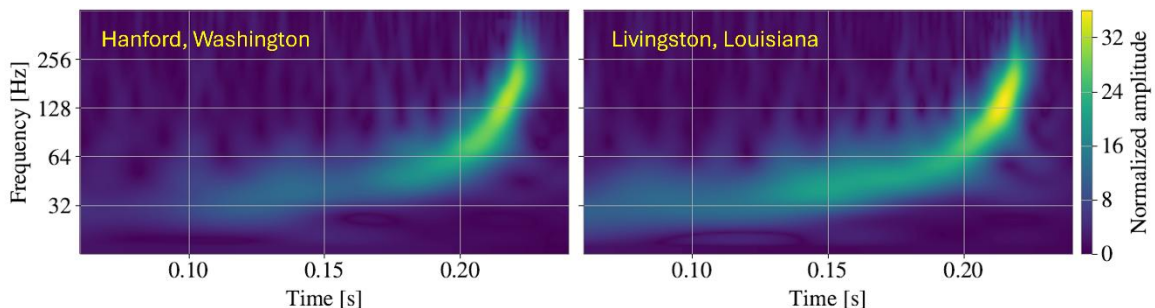


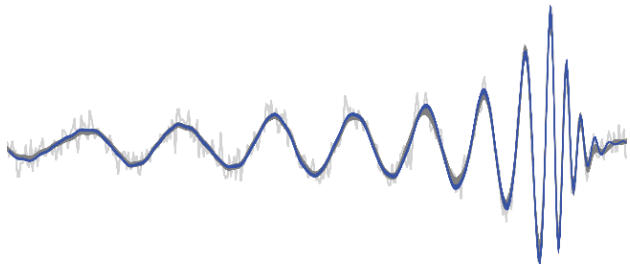
# GW250114: KOSMISK KLOKKESPIL AF KAOS

På tiårsjubilæet for den første observation af tyngdebølger har [LIGO, Virgo and KAGRA \(LVK\) samarbejdet](#) rapporteret et nyt signal fra to kolliderende sorte huller, GW250114. De sorte huller havde slående ligheder, i deres masser og afstande, med dem der blev observeret i LIGOs første observation i 2015: [GW150914](#). Forbedringer af LIGO samt udvidelse af netværket af tyngdebølge detektorer og opdaterede metoder til analysen af deres data har gjort det muligt at "høre" GW250114 tre gange så tydeligt som den pionerende første observation. Med denne observation, der er uden fortilfælde, har forskere bekræftet at sorte huller udelukkende vokser i størrelse og når de bliver forstyrret ringer de som en klokke med den "lyd" som Einstein forudså med sine beregninger.



**Figur 1:** (Tilpasset fra figur 1 i vores [udgivelse](#).) Tyngdebølge eventet GW250114 observeret af LIGO Hanford (venstre panel) og LIGO Livingston (højre panel). De to grafer viser hvordan tyngdebølgens "strain", produceret af eventet i hver LIGO-detektor, varierede som funktion af tid (i sekunder) og frekvens (i hertz eller bølge cyklusser pr. sekund). Begge grafer viser, at frekvensen af GW250114 stiger brat i et "chirp"-lignende mønster, fra omkring 30 Hz til omkring 250 Hz over omtrent to tiendedele af et sekund.

For over 50 år siden fremsatte Stephen Hawking og Jacob Bekenstein hypotesen om, at [arealet af et sort huls begivenhedshorizont](#) indkoder dets [entropi](#). Entropi er et mål for uorden, eller kaos<sup>1</sup>, i et system, som kun kan stige over tid, hvilket man har vidst siden dampmaskinernes tid. Dermed kan arealet af sorte huller kun vokse. Dette fascinerede fysikere, fordi ifølge Einsteins teori om tyngdekraft, [generel relativitetsteori](#), burde sorte huller være yderst simple objekter, der kun beskrives af to tal<sup>2</sup>: Deres masse og spin. Alligevel antyder Hawkings og Bekensteins resultater, at sorte huller på én og samme tid er simple og samtidig koder for enorme mængder kaos. Denne dualitet indikerer en dyb forbindelse mellem [rumtid](#) og [kvantemekanik](#).



**Figur 2:** Skitse, der illustrerer den meget gode overensstemmelse mellem data (vist i lysegrå), observeret af LIGO Livingston-detektoren i øjeblikket for GW250114-registreringen, og vores bedste model for de tyngdebølger, der blev produceret ved sammenstødet mellem de to sorte huller (vist i mørkeblå). Også medtaget er det mørkegrå bånd, som viser en genskabelse af bølgeformen som ikke antager, at signalet blev produceret af to sorte huller. Det faktum, at det mørkegrå bånd er i overensstemmelse med det mørkeblå bånd, indikerer, at vores model beskriver signalet præcist.

## LÆR MERE:

Besøg vores [www.ligo.org](http://www.ligo.org)

hjemmesider:

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

1. Strengt taget henviser kaos i matematik til et andet begreb, der adskiller sig fra begrebet uorden, men termerne bruges ofte i flæng i uformelle beskrivelser – se f.eks. [her](#).

2. Teknisk set kan sorte huller også have en nettoladning, men sorte huller dannet af stjerner forventes at have en forsvindende lille nettoladning.



GW250114 tester begge disse unikke sorte hul egenskaber: at de er simple objekter, og at deres entropi altid øges. Derudover, muliggør klarheden og styrken af signalet fra GW250114 den hidtil mest præcise karakterisering af et sorte huls "runge".

Når et roterende sorte hul forstyrres (som det vil ske, når det født ved kollisionen mellem to forældre-sorter huller), vibrerer det som en klokke eller en tromme og udsender en karakteristisk gravitations-"lyd", der hurtigt ringer af. Dets runge forventes at opføre sig som den matematiske idealisering, som først blev forudsagt af Roy Kerr: som er et [roterende sorte hul](#) — i daglig tale et Kerr sorte hul. For at teste denne hypotese har LVK-forskere brugt GW250114 signalet til omhyggeligt at isolere "lyden" fra det resulterende sorte hul, der blev dannet ved kollisionen (dvs. dets tyngdebølgesignal), og kunne fastslå, at det stemte overens med "lyden" fra et Kerr-sorter hul.

For at forstå et sorte huls runge kan man forestille sig musikinstrumenter. Hvert instrument har en unik klang, bestemt af dets form og materiale — en klokke lyder anderledes end en tromme eller en guitar. Men lyden afhænger også af, hvordan instrumentet forstyrres: at slå på en tromme med en trommestik giver en anden lyd end at slå den med en børste. Kerr sorte huller kan kun udsende lyde med helt specifikke frekvenser og længder, entydigt bestemt af deres masse og rotationshastighed. En forstyrrelse får nogle, men som regel ikke alle, af disse lyde til at blive udsendt. Hvis mere end én af dem måles kan de sammenlignes: Svarer de til det samme Kerr sorte hul? LVK-forskere kunne for første gang med høj sikkerhed fastslå, at mindst to af de forudsagte "sorte huls frekvenser" blev udsendt af det endelige sorte hul, og at deres frekvenser og henfaldstider stemte overens med forventningerne for et Kerr sorte hul. Det resterende sorte hul fra GW250114 viser sig at være et simpelt sorte hul, beskrevet alene ved sin masse og sit spin.

Samtidig bekræftede LVK-forskere, at arealet af dette resterende sorte hul er større end summen af arealerne af de to oprindelige sorte huller (se Figur 3). Det endelige sorte huls runge indeholder den nødvendige information for at måle dets areal. Selvom de oprindelige sorte huller ikke "ringer", udsender de stadig deres eget gravitationssignal. Når de kredser om hinanden, mister de nemlig energi til tyngdebølger og "falder" ind mod hinanden. LVK-forskerne brugte GW250114 signalet fra før kollisionen til at måle arealerne af de oprindelige sorte huller. Disse fuldstændig uafhængige målinger bekræftede, at kollisionen GW250114 faktisk havde øget universets entropi!

Observationen af GW250114 er muliggjort gennem årtiers arbejde udført af tusinder af forskere med at forbedre detektorer, forstå hvordan sorte huller bør ringe og udtænke geniale måder at "høre" denne runge i dataene. På sin tiårs fødselsdag trives tyngdebølge-forskningen og fortsætter med at tilbyde en helt ny måde at udforske vores univers på — med formentlig mange flere overraskelser i vente.

## LÆR MERE:

Besøg vores hjemmesider:

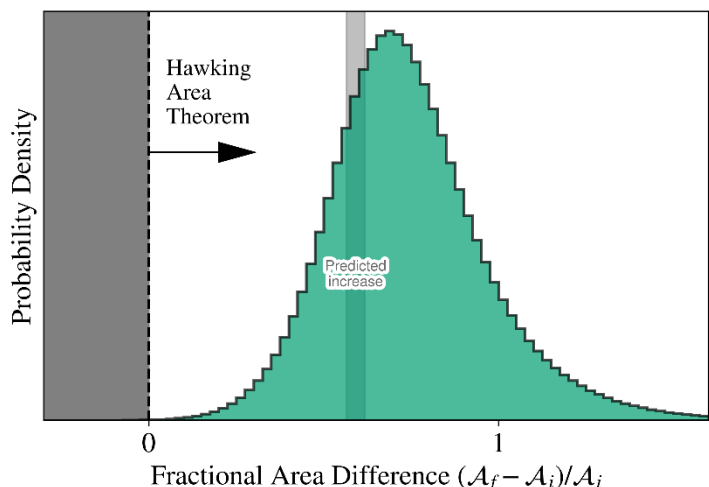
[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

Læs en gratis udgave af den fulde videnskabelige artikel [her](#) eller på journalen, Physical review letters [her](#).

Gravitational-Wave Open Science Centre data for GW250114 kan findes [her](#).



**Figure 3:** (Tilpasset fra figur 5 i vores [udgivelse](#).) Sandsynlighedsfordeling for den fraktionelle arealforskel for GW250114, lig med arealet  $\mathcal{A}_f$  af det endelige sorte hul minus summen af arealerne af de oprindelige sorte huller  $\mathcal{A}_i$  divideret med  $\mathcal{A}_i$  som normalisering. Ifølge Hawkings arealteorem bør den fraktionelle arealforskel derfor ligge til højre for det mørkegrå skraverede område — dvs. til højre for den stiplede lodrette linje, der svarer til en fraktionel arealforskel på nul, dvs.  $\mathcal{A}_f = \mathcal{A}_i$ . Vi kan se, at sandsynlighedsfordelingen taler stærkt imod værdier mindre end nul for den fraktionelle arealforskel; dette er i overensstemmelse med Hawkings arealteorem. Toppen af sandsynlighedsfordelingen er også i god overensstemmelse med det lysegrå lodrette bånd, markeret "Forudsagt stigning", som angiver den fraktionelle arealforskel forudsagt af generel relativitetsteori, svarende til en arealforøgelse på omkring 65 %.