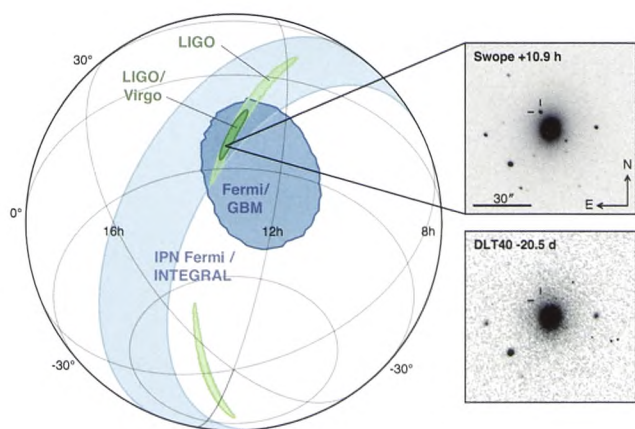


Kilonovaen og oprindelsen af guld

Af Jonatan Selsing, *The Cosmic Dawn Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet*

I denne artikel vil jeg introducere et fænomen, som først for ganske nyligt er trådt frem på den astronomiske scene, nemlig kilonovaer. Kilonovaer har vist sig at være nogle af de mest eksotiske, sjældne og samtidig betydningsfulde begivenheder, der sker i universet. En kilonova er et resultat af sammenstødet mellem to neutronstjerner eller en neutronstjerne og et sort hul. I sammenstødet bliver neutronstjernemateriale slynget ud i universet, og af dette materiale dannes nogle af de tungeste grundstoffer, vi kender, f.eks. ædelmetaller som guld, sølv og platin.

Den 17. august 2017 skete der noget specielt i de tre tyngdebølgedetektorer, der bliver drevet af det, der kaldes LIGO/Virgo-samarbejdet. For første gang registrerede detektorerne det karakteristiske "tyngdebølge-skvulp" fra et binært system, hvis totale vægt var mindre end ca. 2,8 solmasser, hvilket svarer til massen af to neutronstjerner [1]. Uafhængigt heraf, og forsinket med 1,7 s, detekterede GBM-instrumentet (Gamma-ray Burst Monitor) ombord på rumteleskopet *Fermi* et kort signal af gammastråler, der svarer til den type signal, vi kender fra såkaldte korte gammaglimt. Derfra vidste vi med det samme, at tyngdebølgesignalet blev udsendt næsten samtidigt med en eller anden form for elektromagnetisk stråling. Det betød, at vi havde mulighed for for første gang i verdenshistorien at se det optiske modstykke til et tyngdebølgesignal. Dette optiske modstykke var på forhånd blevet anslået til at være lysstærkt nok til, at vi ville kunne se det selv på betragtelig afstand, og samtidig havde teoretikere forudset, at det potentielt kunne være kilde til nogle af de tungeste grundstoffer i universet [3]. På grund af formodningen om, at modstykket ville være betydningsfuldt, var det vigtigt at sikre en hurtig opfølgning med teleskoper, inden det optiske lys blev for svagt til at måle.



Figur 1. Lokaliseringen af kilonovaen baseret på ankomst-tidspunktet af tyngdebølgesignalet til de forskellige detektorer, samt GBM-lokaliseringen. Figuren er taget fra [2].

Ved at triangulere på baggrund af ankomst-tidspunktet af signalet i tre tyngdebølgedetektorer placeret i hver sin ende af USA og i Italien kunne LIGO/Virgo finde frem til, at dette sammenstød skete over den sydlige halvkugle inden for et område med en størrelse på

28 kvadratgrader (til sammenligning fylder Månen ca. en kvart kvadratgrad på himlen). Dette lyder måske ikke af meget, men et typisk areal, som et teleskop kan dække af gangen, er få procent af en kvadratgrad, så det kræver mange billeder at dække hele området. 10,9 timer efter den næsten samtidige observation af tyngdebølger og gamma-stråler blev det optiske modstykke fundet. Detektionsbillederne er vist i figur 1, hvor det øverste højre billede er det første billede, der blev taget af kilonovaen. Så snart det optiske modstykke blev fundet, var usikkerheden på positionen så lille, at en verdensomspændende opfølgningskampagne kunne iværksættes, hvor teleskoper, der dækker hele det elektromagnetiske spektrum, kunne pege mod dette nyopdagede astronomiske fænomen.

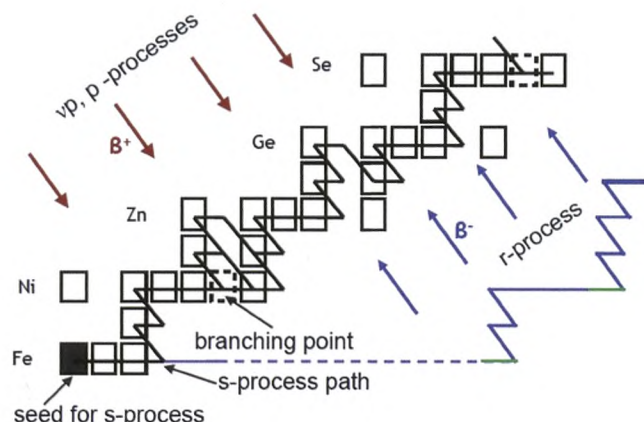
Baggrund

For at forstå, hvorfor der var så stor interesse for at detektere fænomenet, samt hvorfra navnet kilonova stammer, kræves lidt baggrundsviden.

Den kemiske sammensætning af universet er på ethvert tidspunkt et produkt af startbetingelserne og de processer, der undervejs virker for at drive den kemiske berigelse. Big Bang efterlod et univers primært bestående af hydrogen og helium (plus naturligvis mørkt stof, som ikke består af de sædvanlige grundstoffer). Tyngdekraften fik uergassen og det mørke stof til at klumpe sig sammen for til sidst danne stjerner og galakser. Under tilpas høj tæthed og temperatur (der bliver opnået inde i stjernernes centrum) undergår hydrogen og helium kernefusioner. Fire hydrogenkerner støder sammen og danner helium, tre heliumkerner støder sammen og danner karbon, en karbonkerne og en heliumkerne støder sammen og danner ilt, o.s.v. På denne måde bliver grundstofferne tungere og tungere. Denne proces kan lade sig gøre, fordi bindingsenergien af tungere grundstoffer (op til jern) er højere end for lettere grundstoffer. Der kan derfor vindes energi ved at omdanne lette grundstoffer til tunge. Denne fusionsproces er energikilden til alle "tændte" stjerner i universet.

De højeste bindingsenergier per nukleon findes i grundstofferne jern ($^{56}_{26}\text{Fe}$) og nikkel ($^{58}_{28}\text{Ni}$) med atomnummer hhv. 26 og 28 og massetal på hhv. 56 og 58. Atomnummeret betyder, at de hver indeholder hhv. 26 og 28 protoner, og massetallene betyder, at de hver indeholder hhv. 56 og 58 protoner og neutroner. Fordi jern og nikkel har de højeste bindingsenergier, er det også

de tungeste grundstoffer, der naturligt laves ved fusion. Tungere grundstoffer end jern og nikkel er allesammen lavet på basis af neutronindfangning. Neutronindfangning betyder, at en atomkerne optager en fri neutron. Dette kan ske, fordi neutronen er ladningsløs, og der ikke er nogen elektrostatiske frastødning mellem atomkernen og den frie neutron. Ved en neutronindfangning stiger massetallet for et grundstof med 1, fordi der er kommet en ekstra neutron i kernen. Hvis en jernkerne og en fri neutron støder sammen, føree det til processen: $^{56}_{26}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}_{26}\text{Fe} + \gamma$, hvor n er neutronen, og γ er en foton. $^{57}_{26}\text{Fe}$ er en stabil isotop af jern, men hvis indfangningen af neutroner fortsættes, vil det til sidst kunne føre til processen: $^{58}_{26}\text{Fe} + n \rightarrow ^{59}_{26}\text{Fe} + \gamma$. $^{59}_{26}\text{Fe}$ er ikke en stabil isotop og vil betahenfalde til kobolt, en elektron og en anti-elektronneutrino ($^{59}_{26}\text{Fe} \rightarrow ^{59}_{27}\text{Co} + e^- + \bar{\nu}_e$), hvorved atomnummeret stiger med 1. Betahenfald er den proces, hvor en neutron henfalder til en proton og en neutrino.

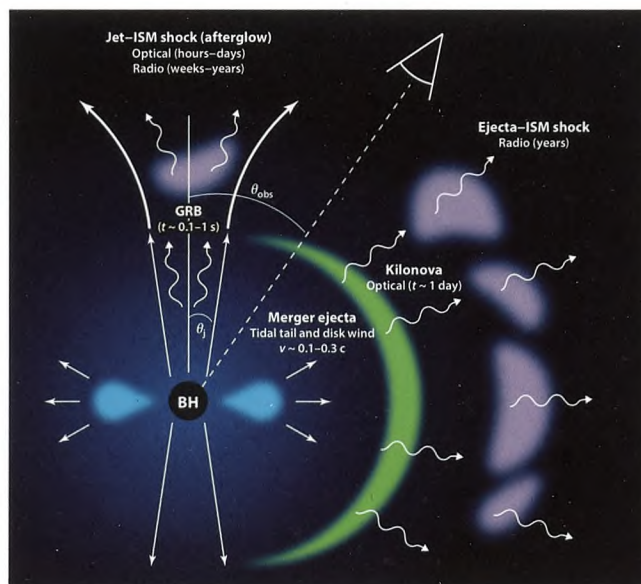


Figur 2. Illustration af s - og r processen. S -processen er den sorte streg, der følger de mest stabile isotoper. Steder, hvor der er huller i "isotopstigen", gør, at s -processen skal bruge lang tid på at kravle opad i atomtal. R -processen, derimod, kan meget hurtigt berige kimgrundstoffer til de tungeste grundstoffer i vores periodiske system.

r -processen

Neutronindfangningsprocessen opdeles i to klasser, som bliver separeret på baggrund af neutronindfangningsraten – altså hastigheden, hvormed neutroner bliver fanget – i forhold til betahenfaldsraten. s -processen, hvor s står for slow, betyder, at neutronindfangningsraten er langsommere end betahenfaldet. I s -processen vil enhver neutronindfangning til en ustabil isotop være efterfulgt af et betahenfald til et grundstof med én proton mere og derfor højere i det periodiske system. s -processen kan i princippet give alle de tungere grundstoffer op til polonium ($^{210}_{84}\text{Po}$), men er for langsom til at kunne berige vores univers i tilstrækkelig grad. r -processen (r står for rapid), derimod, er den hurtigste proces, hvor neutroner bliver indfanget hurtigere, end det nye element kan nå at betahenfalde. Denne proces kan virke på meget korte tidsskalaer og har i princippet ikke nogen øvre grænse for, hvor tunge grundstoffer den kan lave. Problemet med r -processen er, at den kræver en enorm tæthed af frie neutroner – en tæthed, der i praksis er meget svær at opnå. Der er dog ét

sted i universet, hvor neutrontætheden er enorm, nemlig neutronstjerner. Neutronstjerner er restproduktet af en stor del af de supernovaer, der har hydrogen i deres spektre (type II), og er kompakte objekter, der ikke er større end ca. 10 km i diameter. Neutronstjerner vejer som regel omkring 1,4 gange så meget som vores Sol og består sandsynligvis i høj grad af neutroner. De har en tynd ydre skal af jern. Grunden til deres store andel af neutroner er, at tyngdekraften er så høj, at de elektroner og protoner, der måtte være, er blevet presset sammen til neutroner. Hvis man på én eller anden måde kan få en neutronstjerne revet fra hinanden, ville det kunne give den tilstrækkelige tæthed af frie neutroner til at drive r -processen.



Figur 3. Skematisk oversigt over, hvordan vi forestiller os, kilonovaen bliver dannet. Centralt er det nydannede sorte hul (BH), hvor de to blå "dråber" repræsenterer de to neutronstjerner, der er ved at smelte sammen. (ISM = Interstellare Medium og GRB = Gammaglimt (Gamma Ray Burst)). Figuren er fra [4].

Neutronstjernesammenstød

I 1974 blev det første binære neutronstjernesystem fundet, kaldet Hulse-Taylor-systemet. Her fandt man det første bevis for tilstedeværelsen af tyngdestråling fra henfaldet af omløbsbanen af dette system. Henfaldet af omløbsbanen af de to neutronstjerner betyder, at de langsomt bevæger sig nærmere og nærmere hinanden under udsendelse af tyngdebølger i overensstemmelse med Einsteins generelle relativitetsteori. De to neutronstjerner i Hulse-Taylor-systemet vil støde sammen om ca. 300 millioner år.

Sammenstødet mellem to neutronstjerner har, fordi det er det optimale sted for r -processen, været fokus for en del teoretiske undersøgelser. De modeller, der er udviklet for sammenstødet, viser enstemmigt, at en væsentlig del af den totale masse vil blive slynget ud i rummet i det plan, som neutronstjerneerne roterer om hinanden. Grunden til dette er, at som omløbsbanen henfalder, vil rotationshastigheden af systemet stige. På et tidspunkt, ca. samtidigt med at de to neutronstjerner støder sammen, vil rotationshastigheden af de yderste

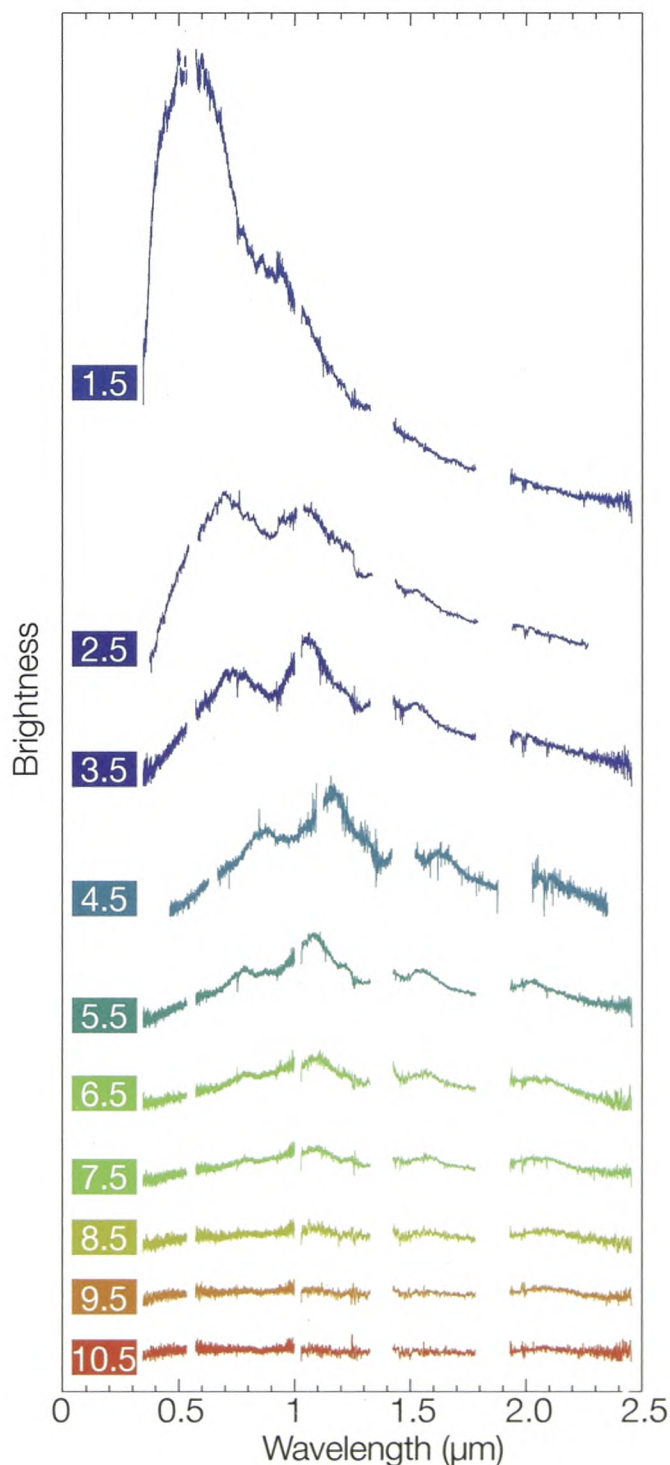
dele af neutronstjernerne være hurtigere end undvigelshastigheden for et binært neutronstjernesystem, hvorfor de vil blive slynget ud. Den store mængde, nu frie, neutroner vil med det samme blive absorberet af jern-laget og drive r -processen hele vejen til de tungeste grundstoffer. De nydannede, meget tunge grundstoffer vil så beta-henfalde og radioaktivt spalte sig under udsendelse af en meget stor mængde lys. De teoretiske modeller forudsiger, at den totale mængde lys, der bliver udsendt, vil være ca. 1000 gange så stor som den mængde lys, der bliver udsendt ved en normal nova. Deraf navnet kilonova – tusind gange så lysstærk som en nova. Det friske r -processyntetiserede materiale vil indeholde alle de tungeste grundstoffer i det periodiske system – inklusive guld, sølv og platin, samt radioaktive isotoper som uran og thorium.

Neutronstjernesammenstød har yderlige to fysiske signaturer, som var yderst eftersøgte. Hidtil havde man ikke nogle troværdige målinger af, hvilke systemer, der giver anledning til korte gammaglimt. Med den samtidige detektion, at et kort gammaglimt og tyngdebølger fra et neutronstjernesammenstød, var der endegyldigt bevis for, at i hvert fald nogle korte gammaglimt bliver lavet af neutronstjernesammenstød. Den anden signatur er den, at “lydstyrken” af tyngdebølger er bestemt af perioden af bølgen. Fra rødforskydningen af værtsgalaksen og denne periode kan vi ret præcist måle en absolut afstand – en måling, der er meget svær at lave, og som har stor betydning for vores estimater af universets alder og udvidelseshistorie.

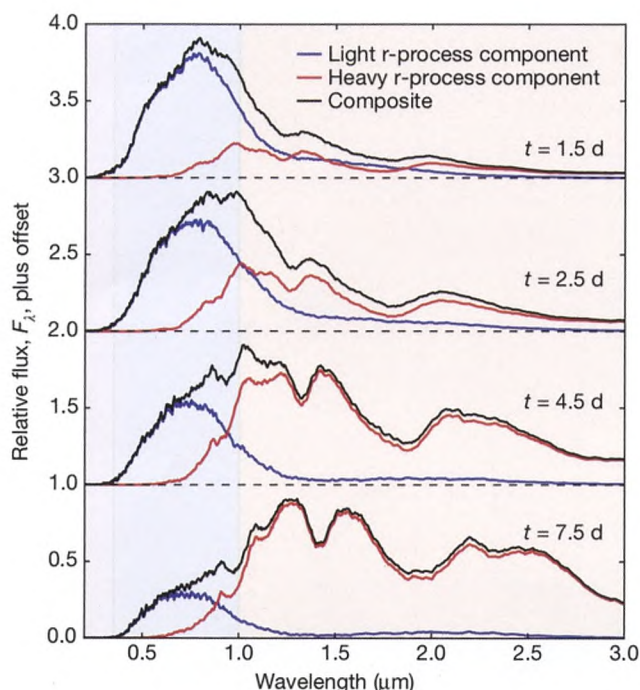
Observationer

Fordi neutronstjerne-sammenstødet var forudset med stor forventning, var det højt prioriteret på observationsprogrammer på teleskoper verden over. Derfor findes der et væld af observationer på tværs af hele det elektromagnetiske spektrum fra røntgenstråling til radiobølger af kilonovaen. Observationerne bekræfter dele af de teoretiske forestillinger om, hvordan sådan et fænomen måtte se ud, hvor især det optiske lys afslører, at de tungeste grundstoffer må være tilstede. Den mest detaljerede information fås fra et sæt spektroskopiske observationer i Chile taget med VLT-instrumentet X-shooter, der iøvrigt er delvist bygget i Danmark med støtte fra Carlsbergfondet. De er vist i figur 3. Spektrene viser, at kilonovaen udsendte en stor del af lyset i den ultraviolette del af spektret til at starte med, men som dagene gik, blev en større del af lyset udsendt ved længere bølgelængder. Dette er lige netop det tegn, vi ville forvente at se, hvis materialet, der udsender lyset, hovedsageligt består af r -procesgrundstofferne. Det er svært at identificere signaturer fra individuelle grundstoffer i spektrene, modsat hvad der er muligt i spektre af supernovaer. Grunden til dette er, at vi ikke har tilstrækkelig viden om overgangene i de grundstoffer, som udsender lyset, samt at udbredelseshastigheden af det lysende materiale nærmer sig 30 procent af lysets hastighed. Den enorme hastighed gør, at alle individuelle signaturer bliver spredt ud i bølgelængder på grund af hhv. rød- og blåforskydninger af lyset. Den store udbredelseshastighed af det lysende

materiale stemmer godt overens med modellerne, hvor de to neutronstjerner drejer rundt om hinanden med en hastighed, der er tæt ved lysets, kort før de brager sammen.



Figur 3. Spektre af kilonovaen AT2017gfo. Hvis man sammenligner spektrene med de teoretiske spektre i figur 4, kan man se, at den kvalitative overensstemmelse er stor. Alle spektrene har brede signaturer og en udvikling, hvor lyset med de korte bølgelængder forsvinder relativt til de længere. Vi kan også se, at der stadig er betydelige forskelle mellem de teoretiske og de observerede spektre. Spektrene her er præsenteret i [6] og [7].



Figur 4. Syntetiske spektre af en kilonova. De forskellige paneler viser tidsudviklingen, hvor man kan se, at en større del af lyset blev udsendt ved længere bølgelængder i de senere tider. Dette er, fordi de tungeste grundstoffer fortrinsvis absorberer det blå lys. Denne figur er fra [5].

Teoretiske modeller

Inden den første kilonova blev fundet, var der allerede udviklet detaljerede modeller for, hvordan de kunne se ud. Baseret på vores viden om atomfysik og simuleringer af sammenstødet mellem de to neutronstjerner var det muligt at forsøge at forudsige, hvordan lyset fra en kilonova ville se ud. Det er det, der er vist i figur 4. Her har man taget en mængde neutronstjernemateriale og ladet det henfalde ifølge lovene for kernefald.

Disse simuleringer tillader, at vi for ethvert tidspunkt kan finde grundstofsammensætningen og på baggrund af denne forsøge at forudsige, hvordan lyset fra en sådan sammensætning vil se ud. Ens for en kombination af de tunge grundstoffer er, at de absorberer forholdsvis mere af lyset med kortere bølgelængder. Det lys, der ikke kan slippe ud ved de kortere bølgelængder, slipper så ud ved længere bølgelængder, og kilonovaen vil derfor fremstå mere rød. Den store mængde blandede, radioaktive stoffer fra alle de tungeste grundstoffer i det periodiske system gør desuden, at lysstyrken skal falde på en meget karakteristisk måde – noget, vi ser reproduceret i målingerne fra kilonovaen.

Som man kan se ved at sammenligne de teoretiske spektre i figur 4 med de observerede spektre i figur 3, er der både ligheder og forskelle. Den overordnede struktur ser nogenlunde ens ud med spektre domineret af brede signaturer, der udviser en udvikling fra lys domineret af kortere bølgelængder til længere bølgelængder. Positionerne af de enkelte signaturer og deres relative størrelse er imidlertid ikke forudsagt korrekt. Dette skyldes primært, at de tungeste grundstoffer stadig er relativt uudforsket land, hvor antallet af overgange og

deres styrker stadig er ukendte. Dette skyldes primært, at udforskningen af dette er en meget dyr og besværlig affære.

Konklusioner

Denne detektion af tyngdebølger sammen med en kilonova er så betydningsfuld, fordi der med ét er blevet ført bevis for adskillige store, ubesvarede spørgsmål. Denne opdagelse har bidraget afgørende til forståelsen af, hvad oprindelsen til disse korte gammaglimt er (i hvertfald én kanal). Den viser også, hvor i hvert fald nogle af de tungeste grundstoffer bliver dannet. Dette betyder, at det guld, du måske har i dine tandfyldninger, på dine fingerringe, om din hals eller i din computer sandsynligvis er blevet syntetiseret på et eller andet tidspunkt, før Jorden blev skabt, i et sammenstød mellem to neutronstjerner.

Litteratur

- [1] Abbott, B. P. m.fl. (2017) GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, *Physical Review Letters*, 119, 161101.
- [2] Abbott, B. P. m.fl. (2017) Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *The Astrophysical Journal Letters*, 848:L12.
- [3] Lattimer, J. M. & Schramm, D. N. (1974) Black-hole-neutron-star collisions. *The Astrophysical Journal Letters*, 192:L145.
- [4] Berger, E. (2014) Short-Duration Gamma-Ray Bursts, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 52:43–105.
- [5] Kasen, D. m.fl. (2017) Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event, *Nature*, bind 551, nr. 7678, side 80–84.
- [6] Pian, E. m.fl. (2017) Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger, *Nature*, bind 551, nr. 7678, side 67–70.
- [7] Smartt, S. J. m.fl. (2017) A kilonova as the electromagnetic counterpart to a gravitational-wave source, *Nature*, bind 551, nr. 7678, side 75–79.



Jonatan Selsing er postdoktoralforsker på The Cosmic Dawn Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, og forsker i optiske modstykker til tyngdebølger.