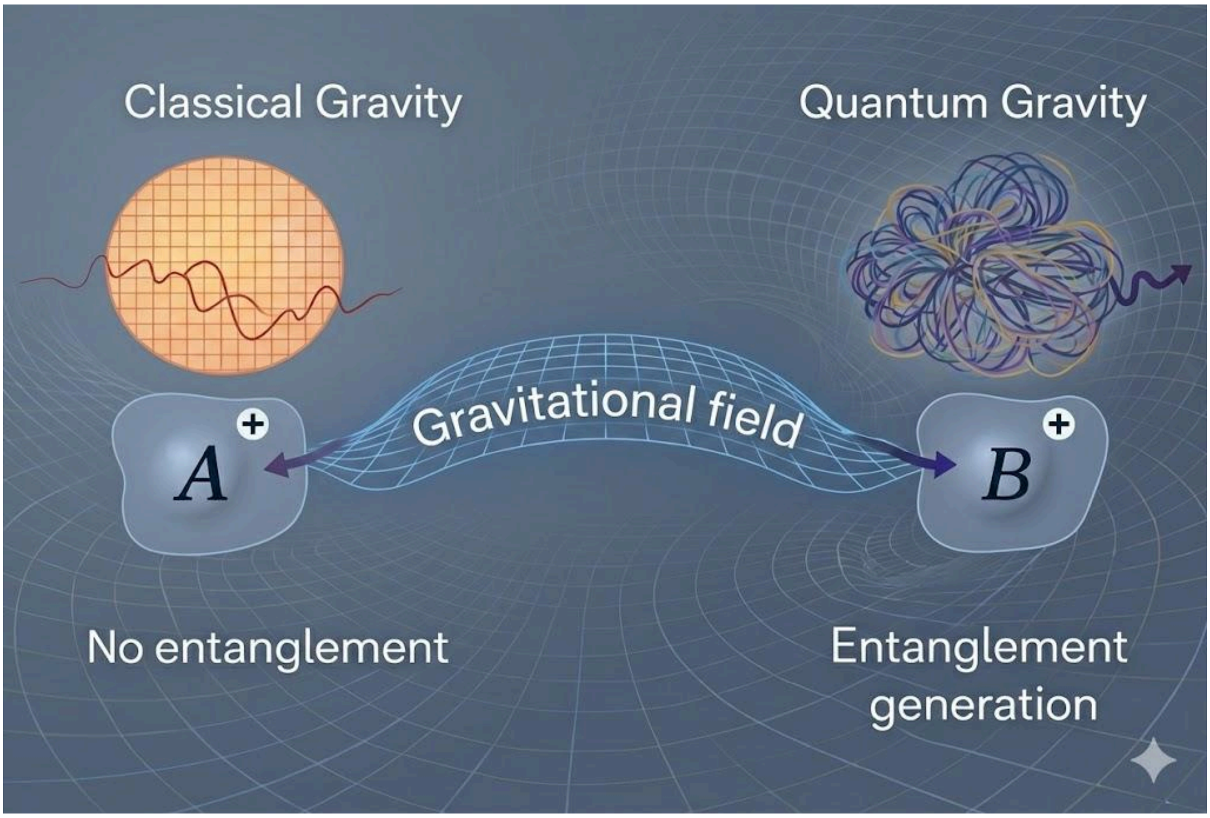
गुरुत्वाकर्षणाचे 'क्वांटम' स्वरूप तपासण्यासाठी आयआयटी मुंबईच्या संशोधकांची नवी चाचणी

संशोधक सांगतात की गुरुत्वाकर्षणाची हालचाल गोठलेली वाटून त्याचे 'क्वांटम' स्वरूप लपू शकते आणि ते तपासण्यासाठी पारंपरिक एन्टँगलमेंट चाचणी अपुरी पडते. या लपलेल्या खुणा शोधण्यासाठी एका नव्या मापनपद्धतीचा संशोधकांनी प्रस्ताव मांडला.



प्रयोगाचे योजनाचित्र. श्रेय : प्रा. एस. शंकरनारायणन आणि नॅनोबनाना.

गुरुत्वाकर्षण हे पुंजयामिकीच्या म्हणजेच क्वांटम मेकॅनिक्सच्या नियमांनुसार चालते हे सिद्ध करणाऱ्या प्रयत्नांमधील एका संभाव्य कमतरतेवर भारतीय तंत्रज्ञान संस्था, मुंबई (आयआयटी मुंबई) येथील संशोधकांनी प्रकाश टाकला आहे. दीर्घकाळ वापरात असलेल्या (क्वांटम) एन्टँगलमेंट चाचणीमध्ये गुरुत्वाकर्षण उत्तीर्ण होत नसले तरीही गुरुत्वाकर्षणाचे मूलभूत गुणधर्म क्वांटम म्हणजे पुंज स्वरूपाचे असू शकतात हे सिद्ध करणारा एक नवा अभ्यास आयआयटी मुंबई येथील पी. जॉर्ज क्रिस्टोफर आणि प्राध्यापक एस. शंकरनारायणन यांनी केला. या संशोधकांनी 'डायनॅमिकल फिडेलिटी ससेप्टिबिलिटी' (डीएफएस) नावाचे एक नवे निदानात्मक साधन प्रस्तावित केले आहे. विश्वातील सर्वात गूढ शक्तीच्या खऱ्या स्वरूपाचा अधिक संवेदनशीलपणे शोध घेणारा प्रोब म्हणून हे साधन कार्य करते.

शंभराहून अधिक वर्षांपासून सैद्धांतिक भौतिकशास्त्रामध्ये दोन गट पडले आहेत. विश्वाचे कार्य कसे चालते यावरील दोन अत्यंत यशस्वी सिद्धांत विकसित झाले आहेत. एका बाजूला पारंपरिक (क्लासिकल) भौतिकशास्त्र आणि सामान्य सापेक्षता आहे. म्हणजेच अल्बर्ट आइनस्टाइन यांचा मूलगामी सिद्धांत जो ग्रह, तारे आणि आकाशगंगा यांसारख्या विशाल गोष्टींचे स्पष्टीकरण देतो. या सिद्धांतानुसार गुरुत्वाकर्षण ही स्वतंत्र शक्ती नसून काल-अवकाश (स्पेस-टाइम) नावाच्या अखंड आणि लवचिक कापडातील वक्रता (कर्व्हेचर) आहे. तर दुसऱ्या बाजूला, क्वांटम फिजिक्स म्हणजे पुंजभौतिकी आहे, जे आण्विक व अवआण्विक (अटॉमिक व सबअटॉमिक) स्तरावरील नियम स्पष्ट करते. या क्षेत्रामध्ये कण तरंगांसारखे

वर्तन करू शकतात आणि एकाच वेळी अनेक ठिकाणी किंवा विविध 'क्वांटम स्थितींमध्ये' अस्तित्वात असू शकतात. आपापल्या क्षेत्रांत अत्यंत यशस्वी असूनही, जेथे दोन्ही क्षेत्रे एकत्र येतात तेथे हे दोन्ही सिद्धांत अपयशी ठरतात—उदाहरणार्थ, कृष्णविवराच्या आत.

भौतिक शास्त्रज्ञांच्या असे लक्षात आले की वरील दोन सिद्धांतांना एकत्र आणण्याचा एक मार्ग म्हणजे गुरुत्वाकर्षण हे निसर्गातील इतर मूलभूत शक्तींप्रमाणेच क्वान्टम स्वरूपाचे आहे असे सिद्ध करणे. याचा अर्थ असा होईल की गुरुत्वाकर्षण हे काल-अवकाशातील वक्रता नसून ग्रॅव्हीटॉन नावाच्या कणांनी संचालित केलेली शक्ती आहे. प्रकाशाचे कण (फोटॉन) जसे विद्‌युत्‌चुंबकीय क्षेत्र निर्माण करतात त्याच्याशी हे साधर्म्य सांगणारे आहे. गुरुत्वाकर्षण क्वांटम नियमांचे पालन करते हे जर दाखवता आले, तर अखेर आपल्याला "संपूर्ण विश्वाचा सिद्धांत" (थियरी ऑफ एव्हरीथिंग) मिळेल. म्हणजे समीकरणांचा एकच असा संच जो लहानातील लहान वस्तूमानापासून मोठ्यात मोठी वस्तूमाने कशी हालचाल करतात हे स्पष्ट करेल. म्हणजे अगदी अणू, क्रिकेटचा चेंडू यांपासून ते तारे आणि आकाशगंगा यांपर्यंत सर्व काही.

गुरुत्वाकर्षणाचे क्वांटम स्वरूप तपासण्यासाठी २०१७ मध्ये बोस-मार्लेटो-वेड्राल (बीएमव्ही) प्रयोग प्रस्तावित करण्यात आला. हा प्रयोग 'एन्टँगलमेंट' (गुंतागुंत) म्हणून ओळखल्या जाणाऱ्या एका क्वांटम गुणधर्मावर आधारित होता. क्वांटम गुंतागुंत किंवा क्वांटम एन्टँगलमेंट ही अशी घटना आहे ज्यात फोटॉन आणि इलेक्ट्रॉन यांसारख्या कणांच्या जोडीमध्ये इतके खोल बंध निर्माण होतात की त्यांच्या गुणधर्मांमध्ये परस्परावलंबित्व तयार होते आणि त्यांचे एकाच क्वांटम स्थितीमध्ये असलेले एक सामायिक एकक म्हणून वर्णन करता येते. याचा अर्थ असा की एका कणाचे गुणधर्म मोजल्यावर, त्याच्या गुंतलेल्या जोडीदाराचे गुणधर्म तत्क्षणी निश्चित होतात—त्यांच्यात कितीही अंतर असले तरीही. बीएमव्ही प्रयोगाने एक सोपी चाचणी सुचवली : जर सुरुवातीला वेगवेगळ्या अवस्थांमध्ये स्पेशियल सुपरपोझिशन मध्ये असलेली दोन वस्तुमाने एकमेकांशी गुंतली आणि त्यांचा परस्परसंवाद केवळ गुरुत्वाकर्षणाद्वारे होत असेल, तर गुरुत्वाकर्षण क्वांटम म्हणजेच पुंज स्वरूपाचे असले पाहिजे.

याबाबत श्री. जॉर्ज क्रिस्टोफर म्हणाले, *"बीएमव्ही प्रस्ताव अभिनव होता कारण फेनमन आणि डीविट यांच्या कामानंतर पहिल्यांदाच गुरुत्वाकर्षणाच्या पैलूंचा सखोल अभ्यास करण्यासाठी प्रयोगशाळेत शक्य असलेली पद्धत समोर ठेवली गेली. बहुतांशी इतर क्वांटम गुरुत्वाकर्षण चाचण्यांसाठी प्लँकियन एनर्जी स्केलची (ऊर्जा स्तर सुमारे १.९६×१०^{९} ज्यूल्स) गरज पडते. आणि ती आपल्या सध्याच्या प्रायोगिक आवाक्याच्या बाहेरची आहे. त्यामुळे ही पद्धत इतरांपेक्षा वेगळी होती."*

बीएमव्ही प्रयोगांमधून काढता येणारा एक निष्कर्ष असा आहे की जर आपल्याला वस्तुमानांमध्ये गुंतागुंत दिसून आली नाही तर गुरुत्वाकर्षण क्वांटम स्वरूपाचे नसावे. मात्र आयआयटी मुंबई येथील संशोधक त्यांच्या नव्या अभ्यासाद्वारे म्हणतात की अशा निष्कर्षामध्ये त्रुटी असू शकतात आणि त्यामध्ये ग्रॅव्हिटॉनच्या गुणधर्मांतील सूक्ष्म पैलू दुर्लक्षित राहू शकतात. त्यांच्या अभ्यासानुसार गुरुत्वाकर्षणासारखा एखादा क्वांटम मध्यस्थ मंद व जणू स्थिर झाल्यासारखा होऊ शकतो; त्यामुळे दिसायला पारंपरिक (क्लासिकल) वाटला, तरीही त्याच्या मूळ स्वरूपात तो क्वांटम स्वरूपाचाच राहतो.

संशोधकांनी हा निष्कर्ष काढण्यासाठी तीन हार्मोनिक ऑसिलेटर म्हणजे लयबद्ध दोलक समाविष्ट असलेला एक गणितीय नमुना (मॉडेल) तयार केला. अशी कल्पना करा की अ, ब आणि क हे तीन चेंडू एका सरळ रेषेत स्प्रिंगने जोडलेले आहेत. दोन टोकांवरील चेंडू (अ आणि क) हे वस्तुमान आहेत. ते एकमेकांना थेट स्पर्श करत नाहीत. ते मधल्या चेंडूच्या म्हणजेच 'ब'च्या माध्यमातूनच परस्परांशी संवाद साधतात. हा मधला चेंडू मध्यस्थ (मिडिएटर) म्हणून काम करतो. हा मधला चेंडू गुरुत्वीय क्षेत्राचे प्रतिनिधित्व करतो.

या मध्यस्थाच्या गुणधर्मांमध्ये बदल करून संशोधकांना दोन वेगवेगळ्या परिस्थिती दिसून आल्या. लाइट मीडिएटर रेजीम (एलएमआर) मध्ये मध्यस्थ मोकळेपणाने हालचाल करतो आणि दोन टोकांवरील दोन चेंडूंमध्ये सहजपणे गुंतागुंत निर्माण करतो. मात्र हेव्ही मीडिएटर रेजीम (एचएमआर) मध्ये मध्यस्थ इतका मंद होतो की त्याची हालचाल जणू गोठल्यासारखी होते आणि तो एका स्थिर पार्श्वभूमीसारखे वर्तन करतो.

"आमच्या मॉडेलमध्ये मध्यस्थ हा मूलतः क्वांटम-मेकॅनिकल ऑसिलेटरच आहे. म्हणजे त्याच्यात हिल्बर्ट अवकाश, शून्य-बिंदू दोलने (अत्यंत सूक्ष्म दोलने; झिरो-पॉईंट फ्लक्चुएशन) आणि सुस्पष्ट क्वांटम स्थिती यांसारखे क्वांटम गुणधर्म आहेत. परंतु, हेव्ही मीडिएटर रेजीम मध्ये, मध्यस्थामध्ये प्रबळ स्व-संवाद व मोठे परिणामकारी वस्तुमान दिसून येते. त्यामुळे त्याची हालचाल अतिशय कठीण झाल्यासारखी दिसते," प्रा. शंकरनारायणन यांनी स्पष्ट केले.

याचा अर्थ असा लागतो की जर ग्रॅव्हिटॉन हे जड मध्यस्थ म्हणजेच हेव्ही मीडिएटर असतील, तर गुरुत्वाकर्षण मूलतः क्वांटम स्वरूपाचे असूनही आपल्याला वस्तुमानांमधील गुंतागुंत (एन्टँगलमेंट) दिसून येईलच असे नाही. त्यामुळे बीएमव्ही प्रयोग, आणि त्यातूनच क्वांटम गुंतागुंत तपासण्याची ही पद्धत, गुरुत्वाकर्षणाच्या क्वांटम स्वरूपाचा शोध घेण्यासाठी तुलनेने कमी प्रभावी ठरू शकते.

यासाठी उपाय म्हणून संशोधकांनी ग्रॅव्हिटॉनचा अधिक संवेदनशीलपणे शोध घेणारी 'डायनॅमिकल फिडेलिटी ससेप्टिबिलिटी' नावाची पद्धत सुचवली आहे. ही संकल्पना पारंपरिक ऊष्मागतिकीतील 'थर्मोडायनॅमिक ससेप्टिबिलिटी' या संकल्पनेसारखी आहे. या संकल्पनेद्वारे तापमान किंवा दाब यांसारख्या बाह्य घटकांमध्ये बदल झाल्यास एखादी प्रणाली त्याला किती संवेदनशीलपणे प्रतिसाद देते हे मोजले जाते.

केवळ वस्तुमानांमधील गुंतागुंत तपासण्याऐवजी, डायनॅमिकल फिडेलिटी ससेप्टिबिलिटी ही पद्धत, अतिशय सूक्ष्म-सूक्ष्म व्यत्ययांना प्रतिसाद म्हणून प्रणालीची क्वांटम स्थिती काळानुसार कशी बदलत जाते हे मोजते. या संशोधनातून असे दिसून आले की गुरुत्वाकर्षण जणू गोठल्यासारखे स्तब्ध झालेले असताना आणि गुंतागुंत जवळजवळ नगण्य असतानाही, ही नवी मापनपद्धती त्याच्या क्वांटम स्वरूपाच्या खुणा ओळखू शकते. ही नवी पद्धत संशोधकांना गुरुत्वाकर्षणाचे स्वरूप खरोखरच क्वांटम आहे का हे तपासण्याचा एक नवा मार्गही उपलब्ध करून देते.

"तत्त्वतः, प्रथम वस्तुमानांची एक प्रारंभिक क्वांटम स्थिती तयार करून, त्यानंतर त्यांना गुरुत्वाकर्षणामार्फत परस्परसंवादाखाली विकसित होऊ दिले जाऊ शकते. त्यानंतर, विकसित झालेली स्थिती आणि मूळ स्थिती यांच्यात किती समानता आहे (ओव्हरलॅप) हे मोजून 'फिडेलिटी'चा अंदाज लावता येईल," प्रा. शंकरनारायणन यांनी स्पष्ट केले.

गुरुत्वाकर्षणाचे क्वांटम स्वरूप शोधणाऱ्या भविष्यातील प्रयोगांसाठी सदर अभ्यास एक मार्गदर्शक आराखडा समोर ठेवतो. वस्तुमानांमध्ये गुंतागुंत आढळली नाही म्हणून आपण गुरुत्वाकर्षणाच्या क्वांटम स्वरूपाची कल्पना सोडून देऊ नये या विचाराला यातून पुष्टी मिळते. किंबहुना, गुरुत्वाकर्षण नेमक्या कोणत्या वस्तुमान-श्रेणीमध्ये बसते याचे अधिक अचूक भाकीत करण्यासाठीही 'डीएफएस' पद्धती एक सक्षम साधन ठरते.

"तात्विक दृष्ट्या, लाइट मीडिएटर रेजीम आणि हेव्ही मीडिएटर रेजीम या दोन्ही क्वांटम म्हणजे पुंज सहसंबंधांमध्ये मध्यस्थ ठरू शकतात. केवळ गुंतागुंत दिसून येते अथवा नाही याचे निरीक्षण केल्याने मध्यस्थ नेमक्या कोणत्या गतिशील स्थितीत कार्यरत आहे हे कळत नाही. परंतु, डीएफएस ही पद्धत मध्यस्थाच्या गतिशील गुणधर्मांबाबत संवेदनशील आहे आणि लाइट व हेव्ही मीडिएटर रेजीम मध्ये ती

गुणात्मकदृष्ट्या वेगळे वर्तन दाखवते. त्यामुळे गुंतागुंत अगदी कमी असली तरीही या दोन स्थितींमधील फरक ओळखणे शक्य होते," श्री. जॉर्ज क्रिस्टोफर म्हणाले.

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Beyond entanglement: Diagnosing quantum mediator dynamics in gravitationally mediated experiments
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1103/njws-rs11
List of all researchers with affiliations	P. George Christopher and S. Shankaranarayanan, Department of Physics, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400076, India
Email of researcher/s	p.georgechristopher@iitb.ac.in; shanki@iitb.ac.in
Writer name	Dennis Joy
Transcreator name	Shweta Bhide
Credits to Graphic:	Pictorial representation of the experiment. Credit: Prof S Shankaranarayanan and NanoBanana
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society
Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive/Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	#gravity, #quantumness
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	@iitbombay, @IndiaDST
Social Media handles of writer	

Social Media handles of researchers	https://www.linkedin.com/in/subramaniam-shankaranarayanan-39b63b21 https://www.researchgate.net/profile/S-Shankaranarayanan https://www.linkedin.com/in/george-christopher-panneer-selvam-95ab5a118/
Funding information (Source: Research paper)	The work is supported by SERB-CRG/2022/002348. The MHRD fellowship at IIT Bombay financially supports P. George Christopher.
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	None
Co-PI information (Source: Research paper)	None
Location:	Mumbai