

मानक मॉडल से परे भौतिकी

2012 तक, CERN में लार्ज हैड्रॉन कोलाइडर (LHC) में हिग्स बोसॉन के अस्तित्व की पुष्टि के साथ, मानक मॉडल (SM) सैद्धांतिक रूप से पूर्ण हो चुका था। प्रत्येक भविष्यवाणी किए गए कण की खोज हो चुकी थी। इसके समीकरणों ने हर प्रयोगात्मक परीक्षण को आश्वर्यजनक सटीकता के साथ पास किया था।

फिर भी, भौतिकी में माहौल समापन का नहीं, बल्कि अधूरापन का था। न्यूटन के नियमों से पहले आइंस्टीन या शास्त्रीय भौतिकी से पहले क्वांटम यांत्रिकी की तरह, मानक मॉडल उन पैमानों पर अत्यधिक सफल था जिनका हम परीक्षण कर सकते हैं, लेकिन यह गहरे सवालों का जवाब देने में असमर्थ था। यह एक लगभग निर्दोष नक्शा था - लेकिन केवल परिदृश्य के एक छोटे से हिस्से का।

गुरुत्वाकर्षण: अनुपस्थित बल

सबसे स्पष्ट चूक गुरुत्वाकर्षण है।

- मानक मॉडल चार ज्ञात मूलभूत बलों में से तीन का वर्णन करता है: विद्युत चुम्बकत्व, कमजोर बल, और मजबूत बल।
- गुरुत्वाकर्षण, जिसे आइंस्टीन की **सामान्य सापेक्षता (GR)** द्वारा वर्णित किया गया है, पूरी तरह से अनुपस्थित है।

यह केवल एक साधारण चूक से कहीं अधिक है। सामान्य सापेक्षता गुरुत्वाकर्षण को अंतरिक्ष-समय की वक्रता के रूप में देखती है, एक चिकना ज्यामितीय क्षेत्र, जबकि मानक मॉडल बलों को क्वांटम क्षेत्रों के रूप में देखता है जो कणों द्वारा मध्यस्थिता करते हैं। गुरुत्वाकर्षण को उसी तरह क्वांटम करने के प्रयास अनंतों में फंस जाते हैं जिन्हें सामान्यीकृत नहीं किया जा सकता।

मानक मॉडल और सामान्य सापेक्षता दो अलग-अलग ॲपरेटिंग सिस्टम की तरह हैं - अपने-अपने क्षेत्रों में शानदार, लेकिन मूल रूप से असंगत। इनका समन्वय शायद आज की भौतिकी की सबसे बड़ी चुनौती है।

न्यूट्रीनो का द्रव्यमान

मानक मॉडल भविष्यवाणी करता है कि न्यूट्रीनो का द्रव्यमान शून्य है। लेकिन जापान में सुपर-कामियोकांडे डिटेक्टर (1998) से शुरू हुए और विश्व भर में पुष्टि किए गए प्रयोगों ने दिखाया कि न्यूट्रीनो विभिन्न स्वादों (इलेक्ट्रॉन, म्यूऑन, टॉ) के बीच दोलन करते हैं। दोलन के लिए द्रव्यमान की आवश्यकता होती है।

यह मानक मॉडल से परे भौतिकी का पहला पुष्ट प्रमाण था। इस खोज ने 2015 का नोबेल पुरस्कार काजिता और मैकडोनाल्ड को दिलाया।

न्यूट्रीनो अविश्वसनीय रूप से हल्के हैं, इलेक्ट्रॉन से कम से कम एक मिलियन गुना हल्के। उनका द्रव्यमान मानक मॉडल द्वारा समझाया नहीं जाता - लेकिन यह नई भौतिकी की ओर इशारा कर सकता है, जैसे **सीसॉ मैकेनिज्म**, स्टेराइल न्यूट्रीनो, या प्रारंभिक ब्रह्मांड से संबंध। कुछ परिदृश्यों में, भारी सीसॉ न्यूट्रीनो **लेप्टोजेनेसिस** को संभव बनाते हैं, जहां प्रारंभिक ब्रह्मांड में लेप्टन असममिति उत्पन्न होती है और बाद में यह **पदार्थ-प्रतिपदार्थ असममिति** में परिवर्तित हो जाती है।

डार्क मैटर

मानक मॉडल द्वारा वर्णित दृश्य पदार्थ ब्रह्मांड का 5% से भी कम हिस्सा बनाता है। बाकी अदृश्य है।

- **डार्क मैटर (~27% ब्रह्मांड)** केवल अपने गुरुत्वाकर्षण के माध्यम से प्रकट होता है: आकाशगंगाएँ उस गति से घूमती हैं जो दृश्य पदार्थ की अनुमति से अधिक है, आकाशगंगा समूह प्रकाश को अधिक मोड़ते हैं, और कॉस्मिक माइक्रोवेव

बैकग्राउंड को अतिरिक्त अदृश्य द्रव्यमान की आवश्यकता होती है।

- मानक मॉडल के कोई भी कण इसे समझा नहीं सकते। न्यूट्रीनो बहुत हल्के और तेज हैं। सामान्य पदार्थ बहुत कम है।

सिद्धांत नए कणों का प्रस्ताव करते हैं: WIMPs (कमजोर रूप से इंटरैक्टिंग बड़े कण), एक्सियन्स, स्टेराइल न्यूट्रीनो, या कुछ और विचित्र। लेकिन दशकों की खोज के बावजूद - भूमिगत डिटेक्टर, कोलाइडर प्रयोग, खगोलीय सर्वेक्षण - डार्क मैटर अभी भी मायावी है।

डार्क एनर्जी

इससे भी अधिक रहस्यमय डार्क एनर्जी है, जो ब्रह्मांड के त्वरित विस्तार को संचालित करती है।

- 1998 में सुपरनोवा अवलोकनों के माध्यम से खोजी गई, डार्क एनर्जी ब्रह्मांड का लगभग ~68% हिस्सा बनाती है।
- सैद्धांतिक रूप से, इसे क्वांटम क्षेत्रों की "वैक्यूम ऊर्जा" के रूप में समझाया जा सकता है। लेकिन QFT के सरल गणनाएँ वैक्यूम ऊर्जा घनत्व को 120 गुना बहुत बड़ा अनुमानित करती हैं - भौतिकी में सबसे खराब भविष्यवाणी।

यह कॉस्मोलॉजिकल कॉन्स्टेंट समस्या शायद क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत और गुरुत्वाकर्षण के बीच सबसे तीखा टकराव है। मानक मॉडल डार्क एनर्जी के बारे में कुछ नहीं कहता। यह हमारी ब्रह्मांड की समझ में एक विशाल अंतर है।

हायरार्की समस्या

हिग्स बोसॉन में ही एक और गहरी पहेली छिपी है।

हिग्स की मापी गई द्रव्यमान 125 GeV है। लेकिन क्वांटम सुधार इसे प्लैक स्केल (10^{19} GeV) के करीब ले जाना चाहिए, जब तक कि चमत्कारी रद्दीकरण न हो। यह गुरुत्वाकर्षण की प्राकृतिक ऊर्जा पैमानों की तुलना में इतना हल्का क्यों है?

यह हायरार्की समस्या है: हिग्स अस्वाभाविक रूप से बारीकी से ठ्यून किया हुआ प्रतीत होता है। भौतिकीविदों को नई भौतिकी पर संदेह है, जैसे सुपरसिमेट्री (SUSY), जो हिग्स द्रव्यमान को स्थिर कर सकती है, खतरनाक सुधारों को रद्द करने वाले पार्टनर कणों को प्रस्तुत करके। (प्राकृतिकता पर चर्चाएँ डायनामिकल समाधानों से लेकर वैक्यूमों के संभावित "लैंडस्केप" में एंथ्रोपिक तर्क तक शामिल हैं।)

पदार्थ-प्रतिपदार्थ असमिति

मानक मॉडल में कुछ CP उल्लंघन शामिल हैं, लेकिन यह इस बात को समझाने के लिए पर्याप्त नहीं है कि आज का ब्रह्मांड पदार्थ से भरा हुआ है, न कि पदार्थ और प्रतिपदार्थ की बराबर मात्रा में। जैसा कि ऊपर उल्लेख किया गया है, लेप्टोजेनेसिस जैसे तंत्र (जो अक्सर न्यूट्रीनो द्रव्यमानों के सीसॉ मूल से संबंधित होते हैं) एक आकर्षक रास्ता प्रदान करते हैं जिसमें मानक मॉडल से परे भौतिकी संतुलन को बिगड़ देती है।

एक सुंदर लेकिन अधूरी तस्वीर

मानक मॉडल को कभी-कभी "भौतिकी में सबसे सफल सिद्धांत" कहा जाता है। इसकी भविष्यवाणियाँ प्रयोगों के साथ 10-12 दशमलव स्थानों तक मेल खाती हैं। यह लगभग हर चीज की व्याख्या करता है जो हम कण त्वरकों और प्रयोगशालाओं में देखते हैं।

लेकिन यह अधूरा है:

- यह गुरुत्वाकर्षण को नजरअंदाज करता है।
- यह न्यूट्रीनो द्रव्यमानों की व्याख्या नहीं कर सकता।
- यह डार्क मैटर या डार्क एनर्जी की व्याख्या नहीं कर सकता।
- यह हायरार्की समस्या और पदार्थ-प्रतिपदार्थ असमिति जैसे गहरे रहस्यों को अनसुलझा छोड़ देता है।

भौतिकीविद अब इतिहास में एक परिचित क्षण का सामना कर रहे हैं। जिस तरह न्यूटनीय यांत्रिकी ने सापेक्षता को रास्ता दिया और शास्त्रीय भौतिकी ने क्वांटम यांत्रिकी को, मानक मॉडल को भी अंततः किसी गहरे सिद्धांत को रास्ता देना होगा।

पवित्र कंघी: एक एकीकृत सिद्धांत

अंतिम लक्ष्य एक ग्रैंड यूनिफाइड थ्योरी (GUT) या यहाँ तक कि एक थ्योरी ऑफ एवरीथिंग (ToE) है: एक ढांचा जो सभी चार बलों को एकीकृत करता है, सभी कणों की व्याख्या करता है, और सबसे छोटे पैमानों (क्वांटम गुरुत्वाकर्षण) से लेकर सबसे बड़े पैमानों (कॉस्मोलॉजी) तक लगातार काम करता है।

यह आधुनिक भौतिकी का पवित्र कंघी है। यही कारण है कि शोधकर्ता कोलाइडरों को उच्च ऊर्जाओं तक धकेल रहे हैं, विशाल न्यूट्रीनो डिटेक्टर बना रहे हैं, टेलीस्कोपों के साथ ब्रह्मांड का मानचित्रण कर रहे हैं, और नई और साहसी गणित का आविष्कार कर रहे हैं।

अगले अध्याय प्रमुख उम्मीदवारों की खोज करेंगे:

- **सुपरसिमेट्री (SUSY)** - पदार्थ और बल कणों के बीच एक समरूपता।
- **स्ट्रिंग थ्योरी और M-थ्योरी** - जहाँ कण कंपन करने वाले तार हैं और ग्रैविटॉन स्वाभाविक रूप से उभरता है।
- **अतिरिक्त आयाम** - प्रारंभिक कलूजा-क्लेन विचार से लेकर आधुनिक रैडल-संड्रम मॉडल तक।
- **अन्य दृष्टिकोण** - जैसे लूप क्वांटम गुरुत्वाकर्षण और एसिम्प्टोटिक सेफ्टी।

इनमें से प्रत्येक विचार एक सिद्धांत के रूप में नहीं, बल्कि विज्ञान के सर्वश्रेष्ठ रूप में उभरा: अंतरालों पर ध्यान देना, नए सिद्धांतों का निर्माण, और उनकी वास्तविकता के खिलाफ परीक्षण।

सुपरसिमेट्री: अगली बड़ी समरूपता?

भौतिकी का एकीकरण के माध्यम से प्रगति का लंबा इतिहास रहा है। मैक्सवेल के समीकरणों ने बिजली और चुम्बकत्व को एकीकृत किया। विशेष सापेक्षता ने अंतरिक्ष और समय को एकीकृत किया। इलेक्ट्रोवीक थ्योरी ने चार मूलभूत बलों में से दो को एकीकृत किया। प्रत्येक छलांग एक छिपी समरूपता की खोज से उत्पन्न हुई।

सुपरसिमेट्री - या SUSY, जैसा कि भौतिकीविद इसे प्यार से बुलाते हैं - एक साहसी प्रस्ताव है कि अगली बड़ी समरूपता दो प्रतीत होने वाली भिन्न श्रेणियों को जोड़ती है: **पदार्थ और बल**।

फर्मियन्स और बोसॉन्स: पदार्थ बनाम बल

मानक मॉडल में, कण दो बड़ी श्रेणियों में विभाजित हैं:

- **फर्मियन्स (स्पिन 1/2):** इसमें क्वार्क और लेप्टॉन शामिल हैं, जो पदार्थ के निर्माण खंड हैं। उनका आधा-पूर्णांक स्पिन का मतलब है कि वे पाउली अपवर्जन सिद्धांत का पालन करते हैं: कोई भी दो समान फर्मियन्स एक ही अवस्था में नहीं हो सकते। यही कारण है कि परमाणुओं में संरचित खोल होते हैं और पदार्थ स्थिर होता है।
- **बोसॉन्स (पूर्णांक स्पिन):** इसमें फोटॉन, ग्लूआॉन, W और Z बोसॉन, और हिग्स शामिल हैं। बोसॉन बलों का मध्यस्थता करते हैं। फर्मियन्स के विपरीत, वे एक ही अवस्था में इकट्ठा हो सकते हैं, यही कारण है कि लेजर (फोटॉन) और बोस-आइस्टीन कंडेसेट्स मौजूद हैं।

संक्षेप में: फर्मियन्स पदार्थ बनाते हैं, बोसॉन बलों को स्थानांतरित करते हैं।

सुपरसिमेट्री परिकल्पना

सुपरसिमेट्री एक समरूपता का प्रस्ताव करती है जो फर्मियन्स और बोसॉन्स को जोड़ती है। प्रत्येक ज्ञात फर्मियन के लिए एक बोसॉनिक पार्टनर है। प्रत्येक ज्ञात बोसॉन के लिए एक फर्मियॉनिक पार्टनर है।

- स्ववार्क → स्ववार्क
- लेप्टॉन → स्लेप्टॉन
- ग्लूऑन → ग्लूइनो
- गेज/हिंग्स सेक्टर → न्यूट्रालिनो (बिनो, विनो, हिंग्सिनो का मिश्रण; न्यूट्रल) और चार्जिनो (विनो, हिंग्सिनो का मिश्रण; आवेशित)

(“फोटिनो” और “जिनो” विशेष गेज अवस्थाओं के लिए पुराने उपनाम हैं; प्रयोग वास्तव में उपरोक्त उल्लिखित द्रव्यमान अवस्थाओं की तलाश करते हैं।)

कणों की दुनिया में इतनी कटूरपंथी दोहरीकरण का प्रस्ताव क्यों? क्योंकि SUSY मानक मॉडल द्वारा छोड़ी गई कुछ सबसे गहरी समस्याओं के लिए सुंदर समाधान प्रदान करती है।

हायरार्की समस्या का समाधान

SUSY का सबसे बड़ा आकर्षण इसकी **हायरार्की समस्या** को हल करने की क्षमता है: हिंग्स बोसॉन प्लैन्क स्केल की तुलना में इतना हल्का क्यों है?

मानक मॉडल में, आभासी कणों से क्वांटम सुधार हिंग्स द्रव्यमान को विशाल मानों तक ले जाना चाहिए। सुपरसिमेट्री पार्टनर कणों को प्रस्तुत करती है जिनके योगदान इन विचलनों को रद्द करते हैं। परिणाम: हिंग्स द्रव्यमान स्वाभाविक रूप से स्थिर हो जाता है, बिना बारीक ट्यूनिंग की आवश्यकता के (कम से कम “प्राकृतिक” SUSY स्पेक्ट्रम में)।

SUSY और ग्रैंड यूनिफिकेशन

SUSY के लिए एक और प्रेरणा बलों के एकीकरण से आती है।

- मजबूत, कमजोर और विद्युत चुम्बकीय बलों के युग्मन स्थिरांकों को उच्च ऊर्जाओं तक प्रक्षेपित करने से पता चलता है कि मानक मॉडल में, वे लगभग, लेकिन पूरी तरह से नहीं, एक बिंदु पर अभिसरण करते हैं।
- SUSY में, पार्टनर कणों के योगदान के साथ, युग्मन स्थिरांक लगभग 10^{16} GeV पर सुंदर ढंग से अभिसरण करते हैं।

यह सुझाव देता है कि बहुत उच्च ऊर्जाओं पर, तीनों बल एक ग्रैंड यूनिफाइड थोरी (GUT) में विलय हो सकते हैं।

डार्क मैटर के लिए SUSY उम्मीदवार

सुपरसिमेट्री डार्क मैटर के लिए एक प्राकृतिक उम्मीदवार भी प्रदान करती है।

यदि SUSY सही है, तो एक पार्टनर कण स्थिर और विद्युत रूप से तटस्थ होना चाहिए। प्रमुख उम्मीदवार सबसे हल्का न्यूट्रालिनो है, जो बिनो, विनो और हिंग्सिनो का मिश्रण है।

न्यूट्रालिनो केवल कमजोर रूप से इंटरैक्ट करते हैं, जो WIMPs (कमजोर रूप से इंटरैक्टिंग बड़े कण) के प्रोफाइल से मेल खाता है। यदि खोजे जाते हैं, तो वे ब्रह्मांड के 27% लापता पदार्थ की व्याख्या कर सकते हैं।

SUSY के लिए प्रयोगात्मक खोज

दशकों तक, भौतिकीविदों ने आशा की थी कि सुपरसिमेट्री कण पहले से खोजे गए ऊर्जा पैमानों के ठीक ऊपर प्रकट होंगे।

- **LEP (CERN, 1990s):** ~100 GeV तक कोई SUSY कण नहीं मिला।
- **टेवाट्रॉन (फर्मलैब, 1990s-2000s):** कोई पार्टनर कण नहीं मिला।
- **LHC (CERN, 2010s-2020s):** प्रोटॉन-प्रोटॉन टकराव **13.6 TeV** तक (डिज़ाइन: **14 TeV**). व्यापक खोजों के बावजूद, स्ववार्क, ग्लूइनो, या न्यूट्रालिनो के कोई सबूत रब-TeV पैमानों तक नहीं मिले।

LHC में SUSY की खोज न होना निराशाजनक रहा है। SUSY के कई सबसे सरल संस्करण, जैसे "मिनिमल सुपरसिमेट्रिक स्टैंडर्ड मॉडल" (MSSM), अब अत्यधिक सीमित हैं। "प्राकृतिक" स्पेक्ट्रम भारी हो गए हैं, जो यह संकेत देता है कि यदि SUSY TeV स्केल के करीब है तो अधिक बारीक ट्यूनिंग की ओर।

फिर भी, SUSY को खारिज नहीं किया गया है। अधिक जटिल मॉडल भारी या अधिक सूक्ष्म पार्टनर कणों की भविष्यवाणी करते हैं, शायद LHC की पहुंच से परे, या ऐसी इंटरैक्शनों के साथ जो आसानी से पता लगाने के लिए बहुत कमज़ोर हैं।

SUSY की गणितीय सुंदरता

इसके फेनोमेनोलॉजिकल प्रेरणाओं से परे, SUSY में गहरी गणितीय सुंदरता है।

- यह अंतरिक्ष-समय समरूपताओं का एकमात्र संभव विस्तार है जो सापेक्षता और क्वांटम यांत्रिकी के साथ संगत है।
- सुपरसिमेट्रिक सिद्धांत अक्सर अधिक गणनीय होते हैं: वे अनंतों को नियंत्रित करते हैं और QFT में छिपी संरचनाओं को प्रकट करते हैं।
- स्ट्रिंग थ्योरी में, SUSY संगतता के लिए आवश्यक है: इसके बिना, सिद्धांत में टैकियन्स और अन्य पैथोलॉजी शामिल हैं।

यहां तक कि अगर प्रकृति SUSY को सुलभ ऊर्जाओं पर लागू नहीं करती, तो इसकी गणित ने पहले ही भौतिकी को समृद्ध किया है।

सुपरसिमेट्री की स्थिति

आज, SUSY एक अजीब स्थिति में है।

- यह मानक मॉडल से परे भौतिकी के लिए सबसे आकर्षक ढांचों में से एक बनी हुई है।
- यह हायरार्की समस्या को हल करती है, एकीकरण का समर्थन करती है, और डार्क मैटर के लिए एक उम्मीदवार प्रदान करती है।
- फिर भी, अभी तक कोई प्रयोगात्मक सबूत नहीं मिला है।

यदि LHC और इसके उत्तराधिकारी कुछ भी नहीं पाते हैं, तो SUSY केवल हमारी पहुंच से बहुत परे ऊर्जा पैमानों पर साकार हो सकती है - या शायद प्रकृति ने पूरी तरह से अलग रास्ता चुना है।

एक विधि, न कि एक हठधर्मिता

सुपरसिमेट्री वैज्ञानिक विधि को कार्य में दिखाती है।

भौतिकीविदों ने समस्याओं की पहचान की: हायरार्की समस्या, एकीकरण, डार्क मैटर। उन्होंने एक नई और साहसी समरूपता का प्रस्ताव दिया जो इन सभी को हल करती है। उन्होंने इसका परीक्षण करने के लिए प्रयोग डिज़ाइन किए। अब तक परिणाम नकारात्मक रहे हैं - लेकिन इसका मतलब यह नहीं है कि यह विचार व्यर्थ गया। SUSY ने हमारे उपकरणों को तेज किया, यह स्पष्ट किया कि हम क्या खोज रहे हैं, और पूरे पीढ़ियों के शोध को प्रेरित किया।

एथर या एपिसाइकिल्स की तरह, SUSY गहरे सत्य की ओर एक कदम हो सकता है, चाहे वह अंतिम शब्द बने या न बने।

स्ट्रिंग थ्योरी और M-थ्योरी

मानक मॉडल से परे भौतिकी अक्सर पैच द्वारा प्रेरित होती है: हायरार्की समस्या को हल करना, डार्क मैटर की व्याख्या करना, गेज युग्मन को एकीकृत करना। स्ट्रिंग थ्योरी अलग है। यह किसी विशेष पहली से शुरू नहीं होती। इसके बजाय, यह गणित से शुरू होती है - और अंततः अंतरिक्ष, समय और पदार्थ की हमारी पूरी अवधारणा को फिर से लिखती है।

उत्पत्ति: एक असफलता से जन्मी सिद्धांत

आश्वर्यजनक रूप से, स्ट्रिंग थ्योरी की शुरुआत थ्योरी ऑफ एवरीथिंग के रूप में नहीं हुई, बल्कि मजबूत परमाणु बल को समझने के असफल प्रयास के रूप में हुई।

1960 के दशक के अंत में, QCD के पूर्ण विकास से पहले, भौतिकीविद हैड्रॉनों के चिड़ियाघर को समझाने की कोशिश कर रहे थे। उन्होंने प्रकीर्णन डेटा में पैटर्न देखे जो यह सुझाव देते थे कि रेजोनेंस को कंपन करने वाले तारों द्वारा मॉडल किया जा सकता है।

1968 में वेनेजियानो द्वारा प्रस्तुत “ड्यूल रेजोनेंस मॉडल” ने मजबूत इंटरैक्शनों का वर्णन किया जैसे कि हैड्रॉन छोटे तारों के उत्तेजन थे। यह मॉडल सुंदर था लेकिन जल्दी ही छोड़ दिया गया जब QCD मजबूत बल की सच्ची सिद्धांत के रूप में उभरी।

फिर भी, स्ट्रिंग थ्योरी मरने से इनकार कर दिया। इसके समीकरणों में उल्लेखनीय विशेषताएँ छिपी थीं जो परमाणु भौतिकी से परे संकेत देती थीं।

आश्वर्यजनक खोज़: ग्रैविटॉन

जब सिद्धांतकारों ने तारों के कंपनों को क्वांटम किया, तो उन्होंने पाया कि स्पेक्ट्रम में अनिवार्य रूप से एक **द्रव्यमान रहित कण स्पिन 2 के साथ शामिल है।**

यह चौंकाने वाला था। क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत ने दिखाया था कि एक द्रव्यमान रहित कण स्पिन 2 के साथ अद्वितीय है: यह गुरुत्वाकर्षण का क्वांटम, **ग्रैविटॉन होना चाहिए।**

जैसा कि जॉन श्वार्ट्ज ने बाद में कहा: “लेकिन एक आश्वर्यजनक सत्य सामने आया: स्ट्रिंग थ्योरी की गणित में अनिवार्य रूप से एक द्रव्यमान रहित कण स्पिन 2 के साथ शामिल था - एक ग्रैविटॉन।”

जो एक हैड्रॉन सिद्धांत के रूप में शुरू हुआ था, उसने गलती से क्वांटम गुरुत्वाकर्षण की आधारशिला का निर्माण किया था।

मुख्य विचारः तार, न कि बिंदु

स्ट्रिंग थ्योरी के मूल में, बिंदु कणों को छोटे एक-आयामी वस्तुओं से बदल दिया जाता है: तार।

- तार खुले (दो सिरों के साथ) या बंद (लूप्स) हो सकते हैं।
- तार के विभिन्न कंपन अवस्थाएँ विभिन्न कणों से मेल खाती हैं。
 - एक विशेष कंपन एक फोटॉन के रूप में प्रकट हो सकता है।
 - दूसरा एक ग्लूऑन के रूप में।
 - दूसरा एक क्वार्क के रूप में।
 - और एक अवस्था, अनिवार्य रूप से, एक ग्रैविटॉन के रूप में।

यह सरल परिवर्तन - बिंदुओं से तारों तक - क्वांटम गुरुत्वाकर्षण को परेशान करने वाले कई अनंतों को हल करता है। तार का सीमित आकार उन इंटरैक्शनों को फैलाता है जो शून्य दूरी पर विस्फोट करते।

सुपरसिमेट्री और सुपरस्ट्रिंग्स

स्ट्रिंग थ्योरी के शुरुआती संस्करणों में समस्याएँ थीं: उनमें टैकियन्स (अस्थिरताएँ) शामिल थे और अवास्तविक विशेषताओं की मांग की। प्रगति **सुपरसिमेट्री** की शुरुआत के साथ आई, जिसने 1970 और 1980 के दशक में **सुपरस्ट्रिंग थ्योरी** को जन्म दिया।

सुपरस्ट्रिंग्स ने टैकियन्स को समाप्त किया, फर्मियन्स को शामिल किया, और नई गणितीय संगतता लाई।

लेकिन एक पकड़ थी: स्ट्रिंग थ्योरी केवल उच्च आयामों में काम करती है। विशेष रूप से, **10 अंतरिक्ष-समय आयाम।**

- चार आयाम जो हम देखते हैं (तीन अंतरिक्ष आयाम, एक समय आयाम)।
- छह अन्य आयाम, संकुचित या छोटे पैमानों पर लपेटे गए, जो वर्तमान प्रयोगों के लिए अदृश्य हैं।

यह विचार, हालांकि कठूरपंथी लगता है, पूरी तरह से नया नहीं था। 1920 के दशक में, **कलूजा-क्लेन सिद्धांत** ने पहले ही संकेत दिया था कि अतिरिक्त आयाम गुरुत्वाकर्षण और विद्युत चुम्बकत्व को एकीकृत कर सकते हैं। स्ट्रिंग थोरी ने इस विचार को पुनर्जनन किया और इसे व्यापक रूप से विस्तार दिया।

पाँच स्ट्रिंग सिद्धांत

1980 के मध्य तक, भौतिकीविदों ने पाया कि स्ट्रिंग थोरी अद्वितीय नहीं है, बल्कि **पाँच अलग-अलग संस्करणों** में आती है:

1. **टाइप I** - खुले और बंद तार, जिसमें दिशात्मक और गैर-दिशात्मक तार शामिल हैं।
2. **टाइप IIA** - बंद तार, दिशात्मक, गैर-काइरल।
3. **टाइप IIB** - बंद तार, दिशात्मक, काइरल।
4. **हेटेरोटिक SO(32)** - बंद तार एक हाइब्रिड संरचना के साथ।
5. **हेटेरोटिक E₈ × E₈** - एक उच्च समरूपता वाला संस्करण, जो बाद में वास्तविक कण भौतिकी से जोड़ने के लिए महत्वपूर्ण था।

प्रत्येक गणितीय रूप से संगत प्रतीत होता था, लेकिन प्रकृति को एक को क्यों चुनना चाहिए?

पहली सुपरस्ट्रिंग क्रांति

1984 में, माइकल ग्रीन और जॉन श्वार्ट्ज ने दिखाया कि स्ट्रिंग थोरी क्वांटम विसंगतियों को स्वचालित रूप से रद्द कर सकती है - कुछ ऐसा जो क्वांटम क्षेत्र सिद्धांतों को सावधानीपूर्वक इंजीनियर करना पड़ता था। इस खोज ने **पहली सुपरस्ट्रिंग क्रांति** को प्रज्वलित किया, जिसमें हजारों भौतिकीविदों ने स्ट्रिंग थोरी को सभी बलों के एकीकृत सिद्धांत के उम्मीदवार के रूप में अपनाया।

यह पहला गंभीर ढांचा था जिसमें क्वांटम गुरुत्वाकर्षण न केवल संगत था बल्कि अनिवार्य था।

दूसरी सुपरस्ट्रिंग क्रांति: M-थोरी

1990 के मध्य में, एक दूसरी क्रांति हुई। एडवर्ड विटन और अन्य ने पाया कि पाँच अलग-अलग स्ट्रिंग सिद्धांत प्रतिस्पर्धी नहीं थे, बल्कि एक गहरे एकल सिद्धांत के विभिन्न सीमाएँ थे: **M-थोरी**।

यह माना जाता है कि M-थोरी **11 आयामों** में मौजूद है और इसमें न केवल तार बल्कि उच्च आयामी वस्तुएँ शामिल हैं जिन्हें **ब्रेन** (मेम्ब्रेन का संक्षिप्त रूप) कहा जाता है।

- एक-आयामी ब्रेन = तार।
- दो-आयामी ब्रेन = मेम्ब्रेन।
- उच्च आयामी ब्रेन 9 अंतरिक्ष आयामों तक।

इन ब्रेनों ने नई और समृद्ध संभावनाएँ खोलीं: पूरे ब्रह्मांड तीन-आयामी ब्रेन के रूप में मौजूद हो सकते हैं, जो उच्च आयामी अंतरिक्ष में तैर रहे हैं, जिसमें गुरुत्वाकर्षण बल्कि रिसता है जबकि अन्य बल सीमित रहते हैं। इस चित्र ने **रैंडल-संड्रम** जैसे आधुनिक अतिरिक्त आयाम मॉडलों को प्रेरित किया।

उल्लेखनीय उदाहरण: कलूजा-क्लेन और रैंडल-संड्रम

- **कलूजा-क्लेन (1920s):** गुरुत्वाकर्षण और विद्युत चुम्बकत्व को एकीकृत करने के लिए एक अतिरिक्त पाँचवाँ आयाम प्रस्तावित किया। यह विचार दशकों तक छोड़ दिया गया था, लेकिन स्ट्रिंग थोरी ने इसे बड़े पैमाने पर पुनर्जनन

किया। संकुचित अतिरिक्त आयाम अभी भी स्ट्रिंग मॉडलों का एक मुख्य विशेषता है।

- **रैंडल-संझम (1999):** “विकृत” अतिरिक्त आयामों का प्रस्ताव दिया, जिसमें हमारा ब्रह्मांड एक तीन-आयामी ब्रेन है जो उच्च आयामों में एम्बेडेड है। गुरुत्वाकर्षण बल्कि में फैलता है, जो यह समझाता है कि यह अन्य बलों से कमजोर क्यों है। इस तरह के मॉडल कण कोलाइडरों में संभावित संकेतों या बहुत छोटी दूरी पर न्यूटन के नियम से विचलनों की भविष्यवाणी करते हैं।

प्रयोगात्मक सुराग और चुनौतियाँ

स्ट्रिंग थोरी साहसी दावे करती है, लेकिन उनका परीक्षण करना अविश्वसनीय रूप से कठिन है।

- **अतिरिक्त आयाम:** लापता ऊर्जा संकेतों या **कलूजा-क्लेन उत्तेजनाओं** के माध्यम से प्रकट हो सकते हैं - संभवतः ग्रैविटॉन्स या यहाँ तक कि मानक मॉडल क्षेत्रों के लिए, कॉन्फ़िगरेशन पर निर्भर करता है। कोलाइडर सीमाएँ आमतौर पर **रब-TeV** रेंज तक पहुँचती हैं।
- **ग्रैविटॉन्स:** एक द्रव्यमान रहित कण स्पिन 2 के साथ भविष्यवाणी की जाती है, लेकिन एक एकल ग्रैविटॉन का पता लगाना संभव तकनीक से परे है। अप्रत्यक्ष प्रभाव, जैसे गुरुत्वाकर्षण तरंगों में विचलन, संभव हो सकते हैं।
- **सुपरसिमेट्री:** स्ट्रिंग थोरी को किसी पैमाने पर SUSY की आवश्यकता होती है, लेकिन LHC ने अभी तक पार्टनर कणों को नहीं पाया है।
- **कॉस्मोलॉजी:** प्रारंभिक ब्रह्मांड, मुद्रास्फीति, और कॉस्मिक माइक्रोवेव बैकग्राउंड में स्ट्रिंग भौतिकी के निशान हो सकते हैं, हालाँकि परिणाम अब तक अस्पष्ट हैं।

चुनौतियों के बावजूद, स्ट्रिंग थोरी ने गणित के लिए एक उपजाऊ जमीन प्रदान की है, जो ज्यामिति, टोपोलॉजी, और AdS/CFT जैसे द्वैत (उच्च आयामों में गुरुत्वाकर्षण को गुरुत्वाकर्षण रहित क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत से जोड़ने) में प्रगति को प्रेरित करती है।

सौंदर्य और विवाद

समर्थक तर्क देते हैं कि स्ट्रिंग थोरी एकीकृत सिद्धांत की ओर सबसे आशाजनक रास्ता है: यह क्वांटम गुरुत्वाकर्षण को शामिल करती है, सभी बलों को एकीकृत करती है, और यह समझाती है कि ग्रैविटॉन का अस्तित्व क्यों होना चाहिए।

आलोचक तर्क देते हैं कि प्रयोगात्मक पुष्टि के बिना, स्ट्रिंग थोरी प्रायोगिक विज्ञान से अलग होने का जोखिम उठाती है। इसके संभावित समाधानों का विशाल “लैंडस्केप” (10^{500} तक) अद्वितीय भविष्यवाणियाँ निकालना मुश्किल बनाता है।

दोनों पक्ष एक बात पर सहमत हैं: स्ट्रिंग थोरी ने हमारे भौतिकी के बारे में सोचने के तरीके को बदल दिया है और एकीकरण के लिए एक नई भाषा प्रदान की है।

थोरी ऑफ एवरीथिंग की ओर

यदि सुपरसिमेट्री मानक मॉडल से परे अगला कदम है, तो स्ट्रिंग थोरी इसके बाद का कदम है: लंबे समय से खोजी गई थोरी ऑफ एवरीथिंग के लिए एक उम्मीदवार।

इसका सबसे साहसी दावा यह नहीं है कि यह केवल मानक मॉडल और गुरुत्वाकर्षण को शामिल करता है, बल्कि ये उच्च आयामों में कंपन करने वाले तारों के अपरिहार्य परिणाम हैं। ग्रैविटॉन एक जोड़ नहीं है - यह अंतर्निहित है।

क्या प्रकृति ने यह रास्ता चुना है, यह अभी भी खोजा जाना बाकी है।

सीमाओं की खोज: मानक मॉडल से परे प्रयोग

सिद्धांत भौतिकी का जीवन रक्त है, लेकिन प्रयोग इसकी धड़कन है। सुपरसिमेट्री, स्ट्रिंग थोरी, और अतिरिक्त आयाम सुंदर गणितीय संरचनाएँ हैं, लेकिन वे साक्ष्य के साथ जीवित रहती हैं या मर जाती हैं। यदि वे अटकलों से अधिक होने वाले हैं, तो

उन्हें डेटा में निशान छोड़ने होंगे।

भौतिकीविदों ने इन निशानों की खोज के लिए चतुर तरीके विकसित किए हैं - कोलाइडरों में, ब्रह्मांड में, और अंतरिक्ष-समय की संरचना में।

कोलाइडर: पार्टनर कणों और ग्रैविटॉन्स की खोज

CERN में लार्ज हैड्रॉन कोलाइडर (LHC) दुनिया का सबसे शक्तिशाली कण त्वरक है, जो प्रोटॉनों को **13.6 TeV** तक (दिज़ाइन: **14 TeV**) टकराता है। यह मानक मॉडल से परे भौतिकी की खोज के लिए मानवता का प्रमुख उपकरण रहा है।

LHC में सुपरसिमेट्री

- पार्टनर कणों की खोज:** ATLAS और CMS प्रयोगों ने स्क्वार्क, ग्लूइनो, और न्यूट्रालिनो/चार्जिनो की तलाश में डेटा का विश्लेषण किया है। ये अक्सर “लापता ऊर्जा” संकेतों के रूप में प्रकट होते हैं, क्योंकि SUSY कण पहचान से बच जाते हैं।
- परिणाम:** रब-TeV पैमाने तक कोई पुष्ट SUSY कण नहीं मिला। इसने SUSY के कई सबसे सरल मॉडलों को खारिज कर दिया है और “प्राकृतिक” SUSY को भारी, अधिक बारीक ट्यून किए गए क्षेत्रों में धकेल दिया है।

ग्रैविटॉन्स और अतिरिक्त आयाम

- कल्पुजा-क्लेन अवस्थाएँ:** यदि अतिरिक्त आयाम मौजूद हैं, तो ग्रैविटॉन्स या यहाँ तक कि मानक मॉडल क्षेत्र भारी KK उत्तेजनाओं के रूप में प्रकट हो सकते हैं, जो डाय-लेप्टॉन, डाय-फोटॉन, या डाय-जेट चैनलों में रेजोनेंस के रूप में पहचाने जा सकते हैं।
- रैंडल-संझम संकेत:** विकृत अतिरिक्त आयाम स्पिन 2 की विशिष्ट कोणीय पैटर्न के साथ ग्रैविटॉन रेजोनेंस उत्पन्न कर सकते हैं।
- परिणाम:** LHC खोजों ने अब तक कोई सबूत नहीं पाया है, लेकिन सीमाएँ रब-TeV रेज तक धकेल दी गई हैं, जो अतिरिक्त आयामों के आकार, विकृति और ज्यामिति को सीमित करती हैं।

माइक्रोस्कोपिक ब्लैक होल

कुछ सिद्धांत सुझाव देते हैं कि यदि अतिरिक्त आयाम मौजूद हैं, तो LHC टकरावों में छोटे ब्लैक होल बन सकते हैं, जो कणों के विस्फोट में वाष्पित हो जाते हैं। ऐसे आयोजन नहीं देखे गए हैं।

सटीक प्रयोग: छोटे पैमानों पर गुरुत्वाकर्षण का परीक्षण

यदि अतिरिक्त आयाम मौजूद हैं, तो न्यूटन का गुरुत्वाकर्षण नियम छोटी दूरी पर टूट सकता है।

- टॉर्शन बैलेंस प्रयोग (“Eöt-Wash”):** वर्ग-विपरीत नियम को सब-मिलीमीटर पैमानों तक परीक्षण करते हैं - वर्तमान में दसियों माइक्रोमीटर ($\sim 50 \mu\text{m}$)।
- परिणाम:** कोई विचलन नहीं मिला। ये प्रयोग $\sim 10^{-4}$ मीटर से बड़े विशेषता लंबाई वाले अतिरिक्त आयाम परिदृश्यों को खारिज करते हैं (मॉडल पर निर्भर)।

ये टेबलटॉप प्रयोग आश्वर्यजनक रूप से संवेदनशील हैं और उन पैमानों की खोज करते हैं जो कोलाइडरों के लिए दुर्गम हैं।

गुरुत्वाकर्षण तरंगों: क्वांटम गुरुत्वाकर्षण के लिए एक नया खिड़की

2015 में LIGO द्वारा गुरुत्वाकर्षण तरंगों की खोज ने एक नया सीमांत खोला।

- अतिरिक्त ध्रुवीकरण / संशोधित प्रचार:** कुछ क्वांटम गुरुत्वाकर्षण या अतिरिक्त आयाम मॉडल GR से विचलन की भविष्यवाणी करते हैं (अतिरिक्त ध्रुवीकरण, प्रकीर्णन, या संशोधित रिंगडाउन)।
- रिंगडाउन स्पेक्ट्रोस्कोपी:** ब्लैक होल के मर्जर के बाद “रिंगडाउन” GR से सूक्ष्म विचलनों को प्रकट कर सकता है।

- **प्राइमॉर्डियल गुरुत्वाकर्षण तरंगें:** बिंग बैंग से उत्पन्न तरंगें स्ट्रिंग भौतिकी के निशान ले जा सकती हैं, जो भविष्य के वेधशालाओं जैसे LISA या आइंस्टीन टेलीस्कोप द्वारा पता लगाने योग्य हैं।

अब तक, अवलोकन GR के साथ वर्तमान अनिश्चितताओं के भीतर संगत हैं, लेकिन उच्च परिशुद्धता आश्वर्य ला सकती है।

कॉस्मोलॉजी: ब्रह्मांड एक प्रयोगशाला के रूप में

ब्रह्मांड स्वयं अंतिम कण त्वरक है।

- **कॉस्मिक माइक्रोवेव बैकग्राउंड (CMB):** छोटी उतार-चढ़ाव प्रारंभिक ब्रह्मांड का नक्शा बनाते हैं। कुछ स्ट्रिंग मॉडल विशेष संकेतों की भविष्यवाणी करते हैं, जैसे गैर-गाऊसीयता या दोलन विशेषताएँ।
- **मुद्रास्फीति:** ब्रह्मांड का तेजी से विस्तार स्ट्रिंग थोरी से संबंधित क्षेत्रों द्वारा संचालित हो सकता था। CMB में प्राइमॉर्डियल B-मोड्स का पता लगाना एक मजबूत सुराग होगा।
- **डार्क मैटर खोजः** SUSY से न्यूट्रालिनो डार्क मैटर के लिए प्रमुख उम्मीदवार हैं। XENONnT, LUX-ZEPLIN, और PandaX जैसे प्रयोग न्यूक्लियस रिकॉइल के माध्यम से WIMPs की तलाश करते हैं।
- **एक्सियन्सः** स्ट्रिंग थोरी भी एक्सियन-जैसे कणों की भविष्यवाणी करती है, जो रेजोनेंट कैविटीज़ या खगोलीय अवलोकनों के माध्यम से पता लगाए जा सकते हैं।

अब तक, आकाश चुप है। डार्क मैटर का पता नहीं चला है, और कॉस्मोलॉजिकल डेटा Λ CDM मॉडल के साथ मेल खाता है बिना स्ट्रिंग की स्पष्ट टबिए अंगुलियों के।

वर्तमान स्थिति: सीमाएँ, न कि पुष्टियाँ

दशकों की खोज ने SUSY, अतिरिक्त आयामों, या स्ट्रिंग संकेतों की पुष्टि नहीं की है। लेकिन साक्ष्य की अनुपस्थिति अनुपस्थिति का साक्ष्य नहीं है:

- SUSY हमारी पहुंच से परे पैमानों पर या कम स्पष्ट स्पेक्ट्रम में मौजूद हो सकती है; अब तक के नकारात्मक परिणाम अधिक बारीक ट्यून किए गए संस्करणों ("कम प्राकृतिक") को प्राथमिकता देते हैं यदि SUSY TeV स्केल के करीब है।
- अतिरिक्त आयाम छोटे, अधिक विकृत, या वर्तमान जांच से किसी तरह छिपे हो सकते हैं।
- स्ट्रिंग थोरी केवल बहुत प्रारंभिक ब्रह्मांड में पता लगाने योग्य निशान छोड़ सकती है, जो केवल कॉस्मोलॉजी के माध्यम से सुलभ है।

कुछ सटीक विसंगतियाँ (उदाहरण के लिए, म्यूऑन का (g-2) माप और कुछ स्वाद भौतिकी तनाव) आकर्षक लेकिन अनसुलझी बनी हुई हैं; वे मानक मॉडल को उखाड़ फेंके बिना निरंतर जांच को प्रेरित करती हैं।

प्रयोगों ने पैरामीटर स्पेस को संकीर्ण किया है। उन्होंने हमें बताया है कि SUSY कहाँ नहीं है, अतिरिक्त आयाम कितने छोटे होने चाहिए, और डार्क मैटर कितना या कितना कम इंटरैक्ट कर सकता है।

आगे का रास्ता

भविष्य के प्रयोग गहरे खोज का वादा करते हैं:

- **हाई-ल्यूमिनोसिटी LHC (HL-LHC):** 10 गुना अधिक डेटा एकत्र करेगा, SUSY को उच्च द्रव्यमानों और दुर्लभ प्रक्रियाओं तक खोजेगा।
- **फ्यूचर सर्कुलर कोलाइडर (FCC-hh):** प्रस्तावित 100 TeV कोलाइडर, जो GUT भौतिकी के प्रकट होने वाले ऊर्जा पैमानों की खोज के लिए पर्याप्त शक्तिशाली है।
- **LISA (2030s):** अंतरिक्ष-आधारित गुरुत्वाकर्षण तरंग वेधशाला, प्रारंभिक ब्रह्मांड से प्राइमॉर्डियल संकेतों के प्रति संवेदनशील।

- **अगली पीढ़ी के डार्क मैटर डिटेक्टर:** कमजोर संकेतों के प्रति संवेदनशीलता के साथ, अंततः एक WIMP या एक्सियन को पकड़ सकते हैं।

एक यात्रा के रूप में विज्ञान

मानक मॉडल से परे भौतिकी का प्रयोगात्मक कहानी असफलता की कहानी नहीं है, बल्कि प्रक्रिया की कहानी है।

- नकारात्मक परिणाम सरल मॉडलों को खारिज करते हैं और हमारे सिद्धांतों को तेज करते हैं।
- प्रत्येक सीमा हमें अधिक परिष्कृत और भविष्यवाणी करने वाले ढांचों की ओर मार्गदर्शन करती है।
- TeV स्केल पर SUSY या अतिरिक्त आयामों की अनुपस्थिति इन विचारों को नष्ट नहीं करती - यह उन्हें नए क्षेत्रों में धकेलती है।

जैसे रदरफोर्ड के गोल्ड फॉइल प्रयोग ने प्लम पुडिंग मॉडल को तोड़ दिया, या LIGO ने गुरुत्वाकर्षण तरंगों पर संदेह को दूर किया, अगली बड़ी खोज अचानक हो सकती है - और सब कुछ बदल सकती है।

थ्योरी ऑफ एवरीथिंग की ओर

सदियों से, भौतिकी एकीकरण के माध्यम से प्रगति करती रही है। न्यूटन ने आकाश और पृथ्वी को एक गुरुत्वाकर्षण नियम के तहत एकीकृत किया। मैक्सवेल ने बिजली और चुम्बकत्व को एकीकृत किया। आइंस्टीन ने अंतरिक्ष और समय को एकीकृत किया। इलेक्ट्रोवीक थ्योरी ने दिखाया कि दो बहुत अलग बल एक ही बल के पहलू हैं।

अगला स्वाभाविक कदम अब तक का सबसे साहसी है: **सभी चार मूल भूत इंटरैक्शनों** - मजबूत, कमजोर, विद्युत चुम्बकीय और गुरुत्वाकर्षण - को एक सुसंगत ढांचे में एकीकृत करना। यह भौतिकी का पवित्र कंधी है: **थ्योरी ऑफ एवरीथिंग (ToE)**।

ToE क्यों महत्वपूर्ण है

पूर्ण एकीकरण केवल दार्शनिक सुंदरता नहीं है; यह व्यावहारिक और वैचारिक गहरी समस्याओं को संबोधित करता है:

- **क्वांटम गुरुत्वाकर्षण:** सामान्य सापेक्षता प्लैन्क स्केल (10^{19} GeV) पर टूट जाती है। केवल एक क्वांटम गुरुत्वाकर्षण सिद्धांत ब्लैक होल और बिंग बैंग सिंगुलैरिटीज की व्याख्या कर सकता है।
- **प्राकृतिकता और फाइन-ट्यूनिंग:** हायरार्की समस्या और कॉस्मोलॉजिकल कॉन्स्टेंट समस्या गहरे स्पष्टीकरण की मांग करती हैं।
- **मानक मॉडल के पैरामीटर:** क्यों के पास उनके द्रव्यमान और आवेश क्यों हैं? क्वार्क और लेप्टॉन की तीन पीढ़ियाँ क्यों? एक ToE इन रहस्यों की व्याख्या कर सकता है।
- **कॉस्मोलॉजी:** डार्क मैटर, डार्क एनर्जी, और मुद्रास्फिति सभी एकीकरण पैमाने पर भौतिकी से संबंधित हो सकते हैं।

एक ToE न केवल बलों को एकीकृत करता है - यह क्वांटम सिद्धांत के सबसे छोटे तारों से लेकर सबसे बड़े कॉस्मिक संरचनाओं तक पैमानों को एकीकृत करता है।

सुपरसिमेट्री और ग्रैंड यूनिफिकेशन

सुपरसिमेट्री (SUSY), यदि प्रकृति में साकार होती है, ToE की ओर एक कदम प्रदान करती है।

- **हायरार्की समस्या हल:** पार्टनर कण हिंग्स द्रव्यमान के लिए विचलनकारी सुधारों को रद्द करते हैं।
- **गेज युग्मन एकीकृत:** SUSY के साथ, तीन बलों की शक्तियाँ 10^{16} GeV पर सुंदर ढंग से अभिसरण करती हैं, जो एक ग्रैंड यूनिफाइड थ्योरी (GUT) की ओर इशारा करती हैं।
- **डार्क मैटर उम्मीदवार:** न्यूट्रालिनो कॉस्मिक डार्क मैटर के लिए एक प्राकृतिक स्पष्टीकरण प्रदान करता है।

SUSY से प्रेरित GUTs (जैसे SU(5), SO(10), या E₆) कल्पना करते हैं कि अत्यधिक उच्च ऊर्जाओं पर, क्वार्क और लेप्टॉन बड़े मल्टीप्लेट्स में एकीकृत होते हैं, और बल एक एकल गेज समूह में विलय हो जाते हैं।

लेकिन SUSY अभी तक प्रयोगों में प्रकट नहीं हुई है। यदि यह केवल हमारी पहुंच से परे पैमानों पर मौजूद है, तो इसकी एकीकरण शक्ति आकर्षक लेकिन छिपी रह सकती है।

स्ट्रिंग थ्योरी: क्वांटम गुरुत्वाकर्षण और ग्रैविटॉन

स्ट्रिंग थ्योरी इससे आगे जाती है। मानक मॉडल को पैच करने के बजाय, यह नींव को फिर से लिखती है:

- **तार, न कि बिंदु:** सभी कण छोटे तारों के कंपन हैं।
- **ग्रैविटॉन स्वाभाविक रूप से उभरता है:** द्रव्यमान रहित स्पिन 2 उत्तेजना अनिवार्य है, जिसका अर्थ है कि क्वांटम गुरुत्वाकर्षण अंतर्निहित है।
- **एकीकरण:** विभिन्न कंपन अवस्थाएँ सभी ज्ञात कणों - क्वार्क, लेप्टॉन, गेज बोसॉन, हिंग्स - को एक ढांचे में उत्पन्न करती हैं।
- **अतिरिक्त आयाम:** स्ट्रिंग थ्योरी को 10 अंतरिक्ष-समय आयामों की आवश्यकता होती है; M-थ्योरी को 11 की आवश्यकता होती है, जिसमें छिपे हुए आयाम संकुचित या विकृत होते हैं।

इस दृष्टिकोण में, एकीकरण संयोग नहीं है - यह ज्यामितीय है। बल अलग हैं क्योंकि तार विभिन्न तरीकों से कंपन करते हैं, जो अतिरिक्त आयामों की टोपोलॉजी द्वारा आकार लेते हैं।

M-थ्योरी और ब्रेन विश्व

यह खोज कि पाँच स्ट्रिंग सिद्धांत द्वैत द्वारा जुड़े हुए हैं, M-थ्योरी को जन्म दिया, एक और भी बड़ा ढांचा:

- इसमें तार, मेम्ब्रेन, और उच्च आयामी ब्रेन शामिल हैं।
- यह सुझाव देता है कि हमारा ब्रह्मांड एक तीन-आयामी ब्रेन हो सकता है, जो उच्च आयामी बल्क में तैर रहा है।
- यह स्वाभाविक स्पष्टीकरण प्रदान करता है कि गुरुत्वाकर्षण कमज़ोर क्यों है (यह बल्क में रिसता है) और कैसे कई ब्रह्मांड एक "मल्टीवर्स" में मौजूद हो सकते हैं।

M-थ्योरी अभी भी अधूरी है, लेकिन यह अब तक का ToE की ओर सबसे साहसी कदम है।

क्वांटम गुरुत्वाकर्षण के अन्य रास्ते

स्ट्रिंग थ्योरी और M-थ्योरी एकमात्र रास्ते नहीं हैं। भौतिकीविद कई ढांचों की खोज कर रहे हैं, प्रत्येक की अलग-अलग ताकतें हैं:

- **लूप क्वांटम गुरुत्वाकर्षण (LQG):** अंतरिक्ष-समय को सीधे क्वांटम करने की कोशिश करता है, यह भविष्यवाणी करता है कि अंतरिक्ष प्लैनेट स्केल पर असतत है।
- **एसिम्पटोटिक सेप्टी:** सुझाव देता है कि गुरुत्वाकर्षण उच्च ऊर्जाओं पर एक गैर-तुच्छ निश्चित बिंदु के कारण अच्छा व्यवहार कर सकता है।
- **कॉर्जल डायनामिकल ट्रायंगलेशन्स (CDT):** अंतरिक्ष-समय को साधारण ज्यामितीय निर्माण खंडों से बनाता है।
- **ट्रिविस्टर सिद्धांत और एम्प्लिट्यूड्रोन:** अंतरिक्ष-समय और प्रकीर्णन आयामों को फिर से सोचने वाले नवीन गणितीय ढांचे।

हालांकि इनमें से कोई भी अभी तक स्ट्रिंग थ्योरी के एकीकरण दायरे के साथ प्रतिस्पर्धा नहीं करता, वे खोज की समृद्धि को दर्शाते हैं।

प्रयोग की भूमिका

एक ToE अंतरः परीक्षण योग्य होनी चाहिए। हालांकि प्लैक स्केल वर्तमान प्रयोगों से बहुत परे है, भौतिकीविद अप्रत्यक्ष साक्ष्य की तलाश करते हैं:

- **कोलाइडर:** SUSY कण, अतिरिक्त आयाम, या माइक्रोस्कोपिक ब्लैक होल।
- **सटीक परीक्षण:** छोटे पैमानों पर न्यूटन के नियम से विचलन।
- **गुरुत्वाकर्षण तरंगें:** विदेशी ध्रुवीकरण या उच्च आयामों के इको।
- **कॉस्मोलॉजी:** मुद्रास्फीति के निशान, डार्क मैटर उम्मीदवार, या स्ट्रिंग थोरी द्वारा भविष्यवाणी किए गए एक्सियन्स।

अब तक, ToE पहुंच से बाहर बनी हुई है, लेकिन प्रत्येक नकारात्मक परिणाम संभावनाओं को संकीर्ण करता है।

सौंदर्य और चुनौती

एक सच्ची ToE न केवल भौतिकी को एकीकृत करती है - यह **मानव ज्ञान** को एकीकृत करती है। यह क्वांटम यांत्रिकी और सापेक्षता, माइक्रो और मैक्रो, कण और ब्रह्मांड को जोड़ती है।

फिर भी, यह एक विरोधाभास का सामना करती है: वह पैमाना जिस पर एकीकरण होता है, हमेशा के लिए प्रयोगात्मक पहुंच से बाहर हो सकता है। एक 100 TeV कोलाइडर केवल प्लैक स्केल तक के रास्ते का एक हिस्सा खोजता है। हमें कॉस्मोलॉजी, गणितीय संगतता, या अप्रत्यक्ष संकेतों पर निर्भर रहना पड़ सकता है।

सपना ढांचों की गहरी सुंदरता के कारण जीवित रहता है। जैसा कि विटन ने कहा, स्ट्रिंग थोरी केवल “समीकरणों का एक सेट” नहीं है, बल्कि “भौतिकी के लिए एक नया ढांचा” है।

एक विधि के रूप में विज्ञान, न कि एक हठधर्मिता

ToE की खोज स्ट्रिंग थोरी, SUSY, या किसी एकल विचार को “सत्य” घोषित करने के बारे में नहीं है। यह **वैज्ञानिक विधि** के बारे में है:

- मौजूदा सिद्धांतों में अंतरालों की पहचान करना।
- नए और साहसी ढांचों का प्रस्ताव करना।
- उनकी वास्तविकता के खिलाफ परीक्षण करना, आवश्यकतानुसार त्यागना या परिष्कृत करना।

कहानी अभी खत्म नहीं हुई है। लेकिन यही खुलापन - किसी भी सिद्धांत को पवित्र मानने से इनकार - है जो भौतिकी को एक जीवित विज्ञान बनाता है, न कि एक हठधर्मिता।

आगे का क्षितिज

अगली सदी की भौतिकी प्रकट कर सकती है:

- सुपरसिमेट्री या इसके विकल्पों के साक्ष्य।
- कॉस्मोलॉजिकल डेटा जो स्ट्रिंग भविष्यवाणियों की पुष्टि या खंडन करता है।
- अंतरिक्ष-समय की गहरी पुनर्रचना।

या शायद सच्ची ToE कुछ ऐसी है जिसकी अभी तक किसी ने कल्पना भी नहीं की है।

लेकिन खोज स्वयं - एकीकरण, व्याख्या, प्रकृति को पूर्ण रूप से देखने का आग्रह - उतना ही मानवता का हिस्सा है जितना कि समीकरण स्वयं।

संदर्भ और आगे पढ़ने के लिए

सुपरसिमेट्री और ग्रैंड यूनिफिकेशन

- वेस, जे., और बेगर, जे. (1992). *सुपरसिमेट्री और सुपरग्रैविटी*. प्रिंसटन यूनिवर्सिटी प्रेस।
- बेयर, एच., और टाटा, एक्स. (2006). *कमजोर स्केल सुपरसिमेट्री: सुपरफील्ड्स से लेकर प्रकीर्णन घटनाओं तक*. कैम्ब्रिज यूनिवर्सिटी प्रेस।
- जॉर्जी, एच., और ग्लाशो, एस. एल. (1974). “सभी प्राथमिक कण बलों का एकीकरण।” *फिजिकल रिव्यू लेटर्स*, 32(8), 438।

स्ट्रिंग थ्योरी और M-थ्योरी

- ग्रीन, एम. बी., श्वार्ट्ज, जे. एच., और विटन, ई. (1987). *सुपरस्ट्रिंग थ्योरी* (खंड 1 और 2)। कैम्ब्रिज यूनिवर्सिटी प्रेस।
- पोलचिंस्की, जे. (1998). *स्ट्रिंग थ्योरी* (खंड 1 और 2)। कैम्ब्रिज यूनिवर्सिटी प्रेस।
- विटन, ई. (1995). “विभिन्न आयामों में स्ट्रिंग थ्योरी डायनामिक्स।” *न्यूक्लियर फिजिक्स B*, 443(1), 85-126।
- बेकर, के., बेकर, एम., और श्वार्ट्ज, जे. एच. (2006). *स्ट्रिंग थ्योरी और M-थ्योरी: एक आधुनिक परिचय*. कैम्ब्रिज यूनिवर्सिटी प्रेस।

लूप क्वांटम गुरुत्वाकर्षण और विकल्प

- रोवेली, सी. (2004). *क्वांटम गुरुत्वाकर्षण*. कैम्ब्रिज यूनिवर्सिटी प्रेस।
- थीमैन, टी. (2007). *आधुनिक कैनोनिकल क्वांटम सामान्य सापेक्षता*. कैम्ब्रिज यूनिवर्सिटी प्रेस।
- एम्बजॉर्न, जे., जुरकिएविक्ज, जे., और लॉल, आर. (2005). “ब्रह्मांड का पुनर्जनन।” *फिजिकल रिव्यू D*, 72(6), 064014।

प्रयोगात्मक सीमाएँ

- अड, जी., और अन्य। (ATLAS सहयोग)। (2012). “मानक मॉडल हिंग्स बोसॉन की खोज में एक नए कण का अवलोकन।” *फिजिक्स लेटर्स B*, 716(1), 1-29।
- चाटरचियान, एस., और अन्य। (CMS सहयोग)। (2012). “125 GeV के द्रव्यमान के साथ एक नए बोसॉन का अवलोकन।” *फिजिक्स लेटर्स B*, 716(1), 30-61।
- एबॉट, बी. पी., और अन्य। (LIGO वैज्ञानिक सहयोग और Virgo सहयोग)। (2016). “बाइनरी ब्लैक होल मर्जर से गुरुत्वाकर्षण तरंगों का अवलोकन।” *फिजिकल रिव्यू लेटर्स*, 116(6), 061102।

सुलभ लोकप्रिय खाते

- ग्रीन, बी. (1999). *द एलिंगेंट यूनिवर्स: सुपरस्ट्रिंग्स, हिडन डायमेंशन्स, और द वर्वेस्ट फॉर द अल्टिमेट थ्योरी*. डब्ल्यू. डब्ल्यू. नॉट्न।
- रैडल, एल. (2005). *वॉरप्ड पासेजेज: अनरैवलिंग द मिस्ट्रीज़ ऑफ द यूनिवर्स'ज़ हिडन डायमेंशन्स*. हार्पर पेरेनियल।
- रोवेली, सी. (2016). *सेवन ब्रीफ लेसन्स ऑन फिजिक्स*. रिवरहेड बुक्स।
- विल्जेक, एफ. (2008). *द लाइटनेस ऑफ बीइंग: मास, ईथर, एंड द यूनिफिकेशन ऑफ फोर्सेस*. बेसिक बुक्स।