Drie zien minder dan twee!

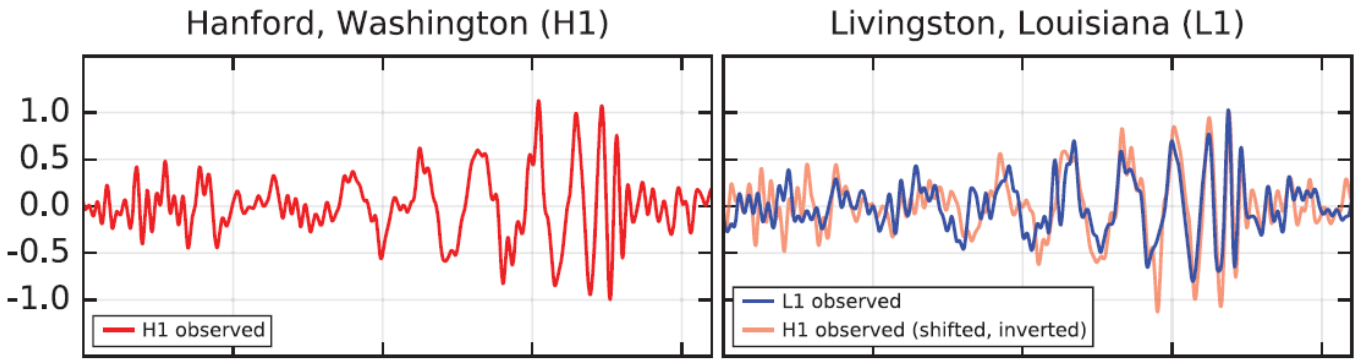
Vorige week werd de Nobelprijs voor de natuurkunde toegekend aan de ontdekkers van zwaartekrachtgolven. In diezelfde week was er nog meer nieuws over dat onderwerp: vlak voor de toekenning van de Nobelprijs werd bekendgemaakt dat er, na drie waarnemingen met twee detectoren, nu voor het eerst een waarneming van zwaartekrachtsgolven met drie detectoren was gedaan. Waarom is die toevoeging van een derde detector zo bijzonder?

Afbeelding 1. De Virgo-detector.Een luchtfoto van de Virgo-detector in Italië. Foto: Virgo Collaboration.

De eerste meting van zwaartekrachtgolven werd gedaan met de LIGO-detector. (We beschreven die ontdekking destijds uitgebreid in een artikel op deze site.) LIGO is eigenlijk niet één detector, maar twee: één in Hanford, in de Amerikaanse staat Washington, en één daar 3000 kilometer vandaad, in Livingston, Lousiana.

Plaatsbepaling

Er zijn twee belangrijke redenen waarom LIGO werkt met twee detectoren. De eerste is dat men graag zeker wil weten dat een trilling die wordt waargenomen afkomstig is van een zwaartekrachtgolf, en niet van bijvoorbeeld een langsrijdende vrachtauto of een aardbeving. Pas als beide detectoren een trilling waarnemen is duidelijk dat die trilling echt uit de ruimte komt, en niet in de buurt van de detector zelf is ontstaan.

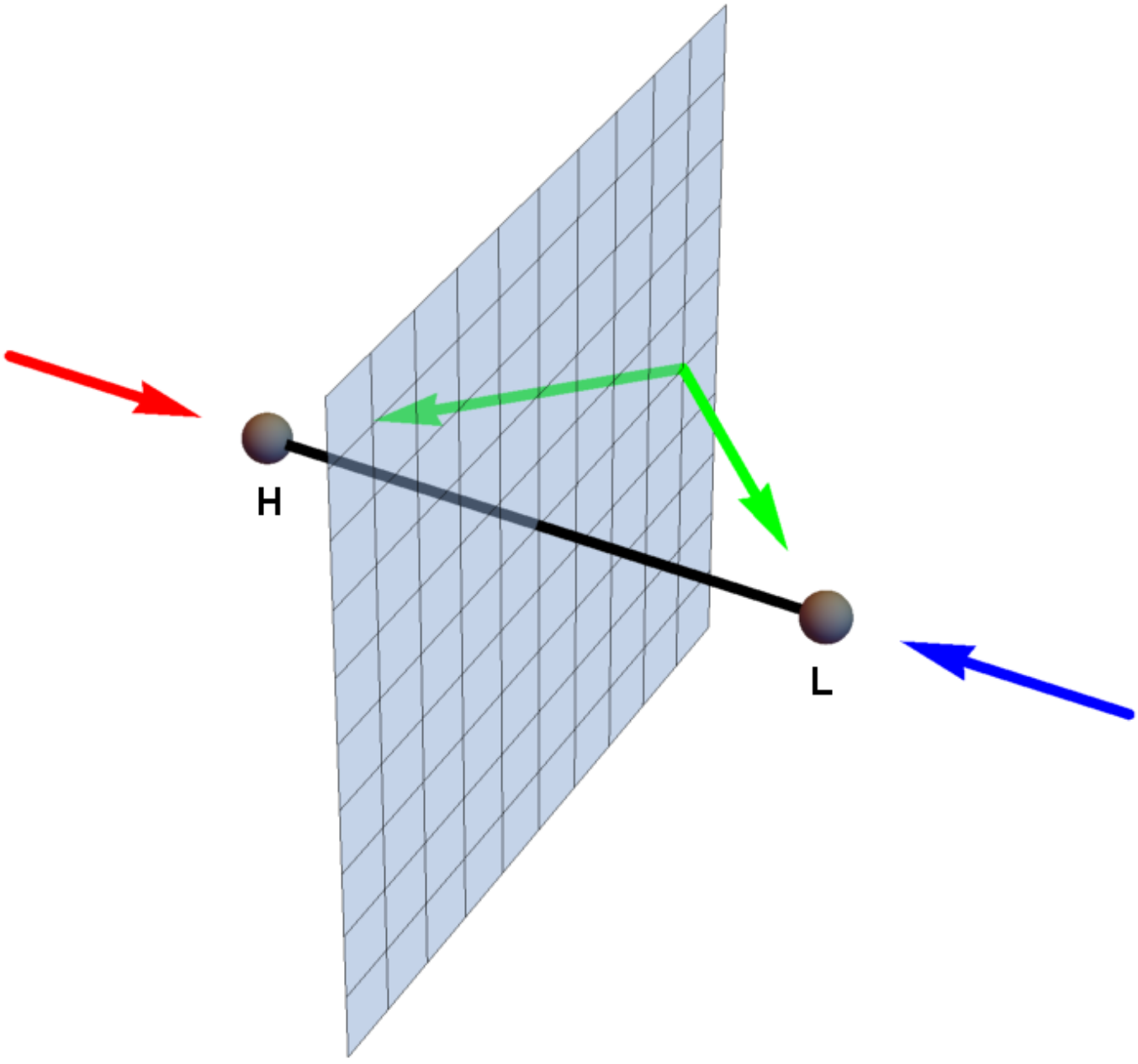


Afbeelding 2. De eerste zwaartekrachtgolfmeting.Links de meting zoals die in Hanford werd gedaan, rechts diezelfde meting over de meting uit Livingston geplakt. Het is duidelijk dat de twee metingen vrijwel dezelfde trilling beschrijven – en dat die trilling dus niet plaatselijk ontstaan kan zijn. Afbeelding: LIGO.

Een tweede reden om twee detectoren te gebruiken, is dat daarmee ook bepaald kan worden waar de zwaartekrachtgolf ongeveer vandaan komt. Doordat de twee detectoren 3000 kilometer van elkaar af liggen – een afstand die een zwaartekrachtgolf in ongeveer een honderdste van een seconde aflegt – bereikt het signaal van zo'n golf beide detectoren namelijk niet exact tegelijkertijd. Als het signaal een honderdste seconde eerder in Hanford aankomt, weten we dat het signaal vanaf een punt aan de hemel in de richting van Hanford komt. Bereikt het juist Livingston een honderdste seconde eerder, dan komt het signaal uit een punt aan de hemel in die richting.

De hierboven genoemde gevallen zijn natuurlijk extremen. Wat als het signaal bijvoorbeeld precies tegelijk in Hanford en Livingston aankomt? Dan weten we dat het signaal afkomstig is uit een punt ergens in het vlak dat loodrecht op de lijn tussen Hanford en Livingston ligt – zie afbeelding 3. Aan de hemel ziet dat vlak eruit als een enorme cirkel. Daarmee werkt de plaatsbepaling dus niet zo goed als wanneer het signaar toevallig precies uit de richting van Hanford en Livingston komt: we kunnen met twee detectoren dan alleen een *cirkel* aan de

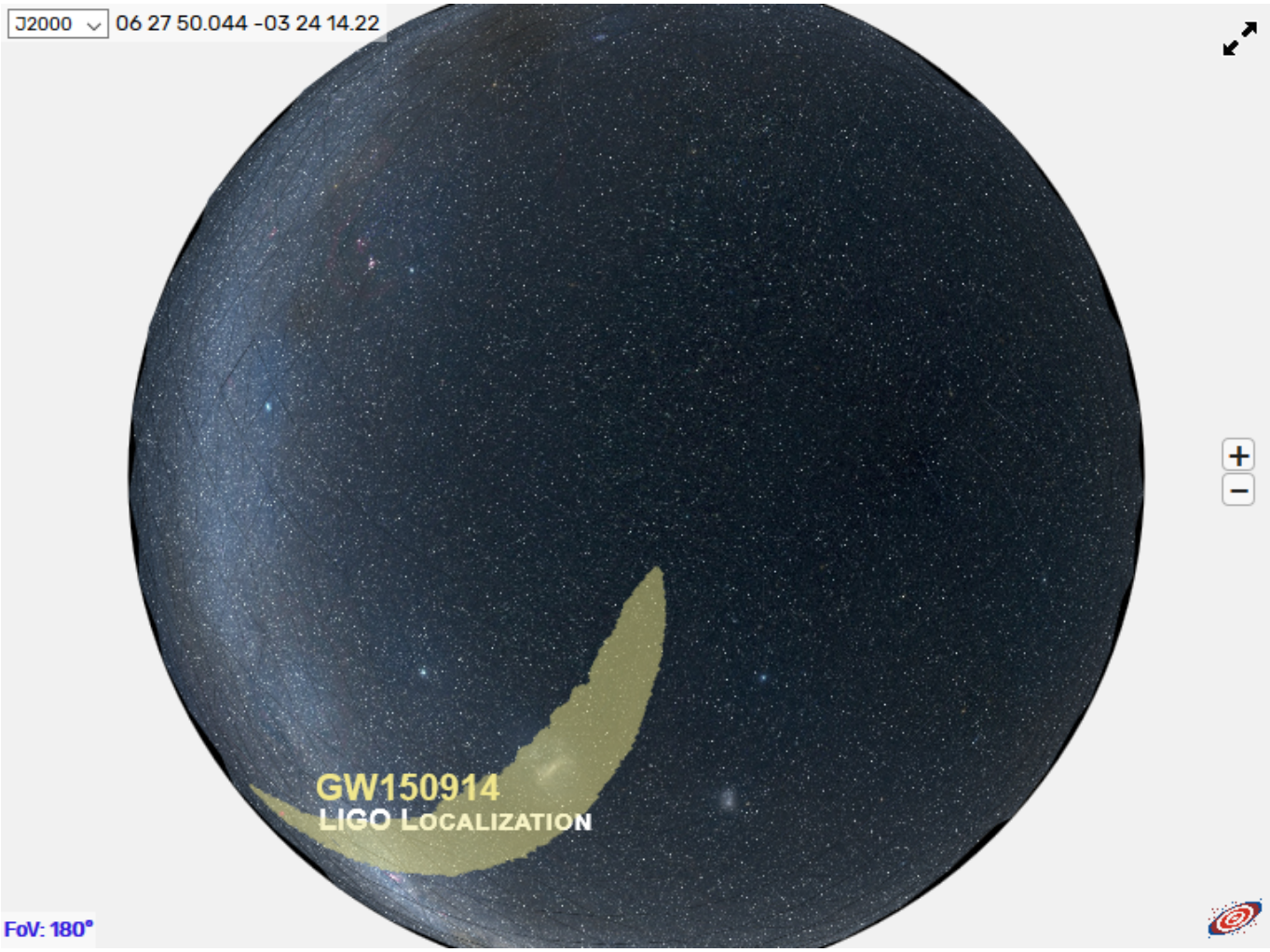
hemel bepalen waaruit het signaal komt, maar niet de preciese positie. En hetzelfde geldt als het signaal bijvoorbeeld drie duizendsten van een seconde eerder in Hanford aankomt: dan weten we dat het signaal komt uit een kleinere cirkel aan de hemel, die meer in de richting van Hanford dan in de richting van Livingston ligt.



Afbeelding 3. Waar komt de golf vandaan?Als de zwaartekrachtgolf precies uit de richting van Livingston komt (blauwe pijl) is die daar een honderdste seconde eerder dan in Hanford. Komt de golf uit de richting van Hanford (rode pijl) dan is het andersom. Komt de golf ergens uit het vlak loodrecht op de lijn tussen de twee

plaatsen, dan worden beide detectoren tegelijk bereikt.

De twee detectoren in Hanford en Livingston bestaan elk uit twee drie kilometer lange buizen waarvan de vervorming wordt gemeten als er een zwaartekrachtgolf langskomt. Doordat die buizen voor de twee detectoren niet exact dezelfde kant op wijzen, kan de hierboven uitgelegde plaatsbepaling nog iets verbeterd worden, waardoor de mogelijke posities aan de hemel niet de hele cirkel beslaan, maar maar een deel van die cirkel. Tegelijkertijd zijn de metingen natuurlijk niet oneindig nauwkeurig, en dus levert de plaatsbepaling niet een oneindig dun cirkelsegment op, maar een wat bredere band. Voor de allereerste waargenomen zwaartekrachtgolf leidde dat tot een plaatsbepaling zoals hieronder in afbeelding 4 weergegeven.



Afbeelding 4. Plaatsbepaling van GW150914.De plaatsbepaling van de bron van de gravitatiegolf uit

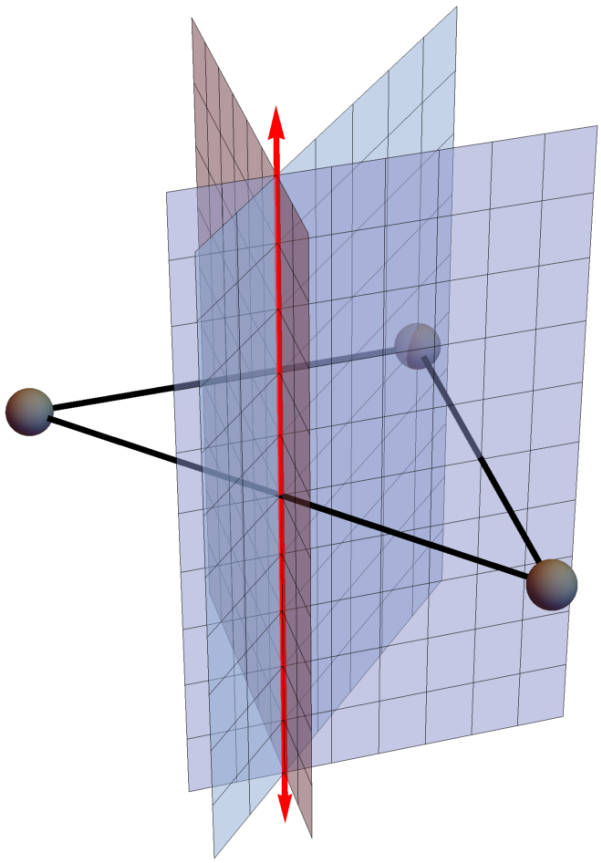
september 2015. Afbeelding: LIGO, gemaakt met deze simulatie.

Van twee naar drie

In de eerste serie metingen van LIGO, tussen september 2015 en januari 2016, werden twee keer zwaartekrachtgolven gemeten van samensmeltende zwarte gaten. Vervolgens gingen de detectoren dicht voor onderhoud en upgrades. In november 2016 werden de detectoren weer aangezet, en in januari 2017 werd in beide detectoren een derde zwaartekrachtgolf gemeten. De tweede run zou volgens de planning duren tot 25 augustus 2017. Er werd gehoopt dat het nog vóór die tijd zou lukken om ook een derde detector werkzaam te krijgen: de Europese detector Virgo, gelegen in het Italiaanse plaatsje Cascina, vlak bij Pisa.

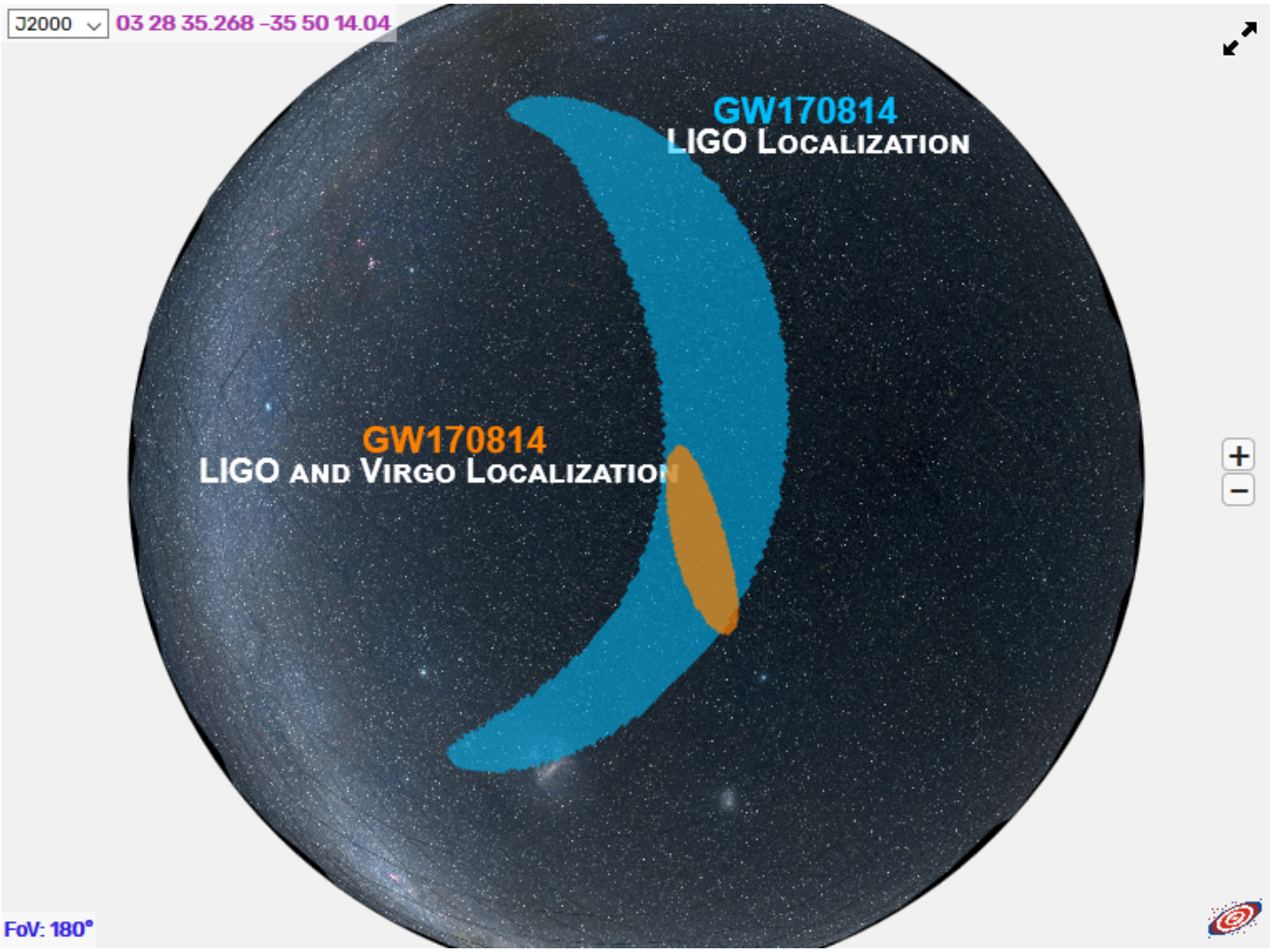
Het spande erom, maar uiteindelijk kon Virgo net op tijd worden “aangezet”. Op 1 augustus 2017 begon die detector met waarnemen. Het leek niet heel waarschijnlijk dat er in de 25 dagen dat de drie detectoren tegelijk draaiden nog een zwaartekrachtgolf zou volgen, maar de onderzoekers hadden geluk: op 14 augustus, nog geen twee weken na het aanzetten van de Virgo-detector, passeerde een sterke zwaartekrachtgolf de aarde. De eerste waarneming met drie detectoren was een feit!

De aanwezigheid van een derde detector is voor de plaatsbepaling van de bron van de zwaartekrachtgolven van cruciaal belang. Met drie detectoren kan uit de tijdsverschillen namelijk precies worden bepaald waar de golf aan de hemel vandaan komt! In afbeelding 5 zien we weer een voorbeeld, met drie detectoren waar het signaal toevallig precies tegelijkertijd aankomt. Als we alleen de data van twee detectoren hebben, geeft dat weer een vlak van mogelijke punten van herkomst (dus aan de hemel: een cirkel), maar het toevoegen van een derde detector geeft nog twee van die vlakken, die elkaar snijden in een lijn. We weten dus dat de bron van de zwaartekrachtsgolven ergens op die lijn moet liggen, en dat betekent aan de hemel dat de golf maar uit twee richtingen kan komen – in dit voorbeeld loodrecht tegenover elkaar aan de hemel. Voegen we aan die informatie nog de informatie uit de oriëntatie van de verschillende detectoren toe, dan kan ook bepaald worden welke van de twee punten het juiste is.



Afbeelding 5. Plaatsbepaling met drie detectoren.Met drie detectoren kan de richting van de bron van de zwaartekrachtgolf precies bepaald worden.

Ook hier zijn de metingen natuurlijk weer niet perfect: er zit wat onzekerheid in de precieze plaatsbepaling. In de praktijk blijft er dus een *gebiedje* aan de hemel waarin de oorsprong van de zwaartekrachtgolf gezocht moet worden, maar vergeleken met het resultaat van twee detectoren is dat gebied nu een heel stuk kleiner geworden. In de afbeelding hieronder staat dat weergegeven voor de op 14 augustus waargenomen zwaartekrachtsgolf. In het blauw zien we het gebied waarin de bron gelocaliseerd had kunnen worden als er met alleen de LIGO-detectoren gemeten zou zijn. Het gele gebied is het gebied waartoe de locatie van de bron beperkt kan worden nu er met drie detectoren is waargenomen. Dat gebied bestrijkt een ongeveer tien keer zo kleine oppervlakte aan de hemel!



Afbeelding 6. Plaatsbepaling van GW170814.Met behulp van de Virgo-detector kan de nauwkeurigheid in de plaatsbepaling enorm vergroot worden. Afbeelding: LIGO, gemaakt met deze simulatie.

Lichtsignalen

Waarom zijn astronomen eigenlijk zo geïnteresseerd in de plaatsbepaling van de bron van een zwaartekrachtgolf? Dat is omdat ze graag zouden willen zien wat er precies gebeurt bij de samensmelting van twee van zulke enorm zware objecten. Dat wil zeggen: zodra de zwaartekrachtgolf gemeten wordt, zouden ze graag een “gewone” telescoop op het juiste punt aan de hemel richten, en daar hopelijk zien wat de gevolgen van de samensmelting zijn.

Dat is een race tegen de klok, want het is natuurlijk maar de vraag hoe lang die gevolgen zichtbaar blijven. Op dit moment lukt het de wetenschappers van LIGO/Virgo om binnen een uur na het waarnemen van een zwaartekrachtgolf een grove plaatsbepaling naar een netwerk van telescopen te sturen – de hoop is dat dat in de toekomst zelfs een kwestie van

minuten zal zijn. Omdat het gebied aan de hemel nog altijd vrij groot is (met de komst van nog meer detectoren in de toekomst zal die situatie nog beter worden) en de tijd van een uur nog vrij lang, is het voor de zwaartekrachtgolf uit augustus niet gelukt om daar ook een “visuele” bron bij te zien. Maar de techniek schijdt snel vooruit – wellicht kunnen we over niet al te lange tijd zo’n eerste “dubbele waarneming” in zwaartekrachtgolven én licht wel verwachten. Stay tuned!