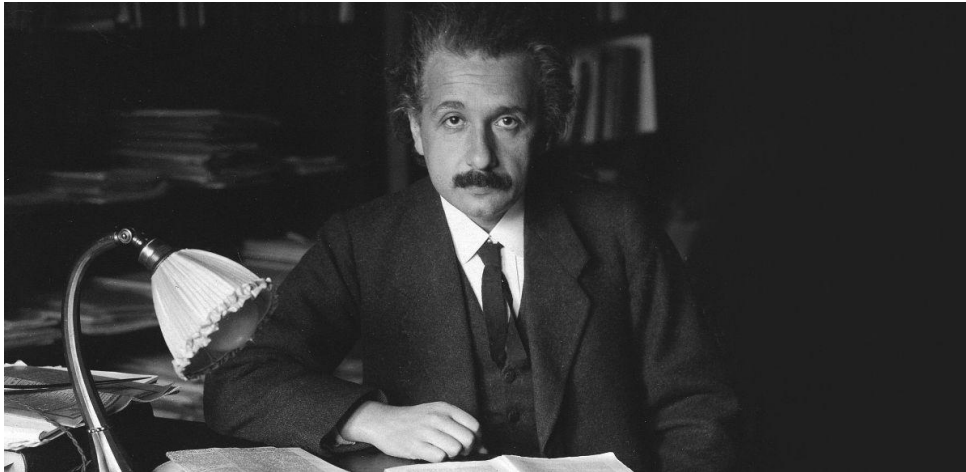


Albert Einstein: A (Relatively) Unknown Quantum Pioneer

By CHARLIE WOOD



Albert Einstein is perhaps the most famous physicist of all time. Most people know him as the [creator of general relativity](#) , a revolutionary theory that redefined the force of gravity as curves in spacetime. He is also known as a skeptic of quantum mechanics who sought an alternative to the strange theory of atoms.

This is a true, but simplified, description of Einstein's relationship with quantum theory. In reality, Einstein contributed multiple fundamental pillars to the edifice that would become quantum mechanics and deserves to be remembered as a quantum pioneer alongside Max Planck, Niels Bohr, Werner Heisenberg, and Erwin Schrödinger. Einstein struggled to accept quantum mechanics, but his resistance did not stem from frivolous rejection or a lack of understanding. On the contrary, Einstein contributed enormously to its development precisely because he deeply intuited the radical implications of the theory.

"I have thought a hundred times more about quantum problems than about the theory of general relativity," he [once told](#) the German physicist Otto Stern.

Planck and Einstein ushered in the quantum era together. In 1900, Planck proposed that matter absorbs energy in packets. Five years later, Einstein published two groundbreaking papers that reinforced the idea that the world is fundamentally quantized. [One](#) established that matter is composed of atoms, ending centuries of debate. [The other](#) expanded on Planck's idea, arguing that light also carries energy in packets. [This idea was controversial](#) , but Einstein was eventually vindicated. He won

his only Nobel Prize for establishing the quantum nature of light, not for his more famous theory of general relativity.

Einstein's discomfort with quantum mechanics began in the 1920s, when it became clear that the theory imposed new and undesirable limits on our knowledge. A particle does not have a fixed position, for example; it simply has [probabilities of being observed](#) in different positions. This led to years of friendly debate between Einstein and Bohr, who exchanged increasingly sophisticated thought experiments that refined physicists' understanding of the theory.

Then, in 1935, Einstein, along with Boris Podolsky and Nathan Rosen (known as "EPR"), proposed a quantum thought experiment with seemingly unthinkable implications. If quantum mechanics were taken seriously, this experiment would create [a disturbing connection](#) in which a single property would reside among multiple particles. This phenomenon, argued Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), was clearly impossible, so quantum mechanics must be just one step toward a more complete theory. "There is no doubt that quantum mechanics has grasped a beautiful element of truth, and that it will be a test stone for any future theoretical foundation," Einstein wrote in 1936.

At this point, Einstein was wrong. [A refined thought experiment](#), developed in the 1960s, virtually guaranteed that the mysterious connection Einstein and his colleagues had identified, which came to be called "entanglement," was intrinsically linked to the nature of reality. Such an experiment has been carried out ever since, and under [increasingly rigorous conditions](#). Physicists have even measured the different speeds at which [entanglement can propagate](#) through chains of particles.

Thanks to his skepticism, Einstein had discovered a profound and powerful physical phenomenon. Schrödinger described entanglement as "*the* defining feature of quantum mechanics." It appears to be, at least in part, [the basis of the power of quantum computers and it allows for the development of robust encryption systems](#).

While Einstein lost the battle over quantum entanglement, some physicists remain hopeful that his perspective may win the battle for the essence of quantum mechanics. The theory is here to stay and may well be a complete description of the world. However, there is a growing conviction that the Bohr-Heisenberg interpretation, known as the Copenhagen interpretation, [leaves much to be desired](#). At a conference held this summer to mark the centenary of quantum mechanics, a hot topic was [the ongoing search](#) for a reinterpretation of the theory that could restore, at least partially, the intuitive and concrete picture of reality that Einstein longed for.

Ironically, Einstein's two great, seemingly antagonistic contributions to 20th-century physics—quantum mechanics and general relativity—have become increasingly intertwined in the 21st century. Physicists have discovered [how to describe](#) a fabric of spacetime with negative curvature as a collection of quantum particles, and vice versa. This translation suggests that the physical laws of spacetime and gravity can be considered remixed versions of the quantum laws of particles, and that quantum

phenomena are distorted images of gravitational phenomena.

In particular, the entanglement that Einstein and his EPR co-authors could not accept might be a reflection of a theoretical geometry of spacetime that he helped to discover (also with Nathan Rosen): a wormhole, technically known as an Einstein-Rosen (ER) bridge. Both entanglement and wormholes imply an enigmatic connection between distant places. Some theorists suspect that the similarity is more than a metaphor: that ["ER" might be equivalent to "EPR"](#) in a literal sense that they do not yet fully understand. Thus, physicists continue trying to unravel the complex web of Einstein's ideas, 120 years after his first groundbreaking papers.

ON THE WEB

Abraham Pais, a physicist who knew Einstein personally, wrote [a definitive and entertaining account](#) of Einstein's history with quantum physics in 1979 for ***the Journal Reviews of Modern Physics*** .

The Library of Congress [houses English translations](#) of Einstein's four papers from 1905, his "year of miracles." These papers laid the fundamental groundwork for both quantum mechanics and relativity.

Learn about [Einstein's theory of space, time, and gravity in this PBS Espacio Tiempo](#) video .

Albert Einstein es quizás el físico más famoso de todos los tiempos. La mayoría lo conoce como el creador de la relatividad general, una teoría revolucionaria que reformuló la fuerza de la gravedad como curvas en el espacio-tiempo. También se le conoce como un escéptico de la mecánica cuántica que buscaba una alternativa a la extraña teoría de los átomos. Esta es una descripción cierta, pero simplificada, de la relación de Einstein con la teoría cuántica. En realidad, Einstein aportó múltiples pilares fundamentales al edificio que se convertiría en la mecánica cuántica y merece ser recordado como un pionero cuántico junto a Max Planck, Niels Bohr, Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger. Einstein tuvo dificultades para aceptar la mecánica cuántica, pero su resistencia no provenía de un rechazo frívolo ni de una falta de comprensión. Al contrario, Einstein contribuyó enormemente a su desarrollo precisamente porque intuyó profundamente las radicales implicaciones de la teoría. «He pensado cien veces más en los problemas cuánticos que

en la teoría de la relatividad general», le dijo una vez al físico alemán Otto Stern. Planck y Einstein iniciaron la era cuántica juntos. En 1900, Planck propuso que la materia absorbe energía en paquetes. Cinco años después, Einstein publicó dos artículos revolucionarios que reforzaron la idea de que el mundo está fundamentalmente cuantizado. Uno de ellos estableció que la materia está compuesta de átomos, poniendo fin a siglos de debate. El otro profundizó en la idea de Planck, argumentando que la luz también transporta energía en paquetes. Esta idea fue controvertida, pero finalmente Einstein fue reivindicado. Ganó su único Premio Nobel por establecer la naturaleza cuántica de la luz, y no por su más conocida teoría de la relatividad general. La incomodidad de Einstein con la mecánica cuántica comenzó en la década de 1920, cuando se hizo evidente que la teoría imponía límites nuevos e indeseables a nuestro conocimiento. Una partícula no tiene una posición fija, por ejemplo; simplemente tiene probabilidades de ser observada en diferentes posiciones. Esto dio lugar a años de debate amistoso entre Einstein y Bohr, quienes intercambiaron experimentos mentales cada vez más sofisticados que afinaron la comprensión de la teoría por parte de los físicos. Luego, en 1935, Einstein, junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen (conocidos como "EPR"), propuso un experimento mental cuántico con implicaciones aparentemente impensables.

Si se tomara en serio la mecánica cuántica, este experimento crearía una conexión "inquietante" en la que una sola propiedad residiría entre múltiples partículas. Este fenómeno, argumentó Einstein-Phreshmann (EPR), era claramente imposible, por lo que la mecánica cuántica debía ser solo un paso hacia una teoría más completa. «No cabe duda de que la mecánica cuántica se ha apoderado de un hermoso elemento de verdad, y que será una piedra de prueba para cualquier base teórica futura», escribió Einstein en 1936. En este punto, Einstein se equivocó. Un experimento mental refinado, desarrollado en la década de 1960, prácticamente garantizó que la misteriosa conexión que Einstein y sus colegas habían identificado, que se denominó «entrelazamiento», estaba intrínsecamente ligada a la naturaleza de la realidad. Dicho experimento se ha llevado a cabo desde entonces, y bajo condiciones cada vez más rigurosas. Los físicos incluso han medido las diferentes velocidades a las que el entrelazamiento puede propagarse a través de cadenas de partículas. Gracias a su escepticismo, Einstein había descubierto un fenómeno físico profundo y potente. Schrödinger describió el entrelazamiento como «el rasgo característico de la mecánica cuántica». Parece ser, al menos en parte, la base de la potencia de las computadoras cuánticas y permite el desarrollo de sistemas de cifrado robustos. Si bien Einstein perdió la batalla por el entrelazamiento cuántico, algunos físicos mantienen la esperanza de que su perspectiva pueda ganar la batalla por la esencia de la mecánica cuántica. La teoría ha llegado para quedarse y bien podría ser una descripción completa del mundo. Sin embargo, existe la creciente convicción de que la interpretación de Bohr y Heisenberg, conocida como la interpretación de Copenhague, deja mucho que desear.

En una conferencia celebrada este verano para conmemorar el centenario de la mecánica cuántica, un tema candente fue la búsqueda constante de una reinterpretación de la teoría que pudiera restaurar, al menos parcialmente, la imagen intuitiva y concreta de la realidad que Einstein anhelaba. Irónicamente, las dos grandes contribuciones de Einstein a la física del siglo XX, aparentemente antagónicas —la mecánica cuántica y la relatividad general—, se han entrelazado cada vez más en el siglo XXI. Los físicos han descubierto cómo describir un tejido espaciotemporal con curvatura negativa como una colección de partículas cuánticas y viceversa. Esta traducción sugiere que las leyes físicas del espacio-tiempo y la gravedad pueden considerarse versiones remezcladas de las leyes cuánticas.

de las partículas, y que los fenómenos cuánticos son imágenes distorsionadas de los fenómenos gravitacionales. En particular, el entrelazamiento que Einstein y sus coautores del EPR no pudieron aceptar podría ser un reflejo de una geometría teórica del espacio-tiempo que él ayudó a descubrir (también con Nathan Rosen): un agujero de gusano, técnicamente conocido como puente de Einstein-Rosen (ER). Tanto el entrelazamiento como los agujeros de gusano implican una conexión enigmática entre lugares distantes. Algunos teóricos sospechan que la similitud es más que una metáfora: que «ER» podría ser equivalente a «EPR» en un sentido literal que aún no comprenden del todo. Así pues, los físicos siguen intentando desentrañar la compleja red de las ideas de Einstein, 120 años después de sus primeros artículos revolucionarios.