

# Bovengrenzen op de Isotrope Achtergrond van Gravitationele Golven door de eerste drie “observing runs” van “Advanced LIGO” en “Advanced Virgo”

De [kosmische achtergrondstraling](#) is de oudste meetbare elektromagnetische straling en heeft ons informatie gegeven over de oorsprong van het Universum. Er bestaat ook een [Achtergrond van Gravitationele Golven \(AGG\)](#) die een superpositie is van gravitatiegolven gegenereerd door verschillende astrofysische en kosmologische bronnen. Door de zwakke koppeling tussen gravitatiegolven (GG) en materie kan deze ons nog oudere informatie geven dan de kosmische achtergrondstraling, over het prille begin van het universum. Voorbeelden van astrofysische bronnen zijn verafgelegen [samensmeltingen van compacte binaire systemen \(SCBS\)](#) die niet individueel waargenomen kunnen worden en ineenstortende supernova's. We hebben een voorspelling voor de grootteorde van de sterkte van de achtergrond afkomstig van verre SCBS. Hoewel de achtergrond van [ineenstortende supernova's](#) zeker bestaat, heeft deze een momenteel onbekende amplitude. Daarnaast zijn er meer speculatieve bronnen zoals “[cosmic strings](#)”, [inflatie](#) en [eerste-orde-faseovergangen](#), die een paar voorbeelden zijn van kosmologische bronnen. Het waarnemen van een van deze bronnen van de AGG zou een belangrijke doorbraak zijn en zou fundamentele inzichten verschaffen in astrofysische en/of kosmologische processen.

We analyseerden gegevens van de eerste drie “[observing runs](#)” (O1, O2 en O3) van “Advanced LIGO” en “Advanced Virgo”. We waren niet in staat om een detectie te claimen, hoewel we betere bovengrenzen op de [sterkte van de AGG](#) hebben geplaatst dan eerder gepubliceerd, dankzij de toevoeging van de meest recente O3 gegevens (zie figuur [1](#)). We verbeterden de gevoeligheid van onze analyse door een procedure toe te passen om overtollige ruis te verwijderen. Tijdens deze procedure zorgden we dat - voor zover wij weten - er geen gecorreleerd signaal afkomstig is van omgevingsruis, zoals instrumentele, geologische of menselijke bronnen. Verder hebben we het effect van luide “[glitches](#)” gemitigeerd door een techniek die “gating” wordt genoemd. Deze techniek wordt voor het eerst gebruikt bij het zoeken naar een AGG, maar is een standaard techniek bij de zoektocht naar SCBS. De techniek bestaat uit het op nul zetten van elke “glitch” in het [tijdsdomein](#).

Het is de eerste keer dat we bij het zoeken naar de AGG ook gegevens van de Virgo [interferometer](#) hebben gebruikt, naast de twee LIGO instrumenten. De “[cross-correlatie](#)” van de gegevens van deze interferometers werd berekend en vervolgens gebruikt om de 95% [betrouwbaarheidsbovengrens](#) van de AGG-amplitude te bepalen door middel van [Bayesiaanse inferentie](#). Door de cross-correlatie van de data te gebruiken, konden we de resterende omgevingsruis uit onze analyse verwijderen, ervan uitgaande dat deze niet gecorreleerd is

tussen de interferometers. Detectoren die co-gelokaliseerd en co-georiënteerd zijn, zijn het meest gevoelig voor een AGG, maar ook voor lokale ruisbronnen. Daarom wordt de gevoeligheid voor de AGG gedomineerd door het paar LIGO-detectoren, die het meeste lijken op een co-gelokaliseerd en co-georiënteerd interferometer-paar, hoewel ze nog steeds aanzienlijk minder dan de maximale gevoeligheid bieden. De bijdrage van de Virgo detector aan de gevoeligheid is slechts een paar procent, vanwege de afstand en de oriëntatie ten opzichte van die van de LIGO-detectoren. Dankzij de niet aflatende inspanningen van alle wetenschappers om de interferometers te verbeteren, is onze huidige bovengrens op de AGG ongeveer een factor 5 beter dan de vorige resultaten. Hoewel een deel van deze verbetering simpelweg te danken is aan het analyseren van een grotere hoeveelheid gegevens, was het grootste deel van de stijging te wijten aan de toename van de gevoeligheid. Indien de interferometers op dezelfde gevoeligheid hadden gewerkt als in O2, zouden de extra gegevens slechts hebben geleid tot een verbetering van de bovengrens met een factor minder dan 2.

We onderzochten eveneens wereldwijd gecorreleerde magnetische ruis, bekend als [Schumann resonanties](#). Hiervoor analyseerden we metingen van het magnetisch veld met behulp van speciale sensoren die in de buurt van de drie interferometers geplaatst zijn. Het identificeren van Schumann resonanties is noodzakelijk omdat ze kunnen verschijnen als een effectieve AGG en zo ons signaal "vervuilen". De magnetische velden koppelen met kritische onderdelen van de interferometer, bijvoorbeeld de magneten op de spiegels. Deze magneten worden gebruikt om die spiegels en dus de interferometer te controleren. Indien de koppeling sterk genoeg is, kan het een waarneembaar signaal vervalsen waarbij de verplaatsing van de spiegel niet te wijten is aan een passerende GG maar wel aan het magnetische veld. Door hun wereldwijde aard kunnen de Schumann resonanties hoge correlaties veroorzaken waardoor we ten onrechte een waarneming van de AGG zouden claimen. Om een voorspelling van mogelijke magnetische contaminatie te construeren (zie figuur 2), hebben we twee belangrijke ingrediënten nodig. Het eerste is een nauwkeurige meting van het magnetisch veld in de buurt van de interferometers. Het tweede is een meting van hoe deze magnetische velden zich koppelen aan onze interferometers en dus de mogelijkheid hebben om als een "vals GG-sigitaal" op te treden. Om deze koppeling te bepalen gebruiken we een spoel om sterke magnetische velden in de buurt van de interferometer te creëren en hun effect op het afgeleide valse GG-sigitaal te observeren, terwijl we ook het magnetisch veld nauwkeurig meten. We testen de magnetische contaminatie op twee manieren. Ten eerste zoeken we naar contaminatie in individuele [frequentiebanden](#). Ten tweede zoeken we naar de mogelijkheid dat de som van de magnetische contaminatie in verschillende frequentiebanden zich ophoopt om een resultaat te geven dat boven onze gevoeligheid ligt. Onze conclusie is dat onze gemeten schattingen van gecorreleerde magnetische ruis ver onder de gevoeligheid liggen die we hebben bereikt in O3, zowel in individuele frequenties als bij een som over meerdere frequenties (zie figuur 2). Daarnaast hebben we een methode geïmplementeerd, gebaseerd op Bayesiaanse inferentie, om tegelijkertijd te zoeken naar een AGG en Schumann resonanties in onze gegevens. In overeenstemming met onze andere methoden, vinden we noch een signaal van de AGG, noch van Schumann resonanties. Toch wordt verwacht dat deze nieuwe methode uiterst nuttig zal blijken in toekomstige analyses, omdat onze gevoeligheid dan nog verder toeneemt.

We hebben eveneens bovengrenzen bepaald op een scalair of vectorieel [gepolariseerde](#) AGG. In [algemene relativiteit](#) zijn dit "[verboden](#)" polarisaties aangezien enkel tensor gepolariseerde GG zijn toegestaan. Het observeren van alternatieve polarisaties zou erop wijzen dat Einstein's algemene relativiteitstheorie moet worden aangepast naar iets ingewikkelder. De zoektocht naar deze alternatieve polarisaties heeft baat gehad bij de toevoeging van Virgo data, aangezien het toevoegen van meer detectoren aan het netwerk helpt om het onderscheid te maken tussen verschillende polarisaties. We hebben geen bewijs gevonden van deze "verboden" polarisaties. Andere GG-waarnemingen zijn eveneens in overeenstemming met GG enkel bestaande uit tensor polarisaties, zoals bijvoorbeeld de waarneming van het signaal [GW170817](#) afkomstig van een binaire neutronenster.

We gebruiken eveneens een model om de AGG te voorspellen afkomstig van SCBS (zie figuur [3](#)). Dit is mogelijk de eerste bron van de AGG die LIGO en Virgo kunnen detecteren, zoals [hier](#) besproken. We hebben de meest recente waarnemingen uit de LIGO-Virgo-catalogus [GWTC-2](#) opgenomen. We kunnen de AGG mogelijk detecteren met verbeterde versies van de huidige detectoren die bekend staan als [LIGO A+](#) en [Advanced Virgo Plus](#). We hebben eveneens een gezamenlijke analyse toegepast op de AGG en waarnemingen van individuele SCBS. De AGG is gevoelig voor binaire samensmeltingen op grotere afstanden dan de individueel detecteerbare compacte binaire samensmeltingen. Hierdoor is het mogelijk dat metingen van de AGG tot een verbetering kunnen leiden van de meting van de snelheid waarmee binaire zwarte gaten in het vroege universum samensmelten. Hoewel dit niet het geval is in O3, tonen we aan dat de AGG in de toekomst bijkomende informatie kan verschaffen.

Ondanks het feit dat we -nog- niet in staat waren om de detectie van een AGG te claimen, was deze analyse nog steeds een grote stap voorwaarts in ons vakgebied. Veel nieuwigheden werden voor het eerst in de analyse geïntroduceerd, zoals het opnemen van gegevens van een derde interferometer, het toepassen van gating om "glitches" te verwijderen, het opstellen van een fit voor Schumann resonanties in één consistente Bayesiaanse methode en het gebruik van een model om de AGG afkomstig van compacte binaire systemen te voorspellen. Deze nieuwigheden kunnen van cruciaal belang zijn voor toekomstige "observing runs" wanneer we de gevoeligheid bereiken om een detectie te claimen.

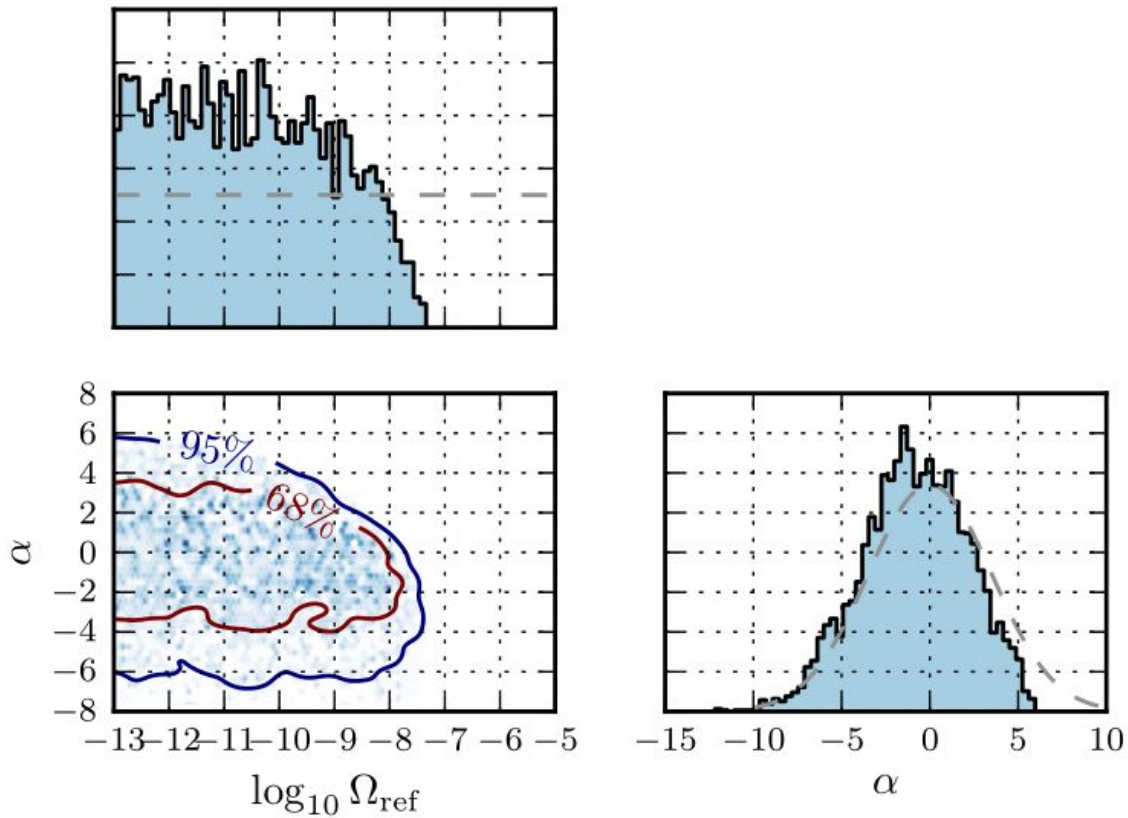
## Woordenlijst

- **Kosmische achtergrondstraling:** Elektromagnetische straling die afkomstig is van het vroege Universum. Voor meer informatie, zie [hier](#).
- **"Observing run":** Periode tijdens dewelke onze interferometers volop aan het werk zijn en gegevens verzamelen die later geanalyseerd zullen worden. De derde "observing run" (O3) vond plaats van 1 April 2019 tot 1 Oktober 2019, en werd na een maand-lange pauze hervat van 1 November 2019 tot 27 Maart 2020.
- **Sterkte van de AGG:** De energiedichtheid aan gravitationele golven. Dit wordt uitgedrukt als de fractie van energie in de vorm van gravitatiegolven ten opzichte van de totale energie in het Universum.
- **"Glitch": *Ruis-uitschieter*** in de gravitationele golven data, analoog aan het geknetter van een luidspreker, dat soms verward zou kunnen worden met het signaal van een echte gravitationele golf of deze kan verbergen. Lees [hier](#) meer over "glitches".

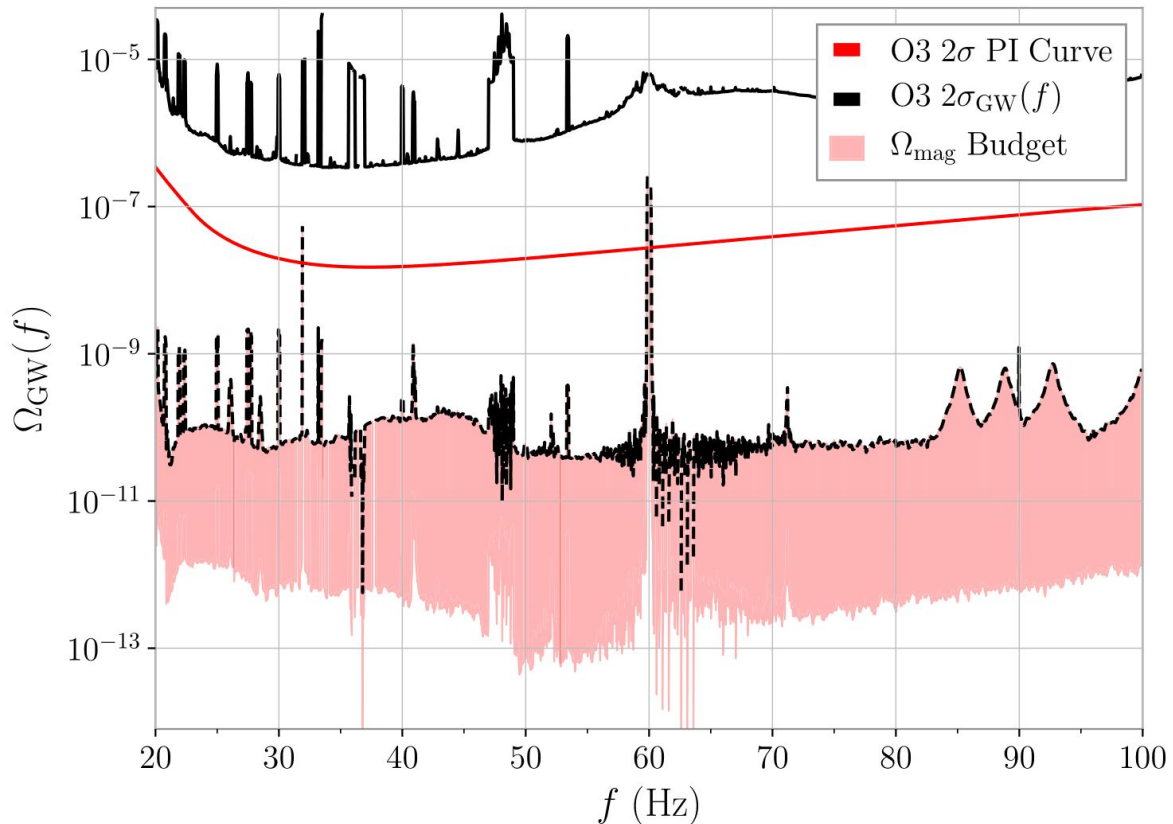
- **Tijdsdomein:** De analyse van wiskundige functies of fysische grootheden in functie van de tijd.
- **Cross-correlatie:** Mate waarin twee (of meer) datasets elkaar gelijkken. Indien gegevens van twee verschillende gravitatiegolf-detectoren gecorreleerd zijn, kan dit wijzen op de aanwezigheid van een achtergrond van gravitationele golven (indien andere oorzaken voor correlatie uitgesloten zijn).
- **Betrouwbaarheidsinterval:** Interval waarbinnen zich de onbekende waarde van een parameter zich situeert met een bepaalde waarschijnlijkheid.
- **Bayesiaanse inferentie:** Methode die ons toelaat om de voorafgaande kennis (wat bekend staat als de "prior") te gebruiken om de waarschijnlijkheid te bepalen dat een verwante gebeurtenis zich voordoet door data te gebruiken. Meer informatie vindt u [hier](#).
- **Schumann resonantie:** Blijksems produceren deze radiogolven met zeer lage frequentie die gevangen blijven tussen het aardoppervlak en de ionosfeer, een laag in de atmosfeer die rond 60 kilometer hoogte begint. Lees [hier](#) meer.
- **Frequentieband:** Interval tussen frequenties bij de analyse van wiskundige functies of fysische grootheden in functie van de frequentie, in plaats van de tijd.
- **Polarisatie van gravitatiegolven:** Geometrische vorm van de uitrekking en de samendrukking van de ruimtetijd ten gevolge van een voorbijkomende gravitationele golf. Een mooie illustratie hiervan kan in Figuur 5 gevonden worden op deze [link](#).
- **Sensitiviteitscurve:** De sensitiviteit (of gevoeligheid) van een gravitatiegolf-detector wordt bepaald door een groot aantal ruisbronnen die overeenkomen met verschillende fysische fenomenen (bv. seismische of elektronische ruis). De som van al deze ruisbronnen bepaalt de sensitiviteit van de detector bij elke frequentie, wat de sensitiviteitscurve oplevert.

## Lees Meer

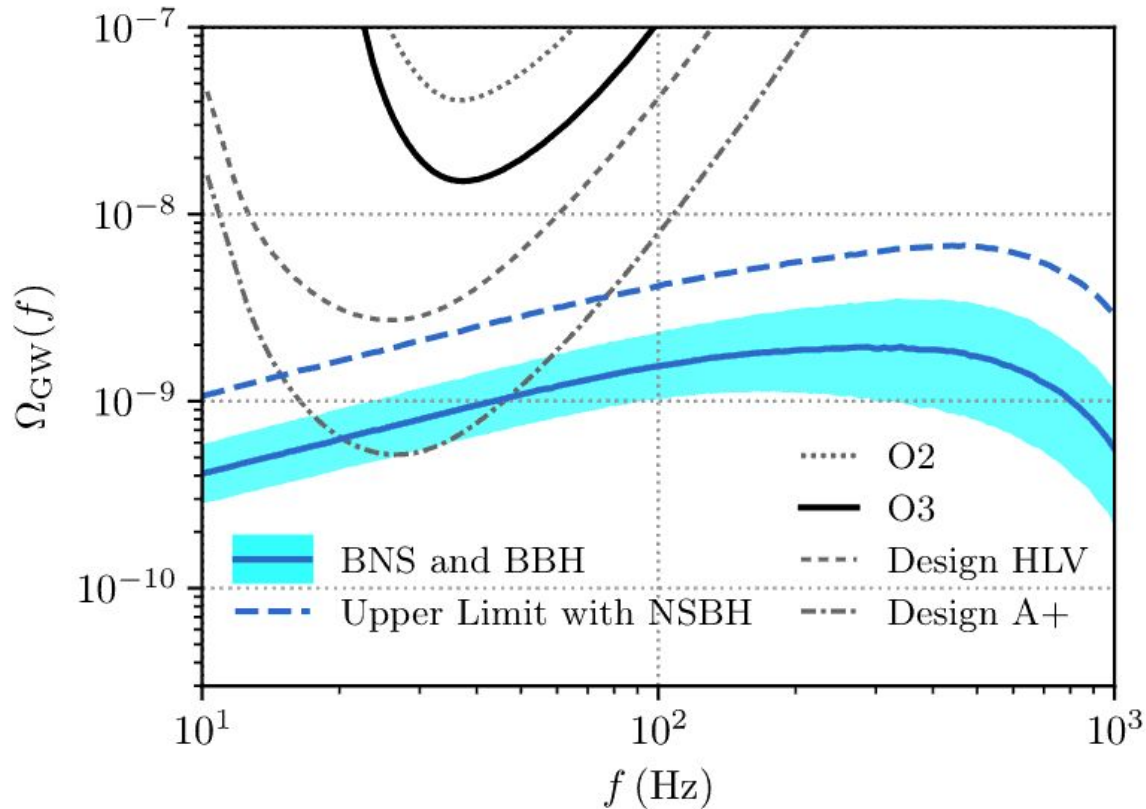
- Bezoek onze websites: [LIGO](#) and [Virgo](#)
- Lees een gratis versie van het volledige wetenschappelijk artikel [hier](#)
- Meer informatie over gravitationele golven in het algemeen vindt u [hier](#)
- Lees meer over de [nood aan verschillende detectoren](#)
- Ontdek wat de ["verboden" polarisaties in algemene relativiteit](#) zijn
- Lees meer over de [samensmelting van compacte binaire systemen](#)



**Figuur 1.** Grafiek die de waarschijnlijkheidsdistributie weergeeft voor de amplitude van de achtergrond van gravitationele golven  $\Omega_{\text{ref}}$  en de spectrale index  $\alpha$  in  $\Omega_{\text{ref}}(f/25 \text{ Hz})^\alpha$ , onze assumptie voor de frequentieafhankelijkheid  $f$  van de AGG (wat de frequentieafhankelijkheid omvat van verschillende mogelijke bronnen). Deze distributies tonen dat de gegevens lagere waarden van  $\Omega_{\text{ref}}$  verkiezen. De grijze onderbroken lijnen stellen onze “a priori” assumpties betreffende deze parameters. De 68% en 95% lijnen tonen de regio's die dit percentage van de totale waarschijnlijkheid omvatten.



**Figuur 2.** Hier wordt het effect van een gecorreleerd magnetisch signaal weergegeven met naam  $\Omega_{\text{Mag}}$  Budget (uitgedrukt in termen van de energiedichtheid aan gravitationele golven ten gevolge van dit gecorreleerd signaal in de interferometers,  $\Omega_{\text{GW}}$ ). Dit effect wordt weergegeven voor zowel individuele frequentiebanden (zwart onderbroken curve) als voor het effect van ophoping over verschillende frequentiebanden (rode band). De bovenkant van de rode band (zwart onderbroken curve) is onder de zwarte [sensitiviteitscurve](#),  $2\sigma_{\text{GW}}(f)$ , wat aangeeft dat de magnetische contaminatie zich ver onder onze sensitiviteit bevindt in elk van de individuele frequentiebanden. De rode sensitiviteitscurve,  $2\sigma$  PI Curve, geeft de sensitiviteit weer voor een ophoping van magnetische ruis over verschillende frequentiebanden. We zien dat de rode band zich ver onder deze rode sensitiviteitscurve bevindt. Onze gemeten schattingen voor de gecorreleerde magnetische ruis bevinden zich onder de sensitiviteit die we in O3 bereiken, zowel voor individuele frequenties als wanneer een mogelijke ophoping over verschillende frequenties in rekening gebracht wordt.



**Figuur 3.** In deze grafiek wordt de sensitiviteit van huidige en toekomstige observaties vergeleken, samen met voorspellingen voor de achtergrond ten gevolge van SCBS, namelijk samensmeltingen van binaire neutronensterren (BNS) en binaire zwarte gaten (BZG). De blauwe lijn is de mediane schatting van de sterkte van de AGG ten gevolge van BNS en BZG, terwijl de lichtblauwe band de 90% onzekerheidsregio weergeeft. De sensitiviteit van de tweede en derde “observing runs” (respectievelijk O2 en O3) worden eveneens weergegeven, alsook de verwachte sensitiviteit bij “design” en A+ (voor het LIGO-Virgo netwerk, HLV). De onderbroken blauwe lijn stelt de 95% bovengrens voor op de voorspelde achtergrond ten gevolge van SCBS, wanneer de samensmelting van een neutronenster en een zwart gat eveneens in rekening gebracht worden. Tot nu toe zijn er geen bevestigde waarnemingen van zulke samensmeltingen, waardoor de frequentie waarmee ze plaatsvinden onzekerder is dan dat van BNS of BZG.