

Bestätigung der Relativitätstheorie durch astronomische Ereignisse

Von der Theorie zur Realität

Facharbeit im Seminarfach Astronomie

Greselius-Gymnasium Bramsche

Johanna Greve, Jahrgang 12

Fachlehrer: Herr Riemer
Abgabedatum: 23.02.2024

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Was ist Relativität?..... | 2 |
| 2.1 | Die Relativitätstheorie..... | 2 |
| 2.2 | Spezielle Relativitätstheorie..... | 2 |
| 2.3 | Allgemeine Relativitätstheorie..... | 4 |
| 2.3.1 | Raumzeit | 4 |
| 2.3.2 | Ablenkung von Lichtbahnen im Gravitationsfeld..... | 5 |
| 2.3.3 | Schwingungen der Raumzeit | 6 |
| 2.3.4 | Periheldrehung des Merkur | 6 |
| 3 | Bestätigung der Relativitätstheorie in der Astronomie | 7 |
| 3.1 | Periheldrehung des Merkur | 8 |
| 3.2 | Gravitationslinseneffekt | 9 |
| 3.2.1 | Die Sonnenfinsternis, die Einstein bekannt machte..... | 10 |
| 3.2.2 | Schwarze Löcher..... | 11 |
| 3.3 | Gravitationswellen | 12 |
| 3.3.1 | PSR 1913+16 | 13 |
| 3.3.2 | Gravitationswellendetektoren | 13 |
| 3.3.3 | Direkte Nachweise | 14 |
| 3.3.4 | Ausblick | 15 |
| 4 | Kritische Diskussion | 16 |
| 5 | Fazit..... | 17 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 18 |

1 Einleitung

Unser heutiges Denken über den Kosmos wurde durch Albert Einstein und seine Relativitätstheorie nachhaltig geprägt. Als er sein berühmtes Werk vollendete, revolutionierte er damit die Wissenschaft. Doch wieso? Die Genialität seiner Arbeit stellen zwar die Wenigsten infrage, aber trotzdem muss auch die Relativitätstheorie wie jede andere wissenschaftliche Arbeit unzähligen Tests und Experimenten standhalten. Viele Wissenschaftler setzen sich nämlich daran, die von Einstein vorhergesagten Prognosen zu überprüfen. Da jene Effekte, die vorhergesagt wurden, nicht im Labor zu testen sind, kann die Theorie nur durch astronomische Ereignisse überprüft werden [7, S.14]. Forscher haben deshalb hoch komplizierte und aufwendige Methoden entworfen, um durch die Beobachtung von bestimmten astronomischen Ereignissen das zu bestätigen, was Einstein damals vorausgesagt hat.

Ausgehend davon soll in dieser Facharbeit beleuchtet werden, auf welchem Weg und vor allem anhand welcher astronomischen Ereignisse die Prognosen der Relativitätstheorie überprüft und bestätigt werden.

Als Grundlage dafür dient erst einmal eine verständliche Darstellung der komplexen Inhalte der Relativitätstheorie, um zu begreifen, was genau Einstein überhaupt prognostiziert hat. Erst wenn diese Grundlagen gesetzt sind, kann der Fokus auf die Ereignisse im Kosmos geworfen werden, anhand derer die einsteinschen Vorhersagen nachgewiesen werden können. Damit einhergehend wird dann veranschaulicht, welche anspruchsvollen Methoden die Forscher dazu entwickelt haben. Dadurch wird sich auch die Frage klären, warum die Relativitätstheorie so revolutionär für unser Bild vom Kosmos ist. Die Erläuterung dieser Methoden wird verdeutlichen, welche hohen Ansprüche an Genauigkeit die Beobachtungen der astronomischen Ereignisse haben. Am Ende folgen eine kritische Auseinandersetzung mit der Bestätigung der Relativitätstheorie, die beleuchtet, welche Schwierigkeiten damit einhergehen, und ein abschließendes Fazit.

2 Was ist Relativität?

„*Alles ist relativ*“ [14], aber was heißt das? Leicht zu verstehen ist das am Beispiel vom Zugfahren. Befindet sich ein Beobachter in einem fahrenden Zug, sieht es für ihn so aus, als würde sich die Welt an ihm vorbeibewegen und nicht er sich an ihr¹. Ein anderer Beobachter am Gleis sieht hingegen, dass sich der Zug an der stillstehenden Landschaft vorbeibewegt. Beide haben Recht, da es vom Standpunkt des Betrachters abhängt, was dieser sieht. Wenn es also heißt, dass etwas relativ ist, bedeutet das, dass alle Faktoren von der Perspektive eines Beobachters abhängen, also variabel sind [14]. Diese Relativität gilt als „*Wesen der Relativitätstheorie*“ [13].

2.1 Die Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie beschreibt die Struktur von Raum und Zeit und beschäftigt sich mit dem Wesen der Gravitation, genaueres dazu folgt noch. Erstmal ist es aber wichtig zu wissen, dass die Theorie aus zwei Hauptteilen besteht. Den ersten Teil, die spezielle Relativitätstheorie (SRT), hat Einstein im Jahr 1905 veröffentlicht [14] und den zweiten Teil, die allgemeine Relativitätstheorie (ART), erst am 25.11.1915 fertiggestellt [3, S.49].

Die Astronomie beschäftigt sich hauptsächlich mit Himmelskörpern und deren Bewegungen im Kosmos [15]. Weil sich nicht beide Theorien so sehr mit dem Kosmos beschäftigen, ist für die Bestätigung der Relativitätstheorie durch astronomische Ereignisse meist eine der beiden relevanter, und zwar die allgemeine Relativitätstheorie. Sie befasst sich nämlich mit der Gravitation, weshalb sie auch als Gravitationstheorie bekannt ist, und deren Zusammenhang mit der Raum-Zeit-Struktur unseres Universums [1, S.63/64]. Die spezielle Relativitätstheorie hingegen beschäftigt sich lediglich mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Relativität von Raum und Zeit, weshalb sie für die Astronomie weniger wichtig ist als die ART. Dennoch lohnt es sich, vorher einen kurzen Blick auf die SRT zu werfen [14].

2.2 Spezielle Relativitätstheorie

Raum und Zeit sind also relativ. Anders verhält es sich mit Licht, denn das bewegt sich immer mit der gleichen Geschwindigkeit, unabhängig davon, wie sich die

¹ Nur, solange die Geschwindigkeit konstant bleibt.

Lichtquelle bewegt. Die Lichtgeschwindigkeit ist eine konstante, nicht veränderbare Größe c . Sie beträgt gerundet 300.000 Kilometer pro Sekunde. Das stand schon vor Einstein fest. Er war aber der Erste, der diese Fakten in einer Theorie zusammenfassen konnte [8].

Ein Phänomen, das Einstein dadurch erkannt hat, ist die sogenannte Zeitdilatation. Seine spezielle Relativitätstheorie sagt voraus, dass aus der Perspektive eines ruhenden Beobachters die Zeit in einem bewegten System langsamer vergeht. Für einen Beobachter im bewegten System wird das Zeitintervall dilatiert². Im Zug-Beispiel vom Beginn vergeht folglich, aus der Perspektive des „ruhenden“³ Beobachters am Gleis, die Zeit im Zug langsamer, weil dieser sich bewegt. Für den Beobachter im Zug jedoch vergeht die Zeit am Gleis langsamer, da sich von ihm aus gesehen ja das Gleis bzw. die Landschaft außerhalb des Zugs bewegt. Bei solch geringen Geschwindigkeiten ist dieser Effekt aber sehr klein. Erst bei Geschwindigkeiten, die sich der Lichtgeschwindigkeit nähern, ist die Zeitdilatation groß und dementsprechend auch bemerkbar [13].

Die sogenannte Längenkontraktion ist ebenfalls ein relativistischer Effekt und wirkt sich auf die Länge eines Objekts aus. Der ruhende Beobachter bemerkt, dass relativ zu ihm schneller bewegte Objekte kürzer erscheinen. Sie werden gestaucht [13].

Der bekannteste Teil der speziellen Relativitätstheorie ist aber wohl die Formel $e = mc^2$. Grob zusammengefasst sagt sie aus, dass Masse (m) und Energie (e) zueinander proportional sind [9]. Sie genauer zu erklären, wäre jedoch zu umfangreich für eine kurze Beleuchtung der SRT und nicht von Bedeutung für das eigentliche Thema. Denn wie bereits erwähnt, ist für die Astronomie die allgemeine Relativitätstheorie relevanter. In Inertialsystemen⁴ haben laut der speziellen Relativitätstheorie alle physikalischen Gesetze die gleiche Gestalt, das heißt, dass alle Vorgänge in solchen Systemen nach den gleichen Naturgesetzen ablaufen [3, S.51]. In seiner ART verallgemeinert Einstein dieses sogenannte Äquivalenzprinzip auch auf beschleunigte Systeme und bezieht die Schwerkraft mit ein [3, S.49].

² gedehnt

³ Welcher Beobachter ruht, ist immer relativ. Aus der Perspektive des Beobachters am Gleis ruht er selbst und der Zug bewegt sich. Für den Beobachter im Zug ist es genau andersrum.

⁴ Ein System, das sich mit konstanter Geschwindigkeit (ohne Beschleunigung) bewegt und frei von äußeren Kräften ist [1, S.66].

2.3 Allgemeine Relativitätstheorie

Die allgemeine Relativitätstheorie beschäftigt sich ebenfalls mit Raum und Zeit, fokussiert sich in diesem Zusammenhang aber eher auf die Beschreibung der Gravitation und dem Einfluss von Materie auf Raum und Zeit [1, S.63]. Sie gilt daher auch als eine Erweiterung von Newtons Gravitationstheorie [7, S.14]. Zudem wird das Wesen dieser beiden Größen in der Relativitätstheorie völlig neu beschrieben. Die wichtigsten Inhalte und Prognosen der ART werden in diesem Kapitel genauer erläutert.

2.3.1 Raumzeit

Raum und Zeit gelten in der ART nicht mehr als unveränderliche, unabhängige Größen voneinander, sondern sind miteinander zu einem dynamischen Feld verwoben, welches sich Raumzeit nennt [6, S.46]. Diese ist vierdimensional und bildet sich aus dem dreidimensionalen Raum⁵ und der eindimensionalen Zeit.

Laut der ART ist die Raumzeit keine ebene Fläche, sondern wird durch Anwesenheit von Materie gekrümmt, sodass, wie hier dargestellt, „Dellen“ in der

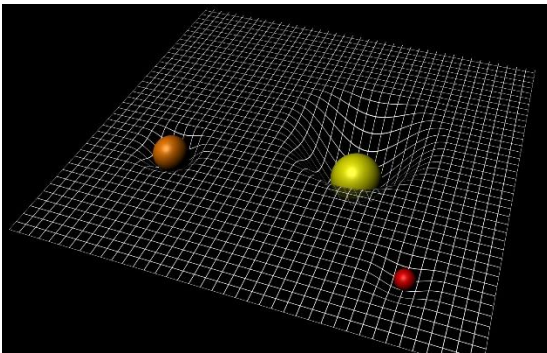


Abbildung 1: Krümmung der Raumzeit

Raumzeit entstehen. Die Tiefe dieser Dellen, hängt davon ab, wie massereich ein Objekt ist. Dabei gilt, je größer die Masse, desto ausgeprägter die Krümmung der Raumzeit [12]. Wenn nun ein anderer Körper in die Nähe dieser Delle

gelangt, bewegt er sich nicht mehr geradeaus, sondern seine Bahn wird abgelenkt. Der Körper, welcher die Raumzeit krümmt, zieht folglich den anderen Körper an. Dieser Effekt, den Einstein als Gravitation bezeichnet, ist so stark, dass selbst Licht abgelenkt wird, wenn es in die Nähe einer solchen Krümmung der Raumzeit gerät [6, S. 46]. Bei sehr massereichen Objekten wie Schwarzen Löchern ist die „Delle“ in der Raumzeit so tief und deshalb die Anziehungskraft so hoch, dass sowohl sämtliche Materie als auch Licht dieser Delle, dem Horizont, nicht mehr entkommen kann. Sie werden folglich nicht mehr nur noch abgelenkt, sondern regelrecht eingesogen [4, S. 46/47]. Durch Himmelskörper mit geringerer Masse, zum Beispiel der Sonne, wird das Licht aber, wie erwähnt, nur von seiner

⁵ Die drei Dimensionen bilden Höhe, Breite und Länge.

ursprünglichen Bahn abgelenkt. Dadurch kann es passieren, dass helle Objekte wie Sterne am Himmel an einem anderen Punkt erscheinen, als sie sich eigentlich befinden. Es findet dann eine scheinbare Positionsverschiebung von Sternen statt [1, S.69].

2.3.2 Ablenkung von Lichtbahnen im Gravitationsfeld

Dass Lichtbahnen durch Anwesenheit von Masse gekrümmt werden, hat Auswirkungen auf unsere Wahrnehmung von Objekten am Himmel. Sieht ein Beobachter einen Stern am Himmel, geht er davon aus, dass sich der Stern dort befindet, wo er zu sehen ist. Diese Annahme kann aber unter bestimmten Umständen falsch sein.

Wenn der Lichtstrahl eines Sterns durch ein Gravitationsfeld verläuft, in welchem die Raumzeit durch ein massereiches Objekt gekrümmt ist, wird er, wie hier zu erkennen, abgelenkt. Wenn dieser umgelenkte Lichtstrahl dann einen Beobachter auf der Erde erreicht, passiert Folgendes: Der Beobachter geht davon aus, dass der Lichtstrahl in einer geraden Linie verläuft, weshalb er den Stern nun an einer anderen Position wahrnimmt. Dieser erscheint also nicht an seiner wirklichen Position, sondern erreicht den Beobachter durch die Ablenkung von einer anderen Stelle aus [16]. Dass Licht durch Anwesenheit von Masse abgelenkt wird, nennt sich

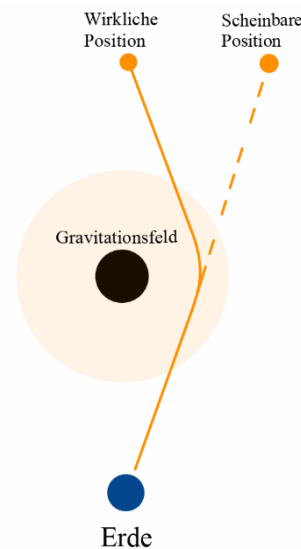


Abbildung 2:
Lichtablenkung

Gravitationslinseneffekt, da die Lichtstrahlen wie in einer Linse gekrümmt werden [1, S.65]. Die aus der Raumzeitkrümmung resultierende Ablenkung von Lichtbahnen ist von großer Bedeutung, wenn es darum geht, die Relativitätstheorie durch astronomische Ereignisse zu bestätigen. Als das Phänomen zum ersten Mal beobachtet werden konnte, entstand eine große Aufmerksamkeit um Einstein, weil dadurch bewiesen wurde, dass er mit seinen Behauptungen Recht hatte. Dieses Ereignis war gewissermaßen der Grundstein für seine große Bekanntheit. Vor einer genaueren Betrachtung des Ereignisses, durch welches Einstein so bekannt wurde, sollen zuerst noch die anderen Phänomene aus der ART dargestellt werden, die wichtig für ihre Bestätigung sind [7, S.16].

2.3.3 Schwingungen der Raumzeit

Massereiche Objekte verändern also die Struktur der Raumzeit. Wenn diese dann anfangen, ihren Bewegungszustand zu ändern, entsteht ein völlig neuer Effekt. Durch die Beschleunigung der Objekte wird die Raumzeit in Schwingung versetzt. Diese Schwingungen verbreiten sich dann mit Lichtgeschwindigkeit durch den

Kosmos und werden als Gravitationswellen bezeichnet. Auch hier gilt, je mehr Masse ein Objekt hat, desto stärker sind die Schwingungen. Um das Phänomen anschaulicher zu erklären, können die Gravitationswellen mit

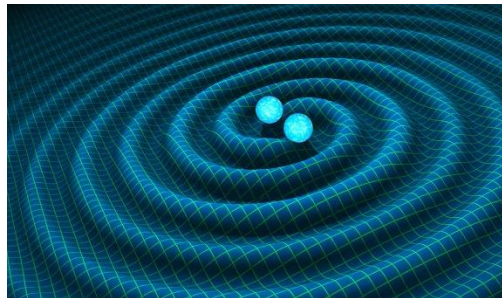


Abbildung 3: Gravitationswellen

Wellen in einem See verglichen werden. Sie verbreiten sich im Prinzip wie Wellen, die in einem See entstanden sind, nachdem ein Objekt auf das Wasser geworfen wurde. Gravitationswellen im Kosmos entstehen jedoch, wie erwähnt, durch die Beschleunigung von massereichen Objekten [6, S.46]. Diese Beschleunigung kann zum Beispiel entstehen, wenn sich zwei Neutronensterne oder Schwarze Löcher umkreisen oder miteinander verschmelzen [6, S. 47]. Durch die Gravitation, die wegen der großen Masse der Objekte sehr stark ist, bewegen sich die Sterne auf einer spiralförmigen Bahn aufeinander zu. Dabei werden ihre Umrundungen immer schneller und es entstehen Gravitationswellen. Die ART sagt voraus, dass bei ihrer Entstehung viel Energie freigesetzt wird. Die Raumzeit kann auch durch Supernovae⁶ in Schwingungen versetzt werden [6, S.49].

Wenn Wissenschaftler solche Schwingungen der Raumzeit tatsächlich registrieren, bestätigt das nicht nur die Relativitätstheorie, sondern bringt auch völlig neue Dimensionen an Möglichkeiten mit sich. Was damit gemeint ist, bzw. wie Gravitationswellen in der Astronomie nachgewiesen werden, wird in Kapitel 3.3 geklärt [2, S. 62].

2.3.4 Periheldrehung des Merkur

Einer der Beweggründe Einsteins, die Relativitätstheorie aufzustellen, war ein besonderes astronomisches Phänomen, welches schon zuvor durch andere Wissenschaftler beobachtet werden konnte: die Periheldrehung des Merkur.

⁶ Sternenexplosionen

Die Bahn, auf welcher sich die Planeten um die Sonne bewegen, nennt sich Ellipse. Diese ist kein exakter Kreis, weshalb es einen Punkt auf der Bahn gibt, welcher sich am nächsten an der Sonne befindet: das Perihel. Merkur ist in unserem Sonnensystem der Planet, welcher sich am nächsten an der Sonne befindet, weshalb er dementsprechend auch der größten Schwerkraft ausgesetzt ist. Würden beide Planeten unabhängig voneinander betrachtet werden, würde laut Newtons Gravitationstheorie⁷ die Bahn des Planeten immer gleichbleiben. In der Realität bewirken allerdings die Anziehungskräfte der anderen Planeten, dass sich die Bahn vom Merkur und dadurch auch die Position des Perihels langsam mit um die Sonne dreht. Diese Periheldrehung haben schon andere Physiker vor Einstein beobachtet. Nach Newton müsste sich dieses Perihel wegen der Gravitation der umliegenden Planeten pro Jahr um $5,3''$ ⁸ drehen. Spätere Beobachtungen wiesen jedoch einen Wert von $5,7''$ auf. Es lag also eine Differenz von $0,4''$ vor. Dieser wollte Einstein näher auf den Grund gehen und ermitteln, warum die Periheldrehung $0,4''$ mehr betrug als durch Newton vorhergesagt [7, S.14/15]. Mit seiner ART konnte Einstein dieses Phänomen schließlich klären, wodurch er selbst den ersten Beweis der Theorie lieferte [3, S.52].

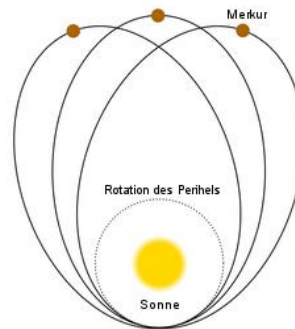


Abbildung 4: Periheldrehung des Merkur

3 Bestätigung der Relativitätstheorie in der Astronomie

Der grundlegende Zweck einer Theorie ist es, bestimmte Vorgänge oder Ergebnisse von Experimenten genau vorherzusagen. Wenn eine neue wissenschaftliche Theorie aufgestellt wird, muss diese sich deshalb bei bestimmten Experimenten oder Tests behaupten können. Die theoretischen Vorhersagen werden dabei in der Realität getestet, wodurch die Theorie auf ihre Gültigkeit überprüft wird. Für die einzelnen Vorhersagen wurden dazu unterschiedliche Methoden entwickelt. Solche Tests bringen große Vorteile mit sich, da sie, wenn sie die Theorie tatsächlich bestätigen können, zu ihrer allgemeinen Akzeptanz beitragen können.

⁷ Newton war ein Physiker und Astronom, der vor Einstein gelebt hat.

⁸ $5,3$ Bogensekunden

Genauso wie andere physikalische Theorien wird auch die Relativitätstheorie genaustens unter die Lupe genommen. Da die ART sich allerdings mit der Astronomie beschäftigt, kann sie anstatt von Versuchen im Labor nur durch astronomische Beobachtungen getestet und überprüft werden. Die Wissenschaftler müssen also bestimmte Ereignisse im Weltraum beobachten und überprüfen, ob dabei das geschieht, was die ART voraussagt [7, S.14]. Seit die Theorie aufgestellt wurde, konnte sie all diesen Tests standhalten, da die Vorhersagen stets mit dem übereinstimmten, was die Astronomen beobachtet haben. Die ART konnte somit noch nie durch ein Experiment widerlegt werden [1, S.64].

Einstein selbst hat einige Effekte vorgeschlagen, die durch Beobachtungen von astronomischen Ereignissen eine Überprüfung seiner ART ermöglichen [5, S.14].

3.1 Periheldrehung des Merkur

Einer der „klassischen Effekte“, der die ART laut Einstein durch astronomische Beobachtungen testen kann, ist die Periheldrehung von Planetenbahnen. Genauer gesagt, die Periheldrehung von der Bahn des Merkur [5, S.14].

Dieses Phänomen wurde vor Einstein schon von anderen Astronomen untersucht, wobei sich allerdings ein Problem ergab: Der Wert, der nach Newtons Theorie für die Periheldrehung errechnet wurde, stimmte nicht mit dem Wert überein, den spätere Beobachtungen ergaben. Die Differenz zwischen dem Wert nach Newton und dem Wert der moderneren und genaueren Messungen lag bei 0,4" pro Jahr. Folglich ist die Drehung des Merkurperihels eigentlich größer als vorhergesagt (vgl. Kapitel 2.3.4). Diesen Unterschied konnte Einstein schließlich mit seiner ART klären [7, S.14/15].

Die Differenz zwischen Berechnung und Beobachtung von 0,4" pro Jahr konnte Einstein nämlich durch seine Feldgleichungen reproduzieren. Diesen Gleichungen nach beträgt der Wert, der bei den newtonschen Rechnungen fehlte, 43,02" pro Jahrhundert, also 0,4" pro Jahr. Jene Berechnung der ART stimmte somit ziemlich genau mit dem fehlenden Wert zur Beobachtung überein. Dieser Nachweis war sehr bedeutend für die Akzeptanz der ART, weil Newtons Theorie in diesem Punkt widerlegt wurde und die ART eine neue Theorie war, die diese anomale Periheldrehung erklären konnte [3, S.52].

Die Gravitation anderer Planeten bewirkt also, dass sich die Position des Perihels ändert, sodass sich dieses mit um die Sonne dreht. Wie aus Kapitel 2.3.1 bekannt, ist die Gravitation in der ART jedoch nicht nur irgendeine Kraft, die zwischen den Planeten wirkt. Sie ist ein Resultat aus der Krümmung der Raumzeit [6, S.46]. Aus der ART ergibt sich folglich, dass die Periheldrehung des Merkur auch durch die Raumzeitkrümmung verursacht wird.

Die fortgeschrittene Technik ermöglichte den Wissenschaftlern ab 1966, die Positionsänderung des Merkurperihels sehr genau zu bestimmen. Sie beobachteten Merkur nämlich nicht mehr mit Teleskopen, sondern nutzten sogenannte Radar-Entfernungsmessungen, um die Periheldrehung zu beobachten. Dadurch konnten sie präzisere Messungen durchführen, als es zur Zeit von Einstein möglich war, und den Wert aus der ART mit einer Genauigkeit von 0,1 Prozent bestätigen [7, S.15].

Durch die Periheldrehung des Merkur kann die ART folglich bestätigt werden, da die zu beobachtende Positionsänderung des Perihels mit dem Wert übereinstimmt, der aus den Feldgleichungen hervorgeht. Einstein selbst konnte also noch zur Interpretation der ART beitragen, da er durch seine Gleichungen die beobachtete Abweichung der Periheldrehung von Newtons Theorie erklären konnte [3, S.55].

Einstein sagte in der ART einen weiteren Effekt voraus, den er ebenfalls als geeignet ansah, um die Theorie durch astronomische Ereignisse zu überprüfen. Die Lichtablenkung durch Anwesenheit von Masse [5, S.14].

3.2 Gravitationslinseneffekt

Dass die Ablenkung von Lichtstrahlen durch Masse nicht nur Theorie ist, bewies Arthur Eddington im Jahr 1919. Unter seiner Leitung starteten am 29.05.1919 zwei Expeditionen nach Sobral, Brasilien, und Principe, Guinea, deren Ziel es war, die in der ART vorausgesagte Lichtablenkung zu überprüfen. Zuvor gab es zwar schon andere Expeditionen mit demselben Ziel, welche jedoch aus verschiedenen Gründen gescheitert waren. Deshalb gelten die Expeditionen vom Mai 1919 als erste erfolgreiche Bestätigung der Ablenkung von Licht. Nun kommt aber höchstwahrscheinlich die Frage auf, wie so eine Lichtablenkung überhaupt beobachtet werden kann [5, S.16].

3.2.1 Die Sonnenfinsternis, die Einstein bekannt machte

Laut Einstein kann diese Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne beobachtet werden [5, S.14]. Die Expeditionen von 1919 konnten die Lichtablenkung durch die Positionsverschiebung von Sternen beobachten (vgl. Kapitel 2.3.1). Dazu mussten sie das direkte Umfeld der Sonne betrachten. Tagsüber scheint die Sonne jedoch zu hell, damit die Sterne dort beobachtet werden können, und nachts ist die Sonne nicht zu sehen. Die einzige Möglichkeit, Sterne im direkten Umfeld der Sonne sehen zu können, ist somit ein ganz besonderes astronomisches Ereignis: eine totale Sonnenfinsternis [5, S.18]. Dabei schiebt sich der Mond genau so vor die Sonne, dass er diese komplett verdeckt und sie von der Erde aus nicht mehr zu

sehen ist. In dieser Totalitätsphase sind dann auch die Sterne im unmittelbaren Umfeld der Sonne zu sehen. Um zu überprüfen, ob eine Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne stattfindet, haben die Forscher während der totalen Sonnenfinsternis fotografische Aufnahmen von der Sonne und ihrer Umgebung gefertigt, wobei dieses Bild entstand. Oben rechts und links von der Sonne wurden drei Sterne gekennzeichnet,

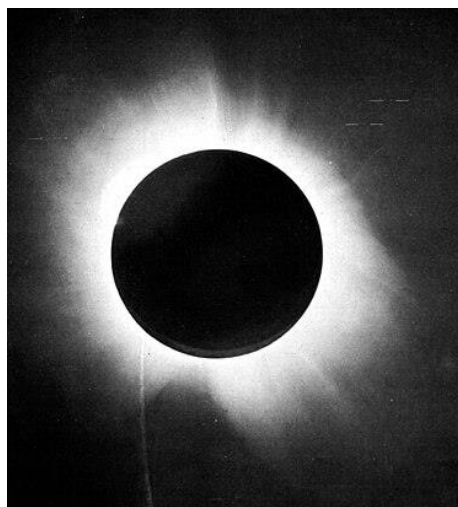


Abbildung 5: Sonnenfinsternis von 1919

die sich in der unmittelbaren Umgebung der Sonne befinden. Die Kennzeichnung erfolgte durch je zwei Striche links und rechts von den Sternen. Vom gleichen Sternfeld, in dem sich die Sonne während der Finsternis befand, wurden dann einige Monate später nochmals Fotografien gemacht. Als diese beiden Aufnahmen dann miteinander verglichen wurden, konnte schließlich festgestellt werden, dass sich die Positionen der Sterne tatsächlich geändert hatten [5, S.18]. Um dann auszurechnen, wie groß die Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne ist, nutzten sie folgende Formel aus der ART:

$$\alpha = \frac{4kM}{c^2 \cdot r} \quad [5, S.15].$$

Die ART selbst sagte für die Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne einen Wert von 1,75" voraus [4, S.46]. Jener Wert, welchen die Forscher dann für die

⁹ α = Lichtablenkungswinkel; k=Gravitationskonstante; M=Sonnenmasse; c=Lichtgeschwindigkeit im Vakuum; r=Abstand, in dem das Licht das Schwerezentrum passiert

Lichtablenkung ermitteln konnten, lag in Sobral bei 1,98" und in Principe bei 1,61" [5, S.16]. Dass die Lichtablenkung bei den Sonnenfinsternis-Expeditionen von 1919 beobachtet wurde, war, trotz der leicht abweichenden Werte eine erfolgreiche Bestätigung der Theorie. Die Beobachtungen stimmten mit dem überein, was in der ART vorausgesagt wurde. Dieses Ereignis war bahnbrechend, weil dadurch bestätigt wurde, dass die vierdimensionale Raumzeit wirklich existiert und dazu in der Lage ist, Lichtbahnen abzulenken, wenn sie durch massereiche Objekte gekrümmt wird. Die erstmalige Bestätigung der ART, revolutionierte somit das gesamte Bild vom Kosmos, wodurch Einstein und die ART schließlich ihre große Bekanntheit erlangten [5, S.16].

Durch andere astronomische Beobachtungen konnte die ART jedoch noch genauer bestätigt werden. Mithilfe von Radioteleskopen haben Forscher 1967 erneut astronomische Beobachtungen durchgeführt. Dabei haben sie gleichzeitig mit mehreren Radioteleskopen beobachtet und dadurch die Lichtablenkung noch genauer messen können, was einen weiteren Durchbruch bezüglich der Bestätigung der ART darstellte [16]. Die Theorie konnte dadurch erneut mit einer sehr hohen Genauigkeit bestätigen [7, S.16].

Da die Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne zwar vorhanden, aber eben nicht sehr stark ausgeprägt ist, könnte ein Beobachter die Krümmung der Lichtstrahlen mit bloßem Auge nicht beobachten. Es gibt jedoch ein astronomisches Phänomen, welches aus der ART hervorgeht, bei dem der Gravitationslinseneffekt besonders deutlich zur Geltung kommt.

3.2.2 Schwarze Löcher

Einsteins Feldgleichungen aus der ART konnten erstmals durch den Astrophysiker Karl Schwarzschild gelöst werden. Jahre später, um 1960, wurde dann festgestellt, dass die Schwarzschild-Lösung ein Schwarzes Loch beschreibt. Ein solches Schwarzes Loch ist ein Gebiet in der Raumzeit, in welchem sehr viel Masse so kompakt zusammengebracht ist, dass aus dem Horizont des Schwarzen Lochs weder Materie noch Licht entkommen können, wenn sie einmal hineingeraten (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Region ist sozusagen vom restlichen Kosmos abgekapselt. Solche Phänomene entstehen, wenn Sterne mit großen Massen in einer Supernova explodieren. Darum besitzen Schwarze Löcher auch so eine große Masse, wodurch sie die Raumzeit sehr stark krümmen [7, S.19].

Die Lichtablenkung in solchen Gebieten ist dementsprechend auch viel stärker als im Schwerfeld der Sonne, weshalb sich der Gravitationslinseneffekt dort viel besser beobachten lässt.

Mithilfe von modernen Computersimulationen lässt sich zeigen, wie stark der Effekt bei Schwarzen Löchern ausfällt. Durch die starke Ablenkung des Lichts um das Schwarze Loch erscheint dessen Umgebung völlig verzerrt [4, S.46]. Um das Loch ist ein rosafarbener Kreis zu erkennen. Dieser ist zu

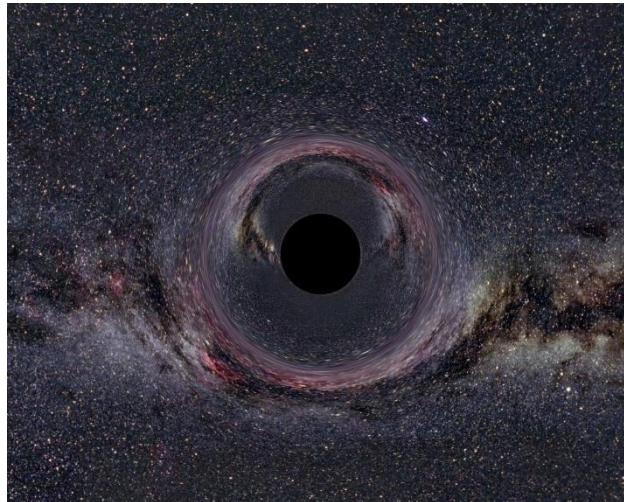


Abbildung 6: Gravitationslinseneffekt bei Schwarzen Löchern

sehen, weil dort Licht genau in dem Abstand vom Schwarzen Loch eingetroffen ist, dass die Lichtstrahlen nicht direkt vom Horizont eingesogen werden, sondern das Schwarze Loch auf einer Kreisbahn für immer umrunden. Dadurch kommt es dazu, dass ein Beobachter den Himmel innerhalb des Kreises noch einmal und im Prinzip unendlich oft sieht [4, S.47].

Anhand von Schwarzen Löchern kann die ART folglich auch bestätigt werden, da sie nicht nur ein Resultat der Theorie sind, sondern auch weil aufgrund ihrer riesigen Masse die Lichtbahnen besonders stark gekrümmt werden und der Gravitationslinseneffekt dementsprechend besonders deutlich zu beobachten ist. Anhand von Schwarzen Löchern kann die ART jedoch nicht nur hinsichtlich des Gravitationslinseneffekts bestätigt werden, sondern auch, wenn es darum geht, Gravitationswellen zu beobachten.

3.3 Gravitationswellen

Dass Gravitationswellen jemals beobachtet werden würden, hielt selbst Einstein für unrealistisch. Seine Zweifel waren jedoch nicht unberechtigt. Die Wechselwirkung zwischen der Materie und den Gravitationswellen ist nämlich sehr schwach, wodurch es folglich ziemlich schwer ist, sie aufzuspüren [6, S.46]. Auch wenn die Suche nach den Gravitationswellen sehr aufwendig ist, gelten die Experimente, die dafür durchgeführt werden als „die bislang genauesten Tests der allgemeinen Relativitätstheorie“ [2, S.62].

3.3.1 PSR 1913+16

Seit die Relativitätstheorie aufgestellt wurde, sind viele Forscher auf der Suche nach Gravitationswellen. Lange galten sie nur als eine bloße Vorhersage der ART, da sie nach deren Aufstellung von niemandem beobachtet werden konnten [2, S.61]. Diesem Pessimismus setzte ein Forscherteam im Jahr 1993 jedoch ein Ende. Die Astrophysiker A. Hulse und J. Taylor beobachteten über mehrere Jahre hinweg ein Doppelsternsystem mit dem Namen PSR 1913+16 [6, S. 48]. Dabei konnten sie feststellen, dass die beiden Neutronensterne des Systems sehr kompakt sind. Das bedeutet, dass sie sehr klein sind und trotzdem eine sehr große Masse besitzen. Somit ist die Gravitation in ihrem Umfeld sehr stark und die Sterne umkreisen sich in einem sehr geringen Abstand¹⁰. Durch die langjährige Beobachtung konnten Hulse und Taylor feststellen, dass die Sterne sich immer schneller umrundeten und dadurch an Energie verloren. Der Energieverlust, welcher für dieses Sternsystem ausgerechnet wurde, kam jenem gleich, den die ART für die Abstrahlung von Gravitationswellen vorausgesagt hatte. Somit haben die beiden zwar keine Gravitationswellen registriert, konnten ihre Existenz jedoch indirekt nachweisen [6, S. 49].

3.3.2 Gravitationswellendetektoren

Um die Schwingungen der Raumzeit direkt registrieren zu können, haben Forscher Gravitationswellendetektoren entwickelt. Bekannte Projekte zum Aufspüren von Gravitationswellen sind beispielsweise LIGO¹¹ in den USA, Virgo in Italien [2, S.62] und GEO600 in Deutschland. Sie arbeiten alle mit einem sogenannten Michelson-Interferometer als Detektor. Diese müssen eine hohe Messempfindlichkeit haben, da die Signale von Gravitationswellen sehr schwach sind. Die Wissenschaftler haben mit den Interferometern zur Registrierung der Raumzeitschwingungen eine nicht unkomplizierte Methode entwickelt.

Ein Laserstrahl wird aufgeteilt und läuft dann auf zwei Messstrecken, welche senkrecht zueinander sind. Am Ende der Strecke befindet sich ein Spiegel, sodass die beiden Strahlen reflektiert werden und sich wieder am Ausgangspunkt treffen. Sie interferieren. Dann wird eine wichtige Eigenschaft des Lichts, die Wellennatur, genutzt. Beim Interferieren wird darauf geachtet, in welcher Wellenphase sich die

¹⁰ Abstand zwischen den Sternen entspricht nur wenige Male der Distanz zwischen Erde und Mond.

¹¹ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

beiden Lichtstrahlen befinden [6, S.49]. Wenn sie im gleichen Takt schwingen, wird es als konstruktive Interferenz bezeichnet, und wenn ihre Phasen versetzt sind, als destruktive Interferenz. Erreicht nun eine Gravitationswelle das Interferometer, wird die Raumzeit entlang des Detektors für kurze Zeit verzerrt und die Länge der Messstrecken ändert sich geringfügig. Daraus resultiert, dass sich das Interferenzmuster ändert, weil die Lichtstrahlen dann phasenversetzt aufeinandertreffen [6, S.52]. Das große Problem dabei ist, dass solche Änderungen des Interferenzmusters nicht nur durch Gravitationswellen entstehen können, sondern ebenfalls durch Einflüsse aus der Umwelt [6, S.52].

3.3.3 Direkte Nachweise

Gravitationswellen direkt nachweisen und damit ein weiteres Feld der ART bestätigen, konnten Forscher erst im Jahr 2015, also lange nach Aufstellung der ART. Dort wurde erstmals die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher durch LIGO registriert. Die Interferometer empfingen das Signal aus einem 1,3 Milliarden Lichtjahre¹² entfernten Doppelsystem zweier Schwarzer Löcher. Die beiden massereichen Objekte umkreisten sich, bis sie letztendlich miteinander verschmolzen, wobei starke Gravitationswellen ausgesendet wurden und am 14.09.2015 LIGO erreichten [10].

Ein weiterer Nachweis von Gravitationswellen wurde im August 2017 geliefert. Dort wurden durch LIGO Schwingungen der Raumzeit registriert, welche vor 130 Millionen Jahren bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne entstanden sind. Solche Ereignisse hatten einen großen Einfluss auf das Bild vom Kosmos. Wenn die Detektoren ein Signal empfangen, kann die Masse der Objekte, welche die Schwingungen ausgesendet haben, ermittelt werden. Außerdem können Forscher dadurch herausfinden, welche Entfernung die Gravitationswellen seit ihrer Aussendung zurückgelegt haben [2, S.64]. Die Entfernung der 2017 gemessenen Wellen wurde mit der Rotverschiebung am Ort der Entstehung verknüpft. Diese gibt an, wie weit sich das Universum zwischen Aussendung und Empfangen der Gravitationswellen ausgedehnt hat. Die Forscher können mit den Schwingungen der Raumzeit also auch die Expansion¹³ des Universums vermessen und dadurch die Entwicklung des Kosmos besser verstehen. Die Gravitationswellenforschung

¹² Entfernung, die Licht in einem Jahr zurücklegt.

¹³ Ausdehnung

wird immer weiter ausgebaut, weshalb bald sogar vom All aus nach den Schwingungen der Raumzeit gesucht werden soll [2, S.66].

3.3.4 Ausblick

Objekte, welche Gravitationswellen verursachen, senden diese über einen bestimmten Frequenzbereich aus. Interferometer auf der Erde können nur Gravitationswellen mit Frequenzen von 400 bis 30 Hertz aufzeichnen und sind somit nicht fähig, alle astronomischen Ereignisse, die Gravitationswellen verursachen, zu registrieren. Die Kollision von zwei supermassereichen Schwarzen Löchern ist für irdische Interferometer zum Beispiel nicht sichtbar, da die Raumzeitschwingungen, welche durch dieses Ereignis verursacht wurden, bei niedrigeren Frequenzen liegen. Um diese und andere kosmische Phänomene jedoch auch aufspüren zu können, ist ein Interferometer im Weltraum namens LISA¹⁴ in Planung. Dieses besitzt nämlich viel längere Messstrecken¹⁵, wodurch es eine viel höhere Empfindlichkeit als irdische Detektoren haben wird und somit auch Gravitationswellen von niedrigeren Frequenzen registrieren kann [2, S.64].

Durch solche Observatorien im All und die Ausbesserung von irdischen Detektoren können Forscher bald viel mehr Ereignisse im Kosmos beobachten und gleichzeitig auch mehr Informationen über das Wesen und die Entstehung Schwarzer Löcher erhalten [2, S.63/64]. Wegen der hohen Empfindlichkeit des Weltraum-Interferometers wird es den Forschern auch möglich sein, die ART mit einem ganz hohen Maß an Genauigkeit zu überprüfen, wenn sie mit LISA Gravitationswellen registrieren [2, S.67]. Außerdem hätten Forscher die Möglichkeit, einen Einblick in die Geschichte des Universums zu bekommen, da Gravitationswellen sogar Informationen über den Urknall liefern könnten. Es wird vermutet, dass bei diesem Ereignis starke Gravitationswellen freigesetzt wurden, die noch heute in Form von Hintergrundstrahlung durch LISA nachgewiesen werden könnten [2, S.67].

An diesem Beispiel wird die stets anhaltende Bedeutung der Relativitätstheorie für die Astronomie besonders deutlich. Seit der Aufstellung der ART entwickelt sich die Gravitationswellenastronomie ständig weiter, sodass die Wissenschaft schon bald durch die Schwingungen der Raumzeit ein besseres Verständnis über die Entwicklung des Universums bekommen wird [2, S.62].

¹⁴ Laser Interferometer Space Antenna [2, S.66]

¹⁵ Die Länge der Messstrecke beträgt mehrere Millionen Kilometer.

4 Kritische Diskussion

So bedeutend die Beobachtungen von Ereignissen wie der Periheldrehung, Sonnenfinsternissen oder Gravitationswellen für die Akzeptanz der ART auch sind, dürfen zwei wichtige Punkte nicht ausgelassen werden. Die Effekte, die in der ART hervorgesagt werden, fallen im heute möglichen Beobachtungsspektrum sehr gering aus. [Die Vorstellung davon, dass diese mit dem bloßen Auge am Himmel beobachtet werden könnten, ist somit falsch.] Wenn nämlich die Rede von der Verschiebung eines Sterns oder Perihels um wenige Bogensekunden ist, muss dies ins Verhältnis mit den riesigen Größen des Universums gebracht werden. Eine Bogensekunde entspricht gerade einmal einem 3600-stel eines Grades, was, relativ gesehen, eine sehr geringe Verschiebung ist (vgl. Kapitel 3.2.2) [11]. Bei Gravitationswellen ist das Ausmaß sogar noch stärker. Die Detektoren reagieren erst auf eine Längenänderung ihrer Messstrecken durch Gravitationswellen von 10^{18} Metern, was gerade einmal einem winzigen Bruchteil eines Protonendurchmessers entspricht (vgl. Kapitel 3.3.2) [6, S.49]. Diese kleinen Maßstäbe führen, zusammen mit den vielen Störfaktoren aus der Umwelt, welche die Beobachtungen von besagten astronomischen Ereignissen negativ beeinflussen können, zu Schwierigkeiten beim Bestätigen der ART [6, S.52]. Die Anforderungen an Genauigkeit bei den Messungen sind somit sehr hoch und die Forscher müssen mit viel Vorsicht und Präzision arbeiten, damit sie die ART durch solche astronomischen Ereignisse bestätigen können. Dank der stetigen Fortschritte in der Astronomie bringen die Beobachtungen von astronomischen Ereignissen und die damit einhergehende Bestätigung der ART jedoch immer mehr Möglichkeiten mit sich. So ist es für die Wissenschaft eher zweitrangig, wie groß die aus der ART resultierenden Effekte sind, da auch kleine Messergebnisse von großer Bedeutung für die Forschung sein können. Die Bestätigung der Relativitätstheorie ermöglicht Einblicke in die Geschichte des Universums. Durch sie werden die Forscher möglicherweise einen Einblick in die Phase des Urknalls bekommen. Gravitationswellen tragen also Informationen, die von keiner anderen Quelle beschaffen werden können. Es gibt folglich noch viele Möglichkeiten, die der Astronomie durch die Beobachtungen von relativistischen Effekten offenstehen [2, S.67].

5 Fazit

Der Fakt, dass die vorhergesagten Effekte aus der ART tatsächlich durch astronomische Ereignisse beobachtet werden können, hat es möglich gemacht, die ART seit ihrer Aufstellung in vielen Belangen bis auf eine sehr hohe Genauigkeit zu bestätigen.

Ursprünglich gibt es noch mehr astronomische Ereignisse, anhand derer die ART bestätigt werden kann, wie z.B. die gravitative Rotverschiebung (vgl. Kapitel 3.3.3). Um den Rahmen dieser Facharbeit aber einhalten zu können, habe ich mich bewusst auf drei Ereignisse konzentriert, damit diese auch ausführlich und verständlich erklärt werden können. Die drei aufgeführten astronomischen Ereignisse können die allgemeine Relativitätstheorie nämlich in beeindruckender Weise bestätigen. Sie tragen zum Verständnis von weiteren kosmischen Phänomenen wie Schwarzen Löchern bei. Außerdem revolutionierte die Bestätigung der Theorie das bisherige Bild vom Kosmos, wodurch der Astronomie wichtige Erkenntnisse über die Struktur des Universums geliefert werden konnten. Vor allem ist aber die Gravitationswellenastronomie von fundamentaler Bedeutung. Der Ausbau dieses Bereiches durch die Verbesserung der Beobachtungsmethoden wird besonders stark zur zukünftigen Entwicklung der Wissenschaft beitragen, da Gravitationswellen sehr wichtige Informationen über die Vorgänge im Kosmos enthalten. Genau deshalb ist es wichtig weiter zu forschen, um die Möglichkeiten, die die Bestätigung der Relativitätstheorie mit sich bringt, voll ausschöpfen zu können. Die Bestätigung der Relativitätstheorie ist ein einzigartiges und vor allem vielfältiges Feld der Astronomie.

Auch wenn die Effekte im momentan möglichen Beobachtungsspektrum noch klein ausfallen, sind die weiteren Möglichkeiten, die mit den Nachweisen der relativistischen Vorhersagen in Zukunft einhergehen werden, umso größer. Letztendlich hängt nämlich alles von der Perspektive ab, denn wie Einstein selbst sagte: „*Alles ist relativ*“ [14].

6 Literaturverzeichnis

Literaturquellen:

- [1] Borgeest, Ulf: Einsteins allgemeine Theorie der Relativität. In: Sterne und Weltraum Special 6, 05/2001, S.62-69.
- [2] Castelvechi, Davide: Gravitationswellen: Am Puls der Raumzeit, In: Spektrum der Wissenschaft, 10/2018, S. 60-67.
- [3] Janssen, Michel und Renn, Jürgen: Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie. In: Spektrum der Wissenschaft, 10/2015, S.48-55.
- [4] Kraus, Ute: Reiseziel: Schwarzes Loch. In: Sterne und Weltraum, 11/2005, S.46-50.
- [5] Lambrecht, H.: Astronomie und Relativitätstheorie. In: Die Sterne, 1979, S.11-23.
- [6] Mokler, Felicitas: Warten auf die Welle. In: Spektrum der Wissenschaft, 12/2015, S.46-55.
- [7] Pössel, Markus: 100 Jahre und quicklebendig. In: Sterne und Weltraum Dossier, 02/2015, S.14-21.

Internetquellen:

- [8] Greuling, Heinz: Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Aus: https://www.planet-wissen.de/geschichte/persoenlichkeiten/albert_einstein_das_jahrhundert_genie/pwiespezielleundallgemeinerelativitaetstheorie100.html, Stand: 13.01.2020.
- [9] Honerkamp, Josef: Was bedeutet eigentlich Einsteins Formel $E=mc^2$? <https://scilogs.spektrum.de/die-natur-der-naturwissenschaft/was-bedeutet-eigentlich-einsteins-formel-e-mc/>, Stand: 31.05.2011.
- [10] Kayser, Rainer: Gravitationswellen. Aus: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/gravitationswellen/>, Stand: 16.10.2023
- [11] Müller, Andreas: Bogensekunde. Aus: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/bogensekunde/50>, Stand: 2007.
- [12] Müller, Andreas: Raumzeit. Aus: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/raumzeit/393>, Stand: 2007.

- [13] Müller, Andreas: Zeitdilatation. Aus:
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/zeitdilatation/544>, Stand:
 2007.
- [14] Northe, Marko: Wer das liest, ist (fast) so schlau wie Einstein. Aus:
<https://www.welt.de/kmpkt/article181451718/Die-Relativitaetstheorie-kurz-und-kmpkt-erklaert.html>, Stand: 24.08.2021.
- [15] Sennewald, Immo: Astronomie. Aus: <https://www.planet-wissen.de/technik/weltraumforschung/astronomie/index.html>, Stand:
 26.03.2020.
- [16] Shapiro, Irwin und Shapiro, Steven: Lichtablenkung durch Gravitation.
 Aus: <https://www.einstein-online.info/spotlight/lichtablenkung/>, Stand:
 2010.

Sämtliche Quellen wurden zuletzt aufgerufen am: 21.02.2024.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Krümmung der Raumzeit (https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime_curvature) | 4 |
| Abbildung 2: Lichtablenkung (eigene Darstellung)..... | 5 |
| Abbildung 3: Gravitationswellen (https://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6568/10784_read-24345/usetemplate-printany/) | 6 |
| Abbildung 4: Periheldrehung des Merkur (https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/sonnensystem/merkur/) | 7 |
| Abbildung 5: Sonnenfinsternis von 1919 (https://de.wikipedia.org/wiki/Tests_der_allgemeinen_Relativit%C3%A4tstheorie#/media/Datei:1919_eclipse_positive.jpg)..... | 10 |
| Abbildung 6: Gravitationslinseneffekt bei Schwarzen Löchern (https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Black_Hole_Milkyway.jpg)..... | 12 |

Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers