

## Kosmiskt kvitter

Den 14 september 2015 såg de stora LIGO-detektorerna i USA för första gången någonsin rymden vibrera av gravitationsvågor. Trots att signalen var extremt svag när den väl kom fram till jorden, lovar den redan en revolution för astrofysiken. Gravitationsvågorna är ett helt nytt sätt att följa de våldsammaste händelserna i rymden, och testa gränserna för vårt vetande.

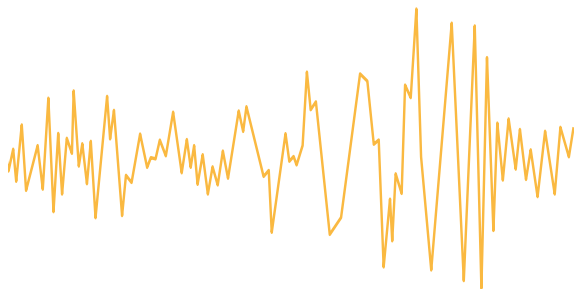


Bild 1. Den första gravitationsvåg som någonsin observerats.

De nu observerade gravitationsvågorna skapades i en våldsam kollision mellan två svarta hål för över tusen miljoner år sedan. Albert Einstein fick rätt igen, även om det dröjde hundra år sedan gravitationsvågor förutsades av hans allmänna relativitetsteori. Själv vacklade han om de någonsin skulle kunna observeras.

**LIGO, Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory**, är ett samarbetsprojekt med drygt tusen forskare från över tjugo länder. Tillsammans har de förverkligat en över fyrtio år gammal vision. Årets Nobelpristagare har med sin entusiasm och uthållighet på var sitt sätt varit outhärliga för LIGO-framgången. Med pionjärerna **Rainer Weiss** och **Kip S. Thorne**, samt **Barry C. Barish**, vetenskapsmannen och ledaren som fått projektet i hamn, har drygt fyra decenniers ansträngningar lett till att gravitationsvågor till slut kunde observeras.

Ryktena hade cirkulerat i fem månader innan den tusenhövdade internationella forskargruppen blev klar med att nagelfara mätningarna. Först den 11 februari 2016 vågade de offentliggöra sina rön. Redan med den allra första upptäckten satte LIGO-forskarna flera rekord. Förutom att de hade upptäckt de första gravitationsvågorna någonsin, så har hela förloppet tolkats som ett första tecken på att det i rymden existerar medelstora svarta hål på mellan 30 och 60 solmassor och att par av svarta hål kan smälta ihop. Så under ett kort ögonblick var energin i gravitationsstrålningen från de kolliderande svarta hålen många gånger större än det samlade ljuset från hela det synliga universums alla stjärnor.

### Rumtiden vibrerar

Det var helt mörkt. Men knappast helt stilla. Skalvet från två svarta hål som slog sig samman ruskade om hela rumtiden. Som vågorna efter en sten kastad i vatten spred sig gravitationsvågorna från sammanslagningen genom kosmos. Det tog tid för dem att komma fram till oss. Trots ljushastigheten, den högsta möjliga, dröjde det över tusen miljoner år för vågorna att anlända hit till jorden. Den 14 september 2015 klockan 11.51 svensk tid avslöjade en lätt darrning i ljusmönstret i de amerikanska tvillinganläggningarna LIGO dramatiken som ägt rum långt bort för länge sedan – 1,3 miljarder ljusår från jorden.

LIGO är inget vanligt teleskop som tar emot ljus eller någon annan elektromagnetisk strålning från rymden, det är ett instrument för att avlyssna rymdens gravitationsvågor. För även om gravitationsvågorna är skälvingar i själva rumtiden och inte några ljudvågor, så motsvarar deras frekvens vad vi kan höra med våra öron.

I flera årtionden har fysikerna satt upp fällor för att fånga gravitationsvågor. De sprids med ljusets hastighet, dessa vågor som skakar om universum såsom Albert Einstein beskrev för hundra år sedan. Då förklarade han att rum och tid, kombinerade till en fyrdimensionell rumtid, vibrerar i gravitationsvågor som alltid skapas när en massa accelererar, som när en isdansös gör en piruett, en stjärna exploderar i en avlägsen galax eller ett par svarta hål roterar kring varandra.

Liksom gravitationsvågor är även svarta hål beskrivna av Einsteins allmänna relativitetsteori från 1915. I över ett halvt sekel var de flesta forskare övertygade om att svarta hål bara fanns som lösningar till Einsteins ekvationer, och inte på riktigt därute i rymden. Relativitetsteorin framställer gravitationen som rumtidens krökning. Där gravitationen är extremt stark kan krökningen bli så stor att ett svart hål bildas. Ett svart hål är rumtidens mest dramatiska störning – inget som kommer i dess närhet, inte ens ljus, kan fara ut igen. Därför utgör de svarta hålen en ständig källa till fysikens gåtfullhet.

Med gravitationsvågor finns det hopp om att få syn på något ingen tänkt på förut. Längre var det oklart om det alls skulle vara möjligt att avslöja universums hemligheter. Albert Einstein själv var övertygad om att gravitationsvågorna aldrig någonsin skulle kunna mätas, och han vacklade ifråga om de var verkliga eller bara en matematisk illusion. Än mer skeptisk var hans samtida kollega, Arthur Eddington, som påpekade att gravitationsvågorna verkade ”röra sig med tankens hastighet”.

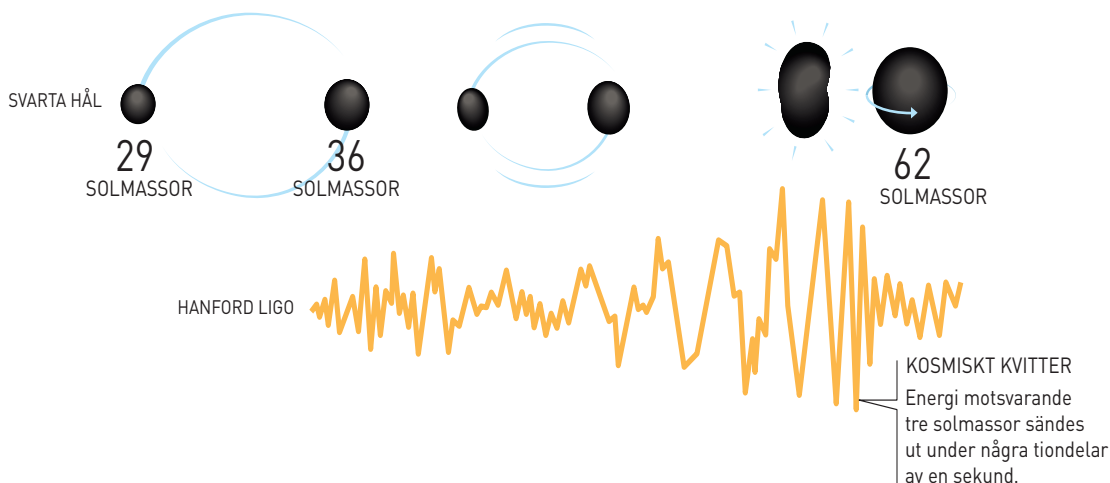
Verkliga blev vågorna först mot slutet av 1950-talet när nya beräkningar visade att de faktiskt bär på energi. I princip ska de då kunna mätas. Ett första indirekt bevis på att gravitationsvågor existerar i rymden kom under 1970-talet, då de amerikanska astronomerna Joseph Taylor och Russell Hulse med ett stort radioteleskop följde ett par extremt täta stjärnor, en dubbelpulsar. De kunde visa att stjärnorna roterade allt snabbare kring varandra samtidigt som de förlorade energi och kom närmare varandra. Mängden förlorad energi stämde med teoretiska beräkningar för gravitationsvågor. För sina upptäckter belönades Joseph Taylor och Russell Hulse med Nobelpriset i fysik år 1993.

För att få fram ett direkt bevis för gravitationsvågor krävs dock direkta observationer av vågorna. Men rumtiden är stel och inte lätt att ruska om. Bara de våldsammaste kosmiska processerna kan åstadkomma mätbara vågor. Ändå är gravitationsvågorna extremt svaga – att mäta dem är som att mäta avståndet till en stjärna tio ljusår bort med en noggrannhet som svarar mot bredden av ett hårstrå. Dessutom, även om hela universum ständigt vibrerar av gravitationsvågor, inträffar de våldsammaste händelserna sällan i vår galax. Det gäller att spana längre ut.

## Gravitationsvågorna avslöjar det förflutna

Nu hade det hänt – för första gången någonsin fastnade universums gravitationsvågor i LIGO-fällan. De två svarta hålen, som till slut kolliderade, hade alltsedan de skapades tidigt i universums historia rört sig i cirklar runt varandra. För varje varv svepte de rumtiden i ett spiralmönster, som i form av gravitationsvågor fortplantade sig allt längre ut i rymden. Vågorna bär bort energi vilket får de svarta hålen att komma allt närmare varandra, och ju tätare spiralen är, desto fortare virvlar de svarta hålen och desto mer energi sänder de ut i en allt snabbare dans som pågått i många miljoner år. Framåt slutet rör de svarta hålen horisontlinjer vid varandra, hålen svingar sig med nära ljusets hastighet in mot sitt ödesdigra slut. Blixtsnabbt, på ett par tiondelar av en sekund, slukar de varandra, alla vibrationer klingar av och ett enda roterande svart hål blir kvar. Det går nu inte att se något spår av dess dramatiska förflutna.

## GRAVITATIONSVÅGOR FRÅN KOLLIDERANDE SVARTA HÅL



**Bild 2.** De två svarta hålen sände ut gravitationsvågor i många miljoner år när de roterade kring varandra. De kom allt närmare innan de på ett par tiondelar av en sekund smälte ihop till ett stort svart hål. Det var då vågorna nådde ett crescendo som hos oss på jorden, 1,3 miljarder ljusår bort, lät som ett kosmiskt fågelkvitter med ett abrupt slut.

Minnet är dock inte helt förlorat – historien finns kvar inpräntad i rumtiden. Gravitationsvågor, som rytmiskt trycker ihop och sträcker ut rumtiden, skiftar ton allteftersom deras budskap förändras. Kunde vi lyssnat på dem alla, och inte bara på de starkaste, så skulle hela universum fyllas av musik, som fågelkvitter i en skog, med en starkare ton här, en lite tystare där. Efter årmiljarderna, när den svarta hålduon ökar farten mot den sista kaotiska sammandrabbningen, kommer ett crescendo innan tonerna bleknar bort, mot en tystnad som inget avslöjar.

Nu kunde bara det sista lilla kvittret höras genom rumtiden. Varför lät det så svagt? Det är för att dess källa ligger så väldigt långt bort, och att gravitationsvågor, likt ljusets vågor, försvagas med avståndet. Så när gravitationsvågorna anländer till oss har deras styrka krympt betydligt – den sträckning av rumtiden som LIGO skulle fånga var tusentals gånger mindre än en atomkärna när vågen passerade jorden.

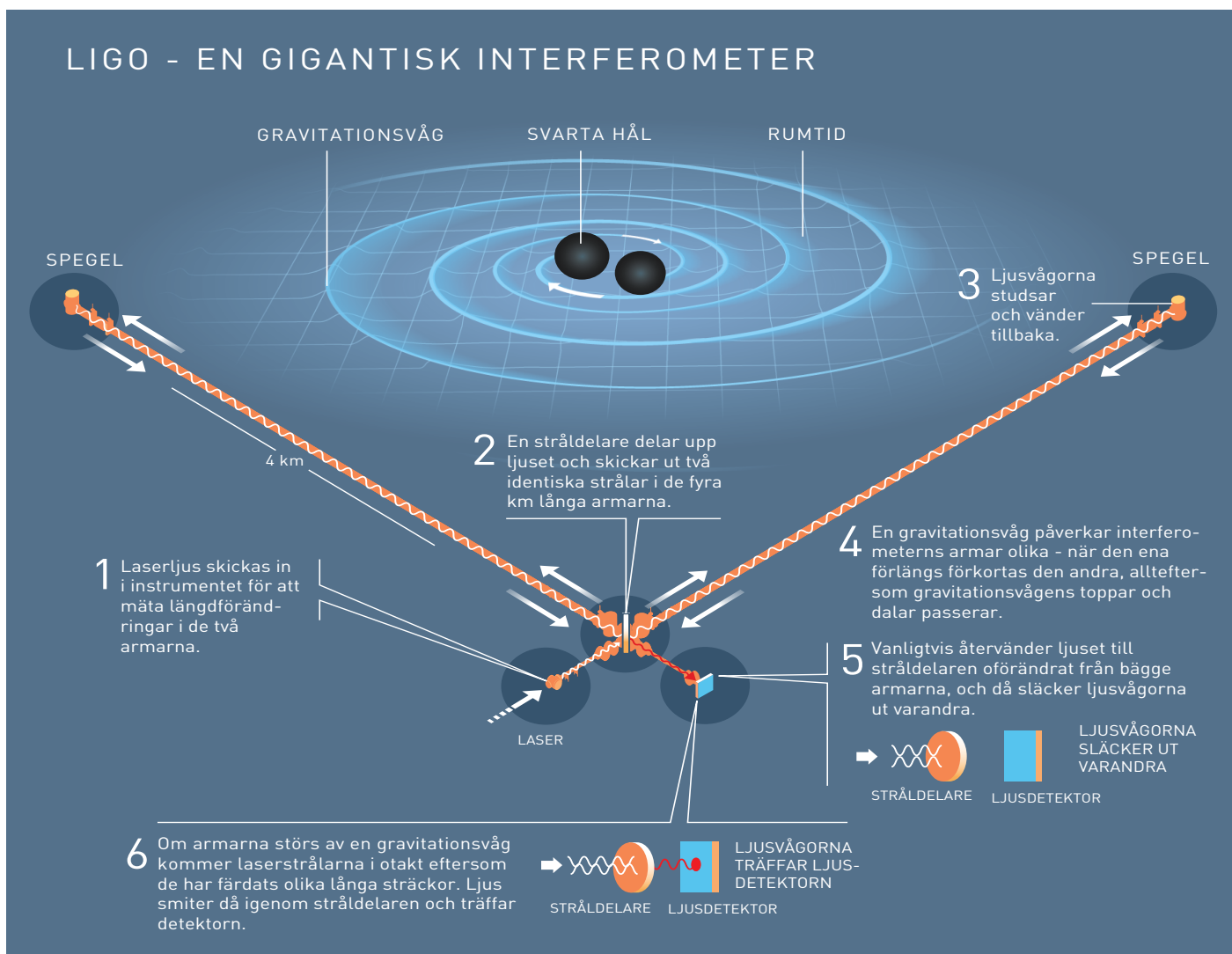
### LIGO – en gigantisk interferometer

Drömmen har funnits i över 50 år och vägen till framgång har varit lång, krokig och tidvis plågsam för många av de inblandade forskarna. En första detektor att fånga gravitationsvågor med påminde om en stämgafler känslig för vågor med en viss frekvens. Men med vilken frekvens som de svarta hålen skulle sjunga sin dödssång, det fick Joseph Weber vid University of Maryland i Washington bara gissa sig till. Under 1960-talet byggde han den allra första detektorn. På den tiden var det många som tvivlade på att gravitationsvågor och svarta hål ens fanns på riktigt. Så när Weber i början av 1970-talet påstod sig ha fångat gravitationsvågorna blev det en sensation. Ingen kunde dock bekräfta Webers resultat, och de betraktas som falsklarm.

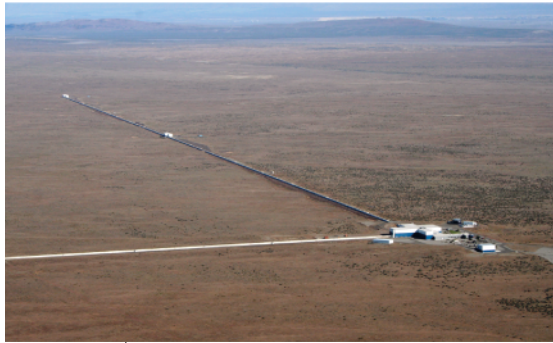
Trots en utbredd misstro var både Rainer Weiss och Kip Thorne redan i mitten av 1970-talet fast övertygade om att gravitationsvågor kunde innebära en revolution för vår kunskap om universum. Rainer Weiss hade redan då gjort en analys av möjliga källor till brus som skulle störa mätningarna. Han hade även designat en detektor, en laserbaserad interferometer, som skulle kunna övervinna dessa störningar.

Medan Rainer Weiss utvecklade sina detektorer vid MIT i Cambridge utanför Boston startade Kip Thorne även ett samarbete med Ronald Drever, som först byggde egna prototyper i Glasgow i Skottland, men kom så småningom till Thorne vid Caltech i Los Angeles. Tillsammans bildade Weiss, Thorne och Drever den trojka som under många år ledde utvecklingen. Så småningom hamnade Drever utanför projektets huvudfåra, men han hann uppleva den första upptäckten innan han avled i mars 2017 hemma i Skottland.

Istället för Webers stämgafl-design utvecklade Weiss, Thorne och Drever ett annat instrument, en laserinterferometer. Principen var välkänd sedan länge. En interferometer består av två armar som formar ett L. I hörnet och i ändarna på L-et hänger massiva speglar i en mycket sofistikerad anordning. En förbipasserande gravitationsvåg påverkar interferometerens armar olika – när den ena armen trycks ihop sträcks den andra ut. Armarna förlängs och förkortas om varandra, allteftersom gravitationsvågens toppar och dalar passerar. Med en laserstråle som studsar mellan speglarna mäts förändringen i armlängderna. Om inget inträffar släcker de studsande strålarna ut varandra när de möts i hörnet på L-et. Men om någon av armarna i interferometern ändrar längd går ljuset olika lång väg, ljusvågorna kommer i otakt och då ändras det sammanlagda ljusets intensitet där strålarna möts igen.



**Bild 3.** Så fångas en gravitationsvåg. Världens första infångade gravitationsvågor skapades i en våldsam kollision mellan två svarta hål 1,3 miljarder ljusår från oss. När dessa vågor passerade jorden 1,3 miljarder år senare hade de försvagats betydligt: den störning av rumtiden som LIGO uppmätte var tusentals gånger mindre än en atomkärna.



◀ Hanfordanläggningen ligger i stäpplandskapet i USA:s nordvästra hörn, utanför Hanford.

Livingstonanläggningen ligger utanför Livingston i Louisianas träsk i söder.



Courtesy Caltech MIT/Ligo Laboratory

**Bild 4.** LIGO består av två gigantiska interferometrar som är exakt lika. Gravitationsvågen träffade först interferometern i Livingston för att 7 millisekunder senare passera dess tvilling i Hanford drygt 3 000 km bort. Signalerna var nästan identiska, och stämde väl överens med den förväntade signalen för en gravitationsvåg. Ur signalerna kunde även ett område på södra himlavalvet pekats ut som vågorna kom ifrån.

Idén var ganska enkel, men fallgroparna var så många att det tog nästan ett halvt sekel att nå framgång. För att mäta mikroskopiska förändringar mindre än en atomkärna krävs storskaliga instrument. Planen var att bygga två interferometrar med fyra kilometer långa armar vardera där laserstrålen studsar många gånger fram och tillbaka. På så sätt förlängs ljusets väg ytterligare för att öka chansen att känna av när rymden tänjs ut. LIGO hamnade i stäpplandskapet i USA:s nordvästra hörn, utanför Hanford, med en tvillinganläggning tre tusen kilometer bort i Livingston i Louisianas träsk i söder.

Det tog årtal att med det känsligaste instrumentet någonsin kunna skilja ut en signal från gravitationsvågor ur allt brus. För detta krävs sofistikerad analys och avancerad teori, och där var Kip Thorne experten. Men för att bygga sinnrika instrument fordras kreativt hantverk och ingenjörskonst av allra högsta klass, och här gjorde Rainer Weiss sina pionjärinsatser. Laserljusets våglängd och intensitet måste vara så stabila som möjligt, strålen ska studsas fram och tillbaka mellan speglarna och träffa dem exakt. De upphängda speglarna får helst inte skaka, inte ens när löven faller från trädet intill, ett barn springer förbi eller när en lastbil passerar på vägen flera kilometer bort. Samtidigt ska speglarnas upphängning vara nog känslig för gravitationsvågens mikroskopiska skälkning. Atomernas termiska rörelser på spegelytorna måste kompenseras för liksom kvanteffekterna i lasern. Det gällde att utveckla lasertekniken, uppfinna nya material, driva de befintliga systemen för vakuum, seismisk isolering och annan nödvändig teknologi långt bortom det redan kända.

Nu räckte det inte att bedriva projektet i en liten skala. När Barry Barish 1994 trädde in som ledare för LIGO omvandlade han forskargruppen på cirka 40 personer till ett storskaligt internationellt samarbete på drygt tusen medverkande. Han sökte upp de nödvändiga experterna och anslöt flera forskargrupper från många länder. Bara genom ett brett samarbete, *big science*, kunde drömmen om det omöjliga förverkligas.



## Signalen kom direkt

I september 2015 skulle LIGO sätta igång igen, efter en flera år lång uppgradering. Upprustad med tiofalt starkare lasrar, 40 kilo tunga speglar, mycket avancerad brusdämpning och ett av världens största vakuumsystem i sina långa armar snappade den upp en vågsignal redan några dagar innan experimentet officiellt skulle sättas igång. Först passerade vågen Livingstonanläggningen för att 7 millisekunder senare med ljusets hastighet dyka upp i Hanford tre tusen kilometer bort.

Meddelandet från det digitaliserade systemet skickades ut sent på natten den 14 september 2015. I USA sov alla, men i Hannover i Tyskland var klockan 11:51 och Marco Drago, en ung fysiker vid Max Planck Institute for Gravitational Physics, gjorde sig redo för lunch. De kurvor han fick syn på såg exakt ut som de han så många gånger övat att känna igen. Var han verkligen den förste i hela världen som bevittnade gravitationsvågorna? Eller var det ett falskt larm, bara ett blindtest, som gjordes då och då och som bara några få kände till?

Vågformen var exakt som den förutsagda, och något test var det inte. Allt stämde perfekt. Pionjärerna, nu i 80-årsåldern, och deras LIGO-kollegor fick äntligen höra sina drömmars melodi som ett glissando eller som ett kort fågelkvitter med ett abrupt slut. Ändå var det nästan för bra för att vara sant, och det fick dröja ända till den 11 februari året därpå innan de fick avslöja nyheten ens för sina närmaste.

Den välbevarade hemligheten kallad GW 150914 motsvarade alla förväntningar. Ur signalen kunde forskarna räkna ut att de svarta hålen var 29 och 36 gånger tyngre än solen, och ändå inte större än cirka 200 kilometer i diameter. Så smälte de samman till ett svart hål på cirka 62 solmassor, vilket innebär att under ett par tiondelar av en sekund hann de stråla ut energi i form av gravitationsvågor motsvarande 3 solmassor. Det gör GW 150914 till det kraftigast strålände objektet i hela universum under detta korta ögonblick. Signalen pekar också ut det område på södra himlavalvet där den våldsamma händelsen inträffade 1,3 miljarder ljusår bort. Kollisionen hände alltså för 1,3 miljarder år sedan, vid tiden då liv på jorden höll på att ta steget från encelliga till flercelliga organismer.

Sedan den första upptäckten har LIGO noterat ytterligare två liknande händelser. I augusti 2017 anslöt även systeranläggningen, den europeiska VIRGO utanför Pisa i Italien, till LIGO och den 27 september annonserade de sin första gemensamma upptäckt. Alla tre detektorer observerade samma kosmiska gravitationsvågor den 14 augusti 2017. Vågorna kom från två medelstora svarta hål som kolliderade för 1,8 miljarder år sedan.

Fyra gånger har nu detektorerna sett universum skaka. Många fler upptäckter väntas komma. Också Indien och Japan håller på att bygga nya observatorier för gravitationsvågor. Med flera experiment placerade långt från varandra ska forskarna kunna peka ut exakt var på himlen signalerna kommer ifrån. Då kan observationer av gravitationsvågor följas av studier med optiska teleskop, röntgenteleskop eller andra typer av teleskop.

Hittills har alla sorters elektromagnetisk strålning och partiklar, som kosmisk strålning eller neutriner, burit fram budskap om universum till oss. Gravitationsvågorna lämnar däremot direkta vittnesmål om störningar i själva rumtiden. Det är något helt nytt och annorlunda. Nya ännu osedda världar öppnar sig, och en rikedom av upptäckter väntar dem som lyckas fånga gravitationsvågorna och tolka deras budskap.

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, [www.kva.se](http://www.kva.se), och <http://nobelprize.org>. Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se).

### LIGO-webbplatser

[www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)  
[www.advancedligo.mit.edu](http://www.advancedligo.mit.edu)  
[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

### Böcker

**Collins, H.** (2017) *Gravity's Kiss: The Detection of Gravitational Waves*, MIT Press.  
**Bartusiak, M.** (2017) *Einstein's Unfinished Symphony: The Story of a Gamble, Two Black Holes, and a New Age of Astronomy*, Yale University Press  
**Levin, J.** (2016) *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space*. Knopf  
**Kennefick, D.** (2007) *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*. Princeton University Press  
**Collins, H.** (2004) *Gravity's Shadow: The Search for Gravitational Waves*. University of Chicago Press.  
**Thorne, K. S.** (1994) *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. W. W. Norton & Company

### Artiklar

**Rose, J.** (2016) Einsteins vågor fångade till slut. *Forskning & Framsteg*, nr 4  
**Danielsson, U.** (2016) Gravitationsvågor och svarta hål, *Kosmos*, band 92:2016  
**Cho, A.** (2016) Meet the college dropout who invented the gravitational wave detector, *Science*, 4 augusti  
**Chu, J.** (2016) Q&A: Rainer Weiss on LIGO's origins. MIT physicist developed the concept for LIGO as a teaching exercise. MIT News, 4 augusti  
**Andersson, N.** (2014) Nära målet. *Forskning & Framsteg*, nr 2

### Videoklipp

**Hör kvittret/ljudet från två kolliderande svarta hål.** *Caltech/MIT/LIGO lab*  
<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v2?highlight=sound%20gravitational>  
**Barish, C. B.** (2017, 13 januari) *The Long Odyssey from Einstein to Gravitational Waves*. Kungl. Vetenskapsakademien  
[http://kva.screen9.tv/media/10tpBoqgCGvsg\\_ifTD8kkg/the-long-odyssey-from-einstein-to-gravitational-waves](http://kva.screen9.tv/media/10tpBoqgCGvsg_ifTD8kkg/the-long-odyssey-from-einstein-to-gravitational-waves)  
**Thorne, K. S.** (2016, 25 maj) *Disturbed Kerr Black Holes*. Kungl. Vetenskapsakademien  
<http://kva.screen9.tv/media/wkdjHKlXoijrB-sc0i9LKA/disturbed-kerr-black-holes>  
**LIGO Generations** (2015) Kai Staats  
<https://vimeo.com/115282354>  
**LIGO, a passion for understanding** (2014) Kai Staats  
<https://vimeo.com/88437726>

### Vetenskaplig artikel

**Abbott, B. P., et al.** (2016) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters*, vol. 116, 061102

---

## Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2017 till

med ena hälften till

och med andra hälften gemensamt till

### ***RAINER WEISS***

Född 1932 (85 år) i Berlin, Tyskland. Fil.dr 1962 vid Massachusetts Institute of Technology, MIT, Cambridge, MA, USA. Professor of Physics, Massachusetts Institute of Technology, MIT, Cambridge, MA, USA.

[http://web.mit.edu/physics/people/faculty/weiss\\_rainer.html](http://web.mit.edu/physics/people/faculty/weiss_rainer.html)

### ***BARRY C. BARISH***      *och*

Född 1936 (81 år) i Omaha, NE, USA. Fil.dr 1962 vid University of California, Berkeley, CA, USA. Linde Professor of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.

<https://labcit.ligo.caltech.edu/~BCBAct/>

### ***KIP S. THORNE***

Född 1940 (77 år) i Logan, UT, USA. Fil.dr 1965 vid Princeton University, NJ, USA. The Feynman Professor of Theoretical Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.

<https://www.its.caltech.edu/~kip/index.html/>

*”för avgörande bidrag till LIGO-detektorn och observationen av gravitationsvågor”*