

GWTC-4.0: HET UPDATEN VAN DE CATALOGUS MET WAARNEMINGEN UIT HET EERSTE DEEL VAN DE VIERDE OBSERVATIEPERIODE

In augustus 2025 hebben de LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) Collaborations de interferometrische *strain* data vrijgegeven van het eerste deel van de vierde observatieperiodes (O4a), die liep van mei 2023 tot januari 2024. In deze data hebben we 128 nieuwe betrouwbare *zwaartekrachtgolf*signalen (of gravitational waves, GW) ontdekt die afkomstig zijn van samensmeltende *zwarte gaten* en *neutronensterren*. Naast het vrijgeven van de data publiceren we ook versie 4.0 van de Gravitational Wave Transient Catalog (GWTC-4.0), die lijsten bevat met de kandidaat signalen en metingen van hun eigenschappen. We publiceren ook een verzameling artikelen die met de catalogus gepaard gaan. Deze artikelen zijn ingediend bij Astrophysical Journal Letters voor publicatie als een Focus Issue. Hier vatten we de eerste drie van deze artikelen samen die focussen op de productie en resultaten van de GWTC zelf.

INLEIDING

Het artikel “GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog” biedt een overzicht van het focus issue, inclusief details van de andere artikelen en belangrijke informatie om de lezer te helpen de terminologie van het vakgebied te begrijpen.

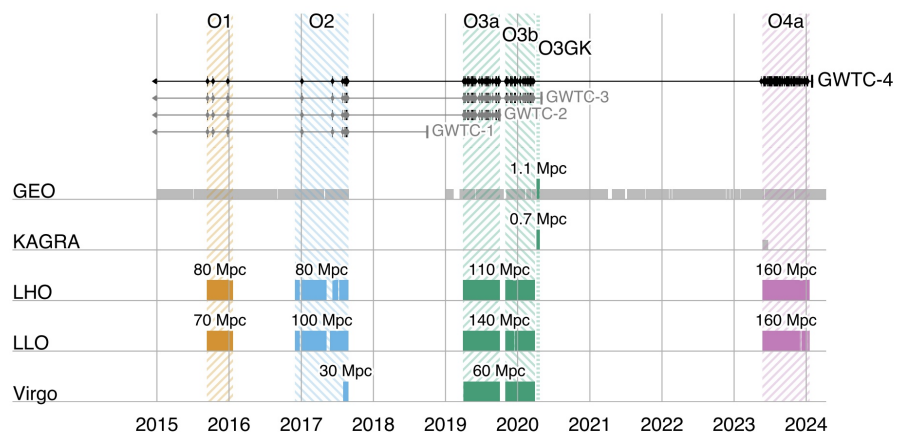
Wat zegt een naam?

We geven onze zwaartekrachtgolven een naam op basis van de datum en tijd waarop zij waargenomen worden, in gecoördineerde wereldtijd (UTC). Het (chronologisch) eerste nieuwe signaal in onze catalogus, aangeduid als GW230518_125908, werd waargenomen op 18 mei 2023 om 12:59:08 UTC. We voegen het voorvoegsel GW toe aan alle kandidaat signalen die we waarnemen. (Dit is iets verschillend van wat we in het verleden deden, omdat signalen waarvan we denken dat zij van aardse effecten komen nu ook aan de catalogus toegevoegd zijn, maar dan met aanvullende gegevens over waarom we denken dat het misschien geen echte zwaartekrachtgolven zijn.)

Cumulatieve catalogi

De GWTC is cumulatief – oftewel, GWTC-4.0 bevat niet alleen de nieuwe resultaten die in O4a waargenomen zijn, maar ook alle vorige catalogi. Ter illustratie tonen we in figuur 1 een tijdlijn met alle observatieperiodes (gekleurde banden) en de dataperiode van elke catalogus. Onze catalogi volgen een naamgevingsconventie: GWTC-*<major>*.*<minor>*, waarbij het major-nummer wordt verhoogd wanneer de dataperiode toeneemt en het minor-nummer wordt verhoogd als er een wijziging is in de methoden/data die de signalen beschrijven (bijvoorbeeld een heranalyse van de data, zoals gebeurd is met GWTC-2.1). In het verleden hebben we het minor-nummer routinematig weggelaten wanneer dit 0 was (zie bijvoorbeeld GWTC-3). We hebben echter gemerkt dat dit tot verwarring kan leiden. Verwijst GWTC-2 bijvoorbeeld naar GWTC-2.0 of GWTC-2.1? Daarom zullen we voortaan altijd het minor-nummer vermelden wanneer we naar een specifieke catalogus verwijzen. We laten het minor-nummer echter nog steeds weg wanneer alleen naar de dataperiode verwijzen wordt (zoals weergegeven in figuur 1).

Figuur 1 laat ook zien dat de twee LIGO-detectoren tijdens O4a observatieel waren: alle kandidaat signalen en metingen zijn uitsluitend gebaseerd op data van deze twee detectoren. KAGRA heeft eventjes aan het begin van de observatieperiode data verzameld, maar de gevoeligheid was onvoldoende om bij te dragen aan resultaten in de catalogus.



Figuur 1: Een tijdlijn van observatieperiodes die de dataverzamelingsperiodes van de zwaartekrachtgolvendetectoren GEO, KAGRA, LIGO-Hanford (LHO), LIGO-Livingston (LLO) en Virgo laat zien. De getallen boven de gekleurde blokken komen overeen met de geschatte afstand waarop de detector een standaard samensmeltend paar neutronensterren kan waarnemen, wat een maatstaf is voor de gevoeligheid. Bovenaan geven we met markeringen aan wanneer signalen zijn toegevoegd aan de GWTC evenals met horizontale strepen de tijdsperiode van de data in elke catalogus.

MEER LEZEN?

Bezoek onze websites (in het Engels):

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



In het inleidende artikel geven we voor het eerst een gedetailleerde beschrijving van de ontwikkeling van de individuele detectoren. Door deze informatie op één plek te verzamelen hopen we een betere verbinding te leggen tussen de astronomische gemeenschap die de waarnemingen bestudeert en de instrumentele gemeenschap die de detectoren bouwt.

In het duister turen

We kunnen uitvogelen wat het 4-dimensionale volume in zowel tijd en ruimte is dat de detectoren hebben waargenomen (dit wordt een ‘hypervolume’ genoemd omdat het een volume in meer dan drie dimensies is) door signalen te simuleren en te kijken of die teruggevonden kunnen worden en dan die informatie te combineren met details over de *arbeidscyclus* van de detectoren. In figuur 2 laten we een benadering van dit hypervolume zien uitgezet tegen het cumulatieve aantal waargenomen signalen met meer dan 50% kans om van astrofysische oorsprong te zijn. De banden in de figuur geven de onzekerheid weer: hoewel veel kandidaten een kans dicht bij 100% hebben om van astrofysische oorsprong te zijn, is het voor kandidaten met een kans van 50% net zo waarschijnlijk dat die door een *ruisfluctuatie* komen. De banden geven dus weer hoe onzeker we zijn over het aantal waargenomen gebeurtenissen.

In de rest van het artikel geven we een overzicht van waargenomen kortstondige bronnen van zwaartekrachtgolven, waarna we afsluiten met een samenvatting. Dit overzicht is niet bedoeld ter vervanging van de vele uitstekende boeken op dit gebied, maar om een korte inleiding te geven in de taal en wiskunde die we gebruiken om onze bronnen in dit focus issue te beschrijven. Als bijlagen voegen we ook een tabel met veelgebruikte acroniemen en een woordenlijst met definities toe, evenals een korte bespreking waarin conventies voor data-analyse worden gedefinieerd.

Het inleidende artikel vormt de basis voor de rest van het focus issue.

Hoewel het zelf geen inhoudelijke wetenschappelijke resultaten bevat, is het de bedoeling om overlap tussen andere artikelen te vermijden, ervoor te zorgen dat ze consistent blijven en duidelijke definities voor het vakgebied te geven.

METHODEN

Het methodeartikel, “GWTC-4.0: Methods for identifying and characterising gravitational-wave transients”, geeft details over de methodologie die is gebruikt om GWTC-4.0 te produceren. We beginnen met de ontwikkeling van theoretische *golfvorm*modellen voor botsende zwarte gaten en neutronensterren, waarna we de *zoekpijpleidingen* beschrijven die kandidatenlijsten opleveren. Elke

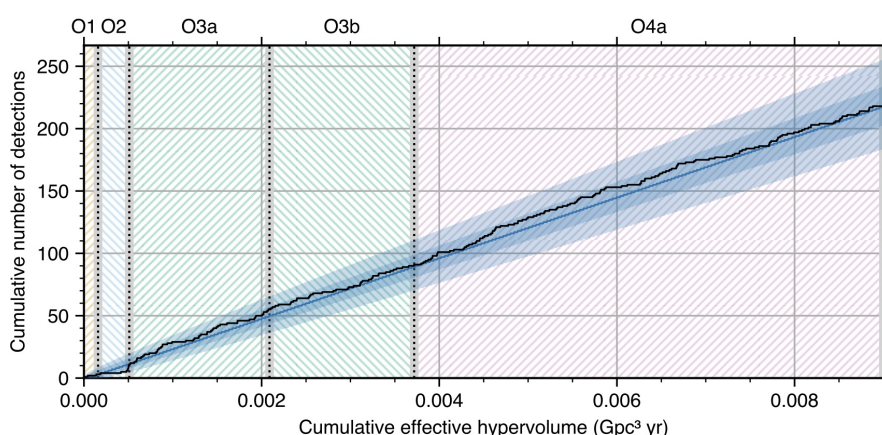
kandidaat wordt vervolgens onderworpen aan een datakwaliteitscontrole en een kandidaatbeoordeling, waarna *parameterschattingen* worden uitgevoerd om de eigenschappen van de bron te begrijpen en golfvormconsistentietoetsen om de onderliggende aannames te valideren.

De meest complexe analyse tot nu toe

Sinds het einde van O3 en de publicatie van GWTC-3.0 hebben we veel moeite gestoken in het verder verbeteren van onze analyses. We hebben nieuwe golfvormmodellen geïntroduceerd die de natuurkunde achter onze bronnen beter beschrijven en sneller zijn in de berekening. We gebruiken niet alleen de nieuwste golfvormmodellen in GWTC-4.0, maar we gebruiken nu ook vier verschillende golfvormmodellen om veel van de signalen te analyseren: twee keer zoveel als in GWTC-3.0, waardoor we beter rekening kunnen houden met onnauwkeurigheden in de modellen. We hebben ook onze zoekalgoritmen aangepast en nieuwe benaderingen geïntroduceerd om de detectie-efficiëntie te verbeteren. Veel van deze verbeteringen hebben de complexiteit van het samenstellen van onze catalogus vergroot, en we zijn doorgegaan met het ontwikkelen van innovatieve nieuwe technologieën om de analyse zoveel mogelijk te automatiseren, zodat we meer kunnen doen en ervoor kunnen zorgen dat onze resultaten gemakkelijk te reproduceren zijn.

Een historisch perspectief

In het methodeartikel vindt u wellicht tot uw verbazing historische beschrijvingen van de algoritmen die al sinds de eerste observatieperiode worden gebruikt. Dit komt door het cumulatieve karakter van de catalogus: als oude data



Figuur 2: Het cumulatieve aantal detecties (kandidaten gevonden met een waarschijnlijkheid van meer dan 50% dat zij astrofysisch zijn) ten opzichte van het geschatte ruimte-tijd-hypervolume dat door de detectoren is bestudeerd.

niet opnieuw worden geanalyseerd met nieuwe methoden, dan is het belangrijk dat gebruikers bij het gebruik van resultaten van die oude signalen begrijpen welke methoden tot die resultaten hebben geleid (die mogelijk heel anders zijn dan de methoden die op nieuwe data worden toegepast). Daarom bieden we in ons methodeartikel zowel een historisch perspectief als een beschrijving van de nieuwe wijzigingen in de methodologie.

Samengevat geeft het methodedocument een overzicht van de werkwijze die we gebruiken, waarbij we laten zien hoe we gebruikmaken van [online/offline](#) analyses, voorlopige studies en zorgvuldige controles om ervoor te zorgen dat de eindproducten rigoureus zijn en aan de hoogste standaarden voldoen.

RESULTATEN

Meer signalen, meer variatie

We hebben 128 nieuwe kandidaten gevonden die een kans van meer dan 50% hebben om astrofysisch te zijn. Dit brengt het totale aantal kandidaten binnen de GWTC op 218 en verdubbelt de omvang van de catalogus! In deze catalogus presenteren we een gedetailleerde analyse van 86 van deze nieuwe signalen. Het is mogelijk geworden om zoveel nieuwe detecties te doen dankzij de toegenomen gevoeligheid van de detectoren zelf en de ontwikkelingen in de analysetechnieken die we gebruiken om de signalen uit de ruis te filteren.

Het is geweldig om zoveel nieuwe waarnemingen te hebben, omdat deze nieuwe set zowel (voor het grootste deel) de gebruikelijke samensmeltende binaire zwarte gaten bevat die de detectoren zo goed kunnen identificeren, als systemen met zwarte gaten en neutronensterren die anders zijn dan alles wat we tot nu toe hebben gezien.

Van online naar offline (en weer terug)

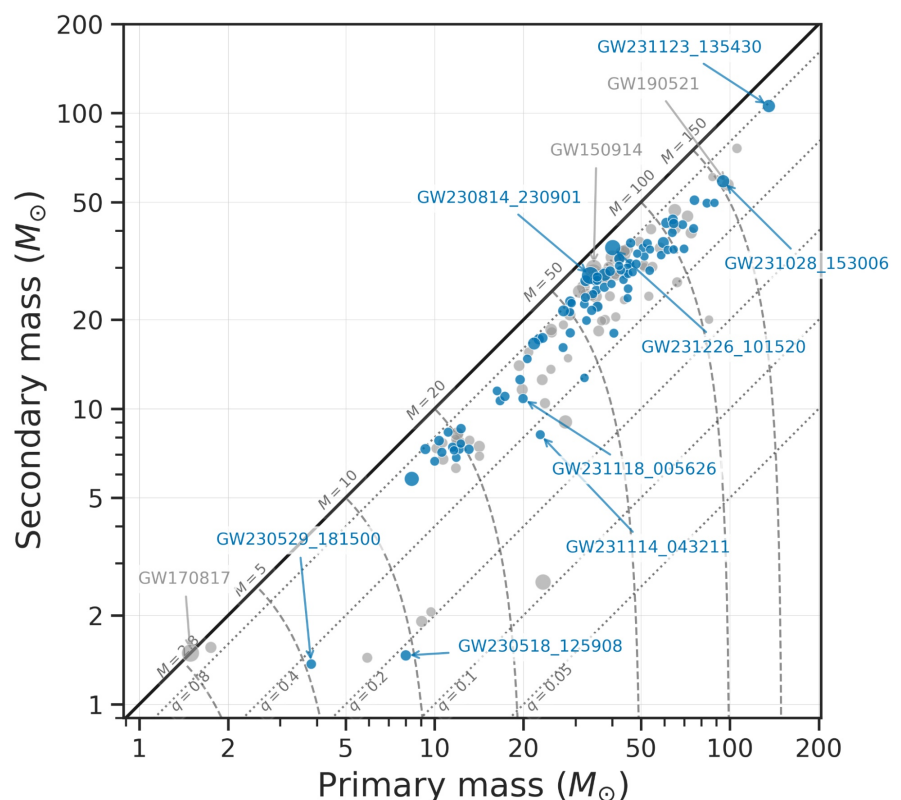
Tijdens O4 hebben we (zo snel mogelijk) online openbare meldingen over waarschijnlijke kandidaten geproduceerd. Hierdoor kunnen andere sterrenkundigen vervolgwaaarnemingen uitvoeren om te zoeken naar licht van de kandidaten. Er waren 1697 meldingen in O4a, waarvan er 82 als zeer waarschijnlijk astrofysisch werden beschouwd en geen problemen met de datakwaliteit hadden. Zoals eerder vermeld, bevat de catalogus 128 zeer waarschijnlijke kandidaten: deze zijn het resultaat van zogenaamde “offline” analyses die gebruikmaken van verbeterde zoekmethoden. Van deze 128 werden er slechts 8 niet online gevonden! Dit toont aan dat de online zoekacties het goed doen voor het vinden van de meeste kandidaten, wat garandeert dat astronomen met zeer nauwkeurige informatie kunnen werken.

Interessante materie

Twee van de signalen in de catalogus lijken te zijn ontstaan door de samensmelting van zwarte gaten met neutronensterren. Signalen als deze zijn erg interessant omdat, in vergelijking met samensmeltingen van zwarte gaten waarbij weinig of geen ‘echte’ materie betrokken is, de aanwezigheid van materie van de neutronenster mogelijk in het signaal kan worden gemeten. Voor de twee signalen zijn we er niet in geslaagd om deze effecten te detecteren, maar hoe meer signalen als deze we zien, hoe groter de kans dat we uiteindelijk materie-effecten kunnen meten.

Massa-effect

We kunnen de massa van het dubbelstelsel rechtstreeks meten aan de hand van het signaal. In figuur 3 tonen we de meest waarschijnlijke waarden voor de massa van de twee componenten: hieruit blijkt dat we weliswaar geen nieuwe dubbele neutronensterren hebben gevonden (in de linkerbenedenhoek), maar wel zeer interessante waarschijnlijke neutronenster-zwart-gat-stelsels en nieuwe signalen met een totale massa van meer dan 150!



Figuur 3: De massa-massa grafiek toont nieuwe kandidaten gevonden in O4a (in blauw) en kandidaten uit O1-O3 (in grijs). Dit zijn puntschattingen die de aanzienlijke onzekerheid negeren en alleen de meest waarschijnlijke waarden weergeven. Voor elke kandidaat is de grootte van de stip evenredig aan de signaal-ruisverhouding. Stippellijnen geven verschillende waarden aan van de massaverhouding q , van de secundaire massa gedeeld door de primaire massa, en streepjeslijnen geven verschillende waarden aan van de totale massa. Alle massa's zijn uitgedrukt in zonsmassa's. (Credit: G. Ashton, Royal Holloway University of London.)

De juiste spin

We kunnen twee eigenschappen van de zwarte gaten of neutronensterren zelf meten, die deel uitmaken van de samensmelting: hun massa en of ze ronddraaien. Als dat het geval is, dan kunnen we de snelheid meten waarmee elk van hen ronddraait en de relatieve oriëntatie van de assen waarom elk van hen ronddraait. We berekenen voor elk signaal een waarde die we de ‘effectieve *spin*’ noemen, die een handig overzicht geeft van de spin van de twee componenten. Een grote positieve effectieve spin betekent dat een of beide componenten snel en in dezelfde richting als hun baan draaien; een negatieve effectieve spin daarentegen vertelt ons dat een of beide componenten in tegengestelde richting van de baan draaien.

GWTC-4.0 verdubbelt het aantal bekende zwaartekrachtgolfsignalen. Dit is een fantastische prestatie en een bewijs van de vele verbeteringen aan de detectoren. De nieuwe signalen geven ons veel nieuwe inzichten over zwarte gaten en neutronensterren en zullen voor veel opwindendheid zorgen binnen de gemeenschap, waardoor een breed scala aan nieuwe studies mogelijk wordt.

MEER LEZEN?

Bezoek onze websites:

www.ligo.org

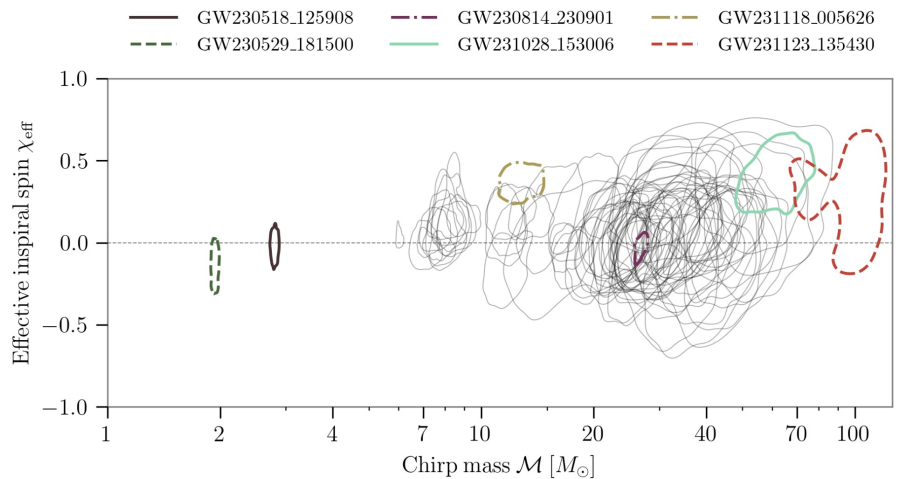
www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lees een gratis preprint van de volledige wetenschappelijke artikelen:

- Inleiding: [hier](#) of op [arxiv](#)
- Methoden: [hier](#) of op [arxiv](#)
- Resultaten: [hier](#) of op [arxiv](#)

Gravitational-Wave Open Science Centre data voor GWTC-4.0 is [hier](#) beschikbaar.



Figuur 4: Een grafiek van de *chirpmassa* ten opzichte van de effectieve spin voor alle nieuwe kandidaten in GWTC-4.0, waarbij een selectie van bijzonder interessante kandidaten in kleur is gemarkeerd. Elke contour omvat het 90%-*betrouwbaarheidsgebied* voor de parameters van die kandidaat.

GLOSSARY

Arbeidscyclus: Deel van een periode waarin een signaal of systeem actief is.

Betrouwbaarheidsinterval: Het percentage van de tijd dat de werkelijke waarde naar verwachting binnen het gegeven bereik zal liggen.

Chirpmassa: Een wiskundige combinatie van massa's voor elk compact object in een dubbelstelsel. De chirpmassa bepaalt de orbitale evolutie van het systeem in de eerste orde als gevolg van energieverlies door het uitzenden van zwaartekrachtgolven.

Efficiëntie: Het percentage gedetecteerde gesimuleerde signalen, uitgaande van een willekeurige aankomstrichting en -tijd. Uitgedrukt als een functie van het type en de sterkte van de golfvorm.

Golfvorm: Het gedrag van de amplitude van een zwaartekrachtgolfsignaal als functie van de tijd.

Neutronenster: Een overblijfsel van een zware ster. Wanneer de ster zijn nucleaire brandstof heeft uitgeput, sterft hij op catastrofale wijze – een supernova – wat kan leiden tot de vorming van een neutronenster: een object dat zo zwaar en compact is (hoewel niet zo compact als een zwart gat) dat atomen hun structuur niet kunnen behouden zoals we die normaal gesproken op Aarde waarnemen. Deze sterren zijn ongeveer even zwaar als onze zon, maar hebben een straal van ongeveer tien kilometer.

Offline zoekactie: Offline analyses zijn zoekacties die worden uitgevoerd op data uit een eerdere observatieperiode, meestal tijdens pauzes wanneer de detectoren niet in werking zijn vanwege onderhoud en upgrades. Ze vormen een aanvulling op realtime analyses (ook wel online analyses genoemd) die tijdens de observatieperiodes worden uitgevoerd.

Parameterschatting: Statistische techniek die wordt gebruikt om de astrofysische parameters af te leiden die overeenkomen met een zwaartekrachtgolfsignaal.

Ruis: Schommelingen in het signaal van de zwaartekrachtgolfmetering als gevolg van verschillende instrumentele en omgevingsfactoren. De gevoeligheid van een zwaartekrachtgolfdetector wordt beperkt door ruis.

Spin: Impulsmoment van een roterend zwart gat; een van de bepalende eigenschappen van zwarte gaten, samen met massa en lading.

Strain: De fractionele verandering in de afstand tussen twee referentiepunten als gevolg van de vervorming van de ruimtetijd door een passerende zwaartekrachtgolf. De typische vervorming van zelfs de sterkste zwaartekrachtgolven die de Aarde bereiken is zeer klein — doorgaans minder dan 10^{-21} .

Zoekpijpleiding: Computerprogramma's die bestaan uit een reeks processen die de gegevens voor analyse bewerken, filteren en vervolgens verschillende grootheden berekenen om zoveel mogelijk ruis te verwijderen en de significantie van kandidaat signalen te schatten.

Zwaartekrachtgolven: Rimpelingen in de ruimtetijd die worden veroorzaakt door enkele van de meest gewelddadige processen in het universum, zoals samensmeltende neutronensterren of zwarte gaten.

Zwart gat: Een gebied in de ruimte-tijd met een zo intense zwaartekracht dat niets, zelfs licht niet, kan ontsnappen. Zwarte gaten zijn er in verschillende maten: zwarte gaten met een stellaire massa ontstaan door het instorten van sterren en hun massa varieert van enkele zonsmassa's tot ongeveer 65 zonsmassa's. Middelzware zwarte gaten hebben een massa van ongeveer 100 zonsmassa's tot 10^5 zonsmassa's. Ten slotte zijn er de superzware zwarte gaten van meer dan 10^5 zonsmassa's tot meer dan 10^9 zonsmassa's.