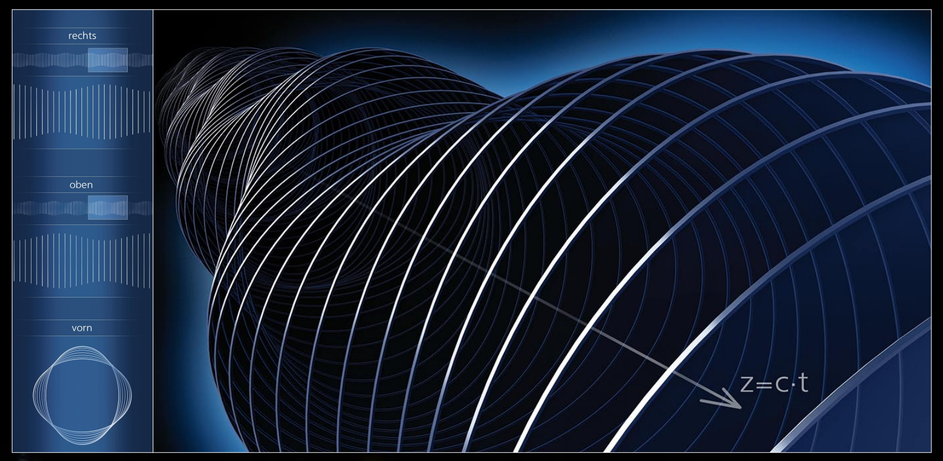
DFG Sonderforschungsbereich/Transregio: „Gravitationswellen-Astronomie", Garching | Hannover | Jena | Potsdam | Tübingen

Gravitation wirkt auf Raum und Zeit

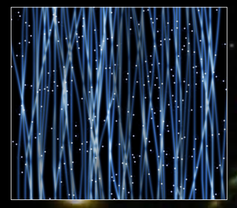
Masse verändert die Raumzeit, die Raumzeit bestimmt die Bahnen von Massen.

In der Newtonschen Theorie galten Raum und Zeit als absolut und unveränderlich. Anders in der Allgemeinen Relativitätstheorie: Hier werden Raum und Zeit, zusammengefasst zur Raumzeit, durch die Gravitationswirkung massiver Objekte verändert. Die Eigenschaften der Raumzeit wiederum bestimmen, wie sich Objekte und Lichtstrahlen bewegen.

Wir sind es gewohnt, dass zwei feste Punkte im Raum einen festen Abstand haben, der nur von ihren Positionen relativ zueinander abhängt. In der Relativitätstheorie dagegen ist dieser Abstand auch eine Eigenschaft des Raumes, der sich zwischen den Punkten befindet. Ein massives Objekt verändert diese Eigenschaft und damit den Abstand zweier Punkte (wie übrigens auch den zeitlichen Abstand zwischen zwei Ereignissen). Dieser Einfluss ist umso stärker, je schwerer die Masse ist, von der die Gravitation ausgeht, und je geringer die Entfernung zu ihr ist.



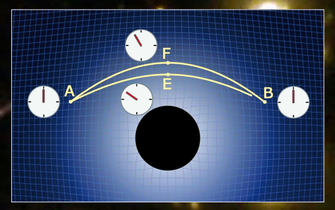
Oben: Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt nicht nur die gegenseitige Anziehung von Massen, sie sagt auch die Existenz von Gravitationswellen voraus. Diese wandern durch den Raum und verändern dabei dessen innere Struktur. Wie bei allen Wellenerscheinungen breitet sich diese Wirkung kontinuierlich in Abhängigkeit von Zeit und Ort aus. Hier ist eine Gravitationswelle dargestellt, die in Richtung der z-Achse wandert und dabei den Raum in einer Ebene senkrecht dazu, also in Richtung der x- und der y-Achse, verzerrt.



„Angesichts von Hindernissen mag die kürzeste Linie zwischen zwei Punkten die krumme sein."

Bert Brecht, „Das Leben des Galilei"

„Ab durch die Mitte" ist nicht immer der schnellste Weg – je nach Gegebenheiten sollte man sich auch mal für einen Umweg entscheiden. In ähnlicher Weise verhält sich das Licht auf seinem Weg durch die Raumzeit, wenn diese durch Gravitation so verändert ist, dass Abstände sich vergrößern und weniger Zeit zur Verfügung steht.



Die Gravitation eines Schwarzen Loches verändert die Raumzeit in seiner Umgebung: Abstände werden größer und der Ablauf der Zeit verlangsamt sich. Dadurch nehmen Lichtstrahlen andere Wege, als sie dies ohne das Schwarze Loch täten.

Wie kann eine Variation der Raumzeit-Eigenschaft „Abstand" die Bahnen von Objekten oder Lichtstrahlen verändern?

Unterliegen diese keinen äußeren Einflüssen, bewegen sie sich auf dem schnellsten Weg von einem Punkt zu einem anderen, gewöhnlich also auf Geraden. Ebenso ist der direkte Weg durchs Zentrum für eine Fahrt von einem Ende einer größeren Stadt ans gegenüberliegende Ende bei niedriger Verkehrsdichte wahrscheinlich der schnellste. Bei hoher Verkehrsdichte ist dagegen eine Fahrt auf einer Umgehungsstraße um das Stadtzentrum herum günstiger. Die Veränderung einer räumlichen Eigenschaft wirkt sich also auf die Form des optimalen Weges aus.

Auf diese Weise erklärt die Allgemeine Relativitätstheorie, wie ein massives Objekt das Verhalten eines anderen beeinflusst. Sie ist also eine Theorie der Gravitation, da sie (unter Anderem) die gegenseitige Anziehung von Massen beschreibt.

Hintergrund: Das Galaxiencluster Abell 2218, 2 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt, umfasst mehrere Tausend Galaxien. Die Gravitation, die von dieser enormen Masse ausgeht, zwingt Lichtstrahlen auf Bahnen, die denen bei einer Sammellinse ähneln. Bilder dahinter liegender Galaxien können dadurch verzerrt oder erheblich vergrößert werden. (Bild: NASA/ESA)

Gekrümmte Flächen, gekrümmter Raum

Veränderte Abstände beeinflussen auch geometrische Beziehungen an ausgedehnten Figuren. Dies kennen wir von gekrümmten Flächen: Zeichnet man einen Kreis auf einer Kugeloberfläche, so misst sein Umfang nicht das Pi-fache seines Durchmessers wie bei einem Kreis auf einer Tischplatte, sondern weniger. Auch Winkel verändern sich: Die Winkelsumme eines Dreieck auf einer Kugeloberfläche ist größer als 180 Grad. Der Satz des Pythagoras gilt ebenfalls nicht mehr.

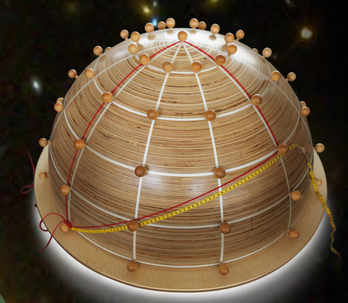
Solche Abweichungen von der gewohnten „Euklidischen" Geometrie entstehen auch bei Figuren im Raum, wenn dieser durch ein massives Objekt beeinflusst ist. Man sagt daher, der Raum werde durch die Gravitation gekrümmt.

Das ist mehr als eine oberflächliche Analogie: Die mathematische Disziplin der Differentialgeometrie beschäftigt sich mit gekrümmten Flächen wie auch gekrümmten drei- oder höher-dimensionalen Räumen. Die Ergebnisse lassen sich darüber hinaus auf eine vierdimensionale Raumzeit verallgemeinern. Die Differentialgeometrie stellt eine mächtige Sammlung mathematischer Werkzeuge bereit, die für die Arbeit mit der Allgemeinen Relativitätstheorie unverzichtbar sind.

Braucht ein gekrümmter Raum einen Hyperraum?

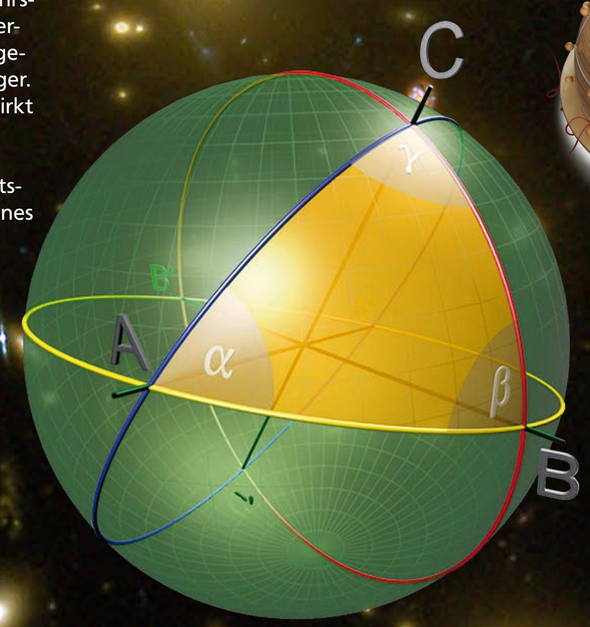
Eine Krümmung einer zweidimensionalen Fläche nehmen wir gewöhnlich als ein Verbiegen der Fläche in den dreidimensionalen Raum hinein wahr. Es scheint daher, ein dreidimensionaler Raum müsse sich in einen „Hyperraum", der mehr als drei Dimensionen hat, hinein verbiegen, um gekrümmt sein zu können.

Die mathematische Behandlung gekrümmter Flächen oder Räume kommt aber völlig ohne diese Vorstellung des Verbiegens aus, ebenso ihre physikalische Anwendung. Die Krümmung beruht allein auf den gegebenen Abstandsrelationen; diese sind rein innere Eigenschaften von Flächen und Räumen. Es ist also nicht notwendig, sie erst in einen Hyperraum einzubetten und sie dann „von aussen" zu betrachten und zu beschreiben.



Unten: Die Oberfläche einer Kugel stellt eine Fläche mit nicht-ebener innerer Geometrie dar. Anhand einer solchen Kugel kann man die Eigenschaften ihrer Geometrie vermessen und die Unterschiede zu einer ebenen Geometrie, wie der einer Tischplatte, untersuchen.

Unten: Die innere Geometrie einer Kugeloberfläche unterscheidet sich von der einer ebenen Tischplatte. So addieren sich die Winkel in Dreiecken zu mehr als 180 Grad, auch die Längen der Seiten eines Dreiecks stehen in einem anderen Verhältnis zueinander. (Bild: Dominique Toussaint)



Design: www.gd90.de