ब्रह्मांड में सतत गुरुत्वाकर्षण तरंगों की तलाश

लाइगो, वर्गो और कागरा की शुरुआती चार प्रेक्षण अवधि (चौथी अवधि के पहले भाग O4a तक) से प्राप्त डेटा का उपयोग करके हमने आकाश भर में सतत (persistent) गुरुत्वाकर्षण तरंगों को खोजा—चाहे वे कुछ ज्ञात स्रोतों से हों या फिर ऐसे अनसुलझे संकेतों की पृष्ठभूमि से। हमें कोई संकेत प्राप्त नहीं हुआ, लेकिन हमने अब तक की सबसे निश्चित ऊपरी सीमाएँ (stringent limits) निर्धारित कीं, और पहले के परिणामों से लगभग दो गुना तक सुधार हासिल किया।

***

सतत गुरुत्वाकर्षण तरंगों की खोज क्यों?

गुरुत्वाकर्षण तरंगें समय-स्थान (spacetime) की लहरें हैं, जो अक्सर विशाल और तेज़ी से गतिशील खगोलीय वस्तुओं से उत्पन्न होती हैं। अब तक हमें ब्लैक होल और न्यूट्रॉन सितारों की टक्कर से उत्पन्न छोटी तरंगें मिली हैं, लेकिन लंबी अवधि तक चलने वाले सतत संकेत भी संभव हैं। ये संकेत घूमते हुए न्यूट्रॉन सितारों, सघन तारकीय समूहों, यहाँ तक कि प्रारंभिक ब्रह्मांड की प्रक्रियाओं से भी आ सकते हैं। अगर ऐसे कई संकेत आपस में मिल जाएँ तो वे एक फैला हुआ पृष्ठभूमि संकेत बना देंगे। यह पृष्ठभूमि समान (uniform) नहीं होगी—इसकी शक्ति आकाश में अलग-अलग दिशाओं के अनुसार बदल सकती है।

इन दृढ़ और दिशात्मक संकेतों की खोज करके हम स्थानीय और दूरस्थ ब्रह्मांड के बारे में नए आयाम खोल सकते हैं—न्यूट्रॉन सितारों, आकाशगंगा समूहों की पहचान या प्रारंभिक ब्रह्मांड की अब तक अज्ञात घटनाओं (जैसे कॉस्मिक स्ट्रिंग्स या inflation) को उजागर कर सकते हैं।

***

चित्र 1
- **बाएँ**: पूर्ण-आकाशीय-पूर्ण-आवृत्ति खोज (O1–O4a और O1–O3 डेटा) से प्राप्त औसत ऊपरी सीमाएँ। छायांकित क्षेत्र ऊपरी सीमा में शोर स्तर दर्शाता है।
- **ऊपर दाएँ**: O1–O4a डेटा से प्राप्त आवृत्ति-औसत ऊपरी सीमा का आकाश मानचित्र। यह मानचित्र एक HL-प्रधान नेटवर्क की सामान्य संवेदनशीलता को दिखाता है।
- **नीचे दाएँ**: O1–O4a और O1–O3 डेटा से प्राप्त सीमा के अनुपात का आकाश मानचित्र।

***

खोज कैसे की गई?
हमने O1–O4a प्रेक्षणों से LIGO का डेटा और Virgo की तीसरी प्रेक्षण अवधि का डेटा उपयोग किया। हमने *गुरुत्वाकर्षण-तरंग रेडियोमीटर* तकनीक अपनाई—जिसमें अलग-अलग डिटेक्टरों के डेटा का अंतर-सहसंबंध (cross-correlation) करके आकाश में संभावित तरंग ऊर्जा का मानचित्र तैयार किया जाता है।

हमने चार प्रकार की विश्लेषण रणनीतियाँ अपनाईं:
- **पूर्ण आकाशीय पूर्ण आवृत्ति खोज**: पूरी दिशा और आवृत्ति श्रेणी में सतत तरंगों की खोज।
- **संकरी पट्टी लक्षित खोज (Narrowband)**: विशेष स्रोत जैसे *Scorpius X-1* और आकाशगंगा केंद्र पर ध्यान केंद्रित।

- **ब्रॉडबैंड खोज**: बिंदु-जैसे स्रोतों द्वारा उत्पन्न विस्तृत आवृत्ति की पृष्ठभूमि तलाशना।
- **विस्तारित स्रोत खोज**: गोलाकार हार्मोनिक्स का उपयोग करके फैले और अस्पष्ट स्रोतों की जाँच।

***

हमें क्या मिला?
किसी भी विश्लेषण में सतत गुरुत्वाकर्षण तरंगों का प्रमाण नहीं मिला। लेकिन हमने "इस प्रकार के संकेतों में" अब तक की सबसे कड़ी ऊपरी सीमाएं तय कीं:
- **पूर्ण-आकाशीय खोज**: विकृति आयाम (स्ट्रेन एम्प्लीट्यूड) को 2.6×10^{-26} तक प्रतिबंधित किया गया।
- **लक्षित खोज**: *Scorpius X-1* और SN 1987A जैसे स्रोतों के लिए strain amplitude लगभग 1.1×10^{-25} से 6.5×10^{-24} के बीच सीमित रहा।
- **ब्रॉडबैंड खोज**: ऊर्जा फ्लक्स की सीमाएँ पिछले परिणामों की तुलना में 1.4–1.7 गुना बेहतर हुईं।
- **विस्तारित स्रोत खोज**: कोणीय पावर स्पेक्ट्रम पर सीमा लगभग दो गुना कड़ी हुई।

ये परिणाम नई स्थायी स्रोत खोज, उन्नत विश्लेषण तकनीकों और भविष्य की खोजों के लिए मंच तैयार करने में सहायक हैं।

***

चित्र 2
O1–O4a डेटा से Terzan 5 तारामंडल पर संकरी पट्टी रेडियोमीटर खोज की ऊपरी सीमा। काली ठोस रेखा बेसियन (Bayesian) सीमा को और धूसर रेखा उस संवेदनशीलता के अनुमान को दर्शाती है जो किसी भी संकेत की अनुपस्थिति की स्थिति में अपेक्षित थी।

***

आगे की राह
जैसे-जैसे लाइगो, वर्गो और कागरा और अधिक संवेदनशील होते जाएँगे, लगातार गुरुत्वाकर्षण तरंगों के खोजे जाने की संभावना भी बढ़ेगी। भविष्य के विश्लेषण में हम और अधिक डेटा जोड़ेंगे और इन पृष्ठभूमि तरंगों की सीमाओं को और अधिक सटीकता से परिष्कृत करेंगे।

***

शब्दावली (Glossary)

- **बेसियन (Bayesian) अनुमान**: तरीका जिसमें हम नए डेटा को पहले से ज्ञात जानकारी (prior) के साथ जोड़कर संभावना (probability) का अनुमान लगाते हैं।
- **ब्लैक होल**: अंतरिक्ष का वह क्षेत्र जहाँ गुरुत्वाकर्षण इतना प्रबल होता है कि प्रकाश तक बाहर नहीं निकल सकता। यह कई प्रकार के द्रव्यमान श्रेणियों में पाए जाते हैं—तारकीय द्रव्यमान (~कुछ से 65 सूर्य द्रव्यमान), मध्यम (~100 से 10^5 सूर्य द्रव्यमान) और अतिदानव (>10^5 से 10^9 सूर्य द्रव्यमान)।
- **क्रॉस-कोरिलेशन**: दो डाटा सेटों की समानता मापने की विधि। यदि दो गुरुत्वाकर्षण तरंगों के मापन में सहसंबंध मिलता है, तो यह पृष्ठभूमि तरंगों का संकेत हो सकता है।
- **ऊर्जा फ्लक्स**: प्रति इकाई समय, प्रति इकाई क्षेत्र में डिटेक्टर तक पहुँचने वाली ऊर्जा की मात्रा।

- **न्यूट्रॉन तारा**: विशालकाय तारे के सुपरनोवा के बाद बचा अवशेष। यह अत्यधिक सघन होता है, सूर्य जितना द्रव्यमान लेकिन केवल 10 किमी त्रिज्या वाला।
- **स्ट्रेन (Strain)**: गुरुत्वाकर्षण तरंग के कारण दो बिंदुओं के बीच दूरी में अंशात्मक परिवर्तन। यह अत्यंत छोटा मान होता है—पृथ्वी तक पहुँचने वाली सबसे बड़ी तरंगों का भी $\lt 10^{-21}$।
- **ऊपरी सीमा (Upper limit)**: किसी मात्रा का अधिकतम मान, जिसके ऊपर जाने पर परिणाम दिए गए डेटा से असंगत हो जाते हैं। सामान्यतः 95% संभावना पर निर्धारित।