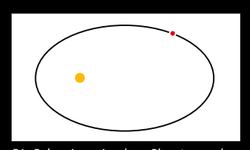
GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung
GEFÖRDERT DURCH DIE Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung

100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie

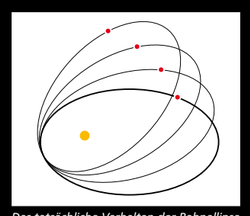
Einstein inside

1905: Noch nicht am Ziel

Warum ist die Spezielle Relativitätstheorie nicht allgemein und umfassend genug?



Die Bahn eines einzelnen Planeten nach Newtons Gravitationsgesetz



Das tatsächliche Verhalten der Bahnellipse (Elliptizität stark übertrieben) von Merkur. Zwischen den einzelnen Positionen liegen jeweils 10.000 Jahre.

Weshalb gab sich Einstein nicht mit der Speziellen Relativitätstheorie zufrieden, sondern suchte nach einer allgemeineren Theorie?

Ein ungelöstes Problem aus der Astronomie

Newtons Gesetz der Gravitation (Massenanziehung) sagt: Die Bahn eines einzelnen Planeten um die Sonne beschreibt eine unveränderliche Ellipse. Die Bahnellipse des Merkur dreht sich aber. Diese Abweichung liegt zum größten Teil am Einfluss der anderen Planeten. Ein kleiner Teil aber, weniger als ein Millionstel eines Kreises pro Jahr, lässt sich mit Newtons Gesetz nicht erklären.

Gesucht: Ein neues Gravitationsgesetz

Seit Jahrhunderten bewährt – doch Newtons Gravitationsgesetz widerspricht der Speziellen Relativitätstheorie: Es beschreibt eine Wirkung, die sich unendlich schnell ausbreitet, statt sich an die Begrenzung auf Lichtgeschwindigkeit zu halten. Es galt, ein Gravitationsgesetz zu finden, das diese Bedingung erfüllt.

Das Relativitätsprinzip

Es gibt keine absolute Bewegung, relevant ist stets nur die Bewegung eines Objekts relativ zu etwas Anderem.

Fährt ein Zug auf gerader Strecke mit konstanter Geschwindigkeit, wird eine Kugel, die im Zug auf einem Tisch liegt, darauf liegen bleiben. Bremst der Zug jedoch oder durchfährt er eine Kurve, wird sich die Kugel auf dem Tisch in Bewegung setzen, ohne dass sie angestoßen wird.

Ein Beobachter am Bahndamm und einer im gleichmäßig fahrenden Zug kommen zum gleichen Ergebnis: „Ohne äußeren Einfluss ändert die Kugel ihren Bewegungszustand nicht.“ Ein Beobachter im bremsenden Zug erhält ein anderes Resultat: „Die Kugel kann ihren Bewegungszustand auch ohne äußeren Einfluss ändern.“

Man kann den Standpunkt eines Beobachters also frei wählen – aber nur, solange dieser sich nicht beschleunigt bewegt. Einsteins Ziel war dagegen eine Beschreibung der Physik, die so allgemein ist, dass sie für einen beschleunigten Beobachter ebenso funktioniert wie für einen unbeschleunigten: eine Allgemeine Relativitätstheorie.

Welcher von den beiden Ballspielern ist in Ruhe, welcher bewegt sich? Das Relativitätsprinzip sagt: Das ist grundsätzlich nicht entscheidbar; beide können mit gleichem Recht behaupten, in Ruhe zu sein. Die Ergebnisse physikalischer Beobachtungen der beiden beeinflusst das nicht.

Fundament der neuen Theorie: das Äquivalenzprinzip

Alle Objekte fallen gleich schnell – das wusste schon Galilei. Einstein formuliert das Äquivalenzprinzip so: „Gravitation und Beschleunigung sind wesensverwandt.“ Dies führt ihn zu einer Theorie, in der Raum und Zeit nicht unveränderlich sind, sondern dynamisch und durch Gravitation verändert werden. Diese Veränderungen wiederum bestimmen, wie sich Objekte und Lichtstrahlen verhalten.

Herzstück der neuen Theorie: die Feldgleichungen

Die Feldgleichungen beschreiben, wie die Gravitation von Massen und Energie die Raumzeit im Detail beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist mathematisch sehr kompliziert; Einstein brauchte acht Jahre, um mit Hilfe von Mathematikern die korrekten Gleichungen auszuarbeiten. Damit hatte er sein Ziel erreicht und alle beschriebenen Probleme gelöst.

Theoretische Astrophysik (TAT), Eberhard Karls Universität Tübingen

Das Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen wurde am 09.01.1995 gegründet durch Zusammenlegung des Astronomischen Instituts sowie der Lehr- und Forschungsbereiche „Theoretische Astrophysik“ und „Physik mit Höchstleistungsrechnern“.

Am 18.07.2007 haben sich alle Abteilungen des Instituts mit Arbeitsbereichen der Teilchenphysik zum „Kepler Center for Astro and Particle Physics“ zusammengeschlossen, um die vorhandenen Kompetenzen auf den Gebieten der Astrophysik und Teilchenphysik in Forschung und Lehre zu bündeln und weiter auszubauen.

Forschungsschwerpunkt des Arbeitsbereichs Theoretische Astrophysik sind Projekte, die sich mit dem Nachweis von Gravitationswellen befassen. Obwohl diese Art der Strahlung bereits vor über 100 Jahren von Einstein vorhergesagt wurde, ist es erst 2015 gelungen, sie mit großem experimentellem Aufwand direkt nachzuweisen.

Neutronensterne und Schwarze Löcher, sowohl isoliert als auch in Mehrfachsystemen, sind die vielversprechendsten Quellen für direkt nachweisbare Gravitationswellen. Die Tübinger Arbeitsgruppe hat sich darauf spezialisiert, anhand des Gravitationswellenspektrums von Neutronensternen deren genaue innere Struktur zu bestimmen; diese Methode wird als „Gravitationswellen-Asteroseismologie“ bezeichnet.

Die Gruppe in Tübingen war Mitglied im SFB/Transregio 7 „Gravitationswellen-Astronomie“, der zum 31.12.2014 endete, und der die theoretische und experimentelle Forschung führender deutscher Universitäten und Max-Planck-Institute auf diesem Gebiet bündelte und förderte.

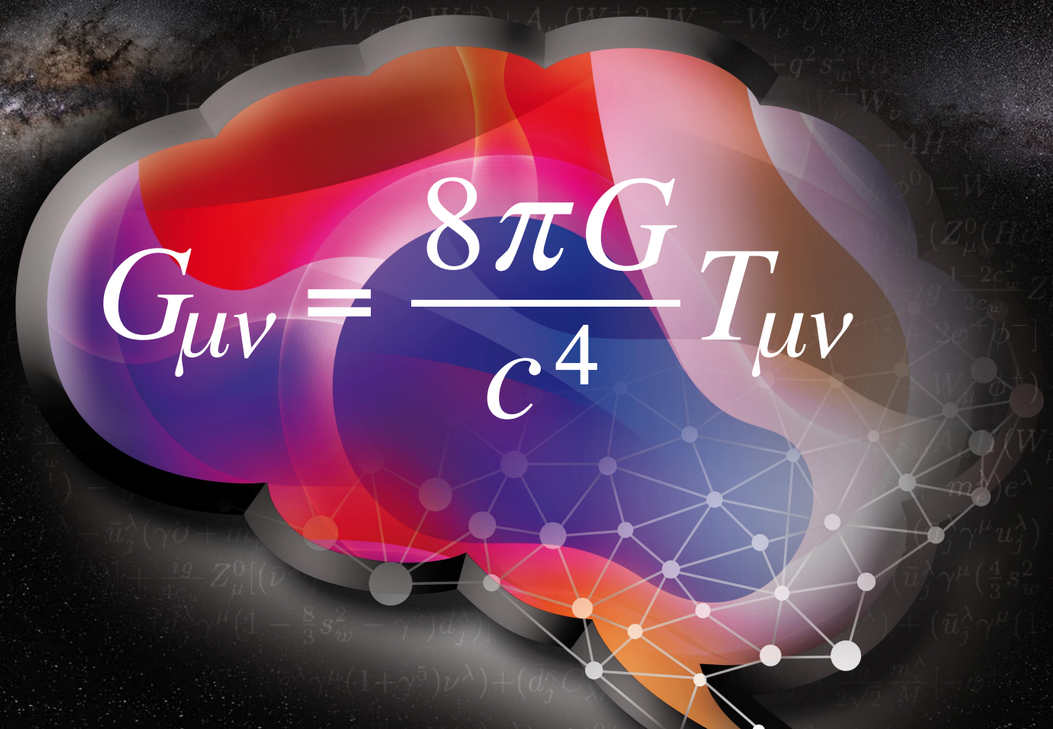
Prof. Dr. Kostas Kokkotas
www.tat.physik.uni-tuebingen.de

Universität Tübingen

Die Einsteinsche Feldgleichung der Gravitation

Diese Gleichung sieht einfach aus, aber sie hat es in sich: Der Einsteintensor $G_{\mu\nu}$ berechnet sich aus der inneren Krümmung der Raumzeit, also aus deren geometrischen Eigenschaften. Der Energieimpulstensor $T_{\mu\nu}$ beschreibt die vorhandene Masse, Energie, Druck usw. Davor stehen Naturkonstanten, im wesentlichen also einfach bekannte Zahlen.

Will man die Feldgleichung anwenden, muss man eine passende Raumzeitgeometrie finden, so dass der Wert des Einsteintensors auf der linken Seite mit dem Ausdruck auf der rechten Seite übereinstimmt.



Design: www.gd90.de