

### **Kosmischen Geheimnissen auf der Spur:**

#### **Kollidierende Neutronensterne und Multimessenger-Astronomie**

Die moderne Astrophysik ist dadurch geprägt, dass einzelne astrophysikalische Ereignisse mit unterschiedlichsten Untersuchungsmethoden analysiert und Erkenntnisse verschiedener Analysen miteinander kombiniert werden. Solche Untersuchungen beinhalten die Studie verschiedener Botensignale, darunter elektromagnetische Wellen, Neutrinos, kosmische Strahlung und Gravitationswellen. Die Multimessenger-Astronomie beschäftigt sich nun mit der Verbindung dieser unterschiedlichen Signaltypen und ermöglicht es dabei, ein besseres Verständnis physikalischer Vorgänge zu gewinnen. Aufgrund einer Vielzahl von theoretischen und experimentellen Fortschritten in den letzten Jahren ist die Multimessenger-Astronomie ein schnell wachsendes Forschungsgebiet, basierend auf der internationalen Zusammenarbeit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit unterschiedlicher Expertise. Durch die Kombination unterschiedlicher Methoden können neue, spannende Erkenntnisse gewonnen und noch offene, ungeklärte Grundfragen der modernen Astrophysik beantwortet werden, so zum Beispiel „Wie schnell expandiert unser Universum?“ und „Wie verhält sich Materie bei extrem hohen Dichten?“.

Zu den spannendsten astrophysikalischen Objekten, die man im Rahmen der Multimessenger-Astronomie untersuchen kann, gehören Neutronensterne. Insbesondere binäre Neutronensternsysteme, also Doppelsternsysteme bestehend aus zwei Neutronensternen, sind einzigartige extraterrestrische Laboratorien, mit deren Hilfe diese beiden und viele weitere Fragen in Zukunft beantwortet werden können. Neutronensterne sind die Überreste von Supernova-Explosionen schwerer Sterne. Bei einer Masse zwischen 1 und 2 Sonnenmassen besitzen Neutronensterne nur einen Radius von 10 bis 15 Kilometern. Damit gehören sie zu den dichtesten und kompaktesten Objekten in unserem Universum. Ein einziger Teelöffel voller Neutronensternmaterial besäße eine Masse von ungefähr 1 Milliarde Tonnen.

Umkreisen sich zwei solcher Neutronensterne in einem Binärsystem, senden sie kontinuierlich Gravitationswellen aus, winzige Veränderungen der Raumzeit, wie sie vor über 100 Jahren erstmals von Albert Einstein vorausgesagt wurden. Um die Bewegung und Kollision der Sterne zu beschreiben, muss man die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie lösen. Diese sind so komplex, dass auf Hochleistungsrechnern durchgeführte Compu-

tersimulationen mehrere Wochen benötigen, um die ausgesendeten Gravitationswellensignale zu berechnen. Im Rahmen meiner Arbeit haben Kollegen und ich viele Hundert Simulationen durchgeführt, um systematisch den Einfluss verschiedener Parameter wie der Neutronensternmasse, der Eigenrotation der Neutronensterne oder der inneren Zusammensetzung der Sterne genau zu bestimmen. Unsere Ergebnisse haben wir im Rahmen einer Datenbank frei zugänglich gemacht. So können andere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unsere Simulationen frei nutzen und müssen nicht selbst die notwendigen Computerprogramme entwickeln und kostspielige Simulationen durchführen.

Leider ist es aufgrund der langen Laufzeit einzelner Simulationen und der damit verbundenen Kosten nicht möglich, alle Szenarien vorab zu berechnen, und man benötigt einfachere Modelle, die es erlauben, schnell und effizient Gravitationswellensignale zu berechnen. In diesem Zusammenhang haben wir aufbauend auf unseren Simulationen neue Verfahren entwickelt, die in weniger als einer Sekunde ein Gravitationswellensignal kollidierender Neutronensterne vollständig berechnen können. Diese Modelle sind derzeit ein wesentlicher Bestandteil der Analyse experimenteller Daten, wie sie von der LIGO Scientific - und Virgo Kollaboration gesammelt werden. Ohne solche Wellenformmodelle wäre es unmöglich, Informationen aus den gemessenen Gravitationswellen zu extrahieren. Jedoch ermöglichen numerisch-relativistische Simulationen nicht nur die Berechnung von Gravitationswellen, sie geben auch Aufschluss darüber, wie sich die Neutronensternmaterie verhält und wie viel Materie während der Kollision aus dem System geschleudert wird. Aufgrund der hohen Neutronendichte können sich innerhalb dieses Materieauswurfs die schweren Elemente des Periodensystems, beispielsweise Gold und Platin, durch schnellen Neutroneneinfang bilden. Damit sind Neutronensternkollisionen eine der wichtigsten „Produktionsfabriken“ schwerer Elemente in unserem Universum. Leben, so wie wir es auf der Erde kennen, wäre ohne diese Zusammenstöße schlichtweg unmöglich.

Durch die Erzeugung der schweren Elemente heizt sich dieses Material auf, wodurch einige Stunden bis einige Wochen nach dem Zusammenstoß der Sterne eine sogenannte Kilonova zu sehen ist. Eine Kilonova ist ein helles, elektromagnetisches Signal, das charakteristisch für Neutronensternkollisionen ist und mit der Zeit abklingt. Ähnlich wie bei der Analyse von Gravitationswellen war es uns möglich, theoretische Modelle zu entwickeln, die die gemessenen Beobachtungsdaten erklären. Durch einen Abgleich der Daten mit unseren Modellrechnungen erhält man schließlich weitere Informationen über die kollidierten Sterne und die vorherrschenden physikalischen Vorgänge. Verbindet man nun die Analyse von Gravitationswellen mit der Studie von elektromagnetischen Signalen, die beim Zusammenstoß zweier

Neutronensterne ausgesendet werden, erhält man im Rahmen der Multimessenger-Astronomie einen genauen Einblick in die Zusammensetzung dieser ultrakompakten Objekte.

Erstmalig war es am 17. August 2017 möglich, Gravitationswellen und elektromagnetische Strahlung von einer Neutronensternkollision zu messen. An diesem wissenschaftlichen Durchbruch waren viele Tausend Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beteiligt. Im Rahmen der von uns durchgeführten Multimessenger-Untersuchung werden nun diese verschiedenen Informationen zu einem Gesamtbild kombiniert. Dabei fließen auch Berechnungen aus dem Gebiet der Kernphysik sowie Radio- und Röntgenmessungen einzelner Neutronensterne mit ein. Man erhält somit ein gutes Verständnis über die Zustandsgleichung, die das Innere eines Neutronensternes beschreibt, mit anderen Worten: wie sich Materie unter den höchsten Dichten, die im Universum vorkommen, verhält. Allerdings ist dies nicht alles. Mithilfe eines solchen Multimessenger-Verfahrens kann auch die Distanz zur Neutronensternkollision bestimmt werden. Diese Distanzbestimmung sowohl durch die gemessenen Gravitationswellen als auch durch die detektierte Kilonova können wir dazu nutzen, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Universums, gemessen durch die Hubble-Konstante, zu bestimmen. Damit gelingt es durch Verbindung von numerischer Relativitätstheorie, Gravitationswellenastronomie und Multimessenger-Astronomie, nicht nur Informationen über die subatomare Struktur von Materie, sondern auch Vorhersagen auf kosmischen Skalen zu liefern.