Weitere wichtige Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind:

- ➤ Die Zeitdehnung im Gravitationsfeld. Uhren gehen in der Nähe von großen Massen langsamer. Auch das wurde experimentell bestätigt und ist Bestandteil der Funktionsweise von Navigationsgeräten.
- Die Existenz von Gravitationswellen. Am 11.2.2016 wurde die Entdeckung von Gravitationswellen verkündet [1]. Einstein war überzeugt davon, dass die Gravitationswellen zu schwach sind, um sie jemals messen zu können. Gravitationswellen muss man sich wie Wasserwellen vorstellen, die von einem ins Wasser geworfenen Stein erzeugt werden. Auch die Wasserwellen werden mit zunehmender Entfernung vom Stein schwächer.
- ➤ Die Existenz von Schwarzen Löchern. Im Zentrum der Milchstraße gibt es eine große konzentrierte Materieansammlung. Ob diese Materieansammlung wirklich all die Eigenschaften hat, die man einem Schwarzen Loch zuschreibt, ist noch unklar.

#### 1. Geheimnis des Universums: Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

## Das Äquivalenzprinzip:

Einstein hat seine Allgemeine Relativitätstheorie aus dem Äquivalenzprinzip abgeleitet. Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind sehr kompliziert und würden den Rahmen dieses Buches sprengen. Aber das Äquivalenzprinzip kann man mit einfachen Worten erklären. Machen wir ein Gedankenexperiment: Wir befinden uns in einer Rakete ohne Fenster, die mit  $9.81~\frac{m}{s^2}$  beschleunigt. Wir spüren eine Kraft, die uns auf den Boden drückt. Das ist die gleiche Kraft, die wir spüren, wenn die S-Bahn losfährt. Jetzt befinden wir uns auf der Erde in einem Kasten ohne Fenster. Wir spüren wieder eine Kraft, die uns auf den Boden drückt. Das Äquivalenzprinzip sagt nun aus, dass wir nicht unterscheiden können, ob wir uns auf der Erde befinden oder in der Rakete beschleunigt werden. Beide Situationen sind äquivalent.

In einem frei fallenden Kasten im Gravitationsfeld spüren wir keine Kraft. Wir sind schwerelos. Die Gezeitenkräfte wollen wir dabei vernachlässigen. Im

Weltraum, weit weg von großen Massen, sind wir ebenfalls schwerelos. Wir können nicht unterscheiden, ob wir im Gravitationsfeld frei fallen oder uns im Weltraum befinden. Das ist der zweite Teil des Äquivalenzprinzips. Dieses ist auch dann noch gültig, wenn wir durch den Ereignishorizont eines Schwarzen Loches fallen. Das Äquivalenzprinzip ist die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.

#### Wie kann man die Allgemeine Relativitätstheorie anschaulich verstehen?

In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird die Gravitationskraft durch die Krümmung der Raum-Zeit verursacht. Einen dreidimensionalen gekrümmten Raum kann sich niemand vorstellen. Mit einem zweidimensionalen Raum geht das schon besser. Zum Beispiel ist unsere Erdoberfläche ein zweidimensionaler gekrümmter Raum. Wir stellen uns vor, dass zwei Flugzeuge sich vom Äquator aus im rechten Winkel auf einer "geraden Flugbahn" zunächst parallel auf den Nordpol zubewegen. Die Flugzeuge haben beim Start am Äquator einen Abstand von 100 km. Obwohl sich die beiden Flugzeuge nicht anziehen, treffen sie am Nordpol zusammen. In der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es also keine Gravitationskraft. Die beiden Flugzeuge treffen zusammen weil die Oberfläche der Erde gekrümmt ist.

#### Wie kann man messen, ob ein Raum gekrümmt ist?

Wir bleiben bei dem Beispiel. Ein Flugzeug fliegt im rechten Winkel vom Äquator aus zum Nordpol, macht am Nordpol einen Kurswechsel um 90° nach rechts und fliegt auf direktem Weg wieder zum Äquator. Dort angekommen macht es wieder einen Kurswechsel um 90° nach rechts und fliegt auf dem Äquator entlang zurück zum Ausgangspunkt. Das Flugzeug ist ein Dreieck auf der Erdoberfläche geflogen und die Winkelsumme in diesem Dreieck beträgt: 90°+90°+90°=270°. Auf einem ebenen Blatt Papier (flacher Raum) ist die Winkelsumme im Dreieck 180°. Dieses einfache Beispiel zeigt anschaulich: Nur wenn die Winkelsumme im Dreieck 180° beträgt, ist der Raum flach. Ist die Winkelsumme nicht 180°, ist der Raum gekrümmt. Dies werden wir später anwenden.

### **Vertiefung 1: Das Gravitationsgesetz:**

Nach Newton ziehen sich zwei Massen im Abstand r – zum Beispiel die Erde mit der Masse M und der Apfel mit der Masse m mit der Gravitationskraft F an:

Es gilt: 
$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

Für die Gravitationskonstante gilt: 
$$G = 6.67 * 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$$

Die Gravitationskonstante gibt die Stärke der Gravitationskraft an. Da die Konstante sehr klein ist, ist die Gravitationskraft sehr schwach. Um die Stärke der Gravitationskraft mit der elektrischen Kraft zu vergleichen machen wir ein Rechenbeispiel: Zwei Protonen ziehen sich mit der Gravitationskraft F an und stoßen sich mit der elektrischen Kraft  $F_{el}$  ab. Die Masse m des Protons beträgt  $1.7*10^{-27}\,kg$ . Seine Ladung q ist  $1.6*10^{-19}\,C$  und die elektrische Konstante k hat den Wert  $9*10^9 \frac{Nm^2}{c^2}$ .

Mit 
$$F_{el} = \frac{kq^2}{r^2}$$
 folgt:  $\frac{F_{el}}{F} = \frac{kq^2}{Gm^2} = 10^{36}$ 

Die Gravitationskraft ist also im Vergleich zu der elektrischen Kraft um 36 Größenordnungen schwächer. Warum die Gravitationskraft so schwach ist, ist Gegenstand aktueller Forschung.

# 1.2. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Wir machen ein Gedankenexperiment: Ein Ball fällt aus 0.5 Metern Höhe aus der rechten Hand nach unten und wird von der linken Hand aufgefangen. Wir filmen den Vorgang und lassen den Film rückwärts laufen. Ist das, was wir dann im Film sehen, auch ein physikalischer Prozess?

Die Antwort ist ja! Zunächst wird potentielle Energie (Lageenergie) in kinetische Energie (Bewegungsenergie) umgewandelt. Wenn der Film rückwärts läuft, wird kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt. Die linke Hand wirft den

Ball nach oben. Der Ball erreicht wieder seinen Ausgangspunkt. Es gilt die Energieerhaltung.

Ein zweites Gedankenexperiment: Wir gießen ein Kilogramm blau eingefärbtes kaltes Wasser in einen Behälter mit einem Kilogramm rot eingefärbtem warmem Wasser und rühren um. Der Vorgang wird gefilmt und wir betrachten den Film rückwärts. Ist das, was wir sehen, ein physikalischer Prozess?

Die Antwort ist nein! Warmes Wasser gibt Wärme an das kalte Wasser ab. Es entsteht lauwarmes Wasser. Wenn der Film rückwärts läuft, kühlt sich ein Teil des Wassers ab. Die abgegebene Wärme erwärmt den anderen Teil des Wassers. Ein solcher Vorgang wurde noch nie beobachtet. Er ist unphysikalisch! Aber warum? Auch im letzten Gedankenexperiment gilt die Energieerhaltung. Der Vorgang ist trotzdem verboten! Welches physikalische Gesetz verbietet diesen Vorgang?

### Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Um solche Vorgänge zu beschreiben, führen die Physiker eine neue Größe ein - die Entropie. Der 2. Hauptsatz sagt nun aus, dass bei allen Vorgängen in abgeschlossenen Systemen die Entropie gleich bleibt oder größer wird:

- 1. Fall: Falls die Entropie gleich bleibt, ist der Vorgang umkehrbar.
- 2. Fall: Falls die Entropie größer wird, ist der Vorgang nicht umkehrbar.

Bleiben wir bei dem Beispiel mit dem kalten und warmen Wasser. Ein Kilogramm Wasser hat bei  $10^{\circ}$ C eine Entropie von 151 J/K. Bei  $30^{\circ}$ C beträgt die Entropie 437 J/K, bei  $20^{\circ}$ C 297 J/K. Die Entropie des Anfangszustandes 151 J/K + 437 J/K = 588 J/K ist kleiner als die Entropie im Endzustand 297 J/K + 297 J/K = 594 J/K. Der 2. Hauptsatz ist also erfüllt. Da die Entropie im Endzustand größer als die Entropie im Anfangszustand ist, ist eine Umkehrung des Vorgangs nach dem 2. Hauptsatz nicht möglich.

Peter Möller

Geheimnisse des Universums - Relativitätstheorie, Quantenmechanik und Schwarze Löcher 2019 / 130 Seiten / 9,95 € / ISBN 978-3-89574-959-9 Verlag Dr. Köster, Berlin / www.verlag-koester.de