https://farid.ps/articles/light_energy_information_life/hi.html

प्रकाश: ऊर्जा, सूचना, जीवन

कुछ ही अवधारणाएँ मानव इतिहास में प्रकाश की तरह इतना प्रतीकात्मक भार वहन करती हैं। इससे पहले कि हम इसकी तरंगदैर्घ्य को माप सकें या इसकी ऊर्जा की गणना कर सकें, लोगों ने महसूस किया कि प्रकाश केवल एक भौतिक घटना से कहीं अधिक है - यह स्वयं जीवन का एक रूपक था।

हिब्रू बाइबिल में, सृष्टि की शुरुआत इन शब्दों से होती है: **"प्रकाश हो जाए।"** कुरान में, भगवान को **"आकाश और पृथ्वी का प्रकाश"** के रूप में वर्णित किया गया है। बौद्ध धर्म में, **ज्ञानोदय** सत्य के प्रति जागृति की अवस्था है। विभिन्न परंपराओं में, प्रकाश दैवीयता, शुद्धता और बुद्धिमत्ता का प्रकटीकरण है। इसके विपरीत, अंधेरा अज्ञानता, बुराई या अराजकता है।

हमारी भाषाएँ इन रूपकों को संरक्षित रखती हैं। हम किसी समस्या पर "प्रकाश डालते हैं", जब हम समझते हैं तो "प्रकाश देखते हैं", और किसी को प्रेरित करने पर उसे "प्रतिभाशाली" कहते हैं। ज्ञान वह प्रकाश है जो अज्ञानता के सायों को दूर करता है।

समकालीन धर्मों से बहुत पहले, विश्व भर की संस्कृतियों ने **शीतकालीन संक्रांति** - सबसे छोटा दिन, जब अंधेरा अपने चरम पर होता है और प्रकाश अपनी वापसी शुरू करता है - को मनाया। प्रारंभिक समाजों के लिए, जो गर्मी और फसल के लिए सूर्य पर निर्भर थे, संक्रांति जीवित रहने और आशा का एक महत्वपूर्ण मोड़ थी। अलाव, भोज और अनुष्ठान प्रकाश के पुनर्जनन का उत्सव मनाते थे। यह परंपरा बाद में ईसाई धर्म में क्रिसमस के रूप में शामिल हो गई, फिर भी इसका गहरा प्रतीकवाद बना रहता है: सूर्य की वापसी के माध्यम से जीवन का नवीकरण। आज भी, संक्रांति उत्सव हमें मानव संस्कृति में प्रकाश के केंद्रीय स्थान की याद दिलाते हैं।

इसलिए, प्रकाश हमेशा हमारे लिए फोटॉनों से कहीं अधिक रहा है: यह ऊर्जा, सूचना और जीवन है - भौतिक और आध्यात्मिक दोनों अर्थों में।

प्रकाश क्या है?

इसके रूपकों के साथ सहस्राब्दियों तक जीने के बाद, मानवता ने अंततः विज्ञान की ओर रुख किया और पूछा: प्रकाश वास्तव में किस चीज से बना है?

एक फोटॉन को एक सूक्ष्म एंटीना या प्रेरकता और संधारित्र से बने एक संनादी सर्किट के रूप में माना जा सकता है - सिवाय इसके कि इसमें कोई भौतिक भाग नहीं होते। यह विद्युत ऊर्जा को चुंबकीय ऊर्जा में और फिर वापस निरंतर परिवर्तन करके मौजूद रहता और प्रसार करता है, एक स्व-निरंतर दोलन जो प्रकाश को अंतरिक्ष में गति करने की अनुमति देता है।

हालांकि, फोटॉन हमारी आँखों को दिखाई देने वाले रंगों के संकीर्ण बैंड तक सीमित नहीं हैं। वे एक विशाल रेंज को कवर करते हैं, गगनचुंबी इमारतों से लंबी रेडियो तरंगों से लेकर परमाणु नाभिक से छोटे गामा किरणों तक। इस स्पेक्ट्रम के पार, वे ब्रह्मांड को आकार देते हैं, जीवन को बनाए रखते हैं, और मानव सभ्यता को शक्ति प्रदान करते हैं।

तरंगदैर्घ्य, आवृत्ति और ऊर्जा

प्रत्येक फोटॉन को तीन परस्पर संबंधित तरीकों से वर्णित किया जा सकता है:

- **तरंगदैर्घ्य (λ):** दोलनशील क्षेत्र के शिखरों के बीच की दूरी।
- **आवृत्ति (ν):** प्रत्येक सेकंड में होने वाली दोलनों की संख्या।
- **ऊर्जा (E):** क्वांटम का आकार, जो प्लैंक के संबंध **E = hν** द्वारा दिया जाता है।

ये प्रकाश की गति से एक साथ जुड़े हुए हैं: **c = λv**। लंबी तरंगदैर्घ्य का अर्थ है कम आवृत्ति और कम ऊर्जा, जबकि छोटी तरंगदैर्घ्य उच्च आवृत्ति और उच्च ऊर्जा लाती हैं। रेंज आश्चर्यजनक है:

- **रेडियो तरंगें:** λ ~ किलोमीटर, v ~ किलोहर्ट्ज़, E ~ 10^{-12} eV।
- **माइक्रोवेव:** λ ~ सेंटीमीटर, v ~ गीगाहर्ट्ज़, E ~ 10^{-5} eV।
- **अवरक्त:** λ ~ माइक्रोन, v ~ टेराहर्ट्ज़, E ~ 0.01 eV।
- **दृश्य प्रकाश:** λ = 400–700 नैनोमीटर, v ~ 10^{14} हर्ट्ज़, E ~ 2–3 eV।
- **एक्स-रे:** λ ~ नैनोमीटर, v ~ 10^{17} हर्ट्ज़, E ~ keV।
- **गामा किरणें:** λ < 0.01 नैनोमीटर, v > 10^{19} हर्ट्ज़, E ~ MeV–GeV।

यह स्पेक्ट्रम दिखाता है कि एक ही क्वांटम - फोटॉन - विभिन्न पैमानों पर अलग-अलग तरीके से खुद को व्यक्त करता है।

फोटॉनों के स्रोत

विभिन्न भौतिक प्रक्रियाएँ स्पेक्ट्रम के विभिन्न क्षेत्रों को जन्म देती हैं:

- **एंटीना:** कंडक्टरों में दोलन करने वाले इलेक्ट्रॉन लंबी तरंगदैर्घ्य वाले फोटॉन उत्सर्जित करते हैं - रेडियो और माइक्रोवेव विकिरण। यह प्रसारण, रडार और वायरलेस नेटवर्क का आधार है।
- **परमाण्विक संक्रमण:** जब परमाणुओं में इलेक्ट्रॉन कक्षा के बीच उछलते हैं, तो वे अवरक्त, दृश्य और पराबैंगनी रेंज में फोटॉन उत्सर्जित करते हैं। ये फोटॉन गर्मी, रंग और रासायनिक ऊर्जा ले जाते हैं।
- **नाभिकीय संक्रमण:** उच्चतम ऊर्जा पर, जब नाभिक में आवेशित कण पुनर्व्यवस्थित होते हैं, तो गामा किरण फोटॉन उत्सर्जित होते हैं। ये दृश्य प्रकाश से लाखों गुना अधिक ऊर्जावान होते हैं।

इस तरह, फोटॉन एंटीना, परमाणुओं और नाभिकों से समान रूप से उत्पन्न होते हैं, जो भौतिक ब्रह्मांड को एक साथ जोड़ते हैं।

क्वांटीकरण और रेडियो तरंगें

क्योंकि फोटॉन की ऊर्जा आवृत्ति के समानुपाती होती है (**E = hv**), रेडियो-आवृत्ति फोटॉनों में बहुत कम ऊर्जा होती है - दृश्य या गामा फोटॉनों की तुलना में ट्रिलियन गुना कम। नतीजतन, एंटीना एक समय में एक फोटॉन को इस तरह से उत्सर्जित नहीं करते कि हम आसानी से पता लगा सकें। इसके बजाय, वे एक साथ **विशाल संख्या** में फोटॉन छोड़ते हैं।

एक एकल प्रसारण एंटीना प्रति सेकंड **10^{20} से 10^{25} रेडियो फोटॉनों** की मात्रा में उत्सर्जन कर सकता है। किसी भी रिसीवर के लिए - या हमारी अंतर्जनन के लिए - यह एक चिकनी, निरंतर तरंग की तरह दिखता है। क्वांटीकरण अभी भी मौजूद है, लेकिन यह प्रचुरता के नीचे छिपा हुआ है।

इसके विपरीत, उच्च-ऊर्जा फोटॉन जैसे पराबैंगनी, एक्स-रे और गामा किरणें व्यक्तिगत रूप से पर्याप्त ऊर्जा ले जाती हैं ताकि उन्हें एक-एक करके पता लगाया जा सके। उनकी कण-समान प्रकृति स्पष्ट है, यही कारण है कि आइंस्टीन का फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव का स्पष्टीकरण पराबैंगनी प्रकाश पर केंद्रित था, न कि रेडियो पर।

धारणा में यह अंतर एक कारण है कि तरंग-कण बहस इतने लंबे समय तक चली।

फोटॉनों का संक्षिप्त इतिहास

फोटॉनों की हमारी समझ सदियों की बहस और खोजों के माध्यम से विकसित हुई है।

- **न्यूटन बनाम ह्यूजेंस (1600 का दशक):** न्यूटन ने तर्क दिया कि प्रकाश छोटे कणों से बना है, जबकि ह्यूजेंस ने जोर देकर कहा कि यह एक तरंग है। दोनों आंशिक रूप से सही थे, लेकिन उस समय की तकनीक इस सवाल को हल नहीं कर सकी।

- **मैक्सवेल (1860 का दशक):** जेम्स क्लर्क मैक्सवेल ने अपनी समीकरणों के साथ बिजली, चुंबकत्व और प्रकाश को एकीकृत किया, यह दिखाते हुए कि प्रकाश एक विद्युतचुंबकीय तरंग है। यह तरंग सिद्धांत के लिए एक जीत थी।
- **प्लैंक और आइंस्टीन (1900–1905):** प्लैंक ने ब्लैकबॉडी विकिरण को समझाने के लिए क्वांटाइज्ड ऊर्जा का विचार पेश किया, और आइंस्टीन ने इसका उपयोग फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव को समझाने के लिए किया। प्रकाश केवल असतत पैकेट में इलेक्ट्रॉनों को बाहर निकाल सकता था - फोटॉन। यह कण दृष्टिकोण के लिए एक जीत थी।
- **क्वांटम यांत्रिकी (1920–30):** तरंग-कण दोहरेपन को औपचारिक रूप दिया गया: कुछ प्रयोगों में फोटॉन तरंगों की तरह और दूसरों में कणों की तरह व्यवहार करते थे। लेकिन वैचारिक चित्र अभी भी असंतोषजनक था।
- **फेन्मन (1940–60):** रिचर्ड फेन्मन ने अपनी पथ अभिन्न सूत्रीकरण के साथ इस विरोधाभास को हल किया। उन्होंने दिखाया कि फोटॉन न तो शास्त्रीय तरंगें हैं और न ही शास्त्रीय कण, बल्कि क्वांटम वस्तुएँ हैं जो सभी रास्तों को लेती हैं, प्रत्येक रास्ता एक "चरण" के साथ योगदान देता है - उनकी प्रसिद्ध कलाई घड़ी की उपमा। इससे उन्होंने क्वांटम इलेक्ट्रोडायनामिक्स (QED), विज्ञान की सबसे सटीक सिद्धांत, के निर्माण में मदद की।

फेन्मन ने फोटॉनों की खोज नहीं की, लेकिन उन्होंने हमें उनकी **सबसे पूर्ण और सटीक समझ** प्रदान की, जो सदियों की परस्पर विरोधी सिद्धांतों को एक सुसंगत ढांचे में एकीकृत करती थी।

ध्रुवीकरण: प्रकाश का नृत्य

आवृत्ति के अलावा, फोटॉनों में एक और गुण होता है: **ध्रुवीकरण**।

चूंकि एक फोटॉन का विद्युत क्षेत्र हमेशा इसकी गति की दिशा के लंबवत दोलन करता है, यह उस अनुप्रस्थ तल में किसी भी कोण पर उन्मुख हो सकता है। एक फोटॉन को आगे बढ़ते हुए कल्पना करें: इसका क्षेत्र ऊर्ध्वाधर, क्षैतिज या उनके बीच कहीं भी दोलन कर सकता है। यही ध्रुवीकरण है।

ध्रुवीकरण का सबसे परिचित परिणाम **चकाचौंध** है। जब प्रकाश पानी, कांच या गीली सड़क जैसे सपाट, क्षैतिज सतह से परावर्तित होता है, तो परावर्तित फोटॉन बेतरतीब ढंग से उन्मुख नहीं होते। परावर्तन की भौतिकी **क्षैतिज रूप से ध्रुवीकृत प्रकाश** को प्राथमिकता देती है, क्योंकि सतह पर इलेक्ट्रॉन उस विद्युत क्षेत्र के घटक को अधिक कुशलता से पुनः विकीर्ण करते हैं जो तल के साथ होता है।

यही कारण है कि **ध्रुवीकृत धूप के चश्मे** इतनी अच्छी तरह से काम करते हैं: इनमें एक ऊर्ध्वाधर ध्रुवीकरण होता है, जो क्षैतिज रूप से ध्रुवीकृत फोटॉनों को रोकता है जबकि ऊर्ध्वाधर फोटॉनों को गुजरने देता है। परिणामस्वरूप, सड़कों, झीलों और विंडशील्ड से चकाचौंध काफी हद तक कम हो जाती है।

ऑटोमोबाइल के शुरुआती दिनों में, इंजीनियरों ने एक और भव्य विचार की खोज की: क्या होगा यदि ध्रुवीकरण को स्वयं कारों में शामिल किया जा सके? प्रस्ताव था कि सभी **हेडलाइट्स को ऊर्ध्वाधर रूप से ध्रुवीकृत** किया जाए, जबकि सभी **विंडशील्ड्स को क्षैतिज ध्रुवीकरण** के साथ सुसज्जित किया जाए। परिणाम यह होगा कि सामने से आने वाली हेडलाइट्स स्वचालित रूप से फ़िल्टर हो जाएंगी, जिससे ड्राइवरों को चकाचौंध से बचाया जा सके। यह अवधारणा चतुर और सुरुचिपूर्ण थी, लेकिन उस समय बड़े पैमाने पर उत्पादन के लिए बहुत महंगी थी। यह विचार छोड़ दिया गया - धूप के चश्मे को उसी समस्या का अधिक व्यावहारिक समाधान छोड़ते हुए।

ध्रुवीकरण और भी विदेशी हो सकता है। यदि फोटॉन के विद्युत क्षेत्र में ऊर्ध्वाधर और क्षैतिज दोनों घटक हों, और ये घटक **चौथाई चक्र से बाहर चरण** में दोलन करते हों, तो परिणाम **वृत्तीय ध्रुवीकरण** होता है। क्षेत्र अब एकल रेखा पर आगे-पीछे नहीं दोलन करता, बल्कि एक सर्पिल बनाता है, जो गति के अक्ष के चारों ओर घूमता है - एक साधारण दोलन के बजाय एक निरंतर पार्श्व नृत्य।

डाइपोल एंटीना की उपमा अभी भी लागू होती है: जैसे डाइपोल में अपनी धुरी के साथ अंधे धब्बे होते हैं, वैसे ही फोटॉन कभी भी अपने विद्युत क्षेत्र को अपने पथ के साथ नहीं जोड़ते। वे अनुप्रस्थ रहते हैं, हमेशा अपनी गति की दिशा के चारों ओर चक्कर लगाते हैं।

फोटॉनों का क्वांटम उत्सर्जन

क्वांटम स्तर पर, फोटॉन अचानक छलांग में उत्सर्जित होते हैं।

- **परमाणु:** जब एक इलेक्ट्रॉन कक्षा के बीच संक्रमण करता है, तो परमाणु संक्षिप्त रूप से एक छोटे डाइपोल एंटीना की तरह व्यवहार करता है और एक फोटॉन उत्सर्जित करता है।
- **नाभिक:** जब प्रोटॉन या न्यूट्रॉन अपनी संरचना बदलते हैं, तो एक गामा किरण फोटॉन उत्सर्जित होता है।
- **कंडक्टर:** तारों में दोलन करने वाले इलेक्ट्रॉन लंबी तरंगदैर्घ्य वाले फोटॉन छोड़ते हैं।

उत्तेजित अवस्थाएँ नैनोसेकंड या घंटों तक बनी रह सकती हैं, जो सिस्टम पर निर्भर करता है, लेकिन जब उत्सर्जन होता है, तो यह तात्कालिक होता है - एक सच्चा **क्वांटम छलांग**, बिना मध्यवर्ती अवस्था और बिना आंशिक फोटॉन के।

यह वह सार्वभौमिक तंत्र है जिसके द्वारा फोटॉन जन्म लेते हैं।

लेजर: फोटॉनों पर नियंत्रण

फोटॉनों का उपयोग करने में मानवता की सबसे बड़ी जीत में से एक है **लेजर**।

लेजर की शुरुआत उत्तेजित अवस्थाओं में रखे गए परमाणुओं के एक जलाशय से होती है। यह **जनसंख्या उलटाव** माध्यम में ऊर्जा पंप करके बनाया जाता है - एक विद्युत निर्वहन, एक अन्य लेजर या एक रासायनिक प्रतिक्रिया का उपयोग करके।

उत्तेजित परमाणु दो दर्पणों के बीच फंसे होते हैं: एक पूरी तरह से परावर्तक और दूसरा आंशिक रूप से पारदर्शी। दर्पणों के बीच की दूरी फोटॉन की तरंगदैर्घ्य से मेल खाने के लिए ट्यून की जाती है। केवल संनादी में फोटॉन बार-बार परावर्तन से बचते हैं; बाकी एक-दूसरे को रद्द कर देते हैं।

शुरुआत में, उत्सर्जन यादृच्छिक होते हैं। फिर एक फोटॉन स्वतःस्फूर्त रूप से गुहा की धुरी के साथ उत्सर्जित होता है। यह फोटॉन **पायलट** बन जाता है, जैसे बिजली की हड़ताल की प्रमुख चिंगारी। इसका विद्युत क्षेत्र सभी बाद के प्रेरित उत्सर्जनों के लिए अभिविन्यास और चरण को परिभाषित करता है। पड़ोसी परमाणु फोटॉन छोड़ते हैं जो सटीक प्रतियां हैं - एक ही आवृत्ति, एक ही चरण, एक ही ध्रुवीकरण।

जैसे-जैसे पायलट बढ़ता है, फोटॉन आगे-पीछे उछलते हैं, एक-दूसरे को मजबूत करते हैं। जब तीव्रता पर्याप्त रूप से उच्च हो जाती है, तो अर्ध-पारदर्शी दर्पण के माध्यम से एक धारा बाहर निकलती है।

परिणाम लेजर प्रकाश है:

- **एकरंगी:** केवल एक आवृत्ति जीवित रहती है।
- **सुसंगत:** सभी फोटॉन एकसाथ टिक करते हैं, उनकी कलाई घड़ियाँ संरेखित होती हैं।
- **ध्रुवीकृत:** पायलट फोटॉन दोलन की दिशा को परिभाषित करता है।

एक बल्ब के मिश्रित, यादृच्छिक प्रकाश के विपरीत, एक लेजर फोटॉनों की एक अनुशासित सेना है जो एकसाथ कदमताल करती है।

फोटॉनों की मूलभूत भूमिका

फोटॉन केवल भौतिकी की जिज्ञासाएँ नहीं हैं - वे ब्रह्मांड की नींव हैं।

- तारों में, फोटॉन संलयन ऊर्जा को दूर ले जाते हैं, पतन को रोकते हैं और तारों की रोशनी को संभव बनाते हैं।
- पृथ्वी पर, सौर फोटॉन ग्रह को गर्म करते हैं और प्रकाश संश्लेषण को शक्ति प्रदान करते हैं, जिससे जीवन संभव होता है।
- सभ्यता में, फोटॉन हमारे दूत हैं। लंबी-तरंग रेडियो से लेकर फाइबर ऑप्टिक्स तक, हमने लगातार स्पेक्ट्रम में ऊपर की ओर प्रगति की है, सूचना घनत्व और पहुँच को बढ़ाया है। आज, फोटॉन इंटरनेट, उपग्रहों, चिकित्सा इमेजिंग और सटीक माप को जोड़ते हैं।

हर ऑक्सीजन की साँस, हर भोजन, हर फोन कॉल, हर ईमेल फोटॉनों पर निर्भर करता है।

निष्कर्ष

फोटॉन विद्युतचुंबकीय क्षेत्र के क्वांटा हैं, जो एक ऐसे स्पेक्ट्रम को कवर करते हैं जो तारों को शक्ति देता है, जीवन को बनाए रखता है और तकनीक को सक्षम बनाता है। उन्होंने वैज्ञानिकों की पीढ़ियों को हैरान किया क्योंकि वे तरंग या कण की श्रेणियों का उल्लंघन करते थे।

फोटॉनों की कहानी न्यूटन के कणों और ह्यूजेंस की तरंगों से शुरू हुई, मैक्सवेल के समीकरणों के साथ बढ़ी, आइंस्टीन के फोटोइलेक्ट्रिक प्रभाव के साथ तीक्ष्ण हुई और अंततः फेन्मन की कलाई घड़ी की उपमा और QED की गणित में अपनी सबसे स्पष्ट अभिव्यक्ति पाई।

पनडुब्बी संकेतों से लेकर गामा किरण विस्फोटों तक, एंटीना से लेकर परमाणुओं और नाभिकों तक, धूप के चश्मों से लेकर लेजरों तक, फोटॉन वहाँ हैं। और फेन्मन की अंतर्दृष्टि के माध्यम से, हम अंततः उन्हें स्पष्ट रूप से देखते हैं - न केवल तरंगों या कणों के रूप में, बल्कि प्रकाश के सार्वभौमिक क्वांटा के रूप में।