

Nobelpreis für Physik 2020

Uwe Spiekermann

Der diesjährige Nobelpreis geht zur Hälfte an den britischen Mathematiker und theoretischen Physiker **Roger Penrose** (Oxford) und zur anderen Hälfte an die amerikanische Astrophysikerin **Andrea Ghez** (Los Angeles) und den deutschen Astrophysiker Reinhard Genzel (Garching).



Roger Penrose



Andrea Ghez



Reinhard Genzel [1]

Der Preis würdigt die theoretische Erforschung **Schwarzer Löcher** und den Nachweis eines solchen Giganten im Zentrum der Milchstraße. Dabei geht es wie bereits bei den Preisträgern 2019, den Amerikaner **James Peebles** und die beiden Schweizer **Michael Mayor** und **Didier Queloz**, als es um die Entwicklung des Kosmos und die Entdeckung von Exoplaneten ging, um kosmische Fragen. Die Geschichte der Erforschung Schwarzer Löcher geht zurück auf **Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (ART)** von 1915. Die ART führt die Gravitation auf das geometrische Phänomen der **gekrümmten Raumzeit** zurück. Mit seinen Feldgleichungen zur ART erschütterte Einstein die Vorstellung, Raum und Zeit seien unbeeinflussbar. Sie gehören untrennbar als vierdimensionale Raumzeit zusammen und werden durch das beeinflusst, was sich in ihnen abspielt.

Massen und Energien krümmen die Raumzeit. Gravitation heißt, dass andere Massen dieser Krümmung folgen.

Schon 1916 veröffentlichte der deutsche Astronom **Karl Schwarzschild** eine erste Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen. Bei einem bestimmten Radius divergiert sie, wird unendlich, eine Singularität tritt auf.

Heute weiß man, dass der Radius an dieser Stelle, wenn die Masse nur groß genug ist, den Horizont eines Schwarzen Lochs beschreibt, den **Schwarzschildradius**, ab dem sich nichts mehr der Gravitation der extrem kompakten Masse entgegensetzen, ab dem nichts mehr von innen nach außen dringen kann.

Karl Schwarzschild berechnete den Schwarzschildradius zu $R = 2Gm/c^2$, wobei G die Gravitationskonstante, m die Masse eines vollständig kollabierten Sterns und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Beispiel: Sonne $R = 3 \text{ km}$

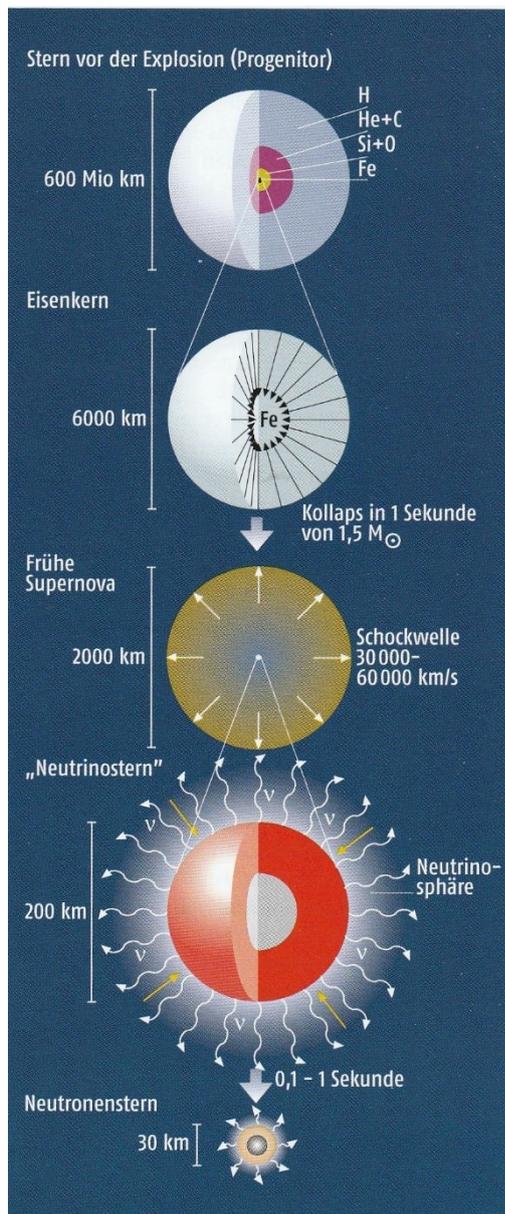
Erde $R = 0,9 \text{ cm}$

1930 entdeckt der amerikanische Astrophysiker **Chandrasekhar** die Grenzmasse für die Entstehung **Weißer Zwerge** (möglicher Endzustand in der Entwicklung eines Sterns, wenn die Kernenergiequellen erschöpft sind, z. B. Sirius B). Ein Stern mit mehr als 1,4 Sonnenmassen wird in der Endphase zu einem **Neutronenstern**.

Ein massereicher Stern wird am Ende seines Lebens nach Einstellen der thermonuklearen Prozesse instabil, sein Eisenkern kollabiert, wobei mit der Dichte die Energie der Gasparkeln ansteigt. Freie Elektronen können dadurch in die Atomkerne eindringen, dort mit Protonen reagieren und sie in Neutronen umwandeln, wobei jede Umwandlung mit dem Ausstoß eines Neutrinos verbunden ist.

s. Abb. [2]

1939 prognostiziert der Physiker **Robert Oppenheimer** die Existenz Schwarzer



Löcher aus Erwägungen zur Entwicklungsgeschichte der Sterne. Nach Oppenheimer wird dieses Endstadium als Neutronenstern nur erreicht, wenn die Massengrenze von 3,2 Sonnenmassen nicht überschritten wird. Ist ein Stern massereicher, entsteht ein Schwarzes Loch.

Anfang der sechziger Jahre gab es erste Hinweise, dass es im Kosmos tatsächlich Objekte geben könnte, die der theoretischen Beschreibung eines Schwarzen Lochs entsprechen. Bestimmte ferne Galaxien, sogenannte

Quasare

(**Quasi-Stellar Radio Source**, „sternähnliche Radioquelle“) strahlen in ihrem Zentrum tausendmal so hell wie die gesamte Milchstraße, was nur durch eine extreme Massenkonzentration erklärt werden konnte.

Die Beobachtung gab den Theoretikern neuen Aufwind. In den sechziger Jahren gelang es Roger Penrose zusammen mit anderen mit Hilfe der Mathematik zu zeigen, dass das Auftreten von Singularitäten eine reale Eigenschaft der Raumzeit darstellt.

Eine grundlegende Erkenntnis der Kosmologie geht auf Roger Penrose und **Stephen**

Hawking zurück, der **Satz von Hawking-Penrose**, nach dem in den Einsteinschen Feldgleichungen notwendig Lösungen mit Singularitäten (z. B. Urknall oder Schwarze Löcher) existieren. Nach Penrose sind Singularitäten aber immer durch Ereignishorizonte abgeschirmt. Nackte Singularitäten kommen nicht vor. So wenig wie man sich in der Zeit rückwärts bewegen kann, ist es möglich, aus einem Schwarzen Loch zu entkommen.

Schwarze Löcher konnten daraufhin zum Verständnis der Quasare dienen. Die Materie, die sich in großen Scheiben in das Zentrum der Galaxien in das sich dort befindende Schwarze Loch hineinbewegt, wird aufgeheizt und erzeugt so eine gigantische Leuchtkraft.

Bis zur Jahrtausendwende fehlte ein empirischer Beweis für die Existenz Schwarzer Löcher. Den konnten auf indirektem Weg erst Andrea Ghez und Reinhard Genzel mit ihren Mitarbeitern liefern.

Dafür richteten sie ihre Teleskope auf das Zentrum der Milchstraße, eine dicht von Sternen, Gas- und Staubwolken besiedelte und damit unübersichtliche Region mit der zentralen Radioquelle **Sagittarius A*** in etwa 26 000 Lichtjahren Entfernung. Ein Objekt mit mehreren Millionen Sonnenmassen im Zentrum müsste Sterne in seiner Nähe eigentlich stark beschleunigen. Aus der Bewegung der Sterne um das Galaktische Zentrum sollte die dortige Massenverteilung abgeleitet und damit die Frage beantwortet werden, welche Art von Objekt sich dort befindet. Diese Strategie erfordert für die Wiedergabe der Sternbewegungen höchste Präzision und lange Beobachtungszeiten, was nur Teleskope am Erdboden leisten können, die dabei jedoch von Bewegungen in der Erdatmosphäre gestört werden.

Ghez und Genzel entwickelten Lösungen für die Probleme wie Lichtdetektoren, die Strahlung im Nahinfrarot auffangen, welche interstellare Staubwolken einigermaßen gut durchdringen kann. Zudem entwickelten sie Methoden, mit denen sich die Luftunruhe in der Atmosphäre korrigieren lässt, die sogenannte **adaptive Optik**.

Das Team Ghez nutzte dafür das Keck-Observatorium auf Hawaii, Genzels Team die Europäische Südsternwarte in Chile und richteten über drei Jahrzehnte hinweg ihre Teleskope auf das galaktische Zentrum.

Die Ergebnisse beider Gruppen stimmten schließlich überein. Insbesondere die Bewegung des Sterns S2, der in knapp 16 Jahren das Zentrum der Milchstraße umkreist, lieferte den Nachweis, dass sich dort ein Schwarzes Loch mit einer Masse von 4 Millionen Sonnenmassen befindet. Dieses Resultat wurde seitdem vielfach bestätigt.

Entdecken können wir Schwarze Löcher allein aufgrund ihrer gravitativen Beeinflussung der sie umgebenden Materie und Strahlung im Röntgenbereich. Einen weiteren indirekten Beweis für Schwarze Löcher lieferten z. B. die Messungen des **Gravitationswellendetektors LIGO**. Dabei konnten die Forscher

2015 zwei massereiche Objekte von 31 und 19 Sonnenmassen beobachten, die miteinander verschmolzen.

Werden riesige Massen, wie die von Schwarzen Löchern und Neutronensternen, beschleunigt, versetzt das die Raumzeit so stark in Schwingung, dass das Gravitationswellenecho noch in großer Entfernung nachweisbar ist.

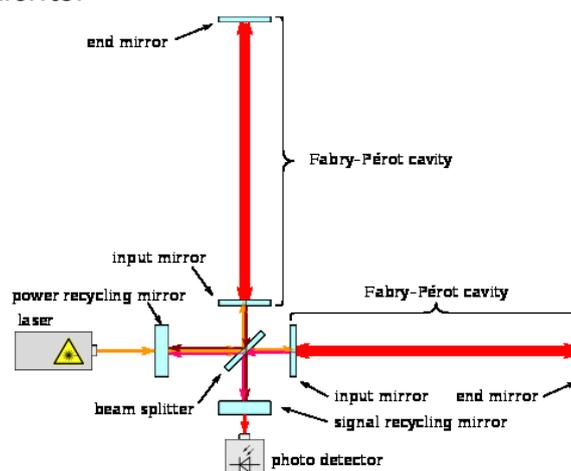
Bei der Kollision der beiden Schwarzen Löcher im September 2015 wandelte sich das Energieäquivalent von drei Sonnenmassen in Raumzeitschwingungen um, die sich im Weltall ausbreiteten.

Alles, was die Gravitationswellen passieren, wird binnen einiger Millisekunden einige Male in einer Richtung gedehnt und in einer anderen zusammengedrückt. Ohne spezielle Messgeräte bekommen wir davon nichts mit. Selbst starke Gravitationswellen verformen das Weltall nur minimal. Einer der 4 km langen Arme des LIGO-Observatoriums wird z. B. lediglich um den 10^{-21} -ten Teil gestaucht.

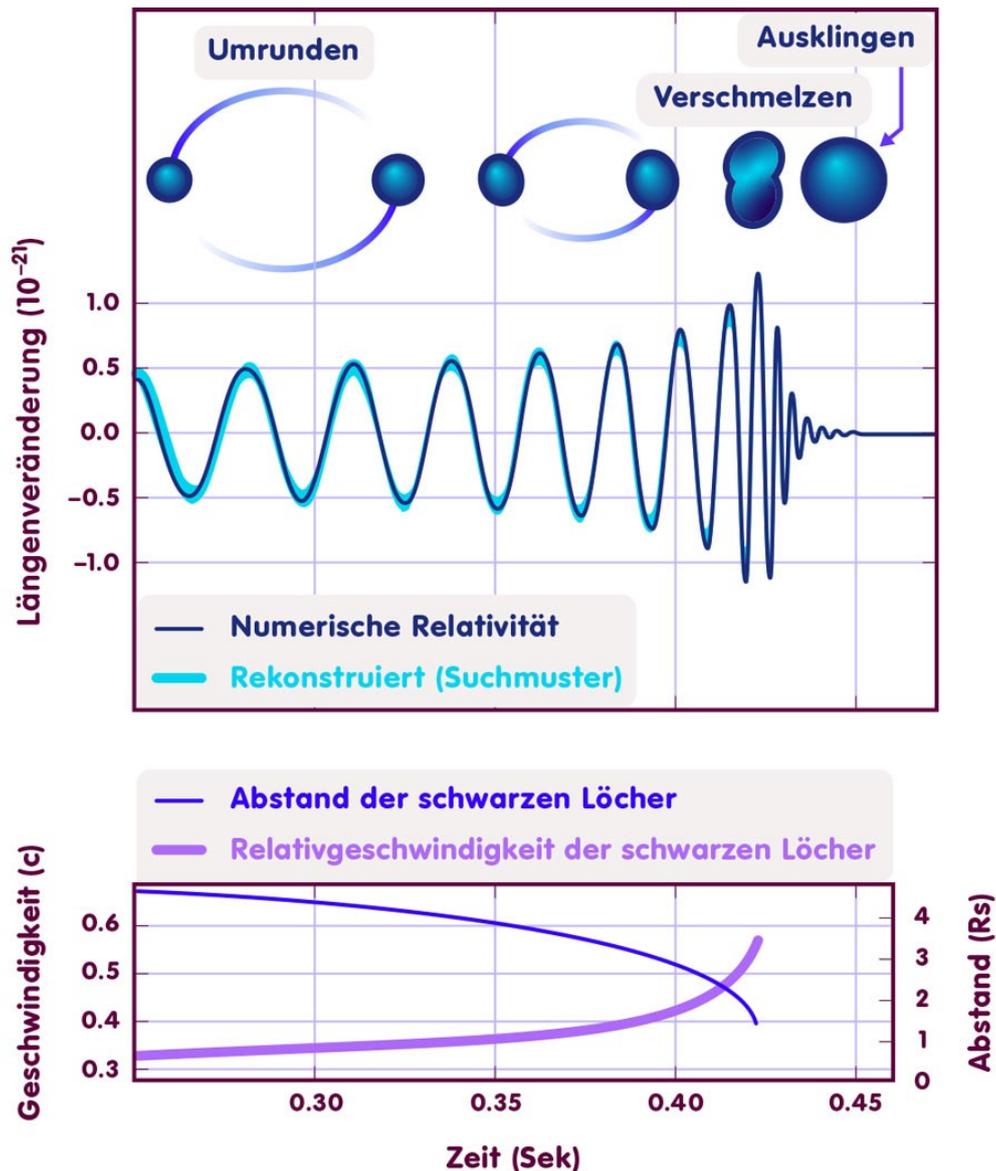
Nachweisen lässt sich die Veränderung mit einer Abwandlung des sogenannten Michelson-Interferometers. Das L-förmige Gerät besteht aus zwei zueinander rechtwinklig angeordneten Armen, an dessen Ende verstellbare Spiegel installiert sind.

Bei einer Messung werden vom Schnittpunkt der Arme zeitgleich zwei Laserstrahlen auf die Spiegel gesandt und nach ihrer Reflexion am Ausgangspunkt wieder zusammengeführt.

Das Interferometer wird so eingestellt, dass sich die beiden Teilstrahlen gerade auslöschen. Durchquert eine Gravitationswelle das Interferometer, ändern sich die Längen der Interferometerarme. Das ruft eine Phasenverschiebung der beiden Teilwellen des Laserlichts hervor und deren Interferenz ändert die Intensität des gemessenen Lichts.



Vereinfachter Aufbau des LIGO [3]



Vergleich der Messdaten des Ablaufs der Verschmelzung der beiden Schwarzen Löcher mit einer mithilfe von Einsteins Feldgleichungen berechneten Kurve [4]

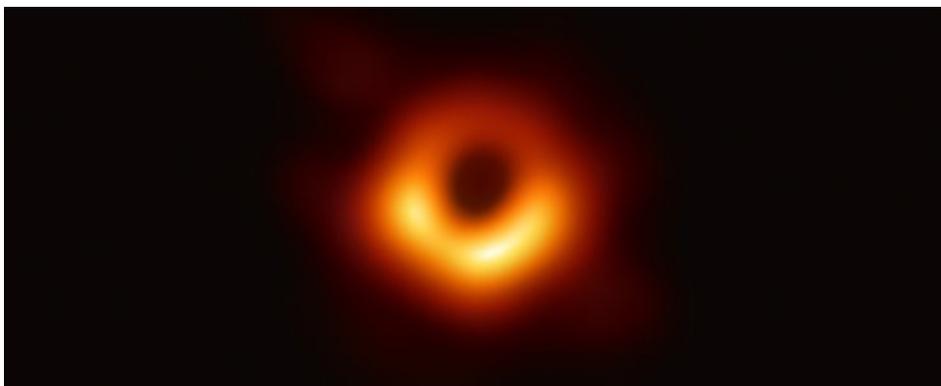
2017 ging der Nobelpreis für Physik an **Rainer Weiss, Barry C. Barish** und **Kip Thorne**. Sie waren entscheidend daran beteiligt, dass Gravitationswellen 2015 entdeckt werden konnten, 100 Jahre nachdem Einstein sie vorhergesagt hatte.



Die einzelnen Teleskope des EHT [5]

Dass sich Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien verbergen hat kürzlich das **Event Horizon Telescope** gezeigt, ein Zusammenschluss von 8 über den Globus verteilten Radioobservatorien an Standorten in Spanien, Chile, Mexiko, den USA und am Südpol. Es erreicht eine deutlich bessere Auflösung als optische Teleskope.

Der Teleskopverbund wurde 2017 auf das extrem massereiche Schwarze Loch im Zentrum der rund 50 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie M87 gerichtet. Zwei Jahre später konnte nach Auswertung von 3000 Gigabyte Daten das erste Bild eines supermassereichen Schwarzen Lochs mit seinem Schatten gezeigt werden. Das Exemplar ist mit rund 6,5 Milliarden Sonnenmassen deutlich massereicher als Sagittarius A* im Herzen unserer Milchstraße.



Das erste Bild eines Schwarzen Lochs[6]

Quellen:

Bild [1] dpa

Bild [2] Hans-Ulrich Keller: Kompendium der Astronomie; Kosmos Verlag 2016

Bild [3] Wikipedia: LIGO Gravitationswellen Observatorium

Bild [4] LIGO.caltech.edu

Bild [5] APEX, IRAM, Narayanan, McMahon, JCMT/JAC, Hostler, Harvey, ESO/Malin

Bild [6] EHT Collaboration

Der Brockhaus: Astronomie; F.A.Brockhaus Verlag 2006

Sterne und Weltraum 12/2020; Spektrum Verlag

Astronomie-Newsletter vom 6.10.2020; Spektrum Verlag

Astronomie-Newsletter vom 3.10.2017; Spektrum Verlag

Sibylle Anderl: Physik-Nobelpreis 2020 vom 6.10.2020; Bayrischer Rundfunk

Weitere Informationen finden Sie auch in dem Bericht „Gravitationswellen: Ein neues Fenster in das Universum“ über den Nachweis von Gravitationswellen und über Neutronensterne unter

<https://www.nwv-luebeck.de/was-bisher-geschah/veranstaltungen-2018/>