

James Webb Teleskop

James Webb Teleskop beginnt mit seiner Arbeit

<https://www.youtube.com/watch?v=83IV6VQ4gaM>

<https://www.youtube.com/watch?v=cfBJtxxhj2c>

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

1905 hatte Albert Einstein seine spezielle Relativitätstheorie veröffentlicht. Diese basierte auf der Annahme, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum konstant ist, unabhängig davon, wie sich Lichtquelle und Beobachter zueinander bewegen. Daraus folgt zwangsläufig, dass die Zeit in bewegten Systemen langsamer vergeht. Der in den Einsteinschen Formeln auftretende Faktor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ zeigt, dass sich Objekte nicht mit Überlichtgeschwindigkeiten bewegen können.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Allgemeiner nimmt man seit Einstein an, dass sich Informationen nicht mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen lassen. Würde man also in 2 Lichtstunden Entfernung eine Sonne ins Weltall setzen, würde deren Gravitationsfeld bei uns erst mit 2 Stunden Verspätung spürbar werden – gleichzeitig mit dem Licht, das bei uns ankommt.

Diese zeitliche Verzögerung ist in Newtons Gravitationsgesetz

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

nicht enthalten. Also ist es mit der speziellen Relativitätstheorie nicht vereinbar.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Einstein dachte jahrelang darüber nach, wie man das Gravitationsgesetz so modifizieren kann, dass es mit der speziellen Relativitätstheorie zusammenpasst. Grundlage seiner Überlegungen war das Äquivalenzprinzip. So wie man durch physikalische Experimente nicht unterscheiden kann, ob man sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt oder in Ruhe ist, so kann man auch nicht unterscheiden, ob man gleichförmig beschleunigt wird oder sich in einem Gravitationsfeld befindet.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

In der Newtonschen Physik gibt es zwei verschiedene Begriffe von Masse:

- ▶ Die träge Masse m_t : diese widersetzt sich einer Beschleunigung und steckt in der Newtonschen Formel $F = m_t a$. Je größer die träge Masse, desto mehr Kraft muss man aufwenden, um sie zu beschleunigen.
- ▶ Die schwere Masse m_s : diese zieht andere Massen M gravitativ an und steckt im Gravitationsgesetz:

$$F = G \cdot \frac{m_s \cdot M}{r^2}.$$

Man kann (mit einer sehr großen Genauigkeit) nachmessen, dass $m_s = m_t$ gilt.

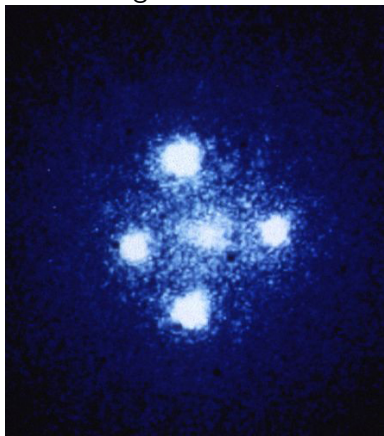
Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Daraus folgt sofort, dass Licht im Gravitationsfeld abgelenkt wird: schickt man in einem Aufzug ein Photon waagrecht los, dann bewegt sich der Aufzug nach oben, folglich ist die Lichtbahn nach unten gekrümmt.

Einstein machte 1916 die dazu notwendigen Berechnungen und sagte vorher, dass sich das Licht eines Sterns am Rand der Sonne bei einer Sonnenfinsternis um etwa $1,75''$ abgelenkt wird (doppelt so viel, wie Newtons Theorie vorhersagen würde, wenn man einem Photon mit der Energie $E = h\nu$ via $E = mc^2$ die Masse m zuordnet). Wegen des zweiten Weltkriegs konnte erst eine Expedition im Mai 1919 diese Ablenkung messen.

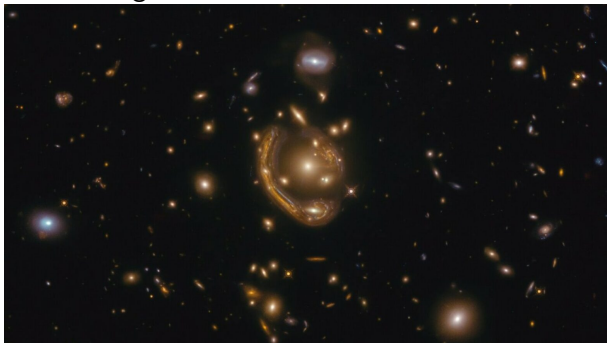
Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Das Hubble Space Teleskop hat sehr viele Beispiele gefunden, in denen das Licht weit entfernter Galaxien von Galaxien im Vordergrund abgelenkt wird. Beispiele sind das Einsteinkreuz sowie Einsteinringe.



Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Einsteinring.



Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Lässt man ein Photon das Gravitationsfeld nach oben laufen, verliert es Energie. Wegen $E = h\nu$ wird dadurch die Frequenz kleiner, folglich wird das Licht rotverschoben.

Ein weiterer Effekt, der etwas schwieriger herzuleiten ist, ist die Zeitdilatation: Uhren im Gravitationsfeld laufen langsamer. Dieser Effekt ist heutzutage im Zusammenhang mit dem GPS-System täglich nachzumessen.

https://www.youtube.com/watch?v=f21-L_7m0NU

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

1916 veröffentlichte Einstein die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie. Die zentrale Aussage: es gibt keine mysteriöse "Schwerkraft" wie bei Newton. Vielmehr krümmt jede Masse die sie umgebende Raumzeit, und die Raumzeit schreibt vor, wie sich Massen zu bewegen haben.

In Einsteins gekrümmter Raumzeit sind die Ellipsenbahnen der Planeten die kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten auf der Weltlinie eines Planeten.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Was ist Krümmung? Die Krümmung der Raumzeit kann man sich als Laie nur schwer vorstellen; die Krümmung des Raums lässt sich dagegen leicht visualisieren. Vernachlässigt man in der allgemeinen Relativitätstheorie die Krümmung des Raums, erhält man die Newtonsche Theorie: das Newtonsche Gravitationsgesetz lässt sich also allein durch die “Krümmung der Zeit” erklären.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Die Abweichungen zwischen Einstein und Newton in unserem Sonnensystem sind winzig; zu den bekannten Effekten gehört neben der Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne die Periheldrehung des Merkur. Die Ellipsenbahn des Merkur dreht sich nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz im Laufe der Jahrhunderte um etwa $530''$ pro Jahrhundert. Davon gehen $280''$ auf das Konto der Venus, $150''$ werden von Jupiter verursacht, und $100'$ von den anderen Planeten. Gemessen werden aber $572''$. Den Unterschied von $43''$ pro Jahrhundert konnte Einstein aus der allgemeinen Relativitätstheorie ableiten.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Wie kann man messen, dass die Erdoberfläche gekrümmt ist?

1. Gehe vom Äquator aus zum Nordpol, drehe dich um 90° , gehe wieder Richtung Äquator. Drehe dich um 90° und gehe zurück zum Ausgangspunkt. Das Dreieck, das man gelaufen ist, hat eine Winkelsumme von $3 \cdot 90^\circ = 270^\circ$. In der euklidischen Ebene ist die Winkelsumme im Dreieck aber 180° .

2. Ziehe einen Kreis um den Mittelpunkt M mit steigendem Radius r . Zuerst wird der Umfang zunehmen, aber immer langsamer; ist der Radius so groß wie ein Viertel des Erdumfangs, nimmt der Umfang wieder ab. Im Gegensatz zur euklidischen Ebene ist die Gleichung $U = 2\pi r$ also nicht mehr richtig.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Im Prinzip kann man so auch die Krümmung unseres Weltalls messen. Allerdings haben wir keine großen Dreiecke zur Verfügung, weil wir uns nicht einfach so eine Milliarde Lichtjahre weit von uns wegbewegen können.

Es bleiben also nur indirekte Methoden, etwas das Zählen der Galaxien in einer Kugel mit wachsendem Radius; im Falle einer verschwindenden Krümmung müsste diese Zahl wie $\frac{4}{3}\pi r^3$ wachsen. Bisher sind alle Messergebnisse mit einem flachen Universum kompatibel.

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie

Schwarze Löcher

<https://www.youtube.com/watch?v=3K9ovJ78hps>

Gravitationswellen

<https://www.youtube.com/watch?v=oXHMx260NS8&t=972s>

Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie