



Gravitationswellen-Astronomie

Bad Honnef 23. - 30. Juni 2023

Gravitationswellen sind winzige Verzerrungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum ausbreiten. Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie zufolge entstehen sie bei einer Vielzahl astronomisch interessanter Prozesse, wie etwa bei der Verschmelzung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, aber auch im frühen Universum kurz nach dem Urknall. Gravitationswellen-Astronomie hat das Ziel, mit Hilfe von Gravitationswellen Informationen über kompakte Himmelskörper wie Schwarze Löcher und Neutronensterne, über Supernovae und über Prozesse im frühen Universum zu gewinnen.

Der direkte Nachweis von Gravitationswellen ist das Ziel großer internationaler Detektor-Kollaborationen wie LIGO, GEO600 und Virgo. Die Gravitationswellen-Teleskope sind riesige Michelson-Interferometer, bei denen die modernsten Erkenntnisse der Quantenoptik Anwendung finden. Das LIGO-Konsortium hat zum ersten Mal im September 2015 direkt Gravitationswellen von zwei kollidierenden Schwarzen Löchern nachweisen können. Im Jahr 2017 wurden Barry Barish, Kip Thorne und Rainer Weiss dafür mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet.

Indirekte Beweise für die Existenz von Gravitationswellen ergaben sich allerdings schon in den Achtziger Jahren durch die Beobachtung eines Doppelpulsars. Theoretisch vorhergesagte Abstrahlungsverluste durch Gravitationswellen müssen eine Verringerung des Abstandes beider Sterne zur Folge haben, was wiederum deren Umlaufdauer reduzieren sollte. Diese Verringerung der Orbitalperiode konnte tatsächlich durch radioastronomische Beobachtungen bestätigt werden, wofür schon 1993 Joseph Taylor und Russell Hulse mit dem Nobelpreis geehrt wurden.

Die Gravitationswellen-Astronomie bietet auch aus pädagogisch-didaktischer Sicht viel. Fundamentale Theorien der Physik wie Mechanik, Optik, Wellentheorie, Relati-

vitätstheorie und Astronomie verbinden sich hier mit Datenanalyse und einer Vielzahl von Simulationen, Projekten und Lehrplänen, die online zur Verfügung stehen und die Behandlung von Gravitationswellen-Astronomie als multimediales und interaktives Lernprojekt fördern können.

In den Vorträgen und Workshops sollen einige wichtige Konzepte aller Facetten der Gravitationswellen-Astronomie herausgearbeitet und Ideen und Anregungen für den Physikunterricht entwickelt werden. Wir wollen insbesondere fragen, welche neuen astronomischen Erkenntnisse wir den ersten Jahren der direkten Beobachtung von Gravitationswellen verdanken und welche Pläne für den Bau neuer Detektoren es gibt. Auch historische Aspekte sollen eine Rolle spielen.

Wissenschaftliche Leitung:

Karl-Heinz Lotze (Friedrich Schiller Universität Jena),
Andreas Malmendier (Utah State University, Logan),
Frank Ohme (MPI Hannover),
Gudrun Wanner (Leibniz Universität Hannover).

URL der DPG-Lehrerfortbildung:

<https://www.usu.edu/math/malmendier/BadHonnef2023/index.html>

Abstracts

Bernd Brügmann (Friedrich Schiller Universität Jena)

Gravitationswellen – was Einstein noch nicht sehen konnte

Albert Einstein hatte Gravitationswellen schon 1916 als Konsequenz aus der damals neuen Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Erst 100 Jahre später konnten Gravitationswellen direkt beobachtet werden, was 2017 mit dem Nobel-Preis in Physik gewürdigt wurde. Bei den ersten und zahlreichen nachfolgenden Beobachtungen handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um Signale von der Kollision und Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher. Der Vortrag gibt einen einführenden Überblick über die Theorie und Praxis der Gravitationswellenphysik.

Einerseits soll erläutert werden, welche extremen Anforderungen ein Gravitationswellendetektor erfüllen muss, um die sehr kleinen Schwingungen der Raumzeit nachzuweisen. Andererseits wird angesprochen, wie Computersimulationen es uns erlauben, das Zwei-Körper-Problem der Allgemeinen Relativitätstheorie zu lösen und Gravitationswellensignale bestimmten astrophysikalischen Ereignissen zuzuordnen. Die erzielten Fortschritte in Experiment und Theorie ermöglichen eine neue Astronomie, die Gravitationswellenastronomie.

David Champion (MPI für Radioastronomie Bonn)

Using pulsars to detect supermassive binary black holes

Galaxy evolution is driven by the merger of smaller galaxies, during which the supermassive black holes at their centres eventually come closer and form binaries. These inspiralling supermassive black hole binaries (SMBHBs) are expected to be the strongest source of gravitational waves (GWs) in the Universe and their emission should be brightest at nanohertz frequencies (wavelengths of several light years). To be sensitive to such long wavelengths we need a GW detector of Galactic scale. For this we use the exceptional rotational stability of pulsars (rotating neutron stars) as clocks and time them over many years in an array. GWs passing over the Earth would cause a pattern of delays and advances in these “clocks”. These detectors are called Pulsar Timing Arrays (PTAs).

For more than a decade the various PTAs have been slowly increasing their sensitivity and constraining models of galaxy evolution. As the dataset grows in time the PTA measures more of the wavelength and so gains sensitivity. Eight years ago the European Pulsar Timing Array started to detect a weak signal common to all pulsars, but without the pattern on the sky (correlation) that is the signature of GWs. In the past year the same signal has been seen more strongly in PTAs in Europe, Australia and North America but still without correlation. Now the race is on to detect the correlation, prove the existence of these ultra-long wavelength GWs, measure their properties, and relate that back to galaxy evolution.

Christian Ecker (Goethe-Universität Frankfurt)

Neutronsterne als Labor für dichte Kernmaterie

Nach einer kurzen Einführung in die Physik von Neutronensternen zeige ich wie numerische Simulationen von Neutronensternenkollisionen und den dabei erzeugten Gravitationswellen dabei helfen die Eigenschaften dichter Kernmaterie besser zu verstehen.

Michèle Heurs (AEI Hannover)

Hochtechnologie für die interferometrische Gravitationswellen-Detektion

Seit der ersten direkten Detektion von Gravitationswellen im Jahr 2015 haben wir ein völlig neues Beobachtungsfenster zum Universum aufgestoßen. Jetzt sehen wir nicht nur Information über astrophysikalische Ereignisse mittels elektromagnetischer Strahlung und Neutrinos, wir können dem Universum nun auch im Gravitationswellenspektrum zuhören. Die Empfindlichkeit dieser Laserinterferometer ist so hoch, dass die Quanteneffekte des verwendeten Laserlichtes bereits limitierend wirken. Die ultragenau stabilisierten Laserquellen sind damit nicht mehr allein ausreichend, sondern es müssen nichtklassische Lichtquellen in den Gravitationswellendetektoren der aktuellen (zweiten) Generation (wie aLIGO und AdVirgo) zum Einsatz kommen. Weitere Rauschquellen, wie seismisches und thermisches Rauschen, bringen weitere Herausforderungen für die Detektoren der nächsten Generation (wie CosmicExplorer und Einstein Telescope) mit sich. Um stets höhere Detektionsraten für aussagekräftige Gravitationswellenastronomie

zu erreichen, wird eine stets wachsende Detektionsempfindlichkeit benötigt. In diesem Vortrag wird das Prinzip der interferometrischen Gravitationswellendetektion eingeführt, und es werden einige Hochtechnologielösungen vorgestellt, die in Advanced LIGO zum Einsatz kommen.

Ute Kraus und Corvin Zahn (Universität Hildesheim)

Die Geometrie von Gravitationswellen (*Workshop*)

In diesem Workshop mit Schwerpunkt auf der Relativitätstheorie geht es um die Beschreibung von Gravitationswellen als gekrümmte Raumzeit. Wir zeigen wie mit Hilfe von (Sektor-)Modellen die Geometrie dreidimensionaler gekrümmter Räume veranschaulicht werden kann. Für eine “Momentaufnahme” einer ebenen Gravitationswelle stellen wir ein solches dreidimensionales Modell vor. Sektormodelle ermöglichen auch die Einbeziehung der Zeit. Wir erläutern raumzeitliche Sektormodelle und stellen ein Gravitationswellenmodell mit einer räumlichen und einer zeitlichen Dimension vor, an dem man Eigenschaften der Welle aufzeigen kann. Durch den anschaulichen Zugang über Modelle eignet sich die Beschreibung auch für die Schule. Vorlagen für die Modelle stellen wir gerne für die Nutzung im Unterricht zur Verfügung.

Karl-Heinz Lotze (Friedrich Schiller Universität Jena)

Gravitationswellenastronomie – eine didaktisch orientierte Einführung in ihre Grundlagen

Die Beobachtungen der LIGO- und VIRGO-Gravitationswellendetektoren haben nicht nur den lange erhofften Nachweis für die Existenz von Gravitationswellen erbracht, sondern damit auch ein neues Teilgebiet der astronomischen Forschung, nämlich die Gravitationswellen-Astronomie begründet.

Wir suchen eine einfache, qualitative Antwort auf die Frage “Warum sind Gravitationswellen so schwach?” Zu diesem Zweck stellen wir die Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Elektromagnetismus und Gravitation einander gegenüber und führen die Schwäche der Gravitationswellen auf die Gleichheit von schwerer und träger Masse zurück. Eine Dimensionsanalyse der Gravitationswellen-Abstrahlung lehrt, daß Systeme umso effizienter Gravitationswellen abstrahlen, je kompakter sie sind und je mehr sich ihre Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert. So werden wir auf astronomische Quellen wie Doppelsternsysteme aus Neutronensternen und Schwarzen Löchern geführt.

Harald Lück (Leibniz Universität Hannover)

Das Einstein Teleskop und die Zukunft der erdgebundenen Gravitationswellendetektoren

Die aktuelle “advanced generation” von Gravitationswellendetektoren hat in den letzten Jahren eine beeindruckende Serie von Beobachtungsläufen durchgeführt und wird zum Zeitpunkt des Vortrags einen weiteren Datenlauf begonnen haben. Die Empfindlichkeit der heutigen Detektoren –so beeindruckend sie auch ist– erlaubt es uns jedoch nur, Quellen in unserer kosmischen Nachbarschaft zu belauschen, und das auch noch nicht mit

einer Genauigkeit, die ausreicht, um die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse im Detail zu untersuchen.

Mit dem Einstein-Teleskop und dem Cosmic Explorer sind Gravitationswellendetektoren der nächsten Generation in Planung, die mit einer um eine Größenordnung höheren und zu niedrigeren Frequenzen ausgedehnten Empfindlichkeit neue Bereiche erschließen und in die frühe Zeit nach dem Urknall zurückblicken können. Die Möglichkeiten, Pläne und Schwierigkeiten, die damit verbunden sind, werden in diesem Vortrag erläutert.

Andreas Malmendier (Utah State University, Logan)

Gravitationswellen von Neutronen- und Black-Hole-Doppelsternen eine elementare Behandlung

In diesem Vortrag führen wir eine vereinfachte, auf der Newtonschen Mechanik und auf Größenordnungs-Abschätzungen beruhende Analyse der Bewegung von Schwarzen Löchern und Neutronensternen als Doppelsternsysteme durch. Dabei beschränken wir uns auf die Phase der Annäherung der beiden Himmelskörper bis zu ihrer Verschmelzung. Der Verschmelzungsvorgang selbst muß der numerischen Allgemeinen Relativitätstheorie vorbehalten bleiben, was nicht Gegenstand dieses Vortrages sein kann. Durch bloße Betrachtung der Originaldaten, insbesondere des Frequenzverhaltens in der Zeit, gelingt es, vernünftige Abschätzungen über die charakteristische sogenannte Chirp-Masse sowie die Massen der beiden beteiligten Himmelskörper vorzunehmen. Auch Informationen über die Menge der in Form von Gravitationswellen abgestrahlten Energie und sogar über die Entfernung des Doppelstern-Systems lassen sich so gewinnen.

Felicitas Mokler (MPI für Radioastronomie Bonn)

Gravitationswellen – Vorhersage, Entdeckung und ihre Bedeutung in der aktuellen Astrophysik und Kosmologie

Gravitationswellen sind eine Folge von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Allerdings ist die Wirkung dieser Schwingungen der Raumzeit so schwach, dass Einstein selbst nicht daran glaubte, dass sie sich jemals würden messen lassen. Wissenschaftler haben an unterschiedlichen Arten von Detektoren geforscht, am aussichtsreichsten und schließlich auch erfolgreich wurden hochempfindliche Laserinterferometer. Und genau 100 Jahre nach ihrer Vorhersage war es endlich soweit: Im September 2015 gingen die Detektoren der internationalen LIGO-Kollaboration das erste Gravitationswellensignal ins Netz. In einer 1.3 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie waren zwei stellare Schwarze Löcher miteinander kollidiert und zu einem größeren Schwarzen Loch verschmolzen. Mittlerweile sind zahlreiche solcher Signale gemessen worden. Anhand dieser Signale lässt sich die Masse der stellaren Schwarzen Löcher sehr genau bestimmen; daraus wiederum lassen sich Rückschlüsse Populationen stellarer Schwarze Löcher und auf die Sternentwicklung ziehen. Darüber hinaus entstehen bei einer ganzen Reihe weiterer astrophysikalischer Prozesse Gravitationswellen, so etwa in durch die extrem massereichen Schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien - sie werden sich allerdings erst mit dem GW-Weltraumobservatorium LISA messen lassen. Davon erhoffen Forscher, die physikalischen und allgemein-relativistischen Prozesse in den Zentren der Galaxi-

en besser zu verstehen. Auch im ganz frühen Universum, könnten während der Phase der Inflation Gravitationswellen erzeugt worden sein - je nach dem von welchem Modell man genau ausgeht. Ein Nachweis oder auch ein Nicht-Nachweis bis zu einer bestimmte Schwelle würde das eine oder andere Modell ausschließen oder bevorzugen.

Michael Daam (Universität Karlsruhe),
Lukas Maczewsky (Universität und Erasmus-Gymnasium Rostock),
Ronny Nawrodt (Universität Stuttgart),
Clara Roth (Universität Stuttgart)

Hands-on Experimente zur Gravitationswellendetektion (*Workshop*)

Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen hat ein neues Fenster zum Universum geöffnet. Sehr schnell wurde die Messung und Datenanalyse von Gravitationswellensignalen Routine in der beobachtenden Astronomie. In einem voranstehenden kurzen Vortrag wird eine Schüler:innen-freundliche theoretische Motivation der Detektion von Gravitationswellen gegeben. Anschließend wollen wir in diesem Workshop experimentell die Funktion moderner Gravitationswellendetektoren klären. Wir werden den Weg aufzeigen, wie eine unvorstellbare Auflösung von 10-18m erreicht werden konnte. Neben der grundlegenden wellenoptischen Funktion stellen wir ebenfalls Möglichkeiten vor, wie man künstliche “Gravitationswellensignale” einspeisen kann. Geplant sind mehrere Experimentierstationen für kleinere Gruppen, so dass genug Zeit für individuellen Austausch bleibt. Alle Materialien für den Workshop werden zur freien, weiteren Verwendung und Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

Hans-Peter Nollert (Eberhard Karls Universität Tübingen)

Gravitationswellen in der Schule? (*Workshop*)

Im Abschlussworkshop beschäftigen wir uns damit, welchen Platz die Beschäftigung mit Gravitationswellen an der Schule haben kann. Welche Themenbereiche eignen sich als Ausgangspunkte, um sich diesem Thema zu nähern? Wie können die Themen, die in der Fortbildung präsentiert wurden, dabei genutzt werden? Welche Materialien und Hilfsmittel stehen zur Verfügung? Als Anregung werden auch Exponate der Ausstellung “Einstein-Wellen-Mobil” dienen, die wir in Videos kennenlernen werden, siehe auch <https://www.einstein-inside.de>.

Frank Ohme (AEI Hannover)

Signale in verrauschten Daten interpretieren

Die Suche und Interpretation von Gravitationswellensignalen ist die sprichwörtliche Suche der Nadel im Heuhaufen. Dies trifft nicht nur auf die Instrumente, sondern auch die Analyse ihrer Daten zu. Unter dem Teppich eines stetigen Instrumentenrauschens gilt es, Signale von bekannter, aber auch unbekannter Form herauszufiltern und ihre Eigenschaften zu bestimmen. In meinem Vortrag werde ich die Mathematik, die hinter der Datenanalyse steht, anschaulich einführen und an Beispielen erläutern, wie Signalverarbeitung, Statistik und Relativitätstheorie gemeinsam gebraucht werden, um die in Gravitationswellen codierten Geheimnisse des Universums zu entschlüsseln.

Markus Pössel (Haus der Astronomie Heidelberg)

Gravitationswellen-Nachweis mit Licht - wie geht das eigentlich?

In den modernen interferometrischen Detektoren wird Laserlicht benutzt, um Gravitationswellen nachzuweisen. Eine nicht allzu seltene Fehlvorstellung ist dabei, dass die Laserlicht-Wellenlänge eine Art Lineal darstellt und die zwei unterschiedlichen Arme eines Gravitationswellendetektors mit jenem Lineal “vermessen” werden. Allerdings zeigt sich: Gravitationswellen verändern auch die Wellenlänge von Laserlicht, ganz analog übrigens zur kosmologischen Rotverschiebung in einem expandierenden Universum. Aber wie kann ein veränderliches Lineal eine Längenänderung nachweisen? Ausgehend von dieser Frage geht es in diesem Vortrag darum, welche physikalischen Prinzipien hinter den interferometrischen Detektoren stehen. Als Bonus bekommen wir das Funktionsprinzip des Nachweises langwelliger Gravitationswellen mit Hilfe von Pulsaren gleich mitgeliefert.

Tilman Sauer (Johannes Gutenberg Universität Mainz)

Ein Blick in Einsteins Originalarbeiten über Gravitationswellen

Eine der ersten Konsequenzen seiner neuen Feldgleichungen der Gravitation, die Einstein unmittelbar nach Vollendung der Allgemeinen Relativitätstheorie untersuchte, war die Implikation von Gravitationswellen in linearer Näherung. Die Überzeugung, dass das Gravitationsfeld ähnlich dem elektromagnetischen Feld Wellenphänomene zeigen sollte, war eine der heuristischen Motivationen in seiner Suche nach relativistischen Feldgleichungen gewesen. Seine erste grundlegende Arbeit über Gravitationswellen aus dem Jahre 1916 enthielt aber, wie sich herausstellte, einen schwerwiegenden Fehler, der Einstein anderthalb Jahre später zu einem Folgeaufsatz veranlasste, in welchem er das Problem nochmals sehr viel sorgfältiger behandelte. Auch eine 20 Jahre später gemeinsam mit Nathan Rosen verfasste Arbeit hat eine interessante Entstehungsgeschichte, in welcher ebenfalls eine ursprüngliche Fassung nochmals revidiert werden musste.

Sebastian Völkel (AEI Potsdam)

Gravitationswellen und Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie

In diesem Vortrag wird es zunächst einen Überblick über die besonderen Eigenschaften Schwarzer Löcher und Neutronensterne innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie geben. Da Gravitationswellen über das Potential verfügen, einzigartige Erkenntnisse über die stärksten Gravitationsfelder im beobachtbaren Universum zu erlangen, ist es naheliegend, damit nicht nur Schwarze Löcher und Neutronensterne zu untersuchen, sondern auch die Allgemeine Relativitätstheorie zu testen. Um zu verstehen, welche Abweichungen dabei möglich sind, werden sowohl spezifische als auch allgemeine Aspekte vorgestellt. Der derzeitige Stand im Rahmen von bereits ermöglichten Beobachtungen und ausgeführten Tests wird ebenfalls diskutiert. Zuletzt wird auf zukünftige Gravitationswellendetektoren und deren Potential, die Allgemeine Relativitätstheorie zu testen, eingegangen.

Gudrun Wanner (Leibniz Universität Hannover)

LISA - Gravitationswellenmessungen im Weltraum

In ca. 12 Jahren wird die LISA Mission der Europäischen Weltraumagentur ESA starten und niederfrequente Gravitationswellen messen. In diesem Vortrag werden wir LISA an Hand von grundlegenden Fragestellungen diskutieren. Wir werden erörtern, warum LISA zusätzlich zu den erdgebundenen Detektoren relevant und interessant ist. Wir werden über Parallelen und Unterschiede zu Gravitationswellen-Detektoren auf der Erde sprechen, die Funktionsweise von LISA analysieren und auch kurz den Missionsstatus und den weiteren Weg von heute bis hin zur ersten Datenaufnahme diskutieren.