

(German version see below)

## **The perfect explosion in space — The mystery of the spherical kilonova**

**When neutron stars collide, they produce an explosion that, contrary to what was believed until recently, is shaped almost like a perfect sphere. Although how this is possible is still a mystery, the discovery may provide a new key to measuring the age of the Universe. The discovery was made by an international collaboration with participation of researchers of the GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt and led by astrophysicists from the University of Copenhagen. The result has been published in the journal Nature.**

Kilonovae are giant explosions occurring when two neutron stars orbit each other and finally collide. The occurring extreme physical conditions are responsible for creating heavy elements, e. g. the atoms in gold jewelry and the iodine in our bodies. Furthermore, kilonovae produce light, which allows for the observation of the explosions with telescopes even at cosmic distances.

But there is still a great deal we do not know about this violent phenomenon. When a kilonova was detected at 140 million light-years away in 2017, it was the first time scientists could gather detailed data. Scientists around the world are still interpreting the data from this colossal explosion, including Albert Sneppen and Professor Darach Watson from the University of Copenhagen, as well as Privatdozent Andreas Bauswein and Dr. Oliver Just of GSI's Theory research department.

One of the open questions concerns the geometrical shape of the kilonova, i.e. the propagation velocity of the explosion in different directions. This problem has been addressed by the international research team led by Sneppen and Watson. The researchers have analyzed the velocity of the explosion in different directions: along the line of sight — that is, the velocity of the material moving towards our Earth — and perpendicular to it. Along the line of sight, the researchers take advantage of the Doppler effect known from approaching fire trucks. Just as the pitch of the siren changes at high speed, the properties of the light from the kilonova explosion, or more precisely from the so-called spectral lines, can be used to determine the velocity. The velocity perpendicular to the line of sight results from the size of the emitting area, which can be derived from the brightness and color of the kilonova.

### **The spherical shape is a mystery**

The analysis surprises: The explosion spreads equally fast in all directions. The kilonova from 2017 is shaped like a sphere. "You have two super-compact stars that orbit each other 100 times a second before collapsing. Our intuition, and most previous models, say that, due to the enormous angular momentum in the system, the explosion cloud created by the collision must have a rather asymmetrical shape," says Albert Sneppen, PhD student at the Niels Bohr Institute and first author of the study published in the journal Nature. How the kilonova can be spherical is a real mystery.

The GSI team in particular contributed simulations of the explosion to test different scenarios and theoretical interpretations to the publication. The researchers were able to show that, even under somewhat speculative assumptions, there is no mechanism that will

necessarily lead to a spherical explosion, although some simulations fit the observation quite well. “Therefore, one possibility could also be that it is pure coincidence. In any case, the observation is exciting because it helps to better understand models of the kilonova explosion and thus the details of element synthesis in these events,” says Oliver Just. Andreas Bauswein adds: “With further measurements of neutron star mergers, we will certainly be able to better assess this result. We expect that with new observatories now available, many additional kilonovae will be discovered in the coming years.”

### **A New Cosmic Ruler**

The shape of the explosion is also interesting for an entirely different reason: “Among astrophysicists there is a great deal of discussion about how fast the Universe is expanding. The speed tells us, among other things, how old the Universe is. And the two most commonly used methods that exist to measure it disagree by about a billion years. Here we may have a third method that can complement and be tested against the other measurements,” says Albert Sneppen.

The so-called “cosmic distance ladder” is the method used today to measure how fast the Universe is growing. This is done simply by calculating the distance between different objects in the universe, which act as rungs on the ladder. “If they are bright and mostly spherical, we can use kilonovae as a new way to measure the distance independently – a new kind of cosmic ruler,” says Darach Watson and continues: “Knowing what the shape is, is crucial here, because if you have an object that is not spherical, it emits differently, depending on your sight angle. A spherical explosion provides much greater precision in the measurement.”

The study is a first result of the newly founded HEAVYMETAL collaboration, which was recently awarded an ERC Synergy grant. (CP)

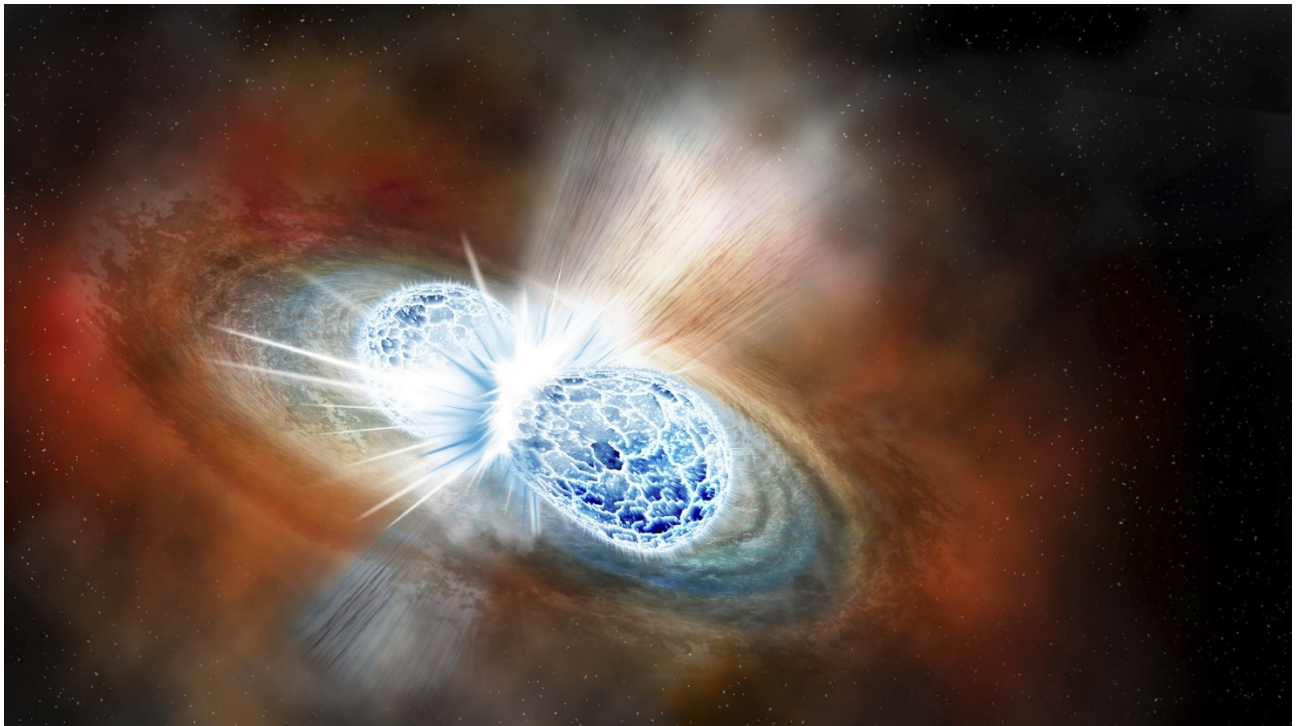
### **About kilonovae:**

- Neutron stars are extremely compact stars that consist mainly of neutrons. They are typically only about 20 kilometers across, but weigh one and a half to two times as much as the Sun. A teaspoon of neutron star matter weighs about as much as Mount Everest.
- When two neutron stars collide, the phenomenon of a kilonova occurs. It is a radioactive, bright fireball that expands at enormous speed and consists mostly of heavy elements formed in the merger and its aftermath. These newly formed elements are ejected into space and mix with gas clouds, which form a new generation of stars and planets.
- Element synthesis in kilonovae was predicted in 1974. In 2017, detailed data from a kilonova was obtained for the first time, when the detectors LIGO (in the USA) and Virgo (in Europe) succeeded in measuring gravitational waves from a neutron star merger and thus indicating the position of the kilonova in the sky. Telescopes then discovered the kilonova AT2017gfo close to a galaxy 140 million light years away.

### **Further information**

- [Publication in scientific journal Nature](#)
- [Press release of the University of Copenhagen](#)

Figure 1:



**Artistic illustration of a kilonova**

Picture: A. Snepken

Figure 2:



**Illustration of a spherical explosion.**

Picture: A. Snepen

## **Die perfekte Explosion im Weltraum – Das Rätsel der sphärischen Kilonova**

**Wenn Neutronensterne kollidieren, entsteht eine Explosion, die – anders als bis vor kurzem angenommen – die Form einer nahezu perfekten Kugel hat. Wie dies möglich ist, ist zwar immer noch ein Rätsel, aber die Entdeckung könnte einen neuen Schlüssel zur Messung des Alters des Universums liefern. Die Entdeckung wurde von einem internationalen Team unter Beteiligung von Forschenden des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt und unter Leitung von Wissenschaftlern der Universität Kopenhagen gemacht. Die Ergebnisse sind in der Zeitschrift Nature veröffentlicht.**

Kilonovae sind gigantische Explosionen, die entstehen, wenn zwei Neutronensterne einander umkreisen und schließlich miteinander kollidieren. Die dabei auftretenden extremen physikalischen Bedingungen sind für die Entstehung schwerer Elemente verantwortlich, beispielsweise die Atome im Goldschmuck und das Jod in unseren Körpern. Des Weiteren erzeugen Kilonovae Licht, so dass man diese Explosionen auch noch in kosmischen Entfernungen mit Teleskopen beobachten kann.

Aber es gibt noch viel, was wir über dieses gewaltige Phänomen nicht wissen. Als 2017 in 140 Millionen Lichtjahren Entfernung eine Kilonova entdeckt wurde, konnten zum ersten Mal detaillierte Daten gesammelt werden. Wissenschaftler\*innen auf der ganzen Welt sind immer noch dabei, die Daten dieser kolossalen Explosion zu interpretieren, darunter Albert Sneppen und Professor Darach Watson von der Universität Kopenhagen, sowie Privatdozent Andreas Bauswein und Dr. Oliver Just aus der GSI-Forschungsabteilung Theorie.

Eine der offenen Frage betrifft die geometrische Form der Kilonova, also die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Explosion in verschiedenen Richtungen. Dieses Problems hat sich das internationale Forschungsteam rund um Sneppen und Watson angenommen. Die Forschenden haben die Geschwindigkeit der Explosion in verschiedenen Richtungen analysiert: entlang der Sichtlinie – also die Geschwindigkeit des Materials, das sich in Richtung unserer Erde bewegt – und senkrecht dazu.

Entlang der Sichtlinie machen sich die Forschenden den Dopplereffekt zunutze, den man vom herannahenden Feuerwehrauto kennt. Wie sich die Tonhöhe der Sirene mit hoher Geschwindigkeit verändert, so kann man auch aus den Eigenschaften des Lichts der Kilonova-Explosion, genauer aus den sogenannten Spektrallinien, die Geschwindigkeit ablesen. Die Geschwindigkeit senkrecht zur Beobachtungslinie ergibt sich aus der Größe der strahlenden Fläche, die sich aus Helligkeit und Farbe der Kilonova ableiten lässt.

### **Die Kugelform ist ein Rätsel**

Die Überraschung dieser Analyse: Die Explosion breitet sich in alle Richtungen gleich schnell aus. Die Kilonova aus dem Jahr 2017 hat die Form einer Kugel. „Man hat zwei superkompakte Sterne, die sich 100 Mal pro Sekunde umkreisen, bevor sie kollabieren. Unsere Intuition und die meisten der bisherigen Modelle besagen, dass die bei der Kollision entstehende Explosionswolke aufgrund des enormen Drehimpulses im System eine eher asymmetrische Form haben muss“, sagt Albert Sneppen, Doktorand am Niels-Bohr-Institut und Erstautor der in der Zeitschrift Nature veröffentlichten Studie. Wie die Kilonova kugelförmig sein kann, ist ein echtes Rätsel.

Das GSI-Team hat insbesondere Simulationen der Explosion zum Test verschiedener Szenarien und theoretische Interpretationen zu der Veröffentlichung beigetragen. Die Forschenden konnten zeigen, dass es selbst unter recht spekulativen Annahmen keinen Mechanismus gibt, der zwangsläufig zu einer sphärischen Explosion führen muss, wenngleich einige Simulationen recht gut zu der Beobachtung passen. „Eine Möglichkeit könnte daher auch sein, dass es sich um eine pure Koinzidenz handelt. Spannend ist die Beobachtung auf alle Fälle, denn sie hilft Modelle der Kilonova-Explosion besser zu verstehen und damit auch Details der Elementenstehung in diesen Ereignissen“, sagt Oliver Just. Andreas Bauswein ergänzt: „Mit Messungen weiterer Neutronensternverschmelzungen wird man dieses Ergebnis sicher besser beurteilen können. Wir erwarten, dass mit neuen, jetzt zur Verfügung stehenden Observatorien in den kommenden Jahren viele weitere Kilonovae entdeckt werden.“

### **Ein neues kosmisches Lineal**

Die Form der Explosion ist auch aus einem ganz anderen Grund interessant: „Unter Astrophysiker\*innen wird viel darüber diskutiert, wie schnell das Universum expandiert. Die Geschwindigkeit sagt uns unter anderem, wie alt das Universum ist. Und die beiden hauptsächlich benutzten Methoden, die es gibt, um dies zu messen, weichen um etwa eine Milliarde Jahre voneinander ab. Hier haben wir vielleicht eine dritte Methode, die die anderen Messungen ergänzt und mit ihnen verglichen werden kann“, sagt Albert Sneppen. Die so genannte „kosmische Entfernungsleiter“ ist die Methode, die heute verwendet wird, um zu messen, wie schnell das Universum wächst. Dazu wird der Abstand zwischen verschiedenen Objekten im Universum berechnet, die als Sprossen auf der Leiter fungieren. „Wenn sie hell und meist kugelförmig sind, können wir die Kilonovae als eine neue Möglichkeit nutzen, um die Entfernung unabhängig zu messen – eine neue Art von kosmischem Lineal“, sagt Darach Watson und fährt fort: „Die Kenntnis der Form ist hier entscheidend, denn wenn ein Objekt nicht kugelförmig ist, strahlt es je nach Blickwinkel anders. Eine kugelförmige Explosion ermöglicht eine viel genauere Messung.“ Die Arbeiten sind ein erstes Resultat der neu gegründeten HEAVYMETAL-Kollaboration, die vergangenes Jahr mit einem ERC Synergy Grant ausgezeichnet wurde. (CP)

### **Über Kilonovae:**

- Neutronensterne sind extrem kompakte Sterne, die hauptsächlich aus Neutronen bestehen. Sie haben in der Regel nur einen Durchmesser von etwa 20 Kilometern, wiegen aber ein- bis zwei Mal soviel wie die Sonne. Ein Teelöffel Neutronensternmaterie wiegt etwa so viel wie der Mount Everest.
- Wenn zwei Neutronensterne miteinander kollidieren, entsteht das Phänomen einer Kilonova. Es handelt sich dabei um einen radioaktiven, hell leuchtenden Feuerball, der sich mit enormer Geschwindigkeit ausdehnt und hauptsächlich aus schweren Elementen besteht, die bei der Verschmelzung und ihren Nachwirkungen entstanden sind. Diese neu gebildeten Elemente werden in den Weltraum geschleudert und mit Gaswolken vermischt, aus denen eine neue Generation von Sternen und Planeten hervorgeht.

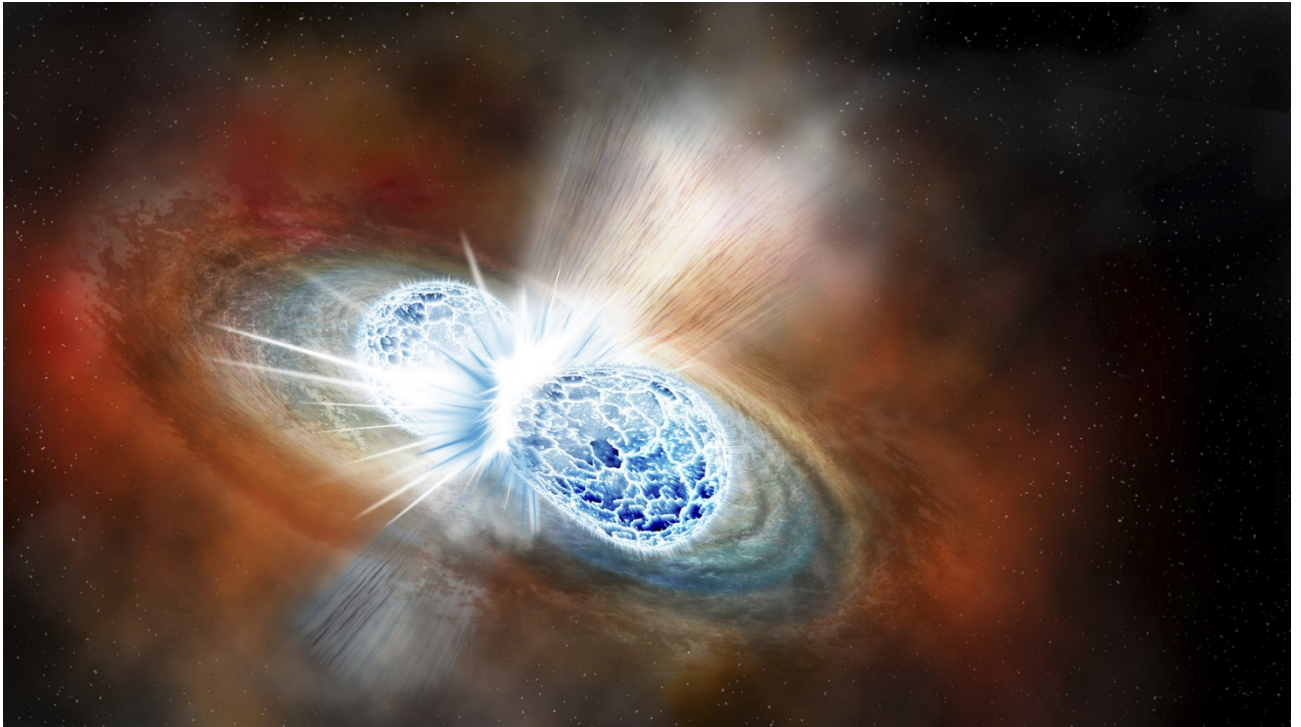
- Die Elemententstehung in Kilonovae wurde 1974 vorhergesagt. Im Jahr 2017 wurden zum ersten Mal detaillierte Daten von einer Kilonova gewonnen, als es den Detektoren LIGO (in den USA) und Virgo (in Europa) gelang, Gravitationswellen einer Neutronensternverschmelzung zu detektieren und die Position der Kilonova am Himmel einzugrenzen. Teleskope fanden schließlich die Kilonova AT2017gfo in der Nähe einer 140 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie.

#### Weitere Informationen

- [Veröffentlichung im Fachjournal NATURE](#) (Englisch)
- [Pressemitteilung der "University of Copenhagen"](#) (Englisch)



Abbildung 1:



**Künstlerische Darstellung einer Kilonova.**

Bild: A. Sneppen



Abbildung 2:



**Darstellung einer sphärischen Explosion.**

Bild: A. Sneppen

