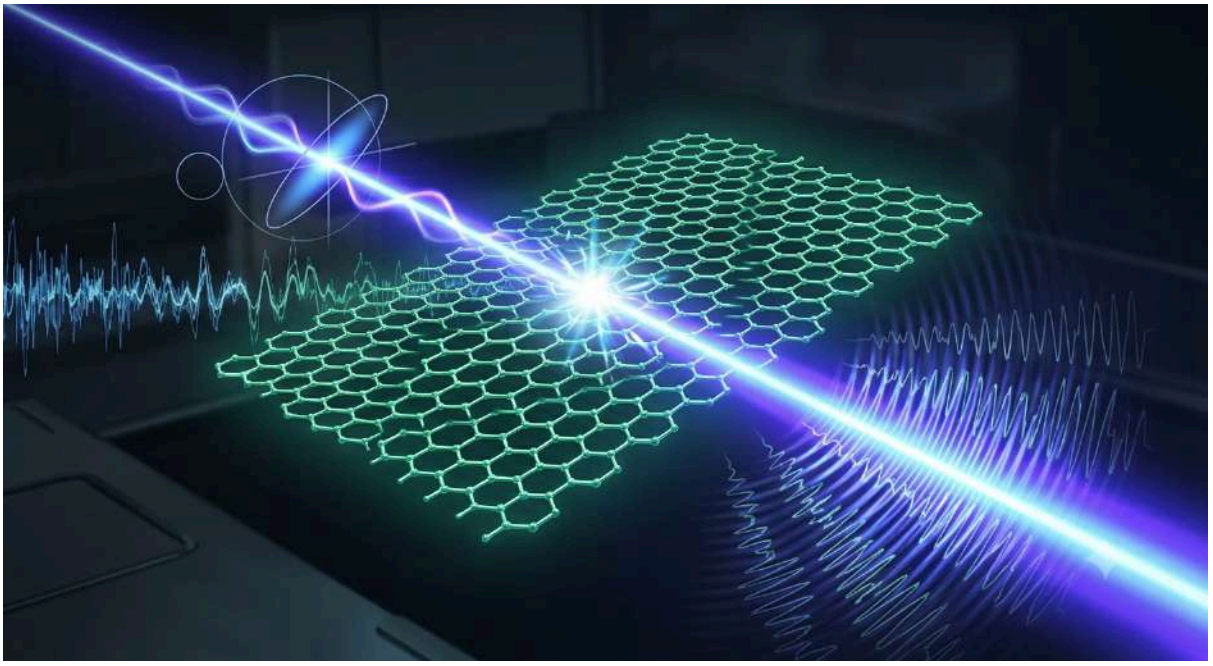
अचूक क्वांटम संवेदनासाठी क्वांटम अनिश्चिततेची मदत

ग्राफीन या पदार्थासोबत विशिष्ट रचना केलेल्या प्रकाशाची आंतरक्रिया (इंटरॅक्शन) घडवून आणल्यास, सहजासहजी दिसून न येणाऱ्या सूक्ष्म क्वांटम घटनांचे मापन कसे करता येते हे आयआयटी मुंबईच्या संशोधकांनी दाखवून दिले आहे.



प्रतिमा श्रेय: गूगल जेमिनी

अस्थिरता, विचलन, चढ-उतार हे व्होल्टेजमधील, प्रकाशातील अथवा तापमानातील असोत– कोणत्याही प्रकारचे चढ-उतार त्रासदायक असतात. विचलनामुळे गैरसोय तर होतेच, शिवाय अभियांत्रिकी आणि वैद्यकीय क्षेत्रातील अनुप्रयोगांमध्ये, त्यामुळे मोजमापे चुकू शकतात किंवा नियंत्रण यंत्रणेत त्रुटी निर्माण होतात. अगदी पुंज भौतिकशास्त्रतील (क्वांटम फिजिक्स) सूक्ष्म पातळीवरील घटनांमध्येही, चढ-उतार (विचलन) उपद्रवी ठरतात. पण काही चढ-उतारांचा उपयोग करून घेता आला तर? भारतीय तंत्रज्ञान संस्था मुंबई (आयआयटी मुंबई) येथील एका सैद्धांतिक अभ्यासातून असे दिसून आले आहे की प्रकाशातील विशिष्ट रचना असलेल्या क्वांटम चढ-उतारांचा उपयोग पुंज प्रकाशीय संकेत (क्वांटम ऑप्टिकल सिग्नल्स) ओळखण्यासाठी व निर्माण करण्यासाठी केला जाऊ शकतो.

आयआयटी मुंबईच्या भौतिकशास्त्र विभागातील श्री. कार्तिक प्रभु आणि प्रा. गोपाल दीक्षित यांनी 'ग्राफीन' या क्वांटम पदार्थाचा संवेदक म्हणून वापर करून प्रकाशातील क्वांटम विचलनाचे संवेदन करण्यासाठी एक नवीन मार्ग सुचवला आहे. अमेरिकन फिजिकल सोसायटीच्या '*फिजिकल रिव्ह्यू बी लेटर*' या नियतकालिकात प्रसिद्ध झालेल्या त्यांच्या अभ्यासातून असे दिसून आले आहे की, विशेषरीत्या तयार केलेला क्वांटम प्रकाश ग्राफीनवर टाकल्यास, त्याची ग्राफीनसोबत होणारी आंतरक्रिया आपाती

प्रकाशाच्या (इन्सिडेंट लाईट) क्वांटम स्वरूपाबद्दलची माहिती उघड करू शकते. या अभ्यासातून हेही स्पष्ट होते की आपाती प्रकाशातील क्वांटम चढ-उतारांमध्ये योग्य ते बदल करून आपण गरजेनुसार उच्च-वारंवारतेचे (हाय-फ्रिक्वेन्सी) उत्सर्जन निर्माण करू शकतो.

"आमच्या अभ्यासात क्वांटम प्रकाश, क्वांटम पदार्थ आणि अति-नील (एक्सट्रीम अल्ट्राव्हायोलेट) वारंवारता श्रेणीतील उच्च-संवादी तरंग निर्मिती (हाय हार्मोनिक जनरेशन) यांना प्रथमच एकत्र आणले गेले आहे," असे प्रा. गोपाल दीक्षित सांगतात.

'उच्च-संवादी तरंग निर्मिती' हे उदयोन्मुख तंत्रज्ञान इलेक्ट्रॉनच्या हालचालींचे चित्रीकरण करण्यासाठी उपयुक्त आहे. ह्या तंत्रज्ञानामुळे गुंतागुंतीच्या रासायनिक प्रक्रियांचे थेट निरीक्षण करणे सुद्धा शक्य होऊ शकते. लेसरचे अत्यंत तीव्र स्पंद (पल्स) निष्क्रिय वायू किंवा विशिष्ट घन पदार्थांवर प्रकाशित केल्यावर ॲटोसेकंद (म्हणजेच सेकंदाचा अब्जावधीचा अब्जावा भाग) या अतिसूक्ष्म कालावधीच्या प्रकाश स्पंद उत्सर्जित होतो ज्याची वारंवारता मूळ लेसरच्या वारंवारतेच्या पटीत (संवादी वारंवारिता किंवा हार्मोनिक) असते. उच्च-संवादी निर्मितीच्या याच पद्धतीसाठी २०२३ चा भौतिकशास्त्रातील नोबेल पुरस्कार प्रदान करण्यात आला होता.

प्रकाशातील क्वांटम विचलन

अभिजात भौतिकशास्त्रात (क्लासिकल फिजिक्स) प्रकाशाला एक लहर (वेव्ह) मानले जाते आणि तिचे वर्णन तिची तीव्रता (ॲम्प्लीट्यूड) आणि प्रावस्था (लाटेच्या शिखरांची सुरुवातीची स्थिती/ फेज) या दोन घटकांद्वारे केले जाते. परंतु काळ, अवकाश आणि तीव्रतेच्या सूक्ष्म पातळीवर पुंज भौतिकशास्त्राचे विश्व सुरू होते. इथे प्रकाशाचे वर्णन करताना तीव्रता आणि प्रावस्था यांसह ह्या दोन घटकांच्या मूल्यांमध्ये असलेल्या अनिश्चिततेचाही समावेष केला जातो.

संपूर्ण निर्वात पोकळीत किंवा दाट अंधारातसुद्धा, एखाद्या ठिकाणी असलेल्या ऊर्जेच्या प्रमाणात यादृच्छिक तात्पुरते बदल घडत असतात. हायझेनबर्गचा अनिश्चिततेचा सिद्धांत असे सांगतो की परस्परांशी गणितीय संबंध असलेल्या कोणत्याही दोन गोष्टींची अचूक माहिती एकाच वेळी मिळवणे शक्य नसते. उदाहरणार्थ, आपण एखाद्या कणाचे स्थान किंवा त्याचा संवेग (मोमेंटम) यांपैकी एकच गोष्ट अचूकपणे निश्चित करू शकतो; एकाच वेळी दोन्ही गोष्टी निश्चित सांगता येत नाहीत.

हीच अनिश्चितता प्रकाशामध्येही आढळते. या अनिश्चिततेमुळे निर्माण होणाऱ्या सूक्ष्म बदलांनाच 'क्वांटम विचलन' (क्वांटम फ्लक्चुएशन्स) असे म्हणतात. अणूंच्या कंपनांवरून वेळ मोजणारी 'अणू घड्याळे' (ॲटोमिक क्लॉक्स) असोत, किंवा 'लिगो' (लेसर इंटरफेरोमीटर ग्रॅव्हिटेशनल वेव्ह ऑब्झर्वेटरी;

LIGO) प्रयोगशाळेतील गुरुत्वीय लहरींची मोजमापे असोत, अशा अत्यंत संवेदनशील प्रयोगांच्या अचूकतेवर या अनिश्चिततेमुळे मर्यादा येतात.

लेसर प्रकाशात, त्यातील अनिश्चितता म्हणजेच क्वांटम विचलन हे त्याची तीव्रता आणि प्रावस्था या दोन्ही घटकांमध्ये समान प्रमाणात विभागलेले असतात. X-अक्षावर तीव्रता आणि Y-अक्षावर प्रावस्था दाखवणाऱ्या आलेखात एखाद्या वारंवारितेचा लेसर आपण एका बिंदूने दाखवू शकतो, पण दोन्ही घटकांमध्ये अनिश्चितता असल्याने व ती समान असल्याने त्या बिंदूच्या ऐवजी एक धूसर वर्तुळ आलेखावर दिसते.

विशिष्ट पदार्थांमधून लेसर प्रकाशाला जाऊ दिले तर आपण एका घटकातील अनिश्चितता कमी करू शकतो; पण त्यामुळे दुसऱ्या घटकातील अनिश्चितता वाढते. तीव्रता-प्रावस्था आलेखावर आधीचे ते गोल वर्तुळ एका बाजूने दबले जाते आणि दुसऱ्या बाजूने लांबट होते. अशा प्रकारे तयार होणाऱ्या प्रकाशाला 'चेपलेला प्रकाश' (स्क्वीझ्ड लाईट) असे म्हणतात.

क्वांटम विचलनाचे संवेदन (सेन्सिंग)

आयआयटी मुंबईच्या या अभ्यासात असा लेसर प्रकाश विचारात घेतला आहे ज्यात दोन घटक आहेत. एका घटकाची वारंवारता दुसऱ्याच्या दुप्पट आहे, ते वर्तुळाकार ध्रुवीकृत (सर्क्युलरली पोलराइज्ड) आहेत व त्यांचे ध्रुवीकरण परस्परांच्या उलट दिशांना फिरणारे आहे. हा प्रकाश ग्राफीनवर टाकला जातो तेव्हा ग्राफीनशी झालेल्या आंतरक्रियेमुळे आपाती प्रकाशापेक्षा कितीतरी पट जास्त वारंवारता असलेला उच्च-वारंवारतेचा प्रकाश तयार होतो (उच्च-संवादी तरंग निर्मिती). मूळ प्रकाशातील क्वांटम विचलन वाढवलेले नसतील तर उच्च-वारंवारतेच्या काही वारंवारता निर्माण होतात, परंतु काही विशिष्ट वारंवारता (विशेषतः मूळ वारंवारतेच्या ३ च्या पटीतील वारंवारता) निर्माण होत नाहीत, त्या वर्ज्य मानल्या जातात.

परंतु संशोधकांनी जेव्हा या प्रयोगात क्वांटम विचलन वाढवलेले असलेला प्रकाश ('चेपलेला प्रकाश') वापरला, तेव्हा एरवी वर्ज्य असणाऱ्या वारंवारता सुद्धा या विचलनामुळे सक्रिय होतात असे दिसून आले. हे क्वांटम विचलन उत्सर्जित प्रकाशाच्या ध्रुवीकरणावर परिणाम करते असे सैद्धांतिक विश्लेषणातून स्पष्ट झाले. संशोधकांनी आपाती प्रकाशाच्या विविध घटकांचे वेगवेगळे प्रकार आणि रचना तपासून पाहिल्या आणि उत्सर्जित प्रकाशाच्या वर्णपटाचे (स्पेक्ट्रम) विश्लेषण केले. याद्वारे असे समोर आले की प्रत्येक रचनेमुळे विशिष्ट गुणधर्म असणारा प्रकाश उत्सर्जित होतो; म्हणजेच, या उत्सर्जित प्रकाशाचा वापर आपाती प्रकाशाचे सूक्ष्म गुणधर्म ओळखण्यासाठी किंवा मोजण्यासाठी केला जाऊ शकतो.

उत्सर्जित प्रकाशावर मूलभूत गणितीय प्रक्रिया करून आपाती प्रकाशाच्या कोणत्या वारंवारता घटकामध्ये क्वांटम विचलन आहे हे समजू शकत होते, परंतु त्यावरून खुद्द क्वांटम घटकाबद्दल माहिती

मिळत नव्हती. या क्वांटम विचलनाची सखोल माहिती मिळवण्यासाठी संशोधकांनी उपलब्ध माहितीचे अधिक सखोल विश्लेषण केले. उत्सर्जित प्रकाशातील एरवी वर्ज्य असणारे वारंवारता घटक हे आपाती प्रकाशातील क्वांटम विचलनाची तीव्रता आणि ध्रुवीकरण यांबद्दलची स्पष्ट माहिती देतात हे त्यांनी दाखवून दिले. या माहितीमुळे आपाती प्रकाशातील क्वांटम विचलन शोधण्यासाठी प्रयोगाद्वारे निरीक्षण करता येणारा एक महत्त्वाचा घटक (पॅरामीटर) उपलब्ध होतो.

"या पद्धतीचे महत्त्वाचे वैशिष्ट्य म्हणजे तिचा अतिजलद (अल्ट्राफास्ट) वेग होय,"* प्रा. दीक्षित स्पष्ट करतात. *"उच्च-संवादी तरंग निर्मितीची प्रक्रिया ही प्रकाशाच्या एका चक्राच्या काही भागामध्येच (फ्रॅक्शन ऑफ ॲन ऑप्टिकल सायकल) घडते. यामुळे क्वांटम प्रकाश आणि पदार्थ यांच्यातील आंतरक्रिया अतिशय सूक्ष्म आणि अल्प कालावधीत अभ्यासणे शक्य होते."

हा अभ्यास सध्या ग्राफीन या पदार्थावर केंद्रित असला, तरी यामागील मूळ संकल्पना इतर अनेक क्वांटम पदार्थांसाठी आणि अरेषीय प्रकाशीय प्रणालींसाठी (नॉन-लीनियर ऑप्टिकल सिस्टम) उपयुक्त ठरू शकते. भविष्यात विविध इतर क्वांटम पदार्थांवर संशोधन करण्याचा प्रा. दीक्षित यांचा मानस आहे. तसेच, डेटासेट तयार करून मशीन लर्निंग मॉडेल विकसित करणे आणि या संकल्पनेचे सामान्यीकरण (जनरलायजेशन) करण्यासाठी कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) वापरणे हे देखील त्यांच्या आगामी योजनेचा भाग आहे.

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Sensing quantum fluctuations via forbidden harmonics in quantum materials
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1103/v886-ypf7
List of all researchers with affiliations	Kartik Prabhu Department of Physics, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400076 India Gopal Dixit Department of Physics, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400076 India Stanford PULSE Institute, 2575 Sand Hill Rd, SLAC National Accelerator Labororatory, Menlo Park, CA 94025 USA Max-Born Institute, Max-Born Straße 2A, 12489 Berlin, Germany
Email of researcher/s	gdixit@phy.iitb.ac.in

Writer name	Arati Halbe
Transcreator name	Arati Halbe
Credits to Graphic:	Created using Gemini Nano Banana Pro
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	#Quantum #QuantumFluctuations #graphene #HighHarmonicsGeneration #Attosecond #HHG
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	X: @iitbombay, @SLAClab LinkedIn: https://www.linkedin.com/company/iitbphysics https://www.linkedin.com/school/indian-institute-of-technology-bombay https://www.linkedin.com/company/max-born-institute-berlin/ https://www.linkedin.com/company/slac-national-accelerator-laboratory/
Social Media handles of writer	X : @Ar_SH LinkedIn : www.linkedin.com/in/aratihalbe
Social Media handles of researchers	LinkedIn : https://www.linkedin.com/in/gopal-dixit-727783a4/
Funding information (Source: Research paper)	None
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	None

Co-PI information (Source: Research paper)	None
Location:	Mumbai