



LIGO
Scientific
Collaboration

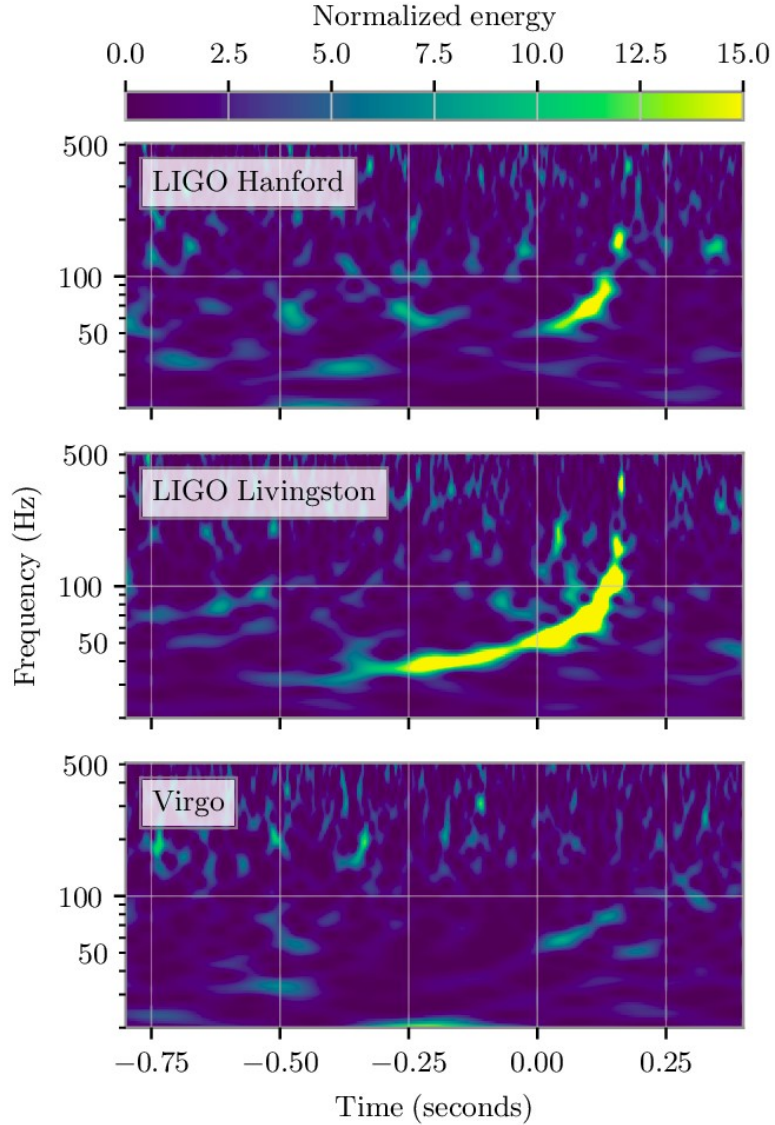


GW १९०४१२: असमान वस्तुमानांच्या कृष्णविवरांपासून उत्पन्न झालेल्या गुरुत्वाकर्षण लहरींचे पहिले वहिले निरीक्षण

आपल्याला काय सापडले?

१२ एप्रिल २०१९ रोजी LIGO वैज्ञानिक मंडळ आणि Virgo मंडळ यांच्या संयुक्त विद्यमाने गुरुत्वाकर्षण लहरींचे (Gravitational Waves: GW) निरीक्षण करण्यात आले. ह्या लहरी दोन कृष्णविवराच्या एकमेकांभोवती फिरून अंततः त्यांच्या विलानीकरणामुळे निर्माण झाल्या होत्या. ही घटना (म्हणजेच GW190412) LIGO वैज्ञानिक आणि Virgo मंडळाच्या तीनही निरीक्षक उपकरणांनी टिपली. अमेरिकेतील Hanford-Washington मधील उपकरण, Livingston-Louisiana मधील उपकरण आणि इटली मधील Cascina येथील Virgo हिच ती उपकरणे. GW190412 चे निरीक्षण प्रगत LIGO आणि VIRGO च्या तिसऱ्या निरीक्षण फेरीत (03 फेरीत) सुरु झाले होते. ह्या फेरीची सुरुवात १ एप्रिल २०१९ रोजी झाली आणि सांगता २७ मार्च २०२० रोजी करण्यात आली.

GW190412 चे ठळक वैशिष्ट्य म्हणजे त्यांना जन्म देणाऱ्या दोन कृष्णविवरांमधल्या वस्तुमानांमधील तफावत. जरीही ह्या कृष्णविवरांचे वस्तुमान सामान्यतः सापडणाऱ्या कृष्णविवरांशी मिळते - जुळते असले, तरीही ती आपापसात मोठ्या प्रमाणात भिन्न आहेत.... एक कृष्णविवर दुसऱ्या कृष्णविवराच्या तब्बल तीन पट मोठे आहे! वस्तुमानातली ही असमानता गुरुत्वाकर्षण लहरींमध्ये काही अश्या प्रकारे बदल घडवते कि ज्यामुळे आपण अनेक घटकांचे अधिक सफाईने मोजमाप करू शकतो. उदाहरणार्थ : कृष्णविवरांचे पृथ्वीपासूनचे अंतर, त्यांच्या एकमेकांभोवती फिरण्याच्या कक्षेचा पृथ्वीपासूनचा कल, तुलनेने जड असणाऱ्या कृष्णविवराचे परिभ्रमण आणि ह्या जोडीच्या कक्षेच्या कलेत होणारे बदल. तसेच अश्या असमान वस्तुमानाच्या व्यवस्थेमुळे आपण थोर शास्त्रज्ञ अल्बर्ट आइनस्टाइन ह्यांच्या सामान्य सापेक्षतावादाच्या सिद्धांताची सुद्धा पडताळणी करू शकतो. ह्यासाठी अश्या असमान वस्तुमानाच्या कृष्णविवरांच्या गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या मूलभूत कंपनांबरोबरच (fundamental frequency) निर्माण होणाऱ्या इतर कंपनांचा अभ्यास करावयास मिळतो, ज्यांना higher harmonics (साधारणतः 'उच्च ताल') म्हटले जाते.



पटल क्रमांक १: ३ गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या निरीक्षक उपकरणांत नोंदवण्यात आलेला GW190412 चा 'spectrogram'. आडवा अक्ष वेळेची नोंद दाखवत आहे व उभा अक्ष कंपनांच्या (frequency) मापनाची नोंद दाखवत आहे. विविध रंग कंपनांच्या विविध क्षमतांचे प्रमाण देत आहेत. एक विशिष्ट खूण (कमी स्पंदनापासून जास्त स्पंदनापर्यंत वेळेनुसार वाढणारा संकेत) येथे टिपला जाऊ शकतो. जसजशी कृष्णविवरे एकमेकांच्या अधिकाधिक जवळ येत आहेत तसतसा हा संकेत गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या वाढत जाणाऱ्या उत्सर्जनाचा आढावा घेत आहे. अंततः दोन्ही कृष्णविवरे एकमेकांत विलीन होतात.

आमच्या संकेतस्थळांना
भेट द्या:

<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



GW190412 च्या सत्यतेची पडताळणी

ह्या गुरुत्वाकर्षण लहरी तीनही निरीक्षक उपराणांत जवळपास एकाच वेळेस टिपल्या गेल्या. हि उपकरणे एकमेकांपासून हजारां किलोमीटर अंतरावर आहेत आणि असे असूनही हे निरीक्षण तीनही उपकरणात एकाच वेळी करता आले म्हणूनच हे निरीक्षण प्रमाण आहे कि ह्या लहरींची उत्पत्ती खगोलशास्त्रीय आहेत आणि केवळ निरीक्षणातील दोष नाहीत.

पटल क्रमांक १ मध्ये ह्या गुरुत्वाकर्षण लहरींचे काळ आणि कंपनांतील (time-frequency) मापन दर्शवण्यात आले आहे, ज्याला 'spectrogram' (स्पेक्ट्रोग्राम) म्हटले जाते. जरीही इथे LIGO च्या Hanford आणि Livingston च्या स्पेक्ट्रोग्राम डेटा मध्ये साध्या डोळ्यांनी सुद्धा गुरुत्वाकर्षण लहरी सहज दिसत असल्या तरीही त्या शोधण्यासाठी तसेच त्यांची जाचपडताळणी करण्यासाठी आम्ही विशिष्ट पद्धतीची गणितीय समीकरणे (algorithms) वापरतो. ह्यापैकी बहुतेक पद्धती 'matched filtering' अर्थात विविध अनुरूप टप्प्यांवर डेटाची गाळणी करण्याच्या तर्कावर आधारलेल्या असतात. हे तर्क आइनस्टाइन च्या सापेक्षतावादाच्या सिद्धांतानुसार अंदाजित गुरुत्वाकर्षण लहरींवर उभारलेले असतात. खूपदा उपकरणातील अनावश्यक आवाज गुरुत्वीय लहरींसारखे भासतात. अश्या योगाला आम्ही 'false alarm rate' म्हणून प्रमाणित करतो. एप्रिल ८ ते एप्रिल १८ च्या डेटा मधून आम्हाला ३०,००० पैकी १ (अर्थात १/३०,०००) असा false alarm rate सापडला! हा rate जसजसा अधिक डेटा O3 फेरीतून पडताळला जाईल तसा अधिकाधिक ठळक होत जाईल. आम्ही भौतिक आणि यांत्रिक माध्यमांतून निर्माण होणारे इतरही अनावश्यक अडथळे पडताळले आणि त्यातून GW190412 च्या निरीक्षणात परिणाम करेल असे कोणतेही उपकरणीय घटक आमच्या निदर्शनात आले नाहीत.

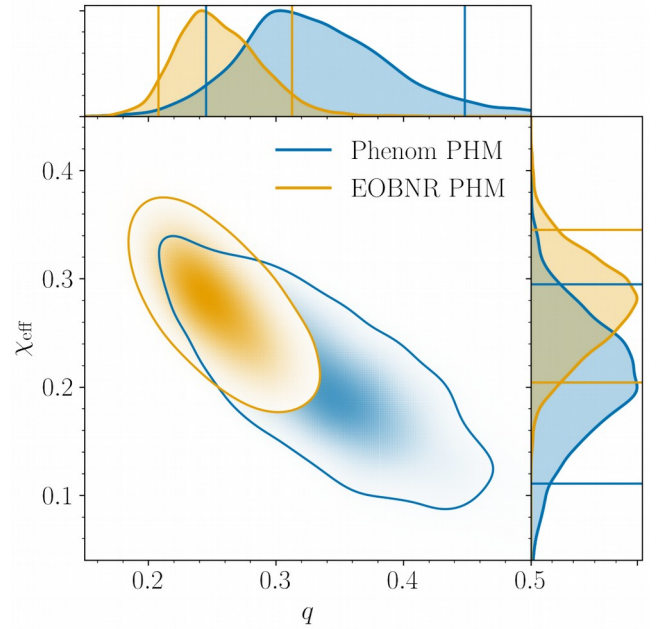
GW190412 चे गुणधर्म

ह्या गुरुत्वाकर्षण लहरींना उत्पन्न करणाऱ्या कृष्णविवरांचे वैयक्तिक वस्तुमान आत्तापर्यंतच्या आमच्या निरीक्षणांती सापडलेल्या कृष्णविवरांच्या वस्तुमानाशी सुसंगत आहे. ह्यापैकी एक कृष्णविवर सूर्याच्या वस्तुमानाचा ३० पट आहे तर दुसरे सूर्याच्या वस्तुमानाच्या ८ पट. किंबहुना, त्यांच्या वस्तुमानाचे गुणोत्तर (हलक्या कृष्णविवराचे वस्तुमान भागिले जड करणाविवराचे वस्तुमान) आत्तापर्यंतच्या सापडलेल्या कृष्णविवरांच्या जोड्यांच्या वस्तुमानाच्या गुणोत्तरापेक्षा अतिभीन्न आहे. ह्यापूर्वी पार पाडण्यात आलेल्या २ निरीक्षण फेऱ्यांमध्ये सापडलेल्या १० कृष्णविवरांच्या जोड्यांतील कृष्णविवरे समान वस्तुमानांची आढळली, परंतु GW190412 च्या बाबतीत मोठ्या कृष्णविवराचे वस्तुमान छोट्या कृष्णविवराच्या वस्तुमानापेक्षा ३ पट जास्त आहे.

GW190412 सारख्या असमान कृष्णविवरांमुळे असमान मिली (asymmetry) असणाऱ्या गुरुत्वाकर्षण लहरी निर्माण होतात, ज्यामुळे त्या लहरींशी संबंधित घटकांचे अधिक प्रभावी पद्धतीने अनुमान काढण्यास मदत होते. आम्हाला ह्या कृष्णविवरांचा प्रभावी परिभ्रमणाचा आकडा घन असल्याचे लक्षात आले, ज्यामुळे आपण सांगू शकतो कि ह्या दोन कृष्णविवरांपैकी किमान एका तरी कृष्णविवराच्या परिभ्रमणाचा कल त्यांच्या एकत्रित कक्षेच्या कलाच्या जवळ होता.

विशेष उल्लेखनीय बाब म्हणजे, ह्या कृष्णविवरांच्या असमान वस्तुमानांमुळे आम्ही पहिल्यांदाच आमच्या अभ्यासात अश्या मोठ्या कृष्णविवराच्या परिभ्रमणाचे अधिक यशस्वीपणे मोजमाप करू शकलो.

सामान्य सापेक्षतावादाच्या सिद्धांतानुसार आखून दिलेल्या परिभ्रमणाच्या महत्तम मर्यादेच्या ४०% परिभ्रमणाने फिरणारे हे कृष्णविवर असल्याचे आमच्या अभ्यासात लक्षात आले. प्रभावी परिभ्रमण आणि वस्तुमानाच्या गुणोत्तराचा सारासार पत्ता पटल क्रमांक २ मध्ये दर्शवण्यात आलेला आहे. आपण एकंदर कक्षेचा बदलणारा कलही येथे पाहू शकतो पण त्याच्या परिणामांबद्दल काहीही ठामपणे सांगणे तूर्तास शक्य नाही. तसेच असमान वस्तुमानांमुळे अंतर आणि कल यांच्यातील निरीक्षणे अधिक प्रभावी



पटल क्रमांक २ : कृष्णविवरांच्या जोडीचे सूचित केले वस्तुमानाचे गुणोत्तर (q) आणि एकंदरीत प्रभावित परिभ्रमणाचे मापन (χ_{eff}) येथे दर्शविले आहे. नारंगी आणि निळी रूपरेषा २ भिन्न सैद्धांतिक लहरींच्या घडणीतून मापन करण्यात आलेल्या घटकांचे वाटप दर्शवितात.

पद्धतीने नोंद करता आली, जेणेकरून अंतर आणि कल यांच्यातील अस्पष्टता दूर होण्यासही मदत झाली. GW190412 लहरी पृथ्वीपासून अंदाजे २.५ अब्ज प्रकाशवर्षे दूर उदयास आल्या हे आपणास कळले.

Higher harmonics (उच्च ताल) चा ध्वनी

GW190412 च्या अनन्यसाधारण गुणांमुळे आपणांस गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या मूलभूत गुणांचा अभ्यास करण्याचीही संधी मिळाली. आइनस्टाइनच्या आमूलाग्र अभ्यासात नंतर पुढे त्यात न्यूमन, पेनरोस, थॉर्न, इत्यादी अनेकांच्या अपूर्व हातभाराची भर पडल्यावर गुरुत्वाकर्षण लहरी स्वभावतः चतुष्पादी (साधारण भाषेत सांगायचे झाले तर चार ध्रुव असणाऱ्या) असल्याचे सिद्ध झाले. हे चतुष्पादी उत्सर्जन एखाद्या सतारीची अथवा गिटारची एक तार ताणल्यावर निर्माण होणाऱ्या सूरामार्फत समजले जाऊ शकते. वाद्यांप्रमाणेच गुरुत्वाकर्षण लहरी देखील उच्च ध्वन्यर्थ (साधारण भाषेत ध्वनी कंपने) उत्सर्जित करत असल्याची संभावना आहे. अश्या उच्च कंपनांना समान वस्तुमानाच्या कृष्णविवरांमुळे निर्माण होणाऱ्या लहरींमध्ये विलग करणे विशिष्टपणे कठीण असते. GW190412 च्या असमान वस्तुमानाच्या कृष्णविवरांमुळे अश्या प्रकारची उच्च कंपने आपणाला अधिक प्रभावीपणे "ऐकता" आली. हा डेटा उच्चतम कंपनांच्या अस्तित्वाचे १०००:१ पेक्षा जास्त गुणोत्तराने प्रमाण देत आहे हे आम्हाला आमच्या अभ्यासात लक्षात आले. भविष्यात अश्या उच्च कंपनांची सापेक्ष तीव्रता आपणाला एकमेकांत सामावून जाणाऱ्या कृषिविवरांबद्दल अधिक उपयुक्त माहिती देऊ शकते. साधारण सापेक्षतावादाच्या अनेक चाचण्या देखील GW190412 च्या माध्यमातून यशस्वीपणे करण्यात आल्या. आम्हाला ह्या सिद्धांतात आणि गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या डेटा मध्ये तीळमात्रही विसंगती आढळली नाही, ज्यामुळे आइनस्टाइन च्या गुरुत्वाकर्षणाच्या सिद्धांताला अधिकच दुजोरा मिळाला.

असमान वस्तुमान असलेल्या कृष्णविवरांच्या जोडीची निर्मिती

अतिशय घन पण आकाराने लहान अश्या 'compact' आणि नवनवीन जोड्यांचा अभ्यास करण्यात प्रगत LIGO आणि VIRGO च्या प्रत्येक निरीक्षण फेऱ्यांतील नवनवीन शोधांमुळे आपणांस यश मिळाले आहे. GW190412 मुळे कृष्णविवरांच्या जोड्यांच्या गुणधर्मांच्या अभ्यासात आपल्याला निश्चितपणे एक अतिशय महत्वाचा मापदंड गवसला. ह्या निरीक्षणामुळे आपणांस उमगले की असमान वस्तुमानाच्या अश्या कृष्णविवरांच्या जोड्या ह्या विश्वात त्या मानाने सर्वसामान्य आहेत आणि भविष्यात अश्या अनेक जोड्या गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या माध्यमातून आपल्या भेटीस येतील.

ताऱ्यांच्या उत्पत्तीच्या सविस्तर भौतिकी अभ्यासातून खगोलशास्त्रज्ञांनी विश्वात कृष्णविवरांची निर्मिती कशी होते ह्याबद्दल सखोल, साचेबद्ध व सैद्धांतिक नमुने तयार केले आहेत. बहुसंख्य सिद्धांत समान वस्तुमान असणाऱ्या कृष्णविवरांच्या विश्वातील सामान्य अस्तित्वाला दुजोरा देतात, तसेच बरेचसे सिद्धांत GW190412 सारख्या असमान वस्तुमान असणाऱ्या कृष्णविवरांच्या सदृश्य अस्तित्वाचे भाकीत करतात. अश्या असमान वस्तुमानाच्या कृष्णविवरांच्या जोड्यांच्या निर्मितीचे प्रमाण समान वस्तुमानाच्या कृष्णविवरांच्या जोड्यांपेक्षा किमान १० पट कमी असल्याचे समजले जाते. किंबहुना, १० हून अधिक कृष्णविवरांच्या जोड्यांच्या शोधानंतर GW190425 सारख्या असमान तसेच अत्यंत जास्त तफावत असणाऱ्या वस्तुमानाच्या कृष्णविवरांचे शोध समूळपणे अनपेक्षित समजले जाऊ शकत नाहीत.

गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या विश्वात जसजसे आपण अधिकाधिक संवेदनशील होत जाऊ आणि अधिकाधिक 'compact' जोड्यांच्या शोधांची नोंद करत जाऊ, तसतसे आपणाला जास्तीत जास्त अश्या शोधांची साथ लाभेल ज्यामधून आपण ताऱ्यांच्या उत्पत्तीचे, अतिघन 'compact' जोड्यांच्या एकीकरणाचे तसेच मूलभूत भौतिकशास्त्राचे अधिकाधिक धडे गिरवण्याची संधी लाभेल.

शब्दकोश

कृष्णविवर: एक अत्यंत घन वस्तू ज्याच्या गुरुत्वाकर्षण शक्तीमुळे प्रकाश सुद्धा निसटून जाऊ शकत नाही.

'compact' जोडी: २ ताऱ्यांचे अवशेष जे अतिघन वस्तुमान असणारे neutron तारे अथवा कृष्णविवरे आहेत.

प्रभावी परिभ्रमण: गुरुत्वाकर्षण लहरींच्या अभ्यासात परिक्रमेची माहिती देणारा सर्वात महत्वाचा घटक. मूलतः हे वस्तुमानावर आधारित मापन असते जे वैयक्तिक कृष्णविवराच्या परिभ्रमणाचे दोन्ही कृष्णविवरांच्या कक्षेच्या पटलावर असणाऱ्या प्रक्षेपणाची कल्पना देते.

साधारण सापेक्षतावाद: गुरुत्वाकर्षणाचा सिद्धांत जो अल्बर्ट आइन्स्टायन ने १९१५ साली मांडला. ह्या सिद्धांतानुसार विश्व एक प्रकारचे कापड आहे जे पदार्थ आणि ऊर्जा ह्यांच्या संपर्कात वाकवले जाते आणि कोणत्याही वस्तू अश्या वाकलेल्या मार्गावर आपली चलनाची दिशा अनुसरतात.

'higher harmonics': गुरुत्वाकर्षण लहरींचे उत्सर्जन गोलाकार स्पंदनांतून रेखाटले जाऊ शकते.

higher harmonics ह्याच स्पंदनांच्या समीकरणातील उच्च संज्ञांतून दर्शविल्या जातात.

कल: एकमेकांभोवती फिरणाऱ्या कृष्णविवरांचा एकंदरीत पृथ्वीच्या तुलनेत कलंडलेला कोन.

matched filtering: विविध अनुरूप तर्कावर केलेली डेटाची गाळणी. हे तर्क आइनस्टाइन च्या सापेक्षतावादाच्या सिद्धांतानुसार अंदाजित गुरुत्वाकर्षण लहरींवर उभारलेले असतात. डेटा मधील अनावश्यक अडथळ्यातून वास्तविक गुरुत्वाकर्षण लहरी शोधणे.