



# Probabilidades como propensiones en mecánica cuántica

*Probabilities as propensities in quantum mechanics*

*Probabilidades como propensões em mecânica quântica*

**Ignacio Javier Rojas Herrera**

Universidad de Artes, Ciencias y Comunicación UNIACC, Facultad de Psicología, Santiago, Chile.

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Filosofía y Letras, Buenos Aires, Argentina.

[ignacio.rojas.h@gmail.com](mailto:ignacio.rojas.h@gmail.com)

0000-0001-9927-2564 

→ **Recibido:** 06 / 10 / 2025  
→ **Aceptado:** 25 / 11 / 2025  
→ **Publicado:** 26 / 12 / 2025

→ **Artículo Dossier**  
"Filosofía y Fundamentos de la Física"  
© 2025 Ignacio J. Rojas Herrera CC BY 4.0

→ **Cómo citar:** Rojas Herrera, I. J. (2025).  
Probabilidades como propensiones en mecánica cuántica. *Culturas Científicas*, 6(1), pp. 119-139.  
[doi.org/10.35588/cc.v6d7880](https://doi.org/10.35588/cc.v6d7880)

## [ RESUMEN ]

El objetivo del presente trabajo es explorar el problema de las probabilidades en mecánica cuántica y cómo el concepto de propensión ha resurgido en ciertas interpretaciones realistas de esta teoría. Tanto Suárez (2007), Dorato y Esfeld (2010) como Lombardi y Castagnino (2008) han defendido la idea de considerar a las probabilidades como probabilidades objetivas del mundo físico, articulándolas en términos de propensiones. En este trabajo buscaremos dilucidar, en primer lugar, qué es lo que caracteriza a las posiciones que defienden las propensiones como la manera más adecuada de interpretar las probabilidades en mecánica cuántica; en segundo lugar, especificar en qué medida difieren entre sí las distintas posiciones en disputa y, por último, defender la tesis planteada tanto por Lombardi y Castagnino (2008) como por da Costa, Lombardi y Lastiri (2013) en el sentido que el mejor modo de comprender el rol de las probabilidades del mundo cuántico son las propensiones. Dentro de una ontología de propiedades como la propuesta por la interpretación Modal-Hamiltoniana, las propensiones constituyen propiedades-tipo de segundo orden que determinan la tendencia a actualizarse de dichas propiedades en un contexto preferente de actualización.

## [ PALABRAS CLAVES ]

*Probabilidades, Propensiones, Propiedades, Mecánica cuántica.*

---

## [ ABSTRACT ]

The aim of this paper is to explore the problem of probabilities in quantum mechanics and how the concept of propensity has resurfaced in certain realist interpretations of this theory. Suárez (2007), Dorato and Esfeld (2010), and Lombardi and Castagnino (2008) have all defended the idea of considering probabilities as objective probabilities of the physical world, articulating them in terms of propensities. In this paper, we will seek to elucidate, firstly, what characterizes the positions that defend propensities as the most appropriate way to interpret probabilities in quantum mechanics; secondly, to specify the extent to which the various competing positions differ from one another; and finally, to defend the thesis put forward by both Lombardi and Castagnino (2008) and da Costa, Lombardi, and Lastiri (2013) that propensities are the best way to understand the role of probabilities in the quantum world. Within a property ontology such as that proposed by the Modal-Hamiltonian interpretation, propensities constitute second-order type-propensities that determine the tendency of said properties to be actualized in a preferred context of actualization.

## [ KEY WORDS ]

*Probabilities, Propensities, Properties, Quantum mechanics.*

## 1. Introducción

El objetivo central del presente trabajo es explorar el problema de las probabilidades en mecánica cuántica y cómo, en el último tiempo, el concepto de propensión ha resurgido en ciertas interpretaciones realistas de esta teoría. En este sentido, tanto Suárez (2007) y Dorato y Esfeld (2010) como Lombardi y Castagnino (2008) y da Costa, Lombardi y Lastiri (2012) han defendido la idea de considerar las probabilidades cuánticas como probabilidades objetivas del mundo físico, articulándolas en términos de propensiones. Si bien en el desarrollo histórico del debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica han existido interpretaciones en las que las disposiciones juegan un rol importante, tales como la idea de *potentia* aristotélica defendida por Heisenberg (1958), o las *propiedades latentes* de Margeneau (1954), fue Popper (1959) quien realizó una detallada defensa de las probabilidades cuánticas como probabilidades objetivas, utilizando el término de propensión para establecer su posición filosófica.

Entre las múltiples críticas que recibió la postura de Popper, en la literatura se considera que la planteada por Humphreys (1985), en lo que se ha denominado como la 'Paradoja de Humphreys', constituye una objeción insalvable para el concepto de propensión debido a que esta interpretación de las probabilidades no satisface los axiomas clásicos de probabilidades, formulados por Kolmogorov (1933), por lo que debe ser desechada como alternativa viable. Sin embargo, Suárez (2013) ha planteado que, si bien esta crítica es un obstáculo difícil de sortear, es posible adoptar una interpretación de las propensiones que permita eludir esta crítica y defender su aplicabilidad en el contexto de la mecánica cuántica. Del mismo modo, desde la formulación original de la interpretación Modal-Hamiltoniana (iM-H) de la mecánica cuántica propuesta por Lombardi y Castagnino (2008), estos autores han sostenido una interpretación de las probabilidades cuánticas en términos de propensiones. Posteriormente, da Costa, Lombardi y Lastiri (2013) han reafirmado esta posición respecto a que las propensiones resultan la mejor manera de resolver los problemas planteados por el rol de las probabilidades en mecánica cuántica.

En este trabajo buscaremos dilucidar, en primer lugar, qué es lo que caracteriza a las posiciones que defienden las propensiones como la manera más adecuada de interpretar las probabilidades objetivas en mecánica cuántica; en segundo lugar, especificar en qué medida difieren entre sí las distintas posiciones en disputa y, por último, defender la tesis planteada tanto por Lombardi y Castagnino (2008) como por da Costa, Lombardi y Lastiri (2013) en el sentido que el mejor modo de comprender el rol de las probabilidades del mundo cuántico son las propensiones, caracterizadas por el operador de estado, las que, dentro de una ontología de propiedades como la propuesta por la interpretación Modal-Hamiltoniana, constituyen propiedades-tipo de segundo orden, determinando la tendencia a actualizarse de dichas propiedades en un contexto preferente de actualización.

## 2. Probabilidades en mecánica cuántica

La introducción de una interpretación probabilista del formalismo cuántico es una de las principales novedades que introdujo Born en su clásico artículo de 1926, 'On the quantum mechanics of collisions'. Aplicando la mecánica ondulatoria recientemente formulada por Schrödinger al problema de un electrón libre que interactúa con un átomo, Born afirma que, si se interpreta el resultado obtenido en términos de partículas, entonces la cantidad  $\Phi(\alpha, \beta, \gamma)$

representa la probabilidad de que el electrón, proveniente desde una dirección cualquiera  $z$ , sea lanzado en la dirección definida por los ángulos  $\alpha, \beta, \gamma$  con un cambio de fase  $\delta$ .

Sin embargo, el artículo contiene algunas reflexiones de Born que anticipan el largo debate posterior respecto al estatus de las probabilidades en mecánica cuántica, debate que, como veremos más adelante, continúa teniendo vigencia y con varias posiciones discordantes en juego. En este sentido, Born sostiene que una de las conclusiones que debemos sacar a partir de su análisis es que ya no es posible obtener respuestas respecto al estado del electrón después de la colisión, sino que solo es posible saber la probabilidad de un resultado específico luego de la interacción. Como corolario a esta constatación, Born afirma que ya no es posible alcanzar una descripción causal del proceso estudiado y que, por lo tanto, "Aquí surge todo el problema del determinismo." (Born 1926, 54).

La reflexión de Born apunta a que, por un lado, no existe una cantidad que determine causalmente el resultado de la interacción átomo-electrón y, por el otro, sostiene que "[...] experimentalmente no tenemos razones para creer que existan algunas propiedades internas del átomo que condicionen un resultado definido para la colisión." (Born 1926, 54). Podemos observar cómo, ya desde el inicio de la introducción de las probabilidades en mecánica cuántica, se instala, implícitamente aún, el debate sobre la posibilidad o no de la existencia de las así denominadas 'variables ocultas'. Sin embargo, Born es explícito en afirmar que él está dispuesto a abandonar el determinismo en el ámbito de la mecánica cuántica, pero que esta es una cuestión de naturaleza esencialmente filosófica y, por lo mismo, los argumentos físicos no resultan decisivos.

Acogiendo, entonces, la invitación extendida por Born a reflexionar desde la filosofía sobre el rol de las probabilidades en mecánica cuántica, veremos más adelante qué opciones filosóficas resultarán más satisfactorias para entender la ausencia de determinismo a nivel subatómico y defender que la introducción de las probabilidades en el formalismo cuántico se debe a la naturaleza del mundo físico y no, como lo sostendría una interpretación subjetiva de las probabilidades, al reflejo de nuestra falta de información respecto al estado de un sistema en un momento determinado. Sin embargo, es importante hacer notar que la interpretación probabilista de la función de onda ofrecida por Born en 1926 no depende de la noción matemática de probabilidad actualmente aceptada, cuya axiomatización solo será acometida y publicada por Kolmogorov en 1933. La interpretación de Born parece descansar más bien en una concepción frecuentista de las probabilidades, como la defendida por Reichenbach (1949) y von Mises (1957), que, como veremos más adelante, constituye solo una de las alternativas posibles para el defensor de las probabilidades como característica propia del mundo físico.

### 3. Interpretaciones de la probabilidad

Siguiendo el análisis de Mellor (2005), es posible clasificar a las probabilidades en tres tipos básicos: físicas, epistémicas y subjetivas. Un ejemplo clásico de probabilidades *físicas* es observar que un dado tiene las mismas *probabilidades* de caer por la cara (1, 2, 3, 4, 5 o 6) o que un fumador tiene mayores *probabilidades* de padecer cáncer que un no-fumador; un ejemplo de probabilidades *epistémicas* sería decir que dadas las evidencias es poco *probable* que el senador X no haya recibido coimas o que toda la evidencia apunta a que *probablemente* una de las causas significativas del fenómeno del calentamiento global se debe a la actividad humana. Finalmente, un ejemplo de probabilidad *subjetiva* sería creer que *probablemente* el partido de fútbol lo gane

el equipo Z o creer que *probablemente* va a llover esta noche. Así, las probabilidades físicas corresponderían a características propias del mundo físico, independientemente de nuestro conocimiento respecto de ellas o de la evidencia que pueda o no sustentar nuestras creencias y opiniones respecto a ciertos hechos determinados.

Las probabilidades epistémicas, por su lado, parecen no ser características del mundo en sí, sino grados en los que cierta(s) evidencia(s) confirma(n) o no algunas de nuestras hipótesis planteadas respecto a ciertos acontecimientos. Asimismo, las probabilidades subjetivas se relacionarían con la fuerza con la que apoyamos nuestras creencias, con la que sostenemos nuestras opiniones y no dependerían de aspectos del mundo para ser sustentadas. En este sentido, serían más bien los grados de confianza que tendría un agente sobre sus propias creencias.

Sobre la base de una interpretación objetiva de las probabilidades, considerándolas como una característica propia del mundo físico e independiente de nuestras creencias y/o evidencias respecto a ciertas hipótesis, como parece sugerir Born en el artículo citado anteriormente, se ha favorecido usualmente una lectura frecuentista de las probabilidades: originalmente, esta interpretación identificaba a las probabilidades con el límite de la frecuencia relativa de secuencias infinitas (Reichenbach 1949 y von Mises 1957). De acuerdo a esta visión, las probabilidades no son más que la frecuencia relativa de ocurrencia actual de un atributo A dentro de una clase de referencia B. Así, la probabilidad de obtener 'cara' al lanzar una moneda es la frecuencia con la que obtenemos 'cara' (atributo A) en una serie de lanzamientos de la moneda, dividida por el número total de lanzamientos (clase de referencia B) o, de manera más simple, la cantidad de casos 'favorables' en relación al total de casos considerados. De acuerdo a Hájek (2012), el frecuentismo es la posición dominante tanto en estadística como en ciencias en general, y tendría su origen en el trabajo de Venn (1876) quien al estudiar la proporción de nacimientos entre machos y hembras de una especie determinó que "[...] la probabilidad *no* es nada más que dicha proporción." (Venn 1876, 84).

Sin embargo, la interpretación frecuentista presenta numerosos problemas, de varios niveles de complejidad, a los que no ha dado respuestas satisfactorias. De acuerdo a Hájek, el origen de dichos problemas radica en su definición deliberadamente operacionalista de las probabilidades, lo que se ve reflejado en una familia de objeciones agrupadas bajo el rótulo del 'problema del caso único': la frecuencia relativa de obtener 'cara' o 'sello' en un lanzamiento único de una moneda es 0 o 1, sin importar si la moneda está construida de manera de favorecer uno de los resultados posibles (estos no serían equiprobables); Del mismo modo, la probabilidad de que un átomo radiactivo actualmente decaiga en el momento que lo hace es 1, ya que su frecuencia relativa es 1/1.

Por otra parte, muchos eventos pueden ser considerados no sólo como difíciles de repetir, sino que, como afirma Hájek, *irrepetibles*: el resultado de una elección presidencial o legislativa, el fin de un conflicto bélico, el resultado de la final de un torneo deportivo o la ocurrencia del Big-Bang, por ejemplo. Otra crítica hacia el frecuentismo, de carácter más general, es que este concibe las probabilidades como relacionadas con la ocurrencia de eventos observados o actuales y, por lo tanto, relativos a la experiencia humana. Así, Bunge ha sostenido que la interpretación frecuentista de las probabilidades quedó a mitad de camino hacia una interpretación objetiva de estas ya que "[...] estaba preocupada de observaciones más que de hechos objetivos." (Bunge 1981, 306).

## 4. Probabilidades como propensiones

Sin duda, una de las críticas más intensas que ha recibido la interpretación frecuentista es la planteada originalmente por Popper (1959), quien señala que la expresión  $P(a/b) = r$  es interpretable como que la probabilidad  $P$  que ocurra  $a$ , dado  $b$ , es  $r$ . Si  $b$  se refiere a las condiciones experimentales y  $a$  describe uno de los resultados posibles del experimento, entonces  $r$  es la frecuencia relativa con la que se estima que se obtiene el resultado experimental  $a$  en una larga (o infinita) secuencia de experimentos realizados bajo las condiciones caracterizadas por  $b$ . Sin embargo, la interpretación frecuentista asume esta secuencia de experimentos como previamente determinada, por lo que, de acuerdo a Popper, “[...] una probabilidad es una *propiedad de una secuencia dada*.” (Popper 1959, p. 34). Para el autor esto es inadecuado, ya que lo que determina a una secuencia determinada es el conjunto de condiciones generadoras de dicha secuencia. Así, la probabilidad debería ser “[...] una propiedad de las condiciones generadoras.” (Popper 1959, 34).

Bajo este cambio de concepción de las probabilidades propuesto por Popper, es posible resolver algunas de las objeciones comúnmente planteadas a la interpretación frecuentista, pero, más importante aún, se pueden concebir probabilidades para el caso de la ocurrencia de eventos singulares, permitiendo además eludir la familia de críticas identificadas por Hájek como el ‘problema del caso único’. Esto, además, afirma Popper, ofrecería una concepción de las probabilidades más adecuada para la mecánica cuántica<sup>1</sup>. El cambio planteado por Popper permite, entonces, decir que  $P(a/b) = r$  expresa el hecho que un evento  $a$  tiene una probabilidad  $r$  a ocurrir debido a que es producido por el conjunto  $b$  de condiciones generadoras, y no porque pertenezca a una secuencia de referencia dada. En este sentido, es posible adscribirle una probabilidad determinada a un evento único, incluso si acaece una sola vez, ya que dicha probabilidad es una propiedad de sus condiciones generadoras.

Una vez introducida esta nueva perspectiva, de las secuencias a las condiciones generadoras, Popper observa que esta nueva concepción de las probabilidades es más adecuada para dar cuenta del rol que estas juegan en mecánica cuántica. De hecho, fue su reflexión sobre situaciones experimentales como el famoso experimento de la ‘doble rendija’ lo que lo llevó a considerar a las probabilidades no solo como físicamente reales, sino como “[...] propiedades disposicionales inobservables del mundo físico.” (Popper 1959, 30). Este es un punto muy relevante para nuestra discusión posterior, ya que, junto con ofrecer una interpretación robusta de las probabilidades como características objetivas de la realidad, Popper afirma que debemos “[...] visualizar que el conjunto de condiciones generadoras posee una tendencia, una disposición, una *propensión*, a producir secuencias cuyas frecuencias son iguales a las probabilidades.” (Popper 1969, 35, énfasis añadido).

De este modo, las probabilidades como propensiones, como las llama Popper, corresponden a propiedades disposicionales de las condiciones generadoras de los eventos observados. Para Popper, al igual que para Heisenberg (1958), esta manera de concebir las probabilidades emparenta las propensiones con las *potentiae* aristotélicas, aunque no deben ser entendidas como propiedades de las *cosas* individuales, sino de los arreglos experimentales de manera global. Es interesante observar que la interpretación popperiana de las probabilidades como propensiones se incorpora a una corriente interpretativa de la mecánica cuántica en términos

<sup>1</sup>Existe cierta ambigüedad en la posición defendida por Popper, lo que ha llevado a diferenciar entre la versión de propensiones ‘de caso único’ y las de ‘largo-plazo’ (ver Suárez 2013 y Gillies 2000b para más detalles).

disposicionales. En este sentido, Margeneau (1954) consideraba que en mecánica cuántica existirían *propiedades latentes* que solo se manifestarían en las mediciones experimentales. Además, Heisenberg (1958) afirma que la función de onda de la mecánica cuántica se refiere a potencialidades o tendencias, como las aristotélicas, completamente objetivas. Hay autores para quienes es justificado retrotraer dicha corriente a la obra de Peirce, quien afirma que “[...] el dado posee un cierto ‘podría-ser’; y decir que un dado posee un ‘podría-ser’ es decir que posee una propiedad, muy similar a cualquier hábito que un hombre podría tener.” (Peirce 1910, 169).

Algunos herederos contemporáneos de esta tendencia, como Dorato (2007), han afirmado que en mecánica cuántica podemos decir que una observación experimental es el pasaje de una propiedad indefinida (*fuzzy*) a una definida (*eigenstate*) o “[...] el pasaje de lo disposicional a lo no-disposicional es el pasaje de la indefinición a la definición de las propiedades relevantes.” (Dorato 2007, p. 9). Asimismo, Dorato y Esfeld (2010) sostienen que en una teoría como la propuesta por Ghirardi, Weber y Rimini (GWR) “[...] las propiedades fundamentales son poderes (disposiciones) que se manifiestan espontáneamente, sin depender de condiciones externas que las desencadenen [...] Más precisamente, entonces, los poderes o disposiciones para localizarse espontáneamente son propensiones.” (Dorato y Esfeld 2010, 9). En este sentido, resulta relevante para nuestra discusión esta distinción entre disposiciones y propensiones: mientras las primeras exigen un estímulo externo para su manifestación, las segundas se manifiestan de manera autónoma y espontánea, sin depender de otros factores para su actualización.

## 5. La paradoja de Humphrey

Si bien la interpretación ofrecida por Popper en términos de propensiones es comúnmente citada en la literatura como una de las dos alternativas disponibles, junto a la frecuentista, para el defensor de las probabilidades objetivas, también es usual encontrar que el análisis planteado por Humphreys (1985), conocido posteriormente como la ‘Paradoja de Humphreys’, constituye una objeción insalvable para toda interpretación posible de las probabilidades como propensiones. En este sentido, Salmon (1979) observa que “Como Paul W. Humphreys me ha hecho notar en una comunicación privada, existe una importante limitación sobre la identificación de propensiones con probabilidades, ya que parece no haber propensiones que coincidan con probabilidades inversas.” (Salmon 1979, 213). Este problema se refiere al hecho matemático que si la probabilidad condicional  $P(a/b)$  existe, entonces la probabilidad condicional inversa  $P(b/a)$  también existe.

El argumento presentado por Humphreys pretende demostrar que toda interpretación de las probabilidades como propensiones es inadecuada ya que no permite dar cuenta ni de las probabilidades condicionales ni del Teorema de Bayes, dos ingredientes fundamentales de todo sistema axiomático para la probabilidad. El ejemplo elegido por Humphreys se refiere al fenómeno físico bien conocido en mecánica cuántica de la reflexión/transmisión de fotones a través de espejos semi-reflectantes. Como se ilustra en la Figura 1, una fuente caracterizada por un conjunto de condiciones de emisión  $C$  emite espontáneamente fotones en un  $t_0$ , de los cuales algunos pueden ser reflejados al incidir en el espejo (línea perpendicular a línea de emisión en la imagen) o pueden ser transmitidos (continuación de la línea de emisión). Si  $I_{t1}$  simboliza el evento en que un fotón incide en el espejo en un tiempo  $t_1$  y  $T_{t2}$  el evento en

que un fotón es transmitido a través del espejo en un tiempo  $t_2$ , posterior a  $t_1$ , entonces, de acuerdo a Humphreys, podemos asignar las siguientes propensiones condicionales  $\text{Pr}_{t_0}$  (donde  $t_0 < t_1 < t_2$ ):

- a)  $\text{Pr}_{t_0}(T_{t_2}/I_{t_1}\mathcal{C}_{t_0}) = p > 0$
- b)  $1 > \text{Pr}_{t_0}(I_{t_1}/\mathcal{C}_{t_0}) = q > 0$
- c)  $\text{Pr}_{t_0}(T_{t_2}/\neg I_{t_1}\mathcal{C}_{t_0}) = 0$

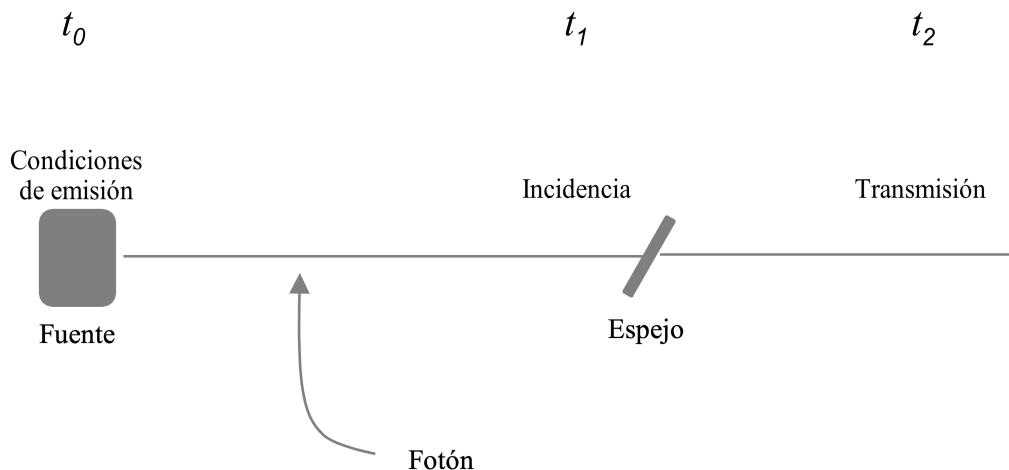


Figura 1: Representación gráfica del experimento propuesto por Humphreys (elaboración propia).

Siguiendo a Humphreys, la expresión a) se interpreta como la propensión condicional de que el fotón sea transmitido ( $T$ ) en  $t_2$ , dado que ha sido emitido en  $t_0$  y ha incidido ( $I$ ) en el espejo en  $t_1$ , es equivalente a la probabilidad  $p$ , que es estrictamente mayor que 0. Del mismo modo, b) expresa que la propensión condicional de que el fotón incida en el espejo en  $t_1$ , dada su emisión en  $t_0$ , es la probabilidad  $q$ , estrictamente menor que 1 y mayor que 0. Finalmente, c) se refiere a la propensión condicional que el fotón sea transmitido en  $t_2$ , dado que ha sido emitido en  $t_0$  y no haya incidido en el espejo en  $t_1$ , es 0. Luego, dice Humphreys, debemos introducir un supuesto adicional: la Independencia Condicional ( $IC$ )

$$(IC) \quad \text{Pr}_{t_0}(I_{t_1}/\mathcal{C}_{t_0}) = \text{Pr}_{t_0}(I_{t_1}/T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0}) = \text{Pr}_{t_0}(I_{t_1}/\neg T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0})$$

que busca capturar la idea que la propensión condicional de que un fotón incida sobre el espejo en  $t_1$  es independiente de si es transmitido o no en  $t_2$  y, por supuesto, solo depende de haber sido emitido, o no, en  $t_0$ .

Si aceptamos la  $IC$ , como razonablemente podría pensarse, entonces surgen los problemas para la interpretación de las probabilidades como propensiones, ya que el Teorema de Bayes falla (ver más adelante). Como observa Humphreys, una vez definida en a) la propensión del fotón a ser transmitido en  $t_2$ , habiendo sido emitido en  $t_0$  e incidido en el espejo en  $t_1$ , matemáticamente podríamos legítimamente preguntarnos por la propensión inversa del fotón, esto es, la propensión a incidir en el espejo en  $t_1$  dado que ha sido emitido en  $t_0$  y ha sido transmitido en  $t_2$ . Es decir, dado  $\text{Pr}_{t_0}(T_{t_2}/I_{t_1}\mathcal{C}_{t_0})$  ¿cuál es el valor de  $\text{Pr}_{t_0}(I_{t_1}/T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0})$ ?

Como es fácilmente observable, usando  $IC$  y b), obtenemos que

$$Pr_{t_0}(I_{t_1}/T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0}) = Pr_{t_0}(I_{t_1}/\mathcal{C}_{t_0}) = q$$

Ahora bien, si además de a), b) y c) agregamos el Teorema de Bayes,

$$Pr(A/B) = \frac{Pr(B/A)Pr(A)}{Pr(B)}$$

el que, afirma Humphreys, toda teoría razonable de probabilidades debiera considerar como válido, obtenemos

$$Pr_{t_0}(I_{t_1}/T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0}) = \frac{Pr_{t_0}(T_{t_2}/\mathcal{C}_{t_0}) \cdot Pr_{t_0}(I_{t_1}/\mathcal{C}_{t_0})}{Pr_{t_0}(T_{t_2}/\mathcal{C}_{t_0})} = \frac{p \cdot q}{p \cdot q} = 1$$

Así, entonces, el autor muestra cómo surge la ‘Paradoja de Humphreys’: de acuerdo al primer cálculo  $Pr_{t_0}(I_{t_1}/T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0}) = 1 > q > 0$  y, de acuerdo al segundo cálculo,  $Pr_{t_0}(I_{t_1}/T_{t_2}\mathcal{C}_{t_0}) = 1$ ! Esto demuestra, además, que a), b), c) e  $IC$  son inconsistentes con los axiomas del cálculo de probabilidades de Kolmogorov.

Más allá de los detalles técnicos, lo interesante del argumento de Humphreys es que muestra que, en general, “[...] una condición necesaria de la teoría de las probabilidades para entregar una respuesta correcta para las propensiones condicionales es que toda influencia en la propensión que está presente en una dirección debe estar presente también en la otra.” (Humphreys 1985, 559). Es decir, existe un conflicto entre la asimetría inherente de las propensiones, que Humphreys interpreta que es debido a su naturaleza causal, y la simetría exigida por el cálculo de probabilidades condicionales inversas. Así, afirma Humphreys, “[...] las propiedades de las propensiones condicionales no son representadas correctamente por la teoría estándar de probabilidades condicionales.” (Humphreys 1985, 559).

Comúnmente en la literatura se considera que, dada la ‘Paradoja de Humphreys’, una interpretación de las probabilidades en términos de propensiones es insostenible y, por lo tanto, debiera ser excluida como alternativa viable para una concepción objetiva de las probabilidades. Sin embargo, el propio Humphreys ha manifestado una posición menos tajante al respecto: “Al menos [la ‘Paradoja de Humphreys’] nos dice que la teoría de la probabilidad estándar no tiene el estatus de teoría universal de fenómenos azarosos que muchos le han otorgado.” (Humphreys 2004, 679). Es decir, enfrentados al conflicto observado entre la teoría de las probabilidades y las propensiones, una alternativa posible sería adoptar una teoría matemática de las probabilidades distinta, una que sea capaz de capturar las características propias de las propensiones, como, por ejemplo, su naturaleza ‘asimétrica’.

## 6. Críticas y propuestas de Suárez

Como hemos mencionado anteriormente, la ‘Paradoja de Humphreys’ es considerada como una objeción insalvable para la interpretación de las probabilidades en términos de propensiones. Sin embargo, Suárez (2013) ha realizado un análisis más fino de los argumentos ofrecidos por Humphreys (1985), a partir del cual entrega una propuesta que reivindica a las propensiones como

una interpretación válida y coherente de las probabilidades, sin necesariamente coincidir con la idea planteada inicialmente por Popper. El objetivo de Suárez es, además, rescatar la concepción pragmatista original de Peirce, lo que permite abrir el debate filosófico hacia alternativas menos operacionalistas y/o subjetivistas de las probabilidades. Las críticas planteadas por Suárez se focalizan en dos supuestos que sustentan la argumentación de Humphreys: por un lado, la 'Tesis de Identidad' [Tdi], de acuerdo a la cual las probabilidades son propensiones y, por otro, la idea que el evento condicionador de una propensión es la causa del evento condicionado (la asimetría causal sugerida por Humphreys).

Respecto a la Tdi, Suárez observa que en realidad esta tesis se conforma por la conjunción de dos 'compromisos': 1) interpretar a las probabilidades como propensiones y 2) entender a las propensiones como probabilidades. A partir de estos compromisos, Suárez identifica dos tesis de identidad:

- Identidad<sub>1</sub>: las propensiones son probabilidades objetivas
- Identidad<sub>2</sub>: interpretación de las probabilidades como propensiones + Identidad<sub>1</sub>

De esta forma, de acuerdo a Identidad<sub>1</sub>, las propensiones  $Pr$  serían un subconjunto de la clase de probabilidades  $P$  y, de acuerdo a Identidad<sub>2</sub>, la probabilidad  $P(a)$  sería igual a la propensión  $Pr(a)$ . Para Suárez, lo fundamental de la igualdad  $P(a) = Pr(a)$  es que denota una identidad extensional y no meramente numérica o cuantitativa. Es importante hacer notar que la igualdad está formulada en términos de probabilidades y propensiones absolutas, aunque, como lo afirma Suárez y lo ejemplifica el argumento de Humphreys, típicamente se formula en términos de probabilidades condicionales:  $P(a/b) = Pr(a/b)$ . A esta última igualdad, Suárez la denomina como Supuesto<sub>1</sub>: las propensiones  $Pr(a/b)$  son (idénticas a) las probabilidades condicionales  $P(a/b)$ .

De acuerdo a Suárez, la 'Paradoja de Humphreys' permite concluir que, debido a la inconsistencia observada entre los valores obtenidos para las propensiones y el cálculo de probabilidades clásico, la Identidad<sub>1</sub> es falsa, es decir, no todas las propensiones son probabilidades. Además, debido a que las probabilidades condicionales pueden ser interpretadas en términos de propensiones solo cuando el o los eventos condicionantes son causa de los eventos condicionados, entonces Identidad<sub>2</sub> también es falsa y, por lo tanto, las probabilidades condicionales no pueden ser concebidas como propensiones. Esto se debe a que, de acuerdo al Teorema de Bayes, dice Suárez, si una probabilidad condicional  $P(a/b)$  está bien definida, entonces la probabilidad condicional inversa  $P(b/a)$  también lo estará.

Sin embargo, como lo atestigua la Independencia Condicional postulada por Humphreys, no tiene sentido pensar que la propensión de un fotón a ser transmitido en  $t_2$  influya en la propensión a que el fotón incida en el espejo en  $t_1$ . Para Suárez, el aspecto temporal no es determinante en este resultado: de manera general, el problema surge porque la transmisión del fotón no puede ser considerada como un factor causal que intervenga en la incidencia, o no, del fotón en el espejo. Así, "Lo que impide una interpretación de la probabilidad condicional en términos de propensiones es la inexistencia de una relación causal en la dirección desde el evento condicionante hacia el evento condicionado, no una falla en el orden temporal apropiado." (Suárez 2013, 27).

La reflexión anterior permite a Suárez identificar un segundo supuesto, denominado como Supuesto<sub>2</sub>: el evento condicionante de una propensión es causa del evento condicionado (en un

tiempo futuro). Esto es justamente a lo que se refiere Humphreys cuando habla de la asimetría propia de la relación causal, asimetría que a su juicio comparten las propensiones, y que se recoge en su supuesto de Independencia Condicional. En este sentido, el análisis de Suárez no parece mostrar mucho más que lo ya postulado explícitamente por Humphreys. Sin embargo, el aporte de Suárez es que ofrece la posibilidad de salir de las estrategias comúnmente propuestas para resolver la ‘Paradoja de Humphreys’: ya sea desechar las propensiones de plano o modificar el cálculo de probabilidades de Kolmogorov.

La clave para resolver el problema, de acuerdo a Suárez, y reformular una nueva concepción de la propensiones, es abandonar la ‘Tesis de Identidad’ anteriormente analizada: ya que Humphreys asume implícitamente en su argumento  $\text{Identidad}_1$  por medio del  $\text{Supuesto}_1$ , que pretende reducir las propensiones a probabilidades, y del  $\text{Supuesto}_2$ , que intenta reducir las propensiones a causas, esto implica, a juicio de Suárez, asumir una estrategia típicamente empírista, la que “[...] busca reducir conceptos teóricos complejos a conceptos empíricos.” (Suárez 2013, 37). Así, una forma de salir del impasse sería adoptar una posición pragmática, la que nos llevaría a considerar que tanto el  $\text{Supuesto}_1$  como el  $\text{Supuesto}_2$  podrían estar equivocados.

Siguiendo a Suárez, si cambiamos de perspectiva, desde una empírista a una pragmatista, podemos rechazar el  $\text{Supuesto}_1$  y considerar que las propensiones no deben identificarse con probabilidades y, especialmente, podrían no estar bien representadas en términos de probabilidades condicionales. Siguiendo a Peirce, dice Suárez, podemos concebir a las propensiones como “[...] propiedades teóricas adscritas a los objetos por los científicos en un intento de explicar fenómenos que involucren a dichos objetos.” (Suárez 2013, 38). Así, al rechazar la identidad  $\text{Pr}(a/b) = P(b/a)$ , las propensiones pueden ser entendidas como propiedades disposicionales cuyas manifestaciones son de carácter probabilista. Por un lado, las probabilidades se definen sobre eventos o proposiciones experimentales y, por otro, las propensiones son propiedades de los objetos. Así, al negar la ‘Tesis de Identidad’, para Suárez es posible distinguir entre las propiedades disposicionales de los sistemas (propensiones), sus efectos en cada prueba experimental singular (probabilidades) y las manifestaciones a largo plazo del experimento (frecuencias).

De este modo, el rescate de la tradición pragmatista peirciana permite formular a Suárez una concepción de las propensiones como

- *Objetuales*: las propensiones se adscriben a los objetos
- *Causales*: se adscriben poderes causales a las propensiones;
- *Hipotéticas*: cumplen un rol teórico-explicativo, y
- *Caso singular*: las propensiones permiten explicar casos singulares.

Es importante hacer notar este último punto ya que, al contrario de la concepción original defendida por Peirce, para Suárez las propensiones permiten explicar los casos singulares, ya que representan propiedades disposicionales subyacentes que se ‘despliegan’ como probabilidades en un experimento particular. Así como la respuesta de Humphreys anteriormente citada respecto a las consecuencias que debiéramos acoger a partir de la ‘Paradoja de Humphreys’ es que podríamos adoptar un cálculo de probabilidades distinto al clásico de Kolmogorov, Suárez

sugiere que “[...] las propensiones no pueden ser uniformemente representadas como probabilidades, bajo ningún cálculo, precisamente porque ellas son distintas de sus manifestaciones probabilísticas.” (Suárez 2013, 41).

## 7. Propensiones en la interpretación Modal-Hamiltoniana

Si bien la propuesta de Suárez permite rescatar a las propensiones de la ‘Paradoja de Humphreys’ y mantenerlas como una interpretación viable de las probabilidades objetivas o físicas (Mellor, 2005), un aspecto de su formulación merece ser analizada con mayor detalle: la dimensión ontológica. Así como Suárez permite articular la noción de propensión como una propiedad de los sistemas, aspecto que será importante en el contexto de la interpretación Modal-Hamiltoniana (iM-H), en términos ontológicos estas son conceptualizadas por Suárez de la manera usual: “Los sistemas son concebidos de manera clásica tradicional, como objetos físicos dotados con ciertas propiedades cuyos valores cambian en el tiempo.” (Suárez 2007, 14). De este modo, las probabilidades como propensiones son asignadas a los objetos portadores de propiedades y, no, como lo planteó Popper originalmente, a la situación experimental en su conjunto.

Sin embargo, para la iM-H ambas posiciones son insostenibles debido a que una de las lecciones que debemos sacar de la formulación de la mecánica cuántica como teoría, y su posterior interpretación, es que se requiere articular una ontología distinta a la heredada por la física clásica. Una ontología que permita dar cuenta de las especificidades del mundo físico descrito por la mecánica cuántica: la indistinguibilidad de los sistemas cuánticos, que desafía la noción tradicional de objeto (no-individualidad de las partículas cuánticas), la contextualidad, que impide asignar valores determinados simultáneamente a todas las propiedades de un sistema cuántico (Teorema de Kochen-Specker), la no-separabilidad, que apunta a desafiar la idea de la existencia de sistemas independientes entre sí (entrelazamiento cuántico o entanglement), entre otros.

Las interpretaciones modales de la mecánica cuántica surgen a partir de la idea originalmente formulada por van Fraassen (1972, 1974) respecto a que el estado de un sistema cuántico, referente central del formalismo concebido tradicionalmente, se refiere a lo posible más que a lo actual: “[...] el estado cuántico delimita lo que puede o no puede ocurrir, y cuán probable lo es –delimita la posibilidad, la imposibilidad y la probabilidad de ocurrencia– pero no lo que actualmente ocurre.” (van Fraassen 1991, 279). A partir de esta idea se ha desarrollado una familia de interpretaciones, entre las que se encuentra la iM-H. Esta interpretación, contrariamente a la posición antirrealista defendida por van Fraassen o a una lectura instrumentalista que suele prevalecer en la literatura, se propone articular desde el inicio una interpretación realista que busca describir cómo sería el mundo si la mecánica cuántica fuera verdadera. Aunque la iM-H adopta el formalismo algebraico, y no el tradicional en términos de espacios de Hilbert, se basa en el formalismo estándar de la mecánica cuántica, es decir, no introduce modificaciones o elementos extra al formalismo originalmente postulado para la teoría.

Sin embargo, un aspecto central de la iM-H es que en esta interpretación una medición cuántica es una interacción física común, igual que el resto de las interacciones, donde los resultados de la medición constituyen propiedades actuales de los aparatos de medición: en este sentido, no existe ‘colapso’ de la función de onda, idea capturada por la introducción del famoso

‘Postulado de Proyección’. Para la iM-H, el estado cuántico describe propiedades posibles de sistemas singulares, con sus probabilidades correspondientes, que evolucionan unitariamente de acuerdo a la ecuación de Schrödinger. En síntesis, la iM-H ofrece una interpretación realista de la mecánica cuántica, de acuerdo a la cual, y sin adoptar el ‘Postulado de Proyección’, “[...] el estado cuántico de un sistema describe las propiedades posibles del sistema, más que las propiedades que posee actualmente.” (Lombardi y Castagnino 2008, 3).

Lo interesante para nuestra discusión es que la iM-H propone una ontología de propiedades, lo cual se ve reflejado en su definición de sistema cuántico:

**Postulado sobre Sistemas (PS):** un sistema cuántico  $\mathcal{S}$  es representado por el par  $(\mathcal{O}, \mathcal{H})$  tal que (i)  $\mathcal{O}$  es un espacio de operadores auto-adjuntos en un espacio de Hilbert que representan a los observables del sistema (propiedades), (ii)  $\mathcal{H} \in \mathcal{O}$  es el Hamiltoniano del sistema (observable privilegiado dentro de la iM-H), y (iii) si  $\rho_0 \in \mathcal{O}'$  es el estado inicial de  $\mathcal{S}$ , donde  $\mathcal{O}'$  es el espacio dual de  $\mathcal{O}$ , evolucionará de acuerdo a la ecuación de Schrödinger.

Junto con lo anterior, la iM-H introduce una distinción entre lo posible y lo actual (sobre la que volveremos más adelante), que podría entenderse como una distinción entre el estado-dinámico (que determina [propiedades-tipo] y [propiedades-caso]) y el estado-valor (que determina [propiedades-tipo] y [propiedades-caso] actuales). Debido a la contextualidad del mundo cuántico, resulta imposible adscribir propiedades-caso actuales a todas propiedades-tipo simultáneamente, por lo que el contexto preferente de actualización se define por medio de la

**Regla de Actualización (RA):** dado un sistema cuántico representado por  $\mathcal{S} : (\mathcal{O}, \mathcal{H})$ , los observables con valores actuales de  $\mathcal{S}$  son el Hamiltoniano  $\mathcal{H}$  y todos los observables que comuten con  $\mathcal{H}$  y que posean, al menos, las mismas simetrías de  $\mathcal{H}$ .

Como es posible observar, la RA determina el rol central que se le asigna al Hamiltoniano como observable en esta interpretación: dentro de un contexto experimental solo se actualizarán y tendrán valores definidos aquellos observables compatibles con el Hamiltoniano, lo que se expresa por medio de la condición de comutación. En este sentido, como lo observan da Costa, Lombardi y Lastiri (2013), es posible entender la relación entre el lenguaje matemático de la teoría, el lenguaje físico o interpretación física de dicho lenguaje y el lenguaje ontológico, es decir, aquellos ítems a los que se refiere la teoría, por medio de la siguiente tabla:

Matemáticas	Física	Ontología
Operadores auto-adjuntos	Observables	Propiedades-tipo
Valores propios de un operador auto-adjunto	Valores de un observable	Propiedades-caso
Función de probabilidad	Probabilidad física	Propensión ontológica
Funcionales	Estados	Codificación de propensiones

Cuadro 1: Relación entre el lenguaje matemático, su interpretación física y la ontología de la interpretación Modal-Hamiltoniana.

Lo más relevante para el debate sobre las probabilidades en mecánica cuántica es que para

la iM-H la relación entre el estado cuántico y las propiedades del sistema que se actualizan en un contexto preferente de actualización es probabilística. Matemáticamente, esto se representa como una función probabilística, definida en cada contexto, por medio del cálculo clásico de Kolmogorov; físicamente, se implementa por medio de la Regla de Born; y, ontológicamente, se concibe en términos de propensiones.

Adoptando la perspectiva planteada anteriormente por Suárez, podemos concebir a las propensiones como propiedades de los sistemas cuánticos. Sin embargo, si rechazamos una ontología tradicional como la defendida por Suárez, podemos adscribir dicha propiedad, las propensiones, a los referentes ontológicos de la iM-H. Así, las propensiones serán entendidas como propiedades de segundo orden de las propiedades-tipo que conforman la ontología del mundo físico y, por lo tanto, las probabilidades serán definidas como la medida de la propensión ontológica de actualización de un hecho posible.

Como vimos anteriormente, la iM-H propone una ontología de propiedades, pero, además, tiene especial cuidado en distinguir entre propiedades y hechos como dos categorías ontológicas diferentes. En este sentido, los hechos posibles serán definidos como la actualización posible de ciertas propiedades-caso, por lo que las probabilidades se aplicarán a ellos. Debido a la naturaleza probabilista de la mecánica cuántica, esta teoría no determina, en general, qué hechos posibles devienen actuales o, utilizando el lenguaje de la iM-H, qué propiedades-tipo son actualizadas en un contexto preferente de actualización manifestándose como propiedades-caso actuales. Así, la RA antes mencionada adquiere un rol preponderante en este vínculo probabilista: el Hamiltoniano, y sus simetrías, determinarán el contexto en el que se produce la actualización de las propiedades.

Sin embargo, una dimensión muy interesante de la ontología de la iM-H es la relación entre lo actual y lo posible: la IM-H adopta una concepción ‘posibilista’ de la posibilidad, de acuerdo a la cual lo *possible* es una característica irreducible de la realidad. Así, para la iM-H la mecánica cuántica como teoría no da cuenta de una realidad *actual*: “[...] la mecánica cuántica es sobre aquello que puede ser el caso, describe la *realidad posible*” (Lombardi y Castagnino 2008, 60) donde las propensiones son concebidas como posibilidades no-actualistas y, por lo tanto, un hecho no requiere devenir actual para ser considerado como real.

Las implicancias filosóficas de esta perspectiva posibilista son de largo alcance ya que el ámbito de lo real se despliega en dos dimensiones: el ámbito de lo actual y el ámbito de lo posible, donde “En términos aristotélicos, *ser* puede ser dicho de diferentes maneras: como ser posible o como ser actual. Y ninguno de ellos es reducible al otro.” (Lombardi y Castagnino 2008, 61). Así, en mecánica cuántica el ámbito de lo posible está constituido por propiedades-tipo, y sus propiedades-caso correspondientes, hechos posibles y propensiones. Las propiedades-caso de cada propiedad-tipo  $[O]$  son propiedades que *pueden* ocurrir; los hechos posibles  $\langle\langle F [O : o_i] \rangle\rangle$  corresponden a la *possible* actualización de una propiedad-caso y las propensiones de actualización son medidas por la probabilidad definida por la Regla de Born. En la iM-H, entonces, “Las propensiones son propiedades reales de segundo orden que siguen una evolución determinista independientemente de qué hechos posibles devienen actuales.” (Lombardi y Castagnino 2008, 62). Del mismo modo, el ámbito de lo actual está conformado por propiedades-tipo actuales, propiedades-caso actuales y por hechos actuales. La mecánica cuántica, dada su naturaleza probabilística, es incapaz de determinar cuál será el que se actualice en un contexto preferente de actualización.

Una ventaja que ofrece la iM-H, además, es que permite computar probabilidades y bloquea

el inconveniente de dar cuenta de qué se entiende por probabilidad en contextos diferentes (respecto de observables incompatibles, es decir, que no comutan). En la iM-H cada sistema cuántico, por constitución, define su propio contexto preferente de actualización, dado al rol principal del Hamiltoniano en su definición, donde los hechos posibles reciben su valuación probabilista y pueden actualizarse. De este modo, es posible eludir el problema de adscribir valuaciones probabilistas a observables incompatibles ya que, dentro de cada contexto preferente de actualización, definido por el propio sistema, el conjunto de hechos posibles preserva su estructura Booleana. Así, nada impide aplicar el cálculo de probabilidades de Kolmogorov dentro de cada contexto determinado.

Además, como vimos anteriormente, de acuerdo a la iM-H debemos tomarnos en serio el Teorema de Kochen-Specker (1967), de acuerdo al cual es imposible adscribir valores precisos a todos los observables de un sistema cuántico de manera simultánea, lo que implicaría la violación del Principio de Determinación Omnímoda (PDO) en mecánica cuántica. De acuerdo a este Principio, una verdad auto-evidente antes del advenimiento de la revolución cuántica, es que en todo individuo los determinables están determinados: el 'determinable' masa de un objeto, por ejemplo, posee un valor determinado, 1 kg, por ejemplo, independientemente de sus otras propiedades determinadas (color, tamaño, etc.) Sin embargo, como observan Lombardi y Dieks (2016), en mecánica cuántica no se aplicaría el PDO y, por lo tanto, “[...] un sistema generalmente será asociado con determinables que no están determinados.” (Lombardi y Dieks 2016, 8). Adoptando la terminología introducida por la iM-H, un sistema cuántico estará definido por sus propiedades posibles (determinables) y no por sus propiedades actuales (determinados). Vemos así, entonces, cómo surge la idea de que los sistemas cuánticos deben ser concebidos como haces de propiedades *posibles* (determinables) y no actuales, una de las tesis centrales de la iM-H sobre la que, por falta de espacio, no es posible profundizar más aquí.

Respecto al conflicto anteriormente mencionado entre el carácter asimétrico de las propensiones y la posibilidad matemática de definir probabilidades condicionales y probabilidades condicionales inversas, a continuación examinaremos dos posibles respuestas que tanto Humphreys como Suárez no contemplan en su análisis: por un lado, una herramienta que entrega el formalismo estándar de la mecánica cuántica, la así denominada 'Regla de Lüders' y, por otro, la que provee el contexto interpretativo que proporciona la interpretación Modal-Hamiltoniana.

## 8. Asimetría de las propensiones: la Regla de Lüders

Aun cuando existe un debate abierto sobre si la regla de Lüders efectivamente captura de manera adecuada la noción de probabilidad condicional clásica en mecánica cuántica<sup>2</sup>, es interesante que tanto Humphreys como Suárez obvien la regla de Lüders en sus análisis del experimento propuesto por Humphreys. Esto, sin dudas, podría permitir un estudio más detallado y fino de la relación entre propensiones y probabilidades condicionales. Es llamativo que el examen planteado por Humphreys en términos de propensiones y probabilidades condicionales pase por alto que en el formalismo cuántico existe una herramienta, la 'Regla de Lüders' (Lüders, 1951), que comúnmente es considerada como análoga a las probabilidades condicionales del cálculo clásico de probabilidades. De acuerdo a Bub (1977), la regla de Lüders “[...] es la regla apropiada para condicionar probabilidades en la estructura posibilista no-Booleana

<sup>2</sup>Ver el trabajo de Guerra Bobo, 2013.

cuántica." (Bub, 1977, 381). Del mismo modo, Busch y Lahti (2009) afirman que "La regla de Lüders está directamente relacionada a la noción de probabilidad condicional en mecánica cuántica, condicionando respecto a un evento único." (Busch y Lahti 2009, 356).

De acuerdo a Bub (1977), la regla de Lüders describe el cambio de un estado cuántico  $T \rightarrow T' \rightarrow T''$  si al medir un observable  $A$  con valores propios  $a_i$  y sus proyectores asociados  $P_i$ , donde  $i = 1, 2, \dots$ , se obtiene el valor  $a_k$ . La formula

$$T' := \frac{P_k T P_k}{\text{tr}(T P_k)}$$

expresa justamente el cambio de estado antes descrito. Sin entrar en los detalles técnicos, es interesante notar que la Regla de Lüders es una elaboración del 'postulado de proyección' formulado originalmente por von Neumann. Es esta reformulación la que, de acuerdo a Bub, permite analizar el clásico experimento cuántico de la doble rendija en términos de probabilidades condicionales. El detallado análisis realizado por Bub (1977) permite observar que al aplicar el postulado de proyección de von Neumann se obtiene un estado mixto que es independiente del estado del sistema cuántico inicial. Al aplicar la Regla de Lüders, por el contrario, se obtiene un estado puro que sí depende del estado inicial. Es decir, se obtiene un resultado probabilístico condicionado a que cierto resultado previo haya sido observado. Además, Bub demuestra que solo si se aplica la regla de Lüders, y no el postulado de proyección de von Neumann, es posible obtener el clásico patrón de interferencia observado y, por lo tanto, el resultado experimental correcto.

Sin embargo, lo más relevante para nuestra discusión es que la Regla de Lüders ofrece una explicación 'natural', dentro del formalismo cuántico, de la ya comentada asimetría de las propensiones: el postulado de proyección. Como vimos anteriormente, Bub caracteriza la regla de Lüders como una generalización del postulado de proyección de von Neumann, el que comúnmente es interpretado como el colapso de la función de onda. En la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, este colapso es definido como el paso de una función de onda, una superposición de estados cuánticos, a un único valor propio al momento de la medición. Es este proceso de observación el que, interpretado de manera tradicional, implica una discontinuidad, un quiebre en la evolución regular y continua descrita por la ecuación de Schrödinger. En este sentido, la observación o medición de un sistema cuántico induce un cambio irreversible en el estado inicial de este, lo que, a su vez, permite entender la asimetría entre el paso de una superposición a un valor propio determinado. Así, podría interpretarse que la imposibilidad de adscribir probabilidades condicionales inversas está en el cambio radical e irreversible que sufre un sistema cuántico cuando es sometido a un proceso de medición experimental.

En el ejemplo ofrecido por Humphreys, la medición hecha sobre un fotón en un tiempo  $t_1$  implicaría un cambio de estado respecto al estado del fotón en  $t_0$  y, por lo tanto, las condiciones de transmisión del fotón inicial no son equivalentes a las de un fotón cuya función de onda ya ha colapsado producto de la interacción con el aparato de medición. La asimetría resultante, entonces, no se debería a factores causales o temporales, sino a la aplicación del postulado de proyección, el que, justamente, describe el cambio discontinuo que experimenta un sistema cuántico al ser sometido a una interacción con un aparato de observación. Sin embargo, este último punto nos permite identificar una importante falencia en el ejemplo originalmente formulado por Humphreys: en su diseño experimental no existe ningún proceso genuino de

medición, ya que no se especifica ninguna interacción con algún aparato de observación y, por lo tanto, no sería posible ni adecuado aplicar el postulado de proyección. Ninguno de los tres eventos identificados en el ejemplo de Humphreys, la emisión de fotones por una fuente en  $t_0$ , la incidencia en el espejo en  $t_1$  y la transmisión en  $t_2$ , implican un proceso de medición y, por lo tanto, podría objetarse que no sería legítimo recurrir al colapso de la función de onda como explicación de la asimetría propia de las propensiones.

Este último punto podría significar que para hacer un análisis de las probabilidades condicionales inversas en un contexto genuinamente cuántico habría que reformular el experimento de Humphreys. En este sentido, habría que incorporar aparatos de medición y considerar magnitudes físicas propias de la mecánica cuántica, es decir, observables en términos estrictamente técnicos. Eventos como la incidencia y la transmisión de fotones solo pueden ser inferidos, no siempre sin dificultades, a partir de, por ejemplo, mediciones del observable posición.

## 9. Asimetría de las propensiones: actualización

Como hemos visto anteriormente, la iM-H no concibe el proceso de medición en términos del colapso de la función de onda, razón por la que la aplicación del postulado de proyección, o la Regla de Lüders, no permitirían comprender la asimetría de las propensiones. Si bien la formalización matemática de las probabilidades condicionales  $P(a/b)$  implica la posibilidad de formular las probabilidades condicionales inversas  $P(b/a)P(b/a)$ , que es lo que justamente origina el análisis de Humphreys y lleva a enunciar su ‘paradoja’, desde el punto de vista de la iM-H existe una explicación de la naturaleza asimétrica de las propensiones que surge en esta interpretación: la regla de actualización.

En la iM-H, un sistema cuántico corresponde a un haz de propiedades-tipo posibles que, al interactuar con otro sistema físico, como, por ejemplo, un aparato de medición, y de acuerdo al contexto preferente de actualización, se actualizarán aquellas propiedades-caso que comuten y posean las mismas simetrías del Hamiltoniano del sistema. Así, el vínculo probabilista entre el estado cuántico inicial y el valor actual observado, interpretado físicamente como la propensión ontológica de un hecho posible correspondiente a una propiedad-tipo a actualizarse, es por definición asimétrico. Al igual que en el caso del colapso de la función de onda, la actualización de un valor definido de un observable determinado en un contexto experimental específico es un proceso probabilista e irreversible. En la iM-H la propensión a actualizarse de un hecho posible en un hecho actual es la probabilidad de la actualización de una propiedad-caso de una propiedad-tipo asociada.

Apoyándonos en los recursos interpretativos que nos provee la iM-H, las probabilidades cuantifican la propensión de un hecho posible a devenir actual, por lo que una vez actualizado no tendría sentido preguntarse, tal como lo plantea Humphreys, sobre la probabilidad de un hecho posible condicionado a la ocurrencia de un hecho actual. En este caso, aunque sea matemáticamente posible definir la probabilidad condicional de un evento  $a$  dado el evento  $b$ , y la probabilidad condicional inversa, sería un error interpretar esta probabilidad condicional como la *propensión* de un hecho posible  $a$  a actualizarse dado el hecho actual  $b$ . Tampoco sería posible plantear la pregunta de Humphreys solo en términos de hechos posibles (definir la probabilidad condicional de un hecho posible  $a$  dado un hecho posible  $b$ ) ya que, de acuerdo a la iM-H, las propensiones relacionan hechos posibles con hechos actuales y no hechos posibles entre sí. Por la misma razón, tampoco tendría sentido formular la pregunta entre hechos

actuales.

Tal como lo plantea la iM-H, el vínculo probabilista de la mecánica cuántica se define entre las propiedades-tipo posibles, que definen a un sistema cuántico, y la ocurrencia actual de una propiedad-caso relacionada, el valor actual determinado resultante de la interacción. En esta interpretación las probabilidades son concebidas como la propensión de un hecho posible a devenir actual, la que por definición contiene una asimetría entre lo posible y lo actual. Es, justamente, esta tendencia disposicional de lo posible a devenir actual lo que hace imposible concebir a las probabilidades condicionales inversas como propensiones y, por lo tanto, permitirían comprender por qué las probabilidades objetivas, conceptualizadas en términos de propensiones, no estarían sujetas a las objeciones planteadas por Humphreys.

Sin embargo, dado que esta interpretación considera que el proceso de medición u observación es una interacción física sin un estatus especial y que el postulado del colapso de la función de onda no es aplicable en mecánica cuántica, sería posible considerar que la interacción de los fotones emitidos con el espejo semi-reflectante del ejemplo de Humphreys es una interacción física, de manera que habría que dar cuenta de la actualización de las propiedades en este caso específico. En este sentido, dado que en la iM-H la actualización de un hecho es un fenómeno objetivo, resulta de crucial importancia determinar *cuando* ocurre la actualización. Así como en la interpretación de 'Copenhague' de la mecánica cuántica, en términos generales, el colapso de la función de onda ocurriría cuando el sistema cuántico interactúa con el aparato de medición, en la iM-H es el contexto preferente de actualización es el que da la respuesta clave.

De acuerdo a la Regla de Actualización propuesta por la iM-H, el contexto preferente de actualización depende de las características del sistema cuántico, de manera que "[...] este es unívocamente fijado una vez que el sistema se constituye como tal." (Lombardi y Castagnino 2008, 66). De esta manera, todos los observables que commuten con el Hamiltoniano son invariantes desde el 'nacimiento' del sistema físico hasta su 'muerte' cuando dicho sistema desaparece al interactuar con otro sistema. En esta interpretación, solo las propensiones evolucionan de acuerdo a la ecuación de Schrödinger, por lo que "[...] el dominio de lo actual es invariante en el tiempo; la dinámica del sistema está confinada al dominio de lo posible." (Lombardi y Castagnino 2008, 67).

De esta forma, los fotones del ejemplo de Humphreys una vez emitidos constituyen sistemas físicos cuyos observables, el Hamiltoniano y todos los que commuten con él, poseen valores definidos durante el lapso de tiempo que dure su 'vida' como sistemas elementales. Una vez que estos sistemas interactúan con otros sistemas (como el espejo semi reflectante), de acuerdo a la regla de actualización de la iM-H, actualizarán nuevas propiedades.<sup>3</sup> Sin embargo, y como ya lo habíamos advertido anteriormente, dado que el experimento propuesto por Humphreys no posee aparatos de medición, nos resultará imposible tener acceso epistémico a dichos observables y establecer experimentalmente sus valores determinados.

<sup>3</sup>Agradezco esta y otras observaciones del árbitro del artículo que ha puesto énfasis en aclarar este y otros puntos del trabajo. En este caso específico, la pregunta planteada requiere un estudio de mayor profundidad, que excede el marco de este artículo, por lo que deberá ser abordado en trabajos posteriores.

## 10. Conclusión

Como hemos visto, la ontología propuesta por la iM-H en términos de propiedades permite rescatar, dentro de una estructura ontológica bien articulada y coherente, el rol de las probabilidades como propensiones. Sin embargo, a diferencia con las posiciones defendidas por Popper, primero, y por Suárez, después, la ontología de propiedades de la iM-H permite concebir a las propensiones como propiedades de segundo orden de las propiedades-tipo que conforman, estructuradas en haces, aquello que se denomina como sistema físico en mecánica cuántica.

En este sentido, para la iM-H las probabilidades son la medida de la propensión ontológica de actualización de un hecho posible y, por lo tanto, permite aplicar el cálculo de probabilidades, dentro de cada contexto preferente de actualización, a casos singulares. Esto, a su vez, admite preservar la aplicación del cálculo de probabilidades clásico de Kolmogorov, ya que, como mencionamos anteriormente, el conjunto de hechos posibles en cada contexto de actualización preserva una estructura Booleana.

En este sentido, contrariamente a la forma en que concibe Humphreys a las propensiones y negando la identidad propensiones = probabilidades, para la iM-H las probabilidades son asignadas a hechos posibles, no actuales, y, en oposición a una ontología tradicional como la defendida por Suárez, las propensiones no son propiedades de objetos sino propiedades de segundo orden de propiedades-tipo posibles, las que constituyen los ítems básicos del dominio óntico de la mecánica cuántica para la iM-H.

Junto con lo anterior, al adoptar la concepción de la iM-H de las probabilidades en mecánica cuántica como la propensión de un hecho posible a devenir actual, es posible determinar que la asimetría identificada por Humphreys en términos causales corresponde, más bien, a la diferencia entre lo posible y lo actual, de manera que no resulta adecuado identificar a las probabilidades condicionales inversas con las propensiones y, por lo tanto, las propensiones así concebidas no estarían sujetas a las objeciones planteadas por la paradoja de Humphreys.

## Referencias

- Bub, J. (1977). Von neumann's projection postulate as a probability conditionalization rule in quantum mechanics, *Joumal of Philosophical Logic* 6: 381-390. Doi: 10.1007/BF00262075
- Bunge, M. (1981). Four concepts of probability, *Applied Mathematical Modelling* 5: 306-312. Doi: 10.1016/S0307-904X(81)80051-0
- Busch, P. y Lahti, P. (2009). Lüders rule. En Greenberger, D., Hentschel, K. y Weinert, F. (eds.) *Compendium of Quantum Physics*, Springer Berlin Heidelberg, 356-358. Doi: 10.1007/978-3-540-70626-7
- Da Costa, N. y Lombardi, O. (2014). Quantum mechanics: ontology without individuals, *Foundations of Physics*, 44: 1246-1257. Doi: 10.1007/s10701-014-9793-1
- da Costa, N., Lombardi, O. & Lastiri, M. (2013) A modal ontology of properties for quantum mechanics. *Synthese* 190, 3671–3693. <https://doi.org/10.1007/s11229-012-0218-4>
- Dieks, D. (2007). Probability in modal interpretations of quantum mechanics, *Studies in History*

- and Philosophy of Modern Physics*, 19: 292-310. Doi: 10.1016/j.shpsb.2006.05.005
- Dorato, M. (2007). Dispositions, Relational Properties and the Quantum World. En Kistler, M. y Gnassonou, B. (eds.). *Dispositions and Causal Powers*, Ashgate, 249-270.
- Dorato, M. y Esfeld, M. (2010). GRW as an Ontology of Dispositions, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41: 41-49. Doi: 10.1016/j.shpsb.2009.09.004
- Gillies, D. (2000b). *Philosophical Theories of Probability*, London: Routledge.
- Guerra Bobo, I. (2013). On Quantum Conditional Probability, *Theoria* 28 (1): 115-137. Doi: 10.1387/theoria.5682
- Hájek, A. (2012). Interpretations of Probability. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2012 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/probability-interpret/>
- Heisenberg, W. (1958). *Physics & Philosophy*, Londres: Allen & Unwin.
- Humphreys, P. (1985). Why Propensities Cannot be Probabilities, *The Philosophical Review*, Vol. 94, No. 4, 557-570. Doi: 10.2307/2185246
- Lombardi, O. y Castagnino, M. (2008). A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39: 380-443. Doi: 10.1016/j.shpsb.2008.01.003
- Lombardi, O. y Dieks, D. (2012). Modal interpretations of quantum mechanics, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/qm-modal/>.
- Lombardi, O. y Dieks, D. (2016). Particles in a quantum ontology of properties, en T. Bigaj y C. Wüthrich (eds.), *Metaphysics in Contemporary Physics*. Leiden: Brill-Rodopi, 123-143. Doi: 10.1163/9789004310827\_007
- Lüders, G. (1951). Über die Zustandsänderung durch den Meßprozeß, *Annalen der Physik* 8, 322-328. Traducción al inglés de Kirkpatrick, K. A. (2006): "Concerning the state-change due to the measurement process", *Ann. Phys. (Leipzig)* 15, 663-670. <https://doi.org/10.1002/andp.200610207>
- Margeneau, H. (1954). Advantages and disadvantages of various interpretations of the quantum theory, *Physics Today* 7, 10: 6-13. <https://www.jstor.org/stable/24533384>
- Mellor, D. H. (2005). *Probability: a Philosophical Introduction*, Londres: Routledge.
- Peirce, Ch. S. (1910). Note on the Doctrine of Chances, en *Philosophical Writings of Peirce*, Nueva York: Dover.
- Peirce, Ch. S. (1893). Reply to the Necessitarians, en Ch. Hartshorne y P. Weiss (eds.) *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, vol. VI: *Scientific Metaphysics*, 1935, Cambridge: Cambridge University Press.
- Popper, K. (1982). *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Vol. III de *The Postscript*, New Jersey: Rowman & Littlefield.
- Popper, K. (1959). The propensity interpretation of probability, *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 10, No. 37: 25-42. <https://www.jstor.org/stable/685773>

- Reichenbach, H. (1949). *The Theory of Probability*. Berkeley: University of California.
- Salmon, W. (1979). Propensities: A Discussion Review, *Erkenntnis*, 14: 183-216. <https://www.jstor.org/stable/20010662>
- Suárez, M. (2004). Quantum selections, propensities and the problem of measurement, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 55: 219-255. Doi: 10.1093/bjps/55.2.219
- Suárez, M. (2007). Quantum Propensities, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38 (2): 418-438. Doi: 10.1016/j.shpsb.2006.12.003
- Suárez, M. (2013). Propensities and Pragmatism, *Journal of Philosophy* 110 (2): 61-92. <https://www.jstor.org/stable/43820751>
- van Fraassen, B. C. (1972). A formal approach to the philosophy of science, en R. Colodny (ed.), *Paradigms and Paradoxes: The Philosophical Challenge of the Quantum Domain*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 303-366.
- van Fraassen, B. C. (1974). The Einstein-Podolsky-Rosen paradox, *Synthese*, 29, 291-309. Doi: 10.1007/BF00484962
- van Fraassen, B. (1991). *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Londres: Oxford University Press.
- Venn, J. (1876). *The Logic of Chance*, 2a edición, London: Macmillan.
- von Mises, R. (1957). *Probability, Statistics and Truth*. Londres: Allen & Unwin.