

Liebe Leserin, lieber Leser,

das Monatsthema Gravitationswellen ist zweifach zeitgemäß. Zum einen war in den Monaten November und Dezember, aus gegebenem Anlass, von Einsteins Theorie der Relativität die Rede gewesen, wobei die Vorhersage der Gravitationswellen (1916, 1918) noch ausgespart geblieben war, zum anderen gab es Gerüchte, seitens der Beobachtung derartiger Wellen täte sich etwas. Die Empfindlichkeit der beiden LIGO-Antennen war um einen Faktor 3–5 in dem hier interessierenden Frequenzbereich (35–250 Hz) verbessert worden. Aus LIGO, dem *Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory*, wurde aLIGO, das *advanced LIGO*. Es handelt sich um Interferometer mit Armlängen von 4 km. Dann kam die denkwürdige Pressekonferenz vom 11. Februar, auf der offiziell die Entdeckung von Gravitationswellen, 100 Jahre nach ihrer Vorhersage, bekanntgegeben wurde. Dass es diese Wellen gibt, war keine Überraschung – der indirekte Nachweis liegt Jahrzehnte zurück –, überraschend war, dass die Messtechnik so weit ist – und wir „dabei“ sein dürfen. Es kommt nicht jeden Tag vor, dass sich ein neues Fenster ins All auftut.

Von der Öffentlichkeit wenig beachtet, hat die ESA Anfang Dezember den „LISA Pathfinder“ auf den Weg zum Sonne-Erde-Lagrangepunkt L_1 gebracht gehabt. Der Pathfinder beherbergt zwei frei-schwebende Testmassen, deren Abstand interferometrisch überwacht wird. Getestet wird damit die Machbarkeit von eLISA (*Evolved Laser Interferometer Space Antenna*) – LIGO sozusagen „in groß“ und angesiedelt im Weltenraum. Frühestens 2034 soll eine Formation von drei Sonden, die ein gleichseitiges Dreieck bilden, niederfrequente Gravitationswellen, solche mit Wellenlängen im AE- und sub-AE-Bereich ($1 \text{ AE} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$), registrieren.

Willkommen im Monat des Frühlingsanfangs!

Willkommen im Frühling der Gravitationswellenastronomie!

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im März

Venus verabschiedet sich als Morgenstern im Laufe des Monats. Sie strebt (aus unserer Sicht) der Sonne zu, an der sie Anfang Juni vorbeimarschiert.

Mars geht am Monatsende bereits vor der MEZ-Mitternacht auf. Leider treibt sich der rote Planet tief im Süden herum. Im August begegnet er gar dem „Gegenmars“, dem roten Antares.

Der beherrschende Planet am Nachthimmel ist der Jupiter. Opposition ist am 8. März. Das ganze findet natürlich nahe dem Herbstpunkt statt. Jupiter bewegt sich auf den Regulus im Löwen zu.

Für Saturn beginnt die Oppositionsphase mit dem Stillstand am 25. März. Bis zum „Gegenschein“ Anfang Juni ist es dann noch gut zwei Monate hin. Auch er tummelt sich tief im Süden, rund eine Stunde östlich vom Mars.

Was sonst noch ansteht? – eine totale Sonnenfinsternis am 8./9. März, die bei uns nicht sichtbar ist. Auch die Halbschattenfinsternis des Mondes, genau einen halben Monat später, entgeht uns.

Frühlingsanfang ist am 20. März um 5 Uhr 30 in der Frühe. Der Vollmond am 23. März ist ausschlaggebend für das Osterfest am darauffolgenden Sonntag. Am selbigen Tag beginnt die Sommerzeit. Gottesdienstbesucher sollten dies beachten.

Gravitationswellen

Elektromagnetische Strahlung, beispielsweise Licht, geht von beschleunigten elektrischen Ladungen aus. Die Schwerkraft kennt auch Ladung – Gravitationsladung. Eine Masse zieht eine andere an. Mein Gewicht ist die Kraft mit der meine *s c h w e r e* Masse, meine Gravitationsladung, von der *s c h w e r e n* Masse der Erde, der mächtigsten Gravitationsladung weit und breit, angezogen wird. Auch Gravitationsladungen „strahlen“, bewegen sie sich beschleunigt. Sie emittieren Gravitationswellen. Nun, jede Kreisbewegung ist eine beschleunigte Bewegung in Richtung Zentrum. Einander umkreisende schwere Massen strahlen und verlieren dadurch Energie und Drehimpuls. Bei dem GW 150914-Ereignis vom 14. September 2015 handelte es sich um zwei schwarze Löcher, die einander immer schneller umkreisten. Bei diesem Extremereignis wurden in Bruchteilen einer Sekunde eine Energiemenge abgestrahlt, die einer Masse von drei Sonnen äquivalent ist. Verglichen damit

ist das „Doppelsystem“ Sonne-Jupiter mit seinen 40 Watt an Dauerleistung harmlos. (Die Frequenz ist das Doppelte der Umlauffrequenz, also 5 nHz, die Wellenlänge der Gravitationswelle beläuft sich auf 6 Lj.)

Dass sich Gravitationsstrahlung bislang nur bei Extremereignissen, wie dem Verschmelzen schwarzer Löcher von Sternenmasse, bemerkbar macht, hat einen Grund. Es gibt, anders als bei elektrischen Ladungen, keine negativen Gravitationsladungen, keine negativen schweren Massen! Damit ist Dipolstrahlung ausgeschlossen, und die Antenne des Gravitationsphysikers grundverschieden von der des Funktechniklers. Es kann sich mithin nur um sog. Quadrupolstrahlung handeln. Die ist von Natur aus mickrig.

Bedeutsamer als die Ähnlichkeiten sind die Unterschiede. Während die Maxwellgleichungen der Elektrodynamik mathematisch gesehen linear sind, was bedeutet, dass für deren Lösungen das Überlagerungsprinzip (Superpositionsprinzip) gilt, trifft dies auf die Einsteinschen Gleichungen nicht zu¹. Diese sind von Hause aus nicht-linear! Wer sich mit ihnen befasst, öffnet die Büchse der Pandora! Gravitationswellen exakt zu beschreiben, insbesondere nahe dem erzeugenden Objekt, ist eine Herausforderung ersten Ranges. Bis vor kurzem musste man sich mit mathematischen Näherungen begnügen, wobei man sich nie sicher sein konnte, ob man nicht dabei des Guten zu viel tat und Wesentliches unter den Tisch fallen ließ. (Man löst dann ein anderes Problem², eines, das mit dem ursprünglichen, rein gar nichts zu tun hat!) Noch vor 60 Jahren war man sich deshalb keineswegs sicher, ob Gravitationswellen überhaupt Energie transportieren! Man muss anmerken, dass der Energiebegriff in der Allgemeinen Relativitätstheorie notorisch heikel ist. Wie man inzwischen weiß, ist der mit einer Gravitationswelle verbundene Energiestrom begrifflich einwandfrei nur zu fassen, kann der Sender als ein isoliertes System, eingebettet in eine (asymptotisch) flache Raum-Zeit, betrachtet werden.

Heutzutage ermöglichen Supercomputer die Originalgleichungen numerisch zu lösen. Das ist ein Fortschritt. Leider kann man durch Berechnung von noch so vielen Einzelfällen niemals zu allgemeingültige Aussagen gelangen.

¹Das Ganze ist in diesem Falle tatsächlich mehr als die Summe seiner Teile. Das macht die Angelegenheit kompliziert, und Fortschritt vollzieht sich im Schneckentempo. Ein bekanntes Beispiel aus der Hydrodynamik sind die sog. Solitonen.

²Dem Mathematiker John von Neumann war das klar. Was bleibt, fragte er sich, streicht man den störenden (nicht-linearen) Reibungsterm in der Hydrodynamik weg? – „trockenes Wasser“!

Gravitationswellen sind „Kräuselungen“ im Gewebe der Raum-Zeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Quelle ist jede Änderung in der Anordnung schwerer Massen, bei der sich das sog. Quadrupolmoment ändert³.

Die leere Raum-Zeit ist eine Art „metrisches Fluidum“⁴ (F. Wilczek) und als solches maximal inkompressibel, das „steifeste Material“, das es gibt: Die „Schallgeschwindigkeit“ ist die Lichtgeschwindigkeit! Kleine Abweichungen von der flachen Minkowski-Metrik breiten sich in ihm wellenförmig aus, wobei – im Gegensatz zu longitudinalen Schallwellen! – senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, also transversal, Entfernungen abwechselnd in einer Richtung gestaucht und in einer dazu senkrechten Richtung gestreckt werden und umgekehrt. Eine Gravitationswelle, die frontal auf ein Buch einfiel, machte es länger und schmaler, um es im nächsten Moment zu stauchen und zu verbreitern, und das im Wechsel (Quelle: Einstein-online).

Daraus ergeben sich Möglichkeiten des Nachweises:

(a) Ein Testkörper im wabernden Raum-Zeit-Gefüge erfährt Gezeitenspannungen, die ihn deformieren (weshalb *s t a r r e* Körper unmöglich sind).

(b) Bei einem Schwarm frei-fallender Testmassen äußert sich eine Gravitationswelle in einer ondulierenden Schwankung der Lichtlaufzeit zwischen ihnen.

Die Effekte sind „zepto-skopisch“! Relative Längenänderungen von Trilliardstel (10^{-21}) sind das, was man günstigstenfalls erwartet. 10^{-21} – das wäre bezogen auf die Entfernung zu Barnards Pfeilstern (6 Lj) eine Haaresbreite ($50 \mu\text{m}$)! Zu preisen ist die US National Science Foundation, die Anstrengungen zum Nachweis von Gravitationswellen, trotz ungewissen Ausgangs, über Jahrzehnte gefördert hat. Die NSF war mutiger als Einstein, der dies für aussichtslos hielt.

In den 60er Jahren des vergangenen Jahrhundert hatte der Experimentalphysiker und Pionier der Laser-Forschung, Joseph Weber (1919–2000) von der Universität Maryland, versucht, das Vibrieren m-großer Metallzylinder aus Aluminium, angeregt durch hochfrequente (1,6 kHz) Gravitationswellen, mittels aufgeklebter Piezoelemente nachzuweisen. (Nahe der Resonanzfrequenz

³Deshalb geht von kollabierenden/pulsierenden Kugeln oder rotierenden rotationssymmetrischen Gebilden keine Gravitationsstrahlung aus. Eine rotierende Hantel strahlt nur, stimmt die Symmetrieachse *n i c h t* mit der Rotationsachse überein. Nichts verriete den Kollaps eines nicht-rotierenden Sterns, der sphärisch-symmetrisch zu einem schwarzen Loch zusammensackte.

⁴Es ist zum Verzweifeln: Den „Äther“ als Träger des Lichts hatte man abgeschafft, nun taucht er verkappt wieder auf – als Träger von Gravitationswellen.

reagiert so ein Ganzkörper-Gravitationswellendetektor am empfindlichsten.) Die Mindestlängenänderung lag anfangs bei 10^{-16} , d. h. bei einer Zylindergröße von ca. 1 m bei 10^{-16} m! Ein Proton ist größer! Im Laufe der Jahre wurde die Empfindlichkeit wesentlich verbessert. So lassen sich thermische Fluktuationen in einer tiefgekühlten Vakuumkammer nahezu vermeiden.

Um irdischen Störgeräuschen und Erschütterungen nicht auf den Leim zu gehen, wurden weitere Zylinder aufgestellt, einer beispielsweise im 800 km entfernten Chicago. Heute geht man davon aus, dass die gefundenen Koinzidenzen wohl nicht auf Gravitationswellen zurückzuführen waren. Die Wellen hätten unplausibel stark sein müssen. Egal, Joseph Weber gebührt das Verdienst, die Jagd nach Gravitationswellen initiiert und naturwissenschaftlich aufgeschlossene Kreise mit seiner Idee elektrisiert zu haben. Den erfolgreichen Nachweis der Wellen mittels Laser-Interferometrie hat er nicht mehr miterlebt. (Diesen Breitband-Detektor hatte er seinerzeit ins Gespräch gebracht gehabt.) Statt seiner war die Witwe, die Astronomin Virginia Trimble, zur historischen Pressekonferenz geladen.

Verglichen mit Webers Zylindern sind die LIGO-Interferometer riesig. Gewaltige Röhren, in denen Laserlicht zwischen erschütterungsfrei aufgehängten 40-kg-Spiegeln hin- und herläuft, müssen evakuiert werden. Diese Geräte sprechen auf niederfrequente Gravitationswellen an, und sie verarbeiten einen breiteren Frequenzbereich als Weber-Resonatoren. In einer L-förmigen Anordnung werden wie beim Michelson-Interferometer die Längen der beiden 4-km-Arme des „L“ miteinander verglichen. Die einzelnen Arme sind optische Resonatoren, d. h. sie werden von den Lichtquanten hundertfach durchlaufen, was den Effekt gehörig verstärkt. Man stimmt das Interferometer so, dass es normalerweise zu destruktiver Interferenz der beiden Lichtstrahlen am Photodetektor kommt, d. h., sie löschen einander aus. Das Ausgangssignal ist Null. Eine Gravitationswelle „verstimmt“ das empfindliche Instrument. Die „Verstimmung“, sofern merklich, ist das gesuchte Signal.

Dank ausgeklügelter Technik und minutiöser Überwachung des Geräteumfeldes zur Unterdrückung diverser Störquellen⁵, hat man die 10^{-21} -Hürde schließlich genommen! Dominierende Rauschquelle ist oberhalb von 150 Hz Photonenrauschen⁶. Prinzipiell nicht aus der Welt zu schaffen sind Beschränkungen, die die Heisenbergsche Unschärferelation dem Messprozess auferlegt.

⁵Darunter fallen seismische Erschütterungen, auch das 60-Hz-Netzbrummen.

⁶Das stochastische „Geballere“ der IR-Photonen auf die frei beweglichen Spiegel wird im Englischen sinnigerweise mit `shot noise` bezeichnet.

Selbst kg- bzw. tonnen-schwere Testmassen sind Quantenobjekte! Je genauer der Schwerpunkt (eines Weber-Zylinders oder Interferometerspiegels) bestimmt wird, desto unbestimmter ist die Schwerpunktsveränderung! Mit dem „Quantenlimit“ muss man leben. Außerdem gibt es Tricks.

Bodengebundene Laserinterferometer zum Nachweis kosmischer Gravitationswellen werden an verschiedenen Orten betrieben bzw. sind in Bau: zwei in den USA (Hanford im Staate Washington und Livingston, Louisiana), jeweils eine Anlage in Italien (Pisa), Japan (Tokyo), Australien (Perth) und Deutschland (Hannover). Indien plant den Bau einer derartigen Apparatur. Bei mehreren Detektionen kann mittels Zeitvergleich der Ort eines Gravitationswellenereignisses am Himmel anhand von Laufzeitunterschieden eingegrenzt werden. Zusammenarbeit ist auch sonst ein Muss.

Die Zukunft gehört sicherlich den weltraum-gestützten Laserinterferometern. Beim LISA-Projekt der ESA fallen drei Raumsonden – genauer: die freischwebenden Testmassen in den jeweiligen Sonden – im Formationsflug durchs Sonnensystem. (Damit die Testmassen im Inneren nicht gegen die Wand prallen, müssen alle nicht-gravitativen Kräfte, wie der Winddruck des Sonnenwindes, technisch kompensiert werden.) Man sucht nach periodischen Änderungen der Seitenlängen dieses frei-fliegenden gleichseitigen Dreiecks. Abstandsänderungen werden à la Michelson laserinterferometrisch bestimmt. Bis es soweit ist, kann man mittels Doppler-Radar nach niederfrequenten Radialgeschwindigkeitsschwankungen von interplanetaren Raumsonden fänden, die anderweitig mysteriös blieben. Interferometer im Weltraum vermögen in Frequenzbereiche vorzudringen, die bodengebundenen Instrumenten allein schon wegen der Erdgezeiten und seismischer und sonstiger niederfrequenter Unruhe nicht zugänglich sind.

GW 150914

Das Signal vom 14. September, 11 Uhr 51 MESZ, das noch vor der offiziellen Wiedereröffnung der LIGO-Anlagen am 18. September in beiden Detektoren mit 7 ms Zeitverzögerung registriert wurde, ist statistisch⁷ hochsignifikant, ein sog. $5\text{-}\sigma$ -Ereignis. Es muss außerirdischen Ursprungs sein und kündigt unmissverständlich von den beiden letzten Zehntelsekunden ei-

⁷Keine Statistik vermag ein seltenes Zusammentreffen „unglücklicher“ Umstände auszuschließen.

nes Doppel-Lochs. Zwei einander umkreisende schwarze Löcher von jeweils etwa 30 Sonnenmassen, Relikte eines massereichen Vorgängerdoppelsterns, verlieren durch Gravitationswellen Energie und Drehimpuls, was die Bahn schrumpfen lässt. Anfänglich schleichend, verkürzt sich die Umlaufzeit in dem Maße, in dem sich die beiden Körper auf Spiralbahnen einander nähern. Die Umlauffrequenz klettert zum Schluss auf schwindelnde Höhen⁸, das Signal wird schriller und schriller und die Strahlungsleistung⁹ schwillt unmittelbar vor der Verschmelzung der beiden Löcher katastrophal an. Verschmelzen heißt, dass sich die beiden Ereignishorizonte zu einem einzigen vereinigen, ohne dass dabei die „nackten“ Singularitäten sichtbar werden. Die Vereinigung geschieht zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Verbindungslinie zwischen den beiden Löchern zeichnet in diesem Moment eine Richtung aus. Die Abstrahlung der Gravitationswellen erfolgt asymmetrisch, wodurch das resultierende schwarze Loch einen Schups bekommt.

Selbst Nachbeben wurde registriert! Das schwarze Loch ist im *Status nascendi* hantelförmig und hat noch nicht den Zustand der Einfachheit erreicht. Es ist noch zu informativ! Abweichungen von der Rotationssymmetrie werden schnellstens in Nachbeben eliminiert. Zurück bleibt ein beruhigtes, rotierendes Kerr-Black-Hole, das durch zwei Angaben `v o l l s t ä n d i g` charakterisiert ist: Masse und Drehimpuls.

Was die Bedeutung der Gravitationswellenastronomie unterstreicht: Im Optischen bzw. generell im elektromagnetischen Bereich hätte man von diesem Vorkommnis, wo drei Sonnenmassen als Gravitationsstrahlung verschwinden, rein gar nichts mitbekommen¹⁰!

Die Entdeckung illustriert, worauf es beim jetzigen Stand der Forschung ankommt: ein womöglich licht-schnelles Hin-und-Her möglichst massereicher Gebilde auf allerengstem Raume! Natürlich ist die Häufigkeit derartiger Ereignisse wichtig. Dazu sollte man wissen: Eine Senkung der Detektionsschwelle um den Faktor 10 erhöhte die Anzahl der Ereignisse um das Tausendfache, weil sich das überwachte Volumen vertausendfacht.

⁸Wie bei einer Euler-Scheibe, einem Physikspielzeug.

⁹Die Leistung ist auf jeden Fall nach oben beschränkt, da Ereignishorizonte das Schlimmste, das Unendliche, verhindern. Theoretisch sind aber bis zu $3,6 \cdot 10^{52}$ Watt drin. Das entspräche der sekundlichen Zerstrahlung von 200 000 Sonnenmassen! Das GW 150914-Ereignis brachte es auf maximal zwei zerstrahlte Sonnen, allerdings in einer Hundertstelsekunde.

¹⁰... jedenfalls nicht auf direktem Wege.

Der Verlauf des Gravitationswellensignals, die Signatur, war eindeutig. Das ist das Schöne an der Physik der Schwerkraft. Sind schwarze Löcher involviert, liefert die Theorie eine „saubere“ Antwort. Woraus die beiden Löcher bestehen, ist genauso belanglos wie deren Vorgeschichte. (Wir erinnern uns: Ein Goldklumpen fällt genauso schnell im Vakuum wie eine Hühnerfeder!) Es kommt nur auf die Massen der beiden Löcher an (und eventuell auf deren Rotation). Alles andere ist schicksalhaft vorgegeben. Deshalb besteht auch kaum Zweifel an der Entdeckung. Das Zirp-Signal mit katastrophal anwachsender Frequenz und Stärke, wie auch die vibrierende Stille unmittelbar danach, ist genau der „Schrei“, den zu vernehmen man im Stillen gehofft hatte.

Gravitationswellenastronomen entgeht im Prinzip nichts¹¹. Man bedenke, der kosmische Kataklysmus vom 14. September 2015, er geschah vor 1,3 Milliarden Jahren! Und vielleicht registrieren wir irgendwann sogar das primordiale „Rumpeln“. Im Gegensatz zu elektromagnetischer Strahlung war das Universum von Anfang an für Gravitationswellen durchsichtig. Es bleibt spannend.

¹¹Streng symmetrische Zusammenbrüche, die spurlos verliefen, sind praktisch ausgeschlossen!