
3

KOSMISKE GULDMINER

Af

JENS HJORTH

PROFESSOR, PH.D.

DARK COSMOLOGY CENTRE,
NIELS BOHR INSTITUTET,
KØBENHAVNS UNIVERSITET

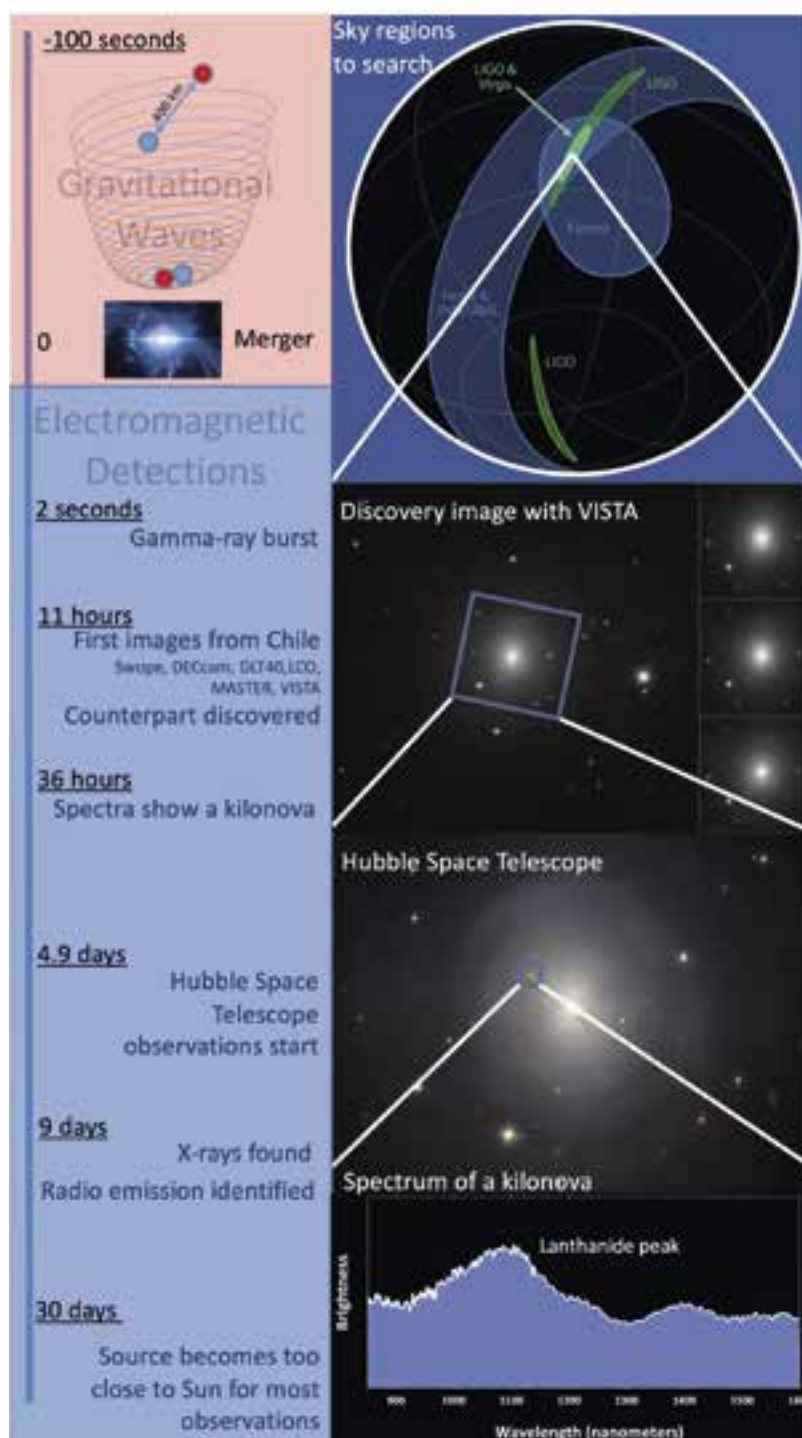
MODTAGET STØTTE TIL
SEMPER ARDENS-PROJEKTET
*CARLSBERG FOUNDATION
FELLOWSHIP PROGRAMME
IN COSMOLOGY*

I august 2017 skete der noget bemærkelsesværdigt på himlen. Og nej, her taler vi ikke om solformørkelsen som dækkede store dele af blandt andet USA. Men derimod om opdagelsen af lys (elektromagnetisk stråling) fra en begivenhed der også udsendte gravitationsbølger. Med overraskende konsekvenser. Professor Jens Hjorth fra Dark Cosmology Centre beretter her om opdagelsen der blev det videnskabelige "Breakthrough of the Year 2017" i Science Magazine og mange andre tidsskrifter i det forgangne år.

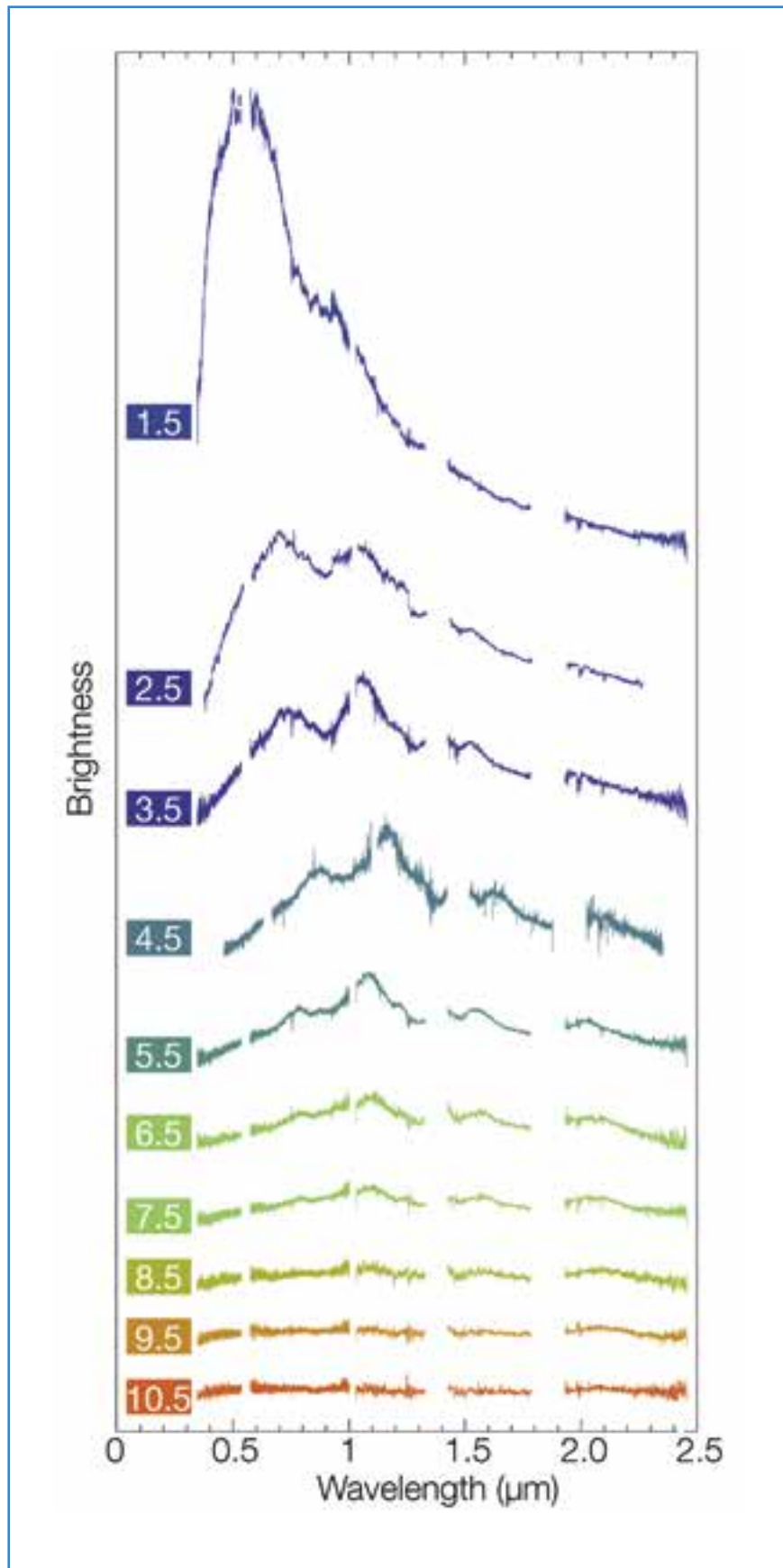
Fredag den 17. august var den sidste dag af en 6 uger lang 'workshop' organiseret af Niels Bohr Professor Enrico Ramirez-Ruiz. Emnet var gravitationsbølger (eller 'tyngdebølger'), som var forudsagt af Einstein i 1915 og for første gang blev detekteret direkte af LIGO-eksperimentet 100 år senere, nemlig 15. september 2015 (Nobelprisen i fysik blev tildelt for denne opdagelse i 2017). Sommeren igennem var førende forskere mødt op i København for at arbejde med unge studerende fra hele verden. Mange var på vej hjem efter nogle spændende uger med mange ideer, spændende foredrag og hårdt arbejde. Det var en fredag eftermiddag med en følelse af et godt udført arbejde og tid til at sige farvel.

Så skete det!. Kl. 14.41.04 dansk tid opfangedes signalet fra to kolliderende neutronstjerner. I cirka 100 sekunder før sammenstødet udsendtes gravitationsbølger der kunne opfanges af detektorer på Jorden. De af os der allerede havde en aftale med LIGO/Virgo-konsortiet, fik en besked på telefon eller e-mail om opdagelsen. Denne detektion var anderledes. Mens tidligere detektioner var fra kolliderende sorte huller, var denne begivenhed tydeligvis fra to neutronstjerner. Og dermed var der en chance for at vi ville kunne detektere lys-signaler fra sammenstødet. Og nej, vi var ikke parate, siddende klar ved vore computere. Folk var på vej hjem, klar til en hyggelig fredag aften. Men alle vidste med det samme at dette var stort. Vi samledes i et lille kontor, RF 116, på Niels Bohr Institutets Dark Cosmology Centre (DARK). På workshoppen havde vi tidligere på dagen diskuteret hvor længe vi egentlig kunne komme til at vente på at detektere lys-signaler fra gravitationsbølge-begivenheder. Og der var bred enighed om at vi nok ikke skulle være for optimistiske og måske kunne komme til at vente flere år før vi ville være heldige.

Gravitationsbølgerne ramte først detektoren Virgo nær Pisa i Italien. Så var de 22 tusindedele af et sekund om at fare gennem jordkloden og nå LIGO-detektoren ved Livingston i Louisiana, og tre tusindedele af et sekund senere nåede de frem til detektoren ved Hanford i Washington. Desuden viste det sig at der 1,7 sekunder senere detekteredes et gammaglimt af de to rumteleskoper *Fermi* og *Integral*. Da gammaglimt er ret sjældne, var der noget der tydede på at de to begivenheder måtte være forbundne. Og det viste sig endda at de skete på det samme område af himlen. Alt tydede på at dette var den begivenhed vi havde ventet på - det første eksempel på en sammenhæng mellem gravitationsbølger og lys (elektromagnetisk stråling, gammastråler er højenergetisk 'lys')² (Figur 1).



Figur 1.
En opsummering af tidsudviklingen og observationerne af GW170817. Figuren er produceret af Andrew Levan (University of Warwick).



Kilonova

Men ville vi kunne lokalisere begivenheden ved andre bølglængder og dermed finde ud af præcis hvor gravitationsbølgerne kom fra? Det var nu vi skulle vise hvad vi kunne! På DARK diskuterede astronomer fra hele verden som var involveret i opfølgingsobservationer, strategien. Mange af forskerne i rum RF 116 skulle vise sig at være konkurrenter, men atmosfæren var en utrolig blanding af opstemthed over detektion af neutronstjerner, en forventningens glæde om hvad der nu skulle ske, og et skarpt fokus på at få det opfølgende arbejde gjort optimalt. Med kombinationen af gravitationsbølger og gammaglimt vidste vi at der var sket en vigtig opdagelse, og vi fik travlt med at aktivere observationsprogrammer så utallige teleskoper og satellitter blev rettet i den retning som gravitationsbølgerne og gammaglimtet blev observeret fra. Kildens position var ikke bestemt særligt præcist, så der var meget af himmelrummet - 31 kvadratgrader - der skulle afsøges. Desuden var LIGO/Virgo området kun 50 grader fra solen, og dermed var det kun synligt fra teleskoper i Chile i omkring en time efter solnedgang. Vores forskningsgruppe besluttede at bruge bl.a. ESO's VISTA teleskop som kunne observere himlen i nært infrarøde bølglængder (1 - 2 μm). Da solen endelig gik ned, kunne vi og alverdens astronomer starte observationerne, bl.a. styret fra RF 116 på DARK.

Da dataene begyndte at komme ind knap 11 timer efter kollisionen, kiggede vi først på områder hvor der allerede lå klare galakser. Det samme gjorde andre. Faktisk fandt 6 forskellige forskergrupper, uafhængigt af hinanden, en ny kilde i nærheden af galaksen NGC 4993 i retning af stjernebilledet Søslangen på den sydlige himmelkugle. Vi fandt den først i det nært-infrarøde, mens en anden gruppe, ledet af Enrico Ramirez-Ruiz', som brugte Swope teleskopet styret fra DARK, først rapporterede den nye kilde i det optiske område.

Kilden, kaldet en 'kilonova' fordi den er meget klarere end en nova, men ikke så klar som en supernova, var lokaliseret i udkanten af galaksen NGC 4993. Omkring 70 observatorier i rummet og på landjorden blev taget i brug for at følge kilonovaens udvikling. Alt andet blev lagt til side. Nu gjaldt det i første omgang om at finde ud af om gravitations-

Figur 2. VLT/X-shooterspektre af kilonovaen der fulgte sammenstødet af neutronstjernerne der gav anledning til GW170817. Tiden i dage efter begivenheden er angivet til venstre for hvert spektrum. X-shooterinstrumentet er delvist finansieret af Carlsbergfondet og delvist bygget på Niels Bohr Institutet. Credit ESO and note 4.

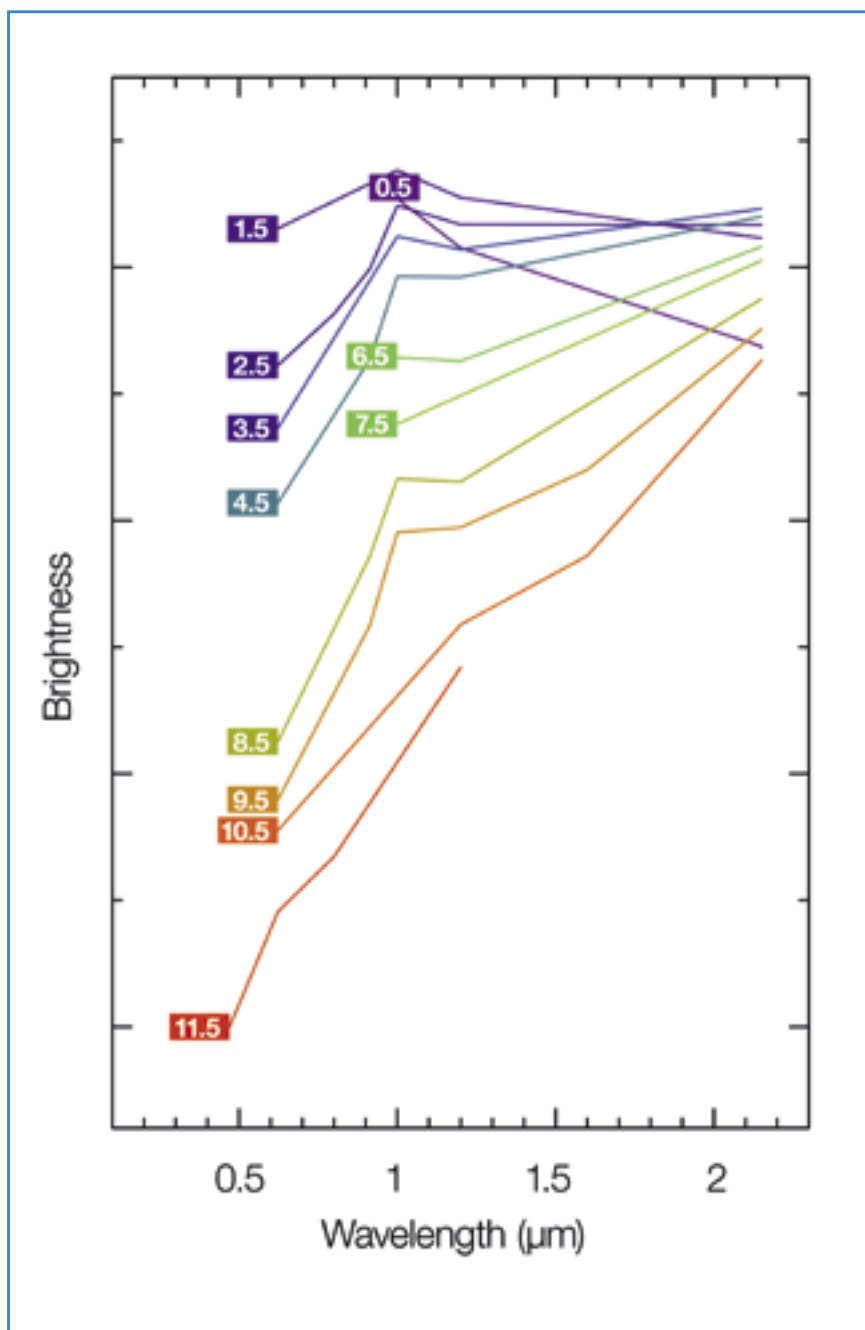
bølgerne og kilonovaen virkelig var resultater af den samme begivenhed. Derfor bestemte jeg og mine kolleger fra DARK afstanden til den galakse som kilonovaen dukkede op i, ved hjælp af klassiske, astronomiske metoder.³ Da afstanden omkring 140 millioner lysår herfra passede med den afstand som blev beregnet ud fra gravitationsbølgerne, kunne vi bekræfte at gravitationsbølgerne kom fra galaksen NGC 4993, som huser kilonovaen.

Nu er himlen fuld af variable kilder, så vi kunne ikke være helt sikre på at denne var relateret til gravitationsbølgerne. Men i de kommende dage brugte vi ESO's Very Large Telescope (VLT) og Hubble rumteleskopet til at bekræfte at dette var en variabel kilde som ingen andre. Den havde farver og lysstyrke som indikerede at den måtte skyldes ekspansion af materiale tæt ved lysets hastighed. Og spektrene vi tog, som DARK PhD-studerende Jonatan Selsing var central i analysen af, lignede ikke noget som astronomer nogensinde havde observeret^{4,5} (Figur 2). Mens kilden blev svagere med tiden i det synlige område, blev den faktisk klarere i det nært infrarøde bølglængdeområde (Figur 3). Det var forudset i 2013 at det præcist var det der ville forventes for en kilonova.^{6,7} Der var ikke tvivl længere: Vi havde fundet det første optiske-infrarøde lys fra en gravitationsbølgebegivenhed fra sammensmeltende neutronstjerner.

Dannelsen af universets tunge grundstoffer

Opdagelsen af en kilonova fremkommet ved sammenstødet mellem to neutronstjerner har bragt os et stort skridt nærmere opklaringen af en af videnskabens store gåder: Hvordan er de tungeste grundstoffer i universet blevet til?

Ved Big Bang blev der kun dannet tre af de ca. 100 grundstoffer vi kender fra det periodiske system, nemlig de tre letteste: brint, helium og en smule litium. Resten af naturens grundstoffer er kommet til senere, og i de seneste 100 år har forskerne kæmpet med at finde ud af hvordan det skete. Størstedelen af de lettere grundstoffer op til jern med



Figur 3. Farveudviklingen af kilonovaen som funktion af tiden siden sammenstødet i dage. Det ses at lyset hovedsageligt blev udsendt i det nært infrarøde (> 1 µm) efter nogle dage. Credit ESO og note 5.

“
Mange af forskerne i rum RF 116 skulle vise sig at være konkurrenter, men atmosfæren var en utrolig blanding af opstemthed over detektion af neutronstjerner, en forventnings glæde om hvad der nu skulle ske, og et skarpt fokus på at få det opfølgende arbejde gjort optimalt.
 ”

atomnummer 26 kan dannes ved sammensmeltning af lettere atomkerner (fusion) i stjernernes indre. Mange grundstoffer kan også dannes i supernovaer, hvor tunge stjerner eksploderer. Men de tungeste af de grundstoffer vi kender fra naturen, som for eksempel de ædelmetaller vi kan finde på Jorden i dag, er ganske svære at danne.

Sammenstød mellem neutronstjerner udspyr neutronrigt materiale ud i rummet. Det er præcist hvad der er brug for til at lave tunge grundstoffer, som har mange flere neutroner end protoner (for eksempel har guld 79 protoner og 118 neutroner). Nogle af disse grundstoffer, specielt de sjældne jordarter kaldet lanthaniderne, blokerer det synlige lys og tillader kun infrarødt lys at passere, præcist som vi observerede. I princippet kunne den nærinfrarøde stråling også komme fra varmt støv, men det blev afvist af lektor Christa Gall fra DARK, som fandt at der ikke kan dannes nok støv i kilonovaen til at give den dens karakteristiske røde farve.⁸

Hafnium er et af de grundstoffer der kunne have bidraget til den røde farve som kilonovaen hurtigt fik. Hafnium med atomnummer 72 har fået sit navn fra Hafnia, latin for København. Grundstoffet blev opdaget i december 1922 af den hollandske fysiker Dirk Coster og den ungarske kemiker George de Hevesy mens de på opfordring fra Niels Bohr undersøgte særlige mineraler på Institut for Teoretisk Fysik på Københavns Universitet – det der senere blev til Niels Bohr Institutet.

Det er ikke kun ædelmetaller og de mere eksotiske grundstoffer vi kan takke neutronstjerner for, men også grundstoffer som er en del af os selv. For første gang i menneskets historie har vi været vidne til dannelsen af tunge grundstoffer som guld og platin.

'Multimessenger' astronomi

Det var et kæmpe arbejde at få alle brikkerne til at passe sammen, og de 2 måneder der gik fra detektion den 17. august til den offentlige præsentation af resultaterne den 16. oktober, var nok nogle af de travleste i vore karrierer. Fra DARK alene skrev vi 20 videnskabelige artikler i tidsrummet fra den 17. august til starten af oktober. Men da vi var færdige, kendte vi svaret på tre centrale spørgsmål i moder-

ne astrofysik. Vi vidste nu at vi kan detektere neutronstjerner både vha. gravitationsbølger og synligt lys, og at disse sammenstød danner korte gammaligt. Vi ved også at de er ansvarlige for dannelsen af de tungeste grundstoffer i universet.

LIGO og Virgo er nu ved at blive opgraderet så de kan se dobbelt så langt og dermed detektere ca. 10 gange så mange begivenheder. Vi regner med de bliver tændt igen mod slutningen af året, og så vil vi være klar igen. Klar til flere neutronstjerne-sammenstød, sammenstød mellem neutronstjerner og sorte huller, eller endda en supernova i Mælkevejen eller i Andromeda-galaksen. Og måske vil vi se noget vi ikke engang har forventet! En ting er klart: At have fundet en sammenhæng mellem gravitationsbølger og lys er helt nyt inden for astronomien, og det kan give os helt ny indsigt i vores univers. Man kan for eksempel bruge gravitationsbølger til direkte afstandsbestemmelse.⁹ Det er derfor vi har arbejdet så længe og hårdt for at nå hertil – og grunden til vi ser med spænding på fremtiden!

Som Jonatan Selsing formulerede det i efteråret 2017: "Vi har fået en ny sans, så vi nu også kan opfatte tyngdeverdenen. Nu kan vi både se og høre universet, så at sige. Forestil dig, at du er ude og gå en tur i skoven. Du hører noget pusle i skovbunden, og så ved du omtrent, hvor du skal kigge efter et dyr. Med lidt held får du øje på det. Sådan er det nu blevet i astronomien, fordi vi med gravitationsbølgedetektorerne kan 'lytte' til universet og finde ud af, hvor vi skal kigge nærmere efter."

Vi taler nu om 'multimessenger'-astronomi, hvor vi kan undersøge samme kosmiske fænomen på to forskellige måder, nemlig både via den elektromagnetiske stråling og de gravitationsbølger det udsender. Ikke alene vil vi blive klogere på hvad der sker i de voldsomme sammenstød. Vi vil også finde ud af hvor ofte de finder sted, hvilket vil gøre det lettere at skrive universets historie. Kollisioner mellem uhyre kompakte objekter er desuden et laboratorium hvor både relativitetsteori og kvantemekanik i høj grad er i spil, og netop foreningen af disse to fundamentale teorier er den hellige gral for fysikken. Denne opdagelse åbner et helt nyt forskningsfelt som forener fundamental fysik, astronomi og kosmologi.



Denne opdagelse åbner et helt nyt forskningsfelt som forener fundamental fysik, astronomi og kosmologi.



Neutronstjerner er de uhyre kompakte rester efter store stjerner der er brændt ud. Cirka 140 millioner lysår herfra i galaksen NGC 4993 kredse to neutronstjerner så vanvittigt hurtigt om hinanden at det blev til flere hundrede omgange i sekundet. Til sidst kom de så tæt på hinanden at de kolliderede i en gigantisk eksplosion.

I kollisionen smeltede de to neutronstjerner, der havde en samlet masse på 2,8 gange massen af Solen, sammen til en meget stor neutronstjerne eller et sort hul. En lille del af massen, svarende til mellem tre og fem procent af Solens masse, undslap denne skæbne og blev i stedet slynget ud i rummet.

Her skabte det udkastede materiale en gigantisk, radioaktiv ildkugle der udvidede sig med hastigheder på en femtedel af lysets – i omegnen af 60.000 kilometer i sekundet, svarende til halvanden gang rundt om Jorden på et enkelt sekund. I denne ildkugle, der hurtigt kunne ses som en kilonova, blev store mængder tunge grundstoffer skabt i en mange tusinde grader varm suppe af neutroner.

I de sidste 100 sekunder før sammenstødet udsendte de to neutronstjerner gravitationsbølger der kunne opfanges af ekstremt følsomme detektorer. Gravitationsbølger er små krusninger i selve rumtiden, og de kraftigste gravitationsbølger kommer når universets tungeste og mest kompakte objekter – sorte huller og neutronstjerner – kredser tæt om hinanden.

Det er første gang der er opfanget gravitationsbølger fra kolliderende neutronstjerner. Tidligere detektioner har været fra sorte huller der smeltede sammen. Endnu vigtigere er det at det for første gang er lykkedes at detektere både gravitationsbølger og elektromagnetisk stråling som lys fra samme begivenhed.

Noter

1 Denne artikel er delvist baseret på pressemateriale tilgængeligt her: http://www.nbi.ku.dk/Nyheder/nyheder_17/aarets-forskningsgennembrud-2017/ 2 Abbott, B.P., et al., 2017, ApJ, 848, L12: Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. 3 Hjorth, J., et al., 2017, ApJ, 848, L31: The Distance to NGC 4993: The Host Galaxy of the Gravitational-wave Event GW170817. 4 Pian, E., et al., 2017, Nature, 551, 67: Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. 5 Tanvir, N.R., et al., 2017, ApJ, 848, L27: The Emergence of a Lanthanide-rich Kilonova Following the Merger of Two Neutron Stars. 6 Barnes, J. & Kasen, D., 2013, ApJ, 775, 18: Effect of a High Opacity on the Light Curves of Radioactively Powered Transients from Compact Object Mergers. 7 Tanvir, N.R., et al., 2013, Nature, 500, 547: A 'kilonova' associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B. 8 Gall, C., et al., 2017, ApJ, 849, L19: Lanthanides or Dust in Kilonovae: Lessons Learned from GW170817. 9 Abbott, B.P., et al., 2017, Nature, 551, 85: A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant.



Det er ikke kun ædelmetaller og de mere eksotiske grundstoffer vi kan takke neutronstjerner for, men også grundstoffer som er en del af os selv. For første gang i menneskets historie har vi været vidne til dannelsen af tunge grundstoffer som guld og platin.

