

Im Rauschen lauschen

Die beiden Gravitationswellendetektoren Advanced LIGO sind bereits wieder in Betrieb. Nun kommt in Italien Advanced VIRGO dazu.

Stefan Jorda

1) vgl. T. Baumgarte, Gravitationswellen gefasst, Physik Journal, April 2016, S. 16

Wenige Kilometer von Pisa entfernt verlässt mich die Autobahn bei der Kleinstadt Cascina. Die Gegend wird landwirtschaftlich genutzt, ein Bauer fährt mit einem Traktor über ein trockenes Feld. In der Ferne scheint eine Pipeline die Felder zu queren. Aus der Nähe entpuppt sich die vermeintliche Leitung als niedriges langes Bauwerk mit weißen Seitenwänden und blauem Wellblechdach. Ich nähere mich dem Gravitationswellendetektor VIRGO. Unter den Blechdächern verbergen sich zwei jeweils drei Kilometer lange Arme eines Laserinterferometers, das vor allem Physiker aus Italien und Frankreich gebaut haben.

Am Schnittpunkt der beiden L-förmig angeordneten Arme und neben der nach Charles Fabry und Alfred Pérot benannten Piazza steht ein mehrstöckiges Gebäude. Darin befinden sich der Laser, zwei Endspiegel der Interferometerarme und zahlreiche weitere Komponenten. Nach einer Schleuse, in der ich in Überschuhe schlüpfe, betrete ich das Innere und erklimme eine Plattform. Von hier schaue ich auf mehrere eingerüstete „Stahltonnen“, zehn Meter hoch und mit zwei Meter Durchmesser. In jeweils einer Tonne hängen – mechanisch durch „Superdämpfer“ von seismischer Aktivität oder Vibrationen durch Traktoren etc. entkoppelt – der Strahlteiler, zwei der über 40 Kilos schweren Endspiegel aus speziellem Quarzglas und Hilfsspiegel. Davon ist aber nichts zu sehen, denn die Stahlgefäße sind ebenso geschlossen und evakuiert wie die 1,2 Meter dicken Stahlrohre, die sich draußen fortsetzen. Seit 2011 wurde VIRGO zu Advanced VIRGO (AdV) umgebaut, um die Nachweisempfindlichkeit zu erhöhen. Derzeit befindet sich der Detektor in der Inbetriebnahme. Ab März 2017 soll er Daten



Blick auf das Laserinterferometer VIRGO am European Gravitational Observatory. Am Schnittpunkt der drei Kilometer langen Arme befindet sich das Hauptgebäude mit dem Laser.

aufzeichnen – gleichzeitig mit Advanced LIGO (aLIGO) in Hanford bzw. Livingston (USA).

Ursprünglich hätte Advanced VIRGO Ende 2015 in Betrieb gehen sollen. Unerwartete technische Schwierigkeiten haben dies jedoch verhindert. Selbst bei einem pünktlichen Start wäre AdV die erste direkt nachgewiesene Gravitationswelle – das Signal GW150914 – aber durch die Lappen gegangen.¹⁾ Um ein Haar wäre es aLIGO an jenem 14. September 2015 genauso ergangen: „Das war der erste Tag, an dem nach fünf Jahren Umbau erstmals beide Detektoren gleichzeitig mit vernünftiger Empfindlichkeit und stabil liefen“, erinnert sich Karsten Danzmann vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. An einem „wunderschönen Montagvormittag“, wenige Minuten vor 12 Uhr, ging der Postdoc Marco Drago in Hannover als erster Wissenschaftler einem computergenerierten Hinweis auf ein möglicherweise interessantes Signal nach und erblickte GW150914 auf dem Bildschirm.

Danzmann kam kurze Zeit später hinzu und staunte: „Das war einfach zu schön, ein Signal wie aus dem Lehrbuch“. Oder doch nur aus der Retorte? Um die Datenauswertung zu überprüfen, wurden nämlich regelmäßig Testsignale in den Detektor eingespeist. Ein Anruf in den LIGO-Kontrollräumen machte aber klar, dass ein Testsignal nicht infrage kam – dort war es 3 bzw. 5 Uhr morgens, und kein Wissenschaftler war vor Ort.

Der Weg bis zur offiziellen Bekanntgabe am 11. Februar 2016 war noch weit. Zunächst wurde der Detektorzustand „eingefroren“, um mit unveränderten Parametern 16 Tage lang Daten zu nehmen. Dies war nötig, um die Statistik der Detektoren kennen zu lernen und zu wissen, wie signifikant das Signal war. Die Datennahme zeigte, dass ein solches Signal höchstens einmal in 200 000 Jahren als falscher Alarm auftreten würde. Weitere Wochen der Analyse waren nötig, um alle denkbaren Störungen auszuschließen und Zweifel auszusräumen. Der Veröffentlichung folgte ein weltwei-

Dr. Stefan Jorda ist Geschäftsführer der Wilhelm und Else-Heraeus-Stiftung und hat VIRGO im Rahmen einer von der Stiftung geförderten deutsch-italienischen Lehrerfortbildung besucht.

ter Medienrummel. Über 600 Zeitungen machten den wissenschaftlichen Durchbruch zur Titelstory.

Hundert Jahre zuvor hat Albert Einstein die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie linearisiert und Lösungen in Form von Gravitationswellen gefunden.²⁾ Diese breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und entsprechen periodischen Streckungen und Stauchungen des Raums. Aufgrund der winzigen Proportionalitätskonstante in der sog. Quadrupolformel (G/c^4) bewirken selbst gewaltige kosmische Ereignisse nur relative Längenänderungen von 10^{-24} bis 10^{-18} . Einstein bezweifelte daher, dass ein Nachweis von Gravitationswellen jemals gelingen könne. Doch ihre Existenz steht seit den 1970er-Jahren außer Frage: Russell Hulse and Joseph Taylor haben gezeigt, dass die Periodendauer eines von ihnen entdeckten Binärsystems abnimmt, was sich durch die Abstrahlung von Gravitationswellen erklären ließ. Für diesen indirekten Nachweis erhielten die beiden 1993 den Physik-Nobelpreis.

Ein weiter Weg

Theoretische Pionierarbeiten zeigten vor knapp 60 Jahren, dass Gravitationswellen die Lichtausbreitung beeinflussen und sich Laserinterferometer im Prinzip für einen direkten Nachweis eignen. 1972 veröffentlichte der in Berlin geborene und am MIT tätige Rainer Weiss den ersten ausgearbeiteten Vorschlag für ein Laserinterferometer, für das er aber keine Finanzierung erhielt. Stattdessen griff der kürzlich mit 102 Jahren verstorbene Heinz Billing am MPI für Physik in München den Vorschlag auf und baute einen Prototypen mit wenigen Metern Armlänge. Der Weg von diesen bescheidenen Anfängen bis zum Erfolg war weit. Billings Nachfolger Karsten Danzmann, der seine gesamte wissenschaftliche Karriere den Gravitationswellen gewidmet hat, erinnert sich: „Uns war klar, dass wir sie irgendwann detektieren würden, allerdings wussten wir nicht, wie gut die Inter-



Karsten Danzmann in Ruthe an einem der GEO600-Interferometerarme

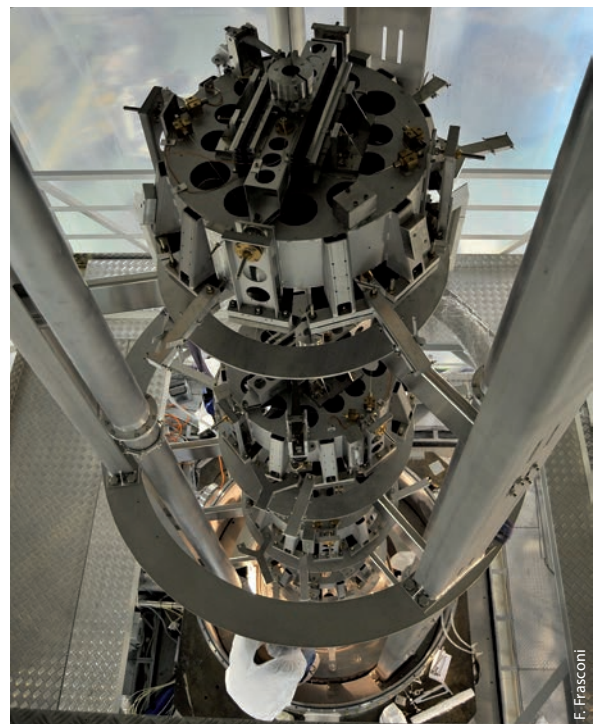
ferometer dafür sein müssten.“ Dies liegt vor allem an der Unsicherheit hinsichtlich der Stärke und Häufigkeit der erwarteten Quellen.

Dazu zählen Supernovae, deren Signalform über die Jahre kontrovers diskutiert wurde, deren Häufigkeit aber gut bekannt ist. Für verschmelzende Doppelsterne war hingegen ungewiss, wie häufig sie vorkommen. Je seltener sie sind, desto empfindlicher muss der Detektor sein, um weiter ins Weltall hinaus horchen und ein größeres Volumen abdecken zu können. Numerische Rechnungen erlauben es, für das Verschmelzen zweier Objekte mit vorgegebenen Massen die Signalform zu berechnen. Für GW150914 ergab der Vergleich zwischen Theorie und Messung, dass vor über einer Milliarde Jahre zwei Schwarze Löcher mit 29 bzw. 36 Sonnenmassen innerhalb vom Bruchteil einer Sekunde miteinander verschmolzen sind und dabei eine drei Sonnenmassen entsprechende Energie als Gravitationswellen abgestrahlt haben. Die maximal abgestrahlte Leistung ist rund zehnfach so hoch wie die gesamte Leuchtkraft aller Sterne und Galaxien im beobachtbaren Universum! Dass solch massereiche Schwarze Löcher existieren, hatte niemand erwartet. Die Gravitationsphysiker hatten daher doppeltes Glück, wie Danzmann betont: „Wir hatten weder mit solchen Quellen gerechnet noch mit einem Signal, das mit bloßem Auge sichtbar ist, statt gerade so aus dem Rauschen herauszuschauen.“

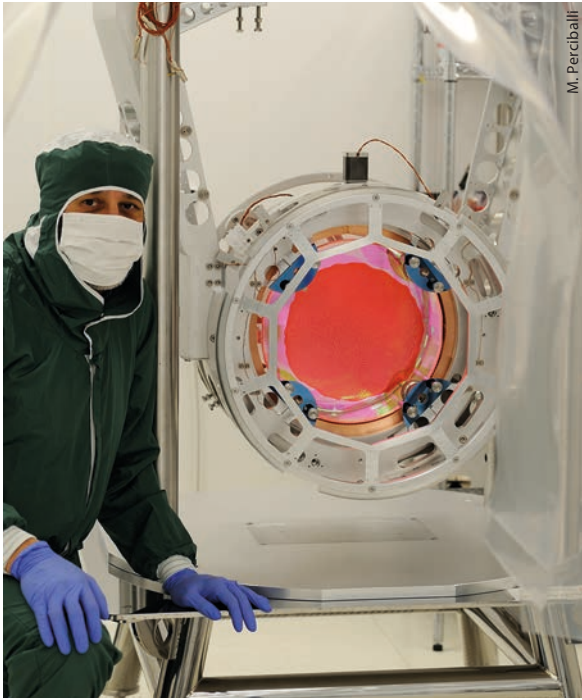
Wesentlich für den erfolgreichen Nachweis waren Fortschritte im Kampf gegen das Rauschen.³⁾ „Den verschiedenen Rauschquellen nachzujagen ist unser tägliches Brot“, sagt der Physiker Franco Frasconi, der seit 20 Jahren der VIRGO-Kollaboration angehört. Er ist verantwortlich für die „Superdämpfer“, an denen die Spiegel hängen und mit denen sich Vibrationen unterdrücken lassen. Einen Eindruck von den komplexen Konstruktionen erhalte ich in einem Gebäude, zu dem wir eineinhalb Kilometer

2) vgl. den Artikel von G. Schäfer auf Seite 35 in diesem Heft und das Physik Journal-Schwerpunktheft zur Allgemeinen Relativitätstheorie, Juni 2015, ab Seite 27

3) vgl. R. Schnabel et al., Wellen aus dem Rauschen fischen, Physik Journal, Oktober 2009, S. 33



Blick von oben auf einen Superdämpfer während der Montage, noch ohne Vakuumgefäß: Die drei senkrechten zylindrischen Rohre (das rechte ist zum größten Teil verdeckt) bilden ein bewegliches Dreibein, an dem über Stahldrähte mehrere Pendelkörper hängen.



Franco Frasconi im Reinraum mit einem Endspiegel

weit entlang eines Interferometerarms fahren.

Frasconi lenkt meine Aufmerksamkeit auf ein glänzendes Metallgerüst, das japanische Kollegen gebaut haben und das als Demonstrator dient. In seinem Inneren stehen drei Zylinder, die unten beweglich befestigt sind und oben eine Art Metallrad tragen. Leicht angestoßen, schwingt das Rad wie ein auf dem Kopf stehendes Pendel. Bei AdV hängen an solchen, aber viel größeren Aufhängungen jeweils eine Kette hintereinander geschalteter Pendel aus Stahldraht und Pendelkörper bis zum Spiegel unten. VIRGO hat im Gegensatz zu LIGO von Anfang an auf eine mehrstufige mechanische Dämpfung gesetzt, die auch aktive Regelkomponenten enthält. „Dadurch war VIRGO bis 2011 der empfindlichste Detektor bei Frequenzen unterhalb von 70 Hz, bei denen LIGO blind war“, sagt Franco Frasconi. Zwar sind die bisherigen Signale bei diesen Frequenzen aufgetreten, vor dem Update hätte die Empfindlichkeit von VIRGO aber nur bei einem sehr nahen Ereignis für den Nachweis gereicht.

Neben den Vibrationen ist das thermische Rauschen eine Störquelle. Dieses Äquivalent der Brownschen Bewegung kann alle Komponenten zu Schwingungen anregen. Daher gilt es, die mecha-

nischen Resonanzen z. B. von den aufgedampften Spiegelschichten oder der Spiegelaufhängung zu optimieren. Bei aLIGO hängen die Spiegel an speziellen Glasfasern, die monolithisch mit ihnen verbunden sind. Für AdV war das auch vorgesehen, doch völlig unerwartet sind die Fasern immer wieder beim Evakuieren der Vakuumgefäße abgerissen. „Angesichts der jahrelangen Erfahrung, die wir mit dieser Verbindungstechnik haben, sind diese Probleme absolut überraschend“, sagt Frasconi. Damit AdV 2017 noch einige Monate gleichzeitig mit aLIGO beobachten kann, hängen nun wie früher alle Spiegel an dünnen Stahldrähten, bis dieses Problem gelöst ist. Dennoch wird AdV empfindlicher als VIRGO sein, da viele Komponenten verbessert wurden – unter anderem das Lasersystem, eine Schlüsselkomponente des Interferometers.

Eine Technologieschmiede

Der Laser muss stabil sein und eine hohe Leistung haben, um das quantenmechanische Photonenrauschen (Schrotrauschen) zu reduzieren. Das 200-Watt-Lasersystem von aLIGO wurde in Hannover entwickelt und gebaut. Dort würde heute ein Interferometer mit drei Kilometer langen Armen stehen, wenn es Anfang der 1990er-Jahre nach dem Willen deutscher und britischer Gravitationsphysiker gegangen wäre. Doch ein entsprechender Antrag wurde nicht weiter verfolgt, nachdem das Bundesministerium für Forschung und Technologie beschlossen hatte, die Gravitationswellenforschung nicht mehr zu fördern. „Nach diesem Trauerspiel mussten wir kleine Brötchen backen“, erinnert sich Danzmann: „Daher beschlossen wir zu ignorieren, dass wir tot sind.“ Die Physiker sammelten von verschiedenen Geldgebern 10 Millionen Euro und bauten GEO600 mit 600 Meter langen Armen. „An dieser Technologieschmiede haben wir viele neue Dinge ausprobiert, um die kurzen Arme zu kompensieren“, sagt Danzmann. Dazu zählt auch

die optische Anordnung, die viel komplizierter ist als bei einem einfachen Fabry-Pérot-Interferometer.

Das Interferometer ist so angeordnet, dass sich die Lichtstrahlen im Ausgang ohne Gravitationswelle auslösen. Ein kompliziertes Regelsystem steuert die Spiegel, damit die Laserstrahlen in die richtige Richtung reflektiert werden und der Spiegelabstand zur Wellenlänge passt. Wenn eine Gravitationswelle mit einer gewissen Frequenz an den Spiegeln „wackelt“ – dieses Bild stimmt nur bedingt –, entstehen zwei gegenüber der Laserfrequenz um diese Frequenz verschobene Seitenbänder, die am Ausgang konstruktiv interferieren und das Messsignal bilden. Zur optischen Anordnung gehören zwei weitere Spiegel, die es erlauben, die Laserleistung im Interferometer zu erhöhen (Power Recycling) bzw. das Signal resonant zu überhöhen (Signal Recycling).

Diese Anordnung findet sich heute wie viele andere bei GEO600 entwickelten Detailverbesserungen auch bei Advanced LIGO, dessen Kollaboration über hundert Wissenschaftler des MPI für Gravitationsphysik bzw. der Universität Hannover angehören. Die enge Zusammenarbeit geht auf die 1970er-Jahre zurück, als nicht nur in Garching, sondern kurz darauf auch in Glasgow ein kleines Interferometer gebaut wurde. Ronald Drever, der Projektverantwortliche in Glasgow, wurde 1979 vom Caltech abgeworben und spielte dort – gemeinsam mit Kip Thorne und Rainer Weiss am MIT – eine maßgebliche Rolle bei LIGO.

Dieses Projekt war Anfang der 1990er-Jahre entscheidungsreif und wurde von der National Science Foundation finanziert. Zur gleichen Zeit ging VIRGO ins Rennen. Inzwischen kooperieren weltweit alle Gruppen miteinander. 2007 haben sie ein Abkommen über eine weitreichende Zusammenarbeit unterzeichnet. „Wir bündeln unsere Kräfte. Daher zeichnen wir alle Daten in einem einheitlichen Format auf, werten sie gemeinsam aus und legen Beobachtungszeiten fest“, erläutert Frasconi. So sind die ersten Veröffentlichungen auch

gemeinsam entstanden. Die Zusammenarbeit ist entscheidend, um die Quellen am Himmel zu lokalisieren. Dafür ist die Differenz der Ankunftszeiten an verschiedenen Detektoren nötig – bei GW150914 waren das sieben Millisekunden zwischen den beiden 3000 Kilometer voneinander entfernten aLIGO-Detektoren. Der Ursprung der Quelle ließ sich aber nur auf eine sichelförmige Region am Südhimmel mit einer Ausdehnung von 600 Quadratgrad eingrenzen.

Daher ist es so wichtig, dass AdV gleichzeitig mit aLIGO auf Empfang ist. Noch besser wären vier oder mehr Detektoren, um neben der Richtung auch die Polarisation der Welle zu messen. Dazu sind zwei zueinander um 45 Grad gedrehte Detektoren notwendig. Während die LIGO-Detektoren parallel zueinander stehen – dies erhöht die Chance, eine Welle nachzuweisen –, ist VIRGO etwas dagegen gedreht. Deutlich besser werden die Möglichkeiten sein, wenn der Aufbau eines weltumspannenden Observatoriums abgeschlossen ist. Derzeit entsteht im japanischen Kamioka-Observatorium der erste unterirdische Gravitationswellen-Detektor. KAGRA hat drei Kilometer lange Arme und gekühlte Spiegel, um das thermische Rauschen zu reduzieren. Neben den technologischen Herausforderungen haben Wassereinbrüche in



Stefan Jorda in der Laserhalle von VIRGO – in den Vakuumbehältern mit den dunklen Deckeln befinden sich die „Superdämpfer“ mit den Spiegeln und dem Strahlteiler.

den Tunneln das Projekt verzögert. In Indien soll ein dritter aLIGO-Detektor entstehen; vor einem Jahr hat die Regierung dafür grundsätzlich grünes Licht gegeben. Nach den Detektoren der ersten Generation VIRGO und LIGO und nach aLIGO, AdV und KAGRA (zweite Generation) befindet sich mit dem europäischen Einstein-Teleskop ein Detektor der dritten Generation in der Designphase (Tabelle). Bei diesem unterirdischen Projekt sollen drei zehn Kilometer lange Arme ein gleichseitiges Dreieck bilden.

Neben GW150914 hat aLIGO im Oktober und Dezember 2015 zwei weitere Signale detektiert, ebenfalls von verschmelzenden Schwarzen Löchern. Zwischen Januar und

November 2016 wurden die Detektoren optimiert, denn noch fehlt ein Faktor 3 zur Designempfindlichkeit. Jetzt geht es darum, viele Quellen zu vermessen und deren statistische Eigenschaften zu bestimmen. Auch der Nachweis von Gravitationswellen, deren Ursprung verschmelzende Neutronensterne sind, steht noch aus. Darüber hinaus erwartet Karsten Danzmann vor allem Überraschungen, denn der Astronomie ist nun ein „neues Sinnesorgan gegeben, das den Vorhang öffnet für die dunkle Seite des Universums“. Diese Seite ist komplementär zur bisher bekannten, da Gravitationswellen an Orten entstehen, an denen die Materie sehr dicht ist und daher gerade keine elektromagnetische Strahlung emittiert wird. Vielleicht ist damit sogar ein Blick auf das sehr frühe Universum möglich. Der Urknall selbst sollte nämlich einen stochastischen Untergrund an Gravitationswellen hinterlassen haben. Doch falls überhaupt, sollten sich diese Signale mit Frequenzen im Millihertzbereich vermutlich nur von einem Weltraumobservatorium wie der geplanten europäischen eLISA-Mission beobachten lassen. Unabhängig davon, welche Überraschungen die Gravitationswellen-Astronomie bereithält, eines ist jedenfalls sicher: Die Zeiten, in den Karsten Danzmann und seine Kollegen belächelt und nur zum „Entertainment“ auf Konferenzen eingeladen wurden, sind vorbei.

Gravitationswellendetektoren					
Name	Länge	Standort	Betrieb	Frequenzbereich	Empfindlichkeit
GEO600	600 m	bei Hannover	seit 2005	50 Hz – 2 kHz	10^{-21}
VIRGO	3 km	Cascina (I)	2007 – 2011	10 Hz – 10 kHz	10^{-21}
LIGO	4 km	Hanford und Livingston (USA)	2002 – 2007 und 2009 – 2011	70 Hz – 10 kHz	10^{-21}
Advanced VIRGO	3 km	Cascina (I)	ab März 2017	10 Hz – 10 kHz	10^{-22}
Advanced LIGO	4 km	Hanford und Livingston (USA)	seit September 2015	10 Hz – 10 kHz	10^{-22}
LIGO India	4 km	offen	offen	10 Hz – 10 kHz	10^{-22}
KAGRA	3 km	Kamioka (Japan)	2018	10 Hz – 10 kHz	10^{-22}
Einstein-Teleskop	10 km	offen	offen	1 Hz – 10 kHz	10^{-24}
eLISA	1 Mio. km	Weltraum	ab 2034	0,1 – 100 mHz	10^{-20}

Weltweit sind mehrere Gravitationswellendetektoren in Betrieb bzw. in Planung. Die angegebenen Empfindlichkeiten sind Richtwerte; de facto hängen sie von der Frequenz ab.