



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN FILOSOFÍA DE LA
CIENCIA**

**EL REALISMO ESTRUCTURAL ÓNTICO EN EL CONTEXTO DEL
PROBLEMA DE LA MEDICIÓN EN LA MECÁNICA CUÁNTICA**

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

PRESENTA: PORFIRIO MORALES AGUILAR

ASESOR: DR. ELIAS OKÓN GURVICH

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

MÉXICO, D. F. Agosto, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Al Dr. Elías Okón por su amistad, comprensión y paciencia en estos tres años. A la Dra. Ana Rosa Pérez Ransanz por su apoyo y motivación durante mis estudios. A los Doctores Sergio Martínez, Aldo Filomeno y Armando Cíntora por su lectura y sus comentarios para enriquecer este trabajo.

A los profesores del Posgrado en Filosofía de la Ciencia: Dr. Jonatan García-Campos, Dr. Ricardo Vázquez, Dr. Julio Beltrán, Dra. Maricruz Galván, Dr. Alfonso Arroyo, Dr. León Olivé, Dr. Carlos Álvarez, Dra. Fernanda Samaniego y Dra. Carmen Martínez Adame . Sus clases fueron fundamentales tanto para mi formación como para el desarrollo de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca que me permitió realizar los estudios de Maestría del 2012 al 2014.

A mi familia

Índice

Introducción.....	6
Realismo y Antirrealismo.....	7
1.1-El realismo.....	7
1.2.-El Argumento del No-milagro.....	10
1.3.- La inducción pesimista.....	12
1.4 ¿Qué es el realismo estructural?.....	17
El realismo estructural epistémico.....	20
2.1 El Realismo Estructural Epistémico.....	21
2.2 Metodología y estructura.....	22
2.3 Oraciones Ramsey.....	25
2.4 El realismo estructural de Russell y la objeción Newman.....	27
2.5 Objeciones.....	33
Realismo Estructural Óptico.....	35
3.1 Naturalismo y Metafísica.....	37
3.2 El Principio de Clausura Naturalista.....	38
3.3.- El principio de los indiscernibles en Mecánica Cuántica.....	40
3.4 Estadística cuántica y estadística clásica.....	41
3.5 Individualidad.....	43
3.6 Realismos estructurales ópticos.....	48
Objeciones contra REO-Eliminativista desde el Problema de la Medición en la Mecánica Cuántica.....	51
4.1 Mecánica Cuántica Estándar.....	51
4.2 El problema de la medición.....	53
4.3 Mecánica cuántica sin observadores I: Mecánica de Bohm.....	56
4.4 Mecánica cuántica sin observadores II: GRW.....	59
4.5 Objeciones contra REO-E desde el Problema de la Medición.....	61

4.6 ¿Es la Mecánica Cuántica una Teoría Fundamental?	62
4.7 REO-Eliminativista y el problema de la medición.	63
Realismo Estructural Óptico Moderado	67
5.1.- Estructura	67
5.2.- La Metafísica del Realismo Estructura Óptico Moderado.	69
5.3.- Enredamiento y holismo.	71
5.4.- Ontología en teorías cuánticas.	74
5.5.- REO-moderado y Ontología Primitiva	77
5.6 REO-moderado y la función de onda.....	78
Conclusión	82
Bibliografía	83

Introducción

En este trabajo se hace una revisión del debate en torno a los dos distintos tipos de Realismo Estructural: por un lado, el Realismo Estructural Epistémico (REE) que afirma que sólo podemos obtener conocimiento estructural del mundo a partir de nuestras mejores teorías, y por otro, el Realismo Estructural Óptico (REO) que afirma que en el mundo no hay objetos, sólo estructura.

En los capítulos I, II y III se realiza un recorrido tanto por REE como por REO, analizando su propuesta y las principales objeciones que se han hecho contra ambos proyectos en los últimos años. En el capítulo IV, desarrollo el llamado Problema de la Medición en Mecánica Cuántica, describiendo las dos teorías cuánticas más prometedoras que pretenden resolverlo: Mecánica de Bohm y GRW. Se afirma entonces que los defensores de REO, caen en varias inconsistencias al postular proposiciones metafísicas desde la Mecánica Cuántica, sin tomar en cuenta el Problema de la Medición. Finalmente, se presenta la propuesta de Michael Esfeld: El Realismo Estructural Óptico Moderado. Esta forma de Realismo Estructural no sólo se toma en serio las inconsistencias de la Mecánica Cuántica Estándar, sino que puede ser útil como heurística para resolver problemas relacionados con la ontología de las distintas teorías cuánticas. Como conclusión, analizo la viabilidad de un estudio de caso propuesto por Esfeld, aquí, se plantea una solución al debate sobre el estatus ontológico de la función de onda dentro de la Mecánica de Bohm y GRW, usando REO moderado.

Capítulo I

Realismo y Antirrealismo

En este Capítulo haré una breve introducción al debate Realismo/Antirrealismo en Filosofía de la Ciencia como antecedente a la aparición del Realismo Estructural. Analizaré el principal argumento a favor del Realismo conocido como el Argumento del No-milagro. Se examina también el argumento de la Meta-inducción pesimista a favor del antirrealismo. Una vez planteados los problemas principales de ambas posturas, se describen las características básicas del Realismo Estructural y su pretensión de ser una postura intermedia que toma lo mejor del Realismo y del Antirrealismo.

1.1-El realismo

Stathis Psillos¹ da un marco teórico que permite clasificar los tipos de realismo científico. Para Psillos toda forma de realismo está compuesta por una o más de las siguientes tres premisas:

1. Tesis Metafísica: Existe un mundo independiente de la cognición humana.
2. Tesis Semántica: Las teorías científicas pueden tomar valores de verdad. Si una teoría es aproximadamente verdadera, las entidades tanto observables como inobservables que postula, pueblan el mundo.
3. Tesis Epistémica: Cuando una teoría es madura y exitosa en sus predicciones novedosas², tenemos buenas razones para creer que las entidades tanto observables como inobservables que postula, pueblan el mundo

¹ Véase Psillos (2010)

² Una predicción es novedosa si esa evidencia empírica no fue utilizada en la construcción de la teoría. Esta noción de “use-novelty” fue propuesta por Worrall. Véase Worrall (1985)

En cuanto a la Tesis Metafísica es posible afirmar que si bien, tanto el realista como el antirrealista no niegan la existencia de un mundo independiente a nuestra cognición, el realista estándar afirma que podemos tener acceso a aspectos inobservables de la realidad, mientras que ciertas posturas filosóficas que Psillos caracteriza como antirrealistas³ niegan esta posibilidad y defienden una mediación conceptual entre nuestras capacidades cognitivas y el mundo.

La tesis metafísica, afirma Psillos, nos indica que hay entidades en el mundo independientemente de que podamos conocerlas o no. Por otro lado, quienes se concentran en la negación o afirmación de las Tesis tanto Semántica como Epistémica; defienden tipos de realismo parcial que indagan sobre las condiciones de posibilidad para afirmar o negar la verdad/falsedad de las proposiciones científicas, así como la existencia de las entidades inobservables que estas postulan.

El carácter acumulativo del conocimiento científico está implícito en las tres tesis. Sin embargo, para los objetivos de éste trabajo, conviene hacer un análisis más riguroso acerca de la noción de acumulación que asume el realismo estándar. Laudan⁴ propone que para el realista, la ciencia exitosa es una aproximación a la verdad⁵. La ciencia exitosa es capaz de predecir fenómenos además de que cuenta con un amplio rango de poder explicativo. Los criterios que usa Laudan para determinar cuándo una teoría es exitosa o no, son pragmáticos: existen dominios específicos de investigación en los que la teoría es aplicable con resultados correctos. Laudan caracteriza al llamado realismo convergente de la siguiente manera:

“L1: Las teorías científicas maduras son aproximadamente verdaderas. Dentro de un dominio de investigación científica específico, las más recientes teorías están más cercanas a la verdad que las más antiguas.

³ Para Psillos, posturas como el Realismo Interno o el Pluralismo Ontológico, negarían la tesis metafísica.

⁴ Véase Laudan(1981)

⁵ Para el realista estándar, la noción de verdad es la de *verdad por correspondencia*: hay un isomorfismo entre lo que nos dice la ciencia madura y lo que el mundo es.

L2: Los términos observacionales y los términos teóricos que postulan este tipo de teorías maduras, genuinamente refieren. Existen entidades en el mundo que corresponden con la ontología presupuesta por las mejores teorías dentro de un dominio específico de investigación científica.

L3: La sucesión teórica de las ciencias maduras preservan las relaciones teóricas y los referentes aparentes de las teorías pasadas. En otras palabras, las teorías antiguas dentro de un dominio de investigación específico representan casos límite de las teorías recientes.

L4: Las nuevas teorías aceptables deberían explicar por qué las teorías predecesoras fueron exitosas.

L5: La ciencia madura es exitosa.”⁶

Para Laudan, esta caracterización del realismo convergente asume que si una teoría es exitosa sus términos teóricos refieren, además de que logra explicar el éxito de las teorías precedentes y sus referentes. Es importante señalar que se ha discutido hasta qué punto el realista está obligado a comprometerse con la referencia de los términos que proponen las teorías⁷, pero al menos para el realismo estándar y siguiendo las tesis realistas de Psillos: tenemos buenas razones para creer que los términos inobservables de nuestras mejores teorías refieren.

⁶ Véase Laudan (1981,p21)

⁷ Olive analiza los argumentos de Laudan cuestionando hasta qué punto es la referencia lo que condiciona el éxito empírico de la ciencia: “Lo que el realista quiere decir cuando afirma que la referencia explica el éxito, es que al dar una explicación del éxito de una teoría, dentro de ella desempeña un papel preponderante el hecho de que tenga una genuina referencia, pero como una más, entre otras, de condiciones necesarias. Así el realista no tiene que comprometerse en absoluto con la idea de referencia como causa de éxito”. Véase Olive (1984,p56)

1.2.-El Argumento del No-milagro.

Uno de los argumentos más importantes a favor del realismo científico es el enunciado por Hilary Putnam⁸ y que puede enunciarse brevemente de la siguiente manera: El realismo científico es la única forma de no convertir el éxito predictivo de la ciencia en un milagro. En otras palabras, sería una coincidencia de proporciones cósmicas o un milagro que el éxito predictivo de las teorías científicas no las hiciera aproximadamente verdaderas y a sus términos referenciales. En la tesis central del argumento se encuentra la Inferencia a la mejor explicación (IBE). La idea es intuitiva y generalmente se utiliza en la práctica científica: Si una teoría T1 explica alguna evidencia mejor que sus teorías rivales, es razonable escoger T1 por sobre las otras. Por lo tanto, si la postura filosófica que mejor explica el éxito de la ciencia es el realismo, IBE implica que es razonable escoger el realismo científico sobre las otras posturas. El realista exige con este argumento que los antirrealistas expliquen el porqué del éxito predictivo del conocimiento científico si sus entidades inobservables no existen.

Las objeciones contra el Argumento del No-Milagro (ANM) se centran en cuestionar la viabilidad de utilizar IBE para elegir entre dos posturas filosóficas distintas. La acusación más sólida es la de circularidad: El realista utiliza un tipo de inferencia cuya justificación está basada en su utilidad dentro de la ciencia y con esto intenta dar una explicación del éxito empírico de la ciencia misma.

El argumento puede establecerse de la siguiente forma:

ANM1: El realismo es la corriente filosófica que mejor explica el éxito empírico de la ciencia si la comparamos con otras corrientes de carácter antirrealista.

ANM2: Los científicos constantemente utilizan la inferencia a la mejor explicación (IBE) y han tenido éxito al utilizar este tipo de inferencia, por lo tanto, tenemos

⁸ Véase Putman (1975)

buenas razones para creer que IBE es un tipo de inferencia que nos da resultados adecuados.

De ANM1 y ANM2 se seguiría que:

ANM3: Si queremos explicar el éxito predictivo de la ciencia y utilizamos IBE, debemos escoger el realismo científico por encima de las otras corrientes filosóficas.

Escrito de esta forma, es evidente que el Argumento del No-Milagro es circular. NMA2 justifica IBE por su uso en la ciencia exitosa; pero lo que el realista quiere es precisamente justificar por qué la ciencia es exitosa. En la premisa ANM2 está implícita la conclusión. Psillos⁹ responde a ésta objeción diferenciando entre una circularidad asociada a una petición de principio dentro del argumento (circularidad viciosa) y el uso de una regla que está justificada de manera independiente al mismo (circularidad legítima). Cuando intentamos justificar IBE, nos enfrentamos a un problema análogo al del viejo intento de justificar la inducción con un argumento a su vez inductivo. Pero si pensamos que la justificación de IBE está dada por virtudes epistémicas puramente pragmáticas, es posible utilizar este tipo de inferencia para justificar el Argumento del No-Milagro. Para Psillos, la regla que permite que el argumento se estructure como una circularidad legítima es una meta-IBE, una inferencia a la mejor explicación de segundo orden que permite justificar a las IBE's de primer orden.

Si le concedemos al realista científico el Argumento del No-milagro como un razonamiento de sentido común a favor de su postura, de cualquier forma, todavía debe responder a uno de los argumentos más importantes contra su propuesta: el cambio teórico y sus consecuencias ontológicas.

⁹ Véase Psillos (1999, pp79-80)

1.3.- La inducción pesimista.

Los problemas que el cambio teórico trae para el realista, en particular con respecto a su compromiso con la referencia de los términos inobservables, son estructurados de manera clara en el argumento inductivo de Laudan¹⁰:

i) Hay muchas teorías científicas empíricamente exitosas en la historia de la ciencia que han sido subsecuentemente rechazadas y cuyos términos no refieren de acuerdo a nuestras mejores teorías actuales.

ii) Nuestras mejores teorías actuales no son diferentes en su forma, de aquellas teorías que fueron descartadas y por lo tanto no tenemos razones para pensar que éstas no serán descartadas por otras a su vez.

Por lo tanto, por inducción, tenemos buenas razones para esperar que nuestras mejores teorías actuales sean remplazadas por nuevas teorías, dando lugar a que algunos de los términos centrales de esas teorías dejarán de referir, esto implica que no deberíamos creer en la verdad aproximada de la referencia de nuestras mejores teorías.

La inducción pesimista como se le ha llamado al argumento, apuesta por revisar la historiografía de la ciencia y demostrar a partir de ésta que en el pasado creímos en la referencia de ciertos términos en algunas teorías, que esas teorías fueron empíricamente exitosas y que sin embargo, al ser desplazadas por otras recientes, dichos términos dejaron de referir. Ladyman¹¹ resume de esta forma los problemas del cambio teórico para el realista.

¹⁰ Véase Laudan (1981)

¹¹ Véase Ladyman (2007)

“a) La referencia exitosa de los términos teóricos centrales es una condición necesaria para la verdad de una teoría.

b) Hay ejemplos de teorías que fueron maduras y que poseían éxito predictivo, pero cuyos términos teóricos centrales no referían.

c) Por lo tanto, hay ejemplos de teorías que fueron maduras y que tenían poder predictivo exitoso pero que no son aproximadamente verdaderas.

d) La verdad aproximada y exitosa de la referencia de términos teóricos centrales no es una condición necesaria para el éxito predictivo de las teorías científicas.”

Por lo tanto, el Argumento del No-Milagro es vulnerado. Si la verdad aproximada y la referencia exitosa no son necesarias para ser parte de la explicación de algunas teorías con éxito predictivo, entonces no hay razón para pensar que el éxito predictivo de las teorías nos comprometa con el realismo. No es necesario un argumento inductivo con una larga lista de teorías cuyos términos fueron pensados como referentes pero que con el cambio de teoría dejaron de serlo, basta con que hayamos tenido algunas teorías en esta situación para que la relación entre referencia exitosa de inobservables y poder predictivo se rompa. Esto abre la puerta para que posturas que no se comprometen con la referencia a los términos teóricos sino únicamente con la adecuación empírica de las teorías¹², también puedan dar cuenta del éxito predictivo de las teorías sin necesidad de milagros o coincidencias cósmicas. El realista podría plantear que términos como electrón o átomo, muestran una continuidad a pesar del cambio científico y continúan apareciendo en nuestras mejores teorías. Sin embargo, existen ejemplos paradigmáticos donde esto no ocurre. Son teorías con éxito predictivo, cuyos términos centrales dejaron de referir

¹² El empirismo constructivo de Van Fraassen por ejemplo, podría explicar el éxito predictivo sin necesidad de comprometerse con los términos teóricos.

ante el cambio teórico. Casos como El Éter y el Calórico¹³, deben ser explicados por el realista.

El Éter era el medio cuya perturbación daba origen a la luz; una sustancia que lo permeaba todo y cuyas propiedades la hacían prácticamente imposible de detectar. El experimento de Michelson y Morley, provocó que la comunidad científica abandonara la idea del Éter y definiera a la luz como radiación electromagnética, es decir, perturbaciones en los campos clásicos. Por otra parte, el calórico era definido como un fluido sin masa que tenía una tendencia natural a moverse de los cuerpos más calientes a los más fríos. Cuando la termodinámica macroscópica fue explicada en base a la Mecánica Estadística, el calórico dejó de pensarse como una sustancia y se definió a partir del movimiento de las partículas en un sistema.

Las repuestas del realista científico a este tipo de casos, giran en torno a estas dos estrategias:

Caso I) Desarrollar una noción de referencia en la cual los términos teóricos abandonados sean considerados como términos referentes, después de todo.

Caso II) Restringir el realismo a aquellas partes de las teorías que juegan un rol esencial en la derivación de predicciones nuevas subsecuentes, entonces argumentar que los términos de teorías pasadas que ahora son considerados como no-referenciales, no fueron esenciales para las predicciones. Entonces no hay razón para negar que los términos teóricos centrales en las teorías actuales serán retenidos.

En el Caso I, el realista propone un tipo de teoría causal de la referencia; desde esta perspectiva, el término Éter por ejemplo, refería a “algo”, pero ese “algo” no era una sustancia que lo permeaba todo, sino los campos electromagnéticos. La luz se

¹³ Laudan da una larga lista de teorías que él considera empíricamente exitosas y cuyos términos no muestran continuidad en la referencia, sin embargo, una respuesta del realista ante eso, es acotar a qué nos referimos con “éxito” empírico y con teoría “madura”. Varias de las teorías que enlista Laudan salen de la lista si acotamos estos términos. No es así con el éter y el calórico. Véase Laudan (1981)

pensaba como una perturbación en el Éter, ahora se define como una perturbación en los campos, de cualquier forma, dice el realista, el término Éter refería a una entidad física. El caso del Calórico podría plantearse de una manera semejante: el calórico dejó de ser pensado como una sustancia, pero después se definió a partir del promedio del movimiento de las partículas. En otras palabras: existe una continuidad en la referencia debida el rol causal que los términos centrales juegan en la explicación de los fenómenos. El mismo fenómeno que explicábamos con el Éter, lo explicamos ahora con campos electromagnéticos.

Laudan¹⁴ responde a este tipo de argumentos de la siguiente manera: “La teoría causal de la referencia trivializa por completo la noción de término central. Tendríamos que admitir que el concepto de movimiento natural aristotélico, juega el mismo rol explicativo que las fuerzas gravitacionales newtonianas, lo mismo para la teoría de los vórtices de Descartes. El problema radica en que tanto el marco teórico aristotélico como el cartesiano son completamente contrarios a una explicación de la caída de los cuerpos debida a la acción a distancia. Entonces ¿Cómo podríamos afirmar que Aristóteles, Newton y Descartes se referían al mismo término como la “causa de la caída de los cuerpos?” Es imposible, dice Laudan, salvo que trivialicemos la noción de referencia de las teorías y entonces podríamos decir que cualquier término dentro de teorías erróneas refería después de todo. El error de la teoría causal de la referencia consiste en confundir explicación con ontología y definir la referencia a partir de relaciones causales que se presumen explicativas. Las relaciones causales son distintas de una teoría a otra y eso corta por completo la continuidad de la referencia.

En el Caso II, el realista intenta hacer una división de los términos en las teorías. La idea es que aquellos términos que fueron abandonados, en realidad no jugaron un papel fundamental al momento de hacer predicciones exitosas. Psillos lo señala de esta forma: “las leyes teóricas y los mecanismos que generaron el éxito de teorías pasadas han sido retenidos en nuestra imagen científica actual. Cuando una teoría es

¹⁴ Véase Laudan (1984).

abandonada, hay ciertos mecanismos y leyes que no lo son, esas partes de la teoría son aquellas que fueron fundamentales para el poder predictivo de la misma. En el caso del calórico por ejemplo, el término se abandonó porque el éxito empírico de la teoría era independiente de las hipótesis acerca de su naturaleza intrínseca.”

Psillos¹⁵ postula su metodología a partir de dos estrategias:

- i) Identificar los constituyentes teóricos de teorías pasadas genuinamente exitosas que contribuyeron a su éxito.
- ii) Mostrar que esos constituyentes, lejos de ser caracterizados como falsos, han sido retenidos en subsecuentes teorías del mismo dominio.

El punto central de la propuesta de Psillos para contrarrestar la inducción pesimista radica en admitir que puede haber términos dentro de teorías empíricamente exitosas, cuyos términos no refieren después del cambio científico, pero que no son los términos centrales de la teoría.

Considero que el problema de esta respuesta es la ambigüedad al momento de dividir los términos teóricos que contribuyeron al éxito de una teoría con los que no. Tendríamos que mirar a las teorías pasadas buscando aquellas partes que de antemano sabemos que mostraron continuidad. Hacer un análisis como el que Psillos señala, sólo es posible una vez que conocemos el destino histórico de cada una de las teorías. Pero la conclusión de la inducción pesimista apunta a desconfiar de los términos teóricos de las teorías actuales. Incluso si aceptáramos la propuesta de Psillos: ¿Cómo sabemos cuáles términos teóricos de ellas realmente refieren y cuáles no? Habría que esperar a que nuestras mejores teorías sean remplazadas y entonces, según (ii), buscar aquellos términos que fueron esenciales en sus predicciones exitosas, algo que sería completamente ad-hoc y que ningún realista aceptaría

¹⁵ Véase Psillos (1996).

Todas las respuestas a la inducción pesimista, buscan detenerla con algún tipo de noción de continuidad a través del cambio científico. El realismo estructural, también habla de continuidad a través del cambio teórico, sólo que lo hace desde otra perspectiva.

1.4 ¿Qué es el realismo estructural?

En 1989 John Worrall¹⁶ publica *Structural Realism: The best of both Worlds*. El artículo pretende encontrar una postura que dé respuesta tanto a la Inducción Pesimista como al Argumento del No Milagro. El caso particular que Worrall analiza es el cambio teórico de las ecuaciones de Fresnel hasta las ecuaciones de Maxwell y su explicación de la naturaleza de la luz. El argumento central plantea que a pesar de los cambios de referencia en los términos teóricos centrales, hay algo que se conserva entre las dos teorías. La continuidad vendría dada por cierta estructura que permanece en las ecuaciones matemáticas a pesar del cambio en cuanto a las propiedades de la luz. Tanto el realista como el antirrealista deben explicar el porqué esa estructura matemática continúa dentro de las teorías subsecuentes. Este tipo de continuidad no sólo es detectada en las ecuaciones de Fresnel, décadas después del artículo de Worrall el debate se ha centrado en estudios de caso específicos dentro de la historiografía de la física. El paso de la mecánica clásica a la relatividad especial o el paso de la mecánica clásica a la mecánica cuántica, muestran, según los realistas estructurales, una continuidad que puede analizarse en el sentido de que una es un caso límite de la otra. En el caso del Calórico, por ejemplo, es posible plantear que hay una estructura que permanece en la Ley de cambio adiabático, estas leyes son reproducidas dentro de la termodinámica de manera similar a como lo eran en las teorías científicas pasadas. El realismo estructural pretende salvarse de la Inducción Pesimista al no comprometerse con todo el armazón ontológico de las teorías, sino sólo con la

¹⁶ Véase Worrall (1989)

estructura matemática que se conserva ante el cambio científico. Esto implica que ante determinada teoría, el realista estructural no le da ningún estatus ontológico a los términos inobservables en el sentido en el que lo hace el realista, esto rompe con la relación entre referencia exitosa de inobservables y verdad aproximada que Laudan objeta. Así, no importa que el término Éter refiera en una teoría y en otra no; lo que importa es que las ecuaciones que describen el movimiento de las ondas se conserva, ya sea en una sustancia o en los campos electromagnéticos.

Una vez que el realista estructural se ha librado de la Inducción Pesimista, ahora debe responder al realista en cuanto al Argumento del No-milagro, es decir, debe darnos una explicación del éxito predictivo de la ciencia. Es aquí donde aparecen los supuestos epistémicos de Worrall: el éxito predictivo de la ciencia se debe a que la estructura que se conserva describe al mundo. Nuestro acceso epistémico es estructural y por lo tanto debemos permanecer agnósticos con respecto a la naturaleza de las entidades y comprometernos solamente con la estructura con la que se relacionan entre ellas. Las predicciones novedosas de la ciencia no son un milagro ni una coincidencia cósmica: es la estructura la que las posibilita¹⁷.

El Argumento del No-Milagro para el realista estructural se establece de la siguiente forma:

- 1) El éxito predictivo es acumulativo; esto es, teorías subsecuentes predicen al menos lo que las teorías predecesoras predecían.
- 2) La estructura matemática es también acumulativa; esto es, teorías subsecuentes incorporan la estructura de teorías precedentes.
- 3) Por lo tanto, hay una correlación entre la acumulación de estructura y la acumulación de predicciones. Predicciones exitosas sugieren que la teoría va por buen camino, entonces, asumir que la reconstrucción de la estructura matemática de una teoría representa correctamente el mundo explica su éxito predictivo.

¹⁷ Véase Psillos (1995)

El uso de IBE dentro del argumento, queda claro si comparamos las siguientes dos opciones:

Hecho: Ciertas ecuaciones matemáticas son retenidas a pesar del cambio de teoría.

Explicación 1: Es un rasgo accidental de la construcción de la teoría.

Explicación 2: Las ecuaciones matemáticas revelan relaciones objetivas de la naturaleza.

Por IBE, nos quedaríamos con la Explicación 2.

Finalmente, resumamos las características del realismo estructural a la Worrall de la siguiente manera:

a) Las teorías científicas pueden, al menos, revelar la forma lógica o estructural de la física subyacente a la realidad por medio de su estructura matemática.

b) Las ecuaciones matemáticas que son retenidas en el cambio científico expresan la relación real entre objetos, de los cuales no conocemos nada más que la forma en cómo son instanciados en esas relaciones.

c) Diferentes ontologías pueden satisfacer la misma estructura matemática pero no hay razones para creer que una de ellas es más correcta que la otra.

Worrall le responde al realista planteando que debemos ser agnósticos con respecto a la ontología que proponen las teorías. Pero al mismo tiempo le responde al antirrealista estableciendo que la ciencia no sólo “salva los fenómenos”. Las teorías nos aportan algo más que la pura adecuación empírica: la estructura del mundo. Worrall no se compromete con el contenido físico de las ecuaciones sino con las relaciones entre entidades que éstas describen.

Capítulo II

El realismo estructural epistémico

Si bien el realismo estructural propuesto por Worrall en 1989 afirmaba que la estructura que se conserva en los cambios de teoría es la responsable de las predicciones novedosas (y no los términos teóricos cuya referencia cambia con el tiempo), existe una ambigüedad en torno a qué postura debemos tener respecto a esa estructura que parece conservarse. Ladyman(1998) señala el carácter confuso de la propuesta de Worrall:

“En particular, hay una pregunta fundamental acerca de la naturaleza del realismo estructural que debe ser respondida: ¿es una propuesta metafísica o epistémica? El artículo de Worrall es ambiguo al respecto”.¹⁸

Los análisis de los supuestos epistémicos y metafísicos de Worrall, llevan a Ladyman a caracterizar dos formas de Realismo estructural: El Realismo Estructural Epistémico (REE), cuya principal tesis es afirmar que sólo podemos conocer la estructura del mundo y debemos ser agnósticos con respecto a la existencia de objetos y propiedades que nuestras mejores teorías postulan, y por otro lado, el Realismo Estructural Óntico (REO), que afirma que los objetos que postulan nuestras mejores teorías no existen y que la estructura que se conserva ante el cambio teórico no es lo que podemos conocer del mundo: es el mundo.

Ambos proyectos son completamente diferentes tanto en sus supuestos metafísicos y epistémicos, como en su metodología al analizar estudios de caso en la historia de la ciencia. En este capítulo presentaré las principales características del realismo estructural epistémico y los problemas que pretende resolver.

¹⁸ In particular, there is a fundamental question about the nature of structural realism that should be answered: is it metaphysics or epistemology? Worrall's paper is ambiguous in this respect. Véase Ladyman (1998,p 410)

2.1 El Realismo Estructural Epistémico.

El realismo estructural en su versión epistémica, postula una restricción al realismo estándar: sólo podemos conocer aspectos estructurales de la realidad, pero no podemos saber nada acerca de la naturaleza de los objetos cuyas relaciones definen las estructuras. A lo largo de los últimos años, los partidarios de REE han refinado su propuesta como producto del debate que han sostenido tanto con realistas como con antirrealistas.

Psillos¹⁹ resume las características del realismo estructural como:

- a) Las teorías científicas, pueden, al menos, revelar la forma lógica o la estructura de la realidad física subyacente por medio de su estructura matemática.
- b) Las ecuaciones matemáticas que son retenidas en el cambio teórico expresan relaciones reales entre objetos de los cuales sólo conocemos que están en esas relaciones.
- c) Diferentes ontologías (y su contenido físico) pueden satisfacer la misma estructura matemática pero no tenemos razones independientes para creer que alguna de ellas es la correcta.

El punto c) es la columna vertebral de REE. Es necesario no comprometerse con la ontología que las teorías postulan para eliminar la Meta-inducción pesimista de Laudan y al mismo tiempo dar respuesta al argumento del No-milagro. Los cambios en la ontología de las teorías no serían relevantes puesto que la parte de

¹⁹ "(a) Scientific theories can, at best, reveal the logical form or structure of the underlying physical reality by means of their mathematical structure.

(b) Mathematical equations which are retained in theory-change express real relations between objects for which we know nothing more than that they stand in these relations to each other.

(c) Different ontologies (and hence physical contents) may satisfy the same mathematical structure but there are no independent reasons to believe in one of those as the correct one.

Véase Psillos, S. (1995,p20)"

ellas que nos dice cómo es el mundo es la continuidad estructural que aparece en las ecuaciones matemáticas, no la referencia de los términos centrales.

El realista estructural epistémico debe entonces dar respuesta a dos problemas fundamentales:

- 1) Plantear una metodología con la que sea posible obtener la estructura de una teoría sin comprometerse con los términos teóricos que las teorías postulan.
- 2) Explicar de qué manera esa estructura es la responsable del poder predictivo de nuestras mejores teorías.

2.2 Metodología y estructura.

Para explicar la propuesta y los problemas del Realismo Estructural Epistémico es necesario partir del concepto de estructura que se utiliza en teoría de conjuntos²⁰.

Una estructura S consiste de:

- a) Un conjunto no vacío de objetos U , que forman el dominio de la estructura.
- b) Un conjunto ordenado (indexado) no vacío de relaciones R entre los elementos de U .

Las relaciones R pueden definir tanto propiedades como relaciones, es decir, propiedades monádicas (propiedades) o propiedades poliádicas (relaciones).

Representamos una estructura como una dupla: $S = \langle U, R \rangle$.

Definición: Dos estructuras $S_1 = \langle U_1, R_1 \rangle$ y $S_2 = \langle U_2, R_2 \rangle$ son isomorfas si existe un mapeo (biyectivo) uno a uno tal que: $f: U_1 \rightarrow U_2$ donde f preserva el sistema de relaciones de las dos estructuras en el siguiente sentido: para toda relación $r_1 \in R_1$ y $r_2 \in R_2$ los elementos a_1, \dots, a_n de U_1 satisfacen la relación r_1 si y sólo si los

²⁰Véase Frigg, R., & Votsis, I. (2011, pp 229-230)

elementos correspondientes $b_1=f(a_1), \dots, f(a_n)$ en U_2 satisfacen r_2 , donde r_1 es la relación en R_1 correspondiente con R_2 (tienen la misma indexación).

Si este es el caso, decimos que f es un *isomorfismo*. La cardinalidad de una estructura S es, por definición, la cardinalidad de su dominio U .

Las relaciones en las estructuras son definidas extensionalmente como un conjunto de tuplas ordenadas y como tales no tienen ninguna interpretación intensional.

La *extensión* de la relación es el conjunto de tuplas ordenadas a las que se aplica, la *intención* de la relación es el contenido material o el significado de la relación. Por ejemplo, la extensión de la relación “ser el padre de” son todas las parejas ordenadas $\langle a_1, a_2 \rangle$ en las que es verdad que a_1 es el padre de a_2 ; la intención de esta relación es la “paternidad”.

Una relación es especificada extensionalmente si todo lo que decimos acerca de ella es el conjunto de tuplas a las que se aplica, mientras que ninguna intención es dada. Las estructuras definidas de esta manera son referidas como “estructuras abstractas” para enfatizar que ni los objetos en el dominio ni las relaciones tienen algún contenido material. Las estructuras abstractas contrastan con las estructuras concretas, en estas, los objetos y las relaciones son interpretados.

Por ejemplo; una estructura con el dominio $U=\{\text{Pedro}, \text{Martín}\}$ y el conjunto R que contiene únicamente la tupla $\{\langle a_1, a_2 \rangle\}$, donde la relación es $r = \text{“ser el padre de”}$, es una estructura concreta mientras que la estructura con el dominio $U=\{a_1, a_2\}$ y R que contiene únicamente la relación $r = \langle a_1, a_2 \rangle$ es una estructura abstracta.

La extensión de una estructura no está determinada únicamente por su intención: hay relaciones con la misma extensión pero diferentes intenciones.

Las estructuras pueden ser instanciadas en diferentes sistemas. Consideremos la estructura S con el dominio $U=\{a_1, a_2, a_3\}$ y el conjunto R que contiene únicamente una relación, $r = \{\langle a_1, a_2 \rangle, \langle a_2, a_3 \rangle, \langle a_3, a_4 \rangle\}$.

Diferentes sistemas pueden tener la estructura S : tres personas con diferentes estaturas, donde r es “más alto que”, tres libros con diferentes precios, donde r es “más caro que”, etc. Esto implica que la estructura S puede ser instanciada en

diferentes sistemas, pero la estructura en sí misma no depende de sus instanciaciones, siendo posible definirla de forma completamente independiente de ellas.

Una vez que hemos definido la noción de estructura y diferenciado estructuras abstractas y estructuras concretas, se establece una manera de asociar una estructura con una ecuación matemática. El ejemplo canónico es obtener la estructura a partir de la ecuación que expresa la Ley de Hook en mecánica clásica²¹.

En un sistema masa-resorte, el cambio en la posición de la masa es proporcional a la fuerza que se aplica sobre el sistema de acuerdo a:

$$F = - k x$$

Donde:

F: fuerza de estiramiento o compresión.

k: una constante dependiente de las propiedades intrínsecas del resorte.

x: la posición de la masa ligada al resorte.

Tanto la fuerza como la posición de la partícula con masa en este caso, pueden tomar valores reales. El dominio de la estructura que la ecuación define estaría en el plano real \mathfrak{R}^2 . Mientras la relación $r = \{(x,y) : y = -kx\}$, serían todas las tuplas $(x,y) \in \mathfrak{R}^2$. La estructura contiene solamente una relación y por lo tanto estaría dada por: $S = \langle \mathfrak{R}^2, R \rangle$, donde el conjunto de relaciones R, contiene únicamente el elemento r.

El objetivo de este ejemplo es mostrar que una vez que hemos obtenido la estructura, desaparece el contenido material de los términos originales de la ecuación. La fuerza F es ahora el número real y, mientras que la posición de la partícula con masa x, se convirtió también en un número real. La estructura no nos dice que representa F o x, simplemente nos da un dominio y sus relaciones. Sin su contenido material, esta misma estructura puede representar cualquier otra cosa.

Como hemos dicho, el realista estructural necesita pasar de las ecuaciones matemáticas interpretadas a estructuras abstractas que no se comprometan con la

²¹Véase Frigg, R., & Votsis, I. (2011, p230)

ontología de las teorías y que por lo tanto no posean ningún contenido material. Una de las principales objeciones²² contra el realismo estructural a la Worrall es la imposibilidad de explicar el éxito predictivo de una teoría sin recurrir a términos teóricos. En otras palabras: una estructura abstracta no puede ser responsable del éxito de nuestras mejores teorías puesto que para realizar predicciones es necesario interpretar las ecuaciones, es decir, referirnos tanto a términos teóricos como observacionales.

La respuesta a esta objeción es recurrir a las Oraciones Ramsey²³ como una metodología que permite eliminar la referencia a los términos teóricos en las teorías. Si esto es posible, la verdad aproximada de una teoría no descansaría en la referencia de sus términos sino en los valores de verdad asociados a las oraciones; el realista estructural no necesitaría entonces comprometerse con ninguna teoría de la referencia y podría dar respuesta al argumento del Nomilagro evadiendo la meta-inducción pesimista²⁴. La verdad aproximada no sería de las teorías en su conjunto sino de sus oraciones Ramsey²⁵.

2.3 Oraciones Ramsey

Una oración Ramsey es lo que obtenemos si remplazamos todos los términos teóricos en una teoría dada con variables distintas y después cuantificamos sobre esas variables. Un ejemplo sobre la metodología para obtener oraciones Ramsey es el siguiente:

Consideremos una ley física simple que postula que dos cuerpos con cargas eléctricas opuestas se atraen. Usando lógica de primer orden, podríamos escribir: $\forall x \forall y [(Px \& Ny) \rightarrow A(x,y)]$, donde P es la propiedad de tener una carga positiva, N lo es de tener una carga negativa y A la relación de atraerse entre ellas. La oración $\forall x \forall y [(Px \& Ny) \rightarrow A(x,y)]$ es verdadera en una estructura cuyo dominio U son todos los objetos del mundo. Llamemos α al conjunto de objetos cargados

²² Véase Psillos, S. (1995, p20)

²³ En la siguiente sección explicaré a detalle el concepto y el uso de las oraciones Ramsey.

²⁴ Véase Newman, M. (2005, pp 1378-79)

²⁵ Véase Frigg, R., & Votsis, I. (2011, p231)

positivamente y β al conjunto de objetos cargados negativamente, y γ al conjunto de pares de objetos que se atraen entre ellos. Si todos los pares con un elemento de α y otro de β están en γ , entonces la teoría representada por la estructura $S = \langle \{(\alpha, \beta), \gamma \rangle$ es verdadera. La estructura S no tiene ningún contenido material, no dice nada sobre las cargas positivas o negativas ni la atracción entre objetos: simplemente expresa un dominio de objetos y una relación entre ellos.

Es posible obtener la Oración Ramsey de este ejemplo cuantificando de la siguiente manera: $\exists X \exists Y \exists Z \forall x \forall y [(Xx \& Yy) \rightarrow Z(x,y)]$. La Oración-Ramsey dice en este caso que existen relaciones X , Y y Z tales que para todos los objetos x y y , la proposición $(Xx \& Yy) \rightarrow Z(x,y)$ es verdadera. Toda mención a la carga y a la atracción desaparecen y el valor de verdad de la proposición solamente expresa que existe un dominio de objetos que satisfacen la relación.

Las Oraciones Ramsey pueden expresar una variedad de proposiciones de una teoría, incluyendo las ecuaciones. Por esta razón en el realismo estructural a la Worrall, las estructuras son analizadas en términos de este tipo de oraciones.²⁶

En general, para obtener la Oración Ramsey de cualquier teoría T , se comienza formalizando T en predicados lógicos de primer orden. Luego se dividen los términos que ocurren en T en términos lógicos, observacionales y teóricos. Los términos observacionales son aquellos que podemos aplicar a cosas observables y cualquier término no lógico remanente es considerado como término teórico. Finalmente, reemplazamos los términos teóricos de T con variables, entonces cuantificamos sobre ellos. Otro ejemplo canónico es el propuesto por Maxwell²⁷:

Supongamos que nuestra teoría está dada por la siguiente expresión lógica de primer orden:

$$\forall x ((Ax \& Dx) \rightarrow (\exists y Cy))$$

Donde A y D son predicados lógicos que significan que x es un átomo de radio y x decae radiactivamente. C es un predicado observacional que significa que un clic es registrado en un contador Geiger. La Oración Ramsey para T en este caso, sería la expresión lógica de segundo orden:

$$\mathcal{R}(\mathcal{E}) = \exists X \exists y \forall x ((Xx \& Yx) \rightarrow (\exists y Cy)).$$

²⁶ Véase Frigg, R., & Votsis, I. (2011, p231)

²⁷ Véase Maxwell (1972).

Como puede observarse, en la Oración Ramsey, han desaparecido los predicados teóricos A y D, de tal forma que la teoría es formulada únicamente en relación con el predicado observable C. El valor de verdad de la Oración-Ramsey vendría dado por la existencia de objetos que pertenecen tanto al conjunto X como al conjunto Y; implicando con esto un clic en el contador Geiger. Para que la Oración sea verdadera no es necesario que los términos teóricos refieran, es decir, no importa si existen átomos de radio o si estos decaen para atribuir valores de verdad a la Oración-Ramsey.²⁸

2.4 El realismo estructural de Russell y la objeción Newman.

La objeción Newman fue planteada como respuesta a una forma de realismo estructural presentado por Bertrand Russell (1927) de manera sistemática en *Análisis de la materia*. Russell pensaba que no podemos conocer la naturaleza intrínseca de los objetos, sino solamente las propiedades relacionales entre ellos. Las unidades de percepción, llamadas perceptos, construyen nuestro acceso a los objetos del mundo. No podemos acceder a lo que hay en el mundo, sólo podemos conocer aquello que inferimos de los perceptos. La epistemología estructuralista de Russell, se basa en los siguientes dos principios²⁹:

- i) El principio de Helmholtz-Weyl: Diferentes perceptos tienen diferentes estímulos.

- ii) El principio de relaciones de espejo: Relaciones entre perceptos corresponden a las relaciones entre sus causas no-perceptuales, de tal forma que se preservan sus propiedades lógico-matemáticas.

²⁸ "Such entities are not referred to by theoretical terms, but are nevertheless required to make the relevant Ramsey sentence true. We are no longer committed to the radium atom as such, for example, but we are committed to that which has the properties X and Y which entail the Geiger counter click." Glick (2014,p87)

²⁹

i) Helmholtz-Weyl Principle (HW): Different effects (i.e. perceptos) imply different causes (i.e. stimuli/physical objects)

ii) Mirroring Relations Principle (MR): Relations between perceptos correspond to relations between their non-perceptual causes in a manner which preserves their logico-mathematical properties . " Véase Frigg, R., & Votsis, I. (2011, p235)

Si aceptamos los dos principios, es posible concluir que no conocemos los objetos físicos, sino la estructura lógico-matemática que inferimos de las relaciones entre nuestros perceptos y que es isomorfa a la estructura del mundo. Tanto la noción de estructura proveniente de la Teoría de Conjuntos como la de las Oraciones-Ramsey encajan con el estructuralismo russelliano.

Los compromisos epistémicos de Russell son³⁰:

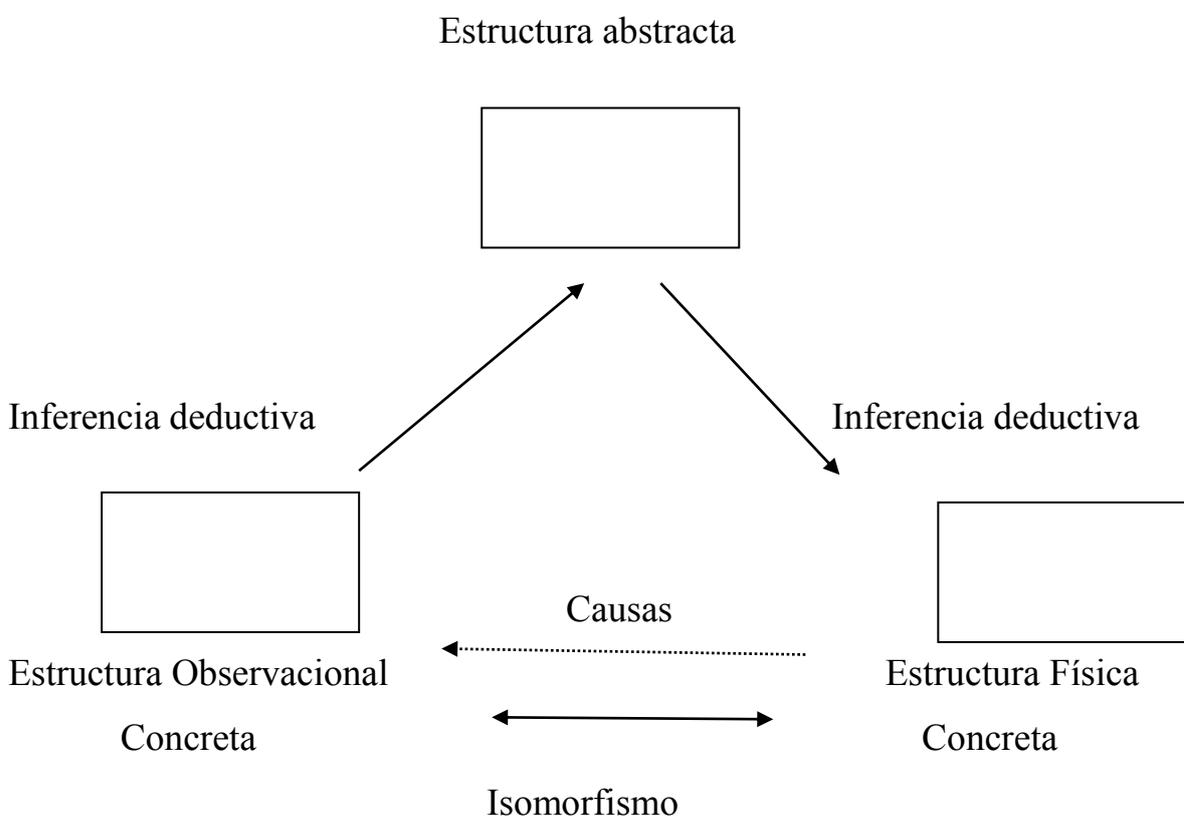
- a) Existen estructuras concretas observacionales.
- b) Existen estructuras abstractas cuyos miembros son las estructuras concretas observacionales.
- c) Existen estructuras físicas concretas que: 1) tienen un dominio que causan las estructuras concretas observacionales a), y 2) son miembros del isomorfismo referido en b).

Es posible resumir la propuesta de Russell de la siguiente forma: Los datos observacionales caen dentro de ciertos patrones permitiéndonos descubrir/postular relaciones entre observables. Estos observables junto con el dominio y sus relaciones forman las “estructuras físicas concretas”. Son concretas porque su dominio es especificado singularmente. Las estructuras abstractas que corresponden a esas estructuras observacionales concretas pueden ser deducidas de una manera sencilla por un proceso de abstracción. Para hacer esto, todo lo que necesitamos hacer es escribir el tipo de isomorfismo del que la estructura concreta observacional es parte. Apelando a los dos principios (Helmontz-Weyl y el Espejo) podemos inferir que cada una de las estructuras observacionales concretas corresponde a una y sólo una estructura física concreta, tal que: 1) las dos son isomorfas, y 2) los miembros del dominio de la

³⁰“ On the basis of these definitions we can now summarise Russell’s epistemic commitments as follows:
(REC1) Concrete observational structures.
(REC2) Abstract structures whose members are the concrete observational structures referred to in REC1.
(REC3) The existence of concrete physical structures that 1) have as domain members the causes of the concrete observational structures’ domain members referred to in REC1 and 2) are members of the isomorphism classes referred to in REC2.”

estructura física concreta son causalmente responsables de los miembros del dominio de la estructura observacional concreta.

Votsis³¹ plantea el siguiente esquema para explicar las inferencias epistémicas planteadas por Russell



El realismo estructural de Russell afirma que a partir de la estructura de nuestras percepciones, podemos inferir cuestiones sobre las estructuras físicas del mundo, pero no podemos inferir el carácter intrínseco de esas estructuras, solamente sus cualidades lógico-matemáticas.

Unos años después de la publicación de *Análisis de la Materia*, apareció una objeción a su propuesta tan contundente, que Russell abandonó por completo su proyecto. Se trataba de la objeción Newman.

La objeción no solamente afecta el estructuralismo de Russell, sino cualquier postura que pretenda llevar el conocimiento científico a ámbitos puramente estructurales, ya sea transformando las ecuaciones en estructuras de Teoría de Conjuntos o utilizando Oraciones Ramsey; de tal forma que el realismo

³¹ Ioannis Votsis. *The epistemological status of scientific theories*. p45

estructural epistémico tal y como Worrall lo defiende, es vulnerable también a la objeción. Si sólo podemos conocer cualidades estructurales del mundo, dice Newman, entonces todo el conocimiento científico se trivializa. En otras palabras: si el planteamiento del realismo estructural es asumir que “hay una relación R tal que la estructura el mundo externo con referencia a R es W ”, entonces debemos considerar el teorema que asume que dada cualquier estructura con un determinado dominio, siempre es posible encontrar otra estructura compatible con la cardinalidad de ese dominio. Si lo que el realista estructural afirma es que para un conjunto-dominio dado, existe un sistema de relaciones que especifica una estructura; siempre es posible encontrar otro conjunto de relaciones que satisfagan el mismo dominio.

El teorema que Newman utiliza es el siguiente:

Teorema: Sea una estructura $S = (U, R_1, \dots, R_k)$ y V un conjunto. Supongamos que $\rho : U \rightarrow V$. Entonces, existe una estructura S' cuyo dominio es V y que tiene una subestructura isomorfa a S .

Si dada una teoría científica madura, obtenemos su estructura o su Oración-Ramsey asumiendo que esa estructura es todo lo que podemos conocer del mundo, el teorema de Newman muestra que para esa estructura siempre hay otra que es compatible con el mismo dominio. En otras palabras, el conocimiento proveniente de la estructura de las teorías sería únicamente la cardinalidad de los objetos que cumplen con las relaciones, pero no una estructura singular proveniente de cada teoría. Puesto que el objetivo del realista estructural es no comprometerse con propiedades intrínsecas de los objetos, se podría dar el caso de dos teorías completamente distintas y con dominios de aplicación diferentes cuya estructura sea la misma. La estructura de las teorías no nos daría ninguna información sobre el mundo: a priori podemos postular lógicamente estructuras con diferentes dominios cumpliendo las mismas relaciones que obtenemos de las ecuaciones de nuestras mejores teorías. El caso de las Oraciones-Ramsey sería peor, puesto que su valor de verdad depende únicamente de la existencia de objetos que satisfacen la Oración; esto implica que siempre existirán objetos en el universo que cumplan con esa función.

El argumento contra el realismo estructural desde la objeción Newman, puede resumirse de la siguiente manera:

- 1- El Realismo Estructural (RE) está comprometido con la postura de que las Oraciones-Ramsey de cualquier teoría científica T, capturan el “contenido cognoscible” completo de una teoría
- 2- Sin embargo, como Newman mostró, las Oraciones Ramsey de cualquier teoría imponen únicamente una restricción débil en el mundo; equivalente en esencia a una restricción a la cardinalidad, de tal manera que si hay suficientes objetos en el mundo entonces la versión Ramsey de una teoría T, para cualquier T, será verdadera.
- 3- Sin embargo, es claro que las teorías científicas estándar imponen restricciones mucho más rigurosas en mundo si ellas son verdaderas, más que la restricción sobre el número mínimo de entidades que debe haber en el mundo.
- 4- Por lo tanto, el realismo estructural está comprometido con una postura acerca del contenido cognoscible de las teorías científicas que es claramente insostenible, por lo tanto, todo el realismo estructural es en sí mismo insostenible³².

La respuesta de Worrall consiste en afirmar que el error del realismo estructural de Russell es postular una representación puramente estructural que no contiene términos observables. Las Oraciones Ramsey del realismo estructural epistémico, son Oraciones interpretadas a partir de términos observacionales. Obtener las Oraciones-Ramsey de esta manera, sólo pretende quitar los términos

³² “1. SSR is committed to the view that the Ramsey sentence of any scientific theory T captures the full ‘cognitive content’ of that theory.

2. However, as Newman showed, the Ramsey sentence of any theory imposes only a very weak constraint on the universe—it amounts in essence to a mere cardinality constraint, and so if there are sufficiently many objects in the universe then the Ramsey-version of T, for any T, will be true.

3. However it is clear that standard scientific theories impose much more stringent constraints on the universe if they are to be true than merely a constraint on the minimum number of entities the world must include.

4. Hence SSR is committed to an account of the cognitive content of scientific theories that is plainly untenable and is, therefore, itself untenable.” Véase Worrall(2007,p141)

inobservables (teóricos) y dejar intactos los términos observables. Worrall y Zahar afirman que la objeción Newman es efectiva sólo si la distinción entre términos observables y teóricos no se realiza³³. La respuesta de Worrall da lugar a una clasificación en la literatura entre los realistas estructurales epistémicos:

- a) Realismo epistémico indirecto o agnóstico: Sólo podemos tener conocimiento estructural tanto de los inobservables como de los observables de las teorías.
- b) Realismo epistémico directo o Kantiano: Sólo podemos tener conocimiento estructural de los inobservables, pero podemos conocer tanto la estructura como la naturaleza de los observables.

El realismo estructural de Russell sería de carácter indirecto y eso lo hace vulnerable a la objeción Newman, mientras que el realismo estructural de Worrall sería de carácter directo; pretendiendo salir de la objeción si las Oraciones Ramsey son utilizadas para eliminar los inobservables y quedarnos únicamente con los términos observables de las teorías. La estructura que se preserva a través del cambio teórico nos da conocimiento sobre los inobservables, pero los observables varían conforme las teorías se modifican.

El Realismo Estructural Epistémico Directo da respuesta de esta manera también a la objeción de Psillos³⁴ que acusa al Realismo Estructural de comprometerse sólo con ecuaciones no interpretadas al tratar de eliminar los términos teóricos: las ecuaciones se interpretan buscando corroborarse o falsearse en el ámbito de lo observable, pero no hay compromiso ontológico con los inobservables que las teorías postulan.

³³ La distinción entre términos observables e inobservables, por momentos pareciera no ser problemática para Worrall, Zahar y Votsis. Sin embargo, la manera como se lleva a cabo el procedimiento de Ramseyficación está completamente ligada a qué entendamos por inobservable u observable; una discusión bastante añeja en el debate realismo-antirrealismo. Véase Van-Fraassen (1980).

³⁴ Véase Psillos (1995).

Ahora bien, si la parte más importante de las Oraciones-Ramsey en las teorías proviene de su contenido ¿no colapsa RRE en un Constructivismo-Empírico a la Vaan Frassen?, es decir, ¿no está Worrall simplemente salvando los fenómenos al no comprometerse con los inobservables más que de manera puramente estructural?

Los defensores de REE-Directo responden a esta objeción argumentando que³⁵:

“Las Oraciones-Ramsey no se siguen lógicamente de su contenido observacional. Las Oraciones contienen generalizaciones empíricas y por lo tanto no pueden ser deducidas del contenido observacional de la teoría.”

Según Votsis, lo que nos dicen las Oraciones-Ramsey no es trivial y va más allá del contenido puramente observacional de las teorías.

2.5 Objeciones.

Al inicio de este capítulo afirmé que los dos problemas fundamentales de REE eran:

- 1) Encontrar una metodología que nos permita obtener la estructura de las teorías científicas sin comprometerse con sus términos teóricos.

Como hemos visto, esta metodología consiste en el uso de las Oraciones-Ramsey siempre y cuando la división entre términos teóricos y términos observables sea clara, algo que es bastante problemático al interpretar las teorías.

- 2) Explicar de qué manera la estructura que se conserva en el cambio teórico es responsable del éxito predictivo de la teoría.

³⁵ “ The Ramsey-sentence does not logically follow from its observational content. The Ramsey-sentence contains empirical generalisations and hence cannot be deduced from the observational content of the theory”. Véase (Votsis,p117).

Considero que la respuesta sigue siendo ambigua. Por un lado podríamos aceptar que sólo conocemos aspectos estructurales de los inobservables, pero es claro que estos aspectos estructurales no son capaces de explicar el éxito predictivo en el REE-Directo sin acudir a los términos observables acotados a una teoría específica.

Ladyman y French darán una respuesta distinta a las objeciones contra el realismo estructural a la Worrall: el realismo estructural óptico.

Capítulo III

Realismo Estructural Óntico

El Realismo Estructural Óntico surge como respuesta a las dos principales objeciones que se han realizado contra el Realismo Estructural a la Worrall:

i) Es imposible hacer que el éxito predictivo de una teoría dependa exclusivamente de la estructura obtenida a partir de las ecuaciones matemáticas. El éxito empírico de una teoría depende también de entidades concretas cuya naturaleza no es posible obtener de las ecuaciones.

El punto clave de esta objeción propuesta por Psillos³⁶ consiste en la afirmación de que es imposible hacer una distinción clara entre términos estructurales (matemáticas) y la ontología (contenido) de la teoría.

ii) La objeción Newman.

Como se vio en el capítulo anterior, la salida de Worrall a la objeción es asumir un Realismo Estructural Epistémico que se compromete únicamente con conocimiento estructural de los inobservables, mientras que asume la posibilidad de conocer entidades no-estructurales en el ámbito observable. Si la promesa del realista estructural epistémico era salvar al realista estándar de la meta-inducción al eliminar los compromisos ontológicos de las teorías y quedarnos sólo con la estructura; la necesidad de postular que podemos conocer objetos concretos no-estructurales (observables) como salida a la Objeción Newman, nos regresa a un antirrealismo de naturaleza mucho menos sólida que la propuesta de Van Fraassen.

El proyecto que emprenden Ladyman (1998, 2001, 2007), Ladyman & Ross (2007), French (1998, 1999, 2006), French & Ladyman, (2003), pretende

³⁶ Véase Psillos (1999, pp147-148)

disolver estas objeciones postulando una nueva forma de realismo estructural: El Realismo Estructural Óptico (REO). Frente a la primera objeción, los defensores de REO, asumen que el Realismo Estructural no necesita diferenciar claramente entre la estructura y los objetos que la instancian dentro de ella por la simple razón de que no existen objetos en el mundo, sólo hay estructura. En cuanto a la segunda objeción, este proyecto plantea que la única forma de evitar la objeción Newman es descartando la concepción sintáctica de las teorías y seguir una metodología basada en la concepción semántica. La estructura deja de ser una estructura abstracta sin contenido, para convertirse en una estructura física.

La motivación para eliminar objetos y quedarse solamente con la estructura, está basada en el análisis de una de nuestras mejores teorías: Mecánica Cuántica.

Son dos los objetivos principales de REO:

- a) Librar la Meta-inducción pesimista de Laudan y al mismo tiempo dar una explicación al Argumento del No-milagro apelando a la estructura que se preserva a través del cambio teórico como responsable del éxito predictivo de las teorías.
- b) Justificar la eliminación de los objetos y sus propiedades a partir de una revisión de nuestra física contemporánea, postulando que son nuestras mejores teorías científicas las que nos indican que lo único que hay en el mundo es estructura.

Es posible analizar la propuesta óptica a partir de dos aristas, cada una con sus propios objetivos y problemas:

- 1) Metafísica: En la primera sección de este capítulo me ocupo de la definición de Metafísica Naturalizada propuesta por los defensores de REO, en particular analizo el llamado Principio de Clausura Naturalista como metodología de naturalización.

- 2) Física: En la segunda sección, me enfocaré en el análisis del llamado *problema de los indiscernibles* en Mecánica Cuántica

3.1 Naturalismo y Metafísica

Los proyectos de naturalización de la filosofía comenzaron en los años sesentas a partir del trabajo de Quine. La mayoría de las propuestas de naturalización se concentraron en la epistemología³⁷. En general, la discusión se centra en dos maneras de entender la naturalización: por un lado, quienes asumen que la filosofía debe *auxiliarse* del conocimiento de nuestras mejores teorías científicas, y por otro, quienes plantean proyectos de remplazo, es decir, propuestas que afirman que los problemas filosóficos deben *resolverse* únicamente a partir del conocimiento científico. En 1981, Quine afirmaba lo siguiente:

“El Naturalismo es el reconocimiento de que es dentro de la ciencia en sí misma, y no en alguna filosofía anterior, que la realidad debe ser identificada y descrita.”³⁸

Los proyectos naturalizados de *reemplazo* interpretan a Quine³⁹ estableciendo que sólo la ciencia puede decirnos algo acerca de la naturaleza fundamental del mundo. En el caso de la Metafísica, propuestas como la de Morgantti (2014) defienden una cooperación entre la Metafísica analítica y nuestras mejores teorías. Desde esta perspectiva, un problema proveniente de la Metafísica puede disolverse volteando hacia lo que en ese momento nos dice la ciencia sobre el tema, pero sin eliminar algunos criterios que tradicionalmente pertenecen a la Metafísica. El proyecto de REO no es proyecto de este estilo. La Metafísica Naturalizada (MN) de Ladyman y Ross, es una propuesta de *reemplazo* donde los criterios para resolver los problemas tradicionales de la Metafísica deben provenir exclusivamente de la ciencia.

³⁷ Véase Hernández y Callebaut (2010)

³⁸ Quine (1981,p21)

³⁹El propio Quine nunca tuvo claro su postura en torno a la manera de interpretar la naturalización: cooperación o reemplazo.

En Ladyman y Ross (2007)⁴⁰, se afirma que la Metafísica Analítica que se ha desarrollado en las últimas décadas, debe desaparecer puesto que está condenada al fracaso. Su principal argumento es que preguntas como ¿qué tipo de entidades hay en el mundo?, ¿qué propiedades poseen?, ¿qué es el tiempo?, deben responderse exclusivamente desde la Mecánica Cuántica, la Relatividad especial y la Relatividad general. La Metafísica debe entonces basarse únicamente en la interpretación de lo que nos dicen nuestras mejores teorías, evitando las especulaciones carentes de justificación empírica⁴¹.

Éste es el marco teórico desde el que hay que entender y problematizar el Realismo Estructural Óptico de Ladyman. Lo que después llamarán *la subdeterminación de la Metafísica por la Física* sólo tiene sentido si pensamos la Metafísica Naturalizada como un proyecto de *reemplazo*, no de *cooperación*.

3.2 El Principio de Clausura Naturalista.

Para Ladyman, una de las principales virtudes del conocimiento científico es su pretensión de darnos una imagen unificada del mundo. De ahí que la tarea principal de la Metafísica sea utilizar esa virtud dentro de su campo. Ladyman lo expresa de la siguiente manera:

“Metafísica, tal y como la entendemos aquí, es la empresa de conciliar de manera crítica las distintas redes que nos proporciona el conocimiento científico.”⁴²

La justificación de esta afirmación es puramente pragmática: si a los científicos les ha sido útil la búsqueda de unificación de las teorías en sus prácticas, es legítima la búsqueda de unidad dentro de la reflexión filosófica⁴³. La tarea de la Metafísica es darnos una imagen unificada del mundo partiendo de cada una de

⁴⁰ Véase Ladyman y Ross (2007, pp 2-8)

⁴¹ Según los defensores de MN, toda la Metafísica Analítica está llena de prejuicios provenientes históricamente de teorías como la Mecánica Clásica. Teorías que ahora sabemos, eran buenas aproximaciones pero que son incorrectas en cuanto a decirnos cómo es el mundo y que tipo de entidades lo pueblan.

⁴² “Metaphysics, as we will understand it here, is the enterprise of critically elucidating consilience networks across the sciences.” Véase Ladyman y Ross (2007, p28)

⁴³ En su proyecto, Ladyman y Ross afirman estar mucho más cerca del pragmatismo de Peirce que de los positivistas. Véase Ladyman y Ross (2007, p28-29)

las distintas disciplinas. Ahora bien, para los defensores de REO, la física es la ciencia fundamental mientras que las otras áreas del conocimiento científico pueden clasificarse como ciencias especiales. La primacía de la física por sobre las otras ciencias se plantea como una cuestión de hecho. Las hipótesis científicas están restringidas por otras hipótesis pertenecientes a otras disciplinas. Una hipótesis en biología debe satisfacer ciertos aspectos que no la hagan contradecirse con una hipótesis en química. Esto ocurre con todas las ramas de la ciencia salvo con la física; ésta no está restringida por otras disciplinas, salvo ella misma. Se postula entonces la regla de “Restricción de la Primacía de la Física” (RPF)⁴⁴:

“Las hipótesis de las ciencias especiales, que entren en conflicto con la Física fundamental, o con el consenso que haya en la Física fundamental, deben ser rechazadas por esa sola razón. Las hipótesis de la Física fundamental, no son simétricamente restringidas por las ciencias especiales”.

Una vez que se postula la regla de supremacía de la Física sobre las otras ciencias, se establece el llamado Principio de Clausura Naturalista (PCN)⁴⁵:

“Cualquier nuevo enunciado metafísico que se tome en serio a un tiempo t , debe estar motivado únicamente por su capacidad para mostrar como dos o más hipótesis científicas específicas –donde al menos una proviene de la física fundamental- pueden explicar más que la suma de lo que explican cada una por separado.”

La propuesta de Metafísica Naturalizada de los defensores de REO puede resumirse de la siguiente forma:

- 1) Debemos seguir la regla de “Restricción de la supremacía de la Física” puesto que es usada por los científicos en su práctica.

⁴⁴ “Special science hypotheses that conflict with fundamental physics, or such consensus as there is in fundamental physics, should be rejected for that reason alone. Fundamental physical hypotheses are not symmetrically hostage to the conclusions of the special sciences.” Véase Ladyman y Ross (2007, p44)

⁴⁵ “Any new metaphysical claim that is to be taken seriously at time t should be motivated by, and only by, the service it would perform, if true, in showing how two or more specific scientific hypotheses, at least one of which is drawn from fundamental physics, jointly explain more than the sum of what is explained by the two hypotheses taken separately” Véase Ladyman y Ross (2007, p37).

- 2) El Principio de Clausura Naturalista nos da una metodología para la Metafísica que acota sus proposiciones solamente a aquellas que unifican las hipótesis científicas siguiendo la “Restricción de la supremacía de la Física”.

Si toda la Metafísica legítima se restringe a estos dos principios, lo que sigue ahora es revisar lo que dicen nuestras mejores teorías con respecto al concepto de estructura y a la existencia o no de los objetos que estas postulan. Como señalé al principio de este capítulo, la justificación del Realismo Estructural Óntico tiene dos niveles, el primero es la Metafísica Naturalizada, el segundo es el que trataré en la siguiente sección y atañe únicamente a la manera en cómo interpretemos lo que ocurre en Mecánica Cuántica.

3.3.- El principio de los indiscernibles en Mecánica Cuántica.

En esta sección, analizaré con detalle en qué sentido los defensores de REO afirman que de acuerdo a lo que postula la Mecánica Cuántica (MQ), la noción de objeto y de individualidad debe modificarse. Partamos del Principio de los Indiscernibles de Leibniz (PII):

$$\forall x \forall y (\forall P (P x \leftrightarrow P y)) \rightarrow (x = y)$$

Morganti (2014)⁴⁶ señala : “Literalmente, PII dice que si dos entidades tienen las mismas propiedades, entonces son la misma entidad. Esto se toma como base para definir individualidad en el sentido de que cada individuo tiene un conjunto de propiedades únicas.”

En Mecánica Clásica, se presupone una noción de impenetrabilidad. En el Libro III de los *principia*, Newton da una lista de propiedades fundamentales de la

⁴⁶ “Literally, PII says that if two entities have all the same properties, then they are the same entity. This is taken to ground individuality in the sense that each individual has a set of properties unique to it.” Véase Morganti (2013,p 54)

materia, e.g., dureza, capacidad de movimiento e inercia. La impenetrabilidad está incluida en estas propiedades y ésta determina que cada cuerpo siempre ocupe un único lugar en el espacio⁴⁷. Dos cuerpos no pueden estar ubicados espacio-temporalmente en el mismo lugar.

La impenetrabilidad es un axioma de la teoría y juega un papel fundamental en Mecánica Clásica. Las entidades clásicas difieren al menos en cuanto a su posición en el espacio-tiempo y esto permite asumir que PII es necesariamente verdadero en el mundo clásico. Sin embargo, en Mecánica Cuántica esto no es evidente o simplemente no se cumple.

3.4 Estadística cuántica y estadística clásica⁴⁸

Supongamos que tenemos N partículas distribuidas sobre M posibles estados. Si estamos interesados en conocer el número de posibles combinaciones físicas, en Mecánica Clásica, las partículas siguen la estadística de Maxwell-Boltzmann (MB). De acuerdo con esta, el número de posibles distribuciones estaría dado por:

$$W = MN$$

Es decir, basta multiplicar el número de partículas por el número de posibles estados para obtener el número de combinaciones posibles.

En el caso de las entidades cuánticas⁴⁹, tenemos dos posibilidades para realizar la misma operación. La estadística Bose-Einstein (BE) que aplica a partículas bosones⁵⁰.

$$W = \frac{(N+M-1)!}{N! (M-1)!}$$

Mientras que en el caso de partículas Fermiones, el Principio de Exclusión de Pauli⁵¹, reduce el número de posibles estados. Su estadística obedece a la llamada estadística de Fermi-Dirac:

⁴⁷ Véase Morganti (2013, pp54-57)

⁴⁸ Véase Morganti (2009, 224-225)

⁴⁹En el siguiente capítulo describiré los postulados de la Mecánica Cuántica y sus posibles interpretaciones, por ahora sólo me interesa diferenciar los dos tipos de estadística: clásica y cuántica.

⁵⁰ Existen dos tipos de partículas: los llamados bosones que son partículas que no poseen masa y los llamados fermiones que la poseen.

$$W = \frac{M!}{M!(N-M)!}$$

Consideremos ahora un sistema físico con dos entidades ($N = 2$) y con dos estados probables disponibles ($M=2$). Clásicamente, la estadística (MB) nos da como resultado:

$$W = (2) (2) = 4$$

Si son cuatro los posibles arreglos, la probabilidad de que el sistema esté en alguno de ellos es $\frac{1}{4}$. Si fuera el caso de que las partículas son bosones, la cantidad de arreglos vendría dada por:

$$W = \frac{(2 + 2 - 1)!}{(2)!(2 - 1)!} = 3$$

La probabilidad sería de $\frac{1}{3}$. Finalmente si las partículas fueran fermiones, la cantidad de arreglos vendría dada por:

$$W = \frac{2!}{2!(2-2)!} = 1$$

Es decir, en el caso de fermiones, tenemos un solo arreglo posible, por lo tanto la probabilidad de que ocurra es 1. Describamos los arreglos posibles para cada estadística de una forma más detallada. Sean x y y los estados posibles, denotemos con los subíndices 1 y 2 las entidades que componen el sistema.

- (C1)(Q1) $|x >_1 |x >_2$
- (C2)(Q2) $|y >_1 |y >_2$
- (C3) $|x >_1 |y >_2$
- (C4) $|y >_1 |x >_2$
- (Q3) $\frac{1}{\sqrt{2}} (|x >_1 |y >_2 + |x >_1 |y >_2)$
- (Q4) $\frac{1}{\sqrt{2}} (|x >_1 |y >_2 - |y >_1 |x >_2)$

Los arreglos señalados como C1-C4, son los arreglos correspondientes a las partículas clásicas, mientras que los arreglos Q1,Q2,Q3, son estados simétricos

⁵¹ Dos fermiones no pueden tener los mismos números cuánticos.

accesibles si las entidades fueran bosones. Finalmente, Q4, es el único estado posible si las partículas fueran fermiones.

Como puede verse, en el caso clásico, un cambio de una partícula por otra (permutación) es a su vez un cambio en el estado: C3 es distinto a C4. Mientras que en el caso cuántico, los cambios no hacen ninguna diferencia en el caso de los bosones, mientras que en los fermiones (caso Q4), el estado sólo varía por un signo. En Q3 no podemos decir cuál partícula es cual puesto que si las permutamos el estado es el mismo. Los estados no-simétricos (C3,C4) no ocurren en el caso cuántico.

Esto nos lleva al Postulado de Indistinguibilidad: “Si tenemos entidades cuánticas idénticas en el mismo sistema, son indistinguibles”.⁵² La conclusión es asumir que las entidades cuánticas no son individualizables. Al menos no lo son en el sentido de PII. La permutación no cambia el estado del sistema puesto que permutar implica que haya identidades y éstas no están bien definidas en el caso cuántico. French (2006) llama *Concepción heredada* a la postura que asume que dentro de la Mecánica Cuántica, las partículas físicas no pueden ser consideradas como individuos.

3.5 Individualidad

En las últimas décadas se han realizado varios intentos por modificar la noción de individualidad de tal forma que no sea necesario que las entidades cuánticas cumplan necesariamente con PII. Se asume que los objetos son indistinguibles en el sentido de que no cumplen con el principio de Leibniz, pero que pueden ser individualizables si el principio se modifica de alguna forma.

Imaginemos un universo dónde sólo existe un objeto. No podemos decir que el objeto es discernible puesto que el concepto de discernibilidad en PII, requiere necesariamente que exista otro objeto con el cual compararlo. Sin embargo, intuitivamente, creemos que el objeto es un individuo. Pareciera ser entonces que individualidad es un aspecto metafísico mientras que discernibilidad es un

⁵² “Quantum identical particles in the same system are consequently said to be indistinguishable.” Morganti (2009, p224)

aspecto epistémico. En general, el debate se ha centrado a partir de una noción de individualidad definida como aquella propiedad que hace que las cosas sean *idénticas a sí mismas* y que a su vez sean *distinguibles numéricamente* unas con respecto a otras.

Existen dos acercamientos en torno a la fundamentación de esta noción⁵³:

“ a) Reduccionismo: Desde esta perspectiva el mundo está constituido enteramente por hechos cualitativos y por lo tanto la individualidad es reducible a las propiedades cualitativas de las cosas.

b) Primitivismo: Desde esta perspectiva, la individualidad de los objetos es algo más que el conjunto de sus aspectos cualitativos y puede estar basada en hechos metafísicos de auto-identidad y distinción numérica. ”

El Reduccionismo se basa fundamentalmente en PII, mientras que el Primitivismo postula una “individualidad trascendental”, es decir, una noción de individualidad que no puede reducirse a la suma de las propiedades de los objetos. Morganti señala⁵⁴ que existen dos interpretaciones distintas del Principio de los Indiscernibles, una metafísica y otra epistémica.

a) Metafísica: PII es necesariamente verdadero. Dos individuos no pueden tener las mismas propiedades puesto que esto contradice la noción misma de individualidad.

b) Epistémica: Tenemos buenas razones para creer que individuos indiscernibles pero distintos numéricamente, no existen.

Quienes interpretan PII metafísicamente, asumen que su verdad es necesaria y que por lo tanto su justificación no necesita de ninguna base empírica. Para ellos, PII es condición de posibilidad del conocimiento empírico. Por otro lado, la interpretación epistémica, invierte el orden de la justificación asumiendo que es la experiencia empírica la que nos da razones justificadas para usar PII al adscribirle individualidad a las cosas. La lectura de los defensores de la

⁵³ “ a) The view that the world is, at root, entirely constituted by qualitative facts (i.e., facts other than those concerning identity and number), and individuality is consequently reducible to (qualitative) properties;

b) The view that the individuality of things is something over and above their qualitative aspects, so that there can be brute (primitive, ungrounded) metaphysical facts of self-identity and numerical distinctness.” Morganti & Dorato (2013, 593).

⁵⁴ Véase Morganti & Dorato (2013, 594-596)

Metafísica naturalizada es obviamente la epistémica y lo que se asume es que la noción de individualidad no es una verdad necesaria y que debe ser contrastada con lo que nos dicen nuestras mejores teorías científicas. Siguiendo este camino se establecen distintos niveles de discernibilidad.

La noción de *propiedad* es inherente a PII. Recordemos que por definición se postulan dos tipos de propiedades; por un lado propiedades monádicas (intrínsecas) cuyas características no involucran la existencia de otros objetos para definirse, mientras que por otro lado tenemos propiedades poliádicas (relacionales), que son aquellas propiedades que se definen a partir de la relación del objeto con otros objetos.

Una vez que se ha establecido esta distinción, es posible hablar de PII en torno a tres niveles de discernibilidad.⁵⁵

PII(1): No es posible que dos individuos posean todas sus propiedades (monádicas y poliádicas) en común.

PII(2): Es posible que dos individuos posean todas sus propiedades en común, pero pueden individuarse porque ocupan un lugar distinto espacio-temporalmente.

PII(3): Es posible de dos individuos posean todas sus propiedades en común y que además no puedan individuarse espacio-temporalmente, sin embargo, es posible definir individualidad si podemos establecer una relación reflexiva entre ellos.

PII(1) es la versión más fuerte de PII, desde esta perspectiva, no son individualizables ni siquiera las partículas clásicas puesto que el hecho de que ocupen lugares distintos espacio-temporalmente no es criterio de individuación.

PII(2) permite asumir que las partículas clásicas son individuos en la medida en la que ocupan lugares distintos espacio-temporalmente. Black (1952) elaboró un experimento pensado que vulnera PII(2): Imaginemos un universo completamente simétrico que es habitado sólo por dos esferas que comparten las mismas propiedades monádicas. Se podría pensar que la posición de las esferas

⁵⁵ Véase French (2011) y Morganti (2013, p595)

puede definirse en términos relacionales, sin embargo, el hecho de que el universo sea simétrico y que la distancia de cada uno de los puntos de cada esfera con la otra sea la misma, imposibilita encontrar una forma de definir por qué ocupan un lugar distinto en el espacio que habitan. Las esferas no pueden individuarse vía PII(2) porque es imposible definir en este universo qué significa que ocupen un lugar distinto espacio-temporalmente. La salida a esta objeción es postular una forma de PII aún más débil. La idea fue desarrollada por Quine (1976) y su versión más reciente en el contexto de la Mecánica Cuántica se debe a Saunders (2006). Quine definió una noción de *discernibilidad débil*. La propuesta radica en que es posible individualizar si podemos definir un enunciado que predique algo de una cosa con respecto a la otra. Saunders afirma que en el caso de las esferas de Black, es posible decir que “una de ellas está a una distancia con respecto a la otra (pero no con respecto de si misma)”. Esto implica que las esferas son numéricamente distintas aunque compartan todas sus propiedades.

En el contexto de la Mecánica Cuántica, un sistema formado por entidades, no puede individualizarse vía PII(1) puesto que comparten todas sus propiedades, tampoco podrían hacerlo desde PII(2) puesto que no está claro en qué sentido ocupan posiciones distintas espacio-temporalmente⁵⁶. Sin embargo, de acuerdo a Saunders, el hecho de que se establezca una relación entre ellos mediante el spin, nos da la posibilidad de individualizarlos débilmente. Podemos enunciar el predicado “si uno posee spin- \uparrow el otro necesariamente posee...”.

Si es factible elaborar esta proposición, necesariamente tienen que existir dos fermiones y por lo tanto son individuos.

La objeción principal contra PII(3) es de circularidad, French (2011) plantea que en el afán de definir individualidad basándose en un determinado tipo de relaciones entre los objetos, a priori se asume que tales objetos son individualizables y numéricamente distintos. En otras palabras, para que el

⁵⁶ La interpretación de la Mecánica Cuántica que se sigue en la mayoría de la literatura referente al tema de la indiscernibilidad es la Mecánica Cuántica Estándar. Sin embargo, en una interpretación tipo Mecánica de Bohm, las partículas ocuparían un lugar distinto espacio-temporalmente. Trataré este tema en el siguiente capítulo.

predicado “si uno posee spin- \uparrow el otro necesariamente posee...”, tenga sentido, debemos previamente haber supuesto que hay objetos e individuos. Pero si la idea de la propuesta reduccionista-epistémica en PII es buscar formas de individualizar usando nuestras mejores teorías científicas, pareciera ser que estamos usando el concepto de individuo para definir la noción de relación que después nos permitirá asumir que en realidad hay dos fermiones.

Hemos llegado a una situación que los defensores de la Metafísica Naturalizada a la Ladyman llaman *la subdeterminación de la Metafísica por la Física*. Tenemos dos formas de interpretar lo que ocurre con el problema de PII en Mecánica Cuántica. Por un lado, podríamos afirmar que a nivel fundamental no es posible individualizar las partículas y por lo tanto construir una Metafísica de acuerdo con esto, o por otro, planteamos propuestas tipo Saunders en las que se busca afirmar que las partículas son individualizables por lo menos débilmente y continuar desarrollando su correspondiente Metafísica.

Las distintas posturas con respecto a la posibilidad de individualizar las entidades⁵⁷ de la física fundamental pueden clasificarse según French⁵⁸ de la siguiente manera:

- (i) Las partículas cuánticas no son individuos.
- (ii) Las partículas cuánticas son individuos en virtud de una individualidad primitiva intrínseca.
- (iii) Los fermiones son individuos en virtud de ser débilmente discernibles.

⁵⁷ Hasta ahora he tratado de utilizar el término “entidades” en lugar del término “partículas”. El concepto es problemático puesto que utilizar el término partícula ya involucra toda una carga de intuiciones metafísicas en torno a qué tipo de entidades nos referimos. Sin embargo, en la mayoría de la literatura se sigue manejando la noción de “partícula cuántica” tal y como lo hacen Steve French o James Ladyman.

⁵⁸ “(i) No quantum particles are individuals (the received view).

(ii) Quantum particles are individuals in virtue of primitive intrinsic individuality

(iii) Elementary fermions are individuals in virtue of being weakly discernible

Véase French (2011,p29)

Cada una de estas posturas tiene una carga Metafísica distinta. Los defensores de REO sostienen que eliminando los objetos y postulando que la estructura es todo lo que hay en el mundo, las distintas cargas Metafísicas convergen a una sola: la Metafísica naturalizada. La solución a la *subdeterminación* por los defensores del Realismo Estructural Óptico es postular que en realidad no hay nada que individualizar: a nivel fundamental no existen los objetos, sólo hay estructura. Metafísica y postular que: todo lo que hay es estructura. Esto pretende resolver el problema del cambio de ontología de una teoría a otra puesto que lo que importa para nuestro conocimiento del mundo es la estructura que se conserva, y por otro lado, coincide con el hecho de que nuestras mejores teorías al abandonar la noción de objeto, nos dan únicamente conocimiento estructural⁵⁹.

3.6 Realismos estructurales ópticos.

Es posible clasificar los tipos de Realismo Estructural Óptico de la siguiente manera⁶⁰:

- a) REO radical (REO-R): Se postula que no existen objetos y que todo lo que hay es estructura.
- b) REO (REO1): Se postula que la estructura es ontológicamente primitiva, mientras que los objetos y propiedades no lo son.
- c) REO o moderado (REOM): Se postula que los objetos y las relaciones son ontológicamente primitivos, pero las propiedades no lo son.⁶¹

Tanto (a) como (b) son llamados en la literatura REO-eliminativistas (REO-E). Frigg y Votsis señalan que la principal diferencia entre REO-R y REO1⁶² “radica

⁵⁹ Como señalé al inicio del capítulo, esta estructura no es una estructura matemática como la que defienden los defensores del realismo estructural epistémico, la estructura de REO pretende ser una estructura física.

⁶⁰ Véase Ainsworth (2010) y Frigg y Votsis (2011).

⁶¹ La propuesta del Realismo Estructural Óptico Moderado es, desde mi perspectiva, la versión más prometedora de REO. Volveré a ella en el Capítulo final de este trabajo.

⁶² “While ROSR insists on an extensional treatment of relations that is standard in mathematical logic, EOSR allows for relations that have intensions; that is, fundamental relations can be relations like ‘being larger than’ rather than only ‘standing in a transitive relation’. In other words, relations are interpreted. Véase Frigg & Votsis (2011, 262)

en el tratamiento de las relaciones. Mientras que REO-R insiste en conceptualizar las relaciones a la manera de la lógica matemática, REO1 permite que las relaciones tengan intencionalidad. Es decir, las relaciones fundamentales pueden ser relaciones del tipo “*más grande que*” en lugar de relaciones que solamente se definen a partir de una relación transitiva. En otras palabras, las relaciones son interpretadas”.

La principal crítica para REO-E es que no pueden existir relaciones *sin relata*. De acuerdo a esta objeción las relaciones no pueden ser reales, a menos que haya cosas que sean relacionadas a través de ellas. Los defensores de REO-E han dado dos principales respuestas a esta crítica⁶³:

- 1) Ladyman y Ross (2007) señalan que la mayoría de las relaciones poseen *relata*, pero que un análisis más cercano devela que esas relata se convierten en estructuras también. Lo que aparenta ser un objeto en realidad es a su vez estructura. Siempre que creemos encontrar un objeto a nivel fundamental, descubrimos que éste es a su vez estructura y así *ad infinitum*.
- 2) La segunda respuesta atañe al hecho de que las relaciones que forman la estructura en REO no son relaciones extensionales. No es una estructura abstracta lo que define al mundo, sino una estructura concreta. La pregunta por los objetos que instancian la estructura se vuelve similar a los problemas metafísicos de la llamada “bundle theory” de Hume: es posible definir ontológicamente un objeto a partir de sus propiedades, sin necesidad de postular la existencia de un sustrato que las contenga.

Finalizo este capítulo resumiendo los tres niveles de justificación para REO: un nivel metafísico en el que se discute la viabilidad de la Metafísica Naturalizada y los problemas que implica la regla de la “Supremacía de la física” así como el “Principio de Clausura Naturalista”. Un nivel ontológico donde se debaten

⁶³ Véase Frigg y Votsis (2011, 263-264)

cuestiones sobre la atribución de propiedades o la individualidad de los objetos a partir de un conocimiento puramente estructural, así como la posibilidad de la existencia de una estructura física que no posea objetos. Y finalmente, un nivel físico donde se discute la interpretación de la Mecánica Cuántica, la Relatividad Especial y la Relatividad General, partiendo de la idea de que son teorías que ponen en duda la existencia de entidades más allá de la estructura en la que se instancian. En el siguiente capítulo presentaré las objeciones contra REO desde *el problema de la medición en Mecánica Cuántica*. El punto central de estas objeciones es plantear que mientras no se resuelva este problema, es poco sostenible extraer proposiciones metafísicas a partir de la Mecánica Cuántica. Además se pone en cuestión el hecho de postular que la Mecánica Cuántica es una teoría fundamental.

Capítulo IV

Objeciones contra REO-Eliminativista desde el Problema de la Medición en la Mecánica Cuántica

El Realismo Estructural Óptico afirma que su principal línea de justificación radica en las afirmaciones provenientes de las teorías físicas contemporáneas. La Mecánica Cuántica es postulada dentro de REO-Eliminativista (REO-E) como la teoría fundamental desde la cual es posible extraer proposiciones metafísicas que nos describan qué es lo que hay en el mundo. En este capítulo analizaré algunas críticas que se han elaborado contra el proyecto de REO-E. Primero describiré a grandes rasgos los postulados de la Mecánica Cuántica Estándar así como el llamado *problema de la medición*. Después haré una descripción de las distintas teorías cuánticas que emergen como solución a dicho problema. Uno de los objetivos de este trabajo es justificar el Realismo Estructural Óptico Moderado sobre REO-E, por lo tanto, es necesario analizar algunos detalles técnicos de las dos propuestas más sólidas que resuelven el problema de la medición: Mecánica de Bohm y GRW. Al final de este capítulo, argumentaré que mientras no se opte por una de las posibles soluciones al problema de la medición, es imposible considerar a la Mecánica Cuántica como una teoría fundamental y mucho menos elaborar una metafísica naturalizada basándonos en ella.

4.1 Mecánica Cuántica Estándar.

Si llamamos “estado” del sistema a todo lo que necesitamos para especificar un sistema físico en un tiempo dado, la Mecánica Cuántica Estándar⁶⁴ (MCE) nos plantea lo siguiente⁶⁵:

⁶⁴ Por Mecánica Cuántica Estándar asumiré el formalismo y la interpretación que se encuentran comúnmente en los libros de texto. En particular, se habla de un proceso A, lineal y determinista, y un proceso B que interrumpe al primero cuando medimos, es decir, colapsa la función de onda. Esta interpretación del formalismo es la que plantearon Dirac y Von Neumann entre otros.

- 1) Existe un objeto matemático ψ llamado la función de onda que representa el estado de cualquier sistema físico.

La función de onda $\psi = \psi(q)$ es una función de la configuración $q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_N)$ donde N es el número de partículas del sistema. Cada $q_i \in \mathcal{R}^3$ con $i = 1, \dots, N$ nos da tres grados de libertad para la función de onda, tal que ésta vive en un espacio de dimensión $d=3N$. Este espacio \mathcal{R}^{3N} es llamado el espacio de configuración. La función de onda es entonces un objeto matemático que vive en el espacio de configuración y que está definida sobre los números complejos:

$$\psi: \mathcal{R}^{3N} \rightarrow \mathbb{C}$$

El conjunto de las funciones de onda forman un *Espacio de Hilbert*⁶⁶.

- 2) La función de onda ψ evoluciona de acuerdo a una ecuación diferencial determinista y lineal llamada *la ecuación de Schrödinger*:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H \psi$$

Donde $\hbar = h/2\pi$, h es la constante de Planck y H es el hamiltoniano⁶⁷ no-relativista.

- 3) Las propiedades del sistema (e.g, posición, energía, momentum) se representan por medio de operadores lineales que actúan en el espacio vectorial correspondiente. La relación entre las propiedades y los operadores está dada por *la regla Eigenvector-Eigenvalor*: Un estado posee el valor λ de una propiedad representada por el operador O si y sólo si ese estado es un eigenvector de O con eigenvalor λ .⁶⁸

⁶⁵ Existen otras formulaciones de la teoría: la formulación matricial, integrales de trayectoria, espacio fase, etc. Para una presentación de nueve formulaciones distintas. Véase Styer, D. F., Balkin, M. S., Becker, K. M., Burns, M. R., Dudley, C. E., Forth, S. T., ... & Wotherspoon, T. D. (2002).

⁶⁶ Un espacio de Hilbert es un espacio vectorial con un producto interno que es completo respecto a la norma vectorial definida por el producto interno.

⁶⁷ El hamiltoniano H , representa la energía total del sistema. En Mecánica Cuántica es un operador definido sobre el espacio de Hilbert del sistema y nos da los posibles valores de energía de un sistema físico.

⁶⁸ Véase Okon (2014)

- 4) La regla de Born nos permite conectar las propiedades asociadas a los operadores con lo que veremos en el laboratorio. Por ejemplo, si tenemos que el estado del sistema escrito en la base asociada a la posición está dado por la superposición:

$$\alpha \psi_1 + \beta \psi_2$$

La regla de Born nos indica que la probabilidad de que al medir el sistema lo encontremos en el estado ψ_1 es α^2 y que la probabilidad de que al medirlo lo encontremos en el estado ψ_2 es β^2 . Si el estado del sistema no está en una superposición, la *regla Eigenvector-Eigenvalor* nos indica que el estado posee esa propiedad con probabilidad 1.

- 5) Cuando se realiza una *medición* A sobre un estado ψ_1 y el resultado es α el estado del sistema salta instantáneamente a un eigenestado con dicho eigenvalor.

La Mecánica Cuántica Estándar nos da un algoritmo en el que obtenemos ciertos resultados a partir de la resolución de una ecuación; después nos da una regla mediante la cual usamos esos resultados para hacer predicciones probabilísticas sobre lo que mediremos.

4.2 El problema de la medición

La paradoja del gato de Schrödinger no es más que un síntoma de la vaguedad en la interpretación de la teoría por parte de sus creadores. El hecho de que no veamos superposiciones macroscópicas y que por otro lado la superposición de estados sea utilizada para explicar un sinnúmero de fenómenos que ocurren a nivel microscópico llevó a una serie de especulaciones en torno a la naturaleza de las entidades que la teoría postula. Es clave plantear que los postulados de la Mecánica Cuántica Estándar hablan directamente del concepto de “Medición” sin definir exactamente qué es una medición. El problema radica en que la medición no es algo externo a la descripción del mundo en Mecánica Cuántica Estándar y

por lo tanto es necesaria una definición clara de lo que es una medición. Si el acto de medir nos lleva del proceso A (lineal y determinista) al proceso B (resultados definidos), la vaguedad en el concepto de medición provoca que la teoría sea ambigua. Maudlin⁶⁹ presenta *el problema de la medición* estableciendo que en las formulaciones de la Mecánica Cuántica, las siguientes tres proposiciones son incompatibles:

- 1) La función de onda provee la descripción completa de cualquier sistema físico.
- 2) La función de onda siempre evoluciona de acuerdo a la ecuación de Schrödinger.
- 3) Siempre tenemos mediciones en el laboratorio que poseen resultados definidos.

Si la función de onda provee la descripción completa de cualquier sistema físico y a su vez ésta evoluciona vía Schrödinger, necesariamente tendríamos que ver estados de superposición macroscópica y no tendríamos porque ver siempre resultados definidos en el laboratorio. Si por otro lado, tenemos resultados definidos en el laboratorio y la función de onda evoluciona vía Schrödinger, tendríamos que concluir que la función de onda no nos da una descripción completa del sistema físico puesto que falta algo que conecte la evolución determinista y lineal con los resultados que vemos en el laboratorio. Finalmente, si la función de onda nos da una descripción física completa del sistema y a su vez tenemos resultados definidos en el laboratorio, tendríamos que abandonar la evolución lineal vía Schrödinger e invocar algún otro proceso.

Bell⁷⁰ había propuesto dos estrategias que pueden verse como salidas a este trilema.

- a) Negar (1) y añadir algo además de la función de onda, que haga que tengamos descripción completa de los sistemas físicos.

⁶⁹ Véase Maudlin (1995)

⁷⁰ Véase Bell (1987).

- b) Negar (2) y permitir que la función de onda evolucione con una ecuación diferente a la ecuación de Schrödinger.

Tenemos entonces una serie de teorías cuánticas que pueden construirse siguiendo las estrategias de Bell⁷¹.

Von Neumann⁷² (Mecánica Cuántica Estándar): La propuesta de introducir un colapso al medir puede verse como una estrategia tipo (b). Lo que Von Neumann propone es que durante el proceso de medición la evolución vía Schrödinger deja de ser válida y la superposición de estados colapsa probabilísticamente hacia uno de ellos. El problema con esta propuesta es que el concepto de medición no está definido de una manera precisa. Así que no tenemos una noción clara de cuándo y dónde ocurre el colapso del sistema al medir.

Bohr: La estrategia de Bohr puede entenderse mejor si la ubicamos en teorías tipo (a). Esta interpretación propone la necesidad de la mecánica clásica para poder entender el mundo descrito por la teoría cuántica. Las dos teorías: la mecánica clásica y la mecánica cuántica serían complementarias. Tenemos acceso al mundo clásico porque éste se adecúa a nuestras capacidades cognitivas, mientras que el mundo cuántico nos es oscuro e incomprensible porque escapa a lo que vemos ordinariamente en el mundo macroscópico. La famosa dualidad onda-partícula sería un concepto necesario para nosotros puesto que las categorías “onda” y “partícula” son nociones que nos son útiles en nuestras teorías clásicas. Tenemos así las dos descripciones que para Bohr son complementarias: la descripción clásica del mundo en donde no vemos superposiciones y una descripción cuántica en donde las hay. El problema de esta propuesta es que nunca especifica dónde establecemos un corte entre el mundo clásico y el mundo cuántico. ¿A las cuántas partículas consideramos algo como

⁷¹ Existe otra estrategia que consiste en negar (3) y postular que no tenemos resultados definidos en el laboratorio y que todos los resultados en realidad ocurren en universos diferentes; este camino lleva a interpretaciones de tipo Muchos Mundos. Este tipo de interpretaciones plantea problemas que por momentos son más graves que el propio problema de la medición. Para los objetivos de esta tesis, dejaré de lado este tipo de propuestas.

⁷² Véase Von Neumann (1955).

clásico? Mientras los partidarios de esta interpretación no den una metodología sobre cómo dividir estos dos mundos supuestamente complementarios la interpretación se muestra insostenible.

Wigner⁷³: Esta propuesta combina las estrategias (a) y (b). Necesitamos algo más que la función de onda para poder dar cuenta de por qué no vemos superposiciones macroscópicas en el mundo, además hay un colapso que modifica la evolución de la ecuación de Schrödinger. Wigner propone que es la conciencia lo que define al observador y que ésta es la causante del colapso de la función de onda. Hay una dualidad entre el mundo físico y la naturaleza de la conciencia; la interacción de estos dos aspectos de la realidad, provocan que veamos resultados definidos en el laboratorio. La conciencia del observador no puede estar en superposición por sus características y esto es lo que rompe con los estados superpuestos. Propuestas de este estilo son bastante especulativas y se enfrentan al problema de definir con exactitud qué es la conciencia para poder resolver el problema de la medición.

Finalmente podemos plantear lo que se denomina en la literatura “Mecánica cuántica sin observadores”. Este tipo de teorías son las más viables y sólidas para resolver el problema de la medición. Las teorías de este tipo no recurren a ningún tipo de conciencia o de dualidades complementarias entre el mundo macroscópico y el mundo microscópico. Son propuestas que incluso describen sin ningún tipo de ambigüedad lo que ocurre cuando medimos.

4.3 Mecánica cuántica sin observadores I: Mecánica de Bohm

Esta propuesta sigue la estrategia tipo (a). Propone que hay que agregar algo a la función de onda para poder tener una descripción física completa del sistema. Lo que se agrega es la existencia de partículas con trayectorias perfectamente definidas. La teoría fue desarrollada por David Bohm en 1952. La versión más

⁷³ Véase Wigner (1967)

accesible de la Mecánica de Bohm⁷⁴ es la que proponen Dürr, Goldstein, y Zangüí⁷⁵.

En esta teoría el estado de un sistema compuesto por N-partículas está dado por la dupla (ψ_t, Q_t) donde $\psi_t = \psi_t(q)$ es la función de onda del sistema y $Q_t = (Q_1(t), \dots, Q_N(t))$, representa la configuración de las N partículas que componen el sistema. Q_k es la posición de las partículas en \mathfrak{R}^3 . Por lo tanto Q_t vive en el *espacio de configuración* \mathfrak{R}^{3N} , es decir, el espacio de posibles posiciones que un sistema físico compuesto de N partículas podría tener.

A diferencia de la Mecánica Cuántica Estándar en donde sólo tenemos un algoritmo para predecir posibles mediciones y no nos dice nada sobre qué tipo de ontología postula, la Mecánica de Bohm nos dice que lo que hay en el mundo son partículas con trayectorias definidas. La función de onda evoluciona con la ecuación de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H \psi$$

Por otra parte, las partículas evolucionan de acuerdo a la ecuación guía:

$$\frac{dQ_k}{dt} = v_k^\psi(Q_1, Q_2, \dots, Q_N) = \frac{\hbar}{m_k} \operatorname{Im} \frac{\psi^* \nabla_k \psi}{\psi^* \psi}(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_N)$$

las m_k , $k = 1, 2, \dots, N$, son las masas de las partículas. La función de onda aquí define un campo de velocidades v^ψ para las partículas. En Mecánica de Bohm ψ representa la función de onda de todo el sistema. El hecho de que la velocidad de cada partícula dependa de la posición de todas las demás partículas del sistema hace que la teoría sea explícitamente no local: lo que le ocurre a cualquier partícula en cualquier parte del sistema puede afectar instantáneamente a todas las demás. Pero por las características matemáticas de la teoría es posible asociar *funciones de onda efectivas* que describen sistemas físicos particulares. En otras

⁷⁴ Existen dos formulaciones de la Mecánica Bohmiana: La versión de *potencial cuántico* y la versión de la *ecuación guía*. Por razones de espacio me ocuparé sólo de la formulación de la ecuación guía. Para una caracterización de estas dos formulaciones. Véase Solé (2010) cap, II.

⁷⁵ Véase Dürr, Goldstein, Zanghi (1992)

palabras, hay situaciones en las que el movimiento de un conjunto de partículas bohmianas es independiente de la evolución dinámica del resto de partículas en el sistema⁷⁶.

Los postulados de la Mecánica de Bohm son:

- 1) El estado de un sistema físico cerrado de N partículas se caracteriza suministrando (i) la posición de cada una de las partículas y (ii) una función matemática que denominaremos función de onda universal o campo cuántico.
- 2) La evolución de la función de onda universal ψ viene dada por la ecuación de Schrödinger.
- 3) La velocidad de cada partícula viene dada por la ecuación guía.
- 4) El cuarto postulado de la Mecánica de Bohm establece que, en el instante t_0 , la distribución de probabilidad de la posición de las partículas viene dada por:

$$\rho = |\psi|^2$$

El último postulado es la llamada *hipótesis del equilibrio cuántico*⁷⁷. La probabilidad aparece en Mecánica de Bohm de manera epistémica: la teoría es totalmente determinista y es nuestra ignorancia respecto a la posición de todas las partículas en el universo la que nos hace poder predecir sólo probabilidades en los sistemas cuánticos. *La hipótesis del equilibrio cuántico* hace que las predicciones de la Mecánica de Bohm coincidan con las que nos da la Mecánica Cuántica Estándar, sin embargo, no hay en Mecánica de Bohm ningún tipo de

⁷⁶ Solé realiza la siguiente descripción de las características de la Mecánica de Bohm: "La ecuación de Schrödinger es una ecuación diferencial de primer orden respecto del tiempo. Así, una solución de la misma queda completamente determinada suministrando el valor de la función de onda en un tiempo inicial. Por otro lado, la ecuación guía especifica directamente la velocidad de las partículas (esto, es la derivada primera de la posición respecto del tiempo) como una función univaluada de la función de onda. Por tanto, dada la función de onda o campo cuántico, las trayectorias de las partículas quedan completamente determinadas si se especifica su configuración inicial." Véase Solé (2010).

⁷⁷ Para un análisis de la hipótesis del equilibrio cuántico y sus consecuencias probabilísticas Véase Dürr, Goldstein, Zangüí (1995).

interrupción por colapso a la evolución de la función de onda vía Schrödinger. En el caso de estados en superposición, las partículas están en alguno de los estados superpuestos. En un gato de Schrödinger por ejemplo, el gato está vivo o muerto puesto que las partículas que lo conforman están realmente en una situación o en otra.

4.4 Mecánica cuántica sin observadores II: GRW

Las teorías de este tipo siguen la estrategia de Bell tipo (b) al resolver el problema de la medición: Modificar la ecuación de Schrödinger. Pero, a diferencia de la propuesta de Von Neumann, no hay en sus postulados ninguna referencia hacia el acto de “medir”. La teoría más sólida en este caso es la llamada de “Colapso espontáneo” o “Colapso Dinámico”. El proyecto fue iniciado por Ghirardi, Rimini y Weber (GRW) en los años 80. En GRW la función de onda evoluciona según la ecuación de Schrödinger hasta el instante en el que ocurre un colapso. El colapso no es provocado por ninguna medición, simplemente es una ley de la naturaleza y tiene una dinámica que es posible describir en términos precisos.

Si la principal objeción contra la noción de colapso en la propuesta de von Neumann es el hecho de no especificar, cómo, cuándo y dónde ocurre el colapso, en la versión más simple de GRW eso se resuelve de la siguiente manera⁷⁸:

- 1) ¿Cómo?: Si un colapso ocurre en la i -ésima partícula, en el punto x , la función de onda es instantáneamente multiplicada por una función Gaussiana (apropiadamente normalizada).

$$G(q_i, x) = K e^{-\frac{(q_i - x)^2}{2d^2}}$$

donde d representa la localización del colapso.

Denotamos la función de onda después de la multiplicación como:

⁷⁸ Véase Ghirardi (2011)

$$L_i(q_1, q_2, \dots, q_N; x) = \psi(q_1, q_2, \dots, q_N) G(q_i, x)$$

- 2) ¿Dónde?: La localización de los colapsos (hits) ocurre con una densidad de probabilidad $P(x)$ que está dada por la integral del módulo al cuadrado de la función L_i sobre el espacio $3N$ dimensional. Esto implica que los hits ocurren con mayor probabilidad en aquellos lugares donde, en la descripción de la Mecánica Cuántica Estándar, existe una probabilidad alta de encontrar la partícula. Nótese que la descripción anterior introduce un elemento no lineal y estocástico en la dinámica. La constante K de la Gaussiana $G(q,x)$ se elige de tal forma que la integral sobre todo el espacio es igual a 1.
- 3) ¿Cuándo?: Se asume que los colapsos ocurren de manera aleatoria en tiempos distribuidos de acuerdo a una distribución de Poisson, con una frecuencia igual a λ .

Cuando ocurren los colapsos, se suprimen las superposiciones lineales de los estados en los cuales la misma partícula está bien localizada en diferentes posiciones separadas por una distancia más grande que d . La probabilidad de los colapsos está dada por $N\lambda$, donde N es el número de partículas del sistema; en el caso de un sistema macroscópico con $N = 10^{23}$ partículas y $\lambda = 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ tenemos 10^8 colapsos por segundo. Esto explica por qué solo vemos los efectos de los estados en superposición en sistemas que consideramos microscópicos mientras que en el mundo clásico los objetos nos parecen tener posiciones bien definidas. En un gato de Schrödinger, de acuerdo a GRW, el gato está vivo y muerto sólo mientras que el sistema tarda en colapsar, es decir, una cantidad de tiempo menor a 10^{-8} segundos, algo completamente alejado hasta ahora de nuestras capacidades de detección en el laboratorio.

El problema de la asignación de propiedades a las entidades de la teoría tiene un carácter distinto en las teorías de Colapso dinámico como GRW. Recordemos que en Mecánica Cuántica Estándar la regla Eigenvalor-Eigenvector nos indica

que dado un operador en el espacio de Hilbert, podemos asociar los eigenvalores a los valores de la propiedad física que representa ese operador. Como en las teorías de GRW el colapso no nos lleva a un eigenestado perfectamente definido, se tiene que suplir esta regla con alguna otra que nos conecte el formalismo matemático con las propiedades de los objetos físicos⁷⁹.

Volveré a las características de GRW y Mecánica de Bohm al analizar el Realismo Estructural Óptico Moderado, por ahora es suficiente con esta descripción del problema de la medición y sus posibles soluciones para objetar el proyecto de REO.

4.5 Objeciones contra REO-E desde el Problema de la Medición.

Como se analizó en el Capítulo III, el Principio de Clausura Naturalista (PCN) nos restringe a sólo enunciar proposiciones metafísicas justificables en nuestras teorías fundamentales. Establecer que la Metafísica está subdeterminada por la Física en el contexto de la noción de individualidad, involucra aceptar las siguientes dos premisas:

- a) La Mecánica Cuántica es una teoría física fundamental.
- b) De acuerdo a lo que nos dice esta teoría, existen situaciones donde las entidades cuánticas no satisfacen el Principio de los Indiscernibles (PII) y por lo tanto, a nivel cuántico la noción de individualidad es puesta en duda. Tenemos entonces dos paquetes metafísicos provenientes de cómo interpretemos la teoría: individuos o no-individuos.

Es posible objetar ambas premisas desde el *problema de la medición*.

⁷⁹ En otras palabras, lo que tenemos es una función cuyos valores están centrados alrededor de una región pero cuyos remanentes nunca desaparecen. Este es el llamado en la literatura “problema de las colas”. Véase Albert, Loewer (1996)

4.6 ¿Es la Mecánica Cuántica una Teoría Fundamental?

De manera simple e intuitiva se podría asumir que una teoría fundamental es aquella cuyo alcance involucra todo lo que hay en el mundo. Siguiendo el PCN, una teoría de este estilo debe conectar las teorías especiales y explicarlas en base a sus propias premisas⁸⁰. Los problemas que la Mecánica Cuántica enfrenta con respecto a la Relatividad General la dejarían fuera de esta clasificación. La Mecánica Cuántica no puede explicarnos aún la gravitación⁸¹ y por lo tanto no nos describe todo lo que vemos en el mundo. Bastaría esta objeción para descartar a la Mecánica Cuántica como teoría fundamental, sin embargo, los defensores de REO-E, argumentan a favor de ella en este sentido en base a la división operacional entre teorías fundamentales y teorías especiales.

Ladyman⁸² define ciencia especial de la siguiente manera: “Una ciencia es especial si y sólo si su objetivo son generalizaciones tales que las mediciones tomadas desde áreas restringidas del universo, y/o en escalas restringidas, son fuentes potenciales de confirmación y/o falsificación de esas generalizaciones.”

La biología sería una ciencia especial puesto que cualquier medición que sea relevante al estudio de la vida estaría restringida a un espacio (la tierra) y a un cierto tiempo (la edad en la que se cree apareció la vida en el planeta). Por otro lado, una ciencia fundamental no está restringida espacio-temporalmente. Sólo la física satisface este requisito.

Sin embargo, como he señalado, en la interpretación estándar de la Mecánica Cuántica (MCE), la aplicación de la teoría considera una división entre el sistema bajo investigación y el aparato de medición. El sistema se estudia desde una

⁸⁰ Véase Hermens (2013, pp 4-6).

⁸¹ Teorías como *Loop quantum gravity* o Supercuerdas, son muy recientes como para caracterizarlas de empíricamente exitosas y por lo tanto, no tenemos aún buenas razones para pensar que la Mecánica Cuántica nos describe también la gravitación.

⁸² “a science is special iff it aims at generalizations such that measurements taken only from restricted areas of the universe, and/or at restricted scales are potential sources of confirmation and/or falsification of those generalizations.” Véase Ladyman (2007, p195).

descripción cuántica mientras que el aparato es considerado para fines prácticos como entidad clásica, además de ser necesario un observador. La Mecánica Cuántica en su interpretación estándar está restringida espacio-temporalmente puesto que sus generalizaciones sólo pueden confirmarse y/o falsearse una vez que hemos establecido una división entre sistema y aparato de medición. Por lo tanto, si seguimos la definición de Ladyman: la Mecánica Cuántica Estándar sería una ciencia especial, no una ciencia fundamental.

Si tratamos de obtener conclusiones metafísicas del tipo “no hay objetos, sólo estructura”, a partir de una ciencia especial y no de una ciencia fundamental, estaríamos postulando algo que va en contra del intento de unificación del conocimiento científico por parte de la Metafísica Naturalizada de Ladyman y Ross.

Supongamos que algunos defensores de REO-E intentan evitar esta inconsistencia modificando la definición de ciencia fundamental. Cualquier otra opción que se argumente debe contener la versión más intuitiva de una teoría fundamental, es decir, debe decirnos algo sobre el universo en su conjunto. Asociar un estado cuántico a todo el universo desde la Mecánica Cuántica Estándar no sólo es imposible sino absurdo: ¿Dónde está el aparato de medición que interactúa con todo el universo?, ¿cómo hacemos la división clásica/cuántica si lo que mediremos es todo el universo?, peor aún, ¿quién lo medirá?⁸³.

La discusión sobre si la Mecánica Cuántica es o no una teoría fundamental no tiene sentido mientras no se resuelva *el problema de la medición*. Los defensores de REO deben ocuparse de sus distintas aristas y sus posibles soluciones para dar una argumento viable en cuanto la supremacía de la estructura por sobre los objetos a un nivel ontológico.

4.7 REO-Eliminativista y el problema de la medición.

El fundamento de REO-E es asumir que las entidades cuánticas no satisfacen PII y que por lo tanto debemos abandonar los objetos y quedarnos sólo con la

⁸³ Véase Bell (1987)

estructura. Pero teorías cuánticas tipo Mecánica de Bohm ponen en duda dicha conclusión. Recordemos que en esta teoría además de la función de onda, existen partículas con trayectorias espacio-temporales bien definidas. Estas partículas serían discernibles a la manera de las partículas clásicas tradicionales⁸⁴ y por lo tanto cumplirían con PII.

Ladyman descalifica teorías tipo Bohm estableciendo que si bien es la teoría cuántica que más satisface a los realistas científicos “... filósofos y científicos la rechazan por ser presuntamente ad hoc, además de que no contiene la relativa simplicidad del formalismo estándar, esto es por su manifiesta no localidad y por su incompatibilidad con la relatividad.⁸⁵” Las soluciones al problema de la medición de este tipo, continua Ladyman, “...resultan en teorías que son empíricamente indistinguibles de la Mecánica Cuántica Estándar y que son, extremadamente difíciles de convertir en teorías de campo adecuadas.⁸⁶”

En cuanto a teorías tipo GRW, su principal objeción es su “incompatibilidad con la relatividad especial”, además de estar basadas en un colapso que debe ser justificado como un proceso físico, algo que atañe a los físicos y que es ajeno a la discusión filosófica por lo que, según él, no tiene mucho que decir.

El problema de la medición para los defensores de REO pareciera ser irrelevante puesto que para ellos, no es necesario que demos cuenta de los objetos macroscópicos a partir de la Mecánica Cuántica, basta con garantizar que tengamos poder predictivo tal y como lo hace la regla de Born al darnos la probabilidad de lo que veremos en el laboratorio. El aparato de medición no tiene porque ser modelado como un objeto cuántico, ellos asumen que es un “patrón emergente” que surge a partir de la estructura fundamental que constituye al mundo; este “patrón” puede ser modelado clásicamente.

Es posible establecer cuatro objeciones contra la postura de Ladyman en torno al *problema de la medición*.

⁸⁴ Véase Morganti (2004, p 92)

⁸⁵ “However, philosophers and physicists have often rejected Bohm theory because of its alleged ad hocness, lack of simplicity relative to the standard formalism, and also because of its manifest non-locality and hence incompatibility with relativity theory.” Véase Ladyman y Ross (2007, p180).

⁸⁶ “It also seems to result in theories that are empirically indistinguishable from regular QM and which are extremely difficult to turn into adequate field theories.” Véase Ladyman y Ross (2007, p180).

- 1) Si bien tanto la Mecánica Cuántica Estándar como Mecánica de Bohm o GRW tienen una región en la que realizan las mismas predicciones empíricas; existe un ámbito en el que la distinción entre lo cuántico y lo clásico se convierte en algo imposible. Es aquí donde Mecánica de Bohm y GRW hacen predicciones distintas a la Mecánica Cuántica Estándar⁸⁷. Esta sola distinción cancela la caracterización por parte de Ladyman de que Mecánica de Bohm o GRW son teorías ad-hoc.
- 2) En cuanto a la no-localidad, cualquier teoría cuántica debe dar cuenta de la violación de las desigualdades de Bell⁸⁸, esto incluye a la Mecánica Cuántica Estándar o a interpretaciones tipo Muchos Mundos⁸⁹.
- 3) Postular que el aparato de medición es un “patrón emergente” que se modela de manera clásica, nos lleva al mismo problema que la Mecánica Cuántica interpretada a la manera de Bohr. Ladyman tendría que darnos un procedimiento exacto sobre cómo hacer la división entre “patrón emergente” y sistema cuántico al momento de medir.
- 4) Decir que la respuesta a estas objeciones le corresponde a los físicos y no a los filósofos es insuficiente. Los defensores de REO-E interpretan una teoría física y justifican la Metafísica Naturalizada analizando los problemas de PII en las entidades cuánticas. Al hacer esto, están tomando

⁸⁷ Aún no es posible realizar este tipo de experimentos por limitaciones tecnológicas, pero lo importante para la objeción es que las predicciones son distintas en este ámbito.

⁸⁸ Después de los experimentos de Aspect en los 80's, prácticamente existe un consenso en torno a que cualquier teoría cuántica debe explicar la no-localidad observada en el laboratorio.

⁸⁹ Ladyman es ambiguo al tratar de no comprometerse con interpretaciones tipo Muchos Mundos y asume que es una interpretación con problemas no resueltos. Sin embargo, su proyecto a veces coquetea con una teoría de este estilo. Basta con decir que en el libro *Every-thing must go*, le dedica toda una sección (pp 175-180) al concepto de estructura y de emergencia en la interpretación de Muchos Mundos de Everett-Wallace-Saunders, mientras que a Mecánica de Bohm o GRW les dedica menos de media cuartilla (p181). Véase Ladyman y Ross (2007).

partido en un debate abierto entre los físicos sobre las distintas formas de resolver el problema de la medición. Su proyecto sería viable si nos argumentaran de manera mucho más precisa por qué descartar teorías como Mecánica de Bohm.

Al ser un proyecto de remplazo y no de cooperación, la Metafísica Naturalizada debe tomar en cuenta tanto a los que señalan la subdeterminación de la individualidad a nivel cuántico, como a los que proponen que no hay tal subdeterminación puesto que las partículas tienen trayectorias bien definidas espacio-temporalmente. El Principio de Clausura nos obligaría a analizar todas las teorías cuánticas y sus posibles respuestas al problema, algo que Ladyman se ha negado a realizar en los últimos diez años.

Sólo una forma de REO que se tome en serio el problema de la medición y que se ocupe de las distintas ontologías que se proponen a partir de su solución puede ser viable. Un proyecto de este estilo es el Realismo Estructural Óptico Moderado propuesto por Michael Esfeld y Vincent Lam. Me ocuparé de esta propuesta en el siguiente capítulo.

Capítulo V

Realismo Estructural Óptico Moderado

5.1.- Estructura

Una de las principales objeciones contra REO-E es su concepto de “estructura”. Si se establece que hay una supremacía ontológica de la estructura eliminando la existencia de los objetos, es necesario aceptar la existencia de una “estructura sin relata”. Esto no sólo es intuitivamente contradictorio sino que hace demasiado vaga la noción al tratar de buscar estudios de caso dentro de nuestras mejores teorías⁹⁰. No basta con que postulemos que hay un “isomorfismo parcial” entre la estructura de las teorías y el mundo. Los defensores de REO deben justificar tanto en el plano metafísico como epistémico por qué ese es el caso⁹¹.

Tomemos una estructura definida a partir de la teoría de conjuntos como $E = \langle A, R \rangle$. Esta estructura está formada por (i) un conjunto de objetos A y (ii) un conjunto de relaciones de R en el dominio A . Pensemos en un modelo como una estructura particular de este tipo elegida por alguna teoría científica⁹². REO-E postula que hay un tipo de isomorfismo entre esta estructura y el mundo⁹³: “Los miembros del dominio D_M pueden ser mapeados dentro del dominio D_M del

⁹⁰ Los defensores de REO-Eliminativista sostienen que el concepto de “estructura sin relata” se vuelve problemático debido a nuestros prejuicios metafísicos basados en la física clásica. En otras palabras, son nuestras capacidades cognitivas las que necesitan objetos para darle sentido a la noción de estructura, pero el mundo no tiene por qué adecuarse a nuestras limitaciones cognitivas. Véase Ladyman y Ross (2007, Cap 2).

⁹¹ Si bien esta tesis se ha concentrado principalmente en las objeciones contra REO desde la interpretación de la Mecánica Cuántica, los problemas que en el plano metafísico y epistémico tiene la propuesta, se han concentrado alrededor del concepto de “estructura”.

⁹² Para los propósitos de los defensores de REO-E, un modelo puede concebirse como una instanciación particular de una estructura dada. Las teorías especifican qué modelos hay y por lo tanto, qué estructuras existen. Véase Glick (2014, pp43-44).

⁹³ “the members of the domain D_M can be mapped onto the domain D_W of the world one-to-one while preserving all of the relations R .” Véase Glick(2014, p 44).

mundo preservando todas las relaciones R ". El problema con esta noción de estructura es que el isomorfismo se da entre estructuras abstractas: parece que REO-E reduce el mundo a una entidad puramente lógico-matemática⁹⁴.

P. Ainsworth⁹⁵ en su tesis doctoral, problematiza esta idea de la siguiente forma:

Consideremos una estructura dada como $\langle D, R \rangle$. Los defensores de REO-E nos dicen que esa estructura es el mundo. Pero esta estructura corresponde a muchos mundos posibles. Por ejemplo, esta estructura puede ser la que existe en un universo con una sola partícula cargada positivamente. La partícula podría tener únicamente la propiedad de estar cargada y no otra. Ahora bien, consideremos la misma situación pero en la cual la partícula tiene la única propiedad de poseer espín $\frac{1}{2}$ y ninguna otra. La estructura que la describiría sería la misma que en el primer caso. Es decir, una sola estructura abstracta puede describir una variedad de mundos posibles. Por lo tanto, el mundo no puede ser solamente una estructura abstracta. El mundo tiene propiedades no estructurales, lo que se evidencia al darnos cuenta de que una sola estructura puede asociarse a mundos distintos. Una propiedad P puede ser distinta en cada mundo: "La lección es que las propiedades matemáticas y sus relaciones son abstractas con respecto a las propiedades físicas y sus relaciones, en este sentido, la misma propiedad matemática o relación puede ser instanciada por un número de diferentes propiedades físicas o relaciones⁹⁶".

Cao⁹⁷ argumenta que ninguna estructura matemática puede tener significado físico si no es interpretada. Los defensores de REO-E han tratado de defenderse de esta objeción estableciendo que la estructura a la que se refieren no es una estructura sin interpretación sino una estructura física concreta. ¿Cuál es su diferencia?, Ladyman⁹⁸ afirma que la diferencia entre una estructura abstracta y

⁹⁴ Aunque parezca absurdo, hay quienes defienden que no hay otra cosa en el mundo más que entidades abstractas. Esta especie de "pitagorismo" asume que lo único que existe son matemáticas. Véase Tegmark (2008).

⁹⁵ Véase Ainsworth (2008, pp 158-160)

⁹⁶ "The lesson is that mathematical properties and relations are abstract with respect to physical properties and relations, in the sense that the same mathematical property or relation can be realised by a number of different physical properties or relations." Véase Ainsworth (2008, p158)

⁹⁷ Véase Cao (2003, p 59).

⁹⁸ Véase Ladyman(2003b,p 75).

una física concreta es que la última es causal. La estructura que REO-E postula como fundamental tiene un carácter modal. Sus relaciones pueden caracterizarse en términos de: necesidad, potencialidad, posibilidad y probabilidad. El carácter probabilístico de las relaciones es lo que le da su cualidad de modal. Esta estructura, es objetiva puesto que es ontológicamente independiente de nuestra capacidad para conocerla⁹⁹.

5.2.- La Metafísica del Realismo Estructura Óptico Moderado.

Michael Esfeld y Vincent Lam postulan¹⁰⁰ una forma de REO donde objetos y propiedades están a un mismo nivel ontológico. Esto evita el problema de conceptualizar una “estructura sin relata”. Los objetos son tan básicos como las estructuras donde se instancian. Sin embargo, los objetos en REO moderado, no poseen ninguna propiedad intrínseca, todas sus propiedades son relacionales. El problema fundamental de esta propuesta es darle sentido a las aparentes propiedades intrínsecas (monádicas) que poseen los objetos en las teorías científicas. En REO-moderado la distinción entre objetos y propiedades es conceptual, más que ontológica¹⁰¹: “No hay dos tipos de entidades, objetos y propiedades incluyendo relaciones o estructuras, eso implica una cierta relación de dependencia ontológica. La dependencia es sólo conceptual.”

Esfeld¹⁰² utiliza una analogía con la Metafísica de Spinoza¹⁰³ para explicar su propuesta: Las propiedades son “modos de ser¹⁰⁴” de los objetos. No hay una distinción ontológica entre los objetos y sus propiedades, los “modos de ser” son la única realidad de todo lo que hay en el mundo. La estructura proporciona a las entidades esos “modos de ser” que los hacen existentes y que les proporcionan

⁹⁹ Para una versión Humeana de OSR que niega el carácter modal de la estructura Véase Lyre (2010).

¹⁰⁰ Véase Esfeld y Lam (2011).

¹⁰¹ “There are not two types of entities, objects and properties including relations or structures, that entertain a certain relationship of ontological dependence. The dependence is only conceptual.” Véase Esfeld (2011, p 8).

¹⁰² Véase Esfeld y Lam (2011, p 8)

¹⁰³ Véase Spinoza (1877), en particular los axiomas al inicio del Libro I, ahí se definen los modos de ser a partir de la noción de atributo.

¹⁰⁴ Esfeld utiliza “ways of existence” para referirse a los “modos de ser” spinozianos.

ciertas propiedades¹⁰⁵: “Podemos dibujar una distinción conceptual entre los objetos y sus modos de ser, pero no existe tal distinción a nivel ontológico. Lo que hay en el mundo son solamente un tipo de entidades existiendo en varios modos de ser.” Ningún objeto existe fuera de esta estructura, esto implica que la existencia de los objetos depende de todos los demás objetos instanciados en ella¹⁰⁶: “No existen objetos en un dominio dado independientes uno de otro, ni están equipados con una identidad intrínseca.”

Los objetos en REO-moderado no son individuos puesto que no hay nada que los pueda distinguir unos de otros fuera de la estructura de propiedades relacionales en la que se instancian y sin la cual no existen. Sin embargo, una vez que están en la estructura, son “débilmente discernibles” a la manera de PII(3) que se analizó en el Capítulo III.

Frente al debate entre propiedades categóricas vs causales, que se ha desarrollado en la Metafísica Analítica, REO-moderado argumenta a favor de una estructura causal en la que los objetos que se instancian en ella adquieren las propiedades disposicionales que los definen.

Es posible situar el debate de la siguiente forma: En una Metafísica de propiedades categoriales (Humeana) las propiedades son puramente cualitativas, es decir, independientes de sus relaciones causales y nomológicas; las propiedades intrínsecas de los objetos son absolutamente ajenas al hecho que existan o no otros objetos en el mundo¹⁰⁷. Por otro lado, en una Metafísica de propiedades causales (No-humeana) como la que postula REO-moderado, se atribuyen a los objetos únicamente propiedades disposicionales. En otras palabras: todas las propiedades que posee un objeto se definen a partir del efecto que la propiedad causa en otro objeto.

Esfeld lo describe de la siguiente manera¹⁰⁸: “Tomemos la carga, por ejemplo: al ser una propiedad cualitativa, lo que la distingue otra propiedad como la masa, es

¹⁰⁵ “One can draw a conceptual distinction between objects and their ways of existence, but not an ontological one, applying to reality. In reality, there is only one type of entity, namely objects that exist in particular ways.” Véase Esfeld (2011, p 8)

¹⁰⁶ “the objects in a given domain do not exist independently of each other, being equipped with an intrinsic identity each.” Véase Esfeld (2011, p 8).

¹⁰⁷ Véase Esfeld (2009,p2)

¹⁰⁸ “Take charge for example: insofar as charge is a qualitative property, distinct from e.g. mass, it is the

el poder de construir un campo electromagnético, resultando en la atracción o repulsión de otra carga: Tanto el humeano como el anti-humeano están de acuerdo en las propiedades que hay en el mundo. Pero están en desacuerdo en cuanto a la ontología de esas propiedades: o son puramente cualitativas o son ciertas cualidades consistentes en el poder de producir ciertos efectos específicos”.

El carácter modal de la estructura de REO estaría dado por las relaciones causales que se posibilitan a partir de las propiedades disposicionales que los objetos adquieren al instanciarse en la estructura. El problema de distinguir entre estructuras matemáticas abstractas y estructuras físicas concretas, queda resuelto si asumimos que las estructuras abstractas no contienen relaciones causales mientras que las estructuras físicas se definen a partir de ellas.

La viabilidad de REO-moderado como proyecto de naturalización, estriba en hasta qué punto la Mecánica Cuántica y la Relatividad General son descriptibles desde este marco teórico. El llamado “enredamiento cuántico” es el punto clave que permite ligar la noción de estructura concreta con lo que ocurre en la Física contemporánea.

5.3.- Enredamiento y holismo.

El ejemplo más común de enredamiento cuántico es plantear un estado singulete de dos partículas cuánticas de la siguiente manera.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (1)$$

Si consideramos ambas partículas como el sistema cuántico, la suma total del spin de todo el sistema es cero. El enredamiento provoca que sólo podamos asignar la propiedad spin de manera bien definida a todo el sistema completo. El estado del sistema completo no superviene en estados que puedan atribuirse a

power to build up an electromagnetic field, resulting in the attraction of opposite-charged and the repulsion of like-charged objects. The Humean and the anti-Humean agree about the properties that there are in the world. They disagree about the ontology of properties – whether properties are pure qualities (quiddities) or whether their being certain qualities consists in the power to produce certain specific effects.” Véase Esfeld (2009, p5)

cada una de las entidades cuánticas tomadas individualmente¹⁰⁹: “No hay estados de espín en cada una de las partes que determinen el estado de espín de todo el sistema. Por el contrario, el estado del todo determina las correlaciones de los posibles valores numéricos definidos de espín en cualquier dirección espacial de las partes; estas correlaciones son del tipo: si uno de los dos objetos tiene espín hacia arriba en una dirección dada, el otro tiene espín hacia abajo en esa dirección.”

El estado cuántico representado en (1) es una superposición de la correlación “el primer objeto tiene espín hacia arriba y el segundo hacia abajo” con la correlación “el primer objeto tiene espín hacia abajo y el segundo hacia arriba”. Esta información no puede obtenerse si consideramos aisladamente cada una de las entidades que conforman el sistema. Lo único que podemos saber sobre cada entidad aislada, es que la probabilidad de obtener espín- arriba o espín- abajo al medir es de $\frac{1}{2}$.

Si separamos las entidades una distancia tipo espacio y medimos espín-arriba en un extremo, podemos inferir que de manera instantánea si medimos la otra entidad, esta aparecería con el valor espín abajo. Esta característica de los sistemas cuánticos implica su carácter no-local: si tenemos un sistema enredado tipo singulete y separamos las entidades de tal forma que pudiéramos mandar al otro lado del universo una de ellas, al medir el espín de una, perturbamos el estado de la otra de manera instantánea.

La no-localidad de la Mecánica Cuántica ha sido analizada desde el teorema de Bell¹¹⁰ y sus implicaciones. Los resultados del trabajo de Bell pueden resumirse enunciando que ninguna teoría física local puede reproducir todas las predicciones de la Mecánica Cuántica. En los años ochenta¹¹¹ Aspect comprobó experimentalmente los resultados de Bell. Podemos decir entonces sin ningún tipo de ambigüedad que independientemente de la interpretación de la Mecánica

¹⁰⁹ “there are no spin states of each of the parts that determine the spin state of the whole. Quite to the contrary, the state of the whole—and only the state of the whole—determines correlations between the possible definite numerical values of the spin in any spatial direction of the parts, namely correlations of the type that if one of the two objects has spin up in a given direction, the other one has spin down in that direction.” Véase Lam y Esfeld (2012, p 244).

¹¹⁰ Véase Bell (1987)

¹¹¹ Véase Aspect, Dalibard y Roger (1982).

Cuántica que elijamos, si somos realistas con respecto a la teoría, el mundo es no-local.

REO-moderado toma esta característica de la Mecánica Cuántica para establecer su noción de estructura. El enredamiento implica la dependencia de las propiedades de los objetos con respecto a la estructura en la que se instancian. Si la estructura está dada por las relaciones de los objetos, lo que le ocurre a uno de ellos, afecta al todo.

Esfeld¹¹² afirma que una metafísica basada en objetos con propiedades intrínsecas necesita forzosamente que los sistemas físicos sean independientes unos de otros. Las propiedades de un sistema formado por varios subsistemas supervienen de las propiedades que posee cada subsistema por separado. Una metafísica de este tipo es considerada atomista en el sentido de que postula entidades independientes unas de otras con propiedades intrínsecas. Frente a esta propuesta, REO-moderado afirma que si tomamos a la Mecánica Cuántica como teoría fundamental, no hay objetos de tipo atomista: todas las propiedades de las entidades son disposicionales y son definidas a partir de sus relaciones con otros objetos.

Esfeld¹¹³ explica su noción de Holismo Metafísico haciendo una analogía con el Coherentismo en Epistemología. En el Coherentismo, tenemos una red de creencias, cada una con el mismo peso epistémico, de tal manera que la justificación epistémica se realiza a partir de la relación de cada creencia con la otra. Lo que le da sentido a una creencia es su relación con el todo; una creencia aislada no puede justificar nada. Ahora llevemos esa misma noción a la metafísica: no tiene sentido hablar de las propiedades de un objeto si no es a partir de su relación con el todo.

Mientras que REO-E se vuelve vulnerable a interpretaciones de la Mecánica Cuántica tipo Bohm, donde las partículas son discernibles vía su posición espacio-temporal. REO-moderado depende de la noción de enredamiento cuántico para sostenerse. Pero, como he planteado, la noción de enredamiento

¹¹² Véase Esfeld (2009, p8)

¹¹³ Véase Esfel (2009, p4)

cuántico y la no-localidad implícita en sus consecuencias, no depende de qué teoría cuántica elijamos como solución al problema de la medición.

En la última parte de este capítulo analizaré un estudio de caso concreto en el que REO-moderado es usado como heurística al momento de proponer una ontología dentro de las teorías cuánticas. Antes, haré una revisión de las propuestas para una ontología en Mecánica Cuántica, volviendo al caso concreto de Mecánica de Bohm y GRW.

5.4.- Ontología en teorías cuánticas.

El problema de asignar una ontología a una teoría cuántica se ha concentrado en los últimos años al debate entre dos opciones¹¹⁴:

- a) Realismo de la función de onda: se asume que ψ es una entidad física. La postura se ha centrado en darnos una explicación del mundo macroscópico a partir de la función de onda como un objeto real que habita en un espacio multidimensional.
- b) Ontología primitiva: La ontología de la teoría es lo que hay en el espacio físico tridimensional. Esta ontología no puede ser inferida del formalismo de la Mecánica Cuántica; es necesario postularla a partir de lo que vemos en el mundo.

Tanto GRW como Mecánica de Bohm pueden interpretarse desde estas dos aristas con ontologías diferentes.

- i) Mecánica de Bohm desde el realismo de la función de onda.

Ser realistas con respecto a la función de onda significa postular que ésta es una entidad física que vive en un espacio de $3N$ ¹¹⁵ dimensiones. El espacio físico tridimensional en el que vivimos sólo sería una apariencia de nuestras

¹¹⁴ Para un análisis de los problemas de ambas posturas, Véase Allori (2013)

¹¹⁵ Cómo hemos visto, N representaría el número de partículas en el universo.

capacidades cognitivas. En el caso de Mecánica de Bohm, los partidarios de esta postura¹¹⁶ afirman que todo lo que hay en el universo es la función de onda total ψ y una sola partícula que es guiada por ésta en un espacio multidimensional. El espacio multidimensional sería un primitivo y por lo tanto no se construye matemáticamente a partir del espacio tridimensional.

El problema esencial de esta propuesta es dar una explicación de por qué percibimos una realidad en 3 dimensiones y no en $3N$ dimensiones.

ii) Mecánica de Bohm desde una ontología primitiva.

La manera más natural de asignar una ontología a la Mecánica de Bohm es postular que lo que hay en el mundo son partículas moviéndose en un espacio tridimensional¹¹⁷. Las posiciones de las partículas son las variables ocultas de la teoría; estas variables junto con la función de onda, proveen una descripción completa de cualquier sistema. La función de onda no es en una entidad física y su lugar en la teoría es el de una ley de la naturaleza que guía a las partículas en movimiento.

iii) GRW desde el realismo de la función de onda.

En la versión mínima de GRW, la función de onda es una especie de campo físico similar al campo electromagnético en electrodinámica clásica. Pero a diferencia del campo electromagnético, la función de onda vive en el espacio de configuración de $3N$ dimensiones. Si los realistas de la función de onda en Mecánica de Bohm tienen que recuperar el espacio tridimensional a partir del espacio de configuración, en GRW, además de eso, deben darnos una explicación de por qué vemos ciertas propiedades físicas determinadas en los

¹¹⁶ Albert señala: “In Bohm’s theory, the world will consist of exactly two physical objects. One of those is the universal wave function and the other is the universal particle.” Véase Albert (1996). Y Lewis (2003).

¹¹⁷ Véase Bohm, Hiley (1993) y Dürr, Goldstein, Zangüí. (2004)

objetos macroscópicos. Albert y Loewer¹¹⁸ proponen una regla en la que se designa un parámetro P , tal que podemos decir que el sistema está en un estado determinado si y sólo si la función de onda ocupa una región delimitada por el valor de P . En otras palabras, podemos decir que el gato está vivo o muerto si su función de onda ocupa en una determinada cantidad la mayoría del área bajo la curva de la función después del colapso dinámico. Sin embargo, es arbitraria la designación respecto a cuánto debe valer P para poder asumir que el sistema está en ese estado.

iii) GRW desde una ontología primitiva.

Existen dos propuestas de ontología primitiva para GRW:

- 1) GRWf: Consideremos los puntos en el espacio-tiempo (x,t) , donde la función de onda colapsa. Llamemos “flashes”¹¹⁹ a estos eventos. Si tomamos estos puntos como la ontología primitiva, estos flashes son todo lo que hay en el universo. Una historia en el mundo es el conjunto discreto de flashes que ocurren en el espacio-tiempo. Los flashes forman los objetos que observamos en el mundo macroscópico. La función de onda es una entidad matemática que nos dice cuándo y dónde ocurren cada uno de los flashes; ψ es una “ley de evolución” de los flashes.

- 2) GRWm: La ontología primitiva es un campo escalar llamado *densidad de masa*¹²⁰. Los objetos que existen en el mundo tridimensional son determinados por esta densidad de masa que es guiada por la función de onda. La densidad de masa es continua y no corpuscular.

GRWm y GRWf son interpretaciones de la teoría que describen la evolución temporal de una ontología primitiva; tanto la densidad de masa por un lado,

¹¹⁸ Véase Albert, Loewer (1996)

¹¹⁹ Véase Tumulka (2006)

¹²⁰ Véase Benatti, Ghirardi, Grassi (1995)

como los flashes por otro, evolucionan de acuerdo a la función de onda de manera estocástica siguiendo la modificación de la ecuación de Schrödinger que plantean las teorías de colapso dinámico.

5.5.- REO-moderado y Ontología Primitiva

El problema principal al momento de asignar ontologías tanto en Mecánica de Bohm como en GRW, es el estatus ontológico de la función de onda. Si somos realistas con respecto a la función de onda, tenemos que serlo también con respecto a un espacio multidimensional y justificar por qué vemos el mundo de manera tridimensional. David Albert¹²¹ defiende esta propuesta argumentando que son las características del hamiltoniano lo que provoca la apariencia de un mundo tridimensional. Los trabajos de Albert son muy recientes y hasta ahora no ha logrado dar una justificación satisfactoria sobre la naturaleza particular de ese hamiltoniano.

La objeción más importante contra este tipo de propuestas proviene de quienes cuestionan el hecho de reificar el espacio multidimensional donde habita la función de onda y no dar una razón de por qué no reificar los objetos matemáticos provenientes de otras formulaciones de la Mecánica Cuántica¹²². Las entidades matemáticas de otras formulaciones equivalentes a la formulación de la función de onda, tienen características completamente distintas. El espacio de Hilbert, por ejemplo, donde operadores actúan sobre vectores, tendría cualidades matemáticas diferentes al espacio de configuración que intentan reificar los realistas de la función de onda. ¿Por qué no reificar el espacio de Hilbert en lugar del espacio de configuración?

Por otro lado, los defensores de la ontología primitiva, se enfrentan a la tarea de decirnos qué naturaleza tiene la función de onda. Si aceptamos que la ontología de las teorías cuánticas debe asignarse a partir de lo que observamos en el mundo (e.g., partículas, densidades de masa, flashes) y que la función de onda nos da una descripción de su evolución temporal, ya sea determinista o probabilista, les

¹²¹ Véase Albert (2013)

¹²² Véase Maudlin (2013)

queda por responder qué es la función de onda. En general, los defensores de una ontología primitiva, plantean que es una especie de ley de la naturaleza. Sin embargo, una objeción contra esta propuesta, es el hecho de que la función de onda evoluciona con el tiempo. El carácter nomológico de la función de onda se pone en duda puesto que extraño que una ley de la naturaleza evolucione temporalmente. Además, aún en el caso de que la función de onda no fuera una Ley, queda por esclarecer de qué manera un objeto multidimensional tiene una especie de relación causal con objetos en el espacio tridimensional.

5.6 REO-moderado y la función de onda.

El problema cardinal que según Esfeld no se ha resuelto satisfactoriamente tanto desde el realismo de la función de onda como desde una ontología primitiva, es dar una explicación satisfactoria de la no-localidad en Mecánica Cuántica.

Si reificamos el espacio multidimensional en el que habita la función de onda, es posible afirmar que la no-localidad que vemos en las correlaciones cuánticas es debida a que en el espacio multidimensional, un punto representa la configuración de todas las partículas en el mundo. Si el punto se mueve en el espacio multidimensional, eso perturba las propiedades de cada partícula en el espacio tridimensional. En otras palabras, algo que es local en el espacio de configuración aparece como no-local en el espacio tridimensional. Esta explicación de la no-localidad sería satisfactoria, pero, como hemos dicho, falta esclarecer por qué vemos en apariencia un mundo tridimensional. Del lado de la ontología primitiva, la no-localidad debe explicarse desde el estatus ontológico de la función de onda. Si pensamos esta entidad matemática como una ley, debemos esclarecer por qué los objetos en el mundo evolucionan a partir de ella de manera no-local.

Esfeld¹²³ plantea que es posible disolver el debate si utilizamos REO-moderado. La función de onda sería la estructura concreta en la que se instancian los objetos y a su vez es la estructura que les otorga todas sus propiedades disposicionales. “Es decir, la función de onda representa una estructura que es instanciada por los

¹²³ Véase Esfeld (2014)

elementos de la ontología primitiva- las partículas, los valores de la densidad de masa o los flashes- en puntos dentro del espacio físico¹²⁴.”

Esfeld plantea que los problemas que se tienen al defender una ontología primitiva en Mecánica Cuántica, quedarían resueltos si se utilizan las herramientas conceptuales que nos proporciona REO-moderado.

El punto clave de su planteamiento es el hecho de que la función de onda en el espacio de configuración puede definirse para cada punto, mientras que en el espacio tridimensional, la función de onda sólo puede definirse a partir de tuplas de puntos. La función de onda tiene significado físico en el mundo sólo a partir de relaciones entre las tuplas. Esfeld toma esta característica y la conceptualiza bajo su noción de estructura física concreta en la que el mundo es descrito a partir de las relaciones entre los objetos.

En el caso de Mecánica de Bohm: la estructura consiste en una red de relaciones que afecta las posiciones todas las partículas con cada una de las otras; la evolución temporal de la posición de cada partícula (su velocidad), depende de las posición de todas las demás partículas. Sin embargo, esa estructura existe además de los elementos de la ontología primitiva, esta no superviene de las características intrínsecas de las partículas. La estructura es una entidad física concreta que evoluciona temporalmente.

La estructura representada por la función de onda, toma todos los elementos de la ontología primitiva como sus relata. La ley de evolución temporal de la estructura (la ecuación guía en Mecánica de Bohm o la ecuación de GRW), superviene de a partir de las propiedades relacionales de la ontología primitiva al instanciarse en la estructura.

El punto decisivo es que ontología primitiva para teorías cuánticas por un lado, y REO-moderado por el otro, pueden ayudarse mutuamente. Mientras para la ontología primitiva, REO-moderado provee una descripción completa y coherente del estatus ontológico de la función de onda. Para REO-moderado, la

¹²⁴ “That is to say, the wave-function represents a structure that is instantiated by the elements of the primitive ontology – the particles, the matter density values, or the flashes at points in physical space.”
Veáse Esfeld (2014, p8)

ontología primitiva de las teorías cuánticas provee a la estructura de las entidades físicas concretas que la instancian en el espacio-tiempo.

Ahora bien, este estatus ontológico de la función de onda puede conceptualizarse tanto para Mecánica de Bohm como para GRW. Queda decidir cuál de las tres ontologías primitivas propuestas (partículas, densidades de masa o flashes) es la más adecuada para REO-moderado. Esfeld asume que es mucho más viable la ontología de partículas debida a Mecánica de Bohm¹²⁵. Su principal argumento es el carácter explícitamente no-local de esta teoría. Sin embargo, no parece una razón lo suficientemente fuerte como para descartar la ontología primitiva de GRW¹²⁶. La estructura que postula REO-moderado también puede ser usada para explicar la dinámica ya sea de las densidades de masa o los flashes.

Finalmente, como hemos visto, la propuesta de Esfeld es unir ontología primitiva con REO-moderado, sin embargo, la idea de tomar a la función de onda como estructura concreta desde el realismo de la función de onda tiene aristas que no se han explorado. Recordemos que ser realista con respecto a la función de onda involucra pensar que el mundo es un espacio multidimensional y los problemas de esta postura provienen de tratar de recuperar el mundo tridimensional a partir de este espacio. Pero al pensar a la función de onda como una entidad física concreta (una estructura de relaciones), estamos postulando una forma de realismo de la función de onda que no tendría este tipo de problemas puesto que ésta habitaría el espacio tridimensional, no el espacio de configuración. Las teorías tipo GRW tienen la necesidad de una ontología primitiva que les permita relacionar a la función de onda con los objetos en el mundo tridimensional; pero si la función de onda es una entidad tridimensional, no habría necesidad de ontología primitiva para GRW. La función de onda entendida como estructura respondería a una evolución vía la ecuación de GRW y los colapsos provocarían

¹²⁵ Vale la pena señalar que Michael Esfeld ha defendido desde hace 10 años a Mecánica de Bohm como la solución más viable al problema de la medición; sus posturas en general, suelen estar bastante sesgadas hacia este tipo de interpretación.

¹²⁶ Las razones que da Esfeld me parecen insatisfactorias, en particular, lo que no acepta de densidad de masa o flashes, es la posibilidad de que una entidad esté localizada en un cierto espacio-tiempo e instantáneamente desaparezca de ese lugar y aparezca en otro; esto es posible en teorías de colapso dinámico. Véase Esfeld (2014, pp 11-13).

que en ciertos momentos tuviéramos objetos macroscópicos bien localizados en el mundo. Sería importante explorar este tipo de ideas a futuro.

Conclusión

El realismo estructural se ha convertido en un sinfín de propuestas cada una de ellas con características distintas. Chakravartty ironiza señalando que hay tantos tipos de realismo estructural como defensores del mismo. En este trabajo me ocupé de las propuestas de realismo estructural más comunes en la literatura. Desde esta perspectiva, me parece que el proyecto de Ladyman es el que muestra más debilidad. No sólo por no ocuparse del problema de la medición en la Mecánica Cuántica sino por la ambigüedad con la que sus partidarios abordan los problemas. Ladyman cambia de postura en ciertos rasgos de su proyecto constantemente y su noción de estructura sigue sin estar completamente clara. Además, los estudios de caso para REO-eliminativista en general suelen ser bastante ad-hoc.

La forma de Realismo Estructural Óptico que parece ser la más prometedora es el proyecto de Esfeld que como se analizó, puede ser útil incluso como heurística para decidir la ontología en algunas teorías cuánticas. Son bastantes recientes los trabajos del grupo de Esfeld sobre Teoría Cuántica de Campos y escapan a los alcances de esta tesis.

La interpretación de las teorías físicas a partir de una estructura física concreta relacional y una Metafísica de propiedades disposicionales me parece que es la mejor vía para la defensa del Realismo Estructural. Queda por analizar qué ocurre con las distintas teorías cuánticas (Mecánica de Bohm o GRW) si se toman en cuenta consideraciones provenientes de la relatividad especial. Una vez hecho este trabajo, habrá que ver si la noción de estructura que Esfeld propone y su Metafísica siguen siendo viables.

Bibliografía

Ainsworth, Peter M.(2008) "Structural realism: A critical appraisal." *Ann Arbor* 1050: 48106-1346. Tesis doctoral disponible en <http://etheses.lse.ac.uk/2951/1/U615902.pdf>

Ainsworth, Peter Mark (2010). What is ontic structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 41 (1):50-57.

Albert and Loewer 1996 D.Z. Albert and B. Loewer. Tails of the Schrödinger's Cat. In R. Clifton (ed), *Perspectives on Quantum Reality*. Dordrecht: Kluwer (1996).

Albert and Loewer 1996 D.Z. Albert and B. Loewer. Tails of the Schrodinger's Cat. In R. Clifton (ed), *Perspectives on Quantum Reality*. Dordrecht: Kluwer (1996).

Allori, V. (2013). Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories. *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*, 58-75.

Bell, J. S. S.(1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. *Collected Papers on Quantum Philosophy*, Cambridge University Press, Cambridge.

Bohm, D., & Hiley, B. J. (1993). *The Undevided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Mechanics*.

Bohm, D., & Hiley, B. J. (1993). *The Undevided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Mechanics*.

Cao, T. Y. (2003). Structural realism and the interpretation of quantum field theory. *Synthese*, 136(1), 3-24.

Clifton, R., & Monton, B. (1999). Discussion. Losing your marbles in wavefunction collapse theories. *The British journal for the philosophy of science*, 50(4), 697-717.

Dorato, Mauro & Morganti, Matteo (2013). *Grades of individuality. A pluralistic view of identity in quantum mechanics and in the sciences*. *Philosophical Studies* 163 (3):591-610.

Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghi, N. (1992). Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty. *Journal of Statistical Physics*, 67(5-6), 843-907.

Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghi, N. (1992). Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty. *Journal of Statistical Physics*, 67(5-6), 843-907.

Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghi, N. (2004). Quantum equilibrium and the role of operators as observables in quantum theory. *Journal of Statistical Physics*, 116(1-4), 959-1055.

Esfeld, M. (2009). The modal nature of structures in ontic structural realism. *International Studies in the Philosophy of Science*, 23(2), 179-194.

Esfeld, M. (2014). How to account for quantum non-locality: ontic structural realism and the primitive ontology of quantum physics. *Synthese*, 1-16.

Esfeld, M., & Lam, V. (2009) Holism and structural realism. In *Worldviews, Science and Us: Studies of Analytical Metaphysics-A Selection of Topics from A Methodological Perspective-Proceedings of the 5Th Metaphysics of Science Workshop* (p. 10). World Scientific.

Esfeld, M., & Lam, V. (2011). Ontic structural realism as a metaphysics of objects. In *Scientific structuralism* (pp. 143-159). Springer Netherlands.

Eugene, P. (1961). Wigner. Remarks on the mind-body question.

F. Benatti, G.C. Ghirardi, R. Grassi. Describing the Macroscopic World: Closing the Circle within the Dynamical Reduction Program. *Foundations of Physics* 25: 5-38 (1995).

F. Benatti, G.C. Ghirardi, R. Grassi. Describing the Macroscopic World: Closing the Circle within the Dynamical Reduction Program. *Foundations of Physics* 25: 5-38 (1995).

French, S., & Ladyman, J. (2003). Remodelling structural realism: Quantum physics and the metaphysics of structure. *Synthese*, 136(1), 31-56.

French, Steven & Ladyman, James (2003). *Remodelling structural realism: Quantum physics and the metaphysics of structure*. Synthese 136 (1):31-56.

French, Steven & Ladyman, James (2011). *In defence of ontic structural realism*. In Alisa Bokulich & Peter Bokulich (eds.), *Scientific Structuralism*. Springer Science+Business Media. 25--42.

French, Steven (2006). *Identity in Physics: A Historical, Philosophical, and Formal Analysis*. Oxford University Press.

French, Steven, (2011) "Identity and Individuality in Quantum Theory", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* Edward N. Zalta (ed.), URL= <<http://plato.stanford.edu/archives/sum2011/entries/qt-idind/>>.

Frigg, Roman & Votsis, Ioannis (2011). *Everything you always wanted to know about structural realism but were afraid to ask*. *European Journal for Philosophy of Science* 1 (2):227-276.

Ghirardi, Giancarlo, "Collapse Theories", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2011 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/win2011/entries/qm-collapse/>

Glick, D. (2014), *Structures and Objects: A Defense of Structural Realism*. Universidad de Arizona Tesis doctoral, disponible en: https://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/322984/1/azu_etd_13385_sip1_m.pdf

Hermens, R. (2014). The Measurement Problem Is Your Problem Too. In *New Directions in the Philosophy of Science* (pp. 469-478). Springer International Publishing.

Hernández y Callebaut, (2010) *Epistemología Naturalizada. Una Visión Panorámica* En: J. LABASTIDA y V. ARÉCHIGA, coord., *Identidad y Diferencia*, vol. 3, La Filosofía y la Ciencia, 138-155. Mexico D.F., Siglo XXI Editores en coedición con la Asociación Filosófica de México.

Ioannis Votsis. *The epistemological status of scientific theories: An investigation of the structural realist account*. London School of Economics and Political Science.

Tesis doctoral disponible en: http://www.votsis.org/PDF/Votsis_Dissertation.pdf.

John Von Neumann. (1955). *Mathematical foundations of quantum mechanics* (No. 2). Princeton university press.

Ladyman, J. (1998). What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 29 (3):409-424.

Ladyman, J. (1998). What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 29(3), 409-424.

Ladyman, J. (2007). *Every thing must go: Metaphysics naturalized*.

Ladyman, James (2001). *Science Metaphysics and Structural Realism*. *Philosophica* 67.

Ladyman, James (2007). *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford University Press.

Ladyman, James, (2014) "Structural Realism", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.)

Lam, V., & Esfeld, M. (2012). The structural metaphysics of quantum theory and general relativity. *Journal for general philosophy of science*, 43(2), 243-258.

Laudan, L. (1981). A confutation of convergent realism. *Philosophy of science*, 48(1), 19.

Laudan, L. (1984). Realism without the real. *Philosophy of Science*, 156-162.

Lyre, H. (2010). *Humean perspectives on structural realism* (pp. 381-397). Springer Netherlands.

Maudlin, T. (1995). Three measurement problems. *Topoi*, 14(1), 7-15.

Maudlin, T. (2013). The nature of the quantum state. *The wave function: Essays on the metaphysics of quantum mechanics*, 126-53.

Morganti, M. (2004). On the preferability of epistemic structural realism. *Synthese*, 142(1), 81-107.

Morganti, Matteo (2009). Inherent Properties and Statistics with Individual Particles in Quantum Mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40 (3):223-231.

Morganti, Matteo (2013). *Combining Science and Metaphysics*. Palgrave Macmillan.

Newman, M. (2005). Ramsey Sentence Realism as an Answer to the Pessimistic Meta-Induction. *Philosophy of Science*, 72(5), 1373-1384.

Ney, A., & Albert, D. Z. (Eds.). (2013). *The wave function: Essays on the metaphysics of quantum mechanics*. Oxford University Press.

Okon, E.(2014) El problema de la medición en mecánica cuántica.

Olivé, L. (1984). Sobre el realismo convergente. *Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 16(48), 53-78.

P.J. Lewis. Four Strategies for Dealing with the Counting Anomaly in Spontaneous Collapse Theories of Quantum Mechanics. *International Studies in the Philosophy of Science* 17: 137-142 (2003).

Psillos Stathis (1995). Is structural realism the best of both worlds? *Dialectica* 49 (1):15-46.

Psillos, Stathis (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. Routledge.

Psillos, Stathis (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. Routledge.

Psillos, Stathis (2003). The Scientific Realism Debate. In Peter Clark & Katherine Hawley(eds.), *Philosophy of Science Today*. Clarendon Press.

Psillos, Stathis. (1996). Scientific realism and the 'pessimistic induction'. *Philosophy of Science*, S306-S314.

Quine, W. V. (1976). Grades of discriminability. *Journal of Philosophy* 73 (5):113-116.

Quine, W. V. (1981). *Theories and Things*. Harvard University Press.

Saunders, Simon (2006). Are quantum particles objects? *Analysis* 66 (289):52–63.

Solé Bellet, A. (2010). Realismo e interpretación en Mecánica Bohmiana. Tesis doctoral. UCM

Styer, D. F., Balkin, M. S., Becker, K. M., Burns, M. R., Dudley, C. E., Forth, S. T., ... & Wotherspoon, T. D. (2002). Nine formulations of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 70(3), 288-297.

Tegmark, M. (2008). The mathematical universe. *Foundations of Physics*, 38(2), 101-150.

Tumulka, R. (2006). A relativistic version of the Ghirardi–Rimini–Weber model. *Journal of Statistical Physics*, 125(4), 821-840.

Van Fraassen, Bas C. (1980). *The Scientific Image*. Oxford University Press.

Votsis, Ioannis (2002). 1 the scientific realism debate. *Philosophy of Science*.

