REVIEW PAPER

The Quantum Entanglement Theory and the 2022 Nobel Prize in Physics

Ragib A. Khan

Freelance Author and Researcher
Leonard Bernstein Strasse 4-6/9/38
1220 Vienna, Austria, +43

Corresponding Email: ragibahsankhan@gmail.com

Received: 01/19/2023; Accepted: 02/19/2023

https://doi.org/10.5281/zenodo.7868704

ABSTRACT

Albert Einstein was one of the key architects of the Quantum Mechanics theory. His Theory of Relativity was a deterministic one. In 1927, Werner Heisenberg proposed his Uncertainty Principle, a key piece of quantum theory, which was indeterministic. With this, indeterminism was introduced to the scientific world. Einstein protested Heisenberg's Uncertainty Principle, and in 1935, to defend determinism, Einstein published a thought experiment: the famous EPR (Einstein Podolsky Rosen) theory along with Nathan Rosen and Boris Podolsky. In 1964, John Stuart Bell intensively reviewed the EPR theory. To verify the correctness of EPR theory, he proposed another thought experiment which would need a mechanical set up. In 1967, Carl Kocher first performed a mechanical experiment to verify Bell's theory. Subsequently, John Clauser and Alain Aspect made several modifications of Carl Kocher's experiment and did not find any hidden variables, which substantiated Bell's theory. In 1993, C.H. Bennett and his team proposed the theoretical Quantum Teleportation concept. Indeed, in 1997, through experiment, Popescu and his team, and Zeilinger and his team independently proved that quantum teleportation is possible. In 2022, for their contribution to quantum mechanics, John Clauser, Alain Aspect, and Anton Zeilinger were ararded the Nobel Prize in physics.

Key Words: Entanglement, Quantum information, EPR Paradox, thought experiment, Bell Theorem, Quantum Teleportation

Cite this article as: *Khan, R.A. 2023,* The Entanglement Theory and the 2022 Nobel Prize in Physics*, Bangla J. Interdisciplinary Sci., **1**(1): 11-24.*

কোয়ান্টাম এনটেংগেলমেন্ট তত্ত্ব এবং পদার্থবিদ্যায় ২০২২ সালের নোবেল প্রাইজ

সারাংশ

কোয়ান্টাম তত্ত্বের অন্যতম স্থপতি আলবার্ট আইনস্টাইনের (Albert Einstein) আপেক্ষিক তত্ত্ব ছিল নিশ্চয়তাবাদী (Deterministic)। ১৯২৭ সালে বিজ্ঞানী ওয়ার্নার হাইজেনবার্গ (Werner Heisenberg) তাঁর অনিশ্চয়তা তত্ত্ব উপস্থাপন করেন, তার অনিবার্য পরিণতি হিসেবে বিজ্ঞানে প্রবেশ করে অনির্দিষ্টবাদ (Indeterminism)। আইনস্টাইন তার প্রতিবাদ করেন এবং Entanglement ধারণাকে প্রস্তাব করেন EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) তত্ত্বে, যেখানে বিজ্ঞানী বরিস পডোলস্কি (Boris Podolsky) ও বিজ্ঞানী নাথান রোজেন (Nathan Rosen) সংযুক্ত ছিলেন। তখনো সেটি ছিল একটি Thought Experiment মাত্র। ১৯৬৪ সালে বিজ্ঞানী জন বেল EPR তত্ত্বের ওপর একটি প্রযুক্তিগত উপায় বা thought experiment প্রস্তাব করেন। তাঁর এ কাজটিই হলো ইতিহাস বিখ্যাত Bell Theorem। তত্ত্বটিকে Bell inequalityও বলা হয়। বিজ্ঞানী কার্ল কখার (Carl Kocher) ১৯৬৭ সালে প্রথম বিজ্ঞানী বেলের তত্ত্বটির একটি প্রযুক্তিগত পরীক্ষণ করেন। তারপরই এগিয়ে আসেন বিজ্ঞানী জন ক্লাউজার, অ্যালে আস্পে (Alain Aspect)। ১৯৯৩ সালে C.H. Bennett এবং তাঁর গবেষকদল আরেকটি গবেষণাপত্রের মাধ্যমে Entanglement তত্ত্বের নতুন যে দিকটির উন্মোচণ করেন, তা হলো Quantum Teleportation ধারণা। ১৯৯৭ সালে সেটি প্রথম প্রযুক্তিগতভাবে প্রদর্শন করেন বিজ্ঞানী পপেস্কু এবং প্রফেসর সাইলিংগারের গবেষকদল। এ ক্রমবিকাশের প্রক্রিয়াটিতে মৌলিক অবদানের জন্য পদার্থবিদ্যায় ২০২২ সালে নোবেল প্রাইজ পেলেন বিজ্ঞানী জন ক্লাউজার (John Clauser), অ্যালে আস্পে (Alain Aspect) এবং আন্টন সাইলিংগার (Anton Zeilinger)।

মূল শব্দগুলি: Entanglement, Quantum information, EPR Paradox, thought experiment, Bell Theorem, Quantum Teleportation

ভূমিকা

আধুনিক পদার্থবিজ্ঞানে মূলত তিনটি মৌলিক আবিষ্কারের মাধ্যমে বিজ্ঞানের তাত্ত্বিক ও প্রাযুক্তিক এলাকায় একটা আমূল পরিবর্তন ঘটে। প্রথম বিপ্লবটি ঘটে বিজ্ঞানী আইজ্যাক নিউটনের মাধ্যাকর্ষণ শক্তি আবিষ্কারের মাধ্যমে, দ্বিতীয় বিপ্লবটি সংগঠিত হয় আলবার্ট আইনস্টাইনের আপেক্ষিক তত্ত্বের মাধ্যমে এবং তৃতীয় বিপ্লবটি সংগঠিত হয় কোয়ান্টাম পদার্থবিদ্যার উদ্ভবের মাধ্যমে। কোয়ান্টাম পদার্থবিদ্যার আরেকটি দিক বর্তমানে বিকাশমান তা হলো: কোয়ান্টাম তথ্যবিজ্ঞান এবং কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশন। এ দুটি আবিষ্কার আমাদের আরেকটি অজানা জগতের সাথে পরিচয় করিয়ে দিচ্ছে এবং আমাদেরকে জ্ঞানের সাধনায় আরেকটি উচ্চতর স্তরে নিয়ে যাচ্ছে।

বিজ্ঞানী নিউটন প্রথম মাধ্যাকর্ষণ শক্তির বৈজ্ঞানিক ভিত্তিপ্রস্তর স্থাপন করেন। কিন্তু তিনি দুটি দূরবর্তী স্থানে অবস্থানরত বস্তুর মাঝে কিভাবে এ আকর্ষণ কাজ করে তার ব্যাখ্যা খুঁজে পাননি। এ সমস্যাটিকে তিনি বলেছেন "Action at a Distance" (Newton, 2007) এবং বলে যান, এ প্রশ্নের উত্তর করবে ভবিষ্যৎ প্রজন্ম। বিজ্ঞানী নিউটনের এই প্রশ্নটি হলো এনটেংগেলমেন্ট (Entanglement) তত্ত্বের উদ্ভবের প্রথম পরোক্ষ ইঙ্গিত।

আইনস্টাইন এসে বিজ্ঞানের জগতে এক বিশাল বিপ্লব ঘটালেন। দেশ ও কালের বক্রতা (Curvature) থেকে তিনি দুটি দূরবর্তী অবস্থানে অবস্থানরত বস্তুর মধ্যে আকর্ষণের (মাধ্যাকর্ষণ শক্তি) আপেক্ষিক ব্যাখ্যা দিলেন। নিউটনের তত্ত্বে সময় ছিল চিরস্থির; আইনস্টাইন বললেন সময় স্থির নয়, সময় পরিবর্তনশীল রাশি; সময়ের পরিমাপ গতির দ্রুততার ওপর নির্ভর করে। তিনি তাঁর কালজয়ী $E = mc^2$ সমীকরণটির মাধ্যমে বস্তুরও নতুন সংজ্ঞা দিলেন এবং তিনি আলোর গতিকেই সর্বোচ্চ সীমা বলে সিদ্ধান্ত দিলেন। আইনস্টাইনের বস্তুর অবস্থান ও গতির নতুন ব্যাখ্যাই হলো কোয়ান্টাম তত্ত্বের উদ্ভবের অন্যতম ভিত্তিমূল; এখানেই আইনস্টাইনের আপেক্ষিক তত্ত্বের সাথে কোয়ান্টাম তত্ত্বের বিরোধ বাধে এবং ওঠে আসে Entanglement তত্ত্ব। এ তত্ত্বেরও আদি স্বপ্নদ্রষ্টা আইনস্টাইন। এখানে চমৎকার ঘটনাটি হলো তিনি একই সাথে কোয়ান্টাম তত্ত্বের বিকাশের অন্যতম প্রধান স্থপতি।

১৯২৭ সালে বিজ্ঞানী হাইজেনবার্গের (Werner Heisenberg) অনিশ্চয়তাবাদ তত্ত্ব (Uncertainty Principle) প্রকাশিত হয় (NASA, 1983; Jha, 2013)। তাঁর তত্ত্বের মূল কথা ছিল আমরা যুগপৎ কোনো সাব এটমিক উপাদানের স্থান ও গতি নির্ণয় করতে পারি না। কোনো সাব এটমিক উপাদানের অবস্থান নির্ণয় করতে গেলে গতির অবস্থান বদলে যায়। অন্যদিকে গতির পরিমাণকে নির্নয় করতে গেলে সঠিক অবস্থানকে নির্ণয় করা যায় না। বিজ্ঞানে এ অনিশ্চয়তার অনুপ্রবেশের সাথে সাথে প্রথম আইনস্টাইন প্রতিবাদ করেন। কারণ তাঁর আপেক্ষিক তত্ত্ব নিশ্চয়তাবাদী এবং বিজ্ঞানে অনিশ্চয়তাকে মেনে নিলে জ্ঞান অনির্দিষ্ট (Indeterministic) হয়ে পড়ে এবং সেখানে কার্য-কারণ (Cause-effect Theory) তত্ত্বও কাজ করে না। কার্য-কারণ তত্ত্বে বলা হয় প্রতিটি কাজের একটি কারণ আছে।

এ সমস্যার সমাধানের জন্য এবং বিজ্ঞানে নির্দিষ্টবাদকে রক্ষা করার জন্য আইনস্টাইন ১৯৩৫ সালে বিজ্ঞানী বরিস পডোলস্কি এবং নাথান রোজেনের সাথে বিখ্যাত "Thought Experiment" EPR তত্ত্ব প্রস্তাব করেন। এখানে অবিস্মরণীয় বিষয়টি হলো আইনস্টাইন বিজ্ঞানে অনিশ্চয়তার বিরুদ্ধে প্রতিবাদ করতে গিয়ে কোয়ান্টম তত্ত্বের আরেকটি মৌলিক দিককে গবেষণায় নিয়ে আসেন।

কোনো কোয়ান্টাম সিস্টেমের উপাদানগুলি কোনো কোয়ান্টাম স্টেটে Superposition এ থাকতে পারে। তখন সিস্টেমের উপাদানগুলি মিশ্রিত অবস্থায় থাকে। এ অবস্থাকে বলা হয় উপাদান দুটি Entanglement state এ অবস্থান করছে। আর তা যদি সত্য হয়, তবে তা আপেক্ষিক তত্ত্বের মূলে আঘাত- যা আইনস্টাইন কিছুতেই মেনে নিতে পারছিলেন না। যেমন: কোনো সিস্টেমে যখন দুটি ইলেকট্রন Entangled অবস্থায় থাকে এবং একটি ইলেকট্রনের ঘূর্ণনকে (Rotation) মাপা হয় তার পরিমাণ, অন্য ইলেকট্রনটির ক্ষেত্রেও একই হয়; এ ক্ষেত্রে অন্য ইলেকট্রনটির পরিমাপ না করেই তার অবস্থান সম্পর্কে সঠিকভাবে জানা যায় এবং এই ঘটনাটি ঘটে সাথে সাথে। সুতরাং বিশাল দূরত্বের ক্ষেত্রেও একই ঘটনা

ঘটবে। তাহলে আইনস্টাইনের সিদ্ধান্ত, "আলোর গতিই স্বতঃসিদ্ধ এবং সর্বোচ্চ"- ভুল প্রমাণিত হয় এবং বিজ্ঞানের ক্ষেত্রে ঢুকে পড়ে অনিশ্চয়তাবাদ। আইনস্টাইন একে "Spooky action at a distance" (Brubaker, 2021) বলেছেন। কারণ এ সমস্যার উত্তর তাঁরও জানা ছিল না। আধুনিক বিশ্বের বিজ্ঞানীরা এ প্রশ্নের ওপর গবেষণা করেই কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশন প্রযুক্তি (Quantum Teleportation Technology) আবিষ্কার করেছেন।

EPR-Paradox

গবেষণাপত্রটির শিরোনাম ছিল "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be considered Complete?" আইনস্টাইন কোয়ান্টাম তত্ত্বের অবস্থান ও গতির অনিশ্চয়তাকে দূর করার জন্য এবং বিজ্ঞানে নিশ্চয়তাবাদকে (Determinism) প্রতিষ্ঠা করার জন্য EPR তত্ত্ব প্রস্তাব করেন; যেখানে তিনি বলেন, এ তত্ত্বে সম্ভবত কোনো সুপ্ত পরিবর্তনশীল (Hidden variable) কিছু একটা আছে, তা আবিষ্কার করতে পারলেই বিজ্ঞানের এলাকা থেকে অনিশ্চয়তাবাদ দূর হবে। তাই কোয়ান্টাম তত্ত্ব সঠিক হলেও অসম্পূর্ণ। "Element of reality" কোয়ান্টাম তত্ত্বে অনুপস্থিত এবং এ অসম্পূর্ণতাকে কোনো "Hidden variable" যুক্ত করে দূর করা যায় (Einstein, 1935)।

EPR তত্ত্বে Thought experiment হিসেবে কোনো সিস্টেমে একজোড়া সাব এটমিক উপাদানকে একটি সিস্টেমে কল্পনা করা হয়। এ জোড়াটিকেই পরবর্তীতে বিজ্ঞানীরা "Entangled State" হিসেবে উপস্থাপন করেন। খুব সংক্ষেপে এনটেগেলমেন্টের ব্যাখ্যা হলো, এটমিক জগতে যখন দুটি উপাদান, যেমন: যখন দুটি ফোটন বা দুটি ইলেকট্রন একত্রে অবস্থান করে তখন তাদের মধ্যে একটা অচ্ছেদ্য যোগাযোগ তৈরি হয়। তারা তখন একটা সুপার পজিশনে থাকে এবং একই সময়ে তারা "spin up"ও "spin down" হিসেবে থাকে। মাপন প্রক্রিয়া শুরু করার পূর্ব পর্যন্ত তাদের সঠিক বাস্তবতা আমরা জানতে পারি না। এসময় তাদের মধ্যে কিছু কোরিলেশন তৈরি হয়। যখন গবেষণাগারে তাদেরকে পৃথক করা হয় তখনো তাদের মধ্যে যোগাযোগ থাকে। এটি বিশাল দূরত্ব পর্যন্ত বিস্তৃত হতে পারে। তার অর্থ হলো, যখন আমরা একটা উপাদানকে মাপি তখন অন্য উপাদানটি সম্পর্কেও আমরা সাথে সাথে জেনে যাই।

এখানে তাঁরা বলেন, যদি ঐ সিস্টেমের একটি উপাদানের অবস্থান মাপা হয়, তবে দ্বিতীয় গতিশীল উপাদানটির অবস্থান সম্পর্কে সঠিক ভবিষ্যদ্বাণী করা যায়। ঠিক একইভাবে যদি কোনো একটি উপাদানের গতিবেগকে মাপা হয়, তবে তার ফলাফল থেকে দ্বিতীয় উপাদানটির গতিবেগের ফলাফলকেও ভবিষ্যদ্বাণী করা যায়। এখানে প্রথম উপাদানটির ক্ষেত্রে কোনো পরিবর্তন করা হয়নি। কিন্তু তাদের মধ্যে তাৎক্ষণিক যোগাযোগ হয়ে যাচ্ছে; সমস্যাটি ঠিক এইখানেই। তাদের মধ্যে যদি সাথে সাথে যোগাযোগ হয় তাহলে আপেক্ষিক তত্ত্বের আলোর গতির সর্বোচ্চ সীমা লঙ্ঘিত হয়। তাই তাৎক্ষণিক যোগাযোগ কিভাবে সম্ভব? তাহলে আলোর গতির ধ্রুবকত্ব বিঘ্নিত হয়।

সুতরাং উপর্যুক্ত ব্যাখ্যার প্রেক্ষাপটে কোয়ান্টাম তত্ত্ব অসম্পূর্ণ। কারণ তারা উপাদানদ্বয়ের সঠিক বস্তুগত চরিত্রকে ব্যাখ্যা করতে পারে না। এ পরীক্ষায় যদি দুটি ফোটনকে ব্যবহার করা হয়, যারা অবশ্যই

কিছু উপাদান বা বৈশিষ্ট্যের অধিকারী। এর ব্যাখ্যা কোয়ান্টাম তত্ত্বে নেই এবং এ কারণেই কোয়ান্টাম তত্ত্বে অনিশ্চয়তার উদ্ভব হয়।

EPR তত্ত্বের সিদ্ধান্তে তাঁরা বলেন "While we have thus shown that the wave function doesn't provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible" (Bell, 1987).

বেল থিউরেম (Bell Theorem)

EPR তত্ত্ব প্রকাশিত হওয়ার পর বিজ্ঞানী মহলে সাড়া পড়ে যায়। বিজ্ঞানী জন বেল (John Stewart Bell) ১৯৬৪ সালে EPR তত্ত্বের অমীমাংসিত প্রশ্ন ও সমস্যাগুলিকে সমাধানের জন্য গবেষণা শুরু করেন এবং তাঁর সুবিখ্যাত Bell's inequality তত্ত্ব প্রস্তাব করেন।

Bell's inequality তত্ত্বের মূল কথা হলো EPR তত্ত্বের প্রস্তাবিত এনটেংগেলমেন্ট তত্ত্বে যদি হিডেন ভেরিয়েবল যোগ করে পরীক্ষণটি করা হয়, তবে EPR তত্ত্বের সিদ্ধান্ত সঠিক। অর্থ্যাৎ পরীক্ষণে উপাদানগুলির গতি আলোর গতির চেয়ে কম বা বড়জোর সমান হয়।

অন্যদিকে পরীক্ষণটিতে যদি হিডেন ভেরিয়েবল যোগ করা না হয় তবে সেখানে উপাদানগুলির মধ্যে যোগাযোগ আলোর গতির চেয়ে দ্রুত হয়। ফলে কোয়ান্টাম তত্ত্বের বক্তব্য সঠিক প্রমাণিত হয় এবং EPR তত্ত্বের ভবিষ্যদ্বাণী ভুল প্রমাণিত হয়। বিজ্ঞানী বেলের এ সিদ্ধান্তটি ছিল একটা গাণিতিক সিদ্ধান্ত, যাকে Thought experiment ও বলা যায়। এটিই হলো Bell inequality Theorem। কোয়ান্টাম তত্ত্বের অনির্দিষ্টবাদী বক্তব্যের সাথে বিজ্ঞানের নির্দিষ্টবাদের (Principle of local reality) দ্বন্দ্বের ক্ষেত্রে বিজ্ঞানী বেল তাঁর গবেষণার ফলাফলগুলির প্রেক্ষাপট বিবেচনা করে এ সিদ্ধান্তে আসেন: "If (a hidden variable theory) it is local, it will not agree with quantum mechanics, and if it agrees with quantum mechanics, it will not be local" (Nobelprize.org, 2022)।

সুতরাং এ পরিস্থিতিতে বিজ্ঞানীরা দুটি অমীমাংসিত প্রশ্নের সম্মুখীন হন:

- বিজ্ঞানী বেলের তত্ত্বের একটি প্রযুক্তিগত পরীক্ষণ ও প্রমাণ
- এনটেংগেলমেন্ট তত্ত্বে কোনো হিডেন ভেরিয়েবল আছে কি না, তার প্রযুক্তিগত পরীক্ষণ করা।

এ প্রশ্নের উত্তর প্রদানের জন্য অর্থ্যাৎ প্রযুক্তিগত পরীক্ষা-প্রমাণের জন্য এগিয়ে আসেন কার্ল কখার এবং কামিন্স (Cummins)। তাঁদের পরীক্ষণের সূত্র ধরেই এগিয়ে আসেন আরো কয়েকজন বিজ্ঞানী। তাঁদের মধ্যে ছিলেন জন ক্লাউজার এবং অ্যালে আস্পে। এখানে তাঁদের পরীক্ষণগুলির মূল ধারার একটি সংক্ষিপ্ত বিবরণ তুলে ধরা হয়েছে; যেগুলির ভিত্তির ওপর নির্ভর করেই প্রফেসর সাইলিংগার ও তাঁর গবেষকদল কোয়ান্টাম টেলিপোরটেশন তত্ত্বে উপনীত হন।

কার্ল কখার এবং কখেন-স্পেকার থিউরেম (Carl Kocher and Kochen-Specker Theorem):

১৯৬৬ সালে বিজ্ঞানী বেল বলেছিলেন, তাঁর তত্ত্ব একটি "No-go theorem"। তাঁর এ মন্তব্যের সূত্র ধরে এগিয়ে আসেন সাইমন কখেন (Simon B. Kochen) এবং আর্নেস্ট স্পেকার (Ernest Specker)।

তাঁরা দুজনে বেল তত্ত্বের বক্তব্যকে বাস্তবে পরীক্ষা করার জন্য একটি গাণিতিক অবকাঠামো প্রণয়ন করেন। গবেষণাটি প্রকাশিত হয় ১৯৬৮ সালে (Kohen and Specker, 1968)। কখেন- স্পেকার তাঁদের পরীক্ষণে কিছু গাণিতিক বাধ্যবাধকতা (Constrain) যুক্ত করেন; যেগুলি সুপ্ত পরিবর্তনশীল রাশি তত্ত্বের সাথে সঙ্গতিপূর্ণ। তার মাধ্যমে কোনো বিষয়-নিরপেক্ষ (Context-independent) পদ্ধতিতে কোয়ান্টাম তত্ত্বের ভবিষ্যদ্বাণীগুলির ওপর পরীক্ষণগত যাচাই সম্ভব। বেলের তত্ত্বের সাথে কখেন-স্পেকার তত্ত্বের মূল পার্থক্য হলো, বিজ্ঞানী বেল Hidden variable এর অস্তিত্বকে কেবল Nonlocality ধারণার মাধ্যমে বৈধতা দেয়ার চেষ্টা করেছেন, আর কখেন-স্পেকার contextualitty ধারণার মাধ্যমে তা বাস্তবেপরীক্ষা করে দেখার প্রস্তাব করেন। কোয়ান্টাম তত্ত্বের ইতিহাসে এটি Kochen-Specker (KS) Theorem নামে পরিচিত। অনেক সময় এটিকে Bell-Kochen-Specker তত্ত্বও বলা হয়।

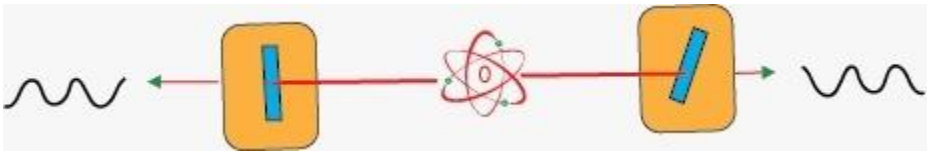
কিন্তু বেল-তত্ত্বের বাস্তব পরীক্ষণের প্রথম কাজটি করেন কার্ল কখার (Carl Kocher) ১৯৬৭ সালে। এটি ছিল তাঁর Ph.D. থিসিস (Kocher, 1967)। তখন কার্ল কখার ক্যালিফোর্নিয়ার বার্কলে বিশ্ববিদ্যালয়ে প্রফেসর কমিনস (Commins) এর অধীনে Ph.D. করছিলেন (১৯৬৪-১৯৬৭) এবং ঐ একই সমস্যার ওপর গবেষণা করছিলেন; তবে তিনি তা করছিলেন পরীক্ষণের মাধ্যমে, গবেষণাগারে। কখার, কখেন-স্পেকারের প্রণীত পরীক্ষণটির বাস্তবায়নের জ্যামিতিক প্রস্তাবের আগেই Constrain কে পরীক্ষণের সাথে যুক্ত করে, পরীক্ষাটি সম্পন্ন করেছিলেন। কিন্তু তখনো তাঁদের মধ্যে কোনো যোগাযোগ ছিল না। চমৎকার বিষয়টি হলো তাঁর গবেষণাপত্রটি প্রকাশিত হয় ১৯৬৭ সালের এপ্রিল মাসে (Kocher-Commins,1967)। এখানে কার্ল কখারের কৃতিত্ব হলো তিনি প্রথম Constrain যুক্ত করে প্রযুক্তিগত পরীক্ষণটি করেন এবং বাস্তবে প্রথম এনটেংগেলমেন্ট তৈরি করেন। বিজ্ঞানী কখার তাঁর পরীক্ষণে কিছু বাধ্য-বাধকতা যুক্ত করে বাস্তবে সুপ্ত পরিবর্তনশীল রাশির অনুসন্ধানের পথ খুলে দেন। সুতরাং পরবর্তী গবেষকদের কাছে প্রশ্ন হলো বাস্তবে সত্যি কোনো পরিবর্তনশীল রাশি আছে কি-না তা পরীক্ষা করে দেখা এবং পরীক্ষণগুলি থেকে গাণিতিক বাধ্য বাধ্যকতাগুলিকে বর্জন করা।

জন ক্লাউজার (John Clauser)

কখার-কমিনসের পরীক্ষণটির পর বিজ্ঞানী জন ক্লাউজার প্রশ্ন দুটির সমাধানকল্পে পরবর্তী গুরুত্বপূর্ণ অবদান রাখেন। তিনি বিজ্ঞানী বেল এর সিদ্ধান্তকে পুরোপুরি প্রত্যাখ্যান বা গ্রহণ করেন নি। তিনি কলম্বিয়া বিশ্ববিদ্যালয় থেকে Ph.D. শেষ করে পোস্ট ডক' এর জন্য বার্কলে বিশ্ববিদ্যালয়ে যোগদান করেন। এখানে তিনি প্রফেসর কমিনসের সাথে যোগাযোগ করেন এবং তাঁদের (কখার-কমিনস) পরীক্ষণটির উপর আরো কাজ করার অনুমতি প্রার্থনা করেন (Clauser, 1992)। প্রফেসর কমিনস সানন্দে অনুমতি দেন এবং তাঁদের ব্যবহৃত যন্ত্রপাতিগুলি ব্যবহারেরও অনুমতি দেন। শুধু তাই নয়, কমিনস তাঁর গ্রাজুয়েট ছাত্র Stuart Freedman কে তাঁর সাথে কাজ করার অনুমতি দেন। ফ্রিডম্যান এবং ক্লাউজার, কার্ল কখারের ব্যবহৃত পুরোনো যন্ত্রপাতিগুলির সাহায্যে বিশ্ববিদ্যালয়ের বেজমেন্টে গড়ে তোলেন তাঁদের গবেষণাগার।

তিনি প্রথমে একটি বাস্তব পরীক্ষণের পরিকল্পনা করেন; যার মাধ্যমে বেলের Bell's Inequality তত্ত্বকে পরীক্ষা করে দেখা যায় (Nobelprize.org, 2022)। তাঁর পরীক্ষণটি ছিল এক জোড়া যমজ উপাদানকে

বিপরীত দিকে নিক্ষেপ করে ফোটনগুলির মেরুপ্রবণ (Polarization) বৈশিষ্ট্য পর্যবেক্ষণ করা এবং তাদের মূল্যায়ন করা।



চিত্র ১: জন ক্লাউজার ক্যালসিয়ামের অণুকে বিশেষ ধরনের আলোর মাধ্যমে উদ্দীপিত করে ফোটনের যমজ-জোড়া তৈরি করেন। তিনি পরীক্ষণ সেটিংটির দুই প্রান্তে দুটি ফিল্টার স্থাপন করেন, যমজ ফোটনের পোলারাইজেশন মাপার জন্য। তিনি এই পরীক্ষণ প্রক্রিয়াটির বহুবার পুনরাবৃত্তি করে প্রমাণ করেন যে, সেখানে বেল ইনইকুয়ালিটি লঙ্ঘিত হয় (Source: Nobelprize.org, 2022)।

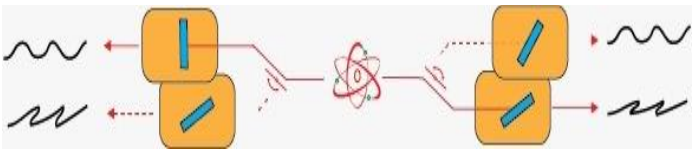
জন ক্লাউজার একটি পরীক্ষণ-সেটিং (Apparatus) তৈরি করেন; যেটি একই সময়ে দুটি যমজ ফোটন বিকিরণ করতে পারে। এখানে দুটি ফোটনকেই দুটি ফিল্টারের দিকে প্রক্ষেপণ করা হয়; যেখান থেকে তাদের পোলারাইজেশন পরীক্ষা করা যায়। ১৯৭২ সালে তিনি ছাত্র ফ্রিডম্যানের (Sturt Freedman) সাথে পরীক্ষাটি করেন এবং দেখান যে, তাঁদের পরীক্ষণে ফোটনদ্বয় পরিষ্কারভাবে বেল ইনইকুয়ালিটিকে লঙ্ঘন করে এবং কোয়ান্টাম তত্ত্বের ভবিষ্যদ্বাণী সঠিক (Clauser and Freedman,1972)।

জন ক্লাউজার পরবর্তী বছরগুলিতে আরো কয়েকজন বিজ্ঞানীর সাথে উপর্যুক্ত পরীক্ষাটির বিভিন্ন সীমাবদ্ধতার ওপর অনুসন্ধান চালিয়ে যেতে থাকেন। তাঁর প্রদর্শিত পরীক্ষণে গণন প্রক্রিয়াটি পূর্ব-নির্ধারিত (Pre-set), সে কারণে অন্য সুপ্ত উপাদানগুলিকে চিহ্নিত (Detect) করা যায় না। তাই যদি হয় তবে উপাদানগুলি এ পর্যায়েও সুপ্ত পরিবর্তনশীল রাশি সম্পন্ন হতে পারে; তাছাড়া সেখানে ফিল্টার থাকে, যাদেরকে সরল রৈখিক নির্দেশনায় স্থাপন করা হয়েছিল। এখানে একজন পর্যবেক্ষক এ ধরনের প্রশ্ন তুলতে পারেন যে, এ সুনির্দিষ্ট সেট-আপের জন্য উপাদানগুলির মধ্যে শক্তিশালী Correlation থাকতে পারে এবং hidden variable বহন করতে পারে।

পরীক্ষণের এ দুর্বলতাটি (Loophole) অত্যন্ত জটিল ও কঠিন। কারণ কোয়ান্টাম স্টেটগুলি ঘনিষ্ঠভাবে জড়ানো-পাকানো অবস্থায় থাকে এবং খুব সহজে সেগুলি ভেঙে যায়। সে কারণে তাদেরকে সুনির্দিষ্ট শৃঙ্খলায় নিয়ে আসা খুবই কঠিন। সুতরাং এখানে প্রয়োজন ফোটনের ওপর আলাদা আলাদাভাবে পরীক্ষাটি চালানো।

এখানে বিজ্ঞানী জন ক্লাউজারের মূল কৃতিত্ব হলো তিনি প্রাযুক্তিকভাবে প্রমাণ করেন যে, এনটেংগেলমেন্টের উপাদানগুলি Bell inequality কে অতিক্রম করে যায়। অর্থ্যাৎ তা আলোর গতির চেয়ে দ্রতগতিসম্পন্ন।

তবে বিজ্ঞানী ক্লাউজারের এ সফল পরীক্ষার মধ্যেও বেশ কিছু দুর্বলতা (Loophole) ছিল, অ্যালে আস্পে সেগুলির সমাধান দেন।



চিত্র ২: (উপরে) জন ক্লাউজার তাঁর পরীক্ষণে ক্যালসিয়াম অণু ব্যবহার করেন এবং বিশেষ ধরনের আলোকপাতের মাধ্যমে তাদেরকে উদ্দীপিত করে যমজ-জোড়া তৈরি করেন। ফোটনের পোলারাইজেশন মাপার জন্য উভয় পার্শ্বে দুটি ফিল্টার স্থাপন করেন। পরীক্ষাটি বেশ কয়েকবার পুনরাবৃত্তি করে তিনি প্রমাণ করেন যে, এখানে বিজ্ঞানী বেলের ইনইকুয়ালিটি প্রস্তাব লঙ্ঘিত হয়।

(নিচে) অ্যালে আস্পে এ পরীক্ষাটিকে আরো বিকশিত করে তোলেন এবং অণুগুলিকে উত্তেজিত করার জন্য ভিন্ন পদ্ধতি অবলম্বন করেন। এ কারণে ফোটনগুলি উচ্চহারে বিচ্ছুরিত হতে থাকে। তিনি তাঁর এ সেটিং দুটির মধ্যে পরীক্ষাটি সাথে সাথে বদলাতে পারতেন; সে কারণে সিস্টেমগুলির মধ্যে কোনো পূর্ব-তথ্য থাকতে পারত না। সুতরাং প্রাপ্ত ফলাফলের ক্ষেত্রেও কোনো প্রভাব পড়ত না (Source: Nobelprize.org, 2022)।

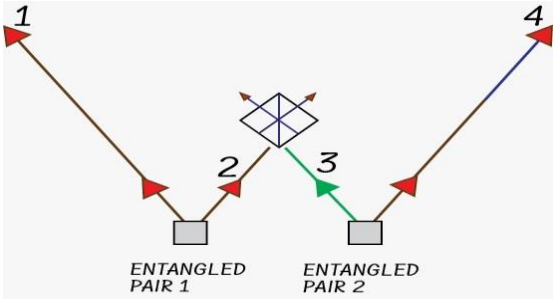
অ্যালে আস্পে (Alain Aspact)

জন ক্লাউজারের গবেষণার এ সমস্যা সমাধানের জন্য এগিয়ে আসেন ফ্রান্সের বিজ্ঞানী অ্যালে আস্পে। তিনি ১৯৮০ থেকে ১৯৮২ সালের মধ্যে জন ক্লাউজারের গবেষণাটির সেটিং এর আরো উন্নত সংস্করণ তৈরি করেন। সেখানে ফোটনগুলিকে দুটি ভিন্ন ফিল্টারের মাধ্যমে ভিন্ন ভিন্ন কৌণিক অবকাঠামোতে পাঠানো এবং ফোটন উৎপাদন ও প্রক্ষেপণের পর তাদের দিককে নিয়ন্ত্রণ করা সম্ভব ছিল। ফিলটারগুলির মধ্যে দূরত্ব ছিল মাত্র ছয় মিটার। সুতরাং তাদের দিক পরিবর্তনের সময়টি ছিল এক সেকেন্ডের কয়েক বিলিয়ন ভাগ ক্ষুদ্র। তাছাড়া ফিলটারের একদিকের তথ্য অন্য পার্শ্বে যেতে পারে না এবং এ কারণে পরীক্ষাটি পরীক্ষণের ফলাফলের ওপরও কোনো প্রভাব পড়ে না। এ পরীক্ষণটির মাধ্যমে বিজ্ঞানী আস্পে পূর্ববর্তী পরীক্ষণগুলির দুর্বলতা দূরিভূত করেন এবং প্রমাণ করেন যে, এখানে কোনো Hidden variable নেই। ফলে কোয়ান্টাম তত্ত্বের ভবিষ্যদ্বাণী সত্য (Nobelprize.org, 2022)।

বিজ্ঞানী বেল তাঁর ১৯৮৭ সালে প্রকাশিত বইটির ৮৯ পাতায় উপর্যুক্ত কাজগুলির মূল্যায়ন করেছেন এভাবে, "I think that future generations should be grateful to those who bring these matters out of the realm of gedanken experiment into that of real experiment" (Bell, 1987).

আন্টন সাইলিংগার ও টেলিপোরটেশন

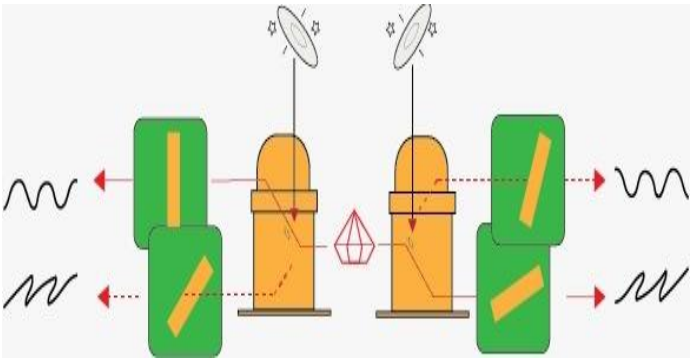
বিশ শতকের আশির দশকে এ্যালো আস্পের গবেষণার ওপর বিজ্ঞানীরা গবেষণা চালিয়ে যেতে থাকেন। ১৯৯৩ সালে এনট্যাংগেলম্যান্ট তত্ত্বের প্রযুক্তিয়ানের ওপর একটি গবেষণাপত্র প্রকাশিত হয় এবং শুরু হয় প্রযুক্তিয়ায়নের আরেকটি নতুন ধারা (Bennet, 1993)। এখানে বিজ্ঞানীরা প্রথম কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশনের কথা বলেন। ১৯৯৭ সালে প্রায় একই সময়ে স্যান্ডু পপেস্কু (Sandu Popescu) (Boschi,1997) এবং প্রফেসর আন্তন সাইলিংগার (Bouwmeester et al.,1997) প্রস্তাবটির পরীক্ষণগত প্রমাণ প্রদর্শন করেন।



চিত্র ৩: এখানে দুটি ভিন্ন উৎস থেকে দুজোড়া যমজ উপাদান বর্হিগত হচ্ছে। এখানে দুটি জোড়ার একটি করে উপাদানকে বিশেষ উপায়ে যুক্ত করে যমজ করা হয়। অন্য দুটি উপাদানও (চিত্রের ১ এবং ৪) তখন যমজ জোড়ায় পরিণত হয় এবং এভাবে তাঁরা দুটি উপাদানের মধ্যে যমজত্ব প্রতিষ্ঠা করেন, যাদের মধ্যে ইতঃপূর্বে কোনো যোগাযোগ ছিলনা (Source: Nobelprize.org, 2022)।

২০০৬ সালে এক সাক্ষাৎকারে প্রফেসর সাইলিংগার টেলিপোরটেশনের সংজ্ঞায়ন করেন এভাবে: "Transfering the light particles over certain distances onto other light particles with no time delay. The procedure is based on phenomena which exist only in the quantum world and is known as "quantum teleportation" (Weltwoche, 2006)।

কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশন এমন একটি প্রযুক্তি, যার মাধ্যমে একজন প্রেরক কোনো একটি অবস্থান থেকে অনির্দিষ্ট দূরত্বে অবস্থিত আরেকজন প্রাপকের কাছে কোয়ান্টাম তথ্যকে পাঠাতে পারে। প্রচলিত অর্থে আমরা টেলিপোর্টেশন বলতে বুঝি কোনো বস্তুগত অস্তিত্বকে এক অবস্থান থেকে অন্য অবস্থানে প্রেরণ করাকে। আর কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশনের মাধ্যমে প্রেরণ করা হয় কেবল তথ্যকে।



চিত্র ৪: প্রফেসর আন্তন সাইলিংগার বেল ইনইকুয়ালিটির ওপর আরো পরীক্ষণ করেন। তিনি একটি বিশেষ ধরনের ক্রিস্টালের ওপর উজ্জ্বল লেজার রশ্মি প্রক্ষেপণের মাধ্যমে ফোটনের যমজ-জোড়া তৈরি করেন। এ সেটিং দুটির মাপন প্রক্রিয়ার মধ্যে তাৎক্ষণিক পরিবর্তন করা সম্ভব। তিনি একটি পরীক্ষণে দুরবর্তী গ্যালাক্সির সিগন্যাল ব্যবহার করেন ফিল্টারগুলিকে নিয়ন্ত্রণ করার জন্য এবং এ পরীক্ষণের মাধ্যমে তিনি নিশ্চিত করেন সিগনালের মাধ্যমে ফিল্টারগুলি প্রভাবিত হয় না (Source: Nobelprize.org, 2022)।

প্রফেসর সাইলিংগারের কাজটি কোয়ান্টাম তথ্যপ্রযুক্তিতে এক বিপ্লব নিয়ে আসে। শুরু হয় কোয়ান্টাম কম্পিউটার তৈরির প্রক্রিয়া। নানো টেকনোলজি এবং Artificial Intelligence এর এলাকায় শুরু হয়েছে এক বিশাল পরিবর্তন। এ অবদানের কারণেই প্রফেসর সাইলিংগার, জন ক্লাউজার এবং অ্যালে আস্পে ২০২২ সালে পদার্থবিদ্যায় নোবেল প্রাইজ অর্জন করেন।

আলোচনা এবং উপসংহার

এখনো কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশনের জন্য মাধ্যম হিসেবে প্রচলিত মাধ্যমগুলিই ব্যবহার করা হচ্ছে। তাই এখানে আলোর গতি লঙ্ঘিত হচ্ছেনা। আলোর গতির চেয়ে দ্রুতগতিতে তথ্য বিনিময়ের উপায় বা পদ্ধতি আবিষ্কারের জন্য আরো সময় লাগবে (Swayne, 2020)। অবশ্য এ নির্দেশনায় চিনের বিজ্ঞানীরা কাজ শুরু করেছেন। তারা স্যাটেলিট এবং পৃথিবীর মধ্যে তথ্য বিনিময়ের ওপর গবেষণা করছেন (Lee Billings, 2017)। এ প্রসঙ্গে প্রফেসর সাইলিংগার একটি সম্ভবনার কথা বলেছেন, "… Americans really start their Mars mission, the 280-day journey will be deadly boring for the astronauts. They might be interested in taking part in a few teleportation experiments on the way and increase the record by a hundred million kilometers or so" (Weltwoche, 2006)।

বিজ্ঞান নিশ্চয়তাবাদী না অনিশ্চয়তাবাদী এ প্রশ্নের প্রেক্ষাপটেই জন্ম নেয় এনটেংগেলম্যান্ট তত্ত্ব; উদ্ভব হয় কোয়ান্টাম টেলিপোরটেশন তত্ত্বের। বিজ্ঞান যদি নিশ্চয়তাবাদী হয় তবে মুক্ত-বুদ্ধিকে (Free Will) জ্ঞান চর্চা থেকে বাদ দিতে হয়। অন্যদিকে বিজ্ঞান যদি অনিশ্চয়তাবাদী হয় তবে মুক্ত-বুদ্ধি বিজ্ঞান চর্চার অপরিহার্য মাধ্যম।

২০০৬ সালের উপর্যুক্ত সাক্ষাৎকারে প্রফেসর সাইলিংগার বলেন, এ মহাবিশ্বে দু ধরনের স্বাধীনতা আছে। একটি হলো পরীক্ষণকারীর স্বাধীনতা (Freedom of Experimenter), আরেকটি হলো প্রকৃতির স্বাধীনতা (Freedom of Nature)। তাঁর ভাষায়, "I call that the **two freedoms:** first the freedom of the experimenter in choosing the measuring equipment – that depends on my freedom of will; and then the freedom of nature in giving me the answer it pleases" (Weltwoche, 2006)। আর এ কারনেই জ্ঞানচর্চায় সম্ভবনা বা অসম্পূর্ণতা-কে বরণ করে নিতে হয়। এনটেংগেলম্যান্ট তত্ত্বের বক্তব্যের প্রযুক্তিগত বাস্তবায়নের মাধ্যমে বর্তমানে অনিশ্চয়তাবাদেরই জয় হয়েছে।

এ সাক্ষাৎকারের আরেক জায়গায় তিনি বলেছেন, " For the concept of "**Information**" is at the basis of everything we call "Nature". The Moon, the chair, the equation of states, anything, and everything, because we can't talk about anything without de facto speaking about the information we have of these things. In this sense the information is the basic building block of our world"
তিনি আরো বলেছেন, "This is a very fine property. It's too bad the philosophers don't spend more time thinking about it." কিন্তু দার্শনিকরা কাজ করছেন। তাঁরা ইতোমধ্যেই "তথ্য-দর্শন" নামে একটি নতুন প্লাটফর্ম তৈরি করেছেন এবং সেখানে তারা প্রফেসর সাইলিংগারের মতোই বলেছেন, "Information is neither matter nor energy, although it needs matter to be embodied and energy to be communicated." দার্শনিকরা বসে নেই, তারা "এক পা" সামনে এগিয়ে গেছেন।

বর্তমানে কোয়ান্টাম এ্যানটেংগেলম্যান্ট এবং কোয়ান্টাম টেলিপোরটেশন তত্ত্ব আমাদেরকে এ বার্তা দিচ্ছে যে, বস্তু এবং বাস্তবতার সংজ্ঞা নতুন করে লিখতে হবে। তার মাধ্যমে নির্দিষ্টবাদ ও অনির্দিষ্টবাদের নতুন ব্যাখ্যা তৈরি হবে। কিন্তু অনিশ্চয়তাবাদ থেকেই যাবে। কারণ শক্তির স্বরূপ সম্পর্কে এখনো আমাদের জানার গন্ডি নবজাত শিশুর মতোই।

আমরা এখন পর্যন্ত শক্তি পরিবহনকারী উপাদানগুলিই আবিষ্কার করতে পেরেছি, শক্তির স্বরূপ সম্পর্কে আমাদের জ্ঞান প্রায় শূন্যের কোঠায়। শক্তির প্রকাশ অসীম না হলেও সীমানাহীন। এখনো আমরা কালোবস্তু বা কালোশক্তি সম্পর্কে প্রযুক্তিগতভাবে কিছুই জানতে পারিনি। মানবীয় শক্তিগুলি সম্পর্কেও আমরা তেমন কিছুই জানি না। উদাহরণ হিসেবে বলা যায়, বর্তমানে কয়েকজন বিজ্ঞানী মানব মস্তিষ্কের মধ্যে টেলিপোর্টেশনের মতো নেটওয়ার্ক তৈরির জন্য গবেষণা করছেন এবং বেশ কিছুদূর এগিয়েও গিয়েছেন। (Georgiou, 2018)।

অন্যদিকে এখন পর্যন্ত আমরা স্ট্রিং তত্ত্ব বা M মডেলের আদি উপাদান সম্পর্কেও প্রমাণ সাপেক্ষ কিছু প্রস্তাব করতে পারিনি। নিউট্রিনো বা কোয়াজী পার্টিকেল সম্পর্কেও পরীক্ষণ সমৃদ্ধ প্রমাণ এখনো আমাদের হাতে পৌছায়নি। কোয়ার্ক কণাগুলি সম্পর্কেও এখন পর্যন্ত আমরা বিস্তারিত জানতে পারিনি। তাই বিজ্ঞানের বিকাশের কোনো এক মাহেন্দ্রক্ষণে বিজ্ঞানীরা হয়ত অনিশ্চয়তা তত্ত্বের "অনিশ্চয়তা" দূর করে নতুন তত্ত্ব প্রণয়ন করবেন। কিন্তু যৌক্তিক বিচারে সেখানেও অনিশ্চয়তা থাকবে। এ উপলব্ধি থেকেই বিজ্ঞানী নীলস বোর প্রতিপূরক তত্ত্ব (Theory of complementarity) প্রণয়ন করেন এবং বলেন "অনিশ্চয়তা" প্রকৃতির একটি চিরন্তন নিয়ম।

বিজ্ঞানের কোনো তত্ত্বই ভুল নয়, কোনো বিশেষ দেশ কালের প্রেক্ষাপটে তারা সঠিক। বর্তমান দেশ-কালের প্রেক্ষাপটে কোয়ান্টাম তত্ত্ব সঠিক। কিন্তু বিকাশের ক্রমধারায় একসময় তাও পুরোনো হয়ে যাবে। মূল প্রশ্ন হলো শক্তির স্বরূপ কী? আর এখানেই এ্যানটেংগেলম্যান্ট তত্ত্বের কৃতিত্ব। এ তত্ত্বের সূত্র ধরেই কোয়ান্টাম টেলিপোর্টেশন তত্ত্ব বিকশিত হচ্ছে। আমরা শক্তির স্বরূপ কী, এ প্রশ্নের ওপর অনুসন্ধানের আরো নিকটবর্তী হচ্ছি এবং সম্ভবত সেখানেই রয়েছে সব প্রশ্নের উত্তর!!

পরিশিষ্ট

Constrain: পদার্থবিদ্যায় এটি হলো একটি গাণিতিক পরিভাষা। কোনো তত্ত্বে যখন কোনো গাণিতিক বাধ্যবাধকতা যোগ করা হয়, তাকেই বলে কনস্ট্রেইন এবং সেগুলি তত্ত্বটির হিডেন ভেরিয়েবলের সাথে সংগতিপূর্ণ। যেমন: কখারের পরীক্ষণে এ ধরনের কনস্ট্রেইনকে প্রয়োগ করা হয়েছিল।

Correlation: দুই বা ততোধিক তথ্য, সংখ্যা বা ঘটনার মধ্যে যে সম্পর্ক বা যোগাযোগ থাকে তাকেই কোরিলেশন বলে। যেমন: ধূমপান এবং ক্যান্সার হওয়ার মধ্যে একটা কোরিলেশন আছে। দেহের ওজন ও উচ্চতার সম্পর্কটিও একটি কোরিলেশন। এগুলি হলো পজিটিভ কোরিলেশন। আবার নেগেটিভ কোরিলেশনও আছে- যেমন যেমন: যখন কোনো ভেরিয়েবল এর একটি দিক বাড়তে থাকে এবং অন্য দিকটি কমতে থাকে।

Element of reality: বাস্তবতার সংজ্ঞায়নের সময় যেসব উপাদানগুলিকে ভিত্তি (Building-block) হিসেবে উপস্থাপন করা হয়- যেমন: স্টান্ডার্ড মডেলে সতেরটি আদি উপাদানের কথা বলা হয়েছে; তবে কোয়ান্টাম তত্ত্বে উপাদানের বিভিন্ন বৈশিষ্ট্য সেখানে অন্তর্ভূক্ত হতে পারে।

Entanglement state: কোয়ান্টাম সিস্টেমের উপাদানগুলি কোনো কোয়ান্টাম স্টেটে সুপারপজিশনে থাকতে পারে। তখন সিস্টেমের উপাদানগুলি মিশ্রিত অবস্থায় থাকে। এ অবস্থাকে বলা হয় উপাদান দুটি Entanglement state এ অবস্থান করছে।

Hidden variable: কোয়ান্টাম তত্ত্বে যখন কোনো কোয়ান্টাম ফেনোমেনার (Phenomena) ব্যাখ্যায় অসম্পূর্ণতা থাকে বা কোনো অমীমাংসিত প্রশ্ন থাকে, তখন সমস্যার সমাধানকল্পে সেখানে কোনো প্রাকল্পিক উপাদান বা নিয়মের প্রস্তাব করা হয়। এর মাধ্যমে ফেনোমেনাটি সম্পূর্ণ বা সঠিক হয়ে ওঠতে পারে। যেমন: EPR তত্ত্ব।

No-go-theorem: পদার্থবিদ্যায় no-go-theorem হলো ঐ ধরনের তত্ত্ব যেখানে কিছু বাস্তব অবস্থার কথা প্রস্তাব করা হয়, যা বাস্তবে (Physically) প্রদর্শন করা সম্ভব নয়।

Non-locality: কোয়ান্টাম তত্ত্বে বলা হয়, সাব এটমিক জগতের একটি ফেনোমেনা হলো- কোনো উপাদানের চূড়ান্ত অবস্থান নির্ণয় করা যায় না এবং দুটি উপাদান বিশাল দূরত্বে অবস্থিত হলেও তাদের মধ্যে তাৎক্ষণিক যোগাযোগ হতে পারে। যেমন: এনটেংগেল তত্ত্বে দুটি উপাদানের অবস্থান।

Polarization: পোলারাইজেশন হলো কোনো সাব এটমিক উপাদানের একটি বিশেষ বৈশিষ্ট্য। কোনো তির্জক গতির সাব এটমিক উপাদানের ক্ষেত্রে এ বৈশিষ্ট্যটি প্রয়োগ করা হয়। এর মাধ্যমে তরঙ্গটির দোলনের (Oscillation) জ্যামিতিক দিক-নির্দেশনা ব্যাখ্যা করা হয়। কোনো তির্জক তরঙ্গে দোলন গতির দিকে লম্বাকৃতির (Perpendicular) হয়।

Quantum superposition: কোয়ান্টাম সুপারপজিশন হলো কোয়ান্টাম তত্ত্বের অন্যতম মূল স্তম্ভ। দুই বা ততোধিক স্টেটকে যখন সংযুক্ত (Superposed) করা হয়, তখন তারা আরেকটি স্টেটে পরিণত হয় অথবা বিপরীতক্রমে, কোনো কোয়ান্টাম স্টেট যদি একাধিক স্টেটের সমন্বয় হয়, তাকেও সুপারপজিশন বলা হয়। এ সুপারপজিশনে স্টেটগুলি সম্ভাবনার জগতে অবস্থান করে এবং তাদের সঠিক অবস্থা আমরা জানতে পারি না। কেবল তাদেরকে বাস্তবে জানতে গেলে তাদের সুপারপজিশন ভেঙে যায় এবং তাদের সম্পর্কে আমরা জানতে পারি।

Quantum System: কোয়ান্টাম তত্ত্ব সাব এটমিক জগতের বাস্তবতার ওপর গবেষণা করে। কোয়ান্টাম সিস্টেম হলো সাব এটমিক স্তরের একটি বিশেষ বাস্তবতার বর্ননা। বাস্তবতার ক্ষুদ্রতম স্তরে এক বা একাধিক উপাদান এবং তাদের স্বরূপ ও শক্তিকে নিয়ে একটি কাল্পনিক ইউনিট গঠন করা হয়, যা পারিপার্শ্বিকতা এবং সমস্ত বাইরের প্রভাব থেকে বিচ্ছিন্ন। বস্তুত এটি একটি গাণিতিক বাস্তবতা এবং কোয়ান্টাম স্টেটের সম্ভাবনার জগতে থাকে।

Thought experiment: কোনো প্রতিষ্ঠিত তত্ত্বের কোনো দুর্বল দিকের ওপর একটা যৌক্তিক কিন্তু প্রাকল্পিক সমাধান প্রস্তাব, যেখানে কল্পনা বা অনুমানও যুক্ত থাকতে পারে। এটি কেবলই একটি চিন্তা-প্রসুত প্রস্তাব, যার বাস্তব পরীক্ষণ এখনো সম্পন্ন হয়নি।

কৃতজ্ঞতা স্বীকার: লেখক এ প্রবন্ধটি প্রুফরিড করে দেবার জন্য ড. নিলুফা আহসানকে এবং গ্রাফিক্সে সহায়তার জন্য কামরুল আহসান খানকে গভীর কৃতজ্ঞতা জানাচ্ছেন।

তথ্যসূত্র

Bell. J. S. 1987, Speakable and unspeakable in quantum mechanics. Cambridge Univ. Press. https://heyokatc.com/pdfs/MISC/Speakable_and_Unspeakable_in_Quantum_Mechanics-_John_S._Bell-firstEd.pdf

Bennett, C.H., Brassard, G., Crepeau, C., Jozsa, R., Peres, A., Wootters, W.K. 1993, Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. Physical Review Letters, 70 (13). Phys. Rev. Lett. 70, 1895 (1993) - Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels (aps.org)

Billings, L. 2017, China Shatters “Spooky Action at a Distance” Record, Preps for Quantum Internet, Sci. Am., https://www.scientificamerican.com/article/china- shatters-ldquo-spooky-action-at-a-distance-rdquo-record-preps-for-quantum-internet/

Boschi, D., Branca, S., De Martini, F., Hardy, L., Popescu, S. 1997, Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State Via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. arxiv.org. https://arxiv.org/pdf/quant-ph/9710013.pdf

Bouwmeester, D., Pan, JW., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H., , A. 1997, Experimental quantum teleportation. Nature, 390: 575-579. Experimental quantum teleportation | Nature

Brubaker, B. 2021, How Bell’s Theorem Proved “Spooky Action at a Distance” Is Real. Quanta magazine. https://www.quantamagazine.org/how-bells-theorem-proved-spooky-action-at-a-distance-is-real-20210720/

Clauser, J. F. 1992, EARLY HISTORY OF BELL'S THEOREM THEORY AND EXPERIMENT. https://courses.engr.illinois.edu/phys513/sp2019/reading/week8/ClauserBellHistory.pdf

Clauser, J. F., Freedman, S. 1972, First Experimental Proof That Quantum Entanglement Is Real. First Experimental Proof That Quantum Entanglement Is Real (scitechdaily.com) Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. 1935, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Instit. Adv. Study, Prinston, New Jersey. https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777;

Georgiou, A. 2018, Scientists Connect Three Peoples Mind So They Can Communicate Using Brainwaves Alone. Newsweek. Scientists Connect Three People's Minds So They Can Communicate Using Brainwaves Alone (newsweek.com)

Jha, A. 2013, What is Heisenberg's Uncertainty Principle? The Guardian. https://www.theguardian.com/science/2013/nov/10/what-is-heisenbergs-uncertainty-principle

Kochen, S., Specker,E. 1968, The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics**,** Indiana Univ. Math. J. 17 (1): 59–87. Full-text Article (indiana.edu)

Kocher, C. A. 1967, Original thesis of Carl Alvin Kocher. https://escholarship.org/uc/item/1kb7660q

Kocher, C. A., Commins, E. D. 1967, Polarization Correlation of Photons Emitted in an Atomic Cascade, Phys. Rev. Lett. 18: 575. https://10.1103/PhysRevLett.18.575

NASA. 1983, Translation of "Über den anschaulichen Inhalt der quanten theoretischen Kinematik ubd Mechanik" Zeitschrift für Physik, 43 (3-4): 172-198. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19840008978/downloads/19840008978.pdf

Newton, I. 2007, The cause of gravity is what I don't pretend to know. Fourth Reply, Letters to Bently, 1692/3. Today, Sci. History. https://todayinsci.com/N/Newton_Isaac/NewtonIsaac-GravityQuote800px.htm

Nobelprize.org, 2022: Popular information - How entanglement has become a powerful tool. Nobelprize.org. https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/popular-physicsprize2022-2.pdf

Swayne, M. 2020, Chinese Scientists Smash Quantum Entanglement Record, The Quantum Insider, https://thequantuminsider.com/2020/02/13/chinese-scientists-smash-quantum-entanglement-record/

Weltwoche, D. 2006, Viennese physicist Anton Zeilinger talks about teleportation, the information stored in a human being and freedom in physics. www.signandsight.com/features/614.html,