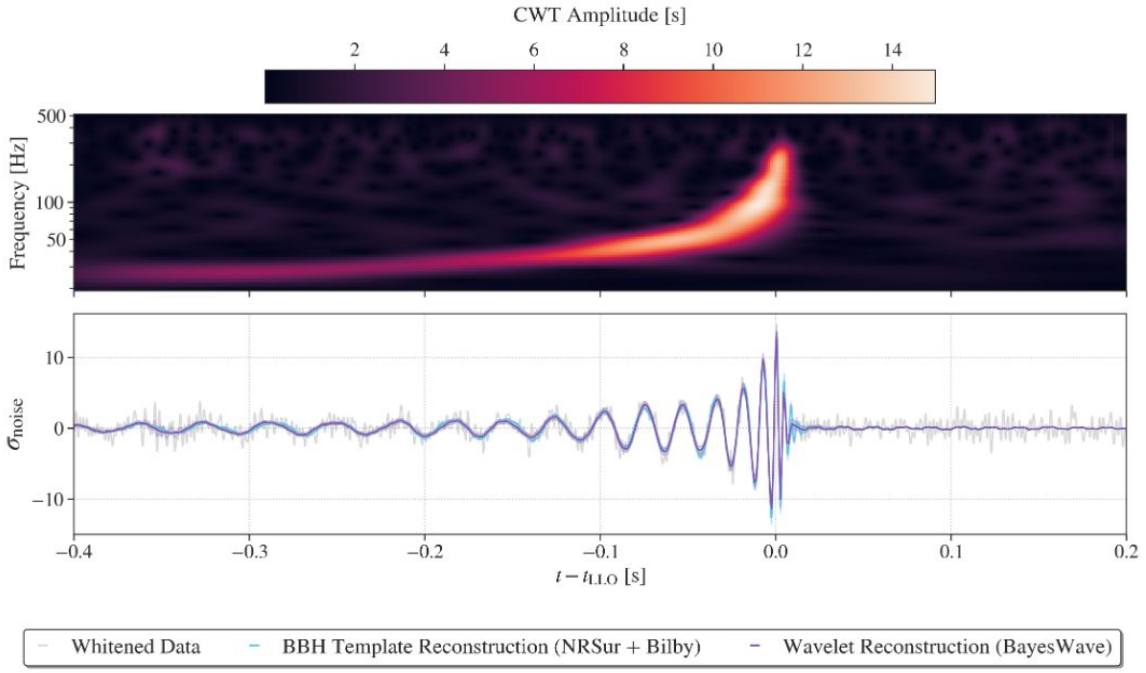
जीडब्ल्यू230814: लाइगो-लिविंग्सटन द्वारा पता लगाया गया एक प्रबल गुरुत्वाकर्षणीय तरंग संकेत

लाइगो-वर्गो-काग्रा सहयोग ने लाइगो-लिविंग्स्टन डिटेक्टर की मदद से एक विशेष रूप से प्रबल गुरुत्वाकर्षण तरंग के संकेतों का पता लगाया।. **जीडब्ल्यू230814** के संकेत 14 अगस्त 2023 को 11:09:01 बजे यूटीसी (भारतीय समयानुसार 15 अगस्त 2023 को सुबह 04:39:01) पर डिटेक्ट हुआ। यह गुरुत्वाकर्षण तरंग संकेत संभवतः दो ब्लैक होल्स के मिलन से उत्पन्न हुआ है।

सिग्नल का पता लगाना

जीडब्ल्यू230814 चौथे अवलोकन चक्र के पहले हिस्से के दौरान अवलोकित किया गया। अवलोकन के समय केवल एडवांस्ड लाइगो लिविंग्स्टन डिटेक्टर ही डेटा ले रहा था। इसके बावजूद भी तरंगों का संकेत बहुत प्रबल था। **चित्र-1** में जीडब्ल्यू230814 सिग्नल के विभिन्न प्रदर्शनों को दर्शाया गया है।



चित्र-1: जीडब्ल्यू230814 का गुरुत्वाकर्षणीय तरंग संकेत| ऊपरी पैनल में सिग्नल का समय-आवृत्ति प्रदर्शक दर्शाया गया है, जहाँ अधिक उज्जवल क्षेत्र बड़े आयाम को सूचित करते हैं। निचले पैनल में सिग्नल को समय श्रृंखला के रूप में दर्शाया गया है। नीली और बैंगनी रेखाएँ सिग्नल वेवफॉर्म को पुनर्निर्मित करने के दो विभिन्न तरीकों को दर्शा रही हैं| यह स्पष्ट है कि सिग्नल एक संकुचित बाइनरी कोलैसेंस है और डेटा पुनर्निर्माणों के साथ रिंगडाउन से पिछले भाग तक अच्छे मेल में हैं|

प्रबल का क्या अर्थ है?

किसी भी गुरुत्वाकर्षणीय तरंग का अवलोकित डेटा संकेत (जो ब्रह्मांड से आता है) और शोर (जो डिटेक्टर और आसपास के वातावरण से आता है) का मेल होता है। हम संकेतों की प्रबलता का माप सिग्नल-टू-नॉइज अनुपात (एसएनआर) से करते हैं, जो एक महत्वपूर्ण मानक है। यह संख्या हमें बताती है कि शोर के मुकाबले संकेत कितना प्रबल है। जीडब्ल्यू230814 के लिए एकल डिटेक्टर एसएनआर 42 है। तुलना के लिए, पहली गुरुत्वाकर्षण-तरंग अवलोकन, जीडब्ल्यू150914, भी प्रबल थी जिसका एसएनआर 24 था।

दो ब्लैक होल्स का विलय, जिन्होंने जीडब्ल्यू230814 सिग्नल उत्पन्न किया

जीडब्ल्यू230814 एक बाइनरी ब्लैक होल प्रणाली के विलय से आने वाले सिग्नल के अनुरूप है। बाइनरी के सिग्नल की अन्य गुणधर्मों, जैसे ब्लैक होल्स का द्रव्यमान और घूर्णन, को जानने के लिए हमने डेटा की आइंस्टीन के सामान्य सापेक्षता सिद्धांत (जीआर) पर आधारित काल्पनिक सिग्नल्स से तुलना की। यहां से हमने पता लगाया कि जीडब्ल्यू230814 शायद दो ब्लैक होल्स के विलय से उत्पन्न हुआ होगा, जिनका द्रव्यमान सूरज के द्रव्यमान से 34 और 28 गुना ज्यादा रहा होगा—यह पहले डिटेक्शन, जीडब्ल्यू150914, से आश्चर्यजनक रूप से समान है।

यह घटना धरती से 300 मेगापार्सेक की दूरी पर हुई - जो लगभग 1 अरब प्रकाश वर्ष के बराबर है। क्योंकि संकेत केवल एक ही डिटेक्टर से अवलोकित हुआ, संकेत की दिशा पता लगाना असंभव है। सामान्यत: जब तक संकेत का समय बहुत ज्यादा न हो, कम से कम 3 डिटेक्टरों की आवश्यकता होती है (हमेशा पर्याप्त नहीं होता), जो एक साथ उस संकेत को अवलोकित करते हैं, जिससे उसे आकाश में सटीक रूप से स्थानित किया जा सके, जैसा कि लगभग 8 साल पहले जीडब्ल्यू170817 के मामले में हुआ था।

एक रहस्यमय संकेत: सामान्य सापेक्षता की परीक्षा

गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेतों का उपयोग आइंस्टीन के सामान्य सापेक्षता सिद्धांत की परीक्षा करने के लिए किया जा सकता है। लाइगो-वर्गो-काग्रा सहयोग विभिन्न परीक्षणों की एक श्रृंखला चलाते हैं, ताकि यह जांचा जा सके कि कोई विशेष गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत सामान्य सापेक्षता (जीआर) के अनुसार है या नहीं। आप यह सोच रहे होंगे कि हम सामान्य सापेक्षता की परीक्षा क्यों करते हैं, जबकि इसे पिछले सदी में कई बार परखा और परीक्षण किया जा चुका है। दूसरी किसी भी भौतिक सिद्धांत की तरह, जीआर भी एक अधिक पूर्ण सिद्धांत का अनुमान हो सकती है, जिसे अभी तक खोजा जाना बाकी है। यही कुछ एक सदी पहले हुआ था जब आइंस्टीन के सामान्य सापेक्षता सिद्धांत ने न्यूटन के गुरुत्वाकर्षण सिद्धांत का विस्तार किया, क्योंकि यह उन घटनाओं को समझाने में सक्षम था जिन्हें न्यूटन के नियम नहीं समझा सके।
हम सामान्यतः 2 से 3 डिटेक्टरों से अवलोकित प्रबल संकेतों की मदद से जीआर की परीक्षा लेते हैं। हालांकि, जीडब्ल्यू230814 की प्रबलता इसे एक खास मामला बनाती है। यह समझने के लिए हमें ब्लैक होल्स के विलय से उत्पन्न गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत के विभिन्न चरणों के बारे में सोचना होगा।

संकुचित बाइनरी विलय के गुरुत्वाकर्षणीय संकेत 3 चरणों में विभाजित होते हैं, ये **चित्र-2** में दर्शाए गए हैं:

- **इंस्पाइरल** वह चरण है जब दो ब्लैक होल्स एक-दूसरे की ओर सर्पिल रूप में घूम रहे होते हैं। इस चरण में, गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत की आवृत्ति और आयाम बढ़ रहे होते हैं।
- **प्लंज-मर्जर** वह चरण है जब दो ब्लैक होल्स विलय की प्रक्रिया में होते हैं और गुरुत्वाकर्षण-तरंग का आयाम सबसे अधिक होता है।
- **रिंगडाउन** वह चरण है जो प्लंज-मर्जर के बाद आता है, जब नवजात ब्लैक होल गुरुत्वाकर्षण-तरंगों को उत्सर्जित करते हुए धीरे-धीरे अपना आयाम कम करते हुए स्थिर हो जाता है। यदि आप एक घंटी को बजाने की कल्पना करें (जो प्लंज-मर्जर के समान होगा), तो जब इसे बजाया जाता है, घंटी की आवाज़ धीरे-धीरे कम होती जाती है और मौन में बदल जाती है – यही रिंगडाउन है।

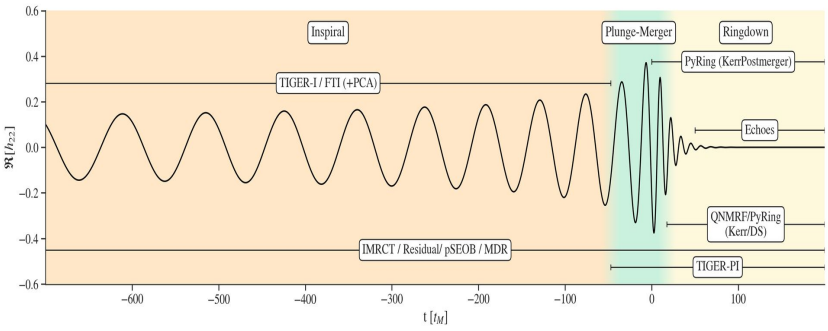


Figure 2: एक संकुचित बाइनरी प्रणाली के विलय से उत्पन्न गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत का सामान्य विकास। यह चित्रात्मक ग्राफ संकेत के आयाम (ऊर्ध्वाधर अक्ष) को समय (क्षैतिज अक्ष) के खिलाफ दर्शाता है। संकेत के विभिन्न चरण हैं: इंस्पाइरल (संतरी), प्लंज-मर्जर (हल्का हरा) और रिंगडाउन (पीला)। साथ ही दिखाए गए हैं सामान्य सापेक्षता के विभिन्न परीक्षणों के तकनीकी नाम, जो किए गए हैं, और संकेत के उन भागों को जो वे ध्यान में रखते हैं – अधिक विवरण के लिए वैज्ञानिक लेख देखें।

अधिक जानकारी के लिए:

हमारी वेबसाइट पर जाएं:
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

लाइगो-वर्गो-काग्रा सहयोग द्वारा किए जाने वाले जीआर के परीक्षण में सिग्नल के विभिन्न भागों का अध्ययन किया जाता है । जीडब्ल्यू230814 के इंस्पाइरल भाग का परीक्षण जीआर से मेल खाता है। जबकि रिंगडाउन और मर्जर भागों पर किए गए परीक्षण एक अनसुलझे से रहस्य को दर्शाते हैं। जीडब्ल्यू230814 का रिंगडाउन सिग्नल जीआर की उम्मीद से कहीं जल्दी गायब हो गया। ऐसा चित्र-3 में दर्शाया गया है, जहाँ विलय के तुरंत बाद का शिखर जीआर पूर्वानुमान से छोटा है।

डेटा और जीआर पूर्वानुमान के बीच इस अंतर का कारण क्या है? कई जांच के मार्गों की खोज की गई है। जांच का एक मार्ग यह था कि क्या उप-प्रधान रिंगडाउन मोड्स इस अंतर का कारण हो सकते हैं| गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत में उप-प्रधान रिंगडाउन मोड्स ऑडियो तरंगों में उच्च हार्मोनिक्स के समान होते हैं। हालांकि, इसे असमानता के कारण के रूप में प्रस्तुत करने के लिए प्रमाण संतोषजनक नहीं हैं।

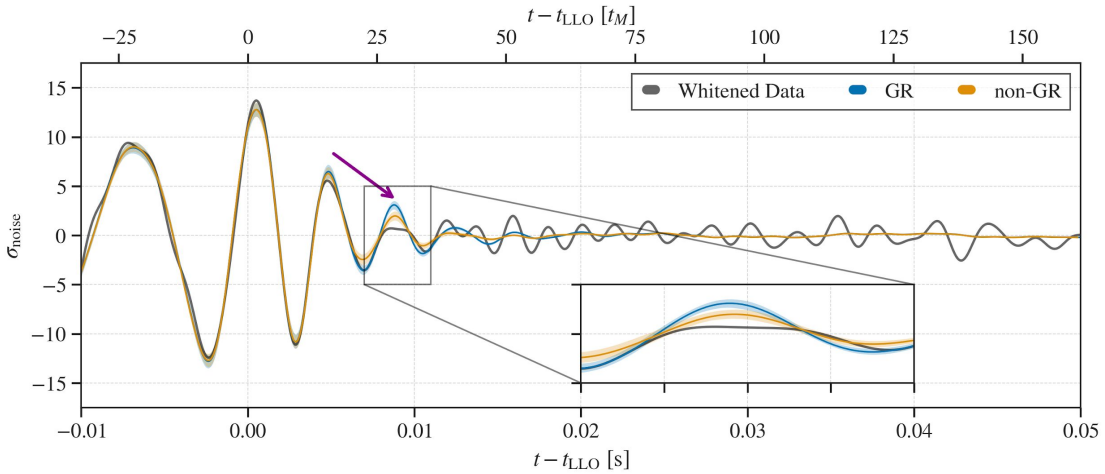


Figure 3: जीडब्ल्यू230814 डेटा (जो कि ग्रे में दिखाया गया है) की तुलना जीआर मॉडल (नीला) और गैर-जीआर मॉडल (संतरी) के पुनर्निर्मित वेवफॉर्म्स से की गई है। बैंगनी तीर उस संकेत के हिस्से को हाइलाइट करता है (जो इनसेट बॉक्स में विस्तारित रूप में दिखाया गया है) जहाँ डेटा का देखा गया आयाम जीआर से अपेक्षित आयाम से कम है। ध्यान दें कि क्षैतिज अक्ष केवल छह एक सेकंड के सौवें हिस्से को कवर कर रहा है (जहाँ समय=0 प्लंज-मर्जर चरण से मेल खाता है): गुरुत्वाकर्षण-तरंग अध्ययन सचमुच सटीकता के युग में प्रवेश कर चुका है!

दूसरी संभावना यह भी हो सकती है कि हमारे जीआर के गुरुत्वाकर्षण-तरंग वेवफॉर्म्स पूरी तरह से सटीक नहीं हैं, जिस वजह से यह स्पष्ट असंगति देखने को मिल रही है। जीडब्ल्यू230814 जैसे प्रबल संकेत ऐसी त्रुटियों को प्रकट करने में सक्षम हैं क्योंकि गुरुत्वाकर्षण-तरंगों को ऐसे संकेतों से और विस्तार से अवलोकित किया जा सकता है। हमारे परीक्षण यह संकेत करते हैं कि वेवफॉर्म सटीकता की सीमाएँ सचमुच स्पष्ट असंगति के लिए एक विश्वसनीय व्याख्या हो सकती हैं।

एक अन्य संभावना डेटा में रैंडम शोर के उतार-चढ़ाव (फ्लक्चुएशन) भी हो सकती है। गुरुत्वाकर्षण-तरंग के रिंगडाउन भाग के साथ ही एक रैंडम शोर फ्लक्चुएशन का होना यह संकेत दे सकता है कि सिग्नल केवल जीआर से असंगत प्रतीत होता है। इस परिकल्पना की जांच करने के लिए, हमने सिमुलेशन किए — ठीक उसी तरह जैसे हम यह परीक्षण कर सकते हैं कि पासा लोडेड हैं या नहीं, उन्हें कई बार घुमा कर। यहां हम मनमर्जी ब्लैक होल्स का विलय तो नहीं कर सकते, इसलिए यह काम हमें कंप्यूटर से कराया जाता है, जो जीआर पर निर्भर होकर गुरुत्वाकर्षण-तरंगों की उत्पत्ति करते हैं। इस प्रकार, हम कई सिमुलेटेड जीडब्ल्यू230814 जैसे गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत बना सकते हैं और उनमें वास्तविक (लेकिन रैंडम रूप से उतार-चढ़ाव करने वाला) शोर जोड़ सकते हैं। फिर हम हर सिमुलेटेड सिग्नल के साथ जीआर के परीक्षण को फिर से करते हैं। परिणाम बताते हैं कि यह भी संभव है कि रैंडम शोर फ्लक्चुएशन ही जीआर से स्पष्ट असंगति का कारण हो सकता है।

डिटेक्टर नेटवर्क का महत्व

गुरुत्वाकर्षण-तरंग अवलोकन केंद्र एक डिटेक्टर नेटवर्क के रूप में सबसे प्रभावी रूप से काम करते हैं। कई स्वतंत्र डिटेक्टरों द्वारा अवलोकित गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेत सिग्नल की सत्यापन, स्रोत गुणों का बेहतर अनुमान और आकाश में संकेत के स्रोत का स्थान निर्धारण संभव बनाता है।

जीडब्ल्यू230814 का मामला डिटेक्टर नेटवर्क के महत्व को उजागर करता है (जैसा कि जीडब्ल्यू170814 की तरह ही था, जो ठीक 6 साल पहले डिटेक्ट किया गया था, और 3 इंटरफेरोमीटरों से डिटेक्ट किया गया पहला सिग्नल था)। सिर्फ एक डिटेक्टर से प्राप्त डेटा संभावित मापदंडों के सेट को सीमित करता है और उनकी सटीकता पर भी सीमा लगा देता है। वैज्ञानिक एक वैश्विक डिटेक्टर नेटवर्क प्राप्त करने के लिए बहुत मेहनत कर रहे हैं, हम यह उम्मीद नहीं कर सकते कि इसका हर हिस्सा 24/7 चालू और सक्रिय रहे। इसलिए, जितना बड़ा नेटवर्क होगा, उतना बेहतर होगा! वर्तमान में (2025), लाइगो-वर्गो-काग्रा नेटवर्क में 4 डिटेक्टर हैं: संयुक्त राज्य अमेरिका में स्थित 2 लाइगो, इटली में स्थित एक यूरोपीय वर्गो उपकरण और जापान में काग्रा। यह तीन सहयोगी वैश्विक रूप से नेटवर्क को संचालित कर रहे हैं, ताकि गुरुत्वाकर्षण-तरंगों की खोज से अधिक से अधिक वैज्ञानिक परिणाम निकाले जा सकें।

एक उज्जवल (और प्रबल) भविष्य

जैसा कि लाइगो-वर्गो-काग्रा सहयोग दो ब्लैक होल्स के विलय से गुरुत्वाकर्षण-तरंगों का पहला डिटेक्शन किए जाने की 10वीं वर्षगांठ मना रहे हैं, हम उम्मीद कर सकते हैं कि जैसे-जैसे हमारे डिटेक्टर नेटवर्क की संवेदनशीलता में सुधार होगा, वैसे-वैसे और भी प्रबल संकेत सामने आएंगे। ऐसी घटनाएँ ब्लैक होल्स की गुणधर्मों का अध्ययन करने के लिए और भी अवसर प्रदान करेंगी, साथ ही आइंस्टीन के सामान्य सापेक्षता सिद्धांत की परीक्षा जारी रखने का अवसर भी देंगी।

शब्दावली

ब्लैक होल: स्पेसटाइम का एक ऐसा क्षेत्र जहाँ गुरुत्वाकर्षण बल इतना अधिक होता है कि प्रकाश भी वहाँ से बचकर नहीं निकल सकता। ब्लैक होल्स विभिन्न आकारों में आते हैं: स्टेलर-मास ब्लैक होल्स सितारे के पतन से उत्पन्न होते हैं और उनका द्रव्यमान कुछ सौर द्रव्यमानों से लेकर लगभग 65 सौर द्रव्यमानों तक होता है। मध्यम-द्रव्यमान ब्लैक होल्स का द्रव्यमान लगभग 100 सौर द्रव्यमानों से लेकर 10^5 सौर द्रव्यमानों तक होता है। अंत में, सुपरमासिव ब्लैक होल्स का द्रव्यमान 10^5 सौर द्रव्यमानों से लेकर 10^9 सौर द्रव्यमानों से अधिक होता है।

बाइनरी ब्लैक होल: एक ऐसा सिस्टम जिसमें दो ब्लैक होल एक-दूसरे के आसपास एक करीबी कक्षा में घूम रहे होते हैं।

सामान्य सापेक्षता: अल्बर्ट आइंस्टीन द्वारा 1915 में प्रस्तावित एक सिद्धांत। इस सिद्धांत में, स्पेस और टाइम एक लचीले कपड़े की तरह होते हैं जो पदार्थ और ऊर्जा की उपस्थिति में मुड़ जाते हैं, और वस्तुएं इस वक्रित अंतरिक्ष के माध्यम से मार्गों का पालन करती हैं।

गुरुत्वाकर्षणीय -तरंगें: स्पेस-टाइम में तरंगें जो ब्रह्मांड में होने वाली कुछ सबसे शक्तिशाली प्रक्रियाओं की वजह से उत्पन्न होती हैं, जैसे न्यूट्रॉन स्टार्स या ब्लैक होल्स का विलय।

इंस्पाइरल: गुरुत्वाकर्षण-तरंगों के उत्सर्जन के कारण बाइनरी के ऑर्बिट का धीरे-धीरे सिकुड़ना। यह बाइनरी के विलय का पहला और सबसे लंबा चरण होता है।

शोर: उपकरण और पर्यावरणीय प्रभावों के कारण गुरुत्वाकर्षण-तरंग संकेतों में उतार-चढ़ाव। गुरुत्वाकर्षण-तरंग डिटेक्टर की संवेदनशीलता शोर से सीमित होती है।

रिंगडाउन: ब्लैक होल विलय का वह चरण जहाँ विलय में उत्पन्न हुआ विकृत ब्लैक होल गुरुत्वाकर्षण-तरंगों का उत्सर्जन करता है, जिससे विकृतियाँ समाप्त हो जाती हैं।

सिग्नल-टू-नॉइज़ अनुपात: यह एक माप है जो विज्ञान और इंजीनियरिंग में उपयोग किया जाता है, जो इच्छित सिग्नल के स्तर को पृष्ठभूमि शोर के स्तर से तुलना करता है।

सौर द्रव्यमान ($M_\odot$): सूर्य का द्रव्यमान, जिसे खगोलशास्त्र में मानक द्रव्यमान इकाई के रूप में उपयोग किया जाता है। यह लगभग 2×10^{30} किलोग्राम के बराबर होता है।

अधिक जानें:

हमारी वेबसाइट पर जाएं:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

पूरे वैज्ञानिक लेख का निःशुल्क प्रीप्रिंट यहाँ पढ़ें या यहाँ आर्काइव पर।

जीडब्ल्यू230814 के लिए ग्रैविटेशनल-वेव ओपन साइंस सेंटर का डेटा रिलीज़ यहाँ उपलब्ध है

ग्रैविटेशनल वेव ट्रांजियंट कैटलॉग-4.0 के लिए ग्रैविटेशनल-वेव ओपन साइंस सेंटर का डेटा रिलीज़ यहाँ उपलब्ध है।