

Sternexplosionen, Neutronensterne und Schwarze Löcher: Relativistische Quellen von Teilchen, Strahlung und Gravitationswellen

Sterne mit mehr als der achtfachen Masse der Sonne beenden ihr Leben in einer gewaltigen Explosion, die zu den energiereichsten kosmischen Ereignissen gehört und ohne die es weder unsere Erde noch Leben gäbe. Während der zentrale Kern des Sterns zu einem Neutronenstern oder Schwarzen Loch zusammenstürzt, werden die äußeren Schichten des Sterns mit ungeheurer Wucht zerfetzt. Neben einer unvorstellbaren Menge Energie, die hauptsächlich in Elementarteilchen frei wird, bringt die Explosion auch die chemischen Elemente hervor, aus denen Planeten und organische Zellen bestehen. Effekte der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie bestimmen den Ablauf dieser Ereignisse, die auch zu den stärksten astrophysikalischen Quellen der von Einstein vorhergesagten Gravitationswellen zählen.

Albert Einsteins spezielle und allgemeine Relativitätstheorie führten zu einer fundamentalen Revolution in unserem Verständnis von Raum und Zeit, von Materie und Energie und von den Vorgängen im Weltall. Phänomene wie die Krümmung des Raumes, Lichtablenkung, die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit, Antimaterie, die Äquivalenz von Masse und Energie, Schwarze Löcher oder der Urknall und die kosmische Expansion prägen unsere heutige Vorstellung von der Natur und vom Universum. Sie haben Eingang in unsere Sprache gefunden und sind auch aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Beobachtungen in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts zwangen uns, von der Illusion eines unveränderlichen Weltalls früherer Epochen endgültig Abschied zu nehmen. Was wir heute mit immer besseren Methoden aus der Frühgeschichte des Alls erfahren und in nahen und fernen Objekten erspähen, zeigt das Universum in stetem Wandel. Es entwickelt sich zu immer mehr Struktur in lokalen Bereichen und immer mehr Unordnung in großen Dimensionen. Einstein hat mit seinen Theorien die Grundlagen dafür gelegt, diesen Wandel zu verstehen.

Energie und Wandel

Wandel geht allgemein einher mit Umwandlung und Fluss von Energie. Es ist der Übergang zu einem energetisch günstigeren Gleichgewicht. Dieser Übergang liegt Veränderungen zugrunde oder liefert die Energie, die zu mehr Komplexität und Zustandserhaltung an anderer Stelle führt. In unserer Alltagswelt sind es fast ausschließlich chemische Prozesse, die die notwendige

Energie produzieren, um Leben wachsen zu lassen, um Häuser zu heizen oder Autos zu bewegen. Im großen Kosmos dagegen reicht der Energiegewinn in chemischen Reaktionen nicht aus. Die beobachteten Erscheinungen beziehen ihre Energie aus anderen Quellen mit weit höherer Effizienz: Atomkernreaktionen und der Bindung von Materie durch die Gravitationskraft.

Chemische Umwandlungen von Stoffen vollziehen sich auf molekularer Ebene und ändern die Struktur der Elektronenhüllen in den beteiligten Atomen. Bei der Verbrennung von einem Gramm Heizöl etwa wird eine Energiemenge frei, die ausreicht, um 1 Kilogramm Wasser um rund 10 (Grad) Kelvin zu erhitzen. Im Vergleich dazu sind Kernreaktionen millionenfach wirkungsvoller. Bei der Umwandlung von Atomkernen sind die beteiligten Kräfte der „starken Wechselwirkung“ zwischen den Kernbausteinen, Neutronen und Protonen, so enorm, dass die nukleare Spaltung von einem einzigen Kilogramm Uran ^{235}U der Wirkung von 20.000 Tonnen des chemischen Sprengstoffs TNT gleichkommt. Dies wurde der Welt im grauenhaften Inferno von Hiroshima bewusst und ist eine unmittelbare Folge der wohl berühmtesten Formel von Einsteins spezieller Relativitätstheorie, $E = m \cdot c^2$. Nukleare Reaktionen wandeln nach dieser Beziehung rund 0,1 Prozent der Masse in Energie um. Einstein erkannte dieses gewaltige Potenzial schon kurz nachdem Otto Hahn und Lise Meitner die Kernspaltung entdeckt hatten. Seine Warnung und die anderer in die USA emigrierter Physiker vor dem möglichen Bau einer Atombombe durch die Nazis führte zum amerikanischen Manhattan-Projekt und zur Entwicklung der ersten Nuklearwaffen (s. Abb. 1).

Vom „Sternkraftwerk“ zum Neutronenstern

Kernreaktionen, speziell die Verschmelzung oder nukleare Fusion leichter Atomkerne zu schwereren Elementen, sind die wichtigste Quelle von Energie in Sternen. In der Sonne speist die Umwandlung des leichtesten Elements, des Wasserstoffs, zu Helium die Lichtabstrahlung an der Oberfläche und sorgt dafür, dass auf der Erde Bedingungen herrschen, die Leben zulassen. Im Zentrum von Sternen, die massereicher sind als unsere Sonne, werden im Laufe der Entwicklung die Temperaturen so hoch, dass Helium weiter zu Kohlenstoff und Sauerstoff verschmelzen kann. In



Abb. 1: Explosion einer Wasserstoff-Bombe über den Marshall-Inseln 1952. Quelle: Deutsches Museum München.

Sternen mit mehr als der achtfachen Masse der Sonne kommt es – in aufeinanderfolgenden nuklearen Brennstufen – zur Bildung immer schwererer Atomkerne. Nach Neon, Magnesium, Schwefel und Silizium entsteht so im Zentrum des Sterns ein Kernbereich aus Eisen, dem am stärksten gebundenen Atomkern. Ein weiterer Energiegewinn durch Fusion ist dann nicht mehr möglich.

Der Stern läuft einer unausweichlichen Katastrophe entgegen, während in seinem Innern das zentrale Gebiet aus Eisen immer weiter anwächst. Schließlich, wenn dieser stellare Eisenkern etwa so gross ist wie der Mond, dabei aber die eineinhalbfache Masse der Sonne hat, kann der Druck des Sternplasmas den wachsenden Kräften der Schwerkraft nicht mehr widerstehen und der Eisenkern bricht in sich zusammen. Was danach geschieht, lässt sich nur mit den Begriffen der Einsteinschen Relativitätstheorie genau beschreiben. Im Kollaps beginnen sich Elektronen mit Protonen zu vereinigen. Neben Neutronen entstehen flüchtige Elementarteilchen, Neutrinos, die kaum mit Materie reagieren und den Stern daher zunächst ungehindert verlassen. Weiterer Druckverlust beschleunigt den Zusammenbruch auf mehr als 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde kollabiert so der stellare Kern zu einem noch viel kompakteren Objekt, einem „Neutronenstern“. In diesem sind Neutronen und Protonen so dicht ge-

packt wie in einem Atomkern und „spüren“ ihre gegenseitige Abstoßung. Erst diese sorgt für die Gegenkraft, die nötig ist, um der Gravitationsanziehung dieser Masseteilchen das Gleichgewicht zu halten. Ein Neutronenstern gleicht einem riesigen Atomkern von mehr als einer Sonnenmasse, in dem die Schwerkraft die Teilchen in einen Raumbereich von nur 20 Kilometern Durchmesser zusammenquetscht.

Die Gravitation ist zwar die bei weitem „schwächste“ der vier bekannten Grundkräfte der Natur, regiert aber dennoch die großen Dinge im Universum, weil sie nicht abschirmbar ist wie elektromagnetische Kräfte. Bei der Bildung eines Neutronensterns zeigt sie auch in anderer Hinsicht ihre Macht: Der Kollaps des stellaren Eisenkerns setzt über zehn mal mehr Energie pro Gramm Materie frei als zuvor durch alle nuklearen Fusionsprozesse erzeugt wurde! Rund zehn Prozent der Masse werden in Energie verwandelt, insgesamt mehrere 10^{46} Joule und damit so viel Energie wie alle Sterne im Universum in einer Sekunde durch Strahlung verlieren! Gravitative Bindung ist eine noch viel ergiebiger Energiequelle als die Kernkräfte im Atomkern.

Supernova-Explosionen

Wenn der Eisenkern eines massereichen Sterns sich fast schlagartig zu einem Neutronenstern verdichtet,



Abb. 2: Der Krebsnebel mit dem Krebs-Pulsar, gasförmiger und kompakter Überrest einer Supernova-Explosion im Jahr 1054 nach Christus. Relativistische Teilchen, die der Pulsar beschleunigt, bringen das Gas selbst 950 Jahre nach der Explosion zum Leuchten. Quelle: European Southern Observatory, ESO.

bleiben die äußeren Schichten nicht unbeeinflusst. Die Energiefreisetzung im Zentrum erzeugt einen gewaltigen Überdruck, der eine Stoßfront mit Überschallgeschwindigkeit durch den Stern treibt. Wenn diese nach Stunden die Sternoberfläche erreicht, rast hinter ihr das aufgeheizte Sternngas mit bis zu einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit auseinander. Der Stern wird in einer gleißend hellen „Supernova-Explosion“ zerfetzt. Diese Sternexplosionen können für Wochen eine ganze Galaxie überstrahlen. Empfindliche Teleskope spüren sie daher noch in Milchstraßen

auf, die viele Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind.

In jeder Sekunde explodiert irgendwo im Universum ein solcher „neuer Stern“. Unsere Milchstraße ist von diesen Ereignissen allerdings nur etwa zweimal pro Jahrhundert betroffen. Davon zeugen die heute noch sichtbaren Überreste dieser Explosionen, gasförmige Nebel sowie die rund 1500 Neutronensterne, die als rotierende Pulsare anhand ihrer periodischen Signale mit Radioteleskopen bislang geortet wurden. Sie jagen

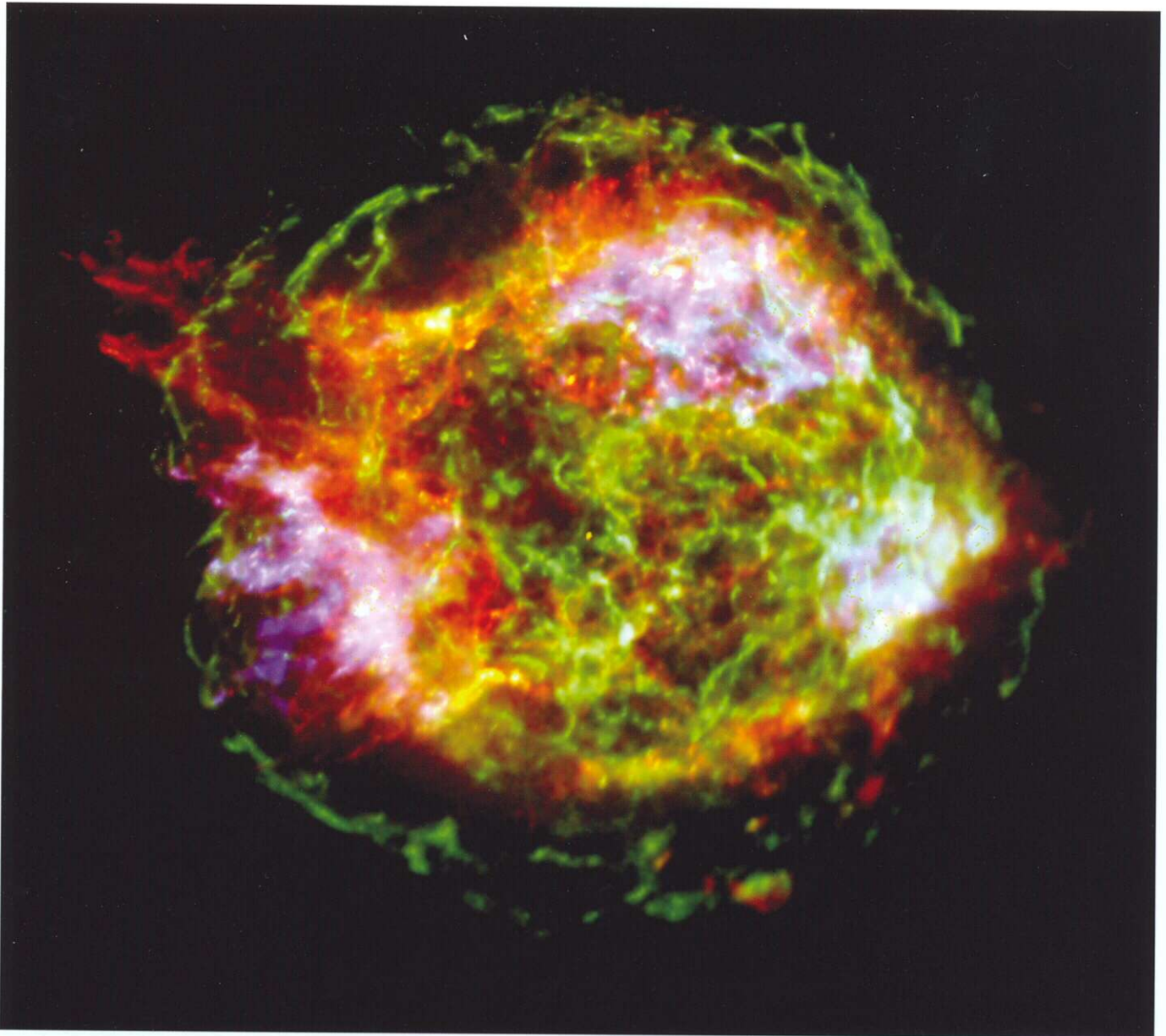


Abb. 3: Der Cassiopeia A-Überrest einer Supernova, die vermutlich vor rund 320 Jahren explodierte. Die Aufnahme wurde vom Röntgensatelliten Chandra gemacht. Rot, Grün und Blau bedeuten Röntgenstrahlung niedriger, mittlerer bzw. höherer Energie. Die Farbunterschiede verschiedener Bereiche weisen auf unterschiedlich hohe Konzentrationen von Silizium und Eisen im ausgeschleuderten Supernovagas hin.
Quelle: NASA/CXC/ GSFC/U.Hwang et al.

im Durchschnitt mit mehreren hundert Kilometern pro Sekunde durch den interstellaren Raum.

Die Supernova des Jahres 1054 nach Christus, von der historische Berichte aus China und Arabien vorliegen, war so nah, dass sie selbst am Taghimmel beobachtet wurde. Ihr Überrest ist der berühmte Krebsnebel mit dem Krebspulsar, der sich 33 mal pro Sekunde um die eigene Achse dreht (Abb. 2). Die von Kepler 1604 beobachtete Supernova und die Supernova, die zur Entstehung des Cassiopeia A Nebels führte (Abb. 3) – sie soll um 1680 explodiert sein – waren die letzten bekannten Ereignisse in unserer Milchstraße. Die dichten Staubbänder in der galaktischen Ebene, in der sich die jungen und massereichen Sterne konzentrie-

ren, haben vermutlich die Entdeckung weiterer Explosionen in den vergangenen 300 Jahren verhindert.

Kreislauf von Werden und Vergehen

Supernova-Explosionen bestimmen die Entwicklung der Galaxien, der Sterne und des Lebens. Was einerseits die Existenz schwerer Sterne abrupt und infernalisch beendet, ist andererseits ein treibender „Motor“ im Kreislauf der Elemente und bei der Entstehung neuer Sterne.

Supernova-Explosionen verteilen die vom Stern in Millionen Jahren erbrüteten chemischen Elemente im interstellaren Raum. Sauerstoff, Kohlenstoff, Silizium

und Eisen werden so dem interstellaren Gas beige-mischt. Die von der Explosion erzeugte Stoßwelle durchpflügt das interstellare Medium, verdichtet es und ermöglicht so die Geburt neuer Sonnen und Planetensysteme. Erst viele Generationen von Sternen haben durch ihr Werden und Vergehen das Gas unserer Milchstraße mit schweren Elementen angereichert. Der Urknall selbst hatte lediglich Wasserstoff und Helium und kleine Mengen Lithium hervorgebracht. Ohne Supernovae gäbe es weder unsere Erde mit ihrer Lufthülle und ihren Ozeanen, noch das auf ihr blühende Leben.

Die Jahrhundert-Supernova

Am 23. Februar 1987 kam es zum wohl spektakulärsten Ereignis der modernen Astronomiegeschichte, das in nie dagewesener Fülle, detailliert aufgezeichnet mit modernen Instrumenten, faszinierende Einblicke in den Ablauf dieses Geschehens eröffnete: Nur 170.000 Lichtjahre entfernt, in der Großen Magellanschen Wolke, einer irregulären, kleinen Begleitgalaxie unserer Milchstraße, erstrahlte die Supernova 1987A (Abb. 4). Zu den spektakulärsten Entdeckungen zählt zweifellos der erste Nachweis von Neutrinos aus einer extragalaktischen Quelle. In großen, unterirdischen Wassertanks wurden Lichtblitze von zwei Dutzend der rund 10^{58} Neutrinos aufgezeichnet, die der entstehende Neutronenstern im Zentrum der Supernova über einen Zeitraum von etwa 10 Sekunden abgestrahlt hat. Diese Messung gilt als Bestätigung unserer theoretischen Vorstellungen über den Tod massereicher Sterne und die Geburt von Neutronensternen. Sie wurde im Jahr 2002 mit dem Nobelpreis für Physik an den Japaner Masatoshi Koshihira belohnt.

Neutrinos und Sternexplosionen

Trotz der enormen Helligkeit ist das optische Feuerwerk einer Supernova lediglich eine schwache Nebenerscheinung des eigentlichen Geschehens im Innern eines sterbenden Sterns. Nur rund ein Prozent der gravitativen Bindungsenergie, die beim Kollaps zum Neutronenstern frei wird, treibt die Explosion und davon wiederum nur ein Prozent verursacht den sichtbaren Lichtausbruch des „neuen Sterns“. Der weitaus überwiegende Teil der Energie, 99 Prozent, wird von Neutrinos fortgetragen. Grund dafür ist die relative Flüchtigkeit dieser nahezu masselosen Teilchen, die sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, aber nur sehr schwach mit Materie wechselwirken. Gerade einmal eines von einer Milliarde Supernova-Neutrinos, die die Erde treffen, reagiert auf seinem Weg durch den Erdball. Die anderen laufen ungehindert hindurch.

Bei den enormen Dichten in einem Neutronenstern sind die Verhältnisse zwar anders. Jedes Neutrino kollidiert dort zehntausende mal bevor es die Neutronensternoberfläche erreicht, was den Energieverlust durch Neutrinoabstrahlung über einige Sekunden streckt.

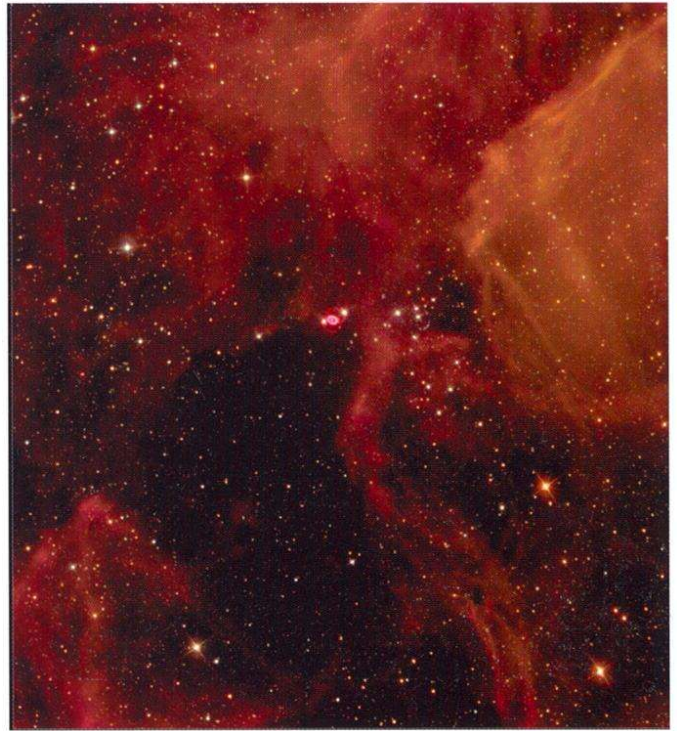


Abb. 4: Die Supernova 1987A im Tarantelnebel in der Großen Magellanschen Wolke, 170.000 Lichtjahre entfernt. Die Aufnahme durch das Weltraumteleskop Hubble aus dem Jahr 1999 zeigt auch das auffällige System von drei Ringen, das die eigentliche Explosionswolke des Sterns umgibt. Es entstand ca. 20000 Jahre vor der Explosion, möglicherweise infolge der Verschmelzung des Supernova-Vorläufers mit einem sehr nahen Begleitstern. Quelle: Space Telescope Science Institute, Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA).

Dennoch entführen Neutrinos die Energie um vieles effizienter als irgendein anderes Teilchen und nehmen daher den Hauptteil der frei werdenden Energie mit sich fort. Stunden bevor die Explosionswelle an der Sternoberfläche ankommt und die heißen Gase des zerstückelnden Sterns in gleißendem Licht erstrahlen, tragen Neutrinos somit Kunde von den infernalischen Vorgängen im Zentrum.

Wie aber kommt es zu der gewaltigen Explosion des Sterns? Diese Frage hat sich als extrem schwierig herausgestellt und beschäftigt die Astrophysiker selbst nach 40 Jahren Forschung noch intensiv. Die favorisierte Theorie, die aber nicht allgemein akzeptiert ist, vermutet, dass es die Neutrinos sind, die die Explosion auslösen. Dazu würde ein kleiner Teil, eben rund ein Prozent, der von Neutrinos weggeschleppten Energie ausreichen. In der Tat zeigen Computersimulationen, dass Neutrinos das stellare Gas aufheizen, das den Neutronenstern umgibt. Eines von zehn Neutrinos verliert dort seine Energie, nachdem es den Neutronenstern verlassen hat. Wie in einem Kochtopf auf der Herdplatte beginnt daher das Gas im Zentrum des Sterns heftigst zu brodeln, bis der stetig ansteigende Druck schließlich den Stern zersprengt (Abb. 5).

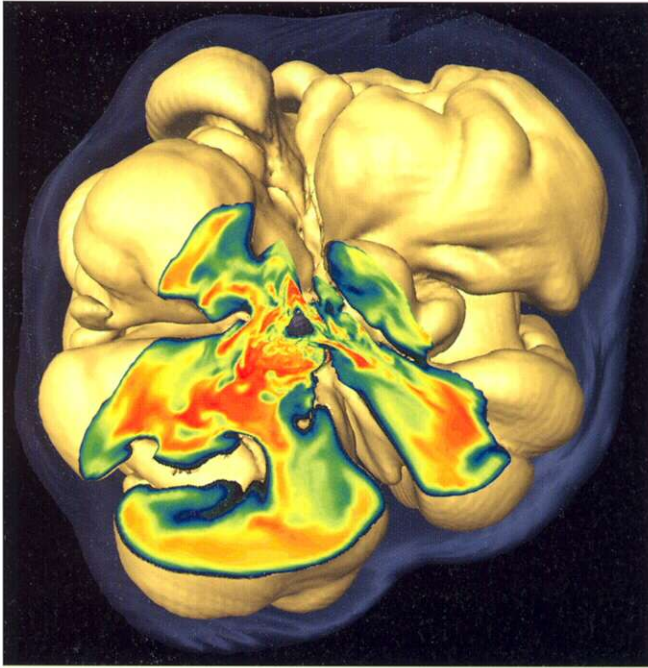


Abb. 5: Beginn einer Supernova-Explosion in einer Computersimulation des Max-Planck-Instituts für Astrophysik. Das von Neutrinos geheizte, sehr heiße Gas (rote und gelbe Gebiete in den Schnittflächen) um dem entstehenden Neutronenstern steigt in großen Blasen auf und treibt die Explosionsfront durch die weiter außen liegenden Sternschichten. Die Front ist als schleierartige umhüllende Fläche erkennbar und befindet sich etwa 1000 Kilometer vom Zentrum entfernt. Das heftige Brodeln der Gasblasen erzeugt Gravitationswellen messbarer Stärke.
Quelle: Leonhard Scheck, MPI für Astrophysik.

Die Details dieses Prozesses folgen den Gesetzen von Einsteins relativistischer Physik und sind so kompliziert, dass es selbst mit den aufwändigsten und rechenzeitintensivsten Computermodellen bis heute nicht möglich ist, alle Effekte genau zu erfassen.

Neueste Berechnungen kommen aber zu einem interessanten Ergebnis, das die Theorie der „neutrinogetriebenen Explosionen“ zu stützen scheint: Die wilden Gasbewegungen, die das Neutrinoheizen um den Neutronenstern hervorruft, können zu großen Asymmetrien bei der Explosion führen. Statt gleichförmig in alle Richtungen dehnt sich dann die Explosionswelle nach verschiedenen Seiten unterschiedlich schnell aus (Abb. 6). Dies könnte erklären, warum viele der beobachteten gasförmigen Überreste einerseits stark von der Kugelform abweichen, und warum andererseits die bei der Explosion entstehenden und ausgeschleuderten schweren chemischen Elemente so ungleichmäßig verteilt sind (Abb. 3). Auch bei der Supernova 1987A wurden eindeutige Hinweise auf solche Anisotropien gefunden. Damit aber nicht genug. Weil die Explosionstrümmer nicht in alle Richtungen mit gleicher Wucht beschleunigt werden, erhält der Neutronenstern wie der Schütze, der ein

Gewehr abfeuert, einen mächtigen Rückstoß, der ihm Geschwindigkeiten bis zu über 1000 Kilometer pro Sekunde verleihen kann. Die gemessenen Eigenbewegungen der Pulsare wären somit eine Folge der heftigen Wallungen des neutrinoheizten Gases.

Schwarze Löcher

Kein bekannter Zustand von Materie kann einen Neutronenstern mit mehr als der dreifachen Masse der Sonne stabilisieren. Überschreitet ein Neutronenstern diese Grenze, gibt es gegen die Schwerkraft kein Halten mehr: es bildet sich ein Schwarzes Loch. Ein solches exotisches Objekt vereint soviel Masse auf so kleinem Raum, dass selbst Licht nicht mehr imstande ist, der Anziehung der Gravitation zu entkommen. Es gibt deshalb keine Möglichkeit, zu erfahren, was sich hinter dem „Ereignishorizont“ verbirgt, der das Schwarze Loch umgibt. Als mathematische Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen vorhergesagt, war die Existenz Schwarzer Löcher lange Zeit stark umstritten. Neue Beobachtungen erhärten jedoch zunehmend die Erkenntnis, dass sich im Zentrum wohl jeder Galaxie ein „supermassereiches“ Schwarzes Loch befindet. Mit der millionen- oder sogar milliardfachen Masse der Sonne scheinen diese Gravitationszentren als „aktive galaktische Kerne“ eine wichtige Rolle bei der Entstehung und dynamischen Entwicklung von Milchstraßen zu spielen.

Ein Neutronenstern über der Massengrenze kollabiert dagegen zu einem „stellaren“ Schwarzen Loch. Das passiert im Innern eines sterbenden Sterns, wenn dieser mehr als rund 25 Sonnenmassen besitzt. Dann ist sein Eisenkern zu mächtig, um als Neutronenstern zu enden. Nah an dieser kritischen Grenze bildet sich das Schwarze Loch mit hinreichender Verzögerung, so dass es auch in diesem Fall zu einer Supernova kommt. Ist der Stern jedoch noch massereicher, vollzieht sich sein Ende vermutlich meist unspektakulär: Das Schwarze Loch im Zentrum verschlingt den Stern ohne das begleitende Feuerwerk einer Explosion.

Gammastrahlenblitze

Nicht so jedoch, wenn besondere Bedingungen zusammentreffen. Wenn ein solch schwerer Stern auch sehr schnell rotiert, können die Stern gases nicht unmittelbar in das im Zentrum entstandene Schwarze Loch fallen. Wie im Wasserstrudel um einen Badewannenabfluss leisten Zentrifugalkräfte der Gravitation Widerstand und zwingen das wirbelnde Gas in einen „Akkretionstorus“ um das Schwarze Loch. Dabei erhitzt es sich durch innere Reibung so stark, dass Reaktionen zwischen den Teilchen Neutrinos erzeugen. Wie ein entstehender Neutronenstern kühlt der Gastorus vor allem durch die Abstrahlung von Neutrinos. Bis zu 40 Prozent der Gasmasse können so in Neutrinos verwandelt werden, bevor das Gas im Schwarzen Loch verschwindet. Magnetfelder wachsen

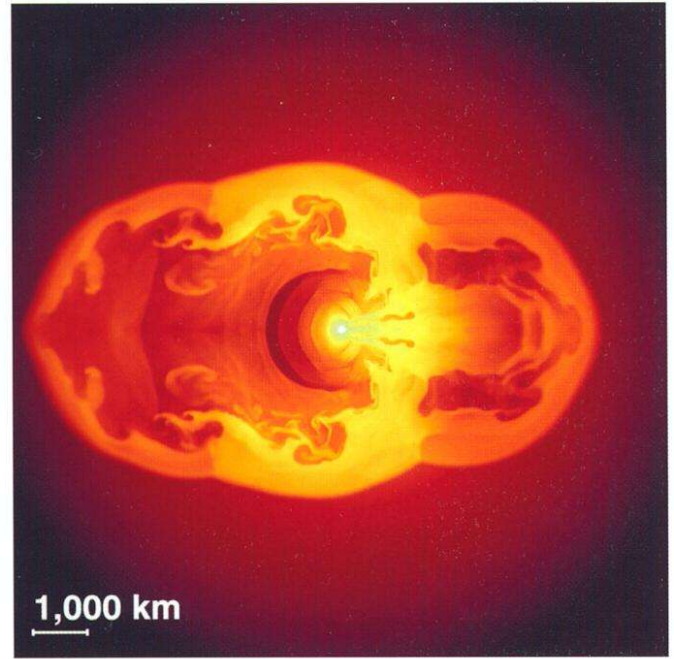
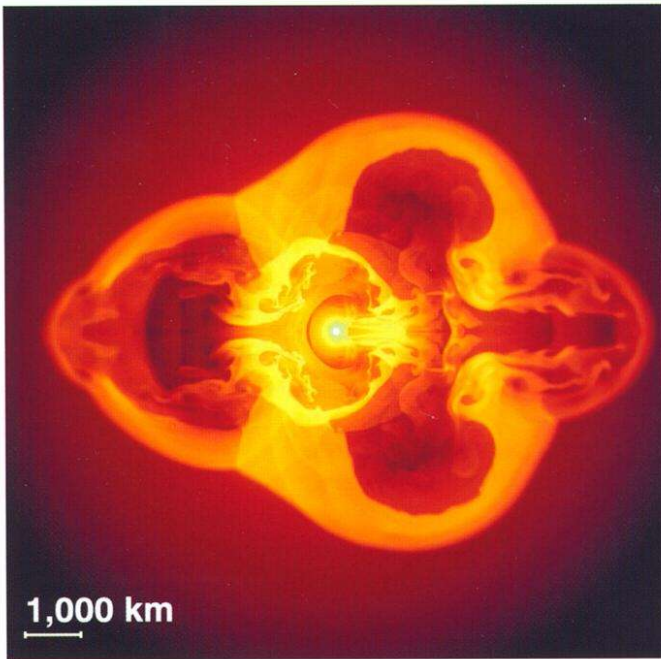


Abb. 6: Asymmetrien bei Supernova-Explosionen. Die beiden Bilder zeigen Ergebnisse zweier Computersimulationen des Max-Planck-Instituts für Astrophysik. Die Explosionswelle und die Verteilung des von Neutrinos geheizten, heißen Gases um den Neutronenstern (unsichtbar klein im Zentrum) zeigen starke Abweichungen von der Kugelgestalt. Orangefarbene, gelbliche und weißliche Bereiche bedeuten Gas höherer Dichte. Die Anisotropien in der Gasdichte und Gasgeschwindigkeit verursachen Gravitationswellen und hohe Rückstoßgeschwindigkeiten des Neutronensterns.
Quelle: Leonhard Scheck, MPI für Astrophysik.

zu gigantischen Stärken und entziehen dem Torus und Schwarzen Loch zusätzliche Energie. Die wahrhaft gewaltige Energiefreisetzung dieses „Gravitationskraftwerks“ in seinem Zentrum kann der Stern nicht überstehen. Es kommt zu einer ungeheuren Explosion, einer „Hypernova“, die zehn, ja 50 mal stärker als eine Supernova sein kann. Entlang der Rotationsachse des Sterns, so die theoretische Vorstellung, schießen eng gebündelte Gasstrahlen, sogenannte „Jets“, in beide Richtungen weg vom Schwarzen Loch. Wenn sie die Sternoberfläche durchbrechen, beschleunigen sie auf mehr als 99.9995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Ein intensiver Blitz von hochenergetischer Gammastrahlung ist die Folge, der so hell ist, dass er bis aus mehr als zehn Milliarden Lichtjahren Entfernung zu uns dringt. Erst als die extrem relativistische Bewegung der vom Stern ausgeschleuderten Jets erkannt wurde, konnten Astrophysiker durch die präzise Anwendung von Einsteins spezieller Relativitätstheorie verstehen, warum Gammastrahlung beobachtbar ist, und mit welchen Eigenschaften sie abgestrahlt wird. „Gammablitze“ wurden in den 1960er Jahren erstmals von US-amerikanischen Satelliten registriert und haben den Forschern 30 Jahre lang Rätsel aufgegeben. Sie haben extrem unterschiedliche Längen. Die kurzen Blitze sind weniger als zwei Sekunden sichtbar und dauern im Durchschnitt nur Bruchteile einer Sekunde. Eine zweite Klasse von langen Blitzen hält

typischerweise rund 30 Sekunden an, kann sich aber bis zu vielen Minuten ausdehnen. Systematische Beobachtungen finden ein bis zwei solche Ereignisse pro Tag. Erst vor wenigen Jahren wurde es möglich, sie durch präzisere Ortung am Himmel besser zu untersuchen und mit stellaren Quellen in fernen Galaxien in Verbindung zu bringen. Ein ungewöhnlich naher und genau verfolgter Gammastrahlenausbruch am 29. März 2003 brachte dann die endgültige Gewissheit: Gammablitze entstehen bei extrem energiereichen Explosionen sehr massereicher Sterne. Supernova-Explosionen sind jedoch über hundert mal häufiger als Gammablitze. Nur unter sehr speziellen Voraussetzungen kann also dieses seltene Phänomen auftreten. Der stellare Eisenkern sollte so schwer sein, dass er in einem Schwarzen Loch endet, der Stern muss dabei extrem schnell rotieren, und der Stern muss vor seinem Kollaps seine ausgedehnten äußeren Schichten aus Wasserstoff und Helium verloren haben, damit die Jets aus dem Zentrum die Sternoberfläche erreichen. Wie kann es zu dieser verzwickten Kombination von Eigenschaften kommen? Welche Geschichte durchlebt ein Stern, der schließlich in einem Gammablitz oder einer Hypernova erstrahlt? Noch hat die Astrophysik keine endgültigen Antworten auf diese Fragen. Manche Forscher spekulieren, dass Doppelsysteme massereicher Sterne mit besonderen Eigenschaften die Quellen sein könnten – wenn die beiden Sterne miteinander verschmelzen, bevor

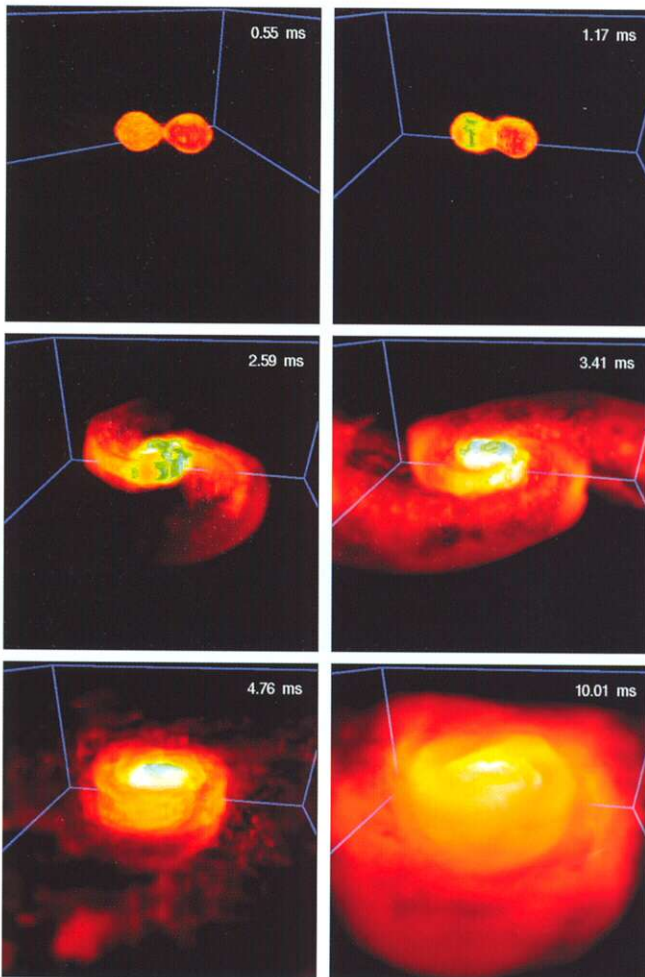


Abb. 7: Verschmelzung zweier Neutronensterne in einer Computersimulation des Max-Planck-Instituts für Astrophysik. Wenn die beiden rasend schnell umeinander wirbelnden Sterne sich zu berühren beginnen (oben), entstehen zwei ausgedehnte Spiralarme (mitte) und schließlich eine heiße Gaswolke um den extrem dichten Kern (unten), in dem der größte Teil der Masse der beiden Sterne vereint ist, und der zum Schwarzen Loch kollabieren wird. Die letzten Phasen dieses kosmischen Crashes laufen in nur einer hundertstel Sekunde ab und werden von einem starken Ausbruch von Gravitationswellen begleitet.

Quelle: Maximilian Ruffert, University of Edinburgh; Hans-Thomas Janka, MPI für Astrophysik.

der Kollaps zum Schwarzen Loch ihre Entwicklung beendet und einen Gammablitz auslöst.

Doppelneutronensterne

Die meisten Sterne werden als Doppel- oder Mehrfachsysteme geboren. Bei Verdichtung und Kollaps teilen sich interstellare Wolken auf und es bilden sich ganze „Herden“ von Sternen. Sind die beiden Sterne in einem Doppelsystem hinreichend massereich, können in zwei aufeinander folgenden Supernova-Explosionen Neutronensterne entstehen oder auch ein Neu-

tronenstern und ein Schwarzes Loch. Eine Reihe solcher Systeme sind in unserer Milchstraße bekannt. Für die Entdeckung des ersten Pulsars in einem Doppelneutronenstern wurden 1993 die amerikanischen Astronomen Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor Jr. mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Die extrem nahe Umkreisung zweier so großer kompakter Massen eröffnet ganz neue Möglichkeiten, die Effekte der Gravitation zu studieren und damit Einsteins allgemeine Relativitätstheorie zu testen. Unter anderem konnte die vorhergesagte Abstrahlung von „Gravitationswellen“ indirekt bestätigt werden, denn es stellte sich heraus, dass im Einklang mit Einsteins Theorie die beiden Neutronensterne einander langsam immer näher kommen.

Der schrumpfende Bahnabstand bedeutet aber, dass Doppelneutronensterne ebenso wie Paare aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch nicht ewig umeinander kreisen. Im Fall des Hulse-Taylor Pulsars werden sie in etwa 400 Millionen Jahren ineinander stürzen. Im Jahr 2004 wurde das erste System mit zwei Pulsaren in Messungen mit Radioteleskopen gefunden. Diese Neutronensterne besitzen einen so engen Abstand, dass ihre Kollision in „nur“ 85 Millionen Jahren erwartet wird. Kurz vor dem finalen Crash werden die beiden Sterne 500 bis 1000 mal pro Sekunde umeinander wirbeln. Die Abstrahlung von Gravitationswellen wird gigantisch ansteigen bis die Sterne schließlich durch die gegenseitige Gravitation zerrissen werden und miteinander verschmelzen (Abb. 7). Auch hier vermutet man in der Folge die Bildung eines Schwarzen Lochs, umgeben von einem heißen Akkretionstorus, der riesige Mengen Energie vor allem durch Neutrinos freisetzt. Auch hier entstehen polare Jets senkrecht zum Torus, die nahezu lichtschnell expandieren und Gammablitz abgeben können. Diese Ereignisse gelten daher als mögliche Erklärung für die Klasse der kurzen Gammablitz. Beobachtungen, die diese Vermutung bestätigen, waren bislang jedoch nicht möglich, sind aber Ziel des im November 2004 gestarteten Gammastrahlen-Satelliten Swift der NASA.

Raumzeit und Gravitationswellen

In seiner inzwischen durch zahlreiche Experimente glänzend bestätigten speziellen Relativitätstheorie von 1905 hat Albert Einstein gezeigt, dass Raum und Zeit entgegen unserer Alltagserfahrung ganz eng miteinander verwoben sind. Der absolute Raum und die davon unabhängige absolute Zeit Isaacs Newtons existieren nicht, sondern Raum und Zeit zusammen bilden eine Einheit, die Raumzeit. Dieser kommt nicht die Bedeutung eines absoluten „Hintergrundes“ zu, in dem die physikalischen Vorgänge sich abspielen, sondern ihre Wahrnehmung hängt vom Beobachter und von Relativbewegungen ab.

Die aus der speziellen Relativitätstheorie folgenden relativistischen Raumzeiteffekte freilich werden erst nahe der Lichtgeschwindigkeit deutlich bemerkbar

und widersprechen daher nicht unserer Alltagserfahrung. In seiner bahnbrechenden Theorie der Gravitation, der allgemeinen Relativitätstheorie von 1915, hat Albert Einstein dann weiter gezeigt, dass die Raumzeit durch das Vorhandensein von Massen (oder äquivalent von Energien) „gekrümmt“ wird und durch Bewegung von Massen zeitliche Veränderungen erfährt. Im Gegenzug bestimmt die Krümmung der Raumzeit die Bewegung der Massen. So deformiert die Sonne das Raumzeitgefüge im Sonnensystem derart, dass die Orientierung der elliptischen Planetenbahnen zeitlich wandert, was an der Merkurbahn glänzend bestätigt wurde.

Eine bisher nur indirekt bestätigte Voraussage der allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein ist die Existenz von Gravitationswellen. Dabei handelt es sich um Verzerrungen des Raumzeitgefüges, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und die durch Massen erzeugt werden, wenn diese sich beschleunigt und dabei nicht kugelsymmetrisch bewegen.

Während Licht- oder Schallwellen sich in der Raumzeit ausbreiten, sind Gravitationswellen eine zeitlich veränderliche Verbeulung der Raumzeit selbst. Ein lossputtender Hundertmeterläufer erzeugt demnach ein Gravitationswellensignal, ebenso wie ein schwingendes Pendel. Allerdings sind diese Signale extrem schwach. Erst wenn sich die Geschwindigkeiten innerhalb einer Quelle der Lichtgeschwindigkeit nähern und wenn die „Kompaktheit“ (d. h. das Verhältnis von Masse und Ausdehnung) hinreichend groß ist, wird ein starkes Gravitationswellensignal ausgesandt. Die Entstehung eines Neutronensterns oder eines Schwarzen Lochs in einer Supernova-Explosion sowie die Verschmelzung eines Neutronensternpaares sollten demnach starke Wellen erzeugen.

Messung von Gravitationswellen

Verzerrungen des Raumzeitgefüges lassen sich durch (relative) Längenänderungen geeigneter Maßstäbe messen, wenn diese von einer Gravitationswelle überlaufen werden. Allerdings sind selbst für die kompaktesten astronomischen Objekte in heftigster Bewegung die Signale immer noch derart schwach, dass sie sich auf der Erde nur durch winzige relative Längenänderungen verraten, wenn man die typischen Entfernungen dieser Quellen zugrunde legt. So muß man Längenänderungen mit der relativen Größe von 10^{-20} messen. Das heißt, ein Maßstab von der Länge der Entfernung Erde-Sonne würde sich nur um einen Atomdurchmesser verändern.

Diese in der Geschichte der Physik beispiellose Anforderung an die Messgenauigkeit ist erst im Jahr 2004 mit Hilfe großer Experimente, sogenannter Laser-Interferometer, möglich geworden.

Ein Laser-Interferometer besteht aus zwei senkrecht zueinander angeordneten Vakuum-Röhren, den Armen. An ihrem Kreuzungspunkt befindet sich ein „Strahlteiler“, der einen einfallenden, möglichst starken Laserstrahl in zwei Teilstrahlen zerlegt, die in die

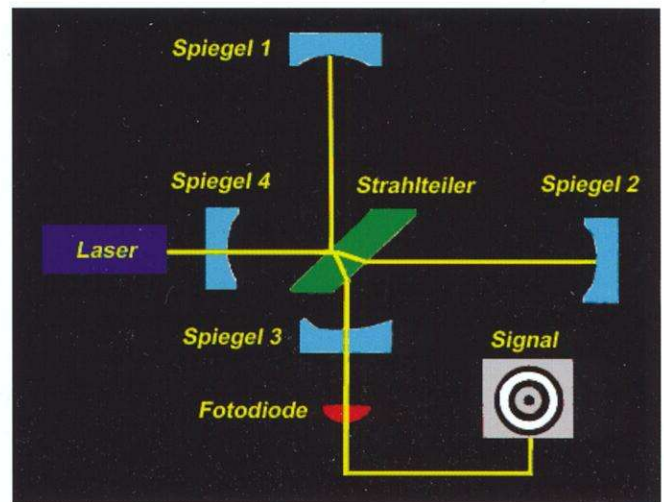


Abb. 8: Schema-Zeichnung eines Laser-Interferometers zur Messung von Gravitationswellen. Die Graphik zeigt den Aufbau des bei Hannover gelegenen GEO600 Experiments. Der Laserstrahl durchläuft einen Strahlteiler und gelangt zu den Spiegeln 1 und 2 des Interferometers, das man so einstellt, dass sich die Lichtwellen bei ihrer Überlagerung in der Fotodiode gegenseitig auslöschen. Eine Gravitationswelle verändert die Abstände zwischen den optischen Elementen des Interferometers und damit die Laufzeiten der Laserstrahlen. Die Wellen der Teilstrahlen verschieben sich dadurch, und am Ausgang (Fotodiode) erscheint ein Signal (Licht). Die zusätzlichen Spiegel 3 und 4 dienen der Verstärkung des Signals.

Quelle: <http://www.geo600.uni-hannover.de/physikjahr/gwmichelson.html>.

zwei Arme eingespeist werden. An den gegenüberliegenden Enden der Arme ist jeweils ein Spiegel freischwingend aufgehängt, der den Laserstrahl möglichst perfekt reflektieren sollte. Die Teilstrahlen werden dann am Kreuzungspunkt durch eine „optische Weiche“ aus dem Interferometer ausgekoppelt und zur Überlagerung gebracht (Abb. 8). Man stellt das Interferometer nun derart ein, dass die beiden Teilstrahlen sich so treffen, dass ein Wellenberg des einen Strahls auf ein Wellental des anderen Strahls trifft, wodurch es am Interferometerausgang dunkel ist. Läuft nun eine Gravitationswelle über das Interferometer werden seine beiden Arme durch die von der Welle hervorgerufenen Verzerrungen des Raumzeitgefüges unterschiedlich stark gestaucht und gestreckt, wodurch sich die Laufzeit der Teilstrahlen entsprechend verkürzt und verlängert. Die vor Eintreffen der Welle perfekte Auslöschung der Teilstrahlen ist daher nicht mehr gegeben, der Ausgang des Interferometers wird hell und ein Gravitationswellensignal ist nachgewiesen. Die Empfindlichkeit des Interferometers steigt mit der Lichtstärke des Lasers und der Länge der Arme, wobei Mehrfachreflexionen eine größere effektive Armlänge ergeben (Abb. 8). Aber auch die Güte des Vakuums und der Spiegel, sowie die reibungsfreie Aufhängung



Abb. 9: Der LIGO Gravitationswellendetektor in Hanford im Bundesstaat Washington, USA. Man erkennt die beiden senkrecht zueinander angeordneten, vier Kilometer langen Arme des Interferometers. Der Laser, der Strahlteiler und die Nachweisapparatur befinden sich in dem Gebäude im Vordergrund. Ein zweiter, ähnlicher Detektor befindet sich in Livingston im Bundesstaat Louisiana, USA.

Quelle: <http://www.ligo-wa.caltech.edu/>.

der Spiegel und deren Isolation gegen äußere Störungen, etwa durch Erschütterungen des Erdbodens, spielen eine wichtige Rolle.

Nur bei Optimierung aller Faktoren durch den Einsatz aufwändiger und allerneuester Technologien lässt sich die notwendige Messgenauigkeit erreichen.

Derzeit sind in den USA zwei Interferometer mit je vier Kilometern Armlänge in Betrieb (Abb. 9), in Deutschland eines mit Armen von 600 Metern Länge und in Japan eines mit 300 Metern Armlänge. Die beteiligten Wissenschaftler arbeiten fieberhaft und mit großem Erfolg an einer weiteren Steigerung der Empfindlichkeit ihrer Instrumente. Da der Nachweis von Gravitationswellen aber derart schwierig ist, müssen zusätzlich wirkungsvolle elektronische Filter eingesetzt werden, um überhaupt ein etwaiges Signal in der erwarteten Flut aller Störungen finden zu können. Für diese Suche nach der sprichwörtlichen Nadel im Heuhaufen muss die Form der zu messenden Welle schon vorab so genau wie möglich bekannt sein. Es ist daher Aufgabe der Theorie, für verschiedenste astrophysikalische Quellen mit detaillierten Modellen die typischen Welleneigenschaften vorherzusagen.

Astronomisches Fenster der Zukunft

Der erfolgreiche Nachweis von Gravitationswellen würde nicht nur eine weitere Bestätigung von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie bringen. Er würde auch ein völlig neuartiges Fenster zum Universum aufstoßen und die Geburtsstunde der Gravitationswellen-Astronomie bedeuten. Dies verspricht aufregende und grundlegende Erkenntnisse zu Sternexplosionen, verschmelzenden Doppelsternen und Schwarzen Löchern. Denn die dynamischen Vorgänge führen zu einer charakteristischen Struktur des Wellensignals, welche von den Eigenheiten der Quelle geprägt wird.

Die Messung von Gravitationswellen aus anderen Galaxien wird Aufschluss über Art und Zahl der Quellen im Virgo-Haufen und in möglicherweise noch weiter entfernten Galaxienhaufen liefern. Dadurch werden wir Neues lernen über die Entwicklung und Endstadien von Sternen, und Antworten finden auf Fragen, wie häufig Schwarze Löcher im Universum entstehen, welche Sterne Schwarze Löcher gebären, ob verschmelzende Neutronensterne und Schwarze Löcher Gammablitz aussenden und allgemeiner, ob Gas verschlingende Schwarze Löcher tatsächlich die Gravitationskraftwerke im Zentrum von Gammablitzen sind. Nur Gravitationswellen werden den Blick ins tiefe Innere dieser Phänomene öffnen. Der Zeitverlauf des Wellensignals wird Rückschlüsse auf die Kompaktheit von Neutronensternen zulassen und anzeigen, wann der Kollaps zum Schwarzen Loch einsetzt. Diese auf andere Art kaum zugängliche Information könnte bahnbrechende Einsichten in den Zustand der Materie in solchen Objekten erlauben, und damit von Materie in ihrer exotischsten Form seit dem Urknall. Der gleichzeitige Nachweis von Neutrinos und Gravitationswellen aus einer zukünftigen Supernova in unserer Milchstraße wird eine einzigartige Möglichkeit bieten, unsere Vorstellungen vom Tod massereicher Sterne direkt experimentell zu prüfen. Satelliten im Weltall, z.B. das in Entwicklung befindliche Interferometer LISA, werden Gravitationswellen auch vom Urknall und von supermassereichen Schwarzen Löchern der Messung zugänglich machen.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass ungeahnte Entdeckungen auf uns warten. Vielleicht sogar stoßen die Experimente nach hundert Jahren auf die Grenzen der Gültigkeit von Einsteins fundamentaler Theorie von Raum und Zeit.

From: Einsteins Relativitaetstheorien in Wissenschaft, Technik und Kunst, Deutsches Museum

