

स्टैंडर्ड मॉडल से पहले की भौतिकी

19वीं सदी के अंत में, भौतिकी लगभग पूर्ण प्रतीत हो रही थी। न्यूटन के गति और गुरुत्वाकर्षण के नियम दो सदी से अधिक समय तक अटल रहे। मैक्सवेल के समीकरणों ने बिजली और चुंबकत्व को एक ही विद्युतचुंबकीय क्षेत्र में एकीकृत किया। ऊष्मागतिकी ने ऊष्मा, इंजन और एंट्रॉपी को समझाया। 1890 के दशक में एक आत्मविश्वास से भरा भौतिकशास्त्री यह मान सकता था कि प्रकृति के मूल सिद्धांत काफी हद तक ज्ञात हो चुके हैं, और केवल कुछ छोटे विवरणों को भरने की आवश्यकता बाकी है।

इस माहौल को लॉर्ड केल्विन ने 1900 में प्रसिद्ध रूप से संक्षेप में कहा, जब उन्होंने घोषणा की कि भौतिकी लगभग पूरी हो चुकी है, सिवाय “क्षितिज पर कुछ बादलों” के। विंडबना यह है कि यही बादल उन तूफानों को भड़काने वाले थे जिन्होंने भौतिकी को हमेशा के लिए बदल दिया।

न्यूटन की सफलता और बुध का पेरीहेलियन

न्यूटन के गति और सार्वभौमिक गुरुत्वाकर्षण के नियम अविश्वसनीय रूप से शक्तिशाली थे। उन्होंने एक ही सूत्र से सेब के गिरने और चंद्रमा की कक्षा को समझाया। उन्होंने हैली धूमकेतु की वापसी की भविष्यवाणी की, ग्रहों की नौवहन में मार्गदर्शन किया और कई पीढ़ियों के वैज्ञानिकों को प्रेरित किया।

लेकिन सब कुछ पूरी तरह से मेल नहीं खाता था। सूर्य के सबसे निकट ग्रह बुध की कक्षा में प्रीसेसन दिखाई देता था—इसका सूर्य के सबसे निकट बिंदु प्रत्येक चक्कर में थोड़ा सा बदल जाता था। इस घटना का अधिकांश हिस्सा न्यूटन के यांत्रिकी और अन्य ग्रहों के गुरुत्वाकर्षण प्रभाव से समझाया जा सकता था। लेकिन प्रति सदी 43 कोणीय सेकंड की एक जिद्दी अतिरिक्त विचलन अस्पष्ट थी। कुछ ने इसे समझाने के लिए एक अदृश्य ग्रह “वल्कन” का प्रस्ताव रखा। लेकिन दूरबीनों ने कभी ऐसा कोई पिंड नहीं पाया।

यह छोटी सी विसंगति आसानी से नजरअंदाज की जा सकती थी, लेकिन यह केल्विन के छिपे हुए बादलों में से एक थी: एक छोटी सी विसंगति जो न्यूटन की तात्कालिक, पूर्ण गुरुत्वाकर्षण की अवधारणा में गहरी खामी का संकेत देती थी—वक्र समय-अंतरिक्ष की पहली फुसफुसाहट।

ब्लैक बॉडी विकिरण आपदा

एक और बादल ऊष्मा और प्रकाश की दुनिया में उभर रहा था। ब्लैक बॉडी—एक आदर्शीकृत वस्तु जो सभी विकिरण को अवशोषित और पुनः उत्सर्जित करती है—अपने तापमान के आधार पर एक विशिष्ट स्पेक्ट्रम के साथ चमकती है। शास्त्रीय भौतिकी ने भविष्यवाणी की कि उच्च आवृत्तियों पर उत्सर्जित विकिरण अनंत तक बढ़ जाएगा, जिससे तथाकथित “पराबैंगनी आपदा” होगी। दूसरे शब्दों में, एक गर्म स्टोव को पराबैंगनी प्रकाश में अनंत ऊर्जा के साथ चमकना चाहिए था—जो स्पष्ट रूप से बेतुका था।

प्रयोगों ने दिखाया कि वास्तविक ब्लैक बॉडी सीमित, अच्छी तरह से परिभाषित स्पेक्ट्रम उत्सर्जित करते हैं। शास्त्रीय भौतिकी की यह विफलता स्पष्ट थी और इसे नए सिद्धांतों के बिना ठीक नहीं किया जा सकता था।

1900 में, मैक्स प्लांक ने अनिच्छा से एक साहसिक समाधान प्रस्तावित किया: ऊर्जा सतत नहीं है, बल्कि असतत पैकेट्स में आती है—क्वांटम। उन्होंने बाद में कहा, “मुझे एक तरह की निराशा का सहारा लेना पड़ा, यह एक निराशाजनक कृत्य था।” यह कट्टरपंथी विचार क्वांटम सिद्धांत का जन्म था, हालांकि प्लांक स्वयं इसे एक क्रांति के बजाय एक चाल के रूप में देखते थे। एक और बादल गहरा हो गया, फटने की प्रतीक्षा में।

फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव

1905 में, अल्बर्ट आइंस्टीन ने शास्त्रीय भौतिकी पर क्वांटम हमले को और गहरा किया। प्रकाश, जो लंबे समय से एक तरंग के रूप में समझा जाता था, एक कण की तरह भी व्यवहार कर सकता था। फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव में, धातु पर पड़ने वाला प्रकाश इलेक्ट्रॉनों को बाहर निकालता है। शास्त्रीय सिद्धांत का कहना था कि बाहर निकाले गए इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा प्रकाश की तीव्रता पर निर्भर करनी चाहिए। लेकिन प्रयोगों ने दिखाया कि यह आवृत्ति पर निर्भर करता है। केवल एक निश्चित सीमा आवृत्ति से ऊपर का प्रकाश—चमक की परवाह किए बिना—इलेक्ट्रॉनों को मुक्त कर सकता था।

आइंस्टीन ने यह समझाया कि प्रकाश बाद में फोटॉन कहे जाने वाले ऊर्जा पैकेट्स में आता है। “प्रकाश के क्वांटम को शाब्दिक रूप से लेना होगा,” उन्होंने लिखा।

प्रकाश की कण दृष्टि में यह चौंकाने वाला वापसी उन्हें नोबेल पुरस्कार दिलाया। इससे भी महत्वपूर्ण यह था कि यह दिखाया कि तरंग-कण द्वैतता केवल एक जिज्ञासा नहीं, बल्कि एक मूलभूत सिद्धांत था। एक और बादल बिजली बन गया।

परमाणु और रदरफोर्ड का आश्रय

1900 के दशक की शुरुआत में, परमाणुओं को वास्तविक माना गया था, लेकिन उनकी संरचना एक रहस्य थी। जे.जे. थॉमसन का “प्लम पुडिंग” मॉडल कल्पना करता था कि इलेक्ट्रॉन एक फैले हुए सकारात्मक आवेश में जड़े हुए हैं। लेकिन 1911 में, अर्नेस्ट रदरफोर्ड के सोने की पत्री प्रयोग ने इस तस्वीर को चकनाचूर कर दिया। पतली सोने की पत्री पर अल्फा कणों को गोली मारने पर, अधिकांश पास हो गए, लेकिन कुछ तीव्र कोणों पर बिखर गए—“जैसे कि आपने 15 इंच का गोला टिशू पेपर पर दागा और वह वापस उछल आया,” रदरफोर्ड ने टिप्पणी की।

निष्कर्ष: परमाणुओं में एक छोटा, घना नाभिक होता है, जो ज्यादातर खाली जगह से घिरा होता है। लेकिन कक्षा में चक्कर लगाने वाले इलेक्ट्रॉन नाभिक में सर्पिल क्यों नहीं करते, अपनी ऊर्जा उत्सर्जित करते हुए? शास्त्रीय विद्युतगतिकी कोई जवाब नहीं देती थी। परमाणुओं की स्थिरता एक रहस्य थी—केल्विन का एक और बादल, जो एक तूफान में बढ़ रहा था।

दो बादल तूफान बन गए

1910 तक, दरारें इतनी बड़ी हो गई थीं कि उन्हें नजरअंदाज नहीं किया जा सकता था। शास्त्रीय भौतिकी निम्नलिखित को समझा नहीं सकती थी:

- बुध की कक्षा।
- ब्लैक बॉडी विकिरण।
- फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव।
- परमाणुओं की स्थिरता।

जो छोटी विसंगतियां प्रतीत होती थीं, वे गहरी असफलताओं के लक्षण निकलीं। दो दशकों में, उन्होंने दो क्रांतियों को जन्म दिया: सामान्य सापेक्षता सिद्धांत गुरुत्वाकर्षण और अंतरिक्ष-समय की ज्यामिति को समझाने के लिए, और **क्वांटम यांत्रिकी** सूक्ष्म दुनिया को समझाने के लिए।

भौतिकी पूर्ण होने से बहुत दूर थी। यह वास्तविकता की अजीब, स्तरित संरचना को उजागर करने की शुरुआत थी।

क्वांटम यांत्रिकी का जन्म

20वीं सदी की शुरुआत में, शास्त्रीय भौतिकी में दरारें विशाल खाइयों में बदल गई थीं। ब्लैक बॉडी विकिरण, फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव, परमाणु की संरचना—इनमें से कोई भी न्यूटन की यांत्रिकी या मैक्सवेल के विद्युतचुंबकत्व से समझाया नहीं जा सकता था। भौतिकशास्त्रियों को तेजी से साहसिक विचारों को अपनाने के लिए मजबूर होना पड़ा। परिणाम एक छोटा सुधार नहीं था, बल्कि वास्तविकता का पूर्ण पुनर्निर्माण था: **क्वांटम यांत्रिकी।**

प्लांक के क्वांटम: अनिच्छुक क्रांति

1900 में, मैक्स प्लांक ने ब्लैक बॉडी समस्या को हल करने की कोशिश की। शास्त्रीय भौतिकी ने उच्च आवृत्तियों पर अनंत विकिरण की भविष्यवाणी की—“पराबैंगनी आपदा”। हताशा में, प्लांक ने एक साहसिक गणितीय चाल प्रस्तावित की: यह मानना कि ऊर्जा सतत नहीं है, बल्कि आवृत्ति के समानुपाती असतत पैकेट्स में आती है:

$$E = h\nu$$

सरल स्पष्टीकरण: आवृत्ति ν वाला प्रकाश पुंज केवल $h\nu$ आकार के टुकड़ों में ऊर्जा का आदान-प्रदान कर सकता है; उच्च आवृत्ति वाला प्रकाश बड़े ऊर्जा “टुकड़े” ले जाता है।

प्लांक ने स्वयं इसे एक व्यावहारिक समाधान के रूप में देखा, न कि एक कद्वितीय परिवर्तन। लेकिन यह निरंतरता की दीवार में पहली दरार थी, जो सदियों से भौतिकी को परिभाषित करती थी।

आइंस्टीन के प्रकाश क्वांटम

पांच साल बाद, आइंस्टीन ने प्लांक के विचार को गंभीरता से लिया। फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव को समझाने के लिए, उन्होंने प्रस्तावित किया कि प्रकाश क्वांटम से बना है—जिन्हें बाद में फोटॉन कहा गया।

यह चौंकाने वाला था। एक सदी पहले यंग के डबल स्लिट प्रयोग से प्रकाश को एक तरंग के रूप में समझा जाता था। लेकिन आइंस्टीन ने दिखाया कि यह एक कण की तरह भी व्यवहार कर सकता है। तरंग-कण द्वैतता का जन्म हुआ।

फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव ने आइंस्टीन को 1921 में नोबेल पुरस्कार दिलाया और क्वांटम वृष्टिकोण की पहली निर्णयिक जीत को चिह्नित किया—एक और बादल तूफान में बदल गया।

बोहर का परमाणु

परमाणु की संरचना अभी भी एक रहस्य थी। रदरफोर्ड ने दिखाया था कि नाभिक मौजूद है, लेकिन कक्षा में चक्कर लगाने वाले इलेक्ट्रॉन नाभिक में सर्पिल क्यों नहीं करते?

1913 में, नील्स बोहर ने एक साहसिक समाधान प्रस्तावित किया: इलेक्ट्रॉन केवल विशिष्ट असतत कक्षाओं में मौजूद होते हैं और प्रकाश के क्वांटम उत्सर्जित या अवशोषित करके उनके बीच छलांग लगा सकते हैं। उनका मॉडल हाइड्रोजन की वर्णक्रमीय रेखाओं को आश्वर्यजनक सटीकता के साथ समझाता था।

बोहर का परमाणु शास्त्रीय कक्षाओं और क्वांटम नियमों का एक असहज मिश्रण था, लेकिन यह काम करता था। यह एक संकेत था कि क्वांटमकरण केवल एक चाल नहीं थी—यह एक मूलभूत सिद्धांत था। बोहर ने मजाक में कहा: “जो कोई क्वांटम सिद्धांत से चौंकता नहीं है, वह इसे समझा नहीं है।” बोहर के लिए, चौंकना इस बात का सबूत था कि आप ध्यान दे रहे हैं।

डी ब्रॉग्ली की तरंगे

1924 में, लुई डी ब्रॉग्ली ने द्वैतता को उलट दिया। अगर प्रकाश तरंगों कण की तरह व्यवहार कर सकती हैं, तो शायद कण भी तरंग की तरह व्यवहार कर सकते हैं। उन्होंने प्रस्तावित किया कि इलेक्ट्रॉनों में तरंगदैर्घ्य होता है, जो निम्नलिखित द्वारा दिया जाता है:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

सरल स्पष्टीकरण: अधिक संवेग p वाले कणों की तरंगदैर्घ्य छोटी होती है; तेज, भारी “गोलियां” धीमे, हल्के कणों की तुलना में कम तरंग जैसी दिखती हैं।

इस विचार की पुष्टि 1927 में हुई जब डेविसन और जर्मर ने एक क्रिस्टल से इलेक्ट्रॉन विवर्तन का अवलोकन किया। पदार्थ तरंग जैसा था। तरंगों और कणों के बीच की दीवार ढह गई।

हाइजेनबर्ग की मैट्रिक्स यांत्रिकी

1925 में, वर्नर हाइजेनबर्ग ने एक सुसंगत ढांचा खोजा जो अवलोकन योग्य मात्राओं—मापी जा सकने वाली उत्सर्जित विकिरण की आवृत्तियों और तीव्रताओं—पर अडिग रहता था, और उन इलेक्ट्रॉन कक्षाओं की कल्पना करने से बचता था जिन्हें देखा नहीं जा सकता था। परिणाम मैट्रिक्स यांत्रिकी थी: एक नई बीजगणित जहां गुण का क्रम मायने रखता था ($AB \neq BA$)।

यह कटूरपंथी गणित इलेक्ट्रॉनों के असतत छलांगों को पकड़ता था और स्पेक्ट्रम को आश्वर्यजनक सटीकता के साथ भविष्यवाणी करता था। भ्रमित करने वाला? हाँ। लेकिन गहराई से भविष्यवाणी करने वाला भी।

श्रोडिंगर की तरंग यांत्रिकी

लगभग एक साथ, इरविन श्रोडिंगर ने एक तरंग समीकरण विकसित किया जो यह वर्णन करता था कि पदार्थ की तरंगें समय के साथ कैसे विकसित होती हैं:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

सरल स्पष्टीकरण: तरंग फलन Ψ सिस्टम की संभावनाओं को कोड करता है, और हैमिल्टन ऑपरेटर \hat{H} यह वर्णन करता है कि ये संभावनाएं समय के साथ कैसे बदलती हैं।

श्रोडिंगर का दृष्टिकोण हाइजेनबर्ग के मैट्रिक्स से अधिक सहज था और जल्दी ही क्वांटम यांत्रिकी की मानक भाषा बन गया। शुरू में, श्रोडिंगर ने सोचा कि इलेक्ट्रॉन शाब्दिक रूप से फैली हुई तरंगें हैं, लेकिन प्रयोगों ने इसके विपरीत दिखाया। तरंग फलन अंतरिक्ष में भौतिक तरंग नहीं थी, बल्कि संभावना की आयाम थी—एक नई तरह की वास्तविकता।

हाइजेनबर्ग का अनिश्चितता सिद्धांत

1927 में, हाइजेनबर्ग ने एक चौंकाने वाले परिणाम को औपचारिक रूप दिया: एक कण का स्थान और संवेग एक साथ मनमानी सटीकता के साथ नहीं जाना जा सकता। यह **अनिश्चितता सिद्धांत** माप उपकरणों की सीमा नहीं थी, बल्कि प्रकृति की एक मूलभूत विशेषता थी:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

सरल स्पष्टीकरण: जितनी सटीकता से आप स्थान जानते हैं, उतनी ही कम सटीकता से आप संवेग जानते हैं, और इसके विपरीत; प्रकृति स्वयं यह सीमा निर्धारित करती है।

न्यूटन की भौतिकी का आधारशिला, निश्चितता, संभावनाओं के सामने झुक गई।

कोपेनहेगन व्याख्या

बोहर और हाइजेनबर्ग ने एक व्याख्या प्रस्तावित की: क्वांटम यांत्रिकी निश्चित वास्तविकताओं को नहीं, बल्कि माप परिणामों की संभावनाओं को वर्णन करती है। माप का कार्य तरंग फलन को संक्षिप्त करता है।

यह **कोपेनहेगन व्याख्या** व्यावहारिक और सफल थी, हालांकि दार्शनिक रूप से परेशान करने वाली थी। आइस्टीन ने प्रसिद्ध रूप से आपसि जताई—“ईश्वर पासा नहीं खेलता”—लेकिन प्रयोगों ने क्वांटम यांत्रिकी की संभावनात्मक प्रकृति की बार-बार पुष्टि की।

डिरैक और सापेक्षवादी क्वांटम सिद्धांत

1928 में, पॉल डिरैक ने क्वांटम यांत्रिकी को विशेष सापेक्षता सिद्धांत के साथ जोड़ा, डिरैक समीकरण बनाया। इसने इलेक्ट्रॉन को अभूतपूर्व सटीकता के साथ वर्णन किया और एक नई कण की भविष्यवाणी की: पॉज़िट्रॉन, जिसे 1932 में खोजा गया। डिरैक का शांत आत्मविश्वास—“भौतिकी के अधिकांश हिस्से और पूरी रसायन विज्ञान की गणितीय सिद्धांत के लिए आवश्यक मूलभूत भौतिक नियम पूरी तरह से ज्ञात हैं”—उस युग की महत्वाकांक्षा को दर्शाता था।

यह पहला संकेत था कि क्वांटम सिद्धांत को सापेक्षता के साथ एकीकृत किया जा सकता है—एक वादा जो क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत में विकसित हुआ।

एक नया विश्व दृष्टिकोण

1930 के दशक तक, क्वांटम क्रांति पूरी हो चुकी थी:

- ऊर्जा क्वांटमित थी।
- प्रकाश और पदार्थ दोनों तरंग और कण थे।
- परमाणु स्थिर था क्योंकि इलेक्ट्रॉन असतत क्वांटम अवस्थाओं पर कब्जा करते थे।
- मूलभूत पैमानों पर संभावना, निश्चितता नहीं, शासन करती थी।

शास्त्रीय भौतिकी को खारिज नहीं किया गया; इसे बड़े पैमानों पर क्वांटम यांत्रिकी की सीमा के रूप में पुनः प्राप्त किया गया। यह आधुनिक भौतिकी का पहला पाठ था: पुराने सिद्धांत कभी “गलत” नहीं होते, केवल अपूर्ण होते हैं।

लेकिन कितना भी शानदार क्यों न हो, क्वांटम यांत्रिकी को नई चुनौतियों का सामना करना पड़ा। कण कैसे परस्पर क्रिया करते हैं, बिखरते हैं, नष्ट होते हैं और फिर से प्रकट होते हैं? एक ऐसा ढांचा कैसे बनाया जाए जहां कणों की संख्या स्थिर न हो और सापेक्षता की आवश्यकताओं को पूरा किया जाए?

जवाब 20वीं सदी के मध्य में **क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत** के साथ आया, जिसे फेनमैन और अन्य ने अग्रणी बनाया—हमारी कहानी का अगला अध्याय।

रिचर्ड फेनमैन और क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत की भाषा

क्वांटम यांत्रिकी ने परमाणुओं और अणुओं को समझाने में विजय प्राप्त की थी, लेकिन जैसे-जैसे प्रयोग गहराई में गए, इसकी सीमाएं स्पष्ट हो गईं। इलेक्ट्रॉन, फोटॉन और अन्य कण केवल बंधी हुई अवस्थाओं में नहीं रहते थे—वे परस्पर क्रिया करते थे, टकराते थे, नष्ट हो जाते थे और नए कण बनाते थे। इन प्रक्रियाओं का वर्णन करने के लिए, क्वांटम यांत्रिकी को आइंस्टीन के विशेष सापेक्षता सिद्धांत के साथ जोड़ा जाना था। परिणाम **क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत (QFT)** था, जो आधुनिक कण भौतिकी का आधार है।

क्वांटम यांत्रिकी क्यों अपर्याप्त थी

सामान्य क्वांटम यांत्रिकी कणों की संख्या को स्थिर मानती थी। एक इलेक्ट्रॉन परमाणु में घूम सकता था, लेकिन अचानक गायब नहीं हो सकता या बदल नहीं सकता था। लेकिन कण त्वरक में प्रयोगों ने यहीं दिखाया: कण लगातार बनते और नष्ट होते हैं। और $E = mc^2$ के साथ सापेक्षता ने मांग की कि पर्याप्त ऊर्जावान टकराव ऊर्जा को नए द्रव्यमान में बदल सकते हैं।

QFT ने ऑन्टोलॉजी को बदलकर जवाब दिया: **क्षेत्र मूलभूत हैं; कण उनके उत्तेजन हैं।** प्रत्येक कण प्रकार एक क्वांटम क्षेत्र से मेल खाता है जो पूरे अंतरिक्ष को व्याप्त करता है।

- इलेक्ट्रॉन इलेक्ट्रॉन क्षेत्र में एक लहर है।
- फोटॉन विद्युतचुंबकीय क्षेत्र में एक लहर है।
- ग्लूऑन, व्हार्क, W और Z बोसॉन, हिंग्स—प्रत्येक अपने क्षेत्र का उत्तेजन है।

सृजन और विनाश स्वाभाविक हो गया: क्षेत्र को उत्तेजित करें या शांत करें।

क्वांटम इलेक्ट्रोडायनामिक्स (QED)

पहला पूरी तरह से सफल सापेक्षवादी QFT था **क्वांटम इलेक्ट्रोडायनामिक्स (QED)**, जो आवेशित पदार्थ (जैसे इलेक्ट्रॉनों) और फोटॉनों के बीच परस्पर क्रिया का वर्णन करता है। 1940 के दशक में रिचर्ड फेनमैन, जूलियन श्विंगर और सिन-इटिरो तोमोनागा द्वारा विकसित—जिन्होंने 1965 का नोबेल पुरस्कार साझा किया—QED ने पहले की गणनाओं की बाधा: अनंतताओं को हल किया।

कुंजी थी **पुनर्जनन** (renormalization), कुछ अनंतताओं को कुछ मापने योग्य मापदंडों (आवेश, द्रव्यमान) में अवशोषित करने की एक सैद्धांतिक विधि, जो सटीक, परिमित भविष्यवाणियां छोड़ती थी। परिणाम ऐतिहासिक था: QED ने इलेक्ट्रॉन के चुंबकीय आधूर्ण को अविश्वसनीय सटीकता के साथ भविष्यवाणी की—विज्ञान में सबसे सटीक रूप से सत्यापित भविष्यवाणियों में से एक।

फेनमैन डायग्राम: भौतिकी की नई व्याकरण

फेनमैन का सबसे प्रभावशाली योगदान वैचारिक था। उन्होंने दृश्य गणना का आविष्कार किया—**फेनमैन डायग्राम**—जो अपारदर्शी इंटीग्रल्स को दृश्य, गणनीय प्रक्रियाओं में बदल देता था।

- सीधी रेखाएं फर्मियों (इलेक्ट्रॉन, क्वार्क) को दर्शाती हैं।
- लहरदार रेखाएं गेज बोसॉनों (फोटॉन, ग्लूऑन) को दर्शाती हैं।
- शीर्ष बिंदु परस्पर क्रिया बिंदु हैं।

डायग्राम एक प्रक्रिया में योगदान देने वाली संभावित “कहानियों” को सूचीबद्ध करते हैं, जो फेनमैन के पथ इंटीग्रल दृष्टिकोण को दर्शाते हैं: क्वांटम प्रक्रिया सभी पथों की खोज करती है; आयाम जोड़े जाते हैं; संभावनाएं उनके परिमाण के वर्ग से उत्पन्न होती हैं। जो कभी भयावह था, वह स्पर्श योग्य और गणनीय हो गया।

QED से परे: मजबूत और कमजोर बलों की ओर

QED ने विद्युतचुंबकत्व पर कब्जा कर लिया। लेकिन वही उपकरण बॉक्स—क्षेत्र, गेज सममिति, पुनर्जनन, डायग्राम तकनीक—आगे बढ़ सकता था।

- **कमजोर बल:** बीटा क्षय और सौर संलयन के लिए जिम्मेदार, इसे भारी मध्यस्थों (W^\pm, Z^0) और समता उल्लंघन की आवश्यकता थी—एक एकीकृत स्पष्टीकरण की मांग करने वाली विचित्रताएं।
- **मजबूत बल:** क्वार्कों को प्रोटॉन और न्यूट्रॉन के अंदर रखने वाला, पूरी तरह से अलग स्वभाव का था—छोटी दूरी पर विशाल बल, लेकिन लंबी दूरी पर लगभग अदृश्य।

एकीकृत थीम थी **गेज सममिति**: समीकरणों को स्थानीय परिवर्तनों के तहत अपनी संरचना बनाए रखने की मांग, आवश्यक गेज क्षेत्रों (फोटॉन, ग्लूऑन, W/Z) और परस्पर क्रिया संरचनाओं को आश्र्यजनक अनिवार्यता के साथ उत्पन्न करती है।

विजय और सीमाएं

सदी के मध्य तक, QFT कण भौतिकी की *lingua franca* बन गई थी। इसने उप-परमाणविक दुनिया को व्यवस्थित किया और सटीक गणनाओं को संभव बनाया। लेकिन गुरुत्वाकर्षण ने क्वांटमकरण का विरोध किया—वही पुनर्जनन चालें विफल हो गई—और अंतरिक्ष-समय का पूर्ण क्वांटम सिद्धांत अभी भी मायावी था। QFT एक शानदार, लेकिन अपने डोमेन में सीमित विजय थी।

क्वांटम क्रोमोडायनामिक्स और मजबूत बल

QED की सफलता ने भौतिकशास्त्रियों को 1950 और 60 के दशक की अराजक सीमा से निपटने के लिए प्रोत्साहित किया: “कण चिड़ियाघर”। नए हैट्रॉन—पायन, कैऑन, हाइपेरोन, रेजोनेस—त्वरकों से भ्रामक प्रचुरता में निकले। क्या यह अराजकता मूलभूत थी, या इसे आवर्त सारणी की तरह व्यवस्थित किया जा सकता था?

मजबूत बल का रहस्य

नाभिकीय बंधन ने अजीब विशेषताएं प्रदर्शित कीं:

- फेन्टोमीटर स्केल पर विशाल बल, इसके बाहर तेजी से गायब हो जाता था।
- संतृप्ति: अधिक न्युक्लियॉन जोड़ने से प्रति कण बंधन रैखिक रूप से नहीं बढ़ता था।
- अल्पकालिक हैड्रॉनिक रेजोनेंस की प्रचुरता।

शास्त्रीय समानताएं विफल हो गई। एक कटूरपंथी नई तस्वीर की आवश्यकता थी।

क्वार्क मॉडल

1964 में, मरे गेल-मैन और स्वतंत्र रूप से जॉर्ज ज़वेग ने प्रस्तावित किया कि हैड्रॉन कम, अधिक मूलभूत घटकों से बने हैं: **क्वार्क।**

- शुरू में: तीन स्वाद—ऊपर, नीचे, अजीब—रसायन में आवर्त पैटर्न की तरह हैड्रॉन मल्टीप्लेट्स को व्यवस्थित करते थे।
- प्रोटॉन और न्यूट्रॉन: ऊपर/नीचे संयोजन।
- कैओन और हाइपेरोन: अजीब शामिल।

मॉडल ने चिड़ियाघर को व्यवस्थित किया। लेकिन कोई भी प्रयोग एकल क्वार्क को अलग नहीं कर सका था। क्या क्वार्क “वास्तविक” थे, या केवल सुविधाजनक बहीखाता?

परिरोधन का रहस्य

यहां तक कि जब प्रोटॉन उच्च ऊर्जा पर टूटे, डिटेक्टर हैड्रॉन की बौछार देखते थे, न कि मुक्त क्वार्क। ऐसा लगता था कि क्वार्कों को बांधने वाली शक्ति उन्हें अलग करने की कोशिश करने पर और मजबूत हो जाती थी—जैसे एक रबर बैंड जो खींचने पर और कस जाता है। एक बल विद्युतचुंबकत्व से इतना अलग कैसे व्यवहार कर सकता था?

क्वांटम क्रोमोडायनामिक्स (QCD)

प्रगति एक नई गैर-एबेलियन गेज सिद्धांत थी: **क्वांटम क्रोमोडायनामिक्स (QCD)**।

- **क्वार्क रंग आवेश** रखते हैं (तीन प्रकार की अमूर्त विशेषता—लाल, हरा, नीला)।
- हैड्रॉन रंगहीन संयोजन हैं (RGB से “सफेद प्रकाश” की तरह)।
- बल **ग्लूऑन** द्वारा संचालित होता है, जो स्वयं रंग रखते हैं—इसलिए वे एक-दूसरे के साथ परस्पर क्रिया करते हैं।

यह अंतिम विशेषता—स्व-परस्पर क्रिया करने वाले गेज बोसॉन—QCD को QED से गुणात्मक रूप से अलग बनाती थी और इसकी सबसे उल्लेखनीय विशेषताओं को समर्थन देती थी।

एसिम्टोटिक स्वतंत्रता और परिरोधन

1973 में, डेविड ग्रॉस, फ्रैंक विल्जेक और डेविड पॉलित्जर ने **एसिम्टोटिक स्वतंत्रता** की खोज की:

- बहुत छोटी दूरी पर (उच्च ऊर्जा में) मजबूत युग्मन **कमजोर** होता है; क्वार्क लगभग स्वतंत्र रूप से व्यवहार करते हैं।
- बड़ी दूरी पर (कम ऊर्जा में) युग्मन **मजबूत** होता है; क्वार्क कसकर बंधे होते हैं—**परिरोधन।**

सरल स्पष्टीकरण: अधिक ऊर्जा के साथ करीब ज़ूम करें, क्वार्क पट्टा से फिसल जाते हैं; दूर ज़ूम करें, पट्टा कस जाता है।

इसने SLAC के गहरे असंयमित प्रकीर्णन परिणामों (प्रोटॉनों के अंदर बिंदु-जैसे घटकों) और मुक्त क्वार्कों की अनुपस्थिति को समझाया। इस तिकड़ी को 2004 में नोबेल पुरस्कार मिला।

QCD के लिए साक्ष्य

QCD एक सुंदर विचार से एक अनुभवजन्य आधार में परिपक्व हुआ:

- **कोलाइडरों में जेट:** उच्च ऊर्जा वाले क्वार्क और ग्लूऑन टकरावों से निकलते हैं और संरेखित स्प्रे में “हैड्रोनाइज़” करते हैं—जेट—जिनके पैटर्न QCD की भविष्यवाणियों से मेल खाते हैं।
- **लैटिस QCD:** सुपरकंप्यूटर सिमुलेशन अंतरिक्ष-समय को असतत करते हैं, हैड्रॉनों के द्रव्यमान और परस्पर क्रिया को प्रभावशाली स्टीकता के साथ पुनर्जनन करते हैं।
- **क्वार्क-ग्लूऑन प्लाज्मा:** अत्यधिक तापमान और घनत्व पर (RHIC, LHC), पदार्थ क्वार्क और ग्लूऑनों की गैर-परिरोधित अवस्था में बदल जाता है—प्रारंभिक ब्रह्मांड की गूंज।

हैड्रॉन मूलभूत नहीं, बल्कि समग्र हो गए; ग्लूऑन “चिपकाने” के लिए जिम्मेदार थे।

दोधारी विजय

QED और इलेक्ट्रोवीक सिद्धांत के साथ मिलकर QCD ने **स्टैंडर्ड मॉडल (SM)** को पूरा किया। यह एक जबरदस्त सफलता थी, लेकिन इसने नए रहस्यों को उजागर किया:

- **परिरोधन** अभी भी पहले सिद्धांतों से विश्लेषणात्मक रूप से सिद्ध नहीं हुआ है (हालांकि भारी समर्थन प्राप्त है)।
- **मजबूत CP समस्या:** QCD प्रयोगों में न दिखने वाले CP उल्लंघन की अनुमति देता प्रतीत होता है।
- **ब्रह्मांडीय अंतराल:** QCD सामान्य पदार्थ को समझाता है, न कि डार्क मैटर।

सिद्धांत ने बहुत कुछ समझाया—लेकिन सब कुछ नहीं।

इलेक्ट्रोवीक एकीकरण और हिंग्स तंत्र

1970 के दशक की शुरुआत में, QED और QCD मजबूती से स्थापित हो चुके थे। लेकिन **कमजोर नाभिकीय बल**—रेडियोधर्मी क्षय और सौर संलयन के लिए जिम्मेदार—अजीब था: छोटी दूरी वाला, समता उल्लंघन करने वाला, भारी बोसॉनों द्वारा संचालित।

एक गहरे एकीकरण ने प्रलोभन दिया। यह **इलेक्ट्रोवीक सिद्धांत** के रूप में आया, जो भौतिकी की सबसे बड़ी उपलब्धियों में से एक था। इसकी केंद्रीय भविष्यवाणी—**हिंग्स बोसॉन**—को सत्यापित करने में लगभग आधा सदी लगी।

कमजोर बल: अजीब परस्पर क्रिया

कमजोर बल निम्नलिखित में प्रकट होता है:

- **बीटा क्षय:** न्यूट्रॉन एक प्रोटॉन बन जाता है, एक इलेक्ट्रॉन और एक एंटीन्यूट्रिनो उत्सर्जित करता है।
- **तारकीय संलयन:** प्रोटॉन न्यूट्रॉन में बदलते हैं ताकि भारी नाभिक बन सकें।

विशिष्ट विशेषताएं:

- बहुत छोटी दूरी ($\sim 10^{-3}$ फेम्टोमीटर) पर कार्य करता है।
- समता (दर्पण सममिति) और यहाँ तक कि CP सममिति को तोड़ता है।
- तीन भारी कणों द्वारा संचालित: W^+ , W^- , Z^0 ।

ये बोसॉन अपनी द्रव्यमान कहाँ से प्राप्त करते हैं, जबकि फोटॉन द्रव्यमान रहित रहता है? यह एक केंद्रीय रहस्य था।

इलेक्ट्रोवीक एकीकरण: ग्लाशो, सलाम, वाइनबर्ग

1960 के दशक में, शेल्डन ग्लाशो, अब्दुस सलाम और स्टीवन वाइनबर्ग ने एकीकरण प्रस्तावित किया: विद्युतचुंबकत्व और कमजोर बल एक ही इलेक्ट्रोवीक परस्पर क्रिया के दो पहलू हैं।

मुख्य विचार:

- उच्च ऊर्जा पर दोनों एक हो जाते हैं; कम ऊर्जा पर अलग दिखते हैं।
- एक नया क्षेत्र जो अंतरिक्ष को भरता है—हिंग्स क्षेत्र—सममिति को तोड़ता है, W और Z को द्रव्यमान देता है, जबकि फोटॉन द्रव्यमान रहित रहता है।
- गणितीय रूप से: $SU(2)_L \times U(1)_Y$ सममिति समूह के साथ एक गेज सिद्धांत।

हिंग्स तंत्र

हिंग्स क्षेत्र एक ब्रह्मांडीय माध्यम की तरह है जो पूरे अंतरिक्ष को भरता है। इसके साथ परस्पर क्रिया करने वाले कण जड़त्व द्रव्यमान प्राप्त करते हैं; जो नहीं करते (जैसे फोटॉन) द्रव्यमान रहित रहते हैं।

- W और Z बोसॉन हिंग्स क्षेत्र के साथ मजबूती से युग्मित होते हैं, लगभग 80-90 GeV द्रव्यमान प्राप्त करते हैं।
- फर्मियों प्रत्येक फर्मी प्रकार के लिए भिन्न-भिन्न ताकत के यूकावा युग्मनों के माध्यम से द्रव्यमान प्राप्त करते हैं।
- हिंग्स बोसॉन स्वयं हिंग्स क्षेत्र की एक लहर (क्वांटम उत्तेजन) है।

सरल स्पष्टीकरण: द्रव्यमान एक बार दिया गया “पदार्थ” नहीं है, बल्कि सर्वव्यापी क्षेत्र के साथ निरंतर परस्पर क्रिया है।

प्रयोगात्मक विजय: W , Z , और हिंग्स

वीरतापूर्ण प्रयोगों ने सिद्धांत का परीक्षण किया:

- 1983 (CERN, SPS):** W^\pm और Z^0 बोसॉनों की खोज, जिनके द्रव्यमान और गुण भविष्यवाणियों के साथ संरेखित थे। कार्लो रुबिया और साइमन वैन डेर मीर को 1984 में नोबेल पुरस्कार मिला।
- 2012 (CERN, LHC):** ATLAS और CMS ने ~125 GeV पर एक नए कण—हिंग्स बोसॉन—की घोषणा की, जिसके उत्पादन और क्षय चैनल SM की अपेक्षाओं के साथ संरेखित थे।

इस खोज ने स्टैंडर्ड मॉडल की कण सूची को पूरा किया। तूफान बीत गया; नवशा भूभाग से मेल खाता था।

स्टैंडर्ड मॉडल पूर्ण वैभव में

2010 के दशक में, स्टैंडर्ड मॉडल विज्ञान की सबसे सफल सिद्धांतों में से एक के रूप में खड़ा था:

- बल (क्षेत्र):**
 - विद्युतचुंबकत्व (QED)
 - मजबूत बल (QCD)
 - कमजोर बल (इलेक्ट्रोवीक का हिस्सा)
- कण:**
 - छह क्वार्क (ऊपर, नीचे, अजीब, आकर्षक, नीचे, ऊपर)।
 - छह लेप्टॉन (इलेक्ट्रॉन, म्यूऑन, टाऊ और उनके न्यूट्रिनो)।
 - गेज बोसॉन (फोटॉन, आठ ग्लूऑन, W , Z)।
 - हिंग्स बोसॉन।

इसकी भविष्यवाणी शक्ति आश्वर्यजनक थी, जिसे कई पीढ़ियों के कोलाइडरों और डिटेक्टरों द्वारा सत्यापित किया गया।

दरारें उभरती हैं

2012 में जब शैपेन की बोतलें खुलीं, तब भी भौतिकशास्त्री जानते थे कि SM अधूरा है।

- यह गुरुत्वाकर्षण को शामिल नहीं करता।
- न्यूट्रिनो में द्रव्यमान है, लेकिन न्यूनतम SM उन्हें द्रव्यमान रहित बनाता है।
- डार्क मैटर और डार्क एनर्जी अनुपस्थित हैं।
- पदानुक्रम समस्या: हिंग का द्रव्यमान प्लांक स्केल पर क्वांटम सुधारों की तुलना में इतना हल्का क्यों है?
- स्वाद रहस्य: ये द्रव्यमान और मिश्रण क्यों? तीन पीढ़ियाँ क्यों?

हिंग की खोज अंत नहीं थी, बल्कि शुरुआत थी—इस बात का संकेत कि SM **जितना दूर जाता है** उतना सही है।

वैज्ञानिक पद्धति का पाठ

केल्विन के मामूली “बादलों” से लेकर पूर्ण पैमाने की क्रांतियों तक, भौतिकी ने विसंगतियों को गंभीरता से लेने से प्रगति की:

1. **भ्रामक डेटा** (बुध की प्रीसेसन, ब्लैक बॉडी स्पेक्ट्रम, फोटोइलेक्ट्रिक थ्रेशोल्ड, परमाणुओं की स्थिरता)।
2. **साहसिक सैद्धांतिक ढांचे** (सामान्य सापेक्षता सैद्धांत; क्वांटम यांत्रिकी)।
3. **एकीकृत औपचारिकताएं** (क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत; गेज सममिति)।
4. **भविष्यवाणी की गई संस्थाएं** (क्वार्क, ग्लूऑन, W/Z , हिंग)।
5. **दशकों की प्रयोगात्मक दृढ़ता** (टेबलटॉप प्रयोगों से टेरा-इलेक्ट्रॉनवोल्ट कोलाइडरों तक)।
6. **विजय—और नए प्रश्न।**

पुराने सिद्धांतों को खारिज नहीं किया गया; वे सीमित मामलों के रूप में **सम्मिलित** किए गए: कम गति और कमजोर गुरुत्वाकर्षण में आइंस्टीन में न्यूटन, बड़े पैमानों पर क्वांटम यांत्रिकी में शास्त्रीय भौतिकी, स्थिर कण संख्या में QFT में गैर-सापेक्षवादी क्वांटम यांत्रिकी।

अंतिम विचार

न्यूटन की यांत्रिक ब्रह्मांड से प्लांक के निराशाजनक क्वांटम तक; आइंस्टीन के फोटॉनों से बोहर के क्वांटम छलांगों तक; फेनमैन के डायग्रामों से QCD के जेट और हिंग क्षेत्र की शांत सर्वव्यापकता तक—पिछले 150 वर्षों ने छोटे बादलों से जन्मे तूफानों को दिखाया है। प्रत्येक विसंगति—बुध की कक्षा, ब्लैक बॉडी स्पेक्ट्रम, अस्थिर परमाणु, लापता हिंग—एक संकेत थी कि कुछ गहरा खोजा जाने की प्रतीक्षा में था।

आज, स्टैंडर्ड मॉडल विजयी रूप से खड़ा है, इसकी भविष्यवाणियाँ उत्कृष्ट सटीकता के साथ सत्यापित हैं। लेकिन केल्विन के बादलों की तरह, नए रहस्य छिपे हुए हैं: **डार्क मैटर, डार्क एनर्जी, न्यूट्रिनो द्रव्यमान, बैरियन असममिति, क्वांटम गुरुत्वाकर्षण।** यदि इतिहास एक मार्गदर्शक है, तो ये दरारें यह नहीं दर्शातीं कि भौतिकी समाप्त हो गई है—वे यह दर्शाती हैं कि यह एक और क्रांति की शुरुआत है।

संदर्भ और आगे पढ़ने के लिए

स्टैंडर्ड मॉडल और क्वांटम क्षेत्र सिद्धांत की मूल बातें

- Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). **Introduction to Quantum Field Theory.** Westview Press.
- Weinberg, S. (1995). **The Quantum Theory of Fields** (Volumes 1-3). Cambridge University Press.
- Griffiths, D. (2008). **Introduction to Elementary Particles** (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1963). **The Feynman Lectures on Physics.** Addison-Wesley.

सामान्य सापेक्षता और ब्रह्मांड विज्ञान

- Einstein, A. (1916). "The Foundation of the General Theory of Relativity." **Annalen der Physik**.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). **Gravitation**. W. H. Freeman.
- Carroll, S. M. (2004). **Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity**. Addison-Wesley.