



*Afbeelding 1: De drie BlackGEM telescopen op de ESO La Silla sterrenwacht in Chili (credit: S. Bloemen, Radboud Universiteit / ESO)*

## Black Hole Finder – Samen op zoek naar zwarte gaten

**Steven Bloemen, Radboud Universiteit**

In het kader van het Dutch Black Hole Consortium ontwikkelden we een app en website waarmee het brede publiek ons kan helpen om te zoeken naar pas gevormde zwarte gaten: de Black Hole Finder app.

### Op zoek naar veranderlijke signalen uit het heelal

Als je naar de hemel kijkt, kan het op het eerste gezicht lijken alsof alles er steeds hetzelfde uit ziet. Niets is minder waar: sterren ontploffen of botsen op elkaar, asteroïden vliegen door ons zonnestelsel, sterren pulseren en vertonen periodieke variaties in hun helderheid. Voor sterrenkundig onderzoek maken we dankbaar gebruik van deze fenomenen om te begrijpen hoe het heelal in elkaar zit. Het laat ons toe om de natuurkunde in actie te zien en te testen

onder verschillende omstandigheden, bijvoorbeeld bij extreme zwaartekracht in de buurt van zwarte gaten en bij hoge temperaturen in de kern van sterren.

Om veranderlijke signalen (helderheidsvariaties) te detecteren, bouwden we de BlackGEM telescopen (Afbeelding 1). Deze staan in Chili op de ESO La Silla site: een plek met een stabiele atmosfeer, die op 2300m hoogte meestal boven de bewolking zit, en ver weg van de bewoonde wereld zodat er weinig lichtvervuiling is. Daarnaast is er, door de Europese samenwerking, de nodige logistiek en personeel aanwezig die toelaat om er efficiënt te werken. De telescopen werken computergestuurd, zonder waarnemer ter plaatse. Waarneemprogramma's worden vanuit Nederland naar de telescopen gestuurd en worden 's nachts dynamisch aangepast als er interessante gebeurtenissen opgevolgd moeten worden. BlackGEM vindt allerlei variabele bronnen aan de hemel, maar is vooral ontworpen om op zoek te gaan naar licht van botsende neutronensterren.

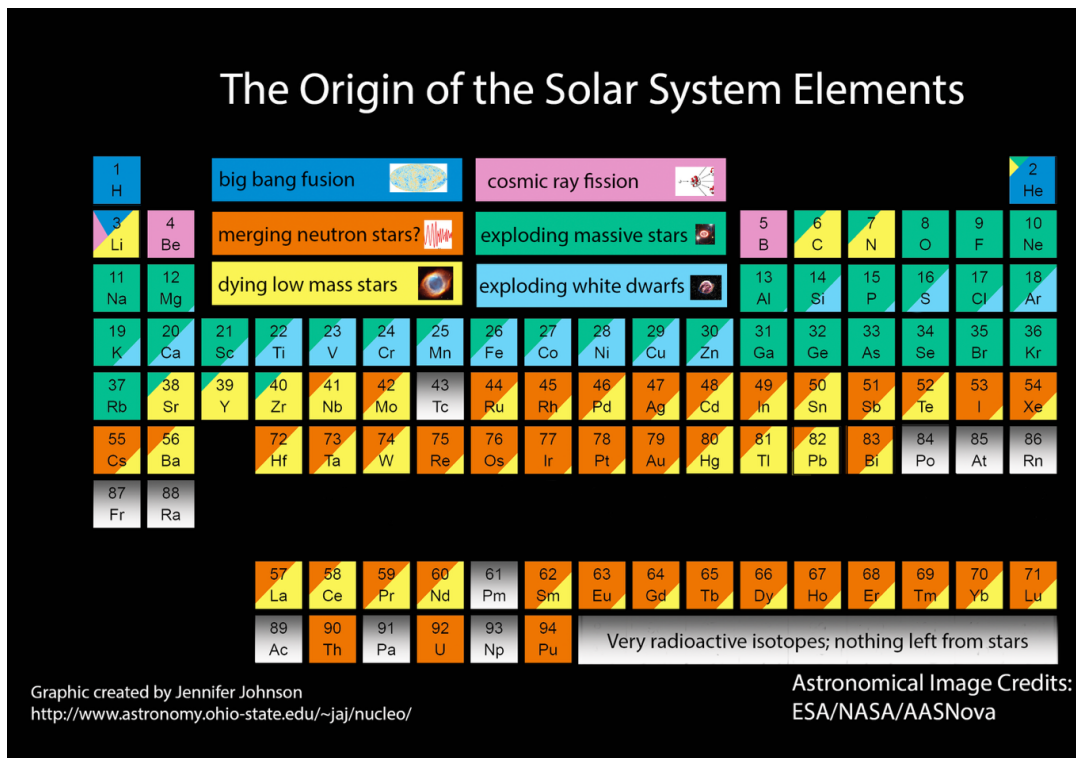
## De jacht op optisch licht uitgestraald door bronnen van zwaartekrachtgolven

Wanneer twee neutronensterren in een dubbelster om elkaar heen draaien veroorzaken ze rimpels in de ruimte-tijd – ook wel zwaartekrachtgolven genoemd. Het bestaan van deze golven volgt rechtstreeks uit Einsteins relativiteitstheorie. Objecten met een massa vervormen lokaal de ruimte-tijd. Wanneer ze bewegen in de ruimte, dan beweegt deze vervorming met het object mee. Twee zware, compacte sterren (neutronen of zwarte gaten) in een dubbelster veroorzaken zo een 'golf van vervorming van de ruimte-tijd': een zwaartekrachtgolf. Door deze golf verliest de dubbelster energie waardoor de baan kleiner wordt en de sterren uiteindelijk op elkaar botsen. Tijdens de laatste (tienden van een) seconde wordt het signaal in zwaartekrachtgolven sterk genoeg om honderden miljoenen lichtjaren verder nog meetbaar te zijn. Het 'praktische', meetbare, effect is dat lengtes tussen twee objecten veranderen wanneer een zwaartekrachtgolf voorbijkomt. Dit effect is typisch van de orde van  $1/10^{23}$  deeltje van de afstand waarover gemeten wordt, ofwel een duizendste van de grootte van een proton op een afstand van enkele kilometers. De LIGO-detectoren in de Verenigde Staten en de Virgo detector in Italië meten dergelijke kleine lengteverschillen over afstanden van 3 tot 4 kilometer met behulp van interferometrie.

Zwaartekrachtgolven bewegen zich voort aan de snelheid van het licht. Wanneer deze detectoren een signaal detecteren, kunnen ze aan de hand van de onderlinge tijdsverschillen tussen de detectoren bepalen uit welke richting het signaal kwam. Deze richtingsbepaling is echter niet erg precies. Vaak gaat het om een gebied van  $\sim 100$  vierkante graden. Ter vergelijking: de maan heeft een diameter van ongeveer een halve graad.

Voor sterrenkundig onderzoek is het erg interessant om naast zwaartekrachtgolven ook elektromagnetische straling van dezelfde botsing van sterren te zien. Bij een botsing van zwarte gaten komt (waarschijnlijk) geen elektromagnetische straling vrij, maar wanneer twee neutronensterren botsen dan wordt een deel van het materiaal weggeslingerd en in dit materiaal komen kernreacties en andere interacties voor waar wél fotonen bij vrijkomen.

Dat licht willen we erg graag vinden en bestuderen. Eén van de redenen is dat we op basis hiervan inzicht kunnen krijgen in de kernreacties die zich voordoen bij een dergelijke botsing van neutronensterren. Volgens onze huidige theorie worden bij deze kernreacties een groot deel van de zware elementen in het periodiek systeem gevormd (Afbeelding 2). Bij de botsing wordt een deel van deze elementen het heelal in geslingerd, waar het in een gaswolk terecht kan komen. Een dergelijk wolk kan aanleiding geven tot de vorming van nieuwe sterren, met bijhorende planeten. Goud, zilver en andere zware elementen die we op aarde vinden, zijn op die manier ook ontstaan bij een botsing van neutronensterren en daarna bij de vorming van ons zonnestelstel op onze planeet terechtgekomen. De hypothese dat de meerderheid van de zware elementen gevormd worden door botsende neutronensterren, willen we testen door het licht van deze botsingen te analyseren.



**Afbeelding 2:** Periodiek Systeem ingekleurd volgens de oorsprong van de elementen. Een groot deel van de zwaarste elementen, in de onderste helft van de tabel, wordt naar verwachting gemaakt bij botsingen van neutronensterren ('merging neutron stars').

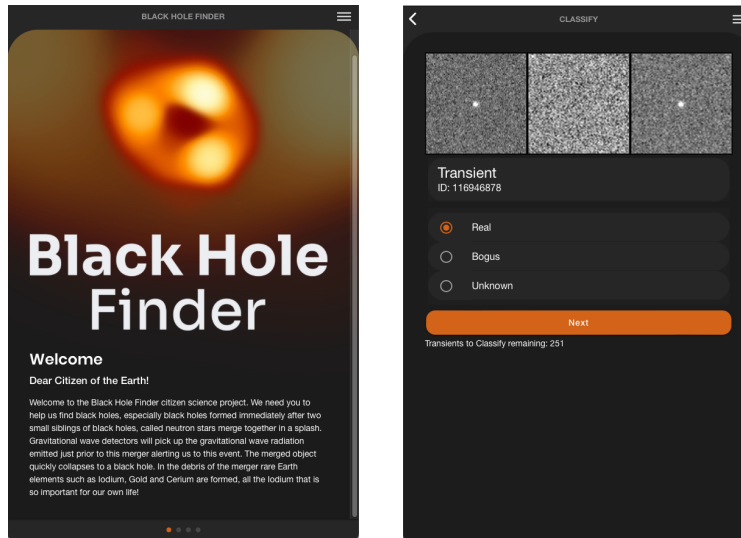
Om het licht dat vrijkomt bij de botsing van neutronensterren te zien waarvan zwaartekrachtgolven gedetecteerd werden, moeten we op zoek gaan naar een erg zwakke bron ( $\sim 22^{\text{ste}}$  magnitude), op een vrij groot deel van de hemel (slechte positiebepaling door zwaartekrachtgolfdetectoren). We moeten deze bron ook vinden en bestuderen in de korte tijd dat ze zichtbaar is. Het licht is immers voornamelijk afkomstig van kernreacties die snel uitdoven, waardoor het optische licht maar een tweetal dagen zichtbaar is.

BlackGEM is gebouwd om precies dat voor elkaar te krijgen: de zwakke optische bron snel lokaliseren aan de hemel. Eenmaal de locatie beter bepaald is, kunnen dan grotere telescopen ingezet worden om detailwaarnemingen te doen, zoals het nemen van spectra die inzicht geven in de kernreacties die zich voordoen.

## Zoeken naar een speld in een hooiberg met de Black Hole Finder app

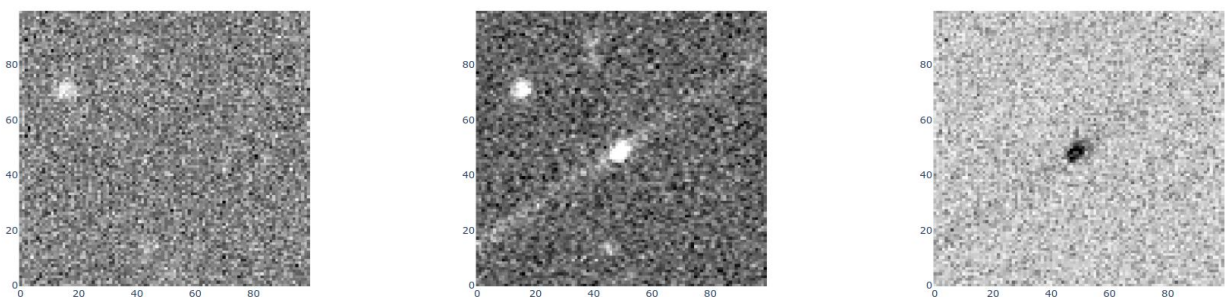
Bij goed weer nemen de drie BlackGEM telescopen elk elke minuut een afbeelding van 110 miljoen pixels. In elke afbeelding zijn duizenden (weg van de Melkweg) tot miljoenen (in de Melkweg) bronnen zichtbaar. Om het licht van een botsing van neutronensterren te vinden tussen alle andere bronnen aan de hemel, maken we gebruik van een geautomatiseerde softwarepipeline. We hebben intussen van bijna de hele hemel een afbeelding gemaakt met de BlackGEM telescopen. Telkens wanneer een nieuwe afbeelding genomen wordt, wordt een afbeelding die minstens enkele weken eerder werd genomen, afgetrokken van de nieuwe afbeelding. Hierbij wordt rekening gehouden met eventuele verschillen die afkomstig zijn van bv. het focus van de telescoop op beide tijdstippen, verschillen in de atmosferische omstandigheden et cetera. Sterren en sterrenstelsels die in beide opnames even helder zijn, vallen in de verschilafbeelding weg. Het aantal bronnen wordt op die manier teruggebracht van  $\sim 100$  miljoen per nacht naar enkele duizenden. Dat laat ons toe om te focussen op de verschillen, bv. bewegende asteroïden, sterren die in helderheid veranderd zijn, supernova-explosies, of een botsing van neutronensterren.

Bij het maken van verschilafbeeldingen en het automatisch detecteren van bronnen die significant veranderd zijn, glippen echter onvermijdelijk ook niet-astrofysische signalen door de mazen van het net. Kosmische deeltjes (bv. protonen van de zon) kunnen enkele pixels van de detector oplichten, een kleine reflectie in de telescoop kan een lichtvlekje veroorzaken, de lampjes op de vleugels van een overvliegend vliegtuig kunnen voor een ster aanzien worden, enzovoort.



**Afbeelding 3:** Schermafbeeldingen van de Black Hole Finder app.

Om deze niet-astrofysische signalen (*bogus*) te onderscheiden van de astrofysische (*real*) wordt gebruik gemaakt van artificiële intelligentie. Om deze te trainen en om snel feedback te krijgen over signalen die door de AI als mogelijk interessant worden gezien, hebben we de Black Hole Finder app ontwikkeld (Figuur 3). Binnen 20 minuten nadat een afbeelding door de BlackGEM telescopen is genomen, worden de bronnen die door de software als mogelijk interessant worden beschouwd, naar de app gestuurd. De gebruiker krijgt eerst een tutorial te zien waarin uitgelegd wordt hoe de meest voorkomende *bogus* signalen van de echte te onderscheiden zijn. Daarna kan de gebruiker beginnen met classificeren. Voor elke mogelijk interessante detectie worden drie kleine afbeeldingen getoond (Figuur 4): uit de oude afbeelding, de nieuwe afbeelding en de verschilafbeelding wordt een klein stukje getoond, gecentreerd op de bron die we willen laten beoordelen. De vraag aan de gebruiker is of de bron astrofysisch is of niet: *real* of *bogus*.



**Afbeelding 4:** Voorbeeld van een niet-astrofysisch signaal (*bogus*) dat door de software als een mogelijk bron werd opgepikt. De linkse afbeelding toont de nieuwe afbeelding, de middelste een oude afbeelding op dezelfde plek aan de hemel, en rechts de verschilafbeelding. In de middelste afbeelding is een vliegtuig zichtbaar (streep door de afbeelding). De lampjes op de vleugels veroorzaken een punt wanneer ze kort flitsen, en dit punt werd door de software foutief als een ster gezien.

## Wachten op een botsing van neutronensterren

Sinds de telescopen operationeel werden in 2023 is er helaas nog geen botsing van neutronensterren gevonden door LIGO en Virgo, die ook 's nachts zichtbaar was. Met de huidige detectiehorizon van enkele honderden miljoen lichtjaren, verwachten we één detectie per 2 tot 3 jaar, die bovendien ook nog niet noodzakelijk 's nachts zichtbaar is, of vanaf het zuidelijk halfrond. De signalen zijn nog zeldzamer dan enkele jaren geleden verwacht werd. Het is daarom wachten op een goed signaal.

Momenteel ondergaan de LIGO en Virgo detectoren een technische upgrade. Vanaf oktober 2026 zullen ze naar verwachting weer actief worden. Als er dan een dubbele neutronenster wordt waargenomen, staat BlackGEM klaar om op zoek te gaan naar het licht van de kernreacties van deze botsing. Hopelijk met de hulp van veel gebruikers van de app!

---

## Nuttige links

- De Black Hole Finder app (ook te vinden via Google Play Store op Android en App Store op iPhone): <https://app.blackholefinder.org>
- Informatie over BlackGEM: <http://www.blackgem.org>
- *Artist impression* van een botsing van neutronensterren: <https://youtu.be/bBCArmUPgCw?si=LmxX15KOFgMjJbO6>
- In het kader van het Stargazing Live! project werden door NOVA en de Hogeschool van Amsterdam een planetariumprogramma, lesactiviteiten (op basis van de Dynalearn software) en een lessenspakket ontwikkeld over het veranderlijke heelal. In het planetarium wordt aan de hand van echte BlackGEM afbeeldingen getoond hoe botsende, ontploffende en pulserende sterren ontdekt en bestudeerd worden: <https://www.astronomie.nl/lesmateriaal/sterrenhemel-live-het-flitsende-heelal-29>