GWTC-2: गुरुत्वीय - तरंग संसूचनों (detections) से सम्बंधित एक विस्तारित सूची

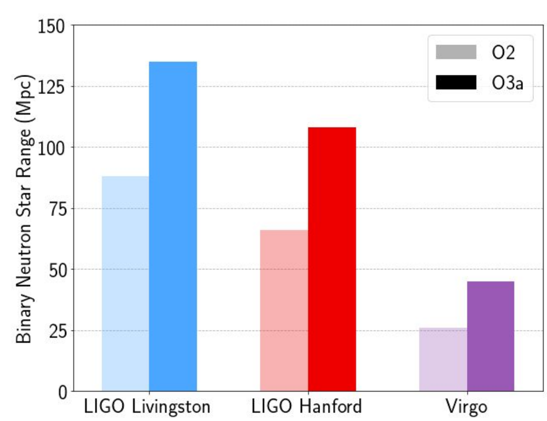
LIGO और Virgo द्वारा 2015 के प्रथम गुरुत्वीय-तरंग संसूचन से लेकर O3a के अंत एवं तीसरे अवलोकन अवधि का प्रथम अर्धांश को शामिल करने तक के गुरुत्वीय-तरंग संसूचनों की एक अद्यतन सूची (GWTC-2 या "गुरुत्वीय-तरंगों की अस्थायी सूची 2") प्रस्तुत हैं। O3a 1 अप्रैल से 1 अक्टूबर, 2019 तक चला, जिसमें 39 गुरुत्वीय तरंगीय संसूचनों तथा GWTC-1 में सूचीबद्ध 11 विश्वस्त संसूचनों को सम्मिलित किया गया, इस प्रकार GWTC-2 में घटनाओं की कुल संख्या 50 हो गई। O3a की खोजें खगोल भौतिकी मापदंडों की एक विस्तृत श्रृंखला तक फैली हैं और बाइनरी ब्लैक होल (बीबीएच), बाइनरी न्यूट्रॉन स्टार्स (बीएनएस), और न्यूट्रॉन स्टार ब्लैक होल (एनएसबीएच) बायनेरिज़ के संलयन के साथ सुसंगत स्रोतों का प्रतिनिधित्व करती हैं।

उल्लेखनीय रूप से, O3a ने अपने पूर्व की दो अवलोकन अवधियों (O1 और O2 संयुक्त रूप से) की तुलना में लगभग तीन गुना अधिक संख्या में विश्वस्त गुरुत्वीय -तरंग घटनाओं का पता लगाया। इसके अतिरिक्त, Virgo संसूचक O3a की पूर्ण अवलोकनावधि के दौरान दो अन्य LIGO संसूचकों के साथ सम्मिलित होने के लिए तैयार था, जिसमे से एक संसूचक न्यूनतम 97% समय अवलोकन कर रहा था तो अन्य दो न्यूनतम 82% समय अवलोकन कर रहे थे। O3a की कुछ विशिष्ट और दिलचस्प घटनाओं में अब तक के द्वितीय गुरुत्वीय-तरंग अवलोकन जो बाइनरी न्यूट्रॉन स्टार विलय के अनुरूप है, असमान द्रव्यमान अब तक की पहली घटना, और सूर्य के द्रव्यमान का लगभग 150 गुना बड़े द्रव्यमान वाला एक बहुत बड़ा ब्लैक होल बाइनरी के अवलोकन की घटना शामिल है। इस संक्षिप्तिका में हमने LIGO और Virgo के सुधारों का वर्णन किया है, जिसने इन अवलोकनों को संभव बनाने के साथ-साथ इन घटनाओं के खगोल विज्ञान के क्षेत्र में महत्व को संभव बनाया।

गुरुत्वीय-तरंगों का संसूचन (detection)

O3a की 39 खोजें LIGO और Virgo वेधशालाओं के उन्नयन, व्यापक डेटा गुणवत्ता और विविधिता वाली गुरुत्वीय -तरंग के पता लगाने का परिणाम हैं। शोर कम करने और संवेदनशीलता बढ़ाने के लिए यंत्रीकरण में किये गए हाल के सुधारों में अधिक शक्तिशाली लेज़र, नए और बेहतर दर्पण को शामिल करना, और प्रकीर्णित प्रकाश का बेहतर नियंत्रण शामिल है। इन परिवर्तनों से सभी तीन संसूचकों के लिए आवृत्ति और दूरी दोनों के विस्तार में वृद्धि हुई जिसने ब्रहमाण्ड के बारे में हमारे दृष्टिकोण को विकसित किया।जैसा कि चित्र 1 में दिखाया गया है, O2 से लेकर O3a तक, तीन संसूचकों के बीच औसतन माध्यिका विस्तार, जिसमें हम एक सामान्य न्यूट्रॉन सितारे के विलयन को देख सकते हैं, में 63% की वृद्धि हुई है, ।

गुरुत्वीय-तरंग स्रोतों की खोज के लिए एक अन्य महत्वपूर्ण उपाय संसूचकों द्वारा प्राप्त कच्चे आँकड़ों को परिष्कृत करना है। आँकड़ों के अनुकूलन की इस प्रक्रिया में आँकड़ो का अंशशोधन करना, शोर घटाना और ग्लीचेस को हटाना शामिल है। सर्वप्रथम, हम प्रारंभिक खोजों के लिए वास्तविक समय के निकट प्रत्येक संसूचक से प्राप्त अपरिष्कृत प्रकाशीय शक्ति में परिवर्तनों को विमा रहित खिंचाव में समायोजित करते हैं ।



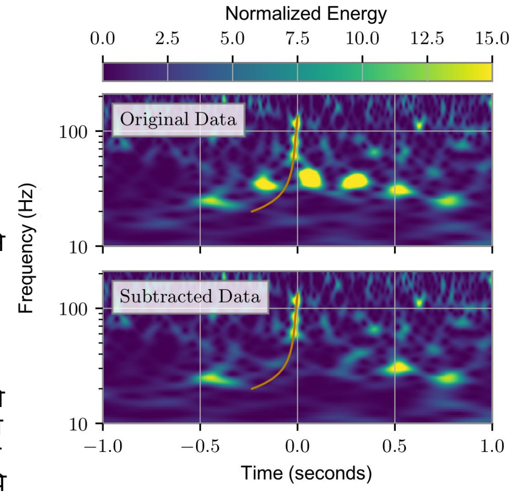
चित्र 1: (O3a) की पहली छमाही की तुलना में दूसरे अवलोकन अवधि (O2) में माध्यिका बाइनरी न्यूट्रॉन सितारा का विस्तार प्रत्येक संसूचक के लिए होता है। टिप्पणी: 1 मेगापार्सेक (Mpc) लगभग 3.26 मिलियन प्रकाश-वर्ष की दूरी है। (क्रेडिट: LIGO Virgo सहयोग / ईव चेस / कैटलिन रोज / नॉर्थवेस्टर्न / यूनिवर्सिटी ऑफ विस्कॉन्सिन-मिल्वौकी)

बाद में हम व्यवस्थित त्रुटि को कम करने के लिए आँकड़ों को पुन: अंशशोधित करते हैं तथा शोर को उस सीमा तक घटाते हैं जिसमें हम गुरुत्वीय-तरंग स्रोतों का पता लगा सकते हैं, परिणामतः आँकड़ों में छिपे कमजोर संकेत भी प्रकट हो जाते हैं ।

गुरुत्वीय-तरंग आँकड़ों के विश्लेषण में, हमारे सामने जो सबसे आम समस्या है, वो है आँकड़ों के गुणवत्ता में ग्लिचेस। ग्लिच अस्थायी शोर संक्रमण हैं, जिनमें से कुछ के श्रोत यांत्रिक कैमरा शटर या लेजर बीम से प्रकाश का प्रकीर्णन हैं। हालाँकि,अन्य ग्लिचेस की उत्पत्ति अधिक रहस्यमय हैं; जैसे ब्राडबैंड अल्पावधिक ग्लिच, जिन्हें ब्लिप्स कहा जाता है। ग्लिचेस को पहचानने और वर्गीकृत करने का एक तरीका Gravity Spy प्लेटफॉर्म हैं जिसमें, हजारों नागरिक वैज्ञानिक मदद करते हैं (देखें कि आप कैसे आप Gravity Spy की सहयता से ग्लिचेस की पहचान में हमारे सहायक हो सकते हैं)। आँकड़ों में महत्वपूर्ण ग्लिचेस की पहचान करने के बाद हम उन्हें गुरुत्वीय-तरंग उम्मीदवारों से हटा देते हैं, जैसा कि **चित्र 2** में दिखाया गया है। O3a में हमने जिन 39 घटनाओं का अवलोकन किया उनमें से 8 पैरामीटर अनुमान विश्लेषण से पहले के पूर्व-प्रसंस्करण कदम के रूप में ग्लिच घटाव से लाभान्वित हुईं।

गुरुत्वीय -तरंगों की खोज में, उम्मीदवार की पहचान दो समय सीमाओं पर होती है। पहले, सार्वजनिक पहचान संकेत उत्पन्न करने के लक्ष्य के साथ कई खोज पाइपलाइनें तुरंत आँकड़ो को संसाधित करती हैं। बाद में, अद्यतन आँकड़ों के अंशांकन, आँकड़ों की गुणवत्ता के आकलन और सांख्यिकीय महत्व की गणना करने के लिए बेहतर तरीकों का उपयोग करके उम्मीदवारों की प्रमुख सूची को प्रस्तुत करने के लिए हम इस गुरत्वीय तरंग आंकड़ों का पुनर्विश्लेषण करते हैं। यह तय करने के लिए कि
कौन सा उम्मीदवार उपयुक्त होगा, हम प्रति वर्ष दो बार कृत्रिम अलार्म दर प्रारंभिक सीमा का अधिरोपण करते हैं ।यह वही दर है जिस पर हम उम्मीद करते हैं कि इस प्रकार के उम्मीदवार को शोर के कारण मौका मिलेगा। O3a में 39 घटनाओं में से, 26 घटनाओं को पहले वास्तविक समय की पहचान अलर्ट के निकट बताई गई थीं, जबकि 13 पहली बार GWTC-2 में बताई गई हैं।

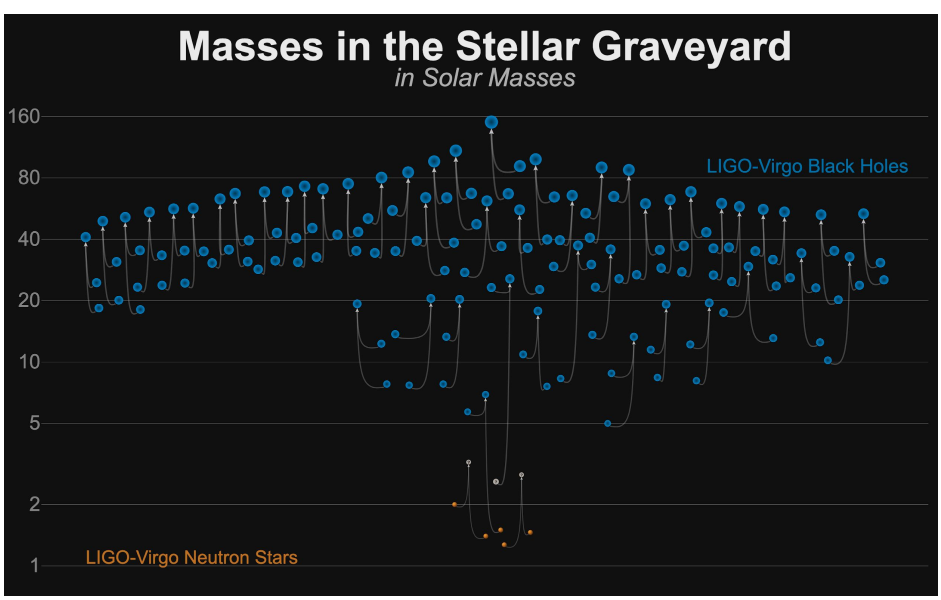
GWTC-2 में हमारे द्वारा उल्लिखित गुरुत्वीय तरंग घटनाओं के लिए हमने नामकरण के एक संशोधित चलन को प्रस्तावित किया है। पूर्व प्रकाशित घटनाओं जिसमे अधुनातन GW190412, GW190425, GW190521 और GW190814 भी शामिल है, के लिए पुराने चलन जिसमें घटनाओं की केवल तिथि ही उपयोग में लायी जाती थी , को कायम रक्खा है। लेकिन नयी GWTC-2 घटनाओं हेतु उनके नाम के साथ उनके UTC संसूचन के समय का भी उल्लेख होता है । उदहारण के लिए GW190701_203306 (देखें चित्र 2) जुलाई 01, 2019 को 20:33:06 UTC पर संसूचित की गयी। इस प्रकार हम एक ही दिन संसूचित की गयी दो घटनाओं को विशिष्ट नाम दे सकते हैं, जैसा की O3a में तीन बार हुआ।



चित्र 2: इवेंट GW190701_203306 में ग्लिच घटाव के पूर्व एवं बाद के समय-आवृत्ति के आँकड़े । इस मामले में, LIGO लिविंगस्टन संसूचक में प्रकीर्णित प्रकाश ने ~ 40 Hz से कम की आवृत्तियों पर अतिरिक्त शोर के रूप में एक ग्लिच का सर्जन किया । (हमारे शोध पत्र के चित्र 5 से अनुकूलित।)

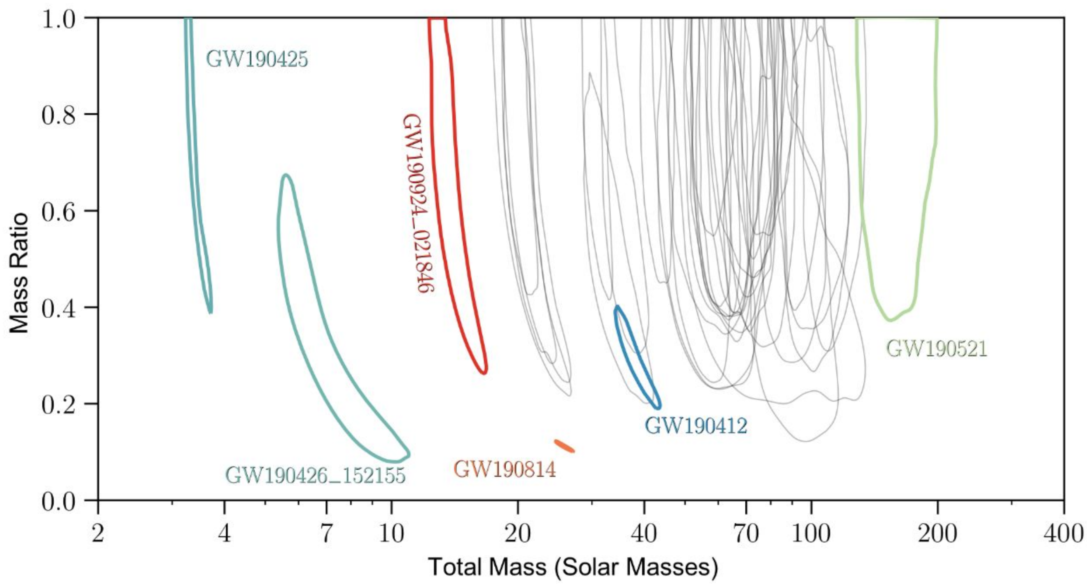
खगोलभौतकीय प्राचल का मापन

हम प्रत्येक घटना की खगोलीय प्रकृति की जांच एक प्रक्रिया के माध्यम से करते हैं, जिसे प्राचल आकलन कहा जाता है, जो प्रत्येक गुरुत्वीय-तरंग घटना से जुड़े बहुत सारे अनोखे खगोलीय गुणों को उजागर करता है। इसमें हम बाह्य गुणों को मापते हैं जो पृथ्वी पर हमारे और एक बाइनरी के मध्य संबंध का विवरण देते हैं, जैसे कि स्रोत की दूरी, आकाश में स्रोत का स्थान और एक पर्यवेक्षक के दृष्टिकोण से बाइनरी का उन्मुखीकरण। इसके अतिरिक्त, हम आंतरिक गुणों को मापते हैं जो बाइनरी में प्रत्येक सघन पिण्ड के द्रव्यमान और स्पिन/चक्रण जैसे गुणों को संदर्भित करते हैं। घटना के गुणों से, हम गुरुत्वीय तरंग के प्रकारों की गणना करते हैं जो समय के साथ अपेक्षित गुरुत्वाकर्षण-तरंग तनाव प्रदर्शित करते हैं। तदोपरांत, हम इस भविष्यवाणी की तुलना संसूचकों LIGO और Virgo में उपस्थित शोर का ध्यान रखते हुए उनके द्वारा मापे गए आंकड़ों से करते हैं। इन प्राचल आकलन तकनीकों के माध्यम से हम ऐसा 90% विश्वसनीय अंतराल पा जाते हैं जो जो ऐसे मानों की श्रेणी प्रस्तुत कराती है जो आंकड़ों से बहुत मेल कहती हैं।



चित्र 3: सघन पिण्डों की विस्तृत श्रृंखला के द्रव्यमानों का संग्रह। रेखाचित्र गुरुत्वीय तरंगों द्वारा संसूचित ब्लैक होल (नीला), न्यूट्रान तारे (नारंगी) और अनिश्चित प्रकृति (ग्रे) के सघन पिण्ड दर्शाते हैं। प्रत्येक सघन बाइनरी विलय तीन सघन पिण्डों के सदृश है: दो विलयन करने वाले पिण्ड और अंतिम विलय अवशेष वाला पिण्ड। (साभार: LIGO -Virgo सहयोग / फ्रैंक इलावस्की, आरोन गेलर / नॉर्थवेस्टर्न)

हमारी इन 39 घटनाओं ने संपूर्ण विश्व में विस्तारित ब्लैक होल और न्यूट्रॉन सितारों के सृजन के इतिहास और जानकारियों के एक विशाल भाग में सामूहिक संकेतीकरण को समेटा हुआ है। हमारी इन 39 घटनाओं में द्रव्यमानों की व्यापक श्रेणी है जिसमें ब्लैक होल और न्यूट्रॉन सितारों के इतिहास और सृजन की वृहद जानकारियां निहित हैं। गुरुत्वीय -तरंग संकेत जो विलयन से काफी पहले उत्पन्न होता है वह घटकों द्रव्यमानों के एक विशेष संयोजन, जिसे चिर्प द्रव्यमान कहते हैं , पर निर्भर करता है। अन्य महत्वपूर्ण द्रव्यमान मापदंडों में प्रत्येक बाइनरी का द्रव्यमान (सघन पिण्डों के द्रव्यमान का योग) और द्रव्यमान अनुपात, जो हल्के पिण्ड और भरी पिण्ड के द्रव्यमान के अनुपात का प्रतिनिधित्व करता है।



चित्र 4: O3a की सभी घटनाओं का द्रव्यमान अनुपात और कुल औसत अनुमान। समोच्च रेखा 90% विश्वसनीय अंतराल को दर्शाती है। छह विशिष्ट घटनाओं को प्रमुखता से दर्शाया गया है। (हमारे शोध पत्र के चित्र 6 से अनुकूलित।)

O3A की अपवादात्मक खोजें

चित्र 3 के अंतर्गत GWTC-2 में द्रव्यमान की विविधता को दर्शाता है, जिसमें न्यूट्रॉन सितारों 1.4 सौर द्रव्यमान से लेकर तक लगभग 150 सौर द्रव्यमान वाले ब्लैक होल शामिल हैं। **चित्र 4 और 5** निम्नलिखित आठ घटनाओं को उजागर करते हैं, जिनमें से चार का विवरण व्यक्तिगत प्रकाशनों के द्वारा किया गया हैं:

- GW190412: निश्चित रूप से असममित घटक द्रव्यमान के साथ वाला यह पहला BBH है, जो उच्च समस्वर के प्रमाण को भी दर्शाता है
- GW190425: एक BNS के अनुरूप दूसरी गुरुत्वीय -तरंग घटना , जो GW170817 का अनुगामी है
- GW190426_152155: एक निम्न द्रव्यमान वाली घटना जो या तो NSBH या BBH के अनुरूप है
- GW190514_065416: सभी O3a घटनाओं के सबसे छोटे प्रभावी संरेखित चक्रण (स्पिन) के साथ एक BBH
- GW190517_055101: सभी O3a घटनाओं के सबसे बड़े प्रभावी संरेखित चक्रण (स्पिन) के साथ एक BBH
- GW190521: एक BBH जिसका कुल द्रव्यमान सूर्य के द्रव्यमान से 150 गुना अधिक है
- GW190814: अस्पष्ट प्रकृति की एक उच्च असममित प्रणाली, जिसमे एक 2.6 सौर द्रव्यमान सघन पिण्ड के साथ 23 सौर द्रव्यमान वाले ब्लैक होल के विलय के बराबर है, जिसे बाद में एक सघन बाइनरी के अंतर्गत या तो सबसे हल्का ब्लैक होल या फिर सबसे भारी न्यूट्रॉन सितारें के रूप में देखा गया।
- GW190924_021846: सबसे निम्न द्रव्यमान वाले BBH के समरूप, जिसमें दोनों ब्लैक होल का द्रव्यमान 3 सौर द्रव्यमान से अधिक हों

इसके अतिरिक्त, GWTC-2 में 2.5 और 5 सौर द्रव्यमान के बीच तथाकथित "निम्न द्रव्यमान अंतर" वाली घटनाएं सम्मिलित हैं। कई वर्षों तक, खगोलविदों ने इस द्रव्यमान सीमा के भीतर अवलोकनों की कमी के कारण इस निम्न द्रव्यमान अंतर के अस्तित्व की संकल्पना दी थी। हालाँकि, O3a ने संभावित "द्रव्यमान अंतर" वाले पिण्डों का पता लगाया, जैसे कि GW190814 और GW190924_021846 के हल्के सहचर।

जैसा कि **चित्र 4** से स्पष्ट है में दर्शाया गया है, GW190521 में O3a का सर्वाधिक द्रव्यमान रखता है , और जो GW170729 का लगभग दोगुना द्रव्यमान है, GWTC-1 में सबसे भारी BBH है। इसके अतिरिक्त, GW190521 गुरुत्वीयतरंगों के माध्यम से ज्ञात 90 सौर द्रव्यमान से अधिक द्रव्यमान वाले संभवतः सबसे भारी विशिष्ट ब्लैक होल को करता सम्मिलित करता हैं। कई अन्य घटनाओं को जैसे GW190519_153544, GW190602_175927 और GW190706_222641 को मिलाने परकुल द्रव्यमान 100 सौर द्रव्यमान से भी अधिक हो सकता है।

GWTC-2 में प्रस्तुत कोई भी स्रोत, जैसे GW190412 और GW190814 जिनका जन्म एक हल्के सहचर और एक ब्लैक होल के विलय से होता हैं, GWTC-1 की तुलना में अधिक असममित द्रव्यमान वाले पदार्थों को प्रस्तुत करता है । असममित विलय उच्च समस्वर के स्वर को बढ़ाते हैं, जैसा कि GW190412 का पता लगाने में दर्शाया गया है। इस अद्यतन सूची में गुरुत्वीय -तरंग खगोल विज्ञान से सम्बंधित कई अन्य अद्भुद कार्य शामिल हैं। O3a में अब तक के सबसे दूरस्थ घटना के साथ-साथ आकाश के कुल क्षेत्रफल का 1% से भी कम स्थानीयकरण वाली 9 घटनाएं शामिल हैं।

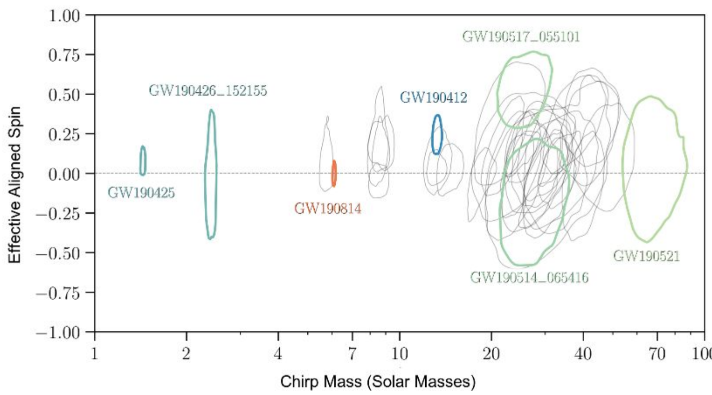


Figure 5: Effective aligned spin and chirp mass estimates for all O3a events. Contours represent 90% credible intervals. (Adapted from Fig. 7 of our paper.)

चक्रण सघन पिण्ड बायनेरिज़ के विकास के इतिहास को और भी उद्घाटित कर सकता है। ये चक्रण किसी दिए गए सघन पिण्ड के कोणीय गति से संबंधित होते हैं और इनके घुमावहीन अवस्था तथा अधिकतम चक्रण में भिन्नता होती हैं। आम तौर पर हम चक्रण को "प्रभावी संरेखित चक्रण " नामक एक प्राचल से मापते हैं, जो विलय से पूर्व प्रत्येक सघन पिण्ड के चक्रण के एक विशिष्ट संयोजन से संबंधित होता है। चित्र 5 प्रत्येक घटना के लिए चिर्प द्रव्यमान के सापेक्ष मापे गए प्रभावी संरेखित चक्रण को दिखाता है। नकारात्मक प्रभावी संरेखित चक्रण अव्यवस्थित चक्रण को इंगित करता है, जो बताता है कि बाइनरी एक सघन वातावरण, जैसे कि गोलाकार समूह, में ही बन सकता है। जैसा कि **चित्र 5** में दर्शाया गया है कि GW190517_055101 संभवतः सर्वाधिक प्रभावी संरेखित चक्रण रखता है। GWTC-2 में किसी भी प्रकार के नकारात्मक परिणामों की पहचान नहीं की गई है, हालांकि GW190514 में प्रभावी संरेखित चक्रण सबसे कम है। इसके अतिरिक्त, ये चक्रण बाइनरी अयनांश की मौज़ूदगी को प्रकट कर सकते हैं; GWTC-2 में ऐसी घटनाएं हैं जो अयनांशों के धुँधले साक्ष्यों का समर्थन कर सकती हैं, जैसे GW190412 और GW190521।

गुरुत्वीय- तरंग खगोल विज्ञान का उज्जवल भविष्य

भले ही यह अवास्तविक लगे लेकिन सितंबर 2015 में पहली बार पहचानने के पांच साल बाद ही गुरुत्वीय तरंगों का पता लगाना अब सामान्य बात हो गयी है। अब 50 गुरुत्वीय-तरंगों को पहचानने के साथ हम ब्रह्मांड में ब्लैक होल और न्यूट्रॉन सितारों की आबादी का पता लगाने में अधिक सक्षम हैं (इस सारांश को देखें)। और अधिक गुरुत्वीय-तरंग को पहचानना सामान्य सापेक्षता के सिद्धांत की हमारी समझ को बढ़ाता हैं (इस सारांश को देखें)।

O3 अवलोकन अवधि के पहले छह महीनों में 39 घटनाओं को शामिल करने के बाद से ही गुरुत्वीय-तरंग खगोल विज्ञान का भविष्य काफी उज्ज्वल प्रतीत हो रहा है। O3 के दूसरे भाग (जिसे O3b कहा जाता है) का विश्लेषण वर्तमान में प्रगति पर है और यह गुरुत्वीय -तरंग की बढ़ते जाने वाली हमारी अस्थाई सूची का और विस्तार करेगा। O3 के बाद, संसूचकों को चौथे अवलोकनावधि के लिए समय पर खगोल भौतिकी तक पहुंच बढ़ाने के लिए अतिरिक्त इंजीनियरिंग सुधार से गुजरना होगा। जहाँ एक ओर हम यांत्रिकी सुधार और नए संसूचकों के निर्माण का इंतजार कर रहे हैं, तो वहीं दूसरी ओर गुरुत्वीय-तरंग समुदाय ब्रह्मांड के माध्यम से ब्लैक होल और न्यूट्रॉन सितारों की प्रकृति का पता लगाना जारी रखेगा।

शब्दावली

चिर्प मास (द्रव्यमान): किसी बाइनरी संयोजन में प्रत्येक सघन पिण्ड के लिए, द्रव्यमान का एक गणितीय संयोजन। चिर्प मास (द्रव्यमान) निम्न-द्रव्यमान बाइनरी के लिए एक गुरुत्वाकर्षण चिर्प की आवृत्ति विशेषता में वृद्धि को निर्धारित करता है।

सघन पिण्ड: ब्लैक होल, श्वेत ड्वार्फ, या न्यूट्रॉन तारे जैसा एक अत्यंत सघन खगोल भौतकीय पिण्ड

गुरुत्वीय तरंगरुप: एक गुरुत्वीय-तरंग संकेत का समय के साथ विकास का निरूपण

द्रव्यमान अनुपात: हल्के सघन पिण्ड तथा भारी सघन पिण्ड के द्रव्यमान का अनुपात

माध्यिक: एक वितरण के ठीक बीच का मान, इस प्रकार आधे मान माध्यिक के ऊपर होते हैं और आधे नीचे

प्राचल(पैरामीटर) का आकलन: एक सांख्यिकीय तकनीक जिसका उपयोग गुरुत्वीय -तरंग संकेत के खगोलीय मापकों का अनुमान लगाने के लिए किया जाता है।

सौर द्रव्यमान: सूर्य का द्रव्यमान। सौर द्रव्यमान खगोल विज्ञान में द्रव्यमान का प्रतिनिधित्व करने के लिए एक सामान्य इकाई है।

तनाव: गुरुत्वाकर्षण तरंगों के गुजरने से अंतरिक्ष-समय में विकृति आ जाती है तब संसूचक की भुजा की लंबाई में परिवर्तन और संसूचक की कुल भुजा की लंबाई का अनुपात

अधिक जानकारी के लिए:

हमारी वेबसाइट पर जाएँ
www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

पूर्ण वैज्ञानिक लेख का एक नि: शुल्क पूर्वमुद्रण पढ़ें
O3a में खोजे गए 39 घटनाओं के आँकड़े GWOSC वेब सर्वर के ईवेंट पोर्टल
https://dcc.ligo.org/P2000061/public

O3a में खोजे गए 39 घटनाओं के आँकड़े GWOSC वेब सर्वर के ईवेंट पोर्टल https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/. पर उपलब्ध है। GWOSC वेब साइट पर सार्वजनिक रूप से सुलभ डेटासेट के अन्वेषण में सहायता के लिए उपयोगी पृष्ठभूमि प्रलेखन, उदाहरण कोड और ट्यूटोरियल उपलब्ध हैं।

हमारी वेबसाइट पर जाएँ:
http://www.ligo.org
http://www.virgo-gw.eu