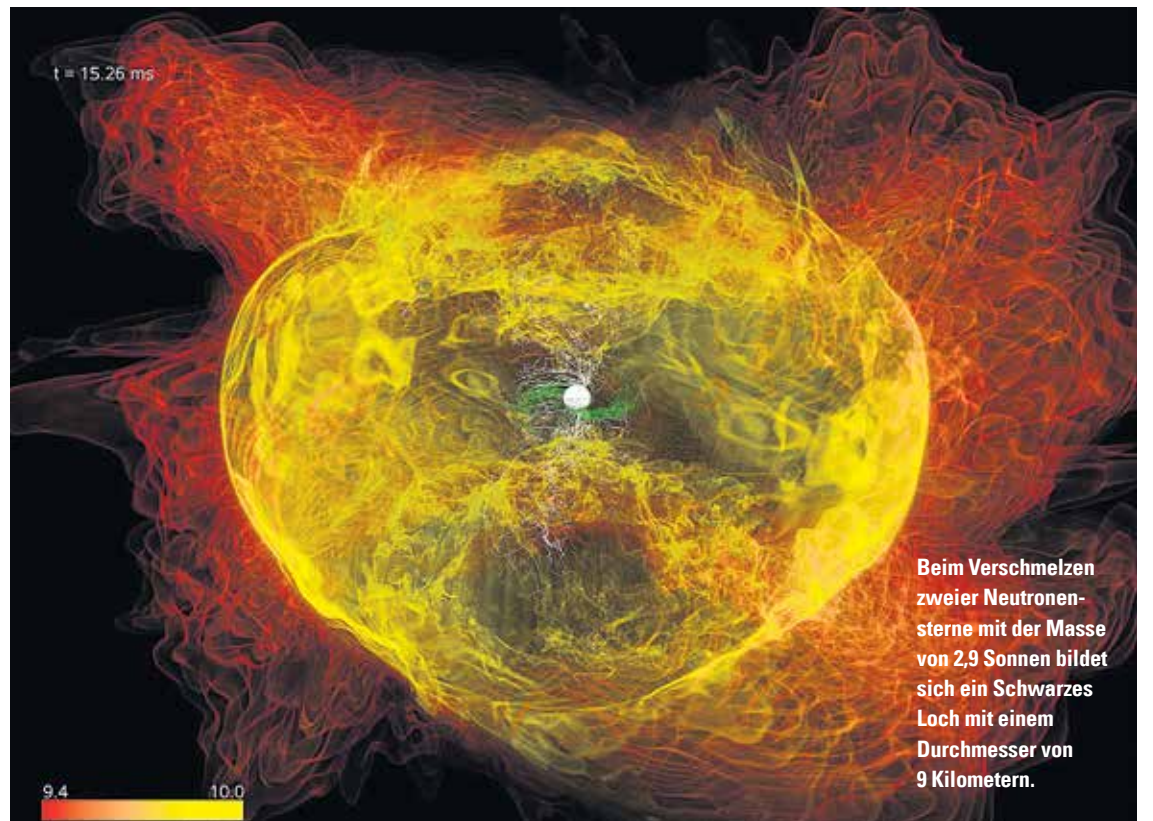
Gekräuselte Raumzeit

Etwas Besonders sind Gravitationswellen. Diese Wellen entstehen immer, wenn sich Masse bewegt – der schwere Stein auf dem Laken oder die Hand beim Winken. Nur sind diese Gravitationswellen viel zu klein, um sie jemals messen zu können. Anders ist es, wenn sich so etwas Schweres sehr schnell bewegt. Binäre Systeme von Neutronensternen und/oder schwarzen Löchern sind dafür perfekt geeignet. Sie bewegen sich mit Geschwindigkeiten von mehreren zehntausend Kilometern pro Se-

kunde – also nahezu mit Lichtgeschwindigkeit – und schicken dabei Gravitationswellen aus, die die Abstände zwischen Objekten verändern. Diese winzigen Kräuselungen der Raumzeit gehören zu den wenigen von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Phänomenen, die bislang nicht direkt nachgewiesen werden konnten. Sie sind sehr schwach, sehr weit entfernt und gehen allzu leicht im „Rauschen“ einer Messung unter. Selbst bei einer im kosmischen Maßstab vergleichsweise nahen Supernova in einer Nachbargalaxie verändert die entstehende Gravitationswelle den Abstand zwischen Erde und Sonne nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms, und das auch nur für wenige tausendstel Sekunden. Messung also nahezu unmöglich?

Es sei denn, man weiß genau, wonach man sucht. Denn verschmelzende Neutronensterne erzeugen zusätzlich zu riesigen Mengen an Gammastrahlung auch Gravitationswellen. Rezzolla konnte in einer sechs Wochen dauernden Simulationsberechnung an einem Supercomputer zum ersten Mal diesen, insgesamt nur 35 Millisekunden dauernden Prozess zeigen und dabei auch die Signalform der Gravitationswellen simulieren. Mit seinen Berechnungen kommt der einzige theoretische Astrophysiker der Goethe-Universität nun seinen experimentellen Kollegen zuhelfe. Die simulierten Wellensignale sollen helfen, im Datenschungel echte Gravitationswellen zu entdecken. Denn wenn man weiß, wonach man sucht, hat man auch eine Chance, es zu finden. Rezzolla erwartet die erste wichtige Messung gegen Ende dieses Jahrzehnts. Sie würde wieder einmal Einsteins Relativitätstheorie bestätigen. Schließlich ist es die bislang beste Gravitationstheorie, die wir kennen.

Beate Meichsner



Beim Verschmelzen zweier Neutronensterne mit der Masse von 2,9 Sonnen bildet sich ein Schwarzes Loch mit einem Durchmesser von 9 Kilometern.