

Max Camenzind



Max Camenzind

Max Camenzind wurde 1944 in Luzern in der Schweiz geboren. Nach dem Schulbesuch in Luzern studierte er Physik an der Universität Bern, wo er 1973 mit einer Arbeit über Eichtheorien der Gravitation promovierte. Die Physik der Gravitation blieb auch in der Folgezeit sein zentrales Forschungsgebiet. Nach zwei Jahren als Assistent in Bern arbeitete er 1975 bis 1978 als Stipendiat des Schweizerischen Nationalfonds am Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg. Zwischen 1978 und 1985 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Theoretische Physik der Universität Zürich. Während der beiden folgenden Jahre arbeitete er als Gastwissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, ehe er ab dem Herbst 1986 dann als beamteter Wissenschaftler an der Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl tätig war. Dort baute er eine sehr aktive und erfolgreiche Theoriegruppe auf, die sich insbesondere mit der numerischen Modellierung relativistischer Objekte und astrophysikalischer Prozesse mit Hilfe von Großrechnern beschäftigte. Wichtige Ergebnisse dieser Arbeiten waren die Ableitung von Mechanismen zur Bildung der relativistischen Plasmajets, die in der Umgebung rotierender Schwarzer Löcher ausgesandt werden, sowie grundlegende Beiträge zur Klärung der Massenakkretion bei der Entstehung von Sternen und Planetensystemen. Nach seiner Habilitation 1990 in Heidelberg war Camenzind als Privatdozent und apl. Professor auch intensiv in der Lehre tätig. Außerdem beteiligte er sich in leitenden Funktionen an mehreren nationalen und europäischen Forschungskoperationen. Nach dem Beginn seines offiziellen Ruhestandes in Heidelberg übernahm er 2009 eine Wilhelm-Conrad-Röntgen-Gastprofessur in Würzburg, wo er immer noch regelmäßig Vorlesungen abhält. Neben seiner Tätigkeit in Forschung und Lehre verfasste Max Camenzind verschiedene schöne Lehrbücher und Monographien, darunter das

Max Camenzind

Standardwerk "Compact Objects in Astrophysics", das 2007 beim Springer-Verlag erschienen ist. Da etwa eine Woche vor dem Vortrag der erste Nachweis von Gravitationswellen von Neutronensternen bekannt geworden war, war Camenzinds Thema und Arbeitsgebiet zum Zeitpunkt des Vortrags ganz besonders aktuell.

Max Camenzind

Faszination der Kompakten Objekte: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher

Als Herr Appenzeller mit dem Vorschlag an mich herantrat, einen Vortrag in Ihrem Kreis zu halten, war nicht abzusehen, dass die Ereignisse der letzten Wochen mich derart überrollen würden – Gravitationswellen werden nachgewiesen, Schwarze Löcher verschmelzen, die LIGO-Entwickler bekommen den Nobelpreis in Physik 2017 und der erste Neutronenstern-Merger wird nachgewiesen. Das zwingt mich natürlich dazu, diesen Vortrag doch etwas anders zu gestalten, da Sie wahrscheinlich erwarten, dass ich zu diesen Entwicklungen Stellung beziehe. Ich werde daher weniger über meinen eigenen Werdegang erzählen als über die dramatische Entwicklung in der Astronomie der letzten Tage. Das ist wahrlich der Beginn einer neuen Ära in der Astronomie.

Es ist mir eine Ehre in Ihrem Kreis über ein Forschungsgebiet zu berichten, zu dem ich in meinem Forscherleben auch in Heidelberg einige Puzzlesteine hinzufügen konnte. Ich möchte insbesondere Herrn Appenzeller ganz herzlich danken, dass er mir die Möglichkeit eröffnet hat, auf diesem Gebiete zu forschen und eine Arbeitsgruppe an der Landessternwarte von 1986 bis 2009 zu installieren.

Mein Weg zur Gravitation

Schon im Gymnasium in Luzern, das ich von 1957 bis 1965 besuchte, inspirierten mich die Bücher von Fred Hoyle, insbesondere das Buch *Frontiers of Astronomy* (1955). Dies war wirklich das erste Buch über Astronomie, das mir ein Freund meines Vaters geschenkt hatte, als ich 1963 mehrere Wochen im Krankenhaus lag.

Dieses Buch verschaffte mir erste Einblicke ins Universum und hatte dann einen starken Einfluss auf meine spätere Denkweise, obschon ich die Idee des Steady State Universe damals schon sehr suspekt fand.

Ich habe meine Promotion in Physik 1973 an der Universität Bern abgeschlossen. In diesem Sinne bin ich eigentlich mitten in die Geburt der Eichtheorien geworfen worden. In den 1960er Jahren wurde die Eichtheorie der schwachen Wechselwirkung vollendet – 1964 wurde das Higgs-Boson von Peter Higgs postuliert, jedoch erst 2012 am LHC nachgewiesen. Anfang der 1970er Jahre wurde die Eichtheorie der starken Wechselwirkung entwickelt – die sog. Quantenchromodynamik QCD, insbesondere auch durch Herrn Heinrich Leutwyler an der Universität Bern. In meiner Promotion interessierte mich daher die naheliegende Frage, ob auch die Gravitation eine Eichstruktur aufweist. Meine Kollegen fanden die Beschäftigung mit dieser Frage gar nicht witzig – Einstein habe dies doch 1915 schon eindeutig geklärt. Diese Frage ist bis heute nicht geklärt. In der Folge habe ich dann eingesehen, dass die Beschäftigung mit dieser Frage zwar eine Lebensaufgabe darstellt, jedoch eher brotlose Kunst ist. Also wandte ich mich in der Folge den *relativistischen Objekten* zu, d.h. jenen Objekten im Kosmos, wo Einsteins Theorie der Gravitation eine Rolle spielt – den Weißen Zwergen, Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Neutronensterne wurden kurz vorher gerade in Form von Radiopulsaren gefunden, und Schwarze Löcher waren als astronomische Objekte in jener Zeit überhaupt noch nicht etabliert. So wurde etwa die Existenz eines supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße noch sehr kontrovers diskutiert, und auch der Vorschlag eines supermassereichen Schwarzen Lochs mit einer Masse von einer Milliarden Sonnenmassen in der Galaxie Messier 87 wurde von den meisten Astronomen als Spinnerei abgetan. Beide Objekte sind heute voll rehabilitiert.

Die Grundlagen der relativistischen Astrophysik habe ich mir dann in meinen ersten Post-Doc Jahren bei Herrn Wolfgang Kundt in Hamburg angeeignet von 1975 bis 1978. Hier habe ich auch

gelernt, wie man Wissen in Gruppendiskussionen erarbeitet. Zum ersten Male bin ich vertraut geworden mit Objekten wie dem Krebsnebel und seinem Pulsar, der erst 1968 entdeckt worden ist, der Frage der Struktur von Pulsarmagnetosphären oder den Eigenschaften der Kerr-Lösung für Schwarze Löcher. Heftig debattiert wurde damals die Bedeutung der Bekenstein-Entropie Schwarzer Löcher. Ich erinnere mich, dass wir damals in unserer Gruppe in Hamburg zu keiner eindeutigen Interpretation kamen.

Diese Grundlagen habe ich dann in meinen Zürcher Jahren von 1979 bis 1985 versucht in zählende Publikationen umzumünzen. In der Arbeitsgruppe von Herrn Norbert Straumann an der Universität Zürich habe ich mich zum ersten Mal mit der relativistischen Magnetohydrodynamik beschäftigt und die Beschleunigung von Jets in rotierenden Magnetosphären um rotierende Schwarze Löcher untersucht, was seinen Niederschlag in einem Lehrbuch fand.¹

Albert Einstein hatte Gravitationswellen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie vor etwa hundert Jahren vorhergesagt. Fast fünfzig Jahre haben Forscher erfolglos nach ihnen gesucht – bis im Herbst 2015 ein Gravitationswellensignal in den Daten der Advanced LIGO-Detektoren auftauchte. Im Februar 2016 publizierten die Wissenschaftler dann im Fachblatt *Physical Review Letters* die erste direkte Beobachtung von Gravitationswellen – und brachten damit den Server der Zeitschrift zum Absturz.²

¹ M. Camenzind, 2007: *Compact Objects in Astrophysics: White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes*, Springer-Verlag Heidelberg

² B.P. Abbott et al., 2016: *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, *Phys. Rev. Letters* 116, 061102

Was sind kompakte Objekte?

Stellare Objekte, die ein geringes Radius-Masse Verhältnis aufweisen, nennt man kompakte Objekte.³ Genauer betrachtet man das Verhältnis von Schwarzschild-Radius $2GM/c^2$ zum Radius R des Objekts. Während Sterne Radien von über 50.000 Schwarzschild-Radien aufweisen – der Sonnenradius beträgt 233.000 Schwarzschild-Radien – liegen die Radien von Weißen Zwergen noch bei 2000 Schwarzschild-Radien und die von Neutronensternen bei gerade noch drei Schwarzschild-Radien. Rotierende Schwarze Löcher weisen einen Horizont auf, der sogar unter einem Schwarzschild-Radius liegt. Die Kompaktheit eines Sterns bestimmt dann auch die gravitative Rotverschiebung von Photonen, die von seiner Oberfläche entweichen. Diese wurde insbesondere bei Weißen Zwergen erfolgreich nachgewiesen.

Unsere Milchstraße beherbergt rund 300 Milliarden normale Sterne und Planetensysteme, etwa 10 Milliarden Weiße Zwerge, 100 Millionen Neutronensterne und rund eine Million Schwarze Löcher (Abb. 1). Nur sehr wenige dieser kompakten Objekte erscheinen in heutigen Katalogen. Im Unterschied zu normalen Sternen, die durch Fusionsenergie gefüttert werden, erzeugen kompakte Objekte keine Energie mehr. Weiße Zwerge und Neutronensterne enthalten jedoch noch viel innere Energie, so dass sie langsam über die Oberfläche auskühlen können. Schwarze Löcher enthalten überhaupt keine Materie, Schwarze Löcher sind reine Geometrie. Mit Schwarzen Löchern bin ich schon in meinen Berner Jahren in Kontakt gekommen. Brandon Carter hatte gerade die wesentlichen Eigenschaften der Kerr-Lösung herausgearbeitet (die Separierbarkeit der Geodäten-Gleichung) und die Relativisten beschäftigten sich vor allem mit der Natur der Singularität in der Kerr-Lösung. Dies machte mich damals schon skeptisch – Singularitäten sind für mich ein Zeichen, dass die Theorie hier überfordert ist und durch etwas Neues ersetzt werden muss. Dieses

³ Max Camenzind, 2016: Gravitation und Physik Kompakter Objekte: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher, Springer Spektrum-Verlag, Heidelberg

Thema war jedoch damals tabu unter den Relativisten – sie glaubten und glauben noch immer an die Existenz von Singularitäten.



Abb. 1. Inventar der Milchstraße. [Grafik: Camenzind]

Weißer Zwerge sind bereits vor 150 Jahren entdeckt worden, jedoch wurden sie damals nicht verstanden. Neutronensterne und Schwarze Löcher traten in den 1960er Jahren in der Astronomie auf. Dies markiert das *Goldene Jahrzehnt in der Astronomie*, das mich dann in 1970er Jahren richtig elektrisiert hat:

1. 1961 haben Hamada und Salpeter die Theorie der Weißen Zwerge wiederbelebt.
2. 1963 hat Roy Kerr die allgemeine Lösung für rotierende Schwarze Löcher gefunden, die heute als Kerr-Lösung bezeichnet wird. Sie ist allein durch zwei freie Parameter gekennzeichnet – die Masse M und den Drehimpuls (Spin) S .
3. 1963 wurden auch die ersten Quasare identifiziert und 1964 die Energieerzeugung dieser Objekte durch Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch postuliert.

4. 1967 haben Radioastronomen zum ersten Mal Neutronensterne in Form von Radiopulsaren nachgewiesen. Der Pulsar im Krebsnebel wurde 1968 gefunden. Heute sind fast 3000 dieser Objekte in Katalogen aufgeführt.
5. 1967 wurde auch der erste Gammastrahlenausbruch (kurz GRB für Gamma-Ray Burst) durch die amerikanischen Vela-Satelliten gemessen. Heute wissen wir, dass die Erde im Schnitt pro Tag von drei solchen Gammablitzen getroffen wird.
6. Das erste stellare Schwarze Loch wurde mit der Röntgenquelle Cygnus X-1 1970 gefunden. Heute sind etwa zwei Dutzend dieser Quellen bekannt mit Massen zwischen 5 und 15 Sonnenmassen.

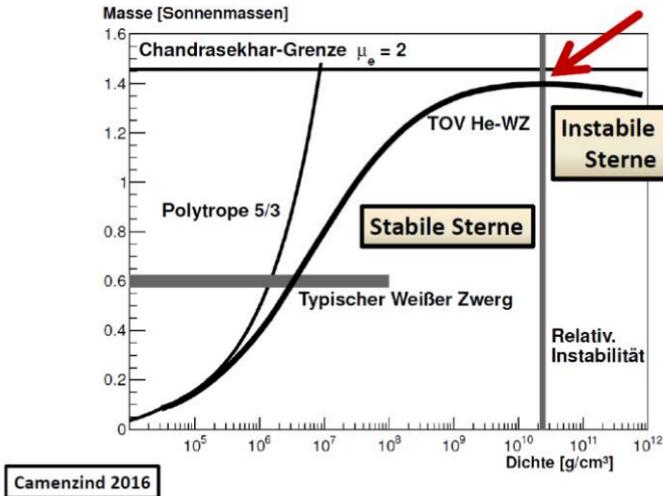


Abb. 2. TOV-Gleichgewichte für Weiße Zwerge als Funktion der Zentraldichte ρ . Das Maximum der Kurve $M(\rho)$ markiert die relativistische Instabilität (Pfeil). [Grafik: Camenzind 2016]

Weiße Zwerge und die relativistische Instabilität

Sirius, der hellste Stern am Nord-Himmel ($-1,5$ mag) hat einen Begleiter Sirius B, welcher 10 Größenklassen schwächer und damit mit bloßem Auge nicht sichtbar ist. Dieser Weiße Zwerg hat eine Temperatur von 25.000 Grad Kelvin, seine Größe beträgt aber nur $3/4$ des Erddurchmessers und umkreist Sirius A in engem Abstand in 50 Jahren.

Vor hundert Jahren waren nur drei Objekte dieser Art bekannt: 40 Eridani B, Procyon B und Sirius B – alle drei in visuellen Doppelsternen. Dies hat zur Konsequenz, dass ihre Massen heute sehr genau bekannt sind und dass sie damit als Testobjekte für die Theorie der Weißen Zwerge gelten (Abb. 2). Damals war der Aufbau dieser Objekte ein Rätsel.

Dies änderte sich schlagartig mit der Entdeckung der Fermi-Statistik für Elektronen. Es ist der Quantendruck der Elektronen, der die Weißen Zwerge im hydrostatischen Gleichgewicht hält und nicht der thermische Druck wie bei normalen Sternen. Echte Modelle wurden dann von Chandrasekhar 1930 und 1931 berechnet. Er fand auch heraus, dass dieses hydrostatische Gleichgewicht nur bis zu einer gewissen Massengrenze, der Chandrasekhar-Grenzmasse von rund 1,45 Sonnenmassen gilt. Diese ist eine Konsequenz der Relativitätstheorie von Einstein: nur wenn die Masse mit zunehmender Dichte auch zunimmt, ist das Gleichgewicht stabil, sonst instabil (s. Abb. 2). Man muss also selbst das Gleichgewicht von Weißen Zwergen mit der relativistischen Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung (kurz TOV-Gleichung) von 1939 hochrechnen, und nicht mit dem Newtonschen hydrostatischen Gleichgewicht (Abb. 2). Chandrasekhar selbst hat damals eine post-Newtonsche Betrachtung angewendet, um die berühmte Beziehung $M_{\text{Ch}} \sim M_{\text{Planck}}^3 / m_p^2$ zu finden. $M_{\text{Planck}} = 10^{19}$ Proton-Massen ist die berühmte Planck-Masse, m_p die Protonenmasse.

Nach 40 Jahren Forschung auf diesem Gebiet können wir heute festhalten:

1. Der typische Weiße Zwerg besteht im Innern aus einem C/O-Gemisch, umgeben von einer Helium-Hülle und einer Wasserstoffatmosphäre (DA Typ), die auch fehlen kann (DB Typ).
2. Der Quantendruck der Elektronen gleicht die Gravitation aus (Fowler 1926, Chandrasekhar 1931, Hamada & Salpeter 1961).
3. Die typische Masse beträgt 0,6 Sonnenmassen mit einer Dichte von 10^6 g/cm^3 .
4. Der Radius dieser Sterne folgt genau der theoretischen Masse-Radius-Beziehung.
5. Die maximal mögliche Masse beträgt für C/O WZ 1,397 Sonnenmassen (Camenzind 2016). Verschmelzen zwei Weiße Zwerge, so entsteht eine Supernova vom Typ Ia.
6. Weiße Zwerge kühlen im Laufe von 12 Milliarden Jahren nicht unter 3000 Grad Kelvin. Sie dienen daher heute als Chronometer der Milchstraße.

Neutronensterne und die Neutronenflüssigkeit

Wenn Elektronen einen Quantendruck aufbauen, dann können dies natürlich Neutronen auch. Kurz nach der Entdeckung des Neutrons durch Chadwick wurde deshalb Anfang der 1930er Jahre spekuliert, dass es auch Sterne geben könnte, die durch Neutronen aufgebaut werden, sog. Neutronensterne. Baade und Zwicky hatten sogar eine Idee, wie diese Objekte in Supernovae gebildet werden können. Die Idee wurde in der Folge wieder vergessen, so dass diese Objekte erst 1967 zufällig entdeckt worden sind. Die Astronomen hatten nicht bedacht, dass diese Neutronensterne auch magnetisiert sein könnten, schnell rotieren und dann als Pulsare – besser eigentlich als Rotare – im Radiobereich strahlen.

Neutronensterne gehören zu den kompaktesten Objekten im Universum. Ihr starkes Gravitationsfeld zieht unweigerlich immer mehr Masse an. Doch diesem Prozess sind Grenzen gesetzt. Ist eine kritische Masse erreicht, so kollabiert der Neutronestern zu einem Schwarzen Loch. Wie groß die Masse maximal werden darf, ist eine seit Jahrzehnten offene Frage und spielt heute bei den Neutronestern-Mergern eine zentrale Rolle. Schon in der Hamburger Zeit

haben wir viel über die Eigenschaften der Neutronenflüssigkeit im Zentrum der Neutronensterne diskutiert – all diese Entwicklungen sind heute durch die Betrachtung der Quantenchromodynamik (QCD) obsolet geworden, die es nun erlaubt, die Zustandsgleichung der komprimierten Kernmaterie genauer zu berechnen. Daraus resultiert heute eine maximale Masse für Neutronensterne von 2,0 – 2,2 Sonnenmassen (Abb. 3). Dies ist recht gut in Einklang mit den gemessenen Massen von Neutronensternen in binären Neutronensternsystemen mit einem Pulsar als Partner. Danach ist kein Neutronenstern mit einer Masse über 2,0 Sonnenmassen gefunden worden.

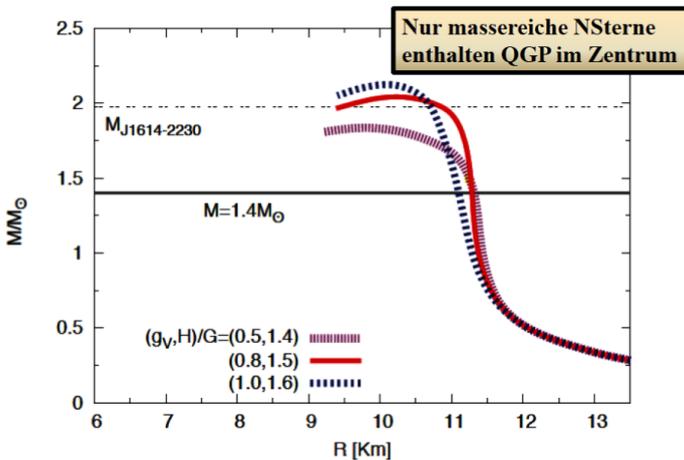


Abb. 3. Die Masse-Radius Relation für Neutronensterne, berechnet mit einer effektiven QCD-Wechselwirkung. QGP: Quark-Gluon Plasma. Neutronensterne mit einer Masse bis zu 1,6 Sonnenmassen enthalten eine Neutronenflüssigkeit im Core, angereichert durch Protonen, Elektronen und Myonen. [Grafik: nach arXiv:1707.04966]

Unklar bleibt nach wie vor die genaue Größe der Neutronensterne. Im Unterschied zu Weißen Zwergen ist die Bestimmung der Radien von Neutronensternen kein leichtes Geschäft. Leider emittieren die Atmosphären der Neutronensterne keine Linien, so dass sich das

Masse-Radius Verhältnis über die gravitative Rotverschiebung bestimmen ließe. Aus vielen photometrischen Messungen ergibt sich jedoch ein Radius im Bereich von 11 – 12 km, und nicht von 14 – 15 km.

Atmosphäre und Oberfläche eines Neutronensternes sind nur wenige Zentimeter dick und enthalten einen zu vernachlässigenden Anteil der Neutronensternmasse. Jedoch beeinflusst die Oberflächenschicht maßgeblich den Transport und die Abgabe thermischer Energie, während die Atmosphäre das ausgesandte Photonenpektrum festlegt. Sie besteht aus einem Plasma aus Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff und Eisen, das den extremen Magnetfeldern bis zu 10^{13} G und einer enormen Schwerebeschleunigung standhalten muss. Die äußere Kruste besteht überwiegend aus Atomkernen, die von einem Elektronengas umgeben sind, sie ist einige hundert Meter dick. Innerhalb der ersten zehn Zentimeter Tiefe steigt die Dichte bereits um drei Größenordnungen von 10^3 g/cm³ auf 10^6 g/cm³ an. Diese Oberflächenschicht besteht aus Eisen-Kernen, die wie bei Festkörpern in einem Gitter angeordnet sind. Ab einer Dichte von 10^6 g/cm³ stellt Eisen allerdings nicht mehr den stabilsten Kern dar. Die Protonen des Eisenkerns fangen Elektronen ein und werden zu Neutronen. So entstehen Kerne mit immer höherem Neutronenanteil, die aus bis zu 200 Nukleonen (Neutronen und Protonen) bestehen. Dabei sind nur noch zehn bis zwanzig Prozent der Kernbausteine Protonen. Normalerweise würden Kerne mit einem so großen Neutronenanteil sofort wieder zerfallen - aber bei diesen hohen Dichten sind sie stabil. Die Tiefe, in der $4,3 \times 10^{11}$ g/cm³ erreicht wird, markiert den Übergang zur inneren Kruste. Diese Dichte wird als "neutron-drip-density" bezeichnet. Bei dieser Dichte ist die Fermi-Energie so hoch, dass es keine Energie mehr kostet, ein Neutron aus dem Kern zu entfernen. Die Neutronen beginnen deshalb, aus den Kernen herauszutropfen. Je weiter die Dichte ansteigt, desto mehr Neutronen verlassen die Atomkerne, bis beim Übergang zum Neutronensternkern in zwei Kilometern Tiefe die gesamte Materie als Flüssigkeit aus entarteten Protonen,

Neutronen, Elektronen und Myonen vorliegt. Der Kern macht etwa 99% der Neutronensternmasse aus. Am Übergang zwischen Kruste und Kern beginnen die Atomkerne, sich zu berühren: Die Dichte von Atomkernen ist erreicht. Der ganze Kern besteht aus einer neutralen Flüssigkeit aus Neutronen, Protonen, Elektronen und Myonen im Beta-Gleichgewicht. Der Quantendruck der Neutronen ist entscheidend für das Druckgleichgewicht.

In den letzten 30 Jahren sind etwa 2500 Neutronensterne als Radiopulsare gefunden worden, von denen viele auch in Doppelsystemen vorkommen. Als Partner kommen Neutronensterne, Weiße Zwerge und normale Sterne in Frage, jedoch auch Schwarze Löcher. Mit zukünftigen Radioteleskopen (z.B. SKA) erwartet man bis zu 20.000 Radiopulsare in der Milchstraße zu detektieren. Über relativistische Effekte lassen sich bei solchen Systemen die Massen der beiden Partner durch Analyse der Pulsankunftszeiten sehr genau messen. Die gemessenen Massen der Neutronensterne liegen alle im Bereich zwischen 1,1 und 2,0 Sonnenmassen. Dies lässt vermuten, dass die obere Massengrenze für Neutronensterne bei 2,0 Sonnenmassen liegt. Neutronensterne können auch in engen Doppelsternsystemen mit normalen Sternen zusammenleben. Dann strömt Materie vom normalen Stern auf den Neutronenstern ein und bildet eine Akkretionsscheibe. Damit erscheint der Neutronenstern als Röntgenstern. Allein stehende Neutronensterne strahlen ebenfalls weiche Röntgenstrahlung ab, wenn sie noch relativ jung sind. Der jüngste bekannte Neutronenstern in der Milchstraße ist der Zentralstern in der Supernova Cassiopeia A – er ist gerade gut 300 Jahre alt und weist eine Oberflächentemperatur von knapp einer Million Grad Kelvin auf, ob- schon sein Inneres immer noch 500 Millionen Grad Kelvin heiß ist.

Schwarze Löcher sind reine Geometrie

Schwarze Löcher stellen das Endstadium in der Entwicklung von massereichen Sternen mit über 25 Sonnenmassen dar. Weder Materie noch Licht können einem solchen Objekt entkommen (Abb. 4). Bisher konnte man nur unter bestimmten Annahmen

Ricci-flache RaumZeit, die asymptotisch flach ist und einen Horizont besitzt (Abb. 4). Mit andern Worten, auch das Innere des Schwarzen Lochs enthält keine Materie, sondern ist Vakuum. Schwarze Löcher sind erstaunlich einfache Himmelskörper: Sie lassen sich allein durch ihre Masse, ihren Drehimpuls und ihre elektrische Ladung charakterisieren. Aufgrund fehlender weiterer Eigenschaften prägte der Physiker John Archibald Wheeler die Aussage: "*Schwarze Löcher haben keine Haare*". Die Folgerungen aus dieser Entdeckung sind groß: Sie erlaubt den direkten Nachweis der Existenz Schwarzer Löcher mit Hilfe von Gravitationswellen.

Die vier bislang von der Detektoranlage aLIGO in den USA empfangenen Gravitationswellensignale stammen von Schwarzen Löchern in Doppelsystemen. Eine neue Analyse der Daten zeigt nun, dass die Rotationsachsen dieser Schwarzen Löcher nicht in die gleiche Richtung weisen, sondern relativ zueinander zufällig orientiert sind. Demnach seien diese Schwarzen Löcher vermutlich getrennt entstanden und erst später durch enge Begegnungen in einem dichten Sternhaufen zu einem Doppelsystem geworden.

Als Konsequenz des Glatzen-Theorems lassen sich astronomische Schwarze Löcher in einer Ebene mit Masse in einer Richtung und Drehimpuls in der andern Richtung darstellen (Abb. 5). Stellare Schwarze Löcher erstrecken sich von 5 bis 40 Sonnenmassen, dann folgt eine Lücke bis etwa 200 Sonnenmassen. Die massereichsten Schwarzen Löcher finden sich in den Zentren von Galaxien.

Stellare Schwarze Löcher besitzen eine Masse von 5 bis zu 40 Sonnenmassen. Sterne mit mehr als zwanzig Sonnenmassen enden in gewaltigen kosmischen Explosionen, sogenannten Supernovae und hinterlassen ein Schwarzes Loch. Ihre Hülle stoßen sie dabei als Gaswolke in den interstellaren Raum ab, ihr Kern kollabiert unter der starken Gravitation innerhalb weniger Sekunden bis Minuten zu einem Schwarzen Loch. Stellare Schwarze Löcher werden nur sichtbar, wenn sie Materie von einem Partnerstern akkretieren, die dann Röntgenphotonen abstrahlt (Cygnus X-1 ist bereits 1970 mit Uhuru entdeckt worden).

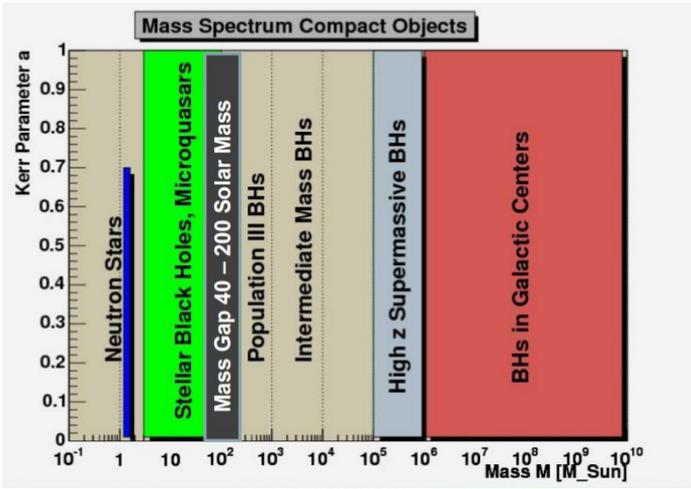


Abb. 5. Die "Glatzebene" der Schwarzen Löcher. Schwarze Löcher sind allein durch ihre Masse M und den Spin-Parameter a bestimmt. Stellare SL sind im Massenbereich von 5 – 40 Sonnenmassen zu finden, supermassereiche SL von 0,1 Mio. bis 10 Mrd. Sonnenmassen. Diese SL rotieren: $a = 1$ entspricht der extremen Kerr-Lösung, $a = 0$ der nichtrotierenden Schwarzschild-Lösung. [Grafik: Camenzind 2016]

Supermassereiche Schwarze Löcher haben eine Masse von etwa 10^5 bis 10^{10} Sonnenmassen. Bisher ist unklar, wie sie im frühen Universum entstanden sind und sich entwickelt haben. Forscher gehen davon aus, dass sich in beinahe jedem Galaxienzentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch befindet. Auch das Schwarze Loch, das sich im Zentrum der Milchstraße gebildet hat, gehört mit 4,3 Millionen Sonnenmassen in diese Kategorie. Wird das Schwarze Loch von einer rotierenden Gas- und Staubscheibe umgeben, kann sich das Material aufheizen und beginnt extrem hell zu leuchten. Solche Erscheinungen werden als Seyfert-Galaxien oder Quasare bezeichnet. Sie waren wichtige Objekte meiner Studien an der LSW.

Forscher vermuten als weitere Gruppe *mittelschwere Schwarze Löcher*, die eine Masse von mehreren Hundert bis einigen Tausend Sonnenmassen besitzen sollten. Bislang ließen sich allerdings keine Objekte dieser Klasse eindeutig nachweisen. Erste Hinweise auf mittelschwere Schwarze Löcher haben Astronomen in jungen Sternhaufen, Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien gefunden. Wir gehen davon aus, dass diese Objekte durch Kollisionen von mehreren Sternen in dichten Sternhaufen entstehen.

Kompakte Objekte in Binärsystemen erzeugen Gravitationswellen

Albert Einstein hatte Gravitationswellen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie vor etwa hundert Jahren vorhergesagt. Seit den 1960er Jahren haben Forscher erfolglos nach ihnen gesucht – bis im Herbst 2015 ein Gravitationswellensignal in den Daten der AdvancedLIGO-Detektoren auftauchte. Gravitation ist nicht wie bei Newton eine Kraft, sondern eine geometrische Eigenschaft der RaumZeit. Jede Masse darin krümmt oder verformt sie und ändert so die Bahnen anderer Körper oder Teilchen.

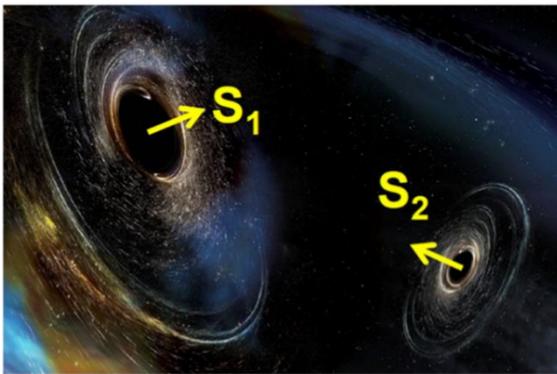


Abb. 6. Zwei Schwarze Löcher in einem Binärsystem strahlen Gravitationswellen ab. Dabei werden ihre Bahnen immer enger. Nach Milliarden von Jahren verschmelzen sie zu einem neuen Loch, das wiederum ein Kerr-Loch ist. [Grafik: Camenzind]

Bei engen Doppelsternsystemen aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern (Abb. 6), die einander umkreisen und dabei Energie verlieren, können die Frequenzen der ausgesendeten Gravitationswellen niedrig sein. Die Schwingungsdauer der Welle entspricht der Hälfte der Umlaufzeit, die Frequenz dem Doppelten der Umlauffrequenz, $f_{\text{GW}} = 2f_{\text{Kepler}}$. Je näher sich die Himmelskörper kommen, desto geringer wird die Wellenlänge und desto höher die Frequenz: Verschmelzende Doppelneutronensterne können bei sehr tiefen Frequenzen im Milli-Hertz-Bereich anfangen und sich dann in den letzten Sekunden bis zu wenigen Hundert Hertz hoch "zirpen".

Die ersten Schwarz-Loch Merger mit aLIGO

Am 14. September 2015 gelang der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen (Abb. 7), wenige Monate später der zweite. Die Detektoren von aLIGO konnten ein System aus zwei Schwarzen Löchern beobachten, das etwa 1,3 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist. Die Schwarzen Löcher besaßen 29 und 36 Sonnenmassen und sind zu einem Schwarzen Loch mit 62 Sonnenmassen verschmolzen. Die Energie der fehlenden drei Sonnenmassen wurde in Form von Gravitationswellen abgestrahlt – und das innerhalb des Bruchteils einer Sekunde. Im Juni 2017 vermeldeten die Wissenschaftler der LIGO-Kollaboration einen weiteren Fund GW170116: Genau wie bei den ersten beiden Signalen entstanden die beobachteten Gravitationswellen bei der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern.

Zwei neue Aspekte dieser Messung sind entscheidend: Es gelang Gravitationswellen zum ersten Mal direkt zu beobachten – nicht nur den Energieverlust, sondern die tatsächliche Verzerrung des Raumes und die Längenänderung hier auf der Erde. Der zweite Aspekt ist, dass aLIGO zum ersten Mal ein solches System aus verschmelzenden Schwarzen Löchern beobachten konnte, von dem keine elektromagnetischen Signale ausgehen und auch keine gefunden worden sind.

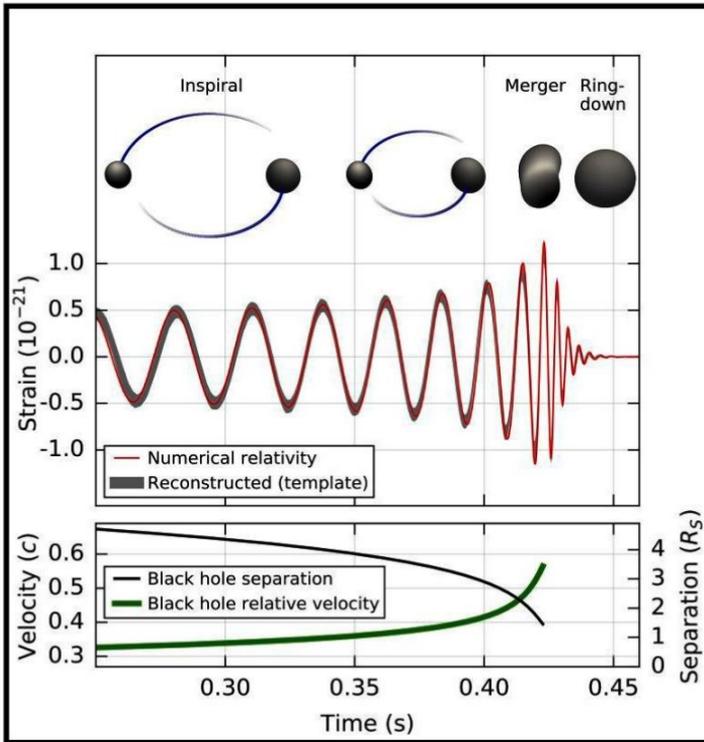


Abb. 7. Das Gravitationswellen-Signal $h(t)$ von GW150914 vom Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen in einer Entfernung von 1,4 Milliarden Lichtjahren. Man kann 3 Phasen unterscheiden: Inspiral, Merger und Ringdown. [Grafik: Abbott et al. 2016, Phys. Rev. Letters 116, 061102]

Anders als bei den bisherigen Funden wurde das neueste Signal – beobachtet am 14. August 2017 als GW170817 – gleichzeitig von drei Detektoren aufgezeichnet: neben den beiden Advanced-LIGO-Detektoren war dieses Mal auch der Advanced-Virgo-Gravitationswellen-Detektor in Italien beteiligt. Die dreifache Messung

verbessert signifikant die Genauigkeit, mit der sich Himmelsposition und Entfernung der Schwarzen Löcher bestimmen lässt.

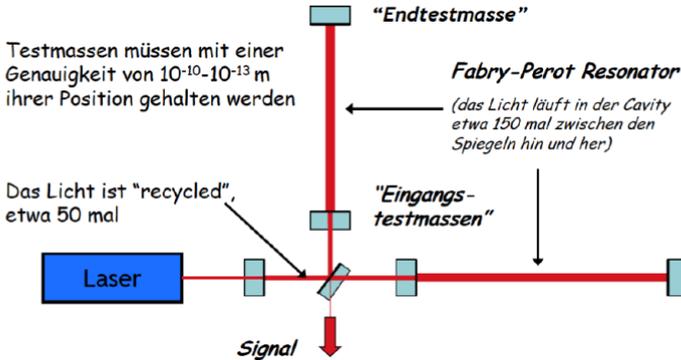
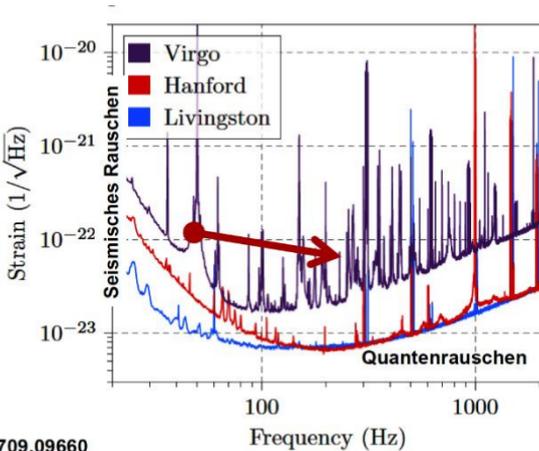


Abb. 8. Das Messprinzip der LIGO-, GEO600-, Virgo- und KAGRA-Detektoren. Eine auf den Detektor einfallende Gravitationswelle verschiebt periodisch die Abstände zwischen den Spiegeln im Interferometer. Der Laser bei aLIGO konnte 2017 nur mit einer Leistung von 25 W betrieben werden, ist jedoch auf 150 W ausgelegt. [Grafik: Camenzind 2016]

Die Nobelpreisträger in Physik 2017

Der Nobelpreis für Physik wird 2017 zur Hälfte an Rainer Weiss vom MIT verliehen, zur anderen Hälfte gemeinsam an Barry C. Barish und Kip S. Thorne vom Caltech für *entscheidende Beiträge zum LIGO-Detektor und die Beobachtung von Gravitationswellen*. Bereits in den 1970er Jahren untersuchte Rainer Weiss mögliche Störeffekte bei der Messung von Gravitationswellen und überlegte, wie der Nachweis eines Signals gelingen könnte. Als geeigneten Detektor schlug er ein sogenanntes Michelson-Laserinterferometer vor (Abb. 8). Dieses besteht aus zwei senkrecht zueinander verlaufenden Armen von 4 km Länge, durch die jeweils ein Laserstrahl mehrmals hin und her läuft. Spiegel am Ende der beiden Röhren werfen das Licht wieder zurück, um die beiden Strahlen

schließlich zu überlagern. Eine einlaufende Gravitationswelle sollte einen Arm des Interferometers strecken, während sie den anderen staucht. Dadurch verlängern beziehungsweise verkürzen sich die von den Laserstrahlen durchlaufenen Strecken und die beiden Lichtwellen schwingen nicht mehr im Takt, was sich messen lässt (Abb. 9).



arXiv:1709.09660

Abb. 9. Die Rauschkurve der drei Detektoren aLIGO und aVirgo im August 2017. Im niederfrequenten Bereich ist die Empfindlichkeit des Detektors durch das seismische Rauschen begrenzt, im hochfrequenten Bereich durch das Quantenrauschen. Die markanten Ausschläge sind Resonanzen im Detektorsystem. [Daten: LIGO und Virgo]

LIGO wird von der NSF finanziert und von Caltech und MIT betrieben, die LIGO konzipierten und die Initial und Advanced LIGO-Projekte leiteten. Finanzielle Unterstützung für das Advanced-LIGO-Projekt kam hauptsächlich von der NSF, wobei Deutschland (Max-Planck-Gesellschaft), Großbritannien (Science and Technology Facilities Council) und Australien (Australian Research Council) signifikantes Engagement und Beiträge leisteten. Mehr als 1200 Wissenschaftler und etwa 100 Forschungs-

einrichtungen aus aller Welt sind durch die LIGO Scientific Collaboration LSC – welche die GEO-Kollaboration und die australische OzGrav Collaboration beinhaltet – an der Unternehmung beteiligt.

Die Virgo-Kollaboration besteht aus mehr als 280 Physiker(innen) und Ingenieuren aus 20 verschiedenen europäischen Forschungsgruppen: 6 vom Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Frankreich; 8 vom Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Italien; 2 in den Niederlanden bei Nikhef; das MTA Wigner RCP in Ungarn; die POLGRAW-Gruppe in Polen; Spanien mit der Universität von Valencia; und das European Gravitational Observatory EGO, die Dacheinrichtung des Virgo-Detektors nahe Pisa in Italien, gefördert von CNRS, INFN und Nikhef.

GW170817 – Verschmelzen von zwei Neutronensternen

Seit Ende August 2017 kursierten bereits Gerüchte, dass aLIGO und aVirgo das erste Gravitationswellen-Signal vom Verschmelzen zweier Neutronensterne beobachtet hätten. Am 10. Oktober 2017 durften die Forscher endlich ihre Sensation verkünden. Und weil daran so viele beteiligt waren, sprengte die Präsentation alle normalen Maßstäbe. Die Pressekonferenz bei der NSF wurde zweigeteilt, weil auf einmal gar nicht alle Ergebnisse präsentiert werden konnten. In *Nature* und *Science* erschienen je sieben Artikel; ein weiteres Paper in *Physical Review Letters* war von rund 4000 Autoren unterzeichnet.⁴ Die genaue Analyse der Ligo-Daten ergab, dass die beiden Neutronensterne 1,1 beziehungsweise 1,6 Mal so viel Masse besaßen wie unsere Sonne und sich am Schluss fast 200 Mal pro Sekunde umkreisten. Bei diesem explosiven Ereignis wurde elektromagnetische Strahlung frei, die von über 70 Teleskopen auf der ganzen Erde beobachtet wurde. Zum ersten Mal ist es damit gelungen, Gravitationswellen aus einer anderen Quelle als Schwarzen Löchern zu detektieren.

⁴ B.P. Abbott et al., 2017: GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, *Phys. Rev. Letters* 119, 161101

Das Signal der Gravitationswellen GW170817 konnte um 12:41:04 Weltzeit am 17. August 2017 mit aLIGO und aVirgo detektiert werden und dauerte ca. 100 Sekunden an. Es überspannte 3000 Zyklen, bei dem die Frequenz der Gravitationswellen auf mehrere hundert Hertz anstieg. Es erreichte zuerst den Virgo-Detektor in Italien, 22 Millisekunden später das LIGO-Observatorium in Louisiana, USA und nochmals 3 Millisekunden später den LIGO-Hanford Detektor in Washington, USA. Mit diesen drei Messungen konnte die Quelle auf einen Bereich von 28 Quadratgrad im südlichen Himmel mit einer 90 % Wahrscheinlichkeit bestimmt werden (Abb. 10). Der Fermi-Satellit zeichnete den Gammablitz um 12:41:06 UTC auf. Die Gamma-Strahlung erreichte die Erde also ca. 2 Sekunden nach den Gravitationswellen. Er dauerte auch nur 2 Sekunden und war damit ein sogenannter kurzer Gammablitz. Nach der Detektion der beiden Signale wurde der entsprechende Himmelsbereich von zahlreichen bodengebundenen und weltraumgestützten Instrumenten untersucht. Innerhalb weniger Stunden wurde das Objekt im optischen Bereich entdeckt und der Helligkeits- und spektroskopische Verlauf konnte in den nächsten Tagen und Wochen dokumentiert werden. Nach zwei Wochen wurden aus dem Bereich auch Röntgenstrahlung und Radiowellen gemessen. Ein Neutrinosignal konnte nicht gemessen werden.

Analysen der LIGO-Daten stellten eine relativ geringe Entfernung zur Neutronensternverschmelzung von rund 130 Millionen Lichtjahren zur Erde fest, in Übereinstimmung mit den 130 Millionen Lichtjahren zur vermuteten Ursprungsgalaxie NGC 4993. Im Gegensatz zu vorherigen Gravitationswellen-Beobachtungen berechneten die Wissenschaftler die Massen der verschmelzenden Objekte zu 1,1 bis 1,6-mal der unserer Sonne, vergleichbar mit denen bekannter Neutronensterne und nicht in Übereinstimmung mit denen von Schwarzen Löchern.

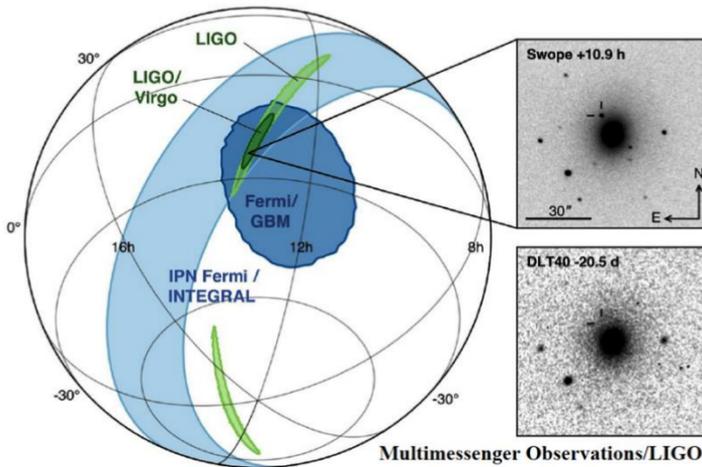


Abb. 10. Multimessenger Messungen des Gravitationswellen-Ereignisses GW170817. Beide LIGO-Detektoren beobachteten GW170817 für rund 100 Sekunden am 17. August 2017. Die Messungen des Virgo-Detektors verbesserten die Himmelslokalisierung signifikant und erlaubten es den Forschern, den Ursprung der Welle auf einen Himmelsfleck am Südhimmel von nur 28 Quadratgrad einzuschränken. Nur 1,7 Sekunden später registrierte der Gamma-Ray Burst Monitor GBM an Bord des Fermi Gamma-Ray Space Telescope einen Gammastrahlenblitz (GRB 170817A) aus ungefähr der gleichen Richtung wie das Gravitationswellensignal. 11 Stunden später wurde die Kilonova in der Galaxie NGC4993 mit Teleskopen am Südhimmel geortet (rechts). [Grafik: LIGO]

Während der größte Teil der Materie des zerrissenen Sterns aus einer Akkretionsscheibe auf den massereicheren Begleiter akkretiert wird (Abb. 11), werden 0,001 bis 0,1 Sonnenmassen des zerstörten Neutronensterns isotrop mit einer Geschwindigkeit vom 0,1- bis 0,2-fachen der Lichtgeschwindigkeit ausgestoßen.

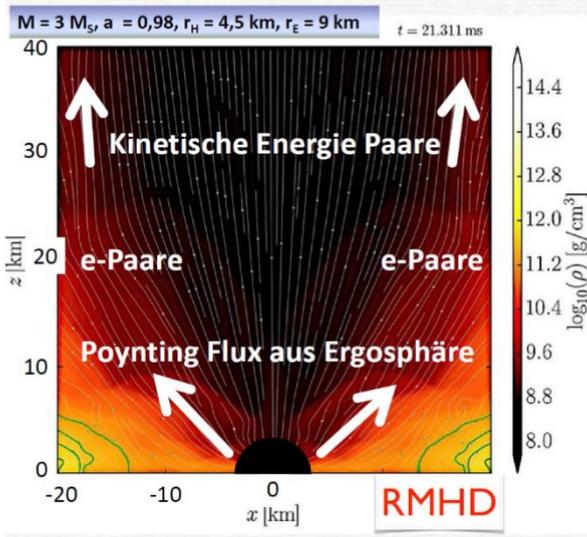


Abb. 11. Magnetosphäre (MS^2) um ein schnell rotierendes Schwarzes Loch, das durch Verschmelzen von 2 Neutronensternen entsteht. Die starke differentielle Rotation des Raumes um ein Schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe baut eine achsensymmetrische MS^2 auf. Die Kühlung der heißen Akkretionsscheibe (gelb) durch Gamma-Photonen und Neutrinos füllt die MS^2 mit Elektron-Positron Paaren, die durch den Poynting-Fluss auf hohe Gamma-Faktoren beschleunigt werden und den Jet des Gamma-Bursters erzeugen. [Grafik: Camenzind]

Die neutronenreiche Materie wandelt sich innerhalb weniger Sekunden durch Fission und Beta-Zerfall in schwere Elemente um (vor allem in seltene Erden), die durch den r -Prozess entstehen. Die neu synthetisierten radioaktiven Elemente zerfallen und die dabei emittierte Strahlung kann als ein 0,5 bis 10 Tage dauernder Ausbruch mit einer Leuchtkraft von 10^{34} W bis $10^{35,5}$ W nachgewiesen werden (Abb. 12). Kilonovae werden als eine bedeutende Quelle für die schweren Elemente des r -Prozesses mit Atommassen von über 130 angesehen, da der Beitrag von Supernova-Ejekta zu

diesen Elementen zu gering zu sein scheint, um die gemessenen Werte in der interstellaren Materie zu erklären.

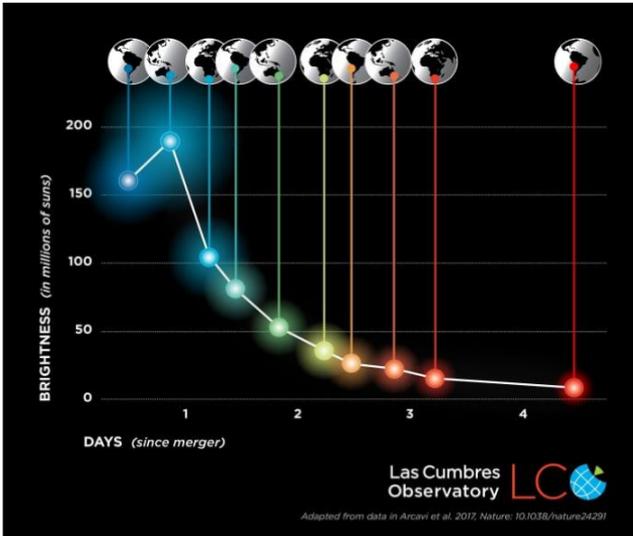


Abb. 12. Die Kilonova, die mit dem Merger GW170817 assoziiert wird. Mittels Teleskope in Chile, Australien und Südafrika gelang es, alle 8 Stunden die Helligkeit der Kilonova zu messen. Die Temperatur der Photosphäre sank im Laufe der Zeit von 10.000 K (blau) auf 2000 K (rot). [Lichtkurve: Sarah Wilkinson / LCO, nach Daten von I. Arcavi et al. 2017: Optical emission from a kilonova following a gravitational-wave-detected neutron-star merger; arXiv:1710.05843]

Gravitationswellen-Astronomie – Blick ins Dunkle Universum

In den letzten 40 Jahren habe ich eine unglaubliche Entwicklung auf dem Gebiet der kompakten Objekte erlebt. Ich konnte im Rahmen dieses Vortrages nur einige Aspekte meiner eigenen Forschung darstellen. Diese Entwicklung bestätigt noch einmal die Richtigkeit der Theorie der Gravitation von Albert Einstein aus

dem Jahre 1915. Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher sind heute als Objekte der Astronomie voll etabliert.

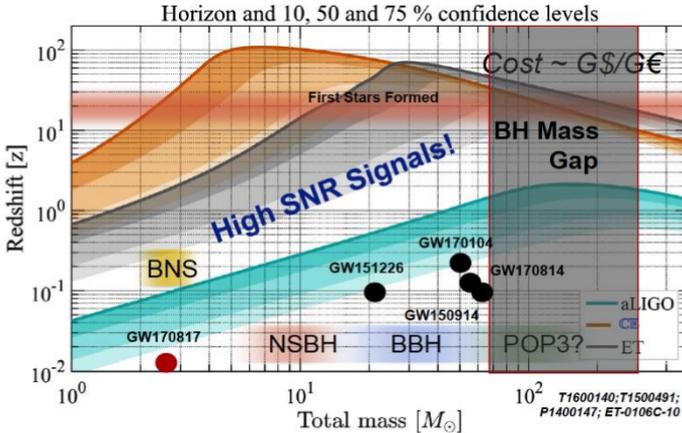


Abb. 13. Die Reichweite der Gravitationswellen-Detektoren in Rotverschiebung z als Funktion der Gesamtmasse M in Einheiten von Sonnenmassen. $z = 0,1$ entspricht einer Distanz von 445 Mpc. Nach heutiger Kenntnis sollten jenseits von etwa 60 Sonnenmassen keine Merger mehr auftreten. BNS: binäre Neutronenstern-Systeme, NSBH: Neutronenstern und Schwarzes Loch, BBH: Schwarz-Loch Merger, aLIGO: Vollausbau (ab 2022) von Advanced-LIGO, CE: Cosmic Explorer, das nächste GWellen-Observatorium der Amerikaner, ET: Einstein Teleskop der Europäer. [Grafik: aus LIGO Whitepaper LIGO-T1600119, modifiziert durch Camenzind]

Die ersten Beobachtungen mit aLIGO haben insbesondere die Existenz von Doppelsternen bestehend aus zwei Schwarzen Löchern oder zwei Neutronensternen bestätigt. Der Nachweis eines Doppelsterns bestehend aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch steht noch aus. aLIGO vermag diese Objekte jedoch nur sozusagen in unserer kosmischen Nachbarschaft nachzuweisen (Abb. 13). Es werden bereits neue Gravitationswellen-Observatorien geplant – Cosmic Explorer in

U.S.A., das Einstein Teleskop ET in Europa und das Weltraum-Observatorium LISA durch die ESA.⁵ Diese neuen Observatorien sind imstande, das ganze Universum zu überblicken (Abb. 13). Damit sind aus dem ganzen sichtbaren Universum etwa 5 bis 10 Neutronenstern-Merger pro Tag zu erwarten mit entsprechendem Nachglühen im optischen Bereich. Von diesen Gravitationswellen-Ereignissen wird nur etwa ein kurzer Gammablitz pro Tag auftreten, da die Jet-Emission nicht isotrop erfolgt. Dies eröffnet einen neuen Bereich der Astronomie – Astronomie mit Gravitationswellen, die erst so etwa ab 2030 richtig in Gang kommen wird. Im Fokus dieser Astronomie stehen binäre Neutronenstern-Systeme (BNS), Systeme bestehend aus Neutronenstern und Schwarzen Loch (NSBH) und binäre Schwarz-Loch Systeme (BBH). Zusätzlich wird mit LISA auch die Beobachtung von supermassereichen Schwarz-Loch Systemen im frühen Universum neue Einsichten in die Entwicklung von Galaxien bringen.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 26. Oktober 2017.

⁵ K. Danzmann, 2017: LISA – Laser Interferometer Space Antenna, [/www.elisascience.org/files/publications/LISA_L3_20170120.pdf](http://www.elisascience.org/files/publications/LISA_L3_20170120.pdf)