



EL Registro Único

Artist's Proof 23

Entrelazamiento

La desigualdad de Bell y la restricción de registro único

Estado y dependencia

Este artículo disuelve la paradoja del entrelazamiento cuántico. El entrelazamiento no es una conexión misteriosa entre partículas distantes sino la actualización de una entidad única del pre-estado.

La aparente no-localidad surge porque el pre-estado (AP07) no tiene estructura espacial — la distancia es una propiedad de la variedad (la acumulación de registros), no del estado de probabilidad que la precede.

Tres resultados formales. El Lema 1 (Interacción local, actualización global) establece por qué una medición local sobre cualquier subsistema de un estado entrelazado necesariamente actualiza el estado global. La Proposición 1 (Registro único) muestra que la actualización de un estado entrelazado es un único evento de escritura de registro sin propagación de señal entre subsistemas. La Proposición 2 (Predicción de Bell) muestra que el teorema de Bell es predicho por los axiomas.

El Axioma C está a salvo porque su alcance es la variedad, no la transición del pre-estado a la variedad.

Cadena de dependencia: AP07 (espacio de Hilbert complejo, regla de Born, pre-estado sin estructura espacial) → AP09 (medición como actualización) → Axioma R (escritura de registro, irreversibilidad) → Axioma C (Restricción) → este artículo.

Estado epistémico por sección. §1 (Problema del entrelazamiento): histórico. §2 (La distancia es propiedad del registro): establecido. §3 (Entidad única): derivado. §4 (Actualización única): derivado — Lema 1 + Proposición 1. §5 (Axioma C a salvo): derivado. §5.1 (Covarianza relativista): derivado. §6 (Bell predicho): derivado — Proposición 2 + verificación CHSH cuantitativa.

Notación

$|AB\rangle$ — el estado entrelazado de dos subsistemas A y B. Un único vector en el producto tensorial $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$.

$\rho_A = \text{Tr}_B(|AB\rangle\langle AB|)$ — la matriz de densidad reducida del subsistema A. Para un estado entrelazado, ρ_A es una mezcla impropia (una marginal de un estado puro global), no una mezcla propia (ignorancia clásica sobre un estado puro definido pero desconocido).

Objetivo de registro — un estado elegible para actualización bajo el Axioma R. Un estado puro (un rayo en el espacio de Hilbert). Una matriz de densidad reducida de un sistema entrelazado no es un objetivo de registro.

Actualización — la escritura de un registro en la variedad. La ruptura. Axioma R. Apunta a estados puros.

Pre-estado — el espacio de Hilbert complejo previo a la actualización (AP07). Sin estructura espacial.

Interrupciones de eliminación

KS-48a (Temporización de correlaciones): ACTIVO — EMPÍRICO. Estructuralmente seguro. KS-48b (No-señalización): ACTIVO — EMPÍRICO. Estructuralmente seguro. KS-49 (Variables ocultas): CERRADO. Local: empírico (tests de Bell). No-local: axiomático (Axioma R). KS-54 (Colapso parcial): ACTIVO — EMPÍRICO. Estructuralmente seguro.

Así es como se destruye este artículo. Demuestra que las correlaciones de entrelazamiento se degradan con la distancia o el tiempo de un modo que la mecánica cuántica no predice. O viola experimentalmente el teorema de no-señalización. O demuestra colapso parcial de un estado genuinamente entrelazado.

§1 — El problema del entrelazamiento

Has roto un plato y dado una mitad a un amigo que condujo al otro lado del país.

Cuando miras tu mitad y ves que la fractura va de izquierda a derecha, sabes instantáneamente que su mitad tiene el borde complementario. No se envió señal. No ocurrió magia. Las mitades siempre fueron un plato.

El entrelazamiento es así — excepto que el plato no tiene borde definido hasta que lo miras.

Dos partículas se preparan en un estado entrelazado — su espín combinado es exactamente cero. Se separan. Una se envía a Alice, la otra a Bob, en extremos opuestos de la galaxia.

Ninguna partícula tiene espín definido hasta ser medida. Están en superposición (AP07). Alice mide su partícula y encuentra espín-arriba. Instantáneamente — no a la velocidad

de la luz, sino instantáneamente — la partícula de Bob se vuelve espín-abajo. A través de 100.000 años-luz. Sin señal enviada.

Einstein llamó a esto "acción fantasmal a distancia." Bell (1964) demostró matemáticamente que ninguna teoría de variables ocultas locales puede reproducir las correlaciones. Las desigualdades de Bell han sido violadas experimentalmente (Aspect, 1982; Hensen et al., 2015). La correlación es real e instantánea.

La pregunta para los axiomas: el Axioma C dicta el límite causal c . ¿Cómo sobrevive la correlación instantánea sin violar el Axioma C?

§2 — La distancia es una propiedad del registro

La paradoja aparente descansa en una suposición: que las dos partículas están separadas. Que hay una distancia entre ellas. Que el espacio yace entre Alice y Bob.

La distancia no es fundamental. La distancia es una propiedad de la variedad. La variedad es la acumulación de registros (Axiomas R y C; AP17). La estructura espacial es el aspecto que tienen los registros cuando se acumulan bajo un límite causal.

Antes de la actualización — antes de que un registro sea escrito — no hay variedad. El pre-estado (AP07) es un espacio de Hilbert complejo. No tiene estructura espacial. No tiene "aquí" ni "allá."

Antes de la actualización, no hay distancia. El concepto de separación no aplica al pre-estado.

§3 — El estado entrelazado es una entidad única

Hasta el momento de la actualización, el sistema entrelazado no son dos partículas separadas por el espacio. Es un único estado de probabilidad ininterrumpido en el pre-estado.

El estado entrelazado $|AB\rangle = (1/\sqrt{2})(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$ es un objeto matemático. Vive en el producto tensorial de los espacios de Hilbert de A y B.

El producto tensorial proporciona distinguibilidad algebraica: A y B son diferentes grados de libertad. Pero distinguibilidad algebraica no es separación espacial. El

producto tensorial $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ combina grados de libertad; no los embebe en el espacio-tiempo.

Las etiquetas "A" y "B" refieren a grados de libertad, no a ubicaciones. La separación espacial es una propiedad de los registros escritos hasta ahora (las trayectorias), no del estado de probabilidad que aún no ha colapsado.

§4 — El colapso es un único evento de actualización

Lema 1 (Interacción local, actualización global).

Si $|AB\rangle$ está entrelazado (no separable), entonces cualquier interacción que cree un registro irreversible involucrando al subsistema A necesariamente actualiza $|AB\rangle$ como un todo.

Demostración.

La medición de Alice está representada por un operador M_a actuando sobre el subsistema A. Pero porque $|AB\rangle$ está entrelazado, la medición actúa sobre el estado global como $(M_a \otimes I_B)$. El registro "a" es una propiedad de esta actualización global, no una actualización independiente de A solo.

La matriz de densidad reducida ρ_A es una marginal del estado global — no es un estado independiente por sí mismo, y no es un objetivo de registro. La actualización escribe un registro para el estado sobre el cual la medición actúa. Ese estado es el estado global $|AB\rangle$. Por lo tanto, la interacción local con cualquier subsistema de un estado entrelazado necesariamente actualiza el estado global. ■

Has tirado de un hilo en un tejido. Toda la trama responde — no porque una señal corra a lo largo del hilo, sino porque los hilos nunca fueron separados. Eran una tela.

Proposición 1 (Registro único).

Sea $|AB\rangle \in \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ un estado entrelazado (no separable). Entonces la actualización de $|AB\rangle$ es un único evento de escritura de registro. El registro determina los resultados para todos los subsistemas simultáneamente. Ninguna señal se propaga entre subsistemas durante la actualización.

Demostración.

Por el Lema 1, cualquier interacción local que desencadene la actualización actualiza el estado global $|AB\rangle$. Por el Axioma R, la actualización escribe un registro para el estado siendo actualizado. El estado es $|AB\rangle$ (un objeto matemático). Por lo tanto se escribe un registro. El registro determina los resultados para todos los subsistemas simultáneamente.

Ningún paso intermedio existe en el que el resultado de A se determina y una señal debe propagarse para determinar B. La propagación de señales (Axioma C) gobierna registros en la variedad; la actualización es la creación de un registro, no la propagación de uno. Creación no es propagación. ■

§5 – El Axioma C no se viola

El Axioma C impone un límite de propagación invariante finito (c) sobre la variedad. Acota la velocidad de señales entre registros en la variedad.

El alcance del Axioma C es: (a) la variedad y su contenido (registros, señales entre registros), no (b) la transición del pre-estado a la variedad.

El colapso del entrelazamiento no es una señal en la variedad. Es la escritura de un registro en la variedad. El acto de actualización no está acotado por el límite de velocidad de la realidad que está actualizando.

La ruptura no viaja. Sucede.

§5.0.1 – No-señalización (derivada de los axiomas)

Después de la actualización, el valor esperado local de Alice es $\langle O_A \rangle = \text{Tr}(\rho_A \cdot O_A)$, donde $\rho_A = \text{Tr}_B(|AB\rangle\langle AB|)$. La traza parcial ha eliminado toda referencia a los grados de libertad de B. Las estadísticas de medición de Alice son independientes de cualquier operación que Bob realice sobre B. Para que Alice aprenda algo del resultado de Bob, se requiere una señal clásica acotada por c (Axioma C).

Axioma C + Proposición 1 + estructura de traza parcial implican conjuntamente la no-señalización. Los axiomas reproducen el teorema estándar de no-señalización.

§5.1 – Covarianza relativista

La actualización no es un evento espacio-temporal. Es la transición del pre-estado (sin estructura espacial, $AP\emptyset 7$) a la variedad. El pre-estado no tiene ubicación espacio-

temporal. Por lo tanto el evento de actualización no tiene ubicación espacio-temporal. Es ontológicamente anterior al espacio-tiempo.

Los registros son covariantes bajo Lorentz: todos los observadores coinciden en los resultados. Solo difieren en el ordenamiento temporal de cuándo aparecen esos registros.

§6 — El teorema de Bell: predicho, no acomodado

Proposición 2 (Predicción de Bell).

Los axiomas prohíben estructuralmente las variables ocultas locales. El Axioma R prohíbe asignaciones de valores preexistentes. El pre-estado no-espacial (AP07) disuelve la presuposición de localidad. Ambos pilares del teorema de Bell — realismo y localidad — son eliminados. Las desigualdades de Bell son violadas, y la violación cuantitativa se sigue de la regla de Born (AP07).

Demostración.

El teorema de Bell requiere dos suposiciones: (1) realismo — que cada partícula porta valores definidos antes de la medición, y (2) localidad — que el resultado en A depende solo de la variable oculta y el ajuste de medición en A, no del ajuste distante en B.

Esto produce la condición de factorización: $P(a,b|\lambda) = P(a|\lambda) \cdot P(b|\lambda)$. Los axiomas eliminan ambas suposiciones. Primero, Axioma R: los estados no poseen valores definidos antes de la escritura del registro. La variable oculta λ está vacía. Segundo, AP07: el pre-estado no tiene estructura espacial. La presuposición de localidad se disuelve.

La derivación de la desigualdad de Bell falla en su primer paso. Las desigualdades deben ser violadas. ■

§6.0.1 — Verificación cuantitativa: CHSH

Para el estado singlete, si Alice mide a lo largo del eje \hat{a} y Bob a lo largo de \hat{b} , la correlación cuántico-mecánica es $E(\hat{a}, \hat{b}) = -\cos\theta$. La desigualdad CHSH establece $S \leq 2$ para cualquier teoría de variables ocultas locales. Con los ajustes óptimos estándar, la regla de Born produce $S = 2\sqrt{2} \approx 2,83$. Esto excede 2.

Los axiomas predicen la magnitud exacta de la violación: $S = 2\sqrt{2}$, el límite de Tsirelson. La predicción máxima permitida por la mecánica cuántica.

Nota sobre variables ocultas: El Axioma R prohíbe estructuralmente todas las variables ocultas, incluidas las no-locales, porque los estados no poseen valores definidos antes de la escritura del registro.

§6.1 — Nota sobre decoherencia

La decoherencia describe el proceso por el cual el pre-estado pierde coherencia a través de la interacción ambiental. Los axiomas identifican cuándo este proceso constituye una actualización: cuando la interacción crea un registro irreversible (Axioma R). La decoherencia es el mecanismo físico; la actualización es el evento ontológico. Son compatibles: la decoherencia es el aspecto que tiene la actualización desde dentro de la variedad.

§7 — El punto más profundo

La incomodidad de Einstein con el entrelazamiento era una incomodidad con la no-localidad. Asumió que la separación espacial era fundamental. Los axiomas disuelven esta suposición.

Lo que parece "acción fantasmal a distancia" es solo el pre-estado único convirtiéndose en registro. La distancia nunca fue relevante. La pluma tocó el papel. Ambas entradas aparecieron porque siempre fueron la misma frase.

Esto es consistente con el principio más profundo de los axiomas: la separación se experimenta pero no es fundamental. El entrelazamiento no es extraño. Es lo predeterminado. Lo extraño — lo que requiere explicación — es la separación.

§8 — Interruptores de eliminación

KS-48a — Temporización de correlaciones (EMPÍRICO).

Si las correlaciones de entrelazamiento se degradan o desvían de las predicciones cuánticas cuando los eventos de medición se arreglan en diferentes ordenamientos relativistas o separaciones espaciales variables, la cuenta de actualización única no-espacial se amenaza. Estado: ACTIVO — EMPÍRICO. Estructuralmente seguro.

KS-48b — No-señalización (EMPÍRICO).

Si las estadísticas marginales de medición de Alice dependen del ajuste de medición de Bob, el Axioma C se viola al nivel de registros. Estado: ACTIVO — EMPÍRICO. Estructuralmente seguro.

KS-49 — Variables ocultas (CERRADO).

Local: empírico (Aspect 1982; Hensen et al. 2015). No-local: axiomático (Axioma R). Si se confirmara experimentalmente una teoría de variables ocultas viable, la cuenta de medición del Axioma R falla. Estado: CERRADO.

KS-54 — Colapso parcial (EMPÍRICO).

Si medir el subsistema A de un estado entrelazado deja el estado global parcialmente colapsado, el Lema 1 falla. Estado: ACTIVO — EMPÍRICO. Estructuralmente seguro.

§9 — Conclusión

No hay paradoja.

Antes de la ruptura, solo hay el pre-estado. Sin espacio. Sin distancia. Sin separación. El estado entrelazado es una entidad única — un estado de probabilidad en un espacio de Hilbert, no dos partículas a distancia.

La medición es actualización. El operador de medición actúa sobre el estado global (Lema 1). La ruptura sucede una vez. Un registro se escribe. Ambos resultados aparecen porque siempre fueron el mismo evento.

El Axioma C no se viola. Su alcance es la variedad — señales entre registros. La actualización es la creación de registros, no su propagación.

Bell no se acomoda sino se predice: el Axioma R prohíbe valores preexistentes, el pre-estado no-espacial disuelve la presuposición de localidad, y la regla de Born produce $S = 2\sqrt{2}$.

Has estado entrelazado con cada persona que has amado. No metafóricamente. Los estados cuánticos de los átomos de tu cuerpo han estado correlacionados con los de los suyos, a través de cada toque, cada aliento de aire compartido, cada fotón intercambiado entre sus ojos.

El entrelazamiento es real. La separación siempre fue la ilusión.

Resumen de afirmaciones

Derivado:

Interacción local actualiza estado global entrelazado (Lema 1). Entrelazamiento como actualización única (Proposición 1). Estados separables permiten actualización independiente (Corolario). Bell predicho (Proposición 2, de Axioma R + AP07). Violación cuantitativa de Bell: $S = 2\sqrt{2}$ (§6.0.1).

Suposición de distancia disuelta (AP07). Alcance del Axioma C clarificado. Covarianza relativista disuelta (§5.1). No-señalización derivada (§5.0.1). Decoherencia complementaria (§6.1).

Interruptores de eliminación:

KS-48a (temporización, EMPÍRICO). KS-48b (no-señalización, EMPÍRICO). KS-49 (variables ocultas, CERRADO). KS-54 (colapso parcial, EMPÍRICO).

No seas imbécil. Sé amable.

Esta obra se publica gratis, para siempre.

the42@code.org