

Mecánica cuántica y los límites de la descripción clásica

Juan Segurola

Pregunta central

¿Cómo sustituyó la mecánica cuántica las trayectorias clásicas por un marco matemático de amplitudes, operadores y probabilidades, y qué reveló esto sobre los límites de la descripción clásica?

Contexto histórico y evolutivo

A comienzos del siglo XX, la radiación de cuerpo negro, los espectros atómicos, el efecto fotoeléctrico y la estabilidad atómica resistían las explicaciones clásicas. La cuantización del intercambio de energía de Planck en 1900 y la propuesta de cuantos de luz de Einstein de 1905 fueron rupturas tempranas, pero una mecánica coherente no llegó hasta mediados de la década de 1920. La mecánica matricial de Heisenberg de 1925, la formalización de Born y Jordan, la mecánica ondulatoria de Schrödinger de 1926 y la interpretación probabilística de Born crearon rutas matemáticamente distintas pero finalmente equivalentes hacia la teoría cuántica. La relación de incertidumbre de Heisenberg de 1927 hizo explícito que la especificación clásica simultánea de variables conjugadas no podía conservarse sin más.

¿Qué podían saber las comunidades antes de esta transición?

La mecánica clásica y el electromagnetismo podían predecir movimiento planetario, máquinas y campos con enorme éxito. La espectroscopia atómica proporcionaba regularidades precisas, y PIO-075 había hecho experimentalmente penetrables los átomos. La limitación era que las partículas y campos clásicos no podían explicar coherentemente espectros cuantizados, átomos estables e interacciones microscópicas radiación-materia.

¿Qué cambió?

Las relaciones observables sustituyeron a órbitas clásicas imaginadas

El programa de Heisenberg de 1925 reformuló deliberadamente la mecánica en torno a magnitudes conectadas con transiciones espectrales observables. La multiplicación matricial introdujo magnitudes no conmutativas, rompiendo la suposición clásica de que las variables físicas podían combinarse siempre en cualquier orden sin consecuencias.

La mecánica ondulatoria aportó otra representación

La ecuación de Schrödinger de 1926 trató los estados cuánticos mediante funciones de onda y ecuaciones diferenciales. Pronto demostró la relación entre su formulación y la mecánica matricial. La existencia de representaciones equivalentes fue en sí misma epistémicamente importante: la teoría no estaba ligada a una única imagen intuitiva.

La probabilidad se volvió fundamental para la predicción

Born interpretó probabilísticamente la función de onda en dispersión. La teoría cuántica no añadió simplemente ruido de medición a la certeza clásica; cambió la forma de la predicción. La relación de incertidumbre de Heisenberg de 1927 mostró además que determinados pares de magnitudes no pueden recibir valores simultáneos arbitrariamente precisos dentro de la teoría.

¿Por qué pudo surgir esta capacidad?

La mecánica cuántica dependió de espectroscopia de precisión, experimentos atómicos y de radiación, matrices matemáticas y ecuaciones diferenciales, la antigua teoría cuántica de Planck, Einstein y Bohr, y una densa red europea de seminarios y correspondencia. La crisis fue productiva porque las regularidades experimentales eran lo bastante precisas para rechazar modelos clásicos inadecuados.

¿Qué formas posteriores de conocimiento hizo posibles?

La mecánica cuántica hizo posibles la física atómica, molecular y del estado sólido, la teoría de semiconductores, los láseres, la física nuclear, la química cuántica y gran parte de la

ciencia moderna de materiales. Proporcionó además el lenguaje para teorías cuánticas de campos y tecnologías de información posteriores.

Nuevos límites y riesgos

La mecánica cuántica predice distribuciones experimentales con extraordinaria precisión, pero deja disputas interpretativas sobre medición, ontología y emergencia de lo clásico. El formalismo matemático puede confundirse con descripción directa de una realidad no observada, mientras que los relatos populares pueden exagerar la incertidumbre hasta afirmar que cualquier cosa es posible. Las aplicaciones tecnológicas conectan además conocimiento cuántico con sistemas de doble uso.

¿Qué cambió en la arquitectura del conocimiento?

La física pasó de una descripción principalmente **basada en trayectorias a una arquitectura de operadores y estados para predicción probabilística**. La relación entre teoría y observación se volvió más explícita, y los conceptos clásicos pasaron a ser aproximaciones límite en lugar de primitivas universales.

Pérdida, exclusión e incertidumbre

Los manuales suelen comprimir la transición en unos pocos hombres famosos y restar importancia a experimentadores, espectroscopistas, matemáticos y contribuyentes como Born, Jordan, Pauli y Dirac. La «interpretación de Copenhague» es además históricamente heterogénea. PIO distingue por ello los logros formales de 1925–1927 de codificaciones filosóficas posteriores.

Mapa de dependencias

- INDIRECTO ← PIO-075 Rayos X, radiactividad y el átomo medible
- INDIRECTO ← PIO-079 Noether, simetría y conservación
- DIRECTO → PIO-083 Física nuclear, energía nuclear y conocimiento de doble uso
- INDIRECTO → PIO-087 ADN y herencia molecular

Referencias

1. Heisenberg, W. «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.» *Zeitschrift für Physik* 33, 879–893 (1925). DOI: 10.1007/BF01328377.
2. Schrödinger, E. «Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen.» *Annalen der Physik* 384(8), 734–756 (1926). DOI: 10.1002/andp.19263840804.
3. Heisenberg, W. «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.» *Zeitschrift für Physik* 43, 172–198 (1927). DOI: 10.1007/BF01397280.
4. Camilleri, K. «How quantum mechanics emerged in a few revolutionary months 100 years ago.» *Nature* 637, 269–271 (2025). DOI: 10.1038/d41586-024-04217-0.