



Inconsistencias en la formulación de Historias Consistentes de la mecánica cuántica

Elias Okon

Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM

En colaboración con D. Sudarsky

Motivación

- Clasificación de físicos con respecto al teorema de Bell (Mermin):
 - **Tipo 1:** Sorprendidos por el teorema.
 - **Tipo 2:** No sorprendidos por el teorema (la mayoría).
 - **Tipo 2a:** Explican por qué no, pero, o no entienden bien la cuestión, o dicen cosas falsas.
 - **Tipo 2b:** Se rehusan a explicar por qué.
- Clasificación de físicos con respecto al problema de la medición:
 - **Tipo 1:** No reconocen el problema (la mayoría).
 - **Tipo 2:** Reconocen el problema.
 - **Tipo 2a:** Lo ignoran o minimizan argumentando que **muchos mundos** lo resuelve (pero no dan detalles de cómo).
 - **Tipo 2b:** Están genuinamente preocupados por el problema.

Introducción

- La formulación de **Historias Consistentes** (CH) de la MC, asigna probabilidades a historias de todo tipo de sistemas, micro y macro, usando una única maquinaria, sin “cortes de Heisenberg” o referencia a mediciones.
- Por lo tanto, de acuerdo con sus proponentes, CH resuelve el problema de la medición (así como muchas otras paradojas cuánticas).
- En este trabajo cuestionamos dicha aseveración exhibiendo una serie de problemas conceptuales con dicha formulación.

Plan

- El problema de la medición
- Formulación de Historias Consistentes
 - La interpretación de Gell-Mann y Hartle
- Objeciones
 - “Tradicionales”
 - Nuevas
 - Relativismo de la realidad
 - Condiciones iniciales
 - IGUSes
 - Mediciones
- Conclusiones

El Problema de la medición

- **Problema de la medición:** a pesar de que la MC estándar depende crucialmente de la noción de medición, dicha noción nunca se define formalmente dentro de la teoría.
 - Para aplicar la teoría, es necesario saber, por medios externos a ella, qué constituye una medición, cuándo ocurre una, y que es lo que ésta mide.
- **Formulación alternativa:** incompatibilidad entre la experiencia y algunas predicciones de la mecánica cuántica unitaria.

Historias consistentes

- Introducida por Griffiths en 1984 y desarrollada por él mismo, Gell-Mann, Hartle y Omnès.
- CH busca un formalismo cuántico para sistemas cerrados (e.g., el universo entero).
- Es visto como “la manera correcta de desarrollar las ideas de Everett.”
- Asigna probabilidades a todos los sistemas, micro o macro, usando la misma maquinaria y sin hacer referencia a mediciones o cortes.
- **Aseveración:** CH constituye un acercamiento *realista* a la mecánica cuántica, que resuelve muchas paradojas cuánticas, incluyendo el problema de la medición.

Historias consistentes

- El objetivo más general de la MC es predecir probabilidades para historias temporales de sistemas.
- Una **historia** es una secuencia de propiedades, representadas por operadores de proyección en tiempos sucesivos.
- CH introduce **conjuntos de historias** y da reglas que asignan probabilidades a los diferentes elementos del conjunto.
- No todos los conjuntos de historias permiten la asignación de probabilidades: i) suma de probabilidades debe ser uno, y ii) todo par de historias del conjunto debe ser ortogonal.
- A las familias que satisfacen estas condiciones se les conoce como **marcos (frameworks)**, o **reinos (realms)**.

Historias consistentes

- **Entrada:** estado inicial $|\psi\rangle$ y dinámica \hat{H} . (dados por teoría fund.)
- Conjunto exclusivo y exhaustivo de alternativas sí/no en un tiempo, representado por un conjunto de operadores de proyección:

$$\{P_\alpha(t)\}, \quad \alpha = 1, 2, 3, \dots$$

tal que

$$\sum_\alpha P_\alpha(t) = 1, \quad \text{y} \quad P_\alpha(t)P_\beta(t) = \delta_{\alpha\beta}P_\alpha(t).$$

- **Conjuntos de historias** se especifican vía:

$$\{P_{\alpha_1}^1(t_1)\}, \{P_{\alpha_2}^2(t_2)\}, \dots, \{P_{\alpha_n}^n(t_n)\} \text{ en tiempos } t_1 < t_2 < \dots < t_n.$$

Historias consistentes

- Una **historia individual** en el conjunto es una secuencia particular de alternativas $(\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \dots, \bar{\alpha}_n)$, representada por la cadena de proyectores correspondiente: $C_{\bar{\alpha}} \equiv P_{\bar{\alpha}_n}^n(t_n) \dots P_{\bar{\alpha}_1}^1(t_1)$.
- A cada historia se le asigna un **vector estado**: $|\psi_{\bar{\alpha}}\rangle = C_{\bar{\alpha}}|\psi\rangle$.
- En general, los conjuntos son **a grano grueso** ya que alternativas no se especifican en todo tiempo y proyecciones pueden ser a sub-espacios con $\dim > 1$.
- Es posible definir operaciones que afinan o engruesan el grano.

Historias consistentes

- No a todos los conjuntos se les puede asignar probabilidades
- Esto puede hacerse sólo cuando la interferencia entre historias es cero (o despreciable)

$$\langle \psi_\alpha | \psi_\beta \rangle \approx 0, \quad \alpha \neq \beta$$

- Estos son los únicos conjuntos para los cuales la MC hace predicciones, con probabilidades (aproximadas) para diferentes historias dadas por

$$p(\alpha) = ||C_\alpha |\psi\rangle||^2$$

- Un conjunto que satisface lo anterior se conoce como **reino** or **marco**.

Predicciones y retrodicciones

Dados datos d en tiempo t_0 , representados por $P_d(t_0)$:

- Predicciones para historias futuras están dadas por:

$$p(\alpha_{fut} | d) = \frac{\|C_{\alpha_{fut}} P_d(t_0) |\psi\rangle\|^2}{\|P_d(t_0) |\psi\rangle\|^2}$$

(con $C_{\alpha_{fut}}$ un conjunto exhaustivo de historias alternativas hacia el futuro de t_0)

- Retrodicciones por:

$$p(\beta_{pst} | d) = \frac{\|P_d(t_0) C_{\beta_{pst}} |\psi\rangle\|^2}{\|P_d(t_0) |\psi\rangle\|^2}$$

(con $C_{\beta_{pst}}$ un conjunto exhaustivo de historias alternativas hacia el pasado de t_0)

Principios de CH

- Dado un sistema, es posible construir **marcos incompatibles**. Por lo tanto, las siguientes reglas deben imponerse:
 - **Regla de un solo marco:** racionamiento probabilístico es inválido a menos de que se lleve a cabo usando un único marco.
 - **Principio de libertad:** uno puede usar el marco que guste para describir un sistema.
 - **Principio de igualdad:** en términos de la mecánica cuántica fundamental, todos los marcos son igualmente aceptables.
 - **Principio de utilidad:** no todos los marcos son igualmente útiles para contestar preguntas particulares de interés físico.
- CH viola el siguiente principio:
 - **Principio de unicidad:** descripciones alternativas de un sistema físico siempre pueden combinarse en una sola descripción, desde la cual todas los puntos de vista pueden derivarse como caracterizaciones parciales.

Mediciones en CH

- Las **mediciones** no juegan un papel especial en CH.
- Las mediciones son procesos que pueden ser descritos dentro de la teoría.
- Para hacerlo, es necesario seleccionar un marco apropiado, desde el cual se pueden calcular probabilidades idénticas a las de la regla de Born.
- Por lo tanto, a pesar de que las mediciones no juegan un papel especial dentro de la teoría, CH parece ser capaz de describirlas de manera consistente, dando lugar a los mismos resultados que la interpretación estándar.

Interpretación de Gell-Mann y Hartle

- A pesar de tener profundas similitudes con otras versiones de CH, la interpretación de Gell-Mann y Hartle difiere significativamente de ellas en al menos tres aspectos:
 - El papel de los IGUSes (sistemas de recaudación y uso de información) en el formalismo.
 - Posiciones con respecto a la naturaleza de la realidad.
 - Un énfasis en aplicaciones en cosmología.

Marcos cuasi-clásicos y IGUSes

- Un marco cuasi-clásico es uno con historias individuales que exhiben tantos patrones de correlaciones clásicas en el tiempo como es posible.
- Los humanos somos sistemas adaptativos complejos o IGUSes. La característica principal de un IGUS es que utiliza una forma (quizás rudimentaria) de la MC para hacer predicciones.
- La existencia de IGUSes puede explicarse en términos evolutivos:
 - Evolucionaron para hacer predicciones porque es adaptativo hacerlo.
 - Se enfocan en marcos cuasi-clásicos porque estos presentan suficientes regularidades para permitir predicciones por medio de métodos rudimentarios.

Realidad

- Hartle sostiene que la reticencia para aceptar CH puede ligarse a defectos con el lenguaje cotidiano.
- Lenguajes humanos contienen **bagaje extra** que debe descartarse para que sean útiles para la física, (e.g., “suceder”, “realidad”).

RE y “suceder”

- El lenguaje humano asume una división en pasado, presente y futuro pero la RE no la respalda. Para resolver el conflicto, debemos dejar de usar construcciones que involucren “suceder” o calificarlas.

Realidad

MC, “suceder” y “realidad”

- Preguntas, respuestas, predicciones, retrodicciones, etc. requieren de la especificación de un marco para cobrar sentido.

If someone asks you ‘What happened yesterday?’ you should strictly speaking respond with the question ‘In what realm’. (Hartle, 2007)

- Pero el uso de “sucedio” asume que sólo un marco existe así que su uso debe reformarse.
- Diferentes marcos tienen diferentes nociones de “realidad”.
- Al usar las palabras “real” o “realidad” es necesario especificar qué marco se está considerando.

Objeciones “tradicionales”

- **Inferencias contrarias:**

- El formalismo permite retrodecir proposiciones contrarias, cada una con probabilidad uno. (Kent, 1997).

- **Falta de poder predictivo:**

- Las predicciones sólo pueden hacerse condicionadas a la elección de un marco.
- El formalismo no especifica cómo seleccionarlo. (Dowker and Kent , 1996).

- **No persistencia de cuasi-clasicalidad:**

- Genéricamente, historias cuasi-clásicas dejan de serlo abruptamente. (Dowker and Kent, 1996).

- **Probabilidades aproximadas:**

- No aproximadas en el sentido de estar cerca de las reales, pero aproximadas en que dejan de obedecer los axiomas de probabilidad. (Barrett, 1999).

Nuevas objeciones

Cuatro nuevas objeciones en contra de CH:

1. Problemas con la propuesta de “relativismo de la realidad”
2. Un asunto sobre condiciones iniciales
3. Relación entre IGUSes y evolución
4. Mediciones según CH

Relativismo de la realidad

- Hartle propone un relativismo de la realidad:

“La realidad es relativa al marco”

- No es la primera vez que la ciencia descubre que algo es relativo (e.g., orden temporal en RE). No parece un problema de lenguaje sino uno epistémico u ontológico.
- En RE lo que está en juego es el orden de eventos, no si estos suceden o no.

Relativismo de la realidad

- Se supone que la realidad es relativa al marco, pero ¿cómo es que elegimos un marco? Gell-Man y Hartle son ambiguos:

[w]e could adopt a subjective point of view... and say that the IGUS “chooses” its coarse graining of histories and, therefore, “chooses” a particular quasiclassical domain... It would be better, however, to say that the IGUS evolves to exploit a particular quasiclassical domain or set of such domains. (Gell-Mann and Hartle, 1990)

- **Dos opciones:** tenemos la capacidad de escoger el marco o no.
 1. Si no, hablar de múltiples marcos parece extravagante y no sirve ningún propósito en la teoría (otros marcos son empíricamente inaccesibles).
 2. Si sí, ¿cómo? Noten que hacerlo involucra elegir proyecciones en todos lados y en todos tiempos, que pueden cambiar la experiencia presente, o ¡hasta el hecho de que existimos en le presente!

Condiciones iniciales

- Dados los datos presentes, no existe un pasado único.
- ¿Cómo escogemos condiciones iniciales (necesarias para hacer predicciones y retrodicciones)?
- **Gell-Mann y Hartle:** Necesitamos una teoría independiente para las condiciones iniciales del universo.
- Si el pasado es relativo, **¿qué puede contar como evidencia para dicha teoría?**

IGUSes y evolución

- **Evolución:** Impacto del ambiente en éxito reproductivo.
 - **Elementos esenciales:** población inicial variada, ambiente externo, herencia y variación, selección.
- **Ninguno de estos elementos está presente en este contexto:** no hay ambiente externo para que los IGUSes evolucionen dado que ¡el ambiente (i.e. el marco) es parte esencial de lo que se supone que se elige selectivamente!
- **Principio antrópico:** características del mundo son lo que son porque, de otra forma, no estaríamos aquí para reflexionarlo.
 - **G-M&H:** percibimos un marco cuasi-clásico porque es el único que permite que IGUSes como nosotros existan.

Mediciones

- El tratamiento de mediciones en CH depende, implícitamente, de **elementos externos a los que provee el formalismo:**
 - ▶ Es necesario asumir que los punteros de los aparatos de medición siempre terminan con posiciones bien definidas.
 - ▶ Nada en el formalismo justifica esta suposición.
- No es el caso que todos los marcos son igualmente válidos (principio de igualdad) pero que uno es más útil o informativo que el resto (principio de utilidad).
- En realidad, **existe sólo un marco** que describe correctamente lo que de hecho percibimos.
- **CH es incapaz de predecir** cuál es el marco que corresponderá con nuestras percepciones.

Mediciones

- Por ejemplo:

The unitary history... cannot be used to describe the measuring process, because the measurement outcomes... are **clearly incompatible** with the final state [of the unitary history]... A quantum mechanical description of a measurement with particular outcomes must, **obviously**, employ a framework in which these outcomes are represented by **appropriate projectors**... (Griffiths, 2002)

- ¿Cómo sabemos cuáles son esos “**proyectores apropiados**”?
- Es necesario saber, por medios externos al formalismo, cuales son los posibles resultados del experimento.
- Dos respuestas comunes. Marcos deben escogerse:
 1. Con el fin de modelar la situación experimental.
 2. De acuerdo con la pregunta que uno quiere responder.

Mediciones

- **Con respecto a 1 (para modelar la situación experimental):**
 - El hecho de que un aparato dado de hecho mide cierta propiedad es algo que no puede ser deducido de CH sino que debe ser descubierto en la práctica.
- **Con respecto a 2 (según la pregunta que uno quiere responder):**
 - No queda clara la relación entre el marco que se decide usar y lo que **de hecho observamos** al realizar el experimento.
 - ¿Qué cambiaría en lo que de hecho vemos si decidimos usar el marco z al medir S_x ? ¡Claramente nada!
 - La elección de marco depende del arreglo experimental y no de la pregunta que nos interesa (de vuelta a 1).

Conclusiones

- Importante (esencial para cosmología) encontrar extensión de MC aplicable a sistemas cerrados.
- Interesante explorar si una MC puramente unitaria puede ser adecuada.
- CH es un intento valiente por atacar estos dos puntos. Sin embargo, al menos en su forma actual, falla.
- Importante realizar análisis de otras propuestas Everettianas.