

Bei massereichen Sternen führt die Gravitation zu einem Kollaps, der nicht zu stoppen ist – ein Schwarzes Loch entsteht.

In stars that are very massive, gravity brings about an unstoppable collapse – and a black hole is born.



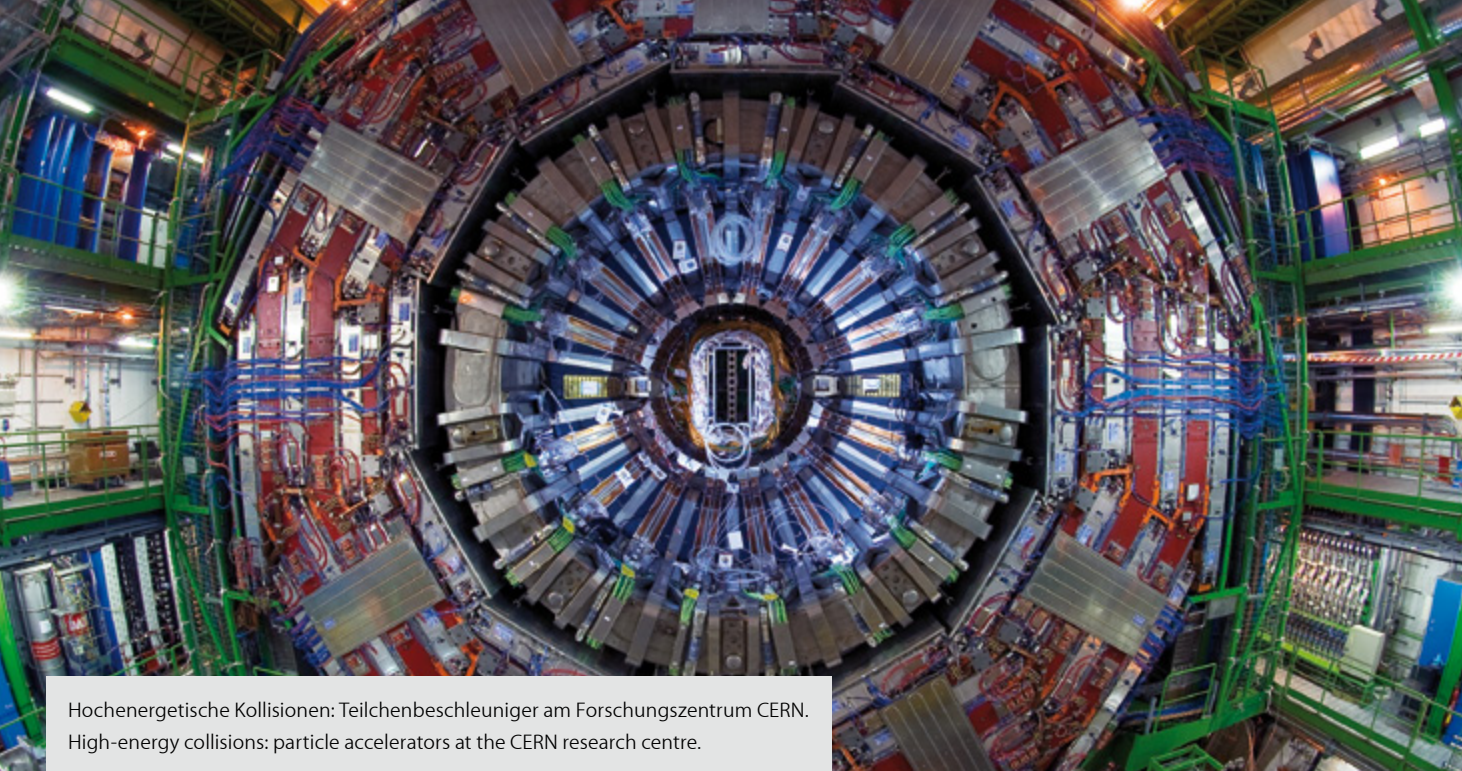
# Jenseits des Ereignishorizonts

## Beyond the Event Horizon

Jutta Kunz, Claus Lämmerzahl

Schwarze Löcher sind eine Herausforderung für die theoretische Physik: Mit ihrer extremen Gravitationskraft verzerren sie Raum und Zeit. Nichts, was ihr Sog erfasst, kann zurück nach außen gelangen. Um das Phänomen fassen zu können, bedarf es – so die Autoren – einer Theorie der Quantengravitation, die über die Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie hinausgeht.

Black holes pose a challenge for theoretical physics: they distort time and space with their extreme gravitational pull. Nothing that enters their gravitational field can escape it. Understanding the phenomenon requires – according to the authors – a theory of quantum gravity that goes beyond Einstein's general theory of relativity.



Hochenergetische Kollisionen: Teilchenbeschleuniger am Forschungszentrum CERN.  
High-energy collisions: particle accelerators at the CERN research centre.

Sterne haben etwas Faszinierendes. Scheinbar unveränderlich stehen sie am Firmament, während die Erde ihre Bahn um die Sonne zieht. Doch auch Sterne sind endlich. Sie entstehen und durchlaufen eine Entwicklung bis hin zum Sterntod, wenn die Kernfusion in ihrem Zentrum erlischt. Je schwerer ein Stern ist, desto schneller ist er ausgebrannt und desto gewaltiger ist sein Ende. Bei den massereichsten Sternen führt die Gravitation zu einem Kollaps, der durch nichts mehr zu stoppen ist. Ein Schwarzes Loch entsteht.

Neben diesen so genannten stellaren Schwarzen Löchern, die etwa so schwer sind wie die Sterne, gibt es in den Zentren der Galaxien supermassereiche Schwarze Löcher. Ihre Masse ist um viele Größenordnungen größer als unsere Sonne. Im Zentrum der Milchstrasse im Sternbild Schütze befindet sich beispielsweise ein riesiges Schwarzes Loch, dessen Masse 4 Millionen Sonnenmassen beträgt. Es wurde in den 1990er Jahren anhand der Bewegung von Sternen um eine Röntgenquelle, Sagittarius A\*, entdeckt. Diese Sterne bewegen sich um das zentrale Schwarze Loch ähnlich wie Planeten um die Sonne und geben so Aufschluss über die zentrale Masse, die sie anzieht. Man geht davon aus, dass in anderen Galaxien zentrale Schwarze Löcher existieren, die viel schwerer sind und Milliarden Sonnenmassen in sich vereinen.

Aus den Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich die Existenz Schwarzer Löcher herleiten. Die Schwarzen Löcher werden durch die Schwarzschild-Lösung und die Kerr-Lösung beschrieben. Bereits 1916 – im Publikations-

### Der Ereignishorizont bildet eine Grenze jeglicher Kommunikation.

onsjahr der Allgemeinen Relativitätstheorie – hatte der Astronom Karl Schwarzschild das theoretisch einfachste Schwarze Loch beschrieben. Es ist kugelsymmetrisch und hat – wie alle Schwarzen Löcher – einen Ereignishorizont, den nichts mehr verlassen kann. Man kann sich den Ereignishorizont als eine Membran vorstellen, die nur in eine Richtung durchlässig ist: Licht und Teilchen können durch diesen Grenzbereich in das

Schwarze Loch hineinfallen, aber sie können nicht mehr zurück in den äußeren Teil des Universums, von wo sie gekommen sind. Damit bildet der Ereignishorizont zugleich eine Grenze jeglicher Kommunikation. Könnte ein Mensch den Horizont durchqueren, so wäre seine Kommunikation nach außen ein für allemal gekappt.

Sterne drehen sich. Der Drehimpuls ist eine physikalische Erhaltungsgröße, er bleibt unverändert. Daher sollten auch Schwarze Löcher sich drehen können. Dies ist allerdings mit der Schwarzschild-Lösung theoretisch nicht fassbar. Erst 1963 entwickelte der neuseeländische Mathematiker Roy Kerr eine Lösung der Einstein Gleichungen für rotierende Schwarze Löcher. Diese Lösung kann möglicherweise alle astrophysikalischen Schwarzen Löcher des Universums beschreiben. Neben dem Ereignishorizont haben sie weitere verblüffende Eigenschaften. Hierzu zählt die so genannte statische Grenze. Sie bildet eine Grenzfläche um das Schwarze Loch. Innerhalb der Grenzen ist alles – ob Licht, Teilchen oder gar ein Raumschiff – mit beliebig starkem Antrieb gezwungen, sich in Drehrichtung des Schwarzen Lochs mitzubewegen.

Im Zentrum eines Schwarzen Lochs – legt man nun die Schwarzschild oder Kerr Lösung zugrunde – sind die Gravitationspotenziale unendlich groß. Hier findet man eine so genannte Krümmungssingularität der Raumzeit. Um solche Singularitäten zu vermeiden und um die Gravitation mit der Theorie der Quantenmechanik zu vereinbaren, muss man nun über die Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie hinausgehen und eine neue Theorie konstruieren: eine Theorie der Quantengravitation. Es gibt heute unterschiedliche Kandidatinnen für eine solche Theorie. Eine der vielversprechendsten ist die Stringtheorie, die mehr als drei Raumdimensionen für ihre mathematische Konsistenz benötigt.

Hier setzt das im Frühjahr 2012 gestartete Graduiertenkolleg „Models of Gravity“ an. Das von der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Kolleg der Universitäten Oldenburg und Bremen, an dem auch die Universitäten Bielefeld, Hannover und Kopenhagen (Dänemark) beteiligt sind, will

Stars have something fascinating about them. They stand apparently immutable in the firmament, while the Earth orbits the Sun. But stars are finite too. They come into being and go through a process of development that ends in their death when the nuclear fusion at their centre is extinguished. The heavier a star, the faster it burns out, and the more dramatic its end. In those stars with the largest mass, gravity brings about a collapse that is utterly unstoppable. A black hole is born.

**The event horizon forms a border for all kinds of communication.**

Besides these so-called stellar black holes, which weigh about as much as the stars, supermassive black holes also exist at the centre of galaxies.

Their mass is greater than our sun by many orders of magnitude. At the centre of the Milky Way in the Sagittarius constellation is a giant black hole whose mass is 4 million times that of the Sun. It was discovered in the 1990s through the movement of the stars around the X-ray emitter Sagittarius A\*. Stars revolve around the central black hole much like planets around a sun,

providing information about the central mass which attracts them. It is assumed that at the centre of other galaxies black holes that are much heavier exist, in which several billion solar masses have converged.

The existence of black holes is inferred by Einstein's field equations of general relativity. Black holes are described by both the Schwarzschild solution and the Kerr metric. Back in 1916 – the year in which the general theory of relativity was first published – the astronomer Karl Schwarzschild described the simplest black hole in theory. It is spherically symmetric and – like all black holes – has an event horizon beyond which nothing can escape the gravitational pull. An event horizon can be pictured as a membrane which is permeable in one direction only. Light and particles can fall through this threshold into the black hole, but they can never escape again to the outer parts of the universe from which they came. Thus the event horizon also forms a border for all forms of communication. If a person were to cross the horizon he or she would never again be able to communicate with anything on the other side.

**Die Autoren The Authors**



Prof. Dr. Jutta Kunz ist seit 1993 Hochschullehrerin für Feldtheorie in Oldenburg. Sie studierte Physik in Gießen und Seattle (USA). Nach ihrer Promotion in Gießen arbeitete sie am Los Alamos National Laboratory in New Mexico (USA). Anschließend lehrte sie an der Universität Gießen und forschte am Nationaal Instituut Voor Subatomaire Fysica in Amsterdam und an der Universität Utrecht (Niederlande). 1989 habilitierte sich Kunz in Oldenburg.

Prof. Dr. Jutta Kunz became Professor for Field Theory at the University of Oldenburg in 1993. She studied physics in Gießen and Seattle (USA). After receiving her PhD in Gießen, Kunz worked at the Los Alamos National Laboratory in New Mexico (USA). Afterwards she taught at the University of Gießen and did research at the Nationaal Instituut Voor Subatomaire Fysica in Amsterdam and at the University of Utrecht (Netherlands). In 1989 she habilitated in Oldenburg.

Prof. Dr. Claus Lämmerzahl, kommissarischer Leiter des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) der Universität Bremen, studierte, promovierte und habilitierte sich in Konstanz. Der Physiker war Post-Doc in Paris (Frankreich) und leitet seit 2003 die Arbeitsgruppe „Fundamental Physics“ am ZARM. Seit 2004 lehrt er am Institut für Physik der Universität Oldenburg. Lämmerzahl ist Vorsitzender des Verbands „Gravitation und Relativitätstheorie“.

Prof. Dr. Claus Lämmerzahl is acting director at the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM) at the University of Bremen. He obtained his degree, doctorate and habilitation in Constance. The Physicist worked as a post-doc in Paris (France) and has been at ZARM since 2003, where he heads the research group on “Fundamental Physics”. He has taught at the Institute of Physics at the University of Oldenburg since 2004. Lämmerzahl is chairman of the association for “Gravity and Relativity Theory”.



Welche Geheimnisse birgt der Kosmos? Die Autoren des Artikels vor der Sternwarte auf dem Campus Wechloy.  
What secrets does the universe conceal? The authors of the article in front of the observatory at the Wechloy campus.

ein tieferes Verständnis von Gravitationsphänomenen im Rahmen solcher erweiterter Gravitationstheorien erreichen. Die Untersuchung der Konsequenzen dieser Theorien für die Eigenschaften der Schwarzen Löcher ist ein zentrales Anliegen des Graduiertenkollegs. Hierzu konstruieren wir zum einen die neuartigen Raum-Zeiten als Lösungen der erweiterten Gleichungen. Zum anderen untersuchen wir die Bewegung von

Teilchen und Licht in diesen Raum-Zeiten, denn nur diese lassen uns das Raum-Zeit-Kontinuum verstehen

### Die Stringtheorie benötigt mehr als drei Raumdimensionen für ihre mathematische Konsistenz.

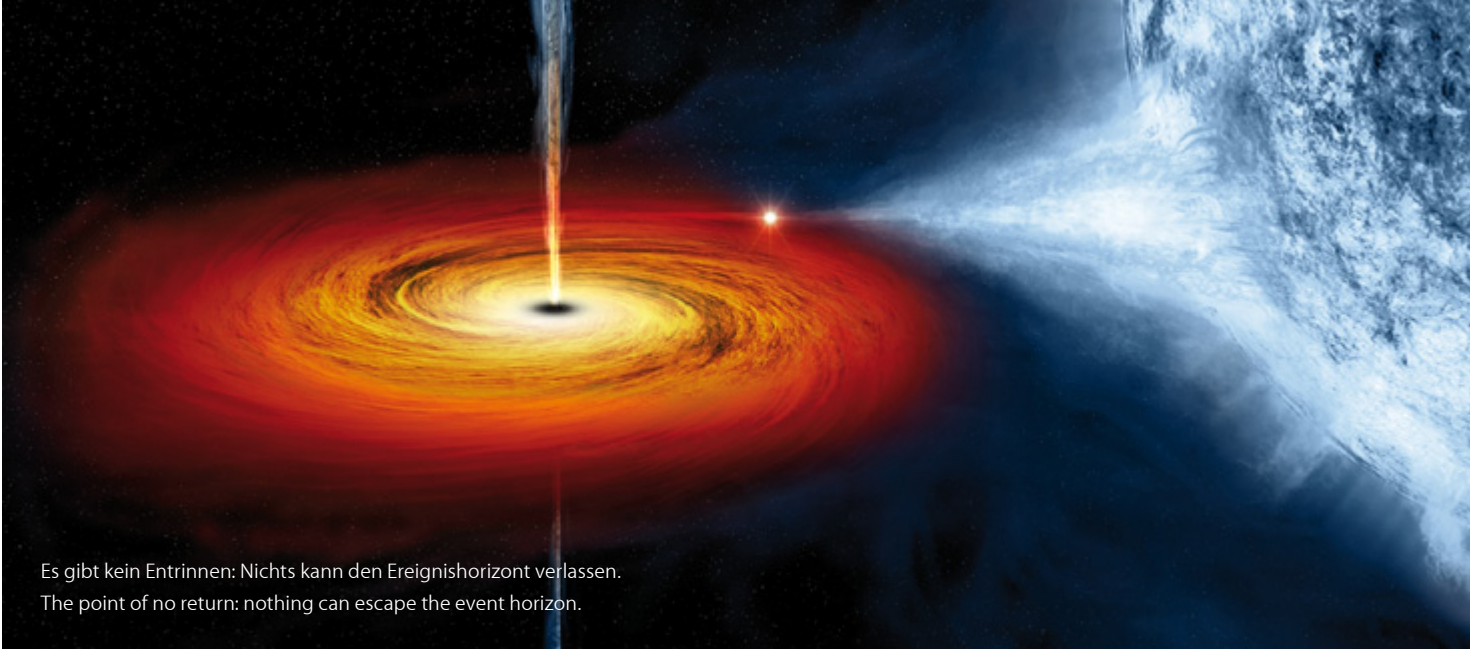
und mit den astrophysikalischen Beobachtungen vergleichen. Beispielsweise hat die Oldenburger Arbeitsgruppe unlängst gezeigt, dass Schwarze Löcher mit Korrekturen durch die Stringtheorie einen größeren Drehimpuls aufweisen können als Schwarze Löcher nach der Kerr-Lösung. Zudem konnten sie nachweisen, dass die Zeitdauer eines Umlaufs um ein solches Schwarzes Loch stark von der Umlaufdauer um ein Kerr-Loch abweichen kann.

Doch nicht nur astronomische Schwarze Löcher sind für das Graduiertenkolleg von Interesse. Durch hochenergetische Kollisionen im Teilchenbeschleuniger LHC des europäischen Forschungszentrums CERN können in der Zukunft möglicherweise mikroskopische Schwarze Löcher erzeugt werden, die Aufschluss über die Existenz weiterer räumlicher Dimensionen geben. Würden die Detektoren dort die charakteristischen Spuren der Schwarzen Löcher aufspüren, dann wäre unser Weltbild von Grund auf verändert. Die höheren Dimensionen bieten eine Vielfalt neuer Möglichkeiten für Schwarze Löcher: Die Ereignishorizonte können nicht nur rund sein, sie können

ringförmig sein. Diese wiederum können Spiralen bilden, so dass sich eine Vielzahl neuartiger Schwarzer Löcher ergibt, die wir in unserem Graduiertenkolleg erkunden.

Eine weiterer Schwerpunkt unserer Untersuchungen geht von der hochaktuellen AdS/CFT-Korrespondenz (anti de Sitter/konforme Feldtheorie) aus. Der Begriff steht für die Äquivalenz zweier Theorien. Dabei entspricht die eine einer Gravitationstheorie für einen  $n$ -dimensionalen Raum. Die andere entspricht einer Feldtheorie für den Rand dieses Raums und ist daher von niedrigerer Dimension. Diese Korrespondenz bietet eine einzigartige Möglichkeit, physikalische Systeme zu studieren, für die näherungsweise (störungstheoretische) Berechnungen nicht möglich sind. In der Physik der kondensierten Materie gibt es diverse solcher Systeme, die auch technologisch von Interesse sind und über deren Eigenschaften wir etwas erfahren können, indem wir die entsprechenden „dualen“ Schwarze Loch-Raum-Zeiten konstruieren und untersuchen.

So kann man im Rahmen der AdS/CFT-Korrespondenz Einblicke gewinnen, wie Wärme- und Ladungsströme in einer Quantenflüssigkeit von Elektronen fließen. Solche Quantenflüssigkeiten findet man oberhalb des Phasenübergangs zur Supraleitung, wenn Elektronen einen quantenkritischen Zustand bilden. Auch lassen sich mit Hilfe geladener Schwarzer Löcher diverse zuvor unerklärte Eigenschaften in Hochtemperatur-Supraleitern verstehen. Unsere Untersuchungen sollen weitere bislang unerklärliche Phänomene physikalischer Systeme besser verständlich machen, die für den Energietransport wichtig sind. Damit könnte die Erforschung Schwarzer Löcher Erkenntnisse erbringen, die auch für unseren Alltag von Bedeutung sein können.



Es gibt kein Entrinnen: Nichts kann den Ereignishorizont verlassen.  
The point of no return: nothing can escape the event horizon.

Stars rotate. This angular momentum is a physical conserved quantity, a constant. This means that black holes should also be able to rotate. But according to the Schwarzschild solution this is theoretically inconceivable. It was not until 1963 that the New Zealander mathematician Roy Kerr came up with a solution to Einstein's equations for rotating black holes. This solution potentially describes all astrophysical black holes in the universe. In addition to the event horizon they also have other astounding properties. One of these is the so-called static limit. This forms a boundary layer around the black hole. Within this boundary everything – light, particles and even spacecraft – even if endowed with an arbitrarily large strength of propulsion – is forced to move in the same direction in which the black hole is rotating.

At the centre of a black hole – according to both the Schwarzschild solution and the Kerr metric – the gravitational potential is infinitely large. This gives rise to a so-called space-time curvature singularity. To avoid such singularities and bring gravity in line with the theory of quantum mechanics, one must move beyond Einstein's theory of general relativity and construe a new theory: a theory of quantum gravity. Several candidates for such a theory exist today. Among the most promising is string theory, which requires more than three spatial dimensions for its mathematical consistency.

This is where the "Models of Gravity" Research Training Group comes in, which was launched in spring 2012. This joint research programme of the universities of Oldenburg and Bremen, which is funded by the German Research Foundation (DFG)

### The string theory requires more than three spatial dimensions for its mathematical consistency.

and in which the universities of Bielefeld, Hanover and Copenhagen (Denmark) are also involved, aims to reach a deeper understanding of gravitational phenomena within the context of such extended theories of gravity. Examining the consequences of these theories for the properties of black holes is a central concern of the training group. To this end we are constructing new forms of space-time as solutions to the extended equations. We are also studying the movement of particles and light within these space-times since this is the only way to understand the space-time continuum and

compare it with astrophysical observations. The Oldenburg research group recently demonstrated that when adjusted to string theory, black holes exhibit greater angular momentum than black holes based on the Kerr solution. Moreover it was able to prove that the time it takes to orbit such a black hole can differ considerably from the time it takes to orbit a Kerr hole. But the research training group is not only interested in astronomical black holes. High-energy collisions in the LHC particle accelerator at the European research centre CERN will potentially be able to create microscopic black holes in the future that will provide insights into the existence of further spatial dimensions. If the detectors there were to record the characteristic traces of black holes, it would fundamentally alter our world view. The higher dimensions offer a broad spectrum of new possibilities for black holes: event horizons can be ring-shaped rather than just round. These, in turn, can form spirals that result in many new types of black hole, which our research group is investigating.

Another focal point of our research is AdS/CFT correspondence (Anti-de-Sitter space / conformal field theory correspondence). The term stands for the equivalence of two theories: one is a gravitational theory for  $n$ -dimensional space; the other is a field theory for the boundary of this space and thus of a lower dimension. This correspondence offers a unique opportunity to study physical systems for which approximate (perturbative) calculations are not possible. In the physics of condensed matter there are a variety of such systems which are also interesting from a technological standpoint, whose properties we can begin to study and learn about by constructing "dual" black hole space-times.

The study of AdS/CFT correspondence provides insights into the flow of thermal and electrical currents through a quantum fluid of electrons. Such quantum fluids are found above the phase transition to superconductivity when electrons move into a quantum-critical state. Charged black holes can also shed light on a number of previously unexplained properties of high-temperature superconductors. Our research aims to make it easier to understand hitherto inexplicable phenomena of physical systems and the implications for energy transport. This means that investigation of black holes can generate knowledge that can also be relevant to our everyday lives.