

# Die allgemeine Relativitätstheorie

Manuel Hohmann  
Universität Hamburg

20. Juni 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Was ist die ART?</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Wie löst die ART alte Probleme?</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Welche neuen Vorhersagen macht die ART?</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Wo steht die ART heute?</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Was kommt als nächstes?</b>	<b>19</b>

1. Was ist die ART?

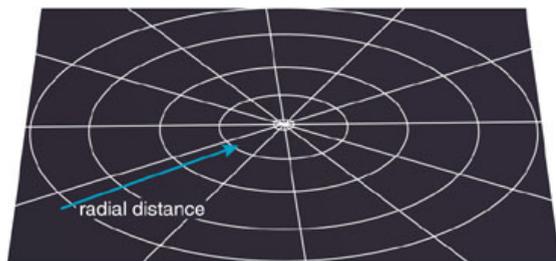
## 1.1. Physik vor der ART

- Spezielle Relativitätstheorie:
  - Alle gleichförmig bewegten Bezugssysteme (Inertialsysteme) sind äquivalent.
  - Die Lichtgeschwindigkeit ist für alle Beobachter gleich.
  - Kein Signal ist schneller als Lichtgeschwindigkeit.
- Newtonsche Gravitationstheorie:
  - Alle Körper ziehen sich mit einer Kraft proportional ihrer Masse an.
  - Diese Kraft wirkt instantan über beliebige Distanzen.
  - Planeten bewegen sich auf stationären, elliptischen Bahnen.
- Ungelöste Probleme:
  - Newtons Theorie beinhaltet eine unendliche Signalgeschwindigkeit, im Widerspruch zu Einsteins Theorie.
  - Die Bahn des Planeten Merkur ist keine stationäre Ellipse.

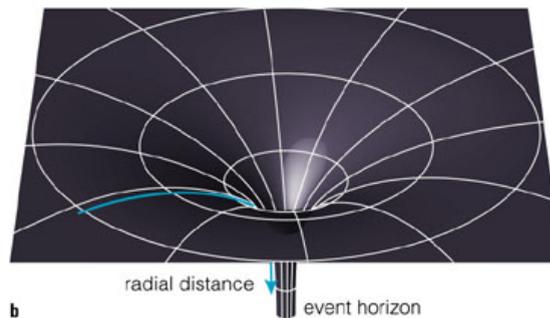
## 1.2. Die Idee

- Beschleunigte Bezugssysteme sind Inertialsystemen äquivalent.
- Gravitation und beschleunigte Bezugssysteme entsprechen einander.
- Beide lassen sich durch eine gekrümmte Raumzeit beschreiben.
- Die Krümmung der Raumzeit wird durch die Materie bestimmt.
- Kräftefreie Körper folgen der Krümmung der Raumzeit.

## 1.3. Die Krümmung der Raumzeit

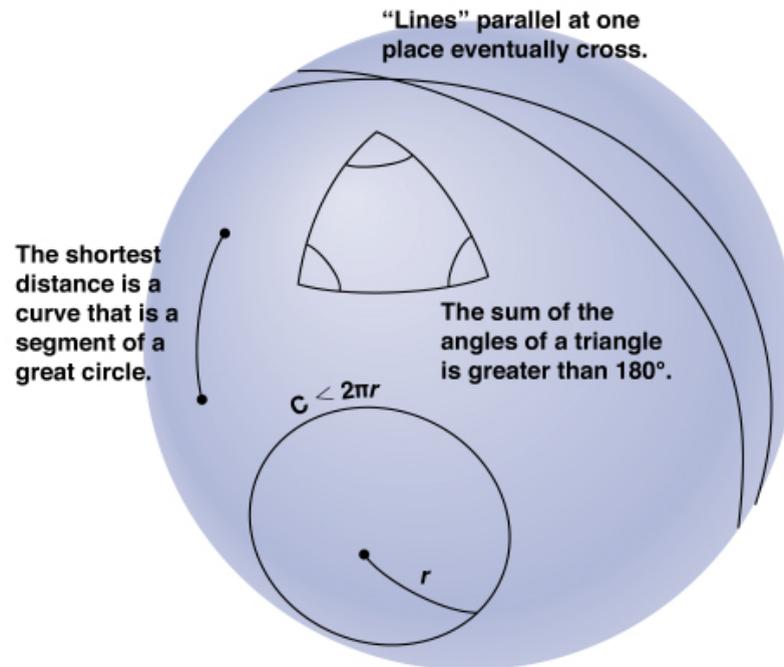


a



b

## 1.4. Woran erkennt man die Krümmung?



## 1.5. Die ART auf einer Briefmarke

Die ART ist eine großartige und sehr komplexe Theorie - und vor allem ist sie eine schöne Theorie, denn sie lässt sich in einer einzigen Gleichung zusammenfassen, die auf eine Briefmarke passt:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

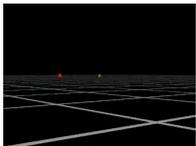
Auf der rechten Seite steht der *Energie-Impuls-Tensor*  $T_{\mu\nu}$ , er beschreibt die Verteilung und Bewegung von Massen. Links steht der *Einstein-Tensor*  $G_{\mu\nu}$ , er beschreibt die Krümmung der Raumzeit. Beide sind gleich, bis auf einen Faktor, der die *Gravitationskonstante*  $G$  enthält.

Wendet man diese Gleichung auf das Universum an, so stellt man fest, dass es instabil ist. Deshalb hat Einstein sie um die kosmologische Konstante  $\Lambda$  ergänzt, um ein statisches Universum zu beschreiben. Doch das Universum ist nicht statisch! Deshalb nannte Einstein sie “die größte Eselei meines Lebens”.

**2. Wie löst die ART alte Probleme?**

## 2.1. Die Periheldrehung des Merkur

- Es gibt in der Newtonschen Mechanik zwei Kraftgesetze, die eine Bewegung auf Ellipsenbahnen bewirken - eines davon ist das Newtonsche Gravitationsgesetz.
- Nach Kepler folgen alle Planeten elliptischen Umlaufbahnen, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet.
- Die Merkurbahn zeigt eine Abweichung davon - die Ellipsenbahn ist nicht fest, sondern rotiert um  $43''$  pro Jahrhundert.
- Möglicher Erklärungsversuch: Ein Planet innerhalb der Merkurbahn?
- Nach Einsteins Theorie ist Newtons Gravitationsgesetz nur eine Näherung, es gibt Korrekturen.
- Planeten bewegen sich nicht auf exakten Ellipsen, die Abweichungen lassen sich berechnen.
- Für Merkur beträgt die berechnete Abweichung  $43''$  pro Jahrhundert.
- Die ART löst das Problem der Periheldrehung des Merkur.



## 2.2. Die Endlichkeit der Signalgeschwindigkeit

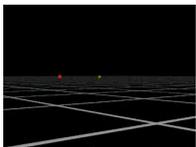
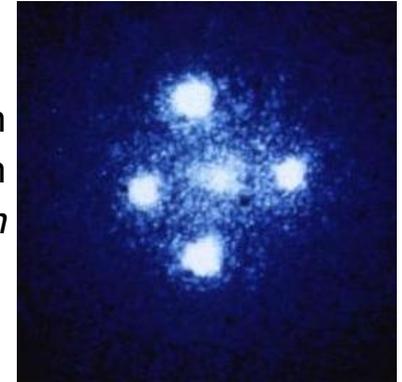
- Newtons Gravitationstheorie behandelt die Gravitation als Fernkraft, die ohne Zeitverzögerung zwischen entfernten Massen wirkt.
- Eine instantane Fernwirkung widerspricht der speziellen Relativitätstheorie
- Einsteins Gravitationstheorie behandelt die Gravitation als eine lokale Eigenschaft der Raumzeit.
- Es gibt keine instantane Fernwirkung, stattdessen breitet sich die Gravitation ebenso aus wie das Licht.

**3. Welche neuen Vorhersagen macht die ART?**

## 3.1. Die Ablenkung von Lichtstrahlen

- Der ART zufolge ist Gravitation eine Krümmung des Raumes und *alles* folgt dieser Raumkrümmung, auch das Licht.
- In einem Gravitationsfeld nimmt auch das Licht eine gekrümmte Bahn, es wird abgelenkt.
- Einstein berechnete die Ablenkung des Sternenlichts durch die Sonne. Im Jahre 1919 wurde dies bei einer Sonnenfinsternis nachgemessen und bestätigt.

- Auch weit entfernte, massereiche Objekte lenken das Licht von dahinter liegenden Galaxien ab. Man hat bereits zahlreiche solcher *Gravitationslinsen* entdeckt.
- 



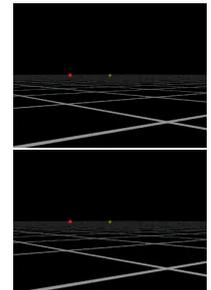
## 3.2. Gravitationswellen

- Die Einsteinschen Feldgleichungen können zu einer *Wellengleichung* umgeformt werden, die eine Ausbreitung von Gravitationswellen im leeren Raum beschreibt.
- Zur Erzeugung solcher Gravitationswellen benötigt man z.B. umeinander kreisende, massive Objekte wie Neutronensterne oder schwarze Löcher.
- Für den Beobachter erscheint eine vorbeilaufende Gravitationswelle als periodische Verzerrung des Raumes.
- Der Nachweis von Gravitationswellen ist bisher nicht direkt gelungen, da der Effekt sehr klein ist. Man sucht mit großen Interferometern, die kleine Längenveränderungen messen können, nach der Verzerrung des Raumes. Zu den größten Projekten zählen GEO600 und LIGO.

Es gibt einen indirekten Nachweis für Gravitationswellen:

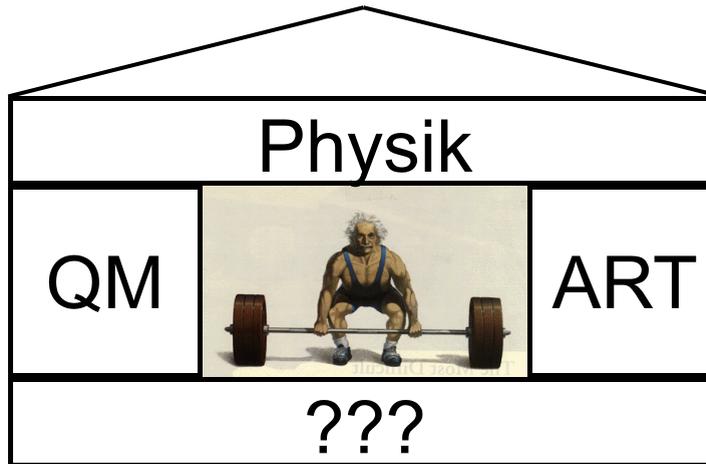
Ein Doppelneutronenstern, der Gravitationswellen aussendet,

- gibt damit Energie ab. Seine Bahn wird dadurch enger und die Rotationsgeschwindigkeit steigt - dies wurde bereits beobachtet.



4. Wo steht die ART heute?

## 4.1. Die zwei Säulen der modernen Physik



Die moderne Physik ruht auf zwei Säulen - der allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Beide sind brillante Theorien, die in ihren jeweiligen Gültigkeitsbereichen mit hoher Genauigkeit überprüft wurden. Doch leider sind sie unvereinbar. Das Fundament, auf dem beide Säulen stehen, kennen wir nicht. Beim Versuch, die beiden Theorien zusammenzubringen, liefern die Gleichungen nur noch unendliche Ergebnisse, die physikalisch sinnlos sind.

## 4.2. Dunkle Materie

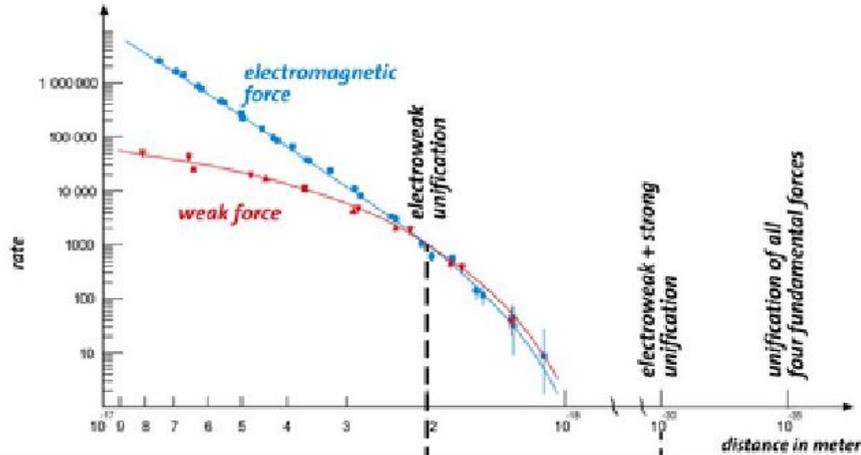
- Viele Galaxien rotieren - ihre Rotationsgeschwindigkeit kann man mit Hilfe des Dopplereffekts messen.
- Die Masse der sichtbaren Materie in einer Galaxie kann man bestimmen, indem man die Sterne zählt.
- Die Gravitation gleicht die durch die Rotation hervorgerufene Fliehkraft aus.
- Vergleicht man die Fliehkraft mit der Gravitation der sichtbaren Materie, so stellt man fest, dass letztere viel zu klein ist - sie könnte die Galaxien nicht zusammenhalten!
- Lösung des Problems: Die Galaxien müssen viel mehr Materie enthalten, die wir nicht sehen können, weil sie nicht leuchtet wie die Sterne sondern dunkel ist.
- Die Beobachtungen zeigen, dass es etwa fünfmal so viel dunkle Materie geben muss wie sichtbare.
- Woraus die dunkle Materie besteht, wissen wir nicht. Wir wissen nur, dass es sie gibt. Mögliche Kandidaten: Neutrinos, WIMPs, kleine schwarze Löcher. . .

### 4.3. Dunkle Energie

- Einstein führte die kosmologische Konstante  $\Lambda$  ein, um seine Theorie zur Beschreibung eines statischen Universums zu machen - als sich herausstellte, dass das Universum nicht statisch ist, verwarf er die Idee.
- Zu Einsteins Zeit wurde bekannt, dass sich das Universum ausdehnt. Edwin Hubble fand, dass sich entfernte Galaxien von uns wegbewegen. Einsteins Theorie sagt vorher, dass sich diese Bewegung durch die Anziehung der Galaxien abbremst.
- Heutige Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Expansion sich beschleunigt!
- Mögliche Erklärung: Die ART muss ergänzt werden, und zwar *genau in der Form, die Einstein vorgeschlagen hatte, durch Einführung von  $\Lambda$ !*
- Doch was ist  $\Lambda$ ? Heutige Interpretation: Der leere Raum ist nicht leer, sondern mit einer merkwürdigen Substanz gefüllt - der dunklen Energie.
- Wir erkennen die dunkle Energie an ihrer Wirkung durch die Gravitation, aber wir können sie nicht sehen und wissen nicht, woraus sie besteht. Dabei macht sie 70% der Materie im Universum aus!

**5. Was kommt als nächstes?**

# 5.1. Die Vereinigung der Naturkräfte



*strong force*

*electromagnetic force*

*weak force*

*gravity*

*electroweak force*

**big bang**



## 5.2. Stringtheorie

- Annahme der Stringtheorie: Elementarteilchen sind nicht punktförmig, sondern kleine Fäden oder schwingende Saiten bzw. Strings. Man wendet die Quantentheorie auf diese Objekte an und nicht auf Punktteilchen.
- Mit der Stringtheorie ist es möglich, sowohl die Teilchenphysik als auch die Gravitation zu beschreiben, in einer gemeinsamen, vereinheitlichten Theorie. Die unendlichen Ergebnisse verschwinden, wenn die Teilchen eine endliche Ausdehnung bekommen.
- Mit der heutigen Theorie kann man noch keine konkreten Berechnungen durchführen, wie mit anderen Theorien der Teilchenphysik. Die Parameter, die Teilchenphysiker heute messen, sind der Stringtheorie noch schwer zugänglich.
- Es gibt nicht nur eine Stringtheorie, sondern 5 Klassen von Stringtheorien, die wie verschiedene Varianten einer Theorie aussehen. Doch die fundamentale Theorie, die von Ed Witten "M-Theorie" getauft wurde ist noch unbekannt. (Man weiß noch nicht einmal, warum Witten das "M" ausgesucht hat...)
- Die Stringtheorie erfordert eine 10-dimensionale Raumzeit, keine 4-dimensionale. Es erfordert einige Kunstgriffe, sie auf unser Universum anzuwenden.

# Literatur

- [1] Albrecht Fölsing, Albert Einstein, Suhrkamp 1999
- [2] Albert Einstein, Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, Springer 2001
- [3] Stephen Hawking, Eine kurze Geschichte der Zeit, Rowohlt 1998
- [4] Torsten Fließbach, Allgemeine Relativitätstheorie, Spektrum 2003
- [5] Brian Greene, Das elegante Universum, Bvt Berliner Taschenbuch Verlag 2004